

(2016年版)

# 注册电气工程师 执业资格考试专业考试 复习指导书

## (供配电专业)

注册电气工程师执业资格考试复习指导教材编委会 编

上册



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书是注册电气工程师执业资格考试系列教材之一。全书共 15 章，章、节的编排与《注册电气工程师（供配电）执业资格考试专业考试大纲》相对应，按照 2016 年新规程规范清单对教材内容进行了更新，为原书的修订版。教材包含了供配电、建筑电气、电气传动等专业的相关内容，是一本较完整的复习资料。教材中的重要内容增加了出处，以便于考生对照复习。修订后的教材内容更加丰富、全面、实用、贴近考试，得到了命题专家组的认可。

本书可供参加注册电气工程师（供配电）执业资格考试的专业技术人员复习参考使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

注册电气工程师执业资格考试专业考试复习指导书：2016 年版·供配电专业：全 2 册/注册电气工程师执业资格考试复习指导教材编委会编. —北京：中国电力出版社，2016.6（2016.7 重印）

ISBN 978-7-5123-9194-9

I. ①注… II. ①注… III. ①电气工程—资格考试—自学参考资料 ②供电系统—资格考试—自学参考资料 ③配电系统—资格考试—自学参考资料 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 073582 号

中国电力出版社出版、发行  
（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）  
三河市百盛印装有限公司印刷  
各地新华书店经售

\*

2016 年 6 月第一版 2016 年 7 月北京第二次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 66.5 印张 1635 千字  
印数 3001—5000 册 定价 260.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 注册电气工程师执业资格考试复习指导教材

## 编 委 会

主 任 李爱民  
副 主 任 郝士杰  
委 员 浦文宗 张玉军 杨月红 张蜂蜜 宋志昂  
任元会 姚家祎 黄纯懿 邵晓钢 张文才  
杨德才 赵登福 陶 勤 张 农 叶四新  
孙成群  
顾 问 弋东方

主 编 济钢集团国际工程技术有限公司 黄纯懿  
副 主 编 中国航空工业规划设计研究院 任元会  
核工业第二研究设计院 姚家祎  
中国航天建筑设计研究院 卞铠生

章 名	编写人	校审人
1 安全	任元会	黄纯懿
2 环境保护与节能	黄纯懿	任元会
3 负荷计算及负荷分级	卞锐生	任元会
4 110kV 及以下供配电系统	濮松夫	姚家祎
5 110kV 及以下变配电站站址选择及 电气设备布置	濮松夫	姚家祎
6 短路电流计算	姚家祎	濮松夫
7 110kV 及以下电气设备选择	姚家祎 任元会	濮松夫 姚家祎
8 导体选择、电缆线路和架空线路	卞锐生	任元会
9 变配电站控制、测量仪表、继电 保护及自动装置	姚家祎	黄纯懿
10 变配电站操作电源	姚家祎	黄纯懿
11 过电压保护及防雷	李鸿路 孙成群	卞锐生
12 接地装置	李鸿路	卞锐生
13 照明	任元会	姚家祎
14 电气传动	黄纯懿	濮松夫
15 建筑智能化	张路明	朱立彤

# 前 言

为加强对勘察设计行业的管理,保证工程质量,维护社会公共利益和人民生命财产安全,规范设计市场,人事部、建设部先后印发了《勘察设计注册工程师制度总体框架及实施规划》(人发〔2001〕5号)和《注册电气工程师执业资格考试实施办法》(人发〔2003〕25号)等文件,启动了勘测设计执业资格注册管理制度。自2005年起,开始组织进行注册电气工程师执业资格考试。

为了便于考生系统地复习,全面掌握注册电气工程师执业资格考试大纲所涉及的内容,提高复习效率,我们组织有关方面的专家成立了注册电气工程师执业资格考试复习指导教材编委会,按照考试大纲的要求,编写了注册电气工程师系列复习指导教材。

近几年来,我国的工程建设规模和技术水平有了很大提高,许多工程建设标准和规程规范都进行了修订,教材中的有些内容已不能与现行的规程规范相适应,为此我们组织专家对教材进行了重新修编,以满足考生应考复习的需要。

此次修编,仍根据《注册电气工程师(供配电)执业资格考试专业考试大纲》所列考试范围,按照2016年报名通知中新规程规范清单,对教材进行更新。同时吸收了培训教师、考生在使用教材时提出的意见和建议,对本书教材内容进行了补充完善,对教材中的重要内容增加了出处,文中摘录规范处,条文编号及图、表编号,直接采用规范本身的编号,文中直接引用规程规范的部分,字体均为楷体,以便于考生对文中内容的区分和对照复习。

教材包含了供配电、建筑电气、电气传动等专业的相关内容,是一本较完整的复习资料。修订后的教材内容更加丰富、全面、实用、贴近考试,得到了命题专家组的认可。可供参加注册电气工程师(供配电)执业资格考试的专业技术人员复习参考。

全书共15章,章、节的编排与《注册电气工程师(供配电)执业资格考试专业考试大纲》相对应,为原书的修订版。本次修订由黄纯懿担任主编,任元会、姚家祎、卞铠生担任副主编。在本书的编审过程中,得到了不少单位和专家的大力支持,并提出了很多宝贵意见和建议,对此我们表示衷心的感谢。

由于考试内容涉及范围广,且修编时间很紧,书中难免存在疏漏之处,真诚希望读者提出宝贵意见,以便本书再版时改进。意见和建议请发至 cceen2@163.com 邮箱中。

注册电气工程师执业资格考试复习指导教材编委会

二〇一六年五月



## 目 录

前言

## 上 册

<b>1 安全</b> .....	1
1.1 工程建设标准(电气专业)强制性条文 .....	1
1.2 电流对人体的效应(根据 GB/T 13870.1—2008《电流对人和家畜的效应 第1部分:通用部分》) .....	1
1.3 安全电压及电击防护的基本要求 .....	15
1.4 低压配电系统接地故障保护和等电位联结 .....	21
1.5 危险环境电力装置的特殊设计要求 .....	32
1.6 电气设备防误操作的要求及措施 .....	59
1.7 电气工程设计的防火要求及措施 .....	60
1.8 电力设施抗震设计和措施 .....	67
<b>2 环境保护与节能</b> .....	71
2.1 电气设备对环境的影响及防治措施 .....	71
2.2 供配电系统设计的节能措施 .....	78
2.3 提高电能质量的措施 .....	114
2.4 节能型电气产品的选用方法 .....	127
<b>3 负荷计算及负荷分级</b> .....	141
3.1 负荷计算 .....	141
3.2 负荷分级 .....	174
<b>4 110kV 及以下供配电系统</b> .....	181
4.1 供配电系统 .....	181
4.2 电能质量 .....	199
4.3 无功补偿 .....	217
<b>5 110kV 及以下变配电站站址选择及电气设备布置</b> .....	226
5.1 变配电站站址选择 .....	226
5.2 变配电站型式 .....	228
5.3 变配电站的布置设计 .....	230
5.4 特殊环境配电装置设计 .....	242
5.5 各级电压配电装置的安全净距 .....	246
<b>6 短路电流计算</b> .....	250
6.1 短路电流计算方法 .....	250
6.2 短路电流计算结果的应用 .....	281

6.3	影响短路电流的因素及限制短路电流的措施	281
6.4	短路电流在导体和电器中引用的热效应	282
<b>7</b>	<b>110kV 及以下电气设备选择</b>	<b>284</b>
7.1	常用电气设备选择的技术条件和环境条件	284
7.2	高压变压器配电设备的选择	289
7.3	低压配电设备及电器元件的选择	313
<b>8</b>	<b>导体选择、电缆线路和架空线路</b>	<b>342</b>
8.1	导体选择	342
8.2	电缆线路	358
8.3	架空线路	378
<b>9</b>	<b>变配电站控制、测量仪表、继电保护及自动装置</b>	<b>404</b>
9.1	变配电站控制、测量和信号设计要求	404
9.2	电气设备和线路继电保护配置、整定计算及选型的原则	420
9.3	变配电站自动装置及综合自动化的设计要求	442
<b>10</b>	<b>变配电站操作电源</b>	<b>448</b>
10.1	系统设计	448
10.2	直流负荷	450
10.3	保护与监控	453
10.4	设备选择	460
10.5	设备布置	480
10.6	专用蓄电池室对相关专业的要求	481
10.7	交流操作电源的设计要求	482

## 下 册

<b>11</b>	<b>过电压保护及防雷</b>	<b>487</b>
11.1	电气装置的过电压保护	487
11.2	电气装置的绝缘配合	509
11.3	建筑物防雷的分类及措施	517
11.4	建筑物防雷装置和防雷电磁脉冲设计的要求和计算方法	540
<b>12</b>	<b>接地装置</b>	<b>566</b>
12.1	高压电气装置接地	566
12.2	发电厂和变电站的接地网	567
12.3	高压架空线路的接地	583
12.4	6kV ~ 220kV 电缆线路的接地	585
12.5	高压配电电气装置的接地	587
12.6	低压系统的接地和保护总等电位连接系统	588
12.7	接地电阻的计算	605
12.8	发电厂和变电站的人地故障电流及地电位升高的计算	610

<b>13 照明</b> .....	613
13.1 照明方式和照明种类.....	613
13.2 照度标准和照明质量.....	615
13.3 光源、电器附件及灯具的选择.....	636
13.4 照明配电及控制.....	647
13.5 照度计算.....	651
13.6 照明工程节能标准与措施.....	657
<b>14 电气传动</b> .....	668
14.1 电气传动系统的组成及分类.....	668
14.2 电动机的选择.....	678
14.3 交、直流电动机的起动方式及起动校验.....	698
14.4 交、直流电动机调速技术.....	720
14.5 交、直流电动机电气制动方式及计算方法.....	789
14.6 电动机保护配置及计算方法.....	794
14.7 低压交流电动机控制电器的选择.....	802
14.8 电动机调速系统性能指标.....	816
14.9 PLC 的应用.....	820
<b>15 建筑智能化</b> .....	846
15.1 火灾自动报警系统.....	846
15.2 建筑设备监控系统.....	885
15.3 安全防范系统.....	911
15.4 通信网络系统.....	930
15.5 综合布线系统.....	947
15.6 有线电视系统.....	959
15.7 公共广播、厅堂扩声及会议系统.....	969
15.8 公共显示装置与呼叫信号系统.....	993
15.9 智能化集成系统.....	1004
15.10 弱电机房工程设计与环境要求.....	1007
15.11 室内弱电线路敷设.....	1017
15.12 室外弱电线路敷设.....	1021
附录一 关于印发《注册电气工程师执业资格制度暂行规定》 《注册电气工程师执业资格考试实施办法》和 《注册电气工程师执业资格考核认定办法》的通知.....	1025
附录二 关于公布注册电气工程师执业资格考试专业考试大纲的通知.....	1029
附录三 专业考试注意事项.....	1042



## 1.1 工程建设标准(电气专业)强制性条文

略。

## 1.2 电流对人体的效应(根据 GB/T 13870.1—2008《电流对人和家畜的效应 第1部分:通用部分》)

### 1.2.1 术语和定义

(1) 纵向电流(longitudinal current): 纵向流过人体躯干的电流(如从手到脚)。

(2) 横向电流(transverse current): 横向流过人体躯干的电流(如从手到手)。

(3) 人体内阻抗(internal impedance of the human body,  $Z_i$ ): 与人体两个部位相接触的二电极间的阻抗, 不计皮肤阻抗。

(4) 皮肤阻抗(impedance of the skin,  $Z_s$ ): 皮肤上的电极与皮下可导电组织之间的阻抗。

(5) 人体总阻抗(total impedance of the human body,  $Z_T$ ): 人体内阻抗与皮肤阻抗的矢量和。

(6) 人体初始电阻(initial resistance of the human body,  $R_0$ ): 在接触电压出现瞬间, 限制电流峰值的电阻。

(7) 干燥条件(dry condition): 活人在正常室内环境条件下休息时, 皮肤接触表面积的湿度的条件。

(8) 水湿润条件(water-wet condition): 浸入于市政供水(平均电阻率  $\rho = 3500\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $\text{pH} = 7 \sim 9$ ) 的水中 1min, 皮肤接触表面积的条件的条件。

(9) 盐水湿润条件(saltwater-wet condition): 浸入于 3% NaCl(氯化钠)的水溶液(平均电阻率  $\rho = 30\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $\text{pH} = 7 \sim 9$ ) 中 1min, 接触表面积皮肤的条件。

(10) 偏差系数(deviation factor,  $F_D$ ): 在给定的接触电压, 人口某百分数的人体总阻抗  $Z_T$  除以人口 50% 百分数的人体总阻抗  $Z_i$ , 即

$$F_D(X\%, U_T) = \frac{Z_T(X\%, U_T)}{Z_i(50\%, U_T)}$$

(11) 感知阈(threshold of perception): 通过人体能引起任何感觉的接触电流的最小值。

(12) 反应阈(threshold of reaction): 能引起肌肉不自觉收缩的接触电流的最小值。

(13) 摆脱阈(threshold of let-go): 人手握电极能自行摆脱电极时接触电流的最大值。

(14) 心室纤维性颤动阈(threshold of Ventricular fibrillation): 通过人体能引起心室纤维性颤动的接触电流最小值。

(15) 心脏—电流因数(heart-current factor,  $F$ ): 电流通过某一路径在心脏中所产生

的电场强度（电流密度）与该等量接触电流通过左手到双脚时在心脏内产生的电场强度（电流密度）之比。

注：在心脏内，电流密度与电场强度成正比。

(16) 易损期 (vulnerable period)：心搏周期中较短的一段时间，在此期间心脏纤维处于不协调的兴奋状态，如果受到足够大的电流激发，就会发生心室纤维性颤动。

注：易损期对应于心电图中T波的前段，约为心搏周期的10%。

(17) 人体的总电阻 (total body resistance,  $R_T$ ) 人体内部电阻与皮肤电阻之和。

(18) 直流/交流的等效因数 (d. c. /a. c. equivalence factor,  $k$ ) 直流电流与其能诱发相同心室纤维性颤动概率的等效的交流电流的方均根 (r. m. s) 值之比。

注：以电击持续时间超过一个心搏周期，并且心室纤维性颤动概率为50%为例，对10s的等效因数约为：

$$k = \frac{I_{d.c. - \text{纤维性颤动}}}{I_{a.c. - \text{纤维性颤动}(r.m.s)}} = \frac{300\text{mA}}{80\text{mA}} = 3.75$$

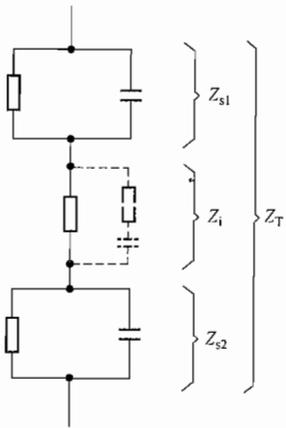
(19) 向上电流 (upward current)：通过人体使脚处于正极性的直流接触电流。

(20) 向下电流 (downward current)：通过人体使脚处于负极性的直流接触电流。

### 1.2.2 人体的阻抗

人体的阻抗值取决于许多因素，尤其是电流的路径、接触电压、电流的持续时间、频率、皮肤的潮湿程度、接触的表面积、施加的压力和温度。

人体阻抗的示意图如图1-2-1所示。



#### 1.2.2.1 人体的内阻抗 ( $Z_i$ )

人体的内阻抗可认为是阻性的。其数值主要由电流路径决定，与接触表面积的关系较小。

如图1-2-2所示为人体不同部位的内阻抗，以一手到一脚为路径的阻抗百分数表示。

对于电流路径为手到手或手到脚时，阻抗主要是四肢（手臂和腿）。若忽略人体躯干的阻抗，可得出如图1-2-3所示的简化的电路图（假设手臂和腿的阻抗值相同）。

#### 1.2.2.2 皮肤阻抗 ( $Z_s$ )

皮肤阻抗可视为由半绝缘层和许多小导体（毛孔）组成的电阻和电容的网络。当电流增加时皮肤阻抗下降。其值取决于电压、频率、通电时间，接触表面积、接触压力、皮肤的潮湿程度和温度。

对较低的接触电压， $Z_s$ 值也会随着条件不同而有很大变化，如接触的表面积和条件（干燥、潮湿、出汗）、温度、快速呼吸等。对较高的接触电压， $Z_s$ 显著下降，当皮肤击穿时，变得可以忽略了。

至于频率的影响，则是频率增加时  $Z_s$  减少。

#### 1.2.2.3 人体总阻抗 ( $Z_T$ )

人体的总阻抗是由电阻性和电容性分量组成的。

对较低的接触电压， $Z_s$  具有显著的变化， $Z_T$  也随之有很大变化。对较高的接触电压，

$Z_s$  对  $Z_T$  影响越来越小, 其值接近于内阻抗  $Z_i$ 。

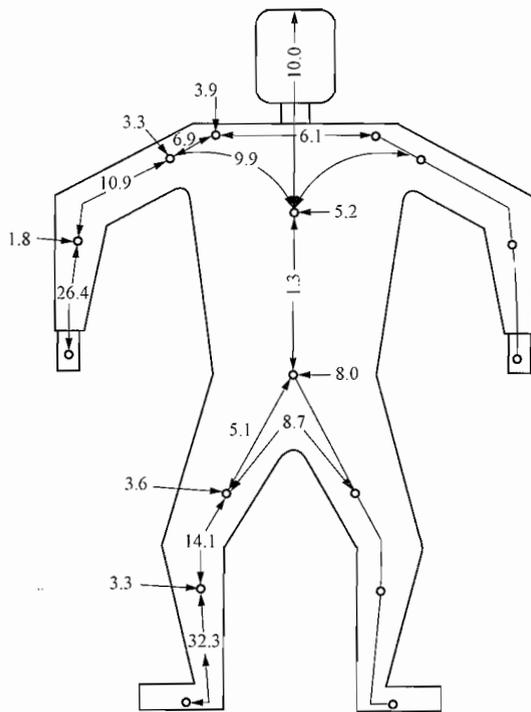
关于频率的影响,  $Z_T$  在直流时较高, 且随着频率增加而减少。

#### 1.2.2.4 影响人体内电阻 ( $R_0$ ) 的因素

接触电压出现的瞬间, 人体电容尚未充电, 皮肤阻抗  $Z_{s1}$  和  $Z_{s2}$  可忽略不计, 故初始电阻  $R_0$  大约等于人体内阻抗  $Z_i$ ,  $R_0$  主要取决于电流通路, 与接触表面关系较少。

#### 1.2.2.5 人体总阻抗值 ( $Z_T$ )

在干燥、水湿润和盐水湿润条件下的大的、中等的和小的接触表面积 (数量级分别为 10000、1000mm<sup>2</sup> 和 100mm<sup>2</sup>), 活人 50% 被测对象的人体总阻抗, 在交流接触电压  $U_T$  从 25 ~ 200V 时的关系曲线, 如图 1-2-4 ~ 图 1-2-6。



数字表示路径为一手到一脚的人体部分内阻抗的百分数。

注: 为了计算所给出的电流路径的  $Z_T$ , 对电流流通的人体所有部分的部分内阻抗  $Z_{ip}$  以及接触表面积的皮肤阻抗都必须相加。人体外面的数字表示, 当电流进入那点时, 才要加到总数中的部分内阻抗。

图 1-2-2 人体不同部位的内阻抗  $Z_{ip}$

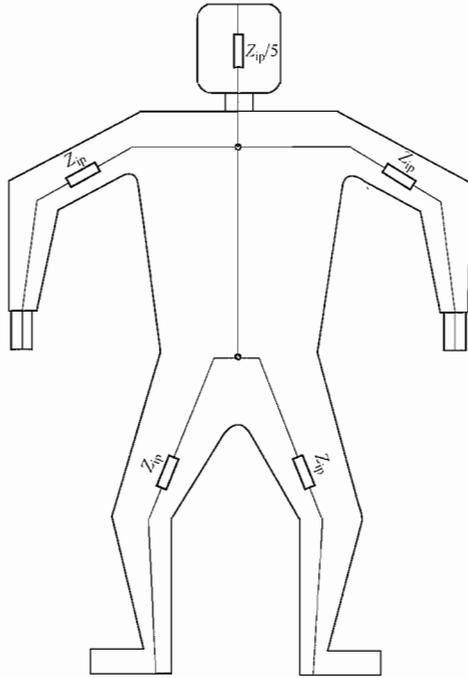
(1) 大接触表面积的正弦交流 (50 ~ 60Hz) 电流下的  $Z_T$  值。

- 1) 干燥条件下, 活的成年人电流路径为手到手的  $Z_T$  值列于表 1-2-1。
- 2) 水湿润条件下的  $Z_T$  值列于表 1-2-2。
- 3) 盐水湿润条件下的  $Z_T$  值列于表 1-2-3。

儿童的  $Z_T$  值预期稍高于成年人。

干燥、水湿润和盐水湿润条件, 大接触面积, 接触电压为 25 ~ 700V, 50% 被测对象的  $Z_T$  值范围如图 1-2-7 所示。

1



$Z_{ip}$ —一个肢体（手臂或腿）部分的内阻抗。

注：从一手到双脚的内阻抗大约是75%，从双手到双脚为50%，而从双手到人体躯干的阻抗为手到手或一手到一脚阻抗的25%。

图 1-2-3 人体内部阻抗的简化示意图

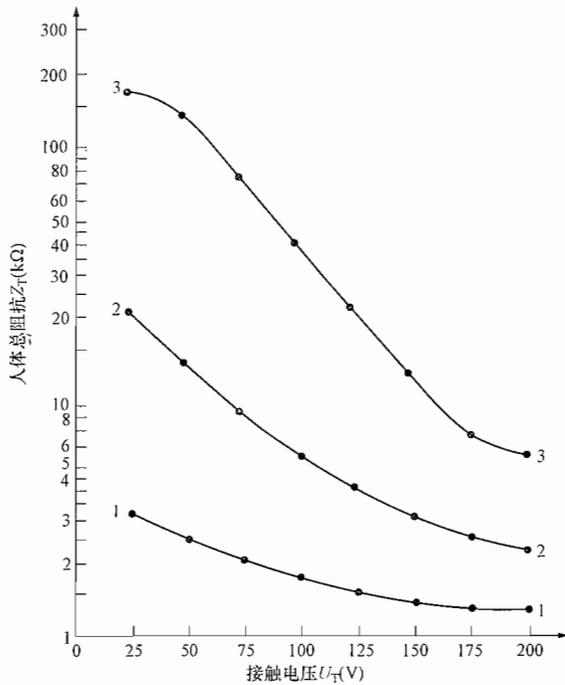


图 1-2-4 干燥条件，大的、中等的和小的接触表面积，活人的 50% 被测对象的  $Z_T$  与交流接触电压  $U_T$  为 25 ~ 200V 的关系曲线

1—大的接触表面积；2—中等尺寸的接触表面积；3—小的接触表面积

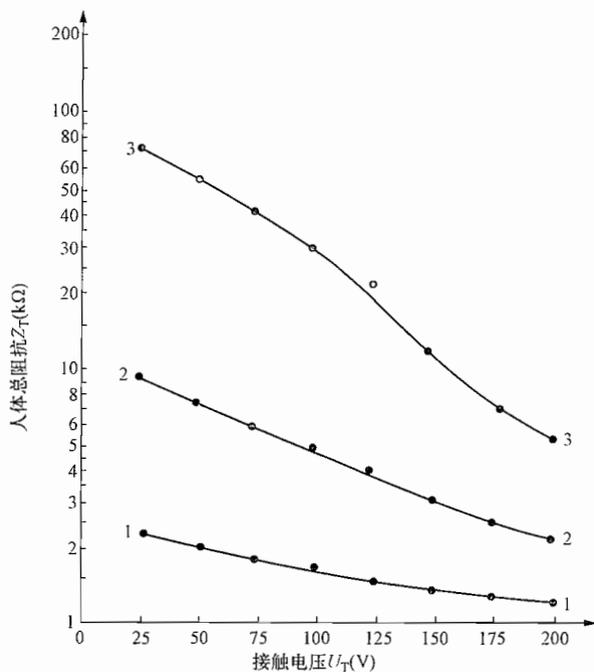


图 1-2-5 水湿润条件, 大的, 中等的和小的接触表面积, 活人 50% 被测对象的  $Z_T$  与交流接触电压  $U_T$  为 25 ~ 200V 的关系曲线  
1—大的接触表面积; 2—中等尺寸的接触表面积; 3—小的接触表面积

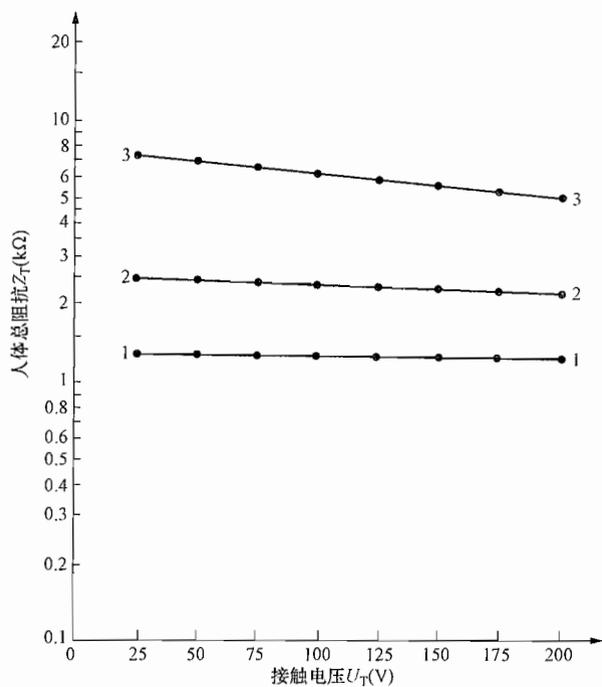


图 1-2-6 盐水湿润条件, 大的、中等的和小的接触表面积, 活人 50% 被测对象的  $Z_T$  与交流接触电压  $U_T$  为 25 ~ 200V 的关系曲线  
1—大的接触表面积; 2—中等尺寸的接触表面积; 3—小的接触表面积

表 1-2-1 干燥条件，大接触表面积的正弦交流（50~60Hz）电流路径手到手的  $Z_T$

接触电压 (V)	不超过下列三项的人体总阻抗 $Z_T$ 值 ( $\Omega$ )		
	被测对象的 5%	被测对象的 50%	被测对象的 95%
25	1750	3250	6100
50	1375	2500	4600
75	1125	2000	3600
100	990	1725	3125
125	900	1550	2675
150	850	1400	2350
175	825	1325	2175
200	800	1275	2050
225	775	1225	1900
400	700	950	1275
500	625	850	1150
700	575	775	1050
1 000	575	775	1050
渐近值 = 内阻抗	575	775	1050

注 1. 电流流路径为一手到一脚的人体总阻抗，稍低于电流路径为手到手的人体总阻抗（10%~30%）。  
 2. 对于活人的  $Z_T$  值，相应于电流的持续时间约为 0.1s。对于更长的持续时间， $Z_T$  值可能减少（约 10%~20%），而当皮肤完全破裂后，则  $Z_T$  接近于内阻抗  $Z_i$ 。

表 1-2-2 水湿润条件，大接触表面积的正弦交流（50~60Hz）电流路径为手到手的  $Z_T$

接触电压 (V)	不超过下列三项的人体总阻抗 $Z_T$ 数值 ( $\Omega$ )		
	被测对象的 5%	被测对象的 50%	被测对象的 95%
25	1175	2175	4100
50	1100	2000	3675
75	1025	1825	3275
100	975	1675	2950
125	900	1550	2675
150	850	1400	2350
175	825	1325	2175
200	800	1275	2050
225	775	1225	1900
400	700	950	1275
500	625	850	1150
700	575	775	1050
1000	575	775	1050
渐近值 = 内阻抗	575	775	1050

注 表注同表 1-2-1。

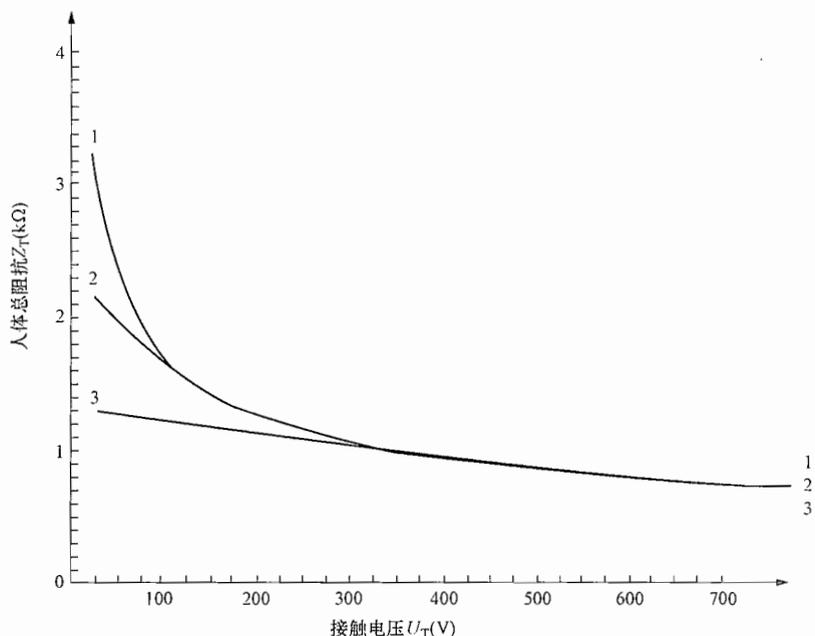


图 1-2-7 干燥、水湿润和盐水湿润条件, 大的接触表面积, 电流路径为手到手, 50Hz/60Hz 交流接触电压  $U_T$  为 25 ~ 700V, 50% 被测对象的  $Z_T$  (50%)

1—干燥条件; 2—水湿润条件; 3—盐水湿润条件

表 1-2-3 盐水湿润条件, 大接触表面积的正弦交流 (50 ~ 60Hz) 电流路径为手到手的  $Z_T$

接触电压 (V)	不超过下列三项的人体总阻抗 $Z_T$ 数值 ( $\Omega$ )		
	被测对象的 5%	被测对象的 50%	被测对象的 95%
25	960	1300	1755
50	940	1275	1720
75	920	1250	1685
100	880	1225	1655
125	850	1200	1620
150	830	1180	1590
175	810	1155	1560
200	790	1135	1530
225	770	1115	1505
400	700	950	1275
500	625	850	1150
700	575	775	1050
1000	575	775	1050
渐近值 = 内阻抗	575	775	1050

注 表注同表 1-2-1。

(2) 中等和小接触表面积的正弦交流 (50 ~ 60Hz) 电流下的  $Z_T$  值。中等和小接触表面积  $Z_T$  值, 比大接触表面积的  $Z_T$  值明显增大, 从图 1-2-4 ~ 图 1-2-6 可以看出。

(3) 频率 20kHz 及以下的正弦交流电流下的  $Z_T$  值。工频以上的高频率时由于皮肤电容影响使  $Z_T$  值下降，频率大于 5kHz 时， $Z_T$  值接近于人体内阻抗  $Z_i$ 。

接触电压 10V，频率由 25Hz 至 20kHz 时  $Z_T$  值的变化见图 1-2-8。

接触电压 10~1000V，频率由 50Hz 至 2kHz  $Z_T$  值的变化见图 1-2-9。

(4) 直流电流下的  $Z_T$  值。人体直流总电阻  $R_T$  在接触电压 200V 以下时，由于人的皮肤电容的阻塞作用，比交流人体总阻抗  $Z_T$  高。

接触电压在 100V 以上时，交流和直流  $Z_T$  差别很小，可采用交流的数据。

(5) 人体初始电阻 ( $R_0$ ) 值。电流路径为手到手或一手到脚和大的接触表面积，对交流和直流的 5% 的人体初始电阻  $R_0$  可取 500  $\Omega$ 。对被测对象 50% 和 95% 的值，分别可取 750  $\Omega$  和 1000  $\Omega$ 。这些数值几乎与接触表面积和皮肤的状况没什么关系。

注：因为在刚一接触时，皮肤的电容和人体内部的电容都还未被充电，所以初始电阻  $R_0$  数值，与交流人体总阻抗  $Z_T$  的渐近值和关于直流人体总电阻  $R_T$  相比，都显稍低。

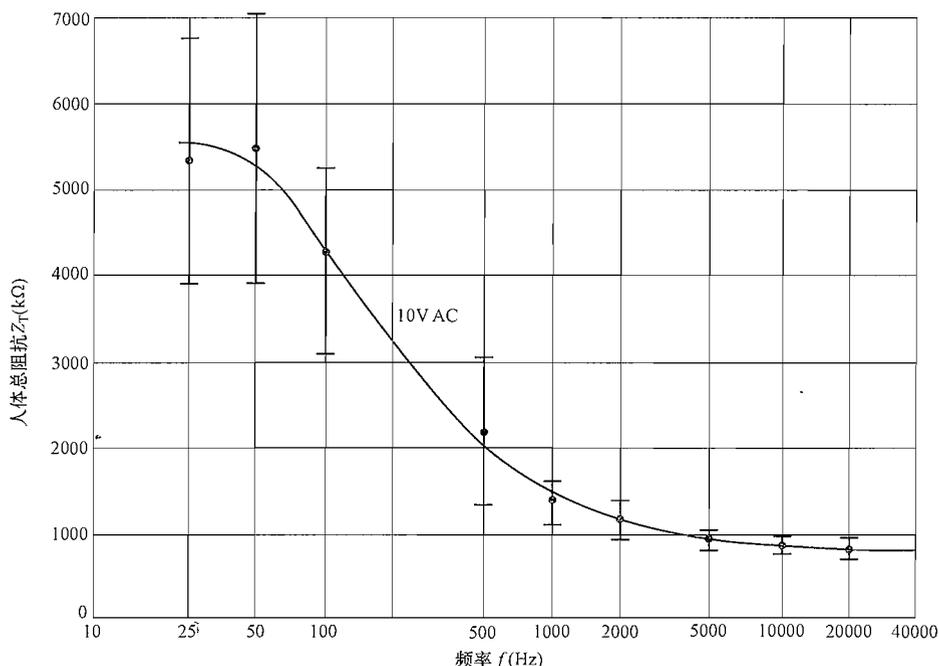


图 1-2-8 干燥条件，手到手的电流路径，大的接触表面积，接触电压为 10V 时，10 个活人测定的人体总阻抗  $Z_T$  与频率从 25Hz 至 20kHz 的关系曲线

### 1.2.3 15~100Hz 正弦交流电流的效应

本节说明频率为 15~100Hz 正弦交流电流（指电流方均根值）通过人体时的效应。接触电流及其效应示于图 1-2-10。

(1) 感知阈。感知阈取决于与电极接触的人体的面积（接触面积）、接触的状况（干燥、潮湿、压力、温度），还取决于个人的生理特性。

(2) 反应阈。反应阈取决于与电极接触的人体的面积（接触面积）、接触的状况（干燥、潮湿、压力、温度），还取决于个人的生理特性。

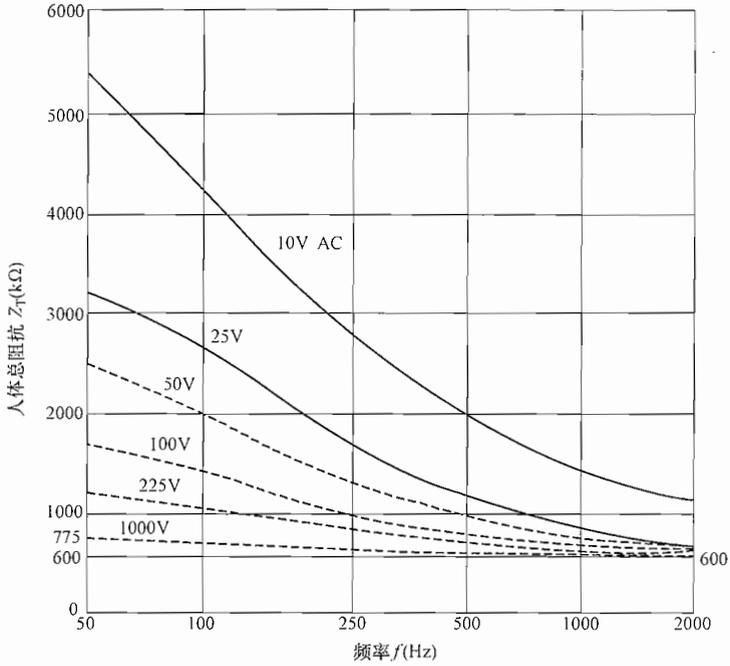


图 1-2-9 干燥条件, 大的接触表面积, 电流路径为手到手或一手到一脚, 接触电压从 10 ~ 1000V, 频率范围从 50Hz 至 2kHz, 50% 被测对象的人体总阻抗  $Z_T$  与频率的关系曲线

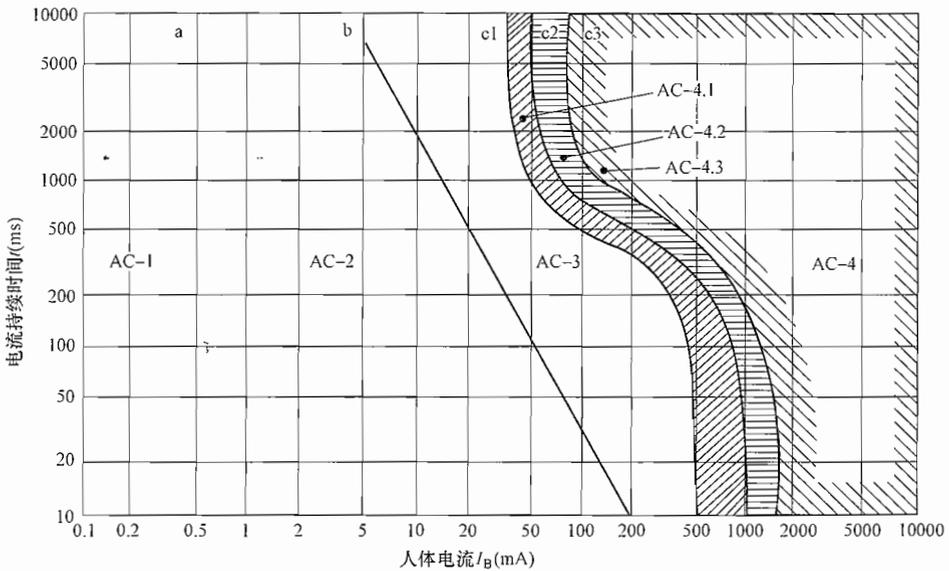


图 1-2-10 电流路径为左手到双脚的交流电流 (15 ~ 100Hz) 对人效应的约定时间/电流区域 (说明见表 1-2-4)

与时间无关的 0.5mA 的电流值, 假设作为当接触可导电的表面时的反应阈。

(3) 活动抑制。在本部分中的“活动抑制”意味着这样一种电流效应, 即受电流影响的人的身体 (或身体的部分) 不能自主地活动。

对肌肉的效应有可能是由于电流通过受损伤的肌肉或通过相关联的神经或相关联的脑髓部分流通所导致的结果。

能导致活动抑制的电流值取决于受损伤肌肉的体积、受电流损伤的神经类型和脑髓的部位。

(4) 摆脱阈。摆脱阈取决于接触面积、电极的形状和尺寸，还取决于个人的生理特性。约10mA的值是针对成年男人而假设的；约5mA的数值适用于所有人。

(5) 心室纤维性颤动阈。心室纤维性颤动阈取决于生理参数（人体结构、心脏功能状态等）以及电气参数（电流的持续时间和路径、电流的特性等）。

对于正弦波交流（50Hz或60Hz），如果电流的流通被延长到超过一个心搏周期，则纤维性颤动阈显著下降。这种效应是由于诱发期外收缩的电流，使心脏不协调的兴奋状态加剧所导致的结果。

当电击的持续时间小于0.1s，电流大于500mA时，纤维性颤动就有可能发生，只要电击发生在易损期内，而数安培的电流幅度，则很可能引起纤维性颤动。对于这样的强度而持续的时间又超过一个心搏周期的电击，有可能导致可逆性的心跳停止。

将于动物的实验结果施用于人体时，以左手到双脚的电流路径，建立了一条经验曲线c1（见图1-2-10），在曲线c1以下，纤维性颤动不大可能发生。对处于10mA和100mA之间的短持续时间的高电平区间，被选作从500~400mA的递降的曲线。在电气事故资料的基础上，对持续时间长于1s的较低的电平区间，被选作在1s时的50mA至持续时间长于3s的40mA的递减的曲线。两电平区间用平滑的曲线连接。

根据对动物实验结果的统计计算，建立了分别为5%和50%的纤维性颤动概率的曲线c2和c3。

(6) 与电击相关的其他效应。其他的电气效应，如肌肉收缩、血压上升、心跳脉冲的形成和传导的紊乱（包括心房纤维性颤动和瞬时的心律失调）都可能发生。这些效应通常并非是致命的。

数安培电流持续的时间超过数秒，则深度的烧伤和其他的内部伤害都可能产生。

心室纤维性颤动是致命的，因为它拒绝能输送所需要氧的血液的流动。不涉及心室纤维性颤动的电气事故也可能是致命的。其他的效应有可能影响呼吸，妨碍人大声呼救。这些相关机理包括呼吸调节的功能紊乱、呼吸肌肉的麻痹、肌肉的神经中枢活动通路的破坏和头脑内部呼吸调节机理的破坏。这些效应如若持久，则会导致死亡。如果电流通过如脊髓或呼吸调节中枢这种关键部分，则很可能发生死亡。

(7) 电流对皮肤的效应。

1) 在10mA/mm<sup>2</sup>以下，一般对皮肤观察不到变化，当电流的持续时间较长（若干秒）时，在电极下的皮肤可能是灰白色的粗糙表面。

2) 在10mA/mm<sup>2</sup>和20mA/mm<sup>2</sup>之间，在电极边缘的皮肤变红出现带有类似的略带白色的隆起的波纹。

3) 在20mA/mm<sup>2</sup>和50mA/mm<sup>2</sup>之间，在电极下的皮肤呈现褐色并深入皮肤。对于电流持续更长的时间（几十秒），在电极周围可观察到充满电流痕迹。

4) 在50mA/mm<sup>2</sup>以上，可能发生皮肤被碳化。

5) 采用大的接触表面积，尽管是致命的电流幅度，而电流密度仍可降低到不会引起皮

肤的任何变化。

(8) 时间/电流区域的说明 (见图 1-2-10)。

表 1-2-4 一手到双脚的通路, 交流 15~100Hz 的时间/电流区域 (图 1-2-10 的简要说明)

区域	范围	生理效应
AC-1	0.5mA 的曲线 a 的左侧	有感知的可能性, 但通常没有被“吓一跳”的反应
AC-2	曲线 a 至曲线 b	可能有感知和不自主地肌肉收缩但通常没有有害的电生理学效应
AC-3	曲线 b 至曲线 c	可强烈地不自主的肌肉收缩。呼吸困难。可逆性的心脏功能障碍。活动抑制可能出现。随着电流幅而加剧的效应。通常没有预期的器官破坏
AC-4 <sup>a</sup>	曲线 c1 以上	可能发生病理—生理学效应, 如心搏停止、呼吸停止以及烧伤或其他细胞的破坏。心室纤维性颤动的概率随着电流的幅度和时间增加
	c1 - c2	AC-4.1 心室纤维性颤动的概率增到大约 5%
	c2 - c3	AC-4.2 心室纤维性颤动的概率增到大约 50%
	曲线 c3 的右侧	AC-4.3 心室纤维性颤动的概率超过 50% 以上

<sup>a</sup> 电流的持续时间在 200ms 以下, 如果相关的阈被超过, 心室纤维性颤动只有在易损期内才能被激发。关于心室纤维性颤动, 本图与在从左手到双脚的路径中流通的电流效应相关。对其他电流路径, 应考虑心脏电流系数。

(9) 心脏电流系数 ( $F$ ) 的应用。心脏电流系数可用于计算通过除左手到双脚的电流通路以外的电流  $I_h$ , 此电流与图 1-2-10 中左手到双脚的  $I_{ref}$  具有同样危险。

$$I_h = \frac{I_{ref}}{F} \quad (1-2-1)$$

式中  $I_{ref}$ ——图 1-2-10 中的路径为左手到双脚的人体电流;

$I_h$ ——各路径的人体电流;

$F$ ——心脏电流系数, 见表 1-2-5。

注: 心脏电流系数被认为只是作为各种电流路径心室纤维性颤动相对危险的大致估算。

将不同电流路径的心脏电流系数列于表 1-2-5。

表 1-2-5 不同电流路径的心脏电流系数  $F$

电 流 路 径	心脏电流系数
左手到左脚、右脚或双脚	1.0
双手到双脚	1.0
左手到右手	0.4
右手到左脚、右脚或双脚	0.8
背脊到右手	0.3
背脊到左手	0.7
胸膛到右手	1.3
胸膛到左手	1.5
臂部到左手、右手或到双手	0.7
左脚到右脚	0.04

例如：从手到手的225mA的电流与从左手到双脚的90mA的电流，具有产生心室纤维性颤动相同的可能性。

#### 1.2.4 直流电流的效应

本节说明通过人体的直流电流的效应。

“直流电流”是指无纹波直流电流，然而，关于纤维性颤动效应，对于含有不大于10%方均根值的正弦纹波电流的直流，本数据是保守的。

接触电流及其效应示于图1-2-11中。

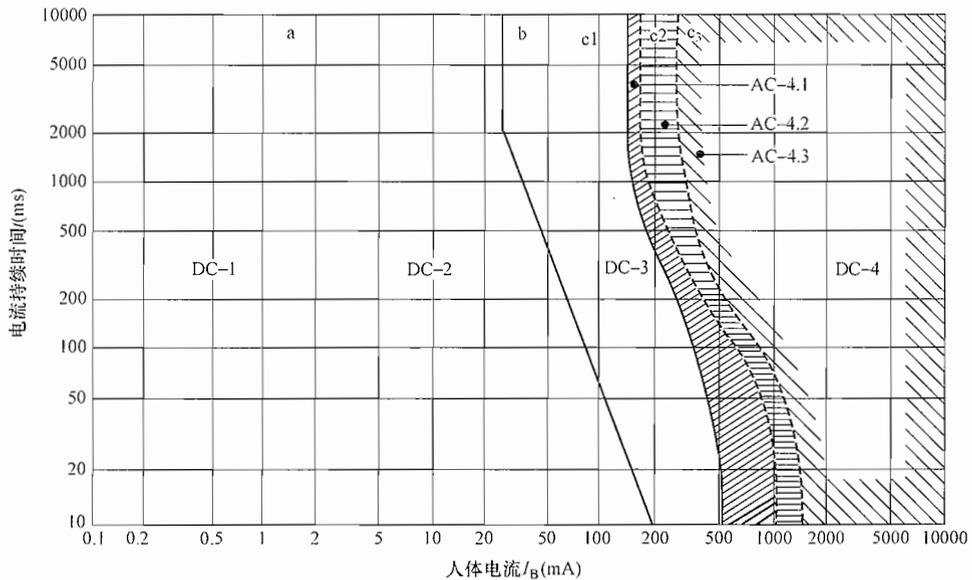


图1-2-11 电流路径为纵向向上的直流电流对人效应的约定时间/电流区域（说明见表1-2-6）

(1) 感知阈和反应阈。这两个阈取决于接触面积、接触状况（干燥度、湿度、压力、温度）、通电时间和个人的生理特点。与交流不同，在感知阈水平时直流只有在接通和断开时才有感觉，而在电流流过期间不会有其他感觉。在与交流类似的研究条件下测得的反应阈约为2mA。

(2) 活动抑制阈和摆脱阈。与交流不同，直流没有确切的活动抑制阈或摆脱阈。只有在电流接通和断开时，才会引起肌肉疼痛和痉挛状收缩。

(3) 心室纤维性颤动阈。直流的纤维性颤动阈也取决于生理和电气参数。

由电气事故资料得知，似是通常纵向电流才会有心室纤维性颤动的危险。至于横向电流，由动物实验得知在更高的电流强度时也可能发生。

从动物的实验及电气事故资料得知，向下电流的纤维性颤动阈，约为向上电流的两倍。

电击时间长于一个心搏周期时，直流的纤维性颤动阈比交流要高好几倍。当电击时间短于200ms时，其纤维性颤动阈和交流以方均根的阈值大致相同。

由动物实验所获得的绘制的曲线，适用于纵向向上的（脚为正极性的）电流。在图1-2-11中的曲线c2和c3表示计算的电流强度和持续时间的组合，在这种情况下，当电流路径为纵向通过躯体（即从左前肢到双后脚）时，则动物的心室纤维性颤动的概率分别约为5%和50%。曲线c1表示电流和持续时间的组合，低于曲线c1，对电流通过人体的同样的

纵向通路, 则心室纤维性颤动的可能比预计低很多。对于人的心室纤维性颤动阈, 对每一个持续时间而言, 都高于与动物相比的电流幅度。例如, 对于健康的人, 其左手到双脚的阈电流, 对于长的电流持续时间, 可能是 200mA 的数量级。有些疾病可能会影响心室纤维性的颤动阈。

(4) 电流的其他效应。电流接近 100mA 时, 通电期间, 四肢有发热感。在接触面的皮肤内感到疼痛。300mA 以下横向电流流过人体几分钟时, 随着时间和电流量的增加, 可引起可逆的心律失常、电流伤痕、烧伤、头昏以及有时失去知觉。超过 300mA 时, 往往会失去知觉。

电流达数安培延续超过几秒, 则可能发生深度烧伤或其他损伤, 甚至死亡。

(5) 时间/电流区域的说明 (见图 1-2-11 和表 1-2-6)。

表 1-2-6 直流——手到双脚通路的时间/电流区域 (图 1-2-11 区域的简要说明)

区域	范围	生理效应
DC-1	2mA 曲线 a 的左侧	当接通、断开或快速变化的电流流通时, 可能有轻微地刺痛感
DC-2	曲线 a 至曲线 b	实质上, 当接通、断开或快速变化的电流流通时, 很可能发生无意识地肌肉收缩, 但通常没有有害的电气生理效应
DC-3	曲线 b 的右侧	随着电流的幅度和时间的增加, 在心脏中很可能发生剧烈的无意识的肌肉反应和可逆的脉冲成形传导的紊乱。通常没有所预期的器官损坏
DC-4 <sup>a</sup>	曲线 c1 以上	有可能发生病理—生理学效应, 如心搏停止、呼吸停止以及烧伤或其他细胞的破坏。心室纤维性颤动的概率也随着电流的幅度和时间而增加
	c1 - c2	DC-4.1 心室纤维性颤动的概率增加到约 5%
	c2 - c3	DC-4.2 心室纤维性颤动的概率增加到约 50%
	曲线 c3 的右侧	DC-4.3 心室纤维性颤动的概率增加大于 50%

<sup>a</sup> 电流的持续时间在 200ms 以下, 如果相关的阈被超过, 则心室纤维性颤动只有在易损期内才能被激发。在这个图中的心室纤维性颤动, 与路径为左手到双脚而且是向上流动的电流效应相关。至于其他的电流路径, 已由心脏电流系数予以考虑。

(6) 心脏系数。交流电流的心脏系数也适用于直流电流, 见表 1-2-5。

### 1.2.5 $Z_T$ 计算实例

接触电流  $I_T$  的计算式如下

$$I_T = \frac{U_T}{Z_T} \quad (1-2-2)$$

式中  $U_T$ ——接触电压, V;

$Z_T$ ——给定的电流路径、接触表面积和接触条件的人体总阻抗,  $\Omega$ 。

【例 1-2-1】 接触电压为 100V 与 200V, 交流 50Hz/60Hz, 电流的路径为双手到双脚, 干燥的条件。双手的接触表面积为中等的, 双脚的表面积为大的。计算接触电流  $I_T$ 。

解: 采用如下的符号:

$Z_{TA}(H-H)$ : 人体总阻抗, 大的接触表面积, 手到手;

$Z_{TA}(H-F)$ : 人体总阻抗, 大的接触表面积, 一手到一脚;

$Z_{TA}(H-T)$ ：人体总阻抗，大的接触表面积，手到躯干；

$$Z_{TA}(H-T) = Z_{TA}(H-H)/2$$

$Z_{TA}(T-F)$ ：人体总阻抗，大的接触表面积，躯干到一脚；

$$Z_{TA}(T-F) = Z_{TA}(H-F) - Z_{TA}(H-T)$$

$Z_{TB}(H-H)$ ：人体总阻抗，中等尺寸的接触表面积，手到手；

$Z_T$ ：大的接触表面积的数据从表 1-2-1 查得（按被测对象的 50%）

$$Z_{TA}(H-H) = 1725\Omega(100V) \text{ 和 } 1275\Omega(200V)$$

按表 1-2-1 的注 1，手到脚的  $Z_T$  比手到手的人体阻抗减少 10%~30%，取平均值 20%，即给出系数 0.8，即， $Z_{TA}(H-F) = 0.8 \times Z_{TA}(H-H)$ 。所以

$$Z_{TA}(H-F) = 1380\Omega(100V) \text{ 和 } 1020\Omega(200V)$$

按  $Z_{TA}(H-T) = Z_{TA}(H-H)/2$

$$Z_{TA}(H-T) = 860\Omega(100V) \text{ 和 } 635\Omega(200V)$$

由于  $Z_{TA}(T-F) = Z_{TA}(H-F) - Z_{TA}(H-T)$

$$Z_{TA}(T-F) = 520\Omega(100V) \text{ 和 } 385\Omega(200V)$$

对于中等的接触表面积（约  $1000\text{mm}^2$ ），从 GB/T 13870.1—2008 中的表 4 查得：

$$Z_{TB}(H-H) = 5200\Omega(100V) \text{ 和 } 2200\Omega(200V)$$

由于  $Z_{TB}(H-T) = Z_{TB}(H-H)/2$

$$Z_{TB}(H-T) = 2600\Omega(100V) \text{ 和 } 1100\Omega(200V)$$

总阻抗  $Z'_T = Z_{TA}(T-F) + Z_{TB}(H-T)$

$$Z'_T = 3120\Omega(100V) \text{ 和 } 1485\Omega(200V)$$

由于双手和双脚为并联，则  $Z_T = Z'_T/2$

$$\text{所以， } Z_T = 1560\Omega(100V) \text{ 和 } 740\Omega(200V)$$

接触电流  $I_T = 64\text{mA}(100V) \text{ 和 } 270\text{mA}(200V)$

计算结果汇总列于表 1-2-7。

表 1-2-7 干燥条件，双手到双脚的电流路径，手为中等的接触表面积，双脚为大的接触表面积，降低系数 0.8，50% 被测对象的人体总阻抗数值和接触电流  $I_T$  的电生理效应

接触电压/V	阻抗手到躯干 $Z_{TB}(H-T)/\Omega$	阻抗躯干到脚 $Z_{TA}(T-F)/\Omega$	阻抗（双）手到 （双）脚 $Z_T/\Omega$	接触电流 $I_T/\text{mA}$	电流持续时间 $t=10\sim30\text{ms}$ 的电生理效应
100	2600	520	1560	64	短促冲撞感
200	1100	385	740	270	强烈电击，身体隆起， 双手臂痛性痉挛

$U_T = 200V$  时的接触电流  $I_T$  为  $100V$  时的 4 倍多，如电流持续时间长于  $0.2s$ ，则心室纤维性颤动就会以很高的概率出现。

【例 1-2-2】  $50\text{Hz}/60\text{Hz}$  的交流接触电压  $100V$  和  $200V$ ，电流路径为手到手，干燥条件，接触表面积为小，求接触电流  $I_T$ 。

解：从 GB/T 13870.1—2008 的表 7 中查得： $U_T = 100V$  和  $200V$ ， $Z_T(H-H)$  为  $40k\Omega$  和  $5.4k\Omega$ 。按式 (1-2-2) 则有

$$100\text{V 时}, I_T = \frac{100}{40 \times 1000} = 2.5\text{mA}$$

$$200\text{V 时}, I_T = \frac{200}{5.4 \times 1000} = 37\text{mA}$$

两者均在心室纤维颤动阈以下。但较长持续时间（如几秒），在皮肤阻抗被击穿以后，则  $I_T$  会超过 100mA 而引起致命的危险。

【例 1-2-3】 50Hz/60Hz 的交流接触电压为 25V，电流路径为双手对身体躯干成并联，盐水湿润条件下，由于很大的手和人体躯干的表面积（皮肤阻抗可以忽略），接触的表面积大，50% 被测对象，求接触电流  $I_T$ 。

解：从表 1-2-3 中查得 25V 时， $Z_T(\text{H-H}) = 1300 \Omega$ ，

因此， $Z_{TA}(\text{H-T}) = Z_{TA}(\text{H-H})/2 = 650 \Omega$

因双手对人体躯干成并联  $Z_T = Z_{TA}(\text{H-T})/2 = 325 \Omega$

结果接触电流  $I_T = 77\text{mA}$ 。

尽管使用安全特低电压（SELV），仍然发生了超过摆脱阈的强烈的不自觉的肌肉反应的电击，而且必须在 0.5~0.6s 内切断故障电路。

【例 1-2-4】 对电压为 1000V 及以上，与手到手的路径相关的渐近的阻抗值，5%、50% 和 95% 级的值分别是 575、775  $\Omega$  和 1050  $\Omega$ 。在这种电压时，皮肤阻抗是可以忽略的。按图 1-2-2 计算  $Z_T$  值，需要将手到手的阻抗减少 10%~30%，按表 1-2-1 注 1 所说明的取平均值 20%，给出了一手到一脚的数值分别为 460、620、840  $\Omega$ 。应用图 1-2-2 中给出的系数，计算一个坐在地面上并用头接触高压导体的人的身体总阻抗  $Z_T$ 。

解：按图 1-2-2：头部阻抗占 10%，躯干阻抗占 1.3%，头到身躯的  $Z_T$  为：

在 5% 级的数值， $Z_T = 460 \Omega \times (0.10 + 0.013) = 52 \Omega$

在 50% 级的数值， $Z_T = 70 \Omega$

在 95% 级的数值， $Z_T = 95 \Omega$

按式（1-2-2）算出的接触电流是几十安培，而且在更高的电压时还会增加。

## 1.3 安全电压及电击防护的基本要求

### 1.3.1 主要术语和定义（根据 GB 50054—2011《低压配电设计规范》）

(1) 预期接触电压（prospective touch voltage）：人或动物尚未接触到可导电部分时，可能同时触及的可导电部分之间的电压。

(2) 约定接触电压限值（conventional prospective touch voltage limit）：在规定的 外界影响条件下，允许无限定时间持续存在的预期接触电压的最大值。

(3) 直接接触（direct contact）：人或动物与带电部分的电接触。

(4) 间接接触（indirect contact）：人或动物与故障状况下带电的外露可导电部分的电接触。

(5) 直接接触防护（protection against direct contact）：无故障条件下的电击防护。

(6) 间接接触防护（protection against indirect contact）：单一故障条件下的电击防护。

(7) 附加防护（additional protection）：直接接触防护和间接接触防护之外的保护措施。

(8) 伸臂范围 (arm's reach): 从人通常站立或活动的表面上的任一点延伸到人不借助任何手段, 向任何方向能用手达到的最大范围。

(9) 外护物 (enclosure): 能提供与预期应用相适应的防护类型和防护等级的外罩。

(10) 保护遮拦 (protective barrier): 为防止从通常可能接近方向直接接触而设置的防护物。

(11) 保护阻挡物 (protective obstacle): 为防止无意的直接接触而设置的防护物。

(12) 电气分隔 (electrical separation): 将危险带电部分与所有其他电气回路和电气部件绝缘以及与地绝缘, 并防止一切接触的保护措施。

(13) 保护分隔 (protective separation): 用双重绝缘、加强绝缘或基本绝缘和电气保护屏蔽的方法将一电路与其他电路分隔。

(14) 特低电压 (extra-low voltage): 相间电压或相对地电压不超过交流方均根值 50V 的电压。

(15) SELV 系统 (SELV system): 在正常条件下不接地, 且电压不能超过特低电压的电气系统。

(16) PELV 系统 (PELV system): 在正常条件下接地, 且电压不能超过特低电压的电气系统。

(17) FELV 系统 (FELV system) 非安全目的而为运行需要的电压不超过特低电压的电气系统。

(18) 等电位联结 (equipotential bonding): 多个可导电部分间为达到等电位进行的联结。

(19) 保护等电位联结 (protective-equipotential-bonding): 为了安全目的进行的等电位联结。

(20) 功能等电位联结 (functional-equipotential-bonding): 为保证正常运行进行的等电位联结。

(21) 总等电位联结 (main equipotential bonding): 在保护等电位联结中, 将总保护导体、总接地导体或总接地端子、建筑物内的金属管道和可利用的建筑物金属结构等可导电部分连接到一起。

(22) 辅助等电位联结 (supplementary equipotential bonding): 在导电部分间用导线直接连通, 使其电位相等或接近, 而实施的保护等电位联结。

(23) 局部等电位联结 (local equipotential bonding): 在一局部范围内将各导电部分连通, 而实施的保护等电位联结。

(24) 基本绝缘 (basic insulation): 能提供基本防护的危险带电部分上的绝缘。

(25) 附加绝缘 (supplementary insulation): 除了基本绝缘外, 用于故障防护附加的单独绝缘。

(26) 双重绝缘 (double insulation): 既有基本绝缘又有附加绝缘构成的绝缘。

(27) 加强绝缘 (reinforced insulation): 危险带电部分上具有相当于双重绝缘的电击防护等级的绝缘。

### 1.3.2 安全电压

#### 1.3.2.1 SELV 系统和 PELV 系统

(1) 直接接触防护的措施和间接接触防护的措施, 除本章 1.3.4 和 1.4 节规定的防护措

施外,亦可采用 SELV 系统和 PELV 系统作为防护措施。

(2) SELV 系统和 PELV 系统的标称电压不应超过交流方均根值 50V。当系统由自耦变压器、分压器或半导体器件等设备从高于 50V 电压系统供电时,应对输入回路采取保护措施。特殊装置或场所的电压限值,应符合现行国家标准 GB 16895《建筑物电气装置》系列标准中的有关规定。

(3) SELV 系统和 PELV 系统的电源,应符合下列要求之一:

1) 由安全隔离变压器供电,变压器应符合 GB 19212.7—2012《电力变压器电源装置和类似产品的安全 第 7 部分 一般用途安全隔离变压器的要求》。

2) 具备与上述规定的安全隔离变压器有同等安全程度的电源。

3) 电化学电源或与高于交流方均根值 50V 电压的回路无关的其他电源。

4) 符合相应标准,而且即使内部发生故障也保证能使出线端子的电压不超过交流方均根值 50V 的电子器件构成的电源。当发生直接接触和间接接触时,电子器件能保证出线端子的电压立即降低到等于小于交流方均根值 50V 时,出线端子的电压可高于交流方均根 50V 的电压。

(4) SELV 系统和 PELV 系统的安全隔离变压器或电动发电机等移动式安全电源,应达到 II 类设备或与 II 类设备等效绝缘的防护要求。

(5) SELV 系统和 PELV 系统回路的带电部分相互之间及与其他回路之间,应进行电气分隔。

(6) 每个 SELV 系统和 PELV 系统的回路导体,应与其他回路导体分开布置。当不能分开布置时,应采取下列措施之一:

1) SELV 系统和 PELV 系统的回路导体应做基本绝缘,并应将其封闭在非金属护套内。

2) 不同电压的回路导体,应用接地的金属屏蔽或金属护套隔开。

3) 不同电压回路可在一个多芯电缆内,但 SELV 系统和 PELV 系统的回路导体应按其中最高电压绝缘。

(7) SELV 系统的回路带电部分严禁与地、其他回路的带电部分或保护导体相连接,并应符合下列要求:

1) 设备的外露可导电部分不应与下列部分连接:

a. 地。

b. 其他回路的保护导体或外露可导电部分。

c. 装置外可导电部分。

2) 电气设备因功能的要求与装置外可导电部分连接时,应保证电压不会高于交流方均根值 50V。

3) SELV 系统回路的外露可导电部分有可能接触其他回路的外露可导电部分时,其电击防护除依靠 SELV 系统保护外,尚应依靠可能被接触的其他回路的外露可导电部分所采取的保护措施。

(8) SELV 系统,当标称电压超过交流方均根值 25V 时,直接接触防护应采取下列措施之一:

1) 设置防护等级不低于国家标准 GB 4208—2008《外壳防护等级 (IP 代码)》规定的 IP××B 级或 IP2×级的遮栏或外壳物。

2) 采用能承受交流方均根值 500V、时间为 1min 的电压耐受试验的绝缘。

(9) 当 SELV 系统的标称电压不超过交流方均根值 25V 时,除另有规定外,可不设直

接接触防护。

(10) PELV系统的直接接触防护，应采用本章1.3.2.1之(8)规定的措施。当建筑物内已设置总等电位联结，PELV系统的接地配置和外露可导电部分已连接到总接地端子上，且符合下列条件时，可不采取直接接触防护措施：

1) 在干燥场所使用，预计人体不会大面积触及带电部分并且标称电压不超过交流方均根值25V；

2) 在其他情况下，标称电压不超过交流方均根值6V。

(11) SELV系统的插头和插座，应符合下列规定：

1) 插头应不能插入其他电压的插座。

2) 其他电压的插头应不能插入。

3) 插座应无保护导体的插孔。

(12) PELV系统的插头和插座，应符合本章1.3.2.1之(11)款之1)、2)项要求。

### 1.3.2.2 FELV

(1) 当不必要采用SELV系统或PELV系统保护或因功能原因使用了标称电压小于等于交流方均根值50V的电压，但不能完全满足本章1.3.2.1要求时，可采用FELV系统。

(2) FELV系统的直接接触防护，应采取下列措施之一：

1) 装设遮拦或外护物。

2) 采用与一次回路所要求的最低试验电压相当的绝缘。

(3) 当属于FELV系统的一部分的设备的绝缘不能耐受一次回路所要求的试验电压时，设备可接近的非导电部分的绝缘应加强，且应使其能耐受交流方均跟值为1500V、时间为1min的试验电压。

(4) FELV系统的间接接触防护，应采取下列措施之一：

1) 当一次回路采用自动切断电源的防护措施时，应将FELV系统中的设备外露可导电部分与一次回路的保护导体连接，此时不排除FELV系统中的带电导体与该一次回路保护导体的连接。

2) 当一次回路采用电气分隔防护时，应将FELV系统中的设备外露可导电部分与一次回路的不接地等电位联结导体连接。

(5) FELV系统的插头和插座，应符合本章1.3.2.1之(11)款1)、2)项的规定。

### 1.3.3 电气设备及其防护措施的配合

#### 1.3.3.1 电气设备按防护措施分类

(1) 0类设备。该类设备采用基本绝缘作为基本防护（直接接触防护）措施，而没有故障防护（间接接触防护）措施。

凡没有用最低限度的基本绝缘与危险的带电部分隔开的可导电部分，都应按危险的带电部分对待。

建议从国际标准中删去0类设备。目前仍有少数产品标准中被引用。

按GB 7000.1—2007《灯具 第一部分 一般要求与试验》规定已删去0类灯具；GB 50034—2013《建筑照明设计标准》规定，严禁使用0类灯具。

(2) I类设备。该类设备采用基本绝缘作为基本防护措施，采用保护联结作为故障防护措施。

该类设备的外露可导电部分，应接到保护联结端子上，实现保护等电位联结。外露可导电部分包括仅涂有涂料、轻漆、喷漆及类似物部分。

(3) II类设备。该类设备采用基本绝缘作为基本防护措施；同时，有附加绝缘作为故障防护措施；或能提供两者功能的加强绝缘。

可触及的可导电部分不应有意地连接到保护导体上。

(4) III类设备。该类设备将电压限制到特低电压值作为基本防护措施，而它不具有故障防护措施。

设备的最高标称电压不超过交流 50V 或无纹波直流 120V。无纹波直流定义为纹波电压含量中的方均根值不大于直流分量的 10%。

III类设备只允许使用 SELV 和 PELV 系统，不应连接保护导体。任何情况下，带电部分都不应做接地连接。

(5) 设备的标志和应用。各类设备的标志和应用见表 1-3-1。

表 1-3-1 设备的标志和应用

设备类别	设备标志	连接和应用
0 类	—	1. 用于非导电场所 2. 采用电气分隔防护
I 类	⚡ 标志字母 PE 或绿黄双色组合	将保护联结端子连接到保护等电位联结上
II 类	□	不连接到保护导体上
III 类	◇	仅使用 SELV 或 PELV，不连接到保护导体

### 1.3.3.2 用电设备保护导体电流的最大交流限值

(1) 应采取措施，限制过大的保护导体电流，而影响正常使用。对于工频交流供电的设备，保护导体电流限值如下：

1) 接自额定电流不大于 32A 的插头、插座（单相或多相）的用电设备见表 1-3-2。

2) 对于没有为保护导体设置专门措施的固定连接的用电设备，或接自额定电流大于 32A 的插头、插座（单相或多相）的用电设备见表 1-3-3。

表 1-3-2 用电设备保护导体电流限值 (1)

设备的额定电流	最大的保护导体电流
≤4A	2mA
>4A, 但≤10A	0.5mA/A
>10A	5mA

表 1-3-3 用电设备保护导体电流限值 (2)

设备的额定电流	最大的保护导体电流
≤7A	3.5mA
>7A, 但≤20A	0.5mA/A
>20A	10mA

(2) 装置中保护导体超过 10mA 的加强型保护导体回路。用电设备应有下列措施之一：

1) 应设有至少能连接 10mm<sup>2</sup> 铜或 16mm<sup>2</sup> 铝保护导体连接端子。

2) 应设有与正常保护导体截面相同的第二个保护导体端子，以便能连接两根相同截面的保护导体。

### 1.3.4 电击防护的基本要求

#### 1.3.4.1 电击防护的基本规划

在下列情况下，危险的带电部分不应是可触及的，而可触及的可导电部分不应是危险的带电部分：

- 在正常工作条件下的防护由基本防护提供，即直接接触防护；
- 在单一故障条件下的防护则由故障防护提供，即间接接触防护。

(1) 直接接触防护。配电系统正常运行中，人触及电气装置的带电部分而可能导致的电击危险。直接接触防护措施在本章 1.3.4.2 中叙述。

(2) 间接接触防护。配电系统带电部分故障，如绝缘失效，而使正常不带电的外露可导电部分呈现危险的电位，对接触到该部分的人可能发生的电击危险。

间接接触应采取下列的防护措施：

- 1) 故障时，应在规定时间内自动切断电源。
- 2) 降低接触电压值到特低电压（ELV）值以下，限制通过人体的故障电流。

间接接触防护措施在本章 1.4 节有详细分析。

#### 1.3.4.2 直接接触防护措施

(1) 将带电部分绝缘。带电部分应全部用绝缘层覆盖，其绝缘层应能长期承受在运行中遇到的机械、化学、电气及热的各种不利影响。油漆、清漆、喷漆不能作为绝缘。

(2) 采用遮挡及外护物。

1) 标称电压超过交流方均根值 25V 容易被触及的裸带电体，应设置遮栏或外护物。其防护等级不应低于国家标准 GB 4208—2008《外壳防护等级（IP 代码）》规定的 IP××B 级或 IP2×级，为更换灯头、插座或熔断器之类部件，或为实现设备的正常功能所需的开孔，在采取了下列两项措施后可除外。

- a. 设置防止人、畜意外触及带电部分的防护设施。
- b. 在可能触及带电部分的开孔处，设置“禁止触及”的标志。

2) 可触及的遮栏或外护物的顶面，其防护等级不应低于 GB 4208—2008 规定的 IP××D 级或 IP4×级。

3) 遮栏或外护物应稳定、耐久、可靠地固定。

4) 需要移动的遮栏以及需要打开或拆下部件的外护物，应采用下列防护措施之一：

a. 只有使用钥匙或其他工具才能移动、打开、拆下遮栏或外护物。

b. 将遮栏或外护物所保护的带电部分的电源切断后，只有在重新放回或重新关闭遮栏或外护物后才能恢复供电。

c. 设置防护等级不低于 GB 4208—2008 规定的 IP××B 级或 IP2×级的中间遮栏，并应能防止触及带电部分且只有使用钥匙或工具才能移开。

5) 按 1.3.4.2 之 (2) 款设置的遮栏或外护物与裸带电体之间的净距，应符合下列规定：

- a. 采用网状遮栏或外护物时，不应小于 100mm。
- b. 采用板状遮栏或外护物时，不应小于 50mm。

(3) 采用阻挡物。

1) 当裸带电体采用遮栏或外护物防护有困难时，在电气专用房间或区域宜采用栏杆或

网状屏障等阻挡物进行防护。阻挡物应能防止人体无意识地接近裸带电体和在操作设备过程中人体无意识地触及裸带电体。

2) 阻挡物应适当固定, 但可以用不用钥匙或工具将其移开。

3) 采用防护等级低于 GB 4208—2008 规定的 IP $\times\times$ B 级或 IP2 $\times$  级的阻挡物时, 阻挡物与裸带电体的水平净距不应小于 1.25m, 阻挡物的高度不应小于 1.4m。

(4) 置于伸臂范围之外。

1) 在电气专用房间或区域, 不采用防护等级等于高于 GB 4208—2008 规定的 IP $\times\times$ B 级或 IP2 $\times$  级的遮栏、外护物或阻挡物时, 应将人可能无意识同时触及的不同电位的可导电部分置于伸臂范围之外。

2) 伸臂范围 (图 1-3-1) 应符合下列规定:

a. 裸带电体布置在有人活动的区域上方时, 其与平台或地面的垂直净距不应小于 2.5m。

b. 裸带电体布置在有人活动的平台侧面时, 其与平台边缘的水平净距不应小于 1.25m。

c. 裸带电体布置在有人活动的平台下方时, 其与平台下方的垂直净距不应小于 1.25m, 且与平台边缘的水平净距不应小于 0.75m。

d. 裸带电体在水平方向的阻挡物、遮栏或外护物, 其防护等级低于 GB 4208—2008 规定的 IP $\times\times$ B 级或 IP2 $\times$  级时, 伸臂范围应从阻挡物、遮栏或外护物算起。

e. 在有人活动区域上方的裸带电体的阻挡物、遮栏或外护物, 其防护等级低于国家标准 GB 4208—2008 规定的 IP $\times\times$ B 级或 IP2 $\times$  级时, 伸臂范围 2.5m 应从人所在地面算起。

f. 人手持大的或长的导电物体时, 伸臂范围应计及该物体的尺寸。

(5) 额定剩余动作电流不超过 30mA 的剩余电流动作保护器, 可作为其他直接接触防护措施失效或使用者疏忽时的附加防护, 但不能单独作为直接接触防护措施。

## 1.4 低压配电系统接地故障保护和等电位联结

(根据 GB 50054—2011《低压配电设计规范》和 GB 16895.21—2011《低压电气装置 第4-41部分: 安全防护 电击防护》)

### 1.4.1 间接接触防护 (接地故障保护) 的一般规定

(1) 间接接触防护的目的是为了防电击和线路损坏以至发生电气火灾。除已采取下列间接接触防护措施者外, 应按本节规定设置自动切断电源的防护:

- 1) 采用 II 类设备。
- 2) 采取电气分隔措施。
- 3) 采用特低电压供电。

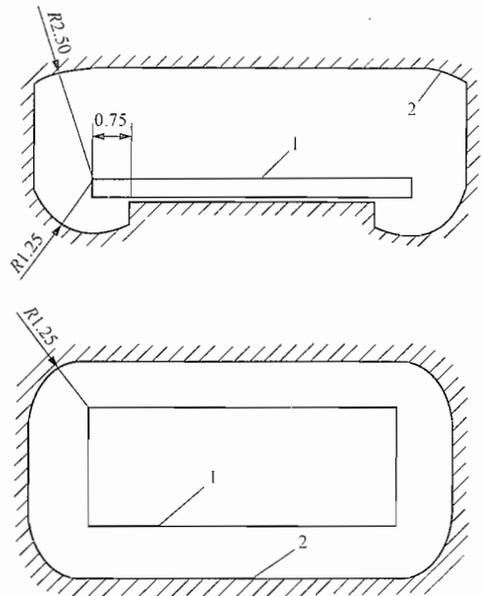


图 1-3-1 伸臂范围 (m)  
1—平台; 2—手臂可达到的界限

4) 将电气设备安装于非导电场所内。

5) 设置不接地的等电位联结。

(2) 在使用 I 类设备、预期接触电压限值为 50V 的场所，当回路或设备中发生带电导体与外露可导电部分或保护导体之间的故障时，间接接触防护电器应能在预期接触电压超过 50V 且持续时间足以引起对人体有害的生理效应前，自动切断该回路。

(3) 电气装置的外露可导电部分，应与保护导体相连接。

(4) 建筑物内的总等电位联结，应符合下列规定：

1) 每个建筑物中的下列可导电部分，应做总等电位联结：

- a. 总保护导体（保护导体、保护接地中性导体）。
- b. 电气装置总接地导体或总接地端子排。
- c. 建筑物内的水管、燃气管、采暖和空调管道等各种金属干管。
- d. 可接用的建筑物金属结构部分。

2) 来自外部的上述干管（可导电部分），应在建筑物内距离引入点最近的地方做总等电位联结。

3) 通信电缆的金属外护层在做等电位联结时，应征得相关部门同意。

(5) 当电气装置或其某一部分发生接地故障后，间接接触的保护电器不能满足自动切断电源要求时，尚应在局部范围内将上述可导电部分再做一次局部等电位联结；亦可将伸臂范围内能同时触及的两个可导电部分之间做辅助等电位联结。两者等电位联结的有效性，应符合下式的要求

$$R \leq \frac{50}{I_a} \quad (1-4-1)$$

式中  $R$ ——可同时触及的外露可导电部分和装置外可导电部分之间，故障电流产生的电压降引起接触电压的一段线路的电阻， $\Omega$ ；

$I_a$ ——保护间接接触保护电器在规定时间内切断故障回路的动作电流，A。

(6) 配电线路间接接触防护的上下级保护电器的动作特性之间应有选择性。

#### 1.4.2 TN 系统

(1) TN 系统配电线路的间接接触防护电器的动作特性，应符合下式的要求

$$Z_s I_a \leq U_0 \quad (1-4-2)$$

式中  $Z_s$ ——接地故障回路的阻抗， $\Omega$ ；

$U_0$ ——相导体对地标称电压，V。

(2) TN 系统配电线路的间接接触防护电器切断故障回路的时间，应符合下列规定：

1) 配电线路或仅供给固定式电气设备用电的末端线路，不宜大于 5s。

2) 供给手持式电气设备和移动式电气设备用电的末端线路或插座回路，TN 系统的最长切断时间不应大于表 1-4-1 的规定。

表 1-4-1 TN 系统的 longest 切断时间

相导体对地标称电压 (V)	切断时间 (s)
220	0.4
380	0.2
>380	0.1

(3) 在 TN 系统中, 当配电箱或配电回路同时直接或间接给固定式、手持式和移动式电气设备供电时, 应采取下列措施之一:

1) 应使配电箱至总等电位联结点之间的一段保护导体的阻抗符合下式的要求:

$$Z_L \leq \frac{50}{U_0} Z_S \quad (1-4-3)$$

式中  $Z_L$ ——配电箱至总等电位联结点之间的一段保护导体的阻抗,  $\Omega$ 。

2) 应将配电箱内保护导体母排与该局部范围内的装置外可导电部分做局部等电位联结或辅助等电位联结。

(4) 当 TN 系统相导体与无等电位联结作用的地之间发生接地故障时, 为使保护导体和与之连接的外露可导电部分的对地电压不超过 50V, 其接地电阻的比值应符合下式的要求

$$\frac{R_B}{R_E} \leq \frac{50}{U_0 - 50} \quad (1-4-4)$$

式中  $R_B$ ——所有与系统接地极并联的接地电阻,  $\Omega$ ;

$R_E$ ——相导体与大地之间的接地电阻,  $\Omega$ 。

(5) 当不符合公式 (1-4-4) 的要求时, 应补充其他有效的间接接触防护措施, 或采用局部 TT 系统。

(6) TN 系统配电线路采用过电流保护电器兼作间接接触防护电器, 其动作特性应符合式 (1-4-2) 的要求, 当不符合规定时, 应采用剩余电流动作保护电器。

#### 1.4.3 TT 系统

(1) TT 系统中, 配电线路内由同一间接接触防护电器保护的外露可导电部分, 应用保护导体连接至共用或各自的接地极上。当有多级保护时, 各级应有各自的或共同的接地极。

(2) TT 系统配电线路间接接触防护电器的动作特性, 应符合下式的要求:

$$R_A I_a \leq 50V \quad (1-4-5)$$

式中  $R_A$ ——外露可导电部分的接地电阻和保护导体电阻之和,  $\Omega$ 。

(3) TT 系统的间接接触防护的保护电器应采用剩余电流动作保护电器 (RCD), 当故障回路阻抗值足够小, 可选用过电流保护电器。

(4) 采用 RCD 时, 切断电源时间不应大小下列数值:

1) 对于 32A 及以下的终端回路,  $U_0$  为 220V 时, 0.2s;  $U_0$  为 380V 时, 0.07s。

2) 其他配电回路, 1s。

(5) 为满足上述的切断电源时间要求, 预期故障电流应显著大于 RCD 的额定剩余动作电流  $I_{\Delta n}$ , 通常要求大于  $5I_{\Delta n}$ 。

(6) 当不能符合式 (1-4-5) 的规定时, 应做局部或辅助等电位联结。

#### 1.4.4 IT 系统

(1) 在 IT 系统的配电线路中, 当发生第一次接地故障时, 应发出报警信号, 且故障电流应符合下式的要求

$$R_A I_d \leq 50V \quad (1-4-6)$$

式中  $I_d$ ——相导体和外露可导电部分间第一次接地故障的故障电流, A, 此值应计及泄漏电流和电气装置全部接地阻抗值的影响。

(2) IT 系统应设置绝缘监测器。当发生第一次接地故障或绝缘电阻低于规定的整定值时，应由绝缘监测器发出音响和灯光信号，且灯光信号应持续到故障消除。

(3) IT 系统的外露导电部分可采用共同接地，亦可个别或成组地接地，并应符合下列规定：

1) 当外露可导电部分为共同接地，发生第二次接地故障时，故障回路的切断应符合 TN 系统自动切断电源的要求。

2) 当外露可导电部分单独或成组地接地，发生第二次接地故障时，故障回路的切断应符合 TT 系统自动切断电源的要求。

(4) IT 系统不宜配出中性导体。

(5) 在 IT 系统的配电线路中，当发生第二次接地故障时，故障回路的最长切断时间不应大于表 1-4-2 的规定。

表 1-4-2 IT 系统第二次故障时最长切断时间

相对地标称电压/相间标称电压 (V)	切断时间 (s)	
	没有中性导体配出	有中性导体配出
220/380	0.4	0.8
380/660	0.2	0.4
580/1000	0.1	0.2

(6) IT 系统的外露可导电部分为共同接地时，应由过电流保护电器或剩余电流保护器切断故障回路，并应符合下列规定：

1) 当 IT 系统不配出中性导体时，保护电器动作特性应符合下式的要求

$$Z_c I_e \leq \frac{\sqrt{3}}{2} U_0 \quad (1-4-7)$$

2) 当 IT 系统配出中性导体时，保护电器动作特性应符合下式的要求

$$Z_d I_e \leq \frac{1}{2} U_0 \quad (1-4-8)$$

式中  $Z_c$ ——包括相导体和保护导体的故障回路的阻抗， $\Omega$ ；

$Z_d$ ——包括相导体和中性导体以及保护导体的故障回路的阻抗， $\Omega$ ；

$I_e$ ——保证保护电器在表 1-4-2 规定时间切断故障回路的电流，A。

注 1. 式 (1-4-8) 是考虑两次接地故障中有一次是 N 线对地的故障。

2. 式 (1-4-7) 和式 (1-4-8) 中的数值 2 是考虑两次故障可能发生在不同的配电回路内的情况。

### 1.4.5 剩余电流保护器的应用

#### 1.4.5.1 剩余电流保护器 (RCD) 的应用场所

(1) 直接接触防护。

1) RCD 可作为直接接触防护措施失效，或使用者疏忽时，直接接触防护的附加防护。

2) RCD 不能作为直接接触防护的唯一措施。

3) 用于直接接触防护的附加防护时，其额定剩余动作电流  $I_{\Delta n}$  不应超过 30mA。

(2) 间接接触防护。

1) 用于间接接触防护的 RCD，应保证故障时在规定时间内自动切断电源。

2) 对于 TT 系统的间接接触防护, 应选用 RCD。

3) 对于 TN 系统的间接接触防护, 当采用过电流保护电器 (断路器、熔断器) 不能满足要求时, 应选用 RCD。

(3) 电气火灾的防护。

1) 对于容易引起火灾危险的场所 (如住宅等) 宜设置 RCD 作为监测或保护电器, 应作用于发出报警或切断电源。

2) RCD 作为监测或保护电气火灾的电器, 应装设在该场所配电线路的首端, 以全面监视有火灾危险的配电线路的绝缘状态。

3) 用作防止或减少电气火灾危险的 RCD, 其  $I_{\Delta n}$  值不应大于 300mA。

(4) 需要装设 RCD 的设备和线路:

1) 住宅、旅馆及各种公共建筑、工业场所配电系统的插座回路。

2) 移动设备和手持电动工具的回路。

3) 建筑施工场地的电气设备和线路。

4) 临时用电的线路。

5) 有火灾危险环境的线路。

6) 游泳池、喷水池、洗浴室的电气设备和线路。

7) 医院 1 类医疗场所内 32A 及以下的末端回路、2 类场所不影响生命安全的电气设备 (如 X 光机)。

(5) 不需要装设 RCD 的电气设备和线路:

1) 采用安全特低电压 (SELV) 供电的回路。

2) 装设隔离变压器的电气分隔线路。

3) 采用 II 类设备的。

4) 采用不接地的等电位联结的非导电场所。

(6) 不允许装设 RCD 的电气设备和线路。

1) 消防电气设备。

2) 确保公共安全的电气设备。

3) 医院内维持患者生命安全的医疗电气设备和外科手术设备。

4) 其他不允许断电, 因断电可能危及安全的重要设备。

#### 1.4.5.2 选用 RCD 的技术要求

(1) RCD 的技术要求应符合 GB 6829—2008《剩余电流动作保护电器的一般要求》的有关规定。

(2) RCD 的选型。

1) 下列场合应选用动作功能与电压无关的 RCD (即电磁式 RCD):

a. 移动式、便携式带 RCD 的插座箱 (盒)。

b. TN 系统中 RCD 安装位置靠近被保护电气设备者。

c. 建筑工地的配电线路。

d. 临时用电的移动线路。

e. 无专业人员维护管理的场所。

2) 下列场合宜选用动作功能与电压有关的 RCD (即电子式 RCD):

- a. TT 系统的配电线路。
- b. 正常环境有辅助等电位联结的回路。
- c. 有专业人员维护管理的配电线路。

3) 按是否含有直流分量时的动作特性选型:

- a. 一般的交流剩余故障电流的场合应选用 AC 型 RCD。
- b. 故障电流含有脉动直流分量, 如采用单相整流的电气设备, 应选用 B 型 RCD。
- c. 故障电流含有脉动直流和平滑直流分量, 如三相交流整流器、变频器、逆变器、UPS、EPS 及 X 光、CT 等医疗设备, 应选用 F 型或 B 型 RCD。

4) 按动作时间选型:

- a. 终端回路、插座回路、单个电气设备的保护应选用一般型(无延时) RCD。
- b. 配电干线和分干线, 启动电流大的感应电动机的保护, 应选用 S 型或延时型 RCD。

(3) RCD 的极数和回路数的选择。

1) 单相 220V 的末端回路, 住宅和旅馆客房应选用两极 RCD, 其他场所, 可选用两极或单极两回路 RCD。

2) 三相三线制线路, 应选用三极 RCD。

3) 三相四线制线路:

- a. TN 系统宜选用三极四回路 RCD, 进线可选用四极 RCD。
- b. TT 系统宜选用四极 RCD。
- c. IT 系统引出中性线时, 应选用四极 RCD。

(4) RCD 的额定剩余动作电流  $I_{\Delta n}$  的确定。

1) RCD 的  $I_{\Delta n}$  值的正确选定, 是选用 RCD 的重要环节, 必须符合下列两项要求:

- a. 正常运行中不应误动作。
- b. 故障时, 应在规定时间内动作。

2) RCD 的  $I_{\Delta n}$  不应选择太小, 应根据被保护电路和设备预期的正常泄漏电流, 或通过实测值, 选择 RCD 的  $I_{\Delta n}$  必须大于被保护线路和设备正常泄漏电流最大值的 2 倍, 对于末端回路宜大于 2.5 ~ 3.0 倍。

3) RCD 的  $I_{\Delta n}$  值不能选得太大, 应符合下列要求:

a. 额定电流 20A 及以下的插座回路、32A 及以下的户外移动式设备采用 RCD 作为直接接触的附加防护, 其  $I_{\Delta n}$  不应大于 30mA。

b. 医疗场所装设的防间接接触的 RCD, 其  $I_{\Delta n}$  不应大于 30mA。

c. 游泳池、喷水池、浴室等场所装设的 RCD, 其  $I_{\Delta n}$  不应大于 30mA。

d. TT 系统配电回路装设的 RCD, 其  $I_{\Delta n}$  值应保证在规定时间内切断电源, 故障电流最小值不应小于  $I_{\Delta n}$  的 5 倍。

e. TN 系统配电回路装设 RCD 时, 其  $I_{\Delta n}$  值应保证在 TN 系统的规定时间内切断电源, 故障电流最小值不应小于  $I_{\Delta n}$  的 5 倍。

f. 住宅、旅馆及其他有火灾危险环境的配电线路进线处装设防电气火灾的 RCD, 其  $I_{\Delta n}$  值不应大于 300mA, 作用于切断电源或发出报警。

(5) 装设多级 RCD 时, 上下级 RCD 应有选择性动作。

1) 上级 RCD 的  $I_{\Delta n}$  值至少应为下级 RCD 的  $I_{\Delta n}$  的 3 倍。如末端回路的 RCD 的  $I_{\Delta n} =$

30mA, 则上级 RCD 的  $I_{\Delta n}$  不应小于 100mA, 再上级  $I_{\Delta n}$  不应小于 300mA。

2) 上级 RCD 在不同故障电流作用下, 其不动作时间应大于下级 RCD 的动作时间。如末级 RCD 为瞬时动作, 其固有动作时间为 0.04s, 则上级 RCD 选用延时型 (S 型), 动作时间宜为 0.15s, 再上级 RCD 的延时不应大于 1s。

(6) RCD 的接线要求。

1) 接线原则: 所有带电导体 (包括相导体和 N 导体) 必须穿过 RCD 的检测回路, 而 PE 导体 (含 PEN 导体) 一定不允许穿过。

2) TN-C 系统不能装设 RCD; 需要装设时, 必须将 RCD 电源端将 PE 和 N 导体分开, 做成局部 TN-S 或局部 TT。

3) RCD 的接线方式见表 1-4-3。

表 1-4-3 漏电保护器接线方式

接线图 极别 接地型式	单相 (单极或双极)	三 相	
		三线 (三极)	四线 (三极或四极)
TT			
TN	TN-C		
TN	TN-S		
TN	TN-C-S		

注 1. L1、L2、L3 为相线; N 为中性线; PE 为保护线; PEN 为保护接地中性线; 为单相、三相电气设备; 为单相照明设备; 为漏电保护器; 为不与系统中性接地点相连的单独接地装置, 作保护接地用。

2. 单相负载或三相负载在不同的接地保护系统中的接线方式图中, 左侧设备为未装有漏电保护器, 中间和右侧为装用漏电保护器的接线图。

3. 在 TN 系统中使用漏电保护器的电气设备, 其外露可导电部分的保护线可接在 PEN 线, 也可以接在单独接地装置上而形成局部 TT 系统, 如 TN 系统接线方式图中的右侧设备的接线。

## 1.4.6 等电位联结

### 1.4.6.1 等电位联结的作用

建筑物的低压电气装置应采用等电位联结，以降低建筑物内间接接触电压和各种金属物体间的电位差；避免自建筑物外经电气线路和金属管道引入的故障电压的危害；减少保护电器动作不可靠带来的危险和有利于避免外界电磁场引起的干扰、改善装置的电磁兼容性。

### 1.4.6.2 等电位联结的分类

等电位联结可分为两类，即保护性等电位联结和功能性等电位联结。通常广泛应用的是保护性等电位联结，简称等电位联结。包括以下三种。

(1) 总等电位联结。总等电位联结是将建筑物电气装置外露导电部分与装置外导电部分电位基本相等的连接。通过进线配电箱近旁的总等电位联结端子板（接地母排）将下列导电部分互相连通：

- 1) 进线配电箱的 PE (PEN) 母排。
- 2) 金属管道如给排水、热力、煤气等干管。
- 3) 建筑物金属结构。
- 4) 建筑物接地装置。

建筑物每一电源进线都应做总等电位联结。

(2) 辅助等电位联结。将导电部分间用导体直接连通，使其电位相等或接近，而实施的保护等电位联结。

(3) 局部等电位联结。在一局部范围内将各可导电部分连通，而实施的保护等电位联结。可通过局部等电位联结端子板将 PE 母线（或干线）、金属管道、建筑物金属体等相互连通。

下列情况需作局部等电位联结：

- 1) 当故障回路阻抗过大，使自动切断电源时间过长，不能满足防电击要求时。
- 2) 由 TN 系统同一配电箱供电给固定式和手持式、移动式两种电气设备，而固定式设备保护电器切断电源时间不能满足手持式、移动式设备防电击要求时。
- 3) 为满足浴室、游泳池、医院手术室等场所对防电击的特殊要求时。
- 4) 为避免爆炸危险场所因电位差产生电火花时。
- 5) 为满足防雷和信息系统抗干扰的要求时，可参见防雷及过电压有关规定。

等电位联结与接地的关系。接地可视为以大地作为参考电位的等电位联结，为防电击而设的等电位联结一般均作接地，与地电位相一致，有利于人身安全。

### 1.4.6.3 等电位联结的应用

(1) 等电位联结示意图，见图 1-4-1。总等电位联结示意图，见图 1-4-2。

(2) 局部等电位联结和辅助等电位联结的应用。

1) 当配电线路较长，故障电流较小，过电流保护动作时间超过规定值时，可不放大线路截面来缩短动作时间，而以做局部等电位联结或辅助等电位联结来降低接触电压，从而可靠地防止电击事故的发生，如图 1-4-3 或图 1-4-4 所示（图中未表示相线）。

如图 1-4-3 做局部等电位联结后，各导电部分间故障时的接触电压大大降低，满足了防电击要求。为验证其安全有效性，可用下式进行校验

$$\frac{Z_{ab}}{Z_s} U_0 \leq 50V \quad (1-4-9)$$

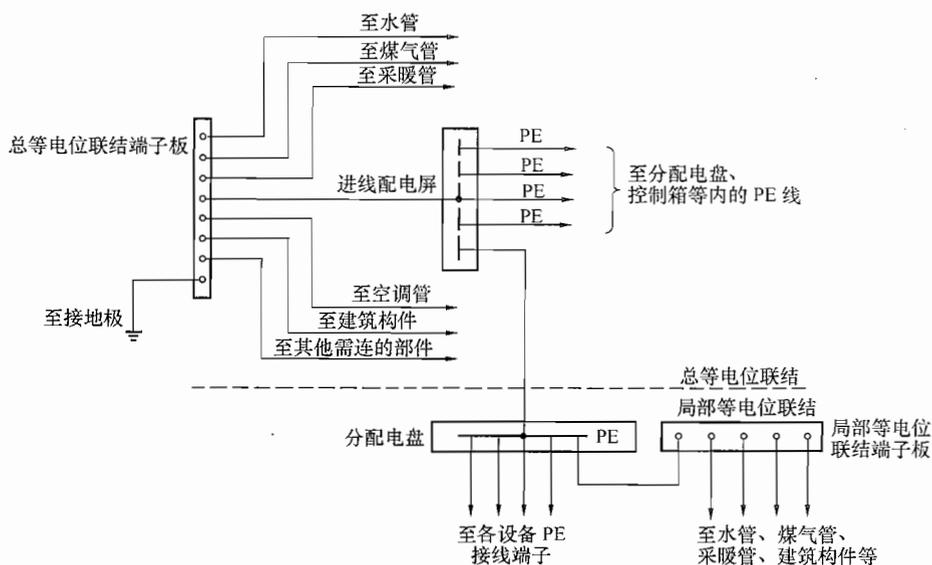


图 1-4-1 等电位联结示意图

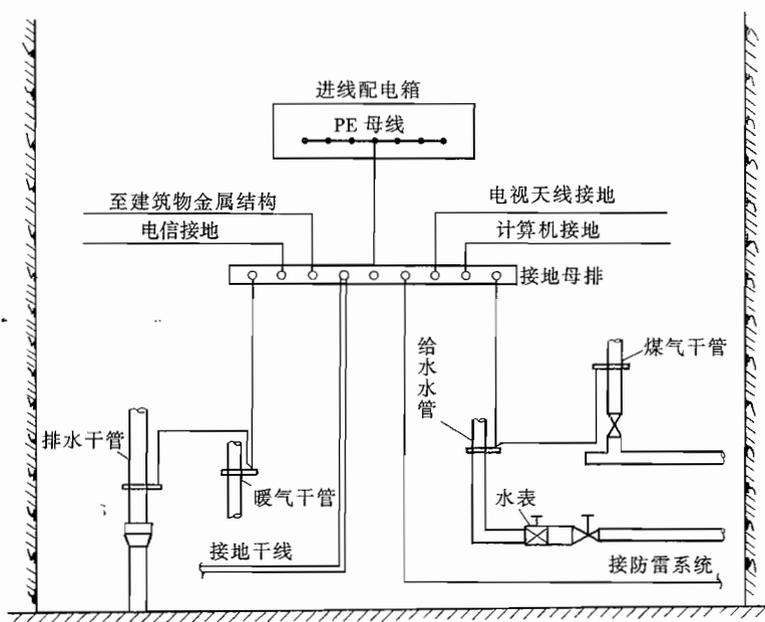


图 1-4-2 总等电位联结示意图

式中  $Z_{ab}$ ——a、b 两点间 PE 线的阻抗,  $\Omega$ ;

$Z_s$ ——接地故障回路阻抗,  $\Omega$ , 包括故障电流所流经的相线、PE 线和变压器的阻抗, 故障处因被熔焊, 不计其阻抗;

$U_0$ ——相线对地标称电压, 在我国一般为 220V。

如图 1-4-4 做辅助等电位联结后, 接触电压为 a、b 点的电压差, 则接近于为零。

2) 如果同一配电盘既供电给固定式设备, 又供电给手握式或移动式设备。当前者发生

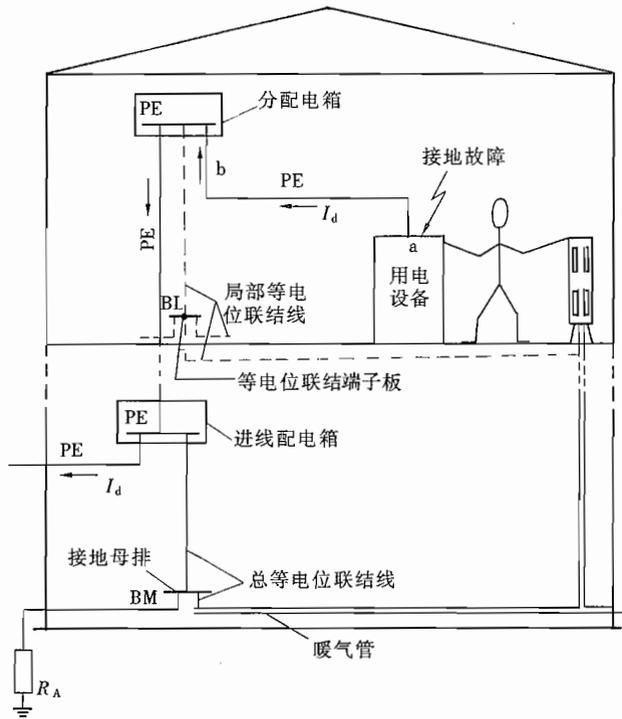


图 1-4-3 局部等电位联结降低接触电压

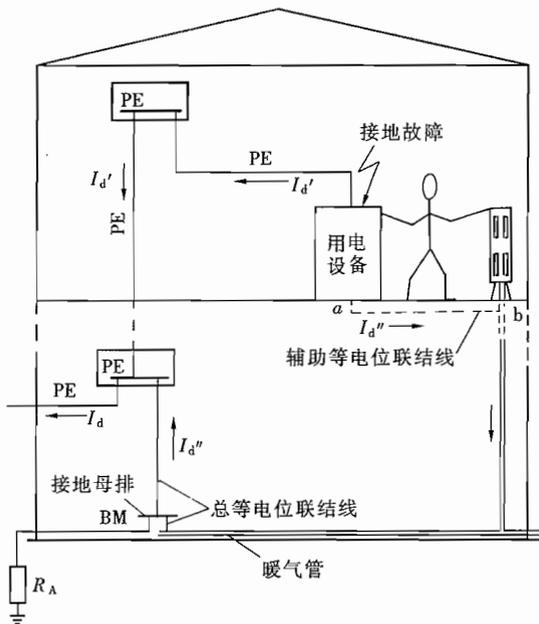


图 1-4-4 辅助等电位联结降低接触电压

接地故障时，引起的危险故障电压将通过 PE 线蔓延到后者的金属外壳，而前者的切断故障时间可达 5s，这可能给手握式设备的使用者带来危险，如图 1-4-5 所示。

可用下式验算手握式或移动式设备上的接触电压，其值为图 1-4-5 中 m-n 段保护线的电压降

$$\Delta U_{mn} = \frac{Z_{mn}}{Z_n} U_0 \leq 50V$$

式中  $Z_{mn}$ ——m-n 段 PE 线的阻抗， $\Omega$ 。

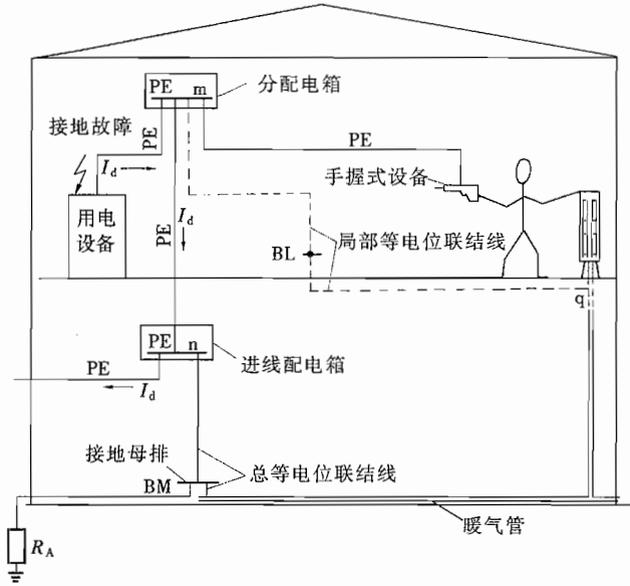


图 1-4-5 局部等电位联结降低手握式设备接触电压

如果 m 和 n 点距离远，则  $\Delta U_{mn}$  超过 50V，可放大导线截面使  $\Delta U_{mn}$  小于 50V，但更好的防电击措施是设置局部等电位联结，如图 1-4-5 所示。这时接触电压只是故障电流分流在一小段局部等电位联结线 m-BL-q 段上的电压降，将可以达到小于 50V。

#### 1.4.6.4 等电位联结导体的截面积

等电位联结导体的截面积综合列于表 1-4-4。

表 1-4-4 等电位联结导体的截面积

类别 取值	总等电位联结	局部等电位联结	辅助等电位联结
一般值	$\geq$ 进线 PE (PEN) 导体截面积的 50%	$\geq$ 局部场所内最大的 PE 导体截面积的 50%	两电气设备外露导电部分之间：两者 PE 导体截面积的较小者； 电气设备与外露导电部分之间：PE 导体截面积之 50%
最小值	铜 6mm <sup>2</sup> 铝 16mm <sup>2</sup> 钢 50mm <sup>2</sup>	有机械保护时：铜 2.5mm <sup>2</sup> ；铝 16mm <sup>2</sup> 无机机械保护时：铜 4mm <sup>2</sup> ；铝 16mm <sup>2</sup>	
最大值	铜 25mm <sup>2</sup> 或相同载流量的铝、钢		—

注 采用铝导体时，应保证铝导体连接的持续导通性。

## 1.5 危险环境电力装置的特殊设计要求

### 1.5.1 爆炸危险环境的电力装置设计（根据 GB 50058—2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》）

#### 1.5.1.1 术语

(1) 闪点 (flash point): 在标准条件下, 使液体变成蒸汽的数量能够形成可燃性气体与空气混合物的最低液体温度。

(2) 引燃温度 (ignition temperature): 可燃性气体或蒸汽与空气形成的混合物, 在规定的条件下被热表面引燃的最低温度。

(3) 可燃性物质 (flammable material): 指物质本身是可燃性的, 能够产生可燃性气体、蒸汽或薄雾。

(4) 可燃性气体或蒸汽 (flammable gas or vapor): 以一定比例与空气混合后, 将会形成爆炸性气体环境的气体或蒸汽。

(5) 可燃液体 (flammable liquid): 在可预见的使用条件下能产生可燃蒸汽或薄雾的液体。

(6) 可燃薄雾 (flammable mist): 在空气中挥发能形成爆炸性环境的可燃性液体微滴。

(7) 爆炸性气体混合物 (explosive gas mixture): 在大气条件下, 气体、蒸汽、薄雾状的可燃物质与空气的混合物, 引燃后燃烧将在全范围内传播。

(8) 高挥发性液体 (highly volatile liquid): 高挥发性液体是指在 37.8℃ 的条件下, 蒸汽绝压超过 276kPa 的液体, 这些液体包括丁烷、乙烷、乙烯、丙烷、丙烯等液体, 液化天然气, 天然气凝液及它们的混合物。

(9) 爆炸性气体环境 (explosive gas atmosphere): 在大气条件下, 气体或蒸汽可燃物质与空气的混合物引燃后, 能够保持燃烧自行传播的环境。

(10) 爆炸极限 (explosive limit):

1) 爆炸下限 (LEL) (Lower Explosive Limit): 可燃气体、蒸汽或薄雾在空气中形成爆炸性气体混合物的最低浓度。空气中的可燃性气体或蒸汽的浓度低于该浓度, 则气体环境就不能形成爆炸。

2) 爆炸上限 (UEL) (Upper Explosive Limit): 可燃气体、蒸汽或薄雾在空气中形成爆炸性气体混合物的最高浓度。空气中的可燃性气体或蒸汽的浓度高于该浓度, 则气体环境就不能形成爆炸。

(11) 爆炸危险区域 (hazardous area): 爆炸性混合物出现的或预期可能出现的数量达到足以要求对电气设备的结构、安装和使用采取预防措施的区域。

(12) 释放源 (source of release): 可释放出能形成爆炸性混合物的物质所在的部位或地点。

(13) 粉尘 (dust): 在大气中依其自身重量可沉淀下来, 但也可持续悬浮在空气中一段时间的固体微小颗粒, 包括纤维和飞絮及国家标准 GB/T 6719—2009《袋式除尘器技术要求》中定义的粉尘和细颗粒。

(14) 可燃性粉尘 (combustible dust): 在空气中能燃烧或无焰燃烧并在大气压和正常温度下能与空气形成爆炸性混合物的粉尘、纤维或飞絮。

(15) 可燃性飞絮 (combustible flyings): 标称尺寸大于 500 $\mu\text{m}$ , 可悬浮在空气中, 也可

依靠自身重沉淀下来的包括纤维在内的固体颗粒。

(16) 导电性粉尘 (conductive dust): 电阻率等于或小于  $1 \times 10^3 \Omega \cdot m$  的粉尘。

(17) 非导电性粉尘 (non-conductive dust): 电阻率大于  $1 \times 10^3 \Omega \cdot m$  的粉尘。

(18) 爆炸性粉尘环境 (explosive dust atmosphere): 在大气环境条件下, 可燃性粉尘与空气形成的混合物被点燃后, 能够保持燃烧自行传播的环境。

(19) 重于空气的气体或蒸汽 (heavier-than-air gases or vapors): 相对密度大于 1.2 的气体或蒸汽。

(20) 轻于空气的气体或蒸汽 (lighter-than-air gases or vapors): 相对密度小于 0.8 的气体或蒸汽。

(21) 粉尘层的引燃温度 (ignition temperature of dust layer): 规定厚度的粉尘层在热表面上发生引燃的热表面的最低温度。

(22) 粉尘云的引燃温度 (ignition temperature of dust cloud): 炉内空气中所含粉尘云点燃时, 炉内壁的最低温度。

(23) 设备保护级别 (EPL) (Equipment Protection Level): 根据设备成为引燃源的可能性, 和爆炸性气体及粉尘环境所具有的不同特征, 对设备规定的保护级别。

### 1.5.1.2 爆炸性气体环境

#### 1. 一般规定

(1) 在生产、加工、处理、转运或贮存过程中出现或可能出现下列爆炸性气体混合物环境之一时, 应进行爆炸性气体环境的电力装置设计:

1) 在大气条件下, 可燃气体与空气混合形成爆炸性气体混合物。

2) 闪点低于或等于环境温度的可燃液体的蒸汽或薄雾与空气混合形成爆炸性气体混合物。

3) 在物料操作温度高于可燃液体闪点的情况下, 有可能泄漏的可燃液体的蒸汽或薄雾与空气混合形成爆炸性气体混合物。

(2) 在爆炸性气体环境中发生爆炸应符合下列条件:

1) 存在可燃气体、可燃液体的蒸汽或薄雾, 浓度在爆炸极限以内。

2) 存在足以点燃爆炸性气体混合物的火花、电弧或高温。

(3) 在爆炸性气体环境中应采取下列防止爆炸的措施:

1) 产生爆炸的条件同时出现的可能性应减到最小程度。

2) 工艺设计中应采取下列消除或减少可燃物质的释放及积聚的措施:

a. 工艺流程中宜采取较低的压力和温度, 将可燃物质限制在密闭容器内。

b. 工艺布置应限制和缩小爆炸危险区域的范围, 并宜将不同等级的爆炸危险区或与非爆炸危险区分隔在各自的界区内。

c. 在设备内可采用以氮气或其他惰性气体覆盖的措施。

d. 宜采取安全连锁或发生事故时加入聚合反应阻聚剂等化学药品的措施。

3) 防止爆炸性气体混合物的形成或缩短其滞留时间可采取下列措施:

a. 工艺装置宜采取露天或开敞式布置;

b. 设置机械通风装置;

c. 在爆炸危险环境内设置正压室;

d. 对区域内易形成和积聚爆炸性气体混合物的地点应设置自动测量仪器装置，当气体或蒸气浓度接近爆炸下限值的50%时，应能可靠地发出信号或切断电源。

4) 在区域内应采取消除或控制设备线路产生火花、电弧或高温的措施。

## 2. 爆炸性气体环境危险区域划分

(1) 爆炸性气体环境应根据爆炸性气体混合物出现的频繁程度和持续时间分为0区、1区、2区，分区应符合下列规定：

1) 0区应为连续出现或长期出现爆炸性气体混合物的环境。

2) 1区应为在正常运行时可能出现爆炸性气体混合物的环境。

3) 2区应为在正常运行时不太可能出现爆炸性气体混合物的环境，或即使出现也仅是短时存在。

(2) 符合下列条件之一时，可划为非爆炸危险区域：

1) 没有释放源且不可能有可燃物质侵入的区域。

2) 可燃物质可能出现的最高浓度不超过爆炸下限值的10%。

3) 在生产过程中使用明火的设备附近，或炽热部件的表面温度超过区域内可燃物质引燃温度的设备附近。

4) 在生产装置区外，露天或开敞设置的输送可燃物质的架空管道地带，但其阀门处按具体情况确定。

(3) 释放源应按可燃物质的释放频繁程度和持续时间长短分为连续级释放源、一级释放源、二级释放源，释放源分级应符合下列规定：

1) 连续级释放源应是连续释放或预计长期释放的。下列情况可划为连续级释放源：

a. 没有用惰性气体覆盖的固定顶盖贮罐中的可燃液体的表面。

b. 油、水分离器等直接与空间接触的可燃液体的表面。

c. 经常或长期向空间释放可燃气体或可燃液体的蒸汽的排气孔和其他孔口。

2) 一级释放源应是在正常运行时，预计可能周期性或偶尔释放的。下列情况可划为一级释放源：

a. 在正常运行时，会释放可燃物质的泵、压缩机和阀门等的密封处。

b. 贮有可燃液体的容器上的排水口处。

c. 正常运行时，会向空间释放可燃物质的取样点。

d. 正常运行时，会向空间释放可燃物质的泄压阀、排气口和其他孔口。

3) 二级释放源应为在正常运行时，预计不可能释放，或仅是偶尔和短期释放的。下列情况可划为二级释放源：

a. 不能出现释放可燃物质的泵、压缩机和阀门的密封处。

b. 不能释放可燃物质的法兰、连接件和管道接头。

c. 不能向空间释放可燃物质的安全阀、排气孔和其他孔口处。

d. 不能向空间释放可燃物质的取样点。

(4) 当爆炸危险区域内通风的空气流量能使可燃物质很快稀释到爆炸下限值的25%以下时，可定为通风良好，并应符合下列规定：

1) 下列场所可定为通风良好场所：

a. 露天场所。

b. 敞开式建筑物，在建筑物的壁、屋顶开口，其尺寸和位置保证建筑物内部通风效果等效于露天场所。

c. 非敞开建筑物，建有永久性的开口，使其具有自然通风的条件。

d. 对于封闭区域，每平方米地板面积每分钟至少提供  $0.3\text{m}^3$  的空气或至少 1h 换气 6 次。

2) 当采用机械通风时，下列情况可不计机械通风故障的影响：

a. 封闭式或半封闭式的建筑物设置备用的独立通风系统。

b. 当通风设备发生故障时，设置自动报警或停止工艺流程等确保能阻止可燃物质释放的预防措施，或使设备断电的预防措施。

(5) 爆炸危险区域的划分应按释放源级别和通风条件确定，存在连续级释放源的区域可划为 0 区，存在一级释放源的区域可划为 1 区，存在二级释放源的区域可划为 2 区，并根据通风条件按下列规定调整区域划分：

1) 当通风良好时，可降低爆炸危险区域等级；当通风不良时，应提高爆炸危险区域等级。

2) 局部机械通风在降低爆炸性气体混合物浓度方面比自然通风和一般机械通风更为有效时，可采用局部通风降低爆炸危险区域等级。

3) 在障碍物、凹坑和死角处，应局部提高爆炸危险区域等级。

4) 利用堤或墙等障碍物，限制比空气重的爆炸性气体混合物的扩散，可缩小爆炸危险区域的范围。

3. 爆炸性气体环境危险区域范围

(1) 爆炸性气体环境危险区域范围应按下列要求确定：

1) 爆炸危险区域的范围应根据释放源的级别和位置、可燃物质的性质、通风条件、障碍物及生产条件、运行经验，经技术经济比较综合确定。

2) 建筑物内部宜以厂房为单位划定爆炸危险区域的范围。当厂房内空间大时，应根据生产的具体情况划分，释放源释放的可燃物质量少时，可将厂房内部按空间划定，并应符合下列规定：

a. 当厂房内具有比空气重的可燃物质时，厂房内通风换气次数不应少于每小时两次，且换气不受阻碍，厂房地面上高度 1m 以内容积的空气与释放至厂房内的可燃物质所形成的爆炸性气体混合浓度应小于爆炸下限。

b. 当厂房内具有比空气轻的可燃物质时，厂房平屋顶平面以下 1m 高度内，或圆顶、斜顶的最高点以下 2m 高度内的容积的空气与释放至厂房内的可燃物质所形成的爆炸性气体混合物的浓度应小于爆炸下限。

c. 释放至厂房内的可燃物质的最大量应按一小时释放量的三倍计算，但不包括由于灾难性事故引起破裂时的释放量。

3) 当高挥发性液体可能大量释放并扩散到 15m 以外时，爆炸危险区域的范围应划分为附加 2 区。

4) 当可燃液体闪点高于或等于  $60^{\circ}\text{C}$  时，在物料操作温度高于可燃液体闪点的情况下，可燃液体可能泄漏时，其爆炸危险区域的范围宜适当缩小，但不宜小于 4.5m。

(2) 爆炸危险区域的等级和范围可根据可燃物质的释放量、释放速率、沸点、温度、

闪点、相对密度、爆炸下限、障碍等条件，结合实践经验确定。

(3) 爆炸性气体环境内的车间采用正压或连续通风稀释措施后，不能形成爆炸性气体环境时，车间可降为非爆炸危险环境。通风引入的气源应安全可靠，且无可燃物质、腐蚀介质及机械杂质，进气口应设高出所划爆炸性危险区域范围的 1.5m 以上处。

(4) 阀门危险区域的划分应符合下列规定：

- 1) 位于通风良好而未封闭的区域内的截断阀和止回阀周围的区域可不分类。
- 2) 位于通风良好的封闭区域内的截断阀和止回阀周围的区域，在封闭的范围内可划为 2 区。
- 3) 位于通风不良的封闭区域内的截断阀和止回阀周围的区域，在封闭的范围内可划为 1 区。
- 4) 位于通风良好而未封闭的区域内的工艺程序控制阀周围的区域，在阀杆密封或类似密封周围的 0.5m 的范围内可划为 2 区。
- 5) 位于通风良好的封闭区域内的工艺程序控制阀周围的区域，在封闭的范围内可划为 2 区。
- 6) 位于通风不良的封闭区域内的工艺程序控制阀周围的区域，在封闭的范围内可划为 2 区。

(5) 蓄电池的危险区域的划分应符合下列规定：

- 1) 蓄电池应属于 II C 级的分类。
- 2) 当含有可充电镍-镉或镍-氢蓄电池的封闭区域，蓄电池无通气口，其总体积小于该封闭区域容积的 1%，并在 1h 放电率下蓄电池的容量小于  $1.5A \cdot h$  时，可按照非危险区域考虑。
- 3) 其他蓄电池的封闭区域，蓄电池无通气口，其总体积小于该封闭区域容积的 1% 或蓄电池的充电系统的额定输出小于或等于 200W，并采取了防止过充电的措施时，可按照非危险区域考虑。
- 4) 含有可充电蓄电池的非封闭区域，通风良好，可划为非危险区域。
- 5) 当所有的蓄电池都能直接或间接地向封闭区域的外部排气，可划为非危险区域。
- 6) 当配有蓄电池、通风较差的封闭区域具备至少能保证该区域的通风情况不低于满足通风良好条件的 25% 及蓄电池的充电系统有防止过充电的设计时，可划为 2 区；当不满足此条件时，可划为 1 区。

#### 4. 爆炸性气体混合物的分级、分组

(1) 爆炸性气体混合物应按其最大试验安全间隙 (MESG) 或最小点燃电流比 (MICR) 分级，应符合表 1-5-1 的规定。

表 1-5-1 爆炸性气体混合物分级

级别	最大试验安全间隙 (MESG) (mm)	最小点燃电流比 (MICR)
II A	$\geq 0.9$	$> 0.8$
II B	$0.5 < \text{MESG} < 0.9$	$0.45 \leq \text{MICR} \leq 0.8$
II C	$\leq 0.5$	$< 0.45$

(2) 爆炸性气体混合物应按引燃温度分组，应符合表 1-5-2 的规定。

表 1-5-2

引燃温度分组

组别	引燃温度 $t$ (°C)
T1	$450 < t$
T2	$300 < t \leq 450$
T3	$200 < t \leq 300$
T4	$135 < t \leq 200$
T5	$100 < t \leq 135$
T6	$85 < t \leq 100$

### 1.5.1.3 爆炸性粉尘环境

#### 1. 一般规定

(1) 当在生产、加工、处理、转运或贮存过程中出现或可能出现可燃性粉尘与空气形成的爆炸性粉尘混合物环境时，应进行爆炸性粉尘环境的电力装置设计。

(2) 在爆炸性粉尘环境中粉尘可分为下列三级：

- 1) III A 级为可燃性飞絮。
- 2) III B 级为非导电性粉尘。
- 3) III C 级为导电性粉尘。

(3) 在爆炸性粉尘环境中，产生爆炸应符合下列条件：

- 1) 存在爆炸性粉尘混合物，其浓度在爆炸极限以内。
- 2) 存在足以点燃爆炸性粉尘混合物的火花、电弧、高温、静电放电或能量辐射。

(4) 在爆炸性粉尘环境中应采取下列防止爆炸的措施：

- 1) 使产生爆炸的条件同时出现的可能性减小到最小程度。
- 2) 按照爆炸性粉尘混合物的特征采取相应的措施。
- 3) 设计中采取下列消除或减少爆炸性粉尘混合物产生和积聚的措施：
  - a. 工艺设备宜将危险物料密封在防止粉尘泄漏的容器内。
  - b. 宜采用露天或开敞式布置，或采用机械除尘措施。
  - c. 宜限制和缩小爆炸危险区域的范围，并将可能释放爆炸性粉尘的设备单独集中布置。
  - d. 提高自动化水平，可采用必要的安全联锁。
  - e. 爆炸危险区域应设有两个以上出入口，至少有一个通向非爆炸危险区域，出入口的门应向爆炸危险性较小的区域侧开启。
  - f. 应对沉积的粉尘进行有效的清除。
  - g. 应限制产生危险温度及火花，特别是由电气设备或线路产生的过热及火花。应防止粉尘进入产生电火花或高温部件的外壳内。应选用粉尘防爆类型的电气设备及线路。
  - h. 可适当增加物料的湿度，降低空气中粉尘的悬浮量。

#### 2. 爆炸性粉尘环境危险区域划分

(1) 粉尘释放源应按释放频繁程度和持续时间长短分为连续级释放源、一级释放源、二级释放源，应符合下列规定：

- 1) 连续级释放源应为粉尘云持续存在或预计长期或短期经常出现的部位。
- 2) 一级释放源应为在正常运行时预计可能周期性的或偶尔释放的释放源。
- 3) 二级释放源应为在正常运行时，预计不可能释放，或仅是不经常地并且是短期地释放。

4) 下列三项不应被视为释放源：

- a. 压力容器外壳主体结构及其封闭的管口和人孔。
- b. 全部焊接的输送管和溜槽。
- c. 在设计和结构方面对防粉尘泄漏进行了适当考虑的阀门压盖和法兰接合面。

(2) 爆炸危险区域应根据爆炸性粉尘出现的频繁程度和持续时间分为 20 区、21 区、22 区，分区应符合下列规定：

- 1) 20 区应为空气中的可燃性粉尘云持续地或长期地或频繁地出现的区域。
- 2) 21 区应为在正常运行时，空气中的可燃性粉尘云很可能偶尔出现的区域。
- 3) 22 区应为在正常运行时，空气中的可燃粉尘云一般不可能出现的区域，即使出现，持续时间也是短暂的。

(3) 爆炸危险区域的划分应按爆炸性粉尘的量、爆炸极限和通风条件确定。

(4) 符合下列条件之一时，可划为非爆炸危险区域：

- 1) 装有良好除尘效果的除尘装置，当该除尘装置停车时，工艺机组能联锁停车。
- 2) 设有为爆炸性粉尘环境服务，并用墙隔绝的送风机室，其通向爆炸性粉尘环境的风道设有能防止爆炸性粉尘混合物侵入的安全装置。

3) 区域内使用爆炸性粉尘的量不大，且在排风柜内或风罩下进行操作。

(5) 为爆炸性粉尘环境服务的排风机室，应与被排风区域的爆炸危险区域等级相同。

### 3. 爆炸性粉尘环境危险区域范围

(1) 区域的范围应通过评价涉及该环境的释放源的级别引起爆炸性粉尘环境的可能来规定。

(2) 20 区范围主要包括粉尘云连续生成的管道、生产和处理设备的内部区域。当粉尘容器外部持续存在爆炸性粉尘环境时，可划分为 20 区。

(3) 21 区的范围应与一级释放源相关联，并按下列规定确定：

- 1) 含有一级释放源的粉尘处理设备的内部可划分为 21 区。
- 2) 由一级释放源形成的设备外部场所，其区域的范围应受到粉尘量、释放速率、颗粒大小和物料湿度等粉尘参数的限制，并应考虑引起释放的条件。对于受气候影响的建筑物外部场所可减小 21 区范围。21 区的范围应按照释放源周围 1m 的距离确定。

3) 当粉尘的扩散受到实体结构的限制时，实体结构的表面可作为该区域的边界。

4) 一个位于内部不受实体结构限制的 21 区应被一个 22 区包围。

5) 可结合同类企业相似厂房的实践经验和实际因素将整个厂房划为 21 区。

(4) 22 区的范围应按下列规定确定：

1) 由二级释放源形成的场所，其区域的范围应受到粉尘量、释放速率、颗粒大小和物料湿度等粉尘参数的限制，并应考虑引起释放的条件。对于受气候影响的建筑物外部场所可减小 22 区范围。22 区的范围应按超出 21 区 3m 及二级释放源周围 3m 的距离确定。

2) 当粉尘的扩散受到实体结构的限制时, 实体结构的表面可作为该区域的边界。

3) 可结合同类企业相似厂房的实践经验和实际的因素将整个厂房划为 22 区。

#### 1.5.1.4 爆炸性环境的电力装置设计

##### 1. 一般规定

爆炸性环境的电力装置设计应符合下列规定:

(1) 爆炸性环境的电力装置设计宜将设备和线路, 特别是正常运行时能发生火花的设备布置在爆炸性环境以外。当需设在爆炸性环境内时, 应布置在爆炸危险性较小的地点。

(2) 在满足工艺生产及安全的前提下, 应减少防爆电气设备的数量。

(3) 爆炸性环境内的电气设备和线路应符合周围环境中化学、机械、热、霉菌以及风沙等不同环境条件对电气设备的要求。

(4) 在爆炸性粉尘环境内, 不宜采用携带式电气设备。

(5) 爆炸性粉尘环境内事故排风用电动机应在便于操作的地方设置事故启动按钮等控制设备。

(6) 在爆炸性粉尘环境内, 应尽量减少插座和局部照明灯具的数量。如需采用时, 插座宜布置在爆炸性粉尘不易积聚的地点, 局部照明灯宜布置在事故时气流不易冲击的位置。

粉尘环境中安装的插座开口的一面应朝下, 且与垂直面的角度不应大于  $60^\circ$ 。

(7) 爆炸性环境内设置的防爆电气设备应符合国家标准 GB 3836.1—2010《爆炸性环境 第 1 部分: 设备 通用要求》的有关规定。

##### 2. 爆炸性环境电气设备的选择

(1) 在爆炸性环境内, 电气设备应根据下列因素进行选择:

- 1) 爆炸危险区域的分区。
- 2) 可燃性物质和可燃性粉尘的分级。
- 3) 可燃性物质的引燃温度。
- 4) 可燃性粉尘云、可燃性粉尘层的最低引燃温度。

(2) 危险区域划分与电气设备保护级别的关系应符合下列规定:

- 1) 爆炸性环境内电气设备保护级别的选择应符合表 1-5-3 的规定。

表 1-5-3 爆炸性环境内电气设备保护级别的选择

危险区域	设备保护级别 (EPL)
0 区	Ga
1 区	Ga 或 Gb
2 区	Ga、Gb 或 Gc
20 区	Da
21 区	Da 或 Db
22 区	Da、Db 或 Dc

2) 电气设备保护级别 (EPL) 与电气设备防爆结构的关系应符合表 1-5-4 的规定。

表 1-5-4 电气设备保护级别（EPL）与电气设备防爆结构的关系

设备保护级别（EPL）	电气设备防爆结构	防爆形式
Ga	本质安全型	“ia”
	浇封型	“ma”
	由两种独立的防爆类型组成的设备，每一种类型达到保护级别“Gb”的要求	—
	光辐射式设备和传输系统的保护	“op is”
Gb	隔爆型	“d”
	增安型	“e” <sup>①</sup>
	本质安全型	“ib”
	浇封型	“mb”
	油浸型	“o”
	正压型	“px” “py”
	充砂型	“q”
	本质安全现场总线概念（FISCO）	—
光辐射式设备和传输系统的保护	“op pr”	
Gc	本质安全型	“ic”
	浇封型	“mc”
	无火花	“n” “nA”
	限制呼吸	“nR”
	限能	“nL”
	火花保护	“nC”
	正压型	“pz”
	非可燃现场总线概念（FNICO）	—
光辐射式设备和传输系统的保护	“op sh”	
Da	本质安全型	“iD”
	浇封型	“mD”
	外壳保护型	“iD”
Db	本质安全型	“iD”
	浇封型	“mD”
	外壳保护型	“tD”
	正压型	“pD”
Dc	本质安全型	“iD”
	浇封型	“mD”
	外壳保护型	“tD”
	正压型	“pD”

注 在 1 区中使用的增安型“e”电气设备仅限于下列电气设备：在正常运行中不产生火花、电弧或危险温度的接线盒和接线箱，包括主体为“d”或“m”型，接线部分为“e”型的电气产品；按国家标准 GB 3836.3—2010《爆炸性环境 第 3 部分：由增安型“e”保护的装置》附录 D 配置的合适热保护装置的“e”型低压异步电动机，启动频繁和环境条件恶劣者除外；“e”型荧光灯；“e”型测量仪表和仪表用电流互感器。

(3) 防爆电气设备的级别和组别不应低于该爆炸性气体环境内爆炸性气体混合物的级别和组别，并应符合下列规定：

1) 气体、蒸汽或粉尘分级与电气设备类别的关系应符合表 1-5-5 的规定。当存在有 两种以上可燃性物质形成的爆炸性混合物时，应按照混合后的爆炸性混合物的级别和组别选用防爆设备，无据可查又不可能进行试验时，可按危险程序较高的级别和组别选用防爆电气设备。

对于标有适用于特定的气体、蒸汽的环境的防爆设备，没有经过鉴定，不得使用于其他的气体环境内。

表 1-5-5 气体、蒸汽或粉尘分级与电气设备类别的关系

气体、蒸汽或粉尘分级	设备类别
II A	II A、II B 或 II C
II B	II B 或 II C
II C	II C
III A	III A、III B 或 III C
III B	III B 或 III C
III C	III C

2) II 类电气设备的温度组别、最高表面温度和气体、蒸汽引燃温度之间的关系符合表 1-5-6 的规定。

表 1-5-6 II 类电气设备的温度组别、最高表面温度和气体、蒸汽引燃温度之间的关系

电气设备温度组别	电气设备允许最高表面温度 (°C)	气体/蒸汽的引燃温度 (°C)	适用的设备温度组别
T1	450	>450	T1 ~ T6
T2	300	>300	T2 ~ T6
T3	200	>200	T3 ~ T6
T4	135	>135	T4 ~ T6
T5	100	>100	T5 ~ T6
T6	85	>85	T6

3) 安装在爆炸性粉尘环境中的电气设备应采取措施防止热表面点可燃性粉尘层引起的火灾危险。III 类电气设备的最高表面温度应按有关标准的规定进行选择。电气设备结构应满足电气设备在规定的运行条件下不降低防爆性能的要求。

(4) 当选用正压型电气设备及通风系统时，应符合下列规定：

1) 通风系统应采用非燃性材料制成，其结构应坚固，连接应严密，并不得有产生气体滞留的死角。

2) 电气设备应与通风系统联锁。运行前应先通风，并应在通风量大于电气设备及其通风系统管道容积的 5 倍时，接通设备的主电源。

3) 在运行中，进入电气设备及其通风系统内的气体不应含有可燃物质或其他有害物质。

4) 在电气设备及其通风系统运行中，对于 px、py 或 pD 型设备，其风压不应低于 50Pa；对于 pz 型设备，其风压不应低于 25Pa。当风压低于上述值时，应自动断开设备的主电源或发出信号。

5) 通风过程排出的气体不宜排入爆炸危险环境；当采取有效地防止火花和炽热颗粒从设备及其通风系统吹出的措施时，可排入 2 区空间。

6) 对闭路通风的正压型设备及其通风系统应供给清洁气体。

7) 电气设备外壳及通风系统的门或盖子应采取联锁装置或加警告标志等安全措施。

### 3. 爆炸性环境电气设备的安装

(1) 油浸型设备应在没有振动、不倾斜和固定安装的条件下采用。

(2) 采用非防爆型设备作隔墙机械传动时，应符合下列规定：

1) 安装电气设备的房间应用非燃烧体的实体墙与爆炸危险区域隔开。

2) 传动轴传动通过隔墙处，应采用填料函密封或有同等效果的密封措施。

3) 安装电气设备房间的出口应通向非爆炸危险区域，必须与爆炸性环境相通时，应对爆炸性环境保持相对的正压。

(3) 除本质安全电路外，爆炸性环境的电气线路和设备应装设过载、短路和接地保护，不可能产生过载的可不装设过载保护。爆炸性环境的电动机应装设断相保护。如果自动断电可能引起比引燃危险造成的危险更大时，应采用报警装置代替自动断电。

(4) 紧急情况下，在危险场所外合适的地点应采取一种或多种措施对危险场所设备断电。连续运行的设备不应包括在紧急断电回路中，而应安装在单独的回路上，防止附加危险产生。

(5) 变电站、配电站和控制室的设计应符合下列规定：

1) 变电站、配电站（包括配电室，下同）和控制室应布置在爆炸性环境以外，当为正压室时，可布置在 1 区、2 区内。

2) 对于可燃物质比空气重的爆炸性气体环境，位于爆炸危险区附加 2 区的变电站、配电站和控制室的电气和仪表的设备层地面应高出室外地面 0.6m。

### 4. 爆炸性环境电气线路的设计

(1) 爆炸性环境电缆和导线的选择应符合下列规定：

1) 低压电力、照明线路采用的绝缘导线和电缆的额定电压应高于或等于工作电压，且  $U_0/U$  不应低于工作电压。中性线的额定电压应与相线电压相等，并应在同一护套或保护管内敷设。

2) 除在配电盘、接线箱或采用金属导管配线系统内，无护套的电线不应作为供配电线路。

3) 在 1 区内应采用铜芯电缆；除本质安全电路外，在 2 区内宜采用铜芯电缆，当采用铝芯电缆时，其截面积不得小于  $16\text{mm}^2$ ，且与电气设备的连接应采用铜-铝过渡接头。敷设在爆炸性粉尘环境 20 区、21 区以及在 22 区内有剧烈振动区域的回路，均应采用铜芯绝缘导线或电缆。

4) 除本质安全系统的电路外，爆炸性环境电缆配电线的技术要求应符合表 1-5-7 的规定。

表 1-5-7 爆炸性环境电缆配线的技术要求

技术要求 爆炸危险区域	项目	电缆明设或在沟内敷设时的最小截面积			移动电缆
		电 力	照 明	控 制	
1 区、20 区、21 区		铜芯 2.5mm <sup>2</sup> 及以上	铜芯 2.5mm <sup>2</sup> 及以上	铜芯 1.0mm <sup>2</sup> 及以上	重 型
2 区、22 区		铜芯 1.5mm <sup>2</sup> 及以上, 铝芯 16mm <sup>2</sup> 及以上	铜芯 1.5mm <sup>2</sup> 及以上	铜芯 1.0mm <sup>2</sup> 及以上	中 型

5) 除本质安全系统的电路外, 在爆炸性环境内电压为 1000V 以下的钢管配线的技术要求应符合表 1-5-8 的规定。

表 1-5-8 爆炸性环境内电压为 1000V 以下的钢管配线的技术要求

技术要求 爆炸危险区域	项目	钢管明配线路用绝缘导线的最小截面积			管子连接要求
		电 力	照 明	控 制	
1 区、20、21 区		铜芯 2.5mm <sup>2</sup> 及以上	铜芯 2.5mm <sup>2</sup> 及以上	铜芯 2.5mm <sup>2</sup> 及以上	钢管螺纹旋合不应少于 5 扣
2 区、22 区		铜芯 2.5mm <sup>2</sup> 及以上	铜芯 1.5mm <sup>2</sup> 及以上	铜芯 1.5mm <sup>2</sup> 及以上	钢管螺纹旋合不应少于 5 扣

6) 在爆炸性环境内, 绝缘导线和电缆截面积的选择还应符合下列规定:

a. 导体允许载流量不应小于熔断器熔体额定电流的 1.25 倍及断路器长延时过电流脱扣器整定电流的 1.25 倍, 本条 b. 项除外。

b. 引向电压为 1000V 以下笼型感应电动机支线的长期允许载流量不应小于电动机额定电流的 1.25 倍。

7) 在架空、桥架敷设时电缆宜采用阻燃电缆。采用能防止机械损伤的桥架时, 塑料护套电缆可采用非铠装电缆。当不存在鼠、虫等损害时, 在 2 区、22 区电缆沟内敷设的可采用非铠装电缆。

(2) 爆炸性环境线路的保护应符合下列规定:

1) 在 1 区内单相网络应装设短路保护, 并同时断开相线和中性线。

2) 对 3~10kV 电缆线路宜装设零序电流保护, 在 1 区、21 区内保护装置宜动作于跳闸。

(3) 爆炸性环境电气线路的安装应符合下列规定:

1) 电气线路宜在爆炸危险性较小的环境或远离释放源的地方敷设, 并应符合下列规定:

a. 当可燃物质比空气重时, 电气线路宜在较高处敷设或直接埋地; 架空敷设时宜采用电缆桥架; 电缆沟敷设时沟内应充砂, 并宜设置排水措施。

b. 电气线路宜在有爆炸危险的建筑物、构筑物的墙外敷设。

c. 在爆炸粉尘环境, 电缆应沿粉尘不易堆积并且易于粉尘清除的位置敷设。

2) 敷设电气线路的沟道、电缆桥架或导管, 所穿过的不同区域之间墙或楼板处的孔洞

应采用非燃性材料严密堵塞。

3) 敷设电气线路时宜避开可能受到机械损伤、振动、腐蚀、紫外线照射以及可能受热的地方，不能避开时，应采取预防措施。

4) 钢管配线可采用无护套的绝缘单芯或多芯导线。当钢管中含有三根或多根导线时，导线包括绝缘层的总截面积不宜超过钢管截面积的40%。钢管应采用低压流体输送用镀锌焊接钢管。钢管连接的螺纹部分应涂以铅油或磷化膏。在可能凝结冷凝水的地方，管线上应装设排除冷凝水的密封接头。

5) 在爆炸性气体环境内钢管配线的电气线路应做好隔离密封，且应符合下列规定：

- a. 在正常运行时，所有点燃源外壳的450mm范围内应做隔离密封。
- b. 直径50mm以上钢管距引入的接线箱450mm以内处应做隔离密封。
- c. 相邻的爆炸性环境之间以及与相邻的其他危险环境或非危险环境之间应进行隔离密封。密封内部应用纤维作填充层的底层或隔层，填充层的有效厚度不应小于钢管的内径，且不得小于16mm。

d. 供隔离密封用的连接部件，不应作为导线的连接或分线用。

6) 在1区内电缆线路严禁有中间接头，在2区、20区、21区内不应有中间接头。

7) 当电缆或导线的终端连接时，电缆内部的导线如果为绞线，其终端应采用定型端子或接线鼻子进行连接。

铝芯绝缘导线或电缆的连接与封端应采用压接、熔焊或钎焊，当与设备（照明灯具除外）连接时，应采用铜-铝过渡接头。

8) 架空电力线路不得跨越爆炸性气体环境，架空线路与爆炸性气体环境的水平距离不应小于杆塔高度的1.5倍。在特殊情况下，采取有效措施后，可适当减小距离。

#### 5. 爆炸性环境接地设计

(1) 当爆炸性环境电力系统接地设计时，1000V交流/1500V直流以下的电源系统的接地应符合下列规定：

- 1) TN系统应采用TN-S型。
- 2) TT系统应采用剩余电流动作保护电器。
- 3) IT系统应设置绝缘监测装置。

(2) 爆炸性气体环境中应设置等电位联结，所有裸露的装置外部可导电部件应接入等电位系统。本质安全型设备的金属外壳可不与等电位系统连接，制造厂有特殊要求的除外。具有阴极保护的装置不应与等电位系统连接，专门为阴极保护设计的接地系统除外。

(3) 爆炸性环境内设备的保护接地应符合下列规定：

1) 按照国家标准GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》的有关规定，下列不需要接地的部分，在爆炸性环境内仍应进行接地：

a. 在不良导电地面处，交流额定电压为1000V及以下和直流额定电压为1500V及以下的设备正常不带电的金属外壳。

b. 在干燥环境，交流额定电压为127V及以下，直流电压为110V及以下的设备正常不带电的金属外壳。

c. 安装在已接地的金属结构上的设备。

2) 在爆炸危险环境内，设备的外露可导电部分应可靠接地。1区、20区、21区内的所

有设备以及 2 区、22 区内除照明灯具以外的设备应采用专用的接地线。该接地线若与相线敷设在同一保护管内时，应具有与相线相等的绝缘。2 区、22 区内的照明灯具，可利用有可靠电气连接的金属管线系统作为接地线，但不得利用输送可燃物质的管道。

3) 在爆炸危险区域不同方向，接地干线应不少于两处与接地体连接。

(4) 设备的接地装置与防止直接雷击的独立避雷针的接地装置应分开设置，与装设在建筑物上防止直接雷击的避雷针的接地装置、与防雷电感应的接地装置可合并设置。接地电阻值应取其中最低值。

(5) 0 区、20 区场所的金属部件不宜采用阴极保护，当采用阴极保护时，应采取特殊的设计。阴极保护所要求的绝缘元件应安装在爆炸性环境之外。

### 1.5.2 特殊装置或场所的电气要求

#### 1.5.2.1 装有浴盆或淋浴的场所

##### 1. 区域划分

(1) 按 GB 16895.13—2012《低压电气装置 第 7-701 部分 特殊装置或场所的要求 装有浴盆和淋浴的场所》的规定，将该场所划分为 3 个区域，即 0 区、1 区和 2 区，区域划分见图 1-5-1 和图 1-5-2。

##### (2) 分区说明。

1) 0 区是指浴盆或淋浴盆内部的区域；对于没有淋浴盆的淋浴，则 0 区的高度为地面以上 100mm，平面范围与 1 区相同。

##### 2) 1 区范围界定：

a. 水平面界定。由固定的淋浴头或出水口的最高点对应的水平面，或离地 2.25m 高的水平面之较高者所限定的区域。

b. 垂直面界定。浴盆或淋浴盆周围的垂直面所限定的区域；对于没有浴盆的淋浴器，是从距出水口中心点 1.2m 垂直面所限定的区域（见图 1-5-2）。

c. 1 区不包括 0 区，在浴盆下面的空间属于 1 区。

##### 3) 2 区范围界定：

a. 水平面界定。和 1 区同。

b. 垂直面界定。由 1 区边界线以外 0.6m 范围（见图 1-5-1）。

c. 没有浴盆的就没有 2 区，但 1 区范围扩大（见图 1-5-2）。

##### 2. 安全防护

(1) 保护措施：采用 SELV 和 PELV 特低电压。

(2) 直接接触防护。

1) 在 0 区、1 区和 2 区内，所有电气设备都应采用以下措施之一：

a. 具有不低于 IP $\times\times$ B 或 IP2 $\times$  防护等级的遮栏或外护物。

b. 能耐受交流 500V 电压持续 1min 的绝缘。

2) 不允许采用阻挡物措施作为直接接触防护，也不允许采用置于伸臂范围之外的措施作直接接触防护。

(3) 附加防护。在装有浴盆或淋浴器的房间，应采用一个或多个额定剩余动作电流 ( $I_{\Delta n}$ ) 不大于 30mA 的剩余电流保护器 (RCD)，对所有回路提供保护。但对下列回路，不要求使用 RCD。

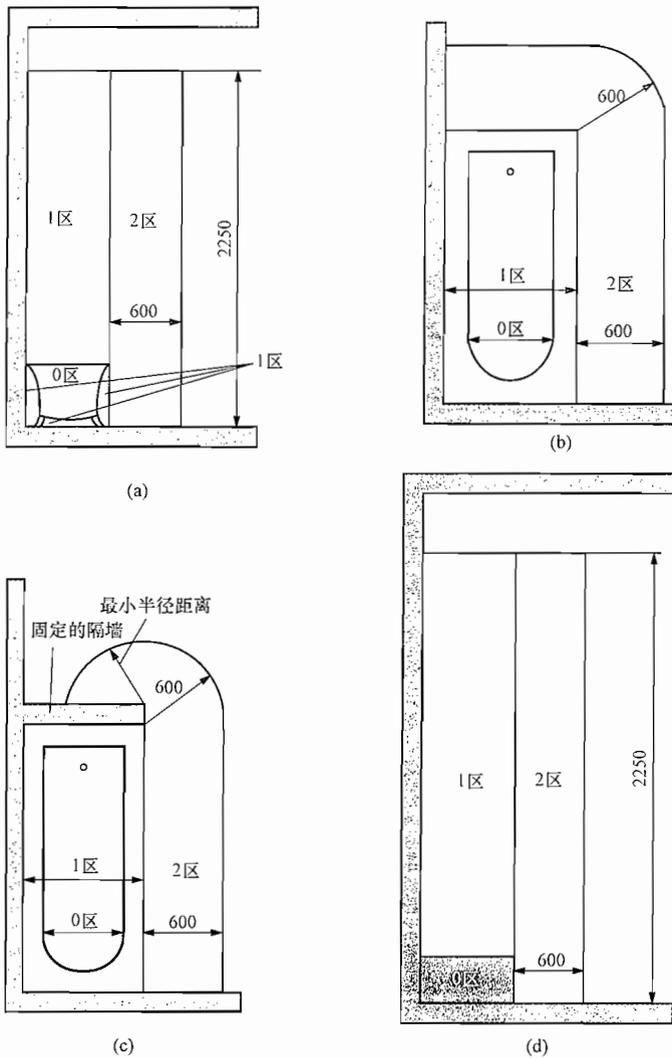


图 1-5-1 装有浴盆或淋浴场所分区范围

(a) 浴盆侧视图；(b) 浴盆顶视图；(c) 浴盆（有固定隔墙）顶视图；(d) 淋浴盆侧视图

- 1) 采用“电气分隔”的保护措施，且一个回路只接一个用电设备。
- 2) 采用 SELV 或 PELV 保护的回路。

(4) 设置局部或辅助等电位联结作为附加防护。在有浴盆和（或）淋浴器的房间内，应将 PE 导体与外露可导电部分和可接近的外界可导电部分相连接，并尽可能在靠近外界可导电部分进入该房间的入口处连接。外界可导电部分，包括供水、排水管、加热系统、空调系统的金属部分，以及可接触到的建筑物金属部分；有塑料护套的金属管，可不连接。

(5) 间接接触防护。

1) 不允许采用“非导电场所”的措施作间接接触防护，也不允许采用“不接地的等电位联结”作间接接触防护。

2) “电气分隔”的间接接触防护措施只应用于：

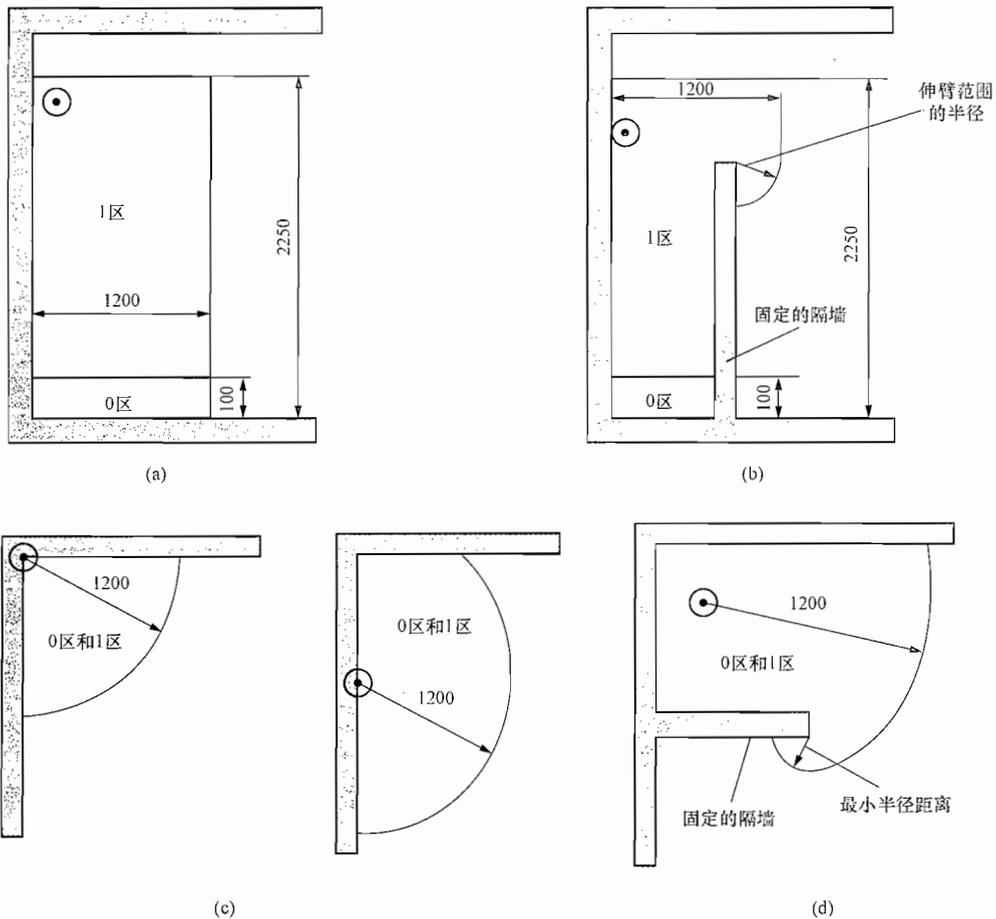


图 1-5-2 装有无淋浴盆或淋浴器的场所的分区分区范围

(a) 侧视图；(b) 侧视图（有固定隔墙）；(c) 出水器不同位置的顶视图；(d) 有出水器的顶视图（有固定隔墙）

a. 向一个用电设备供电的回路。

b. 一个单独的电源插座。

3. 电气设备的选择

(1) 电气设备的防护等级不应低于：

1) 0 区内——IP×7。

2) 1 区内——IP×4。

3) 2 区内——IP×4。剃须刀可以例外，因在 2 区不太可能受到直接喷淋，但用作公共洗浴室清洁用的电气设备，容易遭受水喷淋，防护等级应不低于 IP×5。

(2) 开关和控制设备。

1) 0 区内不允许使用。

2) 1 区内可装设标称电压不超过交流 25V 或直流 60V 的 SELV 或 PELV 作保护措施的回路的附件和电源插座，但其供电电源应设置在 0 区及 1 区以外。

3) 2 区内可装设：SELV 或 PELV 保护的用于信号和通信设备的附件和电源插座；SELV 或 PELV 保护回路的附件和电源插座，但其供电电源应设置在 0 区及 1 区以外；电动剃须刀

器件；开关和控制设备及其附件装在2区内，需要满足安装的墙壁厚度要求。

(3) 用电设备。

1) 0区内安装用电设备，应满足以下条件：

- a. 符合相关产品标准，按生产厂规定的适用区域。
- b. 永久性固定连接。
- c. 采用不超过交流12V或直流30V的SELV保护措施。

2) 1区内安装的用电设备，必须是永久性固定连接，并且是生产厂规定的适用于该区域使用的设备，主要有：

- a. 涡流设备。
- b. 淋浴泵。
- c. 不超过交流25V或直流60V的SELV或PELV保护的設備，如照明设备。
- d. 通风设备。
- e. 电热水器。
- f. 毛巾架。
- g. 灯具。

4. 布线系统的防护

(1) 当0区、1区和2区的电气设备供电的布线，安装在划分区域的墙上时，应安装在墙的表面，或暗敷在墙内，埋设深度不小于50mm。

(2) 1区用电设备的布线的安装方式应是：

1) 固定安装在浴盆上方的设备（如热水器），其线路穿过设备后面的墙，自上垂直向下或水平敷设。

2) 设置在浴盆下面空间的设备，其线路穿过相邻的墙，自下垂直向上或水平敷设。

(3) 所有其他暗敷在0区、1区和2区的墙或隔墙的布线，及其附件，埋设深度不应小于50mm。

(4) 当不能满足以上要求时，可按下列要求之一布线：

1) 采用SELV或PELV或“电气分隔”的保护措施。

2) 回路采用 $I_{\Delta n} \leq 30\text{mA}$ 的RCD的附加保护。

3) 暗敷电缆或导体具有接地的金属护套（符合PE导体要求）；或敷设在导管、槽盒中。

4) 具有机械防护的暗电缆或导线，如用金属导管敷线，能防止被铁钉、钻头等穿透。

5. 地面电加热系统

(1) 地面电加热系统，应按相关标准装用加热电缆或加热薄膜，应具有金属护套或金属外护物，或具有细密的金属网格；这些金属物，都应与供电回路的保护导体（PE）连接。

(2) 如采用SELV作为地面电加热系统的保护措施，则上述要求不是强制性的。

(3) 地面电加热系统不允许采用“电气分隔”的保护措施。

### 1.5.2.2 游泳池和其他水池

1. 适用范围

按GB 16895.19—2002《建筑物电气装置 第7部分：特殊装置和场所的要求 第

702 节：游泳池和其他水池》的规定，本节的特殊要求适用于游泳池、喷水池和戏水池，以及水池周围的区域。这些区域在正常使用时由于人体电阻的降低和人体与地接触而增加电击危险。

对游泳池的要求适用于戏水池和让人进入的喷水池。

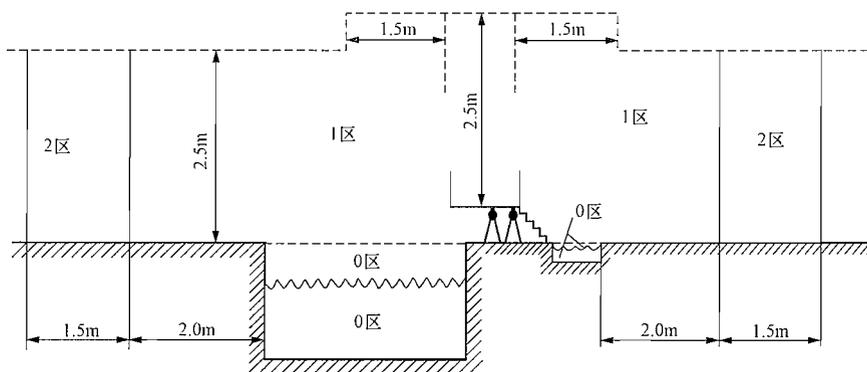
## 2. 区域划分

该场所划分为 3 个区域，即 0 区、1 区和 2 区，尺寸范围见图 1-5-3 ~ 图 1-5-5，说明如下：

(1) 0 区。是水池的池内部分，还包括地面凹入部分和用于洗脚的小水池，以及喷水柱、人工瀑布的内部。

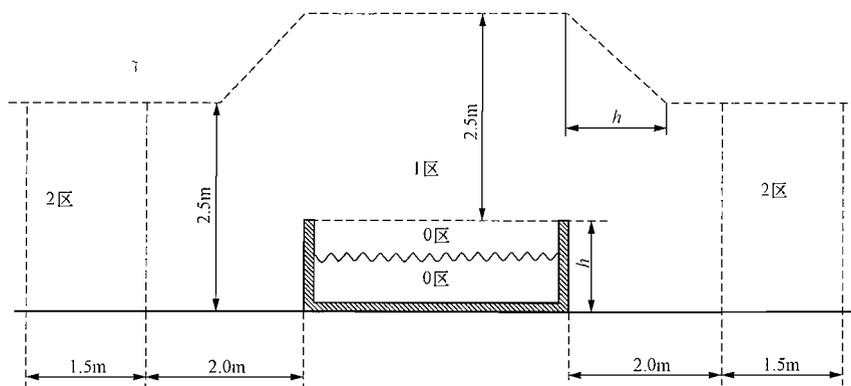
(2) 1 区。0 区的上方，和距水池边缘外 2m 的范围，以及预计有人的地面，高出地面 2.5m 的范围内。

游泳池有跳台、跳板、溢水沟或其他预计有人的部位，应按这些部位周围 1.5m，高出预期有人的最高表面 2.5m 高度的范围。



注：测量的区域尺寸限至墙壁和隔板为止。

图 1-5-3 游泳池和戏水池的区域尺寸



注：测量的区域尺寸限至墙壁和隔板为止。

图 1-5-4 高出地面的水池的区域尺寸

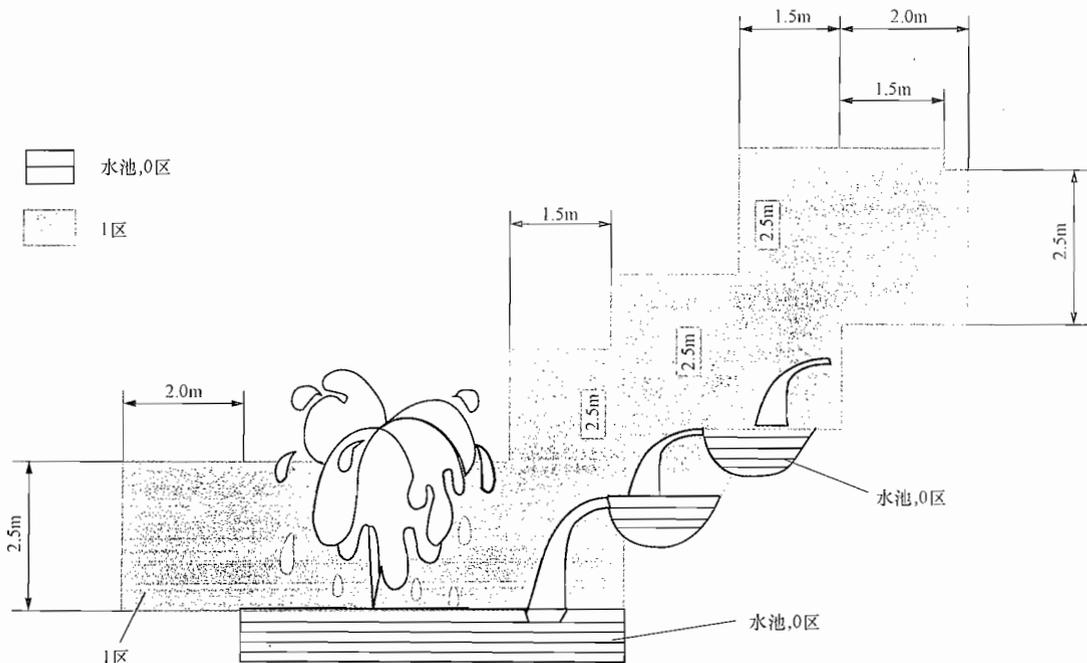


图 1-5-5 确定喷水池的区域示例

(3) 2区。1区以外1.5m范围内，和预期有人的表面以上2.5m高度以内。喷水池没有2区。

### 3. 安全防护—电击防护

(1) 直接接触和间接接触两者兼有的防护。采用 SELV 或 PELV 特低电压防护。采用不接地的 SELV 时，不管标称电压多高，都应采取下列直接接触防护措施之一：

- 1) 防护等级不低于 IP2 × 或 IP × × B 的遮栏或外护物。
  - 2) 能耐受持续 1min 交流 500V 试验电压的绝缘。
- (2) 直接接触防护。不适用阻挡物防护，也不适用伸臂范围以外的防护方式。
- (3) 间接接触防护。

- 1) 0区、1区和2区的所有装置外可导电部分，都应作辅助等电位联结。
- 2) 不适用非导电场所的防护方式，也不适用不接地的局部等电位联结的防护方式。

### 4. 各个区安全防护措施的特殊要求

(1) 游泳池（不包括不进人的喷水池）的0区和1区，只允许采用标准电压不大于交流 12V 或直流 30V 的 SELV 防护，其隔离降压变压器应装在0区、1区和2区以外。

(2) 运行时人不进入水池的，设备的电源回路应采用下列保护方式之一：

- 1) 采用 SELV，其隔离降压变压器应装0区、1区和2区以外。
- 2) 采用  $I_{\Delta n} \leq 30\text{mA}$  的 RCD 自动切断电源。
- 3) 采用电气隔离防护方式，隔离电源仅供给一台设备，并装在0区、1区和2区以外。

(3) 喷水池的0区和1区，应采用的保护措施同本条第(2)款（即运行时人不进入水池）的保护方式。

(4) 游泳池的2区应采用同本条第(2)款的保护措施之一或多项措施。

## 5. 电气设备的选择

(1) 电气设备不应低于以下的防护等级:

- 1) 0 区: IP×8。
- 2) 1 区: IP×5。
- 3) 建筑物内平时不用喷水清洗的游泳池 1 区, 可用 IP×4。
- 4) 2 区室内场所: IP×2;  
2 区室外场所: IP×4;  
2 区可能用喷水清洗的场所: IP×5。

(2) 接线盒。0 区和 1 区内不应安装接线盒, 但 1 区内允许为 SELV 回路安装接线盒。

(3) 开关和控制设备。

1) 0 区和 1 区不应安装开关、控制设备和插座。

2) 小游泳池, 开关和插座不可能装在 1 区以外时, 允许在 1 区内安装, 但应是非金属罩或盖板, 且应设在 0 区外缘 1.25m 以外, 高出地面不小于 0.3m, 还应采用下列保护措施之一:

a. 标称电压不大于交流 25V 或直流 60V 的 SELV, 其隔离变压器应装在 0 区和 1 区之外。

b. 采用  $I_{\Delta n} \leq 30\text{mA}$  的 RCD 自动切断电源。

c. 采用电气隔离, 每台设备应由单独的隔离电源供电, 隔离电源应装在 0 区和 1 区以外。

3) 2 区可安装插座和开关, 但电源回路应采取 1.5.2.2 第 4 条第 (2) 款 (即运行时人不进入水池) 的保护措施之一。

## 6. 布线的特殊要求

(1) 在 0 区、1 区和 2 区内的线路应敷设在不可触及金属外护物内; 不可触及的金属外护物应连接到辅助等电位联结上。

(2) 电缆宜敷设在绝缘材料制作的导管内。

(3) 在 0 区和 1 区的布线应限于只向该区内设备供电的线路。

(4) 喷水池布线补充要求。

1) 0 区内电气设备的电缆应尽量远离水池的外边缘, 到水池内的线路应以最短路径接到设备上; 这些电缆应敷设在导管内。

2) 1 区内电缆的敷设应有机械防护; 应采用符合 GB/T 5013 系列规定的 66 型电缆或等效性能的电缆, 应具有与水长久接触的适应性。

## 7. 0 区和 1 区埋于地面内的加热元件的要求

(1) 采用 SELV 供电, 其隔离变压器应装在 0 区、1 区和 2 区以外。

(2) 用埋于地下接地的金属网格或金属护套覆盖, 该金属件应连接到辅助等电位联结上, 其电源回路应采用  $I_{\Delta n} \leq 30\text{mA}$  的 RCD 作补充防护。

## 8. 游泳池的水下照明

(1) 用于水下或与水接触的照明灯具应符合 GB 7000.218—2008《灯具 第 2-18 部分: 特殊要求 游泳池和类似场所用灯具》的规定。

(2) 位于水密的观察窗后面照射的照明灯具应符合 GB 7000 系列标准的有关规定, 该灯具及附件的外露可导电部分和观察窗的可导电部分之间不允许有意或无意的导电连通。

### 9. 喷水池的电气设备

(1) 0区和1区的电气设备应不可触及，宜用网格玻璃或只能用工具才能拆卸的网格加以防护。

(2) 0区和1区的照明灯具应固定安装，并应符合 GB 7000.218—2008 的规定。

### 10. 游泳池和其他水池 1 区内安装低压电气设备的特殊要求

以低压供电的专用于游泳池和其他水池（如喷水池、滤水池）的固定式设备（不包括标称电压不大于交流 12V 或直流 30V 的 SELV）允许安装在 1 区内，但应满足以下所有要求：

(1) 设备应设在具有相当于附加绝缘的外护物内，并能耐受机械冲击。

(2) 设备应在活动窗（门）内，窗（门）应使用钥匙或工具开启，开启时应断开所有带电导体；电源主开关和电缆应为 II 类防电击结构。

(3) 活动窗（门）开启后，设备的防护等级不应低于 IP × × B。

(4) 该设备的电源回路的防护措施和 1.5.2.2 第 5 条第（3）款之 2）项的 a、b、c 措施之一同。

照明灯具应具有 II 类设备的防电击性能或等同的绝缘性能，并具有能耐受机械冲击的外护物。

### 1.5.2.3 医疗场所

本部分根据 GB 16895.24—2005《建筑物电气装置 第 7—710 部分：特殊装置或场所的要求 医疗场所》编写。

医院对不间断供电和对防电击都有很高要求。医院中断供电可能给患者招致生命危险。医疗电气设备（指用于诊断、治疗或检测病人的电气设备，它与患者有身体的或电气的接触，能将电能传递给患者，并能检测患者输出的电能）不仅与人体表面接触，有时也与人体内部接触。医院中的一些患者在发生灾祸时（包括电气火灾）无逃脱能力，有些患者无法摆脱电击。这些特殊情况都增加了对人身的危险，为此国际电工标准对医院的电气安全提出了更高的要求。

#### 1. 医疗场所的分类和分级

按照国际电工标准，医院内的医疗场所按医疗电气设备与人体接触的状况、断电危险程度和按允许间断供电的时间分类和分级。具体分类和分级见表 1-5-9。

表 1-5-9 医疗场所类别划分和安全供电级别划分示例表

序号	场所名称	类别			级别	
		0	1	2	≤0.5s	>0.5s≤15s
1	按摩室	×	×			×
2	普通病房		×			
3	产房		×		× <sup>①</sup>	×
4	心电图室、脑电图室、子宫电图室		×			×
5	心内窥镜室		× <sup>②</sup>			× <sup>②</sup>
6	检查或治疗室		×			×
7	泌尿科诊疗室		× <sup>②</sup>			× <sup>②</sup>

续表

序 号	场 所 名 称	类 别			级 别	
		0	1	2	≤0.5s	>0.5s≤15s
8	放射线诊断及治疗室（不包括序号 21 所列的内容）		×			×
9	水疗室		×			×
10	理疗室		×			×
11	麻醉室			×	× <sup>①</sup>	×
12	手术室			×	× <sup>①</sup>	×
13	手术预备室		×	×	× <sup>①</sup>	×
14	上石膏室		×	×	× <sup>①</sup>	×
15	手术复苏室		×	×	× <sup>①</sup>	×
16	心导管室			×	× <sup>①</sup>	×
17	重症监护室			×	× <sup>①</sup>	×
18	血管造影检查室			×	× <sup>①</sup>	×
19	血液透析室		×			×
20	磁共振成像室（MRI）		×			×
21	核医学室		×			×
22	早产婴儿室			×	× <sup>①</sup>	×

注 ×表示有此项目。

① 指需在 0.5s 或更短的时间内恢复供电的灯具或维持生命的医疗电气设备。

② 并非指手术室。

(1) 按医疗电气设备与人体接触状况的场所分类：

1) 0 类场所——在此场所内不使用有与人体接触的接触部件的医疗电气设备。

2) 1 类场所——在此场所（不包括 2 类场所）内使用有与人体表面接触或进入人体内的接触部件的医疗电气设备。

3) 2 类场所——在此场所内使用做心脏手术的医疗电气设备（即接触部件进入心脏或接触心脏的医疗设备）或中断供电将导致生命危险的医疗电气设备。

(2) 按允许间断供电时间的场所分级：

1) ≤0.5s 级场所——此场所要求在 0.5s 内恢复供电。

2) >0.5s 且 ≤15s 级场所——此场所可在大于 0.5s，但不大于 15s 内恢复供电。

2. 安全防护—电击防护

(1) 直接接触和间接接触两者兼有的防护。在 1 类和 2 类场所采用 SELV 和 PELV 防护，标称电压不应超过交流 25V 或无纹波直流 60V，同时带电部分应绝缘。

在 2 类场所，设备的外露可导电部分（如手术室的照明灯）应与等电位联结导体相连。

(2) 直接接触防护。

1) 应采用带电部分绝缘，或采用遮栏或外护物作防护。

2) 不允许采用阻挡物作防护，也不允许采用置于伸臂范围之外作防护。

(3) 间接接触防护。自动切断电源的防护应符合下列要求：

1) 在1类或2类场所,其约定接触电压 $U_t$ 不应超过25V;切断时间值:对TN系统,应符合本章1.4.2第(2)款的规定;对TT系统,应符合本章1.4.3节第(4)款的规定。

2) TN系统。

a. 在1类场所中额定电流不大于32A的终端回路,应采用 $I_{\Delta n} \leq 30\text{mA}$ 的RCD作为附加防护。

b. 在2类场所,采用 $I_{\Delta n} \leq 30\text{mA}$ 的RCD作为自动切断电源,应只用于下列回路:

- 手术台驱动机构的供电回路;
- 移动式×光机的回路;
- 额定功率大于5kVA的大型设备的回路;
- 不是用于维持生命的不重要的电气设备的回路。

同时使用同一回路的多台这类设备时,应确保RCD不会误动作。

3) TT系统。在1类或2类场所,所有情况下都应采用RCD作防护,上述TN系统的要求也适用于TT系统。

4) 医疗IT系统。

a. 在2类场所,医疗IT系统应用于维持生命、外科手术和其他位于“患者区域”内的医疗电气设备和系统的供电回路,但不应用于上述TN系统所列设备。

“患者区域”特指离手术台周边水平距离1.5m,高度2.5m内的区域,又称为“病人环境”。

b. 一回独立的医疗IT系统,可用于一个或用途相同相毗邻的几个房间;该系统应配置一个绝缘监测器(IMD),并符合下列要求:

- 交流内阻抗不应小于 $100\text{k}\Omega$ ;
- 测试电压不应大于直流25V;
- 在故障情况下,其注入电流的峰值不应大于1mA;
- 绝缘电阻降低到 $50\text{k}\Omega$ 时,应发出信号,并应配置此功能的试验器具。

c. 每个医疗IT系统,应配备声光报警系统,并装设在有人监视处。报警系统要求:绝缘电阻下降到最小整定值时,黄灯亮,且不能消除;同时音响动作,可解除;故障清除后,黄灯灭。

5) 辅助等电位联结。

a. 1类和2类场所,应安装辅助等电位联结导体,并连接到“患者区域”内的等电位联结母线上,并与保护导体(PE)、外界可导电部分、抗干扰的屏蔽物、导电地板网格、隔离变压器的金属屏蔽层相连接。

b. 在2类场所内,插座的PE端子、固定设备的PE端子或任何外界可导电部分,和等电位联结母线之间的导体的电阻(包括接头电阻)不应超过 $0.2\Omega$ 。

c. 等电位联结母线应位于医疗场所内或靠近医疗场所,在每个配电箱内或附近,应装设附加的等电位联结母线。

3. 电气设备的选择和安装

(1) 医疗IT系统及变压器要求:

1) 医疗IT系统用的变压器二次侧额定电压 $U_n$ 不应大于交流250V。

2) 变压器应装在柜(箱)内,并安装在医疗场所或邻近处。

3) 变压器以额定电压和额定频率供电,空载时出线绕组测得的对地泄漏电流和外护物

的泄漏电流均不应超过 0.5mA。

4) 医疗 IT 系统应采用单相变压器, 其额定输出容量不应小于 0.5kVA, 但不应大于 10kVA。

5) 如需要通过 IT 系统给三相负荷供电, 应采用单独的三相变压器, 其输出线电压不应超过 250V。

(2) 开关和控制设备及线路保护。2 类场所内每个终端回路都应设短路保护和过负荷保护, 但医疗 IT 系统的变压器的进出线回路不允许装设过负荷保护, 但可用熔断器作短路保护。

(3) 照明回路。在 1 类和 2 类场所内, 应配置接自两个不同电源的回路供给照明, 其中一个回路应接自应急电源。

疏散通道的疏散照明应接自应急电源。

(4) 医疗 IT 系统的插座回路。

1) 在患者治疗的地方 (如床头) 应配置插座, 并符合以下要求之一:

- a. 由两个独立回路供电的多个插座。
- b. 每个插座各自装设过电流保护。

2) 同一医疗场所内有接自 TN-S 或 TT 系统的插座时, 接自医疗 IT 系统的插座结构应能防止将它用于 TN-S 或 TT 系统的电气设备, 或者设有固定而明晰的标志。

3) 插座和开关等电气器件的安装位置应距医疗用可燃气体出气口中心的水平距离不小于 0.2m。

(5) 布线系统。在 2 类场所内的电气线路, 只能专用于该场所的设备和器具。

#### 4. 安全设施

(1) 安全设施的分级列于表 1-5-10。

表 1-5-10 医疗场所安全设施的分级

级别	电源自动切换的最大时间	应用举例
0 级 (不间断)	不间断	计算机控医用设备
0.15 级 (很短时间的间断)	$\leq 0.15s$	维持生命的医疗设备
0.5 级 (短时间的间断)	$\leq 0.5s$	手术室
15 级 (不长时间的间断)	$\leq 15s$	检查、治疗室
>15 级 (长时间的间断) <sup>1)</sup>	>15s	一般用房

(2) 安全电源。

1) 当失去正常供电电源或电压下降超过标称电压的 10% 时, 安全电源应在预定切换时间内投入运行, 并在规定时间内持续供电; 电源切换应有延时, 以使与进线断路器的自动重合闸相适应; 由安全电源供电的插座应有易于识别的标志。

2) 切换时间  $\leq 0.5s$  的供电电源: 正常电源故障时, 专用安全电源应在不超过 0.5s 时间内给手术台照明和其他重要照明供电, 如内窥镜的灯要维持不少于 3h。

3) 切换时间  $\leq 15s$  的供电电源: 当电源一根或多根导体电压下降超过标称电压的 10% 且持续时间超过 3s 时, 应在 15s 内接到安全电源, 并能维持不小于 24h 供电; 如医疗过程不超过 3h, 建筑物内人员疏散很快的, 安全电源维持时间可降低到不小于 3h。

4) 切换时间可大于 15s 的供电电源: 为医疗服务的设备, 如消毒设备、建筑物技术装

备（空调、采暖通风、废弃物处理）、冷却设备、炊厨设备、蓄电池充电等，正常电源失电时，可自动或手动转换到安全电源，维持时间不少于24h。

(3) 安全照明。当正常电源故障时，下列场所的照明用电应转换到安全电源供电，以提供必要的照度，转换时间不超过15s。

- 1) 疏散通道，和出口标志照明。
- 2) 应急发电机组的重要部位：开关、控制设备处、主配电盘及安全供电处。
- 3) 重要设施的房间，每间至少一个灯具。
- 4) 1类医疗场所的每一房间至少一个灯具。
- 5) 2类医疗场所的每一房间不少于50%的照明。

注：第1)项实为疏散照明，2)~5)项为备用照明。

(4) 其他设施。照明以外需按安全设施供电的，其转换时间不应超过15s，举例如下：

- 1) 消防电梯。
- 2) 排烟通风系统。
- 3) 医疗呼叫系统。
- 4) 2类医疗场所内为手术和为极重要的医疗设施服务的辅助医疗设备。
- 5) 压缩空气、抽真空和麻醉气体等医疗用供气系统的电气设备，及监测器。
- 6) 火灾探测、火灾报警和灭火系统。

#### 1.5.2.4 活动受限制的可导电场所

本节按照GB 16895.8—2010《低压电气装置 第7-706部分：特殊装置或场所的要求 活动受限制的可导电场所》编写。

(1) 应用范围：主要是由金属或其他可导电体包围的部分而构成。在这种场所中的人很可能通过其身体的大面积与金属或其他可导电体包围的部分相接触，而阻止这种接触的可能性又很小，如锅炉、金属罐槽内部。

本部分要求不适用于人体可自由工作和进出不受约束的场所。

(2) 电击防护措施的补充要求：

1) 向手持式工具和便携式设备供电应符合下列要求之一：

- a. 采用SELV。
- b. 隔离变压器二次绕组只连接一台设备的电气分隔，但隔离变压器可以有多个二次绕组。

2) 向手提灯供电应采用SELV。采用荧光灯时，允许其灯具内的升压变压器由SELV系统的电气分隔变压器绕组供电。

3) 向固定设备供电应符合下列要求之一：

- a. 具有辅助等电位联结的自动切断电源防护。
- b. SELV供电。
- c. PELV供电，所有外露可导电部分和活动受限制的可导电场所内的外界可导电部分间应作等电位联结，并应将PELV系统接地。
- d. 隔离变压器二次绕组只连接一台设备的电气分隔。

e. 采用Ⅱ类设备或有等效绝缘的设备，其供电回路装设 $I_{\Delta n} \leq 30\text{mA}$ 的RCD作附加防护。

(3) 直接接触和间接接触兼有的防护补充要求。SELV和PELV的电源应设置在活动受限制

的可导电场所外面,应提供直接接触防护,而与 SELV 和 PELV 回路的标称电压值无关。

(4) 直接接触防护。不允许采用阻挡物防护,也不允许采用设置于伸臂范围之外的防护。

### 1.5.2.5 数据处理设备用电气装置的接地要求

本节按照 GB/T 16895.9—2000《建筑物电气装置 第7部分:特殊装置或场所的要求 第707节:数据处理设备用电气装置的接地要求》编写。

#### 1. 定义

(1) 数据处理设备 (data processing equipment): 单独的或构成系统的,用于累计、处理和储存数据的电动机。其数据的接收和发送可以采用或不采用电子方式。

(2) 大泄漏电流 (high leakage current): 经插头或插座接入的设备,按 GB 4943 系列规定测得的超过该标准规定限值的对地泄漏电流。

#### 2. 适用范围

用于数据处理设备的抑制射频干扰的滤波器可能产生很大的对地泄漏电流,若发生保护接地连接的失效会形成危险的接触电压。本标准的主要目的就是采取措施以防止这种危害。

本节的要求适用于数据处理设备在下述情况与建筑物电源的连接:

(1) 数据处理设备经插头和插座与建筑物电源连接,其对地泄漏电流超过 GB 4943 系列规定的限值。

(2) 数据处理设备符合 GB 4943 系列标准的要求,包括泄漏电流。本要求也适用于数据处理设备以外的设备,如工业控制设备和通信设备的电气装置,由于其滤波设备而具有大泄漏电流。

#### 3. 正常泄漏电流超过 10mA 防止电击危险的措施

最重要的是防止保护导体 (PE) 中断导致电击危险,其措施有:

(1) 提高 PE 线的机械强度,其措施如下:

1) 当采用单独的 PE 线 (即 PE 线不是多芯电缆的芯线) 时,PE 线用铜线的截面积不应小于  $10\text{mm}^2$ ,或采用双 PE 线并有独立端头的每根 PE 线截面积不应小于  $4\text{mm}^2$ 。

2) 当 PE 线为多芯电缆中的芯线时,电缆中芯线截面积的总和不应小于  $10\text{mm}^2$ 。

3) 当采用电线、电缆套金属管的敷设方式,且 PE 线与金属管并联时,铜芯线截面积不应小于  $2.5\text{mm}^2$ 。

4) 利用能保证导电连续性,且具有足够电导的金属硬或软套管、母线槽管、槽盒、电缆屏蔽层等作 PE 线。

5) 设备和电源的连接不用插头、插座,而用固定的线路连接方式。

(2) 装设 PE 线导电连续性的监测器,当 PE 线中断时自动切断电源。

(3) 利用双绕组变压器限制电容泄漏电流的流经范围和路径连续性被中断的几率,其连接如图 1-5-6 所示。双绕组变压器的二次回路宜采用 TN 系统。如有特殊需要时也可采用 IT 系统。

采用双绕组变压器时仍应满足上述 (1)、(2) 项的要求。

#### 4. 对 TT、IT 系统的补充要求

(1) 采用 TT 系统时在供电回路上如设置 RCD,其额定动作电流应符合下式要求

$$I_t \leq \frac{I_{\Delta n}}{2} \leq \frac{U_L}{2R_A} \quad (1-5-1)$$

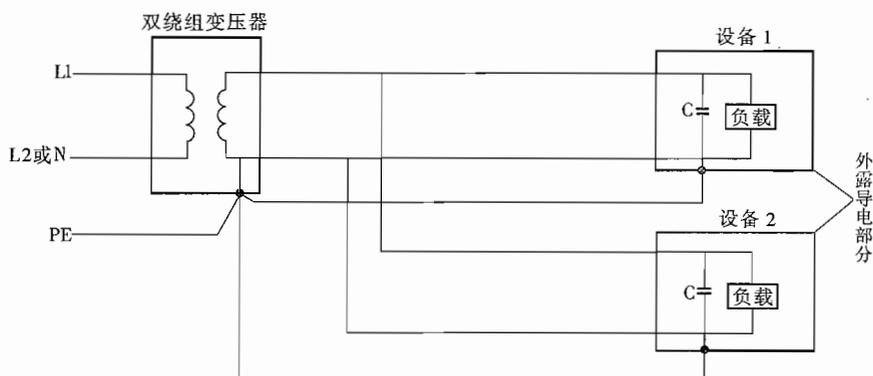


图 1-5-6 数据处理设备与双绕组变压器的连接（图中仅示单相系统）

注：1. C 为滤波电容。

2. L 和 N 接至电源；PE 接至总接地端子，它既用作保护接地线也用作功能接地线。

式中  $I_1$ ——总泄漏电流，A；  
 $R_A$ ——接地极电阻， $\Omega$ ；  
 $I_{\Delta n}$ ——RCD 额定动作电流，A；  
 $U_L$ ——接触电压限值，V。

如不能满足上述要求，应采取前述利用双绕组变压器的措施。

(2) 采用 IT 系统时补充要求如下：

1) 当因过大的泄漏电流，不能满足式 (1-4-6) 要求时，不宜将大泄漏电流的设备直接接入 IT 系统中。如果可能，可经一双绕组变压器在二次转换为 TN 系统给设备供电，以便在发生接地故障时迅速切断故障电路。

2) 当满足式 (1-4-6) 要求，且设备制造厂明确该设备可直接接于 IT 系统内时，设备可直接由 IT 系统供电。当此 IT 系统的电源经阻抗接地时，设备的外露导电部分应通过 PE 线直接接至电源的接地极来实现接地。

5. 低干扰水平接地装置的防电击措施

(1) 数据处理设备的外露导电部分应用绝缘导体直接接至建筑物进线处的总接地母排作一点接地。需作功能接地的 II 类和 III 类防电击类别的设备的外露导电部分的接地，以及功能特低电压 (FELV) 回路的接地也应直接接至总接地母排。严禁将数据处理设备的外露导电部分接至单独的接地极，而不与接地母排相连接。个别情况下，如总接地母排上的干扰水平过高，或数据处理设备对干扰十分敏感时，应另采取有效的抗干扰措施。

(2) 低干扰水平的安全接地应注意满足下述一般安全接地的要求：

1) 保证用作接地故障保护的过电流保护器对过电流保护的有效性。

2) 防止设备的外露导电部分出现过高的接触电压，并保证设备和邻近金属物体和其他设备之间在正常情况和故障情况下的等电位联结的有效性。

3) 防止过大对地泄漏电流带来的危险。

## 1.6 电气设备防误操作的要求及措施

根据国家安全生产监督管理局能源安保(1990)1110号文件要求,凡有可能引起误操作的高压电气设备,均应装设防误装置,装置的性能和质量应符合产品标准和有关文件的规定。

### 1.6.1 防误装置的功能

(1) 按 GB 50060—2008《3~110kV 高压配电装置设计规范》的规定:

1) 屋内、屋外配电装置的隔离开关与相应的断路器和接地刀闸之间应装设闭锁装置。屋内配电装置的设备低式布置时,还应设置防止误入带电间隔的闭锁装置。

2) 35kV 及以下电压等级的配电装置宜采用金属封闭开关设备,金属成套开关设备应具备下列功能(简称“五防”):

- a. 防止误分、误合断路器。
- b. 防止带负荷拉合隔离开关。
- c. 防止带电挂接地线(合接地开关)。
- d. 防止带接地线关(合)断路器(隔离开关)。
- e. 防止误入带电间隔。

(2) 按 GB 50059—2011《35kV~110kV 变电站设计规范》的规定:

35~110kV、单台变压器容量为 5000kVA 及以上的变电站,其配电装置应装设防止电气误操作闭锁装置。该闭锁装置宜采用机械闭锁,成套开关柜应采用机械闭锁装置。屋内间隔式配电装置,尚应装设防止误入带电间隔的设施。

闭锁连锁回路的电源,应与继电保护、控制信号回路的电源分开。

### 1.6.2 设计、制造及选用防误装置的原则

(1) 新订购的高压开关设备,必须具有性能和质量符合要求的防误装置,对不符合要求的不得订货。

(2) 新设计的变电工程中采用防误装置和操作规程,应经运行部门审查。

(3) 新设计的变电工程中采用的防误装置,应做到与主设备同时投运。

1) 防误装置的结构应简单、可靠,操作维护方便,尽可能不增加正常操作和事故处理的复杂性。

2) 电磁锁应采用间隙式原理,锁栓能自动复位。

3) 成套的高压开关设备用防误装置,应优先选用机械连锁。

4) 防误装置应有专用工具(钥匙)进行解锁。

5) 防误装置应满足所配设备的操作要求,并与所配用设备的操作位置相对应。

6) 防误装置应不影响开关设备的主要技术性能(如分合闸时间、速度等)。

7) 防误装置所用的电源应与继电保护、控制回路的电源分开。

8) 防误装置应做到防尘、防异物、防锈、不卡涩。户外的防误装置还应有防水、防潮、防霉的措施。

9) “五防”中除防止误分、误合断路器可采用提示性的装置外,其他“四防”应采用强制性装置。

10) 新设计的户外 110kV 及复杂接线,应优先采用电气连锁或电磁锁方案。

11) 户内配电装置改造加装防误装置，应优先采用机械程序锁或电磁锁。

12) 应选用符合产品标准，功能齐全的产品。对不符合要求的应予以退换，并在订货合同中加以说明。

## 1.7 电气工程设计的防火要求及措施

### 1.7.1 变电站的建、构筑物的耐火等级

(1) 按 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》的规定：油浸变压器室、高压配电装置室的耐火等级不应低于二级。

(2) 按 GB 50059—2011《35kV~110kV 变电站设计规范》和 GB 50229—2006《火力发电厂与变电站设计防火规范》规定单台容量为 5000kVA 及以上的变电站火灾危险性分类及最低耐火等级列于表 1-7-1。

表 1-7-1 变电站建筑物、构筑物火灾危险性分类及耐火等级

建（构）筑物名称		火灾危险性分类	最低耐火等级
主控楼（室）、通讯楼（室）、继电器室		戊	二级
电缆夹层		丙	二级
配电装置室，屋外配电装置	单台设备油量 60kg 以上	丙	二级
	单台设备油量 60kg 及以下	丁	二级
	无含油设备	戊	二级
油浸变压器室		丙	一级
气体或干式变压器室		丁	二级
电容器室（有可燃介质）		丙	二级
干式电容器室，干式铁芯电抗器室		丁	二级
油浸电抗器室		丙	二级
总事故贮油池		丙	一级
消防水泵房，污水、雨水泵房		戊	二级

### 1.7.2 变电站与建筑物、储罐、堆场之间的最小防火间距

(1) 变电站内各建（构）筑物及设备的防火间距不应小于表 1-7-2 的规定。

(2) 屋外油浸变压器之间的最小防火间距应符合表 1-7-3 的规定。

(3) 室外变、配电站和厂房、仓库、民用建筑的防火间距不应小于表 1-7-4 的规定。

表 1-7-2 变电站内各建（构）筑物及设备的防火间距

建（构）筑物名称			丙、丁、戊类生产建筑		屋外配电装置		可燃介质 电容器 (室、棚)	总事 故贮 油池	生活建筑	
			耐火等级		每组断路器油量 (t)				耐火等级	
			一、二级	三级	<1	≥1			一、二级	三级
丙、丁、戊 类生产建筑	耐火等级	一、二级	10	12	—	10	10	5	10	12
		三级	12	14					10	14
屋外配电 装置	每组断路器 油量 (t)	<1	—		—	—	10	5	10	12
		≥1	10							

续表

建(构)筑物名称			丙、丁、戊类生产建筑		屋外配电装置		可燃介质 电容器 (室、棚)	总事 故贮 油池	生活建筑	
			耐火等级		每组断路器油量(t)				耐火等级	
			一、二级	三级	<1	≥1			一、二级	三级
油浸变压器	单台设备 油量(t)	5~10	10		见表1-7-3		10	5	15	20
		>10~50							20	25
		>50							25	30
可燃介质电容器(室、棚)			10	10		—	5	15	20	
总事故贮油池			5		5		5	—	10	12
生活建筑	耐火等级	一、二级	10	12	10		15	10	6	7
		三级	12	14	12		20	12	7	8

- 注 1. 建(构)筑物防火间距应按相邻两建(构)筑物外墙的最近距离计算,如外墙有凸出的燃烧构件时,则应从其凸出部分外缘算起。
2. 相邻两座建筑两面的外墙为非燃烧体且无门窗洞口、无外露的燃烧屋檐,其防火间距可按本表减少25%。
3. 相邻两座建筑较高一面的外墙如为防火墙时,其防火间距可不限,但两座建筑物门窗之间的净距不应小于5m。
4. 生产建(构)筑物侧墙外5m以内布置油浸变压器或可燃介质电容器等电气设备时,该墙在设备总高度加3m的水平线以下及设备外廊两侧各3m的范围内,不应设有门窗、洞口;建筑物外墙距设备外廊5~10m时,在上述范围内的外墙可设甲级防火门,设备高度以上可设防火窗,其耐火极限不应小于0.90h。

表1-7-3 屋外油浸变压器之间的最小防火间距 m

电压等级	最小间距
35kV及以下	5
66kV	6
110kV	8
220kV及以上	10

注 变压器之间的防火间距应按相邻变压器外壁的最近水平距离计。

表1-7-4 室外变、配电站和厂房、仓库、民用建筑的防火间距 m

室外 变配电站	建筑物	甲类厂房			乙类厂房(仓库)			丙、丁、戊类厂房(仓库)			民用建筑			
		单、多层	单、多层	高层	单、多层	高层	单、多层	高层	裙房,单、多层					
									一、二级	一、二级	三级	四级	一、二级	一、二级
变压器 总油量 (t)	≥5, ≤10	25	25	25	12	15	20	12	15	20	25	20		
	>10, ≤50	25	25	25	15	20	25	15	20	25	30	25		
	>50	25	25	25	20	25	30	20	25	30	35	30		

(4) 工业企业变压器总油量大于5t的室外降压变电站,及电力系统35~500kV单台变压器为10MVA及以上的室外变、配电站,和甲类仓库之间的防火间距不应小于表1-7-5的规定。

表 1-7-5 室外变配电站和甲类仓库之间的防火间距

甲类仓库储物品第 3、4 项		甲类仓库储物品第 1、2、5、6 项	
仓库储量 (t)		仓库储量 (t)	
≤5	>5	≤10	>10
30m	40m	25m	30m

注 表中甲类仓库储物品项见 GB 50016—2014 之表 3.1.3 的规定。

(5) 室外变、配电站 [同本条第 (4) 款的范围] 和液体储罐 (区) 或堆场的防火间距不应小于表 1-7-6 的规定。

表 1-7-6 室外变、配电站和液体储罐 (区) 或堆场的防火间距

甲、乙类液体储罐 (区)				丙类液体储罐 (区)			
一个罐区或堆场的总容量 $V$ ( $m^3$ )				一个罐区或堆场的总容量 $V$ ( $m^3$ )			
$1 \leq V < 50$	$50 \leq V < 200$	$200 \leq V < 1000$	$1000 \leq V \leq 5000$	$5 \leq V < 250$	$250 \leq V < 1000$	$1000 \leq V < 5000$	$5000 \leq V < 25000$
30m	35m	40m	50m	24m	28m	32m	40m

(6) 室外变、配电站和湿式可燃气体储罐、湿式氧气储罐的防火间距不应小于表 1-7-7 的规定。

表 1-7-7 室外变、配电站和湿式可燃气体储罐、湿式氧气储罐的防火间距

湿式可燃气体储罐, 总容积 $V$ ( $m^3$ )					湿式氧气储罐, 总容积 $V$ ( $m^3$ )		
$V < 1000$	$1000 \leq V < 10000$	$10000 \leq V < 50000$	$50000 \leq V < 100000$	$100000 \leq V < 300000$	$V \leq 1000$	$1000 < V \leq 50000$	$V > 50000$
20m	25m	30m	35m	40m	20m	25m	30m

注 干式可燃气体储罐, 当其密度比空气大时, 表中间距应增加 25%; 密度比空气小时, 可按表中规定执行。

(7) 室外变、配电站及架空线和液化天然气气化站的液化天然气储罐 (区) 的防火间距不应小于表 1-7-8 的规定。

表 1-7-8 室外变、配电站及架空线和液化天然气储罐的防火间距

名称	液化天然气储罐, 总容积 $V$ ( $m^3$ )							集中放散装置的天 气放散总管
	$V \leq 10$	$10 < V \leq 30$	$30 < V \leq 50$	$50 < V \leq 200$	$200 < V \leq 500$	$500 < V \leq 1000$	$1000 < V \leq 2000$	
变、配电站	30m	35m	45m	50m	55m	60m	70m	30m
架空电力 线 (中心线)	1.5 倍杆高					1.5 倍杆高, 35kV 及 以上的不应小于 40m		2.0 倍杆高
架空通信线 (中心线)	I、II 级	1.5 倍杆高		30m		40m		1.5 倍杆高
	其他	1.5 倍杆高						

(8) 室外变、配电站及架空线和液化石油气供应基地的全压式和半冷冻式液化石油气储罐（区）的防火间距不应小于表 1-7-9 的规定。

表 1-7-9 室外变、配电站及架空线和液化石油气储罐的防火间距

名称	液化石油气储罐总容积 $V$ ( $m^3$ )						
	$30 < V \leq 50$	$50 < V \leq 200$	$200 < V \leq 500$	$500 < V \leq 1000$	$1000 < V \leq 2500$	$2500 < V \leq 5000$	$5000 < V \leq 10000$
变、配电站	45m	50m	55m	60m	70m	80m	120m
架空电力线	应符合本章表 1-7-11 的规定						
架空通信线（中心线）	I、II 级	30m		40m			
	III、IV 级	1.5 倍杆高					

(9) 室外变、配电站和露天、半露天可燃材料堆场的防火间距不应小于 50m。

(10) 独立建造的非露天变电站和民用建筑的防火间距不应小于表 1-7-10 的规定。

表 1-7-10 独立建造的非露天变电站和民用建筑的防火间距

变电站类别	高层民用建筑 一、二级	裙房及其他民用建筑		
		一、二级	三级	四级
变、配电站	应符合表 1-7-4 的规定			
终端变电站	9m	6m	7m	9m
10kV 及以下预装式变电站	3m			

### 1.7.3 变电站、配电装置的防火要求

1. 按 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》规定的防火要求

(1) 变、配电站不应设置在甲、乙类厂房内或贴邻，且不应设在爆炸危险环境内。供甲、乙类厂房专用的 10kV 及以下变、配电站，当采用无门、窗、洞口的防火墙分隔时，可一面贴邻。乙类厂房的配电站需要在防火墙开窗时，应采用甲级防火窗。

(2) 民用建筑的油浸变压器、有可燃油的高压电容器和多油开关、宜设置在建筑物外的专用房间内；确需贴邻民用建筑时，应采用防火等级不低于二级的防火墙分隔，且不应贴邻人员密集场所；确需布置在民用建筑内时，不应布置在人员密集场所的上一层、下一层或贴邻，并应符合下列规定：

- 1) 变压器单台容量不大于 630kVA，总容量不大于 1260kVA。
- 2) 变压器室应设在首层或地下一层靠近外墙处。
- 3) 变压器室的疏散门应直通室外或安全出口。
- 4) 变压器室应采用耐火极限不低于 2h 的防火隔墙和 1.5h 的不燃性楼板分隔，且不得开设洞口。
- 5) 变压器室之间、变压器室与配电室之间，应设耐火极限不低于 2h 的防火隔墙。
- 6) 油浸变压器室、多油开关室、高压电容器室，应设防止油流散的设施；变压器下面

应设能储存全部油量的事故储油设施。

(3) 木结构住宅建筑内的配电间、发电机间，应采用耐火极限不低于2h的防火隔墙和1h的不燃性楼板分隔，不宜开设与室内相通的门、窗、洞口；确需时，可开一扇不直通卧室的单扇乙级防火门。

(4) 城市隧道内的变电站，应采取耐火极限不低于2h的防火隔墙和乙级防火门与车行隧道分隔。

## 2. 20kV及以下变电站防火要求

本部分依据GB 50053—2013《20kV及以下变电所设计规范》编写。

(1) 户内变电站每台油量大于等于100kg的油浸变压器，应设在单独的变压器室内，并应有储油或挡油、排油等防火措施。

(2) 变压器室、配电室和电容器室的耐火等级不应低于二级。

(3) 位于下列场所的油浸变压器室的门应采用甲级防火门：

- 1) 有火灾危险的车间内。
- 2) 易沉积可燃粉尘、可燃纤维的场所。
- 3) 附近有粮、棉或其他易燃物大量集中的露天堆场。
- 4) 民用建筑内，门通向其他相邻房间。
- 5) 变压器室，下面有地下室。

(4) 民用建筑内变电站防火门的设置应符合下列规定：

1) 位于高层建筑内，通向相邻房间的门应为甲级防火门，通向过道的应为乙级防火门。

2) 位于多层建筑的二层及以上的，防火门同1)项。

3) 位于单层或多层建筑的一层的，通向房间或过道应为乙级防火门。

4) 位于地下层或下面有地下层的，通向房间或过道应为甲级防火门。

5) 附近堆有易燃物品或通向汽车库的门应为甲级防火门。

6) 直接通向室外的门应为丙级防火门。

(5) 变压器室的通风窗应采用非燃烧材料。

(6) 露天或半露天变电站安装油浸变压器，变压器外廊与生产建筑物外墙距离小于5m，建筑物外墙在下列范围内不得有门、窗或通风孔：

1) 油量大于1000kg时，在变压器总高加3m及外廊两侧各加3m的范围内。

2) 油量小于等于1000kg时，上述1)项的外廊两侧降为各加1.5m的范围内。

(7) 高层建筑的裙房和多层建筑内的附设变电站，及车间内变电站的油浸变压器室，应设置容量为100%变压器油量的储油池。

(8) 当设置容量不低于20%变压器油量的挡油池时，应有能将油排到安全场所的设置。

(9) 位于下列场所的油浸变压器室，应设置容量为100%变压器油量的储油池或挡油设施：

- 1) 容易沉积可燃粉尘、可燃纤维的场所。
- 2) 附近有粮、棉或其他易燃物大量集中的露天场所。
- 3) 油浸变压器室下面有地下室。

(10) 独立、附设变电站以及露天、半露天变电站中，油量大于等于1000kg的油浸变

压器,应设置储油池或挡油池,并应符合本条第(8)、(9)款的规定。

(11) 在多层建筑或高层建筑裙房的首层布置油浸变压器的变电站时,首层外墙开口部位的上方应设置宽度不小于1.0m的不燃烧体防火挑檐或高度不小于1.2m的窗槛墙。

(12) 在露天或半露天的油浸变压器之间设置防火墙时,其高度应高于变压器储油柜,长度应长过变压器的贮油池两侧各0.5m。

### 3. 35~110kV 变电站防火要求

本部分依据 GB 50059—2011《35kV~110kV 变电站设计规范》编写。

(1) 变电站建、构筑物的耐火等级应符合本节表1-7-1的规定。

(2) 变电站内各建、构筑物及设备的防火间距应符合本节表1-7-2的规定。

(3) 屋外油浸变压器之间的最小防火间距应符合本节表1-7-3的规定;当不能满足最小间距时,应设置防火隔墙,墙应高出油枕顶部,墙长度应大于贮油坑两侧各1.0m;屋外油浸变压器与油量在600kg以上的本回路充油电气设备之间的防火净距,不应小于5.0m。

(4) 变压器室、电容器室、蓄电池室、电缆夹层、配电装置室,设有充油电气设备房间的门,应向疏散方向开启;门外为公共走廊或其他房间时,应采用乙级防火门。

(5) 电缆进室内入口处与电缆竖井的出入口处,以及控制室与电缆层之间,应采取防止电缆火灾蔓延的阻燃及分隔措施。

### 4. 3~110kV 配电装置的防火要求

本部分依据 GB 50060—2008《3~110kV 高压配电装置设计规范》编写。

(1) 屋内敞开式配电装置的充油设备:35kV的应安装在两侧有隔墙(板)的间隔内;66~110kV的应安装在有防爆隔墙的间隔内。

(2) 总油量超过100kg的屋内油浸变压器,应安装在单独的变压器间内,并应设置灭火设施。

(3) 屋内单台电气设备油量在100kg以上时,应设置贮油或挡油设施。挡油设施的容积应按20%油量设计,并应有将事故油排至安全处的设施;不能满足时,应设能容纳100%油量的贮油设施。

(4) 屋外单台电气设备油量在1000kg以上时,应设贮油或挡油设施,并能容纳20%油量,且应有将油排到安全处所的设施;不能满足时,应设能容纳100%油量的贮油或挡油设施;设施应大于设备外廊每边各1000mm,四周高出地面100mm,贮油设施内应铺设厚度不小于250mm卵石层。

当设有油水分离措施的总事故贮油池时,其容量宜按最大一个油箱容量的60%确定。

(5) 油量为2500kg及以上的屋外油浸变压器之间的最小间距应符合本节表1-7-3的规定,不能满足时,应设置防火墙;防火墙的耐火极限不宜小于4h,高度应高于变压器储油柜,长度应大于贮油池两侧各1m。

(6) 油量在250kg及以上的屋外油浸变压器或电抗器与本回路油量为600~2500kg的充油电气设备之间的防火间距,不应小于5m。

#### 1.7.4 电气线路的防火要求

本节主要依据 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》而编写。

(1) 架空电力线与甲、乙类厂房(仓库),液体、气体储罐,可燃材料堆垛的最近水平

距离应符合表 1-7-11 的规定。

表 1-7-11 架空电力线与甲、乙类厂房（仓库）、储罐、可燃材料堆垛等的最近水平距离

厂房、储罐、堆垛名称	与架空电力线最近水平距离
甲、乙类厂房（仓库） 可燃材料堆垛 甲、乙类液体储罐 液化石油气储罐 可燃、助燃气体储罐	电杆（塔）高度的 1.5 倍
直埋地下的甲、乙类液体储罐	电杆（塔）高度的 0.75 倍
丙类液体储罐	电杆（塔）高度的 1.2 倍
直埋地下的丙类液体储罐	电杆（塔）高度的 0.6 倍

(2) 35kV 及以上架空电力线与单罐容积大于  $200\text{m}^3$  或总容量大于  $1000\text{m}^3$  的液化石油气储罐（区）的最近水平距离不应小于 40m。

(3) 电力电缆不应和甲、乙、丙类液体管道、可燃气体管道、热力管道敷设在同一管沟内。

(4) 配电线路不得穿越通风管道内腔或直接敷设在通风管道外壁上，穿金属导管的配电线路可紧贴通风管道外壁敷设。

(5) 建筑物内的电缆竖井的防火要求：

1) 电缆井道应和其他管道井、排气道分别独立设置，井壁的耐火极限不应低于 1.0h，检查门应采用丙级防火门。

2) 电缆井应在每层楼板处采用不低于楼板耐火极限的不燃材料或防火封堵材料封堵；电缆井与房间、走道等相连通的孔隙应采用防火封堵材料封堵。

3) 与电梯无关的电缆、电线不应敷设在电梯井道内；水、暖、气等非电管道不应敷设在电缆井道内。

(6) 电线、电缆管道不宜穿过建筑内的变形缝；确需穿过时，应在穿越处加设不燃材料制作的套管或采取其他变形措施，并应采用防火封堵材料封堵。

(7) 电气线路不应穿越或敷设在燃烧性能为 B1 或 B2 级保温材料中；确需穿越或敷设时，应穿金属管并在金属管周围用不燃隔热材料进行防火隔离等防火保护措施。

设置开关、插座等电器的周围应采用不燃隔热材料进行防火隔离等防火保护措施。

(8) 城市交通隧道内电缆线槽应与其他管道分开敷设；10kV 及以上的高压电缆，应采用耐火极限不低于 2.0h 的防火分隔体与其他区域分隔。

(9) 消防配电干线宜按防火分区划分，消防配电分支线不宜穿越防火分区。

(10) 消防配电线路应满足火灾时连续供电的需要，其敷设应符合下列规定：

1) 明敷（包括在吊顶内）时，应穿金属导管或封闭式金属槽盒保护，这些管、槽盒应采取防火保护措施；阻燃或耐火电缆敷设在电缆井、沟内时，可不穿金属导管或金属槽盒保护；采用矿物绝缘类不燃性电缆时，可直接明敷。

2) 暗敷时，应穿管并敷设在不可燃性结构内，保护层厚度不应小于 30mm。

3) 消防配电线路宜与其他配电线路分设不同的电缆井、沟内；确有困难时，应分设

在电缆井、沟的两侧，且消防配电线路应采用矿物绝缘类不燃性电缆。

(11) 配电线路敷设在可燃物的闷顶、吊顶内时，应采取穿金属导管、封闭式金属槽盒等防火保护措施。

### 1.7.5 照明及照明电器的防火要求

(1) 卤钨灯和额定功率不小于 100W 的白炽灯泡的吸顶灯、槽灯、嵌入式灯，其引入线应采用瓷管、矿棉等不燃材料作隔热保护。

额定功率不小于 60W 的白炽灯、卤钨灯、高压钠灯、金属卤化物灯、荧光高压汞灯（包括其电感镇流器）等，不应直接安装在可燃物体上，或采取其他防火措施。

【编者按】 根据节能要求，按 GB 50034—2013《建筑照明设计标准》的规定，不应采用普通照明用白炽灯（特殊场所除外），更不应采用 60W 以上白炽灯；不应采用卤钨灯（商场等重点照明除外）；不应采用荧光高压汞灯。

(2) 开关、插座和照明灯具靠近可燃物时，应采取隔热、散热等防火措施。

配电箱及开关应设置在仓库外。

(3) 户外电致发光广告牌不应直接设置在有可燃、难燃材料的墙体上。

(4) 火灾危险环境的灯具的防护等级不应低于 IP4X；在有可燃粉尘或可燃纤维的环境，不应低于 IP5X；在有导电粉尘、纤维的环境，不应低于 IP6X。

(5) 嵌入墙内、顶棚内的照明箱及电气箱、盒的外壳防护等级不应低于 IP3X。

(6) 与消防相关的应急照明（包括疏散照明和备用照明）的设置见本书 13.1.2 节（2）款，其照度标准见本书 13.2.3 节（3）款。

## 1.8 电力设施抗震设计和措施

### 1.8.1 依据、适用范围、分类和原则

(1) 本节内容依据 GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》。

(2) 适用范围：用于抗震设防烈度 6 度至 9 度地区的新建、扩建和改建的下列电力设施。

- 1) 单机容量 12 ~ 1000MW 火电厂的电力设施。
- 2) 单机容量 10MW 及以上水电厂的电力设施。
- 3) 电压为 110 ~ 750kV 交流输变电的电力设施。
- 4) 电压为  $\pm 660$ kV 及以下直流输变电的电力设施。
- 5) 电力通信微波塔及其基础。

(3) 电力设施按重要性和特点分类。

1) 重要电力设施：

- a. 单机 300MW 及以上或规划容量 800MW 及以上火电厂。
- b. 停电会造成重要设备破坏或危及人身安全的工矿自备电厂。
- c. 设计容量 750MW 及以上的水电厂。
- d. 220kV 枢纽变电站，330 ~ 750kV 变电站，330kV 及以上换流站。
- e. 超高压输电线路跨越塔。
- f. 不得中断的电力系统的通信设施。

2) 一般电力设施：除上述重要电力设施以外者。

(4) 电力设施中的建（构）筑物分类。

1) 重点设防类，简称乙类。重要电力设施中发电厂的主要建（构）筑物和输变电工程供电建（构）物。

2) 标准设防类，简称丙类。一般电力设施中的主要建（构）筑物、公用建（构）筑物、重要材料库。

3) 适度设防类，简称丁类。乙丙类以外的次要建（构）筑物。

(5) 抗振设计原则。电力设施抗震设防，以减轻地震造成的破坏，避免人员伤亡，减少经济损失。

### 1.8.2 选址和总体布置

(1) 发电厂、变电站应选择在对抗震有利地段，避开不利地段，不得在危险地段。

(2) 发电厂不宜建在设防烈度为9度地区；必须设置时，应建在坚硬土质或岩石场地。

(3) 发电厂的铁路、公路，变电站的进站道路应避开地震时可能崩塌、大面积滑坡、泥石流、地裂和错位的危险地段。

(4) 发电厂的燃油库、酸碱库、液氨脱硝剂制备及存储车间宜布置在厂区边缘较低处。燃油罐、酸碱罐、液氨罐四周应设防护围堤。

(5) 发电厂区的地下管、沟，宜简化和分散布置，不宜平行布置在行车道下面。

(6) 发电厂的主厂房、办公楼、试验楼、食堂等人员密集的建筑物主要出入口应设安全通道，附近应有疏散场地。

### 1.8.3 电气设施的抗震设计

(1) 电气设施的抗震设计应符合下列规定：

1) 重要电力设施中的电气设施，当抗震设防烈度为7度及以上时，应进行抗振设计。

2) 一般电力设施中的电气设施，当抗震设防烈度为8度及以上时，应进行抗振设计。

3) 安装在屋内二层及以上和屋外高架平台上的电气设施，当抗震设防烈度为7度及以上时，应进行抗震设计。

(2) 电气设备、通信设备应根据设防标准进行选择。对位于高烈度区且不能满足抗震要求或对于抗震安全性和使用功能有较高要求或专门要求的电气设施，可采用隔震或消能减震措施。

(3) 电气设施的抗震设计宜采用下列设计方法：

1) 对于基频高于33Hz的刚性电气设施，可采用静力法。

2) 对于以剪切变形为主或近似于单质点体系的电气设施，可采用底部剪力法。

3) 除以上款外的电气设施，宜采用振型分解反应谱法。

4) 对于特殊不规则或有特殊要求的电气设施，可采用时程分析法进行补充抗震设计。

(4) 当电气设备有支承结构时，应充分考虑支承结构的动力放大作用；若仅作电气设备本体的抗震设计时，地震输入加速度应乘以支承结构动力反应放大系数，并应符合下列规定：

1) 当支架设计参数确定时，应将支架与电气设备作为一个整体进行抗震设计。

2) 当支架设计参数缺乏时，对于预期安装在室外、室内底层、地下洞内、地下变电站底层地面上或低矮支架上的电气设施，其支架的动力反应放大系数的取值不宜小于1.2，且支架设计应保证其动力反应放大系数不大于所取值。

3) 安装在室内二、三层楼板上的电气设备和电气装置, 建筑物的动力反应放大系数应取 2.0。

4) 安装在变压器、电抗器的本体上的部件, 动力反应放大系数应取 2.0。

(5) 电气设施抗震设计地震作用计算应包括体系的总重力(含端子板、金具及导线的重量)、内部压力、端子拉力及 0.25 倍设计风载等产生的荷载, 可不计算地震作用与短路电动力的组合。

#### 1.8.4 电气设施布置

(1) 电气设施布置应根据设防烈度、场地条件和其他环境条件, 并结合电气总布置及运行、检修条件确定。

(2) 当抗震设防烈度为 8 度及以上时, 电气设施布置宜符合下列要求:

1) 电压为 110kV 及以上的配电装置形式, 不宜采用高型、半高型和双层屋内配电装置。

2) 电压为 110kV 及以上的管型母线配电装置的管型母线, 宜采用悬挂式结构。

3) 电压为 110kV 及以上的高压设备, 当满足抗震强度验证试验要求时, 可按照产品形态要求进行布置。

(3) 当抗震设防烈度为 8 度及以上时, 110kV 及以上的电容补偿装置的电容器平台宜采用悬挂式结构。

(4) 当抗震设防烈度为 8 度及以上时, 干式空心电抗器不宜采用三相垂直布置。

#### 1.8.5 电力通信

(1) 重要电力设施的电力通信, 必须设有两个及以上相互独立的通信通道, 并应组成环形或有迂回回路的通信网络。两个相互独立的通道宜采用不同的通信方式。

(2) 一般电力设施的大、中型发电厂和重要变电站的电力通信, 应有两个或以上相互独立的通信通道, 并宜组成环形或有迂回回路的通信网络。

(3) 电力通信设备应具有可靠的电源, 并应符合下列要求:

1) 重要电力设施的电力通信电源, 应由能自动切换的、可靠的双回路交流电源供电, 并应设置独立可靠的直流备用电源。

2) 一般电力设施的大型发电厂和重要变电站的电力通信电源, 应设置工作电源和直流备用电源。

#### 1.8.6 电气设施安装设计的抗震要求

(1) 设备引线和设备间连线宜采用软导线, 其长度应留有余量。当采用硬母线时, 应有软导线或伸缩接头过渡。

(2) 电气设备、通信设备和电气装置的安装应牢固可靠, 其安装螺栓或焊接强度应满足抗震要求。

(3) 变压器类安装设计应符合下列要求:

1) 变压器类宜取消滚轮及其轨道, 并应固定在基础上。

2) 变压器类本体上的储油柜、潜油泵、冷却器及其连接管道等附件以及集中布置的冷却器与本体间连接管道, 应符合抗震要求。

3) 变压器类的基础台面宜适当加宽。

(4) 旋转电动机安装设计应符合下列要求:

- 1) 安装螺栓和预埋铁件的强度，应符合抗震要求。
- 2) 在调相机、空气压缩机和柴油发电机附近应设置补偿装置。
- (5) 断路器、隔离开关、GIS 等设备的操作电源或气源的安装设计应符合抗震要求。
- (6) 蓄电池、电力电容器的安装设计应符合下列要求：

- 1) 蓄电池安装应装设抗震架。
- 2) 蓄电池在组架间的连线宜采用软导线或电缆连接，端电池宜采用电缆作为引出线。

3) 电容器应牢固地固定在支架上，电容器引线宜采用软导线。当采用硬母线时，应装设伸缩接头装置。

(7) 开关柜（屏）、控制保护屏、通信设备等，应采用螺栓或焊接的固定方式。当设防烈度为 8 度或 9 度时，可将几个柜（屏）在重心位置以上连成整体。

### 1.8.7 电气设备的隔震与消能减震设计

(1) 应根据电气设备的结构特点、使用要求、自振周期以及场地类别等，选择相适应的隔震与消能减震措施。

(2) 隔震与减震措施分别为装设隔震器和减震器。常用的隔震器或减震器包括橡胶阻尼器、阻尼垫和剪弯型、拉压型、剪切型等铅合金减震器以及其他减震装置。

(3) 当采用隔震或消能措施时，不应影响电气设备的正常使用功能。

(4) 隔震器和消能减震器应满足强度和位移要求。

(5) 隔震器或消能减震器宜设置在支架或电气设备与基础、建筑物及构筑物的连接处。

(6) 减震设计应根据电气设备结构特点、自振频率、安装地点场地土类别，选择相适应的减震器，并应符合下列要求：

1) 安装减震器的基础或支架的平面应平整，每个减震器受力应均衡。

2) 根据减震器的水平刚度及转动刚度验算电气设备体系的稳定性。

(7) 冬季环境温度低于  $-15^{\circ}\text{C}$  及以下地区，应选用具有耐低温性能的隔震或减震器。

### 1.8.8 变电站建筑物、线路及微波塔抗震设计

(1) 变电站主控通信楼、配电装置楼（室），宜选用规则的形体，其抗侧力构件的平面布置宜规则对称，侧向刚度沿竖向宜均匀变化，竖向抗侧力构件的截面积尺寸和材料强度宜自下而上逐渐减小，避免侧向刚度和承载力的突变。

(2) 变电站多层配电装置楼不应采用单跨框架结构。

(3) 变压器、换流器等大型落地设备，应加强设备本体与基础之间的连接，以防止其在地震时发生滑移、脱轨、转动或倾斜等震害。

(4) 送电线路路径和塔位选择宜避开危险地段，如地震时易出现滑坡、崩塌、地裂、泥石流等地段。

(5) 当送电线路通过地质灾害易发区时，宜采用单回路架线。

(6) 位于 7 度及以上地区的混凝土高塔，8 度及以上地区的钢结构大跨越塔和微波高塔，9 度及以上地区的各类杆塔和微波塔均应进行抗震验算。

## 环境保护与节能

## 2.1 电气设备对环境的影响及防治措施

## 2.1.1 电磁兼容

## 2.1.1.1 电磁兼容的相关术语

摘自 GB/T 4365—2003 《电工术语 电磁兼容》。

## 2 电磁兼容术语

## 2.1 基本概念

## 161-01-01 电磁环境 electromagnetic environment

存在于给定场所的所有电磁现象的总和。

注：通常，电磁环境与时间有关，对它的描述可能需要用统计的方法。

## 161-01-02 电磁噪声 electromagnetic noise

一种明显不传达信息的时变电磁现象，它可能与有用信号叠加或组合。

## 161-01-03 无用信号 unwanted signal; undesired signal

可能损害有用信号接收的信号。

## 161-01-04 干扰信号 interfering signal

损害有用信号接收的信号。

## 161-01-05 电磁骚扰 electromagnetic disturbance

任何可能引起装置、设备或系统性能降低或者对生物或非生物产生不良影响的电磁现象。

注：电磁骚扰可能是电磁噪声、无用信号或传播媒介自身的变化。

## 161-01-06 电磁干扰 electromagnetic interference; EMI

电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降。

注：

1. 术语“电磁骚扰”和“电磁干扰”分别表示“起因”和“后果”。

2. 过去“电磁骚扰”和“电磁干扰”常混用。

## 161-01-07 电磁兼容性 electromagnetic compatibility; EMC

设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。

## 161-01-08 [电磁] 发射 (electromagnetic) emission

从源向外发出电磁能的现象。

## 161-01-09 (无线电通信中的) 发射 emission (in radio communication)

由无线电发射台产生并向外发出无线电波或信号的现象。

## 161-01-10 [电磁] 辐射 (electromagnetic) radiation

- a) 能量以电磁波形式由源发射到空间的现象。  
b) 能量以电磁波形式在空间传播。  
注：“电磁辐射”一词的含义有时也可引申，将电磁感应现象也包括在内。
- 161-01-11 无线电环境 radio environment  
a) 无线电频率范围内的电磁环境。  
b) 在给定场所内所有处于工作状态的无线电发射机产生的电磁场总和。
- 161-01-12 无线电 [频率] 噪声 radio (frequency) noise  
具有无线电频率分量的电磁噪声。
- 161-01-13 无线电 [频率] 骚扰 radio (frequency) disturbance  
具有无线电频率分量的电磁骚扰。
- 161-01-14 无线电频率干扰 radio frequency interference; RFI  
由无线电骚扰引起的有用信号接收性能的下降。  
注：  
1. 713-11-05 射频干扰 radio-frequency interference (RFI)  
由射频骚扰引起的有用信号的接收性能的下降。  
2. 英语中“interference (干扰)”和“disturbance (骚扰)”两词经常不加区分地使用。  
短语“radio-frequency interference (射频干扰)”一般也用于射频骚扰或无用信号。  
3. 为了管理目的，ITU 无线电规则中定义了不同级别的干扰，即可允许干扰，可承受干扰和有害干扰。
- 161-01-15 系统间干扰 inter-system interference  
由其他系统产生的电磁骚扰对一个系统造成的电磁干扰。  
注：713-11-07 系统间干扰 inter-system interference  
由其他特定系统产生的射频辐射对一个系统引起的射频干扰。
- 161-01-16 系统内干扰 intra-system interference  
系统中出现的由本系统内部电磁骚扰引起的电磁干扰。  
注：713-11-09 系统内干扰 intra-system interference  
一个系统内由本系统产生的射频辐射引起的射频干扰。
- 161-01-17 自然噪声 natural noise  
来源于自然现象而非人工装置产生的电磁噪声。
- 161-01-18 人为噪声 man-made noise  
来源于人工装置的电磁噪声。  
注：713-11-28 人为噪声 man-made noise  
来源于人工装置的射频噪声。
- 161-01-19 (性能) 降低 degradation (of performance)  
装置、设备或系统的工作性能与正常性能的非期望偏离。  
注：“降低”一词可用于暂时失效或永久失效。
- 161-01-20 (对骚扰的) 抗扰度 immunity (to a disturbance)  
装置、设备或系统面临电磁骚扰不降低运行性能的能力。
- 161-01-21 [电磁] 敏感度 (electromagnetic) susceptibility

在有电磁骚扰的情况下，装置、设备或系统不能避免性能降低的能力。

注：敏感度高，抗扰度低。

161-01-22 静电放电 electrostatic discharge; FSD

具有不同静电电位的物体相互靠近或直接接触引起的电荷转移。

161-01-23 (电磁骚扰的) 发射体 emitter (of electromagnetic disturbance)

产生的电压、电流或电磁场相当于电磁骚扰的那些装置、设备或系统。

161-01-24 敏感装置 susceptible device

受电磁骚扰的影响，性能可能降低的装置、设备或系统。

2

### 2.1.1.2 电磁兼容性的概念

依据：《电气传动自动化技术手册》（第3版）13.1节。

电磁兼容性（electromagnetic compatibility, EMC）是指装置在规定的电磁环境中正常工作而不对该环境或其他设备造成不允许的扰动的能力。使电气设备或电子装置性能下降、工作不正常或发生故障的电磁扰动称为电磁干扰（electromagnetic interference, EMI）。装置在受到电磁能作用时发生非期望响应特性称为装置的敏感性（susceptibility）。

随着微电子技术和计算机技术的迅速发展，由敏感的电子线路构成的新型电子系统（如微型计算机和小型计算机），不仅在企业管理和办公自动化等领域中，而且在工业生产过程，如化工厂、轧钢厂、炼油厂、发电厂和变电站的测量和控制领域中，获得广泛应用。工业生产过程中的各类工业设备产生的电磁干扰环境使工业过程测量和控制装置处于严酷的电磁环境中。为了保证装置和系统能正常工作，并具有较高的可靠性，这些装置和系统必须经受再现和模拟其工作现场可能遇到的电磁干扰环境的各种试验。

工业过程测量和控制装置电磁兼容性系列标准所考虑的干扰形式起因于外界干扰源对设备和系统的影响。干扰通过电源线直接导入，或通过连接电缆线由电容耦合或电感耦合从干扰源导入，或者通过本地装置和远程装置各自的参考端之间电位差导入。此外，操作人员与仪表盘、外壳或箱柜间的静电放电，以及来源于对讲机、广播电台、电视台、雷达站和工科医设备的辐射电磁场，都可产生干扰。

电磁兼容水平的确定包含两部分具体内容：

(1) 电气设备或系统在正常运行时应当能够承受有限的电磁干扰，称为抗干扰水平。

(2) 电气设备或系统在保证自身正常运行的同时不应对共用电磁环境造成过多的污染而影响其他设备或系统的正常工作，称为发射水平。

### 2.1.2 电磁环境

本节部分内容摘自《电力系统中电磁现象和电能质量标准》。

#### 2.1.2.1 电磁环境的概念

电力系统中的各种电气设备通过电或磁的关系彼此紧密相连，相互影响。电力系统中存在大量电场、磁场和静电干扰以及谐波、电压波动和闪变、不平衡、电压暂降和短时中断、过电压、频率变化等传导性干扰，所有这些干扰现象构成了“电磁环境”，而“电磁环境”

直接关系到电气设备的安全正常工作，甚至还产生生态效应。20世纪80年代兴起的电磁兼容学科是对电磁干扰的产生、传播、接收、抑制机理，以及相应的测量、计量技术和标准等进行研究，以求得同一电磁环境下工作的各种电气设备能正常工作，“和谐”相处，达到兼容状态。

### 2.1.2.2 电力系统电磁环境的特点

随着国民经济的快速增长，电网的发展正面临新的挑战：一方面以消耗化石能源（即煤炭、天然气、石油等）为主的发电方式面临资源枯竭和环境污染（即温室气体排放）的双重压力；另一方面以微电子技术为核心的大量新技术、新产业的发展以及用电智能化对供电可靠性和电能质量提出越来越高的要求。同时，电网本身正朝着电压等级更高、输电容量更大、距离更远、电力网络更密集、系统更复杂的方向发展，这导致电力系统产生的电磁干扰更严重、更复杂，另外，智能电网的建设对电磁环境（包括电能质量）提出了严峻的挑战，主要有：

(1) 大量分布式电源的接入，改变了传统电网的单向供电模式，对电网电压水平的控制和调整带来一系列复杂的问题。

(2) 大量新能源的利用，特别是风能和太阳能等不稳定电源的接入，引起供电电压的波动和闪变。

(3) 许多分布式电源通过电力变换器（变流器）接入电网，带来谐波和间谐波的干扰。

(4) 智能电网中为使电网灵活、可控和提高电能质量，将大量使用各种电力电子装置。这些技术的应用，均会使电网中电磁环境大大复杂化。

(5) 对电能质量敏感的负荷不断增加，用电智能化的发展要求根据用户需要提供相应等级的电磁环境和电能质量，对电能实现“按质论价”。

(6) 需要解决一些特殊的电磁环境和电能质量问题，例如“孤岛”运行时电网电压和频率的控制、防止故障时可能引发的铁磁谐振、防止分布式电源对电网3次谐波和直流干扰等。

电力系统中的各种电气设备由于运行方式的改变、开关操作、故障、雷击等引起电磁振荡会很快（以ms和s计）波及许多电气设备，使其工作受到影响或遭到破坏，甚至危及人体健康。即使在正常运行状态下，某些整流及非线性设备产生的谐波、冲击负荷引起的电压波动和闪变、单相负荷造成电压不平衡也会危害其他设备。因此，电力系统内部存在着大量的电磁兼容问题。

### 2.1.2.3 电力系统电磁现象的分类

摘自 GB/Z 18039.1—2000《电磁兼容 环境 电磁环境的分类》。

#### 3.2 环境现象

预计电子系统在电磁环境中工作而不受干扰是非常复杂的。对本分类法来说，已经定义了三类环境现象来描述所有的骚扰：

- 低频现象（传导的和辐射的，除ESD以外）；
- 高频现象（传导的和辐射的，除ESD以外）；
- 静电放电（ESD）现象（传导的和辐射的）。

表1 产生电磁骚扰的基本现象

低频传导现象： <ul style="list-style-type: none"> <li>——谐波、谐间波</li> <li>——信号电压</li> <li>——电压波动</li> <li>——电压暂降和短时中断</li> <li>——电压不平衡</li> <li>——电源频率变化</li> <li>——低频感应电压</li> <li>——交流网络中的直流</li> </ul>
低频辐射现象： <ul style="list-style-type: none"> <li>——磁场</li> <li>——电场</li> </ul>
高频传导现象： <ul style="list-style-type: none"> <li>——感应连续 (CW) 波电压和电流</li> <li>——单向瞬态</li> <li>——振荡瞬态</li> </ul>
高频辐射现象： <ul style="list-style-type: none"> <li>——磁场</li> <li>——电场</li> <li>——电磁场</li> <li>· 连续波</li> <li>· 瞬态</li> </ul>
静电放电 (ESD) 现象
核电磁脉冲 (NEMP)

### 2.1.3 抗干扰技术

依据：《电气传动自动化技术手册（第3版）》13.1、13.2节。

#### 2.1.3.1 抗干扰技术的重要性

随着电力电子、微电子和计算机技术的迅速开发和广泛应用，原来以强电和电器为主，功能简单的电气控制设备已发展成强弱电紧密结合、以电力电子和微电子器件为核心、功能齐全的新型电子控制设备。在我国，新一代电子控制设备正越来越广泛地应用到国民经济各个部门，并产生了巨大的经济效益。然而，电子控制设备由于其所用的元器件和电子线路具有工作信号电平低、速度快、元器件安装密度高等特点，对电磁干扰较敏感，因而对使用现场的电磁环境要求也较苛刻。另外，电子控制设备本身在工作时也向外界发出电磁干扰，往往影响其他电子设备的正常工作。

国内外实践证明，如果现代电子控制设备和系统在设计、制造、安装和使用缺乏正确的抗干扰技术指导，则往往设备既不能迅速投入正常工作，也不能长期稳定可靠地运行，有

的甚至严重影响整个企业的经济效益。

在此期间，国内外许多部门先后投入了相当力量从事电子控制设备抗干扰技术的研究，国际性的抗干扰（或电磁兼容性）专业组织也相继成立，对电磁干扰进行了大量的调查；开发了各种干扰量和抗干扰能力的测试方法和测试仪器，制定了一系列有关抗干扰的试验、设计、施工等标准和规范；大力推广研究成果，将抗干扰技术从凭经验和定性分析的低级阶段提高到依靠科学和定量分析来抑制干扰的高级阶段。现在已经能够有目的地采取经济而有效的措施来提高电子控制设备的抗干扰能力，减少其发出的干扰，并且使它们能在现场严酷的电磁环境中长期稳定可靠地运行，从而在实践中取得了明显的社会效益。

### 2.1.3.2 抗干扰设计的基本原则

抗干扰设计的基本任务是使系统或装置既不因外界电磁干扰的影响而误动作或丧失功能，也不向外界发送过大的噪声干扰，以免影响其他系统或装置正常工作，所以其设计主要遵循下列三个原则：

- (1) 抑制噪声源，直接消除干扰产生的原因；
- (2) 切断电磁干扰的传递途径，或者提高传递途径对电磁干扰的衰减作用，以消除噪声源和受扰设备之间的噪声耦合；
- (3) 加强受扰设备抵抗电磁干扰的能力，降低其噪声敏感度。

### 2.1.3.3 噪声的分类与抑制

噪声的定义：任何不希望有的信号，确切地说是在一有用频带内的任何不希望有的干扰。对于电噪声来说：“叠加于有用信号上的扰乱信号传输，使原来的有用信号发生畸变变化的电物理量叫电噪声，简称噪声”。

噪声的种类繁多，其产生、传递及抑制的方法也各不相同。可以按噪声产生的原因、性质、波形、持续时间或传递方式来分类。下面是以产生原因来分类，分为内部噪声和外部噪声。

- (1) 内部噪声是指电子设备和装置内部或器件本身产生的噪声，见表 2-1-1。

表 2-1-1 内部噪声种类

类别	产生原因
热噪声	由导体、半导体器件和电阻中电子热骚动所形成的电子噪声
散粒噪声	由电子管或半导体器件内电子或载流子的不规则、不连续的运动而引起的电压起伏现象
闪变噪声	电子管内各种表面漏电效应引起载流子密度的波动所产生的低频噪声
颤动噪声	由于机械振动使电子管电极电流波动而产生
交流噪声	工频整流电路滤波不佳、变压器漏磁通感应分量，导致输出中混入交流分量，产生交流噪声
感应噪声	由于器件布局、配线或接地不当所产生的静电感应、电磁感应噪声
断裂噪声	接地不良所产生“喀喇”“卡塔”噪声
尖峰噪声	切断感性负载或接通容性负载时所产生的冲击或衰减振荡噪声
振荡噪声	由于去耦不佳，部分输出功率反馈到输入引起放大电路产生振荡
反射噪声	高速电路长线传输时，由于阻抗不匹配，发生信号传输反射、引起信号波形畸变
其他	谐波、器件特性变坏等引起的噪声

- (2) 外部噪声是指从外部侵入电子设备和装置的噪声，主要是自然噪声和来自其他机

器和设备的噪声（人为噪声），见表 2-1-2。

表 2-1-2 外部噪声种类

	噪声来源	原因	特点
自然噪声	大气层噪声	当大气层中有构成电荷分离、积蓄等条件时所产生的充放电现象，如雷闪、台风、火山喷烟、黄砂、飞雪等	火花放电，频带甚宽，传送距离甚远，随季节和地区不同而变化
	太阳噪声	由于太阳黑子或磁暴发射出的电磁噪声	强度与黑子活动状况有关，严重干扰通信
	宇宙噪声	宇宙中电子转移、星体爆炸等产生	干扰无线电通信和危害宇宙航行
人为噪声	有触点电器	继电器、接触器、电磁开关的开关动作	火花放电，电弧放电，脉冲噪声
	带换向器电动机的机械	电钻、汽车发动机、吸尘器、搅拌机、直流电动机	火花放电，电弧放电
	放电管	荧光灯、高压汞灯	辉光放电
	半导体控制装置	晶闸管、逆变器、开关电源	谐波、高频噪声
	高频设备	高频加热器、电焊机、超高频理疗器械、电测仪	高频噪声
	超声波设备	探伤仪、测深仪、洗涤器	高频噪声
	电力输电线路	工频感应、静电、电磁感应、大地漏电流、绝缘老化、触点接触不良	工频或脉冲噪声，电晕放电，电弧放电
	电气化铁路	整流装置、供电接触不稳，本身引起反射	火花放电，电弧放电反射
	大功率发射装置接收装置	广播设备、雷达、发报机、电视机、调频机、调幅机	辐射噪声
	电子计算机	时钟发生器	高频脉冲
核爆炸	气体电离使地磁场剧烈异变产生 100kA 的电磁脉冲	电磁脉冲波	

(3) 常见噪声的抑制见《电气传动自动化技术手册》13.3 节。

#### 2.1.3.4 抗干扰的基本措施

抗干扰技术的基本方法是基于前述的三个原则进行的。一般来说，对于噪声源，可采用滤波、阻尼、屏蔽、阻抗匹配、对称或平衡配线，以及电路去耦等措施；对于被干扰设备，可采用提高信噪比、增加开关时间、提高功率等级，以及对电源和信号滤波等措施。根据电磁环境、装置的工作要求选用，往往是多种措施并列采用，才能得到满意的抗干扰效果。表 2-1-3 列出这种最基本的措施供设计参考。

表 2-1-3 最基本的抗干扰措施

措施	适用范围	方式
电路/电器	旋转机械	采用 RC、LC 滤波器等
	继电器等感性负载	采用 RC、二极管等
	电子电路	采用旁路电容器、压敏电阻、积分电路、光隔离器等
滤波	电源回路	用常模、共模滤波器，铁氧体磁珠，电源变压器，非线性电阻器等
	信号回路	用共模滤波器、传输滤波器等
屏蔽	壳、套、罩	用机壳、盒、箱、屏蔽网、板、室等
	封装插件	用衬板、垫圈、密封材料等
布线	配线	用分类走线、屏蔽线、绞合线、同轴电缆等
	连接器	用带屏蔽的接插件、滤波连接器等
接地	结构（件）	通过建筑物、机房、柜、箱、盒、屏、底盘等接地
	电器、导线	各种电缆的外皮接地

#### 2.1.4 电气设备对环境的其他污染

电气设备对环境还可能产生其他污染，例如：

- (1) 电气设备的空气冷却，事故排风蓄电池室的通风等可能产生对空气的污染。
- (2) 电机、变压器运行、电气设备的冷却风机运行等可能产生噪声，对环境 and 人身产生不良影响。
- (3) 电气设备的冷却水及蓄电池废酸、变压器等油浸冷却设备的油泄漏对环境也可能产生污染。

(4) 电气设备的安全、检修、维护及事故处理可能产生固体废弃物对环境产生污染。

以上电气设备可能产生的水污染、空气污染、噪声污染、事故及检修对环境的污染、腐蚀污染等内容的防治执行《中华人民共和国水污染防治法》《中华人民共和国大气污染防治法》《中华人民共和国固体废物污染防治法》《中华人民共和国噪声污染防治法》。

## 2.2 供配电系统设计的节能措施

除具体说明了出处的内容外，本节其他内容引自《节约用电手册》《电力网降损节能手册》。

### 2.2.1 节能的重要性及基本要求

#### 2.2.1.1 节能的重要性

依据：《钢铁企业电力设计手册》6.1节。

(1) 节能的意义。随着生产力的进步和工业现代化的发展，能源消耗的速度也越来越快，远远超过了人口增长的速度，而煤、石油、天然气这些主要能源是不可再生的。据世界能源组织（IEA）报道，按照现在的经济发展速度，预计世界能源储量只能再用几十年。能源问题已经到了非常严峻的地步，节约能源作为人类共同面临的重大问题，已引起世界各国的高度重视。

电能是提高现代人类生存质量不可缺少的能源之一，也是人类社会生存和发展的物质基础。节约电力资源是节能的重要内容，对于以火电为电能主力的我国来说，节约电能的同时

还意味着节约了大量的煤炭,减轻了对生态环境的损害。为了维持经济的持续高速发展,提高能效、节约能源就成了重中之重。

企业生产耗电高、用电量大,节电潜力也大,抓好各生产工序的节电,是节约能源的重要环节,要加强电能管理工作,合理组织生产和用电设备的经济运行,改革耗电高的工艺,逐步淘汰低效设备,推广节电新技术,提高电能利用率。通过节电工作,使各种产品耗电指标逐步达到国内和国际先进水平,以提高企业经济效益。

(2) 节电的前提。节电要以下列条件为前提:

1) 不影响产品的质量、性能和产量。

2) 不造成环境的恶化。要避免工作环境的恶化,例如,在减少照明器具时,必须考虑对工作人员的影响。排放的物质必须限制在环保部门允许的数值内。

3) 能够在短期内回收投资费用。为节电而花费的投资,能在2~5年内收回。另外,由于实行节电措施而使设备寿命缩短时(例如连续运行的电动机作间歇运行),必须考虑在扣除设备的更新和维护费用后还有足够的效益。

4) 不引起其他费用提高和增加额外工作。最理想的节电措施是既节电又不增加其他工作量。

### 2.2.1.2 合理用电的基本要求

摘自 GB/T 3485—1998《评价企业合理用电技术导则》。

#### 3 企业供电的合理化

3.1 企业应根据用电性质、用电容量,选择合理供电电压和供电方式。

3.2 企业变配电所的位置应接近负荷中心,减少变压级数,缩短供电半径,按经济电流密度选择导线截面。

3.3 企业根据受电端至用电设备的变压级数,其总线损率分别应不超过以下指标:

a) 一级 3.5%;

b) 二级 5.5%;

c) 三级 7%。

3.4 企业受电端电压在额定电压允许偏差范围内,企业用电设备的供电电压偏移值不应超过额定电压 $\pm 5\%$ 。

3.5 调整企业用电设备的工作状态,合理分配与平衡负荷,使企业用电均衡化,提高企业负荷率。根据不同的用电情况,企业日负荷率应不低于以下指标:

a) 连续性生产 95%;

b) 三班制生产 85%;

c) 二班制生产 60%;

d) 一班制生产 30%。

3.6 企业单相用电设备应均匀地接在三相网络上,降低三相电压不平衡度,供电网络的电压不平衡度应小于2%。

3.7 企业在提高自然功率因数的基础上,应在负荷侧合理装置集中与就地无功补偿设备,在企业最大负荷时的功率因数应不低于0.90;低负荷时,应调整无功补偿设备的容量,不得过补偿。

3.8 企业应根据用电负荷的特性和变化规律,正确选择和配置变压器容量和台数,通

过运行方式的择优，合理调整负荷，实现变压器经济运行。

3.9 企业变配电所内的变配电设备要配置相应的测量和计量仪表。监测并记录电压、电流、功率、功率因数和有功电量、无功电量。电能计量仪表准确度等级为 2.0 ~ 1.0 级。

3.10 企业用电设备的非线性负荷产生高次谐波，引起电网电压及电流的畸变，应采取抑制高次谐波的措施达到 GB/T 14549 的要求。

3.11 企业用电设备的冲击负荷及波动负荷，引起电网电压波动、闪变，应采取限制冲击负荷及波动负荷的措施达到 GB/T 12326 的要求。

3.12 对企业自备电厂和地方电厂应考核厂用电率指标。

#### 4 电能转换为机械能的合理化

4.1 电动机类型应在满足电动机安全、起动、制动、调速等方面要求的情况下，以节能的原则来选择。

4.1.1 恒负载连续运行，功率在 250kW 及以上，宜采用同步电动机。

4.1.2 功率在 200kW 及以上，宜采用高压电动机。

4.1.3 除特殊负载需要外，一般不宜选用直流电动机。

4.2 电动机功率选择，应根据负载特性和运行要求合理选择，使电动机工作在经济运行范围内。

4.3 异步电动机当采取更换或改造措施时，需经综合功率损耗与节约功率计算及起动转矩的校验后，在满足机械负载要求的条件下，使新投入的电动机工作在经济运行范围内。

4.4 异步电动机当采取调压节电措施时，需经综合功率损耗与节约功率计算及起动转矩、过载能力的校验后，在满足机械负载要求的条件下，使调压的电动机工作在经济运行范围内。

4.5 对机械负载经常变化的电气传动系统，应采用调速运行的方式加以调节。调速运行方式的选择，应根据系统的特点和条件，通过安全、技术、经济、运行维护等方面综合经济分析比较后确定。

4.6 在安全、经济合理的条件下，对异步电动机采取就地补偿无功功率，提高功率因数，降低线损，达到经济运行。

4.7 对交流电气传动系统，应在满足工艺要求、生产安全和运行可靠前提下，通过科学管理及技术改进，使电气传动系统中的设备、管网及负载相匹配，达到系统经济运行，提高系统电能利用率。

4.8 功率在 50kW 及以上的电动机，应单独配置电压表、电流表、有功电能表等计量仪表，以便监测与计量电动机运行中的有关参数。

## 2.2.2 变压器节能

### 2.2.2.1 变压器损耗及有关参数计算

(1) 变压器功率损耗的动态计算（GB/T 13462—2008《电力变压器经济运行》附录 A、B）。

#### A.1 功率损耗的动态计算

计算变压器有功、无功和综合功率损耗时应考虑负载波动损耗系数对计算结果的影响,采用动态计算式。

## A.2 双绕组变压器功率损耗的动态计算

### A.2.1 双绕组变压器平均负载系数计算

$$\beta = \frac{S}{S_N} = \frac{P_2}{S_N \cos\varphi} \quad (\text{A.1})$$

式中:

$\beta$ ——变压器的平均负载系数;

$S$ ——一定时间内变压器平均输出的视在功率,单位为千伏安(kVA);

$S_N$ ——变压器的额定容量,单位为千伏安(kVA);

$P_2$ ——一定时间内变压器平均输出的有功功率,单位为千瓦(kW);

$\cos\varphi$ ——一定时间内变压器负载侧平均功率因数。

### A.2.2 有功功率损耗计算

$$\Delta P = P_0 + K_T \beta^2 P_k \quad (\text{A.2})$$

式中:

$\Delta P$ ——有功功率损耗,单位为千瓦(kW);

$K_T$ ——负载波动损耗系数;

$P_0$ ——变压器空载功率损耗,单位为千瓦(kW);

$P_k$ ——变压器额定负载功率损耗,单位为千瓦(kW)。

### A.2.3 无功功率损耗计算

$$\Delta Q = Q_0 + K_T \beta^2 Q_k \quad (\text{A.3})$$

式中:

$\Delta Q$ ——无功功率损耗,单位为千乏(kvar);

$Q_0$ ——变压器空载励磁功率,单位为千乏(kvar);

$Q_k$ ——变压器额定负载漏磁功率,单位为千乏(kvar)。

### A.2.4 综合功率损耗计算

$$\Delta P_z = \Delta P + K_Q \Delta Q = P_{0z} + K_T \beta^2 P_{kz} \quad (\text{A.4})$$

式中:

$K_Q$ ——无功经济当量,单位为千瓦每千乏(kW/kvar);

$P_{0z}$ ——变压器综合功率的空载损耗,单位为千瓦(kW);

$P_{kz}$ ——变压器综合功率的额定负载功率损耗,单位为千瓦(kW)。

### A.2.5 变压器综合功率空载损耗计算

$$P_{0z} = P_0 + K_Q Q_0 \quad (\text{A.5})$$

### A.2.6 变压器综合功率额定负载功率损耗计算

$$P_{kz} = P_k + K_Q Q_k \quad (\text{A.6})$$

## A.4 变压器损耗率的计算

变压器有功功率损耗率、无功功率损耗率及综合功率损耗率计算式:

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P_1} \times 100\% \quad (\text{A.10})$$

$$\Delta Q\% = \frac{\Delta Q}{P_1} \times 100\% \quad (\text{A. 11})$$

$$\Delta P_z\% = \frac{\Delta P_z}{P_1} \times 100\% \quad (\text{A. 12})$$

式中：

$\Delta P\%$ ——变压器有功功率损耗率，单位为%；

$\Delta Q\%$ ——变压器无功功率损耗率，单位为%；

$\Delta P_z\%$ ——变压器综合功率损耗率，单位为%；

$P_1$ ——变压器电源侧有功功率，单位为千瓦（kW），对双绕组变压器  $P_1 = P_2 + \Delta P$ ，对三绕组变压器  $P_1 = P_2 + P_3 + \Delta P$ 。

### B.2 查表法

当变压器连接系统的电阻  $R$  值无法取得时，即不能用式（B.10）进行无功经济当量  $K_Q$  计算时，可按变压器在电网中的受电位置（变压次数）及功率因数查表 B.1 取得无功经济当量  $K_Q$  值。

表 B.1 无功经济当量

变压器受电位置	$K_Q$
发电厂母线直配	0.04
二次变压	0.07
三次变压	0.10
当功率因数已补偿到 0.9 及以上时	0.04

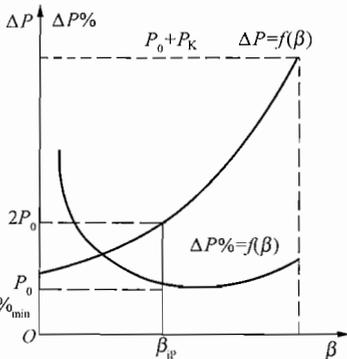
注：发电厂母线直配指系统的一次变电站及发电厂的直配用户；二次变压指系统的二次变电站；三次变压指配电变压器；当功率因数已补偿到 0.9 及以上时指变压器全年受入端功率因数。

（2）变压器的有功功率损失率和损失率的负载特性（《钢铁企业电力设计手册》

#### 6.2.3.1 节）。

变压器有功功率损失率  $\Delta P\%$  的计算式为

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P_1} = \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta S_N \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} \times 100\% \quad (2-2-1)$$



式中  $P_1$ ——变压器电源侧输入功率，kW；

$\cos\varphi_2$ ——负载功率因数；

$\beta$ ——负载系数；

$S_N$ ——变压器额定容量，kVA；

$P_0$ ——变压器的空载损耗，kW；

$P_K$ ——变压器短路损耗，kW。

变压器有功功率损失  $\Delta P$  和损失率  $\Delta P\%$  的负载特性曲线如图 2-2-1 所示。

由图 2-2-1 的变压器损失率曲线可以看出，当负载系数  $\beta$  达到某一数值时，损失率将达到最小值  $\Delta P\%_{\min}$ 。将式（2-2-1）对  $\beta$  取一阶导数，并使之为零，即

图 2-2-1 变压器功率损失和损失率的负载特性曲线

$$\frac{d(\Delta P\%)}{d\beta} = 0$$

则可求出产生最小损失率的条件为

$$P_0 = \beta^2 P_K$$

$$\text{或} \quad \beta_{\text{JP}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} \quad (2-2-2)$$

式(2-2-2)说明当铜损等于铁损时,变压器的损失率达到最低,  $\beta_{\text{JP}}$ 称为有功经济负载系数。所以,当固定变压器运行时,可以通过调负载来降低 $\Delta P\%$ 。一般变压器的  $\frac{P_0}{P_K} \approx \frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$ , 故最低损失率大体发生在负载系数  $\beta \approx 0.5 \sim 0.6$ 。

### 2.2.2.2 变压器的经济运行

(1) 经济运行方式选择 (GB/T 13462—2008《电力变压器经济运行》5.1)。

#### 5.1 并列运行的双绕组变压器经济运行方式的选择

在选择经济运行方式前,应绘制出两种组合方式综合功率损耗负载特性曲线  $\Delta P_z = f(S)$ , 经比较两条负载特性曲线确定出组合(含单台)变压器经济运行方式。

若两种组合方式综合功率损耗的负载特性曲线无交点时,应选用综合功率空载损耗值较小的变压器组合方式运行。

若两种组合方式综合功率损耗的负载特性曲线有交点时(如图1),应按A.6计算出临界综合负载视在功率  $S_{\text{LZ}}$ , 并将变压器总平均视在功率  $S$  与临界综合负载视在功率  $S_{\text{LZ}}$  对比。

当负载视在功率  $S$  小于  $S_{\text{LZ}}$  时,应选用综合功率空载损耗值较小的变压器组合方式运行;

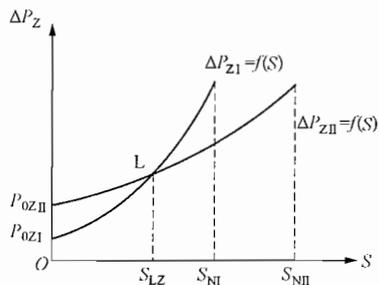
当负载视在功率  $S$  大于  $S_{\text{LZ}}$  时,应选用综合功率额定负载损耗值较小的变压器组合方式运行。

#### 5.2 分列运行的双绕组变压器经济运行方式的选择

对二次侧有联络线的分列运行的双绕组变压器,在总供电负载不变情况下,应对共用一台或两台分列运行方式进行比较选择。

在采用一台变压器满足总供电负载的情况下,应对两台分列运行变压器的空载损耗和额定负载损耗进行比较,选择总损耗最低的为共用变压器。再对选定共用变压器与两台变压器分列运行方式进行比较,选择出综合功率损耗最小的运行方式。

共用与分列运行变压器的临界综合负载视在功率按式(A.18)计算,降低的综



注:  $\Delta P_{zI} = f(S)$  与  $\Delta P_{zII} = f(S)$  分别为变压器两种组合方式综合功率损耗  $\Delta P_z$  与负载视在功率  $S$  的函数特性曲线, 两条曲线交点  $L$  的横坐标  $S_{\text{LZ}}$  即为两种组合运行方式的临界综合负载视在功率。

图1 变压器间综合功率损耗特性曲线

合功率损耗应按式 (A.19) 计算。

### 5.3 并列运行的三绕组变压器经济运行方式的选择

并列运行的三绕组变压器可参照 5.1 选择经济运行方式，临界综合负载视在功率按式 (A.20) 进行计算。并列运行的三绕组变压器经济运行方式降低的综合功率损耗应按式 (A.21) 计算。

(2) 经济负载系数的计算与经济运行区的划分 (GB/T 13462—2008《电力变压器经济运行》6)。

### 6.1 双绕组变压器经济负载系数计算与经济运行区划分

#### 6.1.1 经济负载系数计算

双绕组变压器在运行中，其综合功率损耗率随负载系数呈非线性变化，在其非线性曲线中，最低点为综合功率经济负载系数，其计算式：

$$\beta_{JZ} = \sqrt{\frac{P_{0Z}}{K_T P_{KZ}}} \quad (1)$$

式中：

$\beta_{JZ}$ ——变压器综合功率经济负载系数；

$P_{0Z}$ ——变压器综合功率空载损耗，单位为千瓦 (kW)；

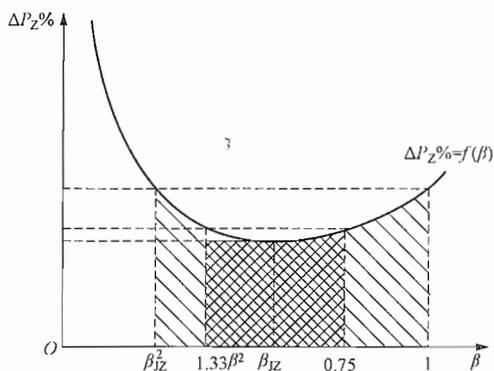
$P_{KZ}$ ——变压器综合功率额定负载功率损耗，单位为千瓦 (kW)；

$K_T$ ——负载波动损耗系数。

#### 6.1.2 经济运行区划分

变压器在额定负载运行为经济运行区上限，与上限额定综合功率损耗率相等的另一点为经济运行区下限。经济运行区上限负载系数为 1，经济运行区下限负载系数为  $\beta_{JZ}^2$ ，见图 2。

#### 6.1.3 最佳经济运行区划分



注： $\Delta P_z\% = f(\beta)$  为变压器综合功率损耗率与平均负载系数  $\beta$  的函数特性曲线。变压器综合功率运行区间的范围划分为，经济运行区为  $\beta_{JZ}^2 \leq \beta \leq 1$ ，最佳经济运行区为  $1.33\beta_{JZ}^2 \leq \beta \leq 0.75$ ，非经济运行区为  $0 \leq \beta \leq \beta_{JZ}^2$ 。

图 2 双绕组变压器综合功率运行区间划分

变压器在 75% 负载运行为最佳经济运行区上限，与上限综合功率损耗率相等的另一点为最佳经济运行区下限。最佳经济运行区上限负载系数为 0.75，最佳经济运行区下限负载系数为  $1.33\beta_{JZ}^2$ ，见图 2。

### 6.2 三绕组变压器经济负载系数、最佳经济负载系数计算与经济运行区划分

#### 6.2.1 经济负载系数

当三绕组变压器二次侧与三次侧绕组的负载是任意分配时，对应变压器综合功率损耗率最低点即为综合功率经济负载系数，其电源侧综合功率经济负载系数应按式 (A.22) 计算。

### 6.2.2 最佳经济负载系数

当三绕组变压器二次侧与三次侧绕组的负载是经济分配时,对应变压器综合功率损耗率最低点即为综合功率最佳经济负载系数。二次侧与三次侧绕组的负载经济分配系数的计算式见式(A.23)、式(A.24)。三绕组变压器电源侧综合功率最佳经济负载系数应按的计算式见式(A.25)。

### 6.2.3 经济运行区划分

变压器在额定负载运行为经济运行区上限,与上限额定综合功率损耗率相等的另一点为经济运行区下限。电源侧经济运行区上限负载系数为1;下限负载系数为 $\beta_{Z1}^2$ 。

### 6.2.4 最佳经济运行区划分

三绕组变压器综合功率损耗率小于1.2%的运行区为最佳经济运行区。电源侧最佳经济运行区上限负载系数为 $1.865\beta_{Z1}$ ,电源侧最佳运行区下限负载系数为 $0.537\beta_{Z1}$ 。

(3) 变压器经济运行节电效果计算 (GB/T 13462—2008《电力变压器经济运行》附录A.5)。

#### A.5 变压器经济运行节电效果的计算

变压器经济运行降低的有功功率、无功功率及综合功率计算式

$$\Delta\Delta P = \Delta P_y - \Delta P_j \quad (\text{A.13})$$

$$\Delta\Delta Q = \Delta Q_y - \Delta Q_j \quad (\text{A.14})$$

$$\Delta\Delta P_z = \Delta P_{zy} - \Delta P_{zj} \quad (\text{A.15})$$

式中:

$\Delta\Delta P$ ——变压器经济运行降低的有功功率,单位为千瓦(kW);

$\Delta\Delta Q$ ——变压器经济运行降低的无功功率,单位为千乏(kvar);

$\Delta\Delta P_z$ ——变电器经济运行降低的综合功率,单位为千瓦(kW);

y——原运行方式;

j——经济运行方式。

#### 2.2.2.3 降低变压器损耗的措施

(1) 变压器产品的损耗比较。按变压器技术参数水平进行分析,可把20世纪60年代以来的各类型变压器划分为四代产品。第一代变压器称为热轧硅钢片变压器(简称“64”标准变压器);第二代变压器称为冷轧硅钢片变压器(简称“73”标准变压器);第三代变压器产品称为低损耗节能型变压器,即S7、SL7和S9型(简称“86”标准变压器);第四代是非晶合金铁芯变压器。

不同标准配电变压器负载损耗如图2-2-2所示。图中为三种标准的100kVA配电变压器在不同负载时的负载损耗曲线。

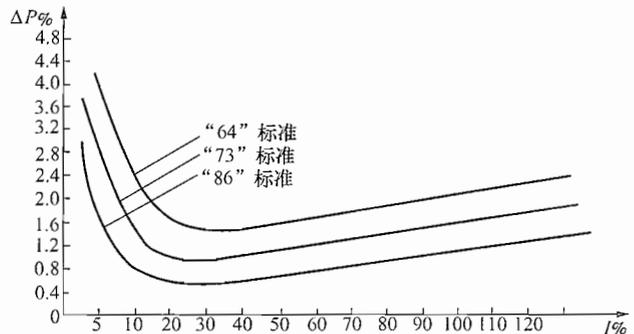


图 2-2-2 损耗曲线图

非晶合金铁芯变压器是利用铁、硼、硅和碳四种元素合成的非晶合金作铁芯材料而制成的变压器，铁磁损失极小，对配电系统的节能降耗具有重大意义。

非晶合金铁芯配电变压器（AMDT）的损耗及节能效果见表2-2-1。

表2-2-1 非晶合金铁芯配电变压器（AMDT）节能效果和投资差额回收

配电变压器类型	AMDT	S9	配电变压器类型	AMDT	S9
变压器容量（kVA）	400	400	年节约电费（元） （按每千瓦时电费0.6元计）	3363.84	
空载损耗（W）	170	810			
负载损耗（W）	4600	4600	每台变压器售价（元）	69030	53100
年空载损耗电量（kWh）	1489.20	7095.60	变压器差价（元）	15930	
年节约损耗电量（kWh）	5606.40		投资差额回收年限（年）	4.736*	

注 表中价格仅供参考。

\* 通常为4~6年。

## （2）高性能变压器的更换。

1) 高耗能变压器更换的经济评价（DL/T 985—2012《配电变压器能效技术经济评价导则》4.5）。

### 4.5 已运行但未满经济使用年限配电变压器更新时的经济评价

#### 4.5.1 更新决策的原则

在对已运行但未满经济使用年限的配电变压器进行更新决策时，应按已运行配电变压器可继续使用年限，计算新配电变压器与已运行配电变压器的综合能效费用（TOC值）。如已运行配电变压器的综合能效费用小，则不应更新；反之，应予更新。具体计算过程可以参考附录C中的案例3。

#### 4.5.2 更新配电变压器的综合能效费用的计算

计算更新配电变压器的综合能效费用时，变压器经济使用年限取已运行配电变压器可继续使用的年限 $n_r$ 。

#### 4.5.3 已运行配电变压器初始费用的计算

已运行配电变压器的初始费用，取已运行配电变压器当前所剩价值，按下列平均年限折旧法计算：

$$CI = V_0 \frac{n_r}{n} \quad (14)$$

式中：

$V_0$ ——已运行配电变压器的购置费用，元。

#### 4.5.4 拟更新的新配电变压器初始费用的计算

拟更新的新配电变压器初始费用，取新配电变压器在 $n_r$ 年内所消耗的价值，按下列平均年限折旧法计算：

$$CI = V_N \frac{n_r}{n} \quad (15)$$

式中：

$V_N$ ——新配电变压器的购置费用，元。

2) 相关计算 (DL/T 985—2012《配电变压器能效技术经济评价导则》4.2)。

#### 4.2 基本计算

##### 4.2.1 供电企业的配电变压器综合能效费用的计算

供电企业管辖的公用配电变压器经济使用期综合能效费用包括配电变压器的初始费用、空载损耗的等效初始费用、负载损耗的等效初始费用和由配电变压器损耗增加的上级电网综合投资。其综合能效费用按下式计算:

$$TOC = CI + A(P_0 + K_Q I_0 S_e) + B(P_k + K_Q U_k S_e) + C_N \quad (1)$$

式中:

$CI$ ——设备初始费用, 元;

$A$ ——变压器空载损耗等效初始费用系数, 元/kW;

$B$ ——变压器负载损耗等效初始费用系数, 元/kW

$P_0$ ——变压器额定空载损耗, kW;

$P_k$ ——变压器额定负载损耗, kW;

$K_Q$ ——无功经济当量, 按变压器在电网中的位置取值, 一般 35kV 配电变压器的取值范围为  $0.02 \leq K_Q \leq 0.05$ , 10kV 配电变压器的取值范围为  $0.05 \leq K_Q \leq 0.1$ ;

$I_0$ ——变压器额定空载电流, %;

$U_k$ ——变压器额定短路阻抗, %;

$S_e$ ——变压器额定容量, kVA;

$C_N$ ——因配电变压器损耗增加的上级电网建设综合投资, 元。

供电企业配电变压器综合能效费用的计算可参考附录 C 中的案例 1。

##### 4.2.2 非供电企业的配电变压器综合能效费用的计算

非供电企业的配电变压器经济使用期综合能效费用包括配电变压器的初始费用、空载损耗的等效初始费用、负载损耗的等效初始费用, 并与非供电企业基本电费的记取方式有关。

当按照最大需量计算基本电费时, 其综合能效费用按下式计算:

$$TOC = CI + AP_0 + BP_k \quad (2)$$

当按照变压器容量计算基本电费时, 其综合能效费用按下式计算:

$$TOC = CI + AP_0 + BP_k + 12k_{pv} E_c S_e \quad (3)$$

式中:

$k_{pv}$ ——贴现率为  $i$  的连续  $n$  年费用现值系数;

$E_c$ ——企业支付的单位容量电费, 即两部制电价中按变压器容量收取的月基本电费, 元/kVA;

$S_e$ ——变压器额定容量, kVA。

非供电企业的配电变压器综合能效费用的计算可参考附录 C 中的案例 2。

3) 其他计算。其他与变压器经济评价有关的计算方法参见 DL/T 985—2012《配电变压器能效技术经济评价导则》4.3、4.4、4.5。

#### (3) 高耗能变压器的改造:

1) 变压器改造的技术要求。根据国家对配电变压器能效限定值及能效等级的要求, 对高能耗变压器进行节能技术改造。

## 2) 变压器的改造方法:

a. 降容改造。变压器的降容改造是企业目前采用的一种对高能耗变压器进行节能技术改造的主要方法。其改造原理主要是通过增加线圈匝数,减少铁芯磁通密度,减少变压器的单位损耗来实现。

b. 保容改造。无力更新变压器的企业,对高能耗变压器进行保容改造则是一个既可节约资金,又能达到节能降耗的好办法,变压器保容改造一般采取四种方式:①同时更换铁芯、绕组,减小铁损、铜损;②铝线换铜线,增加绕组匝数,降低匝电势,降低磁通密度;③更换铁芯,将热轧硅钢片改为冷轧硅钢片;④更换芯体制,按低损耗变压器标准技术要求重新设计铁芯及绕组。

### 2.2.3 供配电系统节电

#### 2.2.3.1 供配电系统节能要点

从发电到供电,一直到用电的过程——电力系统中的各种电气设备(包括发电机、变压器、电力线路、电动机等)全部的电能损耗占发电量的27%~32%,参见图2-2-3。

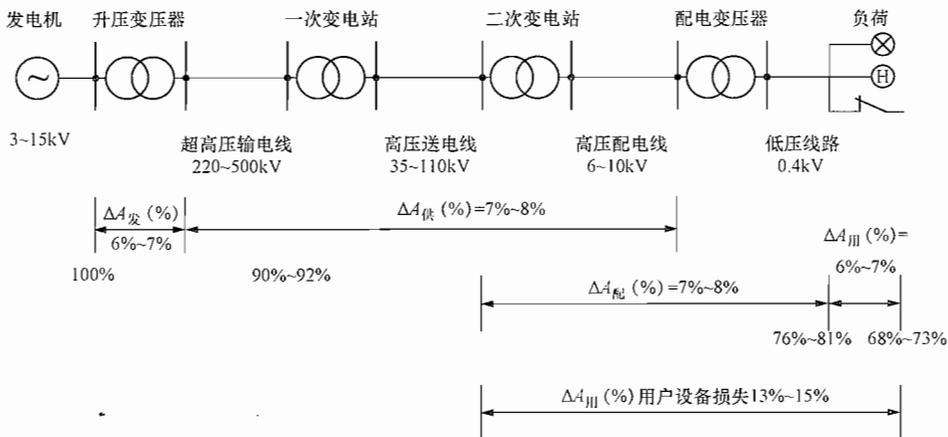


图 2-2-3 电力系统电能损失率的构成图

电力系统是由发电、供电、用电三部分组成,所以电力系统的电能损失也应包括发、供、用电设备的全部损失,即由发电损失、供电损失、用电损失之和为电力系统总损失。

由电力系统电能损失率构成图中可以看出发电设备总电能损失  $\Delta A_{发}$  主要包括发电机、升压变压器、厂用电变压器及其他电气设备的电能损失和厂用电消耗,这一部分电能损失  $\Delta A_{发}(\%)$  占系统发电量的 6%~7%; 供电设备总电能损失  $\Delta A_{供}$  主要包括超高压输电线路、一次变电站,高压送电线路、二次变电站及高压配电线路等的电能损失,这部分电能损失  $\Delta A_{供}(\%)$  占系统发电量的 7%~8%; 用电设备总电能损失  $\Delta A_{用}$  主要包括用户变电站、配电线路、配电变压器及用电设备等的电能损失,这部分损失  $\Delta A_{用}(\%)$  占系统发电量 13%~15%。

供配电系统节能的主要方向是减少供电系统电能的损失。供配电系统的节能要点有:

- (1) 降低配电系统线损率。
- (2) 配电网负荷调整节电降损。
- (3) 供配电系统合理配置。
- (4) 提高配电系统的功率因数。

### 2.2.3.2 供配电系统的线损

(1) 线损电量的定义。发电机发出的电能输送到用户，必须经过输、变、配电设备，由于这些设备存在阻抗，因此电能通过时，就会产生电能损耗，以热能的形式散发在周围介质中，这个电能损耗称为线损电量。

线损电量通常分为负载损耗（可变损耗）和空载损耗（固定损耗），负载损耗是指输、变、配电设备中的铜损，它与流过电流平方成正比；空载损耗是指变、配电设备中的铁损、电晕损耗、绝缘体中的介质损耗以及仪表和保护装置中的损耗，这部分损耗与运行电压高低有关。

(2) 线损率的定义和指标。

电力网线损率是线损电量占供电量的百分率，其计算公式是

$$\text{线损率} = \frac{\text{线损电量}}{\text{供电量}} \times 100\%$$

在 GB/T 3485—1998《评价企业合理用电技术导则》中规定，根据受电端至用电设备的变压级数，其总线损率分别应不超过以下指标：一次变压不得超过 3.5%；二次变压不得超过 5.5%；三次变压不得超过 7%。

(3) 线损的计算和降损的分析。电能从发电厂输送到用户的过程中产生的电能损耗，可以根据输、变、配电设备的参数、负荷特性用理论计算方式求得，通常称理论线损。电能损耗通过理论计算能够查明电能损耗的组成和分布情况，分析找出存在的问题，以采取措施把电能损耗降低到一个比较合理的范围以内。

(4) 电能损耗的计算。供配电系统中电能损耗的计算方法见本书 3.1.10 节。

### 2.2.3.3 配电网负荷调整节电降损

(1) 提高配电网负荷率节电降损。

1) 提高负荷率的节电原理。配电网的负荷率是指平均负载功率与最大负载功率之比。负荷率低标志负荷曲线波动大，负荷率越高表明负荷波动越接近平均值，即负荷曲线趋于平直。提高负荷率的实质就是调整变压器的负荷曲线，使之接近于平稳。资料表明，负荷率提高 10%，线损可降 2%。

提高负荷率可以降损节电，可从图 2-2-4 中有功功率负荷特性曲线  $\Delta P = f(S)$

的定性分析中得出  $\Delta P_c < \frac{1}{2}(\Delta P_a + \Delta P_b)$ ,

$S_c < \sqrt{\frac{1}{2}(S_a^2 + S_b^2)}$ 。由此可知在保持变压器某一段时间内的供电量不变时，通过调整年、月、日负荷曲线使均方根值更趋于平均值，就可以减少变压器的功率损耗。

2) 企业日负荷平均指标。调整企业用电设备的工作状态，合理分配与平衡负荷，使企业用电均衡化，提高企业负荷率。根据不同的用电情况，企业日负荷率应不低于以下指标：①连续性生产 95%；②三班制生产 85%；③二班制生产

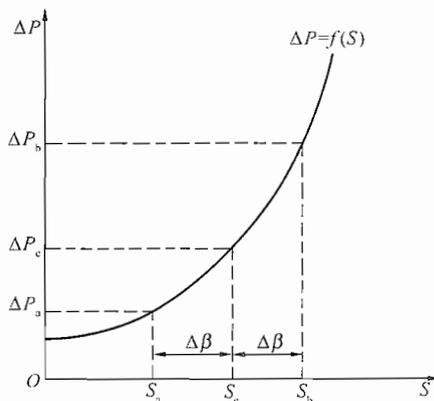


图 2-2-4 提高负荷率节电原理图

60%；④一班制生产30%。

(2) 削峰填谷的节电降损。所谓削峰填谷，就是将负荷曲线高峰负荷时段的部分负荷调整到低谷负荷时段，即要求用户按负荷变化规律，让部分用电设备躲过系统负荷高峰，而在系统低谷时段运行。

削峰填谷的主要作用是合理利用国家电力资源，充分利用发、供电设备能力，提高发、供、用电部门经济效益；它也是缓和电力供需矛盾、实现均衡用电的重要手段之一。同时还能够减少电力线路、电力变压器等供电设备的有功损耗和无功消耗，具有节电的作用。

削峰填谷不是不用电，也不是少用电，而是改变用电时间，所以削峰填谷也是调整负荷曲线、提高负荷率的一种特例。

削峰填谷节电的原理如图2-2-5所示。

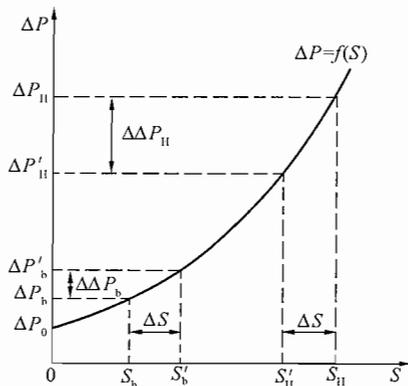


图2-2-5 削峰填谷节电原理图

从图2-2-5中明显反映出，在横坐标轴上调整负荷 $\Delta S$ （即高峰时段减少 $\Delta S$ ，低谷时段增加 $\Delta S$ ）在纵轴上高峰时段减少的损耗 $\Delta\Delta P_h$ 大于低谷时段增加的损耗 $\Delta\Delta P_b$ 。由此可见削峰填谷可减少变压器的有功功率损耗，实现节电。

(3) 平衡三相负荷。低压电网如果在运行中三相负荷不平衡，会在线路、变压器上增加损耗，三相不平衡负荷电流越大，损耗增加越大。

GB/T 3485—1998《评价企业合理用电技术导则》中规定：企业单相用电设备应均匀地接在三相网络上，降低三相电压不平衡度，供电网络的电压不平衡度应小于2%。

#### 2.2.3.4 供配电系统的合理配置

(1) 合理选择供电电压。根据供电距离和负荷容量，合理地设计供电系统和选择电压，以减少电能损耗。

避免重复降压、简化电压等级是有力的降损措施，目前城市供电（企业配电）一般要求四级降压，即220/110/10/0.38kV或220/66/10/0.38kV或220/35/10/0.38kV。对重复降压的、非标准电压的或者负荷过重的要进行升压改造，其降损效果是，当输送负荷不变时升压后降低功率损耗的百分率是

$$\Delta\Delta P\% = \left(1 - \frac{U_{N1}^2}{U_{N2}^2}\right) \times 100$$

降损节电量是

$$\Delta(\Delta A) = \Delta\Delta A \left(1 - \frac{U_{N1}^2}{U_{N2}^2}\right)$$

式中  $U_{N1}$ ——电网升压前的额定电压，kV；

$U_{N2}$ ——电网升压后的额定电压，kV；

$\Delta\Delta A$ ——电网升压前的损失电量，kWh。

电网升压后功率损耗降低百分率见表 2-2-2。

表 2-2-2 电网升压后功率损耗降低百分率

升压前额定电压 $U_{N1}$ (kV)	升压后额定电压 $U_{N2}$ (kV)	升压后功率损耗降低 百分率 $\Delta\Delta P$ (%)	升压前额定电压 $U_{N1}$ (kV)	升压后额定电压 $U_{N2}$ (kV)	升压后功率损耗降低 百分率 $\Delta\Delta P$ (%)
220	330	55.6	22 10	35	60.5 91.8
110	220	75	6 3	10	64 91
66 35	110	64 89.9	0.38	10	99.8

(2) 合理选择线路导线形式和截面。

1) 合理选择线路导线截面。线路架设时, 应按经济电流密度来选择导线截面, 经济电流密度是根据节省投资, 年运行费用及有色金属消耗等因素综合考虑后制定的, 进行能耗分析估算时, 各种导线的经济电流密度和经济电流值可参见表 2-2-3 和表 2-2-4。详细计算见本书 8.1.3.3 节。

表 2-2-3 各种导线的经济电流密度  $A/mm^2$

导线材料	最大负荷利用小时数 (h)			导线材料	最大负荷利用小时数 (h)		
	3000 以下	3000 ~ 5000	5000 以上		3000 以下	3000 ~ 5000	5000 以上
铜	3.0	2.25	1.75	铝	1.65	1.15	0.9

表 2-2-4 各种导线的经济电流 A

导线型号	最大负荷利用小时数 (h)			导线型号	最大负荷利用小时数 (h)		
	3000 以下	3000 ~ 5000	5000 以上		3000 以下	3000 ~ 5000	5000 以上
M-25	75	56	44	LGJ-70	116	81	63
M-35	105	79	61	LGJ-95	157	109	86
M-50	150	113	108	LGJ-120	198	138	108
M-70	210	158	123	LGJ-150	248	173	135
M-95	285	214	166	LGJ-185	305	213	167
LGJ-35	58	40	32	LGJ-240	396	276	216
LGJ-50	83	58	45				

2) 加大导线截面。在输送负荷不变的条件下, 换粗导线截面, 可以减少线路电阻从而降损, 换线后降低功率损耗的百分率按下式计算

$$\Delta P(\%) = \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) \times 100\%$$

式中  $R_1$ ——换线前的导线电阻,  $\Omega$ ;

$R_2$ ——换线后的导线电阻,  $\Omega$ 。

换粗导线截面降低功率损耗百分率  $[\Delta P(\%)]$  见表 2-2-5。

表 2-2-5 换粗导线截面降低功率损耗百分率表

导线换粗前		导线换粗后		降低损耗百分率 $\Delta P(\%)$
型号	电阻 ( $\Omega/\text{km}$ )	型号	电阻 ( $\Omega/\text{km}$ )	
LGJ-25	1.25	LGJ-35	0.85	32
LGJ-35	0.85	LGJ-50	0.65	23.5
LGJ-50	0.65	LGJ-70	0.46	29.2
LGJ-70	0.46	LGJ-95	0.33	28.3
LGJ-95	0.33	LGJ-120	0.27	18.2
LGJ-120	0.27	LGJ-150	0.21	22.2
LGJ-150	0.21	LGJ-185	0.17	19.0
LGJ-185	0.17	LGJ-240	0.132	22.4
LGJ-240	0.132	LGJ-300	0.107	18.8
LGJ-300	0.107	LGJ-400	0.08	25.2

加大导线截面会增加投资，采用此节能方案时应对经济效益进行分析后决定是否实施。

3) 采用相分裂导线，减小电抗，增大载流量，减少线路损失。

4) 推广耐热铝合金线。在高温（最高  $150^{\circ}\text{C}$ ）下可传输电力的铝合金线，载流量为普通导线载流量的 1.6 倍。

(3) 合理选择变配电所位置。变配电所位置应接近负荷中心，缩短供电半径。

(4) 正确选择配置变压器容量和台数。根据用电负荷的特性和变化规律，正确选择和配置变压器容量和台数，通过运行方式的择优，合理调整负荷，实现变压器经济运行。

### 2.2.3.5 提高供配电系统功率因数

依据：《钢铁企业电力设计手册》6.3 节。

(1) 提高功率因数的节能作用。

1) 提高功率因数可减少线路损耗。如果输电线路导线每相电阻为  $R(\Omega)$ ，则三相输电线路的功率损耗为

$$\Delta P = 3I^2R \times 10^{-3} = \frac{P^2R}{U^2 \cos^2\varphi} \times 10^{-3} \quad (2-2-3)$$

式中  $\Delta P$ ——三相输电线路的功率损耗，kW；

$P$ ——电力线路输送的有功功率，kW；

$U$ ——线电压，V；

$I$ ——线电流，A；

$\cos\varphi$ ——电力线路输送负荷的功率因数。

由式 (2-2-3) 看出，在全厂有功功率一定的情况下， $\cos\varphi$  越低，功率损耗  $\Delta P$  也将越大。设法将  $\cos\varphi$  提高，就可使  $\Delta P$  减小。

当线路的电压  $U$  和有功功率  $P$  不变的情况下，改善前的功率因数为  $\cos\varphi_1$ ，改善后的功率因数为  $\cos\varphi_2$ ，则三相回路实际减少的功率损耗可按下式计算

$$\Delta P = \left(\frac{P}{U}\right)^2 R \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_2}\right) \times 10^{-3}$$

2) 减少变压器的铜损。变压器的损耗主要有铁损和铜损。如果提高变压器二次侧的功率因数, 可使总的负荷电流减少, 从而减少铜损。

提高功率因数后, 变压器节约的有功功率 $\Delta P$ 和节约的无功功率 $\Delta Q$ 的计算公式为

$$\Delta P = \left(\frac{P_2}{S_N}\right)^2 \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_2}\right) P_K$$

$$\Delta Q = \left(\frac{P_2}{S_N}\right)^2 \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - \frac{1}{\cos^2 \varphi_2}\right) Q_K$$

式中  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$ ——变压器的有功功率节约值和无功功率节约值, kW、kvar;

$P_2$ ——变压器负载侧输出功率, kW;

$S_N$ ——变压器额定容量, kVA;

$\cos \varphi_1$ ——变压器原负载功率因数;

$\cos \varphi_2$ ——提高后的变压器负载功率因数;

$P_K$ ——变压器的短路损失, kW;

$Q_K$ ——变压器额定负载时的无功功率, kvar。

3) 减少线路及变压器的电压损失。由于提高了功率因数, 减少了无功电流, 因而减少了线路及变压器的电流, 从而减小了电压降。

4) 提高功率因数可以增加发配电设备的供电能力。由于提高了功率因数, 供给同一负载功率 $P_2$ 所需的视在功率及负荷电流均减少, 所以, 对现有设备而言, 变压器容量和电缆截面就有了富余, 这可用来增加负荷, 即使在增加设备时, 现有配电设备的容量也可能够用。另外, 在基建时由于提高了负荷的功率因数, 可减少电源线路的截面及变压器的容量, 节约设备投资。

(2) 提高用电设备的自然功率因数。企业无功功率消耗, 一般感应电动机占 70%、变压器占 20%、线路占 10%。由此可见, 为了降低无功功率消耗, 提高自然功率因数, 通常采取下列措施:

1) 合理选择电动机容量, 使其接近满载运行。

2) 对于平均负荷小于 40% 的感应电动机, 换以小容量电动机, 或将定子三角形接线改为星形接线 (仅适用于轻载或空载起动的电动机)。

3) 正确选择变压器容量, 提高变压器负荷率 (一般 75% ~ 80% 较合适)。变压器负荷率越低, 功率因数越低。对平均负荷率小于 30% 的变压器, 予以更换; 或者通过变压器二次侧联络线调整负荷, 断开部分轻载变压器。

4) 提高感应电动机的检修质量, 防止间隙加大。

5) 对于负荷率不大于 70% 及尖峰负荷不大于 90% 的绕线型感应电动机, 必要时使其同步化。

(3) 提高企业自然功率因数。其主要措施有:

1) 合理安排和调整工艺流程, 改善电气设备的运行状态, 使电能得到最充分的利用。

2) 合理使用异步电动机及变压器, 变压器要做到经济运行。

3) 正确设计和选用交流装置, 对直流设备的供电和励磁, 应采用硅整流或晶闸管整流

装置，取代变流机组、汞弧整流器等直流电源设备。

4) 限制电动机和电焊机的空载运转。设计中空载率大于 50% 的电动机和电焊机，可安装空载断电装置。对大、中型连续运行的胶带运输系统，可采用空载自停控制装置。

5) 条件允许时，用同等容量的同步电动机代替异步电动机，在经济合算的前提下，也可采用异步电动机同步化运行。

(4) 功率因数的人工补偿。当自然功率因数达不到要求时，可采取人工补偿的办法，以满足规定的功率因数要求。

对车间内供电系统，根据负荷性质，应分别采取如下措施进行无功补偿：

1) 企业在提高自然功率因数的基础上，应在负荷侧合理装置集中与就地无功补偿设备，在企业最大负荷时的功率因数应不低于 0.90；低负荷时，应调整无功补偿设备的容量，不得过补偿。

2) 在车间负荷变动大的变电站母线上，应采用集中功率因数自动调节补偿和 SVC 无功自动调节补偿的节电措施。

3) 在车间负荷变动不大的变电站母线上，也可采用手动控制进行无功补偿。

4) 并联电容器补偿装置具有投资省、有功功率损耗小、运行维护方便、故障范围小等优点，在供配电系统中得到广泛应用。

(5) 利用同步电动机补偿无功（《工业与民用配电设计手册（第三版）》第一章第十三节三）。

当工艺条件适当，证明工艺设备采用同步电动机合理时，可利用同步电动机过励磁超前运行，以补偿系统的感性无功功率；当经技术经济比较，确认采用同步电动机作为无功补偿装置合理时，才可采用同步电动机作为无功补偿装置。

同步电动机输出的无功功率为

$$Q_M = S_r q$$

式中  $S_r$ ——同步电动机的额定容量，kVA；

$q$ ——同步电动机的补偿能力，kvar/kVA，与电动机负荷率  $\beta$ 、励磁电流  $I_1$  与额定励磁电流  $I_r$  的比值及额定功率因数  $\cos\varphi_r$  有关，其值可从图 2-2-6 查得。

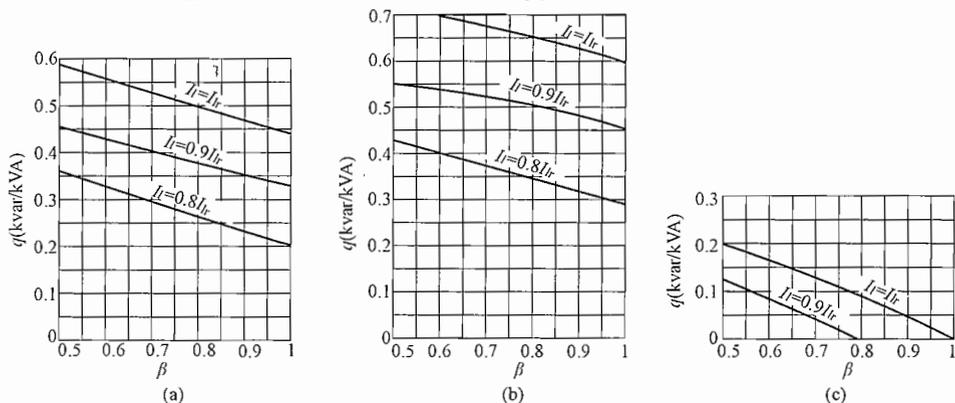


图 2-2-6 同步电动机的补偿能力  $q$  与负荷率  $\beta$ 、励磁电流  $I_1$  与额定励磁电流  $I_r$  的比值及额定功率因数  $\cos\varphi_r$  的关系

(a) 当  $\cos\varphi_r = 0.9$  超前；(b) 当  $\cos\varphi_r = 0.8$  超前；(c) 当  $\cos\varphi_r = 1.0$

当同步电动机的负荷率在 0.4~1 范围内变化时, 同步电动机输出的无功功率  $Q_M$  可按如下近似公式求得

$$Q_M = S_r [\sin\varphi_r + r(1 - \beta)] \quad (2-2-4)$$

式中  $S_r$ ——同步电动机的额定容量, kVA;

$\varphi_r$ ——同步电动机额定功率因数角;

$\beta$ ——同步电动机负荷率;

$r$ ——同步电动机带负荷时的无功功率增加系数, 其值见表 2-2-6。

当电动机的负荷率  $\beta$  低于 0.4 时, 其输出的无功功率等于按式 (2-2-4) 求出的无功功率加上 (0.01~0.04)  $S_r$ 。

表 2-2-6

r 值表

$\cos\varphi_r$	$\sin\varphi_r$	$r$
0.8	0.6	0.2
0.9	0.44	0.36
1.0	0	0.4

## 2.2.4 电动机节能

### 2.2.4.1 电动机的效率

依据:《钢铁企业电力设计手册》6.4.1.1 节。

(1) 三相异步电动机。

电动机的效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \times 100\%$$

式中  $P_2$ ——电动机的输出功率, kW;

$P_1$ ——电动机的输入功率, kW;

$\Delta P$ ——电动机的功率损耗, kW。

电动机的损耗分负载损耗 (主要是铜损) 和空载损耗 (主要是铁损), 如图 2-2-7 所示。

当输出功率  $P_2$  减少后, 虽然总的损耗也在减少, 但减少的速度较慢。因此, 电动机的效率随负荷的减少而降低。特别是负荷系数低于 50% 以后, 电动机效率下降更快。当空载运行时,  $P_2 = 0$ , 而总的损耗等于恒定损耗。因此, 空载时电动机的效率为零。电动机效率  $\eta$  和功率因数  $\cos\varphi$  与负荷系数  $\beta$  的关系如图 2-2-8 所示。

(2) 直流电动机。直流电动机的效率通常比交流电动机差, 主要是由于直流电动机的励磁损耗和铜损大的缘故。与同一容量的三相异步电动机相比, 效率要低 2%~3%, 这是近来交流调速装置被引起重视的原因之一。而且, 直流电动机需要励磁, 为了连续使用, 必须进行强迫冷却, 在直流电动机较多时, 风机的耗电不可忽视。因此, 在有条件且经济合理时宜用交流调速系统代替直流调速系统。

### 2.2.4.2 电动机的功率因数

依据:《钢铁企业电力设计手册》6.4.1.2 节。

电动机功率因数  $\cos\varphi$  的降低, 不仅会增加电动机输电线路及变压器的电能损耗, 而且会增加发电、输配电系统中的附加损耗, 从而增加这方面的投资。因此, 在电动机的节能工

2

作中，必须了解功率因数  $\cos\varphi$  的变化规律。

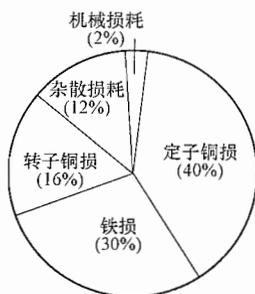


图 2-2-7 小型异步电动机各种损耗

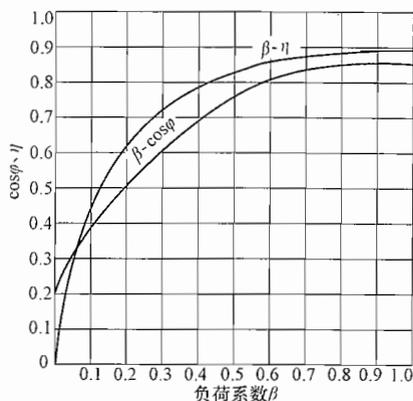


图 2-2-8 电动机的效率  $\eta$  和功率因数  $\cos\varphi$  与负荷系数  $\beta$  的关系

(1) 异步电动机的功率因数。异步电动机的等值电路如图 2-2-9 所示。对电源来说，相当于一个电阻和一个电感串联负荷，因而功率因数  $\cos\varphi$  总是小于 1 的。为了建立磁场，异步电动机从电网吸取很大的无功电流  $I_0$ ，它在正常工作范围内几乎不变，在空载时定子电流  $I_1 = I_0$ ，此时功率因数很低，一般  $\cos\varphi = 0.2$  左右。当负载增加时，定子电流中的有功分量

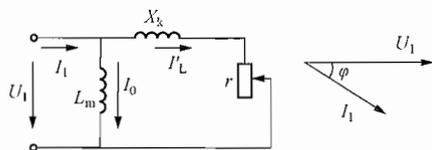


图 2-2-9 异步电动机的等值电路

增加，使  $\cos\varphi$  很快上升，当接近额定负载时， $\cos\varphi$  达最大值。但负荷增大到一定程度后，由于转差率的增加，转子漏抗增大，转子电路的无功电流增加，相应定子的无功电流也增加。因此，功率因数反而下降。异步电动机的  $\cos\varphi$  与负荷系数的关系如图 2-2-8 所示。

(2) 同步电动机的功率因数。同步电动机的功率因数  $\cos\varphi$  与异步电动机的不同。它可以为滞后，也可以为超前。当励磁电流改变时，对同步电动机的定子电流和功率因数有影响，但并不改变电动机的输出功率和转速。三相同步电动机的输出功率  $P_2$  可用下式表示

$$P_2 = \sqrt{3}UI\cos\varphi\eta_M$$

当电压  $U$  不变时，在同一负荷下，电动机的效率  $\eta_M$  也是不变的。这时定子电流  $I$  与  $\cos\varphi$  的乘积应该在励磁电流变化后仍然保持不变。在同步电动机中，控制励磁电流是非常简单的。在任何负荷下，只要把功率因数  $\cos\varphi$  调整到 1，就可以使网络电流最小，于是电动机吸收网络中的无功功率（指感性无功）。与此相反，如果增大励磁电流，输入电流也增加，则同步电动机给网络输送无功功率。图 2-2-10 为各种负荷系数的同步电动机 V 形曲线，表 2-2-7 表示同步电动机的功率因数与有功功率和无功功率的关系。

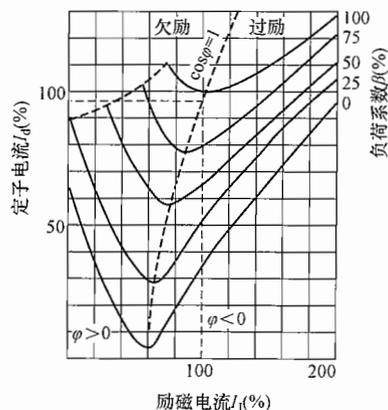


图 2-2-10 同步电动机的 V 形曲线

表 2-2-7 同步电动机的功率因数与有功功率和无功功率的关系

$\cos\varphi$	1	0.975	0.95	0.9	0.85	0.8	0.7	0.6
有功负荷 (kW)	100	100	100	100	100	100	100	100
无功负荷 (kvar)	0	23	33	49	62	75	100	133

### 2.2.4.3 电动机经济运行

(1) 电动机经济运行的原则 (GB/T 12497—2006《三相异步电动机经济运行》4.1)。

#### 4.1 电动机选择

##### 4.1.1 电动机类型选择

4.1.1.1 电动机选用前应充分了解被拖动物机械的负载 (以下简称负载) 特性, 该负载对起动、制动、调速无特殊要求时应选用笼型异步电动机。从节能角度考虑应首先选用符合 GB 18613 的电动机, 不应选用国家明令淘汰的产品。

4.1.1.2 负载对起动、制动、调速有特殊要求时, 所选择的电动机应满足相应的堵转矩与最大转矩要求, 所选电动机应与调速方式合理匹配。

4.1.1.3 应依据电动机的工作是否处于易燃、易爆、粉尘污染、腐蚀性气体、高温、高海拔、高湿度、水淋和潜水工作环境, 选择相应的防护类型、外壳防护等级和电动机的绝缘等级。

4.1.1.4 拖动高精度加工机械和有静音环境要求的电动机, 应按要求选用有精确速度控制、低振动和低噪声设计的电动机。

4.1.1.5 应依据负载要求, 选择具有合适的安装尺寸与连接方式。

##### 4.1.2 电动机额定功率选择

电动机额定功率应满足负载的功率要求, 同时要考虑负载特性与运行方式。

4.1.2.1 应依据反映负载变化规律的负荷曲线, 确定经济负载率。

4.1.2.2 应根据负载的类型和重要性确定适当的备用系数。具有长期连续运行或稳定负载的电动机, 应使电动机的负载率接近综合经济负载率。

4.1.2.3 年运行时间大于 3000h、负载率大于 60% 的电动机, 应优先选用能效指标符合 GB 18613 中节能评价值的节能电动机。

##### 4.1.3 电动机工作电压选择

电动机的工作电压应与供电电压相适应。额定容量大于 200kW 的电动机宜优先选用高压电动机。运行在可调速状态的电动机宜选用较低额定电压等级。

##### 4.1.4 电动机转速选择

4.1.4.1 在满足传动要求的前提下, 选择电动机转速时应减少机械传动级数。

4.1.4.2 需要调速的负载应根据调速范围、效率、对转矩的影响以及长期经济效益等因素, 选择合理的调速方式和电动机。

##### 4.1.5 电动机转矩选择

4.1.5.1 电动机应满足负载的堵转矩和最大转矩的需要。

4.1.5.2 对有频繁起动、冲击负载和高起动转矩等特殊要求的负载应选用相应的专用电动机并进行转矩校验。

(2) 电动机经济运行参数计算 (GB/T 12497—2006《三相异步电动机经济运行》附录 A)。

### A.1 电动机有功功率损耗计算

$$\Delta P = \Delta P_0 + \beta^2 (\Delta P_N - \Delta P_0) \quad (\text{A.1})$$

式中:

$\Delta P$ ——电动机的有功损耗, 单位为千瓦 (kW);

$\Delta P_0$ ——电动机的空载有功损耗, 单位为千瓦 (kW);

$\beta$ ——负载系数,  $\beta = P_2/P_N$ ;

$P_2$ ——电动机的输出功率, 单位为千瓦 (kW);

$P_N$ ——电动机的额定功率, 单位为千瓦 (kW);

$\Delta P_N$ ——电动机额定负载时的有功损耗, 单位为千瓦 (kW);

$$\Delta P_N = \left( \frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N$$

$\eta_N$ ——电动机额定效率,  $P_N$  与  $\eta_N$  的数值从电动机额定工况试验或从出厂资料获得。

### A.2 电动机的无功功率计算

$$Q = Q_0 + \beta^2 (Q_N - Q_0) \quad (\text{A.2})$$

式中:

$Q$ ——电动机的无功功率, 单位为千乏 (kvar);

$Q_0$ ——电动机的空载无功功率, 单位为千乏 (kvar);

$$Q_0 = \sqrt{3U^2 I_0^2 \times 10^{-6} - P_0^2}$$

$U$ ——电源电压, 单位为伏 (V);

$I_0$ ——电动机的空载电流, 单位为安 (A);

$Q_N$ ——电动机额定负载时的无功功率, 单位为千乏 (kvar);

$$Q_N = \frac{P_N}{\eta_N} \times \tan \varphi_N$$

$P_0$ ——电动机的空载有功损耗, 单位为千瓦 (kW);

$\varphi_N$ ——额定运行时输入电动机相电流滞后于相电压的相角。

### A.3 电动机的综合功率损耗计算

$$\Delta P_c = \Delta P_0 + \beta^2 (\Delta P_N - \Delta P_0) + K_Q [Q_0 + \beta^2 (Q_N - Q_0)] \quad (\text{A.3})$$

式中:

$\Delta P_c$ ——电动机的综合功率损耗, 单位为千瓦 (kW);

$K_Q$ ——无功经济当量, 单位为千瓦每千乏 (kW/kvar)。

当电动机直连发电机母线或直连已进行无功补偿的母线时,  $K_Q$  取 0.02 ~ 0.04; 二次变压取 0.05 ~ 0.07; 三次变压  $K_Q$  取 0.08 ~ 0.1。当电网采取无功补偿时, 应从补偿端计算电动机电源变压次数。

#### A.3.1 电动机额定综合功率损耗计算

$$\Delta P_{cN} = \Delta P_N + K_Q Q_N \quad (\text{A.4})$$

#### A.3.2 电动机综合消耗功率计算

$$P_{cl} = \beta P_N + \Delta P_c \quad (\text{A.5})$$

式中:

$P_{cl}$ ——电动机的综合消耗功率,单位为千瓦(kW)。

#### A.3.3 电动机额定综合消耗功率计算

$$P_{clN} = P_N + \Delta P_{cN} \quad (\text{A.6})$$

式中:

$P_{clN}$ ——电动机的额定综合消耗功率,单位为千瓦(kW)。

#### A.4 电动机运行负载系数计算

在运行中的负载率可用电动机输入功率 $P_1$ 和电动机额定参数与空载参数进行计算:

$$\beta = \frac{-P_N/2 + \sqrt{P_N^2/4 + (\Delta P_N - \Delta P_0)(P_1 - \Delta P_0)}}{\Delta P_N - \Delta P_0} \quad (\text{A.7})$$

式中:

$P_1$ ——电动机输入功率,单位为千瓦(kW)。

#### A.4.1 电动机的综合效率计算

$$\eta_c = \frac{\beta P_N}{\beta P_N + \Delta P_c} \times 100\% \quad (\text{A.8})$$

式中:

$\eta_c$ ——电动机的综合效率,%。

#### A.4.2 电动机额定综合效率计算

$$\eta_{cN} = \frac{P_N}{P_N + \Delta P_{cN}} \times 100\% \quad (\text{A.9})$$

式中:

$\eta_{cN}$ ——电动机额定综合效率,%。

(3) 电动机经济运行的判定 (GB/T 12497—2006《三相异步电动机经济运行》7.4)。

### 7.4 经济运行计算与判定

#### 7.4.1 计算电动机额定综合效率

电动机额定综合效率的计算方法见 A.4.2。

#### 7.4.2 测试与计算电动机综合效率

当测试的供电电压偏离额定值时,应对测试结果进行适当修正。视电压升高或降低的幅度,在-0.08%~0.07%之间进行正比例修正。

#### 7.4.3 经济运行判定

7.4.3.1 电动机综合效率大于或等于额定综合效率表明电动机对电能利用是经济的;电动机综合效率小于额定综合效率但大于额定综合效率的60%,则电动机对电能利用是基本合理的;电动机综合效率小于额定综合效率的60%,表明电动机对电能利用是不经济的。

7.4.3.2 在现场计算电动机综合效率有困难的情况下也可用电动机输入功率(电流)与额定输入功率(电流)之比来判断电动机的工作状态:输入电流下降在15%以内属于经济使用范围;输入电流下降在35%以内属于允许使用范围;输入电流下降超过35%

属于非经济使用范围。在考察输入电流变化的同时应检查测量电动机功率因数的变化，并按附录 A 给出的数值估计其影响。

(4) 电动机更换或改造（GB/T 12497—2006《三相异步电动机经济运行》6）。

## 6 电动机更换或改造

### 6.1 更换或改造的基本要求

6.1.1 当电动机处于非经济运行状态，采取更换或改造措施时，必须满足被拖动物机械负载的要求，使电动机运行的负载率在接近综合经济负载率。使更新或改造后电动机的综合功率损耗小于原电动机的综合功率损耗。

6.1.2 应根据工作环境、拖动负载更换电动机，在国家现行系列产品中合理选择。电动机的更换应符合 4.1 的规定。

6.1.3 电动机更换或改造应使用寿命周期成本分析方法进行经济性的检验。

### 6.2 起动性能校验

6.2.1 更换或改造电动机应进行起动性能的校验。

6.2.2 按式 (3) 计算电动机起动过程中的最小转矩：

$$M_{\min} \geq M_{\max} \times K_s / K_V^2 \quad (3)$$

式中：

$M_{\max}$ ——电动机起动过程中可能出现的最大负载转矩（标么值）；

$M_{\min}$ ——电动机起动过程中的最小转矩（标么值）；

$K_s$ ——保证起动时有足够加速转矩所采用的系数， $K_s$  为 1.15 ~ 1.25；

$K_V$ ——电压波动系数， $K_V$  为 0.81 ~ 0.95。

### 6.3 节电量计算

更换或改造电动机的节电量按式 (4) 计算：

$$\Delta E_c = \sum_{i=1}^n [(\Delta P_{cai} - \Delta P_{chi}) \times t_i] \quad (4)$$

式中：

$\Delta P_{cai}$ ——原电动机的综合功率损耗，单位为千瓦 (kW)；

$\Delta P_{chi}$ ——更新或改造后电动机的综合功率损耗，单位为千瓦 (kW)；

$t_i$ ——电动机在负载  $i$  下的运行时间，单位为小时 (h)。

#### 2.2.4.4 电动机的节能措施

(1) 根据电动机经济运行原则合理选用电动机。见 2.2.1.2 节（GB/T 3485—1998《评价企业合理用电技术导则》4）。

(2) 采用高效率电动机（《钢铁企业电力设计手册》6.4.2 节）。

目前，国内外有关部门在分析电动机损耗的基础上，采取了各种切实可行的措施，对减少电动机的各部分损耗、提高电动机的效率和功率因数有良好效果。这些减少损耗的措施如图 2-2-11 所示。

采取各种减少损耗措施后的高效率电动机，其总损耗比普通标准电动机减少 20% ~

30%，电动机的效率可以比普通的标准型提高 3% ~ 6%。



图 2-2-11 减少电动机损耗的措施

普通高效电机价格比一般电机高 20% ~ 30%，采用时要考虑资金回收期，即在短期内靠节电费用收回多花的费用。一般符合下列条件时可选用普通高效电机：

- 1) 负载率在 0.6 以上；
- 2) 每年连续运行时间在 3000h 以上；
- 3) 电机运行时无频繁起、制动（最好是轻载起动，如风机、水泵类负载）；
- 4) 单机容量较大。

采用高效电动机每年节省的电费可用下式计算：

$$G_d = J_d P_N \left( \frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right) t K$$

式中  $G_d$ ——每年节省的电费，元；

$J_d$ ——电价，元/kWh；

$P_N$ ——电机的额定功率，kW；

$\eta_1$ ——普通电动机的效率；

$\eta_2$ ——高效电动机的效率；

$t$ ——电动机一年连续运行的时间，h；

$K$ ——负载率， $K = \frac{P_2}{P_N}$ ；

$P_2$ ——电动机实际输出功率，kW。

不计资金利息，采用高效电动机的投资回收期  $T_d$  可用下式计算：

$$T_d = \frac{\text{电机价格(元)}}{\text{年节省电费}}$$

(3) 对轻载电动机采用降压运行方式实现节能。

- 1) 轻载运行降压的节能效果。

异步电动机的损耗 $\Delta P$ 可用下式表示

$$\Delta P = P_{cu1} + P_{cu2} + P_{Fe} + P_m + P_s$$

式中  $P_{cu1}$ 、 $P_{cu2}$  ——定子和转子铜损；

$P_{Fe}$  ——铁损；

$P_m$  ——机械损耗；

$P_s$  ——杂散损耗。

当电动机轻载时输出功率减少，同时转子铜损  $P_{cu2}$  随之降低；但  $P_{Fe}$ 、 $P_m$ 、 $P_s$  基本不变。由于励磁电流未变，定子铜损  $P_{cu1}$  降低不多，因此电机效率和功率因数大为降低。如果在轻

载时适当降低输入电压，则电机铁损  $P_{Fe}$  差不多随电压平方而减少，励磁电流也因磁通的减小而下降，使  $P_{cu1}$  减少，从而降低了总损耗  $\Delta P$ ，使效率和功率因数得到提高，这就是电动机轻载降压节能的基本原理。

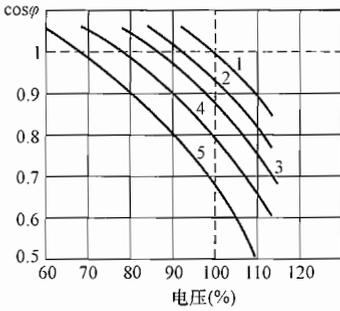


图 2-2-12 在不同负载时改变电动机电压对功率因数的影响

图 2-2-12 表示感应电动机在不同负荷时，改变电压对功率因数的影响。从图中可以看出降压运行对功率因数的改善具有很明显的效益。

减少加在电动机定子上的外加电压之后，将使电动机的输出转矩减小，由于它们之间是平方的关系，所以对轻负载电动机才能采用。同样电动机的出力也与转矩一样与电压平方成正比，电压降低之后电动机的实际出力为

$$P' = P \times \left(\frac{U}{U_N}\right)^2$$

式中  $P'$  ——降压后电动机的实际出力；

$P$  ——电动机的额定容量；

$U$  ——降压以后的电压；

$U_N$  ——电动机的额定电压。

## 2) 改变电动机绕组接法的节电方法（《钢铁企业电力设计手册》6.4.2 节）。

对经常处于轻负荷运行的电动机，应采用三角-星切换装置，将三角形接法的电动机改为星形接法，可以达到良好的节电效果。

电动机的星形接法和三角形接法的效率比  $\frac{\eta_Y}{\eta_D}$  与负荷系数  $\beta$  的关系见表 2-2-8。

表 2-2-8 负荷系数与不同接法时的电动机效率比

负荷系数 $\beta$	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40	0.45	0.50
效率比 $\frac{\eta_Y}{\eta_D}$	1.27	1.14	1.10	1.06	1.04	1.01	1.005	1.00

由表 2-2-8 知，只有在负荷系数低于 0.3 后，将电动机的三角形接法改为星形才能使电动机的效率有明显提高。当负载系数为 0.5 时，星形接法和三角形接法的效率基本相等，无节电效果。当负荷系数大于 0.5 后，电动机星形接法的效率反而低于三角形接法。另外，电动机的功率因数  $\cos\phi$  在负载系数低于 0.4 后，将三角形接法改为星形接法后都有比较明

显的提高,这对于变压器和输电线路的节电是有好处的。

但电动机由三角形接法改为星形接法后,其极限允许负载大致为铭牌容量的 38% ~ 45%。因此,在用三角形改星形接法作为节电方法时,一定要考虑到改接后的电动机容量是否能满足负载的要求。

一般认为,由三角形改星形接法的转换点在  $\beta = 0.3 \sim 0.4$ 。对不同型号的电动机,其转换点并不一定完全相同,应该进行具体分析计算才能确定。极据经验。当  $\beta < 0.3$  时,将三角形连接的绕组改为星形连接,往往可以节电。

### 3) 电压波动对电动机节能的影响。

电动机端电压波动时,异步电动机的特性变化见表 2-2-9。

表 2-2-9 端电压偏差对异步电动机特性的影响 (18.5kW 以上)

项 目	电 压 偏 差			
	-10%	电压函数	+10%	+20%
起动转矩和最大转矩	降低 19%	$u^2$	增加 21%	增加 44%
同步转速	不变	常数	不变	不变
滑差率	增加 23%	$u^{-2}$	降低 17%	降低 30%
全负荷转速	降低 1.5%	同步转速—滑差率	增加 1%	增加 1.5%
效率 全负荷 2/4 负荷 1/2 负荷	降低 1.5% 实际不变 增加 1% ~ 2%		增加 0.5% ~ 1% 实际不变 降低 1% ~ 2%	微增 降低 2% ~ 5% 降低 7% ~ 20%
$\cos\varphi$ 全负荷 2/4 负荷 1/2 负荷	增加 0.01 增加 0.02 ~ 0.03 增加 0.04 ~ 0.05		降低 0.03 降低 0.04 降低 0.07	降低 0.05 ~ 0.15 降低 0.1 ~ 0.3 降低 0.15 ~ 0.4
全负荷电流	增加 11%		减少 7%	减少 11%
起动电流	减少 10% ~ 12%	$u$	增加 10% ~ 12%	增加 25%
全负荷温升	增加 6 ~ 7°C		降低 3 ~ 4°C	降低 5 ~ 6°C
最大过负荷能力	降低 19%	$u^2$	增加 21%	增加 44%
电磁噪声 (特别空载时)	轻微减小		轻微增加	

电压下降时最成问题的是起动转矩与最大转矩的减少,使负荷电流增加,从而引起线路损耗增加,电动机温度上升等,而电压升高也要引起励磁电流的显著增加,温度上升和效率降低,所以要加以注意。

### (4) 电动机无功功率就地补偿。

#### 1) 电动机无功功率就地补偿的方法 (《钢铁企业电力设计手册》6.4.2 节)。

对距供电点较远的大、中容量连续运行工作制的电动机,应采用电动机的无功功率就地补偿装置。

电动机无功功率就地补偿,对改变远距离送电的电动机低功率因数运行状态,减少线路损失,提高变压器负载率有着明显的效果。实践表明,就地补偿是一项值得推广的节电技术。特别是对于下列运行条件的电动机要首先应用:

- a. 远离电源的水源泵站电动机。
- b. 距离供电点 200m 以上的连续运行电动机。
- c. 轻载或空载运行时间较长的电动机。
- d. 高负载率变压器供电的电动机。

## 2) 无功就地补偿的效益。

a. 改善用电设备的功率因数，使之提高到 92% ~ 97% 以上，降低无功损耗 50% ~ 80%，平均节电 10% ~ 15%。

b. 提高变压器的负载率。经过就地补偿可使变压器平均增容 20% ~ 30%。对需要扩容的单位可减少增容费，和减少变压器的用电贴费。

c. 每千乏补偿器一年可以节电 300 ~ 500kWh，仅以节约电的电费计算，半年至一年即可收回投资。

3) 电动机无功功率就地补偿计算（GB/T 12497—2006《三相异步电动机经济运行》6.4）。

## 6.4 电动机无功功率就地补偿

### 6.4.1 电动机无功功率补偿按式（5）计算：

$$Q_c = P_1 (\tan\varphi - \tan\varphi_1) \quad (5)$$

式中：

$Q_c$  ——就地补偿的无功功率值，单位为千乏（kvar）；

$P_1$  ——电动机的输入功率，单位为千瓦（kW）；

$\tan\varphi$  ——补偿前输入相电流滞后于相电压相角的正切值， $\tan\varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{\cos\varphi}$ ；

$\cos\varphi$  ——电动机补偿前的功率因数；

$\tan\varphi_1$  ——补偿后输入相电流滞后于相电压相角的正切值， $\tan\varphi_1$  取 0.484，这相当于将功率因数补偿到 0.90。

### 6.4.2 无功功率补偿后节约的有功功率按式（6）计算：

$$\Delta P_u = K_Q \times Q_c \quad (6)$$

式中：

$\Delta P_u$  ——采取无功功率补偿后节约的有功功率，单位为千瓦（kW）；

$K_Q$  ——无功经济当量，按附录 A.3 取值。

### 6.4.3 无功功率补偿的节电量按式（7）计算：

$$\Delta E_c = T_{ec} \times \Delta P_u \quad (7)$$

式中：

$\Delta E_c$  ——年节电量，单位为千瓦时（kWh）；

$T_{ec}$  ——年运行时间，单位为小时（h）。

4) 单台电动机补偿容量的选择。根据 GB 50052—2009《供配电系统设计规范》第 6.0.12 条：“接在电动机控制设备侧电容器的额定电流，不应超过电动机励磁电流的 0.9 倍”。为了防止产生自励磁过电压，单机补偿容量不宜过大，应保证电动机在额定电压下断电时电容器的放电电流不大于  $0.9I_0$ 。

单台电动机的补偿容量由下式计算

$$Q_b \leq 0.9 \times \sqrt{3} U_N I_0$$

式中  $U_N$  ——电动机的额定电压, kV;

$I_0$  ——电动机的空载电流, A;

$Q_b$  ——补偿电容器容量, kvar。

## 2.2.5 晶闸管变流装置供电方式的节电

### 2.2.5.1 晶闸管变流装置替代电动-发电机组

依据:《钢铁企业电力设计手册》6.5节。

根据我国的节能技术政策,新建的直传动设备,均采用晶闸管变流装置供电。钢铁企业内目前尚有由电动-发电机组供电的生产机械,这些生产设备,不仅耗电多,且生产维护不便,噪声大。从节约能源角度出发,现有容量大小不等的由机组供电的机械,宜改由新的变流设备供电。

各种不同容量的供电方式(变流方式)的效率,见表2-2-10及表2-2-11。由表2-2-10和表2-2-11可见,晶闸管变流装置的综合效率比电动-发电机组的综合效率高10%~15%。

表2-2-10

晶闸管供电系统的效率

%

设备	容量 (kW)		
	100	500	1000
电源变压器	98	98.5	98.5
晶闸管供电装置	97	97.5	98
直流电动机	91	93	94
其他(配线电缆等)	98	98	98
综合效率	85	88	89

表2-2-11

电动发电机的效率

%

设备	容量 (kW)		
	100	500	1000
交流电动机	90	93	94
直流发电机	90	93	93.5
直流电动机	91	93	94
控制设备	96	97	98
其他(配线电缆等)	97	97	97
综合效率	69	76	79

直流电动机由发电机供电改为晶闸管变流装置供电后效率提高,年节电量  $W$  可按下式计算:

$$W = P_N \left( \frac{1}{\eta_2} - \frac{1}{\eta_1} \right) T_Y K_L K_W$$

式中  $P_N$  ——直流电动机的额定容量, kW;

- $\eta_1$  ——晶闸管变流装置的效率,  $\eta_1 = 0.89$ ;
- $\eta_2$  ——电动 - 发电机组的效率,  $\eta_2 = 0.79$ ;
- $T_V$  ——设备年工作时间, h, 取 5500 ~ 6000h;
- $K_L$  ——平均负载系数, 取 0.65;
- $K_w$  ——实际有效作业率, 取 0.7 ~ 0.8。

### 2.2.5.2 整流供电装置节电

整流供电装置由整流装置和直流线路构成, 现在使用得最多的是硅整流装置(含晶闸管整流装置)。以往应用的汞弧整流器、引燃管整流器等离子式整流器均已被淘汰。硅整流装置有以下节约电能的措施:

(1) 设计应符合 GB 3485—1998《评价企业合理用电技术导则》的规定, 提高整流装置效率。

(2) 合理选择整流电路的接线方式。应根据负荷的容量、电压、电流以及对整流电压波纹系数的要求, 通过技术经济比较, 合理地选择整流装置的相数和接线方式。一般应以三相桥式整流和带平衡电抗器的双反星形整流电路为优选方案。

(3) 合理选择调压方式:

1) 对于像直流桥式起重机电源整流站或无轨电车整流站之类的整流装置, 一般只靠调整整流变压器分接头的方式进行无载调压, 往往是一旦调整到某一电压后, 就不再随时进行调整。

2) 用于电解、电镀等的整流装置, 以往多使用感应调压器调整整流变压器的初级电压的调压方案。

3) 对于容量较大的整流装置, 可采用带有有载调压装置的整流变压器。此种方案接线比较简单, 效率也高, 但有载调压式整流变压器本身结构复杂, 维护工作量较大, 造价也比较高。

(4) 合理选择整流元件:

1) 选用正向压降小, 反向泄漏电流小的硅整流元件。

2) 尽量减少串联元件的数量, 以减少由于正向压降造成的损耗。

3) 尽量选用大电流的元件, 以减少元件的并联。

(5) 合理选择整流元件的冷却方式。硅整流元件的冷却方式, 可分为自冷、风冷、油浸自冷、水冷等类。

(6) 合理选择与布置大电流交、直流线路, 降低接触电阻和损耗。

(7) 抑制整流器谐波:

1) 增加整流相数。该措施可以基本消除幅值较大的低次谐波, 可采用 12 相、24 相等多相整流系统。这些都是在 6 相的基础上, 利用变压器的三相绕组组成星形或三角形的不同组合或采用移相绕组实现的。

2) 合理配置系统参数。

3) 设置滤波装置。

### 2.2.6 风机水泵的节能

风机、泵、压缩机等通用机械拖动设备为我国最主要终端耗电设备, 根据全国统计, 风机和泵类设备装机容量达 1.6 亿 kW, 其中, 泵有 4888 万台, 容量 1.1 亿 kW, 占全国用电量的 20%。节电潜力很大。

风机水泵机组可采用合理选型,采用合理的调节方式及采用高效率设备等措施实现节能。

### 2.2.6.1 合理选择风机、水泵机组

(1) 合理选型。无论是风机或泵类,设计选型要求合理,使风机与水泵的额定流量和压力尽量接近于工艺要求的流量与压力,从而设备运行时的工况,经常保持在高效区。

如图 2-2-13 所示,图中 A 点是运行的高效点。如果选择不当,余量太大,如图中 B 点偏离高效区。则造成风机、水泵效率下降,浪费能源。

(2) 合理配置电动机。电动机与风机水泵配套时容量计算见 14.2.7.2。

在选择电动机时要考虑发热、电网电压波动、电动机容量级差等因素,有时所选择的电动机很难和风机水泵的要求完全一致。一般认为,所选电动机的容量比风机水泵要求的适当的大些是允许的。在设计电动机时,常常把最高效率点设在额定功率的 70%~100%。因此,从节能的角度看,80% 满载时电动机的运行效果最佳。当电动机的平均负载在 70% 以上时,可以认为电动机的容量是合适的。但是,如果由于种种原因,电动机容量过大,负载太低,如低于 60% 的,应予以更换或改造。

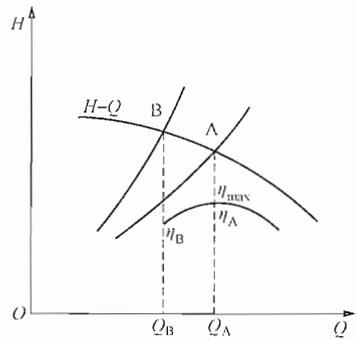


图 2-2-13 风机和水泵  $H-Q$ 、 $\eta-Q$  曲线

### 2.2.6.2 合理选择风机水泵的系统调节方式

泵或通风机系统选用何种类型的调节方式,主要决定于以下因素:工作流量的变化规律;管路性能曲线的静扬程(静压)所占全扬程(全压)的比例;泵或风机容量的大小;调节装置价格的高低、可靠性、调节效率以及功率因数特性等。在选择调节装置时需要综合考虑上述因素,全面衡量后选用最合适的条件方式。必要时应进行全面的经济技术比较。

(1) 泵或风机系统工作流量的变化规律往往是决定调节装置类型的基本依据。通常,工作流量变化范围大,则选用变速调节装置时转速的变化范围也大。在这种情况下,选用变速调节装置就可取较大的节能效果。同时,根据变速范围的大小,也应选用不同的变速装置,如变频调速装置适用于变速范围很大的场合;而晶闸管串级调速装置适用于变速范围不很大的场合(通常最小流量在额定流量的 50%~70% 以上)。工作流量在额定流量 90% 以上变化时,一般不采用变速调节。

(2) 泵或风机系统管路性能曲线中静扬程(静压)所占比例的大小,与变速装置节能效果的大小相关。当静扬程所占比例很大时,即使泵系统的工作流量变化很大,但变速装置的转速变化范围并不大,结果变速调节的节能效果也不大。所以说,对于有较大静扬程的泵或风机,只用工作流量变化范围大小确定调速装置的类型就不正确了,应根据转速变化范围确定调速装置的类型才是正确的。

(3) 泵与风机轴功率大小也与选择调节装置的类型有关。小功率的泵或风机采用较高调节效率的调速装置后,其每年节约的电费往往比调速装置的初投资要少得多。而大功率的泵与风机采用高效调速方式,虽然高效调速装置的初投资很高,但每年节约电费的数量更大。通常配套电动机功率在 15kW 以下风机、水泵不采用调速装置。

(4) 调节装置的可靠性必须有保证。

(5) 选择高效调节方法，在调节过程减少损耗，实现功率回收，提高功率因数，必要时应进行功率因数补偿。

### 2.2.6.3 调节电动机转速的节能方法

依据：《钢铁企业电力设计手册》6.6节。

(1) 采用调速装置的条件。对压力或流量变化幅度较大，年运行总时数较长的系统，应按表 2-2-12 的条件并通过 GB/T 13471—2008《节电措施经济效益计算与评价方法》进行评价后才可采用调速装置。

表 2-2-12 采用调速装置的条件

变化参数	参数范围			变化参数	参数范围		
	15~30	30~110	>110		>40	>30	>30
容量 (kW)	15~30	30~110	>110	变工况年时率 (%)	>40	>30	>30
流量变化幅度 (%)	>30	>20	>10	年总运行时间 (h)	>5000	>4000	>3000

(2) 变速变流量的节能原理。许多风机、水泵的流量不是要求恒定的。根据风机、水泵的压力-流量特性曲线，按照工艺要求的流量，实现变速变流量控制，是节电的有效方法。从理论上讲，风机、泵类具有以下特点：

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1}, \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2, \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

式中  $Q_1$ 、 $Q_2$  ——流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$N_1$ 、 $N_2$  ——转速， $\text{r}/\text{min}$ ；

$P_1$ 、 $P_2$  ——功率， $\text{kW}$ ；

$H_1$ 、 $H_2$  ——扬程， $\text{m}$ 。

即流量与转速成比例，而功率与流量的 3 次方成比例。由于风机、水泵一般用不调速的笼型电动机传动，当流量需要改变时，用改变风门或阀门的开度进行控制，效率很低。若采用转速控制。当流量减小时，所需功率近似按流量的 3 次方大幅度下降。

图 2-2-14 和图 2-2-15 分别为风门控制和转速控制流量的特性曲线。由图 2-2-14 可知，当流量降到 80% 时，功耗为原来的 96%，即

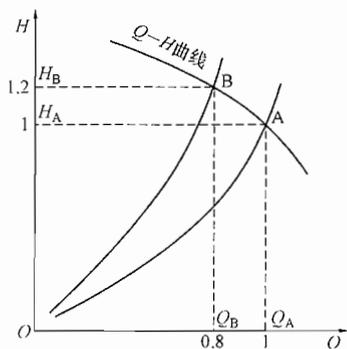


图 2-2-14 风机流量的风门控制

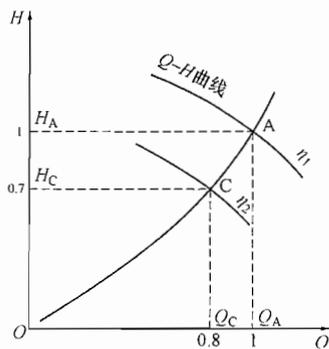


图 2-2-15 风机流量的转速控制 ( $\eta_1 > \eta_2$ )

$$P_B = H_B Q_B = 1.2 H_A \times 0.8 Q_A = 0.96 P_A$$

由图 2-2-15 可见, 当流量下降到 80% 时, 功率为原来的 56% (即降低了 44%), 即

$$P_C = H_C Q_C = 0.7 H_A \times 0.8 Q_A = 0.56 P_A$$

由此看来, 调速比调风门增大的节电率为

$$\frac{0.96 P_A - 0.56 P_A}{0.96 P_A} \times 100\% = 41\%$$

可见流量的转速控制节电效果显著。

(3) 对于小容量的笼型电动机, 当流量只需几级调节时, 可选用变极调速电机。

(4) 对于要求连续无极变流量控制, 当为笼型电动机时, 可采用变频调速或液力耦合器调速; 当为绕线型电动机时, 可采用晶闸管串级调速。

(5) 液力耦合器调速, 如同转子串电阻或定子变电压调速以及电磁滑差离合器控制一样, 属于转差功率不能回收利用的低效率调速。液力耦合器的调速范围为 (20% ~ 97%)  $n_N$  ( $n_N$  为电机额定转速), 有速度损失, 因其装于电机与负载之间, 无法达到额定速度运转。因其转差功率损耗变为油的热能而使温升升高, 必须采取适当冷却措施。由于低速小功率液力耦合器造价高。因而仅适用于高速大功率风机、泵类负载。

液力耦合器有以下优点:

- 1) 可节省电能;
- 2) 采用液力耦合器起动风机时, 属于空载起动, 对变压器和其他用电设备无冲击, 安全可靠;
- 3) 改善了运行状况, 延长了机组及其部件寿命;
- 4) 采用液力耦合器, 可以取消调节阀门, 减少进风阻力, 提高风机的效率。

因此, 对连续运转并有调节流量要求的大、中型笼型电动机, 通过技术经济比较, 可采用液力耦合器调速或其他方式调速。

(6) 调速装置的效率和功率因数。所谓高效调速方法是指在调速过程中没有转差损耗或对转差损耗能够进行回收, 如变极电动机调速、变频调速、串级调速等。低效调速方法是指在调速过程中有转差损耗, 如电磁调速电动机调速、调压调速、液力耦合器调速等。

高效调速方法在调速过程中转差变化很小, 但是为了实现调速, 在系统中增加了相应的装置, 如变频调速的变频器及其控制回路, 串级调速的整流装置、逆变装置、变压器等, 它们都要消耗电能。但这些装置大都是电力电子元件, 本身功耗很低, 效率较高, 为 90% ~ 95%。

可调速系统的功率因数值主要由电动机的功率因数及调速装置的功率因数决定。由于风机、泵的轴功率与转速 3 次方有关, 因而电动机负载变化较大时, 电动机功率因数变化也较大。如转速在额定转速 70% 时, 轴功率仅为额定功率的 34%, 功率因数为 0.55 ~ 0.65。高效调速装置功率因数还受变速装置影响, 降速时负载减少, 相应的功率因数也下降, 尤其是采用晶闸管装置, 功率因数低问题更为突出。一般晶闸管串级调速装置的功率因数为 0.35 ~ 0.7, 变频调速装置为 0.3 ~ 0.8。各种调速系统的效率及功率因数值见表 2-2-13。

表 2-2-13

各种调速系统的效率及功率因数

调速方式	系统效率		功率因数	
	全速	50% 转速	全速	50% 转速
变频调速	0.80~0.90	0.60~0.80	0.80~0.90	0.3 左右
晶闸管串级调速	0.90	0.80	0.70~0.75	0.35 左右
变极电动机调速	0.80~0.90	0.70~0.80	0.87~0.91	0.70~0.85
液力耦合器	0.90~0.92	0.40~0.50	0.90	0.65 左右
电磁调速电动机	0.80 左右	0.50	0.90	0.65 左右

由于可调速电力传动的功率因数要比不调速系统低，从整体效益来考虑，应进行功率因数补偿。

#### 2.2.6.4 风机水泵其他的节电方法

(1) 采用高效率设备。应选用高效率的新产品，包括控制装置、电动机、传动装置和风机水泵，它们中任一设备效率的提高，对节电均有好处。

(2) 减少空载运行时间。有些风机、泵类不是连续运行的，应严格控制该类设备的空载运转，力争做到间歇停开电动机。

(3) 更换或改造低效设备。在改造设计中，当通风机、鼓风机效率低于 70% 时，应予以更换或改造。

#### 2.2.6.5 风机水泵节能控制方案的选择

(1) 风机和泵类电气传动系统方案（《电气传动自动化技术手册（第3版）》2.4.1节）。

对长期工作二次型平稳负载，这类机械起动不困难，运行稳定，一般不调速。通常工厂设计时，按生产中可能需要的最大风量或流量并留有较大的裕量选风机和泵，而实际运行时又不要那么大，电动机不能调速，无法改变机械出力，只好用挡板调节风量或流量，能量利用率很低。近年来，为取得最佳经济运行效果，这类机械也开始要求调速，通过改变速度控制风量和流量，以实现节能。

其电气传动系统方案有：

1) 一般采用母线供电、电器控制、交流电动机不调速。

2) 为节能，实现经济运行，采用交流调速，调速范围不大，可能的方案有：

a. 变极对数调速，优点是简单经济；缺点是速度级数少，效果不如无级调速。

b. 串级调速，优点是变流设备容量（转差功率）小，较其他无级调速方案经济；缺点是必须使用绕线转子异步电动机，功率因数低（已开发多种改善功率因数线路），转子电流方波，增加电动机损耗，最高转速降低。双馈方案是串级调速的发展，可克服一般串级调速的缺点，但变流和控制复杂，仍需使用绕线转子异步电动机，成本高。

c. 变频调速，优点是调速性能好，使用笼型异步电动机（或同步电动机）；缺点是成本高。其中，晶体管 PWM 电压型交-直-交变频用于 100~200kW 设备，功率因数好，谐波少。晶闸管电流型交-直-交变频用于几百千瓦到 2000kW 大型设备。交-交直接变频（600r/min 以下）和大功率无换向器电动机（600r/min 以上）用于几千千瓦以上的特大型设备（同步电动机）。

3) 某些特大功率（上万千瓦）的风机和泵虽不调速，但需变频软起动装置，采用大功

率无换向器电动机或中压 PWM 变频方案。

(2) 风机风量调节的控制方案（《钢铁企业电力设计手册》6.6 节）。

风机流量变化，电动机可采用以下几种控制方法：

1) 采用调节风门开度，用出口挡板或入口挡板控制。

2) 采用变极调速 + 出口挡板或变极调速 + 入口挡板方式，先将电机转速调整到接近所需流量的转速，再用挡板细调。

3) 采用变频调速。各种控制方式下不同风量风机动率消耗相对值见表 2-2-14 和图 2-2-16。根据不同的控制方式，风量和运行时间可分别计算各种作业方式的耗电量。

表 2-2-14 各种控制方式下风机功率消耗相对值

风量 (%)	出口挡板控制	变极调速 + 出口挡板控制		入口挡板控制	变极调速 + 入口挡板控制		变频调速
		6/8 极	4/6 极		6/8 极	4/6 极	
100	1	6 极 1	4 极 1	1	6 极 1	4 极 1	1.05
90	0.98	0.98	0.98	0.91	0.91	0.91	0.82
80	0.95	0.95	0.95	0.82	0.82	0.82	0.61
75	0.93	8 极 0.52	0.93	0.79	8 极 0.52	0.79	0.53
70	0.91	0.52	0.91	0.76	0.47	0.76	0.45
67	0.9	0.51	6 极 0.41	0.74	0.44	6 极 0.41	0.41
50	0.83	0.45	0.37	0.65	0.31	0.26	0.23
33	0.7	0.59	0.31	0.58	0.21	0.14	0.12

如：75kW 电动机，年运行时间 4000h，风量为 90% 时，运行时间占 40%；风量为 50% 时，运行时间占 20%；风量为 33% 时，运行时间占 40%，则变频调速控制风量时间耗电量为

$$75 \times (0.82 \times 0.4 + 0.23 \times 0.2 + 0.12 \times 0.4) \times 4000 = 126600 \text{ (kWh)}$$

比较所需作业方式用不同控制方式的耗电量，可以得出最节电的控制方案。除变频调速节电效果最佳外，其他控制方案中变极调速 + 入口挡板控制有较好的节电效果。

### 2.2.7 照明节电

照明节电见第 13 章。

### 2.2.8 低压电器的节能

#### 2.2.8.1 采用具有节电效果的低压电器更新老产品

依据：《钢铁企业电力设计手册》6.8.3 节。

低压电器是量大面广的基础元件，就每只低压电器而言，所消耗的电能并不大，一般仅数瓦或数十瓦，但由于用量大（如接触器、热继电器、熔断器和信号灯等），所以，总的耗电量也是很可观的。因此，采用成熟、有效、

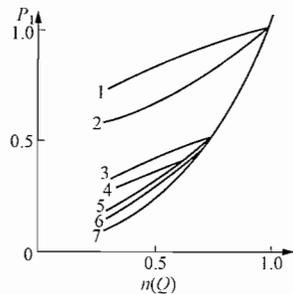


图 2-2-16 75kW 4 极带风机负载

流量与输入有功功率关系

1—4 极变 6 极出口挡板控制；

2—4 极变 6 极入口挡板控制；

3—6 极变 8 极出口挡板控制；

4—4 极变 8 极出口挡板控制；

5—6 极变 8 极入口挡板控制；

6—4 极变 8 极入口挡板控制；

7—变频调速控制

可靠的节电型低压电器是节电工作中不可忽视的部分。

### 2.2.8.2 交流接触器的节电技术

(1) 交流接触器能效限定值及能效等级（GB 21518—2008《交流接触器能效限定值及能效等级》）。

#### 4.2 接触器能效等级

接触器能效等级分为3级，1级吸持功率最低。各等级接触器的吸持功率均不应不大于表1的规定。

表1 接触器能效等级

额定工作电流 $I_c/A$	吸持功率/ (V·A)		
	1级	2级	3级
$9 \leq I_c \leq 12$	0.5	5.0	8.3
$12 < I_c \leq 22$	0.5	5.1	8.5
$22 < I_c \leq 32$	0.5	8.3	13.9
$32 < I_c \leq 40$	0.5	11.4	19.0
$40 < I_c \leq 63$	0.5	34.2	57.0
$63 < I_c \leq 100$	1.0	36.6	61.0
$100 < I_c \leq 160$	1.0	51.3	85.5
$160 < I_c \leq 250$	1.0	91.2	152.0
$250 < I_c \leq 400$	1.0	150.0	250.0
$400 < I_c \leq 630$	1.0	150.0	250.0

#### 4.3 接触器能效限定值

接触器吸持功率应不大于表1中3级的规定。

#### 4.4 接触器节能评价

接触器吸持功率应不大于表1中2级的规定。

(2) 交流接触器的节电原理。交流接触器的节电原理是将交流接触器的电磁操作线圈的电流由原来的交流改为直流。目前我国生产的60A以上大、中容量的交流接触器，其交流操作电磁系统消耗的有功功率在数十瓦至100多瓦之间。功率的分配大约为：铁心消耗功率占65%~75%，短路环占25%~30%，线圈占3%~5%。大中容量交流接触器加装节电器后，将操作电磁系统由原设计的交流操作改为直流吸持，则可省去铁心和短路环中占绝大部分的损耗功率，从而取得较高的节电效益，一般节电率高达85%以上。交流接触器采用节电技术还可降低线圈的温升及噪声。大中型交流接触器采用节电技术后，每台平均节电约50W。

(3) 交流接触器节电器节电率计算（GB 8871—2001《交流接触器节电器》）。

#### 7.2.8 节电率

节电器的节电率分有功功率节电率和无功功率节电率。有功功率节电率按公式

(1) 计算：

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$P_1$ ——不装节电器的交流接触器在吸持状态下,其电磁线圈消耗的有功功率;

$P_2$ ——加装节电器的交流接触器处在吸持状态,在节电器输入端测得的所消耗的有功功率。

无功功率节电率按公式(2)计算:

$$\Delta Q = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$Q_1$ ——不装节电器的交流接触器在吸持状态下,其电磁线圈消耗的无功功率;

$Q_2$ ——加装节电器的交流接触器处在吸持状态,在节电器输入端测得的所消耗的无功功率。

(4) 永磁交流接触器。永磁交流接触器是利用磁极的同性相斥、异性相吸的原理,用永磁驱动机构取代传统的电磁铁驱动机构而形成的一种微功耗接触器。安装在接触器联动机构上极性固定不变的永磁铁,与固化在接触器底座上的可变极性软磁铁相互作用,从而达到吸合、保持与释放的目的。软磁铁的可变极性是通过与其固化在一起的电子模块产生十几到二十几毫秒的正反向脉冲电流,而使其产生不同的极性。根据现场需要,用控制电子模块来控制设定的释放电压值,也可延迟一段时间再发出反向脉冲电流,以达到低电压延时释放或断电延时释放的目的,使其控制的电机免受电网晃电而跳停,从而保持生产系统的稳定。

永磁交流接触器有以下优点:

1) 节能。传统接触器的合闸保持是靠合闸线圈通电产生电磁力来克服分闸弹簧来实现的,一旦电流变小使产生的电磁力不足以克服弹簧的反作用力,接触器就不能保持合闸状态,所以,传统交流接触器的合闸保持是必须靠线圈持续不断的通电来维持的,这个电流从数十到数千毫安。而永磁交流接触器合闸保持依靠的是永磁力,而不需要线圈通过电流产生电磁力来进行合闸保持,只有电子模块的0.8~1.5mA的工作电流,因而,能最大限度地节约电能,节电率高达99.8%以上。

2) 寿命长,可靠性高。接触器寿命和可靠性主要是由线圈和触头寿命决定的。传统交流接触器由于它工作时线圈和铁芯会发热,特别是电压、电流、磁隙增大时容易导致发热而将线圈烧毁,而永磁交流接触器不存在烧毁线圈的可能。触头烧蚀主要是由分闸、合闸时产生的电弧造成的。与传统接触器相比,永磁交流接触器在合闸时,除同样有电磁力作用外,还具有永磁力的作用,因而合闸速度较传统交流接触器快很多,经检测,永磁交流接触器合闸时间一般小于20ms,而传统接触器合闸速度一般在60ms左右。分闸时,永磁交流接触器除分闸弹簧的作用外,还具有磁极相斥力的作用,这两种作用使分闸的速度较传统接触器快很多,经检测,永磁交流接触器分闸时间一般小于25ms,而传统接触器分闸速度一般在80ms以上。此外,线圈和铁芯的发热会降低主触头容量,电压波动导致的吸力不够或颤动会使传统接触器主触头发热、拉弧甚至熔焊。永磁交流接触器触头寿命与传统交流接触器触头相比,在同等条件下寿命提高3~5倍。

- 3) 无噪声。
- 4) 无线圈温升。
- 5) 触点不振颤，不会因振颤而烧毁主触点。

## 2.3 提高电能质量的措施

本节部分内容引自《电能质量》一书。

### 2.3.1 电能质量的概念

电能质量描述的是通过公用电网供给用户端的交流电能的品质。理想状态的公用电网应以恒定的频率、正弦波形和标准电压对用户供电。在三相交流系统中，还要求各相电压和电流的幅值应大小相等、相位对称且互差  $120^\circ$ 。但由于系统中的发电机、变压器、输电线路和各种设备的非线性或不对称性，以及运行操作、外来干扰和各种故障等原因，这种理想状态并不存在，因此产生了电网运行、电力设备和供用电环节中的各种问题，也就产生了电能质量的概念。

从电磁兼容及相互干扰的角度考虑，电磁干扰及其对电能质量影响的分类见表 2-3-1。

表 2-3-1 关于电磁干扰及其对电能质量影响的分类

序号	电磁干扰现象	对电能质量产生的影响因素
1	传导型低频现象	谐波、间谐波、载波干扰；电压波动；电压跌落和间断；电压不对称；工频偏差；感应低频电压；交流电网中的直流分量
2	辐射型低频现象	工频电磁场
3	传导型高频现象	感应连续波电压或电流；单方向瞬变；振荡性瞬变
4	辐射型高频现象	磁场；电场；电磁场；连续波；瞬变
5	静电放电现象	
6	核电磁脉冲	

### 2.3.2 电能质量的标准

目前我国电能质量指标国家指标有 8 项：

1. GB/T 12325—2008 《电能质量 供电电压偏差》
2. GB/T 12326—2008 《电能质量 电压波动和闪变》
3. GB/T 14549—1993 《电能质量 公用电网谐波》
4. GB/T 15543—2008 《电能质量 三相电压不平衡》
5. GB/T 15945—2008 《电能质量 电力系统频率偏差》
6. GB/T 18481—2001 《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》
7. GB/T 24337—2009 《电能质量 公用电网间谐波》
8. GB/T 30137—2013 《电能质量 电压暂降与短时中断》

其他与电能质量相关的监测、设备、技术规程和行业标准也陆续修改制订，我国电能质量标准体系正在逐步完善。

以上 8 项电能质量指标国家标准中，前 6 项为目前供配电系统设计常用规范。主要电能质量指标有以下内容：

### 2.3.2.1 供电电压偏差

摘自 GB/T 12325—2008 《电能质量 供电电压偏差》。

#### 4 供电电压偏差的限值

4.1 35kV 及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的 10%。

注：如供电电压上下偏差同号（均为正或负）时，按较大的偏差绝对值作为衡量依据。

4.2 20kV 及以下三相供电电压偏差为标称电压的  $\pm 7\%$ 。

4.3 220V 单相供电电压偏差为标称电压的  $+7\%$ ， $-10\%$ 。

4.4 对供电点短路容量较小、供电距离较长以及对供电电压偏差有特殊要求的用户，由供、用电双方协议确定。

### 2.3.2.2 电压波动和闪变

摘自 GB/T 12326—2008 《电能质量 电压波动和闪变》。

#### 4 电压波动的限值

任何一个波动负荷用户在电力系统公共连接点产生的电压变动，其限值和电压变动频度、电压等级有关。对于电压变动频度较低（例如  $r \leq 1000$  次/h）或规则的周期性电压波动，可通过测量电压方均根值曲线  $U(t)$  确定其电压变动频度和电压变动值。电压波动限值见表 1。

表 1 电压波动限值

$r$ / (次/h)	$d/\%$	
	LV、MV	HV
$r \leq 1$	4	3
$1 < r \leq 10$	3*	2.5*
$10 < r \leq 100$	2	1.5
$100 < r \leq 1000$	1.25	1

注 1：很少的变动频度（每日少于 1 次），电压变动限值  $d$  还可以放宽，但不在本标准中规定。

注 2：对于随机性不规则的电压波动，如电弧炉负荷引起的电压波动，表中标有“\*”的值为其限值。

注 3：参照 GB/T 156—2007，本标准中系统标称电压  $U_N$  等级按以下划分：

低压 (LV)  $U_N \leq 1$  kV

中压 (MV)  $1$  kV  $< U_N \leq 35$  kV

高压 (HV)  $35$  kV  $< U_N \leq 220$  kV

对于 220 kV 以上超高压 (EHV) 系统的电压波动限值可参照高压 (HV) 系统执行。

#### 5 闪变的限值

5.1 电力系统公共连接点，在系统正常运行的较小方式下，以一周（168 h）为测量周期，所有长时间闪变值  $P_{li}$  都应满足表 2 闪变限值的要求。

表 2 闪变限值

$P_{li}$	
$\leq 110$ kV	$> 110$ kV
1	0.8

5.2 任何一个波动负荷用户在电力系统公共连接点单独引起的闪变值一般应满足下列要求。

5.2.1 电力系统正常运行的较小方式下，波动负荷处于正常、连续工作状态，以一天（24 h）为测量周期，并保证波动负荷的最大工作周期包含在内，测量获得的最大长时间闪变值和波动负荷退出时的背景闪变值，通过下列计算获得波动负荷单独引起的长时间闪变值：

$$P_{l12} = \sqrt[3]{P_{l11}^3 - P_{l10}^3} \quad (1)$$

式中：

$P_{l11}$  ——波动负荷投入时的长时间闪变测量值；

$P_{l10}$  ——背景闪变值，是波动负荷退出时一段时期内的长时间闪变测量值；

$P_{l12}$  ——波动负荷单独引起的长时间闪变值。

波动负荷单独引起的闪变值根据用户负荷大小、其协议用电容量占总供电容量的比例以及电力系统公共连接点的状况，分别按三级做不同的规定和处理。

### 2.3.2.3 公用电网谐波

摘自 GB/T 14549—1993 《电能质量 公用电网谐波》。

#### 4 谐波电压限值

公用电网谐波电压（相电压）限值见表1。

表1

电网标称电压 kV	电压总谐波畸变率 %	各次谐波电压含有率,%	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

#### 5 谐波电流允许值

5.1 公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量（方均根值）不应超过表2中规定的允许值。当公共连接点处的最小短路容量不同于基准短路容量时，表2中的谐波电流允许值的换算见附录B（补充件）。

表2 注入公共连接点的谐波电流允许值

标准电压 kV	基准短路容量 MVA	谐波次数及谐波电流允许值, A																								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12	
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8	

续表

标准电压 kV	基准 短路 容量 MVA	谐波次数及谐波电流允许值, A																							
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

注: 220 kV 基准短路容量取 2000 MVA。

5.2 同一公共连接点的每个用户向电网注入的谐波电流允许值按此用户在该点的协议容量与其公共连接点的供电设备容量之比进行分配。分配的计算方法见附录 C (补充件)。

### 附录 A 谐波术语的数学表达式 (补充件)

A1 第  $h$  次谐波电压含有率  $HRU_h$

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100(\%) \quad (\text{A1})$$

式中:  $U_h$  ——第  $h$  次谐波电压 (方均根植);

$U_1$  ——基波电压 (方均根植)。

A2 第  $h$  次谐波电流含有率  $HRI_h$

$$HRI_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100(\%) \quad (\text{A2})$$

式中:  $I_h$  ——第  $h$  次谐波电流 (方均根植);

$I_1$  ——基波电流 (方均根植)。

A3 谐波电压含量  $U_H$

$$U_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2} \quad (\text{A3})$$

A4 谐波电流含量  $I_H$

$$I_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2} \quad (\text{A4})$$

A5 电压总谐波畸变率  $THD_u$

$$THD_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% \quad (\text{A5})$$

A6 电流总谐波畸变率  $THD_i$

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% \quad (\text{A6})$$

## 附录 B

### 谐波电流允许值的换算

（补充件）

当电网公共连接点的最小短路容量不同于表 2 基准短路容量时，按下式修正表 2 中的谐波电流允许值：

$$I_h = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp} \quad (\text{B1})$$

式中： $S_{k1}$ ——公共连接点的最小短路容量，MVA；

$S_{k2}$ ——基准短路容量，MVA；

$I_{hp}$ ——表 2 中的第  $h$  次谐波电流允许值，A；

$I_h$ ——短路容量为  $S_{k1}$  时的第  $h$  次谐波电流允许值。

## 附 录 C

### 谐波的基本计算式

（补充件）

C1 第  $h$  次谐波电压含有率  $HRU_h$  与第  $h$  次谐波电流分量  $I_h$  的关系：

$$HRU_h = \frac{\sqrt{3} \cdot Z_h \cdot I_h}{10 \cdot U_N} (\%) \quad (\text{C1})$$

近似的工程估算按 (C2) 或 (C3) 式计算：

$$HRU_h = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot h \cdot I_h}{10 \cdot S_k} (\%) \quad (\text{C2})$$

或

$$I_h = \frac{10 \cdot S_k \cdot HRU_h}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot h} (\%) \quad (\text{C3})$$

式中： $U_N$ ——电网的标称电压，kV；

$S_k$ ——公共连接点的三相短路容量，MVA；

$I_h$ ——第  $h$  次谐波电流，A；

$Z_h$ ——系统的第  $h$  次谐波阻抗， $\Omega$ 。

C2 两个谐波源的同次谐波电流在一条线路的同一相上叠加，当相位角已知时按 (C4) 式计算：

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + 2I_{h1} \cdot I_{h2} \cdot \cos\theta_h} \quad (\text{C4})$$

式中： $I_{h1}$ ——谐波源 1 的第  $h$  次谐波电流，A；

$I_{h2}$ ——谐波源 2 的第  $h$  次谐波电流，A；

$\theta_h$ ——谐波源 1 和 谐波源 2 的第  $h$  次谐波电流之间的相位角。

当相位角不确定时，可按 (C5) 式进行计算：

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + K_h I_{h1} I_{h2}} \quad (\text{C5})$$

式中  $K_h$  系数按表 C1 选取。

表 C1 公式 (C5) 中系数  $K_h$  的值

$h$	3	5	7	11	13	9   >13   偶次
$K_h$	1.62	1.28	0.72	0.18	0.08	0

两个以上同次谐波电流叠加时, 首先将两个谐波电流叠加, 然后再与第三个谐波电流相叠加, 以此类推。

两个及以上谐波源在同一节点同一相上引起的同次谐波电压叠加的计算式与式 (C4) 或 (C5) 类同。

C3 在公共连接点处第  $i$  个用户的第  $h$  次谐波电流允许值 ( $I_{hi}$ ) 按 (C6) 式计算:

$$I_{hi} = I_h (S_i/S_1)^{1/a} \quad (C6)$$

式中:  $I_h$  ——按附录 B 换算的第  $h$  次谐波电流允许值, A;

$S_i$  ——第  $i$  个用户的用电协议容量, MVA;

$S_1$  ——公共连接点的供电设备容量, MVA;

$a$  ——相位叠加系数, 按表 C2 取值。

表 C2

$h$	3	5	7	11	13	9   >13   偶次
$a$	1.1	1.2	1.4	1.8	1.9	2

### 2.3.2.4 三相电压不平衡

摘自 GB/T 15543—2008 《电能质量 三相电压不平衡》。

#### 4 电压不平衡度限值

##### 4.1 电力系统公共连接点电压不平衡度限值为:

电网正常运行时, 负序电压不平衡度不超过 2%, 短时不得超过 4%;

低压系统零序电压限值暂不作规定, 但各相电压必须满足 GB/T 12325 的要求。

注 1: 本标准中不平衡度为在电力系统正常运行的最小方式 (或较小方式) 下、最大的生产 (运行) 周期中负荷所引起的电压不平衡度的实测值。

注 2: 低压系统是指标称电压不大于 1kV 的供电系统。

4.2 接于公共连接点的每个用户引起该点负序电压不平衡度允许值一般为 1.3%, 短时不超过 2.6%。根据连接点的负荷状况以及邻近发电机、继电保护和自动装置安全运行要求, 该允许值可作适当变动, 但必须满足 4.1 的规定。

### 2.3.2.5 电力系统频率偏差

摘自 GB/T 15945—2008 《电能质量 电力系统频率偏差》。

#### 3 频率偏差限值

3.1 电力系统正常运行条件下频率偏差限值为  $\pm 0.2\text{Hz}$ 。当系统容量较小时, 偏差限值可以放宽到  $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

3.2 冲击负荷引起的频率偏差限值见本标准附录 A。

3.3 电力系统中频率合格率的统计方法见本标准附录 B。

附录 A  
(规范性附录)

冲击负荷引起的频率偏差变化

冲击负荷引起的系统频率变化为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ，根据冲击负荷性质和大小以及系统的条件也可适当变动，但应保证近区电力网、发电机组和用户的安全、稳定运行以及正常供电。

2.3.2.6 暂时过电压和瞬态过电压

摘自 GB/T 18481—2001《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》。

3.1 过电压 overvoltage

以 $U_m$ 表示三相系统最高电压，则峰值超过系统最高相对地电压峰值（ $\sqrt{2/3}U_m$ ）或最高相间电压峰值（ $\sqrt{2}U_m$ ）的任何波形的相对地或相间电压分别为相对地或相间过电压。

注：系统最高电压是指当系统正常运行时，在任何时间、系统上任何一点所出现的电压最高值（不包括系统的暂态和异常电压。）

4 系统（设备）按最高电压 $U_m$ 的划分

$U_m \leq 1\text{ kV}$  的系统（设备）称为低压系统（设备）；

$U_m > 1\text{ kV}$  的系统（设备）称为高压系统（设备）。

高压系统（设备）还可以分为两个范围

范围 I： $1\text{ kV} < U_m \leq 252\text{ kV}$

范围 II： $U_m > 252\text{ kV}$

注：设备最高电压等于所在系统的系统最高电压，各级系统（设备）的最高电压在 GB 150 中规定。

5 电气设备上作用的过电压及其要求

5.1 交流电力系统中的电气设备，在运行中除了作用有持续工频电压（其值不超过系统最高电压 $U_m$ ，持续时间等于设计的运行寿命）外，还受到过电压的作用。按照作用过电压的幅值、波形及持续时间，可分为：

——暂时过电压，包括工频过电压、谐振过电压；

——瞬态过电压，包括操作（缓波前）过电压、雷电（快波前）过电压。

5.2 暂时过电压和操作过电压的标么值如下：

a) 工频过电压的 $1.0\text{p. u.} = U_m / \sqrt{3}$ ；

b) 谐振过电压和操作过电压的 $1.0\text{p. u.} = \sqrt{2}U_m / \sqrt{3}$ 。

注：此处 $U_m$ 指系统最高电压。

5.4 瞬态过电压（操作过电压、雷电过电压）及其要求

5.4.1 操作过电压一般由以下原因引起：

a) 线路切、合与重合；

b) 故障与切除故障；

c) 开断容性电流和开断较小或中等的感性电流；

d) 负载突变。

#### 5.4.2 线路合闸和重合闸过电压的要求

a) 系统最高电压范围Ⅱ的空载线路合闸，单相重合闸和成功的三相重合闸（如运行中使用），在线路上产生的相对地统计过电压，对330kV和500kV系统分别不大于2.2p.u.和2.0p.u.。

b) 系统最高电压范围Ⅰ的线路合闸和重合闸过电压不超过3.0p.u.。

#### 5.4.3 空载线路分闸过电压的限值

a) 范围Ⅱ，线路断路器在电源对地电压为1.3p.u.条件下开断空载线路不发生重击穿，即不应产生过电压。

b) 范围Ⅰ，110kV和220kV开断空载线路过电压不超过3.0p.u.。

c) 范围Ⅰ，66kV及以下非低电阻接地系统开断空载线路过电压不超过4.0p.u.；低电阻接地系统不超过3.2p.u.。

5.4.4 范围Ⅱ线路非对称故障分闸和振荡解列过电压不超过5.4.2 a)的相应值。范围Ⅰ不超过5.4.2 b)的相应值。

5.4.5 3kV~66kV用断路器开断关联电容补偿装置时电容器高压端对地过电压不超过4.0p.u.；电容器极间过电压不超过 $2.15\sqrt{2}U_{n,c}$ 。

注： $U_{n,c}$ 为电容器的额定电压。

5.4.6 用断路器开断具有冷轧硅钢片的变压器时，过电压不超过2.0p.u.；开断具有热轧硅钢片铁芯的110kV及220kV变压器的过电压不超过3.0p.u.，66kV及以下变压器不超过4.0p.u.；空载变压器和并联电抗器补偿装置合闸产生的操作过电压不超过2.0p.u.。

5.4.7 高压感应电动机合闸过电压一般不超过2.0p.u.；空载分闸过电压不超过2.5p.u.。

5.4.8 大于1kV且小于等于66kV系统单相间隙性电弧接地过电压的限值，随接地方式不同而异：

不接地 3.5p.u.；

消弧线圈接地 3.2p.u.；

电阻接地 2.5p.u.。

#### 5.4.10 雷电过压及其限制

a) 作用于输配电线路的雷电过电压有雷直击于导线、雷击于塔顶或避雷线后反击导线而产生的过电压以及雷击于线路及其附近的地面（包括塔顶），由于电、磁场的激烈变化产生的感应过电压。作用于发电厂、变电站电气设备上的雷电过电压，在大多数情况下是沿线路而来的雷电波。

b) 架空线路上的雷电过电压。

1) 距架空线路 $S > 65\text{m}$ 处，雷击对地放电时，线路上产生的感应过电压最大值为

$$U_i \approx 25 \frac{Ih_c}{S} \quad (1)$$

式中： $U_i$ ——雷击大地时感应过电压最大值，kV；

$I$ ——雷电流幅值（一般不超过100），kA；

$h_c$  ——导线平均高度，m；

$S$  ——雷击点与线路的距离，m。

线路上的感应过电压为随机变量，其最大值可达 300kV ~ 400kV，一般仅对 35kV 及以下线路的绝缘有一定威胁。

2) 雷击架空线路导线产生的直击雷过电压为

$$U_s \approx 100I \quad (2)$$

式中： $U_s$  ——雷击点过电压最大值，kV。

3) 因雷击架空线路避雷线、杆顶形成作用于线路绝缘的雷电反击过电压，与雷电参数、杆塔型式、高度和接地电阻等有关。

### 2.3.3 提高电能质量的措施

电能质量对供电系统经济运行及节能有较大的影响。有关部门在《电网电能质量技术监督管理规定》中，提出了“谁干扰，谁污染，谁治理”的原则，并指出：为保证电力系统安全、稳定、经济、优质运行，全面保障电能质量是电力企业和用户共同的责任和义务。

电能质量的内容比较多，对供电系统关系比较密切的有供电电压偏差、电压波动和闪变、三相电压不平衡、公用电网谐波、电力系统过电压及电力系统频率等几方面。本节主要介绍电能质量对节能及供电系统经济运行的影响及提高电能质量的措施要点。电能质量的具体设计规范要求、参数计算等内容见本书第 4 章、第 11 章。

#### 2.3.3.1 供电电压偏差

(1) 供电电压超差对电气设备运行及能耗的影响。

1) 变压器：

a. 电压升高，变压器空载损耗增大。

b. 电压降低，在传输同样功率的条件下变压器电流增大，绕组损耗增大，损耗值与电流平方成正比。

c. 电压过高，加快变压器绕组绝缘老化，缩短使用寿命。

2) 电动机：

a. 电压降低，电动机起动转矩和最大转矩下降。

b. 电压下降，交流电动机转差率增大转速下降轴功率减小，同样的负载力矩下电流增大。

3) 对电网经济运行的影响。输电线路和变压器在输送功率不变的条件下，其电流大小与运行电压成反比。电网低电压运行，会使线路和变压器电流增大。线路和变压器绕组的有功损耗与电流平方成正比，因此低电压运行会使电网有功功率损耗和无功功率损耗大大增加，增大了供电成本。

(2) 改善电压偏差的主要措施：

1) 合理选择变压器的变比和电压分接头。

2) 合理减小配电系统阻抗。

3) 合理补偿无功功率：

a. 调整并联补偿电容器组的接入容量。

b. 调整同步电动机的励磁电流。

4) 尽量使三相负荷平衡。

5) 改变配电系统运行方式。如切、合联络线或将变压器分、并列运行,借助改变配电系统的阻抗,调整电压偏差。

6) 采用有载调压变压器。

改善电压偏差的具体措施见 4.3.2.4 节。

### 2.3.3.2 电压波动和闪变

(1) 电压波动对受电设备的影响(《钢铁企业电力设计手册》5.3 节)。

电压频繁波动,对于联结在同一网络中的其他受电设备的运行是不利的。对于同步电动机,急剧的电压波动,可能产生振荡现象;对于照明则产生闪烁。由闪烁引起人们的烦躁,不但与电压变化的百分值有关,而且与电压波动的频率等因素有关。荧光灯和高压气体放电灯在电压变化时引起的闪烁比白炽灯轻微。

(2) 电压波动和闪变的抑制。电压波动和闪变的抑制措施见 4.2.2 节。

### 2.3.3.3 公用电网谐波

依据:《工业与民用配电设计手册》(第三版)第六章第五节。

(1) 电网谐波对设备运行及能耗的影响:

1) 对旋转电动机的影响。旋转电动机定子中的正序和负序谐波电流,分别形成正向和反向旋转磁场,使旋转电动机产生固定数的振动力矩和转速的周期变化,从而使电动机效率降低,发热增加。对于同步电动机的转子,又分别感应出正序和负序谐波电流。由于集肤效应,其主要部分并不是在转子绕组中流动,而是在转子表面形成环流,造成明显局部发热,缩短其使用寿命。

2) 对变压器的影响。变压器等电气设备由于过大的谐波电流而产生附加损耗,从而引起过热,使绝缘介质老化加速,导致绝缘损坏。正序和负序谐波电流同样使变压器铁芯产生磁滞伸缩和噪声,电抗器产生振动和噪声。

3) 对并联电容器的影响。并联电容器的容性阻抗特性,以及阻抗和频率成反比的特性,使得电容器容易吸收谐波电流而引起过载发热;当其容性阻抗与系统中感性阻抗相匹配时,容易构成谐波谐振,使电容器发热导致绝缘击穿的故障增多。谐波电压与基波电压峰值发生叠加,使得电容器介质更容易发生局部放电;此外,谐波电压与基波电压叠加时使电压波形增多了起伏,倾向于增多每个周期中局部放电的次数,相应地增加了每个周期中局部放电的功率,而绝缘寿命则与局部放电功率成反比。

4) 对断路器的影响。谐波电流的发热作用大于有效值相等的工频电流,能降低热元件的发热动作电流。

高次谐波含量较高的电流能使断路器的开断能力降低。当电流的有效值相同时,波形畸变严重的电流与工频正弦波形的电流相比,在电流过零时的  $di/dt$  可能较大。当存在严重的谐波电流时,某些断路器的磁吹线圈不能正常工作。

5) 对电子设备的影响。使相位控制设备的正常工作因控制信号紊乱而受到干扰,如电子计算机误动作、电子设备误触发、电子元件测试无法进行等。

6) 对继电保护的影响。使某些类型的继电保护,如晶体管整流型距离保护、变压器及母线复合电压保护由于相位变化而误动或拒动。

7) 对通信线路的影响。使通信线路、信息线路产生噪声,甚至造成故障。

8) 其他。消弧线圈是按照所接的局部电网的工频参数来调谐的,对于谐波实际上不起

作用。谐波电压使电缆绝缘局部放电增加，对电缆使用寿命有较大影响。大容量高压变压器由谐波造成的涌磁过程能延续数秒或更长的时间，有可能引起谐波过电压，并使有关避雷器的放电时间过长，放电能量过大而受到损坏。三相或单相电压互感器往往由于谐波引起的谐振而导致损坏。谐波电流引起的电气设备及配电线路过载导致短路，甚至引发火灾的事件屡有发生。

(2) 减小谐波影响、提高电能质量的措施。

减小谐波影响的技术措施见表 2-3-2。

表 2-3-2 减小谐波影响的技术措施

序号	名称	内容	评价
1	增加换流装置的脉动数	改造换流装置或利用相互间有一定移相角的换流变压器	1. 可有效地减少谐波含量 2. 换流装置容量应相等 3. 使装置复杂化
2	加装交流滤波装置	在谐波源附近安装若干单调谐或高通滤波支路，以吸收谐波电流	1. 可有效地减少谐波含量 2. 应同时考虑无功补偿和电压调整效应 3. 运行维护简单，但需专门设计
3	改变谐波源的配置或工作方式	具有谐波互补性的设备应集中布置，否则应分散或交错使用，适当限制谐波量大的工作方式	1. 可以减小谐波的影响 2. 对装置的配置或工作方式有一定的要求
4	加装串联电抗器	在用户进线处加串联电抗器，以增大和系统的电气距离，减小谐波对地区电网的影响	1. 可减小和系统的谐波相互影响 2. 应同时考虑功率因数补偿和电压调整效应 3. 装置运行维护简单，但需专门设计
5	改善三相不平衡度	从电源电压、线路阻抗、负荷特性等找出三相不平衡原因，加以消除	1. 可有效地减少 3 次谐波的产生 2. 有利于设备的正常用电，减小损耗 3. 有时需要用平衡装置
6	加装静止无功补偿装置（或称动态无功补偿装置）	采用 TCR、TCT 或 SR 型静补装置时，其容性部分设计成滤波器	1. 可有效地减少波动谐波源的谐波含量 2. 有抑制电压波动、闪变、三相不对称和无功补偿的功能 3. 一次性投资较大，需专门设计
7	增加系统承受谐波能力	将谐波源改由较大容量的供电点或由高一电压的电网供电	1. 可以减小谐波源的影响 2. 在规划和设计阶段考虑
8	避免电力电容器组对谐波的放大	改变电容器组串联电抗器的参数，或将电容器组的某些支路改为滤波器，或限制电容器组的投入容量	1. 可有效地减小电容器组对谐波的放大并保证电容器组安全运行 2. 需专门设计
9	提高设备或装置抗谐波干扰能力，改善抗谐波保护的性能	改进设备或装置性能，对谐波敏感设备或装置采用灵敏的保护装置	1. 使用于对谐波（特别暂态过程中的谐波）较敏感的设备或装置 2. 需专门研究
10	采用有源滤波器、无源滤波器 etc 新型抑制谐波的措施	研制、逐步推广应用	目前还只用于较小容量谐波源的补偿，造价较高

#### 2.3.3.4 三相电压不平衡

依据：《工业与民用配电设计手册》（第三版）第六章第六节。

(1) 三相不平衡负荷对运行及能耗的影响。

1) 引起旋转电机的附加发热和振动，危及其安全运行和正常出力。  
2) 引起以负序分量为起动元件的多种保护发生误动作（特别是当电网中同时存在谐波时），这对电网安全运行是有严重威胁的。

3) 电压不平衡使半导体变流设备产生附加的谐波电流（非特征谐波），而这种设备一般设计上只允许2%的电压不平衡度。

4) 电压不平衡使发电机容量利用率下降。由于不平衡时最大相电流不能超过额定值，在极端情况下，只带单相负荷时，则设备利用率仅为  $UI/\sqrt{3}UI = 0.577$ 。

5) 变压器的三相负荷不平衡，不仅使负荷较大的一相绕组过热导致其寿命缩短，而且还会由于磁路不平衡，大量漏磁通经箱壁、夹件等使其严重发热，造成附加损耗。

6) 在低压配电线路中，三相负荷不平衡会影响计算机正常工作，还会引起照明光源寿命缩短（电压过高）或照度不足（电压过低）以及电视机的损坏等。

7) 三相负荷不平衡时，将引起电网损耗的增加。

8) 使电加热炉的电能消耗增加，产量减少，使炉子的效率降低。

9) 对于通信系统，电力三相不平衡时，会增大对其干扰，影响正常通信质量。

(2) 降低三相不平衡度的措施。

1) 单相用电设备接入220/380V三相系统时应尽量使三相负荷平衡。

2) 由地区公共低压电网供电的220V照明负荷，若线路电流不超过30A可用单相供电，否则应以220/380V三相四线制供电。

3) 将不对称负荷接到更高的电压等级电网供电，以使连接点的短路容量  $S_k$  足够大（例如对于单相负荷， $S_k$  大于50倍负荷容量时，就能保证连接点的电压不平衡度小于2%）。

4) 采用平衡装置。

#### 2.3.3.5 电力系统频率

(1) 电力系统频率变化对供配电系统的影响。我国各地多次的系统频率特性试验综合结果为：在50Hz系统中，频率每变化0.1Hz，负荷功率变化0.02%~0.06%。

频率下降使系统中所需磁化电流增加（特别是晶格取向铁芯的配电变压器），再加上恒电流特性的无功负荷和恒定阻抗特性的并联电容器的影响，使系统电压下降，引起系统有功负荷的进一步降低。

1) 当电源电压恒定时，异步电机受电源频率的影响可归纳如下：

- a. 同步转速与频率成正比；
- b. 空载电流与频率2~3次方成正比（风损大的电动机影响小）；
- c. 定子电流与频率近似成反比；
- d. 起动电流与频率近似成反比；
- e. 最大功率与频率近似成反比；
- f. 最大转矩与频率二次方近似成反比；
- g. 起动转矩与频率三次方近似成反比；

- h. 功率因数与频率近似成比例；
- i. 效率与频率近似成比例；
- j. 功率一定时，频率增加则温升下降。

2) 变压器受电源频率的影响。各种输电或配电用变压器，包括带负荷调节分接头的，都是按标准在额定频率运行条件下确定其额定容量（kVA），并在二次侧绕组电压为1.05倍额定电压、功率因数为0.8及以上时，使变压器温升不超过规定极限值。若频率偏离额定值，变压器的铁芯损耗、漏磁通和噪声所受的影响，与相反方向的电压偏离导致的影响十分相似。虽然铁芯的磁滞损耗、杂散负荷损耗和介质损耗在运行频率下降时会有所下降，但对强迫冷却的变压器，其冷却介质的流量将会近似地按频率变化成比例降低。在频率对额定值的负偏离超出5%时，需要顾及温升对变压器出力的限制。配电变压器很少采用强迫冷却方式，但变压器励磁电流随着运行频率的下降而非线性地增加，在地区内无功补偿不足或调压措施不完善时，将会导致地区电压下降。

3) 电容器受电源频率的影响。并联无功补偿用电容器能持续在额定频率和110%额定电压下提供其最大的无功功率。当运行频率下降时，电容器的无功出力和额定电流将直接按频率的降低成比例地下降。此时电压对并联电容器的支撑作用也因频率下降引起的容抗增大而削弱，进一步使输出电流减小。在频率对额定值负偏离不超出5%时，对并联电容器的影响很小。无功补偿用并联电抗器的感抗随频率的降低而线性地下降，同时导致无功电流的增加。有关标准规定，并联电抗器要能在105%额定电压下持续运行。这相当于可长期耐受105%额定电流。因此，就设备的容量而言，-5%的频率偏离不会带来明显的影响。何况可按系统对无功功率需求量，对这些电抗器进行切合操作，也可利用晶闸管平滑地进行无功（电压）调节，即使频率波动较大带来一些不良影响，在调节中也总可以得到补偿。

线路串联补偿用电容器，若运行频率下降，则在线路感抗随之下下降的同时，增大了电容器的容抗，导致线路补偿度的增加，使线路的传输能力得到提高。但此时线路在给定的传输功率下，串联电容器装置两端的电压差增加，削弱了串联电容器的电压裕度。在多数实际运行系统中，串联电容器的容量受其额定电流的制约，即低频率运行时，只能认为是串联补偿线路输送能力的储备得到了提高。

(2) 应对电网频率产生偏差的措施：

- 1) 发电系统保证频率符合国家标准。
- 2) 电力系统频率自动调整。

3) 在设计选择电力供电系统及设备时，应使供电系统传输环节和耗能环节的各种设备在运行中所能承受的频率偏差符合国家标准，具备抗运行中频率扰动（偏差）的能力，保证供配电系统及电气设备经济运行。

### 2.3.3.6 电力系统过电压

交流电力系统中的电气设备，在运行中除了作用有持续工频电压外，还受到过电压的作用。电力系统过电压的危害主要体现在造成系统中的电力设备和线路绝缘击穿或损伤，危及电力系统安全运行。

电力系统过电压的分类、产生原因及防治措施见本书第11章。

## 2.4 节能型电气产品的选用方法

本节部分内容引自《节约用电手册》。

### 2.4.1 低损耗电力变压器的选用

#### 2.4.1.1 三相配电变压器能效限定值及能效等级

摘自 GB 20052—2013《三相配电变压器能效限定值及能效等级》。

#### 4.2 配电变压器能效等级

配电变压器能效等级分为3级，其中1级损耗最低。各级油浸式配电变压器空载损耗和负载损耗值均应不高于表1的规定。各级干式配电变压器空载损耗值和负载损耗值均应不高于表2的规定。

#### 4.3 配电变压器能效限定值

油浸式配电变压器的空载损耗值和负载损耗值均应不高于表1中3级的规定。干式配电变压器的空载损耗值和负载损耗值均应不高于表2中3级的规定。

表1 油浸式配电变压器能效等级

额定容量/ kV·A	1级						2级				3级			短路阻抗/ %
	电工钢带			非晶合金			空载损耗 /W		负载损耗 /W		空载损耗 /W	负载损耗 /W		
	空载损耗 /W	Dyn11/ Yzn11	Yyn0	空载损耗 /W	Dyn11/ Yzn11	Yyn0	电工钢带	非晶合金	Dyn11/ Yzn11	Yyn0		Dyn11/ Yzn11	Yyn0	
30	80	505	480	33	565	540	80	33	630	600	100	630	600	4.0
50	100	730	695	43	820	785	100	43	910	870	130	910	870	
63	110	870	830	50	980	935	110	50	1090	1040	150	1090	1040	
80	130	1050	1000	60	1180	1125	130	60	1310	1250	180	1310	1250	
100	150	1265	1200	75	1420	1350	150	75	1580	1500	200	1580	1500	
125	170	1510	1440	85	1700	1620	170	85	1890	1800	240	1890	1800	
160	200	1850	1760	100	2080	1980	200	100	2310	2200	280	2310	2200	
200	240	2185	2080	120	2455	2340	240	120	2730	2600	340	2730	2600	
250	290	2560	2440	140	2880	2745	290	140	3200	3050	400	3200	3050	
315	340	3065	2920	170	3445	3285	340	170	3830	3650	480	3830	3650	
400	410	3615	3440	200	4070	3870	410	200	4520	4300	570	4520	4300	
500	480	4300	4120	240	4870	4635	480	240	5410	5150	680	5410	5150	
630	570	4960		320	5580		570	320	6200		810	6200		4.5
800	700	6000		380	6750		700	380	7500		980	7500		
1000	830	8240		450	9270		830	450	10300		1150	10300		
1250	970	9600		530	10800		970	530	12000		1360	12000		
1600	1170	11600		630	13050		1170	630	14500		1640	14500		

2

表2 干式配电变压器能效等级

额定容量/ kV·A	1级						2级						3级			短路阻抗/%	
	电工钢带			非晶合金			空载损耗/W			空载损耗/W			空载损耗/W				
	负载损耗/W			负载损耗/W			电工钢带			非晶合金			负载损耗/W				
	B (100℃)	F (120℃)	H (145℃)	B (100℃)	F (120℃)	H (145℃)	电工钢带	非晶合金	B (100℃)	F (120℃)	H (145℃)	B (100℃)	F (120℃)	H (145℃)	B (100℃)		F (120℃)
30	135	640	685	635	675	720	150	70	670	710	760	670	710	760	670	710	760
50	195	845	965	895	950	1015	215	90	940	1000	1070	940	1000	1070	940	1000	1070
80	265	1160	1330	1225	1310	1405	295	120	1290	1380	1480	1290	1380	1480	1290	1380	1480
100	290	1330	1520	1405	1490	1605	320	130	1480	1570	1690	1480	1570	1690	1480	1570	1690
125	340	1565	1780	1655	1760	1880	375	150	1740	1850	1980	1740	1850	1980	1740	1850	1980
160	385	1800	2050	1900	2025	2165	430	170	2000	2130	2280	2000	2130	2280	2000	2130	2280
200	445	2135	2440	2250	2405	2575	495	200	2370	2530	2710	2370	2530	2710	2370	2530	2710
250	515	2330	2665	2460	2620	2810	575	230	2590	2760	2960	2590	2760	2960	2590	2760	2960
315	635	2945	3355	3105	3295	3545	705	280	3270	3470	3730	3270	3470	3730	3270	3470	3730
400	705	3375	3850	3560	3790	4065	785	310	3750	3990	4280	3750	3990	4280	3750	3990	4280
500	835	4130	4705	4360	4635	4970	930	360	4590	4880	5230	4590	4880	5230	4590	4880	5230
630	965	4975	5660	5255	5585	5975	1070	420	5530	5880	6290	5530	5880	6290	5530	5880	6290
630	935	5050	5760	5330	5660	6080	1040	410	5610	5960	6400	5610	5960	6400	5610	5960	6400
800	1095	5895	6265	6220	6610	7085	1215	480	6550	6960	7460	6550	6960	7460	6550	6960	7460
1000	1275	6885	7315	7265	7725	8320	1415	550	7650	8130	8760	7650	8130	8760	7650	8130	8760
1250	1505	8190	8720	8645	9205	9850	1670	650	9100	9690	10370	9100	9690	10370	9100	9690	10370
1600	1765	9945	10555	10495	11145	11950	1960	760	11050	11730	12580	11050	11730	12580	11050	11730	12580
2000	2195	12240	13005	12920	13725	14780	2440	1000	13600	14450	15560	13600	14450	15560	13600	14450	15560
2500	2590	14535	15455	15340	16310	17525	2880	1200	16150	17170	18450	16150	17170	18450	16150	17170	18450

### 2.4.1.2 电力变压器能效限定值及能效等级

电力变压器能效限定值及能效等级的具体内容见 GB 24790—2009《电力变压器能效限定值及能效等级》。

### 2.4.1.3 S11 系列低损耗配电变压器

(1) S11 系列低损耗配电变压器是节能配电变压器，用卷铁芯结构改变了传统的叠片式铁芯结构，有以下特点：

1) 硅钢片连续卷制，铁芯无缝，大大减少了磁阻，空载电流减少了 60%~80%，提高了功率因数，降低了电网线损，改善了电网的供电品质。

2) 连续卷绕充分利用了硅钢片的取向性，空载损耗降低 20%~35%。

3) 卷铁芯经退火工艺后，其导磁性能可恢复到机加工前的原有水平。

4) 卷铁芯结构成自然紧固状态，无需夹件紧固，避免了因铁芯夹紧所带来的铁芯性能恶化，损耗增加。

5) 卷铁芯自身是一个无缝的整体，且结构紧凑，在运行时的噪声水平降低到 30~45dB，保护了环境。因此，很适合于建筑物内和生活区安装使用。

6) 卷铁芯节约加工材料，硅钢片无横剪工序，边角废料少，材料利用率比 S9 型叠片式铁芯变压器高。

(2) 立体卷铁芯变压器。

这种变压器是在平面卷铁芯变压器结构基础上进行特殊设计改进而发展起来的。将平面形卷铁芯的内外框改成窗口尺寸与内框相同的三只相同单框，三框拼合在一起，就成为对称的立体三角形卷铁芯结构，实现三相磁路完全对称等长。具有三相平衡，节省硅钢片及电磁线，空载损耗低，空载电流低，噪声低，减少电磁辐射等特点。与 S9 系列同容量变压器相比，三级能效立体卷铁芯油浸变压器空载损耗平均下降 29%，空载电流平均下降 84%；二级能效变压器空载损耗平均下降 48%，空载电流平均下降 87%；一级能效变压器空载损耗平均下降 48%，负载损耗平均下降 20%，空载电流平均下降 89%。一级能效立体卷铁芯变压器与 S9 变压器指标对比见表 2-4-1。

表 2-4-1 立体卷铁芯变压器与 S9 变压器技术指标对比表

额定容量 (kVA)	短路阻抗 (%)	S9			立体卷铁芯变压器			同 S9 相比下降		
		空载损耗 (W)	负载损耗 (W)	空载电流 (%)	空载损耗 (W)	负载损耗 (W)	空载电流 (%)	空载 损耗	负载 损耗	空载 电流
30	4	130	630	2.30	80	505	0.28	38%	20%	88%
50	4	170	910	2.00	100	730	0.23	41%	20%	89%
63	4	200	1090	1.90	110	870	0.21	45%	20%	89%
80	4	250	1310	1.90	130	1050	0.18	48%	20%	91%
100	4	290	1580	1.80	150	1265	0.17	48%	20%	91%
125	4	340	1890	1.70	170	1510	0.16	50%	20%	91%
160	4	400	2310	1.60	200	1850	0.16	50%	20%	90%
200	4	480	2730	1.50	240	2185	0.16	50%	20%	89%
250	4	560	3200	1.40	290	2560	0.14	48%	20%	90%
315	4	670	3830	1.40	340	3065	0.13	49%	20%	91%

续表

额定容量 (kVA)	短路阻抗 (%)	S9			立体卷铁芯变压器			同 S9 相比下降		
		空载损耗 (W)	负载损耗 (W)	空载电流 (%)	空载损耗 (W)	负载损耗 (W)	空载电流 (%)	空载 损耗	负载 损耗	空载 电流
400	4	800	4520	1.30	410	3615	0.13	49%	20%	90%
500	4	960	5410	1.20	480	4330	0.13	50%	20%	89%
630	4.5	1200	6200	1.10	570	4960	0.12	53%	20%	89%
800	4.5	1400	7500	1.00	700	6000	0.12	50%	20%	88%
1000	4.5	1700	10300	1.00	830	8240	0.12	51%	20%	88%
1250	4.5	1950	12000	0.90	970	9600	0.12	50%	20%	87%
1600	4.5	2400	14500	0.80	1170	11600	0.12	51%	20%	85%
平均下降								48%	20%	89%

注 对于额定容量为500kVA及以下的变压器，上表的负载损耗值以 Dyn11 联结组的数据计算。

#### 2.4.1.4 调容变压器

目前，我国广大电力用户，包括一些企业和农村地区使用的配电变压器的容量一般是按照用电高峰时的容量配置的，因而普遍较大。这种配置在用户用电高峰时比较实用，而在用电低谷时，由于负载轻，用电量小，往往就会出现“大马拉小车”的不合理现象，既浪费了国家宝贵的电力资源，又增加了企业的经济负担。本产品采用外设调容开关的技术方案，巧妙地解决了变压器容量闲置，导致“大马拉小车”的问题。构造简单、体积小、造价低、操作装修方便、性能优越可靠。本产品的设计特点是在变压器大容量绕组的基础上，高压、低压各加一段绕组，变压器外壳装设有调容开关，变换开关的投掷位置，即可改变绕组的连接从而改变铁芯的磁能密度、变压器容量。

以额定容量为100kVA、30kVA，额定电压10kV/0.4kV双容量变压器为例，本产品的主要性能见表2-4-2。

表 2-4-2 调容变压器主要性能表

容量 (kVA)	空载损耗 (W)	负载损耗 (W)	空载电流 (%)	阻抗电压 (%)
100	312	2100	3.0	4.2
30	150	800	2.4	4.3

采用这种双容量变压器与一台100kVA和一台30kVA轮换使用的子母变压器相比，一次性投资可节约数千元，节电效果相同；与100kVA单容量节能型变压器相比，成本仅增加几百元，但是仅自身损耗一项，每年即可节电3000~5000kWh。使用此产品投资小，回报高，节电效果显著，经济效益十分明显，市场前景十分广阔。

#### 2.4.1.5 SH系列非晶合金变压器

非晶合金铁芯变压器是利用铁、硼、硅和碳四种元素合成的非晶合金作铁芯材料而制作成的变压器。非晶合金是将合金金属经特高温而后急冷，再经过高速旋转喷转而成的非晶（犹如玻璃等非晶体材料）带状薄膜（约0.02mm）。这种带材是非磁性材料，它可以根据不同用途进行磁化后达到所需要的磁密。非晶合金变压器的铁芯是由不间断的非晶合金带材卷

绕而成，没有间隙，所以铁磁损失极小。

研究表明，非晶合金铁芯的特点如下：

(1) 非晶合金材料不存在晶体结构，是一种各向同性的软磁材料，磁化功率小。

(2) 不存在阻碍磁畴壁移动的结构缺陷，其磁滞损耗要比硅钢片小。

(3) 非晶合金带的厚度极薄，只有  $20 \sim 30 \mu\text{m}$ ，填充系数相应变小，只有  $0.75 \sim 0.8$ 。

(4) 电阻率很高，是硅钢片的  $3 \sim 6$  倍，非晶合金材料的涡流损耗大大降低，因此，单位损耗仅为硅钢片的  $20\% \sim 30\%$ 。

(5) 为了消除非晶合金在成材过程中急速冷却和卷绕铁芯时产生的应力，必须进行退火处理。通过退火的卷铁芯结构非晶合金变压器空载损耗可下降  $2/3$ 。

(6) 非晶合金材料的磁畴伸缩比硅钢片要大得多，是硅钢片的  $7 \sim 8$  倍，直接影响非晶变压器噪声。非晶材料在一定磁场强度下，经过退火处理，使磁畴沿外磁场方向形成条带状磁畴，保温冷却后，这种磁畴被保留下来，磁畴只沿带宽方向变化，而不发生磁畴转动。如果磁场退火效果达  $100\%$ ，再次磁化时将不显示磁致伸缩。实际上退火效果不可能达到  $100\%$ ，还存在一定的磁致伸缩。因此，非晶变压器的铁芯在良好的退火条件下噪声通常都低于硅钢片变压器。

非晶合金铁芯变压器技术指标见表 2-4-3。

表 2-4-3 非晶合金铁芯变压器技术指标

容量 (kVA)	电压组合及分接范围			联结 组标号	短路 阻抗 (%)	平面卷铁芯 SH-NX2 (SH15)			立体卷铁芯 SH-NX1 (SH16)		
	高压 (kV)	高压 分接范围 (%)	低压 (kV)			空载 损耗 (W)	负载损耗 (W)	空载 电流 (%)	空载 损耗 (W)	负载损耗 (W)	空载 电流 (%)
30	6 6.3 10 10.5 11	±5 ±2×2.5	0.4	Dyn11 Yyn0	4.0	33	630/600	0.50	33	565/540	0.28
50						43	910/870	0.48	43	820/785	0.23
63						50	1090/1040	0.45	50	980/935	0.21
80						60	1310/1250	0.44	60	1180/1125	0.18
100						75	1580/1500	0.43	75	1420/1350	0.17
125						85	1890/1800	0.42	85	1700/1620	0.16
160						100	2310/2200	0.41	100	2080/1980	0.16
200						120	2730/2600	0.38	120	2455/2340	0.16
250						140	3200/3050	0.37	140	2880/2745	0.14
315						170	3830/3650	0.36	170	3445/3285	0.13
400						200	4520/4300	0.32	200	4070/3870	0.13
500						240	5410/5150	0.32	240	4870/4635	0.13
630						320	6200	0.28	320	5580	0.12
800						380	7500	0.28	380	6750	0.12
1000						450	10300	0.27	450	9270	0.12
1250						530	12000	0.20	530	10800	0.12
1600	630	14500	0.20	630	13050	0.12					

注 表中斜线上方的负载损耗值适用于 Dyn11 联结组，斜线下方的负载损耗值适用于 Yyn0 联结组。

### 2.4.1.6 变压器节能产品介绍

为促进高效节能产品的推广应用，工信部每年都发布《节能机电设备（产品）推荐目录》及《“能效之星”产品目录》。

在工信部公布的2015《节能机电设备（产品）推荐目录（第六批）》中涉及变压器98个产品，包括油浸配电变压器、干式变压器、非晶合金铁芯变压器、立体卷铁芯变压器、电力变压器等类型。相关型号有S-M，S-M.RL，S11，S13，SCB13，SCBH，SH，SH15-M.RL，SBH，SZ11，SSZ，SFZ11等。它们的主要技术参数如空载损耗、负载损耗，均优于国标规定的2级能效指标或1级能效指标。

工信部2014年“能效之星”变压器产品目录见表2-4-4。

表2-4-4 工信部2014年“能效之星”变压器产品目录

1.1 变压器：油浸式非晶合金铁芯配电变压器						
序号	制造商	产品型号	能效指标（实测值）		能效指标（评价值）	
			空载能耗 kW	负载能耗 kW	空载能耗 kW	负载能耗 kW
1	常德国力变压器有限公司	SBH15-M-500/10	0.204	4.631	优于能效一级	优于能效一级
2	上海置信电气非晶有限公司	SBH-M-400/10-NX1	0.143	3.906		
3	天津市特变电工变压器有限公司	S(B)H15-M-630/10-NX1	0.235	5.314		
4	特变电工股份有限公司	SH-M-630/10-NX1	0.216	5.078		
5	江苏宏源电气有限责任公司	SBH-M-200/10-NX1	0.087	2.362		
1.2 变压器：油浸式电工钢带铁芯配电变压器						
序号	制造商	产品型号	能效指标（实测值）		能效指标（评价值）	
			空载能耗 kW	负载能耗 kW	空载能耗 kW	负载能耗 kW
1	江苏华鹏变压器有限公司	S-M-1600/10-NX1	1.111	11.520	优于能效一级	优于能效一级
2	江苏宏源电气有限责任公司	S-M-800/10-NX1	0.621	5.459	优于能效一级	优于能效一级
1.3 变压器：干式非晶合金铁芯配电变压器						
序号	制造商	产品型号	能效指标（实测值）		能效指标（评价值）	
			空载能耗 kW	负载能耗 kW	空载能耗 kW	负载能耗 kW
1	正泰电气股份有限公司	SCBH-1250/10-NX1	0.526	8.806	优于能效一级	优于能效一级
2	明珠电气有限公司	SCBH16-2500/10-NX1	0.774	15.99		
1.4 变压器：干式电工钢带铁芯配电变压器						
序号	制造商	产品型号	能效指标（实测值）		能效指标（评价值）	
			空载能耗 kW	负载能耗 kW	空载能耗 kW	负载能耗 kW
1	顺特电气设备有限公司	SCB-2500/10-NX1	2.477	14.775	优于能效一级	优于能效一级
2	海鸿电气有限公司	SGB-RL-1600/10-NX1	1.518	9.38		
3	特变电工股份有限公司	SC(B)-1250/10-NX1	1.295	7.822		
4	明珠电气有限公司	SCB-800/10-NX1	0.905	5.706		
5	江苏宏源电气有限责任公司	SC(B)-1000/10-NX1	1.23	7.488		

续表

## 1.5 变压器：电力变压器

序号	制造商	产品型号	能效指标 (实测值)		能效指标 (评价值)	
			空载能耗 kW	负载能耗 kW	空载能耗 kW	负载能耗 kW
1	山东华驰变压器股份有限公司	SZ11-20000/35	14.337	83.196	优于能效 一级	优于能效 一级
2	江苏华鹏变压器有限公司	SSZ-180000/220 (JN)	72.78	488.43		
3	华城电机(武汉)有限公司	SZ11-6300/35	5.472	36.933		

工信部 2015 年“能效之星”变压器产品目录见表 2-4-5。

表 2-4-5 工信部 2015 年“能效之星”变压器产品目录

## 1.1 三相配电变压器：油浸式非晶合金铁芯变压器

序号	制造商	产品型号	能效指标 (实测值)		能效指标 (评价值)	
			空载损耗 kW (kVA)	负载损耗 kW (kVA)	空载损耗 kW (kVA)	负载损耗 kW (kVA)
1	浙江广天变压器有限公司	SBH16-M-30-1600/10	系列： 0.081 (125) 0.288 (630) 0.524 (1250)	系列： 1.618 (125) 5.302 (630) 10.638 (1250)	优于能效 一级	优于能效 一级
2	沪光集团有限公司	SBH15-M-500-1600/10	系列： 0.224 (500) 0.41 (1000) 0.579 (1600)	系列： 4.47 (500) 8.15 (1000) 10.82 (1600)		
3	白城电力镇赉变压器有限公司	SBH15-M-1000/10	0.24	7.499		
4	顾特电气设备有限公司	SBH-M-160-500/10	0.186	4.621		

## 1.2 三相配电变压器：油浸式电工钢带铁芯变压器

序号	制造商	产品型号	能效指标 (实测值)		能效指标 (评价值)	
			空载损耗 kW (kVA)	负载损耗 kW (kVA)	空载损耗 kW (kVA)	负载损耗 kW (kVA)
1	广州广高高压电器有限公司	S14-M-30-1600/10	系列： 0.134 (100) 0.495 (630) 0.722 (1000)	系列： 1.174 (100) 4.750 (630) 7.587 (1000)	优于能效 一级	优于能效 一级
2	广州广高高压电器有限公司	S13-M-30-1600/10	系列： 0.139 (100) 0.490 (630) 0.724 (1000)	系列： 1.210 (100) 4.660 (630) 7.587 (1000)		
3	沪光集团有限公司	S14-M-100-1250/10	系列： 0.127 (100) 0.433 (500) 0.912 (1250)	系列： 1.235 (100) 4.318 (500) 9.468 (1250)		

续表

## 1.3 三相配电变压器：干式非晶合金铁芯变压器

序号	制造商	产品型号	能效指标（实测值）		能效指标（评价值）	
			空载损耗 kW (kVA)	负载损耗 kW (kVA)	空载损耗 kW (kVA)	负载损耗 kW (kVA)
1	顺特电气设备有限公司	SCBH-1250/10	0.623	8.711	优于能效一级	优于能效一级
2	广州广高高压电器有限公司	SCBH15-630/10	0.285	4.980		
3	沪光集团有限公司	SCBH15-500-2500/10	系列： 0.311 (500) 0.506 (1000) 0.490 (1250)	系列： 3.472 (500) 7.68 (1000) 8.20 (1250)		

## 1.4 三相配电变压器：干式电工钢带铁芯变压器

序号	制造商	产品型号	能效指标（实测值）		能效指标（评价值）	
			空载损耗 kW (kVA)	负载损耗 kW (kVA)	空载损耗 kW (kVA)	负载损耗 kW (kVA)
1	海南金盘电气有限公司	SCB13-30-2500/10	0.337 (160) 1.363 (1250) 2.1 (2000)	1.78 (160) 8.23 (1250) 12.72 (2000)	优于能效一级	优于能效一级
2	浙江派尔电气有限公司	SCB13-30-2000/10	0.256 (100) 0.937 (800) 1.993 (2000)	1.230 (100) 5.920 (800) 12.170 (2000)		
3	沪光集团有限公司	SCB-100-2000/10	0.286 (100) 1.502 (1250) 2.07 (2000)	1.244 (100) 8.218 (1250) 12.936 (2000)		

## 2.4.2 高效电动机的选用

## 2.4.2.1 中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级

摘自 GB 18613—2012《中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》。

## 4.2 电动机能效等级

电动机能效等级分为3级，其中1级能效最高。各等级电动机在额定输出功率下的实测效率应不低于表1的规定，其容差应符合 GB 755—2008 第12章的规定。

表1中未列出额定功率值的电动机，其效率可用线性插值法确定。

## 4.3 电动机能效限定值

电动机能效限定值在额定输出功率的效率应不低于表1中3级的规定。

表1 电动机能效等级

额定功率/ kW	效率 /%								
	1级			2级			3级		
	2极	4极	6极	2极	4极	6极	2极	4极	6极
0.75	84.9	85.6	83.1	80.7	82.5	78.9	77.4	79.6	75.9
1.1	86.7	87.4	84.1	82.7	84.1	81.0	79.6	81.4	78.1

续表

额定功率/ kW	效率 /%								
	1级			2级			3级		
	2极	4极	6极	2极	4极	6极	2极	4极	6极
1.5	87.5	88.1	86.2	84.2	85.3	82.5	81.3	82.8	70.0
2.2	89.1	89.7	87.1	85.9	86.7	84.3	83.2	84.3	81.8
3	89.7	90.3	88.7	87.1	87.7	85.6	84.6	85.5	83.3
4	90.3	90.9	89.7	88.1	88.6	86.8	85.8	86.6	84.6
5.5	91.5	92.1	89.5	89.2	89.6	88.0	87.0	87.7	86.0
7.5	92.1	92.6	90.2	90.1	90.4	89.1	88.1	88.7	87.2
11	93.0	93.6	91.5	91.2	91.4	90.3	89.4	89.8	88.7
15	93.4	94.0	92.5	91.9	92.1	91.2	90.3	90.6	89.7
18.5	93.8	94.3	93.1	92.4	92.6	91.7	90.9	91.2	90.4
22	94.4	94.7	93.9	92.7	93.0	92.2	91.3	91.6	90.9
30	94.5	95.0	94.3	93.3	93.6	92.9	92.0	92.3	91.7
37	94.8	95.3	94.6	93.7	93.9	93.3	92.5	92.7	92.2
45	95.1	95.6	94.9	94.0	94.2	93.7	92.9	93.1	92.7
55	95.4	95.8	95.2	94.3	94.6	94.1	93.2	93.5	93.1
75	95.6	96.0	95.4	94.7	95.0	94.6	93.8	94.0	93.7
90	95.8	96.2	95.6	95.0	95.2	94.9	94.1	94.2	94.0
110	96.0	96.4	95.6	95.2	95.4	95.1	94.3	94.5	94.3
132	96.0	96.5	95.8	95.4	95.6	95.4	94.6	94.7	94.6
160	96.2	96.5	96.0	95.6	95.8	95.6	94.8	94.9	94.8
200	96.3	96.6	96.1	95.8	96.0	95.8	95.0	95.1	95.0
250	96.4	96.7	96.1	95.8	96.0	95.8	95.0	95.1	95.0
315	96.5	96.8	96.1	95.8	96.0	95.8	95.0	95.1	95.0
355~375	96.6	96.8	96.1	95.8	96.0	95.8	95.0	95.1	95.0

#### 4.4 电动机目标能效限定值

电动机目标能效限定值在额定输出功率的效率应不低于表1中2级的规定。在表1中7.5kW~375kW的目标能效限定值在本标准实施之日4年后开始实施；7.5kW以下的目标能效限定值在本标准实施之日5年后开始实施，并替代表1中3级的规定。

#### 4.5 电动机节能评价值

电动机节能评价值在额定输出功率的效率均应不低于表1中2级的规定。

### 2.4.2.2 高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级

高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级的具体内容见GB 30254—2013《高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级》。

### 2.4.2.3 三相异步电动机节能产品介绍

在工信部公布的2015《节能机电设备（产品）推荐目录（第六批）》中涉及电动机79个产品，包括TCA系列、YE3系列、JM4系列、YCE2系列、JYE3系列、YTE2系列、MME系列低压三相异步电动机；YB3系列、YBKE3、YBX3系列隔爆型三相异步电动机；YX系列、Y2W系列、NMI、NXR、YXKS、Y系列、YKK系列、YJS系列、YXKK、YKS系列高压三相异步电动机；YB2系列、YB3系列隔爆高压三相异步电动机等。它们的效率均优于国家标准规定的2级能效指标，有的低压电动机效率 $\geq 91.2\% \sim 95.4\%$ ，高压电动机效率 $\geq 95.0\% \sim 96.4\%$ 。

工信部2014年“能效之星”电动机产品目录见表2-4-6。

表2-4-6 工信部2014年“能效之星”电动机产品目录

2.1 电动机：低压三相异步电动机				
序号	制造商	产品型号	能效指标（实测值） 效率（%）	能效指标（评价值） 效率（%）
1	浙江金龙电机股份有限公司	JM4-355M-4	97.72	优于能效一级
2	重庆赛力盟电机有限责任公司	YCE2-355L-6	96.43	
3	重庆赛力盟电机有限责任公司	YCE2-355L1-4	96.97	
4	浙江金龙电机股份有限公司	JM4-180M-4	94.32	
2.2 电动机：高压三相异步电动机				
序号	制造商	产品型号	能效指标（实测值） 效率%	能效指标（评价值） 效率%
1	佳木斯电机股份有限公司	YB3 450-2	97.02%	优于能效一级
2	江苏航天动力机电有限公司	Y2W400-2	96.39%	

工信部2015年“能效之星”电动机产品目录见表2-4-7。

表2-4-7 工信部2015年“能效之星”电动机产品目录

2.1 电机				
序号	制造商	产品型号	能效指标（实测值） 效率（%）	能效指标（评价值） 效率（%）
1	南阳防爆集团股份有限公司	YZTE4-200L-2	95.3	优于能效一级
2	江苏大中电机股份有限公司	YE3-180M-2	94.46	
3	安徽皖南电机股份有限公司	YE3-315L1-6	95.86	
4	德州恒力电机有限责任公司	YE3-280S-4	96.15	

## 2.4.3 交流调速装置的选用

### 2.4.3.1 评价调速系统效率的原则

常见的交流调速系统有以下方式：①调压调速；②电磁转差离合器调速；③绕线转子异步电动机转子回路串电阻调速；④绕线转子异步电动机串级调速；⑤变极调速；⑥变频调速。

从能量转换的角度看，转差功率是否增大，是消耗掉还是得到回收，显然是评价调速系统效率高的一种标志。从这点出发，可以把异步电动机的调速系统分成以下三类：

(1) 转差功率消耗型调速系统。全部转差功率都以转换成热能的形式而消耗掉。上述的第①、②、③三种调速方法都属于这一类。在异步电动机调速系统中，这类系统的效率最低，但结构最简单，所以还有一定的应用场合。

(2) 转差功率回馈型调速系统。转差功率的一部分消耗掉,大部分则通过变流装置回馈给电网或者转化为机械能予以利用。转速越低,回收的功率越多,上述第④种调速方法属于这一类。这类调速系统的效率显然比第一类要高,但增加的变流装置总要多消耗一部分功率,因此不及下一类。

(3) 转差功率不变型调速系统。转差功率中转子铜耗部分的消耗是不可避免的,但在这类系统中,无论转速高低,转差功率的消耗基本不变,因此,效率最高。上述的第⑤、⑥种调速方法属于此类。其中变极调速只能有级调速,应用场合有局限性,而变频调速可以构成高动态性能的交流无级调速系统,是最有发展前途的。

#### 2.4.3.2 调速装置的选择

(1) 选择技术成熟的调速装置。根据国内交流调速装置的科研、生产和使用情况,目前技术成熟并具有一定规模系列化生产能力的交流调速装置有:适配笼型电动机的变极调速装置(双速或多速电机)、电磁调速电机、液力耦合器与液体调速离合器、低压中小容量变频调速装置、高-低压中大容量变频调速集成系统;适配绕线型电动机的串级调速装置、双馈电机、变压和变阻调速装置。对于大功率变频调速装置、无换向器电机,须进一步开发、系列化和国产化。

(2) 根据运行参数选择调速装置(以风机泵类负荷为例)。调速装置应能满足功率要求、变量规律、调速范围、调速精度、速度稳定性等参数要求。风机泵类变量设备的运行规律,按其流量的变化范围和在各种变量下运行的时间来分,主要有以下四种类型:

1) 高变量型。如图2-4-1和表2-4-8所示,超过90%流量时,各种调速方式的节能效果与入口节流方式相近,故不宜调速运行,节流控制即够用了,以节省不必要的投资。当超过85%流量时,一些有转差损耗的调速方式(如液力耦合器、电磁调速电机、变压与变阻调速)的节能效果与入口节流方式相近,只能采用高效调速方式,如变频或串级调速。在60%~100%变量范围内,上述几种调速方式均可使用。

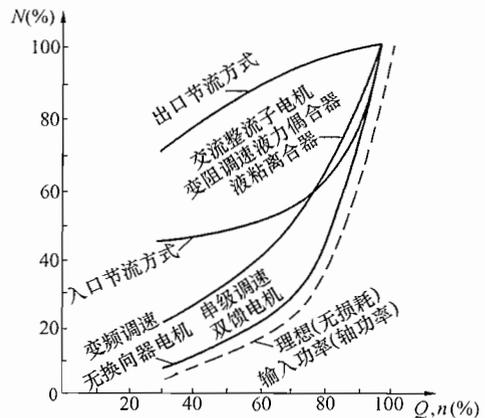


图 2-4-1 各种调节流量系统功耗对比图

表 2-4-8

风机泵设备不同变量方式的功耗对比

%

流量 $Q$	轴功率 $N$	变频、串级			滑差、变阻			入口节流			出口节流			变极调速		
		电动机	装置	节电率	电动机	装置	节电率	电动机	节流	节电率	电动机	节流	节电率	电动机	装置	节电率
100	100	108	8	-8	108	8	-8	106	6	-6	107	7	-7	106	6	-6
90	72.9	79	6	21	86	13.1	14	84	11.1	16	103.5	30.6	-3.5	—	—	—
80	51.2	55	3.8	45	68	16.8	32	72.5	21.3	27.5	99.5	48.3	0.5	—	—	—
70	34.3	38	3.7	62	52	17.7	48	68	33.7	32	96	60.7	4	—	—	—
60	21.6	25	3.4	75	39	17.4	61	64	42.4	36	89.5	67.9	10.5	—	—	—
50	12.5	15	2.5	85	29	16.5	71	60	47.5	40	84	71.5	16	14	1.5	86

续表

流量 $Q$	轴功率 $N$	变频、串级			滑差、变阻			入口节流			出口节流			变极调速		
		电动机	装置	节电率	电动机	装置	节电率	电动机	节流	节电率	电动机	节流	节电率	电动机	装置	节电率
40	6.4	9	2.6	91	21	14.6	79	56	49.6	44	77.5	71.7	22.5	—	—	—
30	2.7	5	2.3	95	15	12.3	85	52	47.3	48	71	68.3	29	—	—	—

2) 低变量型。以变频方式最佳。

3) 全变量型。视其流量和时间选定类型，低流量时间长，可采用变频方式；若高流量时间长，则用变频或串调方式，也可用有转差损耗的调速方式；当流量长时间超过 85% 时，就不宜用有转差损耗的调速方式；若流量长时间超过 90% 时，只好切换至全速运行，在入口处节流控制。

4) 全变量间歇型。变频方式可以较其他调速装置获得较大的节能效果。

表 2-4-9 列出了几种技术成熟的交流调速方式所适宜的流量变化范围。

(3) 经济效益分析。对于技术成熟且又适宜运行规律的交流调速方式，还要视其投入产出比是否合算。这就要比较不同调速方式的节能效益、运行效率、功率因数、谐波含量和投资的回收期，再做选择。

表 2-4-9 几种交流调速方式适宜变量范围表

序号	变量范围 (%)	调速方法
1	100 以上	变频 (交-直-交)，双馈 (绕线电机)
2	90 ~ 100	入口节流，不宜调速
3	85 ~ 100	变频 (交-直-交)，双馈，串调 (绕线电机)
4	80 ~ 100	变频，双馈，串级，液力 (高速大功率)，电磁 (1200r/min 以下中小功率)，变压 (小功率笼型)，变阻 (绕线电机，水电阻大功率，斩波 200kW 以下)
5	75/100	变极 (双速)
6	70 ~ 100	变频 (交-直-交)，双馈，串级，液力，电磁，变压 (中功率绕线电机)，变阻
7	67/100	变极 (双速)
8	50 ~ 100	变频 (交-直-交)，双馈，串级，液力，电磁
9	50/100 50/67/100	变极 (双速) 三速
10	33 ~ 50	变频 (交-交或交-直-交)，双馈
11	33/100 30/50/67/100	变极 (双速) 四速
12	≤ 33	变频 (交-交大功率)，双馈
13	33 ~ 100	变频 (交-直-交)，双馈，液力，电磁
14	20 ~ 100	变频 (交-直-交)，双馈，液力，电磁
15	10 ~ 100	变频 (交-直-交)

调速装置的节电率与调速系统的运行效率有关。图 2-4-2 给出了几种技术成熟的调速方式在其适宜调速范围内的系统效率。显而易见，变频调速、无换向器电机、双馈电机和串

级调速效率最高，同属于高效调速方式；而交流整流子电机、变阻调速、液力耦合器、液粘离合器、电磁调速电机和变压调速方式，因均有转差损耗、效率较低，尤其是低速时效率更低。这两大类调速方式以有无转差功耗为标志，高效调速方式的节电率要比有转差功耗的调速方式高出 10% ~ 30%。不同调速方式总效率对比见表 2-4-10。

表 2-4-10 不同调速方式总效率对比 %

调速方式		笼型电动机				绕线型电动机			电磁调速电机	液力耦合器
		PWM 变频器	电流源型逆变器	交-交型变频器	定子调压装置	次同步串级调速	超同步双馈电机	转子串电阻器		
负 荷 率	100	~95	~95	~95	~90	~92	~92	~92	~80	~84
	80	~90	~90	~90	~75	~88	~88	~75	~70	~75
	50	~82	~80	~80	—	~80	~80	~50	~50	~40

节电率的计算一般只考虑有功功率，但无功功率也不能忽视。如图 2-4-3 和表 2-4-11 所示，其中，属 PWM 型变频调速装置的功率因数最高，在 40% ~ 100% 调速范围内，均可高达 0.9 ~ 0.98 以上；有转差功耗的调速方式的功率因数较高，对比节流方式有节电效益；而高效调速方式的功率因数多偏低，特别是低速时更低。一方面要从内部找措施，如在串级装置中加斩波器， $\cos\varphi$  可提高到 0.8 以上；另一方面可从外电路上补偿，如安装补偿电容器；但 PWM 变频装置无需电容器补偿，功率因数高达 0.98，即使在 40% 转数下也能达 0.97。

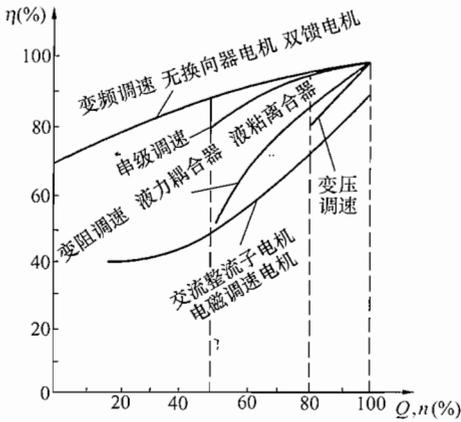


图 2-4-2 几种调速系统效率对比图

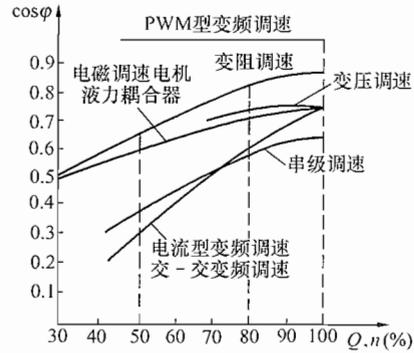


图 2-4-3 几种调速系统功率因数对比图

表 2-4-11 不同调速方式的系统功率因数 ( $\cos\varphi$ ) 对比

调速方式		笼型电动机				绕线型电动机			电磁调速电机	液力耦合器
		PWM 变频器	电流源型逆变器	交-交型变频器	定子调压装置	次同步串级调速	超同步双馈电机	转子串电阻器		
负 荷 率	100	$\geq 0.93$	~0.8	~0.9	~0.8	~0.7	$\geq 0.9$	~0.85	~0.8	~0.8
	80	$\geq 0.93$	~0.65	~0.65	~0.75	~0.57	~0.7	~0.8	~0.75	~0.75
	50	$\geq 0.93$	~0.3	~0.3	—	~0.35	~0.4	~0.65	~0.65	~0.65

(4) 安装维护条件。选择调速方式还应考虑环境温度、湿度、粉尘、燃气、面积及空间等条件。如纺织行业的空调机调速装置和电机，均应有防护棉花绒措施，或采用密封形式；在有可燃气体的场合，调速装置和电机应选用防爆式；水泵的调速装置应进行三防处理，电机最低限应是防滴式；在不允许停歇的场合，调速装置应有切换全速措施，以备调速装置一旦发生故障，及时全速运行，保留节流方式；或采用多运行模式，如变频-工频、串级-变阻-全速节流等，确保生产连续性和安全性。

(5) 大力推广变频调速节电。目前，在美国市场有近 50% 的调速电动机为变频异步电动机，国外工业发达国家使用交流调速已达到 60% ~ 70%，我国在交流电动机中使用变频调速运行的节能潜力巨大。运行实践表明，采用变频调速单机平均节电率为 30% ~ 60%。据预测，采用变频调速、年总节电量为 600 亿 kWh。其中低压（380V）中小容量电动机为 200 亿 kWh，高压中等容量电动机为 100 亿 kWh，高压大容量（800kW 以上）电动机为 300 亿 kWh。据预测变频调速必将得到更大发展，并将逐步取代直流调速和交流调速中的其他调速方式。

2

## 负荷计算及负荷分级

### 3.1 负荷计算

#### 3.1.1 基本概念

##### 3.1.1.1 概述

(1) 负荷计算的目地: 获得供配电系统设计所需的各项负荷数据, 用以选择和校验导体、电器、设备、保护装置和补偿装置, 计算电压降、电压偏差、电压波动等。

(2) 负荷计算的内容: 求取各类计算负荷, 包括最大计算负荷、平均负荷、尖峰电流; 计算电能消耗量、电网损耗等。

(3) 实际负荷: 即接在电网上的各种电气负荷。通常每台设备的负荷是随机变动的, 多台设备叠加的变化更加复杂。实际负荷须经适当的方法转换为计算负荷, 才能用于工程设计。

(4) 计算负荷: 是一个假想的持续性负荷, 它在一定的时间间隔中产生的特定效应与变动的实际负荷相等。

按不同的用途, 取不同的负荷效应和时间间隔, 将得出各类不同的计算负荷, 详见 3.1.1.2。

(5) 计算范围: 计算负荷是按配电点 (配电箱、配电干线、变电站母线等) 划分的; 其配电范围即为负荷计算范围。供配电系统各配电点间存在母集和子集的关系; 负荷计算范围也构成相应的关系。

##### 3.1.1.2 计算负荷的分类及其用途

设计中常用的三类计算负荷如下:

(1) 最大负荷或需要负荷 (通称计算负荷):

1) 此负荷用于按发热条件选择电器和导体; 计算电压偏差、电网损耗、无功补偿容量等; 有时用以计算电能消耗量。

2) 此负荷的热效应与实际变动负荷产生的最大热效应相等。对带绝缘的电气元件如变压器、电缆之类, 是绝缘热老化程度相等。

3) 此负荷的持续时间应取导体发热时间常数  $\tau$  的 3 倍。对较小截面导线 ( $\tau \geq 10\text{min}$ ), 通常取 0.5h 计算负荷即“半小时最大负荷”; 对较大截面电缆 ( $\tau \geq 20\text{min}$ ), 宜取 1h 计算负荷; 对母线槽和变压器 ( $\tau \geq 40\text{min}$ ), 宜取 2h 计算负荷。

(2) 平均负荷:

1) 年平均负荷用于计算电能年消耗量; 有时用以计算无功补偿容量。

2) 最大负荷班平均负荷用于计算最大负荷 (见利用系数法)。

(3) 尖峰电流:

1) 尖峰电流用于计算电压波动和电压暂降；选择和整定保护器件；校验电动机起动条件。

2) 尖峰电流取持续 1s 左右的最大负荷电流，即起动电流的周期分量。在校验瞬动元件时，还应考虑其非周期分量。

注：①计算负荷广义上是上述三类负荷的统称；狭义上是指最大负荷（或需要负荷）；②计算负荷包括其有功功率、无功功率、视在功率、计算电流及功率因数。

计算电压降时应区分情况，采用不同的计算负荷：校核长时间电压水平（如电压偏差）时，应采用最大负荷或需要负荷；校核短时电压水平（如电压暂降、电压波动）时，应采用尖峰电流。

### 3 3.1.1.3 负荷曲线和计算参数

(1) 负荷曲线是表示电力负荷随时间变动的曲线，是负荷计算的重要基础。负荷曲线通常由实测数据取得，也可套用同类负荷的典型曲线。

(2) 负荷曲线的分类：按用电对象分，有区域、工厂、车间、单体建筑、用电设备组等负荷曲线；按时间跨度分，有年、季、月、周、日等负荷曲线；按负荷参数分，有有功功率和无功功率等负荷曲线。

(3) 负荷曲线的型式：把实测值顺序相连即为逐点曲线。为便于数据计算，通常绘制成梯形曲线。图 3-1-1 所示为三班制金属加工厂日负荷曲线示例。负荷曲线还可进一步处理成负荷持续时间曲线，以表明不同负荷值出现的频度，如图 3-1-2 所示。

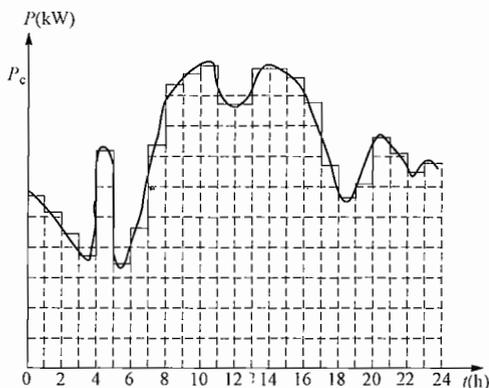


图 3-1-1 日负荷逐点曲线和梯形曲线

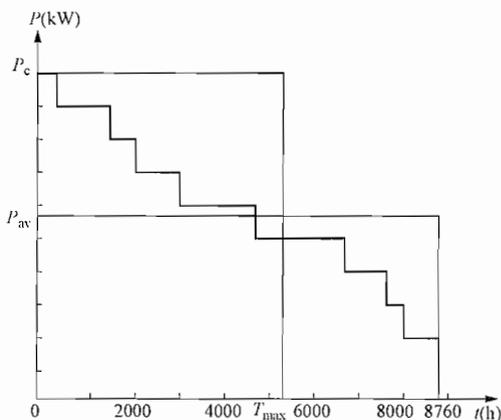


图 3-1-2 年负荷持续时间曲线

(4) 负荷曲线可形象地表明多种参数及其相互关系。例如，负荷曲线所包围的面积，就是用电负荷在该时间段的电能消耗量，并等于  $P_c T_{\max}$  或  $P_{av} t_o$ 。

(5) 有功计算功率  $P_c$ 、无功计算功率  $Q_c$ 、视在计算功率  $S_c$ ：即最大负荷（或需要负荷）的有功功率、无功功率、视在功率，参见 3.1.1.2 (1)。

(6) 有功平均功率  $P_{av}$ 、无功平均功率  $Q_{av}$ ：在某一时间阶段  $t$  内，用电设备的  $P_{av}$ （或  $Q_{av}$ ）等于有功电能消耗量  $W_t$ （或无功电能消耗量  $V_t$ ）除以该阶段的时间  $t$ 。例如，年平均有功功率  $P_{av/a} = W_a / 8760h$ 。

(7) 年最大负荷利用小时  $T_{\max}$ ：是一个假想时间，负荷在此时间内以年最大负荷  $P_c$  持

续运行所消耗的电能，等于实际负荷的年电能消耗量  $W_a$ ，即  $T_{\max} = W_a / P_c$ 。

(8) 年最大负荷损耗小时  $\tau_{\max}$ ：是一个假想时间，负荷在此时间内以年最大负荷  $S_c$  持续运行所造成的电网中电能损耗，等于实际负荷全年的电能损耗。

(9) 额定功率  $P_r$  (或  $S_r$ )：电气设备的产品说明书或铭牌上标明的功率。对于照明器是灯泡或灯管的功率；对于电动机是轴功率；对于其他设备是由电网输入的功率。

(10) 设备功率  $P_e$ ：将不同工作制的用电设备的额定功率换算为连续工作制的有功功率。详见 3.1.2 节。

(11) 利用系数  $K_u$ ：一组设备的平均功率与设备功率之比。利用系数是对一定的时间阶段（班、月、年）而言的。

(12) 最大系数  $K_m$ ：在某一时间阶段内，有功计算功率  $P_c$  与有功平均功率  $P_{av}$  之比。最大系数的倒数为该时间阶段的负荷曲线填充系数  $K_f$ 。

(13) 接通系数  $K_s$ ：用电设备在一个周期内的接通持续时间（包括带负荷运行持续时间和空载持续时间）与一个周期的全部持续时间之比。对一组设备而言，接通系数是组内全部设备接通系数的加权平均值。

(14) 负荷系数  $K_l$ ：用电设备实际需要的有功功率与其设备功率之比。成组负荷系数是成组利用系数与成组接通系数之比。

(15) 需要系数  $K_d$ ：有功计算功率  $P_c$  与全组设备功率  $P_e$  之比。

(16) 有功功率同时系数  $K_{\Sigma p}$ ：母集计算范围内的总有功计算功率  $P_c$  与其各子集有功计算功率总和  $\Sigma P_e$  的比值。

(17) 无功功率同时系数  $K_{\Sigma q}$ ：母集计算范围内的总无功计算功率  $Q_c$  与其各子集无功计算功率总和  $\Sigma Q_e$  的比值。

(18) 用电设备组：负荷特性和工作情况相近、可采用相同计算系数和功率因数的一组用电设备。

(19) 最大负荷班：在有代表性的一昼夜中，某一用电设备组、车间或整个企业电能消耗最多的一个班。

#### 3.1.1.4 负荷计算法的选择

(1) 单位指标法：

1) 分类：包括负荷密度指标法（单位面积功率法）、综合单位指标法、单位产品耗电量法。

2) 简介：源于实用数据的归纳。用相应的指标直接求出结果。

3) 评价：计算过程简便。计算精度低；指标受多种因素的影响，变化范围很大。

4) 适用范围：适用于设备功率不明确的各类项目，如民用建筑中的分布负荷；尤其适用于设计前期的负荷匡算和对计算结果的校核。

(2) 需要系数法：

1) 简介：源于负荷曲线的分析。设备功率乘需要系数得需要功率；多组负荷相加时，再逐级乘同时系数。

2) 评价：计算过程较简便。计算精度与用电设备台数有关，台数多时较准确，台数少时误差大。

3) 适用范围：适用于设备功率已知的各类项目，尤其是照明、高压系统和初步设计的

负荷计算。计算范围内全部用电设备数为5台及以下时，不宜采用需要系数法。

(3) 利用系数法：

1) 简介：其数学模型基于概率论与数理统计。先求易于实测的平均负荷，再乘最大系数求得最大负荷。最大系数取决于总利用系数和用电设备有效台数；后者计及设备台数和各台设备间功率差异的影响。

2) 评价：计算精度高，计算结果比较接近实际；可用于设备台数较少的情况。计算过程较繁，尤其是用电设备有效台数的计算应改进。利用系数的实用数据有待积累。

3) 适用范围：适用于设备功率或平均功率已知的各类项目，尤其是工业企业电力负荷计算。通常不用于照明负荷计算。

(4) 其他算法：

1) 二项式法：为前苏联的经验公式，计算结果不可靠，早已被利用系数法取代，不宜再用。

2) 改良利用系数法：为解决有效台数计算烦琐的问题，国内推导过多种简化算式，还有绕开有效台数的ABC法等。这类方法也已废弃。

3) 新二项式法及新利用系数法：基于概率论与数理统计，给出了简化计算式，并在以金属冷加工为主的机械工厂做过实测试验，但未能推广。

4) 简化利用系数法和新需要系数法：认为只有5台功率最大的设备影响计算负荷与平均负荷的差值，给出了 $C-K_L$ 法，并再简化为 $C-P_x$ 法，还有用于5台及以下设备的 $C-P_5$ 法。三者均属于简化利用系数法。 $D-K_x$ 法实质上是需要系数法形式的 $C-K_L$ 法，称为新需要系数法。20多年来，算法迭出，但未被业界广泛接受。

下面只介绍多年通用的单位指标法、需要系数法和利用系数法；不介绍其他算法。

### 3.1.1.5 本章适用范围和使用说明

(1) 本章适用于一般工业和民用工程项目，不适用于特殊行业及特殊装置，如石油钻探、井下采掘、电气化铁路、试验设备等。

各行业宜采用业内适用的负荷计算方法。

(2) 本章仅用于高压配电系统、低压母线和低压配电线路的负荷计算，不适用于低压末端线路的计算电流。

低压末端线路（如电动机、起重机、电梯、电焊机、电阻炉、整流器等）的计算电流，见GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》。

(3) 本章的重点是负荷算法，而非具体数据。各工程的用电指标和计算系数，应采用同类项目的实测数据。如因缺乏数据而参照本章的资料时，也应深入分析负荷性质和使用情况，适当调整有关指标和系数。

注：为保持通用性，常用手册所列计算指标和系数通常偏大，尤其是缺乏实测数据时。

(4) 有关资料显示，现有变电站负荷率普遍偏低，有的甚至不到1/3。这表明计算负荷明显偏高。对此，宜采取如下做法：

1) 开展负荷调查和实测工作，逐步修订各项指标和计算系数。

2) 除中小截面导线外，计算负荷应采用1h最大负荷或2h最大负荷，即压低需要系数、利用系数和最大系数（参见3.1.5）。

3) 采用多种计算方法互相对照，使计算结果接近实测数据或经验指标。

4) 计算变压器经济负荷率时, 不应采用最大负荷, 应采用加权年平均负荷, 并按总价最低原则选择变压器容量。

### 3.1.2 设备功率的确定

#### 3.1.2.1 单台用电设备的设备功率

单台设备功率换算的基本原则是: 不同工作制用电设备的额定功率统一换算为连续工作制的功率; 不同物理量的功率统一换算为有功功率。单台设备功率取值的原则是简单方便(如整流器)。

(1) 连续工作制电动机的设备功率等于额定功率。

(2) 周期工作制电动机的设备功率是将额定功率一律换算到负载持续率为 100% 的有功功率

$$P_e = P_r \sqrt{\varepsilon_r} \quad (3-1-1)$$

式中  $P_e$ ——负载持续率为 100% 的有功功率, kW;

$P_r$ ——电动机额定功率, kW;

$\varepsilon_r$ ——电动机额定负载持续率。

【编者按】常见的周期工作制电动机是起重机用电动机。过去的习惯做法是: 采用利用系数法时, 换算为  $\varepsilon = 100\%$  的功率; 采用需要系数法时, 换算为  $\varepsilon = 25\%$  的功率。这种不统一的做法应予以摒弃, 如利用原有的需要系数时, 只要相应地调整其取值即可。

(3) 短时工作制电动机的设备功率是将额定功率换算为连续工作制的有功功率。为解决缺乏简单可靠换算法的问题, 可把短时工作制电动机近似地看作周期工作制电动机, 再用式 (3-1-1) 换算。0.5h 工作制电动机可按  $\varepsilon \approx 15\%$  考虑, 1h 工作制电动机可按  $\varepsilon \approx 25\%$  考虑。

注: 交流电梯通常采用短时工作制电动机, 但在设计阶段难以得到确切数据。计及频繁起动和制动的影 响, 可把电梯工作情况分为较轻、频繁、特重, 分别按  $\varepsilon \approx 15\%$ 、 $\varepsilon \approx 25\%$ 、 $\varepsilon \approx 40\%$  考虑。

(4) 电焊机的设备功率是将额定容量换算到负载持续率为 100% 的有功功率

$$P_e = S_r \sqrt{\varepsilon_r} \cos\varphi \quad (3-1-2)$$

式中  $P_e$ ——负载持续率为 100% 的有功功率, kW;

$S_r$ ——电焊机的额定容量, kVA;

$\cos\varphi$ ——计算功率因数(参见表 3-1-10 或表 3-1-17)。

(5) 电炉变压器的设备功率是额定功率因数时的有功功率

$$P_e = S_r \cos\varphi_r \quad (3-1-3)$$

式中  $P_e$ ——设备有功功率, kW;

$S_r$ ——电炉变压器的额定容量, kVA;

$\cos\varphi_r$ ——电炉变压器的额定功率因数。

(6) 整流器的设备功率取额定直流功率。

(7) 以下电光源的设备功率应直接取灯功率(即输入功率):

- 1) 白炽灯, 没有附件。
- 2) 低压卤素灯, 灯功率已含电子变压器功率损耗。
- 3) 自镇流荧光灯, 灯功率已含内装的镇流器功率损耗。
- 4) LED 灯, 灯功率已含驱动电源功率损耗。

(8) 表 3-1-1 中电光源的设备功率应取总输入功率或灯功率加镇流器功率损耗。

表 3-1-1 电光源的总输入功率或镇流器的功率损耗

电光源类型	配用镇流器	灯功率 (W)	总输入功率 (W)	镇流器功率损耗与 灯功率之比 (%)
T8 直管荧光灯	高频电子镇流器	36	36 ~ 38	
		18	20 ~ 22	
	节能电感镇流器	36	41 ~ 43	
		18	23 ~ 25	
T5 直管荧光灯	高频电子镇流器	28	32 ~ 34	
		14	18 ~ 20	
高压钠灯	节能电感镇流器	≥400		7% ~ 9%
		≤250		8% ~ 11%
	电子式镇流器	≥400		7% ~ 8%
		≤250		8% ~ 10%
金属卤化物灯 (钨钠灯)	节能电感镇流器	≥400		12% ~ 15%
		≤250		15% ~ 17%
金属卤化物灯 (钠铊铟灯)	节能电感镇流器	≥400		10% ~ 12%
		≤250		12% ~ 14%

### 3.1.2.2 用电设备组的设备功率

用电设备组的设备功率是所有单个用电设备的设备功率之和，但不包括下列设备：

(1) 备用设备。

注：包含工作设备和备用设备的一组负荷分属不同的计算范围时，应按可能出现的组合方式取值。

(2) 专门用于检修的设备（如动力站房的起重机）和工作时间很短的设备（如电动闸阀）。

注：计算范围内以这些负荷为主时，应按实际情况处理。

### 3.1.2.3 计算范围（配电点）的总设备功率

计算范围（配电点）的总设备功率应取所接入的各用电设备组设备功率之和，并符合下列要求：

(1) 计算正常电源的负荷时，仅在消防时才工作的设备不应计入总设备功率。

(2) 同一计算范围内的季节性用电设备（如采暖设备和舒适性空调的制冷设备），应选取二者中较大者计入总设备功率。

(3) 计算备用电源的负荷时，应根据负荷性质和供电要求，选取应计入的设备功率。

注：多台用电设备的设备功率的合成原则是，计算范围内不可能同时出现的负荷不叠加。

### 3.1.3 单位指标法求计算负荷

#### 3.1.3.1 负荷密度指标法

(1) 负荷密度指标法（单位面积功率法）的计算有功功率为

$$P_c = \frac{p_a A}{1000} \quad (3-1-4)$$

式中  $P_c$ ——计算有功功率，kW；

$p_a$ ——负荷密度,  $W/m^2$ ;

$A$ ——建筑面积,  $m^2$ 。

(2) 单位指标受多种因素的影响, 如地理位置、气候条件、地区发展水平、居民生活习惯、建筑规模大小、建设标准高低、使用能源种类、节能措施力度等。

作为示例, 表 3-1-2 所列为规划用单位建设用地和单位建筑面积负荷指标; 表 3-1-3 所列为东部沿海和西部内地的负荷密度示例; 表 3-1-4 所列为部分车间的负荷密度和功率因数参考指标。

表 3-1-2 规划单位建设用地负荷指标和规划单位建筑面积负荷指标

城市建设用地类别	单位建设用地负荷指标 ( $W/m^2$ )	建筑类别	单位建筑面积负荷指标 ( $W/m^2$ )
居住用地	10~40	居住建筑	30~70 (4~16kW/户)
商业服务业设施用地	40~120		
公共管理与公共服务设施用地	30~80	公共建筑	40~150
工业用地	20~80	工业建筑	40~120
物流仓储用地	2~4		
道路与交通设施用地	1.5~3	仓储物流建筑	15~50
公用设施用地	15~20	市政设施建筑	20~50
绿地与广场用地	1~3		

表 3-1-3 各类建筑用电负荷指标示例

建筑类别	负荷密度 ( $W/m^2$ )		建筑类别	负荷密度 ( $W/m^2$ )
	中心和新城	新市镇		
上海市控规技术准则的用电负荷指标			陕西省规划设计院的预测指标	
住宅建筑	平均	50~60	住宅	80
	90m <sup>2</sup> 以下	60 50		
	90~140m <sup>2</sup>	75 60		
	140m <sup>2</sup> 以上	70 60		
公共建筑	平均	80~90	—	—
	办公金融	100 80	办公金融	90
	商业	120 100	商业	100
	医疗卫生	90 80	医疗卫生	70
	教育科研	80 60	教育科研	50
	文化娱乐	90 80	文化娱乐	80
工业建筑	平均	55~60	—	—
	研发	80~90	—	—
	精细化工、生物制药	90~100	—	—
	电子信息	55~80	—	—
	精密机械、新型材料	50~60	—	—

续表

建筑类别	负荷密度 (W/m <sup>2</sup> )		建筑类别	负荷密度 (W/m <sup>2</sup> )
	中心城和新城	新市镇		
市政设施	35 ~ 40		市政设施	90
仓储物流	10 ~ 40		仓储物流	40
公共绿地	2			
道路广场	2		道路广场	30

表 3-1-4 部分车间的负荷密度和功率因数

车间名称		负荷密度 (W/m <sup>2</sup> )	cosφ	tanφ	备注
金属加工	小型机床部	100 ~ 290	0.55 ~ 0.65	1.52 ~ 1.17	
	中型机床部	300 ~ 500	0.55 ~ 0.65	1.52 ~ 1.17	
	装配部	150 ~ 350	0.4 ~ 0.5	2.29 ~ 1.73	
铸铁车间		60	0.7	1.02	
铸钢车间		55 ~ 60	0.65	1.17	不包括电弧炉
工具车间		100 ~ 120	0.65	1.17	
铆焊车间		40 ~ 200	0.45 ~ 0.5	1.98 ~ 1.73	
金属结构车间		150	0.35 ~ 0.45	2.67 ~ 1.98	
木工车间		60	0.6	1.33	

(3) 单位指标的取值应根据同类项目的实测数据不断积累、细化和深化。例如，高层建筑先按地库、裙房和塔楼区分，裙房再按办公金融、商店、餐饮等细分，商店进一步按百货、家电、珠宝等细化。再如，用电负荷可区分为均布负荷（照明、办公等）和集中负荷（电梯、冷冻机等）；冷冻机可细分为压缩式制冷和吸收式制冷，并可深化为是否蓄冰等。

(4) 除负荷密度指标外，还有变压器装设容量指标，可供设计前期工作中参照。例如，我国各地已建成的旅游宾馆，配电变压器装设容量多为 80 ~ 100VA/m<sup>2</sup>。上海市电力公司给出的公共建筑变压器配置容量见表 3-1-5（按“N-1”原则配置，即变电站一台变压器退出时，其余变压器能带全部负荷）。

表 3-1-5 公共建筑变压器配置容量参考值

建筑类型	变压器配置容量 (VA/m <sup>2</sup> )	建筑类型	变压器配置容量 (VA/m <sup>2</sup> )
小型商业（不超过 30 000m <sup>2</sup> ）等	≥150	剧场、高校、展览馆等	≥120
大中型商业、饭店、休闲场所	≥120	旅馆、体育建筑等	≥100
办公楼、宾馆、酒店、医院等	≥130	车库	≥34

### 3.1.3.2 综合单位指标法

(1) 综合单位指标法的计算有功功率为

$$P_c = p_n N \quad (3-1-5)$$

式中  $P_c$ ——计算有功功率，kW；

$p_n$ ——综合单位用电指标, 如 kW/户、kW/人、kW/床等;

$N$ ——综合单位数量, 如户数、人数、床位数等。

综合单位可选取任何便于实测、统计和应用的单位。例如, 高档宾馆可按 2~2.4kW/床估算; 影剧院可按 0.26kVA/座位估算; 电梯用于住宅、商业、多层厂房者, 可分别按 30、40、50kVA/部估算。

(2) 综合单位指标在住宅设计中应用最广。每套住宅的用电指标具有双重属性: 用于选择入户线和电能表时, 它是计算功率; 用于上级计算范围(如楼座、变电站)的负荷计算时, 则代替每套住宅的设备功率。

单位指标受多种因素的影响, 不宜简单地规定硬性指标, 特别是全国通用的指标。表 3-1-6 列出了住宅用电负荷的几种指标。住宅用电负荷的需要系数见表 3-1-7。表 3-1-8 列出了住宅用电负荷和需要系数的实测参考值。

表 3-1-6 住宅用电负荷指标

每套建筑面积 $S$ ( $m^2$ )	用电负荷 (kW)	电能表 (A)	每套建筑面积 $S$ ( $m^2$ )	用电负荷 (kW)
JGJ 242—2011《住宅建筑电气设计规范》			上海市电力公司	
$\leq 60$	$\geq 3$	5 (20)	$\leq 120$	8
$60 < S \leq 90$	$\geq 4$	10 (40)	120 ~ 150	12
$90 < S \leq 150$	$\geq 6$	10 (40)	$> 150$	80W/ $m^2$
$> 150$	超出面积可按 40~50W/ $m^2$		别墅	$\geq 100W/m^2$
北京市规划委《北京市建筑设计技术细则》			中国南方电网有限责任公司	
一室 45 ~ 50 ~ 56	3	5 (30)	$\leq 80$	4
二室 60 ~ 65 ~ 72	3	5 (30)	81 ~ 120	6
三室 75 ~ 80 ~ 88	4	10 (40)	121 ~ 150	8 ~ 10
四室 90 ~ 93 ~ 102	4	10 (40)	$> 150$ 的高档住宅、别墅	12 ~ 20
远期	$\geq 6$		豪华式和有中央空调	0.45kVA/ $m^2$

表 3-1-7 住宅用电负荷的需要系数

按单相配电计算时所连接的基本户数	按三相配电计算时所连接的基本户数	需要系数
1 ~ 3	3 ~ 9	0.90 ~ 1
4 ~ 8	12 ~ 24	0.65 ~ 0.90
9 ~ 12	27 ~ 36	0.50 ~ 0.65
13 ~ 24	39 ~ 72	0.45 ~ 0.50
25 ~ 124	75 ~ 372	0.40 ~ 0.45
125 ~ 259	375 ~ 777	0.30 ~ 0.40
260 ~ 300	780 ~ 900	0.26 ~ 0.30

注 1. 本表已按《住宅建筑电气设计规范》编制组发布于《建筑电气》2012 年第 8 期的《JGJ 242—2011〈住宅建筑电气设计规范〉勘误》调整。

2. 住宅的公用照明和公用电力负荷需要系数可取 0.8。

表 3-1-8 住宅用电负荷和需要系数的实测参考值

地区	户数	单户用电负荷			需要系数	
		计算值	实测值（夏季）	实测值（冬季）	计算值	实测值
严寒（哈尔滨）	28	6	3.98	2.93	0.5~0.65	0.13
寒冷（北京）	60	6	—	—	0.45~0.5	0.14
夏热冬冷（上海）	18	6	3.75	5.76	0.65~0.9	0.36
夏热冬暖（深圳）	14	6	3.98	4.70	0.65~0.9	0.34

## 3.1.3.3 单位产品耗电量法

单位产品耗电量的计算有功功率为

$$P_c = \frac{w_n N}{T_{\max}} \quad (3-1-6)$$

式中  $P_c$ ——计算有功功率，kW；

$w_n$ ——单位产品电能消耗量，如 kW/t、kW/台、kW/套等；

$N$ ——年产量，如 t、台、套等。

$T_{\max}$ ——年最大负荷利用小时，参见 3.1.9，h。

单位产品电能消耗量  $w_n$  和年产量  $N$  由工艺专业提供。单位产品电能消耗量示例见表 3-1-9。

表 3-1-9 单位产品的电能消耗量示例

标准产品	产品单位	单位产品电能消耗量 (kWh)	标准产品	产品单位	单位产品电能消耗量 (kWh)
有色金属铸造	t	600~1000	变压器	kVA	2.5
电解铝	t	14 200~15 300	静电电容器	kvar	3
钢铁综合耗电	t	750	电动机	kW	14
合成氨	t	1250	量具刃具	t	6300~8500
烧碱	t	2300	轴承	套	1~2.5~4
水泥综合耗电	t	97	铸铁件	t	300
重型机床	t	1600	锻铁件	t	30~80
机床	t	1000	纱	t	40
拖拉机	台	5000~8000	棉布	100m	34
汽车	辆	1500~2500	橡胶制品	t	250~400
自行车	辆	20~25			

## 3.1.4 需要系数法求计算负荷

(1) 用电设备组的计算功率

$$\text{有功功率} \quad P_c = K_d P_e \quad (3-1-7)$$

$$\text{无功功率} \quad Q_c = P_c \tan \varphi \quad (3-1-8)$$

(2) 配电干线或车间变电所的计算功率

$$\text{有功功率} \quad P_c = K_{\Sigma p} \sum (K_d P_e) \quad (3-1-9)$$

$$\text{无功功率} \quad Q_c = K_{\Sigma q} \sum (K_d P_e \tan \varphi) \quad (3-1-10)$$

(3) 计算视在功率和计算电流

$$\text{视在功率} \quad S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (3-1-11)$$

$$\text{计算电流} \quad I_c = \frac{S_c}{\sqrt{3}U_n} \quad (3-1-12)$$

以上各式中  $P_c$ ——计算有功功率, kW;

$Q_c$ ——计算无功功率, kvar;

$S_c$ ——计算视在功率, kVA;

$I_c$ ——计算电流, A;

$P_e$ ——用电设备组的设备功率, kW;

$K_d$ ——需要系数, 见表 3-1-10 ~ 表 3-1-13;

$\tan \varphi$ ——计算负荷功率因数角的正切值, 见表 3-1-10 ~ 表 3-1-12、表 3-1-14、表 3-1-15;

$K_{\Sigma p}$ ——有功功率同时系数;

$K_{\Sigma q}$ ——无功功率同时系数;

$U_n$ ——系统标称电压, kV。

同时系数也称参差系数或最大负荷重合系数。 $K_{\Sigma p}$ 可取 0.8 ~ 0.9。 $K_{\Sigma q}$ 可取 0.93 ~ 0.97, 简化计算时可与  $K_{\Sigma p}$ 相同。通常, 用电设备数量越多, 同时系数越小。

表 3-1-10 工业用电设备的  $K_d$ 、 $\cos \varphi$  及  $\tan \varphi$

用电设备组名称	$K_d$	$\cos \varphi$	$\tan \varphi$
单独传动的金属加工机床			
小批量生产的金属冷加工机床	0.12 ~ 0.16	0.50	1.73
大批量生产的金属冷加工机床	0.17 ~ 0.20	0.50	1.73
小批量生产的金属热加工机床	0.20 ~ 0.25	0.55 ~ 0.60	1.51 ~ 1.33
大批量生产的金属热加工机床	0.25 ~ 0.28	0.65	1.17
锻锤、压床、剪床及其他锻工机械	0.25	0.60	1.33
木工机械	0.20 ~ 0.30	0.50 ~ 0.60	1.73 ~ 1.33
液压机	0.30	0.60	1.33
生产用通风机	0.75 ~ 0.85	0.80 ~ 0.85	0.75 ~ 0.62
卫生用通风机	0.65 ~ 0.70	0.80	0.75
泵、活塞压缩机、空调送风机	0.75 ~ 0.85	0.80	0.75
冷冻机组	0.85 ~ 0.90	0.80 ~ 0.90	0.75 ~ 0.48
球磨机、破碎机、筛选机、搅拌机等	0.75 ~ 0.85	0.80 ~ 0.85	0.75 ~ 0.62
电阻炉 (带调压器或变压器)			
非自动装料	0.60 ~ 0.70	0.95 ~ 0.98	0.33 ~ 0.20
自动装料	0.70 ~ 0.80	0.95 ~ 0.98	0.33 ~ 0.20
干燥箱、电加热器等	0.40 ~ 0.60	1.00	0

续表

用电设备组名称	$K_d$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
工频感应电炉（不带无功补偿装置）	0.80	0.35	2.68
高频感应电炉（不带无功补偿装置）	0.80	0.60	1.33
焊接和加热用高频加热设备	0.50~0.65	0.70	1.02
熔炼用高频加热设备	0.80~0.85	0.80~0.85	0.75~0.62
表面淬风电炉（带无功补偿装置）			
电动发电机	0.65	0.70	1.02
真空管振荡器	0.80	0.85	0.62
中频电炉（中频机组）	0.65~0.75	0.80	0.75
氢气炉（带调压器或变压器）	0.40~0.50	0.85~0.90	0.62~0.48
真空炉（带调压器或变压器）	0.55~0.65	0.85~0.90	0.62~0.48
电弧炼钢炉变压器	0.90	0.85	0.62
电弧炼钢炉的辅助设备	0.15	0.50	1.73
点焊机、缝焊机	0.35, 0.20 <sup>①</sup>	0.60	1.33
对焊机	0.35	0.70	1.02
自动弧焊变压器	0.50	0.50	1.73
单头手动弧焊变压器	0.35	0.35	2.68
多头手动弧焊变压器	0.40	0.35	2.68
单头直流弧焊机	0.35	0.60	1.33
多头直流弧焊机	0.70	0.70	1.02
金属加工、机修、装配车间用起重机 <sup>②</sup>	0.10~0.25	0.50	1.73
铸造车间用起重机 <sup>②</sup>	0.15~0.45	0.50	1.73
连锁的连续运输机械	0.65	0.75	0.88
非连锁的连续运输机械	0.50~0.60	0.75	0.88
一般工业用硅整流装置	0.50	0.70	1.02
电镀用硅整流装置	0.50	0.75	0.88
电解用硅整流装置	0.70	0.80	0.75
红外线干燥设备	0.85~0.90	1.00	0
电火花加工装置	0.50	0.60	1.33
超声波装置	0.70	0.70	1.02
X光设备	0.30	0.55	1.52
磁粉探伤机	0.20	0.40	2.29
电子计算机主机	0.60~0.70	0.80	0.75
电子计算机外部设备	0.40~0.50	0.50	1.73
试验设备（电热为主）	0.20~0.40	0.80	0.75
试验设备（仪表为主）	0.15~0.20	0.70	1.02
铁屑加工机械	0.40	0.75	0.88

续表

用电设备组名称	$K_d$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
排气台	0.50 ~ 0.60	0.90	0.48
老炼台	0.60 ~ 0.70	0.70	1.02
陶瓷隧道窑	0.80 ~ 0.90	0.95	0.33
拉单晶炉	0.70 ~ 0.75	0.90	0.48
赋能腐蚀设备	0.60	0.93	0.40
真空浸渍设备	0.70	0.95	0.33

① 电焊机的需要系数 0.2 仅用于电子行业以及焊接机器人。

② 起重机的设备功率为换算到  $\varepsilon = 100\%$  的功率，其需要系数已做相应调整。表 3-1-11 民用建筑用电设备的  $K_d$ 、 $\cos\varphi$  及  $\tan\varphi$ 

用电设备组名称	$K_d$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
通风和采暖用电设备			
各种风机、空调器	0.70 ~ 0.80	0.80	0.75
恒温空调箱	0.60 ~ 0.70	0.95	0.33
集中式电热器	1.00	1.00	0
分散式电热器	0.75 ~ 0.95	1.00	0
小型电热设备	0.30 ~ 0.50	0.95	0.33
冷冻机	0.85 ~ 0.90	0.80 ~ 0.9	0.75 ~ 0.48
各种水泵	0.60 ~ 0.80	0.80	0.75
锅炉房用电	0.75 ~ 0.80	0.80	0.75
电梯（交流）	0.18 ~ 0.22	0.5 ~ 0.6	1.73 ~ 1.33
输送带、自动扶梯	0.60 ~ 0.65	0.75	0.88
起重机械	0.10 ~ 0.20	0.50	1.73
厨房及卫生用电设备			
食品加工机械	0.50 ~ 0.70	0.80	0.75
电饭锅、电烤箱	0.85	1.00	0
电炒锅	0.70	1.00	0
电冰箱	0.60 ~ 0.70	0.70	1.02
热水器（淋浴用）	0.65	1.00	0
除尘器	0.30	0.85	0.62
机修用电设备			
修理间机械设备	0.15 ~ 0.20	0.50	1.73
电焊机	0.35	0.35	2.68
移动式电动工具	0.20	0.50	1.73
打包机	0.20	0.60	1.33
洗衣房动力	0.30 ~ 0.50	0.70 ~ 0.9	1.02 ~ 0.48
天窗开闭机	0.10	0.50	1.73
通信及信号设备	0.70 ~ 0.90	0.80	0.75
客房床头电气控制箱	0.15 ~ 0.25	0.70 ~ 0.85	1.02 ~ 0.62

表 3-1-12 旅游宾馆用电设备的  $K_d$ 、 $\cos\varphi$  及  $\tan\varphi$ 

用电设备组名称	$K_d$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
照明设备			
客房	0.35~0.45	0.90	0.48
其他场所	0.50~0.70	0.60~0.90	1.33~0.48
冷水机组、泵	0.65~0.75	0.80	0.75
通风机	0.60~0.70	0.80	0.75
电梯	0.18~0.22	0.50	1.73
洗衣机	0.30~0.35	0.70	1.02
厨房设备	0.35~0.45	0.75	0.88
窗式空调机	0.35~0.45	0.80	0.75

表 3-1-13 照明用电设备的需要系数  $K_d$ 

建筑类别	$K_d$	建筑类别	$K_d$
生产厂房（有天然采光）	0.80~0.90	体育馆	0.70~0.80
生产厂房（无天然采光）	0.90~1.00	展览馆	0.70~0.80
锅炉房	0.90	旅馆	0.60~0.70
仓库	0.50~0.70	医院	0.50
办公楼	0.70~0.80	学校	0.60~0.70
设计室	0.90~0.95	托儿所、幼儿园	0.80~0.9
科研楼	0.80~0.90	集体宿舍	0.60~0.80
综合商业服务楼	0.75~0.85	食堂、餐厅	0.80~0.90
商店	0.85~0.90		

表 3-1-14 照明用电设备的功率因数

光源类别	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	光源类别	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
白炽灯、卤钨灯	1.00	0.00	金属卤化物灯	0.40~0.55	2.29~1.52
荧光灯			氙灯	0.90	0.48
电感镇流器（无补偿）	0.50	1.73	霓虹灯	0.4~0.5	2.29~1.73
电感镇流器（有补偿）	0.90*	0.48	LED灯， $\leq 5W$	0.4	2.29
电子镇流器 <sup>①</sup> （ $> 25W$ ）	0.95~0.98	0.33~0.20	LED灯， $> 5W$	0.7	1.02
高压汞灯	0.4~0.55	2.29~1.52	LED灯，宣称高功率因数者	0.9	0.48
高压钠灯	0.4~0.50	2.29~1.73			

\* 按实际补偿后的功率因数。灯具小于 25W 时，镇流器应做消谐处理。

表 3-1-15  $\cos\varphi$  与  $\tan\varphi$ 、 $\sin\varphi$  对应值

$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	$\sin\varphi$
1.000	0.000	0.000	0.980	0.203	0.199	0.960	0.292	0.280
0.990	0.142	0.141	0.970	0.251	0.243	0.950	0.329	0.312

续表

$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	$\sin\varphi$
0.940	0.363	0.341	0.830	0.672	0.558	0.550	1.518	0.835
0.930	0.395	0.367	0.820	0.698	0.572	0.500	1.732	0.866
0.920	0.426	0.392	0.810	0.724	0.586	0.450	1.985	0.893
0.910	0.456	0.415	0.800	0.750	0.600	0.400	2.291	0.916
0.900	0.484	0.436	0.780	0.802	0.626	0.350	2.676	0.937
0.890	0.512	0.456	0.750	0.882	0.661	0.300	3.180	0.954
0.880	0.540	0.475	0.720	0.964	0.694	0.250	3.873	0.968
0.870	0.567	0.493	0.700	1.020	0.714	0.200	4.899	0.980
0.860	0.593	0.510	0.680	1.078	0.733	0.150	6.591	0.989
0.850	0.620	0.527	0.650	1.169	0.760	0.100	9.950	0.995
0.840	0.646	0.543	0.600	1.333	0.800			

(4) 配电所或总降压变电站的计算负荷,为各车间变电站计算负荷之和再乘以同时系数  $K_{\Sigma p}$  和  $K_{\Sigma q}$ 。配电所的  $K_{\Sigma p}$  和  $K_{\Sigma q}$  分别取 0.85 ~ 1 和 0.95 ~ 1, 总降压变电站的  $K_{\Sigma p}$  和  $K_{\Sigma q}$  分别取 0.8 ~ 0.9 和 0.93 ~ 0.97。当简化计算时,同时系数  $K_{\Sigma p}$  和  $K_{\Sigma q}$  可都取  $K_{\Sigma p}$  值。

对于多级高压配电系统,特别是多级降压的供配电系统,应逐级多次取同时系数。

(5) 计算结果应与同类项目的实测数据或经验指标对照;如偏离较大,应找出原因,调整需要系数和同时系数。表 3-1-16 列出了部分工厂设计的全厂总需要系数,数据偏大,仅供参考。

(6) 用电设备台数为 5 台及以下时,不宜采用需要系数法,推荐采用利用系数法计算。

表 3-1-16 部分工厂全厂总需要系数

工厂类别	总需要系数	工厂类别	总需要系数
汽轮机制造厂	0.33	电机制造厂	0.33
锅炉厂	0.27	石油机械厂	0.45
柴油机厂	0.35	电线电缆厂	0.35
重型机械厂	0.32	电气开关厂	0.35
机床厂	0.2	阀门制造厂	0.38
重型机床厂	0.32	橡胶厂	0.5
工具厂	0.34	通用机械厂	0.4
仪器仪表厂	0.37	半导体制造厂	0.45
量具刀具厂	0.26	平板显示器工厂	0.5

### 3.1.5 利用系数法求计算负荷

#### 3.1.5.1 利用系数法的计算步骤

(1) 最大负荷班的用电设备组平均负荷

$$\text{有功功率} \quad P_{av} = K_u P_e \quad (3-1-13)$$

$$\text{无功功率} \quad Q_{av} = P_{av} \tan\varphi \quad (3-1-14)$$

- 式中  $P_{av}$ ——用电设备组的平均有功功率, kW;  
 $Q_{av}$ ——用电设备组的平均无功功率, kvar;  
 $P_e$ ——用电设备组的设备功率, kW;  
 $K_u$ ——最大负荷班的用电设备组利用系数, 见表 3-1-17;  
 $\tan\varphi$ ——用电设备组的功率因数角的正切值, 见表 3-1-17。

表 3-1-17 利用系数  $K_u$ 、 $\cos\varphi$  及  $\tan\varphi$ 

用电设备组名称	$K_u$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$
一般工作制小批生产用金属切削机床 (小型车床、刨床、插床、铣床、钻床、砂轮机等)	0.1~0.12	0.50	1.73
一般工作制大批生产用金属切削机床	0.12~0.14	0.50	1.73
重工作制金属切削机床 (冲床、自动车床、六角车床、大型车床、粗磨、铣齿、刨床、铣床、镗床、立车)	0.16	0.55	1.51
小批生产金属热加工机床 (锻锤传动装置、锻造机、拉丝机、清理转磨筒、碾磨机等)	0.17	0.60	1.33
大批生产金属热加工机床	0.20	0.65	1.17
移动式电动工具	0.05	0.50	1.73
生产用通风机	0.55	0.80	0.75
卫生用通风机	0.50	0.80	0.75
泵、空气压缩机、电动发电机组	0.55	0.80	0.75
非连锁的连续运输机械 (提升机、皮带运输机、螺旋运输机等)	0.35	0.75	0.88
连锁的连续运输机械	0.50	0.75	0.88
起重机及电动葫芦 ( $\varepsilon_r = 100\%$ )	0.15~0.20	0.50	1.73
电阻炉、干燥箱、加热器设备	0.55~0.65	0.95	0.33
试验室用小型电热设备	0.35	1.00	0.00
10t 以下电弧炼钢炉	0.65	0.80	0.75
单头直流弧焊机	0.25	0.60	1.33
多头直流弧焊机	0.50	0.70	1.02
单头弧焊变压器	0.25	0.35	2.67
多头弧焊变压器	0.30	0.35	2.67
自动弧焊机	0.30	0.50	1.73
点焊机及缝焊机	0.25	0.60	1.33
对焊机及铆钉加热器	0.25	0.70	1.02
工频感应电炉	0.75	0.35	2.67
高频感应电炉 (用电动发电机组)	0.70	0.80	0.75
高频感应电炉 (用真空管振荡器)	0.65	0.65	1.17

## (2) 全计算范围的总利用系数

$$K_{ut} = \frac{\sum P_{av}}{\sum P_e} \quad (3-1-15)$$

式中  $K_{ut}$ ——总利用系数；

$\Sigma P_{av}$ ——各用电设备组的平均有功功率之和，kW；

$\Sigma P_e$ ——各用电设备组的设备功率之和，kW。

(3) 用电设备有效台数  $n_{eq}$ ：各台设备功率和运行方式不相同的实际用电设备组，如化为某一假想的各台设备功率和运行方式均相同的用电设备组，而其最大计算负荷仍保持不变，则该假想用电设备组的台数就是这一实际用电设备组的有效（换算）台数。

用电设备有效台数的精确计算式为

$$n_{eq} = \frac{(\sum_{i=1}^n P_{ei})^2}{\sum_{i=1}^n P_{ei}^2} \quad (3-1-16)$$

式中  $n_{eq}$ ——用电设备的有效台数；

$P_{ei}$ ——第  $i$  台用电设备的设备功率，kW。

用电设备有效台数的简化计算详见 3.1.5.2。

(4) 最大系数  $K_m$ ：可根据总利用系数  $K_{ut}$  和用电设备有效台数  $n_{eq}$ ，从表 3-1-18 查得。较小截面积导体（ $\leq 3 \times 35\text{mm}^2$  的绝缘线和电缆）采用 0.5h 最大系数；中等截面积导体（ $\geq 3 \times 50\text{mm}^2$  的绝缘线和  $3 \times 50 \sim 3 \times 120\text{mm}^2$  的电缆）采用 1h 最大系数；变压器和大截面积导体（ $\geq 3 \times 150\text{mm}^2$  的电缆）采用 2h 最大系数。无论是  $n_{eq}$ 、 $K_{ut}$  还是  $K_m$ ，均可采用档间插入法。

注：在选择最大系数时，导体截面积虽然未知，但可按平均功率预估，通常无需试算。

任意时长的最大系数按式 (3-1-17) 换算

$$K_{m(t)} \leq 1 + \frac{K_{m(0.5)} - 1}{\sqrt{2t}} \quad (3-1-17)$$

式中  $K_{m(t)}$ ——任意时长的最大系数；

$K_{m(0.5)}$ ——0.5h 最大系数；

$t$ ——导体达到稳定温升的时长，h。

(5) 计算负荷

$$\text{有功功率} \quad P_e = K_m \Sigma P_{av} \quad (3-1-18)$$

$$\text{无功功率} \quad Q_e = K_m \Sigma Q_{av} \quad (3-1-19)$$

$$\text{视在功率} \quad S_c = \sqrt{P_e^2 + Q_e^2} \quad (3-1-20)$$

$$\text{计算电流} \quad I_c = \frac{S_c}{\sqrt{3}U_n} \quad (3-1-21)$$

式中  $P_e$ ——计算有功功率，kW；

$Q_e$ ——计算无功功率，kvar；

$S_c$ ——计算视在功率，kVA；

$I_c$ ——计算电流，A；

$\Sigma P_{av}$ ——各用电设备的平均有功功率之和，kW；

$\Sigma Q_{av}$ ——各用电设备的平均无功功率之和，kvar；

$K_m$ ——最大系数；

$U_n$ ——系统标称电压，kV。

0.5h/1h/2h最大系数  $K_{ut}$ 

$n_{eq}$	$K_{ut}=0.15$	$K_{ut}=0.2$	$K_{ut}=0.3$	$K_{ut}=0.4$	$K_{ut}=0.5$	$K_{ut}=0.6$	$K_{ut}=0.7$	$K_{ut}=0.8$
4	3.11/2.49/2.06	2.64/2.16/1.82	2.14/1.81/1.57	1.87/1.62/1.44	1.65/1.46/1.33	1.46/1.33/1.23	1.29/1.21/1.15	1.14/1.10/1.07
5	2.87/2.32/1.94	2.42/2.00/1.71	2.00/1.71/1.50	1.76/1.54/1.38	1.57/1.40/1.29	1.41/1.29/1.21	1.26/1.18/1.13	1.12/1.08/1.06
6	2.64/2.16/1.82	2.24/1.88/1.62	1.68/1.62/1.44	1.66/1.47/1.33	1.51/1.36/1.26	1.37/1.26/1.19	1.23/1.16/1.12	1.10/1.07/1.05
7	2.48/2.05/1.74	2.10/1.78/1.55	1.80/1.57/1.40	1.58/1.41/1.29	1.45/1.32/1.23	1.33/1.23/1.17	1.21/1.15/1.11	1.09/1.06/1.05
8	2.31/1.93/1.66	1.99/1.70/1.50	1.72/1.51/1.36	1.52/1.37/1.26	1.40/1.28/1.20	1.30/1.21/1.15	1.20/1.14/1.10	1.08/1.06/1.04
9	2.20/1.85/1.60	1.90/1.64/1.45	1.65/1.46/1.33	1.47/1.33/1.24	1.37/1.26/1.19	1.28/1.20/1.14	1.18/1.13/1.09	1.08/1.06/1.04
10	2.10/1.78/1.55	1.84/1.59/1.42	1.60/1.42/1.30	1.43/1.30/1.22	1.34/1.24/1.17	1.26/1.18/1.13	1.16/1.11/1.08	1.07/1.05/1.04
12	1.96/1.68/1.48	1.75/1.53/1.38	1.52/1.38/1.26	1.36/1.25/1.18	1.28/1.20/1.14	1.23/1.16/1.12	1.15/1.11/1.08	1.07/1.05/1.04
14	1.85/1.60/1.43	1.67/1.47/1.34	1.45/1.32/1.23	1.32/1.23/1.16	1.25/1.18/1.13	1.20/1.14/1.10	1.13/1.09/1.07	1.07/1.05/1.04
16	1.77/1.54/1.37	1.61/1.43/1.31	1.41/1.29/1.22	1.28/1.20/1.14	1.23/1.16/1.12	1.18/1.13/1.09	1.12/1.08/1.06	1.07/1.05/1.04
18	1.70/1.49/1.35	1.55/1.39/1.28	1.37/1.26/1.19	1.26/1.18/1.13	1.21/1.15/1.11	1.16/1.11/1.18	1.11/1.08/1.06	1.06/1.04/1.03
20	1.65/1.46/1.33	1.50/1.35/1.25	1.34/1.24/1.17	1.24/1.17/1.12	1.20/1.14/1.10	1.15/1.11/1.08	1.11/1.08/1.06	1.06/1.04/1.03
25	1.55/1.39/1.28	1.40/1.28/1.20	1.28/1.20/1.14	1.21/1.15/1.11	1.17/1.12/1.09	1.14/1.10/1.07	1.10/1.07/1.05	1.06/1.04/1.03
30	1.46/1.33/1.23	1.34/1.24/1.17	1.24/1.17/1.12	1.19/1.13/1.10	1.16/1.11/1.08	1.13/1.09/1.06	1.10/1.07/1.05	1.05/1.04/1.03
35	1.41/1.29/1.21	1.30/1.21/1.15	1.21/1.15/1.11	1.17/1.12/1.09	1.15/1.11/1.08	1.12/1.08/1.06	1.09/1.06/1.05	1.05/1.04/1.03
40	1.37/1.26/1.19	1.27/1.19/1.14	1.19/1.13/1.10	1.15/1.11/1.08	1.13/1.09/1.06	1.12/1.08/1.06	1.09/1.06/1.05	1.05/1.04/1.03
45	1.33/1.23/1.17	1.25/1.18/1.13	1.17/1.12/1.09	1.14/1.10/1.07	1.12/1.08/1.06	1.11/1.08/1.06	1.08/1.06/1.04	1.04/1.03/1.02
50	1.30/1.21/1.15	1.23/1.16/1.12	1.16/1.11/1.08	1.14/1.10/1.07	1.11/1.08/1.06	1.10/1.07/1.05	1.08/1.06/1.04	1.04/1.03/1.02
60	1.25/1.18/1.13	1.19/1.13/1.10	1.14/1.10/1.07	1.12/1.08/1.06	1.11/1.08/1.06	1.09/1.06/1.05	1.07/1.05/1.04	1.03/1.02/1.02
70	1.22/1.16/1.11	1.17/1.12/1.09	1.12/1.08/1.06	1.10/1.07/1.05	1.10/1.07/1.05	1.09/1.06/1.05	1.06/1.04/1.03	1.03/1.02/1.02
80	1.20/1.14/1.05	1.15/1.11/1.08	1.11/1.08/1.06	1.10/1.07/1.05	1.10/1.07/1.05	1.08/1.06/1.04	1.06/1.04/1.03	1.03/1.02/1.02
90	1.18/1.13/1.09	1.13/1.09/1.07	1.10/1.08/1.05	1.09/1.06/1.05	1.09/1.06/1.05	1.08/1.06/1.04	1.05/1.04/1.03	1.02/1.01/1.01
100	1.17/1.12/1.09	1.12/1.08/1.06	1.10/1.08/1.05	1.08/1.06/1.04	1.08/1.06/1.04	1.07/1.05/1.04	1.05/1.04/1.03	1.02/1.01/1.01
120	1.16/1.11/1.08	1.12/1.08/1.06	1.09/1.06/1.05	1.07/1.05/1.04	1.07/1.05/1.04	1.07/1.05/1.04	1.05/1.04/1.03	1.02/1.01/1.01
160	1.13/1.09/1.07	1.10/1.08/1.05	1.08/1.06/1.04	1.05/1.04/1.03	1.05/1.04/1.03	1.05/1.04/1.03	1.04/1.03/1.02	1.02/1.01/1.01
200	1.12/1.08/1.06	1.09/1.06/1.05	1.07/1.05/1.04	1.05/1.04/1.03	1.05/1.04/1.03	1.05/1.04/1.03	1.04/1.03/1.02	1.01/1.01/1.01
240	1.11/1.08/1.06	1.08/1.06/1.04	1.07/1.05/1.04	1.05/1.04/1.03	1.05/1.04/1.03	1.05/1.04/1.03	1.03/1.02/1.02	1.01/1.01/1.01

### 3.1.5.2 用电设备有效台数的简化计算

用电设备有效台数精确计算式的形式并不复杂,但当设备台数(即分母的项数)很多时,计算较烦琐。为便于计算,给出了简化计算式;本书推荐实用简化法。

#### 3.1.5.2.1 简化计算式

(1) 当有效台数为4台及以上,且最大一台设备功率  $P_{e,\max}$  与最小一台设备功率  $P_{e,\min}$  的比值  $m \leq 3$  时,取

$$n_{\text{eq}} = n \quad (3-1-22)$$

在确定  $m$  值时,可将组内总功率不超过全组总设备功率5%的最小一档用电设备略去。

(2) 当  $m > 3$  和  $K_{u,\text{av}} \geq 0.2$  时,取

$$n_{\text{eq}} = \frac{\sum P_e}{0.5 P_{e,\max}} \quad (3-1-23)$$

如按式(3-1-23)求得的  $n_{\text{eq}}$  比实际台数还多,则取  $n_{\text{eq}} = n$ 。

以上各式中  $n_{\text{eq}}$ ——用电设备有效台数;

$n$ ——用电设备实际台数;

$\sum P_e$ ——各用电设备组的设备功率之和, kW;

$P_{e,\max}$ ——最大一台用电设备的设备功率, kW;

$P_{e,\min}$ ——最小一台用电设备的设备功率, kW。

必须指出,当设备台数很多时,  $m \leq 3$  的条件很难满足;当有若干项设备功率与最大一台设备功率相近时,式(3-1-23)的误差很大。

此外,还有“相对有效台数法”,其过程烦琐,计算式复杂,查表或查曲线也不方便,本书不再做介绍。

#### 3.1.5.2.2 实用简化法

(1) 要点:用精确式分挡计算;功率相差不大的一挡设备用平均功率代替实际功率,使  $\sum P_e^2$  的计算不再烦琐。

(2) 步骤:

1) 略去最小一档 ( $\sum P_{\min} \leq 5\% \sum P_e$ ) 设备。

注:计算有效台数时,这些设备的影响微乎其微。计算平均功率时,这些设备功率仍宜计入。

2) 对最大一档(最大一台设备和功率不小于其1/2的设备),直接用精确式计算。

注:用电设备有效台数主要是由大功率设备决定的;大功率设备台数很少,计算并不烦琐。

3) 对其余  $m \leq 3$  的挡,以每挡的平均设备功率和实际台数代入精确式。

注:①  $m = P_{e,\max}/P_{e,\min}$ , 即最大一台设备功率与最小一台设备功率的比值;②除去大小两挡后,用电设备组中其余设备通常归于一挡即可。

【例3-1-1】①已知:一组用电设备的设备功率为  $2 \times 37\text{kW}$ ,  $4 \times 22\text{kW}$ ;  $5.5 \sim 15\text{kW}$  共20台合计  $200\text{kW}$ ;  $3\text{kW}$  及以下共10台合计  $15\text{kW}$ 。②求用电设备有效台数。

解:略去最小挡10台  $15\text{kW}$

$$(\sum P_e)^2 = (2 \times 37 + 4 \times 22 + 200)^2 = 131\,044$$

$$\sum P_e^2 = 2 \times 37^2 + 4 \times 22^2 + 20 \times (200/20)^2 = 6674$$

$$n_{\text{eq}} = (\sum P_e)^2 / \sum P_e^2 = 131\,044 / 6674 = 19.6$$

可以看出，5.5~15kW 一档采用平均设备功率，一次代入 20 台设备，计算很简便，而且不必确知每台设备的功率。

当有多个用电设备组时，推荐列表计算，只需加入  $\sum P_e^2$  一列即可，详见 3-1-11 计算示例。

### 3.1.5.3 5 台及以下用电设备的计算负荷

(1) 计算范围内只有 5 台及以下用电设备时，负荷计算应采用利用系数法；用电设备有效台数的计算应采用精确式（设备台数少，计算简便）。

(2) 用电设备有效台数为 4 及以上时，应按 3.1.5.1 步骤计算。

(3) 用电设备有效台数小于 4 时，计算负荷为

$$\text{有功功率} \quad P_c = \sum K_1 P_e \quad (3-1-24)$$

$$\text{无功功率} \quad Q_c = P_c \tan \varphi \quad (3-1-25)$$

式中  $P_c$ ——计算有功功率，kW；

$Q_c$ ——计算无功功率，kvar；

$P_e$ ——各用电设备的设备功率，kW；

$K_1$ ——各用电设备的负荷系数，由工艺专业或设备专业提供；

$\tan \varphi$ ——计算负荷功率因数角的正切值。

(4) 当缺乏负荷系数的资料时，可采用平均负荷系数。

1) 连续工作制设备：实际台数大于 3 时取 0.9；实际台数不大于 3 时取 1。

2) 短时或周期工作制设备：实际台数大于 3 时取 1；实际台数不大于 3 时取 1.15。

(5) 应当指出，这种算法只允许用于计算范围内只有 5 台及以下用电设备的情况。当计算范围内有其他用电设备组时，尽管某组设备台数少，仍应按 3.1.5.1 计算。

### 3.1.5.4 利用系数法和需要系数法的关联

(1) 当电力负荷采用利用系数法计算时，照明负荷仍应采用需要系数法计算。变电站或更大计算范围的总负荷，应为前者的最大负荷  $P_c$  和  $Q_c$  与后者的需要负荷  $P_n$  和  $Q_n$  分别相加。

(2) 在一定条件下，需要系数和利用系数存在转换关系。当缺乏某些计算系数的资料时，二者可相互补充。需要系数与利用系数的关系见表 3-1-19。

表 3-1-19 需要系数与利用系数的关系

需要系数	0.5	0.6	0.65~0.7	0.75~0.8	0.85~0.9	0.92~0.95
利用系数	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

注 本表数据按照接通系数 0.8 给出。

## 3.1.6 相间负荷和单相负荷计算

### 3.1.6.1 计算原则

(1) 相间负荷和单相负荷应均衡分配到三相上，使各相的计算负荷尽量相近，减小不平衡度。

(2) 当符合式 (3-1-26) 条件时，相间负荷和单相负荷可不换算，直接与三相负荷相加

$$\Sigma P_{e.s} \leq 15\% \Sigma P_{e.l} \quad (3-1-26)$$

式中  $\Sigma P_{e.s}$ ——计算范围内相间负荷、单相负荷的设备功率之和, kW;

$\Sigma P_{e.l}$ ——计算范围内三相负荷的设备功率之和, kW。

(3) 当  $\Sigma P_{e.s} > 15\% \Sigma P_{e.l}$  时, 相间负荷和单相负荷应换算为等效三相负荷后, 再纳入三相负荷计算。

(4) 进行相间、单相负荷换算时, 一般采用计算功率。对需要系数法, 计算功率即为需要功率; 对利用系数法, 计算功率取平均功率。如单相负荷均为同类用电负荷, 也可直接采用设备功率换算。

注: 本节所称相间负荷和单相负荷, 在各个具体情况下分别代表需要功率、平均功率或设备功率。负荷接于线电压或相电压时, 相应地称为相间负荷或单相负荷。

### 3.1.6.2 相间负荷、单相负荷换算为等效三相负荷的简化法

(1) 只有相间负荷时, 将各相间负荷相加, 选取较大两项数据进行计算。

当  $P_{UV} \geq P_{VW} \geq P_{WU}$  时

$$P_{eq} = \sqrt{3}P_{UV} + (3 - \sqrt{3})P_{VW} = 1.73P_{UV} + 1.27P_{VW} \quad (3-1-27)$$

当  $P_{UV} = P_{VW}$  时

$$P_{eq} = 3P_{UV} \quad (3-1-28)$$

当只有  $P_{UV}$  时

$$P_{eq} = \sqrt{3}P_{UV} \quad (3-1-29)$$

以上各式中  $P_{eq}$ ——等效三相负荷, kW;

$P_{UV}$ 、 $P_{VW}$ 、 $P_{WU}$ ——接于 UV、VW、WU 相间的负荷, kW;

(2) 只有单相负荷时, 等效三相负荷取最大相负荷的 3 倍。

(3) 简化相间和单相负荷换算的措施: 相间负荷和单相负荷 (如电焊机和照明灯) 分别配电, 使各配电线路均符合简化法的条件。

(4) 缩减单相负荷范围的约定: 数量多而单台功率小的用电器具 (如灯具和家用电器), 容易均匀地分接到三相上, 在大计算范围内应视同三相负荷。按此约定, 低压母线的负荷通常符合式 (3-1-26) 的条件, 不必进行任何换算。

### 3.1.6.3 相间负荷、单相负荷换算为等效三相负荷的精确法

对于既有相间负荷又有单相负荷的情况, 应采用精确法换算。

(1) 先将相间负荷换算为单相负荷, 各相负荷分别为:

$$U \text{ 相} \quad P_U = P_{UV}p_{(UV)U} + P_{WU}p_{(WU)U} \quad (3-1-30)$$

$$Q_U = P_{UV}q_{(UV)U} + P_{WU}q_{(WU)U} \quad (3-1-31)$$

$$V \text{ 相} \quad P_V = P_{UV}p_{(UV)V} + P_{VW}p_{(VW)V} \quad (3-1-32)$$

$$Q_V = P_{UV}q_{(UV)V} + P_{VW}q_{(VW)V} \quad (3-1-33)$$

$$W \text{ 相} \quad P_W = P_{VW}p_{(VW)W} + P_{WU}p_{(WU)W} \quad (3-1-34)$$

$$Q_W = P_{VW}q_{(VW)W} + P_{WU}q_{(WU)W} \quad (3-1-35)$$

以上各式中  $P_{UV}$ 、 $P_{VW}$ 、 $P_{WU}$ ——接于 UV、VW、WU 相间的有功负荷, kW;

$P_U$ 、 $P_V$ 、 $P_W$ ——换算为 U、V、W 相的有功负荷, kW;

$Q_U$ 、 $Q_V$ 、 $Q_W$ ——换算为 U、V、W 相的无功负荷, kvar;

$p_{(UV)U}$ 、 $q_{(UV)U}$ ——接于 UV 相间负荷换算为 U 相负荷的有功及无功换算系

数，其余类推，见表3-1-20。

(2) 各相负荷分别相加，选出最大相负荷，取其3倍作为等效三相负荷。

(3) 直接用解析式计算很烦琐，且易出错。推荐列表计算，详见表3-1-21。

表3-1-20 相间负荷换算为相负荷的有功及无功换算系数

换算系数	负荷功率因数								
	0.35	0.40	0.50	0.60	0.65	0.70	0.80	0.90	1.00
$P_{(UV)U}、P_{(VW)V}、P_{(WU)W}$	1.27	1.17	1.00	0.89	0.84	0.80	0.72	0.64	0.50
$P_{(UV)V}、P_{(VW)W}、P_{(WU)U}$	-0.27	-0.17	0	0.11	0.16	0.20	0.28	0.36	0.50
$q_{(UV)U}、q_{(VW)V}、q_{(WU)W}$	1.05	0.86	0.58	0.38	0.30	0.22	0.09	-0.05	-0.29
$q_{(UV)V}、q_{(VW)W}、q_{(WU)U}$	1.63	1.44	1.16	0.96	0.88	0.80	0.67	0.53	0.29

注 当功率因数与表内数值不同时，换算系数按下列各式类推：

$$P_{(UV)U} = \frac{\sqrt{3}}{6} \tan \varphi + \frac{1}{2}; \quad P_{(UV)V} = -\frac{\sqrt{3}}{6} \tan \varphi + \frac{1}{2}$$

$$q_{(UV)U} = \frac{1}{2} \tan \varphi - \frac{\sqrt{3}}{6}; \quad q_{(UV)V} = \frac{1}{2} \tan \varphi + \frac{\sqrt{3}}{6}$$

【例3-1-2】 已知：某线路上装有单相220V电热干燥箱40kW 2台、20kW 2台，电加热器20kW 1台；相间380V自动焊机（ $\varepsilon_r = 100\%$ ）46kW 3台、51kW 2台、32kW 1台。采用利用系数法进行负荷计算。

解：1) 求平均功率：首先应将单相负荷逐相分配，尽量使其平衡。计算过程详见表3-1-21。

计算结果表明，平均负荷最大的相为v相， $P_{av.v} = 76\text{kW}$ ， $Q_{av.v} = 74\text{kvar}$ 。

等效三相平均功率 $\sum P_{av} = 3P_{av.v} = 228\text{ (kW)}$ ； $\sum Q_{av} = 3Q_{av.v} = 222\text{ (kvar)}$ 。

2) 求总利用系数：接于线电压的设备功率按式(3-1-28)推算， $P_e = 3P_{uv} = 3P_{vu} = 3 \times 97 = 291\text{ (kW)}$ ；接于相电压的设备功率 $P_e = 3P_v = 3 \times 60 = 180\text{ (kW)}$ ； $\sum P_e = 291 + 180 = 471\text{ (kW)}$ 。

根据式(3-1-15)， $K_{ut} = \sum P_{av} / \sum P_e = 228 / 471 = 0.48$ 。

3) 求用电设备有效台数： $\because m = 46 / 20 = 2.3 \leq 3$ ， $\therefore n_{eq} = n = 11$ 。

注：如用精确法计算： $\gamma(\sum P_e)^2 = (412)^2 = 169\,744$ ； $\sum P_e^2 = 2 \times 40^2 + 3 \times 20^2 + 3 \times 46^2 + 2 \times 51^2 + 32^2 = 16\,974$ ； $n_{eq} = 169\,744 / 16\,974 = 10.000\,236$ 。

4) 求1h最大系数：查表3-1-18，取 $K_m = 1.25$ 。

5) 求1h最大负荷： $P_e = K_m \sum P_{av} = 1.25 \times 228 = 285\text{ (kW)}$ ； $Q_e = K_m \sum Q_{av} = 1.25 \times 222 = 278\text{ (kvar)}$ 。

可以看出，采用利用系数法计算相间和单相负荷的过程很烦琐。还应指出，相间负荷的典型案例是电焊机；对焊接车间变压器的选择而言，控制条件往往不是发热，而是电压波动。因此，不必追求精确的负荷计算，推荐采用需要系数法。

采用需要系数法计算时，只需把表3-1-21中 $K_u$ 改为 $K_d$ ，即可得出各相的需要功率；最大相需要功率的3倍就是计算结果。

表 3-1-21 有相间、单相用电设备的三相网路负荷计算

设备名称	设备功率 (kW)	台数	cosφ/ tanφ	接于相间的设备 功率 (kW)			换算系数			单相设备功率 (kW)			利用 系数 K <sub>u</sub>	各相平均负荷								
							相序	p	q					有功功率 P <sub>av</sub> (kW)		无功功率 Q <sub>av</sub> (kvar)						
				UV	VW	WU				U	V	W		U	V	W						
单相 220V 电 干燥箱	40	2	0.95 /0.33							20			0.6		12			4				
	20	2							40		40				24		24	8		8		
	20	1									40						24			8		
相间 380V 自 动焊机	46	3	0.6	46 + 51 =97			U	0.89	0.38				0.5	43				18				
							V	0.11	0.96						5			47				
	51	2		46 + 32 =78			V	0.89	0.38							35				15		
							W	0.11	0.96								4				37	
	32	1			46 + 51 =97			W	0.89	0.38									43			18
								U	0.11	0.96									5			47
总计	412	10		97	78	97				40	60	40		72	76	71	73	74	63			

## 3.1.7 电弧炉负荷计算

普通功率电弧炉的负荷计算除采用利用系数法和需要系数法外，还可采用冶炼周期算法。

在选择电弧炉变压器容量时，规定熔化期最大负荷相当于变压器额定容量的 1.2 倍。

用冶炼周期算法计算的电弧炉最大负荷：

(1) 一台电弧炉的计算负荷

$$P_c = 1.2S_r \cos\varphi_1 \quad (3-1-36)$$

$$Q_c = P_c \tan\varphi_1 \quad (3-1-37)$$

(2) 数台电弧炉的计算负荷

$$P_c = 1.2 \cos\varphi_1 \sum (n_1 S_r) + 0.66 \cos\varphi_2 (n_2 S_r) \quad (3-1-38)$$

$$Q_c = 1.2 \sin\varphi_1 \sum (n_1 S_r) + 0.66 \sin\varphi_2 (n_2 S_r) \quad (3-1-39)$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (3-1-40)$$

以上各式中  $P_c$ ——最大负荷有功功率，kW；

$Q_c$ ——最大负荷无功功率，kvar；

$S_c$ ——最大负荷视在功率，kVA；

$\cos\varphi_1$ ——电弧炉熔化期的功率因数，取 0.85， $\sin\varphi_1$ 取 0.527；

$\cos\varphi_2$ ——电弧炉精练期的功率因数，取 0.9， $\sin\varphi_2$ 取 0.436；

$S_r$ ——电弧炉变压器的额定容量，kVA；

$n_1$ ——熔化期电弧炉计算台数，见表 3-1-22；

$n_2$ ——精练期电弧炉计算台数，见表 3-1-22。

当电弧炉变压器额定容量不同时，熔化期应取容量较大的几台电弧炉计算。

(3) HX 系列三相电弧炼钢炉配套变压器的数据见表 3-1-23。

表 3-1-22 电弧炉计算台数

总台数 $n$	熔化期计算台数 $n_1$	精炼期计算台数 $n_2$
3	2	1
4	2	2
5	3	2
6	3	3

表 3-1-23 HX 系列三相电弧炼钢炉配套变压器数据

电弧炼钢炉型号	HX-0.5	HX-1.5	HX-3	HX-5	HX-10
电弧炉额定容量 (t)	0.5	1.5	3.0	5.0	10
变压器型号容量 <sup>①</sup> (内附电抗器)	HS-1000/10 1000kVA	HS-1800/10 1800kVA	HS-3000/10 3000kVA	HSSP-4200/10 4200kVA	HSSPZ-7200/10 7200kVA
变压器额定容量 (kVA)	650	1250	2200	3200	5500
高压侧电压 (kV)	6 或 10	6 或 10	6 或 10	6 或 10	6 或 35
低压侧电压 (V)	200~98 (4)	210~104 (4)	220~110 (4)	240~121 (4)	260~139 (4) 270~135.5 (4)

注 括号内为变压器低压侧电压抽头的级数。

① 变压器型号及容量是根据电弧炉变压器的材料消耗折算成三相双绕组电力变压器的相当容量，型号数据仅供参考。

### 3.1.8 尖峰电流计算

尖峰电流是电动机等用电设备起动或冲击性负荷工作时产生的最大负荷电流，其持续时间一般为 1~2s。

(1) 单台电动机、电弧炉或电焊变压器的支线，其尖峰电流为

$$I_{st} = KI_{rM} \quad (3-1-41)$$

(2) 接有多台电动机的配电线路，只考虑一台电动机起动时的尖峰电流为

$$I_{st} = (KI_r)_{\max} + I'_c \quad (3-1-42)$$

以上各式中  $I_{st}$ ——尖峰电流，A；

$I_{rM}$ ——电动机额定电流、电弧炉或电焊变压器一次侧额定电流，A；

$K$ ——起动电流倍数，即起动电流与额定电流之比（笼型电动机可达 7 倍左右；绕线转子电动机一般不大于 2 倍；直流电动机为 1.5~2 倍；单台电弧炉为 3 倍；弧焊变压器和弧焊整流器为小于或等于 2.1 倍；电阻焊机为 1 倍；闪光对焊机为 2 倍）；

$(KI_r)_{\max}$ ——起动电流最大的一台电动机的起动电流，A；

$I'_c$ ——除起动电动机以外的配电线路计算电流，A。

两台及以上的电动机有可能同时起动时，尖峰电流根据实际情况确定。

### 3.1.9 年电能消耗量计算

(1) 用年最大负荷利用小时计算

$$W_y = P_c T_{\max} \quad (3-1-43)$$

$$V_y = Q_c T_{\max, r} \quad (3-1-44)$$

(2) 用年平均负荷计算

$$W_y = 8760 \alpha_y P_c \quad (3-1-45)$$

$$V_y = 8760 \beta_y Q_c \quad (3-1-46)$$

(3) 用单位产品耗电量计算:

$$W_y = w m \quad (3-1-47)$$

$$V_y = W_y \tan \varphi_{av} \quad (3-1-48)$$

以上各式中  $W_y$ ——年有功电能消耗量, kWh;

$V_y$ ——年无功电能消耗量, kvarh;

$P_c$ ——有功计算功率, kW;

$Q_c$ ——无功计算功率, kvar;

$T_{\max}$ ——年最大有功负荷利用小时数, 参见表 3-1-24;

$T_{\max, r}$ ——年最大无功负荷利用小时数, 当缺乏此数据时, 可取稍高或等于  $T_{\max}$ ;

$\alpha_y$ ——年平均有功负荷系数, 参见表 3-1-24;

$\beta_y$ ——年平均无功负荷系数, 当缺乏此数据时, 可取稍高或等于  $\alpha_y$ ;

$w$ ——单位产品耗电量, 由工艺设计提供, 参见表 3-1-9, kWh/单位产品;

$m$ ——产品年产量, 由工艺设计提供 (单位应与  $w$  中的单位产品一致);

$\tan \varphi_{av}$ ——年加权平均功率因数角的正切值,  $\tan \varphi_{av} = \beta_y Q_c / \alpha_y P_c$ 。

表 3-1-24 年最大负荷利用小时数和年平均有功负荷系数

行 业		年最大负荷利用 小时数 $T_{\max}$ (h)	年平均有功 负荷系数 $\alpha_y$	年最大负荷损耗小时数 $\tau$ (h) ( $\cos \varphi = 0.9$ )
有色金属	电解	7000	0.8	5800
	冶炼	6800	0.78	5500
	采选	5800	0.66	4350
钢铁	冶炼	4500 ~ 6000	0.51 ~ 0.68	2900 ~ 4500
	轧钢	2000 ~ 4000	0.23 ~ 0.46	1000 ~ 2400
	供气、供热、供水	5000 ~ 6500	0.57 ~ 0.74	3400 ~ 5100
化工		7300	0.83	6375
石油		7000	0.8	5800
机械制造	重型机械	3800	0.43	
	机床、工具	4100 ~ 4400	0.47 ~ 0.5	
	滚珠轴承	5300	0.61	
	汽车、农业机械	5000 ~ 5300	0.57 ~ 0.61	
	电器	4300	0.49	
	仪器仪表	3100	0.35	

续表

行 业		年最大负荷利用 小时数 $T_{\max}$ (h)	年平均有功 负荷系数 $\alpha_y$	年最大负荷损耗小时数 $\tau$ (h) ( $\cos\varphi=0.9$ )	
轻工纺织	食品	4500	0.51	2900	
	纺织	6000	0.68	4500	
	漂染	5700	0.65		
中心城区	住宅	豪华	3280	0.37	
		高档	2790	0.32	
		普通	3090	0.35	
	行政科教	办公	2790	0.32	
		教学	1540	0.18	
		科研	3300	0.38	
	商业金融	商务办公	1520	0.17	
		商场	2500	0.29	
		酒店宾馆	1230	0.14	
	文化体育	图书馆	2750	0.31	
		展览馆	2600	0.3	
		影剧院	1110	0.13	
		体育场馆	2000	0.23	1000
	市政	轨道交通车站	6750	0.77	
		市政泵站	100	0.01	
公共绿地		3540	0.4		
农村	农业灌溉	2800	0.32		
	农村企业	3500	0.4	2000	
	农村照明	1500	0.17	750	

### 3.1.10 电网损耗计算

#### 3.1.10.1 电网中的功率损耗计算

(1) 电力线路中的功率损耗计算：三相线路中有功功率损耗和无功功率损耗为

$$\Delta P_L = 3I_c^2 R \times 10^{-3} \quad (3-1-49)$$

$$\Delta Q_L = 3I_c^2 X \times 10^{-3} \quad (3-1-50)$$

式中  $\Delta P_L$ ——三相线路中有功功率损耗，kW；

$\Delta Q_L$ ——三相线路中无功功率损耗，kvar；

$R$ ——每相线路电阻， $R=rl$ ， $\Omega$ ；

$X$ ——每相线路电抗， $X=xl$ ， $\Omega$ ；

$l$ ——线路计算长度，km；

$I_c$ ——计算相电流，A；

$r$ 、 $x$ ——线路单位长度的交流电阻及电抗，见第4章， $\Omega/\text{km}$ 。

(2) 双绕组变压器中的功率损耗计算：双绕组变压器的有功及无功功率损耗为

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + \Delta P_k \left( \frac{S_c}{S_{rT}} \right)^2 \quad (3-1-51)$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_0 + \Delta Q_k \left( \frac{S_c}{S_{rT}} \right)^2 = \frac{I_0 \% S_{rT}}{100} + \frac{u_k \% S_{rT}}{100} \left( \frac{S_c}{S_{rT}} \right)^2 \quad (3-1-52)$$

式中  $\Delta P_T$ ——变压器中的有功功率损耗, kW  
 $\Delta Q_T$ ——变压器中的无功功率损耗, kvar;  
 $S_c$ ——变压器计算负荷, kVA;  
 $S_{rT}$ ——变压器额定容量, kVA;  
 $\Delta P_0$ ——变压器空载有功损耗, kW;  
 $\Delta P_k$ ——变压器短路有功损耗, kW;  
 $\Delta Q_0$ ——变压器空载无功损耗, kvar;  
 $\Delta Q_k$ ——变压器短路无功损耗, kvar;  
 $I_0 \%$ ——变压器空载电流百分数;  
 $u_k \%$ ——变压器阻抗电压百分数。

$\Delta P_0$ 、 $\Delta P_k$ 、 $I_0 \%$ 、 $u_k \%$  均可由变压器产品样本中查得。

当变压器负荷率不大于 85% 时, 其功率损耗可以概略计算如下

$$\Delta P_T = 0.01 S_c \quad (3-1-53)$$

$$\Delta Q_T = 0.05 S_c \quad (3-1-54)$$

(3) 三绕组变压器中的功率损耗计算:

1) 三绕组降压变压器的功率损耗, 应将三个绕组分开计算, 简化计算公式为

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + \Delta P_{kT1} \left( \frac{S_{c1}}{S_{rT1}} \right)^2 + \Delta P_{kT2} \left( \frac{S_{c2}}{S_{rT2}} \right)^2 + \Delta P_{kT3} \left( \frac{S_{c3}}{S_{rT3}} \right)^2 \quad (3-1-55)$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_0 + \Delta Q_{kT1} \left( \frac{S_{c1}}{S_{rT1}} \right)^2 + \Delta Q_{kT2} \left( \frac{S_{c2}}{S_{rT2}} \right)^2 + \Delta Q_{kT3} \left( \frac{S_{c3}}{S_{rT3}} \right)^2 \quad (3-1-56)$$

式中  $S_{rT1}$ 、 $S_{rT2}$ 、 $S_{rT3}$ ——变压器高压、中压、低压绕组的额定容量, kVA;

$S_{c1}$ 、 $S_{c2}$ 、 $S_{c3}$ ——变压器高压、中压、低压绕组的计算负荷, kVA;

$\Delta P_0$ ——整个变压器的空载有功损耗, 由产品样本查得, kW;

$\Delta P_{kT1}$ 、 $\Delta P_{kT2}$ 、 $\Delta P_{kT3}$ ——变压器高压、中压、低压绕组额定负荷时的负载有功损耗, kW;

$\Delta Q_0$ ——整个变压器的空载无功损耗, kvar;

$\Delta Q_{kT1}$ 、 $\Delta Q_{kT2}$ 、 $\Delta Q_{kT3}$ ——变压器高压、中压、低压绕组额定负荷时的负载无功损耗, kvar。

$\Delta Q_0$  值由式 (3-1-57) 求得

$$\Delta Q_0 = \frac{I_0 \% S_{rT}}{100} \quad (3-1-57)$$

式中  $\Delta Q_0$ ——整个变压器的空载无功损耗, kvar;

$I_0 \%$ ——变压器的空载电流占额定电流的百分数, 由产品样本中查得;

$S_{rT}$ ——变压器的额定容量, kVA。

2)  $\Delta P_{kT1}$ 、 $\Delta P_{kT2}$ 、 $\Delta P_{kT3}$  由以下各式求出:

当三个绕组容量都是变压器容量的 100% 时

$$\Delta P_{kT1} = 3I_{rT1}^2 R_{T1} \times 10^{-3} \quad (3-1-58)$$

$$\Delta P_{kT2} = 3I_{rT1}^2 R'_{T2} \times 10^{-3} \quad (3-1-59)$$

$$\Delta P_{kT3} = 3I_{rT1}^2 R'_{T3} \times 10^{-3} \quad (3-1-60)$$

式中  $I_{rT1}$ ——变压器高压绕组的额定电流，A；

$R_{T1}$ ——变压器高压绕组的相电阻， $\Omega$ ；

$R'_{T2}$ 、 $R'_{T3}$ ——折算到高压侧的中压、低压绕组相电阻， $\Omega$ 。

变压器三个绕组的相电阻为

$$R_{T1} = \frac{\Delta P_k}{6I_{rT1}^2} \times 10^3 \quad (3-1-61)$$

3 式中  $R_{T1}$ ——变压器高压绕组的相电阻， $\Omega$ ；

$\Delta P_k$ ——变压器高中、高低绕组额定负载时的有功损耗值，即短路损耗，取其最大值，由产品样本中查得，kW；

$I_{rT1}$ ——变压器高压绕组的额定电流，A。

若中压或低压绕组容量为变压器额定容量的100%时，则

$$R'_{T2} \text{ 或 } R'_{T3} = R_{T1} \quad (3-1-62)$$

若中压或低压绕组容量为变压器额定容量的67%时，则

$$R'_{T2} \text{ 或 } R'_{T3} = 1.5R_{T1} \quad (3-1-63)$$

若中压或低压绕组容量为变压器额定容量的50%时，则

$$R'_{T2} \text{ 或 } R'_{T3} = 2R_{T1} \quad (3-1-64)$$

以上各式中  $R_{T1}$ ——变压器高压线圈的相电阻， $\Omega$ ；

$R'_{T2}$ 、 $R'_{T3}$ ——折算到高压侧的中压、低压绕组相电阻， $\Omega$ 。

3)  $\Delta Q_{kT1}$ 、 $\Delta Q_{kT2}$ 、 $\Delta Q_{kT3}$ 由以下各式求出：

当三个绕组的容量都是变压器容量的100%时

$$\Delta Q_{kT1} = 3I_{rT1}^2 \frac{10U_{rT}^2}{2S_{rT}} (u_{k1-2}\% + u_{k1-3}\% - u_{k2-3}\%) \times 10^{-3} \quad (3-1-65)$$

$$\Delta Q_{kT2} = 3I_{rT1}^2 \frac{10U_{rT}^2}{2S_{rT}} (u_{k1-2}\% + u_{k2-3}\% - u_{k1-3}\%) \times 10^{-3} \quad (3-1-66)$$

$$\Delta Q_{kT3} = 3I_{rT1}^2 \frac{10U_{rT}^2}{2S_{rT}} (u_{k1-3}\% + u_{k2-3}\% - u_{k1-2}\%) \times 10^{-3} \quad (3-1-67)$$

式中  $\Delta Q_{kT1}$ 、 $\Delta Q_{kT2}$ 、 $\Delta Q_{kT3}$ ——变压器高压、中压、低压绕组额定负荷时的负载无功损耗，kvar；

$u_{k1-2}\%$ 、 $u_{k1-3}\%$ 、 $u_{k2-3}\%$ ——变压器高中、高低、中低绕组间的短路电压比，即阻抗电压，由产品样本中查得；

$U_{rT}$ ——变压器高压绕组的额定电压，kV；

$I_{rT1}$ ——变压器高压绕组的额定电流，A；

$S_{rT}$ ——变压器的额定容量，kVA。

当中压或低压绕组中有一个绕组的容量为变压器额定容量的67%时，则式(3-1-59)及式(3-1-60)或式(3-1-66)及式(3-1-67)中的 $I_{rT1}$ 应乘以0.67。

当中压或低压绕组中有一个绕组的容量为变压器额定容量的 50% 时, 则式 (3-1-59) 及式 (3-1-60) 或式 (3-1-66) 及式 (3-1-67) 中的  $I_{rT1}$  应乘以 0.5。

4) 变压器高压绕组的额定电流  $I_{rT1}$  由式 (3-1-68) 求得

$$I_{rT1} = \frac{1000S_{rT}}{\sqrt{3}U_{rT}} \quad (3-1-68)$$

式中  $U_{rT}$ ——变压器高压绕组的额定电压, kV;

$I_{rT1}$ ——变压器高压绕组的额定电流, A;

$S_{rT}$ ——变压器的额定容量, MVA。

铜、铝芯三相三绕组电力变压器的  $\Delta P_0$ 、 $I_0\%$ 、 $\Delta P_k$ 、 $u_{k1-2}\%$ 、 $u_{k1-3}\%$ 、 $u_{k2-3}\%$  等参数可由产品样本查得或由制造厂提供。

(4) 电容器的功率损耗计算: 电容器的有功功率损耗为

$$\Delta P_C = Q_C \tan \delta \quad (3-1-69)$$

电容器并联补偿装置应计及其中放电电阻、电抗器、保护和计量器件的损耗, 一般按式 (3-1-70) 估算

$$\Delta P_C = (0.25 \sim 0.5)\% Q_C \quad (3-1-70)$$

以上各式中  $\Delta P_C$ ——电容器或并联补偿装置的有功功率损耗, kW;

$Q_C$ ——电容器容量, kvar;

$\tan \delta$ ——电容器介质损失角的正切值。

(5) 电抗器的功率损耗计算: 三相电抗器的有功和无功功率损耗为

$$\Delta P_X = 3\Delta P_r \left( \frac{I_c}{I_{rX}} \right)^2 \quad (3-1-71)$$

$$\Delta Q_X = 3\Delta Q_r \left( \frac{I_c}{I_{rX}} \right)^2 \quad (3-1-72)$$

式中  $\Delta P_X$ ——电抗器的有功功率损耗, kW;

$\Delta Q_X$ ——电抗器的无功功率损耗, kvar;

$\Delta P_r$ ——额定电流时电抗器每相的有功损耗, kW;

$\Delta Q_r$ ——额定电流时电抗器每相的无功损耗, kvar;

$I_c$ ——通过电抗器的计算电流, A;

$I_{rX}$ ——电抗器的额定电流, A。

$\Delta P_r$ 、 $\Delta Q_r$ 、 $\tan \delta$  可由产品样本中查得。

### 3.1.10.2 电网中的电能损耗计算

(1) 三相线路年有功电能损耗

$$\Delta W_L = \Delta P_L \tau \quad (3-1-73)$$

(2) 双绕组变压器年有功电能损耗

$$\Delta W_T = \Delta P_0 t + \Delta P_k \left( \frac{S_c}{S_{rT}} \right)^2 \tau \quad (3-1-74)$$

(3) 三绕组变压器年有功电能损耗

$$\Delta W_T = \Delta P_0 t + \Delta P_{k1} \left( \frac{S_{c1}}{S_{rT1}} \right)^2 \tau_1 + \Delta P_{k2} \left( \frac{S_{c2}}{S_{rT2}} \right)^2 \tau_2 + \Delta P_{k3} \left( \frac{S_{c3}}{S_{rT3}} \right)^2 \tau_3 \quad (3-1-75)$$

(4) 电容器年电能损耗

$$\Delta W_C = \Delta P_C t \quad (3-1-76)$$

(5) 电抗器年电能损耗

$$\Delta W_X = \Delta P_X \tau \quad (3-1-77)$$

以上各式中  $\Delta W_L$ 、 $\Delta W_T$ 、 $\Delta W_C$ 、 $\Delta W_X$ ——三相线路、变压器、电容器、电抗器的年有功电能损耗，kWh；

$\Delta P_L$ 、 $\Delta P_C$ 、 $\Delta P_X$ ——三相线路、电容器、电抗器的有功功率损耗，kW；

$\Delta P_0$ ——变压器空载损耗，kW；

$\Delta P_k$ ——变压器短路损耗，kW；

$\tau$ ——年最大负荷损耗小时，可由图 3-1-3、表 3-1-25 或表 3-1-24 查得；

$t$ ——变压器或电抗器全年投入运行小时数，当全年投入运行时取 8760h；

$S_c$ ——变压器计算负荷，kVA；

$S_{rT}$ ——变压器额定容量，kVA。

注：对于三绕组变压器，其一次、二次、三次绕组的数据，分别加下标 1、2、3 表示。

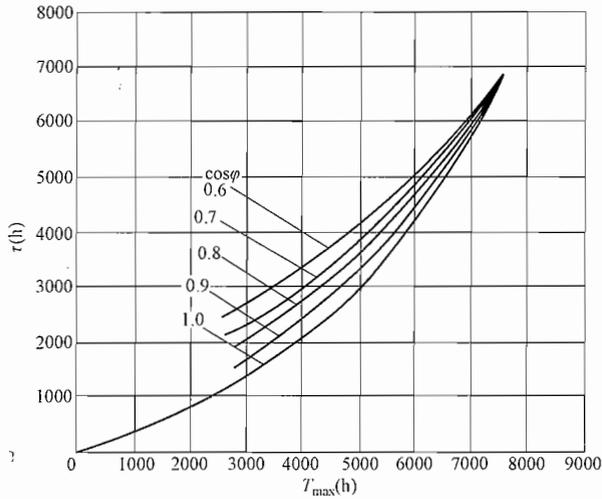


图 3-1-3  $\tau$  与  $T_{max}$  的关系曲线

表 3-1-25 年最大负荷损耗小时

$T_{max}$ (h)	$\tau$ (h)				
	$\cos\varphi = 0.8$	$\cos\varphi = 0.85$	$\cos\varphi = 0.90$	$\cos\varphi = 0.95$	$\cos\varphi = 1$
1000	950	900	750	600	300
2000	1500	1200	1000	800	700
2500	1700	1500	1250	1100	950
3000	2000	1800	1600	1400	1250

续表

$T_{\max}$ (h)	$\tau$ (h)				
	$\cos\varphi = 0.8$	$\cos\varphi = 0.85$	$\cos\varphi = 0.90$	$\cos\varphi = 0.95$	$\cos\varphi = 1$
3500	2350	2150	2000	1800	1600
4000	2750	2600	2400	2200	2000
4500	3150	3000	2900	2700	2500
5000	3600	3500	3400	3200	3000
5500	4100	4000	3950	3750	3600
6000	4650	4600	4500	4350	4200
6500	5250	5200	5100	5000	4850
7000	5950	5900	5800	5700	5600
7500	6650	6600	6550	6500	6400
8000	7400	7380	7350	7300	7250

注 各行业的年最大负荷利用小时  $T_{\max}$  和相应的年最大负荷损耗小时  $\tau$ , 参见表 3-1-24。

### 3.1.11 负荷计算示例

采用利用系数法和需要系数法计算同一案例的负荷, 以便于对比。

#### 3.1.11.1 利用系数法负荷计算示例

利用系数法的计算过程和结果见表 3-1-26。

表 3-1-26 利用系数法负荷计算表

用电设备组	设备功率 (kW)			$\Sigma P_e^2$	$K_u$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	平均负荷		$K_m$	计算负荷				
	单台功率	台数	$\Sigma P_e$					$P_{av}$ (kW)	$Q_{av}$ (kvar)		$P_c$ (kW)	$Q_c$ (kvar)	$S_c$ (kVA)		
重工作制 机床	57	1	173	6517	0.16	0.55	1.52	27.7	42.1						
	44	1													
	21	2													
	15	2													
一般工作 制机床	(4~10) 5.8	30	174	1009	0.12	0.5	1.73	20.9	36.1						
风机 水泵	75	2	298	15 357	0.55	0.8	0.75	163.9	122.9						
	37	2													
	18.5	4													
	(3~7.5) 6	6	36	216	0.55	0.8	0.75	19.8	14.9						
压缩机	110	2	220	24 200	0.55	0.8	0.75	121	90.8						
电阻炉	90 60	3 4	510	38 700	0.6	0.95	0.33	306	101						
148kVA 自动弧焊	57.3	2	114.6	6567	0.3	0.5	1.73	34.4	59.5						

续表

用电设备组	设备功率 (kW)			$\Sigma P_e^2$	$K_u$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	平均负荷		$K_m$	计算负荷		
	单台功率	台数	$\Sigma P_e$					$P_{av}$ (kW)	$Q_{av}$ (kvar)		$P_c$ (kW)	$Q_c$ (kvar)	$S_c$ (kVA)
200、75kVA 点焊机	53.7 20.1	1 2	93.9	11 782	0.25	0.6	1.33	23.5	31.2				
10、5t 起重机	15 11.5	1 2	38	490	0.15	0.5	1.73	5.7	9.9				
电力合计		$n_{eq} = 26.2$	1657.5	104 838	$K_{nt} = 0.44$			722.9	508.4	1.1	795.2	559.2	
照明合计			70		$K_d = 0.8$	0.7	1.02				56	57.1	
无功补偿												-240	
总计			1727.5								851.2	376.3	930.7

- 注 1. 单台设备功率带下划线者为该挡设备功率的平均值, 例如  $\underline{5.8} = 174/30$ , 参见 3.1.5.2.2。  
 2. 弧焊机  $\varepsilon_r = 0.6$ , 点焊机  $\varepsilon_r = 0.2$ , 均为单相 380V。照明视同三相负荷。单相负荷设备功率之和不超过三相负荷设备功率之和的 15%, 不需换算。  
 3. 用电设备有效台数  $n_{eq} = (\Sigma P_e)^2 / \Sigma P_e^2 = (1657.5)^2 / 104 838 = 26.205$ 。用精确法计算  $n_{eq} = 26.164$ 。  
 4. 总利用系数  $K_u = \Sigma P_{av} / \Sigma P_e = 722.9 / 1657.5 = 0.44$ 。  
 5. 查表 3-1-18, 取 2h 最大系数。

### 3.1.11.2 需要系数法负荷计算示例

10kV/0.4kV 变电站的负荷与 3.1.11.1 相同, 计算过程和结果见表 3-1-27。

表 3-1-27 需要系数法负荷计算表

用电设备组		需要系数 $K_d$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	需要负荷		同时系数 $K_\Sigma$	计算负荷		
负荷性质	设备功率 (kW)				$P$ (kW)	$Q$ (kvar)		$P_c$ (kW)	$Q_c$ (kvar)	$S_c$ (kVA)
重工作制机床	173	0.25	0.6	1.33	43.3	57.5				
一般工作制机床	174	0.18	0.5	1.73	31.3	54.2				
风机、水泵	334	0.7	0.8	0.75	233.8	175.4				
压缩机	220	0.75	0.8	0.75	165	123.8				
电阻炉	510	0.7	0.95	0.33	357	117.8				
自动弧焊变压器 148kVA × 2	114.6	0.5	0.5	1.73	57.3	99.1				
点焊机 75kVA × 2 200kVA × 1	93.9	0.35	0.6	1.33	32.9	43.7				
起重机	38	0.25	0.5	1.73	9.5	16.4				
照明	70	0.8	0.7	1.02	56	57.1				

续表

用电设备组		需要系数 $K_d$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	需要负荷		同时系数 $K_\Sigma$	计算负荷		
负荷性质	设备功率 (kW)				$P$ (kW)	$Q$ (kvar)		$P_c$ (kW)	$Q_c$ (kvar)	$S_c$ (kVA)
合计					986.1	745	0.87	857.9	648.2	
无功补偿									-240	
总计	1727.5							857.9	408.2	950.1

注 1. 弧焊变压器  $\varepsilon_r = 0.6$ , 点焊机  $\varepsilon_r = 0.2$ , 均为单相 380V。照明视同三相负荷。单相负荷设备功率之和不超过三相负荷设备功率之和的 15% 时, 不需换算。

2. 起重机  $\varepsilon_r = 0.25$ , 设备功率换算到  $\varepsilon = 1$ , 需要系数已适当放大。

### 3.1.11.3 110kV/35kV/10kV 总降压变电站负荷计算示例

(1) 35kV 侧接有 5t 和 1.5t 电弧炉各 2 台, 变压器额定容量分别为  $2 \times 3200\text{kVA}$  和  $2 \times 1250\text{kVA}$ 。电弧炉的计算负荷为

$$P_c = 1.2 \cos\varphi_1 \sum (n_1 S_r) + 0.66 \cos\varphi_2 \sum (n_2 S_r)$$

$$= 1.2 \times 0.85 \times 2 \times 3200 + 0.66 \times 0.9 \times 2 \times 1250 = 8013 (\text{kW})$$

$$Q_c = 1.2 \sin\varphi_1 \sum (n_1 S_r) + 0.66 \sin\varphi_2 \sum (n_2 S_r)$$

$$= 1.2 \times 0.527 \times 2 \times 3200 + 0.66 \times 0.436 \times 2 \times 1250 = 4767 (\text{kvar})$$

(2) 10kV 侧接有 10kV/0.4kV 变电站 4 座, 2000kW 同步电动机 2 台, 800kW 异步电动机 4 台。

同步电动机的额定功率因数为 0.9 超前, 负荷率为 0.8; 每台可输出无功功率为

$$Q_M = S_r [\sin\varphi_r + \gamma(1 - \beta)] = (2000/0.9) [0.44 + 0.36(1 - 0.8)] = 1138 (\text{kvar})$$

(3) 总降压变电站负荷计算见表 3-1-28。

表 3-1-28 总降压变电站负荷计算表

负荷名称	设备功率 (kW)	需要系数 $K_d$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	需要负荷		
					$P$ (kW)	$Q$ (kvar)	$S_c$ (kVA)
35kV 侧负荷							
电弧炉	(8013)				8013	4767	9324
10kV 侧负荷							
1号变电站合计	2172				838	310	894
变压器损耗: $\Delta P = 0.01S$ , $\Delta Q = 0.05S$					9	45	
1号变电站高压侧	2172	0.39	0.92		847	355	
2号变电站高压侧	2373	0.37	0.91		878	400	
3号变电站高压侧	2412	0.33	0.93		796	314	
4号变电站高压侧	2896	0.31	0.94		898	326	
同步电动机	4000	0.8			3200	-2276	
异步电动机	3200	0.7	0.8	0.75	2240	1680	
合计	17 053				8859	799	
乘以同时系数 $K_{\Sigma P} = 0.93$ , $K_{\Sigma Q} = 1$					8239	799	8278

续表

负荷名称	设备功率 (kW)	需要系数 $K_d$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	需要负荷		
					$P$ (kW)	$Q$ (kvar)	$S_c$ (kVA)
110kV 侧负荷							
共计					16 252	5566	
乘以同时系数 $K_{\Sigma P} = 0.96$ , $K_{\Sigma Q} = 1$					15 602	5566	16 565
变压器损耗: $\Delta P = 0.01S$ , $\Delta Q = 0.05S$					166	828	
总计	25 066		0.927		15 768	6394	17 015

## 3 3.2 负荷分级

### 3.2.1 负荷分级原则

电力负荷应根据对供电可靠性的要求及中断供电在对人身安全、经济损失上所造成的影响程度进行分级。

(1) 符合下列情况之一时，应视为一级负荷：

- 1) 中断供电将造成人身伤害时；
- 2) 中断供电将在经济上造成重大损失时；
- 3) 中断供电将影响重要用电单位的正常工作时。

例如：中断供电使生产过程或生产装备处于不安全状态，重大产品报废，用重要原料生产的产品大量报废，生产企业的连续生产过程被打乱需要长时间才能恢复等将在经济上造成重大损失，则其负荷特性为一级负荷。大型银行营业厅的照明、一般银行的防盗系统，大型博物馆、展览馆的防盗信号电源，珍贵展品室的照明电源，一旦中断供电可能会造成珍贵文物和珍贵展品被盗，因此其负荷特性为一级负荷。重要交通枢纽、重要通信枢纽、重要的经济信息中心、特级或甲级体育建筑、重要宾馆、国宾馆、承担重大国事活动的会堂、经常用于重要国际活动的大量人员集中的公共场所等，中断供电将影响重要用电单位的正常工作或造成正常秩序严重混乱的用电负荷为一级负荷。

(2) 在一级负荷中，当中断供电将造成人员伤亡或重大设备损坏或发生中毒、爆炸和火灾等情况的负荷，以及特别重要场所的不允许中断供电的负荷，应视为一级负荷中特别重要的负荷。

例如：在生产连续性较高行业，当生产装置工作电源突然中断时，为确保安全停车，避免引起爆炸、火灾、中毒、人员伤亡，而必须保证的负荷，为特别重要负荷。中压及以上的锅炉给水泵、大型压缩机的润滑油泵等或者事故一旦发生能够及时处理，防止事故扩大，保证工作人员的抢救和撤离，而必须保证的用电负荷，也为特别重要负荷。在工业生产中，如正常电源中断时处理安全停产所必需的应急照明、通信系统、保证安全停产的自动控制装置等；民用建筑中，如大型金融中心的关键电子计算机系统和防盗报警系统；大型国际比赛场馆的记分系统以及监控系统等，用电负荷为特别重要负荷。

(3) 符合下列情况之一时，应视为二级负荷：

- 1) 中断供电将在经济上造成较大损失时；
- 2) 中断供电将影响较重要用电单位的正常工作时。

例如：中断供电使得主要设备损坏、大量产品报废、连续生产过程被打乱需较长时间才能恢复、重点企业大量减产等将在经济上造成较大损失；交通枢纽、通信枢纽等用电单位中的重要电力负荷，以及中断供电将造成大型影剧院、大型商场等较多人员集中的重要的公共场所秩序混乱，以上用电负荷特性为二级负荷

(4) 不属于一级和二级负荷者应为三级负荷。

由于各行业的一级负荷、二级负荷很多，规范只能对负荷分级做原则性规定，具体划分需在行业标准中规定。

### 3.2.2 负荷分级示例

(1) 机械工厂的负荷分级见表 3-2-1。

(2) 民用建筑负荷分级见表 3-2-2。

(3) 消防负荷分级见表 3-2-3。

表 3-2-1 机械工厂的负荷分级

序号	建筑物名称	电力负荷名称	负荷级别
1	炼钢车间	容量为 100t 以上的平炉加料起重机、浇铸起重机、倾动装置及冷却水系统的用电设备	一级
		容量为 100t 及以下的平炉加料起重机、浇铸起重机、倾动装置及冷却水系统的用电设备	二级
		平炉鼓风机、平炉用其他用电设备。5t 以上电弧炼钢炉的电极升降机构、倾炉机构及浇铸起重机	二级
		总安装容量为 30MVA 以上，停电会造成重大经济损失的多台大型电热装置（包括电弧炉、矿热炉、感应炉等）	一级
2	铸铁车间	30t 及以上的浇铸起重机、重点企业冲天炉鼓风机	二级
3	热处理车间	井式炉专用淬火起重机、井式炉油槽抽油泵	二级
4	锻压车间	锻造专用起重机、水压机、高压水泵、抽油机	二级
5	金属加工车间	价格昂贵、作用重大、稀有的大型数控机床，停电会造成设备损坏，如自动跟踪数控仿形铣床、强力磨床等设备	一级
		价格贵、作用大、数量多的数控机床工部	二级
6	电镀车间	大型电镀工部的整流设备、自动流水作业生产线	二级
7	试验站	单机容量为 200MW 以上的大型电机试验、主机及辅机系统，动平衡试验的润滑油系统	一级
		单机容量为 200MW 及以下的大型电机试验、主机及辅机系统，动平衡试验的润滑油系统	二级
		采用高位油箱的动平衡试验润滑油系统	二级
8	层压制品车间	压机及供热锅炉	二级
9	线缆车间	熔炼炉的冷却水泵、鼓风机、连铸机的冷却水泵、连轧机的水泵及润滑泵；压铅机、压铝机的熔化炉、高压水泵、水压机；交联聚乙烯加工设备的挤压交联冷却、收线用电设备，漆包机的传动机构、鼓风机、漆泵；干燥浸油缸的连续电加热、真空泵、液压泵	二级
10	磨具成型车间	隧道窑鼓风机、卷扬机构	二级
11	油漆树脂车间	2500L 及以上的反应釜及其供热锅炉	二级

续表

序号	建筑物名称	电力负荷名称	负荷级别
12	焙烧车间	隧道窑鼓风机、排风机、窑车推进机、窑门关闭机构。油加热器、油泵及其供热锅炉	二级
13	热煤气站	煤气加压机、加压油泵及煤气发生炉鼓风机	一级
		有煤气罐的煤气加压机、有高位油箱的加压油泵	二级
		煤气发生炉加煤机及传动机构	二级
14	冷煤气站	鼓风机、排送机、冷却通风机、发生炉传动机构、高压整流器等	二级
15	锅炉房	中压及以上锅炉的给水泵	一级
		有汽动水泵时，中压及以上锅炉的给水泵	二级
		单台容量为20t/h及以上锅炉的鼓风机、引风机、二次风机及炉排电动机	二级
16	水泵房	供一级负荷用电设备的水泵	一级
		供二级负荷用电设备的水泵	二级
17	空压站	部重点企业单台容量为60m <sup>3</sup> /min及以上空压站的空气压缩机、独立励磁机	二级
		离心式压缩机润滑油泵	一级
		有高位油箱的离心式压缩机润滑油泵	二级
18	制氧站	部重点企业中的氧压机、空压机冷却水泵、润滑油泵（带高位油箱）	二级
19	计算中心	大中型计算机系统电源（自带UPS）	二级
20	理化计量楼	主要实验室、要求高精度恒温的计量室的恒温装置电源	二级
21	刚玉、碳化硅冶炼车间	冶炼炉及其配套的低压用电设备	二级
22	涂装车间	电泳涂装的循环搅拌、超滤系统的用电设备	二级

注 本表引自 JBJ 6—1996《机械工厂电力设计规程》。

表 3-2-2 民用建筑中各类建筑物的主要用电负荷分级

序号	建筑物名称	用电负荷名称	负荷级别
1	国家级会堂、国宾馆、国家级国际会议中心	主会场、接待厅、宴会厅照明、电声、录像、计算机系统用电	一级*
		客梯、总值班室、会议室、主要办公室、档案室用电	一级
2	国家及省部级政府办公建筑	客梯、主要办公室、会议室、总值班室、档案室用电	一级
		省部级行政办公建筑主要通道照明用电	二级
3	国家及省部级数据中心	计算机系统用电	一级*
4	国家及省部级防灾中心、电力调度中心、交通指挥中心	防灾、电力调度及交通指挥计算机系统用电	一级*
5	办公建筑	建筑高度超过100m的高层办公建筑主要通道照明和重要办公室用电	一级
		一类高层办公建筑主要通道照明和重要办公室用电	二级
6	地、市级及以上气象台	气象业务用计算机系统用电	一级*
		气象雷达、电报及传真收发设备、卫星云图接收机及语言广播设备、气象绘图及预报照明用电	一级

续表

序号	建筑物名称	用电负荷名称	负荷级别
7	电信枢纽、卫星地面站	保证通信不中断的主要设备用电	一级*
8	电视台、广播电台	国家及省、区、市电视台、广播电台的计算机系统用电；直接播出的电视演播厅、中心机房、录像室、微波设备及其发射机房用电	一级*
		语音播音室、控制室的电力和照明用电	一级
		洗印室、电视电影室、审听室、通道照明用电	二级
9	剧场	甲等剧场的舞台照明、贵宾室、演员化妆室，舞台机械设备、电声设备、电视转播、显示屏和字幕系统用电	一级
		甲等剧场的观众厅照明、空调机房电力和照明用电	二级
10	电影院	甲等电影院的照明与放映用电	二级
11	博展建筑	珍贵展品展室的照明及安全防范系统用电	一级*
		甲等、乙等展厅安全防范系统用电	一级
		丙等展厅照明用电；展览用电	二级
12	图书馆	藏书量超过 100 万册及重要图书馆的安全防范系统、图书检索用电子计算机系统用电	一级
		藏书量超过 100 万册的图书馆的照明用电	二级
13	体育建筑	特级体育场（馆）及游泳馆的比赛场（厅）、主席台、贵宾室、接待室、新闻发布厅、广场及主要通道照明、计时记分装置、计算机房、电话机房、广播机房、电台和电视转播及新闻摄影用电	一级*
		甲级体育场（馆）及游泳馆的比赛场（厅）、主席台、贵宾室、接待室、新闻发布厅、广场及主要通道照明、计时记分装置、计算机房、电话机房、广播机房、电台和电视转播及新闻摄影用电	一级
		特级及甲级体育场（馆）及游泳馆的非比赛用电，乙级及以下体育建筑比赛用电	二级
14	商场、百货商店、超市	大型百货商店、商场及超市的经营管理用计算机系统用电	一级
		大型百货商店、商场及超市营业厅、门厅公共楼梯及主要通道的照明及乘客电梯、自动扶梯及空调用电	二级
15	金融建筑（银行、金融中心、证交中心）	重要的计算机系统和安全防范系统用电；特级金融设施用电	一级*
		大型银行营业厅备用照明用电，一级金融设施用电	一级
		中小型银行营业厅备用照明用电，二级金融设施用电	二级
16	民用机场	航空管制、导航、通信、气象、助航灯光系统设施和台站用电；边防、海关的安全检查设备用电，航班预报设备用电，航班信息、显示及时钟系统用电；航站楼、外航住机场办事处中不允许中断供电的重要场所的用电	一级*
		Ⅲ类及以上民用机场航站楼中的公共区域照明、电梯、送排风系统设备、排污泵、生活水泵、行李处理系统（BHS）用电；航站楼、外航住机场办事处、机场宾馆内与机场航班信息相关的系统、综合监控系统及其他信息系统用电；站坪照明、站坪机务用电；飞行区内雨水泵站等用电	一级
		航站楼内除一级负荷以外的公共场所空调系统设备、自动扶梯、自动人行道用电；Ⅳ类及以下民用机场航站楼的公共区域照明、电梯、送排风系统设备、排污泵、生活泵等用电	二级

续表

序号	建筑物名称	用电负荷名称	负荷级别
17	铁路旅客站 综合交通枢纽站	特大型铁路旅客车站、集大型铁路旅客车站及其他车站等为一体的大型综合交通枢纽站中不允许中断供电的重要场所的用电	一级*
		特大型铁路旅客车站、国境站和集大型铁路旅客车站及其他车站等为一体的大型综合交通枢纽的旅客站房、站台、天桥、地道的用电；防灾报警设备用电；特大型铁路旅客车站、国境站的公共区域照明用电；售票系统设备、安全防范及安全检测设备、通信系统用电	一级
		大中型铁路旅客车站、国境站和集大型铁路旅客车站及其他车站等为一体的大型综合交通枢纽的旅客站房、站台、天桥、地道的用电；特大型铁路旅客车站、国境站的列车到发预告显示系统、旅客用电梯、自动扶梯、国际换装设备、行包用电梯、皮带输送机、送排风机、排污泵设备用电；特大型铁路旅客车站的冷热源设备用电；大中型铁路旅客车站的公共区域照明、管理用房照明及设备用电；铁路旅客车站的驻站警务室用电	二级
18	城市轨道交通车站 磁浮列车站 地铁车站	通信系统设备、信号系统设备、地铁车站内的变电站操作电源、车站内不允许中断供电的其他重要场所的用电	一级*
		电力、环境与设备监控系统，自动售票系统设备用电；车站中作为事故疏散用的自动扶梯、电动屏蔽门（安全门）、防护门、防淹门、排水泵、车站排水泵、信息设备管理用房照明、公共区域照明用电；地下站厅站台照明、地下区间照明用电	一级
		非消防用电梯及自动扶梯、地上站厅站台及附属房间照明、送排风机、排污泵等用电	二级
19	港口客运站	一级港口客运站的通信、监控系统设备、导航设施及广播用电	一级
		港口重要作业区、一级及二级客运站公共区域照明、管理用房照明及设备、电梯、送排风系统设备、排污水设备、生活水泵用电	二级
20	汽车客运站	一、二级客运站广播及照明用电	二级
21	旅游饭店	四星级及以上旅游饭店的经营及管理用计算机系统用电	一级*
		四星级及以上旅游饭店的宴会厅、餐厅、厨房、康乐设施用房、门厅及高级客房、主要通道等场所的照明用电，厨房、排污泵、生活水泵、主要客梯用电，计算机、电话、电声和录像设备、新闻摄影用电	一级
		三星级旅游饭店的宴会厅、餐厅、厨房、康乐设施、门厅及高级客房、主要通道等场所的照明用电，厨房、排污泵、生活水泵、主要客梯用电、计算机、电话、电声和录像设备、新闻摄影用电，除上栏所述之外的四星级及以上旅游饭店的其他用电	二级
22	科研院所、高等院校	四级生物安全实验室等对供电连续性要求极高的国家重点实验室用电	一级*
		三级生物安全实验室和除上栏所述之外的其他重要实验室用电	一级
		主要通道照明用电	二级
23	二级以上医院	重要手术室、重症监护等涉及患者生命安全的设备（如呼吸机等）及照明用电	一级*
		急诊部、重症监护病房、手术部、分娩室、婴儿室、血液病房的净化室、血液透析室、病理切片分析、磁共振、介入治疗用CT及X光机扫描室、血库、高压氧舱、加速器机房、治疗室及配血室的电力照明用电，培养箱、冰箱、恒温箱用电，走道照明用电，百级洁净度手术室空调系统用电、重症呼吸道感染区的通风系统	一级

续表

序号	建筑物名称	用电负荷名称	负荷级别
23	二级以上医院	除上栏所述之外的其他手术室空调系统用电, 电子显微镜、一般诊断用 CT 及 X 光机用电, 客梯用电, 高级病房、肢体伤残康复病房照明用电	二级
24	住宅建筑	建筑高度不小于 50m 且 19 层及以上的高层住宅的航空障碍照明、走道照明、值班照明、安防系统、电子信息设备机房、客梯、排污泵、生活水泵用电	一级
		10~18 层的二类高层住宅的走道照明、值班照明、安全防范系统、客梯、排污泵、生活水泵用电	二级
25	一类高层建筑	消防用电, 值班照明、警卫照明、障碍照明用电, 主要业务和计算机系统用电, 安全防范系统用电, 电子信息设备机房用电, 客梯用电, 排污泵、生活水泵用电	一级
		主要通道及楼梯间照明用电	二级
26	二类高层建筑	消防用电, 主要通道及楼梯间照明用电, 客梯用电, 排污泵、生活水泵用电	二级
27	建筑高度大于 250m 的超高层建筑	消防负荷用电	一级*
28	体育场(馆)及游泳馆	特级体育场(馆)及游泳馆的应急照明用电	一级*
		甲级体育场(馆)及游泳馆的应急照明用电	一级
29	交通建筑	地铁站应急照明、火灾自动报警系统用电	一级*
		地铁站消防系统设备、消防电梯、排烟系统用风机及电动阀门用电	二级
		Ⅲ类及以上民用机场航站楼、特大型和大型铁路旅客车站、集民用机场航站楼或铁路及城市轨道交通车站为一体的大型综合交通枢纽站、城市轨道交通地下站以及具有一级耐火等级的交通建筑的消防用电	一级
		Ⅲ类以下机场航站楼、铁路旅客车站、城市轨道交通地面站或地上站、港口客运站、汽车客运站及其他交通建筑的消防用电	二级
		I、II类飞机库的消防用电	一级
		Ⅲ类飞机库的消防用电	二级
		I类汽车库的消防用电, 机械停车设备、采用升降梯作车辆疏散出口的升降梯用电	一级
		II、Ⅲ类汽车库和 I 类修车库的消防用电, 机械停车设备、采用升降梯作车辆疏散出口的升降梯用电	二级
		一、二类隧道的消防用电	一级
		三类隧道的消防用电	二级
30	剧场	甲等剧场的消防用电	一级
		乙、丙等剧场消防用电	二级

- 注
1. 负荷分级表中“一级\*”为一级负荷特别重要负荷;
  2. 本表中未列出的用电负荷分级可类比本表确定;
  3. 当序号 1~24 各类建筑物与一类、二类高层建筑的用电负荷级别以及消防用电负荷不相同, 负荷级别应按其中高者确定。
  4. 本表引自国家标准《民用建筑电气设计规范》征求意见稿, 请以正式版本为准。

表 3-2-3 消防负荷分级

序号	消防负荷名称	负荷级别
1	建筑高度大于 50m 的乙、丙类厂房和丙类仓库中消防负荷	一级
2	一类高层民用建筑中消防负荷	一级
3	室外消防用水量大于 30L/s 的厂房（仓库）中消防负荷	二级
4	室外消防用水量大于 35L/s 的可燃材料堆场、可燃气体储罐（区）和甲、乙类液体储罐（区）中消防负荷	二级
5	粮食仓库及粮食筒仓中消防负荷	二级
6	二类高层民用建筑中消防负荷	二级
7	座位数超过 1500 个的电影院、剧场，座位数超过 3000 个的体育馆，任一层建筑面积大于 3000m <sup>2</sup> 的商店和展览建筑，省（市）级及以上的广播电视、电信和财贸金融建筑中消防负荷	二级
8	室外消防用水量大于 25L/s 的其他公共建筑中消防负荷	二级

注 本表引自 GB 50016—2014《建筑防火设计规范》。

【编者按】表 3-2-3 所列为消防负荷分级的最低要求。当建筑物另有更高级别的负荷时，消防负荷应与之同级；当建筑物设有应急供电系统时，消防负荷应归入应急负荷。

# 110kV 及以下供配电系统

## 4.1 供配电系统

### 4.1.1 供电电源分类

(1) 正常电源。维持正常生产和生活而配置的长期供电电源。

(2) 备用电源。(GB 50052—2009《供配电系统设计规范》)。

2.0.5 当正常电源断电时,由于非安全原因用来维持电气装置或其某些部分所需的电源。

(3) 应急电源。(GB 50052—2009)。

2.0.4 用作应急供电系统组成部分的电源。

2.0.3 应急电源系统是用来维持电气设备和电气装置运行的供电系统,主要是:为了人体和家畜的健康和安全,和/或为避免对环境或其他设备造成损失以符合国家规范要求。

注:供电系统包括电源和连接到电气设备端子的电气回路。在某些场合,它也可以包括设备。

(4) 分布式电源 (GB 50052—2009)。

2.0.6 分布式电源主要是指布置在电力负荷附近,能源利用效率高并与环境兼容,可提供电、热(冷)的发电装置,如微型燃气轮机、太阳能光伏发电、燃料电池、风力发电和生物质能发电等。

(5) 双重电源 (GB 50052—2009)。

2.0.2 一个负荷的电源是由两个电路提供的,这两个电路就安全供电而言被认为是互相独立的。

(6) 自备电源 (GB 50052—2009)。

4.0.1 符合下列条件之一时,用户宜设置自备电源:

1 需要设置自备电源作为一级负荷中的特别重要负荷的应急电源时或第二电源不能满足一级负荷的条件时。

2 设置自备电源比从电力系统取得第二电源经济合理时。

3 有常年稳定余热、压差、废弃物可供发电,技术可靠、经济合理时。

4 所在地区偏僻,远离电力系统,设置自备电源经济合理时。

5 有设置分布式电源的条件,能源利用效率高、经济合理时。

## 4.1.2 供配电电压

### 4.1.2.1 供配电电压的选择

GB 50052—2009 规定：

- 5.0.1 用户的供电电压应根据用电容量、用电设备特性、供电距离、供电线路的回路数、当地公共电网现状及其发展规划等因素，经技术经济比较确定。
- 5.0.2 供电电压大于等于35kV时，用户的一级配电电压宜采用10kV；当6kV用电设备的总容量较大，选用6kV经济合理时，宜采用6kV；低压配电电压宜采用220V/380V，工矿企业亦可采用660V；当安全需要时，应采用小于50V电压。
- 5.0.3 供电电压大于等于35kV，当能减少配变电级数、简化接线、技术经济合理时，配电电压宜采用35kV或相应等级电压。

# 4

### 4.1.2.2 民用建筑供配电电压的选择

JGJ 16—2008《民用建筑电气设计规范》规定：

- 3.4.2 当用电设备总容量在250kW及以上或变压器容量在160kVA及以上时，宜以10(6)kV供电；当用电设备总容量在250kW以下或变压器容量在160kVA以下时，可由低压供电。
- 3.4.3 对大型公共建筑，应根据空调冷水机组的容量以及地区供电条件，合理确定机组的额定电压和用电单位的供电电压，并应考虑大容量电动机启动时对变压器的影响。

### 4.1.3 各级负荷对供电电源的要求

GB 50052—2009 规定：

- 3.0.2 一级负荷应由双重电源供电，当一电源发生故障时，另一电源不应同时受到损坏。
- 3.0.3 一级负荷中特别重要的负荷供电，应符合下列要求：
  - 1 除应由双重电源供电外，尚应增设应急电源，并严禁将其他负荷接入应急供电系统。
  - 2 设备的供电电源的切换时间，应满足设备允许中断供电的要求。
- 3.0.7 二级负荷的供电系统，宜由两回线路供电。在负荷较小或地区供电条件困难时，二级负荷可由一回6kV及以上专用的架空线路供电。
- 3.0.8 各级负荷的备用电源设置可根据用电需要确定。

### 4.1.4 高压供配电系统的设计原则

GB 50052—2009 规定：

- 4.0.3 供配电系统的设计，除一级负荷中的特别重要负荷外，不应按一个电源系统检修或故障的同时另一电源又发生故障进行设计。
- 4.0.4 需要两回电源线路的用户，宜采用同级电压供电。但根据各级负荷的不同需要及地区供电条件，亦可采用不同电压供电。
- 4.0.5 同时供电的两回及以上供配电线路中，当有一回路中断供电时，其余线路应能

满足全部一级负荷及二级负荷。

4.0.6 供配电系统应简单可靠，同一电压等级的配电级数高压不宜多于两级；低压不宜多于三级。

4.0.7 高压配电系统宜采用放射式。根据变压器的容量、分布及地理环境等情况，亦可采用树干式或环式。

4.0.8 根据负荷的容量和分布，配变电站应靠近负荷中心。当配电电压为 35kV 时，亦可采用直降至低压配电电压。

4.0.9 在用户内部邻近的变电站之间，宜设置低压联络线。

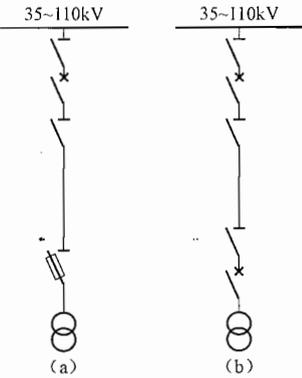
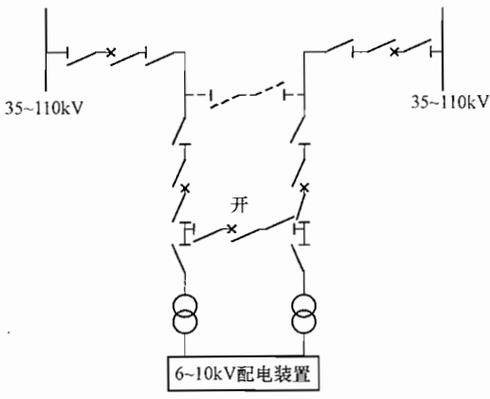
4.0.10 小负荷的用户，宜接入地区低压电网。

#### 4.1.5 供配电系统接线方式及其特点（《钢铁企业电力设计手册 上册》）

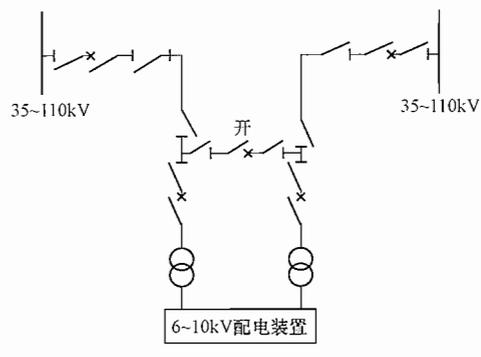
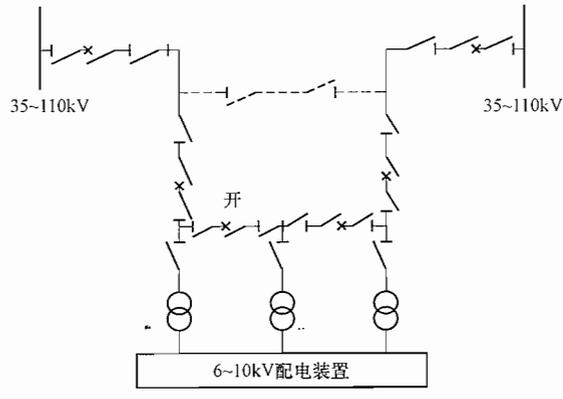
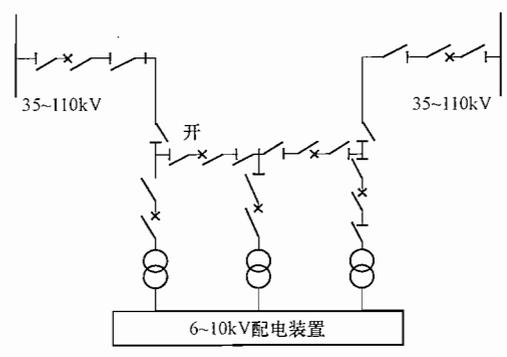
##### 4.1.5.1 35~110kV 电源系统

电源系统接线方式结合实际情况会有很多种。表 4-1-1 列出了常用的几种。

表 4-1-1 电源系统接线

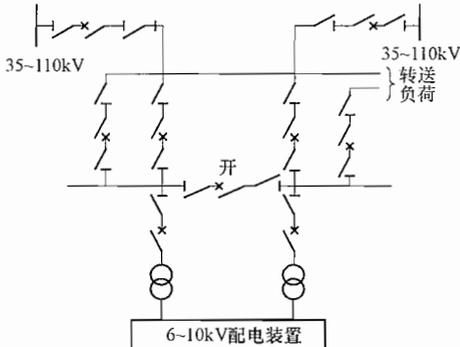
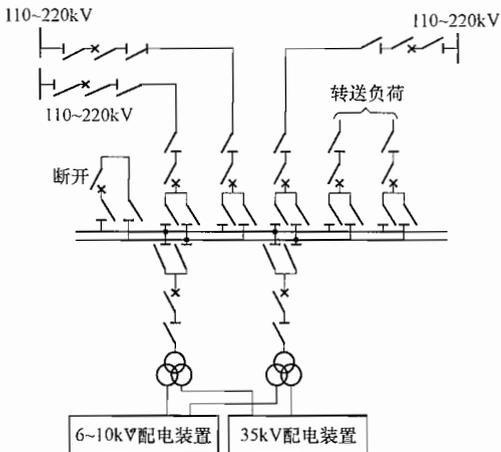
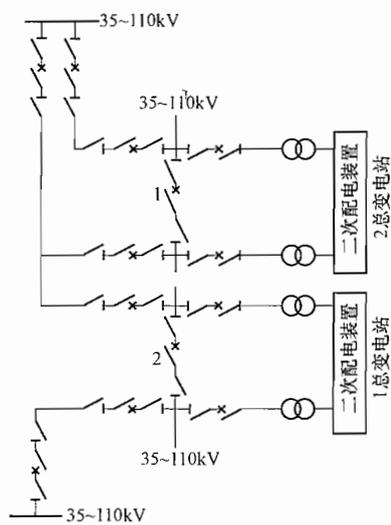
接线图	简要说明
放射式接线	
<p>(1) 一回电源线路和一台变压器接线</p> 	<p>(a) 对于系统短路容量较小的 35~110kV 不太重要的小型变电站，当高压熔断器参数能满足要求时，可采用变压器一次侧装设高压熔断器的接线。但在设计上仍应考虑到扩建或改建的可能性。</p> <p>(b) 当有操作或继电保护等要求时，变压器一次侧装设断路器</p>
<p>(2) 具有两回电源线路和两台变压器的内桥接线</p> 	<p>当电源线路较长（线路的故障机会较多）或不需要经常切断变压器时采用内桥接线。</p> <p>当桥接断路器是合闸运行时，任何一回电源线路故障，继电保护装置将其相应的断路器断开，并不影响所有变压器的正常运行。当桥接断路器是断开运行时，一回电源线路故障，可采用自动投入装置将桥接断路器合闸，使接于故障线路的变压器继续运行。</p> <p>为了在抢修线路断路器时保证不中断线路的供电，可在线路断路器的外侧增设带两组隔离开关（考虑隔离开关本身检修）的跨条，如图中虚线所示。</p> <p>适用于对一、二级负荷供电和以后不发展的变电站</p>

续表

接线图	简要说明
<p>(3) 具有两回电源线路和两台变压器的外桥接线</p> 	<p>当供电线较短或需要经常切断变压器（例如由于负荷昼夜变化相当大）时，一般采用外桥接线。</p> <p>当一路电源线路发生故障时，短时间内（操作开关所需时间）停止对相应一台变压器的供电。</p> <p>当操作无要求时，桥接断路器也可采用隔离开关。</p> <p>适用于对一、二级负荷供电和以后不发展的变电站</p>
<p>(4) 具有两回电源线路和三台变压器的扩大内桥接线</p> 	<p>采用本接线的条件和运行情况与图（2）说明相同。</p> <p>适用于对各级负荷既集中容量又很大且需要装设三台变压器的变电站和以后不发展的变电站</p>
<p>(5) 具有两回电源线路和三台变压器的扩大外桥接线</p> 	<p>采用本接线的条件和运行情况与图（3）说明相同。但桥接方式在任何情况均应采用断路器。</p> <p>适用于对各级负荷既集中、容量又很大且需要装设三台变压器的变电站和以后不发展的变电站</p>

4

续表

接线图	简要说明
<p>(6) 单母线分段接线</p> 	<p>具有两回路电源线路，一、二回转送线路和两台变压器的变电站，一般采用单母线分段接线。</p> <p>母线检修时，接在该母线上的电源线路和馈出线路均要停止运行。因此对重要用户应由两段母线分别供电。</p> <p>本接线在大、中型企业中采用较多</p>
<p>(7) 双母线接线</p> 	<p>具有 35 ~ 110kV 电压、负荷重要、线路回路数较多或有其他特殊要求时，可采用双母线接线。</p> <p>母线检修时，可不停电地将所接回路倒换到另一组母线上继续供电。但接线复杂，投资较贵。</p> <p>本接线在大型企业中采用较多</p>
<p>(8) 三回路电源线路和两个总变电站</p> 	<p>大、中型企业需建两个总变电站时采用。</p> <p>均作为终端变电站运行，故 1、2 分段断路器在正常运行时断开。</p> <p>其特点是每个总变电站均有一回专用电源线路供电，并且还有一回共用电源线路供电，提高供电可靠性，故均可向一级负荷供电，尤其是 1 总变电站供电可靠性更高。</p>

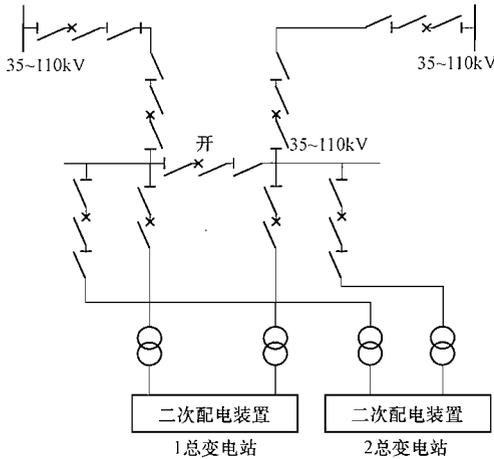
4

续表

接线图

简要说明

(9) 两回路电源线路和两个总变电站



当只有两回电源线路又需要建两个总变电站时采用。

(1) 总变电站作为终端变电站运行，分段断路器在正常运行时断开。

(2) 总变电站的变压器一次侧不设置配电装置，但需在变压器一次套管内装电流互感器或另外装电流互感器作为变压器差动保护使用，其保护信号发送到电源断路器跳闸。

特点是接线简单，供电可靠性高，管理集中，投资省，运行费省。均可向一级负荷供电

4

4.1.5.2 6~10kV 配电系统（《钢铁企业电力设计手册 上册》）配电系统的接线一般可参照表 4-1-2 选用。

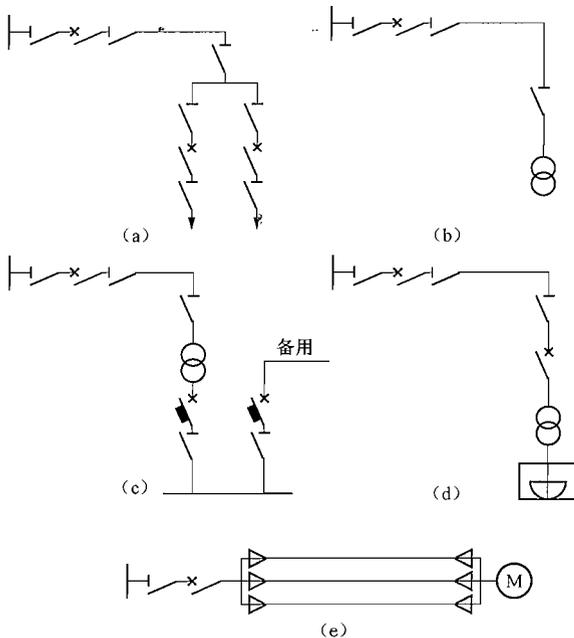
表 4-1-2 配电系统接线

接线图

简要说明

放射式接线

(1) 6~10kV 单回路放射式



这种接线一般用于配电给没有一级负荷的小容量用户或专用设备。

图 (a) 向只设一段母线配电站的配电。当母线上馈电回路较多或需要经常操作时，则受电开关应采用断路器。

图 (b) 向单台变压器变电站配电。

图 (c) 向单台变压器变电站配电，并从邻近车间取得低压备用电源（另外独立电源），故可以供给带有不大的一级负荷用户用电。

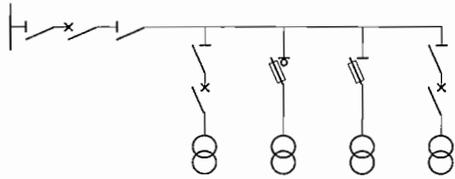
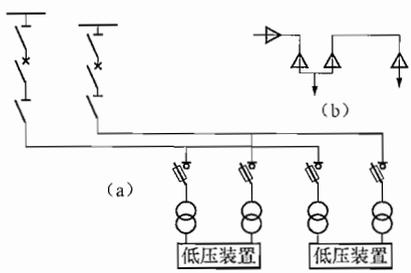
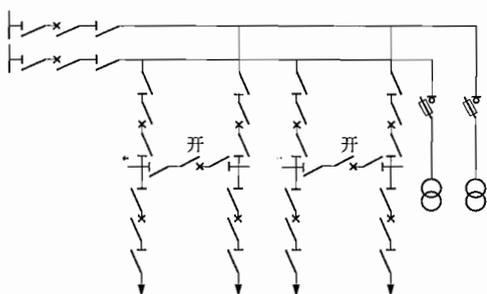
图 (d) 对电弧炉变压器的配电。较大容量的电弧炉变压器，一般由总变电站直接配电，其电源电缆多根时宜增加一根备用电缆。

图 (e) 较大容量的大型电动机宜由总变电站直接配电。电源电缆多根时，宜增加一根备用电缆

续表

接 线 图	简 要 说 明
<p>(2) 6~10kV 双回路放射式</p> <p>(a) (b) (c) (d)</p>	<p>这种接线一般用于较大容量或具有一级负荷的用电点。</p> <p>图(a)用于配电给二、三级负荷，容量大于2000kVA的用户。</p> <p>图(b)用于配电给一级负荷，容量大于2000kVA的用户，或配电给二、三级负荷，但每段母线馈出回路在5回及以上者。</p> <p>图(c)、图(d)同(b)图说明</p>
<p>(3) 6~10kV 有联络线的单回路放射式</p>	<p>适用于供二、三级负荷的小容量配电站，当电源线路故障或检修时，由联络线供电。</p> <p>电源线路容量按照两个配电站总负荷选择，联络线容量按照配电站中较大负荷选择。</p> <p>缺点：继电保护增加一级为三级保护</p>

续表

接线图	简要说明
树干式接线	
<p>(4) 6~10kV 单回路干线式</p> 	<p>一般用于架空线路上，对三级负荷分散用户供电。 干线的分支数不应超过 5 个，变压器容量在 315kVA 及以下时，采用隔离开关熔断器保护；户外安装的变压器采用跌落式熔断器保护。 电源最好接到总变电站母线上，如果接到二级配电站母线上继电保护要无选择性动作或者采用自动重合闸来弥补</p>
<p>(5) 6~10kV 双干线式之一</p> 	<p>用以配电给各级负荷装有两台变压器的变电站，干线可采用架空线也可采用电缆。前者接变压器不得超过 5 台，后者不得超过 2 台，但当供一级负荷时都不得超过 2 台。 继电保护的缺点同（4）图说明。 图（b）为电缆干线接法</p>
<p>(6) 6~10kV 双干线式之二</p> 	<p>用以配电给二、三级负荷用户。当每条干线上只有 1 个分支（接 2 个变电站）时，也可配电给一级负荷用户。 缺点同（4）图</p>

4

#### 4.1.6 配电系统中性点的接地方式

##### 4.1.6.1 概述

系统中性点的接地方式与电压等级、单相接地故障电流大小、过电压水平、保护装置配置等有关，直接影响系统的可靠性、连续性、主变压器和发电机的运行安全性以及对通信线路的干扰等。直接接地的单相接地故障电流很大，对通信线路干扰严重，故障后线路和设备须立即切除，中断了供电的连续性，但因过电压较低，绝缘水平可下降，减少了设备造价，故用于 110kV 及以上的电网。110kV 以下的配电系统常用的中性点接地方式有不接地、谐振接地（通常为经消弧线圈接地）和经电阻接地（有高电阻接地及低电阻接地两种）。现分别叙述如下：

##### 1. 中性点不接地

中性点不接地方式实际上是经容抗接地，该容抗由电网中的架空线路、电缆线路、电动

机和变压器绕组等对地耦合电容所组成,如图 4-1-1 所示。在正常情况下,各相流过的电容电流之和为零。当发生单相接地时,例如 A 相接地, A 相对地电容被短接,破坏了原先电容电流的对称性,故障点便出现了电流。如为金属性短路时,仅非故障相对地电压升高而线电压对称性并未受到破坏,故允许电网带接地故障继续运行 2h。

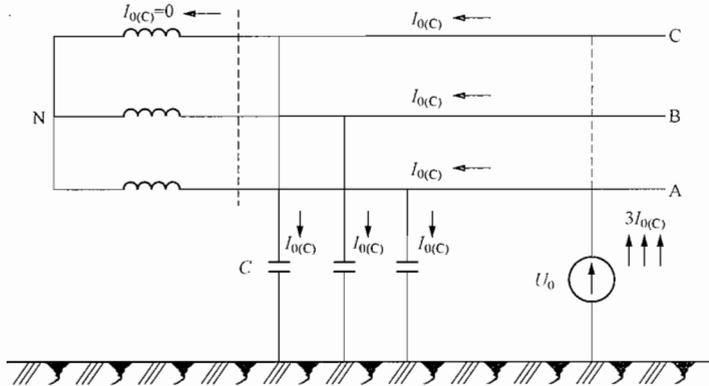


图 4-1-1 中性点不接地系统 A 相接地时零序电流的分布

中性点不接地系统的优点是发生接地故障后不会立刻中断供电。缺点是带病运行,非故障相对地电压升高容易发展为相间短路;当发生弧光接地时,还会出现过电压,影响电气设备的绝缘。

## 2. 中性点经消弧线圈接地

在中性点与地之间接入可调节电感电流的消弧线圈,由于电感电流与电容电流在相位上差  $180^\circ$ ,因此发生单相接地故障时,流过故障点的电流等于它们的差值。如电感电流等于电容电流,称为全补偿;电感电流大于电容电流,称为过补偿;电感电流小于电容电流称为欠补偿。在正常运行时,全补偿会使消弧线圈电感和对地电容组成  $L-3C$  的串联回路,将会产生串联谐振过电压,致使中性点位移电压升高到最大而超过允许值。欠补偿则在中性点位移电压比较高时,会使消弧线圈铁心趋于饱和并使电感值降低,产生铁磁谐振。因此,消弧线圈必须在过补偿状态下运行。A 相接地时零序电流的分布如图 4-1-2 所示。

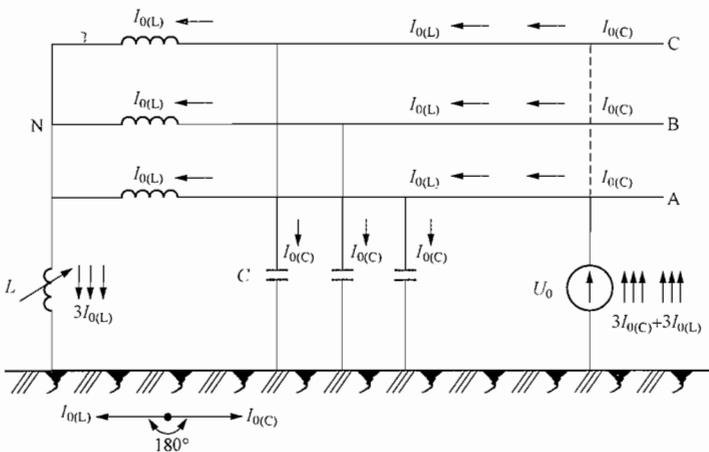


图 4-1-2 中性点经消弧线圈接地 A 相接地时零序电流的分布

中性点经消弧线圈接地的优点是流过故障点的残余电流很小，接地电弧不能维持而立即熄弧，使电网恢复正常；缺点是运行维护较复杂，因实际电网参数往往随改变接线方式或运行方式而改变。为保证过补偿，需要运行人员及时调节补偿电流，在电容电流变化大的场所，增加了运行人员的劳动强度。但随着科技的发展，现有自动跟踪动态补偿式消弧线圈可供采用，降低了劳动强度。

### 3. 中性点经电阻接地

在中性点与地之间接入一电阻，由于增加了一个较电容电流大而相位差  $90^\circ$  的有功电流，使流过故障点的电流比不接地电网增加  $\sqrt{2}$  倍以上。与消弧线圈相比，改变了接地电流的相位，加速泄放回路中的残余电荷，促使接地电弧熄灭，从而降低弧光接地过电压。A 相接地时零序电流的分布如图 4-1-3 所示。

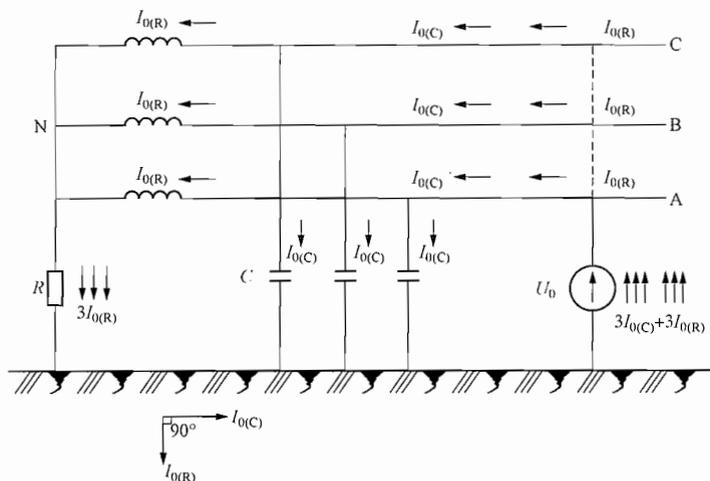


图 4-1-3 中性点经电阻接地 A 相接地时零序电流的分布

(1) 中性点经高电阻接地。接入一阻值为数百至数千欧姆的电阻，使单相接地故障电流小于 10A。这种接地方式的优点是可限制由于电弧接地故障产生的瞬态过电压，且可在故障条件下持续运行不中断供电；缺点是系统绝缘水平要求较高。

(2) 中性点经低电阻接地。接入一电阻使单相接地故障电流一般为 100 ~ 1000A。这种接地方式的优点是过电压水平低，可采用绝缘水平较低的电缆和设备，且可获得快速选择性继电保护所需的足够电流；缺点是接地故障后要跳闸，中断供电。

#### 4.1.6.2 不同接地方式采用的规定

GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》规定：

##### 3.1.3 中性点不接地方式应符合下列规定：

1 35kV、66kV 系统和不直接连接发电机，由钢筋混凝土杆或金属杆塔的架空线路构成的 6kV ~ 20kV 系统，当单相接地故障电容电流不大于 10A 时，可采用中性点不接地方式；当大于 10A 又需在接地故障条件下运行时，应采用中性点谐振接地方式。

2 不直接连接发电机、由电缆线路构成的 6kV ~ 20kV 系统，当单相接地故障电容电流不大于 10A 时，可采用中性点不接地方式；当大于 10A 又需在接地故障条件下运行时，宜采用中性点谐振接地方式。

3 发电机额定电压 6.3kV 及以上的系统，当发电机内部发生单相接地故障不要求

瞬时切机时,采用中性点不接地方式时发电机单相接地故障电容电流最高允许值应按表 3.1.3 确定;大于该值时,应采用中性点谐振接地方式,消弧装置可装在厂用变压器中性点上或发电机中性点上。

表 3.1.3 发电机单相接地故障电容电流最高允许值

发电机额定电压 (kV)	发电机额定容量 (MW)	电流允许值 (A)	发电机额定电压 (kV)	发电机额定容量 (MW)	电流允许值 (A)
6.3	≤50	4	13.80 ~ 15.75	125 ~ 200	2*
10.5	50 ~ 100	3	≥18	≥300	1

注: \* 对额定电压为 13.80kV ~ 15.75kV 的氢冷发电机,电流允许值为 2.5A。

4 发电机额定电压 6.3kV 及以上的系统,当发电机内部发生单相接地故障要求瞬时切机时,宜采用中性点电阻接地方式,电阻器可接在发电机中性点变压器的二次绕组上。

3.1.4 6kV ~ 35kV 主要由电缆线路构成的配电系统、发电厂厂用电系统、风力发电场集电系统和除矿井的工业企业供电系统,当单相接地故障电容电流较大时,可采用中性点低电阻接地方式。变压器中性点电阻器的电阻,在满足单相接地继电保护可靠性和过电压绝缘配合的前提下宜选较大值。

3.1.5 6kV 和 10kV 配电系统以及发电厂厂用电系统,当单相接地故障电容电流不大于 7A 时,可采用中性点高电阻接地方式,故障总电流不应大于 10A。

#### 4.1.6.3 接地方式的汇总比较

中性点接地方式的比较见表 4-1-3。

表 4-1-3 中性点接地方式比较

接地方式	有效接地	非有效接地			
	直接接地	低电阻接地	高电阻接地	消弧线圈接地	不接地
接地故障电流	大,有时大于三相短路电流	较大,等于有功电流与电容电流的矢量和	较小,但大于接地电容电流	最小,等于残流	较小,仅对地电容电流
一相接地时非故障相电压升高	小于 0.8 倍线电压	全线电压,有时更高	全线电压,有时更高	全线电压	全线电压或稍高
弧光接地过电压	可避免	可避免	可避免	可避免	可能发生
操作过电压	低	低	低	可控	高
重复故障的可能性	小	小	小	小	大
供电连续性	跳闸	跳闸	2h	2h	2h
接近故障点时对生命的危险性	严重	减轻	减轻	可忽略	较重,常拖延时间

续表

接地方式	有效接地	非有效接地			
	直接接地	低电阻接地	高电阻接地	消弧线圈接地	不接地
运行维护	简单	简单	简单	复杂，要经常根据电网的变化来调节*	—
接地装置费用	最少，可装设普通接地开关	较多	较多	最多	—

\* 按 GB/T 50064—2014 第 3.1.6 条，谐振接地宜采用具有自动跟踪补偿功能的消弧装置，便于运行维护。

#### 4.1.7 低压配电系统的设计原则

GB 50052—2009 规定：

7.0.2 在正常环境的建筑物内，当大部分用电设备为中小容量，且无特殊要求时，宜采用树干式配电。

7.0.3 当用电设备为大容量或负荷性质重要，或在有特殊要求的建筑物内，宜采用放射式配电。

7.0.4 当部分用电设备距供电点较远，而彼此相距很近、容量很小的次要用电设备，可采用链式配电，但每一回路环链设备不宜超过 5 台，其总容量不宜超过 10kW。容量较小用电设备的插座，采用链式配电时，每一条环链回路的设备数量可适当增加。

7.0.5 在多层建筑物内，由总配电箱至楼层配电箱宜采用树干式配电或分区树干式配电。对于容量较大的集中负荷或重要用电设备，应从配电室以放射式配电；楼层配电箱至用户配电箱应采用放射式配电。

在高层建筑物内，向楼层各配电点供电时，宜采用分区树干式配电；由楼层配电间或竖井内配电箱至用户配电箱的配电，应采取放射式配电；对部分容量较大的集中负荷或重要用电设备，应从变电所低压配电室以放射式配电。

7.0.6 平行的生产流水线或互为备用的生产机组，应根据生产要求，宜由不同的回路配电；同一生产流水线的各用电设备，宜由同一回路配电。

7.0.7 在低压电网中，宜选用 Dyn11 接线组别的三相变压器作为配电变压器。

7.0.8 在系统接地型式为 TN 及 TT 的低压电网中，当选用 Yyn0 接线组别的三相变压器时，其由单相不平衡负荷引起的中性线电流不得超过低压绕组额定电流的 25%，且其一相的电流在满载时不得超过额定电流值。

7.0.9 当采用 200/380V 的 TN 及 TT 系统接地型式的低压电网时，照明和电力设备宜由同一台变压器供电，必要时亦可单独设置照明变压器供电。

7.0.10 由建筑物外引入的配电线路，应在室内分界点便于操作维护的地方装设隔离电器。

#### 4.1.8 低压配电系统的接线方式及其特点（《工业与民用配电设计手册（第三版）》）

常用的接线方式见表 4-1-4。

表 4-1-4

常用低压电力配电系统接线及有关说明

名称	接线图	简要说明
放射式		<p>配电线故障互不影响, 供电可靠性较高, 配电设备集中, 检修比较方便, 但系统灵活性较差, 有色金属消耗较多, 一般在下列情况下采用:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 容量大、负荷集中或重要的用电设备。</li> <li>(2) 需要集中联锁启动、停车的设备。</li> <li>(3) 有腐蚀性介质或爆炸危险等环境, 不宜将用电及保护启动设备放在现场者</li> </ol>
树干式		<p>配电设备及有色金属消耗较少, 系统灵活性好, 但干线故障时影响范围大。</p> <p>一般用于用电设备的布置比较均匀、容量不大, 又无特殊要求的场合</p>
变压器树干式		<p>除了具有树干式系统的优点外, 接线更简单, 能大量减少低压配电设备。</p> <p>为了提高母干线的供电可靠性, 应适当减少接出的分支回路数, 一般不超过 10 个。</p> <p>频繁启动、容量较大的冲击负荷, 以及对电压质量要求严格的用电设备, 不宜用此方式供电</p>
备用柴油发电机组		<p>10kV 专用架空线路为主电源, 快速自启动型柴油发电机组做备用电源。</p> <p>用于附近只能提供一个电源, 若得到第二个电源需要大量投资时, 经技术经济比较, 可采用此方式供电。宜注意:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 与外网电源间应设机械与电气联锁, 不得并网运行。</li> <li>(2) 避免与外网电源的计费混淆。</li> <li>(3) 在接线上要具有一定的灵活性, 以满足在正常停电 (或限电) 情况下能供给部分重要负荷用电</li> </ol>
链式		<p>特点与树干式相似, 适用于距配电屏较远而彼此相距又较近的不重要的小容量用电设备。</p> <p>链接的设备一般不超过 5 台、总容量不超过 10kW。</p> <p>供电给容量较小用电设备的插座, 采用链式配电时, 每一条环链回路的数量可适当增加</p>

#### 4.1.9 低压带电导体系统和接地系统的分类 (《工业与民用配电设计手册 (第三版)》)

##### 1. 带电导体系统的分类

带电导体是指正常通过工作电流的导体, 包括相线和中性线 (N 线及 PEN 线), 但不包括 PE 线。带电导体系统根据相数和带电导体根数来分类, 参见图 4-1-4。我国常用的带

电导体系统的型式有三相四线制、三相三线制和单相二线制，有时也用两相三线制；此外，在 IEC 标准中还有单相三线、两相五线制等。

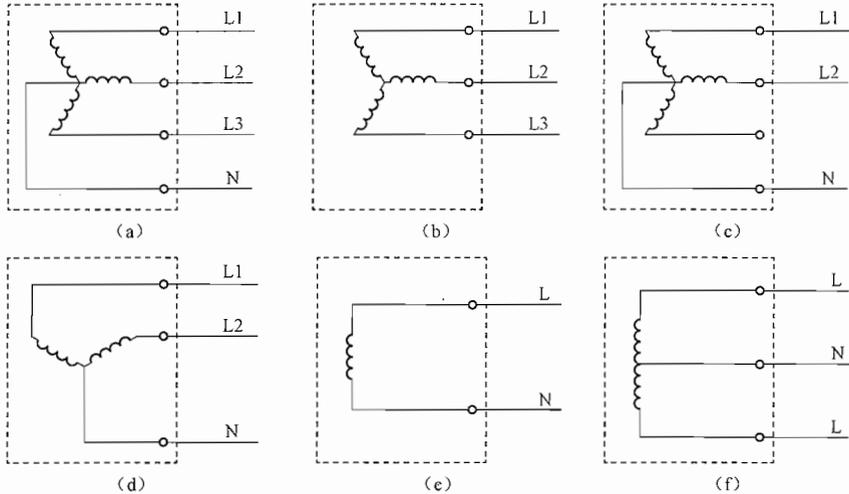


图 4-1-4 带电导体系统的型式

(a) 三相四线制；(b) 三相三线制；(c)、(d) 两相三线制；(e) 单相二线制；(f) 单相三线制

## 2. 接地系统的分类

接地系统分类的根据是电源点的对地关系和负荷侧电气装置的外露导电部分的对地关系。电气装置是指所有的电气设备及其相互连接的线路的组合。外露导电部分是指电气设备的金属外壳、线路的金属支架、套管及电缆的金属铠装等。

接地系统的型式有 TN、TT、IT 三种。TN 系统按 N 线（中性线）与 PE 线（保护线）的组合情况还分 TN-S、TN-C-S 和 TN-C 三种系统。

### 4.1.10 供配电系统级间保护配合及参数设定

#### 4.1.10.1 继电保护装置动作电流与动作时间的配合

上下级保护装置的动作应相互配合，以保证保护装置具有选择性。其配合方式有以下两种：

(1) 按动作电流配合。在所选定的故障形式下，上下级保护装置的動作电流之比应不小于 1.1。

(2) 按动作时间配合。上下级保护装置的動作时限应有一差值  $\Delta t$ （时限阶段），定时限保护之间的配合为 0.5s，定时限保护与反时限保护之间及反时限保护之间的配合为 0.7s，如采用微机保护，则  $\Delta t$  可缩短到 0.3s。

当上下级保护装置的时限差不能满足选择性要求时，可采用自动重合闸或备用电源自动投入装置来补救。

#### 4.1.10.2 上下级继电保护装置配合示例

图 4-1-5 所示为一 10kV 电压等级的两级配电系统。上级变电站及车间变电站均设有一套过电流及一套电流速断保护。过电流保护的一次动作电流为  $I_{op1}$ 、 $I_{op2}$ ，电流速断保护的一次动作电流为  $I'_{op1}$ 、 $I'_{op2}$ 。

## 1. 上下级都采用定时限特性继电器

在选择保护装置动作时限，应从离电源最远一级，即车间变电站的保护装置 1 开始，考虑到与配电变压器的二次侧自动开关相配合，其动作时限取  $t_1$ ，上级变电站保护装置 2 的动作时限较  $t_1$  大一时限为  $t_2 = t_1 + \Delta t$ （见图 4-1-6）。

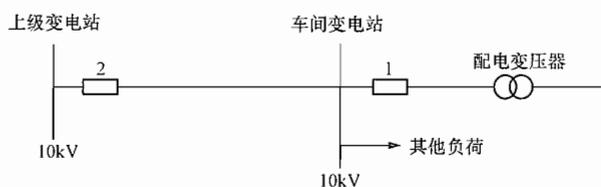


图 4-1-5 配电系统图

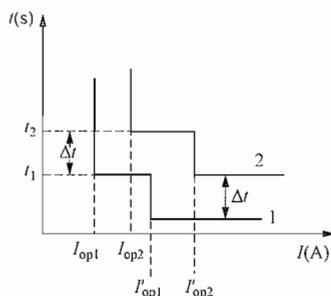


图 4-1-6 定时限配合

## 2. 上下级都采用反比延时特性继电器

同样，在选择保护装置动作时限，从离电源最远一级即车间变电站的保护装置 1 开始。其一次动作电流为  $I_{op1}$ ，其动作时限（即 10 倍动作电流的动作时间）为  $t_1$ ，这样保护装置 1 的动作时限曲线 1 即可确定。再根据电流速断保护装置的一次动作电流  $I'_{op1}$  及时限曲线 1，确定该电流值下的动作时限  $t_b$ 。接着整定保护装置 2，在电流为  $I_{op1}$  时，保护装置 2 的时限  $t_d = t_b + \Delta t$ ，即其动作时限曲线通过  $d$  点。这样动作时限曲线 2 可根据在  $d$  点的动作电流倍数及动作时限  $t_d$  来确定（见图 4-1-7）。

## 3. 上级为定时限下级为反比延时继电器

同样，从保护装置 1 开始，保护装置 1 的一次动作电流为  $I_{op1}$ ，动作时限为  $t_1$ 。这样保护装置 1 的动作时限曲线 1 即可确定。再根据保护装置 2 的一次动作电流  $I_{op2}$  及动作时限曲线 1，确定该电流值下的动作时限  $t_r$ 。接着整定保护装置 2，其一次动作电流为  $I_{op2}$ ，动作时限  $t_r = t_b + \Delta t$ ，这样保护装置 2 的动作时限曲线 2 就确定了（见图 4-1-8）。

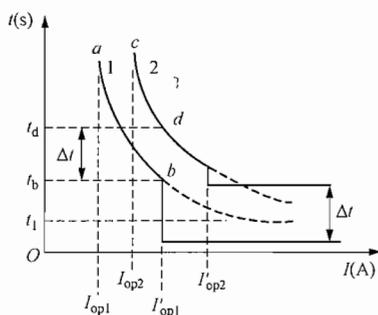


图 4-1-7 反比延时配合

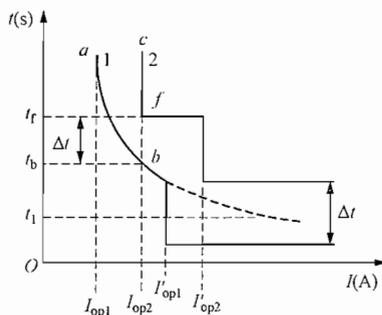


图 4-1-8 定时限与反比延时配合

## 4.1.11 应急电源

## 4.1.11.1 应急电源的设计原则

GB 50052—2009 规定：

4.0.2 应急电源与正常电源之间，应采取防止并列运行的措施。当有特殊要求，应急电源向正常电源转换需短暂并列运行时，应采取安全运行的措施。

3.0.9 备用电源的负荷严禁接入应急供电系统。

3.0.3 条文说明 工程设计中，对于其他专业提出的特别重要负荷，应仔细研究，凡能采取非电气保安措施者，应尽可能减少特别重要负荷的负荷量。

3.0.4 条文说明 正常与电网并联运行的自备电站不宜作为应急电源使用。

#### 4.1.11.2 应急电源的类型选择

GB 50052—2009 规定：

3.0.5 条文说明 应急电源类型的选择，应根据特别重要负荷的容量、允许中断供电的时间，以及要求的电源为交流或直流等条件来进行。由于蓄电池装置供电稳定、可靠、无切换时间、投资较少，故凡允许停电时间为毫秒级，且容量不大的特别重要负荷，可采用直流电源的，应由蓄电池装置作为应急电源。若特别重要负荷要求交流电源供电，允许停电时间为毫秒级，且容量不大，可采用静止型不间断供电装置。若有需要驱动的电动机负荷，且负荷不大，可以采用静止型应急电源，负荷较大，允许停电时间为15s以上的可采用快速起动的发电机组，这是考虑快速起动的发电机组一般起动时间在10s以内。

大型企业中，往往同时使用几种应急电源，为了使各种应急电源设备密切配合，充分发挥作用，应急电源接线示例见图1（以蓄电池、不间断供电装置、柴油发电机同时使用为例）。

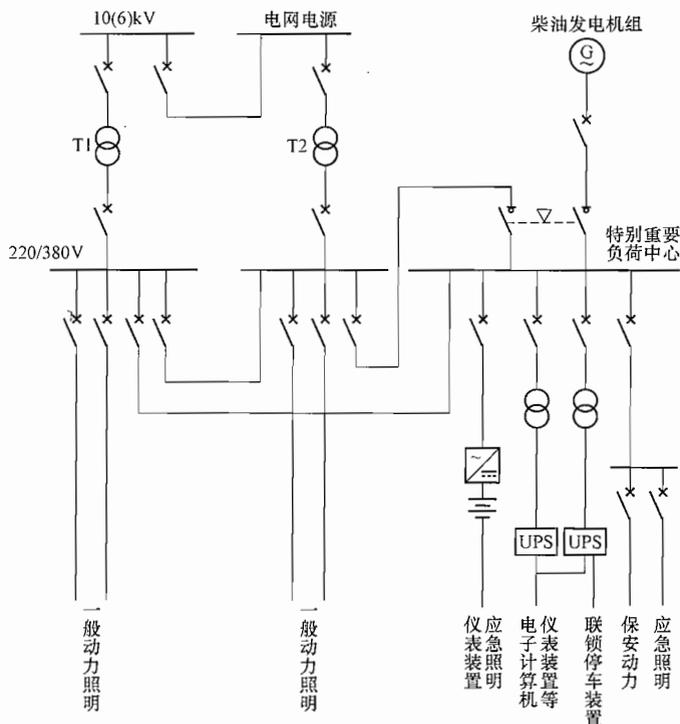


图1 应急电源接线示例

### 4.1.11.3 各类应急电源的容量选择

1. 柴油发电机组的容量选择 (《工业与民用配电设计手册 (第三版)》)

可按下述三种方法计算并选择其中容量最大者:

(1) 按稳定负荷计算发电机容量

$$S_{G1} = \frac{P_{\Sigma}}{\eta_{\Sigma} \cos\varphi} \quad (2-6)$$

式中:

$S_{G1}$ ——按稳定负荷计算的发电机视在功率, kVA;

$P_{\Sigma}$ ——发电机总负荷计算功率, kW;

$\eta_{\Sigma}$ ——所带负荷的综合效率, 一般取  $\eta_{\Sigma} = 0.82 \sim 0.88$ ;

$\cos\varphi$ ——发电机额定功率因数, 一般取  $\cos\varphi = 0.8$ 。

(2) 按尖峰负荷计算发电机容量

$$S_{G2} = \frac{K_j}{K_C} S_m = \frac{K_j}{K_C} \sqrt{P_m^2 + Q_m^2} \quad (2-7)$$

式中:

$S_{G2}$ ——按尖峰负荷计算的发电机视在功率, kVA;

$K_j$ ——因尖峰负荷造成电压、频率降低而导致电动机功率下降的系数, 一般取  $K_j = 0.9 \sim 0.95$ ;

$K_C$ ——发电机允许短时过载系数, 一般取  $K_C = 1.4 \sim 1.6$ ;

$S_m$ ——最大的单台电动机或成组电动机的起动容量, kVA;

$P_m$ —— $S_m$ 的有功功率, kW;

$Q_m$ —— $S_m$ 的无功功率, kvar。

(3) 按发电机母线允许压降计算发电机容量

$$S_{G3} = \frac{1 - \Delta U}{\Delta U} X'_d S_{st\Delta} \quad (2-8)$$

式中:

$S_{G3}$ ——按母线允许压降计算的发电机视在功率, kVA;

$\Delta U$ ——发电机母线允许电压降, 一般取  $\Delta U = 0.2$ ;

$X'_d$ ——发电机瞬态电抗, 一般取  $X'_d = 0.2$ ;

$S_{st\Delta}$ ——导致发电机最大电压降的电动机的最大起动容量, kVA。

2. 不间断电源 UPS 容量的选择 (《工业与民用配电设计手册 (第三版)》)

(1) 不间断电源设备输出功率, 应按下列条件选择:

1) 不间断电源设备给电子计算机供电时, 单台 UPS 的输出功率应大于电子计算机各设备额定功率总和 1.5 倍。对其他用电设备供电时, 为最大计算负荷的 1.3 倍。

2) 负荷的最大冲击电流不应大于不间断电源设备的额定电流的 150%。

(2) UPS 应急供电时间, 应按下列条件选择:

1) 为保证用电设备按照操作顺序停机, 其蓄电池的额定放电时间可按停机所需最长时间来确定, 一般可取 8 ~ 15min。

2) 当有备用电源时, 为保证用电设备供电连续性, 其蓄电池额定放电时间按等待备用电源投入考虑, 一般可取 10~30min。设有应急发电机时, UPS 应急供电时间可以短一些。

3) 如有特殊要求, 其蓄电池额定放电时间应根据负荷特性来确定。

3. 应急电源 EPS 容量的选择 (《工业与民用配电设计手册 (第三版)》)

选用 EPS 的容量必须同时满足以下条件:

(1) 负载中最大的单台直接起动的电机容量, 只占 EPS 容量的 1/7 以下。

(2) EPS 容量应是所供负载中同时工作容量总和的 1.1 倍以上。

(3) 直接起动风机、水泵时, EPS 的容量应为同时工作的风机、水泵容量的 5 倍。

(4) 若风机、水泵为变频起动, 则 EPS 的容量为同时工作的电机总容量的 1.1 倍。

(5) 若风机、水泵采用星-三角降压起动, 则 EPS 的容量应为同时工作的电机总容量的 3 倍以上。

4. 民用建筑柴油发电机组的容量选择

JGJ 16—2008 规定:

6.1.2 柴油发电机组的选择应符合下列规定:

1 机组容量与台数应根据应急负荷大小和投入顺序以及单台电动机最大起动容量等因素综合确定。当应急负荷较大时, 可采用多机并列运行, 机组台数宜为 2~4 台。当受并列条件限制, 可实施分区供电。当用电负荷谐波较大时, 应考虑其对发电机的影响。

2 在方案及初步设计阶段, 柴油发电机容量可按配电变压器总容量的 10%~20% 进行估算。在施工图设计阶段, 可根据一级负荷、消防负荷以及某些重要二级负荷的容量, 按下列方法计算的最大容量确定:

1) 按稳定负荷计算发电机容量;

2) 按最大的单台电动机或成组电动机起动的需要, 计算发电机容量;

3) 按起动电动机时, 发电机母线允许电压降计算发电机容量。

3 当有电梯负荷时, 在全电压起动最大容量笼型电动机情况下, 发电机母线电压不应低于额定电压的 80%; 当无电梯负荷时, 其母线电压不应低于额定电压的 75%。当条件允许时, 电动机可采用降压起动方式。

以上三种确定方法的计算公式可见 6.1.2 条文说明。

5. 民用建筑不间断电源 UPS 装置的选择

JGJ 16—2008 规定:

6.3.3 UPS 装置的选择, 应按负荷性质、负荷容量、允许中断

供电时间等要求确定, 并应符合下列规定:

1 UPS 装置, 宜用于电容性和电阻性负荷;

2 对电子计算机供电时, UPS 装置的额定输出功率应大于计算机各设备额定功率总和的 1.2 倍, 对其他用电设备供电时, 其额定输出功率应为最大计算负荷的 1.3 倍;

3 蓄电池组容量应由用户根据具体工程允许中断供电时间的要求选定;

4 不间断电源装置的工作制, 宜按连续工作制考虑。

6.3.4 当 UPS 装置容量较大时,宜在电源侧采取高次谐波的治理措施。

#### 6. 民用建筑应急电源 EPS 装置的选择

JGJ 16—2008 规定:

##### 6.2.2 EPS 装置的选择应负荷下列规定:

- 1 EPS 装置应按负荷性质、负荷容量及备用供电时间等要求选择。
- 2 EPS 装置可分为交流制式及直流制式。电感性和混合性的照明负荷宜选用交流制式;纯阻性及交、直流共用的照明负荷宜选用直流制式。
- 3 EPS 的额定输出功率不应小于所连接的应急照明负荷总容量的 1.3 倍。
- 4 EPS 的蓄电池初装容量应保证备用时间不小于 90min。
- 5 EPS 装置的切换时间应满足下列要求:
  - 1) 用作安全照明电源装置时,不应大于 0.25s。
  - 2) 用作疏散照明电源装置时,不应大于 5s。
  - 3) 用作备用照明电源装置时,不应大于 5s;金融、商业交易场所不应大于 1.5s。

6.2.3 当 EPS 装置容量较大时,宜在电源侧采取高次谐波的治理措施。

## 4.2 电能质量

供配电系统的电能质量包括电压质量、波形质量和频率质量。现将用电设备(干扰源)对电能质量的影响及可采取的改善措施汇总列于表 4-2-1 中。

表 4-2-1 用电设备对电能质量的影响及其改善措施

	名称	产生原因	干扰源	改善措施
电压质量	电压偏差	电路中所有串联元件阻抗引起的电压降,例如变压器和线路	负荷的昼夜和季节变化	合理选择变压器分接头 减少配电系统阻抗 进行无功功率补偿 采用有载调压变压器 尽量使三相负荷平衡
	电压波动 电压闪变	由冲击性负荷引起无功功率急剧变化而产生。例如炼钢电弧炉在熔化期,其运行工作点在正常运行点和工作短路点之间变化,产生无功冲击,在工作短路时,无功冲击最大。低速咬钢,带钢加速轧制的连轧机也会在此过程下出现大的无功冲击	炼钢电弧炉 整流电源与直流传动 交-交变频传动 大型电焊机 大型 X 光机	接入较高的电压级 装设静补装置(静止型 动态无功补偿装置)
	不对称度 (不平衡度)	炼钢电弧炉在运行中由于炉料的不均匀性和电极的不断分相调整,使三相电流严重不平衡,导致负序电流的产生。电气化铁路的单相电机车,也会出现大容量的三相不平衡负荷	炼钢电弧炉 单相电机车	尽量使三相负荷平衡 接入较高的电压级 装设分相调节的静补 装置

续表

	名称	产生原因	干扰源	改善措施
电压质量	过电压	暂时过电压一般由线路空载、接地故障等引起，以及因操作或故障引起元件出现不利组合而产生谐振过电压。 瞬时过电压一般由切合空线、负荷突变等引起，以及雷击于线路及其附近，由于电磁场的激烈变化而产生感应过电压	暂时过电压 瞬时过电压	详见第11章
波形质量	谐波	炼钢电弧炉由于电弧伏安特性的非线性和燃烧不稳定性，导致电流波形严重畸变。变流装置与变频装置均为非线性负荷，也使电流波形发生畸变，产生各次谐波电流	炼钢电弧炉 整流装置 变频装置 晶闸管调压装置 气体放电灯	接入较高的电压级 增加整流装置的脉动数 装设滤波器
频率质量	频率偏差	大型电弧炉和大型连轧机在产生大量无功功率冲击的同时，也产生大量有功功率的冲击，有可能使电网频率波动超过允许值	炼钢电弧炉 整流电源与直流传动 交-交变频传动 交-直-交变频传动	一般由电力系统承担有功功率冲击

4

#### 4.2.1 电压偏差

当地区电网和企业供配电系统的运行方式改变或所供负荷缓慢变化时，供配电系统各点电压也随之变化。此电压与系统标称电压之差为电压偏差，用系统标称电压的百分数表示时为

$$\delta U = \frac{U - U_n}{U_n} \times 100\% \quad (4-2-1)$$

式中  $U$ ——系统各点的实际电压，kV；

$U_n$ ——系统的标称电压，kV。

##### 4.2.1.1 供配电系统的电压降

图4-2-1所示为一阻抗串联电路及电压降矢量图。

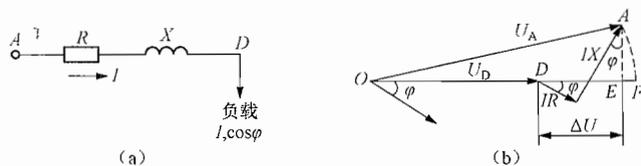


图4-2-1 阻抗串联电路及电压降矢量图

(a) 串联电路；(b) 矢量图

电压降是指串联电路中阻抗元件两端的代数差，图4-2-1中AD间的电压降为

$$\Delta U = U_A - U_D = DF$$

在工程计算中，电压降取电压降的横向分量DE。而误差EF忽略不计，即

$$\Delta U = DE = \frac{I(R \cos \varphi + X \sin \varphi)}{1000} \quad \text{kV} \quad (4-2-2)$$

三相平衡负荷电路的电压降用相对于标称电压的百分数来表示为

$$\begin{aligned}\Delta U &= \frac{\sqrt{3}I(R\cos\varphi + X\sin\varphi)}{1000U_n} \times 100\% \\ &= \frac{\sqrt{3}I(R\cos\varphi + X\sin\varphi)}{10U_n} \% \\ &= \frac{\sqrt{3}IU_n R\cos\varphi + \sqrt{3}IU_n \sin\varphi}{10U_n U_n} \% \\ &= \frac{PR + QX}{10U_n^2} \%\end{aligned}\quad (4-2-3)$$

式中  $U_n$ ——系统标称电压, kV;

$I$ ——负荷电流, A;

$\cos\varphi$ ——负荷功率因数;

$P$ ——负荷的有功功率, kW;

$Q$ ——负荷的无功功率, kvar;

$R$ 、 $X$ ——阻抗元件的电阻和电抗,  $\Omega$ 。

#### 4.2.1.2 过补偿下的电压升

图 4-2-2 所示为一电压升矢量图。

如过补偿的情况下  $\varphi$  角为负,  $\sin\varphi$  为负, 则  $Q$  为负,

公式变为

$$\Delta U = \frac{PR + (-QX)}{10U_n^2} \% = \frac{PR - QX}{10U_n^2} \% \quad (4-2-4)$$

当  $\Delta U$  为负时, 即为电压升。

#### 4.2.1.3 供电线路的电压降

线路电压降可按表 4-2-2 中的公式计算。

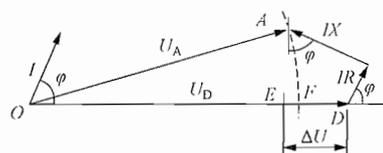


图 4-2-2 电压升矢量图

表 4-2-2 线路电压降计算公式

线路种类	线路电压降计算公式	符号说明
三相平衡 负荷线路	$\Delta u = \frac{\sqrt{3}Il}{10u_n}(R'\cos\varphi + X'\sin\varphi) = Il\Delta u_a \quad (4-3-5)$	$\Delta u$ ——线路电压降, %; $u_n$ ——系统标称电压, kV; $I$ ——负荷电流, A; $\cos\varphi$ ——负荷功率因数; $P$ ——负荷的有功功率, kW; $l$ ——线路长度, km; $R'$ 、 $X'$ ——三相线路单位长度的电阻和电抗, $\Omega/\text{km}$ ; $\Delta u_a$ ——三相线路单位电流长度的电压降, %/(A·km); $\Delta u_p$ ——三相线路单位功率长度的电压降, %/(kW·km)
	$\Delta u = \frac{Pl}{10u_n^2}(R' + X'\tan\varphi) = Pl\Delta u_p \quad (4-3-6)$	
线电压的 单相负荷线路	$\Delta u = \frac{2Il}{10u_n}(R'\cos\varphi + X'\sin\varphi) \approx 1.15Il\Delta u_a \quad (4-3-7)$	
	$\Delta u = \frac{2Pl}{10u_n^2}(R' + X'\tan\varphi) \approx 2Pl\Delta u_p \quad (4-3-8)$	
相电压的 单相负荷线路	$\Delta u = \frac{2\sqrt{3}Il}{10u_n}(R'\cos\varphi + X'\sin\varphi) \approx 2Il\Delta u_a \quad (4-3-9)$	
	$\Delta u = \frac{6Pl}{10u_n^2}(R' + X'\tan\varphi) \approx 6Pl\Delta u_p \quad (4-3-10)$	

注 表中  $R'$ 、 $X'$ 、 $\Delta u_a$ 、 $\Delta u_p$  的数值可从有关设计手册中查得。

#### 4.2.1.4 变压器的电压降

变压器的电压降（%）可按下列式计算

$$\Delta u_T \approx \beta(u_a \cos\varphi + u_r \sin\varphi) = \frac{Pu_a + Qu_r}{S_{rT}} \quad (4-2-5)$$

$$u_a = \frac{100\Delta P_T}{S_{rT}}$$

$$u_r = \sqrt{u_T^2 - u_a^2}$$

式中  $S_{rT}$ ——变压器额定容量，kVA；

$u_a$ ——变压器阻抗电压的有功分量，%；

$u_r$ ——变压器阻抗电压的无功分量，%；

$u_T$ ——变压器阻抗电压，%；

$\Delta P_T$ ——变压器的短路损耗，kW；

$\beta$ ——变压器的负荷率；

$\cos\varphi$ ——负荷的功率因数；

$P$ ——三相负荷的有功功率，kW；

$Q$ ——三相负荷的无功功率，kvar。

有关变压器的参数可从变压器样本上查出。

#### 4.2.1.5 电压偏差及其允许值

##### 1. 供电部门电压允许偏差

GB 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》规定：

4.1 35kV及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的10%。

注：如供电电压上下偏差同号（均为正或负）时，按较大的偏差绝对值作为衡量依据。

4.2 20kV及以下三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$ 。

4.3 220V单相供电电压偏差为标称电压的 $+7\%$ ， $-10\%$ 。

4.4 对供电点短路容量较小、供电距离较长以及对供电电压偏差有特殊要求的用户，由供、用电双方协议确定。

##### 2. 用电设备端子处电压允许偏差

GB 50052—2009 规定：

5.0.4 正常运行情况下，用电设备端子处电压偏差允许值宜符合下列要求：

1 电动机为 $\pm 5\%$ 额定电压。

2 照明：在一般工作场所为 $\pm 5\%$ 额定电压；对于远离变电站的小面积一般工作场所，难以满足上述要求时，可为 $+5\%$ ， $-10\%$ 额定电压；应急照明、道路照明和警卫照明等为 $+5\%$ ， $-10\%$ 额定电压。

3 其他用电设备当无特殊规定时为 $\pm 5\%$ 额定电压。

#### 4.2.1.6 电压偏差计算（《工业与民用配电设计手册（第三版）》）

如果在某段时间内线路或其他供电元件首段的电压偏差为 $\delta u_1$ ，线路电压降为 $\Delta u_1$ ，则线路末端电压偏差为

$$\delta u_x = \delta u_1 - \Delta u_1 \quad (4-2-6)$$

当有变压器或其他调压设备时, 还应计入该类设备内的电压提升, 即

$$\delta u_x = \delta u_1 + e - \sum \Delta u \quad (4-2-7)$$

在图 4-2-3 所示的电路中, 其末端的电压偏差为

$$\begin{aligned} \delta u_x &= \delta u_1 + e - \sum \Delta u \\ &= \delta u_1 + e - (\Delta u_{l1} + \Delta u_T + \Delta u_{l2}) \end{aligned} \quad (4-2-8)$$

式中  $\delta u_1$ ——线路首端的电压偏差, %;

$\sum \Delta u$ ——回路中电压降总和, %;

$\Delta u_{l1}$ 、 $\Delta u_{l2}$ ——高压线路和低压线路的电压降, %;

$\Delta u_T$ ——变压器电压降, %;

$e$ ——变压器分接头设备的电压提升, %, 常用配电变压器分接头与二次空载电压和电压提升的关系见表 4-2-3。

如果工厂负荷不变, 地区变电站供电母线电压也不变, 则电路沿线各点的电压偏差也是固定不变的。但实际上用户和地区变电站的负荷是在最大负荷和最小负荷之间变动, 电路沿线电压偏差曲线也相应地在图 4-2-3 所示的实线和虚线之间变动。电路某点电压偏差最大值与最小值的差额成为电压偏差范围。由图 4-2-3 可见, 用户负荷变化引起网络电压降的变化, 从而引起各级线路电压偏差范围逐级加大, 形成喇叭状。

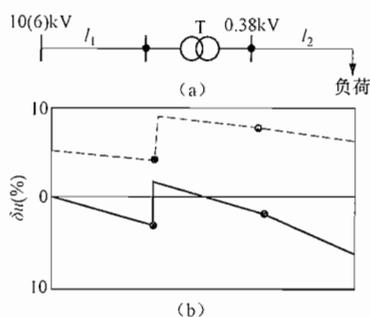


图 4-2-3 网络电压偏差计算电路  
(a) 计算电路; (b) 电路沿线的电压偏差曲线  
注: 实线表示最大负荷; 虚线表示最小负荷。

表 4-2-3 变压器分接头与二次侧空载电压和电压提升的关系

10 (6) ±5%/0.4kV 变压器分接头	+5%	0	-5%
变压器二次空载电压 <sup>①</sup> (V)	380	400	420
低压提升 <sup>①</sup> (%)	0	+5	+10

① 对应于变压器一次端子电压为网络标称电压 10 (6) kV 时的电压。

#### 4.2.1.7 电压偏差对常用电气设备的影响 (《工业与民用配电设计手册 (第三版)》)

电压偏差对常用电气设备的影响见表 4-2-4。

表 4-2-4 端子电压偏差对常用电气设备特性的影响

名 称	与电压 $U$ 的关系	电压偏差值 (%)	
		-10%	+10%
异步电动机:			
起动转矩和最大转矩	$U^2$	-19	+21
滑差率	$U^{-2}$	+23	-17
起动电流	$U$	-10 ~ -12	+10 ~ +12
满载电流 <sup>①</sup>		+11	-7
满载温升 <sup>①</sup>		+6 ~ +7	-3 ~ +4

续表

名 称	与电压 $U$ 的 关系	电压偏差值 (%)	
		-10%	+10%
同步电动机 <sup>②</sup> ： 与异步电动机相似，但转速最大转矩（拖出转矩）	$U$	-10	+10
电热设备 <sup>③</sup> ： 输出热能	$U^2$	-19	+21
白炽灯 光通量	$\approx U^{3.6}$	-32	+39
使用寿命 <sup>④</sup>	$\approx U^{-14}$	+330	-70
气体放电灯 <sup>④</sup> 荧光灯光通量	$\approx U$	$\sim -9$	$\sim +9$
荧光灯使用寿命 <sup>④</sup>			-20
高压汞灯光通量	$\approx U^3$	-27	+28
金属卤化物灯光通量	$\approx U^3$	-27	+38
高压钠灯光通量		-30	+33

① 数据仅供参考，其值因设计和制造而异。

② 如果采用晶闸管励磁，且其交流侧电源是与同步电动机共用的，则其最大转矩与端子电压的平方成正比。

③ 电压长期偏高将使电热元件寿命缩短。

④ 灯泡、灯管的使用寿命是指其在光效到初始值的70%时的燃用时间。气体放电灯在电压过高或过低时都会缩短使用寿命，电压过低时启辉困难，电压过高时镇流器将因过热而缩短寿命。

#### 4.2.1.8 改善电压偏差的措施

GB 50052—2009 规定：

5.0.6 符合在下列情况之一的变电站中的变压器，应采用有载调压变压器：

- 1 大于35kV电压的变电站中的降压变压器，直接向35、10、6kV电网送电时。
- 2 35kV降压变电站的主变压器，在电压偏差不能满足要求时。

5.0.7 10、6kV配电变压器不宜采用有载调压变压器；但在当地10、6kV电源电压偏差不能满足要求，且用户对电压要求严格的设备，单独设置调压装置技术经济不合理时，亦可采用10、6kV有载调压变压器。

5.0.8 电压偏差应符合用电设备端电压的要求，大于等于35kV电网的有载调压宜实行逆调压方式。逆调压的范围为额定电压的0~+5%。

5.0.9 供配电系统的设计为减小电压偏差，应符合下列要求：

- 1 应正确选择变压器的变压比和电压分接头。
- 2 应降低系统阻抗。
- 3 应采取补偿无功功率措施。
- 4 宜使三相负荷平衡。

#### 4.2.2 电压波动和闪变

##### 4.2.2.1 基本概念

电压波动或闪变是指电压方均根值（每半个基波电压周期方均根值）一系列的快速变

动。它是波动负荷（生产或运行过程中从电网中取用快速变动功率的负荷，例如炼钢电弧炉、轧机、电弧焊机等）引起的电压快速变动，可能引起人对灯闪的不适感以及信息技术设备的工作受到干扰。

电压变动  $d$  是电压方均根值变动的特性曲线上相邻两个极值电压最大值  $U_{\max}$  与最小值  $U_{\min}$  之差，用与系统标称电压  $U_n$  比值的百分数表示，即

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} \times 100\% \quad (4-2-9)$$

电压变化频度  $r$  是单位时间内电压变动的次数（电压由大到小或由小到大各算一次变动），称为电压变动的频度，一般以  $\text{min}^{-1}$  或  $\text{s}^{-1}$  作为频度的单位。同一方向的若干次变动，如间隔时间小于 30ms，则算一次变动。

由于冲击负荷周期性从电网中取用快速变动的功率，使电压快速变化从而引起人眼对灯闪的明显感觉，此种人眼对灯闪的主观感觉称为闪变。

#### 4.2.2.2 电压波动和闪变产生的原因

电压波动是由波动负荷引起，工业企业主要的波动负荷有：

(1) 炼钢电弧炉。电弧炉工作在熔化期，由于废钢的不规律性，容易发生塌料引起工作短路，因此其运行工作点经常在正常运行点和工作短路点之间变化，工作短路时功率因数很低，故引起无功功率的急剧变化。

(2) 整流电源与直传动。用直流电动机传动轧机时，如用晶闸管相位控制进行整流器输出电压的调整，在额定转速下，功率因数一般在 0.7 左右。当轧制工艺需要低速咬钢、带钢升速时，由于低速咬钢时的功率因数很低，咬钢后又快速升速，引起大量无功功率冲击。

(3) 循环变流器负荷。用循环变流器即交—交变频器直接供电的传动负荷，变频器的输出频率一般为 0 ~ 20Hz，在额定转速下，功率因数约为 0.7。在需要低速咬钢、带钢升速的轧制工艺时，如同整流器向直流电动机供电一样，也引起大量的无功功率冲击。

(4) 电阻焊机和电弧焊机。大功率的电阻焊机和电弧焊机系间歇通电的负荷，工作时也会引起配电母线的电压波动和闪变。

#### 4.2.2.3 电压波动和闪变的危害

(1) 电气照明灯光的闪烁，引起人的视觉疲劳甚至难以忍受。

(2) 电动机转速不均匀，影响产品质量，甚至损坏电动机。

(3) 电压波动会使电子控制系统失灵。

#### 4.2.2.4 电压波动和闪变的测量和估算

##### 1. 电压波动的测量和估算

GB/T 12326—2008《电能质量 电压波动和闪变》第 6 节规定：

电压波动可以通过电压方均根值曲线  $U(t)$  来描述，电压变动  $d$  和电压变动频度  $r$  则是衡量电压波动大小和快慢的指标。

电压变动  $d$  的定义表达式为：

$$d = \frac{\Delta U}{U_n} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

$\Delta U$ ——电压方均根值曲线上相邻两个极值电压之差；

$U_n$ ——系统标称电压。

当电压变动频度较低且具有周期性时，可通过电压方均根值曲线  $U(t)$  的测量，对电压波动进行评估。单次电压变动可通过系统和负荷参数进行估算。

当已知三相负荷的有功功率和无功功率的变化量分别为  $\Delta P_i$  和  $\Delta Q_i$  时，可用下式计算：

$$d = \frac{R_L \Delta P_i + X_L \Delta Q_i}{U_n^2} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

$R_L$ 、 $X_L$ ——电网阻抗的电阻、电抗分量。

在高压电网中，一般  $X_L \gg R_L$ ，则：

$$d \approx \frac{\Delta Q_i}{S_{sc}} \times 100\% \quad (6)$$

式中：

$S_{sc}$ ——考察点（一般为 PCC）在正常较小方式下的短路容量。

在无无功功率的变化量为主要成分时（例如大容量电动机起动），可采用式（7）、式（8）进行粗略计算。

对于平衡的三相负荷：

$$d \approx \frac{\Delta S_i}{S_{sc}} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

$\Delta S_i$ ——三相负荷的变化量。

对于相间单相负荷：

$$d \approx \frac{\sqrt{3} \Delta S_i}{S_{sc}} \times 100\% \quad (8)$$

式中：

$\Delta S_i$ ——相间单相负荷的变化量。

注1：当缺正常较小方式的短路容量时，设计所取的系统短路容量可以用投产时系统最大短路容量乘系数 0.7 进行计算。

注2：公共连接点（PCC）为电力系统中一个以上用户的连接处。

## 2. 闪变的测量和估算

GB/T 12326—2008 第 7 节规定：

闪变是电压波动在一段时期内的累计效果，它通过灯光照度不稳定造成的视感来反映，主要由短时间闪变  $P_{st}$  和长时间闪变值  $P_{lt}$  来衡量。短时间闪变值  $P_{st}$  的计算方法见附录 A，长时间闪变值  $P_{lt}$  由测量时间段内包含的短时间闪变值  $P_{st}$  计算获得：

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} (P_{stj})^3} \quad (9)$$

式中:

$P_{stj}$ ——2h 内第  $j$  个短时间闪变值。

### 3. 电弧炉的闪变估算方法

GB/T 12326—2008 附录 C 规定:

电弧炉在运行过程中,特别是在熔化期,随机且大幅度波动的无功功率会引起供电母线严重的电压波动和闪变。电弧炉在熔化期电极和炉料(或融化后钢水)接触可以有开路和短路两种极端状态,当相继出现这两种状态时,其最大无功功率变动量 $\Delta Q_{\max}$ 就等于短路容量 $S_d$ 。

电弧炉在 PCC 点引起的最大电压变动 $d_{\max}$ 可通过其最大无功功率变动量 $\Delta Q_{\max}$ 由式(6)计算获得。电弧炉在 PCC 点引起的闪变大小主要与 $d_{\max}$ 有关,也与电弧炉的类型、炉变参数、短网、冶炼的工艺、炉料的状况等有关。通过经验公式,由电弧炉的类型和其 $d_{\max}$ 可对其闪变值进行粗略的估算,经验公式如下:

$$P_{fl} = K_{fl} d_{\max} \quad (C.1)$$

式中:

$K_{fl}$ ——交流电弧炉一般取 0.48;直流电弧炉一般取 0.30;精炼电弧炉一般取 0.20;康斯丁(CONSTEEL)电弧炉一般取 0.25。

## 4.2.2.5 电压波动和闪变的限值

### 1. 电压波动的限值 (GB/T 12326—2008 第 4 节)

电压波动限值见表 1。

表 1 电压波动限值

$r$ (次/h)	$d$ (%)	
	LV、MV	HV
$r \leq 1$	4	3
$1 < r \leq 10$	3*	2.5*
$10 < r \leq 100^{\dagger}$	2	1.5
$100 < r \leq 1000$	1.25	1

注 1: 很少的变动频度 (每日少于 1 次), 电压变动限值  $d$  还可以放宽, 但不在本标准中规定。

注 2: 对于随机性不规则的电压波动, 如电弧炉负荷引起的电压波动, 表中标有“\*”的值为其限值。

注 3: 参照 GB/T 156—2007, 本标准中系统标称电压  $U_n$  等级按一下划分:

低压 (LV)  $U_n \leq 1\text{kV}$   
 中压 (MV)  $1\text{kV} < U_n \leq 35\text{kV}$   
 高压 (HV)  $35\text{kV} < U_n \leq 220\text{kV}$

对于 220kV 以上超高压 (EHV) 系统的电压波动限值可参照高压 (HV) 系统执行。

### 2. 闪变的限值 (GB/T 12326—2008 第 5 节)

5.1 电力系统公共连接点, 在系统正常运行的较小方式下, 以一周 (168h) 为测量周期, 所有长时间闪变值  $P_{fl}$  都应满足表 2 闪变限值的要求。

表2 闪变限值

$P_{fl}$	
$\leq 110\text{kV}$	$> 110\text{kV}$
1	0.8

5.2 任何一个波动负荷用户在电力系统公共连接点单独引起的闪变值一般应满足下列要求。

5.2.1 电力系统正常运行的较小方式下，波动负荷处于正常、连续工作状态，以一天（24h）为测量周期，并保证波动负荷的最大工作周期包含在内，测量获得的最大长时间闪变值和波动负荷退出时的背景闪变值，通过下列计算获得波动负荷单独引起的长时间闪变值：

$$P_{fl2} = \sqrt[3]{P_{fl1}^3 - P_{fl0}^3} \quad (1)$$

式中：

$P_{fl1}$ ——波动负荷投入时的长时间闪变测量值；

$P_{fl0}$ ——背景闪变值，是波动负荷退出时一段时期内的长时间闪变测量值；

$P_{fl2}$ ——波动负荷单独引起的长时间闪变值。

波动负荷单独引起的闪变值根据用户负荷大小、其协议用电容量占总供电容量的比例以及电力系统公共连接点的状况，分别按三级做不同的规定和处理。

5.2.2 第一级规定。满足本级规定，可以不经闪变核算允许接入电网。

a) 对于 LV 和 MV 用户，第一级限值见表 3。

表3 LV 和 MV 用户第一级限值

$r$ (次/min)	$k = (\Delta S/S_{sc})_{\max}$ (%)
$r < 10$	0.4
$10 \leq r \leq 200$	0.2
$200 < r$	0.1

注：表中  $\Delta S$  为波动负荷视在功率的变动； $S_{sc}$  为 PCC 短路容量。

b) 对于 HV 用户，满足  $(\Delta S/S_{sc})_{\max} < 0.1\%$

c) 满足  $P_{fl} < 0.25$  的单个波动负荷用户。

d) 符合 GB 17625.2 和 GB/Z 17625.3 的低压用电设备。

5.2.3 第二级规定。波动负荷单独引起的长时间闪变值须小于该负荷用户的闪变限值。

每个用户按其协议用电容量  $S_i$  ( $S_i = P_i / \cos\varphi_i$ ) 和总供电容量  $S_t$  之比，考虑上一级对下一级闪变传递的影响（下一级对上一级的传递一般忽略）等因素后确定该用户的闪变限值。单个用户闪变限值的计算方法如下：

首先求出接于 PCC 点的全部负荷产生闪变的总限值  $G$ ：

$$G = \sqrt[3]{L_p^3 - T^3 L_H^3} \quad (2)$$

式中：

$L_p$ ——PCC 点对应电压等级的长时间闪变值  $P_{Hl}$  限值；

$L_H$ ——上一电压等级的长时间闪变值  $P_{Hl}$  限值；

$T$ ——上一电压等级对下一电压等级的闪变传递系数，推荐为 0.8。不考虑超高压（EHV）系统对下一级电压系统的闪变传递。各电压等级的闪变限值见表 2。

单个用户闪变限值  $E_i$  为：

$$E_i = G \sqrt[3]{\frac{S_i}{S_1} \cdot \frac{1}{F}} \quad (3)$$

式中：

$F$ ——波动负荷的同时系数，其典型值  $F = 0.2 \sim 0.3$ （但必须满足  $S_i/F \leq S_1$ ），高压（HV）系统 PCC 总供电容量  $S_{HV}$  确定方法见附录 B。

5.2.4 第三级规定。不满足第二级规定的单个波动负荷用户，经过治理后仍超过其闪变限值，可根据 PCC 点实际闪变状况和电网的发展预测适当放宽限值，但 PCC 点的闪变值必须符合 5.1 的规定。

#### 4.2.2.6 改善电压波动和闪变的措施

GB 50052—2009 规定：

5.0.11 对波动负荷的供电，除电动机起动时允许的电压下降情况外，当需要降低波动负荷引起的电网电压波动和电压闪变时，宜采取下列措施：

- 1 采用专线供电。
- 2 与其他负荷共用配电线路时，降低配电线路阻抗。
- 3 较大功率的波动负荷或波动负荷群与对电压波动、闪变敏感的负荷，分别由不同的变压器供电。
- 4 对于大功率电弧炉的炉用变压器。由短路容量较大的电网供电。
- 5 采用动态无功补偿装置或动态电压调节装置。

#### 4.2.3 三相电压不平衡度

##### 4.2.3.1 三相不平衡度的计算

GB/T 15543—2008 附录 A 规定：

##### A.1 不平衡度的表达式

$$\begin{cases} \varepsilon_{U2} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \\ \varepsilon_{U0} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% \end{cases} \quad (A.1)$$

式中：

$U_1$ ——三相电压的正序分量方均根值，单位为伏（V）；

$U_2$ ——三相电压的负序分量方均根值，单位为伏（V）；

$U_0$ ——三相电压的零序分量方均根值，单位为伏（V）。

将式（A.1）中  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_0$  换为  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_0$  则为相应的电流不平衡度  $\varepsilon_{I2}$  和  $\varepsilon_{I0}$  的表达式。

## A.2 不平衡度的准确计算式

A.2.1 在三相系统中，通过测量获得三相电量的幅值和相位后应用对称分量法分别求出正序分量、负序分量和零序分量，由式（A.1）求出不平衡度。

A.2.2 在没有零序分量的三相系统中，当已知三相量  $a$ 、 $b$ 、 $c$  时也可以用式（A.2）求负序不平衡度：

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6L}}{1 + \sqrt{3 - 6L}}} \times 100(\%) \quad (\text{A.2})$$

式中：

$$L = (a^4 + b^4 + c^4) / (a^2 + b^2 + c^2)^2$$

【编者注】 $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别表示三相线电压。

## A.3 不平衡度的近似计算式

A.3.1 设公共连接点的正序阻抗与负序阻抗相等，则负序电压不平衡度为：

$$\varepsilon_{U2} = \frac{\sqrt{3}I_2 U_L}{S_k} \times 100(\%) \quad (\text{A.3})$$

式中：

$I_2$ ——负序电流值，单位为安（A）；

$S_k$ ——公共连接点的三相短路容量，单位为伏·安（V·A）；

$U_L$ ——线电压，单位为伏（V）。

A.3.2 相间单相负荷引起的负序电压不平衡度可近似为：

$$\varepsilon_{U2} = \frac{S_L}{S_k} \times 100(\%) \quad (\text{A.4})$$

式中：

$S_L$ ——单相负荷容量，单位为伏·安（V·A）。

## 4.2.3.2 三相电压不平衡的产生原因

电力系统中三相电压不平衡主要是由负荷不平衡、系统三相阻抗不对称以及消弧线圈的不正确调谐所引起的。由于系统阻抗不对称而引起的背景电压不平衡度，一般很少超过 0.5%，但在高峰负荷时或高压线停电时，不平衡有时超过 1%。

工作中造成负荷不平衡的主要原因有：

(1) 炼钢电弧炉。电弧炉在运行中由于炉料的不均匀性和电极的不断分相调整，使三相电流严重不平衡。此外，废钢熔化到一定程度后的塌料造成三相电极的不平衡短路，导致负序电流的产生。最严重的情况是一相断流，只有两相有电流或一相电极处于正常运行，另两相电极发生短路的工况。

(2) 单相电机车。由牵引网向电机车是单相供电，由于牵引变压器对电机车的这种不对称的供电方式，将产生负序电流与负序电压。牵引负荷还具有波动性大和沿线分布广等特点，因而它是不平衡的动态干扰性负荷。

## 4.2.3.3 三相电压不平衡的危害（《工业与民用配电设计手册（第三版）》）

(1) 引起旋转电机的附加发热和振动，危及其安全运行和正常出力。

(2) 引起以负序分量为起动元件的多种保护发生误动作（特别是当电网中同时存在谐

波时), 这对电网安全运行是有严重威胁的。

(3) 电压不平衡使半导体变流设备产生附加的谐波电流(非特征谐波), 而这种设备一般设计上只允许 2% 的电压不平衡度。

(4) 电压不平衡使发电机容量利用率下降。由于不平衡时最大相电流不能超过额定值, 在极端情况下, 只带单相负荷时, 则设备利用率仅为  $UI/\sqrt{3}UI \approx 0.577$ 。

(5) 变压器的三相负荷不平衡, 不仅使负荷较大的一相绕组过热导致其寿命缩短, 而且还会由于磁路不平衡, 大量漏磁通经箱壁、夹件等使其严重发热, 造成附加损耗。

(6) 在低压配电线路中, 三相负荷不平衡会影响计算机正常工作, 还会引起照明光源寿命缩短(电压过高)或照度不足(电压过低)以及电视机的损坏等。

(7) 三相负荷不平衡时, 将引起电网损耗的增加。

(8) 使电加热炉的电能消耗增加, 产量减少, 使炉子的效率降低。

(9) 对于通信系统, 电力三相不平衡时, 会增大对其干扰, 影响正常通信质量。

#### 4.2.3.4 三相不平衡度的允许值

GB/T 15543—2008 规定:

##### 4.1 电力系统公共连接点电压不平衡度限值为:

电网正常运行时, 负序电压不平衡度不超过 2%, 短时不得超过 4%;

低压系统零序电压限值暂不做规定, 但各相电压必须满足 GB/T 12325 的要求。

注 1: 本标准中不平衡度为在电力系统正常运行的最小方式(或较小方式)下、最大的生产(运行)周期中负荷所引起的电压不平衡度的实测值。

注 2: 低压系统是指标称电压不大于 1kV 的供电系统。

4.2 接于公共连接点的每个用户引起该点负序电压不平衡度允许值一般为 1.3%, 短时不超过 2.6%。根据连接点的负荷状况以及邻近发电机、继电保护和自动装置安全运行要求, 该允许值可做适当变动, 但必须满足 4.1 的规定。

#### 4.2.3.5 改善三相不平衡度的措施

(1) 将分散的不对称负荷分别接到不同的供电点, 以减小集中连接造成不平衡度的超标问题。

(2) 使不对称负荷合理分配到各相, 尽量使其平衡化。

(3) 将不对称负荷接到更高电压级上供电, 以使连接点的短路容量足够大。例如对于单相负荷, 连接点的短路容量大于 50 倍的负荷容量时, 就能保证连接点的电压不平衡度小于 2%。

(4) 装设能分相调节的静补装置。

(5) 设计低压配电系统时, 宜采取下列措施, 降低三相低压配电系统的不对称度:

1) 220V 或 380V 单相用电设备接入 220/380V 三相系统时, 宜使三相平衡。

2) 由地区公共低压电网供电的 220V 负荷, 线路电流小于等于 60A 时, 可采用 220V 单相供电; 大于 60A 时, 宜采用 220/380V 三相四线制供电。

#### 4.2.4 过电压

交流电力系统中的电气设备, 在运行中除了受持续工频电压作用外, 还受到过电压的作用。按照作用过电压的幅值、波形及持续时间, 可分为暂时过电压(包括工频过电压、谐

振过电压)及瞬态过电压(包括操作过电压、雷电过电压)。

为了保证供配电及用电设备的安全,对于系统中出现的暂时和瞬态过电压应采取相应的保护,使其和设备的绝缘水平相配合,其过电压产生原因和保护方法见第11章防雷及过电压保护。

#### 4.2.5 高次谐波

##### 4.2.5.1 基本概念

我国电网的标称频率(基波频率)为50Hz。一个周期性电气量的正序分量为基波频率整数倍的叫高次谐波,例如2、3、4、5次谐波,则其频率依次为100、150、200、250Hz。

##### 4.2.5.2 谐波产生的原因及其计算

交流电网中存在大量非线性负荷,例如交流电弧炉以及用于轧机、卷扬机、电机车和电解设备等供电的变流装置和变频装置,照明用的气体放电灯等都是主要的谐波发生源。

这类非线性负荷产生的波形,可按傅里叶级数分析,分解成基波分量和具有基波分量整数倍的谐波分量。这些谐波电流注入电网,通过电网阻抗产生谐波压降,叠加在基波上,引起电网的电压畸变。

###### 1. 谐波术语的数学表达式

GB/T 14549—1993 附录 A 规定:

###### A.1 第 $h$ 次谐波电压含有率 $HRU_h$ :

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (\text{A.1})$$

式中:

$U_h$ ——第  $h$  次谐波电压(方均根值);

$U_1$ ——基波电压(方均根值)。

###### A.2 第 $h$ 次谐波电流含有率 $HRI_h$ :

$$HRI_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (\text{A.2})$$

式中:

$I_h$ ——第  $h$  次谐波电流(方均根值);

$I_1$ ——基波电流(方均根值)。

###### A.3 谐波电压含量 $U_H$ :

$$U_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2} \quad (\text{A.3})$$

###### A.4 谐波电流含量 $I_H$ :

$$I_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2} \quad (\text{A.4})$$

###### A.5 电压总谐波畸变率 $THD_u$

$$THD_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% \quad (\text{A.5})$$

###### A.6 电流总谐波畸变率 $THD_i$ :

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% \quad (\text{A.6})$$

## 2. 谐波的基本计算式

GB/T 14549—1993 附录 C 规定:

C.1 第  $h$  次谐波电压含有率  $HRU_h$  与第  $h$  次谐波电流分量  $I_h$  的关系如下

$$HRU_h = \frac{\sqrt{3}Z_h \cdot I_h}{10U_n} (\%) \quad (\text{C.1})$$

近似的工程估算按式 (C.2) 或 (C.3) 计算

$$HRU_h = \frac{\sqrt{3}U_n \cdot h \cdot I_h}{10S_k} (\%) \quad (\text{C.2})$$

或

$$I_h = \frac{10S_k \cdot HRU_h}{\sqrt{3}U_n \cdot h} (\%) \quad (\text{C.3})$$

式中:

$U_n$ ——电网的标称电压, kV;

$S_k$ ——公共连接点的三相短路容量, MVA;

$I_h$ ——第  $h$  次谐波电流, A;

$Z_h$ ——系统中第  $h$  次谐波阻抗,  $\Omega$ 。

## 3. 部分电气设备产生的谐波电流值

(1) 变流装置。理论上, 产生的谐波电流为特征谐波可按下式计算

$$h = kp \pm 1$$

式中:  $k$  为正整数;  $p$  为变流装置的脉动数。各次谐波电流值  $I_h = I_1/h$ , 式中:  $I_h$  为  $h$  次谐波电流,  $I_1$  为基波电流, 因而 12 脉动变流器只有 11、13、23、25 次等高次谐波, 18 脉动变流器只有 17、19、35、37 次等高次谐波。

(2) 炼钢电弧炉。电弧炉在运行中由于电弧的非线性和燃烧的不稳定性, 导致电流波形的严重畸变, 含有 2, 3, 4, 5, 6, 7 次等高次谐波。

(3) 气体放电灯。气体放电灯如荧光灯、高压钠灯、高压汞灯的电路本身含有电弧, 此种负阻特性产生谐波电流, 主要是三次谐波电流。

### 4.2.5.3 谐波的危害 (《工业与用配电设计手册 (第三版)》)

#### 1. 对旋转电动机的影响

旋转电动机定子中的正序和负序谐波电流, 分别形成正向和反向旋转磁场, 使旋转电动机产生固定数的振动力矩和转速的周期变化, 从而使电动机效率降低, 发热增加。对于同步电动机的转子, 又分别感应出正序和负序谐波电流。由于集肤效应, 其主要部分并不是在转子绕组中流动, 而是在转子表面形成环流, 造成明显局部发热, 缩短其使用寿命。

#### 2. 对变压器的影响

变压器等电气设备由于过大的谐波电流而产生附加损耗, 从而引起过热, 使绝缘介质老

化加速，导致绝缘损坏。正序和负序谐波电流同样使变压器铁芯产生磁滞伸缩和噪声，电抗器产生振动和噪声。

### 3. 对并联电容器的影响

并联电容器的容性阻抗特性，以及阻抗和频率成反比的特性，使得电容器容易吸收谐波电流而引起过载发热；当其容性阻抗与系统中感性阻抗相匹配时，容易构成谐波谐振，使电容器发热导致绝缘击穿的故障增多。谐波电压与基波电压峰值发生叠加，使得电容器介质更容易发生局部放电；此外，谐波电压与基波电压叠加时使电压波形增多了起伏，倾向于增多每个周期中局部放电的次数，相应地增加了每个周期中局部放电的功率，而绝缘寿命则与局部放电功率成反比。

### 4. 对断路器的影响

谐波电流的发热作用大于有效值相等的工频电流，能降低热元件的发热动作电流。

高次谐波含量较高的电流能使断路器的开断能力降低。当电流的有效值相同时，波形畸变严重的电流与工频正弦波形的电流相比，在电流过零时的  $di/dt$  可能较大。当存在严重的谐波电流时，某些断路器的磁吹线圈不能正常工作。

### 5. 对电子设备的影响

使相位控制设备的正常工作因控制信号紊乱而受到干扰，如电子计算机误动作、电子设备误触发、电子元件测试无法进行等。

### 6. 对继电保护的影响

使某些类型的继电保护，如晶体管整流型距离保护、变压器及母线复合电压保护，由于相位变化而误动或拒动。

### 7. 对通信线路的影响

使通信线路、信息线路产生噪声，甚至造成故障。

### 8. 其他

消弧线圈是按照所接的局部电网的工频参数来调谐的，对于谐波实际上不起作用。谐波电压使电缆绝缘局部放电增加，对电缆使用寿命有较大影响。大容量高压变压器由谐波造成的涌磁过程能延续数秒或更长的时间，有可能引起谐波过电压，并使有关避雷器的放电时间过长、放电能量过大而受到损坏。三相或单相电压互感器往往由于谐波引起的谐振而损坏。谐波电流引起的电气设备及配电路过载导致短路，甚至引发火灾的事件屡有发生。

## 4.2.5.4 谐波电压的限值与谐波电流的允许值

### 1. 谐波电压限值

GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》规定：

公共电网谐波电压（相电压）限值见表1。

表1 公共电网谐波电压（相电压）限值

电网标称电压 (kV)	电压总谐波畸变 (%)	各次谐波电压含有率 (%)		电网标称电压 (kV)	电压总谐波畸变 (%)	各次谐波电压含有率 (%)	
		奇次	偶次			奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0	35、66	3.0	2.4	1.2
6、10	4.0	3.2	1.6	110	2.0	1.6	0.8

## 2. 谐波电流允许值

GB/T 14549—1993 规定:

5.1 公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量(方均根值)不应超过表2规定的允许值。当公共连接点处的最小短路容量不同于基准短路容量时,表2中的谐波电流允许值的换算见附录B。

表2 注入公共连接点的谐波电流允许值

标准电压(kV)	基准短路容量(MVA)	谐波次数及谐波电流允许值(A)											
		h=2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7

标准电压(kV)	基准短路容量(MVA)	谐波次数及谐波电流允许值(A)											
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0.38	10	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12
6	100	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8
10	100	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1
35	250	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5
66	500	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6
110	750	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

注: 220kV 基准容量取2000MVA。

(1) 实际短路容量与基准短路容量不同时的换算(附录B)。

当电网公共连接点的最小短路容量不同于表2基准短路容量时,按下式修正表中的谐波电流允许值

$$I_h = (S_{k1}/S_{k2})I_{hp} \quad (\text{B.1})$$

式中:

 $S_{k1}$ ——公共连接点的最小短路容量, MVA; $S_{k2}$ ——基准短路容量, MVA; $I_{hp}$ ——表2中第 $h$ 次谐波电流允许值, A; $I_h$ ——短路容量为 $S_{k1}$ 时的第 $h$ 次谐波电流允许值, A。

(2) 按协议容量分配的换算(附录C)。

5.2 同一公共连接点的每个用户向电网注入的谐波电流允许按此协议容量与其公共连接点的供电容量之比进行分配。分配的计算方法如下:

在公共连接点处第 $i$ 个用户的第 $h$ 次谐波电流允许值( $I_{hi}$ )按式(C.6)计算

$$I_{hi} = I_h (S_i/S_t)^{1/\alpha} \quad (\text{C.6})$$

式中：

$I_h$ ——按式（B.1）换算的第  $h$  次谐波电流允许值，A；

$S_i$ ——第  $i$  个用户的用电协议容量，MVA；

$S_1$ ——公共连接点的供电设备容量，MVA；

$\alpha$ ——相位叠加系数，按表 C.2 取值。

表 C.2 谐波相位叠加系数

$h$	3	5	7	11	13	$9 >13 $ 偶次
$\alpha$	1.1	1.2	1.4	1.8	1.9	2

#### C.2 两个谐波源的同次谐波电流在一条线路的同一相上叠加计算

已知相位角时按式（C.4）计算

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + 2I_{h1}I_{h2}\cos\theta_h} \quad (\text{C.4})$$

式中：

$I_{h1}$ ——谐波源 1 的第  $h$  次谐波电流，A；

$I_{h2}$ ——谐波源 2 的第  $h$  次谐波电流，A；

$\theta_h$ ——谐波源 1 和谐波源 2 的第  $h$  次谐波电流之间的相位角。

当相位角不确定时可按式（C.5）计算

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + K_h I_{h1} I_{h2}} \quad (\text{C.5})$$

式中： $K_h$  系数按表 C.1 选取。

表 C.1 式（C.5）中系数  $K_h$  的值

$h$	3	5	7	11	13	$9 >13 $ 偶次
$K_h$	1.62	1.28	0.72	0.18	0.08	0

两个以上同次谐波电流叠加时，首先将两个谐波电流叠加，然后再与第三个谐波电流相叠加，依此类推。

两个及以上谐波源在电网中同一节点同一相上引起的同次谐波电压的计算式与式（C.4）或式（C.5）类同。

#### 4.2.5.5 抑制谐波的措施

(1) 因电压越高，允许注入公共连接点的谐波容量越大（谐波容量为基波电压与谐波电流的乘积）。采用较高的供电电压，增大对谐波的承受能力。

(2) 增加变流装置的脉动数、增大换向电抗和改善触发对称度，利用谐波源之间的相位不同以抵消部分谐波。例如相位差为  $30^\circ$  的两组 6 脉动变流器并联，在容量相等的条件下即成为 12 脉动变流器。同理，三组或四组相同容量的 6 脉动变流器并联工作，如相互之间的相位差为  $20^\circ$  和  $15^\circ$ ，则可组成 18 脉动和 24 脉动变流器。

(3) 装设滤波器。

(4) 选用 Dyn11 配电变压器。

#### 4.2.6 频率偏差

##### 4.2.6.1 产生频率偏差的原因

电力系统频率的实际值和标称值之差称为频率偏差。若电力系统的有功功率满足不了用

户的要求,会造成频率下降,正常运行条件下频率偏差有限值。若用户在生产(或运行)过程中周期性或非周期性地从电网取用快速变动功率的冲击负荷时,将受到冲击负荷引起的频率偏差变化的限制。

#### 4.2.6.2 频率偏差的危害

电力系统如长期处于低频下运行,则:

- (1) 将使用户电动机转速下降,出力降低,从而影响产品的质量和产量。
- (2) 引起交流电钟的不正确。
- (3) 使电气测量仪表误差增大,安全自动装置及继电保护误动作等。

#### 4.2.6.3 频率偏差的限值

GB/T 15945—2008 规定:

- 3.1 电力系统正常运行条件下频率偏差范围为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ,当系统容量较小时,偏差限值可放宽到 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。
- 3.2 冲击负荷引起的频率偏差限值见本标准附录 A,即频率变化范围为 $\pm 0.2\text{Hz}$ 。根据冲击负荷性质和大小以及系统的条件也可适当变动,但应保证近区电力网、发电机组和用户的安全、稳定运行以及正常供电。

#### 4.2.6.4 频率偏差的调整

利用发电机组的调速器来调整频率偏差。对企业用户来讲,有功功率的冲击负荷一般由电力系统来承担。

### 4.3 无功补偿

#### 4.3.1 设计原则

GB 50052—2009 规定:

- 6.0.1 供配电系统设计中应正确选择电动机、变压器的容量,并应降低线路感抗,当工艺条件允许时,宜采用同步电动机或选用带空载切除的间歇工作制设备。
- 6.0.2 当采用提高自然功率因数措施后,仍达不到电网合理运行要求时,应采用并联电力电容器作为无功补偿装置。
- 6.0.4 采用并联电力电容器作为无功补偿装置时,宜就地平衡补偿,并符合下列要求:
  - 1 低压部分的无功功率,应由低压电容器补偿。
  - 2 高压部分的无功功率,宜由高压电容器补偿。
  - 3 容量较大、负荷平稳且经常使用的用电设备的无功功率,宜单独就地补偿。
  - 4 补偿基本无功功率的电容器组,应在配变电站内集中补偿。
  - 5 在环境正常的建筑物内,低压电容器宜分散设置。
- 6.0.12 接在电动机控制设备侧电容器的额定电流,不应超过电动机励磁电流的 0.9 倍;过电流保护装置的整定值,应按电动机-电容器组的电流确定。

说明:对于电动机-电容器组的接线来说,当电源断开后,电动机相当于一台不并网的异步发电机,其励磁电流由电容器提供。为了使自激过电压不致太高,故规范规定电容器的额定电流不超过电动机励磁电流的 0.9 倍。一般电动机的励磁电流约为电动机额定电流( $I_N$ )的 25%~30%,则电容器的额定电流为 $I_c = 0.9(25\% \sim 30\%)I_N$ ,即

$I_c = (0.225 \sim 0.27) I_N$ ，也就是  $Q_c = (0.225 \sim 0.27) Q_N$ 。现取电动机的  $\cos\varphi = 0.8$ ， $\eta = 0.9$ ， $S_N = \frac{P_N}{\cos\varphi\eta} = 1.39P_N$ ，故电容器容量

$$\begin{aligned} Q_c &= (0.225 \sim 0.27) \times 1.39P_N \\ &= (0.313 \sim 0.375) P_N \end{aligned}$$

《钢铁企业电力设计手册》下册 28.6.2.5 节取  $Q_c \approx 0.35P_N$ 。

#### 4.3.2 接入电网的基本要求

GB 50227—2008 规定：

3.0.2 变电站的电容器安装容量，应根据本地区电网无功规划和国家现行标准中有关规定经计算后确定，也可根据有关规定按变压器容量进行估算。用户的并联电容器安装容量，应满足就地平衡的要求。

3.0.3 并联电容器分组容量的确定应符合下列规定：

1 在电容器分组投切时，母线电压波动应满足国家现行有关标准的要求，并应满足系统无功功率和电压调控要求。

2 当分组电容器按各种容量组合运行时，应避免谐振容量，不得发生谐波的严重放大和谐振，电容器支路的接入所引起的各侧母线的任何一次谐波量均不应超过现行国家标准《电能质量 公用电网谐波》GB/T 14549 的有关规定。

3 发生谐振的电容器容量，可按下列式计算：

$$Q_{cx} = S_d \left( \frac{1}{n^2} - K \right) \quad (3.0.3)$$

式中：

$Q_{cx}$ ——发生  $n$  次谐波谐振的电容器容量，Mvar；

$S_d$ ——并联电容器装置安装处的母线短路容量，MV·A；

$n$ ——谐波次数，即谐波频率与电网基波频率之比；

$K$ ——电抗率。

3.0.4 并联电容器装置宜装设在变压器的主要负荷侧。当不具备条件时，可装设在三绕组变压器的低压侧。

3.0.5 当配电站中无高压负荷时，不宜在高压侧装设并联电容器装置。

#### 4.3.3 补偿容量的计算

##### 4.3.3.1 按计算负荷求补偿容量

GB 50052—2009 规定：

6.0.5 无功补偿容量，宜按无功功率曲线或按以下公式确定：

$$Q_c = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (6.0.5)$$

式中：

$Q_c$ ——无功补偿容量，kvar；

$P$ ——用电设备的计算有功功率，kW；

$\tan\varphi_1$ ——补偿前用电设备自然功率因数的正切值；

$\tan\varphi_2$ ——补偿后用电设备功率因数的正切值，取  $\cos\varphi_2$  不小于 0.9 值。

#### 4.3.3.2 按平均负荷求补偿容量 (《钢铁企业电力设计手册》)

按平均负荷计算补偿容量可按式:

$$Q_c = \alpha P_{30} (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (10-2)$$

式中:

$Q_c$ ——需要补偿的无功容量, kvar;

$P_{30}$ ——全企业的有功计算负荷, kW;

$\alpha$ ——平均负荷系数, 取 0.7~0.8;

$\tan\varphi_1$ 、 $\tan\varphi_2$ ——补偿前后的计算负荷功率因数角的正切值。

#### 4.3.3.3 欠补偿与过补偿

(1) 欠补偿。如图 4-3-1 所示

$$\tan\varphi_1 = \frac{Q_1}{P}$$

$$\tan\varphi_2 = \frac{Q_2}{P}$$

欠补偿时, 补偿后的功率因数滞后,  $\varphi_2$ 角为正, 故补偿容量为

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$$

(2) 过补偿。如图 4-3-2 所示

$$\tan\varphi_1 = \frac{Q_1}{P}$$

$$\tan\varphi_2 = \frac{Q_2}{P}$$

过补偿时, 补偿后的功率因数超前,  $\varphi_2$ 角为负, 故补偿容量为

$$\begin{aligned} Q_c &= P[\tan\varphi_1 - (-\tan\varphi_2)] \\ &= P(\tan\varphi_1 + \tan\varphi_2) \end{aligned}$$

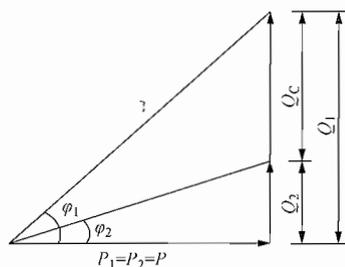


图 4-3-1 欠补偿

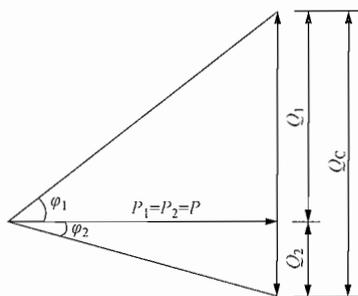


图 4-3-2 过补偿

#### 4.3.4 并联电容器装置的接线方式

GB 50227—2008《并联电容器装置设计规范》规定:

4.1.1 并联电容器装置的分组回路可采用直接接入母线, 并经总回路接入变压器的接线方式 (见图 4.1.1-1 和图 4.1.1-2)。当同级电压母线上有供电线路, 经技术经济比较合理时, 也可采用设置电容器专用母线的接线方式 (见图 4.1.1-3)。

4

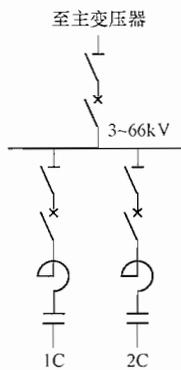


图 4.1.1-1 同级电压母线上无供电线路时的接线方式

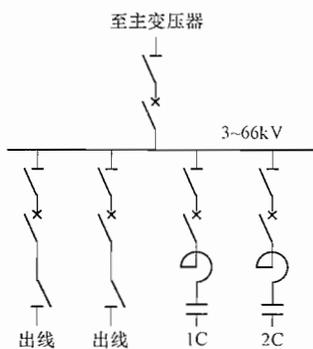


图 4.1.1-2 同级电压母线上有供电线路时的接线方式

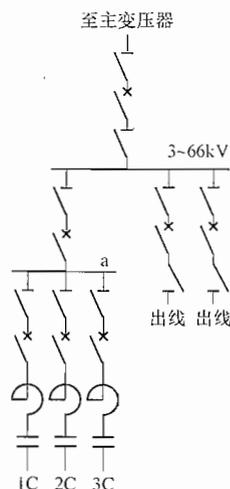


图 4.1.1-3 设置电容器专用母线的接线方式  
a—电容器专用母线

#### 4.1.2 并联电容器组的接线方式应符合下列规定：

- 1 并联电容器组应采用星形接线。在中性点非直接接地的电网中，星形接线电容器组的中性点不应接地。
- 2 并联电容器组的每相或每个桥臂，由多台电容器串并联组合连接时，宜采用先并联后串联的连接方式。
- 3 每个串联段的电容器并联总容量不应超过 3900kvar。

#### 4.1.3 低压并联电容器装置可与低压供电柜同接一条母线。低压电容器或电容器组，可采用三角形接线或星形接线方式。

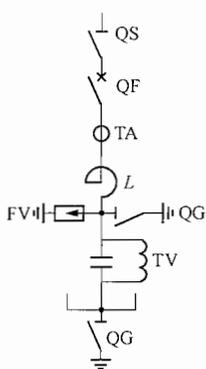


图 4.2.1 并联电容器组与配套设备连接方式

#### 4.3.5 并联电容器装置的配套设备及其连接

GB 50227—2008 规定：

##### 4.2.1 并联电容器装置应装设下列配套设备（见图 4.2.1）：

- 1 隔离开关、断路器；
- 2 串联电抗器（含阻尼式限流器）；
- 3 操作过电压保护用避雷器；
- 4 接地开关；
- 5 放电器件；
- 6 继电保护、控制、信号和电测量用一次及二次设备；
- 7 单台电容器保护用外熔断器，应根据保护需要和单台电容器容量配置。

##### 4.2.2 并联电容器装置分组回路的断路器，应装设于电容器组的电源侧。

##### 4.2.3 并联电容器装置的串联电抗器宜装设于电容器的电源侧，并应校验其耐受短路电流的能力。当油浸式铁心电抗器和干式铁心电抗器的耐受短路电流的能力不能满足装

设电源侧时，应装设于中性点侧。

4.2.4 电容器配置外熔断器时，每台电容器应配置一个专用熔断器。

4.2.5 电容器的外壳直接接地时，外熔断器应串接在电容器的电源侧。电容器装设于绝缘框（台）架上且串联段数为 2 段及以上时，至少应有一个串联段的外熔断器串接于电容器的电源侧。

4.2.6 并联电容器装置的放电线圈接线应符合下列规定：

- 1 放电线圈与电容器宜采用直接并联接线。
- 2 严禁放电线圈一次绕组中性点接地。

4.2.7 并联电容器装置宜在其电源侧和中性点侧设置检修接地开关，当中性点侧装设接地开关有困难时，也可采用其他检修接地措施。

4.2.8 并联电容器装置应装设抑制操作过电压的避雷器，避雷器连接方式应符合下列规定：

- 1 避雷器连接应采用相对地方式（见图 4.2.8）。
- 2 避雷器接入位置应紧靠电容器组的电源侧。
- 3 不得采用三台避雷器星形连接后经第四台避雷器接地的接线方式。

4.2.9 低压并联电容器装置宜装设下列配套元件（见图 4.2.9）；当采用的电容器投切器件具有限制涌流功能和电容器柜有谐波超值保护时，可不装设限流线圈和过载保护器件：

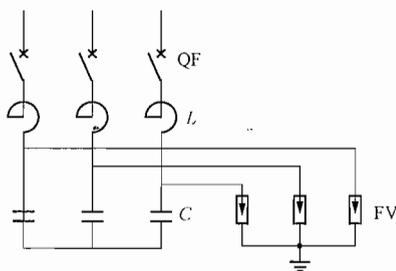


图 4.2.8 相对地避雷器接线

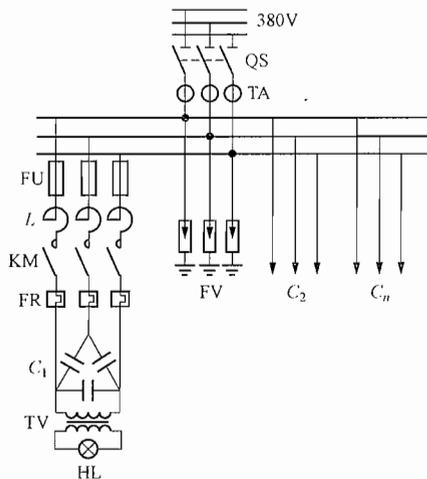


图 4.2.9 低压并联电容器装置元件配置接线

注：回路元件配置同图左侧。

- 1 总回路刀开关和分回路投切器件；
  - 2 操作过电压保护用避雷器；
  - 3 短路保护用熔断器；
  - 4 过载保护器件；
  - 5 限流线圈；
  - 6 放电器件；
  - 7 谐波含量超限保护、自动投切控制器、保护元件、信号和测量表计等配套器件。
- 4.2.10 低压电容器装设的外部放电器件，可采用三角形接线或星形接线，并应直接与电容器（组）并联连接。

### 4.3.6 并联电容器装置的主要电气设备

GB 50227—2008 规定：

#### 5.2 电容器

##### 5.2.1 电容器选型应符合下列规定：

1 组成并联电容器装置的电容器，可选用单台电容器、集合式电容器、自愈式电容器。单组容量较大时，宜选用单台容量为 500kvar 及以上的电容器。

2 电容器的温度类别应根据安装地点的环境空气温度或屋内冷却空气温度选择。

3 安装在严寒、高海拔、湿热带等地区 and 污秽、易燃、易爆等环境中的电容器，应满足环境条件的特殊要求。

##### 5.2.2 电容器额定电压选择，应符合下列要求：

1 宜按电容器接入电网处的运行电压进行计算。

2 电容器应能承受 1.1 倍长期工频过电压。

3 应计入串联电抗器引起的电容器运行电压升高。接入串联电抗器后，电容器运行电压应按下式计算：

$$U_c = \frac{U_s}{\sqrt{3}S} \cdot \frac{1}{1-K} \quad (5.2.2)$$

式中：

$U_c$ ——电容器的运行电压，kV；

$U_s$ ——并联电容器装置的母线运行电压，kV；

$S$ ——电容器组每相的串联段数；

$K$ ——电抗率。

5.2.3 电容器的绝缘水平，应按电容器接入电网处的电压等级、由电容器组接线方式确定的串并联组合、安装方式要求等，根据电容器产品标准选取。

5.2.4 单台电容器额定容量选择，应根据电容器组容量和每相电容器的串联段数和并联台数确定，并宜在电容器产品额定容量系列的优先值中选取。

#### 5.3 断路器

5.3.1 用于并联电容器装置的断路器选型，应采用真空断路器或 SF<sub>6</sub> 断路器等适合于电容器组投切的设备，其技术性能应符合断路器共用技术要求，尚应满足下列特殊要求：

1 应具备频繁操作的性能。

2 合、分时触头弹跳不应大于限定值，开断时不应出现重击穿。

3 应能承受电容器组的关合涌流和工频短路电流以及电容器高频涌流的联合作用。

5.3.2 并联电容器装置总回路中的断路器，应具有切除所连接的全部电容器组和开断总回路短路电流的性能。分组回路断路器可采用不承担开断短路电流的开关设备。

5.3.3 低压并联电容器装置中的投切开关宜采用具有选项功能和功耗较小的开关器件。当采用普通开关时，其接通、分断能力和短路强度等技术性能，应符合设备装设点的电网条件；切除电容器时，并关不应发生重击穿；投切开关应具有频繁作操作的性能。

#### 5.4 熔断器

5.4.1 用于单台电容器保护的外熔断器选型时，应采用电容器专用熔断器。

5.4.2 用于单台电容器保护的外熔断器的熔丝额定电流，应按电容器额定电流的

1.37~1.50 倍选择。

5.4.3 用于单台电容器保护的外熔断器的额定电压、耐受电压、开断性能、熔断性能、耐爆能量、抗涌流能力、机械强度和电气寿命等，应符合国家现行有关标准的规定。

#### 5.5 串联电抗器

5.5.1 串联电抗器选型时，选用干式电抗器或油浸式电抗器，应根据工程条件经技术经济比较确定。

安装在屋内的串联电抗器，宜采用设备外漏磁场较弱的干式铁心电抗器或类似产品。

5.5.2 串联电抗器电抗率选择，应根据电网条件与电容器参数经相关计算分析确定，电抗率取值范围应符合下列规定：

1 仅用于限制涌流时，电抗率宜取 0.1%~1.0%。

2 用于抑制谐波时，电抗率应根据并联电容器装置接入电网处的背景谐波含量的测量值选择。当谐波为 5 次及以上时，电抗率宜取 4.5%~5.0%；当谐波为 3 次及以上时，电抗率宜取 12.0%，亦可采用 4.5%~5.0% 与 12.0% 两种电抗率混装方式。

#### 5.6 放电器件

5.6.1 放电线圈选型时，应采用电容器组专用的油浸式或干式放电线圈产品。油浸式放电线圈应为全密封结构，产品内部压力应满足使用环境温度变化的要求，在最低环境温度下运行时不得出现负压。

5.6.2 放电线圈的额定一次电压应与所并联的电容器组的额定电压一致。

5.6.4 放电线圈的最大配套电容器容量（放电容量），不应小于与其并联的电容器组容量；放电线圈的放电时间应能满足电容器组断开电源后，在 5s 内将电容器组的剩余电压降至 50V 及以下。

5.6.5 放电线圈带有二次线圈时，其额定输出、准确级，应满足保护和测量的要求。

5.6.6 低压并联电容器装置的放电器件应满足电容器断电后，在 3min 内将电容器的剩余电压降至 50V 及以下；当电容器再次投入时，电容器端子上的剩余电压不应超过额定电压的 0.1 倍。

#### 5.7 避雷器

5.7.1 用于并联电容器装置操作过电压保护的避雷器，应采用无间隙金属氧化物避雷器。

5.7.2 用于并联电容器操作过电压保护的避雷器的参数选择，应根据电容器组参数和避雷器接线方式确定。

### 4.3.7 并联电容器组保护和投切装置

#### 4.3.7.1 保护装置

GB 50227—2008 规定：

6.1.1 单台电容器内部故障保护方式（内熔丝、外熔断器和继电保护），应在满足并联电容器组安全运行的条件下，根据各地的实践经验配置。

6.1.2 并联电容器组（内熔丝、外熔断器和无熔丝）均应设置不平衡保护。不平衡保护应满足可靠性和灵敏度要求，保护方式可根据电容器组接线在下列方式中选取：

- 1 单星形电容组，可采用开口三角电压保护（见图 6.1.2-1）。
- 2 单星形电容器组，串联段数为两段及以上时，可采用相电压差动保护（见图 6.1.2-2）。
- 3 单星形电容器组，每相能接成四个桥臂时，可采用桥式差电流保护（见图 6.1.2-3）。

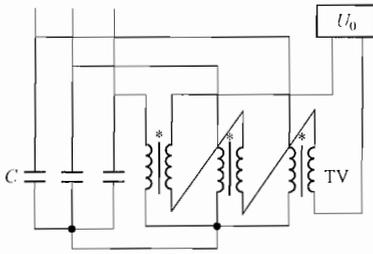


图 6.1.2-1 单星形电容器组开口三角电压保护原理接线

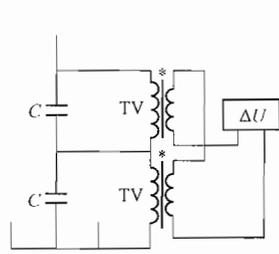


图 6.1.2-2 单星形电容器组相电压差动保护原理接线

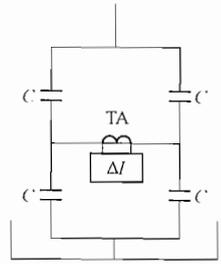


图 6.1.2-3 单星形电容器组桥式差电流保护原理接线

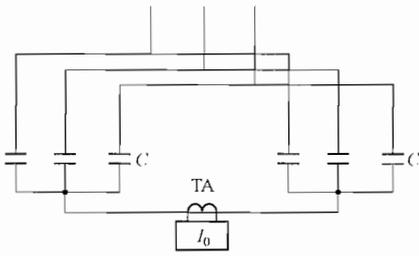


图 6.1.2-4 双星形电容器组中性点不平衡电流保护原理接线

4 双星形电容器组，可采用中性点不平衡电流保护（见图 6.1.2-4）。

5 不平衡保护的整定值应按电容器组运行的安全性、保护动作的可靠性和灵敏性，并根据不同保护方式进行计算确定。

6.1.3 并联电容器装置应设置速断保护，保护应动作于跳闸。速断保护的動作電流值，按最小运行方式下，在电容器组端部引线发生两相短路时，保护的灵敏系数应符合继电保护要求；速断保护的動作時限，应大于电容器组的合闸涌流

时间。

6.1.4 并联电容器装置应装设过电流保护，保护应动作于跳闸。过电流保护的動作電流值，应按大于电容器组的长期允许最大过电流整定。

6.1.5 并联电容器装置应装设母线过电压保护，保护应带时限动作于信号或跳闸。

6.1.6 并联电容器装置应装设母线失电压保护，保护应带时限动作于跳闸。

6.1.7 并联电容器装置的油浸式串联电抗器，其容量为  $0.18\text{MV}\cdot\text{A}$  及以上时，宜装设瓦斯保护。当油箱内故障产生轻微瓦斯或油面下降时，应瞬时动作于信号；当油箱内故障产生大量瓦斯时，应瞬时动作于断路器跳闸。

干式串联电抗器，宜根据具体条件设置保护。

6.1.8 电容器组的电容器外壳直接接地时，宜装设电容器组接地保护。

6.1.9 集合式电容器应装设压力释放和温控保护，压力释放动作于跳闸，温控动作于信号。

6.1.10 低压并联电容器装置，应有短路保护、过电流保护、过电压保护和失电压保护，并宜装设谐波超值保护。

#### 4.3.7.2 投切装置

GB 50052—2009《供配电系统设计规范》规定：

6.0.7 无功补偿装置的投切方式，具有下列情况之一时。宜采用手动投切的无功补偿装置：

- 1 补偿低压基本无功功率的电容器组。
- 2 常年稳定的无功功率。
- 3 经常投入运行的变压器或每天投切次数少于三次的高压电动机及高压电容器组。

6.0.8 无功补偿装置的投切方式，具有下列情况之一时，宜装设无功自动补偿装置：

- 1 避免过补偿，装设无功自动补偿装置在经济上合理时。
- 2 避免在轻载时电压过高，造成某些用电设备损坏，而装设无功自动补偿装置在经济上合理时。
- 3 只有装设无功自动补偿装置才能满足在各种运行负荷的情况下的电压偏差允许值时。

6.0.9 当采用高、低压自动补偿装置效果相同时，宜采用低压自动补偿装置。

6.0.10 无功自动补偿的调节方式，宜根据下列要求确定：

- 1 以节能为主进行补偿时，宜采用无功功率参数调节；当三相负荷平衡时，亦可采用功率因数参数调节。
- 2 提供维持电网电压水平所必要的无功功率及以减少电压偏差为主进行补偿时，应按电压参数调节，但已采用变压器自动调压者除外。
- 3 无功功率随时间稳定变化时，宜按时间参数调节。

GB 50227—2008《并联电容器装置设计规范》规定：

6.2.3 变电站中有两种电抗率的并联电容器装置时，其中12%的装置应具有先投后切的功能。

6.2.4 并联电容器的投切装置严禁设置自动重合闸。

# 110kV 及以下变配电站站址选择及电气设备布置

## 5.1 变配电站站址选择

### 5.1.1 35 ~ 110kV 变电站站址选择和站区布置

GB 50059—2011《35kV ~ 110kV 变电站设计规范》规定:

2.0.1 变电站站址的选择,应符合现行国家标准《工业企业总平面设计规范》GB 50187 的有关规定,并应符合下列要求:

- 1 应靠近负荷中心。
- 2 变电站布置应兼顾规划、建设、运行、施工等方面的要求,宜节约用地。
- 3 应与城乡或工矿企业规划相协调,并应便于架空和电缆线路的引入和引出。
- 4 交通运输应方便。
- 5 周围环境宜无明显污秽。空气污秽时,站址宜设在受污染源影响最小处。
- 6 变电站应避免与邻近设施之间的相互影响,应避免火灾、爆炸及其他敏感设施。

与爆炸危险性气体区域邻近的变电站站址选择及其设计应符合现行国家标准《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》GB 50058 的有关规定。

【编者按:GB 50058—2014 改名称为《爆炸危险环境电力装置设计规范》。】

7 应具有适宜的地质、地形和地貌条件,站址宜避免选在有重要文物或开采后对变电站有影响的矿藏地点。无法避免时,应征得有关部门的同意。

8 站址标高宜在 50 年一遇高水位上。无法避免时,站区应有可靠的防洪措施或与地区(工业企业)的防洪标准相一致,并应高于内涝水位。

9 变电站主体建筑应与周边环境相协调。

2.0.4 变电站主变压器布置除应运输方便外,并应布置在运行噪声对周边环境影响较小的位置。

2.0.5 屋外变电站实体围墙不应低于 2.2m。城区变电站、企业变电站围墙形式应与周围环境相协调。

2.0.6 变电站内为满足消防要求的主要道路宽度应为 4.0m。主要设备运输道路的宽度可根据运输要求确定,并应具备回车条件。

2.0.7 变电站的场地设计坡度,应根据设备布置、土质条件、排水方式确定。坡度宜为 0.5% ~ 2%,且不应小于 0.3%;平行于母线方向的坡度。应满足电气及结构布置的要求。道路最大坡度不宜大于 6%。当利用路边明沟排水时,沟的纵向坡度不宜小于 0.5%,局部困难地段不应小于 0.3%。

电缆沟及其他类似沟道的沟底纵坡,不宜小于 0.5%。

2.0.8 变电站内的建筑物标高、基础埋深、路基和管线埋深，应相互配合；建筑物内地面标高，宜高出屋外地面0.3m，屋外电缆沟壁，宜高出地面0.1m。

### 5.1.2 20kV 及以下变配电站站址选择

GB 50053—2013《20kV 及以下变配电站设计规范》规定：

2.0.1 变电站的站址应根据下列要求，经技术经济等因素综合分析和比较后确定：

- 1 宜接近负荷中心。
- 2 宜接近电源侧。
- 3 应方便进出线。
- 4 应方便设备运输。
- 5 不应设在有剧烈振动或高温的场所。

6 不宜设在多尘或有腐蚀性物质的场所，当无法远离时，不应设在污染源盛行风向的下风侧，或应采取有效的防护措施；

7 不应设在厕所、浴室、厨房或其他经常积水场所的正下方处，也不宜设在与上述场所相贴邻的地方。当贴邻时，相邻的隔墙应做无渗漏、无结露的防水处理。

8 当与有爆炸或火灾危险的建筑物毗连时，变电所的所址应符合现行国家标准《爆炸和火灾危险环境电力装置设计规范》GB 50058 的有关规定。

【编者按：GB 50058—2014 改名称为《爆炸危险环境电力装置设计规范》。】

9 不应设在地势低洼和可能积水的场所。

10 不宜设在对防电磁干扰有较高要求的设备机房的正上方、正下方或与其贴邻的场所，当需要设在上述场所时，应采取防电磁干扰的措施。

2.0.2 油浸变压器的车间内变电站，不应设在三、四级耐火等级的建筑物内；当设在二级耐火等级的建筑物内时，建筑物应采取局部防火措施。

2.0.3 在多层建筑物或高层建筑物的裙房中，不宜设置油浸变压器的变电站。当受条件限制必须设置时，应将油浸变压器的变电站设置在建筑物首层靠外墙的部位，且不得设置在人员密集场所的正上方、正下方、贴邻处以及疏散出口的两旁。高层主体建筑内不应设置油浸变压器的变电站。

2.0.4 在多层或高层建筑物的地下层设置非充油电气设备的配电站、变电站时，应符合下列规定：

1 当有多层地下层时，不应设置在最底层；当只有地下一层时，应采取抬高地面和防止雨水、消防水等积水的措施。

2 应设置设备运输通道。

3 应根据工作环境要求加设机械通风、去湿设备或空气调节设备。

2.0.5 高层或超高层建筑物根据需要可以在避难层、设备层和屋顶设置配电站、变电站，但应设置设备的垂直搬运及电缆敷设的措施。

2.0.6 露天或半露天的变电站，不应设置在下列场所：

- 1 有腐蚀性气体的场所；
- 2 挑檐为燃烧体或难燃体和耐火等级为四级的建筑物旁；
- 3 附近有棉、粮及其他易燃、易爆物品集中的露天堆场；

4 容易沉积可燃粉尘、可燃纤维、灰尘或导电尘埃且会严重影响变压器安全运行的场所。

### 5.1.3 爆炸性环境变配电站站址选择

GB 50058—2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》规定：

5.3.5 变电站、配电站和控制室的设计符合下列规定：

1 变电站、配电站（包括配电室，下同）和控制室应布置在爆炸性环境以外，当为正压室时，可布置在1区、2区内。

2 对于可燃物质比空气重的爆炸性气体环境，位于爆炸危险区附加2区的变电站、配电站和控制室的电气和仪表的设备层地面应高出室外地面0.6m。

### 5.1.4 民用建筑配变电站的站址选择

JGJ 16—2008 规定：

4.2.1 配变电站位置选择，应根据下列要求综合确定：

1 深入或接近负荷中心。

2 进出线方便。

3 接近电源侧。

4 设备吊装、运输方便。

5 不应设在有剧烈振动或有爆炸危险介质的场所。

6 不宜设在多尘、水雾或有腐蚀性气体的场所，当无法远离时，不应设在污染源的下风侧。

7 不应设在厕所、浴室、厨房或其他经常积水场所的正下方，且不宜与上述场所贴邻。如果贴邻，相邻隔墙应做无渗漏、无结露等防水处理。

8 配变电站为独立建筑物时，不应设置在地势低洼和可能积水的场所。

4.2.2 配变电站可设置在建筑物的地下层，但不宜设置在最低层。配变电站设置在建筑物地下层时，应根据环境要求加设机械通风、去湿设备或空气调节设备。当地下只有一层时，尚应采取预防洪水、消防水或积水从其他渠道淹渍配变电站的措施。

4.2.3 民用建筑宜集中设置配变电站，当供电负荷较大、供电半径较长时，也可分散设置，高层建筑可分设在避难层、设备层及屋顶层等处。

4.2.4 住宅小区可设独立式配变电站，也可附设在建筑物内或选用户外预装式变电站。

## 5.2 变配电站型式

### 5.2.1 35~110kV 变电站型式

(1) 35~110kV 降压变电站一般为独立布置。

(2) 对用电负荷很大的车间，如采用高压深入，35~110kV 也可成为附设式的车间变电站。

(3) 35/10(6)kV 变电站分为屋外式和屋内式，由于一般都采用成套高压柜，故宜采

用屋内式。这样既节省土地，又便于运行维护。

(4) 110kV 配电装置一般采用屋外式。在空气污秽地区或用地受到限制地区，66 ~ 110kV 配电装置也可采用屋内式。

(5) 35 ~ 110kV 电力变压器一般布置在屋外，但为节约占地或避免环境污秽，也可布置在屋内。

(6) 控制室的布置应符合下列要求：

GB 50059—2011 规定：

3.9.1 有人值班变电站的控制室，应位于运行管理方便、电缆总长较短、朝向良好和便于观察屋外主要设备的位置。

3.9.2 控制屏、柜的排列布置，宜与配电装置的间隔排列次序相对应。

3.9.3 控制室的建筑，应按变电站的规划容量在第一期工程中一次建成，屏位应按规划容量确定，并应留有备用屏位的余地。

3.9.4 无人值班变电站不宜设专用的控制室。

## 5.2.2 20kV 及以下变电站型式

GB 50053—2013 《20kV 及以下变电站设计规范》规定：

4.1.1 变电站型式的选择应符合下列规定：

1 负荷较大的车间和动力站房，宜设附设变电站、户外预装式变电站或露天、半露天变电站。

2 负荷较大的多跨厂房，负荷中心在厂房的中部且环境许可时，宜设车间内变电站或预装式变电站。

3 高层或大型民用建筑内，宜设户内变电站或预装式变电站；

4 负荷小而分散的工业企业，民用建筑和城市居住区，宜设独立变电站或户外预装式变电站。当条件许可时，也可设附设变电站。

5 城镇居民区、农村居民区和工业企业的生活区，宜设户外预装式变电站。当环境允许且变压器容量小于或等于400kVA时，可设杆上式变电站。

各种型式变电站的名称解释如下（GB 50053—2003 4.1.1 条条文说明）：

(1) 露天变电站：变压器位于露天地面上的变电站。

(2) 半露天变电站：变压器位于露天地面上的变电站，但变压器的上方有顶板或挑檐。

(3) 附设变电站，变电站的一面或数面墙与建筑物的墙共用，且变压器室的门和通风窗通向建筑物外。

(4) 车间内变电站：位于车间内部的变电站，且变压器室的门向车间内开。

(5) 独立变电站：变电站为一座独立建筑物。

(6) 预装式变电站：预装的并经过型式试验的成套设备，通常由高压配电装置、变压器和低压配电装置组成，并组合在一个或数个箱体内。

(7) 杆上式变电站：安装在一根或多根电杆上的户外变电站。

## 5.3 变配电站的布置设计

### 5.3.1 高压配电装置的型式及布置

#### 5.3.1.1 35~110kV 配电装置的型式布置

GB 50060—2008《3kV~110kV 高压配电装置设计规范》规定：

5.2.1 配电装置型式的选择，应根据设备选型及进出线方式，结合工程实际情况，并与工程总体布置协调，通过技术经济比较确定。在技术经济合理时，应采用占地少的配电装置型式。

5.2.2 66kV~110kV 配电装置宜采用敞开式中型配电装置或敞开式半高型配电装置。

5.2.3 IV级污秽地区、大城市中心地区、土石方开挖工程量大的山区，66kV~110kV 配电装置，宜采用屋内敞开式配电装置；当技术经济合理时，也可采用气体绝缘金属封闭开关设备配电装置。

5.2.4 地震烈度为9度及以上地区的110kV 配电装置宜采用气体绝缘金属封闭开关设备配电装置。

5.3.1 配电装置的布置应结合接线方式、设备型式以及工程总体布置综合因素确定。

5.3.2 3kV~35kV 配电装置采用金属封闭高压开关设备时，应采用屋内布置。

5.3.3 35kV~110kV 配电装置，双母线接线，当采用软母线配普通双柱式或单柱式隔离开关时，屋外敞开式配电装置宜采用中型布置，断路器宜采用单列式布置或双列式布置。

110kV 配电装置，双母线接线，当采用管型母线配双柱式隔离开关时，屋外敞开式配电装置宜采用半高型布置，断路器宜采用单列式布置。

5.3.4 35kV~110kV 配电装置，单母线接线，当采用软母线配普通双柱式隔离开关时，屋外敞开式配电装置应采用中型布置，断路器宜采用单列式布置或双列式布置。

5.3.5 110kV 配电装置，双母线接线，当采用管型母线配双柱式隔离开关时，屋内敞开式配电装置应采用双层布置，断路器宜采用双列式布置。

5.3.6 110kV 配电装置，气体绝缘金属封闭开关设备配电装置可采用户内或户外布置。

5.3.7 110kV 配电装置，当采用管型母线时，管型母线宜选用单管结构。管型母线固定方式可采用支持式。当地震烈度为8度及以上时，管型母线固定方式宜采用悬吊式。

配电装置布置型式的说明如下：

(1) 普通中型布置。一般母线下面不布置电气设备，这种布置检修维护方便，但占地较大，所有设备都安装在地面的支架上。

(2) 半高型布置。将母线及母线隔离开关抬高，将断路器、电流互感器、电压互感器等布置在母线的下面。这种布置紧凑、占地少，除设备上方有带电母线外，其他情况和中型布置相似。

#### 5.3.1.2 20kV 及以下配电装置的布置设计

GB 50053—2013 规定：

4.1.2 非充油的高、低压配电装置和非油浸型的电力变压器，可设置在同一房间内。当二者相互靠近布置时，应符合下列规定：

1 在配电室内相互靠近布置时，二者的外壳均应符合现行国家标准《外壳防护等级（IP 代码）》GB 4208 中 IP2X 防护等级的有关规定；

2 在车间内相互靠近布置时，二者的外壳均应符合现行国家标准《外壳防护等级（IP 代码）》GB 4208 中 IP3X 防护等级的有关规定。

4.1.3 户内变电站每台油量大于或等于 100kg 的油浸三相变压器应设在单独的变压器室内，并应有储油或挡油、排油等防火设施。

4.1.4 有人值班的变电站，应设单独的值班室。值班室应与配电室直通或经过通道相通，且值班室应有直接通向室外或通向变电站外走道的门。当低压配电室兼作值班室时，低压配电室的面积应适当增大。

4.1.5 变电站宜单层布置。当采用双层布置时，变压器应设在底层，设于二层的配电室应设搬运设备的通道、平台或孔洞。

4.1.6 高、低压配电室内，宜留有适当的配电装置备用位置。低压配电装置内，应留有适当数量的备用回路。

4.1.7 由同一配电站供给一级负荷用电的两回电源线路的配电装置，宜分开布置在不同的配电室；当布置在同一配电室时，配电装置宜分列布置；当配电装置并排布置时，在母线分段处应设置配电装置的防火隔板或有门洞的隔墙。

4.1.8 供给一级负荷用电的两回电源线路的电缆不宜通过同一电缆沟；当无法分开时，应采用阻燃电缆，且应分别敷设在电缆沟或电缆夹层的不同侧的桥（支）架上；当敷设在同一侧的桥（支）架上时，应采用防火隔板隔开。

### 5.3.2 并联电容器装置布置和安装

#### 5.3.2.1 一般规定

GB 50227—2008《并联电容器装置设计规定》规定：

8.1.1 并联电容器装置的布置和安装设计，应利于通风散热、运行巡视。便于维护检修和更换设备以及预留分期扩建条件。

8.1.2 并联电容器装置的布置形式，应根据安装地点的环境条件、设备性能和当地实践经验选择。一般地区宜采用屋外布置；严寒、湿热、风沙等特殊地区和污秽、易燃、易爆等特殊环境宜采用屋内布置。

屋内布置的并联电容器装置，应采取防止凝露引起污闪事故的安全措施。

8.1.4 供电线路的开关柜不宜与并联电容器装置布置在同一配电室中。

#### 5.3.2.2 布置和安装设计

GB 50227—2008 规定：

8.2.1 并联电容器组的布置，宜分相设置独立的框（台）架。当电容器台数较少或受到场地限制时，可设置三相共用的框架。

8.2.2 分层布置的 66kV 及以下电压等级的并联电容器组框（台）架，不宜超过 3 层，每层不应超过 2 排，四周和层间不得设置隔板。

## 8.2.3 并联电容器组的安装设计最小尺寸，应符合表 8.2.3 的规定。

表 8.2.3 并联电容器组安装设计最小尺寸（mm）

名称	电容器（屋外、屋内）		电容器底部距地面		框（台）架顶部至 屋内顶面净距
	间距	排间距离	屋外	屋内	
最小尺寸	70	100	300	200	1000

8.2.4 屋外或屋内布置的并联电容器组，应在其四周或一侧设置维护通道，维护通道的宽度不宜小于 1.2m。电容器在框（台）架上单排布置时，框（台）架可靠墙布置；电容器在框（台）架上双排布置时，框（台）架相互之间或与墙之间，应留出距离设置检修走道，走道宽度不宜小于 1m。

注：维护通道指正常运行时可使用的通道；检修走道指在停电后才能使用的走道。

8.3.1 油浸式铁心串联电抗器的安装布置，应符合下列要求：

- 1 宜布置在屋外，当污秽较重的工矿企业采用普通电抗器时，应布置在屋内。
- 2 屋内安装的油浸式铁心串联电抗器，其油量超过 100kg 时，应单独设置防爆间  
隔和储油设施。

8.3.2 干式空心串联电抗器的安装布置，应符合下列要求：

- 1 宜采用分相布置的水平排列或三角形排列。
- 2 当采用屋内布置时，应加大对周围的空间距离，并应避免靠近继电保护和微机监控等电气二次弱电设备。

8.3.3 干式空心串联电抗器布置与安装时，应满足防电磁感应要求。电抗器对其四周不形成闭合回路的铁磁性金属构件的最小距离以及电抗器相互之间的最小中心距离，均应满足下列要求：

- 1 电抗器对上部、下部和基础中的铁磁性构件距离，不宜小于电抗器直径的 0.5 倍。
- 2 电抗器中心对侧面的铁磁性构件距离，不宜小于电抗器直径的 1.1 倍。
- 3 电抗器相互之间的中心距离，不宜小于电抗器直径的 1.7 倍。

8.3.4 干式空心串联电抗器支承绝缘子的金属底座接地线，应采用放射形或开口环形。

8.3.5 干式空心串联电抗器组装的零部件，宜采用非导磁的不锈钢螺栓连接；当采用矩形母线与相邻设备连接时，矩形母线宜采用立式安装方式。

8.3.6 干式铁心电抗器应布置在屋内，安装时应满足产品的相关规定。

GB 50053—2013 规定：

5.3.1 高压电容器装置宜设置在单独的房间内，当采用非可燃介质的电容器且电容器组容量较小时，可设置在高压配电室内。

低压电容器装置可设置在低压配电室内，当电容器总容量较大时，宜设置在单独的房间内。

5.3.2 装配式电容器组单列布置时，网门与墙的距离不应小于 1.3m；当双列布置时，网门之间的距离不应小于 1.5m。

5.3.3 成套电容器柜单列布置时，柜前通道宽度不应小于1.5m；当双列布置时，柜面之间的距离不应小于2.0m。

### 5.3.3 低压配电设备的布置

#### 5.3.3.1 一般规定

GB 50054—2011《低压配电设计规范》规定：

4.1.1 配电室的位置应靠近用电负荷中心，设置在尘埃少、腐蚀介质少、周围环境干燥和无剧烈振动的场所，并宜留有发展余地。

4.1.2 配电设备的布置应遵循安全、可靠、适用和经济等原则，并应便于安装、操作、搬运、检修、试验和监测。

4.1.3 配电室内除本室需用的管道外，不应有其他的管道通过。室内水、汽管道上不应设置阀门和中间接头；水、汽管道与散热器的连接应采用焊接，并应做等电位连接。配电屏上、下方及电缆沟内不应敷设水、汽管道。

#### 5.3.3.2 布置和安全措施

GB 50054—2011 规定：

4.2.1 落地式配电箱的底部应抬高，高出地面的高度室内不应低于50mm，室外不应低于200mm；其底座周围应采取封闭措施，并应能防止鼠、蛇类等小动物进入箱内。

4.2.2 同一配电室内相邻的两段母线，当任一段母线有一级负荷时，相邻的两段母线之间应采取防火措施。

4.2.3 高压及低压配电设置在同一室内，且两者有一侧柜顶有裸露的母线时，两者之间的净距不应小于2m。

4.2.4 成排布置的配电屏，其长度超过6m时，屏后的通道应设2个出口，并宜布置在通道的两端；当两出口之间的距离超过15m时，其间尚应增加出口。

### 5.3.4 气体绝缘金属封闭设备（GIS）配电装置

GB 50060—2008 规定：

6.0.1 采用电气绝缘金属封闭开关设备的配电装置，接地开关的配置应满足运行检修的要求。

6.0.2 与气体绝缘金属封闭开关设备配电装置连接并需要单独检修的电气设备、母线和出线，均应配置接地开关。

出线回路的线路侧接地开关应采用具有关合短路电流能力的快速接地开关。

6.0.3 气体绝缘金属封闭开关设备配电装置母线需装设避雷器时，避雷器和电压互感器可合设一组隔离开关或隔离断口。

6.0.4 气体绝缘金属封闭开关设备配电装置，应在气体绝缘金属封闭开关设备套管与架空线路连接处装设避雷器，避雷器宜采用敞开式金属氧化物避雷器。

6.0.5 气体绝缘金属封闭开关设备配电装置宜采用多点接地方式。外壳和支架上的感应电压，正常运行条件下不应大于24V，故障条件下不应大于100V。

6.0.6 在气体绝缘金属封闭开关设备配电装置内，应设置一条贯穿所有气体绝缘金属封闭开关设备间隔的接地母线或环形接地母线。

6.0.7 气体绝缘金属封闭开关设备配电装置每间隔应分为若干个隔室，隔室的分隔应满足正常运行条件和间隔元件设备检修要求。

### 5.3.5 变配电站的通道与围栏

GB 50060—2008 规定：

5.4.2 中型布置的屋外配电装置内的检修、维护用环形道路宽度不宜小于 3000mm。成环有困难时，应具备回车条件。

5.4.3 屋外配电装置应设置巡视和操作道路。可利用地面电缆沟的布置作为巡视路线。

5.4.4 屋内配电装置采用金属封闭开关设备时，屋内各种通道的最小宽度（净距），应符合表 5.4.4 的规定。

表 5.4.4 配电装置屋内各种通道的最小宽度（净距）（mm）

布置方式	通道分类	维护通道	操作通道	
			固定式	移开式
设备单列布置时		800	1500	单车长 + 1200
设备双列布置时		1000	2000	双车长 + 900

- 注：1. 通道宽度在建筑物的墙柱个别突出处，可缩小 200mm；  
2. 移开式开关柜不需要进行就地检修时，其通道宽度可适当减小；  
3. 固定式开关柜靠墙布置时，柜背离墙距离宜取 50mm；  
4. 当采用 35KV 开关柜时，柜后通道不宜小于 1000mm。

5.4.5 室内油浸变压器外廓与变压器室四周墙壁的最小净距应符合表 5.4.5 的规定。就地检修的室内油浸变压器，室内高度可按吊芯所需的最小高度再加 700mm，宽度可按变压器两侧各加 800mm。

表 5.4.5 屋内油浸变压器外廓与变压器室四壁的最小净距（mm）

变压器容量	1000kV·A 及以下	1250kV·A 及以上
变压器与后壁、侧壁之间	600	800
变压器与门之间	800	1000

5.4.6 设置于屋内的无外壳干式变压器，其外廓与四周墙壁的净距不应小于 600mm。干式变压器之间的距离不应小于 1000mm，并应满足巡视维修的要求。

5.4.7 66kV ~ 110kV 屋外配电装置，其周围宜设置高度不低于 1500mm 的围栏，并应在围栏醒目地方设置警示牌。

5.4.8 配电装置中电气设备的栅状遮栏高度不应小于 1200mm，栅状遮栏最低栏杆至地面的净距不应大于 200mm。

5.4.9 配电装置中电气设备的网状遮栏高度不应小于 1700mm，网状遮栏网孔不应大于 40mm × 40mm。围栏门应装锁。

5.4.10 在安装有油断路器的屋内间隔内应设置遮栏。就地操作的油断路器及隔离开

关,应在其操动机构处设置防护隔板。防护隔板的宽度应满足人员操作的范围要求,高度不应小于1900mm。

GB 50053—2013 规定:

4.2.2 露天或半露天变电站的变压器四周应设高度不低于1.8m的固定围栏或围墙,变压器外廓与围栏或围墙的净距不应小于0.8m,变压器底部距地面不应小于0.3m。油重小于1000kg的相邻油浸变压器外廓之间的净距不应小于1.5m;油重1000kg~2500kg的相邻油浸变压器外廓之间的净距不应小于3.0m;油重大于2500kg的相邻油浸变压器外廓之间的净距不应小于5m;当不能满足上述要求时,应设置防火墙。

4.2.3 当露天或半露天变压器供给一级负荷用电时,相邻油浸变压器的净距不应小于5m;当小于5m时,应设置防火墙。

4.2.5 设置在变电站内的非封闭式干式变压器,应装设高度不低于1.8m的固定围栏,围栏网孔不应大于40mm×40mm。变压器的外廓与围栏的净距不宜小于0.6m,变压器之间的净距不应小于1.0m。

4.2.6 配电装置的长度大于6m时,其柜(屏)后通道应设两个出口,当低压配电装置两个出口间的距离超过15m时应增加出口。

4.2.7 高压配电室内成排布置的高压配电装置,其各种通道的最小宽度,应符合表4.2.7的规定。

表4.2.7 高压配电室内各种通道的最小宽度(mm)

开关柜布置方式	柜后维护通道	柜前操作通道	
		固定式开关柜	移开式开关柜
单排布置	800	1500	单手车长度+1200
双排面对面布置	800	2000	双手车长度+900
双排背对背布置	1000	1500	单手车长度+1200

注:1 固定式开关柜为靠墙布置时,柜后与墙净距应大于50mm,侧面与墙净距宜大于200mm;

2 通道宽度在建筑物的墙面上有柱类局部凸出时,凸出部位的通道宽度可减少200mm;

3 当开关柜侧面需设置通道时,通道宽度不应小于800mm;

4 对全绝缘密封式成套配电装置,可根据厂家安装使用说明书减少通道宽度。

GB 50054—2011 规定:

4.2.5 当防护等级不低于现行国家标准《外壳防护等级(IP代码)》GB 4208 规定的IP2X级时,成排布置的配电屏通道最小宽度应符合表4.2.5的规定。

表4.2.5 成排布置的配电屏通道最小宽度(m)

配电屏种类		单排布置			双排面对面布置			双排背对背布置			多排同向布置			屏侧通道
		屏前	屏后		屏前	屏后		屏前	屏后		屏间	前、后排屏距墙		
			维护	操作		维护	操作		维护	操作		前排屏前	后排屏后	
固定式	不受限制时	1.5	1.0	1.2	2.0	1.0	1.2	1.5	1.5	2.0	2.0	1.5	1.0	1.0
	受限制时	1.3	0.8	1.2	1.8	0.8	1.2	1.3	1.3	2.0	1.8	1.3	0.8	0.8

续表

配电屏种类		单排布置			双排面对面布置			双排背对背布置			多排同向布置			屏侧通道
		屏前	屏后		屏前	屏后		屏前	屏后		屏间	前、后排屏距墙		
			维护	操作		维护	操作		维护	操作		前排屏前	后排屏后	
抽屉式	不受限制时	1.8	1.0	1.2	2.3	1.0	1.2	1.8	1.0	2.0	2.3	1.8	1.0	1.0
	受限制时	1.6	0.8	1.2	2.1	0.8	1.2	1.6	0.8	2.0	2.1	1.6	0.8	0.8

- 注：1 受限制时是指受到建筑平面的限制、通道内有柱等局部突出物的限制；  
 2 屏后操作通道是指需在屏后操作运行中的开关设备的通道；  
 3 背靠背布置时屏前通道宽度可按本表中双排背对背布置的屏前尺寸确定；  
 4 控制屏、控制柜、落地式动力配电箱前后的通道最小宽度可按本表确定；  
 5 挂墙式配电箱的箱前操作通道宽度，不宜小于1m。

4.2.6 配电室通道上方裸带电体距地面的高度不低于2.5m；当低于2.5m时，应设置不低于现行国家标准《外壳防护等级（IP代码）》GB 4208规定的IPXXB级或IP2X级的遮栏或外护物，遮栏或外护物底部距地面的高度不应低于2.2m。

JGJ 16—2008 规定：

4.5.9 变压器外廓（防护外壳）与变压器室墙壁和门的净距不应小于表4.5.9的规定。

4.5.10 多台干式变压器布置在同一房间内时，变压器防护外壳间的净距不应小于表4.5.10及图4.5.10-1和图4.5.10-2的规定。

表4.5.9 变压器外廓（防护外壳）与变压器室墙壁和门的最小净距（m）

项 目	变压器容量（kVA）	
	100~1000	1250~2500
油浸变压器外廓与后壁、侧壁净距	0.6	0.8
油浸变压器外廓与门净距	0.8	1.0
干式变压器带有IP2X及以上防护等级金属外壳与后壁、侧壁净距	0.6	0.8
干式变压器带有IP2X及以上防护等级金属外壳与门净距	0.8	1.0

注：表中各值不适用于制造厂的成套产品。

表4.5.10 变压器防护外壳间的最小净距（m）

项 目	变压器容量（kVA）		
	100~1000	1250~2500	
变压器侧面具有IP2X防护等级及以上的金属外壳	A	0.6	0.8
变压器侧面具有IP3X防护等级及以上的金属外壳	A	可贴邻布置	可贴邻布置
考虑变压器外壳之间有一台变压器拉出防护外壳	B <sup>①</sup>	变压器宽度 $b+0.6$	变压器宽度 $b+0.6$
不考虑变压器外壳之间有一台变压器拉出防护外壳	B	1.0	1.2

① 当变压器外壳的门为不可拆卸式时，其B值应是门扇的宽度c加变压器宽度b之和再加0.3m。

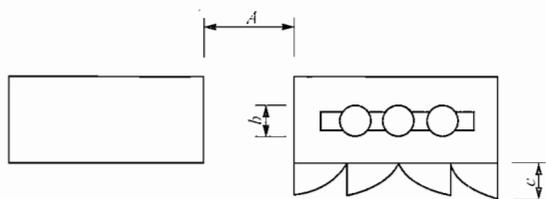


图 4.5.10-1 多台干式变压器之间 A 值

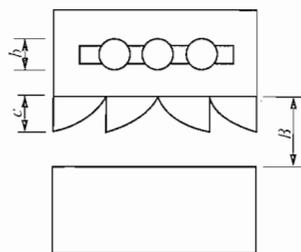


图 4.5.10-2 多台干式变压器之间 B 值

4.6.3 屋内配电装置距顶板的距离不宜小于 0.8m。当有梁时，距梁底不宜小于 0.6m。

4.7.4 成排布置的配电屏，其屏前和屏后的通道净宽不应小于表 4.7.4 的规定。

表 4.7.4 配电屏前后的通道净宽 (m)

装置种类	布置方式	单排布置		双排对面布置		双排背对背布置	
		屏前	屏后	屏前	屏后	屏前	屏后
固定式		1.5	1.0	2.0	1.0	1.5	1.5
抽屉式		1.8	1.0	2.3	1.0	1.8	1.0
控制屏(柜)		1.5	0.8	2.0	0.8	—	—

注：1. 当建筑物墙面遇有柱类局部凸出时，凸出部位的通道宽度可减少 0.2m；

2. 各种布置方式，屏端通道不应小于 0.8m。

### 5.3.6 变配电站防火与蓄油设施

GB 50060—2008 规定：

5.5.1 35kV 屋内敞开式配电装置的充油设备应安装在两侧有隔墙(板)的间隔内；66~110kV 屋内敞开式配电装置的充油设备应安装在有防爆隔墙的间隔内。

总油量超过 100kg 的屋内油浸电力变压器，应安装在单独的变压器间内，并应设置灭火设施。

5.5.2 屋内单台电气设备的油量在 100kg 以上时，应设置贮油设施或挡油设施。挡油设施的容积应按容纳 20% 油量设计，并应有将事故油排至安全处的设施；当不能满足上述要求时，应设置能容纳 100% 油量的贮油设施。

排油管的内径不应小于 150mm，管口应加装铁栅滤网。

5.5.3 屋外单台电气设备的油量在 1000kg 以上时，应设置贮油或挡油设施。当设置有容纳 20% 油量的贮油或挡油设施时，应设置将油排带安全处所的设施，且不应引起污染危害。

当不能满足上述要求时，应设置能容纳 100% 油量的贮油或挡油设施。贮油和挡油设施应大于设备外廓每边各 1000mm，四周应高出地面 100mm。贮油设施内应铺设卵石层，卵石层厚度不应小于 250mm，卵石直径为 50mm~80mm。

当设置有油水分离措施的总事故贮油池时，贮油池容量宜按最大一个油箱容量的60%确定。

5.5.4 油量为2500kg及以上的屋外油浸变压器之间的最小净距应符合表5.5.4的规定。

表5.5.4 屋外油浸变压器之间的最小净距（m）

电压等级	最小净距
35kV及以下	5
66kV	6
110kV	8

5.5.5 油量为2500kg及以上的屋外油浸变压器之间的防火间距不能满足表5.5.4的要求时，应设置防火墙。

防火墙的耐火极限不宜小于4h。防火墙的高度应高于变压器油枕，其长度应大于变压器贮油池两侧各1000mm。

5.5.6 油量在250kg及以上的屋外油浸变压器或电抗器与本回路油量为600kg~2500kg的充油电气设备之间的防火间距，不应小于5000mm。

5.5.7 在防火要求较高的场所，有条件时宜选用非油绝缘的电器设备。

GB 50053—2013 规定：

6.1.1 变压器室、配电室和电容器室的耐火等级不应低于二级。

6.1.2 位于下列场所的油浸变压器室的门应采用甲级防火门：

- 1 有火灾危险的车间内；
- 2 容易沉积可燃粉尘、可燃纤维的场所；
- 3 附近有粮、棉及其他易燃物大量集中的露天堆场；
- 4 民用建筑物内，门通向其他相邻房间；
- 5 油浸变压器室下面有地下室。

6.1.3 民用建筑内变电站防火门的设置应符合下列规定：

1 变电站位于高层主体建筑或裙房内时，通向其他相邻房间的门应为甲级防火门，通向过道的门应为乙级防火门；

2 变电站位于多层建筑物的二层或高层时，通向其他相邻房间的门应为甲级防火门，通向过道的门应为乙级防火门；

3 变电站位于单层建筑物内或多层建筑物的一层时，通向其他相邻房间或过道的门应为乙级防火门；

4 变电站位于地下层或下面有地下层时，通向其他相邻房间或过道的门应为甲级防火门；

5 变电站附近堆有易燃物品或通向汽车库的门应为甲级防火门；

6 变电站直接通向室外的门应为丙级防火门。

- 6.1.4 变压器室的通风窗应采用非燃烧材料。
- 6.1.5 当露天或半露天变电站安装油浸变压器，且变压器外廓与生产建筑物外墙的距离小于5m时，建筑物外墙在下列范围内不得有门、窗或通风孔：
- 1 油量大于1000kg时，在变压器总高度加3m及外廓两侧各加3m的范围内；
  - 2 油量小于或等于1000kg时，在变压器总高度加3m及外廓两侧各加1.5m的范围内。
- 6.1.6 高层建筑物的裙房和多层建筑物内的附设变电站及车间内变电站的油浸变压器室，应设置容量为100%变压器油量的储油池。
- 6.1.7 当设置容量不低于20%变压器油量的挡油设施时，应有能将油排到安全场所的设施。位于下列场所的油浸变压器室，应设置容量为100%变压器油量的储油池或挡油设施：
- 1 容易沉积可燃粉尘、可燃纤维的场所；
  - 2 附近有粮、棉及其他易燃物大量集中的露天场所；
  - 3 油浸变压器室下面有地下室。
- 6.1.8 独立变电站、附设变电站、露天或半露天变电站中，油量大于或等于1000kg的油浸变压器，应设置储油池或挡油设施，并应符合本规范第6.1.7条的有关规定。
- 6.1.9 在多层建筑物或高层建筑物裙房的首层布置油浸变压器的变电站时，首层外墙开口部位的上方应设置宽度不小于1.0m的不燃烧体防火挑檐或高度不小于1.2m的窗槛墙。
- 6.1.10 在露天或半露天的油浸变压器之间设置防火墙时，其高度应高于变压器油枕，长度应大于变压器的贮油池两侧各0.5m。

GB 50227—2008 规定：

9.1.1 屋外并联电容器装置与变电站内建（构）筑物和设备的防火间距，应符合现行国家标准《火力发电厂与变电站设计防火规范》GB 50229的有关规定。当不能满足规定时，应设置防火墙。

当并联电容器室与其他建筑物连接布置时，相互之间应设置防火墙，防火墙上及两侧2m以内的范围，不得开门窗及孔洞。电容器室的楼板、隔墙、门窗和孔洞均应满足防火要求。

9.1.2 并联电容器装置的消防设施，应符合下列要求：

- 1 属于不同主变压器的屋外大容量并联电容器装置之间，宜设置消防通道。
- 2 属于不同主变压器的屋内并联电容器装置之间，宜设置防火隔墙。
- 3 并联电容器装置必须设置消防设施。

9.1.5 并联电容器室的长度超过7m时，应设两个出口。并联电容器室的门应向外开启。相邻两个并联电容器室之间的隔墙需开门时，应采用乙级防火门。

并联电容器室，不宜设置采光玻璃窗。

9.1.7 油浸集合式并联电容器，应设置储油池或挡油墙。电容器的浸渍剂和冷却油不得污染周围环境和地下水。

### 5.3.7 变配电站设计对有关专业的要求

#### 5.3.7.1 对建筑专业的要求

GB 50060—2008 规定：

- 7.1.1 长度大于7000mm的配电装置室，应设置2个出口。长度大于60000mm的配电装置室，宜设置3个出口；当配电装置室有楼层时，一个出口可设置在通往屋外楼梯的平台处。
- 7.1.2 屋内敞开式配电装置的母线分段处，宜设置带有门洞的隔墙。
- 7.1.3 充油电气设备间的门开向不属配电装置范围的建筑物内时，应采用非燃烧体或难燃烧体的实体门。
- 7.1.4 配电装置室的门应设置向外开启的防火门，并应装弹簧锁，严禁采用门闩；相邻配电装置室之间有门时，应能双向开启。
- 7.1.5 配电装置室可开固定窗采光，并应采取防止玻璃破碎时小动物进入的措施。
- 7.1.6 配电装置室的顶棚和内墙应做耐火处理，耐火等级不应低于二级。地（楼）面应采用耐磨、防滑、高硬度地面。
- 7.1.7 配电装置室有楼层时，楼层楼面应有防渗水措施。
- 7.1.8 配电装置室应按事故排烟要求装设事故通风装置。
- 7.1.9 配电装置屋内通道应保证畅通无阻，不得设立门槛，不应有与配电装置无关的管道通过。
- 7.1.10 布置在屋外配电装置区域内的继电器小室，宜采取防尘、防潮、防强电磁干扰和静电干扰的措施。
- 7.1.11 建筑物与户外油浸变压器的外廓间距不宜小于10000mm；当其间距小于10000mm，且在5000mm以内时，在变压器外轮廓投影范围外侧各3000mm内的屋内配电装置楼、主控制楼及网络控制楼面向油浸变压器的外墙不应开设门、窗和通风孔；当其间距在5000mm~10000mm时，在上述外墙上可设甲级防火门。变压器高度以上可设防火窗，其耐火极限不应小于0.90h。
- 7.3.1 屋内气体绝缘金属封闭开关设备配电装置屋内地面宜采用耐磨、防滑、高硬度地面，并应满足气体绝缘金属封闭开关设备对基础不均匀沉降的要求。同一间隔气体绝缘金属封闭开关设备的布置应避免跨土建结构缝。
- 7.3.3 屋内气体绝缘金属封闭开关设备配电装置两侧应设置安装、检修和巡视的通道。主通道宜靠近断路器侧，宽度宜为2000mm；巡视通道宽度不应小于1000mm。
- 7.3.4 屋内气体绝缘金属封闭开关设备配电装置应设置起吊设备。起吊设备的容量应满足起吊最大检修单元，以及设备检修的要求。

GB 50053—2013 规定：

- 6.2.1 地上变电站宜设自然采光窗。除变电站周围设有1.8m高的围墙或围栏外，高压配电室窗户的底边距室外地面的高度不应小于1.8m，当高度小于1.8m时，窗户应采用不易破碎的透光材料或加装格栅；低压配电室可设能开启的采光窗。
- 6.2.2 变压器室、配电室、电容器室的门应向外开启。相邻配电室之间有门时，应采用不燃材料制作的双向弹簧门。

- 6.2.3 变电站各房间经常开启的门、窗，不应直通相邻的酸、碱、蒸汽、粉尘和噪声严重的场所。
- 6.2.4 变压器室、配电室、电容器室等房间应设置防止雨、雪和蛇、鼠等小动物从采光窗、通风窗、门、电缆沟等处进入室内的设施。
- 6.2.5 配电室、电容器室和各辅助房间的内墙表面应抹灰刷白，地面宜采用耐压、耐磨、防滑、易清洁的材料铺装。配电室、变压器室、电容器室的顶棚以及变压器室的内墙面应刷白。
- 6.2.7 配电装置室的门和变压器室的门的高度和宽度，宜按最大不可拆卸部件尺寸，高度加 0.5m，宽度加 0.3m 确定；其疏散通道门的最小高度宜为 2.0m，最小宽度宜为 750mm。
- 6.2.11 配电装置的布置宜避开建筑物的伸缩缝。

GB 50054—2011 规定：

- 4.3.4 配电室内的电缆沟，应采取防水和排水措施。配电室的地面宜高出本层地面 50mm 或设置防水门槛。
- 4.3.6 位于地下室和楼层内的配电室，应设设备运输通道，并应设有通风和照明设施。
- 4.3.8 配电室不宜设在建筑物地下室最底层。设在地下室最底层时，应采取防止水进入配电室内的措施。

### 5.3.7.2 对采暖通风专业的要求

GB 50060—2008 规定：

- 7.3.5 屋内气体绝缘金属封闭开关设备配电装置宜配备 SF<sub>6</sub> 气体回收装置，低位区应配备 SF<sub>6</sub> 泄漏报警仪及事故排风装置。

GB 50053—2013 规定：

- 6.3.1 变压器室宜采用自然通风，夏季的排风温度不宜高于 45℃，且排风与进风的温差不宜大于 15℃。当自然通风不能满足要求时，应增设机械通风。
- 6.3.2 电容器室应有良好的自然通风，通风量应根据电容器允许的温度，按夏季排风温度不超过电容器所允许的最高环境空气温度计算；当自然通风不能满足要求时，可增设机械通风。电容器室、蓄电池室、配套有电子类温度敏感器件的高、低压配电室和控制室，应设置环境空气温度指示装置。
- 6.3.3 当变压器室、电容器室采用机械通风时，其通风管道应采用非燃烧材料制作。当周围环境污秽时，宜加设空气过滤器。
- 6.3.4 配电室宜采用自然通风。设置在地下或地下室的变、配电站，宜装设除湿、通风换气设备；控制室和值班室宜设置空气调节设施。
- 6.3.5 在采暖地区，控制室和值班室应设置采暖装置。配电室内温度低影响电气设备元件和仪表的正常运行时，也应设置采暖装置或采取局部采暖措施。控制室和配电室内的采暖装置宜采用钢管焊接，且不应有法兰、螺纹接头和阀门等。

## 5.4 特殊环境配电装置设计

### 5.4.1 污秽地区配电装置的设计

#### 5.4.1.1 污秽源

火力发电厂、化工厂、冶炼厂、水泥厂和海岸线或盐场附近的盐雾场所都是污秽源。这些地区的空气中含有二氧化氮、硫化氢、氨、氯等烟气或粉尘，在潮湿的气候下将形成腐蚀性或导电的物质，使电气设备外绝缘强度下降，易造成污闪事故。

#### 5.4.1.2 污秽等级

污秽等级主要由污秽特性和对应的盐密来划分。线路和发电厂、变电站污秽分级标准见表 B.0.1（引自 GB 50060—2008 附录 B）。

表 B.0.1 线路和发电厂、变电站污秽分级标准

污秽等级	污 秽 特 征	盐密 (mg/cm <sup>2</sup> )	
		线路	发电厂、变电站
0	大气清洁地区及离海岸盐场 50km 以上无明显污秽地区	≤0.03	—
I	大气轻度污秽地区，工业区和人口低密集区，离海岸盐场 10~50km 地区，在污闪季节中干燥少雾（含毛毛雨）或雨量较多时	>0.03~0.06	≤0.06
II	大气中等污秽地区，轻盐碱和炉烟污秽地区，离海岸盐场 3~10km 地区，在污闪季节中潮湿多雾（含毛毛雨）但雨量较少时	>0.06~0.10	>0.06~0.10
III	大气污染较严重地区，重雾和重盐碱地区，近海岸盐场 1~3km 地区，工业与人口密度较大地区，离化学污染源和炉烟污秽 300~1500m 的较严重污秽地区	>0.10~0.25	>0.10~0.25
IV	大气特别严重污染地区，离海岸盐场 1km 以内，离化学污染源和炉烟污秽 300m 以内的地区	>0.25~0.35	>0.25~0.35

#### 5.4.1.3 配电装置的防污措施

(1) 尽量远离污染源。变电站配电装置的位置，在条件许可的情况下，应尽量远离污染源，并使配电装置在潮湿季节处于污染源的上风向。表 10-32（引自《电力工程电气设计手册 第 1 册》）为屋外配电装置与各类污染源之间的最小距离。

表 10-32 屋外配电装置与各类污染源之间的最小距离

污染源类别	与污染源之间的最小距离 (km)	污染源类别	与污染源之间的最小距离 (km)
制铝厂	2	冶金厂和钢厂	0.6~1.0
化肥厂	1~2	一般厂	0.5
化工厂和冶金厂	1.5	冶金厂	0.6
化工厂和一般厂	0.8	水泥厂	0.5

(2) 合理选择配电装置型式。6~35kV 配电装置一般都采用屋内配电装置，63~110kV

配电装置处于Ⅱ级以上污秽区时，宜采用屋内配电装置。在重污秽地区，也可采用 SF<sub>6</sub> 全封闭电器。

(3) 增大电瓷外绝缘的有效爬电比距或选用防污产品。各级污秽等级下的爬电比距分级数值见表 B.0.2 (引自 GB 50060—2008 附录 B)。

表 B.0.2 各级污秽等级下的爬电比距分级数值

污秽等级	爬电比距 (cm/kV)	
	线路	发电厂、变电站
	110kV 及以下	110kV 及以下
0	1.39 (1.60)	—
I	1.39 ~ 1.74 (1.60 ~ 2.00)	1.60 (1.84)
II	1.74 ~ 2.17 (2.00 ~ 2.50)	2.00 (2.30)
III	2.17 ~ 2.78 (2.50 ~ 3.20)	2.50 (2.88)
IV	2.78 ~ 3.30 (3.20 ~ 3.80)	3.10 (3.57)

注：1. 线路和发电厂、变电站爬电比距计算时取系统最高工作电压。表中括号内数字为按额定电压计算值。

2. 对电站设备 0 级 (110V 及以下爬电比距为 1.48cm/kV)，目前保留作为过渡时期的污秽等级。

3. 对处于污秽环境中用于中性点绝缘和经消弧线接地系统的电力设备，其外绝缘水平可按高一级选取。

防污类产品除爬电比距大外，其表面材料或造型也有利于防污，如采用半导体釉、大小伞、大倾角、钟罩式等特制瓷套管和绝缘子。

污秽地区配电装置的悬垂绝缘子串的绝缘子片数与耐张绝缘子串相同。

(4) 采用防污涂料。对于污秽严重地区，在绝缘瓷件表面敷防污油脂涂料也是有效的防污措施之一。目前采用的防污涂料主要有矿脂涂料和有机涂料两大类。

(5) 加强运行维护。加强运行维护是防止污闪事故的重要环节。除运行单位定期进行停电清扫外，在重污秽地区配电装置设计时，应考虑带电水冲洗。

目前采用的带电水冲洗装置多为移动式。采用固定式带电水冲洗装置的效果更好，但需在设备瓷套管或绝缘子四周设置固定的管道系统和必要的喷头，投资较大。

#### 5.4.2 高海拔地区配电装置的设计

高压电器设备一般的使用条件为海拔不超过 1000m；超过 1000m 时，对电器的影响主要是温升和外绝缘的问题。

##### 5.4.2.1 温升问题

《工业与民用配电设计手册（第三版）》中：

当海拔增加时，空气密度降低，散热条件变坏，使高压电器在运行中的温升增加，但空气温度则随海拔的增加而相应递减，其值足以补偿由于海拔增加对高压电器温升的影响。因而在海拔不超过 4000m 的地区使用时，高压电器的额定电流可以保持不变。

##### 5.4.2.2 外绝缘问题

(1) 《工业与民用配电设计手册（第三版）》中：

海拔增加，由于空气稀薄，气压降低，空气绝缘强度减弱，使高压电器外绝缘水平降低而对内绝缘没有影响，对于海拔高于 1000m 但不超过 4000m 的高压电器外绝缘，

海拔每升高100m，其绝缘强度约降低1%。

在海拔超过1000m的地区，可以通过采取加强保护或加强绝缘等措施，保证高压电器安全运行。

加强保护是指选用特殊制造、性能优良的避雷器，可以使普通绝缘的高压电器使用于3000m以下的高海拔地区，有利于降低高压电气设备的造价。

加强绝缘是指在加强保护的措施不能满足要求时，按使用地区的海拔加强高压电器的外绝缘，选择适用于该海拔的产品，或在订货时向制造厂提出加强绝缘的技术要求。

(2) 外绝缘放电电压的海拔修正。《工业与民用配电设计手册（第三版）》中：

对于安装在海拔1000m以上的高压电器，该使用场所要求的绝缘耐受电压是在标准参考大气条件下的绝缘耐受电压乘以修正系数 $K_a$ 来决定， $K_a$ 的计算式为

$$K_a = e^{m(H-1000)/8150} \quad (5-9)$$

式中：

$H$ ——海拔，m；

$m$ ——为了简单起见，取下述确定值： $m=1$ 用于工频、雷电冲击和相间操作冲击电压， $m=0.9$ 用于纵绝缘操作冲击电压， $m=0.75$ 用于相对地操作冲击电压。

海拔修正系数 $K_a$ 也可以由图5-2选取。

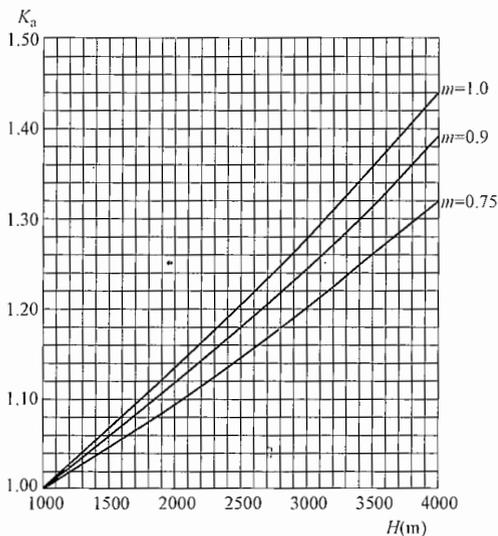


图5-2 海拔修正系数 $K_a$ 与海拔 $H$ 的关系曲线

### 5.4.3 高烈度地震区配电装置的设计

按GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》1.0.6条划分，110kV及以下变电站属于一般电力设施。

#### 5.4.3.1 一般规定

GB 50260—2013规定：

6.1.1 电气设施的抗震设计应符合下列规定：

2 一般电力设施中的电气设施，当抗震设防烈度为8度及以上时，应进行抗震设计。

3 安装在屋内二层及以上和屋外高架平台上的电气设施，当抗震设防烈度为7度及以上时，应进行抗震设计。

6.1.2 电气设备、通信设备应根据设防标准进行选择。对位于高烈度区且不能满足抗震要求或对于抗震安全性和使用功能有较高要求或专门要求的电气设施，可采用隔震或消能减震措施。

#### 5.4.3.2 电气设施布置

GB 50260—2013规定：

- 6.5.1 电气设施布置应根据抗震设防烈度、场地条件和其他环境条件，并结合电气总布置及运行、检修条件，通过技术经济分析确定。
- 6.5.2 当抗震设防烈度为 8 度及以上时，电气设施布置宜符合下列要求：
- 1 电压为 110kV 及以上的配电装置形式，不宜采用高型、半高型和双层屋内配电装置。
  - 2 电压为 110kV 及以上的管型母线配电装置的管型母线，宜采用悬挂式结构。
  - 3 电压为 110kV 及以上的高压设备，当满足本规范第 6.4.1 条抗震强度验证试验要求时，可按照产品形态要求进行布置。
- 6.5.3 当抗震设防烈度为 8 度及以上时，110kV 及以上电压等级的电容补偿装置的电容器平台宜采用悬挂式结构。
- 6.5.4 当抗震设防烈度为 8 度及以上时，干式空心电抗器不宜采用三相垂直布置。

#### 5.4.3.3 电气设施安装的抗震要求

GB 50260—2013 规定：

- 6.7.1 抗震设防烈度为 7 度及以上的电气设施的安装设计应符合本节要求。
- 6.7.2 设备引线和设备间连线宜采用软导线，其长度应留有余量。当采用硬母线时，应有软导线或伸缩接头过渡。
- 6.7.3 电气设备、通信设备和电气装置的安装应牢固可靠。设备和装置的安装螺栓或焊接强度应满足抗震要求。
- 6.7.4 变压器类安装设计应符合下列要求：
- 1 变压器类宜取消滚轮及其轨道，并应固定在基础上。
  - 2 变压器类本体上的油枕、潜油泵、冷却器及其连接管道等附件以及集中布置的冷却器与本体间连接管道，应符合抗震要求。
  - 3 变压器类的基础台面宜适当加宽。
- 6.7.5 旋转电机安装设计应符合下列要求：
- 1 安装螺栓和预埋铁件的强度，应符合抗震要求。
  - 2 在调相机、空气压缩机和柴油发电机附近应设置补偿装置。
- 6.7.6 断路器、隔离开关、GIS 等设备的操作电源或气源的安装设计应符合抗震要求。
- 6.7.7 蓄电池、电力电容器的安装设计应符合下列要求：
- 1 蓄电池安装应装设抗震架。
  - 2 蓄电池在组架间的连线宜采用软导线或电缆接线，端电池宜采用电缆作为引出线。
  - 3 电容器应牢固地固定在支架上，电容器引线宜采用软导线。当采用硬母线时，应装设伸缩接头装置。
- 6.7.8 开关柜（屏）、控制保护屏、通信设备等，应采用螺栓或焊接的固定方式。当设防烈度为 8 度或 9 度时，可将几个柜（屏）在重心位置以上连成整体。

#### 5.4.3.4 电气设备的隔震与消能减震设计

GB 50260—2008 规定：

- 6.8.1 应根据电气设备的结构特点、使用要求、自振周期以及场地类别等，选择相适应的隔震与消能减震措施。
- 6.8.2 隔震与减震措施分别为装设隔震器和减震器。常用的隔震器或减震器包括橡胶阻尼器、阻尼垫和剪弯型、拉压型、剪切型等铅合金减震器以及其他减震装置。
- 6.8.4 隔震器和消能减震器应满足强度和位移要求。
- 6.8.5 隔震器或消能减震器宜设置在支架或电气设备与基础、建筑物及构筑物的连接处。

### 5.5 各级电压配电装置的安全净距

GB 50060—2008 规定：

- 5.1.1 屋外配电装置的安全净距不应小于表 5.1.1 所列数值。电气设备外绝缘体最低部位距地小于 2500mm 时，应装设固定遮栏。
- 5.1.2 屋外配电装置的安全净距，应按图 5.1.2-1、图 5.1.2-2 和图 5.1.2-3 校验。

表 5.1.1 屋外配电装置的安全净距

符号	适应范围	系统标称电压 (kV)					
		3~10	15~20	35	66	110J	110
$A_1$	1. 带电部分至接地部分之间 2. 网状遮栏向上延伸线距地 2.5m 处与遮栏上方带电部分之间	200	300	400	650	900	1000
$A_2$	1. 不同相的带电部分之间 2. 断路器和隔离开关的断口两侧引线带电部分之间	200	300	400	650	1000	1100
$B_1$	1. 设备运输时，其设备外廓至无遮栏带电部分之间 2. 交叉的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间 3. 栅状遮栏至绝缘体和带电部分之间 4. 带电作业时带电部分至接地部分之间	950	1050	1150	1400	1650	1750
$B_2$	网状遮栏至带电部分之间	300	400	500	750	1000	1100
$C$	1. 无遮栏裸导体至地面之间 2. 无遮栏裸导体至建筑物、构筑物顶部之间	2700	2800	2900	3100	3400	3500
$D$	1. 平行的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间 2. 带电部分与建筑物、构筑物的边沿部分之间	2200	2300	2400	2600	2900	3000

- 注：1 110J 指中性点有效接地系统。  
 2 海拔超过 1000m 时，A 值应进行修正。  
 3 本表所列各值不适用于制造厂的成套配电装置。  
 4 带电作业时，不同相或交叉的不同回路带电部分之间，其  $B_1$  值可在  $A_2$  值上加 750mm。

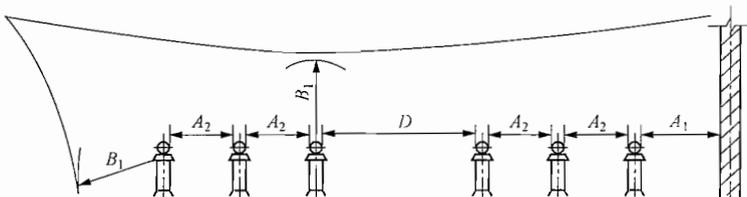
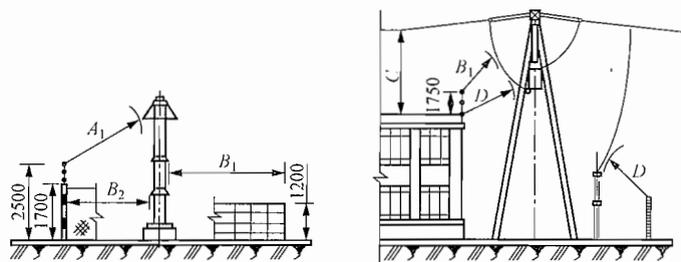
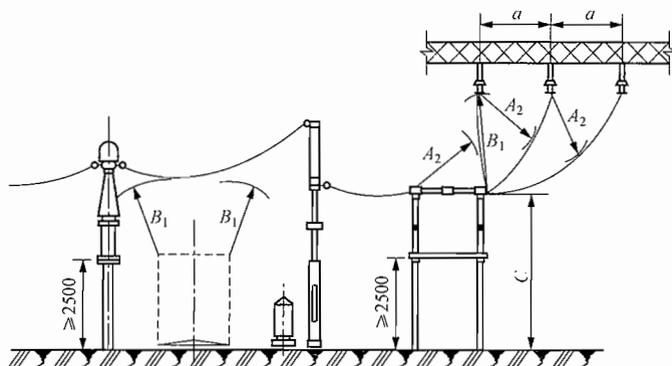


图 5.1.2-1 屋外  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $D$  值校验

图 5.1.2-2 屋外  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C$ 、 $D$  值校验图 5.1.2-3 屋外  $A_2$ 、 $B_1$ 、 $C$  值校验

注： $a$  为不同相带电部分之间的距离。

5.1.3 屋外配电装置使用软导线时，在不同条件下，带电部分至接地部分和不同相带电部分之间的最小安全净距，应根据表 5.1.3 进行校验，并应采用最大值。

表 5.1.3 带电部分至接地部分和不同相带电部分之间的最小安全净距 (mm)

条件	校验条件	设计风速 (m/s)	A 值	系统标称电压 (kV)			
				35	66	110J	110
雷电 过电压	雷电过电压 和风偏	10 (注)	$A_1$	400	650	900	1000
			$A_2$	400	650	1000	1100
工频 过电压	1. 最大工作电压、短路和风偏 (取 10m/s 风速) 2. 最大工作电压和风偏 (取最大设计 风速)	10 或最大 设计风速	$A_1$	150	300	300	450
			$A_2$	150	300	500	500

注：在最大设计风速为 35m/s 及以上，以及雷暴时风速较大等气象条件恶劣的地区应采用 15m/s。

5.1.4 屋内配电装置的安全净距不应小于表 5.1.4 所列数值。电气设备外绝缘体最低部位距地小于 2300mm 时，应装设固定遮栏。

表 5.1.4 屋内配电装置的安全净距 (mm)

符号	适应范围	系统标称电压 (kV)								
		3	6	10	15	20	35	66	110J	110
$A_1$	1. 带电部分至接地部分之间 2. 网状和板状遮栏向上延伸线距地 2300mm 处与遮栏上方带电部分之间	75	100	125	150	180	300	550	850	950
$A_2$	1. 不同相的带电部分之间 2. 断路器和隔离开关的断口两侧引线带电部分之间	75	100	125	150	180	300	550	900	1000
$B_1$	1. 栅状遮栏至带电部分之间 2. 交叉的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间	825	850	875	900	930	1050	1300	1600	1700
$B_2$	网状遮栏至带电部分之间	175	200	225	250	280	400	650	950	1050
$C$	无遮栏裸导体至地（楼）面之间	2500	2500	2500	2500	2500	2600	2850	3150	3250
$D$	平行的不同时停电检修的无遮栏裸导体之间	1875	1900	1925	1950	1980	2100	2350	2650	2750
$E$	通向屋外的出线套管至屋外通道的路面	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4500	5000	5000

- 注：1 110J 指中性点有效接地系统。  
 2 海拔超过 1000m 时， $A$  值应进行修正。  
 3 当为板状遮栏时， $B_2$  值可在  $A_1$  值上加 30mm。  
 4 通向屋外配电装置的出线套管至屋外地面的距离，不应小于表 5.1.1 中所列屋外部分  $C$  值。  
 5 本表所列各值不适用于制造厂的产品设计。

5.1.5 屋内配电装置的安全净距应按图 5.1.5-1 和图 5.1.5-2 校验。

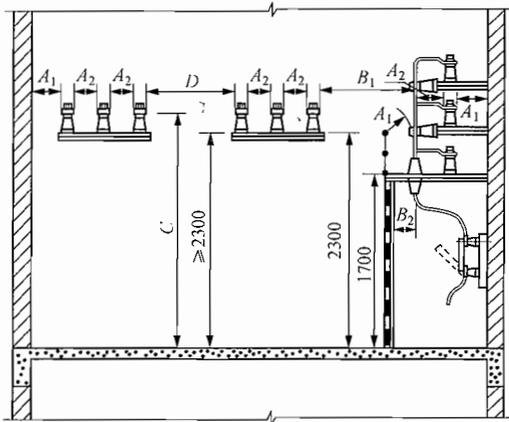


图 5.1.5-1 屋内  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C$ 、 $D$  值校验

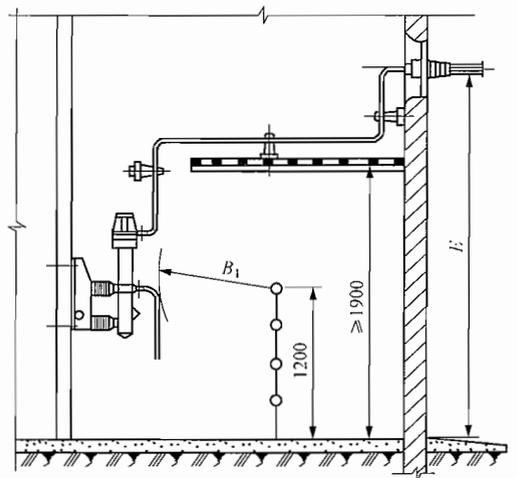


图 5.1.5-2 屋内  $B_1$ 、 $E$  值校验

5.1.6 配电装置中，相邻带电部分的系统标称电压不同时，相邻带电部分的安全净距

应按较高的系统标称电压确定。

5.1.7 屋外配电装置裸露的带电部分的上面和下面不应有照明、通信和信号线路架空跨越或穿过；屋内配电装置裸露的带电部分上面不应有明敷的照明、动力线路或管线跨越。

GB 50053—2013 规定：

4.2.1 室内、外配电装置的最小电气安全净距应符合表 4.2.1 的规定。

表 4.2.1 室内、外配电装置的最小电气安全净距 (mm)

监控项目	场所	额定电压 (kV)						符号
		≤1	3	6	10	15	20	
无遮栏裸带电部分至地 (楼) 面之间	室内	2500	2500	2500	2500	2500	2500	—
	室外	2500	2700	2700	2700	2800	2800	
裸带电部分至接地部分和不同的裸带电部分之间	室内	20	75	100	125	150	180	A
	室外	75	200	200	200	300	300	
距地面 2500mm 以下的遮栏防护等级为 IP2X 时, 裸带电部分与遮护物间水平净距	室内	100	175	200	225	250	280	B
	室外	175	300	300	300	400	400	
不同时停电检修的无遮栏裸导体之间的水平距离	室内	1875	1875	1900	1925	1950	1980	—
	室外	2000	2200	2200	2200	2300	2300	
裸带电部分至无孔固定遮栏	室外	50	105	130	155	—	—	—
裸带电部分至用钥匙或工具才能打开或拆卸的栅栏	室内	800	825	850	875	900	930	C
	室外	825	950	950	950	1050	1050	
高低压引出线的套管至户外通道地面	室外	3650	4000	4000	4000	4000	4000	—

注：1 海拔高度超过 1000m 时，表中符号 A 后的数值应按每升高 100m 增大 1% 进行修正，符号 B、C 后的数值应加上符号 A 的修正值；

2 裸带电部分的遮栏高度不小于 2.2m。

DL/T 5222—2005 《导体和电器选择设计技术规定》规定：

13.0.9 单纯以空气作为绝缘介质时，开关内各相导体的相间与对地净距必须符合表 13.0.9 的要求。

表 13.0.9 开关内各相导体的相间与对地净距

序号	额定电压 kV	7.2	12 (11.5)	24	40.5
1	导体至接地间净距 mm	100	125	180	300
2	不同相导体之间的净距 mm	100	125	180	300
3	导体至无孔遮栏间净距 mm	130	155	210	330
4	导体至网状遮栏间净距 mm	200	225	280	400

注：海拔超过 1000m 时本表所列 1、2 项值按每升高 100m 增大 1% 进行修正，3、4 项之值应分别增加 1 或 2 项值的修正值。

## 短路电流计算<sup>①</sup>

### 6.1 短路电流计算方法

DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》中明确运用了短路电流实用计算方法。该方法根据国产机组的参数,考虑到我国电力系统负荷分配的实际情况,用概率统计方法制定了新的短路电流运算曲线,并对非周期分量的时间常数及短路电流热效应计算提出了新的方法。

DL/T 5153—2014《火力发电厂厂用电设计技术规程》中附录 L 和附录 M (规范性附录) 中短路电流计算也按上述实用计算方法。

#### 6.1.1 短路电流计算的基本概念

(1) 在三相交流系统中可能发生的短路故障主要有三相短路、两相短路和单相短路(包括单相接地故障)。通常,三相短路电流最大,当短路点发生在发电机附近时,两相短路电流可能大于三相短路电流;当短路点靠近中性点接地的变压器时,单相短路电流也有可能大于三相短路电流。

(2) 短路过程中短路电流变化的情况决定于系统电源容量的大小或短路点离电源的远近,其短路电流波形如图 6-1-1 所示。在工程计算中,如果以供电电源容量为基准的短路电路计算电抗不小于 3,短路时即认为电源母线电压维持不变,不考虑短路电流交流分量(周期分量)的衰减,可按短路电流不含衰减交流分量的系统,即无限大电源容量的系统或远离发电机端短路进行计算。否则,应按短路电流含衰减交流分量的系统,即有限电源容量的系统或靠近发电机端短路进行计算。

(3) 短路电流计算应求出最大短路电流值,用以校验电气设备的动稳定、热稳定及分断能力,整定继电保护装置;还应求出最小短路电流值,作为校验继电保护装置灵敏系数的依据。此外利用阻抗标幺值计算校验电动机起动电压降。

一般需要计算下列短路电流值:

- (1)  $i_p$ ——短路峰值电流(短路冲击电流或短路全电流最大瞬时值)。
- (2)  $I_k''$ 或  $I_k'$ ——对称短路电流初始值(超瞬态短路电流)。
- (3)  $I_{0.2}$ ——短路后 0.2s 的短路电流交流分量(周期分量)有效值。
- (4)  $I_k$ ——稳态短路电流有效值。

#### 6.1.2 短路电流计算的术语

(1) 远端短路(短路电流中交流分量不衰减的系统)。预期短路电流对称交流分量的值在短路过程中基本保持不变的短路。即预期短路电流由不衰减的交流分量和以初始值  $A$  衰

① 本章主要依据《工业与民用配电手册(第三版)》。

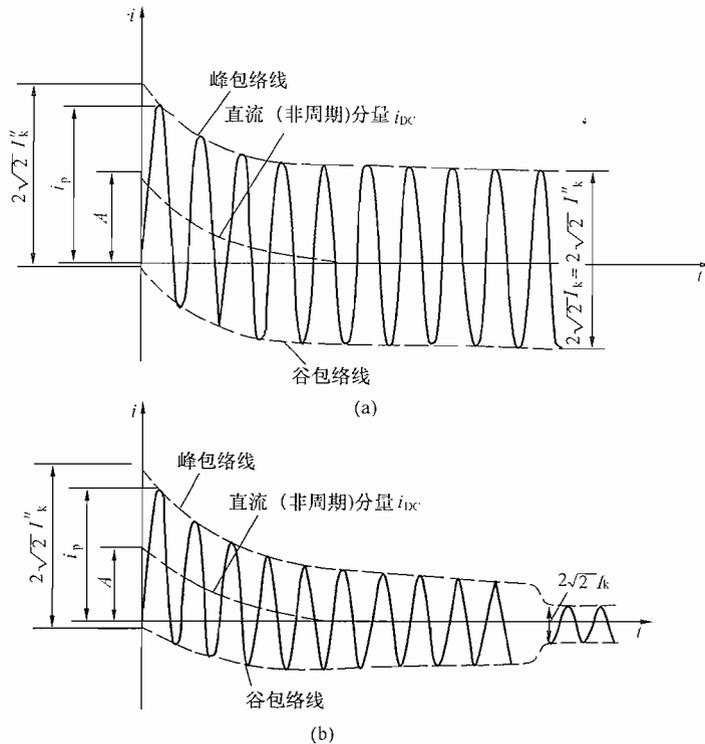


图 6-1-1 短路电流波形图

(a) 远端短路时的电流波形图；(b) 近端短路的电流波形图  
 $I_k''$ —对称短路电流初始值； $i_p$ —短路电流峰值； $I_k$ —稳态短路电流；  
 $i_{DC}$ —短路电流直流分量； $A$ —直流分量  $i_{DC}$  的初始值

减到零的直流分量组成，可以认为远端短路的对称电流初始值  $I_k''$  和稳态短路电流  $I_k$  是相等的。当电力系统电抗  $X_s$  与变压器低压侧电抗  $X_{TLV}$  满足关系式  $X_{TLV} \geq 2X_s$  时，可视为远端短路。

在工程计算中，如果以供电电源容量为基准的短路电路计算电抗标幺值  $X_{sc} \geq 3$  时，可认为电源母线电压维持不变，不考虑短路电流交流分量的衰减，此种短路也称为远端短路。

(2) 近端短路（短路电流中交流分量衰减的系统）。至少有一台同步发电机供给短路点的预期对称短路电流初始值超过这台发电机额定电流两倍的短路；或同步和异步电动机反馈到短路点的电流超过不接电动机时该点的对称短路电流初始值  $I_k''$  的 5% 的短路。

通常，近端短路时，稳态短路电流  $I_k$  小于  $I_k''$ 。预期短路电流由幅值衰减的交流分量和以初始值开始衰减到零的直流分量组成。

(3) 对称短路，见图 6-1-2 (a)。电力系统为对称的三相系统，并假设三相短路是同时产生的，该短路型式称对称短路或称三相短路。

(4) 不对称短路。除三相对称短路之外的短路称为不对称短路，本章只对以下三种不对称短路型式进行计算：

- 1) 两相不接地短路，见图 6-1-2 (b)。
- 2) 单相对中性线短路，见图 6-1-2 (c)。
- 3) 单相接地短路，见图 6-1-2 (d)。

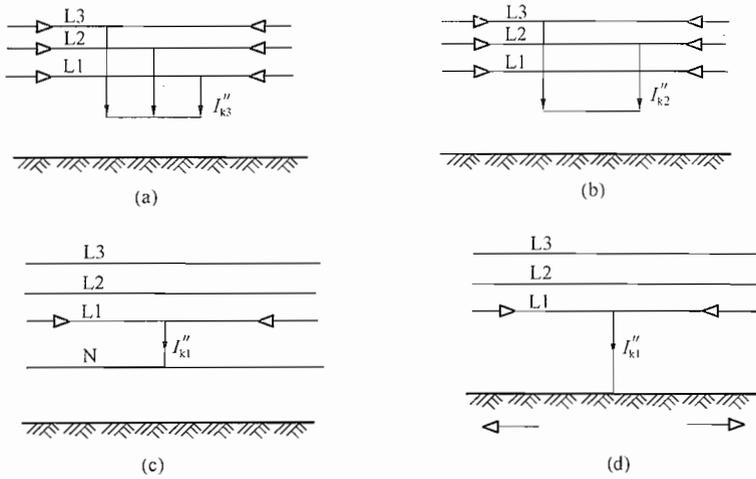


图 6-1-2 短路型式和电流方向

(a) 对称三相短路；(b) 两相不接地短路；(c) 单相对中性线短路；(d) 单相接地短路

—— 短路电流；——▶—— 在导体和地中的支路短路电流

注：图中箭头方向为任意选定的电流流向。

6

### 6.1.3 高压系统短路电流计算

进行短路电流计算时，先要知道短路电路的电参数，如电路元件的阻抗、电路电压、电源容量等，然后通过网络变换求得电源至短路点之间的等值总阻抗，最后按照公式或运算曲线求出短路电流。

短路电路的电参数可以用有单位制表示，也可以用标幺制表示。有单位制一般用于 1000V 以下低压网络的短路电流计算，标幺制则广泛用于高压网络。

#### 6.1.3.1 标幺制

标幺制是一种相对单位制，电参数的标幺值为其有名值与基准值之比，即：

$$\text{容量标幺值} \quad S_* = \frac{S}{S_j} \quad (6-1-1)$$

$$\text{电压标幺值} \quad U_* = \frac{U}{U_j} \quad (6-1-2)$$

$$\text{电流标幺值} \quad I_* = \frac{I}{I_j} \quad (6-1-3)$$

$$\text{电抗标幺值} \quad X_* = \frac{X}{X_j} \quad (6-1-4)$$

工程计算中通常首先选定基准容量  $S_j$  和基准电压  $U_j$ ，与其相应的基准电流  $I_j$  和基准电抗  $X_j$ ，在三相电力系统中的计算式为

$$I_j = \frac{S_j}{\sqrt{3}U_j} \quad (6-1-5)$$

$$X_j = \frac{U_j}{\sqrt{3}I_j} = \frac{U_j^2}{S_j} \quad (6-1-6)$$

在三相电力系统中，电路元件电抗的标么值  $X_*$  可表示为

$$X_* = \frac{X}{X_j} = \frac{\sqrt{3}I_j X}{U_j} = \frac{S_j X}{U_j^2} \quad (6-1-7)$$

基准容量可以任意选定。但为了计算方便，基准容量  $S_j$  一般取 100MVA；如为有限电源容量系统，则可选取向短路点馈送短路电流的发电机额定总容量  $S_{j\Sigma}$  作为基准容量。基准电压  $U_j$  应取各电压级平均电压（线电压） $U_{av}$ ，即  $U_j = U_{av} = 1.05U_n$ （ $U_n$  为系统标称电压），对于标称电压为 220/380V 的电压级，则计入电压系数  $c$ （取 1.05），即  $1.05U_n = 400V$  或 0.4kV，常用基准值见表 6-1-1。

表 6-1-1 常用基准值 ( $S_j = 100MVA$ )

系统标称电压 $U_n$ (kV)	0.38	3	6	10	35	110
基准电压 $U_j = U_{av}^D$ (kV)	0.40	3.15	6.30	10.50	37	115
基准电流 $I_j$ (kA)	144.30	18.30	9.16	5.50	1.56	0.50

①  $U_j = U_{av} \approx 1.05U_n$ ，但对于 0.38kV， $U_j = cU_n = 1.05 \times 0.38 = 0.4$  (kV)。

采用标么值计算短路电路的总阻抗时，必须先将元件阻抗的有名值和相对值按同一基准容量换算为标么值，而基准电压采用各元件所在级的平均电压。电路元件阻抗标么值和有名值的换算公式见表 6-1-2。

### 6.1.3.2 有名单位制

用有名单位制（欧姆制）计算短路电路的总阻抗时，必须把各电压级所在元件阻抗的相对值和欧姆值，都归算到短路点所在级平均电压下的欧姆值，电路元件阻抗标么值和有名值的换算公式见表 6-1-2。

### 6.1.3.3 网络变换

网络变换的目的是简化短路电路，以求得电源至短路点间的等值总阻抗。

标么制和有名单位制的常用电抗网络变换公式完全相同，详见表 6-1-3。

在简化短路电路过程中，如果各电路元件的电抗和电阻均需计入，则简化过程比较复杂。

当电路元件为串联时，则总电抗和总电阻的计算式为

$$\left. \begin{aligned} X_{\Sigma} &= X_1 + X_2 + \cdots \quad (\Omega) \\ R_{\Sigma} &= R_1 + R_2 + \cdots \quad (\Omega) \end{aligned} \right\} \quad (6-1-8)$$

当两个电路元件为并联时，若两个并联元件的电阻与电抗的比值比较接近时，则并联电路的总电阻和总电抗可按并联公式分别计算

当  $\frac{R_1}{X_1} \approx \frac{R_2}{X_2}$  时，则

$$\left. \begin{aligned} X_{\Sigma} &= \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} \\ R_{\Sigma} &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned} \right\} \quad (6-1-9)$$

表 6-1-2 电路元件阻抗标么值和有名值的换算公式

序号	元件名称	标么值	有名值(Ω)	符号说明
1	同步电机(同步发电机或电动机)	$X_{*d}'' = \frac{x_d''\%}{100} \cdot \frac{S_j}{S_r} = x_d'' \frac{S_j}{S_r}$	$X_d'' = \frac{x_d''\%}{100} \cdot \frac{U_r^2}{S_r} = x_d'' \cdot \frac{U_r^2}{S_r}$	<p><math>S_r</math>——同步电机的额定容量, MVA;  <math>S_{rT}</math>——变压器的额定容量, MVA(对于三绕组变压器, 是指最大容量绕组的额定容量);  <math>x_d''\%</math>——同步电机的超瞬态电抗相对值;  <math>x_d''\%</math>——同步电机的超瞬态电抗百分值;  <math>u_k\%</math>——变压器阻抗电压百分值;  <math>x_k\%</math>——电抗器的电抗百分值;  <math>U_r</math>——额定电压(指线电压), kV;  <math>I_r</math>——额定电流, kA;  <math>X, R</math>——线路每相电抗值、电阻值, Ω;  <math>S''</math>——系统短路容量, MVA;  <math>S_j</math>——基准容量, MVA;  <math>I_j</math>——基准电流, kA;  <math>\Delta P</math>——变压器短路损耗, kW;  <math>U_j</math>——基准电压, kV, 对于发电机实际是设备电压</p>
2	变压器	$R_{*T} = \Delta P \frac{S_j}{S_{rT}} \times 10^{-3}$ $X_{*T} = \sqrt{Z_{*T}^2 - R_{*T}^2}$ $Z_{*T} = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{S_j}{S_{rT}}$ 当电阻值允许忽略不计 $X_{*T} = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{S_j}{S_{rT}}$	$R_T = \frac{\Delta P}{3I_r^2} \times 10^{-3} = \frac{\Delta P U_r^2}{S_{rT}^2} \times 10^{-3}$ $X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$ $Z_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_r^2}{S_{rT}}$ 当电阻值允许忽略不计 $X_T = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_r^2}{S_{rT}}$	
3	电抗器	$X_{*k} = \frac{x_k\%}{100} \cdot \frac{U_r}{\sqrt{3}I_r} \cdot \frac{S_j}{U_j^2}$ $= \frac{x_k\%}{100} \cdot \frac{U_r}{I_r} \cdot \frac{I_j}{U_j}$	$X_k = \frac{x_k\%}{100} \cdot \frac{U_r}{\sqrt{3}I_r}$	
4	线路	$X_* = X \frac{S_j}{U_j^2}$ $R_* = R \frac{S_j}{U_j^2}$		
5	电力系统(已知短路容量 $S''$ )	$X_{*s} = \frac{S_j}{S''}$	$X_s = \frac{U_j^2}{S''}$	
6	基准电压相同, 从某一基准容量 $S_{j1}$ 下的标么值 $X_{*1}$ 换算到另一基准容量 $S_{j2}$ 下的标么值 $X_*$	$X_* = X_{*1} \frac{S_{j1}}{S_{j2}}$		
7	将电压 $U_{j1}$ 下的电抗值 $X_1$ 换算到另一电压 $U_{j2}$ 下的电抗值 $X_2$		$X_2 = X_1 \frac{U_{j2}^2}{U_{j1}^2}$	

表 6-1-3

常用电抗网络变换公式

原 网 络	变换后的网络	换 算 公 式
		$X = X_1 + X_2 + \dots + X_n$
		$X = \frac{1}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_n}}$ 当只有两个支路时, $X = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2}$
		$X_1 = \frac{X_{12} X_{31}}{X_{12} + X_{23} + X_{31}}$ $X_2 = \frac{X_{12} X_{23}}{X_{12} + X_{23} + X_{31}}$ $X_3 = \frac{X_{23} X_{31}}{X_{12} + X_{23} + X_{31}}$
		$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_3}$ $X_{23} = X_2 + X_3 + \frac{X_2 X_3}{X_1}$ $X_{31} = X_3 + X_1 + \frac{X_3 X_1}{X_2}$
		$X_{12} = X_1 X_2 \Sigma Y$ $X_{23} = X_2 X_3 \Sigma Y$ $X_{24} = X_2 X_4 \Sigma Y$ ..... 式中 $\Sigma Y = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_4}$
		$X_1 = \frac{1}{\frac{1}{X_{12}} + \frac{1}{X_{13}} + \frac{1}{X_{41}} + \frac{1}{X_{12} X_{41}}}$ $X_2 = \frac{1}{\frac{1}{X_{12}} + \frac{1}{X_{23}} + \frac{1}{X_{24}} + \frac{1}{X_{12} X_{23}}}$ $X_3 = \frac{1}{1 + \frac{X_{12}}{X_{23}} + \frac{X_{12}}{X_{24}} + \frac{X_{13}}{X_{23}}}$ $X_4 = \frac{1}{1 + \frac{X_{12}}{X_{13}} + \frac{X_{12}}{X_{41}} + \frac{X_{24}}{X_{41}}}$
		星形网络中 $m$ 和 $n$ 点间直接连接的支路电抗 $X_{mn} = X_m X_n \Sigma Y$ 。式中, $\Sigma Y$ 为接到星形中心点各支路的电纳之和, $\Sigma Y = 1/X_1 + 1/X_2 + \dots + 1/X_m + 1/X_n$

6

### 6.1.3.4 高压系统电路元件的阻抗

(1) 同步电机。同步电机的阻抗参数由电机制造厂提供。若数据缺少时，在近似计算中，亦可采用表 6-1-4 中所列的各类同步电机的电抗平均值。

表 6-1-4 各类同步电机的电抗平均值

序号	同步电机类型	$x''_d$ 或 $x_{(1)}$ (%)	$x_{(2)}$ (%)	$x_{(0)}$ (%)
1	汽轮发电机 ≤50MW	14.5	17.5	7.5
	100~125MW	17.5	21.0	8.0
	200MW	14.5	17.5	8.5
	300MW	17.2	19.8	8.4
2	水轮发电机 无阻尼绕组时	29.0	45.0	11.0
	有阻尼绕组时	21.0	21.5	9.5
3	同步调相机	16.0	16.5	8.5
4	同步电动机	15.0	16.0	8.0

注  $x_{(1)}$ 、 $x_{(2)}$ 、 $x_{(0)}$  表示正序电抗相对值、负序电抗相对值、零序电抗相对值。

(2) 异步电动机。高、低压异步电动机的超瞬态电抗相对值  $x''_d$  的计算式为

$$x''_d = \frac{1}{K_{qM}} \quad (6-1-10)$$

式中  $K_{qM}$ ——异步电动机的起动电流倍数，由产品样本查得。

(3) 电力变压器。三相双绕组电力变压器的电抗标么值可按表 6-1-2 中有关公式计算。表 6-1-5 列出了常用规格三相双绕组电力变压器的电抗标么值 ( $S_j = 100\text{MVA}$ )。

表 6-1-5 三相双绕组电力变压器的电抗标么值

变压器容量 (kVA)	阻抗电压 (%)	$S_j = 100\text{MVA}$ 时的电抗标么值	变压器容量 (kVA)	阻抗电压 (%)	$S_j = 100\text{MVA}$ 时的电抗标么值
35/10.5kV			12 500 16 000 20 000 25 000	10.5	0.84 0.66 0.53 0.42
1000	6.5	6.50			
1250		5.20			
1600		4.06			
2000		3.25			
2500		2.60	10/6.3kV		
3150		2.22	200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300	4	20.00 16.00 12.70 10.00
4000	7	1.75			
5000		1.40			
6300		1.19			
8000	7.5	0.94		4.5	8.00 8.73
10 000		0.75			
12 500	8	0.64		5.5	6.88 5.50 4.40 3.44 2.75 2.20 1.75 1.38 1.10 0.87
16 000		0.50			
20 000		0.40			
110/10.5kV					
6300	10.5	1.67			
8000		1.31			
10 000		1.05			

三相三绕组电力变压器每个绕组的电抗百分值的计算式为

$$\left. \begin{aligned} x_1 \% &= \frac{1}{2}(u_{k12} \% + u_{k13} \% - u_{k23} \%) \\ x_2 \% &= \frac{1}{2}(u_{k12} \% + u_{k23} \% - u_{k13} \%) \\ x_3 \% &= \frac{1}{2}(u_{k13} \% + u_{k23} \% - u_{k12} \%) \end{aligned} \right\}$$

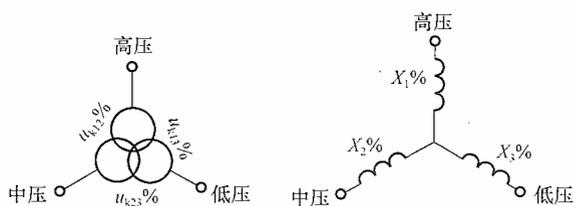


图 6-1-3 三相三绕组变压器等值变换

$$(6-1-11)$$

式中  $u_{k12} \%$ 、 $u_{k13} \%$ 、 $u_{k23} \%$ ——每对绕组的阻抗电压百分值，其间的相互关系见图 6-1-3。

110kV 级 6300 ~ 25000kVA、三相三绕组电力变压器每个绕组的电抗标么值见表 6-1-6。

表 6-1-6 110kV 三相三绕组电力变压器的电抗标么值

变压器容量 (kVA)		6300	8000	10000	12500	16000	20000	25000	变压器容量 (kVA)	
按阻抗电压 $u_k \%$ 的第一种组合方式 (升压型)	阻抗电压 $u_k \%$	高中	17	17.5	17	18	18	18	18	按阻抗电压 $u_k \%$ 的第二种组合方式 (降压型)
		高低	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	
		中低	6	6.5	6	6.5	6.5	6.5	6.5	
	绕组电抗 $x$ (%)	高压	10.75	10.75	10.75	11	11	11	11	
		中压	6.25	6.75	6.25	7	7	7	7	
		低压	-0.25	-0.25	-0.25	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	
$S_j = 100\text{MVA}$ 时绕组电抗标么值 $X_s$	高压	1.706	1.344	1.075	0.880	0.688	0.550	0.440		
	中压	0.992	0.844	0.625	0.560	0.438	0.350	0.280		
	低压	-0.040	-0.031	-0.025	-0.04	-0.031	-0.025	-0.02		

(4) 电抗器。电抗器的电抗标么值及有名值的计算见表 6-1-2。

(5) 高压线路。对计算要求不十分精确时，可采用表 6-1-7 所列的高压线路每千米电抗近似值。如果要求比较精确，则可查阅有关计算表。

表 6-1-7 高压线路每千米电抗近似值

线路种类	标称电压 $U_n$ (kV)	电抗 $X$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$S_j = 100\text{MVA}$ 时的电抗标么值 $X_s$
电缆线路	6	0.07	0.176
	10	0.08	0.073
	35	0.12	0.009
架空线路	6	0.35	0.882
	10	0.35	0.317
	35	0.40	0.029
	110	0.40	0.003

注 计算电抗标么值时，所采用的基准电压  $U_j$  分别为 6.3、10.5、37、115kV。

### 6.1.3.5 高压系统短路电流计算方法

(1) 计算条件：

1) 短路前三相系统是正常运行情况下的接线方式，不考虑仅在切换过程中短时出现的接线方式。

2) 设定短路回路各元件的磁路系统为不饱和状态, 即认为各元件的感抗为常数。若电网电压在 6kV 以上时, 除电缆线路应考虑电阻外, 网络阻抗一般可视为纯电抗 (略去电阻); 若短路电路中总电阻  $R_{\Sigma}$  大于总电抗  $X_{\Sigma}$  的 1/3, 则应计入其有效电阻。

3) 电路电容和变压器的励磁电流略去不计。

4) 在短路持续时间内, 短路相数不变, 如三相短路保持三相短路, 单相接地短路保持单相接地短路。

5) 电力系统中所有发电机电势相角都认为相同 (大多数情况下相角很接近)。

6) 对于同类型的发电机, 当它们对短路点的电气距离比较接近时, 则假定它们的超瞬态电势的大小和变化规律相同。因此, 可以用超瞬态网络 (发电机用超瞬态电抗  $X''_d$  来代表) 进行网络化简, 并将这些发电机合并成一台等值发电机。

7) 具有分接开关的变压器, 其开关位置视为在主分接位置。

8) 电力系统为对称的三相系统。负荷只作近似的估计, 并用恒定阻抗来代表。

(2) 远端短路的单电源馈电的三相短路电流初始值  $I''_k$  的计算。远离发电机端的 (无限大电源容量的) 网络发生短路时, 即以电源容量为基准的计算电抗  $X_{*c} \geq 3$  时, 短路电流交流分量在整个短路过程不发生衰减, 即  $I''_k = I_{0.2} = I_k$ , 见图 6-1-1 (a)。其计算方法有:

1) 用标幺制计算。用标幺制计算时, 三相短路电流初始值  $I''_k$  的计算式为

$$I_{*k} = S_{*k} = I''_* = \frac{1}{X_{*c}} \quad (6-1-12)$$

$$I''_k = I_{*k} I_j = I''_* I_j = \frac{I_j}{X_{*c}} \quad (6-1-13)$$

$$S_k = S_{*k} S_j = I_{*k} S_j = I''_* S_j = \frac{S_j}{X_{*c}} \quad (6-1-14)$$

式中  $I_{*k}$  —— 短路电流交流分量有效值的标幺值;

$S_{*k}$  —— 短路容量标幺值;

$X_{*c}$  —— 短路电路总电抗 (计算电抗) 标幺值;

$I''_k$  —— 短路电流初始值, kA;

$S_k$  —— 短路容量, MVA;

$I_j$  —— 基准电流, kA;

$S_j$  —— 基准容量, MVA。

2) 用有各单位制计算。用有各单位制计算时, 三相短路电流初始值  $I''_k$  的计算式为

$$I_k = I''_k = \frac{U_{av}}{\sqrt{3}X_c} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-15)$$

如果  $R_c > \frac{1}{3}X_c$ , 则应计入有效电阻  $R_c$ ,  $I''_k$  值的计算式为

$$I_k = I''_k = \frac{U_{av}}{\sqrt{3}Z_c} = \frac{U_{av}}{\sqrt{3}\sqrt{R_c^2 + X_c^2}} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-16)$$

以上式中  $U_{av}$  —— 短路点所在级的网络平均电压, kV, 见表 6-1-1;

$Z_c$  —— 短路电路总阻抗,  $\Omega$ ;

$R_c$  —— 短路电路总电阻,  $\Omega$ ;

$X_c$ ——短路电路总电抗,  $\Omega$ 。

远端短路时, 10~110kV 级常用变压器低压侧三相短路的短路容量见表 6-1-8。

表 6-1-8 远端短路时 10~110kV 级常用变压器低压侧  
三相短路的短路容量

变压器容量 (kVA)	阻抗电压 (%)	变压器高压侧短路容量 $S_{k1}$ (MVA)									
		30	50	75	100	150	200	250	300	500	$\infty$
35/10.5kV											
1000	6.5	10.17	11.76	12.76	13.33	13.95	14.28	14.49	14.63	14.92	15.38
1250		11.72	13.89	15.31	16.13	17.04	17.54	17.86	18.07	18.52	19.23
1600		13.52	16.50	18.54	19.76	21.15	21.92	22.41	22.75	23.46	24.62
2000		15.19	19.05	21.82	23.53	25.53	26.67	27.40	27.91	28.99	30.77
2500		16.85	21.74	25.42	27.78	30.61	32.26	33.33	34.09	35.71	38.46
3150	7	18.00	23.68	28.12	31.03	34.62	36.73	38.14	39.13	41.28	45.00
4000		19.67	26.67	32.43	36.36	41.38	44.44	46.51	48.00	51.28	57.14
5000		21.13	29.41	36.59	41.67	48.39	52.63	55.56	57.70	62.50	71.43
6300	7.5	22.11	31.34	39.62	45.65	53.85	59.15	62.87	65.62	71.92	84.00
8000		23.41	34.04	44.04	51.61	62.34	69.57	74.77	78.69	87.91	106.67
10 000		24.49	36.36	48.00	57.14	70.59	80.00	86.96	92.31	105.26	133.33
12 500	8	25.17	37.88	50.68	60.98	76.53	87.72	96.15	102.74	119.05	156.25
16 000		26.09	40.00	54.55	66.67	85.71	100.00	111.11	120.00	142.86	200.00
20 000		30.00	41.67	57.69	71.43	93.75	111.11	125.00	136.36	166.67	250.00
110/10.5kV											
6300	10.5	20.00	27.27	33.33	37.50	42.86	46.15	48.39	50.00	53.57	60.00
8000		21.52	30.19	37.80	43.24	50.53	55.17	58.39	60.76	66.12	76.19
10 000		22.81	32.79	41.96	48.78	58.25	64.52	68.97	72.29	80.00	95.24
12 500		23.96	35.21	46.01	54.35	66.37	74.63	80.65	85.23	96.16	119.05
16 000		25.07	37.65	50.26	60.38	75.59	86.49	94.67	101.05	116.79	152.38
20 000		25.92	39.60	53.81	65.57	83.92	97.56	108.11	116.51	137.93	190.48
25 000		26.64	41.32	57.03	70.42	92.03	108.70	121.95	132.74	161.29	238.10
31 500		27.27	42.86	60.00	75.00	100.00	120.00	136.36	150.00	187.50	300.00
40 000		27.81	44.20	62.66	79.21	107.62	131.15	150.94	167.83	216.22	380.95
10/6.3kV											
200	4	4.29	4.55	4.69	4.76	4.84	4.88	4.90	4.92	4.95	5.00
250		5.17	5.56	5.77	5.88	6.00	6.06	6.10	6.12	6.17	6.25
315		6.24	6.81	7.13	7.30	7.49	7.58	7.64	7.68	7.76	7.88
400		7.50	8.33	8.82	9.09	9.38	9.52	9.62	9.68	9.80	10.00
500		8.82	10.00	10.71	11.11	11.54	11.76	11.90	12.00	12.20	12.50
630	4.5	8.29	9.32	9.93	10.27	10.64	10.83	10.95	11.03	11.19	11.45
800	5.5	9.8	11.27	12.19	12.70	13.26	13.56	13.75	13.88	14.14	14.55

续表

变压器容量 (kVA)	阻抗电压 (%)	变压器高压侧短路容量 $S_{k1}$ (MVA)									
		30	50	75	100	150	200	250	300	500	$\infty$
10/6.3kV											
1000	5.5	11.32	13.33	14.63	15.38	16.21	16.67	16.95	17.14	17.54	18.18
1250		12.93	15.63	17.44	18.52	19.74	20.41	20.84	21.13	21.74	22.73
1600		14.77	18.39	20.96	22.53	24.36	25.40	26.06	26.52	27.49	29.09
2000		16.44	21.05	24.49	26.66	29.27	30.77	31.74	32.43	33.90	36.36
2500		18.07	23.81	28.30	31.25	34.88	37.03	38.46	39.47	41.66	45.45
3150		19.69	26.69	32.47	36.42	41.45	44.52	46.60	48.09	51.38	57.27
4000		21.24	29.63	36.92	42.11	48.98	53.33	56.34	58.54	63.49	72.73
5000		22.56	32.26	41.10	47.62	56.60	62.50	66.67	69.77	76.92	90.91
6300		23.77	34.81	45.32	53.39	64.95	72.83	78.56	82.90	93.20	114.55

注 1.  $S_{k2}$  的计算式为

$$S_{k2} = \frac{S_{k1} S_k}{S_{k1} + S_k}$$

式中  $S_{k2}$ ——变压器低压侧三相短路的短路容量, MVA; $S_{k1}$ ——变压器高压侧短路容量, MVA; $S_k$ ——变压器本身短路容量, MVA, 其值等于高压侧接入无限大电源容量时的低压侧短路容量,

$$\text{即 } S_k = \frac{100 S_T}{u_k \%};$$

 $S_T$ ——变压器的额定容量, MVA; $u_k \%$ ——变压器阻抗电压百分值。

2. 粗线框以右部分为变压器低压侧发生短路时, 以变压器高压侧短路容量为基准的计算电抗  $X_{*c} \geq 3$  或以变压器高压侧短路容量为基准的变压器计算电抗  $X_{*c \cdot T} \geq 2$ , 其计算式为

$$X_{*c} = \frac{S_j}{S_{k1}} + \frac{S_j}{S_k} = \frac{S_{k1}}{S_{k1}} + \frac{S_{k1}}{S_k} = 1 + \frac{S_{k1}}{S_k} = 1 + \frac{S_{k1}}{100 S_T / u_k \%} = 1 + \frac{u_k \% / 100}{S_T / S_{k1}}$$

$$X_{*c \cdot T} = \frac{S_j}{S_k} = \frac{S_{k1}}{S_k} = \frac{S_{k1}}{100 S_T / u_k \%} = \frac{u_k \% / 100}{S_T / S_{k1}}$$

(3) 近端短路的—台发电机馈电的三相短路电流初始值  $I_k''$  的计算。

1) 按公式计算。靠近发电机端或有限电源容量的网络发生短路的主要特点是: 电源母线上的电压在短路发生后的整个过渡过程不能维持恒定, 短路电流交流分量随之变化, 见图 6-1-1 (b), 电源的内阻抗不能忽略不计。

短路电流的变化与发电机的电参数及电压自动调整装置的特性有关。工程设计中常采用运算曲线法计算短路过程某一时刻的短路电流交流分量。因为同步电机的转子绕组(等效阻尼绕组及励磁绕组)的磁链在突然短路瞬间不能突变, 与转子绕组的磁链成正比的超瞬态电动势  $E''$ , 在突然短路瞬间仍保持短路前的数值, 因此短路电流交流分量的起始值, 即超瞬态短路电流有效值  $I_k''$  可利用公式直接计算

$$\text{对于汽轮发电机} \quad I_k'' = \frac{E''}{\sqrt{3}(X_d'' + X_w)} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-17)$$

$$\text{或} \quad I_k'' = \frac{I_j}{X_{*d}'' + X_{*w}} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-18)$$

$$\text{对于水轮发电机} \quad I_k'' = \frac{KE''}{\sqrt{3}(X_{*d}'' + X_{*w})} = \frac{KI_j}{X_{*d}'' + X_{*w}} \quad (6-1-19)$$

式中  $I_j$ ——基准电流, kA;

$E''$ ——发电机超瞬态电动势, 工程计算中可以认为  $E'' \approx U_{iG}$ , kV;

$U_{iG}$ ——发电机额定电压, kV,  $U_{iG} = 1.05U_n$ ;

$U_n$ ——系统标称电压, kV;

$X_{*d}''$ ——发电机超瞬态电抗,  $\Omega$ ;

$X_w$ ——自发电机出口至短路点间的短路电路电抗,  $\Omega$ ;

$X_{*d}'$ 、 $X_{*w}$ ——以发电机额定总容量  $S_{n\Sigma}$  为基准容量的  $X_{*d}'$  和  $X_w$  的标么值;

$K$ ——考虑到水轮发电机的超瞬态电抗  $X_{*d}''$  值比较大而引入的计算系数, 见表6-1-9。

表 6-1-9 水轮发电机的计算系数  $K$  值

发电机型式	$X_{*d}' + X_{*w} = X_{*c}$ 为下列诸值时								
	0.2	0.27	0.3	0.4	0.5	0.75	1	1.5	$\geq 2$
无阻尼绕组		1.16	1.14	1.1	1.07	1.05	1.03	1.02	1
有阻尼绕组	1.11	1.07	1.07	1.05	1.03	1.02	1	1	1

2) 按发电机运算曲线(数字表)计算。用运算曲线或查相对应的发电机运算曲线数字表(如表6-1-10、表6-1-11所示)计算交流分量是十分简便的。由于在制定运算曲线(数字表)时计及了同步电机的过渡过程和负荷对交流分量的影响,因而也是比较准确的。用运算曲线(数字表)计算交流分量的步骤如下:

a. 网络简化。根据计算条件,首先去掉系统中所有负荷、线路电容、并联电抗等,同时忽略系统各元件的电阻,发电机用超瞬态电抗  $X_{*d}''$  来代表,将电气距离(对短路点而言)大致相等的、同类型的发电机合并为一台等值电机,用统一的基准容量(如1000MVA或100MVA)和平均额定电压(如230、115、37kV等)归算系统各元件电抗的标么值,进行网络简化,求得各电源对短路点的等值电抗。

b. 求计算用电抗  $X_c$ 。运算曲线(数字表)  $I_{kt} = f(X_c, t)$  的自变量  $X_c$ , 是与其相应发电机的额定容量为基准容量的标么电抗值。在使用运算曲线时,应将各电源对短路点的等值电抗归算到以本电源等值发电机的额定容量为基准容量的标么值,这个电抗称为计算用电抗  $X_c$ 。

c. 求  $t$  时刻的短路电流交流分量的标么值。根据求得的各个电源对短路点的  $X_c$ , 查相应的  $t$  时刻的运算曲线,或查相对应的发电机运算曲线数字表,即可求得交流分量的标么值。

d. 求  $t$  时刻的短路电流交流分量的有名值。由运算曲线(数字表)查得的短路电流标么值  $I_*$  乘以相应电源的基准电流  $I_{r,j}$  (由等值发电机的额定容量和相应的平均额定电压求得),即得到该分支短路电流交流分量的有名值

$$I_{kt} = I_* I_{r,j} \quad (6-1-20)$$

e. 参数的差异所引起的交流分量的修正。当发电机的参数与“标准参数”有较大差别

时，为提高计数的精确度，可对交流分量进行修正计算。同步发电机的标准参数见表6-1-12。

表6-1-10

汽轮发电机运算曲线数字表

$X_c$	$t$ (s)										
	0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	1	2	4
0.12	8.963	8.603	7.186	6.400	5.220	4.252	4.006	3.821	3.344	2.795	2.512
0.14	7.718	7.467	6.441	5.839	4.878	4.040	3.829	3.673	3.280	2.808	2.526
0.16	6.763	6.545	5.660	5.146	4.336	3.649	3.481	3.359	3.060	2.706	2.490
0.18	6.020	5.844	5.122	4.697	4.016	3.429	3.288	3.186	2.944	2.659	2.476
0.20	5.432	5.280	4.661	4.297	3.715	3.217	3.099	3.016	2.825	2.607	2.462
0.22	4.938	4.813	4.296	3.988	3.487	3.052	2.951	2.882	2.729	2.561	2.444
0.24	4.526	4.421	3.984	3.721	3.286	2.904	2.816	2.758	2.638	2.515	2.425
0.26	4.178	4.088	3.714	3.486	3.106	2.769	2.693	2.644	2.551	2.467	2.404
0.28	3.872	3.705	3.472	3.274	2.939	2.641	2.575	2.534	2.464	2.415	2.378
0.30	3.603	3.536	3.255	3.081	2.785	2.520	2.463	2.429	2.379	2.360	2.347
0.32	3.368	3.310	3.063	2.909	2.646	2.410	2.360	2.332	2.299	2.306	2.316
0.34	3.159	3.108	2.891	2.754	2.519	2.308	2.264	2.241	2.222	2.252	2.283
0.36	2.975	2.930	2.736	2.614	2.403	2.213	2.175	2.156	2.149	2.109	2.250
0.38	2.811	2.770	2.597	2.487	2.297	2.126	2.093	2.077	2.081	2.148	2.217
0.40	2.664	2.628	2.471	2.372	2.199	2.045	2.017	2.004	2.017	2.099	2.184
0.42	2.531	2.499	2.357	2.267	2.110	1.970	1.946	1.936	1.956	2.052	2.151
0.44	2.411	2.382	2.253	2.170	2.027	1.900	1.879	1.872	1.899	2.006	2.119
0.46	2.302	2.275	2.157	2.082	1.950	1.835	1.817	1.812	1.845	1.963	2.088
0.48	2.203	2.178	2.069	2.000	1.879	1.774	1.759	1.756	1.794	1.921	2.057
0.50	2.111	2.088	1.988	1.924	1.813	1.717	1.704	1.703	1.746	1.880	2.027
0.55	1.913	1.894	1.810	1.757	1.665	1.589	1.581	1.583	1.635	1.785	1.953
0.60	1.748	1.732	1.662	1.617	1.539	1.478	1.474	1.479	1.538	1.699	1.884
0.65	1.610	1.596	1.535	1.497	1.431	1.382	1.381	1.388	1.452	1.621	1.819
0.70	1.492	1.479	1.426	1.393	1.336	1.297	1.298	1.307	1.375	1.549	1.734
0.75	1.390	1.379	1.332	1.302	1.253	1.221	1.225	1.235	1.305	1.484	1.596
0.80	1.301	1.291	1.249	1.223	1.179	1.154	1.159	1.171	1.243	1.424	1.474
0.85	1.222	1.214	1.176	1.152	1.114	1.094	1.100	1.112	1.186	1.358	1.370
0.90	1.153	1.145	1.110	1.089	1.055	1.039	1.047	1.060	1.134	1.279	1.279
0.95	1.091	1.084	1.052	1.032	1.002	0.990	0.998	1.012	1.087	1.200	1.200
1.00	1.035	1.028	0.999	0.981	0.954	0.945	0.954	0.968	1.013	1.129	1.129
1.05	0.985	0.979	0.952	0.935	0.910	0.904	0.914	0.928	1.003	1.067	1.067
1.10	0.940	0.934	0.908	0.893	0.870	0.866	0.876	0.891	0.966	1.011	1.011
1.15	0.898	0.892	0.869	0.854	0.833	0.832	0.842	0.857	0.932	0.961	0.961

续表

$X_c$	$t$ (s)										
	0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	1	2	4
1.20	0.860	0.855	0.832	0.819	0.800	0.800	0.811	0.825	0.898	0.915	0.915
1.25	0.825	0.820	0.799	0.786	0.769	0.770	0.781	0.796	0.864	0.874	0.874
1.30	0.793	0.788	0.768	0.756	0.740	0.743	0.754	0.769	0.831	0.836	0.836
1.35	0.763	0.758	0.739	0.728	0.713	0.717	0.728	0.743	0.800	0.802	0.802
1.40	0.735	0.731	0.713	0.703	0.688	0.693	0.705	0.720	0.769	0.770	0.770
1.45	0.710	0.705	0.688	0.678	0.665	0.671	0.682	0.697	0.740	0.740	0.740
1.50	0.686	0.682	0.665	0.656	0.644	0.650	0.662	0.676	0.713	0.713	0.713
1.55	0.663	0.659	0.644	0.635	0.623	0.630	0.642	0.657	0.687	0.687	0.687
1.60	0.642	0.639	0.623	0.615	0.604	0.612	0.624	0.638	0.664	0.664	0.664
1.65	0.622	0.619	0.605	0.596	0.586	0.594	0.606	0.621	0.642	0.642	0.642
1.70	0.604	0.601	0.587	0.579	0.570	0.578	0.590	0.604	0.621	0.621	0.621
1.75	0.586	0.583	0.570	0.562	0.554	0.562	0.574	0.589	0.602	0.602	0.602
1.80	0.570	0.567	0.554	0.547	0.539	0.548	0.559	0.573	0.584	0.584	0.584
1.85	0.554	0.551	0.539	0.532	0.524	0.534	0.545	0.559	0.566	0.566	0.566
1.90	0.540	0.537	0.525	0.518	0.511	0.521	0.532	0.544	0.550	0.550	0.550
1.95	0.526	0.523	0.511	0.505	0.498	0.508	0.520	0.530	0.535	0.535	0.535
2.00	0.512	0.510	0.498	0.492	0.486	0.496	0.508	0.517	0.521	0.521	0.521
2.05	0.500	0.497	0.486	0.480	0.474	0.485	0.496	0.504	0.507	0.507	0.507
2.10	0.488	0.485	0.475	0.469	0.463	0.474	0.485	0.492	0.494	0.494	0.494
2.15	0.476	0.474	0.464	0.458	0.453	0.463	0.474	0.481	0.482	0.482	0.482
2.20	0.465	0.463	0.453	0.448	0.443	0.453	0.464	0.470	0.470	0.470	0.470
2.25	0.455	0.453	0.443	0.438	0.433	0.444	0.454	0.459	0.459	0.459	0.459
2.30	0.445	0.443	0.433	0.428	0.424	0.435	0.444	0.448	0.448	0.448	0.448
2.35	0.435	0.433	0.424	0.419	0.415	0.426	0.435	0.438	0.438	0.438	0.438
2.40	0.426	0.424	0.415	0.411	0.407	0.418	0.426	0.428	0.428	0.428	0.428
2.45	0.417	0.415	0.407	0.402	0.399	0.410	0.417	0.419	0.419	0.419	0.419
2.50	0.409	0.407	0.399	0.394	0.391	0.402	0.409	0.410	0.410	0.410	0.410
2.55	0.400	0.399	0.391	0.387	0.383	0.394	0.401	0.402	0.402	0.402	0.402
2.60	0.392	0.391	0.383	0.379	0.376	0.387	0.393	0.393	0.393	0.393	0.393
2.65	0.385	0.384	0.376	0.372	0.369	0.380	0.385	0.386	0.386	0.386	0.386
2.70	0.377	0.377	0.369	0.365	0.362	0.373	0.378	0.378	0.378	0.378	0.378
2.75	0.370	0.370	0.362	0.359	0.356	0.367	0.371	0.371	0.371	0.371	0.371
2.80	0.363	0.363	0.356	0.352	0.350	0.361	0.364	0.364	0.364	0.364	0.364
2.85	0.357	0.356	0.350	0.346	0.344	0.354	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357

续表

$X_c$	$t$ (s)										
	0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	1	2	4
2.90	0.350	0.350	0.344	0.340	0.338	0.348	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351
2.95	0.344	0.344	0.338	0.335	0.333	0.343	0.344	0.344	0.344	0.344	0.344
3.00	0.338	0.338	0.332	0.329	0.327	0.337	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338
3.05	0.332	0.332	0.327	0.324	0.322	0.331	0.332	0.332	0.332	0.332	0.332
3.10	0.327	0.326	0.322	0.319	0.317	0.326	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327
3.15	0.321	0.321	0.317	0.314	0.312	0.321	0.321	0.321	0.321	0.321	0.321
3.20	0.316	0.316	0.312	0.309	0.307	0.316	0.316	0.316	0.316	0.316	0.316
3.25	0.311	0.311	0.307	0.304	0.303	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311
3.30	0.306	0.306	0.302	0.300	0.298	0.306	0.306	0.306	0.306	0.306	0.306
3.35	0.301	0.301	0.298	0.295	0.294	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301
3.40	0.297	0.297	0.293	0.291	0.290	0.297	0.297	0.297	0.297	0.297	0.297
3.45	0.292	0.292	0.289	0.287	0.286	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292	0.292

表 6-1-11

水轮发电机运算曲线数字表

$X_c$	$t$ (s)										
	0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	1	2	4
0.18	6.127	5.695	4.623	4.331	4.100	3.933	3.867	3.807	3.605	3.300	3.081
0.20	5.526	5.184	4.297	4.045	3.856	3.754	3.716	3.681	3.563	3.378	3.234
0.22	5.055	4.767	4.026	3.806	3.633	3.556	3.531	3.508	3.430	3.302	3.191
0.24	4.647	4.402	3.764	3.575	3.433	3.378	3.363	3.348	3.300	3.220	3.151
0.26	4.290	4.083	3.538	3.375	3.253	3.216	3.208	3.200	3.174	3.133	3.098
0.28	3.993	3.816	3.343	3.200	3.096	3.073	3.070	3.067	3.060	3.049	3.043
0.30	3.727	3.574	3.163	3.039	2.950	2.938	2.941	2.943	2.952	2.970	2.993
0.32	3.494	3.360	3.001	2.892	2.817	2.815	2.822	2.828	2.851	2.895	2.943
0.34	3.285	3.168	2.851	2.755	2.692	2.699	2.709	2.719	2.754	2.820	2.891
0.36	3.095	2.991	2.712	2.627	2.574	2.589	2.602	2.614	2.660	2.745	2.837
0.38	2.922	2.831	2.583	2.508	2.464	2.484	2.500	2.515	2.569	2.671	2.782
0.40	2.767	2.685	2.464	2.398	2.361	2.388	2.405	2.422	2.484	2.600	2.728
0.42	2.627	2.554	2.356	2.297	2.267	2.297	2.317	2.336	2.404	2.532	2.675
0.44	2.500	2.434	2.256	2.204	2.179	2.214	2.235	2.255	2.329	2.467	2.624
0.46	2.385	2.325	2.164	2.117	2.098	2.136	2.158	2.180	2.258	2.406	2.575
0.48	2.280	2.225	2.079	2.038	2.023	2.064	2.087	2.110	2.192	2.348	2.527
0.50	2.183	2.134	2.001	1.964	1.953	1.996	2.021	2.044	2.130	2.293	2.482
0.52	2.095	2.050	1.928	1.895	1.887	1.933	1.958	1.983	2.071	2.241	2.438
0.54	2.013	1.972	1.861	1.831	1.826	1.874	1.900	1.925	2.015	2.191	2.396

续表

$X_c$	$I_*$	$t(s)$										
		0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	1	2	4
0.56		1.938	1.899	1.798	1.771	1.769	1.818	1.845	1.870	1.963	2.143	2.355
0.60		1.802	1.770	1.683	1.662	1.665	1.717	1.744	1.770	1.866	2.054	2.263
0.65		1.658	1.630	1.559	1.543	1.550	1.605	1.633	1.660	1.759	1.950	2.137
0.70		1.534	1.511	1.452	1.440	1.451	1.507	1.535	1.562	1.663	1.846	1.964
0.75		1.428	1.408	1.358	1.349	1.363	1.420	1.449	1.476	1.578	1.741	1.794
0.80		1.336	1.318	1.276	1.270	1.286	1.343	1.372	1.400	1.498	1.620	1.642
0.85		1.254	1.239	1.203	1.199	1.217	1.274	1.303	1.331	1.423	1.507	1.513
0.90		1.182	1.169	1.138	1.135	1.155	1.212	1.241	1.268	1.352	1.403	1.403
0.95		1.118	1.106	1.080	1.078	1.099	1.156	1.185	1.210	1.282	1.308	1.308
1.00		1.061	1.050	1.027	1.027	1.048	1.105	1.132	1.156	1.211	1.225	1.225
1.05		1.009	0.999	0.979	0.980	1.002	1.058	1.084	1.105	1.146	1.152	1.152
1.10		0.962	0.953	0.936	0.937	0.959	1.015	1.038	1.057	1.085	1.087	1.087
1.15		0.919	0.911	0.896	0.898	0.920	0.974	0.995	1.011	1.029	1.029	1.029
1.20		0.880	0.872	0.859	0.862	0.885	0.936	0.955	0.966	0.977	0.977	0.977
1.25		0.843	0.837	0.825	0.829	0.852	0.900	0.916	0.923	0.930	0.930	0.930
1.30		0.810	0.804	0.794	0.798	0.821	0.866	0.878	0.884	0.888	0.888	0.888
1.35		0.780	0.774	0.765	0.769	0.792	0.834	0.843	0.847	0.849	0.849	0.849
1.40		0.751	0.746	0.738	0.743	0.766	0.803	0.810	0.812	0.813	0.813	0.813
1.45		0.725	0.720	0.713	0.718	0.740	0.774	0.778	0.780	0.780	0.780	0.780
1.50		0.700	0.696	0.690	0.695	0.717	0.746	0.749	0.750	0.750	0.750	0.750
1.55		0.677	0.673	0.668	0.673	0.694	0.719	0.722	0.722	0.722	0.722	0.722
1.60		0.655	0.652	0.647	0.652	0.673	0.694	0.696	0.696	0.695	0.696	0.696
1.65		0.635	0.632	0.628	0.633	0.653	0.671	0.672	0.672	0.672	0.672	0.672
1.70		0.616	0.613	0.610	0.615	0.634	0.649	0.649	0.649	0.649	0.649	0.649
1.75		0.598	0.595	0.592	0.598	0.616	0.628	0.628	0.628	0.628	0.628	0.628
1.80		0.581	0.578	0.576	0.582	0.599	0.608	0.608	0.608	0.608	0.608	0.608
1.85		0.565	0.563	0.561	0.566	0.582	0.590	0.590	0.590	0.590	0.590	0.590
1.90		0.550	0.548	0.546	0.552	0.566	0.572	0.572	0.572	0.572	0.572	0.572
1.95		0.536	0.533	0.532	0.538	0.551	0.556	0.556	0.556	0.556	0.556	0.556
2.00		0.522	0.520	0.519	0.524	0.537	0.540	0.540	0.540	0.540	0.540	0.540
2.05		0.509	0.507	0.507	0.512	0.523	0.525	0.525	0.525	0.525	0.525	0.525
2.10		0.497	0.495	0.495	0.500	0.510	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512	0.512
2.15		0.485	0.483	0.483	0.488	0.497	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498
2.20		0.474	0.472	0.472	0.477	0.485	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486	0.486

6

续表

$X_c$	$I_e$	$t$ (s)										
		0	0.01	0.06	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	1	2	4
2.25		0.463	0.462	0.462	0.466	0.473	0.474	0.474	0.474	0.474	0.474	0.474
2.30		0.453	0.452	0.452	0.456	0.462	0.462	0.462	0.462	0.462	0.462	0.462
2.35		0.443	0.442	0.442	0.446	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452	0.452
2.40		0.434	0.433	0.433	0.436	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441	0.441
2.45		0.425	0.424	0.424	0.427	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431	0.431
2.50		0.416	0.415	0.415	0.419	0.422	0.422	0.422	0.422	0.422	0.422	0.422
2.55		0.408	0.407	0.407	0.410	0.413	0.413	0.413	0.413	0.413	0.413	0.413
2.60		0.400	0.399	0.399	0.402	0.404	0.404	0.404	0.404	0.404	0.404	0.404
2.65		0.392	0.391	0.392	0.394	0.396	0.396	0.396	0.396	0.396	0.396	0.396
2.70		0.385	0.384	0.384	0.387	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388	0.388
2.75		0.378	0.377	0.377	0.379	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380
2.80		0.371	0.370	0.370	0.372	0.373	0.373	0.373	0.373	0.373	0.373	0.373
2.85		0.364	0.363	0.364	0.365	0.366	0.366	0.366	0.366	0.366	0.366	0.366
2.90		0.358	0.357	0.357	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359
2.95		0.351	0.351	0.351	0.352	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353	0.353
3.00		0.345	0.345	0.345	0.346	0.346	0.346	0.346	0.346	0.346	0.346	0.346
3.05		0.339	0.339	0.339	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340	0.340
3.10		0.334	0.333	0.333	0.334	0.334	0.334	0.334	0.334	0.334	0.334	0.334
3.15		0.328	0.328	0.328	0.329	0.329	0.329	0.329	0.329	0.329	0.329	0.329
3.20		0.323	0.322	0.322	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323	0.323
3.25		0.317	0.317	0.317	0.318	0.318	0.318	0.318	0.318	0.318	0.318	0.318
3.30		0.312	0.312	0.312	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313	0.313
3.35		0.307	0.307	0.307	0.308	0.308	0.308	0.308	0.308	0.308	0.308	0.308
3.40		0.303	0.302	0.302	0.303	0.303	0.303	0.303	0.303	0.303	0.303	0.303
3.45		0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298

表 6-1-12

同步发电机的标准参数

发电机类型	$X_d$ (B)	$X'_d$ (B)	$X''_d$ (B)	$X_q$ (B)	$X''_q$ (B)	$T'_{d0}$ (B) (s)	$T''_{d0}$ (B) (s)	$T''_{q0}$ (B) (s)	$T_d$ (B) (s)	$T'_d$ (B) (s)	$T''_d$ (B) (s)	$\cos\varphi$
汽轮发电机	1.9040	0.2150	0.1385	0.9040	0.1385	9.0283	0.1819	2.0125	0.2560	1.0195	0.1172	0.825
水轮发电机	0.9851	0.3025	0.2055	0.6423	0.2257	5.9000	0.0673	0.1581	0.2124	1.8117	0.0457	0.850

如果实际电源的发电机的时间常数  $T$  与表 6-1-12 所示数值相差较大时, 则查曲线 (数字表) 时应用修正后的短路时间。

当  $t \leq 0.06\text{s}$  时, 交流分量处于超瞬态过程, 可用换算过时间  $t''$  代替实际短路时间  $t$  来查曲线 (数字表), 以求得  $t$  时刻的实际短路电流。 $t''$  的计算式为

$$t'' = \frac{T_d''(B)}{T_d''} t \quad (6-1-21)$$

$$T_d''(B) = \frac{X_d''(B)}{X_d'(B)} T_{d0}''(B), T_d'' = \frac{X_d''}{X_d'} T_{d0}''$$

当  $t > 0.06\text{s}$  时, 交流分量处于瞬态过程, 可用换算过的时间  $t'$  代替实际短路时间  $t$  来查曲线, 以求得  $t'$  时刻的实际短路电流。  $t'$  的计算式为

$$t' = \frac{T_d'(B)}{T_d'} t \quad (6-1-22)$$

$$T_d'(B) = \frac{X_d'(B)}{X_d(B)} T_{d0}'(B), T_d' = \frac{X_d'}{X_d} T_{d0}'$$

以上式中  $T_d''(B)$ 、 $T_{d0}''$ ——发电机的短路超瞬态时间常数;  
 $T_{d0}''(B)$ 、 $T_{d0}''$ ——发电机的开路超瞬态时间常数;  
 $T_d'(B)$ 、 $T_d'$ ——发电机的短路瞬态时间常数;  
 $T_{d0}'(B)$ 、 $T_{d0}'$ ——发电机的开路瞬态时间常数;  
 $X_d''(B)$ 、 $X_d''$ ——发电机的超瞬态电抗;  
 $X_d'(B)$ 、 $X_d'$ ——发电机的瞬态电抗;  
 $X_d(B)$ 、 $X_d$ ——发电机的同步电抗。

以上各式中带有标号 (B) 的是标准参数, 不带标号 (B) 的是发电机的实际参数。

(4) 短路点由多个电源供电的三相短路电流初始值  $I_k''$  的计算。当一个网络由参数条件相差悬殊的多个电源供电, 则在绘制短路电流计算网络时, 应将参数条件相近的电源合并, 分成几个等效电源组。然后分别算出各等效电源组向短路点提供的短路电流, 最后将各组提供的短路电流相加, 即得到通过短路点的全部短路电流。

电源参数条件指发电机型式、电源容量以及电源至短路点的阻抗大小等。如图 6-1-4 (a) 为原等值网络多电源供电, 假设图 6-1-4 (a) 中电源 1 和 2, 3 和 4 的参数条件相近, 均为有限电源容量; 电源 5 为无限大电源容量。下面以计算短路点 k 的三相短路电流交流分量为例, 叙述计算步骤:

1) 先将各电源的内电抗  $x_d''$  和支路外电抗  $x_w$  按同一基准容量  $S_j$  (一般  $S_j = 100\text{MVA}$ ) 归算为标么值, 再将各电源及其所在的支路电抗合并成一个等效标么电抗  $X_*$ , 归算后的等值网络如图 6-1-4 (b) 所示。

2) 将各电源按其参数条件分组合并, 电源  $S_{*1}$  和  $S_{*2}$  合并为  $S_{*\Sigma 1}$ , 电源  $S_{*3}$  和  $S_{*4}$  合并为  $S_{*\Sigma 2}$ ; 支路电抗  $X_{*1}$  和  $X_{*2}$  合并为  $X_{*11}$ ,  $X_{*3}$  和  $X_{*4}$  合并为  $X_{*21}$ ; 其等值网络如图 6-1-4 (c) 所示。

3) 消去公共支路电抗  $X_{*6}$ , 求出各组电源至短路点 k 之间的等值电抗, 其等值网络如图 6-1-4 (d) 所示。图中

$$\left. \begin{aligned} X_{*12} &= X_{*\Sigma} / C_1 \\ X_{*22} &= X_{*\Sigma} / C_2 \\ X_{*52} &= X_{*\Sigma} / C_3 \end{aligned} \right\} \quad (6-1-23)$$

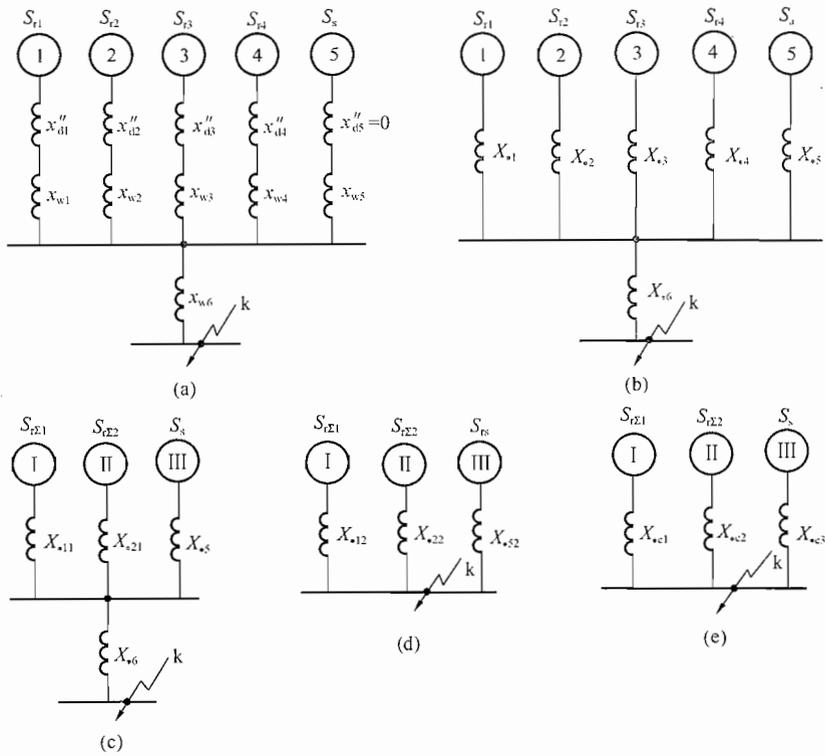


图 6-1-4 多电源网络短路电流计算程序

(a) 原等值网络；(b) 按同一基准容量归算后的等值网络；(c) 按参数条件分组合并后的等值网络；  
(d) 消去公共支路电抗后的等值网络；(e) 按各支路电源总容量归算后的等值电抗网络

式中  $X_{*\Sigma}$ ——短路电路的总电抗，且有

$$X_{*\Sigma} = \frac{X_{*11}X_{*21}X_{*5}}{X_{*11}X_{*21} + X_{*21}X_{*5} + X_{*5}X_{*11}} + X_{*6}$$

$C_1, C_2, C_3$ ——分布系数，且有

$$C_1 = \frac{X_{*21}X_{*5}}{X_{*11}X_{*21} + X_{*21}X_{*5} + X_{*5}X_{*11}}$$

$$C_2 = \frac{X_{*11}X_{*5}}{X_{*11}X_{*21} + X_{*21}X_{*5} + X_{*5}X_{*11}}$$

$$C_3 = \frac{X_{*11}X_{*21}}{X_{*11}X_{*21} + X_{*21}X_{*5} + X_{*5}X_{*11}}$$

对于同一个短路点，应有  $C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n = 1$ 。

4) 再将  $X_{*12}$  和  $X_{*22}$  分别归算到以  $S_{r\Sigma1}$  和  $S_{r\Sigma2}$  为基准容量的标么值  $X_{*c1}$  和  $X_{*c2}$ 。至于  $X_{*52}$ ，因为该支路由无限大电源容量供电，故可不必换算。取  $X_{*c3} = X_{*52}$ ，归算后等值电抗网络如图 6-1-4(e) 所示。

5) 根据电源组 I 和 II 的发电机类型及其所在支路的标么值  $X_{*c1}$  和  $X_{*c2}$ ，即可从相应的运算

曲线(数字表)上查出某一时刻  $t$  由电源组 I 和 II 通过相应支路, 送到短路点去的短路电流交流分量标么值  $I''_{*1}$  和  $I''_{*2}$ ; 支路 III 采用式 (6-1-18), 按无限大电源容量系统计算, 即

$$I''_{*3} = \frac{1}{X_{*c3}}$$

6) 求出各组电源送到短路点去的短路电流交流分量有效值  $I''_1$ 、 $I''_2$ 、 $I''_3$ 。此三路电流之和即为通过短路点  $k$  的全部短路电流  $I''_{\Sigma}$ , 即

$$I''_{\Sigma} = I''_1 + I''_2 + I''_3 \quad (\text{kA}) \quad (6-1-24)$$

$$\text{式中, } I''_1 = I''_{*1} \frac{S_{r\Sigma 1}}{\sqrt{3}U_j}; \quad I''_2 = I''_{*2} \frac{S_{r\Sigma 2}}{\sqrt{3}U_j}; \quad I''_3 = I''_{*3} \frac{S_j}{\sqrt{3}U_j} = \frac{S_j}{\sqrt{3}U_j X_{*c3}}。$$

如果支路 I 或 II 的等效电抗标么值  $X_{*c} \geq 3$ , 则通过该支路的短路电流交流分量有效值  $I''$  在整个短路过渡过程可以认为不衰减, 因而可以按无限大电源容量系统考虑, 直接用公式算出, 即

$$I'' = \frac{S_{r\Sigma}}{\sqrt{3}U_j X_{*c}} \quad (\text{kA})$$

(5) 三相短路电流峰值  $i_p$  (即短路全电流最大瞬时值) 的计算和全电流最大有效值  $I_p$  的计算。根据短路电流变化可知, 短路全电流峰值  $i_p$  包含有交流分量  $i_{AC}$  和直流分量  $i_{DC}$ 。短路电流直流分量的起始值  $A = \sqrt{2}I''_k$ , 短路全电流峰值  $i_p$  出现在短路发生后的半周期 (0.01s) 内的瞬间, 其计算式为

$$i_p = K_p \sqrt{2}I''_k \quad (6-1-25)$$

短路全电流最大有效值  $I_p$  按式 (6-1-26) 计算

$$I_p = I''_k \sqrt{1 + 2(K_p - 1)^2} \quad (6-1-26)$$

式中  $K_p$ ——短路电流峰值系数,  $K_p = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_f}}$ ;

$T_f$ ——短路电流直流分量衰减时间常数, s, 当电网频率为 50Hz 时,  $T_f = \frac{X_{\Sigma}}{314R_{\Sigma}}$ ;

$X_{\Sigma}$ ——短路电路总电抗,  $\Omega$ ;

$R_{\Sigma}$ ——短路电路总电阻,  $\Omega$ 。

如果电路只有电抗, 则  $T_f = \infty$ ,  $K_p = 2$ ; 如果电路只有电阻, 则  $T_f = 0$ ,  $K_p = 1$ ; 可见  $2 \geq K_p \geq 1$ 。

$K_p$  与比值  $\frac{X_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}$  的关系曲线如图 6-1-5 所示。工程设计中  $K_p$  的取值以及  $i_p$  的计算值如下:

1) 当短路发生在发电机端时, 取  $K_p = 1.9$ ,  $i_p = 2.69I''_k$ ,  $I_p = 1.62I''_k$ 。

2) 当短路发生在发电厂高压侧母线时, 取  $K_p = 1.85$ ,  $i_p = 2.62I''_k$ ,  $I_p = 1.56I''_k$ 。

3) 当短路点远离发电厂、短路电路的总电阻较小、总电抗较大 ( $R_{\Sigma} \leq \frac{1}{3}X_{\Sigma}$ ) 时,  $T_f \approx 0.05\text{s}$ , 取  $K_p = 1.8$ ,  $i_p = 2.55I''_k$ ,  $I_p = 1.51I''_k$ 。

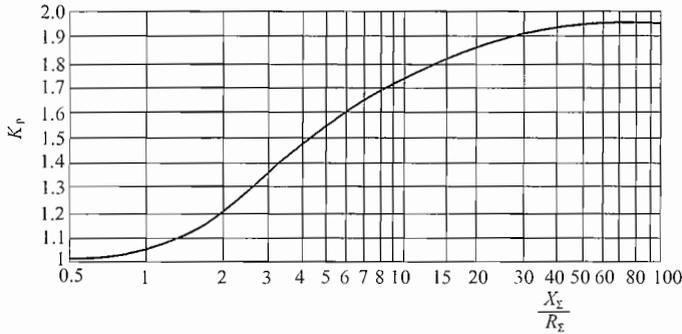


图 6-1-5  $K_p$  与比值  $\frac{X_\Sigma}{R_\Sigma}$  的关系曲线

4) 在电阻较大 ( $R_\Sigma > \frac{1}{3}X_\Sigma$ ) 的电路中, 发生短路时, 短路电流非周期分量衰减较快, 可取  $K_p = 1.3$ ,  $i_p = 1.84I''_k$ ,  $I_p = 1.09I''_k$ 。

(6) 电动机对短路电流的影响。

1) 同步电动机在短路计算中, 按同步发电机处理。高压同步电动机对短路电流的影响可按有限电源容量考虑。同步电动机在短路过渡过程任一时刻, 所给出的短路电流周期分量可利用运算曲线(数字表)计算。如果同步电动机的励磁绕组时间常数  $T_d$  与制定曲线的标准参数(表 6-1-12)相差较大时, 则时间  $t$  应按式(6-1-21)和式(6-1-22)修正。而励磁系统时间常数  $T_e$  对周期分量的影响很小, 可不修正。

2) 高压异步电动机对短路电流的影响, 只有在计算电动机附近短路点的短路峰值电流时才予以考虑。在下列情况下, 可不考虑高压异步电动机对短路峰值电流的影响。

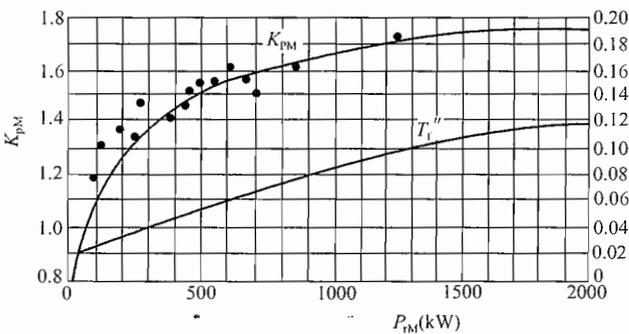


图 6-1-6 异步电动机额定容量  $P_m$  与冲击系数  $K_{pM}$  的关系  
 $T_f''$ —反馈电流周期分量衰减时间常数

- a. 异步电动机与短路点的连接已相隔一个变压器。
  - b. 在计算不对称短路电流时。
- 3) 异步电动机提供的反馈电流的计算。

a. 由一台异步电动机提供的反馈电流周期分量初始值的计算式为

$$I''_M = K_{stM} I_{rM} \times 10^{-3} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-27)$$

b. 由  $n$  台异步电动机提供的反馈电流周期分量初始值的计算式为

$$I''_M = \sum_{i=1}^n K_{stMi} I_{rMi} \times 10^{-3} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-28)$$

c. 由  $n$  台异步电动机提供的反馈电流峰值电流的计算式为

$$i_{pM} = 1.1 \times \sqrt{2} \sum_{i=1}^n K_{pMi} K_{stMi} I_{rMi} \times 10^{-3} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-29)$$

以上式中  $I''_M$ ——电动机反馈电流交流分量初始值（有效值），kA；  
 $K_{stM}$ ——电动机反馈电流倍数，可取其起动电流倍数；  
 $K_{stMi}$ ——第  $i$  台电动机的反馈电流倍数，可取起动电流倍数；  
 $I_{rM}$ ——电动机额定电流，kA；  
 $I_{rMi}$ ——第  $i$  台电动机额定电流，kA；  
 $K_{pMi}$ ——第  $i$  台电动机反馈电流峰值系数。

4) 计入异步电动机影响后的短路电流。

a. 三相短路电流交流分量初始值的计算式为

$$I''_k = I''_s + I''_M \quad (\text{kA}) \quad (6-1-30)$$

b. 短路电流峰值计算式为

$$i_p = i_{ps} + i_{pM} = \sqrt{2}(K_{ps}I''_s + 1.1K_{pM}I''_M) \quad (\text{kA}) \quad (6-1-31)$$

式中  $I''_s$ ——由系统送到短路点的三相短路电流初始值，kA；

$I''_M$ ——由短路点附近的异步电动机反馈电流初始值，kA；

$i_{ps}$ ——由系统送到短路点的短路电流峰值，kA；

$i_{pM}$ ——由短路点附近的电动机反馈的短路电流峰值，kA；

$K_{ps}$ ——由系统馈送的短路电流峰值系数，kA；

$K_{pM}$ ——由异步电动机馈送的短路电流峰值系数，一般可取 1.4 ~ 1.7，正确数据可查图 6-1-6。

(7) 两相不接地短路电流的计算。两相不接地短路电流初始值  $I''_{k2}$  的计算式为

$$\text{对于汽轮发电机} \quad I''_{k2} = \frac{E''}{2(X''_d + X_w)} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-32)$$

$$\text{对于水轮发电机} \quad I''_{k2} = \frac{KE''}{2(X''_d + X_w)} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-33)$$

将两相短路超瞬态电流计算公式与三相短路超瞬态电流计算公式相除，得

$$\frac{I''_{k2}}{I''_{k3}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866 \quad (6-1-34)$$

而  $i_p, I_p$  均正比于  $I''_k$ ，故

$$I''_{k2} = 0.866I''_{k3}; \quad i_{pk2} = 0.866i_{pk3}; \quad I_{pk2} = 0.866I_{pk3} \quad (6-1-35)$$

两相短路稳态电流  $I_{k2}$  与三相短路稳态电流  $I_{k3}$  的比值关系，视短路点与电源的距离远近而定：

1) 在发电机出口处发生短路时

$$I_{k2} = 1.5I_{k3} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-36)$$

2) 在远距离点短路时，即  $X_{*c} > 3$  时，因  $I_k = I''_k$ ，故

$$I_{k2} = 0.866I_{k3} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-37)$$

3) 一般可这样估算

$$X_{*c} > 0.6 \text{ 时, } I_{k2} < I_{k3}$$

$$X_{*c} \approx 0.6 \text{ 时, } I_{k2} = I_{k3}$$

$$X_{*c} < 0.6 \text{ 时, } I_{k2} > I_{k3} \quad (6-1-38)$$

在靠近发电机端短路时，两相短路电流的交流分量亦可利用三相短路的运算曲线（数

字表)进行近似计算,其方法是以两倍的 $X_{*c}$ ( $X_{*c}$ 为计算三相短路电流用的短路电路电抗的标么值)作横坐标,从运算曲线(数字表)上查得 $I_{*z}$ ,然后按式(6-1-39)求出两相短路电流在某一时刻 $t$ 的交流分量有名值 $I_{zk2}$

$$I_{zk2} = \sqrt{3} I_{*z} I_{r\Sigma} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-39)$$

式中  $I_{r\Sigma}$ ——有限电源容量系统向短路点馈送短路电流时所有发电机额定电流的总和, kA。

(8) 单相接地电容电流的计算。电网中的单相接地电容电流由电力线路和电力设备(同步发电机、大容量同步电动机及变压器等)两部分的电容电流组成。变电站电力设备增加的电容电流见表6-1-13。

1) 电缆线路的单相接地电容电流计算式为

$$6\text{kV 电缆线路} \quad I_c = \frac{95 + 2.84S}{2200 + 6S} U_r l \quad (\text{A}) \quad (6-1-40)$$

$$10\text{kV 电缆线路} \quad I_c = \frac{95 + 1.44S}{2200 + 0.23S} U_r l \quad (\text{A}) \quad (6-1-41)$$

电缆线路的单相接地电容电流还可以按式(6-1-42)估算

$$I_c = 0.1 U_r l \quad (\text{A}) \quad (6-1-42)$$

6 以上式中  $S$ ——电缆芯线的标称截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$U_r$ ——线路额定线电压, kV;

$l$ ——线路长度, km;

$I_c$ ——接地电容电流, A。

2) 架空线路单相接地电容电流计算式为

$$\text{无架空地线单回路} \quad I_c = 2.7 U_r l \times 10^{-3} \quad (\text{A}) \quad (6-1-43)$$

$$\text{有架空地线单回路} \quad I_c = 3.3 U_r l \times 10^{-3} \quad (\text{A}) \quad (6-1-44)$$

架空线路的单相接地电容电流还可以按式(6-1-45)估算

$$I_c = \frac{U_r l}{350} \quad (\text{A}) \quad (6-1-45)$$

架空线路和电缆线路每千米单相接地电容电流的平均值见表6-1-14。

表6-1-13 变电站电力设备增加的接地电容电流值

额定电压 (kV)	6	10	15	35	63	110
附加值 (%)	18	16	15	13	12	10

表6-1-14 架空线路和电缆线路每千米单相接地电容电流的平均值

电压 (kV)	电缆线路, 当芯线截面积为下列诸值时 ( $\text{mm}^2$ )											架空线路 (A/km)	
	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	单回路	双回路
6	0.33	0.37	0.46	0.52	0.59	0.71	0.82	0.89	1.10	1.20	1.30	0.013	0.017
10	0.46	0.52	0.62	0.69	0.77	0.90	1.00	1.10	1.30	1.40	1.60	0.0256	0.035
35						3.70	4.10	4.40	4.80	5.20		0.078	0.102
												(0.091)	(0.110)

注 括号内数字用于有架空地线的架空线路。

### 6.1.4 低压系统短路电流计算

在计算三相短路电流时阻抗指的是元件的相阻抗,即相正序阻抗。因为已经假定系统是对称的,发生三相短路时只有正序分量存在,所以不需要特别提出序阻抗的概念。

在计算单相短路(包括单相接地故障)电流时,则必须提出序阻抗和相保阻抗的概念。在低压网络中发生不对称短路时,由于短路点离发电机较远,因此可以认为所有元件的负序阻抗等于正序阻抗,即等于相阻抗。

TN 接地系统低压网络的零序阻抗等于相线的零序阻抗与 3 倍保护线(即 PE、PEN 线)的零序阻抗之和,即

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{(0)} &= \dot{Z}_{(0)\cdot\text{ph}} + 3\dot{Z}_{(0)\cdot\text{p}} \\ R_{(0)} &= R_{(0)\cdot\text{ph}} + 3R_{(0)\cdot\text{p}} \\ X_{(0)} &= X_{(0)\cdot\text{ph}} + 3X_{(0)\cdot\text{p}} \end{aligned} \quad (6-1-46)$$

TN 接地系统低压网络的相保阻抗与各序阻抗的关系为

$$\begin{aligned} Z_{\text{ph}\cdot\text{p}} &= \frac{\dot{Z}_{(1)} + \dot{Z}_{(2)} + \dot{Z}_{(0)}}{3} \\ R_{\text{ph}\cdot\text{p}} &= \frac{R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0)}}{3} = \frac{2R_{(1)} + R_{(0)}}{3} \\ X_{\text{ph}\cdot\text{p}} &= \frac{X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)}}{3} = \frac{2X_{(1)} + X_{(0)}}{3} \end{aligned} \quad (6-1-47)$$

#### 6.1.4.1 高压侧系统阻抗

在计算 220/380V 网络短路电流时,变压器高压侧系统阻抗需要计入。若已知高压侧系统短路容量为  $S''_s$ ,则归算到变压器低压侧的高压系统阻抗的计算式为

$$Z_s = \frac{(cU_n)^2}{S''_s} \times 10^3 \quad (\text{m}\Omega) \quad (6-1-48)$$

如不知道其电阻  $R_s$  和电抗  $X_s$  的确切值,可以认为

$$R_s = 0.1X_s, \quad X_s = 0.995Z_s$$

式中  $U_n$ ——变压器低压侧标称电压,0.38kV;  
 $c$ ——电压系数,计算三相短路电流时取 1.05;  
 $S''_s$ ——变压器高压侧系统短路容量, MVA;

$R_s$ 、 $X_s$ 、 $Z_s$ ——归算到变压器低压侧的高压系统电阻、电抗、阻抗, m $\Omega$ 。

至于零序阻抗, Dyn11 和 Yyn0 联结的配电变压器,当低压侧发生单相短路时,零序电流不能在高压侧绕组流通,高压侧对于零序电流相当于开路状态,故在计算单相接地短路电流时可视为无此阻抗。10(6)/0.4kV 配电变压器高压侧系统短路容量与高压侧系统阻抗、相保阻抗(归算到 400V)的数值关系见表 6-1-15。

表 6-1-15 10(6)/0.4kV 配电变压器高压侧系统短路容量与高压侧系统阻抗、相保阻抗(归算到 400V)的数值关系

高压侧短路容量 $S_s''$ (MVA)	相保阻抗(归算到 400V)的数值关系								
	10	20	30	50	75	100	200	300	$\infty$
$Z_s^{①}$	16.00	8.00	5.33	3.20	2.13	1.60	0.80	0.53	0
$X_s^{②}$	15.92	7.96	5.30	3.18	2.12	1.59	0.80	0.53	0
$R_s^{②}$	1.59	0.80	0.53	0.32	0.21	0.16	0.08	0.05	0
$R_{php \cdot s}^{③}$	1.06	0.53	0.35	0.21	0.14	0.11	0.05	0.03	0
$X_{php \cdot s}^{③}$	10.61	5.31	3.53	2.12	1.41	1.06	0.53	0.35	0

① 系统阻抗  $Z_s = \frac{U_{av}^2}{S_s''} \times 10^3 = \frac{160}{S_s''} (\text{m}\Omega)$ ;  $U_{av}$ ——系统平均电压;

② 系统电抗  $X_s = 0.995Z_s$ , 系统电阻  $R_s = 0.1X_s$ ;

③ 对于 Dyn11 或 Yyn0 联结的变压器, 零序电流不能在高压侧流通, 故不计入高压侧的零序阻抗  $R_{(0) \cdot s}, X_{(0) \cdot s}$ , 即

$$\text{相保电阻 } R_{php \cdot s} = \frac{1}{3} [R_{(1) \cdot s} + R_{(2) \cdot s} + R_{(0) \cdot s}] = \frac{2R_{(1) \cdot s}}{3} = \frac{2R_s}{3} \quad (\text{m}\Omega)$$

$$\text{相保电抗 } X_{php \cdot s} = \frac{1}{3} [X_{(1) \cdot s} + X_{(2) \cdot s} + X_{(0) \cdot s}] = \frac{2X_{(1) \cdot s}}{3} = \frac{2X_s}{3} \quad (\text{m}\Omega)$$

6

### 6.1.4.2 10(6)/0.4kV 三相双绕组配电变压器的阻抗

配电变压器的正序阻抗可按表 6-1-2 中有关公式计算, 变压器的负序阻抗等于正序阻抗。Yyn0 联结的变压器的零序阻抗比正序阻抗大得多, 其值由制造厂通过测试提供; Dyn11 联结变压器的零序阻抗如果没有测试数据时, 可取其值等于正序阻抗值, 即相阻抗。表 6-1-16 及表 6-1-17 列出了几种变压器的各序阻抗值和相保阻抗值。

表 6-1-16 S9、S9-M 系列 10/0.4kV 变压器的阻抗平均值(归算到 400V 侧)

型号	电压 (kV)	容量 (kVA)	阻抗 电压 (%)	负载 损耗 (kW)	电阻(mΩ)			电抗(mΩ)			电阻(mΩ)			电抗(mΩ)		
					Dyn11			Dyn11			Yyn0			Yyn0		
					正、 负序 $R_{(1)}$ 、 $R_{(2)}$ $R$	零序 $R_{(0)}$	相保 $R_{php \cdot T}$	正、 负序 $X_{(1)}$ 、 $X_{(2)}$ $X$	零序 $X_{(0)}$	相保 $X_{php \cdot T}$	正、 负序 $R_{(1)}$ 、 $R_{(2)}$ $R$	零序 $R_{(0)}$	相保 $R_{php \cdot T}$	正、 负序 $X_{(1)}$ 、 $X_{(2)}$ $X$	零序 $X_{(0)}$	相保 $X_{php \cdot T}$
S9 S9-M	10/0.4	200	4	2.50 (2.60)	10	10	10	30.40	30.40	30.40	10 (10.40)	36	18.67 (18.93)	30.40 (30.26)	116	58.93 (58.84)
		250	4	3.05	7.81	7.81	7.81	23.75	23.75	23.75	7.81	29.2	14.94	23.75	100.2	49.23
		315	4	3.65	5.89	5.89	5.89	19.43	19.43	19.43	5.89	20.3	10.69	19.43	79.7	39.52
		400	4	4.30	4.30	4.30	4.30	15.41	15.41	15.41	4.30	15.1	7.90	15.41	63	31.27
		500	4	5.10	3.26	3.26	3.26	12.38	12.38	12.38	3.26	12.48	6.33	12.38	53.1	25.95
		630	4.5	6.20	2.50	2.50	2.50	11.15	11.15	11.15	2.50	8.7	4.57	11.15	40.24	20.85
		800	4.5	7.50	1.88	1.88	1.88	8.8	8.8	8.8	1.88	6.5	3.42	8.8	31.80	16.47
		1000	4.5	10.30	1.65	1.65	1.65	7.0	7.0	7.0	1.65	5.8	3.03	7.0	28.20	14.07
		1250	4.5	12.00	1.23	1.23	1.23	5.63	5.63	5.63	1.23	4.4	2.29	5.63	22.6	11.29
		1600	4.5	20.00 (14.5)	1.25	1.25	1.25	4.32	4.32	4.32	1.25 (0.91)	3.2	1.9 (1.67)	4.32 (4.41)	17.1	8.58 (8.64)

注 括号内数值为 S9-M 系列变压器数值。

表 6-1-17 SC(B)9 系列 10/0.4kV 变压器的阻抗平均值(归算到 400V 侧)

型号	电压 (kV)	容量 (kVA)	阻抗电压 (%)	负载损耗 (kW)	电阻 (mΩ)			电抗 (mΩ)			电阻 (mΩ)			电抗 (mΩ)		
					Dyn11			Dyn11			Yyn0			Yyn0		
					正、负序	零序	相保									
					$R_{(1)}$ 、 $R_{(2)}$ R	$R_{(0)}$	$R_{php \cdot T}$	$X_{(1)}$ 、 $X_{(2)}$ X	$X_{(0)}$	$X_{php \cdot T}$	$R_{(1)}$ 、 $R_{(2)}$ R	$R_{(0)}$	$R_{php \cdot T}$	$X_{(1)}$ 、 $X_{(2)}$ X	$X_{(0)}$	$X_{php \cdot T}$
SC9	10/0.4	160	4	1.98	12.38	12.38	12.38	38.04	38.04	38.04	12.38	37.4	20.72	38.04	405	160.36
		200	4	2.24	8.96	8.96	8.96	29.93	29.93	29.93	8.96	35.46	17.79	29.93	359.8	139.89
		250	4	2.41	6.17	6.17	6.17	24.85	24.85	24.85	6.17	33.03	15.12	24.85	303.4	117.70
		315	4	3.10	5.00	5.00	5.00	19.70	19.70	19.70	5.00	29.86	13.29	19.70	230	89.8
		400	4	3.60	3.60	3.60	3.60	15.59	15.59	15.59	3.60	16.88	8.03	15.59	214.8	81.99
SCB9	10/0.4	500	4	4.30	2.75	2.75	2.75	12.50	12.50	12.50	2.75	12.88	6.13	12.50	177.7	67.57
		630	4	5.40	2.18	2.18	2.18	9.92	9.92	9.92	2.18	10.19	4.85	9.92	150.1	56.65
		630	6	5.60	2.26	2.26	2.26	15.07	15.07	15.07	2.26	11.44	5.32	15.07	197.8	75.98
		800	6	6.60	1.65	1.65	1.65	11.89	11.89	11.89	1.65	7.96	3.75	11.89	148.7	57.49
		1000	6	7.60	1.22	1.22	1.22	9.52	9.52	9.52	1.22	7.73	3.39	9.52	109.1	42.71
		1250	6	9.10	0.93	0.93	0.93	7.62	7.62	7.62	0.93	6.49	2.78	7.62	79	31.41
		1600	6	11.00	0.69	0.69	0.69	5.96	5.96	5.96	0.69	4.43	1.94	5.96	58	23.31
		2000	6	13.30	0.53	0.53	0.53	4.77	4.77	4.77	0.53	2.91	1.32	4.77	46.3	18.61
2500	6	15.80	0.40	0.40	0.40	3.82	3.82	3.82	0.40	2.18	0.99	3.82	36.7	14.78		

注 因 SC(B)10 系列阻抗平均值与 SC(B)9 系列阻抗平均值相近,所以本表变压器阻抗平均值也可用于 SC(B)10 系列。

### 6.1.4.3 低压配电线路的阻抗

各种型式的低压配电线路阻抗(正、负序)的计算方法详见有关公式。这里只对线路的零序阻抗和相保阻抗的计算方法做一补充。

(1) 线路零序阻抗的计算。各种型式的低压配电线路的零序阻抗  $Z_{(0)}$  计算式为

$$| \dot{Z}_{(0)} | = | \dot{Z}_{(0)ph} + 3\dot{Z}_{(0)p} | \quad (6-1-49)$$

$$= \sqrt{[R_{(0)ph} + 3R_{(0)p}]^2 + [X_{(0)ph} + 3X_{(0)p}]^2}$$

式中  $Z_{(0)ph}$ ——相线的零序阻抗,  $Z_{(0)ph} = \sqrt{R_{(0)ph}^2 + X_{(0)ph}^2}$ , mΩ;

$Z_{(0)p}$ ——保护线的零序阻抗,  $Z_{(0)p} = \sqrt{R_{(0)p}^2 + X_{(0)p}^2}$ , mΩ;

$R_{(0)ph}$ 、 $X_{(0)ph}$ ——相线的零序电阻和电抗, mΩ;

$R_{(0)p}$ 、 $X_{(0)p}$ ——保护线的零序电阻和电抗, mΩ。

相线、保护线的零序电阻和零序电抗的计算方法与正、负序电阻和电抗的计算方法相同,但在计算相线零序电抗  $X_{(0)ph}$  和保护线零序电抗  $X_{(0)p}$  时,线路电抗计算公式中的几何均距  $D_j$  改用  $D_0$  代替,其计算公式为

$$D_0 = \sqrt[3]{D_{L1p} D_{L2p} D_{L3p}} \quad (6-1-50)$$

式中  $D_{L1p}$ 、 $D_{L2p}$ 、 $D_{L3p}$ ——相线 L1、L2、L3 中心至保护线 PE 或 PEN 线中心的距离, mm。

(2) 线路相保阻抗的计算。单相接地短路电路中任一元件(配电变压器、线路等)的

相保阻抗  $Z_{\text{ph},p}$  的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} Z_{\text{ph},p} &= \sqrt{R_{\text{ph},p}^2 + X_{\text{ph},p}^2} \\ R_{\text{ph},p} &= \frac{1}{3} [R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0)}] \\ &= \frac{1}{3} [R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0)\text{ph}} + 3R_{(0)p}] = R_{\text{ph}} + R_p \\ X_{\text{ph},p} &= \frac{1}{3} [X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)}] = \frac{1}{3} [X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)\text{ph}} + 3X_{(0)p}] \\ &= \frac{1}{3} [X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)\text{ph}}] + X_{(0)p} \end{aligned} \right\} (6-1-51)$$

式中  $R_{\text{ph},p}$  ——元件的相保电阻,  $R_{\text{ph},p} = \frac{1}{3} [R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0)}]$ ,  $\text{m}\Omega$ ;

$X_{\text{ph},p}$  ——元件的相保电抗,  $X_{\text{ph},p} = \frac{1}{3} [X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)}]$ ,  $\text{m}\Omega$ ;

$R_{(1)}, X_{(1)}$  ——元件的正序电阻和正序电抗,  $\text{m}\Omega$ ;

$R_{(2)}, X_{(2)}$  ——元件的负序电阻和负序电抗,  $\text{m}\Omega$ ;

$R_{(0)}, X_{(0)}$  ——元件的零序电阻和零序电抗,  $R_{(0)} = R_{(0)\text{ph}} + 3R_{(0)p}, X_{(0)} = X_{(0)\text{ph}} + 3X_{(0)p}$ ,  $\text{m}\Omega$ ;

$R_{\text{ph}}, R_{(0)\text{ph}}, X_{(0)\text{ph}}$  ——元件相线的电阻、相线的零序电阻和相线的零序电抗,  $\text{m}\Omega$ ;

$R_p, R_{(0)p}, X_{(0)p}$  ——元件保护线的电阻、保护线的零序电阻和保护线的零序电抗,  $\text{m}\Omega$ 。

(3) 线路阻抗的数据。各种型式配电线路的相线（正、负序）电阻和相线（正、负序）电抗及相保电阻、相保电抗值见表 6-1-18 和表 6-1-19。

表 6-1-18

低压母线单位长度阻抗值

 $\text{m}\Omega/\text{m}$ 

母线规格 <sup>①</sup> (mm)	$R^{③}$	$R'_{\text{ph},p} = ③$ $R' + R'_p$	$X'$		$X'_{\text{ph},p}$	
			$D^{②}$ (mm)		$D_n^{②} = 200\text{mm}, D$ (mm)	
			250	350	250	350
3 [2 (125 × 10)] + 125 × 10	0.014	0.042	0.147	0.170	0.317	0.344
3 [2 (125 × 10)] + 80 × 10	0.014	0.054	0.147	0.170	0.340	0.367
4 (125 × 10)	0.028	0.056	0.147	0.170	0.317	0.344
3 (125 × 10) + 80 × 8	0.028	0.078	0.147	0.170	0.341	0.369
3 (125 × 10) + 80 × 6.3	0.028	0.088	0.147	0.170	0.343	0.370
4 [2 (100 × 10)]	0.016	0.032	0.156	0.181	0.336	0.366
3 [2 (100 × 10)] + 100 × 10	0.016	0.048	0.156	0.181	0.336	0.366
3 [2 (100 × 10)] + 80 × 8	0.016	0.066	0.156	0.181	0.350	0.380
4 (100 × 10)	0.033	0.066	0.156	0.181	0.336	0.366
3 (100 × 10) + 80 × 10	0.033	0.073	0.156	0.181	0.349	0.378

续表

母线规格 <sup>①</sup> (mm)	$R'$ <sup>③</sup>	$R'_{pbp} =$ <sup>③</sup> $R' + R'_p$	$X'$		$X'_{pbp}$	
			$D$ <sup>②</sup> (mm)		$D_n$ <sup>②</sup> = 200mm, $D$ (mm)	
			250	350	250	350
4 (80×10)	0.040	0.080	0.168	0.193	0.361	0.390
3 (80×10) +63×6.3	0.040	0.116	0.168	0.193	0.380	0.410
铜4 (100×10)	0.025	0.050	0.156	0.181	0.336	0.366
铜3 (100×10) +80×8	0.025	0.056	0.156	0.181	0.350	0.380
铜4 (80×8)	0.031	0.062	0.170	0.195	0.364	0.394
铜3 (80×8) +63×6.3	0.031	0.078	0.170	0.195	0.382	0.412
铜3 (80×8) +50×5	0.031	0.104	0.170	0.195	0.394	0.423
4 (100×8)	0.040	0.080	0.158	0.182	0.340	0.368
3 (100×8) +80×8	0.040	0.090	0.158	0.182	0.352	0.381
3 (100×8) +63×6.3	0.040	0.116	0.158	0.182	0.370	0.399
4 (80×8)	0.050	0.100	0.170		0.364	
3 (80×8) +63×6.3	0.050	0.126	0.170		0.382	
3 (80×8) +50×5	0.050	0.169	0.170		0.394	
4 (80×6.3)	0.060	0.120	0.172		0.368	
3 (80×6.3) +63×6.3	0.060	0.136	0.172		0.384	
3 (80×6.3) +50×5	0.060	0.179	0.172		0.396	
4 (63×6.3)	0.076	0.152	0.188		0.400	
3 (63×6.3) +40×4	0.076	0.262	0.188		0.426	
4 (50×5)	0.119	0.238	0.199		0.423	
3 (50×5) +40×4	0.119	0.305	0.199		0.437	
4 (40×4)	0.186	0.372	0.212		0.451	

- ① 母线规格一栏除注明铜以外，均为铝母线；母线规格建议优先采用100×10、80×8、63×6.3、50×5及40×4。  
 ② 本表所列数据对于母线平放或竖放均适用，PEN线在边位， $D$ 为相线间距， $D_n$ 为PEN线与邻近相线中心间距。当变压器容量 $\leq 630\text{kVA}$ 时， $D$ 为250mm；当变压器容量 $\geq 630\text{kVA}$ 时， $D$ 为350mm。  
 ③  $R'$ 、 $R'_{pbp}$ 为20℃时导线单位长度电阻值。  
 ④ 当采用密集型母线作为配电导线时，该导线的阻抗值应按产品生产厂家提供的数值和实际安装长度进行计算，在计算保护线的阻抗时，还要考虑工程中保护线的配置方式。

表 6-1-19

线路单位长度阻抗值

mΩ/m

$S$ (mm <sup>2</sup> ) <sup>②</sup>	$R'$ <sup>①</sup>													
	185	150	120	95	70	50	35	25	16	10	6	4	2.5	1.5
铝	0.156	0.192	0.240	0.303	0.411	0.575	0.822	1.151	1.798	2.876	4.700	7.050	11.280	
铜	0.095	0.117	0.146	0.185	0.251	0.351	0.501	0.702	1.097	1.754	2.867	4.300	6.880	11.467

续表

$R'_{php} = 1.5 (R'_{ph} + R'_p)^{\text{③}}$																
$S_p = S \text{ (mm}^2\text{)}^{\text{②}} \times$	185	150	120	95	70	50	35	25	16	10	6	4	2.5	1.5		
铝	0.468	0.576	0.720	0.909	1.233	1.725	2.466	3.453	5.394	8.628	14.100	21.150	33.840			
铜	0.285	0.351	0.438	0.555	0.753	1.053	1.503	2.106	3.291	5.262	8.601	12.900	20.640	34.401		
$S_p = S/2$ (mm <sup>2</sup> )	3 ×	185	150	120	95	70	50	35	25	16	10	6	4			
	+1 ×	95	70	70	50	35	25	16	16	10	6	4	2.5			
铝	0.689	0.905	0.977	1.317	1.850	2.589	3.930	4.424	7.011	11.364	17.625	27.495				
铜	0.420	0.552	0.596	0.804	1.128	1.580	2.397	2.699	4.277	6.932	10.751	16.770				
电缆铅包电阻 $R'_{(0)p}$	1.1	1.3	1.5	1.7	2.0	2.4	2.9	3.1	4.0	5.0	5.5	6.4				
布线钢管电阻 $R'_{(0)p}$ 分母为管径 (mm)	0.7 G80		0.7 G65		0.8 G50		0.9 G40		1.3 G32	1.5 G25		2.5 G20				
$X'$																
线芯 $S \text{ (mm}^2\text{)}$	185	150	120	95	70	50	35	25	16	10	6	4	2.5	1.5		
架空线 <sup>④</sup>	0.30	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.40						
绝缘子 布线 <sup>⑤</sup>	$D = 150\text{mm}$	0.208	0.216	0.223	0.231	0.242	0.251	0.266	0.277	0.290	0.306	0.325	0.338	0.353	0.368	
	$D = 100\text{mm}$	0.184						0.241	0.251	0.265	0.280	0.300	0.312	0.327	0.342	
	$D = 70\text{mm}$	0.162										0.277	0.290	0.305	0.321	
全塑电缆	四芯	0.076		0.079	0.078	0.079	0.080	0.082	0.087	0.094	0.100					
纸绝缘电缆	四芯	0.068		0.070	0.069		0.070	0.073		0.082	0.088	0.093	0.098			
交联电缆（四等芯）		0.077	0.076	0.077	0.078	0.079	0.080		0.082	0.085	0.092	0.097				
管子布线		0.08		0.09			0.10			0.11		0.12	0.13	0.14		
布线钢管的零序电抗 $X'_{(0)p}$ 管径 (mm)	0.6 G80		0.6 G65		0.8 G50		0.9 G40		1.0 G32	1.1 G25		1.3 G20				
$X'_{php}$																
$S \text{ (mm}^2\text{)}$	185	150	120	95	70	50	35	25	16	10	6	4	2.5	1.5		
架空线	$S_p = S$	0.57	0.59	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.75	0.77					
	$S_p \approx S/2$	0.60	0.62	0.63	0.65	0.67	0.69	0.72	0.73	0.767						
绝缘子 布线	$D = 150\text{mm}$	$S_p = S$	0.448	0.464	0.478	0.493	0.517	0.537	0.563	0.583	0.611	0.643	0.681	0.707	0.737	0.767
		$S_p \approx S/2$	0.470	0.491	0.498	0.516	0.539	0.559	0.587	0.597	0.627					
	$D = 100\text{mm}$	$S_p = S$							0.513	0.533	0.561	0.591	0.631	0.655	0.685	0.716
		$S_p \approx S/2$							0.537	0.547	0.576					
	$D = 70\text{mm}$	$S_p = S$											0.585	0.611	0.645	0.673
		$S_p \approx S/2$														
全塑 电缆	$S_p = S$	0.152	0.152	0.152	0.158	0.156	0.158	0.160	0.164	0.174	0.188	0.200	0.200			
	$S_p \approx S/2$	0.179	0.161	0.161	0.186	0.178	0.187	0.191	0.192	0.201	0.224	0.211	0.234			
纸绝缘 电缆	$S_p = S$	0.136	0.136	0.140	0.138	0.138	0.140	0.146	0.146	0.164	0.176	0.186	0.196			
	$S_p \approx S/2$	0.155	0.155	0.153	0.163	0.163	0.177	0.179	0.182	0.198	0.219	0.219				

续表

钢管 布线	$S_p = S$	0.20	0.21	0.23	0.22	0.21	0.24	0.23	0.25	0.26	0.26	0.28	0.29	0.32
	$S_p \approx S/2$	0.21	0.21	0.21	0.23	0.22	0.25	0.25	0.25					
	钢管作 保护线	0.69	0.69	0.70	0.70	0.90	1.01	1.00	1.11	1.22	1.42	1.43	1.44	1.45

- ①  $R'$  为导线 20℃ 时单位长度电阻值,  $R' = C_j \frac{\rho_{20}}{S} \times 10^3$  (mΩ), 铝  $\rho_{20} = 2.82 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ , 铜  $\rho_{20} = 1.72 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 。 $C_j$  为绞入系数, 导线截面积  $\leq 6\text{mm}^2$  时,  $C_j$  取为 1.0; 导线截面积  $> 6\text{mm}^2$  时,  $C_j$  取为 1.02。
- ②  $S$  为相线线芯截面积,  $S_p$  为 PEN 线线芯截面积。
- ③  $R'_{\text{ph}}$  为计算单相对地短路电流用, 其值取导线 20℃ 时电阻的 1.5 倍。
- ④ 架空线水平排列, PEN 线在中间, 线间距离依次为 400、600、400mm。
- ⑤ 绝缘子布线水平排列, PEN 线在边位,  $D$  (mm) 为线间距离。

#### 6.1.4.4 低压系统短路电流计算方法

(1) 计算条件。高压系统短路电流的计算条件同样适用于低压网络短路电流的计算, 但低压网络还有如下一些特点:

1) 一般用电单位的电源来自地区大中型电力系统, 配电用的电力变压器的容量远小于系统的容量, 因此短路电流可按远离发电机端, 即无限大电源容量的网络短路进行计算, 短路电流周期分量不衰减。

2) 计入短路电路各元件的有效电阻, 但短路点的电弧电阻、导线连接点、开关设备和电器的接触电阻可忽略不计。

3) 当电路电阻较大, 短路电流直流分量衰减较快, 一般可以不考虑直流分量。只有在离配电变压器低压侧很近处, 例如低压侧 20m 以内大截面线路上或低压配电屏内部发生短路时, 才需要计算直流分量。

4) 单位线路长度有效电阻的计算温度不同, 在计算三相最大短路电流时, 导体计算温度取为 20℃; 在计算单相短路电流时, 假设的计算温度升高, 电阻值增大, 其值一般为 20℃ 时电阻的 1.5 倍。

5) 计算过程采用有单位制, 电压用 V、电流用 kA、容量用 kVA、阻抗用 mΩ。

6) 计算 220/380V<sub>3</sub> 网络三相短路电流时, 计算电压  $cU_n$  取电压系数  $c$  为 1.05, 计算单相接地故障电流时,  $c$  取 1.0,  $U_n$  为系统标称电压 (线电压) 380V。

(2) 三相和两相 (不接地) 短路电流的计算。在 220/380V 网络中, 一般以三相短路电流为最大。一台变压器供电的低压网络三相短路电流计算电路如图 6-1-7 所示。

低压网络三相起始短路电流交流分

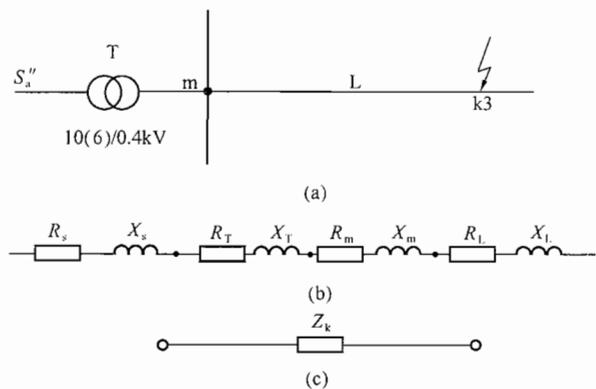


图 6-1-7 一台变压器供电的低压网络三相短路电流计算电路

(a) 系统图; (b) 等效电路图; (c) 用短路阻抗  $Z_k$  表示的等效电路

量有效值的计算式为

$$I'' = \frac{cU_n/\sqrt{3}}{Z_k} = \frac{1.05U_n/\sqrt{3}}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (6-1-52)$$

$$= \frac{230}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (\text{kA})$$

$$R_k = R_s + R_T + R_m + R_L \quad (6-1-53)$$

$$X_k = X_s + X_T + X_m + X_L \quad (6-1-54)$$

以上式中  $U_n$ ——网络标称电压（线电压），V，220/380V 网络为 380V；

$c$ ——电压系数，计算三相短路电流时取 1.05；

$Z_k, R_k, X_k$ ——短路电路总阻抗、总电阻、总电抗，mΩ；

$R_s, X_s$ ——变压器高压侧系统的电阻、电抗（归算到 400V 侧），mΩ；

$R_T, X_T$ ——变压器的电阻、电抗，mΩ；

$R_m, X_m$ ——变压器低压侧母线段的电阻、电抗，mΩ；

$R_L, X_L$ ——配电线路的电阻、电抗，mΩ；

$I''$ ——三相短路电流的初始值，kA。

只要  $\sqrt{R_T^2 + X_T^2}/\sqrt{R_s^2 + X_s^2} \geq 2$ ，变压器低压侧短路时的短路电流交流分量不衰减，即三相短路电流稳态值  $I_k = I''$ 。

三相短路电流峰值  $i_p$  的计算与高压系统相同，见式（6-1-25）。电动机反馈对短路电流峰值的影响，仅当短路点附近所接用电动机额定电流之和大于短路电流的 1%（ $\sum I_{r,m} > 0.01I''_k$ ）时，才考虑其影响。异步电动机起动电流倍数可取 6~7，异步电动机的短路电流峰值系数可取 1.3。由异步电动机馈送的短路电流峰值的计算见高压系统计算式（6-1-29）。

低压网络两相短路电流  $I''_{k2}$  与三相短路电流  $I''_{k3}$  的关系也和高压系统相同，即  $I''_{k2} = 0.866I''_{k3}$ 。

两相短路稳态电流  $I_{k2}$  与三相短路稳态电流  $I_{k3}$  的比值也和高压系统相同。在远离发电机短路时， $I_{k2} = 0.866I_{k3}$ ；在发电机出口处短路时， $I_{k2} = 1.5I_{k3}$ 。

（3）单相短路（包括单相接地故障）电流的计算。

1) 单相接地故障电流的计算。TN 接地系统的低压网络单相接地故障电流  $I''_{k1}$  的计算式为

$$I''_{k1} = \frac{cU_n/\sqrt{3}}{\frac{|\dot{Z}_{(1)} + \dot{Z}_{(2)} + \dot{Z}_{(0)}|}{3}} = \frac{1.0 \times U_n/\sqrt{3}}{\sqrt{\left(\frac{R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0)}}{3}\right)^2 + \left(\frac{X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)}}{3}\right)^2}}$$

$$= \frac{U_n/\sqrt{3}}{\sqrt{R_{\text{php}}^2 + X_{\text{php}}^2}} = \frac{220}{\sqrt{R_{\text{php}}^2 + X_{\text{php}}^2}} = \frac{220}{Z_{\text{php}}} \quad (\text{kA}) \quad (6-1-55)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{php}} &= \frac{R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(0)}}{3} = R_{\text{php} \cdot s} + R_{\text{php} \cdot T} + R_{\text{php} \cdot m} + R_{\text{php} \cdot L} \\ X_{\text{php}} &= \frac{X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)}}{3} = X_{\text{php} \cdot s} + X_{\text{php} \cdot T} + X_{\text{php} \cdot m} + X_{\text{php} \cdot L} \\ Z_{\text{php}} &= \sqrt{R_{\text{php}}^2 + X_{\text{php}}^2} \end{aligned} \right\} \quad (6-1-56)$$

$$R_{(1)} = R_{(1) \cdot s} + R_{(1) \cdot T} + R_{(1) \cdot m} + R_{(1) \cdot L}$$

$$R_{(2)} = R_{(2) \cdot s} + R_{(2) \cdot T} + R_{(2) \cdot m} + R_{(2) \cdot L}$$

$$R_{(0)} = R_{(0) \cdot s} + R_{(0) \cdot T} + R_{(0) \cdot m} + R_{(0) \cdot L}$$

$$X_{(1)} = X_{(1) \cdot s} + X_{(1) \cdot T} + X_{(1) \cdot m} + X_{(1) \cdot L}$$

$$X_{(2)} = X_{(2) \cdot s} + X_{(2) \cdot T} + X_{(2) \cdot m} + X_{(2) \cdot L}$$

$$X_{(0)} = X_{(0) \cdot s} + X_{(0) \cdot T} + X_{(0) \cdot m} + X_{(0) \cdot L}$$

以上各式中  $U_n$ ——220/380V 网络标称线电压, 即 380V,  $U_n/\sqrt{3} = 380/\sqrt{3}$ , 取 220V;

$c$ ——电压系数, 计算单相接地故障电流时取 1;

$R_{(1)}$ 、 $R_{(2)}$ 、 $R_{(0)}$ ——短路电路正序、负序、零序电阻, m $\Omega$ ;

$X_{(1)}$ 、 $X_{(2)}$ 、 $X_{(0)}$ ——短路电路正序、负序、零序电抗, m $\Omega$ ;

$Z_{(1)}$ 、 $Z_{(2)}$ 、 $Z_{(0)}$ ——短路电路正序、负序、零序阻抗, m $\Omega$ ;

$R_{\text{php}}$ 、 $X_{\text{php}}$ 、 $Z_{\text{php}}$ ——短路电路的相线—保护线回路(以下简称相保, 保护线包括 PE 线和 PEN 线)电阻、相保电抗、相保阻抗, m $\Omega$ 。

2) 单相与中性线短路(即相线与中性线之间短路)电流初始值  $I''_{kl}$  的计算。TN 和 TT 接地系统的低压网络相线与中性线之间短路的单相短路电流  $I''_{kl}$  的计算, 与上述单相接地故障电流计算相似, 仅将配电线路的相保电阻  $R_{\text{php} \cdot L}$ 、相保电抗  $X_{\text{php} \cdot L}$  改用相线—中性线回路的电阻、电抗。

6

## 6.2 短路电流计算结果的应用

(1) 电气接线方案的比较和选择。

(2) 正确选择和校验电气设备(包括限制短路电流的设备, 详见第 7 章)。

(3) 正确选择和校验载流导体(详见第 8 章)。

(4) 继电保护的选择、整定及灵敏系数校验(详见第 9 章)。

(5) 接地装置的设计及确定中性点接地方式(详见第 4 章、第 7 章)。

(6) 计算软导线的短路摇摆。

(7) 确定分裂导线间隔棒的间距。架空线当传输容量较大时, 导线采用分裂导线, 为了避免由于电磁力作用、风力作用和冰雪作用, 分裂导线缠绕发生摩擦和碰线, 而保持一定的分裂间距应安装间隔棒。

(8) 验算接地装置的接触电压和跨步电压。

(9) 大、中型电动机的起动(起动压降计算)。短路电流计算应求出最大短路电流值, 以确定电气设备容量或额定参数; 整定继电保护装置。求出最小短路电流值, 作为选择熔断器, 校验继电保护装置灵敏系数的依据。此外利用阻抗标幺值计算来校验电动机起动的电压降。

## 6.3 影响短路电流的因素及限制短路电流的措施

### 6.3.1 影响短路电流的因素

(1) 系统的电压等级。

(2) 主接线形式以及主接线的运行方式。

(3) 系统的元件正负序阻抗及零序阻抗大小(变压器中性点接地点的多少)。

(4) 是否加装限流电抗器（如限流电抗器、分裂电抗器或分裂绕组变压器，增加回路电抗值限制短路电流）。

(5) 是否采用限流型电气设备（如限流熔断器、限流型低压断路器，能在短路电流达到冲击值之前完全熄灭电弧起到了限流作用）。

(6) 是否装设故障电流限制器（FCL）。

### 6.3.2 限制短路电流措施

#### 6.3.2.1 电力系统可采取的限流措施

(1) 提高电力系统的电压等级（电压等级高，在相同的短路容量下则短路电流小）。

(2) 直流输电（直流系统的“定电流控制”将快速地将短路电流限制在额定电流左右，即使在暂态过程也不超过2倍额定值，可限制短路电流）。

(3) 在电力系统主网加强联系后，将次级电网解环运行。

(4) 在允许的范围内，增大系统的零序阻抗，例如采用不带第三绕组或第三绕组为Y接线的全星形自耦变压器，减少变压器中性点的接地点等（可减小系统的单相短路电流）。

(5) 装设故障电流限制器（FCL）。

#### 6.3.2.2 发电厂和变电站中可采取的限流措施

(1) 发电厂中，在发电机电压母线分段回路中安装电抗器（当线路上或一段母线上发生短路故障时能限制另一段母线上电源所提供的短路电流）。

(2) 变压器分列运行。

(3) 变电站中，在变压器回路中装设分裂电抗器或电抗器。

(4) 采用低压侧为分裂绕组的变压器。

(5) 出线上装设电抗器。

#### 6.3.2.3 终端变电站中可采取的限流措施

(1) 变压器分列运行。

(2) 采用高阻抗变压器（增加变压器的  $u_k\%$  能增大变压器阻抗限制短路电流）。

(3) 在变压器回路中装设电抗器（增加回路的电抗值限制短路电流）。

(4) 采用小容量变压器（当  $u_k\%$  一定时变压器容量越小则变压器阻抗越大，可限制短路电流）。

## 6.4 短路电流在导体和电器中引用的热效应

按实用计算法，短路电流在导体和电器中引起的热效应为

$$Q_t = \int_0^t i_{kt}^2 dt = \int_0^t I_{kt}^2 dt + \int_0^t i_{DC}^2 e^{-kt/T_s} dt = Q_z + Q_f \quad (6-4-1)$$

$$Q_z = \frac{I''^2 + 10I_{kt/2}^2 + I_{kt}^2}{12} t \quad (6-4-2)$$

$$Q_f = T_{eq} I''^2 \quad (6-4-3)$$

式中  $Q_t$ ——短路电流在导体和电器中引起的热效应， $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$ ；

$Q_z$ ——短路电流交流分量引起的热效应， $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$ ；

$Q_f$ ——短路电流直流分量引起的热效应， $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$ ；

$i_{kt}$ ——短路电流瞬时值， $\text{kA}$ ；

$i_{DC}$ ——短路电流直流分量, kA;

$T_a$ ——衰减时间常数;

$t$ ——短路电流持续时间, s;

$I''$ ——超瞬态短路电流有效值, kA;

$I_{k/2}$ ——短路电流在  $t/2$  时的交流分量有效值, kA;

$I_{kt}$ ——短路时间  $t$  时的短路电流交流分量有效值, kA;

$T_{eq}$ ——直流分量等效时间, s, 为简化计算可由表 6-4-1 查得。

表 6-4-1 直流分量等效时间

短 路 点	$T_{eq}$ (s)	
	$t < 0.1$	$t > 0.1$
发电机出口及母线	0.15	0.2
发电机升压变压器高压侧及出线发电机电抗器后	0.08	0.1
变电站各级电压母线及出线	0.05	0.05

# 110kV 及以下电气设备选择<sup>①</sup>

## 7.1 常用电气设备选择的技术条件和环境条件

### 7.1.1 电气设备选择的一般原则

- (1) 应满足正常运行、检修、短路和过电压情况下的要求,并考虑远景发展。
- (2) 应按当地环境条件校核。
- (3) 应力求技术先进和经济合理。
- (4) 与整个工程的建设标准应协调一致。
- (5) 同类设备应尽量减少品种。
- (6) 选用的新产品均应具有可靠的试验数据,并经正式鉴定合格。

### 7.1.2 技术条件

选择的高压电气设备,应能在长期工作条件下和发生过电压、过电流的情况下保持正常运行。选择各种高压电气设备的一般技术条件如表 7-1-1 所示。

表 7-1-1 选择各种高压电气设备的一般技术条件

序号	电器名称	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	额定容量 (kVA)	机械荷载 (N)	额定 开断电流 (kA)	短路稳定性		绝缘水平
							热稳定	动稳定	
1	高压断路器	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
2	隔离开关	✓	✓		✓		✓	✓	✓
3	负荷开关熔断器组合电器	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
4	负荷开关	✓	✓		✓		✓	✓	✓
5	熔断器	✓	✓		✓	✓			✓
6	电压互感器	✓			✓				✓
7	电流互感器	✓	✓		✓		✓	✓	✓
8	限流电抗器	✓	✓		✓		✓	✓	✓
9	消弧线圈	✓	✓	✓	✓				✓
10	接地变压器	✓	✓	✓					✓
11	接地电阻	✓					✓		
12	避雷器	✓			✓				✓
13	交流金属封闭开关设备	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
14	穿墙套管	✓	✓		✓		✓	✓	✓
15	绝缘子	✓			✓			✓ <sup>①</sup>	✓

① 悬式绝缘子不校验动稳定。

① 本章第 7.1 节、第 7.2 节主要依据 DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》;第 7.3 节依据《工业与民用配电手册(第三版)》。

### 7.1.2.1 长期工作条件

(1) 电压。选用电气设备的允许最高工作电压  $U_{\max}$  不得低于该回路的最高运行电压  $U_z$ , 即

$$U_{\max} \geq U_z \quad (7-1-1)$$

三相交流 3kV 及以上设备的最高电压见表 7-1-2。

(2) 电流。选用电气设备的额定电流  $I_n$  不得低于所在回路在各种可能运行方式下的持续工作电流  $I_z$ , 即

$$I_n \geq I_z \quad (7-1-2)$$

不同回路的持续工作电流可按表 7-1-3 中所列原则计算。

由于变压器短时过载能力很大, 双回路出线的工作电流变化幅度也较大, 故其计算工作电流应根据实际需要确定。

表 7-1-2 额定电压与设备最高电压 kV

受电设备或系统额定电压	供电设备额定电压	设备最高电压
3	3.15	3.6
6	6.3	7.2
10	10.5	12
35		40.5
63		72.5
110		126

表 7-1-3 回路持续工作电流

回路名称	计算工作电流	说明	
出线	带电抗器出线	电抗器额定电流	
	单回路	线路最大负荷电流	包括线路损耗与事故时转移过来的负荷
	双回路	(1.2~2) 倍一回线的正常最大负荷电流	包括线路损耗与事故时转移过来的负荷
	环形与一台半断路器接线回路	两个相邻回路正常负荷电流	考虑断路器事故或检修时, 一个回路加另一最大回路负荷电流的可能
	桥型接线	最大元件负荷电流	桥回路尚需考虑系统穿越功率
变压器回路	1.05 倍变压器额定电流	1. 在 0.95 额定电压以上时其容量不变; 2. 带负荷调压变压器应按变压器的最大工作电流	
	(1.3~2.0) 倍变压器额定电流	若要求承担另一台变压器事故或检修时转移的负荷, 则按第 7.2.1 节内容确定	
母线联络回路	1 个最大电源元件的计算电流		
母线分段回路	分段电抗器额定电流	1. 考虑电源元件事故跳闸后仍能保证该段母线负荷; 2. 分段电抗器一般发电厂为最大一台发电机额定电流的 50%~80%, 变电站应满足用户的一级负荷和大部分二级负荷	
旁路回路	需旁路的回路最大额定电流		

高压电气设备没有明确的过载能力, 所以在选择其额定电流时, 应满足各种可能运行方

式下回路持续工作电流的要求。

表 7-1-4 套管和绝缘子的安全系数

类 别	荷载长期作用时	荷载短期作用时
套管、支持绝缘子及其金具	2.5	1.67
悬式绝缘子及其金具 <sup>①</sup>	4	2.5

① 悬式绝缘子的安全系数对应于一小时机电试验荷载，而不是破坏荷载。若是后者，安全系数则分别应为 5.3 和 3.3。

短路电流一般取三相短路时的短路电流，若发电机出口的两相短路，或中性点直接接地系统及自耦变压器等回路中的单相、两相接地短路较三相短路严重时，则应按严重情况校验。

2) 用熔断器保护的电气设备可不验算热稳定。当熔断器有限流作用时，可不验算动稳定。用熔断器保护的电压互感器回路可不验算动、热稳定。

(2) 短路的热稳定条件

$$I_t^2 t > Q_{dt} \quad (7-1-3)$$

式中  $Q_{dt}$ ——在计算时间  $t$  秒内短路电流的热效应， $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$ ；

$I_t$ —— $t$  秒内设备允许通过的热稳定电流有效值， $\text{kA}$ ；

$t$ ——设备允许通过的热稳定电流时间， $\text{s}$ 。

校验短路热稳定所用的计算时间  $t$  的计算式为

$$t = t_b + t_d \quad (7-1-4)$$

式中  $t_b$ ——继电保护装置后备保护动作时间， $\text{s}$ ；

$t_d$ ——断路器的全分闸时间， $\text{s}$ 。

采用无延时保护时， $t$  可取表 7-1-5 中的数据。该数据为继电保护装置的启动机构和执行机构的动作时间，断路器的固有分闸时间以及断路器触头电弧持续时间的总和。当继电保护装置有延时整定时，则应按表 7-1-5 中数据加上相应的整定时间。

(3) 短路的动稳定条件

$$\left. \begin{aligned} i_p &\leq i_{dr} \\ I_p &\leq I_{dr} \end{aligned} \right\} \quad (7-1-5)$$

式中  $i_p$ ——短路冲击电流峰值， $\text{kA}$ ；

$I_p$ ——短路全电流有效值， $\text{kA}$ ；

$i_{dr}$ ——电器允许的极限通过电流峰值， $\text{kA}$ ；

$I_{dr}$ ——电器允许的极限通过电流有效值， $\text{kA}$ 。

(3) 机械荷载。所选电气设备端子的允许荷载，应大于电气设备引线在正常运行和短路时的最大作用力。

电气设备机械荷载的安全系数，由制造部门在产品制造中统一考虑。套管和绝缘子的安全系数不应小于表 7-1-4 所列数值。

#### 7.1.2.2 短路稳定条件

(1) 校验的一般原则。

1) 电气设备在选定后应按最大可能通过的短路电流进行动、热稳定校验。校验的

表 7-1-5 校验热效应的计算时间  $\text{s}$

断路器 开断速度	断路器的全分闸时间 $t_d$	计算时间 $t$
高速断路器	<0.08	0.1
中速断路器	0.08 ~ 0.12	0.15
低速断路器	>0.12	0.2

### 7.1.2.3 绝缘水平

在工作电压和过电压的作用下,电气设备的内、外绝缘应保证必要的可靠性。

电气设备的绝缘水平,应按电网中出现的各种过电压和保护设备相应的保护水平来确定。当所选电气设备的绝缘水平低于国家规定的标准数值时,应通过绝缘配合计算,选用适当的过电压保护设备。

### 7.1.3 环境条件

#### 7.1.3.1 温度

选择电气设备的环境温度如表 7-1-6 所示。

按 GB/T 11022—2011《高压开关设备和控制设备标准的共同技术要求》的规定,户内开关设备周围空气温度:最高为 40℃,24h 平均值不超过 35℃;最低为 -5、-15、-25℃ 三级。户外开关设备周围空气温度:最高为 40℃,24h 平均值不超过 35℃;最低为 -10、-25、-40℃ 三级。由于 GB/T 11022—1999 中未给出减少或者增加的具体

计算数据,为了便于计算,现将 DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》的有关数据给出,以供参考:当环境温度高于 40℃ 但不高于 60℃ 时,环境温度每增高 1℃,应减少额定电流 1.8%;当环境温度低于 40℃ 时,环境温度每降低 1℃,可相应增加额定电流 0.5%,但其最大过负荷不得超过额定电流的 20%。

普通高压电气设备一般可在环境最低温度为 -30℃ 时正常运行。在高寒地区,应选择能适应环境最低温度为 -40℃ 的高寒电气设备。

在年最高温度超过 40℃,而长期处于低湿度的干热地区,应选用型号后带“TA”字样的干热带型产品。

#### 7.1.3.2 日照

屋外高压电气设备在日照影响下将产生附加温升。

在进行试验或计算时,日照强度取 0.1W/cm<sup>2</sup>,风速取 0.5m/s。

#### 7.1.3.3 风速

一般高压电气设备可在风速不大于 35m/s 的环境下使用。

选择电气设备时所用的最大风速,可取离地 10m 高、30 年一遇的 10min 平均最大风速。

对于台风经常侵袭或最大风速超过 35m/s 的地区,除向制造部门提出特殊订货外,在设计布置时应采取有效防护措施,如降低安装高度、加强基础固定等。

#### 7.1.3.4 冰雪

在积雪和覆冰严重的地区,应采取措施防止冰串引起瓷件绝缘对地闪络。

隔离开关的破冰厚度一般为 10mm。在重冰区(如云贵高原,山东河南部分地区,湘中、粤北重冰地带以及东北部分地区),所选隔离开关的破冰厚度,应大于安装场所的最大覆冰厚度。

表 7-1-6 选择电气设备的环境温度

安装场所	最高	最低
屋外	年最高温度	年最低温度
电抗器室	该处通风设计最高排风温度	
屋内其他处	该处通风设计温度。当无资料时,可取最热月平均最高温度加 5℃	

- 注 1. 年最高(或最低)温度为一年中所测得的最高(或最低)温度的多年平均值。  
2. 最热月平均最高温度为最热月每日最高温度的月平均值,取多年平均值。

### 7.1.3.5 湿度

选择电气设备的湿度，应采用当地相对湿度最高月份的平均相对湿度（相对湿度——在一定温度下，空气中实际水汽压强值与饱和水汽压强值之比；最高月份的平均相对湿度——该月中日最大相对湿度值的月平均值）。对湿度较高的场所，应采用该处实际相对湿度。当无资料时，可取比当地湿度最高月份平均值高5%的相对湿度。

一般高压电气设备可使用在+20℃，相对湿度为90%的环境中（电流互感器为85%）。在长江以南和沿海地区，当相对湿度超过一般产品使用标准时，应选用湿热带型高压电气设备。这类产品的型号后面一般都标有“TH”字样。

### 7.1.3.6 污秽

在距海岸1~2km或盐场附近的盐雾场所，在火电厂、炼油厂、冶炼厂、石油化工厂和水泥厂等附近含有由工厂排出的二氧化硫、硫化氢、氨、氯等成分烟气、粉尘等场所，在潮湿的气候下将形成腐蚀性或导电的物质。污秽地区内各种污物对电气设备的危害，取决于污秽物质的导电性、吸水性、附着力、数量、比重及距污源的距离和气象条件。在工程设计中，应根据污秽情况选用下列措施：

(1) 增大电瓷外绝缘的有效爬电比距或选用有利于防污的电瓷造型，如采用硅橡胶、大小伞、大倾角、钟罩式等特制绝缘子。

(2) 采用屋内配电装置。线路和发电厂、变电站污秽等级和各污秽等级下的爬电比距分级数值参见5.4.1。

### 7.1.3.7 海拔

电气设备的一般使用条件为海拔不超过1000m。海拔超过1000m的地区称为高原地区。

对安装在海拔超过1000m地区的电气设备外绝缘一般应予加强，可选用高原型产品或选用外绝缘提高一级的产品。

由于现有110kV及以下大多数电气设备的外绝缘有一定裕度，故可使用在海拔2000m以下的地区。

对于安装在海拔1000m以上的高压电器，该使用场所要求的绝缘耐受电压是在标准参考大气条件下的绝缘耐受电压乘以修正系数 $K_a$ 来决定， $K_a$ 的计算式为

$$K_a = e^{m(H-1000)/8150} \quad (7-1-6)$$

式中  $H$ ——海拔，m；

$m$ ——为了简单起见，取下述确定值： $m=1$ 用于工频、雷电冲击和相间操作冲击电压， $m=0.9$ 用于纵绝缘操作冲击电压， $m=0.75$ 用于相对地操作冲击电压。

### 7.1.3.8 地震

地震对电气设备的影响主要是地震波的频率和地震振动的加速度。一般电气设备的固有振动频率与地震振动频率很接近，应设法防止共振的发生，并加大电气设备的阻尼比。

选择电气设备时，应根据当地的地震烈度选用能够满足地震要求的产品。电气设备的辅助设备应具有与主设备相同的抗震能力。一般电气设备产品可以耐受地震烈度为8度的地震

力。在安装时,应考虑支架对地震力的放大作用。根据有关规程的规定,地震基本烈度为7度及以下地区的电气设备可不采取防震措施。在7度以上地区,电气设备应能承受的地震力,可按表7-1-7所列加速度值和电气设备的质量进行计算。

表 7-1-7 计算电气设备承受的  
地震力时用的加速度值

地震烈度(度)	8	9
地面水平加速度	0.2g	0.4g
地面垂直加速度	0.1g	0.2g

#### 7.1.4 环境保护

选用电气设备,尚应注意电气设备对周围环境的影响。根据周围环境的控制标准,要对制造部门提出必要的技术要求。

##### 7.1.4.1 电磁干扰

频率大于10kHz的无线电干扰主要来自电气设备的电流、电压突变和电晕放电。它会损害或破坏电磁信号的正常接收及电气设备、电子设备的正常运行。因此,电气设备及其金具在最高工作相电压下,晴天的夜晚不应出现可见电晕。110kV电气设备户外晴天无线电干扰电压不宜大于500 $\mu$ V。

根据运行经验和现场实测结果,对于110kV以下的电气设备一般可不校验无线电干扰电压。

##### 7.1.4.2 噪声

为了减少噪声对工作场所和附近居民区的影响,所选高压电气设备在运行中或操作时产生的噪声,在距电气设备外沿垂直面的水平距离2m,离地面高度1~1.5m处不应大于:

- (1) 连续性噪声水平:85dB。
- (2) 非连续性噪声水平:屋内90dB;屋外110dB。

## 7.2 高压变压器配电设备的选择

### 7.2.1 变压器的选择

#### 7.2.1.1 变压器技术条件选择

变压器参数选择如表7-2-1所示,并按表中使用环境条件校验。

表 7-2-1 变压器参数选择

项 目		参 数
技术条件		型式、容量、绕组电压、相数、频率、冷却方式、联结组别、短路阻抗、绝缘水平、调压方式、调压范围、励磁涌流、并联运行特性、损耗、温升、过载能力、中性点接地方式、附属设备、特殊要求、系统电压波形及谐波含量
环境条件	环 境	环境温度、日温差 <sup>①</sup> 、最大风速 <sup>①</sup> 、相对湿度 <sup>②</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、海拔、地震烈度
	环境保护	噪声、电磁干扰

① 当在屋内使用时,可不校验。

② 当在屋外使用时,可不校验。

#### 7.2.1.2 10kV 及以下变电站变压器选择要求

(1) 变压器台数应根据负荷特点和经济运行进行选择。当符合下列条件之一时,宜装设两台及以上变压器。

- 1) 有大量一级或二级负荷。
- 2) 季节性负荷变化较大。
- 3) 集中负荷较大。

(2) 装两台及以上变压器的变电站，当其中任一台变压器断开时，其余变压器的容量应满足一级负荷及二级负荷的用电。

(3) 变电站中单台变压器（低压为0.4kV）的容量不宜大于1250kVA。当用电设备容量较大、负荷集中且运行合理时，可选用较大容量的变压器。

(4) 在一般情况下，动力和照明宜共用变压器。当属下列情况之一时，可设专用变压器。

1) 当照明负荷较大或动力和照明采用共用变压器严重影响照明质量及灯泡寿命时，可设照明专用变压器。

2) 单台单相负荷较大时，宜设单相变压器。

3) 冲击性负荷较大，严重影响电能质量时，可设冲击负荷专用变压器。

4) 在电源系统不接地或经阻抗接地，电气装置外露导电体就地接地系统（IT系统）的低压电网中，照明负荷应设专用变压器。

(5) 多层或高层主体建筑内变电站，宜选用不燃或难燃型变压器。

(6) 在多尘或有腐蚀性气体严重影响变压器安全运行的场所，应选用防尘型或防腐型变压器。

### 7.2.1.3 35~110kV 变电站主变压器选择要求

(1) 主变压器的台数和容量，应根据地区供电条件、负荷性质、用电容量和运行方式等条件综合考虑确定。

(2) 在有一、二级负荷的变电站中宜装设两台主变压器，当技术经济比较合理时，可装设两台以上主变压器。如变电站可由中、低压侧电力网取得足够容量的备用电源时，可装设一台主变压器。

(3) 装有两台及以上主变压器的变电站，当断开一台时，其余主变压器的容量应保证用户的一、二级负荷。

(4) 具有三种电压的变电站，如通过主变压器各侧绕组的功率均达到该变压器容量的15%以上，主变压器宜采用三绕组变压器。

(5) 电力潮流变化大和电压偏移大的变电站，如经计算普通变压器不能满足电力系统和用户对电压质量的要求时，应采用有载调压变压器。

(6) 选择变压器联结组标号时，配电侧同级电压相位角要一致。

(7) 变压器结构性能。

1) 结构型式。根据系统的需要及运输条件，可选用普通或自耦，单相或三相，双绕组、三绕组或分裂绕组，升压或降压等变压器以及组别接法。

2) 调压方式。按运行要求可选用有载调压或无励磁调压变压器以及分接头变比。

3) 阻抗。按系统的短路容量、系统稳定、继电保护、供电电压水平等要求以及变压器具体结构条件确定，一般情况则采用标准阻抗。

(8) 变压器运行特性。

1) 过载能力。需满足运行要求。

2) 游离及防晕。运行中游离电晕及电晕放电不超过规定。

3) 噪声。不超过环境保护规定。

4) 损耗。不超过规定，一般采用低损耗变压器。

(9) 中性点接地方式。按系统的需要可选择中性点直接接地或非直接接地两种方式，

一般要有中性点引出，绝缘水平按标准或实际需要确定。

#### 7.2.1.4 变压器阻抗和电压调整方式的选择

(1) 阻抗选择原则。变压器的阻抗实质就是绕组间的漏抗。阻抗的大小主要决定于变压器的结构和采用的材料。当变压器的电压比和结构、型式、材料确定之后，其阻抗大小一般和变压器容量关系不大。

从电力系统稳定和供电电压质量考虑，主变压器的阻抗越小越好，但阻抗偏小又会使系统短路电流增加，高、低压电气设备很难选择。此外阻抗的大小还要考虑变压器并联运行的要求。主变压器阻抗的选择要考虑的原则：

1) 各侧阻抗值的选择必须从电力系统稳定、潮流方向、无功分配、继电保护、短路电流、系统内的调压手段和并联运行等方面进行综合考虑；并由对工程起决定性作用的因素来确定。

2) 对双绕组普通变压器，一般按标准规定值选择。

3) 对三绕组的普通型和自耦型变压器，其最大阻抗是放在高、中压侧还是高、低压侧，必须按上述第1)条原则来确定。目前国内生产的变压器有“升压型”和“降压型”两种结构：“升压型”的绕组排列顺序为自铁芯向外依次为中、低、高，所以高、中压侧阻抗最大；“降压型”的绕组排列顺序为自铁芯向外依次为低、中、高，所以高、低压侧阻抗最大。

(2) 电压调整方式的选择。变压器的电压调整是用分接开关切换变压器的分接头，从而改变变压器变比来实现的。切换方式有两种：一种是不带电切换，称为无励磁调压，调整范围通常在 $\pm 5\%$ 以内；另一种是带负载切换，称为有载调压，调整范围可达30%。

设置有载调压的原则：

1) 对于110kV及以下的变压器，宜考虑至少有一级电压的变压器采用有载调压方式。

2) 见7.2.1.3第(5)款。

分接头的设置原则：

1) 在高压绕组或中压绕组上，而不是在低压绕组上。

2) 尽量在星形联结绕组上，而不是在三角形联结的绕组上。

3) 在网络电压变化最大的绕组上。

### 7.2.2 开关电器选择

#### 7.2.2.1 高压断路器

(1) 参数选择。断路器及其操动机构参数应按表7-2-2所列技术条件选择，并按表中使用环境条件校验。

表7-2-2中的一般项目按7.1节有关要求进行选择，并补充说明如下：

表7-2-2 断路器及其操动机构参数选择

项 目		参 数
技术条件	正常工作条件	电压、电流、频率、机械荷载
	短路稳定性	动稳定电流、热稳定电流和持续时间
	承受过电压能力	对地和断口间的绝缘水平、爬电比距
	操作性能	开断电流、短路关合电流、操作循环、操作次数、操作相数、分合闸时间及同期性、对过电压的限制、某些特需的开断电流、操动机构

续表

项 目		参 数
环境条件	环 境	环境温度、日温差 <sup>①</sup> 、最大风速 <sup>①</sup> 、相对湿度 <sup>②</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、海拔、地震烈度
	环境保护	噪声、电磁干扰

① 当在屋内使用时，可不校验。

② 当在屋外使用时，可不校验。

1) 断路器的额定电压应不低于系统的最高电压；额定电流应大于运行中可能出现的任何负荷电流。

2) 频率的要求主要针对进出口产品。

3) 断路器的额定关合电流，不应小于短路冲击电流值。

4) 当断路器的两端为互不联系的电源时，设计中应按以下要求校验：

a. 断路器断口间的绝缘水平应满足另一侧出现工频反相电压的要求。

b. 在反相下操作时的开断电流不超过断路器的额定反相开断性能。

c. 断路器同极断口间的爬电比距为对地的 1.15 ~ 1.3 倍。

5) 变压器中性点绝缘等级低于相电压系统中绝缘等级，断路器的分合闸操作不同期时间宜小于 10ms。

6) 不应选用手动操动机构。

(2) 型式选择。断路器型式的选择，除应满足各项技术条件和环境条件外，还应考虑便于施工调试和运行维护，并经技术经济比较后确定。目前常用的断路器有真空断路器、六氟化硫断路器等。

(3) 关于开断能力的几个问题：

1) 校验开断能力的量。在校核断路器的断流能力时，应用开断电流代替断流容量。一般取断路器实际开断时间（继电保护的工作时间与断路器固有分闸时间之和）的短路电流作为校验条件。

2) 首相开断系数。在中性点直接接地或经小阻抗接地的系统中，选择断路器时，应取首相开断系数为 1.3 的额定开断电流；在 110kV 及以下的中性点非直接接地的系统中，则应取首相开断系数为 1.5 的额定开断电流。

3) 当断路器安装地点的短路电流直流分量不超过断路器额定短路开断电流幅值的 20% 时，额定短路开断电流仅由交流分量来表征，不必校验断路器的直流分断能力，如果短路电流直流分量超过 20% 时，应与制造厂协商，并在技术协议书中明确所要求的直流分量百分数。

4) 用于切合并联补偿电容器的断路器，应校验操作时的过电压倍数，并采取相应的限制过电压措施。宜用真空断路器或 SF<sub>6</sub> 断路器。

5) 断路器尚应根据其使用条件校验下列性能：

a. 近区故障条件下的开合性能。

b. 异相接地条件下的开合性能。

c. 失步条件下的开合性能。

d. 小电感电流开合性能。

- e. 容性电流开合性能。  
f. 二次侧短路开断性能。

6) 当系统单相短路电流计算值在一定条件下有可能大于三相短路电流值时, 所选断路器的额定开断电流值应不小于所计算的单相短路电流值。

7) 重合闸。装有自动重合闸装置的断路器, 应考虑重合闸对额定开断电流的影响。

对于按自动重合闸操作循环完成试验的断路器, 不必再因为重合闸而降低其断流能力。

如要求断路器需要具备二次快速重合的能力, 则应与制造部门协商。

(4) 机械荷载。断路器接线端子允许的水平机械荷载如表 7-2-3 所示。

在与制造部门签订技术协议或引进国外产品时, 可按表 7-2-4 所列数据提出要求。

表 7-2-3 断路器接线端子允许的水平机械荷载

额定电压 (kV)	10 及以下	35 ~ 63	110
接线端子水平机械拉力(N)	250	500	750

- 注 1. 本表引自 GB 1984—2014《高压交流断路器》。  
2. 超过本表所列数值时, 应与制造厂商定。

表 7-2-4 断路器接线端子应能承受的静态拉力

额定电压 (kV)	额定电流 (A)	纵向水平拉力 (N)	横向水平拉力 (N)	垂直力 (N)
10 (12)		500	250	300
35 ~ 63 (40.5 ~ 72.5)	≤1250	750	400	500
	≥1600	750	500	750
110 (126)	≤2000	1000	750	750
	≥2500	1250	750	1000

- 注 1. 本表引自 DL/T 402—2007《高压交流断路器订货技术条件》。  
2. 静态安全系数为 3.2 ~ 3.5。

### 7.2.2.2 高压隔离开关

(1) 参数选择。隔离开关及其操动机构参数应按表 7-2-5 所列技术条件选择, 并按表中使用环境条件校验。

表 7-2-5 隔离开关及其操动机构参数选择

项 目		参 数
技术条件	正常工作条件	电压、电流、频率、机械荷载
	短路稳定性	动稳定电流、热稳定电流和持续时间
	承受过电压能力	对地和断口间的绝缘水平、爬电比距
	操作性能	分合小电流、旁路电流和母线环流, 单柱式隔离开关的接触区, 操动机构
环境条件	环境	环境温度、最大风速 <sup>①</sup> 、覆冰厚度 <sup>①</sup> 、相对湿度 <sup>②</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、海拔、地震烈度
	环境保护	电磁干扰

- ① 当在屋内使用时, 可不校验。  
② 当在屋外使用时, 可不校验。

表 7-2-5 中的一般项目, 按第 7.1 节有关要求进行选择, 并补充说明如下:

1) 频率的要求主要针对进出口产品。

2) 当安装的 63kV 及以下隔离开关的相间距离小于产品规定的相间距离时，其实际动稳定电流值应与厂家联系确定。

3) 单柱垂直开启式隔离开关在分闸状态下，动静触头间的最小电气距离不应小于配电装置的最小安全净距  $B$  值。

(2) 型式选择。隔离开关的型式，应根据配电装置的布置特点和使用要求等因素，进行综合技术经济比较后确定。

(3) 为保证检修安全，63kV 及以上断路器两侧的隔离开关和线路隔离开关的线路侧宜配置接地开关。

隔离开关的接地开关应根据其安装处的短路电流进行动、热稳定校验。

(4) 选用的隔离开关应具有切合电感、电容小电流的能力，应使电压互感器、避雷器、空载母线、励磁电流不超过 2A 的空载变压器及电容电流不超过 5A 的空载线路等，在正常情况下操作时能可靠切断，并符合有关电力工业技术管理的规定。当隔离开关的技术性能不能满足上述要求时，应向制造部门提出，否则不得进行相应的操作。

隔离开关尚应能可靠切断断路器的旁路电流及母线环流。

(5) 屋外隔离开关接线端的机械荷载不应大于规定值（参见表 7-2-4）。机械荷载应考虑母线（或引下线）的自重、张力、风力和冰雪等施加于接线端的最大水平静拉力。当引下线采用软导线时，接线端机械荷载中不需再计入短路电流产生的电动力。但对采用硬导体的设备间连线，则考虑短路电动力。

### 7.2.2.3 高压负荷开关

(1) 参数选择。高压负荷开关及其操动机构参数应按表 7-2-6 所列技术条件选择，并按表中使用环境条件校验。

表 7-2-6 高压负荷开关及其操动机构参数选择

项 目		参 数
技术条件	正常工作条件	电压、电流、机械荷载
	短路稳定性	动稳定电流、额定关合电流、热稳定电流和持续时间
	承受过电压能力	对地和断口间的绝缘水平、爬电比距
	操作性能	开断和关合电流、操动机构
环境条件		环境温度、最大风速 <sup>①</sup> 、覆冰厚度 <sup>①</sup> 、相对湿度 <sup>②</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、海拔、地震烈度

① 当在屋内使用时，可不校验。

② 当在屋外使用时，可不校验。

表 7-2-6 中的一般项目，按第 7.1 节有关要求进行选择。配手动操动机构的负荷开关，仅限于 10kV 及以下，其关合电流不大于 8kA（峰值）。

(2) 开断和关合性能。高压负荷开关主要用以切断和关合负荷电流，与高压熔断器联合使用可代替断路器作短路保护，带有热脱扣器的负荷开关还具有过载保护性能。

35kV 及以下通用型负荷开关具有以下开断和关合能力：

1) 开断有功负荷电流和闭环电流，其值等于负荷开关的额定电流。

2) 开断不大于 10A 的电缆电容电流或限定长度的架空线充电电流。

3) 开断 1250kVA 配电变压器的空载电流。

4) 关合额定的“短路关合电流”。

当开断电流超过上述限额或开断其电容电流为额定电流 80% 以上的电容器组时, 应与制造部门协商, 选用专用的负荷开关。

#### 7.2.2.4 高压熔断器

(1) 参数选择。高压熔断器参数应按表 7-2-7 所列技术条件选择, 并按表中使用环境条件校验。

表 7-2-7 高压熔断器参数选择

项 目	参 数
技术条件	电压、电流、开断电流、保护熔断特性
环境条件	环境温度、最大风速 <sup>①</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、海拔、地震热度

① 当在屋内使用时可不校验。

(2) 高压熔断器的额定开断电流应大于回路中可能出现的最大预期短路电流周期分量有效值。

(3) 限流式高压熔断器不宜使用在工作电压低于其额定电压的电网中, 以免因过电压而使电网中的电气设备损坏。

(4) 高压熔断器熔管的额定电流应不小于熔体的额定电流。熔体的额定电流应按高压熔断器的保护熔断特性选择。

(5) 选择熔体时, 应保证前后两级熔断器之间, 熔断器与电源侧继电保护之间, 以及熔断器与负荷侧继电保护之间动作的选择性。

(6) 高压熔断器熔体在满足可靠性和下一段保护选择性的前提下, 当在本段保护范围内发生短路时, 应能在最短的时间内切断故障, 以防止熔断时间过长而加剧被保护电气设备的损坏。

(7) 保护 35kV 及以下电力变压器的高压熔断器, 其熔体的额定电流可按式 (7-2-1) 选择

$$I_{rr} = KI_{gmax} \quad (7-2-1)$$

式中  $I_{rr}$ ——熔体的额定电流, A;

$K$ ——系数, 当不考虑电动机自起动时, 可取 1.1~1.3; 当考虑电动机自起动时, 可取 1.5~2;

$I_{gmax}$ ——电力变压器回路最大工作电流, A。

为了防止变压器突然投入时产生的励磁涌流损伤熔断器, 变压器的励磁涌流通过熔断器产生的热效应可按 10~20 倍的变压器满载电流持续 0.1s 计算, 必要时可再按 20~25 倍的变压器满载电流持续 0.01s 计算。

(8) 保护电压互感器的高压熔断器, 只需按额定电压和开断电流选择, 熔体的选择只限能承受电压互感器的励磁冲击电流, 不必校验额定电流。

(9) 保护并联电容器的高压熔断器熔体的额定电流可按式 (7-2-2) 选择

$$I_{rr} = KI_{rc} \quad (7-2-2)$$

式中  $I_{rr}$ ——熔体的额定电流, A;

$K$ ——系数, 对限流式熔断器, 当保护一台电力电容器时, 系数可取 1.37~1.5, 当保护一组电力电容器时, 系数可取 1.43~1.55;

$I_{rc}$ ——电力电容器回路的额定电流，A。

(10) 电动机回路熔断器的选择应符合下列规定：

- 1) 熔断器应能安全通过电动机的容许过负荷电流。
- 2) 电动机的起动电流不应损伤熔断器。
- 3) 电动机在频繁地投入、开断或反转时，其反复变化的电流不应损伤熔断器。

### 7.2.2.5 高压负荷开关—熔断器组合电气设备

组合电气设备中的高压负荷开关和熔断器的选择除应分别满足相关的要求外，还应进行转移电流或交接电流的校验。

(1) 转移电流和交接电流的校验。负荷开关—熔断器组合电气设备，当采用撞击器操作负荷开关分闸时，在熔断器与负荷开关转换开断职能时的三相对称电流值，称为组合电气设备的额定转移电流。当预期短路电流低于额定转移电流值时，首开相电流由熔断器开断，而后两相电流由负荷开关开断；当预期短路电流大于额定转移电流值时，三相电流仅由熔断器开断。

负荷开关—熔断器组合电气设备，当采用脱扣器操作负荷开关分闸时，两种过电流保护装置（负荷开关脱扣器和熔断器）的时间—电流特性曲线交点所对应的电流值，称为组合电气设备的额定交接电流。预期短路电流小于额定交接电流值时，熔断器把开断电流的任务交给由脱扣器触发的负荷开关承担。

负荷开关—熔断器组合电气设备的实际转移电流，应按式(7-2-3)校验

$$I_{r.zx} \leq I_{c.zy} < I_{r.zy} \quad (7-2-3)$$

7 式中  $I_{r.zx}$ ——熔断器的额定最小开断电流，A；

$I_{c.zy}$ ——计算的实际转移电流，A；

$I_{r.zy}$ ——负荷开关—熔断器组合电气设备的额定转移电流，A。

当采用高压负荷开关—熔断器组合电气设备保护变压器时，因一次侧保护装置专门保护变压器二次保护装置前面的故障，当变压器二次侧端子直接短路时，变压器一次侧故障电流必须由高压熔断器单独开断，不能转移到负荷开关开断，以保证组合电器中负荷开关的安全使用，因此实际转移电流校验还应满足

$$I_{c.zy} < I_{sc} \quad (7-2-4)$$

式中  $I_{sc}$ ——变压器二次侧直接短路时一次侧故障电流，A；

其他符号含义见式(7-2-3)。

高压负荷开关—熔断器组合电气设备的实际交接电流，应按式(7-2-5)校验

$$I_{c.jj} < I_{r.jj} \quad (7-2-5)$$

式中  $I_{c.jj}$ ——计算的实际交接电流，A；

$I_{r.jj}$ ——负荷开关—熔断器组合电气设备的额定交接电流，A。

(2) 实际转移电流和实际交接电流的确定方法。高压负荷开关—熔断器组合电气设备的实际转移电流取决于两个因素，即熔断器触发的负荷开关分闸时间和熔断器的时间—电流特性。

对于给定用途的组合电气设备，其实际转移电流可由制造厂家提供，当厂家不能提供时可按下面方法确定。

在熔断器的最小弧前时间—电流特性（基于电流偏差-6.5%）曲线上， $T_{m1}$ 所对应的电流值就是确定的实际转移电流值， $T_{m1}$ 的计算式为

$$T_{m1} = 0.9T_0 \quad (7-2-6)$$

式中  $T_{mi}$ ——三相故障电流下首先动作的熔断器在最小时间—电流特性曲线上的熔断时间, s;  
 $T_0$ ——熔断器触发的负荷开关分闸时间, s。

高压负荷开关—熔断器组合电气设备的实际交接电流也取决于两个因素, 即脱扣器触发的负荷开关的分闸时间和熔断器的时间—电流特性。

对于给定用途的组合电气设备, 其最大交接电流可由制造厂提供, 也可通过下面方法确定。

在熔断器的最大弧前时间—电流特性(基于电流偏差+6.5%)曲线上, 时间坐标为最小的脱扣器触发的负荷开关分闸时间, 如果适用再加上 0.02s(以代表外部继电器的最小动作时间)后的总时间, 它所对应的电流就是实际的交接电流值。

### 7.2.3 互感器选择

选择电流、电压互感器应满足继电保护、自动装置和测量仪表的要求。

#### 7.2.3.1 电流互感器

(1) 参数选择。电流互感器参数应按表 7-2-8 所列技术条件选择, 并按表中使用环境条件校验。

表 7-2-8 中的一般项目按第 7.1 节有关要求进行选择。

表 7-2-8 电流互感器参数选择

项 目		参 数
技术条件	正常工作条件	一次回路电压、一次回路电流、二次回路电流、二次侧负荷、准确度等级、暂态特性、二次级数量、机械荷载
	短路稳定性	动稳定倍数、热稳定倍数
	承受过电压能力	绝缘水平、爬电比距
环境条件		环境温度、最大风速 <sup>①</sup> 、相对湿度 <sup>②</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、海拔、地震烈度

① 当在屋内使用时, 可不校验。

② 当在屋外使用时, 可不校验。

(2) 型式选择。35kV 以下屋内配电装置的电流互感器, 根据安装使用条件及产品情况, 宜采用树脂浇注绝缘结构。

35kV 及以上配电装置宜采用油浸瓷箱式绝缘结构的独立式电流互感器、树脂浇注绝缘电流互感器。在有条件时, 如回路中有变压器套管、穿墙套管, 应优先采用套管电流互感器, 以节约投资、减少占地。

选用母线式电流互感器时, 应注意校核窗口允许穿过的母线尺寸。

对 110kV 及以下系统的保护用电流互感器一般可不考虑暂态影响, 可采用 P 类电流互感器。对某些重要回路可适当提高所选互感器的准确限值系数或饱和电压, 以减缓暂态影响。

选择测量用电流互感器应根据电力系统测量和计量系统的实际需要合理选择互感器的类型。要求在较大工作电流范围内作准确测量时可选用 S 类电流互感器。为保证二次电流在合适的范围内, 可采用复变比或二次绕组带抽头的电流互感器。

电能计量用仪表与一般测量仪表在满足准确级条件下, 可共用一个二次绕组。

(3) 一次额定电流选择。

1) 当电流互感器用于测量时, 其一次额定电流应尽量选择比回路中正常工作电流大

1/3 左右的，以保证测量仪表的最佳工作，并在过负荷时使仪表有适当的指示。

2) 电力变压器中性点电流互感器的一次额定电流应按大于变压器允许的不平衡电流选择，一般情况下，可按变压器额定电流的 1/3 进行选择。安装在放电间隙回路中的电流互感器，一次额定电流可按 100A 选择。

(4) 短路稳定校验。动稳定校验是对产品本身带有一次回路导体的电流互感器进行校验，对于母线从窗口穿过且无固定板的电流互感器（如 LMZ 型）可不校验动稳定。热稳定校验则是验算电流互感器承受短路电流发热的能力。

1) 内部动稳定校验。电流互感器的内部动稳定性通常以额定动稳定电流或动稳定倍数  $K_d$  表示。 $K_d$  等于极限通过电流峰值与一次绕组额定电流  $I_{1n}$  峰值之比。校验计算公式为

$$K_d \geq \frac{i_p}{\sqrt{2}I_{1n}} \times 10^3 \quad (7-2-7)$$

式中  $K_d$ ——动稳定倍数，由制造部门提供；

$i_p$ ——短路冲击电流的瞬时值，kA；

$I_{1n}$ ——电流互感器的一次绕组额定电流，A。

2) 外部动稳定校验。外部动稳定校验主要是校验电流互感器出线端受到的短路作用力不超过允许值。其校验公式与支持绝缘子相同，即

$$F_{\max} = 1.76i_p^2 \frac{l_M}{a} \times 10^{-1} \quad (7-2-8)$$

$$l_M = \frac{l_1 + l_2}{2} \quad (7-2-9)$$

上两式中  $a$ ——回路相间距离，cm；

$l_M$ ——计算长度，cm；

$l_1$ ——电流互感器出线端部至最近一个母线支柱绝缘子的距离，cm；

$l_2$ ——电流互感器两端瓷帽的距离，cm，当电流互感器为非母线式瓷绝缘时， $l_2 = 0$ 。

3) 热稳定校验。制造部门在产品型录中一般给出  $t = 1s$  或  $5s$  的额定短时热稳定电流或热稳定电流倍数  $K_r$ ，校验计算公式为

$$K_r \geq \frac{\sqrt{Q_{it}/t}}{I_{1n}} \times 10^3 \quad (7-2-10)$$

式中  $Q_{it}$ ——短路电流引起的热效应， $kA^2 \cdot s$ ；

$t$ ——制造部门提供的热稳定计算采用的时间， $t = 1s$  或  $5s$ 。

4) 提高短路稳定度的措施。当动热稳定不够时，例如有时由于回路中的工作电流较小，互感器按工作电流选择后不能满足系统短路时的动、热稳定要求，则可选择额定电流较大的电流互感器，增大变流比。若此时 5A 元件的电流表读数太小时，可选用 1~2.5A 元件的电流表。

### 7.2.3.2 电压互感器

(1) 参数选择。电压互感器参数应按表 7-2-9 所列技术条件选择，并按表中环境条

件校验。

表 7-2-9 电压互感器参数选择

项 目		参 数
技术条件	正常工作条件	一次回路电压、二次电压、二次负荷、准确度等级、机械荷载
	承受过电压能力	绝缘水平, 爬电比距
环境条件		环境温度、最大风速 <sup>①</sup> 、相对湿度 <sup>②</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、海拔、地震烈度

① 当在屋内使用时, 可不校验。

② 当在屋外使用时, 可不校验。

### (2) 型式选择。

1) 6~35kV 电压互感器在高压开关柜中或在布置地位狭窄的地方, 宜采用树脂浇注绝缘结构。当需要零序电压时, 一般采用三相五柱电压互感器, 或三个单相三绕组电压互感器。

2) 35~110kV 屋外配电装置一般采用油浸绝缘结构电磁式电压互感器。

(3) 接线方式选择。在满足二次电压和负荷要求的条件下, 电压互感器应尽量采用简单接线。

(4) 电压选择。电压互感器的额定电压按表 7-2-10 选择。

表 7-2-10 电压互感器的额定电压选择

型式	一次电压 (V)		二次电压 (V)	第三绕组电压 (V)	
单相	接于一次线电压上 (如 Vv 接法)	$U_x$	100	—	
	接于一次相电压上	$U_x/\sqrt{3}$	$100/\sqrt{3}$	中性点非直接接地系统	100/3
				中性点直接接地系统	100
三相	$U_x$		100	100/3	

注  $U_x$ ——系统额定电压。

(5) 在中性点非直接接地系统中的电压互感器, 为了防止铁磁谐振过电压, 应采取消谐措施, 并应选用全绝缘。

(6) 电磁式电压互感器可兼作并联电容器的泄能设备, 但此电压互感与电容器组之间, 不应有开断点。

### 7.2.4 限流电抗器选择

(1) 参数选择。限流电抗器参数应按表 7-2-11 所列技术条件选择, 并按表中环境条件校验。

表 7-2-11 中的一般项目, 按第 7.1 节有关要求进行选择, 并补充说明如下:

1) 普通电抗器  $X_k\% > 3\%$  时, 制造厂已考虑连接于无穷大电源、额定电压下, 电抗器端头发生短路时的动稳定度。但由于短路

电流计算是以平均电压 (一般比额定电压高 5%) 为准, 因此在一般情况下仍应进行动稳定

表 7-2-11 限流电抗器参数选择

项 目		参 数
技术条件	正常工作条件	电压、电流、频率、电抗百分值、额定容量绝缘水平、噪声水平
	短路稳定性	动稳定电流、热稳定电流和持续时间
	安装条件	安装方式、进出线端子角度
环境条件		环境温度、相对湿度、海拔、地震烈度

校验。

2) 分裂电抗器动稳定保证值有两个, 其一为单臂流过短路电流时之值, 其二为两臂同时流过反向短路电流时之值。后者比前者小很多。在校验动稳定时应分别对这两种情况, 选定对应的短路方式进行。

3) 安装方式是指电抗器的布置方式。普通电抗器一般有水平布置、垂直布置和品字布置三种。进出线端子角度一般有  $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$  三种, 分裂电抗器推荐使用  $120^\circ$ 。

(2) 额定电流选择。普通电抗器的额定电流选择:

1) 电抗器几乎没有过负荷能力, 所以主变压器或出线回路的电抗器, 应按回路最大工作电流选择, 而不能用正常持续工作电流选择。

2) 变电站母线分段回路的电抗器应满足用户的一级负荷和大部分二级负荷的要求。

(3) 电抗百分值选择。普通电抗器的电抗百分值应按下列条件选择和校验:

1) 将短路电流限制到要求值。此时所必需的电抗器的电抗百分值 ( $X_k\%$ ) 按下式计算

$$X_k\% \geq \left( \frac{I_j}{I''} - X_{*j} \right) \frac{I_{nk} U_j}{U_{nk} I_j} \times 100\% \quad (7-2-11)$$

$$\text{或} \quad X_k\% \geq \left( \frac{S_j}{S''} - X_{*j} \right) \frac{U_j I_{nk}}{I_j U_{nk}} \times 100\% \quad (7-2-12)$$

式中  $U_j$ ——基准电压, kV;

$I_j$ ——基准电流, A;

$X_{*j}$ ——以  $U_j$ 、 $I_j$  为基准, 从网络计算至所选用电抗器前的电抗标么值;

$S_j$ ——基准容量, MVA;

$U_{nk}$ ——电抗器的额定电压, kV;

$I_{nk}$ ——电抗器的额定电流, A;

$I''$ ——被电抗限制后所要求的短路超瞬态电流, kA;

$S''$ ——被电抗限制后所要求的零秒短路容量, MVA。

当系统电抗等于零时, 电抗器的额定电流  $I_{nk}$  和电抗百分值  $X_k\%$  与短路电流  $I_d$  的关系曲线如图 7-2-1 所示。

2) 正常工作时电抗器上的电压降 ( $\Delta U\%$ ) 不宜大于额定电压的 5%, 可由图 7-2-2 曲

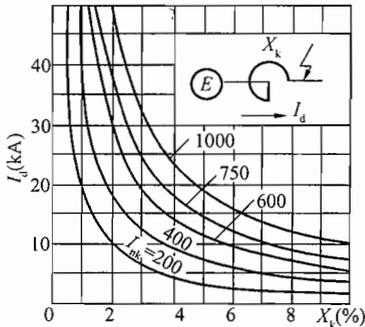


图 7-2-1 电抗器的额定电流  $I_{nk}$  和电抗百分值  $X_k\%$  与短路电流  $I_d$  的关系曲线 ( $X_s = 0$ )

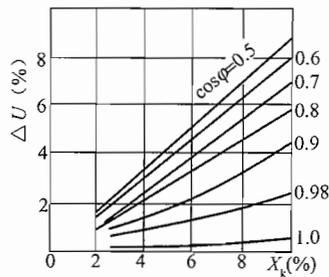


图 7-2-2 电抗器的电压降曲线

线查得或按式 (7-2-13) 计算

$$\Delta U\% = X_k\% \frac{I_g}{I_{nk}} \sin\varphi \quad (7-2-13)$$

式中  $I_g$ ——正常通过的工作电流, A;

$\varphi$ ——负荷功率因数角 (一般取  $\cos\varphi=0.8$ , 则  $\sin\varphi=0.6$ )。

对出线电抗器尚应计及出线上的电压降。

3) 校验短路时母线上的剩余电压。当出线电抗器的继电保护装置带有时限时, 应按在电抗器后发生短路计算, 并按式 (7-2-14) 校验

$$U_y\% \leq X_k\% \frac{I''}{I_n} \quad (7-2-14)$$

式中  $U_y\%$ ——母线必须保持的剩余电压, 一般为 60% ~ 70%。若电抗器接在 6kV 发电机母线上, 则母线剩余电压应尽量取上限值。

若剩余电压不能满足要求, 则可在线路继电保护及线路电压降允许范围内增加出线电抗器的电抗百分值或采用快速继电保护切除短路故障。对于母线分段电抗器、带几回出线的电抗器及其他具有无时限继电保护的出线电抗器, 不必按短路时的母线剩余电压校验。

## 7.2.5 中性点设备选择

### 7.2.5.1 消弧线圈

(1) 参数及型式选择。消弧线圈参数应按表 7-2-12 所列技术条件选择, 并按表中使用环境条件校验。

表 7-2-12

消弧线圈参数选择

项 目	参 数
技术条件	电压、频率、容量、补偿度、电流分接头、中性点位移电压
环境条件	环境温度、日温差 <sup>①</sup> 、相对湿度 <sup>②</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、海拔、地震烈度

① 当在屋内使用时, 可不校验。

② 当在屋外使用时, 可不校验。

消弧线圈宜选用油浸式。装设在屋内相对湿度小于 80% 场所的消弧线圈, 也可选用干式。在电容电流变化较大的场所, 宜选用自动跟踪动态补偿式消弧线圈。

(2) 容量及分接头选择。消弧线圈的补偿容量的计算式为

$$Q = KI_c \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (7-2-15)$$

式中  $Q$ ——补偿容量, kVA;

$K$ ——系数, 过补偿取 1.35, 欠补偿按脱谐度确定;

$U_n$ ——电网的额定线电压, kV;

$I_c$ ——电网的电容电流, A。

消弧线圈应避免在谐振点运行。一般需将分接头调谐到接近谐振点的位置, 以提高补偿成功率。为便于运行调谐, 选用的容量宜接近于计算值。

装在电网变压器中性点的消弧线圈应采用过补偿方式, 防止运行方式改变时, 电容电流减少, 使消弧线圈处于谐振点运行。在正常情况下, 脱谐度一般不大于 10% (脱谐度  $\nu =$

$\frac{I_c - I_L}{I_c}$ , 其中  $I_L$  为消弧线圈电感电流)。

消弧线圈的分接头数量应满足调节脱谐度的要求, 接于变压器的一般不小于 5 个。

(3) 电容电流计算。电网的电容电流, 应包括有电气连接的所有架空线路、电缆线路、发电机、变压器以及母线和电气设备的电容电流, 并应考虑电网 5~10 年的发展。

1) 架空线路的电容电流估算式为

$$I_c = (2.7 \sim 3.3) U_n L \times 10^{-3} \quad (7-2-16)$$

式中  $L$ ——线路的长度, km;

$I_c$ ——架空线路的电容电流, A;

2.7——系数, 适用于无架空地线的线路;

3.3——系数, 适用于有架空地线的线路。

同杆双回线路的电容电流为单回路的 1.3~1.6 倍。

2) 电缆线路的电容电流估算式为

$$I_c = 0.1 U_n L \quad (7-2-17)$$

3) 对于变电站增加的接地电容电流值见表 7-2-13。

表 7-2-13 变电站增加的接地电容电流值

额定电压 (kV)	6	10	15	35	63	110
附加值 (%)	18	16	15	13	12	10

(4) 中性点位移校验。长时间中性点位移电压不应超过下列数值。

中性点经消弧线圈接地的电网  $15\% \times \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ 。

中性点位移电压一般计算式为

$$U_0 = \frac{U_{bd}}{\sqrt{d^2 + v^2}} \quad (7-2-18)$$

式中  $U_{bd}$ ——消弧线圈投入前, 电网中性点的不对称电压值, 一般取 0.8% 相电压;

$d$ ——阻尼率, 一般对 63~110kV 架空线路取 3%, 35kV 及以下架空线路取 5%, 电缆线路取 2%~4%;

$v$ ——脱谐度。

(5) 在选择消弧线圈的台数和容量时, 应考虑消弧线圈的安装地点, 并按下列原则进行:

1) 在任何运行方式下, 大部分电网不得失去消弧线圈的补偿。不应将多台消弧线圈集中安装在一处, 并应避免电网仅装一台消弧线圈。

2) 在变电站中, 消弧线圈宜装在变压器中性点上。

3) 安装在 YNd 接线双绕组或 YNynd 接线三绕组变压器中性点上的消弧线圈的容量, 不应超过变压器三相总容量的 50%, 并且不得大于三绕组变压器的任一绕组容量。

4) 安装在 YNyn 接线的内铁芯式变压器中性点上的消弧线圈容量, 不应超过变压器三相绕组总容量的 20%。

消弧线圈不应接于零序磁通经铁心闭路的 YNyn 接线变压器的中性点上（例如单相变压器组或外铁型变压器）。

5) 如变压器无中性点或中性点未引出，应装设容量相当的专用接地变压器，接地变压器可与消弧线圈采用相同的额定工作时间。

### 7.2.5.2 接地电阻

(1) 参数选择。接地电阻参数应按表 7-2-14 所列技术条件和环境条件选择。

表 7-2-14 接地电阻参数选择

项 目	参 数
技术条件	电压、频率、正常运行电流、电阻值、热稳定电流和持续时间、中性点位移电压
环境条件	环境温度、日温差、相对湿度、污秽、海拔、地震烈度

(2) 中性点电阻材质可选用金属、非金属或金属氧化物线性电阻。

(3) 系统中性点经电阻接地方式可根据系统单相接地电容电流值来确定。当接地电容电流小于规定值时，可采用高电阻接地方式；当接地电容电流值大于规定值时，可采用低电阻接地方式。

(4) 当中性点采用高电阻接地方式时，高电阻选择计算过程为

1) 经高电阻直接接地。

电阻的额定电压

$$U_R \geq 1.05 \times \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad (7-2-19)$$

电阻值

$$R = \frac{U_N}{I_R \sqrt{3}} \times 10^3 = \frac{U_N}{KI_C \sqrt{3}} \times 10^3 \quad (7-2-20)$$

电阻消耗功率

$$P_R = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \times I_R \quad (7-2-21)$$

式中  $R$ ——中性点接地电阻值， $\Omega$ ；

$U_N$ ——系统额定线电压，kV；

$U_R$ ——电阻额定电压，kV；

$I_R$ ——电阻电流，A；

$I_C$ ——系统单相对地短路时电容电流，A；

$K$ ——单相对地短路时电阻电流与电容电流的比值，一般取 1.1。

2) 经单相配电变压器接地。电阻的额定电压应不小于变压器二次侧电压，一般选用 110V 或 220V。

电阻值

$$R_{N2} = \frac{U_N \times 10^3}{1.1 \times \sqrt{3} I_C n_\phi^2} \quad (7-2-22)$$

接地电阻消耗功率

$$P_R = I_{R2} \times U_{N2} \times 10^{-3} = \frac{U_N \times 10^3}{\sqrt{3} n_\phi R_{N2}} \times \frac{U_N}{\sqrt{3} n_\phi} = \frac{U_N^2}{3 n_\phi^2 R_{N2}} \times 10^3$$

$$n_{\phi} = \frac{U_N \times 10^3}{\sqrt{3}U_{N2}} \quad (7-2-23)$$

式中  $n_{\phi}$ ——降压变压器一、二次之间的变比；

$I_{R2}$ ——二次电阻上流过的电流，A；

$U_{N2}$ ——单相配电变压器的二次电压，V；

$R_{N2}$ ——间接接入电阻值， $\Omega$ 。

(5) 当中性点采用低阻接地方式时，接地电阻选择计算过程为电阻的额定电压

$$U_R \geq 1.05 \times \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad (7-2-24)$$

电阻值

$$R_N = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_d} \quad (7-2-25)$$

接地电阻消耗功率

$$P_R = I_d \times U_R \quad (7-2-26)$$

式中  $R_N$ ——中性点接地电阻， $\Omega$ ；

$U_N$ ——系统额定线电压，V；

$I_d$ ——选定的单相接地电流，A。

短时耐受接地电流按 10s 时间考虑。

### 7.2.5.3 接地变压器

(1) 参数选择。接地变压器参数应按表 7-2-15 所列技术条件和环境条件选择。

表 7-2-15 接地变压器参数选择

项 目	参 数
技术条件	型式、容量、绕组电压、频率、电流、绝缘水平、温升、过载能力
环境条件	环境温度、日温差 <sup>①</sup> 、最大风速 <sup>①</sup> 、相对湿度 <sup>②</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、海拔、地震烈度

① 当在屋内使用时，可不校验。

② 当在屋外使用时，可不校验。

(2) 当系统中性点可以引出时宜选用单相接地变压器，系统中性点不能引出时应选用三相接地变压器。有条件时宜选用干式无励磁调压接地变压器。

(3) 接地变压器参数选择。

1) 接地变压器的额定电压。安装在发电机或变压器中性点的单相接地变压器额定一次电压

$$U_{Nb} = U_N \quad (7-2-27)$$

式中  $U_N$ ——发电机或变压器额定一次线电压，kV。

接于系统母线三相接地变压器额定一次电压应与系统额定电压一致。接地变压器二次电压可根据负载特性确定。

2) 接地变压器的绝缘水平应与连接系统绝缘水平相一致。

3) 接地变压器的额定容量。

单相接地变压器额定容量为

$$S_N \geq \frac{1}{K} U_2 I_2 = \frac{U_N}{\sqrt{3} K n_\phi} I_2 \quad (\text{kVA}) \quad (7-2-28)$$

式中  $U_2$ ——接地变压器二次侧电压, kV;

$I_2$ ——二次电阻电流, A;

$K$ ——变压器的过负荷系数 (由变压器制造厂提供)。

三相接地变压器, 其额定容量应与消弧线圈或接地电阻容量相匹配。若带有二次绕组还应考虑二次负荷容量。

对 Z 型或 YNd 接线三相接地变压器, 若中性点接消弧线圈或电阻的话, 接地变压器容量为

$$S_N \geq Q_X \quad S_N \geq P_r \quad (7-2-29)$$

式中  $Q_X$ ——消弧线圈额定容量;

$P_r$ ——接地电阻额定容量。

对 Y/开口 d 接线接地变压器 (三台单相), 若中性点接消弧线圈或电阻的话, 接地变压器容量为

$$S_N \geq \sqrt{3} Q_X / 3 \quad S_N \geq \sqrt{3} P_r / 3 \quad (7-2-30)$$

#### 7.2.5.4 避雷器

(1) 参数选择。阀式避雷器参数应按表 7-2-16 所列技术条件选择, 并按表中环境条件校验。

表 7-2-16

阀式避雷器参数选择

项 目		参 数
技术条件	正常工作条件	避雷器额定电压 ( $U_r$ )、避雷器持续运行电压 ( $U_c$ )、额定频率、机械荷载
	承受过电压能力	工频放电电压、冲击放电电压和残压、通流容量
环境条件		环境温度、最大风速 <sup>①</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、海拔、地震烈度

① 当在屋内使用时可不校验。

(2) 采用阀式避雷器进行雷电过电压保护时, 除旋转电机外, 对不同电压范围、不同系统接地方式的避雷器选型为:

1) 有效接地系统, 范围 II ( $U_m > 252\text{kV}$ ) 应该选用金属氧化物避雷器; 范围 I ( $3.6\text{kV} \leq U_m \leq 252\text{kV}$ ) 宜采用金属氧化物避雷器。

2) 气体绝缘全封闭组合电气设备和低电阻接地系统应选用金属氧化物避雷器。

3) 不接地、消弧线圈接地和高电阻接地系统, 根据系统中谐振过电压和间歇性电弧接地过电压等发生的可能性及其严重程度, 可任选金属氧化物避雷器或碳化硅普通阀式避雷器。

4) 旋转电机的雷电侵入波过电压保护, 宜采用旋转电机金属氧化物避雷器或旋转电机磁吹阀式避雷器。

(3) 阀式避雷器标称放电电流下的残压 ( $U_{res}$ ), 不应大于被保护电气设备 (旋转电机除外) 标准雷电冲击全波耐受电压 (BIL) 的 71%。

(4) 有串联间隙金属氧化物避雷器和碳化硅阀式避雷器的额定电压, 在一般情况下应符合下列条件:

1) 110kV 有效接地系统不低于  $0.8U_m$ 。

2) 3~10kV 和 35kV、66kV 系统分别不低于  $1.1U_m$  和  $U_m$ ；3kV 及以上具有发电机的系统不低于 1.1 倍发电机最高运行电压。

3) 中性点避雷器的额定电压，对 3~20kV 和 35、66kV 系统，分别不低于  $0.64U_m$  和  $0.58U_m$ ；对 3~20kV 发电机，不低于 0.64 倍发电机最高运行电压。

(5) 采用无间隙金属氧化物避雷器作为雷电过电压保护装置时，应符合：

- 1) 避雷器持续运行电压和额定电压应不低于表 7-2-17 所列数值。
- 2) 避雷器能承受所在系统作用的暂时过电压和操作过电压能量。

表 7-2-17 无间隙金属氧化物避雷器持续运行电压和额定电压

系统接地方式	持续运行电压 (kV)		额定电压 (kV)	
	相 地	中性点	相 地	中性点
110kV 有效接地	$U_m/\sqrt{3}$	$0.45U_m$	$0.75U_m$	$0.57U_m$
3~20kV 和 35、66kV 不接地	$1.1U_m$ ； $U_{mg}$ $U_m$	$0.64U_m$ ； $U_{mg}/\sqrt{3}$ $U_m/\sqrt{3}$	$1.38U_m$ ； $1.25U_{mg}$ $1.25U_m$	$0.8U_m$ ； $0.72U_{mg}$ $0.72U_m$
消弧线圈	$U_m$ ； $U_{mg}$	$U_m/\sqrt{3}$ ； $U_{mg}/\sqrt{3}$	$1.25U_m$ ； $1.25U_{mg}$	$0.72U_m$ ； $0.72U_{mg}$
低电阻	$0.8U_m$		$U_m$	
高电阻	$1.1U_m$ ； $U_{mg}$	$1.1U_m/\sqrt{3}$ ； $U_{mg}/\sqrt{3}$	$1.38U_m$ ； $1.25U_{mg}$	$0.8U_m$ ； $0.72U_{mg}$

注 1. 110kV 变压器中性点不接地且绝缘水平低于标准时，避雷器的参数需另行确定。

2.  $U_m$  为系统最高电压， $U_{mg}$  为发电机最高运行电压。

(6) 保护变压器中性点绝缘的避雷器型式按表 7-2-18 和表 7-2-19 选择。

表 7-2-18 中性点非直接接地系统中保护变压器中性点绝缘的避雷器

变压器额定电压 (kV)	35	63
避雷器型式	FZ-15 + FZ-10 FZ-30 FZ-35 Y1.5W-55	FZ-40 FZ-60 Y1.5W-55 Y1.5W-60 Y1.5W-72

注 避雷器尚应与消弧线圈的绝缘水平相配合。

表 7-2-19 中性点直接接地系统中保护变压器中性点绝缘的避雷器

变压器额定电压 (kV)	110		220
中性点绝缘	110kV 级	35kV 级	110kV 级
避雷器型式	FZ-110J FZ-60 Y1.5W-72	Y1.5W-72	FCZ-110 FZ-110J Y1.5W-144

(7) 对中性点为分级绝缘的 110、220kV 变压器，如使用同期性能不良的断路器，变压器中性点宜用金属氧化物避雷器保护。当采用阀型避雷器时，变压器中性点宜增设棒型保护间隙，并与阀型避雷器并联。

(8) 无间隙金属氧化物避雷器按其标称放电电流的分类见表 7-2-20。

表 7-2-20 无间隙金属氧化物避雷器按其标称放电电流的分类

标称放电电流 $I_n$ (kA)	避雷器额定电压 $U_r$ (有效值) (kV)	备 注
20	$420 \leq U_r \leq 468$	电站用避雷器
10	$90 \leq U_r \leq 468$	
5	$4 \leq U_r \leq 25$	发电机用避雷器
	$5 \leq U_r \leq 17$	配电用避雷器
	$5 \leq U_r \leq 90$	并联补偿电容器用避雷器
	$5 \leq U_r \leq 108$	电站用避雷器
	$42 \leq U_r \leq 84$	电气化铁道用避雷器
2.5	$4 \leq U_r \leq 13.5$	电动机用避雷器
1.5	$0.28 \leq U_r \leq 0.50$	低压避雷器
	$2.4 \leq U_r \leq 15.2$	电机中性点用避雷器
	$60 \leq U_r \leq 207$	变压器中性点用避雷器

(9) 系统额定电压 35kV 及以上的避雷器宜配备放电动作记录器。保护旋转电机的避雷器, 应采用残压低的动作记录器。

#### 7.2.5.5 阻容吸收器

(1) 参数选择阻容吸收器参数应按表 7-2-21 所列技术条件和环境条件选择。

表 7-2-21 阻容吸收器参数选择

项 目		参 数
技术条件	正常工作条件	额定电压、额定频率、电阻值、电容值、布置型式
	承受过电压能力	绝缘水平
环境条件		环境温度、海拔

(2) 当用于中性点不接地系统时, 应校验所装阻容吸收器电容值, 不应影响系统的中性点接地方式。

(3) 当用于易产生高次谐波的电力系统时, 应注意选用能适应谐波影响的阻容吸收器。

(4) 应校验所在回路的过电压水平, 使其始终被限制在设备允许值之内。

#### 7.2.6 高压电瓷选择

(1) 参数选择: 绝缘子和穿墙套管参数应按表 7-2-22 所列技术条件选择, 并按表中环境条件校验。

表 7-2-22 绝缘子和穿墙套管参数选择

项 目		绝缘子的参数	穿墙套管的参数
技术条件	正常工作条件	电压、正常机械荷载	电压、电流
	短路稳定性	支柱绝缘子的动稳定	动稳定、热稳定电流及持续时间
	承受过电压能力	绝缘水平、爬电比距	绝缘水平
环境条件		环境温度、日温差 <sup>①</sup> 、最大风速 <sup>①</sup> 、相对湿度 <sup>②</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、海拔、地震烈度	

① 当在屋内使用时, 可不校验。

② 当在屋外使用时, 可不校验。

表 7-2-22 中的一般项目按第 7.1 节有关要求进行选择，并补充说明如下：

1) 变电站的 3~20kV 屋外支柱绝缘子和穿墙套管，当有冰雪时，宜采用高一电压的产品。对 3~6kV 者，也可采用提高两级电压的产品。

2) 母线型穿墙套管不按持续电流来选择，只需保证套管的型式与母线的尺寸相配合。

3) 当周围环境温度高于 +40℃ 但不超过 +60℃ 时，穿墙套管的持续允许电流  $I_{xu}$  应按式 (7-2-31) 修正

$$I_{xu} = I_n \times \sqrt{\frac{90-t}{90-40}} \quad (7-2-31)$$

式中  $t$ ——周围实际环境温度，℃；

$I_n$ ——持续允许额定电流，A。

(2) 型式选择。

1) 屋外支柱绝缘子一般采用棒式支柱绝缘子。屋外支柱绝缘子需倒装时，宜用悬挂式支柱绝缘子。

2) 屋内支柱绝缘子一般采用联合胶装的多棱式支柱绝缘子。

3) 穿墙套管一般采用铝导体穿墙套管，对铝有明显腐蚀的地区如沿海地区可以例外。

4) 在污秽地区，应尽量选用防污盘形悬式绝缘子。

(3) 动稳定校验。按短路动稳定校验支柱绝缘子和穿墙套管，要求

$$P \leq 0.6 P_{xu} \quad (7-2-32)$$

式中  $P_{xu}$ ——支柱绝缘子或穿墙套管的抗弯破坏负荷，N；

$P$ ——在短路时作用于支柱绝缘子或穿墙套管的力，N。

在实际计算时，也可根据实际布置尺寸反算出允许的短路冲击电流峰值，按式 (7-1-5) 与工程计算的短路电流进行比较。

在校验 35kV 及以上水平安装的支柱绝缘子的机械强度时，应计及绝缘子自重、母线重量和短路电力的联合作用。由于自重和母线重量产生的弯矩，将使绝缘子允许的机械强度减小。其降低数值如表 7-2-23 所示。

表 7-2-23 绝缘子水平安装时机械强度降低数值

电压 (kV)	35	63	110
降低数值 (%)	1~2	3	6

注 35kV 以下的产品，降低数值 < 1%，可不必考虑。

支柱绝缘子在力的作用下，还将产生扭矩。在校验机械强度时，还应校验抗扭机械强度。

(4) 悬式绝缘子片数选择。悬式绝缘子的片数按下列条件选择：

1) 按额定电压和爬电比距选择。绝缘子串的有效爬电比距不应小于表 7-1-8 所列数值。片数  $n$  的计算式为

$$n \geq \frac{\lambda U_d}{l_0} \quad (7-2-33)$$

式中  $\lambda$ ——爬电比距，见表 7-1-8，cm/kV；

$U_d$ ——额定电压，kV；

$l_0$ ——每片绝缘子的爬电距离。

2) 按内过电压选择。110kV 及以下电压等级, 绝缘子串的工频湿闪电压的计算式为

$$U_s \geq \frac{KU_{xg}}{K_\Sigma} \quad (7-2-34)$$

式中  $U_s$ ——绝缘子的湿闪电压, kV;

$K$ ——内过电压计算倍数;

$U_{xg}$ ——系统最高运行相电压, kV;

$K_\Sigma$ ——考虑各种因素的综合系数, 一般  $K_\Sigma = 0.9$ 。

由式 (7-2-34) 计算出  $U_s$ , 然后查闪络电压曲线, 即可得所需片数。

3) 按大气过电压选择。大气过电压要求的绝缘子串正极性雷电冲击电压波 50% 放电电压  $U_{1,50}$ , 应符合式 (7-2-35) 要求, 且不得低于变电站电气设备中隔离开关和支柱绝缘子的相应值。

$$U_{1,50} \geq K_1 U_{ch} \quad (7-2-35)$$

式中  $K_1$ ——绝缘子串大气过电压配合系数,  $K_1 = 1.45$ ;

$U_{ch}$ ——避雷器在雷电流下的残压, kV。110kV 及以下采用 5kA 雷电流下的残压。

绝缘子串的片数根据  $U_{1,50}$  由闪络电压曲线查出。

选择悬式绝缘子除以上条件外, 尚应考虑绝缘子的老化, 每串绝缘子要预留的零值绝缘子为: 35~110kV 耐张串 2 片, 悬垂串 1 片; 选择 V 形悬挂的绝缘子串片数时, 应注意邻近效应对放电电压的影响, 取得试验数据。

在海拔为 1000m 及以下的一级污秽地区, 当采用 X-4.5 型或 XP-6 型悬式绝缘子时, 耐张绝缘子串的绝缘子片数不宜小于表 7-2-24 所列数值。

表 7-2-24 X-4.5 型或 XP-6 型绝缘子耐张串片数

电压 (kV)	35	63	110
绝缘子片数	4	6	8

在空气清洁无明显污秽的地区, 悬垂绝缘子串的绝缘子片数可比耐张绝缘子串的同型

绝缘子少一片。污秽地区的悬垂绝缘子串的绝缘子片数应与耐张绝缘子串相同。

在海拔为 1000~3500m 的地区, 当需要增加绝缘子数量来加强绝缘时, 耐张绝缘子串的片数可按 DL/T 5222—2005 第 21.0.12 条的有关内容进行修正。

### 7.2.7 交流金属封闭开关设备选择

(1) 参数选择。交流金属封闭开关设备 (简称开关柜) 参数应按表 7-2-25 所列技术条件选择, 并按表中使用环境条件校验。

表 7-2-25 交流金属封闭开关设备参数选择

项 目		参 数
技术条件	正常工作条件	电压、电流、频率、温升、系统接地方式、防护等级
	短路稳定性	动稳定电流、热稳定电流和持续时间
	承受过电压能力	绝缘水平
	操作性能	开断电流、短路关合电流、操动机构和辅助回路电压
环境条件		环境温度、日温差、相对湿度、海拔、地震烈度

(2) 开关柜的分类及主要特点见表 7-2-26。

(3) 开关柜的防护等级应满足环境条件的要求。

(4) 当环境温度高于 40℃ 时，开关柜内的电气设备应按 7.1.3.1 条的要求降容使用，母线的允许电流计算式为

$$I_t = I_{40} \sqrt{\frac{40}{t}} \quad (7-2-36)$$

式中  $t$ ——环境温度，℃；

$I_t$ ——环境温度  $t$  下的允许电流，A；

$I_{40}$ ——环境温度 40℃ 时的允许电流，A。

表 7-2-26 金属封闭开关设备的分类及主要特点

分类方式	基本类型	主要特点
按主开关与柜体的配合方式	固定式	主开关及其他元件固定安装，可靠性高，成本低
	移开式（手车式）	主开关可移至柜外，便于主开关的更换、维修、结构紧凑，绝缘结构较复杂，成本较高
按开关柜隔室的构成形式	铠装型	主开关及其两端相连的元件均具有单独的隔室，隔室由接地的金属隔板构成，可靠性高
	间隔型	隔室的设置与铠装型一样，但隔室的隔板用绝缘材料，结构紧凑
	箱型	隔室的数目少于铠装型和间隔型
按主母线系统	单母线	进出线均与一组母线直接相连，检修主开关和主母线时需对负载停电
	单母线带旁路	可由单母线柜派生，检修主开关时可由旁路开关经旁路母线供电
	双母线	进出线可由一组母线转换至另一组母线，一路母线退出时，可由另一路母线供电
按柜内绝缘介质	主要以大气绝缘	结构比较简单、成本低、使用场所受环境条件限制
	气体绝缘（SF <sub>6</sub> ）	可用于高湿、严重污染、高海拔等严酷条件场所，体积小、成本较高
按使用场所	户内	使用于户内
	户外	具有防雨、防晒、隔热等措施，用于户外

(5) 沿开关柜的整个长度延伸方向应设有专用的接地导体，专用接地导体所承受的动、热稳定电流应为额定短路开断电流的 86.6%。

(6) 开关柜内装有电压互感器时，电压互感器高压侧应有防止内部故障的高压熔断器，其开断电流应与开关柜参数相匹配。

(7) 高压开关柜中各组件及其支持绝缘件的外绝缘爬电比距（高压电器组件外绝缘的爬电距离与最高电压之比）应符合：

1) 凝露型的爬电比距。瓷质绝缘不小于 14/18mm/kV（I/II 级污秽等级），有机绝缘不小于 16/20mm/kV（I/II 级污秽等级）。

2) 不凝露型的爬电比距。瓷质绝缘不小于 12mm/kV，有机绝缘不小于 14mm/kV。

(8) 单纯以空气作为绝缘介质时，开关柜内各相导体的相间与对地净距必须符合表 7-2-27 的要求。

表 7-2-27

开关柜内各相导体的相间与对地净距

mm

额定电压 (kV)	7.2	12 (11.5)	24	40.5
1. 导体至接地间净距	100	125	180	300
2. 不同相导体之间的净距	100	125	180	300
3. 导体至无孔遮栏间净距	130	155	210	330
4. 导体至网状遮栏间净距	200	225	280	400

注 海拔超过 1000m 时表中所列 1.2 项值按每升高 100m 增大 1% 进行修正, 3.4 项之值应分别增加 1 或 2 项值的修正值。

(9) 高压开关柜应具备防止误拉、合断路器, 防止带负荷分、合隔离开关, 防止带接地开关 (或接地线) 送电, 防止带电合接地开关 (或挂地线), 防止误入带电间隔等五项措施 (即五防措施)。

### 7.2.8 72.5kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS) 选择

(1) 72.5kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS) 参数应按表 7-2-28 所列技术条件选择, 并按表中使用环境条件校验。

表 7-2-28 中的一般项目按 7.1 节有关要求进行选择, 并补充说明如下。

表 7-2-28 72.5kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS) 参数选择

项 目		参 数
技术条件	正常工作条件	电压、电流 (主回路的)、频率、机械荷载
	短路稳定性	动稳定电流 (主回路的和接地回路的)、热稳定电流 (主回路的和接地回路的)、短路持续时间
	承受过电压能力	绝缘水平 (对地和断口间)
	操作性能	开断电流、操作顺序、机械和电气寿命、分、合闸时间、操动机构
	其 他	绝缘气体密度、年漏气率、各组成元件 (包括它们的操动机构和辅助设备) 的额定值
环境条件	环 境	环境温度、日温差 <sup>①</sup> 、最大风速 <sup>①</sup> 、相对湿度 <sup>②</sup> 、污秽 <sup>①</sup> 、覆冰厚度 <sup>①</sup> 、海拔、地震烈度
	环境保护	噪声、电磁干扰

① 当在屋内使用时, 可不校验。

② 当在屋外使用时, 可不校验。

(2) 在经济技术比较合理时, 气体绝缘金属封闭开关设备宜用于下列情况的 63kV 及以上系统。

- 1) 城市内的变电站。
- 2) 布置场所特别狭窄地区。
- 3) 地下式配电装置。
- 4) 重污秽地区。
- 5) 高海拔地区。
- 6) 高烈度地震区。

(3) 气体绝缘金属封闭开关设备的各元件按其工作特点尚应满足下列要求：

1) 负荷开关元件。①开断负荷电流；②关合负荷电流；③动稳定电流；④热稳定电流；⑤操作次数；⑥分、合闸时间；⑦允许切、合空载线路的长度和空载变压器的容量；⑧允许关合短路电流；⑨操动机构型式。

2) 接地开关和快速接地开关元件。①关合短路电流；②关合时间；③关合短路电流次数；④切断感应电流能力；⑤操动机构型式、操作气压、操作电压、相数。

注：如不能预先确定回路不带电，应采用关合能力等于相应的额定峰值耐受能力的接地开关；如能预先确定回路不带电，可采用不具有关合能力或关合能力低于相应的额定峰值耐受电流的接地开关。一般情况下不宜采用可移动的接地装置。

3) 电缆终端与引线套管。①动稳定电流；②热稳定电流；③安装时的允许倾角。

注：当气体绝缘金属封闭开关设备与电缆或变压器高压出线端直接连接时，如有必要，宜在两者接口的外壳上设置直流和/或交流试验用套管的安装孔，制造厂应根据用户的要求，提供试验用套管或给出套管安装的有关资料。

其他元件的选择，见本章有关章节。

(4) 选择气体绝缘金属封闭开关设备内的元件时，应考虑下列情况：

1) 断路器元件的断口布置形式需根据场地情况及检修条件确定，当需降低高度时，宜选用水平布置；当需减少宽度时，可选用垂直布置。

灭弧室宜选用单压式。

2) 负荷开关元件在操作时应三相联动，其三相合闸不同期性不应大于 10ms，分闸不同期性不应大于 5ms。

3) 隔离开关和接地开关应具有表示其分、合位置的可靠和便于巡视的指示装置，如该位置指示器足够可靠的话，可不设置观察触头位置的观察窗。

4) 在气体绝缘金属封闭开关设备停电回路的最先接地点（不能预先确定该回路不带电）或利用接地装置保护封闭电气设备外壳时，应选择快速接地开关；而在其他情况下则选用一般接地开关。接地开关或快速接地开关的导电杆应与外壳绝缘。

5) 电压互感器元件宜选用电磁式，如需兼作现场工频实验变压器时，应在订货中予以说明。

6) 在气体绝缘金属封闭开关设备母线上安装的避雷器宜选用 SF<sub>6</sub> 气体作绝缘和灭弧介质的避雷器，在出线端安装的避雷器一般宜选用敞开式避雷器。SF<sub>6</sub> 避雷器应做成单独的气隔，并应装设防爆装置、监视压力的压力表（或密度继电器）和补气用的阀门。

7) 如气体绝缘金属封闭开关设备将分期建设时，宜在将来的扩建接口处装设隔离开关和隔离气室，以便将来不停电扩建。

(5) 为防止因温度变化引起伸缩，以及因基础不均匀下沉，造成气体绝缘金属封闭开关设备漏气与操作机构失灵，在气体绝缘金属封闭开关设备的适当部位应加装伸缩节。

伸缩节主要用于装配调整（安装伸缩节），吸收基础间的相对位移或热胀冷缩（温度伸缩节）的伸缩量等。

在气体绝缘金属封闭开关设备分开的基础之间允许的相对位移（不均匀下沉）应由制造厂和用户协商确定。

(6) 气体绝缘金属封闭开关设备在同一回路的断路器、隔离开关、接地开关之间应设置联锁装置。线路侧的接地开关宜加装带电指示和闭锁装置。

(7) 气体绝缘金属封闭开关设备内各元件应分成若干气隔。气隔的具体划分可根据布置条件和检修要求,在订货技术条款中由用户与制造厂商定。气体系统的压力,除断路器外,其余部分宜采用相同气压。

长母线应分成几个隔室,以利于维修和气体管理。

(8) 外壳的厚度,应以设计压力和在下述最小耐受时间内外壳不烧穿为依据:

- 1) 电流等于或大于 40kA, 0.1s;
- 2) 电流小于 40kA, 0.2s。

(9) 气体绝缘金属封闭开关设备应设置防止外壳破坏的保护措施,制造厂应提供关于所用的保护措施方面的充足资料。

制造厂和用户可商定一个允许的内部故障电弧持续时间。在此时间内,当短路电流不超过某一数值时,将不发生电弧的外部效应。此时可不装设防爆膜或压力释放阀。

(10) 气体绝缘金属封闭开关设备外壳要求高度密封性。制造厂宜按 GB 11023—1989《高压开关设备六氟化硫气体密封试验方法》确定每个气体隔室允许的相对年泄漏率。每个隔室的相对年泄漏率应不大于 1%。

(11) 气体绝缘金属封闭开关设备的允许温升应按 GB 7674—2008《额定电压 72.5kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备》的要求执行。

(12) 气体绝缘金属封闭开关设备中 SF<sub>6</sub> 气体的质量标准应符合 GB/T 8905—2012《六氟化硫电气设备中气体管理和检修导则》的规定。

(13) 气体绝缘金属封闭开关设备的外壳应接地。

凡不属于主回路或辅助回路的且需要接地的所有金属部分都应接地。外壳、构架等的相互电气连接宜采用紧固连接(如螺栓连接或焊接),以保证电气上连通。

接地回路导体应有足够的截面,具有通过接地短路电流的能力。

在短路情况下,外壳的感应电压不应超过 24V。

## 7.3 低压配电设备及电器元件的选择

### 7.3.1 低压配电电器选择要求

选用的低压配电电器,首先应符合国家现行有关标准的规定,并应符合下列要求:

- (1) 电器的额定电压应与所在回路标称电压相适应。
- (2) 电器的额定电流不应小于所在回路的计算电流。
- (3) 电器的额定频率应与所在回路的频率相适应。
- (4) 电器应适应所在场所的环境条件。
- (5) 电器应满足短路条件下的动稳定与热稳定的要求。
- (6) 用于断开短路电流的保护电器,应满足短路条件下的通断能力。

### 7.3.2 按使用环境条件选择电器

#### 7.3.2.1 多尘环境

多尘作业工业场所的空间含尘浓度的高低随作业的性质、破碎程度、空气湿度、风向等不同而有很大差异。多尘环境中灰尘的量值用在空气中的浓度 (mg/m<sup>3</sup>) 或沉降量

[ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ] 来衡量。灰尘沉降量分级见表 7-3-1。

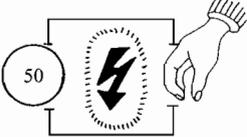
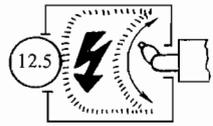
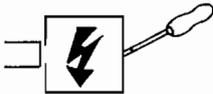
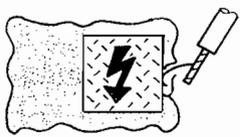
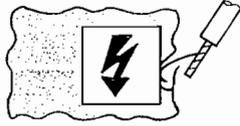
级 别	灰尘沉降量(月平均值)	说 明
I	10 ~ 100	清洁环境
II	300 ~ 550	一般多尘环境
III	$\geq 550$	多尘环境

对于存在非导电灰尘的一般多尘环境，宜采用防尘型（IP5X 级）电器；对于多尘环境或存在导电性灰尘的一般多尘环境，宜采用尘密型（IP6X 级）电器；对导电纤维（如碳素纤维）环境，应采用 IP65 级电器。

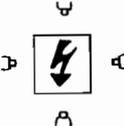
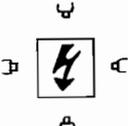
### 7.3.2.2 封闭电器的外壳防护等级（IP 代码）

按 GB 14048.1—2012《低压开关设备和控制设备 第 1 部分：总则》，封闭电器的外壳防护等级（IP 代码）见表 7-3-2。

表 7-3-2 封闭电器的外壳防护等级（IP 代码）

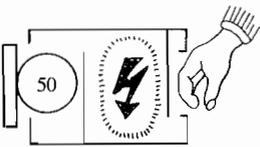
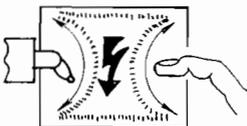
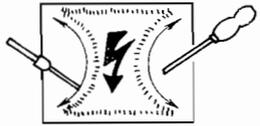
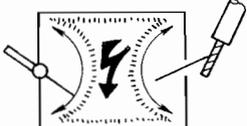
第 一 位 数 码			防止人体接近危险部件
IP	要 求	举 例	
0	无防护		无防护
1	直径 50mm 的球形物体不得完全进入，不得触及危险部件		手背
2	直径 12.5mm 的球形物体不得完全进入，试指应与危险部件有足够的间隙		手指
3	直径 2.5mm 的试具不得进入		工具
4	直径 1.0mm 的试具不得进入		金属线
5	允许有限的灰尘进入（没有有害的沉积）		金属线
6	完全防止灰尘进入		金属线

续表

第二位数码			防 水
IP	简 述	举 例	
0	无防护		无防护
1	防止垂直下落滴水, 允许少量水滴入		垂直滴水
2	防止当外壳在 15° 范围内倾斜时垂直下落滴水, 允许少量水滴入		与垂直面成 15° 滴水
3	防止与垂直面成 60° 范围内淋水, 允许少量水进入		少量淋水
4	防止任何方向的溅水, 允许少量水进入		任何方向的溅水
5	防止喷水, 允许少量水进入		任何方向的喷水
6	防止强烈喷水, 允许少量水进入		任何方向的强烈喷水
7	防止 15cm ~ 1m 深的浸水影响		短时间浸水
8	防止在有压力下长期浸水		持续浸水

7

续表

附加字母（可选择）			
IP	要 求	举 例	防止人体接 近危险部件
A 用于第 一位数字 为0	直径50mm的球形物体进入到隔板， 不得触及危险部件		手背
B 用于第 一位数字 为0、1	试指进入最长长度为80mm，不得触 及危险部件		手指
C 用于第 一位数字 为1、2	当挡盘部分进入时，直径为2.5mm， 长为100mm的金属线不得触及危险 部件		工具
D 用于第 一位数字 为2、3	当挡盘部分进入时，直径为1.0mm， 长为100mm的金属线不得触及危险 部件		金属线

注 本表引自GB 14048.1—2012《低压开关设备和控制设备 第1部分：总则》之附录C。

### 7.3.2.3 化学腐蚀环境

按照HG/T 20666—1999《化工企业腐蚀环境电力设计规程》，腐蚀环境类别的划分应根据工艺专业提供的腐蚀性物质释放严酷度，结合所在地区最湿月平均最高相对湿度等条件，协同环境保护要求而定。

化学腐蚀性物质释放严酷度分级见表7-3-3。

腐蚀环境划分为三类，划分的主要依据和参考依据见表7-3-4和表7-3-5。

腐蚀环境的电气设备应根据划分的环境类别按表7-3-6和表7-3-7的规定选择相适应的防腐型产品。

防腐电工产品的防护类型共有五种，其标志符号如下：

代号F1——户内防中等腐蚀型

代号F2——户内防强腐蚀型

代号W——户外防轻腐蚀型

代号WF1——户外防中等腐蚀型

代号WF2——户外防强腐蚀型

表 7-3-3 化学腐蚀性物质释放严酷度分级

化学腐蚀性物质名称		级 别					
		1 级		2 级		3 级	
		平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
气体及其 释放浓度 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	氯气 ( $\text{Cl}_2$ )	0.1	0.3	0.3	1.0	0.6	3.0
	氯化氢 ( $\text{HCl}$ )	0.1	0.5	1.0	0.5	1.0	5.0
	二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )	0.3	1.0	5.0	10.0	13.0	40.0
	氮氧化物 (折算成 $\text{NO}_2$ )	0.5	1.0	3.0	9.0	10.0	20.0
	硫化氢 ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0.1	0.5	3.0	10.0	14.0	70.0
	氟化物 (折算成 $\text{HF}$ )	0.01	0.03	0.1	2.0	0.1	2.0
	氨气 ( $\text{NH}_3$ )	1.0	3.0	10.0	35.0	35.0	175.0
	臭氧	0.05	0.1	0.1	0.3	0.2	2.0
雾	酸雾 (硫酸、盐酸、硝酸) 碱雾 (氢氧化钠)	—		有时存在		经常存在	
液体	硫酸、盐酸、硝酸 氢氧化钠 食盐水、氨水	—		有时滴漏		经常滴漏	
粉尘	沙 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	30/300		300/1000		3000/4000	
	尘 (漂浮 $\text{mg}/\text{m}^3$ )	0.2/5.0		0.4/15		4/20	
	尘 (沉积 $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )	1.5/20		15/40		40/80	
土壤	pH 值	$>6.5 \sim \leq 8.5$		$4.5 \sim 6.5$		$<4.5, >8.5$	
	有机质 (%)	$<1$		$1 \sim 1.5$		$>1.5$	
	硝酸根离子 (%)	$<1 \times 10^{-4}$		$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$		$>1 \times 10^{-3}$	
	电阻系数 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$>50 \sim 100$		$23 \sim 50$		$<23$	

- 注 1. 化学腐蚀性气体释放浓度系历年最湿月在电气装置安装场所实测到的平均最高浓度值。实测处距化学腐蚀性气体释放口一般要求 1m 范围外, 不应紧靠释放源。
2. 粉尘一栏中, 分子为有气候防护场所, 分母为无气候防护场所。
3. 平均值是长期数值的平均; 最大值是在一周期内的极限值或峰值, 每天不超过 30min。

表 7-3-4 腐蚀环境划分的主要依据

主要依据	类 别				
	0 类 (轻腐蚀环境)		1 类 (中等腐蚀环境)		2 类 (强腐蚀环境)
地区或局部环境最湿月平均最高相对湿度 ( $25^\circ\text{C}$ )	60% 及以上	75% 以下	75% 及以上	85% 以下	85% 及以上
化学腐蚀性物质的释放状况	一般无泄漏现象, 任一种腐蚀性物质的释放严酷度经常为 1 级, 有时 (如事故或不正常操作时) 可能达到 2 级		有泄漏现象, 任一种腐蚀性物质的释放严酷度经常为 2 级, 有时 (如事故或不正常操作时) 可能达到 3 级		泄漏现象严重, 任一种腐蚀性物质的释放严酷度经常为 3 级, 有时 (如事故或不正常操作时) 偶然超过 3 级

注 如地区或局部环境最湿月平均最高温度不是  $25^\circ\text{C}$  时, 其同月平均最高相对湿度必须换算到  $25^\circ\text{C}$  时的相对湿度。

表 7-3-5 腐蚀环境划分的参考依据

参考依据	类 别		
	0类（轻腐蚀环境）	1类（中等腐蚀环境）	2类（强腐蚀环境）
操作条件	由于风向关系，有时可闻到化学物质气味	经常能感到化学物质的刺激，但不需佩戴防护器具进行正常的工艺操作	对眼睛或外呼吸道有强烈刺激，有时需佩戴防护器具才能进行正常的工艺操作
表现现象	建筑物和工艺、电气设施只有一般腐蚀现象，工艺和电气设施只需常规维修；一般树木生长正常	建筑物和工艺、电气设施腐蚀现象明显，工艺和电气设施一般需年度大修；一般树木生长不好	建筑物和工艺、电气设施腐蚀现象严重，设备大修间隔期小于一年；一般树木成活率低
通风情况	通风换气良好	通风换气一般	通风换气不好

表 7-3-6 户内腐蚀环境用电设备的选择

序号	名 称	环 境 类 别		
		0类（轻腐蚀环境）	1类（中等腐蚀环境）	2类（强腐蚀环境）
1	配电装置	IP2X ~ IP4X	F1级防腐型	F2级防腐型
2	控制装置	F1级防腐型	F1级防腐型	F2级防腐型
3	电力变压器	普通型、密闭型	F1级防腐型	F2级防腐型
4	电动机	YE3系列电动机	F1级防腐型	F2级防腐型
5	控制电器和仪表（包括按钮、信号灯、电表、插座等）	防腐型、密闭型	F1级防腐型	F2级防腐型
6	灯具	保护型、防水防尘型	防腐型	
7	电线	塑料绝缘电线、橡皮绝缘电线、塑料护套电线		
8	电缆	塑料外护套电缆		
9	电缆桥架	普通型	F1级防腐型	F2级防腐型

表 7-3-7 户外腐蚀环境用电设备的选择

序号	名 称	环 境 类 别		
		0类（轻腐蚀环境）	1类（中等腐蚀环境）	2类（强腐蚀环境）
1	配电装置	W级户外型	WF1级防腐型	WF2级防腐型
2	控制装置	W级户外型	WF1级防腐型	WF2级防腐型
3	电力变压器	普通型、密闭型	WF1级防腐型	WF2级防腐型
4	电动机	W级户外型	WF1级防腐型	WF2级防腐型
5	控制电器和仪表（包括按钮、信号灯、电表、插座等）	W级户外型	WF1级防腐型	WF2级防腐型
6	灯具	防水防尘型	户外防腐型	
7	电线	塑料绝缘电线		
8	电缆	塑料外护套电缆		
9	电缆桥架	普通型	WF1级防腐型	WF2级防腐型

### 7.3.2.4 高原地区

我国低压电器各类标准和 IEC 标准都是适用于海拔 2000m 及以下地区, 超过 2000m 时由于空气压力和空气密度下降, 空气温度降低, 空气绝对湿度减小, 对低压电器的使用带来一定影响。因此, 海拔为 2000m 以上地区应选用高原型产品。

按 GB/T 20645—2006《特殊环境条件 高原用低压电器技术要求》规定, 高原型低压电器分为户内高原型和户外高原型两类; 按海拔范围为 2000m 以上至 5000m, 并按每升高 1000m 划分一级等级, 产品的海拔分级和标识为:  $G \times$  或  $G \times - \times$ 。

G 表示高原型产品; 阿拉伯数字表示海拔等级。例如: G5 表示适用于海拔最高达 5000m 的产品; G3—4 表示适用于海拔 3000 ~ 4000m 的产品。

### 7.3.2.5 热带地区

热带地区根据常年空气的干湿程度分为湿热带和干热带。

湿热带系指一天内有 12h 以上气温不低于 20℃、相对湿度不低于 80% 的气候条件, 这样的天数全年累计在两个月以上的地区。其气候特征是高温伴随高湿。

干热带系指年最高气温在 40℃ 以上而长期处于低湿度的地区。其气候的特征是高温伴随低湿, 气温日变化大, 日照强烈且有较多的沙尘。

热带气候条件对低压电器的影响:

(1) 由于空气高温、高湿、凝露及霉菌等作用, 电器的金属件及绝缘材料容易腐蚀、老化, 绝缘性能降低, 外观受损。

(2) 由于日温差大和强烈日照的影响, 密封材料产生变形开裂, 熔化流失, 导致密封结构的泄漏, 绝缘油等介质受潮劣化。

(3) 低压电器在户外使用时, 如受太阳辐射, 其温度升高, 将影响其载流量。如受雷暴、雨、盐雾的袭击, 将影响其绝缘强度。

湿热带地区宜选用湿热带型产品, 在型号后加 TH。干热带地区宜选用干热型产品, 在型号后加 TA。

热带型低压电器使用环境条件见表 7-3-8。

表 7-3-8 热带型低压电器使用环境条件

环境因素		湿热带型	干热带型
海拔 (m)		≤2000	≤2000
空气温度 (℃)	年最高	40	55
	年最低	0	-5
空气相对湿度 (%)	最湿月平均最大相对湿度	95 (25℃)	—
	最干月平均最小相对湿度	—	10 (40℃时)
凝露		有	—
霉菌		有	—
沙尘		—	有

### 7.3.2.6 爆炸危险环境低压电器

爆炸危险环境低压电器选择见本书 1.5 节。

### 7.3.3 开关电器和隔离电器的选择

#### 7.3.3.1 装设要求

##### (1) 隔离电器：

- 1) 当维护、测试和检修设备需要断开电源时，应装设隔离电器。
- 2) 在 TN-C 系统中，PEN 线不应装设隔离电器；TN-S 系统中，N 线不需要装设隔离电器。

##### (2) 功能性开关电器：

- 1) 需要独立控制电气装置的电路的每一部分都应装设功能性开关电器。
- 2) 功能性开关电器应能执行可能出现的最繁重的工作制。
- 3) 功能性开关电器可仅控制电流而不断开其相应的极。

##### (3) 在下列情况下，应选用具有断开中性极的开关电器：

- 1) TN 系统、TT 系统与引出中性导体的 IT 系统之间的电源转换开关电器。
- 2) TT 系统的隔离电器（负荷侧无中性导体的除外）。
- 3) 引出中性导体的 IT 系统时选用的开关电器和隔离电器。
- 4) 剩余电流动作保护器（负荷侧无中性导体的除外）。

#### 7.3.3.2 隔离电器和操作电器的选择

(1) 隔离电器应采用隔离开关、隔离器、隔离插头；也可用熔断器或有隔离功能的开关和断路器；还可用连接片、插头与插座、不需要拆除导线的特殊端子；但严禁用半导体电器作隔离用。

(2) 功能性开关电器可采用开关、隔离开关、断路器、接触器、半导体开关电器，也可用继电器，小电流者还可用 16A 及以下的插头与插座。严禁用隔离器、熔断器或连接片作为功能性开关电器。

#### 7.3.3.3 开关、隔离开关（含与熔断器组合电器）的功能、分类和特性

(1) 定义和功能。按照 GB 14048.3—2008《低压开关设备和控制设备 第3部分：开关、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器》，各电器的定义和功能如下：

1) 开关。在正常电路条件下（包括规定的过载），能接通、承载和分断电流，并在规定的非正常电流条件（如短路）下，能在规定时间内承载电流的机械开关电器，可以接通，但不能分断短路电流。

2) 隔离器。在断开状态下能符合规定隔离功能要求的电器，应满足触头断开距离、泄漏电流要求，以及断开位置指示可靠性<sup>①</sup>和加锁等附加要求；能承载正常电路条件下的电流和一定时间内非正常电路条件下的电流（短路电流）；如分断或接通的电流可忽略（如线路分布电容电流、电压互感器等的电流），也能断开和闭合电路。

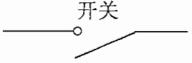
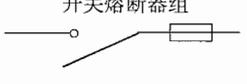
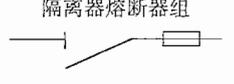
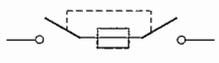
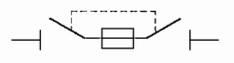
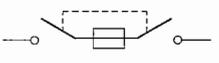
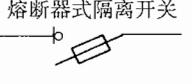
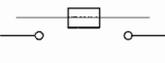
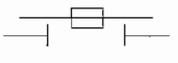
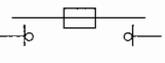
3) 隔离开关。在断开状态能符合隔离器的隔离要求的开关。

4) 熔断器组合电器。它是熔断器开关电器的总称，是将开关电器或隔离电器与一个或多个熔断器组装在同一单元内的组合电器，通常包括六种组合。

以上各电器的功能和图形符号见表 7-3-9。

① 断开触头之间的隔离距离应该是可见的或用明显的标记——“闭合”或“断开”可靠地标示出来；这种标示只有在每极断开触头之间达到隔离距离时才出现。

表 7-3-9 开关、隔离电器功能和图形符号

类 型	功 能			
	接通、承载、分断正常电流； 承载规定时间内的短路电流；可 接通短路电流	隔离功能（开距、泄漏小， 断开位置指示，加锁）	同时有左侧两者 功能	断点数
开关、隔离 电器				
熔断器串联  熔断器组合电器				单断点
				双断点
				单断点
				双断点

## (2) 分类。

1) 按使用类别分类。使用类别列于表 7-3-10，表中类别 A 用于经常操作环境；类别 B 用于不经常操作，如只在维修时为你提供隔离才操作的隔离器，或以熔断体触刀作动触头的开关电器。

表 7-3-10 使用类别和典型用途

电流种类	使用类别		典 型 用 途
	类别 A	类别 B	
交流	AC-20A AC-21A AC-22A AC-23A	AC-20B AC-21B AC-22B AC-23B	空载条件下闭合和断开 通断阻性负载，包括适当的过载 通断电阻和电感混合负载，包括适当的过载 通断电动机负载或其他高电感负载
直流	DC-20A DC-21A DC-22A DC-23A	DC-20B DC-21B DC-22B DC-23B	空载条件下闭合和断开 通断阻性负载，包括适当的过载 通断电阻和电感混合负载，含适当的过载（如并激电动机） 通断高电感负载（如串激电动机）

注 AC-20、DC-20 类别在美国不允许使用。

## 2) 按人力操作方式分类。

- a. 有关人力操作。完全靠直接施加人力的操作，速度与力和操作者动作有关。
- b. 无关人力操作。能量来源于人力的储能操作，速度与力和操作者动作无关。
- c. 半无关人力操作。完全靠直接施加达到某一阈值的人力操作。

## (3) 正常负荷特性。

1) 额定接通能力。是在规定接通条件下能良好接通的电流值。对于交流,用电流周期分量有效值表示,其值见表7-3-11。

2) 额定分断能力。是在规定分断条件下能良好分断的电流值。对于交流,用电流周期分量有效值表示,其值见表7-3-11。

表 7-3-11 各种使用类别的接通和分断能力及验证条件

使用类别	接 通		分 断		操作循环次数
	$I/I_r$	$\cos\varphi$	$I_c/I_r$	$\cos\varphi$	
AC-21A AC-21B	1.5	0.95	1.5	0.95	5
AC-22A AC-22B	3	0.65	3	0.65	5
AC-23A AC-23B	10	0.45/0.35	8	0.45/0.35	5/3
使用类别	$I/I_r$	$L/R$ (ms)	$I_c/I_r$	$L/R$ (ms)	操作循环次数
DC-21A DC-21B	1.5	1	1.5	1	5
DC-22A DC-22B	4	2.5	4	2.5	5
DC-23A DC-23B	4	15	4	15	5

注 1. 接通在外施电压为额定工作电压的1.05倍进行,分断在工频或直流恢复电压为额定工作电压的1.05倍进行。

2. 表中符号: $I$ —接通电流; $I_c$ —分断电流; $I_r$ —额定工作电流。

3. AC-23栏中,分子表示额定工作电流为100A及以下电器的数据;分母表示100A以上电器的数据。

#### (4) 短路特性。

1) 额定短时耐受电流( $I_{cw}$ )。系指电器能够短时承受而不发生任何损坏的电流值。短时耐受电流值不得小于12倍最大额定工作电流。通电持续时间应为1s(另有规定除外)。对于交流,是指交流分量有效值,并认为可能出现的最大峰值电流不会超过此有效值的 $n$ 倍。比率 $n$ 见表7-3-12。

2) 额定短路接通能力( $I_{cm}$ )。该值用最大预期电流峰值表示。开关或隔离开关的 $I_{cm}$ 值由制造厂规定。对于交流预期电流峰值与有效值的关系见表7-3-12。

表 7-3-12 对应于试验电流的功率因数、时间常数和电流峰值与有效值的比率  $n$

试验电流 $I$ (A)	功率因数	时间常数 (ms)	$n$	试验电流 $I$ (A)	功率因数	时间常数 (ms)	$n$
$I \leq 1500$	0.95	5	1.41	$6000 < I \leq 10000$	0.5	5	1.7
$1500 < I \leq 3000$	0.9	5	1.42	$10000 < I \leq 20000$	0.3	10	2.0
$3000 < I \leq 4500$	0.8	5	1.47	$20000 < I \leq 50000$	0.25	15	2.1
$4500 < I \leq 6000$	0.7	5	1.53	$50000 < I$	0.2	15	2.2

3) 额定限制短路电流。是在短路保护电器动作时间内能够良好地承受的预期短路电流值。对交流,用交流分量有效值表示,该值由制造厂规定。

(5) 隔离电器的泄漏电流。施加试验电压为额定工作电压1.1倍时,其泄漏电流不应超过下列允许值:

1) 使用类别为AC-20A、AC-20B、DC-20A、DC-20B每极允许值为0.5mA。

2) 所有其他使用类别的电器,每极允许值为2mA。

### 7.3.4 保护电器的选择

按 GB 50054—2011《低压配电设计规范》的规定，配电线路应装设短路保护、过负荷保护和间接接触防护。

保护电器一般是采用低压熔断器和低压断路器两类，应在每一段配电线路的首端装设；同时应在配电干线引接出的分支线的分接处和配电线路截面减少处装设。

保护电器应在电路故障时能切断电源，而在正常运行或设备正常启动时，不应动作，这是一对矛盾；另外，保护电器在电路故障时应较快速动作，而配电线路的上下级保护电器又要有选择性动作，即故障时，应使最靠近故障点的保护电器动作，而上级保护电器不应动作，使停电范围最小，这又是一对矛盾。这就使设计时选择保护电器更为复杂，必须经过计算，认真选择保护电器类型，确定其电流和动作时间等参数。

下面先介绍保护电器的主要特性，再叙述配电线路保护要求及如何选择保护电器。

#### 7.3.4.1 熔断器主要特性

熔断器应符合 GB 13539.1—2008《低压熔断器 第1部分：基本要求》和 GB/T 13539.2—2008《低压熔断器 第2部分：专职人员使用的熔断器的补充要求》，主要特性如下。

##### (1) 分类。

1) 按结构分。熔断器的结构型式与使用人员有关，因此可分为：

a. 专职人员使用的熔断器（主要用于工业场所），主要有：刀型触头、螺栓连接、圆筒形帽及偏置触刀等几种熔断器。

b. 非熟练人员使用的熔断器（主要用于家用和类似用途的熔断器）。

2) 按分断范围分：

a. “g”熔断体。在规定条件下，能分断使熔断体熔化的电流至额定分断能力之间的所有电流的限流熔断体（全范围分断）。

b. “a”熔断体：在规定条件下，能分断示于熔断体熔断时间—电流特性曲线上的最小电流至额定分断能力之间的所有电流的熔断体（部分范围分断）。

3) 按使用类别分：

a. “G”类。一般用途的熔断体，即保护配电线路用。

b. “M”类。保护电动机回路的熔断体。

c. “T<sub>r</sub>”类。保护变压器的熔断体。

d. “R”或“S”类。半导体设备保护用熔断体。

e. PV类。太阳能光伏系统保护用熔断体。

分断范围和使用类别可以有不同的组合，如“gG”“gM”“gTr”“aM”等，其中“gG”为具有全范围分断能力，可用作配电线路保护的熔断体；“aM”具有部分范围分断能力，可用作电动机保护的熔断体。

##### (2) 特性。

1) 时间—电流特性。在规定的熔断条件下，作为预期电流的函数的弧前时间或熔断时间曲线。目前，符合国家标准的熔断器主要类型有 RT16、RT17、RT20、RL6、RL7 型等，NT（RT16、RT17）型熔断器的熔断时间—电流曲线见图 7-3-1 和图 7-3-2。

2) 约定时间和约定电流。“gG”和“gM”熔断体的约定时间和约定电流，按 GB

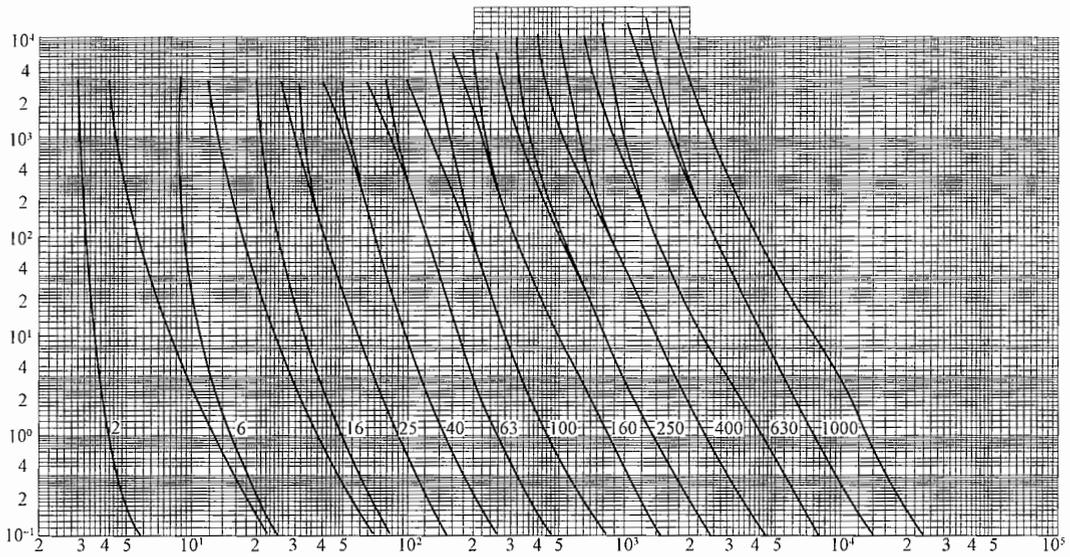


图 7-3-1 熔断体的时间—电流带 (A)

13539.1—2008 及 GB/T 13539.2—2008 的规定列于表 7-3-13 和表 7-3-14。

3) 过电流选择比。上、下级熔断体的额定电流比为 1.6: 1, 具有选择性熔断, 该比值即为过电流选择比。

4)  $I^2t$  特性。熔断体允许通过的  $I^2t$  (焦耳积分) 值, 是在规定的动作条件下作为预期电流函数的  $I^2t$  曲线, 用以衡量在故障时间内产生的热能。弧前  $I^2t$  是熔断器弧前时间内的焦耳积分; 熔断  $I^2t$  是全熔断时间内的焦耳积分, 是用以考核其过电流选择性、熔断器与断路器间的级间选择性配合的参数。

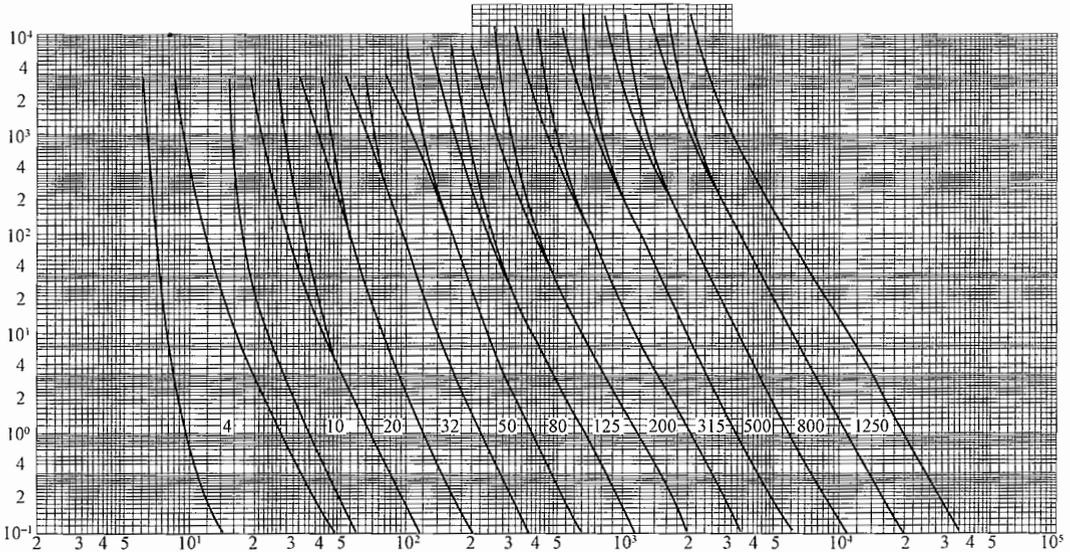


图 7-3-2 熔断体的时间—电流带 (B)

表 7-3-13 “gG” 和 “gM” 熔断体的约定时间和约定电流

“gG” 额定电流 $I_r$ “gM” 特性电流 $I_{ch}$ (A)	约定时间 (h)	约定电流 (A)	
		$I_{nf}$	$I_f$
$I_r < 16$	1	①	①
$16 \leq I_r \leq 63$	1	1.25 $I_r$	1.6 $I_r$
$63 < I_r \leq 160$	2		
$160 < I_r \leq 400$	3		
$400 < I_r$	4		

① 见表 7-3-14。

注 表中符号： $I_f$ —约定熔断电流； $I_{nf}$ —约定不熔断电流。表 7-3-14  $I_r < 16A$  的 “gG” 熔断体的约定电流

“gG” 额定 电流 $I_r$ (A)	刀型触头熔断器、圆筒形帽熔断器		螺栓连接熔断器		偏置触刀熔断器	
	$I_{nf}$	$I_f$	$I_{nf}$	$I_f$	$I_{nf}$	$I_f$
$4 < I_r < 16$	1.5 $I_r$	1.9 $I_r$	1.25 $I_r$	1.6 $I_r$	1.25 $I_r$	1.6 $I_r$
$I_r \leq 4$	1.5 $I_r$	2.1 $I_r$	1.25 $I_r$	1.6 $I_r$	1.25 $I_r$	2.1 $I_r$

5) 分断能力。在规定的使用 and 性能条件下，熔断体在规定电压下能够分断的预期电流值。对交流熔断器是指交流分量有效值。

### 7.3.4.2 断路器的主要特性

低压断路器应符合 GB 14048.2—2008 《低压开关设备和控制设备 第 2 部分：断路器》的要求。

#### (1) 分类。

1) 按使用类别分为 A、B 两类：A 类为非选择型；B 类为选择型，在短路情况下，具有一个用于选择性的人为短延时。

2) 按设计型式分为万能式和塑料外壳式或模压外壳式。

3) 按是否适合隔离分为：

a. 适合隔离。断路器在断开位置时，具有符合隔离功能安全要求的隔离距离，并提供一种或几种方法（用操动器的位置、独立的机械式指示器、所有主动触头可视）显示主触点的位置；试验电压为  $1.1U_n$  时，在触头断开位置，每极泄漏电流不应超过  $0.5mA$ 。

b. 不适合隔离。

4) 除上述分类外，还有其他多种分类。如按分断介质分，按操动机构的控制方式分，按是否需要维修分，按安装方式分，按外壳防护等级分等。

(2) 特性。断路器的特性包括断路器的型式（极数、电流种类）、主电路的额定值和极限值（包括短路特性）、控制电路、辅助电路、脱扣器型式（分励脱扣器、过电流脱扣器、欠电压脱扣器）、操作过电压等。现就主要特性说明如下：

1) 额定短路接通能力 ( $I_{cm}$ )。在规定的额定工作电压、额定频率以及一定的功率因数（对于交流）或时间常数（对于直流）下，断路器的短路接通能力值，用最大预期峰值电流表示。对于交流，断路器的额定短路接通能力不应小于其额定极限短路分断能力乘以表 7-3-15 中系数  $n$  的乘积。

2) 额定极限短路分断能力 ( $I_{cu}$ )。按相应的额定工作电压，断路器在规定的条件下应能分断的极限短路分断能力值，用预期分断电流表示（在交流情况下用交流分量有效值表示）。

3) 额定运行短路分断能力 ( $I_{cs}$ )。按相应的额定工作电压，断路器在规定的条件下应能分断的运行短路分断能力值，用预期分断电流表示，相当于额定极限短路分断能力规定的百分

数中的一档，并化整到最接近的整数。它可用  $I_{cu}$  的百分数表示。

表 7-3-15 (交流断路器的) 短路接通和分断能力之间的比值  $n$

额定极限短路分断能力 $I_{cu}$ (kA)	功率因数	系数 $n$
$4.5 < I_{cu} \leq 6$	0.7	1.5
$6 < I_{cu} \leq 10$	0.5	1.7
$10 < I_{cu} \leq 20$	0.3	2.0
$20 < I_{cu} \leq 50$	0.25	2.1
$50 < I_{cu}$	0.2	2.2

4) 额定短时耐受电流 ( $I_{cw}$ )。在规定的试验条件下对断路器确定的短时耐受电流值。对于交流，此电流为有效值。预期短路电流的交流分量在短延时时间内认为是恒定的，相应的短延时不应小于 0.05s，其优选值为 0.05、0.1、0.25、0.5、1.0s。额定短时耐受电流不应小于表 7-3-16 所示的相应值。

5) 过电流脱扣器。过电流脱扣器包括瞬时脱扣器、定时限过电流脱扣器（又称短延时过电流脱扣器）、反时限过电流脱扣器（又称长延时过电流脱扣器）。

a. 瞬时或定时限过电流脱扣器在达到电流整定值时应瞬时（应有一个固有动作时间）动作。

b. 反时限过电流脱扣器在基准温度下的断开特性见表 7-3-17。反时限过电流脱扣器在基准温度下，在约定不脱扣电流，即电流整定值的 1.05 倍时，脱扣器的各相极同时通电，断路器从冷态开始，在小于约定时间内不应发生脱扣；在约定时间结束后，立即使电流上升至电流整定值的 1.30 倍，即达到约定脱扣电流，断路器在小于约定时间内脱扣。

表 7-3-16 额定短时耐受电流最小值

额定电流 $I_r$ (A)	额定短时耐受电流 $I_{cw}$ 的最小值 (kA)
$I_r \leq 2500$	$12I_r$ 或 5kA 中取大者
$I_r > 2500$	30

表 7-3-17 反时限过电流断开脱扣器在基准温度下的断开动作特性

所有相极通电		约定时间 (h)
约定不脱扣电流	约定脱扣电流	
1.05 倍整定电流	1.30 倍整定电流	2*

\* 当  $I_r \leq 63A$  时，为 1h。

反时限过电流脱扣器时间—电流特性应以制造厂提供曲线形式为准。这些曲线表明从冷态开始的断开时间与脱扣器动作范围内的电流变化关系。目前，符合国家标准的断路器主要型号有 DW45、DW50、DW15HH、S 等，DW-45 型断路器的时间—电流曲线见图 7-3-3。

### 7.3.4.3 短路保护和保护电器选择

(1) 短路保护要求。保护电器应在短路电流对导体和连接处产生的热效应和机械作用造成危害之前切断电源。

(2) 短路保护电器应满足的两个条件：

- 1) 分断能力不应小于保护电器安装处的预期短路电流。
- 2) 应在短路电流使导体达到允许的极限温度之前分断该短路电流。

当短路持续时间不大于 5s 时，绝缘导体从正常运行的允许最高温度上升到极限温度的持续时间  $t$  可近似地用式 (7-3-1) 计算

$$t \leq \frac{K^2 \cdot S^2}{I^2} \text{ 或 } S \geq \frac{I}{K} \sqrt{t} \quad (7-3-1)$$

式中  $S$ ——绝缘导体的线芯截面， $\text{mm}^2$ ；

$I$ ——预期短路电流有效值（均方根值），A；

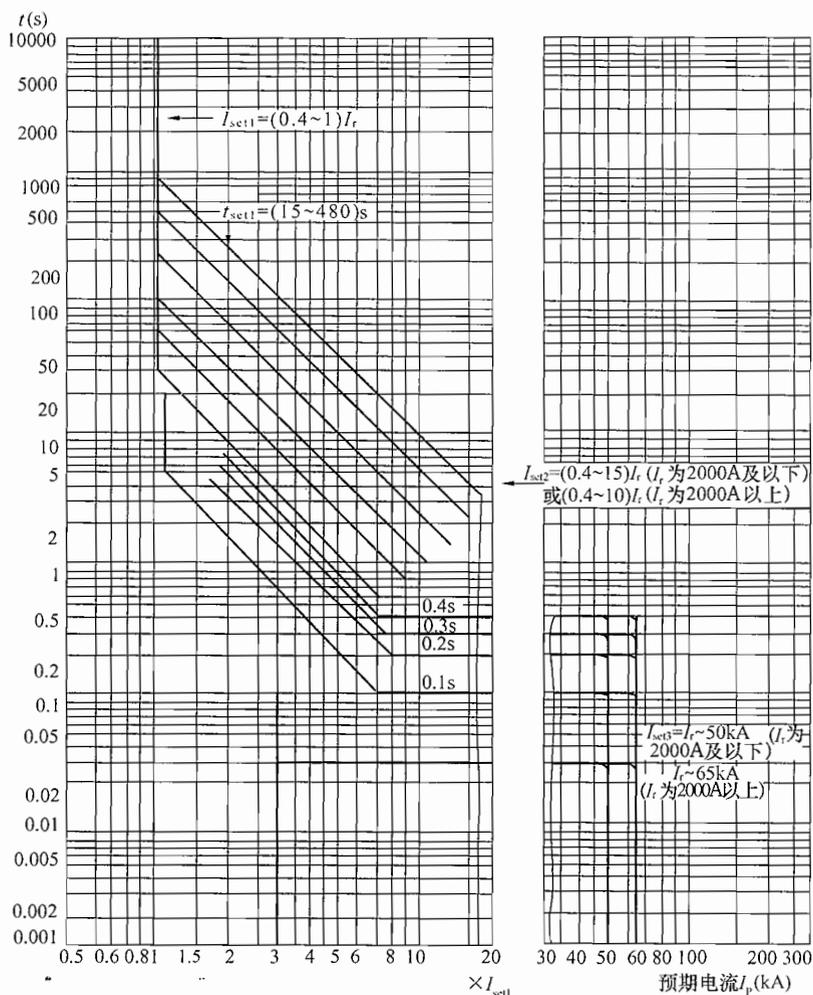


图 7-3-3 DW45 型断路器时间—电流特性

$I_{set1}$ ——长延时过电流脱扣器整定电流；

$I_{set2}$ ——短延时过电流脱扣器整定电流；

$I_{set3}$ ——瞬时过电流脱扣器整定电流；

$I_r$ ——断路器额定电流

$t$ ——保护电器自动切断短路电流的动作时间，s；

$K$ ——计算系数，按表 7-3-18 取值，取决于导体的物理特性，如电阻率、导热能力、热容量以及短路时的初始温度和最终温度（这两种温度取决于绝缘材料）。

表 7-3-18

常用绝缘材料的  $K$  值

项 目	导 体 绝 缘 材 料					
	PVC ≤300mm <sup>2</sup>	PVC >300mm <sup>2</sup>	EPR/XLPE	橡胶 60℃	矿 物 质	
					带 PVC	裸的
初始温度 (°C)	70	70	90	60	70	105
最终温度 (°C)	160	140	250	200	160	250

续表

项 目		导 体 绝 缘 材 料					
		PVC ≤300mm <sup>2</sup>	PVC >300mm <sup>2</sup>	EPR/XLPE	橡胶 60℃	矿 物 质	
						带 PVC	裸的
导体 材料	铜	115	103	143	141	115	135
	铝	76	68	94	93	—	—
	铜导体的锡焊接头	115	—	—	—	—	—

注 1. PVC—聚氯乙烯；EPR—乙丙橡胶；XLPE—交联聚乙烯。

2. 表中初始温度，即正常运行的允许最高温度；最终温度即短路时的极限温度。

当短路持续时间小于0.1s时，应计入短路电流非周期分量对热作用的影响，这种情况应校验  $k^2 S^2 \geq I^2 t$  ( $I^2 t$  为保护电器制造厂提供的允许通过的能量值)，以保证保护电器在分断短路电流前，导体能承受包括非周期分量在内的短路电流的热作用。

当短路持续时间大于5s时，校验时应计及散热的影响。

(3) 校验导体短路热稳定的简化方法：

1) 采用熔断器保护时，由于熔断器的反时限特性，用式(7-3-1)校验较麻烦。先要计算出预期短路电流值，再按选择的熔断体电流值查熔断器特性曲线，找出相应的全熔断时间  $t$ ，代入式(7-3-1)。为方便使用，将电缆、绝缘导线截面与允许最大熔断体电流的配合关系列于表7-3-19。

表 7-3-19

电缆、导线截面与允许最大熔体电流配合表

A

导线电缆的 绝缘材料 线芯材料 及 K 值 线芯截面 (mm <sup>2</sup> )	PVC		EPR/XLPE		橡 胶	
	铜 K = 115	铝 K = 76	铜 K = 143	铝 K = 94	铜 K = 141	铝 K = 93
	1.5	16	—	—	—	16
2.5	25	16	—	—	32	20
4	40	25	50	32	50	32
6	63	40	63	50	63	50
10	80	63	100	63	100	63
16	125	80	160	100	160	100
25	200	125	200	160	200	160
35	250	160	315	200	315	200
50	315	250	400	315	400	315
70	400	315	500	400	500	400
95	500	400	550	500	550	500
120	550	500	630	500	630	550
150	630	550	800	630	800	630

注 1. 表中  $t$  按最不利条件 5s 计算。

2. 表中熔断体电流值适用于符合 GB 13539.1—2008 的产品，本表按 RT16、RT17 型熔断器而编制。

2) 采用断路器保护时, 导体热稳定的校验比较简单:

a. 瞬时脱扣器的全分断时间(包括灭弧时间)极短, 一般为 10~20ms, 都属于  $t < 0.1\text{s}$  范围, 因此应按上述的  $K^2 \cdot S^2 \geq I^2 t$  进行校验, 虽短路电流很大, 一般都能符合要求。但应注意, 当配电变压器容量很大, 从低压配电屏直接引出馈线时, 其截面积不应太小, 铜芯绝缘线的截面积不宜小于  $10\text{mm}^2$ 。

b. 短延时脱扣器的动作时间一般为 0.1~0.4s, 根据经验, 选用带短延时脱扣器的断路器所保护的配电干线截面不会太小, 一般能满足式 (7-3-1) 要求, 可不校验。如需校验时, 仍按式 (7-3-1) 进行。

#### 7.3.4.4 过负荷保护和保护电器选择

(1) 一般要求:

1) 保护电器应在过负荷电流引起的导体温升对导体的绝缘、接头、端子或导体周围的物质造成损害之前分断该过负荷电流。

2) 对于突然断电比过负荷造成的损失更大的线路, 如消防水泵之类的负荷, 其过负荷保护应作用于信号而不应作用于切断电路。

(2) 过负荷保护电器的动作特性。过负荷保护电器的动作特性应同时满足以下两个条件

$$I_c \leq I_r \leq I_z \text{ 或 } I_c \leq I_{\text{set1}} \leq I_z \quad (7-3-2)$$

$$I_2 \leq 1.45I_z \quad (7-3-3)$$

式中  $I_c$ ——线路计算电流, A;

$I_r$ ——熔断器熔体额定电流 A;

$I_{\text{set1}}$ ——断路器反时限脱扣器整定电流, A;

$I_z$ ——导体允许持续载流量, A;

$I_2$ ——保证保护电器可靠动作的电流, A。当保护电器为断路器时,  $I_2$  为约定时间内的约定动作电流; 当保护电器为熔断器时,  $I_2$  为约定时间内的约定熔断电流。

$I_2$  由产品标准给出或由制造厂给出。

(3) 过负荷保护电器选择:

1) 采用断路器保护时: 按 GB 14048.2—2008 的规定(见表 7-3-17), 约定动作电流  $I_2$  为  $1.3I_{\text{set1}}$ , 只要满足  $I_{\text{set1}} \leq I_z$ , 则满足  $I_2 \leq 1.45I_z$ 。即满足  $I_c \leq I_{\text{set1}} \leq I_z$  即可。

2) 采用熔断器保护时, 由于式 (7-3-3) 中有约定熔断电流  $I_2$ , 使用不方便, 分析如下:

根据国标 GB 13539.1—2008 的 8.4.3.5 条, “gG” 熔断体约定电缆过载保护验证: 试验连接导体采用 PVC 绝缘铜导线, 用熔断体的额定电流预热, 预热时间等于约定时间, 随后试验电流增加到  $1.45I_z$ , 熔断体应在小于约定时间内熔断。因此, 可以认为  $I_r \geq 12\text{A}$  的 “gG” 熔断体满足式 (7-3-2) 时, 即可以满足式 (7-3-3) 的要求。

按照表 7-3-13 和表 7-3-14 列出的熔断体约定熔断电流值和上述试验结果, 得出熔体电流  $I_r$  与导体载流量  $I_z$  的关系式, 列于表 7-3-20。

表 7-3-20 用熔断器作过载保护时熔体电流 ( $I_r$ ) 与导线载流量 ( $I_z$ ) 的关系

专职人员用熔断器类型	$I_r$ 值范围 (A)	$I_r$ 与 $I_z$ 的关系
螺栓连接熔断器	全值范围	$I_r \leq I_z$
刀型触头熔断器和 圆筒形帽熔断器	$I_r \geq 16$	$I_r \leq I_z$
	$16 > I_r > 4$	$I_r \leq 0.77 I_z$
	$I_r \leq 4$	$I_r \leq 0.69 I_z$

## 7.3.4.5 按间接接触防护（即接地故障防护）要求选择保护电器

(1) 接地故障防护要求：见本书第 1.4 节。

(2) 接 TN 系统接地故障防护要求选择保护电器：

1) TN 系统配电线路接地故障防护的动作特性应符合式 (7-3-4) 要求

$$Z_s \cdot I_a \leq U_0 \quad (7-3-4)$$

式中  $Z_s$ ——接地故障回路的阻抗， $\Omega$ ；

$I_a$ ——保证保护电器在规定时间内切断故障回路的电流，A。规定时间：对配电线路及仅供固定用电设备的末端回路不大于 5s；对供给手握式、移动式用电设备的末端回路或插座回路对  $U_0$  为交流 220V 时不应大于 0.4s；对  $U_0$  为交流 380V 时，不应大于 0.2s；

$U_0$ ——相线对地标称电压，V。

2) TN 系统采用过电流保护电器（即熔断器或断路器）兼作接地故障防护；当不能满足式 (7-3-4) 要求时，应采用剩余电流动作保护电器。

3) 采用熔断器作接地故障防护时，符合式 (7-3-5) 条件，即可满足式 (7-3-4) 的要求

$$I_d \geq K_r \cdot I_r \quad (7-3-5)$$

式中  $I_d$ ——被保护线路末端接地故障电流，A；

$I_r$ ——熔断器的熔断体额定电流，A；

$K_r$ ——故障电流  $I_d$  为  $I_r$  值的倍数，其值不小于表 7-3-21 的规定。

表 7-3-21 熔断器作接地故障保护的  $K_r$  最小值

熔断体额定电流 (A)		$\leq 20$	25 ~ 40	50 ~ 63	80 ~ 200	250 ~ 400
切断接地故障回路的 最大允许时间 (s)	5	4.5	5	5.5	6	7
	0.4	8	9	10	11	—

4) 采用断路器作接地故障防护：

a. 用断路器的瞬时过电流脱扣器作接地故障防护，符合下式即满足式 (7-3-4) 的要求

$$I_d \geq 1 \cdot 3 I_{\text{set3}} \quad (7-3-6)$$

式中  $I_d$ ——被保护线路末端接地故障电流，A；

$I_{\text{set3}}$ ——瞬时过电流脱扣器整定电流，A；

1·3——按 GB 50054—2011 规定的保证断路器可靠脱扣的系数。

b. 用断路器的短延时过电流脱扣器作接地故障防护，符合式 (7-3-7)，即满足式 (7-3-4) 的要求

$$I_d \geq 1 \cdot 3 I_{\text{set}2} \quad (7-3-7)$$

式中  $I_{\text{set}2}$ ——短延时脱扣器整定电流 (A), 其他同式 (7-3-6) 的符号说明。

c. 用带接地故障保护的断路器时, 又分两种方式, 即零序电流保护和剩余电流保护。

(a) 零序电流保护。三相四线制配电线路正常运行时, 如三相负荷完全平衡, 无谐波电流, 忽略正常泄漏电流, 则流过中性线 (N) 的电流为 0, 即零序电流  $I_N = 0$ ; 如果三相负荷不平衡, 则产生零序电流,  $I_N \neq 0$ ; 如果某一相发生接地故障时, 零序电流  $I_N$  将大大增加, 达到  $I_{N(G)}$ 。因此利用检测零序电流值发生的变化, 可取得接地故障的信号。

检测零序电流通常是在断路器后三个相线 (或母线) 上各装一只电流互感器 (TA), 取 3 只 TA 二次电流矢量和乘以变比, 即零序电流  $I_N = I_U + I_V + I_W$ 。

零序电流保护整定值  $I_{\text{set}0}$  必须大于正常运行时 PEN 线中流过的最大三相不平衡电流、谐波电流、正常泄漏电流之和; 而在发生接地故障时必须动作。零序电流保护整定值  $I_{\text{set}0}$  应符合式 (7-3-8)、式 (7-3-9) 要求

$$I_{\text{set}0} \geq 2.0 I_N \quad (7-3-8)$$

$$I_{N(G)} \geq 1.3 I_{\text{set}0} \quad (7-3-9)$$

式中  $I_{N(G)}$ ——发生接地故障时检测的零序电流。

上两式中, 系数 2.0 是保证不致因三相不平衡电流导致误动作; 系数 1.3 是保证接地故障时可靠动作。

零序电流保护适用于 TN-C、TN-C-S、TN-S 系统, 但不适用于谐波电流较大的配电线路。

(b) 剩余电流保护。剩余电流保护所检测的是三相电流加中性线电流的相量和, 即剩余电流  $I_{\text{PE}} = I_U + I_V + I_W + I_N$ 。

三相四线配电线路正常运行时, 即使三相负荷不平衡, 剩余电流只是线路泄漏电流, 当某一相发生接地故障时, 则检测的三相电流加中性电流的相量和不为零, 而等于接地故障电流  $I_{\text{PE}(G)}$ 。

检测剩余电流通常是在断路器后三相线和中性线上各装一只 TA, 取 4 只 TA 二次电流相量和, 或采用专用的剩余电流互感器, 乘以变比, 即剩余电流  $I_{\text{PE}} = I_U + I_V + I_W + I_N$ 。

为避免误动作, 断路器剩余电流保护整定值  $I_{\text{set}4}$  应大于正常运行时线路和设备的泄漏电流总和的 2.5~4 倍, 同时, 断路器接地故障保护的整定值  $I_{\text{set}4}$  还应符合式 (7-3-10) 要求

$$I_{\text{PE}(G)} \geq 1.3 I_{\text{set}4} \quad (7-3-10)$$

可见, 采用剩余电流保护比零序电流保护的動作灵敏度更高。

剩余电流保护适用于 TN-S 系统, 但不适用于 TN-C 系统。

5) TN 系统的配电回路或配电箱同时给固定式和移动式 (或手持式) 电气设备供电时, 应采取下列措施之一:

a. 使配电箱到总等电位联结点之间的一段 PE 导体的阻抗  $Z_{\text{PE}}$  符合下式要求:

$$Z_{\text{PE}} \leq \frac{50}{U_0} \cdot Z_s \quad (7-3-11)$$

b. 将该配电箱的 PE 导体作局部等电位联结。

6) TN 系统的相导体对地发生接地故障, 而该处“地”没有等电位联结 (编者注: 由于建筑物内部都要求做等电位联结, 所以此处的“地”意指户外的大地; 这种情况的发生,

常出现在户外架空线相导体断线碰地或碰金属电杆，还有埋地电缆受损伤使相导体触及地或金属构架，俗称“放炮”，这种接地故障之故障电流往往不大，不能使保护电器切断电路，而该故障电流经过电源中性点的系统接地电阻  $R_B$  产生电位升，使中性点电位抬高，该电位从中性点沿 TN 系统的 PE 和 PEN 导体传递到外露可导电部分，如该电位超过 50V 将危及人身安全。因此要降低接地电阻  $R_B$  使中性点电位不超过 50V，接地电阻  $R_B$  应符合

$$\frac{R_B}{R_E} \leq \frac{50}{U_0 - 50} \quad (7-3-12)$$

式中  $R_B$ ——系统接地电阻（含与之并联的电阻）， $\Omega$ ；

$R_E$ ——相导体与大地之间的接地电阻， $\Omega$ 。

当不能满足式（7-3-12）要求时，应降低  $R_B$  值，或补充有效的间接接触防护措施，或采用局部 TT 系统。

（3）按 TT 系统接地故障防护要求选择保护电器。

1) TT 系统配电线路保护电器动作特性应符合

$$R_A \cdot I_a \leq 50V \quad (7-3-13)$$

式中  $R_A$ ——外露可导电部分的接地电阻和 PE 导体电阻和， $\Omega$ ；

$I_a$ ——保证保护电器在规定时间内切断故障回路的电流，A。

2) 切断故障回路的时间应符合下列要求：

a. 供给手持式或移动式电气设备的末端回路、插座回路，以及 32A 及以下的末端回路， $U_0$  为交流 220V 时，不应大于 0.2s； $U_0$  为交流 380V 时，不应大于 0.07s。

b. 其他配电回路，不应大于 1s。

3) 保护电器动作特性不符合式（7-3-13）规定时，应做局部或辅助等电位联结。

4) TT 系统中接地故障电流通常很小，应采用剩余电流保护器（RCD）作故障防护；只有当故障回路的阻抗  $Z_s$  足够小，且确保其值可靠又能保护稳定，也可采用过电流保护电器，但这样做显然是不经济、不合理的，因为需要将接地电阻  $R_A$  和  $R_B$  都降到很低。

5) TT 系统采用 RCD 作故障防护时，如何确定 RCD 的额定剩余动作电流  $I_{\Delta n}$  及接地电阻  $R_A$ ？

a. 应保证正常运行中 RCD 不致误动作，因此要求  $I_{\Delta n}$  不能太小，至少应大于正常泄漏电流最大值的 2 倍，因为 RCD 的额定剩余不动作电流  $I_{\Delta n0} = \frac{1}{2} I_{\Delta n}$ ；为可靠起见， $I_{\Delta n}$  最好能不小于泄漏电流最大值的 2.5~3.0 倍。但至少应符合式（7-3-14）的要求

$$I_{\Delta n} > 2I_{L \cdot \max} \quad (7-3-14)$$

式中  $I_{L \cdot \max}$ ——正常运行时泄漏电流最大值，mA。

b. 为保证 RCD 在 TT 系统规定时间内可靠动作，按 GB 16895.21—2011《低压电气装置 第 4-41 部分：安全防护 电击防护》的规定，预期剩余故障电流  $I_d$  应符合式（7-3-15）的要求

$$I_d \geq 5I_{\Delta n} \quad (7-3-15)$$

c.  $I_d$  值的计算：TT 系统接地故障时的等效电路见图 7-3-4。

从等效电路图可知（忽略变压器内阻）

$$I_d = \frac{U_0}{R_{ph} + R_A + R_B}$$

由于相导体电阻  $R_{ph}$  远远小于  $R_B$ , 可以近似认为

$$I_d = \frac{U_0}{R_A + R_B} \quad (7-3-16)$$

将式 (7-3-15) 代入式 (7-3-16) 经整理后得  $R_A$  的计算式为

$$R_A \leq \frac{U_0}{5I_{\Delta n}} - R_B \quad (7-3-17)$$

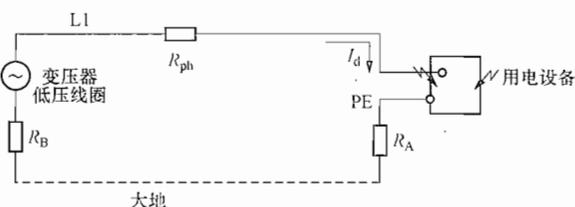


图 7-3-4 TT 系统接地故障时的等效电路图

#### d. TT 系统参数计算示例

**【例 7-3-1】** 某配电路采用 TT 系统,  $U_0 = 220V$ , 用 RCD 作接地故障防护, 正常泄漏电流  $I_{L,max}$  约为  $100mA$ , 变电站系统接地电阻  $R_B$  为  $4\Omega$ , 设计 RCD 的  $I_{\Delta n}$  值及  $R_A$  值应为多少?

**解:** 按式 (7-3-14): RCD 的  $I_{\Delta n}$  宜确定为  $300mA$ 。

注: RCD 的  $I_{\Delta n}$  的优选值为:  $30、60、100、300、500、1000、2000、3000mA$  等。按式 (7-3-17), 当  $I_{\Delta n} = 300mA$  时, 计算出:  $R_A \leq 142\Omega$ 。可以取  $100\Omega$  或更小。

(4) 按 IT 系统接地故障防护要求选择保护电器。

1) 为了提高供电连续性而采用 IT 系统, 发生第一次接地故障不应切断电源, 而应装设绝缘监测器, 接地故障时应发出可解除的音响信号, 和一直持续到故障被消除为止的灯光信号。

2) 应合理设置报警信号的位置, 以求在尽可能短的时间内消除第一次故障。

3) 当电气设备的外露可导电部分为共同接地, 发生第二次接地故障时, 应按 TN 系统要求自动切断电源。

#### 7.3.4.6 按设备启动时不误动作要求选择保护电器

保护电器的选型和整定电流等参数, 应保证设备启动过程中不致动作, 这是基本要求, 这种动作, 就是误动作, 将导致无法正常运行。

(1) 按用电设备启动要求选择熔断器:

1) 单台笼型电动机直接启动时:

a. 选用“aM”型熔断器时, 应符合式 (7-3-18) 要求

$$I_r \geq (1.05 \sim 1.10)I_M \quad (7-3-18)$$

式中  $I_r$ ——“aM”型熔断器熔断体额定电流, A;

$I_M$ ——笼型电动机额定电流, A。

b. 选用“gG”型熔断器时, 应使其安秒特性曲线及偏差后略高于电动机的启动电流和启动时间的交点。根据经验, 一般不应小于电动机额定电流 ( $I_M$ ) 的  $1.5 \sim 2.3$  倍左右。

2) 笼型电动机启动时配电线路的熔断体选择应符合式 (7-3-19) 要求

$$I_r \geq K_r [I_{rM1} + I_{C(n-1)}] \quad (7-3-19)$$

式中  $I_r$ ——熔断体的额定电流, A;

$I_{rM1}$ ——线路中启动电流最大的一台电动机的额定电流, A;

$I_{C(n-1)}$ ——除启动电流最大的一台电动机以外的线路计算电流, A;

$K_r$ ——配电线路熔断体选择计算系数, 取决最大一台电动机额定电流 ( $I_{rM1}$ ) 与线路计算电流 ( $I_C$ ) 的比值, 见表 7-3-22。

3) 照明线路熔断体 ( $I_r$ ) 选择应符合式 (7-3-20) 要求

$$I_r \geq K_m I_C \quad (7-3-20)$$

式中  $K_m$ ——照明线路熔断体选择计算系数，取决于电光源启动状况和熔断时间—电流特性，其值见表 7-3-23。

$I_C$ ——线路的计算电流，A；

(2) 按用电设备启动要求选择断路器：

表 7-3-23  $K_m$  值

表 7-3-22  $K_r$  值

$I_{\text{all}}/I_C$	$\leq 0.25$	0.25 ~ 0.4	0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8
$K_r$	1.0	1.0 ~ 1.1	1.1 ~ 1.2	1.2 ~ 1.3

熔断器型号	熔断体额定电流 (A)	$K_m$		
		白炽灯、卤钨灯、荧光灯	高压钠灯、金属卤化物灯	LED 灯
RL7、NT	$\leq 63$	1.0	1.2	1.1
RL6	$\leq 63$	1.0	1.5	1.1

1) 反时限（即长延时）过电流脱扣器整定电流 ( $I_{\text{set1}}$ ) 应符合以下要求

a. 对于单台笼型电动机直接起动时，应符合下式要求

$$I_{\text{set1}} \geq I_M \quad (7-3-21)$$

式中  $I_M$ ——笼型电动机额定电流，A。

b. 对于配电线路，应符合下式要求

$$I_{\text{set1}} \geq I_c \quad (7-3-22)$$

7 式中  $I_c$ ——线路的负荷计算电流，A。

2) 定时限（短延时）过电流脱扣器的整定值 ( $I_{\text{set2}}$ )。定时限过电流脱扣器主要用于保证保护电器动作的选择性。

a. 对于配电线路，定时限过电流脱扣器整定电流，应躲过短时间出现的负荷尖峰电流，即

$$I_{\text{set2}} \geq K_{\text{rel2}} [I_{\text{stM1}} + I_{C(n-1)}] \quad (7-3-23)$$

式中  $K_{\text{rel2}}$ ——低压断路器定时限过电流脱扣器可靠系数，取 1.2；

$I_{\text{stM1}}$ ——线路中最大一台电动机的起动电流，A；

$I_{C(n-1)}$ ——除起动电流最大的一台电动机以外的线路负荷计算电流，A。

b. 对于单台笼型电动机直接起动时，应躲过起动电流（注：单台电动机不宜选用带短延时脱扣器的断路器）

$$I_{\text{set2}} \geq K_{\text{rel2}} \cdot I_{\text{stM1}} \quad (7-3-24)$$

式中参数同上式 (7-3-23)。

c. 定时限过电流脱扣器的整定时间通常有 0.1（或 0.2）、0.3、0.4、0.5s 等几种，根据需要确定。其整定时间要比下级任一组熔断器可能出现的最大熔断时间大一个量级，上下级时间级差不小于 0.1~0.2s。

3) 瞬时过电流脱扣器整定值：

a. 对于配电线路，瞬时过电流脱扣器整定电流  $I_{\text{set3}}$ ，应躲过尖峰电流，即

$$I_{\text{set3}} \geq K_{\text{rel3}} [I'_{\text{stM1}} + I_{C(n-1)}] \quad (7-3-25)$$

式中  $K_{\text{rel3}}$ ——低压断路器瞬时脱扣器可靠系数，考虑电动机起动电流误差和断路器瞬动电

流误差, 取 1.2;

$I'_{stM1}$ ——线路中最大一台电动机全起动电流, A, 它包括了周期分量和非周期分量, 其值取电动机起动电流  $I_{stM1}$  的 1.5 ~ 2.2 倍;

$I_{C(n-1)}$ ——除起动电流最大的一台电动机以外的线路计算电流, A。

b. 对于单台笼型电动机直接起动时,  $I_{set3}$  应躲过该电动机的全起动电流, 按 GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》第 2.3.5 条规定,  $I_{set3}$  应取电动机起动电流 ( $I_{stM1}$ ) 的 2 ~ 2.5 倍, 即

$$I_{set3} = (2 \sim 2.5)I_{stM1} \quad (7-3-26)$$

c. 为满足被保护线路各级间选择性要求, 选择型低压断路器的瞬时脱扣器电流整定值  $I_{set3}$ , 还应大于下一级保护电器所保护线路的最大短路电流。

4) 保护照明线路的断路器的过电流脱扣器的整定。反时限过电流脱扣器整定电流 ( $I_{set1}$ ) 和瞬时过电流脱扣器整定电流 ( $I_{set3}$ ) 应分别符合式 (7-3-27)、式 (7-3-28) 要求

$$I_{set1} \geq K_{rel1} I_c \quad (7-3-27)$$

$$I_{set3} \geq K_{rel3} I_c \quad (7-3-28)$$

式中  $I_c$ ——照明线路的计算电流, A;

$K_{rel1}$ 、 $K_{rel3}$ ——反时限和瞬时过电流脱扣器可靠系数, 取决于电光源启动特性和断路器特性, 其值见表 7-3-24。

表 7-3-24 照明线路保护的断路器反时限和瞬时过电流脱扣器可靠系数

低压断路器种类	可靠系数	白炽灯、卤钨灯	荧光灯	高压钠灯、金属卤化物灯	LED 灯
反时限过电流脱扣器	$K_{rel1}$	1.0	1.0	1.0	1.0
瞬时过电流脱扣器	$K_{rel3}$	10 ~ 12	5	5	5

#### 7.3.4.7 保护电器的分断能力

(1) 每一级配电线路的保护电器都应校验其分断能力。要求保护电器的额定分断能力应大于其出线端最大短路电流周期分量有效值。

(2) 当短路点附近所接电动机额定电流之和超过短路电流的 1% 时, 应计入电动机反馈电流的影响。

(3) 靠近配电变压器低压出线处, 特别是大容量变压器低压出线处的短路电流很大, 因此出线低压断路器和低压配电盘上馈电线熔断器或断路器, 应特别注意校验其分断能力; 微型断路器的额定分断能力较小, 只能用于末端回路的保护, 不能装设在大容量变电站内。

(4) 同一型号断路器往往有几种不同分断能力的产品, 分别有一般型、较高分断型、高分断型, 还有经济型, 应注意选择合适的类型。

(5) 变电站低压配电盘内通常装设全封闭有填料熔断器 (如 RT16、RT17), 其分析能力很高, 可不作校验。

#### 7.3.4.8 各级保护电器间的选择性

(1) 选择性动作的意义和要求。低压配电线路发生短路、过负荷或接地故障时, 既要保证可靠地分断故障电路, 又要尽可能地缩小断电范围, 减少不必要的停电, 即有选择性地

分断。这就要求合理设计低压配电系统，准确计算故障电流，恰当选择保护电器，正确整定保护电器的动作电流和动作时间，才能保证有选择性地切断故障回路。

下面具体分析各类保护电器的上下级间选择性配合特性。

(2) 熔断器与熔断器的级间配合。熔断器之间的选择性在 GB 13539.1—2008 中已有规定。标准规定了当弧前时间大于 0.1s 时，熔断体的过电流选择性用“弧前时间—电流”特性校验；弧前时间小于 0.1s 时，其过电流选择性则以  $I^2t$  特性校验。当上级熔断体的弧前  $I^2t_{\min}$  值大于下级熔断体的熔断  $I^2t_{\max}$  值时，可认为在弧前时间大于 0.01s 时，上下级熔断体间的选择性可得到保证。标准规定额定电流 16A 及以上的串联熔断体的过电流选择比为 1.6:1。也就是在一定条件下，上级熔断体电流不小于下级熔断体电流的 1.6 倍，就能实现有选择性熔断。标准规定熔断体额定电流值也是近似按这个比例制定的，如 25、40、63、100、160、250A 相邻级间，以及 32、50、80、125、200、315A 相邻级间，均有选择性。熔断器的选择性在图 7-3-1 及图 7-3-2 中表现得十分清楚。

(3) 熔断器与非选择型断路器的级间配合：

1) 过载时，只要断路器长延时脱扣器的反时限动作特性和熔断器的反时限特性计入误差后不相交，且熔断体的额定电流值比长延时脱扣器的整定电流值大一定数值，则能满足选择性要求。

2) 短路时，要求熔断器的时间—电流特性曲线上对应于预期短路电流值的熔断时间，比断路器瞬时脱扣器的动作时间（指它的固有动作时间）大 0.1s 以上，则下级断路器瞬时脱扣，而上级熔断器不会熔断，能满足选择性要求。

(4) 非选择型断路器与熔断器的级间配合：

1) 过载时，只要熔断器的反时限特性和断路器长延时脱扣器的反时限动作特性计入误差后不相交，且长延时脱扣器的整定电流值比熔断体的额定电流值大一定数值，则能满足选择性要求。

2) 短路时，当故障电流大于非选择型断路器的瞬时脱扣器整定电流  $I_{\text{se}3}$ （通常为该断路器长延时整定电流  $I_{\text{se}1}$  的 5~10 倍）时，则上级断路器瞬时脱扣，因此没有选择性；当故障电流小于  $I_{\text{se}3}$  时，下级熔断器先熔断，具有部分选择性。这种方案仅用于允许无选择性断电的情况下，不予推荐。

(5) 选择型断路器与熔断器的级间配合：

1) 过载时，只要熔断器的反时限特性和断路器长延时脱扣器的反时限动作特性不相交，且长延时脱扣器的整定电流值比熔断体的额定电流值大一定数值，则能满足选择性要求。

2) 短路时，由于上级断路器具有短延时功能，一般能实现选择性动作。但必须整定正确，不仅是短延时脱扣整定电流  $I_{\text{se}2}$  及延时时间要合适，而且还要正确整定其瞬时脱扣整定电流值  $I_{\text{se}3}$ 。确定这些参数的原则是：

a. 下级熔断器额定电流  $I_f$  不宜太大。

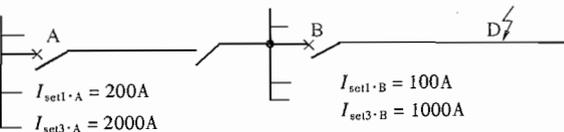
b. 上级断路器的  $I_{\text{se}2}$  值不宜太小，在满足  $I_d \geq 1.3I_{\text{se}2}$  要求前提下，宜整定大些，如下级的  $I_f$  为 200A 时， $I_{\text{se}2}$  不宜小于 2500~3000A。

c. 短延时时间应整定长一些，如 0.2~0.4s。

d.  $I_{\text{se}3}$  在满足动作灵敏性条件下，尽量整定得大一些，以免破坏选择性。

具体方法是：在多个下级熔断器中找出额定电流最大的，其值为  $I_r$ ，假设熔断器后发生的故障电流  $I_d \geq I_{set2}$  时，在熔断器时间—电流特性曲线上查出其熔断时间  $t$ ；再使断路器脱扣器的延时时间比  $t$  值长 0.15 ~ 0.2s。

(6) 非选择型断路器与非选择型断路器的级间配合。上级断路器 A 和下级断路器 B 的长延时整定值  $I_{set1}$  和瞬时整定值  $I_{set3}$  示例列于图 7-3-5。



当断路器 B 后任一点（如 D 点）发生故障，在不考虑 1.3 倍可靠系数的前提下，若故障电流  $I_d < 1000A$  时，断路器 A、B 均不能瞬时动作，不符合保护灵敏性要求；当  $1000A < I_d < 2000A$  时，则 B 动作，A 不动作，有选择性；当  $I_d > 2000A$  时，A、B 均动作，无选择性，见图 7-3-6。总体上说，这种配合不能保证选择性，仅有局部选择性，不推荐采用。

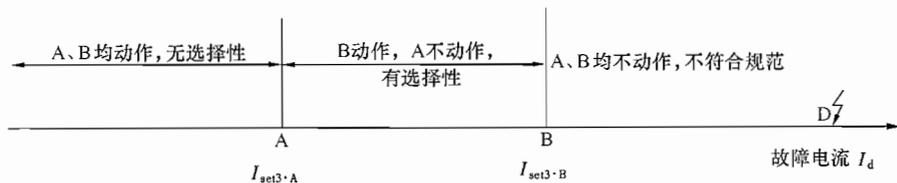


图 7-3-6 上下级均为非选择型断路器的选择性分析

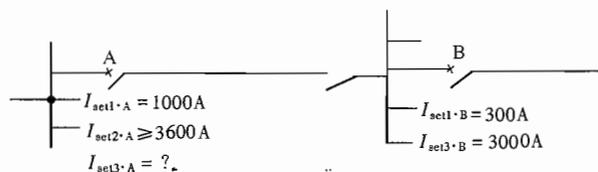


图 7-3-7 选择型与非选择型断路器配合示例 (7) 选择型断路器与非选择型断路器的级间配合。这种配合应该具有良好的选择性，但必须正确整定各项参数。以图 7-3-7 为例，若下级断路器 B 的长延时整定值  $I_{set1.B} = 300A$ ，瞬时整定值  $I_{set3.B} = 3000A$ ；上级断路器 A 的  $I_{set1.A}$  应根据其计算电流确定，由于选择型断路器多用于馈电干线，通常  $I_{set1.A}$  比  $I_{set1.B}$  大很多。

设  $I_{set1.A} = 1000A$ ，其  $I_{set2.A}$  及  $I_{set3.A}$  整定原则如下：

1)  $I_{set2.A}$  整定值应符合下式要求

$$I_{set2.A} \geq 1.3I_{set3.B} \quad (7-3-29)$$

若  $I_{set2.A} < I_{set3.B}$ ，当故障电流达到  $I_{set2.A}$  值，而小于  $I_{set3.B}$  时，则断路器 B 不能瞬时动作，而断路器 A 经短延时动作，破坏了选择性。1.3 是可靠系数，考虑脱扣器动作误差的需要。

2) 短延时的时间没有特别要求，主要是按与下级熔断器的选择性配合确定。

3)  $I_{set3.A}$  应在满足动作灵敏性前提下，尽量整定大些，以免在故障电流很大时导致 A、B 均瞬时动作，破坏选择性。通常要求  $I_{set3.A}$  值大于断路器 B 处的短路电流值的 1.2 倍以上。

(8) 上级用带专用接地故障保护的断路器：

1) 零序保护方式：零序保护整定电流  $I_{set0}$  一般为  $I_{set1}$  的 20% ~ 100%，多为几百安到 1000A，与下级熔断器和一般断路器很难有选择性。只有后者的额定电流很小（如几十安）时，才有可能。

使用零序保护时，在满足动作灵敏性要求前提下， $I_{\text{set}0}$ 应整定得大一些，延时时间尽量长一些。

2) 剩余电流保护方式。这种方式的整定电流更小，对于 TN-S 系统，在发生接地故障时，和下级熔断器、断路器之间很难有选择性。这种保护只能要求和下级剩余电流动作保护器之间具有良好选择性。这种方式多用于安全防护要求高的场所，所以应在末端电路装设剩余电流动作保护器，以减少非选择性切断电路。

对为了防止接地故障引起电气火灾而设置的剩余电流动作保护器，其整定电流不应大于 300mA，应是延时动作，同时末端电路应设有剩余电流动作保护器，并瞬时动作。有条件时（如有专人值班维护的场所），前者可不切断电路而发出报警信号。

对于 TT 系统，由于下级都使用了剩余电流动作保护，只要各级的整定电流和延时时间有一定级差，就能保证有较好的选择性。

(9) 区域选择性联锁 (Zone Selective Interlocking, ZSI)。现在的智能断路器（如 DW45 型），具有“区域选择联锁”的功能，这是利用微电子技术使保护更为完善，保证了动作灵敏性和选择性。

#### 7.3.4.9 保护电器选择的总结

(1) 保护电器的选择应同时满足上述各项要求：

- 1) 正常工作不动作：按式 (7-3-2)。
- 2) 用电设备启动时不动作：熔断器按式 (7-3-18)、式 (7-3-19)、式 (7-3-20)；断路器按式 (7-3-21) ~ 式 (7-3-28)。
- 3) 保护电器的动作时间满足导体热稳定要求（短路保护）：按式 (7-3-1) 和表 7-3-19。
- 4) 整定值满足过负荷保护要求：按式 (7-3-2) 和表 7-3-20。
- 5) 满足接地故障保护要求：按式 (7-3-4) ~ 式 (7-3-17)。
- 6) 满足分断能力要求：按 7.3.4.7 节。
- 7) 上级保护电器应符合选择性动作要求：按 7.3.4.8 节。

(2) 设计中选择保护电器的程序：

- 1) 根据计算电流  $I_c$  初步选择  $I_r$  或  $I_{\text{set}1}$ 。
- 2) 按用电设备启动条件校验保护电器，确定  $I_r$  或  $I_{\text{set}1}$  及  $I_{\text{set}3}$ 。
- 3) 按过负荷保护条件选择导体截面积。
- 4) 计算保护电器处三相短路电流和所保护线路末端的接地故障电流  $I_d$ 。
- 5) 按短路保护要求校验导体热稳定。
- 6) 校验接地故障时，保护电器动作的灵敏性。
- 7) 校验保护电器的分断能力。
- 8) 分析上下级保护电器选择性动作要求。
- 9) 以上各步骤，如达不到规定要求，应调整参数或采取其他措施。

#### 7.3.4.10 保护电器选择示例

【例 7-3-2】设有如图 7-3-8 所示的配电系统，试选择母干线保护电器类型及各项参数的整定。已知：10kV 侧短路容量为 300MVA；变压器为 1000kVA，10/0.4kV，Dyn11 接线；变压器至低压主断路器母线长 10m，引出母干线长 165m，母干线计算电流 1050A，

采用TN-S接地系统。

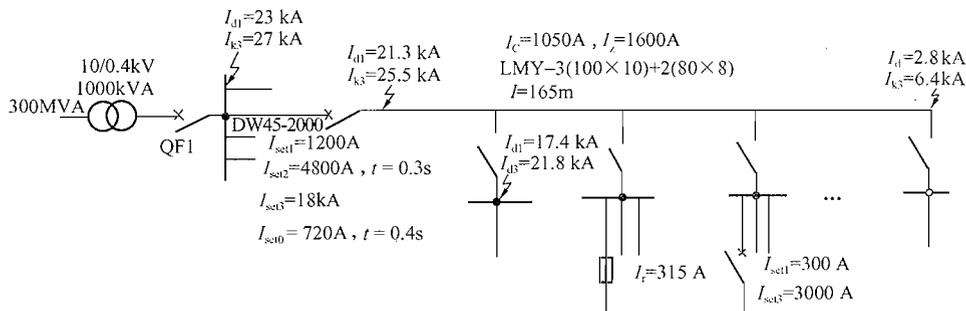


图 7-3-8 树干式配电系统保护示例

解：(1) 确定母干线截面。要求  $I_z \geq I_c$ ，考虑母干线配电范围大，并考虑发展，应预留较大裕量，拟采用铝母排 LMY-3(100×10)+2(80×8)，其  $I_z = 1600\text{A}$ （环境温度 35℃）。

(2) 计算三相短路电流  $I_{k3}$  和接地故障电流  $I_d$  值。计算几个点的三相短路电流  $I_{k3}$  和接地故障电流  $I_d$  值，标记在图 7-3-8 中。

(3) 母干线保护电器选型。考虑到该生产车间的重要性及这种较大的树干式配电系统保护的复杂性，选用一台 DW45 型智能型断路器，框架电流 2000A 可以得到良好的保护性能。两种断路器的分断能力都远大于最大的三相短路电流  $I_{k3}$  值。

(4) 母干线断路器参数整定：

1) 长延时过电流脱扣器整定电流  $I_{set1}$ ：按过负荷保护要求，应符合  $I_c \leq I_{set1} \leq I_z$ ，即  $I_{set1}$  应大于 1050A，小于 1600A，取  $I_{set1} = 1200\text{A}$ ，也可取 1400A。

2) 短延时过电流脱扣器整定电流  $I_{set2}$  及短延时动作时间整定：为保证可靠动作，应符合接地故障电流  $I_d \geq 1.3I_{set2}$  要求，鉴于这个要求难以满足，可以利用 DW45 型断路器所带接地故障保护脱扣器作为接地故障保护，则符合末端相间短路电流  $I_{k3} \geq 1.3I_{set2}$  即可，即  $I_{set2} \leq 6400\text{A}/1.3 = 4923\text{A}$ ，取  $I_{set2} = 4800\text{A}$ （即  $I_{set1}$  的 4 倍）。

该短延时动作整定电流  $I_{set2}$  与下级保护电器选择性分析：

a. 该短延时动作整定电流  $I_{set2} = 4800\text{A}$ ，为下级最大断路器瞬时动作整定电流  $I_{set3} = 3000\text{A}$  的 1.3 倍，符合选择性要求。

b. 该短延时动作整定电流  $I_{set2} = 4800\text{A}$ ，为下级最大熔断器熔体电流  $I_f = 315\text{A}$  的 15.2 倍，是否符合选择性要求，主要取决于短延时动作时间整定值。

短延时时间整定：下级最大熔断器故障电流等于或大于 4800A（按  $I_{set2}$  值）时，能使上级短延时过电流脱扣器动作，而 315A 熔断体的熔断时间约为 0.15s，因此短延时动作时间应整定为 0.3s。

注意：若主断路器不带接地故障保护，则短延时过电流脱扣器整定电流  $I_{set2}$  必须保证末端的接地故障电流  $I_d$  能可靠动作，即  $I_d \geq 1.3I_{set2}$ ，即  $I_{set2} \leq 2800\text{A}/1.3 = 2150\text{A}$ ，取  $I_{set2} = 1.5I_{set1} = 1800\text{A}$ 。其短延时动作时间就要长得多，否则将无法保证与下级熔断器的选择性。

3) 瞬时过电流脱扣器整定电流  $I_{set3}$ ：由于有短延时过电流保护，为了保证更好的选择性， $I_{set3}$  值可以整定得大一些，如为  $I_{set1}$  的 15 倍，则  $I_{set3} = 15 \times 1200\text{A} = 18\text{kA}$ ，这样，当最近

一个配电箱母线处产生接地故障时，不致瞬时脱扣。并根据运行经验，母干线相间短路极少。

4) 热稳定校验。由于瞬时脱扣器的全分断时间（包括灭弧时间）极短，母干线截面积较大，可不做校验。

5) 接地故障保护整定：

a. 采用零序电流保护。动作电流整定值  $I_{set0}$  应满足  $I_{set0} \geq 2.0 I_N$  及  $I_{N(d)} \geq 1.3 I_{set0}$  要求，设该母干线正常运行时的三相不平衡电流  $I_N$  为 200A，而最小接地故障电流为 2.8kA，取  $I_{set0} = 0.6 I_{set1} = 0.6 \times 1200A = 720A$ 。

由于  $I_{set0}$  整定值很小，与下级 315A 熔断器和  $I_{set3} = 3000A$  的断路器之间很难有选择性，但是与下级更小的断路器 ( $I_{set3} \leq 600A$ ) 和熔断器 ( $I_t \leq 63A$ ) 之间可有选择性。零序电流保护应有较长的延时，宜为 0.4s。

b. 采用剩余电流保护。动作电流整定值  $I_{set4}$  应满足  $I_{dl} \geq 1.3 I_{set4}$  要求。因此可取  $I_{set4} = 0.2 \times I_{set1} = 0.2 \times 1200A = 240A$ ，动作时间可取 0.4s。这样更难以与下级断路器和熔断器有选择性。在供电可靠性要求高的场所，该接地故障保护可不切断电路而只发出报警信号。

对于以上两种接地故障保护有两个要求：第一，必须延时动作，延时不宜小于 0.4s；第二，最好在末端回路设有剩余电流动作保护。

(5) 变压器低压侧主断路器 QF1 的保护设置：

1) 为使变压器容量得到充分利用又不影响变压器的寿命，变压器低压侧主断路器 QF1 过负荷整定应与变压器允许的正常过负荷相适应，长延时过电流脱扣器整定电流宜等于或接近于变压器低压侧额定电流，即

$$I_{set1} = I_{rT}$$

式中  $I_{rT}$ ——变压器低压侧额定电流，为 1443A。

故  $I_{set1}$  取 1500A。

2) 断路器 QF1 可设置短延时过电流保护，取  $I_{set2} = 4 \times I_{set1} = 6000A$ ，短延时时间宜整定为 0.4s，此时母干线断路器的短延时脱扣器延时时间应为 0.2~0.3s。

3) 断路器 QF1 与各馈出线的保护电器都装在低压配电屏内，距离不过几米，在此范围内发生短路和接地故障的概率很小，不设置瞬时过电流保护，以避免馈出线故障时 QF1 无选择性动作。如设置瞬时过电流脱扣器，则其动作电流应选择很大，如取 22~24kA。

【例 7-3-3】某放射式配电系统，如图 7-3-9，各配电线路的计算电流  $I_c$ 、各点的故障电流、笼型电动机（直接起动）的参数标示于图，试选择各级保护电器及其参数。

解：

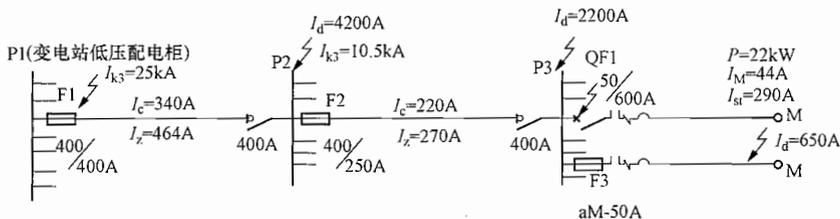


图 7-3-9 放射式配电系统保护示例

## (1) 选择电动机 M 终端回路保护电器

## 1) 采用断路器 (QF):

a.  $I_{\text{set1}} > I_M$ , 选  $I_{\text{set1}} = 50\text{A}$ 。b. 按式 (7-3-26):  $I_{\text{set3}} \geq (2.0 \sim 2.5) I_{\text{sl} \cdot \text{M}} = (2.0 \sim 2.5) \times 290 = 580 \sim 725\text{A}$ , 至少应取  $I_{\text{set3}} = 600\text{A}$ 。c. 按接地故障防护校验: 按式 (7-3-6)  $I_d \geq 1.3 I_{\text{set3}}$ , 而  $1.3 I_{\text{set3}} = 1.3 \times 600 = 780\text{A}$ ,  $I_d = 650\text{A} < 780\text{A}$ , 不符合要求。

为此, 应采取下列措施之一, 以满足接地故障防护要求:

(a) 增大该终端回路和 (或) 上级线路截面积以增大末端  $I_d$  值到 780A 以上, 这样要再计算, 并增加费用。

(b) 将保护电器断路器改为熔断器, 最好是电动机专用型 “aM” 熔断器。

(c) 增加 RCD, 以满足接地故障防护要求。

## 2) 采用 “aM” 型熔断器 (F3) 方案:

a. 按式 (7-3-18):  $I_r \geq (1.05 \sim 1.1) I_M = (1.05 \sim 1.10) \times 44\text{A} = 46.2 \sim 48.4\text{A}$ , 取  $I_r = 50\text{A}$ 。b. 按接地故障防护校验: 按表 7-3-21, 要求  $K_r = \frac{I_d}{I_r} > 5.5$ , 现  $\frac{I_d}{I_r} = \frac{650}{50} = 13$ , 远大于要求的 5.5, 符合规定。(2) 选择  $P_2$  配电箱引出配电回路的保护电器 (F2)。1) 按过负荷保护。按式 (7-3-2)  $I_c \leq I_r \leq I_z$ , 因  $I_c = 220\text{A}$ , 选熔断器 F2 的  $I_r = 250\text{A}$ , 同时, 该回路的  $I_z$  不应小于 250A。选铜芯交联聚乙烯线 (35°C)  $3 \times 120\text{mm}^2$  (另加 N 和 PE 导体)  $I_z = 270\text{A}$ 。2) 接地故障防护校验。按表 7-3-21, 要求  $K_r = \frac{I_d}{I_r} > 7$ , 现  $\frac{I_d}{I_r} = \frac{2200}{250} = 8.8$ , 符合要求 (即可以在 5s 以内熔断)。3) 短路热稳定校验。P2 处的三相短路电流为 10.5kA, 为  $I_r = 250\text{A}$  的 42 倍, 熔断时间小于 0.1s, 应按  $(K \cdot S)^2 \geq I^2 t$  校验。

$$(K \cdot S)^2 = (143 \times 120)^2 = 294 \times 10^6 \text{A}^2 \text{s}$$

250A 熔断体 (按 RT16 型) 的  $I^2 t$  为  $0.56 \times 10^6 \text{A}^2 \text{s}$ , 符合要求。4) 分断能力校验。RT16 型熔断器是全封闭有填料熔断器, 其分断能力达 120kA, 远大于该处的  $I_{k3} = 10.5\text{kA}$ 。5) 电动机起动的影响。按式 (7-3-19):  $I_r \geq K_r [I_{rM1} + I_{c(n-1)}]$  校验, 由于  $K_r = 1$  (按表 7-3-22), 计算结果  $I_r$  为 250A 符合要求。

(3) 选择 P1 低压开关柜引出馈电回路的保护电器, 仍选择 RT16 熔断器。计算和校验方法同上, 结果列于图中。

(4) 选择性校验。F1 为 400A, 为 F2 之 250A 的 1.6 倍, 具有选择性; F2 比 F3 大得多, 更有选择性; F2 与断路器 CB1 也具有选择性。

## 导体选择、电缆线路和架空线路

### 8.1 导体选择

#### 8.1.1 3~35kV 配电装置的导体选择

【说明】以下楷体字为 DL/T 5222—2005《导体和电器选择设计技术规定》的条文。

##### 8.1.1.1 导体选择的基本规定

DL/T 5222—2005 规定：

7.1.1 导体应根据具体情况，按下列技术条件进行选择或校验：

- 1 电流；
- 2 电晕；
- 3 动稳定或机械强度；
- 4 热稳定；
- 5 允许电压降；
- 6 经济电流密度；

注：当选择的导体为非裸导体时，可不校验 2 款。

7.1.2 导体尚应按下列使用环境条件校验：

- 1 环境温度；
- 2 日照；
- 3 风速；
- 4 污秽；
- 5 海拔。

注：当在屋内使用时，可不校验 2、3、4 款。

7.1.3 载流导体一般选用铝、铝合金或铜材料；对持续工作电流较大且位置特别狭窄的发电机出线端部或污秽对铝有较严重腐蚀的场所宜选铜导体；钢母线只在额定电流小而短路电动力大或不重要的场合下使用。

7.1.4 普通导体的正常最高工作温度不宜超过 +70℃，在计及日照影响时，钢芯铝线及管形导体可按不超过 +80℃ 考虑。

当普通导体接触面处有镀（搪）锡的可靠覆盖层时，可提高到 +85℃。

特种耐热导体的最高工作温度可根据制造厂提供的数据选择使用，但要考虑高温导体对连接设备的影响，并采取防护措施。

##### 8.1.1.2 导体选择的环境条件

(1) DL/T 5222—2005 规定：

6.0.2 选择导体和电器的环境温度宜采用表 6.0.2 所列数值。

表 6.0.2 选择导体和电器的环境温度

类别	安装场所	环境温度 ℃	
		最高	最低
裸导体	屋外	最热月平均最高温度	
	屋内	该处通风设计温度。当无资料时，可取最热月平均最高温度加 5℃	

注：1. 年最高（或最低）温度为一年中所测得的最高（或最低）温度的多年平均值。

2. 最热月平均最高温度为最热月每日最高温度的月平均值，取多年平均值。

6.0.3 选择屋外导体时，应考虑日照的影响。对于按经济电流密度选择的屋外导体，如发电机引出线的封闭母线、组合导线等，可不校验日照的影响。

计算导体日照的附加温升时，日照强度取  $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ ，风速取  $0.5\text{m}/\text{s}$ 。

6.0.4 选择导体和电器时所用的最大风速，可取离地面 10m 高、30 年一遇的 10min 平均最大风速。

(2) 发电厂、变电站和架空线路的污秽等级及其要求的爬电距离见表 7-1-7 和表 7-1-8。

### 8.1.1.3 按工作电流选择导体

(1) 不同回路的持续工作电流按表 7-1-3 计取。

(2) DL/T 5222—2005 规定：

7.1.5 在按回路正常工作电流选择导体截面积时，导体的长期允许载流量，应按所在地区的海拔及环境温度进行修正。

导体的长期允许载流量及其修正系数可采用附录 D 所列数值。

导体采用多导体结构时，应考虑邻近效应和热屏蔽对载流量的影响。

表 D.11 裸导体载流量在不同海拔及环境温度下的综合修正系数

导体最高允许温度 ℃	适用范围	海拔 m	实际环境温度 ℃						
			+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
+70	屋内矩形、槽形、管形导体和不计日照的屋外软导线		1.05	1.00	0.94	0.88	0.81	0.74	0.67
+80	计及日照时屋外软导线	1000 及以下	1.05	1.00	0.94	0.89	0.83	0.76	0.69
		2000	1.01	0.96	0.91	0.85	0.79		
		3000	0.97	0.92	0.87	0.81	0.75		
		4000	0.93	0.89	0.84	0.77	0.71		
	计及日照时屋外管形导体	1000 及以下	1.05	1.00	0.94	0.87	0.80	0.72	0.63
		2000	1.00	0.94	0.88	0.81	0.74		
		3000	0.95	0.90	0.84	0.76	0.69		
		4000	0.91	0.86	0.80	0.72	0.65		

## 8.1.1.4 按短路热稳定选择导体

- (1) 短路稳定校验的一般原则见 7.1.2.2 (1)。  
 (2) 热效应的计算时间取主保护动作时间与表 7-1-5 的计算时间之和。  
 (3) 短路电流在导体和电器中引起的热效应

$$Q_t = \int_0^t i_{kt}^2 dt = \int_0^t I_{kt}^2 dt + \int_0^t i_{DC}^2 e^{-2t/T_a} dt = Q_z + Q_f \quad (8-1-1)$$

$$Q_z = \int_0^t I_{kt}^2 dt = \frac{(I_k'^2 + 10I_{k/2}^2 + I_{kt}^2)t}{12} \quad (8-1-2)$$

$$Q_f = \int_0^t i_{DC}^2 e^{-\frac{2t}{T_a}} dt = T_{eq} I_k'^2 \quad (8-1-3)$$

式中  $Q_t$ ——短路电流在导体和电器中引起的热效应,  $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$ ;

$Q_z$ ——短路电流交流分量引起的热效应,  $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$ ;

$Q_f$ ——短路电流直流分量引起的热效应,  $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$ ;

$i_{kt}$ ——短路电流瞬时值,  $\text{kA}$ ;

$I_{kt}$ ——短路时间  $t$  时的短路电流交流分量方均根值,  $\text{kA}$ ;

$i_{DC}$ ——短路电流直流分量,  $\text{kA}$ ;

$T_a$ ——衰减时间常数;

$t$ ——短路电流持续时间,  $\text{s}$ ;

$I_k'$ ——短路电流交流分量初始方均根值,  $\text{kA}$ ;

$I_{k/2}$ ——短路电流在  $t/2$  时的交流分量方均根值,  $\text{kA}$ ;

$T_{eq}$ ——直流分量等效时间, 为简化计算可按表 8-1-1 查得,  $\text{s}$ 。

表 8-1-1 直流分量等效时间

短 路 点	$T_{eq}$ (s)	
	$t \leq 0.1$	$t > 0.1$
发电机出口及母线	0.15	0.2
发电机升压变压器高压侧及出线, 发电机电抗器后	0.08	0.1
变电所各级电压母线及出线	0.05	

对于无限大电源系统可取

$$Q_t = I_{kt}^2 t \quad (8-1-4)$$

式中符号含义同前。

- (4) 导体热稳定允许的最小截面积按下式计算

$$S_{min} = \frac{\sqrt{Q_t}}{C} \times 10^3 \quad (8-1-5)$$

式中  $S_{min}$ ——导体满足热稳定所需的最小截面积,  $\text{mm}^2$ 。

$Q_t$ ——短路电流产生的热效应,  $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$ ;

$C$ ——导体的热稳定系数, 见表 8-1-2。

表 8-1-2

导体的热稳定系数  $C$ 

短路前工作温度 (°C)	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
硬铝、铝镁合金	95	93	91	89	87	85	83	81	79	77	75	73
硬铜	181	179	176	174	171	169	166	164	161	159	157	155

## 8.1.1.5 按短路动稳定选择导体

(1) 短路电流通过平行导体产生的电磁效应:

1) 当两根平行导体中分别有电流  $i_1$  和  $i_2$  通过时, 导体间的相互作用力  $F$  为

$$F = 0.2K_x i_1 i_2 \frac{l}{D} \quad (8-1-6)$$

2) 当三相短路电流通过在同一平面的三相导体时, 中间相所处情况为最严重, 其最大作用力  $F_{k3}$  为

$$F_{k3} = 0.173K_x i_p^2 \frac{l}{D} \quad (8-1-7)$$

以上各式中  $F$ ——两根平行导体中分别有电流通过时导体间的相互作用力, N;

$F_{k3}$ ——三相短路时中间相导体的最大作用力, N;

$i_1$ 、 $i_2$ ——流过两根平行导体的电流瞬时值, kA;

$i_p$ ——三相短路冲击电流 (三相短路峰值电流), kA;

$l$ ——平行导体长度, m;

$D$ ——导体中心距离, m;

$K_x$ ——矩形截面导体的形状系数, 可根据与导体厚度  $b$ 、宽度  $h$  中心距离  $D$  有关的关系式  $\frac{D-b}{h+b}$  和  $\frac{b}{h}$ , 从图 8-1-1 查得, 当  $\frac{D-b}{h+b}$  大于 2 时  $K_x$  取 1;

$b$ ——导体的厚度, m;

$h$ ——导体的宽度, m。

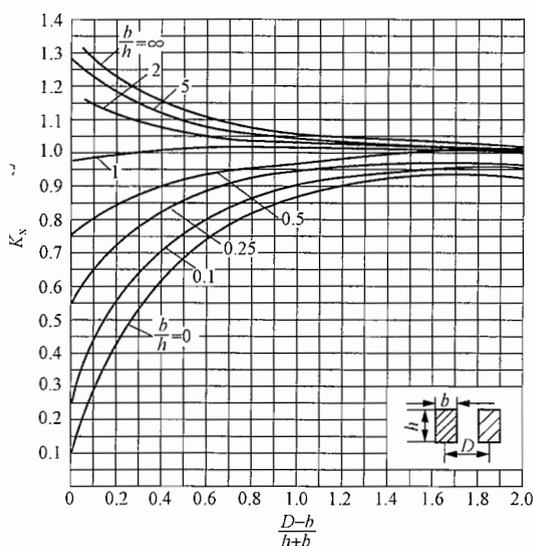


图 8-1-1 矩形截面导体的形状系数  $K_x$  与  $(D-b)/(h+b)$  的关系曲线

(2) 不考虑机械共振时单片矩形导体的应力：

当跨数大于2时，导体的应力 $\sigma_c$ 为

$$\sigma_c = 1.73K_x i_p^2 \frac{l^2}{DW} \times 10^{-2} \quad (8-1-8)$$

当跨数等于2时，导体的应力 $\sigma_c$ 为

$$\sigma_c = 2.16K_x i_p^2 \frac{l^2}{DW} \times 10^{-2} \quad (8-1-9)$$

以上各式中  $\sigma_c$ ——导体的应力，Pa；

$K_x$ ——矩形截面导体的形状系数；

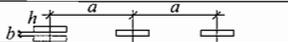
$i_p$ ——三相短路冲击电流，kA；

$l$ ——绝缘子间跨度，m；

$D$ ——导体相间距离，m；

$W$ ——导体截面系数， $m^3$ ，见表8-1-3。

表 8-1-3 不同形状和布置的导体的截面系数及惯性半径

导体布置方式及其截面形状	截面系统 $W$ ( $m^3$ )	惯性半径 $r_i$ (m)
	$0.167bh^2 \times 10^{-6}$	$0.289h \times 10^{-2}$
	$0.167hb^2 \times 10^{-6}$	$0.289b \times 10^{-2}$
	$0.333bh^2 \times 10^{-6}$	$0.289h \times 10^{-2}$
	$1.44hb^2 \times 10^{-6}$	$1.04b \times 10^{-2}$
	$0.5bh^2 \times 10^{-6}$	$0.289h \times 10^{-2}$
	$3.3hb^2 \times 10^{-6}$	$1.66b \times 10^{-2}$

注 图中  $a$ 、 $b$ 、 $h$  单位为  $m$ 。

(3) 多片矩形导体的应力为

$$\sigma = \sigma_{x-x} + \sigma_c \quad (8-1-10)$$

$$\sigma_c = 4.9 \frac{F_{k3} l_c^2}{hb^2} \quad (8-1-11)$$

式中  $\sigma$ ——多片矩形导体的总应力，Pa；

$\sigma_{x-x}$ ——多片矩形导体的相间作用力的应力，计算公式同单片矩形导体，Pa；

$\sigma_c$ ——同相的多片矩形导体之间作用力的应力，Pa；

$F_{k3}$ ——三相短路时多片导体之间的作用力，N；

$l_c$ ——同相导体片间的间隔垫距离，m；

$h$ ——导体的宽度，m；

$b$ ——同相导体的片间距离，与导体的厚度相等，m。

1) 每相两片矩形导体时片间的作用力

$$F_{k3} = 2.55K_{x12} i_p^2 \frac{l_c}{b} \quad (8-1-12)$$

2) 每相三片矩形导体时片间的作用力

$$F_{k3} = 0.8(K_{x12} + K_{x13}) i_p^2 \frac{l_c}{b} \quad (8-1-13)$$

以上各式中  $F_{k3}$ ——三相短路时多片导体之间的作用力, N;  
 $K_{x12}$ ——第一与第二片导体的形状系数, 可从图 8-1-1 查得;  
 $K_{x13}$ ——第一与第三片导体的形状系数, 可从图 8-1-1 查得;  
 $i_p$ ——三相短路冲击电流, kA;  
 $l_c$ ——同相导体片间的间隔垫距离, m;  
 $b$ ——同相导体的片间距离, 与导体的厚度相等, m。

(4) 硬导体满足动稳定的一般要求

$$\sigma_{cm} \leq \sigma_y \quad (8-1-14)$$

式中  $\sigma_{cm}$ ——短路时硬导体中的最大应力, Pa;  
 $\sigma_y$ ——硬导体最大允许应力, Pa, 见表 8-1-4。

表 8-1-4 硬导体的最大允许应力 MPa

项目	导体材料及牌号和状态							
	铜/硬铜	铝及铝合金						
		1060 H112	1R35 H112	1035 H112	3A21 H18	6061 T6	6063 T6	6R05 T6
最大允许应力	120/170	30	30	35	100	115	120	125

注 表中数字为已计及安全系数后的最大允许应力, 对应于材料破坏应力的安全系数一般为 1.7; 对应于材料屈服点应力为 1.4。

(5) 对水平布置在同一平面的矩形导体, 导体的固有自振频率在共振频率范围之外时, 硬导体按机械强度允许的最大跨距

$$l_{max} = 7.603 \sqrt{W\sigma_y} \frac{\sqrt{D}}{i_p} = K' \frac{\sqrt{D}}{i_p} \quad (8-1-15)$$

$$K' = 7.603 \sqrt{W\sigma_y} \quad (8-1-16)$$

式中  $l_{max}$ ——水平布置矩形导体最大允许跨距, m;

$W$ ——导体截面系数,  $m^3$ 。

$\sigma_y$ ——硬导体最大允许应力, Pa;

$D$ ——导体相间距离, m;

$K'$ ——机械强度允许的最大跨距系数;

$i_p$ ——三相短路冲击电流, kA。

(6) 为了消除由于温度变化引起的危险应力, 矩形硬铝导体的直线段一般每隔 20m 左右安装一个伸缩接头。对滑动支持式铝管导体一般每隔 30~40m 安装一个伸缩接头; 对滚动支持式铝管导体应根据计算确定。导体伸缩接头的截面积不应小于其所连接导体截面积的 1.2 倍。

### 8.1.1.6 按经济电流密度选择导体

DL/T 5222—2005 规定:

7.1.6 除配电装置的汇流母线外, 较长导体的截面积宜按经济电流密度选择。导体的经济电流密度可参照附录 E 所列数值选取。

当无合适规格导体时, 导体截面积可按经济电流密度计算截面积的相邻下一档选取。

## 8.1.2 电线、电缆类型的选择

### 8.1.2.1 导体材料的选择

(1) 应采用铜导体的场合：

- 1) 供给照明、插座和小型用电设备的分支回路；
- 2) 重要电源、操作回路及二次回路、电机的励磁回路等需要确保长期运行中连接可靠的回路；
- 3) 移动设备的线路及振动场所的线路；
- 4) 对铝有腐蚀的环境；
- 5) 高温环境、潮湿环境、爆炸及火灾危险环境；
- 6) 应急系统及消防设施的线路；
- 7) 市政工程、户外工程的布电线。

(2) 不宜采用铝或铝合金导体场合：

- 1) 非专业人员容易接触的线路，如公共建筑与居住建筑；
- 2) 导体截面积  $10\text{mm}^2$  及以下的电缆。

(3) 应采用铝或铝合金导体场合：

- 1) 对铜有腐蚀而对铝腐蚀相对较轻的环境；
- 2) 加工或储存氨气（液）、硫化氢、二氧化硫等的场所。

(4) 宜采用铝或铝合金导体场合。

- 1) 架空线路；
- 2) 较大截面积的中频线路。

## 8

### 8.1.2.2 电缆芯数的选择

(1) 电缆芯数应满足载流导体根数的要求；PE 导体采用电缆芯线时，电缆芯数应为载流导体根数加 1。

(2) 下列情况下宜采用单芯电缆：

- 1) 在水下、隧道或特殊的较长距离线路中，为避免或减少中接头时；
- 2) 沿电缆桥架敷设，当导体截面积较大为减小弯曲半径时；
- 3) 负荷电流很大，采用两根电缆并联仍难以满足要求时；
- 4) 采用刚性矿物绝缘电缆时。

(3) 采用单芯电缆的技术要求如下：

1) 用于交流系统的单芯电缆宜选用无金属护套和无钢带铠装的类型。必须铠装时，应采用非铁磁材料铠装或隔磁、退磁处理的铠装电缆，35kV 及 110kV 可用节距足够大的铠装。

2) 单芯电缆成束穿进铁磁性材料外壳时，回路中所有导体，包括 PE 导体，都应被铁磁性材料包围。

3) 三相供电系统采用单芯电缆时，应考虑短路时承受的机械力；水平排列且敷设距离较长时，须注意核算电压降值。

4) 单芯电缆的金属护套和铠装的接地要求，见 12.4。

### 8.1.2.3 电缆绝缘水平的选择

(1) 以  $U_0$  表示电缆中每一导体与屏蔽层或金属套之间的额定工频电压， $U$  表示电缆的额定电压， $U_m$  表示电缆运行最高电压。

(2) 高压电力系统种类:

A 类——接地故障能尽可能快地被清除,但在任何情况下不超过 1min 的电力系统。

B 类——该类仅指在单相接地故障情况下能短时运行的系统。一般情况下,带故障运行时间不超过 1h。但是,如果有关电缆产品标准有规定时,则允许运行更长时间。

注:在接地故障不能被自动和迅速切除的电力系统中,电缆绝缘上过高的电场强度使电缆寿命有一定程度的缩短。如果预期电力系统经常会出现持久的接地故障,也许将该系统归为下述的 C 类是经济的。

C 类——该类包括不属于 A 类或 B 类的所有系统。

(3) 高压电缆的额定电压值  $U_0/U$  和  $U_m$  的关系列于表 8-1-5。

表 8-1-5 电缆的额定电压值  $U_0/U$  和  $U_m$  的关系 kV

电缆额定电压 $U$	最高电压 $U_m$	电缆额定工频电压 $U_0$	
		A 类, B 类	C 类
1	1.2	0.6	0.6
3	3.6	1.8	3.0
6	7.2	3.6	6.0
10	12	6	8.7
20	24	12	18
35	40.5	21	26
66	72.5	36	50
110	126 *	64	—

\* IEC 标准为 123kV。

(4) 低压电线、电缆额定电压为 300/300、300/500V 和 450/750V。

1) 220V 单相供电系统可选择电缆额定电压为 300/300V。

2) 220/380V 系统: 接地型式 IT 系统应选择电缆额定电压为 450/750V, 接地型式 TN 或 TT 系统可选择电缆额定电压为 300/500V。

#### 8.1.2.4 电缆绝缘材料的选择

(1) 聚氯乙烯 (PVC) 绝缘电线、电缆导体长期允许最高工作温度 70℃; 短路暂态温度 (热稳定允许温度) 对 300mm<sup>2</sup> 及以下截面积不超过 160℃; 对 300mm<sup>2</sup> 以上截面积不超过 140℃。

聚氯乙烯绝缘的主要优点是制造工艺简便,质量较轻,耐油、耐酸碱腐蚀,价格便宜;但不适用于下列情况:

1) 绝缘电阻较低,介质损耗较高,因此 6kV 及以上的电缆不应使用聚氯乙烯绝缘。

2) 低温时变硬发脆。普通型聚氯乙烯绝缘电缆的适用温度范围为 +60 ~ -15℃, 不宜在 -15℃ 以下的环境温度下使用。它敷设时的温度更不能低于 -5℃, 当低于 0℃ 时, 宜先对电线、电缆加热。低于 -15℃ 的严寒地区可选用耐寒聚氯乙烯电缆。

3) 高温或日光照射下,增塑剂易挥发而导致绝缘加速老化,因此,在未具备有效隔热措施的高温环境或日光经常强烈照射的场合,宜选用相应的特种电线、电缆,如耐热聚氯乙烯线缆。耐热线缆的绝缘材料中添加了耐热增塑剂,导体长期允许最高工作温度达 90℃ 及 105℃ 等,适应在环境温度 50℃ 以上使用,但要求电线接头处或绞接处锡焊处理,防止接头

处氧化。

4) 移动式设备、有较高柔软性要求、放射线作用场所等, 不应选用聚氯乙烯绝缘电缆。

5) 人员密集的公共设施、有低毒阻燃性防火要求的场所, 不应选用含卤素的聚氯乙烯绝缘电缆。

6) 聚氯乙烯电缆不适用在含有苯及苯胺类、酮类、吡啶、甲醇、乙醇、乙醛等化学剂的土质中直埋地敷设; 在含有三氯乙烯、三氯甲烷、四氯化碳、二硫化碳、醋酸酐、冰醋酸的环境不宜采用。

随着技术进步, 聚氯乙烯绝缘电线还有不少衍生品种。如 BVN、BVN-90 及 BVNVB 型聚氯乙烯绝缘尼龙护套电线等。这种电线表面耐磨而且比普通 BV 型导线外径小、质量轻, 特别适合穿管敷设。但在  $35\text{mm}^2$  以上截面积时价格比 BV 型导线贵得多而且比较硬, 因此使用很少。

(2) 交联聚乙烯绝缘 (XLPE) 电线、电缆的导体长期允许最高工作温度为  $90^\circ\text{C}$ , 短路暂态温度 (热稳定允许温度) 不超过  $250^\circ\text{C}$ 。

交联聚乙烯绝缘性能优良, 介质损耗低; 外径小, 质量轻, 载流量大, 敷设方便, 电压等级全覆盖。由于交联聚乙烯料轻, 故  $1\text{kV}$  级的电缆价格与聚氯乙烯绝缘电缆相差有限。

普通的交联聚乙烯绝缘材料不含卤素, 因此不具备阻燃性能。此外, 交联聚乙烯材料对紫外线照射较敏感, 因此通常采用聚氯乙烯作外护套材料。在露天环境下长期强烈阳光照射下的电缆应采取覆盖遮阴措施。

交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆还可敷设于水下, 但应具有高密度聚乙烯护套及防水层的构造。

(3) 普通橡皮绝缘电力电缆用于固定敷设线路。移动式电气设备的供电回路应采用橡皮绝缘橡皮护套软电缆 (简称橡套软电缆); 有屏蔽要求的回路应具有分相屏蔽。普通橡胶遇到油类及其化合物时, 很快就被损坏; 在可能被油浸泡的场所, 宜使用耐油型橡胶护套电缆。普通橡胶耐热性能差, 允许运行温度较低; 高温环境又有柔软性要求的回路, 宜选用乙丙橡胶绝缘电缆。

### 8.1.2.5 电缆护层的选择

(1) 电缆外护层及铠装的选择见表 8-1-6。表中外护层类型按 GB/T 2952.1 ~ 2952.4—2008《电缆外护层》系列标准编制。

表 8-1-6

各种电缆外护层及铠装的适用敷设场合

代号	护套或外护层	铠装	敷设方式							环境条件						备注	
			户内	电缆沟	托盘	隧道	管道	竖井	埋地	水下 21	火灾危险 22	移动 1	多烁石 2	一般腐蚀 10	严重腐蚀 10		潮湿
	一般橡套	无	√	√	√	√	√	√			√	√	√	√	√		
	不延燃橡套	无	√	√	√	√	√	√			√	√	√	√	√		耐油
F	聚氯乙烯护套	无	√	√	√	√	√		√		√	√	√	√	√		
V	聚乙烯护套	无	√	√	√	√	√	√	√		√	√	√	√	√		

续表

代号	护套或外护层	铠装	敷设方式							环境条件						备注	
			户内	电缆沟	托盘	隧道	管道	竖井	埋地	水下21	火灾危险22	移动1	多砾石2	一般腐蚀10	严重腐蚀10		潮湿
Y	铜护套	无	√	√	√	√	√	√	√		√	√		√	√	√	刚性矿物绝缘
	矿物化合物	无	√		√	√		√			√			√	√		柔性矿物绝缘
22	聚氯乙烯护套	钢带	√	√	√	√			√					√	√	√	
23	聚乙烯护套	钢带	√	√	√	√	√		√	√				√	√	√	
32	聚氯乙烯护套	细钢丝				√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
33	聚乙烯护套	细钢丝				√	√	√	√	√	√			√	√	√	
42	聚氯乙烯护套	粗钢丝				√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
43	聚乙烯护套	粗钢丝				√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
62	聚乙烯护套	铝合金带	√	√	√	√	√	√	√				√				

## (2) 直接埋地敷设:

1) 电缆可能承受较大压力或存在机械损伤危险时, 应选用钢带铠装或铝合金联锁铠装。

在土壤可能发生位移的地段, 如流沙、回填土及大型建筑物、构筑物附近, 应选用能承受机械张力的钢丝铠装电缆, 或采取预留长度、用板桩或排桩加固土壤等措施, 以减少或消除因土壤位移而作用在电缆上的应力。

白蚁危害严重时, 可采用防蚁型外套电缆或钢带铠装的电缆。

除上述情况外, 可不需要带有铠装。

2) 直埋地敷设的电缆金属套或铠装外面应具有塑料防腐外套; 当位于盐碱、沼泽或在含有腐蚀性的矿渣回填土时, 应具有增强防护性的外护套。

(3) 水下敷设: 敷设于通航河道、激流河道或被冲刷河岸、海湾处宜采用钢丝铠装; 在河滩宽度小于100m、不通航的小河或沟渠底部, 且河床或沟底稳定的场合可采用钢带铠装; 但钢丝、钢带外面均须具有耐腐蚀的防水塑料外被层。对中压电缆一般需要有纵向和横向水密结构的护层。

(4) 导管或排管中敷设宜选用塑料外护套。

(5) 空气中敷设:

1) 可能承受机械损伤或防鼠害、蚁害要求较高的场所, 应采用钢带铠装电缆或铝合金联锁裸铠装电缆, 敷设于托盘、梯架、槽盒内。小截面挤塑绝缘电缆直接在臂式支架上敷设时, 宜带钢带铠装。高落差受力条件的电缆, 可采用钢丝铠装电缆。除上述情况外, 敷设在梯架、托盘等密集支撑的电缆, 可不需铠装。

注: a. 防白蚁型聚乙烯护套电缆、电缆的规格、电气性能、机械和物理性能与普通同类产品相同。

b. 铝合金带连锁裸铠装，是将单根铝合金带缠绕形成一环扣一环的连锁结构，可起到一定的屏蔽作用，并可耐受鼠咬。这种铠装层保护的电缆敷设安装方便，可以暗敷、明敷或敷设在电缆梯架、网格及各式电缆托盘中，亦可直接沿墙或在支架上敷设而不再穿管。敷设时不能牵引铠装，应该剥开铠装直接牵引导体。

2) 在含有腐蚀性气体环境中，铠装应具有挤出外护套。

在有放射线作用的场所（如医疗放射设备、X射线探伤机、粒子加速器以及用于核反应堆壳内的电力电缆），应采用氯丁橡胶、金属护套、矿物化合物护套或其他耐辐射的外护套。

3) 高温场所应采用硅橡胶类耐高温外护套、铜护套或矿物化合物护套。

4) 除架空绝缘电缆外，普通电缆用于户外时，宜有遮阳措施，如加罩、盖或穿管等。

### 8.1.3 电线、电缆截面积的选择

#### 8.1.3.1 电线、电缆导体截面积选择的条件

(1) 按温升选择。

(2) 按经济条件选择。

(3) 按短路热稳定校验，参见 8.1.1。

(4) 按线路电压降校验，参见 4.2.1。

(5) 满足机械强度的要求。

(6) 低压电线、电缆应符合过载保护的要求，见 7.3.4.4；TN 系统中还应保证在接地故障时保护电器能断开电路，见 1.4.2。

综合以上 6 个条件，将其中最大截面积作为最终结果。

## 8

#### 8.1.3.2 按温升选择截面积

(1) 导体通过负载电流时，导体温度不应超过导体绝缘所能承受的长期允许最高工作温度。电线、电缆的长期允许最高工作温度见表 8-1-7。

表 8-1-7 电线、电缆导体长期允许最高工作温度 ℃

电线、电缆种类		导体长期允许最高工作温度	电线、电缆种类	导体长期允许最高工作温度
橡皮绝缘电线	500V	65	通用橡套软电缆	60
塑料绝缘电线	450/750V	70	耐热聚氯乙烯导线	105
交联聚乙烯绝缘电力电缆	1~10kV	90	铜、铝母线槽	110
	35kV	80	铜、铝滑接式母线槽	70
聚氯乙烯绝缘电力电缆	1kV	70	刚性矿物绝缘电缆	70、105*
裸铝、铜母线和绞线		70	柔性矿物绝缘电缆	125
乙丙橡胶电力电缆		90		

\* 刚性矿物绝缘电缆指电缆表面温度，线芯温度约高 5~10℃。

(2) 敷设处的环境温度，指电线、电缆无负荷时周围介质温度，见表 8-1-8。

表 8-1-8 确定电线、电缆载流量的环境温度

电缆敷设场所	有无机械通风	选取的环境温度
土中直埋	—	埋深处的最热月平均地温
水下	—	最热月的日最高水温平均值
户外空气中、电缆沟	—	最热月的日最高温度平均值
有热源设备的厂房	有	通风设计规范
	无	最热月的日最高温度平均值另加 5℃
一般性厂房及其他建筑物内	有	通风设计温度
	无	最热月的日最高温度平均值
户内电缆沟	无	最热月的日最高温度平均值另加 5℃
隧道、电气竖井		
隧道、电气竖井	有	通风设计规范

- 注 1. 数量较多的工作温度大于 70℃ 的电缆敷设于未装机械通风的隧道、电气竖井时，应计入对环境温升的影响，不能直接采取仅加 5℃。
2. 本表摘自 GB 50054—2011《低压配电设计规范》。

(3) GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》规定：

3.7.2 10kV 及以下常用电缆按 100% 持续工作电流确定电缆导体允许最小截面积时，应符合本规范附录 C 和附录 D 的规定，其载流量按照下列使用条件差异影响计入校正系数后的实际允许值应大于回路的工作电流。

- 1 环境温度差异。
- 2 直埋敷设时土壤热阻系数差异。
- 3 电缆多根并列的影响。
- 4 户外架空敷设无遮阳时的日照影响。

3.7.3 除本规范第 3.7.2 条规定的情况外，电缆按 100% 持续工作电流确定电缆导体允许最小截面积时，应经计算或测试验证，计算内容或参数选择应符合下列规定：

- 1 交流线路，特别是含有高次谐波或中频负荷回路，应计入集肤效应和邻近效应对发热的影响。
- 2 交叉互联接地的单芯高压电缆，单元系统中三个区段不等长时，应计入金属层的附加损耗发热的影响。
- 3 敷设于保护管中的电缆，应计入热阻影响；排管中不同孔位的电缆还应分别计入互热因素的影响。
- 4 敷设于封闭、半封闭或透气式耐火槽盒中的电缆，应计入包含该型材质及其箱体厚度、尺寸等因素对热阻增大的影响。
- 5 施加在电缆上的防火涂料、包带等覆盖层厚度大于 1.5mm 时，应计入其热阻影响。
- 6 沟内电缆埋砂且无经常性水分补充时，应按砂质情况选取大于  $2.0\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$  的热阻系数计入对电缆热阻增大的影响。

3.7.4 电缆导体工作温度大于 70℃ 的电缆，计算持续允许载流量时，应符合下列规定：

1 数量较多的该类电缆敷设于未装机械通风的隧道、竖井时，应计入对环境温升的影响。

2 电缆直埋敷设在干燥或潮湿土壤中，除实施换土处理等能避免水分迁移的情况外，土壤热阻系数取值不宜小于  $2.0\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$ 。

3.7.6 通过不同散热条件区段的电缆导体截面积的选择，应符合下列规定：

1 回路总长未超过电缆制造长度时，重要回路电缆全长宜按其中散热较差区段条件选择同一截面积。非重要回路电缆可对大于  $10\text{m}$  区段散热条件按段选择截面积，但每回路不宜多于 3 种规格。水下电缆敷设有机械强度要求需增大截面积时，回路全长可选同一截面积。

2 回路总长超过电缆制造长度时，宜按区段选择电缆导体截面积。

【编者按】GB 50217—2007 的附录 C 和附录 D 存在下列问题：

- a. 未给出  $20\sim 110\text{kV}$  电缆的载流量。
- b. 仅给出铝芯载流量，而工业与民用项目大量使用铜芯电缆，换算不便。
- c. 交联聚乙烯绝缘电缆埋地敷设载流量的土壤热阻为  $2.0\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$ ，但表 D.0.3 的校正系数是以土壤热阻  $1.2\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$  为基准。

(4) GB/T 16895.6—2014《建筑物电气装置 第 5 部分：电气设备的选择和安装 第 52 章：布线系统》给出了多种敷设方式的  $1\text{kV}$  及以下无铠装电缆和绝缘导体的载流量。

(5) GB 50060—2008《 $3\text{kV}\sim 110\text{kV}$  高压配电装置设计规范》附录 A 为矩形铝导体长期允许载流量，未给出其他母线载流量。

8 【编者按】不同来源的载流量的基准环境温度、土壤温度和基准土壤热阻均不相同，因此校正系数不能交叉使用。考试命题时，必须说明载流量的来源。

(6) GB 50061—2010《 $66\text{kV}$  及以下架空电力线路设计规范》和 GB 50545—2010《 $110\text{kV}\sim 750\text{kV}$  架空输电线路设计规范》均未给出架空导线和架空电缆的载流量。

【编者按】综上所述，建议在实际工作中采用通用设计手册中已经整合的载流量及其配套的校正系数。

### 8.1.3.3 按经济电流选择截面积

(1) GB 50217—2007 附录 B 规定：

B.0.2 电缆经济电流截面积计算式

$$S_j = I_{\max} / J \quad (\text{B.0.2})$$

式中：

$S_j$ ——经济电缆截面积， $\text{mm}^2$ ；

$I_{\max}$ ——最大工作电流，A；

$J$ ——经济电流密度， $\text{A}/\text{mm}^2$ 。

B.0.3  $10\text{kV}$  及以下电力电缆按经济电流截面积选择，应符合下列要求：

1 按照工程条件、电价、电缆成本、贴现率等计算拟选用的  $10\text{kV}$  及以下铜芯或铝芯的聚氯乙烯、交联聚乙烯绝缘等电缆的经济电流密度值。详见 GB 50217—2007 附录 B。

2 对备用回路的电缆，如备用的电动机回路等，宜按正常使用运行小时数的一半选择电缆截面积。对一些长期不使用的回路，不宜按经济电流密度选择截面积。

3 当电缆经济电流截面介于电缆标称截面档次之间, 可视其接近程度, 选择较接近一档截面, 且宜偏小选取。

(2) 基于总拥有费用法的概念, 国际电工委员会 (IEC) 给出了两种电缆截面经济选择的实用方法: 计算电缆标称截面的经济电流范围方法和计算电缆的经济电流密度方法。

1) 经济电流范围。在一定的敷设条件下, 每一线芯导体截面都有一个经济电流范围, IEC 60287-3-2: 1995 提供了这一范围上、下限值的计算式 (略)。

根据计算, 编制了常用电缆的经济电流范围表。编制时做了如下的限定:

电价——我国各地区电价差别很大, 工业与民用企业通常采用两部电价制, 即基本电价加电度电价。所谓基本电价就是根据变压器安装容量, 每月收取 20 ~ 30 元/kVA, 电度电价则根据计量电度收取电费。此外, 各地尚有多项地方附加费。计算时将电度电价分为三档:

0.61 ~ 0.7 元/kWh 代表高电价区域;

0.51 ~ 0.6 元/kWh 代表中电价区域;

0.4 ~ 0.5 元/kWh 代表低电价区域。

最大负荷损耗小时数  $\tau$ ——为符合使用习惯, 表中转化为最大负荷利用小时  $T_{\max}$ 。当  $\cos\varphi = 0.8$  时, 通常:

单班制  $\tau = 1800\text{h}$ , 对应  $T_{\max} = 2000\text{h}$ ;

两班制  $\tau = 2800\text{h}$ , 对应  $T_{\max} = 4000\text{h}$ ;

三班制  $\tau = 4750\text{h}$ , 对应  $T_{\max} = 6000\text{h}$ 。

根据电价、 $T_{\max}$  和计算电流三个参数, 从表 8-1-9、表 8-1-10 中可快捷求取经济截面。

表 8-1-9 10kV 铜芯交联聚乙烯绝缘电缆的经济电流范围

导体 截面 (mm <sup>2</sup> )	经济电流范围上限值 (A) ( $P=0.40 \sim 0.50$ 元/kWh)			经济电流范围上限值 (A) ( $P=0.51 \sim 0.60$ 元/kWh)			经济电流范围上限值 (A) ( $P=0.61 \sim 0.70$ 元/kWh)		
	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)
	2000	4000	6000	2000	4000	6000	2000	4000	6000
4	11.2	8.3	6.5	8.8	6.4	5	8.4	6.1	4.7
6	17.5	13	10.2	13.7	10.1	7.8	13.1	9.6	7.4
10	29.1	21.6	16.9	22.8	16.8	13	21.8	15.9	12.3
16	45.2	33.6	26.2	35.4	26	20.2	33.8	24.7	19.1
25	68.7	51.1	39.9	53.8	39.5	30.7	51.4	37.5	29
35	102.7	76.3	59.6	80.5	59.1	45.9	76.9	56.1	43.4
50	127.1	94.4	73.8	99.6	73.2	56.8	95.1	69.4	53.7
70	178.6	132.7	103.7	139.9	102.8	79.9	133.7	97.5	75.5
95	245.1	182.2	142.3	192.1	141.1	109.6	183.5	133.8	103.6
120	316.2	235	183.6	247.8	182	141.4	236.7	172.6	133.6
150	366	272	212.5	286.8	210.7	163.7	274	199.8	154.6
185	467.5	347.5	271.4	366.4	269.2	209.1	350	255.2	197.6
240	617.2	458.8	358.3	483.7	355.3	276	462	336.9	260.8
300				709.6	521.3	404.9	677.8	494.3	382.6

注 经济电流范围的下限值即小一级截面的上限值 (A); 经济电流范围的上限值即为大一级截面的下限值 (A)。

表 8-1-10 0.6/1.0kV 铜芯低压电缆的经济电流范围

导体截面积 (mm <sup>2</sup> )	经济电流范围上限值 (A) ( $P=0.40 \sim 0.50$ 元/kWh)			经济电流范围上限值 (A) ( $P=0.51 \sim 0.60$ 元/kWh)			经济电流范围上限值 (A) ( $P=0.61 \sim 0.70$ 元/kWh)		
	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)	$T_{\max}$ (h)
	2000	4000	6000	2000	4000	6000	2000	4000	6000
4	10	7.5	5.8	9.4	6.9	5.4	9	6.6	5.1
6	15.7	11.7	9.1	14.7	10.8	8.4	14.1	10.3	7.9
10	26.1	19.4	15.2	24.5	18	14	23.4	17.1	13.2
16	40.5	30.1	23.5	38	27.9	21.7	36.3	26.5	20.5
25	61.6	45.8	35.8	57.8	42.4	33	55.2	40.2	31.2
35	92.1	68.4	53.5	86.4	63.5	49.3	82.5	60.2	46.6
50	114	84.7	66.2	106.9	78.5	61	102.1	74.4	57.6
70	160.2	119	93	150.2	110.4	85.7	143.5	104.6	81
95	219.8	163.4	127.6	206.2	151.5	117.6	196.9	143.6	111.2
120	283.6	210.8	164.6	266	195.4	151.8	254.1	185.3	143.4
150	328.2	244	190.5	307.8	226.2	175.7	294.1	214.4	166
185	419.3	311.7	243.4	393.3	288.9	224.4	375.6	273.9	212
240	553.6	411.5	321.4	519.2	381.4	296.2	495.9	361.7	279.9
300	812.1	603.6	471.5	761.7	559.6	434.6	727.6	530.6	410.7

注 1. 经济电流范围下限值即小一级截面积的上限值 (A); 经济电流范围的上限值即为大一级截面积的下限值。  
2. 表中数据适用于低压 XLPE 和 PVC 绝缘电缆。

2) 经济电流密度曲线。如果电价  $P$  与经济电流范围表中所列值差别较大时, 可借助电缆的经济电流密度曲线 (略) 求取经济截面积。

#### 8.1.3.4 按机械强度校验截面积

- (1) 多芯电力电缆导体最小截面积, 铜导体不宜小于  $2.5\text{mm}^2$ , 铝导体不宜小于  $4\text{mm}^2$ 。
- (2) 交流回路的相导体和直流回路中带电导体的截面积不应小于表 8-1-11 的值。

表 8-1-11 按机械强度允许的最小截面积

敷设方式	绝缘子支撑点间距 $L$ (m)	导体最小截面积 (mm <sup>2</sup> )	
		铜导体	铝导体
裸导体敷设在绝缘子上	—	10	16
绝缘导线敷设在绝缘子上	$L \leq 2$	1.5	10
	$2 < L \leq 6$	2.5	10
	$6 < L \leq 16$	4	10
	$16 < L \leq 25$	6	10
绝缘导线穿导管敷设或在槽盒中敷设	—	1.5	10

#### 8.1.3.5 中性导体 (N) 的截面积选择

(1) 单相两线制电路中, 无论相导体截面积大小, 中性导体截面积都应与相导体截面积相同。

(2) 三相四线制配电系统中, N 导体的允许载流量不应小于线路中最大的不平衡负荷电流及谐波电流之和。

当相导体为铜导体且截面积不大于  $16\text{mm}^2$  或者铝导体且截面积不大于  $25\text{mm}^2$  时, 中性导体应与相线截面积相等。

当相导体截面积为大于  $16\text{mm}^2$  的铜导体或者大于  $25\text{mm}^2$  的铝导体时, 若中性导体电流(包括三及三的奇数倍次谐波)不超过相电流的 15%, 可选择小于相导体截面积, 但不应小于相导体截面积的 50%, 且铜不小于  $16\text{mm}^2$  或铝不小于  $25\text{mm}^2$ 。

### 8.1.3.6 存在谐波电流时导体截面积选择

三相平衡系统中, 影响最显著的是三次谐波电流。三次谐波电流在中性导体中呈现 3 倍叠加。选择导体截面积时, 应计入谐波电流的影响。

(1) 当谐波电流较小时, 仍可按相导体电流选择导体截面积, 但计算电流应按基波电流除以表 8-1-12 中的校正系数。

(2) 当三次谐波电流超过 33% 时, 它所引起的中性导体电流超过基波的相电流。此时应按中性导体电流选择导体截面积。计算电流同样要除以表 8-1-12 中的校正系数。

表 8-1-12 含有谐波电流时的计算电流校正系数

相电流中三次谐波分量 (%)	校正系数		相电流中三次谐波分量 (%)	校正系数	
	按相线电流选截面积	按中性线电流选择截面积		按相线电流选截面积	按中性线电流选择截面积
0~15	1.0		33~45		0.86
15~33	0.86		>45		1.0

注 表中数据仅适用于中性线与相线等截面积的 4 芯或 5 芯电缆及穿管导线, 并以三芯电缆或三线穿管的载流量为基础, 即把整个回路的导体视为一综合发热体来考虑。

(3) 当谐波电流大于 15% 时, 中性导体的截面积不应小于相导体的截面积。例如以气体放电灯为主的照明线路、变频调速设备、计算机及直流电源设备等的供电线路。

(4) 谐波电流校正系数应用举例。

【例 8-1-1】三相平衡系统, 负载电流 39A, 采用 PVC 绝缘 4 芯电缆, 沿墙明敷, 求电缆截面积。

解: 不同谐波电流下的计算电流和选择结果见表 8-1-13。

表 8-1-13 谐波对导线截面积选择影响示例

负载电流状况	选择截面的计算电流 (A)		选择结果	
	按相线电流	按中性线电流	截面积 ( $\text{mm}^2$ )	额定载流量 (A)
无谐波	39		6	41
20% 三次谐波	$\frac{39}{0.86} = 45$		10	57
40% 三次谐波		$\frac{39 \times 0.4 \times 3}{0.86} = 54.4$	10	57
50% 三次谐波		$\frac{39 \times 0.5 \times 3}{1.0} = 58.5$	16	76

注 33% 以下三次谐波电流对相线电流的影响较小可忽略。

## 8.2 电缆线路

### 8.2.1 电缆的路径和布置

GB 50217—2007 规定：

5.1.1 电缆路径选择，应符合下列规定：

- 1 应避免电缆遭受机械性外力、过热、腐蚀等危害。
- 2 满足安全要求条件下，应保证电缆路径最短。
- 3 应便于敷设、维护。
- 4 宜避开将要挖掘施工的地方。

5.1.2 电缆在任何敷设方式及其全部路径条件的上下左右改变部位，均应满足电缆允许弯曲半径要求。

电缆的允许弯曲半径，应符合电缆绝缘及其构造特性要求。

5.1.3 同一通道内电缆数量较多时，若在同一侧的多层支架上敷设，应符合下列规定：

1 应按电压等级由高至低的电力电缆、强电至弱电的控制和信号电缆、通信电缆“由上而下”的顺序排列。

当水平通道中含有35kV以上高压电缆，或为满足引入柜盘的电缆符合允许弯曲半径要求时，宜按“由下而上”的顺序排列。在同一工程中或电缆通道延伸于不同工程的情况，均应按相同的上下排列顺序配置。

2 支架层数受通道空间限制时，35kV及以下的相邻电压级电力电缆可排列于同一层支架上，1kV及以下电力电缆也可与强电控制和信号电缆配置在同一层支架上。

3 同一重要回路的工作与备用电缆实行耐火分隔时，应配置在不同层的支架上。

5.1.4 同一层支架上电缆排列的配置，宜符合下列规定：

1 控制和信号电缆可紧靠或多层叠置。

2 除交流系统用单芯电力电缆的同一回路可采取品字形（三叶形）配置外，对重要的同一回路多根电力电缆，不宜叠置。

3 除交流系统用单芯电缆情况外，电力电缆相互间宜有1倍电缆外径的空隙。

5.1.5 交流系统用单芯电力电缆的相序配置及其相间距离，应同时满足电缆金属护套的正常感应电压不超过允许值，并宜保证按持续工作电流选择电缆截面积小的原则确定。未呈品字形配置的单芯电力电缆，有两回线及以上配置在同一通路时，应计入相互影响。

5.1.6 交流系统用单芯电力电缆与公用通信线路相距较近时，宜维持技术经济上有利的电缆路径，必要时可采取下列抑制感应电势的措施：

1 使电缆支架形成电气通路，且计入其他并行电缆抑制因素的影响。

2 对电缆隧道的钢筋混凝土结构实行钢筋网焊接连通。

3 沿电缆线路适当附加并行的金属屏蔽线或罩盒等。

5.1.7 明敷的电缆不宜平行敷设在热力管道的上部。电缆与管道之间无隔板防护时的允许距离，除城市公共场所应按现行国家标准《城市工程管线综合规划规范》GB 50289 执行外，尚应符合表 5.1.7 的规定。

表 5.1.7 电缆与管道之间无隔板防护时的允许距离

单位: mm

电缆与管道的关系		电力电缆	控制和信号电缆
热力管道	平行	1000	500
	交叉	500	250
其他管道	平行	150	100

5.1.8 需抑制电磁干扰强度的弱电回路控制和信号电缆, 当需要时可采取下列措施:

1 与电力电缆并行敷设时相互间距, 在可能范围内宜远离; 对电压高、电流大的电力电缆, 间距宜更远。

2 敷设于配电装置内的控制和信号电缆, 与耦合电容器或电容式电压互感器、避雷器或接闪杆接地处的距离, 宜在可能范围内远离。

3 沿控制和信号电缆可平行敷设屏蔽线, 也可将电缆敷设于钢制管或盒中。

5.1.9 在隧道、沟、浅槽、竖井、夹层等封闭式电缆通道中, 不得布置热力管道, 严禁有易燃气体或易燃液体的管道穿越。

5.1.10 爆炸性气体危险场所敷设电缆, 应符合下列规定:

1 在可能范围应保证电缆距爆炸释放源较远, 敷设在爆炸危险较小的场所。并应符合下列规定:

1) 易燃气体比空气重时, 电缆应埋地或在较高处架空敷设, 且对非铠装电缆采取穿管或置于托盘、槽盒中等机械性保护。

2) 易燃气体比空气轻时, 电缆应敷设在较低处的管、沟内, 沟内非铠装电缆应埋砂。

2 电缆在空气中沿输送易燃气体的管道敷设时, 应配置在危险程度较低的管道一侧, 并应符合下列规定:

1) 易燃气体比空气重时, 电缆宜配置在管道上方。

2) 易燃气体比空气轻时, 电缆宜配置在管道下方。

3 电缆及其管、沟穿过不同区域之间的墙、板孔洞处, 应采用非燃性材料严密堵塞。

4 电缆线路中不应有接头; 如采用接头时, 必须具有防爆性。

5.1.11 用于下列场所、部位的非铠装电缆, 应采用具有机械强度的管或罩加以保护:

1 非电气人员经常活动场所的地坪以上 2m 内、地中引出的地坪以下 0.3m 深电缆区段。

2 可能有载重设备移经电缆上面的区段。

5.1.12 除架空绝缘型电缆外的非户外型电缆, 户外使用时, 宜采取罩、盖等遮阳措施。

5.1.13 电缆敷设在有周期性振动的场所, 应采取下列措施:

1 在支持电缆部位设置由橡胶等弹性材料制成的衬垫。

2 使电缆敷设成波浪状且留有伸缩节。

5.1.14 在有行人通过的地坪、堤坝、桥面、地下商业设施的路面, 以及通行的隧洞中, 电缆不得敞露敷设于地坪或楼梯走道上。

5.1.15 在工厂的风道、建筑物的风道、煤矿里机械提升的除运输机通行的斜井通风巷道或木支架的竖井井筒中，严禁敷设敞露式电缆。

## 8.2.2 电缆敷设方式的选择

GB 50217—2015 规定：

5.2.1 电缆敷设方式的选择，应视工程条件、环境特点和电缆类型、数量等因素，以及满足运行可靠、便于维护和技术经济合理的原则来选择。

5.2.2 电缆直埋敷设方式的选择，应符合下列规定：

1 同一通路少于6根的35kV及以下电力电缆，在厂区通往远距离辅助设施或城郊等不易有经常性开挖的地段，宜采用直埋；在城镇人行道下较易翻修情况或道路边缘，也可采用直埋。

2 厂区内地下管网较多的地段，可能有熔化金属、高温液体溢出的场所，待开发有较频繁开挖的地方，不宜采用直埋。

3 在化学腐蚀或杂散电流腐蚀的土壤范围内，不得采用直埋。

5.2.3 电缆穿管敷设方式的选择，应符合下列规定：

1 在有爆炸危险场所明敷的电缆，露出地坪上需加以保护的电缆，以及地下电缆与公路、铁道交叉时，应采用穿管。

2 地下电缆通过房屋、广场的区段，以及电缆敷设在规划中作为道路的地段，宜采用穿管。

3 在地下管网较密的工厂区、城市道路狭窄且交通繁忙或道路挖掘困难的通道等电缆数量较多时，可采用穿管。

5.2.4 下列场所宜采用浅槽敷设方式：

1 地下水位较高的地方。

2 通道中电力电缆数量较少，且在不经常有载重车通过的户外配电装置等场所。

5.2.5 电缆沟敷设方式的选择，应符合下列规定：

1 在化学腐蚀液体或高温熔化金属溢流的场所，或在载重车辆频繁经过的地段，不得采用电缆沟。

2 经常有工业水溢流、可燃粉尘弥漫的厂房内，不宜采用电缆沟。

3 在厂区、建筑物内地下电缆数量较多但不需要采用隧道，城镇人行道开挖不便且电缆需分期敷设，同时不属于上述情况时，宜采用电缆沟。

4 有防爆、防火要求的明敷电缆，应采用埋砂敷设的电缆沟。

5.2.6 电缆隧道敷设方式的选择，应符合下列规定：

1 同一通道的地下电缆数量多，电缆沟不足以容纳时应采用隧道。

2 同一通道的地下电缆数量较多，且位于有腐蚀性液体或经常有地面水溢流的场所，或含有电压大于35kV的电缆以及穿越公路、铁道等地段，宜采用隧道。

3 受城镇地下通道条件限制或交通流量较大的道路下，与较多电缆沿同一路径有非高温的水、气和通信电缆管线共同配置时，可在公用性隧道中敷设电缆。

5.2.7 垂直走向的电缆，宜沿墙、柱敷设；当数量较多，或含有35kV以上高压电缆时，应采用竖井。

5.2.8 电缆数量较多的控制室、继电保护室等处,宜在其下部设置电缆夹层。电缆数量较少时,也可采用有活动盖板的电缆层。

5.2.9 在地下水水位较高的地方、化学腐蚀液体溢流的场所、厂房内应采用支持式架空敷设。

建筑物或厂区不宜地下敷设时,可采用架空敷设。

5.2.10 明敷且不宜采用支持式架空敷设的地方,可采用悬挂式架空敷设。

5.2.11 通过河流、水库的电缆,无条件利用桥梁、堤坝敷设时,可采取水下敷设。

## 8.2.3 电缆敷设要求

### 8.2.3.1 地下直埋敷设要求

GB 50217—2007 规定:

5.3.1 直埋敷设电缆的路径选择,应符合下列规定:

- 1 应避免含有酸、碱强腐蚀或杂散电流电化学腐蚀严重影响的地段。
- 2 无防护措施时,宜避开白蚁危害地带、热源影响和易遭外力损伤的区段。

5.3.2 直埋敷设电缆方式,应符合下列规定:

1 电缆应敷设于壕沟里,并应沿电缆全长的上、下紧邻侧铺以厚度不少于100mm的软土或砂层。

2 沿电缆全长应覆盖宽度不小于电缆两侧各50mm的保护板,保护板宜采用混凝土。

3 城镇电缆直埋敷设时,宜在保护板上层铺设醒目标志带。

4 位于城郊或空旷地带,沿电缆路径的直线间隔100m、转弯处或接头部位,应设立明显的方位标志或标桩。

5 当采用电缆穿波纹管敷设于壕沟时,应沿波纹管顶全长浇注厚度不小于100mm的素混凝土,宽度不应小于管外侧50mm,电缆可不含铠装。

5.3.3 直埋敷设于非冻土地区时,电缆埋置深度应符合下列规定:

1 电缆外皮至地下构筑物基础,不得小于0.3m。

2 电缆外皮至地面深度,不得小于0.7m;当位于行车道或耕地下时,应适当加深,且不宜小于1.0m。

5.3.4 直埋敷设于冻土地区时,宜埋入冻土层以下。当无法深埋时可埋设在土壤排水性好的干燥冻土层或回填土中,也可采取其他防止电缆受到损伤的措施。

5.3.5 直埋敷设的电缆,严禁位于地下管道的正上方或正下方。

电缆与电缆、管道、道路、构筑物等之间的容许最小距离,应符合表5.3.5的规定。

表5.3.5 电缆与电缆、管道、道路、构筑物等之间的容许最小距离 单位:m

电缆与邻近设施的关系		平行	交叉
控制电缆之间		—	0.5*
电力电缆之间或与 控制电缆之间	10kV及以下电缆	0.1	0.5**
	超过10kV的电力电缆	0.25**	0.5*

续表

不同部门使用的电缆		0.5 <sup>**</sup>	0.5 <sup>*</sup>
电缆与地下管线	热力管沟	2 <sup>***</sup>	0.5 <sup>*</sup>
	油管或可燃气管道	1	0.5 <sup>*</sup>
	其他管道	0.5	0.5 <sup>*</sup>
电缆与铁路	非直流电气化铁路路轨	3	1
	直流电气化铁路路轨	10	1
电缆与建筑物基础		0.6 <sup>***</sup>	-
电缆与公路边		1 <sup>***</sup>	
电缆与排水沟		1 <sup>***</sup>	
电缆与树木的主干		0.7	
电缆与1kV以下架空线电杆		1 <sup>***</sup>	
电缆与1kV以上架空线杆塔基础		4 <sup>***</sup>	

\* 用隔板分隔或电缆穿管时可为0.25。

\*\* 用隔板分隔或电缆穿管时可为0.1。

\*\*\* 特殊情况可酌减且最多减少一半值。

5.3.6 直埋敷设的电缆与铁路、公路或街道交叉时，应穿于保护管内，保护范围应超出路基、街道路面两边以及排水沟边0.5m以上。

5.3.7 直埋敷设的电缆引入构筑物，在贯穿墙孔处应设置保护管，管口应实施阻水堵塞。

5.3.8 直埋敷设电缆的接头配置，应符合下列规定：

- 1 接头与邻近电缆的净距，不得小于0.25m。
- 2 并列电缆的接头位置宜相互错开，且净距不宜小于0.5m。
- 3 斜坡地形处的接头安置，应呈水平状。
- 4 重要回路的电缆接头，宜在其两侧约1.0m开始的局部段，按留有备用量方式敷设电缆。

5.3.9 直埋敷设电缆采取特殊换土回填时，回填土的土质应对电缆外护层无腐蚀性。

### 8.2.3.2 保护管敷设要求

GB 50217—2007 规定：

5.4.1 电缆保护管内壁应光滑无毛刺。其选择，应满足使用条件所需的机械强度和耐久性，且应符合下列规定：

- 1 需采用穿管抑制对控制电缆的电气干扰时，应采用钢管。
- 2 交流单芯电缆以单根穿管时，不得采用未分隔磁路的钢管。

5.4.2 部分或全部露出在空气中的电缆保护管的选择，应符合下列规定：

1 防火或机械性要求高的场所，宜采用钢质管，并应采取涂漆或镀锌包塑等适合环境耐久要求的防腐处理。

2 满足工程条件自熄性要求时，可采用阻燃型塑料管。部分埋入混凝土中等有耐冲击的使用场所，塑料管应具备相应承压能力，且宜采用可挠性的塑料管。

5.4.3 地中埋设的保护管,应满足埋深下的抗压要求和耐环境腐蚀性的要求。管枕配置跨距,宜按管路底部未均匀夯实时满足抗弯矩条件确定;在通过不均匀沉降的回填土地段或地震活动频发地区,管路纵向连接应采用可挠式管接头。同一通道的电缆数量较多时,宜采用排管。

5.4.4 保护管管径与穿过电缆数量的选择,应符合下列规定:

1 每管宜只穿1根电缆。除发电厂、变电站等重要场所外,对一台电动机所有回路或同一设备的低压电动机所有回路,可在每管合穿不多于3根电力电缆或多根控制电缆。

2 管的内径,不宜小于电缆外径或多根电缆包络外径的1.5倍。排管的管孔内径,不宜小于75mm。

5.4.5 单根保护管使用时,应符合下列规定:

1 每根电缆保护管的弯头不宜超过3个,直角弯不宜超过2个。

2 地中埋管距地面深度不宜小于0.5m;与铁路交叉处距路基不宜小于1.0m;距排水沟底不宜小于0.3m。

3 并列管相互间宜留有不小于20mm的空隙。

5.4.6 使用排管时,应符合下列规定:

1 管孔数宜按发展预留适当备用。

2 导体工作温度相差大的电缆,宜分别配置于适当间距的不同排管组。

3 管路顶部土壤覆盖厚度不宜小于0.5m。

4 管路应置于经整平夯实土层且有足以保持连续平直的垫块上;纵向排水坡度不宜小于0.2%。

5 管路纵向连接处的弯曲度,应符合牵引电缆时不致损伤的要求。

6 管孔端口应采取防止损伤电缆的处理措施。

5.4.7 较长电缆管路中的下列部位,应设置工作井:

1 电缆牵引张力限制的间距处。电缆穿管敷设时容许最大管长的计算方法,应符合GB 50217—2007附录H的规定。

2 电缆分支、接头处。

3 管路方向较大改变或电缆从排管转入直埋处。

4 管路坡度较大且需防止电缆滑落的必要加强固定处。

### 8.2.3.3 电缆构筑物中敷设要求

GB 50217—2007 规定:

5.5.1 电缆构筑物的尺寸应按容纳的全部电缆确定,电缆的配置应无碍安全运行,满足敷设施工作业与维护巡视活动所需空间,并应符合下列规定:

1 隧道内通道净高不宜小于1900mm;在较短的隧道中与其他沟道交叉的局部段,净高可降低,但不应小于1400mm。

2 封闭式工作井的净高不宜小于1900mm。

3 电缆夹层室的净高不得小于2000mm,但不宜大于3000mm。民用建筑的电缆夹层净高可稍降低,但在电缆配置上供人员活动的短距离空间不得小于1400mm。

## 4 电缆沟、隧道或工作井内通道的净宽，不宜小于表 5.5.1 所列值。

表 5.5.1 电缆沟、隧道或工作井内通道的净宽最小值 单位：mm

电缆支架配置方式	具有下列沟深的电缆沟			开挖式隧道或 封闭式工作井	非开挖式隧道
	<600	600~1000	>1000		
两侧	300*	500	700	1000	800
单侧	300*	450	600	900	800

\* 浅沟内可不设置支架，无需有通道。

5.5.2 电缆支架、梯架或托盘的层间距离，应满足能方便地敷设电缆及其固定、安置接头的要求，且在多根电缆同置于一层情况下，可更换或增设任一根电缆及其接头。

在采用电缆截面或接头外径尚非很大的情况下，符合上述要求的电缆支架、梯架或托盘的层间距离的最小值，可取表 5.5.2 所列数值。

表 5.5.2 电缆支架、梯架或托盘的层间距离的最小值 单位：mm

电缆类型、敷设特征		普通支架、吊架	桥架
控制电缆明敷		120	200
电力 电缆 明敷	<6kV	150	250
	6~10kV 交联聚乙烯	200	300
	35kV 单芯	250	300
	35kV 三芯	300	350
	110~220kV，每层多于1根		
电缆敷设于槽盒中		$h+80$	$h+100$

注：h 为槽盒外壳高度。

5.5.3 水平敷设时电缆支架的最上层、最下层布置尺寸，应符合下列规定：

1 最上层支架距构筑物顶板或梁底的净距允许最小值，应满足电缆引接至上侧柜盘时的允许弯曲半径要求，且不宜小于表 5.5.2 所列数再加 80mm~150mm 的和值。

2 最上层支架距其他设备的净距，不应小于 300mm；当无法满足时应设置防护板。

3 最下层支架距地坪、沟道底部的最小净距，不宜小于表 5.5.3 所列值。

表 5.5.3 最下层支架距地坪、沟道底部的最小净距 单位：mm

电缆敷设场所及其特征		垂直净距
电缆沟		50
电缆隧道		100
电缆夹层	非通道处	200
	至少在一侧不小于 800mm 宽通道处	1400
公共隧道中电缆支架无围栏防护		1500
厂房内		2000
厂房外	无车辆通过	2500
	有车辆通过	4500

5.5.4 电缆构筑物应满足防止外部进水、渗水的要求,且应符合下列规定:

1 对电缆沟或隧道底部低于地下水位、电缆沟与工业水管沟并行邻近、隧道与工业水管沟交叉时,宜加强电缆构筑物防水处理。

2 电缆沟与工业水管沟交叉时,电缆沟宜位于工业水管沟的上方。

3 在不影响厂区排水情况下,厂区户外电缆沟的沟壁宜稍高出地坪。

5.5.5 电缆构筑物应实现排水畅通,且符合下列规定:

1 电缆沟、隧道的纵向排水坡度,不得小于0.5%。

2 沿排水方向适当距离宜设置集水井及其泄水系统,必要时应实施机械排水。

3 隧道底部沿纵向宜设置泄水边沟。

5.5.6 电缆沟沟壁、盖板及其材质构成,应满足承受荷载和适合环境耐久性的要求。

可开启的沟盖板的单块质量,不宜超过50kg。

5.5.7 电缆隧道、封闭式工作井应设置安全孔,安全孔的设置应符合下列规定:

1 沿隧道纵长不应少于2个。在工业厂区或变电所内隧道的安全孔间距不宜大于75m。在城镇公共区域开挖式隧道的安全孔间距不宜大于200m,非开挖式隧道的安全孔间距可适当增大,且宜根据隧道埋深和结合电缆敷设、通风、消防等综合确定。

隧道首末端无安全门时,宜在不大于5m处设置安全孔。

2 对封闭式工作井,应在顶盖板处设置2个安全孔。位于公共区域的工作井,安全孔井盖的设置宜使非专业人员难以开启。

3 安全孔至少应有一处适合安装机具和安置设备的搬运,供人出入的安全孔直径不得小于700mm。

4 安全孔内应设置爬梯,通向安全门应设置步道或楼梯等设施。

5 在公共区域露出地面的安全孔设置部位,宜避开公路、轻轨,其外观宜与周围环境景观相协调。

5.5.8 高落差地段的电缆隧道中,通道不宜呈阶梯状,且纵向坡度不宜大于 $15^\circ$ ,电缆接头不宜设置在倾斜位置上。

5.5.9 电缆隧道宜采取自然通风。当有较多电缆导体工作温度持续达到 $70^\circ\text{C}$ 以上或其他影响环境温度显著升高时,可装设机械通风,但机械通风装置应在一旦出现火灾时能可靠地自动关闭。长距离的隧道,宜适当分区段实行相互独立的通风。

5.5.10 非拆卸式电缆竖井中,应有人员活动的空间,且应符合下列规定:

1 未超过5m高时,可设置爬梯,且活动空间不宜小于 $800\text{mm}\times 800\text{mm}$ 。

2 超过5m高时,宜设置楼梯,且每隔3m宜设置楼梯平台。

3 超过20m高且电缆数量多或重要性要求较高时,可设置简易式电梯。

#### 8.2.3.4 公用设施中敷设要求

GB 50217—2007 规定:

5.6.1 通过木质结构的桥梁、码头、栈道等公用构筑物,用于重要的木质建筑设施的非矿物绝缘电缆时,应敷设在不可燃性的保护管或槽盒中。

5.6.2 交通桥梁上、隧洞中或地下商场等公共设施的电缆,应具有防止电缆着火危害、避免外力损伤的可靠措施,并应符合下列规定:

- 1 电缆不得明敷在通行的路面上。
  - 2 自容式充油电缆在沟槽内敷设时应埋砂。在保护管内敷设时，保护管应采用非导磁的不燃性材质的刚性保护管。
  - 3 非矿物绝缘电缆用在无封闭式通道时，宜敷设在不可燃性的保护管或槽盒中。
- 5.6.3 公路、铁道桥梁上的电缆，应采取防止振动、热伸缩以及风力影响下金属套因长期应力疲劳导致断裂的措施，并应符合下列规定：
- 1 桥墩两端和伸缩缝处，电缆应充分松弛。当桥梁中有挠角部位时，宜设置电缆迂回补偿装置。
  - 2 35kV 以上大截面积电缆宜采用蛇形敷设。
  - 3 经常受到振动的直线敷设电缆，应设置橡皮、砂袋等弹性衬垫。

### 8.2.3.5 水下敷设要求

GB 50217—2007 规定：

5.7.1 水下电缆路径的选择，应满足电缆不易受机械性损伤、能实施可靠防护、敷设作业方便、经济合理等要求，且应符合下列规定：

- 1 电缆宜敷设在河床稳定、流速较缓、岸边不易被冲刷，海底无石山或沉船等障碍、少有沉锚和拖网渔船活动的水域。

- 2 电缆不宜敷设在码头、渡口、水工构筑物附近且不宜敷设在疏浚挖泥区和规划筑港地带。

5.7.2 水下电缆不得悬空于水中，应埋置于水底。在通航水道等需防范外部机械力损伤的水域，电缆应埋置于水底适当深度的沟槽中，并应加以稳固覆盖保护；浅水区的埋深不宜小于 0.5m，深水航道的埋深不宜小于 2m。

5.7.3 水下电缆严禁交叉、重叠。相邻的电缆应保持足够的安全间距，且应符合下列规定：

- 1 主航道内，电缆间距不宜小于平均最大水深的 1.2 倍。引至岸边间距可适当缩小。

- 2 在非通航的流速未超过 1m/s 的小河中，同回路单芯电缆间距不得小于 0.5m，不同回路电缆间距不得小于 5m。

- 3 除上述情况外，应按水的流速和电缆埋深等因素确定。

5.7.4 水下的电缆与工业管道之间的水平距离，不宜小于 50m；受条件限制时，不得小于 15m。

5.7.5 水下电缆引至岸上的区段，应采取适合敷设条件的防护措施，且应符合下列规定：

- 1 岸边稳定时，应采用保护管、沟槽敷设电缆，必要时可设置工作井连接，管沟下端宜置于最低水位下不小于 1m 处。

- 2 岸边未稳定时，宜采取迂回形式敷设以预留适当备用长度的电缆。

5.7.6 水下电缆的两岸，应设置醒目的警告标志。

### 8.2.3.6 电缆明敷要求

GB 50217—2014 规定：

6.1.1 电缆明敷时，应沿全长采用电缆支架、桥架、挂钩或吊绳等支持与固定。最大跨距应符合下列规定：

- 1 应满足支架件的承载能力和无损电缆的外护层及其导体的要求。
  - 2 应保证电缆配置整齐。
  - 3 应适应工程条件下的布置要求。
- 6.1.2 直接支持电缆的普通支架（臂式支架）、吊架的允许跨距，应符合表 6.1.2 所列值。

表 6.1.2 电缆的普通支架（臂式支架）、吊架的允许跨距 单位：mm

电缆特征	敷设方式	
	水平	垂直
未含金属套、铠装的全塑小截面积电缆	400*	1000
除上述情况外的中、低压电缆	800	1500
电压超过 35kV 的电缆	1500	3000

\* 维持电缆较平直时，该值可增加 1 倍。

6.1.3 35kV 及以下电缆明敷时，应设置适当固定的部位，并应符合下列规定：

- 1 水平敷设，应设置在电缆线路首、末端和转弯处以及接头的两侧，且宜在直线段每隔不少于 100m 处。
- 2 垂直敷设，应设置在上、下端和中间适当数量位置处。
- 3 斜坡敷设，应遵照 1、2 款因地制宜。
- 4 当电缆间需保持一定间隙时，宜设置在每隔约 10m 处。
- 5 交流单芯电力电缆，还应满足按短路电动力确定所需予以固定的间距。

6.1.4 电压超过 35kV 的电缆明敷时，加设固定的部位除应符合 6.1.3 条的规定外，尚应符合下列规定：

- 1 在终端、接头或转弯处紧邻部位的电缆上，应设置不少于 1 处的刚性固定。
- 2 在垂直或斜坡的高位侧，宜设置不少于 2 处的刚性固定；采用钢丝铠装电缆时，还宜使铠装钢丝能夹持住并承受电缆自重引起的拉力。
- 3 电缆蛇形敷设的每一节距部位，宜采取挠性固定。蛇形转换成直线敷设的过渡部位，宜采取刚性固定。

6.1.5 在 35kV 以上高压电缆的终端、接头与电缆连接部位，宜设置伸缩节。伸缩节应大于电缆容许弯曲半径，并应满足金属护层的应变不超出容许值。未设置伸缩节的接头两侧，应采取刚性固定或在适当长度内电缆实施蛇形敷设。

6.1.10 交流单芯电力电缆固定部件的机械强度，应验算短路电动力条件，并宜满足下式要求：

$$F = \frac{2.05i^2 Lk}{D} \times 10^{-7} \quad (6.1.10-1)$$

对于矩形断面夹具：

$$F = bh\sigma \quad (6.1.10-2)$$

以上式中：

$F$ —夹具、扎带等固定部件的抗张强度，N；

$i$ —通过电缆回路的最大短路电流，A；

$D$ —电缆相间中心距离，m；

- $L$ —电缆夹具、扎带等的相邻跨距，m；
- $k$ —安全系数，取大于2；
- $b$ —夹具厚度，mm；
- $h$ —夹具宽度，mm；
- $\sigma$ —夹具材料允许拉力，Pa；对铝合金夹具，取  $80 \times 10^4$  Pa。

### 8.2.3.7 电缆支架和桥架

GB 50217—2014 规定：

6.2.1 电缆支架和桥架，应符合下列规定：

- 1 表面应光滑无毛刺。
- 2 应适应使用环境的耐久稳固。
- 3 应满足所需的承载能力。
- 4 应符合工程防火要求。

6.2.2 电缆支架除支持工作电流大于1500A的交流系统单芯电缆外，宜选用钢制。在强腐蚀环境，选用其他材料电缆支架、桥架，应符合下列规定：

- 1 电缆沟中普通支架（臂式支架），可选用耐腐蚀的刚性材料制电缆桥架。
- 2 电缆桥架组成的梯架、托盘，可选用满足工程条件阻燃性的玻璃钢制电缆桥架。
- 3 技术经济综合较优时，可选用铝合金制电缆桥架。

6.2.3 金属制的电缆支架应有防腐蚀处理，且应符合下列规定：

1 大容量发电厂等密集配置场所或重要回路的钢制电缆桥架，应从一次性防腐处理具有的耐久性，按工程环境和耐久要求，选用合适的防腐处理方式。

在强腐蚀环境，宜采用热浸锌等耐久性较高的防腐处理。

2 型钢制臂式支架，轻腐蚀环境或非重要性回路的电缆桥架，可用涂漆处理。

6.2.4 电缆支架的强度，应满足电缆及其附件荷重和安装维护的受力要求，且应符合下列规定：

- 1 有可能短暂上人时，计入900N的附加集中荷载。
- 2 机械化施工时，计入纵向拉力、横向推力和滑轮质量等影响。
- 3 在户外时，计入可能有覆冰、雪和大风的附加荷载。

6.2.5 电缆桥架的组成结构，应满足强度、刚度及稳定性要求，且应符合下列规定：

1 桥架的承载能力，不得超过使桥架最初产生永久变形时的最大荷载除以安全系数为1.5的数值。

2 梯架、托盘在允许均布承载作用下的相对挠度值，钢制不宜大于1/200；铝合金制不宜大于1/300。

3 钢制托臂在允许承载下的偏斜与臂长比值，不宜大于1/100。

6.2.6 电缆支架型式的选择，应符合下列规定：

1 明敷的全塑电缆数量较多，或电缆跨越距离较大、高压电缆蛇形安置方式时，宜选用电缆桥架。

2 除上述情况外，可选用普通支架、吊架。

6.2.7 电缆桥架型式的选择，应符合下列规定：

- 1 需屏蔽外部的电气干扰时, 应选用无孔金属托盘加实体盖板。
  - 2 在有易燃粉尘场所, 宜选用梯架, 最上一层桥架应设置实体盖板。
  - 3 高温、腐蚀性液体或油的溅落等需防护场所, 宜选用托盘, 最上一层桥架应设置实体盖板。
  - 4 需因地制宜组装时, 可选用组装式托盘。
  - 5 除上述情况外, 宜选用梯架。
- 6.2.8 梯架、托盘的直线段超过下列长度时, 应留有不少于20mm的伸缩缝:
- 1 钢制30m。
  - 2 铝合金或玻璃钢制15m。
- 6.2.9 金属制桥架系统, 应设置可靠的电气连接并接地。采用玻璃钢桥架时, 应沿桥架全长另敷设专用接地线。
- 6.2.10 振动场所的桥架系统, 包括接地部位的螺栓连接处, 应装置弹簧垫圈。
- 6.2.11 要求防火的金属桥架, 除应符合本规范第7章的规定外, 尚应对金属构件外表面施加防火涂层, 其防火涂层应符合现行国家标准《电缆防火涂料通用技术条件》GA 181的有关规定。

## 8.2.4 电缆防火与阻止延燃

### 8.2.4.1 电缆防火与阻燃措施

GB 50217—2014 规定:

7.0.1 对电缆可能着火蔓延导致严重事故的回路、易受外部影响波及火灾的电缆密集场所, 应设置适当的阻燃分隔, 并按工程重要性、火灾几率及其特点和经济合理等因素, 采取下列安全措施:

- 1 实施阻燃防护或阻止延燃。
- 2 选用具有阻燃性的电缆。
- 3 实施耐火防护或选用具有耐火性的电缆。
- 4 实施防火构造。
- 5 增设自动报警与专用消防装置。

7.0.2 阻燃分隔方式的选择, 应符合下列规定:

1 电缆构筑物中电缆引至电气柜、盘或控制屏、台的开孔部位, 电缆贯穿隔墙、楼板的孔洞处, 工作井中电缆管孔等均应实施阻燃封堵。

2 在隧道或重要回路的电缆沟中的下列部位, 宜设置阻火墙(防火墙)。

- 1) 公用主沟道的分支处。
- 2) 多段配电装置对应的沟道适当分段处。
- 3) 长距离沟道中相隔约200m或通风区段处。
- 4) 至控制室或配电装置的沟道入口、厂区围墙处。

3 在竖井中, 宜每隔7m设置阻火隔层。

7.0.3 实施阻燃分隔的技术特性, 应符合下列规定:

1 阻燃封堵、阻火隔层的设置, 应按电缆贯穿孔洞状况和条件, 采用相适合的防火封堵材料或防火封堵组件。用于电力电缆时, 宜使对载流量影响较小; 用在楼板竖井

孔处时，应能承受巡视人员的荷载。阻火封堵材料的使用，对电缆不得有腐蚀和损害。

2 阻火墙的构成，应采用适合电缆线路条件的阻火模块、防火封堵板材、阻火包等软质材料，且应在可能经受积水浸泡或鼠害作用下具有稳固性。

3 除通向主控室、厂区围墙或长距离隧道中按通风区段分隔的阻火墙部位应设置防火门外，其他情况下，有防止窜燃措施时可不设防火门。防窜燃方式，可在阻火墙紧靠两侧不少于1m区段所有电缆上施加防火涂料、包带或设置挡火板等。

4 阻火墙、阻火隔层和阻火封堵的构成方式，应按等效工程条件特征的标准试验，满足耐火极限不低于1h的耐火完整性、隔热性要求确定。

当阻火分隔的构成方式不为该材料标准试验的试件装配特征涵盖时，应进行专门的测试论证或采取补加措施；阻火分隔厚度不足时，可沿封堵侧紧靠的约1m区段电缆上施加防火涂料或包带。

7.0.4 非阻燃性电缆用于明敷时，应符合下列规定：

1 在易受外因波及而着火的场所，宜对该范围内的电缆实施阻燃防护；对重要电缆回路，可在适当部位设置阻火段以实施阻止延燃。

阻燃防护或阻火段，可采取在电缆上施加防火涂料、包带；当电缆数量较多时，也可采用阻燃、耐火槽盒或阻火包等。

2 在接头两侧电缆各约3m区段和该范围内邻近并行敷设的其他电缆上，宜采用防火包带实施阻止延燃。

7.0.5 在火灾几率较高、灾害影响较大的场所，明敷方式下电缆的选择，应符合下列规定：

1 火力发电厂主厂房、输煤系统、燃油系统及其他易燃易爆场所，宜选用阻燃电缆。

2 地下的客运或商业设施等人流密集环境中需增强防火安全的回路，宜选用具有低烟、低毒的阻燃电缆。

3 其他重要的工业与公共设施供电回路，当需要增强防火安全时，也可选用具有阻燃性或低烟、低毒的阻燃电缆。

7.0.7 在外部火势作用一定时间内需维持通电的下列场所或回路，明敷的电缆应实施耐火防护或选用具有耐火性的电缆。

1 消防、报警、应急照明、断路器操作直流电源和发电机组紧急停机的保安电源等重要回路。

2 计算机监控、双重化继电保护、保安电源或应急电源等双回路合用同一通道未相互隔离时的其中一个回路。

3 油罐区、钢铁厂中可能有熔化金属溅落等易燃场所。

4 火力发电厂水泵房、化学水处理、输煤系统、油泵房等重要电源的双回路供电回路合用同一电缆通道而未相互隔离时的其中一个回路。

5 其他重要公共建筑设施等需有耐火要求的回路。

7.0.8 明敷电缆实施耐火防护方式，应符合下列规定：

1 电缆数量较少时，可采用防火涂料、包带加于电缆上或把电缆穿于耐火管中。

2 同一通道中电缆较多时，宜敷设于耐火槽盒内，且对电力电缆宜采用透气型式，

在无易燃粉尘的环境可采用半封闭式，敷设在桥架上的电缆防护区段不长时，也可采用阻火包。

7.0.13 在安全性要求较高的电缆密集场所或封闭通道中，宜配备适于环境的可靠动作的火灾自动探测报警装置。

明敷充油电缆的供油系统，宜设置反映喷油状态的火灾自动报警和闭锁装置。

7.0.14 在地下公共设施的电缆密集部位、多回充油电缆的终端设置处等安全性要求较高的场所，可装设水喷雾灭火等专用消防设施。

#### 8.2.4.2 阻燃电缆的类别

阻燃电缆是指在规定的试验条件下，试样燃烧，撤去火源后，火焰在试样上的蔓延仅在限定范围内且自行熄灭的电缆，即具有阻止或延缓火焰发生或蔓延的能力。

阻燃的目的是阻止火灾通过电缆蔓延，而非保护电缆本身。阻燃性能取决于护套材料。

(1) 阻燃电缆的性能主要用氧指数和发烟性两项指标来评定。由于空气中氧气占 21%，因此对于氧指数超过 21 的材料在空气中会自熄；材料的氧指数越高，则表示它的阻燃性能越好。

电线电缆的发烟性能可以用透光率来表示，透光率越小表示材料的燃烧发烟量越大。大量的烟雾伴随着有害的 HCl 气体，妨碍救火工作，危及人体及设备。

(2) 根据 GB/T 19666—2005《阻燃和耐火电线电缆通则》及 IEC 60332-3-25:2009，采用 GB/T 18380.3—2008《电线电缆燃烧试验方法 成束电线电缆燃烧试验方法》的试验条件，阻燃电线电缆分为 A、B、C、D 四个类别，见表 8-2-1。

电线电缆按发烟透光率  $\geq 60\%$  判定低烟性能，见表 8-2-2。

表 8-2-1 阻燃电缆分级表（成束阻燃性能要求）

类别	供火温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	供火时间 (min)	成束电缆的非金属 材料体积 (L/m)	焦化高度 (m)	自熄时间 (h)
A	$\geq 815$	40	$\geq 7$	$\leq 2.5$	$\leq 1$
B			$\geq 3.5$		
C		20	$\geq 1.5$		
D			$\geq 0.5$		

注 D 级标准仅适用于外径不大于 12mm 的绝缘电线。

表 8-2-2 电线电缆发烟量及烟气毒性分级表

代号	试样外径 $d$ (mm)	规定试样数量 (束)	最小透光率
D	$d > 40$	1	60%
	$20 < d \leq 40$	2	
	$10 < d \leq 20$	3	
	$5 < d \leq 10$	$45/d$	
	$2 < d \leq 5$	$45/3d$	

注 1. 试验方法见 GB/T 17651.2—1998《电缆或光缆在特定条件下燃烧的烟密度测定 第 2 部分：试验步骤和要求》。

2. 试样由 7 根绞合成束。

阻燃电缆燃烧时烟气特性又可分为三大类：

1) 一般阻燃电缆：成品电缆燃烧试验性能达到表 8-2-1 所列标准，而对燃烧时产生的 HCl 气体腐蚀性 & 发烟量不做要求。

2) 低烟低卤阻燃电缆：除了符合表 8-2-2 的分级标准外，电缆燃烧时要求气体酸度较低，测定酸气逸出量在 5% ~ 10% 的范围，酸气 pH 小于 4.3，电导率不大于 20 $\mu$ S/mm，烟气透光率大于 30%，简称低卤电缆。

3) 无卤阻燃电缆：电缆在燃烧时不发生卤素气体，酸气含量在 0% ~ 5% 的范围，酸气 pH 不小于 4.3，电导率不大于 10 $\mu$ S/mm，烟气透光率大于 60%，简称无卤电缆（试验方法见 GB/T 17650.2—1998）。

一般阻燃电缆含卤素，虽阻燃性能好又价格低，但燃烧时烟雾浓，酸雾及毒气大。

无卤阻燃电缆烟少、毒低，无酸雾，但阻燃性能较差。无卤电缆大多只能做到 C 级，而价格比一般阻燃电缆贵很多；若要达到 B 级，价格更贵。为提高材料氧指数和降低发烟量，必须在绝缘材料中添加大量的金属水化物等填充料，致使材料的电气性能、机械强度及耐水性能降低，一般只能做到 0.6/1kV 电压等级。

(3) 高阻燃等级、低烟低毒及较高的电压等级的阻燃电缆：

1) 隔氧层电缆：在原电缆绝缘和外护套之间，填充一层无嗅无毒无卤的 Al(OH)。当电缆遇火时，Al(OH) 可析出大量结晶水，降低火焰温度，而且变成不熔不燃的硬壳，阻断氧气供应。PVC 及 XLPE 绝缘的隔氧层电缆阻燃等级均可达 A 级，烟量少于同类绝缘低烟低卤电缆。XLPE 绝缘的隔氧层电缆，耐压可达 35kV 级，而价格比同类绝缘的普通电缆高得不多。

2) 采用聚烯烃绝缘材料、阻燃玻璃纤维填充料、辐照交联聚烯烃护套的低烟无卤电缆：其燃烧试验的碳化高度仅 0.95m，大大低于 A 级阻燃  $\leq 2.5$ m 的要求，而且发烟量也低于 PVC 及 XLPE 绝缘的隔氧层电缆，但它的价格较贵。

3) 超 A 类品质的阻燃电缆：采用隔氧层及隔离套结构，燃烧试验允许非金属含量可达 28L/m，炭化高度小于 1m。电压可达 35kV 级，其外径仅比普通电缆大 2 ~ 4mm，质量大 8%。此外，增加高密度交联聚乙烯护套，克服了低烟无卤电缆耐水性差的弊病。

(4) 根据 GB 31247—2014《电缆及光缆燃烧性能分级》，阻燃级别由原来的 A、B、C、D 级，改划分为 A、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub> 级。A 级为不燃型，也就是外护套为金属护套的电缆，如 MI 电缆等；B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 级为应用量最大的阻燃电缆；B<sub>3</sub> 为不阻燃型，如 VV、YJV 等。

新标准主要通过电缆在受火条件下的火焰蔓延、热释放和产烟特性进行主分级，见表 8-2-3。电缆及光缆燃烧性能等级为 B<sub>1</sub> 级和 B<sub>2</sub> 级的，还应给出附加分级，包括燃烧滴落物/微粒等级、烟气毒性等级和腐蚀性等级，详见表 8-2-4。

表 8-2-3 电缆及光缆燃烧性能主分级

燃烧性能等级	试验方法	分级判据
A	GB/T 14402—2007《建筑材料及制品的燃烧性能 燃烧热值的测定》	总热值 $PCS \leq 2.0 \text{ MJ/kg}^*$

续表

燃烧性能等级	试验方法	分级判据
B <sub>1</sub>	GB/T 31248—2014《电缆或光缆在受火条件下火焰蔓延、热释放和产烟特性的试验方法》(20.5kW 火源)	火焰蔓延 $FS \leq 1.5\text{m}$ ; 热释放速率峰值 $HRR$ 峰值 $\leq 30\text{kW}$ ; 受火 1200s 内的热释放总量 $THR_{1200} \leq 15\text{MJ}$ ; 燃烧增长速率指数 $FIGRA \leq 150\text{W/s}$ ; 产烟速率峰值 $SPR$ 峰值 $\leq 0.25\text{m}^2/\text{s}$ ; 受火 1200s 内的产烟总量 $TSP_{1200} \leq 50\text{m}^2$
	GB/T 17651.2	烟密度 (最小透光率) $I_1 \geq 60\%$
	GB/T 18380.12—2008《电缆和光缆在火焰条件下的燃烧试验 第 12 部分: 单根绝缘电缆火焰垂直蔓延试验 1kW 预混合型火焰试验方法》	垂直火焰蔓延 $H \leq 425\text{mm}$
B <sub>2</sub>	GB/T 31248—2014 (20.5 kW 火源)	火焰蔓延 $FS \leq 2.5\text{m}$ ; 热释放速率峰值 $HRR$ 峰值 $\leq 60\text{kW}$ ; 受火 1200s 内的热释放总量 $THR_{1200} \leq 30\text{MJ}$ ; 燃烧增长速率指数 $FIGRA \leq 300\text{W/s}$ ; 产烟速率峰值 $SPR$ 峰值 $\leq 1.5\text{m}^2/\text{s}$ ; 受火 1200s 内的产烟总量 $TSP_{1200} \leq 400\text{m}^2$
	GB/T 17651.2	烟密度 (最小透光率) $I_1 \geq 20\%$
	GB/T 18380.12—2008	垂直火焰蔓延 $H \leq 425\text{mm}$
B <sub>3</sub>	*	未达到 B <sub>2</sub> 级

\* 对整体制品及其任何一种组件 (金属材料除外) 应分别进行试验, 测得的整体制品的总热值以及各组件的总热值均满足分级判据时, 方可判定为 A 级。

表 8-2-4 电缆及光缆燃烧性能附加分级

等级	试验方法	分级判据
燃烧滴落物/微粒等级		
d <sub>0</sub>	GB/T 31248—2014	1200s 内无燃烧滴落物/微粒
d <sub>1</sub>		1200s 内燃烧滴落物/微粒持续时间不超过 10s
d <sub>2</sub>		未达到 d <sub>1</sub> 级
烟气毒性等级		
t <sub>0</sub>	GB/T 20285—2006	达到 ZA <sub>2</sub>
t <sub>1</sub>		达到 ZA <sub>3</sub>
t <sub>2</sub>		未达到 t <sub>1</sub> 级

续表

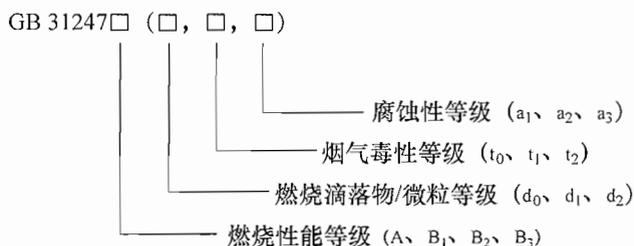
等级	试验方法	分级判据
腐蚀性等级		
a <sub>1</sub>	GB/T 17650.2	电导率不大于 2.5 μS/mm 且 pH 不小于 4.3
a <sub>2</sub>		电导率不大于 10 μS/mm 且 pH 不小于 4.3
a <sub>3</sub>		未达到 a <sub>2</sub> 级

(5) 阻燃电缆的型号标注：

1) GB/T 19666—2005 的表示方法：阻燃电缆在原型号前增加阻燃代号：Z×为有卤阻燃；WDZ×为无卤低烟阻燃；GZ×为隔氧层一般阻燃；GWL×为隔氧层低烟无卤阻燃。其中“×”为阻燃类别 A 或 B 或 C 或 D。

例如：WDZA-YJV-8.7/10 3×240，表示无卤低烟、阻燃 A 级、XLPE 绝缘、PVC 护套、8.7/10kV、3×240mm<sup>2</sup> 电缆。

2) GB 31247—2014 的表示方法如下：



例如：GB 31247 B<sub>1</sub> (d<sub>0</sub>, t<sub>1</sub>, a<sub>1</sub>)，表示电缆的燃烧性能等级为 B<sub>1</sub> 级，燃烧滴落物/微粒等级为 d<sub>0</sub> 级，烟气毒性等级为 t<sub>1</sub> 级，腐蚀性等级为 a<sub>1</sub> 级。

#### 8.2.4.3 阻燃电缆选择要点

(1) 有机材料的阻燃概念是相对的，数量较少时呈阻燃特性，而数量较多时有可能呈不阻燃特性。因此，电线电缆成束敷设时，应采用阻燃型电线电缆。重要或人流密集的民用建筑应核算电线电缆的非金属材料体积总量，并按表 8-2-1 确定阻燃等级。

当电缆在托盘内敷设时，应考虑将来增加电缆时，也能符合阻燃等级，宜按近期敷设电缆的非金属材料体积预留 20% 余量。电线在槽盒内敷设时，也宜按此原则来选择阻燃等级。

(2) 阻燃电缆必须注明阻燃等级。不注明等级者，将默认为 C 级。

(3) 在同一通道中敷设的电缆，应选用同一阻燃等级的电缆。非同一设备的电力与控制电缆若在同一通道时，宜互相隔离。

(4) 直接埋地电缆、直接埋入建筑孔洞或砌体的电缆、穿管敷设的电线电缆，可选用普型电线电缆。

由于低烟无卤电缆的外护套防水性能差，不适合埋地敷设。又因护套的机械强度低，若穿管敷设宜采取加大管径等防划伤措施。

(5) 敷设在有盖槽盒、有盖板的电缆沟中的电缆,若已采取封堵、阻燃、隔离等防止延燃措施,可降低一级阻燃要求。

(6) 选用低烟无卤型电缆时,应注意到这种电缆阻燃等级一般仅为 C 级。若要较高阻燃等级应选用隔氧层电缆或辐照交联聚烯烃绝缘、聚烯烃护套的特种电缆。

(7) 由于 A 级阻燃电缆价格贵,宜在敷设路径中设法减少电缆束的非金属含量。例如电缆选择不同路径或减少同一路径中电缆数量等。变电站出线较多时,宜分别敷设在不同电缆托盘内,以降低电缆阻燃等级。

#### 8.2.4.4 耐火电缆的类型

耐火电缆是指在规定的试验条件下,在火焰中被烧一定时间内能保持正常运行特性的电缆。

(1) 根据 GB/T 19666—2005《阻燃和耐火电线电缆通则》,耐火电缆按耐火特性分为 N、NJ、NS 三种,见表 8-2-5。

表 8-2-5 耐火电缆性能表

代号	名称	供电时间 + 冷却时间 (min)	冲击	喷水	合格指标
N	耐火	90 + 15	—	—	2A 熔丝不熔断,指示灯不熄
NJ	耐火 + 冲击		√	—	
NS	耐火 + 喷水		—	√	

- 注 1. 试验方法见 GB/T 19216.21—2003 ~ GB/T 19216.23—2003。  
2. 试验电压: 0.6/1kV 及以下电缆取额定电压; 数据及信号电缆取相对地电压 110V ± 10V。  
3. 供电温度均为 750℃。

(2) 耐火电缆按绝缘材质可分为有机型和无机型两种。

1) 有机型耐火电缆主要是采用耐高温 800℃ 的云母带以 50% 重叠搭盖率包覆两层作为耐火层。外部采用聚氯乙烯或交联聚乙烯为绝缘,若同时要求阻燃,只要将绝缘材料选用阻燃型材料即可。它之所以具有“耐火”特性完全依赖于云母层的保护。采用阻燃耐火型电缆,可以在外部火源撤除后迅速自熄,使延燃高度不超过 2.5m。有机类耐火电缆一般只能做到 N 类。

2) 无机型耐火电缆又称为矿物绝缘电缆,国外称为 MI 电缆。可分为刚性和柔性两种。

矿物绝缘电缆尚无国家标准。除了满足耐火标准外,应对抗喷淋和抗机械撞击性能提出要求。为此,可参考英国标准 BS-6387,参见表 8-2-6。

表 8-2-6 BS-6387 电缆耐火性能规定

耐火	抗喷淋	抗机械撞击	
A 类: 650℃ ± 40℃ 180 min	W 类 650℃ ± 40℃ 15min; 后再洒水 15min	X 类 650℃ ± 50℃ 15 min	每分钟撞击 2 次
B 类: 750℃ ± 40℃ 180 min		Y 类 750℃ ± 50℃ 15 min	
C 类: 950℃ ± 40℃ 180 min		Z 类 950℃ ± 50℃ 15 min	
S 类: 950℃ ± 40℃ 20 min		—	

无机型刚性耐火电缆通常标注为 BTT 型,按绝缘等级及护套厚度分为轻型 BTTQ、BT-

TVQ (500V) 和重型 BTTZ、BTTVZ (750V) 两种。分别适用于线芯和护套间电压不超过 500V 及 750V (方均根值) 的场合。BTT 电缆的铜护套机械强度高, 可兼作 PE 线, 接地十分可靠。

BTT 型电缆按护套工作温度分为 70℃ 和 105℃。70℃ 分为带 PVC 外护套及裸铜护套两种。105℃ 的电缆适用于人不可能触及的空间。在高温环境中应采用裸铜护套型, 在民用建筑中应用两种均可。但 105℃ 线缆如直接与电器设备连接而未加特种过渡接头时, 应将工作温度限制在 85℃。若 BTTZ 电缆与其他电缆同路径敷设时, 应选用 70℃ 的品种。BTT 电缆还适用于防辐射的核电站、γ 射线探伤室及工业 X 光室等。

刚性矿物绝缘电缆须严防潮气侵入, 必须配用专用接头及附件, 施工要求极为严格。

无机型柔性耐火电缆结构是在铜导体外均匀包绕两层云母带, 以 50% 重叠搭盖作为耐火层。线芯绝缘 (分包层) 及护套采用特殊配方的无机化合物经过高能 β 射线辐照, 使材料保持柔软的同时, 达到较高的耐火性能。不仅同样满足 BS-6387 中 C-W-Z 的最高标准, 而且敷设如同普通电力电缆, 十分方便。由于制造长度长, 大大减少接头, 使线路的可靠性提高。

无机型柔性耐火电缆的型号通常标注为 BBTRZ- (重型 750、1000V 两种) 或 BBTRQ- (轻型 500V)。标注电压为导体间电压有效值。导体长期允许最高工作温度可达 125℃。但选用时也与刚性耐火电缆一样, 须进行修正。

(3) 耐火电缆按电压分类共有低压 0.6/1.0kV 和中压 6/10、8.7/15、26/35kV 四种。

近年来推出的中压隔离型柔性矿物绝缘耐火电缆, 技术核心仍然是隔氧层技术。隔离型耐火电缆采用交联聚乙烯绝缘, 长期允许最高工作温度 90℃, 阻燃性能 A 级。也可实现低烟无卤性能。耐火性能是火焰温度 800℃ 供火时间 90min 绝缘不击穿。也可承受水喷淋及机械撞击。铠装层有钢带和钢丝两类, 截面积范围为  $3 \times 25 \sim 3 \times 400\text{mm}^2$ 。适用于各类工业与民用建筑及市政工程。

隔离型耐火电缆外径与质量略大于普通的交联聚乙烯电缆。它的敷设方法、弯曲半径、载流量、电压降值均与普通交联聚乙烯电缆相同。所不同的是在绝缘层外包覆了绝缘屏蔽层和铜带屏蔽层, 不仅有效地均匀电压, 而且大大减少相间短路的可能性。

(4) 耐火电缆的型号标注与阻燃电缆类似, 即在原型号前增加阻燃和耐火代号。

1) 有机型耐火电缆的耐火代号, 一般标注为 NH。阻燃和耐火代号为: 阻燃 A 级 ZANH; 阻燃 B 级 ZBNH; 阻燃 C 级 ZRNH 或 ZNH。

无卤低烟阻燃耐火 WZRNH 或 WZDN; 隔氧层一般阻燃耐火 GZRNH 或 GZN; 隔氧层低烟无卤阻燃耐火 GWLNH 或 GWN。

例如: NH-VV-0.6/1 3×240+1×120, 表示耐火型聚氯乙烯绝缘及护套电力电缆。

又如: ZRNH-VV<sub>22</sub>-0.6/1 3×240+1×120, 表示阻燃 C 级的耐火电缆, 无发烟量限制的聚氯乙烯绝缘, 聚氯乙烯护套钢带内铠装电力电缆。

2) 刚性矿物绝缘电缆的标注: BTTVZ (重型, 750V); BTTVQ (轻型, 500V)。其中“V”为 PVC 外护层, 无护层者不注。

导体结构: 1H 代表单芯, L 代表多芯。如 BTTVZ 4×(1H150), 表示 1 芯 150mm<sup>2</sup>; 又如 BTTQ 4L2.5, 表示 4 芯 2.5mm<sup>2</sup>。

3) 柔性矿物绝缘电缆代号为 BBTRZ (重型, 600/1000V 或 450/750V); BBTRQ (轻

型, 300/500V)。防鼠型加“S”; 内铠装加下角“22”。

如 BBTRZ<sub>22</sub>-1000 3×120+1×50, 表示: 重型,  $U_0/U$  为 600/1000V 带内铠装的柔性矿物绝缘电缆; 导体为 3×120+1×50 mm<sup>2</sup>。

又如 BBTRZS-750 3×70+1×35; 表示: 重型,  $U_0/U$  为 450/750V 的防鼠型柔性矿物绝缘电缆; 导体为 3×70+1×35 mm<sup>2</sup>。

4) 中压隔离型耐火电缆均为低烟无卤 A 类阻燃型耐火电缆, 代号为 WDZAN; 铠装加相应下角。如 WDZAN-YJY<sub>23</sub>-8.7/10 3×95。

#### 8.2.4.5 耐火电线电缆选用要点

(1) 耐火电线、电缆应用范围: 主要用于在火灾时, 仍须保持正常运行的线路, 如工业及民用建筑的消防系统、救生系统或高温环境、辐射较强的场合等, 具体如:

- 1) 消防泵、喷淋泵、消防电梯的供电线路及控制线路;
- 2) 防火卷帘门、电动防火门、排烟系统风机、排烟阀、防火阀的供电控制线路;
- 3) 消防报警系统的手动报警线路, 消防广播及电话线路;
- 4) 高层建筑或机场、地铁等重要设施中的安保闭路电视线路;
- 5) 集中供电的应急照明线路, 控制及保护电源线路;
- 6) 大、中型变配电站中, 重要的继电保护线路及操作电源线路;
- 7) 重要的计算机监控线路;
- 8) 冶金工业熔炼车间、建材工业的玻璃炉窑等高温环境;
- 9) 核电站或核反应堆、电子加速器等辐射较强的场合。

(2) 耐火电线、电缆选择要点:

1) 通常油库、炼钢炉或者电缆密集的隧道及电缆夹层内宜选择刚性或柔性矿物绝缘耐火电缆。也可根据建筑物或工程的重要性确定, 特别重要的选无机型耐火电缆, 一般的选有机型耐火电缆。

2) 明敷的耐火电缆需要同时防水冲击及防重物坠落损伤时, 应采用无机型矿物绝缘电缆(刚性或柔性)。

3) 一般有机类的耐火电缆本身并不阻燃。若既需要耐火又要满足阻燃者, 应采用阻燃耐火型电缆或矿物绝缘电缆。

4) 用于建筑物消防设施的电源及控制线路时, 宜采用刚性或柔性矿物绝缘型耐火电缆。

5) 刚性和柔性矿物绝缘耐火电缆比较详见表 8-2-7。

表 8-2-7 刚性和柔性矿物绝缘电缆比较表

项 目	刚性 (BTT□-)	柔性 (BBTR□-)
导体结构	圆铜杆	细铜绞线
导体长期允许最高工作温度	70℃ 及 105℃	125℃
电压等级	Z-750V	Z <sub>1</sub> -600/1000V
	Q-500V	Z <sub>2</sub> -450/700V
		Q-300/500V
制造长度	短 (截面积越大制造长度越短)	长 (只受装盘尺寸限制)

续表

项 目	刚性 (BTT□-)	柔性 (BBTR□-)
接头制作工艺	复杂	简便
芯数选择	推荐用单芯	推荐用多芯
敷设方式	要求较高	同普通电力电缆
燃烧烟量	无 PVC 护套——无 带 PVC 护套——少量	微量
耐火等级	符合 GB/T 19666—2005 NJ + NS 级 BS-6387 C-W-Z 级	符合 GB/T 19666—2005 NJ + NS 级 BS-6387 C-W-Z 级
价格	较高	较低

注 GB/T 19666—2005《阻燃和耐火电线电缆通则》。

### (3) 其他注意事项:

1) 火灾时, 由于环境温度剧烈升高, 导致导体电阻增大。当火焰温度为  $800 \sim 1000^{\circ}\text{C}$  时, 导体温度可达到  $400 \sim 500^{\circ}\text{C}$ , 电阻约增大  $3 \sim 4$  倍。此时仍应保证系统正常工作, 须按此条件校验电压降。

2) 耐火电缆亦应考虑自身在火灾时的机械强度, 因此, 明敷的耐火电缆截面积不应小于  $2.5\text{mm}^2$ 。

3) 应注意区分耐高温电缆与耐火电缆。耐高温电缆只适用于高温环境, 不能满足耐火要求。

矿物绝缘耐火电缆同时具备耐高温特性, 适用于高温环境, 如冶金、建材工业的锅炉、玻璃炉窑、高炉等表面敷设。

4) 普通电缆及阻燃电缆敷设在耐火电缆槽盒内, 并不一定能满足耐火的要求, 设计选用时必须注意这一点。有的标准要求钢制电缆桥架表面涂刷防火涂料, 以达到电缆耐火目的, 是一个误区。

## 8.3 架空线路

### 8.3.1 架空线路的路径选择

GB 50061—2010《66kV 及以下架空电力线路设计规范》规定:

3.0.1 架空线路的路径选择, 应认真进行调查研究, 综合考虑运行、施工、路径长度等因素, 进行多方案比较, 做到经济合理、安全适用。

3.0.2 市区及用户内部的架空线路的路径, 应与城市总体规划及工程项目的总体设计相结合, 路径走廊位置应与各种管线和设施统一安排。

3.0.3 架空电力线路路径的选择应符合下列要求:

1 应减少与其他设施交叉; 当与其他架空线路交叉时, 其交叉点不宜选在被跨越线路的杆塔顶上。

2 架空弱电线路等级划分应符合本规范附录 A 的规定。

3 架空电力线路跨越架空弱电线路的交叉角, 应符合表 3.0.3 的要求。

表 3.0.3 架空配电线路跨越架空弱电线路的交叉角

弱电线路等级	一级	二级	三级
交叉角	$\geq 40^\circ$	$\geq 25^\circ$	不限制

## 附录 A 弱电线路等级

一级——首都与各省、自治区、直辖市人民政府所在地及其相互联系的主要线路；首都至各重要工矿城市、海港的线路以及由首都通达国外的国际线路；重要的国际线路和国防线路；铁道部与各铁路局及铁路局之间联系用的线路，铁路信号自动闭塞装置专用线路。

二级——各省、自治区、直辖市人民政府所在地与各地（市）、县及其相互间的通信线路，相邻两省（自治区）各地（市）、县相互间的通信线路，一般市内电话线路；铁路局与各站、段及站相互间的线路，铁路信号闭塞装置的线路。

三级——县至区、乡人民政府的县内线路和两对以下的城郊线路；铁路的地区线路及有线广播线路。

4 3kV 及以上至 66kV 及以下架空电力线路，不应跨越储存易燃、易爆危险品的仓库区域。架空电力线路与甲类生产厂房和库房、易燃易爆材料堆场以及可燃或易燃、易爆液（气）体储罐的防火间距，应符合国家有关法律法规和现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016 的有关规定。

5 甲类厂房、库房，易燃材料堆垛，甲、乙类液体储罐，液化石油气储罐，可燃、助燃气体储罐与架空电力线路的最近水平距离不应小于电杆（塔）高度的 1.5 倍；丙类液体储罐与电力架空线的最近水平距离不应小于电杆（塔）高度 1.2 倍。35kV 以上的架空电力线路与储量超过 200m<sup>3</sup> 的液化石油气单罐的最近水平距离不应小于 40m。

6 架空电力线路应避免开洼地、冲刷地带、不良地质地区、原始森林区以及影响线路安全运行的其他地区。

3.0.4 架空电力线路不宜通过林区，当确需经过林区时应结合林区道路和林区具体条件选择线路路径，并应尽量减少树木砍伐。

10kV 及以下架空电力线路的通道宽度，不宜小于线路两侧向外各延伸 2.5m。35kV 和 66kV 架空电力线路宜采用跨越设计，特殊地段宜结合电气安全距离等条件严格控制树木砍伐。

3.0.5 架空电力线路通过果林、经济作物林以及城市绿化灌木林时，不宜砍伐通道。

3.0.6 耐张段的长度宜符合下列规定：

- 1 35kV 和 66kV 架空电力线路耐张段的长度不宜大于 5km；
- 2 10kV 及以下架空电力线路耐张段的长度不宜大于 2km。

3.0.7 35kV 和 66kV 架空电力线路不宜通过国家批准的自然保护区的核心区和缓冲区内。

## 8.3.2 杆塔定位、对地距离和交叉跨越

(1) GB 50061—2010 规定：

12.0.1 转角杆塔的位置应根据线路路径、耐张段长度、施工和运行维护条件等因素综合确定。直线杆塔的位置应根据导线对地距离、导线对被交叉物距离或控制档距确定。

12.0.2 10kV 及以下架空线路的档距，应根据各地区的运行经验确定，如无可靠运行资料时，一般可采用表 12.0.2 所列数值。市区 66、35kV 架空线路，应综合考虑城市发展等因素，档距不宜过大。

表 12.0.2 10kV 及以下架空线路的档距

单位：m

区 域	线路电压	
	3kV 以下	3kV ~ 10kV
市 区	40 ~ 50	45 ~ 50
郊 区	40 ~ 60	50 ~ 100

12.0.3 杆塔定位应考虑杆塔和基础的稳定性，并应便于施工和运行维护。以下地点不宜设置杆塔：

- 1 可能发生滑坡或山洪冲刷的地点；
- 2 容易被车辆碰撞的地点；
- 3 可能变为河道的不稳定河流变迁地区；
- 4 局部不良地质的地点；
- 5 地下管线的井孔附近和影响安全运行的地点。

12.0.4 当耐张段较长时，每 10 基应设置 1 基加强型直线杆塔。

12.0.5 当跨越其他架空线路时，跨越杆塔宜靠近被跨越线路设置。

12.0.6 导线与地面、建筑物、树木、铁路、河流、管道、索道及各种架空线路间的距离，应按以下原则确定：

1 应根据最高气温情况或覆冰情况求得的最大弧垂和最大风速或覆冰情况求得的最大风偏进行计算；

2 计算以上距离应计入导线架线后塑性伸长的影响和设计、施工的误差，但不应计入由于电流、太阳辐射、覆冰不均匀等引起的弧垂增大；

3 当架空线路与标准轨距铁路、高速公路和一级公路交叉，且架空线路的档距超过 200m 时，最大弧垂应按导线温度为 +70℃ 计算。

12.0.7 导线与地面的最小距离，在最大计算弧垂情况下，应符合表 12.0.7 的规定。

表 12.0.7 导线与地面的最小距离

单位：m

线路经过区域	线路电压		
	3kV 以下	3kV ~ 10kV	35kV ~ 66kV
人口密集地区	6.0	6.5	7.0
人口稀少地区	5.0	5.5	6.0
交通困难地区	4.0	4.5	5.0

12.0.8 导线与山坡、峭壁、岩石之间的最小水平距离，在最大计算风偏情况下，应符合表 12.0.8 的规定。

表 12.0.8 导线与山坡、峭壁、岩石之间的最小水平距离 单位: m

线路经过区域	线路电压		
	3kV 以下	3kV ~ 10kV	35kV ~ 66kV
步行可以到达的山坡	3.0	4.5	5.0
步行不能到达的山坡、峭壁、岩石	1.0	1.5	3.0

12.0.9 架空线路跨越建(构)筑物时,导线与建(构)筑物之间的最小垂直距离,在最大计算弧垂情况下,应符合表 12.0.9 的规定。

表 12.0.9 导线与建(构)筑物之间的最小垂直距离 单位: m

线路电压	3kV 以下	3kV ~ 10kV	35kV	66kV
距 离	3.0	3.0	4.0	5.0

12.0.10 架空线路在最大计算风偏情况下,边导线与建(构)筑物或城市规划建筑线间的最小水平距离,以及边导线与不在规划范围内的建(构)筑物的最小水平距离,应符合表 12.0.10 的规定。边导线与不在规划范围内的建筑物的水平距离,在无风偏情况下,不应小于 12.0.10 所列数值的 50%。

表 12.0.10 导线与建(构)筑物之间的最小水平距离 单位: m

线路电压	3kV 以下	3kV ~ 10kV	35kV	66kV
距 离	1.0	1.5	3.0	4.0

12.0.11 导线与树木(考虑自然生长高度)之间的最小垂直距离,应符合表 12.0.11 的规定。

表 12.0.11 导线与树木之间的最小垂直距离 单位: m

线路电压	3kV 以下	3kV ~ 10kV	35kV ~ 66kV
距 离	3.0	3.0	4.0

12.0.12 导线与公园、绿化区域或防护林带的树木之间的最小水平距离,在最大计算风偏情况下,应符合表 12.0.12 的规定。

表 12.0.12 导线与公园、绿化区域或防护林带的树木之间的最小水平距离 单位: m

线路电压	3kV 以下	3kV ~ 10kV	35kV ~ 66kV
距 离	3.0	3.0	3.5

12.0.13 导线与果树、经济作物或城市绿化灌木之间的最小垂直距离,在最大计算弧垂情况下,应符合表 12.0.13 的规定。

表 12.0.13 导线与果树、经济作物或城市绿化灌木之间的最小垂直距离 单位: m

线路电压	3kV 以下	3kV ~ 10kV	35kV ~ 66kV
距 离	1.5	1.5	3.0

12.0.14 导线与街道行道树之间的最小距离,应符合表 12.0.14 的规定。

表 12.0.14 导线与街道行道树之间的最小距离

单位: m

检验状况	3kV 以下	3kV ~ 10kV	35kV ~ 66kV
最大计算弧垂情况下的垂直距离	1.0	1.5	3.0
最大计算风偏情况下的水平距离	1.0	2.0	3.5

12.0.15 10kV 及以下采用绝缘导线的架空电力线路,除导线与地面的距离和重要交叉跨越距离之外,其他最小距离的规定,可结合地区运行经验确定。

(2) 当铁路或道路有超限货物的车辆通过时,架空线路的导线与超限货物之间的最小垂直距离,在最大计算弧垂情况下,应不小于表 8-3-1 所列数值。

表 8-3-1

导线与超限货物之间的最小垂直距离

单位: m

线路电压	小于 3kV	3kV ~ 10kV	35kV ~ 66kV
距 离	1.0	1.5	2.5

(3) 架空线路的杆塔埋地部分与地下各种工程设施间的水平距离,应不小于表 8-3-2 所列数值。

表 8-3-2

杆塔与地下各种工程设施之间的最小水平距离

单位: m

线路电压	小于 3kV	3kV ~ 10kV	35kV ~ 66kV
距 离	1.0	1.0	3.0

(4) GB 50061—2010 规定:

12.0.16 架空线路与铁路、道路、河流、管道、索道及各种架空线路交叉或接近的要求,应符合表 12.0.16 的规定。

表 12.0.16 架空线路与铁路、道路、通航河流、管道、索道及各种架空线路交叉或接近的要求

项目	铁路	公路和道路	电车道 (有轨及无轨)	通航河流	不通航 河流
导线或地线在跨越档接头	标准轨距: 不得接头 窄轨: 不限制	高速公路和一、二级公路及城市一、二级道路: 不得接头。 三、四级公路及城市三级道路: 不限制	不得接头	不得接头	不限制
交叉档导线最小截面积	35kV 及以上采用钢芯铝绞线为 35mm <sup>2</sup> ; 10kV 及以下采用铝绞线或铝合金线为 35mm <sup>2</sup> ; 其他导线为 16mm <sup>2</sup>			—	
交叉档距绝缘子固定方式	双固定	高速公路和一、二级公路及城市一、二级道路: 双固定	双固定	双固定	不限制

续表

项目		铁路			公路和道路			电车道 (有轨及无轨)		通航河流		不通航河流		
最小 垂直 距离 (m)	线路 电压 (kV)	至 标准 轨顶	至 窄轨 轨顶	至承力 索或接 触线	至路面			至路面	至承力 索或接 触线	至常年 高水位	至最高 航行的最 高船 桅顶	至最高 洪水位	冬季 至 冰面	
	35~66	7.5	7.5	3.0	7.0			10.0	3.0	6.0	2.0	3.0	5.0	
	3~10	7.5	6.0	3.0	7.0			9.0	3.0	6.0	1.5	3.0	5.0	
	<3	7.5	6.0	3.0	6.0			9.0	3.0	6.0	1.0	3.0	5.0	
最小 水平 距离 (m)	线路 电压 /kV	杆塔外缘至轨道 中心		杆塔外缘至 路基边缘			杆塔外缘至 路基边缘		边导线至斜坡上缘 (线路与拉纤小路平行)					
		交叉	平行	开阔 地区	路径受 限制 地区	市区内	开阔 地区	路径受 限制 地区						
	35~66	30	最高 杆塔 高加 3m	交叉: 8.0	5.0	0.5	交叉: 8.0	5.0	最高杆塔高					
	3~10	5		0.5			0.5						0.5	0.5
<3	5	0.5		0.5			0.5						0.5	0.5
其他要求	35kV~66kV 不宜 在铁路出站信号机以 内跨越			在不受环境和规划限制 的地区架空电力线路与国道 的距离不宜小于20m, 省道 不宜小于15m, 县道不宜小 于10m, 乡道不宜小于5m			—						最高洪水位时, 有抗洪 抢险船只航行的河流, 垂 直距离应协商确定	
项 目	弱电架空线路			电力线路			特殊管道	一般管道、 索道						
导线或地线在 跨越档接头	一、二级: 不得接头 三级: 不限制			35kV 及以上: 不得接头 10kV 及以下: 不限制			不得接头	不得接头						
交叉档导线 最小截面积	—			—			—	—						
交叉档距 绝缘子固 定方式	10kV 及以下线路跨 一、二级弱电线路: 双固定			10kV 线路跨6kV~10kV 线路: 双固定			双固定	双固定						
最小 垂直 距离 (m)	线路电压 (kV)	至被跨越线			至被跨越线			至管道 任何部分		至管道 任何部分				
	35~66	3.0			3.0			4.0		3.0				
	3~10	2.0			2.0			3.0		2.0				
	<3	1.0			1.0			1.5		1.5				

8

续表

项目		弱电架空线路		电力线路		特殊管道	一般管道、索道
最小水平距离 (m)	线路电压 (kV)	边导线间		至被跨越线		边导线至管道、索道任何部分	
		开阔地区	路径受限制地区	开阔地区	路径受限制地区	开阔地区	路径受限制地区
	35~66		4.0		5.0		4.0
	3~10	最高杆塔高	2.0	最高杆塔高	2.5	最高杆塔高	2.0
	<3		1.0		2.5		1.5
其他要求		电力线应架设在上方；交叉点应尽量靠近杆塔，但应不小于7m（市区除外）		电压高的线路应架设在电压低的线路上方；电压相同时，公用线应在专用线上方		与索道交叉，如索道在上方，下方索道应装设保护措施；交叉点不应选在管道检查井处；与管道、索道平行、交叉时，管道、索道应接地	

- 注 1. 特殊管道指架设在地面上输送易燃、易爆物的管道。  
 2. 管道、索道上的附属设施，应视为管道、索道的一部分。  
 3. 常年高水位是指5年一遇洪水位。最高洪水位对35kV及以上架空电力线路是指百年一遇洪水位，对10kV及以下架空电力线路是指50年一遇洪水位。  
 4. 不能通航河流是指不能通航，也不能浮运的河流。  
 5. 对路径受限制地区的最小水平距离的要求，应计及架空电力线路的最大风偏。  
 6. 对电气化铁路的安全距离主要是电力线导线与承力索和接触线的距离控制。因此，对电气化铁路轨顶的距离按实际情况确定。

(5) 公路分为高速公路、一级公路、二级公路、三级公路及四级公路5个技术等级。各级公路的功能划分见表8-3-3。

表8-3-3 各级公路的功能划分

公路等级	功能
高速公路	专供汽车分方向、分车道行驶，全部控制出入的多车道公路；年平均日设计交通量宜在15000辆小客车以上
一级公路	为供汽车分方向、分车道行驶，全部控制出入的多车道公路；年平均日设计交通量宜在15000辆小客车以上
二级公路	为供汽车行驶的双车道公路；年平均日设计交通量宜为5000~15000辆小客车
三级公路	为供汽车、非汽车交通混合行驶的双车道公路；年平均日设计交通量宜为2000~6000辆小客车
四级公路	为供汽车、非汽车交通混合行驶的双车道公路；年平均日设计交通量宜为2000~6000辆小客车

(6) 城市道路应按道路在道路网中的地位、交通功能以及对沿线的服务功能等，分为快速路、主干路、次干路和支路4个等级：

- 1) 快速路应中央分隔、全部控制出入、控制出入口间距及形式，应实现交通连续通

行,单向设置不应少于两条车道,并应设有配套的交通安全与管理设施。快速路两侧不应设置吸引大量车流、人流的公共建筑物的出入口。

2) 主干路应连接城市各主要分区,应以交通功能为主。主干路两侧不宜设置吸引大量车流、人流的公共建筑物的出入口。

3) 次干路应与主干路结合组成干路网,应以集散交通的功能为主,兼有服务功能。

4) 支路宜与次干路和居住区、工业区、交通设施等内部道路相连接,应以解决局部地区交通,以服务功能为主。

### 8.3.3 10kV 及以下架空进户线

(1) 10kV 及以下进户线是指由架空配电布线线路杆塔接入建筑物外墙第一支持点之间的架空导线。

(2) 高压进户线的档距不宜大于40m,低压进户线的档距不宜大于25m,超过时宜设进户杆。

(3) 3~10kV 进户线的截面积,不应小于下列数值:铝绞线为 $25\text{mm}^2$ ;铜绞线为 $16\text{mm}^2$ 。

(4) 1kV 及以下进户线应采用绝缘导线,导线截面积应根据允许载流量选择,但不应小于表8-3-4所列数值。

表 8-3-4

1kV 及以下进户线最小截面积

$\text{mm}^2$

接入方式	档距 (m)	铝 线	铜 线
自电杆引下	<10	16	6.0
	10~25	16	6.0
沿墙敷设	$\leq 6$	16	6.0

(5) 3~10kV 进户线的线间距离不应小于450mm。

(6) 进户线的对地距离,不应小于下列数值:3~10kV 进户线为4.5m;1kV 及以下为2.5m。

(7) 跨越道路街道的低压接户线,至路面中心的垂直距离,应不小于下列数值:通车街道为6.0m;通车困难的街道、人行道为3.5m;胡同(里弄、巷)为3.5m。

(8) 低压进户线与建筑物有关部分的距离,应不小于下列数值:与进户线上方窗户的垂直距离,300mm;与进户线上方阳台或下方窗户的垂直距离,800mm;与窗户或阳台的水平距离,750mm;与墙壁、构架的水平距离,50mm。

### 8.3.4 导线、地线、绝缘子和金具

#### 8.3.4.1 导线和地线选择

(1) 架空线路采用的导线和地线,除应满足导体选择的一般要求外,尚应符合下列规定:

1) 导线和地线应具有较高的机械强度和耐振性能,参见8.3.6;

2) 地线宜采用钢绞线;

3) 导线宜采用钢芯铝绞线或铝绞线,不应采用单股的铝线、铝合金线;

4) 在沿海(离海岸5km以内)和其他对导线腐蚀比较严重的地区,可采用耐腐蚀、增容导线。

(2) GB 50061—2010 规定：

5.1.2 市区 10kV 及以下的架空电力线路，遇下列情况可采用绝缘铝绞线：

- 1 线路走廊狭窄，与建筑物之间的距离不能满足安全要求的地段；
- 2 高层建筑临近地段；
- 3 繁华街区或人口密集地区；
- 4 游览区和绿化区；
- 5 空气严重污秽地段；
- 6 建筑施工现场。

(3) 架空线路采用的导线持续允许载流量应按周围空气温度进行校正，周围空气温度应采用当地 10 年或 10 年以上的最热月的每日最高温度的月平均值。

(4) 架空线路导线截面积应不小于表 8-3-5 所列数值。

表 8-3-5 导线最小截面积  $\text{mm}^2$

导线种类	35kV 线路	3kV ~ 10kV 线路		1kV 及以下线路
		居民区	非居民区	
铝绞线及铝合金线	35	35	25	16
钢芯铝绞线	35	25	16	16
铜绞线		16	16	10 (线直径 3.2mm)

注 1. 居民区指居住小区、厂矿地区、港口、码头、火车站、城镇及乡村等人口密集地区。

2. 非居民区指居民区以外的其他地区。此外，虽有车辆、行人或农业机械到达但未建房屋或房屋稀少地区，亦属非居民区。

(5) 地线的钢绞线截面积不宜小于  $25\text{mm}^2$ 。

(6) 不同金属或不同截面积的导线不得在档距内连接。

(7) 常用导线和地线的常用数据（略）。

### 8.3.4.2 绝缘子和金具的选择

(1) GB 50061—2000 规定：

6.0.1 架空线路环境污秽等级应符合本规范附录 B 的规定。污秽等级可根据审定的污秽分区图并结合运行经验、污湿特征、外绝缘表面污秽物的性质及其等值附盐密度等因素综合确定。

6.0.2 35kV 和 66kV 架空线路绝缘子的型式和数量，应根据绝缘的单位爬电距离确定。瓷绝缘的单位爬电距离应符合本规范附录 B 的规定。

注：环境污秽等级和爬电比距，见第 7 章。

6.0.3 35kV 和 66kV 架空线路宜采用悬式绝缘子。在海拔 1000m 以下空气清洁地区，悬垂绝缘子串的 XP-70 型绝缘子数量宜采用：35kV 线路—3 片；66kV 线路—5 片。

6.0.4 耐张绝缘子串的绝缘子数量，应比悬垂绝缘子串的同型绝缘子多一片。对于全高超过 40m 有地线的杆塔，高度每增加 10m，应增加一片绝缘子。

6.0.5 6kV 和 10kV 架空线路的直线杆塔宜采用针式绝缘子或瓷横担绝缘子；耐张杆塔

宜采用悬垂绝缘子串或蝶式绝缘子和悬垂绝缘子组成的绝缘子串。

6.0.6 3kV 及以下架空线路的直线杆塔宜采用针式绝缘子或瓷横担绝缘子；耐张杆塔宜采用蝶式绝缘子。

6.0.7 海拔超过 3500m 的地区，绝缘子串的绝缘子数量可根据运行经验适当增加。海拔 1000~3500m 的地区，绝缘子串的绝缘子数量应按下式确定：

$$n_h \geq n [1 + 0.1 (H - 1)] \quad (6.0.7)$$

式中：

$n_h$ —海拔 1000~3500m 地区的绝缘子数量，片；

$n$ —海拔 1000m 以下地区的绝缘子数量，片；

$H$ —海拔，m。

6.0.8 污秽地区的架空线路宜采用防污绝缘子、有机复合绝缘子或采取其他防污措施。

5.3.1 绝缘子和金具的机械强度应按下式计算

$$K F \leq F_0 \quad (5.3.1)$$

式中：

$K$ —安全系数；

$F$ —设计荷载，kN；

$F_0$ —悬式绝缘子 1h 机电试验的试验荷载、蝶式绝缘子和金具的破坏荷载、针式绝缘子和瓷横担的受弯破坏荷载，kN。

5.3.2 绝缘子和金具的安装设计可采用安全系数设计法。绝缘子和金具的机械强度安全系数应符合表 5.3.2 的规定。

表 5.3.2 绝缘子和金具的机械强度安全系数

类 型	安全系数		
	运行工况	断线工况	断联工况
悬式绝缘子	2.7	1.8	1.5
针式绝缘子	2.5	1.5	1.5
蝶式绝缘子	2.5	1.5	1.5
瓷横担绝缘子	3.0	2.0	—
合成绝缘子	3.0	1.8	1.5
金具	2.5	1.5	1.5

(2) 当采用铁横担时，针式绝缘子宜采用高一电压等级的绝缘子。

(3) 绝缘子的组装方式，应能防止瓷裙积水。

### 8.3.5 架空线路的气象条件

(1) GB 50061—2010 规定：

4.0.1 架空线路设计的气温应根据当地 15~30 年气象记录中的统计值确定。最高气温宜采用 +40℃，在最高气温、最低气温和年平均气温三种工况下，应按无风、无冰计算。

4.0.2 架空线路设计采用的年平均气温应按下列方法确定：

1) 当地区的年平均气温在 $3^{\circ}\text{C} \sim 17^{\circ}\text{C}$ 之间时, 年平均气温应取与此数邻近的5的倍数;

2) 当地区的年平均气温小于 $3^{\circ}\text{C}$ 或大于 $17^{\circ}\text{C}$ 时, 应将年平均气温减少 $3^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ 后, 取与此数邻近的5的倍数。

4.0.3 架空线路设计采用的导线或地线的覆冰厚度, 在调查的基础上可取5、10、15、20mm, 冰的密度应按 $0.9\text{g}/\text{cm}^3$ 计; 覆冰时的气温应采用 $-5^{\circ}\text{C}$ , 风速宜采用 $10\text{m}/\text{s}$ 。

4.0.4 安装工况的风速应采用 $10\text{m}/\text{s}$ , 且无冰。气温应按下列规定采用:

1) 最低气温为 $-40^{\circ}\text{C}$ 的地区, 应采用 $-15^{\circ}\text{C}$ ;

2) 最低气温为 $-20^{\circ}\text{C}$ 的地区, 应采用 $-10^{\circ}\text{C}$ ;

3) 最低气温为 $-10^{\circ}\text{C}$ 的地区, 宜采用 $-5^{\circ}\text{C}$ ;

4) 最低气温为 $-5^{\circ}\text{C}$ 及以下的地区, 宜采用 $0^{\circ}\text{C}$ 。

4.0.5 雷电过电压工况的气温可采用 $15^{\circ}\text{C}$ , 风速对于最大设计风速 $35\text{m}/\text{s}$ 及以上地区可采用 $15\text{m}/\text{s}$ , 最大设计风速小于 $35\text{m}/\text{s}$ 的地区可采用 $10\text{m}/\text{s}$ 。

4.0.6 检验导线与地线之间的距离时, 应按无风、无冰考虑。

4.0.7 内部过电压工况的气温可采用年平均气温, 风速可采用最大设计风速的50%, 并不宜低于 $15\text{m}/\text{s}$ , 且无冰。

4.0.8 在最大风速工况下应按无冰计算, 气温应按下列规定采用:

1) 最低气温为 $-10^{\circ}\text{C}$ 及以下的地区, 应采用 $-5^{\circ}\text{C}$ ;

2) 最低气温为 $-5^{\circ}\text{C}$ 及以下的地区, 宜采用 $+10^{\circ}\text{C}$ 。

4.0.9 带电作业工况的风速可采用 $10\text{m}/\text{s}$ , 气温应采用 $+15^{\circ}\text{C}$ , 且无冰。

4.0.10 长期荷载工况的风速应采用 $5\text{m}/\text{s}$ , 气温应采用年平均气温, 且无冰。

4.0.11 最大设计风速应采用当地空旷平坦地面上离地 $10\text{m}$ 高, 统计所得的30年一遇 $10\text{min}$ 平均最大风速; 当无可靠资料时, 最大设计风速不应低于 $23.5\text{m}/\text{s}$ , 并应符合下列规定:

1) 山区架空线路的最大设计风速, 应根据当地气象资料确定; 当无可靠资料时, 最大设计风速可按附近平地风速增加10%, 且不应低于 $25\text{m}/\text{s}$ ;

2) 架空线路位于河岸、湖岸、山峰以及山谷口等容易产生强风的地带时, 其最大基本风速应按附近一般地区适当增大; 对易覆冰、风口、高差大的地段, 宜缩短耐张段长度, 杆(塔)使用条件应适当留有裕度;

3) 在厂区内, 两侧屏蔽物的平均高度大于杆塔高度的 $2/3$ 时, 其最大设计风速宜比当地最大设计风速减少20%。

(2) 为使架空线路的结构强度和电气性能能够适应自然界的气象条件, 以保证架空线路安全运行, 应对沿线经过地段的气象条件进行全面的了解, 详细搜集设计所需要的气象资料。搜集资料的内容和主要用途见表8-3-6。

(3) 计算架空线路时, 根据沿线经过地段的气象资料和附近已有线路的运行经验, 可套用接近的典型气象区中的分类。全国送电线路和配电线路典型气象区的划分, 见表8-3-7和表8-3-8。

表 8-3-6 搜集气象资料的内容和用途

项 目	用 途
最高气温	计算导线最大弧垂, 使导线对地面或其他构筑物保持一定的安全距离
最低气温	在最低气温时, 导线可能产生最大应力, 检查绝缘子串上扬或导线上拔及防震计算用等
年平均气温	防震设计一般用平均气温时导线的应力作为计算控制条件
历年最低气温月的平均气温	计算导线或杆塔安装检修时的初始条件
最大风速及最大风速月的平均风速	风荷载是考虑杆塔和导线强度的基本条件
地区最多风向及其出现频率	用于导线的防震、防腐及绝缘防污设计
导线覆冰厚度	杆塔及导线强度设计依据, 验算不均匀覆冰时导线纵向不平衡张力及垂直布置的导线接近距离, 可能出现最大弧垂时决定跨越间距
雷电日数 (或小时数)	防雷计算用
雪天、雨天、雾淞的持续小时数	计算电晕损失时的基本数据
土壤冻结深度	用于杆塔基础设计
常年洪水位及最高航行水位	确定跨越杆塔高度及验算交叉跨越距离
最高气温月的日最高气温的平均值	用于计算导线发热温升
历年最低气温月的日最低平均气温	用于计算断线或断串时的气温条件

表 8-3-7 输电线路的典型气象区

气 象 区		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
大气温度 (°C)	最 高	+40									
	最 低	-5	-10	-10	-20	-10	-20	-40	-20	-20	
	覆 冰	—	-5								
	基本风速	+10	+10	-5	-5	+10	-5	-5	-5	-5	
	安 装	0	0	-5	-10	-5	-10	-15	-10	-10	
	雷电过电压	+15									
	操作过电压年平均气温	+20	+15	+15	+10	+15	+10	-5	+10	+10	
风速 (m/s)	基本风速	35	30	25	25	30	25	30	30	30	
	覆 冰	10							15		
	安 装	10									
	雷电过电压	15	10								
	操作过电压	0.5 × 基本风速折算至导线平均高度处的风速 (不低于 15m/s)									
覆冰厚度 (mm)		0	5	5	5	10	10	10	15	20	
冰的密度 (kg/m <sup>3</sup> )		900									

表 8-3-8 配电线路的典型气象区

气象区		I	II	III	IV	V	VI	VII
大气温度 (°C)	最高	+40						
	最低	-5	-10	-5	-20	-20	-40	-20
	覆冰	-5						
	基本风速	+10	+10	-5	-5	-5	-5	-5
风速 (m/s)	基本风速	30	25	25	25	25	25	25
	覆冰	10						
	最低、最高气温	0						
覆冰厚度 (mm)		0	5	5	5	10	10	15
冰的密度 (kg/m <sup>3</sup> )		900						

### 8.3.6 导线力学计算

#### 8.3.6.1 架线设计的一般要求

GB 50061—2010 规定：

5.2.1 在各种气象条件下，导线的张力、弧垂计算应采用最大使用张力和平均运行张力作为控制条件。地线的张力、弧垂计算可采用最大使用张力、平均运行张力和导线与地线间的距离作为控制条件。

5.2.2 导线与地线在档距中央的距离，在 +15°C 气温、无风无冰条件时，应符合下式要求：

$$S \geq 0.012L + 1 \quad (5.2.2)$$

式中：

$S$ ——导线与地线在档距中央的距离，m；

$L$ ——档距，m。

5.2.3 导线或地线的最大使用张力应不大于绞线瞬时破坏张力的 40%。

注：为简化计算，通常以导线最低点的应力为计算基点，即最低点应力不超过破坏应力的 40%，导线悬挂点的应力可较最低点的应力高 10%。当档距大到使悬挂点应力达到破坏应力的 44% 时，则称之为“极大档距”；对于市区配电线路，这种罕见情况可不考虑。

5.2.4 导线或地线的平均运行张力上限及防振措施应符合表 5.2.4 的要求。

表 5.2.4 导线或地线的平均运行张力上限及防振措施

档距和环境状况	平均运行张力上限（瞬时破坏张力的百分数）/%		防振措施
	钢芯铝绞线	镀锌钢绞线	
开阔地区档距 < 500m	16	12	不需要
非开阔地区档距 < 500m	18	18	不需要
档距 < 120m	18	18	不需要
不论档距大小	22	—	护线条
不论档距大小	25	25	防振锤（线）或另加护线条

5.2.5 35kV 和 66kV 架空线路的导线或地线的初伸长率应通过试验确定。导线或地线的初伸长对弧垂的影响可采用降温法补偿。当无试验资料时，初伸长率和降低的温度可采用表 5.2.5 的数据。

表 5.2.5 导线或地线的初伸长率和降低的温度

类型	初伸长率	降低的温度 /℃
钢芯铝绞线	$3 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$	15 ~ 25
镀锌钢绞线	$1 \times 10^{-4}$	10

注：截面铝钢比小的钢芯铝绞线应采用表中的下限数值；截面铝钢比大的钢芯铝绞线应采用表中的上限数值

5.2.6 10kV 及以下架空线路的导线初伸长对弧垂的影响可采用减少弧垂法补偿。弧垂减小率应为：铝绞线或绝缘铝绞线应采用 20%；钢芯铝绞线应采用 12%。

### 8.3.6.2 导线的单位荷载和比载

(1) 导线每米长度上的荷载简称单位荷载  $q$ ；折算到导线单位截面积上的单位荷载称为比载  $g$ 。

(2) 各种单位荷载和比载的意义和计算式，见表 8-3-9。

表 8-3-9 导线单位荷载和比载计算

荷载种类	单位荷载		比载		符号说明
	符号	计算式	符号	计算式	
自重荷载	$q_1$	$9.807p_1$	$g_1$	$q_1/A$	$A$ ——导线截面积， $\text{mm}^2$ ； $p_1$ ——导线单位质量， $\text{kg/m}$ ； $d$ ——导线直径， $\text{mm}$ ； $\delta$ ——导线覆冰厚度， $\text{mm}$ ； $\nu$ ——导线平均高度处的风速， $\text{m/s}$ ； $\alpha$ ——导线风压不均匀系数； $\mu$ ——导线受风体型系数
冰重荷载	$q_2$	$9.807 \times 0.9\pi\delta(\delta+d) \times 10^{-3}$	$g_2$	$q_2/A$	
自重加冰重荷载	$q_3$	$g_1 + g_2$	$g_3$	$q_3/A$	
无冰时风荷载	$q_4$	$0.625\nu^2 d\alpha\mu \times 10^{-3}$	$g_4$	$q_4/A$	
覆冰时风荷载	$q_5$	$0.625\nu^2(d+2\delta)\alpha\mu \times 10^{-3}$	$g_5$	$q_5/A$	
无冰时综合荷载	$q_6$	$\sqrt{q_1^2 + q_4^2}$	$g_6$	$q_6/A$	
覆冰时综合荷载	$q_7$	$\sqrt{q_3^2 + q_5^2}$	$g_7$	$q_7/A$	

注 常数  $9.807\text{m/s}^2$  为重力加速度； $0.625$  为空气密度  $1.25\text{kg/m}^3$  的  $1/2$ 。

(3) 导线风压不均匀系数见表 8-3-10；导线受风体型系数见表 8-3-11。

表 8-3-10 导线风压不均匀系数

导线风压不均匀系数 $\alpha$	基准高度的风速 (m/s)				
	$\nu \leq 10$	$10 < \nu < 20$	$20 \leq \nu < 30$	$30 \leq \nu < 35$	$\nu \geq 35$
计算杆塔所受张力和风荷载时	1.0	1.0	0.85	0.75	0.7
校验电气间隙计算张力和风荷载时	1.0	0.75	0.61	0.61	0.61

表 8-3-11 导线受风体型系数

导线表面状况	无冰		覆冰
	$d < 17$	$d \geq 17$	
导线外径 $d$ (mm)	$d < 17$	$d \geq 17$	不论 $d$ 大小
导线受风体型系数 $\mu$	1.2	1.1	1.2

### 8.3.6.3 导线应力弧垂计算

(1) 架空线路的档距足够大时，导线材料的刚性可以忽略。悬挂在两个固定点的一根柔索的形状为“悬链线”，是双曲线函数，计算复杂；在工程上，除特殊情况外，通常采用抛物线简化计算式。

导线荷载是沿悬链线均匀分布的；如假定荷载沿连接两悬挂点的直线均匀分布，可导出简化的斜抛物线计算式；如假定荷载沿档距均匀分布，则导出更简化的平抛物线计算式。

(2) 导线悬挂曲线上任意一点至两悬挂点连线在铅直方向上的距离，称为该点的弧垂。通常所说弧垂，除特别指明者外，均指最大弧垂。最大弧垂位于档距中点，而非导线最低点。

(3) 导线最低点的位置取决于悬挂角。悬挂角（高差角）是指两悬挂点连线与水平线的夹角。

(4) 导线最低点至悬挂曲线上任意一点的曲线长度称为弧长。一个档距内导线的曲线长度称为一档线长（档内线长）。

(5) 导线应力是指导线单位截面积上的应力。因导线荷载为沿导线长度均匀分布，一档中导线各点的应力不相等，应力方向也不同，但各点的水平应力相等。在导线应力弧垂分析中，除特别指明者外，导线应力均指导线各点的水平应力即导线最低点的应力。

(6) 档距是指两悬挂点之间的水平距离。对于直线杆塔连续档，档距取耐张段的代表档距。

(7) 高差是指两悬挂点之间的垂直距离。

(8) 水平档距是计算杆塔所承受的导线横向风荷载用的档距，取杆塔两侧档距的平均值；当高差较大时，两侧档距取悬挂点之间的斜线距离。

(9) 垂直档距是计算杆塔所承受的导线垂直荷载用的档距，其值以水平档距为基础，并计及导线张力垂直分量的影响。

(10) 导线应力弧垂计算式一览表见表 8-3-12。

### 8.3.6.4 导线的状态方程式

导线的状态方程式用于从已知某一气象条件下的导线应力  $\sigma_m$  求出另一气象条件下的导线应力  $\sigma_n$ 。导线的状态方程式考虑了导线的弹性伸长和温度伸长，根据两种气象条件下档内原始线长（制造线长即不受拉力的线长）相等的原则导出。

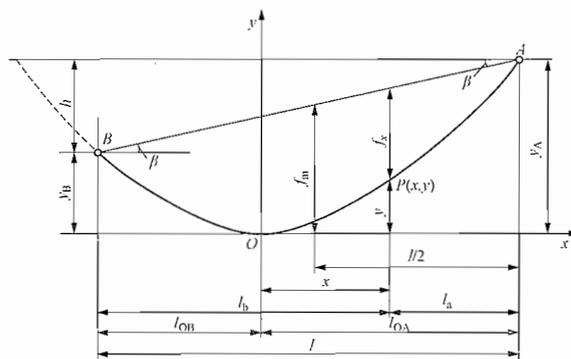
悬挂点等高的导线的状态方程式

$$\sigma_n - \frac{g_n^2 l^2 E}{24\sigma_n^2} = \sigma_m - \frac{g_m^2 l^2 E}{24\sigma_m^2} - \alpha E(t_n - t_m) \quad (8-3-1)$$

表 8-3-12

导线应力弧垂计算式一览表

项目	斜抛物线计算式	平抛物线计算式	符号说明
曲线方程	$y = \frac{gx^2}{2\sigma_0 \cos\beta}$	$y = \frac{gx^2}{2\sigma_0}$	$x$ —导线任一点与最低点的水平距离, m;
任一点弧垂	$f_x = \frac{g}{2\sigma_0 \cos\beta} l_a l_b$	$f_x = \frac{g}{2\sigma_0} l_a l_b$	$y$ —导线任一点与最低点的垂直距离, m;
最大弧垂	$f_m = \frac{gl^2}{8\sigma_0 \cos\beta}$	$f_m = \frac{gl^2}{8\sigma_0}$	$y_A$ ( $y_B$ )—悬挂点 A (悬挂点 B) 与最低点的垂直距离, m;
一档线长	$L = \frac{l}{\cos\beta} + \frac{g^2 l^3 \cos\beta}{24\sigma_0^2}$	$L = \frac{l}{\cos\beta} + \frac{g^2 l^3}{24\sigma_0^2}$	$f_x$ —导线任一点的弧垂, m;
悬挂点轴向应力	$\sigma_A = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{g^2 l_{OA}^2}{\cos^2\beta}}$ $\sigma_B = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{g^2 l_{OB}^2}{\cos^2\beta}}$	$\sigma_A = \sigma_0 + \frac{g^2 l_{OA}^2}{2\sigma_0}$ $\sigma_B = \sigma_0 + \frac{g^2 l_{OB}^2}{2\sigma_0}$	$f_m$ —导线最大弧垂, m;
最低点至悬挂点的水平距离	$l_{OA} = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{g} \sin\beta$ $l_{OB} = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{g} \sin\beta$	$l_{OA} = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{g} \tan\beta$ $l_{OB} = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_0}{g} \tan\beta$	$\sigma_0$ —导线各点的水平应力 (即最低点的应力), N/mm <sup>2</sup> ;
最低点至悬挂点的垂直距离	$y_A = \frac{gl_{OA}^2}{2\sigma_0 \cos\beta}$ $y_B = \frac{gl_{OB}^2}{2\sigma_0 \cos\beta}$	$y_A = \frac{gl_{OA}^2}{2\sigma_0}$ $y_B = \frac{gl_{OB}^2}{2\sigma_0}$	$\sigma_A, \sigma_B$ —悬挂点 A 或悬挂点 B 的轴向应力, N/mm <sup>2</sup> ;
代表档距	$l_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i^3 \cos^2\beta_i)}{\sum_{i=1}^n (\frac{l_i}{\cos\beta_i})}}$	$l_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n l_i^3}{\sum_{i=1}^n l_i}}$	$g$ —导线比载, N/m·mm <sup>2</sup> ;
水平档距	$l_h = \frac{1}{2} \left( \frac{l_1}{\cos\beta_1} + \frac{l_2}{\cos\beta_2} \right)$	$l_h = \frac{l_1 + l_2}{2}$	$\beta$ —悬挂角 ( $\tan\beta = h/l$ );
垂直档距	$l_v = \frac{l_h}{\cos\beta} + \frac{\sigma_{01} h_1}{g_v l_1} + \frac{\sigma_{02} h_2}{g_v l_2}$	$l_v = l_h + \frac{h_1}{l_1} + \frac{h_2}{l_2}$	$h$ —两悬挂点的高差, m;
			$l$ —档距, m;
			$l_a, l_b$ —导线任一点与悬挂点 A 或悬挂点 B 的水平距离, m;
			$l_{OA}, l_{OB}$ —导线最低点至悬挂点 A 或悬挂点 B 的水平距离, m;
			$L$ —一档线长 (档内线长), m;
			$l_r$ —代表档距, m;
			$l_i$ —耐张段中各档的档距, m;
			$\beta_i$ —耐张段中各档的悬挂角;
			$l_h$ —水平档距, m;
			$l_v$ —垂直档距, m;
			$l_1, l_2$ —杆塔两侧档的档距, m;
			$h_1, h_2$ —杆塔两侧档的高差, m; 相邻杆塔较低时, $h$ 取正值; 相邻杆塔较高时, $h$ 取负值;
			$\sigma_{01}, \sigma_{02}$ —杆塔两侧档的水平应力, N/mm <sup>2</sup> ; 对于直线杆塔, $\sigma_{01} = \sigma_{02}$ ;
			$g_v$ —垂直比载 ( $g_1$ 或 $g_3$ ), N/m·mm <sup>2</sup>



## 附注

- (1) 当  $h/l \leq 0.1$  时, 平抛物线计算式有较高的精度。
- (2) 当  $h/l > 0.15$  时, 宜用斜抛物线计算式;  $h/l$  增大, 其误差反而更小。但是, 斜抛物线不便刻制弧垂曲线定位模版

悬挂点不等高的导线的状态方程式

$$\sigma_n - \frac{g_n^2 l^2 E \cos^2 \beta}{24 \sigma_n^2} = \sigma_m - \frac{g_m^2 l^2 E \cos^2 \beta}{24 \sigma_m^2} - \alpha E \cos \beta (t_n - t_m) \quad (8-3-2)$$

以上式中  $\sigma_m, \sigma_n$ ——已知和待求条件下的应力,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$g_m, g_n$ ——已知和待求条件下的比载,  $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)$ ;

$t_m, t_n$ ——已知和待求条件下的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$l$ ——档距,  $\text{m}$ ;

$E$ ——导线的弹性系数, 见表 8-3-13、表 8-3-14,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

$\alpha$ ——导线的温度线膨胀系数, 见表 8-3-13、表 8-3-14,  $1/^{\circ}\text{C}$ 。

表 8-3-13 钢芯铝绞线的弹性系数和线膨胀系数

铝线股数	钢芯股数	铝钢截面积比	弹性系数 (实际值) ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )	线膨胀系数 (计算值) ( $1/^{\circ}\text{C}$ )
6	1	6.0	79	$19.1 \times 10^{-6}$
7	7	5.1	76	$18.5 \times 10^{-6}$
12	7	1.7	105	$15.3 \times 10^{-6}$
18	1	18.0	66	$21.2 \times 10^{-6}$
24	7	7.7	73	$19.6 \times 10^{-6}$
26	7	6.1	76	$18.9 \times 10^{-6}$
30	7	4.3	80	$17.8 \times 10^{-6}$
30	19	4.4	78	$18.0 \times 10^{-6}$
42	7	19.4	61	$21.4 \times 10^{-6}$
45	7	14.5	63	$20.9 \times 10^{-6}$
48	7	11.3	65	$20.5 \times 10^{-6}$
54	7	7.7	69	$19.3 \times 10^{-6}$
54	19	7.9	67	$19.4 \times 10^{-6}$

表 8-3-14 钢绞线的弹性系数和线膨胀系数

股数	弹性系数 (实际值) ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )	线膨胀系数 ( $1/^{\circ}\text{C}$ )	股数	弹性系数 (实际值) ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )	线膨胀系数 ( $1/^{\circ}\text{C}$ )
7	59	$23.0 \times 10^{-6}$	37	56	$23.0 \times 10^{-6}$
19	56	$23.0 \times 10^{-6}$	61	54	$23.0 \times 10^{-6}$

为了便于计算, 通常把状态方程式中的多个物理量组合成系数。以式 (8-3-1) 为例, 令

$$A = \frac{g_n^2 l^2 E}{24}; B = \frac{g_m^2 l^2 E}{24 \sigma_m^2} - \sigma_m + \alpha E (t_n - t_m)$$

则式 (8-3-1) 变为如下形式

$$\sigma_n^2 (\sigma_n - B) = A \text{ 或 } \sigma_n^3 - B \sigma_n^2 - A = 0 \quad (8-3-3)$$

式 (8-3-3) 为三次方程, 可借助电子计算机采用迭代法求解; 也可用电子计算器, 按如下方法求解:

$$\text{判别式 } \Delta = \frac{13.5A}{|B|^3} \pm 1$$

$$\text{当 } \Delta \geq 1, \text{ 令 } \theta = \operatorname{arcch} \Delta, \text{ 则 } \sigma_n = \frac{|B|}{3} \left( 2 \operatorname{ch} \frac{\theta}{3} \pm 1 \right);$$

$$\text{当 } \Delta < 1, \text{ 令 } \theta = \arccos \Delta, \text{ 则 } \sigma_n = \frac{|B|}{3} \left( 2 \cos \frac{\theta}{3} \pm 1 \right);$$

$$\text{当 } \Delta = 0, \text{ 则 } \sigma_n = \sqrt[3]{A}.$$

以上式中的“ $\pm$ ”号,如 $B > 0$ 时,取“+”号;如 $B < 0$ 时,取“-”号。

例如:  $\sigma_n^3 + 10\sigma_n^2 - 100 = 0$ , 其中  $B = -10 < 0$ , 则

$$\Delta = \frac{13.5A}{|B|^3} - 1 = \frac{13.5 \times 100}{10^3} - 1 = 0.35 < 1, \theta = \arccos 0.35 = 69.5217^\circ$$

$$\sigma_n = \frac{|B|}{3} \left( 2 \cos \frac{\theta}{3} \pm 1 \right) = \frac{10}{3} \left( 2 \cos \frac{69.5217}{3} - 1 \right) = 2.7956$$

$$\text{注: 双曲正弦 } \operatorname{sh} x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \frac{x^7}{7!} + \dots;$$

$$\text{双曲余弦 } \operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} = 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \frac{x^6}{6!} + \dots;$$

$$\text{反双曲正弦: 若 } x = \operatorname{sh} y, \text{ 则 } y = \operatorname{arcs} h x = \pm \ln(x + \sqrt{x^2 + 1});$$

$$\text{反双曲余弦: 若 } x = \operatorname{ch} y, \text{ 则 } y = \operatorname{arc} c h x = \pm \ln(x + \sqrt{x^2 - 1}), x \geq 1.$$

### 8.3.6.5 最大应力和最大弧垂的控制条件

(1) 对于某一耐张段,导线应力计算的控制条件有4种: ①最大使用应力与最低气温; ②最大使用应力与最大覆冰; ③最大使用应力与最大风速; ④年平均运行应力与年平均气温。

(2) 分析导线状态方程式可知,档距很小时,导线应力主要取决于气温变化;档距很大时,导线应力主要取决于荷载大小。因此,在某个档距下,可使最大比载和最低气温两种气象条件的导线应力分别等于各自的控制应力。这个档距就是两种控制条件之间的临界档距,其计算式为

$$l_c = \sqrt{\frac{24(\sigma_m - \sigma_n) + 24\alpha(t_m - t_n)}{\left(\frac{g_m}{\sigma_m}\right)^2 - \left(\frac{g_n}{\sigma_n}\right)^2}} \quad (8-3-4)$$

当两种控制条件的控制应力相等时,可简化为

$$l_c = \sqrt{\frac{24\alpha(t_m - t_n)}{g_m^2 - g_n^2}} \quad (8-3-5)$$

以上各式中  $l_c$ ——临界档距, m;

$\sigma_m, \sigma_n$ ——两种控制条件的控制应力, MPa;

$g_m, g_n$ ——两种控制气象条件的比载, N/(m·mm<sup>2</sup>);

$t_m, t_n$ ——两种控制气象条件的气温, °C;

$\alpha$ ——导线的温度线膨胀系数, 1/°C;

$E$ ——导线的弹性系数， $N/mm^2$ 。

(3) 控制条件有4种，对其两两配对，则有6种组合；相应的临界档距共有6个。由于每种控制条件的档距区间是连续的，即使控制条件均起作用，也只能有4个档距区间，即有效临界档距不超过3个。因此需要判别出有效临界档距，进而确定各档距区间的导线应力受哪个控制条件控制。这样，代表档距处在哪个档距区间，就以其控制条件的最大使用应力、比载、气温等为已知量，利用导线状态方程式求得其他气象条件下的应力、弧垂等。

(4) 判别有效临界档距，有一整套成熟的方法，但流程较复杂。对于市区的配电线路，可认为导线最大应力出现的气象条件为：①最低气温，无冰，无风；②最大覆冰， $-5^{\circ}C$ ，相应风速（详见8.3.5）。将这两个条件代入式（8-3-5），即可求出临界档距。当代表档距小于临界档距，导线最大应力发生在最低气温时；反之，则发生在最大覆冰时。

(5) 导线的最大弧垂可能发生在最高气温时或最大覆冰时。也有采用临界温度或临界比载判别最大弧垂的方法，但不够直观。采用最大弧垂比较法是非常简便的，方法为：当 $g_3/\sigma_3 > g_1/\sigma_1$ 时，最大弧垂发生在最大覆冰时；反之，则发生在最高气温时。上述 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 均指某一代表档距下的应力。进行判别时应考虑应力随代表档距不同而变。

### 8.3.7 导线在杆塔上的排列

(1) GB 50061—2010 规定：

7.0.3 架空电力线路导线的线间距离应结合运行经验，并按下列要求确定：

1 35kV 和 66kV 杆塔的线间距离应按下列各式计算：

$$D \geq 0.4L_k + \frac{U}{110} + 0.65\sqrt{f} \quad (7.0.3-1)$$

$$D_x \geq \sqrt{D_p^2 + \left(\frac{4}{3}D_z\right)^2} \quad (7.0.3-2)$$

$$h \geq 0.75D \quad (7.0.3-3)$$

以上式中：

$D$ ——导线水平线间距离，m；

$D_x$ ——导线三角排列的等效水平线间距离，m；

$D_p$ ——导线间水平投影距离，m；

$D_z$ ——导线间垂直投影距离，m；

$L_k$ ——悬垂绝缘子串长度，m；

$U$ ——线路电压，kV；

$f$ ——导线最大弧垂，m；

$h$ ——导线垂直排列的垂直线间距离，m。

2 使用悬垂绝缘子串的杆塔，其线间垂直距离应符合下列规定：66kV 时，不应小于2.25m；35kV 时，不应小于2m。

3 采用绝缘导线的杆塔，其最小线间距离可结合地区经验确定。380V 及以下沿墙敷设的绝缘导线，当档距不大于20m 时，其线间距离不宜小于0.2m；3kV 以下架空电力线路，靠近电杆的两导线间的水平距离不应小于0.5m；10kV 及以下杆塔的最小线间距离，应符合表7.0.3 的规定。

表 7.0.3 10kV 及以下杆塔架空线路导线间的距离

单位: m

线路电压	档距 (m)								
	40 及以下	50	60	70	80	90	100	110	120
3kV ~ 10kV	0.60	0.65	0.70	0.75	0.85	0.90	1.00	1.05	1.15
3kV 以下	0.30	0.40	0.45	0.50	—	—	—	—	—

7.0.4 采用绝缘导线的多回路杆塔,横担间最小垂直距离,可结合地区运行经验确定。10kV 及以下多回路杆塔和不同电压等级同杆架设的杆塔,横担间最小垂直距离应符合表 7.0.4 的规定。

表 7.0.4 10kV 及以下多回路杆塔线路横担间的最小垂直距离

单位: m

多回路组合方式	直线杆	转角杆或分支杆
3kV ~ 10kV 与 3kV ~ 10kV	0.8	0.45/0.6
3kV ~ 10kV 与 3kV 以下	1.2	1.0
3kV 以下与 3kV 以下	0.6	0.3

注:表中 0.45/0.6 系指距上面的横担 0.45m,距下面的横担 0.6m。

7.0.5 设计覆冰厚度为 5mm 及以下的地区,上下层导线间或导线与地线间的水平偏移,可结合各地区的运行经验确定;对设计冰厚为 20mm 及以上的重冰地区,导线宜采用水平排列。35kV 和 66kV 架空线路,在覆冰地区上下层导线间或导线与地线的水平偏移,不应小于表 7.0.5 所列数值。

表 7.0.5 覆冰地区上下层导线间或导线与地线间的最小水平偏移

设计覆冰厚度 (mm)	最小水平偏移 (m)	
	线路电压 35kV	线路电压 66kV
10	0.20	0.35
15	0.35	0.50
≥20	0.85	1.00

7.0.6 3kV ~ 66kV 多回路杆塔,不同回路的导线间最小距离,应符合表 7.0.6 的规定。

表 7.0.6 不同回路的导线间最小距离

单位: m

线路电压	3kV ~ 10kV	35kV	66kV
线间距离	1.0	3.0	3.5

采用绝缘导线的杆塔,不同回路的导线间的最小水平距离可结合各地区的运行经验确定。

【编者按】表 7.0.6 的规定应指裸线,而非绝缘线。因此,把原条文分号前的一句话移

到后面，以免误解。

7.0.7 66kV 与 10kV 同杆塔共架的线路，不同电压等级导线间的垂直距离不应小于 3.5m；35kV 与 10kV 同杆塔共架的线路，不同电压等级导线间的垂直距离不应小于 2m。

(2) 向一般负荷供电的 10kV 及以下高低压线路宜同杆架设。为了维修方便和减少停电几率，直线杆横担不宜超过 4 层（包括路灯线路），具体可按下列情况而定：

- 1) 仅高压线路时为二回路；
- 2) 仅低压线路时为四回路；
- 3) 高低压同杆时为四回路（其中允许有两路高压）。

同杆架设的线路，高压线路在上，低压线路在下，路灯线路应架设在最下面。

(3) 向重要负荷供电的双电源线路，不应同杆架设。

(4) 380V 及以下架空线路的中性导体应靠近电杆或建筑物侧，不高于相导体的位置。在同一地区内，中性导体的位置应统一。路灯线的熔断器应装在导线之下。

(5) 3~10kV 架空线路的过引线（引流线）、引下线至与相邻导线的净空距离，不应小于 0.3m；1kV 及以下时，不应小于 0.15m。

(6) 3~10kV 架空线路的导线与拉线、导线与电杆、导线与构件的净空距离，不应小于 0.2m；1kV 及以下时，不应小于 0.15m。

(7) 3~10kV 架空线路的引下线与低压线间的距离不宜小于 0.2m。

(8) 进户线的线间距离不应小于表 8-3-15 所列数值。

表 8-3-15 进户线的线间距离

进户线型式	支持点距离 (mm)	线间距离 (mm)
低压进户线自电杆引下	250 及以下	150
	250 以上	200
低压进户线沿墙敷设	60 及以下	100
	60 以上	150
高压进户线		450

(9) 低压进户线的相线和中性线交叉处，为防止混线，应保持一定的距离，必要时应采取绝缘措施，例如加绝缘瓷套管等。

(10) 低压进户线与通信线路的交叉距离，应不小于下列数值：

- 1) 低压进户线在通信线路上方时，应不小于 600mm；
- 2) 低压进户线在通信线路下方时，应不小于 300mm。

如不能满足以上要求时，可加绝缘瓷套管隔离。

(11) 通信电缆与 3~10kV 架空线路同杆共架时，其间距不得小于 2.5m。通信电缆与 1kV 及以下架空线路同杆共架时，其间距不得小于 1.5m。

### 8.3.8 杆塔型式

#### 8.3.8.1 杆塔型式的选择

杆塔型式主要取决于电压等级、回路数及使用条件。目前各级电压等级的线路常用的杆塔有钢筋混凝土杆和铁塔两种。不同杆塔型式的主要特点见表 8-3-16。

表 8-3-16

杆塔型式特点

型式	特点
直线型 直线杆塔	<p>(1) 用在线路的直线部分, 主要承受导线重量和侧面风力, 杆塔结构较简单, 一般不设拉线。</p> <p>(2) 正常情况下不能承受沿线路方向较大的不平衡张力。</p> <p>(3) 断线时不能限制事故范围。</p> <p>(4) 紧线时不能用以支持线条拉力。</p> <p>(5) 送电线路一般不能转角, 有的可兼有不大于<math>5^\circ</math>的小转角, 配电线路视导线截面积可有小于等于<math>15^\circ</math>或<math>30^\circ</math>的转角</p>
耐张杆塔	<p>(1) 为限制倒杆塔或断线的事故范围, 需把线路的直线部分划分为若干耐张段, 在耐张段的两侧设置耐张杆塔。耐张杆塔除承受导线重量和侧面风力外, 还要承受邻档导线拉力差所引起的沿线路方向的拉力。为平衡此拉力, 通常在耐张杆塔的前后方各设拉线。</p> <p>(2) 正常情况下能承受沿线路方向较大的不平衡张力。</p> <p>(3) 断线时能限制事故范围。</p> <p>(4) 紧线时能用以支持线条拉力。</p> <p>(5) 能转不大于<math>5^\circ</math>的小转角</p>
耐张型 转角杆塔	<p>(1) 特点同耐张杆塔, 但位于线路的转角点。转角一般分为<math>15^\circ</math>、<math>30^\circ</math>、<math>45^\circ</math>、<math>60^\circ</math>、<math>90^\circ</math>五种。</p> <p>(2) 转角杆的结构随线路转角不同而不同:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 转角杆在<math>15^\circ</math>以内时, 可仍用原横担承受转角合力。</li> <li>2) 转角杆在<math>15^\circ \sim 30^\circ</math>时, 可用双横担, 在转角合力的反方向设一根拉线。</li> <li>3) 转角杆在<math>30^\circ \sim 45^\circ</math>时, 除用双横担外, 两侧导线应用跳线连接, 在导线拉力反方向各设一根拉线。</li> <li>4) 转角杆在<math>45^\circ \sim 90^\circ</math>时, 用两对横担构成双层, 两侧导线用跳线连接, 同时在导线拉力反方向各设一根拉线</li> </ol>
终端杆塔	<p>(1) 特点同转角杆塔, 但位于线路的起点和终点。有时因受地形、地面建(构)筑物的限制, 转角大于<math>90^\circ</math>。</p> <p>(2) 终端杆塔承受导线的单方向拉力。电杆需在导线的反方向设拉线</p>
分支杆塔	<p>(1) 分支杆塔设在分支线路连接处。在分支杆上应设拉线, 用来平衡分支线拉力。</p> <p>(2) 分支杆结构分为丁字分支和十字分支两种。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 丁字分支是在横担下方增设一层双横担, 以耐张方式引出分支线。</li> <li>2) 十字分支是在原横担下方设两根互成<math>90^\circ</math>的横担, 然后引出分支线</li> </ol>
特殊杆塔	有跨越杆塔、换位杆塔等

### 8.3.8.2 横担选择

(1) 设计横担时, 应尽量使用同一种导线用的单横担与双横担, 采用相同规格的钢材, 并在同一区段内的同一种横担的线间距应尽量相同, 以便减少横担的规格种类。

(2) 根据受力情况可分为中间型、耐张型和终端型横担。中间型横担只承受导线的垂直荷载。耐张型横担主要承受两侧导线的拉力差。终端型横担主要承受导线的最大允许拉力。横担结构类型与相应的杆型及受力情况见表 8-3-17。

表 8-3-17 横担类型与相应的杆型及其受力情况

横担类型	杆 型	承 受 荷 载
单横担	直线杆, 15°以下转角杆	导线的垂直荷载
双横担	15°~45°转角杆, 耐张杆 (两侧导线无拉力差)	导线的垂直荷载
	45°以上转角杆、终端杆、分支杆	(1) 一侧导线最大允许拉力的水平荷载。 (2) 导线的垂直荷载
	耐张杆 (两侧导线有拉力差), 大跨越杆	(1) 两侧导线的拉力差的水平荷载。 (2) 导线的垂直荷载
带斜撑的 双横担	终端杆、分支杆、终端型转角杆	(1) 一侧导线最大允许拉力的水平荷载。 (2) 导线的垂直荷载
	大跨越杆	(1) 两侧导线的拉力差的水平荷载。 (2) 导线的垂直荷载

(3) 架空配电线路与铁路、道路、管道及各种架空线路交叉跨越杆塔的悬垂线夹, 应采用固定型。

(4) 35kV 架空线路通过厂区时, 应采用固定横担和固定线夹。

### 8.3.9 杆塔荷载

GB 50061—2010 规定:

8.1.1 风向与杆塔面垂直情况的杆塔塔身或横担风荷载的标准值应按下列式计算

$$W_s = \beta \mu_s \mu_z A W_0 \quad (8.1.1)$$

式中:

$W_s$  ——杆塔塔身或横担风荷载的标准值, kN;

$\beta$  ——风振系数, 按本规范 8.1.5 条的规定采用;

$\mu_s$  ——风荷载体型系数;

注: 对环形断面钢筋混凝土杆, 取 0.6; 对矩形断面钢筋混凝土杆, 取 1.4。

$\mu_z$  ——风压高度变化系数;

注: 对 15m 高以下的杆塔取 0.74; 对 15m~20m 高的杆塔取 0.84; 对 20m~30m 高的杆塔取 1.0。

$A$  ——杆塔结构构件迎风面的投影面积,  $m^2$ ;

$W_0$  ——基本风压,  $kN/m^2$ 。

8.1.2 风向与线路垂直情况的导线或地线的风荷载标准值, 应按下列式计算

$$W_x = \alpha \mu_s d L_w W_0 \quad (8.1.2)$$

式中:

$W_x$  ——导线或接闪线的风荷载的标准值, kN;

$\alpha$  ——风荷载档距系数, 按本规范 8.1.6 条的规定采用;

$d$  ——导线或接闪线覆冰后的计算外径之和, m (对分裂导线, 不应考虑线间的屏蔽影响);

$\mu_s$  ——风荷载体型系数 (当  $d < 17mm$ , 取 1.2; 当  $d \geq 17mm$ , 取 1.1; 覆冰时取 1.2);

$L_w$  ——风力档距, m。

8.1.3 各类杆塔均应按以下三种情况计算塔身、横担、导线和地线的风荷载:

1) 风向与线路方向相垂直, 转角塔应按转角等分线方向;

2) 风向与线路方向的夹角成  $60^\circ$  或  $45^\circ$ ;

3) 风向与线路方向相同。

8.1.5 拉线高塔和其他特殊杆塔的风振系数  $\beta$ , 宜按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定采用, 也可按表 8.1.5 的规定采用。

表 8.1.5 杆塔的风振系数

部 位	杆塔总高度 (m)		
	<30	30~50	>50
塔身	1.0	1.2	1.5
基础	1.0	1.0	1.2

8.1.6 风荷载档距系数  $\alpha$  应按表 8.1.6 采用。

表 8.1.6 风荷载档距系数

设计风速 (m/s)	20 以下	20~29	30~34	35 以上
$\alpha$	1.0	0.85	0.75	0.7

8.1.8 各类杆塔均应计算线路的运行工况、断线工况和安装工况的荷载。

8.1.9 各类杆塔的运行工况应计算下列工况的荷载:

- 1) 最大风速、无冰、未断线;
- 2) 覆冰、相应风速、未断线;
- 3) 最低气温、无风、无冰、未断线。

8.1.10 直线型杆塔的断线工况应计算下列工况的荷载:

- 1) 单回路和双回路杆塔断 1 根导线、地线未断、无风、无冰;
- 2) 多回路杆塔, 同档断不同相的 2 根导线、地线未断、无风、无冰;
- 3) 断 1 根地线、导线未断、无风、无冰。

8.1.11 耐张型杆塔在断线工况应计算下列工况的荷载:

- 1) 单回路杆塔, 同档断两相导线; 双回路或多回路杆塔, 同档断导线的数量为杆塔上全部导线数量的  $1/3$ ; 终端塔断两相导线、地线未断、无风、无冰。
- 2) 断一根地线、导线未断、无风、无冰。

8.1.12 断线工况下, 直线杆塔的导线或地线张力应符合下列规定:

- 1) 单导线和地线不应小于表 8.1.12 所列数值;
- 2) 分裂导线平地应取 1 根导线最大使用张力的 40%, 山地应取 50%;
- 3) 针式绝缘子杆塔的导线断线张力宜大于 3000N。

表 8.1.12 直线杆塔单导线和地线的断线张力

导线或地线种类		断线张力 (最大张力的百分数) (%)		
		混凝土杆、钢管混凝土杆	拉线塔	自立塔
地 线		15~20	30	50
导线	截面积 $95\text{mm}^2$ 及以下	30	30	40
	截面积 $120\text{mm}^2 \sim 185\text{mm}^2$	35	35	40
	截面积 $240\text{mm}^2$ 及以上	40	40	50

8.1.13 断线工况下，耐张型杆塔的地线张力应取地线最大使用张力的80%，导线张力应取导线最大使用张力的70%。

8.1.14 重冰地区各类杆塔的断线工况应按覆冰、无风、气温为 $-5^{\circ}\text{C}$ 计算，断线工况的覆冰荷载不应小于运行工况计算覆冰的50%，并按所有导线及地线不均匀脱冰，一侧覆冰100%，另一侧覆冰不大于50%计算不平衡张力荷载。对直线杆塔，可按导线和接闪线不同时发生不均匀脱冰验算。对耐张型杆塔，可按导线和地线同时发生不均匀脱冰验算。

8.1.15 各类杆塔的安装工况应按安装荷载、相应风速、无冰条件计算。导线和地线及其附件的起吊安装荷载，应包括提升重力、紧线张力荷载和安装人员及工具的重力。

8.1.16 终端杆塔应按进线档已架线及未架线两种工况计算。

### 8.3.10 电杆、拉线与基础

(1) 环形断面钢筋混凝土电杆的钢筋宜采用Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级钢筋；预应力混凝土电杆的钢筋宜采用碳素钢丝、刻痕钢丝、热处理钢筋或冷拉Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级钢筋。混凝土基础的钢筋宜采用Ⅰ级或Ⅱ级钢筋。

(2) 环形断面钢筋混凝土电杆的混凝土强度不应低于C30；预应力混凝土电杆的混凝土强度不应低于C40。其他预制混凝土强度不应低于C20。

(3) 混凝土和钢筋的材料强度设计值与标准值应按现行国家标准 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》的有关规定采用。

(4) 拉线杆塔主柱的长细比不宜超过表 8-3-18 所列数值。

表 8-3-18 拉线杆塔主柱的长细比

拉线杆塔主柱	拉线杆塔主柱的长细比
单柱铁杆	80
双柱铁杆	110
钢筋混凝土耐张杆	160
钢筋混凝土直线杆	180
预应力混凝土耐张杆	180
预应力混凝土直线杆	200
空心钢管混凝土直线杆	200

(5) 无拉线锥型单杆可按受弯构件计算，弯矩应乘以增大系数 1.1。

(6) 环形断面混凝土应符合现行国家标准 GB 50010—2010 的有关规定。

(7) 环形断面钢筋混凝土受弯构件的最小配筋量不应小于表 8-3-19 所列数值。

表 8-3-19 环形断面钢筋混凝土受弯构件最小配筋量

环形断面的外径 (mm)	200	250	300	350	400
最小配筋量	8 $\phi$ 10	10 $\phi$ 10	12 $\phi$ 12	14 $\phi$ 12	16 $\phi$ 12

(8) 环形断面钢筋混凝土受弯构件的主筋直径不宜小于 10mm，宜不大于 20mm；主筋净距宜采用 30~70mm。

(9) 用离心法生产的电杆, 混凝土保护层不宜小于 15mm, 节点预留孔宜设置钢管。

(10) 拉线宜采用镀锌钢绞线, 截面积不应小于  $25\text{mm}^2$ 。拉线棒的直径不应小于 16mm, 且应热镀锌。

(11) 跨越道路的拉线, 对路边的垂直距离不宜小于 6m。拉线柱的倾斜角宜采用  $10^\circ \sim 20^\circ$ 。

(12) 基础的型式应根据线路沿线的地形、地质、材料来源、施工条件和杆塔型式等因素综合确定。在有条件的情况下, 应优先采用原状土基础、高低柱基础等有利于环境保护的基础型式。

(13) 基础应根据杆位或塔位的地质资料进行设计。现场浇制钢筋混凝土基础的混凝土强度等级不应低于 C20。

(14) 基础设计应考虑地下水位季节性的变化。位于地下水位以下的基础和土壤应考虑水的浮力并取有效重度。计算直线杆塔基础的抗拔稳定时, 对塑性指数大于 10 的黏性土可取天然重度。黏性土应根据塑性指数分为粉质黏土和黏土。

(15) 原状土基础在计算上拔稳定时, 抗拔深度应扣除表层非原状土的深度。

(16) 基础的埋置深度不应小于 0.5m。在有冻胀性土的地区, 埋深应按地基土的冻结深度和冻胀性土的类别确定。有冻胀性土的地区的钢筋混凝土杆和基础应采取防冻胀的措施。

(17) 设置在河流两岸或河中的基础应根据地质水文资料进行设计, 并应计入水流对地基的冲刷和漂浮物对基础的撞击影响。

(18) 基础设计(包括地脚螺栓、插入角钢设计)时, 基础作用力计算应计入杆塔风荷载调整系数。当杆塔全高超过 50m 时, 风荷载调整系数取 1.3; 当杆塔全高未超过 50m 时, 风荷载调整系数取 1.0。

(19) 10kV 及以下架空线路混凝土杆埋设深度, 不应小于表 8-3-20 所列数值, 并进行倾覆稳定验算。

表 8-3-20

10kV 及以下架空线路电杆埋深

m

	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	15.0
杆高							
埋深	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.3

# 变配电站控制、测量仪表、继电保护 及自动装置<sup>①</sup>

## 9.1 变配电站控制、测量和信号设计要求

### 9.1.1 变配电站的控制、信号回路的设计原则

(1) 控制、信号回路一般分为控制保护回路、合闸回路、事故信号回路、预告信号回路、隔离开关与断路器闭锁回路等。

(2) 断路器的控制、信号回路电源取决于操动机构的型式和控制电源的种类。断路器一般采用电磁或弹簧操动机构。弹簧操动机构的控制电源可用直流也可用交流，电磁操动机构的控制电源要用直流。

(3) 断路器的控制、信号回路接线可采用灯光监视方式或音响监视方式。工业企业和民用建筑变配电站一般采用灯光监视的接线方式。

(4) 断路器的控制、信号回路的接线要求：

1) 应能监视电源保护装置（熔断器或低压断路器）及跳、合闸回路的完整性（在合闸线圈及合闸接触器线圈上不允许并接电阻）。

2) 应能指示断路器合闸与跳闸的位置状态，自动合闸或跳闸时应有明显信号。

3) 有防止断路器跳跃（简称“防跳”）的闭锁装置。

4) 合闸或跳闸完成后应使命令脉冲自动解除。

5) 接线应简单可靠，使用电缆芯最少。

(5) 断路器事故跳闸信号回路，可采用不对应原理的接线。当断路器为电磁或弹簧操动时，利用控制开关与操动机构辅助触点构成不对应接线。

(6) 各断路器应有事故跳闸信号，事故信号能使中央信号装置发出音响及灯光信号。用灯光（平光或闪光）表示本回路发生事故，并用信号继电器直接指示故障的性质。

(7) 断路器的控制、信号回路根据需要可采用闪光信号装置，用以与事故信号和自动装置配合，指示事故跳闸和自动投入的回路。绿灯闪光表示断路器自动跳闸，红灯闪光表示断路器自动合闸（通常有自动投入装置时，才将红灯接入闪光）。

当断路器的转换开关采用 LW12、LW2 型时，要求将红灯也接入闪光信号回路，使闪光信号还能起到对位作用。转换开关在“预备跳闸”位置时红灯闪光，转换开关在“预备合闸”位置时绿灯闪光。

(8) 有可能出现不正常情况的线路和回路，应有预告信号。预告信号应能使中央信号

① 本章主要依据 GB/T 50062—2008《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》、GB/T 50063—2008《电力装置的电测量仪表装置设计规范（附条文说明）》和《工业与民用配电设计手册（第三版）》。

装置发出音响及灯光信号，并用信号继电器直接指示故障的性质、发生故障的线路及回路。

预告信号一般包括下列内容，可按需要装设。

- 1) 变压器过负荷。
- 2) 变压器温度过高（油浸变压器为油温过高）。
- 3) 变压器温度信号装置电源故障。
- 4) 变压器轻瓦斯动作（油浸变压器）。
- 5) 变压器压力释放装置动作。
- 6) 自动装置动作。
- 7) 控制回路内故障（熔断器熔丝熔断或自动开关跳闸）。
- 8) 保护回路断线或跳、合闸回路断线。
- 9) 交流系统绝缘降低（高压中性点不接地系统）。
- 10) 直流系统绝缘降低。

11) 当采用微机监控综合自动化系统时，应在变电站内设置一套微机中央信号监控装置。此装置能完成全站事故信号与预告信号报警，同时可将全站各种信息传送至监控主机。

装置测量部分可完成直流系统电压及控制回路电流，变压器油温及环境温度的测量。

装置监视部分能实现装置故障报警、直流系统接地报警、直流电压过高报警、直流电压过低报警、预告音响报警、事故音响报警及变压器油温高报警。

### 9.1.2 变配电站电气测量设计要求

#### 1. 一般规定

(1) 电气测量仪表的装设应满足下列要求：

1) 电测量装置的配置应正确反映电力装置的电气运行参数和绝缘状况。

2) 电测量装置宜包括计算机监控系统的测量部分、常用电测量仪表，以及其他综合装置中的测量部分。

3) 电测量装置可采用直接仪表测量、一次仪表测量或二次仪表测量。

(2) 电测量装置的准确度要求不应低于表 9-1-1 的规定。

表 9-1-1 电测量装置的准确度要求

电测量装置类型名称		准确度（级）
计算机监控系统的测量部分（交流采样）		误差不大于 0.5%，其中电网频率测量误差不大于 0.01Hz
常用电测量仪表、 综合装置中的测量部分	指针式交流仪表	1.5
	指针式直流仪表	1.0（经变送器二次测量）
	指针式直流仪表	1.5
	数字式仪表	0.5
	记录型仪表	应满足测量对象的准确度要求

(3) 交流回路指示仪表的综合准确度不应低于 2.5 级，直流回路指示仪表的综合准确度不应低于 1.5 级，接于电测量变送器二次侧仪表的准确度不应低于 1.0 级。仪表用电流、电压互感器及附件、配件的准确度不应低于表 9-1-2 的规定。

表 9-1-2 仪表用电流、电压互感器及附件、配件的准确度最低要求

仪表准确度等级	准确度最低的要求（级）			
	电流、电压互感器	变送器	分流器	中间互感器
0.5	0.5	0.5	0.5	0.2
1.0	0.5	0.5	0.5	0.2
1.5	1.0	0.5	0.5	0.2
2.5	1.0	0.5	0.5	0.5

注 0.5 级指数字式仪表的准确度等级。

(4) 指针式测量仪表的测量范围，宜保证电力设备额定值指示在仪表标度尺的 2/3 处左右。对于有可能过负荷运行的电力设备和回路，测量仪表宜选用过负荷仪表。

(5) 对多个同类型电力设备和回路可采用选择测量。根据生产工艺和运行监视的要求，可采用变送器、切换装置和公用二次仪表组成的选测接线。

(6) 经变送器的二次测量宜采用磁电系列直流仪表，其满刻度值应与变送器的校准值相匹配。

(7) 对双向电流的直流回路和双向功率的交流回路，应采用具有双向标度尺的电流表和功率表，对有极性的直流电流和电压回路，应采用具有极性的仪表。

(8) 对重载起动的电动机以及有可能出现短时冲击电流的电力设备和回路，宜采用具有过负荷标度尺的电流表。

(9) 当发电厂和变电站设有远动遥测，计算机监测（控）系统且用直流系统采样时，二次测量仪表、计算机、远动遥测三者宜共用一套变送器。

(10) 励磁回路仪表的上限值不得低于额定工况的 1.3 倍，仪表的综合误差不得超过 1.5%。

(11) 无功补偿装置的测量仪表量程应满足设备允许通过的最大电流和允许耐受的最高电压的要求。并联电容器组的电流测量应按并联电容器组持续通过的电流为其额定电流的 1.35 倍设计。

(12) 计算机监控系统中的测量部分、综合装置中的测量部分，当其精度满足要求时，可取代相应的常用电测量仪表。

(13) 直接仪表测量中配置的电测量装置，应满足相应一次回路动热稳定的要求。

2. 下列回路，应测量交流电流

(1) 同步发电机和发电/电动机的定子回路。

(2) 双绕组主变压器的一侧，三绕组主变压器的三侧，自耦变压器的三侧，自耦变压器公共绕组回路。

(3) 双绕组厂（站）用变压器的一侧及各分支回路，三绕组厂（站）用变压器的三侧，发电机励磁变压器的高压侧。

(4) 柴油发电机接至低压保安段进线及交流不停电电源的进线回路。

(5) 1200V 及以上的线路，1200V 以下的供电、配电和用电网络的总干线路。

(6) 母线联络断路器、母线分段断路器、旁路断路器和桥断路器回路。

(7) 10 ~ 66kV 低压并联电抗器和并联电容器回路。

(8) 50kV · A 及以上的照明变压器和消弧线圈回路。

(9) 55kW 及以上的电动机，55kW 以下保安用电动机。

3. 下列回路除应符合上述第2款的规定外, 还应测量三相交流电流

(1) 同步发电机和发电/电动机的定子回路。

(2) 110kV 及以上电压等级输电线路和变压器回路。

(3) 变压器低压侧装有无功补偿装置的总回路。

(4) 照明变压器、照明与动力共用的变压器, 照明负荷占 15% 及以上的动力与照明混合供电的 3kV 以下的线路。

(5) 三相负荷不平衡率大于 10% 的 1200V 及以上的电力用户线路, 三相负荷不平衡率大于 15% 的 1200V 以下的供电线路。

4. 下列回路, 宜测量负序电流, 且负序电流测量仪表的准确度不应低于 1.0 级

(1) 承受负序电流过负荷能力  $A$  值小于 10 的大容量汽轮发电机。

(2) 负荷不平衡率超过额定电流 10% 的发电机。

(3) 负荷不平衡率超过 0.1 倍额定电流的 1200V 及以上线路。

5. 下列回路, 应测量直流电流

(1) 同步发电机、发电/电动机和同步电动机的励磁回路, 自动及手动调整励磁的输出回路。

(2) 直流发电机及其励磁回路, 直流电动机及其励磁回路。

(3) 蓄电池组的输出回路, 充电及浮充电整流装置的输出回路。

(4) 重要电力整流装置的直流输出回路。

(5) 整流装置的电流测量宜包含谐波监测。

6. 下列回路, 应测量交流电压

(1) 同步发电机和发电/电动机的定子回路。

(2) 各电压等级的交流主母线。

(3) 电力系统联络线(线路侧)。

(4) 配置电压互感器的其他回路。

(5) 电力系统电压质量监视点和容量为 50MW 及以上的汽轮发电机电压母线, 应测量并记录交流电压。

(6) 110kV 及以上中性点有效接地系统的主母线、变压器回路应测量三个线电压, 66kV 及以下中性点有效接地系统的主母线、变压器回路可只测量一个线电压。单电压互感器接线的主母线、变压器回路可只测量单相电压或一个线电压。

7. 下列回路, 应监测交流系统的绝缘

(1) 同步发电机和发电/电动机的定子回路。

(2) 中性点非有效接地系统的母线和回路。

(3) 中性点非有效接地系统的主母线, 宜测量母线的三个线电压和监测绝缘的三个相电压。

(4) 发电机定子回路的绝缘监测, 可采用测量发电机电压互感器辅助二次绕组的零序电压方式, 也可采用测量发电机的三个相电压方式。

8. 下列回路, 应测量直流电压

(1) 同步发电机和发电/电动机的励磁回路, 相应的自动及手动调整励磁的输出回路。

- (2) 同步电动机的励磁回路。
- (3) 直流发电机回路。
- (4) 直流系统的主母线，蓄电池组、充电及浮充电整流装置的直流输出回路。
- (5) 重要电力整流装置的输出回路。

9. 下列回路，应监测直流系统的绝缘

- (1) 同步发电机和发电/电动机的励磁回路。
- (2) 同步电动机的励磁回路。
- (3) 直流系统的主母线和重要的直流回路。
- (4) 重要电力整流装置的输出回路。
- (5) 直流系统应装设直接测量绝缘电阻值的绝缘监测装置，其测量准确度不应低于

1.5级。

10. 下列回路，应测量有功功率

- (1) 同步发电机和发电/电动机的定子回路。
- (2) 双绕组主变压器的一侧，三绕组主变压器的三侧，以及自耦变压器的三侧。
- (3) 厂（站）用变压器：双绕组变压器的高压侧，三绕组变压器的三侧。
- (4) 3kV及以上输配电线路和用电线路。
- (5) 旁路断路器、母联（或分段）兼旁路断路器回路和35kV及以上的外桥断路器回路。
- (6) 发电机励磁变压器高压侧。
- (7) 双向送、受电运行的输配电线路、水轮发电机、发电/电动机和主变压器等设备，应测量双方向有功功率。

11. 下列回路，应测量无功功率

- (1) 同步发电机和发电/电动机的定子回路。
  - (2) 双绕组主变压器的一侧，三绕组主变压器的三侧，以及自耦变压器的三侧。
  - (3) 3kV及以上的输配电线路和用电线路。
  - (4) 旁路断路器、母联（或分段）兼旁路断路器回路和35kV及以上的外桥断路器回路。
  - (5) 10~66kV 低压并联电容器和电抗器组。
  - (6) 发电机励磁变压器高压侧。
12. 下列回路，应测量双方向的无功功率
- (1) 具有进相、滞相运行要求的同步发电机、发电/电动机。
  - (2) 主变压器低压侧装设并联电容器和电抗器的总回路。
  - (3) 10kV及以上用电线路。
13. 发电机、发电/电动机宜测量功率因数
14. 频率测量范围应为45~55Hz，准确度不应低于0.2级
15. 下列回路，应测量频率
- (1) 接有发电机变压器组的各段母线。
  - (2) 发电机。
  - (3) 电网有可能解列运行的各段母线。

#### 16. 静止补偿装置宜测量并记录的参数

- (1) 一个系统参考线电压。
- (2) 静止补偿装置所接母线的的一个线电压。
- (3) 静止补偿装置用中间变压器高压侧的三相电流。
- (4) 分组并联电容器回路的单相电流和无功功率。
- (5) 分组晶闸管投切电容器回路的单相电流和无功功率。
- (6) 分组谐波滤波器组回路的单相电流和无功功率。
- (7) 总回路的三相电流、无功功率和无功电能。
- (8) 当总回路下装设并联电容器和电抗器时，应测量双方向的无功功率，并应分别计量进相、滞相运行的无功电能。

#### 17. 公用电网谐波的监测

- (1) 公用电网谐波的监测可采用连续或专项监测。
- (2) 在谐波监测点，宜装设谐波电压和谐波电流测量仪表。谐波监测点应结合谐波源的分布布置，并应覆盖主网及全部供电电压等级。
- (3) 宜设置谐波监测点的回路。
  - 1) 系统指定谐波监测点（母线）。
  - 2) 10~66kV 无功补偿装置所连接母线的谐波电压。
  - 3) 向谐波源用户供电的线路送电端。
  - 4) 一条供电线路上接有两个及以上不同部门的谐波源用户时，谐波源用户受电端。
  - 5) 特殊用户所要求的回路。
  - 6) 其他有必要监测的回路。
- (4) 用于谐波测量的电流互感器和电压互感器的准确度不宜低于 0.5 级。
- (5) 谐波测量的次数不应少于 2~15 次。
- (6) 谐波电流和电压的测量可采用数字式仪表，测量仪表的准确度不宜低于 1.0 级。

### 9.1.3 变配电站电能计量设计要求

#### 1. 一般规定

(1) 电能计量装置应满足发电、供电、用电的准确计量的要求，以作为考核电力系统技术经济指标和实现贸易结算的计量依据。

(2) 电能计量装置按其所计量对象的重要程度和计量电能的多少分为五类：

1) I 类电能计量装置。月平均用电量 5000MWh 及以上或变压器容量为 10MVA 及以上的高压计费用户、200MW 及以上发电机、发电/电动机、发电企业上网电量、电网经营企业之间的电量交换点。省级电网经营企业与其供电企业的供电关口计量点的电能计量装置。

2) II 类电能计量装置。月平均用电量 1000MWh 及以上或变压器容量为 2MVA 及以上的高压计费用户、100MW 及以上发电机、发电/电动机、供电企业之间的电量交换点的电能计量装置。

3) III 类电能计量装置。月平均用电量 100MWh 以上或负荷容量为 315kVA 及以上的计费用户、100MW 以下发电机的发电企业厂（站）用电量、供电企业内部用于承包考核用的计量点、110kV 及以上电压等级的送电线路有功电量平衡的考核用、无功补偿装置的电能计

量装置。

4) IV类电能计量装置。负荷容量为315kVA以下的计费用户、发供电企业内部经济技术指标分析、考核用的电能计量装置。

5) V类电能计量装置。单相电力用户计费用的电能计量装置。

(3) 电能计量装置准确度最低要求见表9-1-3。

表9-1-3 电能计量装置的准确度最低要求

电能计量装置类别	准确度(级)			
	有功电能表	无功电能表	电压互感器	电流互感器
I类	0.2S	2.0	0.2	0.2S或0.2
II类	0.5S	2.0	0.2	0.2S或0.2
III类	1.0	2.0	0.5	0.5S
IV类	2.0	2.0	0.5	0.5S
V类	2.0			0.5S

注 0.2级电流互感器仅用于发电机计量回路。

(4) 电能表的电流和电压回路应分别装设电流和电压专用试验接线盒。

(5) 执行功率因数调整电费的用户，应装设具有计量有功电能、感性和容性无功电能功能的电能计量装置；按最大需量计收基本电费的用户应装设具有最大需量功能的电能表；实行分时电价的用户应装设复费率电能表或多功能电能表。

(6) 具有正向和反向输电的线路计量点，应装设计量正向和反向有功电能及四象限无功电能的电能表。

(7) 进相和滞相运行的发电机回路，应分别计量进相和滞相的无功电能。

(8) 中性点有效接地系统的电能计量装置应采用三相四线的接线方式；中性点非有效接地系统的电能计量装置宜采用三相三线的接线方式。经消弧线圈等接地的计费用户且年平均中性点电流大于0.1%额定电流时，应采用三相四线的接线方式；照明变压器、照明与动力共用的变压器、照明负荷占15%及以上的动力与照明混合供电的1200V及以上的供电线路，以及三相负荷不平衡率大于10%的1200V及以上的电力用户线路，应采用三相四线的接线方式。

(9) 应选用过载4倍及以上的电能表。经电流互感器接入的电能表，标定电流不宜超过电流互感器额定二次电流的30%（对S级为20%），额定最大电流宜为额定二次电流的120%。直接接入式电能表的标定电流应按正常运行负荷电流的30%选择。

(10) 当发电厂和变（配）电站装设远动遥测和计算机监控时，电能计量、计算机和远动遥测宜共用一套电能表。电能表应具有数据输出或脉冲输出功能，也可同时具有两种输出功能。电能表脉冲输出参数应满足计算机和远动遥测的要求，数据输出的通信规约应符合国家现行标准DL/T 645—2007《多功能电能表通信协议》的有关规定。

(11) 发电电能关口计量点和省级及以上电网公司之间电能关口计量点，应装设两套准确度相同的主、副电能表。发电企业上网线路的对侧应设置备用和考核计量点，并应配置与对侧相同规格、等级的电能计量装置。

(12) I类电能计量装置应在关口点根据进线电源设置单独的计量装置。

(13) 低压供电且负荷电流为50A及以下时,宜采用直接接入式电能表;负荷低压供电且电流为50A以上时,宜采用经电流互感器接入式的接线方式。

(14) I、II、III类电能计量装置应具有电压失压计时功能。

#### 2. 应计量有功电能的回路

(1) 同步发电机和发电/电动机的定子回路。

(2) 双绕组主变压器的一侧,三绕组主变压器的三侧,以及自耦变压器的三侧。

(3) 1200V及以上的线路,1200V以下网络的总干线路。

(4) 旁路断路器、母联(或分段)兼旁路断路器回路。

(5) 双绕组厂(站)用变压器的高压侧,三绕组厂(站)用变压器的三侧。

(6) 厂用、站用电源线路及厂外用电线路。

(7) 外接保安电源的进线回路。

(8) 3kV及以上高压电动机回路。

#### 3. 应计量无功电能的回路

(1) 同步发电机和发电/电动机的定子回路。

(2) 双绕组主变压器的一侧,三绕组主变压器的三侧,以及自耦变压器的三侧。

(3) 10kV及以上的线路。

(4) 旁路断路器、母联(或分段)兼旁路断路器回路。

(5) 66kV及以下低压并联电容器和并联电抗器组。

### 9.1.4 计算机监测(控)系统的测量

#### 1. 一般规定

(1) 计算机监控系统数据采集应符合9.1.2、9.1.3的有关规定,计算机监控系统采集的模拟量及电能数据量可按GB/T 50063—2008《电力装置的电测量仪表装置设计规范》附录C配置。

(2) 电气参数可通过计算机监控系统进行监测和记录,可不单独装设记录型仪表。

(3) 当采用计算机监控系统时,就地厂(站)用配电盘上应保留必要的测量表计或监测单元。

#### 2. 计算机监控系统的数据采集

(1) 计算机监控系统的电测量数据采集应包括模拟量和电能数据量。

(2) 模拟量的采集宜采用交流采样,也可采用直流采样。

(3) 交流采样的模拟量可根据运行需要适当增加电气计算量。

#### 3. 计算机监控时常用电测量仪表

(1) 计算机监控不设模拟屏时,控制室常用电测量仪表宜取消。计算机监控设模拟屏时,模拟屏上的常用电测量仪表应精简,并可采用计算机驱动的数字式仪表。

(2) 当发电厂采用计算机监控系统时,机组后备屏或机旁屏上发电机部分的常用电测量仪表可按GB/T 50063—2008附录C装设。

### 9.1.5 电气测量与电能计量仪表的装设

35kV及以下变配电站测量与计量仪表的装设见表9-1-4。

表 9-1-4 35kV 及以下变配电站测量与计量仪表的装设

线路名称		装设的表计数量						说 明
		电流表	电压表	有功功率表	无功功率表	有功电能表	无功电能表	
35kV								
35/6~10kV 双绕组变压器	高压侧	1		1	1	1	1	仪表装在变压器高压侧或低压侧 按具体情况确定
	低压侧							
3~10kV								
3~10kV 进线		1				1*	1*	* 10kV 及以上的线路应装设
3~10kV 母线 (每段母线)			4 或 1*			1	1	* 中性点有效接地系统的主母线， 应测量母线的三个线电压，也可用 一只电压表和切换开关测母线的三 个线电压 中性点非有效接地系统的主母 线，宜测量母线的的一个线电压和监 测绝缘的三个相电压，或使用一只 电压表和切换开关选测母线的的一 个线电压和三个相电压
消弧线圈		1						需要时装设记录型电流表
3~10kV 联络线		1		1		2*	2*	* 电能表只装在线路的一端，感 应式电能表应带有逆止机构
3~10kV 出线		1				1	1	10kV 及以上线路应装设
6~10/3~6kV 变压器	高压侧	1				1	1	仪表装在变压器高压侧或低压 侧，按具体情况确定
	低压侧							
6~10/0.4kV 变压器	高压侧	1				1	1	
整流变压器		1				1		如为冲击负荷，按需要可再装设 记录型有功、无功功率表各一只。 当冲击负荷由数台整流变压器组成 供电时，可只计量总的有功、无功 功率，例如将表计装在进线上或上 级变电站的出线上
电炉变压器		1				1		如为了掌握电炉的运行情况而必 须监视三相电流时，可装设三只电 流表
同步电动机		1			1	1	1	如成套控制屏上已装有有功、无 功电能表时，配电装置上可不再装 设。装功率因数表比装无功功率表 好，可直接指示功率因数的超前 滞后
异步电动机		1*				1*		* ≥55kW 和 55kW 以下易过负荷 的电动机，需要进行技术经济考核 的高压电动机
静电电容器		3					1	

续表

线路名称	装设的表计数量						说 明
	电流表	电压表	有功功率表	无功功率表	有功电能表	无功电能表	
0.38kV							
进线或变压器低压侧	3						如变压器高压侧未装电能表时,还应装设有功电能表一只
母线(每段)		1					
出线(>100A)	1						<100A的线路,根据生产过程的要求,需进行电流监视时,可装设一只电流表; 三相长期不平衡运行的线路如动力和照明混合的线路,在照明负荷占总负荷的15%~20%以上时,应装设三只电流表; 送往单独的经济核算单位的线路,应加装有功电能表一只

### 9.1.6 变配电站交流电流、电压回路及互感器的选择

#### 9.1.6.1 测量与计量用电流互感器的选择

(1) 电流互感器的选择除应满足一次回路的额定电压、最大负荷电流及短路时的动、热稳定电流要求外,还应满足二次回路测量仪表、继电保护和自动装置的要求。

(2) 各种测量与计量仪表对电流互感器准确度的要求见本节设计原则中的有关规定。

(3) 当一个电流互感器的回路内有几个不同型式的仪表时,电流互感器的准确度等级应按对准确度要求高的仪表选择。

(4) 对于 I、II、III 类计费用的电能计量装置,宜按计量点设置专用电流互感器或二次绕组。

(5) 电流互感器额定一次电流宜按正常运行的实际负荷电流达到额定值的 60%,且不应小于 30% (对 S 级为 20%) 选用。也可选用较小变比或二次绕组带抽头的电流互感器。电流互感器额定二次负荷的功率因数应为 0.8~1.0。

(6) 对于正常负荷电流小、变化范围大 (1%~120% $I_n$ ) 的回路,宜选用特殊用途 (S 级) 的电流互感器。

(7) 电流互感器的额定二次电流可选用 5A 或 1A 的规格。220kV 及以上电压等级宜选用 1A 的电流互感器。

(8) 电流互感器二次绕组中所接入的负荷 (包括测量仪表、电能计量装置和连接导线等) 应保证实际二次负荷在 25%~100% 额定二次负荷范围内。

(9) 电流互感器在不同二次负荷时准确度也不同。制造厂给出的电流互感器二次负荷数据,通常以欧表示,也有用伏安表示,两者关系为

$$I_{2r}^2 Z_{fn,ry} = S_2 \quad (\text{VA}) \quad (9-1-1)$$

式中  $I_{2r}$ ——电流互感器的二次额定电流, A;

$Z_{fn,ry}$ ——电流互感器的二次回路允许负荷,  $\Omega$ ;

$S_2$ ——电流互感器的二次负荷，VA。

一般电流互感器的二次额定电流为5A，所以

$$S_2 = 25Z_{n,ry} \quad (\text{VA}) \quad (9-1-2)$$

校验电流互感器的准确度时；电流互感器的实际二次负荷的计算式为

$$Z_{n,ry} = K_{jx2}Z_{ej} + K_{jx1}R_{dx} + R_{jc} \quad (\Omega) \quad (9-1-3)$$

式中  $Z_{n,ry}$ ——电流互感器的实际二次负荷， $\Omega$ ；

$K_{jx1}$ 、 $K_{jx2}$ ——导线接线系数、仪表或继电器接线系数，见表9-1-5；

$Z_{ej}$ ——测量与计量仪表线圈的阻抗， $\Omega$ ，见表9-1-6；

$R_{jc}$ ——接触电阻， $\Omega$ ，一般取0.05~0.1 $\Omega$ ；

$R_{dx}$ ——连接导线的电阻， $\Omega$ 。

表9-1-5 仪表或继电器用电流互感器各种接线方式时的接线系数

电流互感器接线方式		导线接线系数 $K_{jx1}$	仪表或继电器接线系数 $K_{jx2}$	备注
单相		2	1	
三相星形		1	1	
两相星形	$Z_{ej0} = Z_{ej}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$Z_{ej0}$ 为中性线回路的 负荷阻抗
	$Z_{ej0} = 0$	$\sqrt{3}$	1	
两相差接		$2\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	
三角形		3	3	

表9-1-6 常用测量与计量仪表的线圈的阻抗或负荷

仪表名称	型号	每个电流串联线圈		电流串 联线圈 总数	电压线圈 的电压 (V)	每个电压线 圈的负荷 (VA)	电压线 圈的个 数	备注
		阻 抗 ( $\Omega$ )	负 荷 (VA)					
电流表	42L20-A 85L1-A 46L2-A, 16L8-A 44L1-A, 59L4-A		1	1				
电压表	42L20-V 85L1-V 46L2-V, 16L8-V 44L1-V, 59L4-V				100	0.3	1	
有功功率表	42L20-W 85L1-W 46L2-W, 16L8-W 44L1-W, 59L4-W		0.5	2	100	1.4	2	

续表

仪表名称	型 号	每个电流串联线圈		电流串 联线圈 总 数	电压线圈 的电压 (V)	每个电压线 圈的负荷 (VA)	电压线 圈的个 数	备 注
		阻 抗 ( $\Omega$ )	负 荷 (VA)					
有功功率表	42L20-var 85L1-var 46L2-var, 16L8-var 44L1-Avar, 59L4-var		0.5	2	100	1.4	2	
有功电能表	DS862-2 100V 6A	0.02	0.5	2	100	1.5	2	
无功电能表	DX865-2 100V 6A	0.02	0.5	2	100	1.5	2	
功率因数表	45L8-cos $\varphi$ , 63L18-cos $\varphi$		0.9		100	0.6		

一般测量用电流互感器的误差限值见表 9-1-7。

表 9-1-7 一般测量用电流互感器的误差限值

准确度等级	一次电流为额定电流的百分比 (%)	误 差 限 值		二次负荷变化范围
		电流误差 (%)	相位差 (')	
0.1	5	$\pm 0.4$	$\pm 15$	$(0.25 \sim 1) S_r$
	20	$\pm 0.2$	$\pm 8$	
	100 ~ 120	$\pm 0.1$	$\pm 5$	
0.2	5	$\pm 0.75$	$\pm 30$	$(0.25 \sim 1) S_r$
	20	$\pm 0.35$	$\pm 15$	
	100 ~ 120	$\pm 0.2$	$\pm 10$	
0.5	5	$\pm 1.5$	$\pm 90$	$(0.25 \sim 1) S_r$
	20	$\pm 0.75$	$\pm 45$	
	100 ~ 120	$\pm 0.5$	$\pm 30$	
1	5	$\pm 3.0$	$\pm 180$	$(0.25 \sim 1) S_r$
	20	$\pm 1.5$	$\pm 90$	
	100 ~ 120	$\pm 1.0$	$\pm 60$	
3	50	$\pm 3.0$	不规定	$(0.5 \sim 1) S_r$
	120			
5	50	$\pm 3.0$	不规定	$(0.5 \sim 1) S_r$
	120			

注  $S_r$  为电流互感器额定二次负荷。

### 9.1.6.2 电流互感器的二次回路的设计原则

(1) 当几种仪表接在电流互感器的一个二次绕组时, 其接线顺序宜先接指示和积算仪表, 再接记录仪表, 最后接发送仪表。

(2) 当电流互感器二次绕组接有常测与选测仪表时，宜先接常测仪表，后接选测仪表。

(3) 直接接于电流互感器二次绕组的一次测量仪表，不宜采用开关切换检测三相电流，必要时应有防止电流互感器二次开路的保护措施。

(4) 测量表计和继电保护不宜共用电流互感器的同一个二次绕组。如受条件限制仪表和保护共用一个二次绕组时，宜采取下列措施之一：

1) 保护装置接在仪表之前，中间加装电流试验部件，以避免仪表校验影响保护装置正常工作。

2) 加装中间电流互感器将仪表与保护装置从电路上隔开。中间电流互感器的技术特性应满足仪表和保护的要求。

(5) 电流互感器的二次绕组的中性点应有一个接地点。测量用二次绕组应在配电装置处接地。和电流的两个二次绕组的中性点应并接后一点接地。

(6) 电流互感器二次电流回路的电缆芯线截面积，应按电流互感器的额定二次负荷来计算，二次回路额定电流为5A宜不小于 $4\text{mm}^2$ ，1A宜不小于 $2.5\text{mm}^2$ 。

### 9.1.6.3 电压互感器的选择

(1) 电压互感器的选择一般原则：

1) 应满足一次回路额定电压的要求。

2) 对于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类计费用途的电表计量装置，宜按计量点设置专用电压互感器或专用二次绕组。

3) 电压互感器的主二次绕组额定二次线电压为100V。

(2) 按照型式和接线选择。工业企业和民用建筑变、配电站常用的几种电压互感器接线如下：

1) 采用一个单相电压互感器（ $1 \times \text{JDZ}$ ）的接线，供仪表和继电器接于同一个线电压，如用作备用电源进线的电压监视。

2) 采用两个单相电压互感器（ $2 \times \text{JDZ}$ ）接成V形的接线，供仪表和继电器接于 $u-v$ 、 $v-w$ 两个线电压，用于主接线较简单的变、配电站。

3) 采用一个三相五铁心三绕组电压互感器（ $1 \times \text{JSZW}$ ）或三个单相三绕组电压互感器（ $3 \times \text{JDZJ}$ ）接成Y<sub>yd</sub>的接线，供仪表和继电器接于三个线电压，剩余电压二次绕组接成开口三角形，构成零序电压过滤器，用于需要绝缘监视的变、配电站。

4) 对中性点非直接接地系统，需要检查和监视一次回路单相接地时，应选用三相五柱或三个单相式电压互感器，其剩余电压二次绕组额定电压应为 $100\text{V}/3$ 。中性点直接接地系统，电压互感器剩余电压二次绕组额定电压应为100V。

(3) 按照准确度和容量选择。

1) 容量和准确等级（包括电压互感器剩余电压二次绕组）应满足测量仪表、保护装置和自动装置的要求，测量与计量仪表对电压互感器准确度的要求见本节设计原则中的有关规定。

2) 电压互感器二次绕组中所接入的负荷（包括测量仪表、电能计时装置、继电保护和连接导线等），应保证实际二次负荷在25%~100%额定二次负荷范围内，额定二次功率因数与实际二次负荷的功率因数（0.3~0.5）相接近。

在企业变电站中供测量、计量和保护用的电压互感器，其二次负荷较小，一般能够满足

仪表对电压互感器准确度的要求。只有在利用电压互感器作为控制电源（如交流操作），或当电压互感器二次侧接有经常通电的事故照明灯时，才需校验电压互感器的准确度。校验电压互感器准确度时，应计算出互感器的二次回路负荷（测量用电压互感器的误差限值见表 9-1-8。电压互感器在不同接线时，二次侧的负荷计算公式见表 9-1-9。常用测量与计量仪表的线圈负荷见表 9-1-9。继电器的负荷见产品样本）。

表 9-1-8 测量用电压互感器的误差限值

准确度等级	误差限值		一次电压变化范围	二次负荷变化范围
	电压误差 (%)	相位差 (')		
0.1	±0.1	±5	(0.8 ~ 1.2) $U_{1r}$	(0.25 ~ 1) $S_{2r}$
0.2	±0.2	±10		
0.5	±0.5	±20		
1.0	±1.0	±40		
3.0	±3.0	未规定		

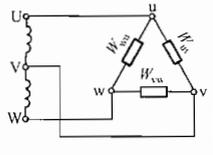
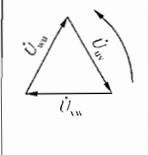
注  $U_{1r}$ —电压互感器额定一次电压； $S_{2r}$ —电压互感器额定二次负荷。

表 9-1-9 电压互感器在不同接线时二次侧负荷的计算公式

电压互感器与二次侧负荷的接线方式	相量图	二次侧负荷的计算公式		
		$P_U = \frac{1}{\sqrt{3}} [W_{uv} \cos(\varphi_{uv} - 30^\circ) + W_{wu} \times \cos(\varphi_{wu} + 30^\circ)]$ $Q_U = \frac{1}{\sqrt{3}} [W_{uv} \sin(\varphi_{uv} - 30^\circ) + W_{wu} \times \sin(\varphi_{wu} + 30^\circ)]$ $W_U = \sqrt{P_U^2 + Q_U^2}$	$P_V = \frac{1}{\sqrt{3}} [W_{uv} \cos(\varphi_{uv} + 30^\circ) + W_{vw} \cos(\varphi_{vw} - 30^\circ)]$ $Q_V = \frac{1}{\sqrt{3}} [W_{uv} \sin(\varphi_{uv} + 30^\circ) + W_{vw} \sin(\varphi_{vw} - 30^\circ)]$ $W_V = \sqrt{P_V^2 + Q_V^2}$	$P_W = \frac{1}{\sqrt{3}} [W_{vw} \cos(\varphi_{vw} + 30^\circ) + W_{wu} \times \cos(\varphi_{wu} - 30^\circ)]$ $Q_W = \frac{1}{\sqrt{3}} [W_{vw} \sin(\varphi_{vw} + 30^\circ) + W_{wu} \sin(\varphi_{wu} - 30^\circ)]$ $W_W = \sqrt{P_W^2 + Q_W^2}$
		$P_U = \frac{1}{\sqrt{3}} W_{uv} \cos(\varphi_{uv} - 30^\circ)$ $Q_U = \frac{1}{\sqrt{3}} W_{uv} \sin(\varphi_{uv} - 30^\circ)$ $W_U = \sqrt{P_U^2 + Q_U^2}$	$P_V = \frac{1}{\sqrt{3}} [W_{uv} \cos(\varphi_{uv} + 30^\circ) + W_{vw} \cos(\varphi_{vw} - 30^\circ)]$ $Q_V = \frac{1}{\sqrt{3}} [W_{uv} \sin(\varphi_{uv} + 30^\circ) + W_{vw} \sin(\varphi_{vw} - 30^\circ)]$ $W_V = \sqrt{P_V^2 + Q_V^2}$	$P_W = \frac{1}{\sqrt{3}} W_{vw} \cos(\varphi_{vw} + 30^\circ)$ $Q_W = \frac{1}{\sqrt{3}} W_{vw} \sin(\varphi_{vw} + 30^\circ)$ $W_W = \sqrt{P_W^2 + Q_W^2}$
		$P_{uv} = W_{uv} \cos \varphi_{uv}$ $Q_{uv} = W_{uv} \sin \varphi_{uv}$ $W_{uv} = \sqrt{P_{uv}^2 + Q_{uv}^2}$	$P_{vw} = W_{vw} \cos \varphi_{vw}$ $Q_{vw} = W_{vw} \sin \varphi_{vw}$ $W_{vw} = \sqrt{P_{vw}^2 + Q_{vw}^2}$	

9

续表

电压互感器与二次侧负荷的接线方式	相量图	二次侧负荷的计算公式	
		$P_{uv} = W_{uv} \cos \varphi_{uv} + W_{wu} \cos(\varphi_{wu} + 60^\circ)$ $Q_{uv} = W_{uv} \sin \varphi_{uv} + W_{wu} \sin(\varphi_{wu} + 60^\circ)$ $W_{uv} = \sqrt{P_{uv}^2 + Q_{uv}^2}$	$P_{vw} = W_{vw} \cos \varphi_{vw} + W_{wu} \cos(\varphi_{wu} - 60^\circ)$ $Q_{vw} = W_{vw} \sin \varphi_{vw} + W_{wu} \sin(\varphi_{wu} - 60^\circ)$ $W_{vw} = \sqrt{P_{vw}^2 + Q_{vw}^2}$

#### 9.1.6.4 电压互感器二次回路的设计原则

(1) 应保证电压互感器负荷端仪表、保护和自动装置工作时所要求的电压准确等级。电压互感器二次负荷三相宜平衡配置。

(2) 电压互感器的一次侧隔离开关断开后，其二次回路应有防止电压反馈的措施。

(3) 电压互感器二次绕组的接地。对中性点直接接地系统，电压互感器星形接线的二次绕组应采用中性点一点接地方式（中性线接地）。中性点接地线（中性线）中不应串接有可能断开的设备。

对中性点非直接接地系统，电压互感器星形接线的二次绕组宜采用 v 相一点接地方式，也可采用中性点一点接地方式（中性线接地）。当采用 v 相接地方式时，二次绕组中性点应经击穿保险接地。v 相接地线和 v 相熔断器或自动开关之间不应再串接有可能断开的设备。

对 V-v 接线的电压互感器，宜采用 v 相一点接地，v 相接地线上不应串接有可能断开的设备。

电压互感器剩余电压二次绕组的引出端之一应一点接地，接地引线上不应串接有可能断开的设备。

几组电压互感器二次绕组之间有电路联系或者地电流会产生零序电压使保护误动作时，接地点应集中在控制室或继电器室内一点接地。无电路联系时，可分别在不同的控制室或配电装置内接地。

由电压互感器二次绕组向交流操作继电器保护或自动装置操作回路供电时，电压互感器二次绕组之一或中性点应经击穿保险或氧化锌避雷器接地。

(4) 在电压互感器二次回路中，除接成开口三角形的剩余电压二次绕组和另有规定者（例如自动调整励磁装置）外，应装设熔断器或自动开关。

(5) 电压互感器二次侧互为备用的切换，应由在电压互感器控制屏上的切换开关控制。在切换后，控制屏上应有信号显示。中性点非直接接地系统的母线电压互感器，应设有绝缘监察信号装置及抗铁磁谐振措施。

(6) 当电压回路电压降不能满足电能表的准确度的要求时，电能表可就地布置，或在电压互感器端子箱处另设电能表专用的熔断器或自动开关，并引接电能表电压回路专用的引接电缆，控制室应有该熔断器或自动开关的监视信号。

#### 9.1.6.5 电压互感器原理接线

图 9-1-1 为 Vv 接法的电压互感器二次电路图。

图 9-1-2 为 Yyd 接法的电压互感器二次电路图。

### 9.1.6.6 电测量变送器的选择

(1) 变送器的输入参数应与电流互感器和电压互感器的参数相符合。输出参数应能满足测量仪表、计算机和远动遥测的要求。电能结算用电能计量不应采用电能变送器。

(2) 变送器的模拟量输出可为电流输出或电压输出，或者数字信号输出。变送器的电流输出宜选用 4 ~ 20mA 的规格，且串联使用。

(3) 变送器模拟量输出回路所接入的负荷（包括计算机、遥测装置、测量仪表和连接导线等）不应超过变

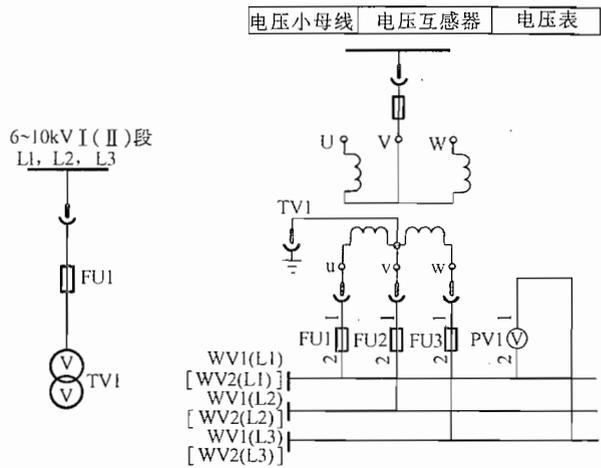


图 9-1-1 Vv 接法的电压互感器二次电路图

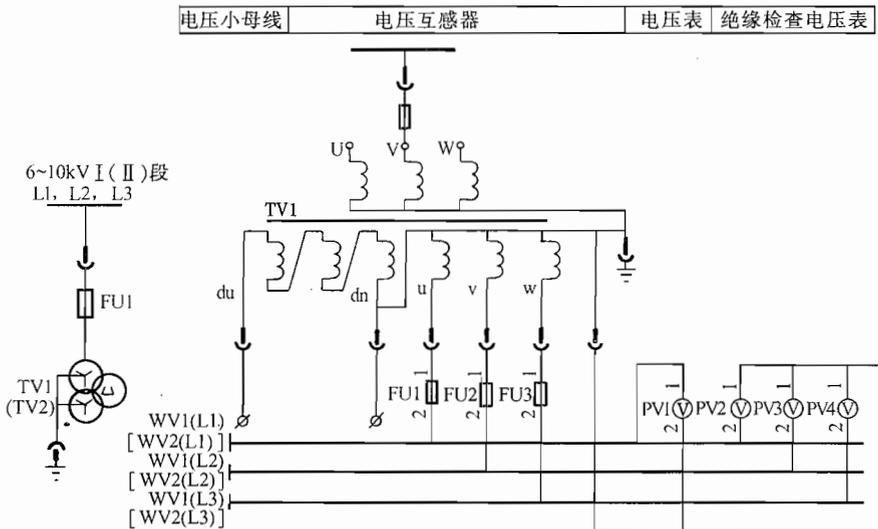


图 9-1-2 Yyd 接法的电压互感器二次电路图

送器输出的二次负荷值。

(4) 变送器的校准值应与二次测量仪表的满刻度值相匹配。

(5) 变送器的交流电源宜由交流不停电电源供给。当全厂（站）停电时，不停电电源系统应能保证连续供电时间不少于半小时。

### 9.1.7 信号系统

中央信号装置的设计原则：

(1) 变、配电站在控制室或值班室内一般设中央信号装置。中央信号装置由事故信号和预告信号组成。

(2) 中央事故信号装置应保证在任何断路器事故跳闸时，能瞬时发出音响信号，在控制屏上或配电装置上还应有表示该回路事故跳闸的灯光或其他指示信号。

(3) 中央预告信号装置应保证在任何回路发生故障时，能瞬时发出预告音响信号，并有显示故障性质和地点的指示信号（灯光或信号继电器）。

(4) 中央事故音响与预告音响信号应有区别。一般事故音响信号用电笛，预告音响信号用电铃。

(5) 中央信号装置应能进行事故和预告信号及光字牌完好性的试验。

(6) 中央事故与预告信号装置在发出音响信号后，应能手动或自动复归音响，而灯光或指示信号仍应保持，直至处理后故障消除时为止。

(7) 中央信号装置接线应简单、可靠，对其电源熔断器是否熔断应有监视。

(8) 企业变、配电站为直流操作并采用灯光监视时，一般设有闪光装置，与断路器事故信号和自动装置相配合，指示断路器事故跳闸和自动投入。闪光装置一般装在直流电源屏上。

(9) 企业变电站的中央事故与预告信号一般采用重复动作的信号装置。如变电站主接线较简单，中央事故信号可采用不重复动作。工业企业和民用建筑配电站一般采用不重复动作的中央信号装置。

(10) 中央信号可采用由制造厂成套供应的闪光报警装置，也可采用由冲击继电器或脉冲继电器构成的装置。

(11) 中央信号系统还可采用与直流屏配套的微机中央信号控制屏，其内配有微机控制中央信号报警器。此报警器除具备常规中央信号装置的各项功能外，还具有记忆信号和编程设定等功能。

## 9.2 电气设备和线路继电保护配置、整定计算及选型的原则

### 9.2.1 微机继电保护装置的特点

(1) 可靠性高。微机保护的软件设计，考虑到电力系统中各种复杂的故障，具有很强的综合分析能力和判断能力，因此可靠性较高。此外微机保护装置的自检和巡检功能也提高了可靠性。

(2) 动作正确率高。由于微机软件计算的实时性特点，微机保护装置能保证在任何时刻均不断迅速地采样计算，反复准确地校核。在电力系统发生故障的暂态时期内，就能正确判断故障，当故障发生了变化或进一步发展，也能及时做出判断和自纠。因此微机保护的動作正确率高，在运行中已得到证实。

(3) 保护性能容易得到改善。由于微机软件可方便改写的特点，所以保护的性能够通过研究新的保护原理来得到改善，且现代新原理的算法无法用硬件来实现。

(4) 易于获得各种附加功能。由于微机软件的特点，使得微机保护可以做到硬件和软件资源共享，在不增加任何硬件的情况下，只需增加一些软件即可获得各种附加功能。例如在微机保护装置中，可很方便地附加低频减载和自动重合闸功能，故障录波、故障测距等自动装置功能。

(5) 使用灵活、方便。目前微机保护装置的人机界面做得很好，也很简单方便。例如汉化界面、微机保护的查询、运行方式变化及整定更改等都十分灵活方便。

(6) 维护、调试方便。微机保护除输入量的采集外，所有计算、逻辑判断都是由软件完成。成熟的软件一次性设计测试完好后，就不必在投产前再逐项试验。微机保护对硬件和软件都有自检功能，装置通电后硬件、软件有故障就会立即报警。因此对微机保护装置几乎不用调试，需要调试的主要项目也在制造厂完成，投运前做一次静态和动态试验即可试

运行。

(7) 具有远方监控特性。微机保护装置都具有串行通信功能，与变电站微机监控系统的通信联络使微机保护具有远方监控的特点，并将微机保护纳入变电站综合自动化系统。

## 9.2.2 电力变压器的保护

### 9.2.2.1 保护配置

电力变压器的继电保护配置见表 9-2-1。

表 9-2-1 电力变压器的继电保护配置

变压器容量 (kVA)	保护装置名称							备注
	带时限的 <sup>①</sup> 过电流 保护	电流速 断保护	纵联差 动保护	单相低 压侧接 地保护 <sup>②</sup>	过负荷 保护	瓦斯 保护	温度 保护	
<400						≥315kVA 的车间内油 浸变压器 装设		一般用高压熔断 器保护
400~630	高压侧 采用断路 器时装设	高压侧采用 断路器且过电 流保护时限 >0.5s时装设		装 设	并 联 运 行的变 压 器 装 设， 作为其他 备用电源 的变压器 根据过负 荷的可能 性装设 <sup>③</sup>	车间内变 压器装设		一般采用微机型 继电器兼作过电 流及电流速断保护
800								
1000~1600	装 设	过电流保护 时限 > 0.5s 时 装设	当电流速 断保护不能 满足灵敏性 要求时装设			装 设	装 设	
2000~5000								
6300~8000		单独运行的 变压器或负荷 不太重要的变 压器装设	并列运行 的变压器或 重要变压器 或当电流速 断保护不能 满足灵敏性 要求时装设					≥5000kVA 的单 相变压器宜装设远 距离测温装置 ≥8000kVA 的变 压器宜装设远距 离测温装置
≥10000	装 设		装 设			装 设	装 设	

① 当带时限的过电流保护不能满足灵敏性要求时，应采用低电压闭锁的带时限过电流保护。

② 当利用高压侧过电流保护不能满足灵敏性要求时，应装设变压器中性线上的零序过电流保护。

③ 低压电压为 230/400V 的变压器，当低压侧出线断路器带有过负荷保护时，可不装设专用的过负荷保护。

### 9.2.2.2 整定计算

电力变压器的电流保护整定计算见表 9-2-2。

表 9-2-2

电力变压器的电流保护整定计算

保护名称	计算项目和公式	符号说明
过电流保护	<p>保护装置的动作电流（应躲过可能出现的过负荷电流）</p> $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \frac{K_{ni} I_{1rT}}{K_r n_{TA}} \quad (A)$ <p>保护装置的灵敏系数 [按电力系统最小运行方式下，低压侧两相短路时流过高压侧（保护安装处）的短路电流<sup>①</sup>校验]</p> $K_{sen} = \frac{I_{2k2 \cdot min}}{I_{op}} \geq 1.3$ <p>保护装置的动作时限（应与下一级保护动作时限相配合），一般取 0.3 ~ 0.5s</p>	<p><math>K_{rel}</math>——可靠系数，用于过电流保护时取 1.2，用于电流速断保护时取 1.3，用于低压侧单相接地保护时（在变压器中性线上装设的）取 1.2，用于过负荷保护时取 1.05 ~ 1.1；</p> <p><math>K_{con}</math>——接线系数，接于相电流时取 1，接于相电流差时取 <math>\sqrt{3}</math>；</p> <p><math>K_r</math>——继电器返回系数，取 0.9（动作电流）；</p> <p><math>K_{ni}</math>——过负荷系数<sup>②</sup>，包括电动机自启动引起的过电流倍数，一般取 2 ~ 3，当无自启动电动机时取 1.3 ~ 1.5；</p> <p><math>n_{TA}</math>——电流互感器变比；</p> <p><math>I_{1rT}</math>——变压器高压侧额定电流，A；</p> <p><math>I_{2k2 \cdot min}</math>——最小运行方式下变压器低压侧两相短路时，流过高压侧（保护安装处）的稳态电流，A；</p> $I_{2k2 \cdot min} = I_{22k2 \cdot min} / n_T \quad (Yyn)$ $I_{2k2 \cdot min} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_{22k2 \cdot min} / n_T \quad (Dyn)$
电流速断保护	<p>保护装置的动作电流（应躲过低压侧短路时，流过保护装置的最大短路电流）</p> $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \frac{I_{2k3 \cdot max}''}{n_{TA}} \quad (A)$ <p>保护装置的灵敏系数（按系统最小运行方式下，保护装置安装处两相短路电流校验）</p> $K_{sen} = \frac{I_{1k2 \cdot min}''}{I_{op}} \geq 1.5$	<p><math>I_{2k2 \cdot min}</math>——最小运行方式下，变压器低压侧两相短路稳态短路电流，A；</p> <p><math>I_{op}</math>——保护装置一次动作电流，A，<math>I_{op} = I_{op \cdot K} \frac{n_{TA}}{K_{con}}</math>；</p> <p><math>I_{2k3 \cdot max}''</math>——最大运行方式下变压器低压侧三相短路时，流过高压侧（保护安装处）的超瞬态电流，A；</p> <p><math>I_{1k2 \cdot min}''</math>——最小运行方式下保护装置安装处两相短路超瞬态电流<sup>③</sup>，A；</p> <p><math>I_{2k1 \cdot min}</math>——最小运行方式下变压器低压侧母线或母干线末端单相接地短路时，流过高压侧（保护安装处）的稳态电流，A，<math>I_{2k1 \cdot min} = \frac{2}{3} I_{22k1 \cdot min} / n_T</math>（Yyn），<math>I_{2k1 \cdot min} = \frac{\sqrt{3}}{3} I_{22k1 \cdot min} / n_T</math>（Dyn）；</p> <p><math>I_{22k1 \cdot min}</math>——最小运行方式下变压器低压侧母线或母干线末端单相接地稳态短路电流，A；</p> <p><math>n_T</math>——变压器变比；</p> <p><math>K_{eo}</math>——配合系数，取 1.1；</p> <p><math>I_{op \cdot br}</math>——低压分支线上零序保护的動作电流，A；</p> <p><math>I_{2rT}</math>——变压器低压侧额定电流，A；</p> <p><math>K_{sen}</math>——灵敏系数</p>
低压侧单相接地保护（利用高压侧三相过电流保护）	<p>保护装置的動作电流和動作时限与过电流保护相同；</p> <p>保护装置的灵敏系数 [按最小运行方式下，低压侧母线或母干线末端单相接地时，流过高压侧（保护安装处）的短路电流<sup>①</sup>校验]</p> $K_{sen} = \frac{I_{2k1 \cdot min}}{I_{op}} \geq 1.3$	
低压侧单相接地保护 <sup>④</sup> （采用在低压侧中性线上装设专用的零序保护）	<p>保护装置的動作电流（应躲过正常运行时，变压器中性线上流过的最大不平衡电流，其值按电力标准 DL/T 1102—2009《配电变压器运行规程》规定，不超过额定电流的 25%<sup>⑤</sup>）</p> $I_{op \cdot K} = K_{rel} \frac{0.25 I_{2rT}}{n_{TA}} \quad (A)$ <p>保护装置的動作电流尚应与低压出线上零序保护相配合</p> $I_{op \cdot K} = K_{eo} \frac{I_{op \cdot br}}{n_{TA}} \quad (A)$ <p>保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下，低压侧母线或母干线末端单相接地稳态短路电流校验）</p> $K_{sen} = \frac{I_{22k1 \cdot min}}{I_{op}} \geq 1.3$ <p>保护装置的動作时限一般取 0.3 ~ 0.5s</p>	

续表

保护名称	计算项目和公式	符号说明
过负荷保护	保护装置的动作电流（应躲过变压器额定电流） $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \frac{I_{1rT}}{K_r \cdot n_{TA}} \text{ (A)}$ 保护装置的动作时限（应躲过允许的短时工作过负荷时间，如电动机起动或自启动的时间）一般定时限取 9~15s	
低电压起动的带时限过电流保护	保护装置的动作电流（应躲过变压器额定电流） $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \cdot \frac{I_{1rT}}{K_r \cdot n_{TA}} \text{ (A)}$ 保护装置的动作电压 $U_{op \cdot K} = \frac{U_{min}}{K_{rel} K_r n_{TV}} \text{ (V)}$ 保护装置的灵敏系数（电流部分）与过电流保护相同。 保护装置的灵敏系数（电压部分） $K_{sen} = \frac{U_{op}}{U_{rem \cdot max}} = \frac{U_{op \cdot K} n_{TV}}{U_{rem \cdot max}}$ 保护装置动作时限与过电流保护相同	$K_{rel}$ ——可靠系数，取 1.2； $K_r$ ——继电器返回系数，取 1.15（动作电压）； $n_{TV}$ ——电压互感器变比； $U_{min}$ ——运行中可能出现的最低工作电压（如电力系统电压降低，大容量电动机起动及电动机自启动时引起的电压降低），一般取 0.5~0.7 $U_{1rT}$ （变压器高压侧母线额定电压）； $U_{rem \cdot max}$ ——保护安装处的最大剩余电压，V； $U_{op}$ ——保护装置一次动作电压，V

① Yd11、Yyn0、Dyn11 接线变压器高压侧的短路电流分布，见配电手册第七章第十节之五。

② 带有自启动电动机的变压器，其过负荷系数按电动机的自启动电流确定。当电源侧装设自动重合闸或备用电源自动投入装置时，可近似地用下式计算

$$K_{ol} = \frac{1}{u_k + \frac{S_{rT}}{K_{st} S_{M\Sigma}} \times \left(\frac{380}{400}\right)^2}$$

式中  $u_k$ ——变压器的阻抗电压相对值；

$S_{rT}$ ——变压器的额定容量，kVA；

$S_{M\Sigma}$ ——需要自启动的全部电动机的总容量，kVA；

$K_{st}$ ——电动机的起动电流倍数，一般取 5。

③ 两相短路超瞬态电流  $I''_{k2}$  等于三相短路超瞬态电流  $I''_{k3}$  的 0.866 倍，三相短路超瞬态电流即对称短路电流初始值。

④ Yyn0 接线变压器采用在低压侧中性线上装设专用零序互感器的低压侧单相接地保护，而 Dyn11 接线变压器可不装设。

⑤ 对于 Yyn0 接线的变压器为 25%，对于 Dyn11 接线的变压器可大于 25%，一般取 35%。

### 9.2.2.3 变压器差动保护装置的特点

(1) 变压器差动保护所用的电流互感器二次侧采用星形接线，其相位补偿和电流平衡系数由软件实现，在正常运行中显示差流值，防止极性、变比、相别等接错，并具有差流超限报警功能。

(2) 气体继电器保护跳闸回路不接入微机保护装置，可直接作用于跳闸，以保证可靠性，但可经触点向微机保护装置输入动作信息，进行显示并打印，或进入单独的非电量微机

保护装置。

- (3) 设有液晶显示，便于整定、调试，同时可实现运行监视和故障、异常状态显示。
- (4) 具备高速数据通信网接口及打印功能。

平衡系数

$$\text{对于变压器Y接线侧} \quad K_{ph1} = \frac{U_{1n} \times n_{TA1}}{S} \leq 2.3 \quad (9-2-1)$$

$$\text{对于变压器}\Delta\text{接线侧} \quad K_{ph2} = \frac{\sqrt{3}U_{2n} \times n_{TA2}}{S} \leq 4 \quad (9-2-2)$$

若报“平衡系数错”说明平衡系数太大应改变电流互感器变比，以满足要求。

### 9.2.2.4 变压器、差动保护整定计算

变压器差动保护多采用带谐波制动的比率制动式保护，其比率制动特性曲线见图9-2-1。

(1) 比率制动差动保护起动电流。由于电流互感器存在一定误差以及变压器分接头位置变化产生的不平衡电流，所以差动保护动作必须使  $I_d$  大于一个起动定值  $I_{d \cdot st}$ ， $I_{d \cdot st} = (0.2 \sim 0.3) I_n$ ，也就是说

$$I_d = I_{op \cdot min} > I_{d \cdot st}$$

$$\text{即} \quad I_{d \cdot st} = I_{op \cdot min} > (0.2 \sim 0.3) I_n \quad (9-2-3)$$

式中  $I_d$ ——差动电流，A；

$I_{op \cdot min}$ ——差动保护的最小动作电流，A；

$I_n$ ——电流基准值（基准侧的二次额定电流），A。

(2) 比率制动斜率。

比率制动斜率公式为

$$K_{zdl} = I_d / I_{zd} \quad (9-2-4)$$

式中  $I_d$ ——差动电流，A；

$I_{zd}$ ——制动电流，A。

$K_{zdl}$ 是一个变量，要求在区内故障时  $K_{zdl}$  大于固定的整定值，保护可靠动作，而在区外故障时  $K_{zdl}$  却小于固定的整定值，使保护不动作。一般  $K_{zdl}$  取 0.3 ~ 0.5。

(3) 差动速断动作电流。差动速断保护是差动电流过电流瞬时速断保护，以加快保护在内部严重故障时的动作速度。由于微机保护的動作速度快，励磁涌流开始衰减很快，因此微机保护的差动速断整定值  $I_{d \cdot set}$  应较电磁式保护取值大。

$$\text{一般} \quad I_{d \cdot set} \geq (5 \sim 6) I_n \quad (9-2-5)$$

式中  $I_n$ ——电流基准值（基准侧的二次额定电流），A。

灵敏系数

$$K_{sen} = \frac{I_{k2 \cdot min}}{n_{TA} \cdot I_{d \cdot set}} \geq 1.2 \quad (9-2-6)$$

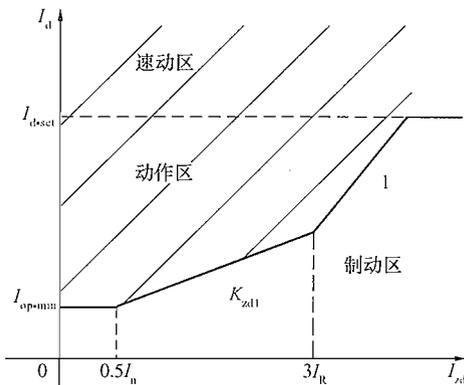


图9-2-1 比率制动特性曲线

(4) 二次谐波制动系数。变压器励磁涌流中含有大量的二次谐波分量, 利用差电流中二次谐波所占比例作为制动系数  $K_{zd2}$ , 可鉴别变压器空载合闸时励磁涌流,  $K_{zd2}$  大于一定值就可认为是励磁涌流出现, 保护不应动作。  $K_{zd2}$  小于一定值, 同时满足比率差动动作条件, 才允许保护动作。一般  $K_{zd2}$  取 0.15、0.2、0.25 或 0.15~0.2。

(5) 灵敏系数。

$$K_{sen} \approx \frac{I_{k2 \cdot \min}}{n_{TA} \cdot I_{op}} \geq 1.5 \quad (9-2-7)$$

式中  $I_{k2 \cdot \min}$ ——最小运行方式下保护区内两相短路最小短路电流, A;

$n_{TA}$ ——电流互感器变比;

$I_{op}$ ——差动继电器动作电流, A, 根据制动电流的大小在相应制动特性曲线上求得相应的动作电流。

### 9.2.2.5 设备选型的原则

(1) 电压为 3~110kV, 容量为 63MVA 及以下的电力变压器, 对下列故障及异常运行方式, 应装设相应的保护装置。

1) 绕组及其引出线的相间短路和在中性点直接接地或经小电阻接地侧的单相接地短路。

2) 绕组的匝间短路。

3) 外部相间短路引起的过电流。

4) 中性点直接接地或经小电阻接地的电网中外部接地短路引起的过电流及中性点过电压。

5) 过负荷。

6) 油面降低。

7) 变压器油温过高、绕组温度过高、油箱压力过高、产生瓦斯或冷却系统故障。

(2) 容量为 0.4MVA 及以上的车间内油浸式变压器、容量为 0.8MVA 及以上的油浸式变压器, 以及带负荷调压变压器的充油调压开关均应装设瓦斯保护, 当壳内故障产生轻微瓦斯或油面下降时, 应瞬时动作于信号; 当产生大量瓦斯时, 应动作于断开变压器各侧断路器。

瓦斯保护应采取防止因振动、气体继电器的引线故障等引起瓦斯保护误动作的措施。

当变压器安装处电源侧无断路器或短路开关时, 保护动作后应作用于信号并发出远跳命令, 同时应断开线路对侧断路器。

(3) 对变压器引出线、套管及内部的短路故障, 应装设下列保护作为主保护, 且应瞬时动作于断开变压器的各侧断路器, 并应符合下列规定。

1) 电压为 10kV 及以下、容量为 10MVA 以下单独运行的变压器, 应采用电流速断保护。

2) 电压为 10kV 以上、容量为 10MVA 及以上单独运行的变压器, 以及容量为 6.3MVA 及以上并列运行的变压器, 应采用纵联差动保护。

3) 容量为 10MVA 以下单独运行的重要变压器, 可装设纵联差动保护。

4) 电压为 10kV 的重要变压器或容量为 2MVA 及以上的变压器, 当电流速断保护灵敏度不符合要求时, 宜采用纵联差动保护。

5) 容量为0.4MVA及以上、一次电压为10kV及以下，且绕组为三角形-星形连接的变压器，可采用两相三继电器式的电流速断保护。

(4) 变压器的纵联差动保护应符合下列要求。

1) 应能躲过励磁涌流和外部短路产生的不平衡电流。

2) 应具有电流回路断线的判别功能，并应能选择报警或允许差动保护动作跳闸。

3) 差动保护范围应包括变压器套管及其引出线，如不能包括引出线时，应采取快速切除故障的辅助措施。但在63kV或110kV电压等级的终端变电站和分支变电站，以及具有旁路母线的变电站在变压器断路器退出工作由旁路断路器代替时，纵联差动保护可短时利用变压器套管内的电流互感器，此时套管和引线故障可由后备保护动作切除；如电网安全稳定运行有要求时，应将纵联差动保护切至旁路断路器的电流互感器。

(5) 对由外部相间短路引起的变压器过电流，应装设下列保护作为后备保护，并应带时限动作于断开相应的断路器，同时应符合下列规定。

1) 过电流保护宜用于降压变压器。

2) 复合电压起动的过电流保护或低电压闭锁的过电流保护，宜用于升压变压器、系统联络变压器和过电流保护不符合灵敏性要求的降压变压器。

(6) 外部相间短路保护应符合下列规定。

1) 单侧电源双绕组变压器和三绕组变压器，相间短路后备保护宜装于各侧；非电源侧保护可带两段或三段时限；电源侧保护可带一段时限。

2) 两侧或三侧有电源的双绕组变压器和三绕组变压器，相间短路应根据选择性的要求装设方向元件，方向宜指向本侧母线，但断开变压器各侧断路器的后备保护不应带方向。

3) 低压侧有分支，且接至分开运行母线段的降压变压器，应在每个分支装设相间短路后备保护。

4) 当变压器低压侧无专用母线保护，高压侧相间短路后备保护对低压侧母线相间短路灵敏度不够时，应在低压侧配置相间短路后备保护。

(7) 三绕组变压器的外部相间短路保护，可按下列原则进行简化。

1) 除主电源侧外，其他各侧保护可仅作本侧相邻电力设备和线路的后备保护。

2) 保护装置作为本侧相邻电力设备和线路保护的后备时，灵敏系数可适当降低，但对本侧母线上的各类短路应符合灵敏性要求。

(8) 中性点直接接地的110kV电力网中，当低压侧有电源的变压器中性点直接接地运行时，对外部单相接地引起的过电流，应装设零序电流保护，并应符合下列规定：

1) 零序电流保护可由两段组成，其动作电流与相关线路零序过电流保护相配合，每段应各带两个时限，并均应以较短的时限动作于缩小故障影响范围，或动作于断开本侧断路器，同时应以较长的时限动作于断开变压器各侧断路器。

2) 双绕组及三绕组变压器的零序电流保护应接到中性点引出线上的电流互感器上。

(9) 110kV中性点直接接地的电力网中，当低压侧有电源的变压器中性点可能接地运行或不接地运行时，对外部单相接地引起的过电流，以及对因失去中性点接地引起的电压升高，应装设后备保护，并应符合下列规定。

1) 全绝缘变压器的零序保护应按第(8)条装设零序电流保护，并应增设零序过电压保护。当变压器所连接的电力网选择断开变压器中性点接地时，零序过电压保护应经0.3~

0.5s 时限动作于断开变压器各侧断路器。

2) 分级绝缘变压器的零序保护,应在变压器中性点装设放电间隙。应装设用于中性点直接接地和经放电间隙接地的两套零序过电流保护,并应增设零序过电压保护。用于中性点直接接地运行的变压器应按第(8)条装设零序电流保护;用于经间隙接地的变压器,应装设反应间隙放电的零序电流保护和零序过电压保护。当变压器所接的电力网失去接地中性点,且发生单相接地故障时,此零序电流电压保护应经 0.3~0.5s 时限动作于断开变压器各侧断路器。

(10) 当变压器低压侧中性点经小电阻接地时,低压侧应配置三相式过电流保护,同时应在变压器低压侧装设零序过电流保护,保护应设置两个时限。零序过电流保护宜在变压器低压侧中性点回路的零序电流互感器上。

(11) 专用接地变压器应按第(3)条配置主保护,并应配置过电流保护和零序过电流保护作为后备保护。

(12) 当变压器中性点经消弧线圈接地时,应在中性点设置零序过电流或过电压保护,并应动作于信号。

(13) 容量在 0.4MVA 及以上、绕组为星形-星形接线,且低压侧中性点直接接地的变压器,对低压侧单相接地短路应选择下列保护方式,保护装置应带时限动作于跳闸。

1) 利用高压侧的过电流保护时,保护装置宜采用三相式。

2) 在低压侧中性线上装设零序电流保护。

(14) 容量在 0.4MVA 及以上、一次电压为 10kV 及以下、绕组为三角形-星形接线,且低压侧中性点直接接地的变压器,对低压侧单相接地短路,可利用高压侧的过电流保护,当灵敏度符合要求时,保护装置应带时限动作于跳闸;当灵敏度不符合要求时,可按第(13)条第 2 款装设保护装置,并应带时限动作于跳闸。

(15) 容量在 0.4MVA 及以上并列运行的变压器或作为其他负荷备用电源的单独运行的变压器,应装设过负荷保护。对多绕组变压器,保护装置应能反应变压器各侧的过负荷。过负荷保护应带时限动作于信号。

在无经常值班人员的变电站,过负荷保护可动作于跳闸或断开部分负荷。

(16) 对变压器油温度过高、绕组温度过高、油面过低、油箱内压力过高、产生瓦斯和冷却系统故障,应装设可作用于信号或动作于跳闸的装置。

### 9.2.3 电力电容器的保护

#### 9.2.3.1 保护配置

6~10kV 电力电容的继电保护配置见表 9-2-3。

表 9-2-3 6~10kV 电力电容器的继电保护配置

被保护设备	保护装置名称								备注
	带有短延时的速断保护	过电流保护	过负荷保护	中性线不平衡电流保护	开口三角电压保护	过电压保护	低电压保护	单相接地保护	
电容器组	装设	装设	宜装设	对电容器内部故障及其引出线短路采用专用的继电保护时,装设		当电压可能超过 110% 额定值时,装设	装设	电容器与支架绝缘时可不装设	当电容器组的容量在 400kvar 以内时,可以用带熔断器的负荷开关进行保护

## 9.2.3.2 整定计算

6~10kV 电力电容器组的继电保护整定计算见表 9-2-4。

表 9-2-4 6~10kV 电力电容器组的继电保护整定计算<sup>2</sup>

保护名称	计算项目和公式	符号说明
带有短延时的速断保护	<p>保护装置的動作电流（应按电容器组端部引线发生两相短路时，保护的灵敏系数应符合要求整定）</p> $I_{op \cdot K} \leq \frac{I''_{k2 \cdot \min}}{1.5 n_{TA}} \cdot K_{con}$ <p>保护装置的動作时限应大于电容器组合闸涌流时间，为 0.2s 及以上</p>	
过电流保护	<p>保护装置的動作电流（应按大于电容器组允许的长期最大过电流整定）</p> $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \frac{K_{ol} I_{rc}}{K_r n_{TA}}$ <p>保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下电容器组端部两相短路时，流过保护安装处的短路电流校验）</p> $K_{sen} = \frac{I''_{k2 \cdot \min}}{I_{op}} \geq 1.3$ <p>保护装置的動作时限应较电容器组短延时速断保护的时限大一个时限阶段，一般为 0.3~0.5s</p>	<p><math>K_{con}</math>——接线系数，接于相电流时取 1，接于相电流差时取 <math>\sqrt{3}</math>；</p> <p><math>n_{TA}</math>——电流互感器变比；</p> <p><math>I''_{k2 \cdot \min}</math>——最小运行方式下，电容器组端部两相短路时，流过保护安装处的超瞬态电流<sup>①</sup>，A；</p> <p><math>K_{rel}</math>——可靠系数，取 1.2；</p> <p><math>K_r</math>——继电器返回系数，取 0.9；</p> <p><math>K_{ol}</math>——过负荷系数，取 1.3；</p> <p><math>I_{rc}</math>——电容器组额定电流，A；</p> <p><math>K_{sen}</math>——保护装置的灵敏系数；</p> <p><math>I_{op}</math>——保护装置一次动作电流，A；</p>
过负荷保护	<p>保护装置的動作电流（应按电容器组负荷电流整定）</p> $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \frac{I_{rc}}{K_r n_{TA}}$ <p>保护装置的動作时限应较过电流保护大一时限阶段，一般大 0.5s</p>	
中性线不平衡电流保护（双星形接线）	<p>保护装置的動作电流（应躲过正常时，中性线上电流互感器二次回路中的最大不平衡电流，及当单台电容器内部 50%~75% 串联元件击穿时，使保护装置有一定的灵敏系数，即 <math>K_{sen} \geq 1.5</math>）</p> $I_{op \cdot K} \geq K_{rel} I_{umb} (A)$ $I_{op \cdot K} \leq \frac{1}{K_{sen} n_{TA}} \cdot \frac{3m\beta_C I_{rc}}{\{6n[m(1-\beta_C) + \beta_C] - 5\beta_C\}} (A)$	$I_{op} = I_{opk} \frac{n_{TA}}{K_{con}}$ <p><math>I_{umb}</math>——最大不平衡电流，A，由测试决定；</p> <p><math>\beta_C</math>——单台电容器元件击穿相对数，取 0.5~0.75；</p>
开口三角电压保护（单星形接线）	<p>保护装置的動作电压（应躲过由于三相电容的不平衡及电网电压的不对称，正常时所存在的不平衡零序电压，及当单台电容器内部 50%~75% 串联元件击穿时，使保护装置有一定的灵敏系数，即 <math>K_{sen} \geq 1.5</math>）</p> $U_{op \cdot K} \geq K_{rel} U_{umb} (V)$ $U_{op \cdot K} \leq \frac{1}{K_{sen} n_{TV}} \cdot \frac{3\beta_C U_{\phi h}}{\{3n[m(1-\beta_C) + \beta_C] - 2\beta_C\}} (V)$	

续表

保护名称	计算项目和公式	符号说明
过电压保护	保护装置的動作电压（按母线电压不超过 110% 额定电压值整定） $U_{op.K} = 1.1 U_{r2} (V)$ 保护装置动作于信号或带 3 ~ 5min 时限动作于跳闸	$m$ ——每相各串联段电容器并联台数； $n$ ——每相电容器的串联段数； $U_{unb}$ ——最大不平衡零序电压，V，由测试决定； $U_{ph}$ ——电容器组的额定相电压，V； $n_{TV}$ ——电压互感器变比； $U_{r2}$ ——电压互感器二次额定电压，V，其值为 100V； $K_{min}$ ——系统正常运行母线电压可能出现的最低电压系数，一般取 0.5； $I_{CS}$ ——电网的总单相接地电容电流，A； $I'_{rc}$ ——单台电容器额定电流，A
低电压保护	保护装置的動作电压（按母线电压可能出现的低电压整定） $U_{op.K} = K_{min} U_{r2} (V)$	
单相接地保护	保护装置的一次動作电流（按最小灵敏系数 1.3 整定） $I_{op} \leq \frac{I_{CS}}{1.3} (A)$	

① 两相短路超瞬态电流  $I'_{k2}$  等于三相短路超瞬态电流  $I'_{k3}$  的 0.866 倍，三相短路超瞬态电流即对称短路电流初始值。

② 电力电容器组的继电保护整定计算均未装设专用单台熔断器保护考虑。

### 9.2.3.3 设备选型原则

(1) 3kV 及以上的并联补偿电容器组的下列故障及异常运行状态，应装设相应的保护。

- 1) 电容器内部故障及其引出线短路。
- 2) 电容器组和断路器之间连接线短路。
- 3) 电容器组中某一故障电容器切除后所引起的剩余电容器的过电压。
- 4) 电容器组的单相接地故障。
- 5) 电容器组过电压。
- 6) 电容器组所连接的母线失电压。
- 7) 中性点不接地的电容器组，各相对中性点的单相短路。

(2) 并联补偿电容器组应装设相应的保护，并应符合下列规定。

1) 电容器组和断路器之间连接线的短路，可装设带有短时限的电流速断和过电流保护，并应动作于跳闸。速断保护的動作电流，应按最小运行方式下，电容器端部引线发生两相短路时有足够的灵敏度，保护的動作时限应确保电容器充电产生涌流时不误动。过电流保护装置的動作电流，应按躲过电容器组长期允许的最大工作电流整定。

2) 电容器内部故障及其引出线的短路，宜对每台电容器分别装设专用的熔断器。熔丝的额定电流可为电容器额定电流的 1.5 ~ 2.0 倍。

3) 当电容器组中的故障电容器切除到一定数量后，引起剩余电容器组端电压超过 105% 额定电压时，保护应带时限动作于信号；过电压超过 110% 额定电压时，保护应将整组电容器断开，对不同接线的电容器组，可采用下列保护之一。

- a. 中性点不接地单星形接线的电容器组，可装设中性点电压不平衡保护。
- b. 中性点接地单星形接线的电容器组，可装设中性点电流不平衡保护。

- c. 中性点不接地双星形接线的电容器组，可装设中性点间电流或电压不平衡保护。
- d. 中性点接地双星形接线的电容器组，可装设中性点回路电流差的不平衡保护。
- e. 多段串联单星形接线的电容器组，可装设段间电压差动或桥式差电流保护。
- f. 三角形接线的电容器组，可装设零序电流保护。

4) 不平衡保护应带有短延时的防误动的措施。

(3) 电容器组单相接地故障，可利用电容器组所连接母线上的绝缘监察装置检出；当电容器组所连接母线有引出线路时，可装设有选择性的接地保护，并应动作于信号；必要时，保护应动作于跳闸。安装在绝缘支架上的电容器组，可不再装设单相接地保护。

(4) 电容器组应装设过电压保护，并应带时限动作于信号或跳闸。

(5) 电容器组应装设失压保护，当母线失压时，应带时限跳开所有接于母线上的电容器。

(6) 电网中出现的高次谐波可能导致电容器过负荷时，电容器组宜装设过负荷保护，并应带时限动作于信号或跳闸。

### 9.2.4 3~10kV 电动机的保护

#### 9.2.4.1 保护配置

3~10kV 电动机的继电保护配置见表 9-2-5。

表 9-2-5 3~10kV 电动机的继电保护配置

电动机容量 (kW)	保护装置名称						
	电流速断 保护	纵联差动保护	过负荷 保护	单相接地保护	低电压保护	失步 保护 <sup>①</sup>	防止非同步冲击 的断电失步保护 <sup>②</sup>
异步电动机 <2000	装 设	当电流速断保护 不能满足灵敏性要 求时装设	生产过程 中易发生过 负荷时，或 启动、自起 动条件严重 时应装设	单相接地电流 > 5A 时装设，≥10A 时一般动作于跳闸， 5~10A 时可动作于 跳闸或信号	根据需 要装设		
异步电动机 ≥2000		装 设					
同步电动机 <2000	装 设	当电流速断保护 不能满足灵敏性要 求时装设				装 设	根据需要装设
同步电动机 ≥2000		装 设					

① 下列电动机可以利用反应定子回路的过负荷保护兼作失步保护：短路比在 0.8 及以上且负荷平稳的同步电动机，负荷变动大的同步电动机，但此时应增设失磁保护。短路比数据见《配电手册》表 7-23。

② 大容量同步电动机当不允许非同步冲击时，宜装设防止电源短时中断再恢复时，造成非同步冲击的保护。

#### 9.2.4.2 整定计算

(1) 3~10kV 电动机的继电保护整定计算见表 9-2-6。

表 9-2-6 3~10kV 电动机的继电保护整定计算

保护名称	计算项目和公式	符号说明
电流速断保护	保护装置的動作电流： 异步电动机（应躲过电动机的起動电流） $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \frac{K_{st} I_{rM}}{n_{TA}} \text{ (A)}$ 同步电动机（应躲过电动机的起動电流或外部短路时电动机的输出电流） $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \frac{K_{st} I_{rM}}{n_{TA}} \text{ (A)}$ 和 $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \frac{I''_{k3M}}{n_{TA}} \text{ (A)}$ 保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下，电动机接线端两相短路时，流过保护安装处的短路电流校验） $K_{sen} = \frac{I''_{k2 \cdot min}}{I_{op}} \geq 1.5$	$K_{rel}$ ——可靠系数，用于电流速断保护时，取 1.3，用于差动保护时取 1.3，用于过负荷保护时动作于信号取 1.05，动作于跳闸取 1.1； $K_{con}$ ——接线系数，接于相电流时取 1.0，接于相电流差时取 $\sqrt{3}$ ； $n_{TA}$ ——电流互感器变比； $I_{rM}$ ——电动机额定电流，A； $K_{st}$ ——电动机起動电流倍数 <sup>①</sup> ； $I''_{k3M}$ ——同步电动机接线端三相短路时，输出的超瞬态电流 <sup>②</sup> ，A； $I''_{k2 \cdot min}$ ——最小运行方式下，电动机接线端两相短路时，流过保护安装处的超瞬态电流 <sup>③</sup> ，A；
过负荷保护	保护装置的動作电流（应躲过电动机的额定电流） $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \frac{I_{rM}}{K_r n_{TA}} \text{ (A)}$ 保护装置的動作时限（躲过电动机起動及自起動时间，即 $t_{op} > t_{st}$ ）对于一般电动机为 $t_{op} = (1.1 \sim 1.2) t_{st} \text{ (s)}$ 对于传动风机负荷的电动机为 $t_{op} = (1.2 \sim 1.4) t_{st} \text{ (s)}$	$I_{op}$ ——保护装置一次動作电流，A， $I_{op} = \frac{I_{op} \cdot K n_{TA}}{K_{jx}}$ ； $K_r$ ——继电器返回系数，取 0.9； $t_{st}$ ——电动机实际起動时间，s； $t_{op}$ ——保护装置動作时限，一般选为 10~15s，应在实际起動时校验其能否躲过起動时间； $I_{CM}$ ——电动机的电容电流，A，除大型同步电动机外，可忽略不计，大型同步电动机的电容电流计算见配电手册； $I_{CS}$ ——电网的总单相接地电容电流，A
单相接地保护	保护装置的—次動作电流（应按被保护元件发生单相接地故障时最小灵敏系数 1.3 整定） $I_{op} \leq \frac{I_{CS} - I_{CM}}{1.3} \text{ (A)}$	
失步保护	过负荷保护兼作失步保护，保护装置的動作电流和動作时限与过负荷保护相同。专用失步保护见配电手册	
低电压保护	保护装置的电压整定值为 65%~70% $U_n$ ，動作时限为 0.5s；45%~50% $U_n$ ，動作时限为 9s	

① 如为降压电抗器起動及变压器—电动机组，其起動电流倍数  $K_{st}$  改用  $K'_{st}$  代替

$$K'_{st} = \frac{1}{\frac{1}{K_{st}} + \frac{u_k S_{rM}}{S_{rT}}}$$

式中  $u_k$ ——电抗器或变压器的阻抗电压相对值；

$S_{rM}$ ——电动机额定容量，kVA；

$S_{rT}$ ——电抗器或变压器额定容量，kVA。

② 同步电动机接线端三相短路时，输出的超瞬态电流为

$$I''_{k3M} = \left( \frac{1.05}{x''_k} + 0.95 \sin \varphi_r \right) I_{rM} \text{ (A)}$$

式中  $x''_k$ ——同步电动机超瞬态电抗，相对值；

$\varphi_r$ ——同步电动机额定功率因数角；

$I_{rM}$ ——同步电动机额定电流，A。

③ 两相短路超瞬态电流  $I''_{k2}$  等于三相短路超瞬态电流  $I''_{k3}$  的 0.866 倍，三相短路超瞬态电流即对称短路电流初始值。

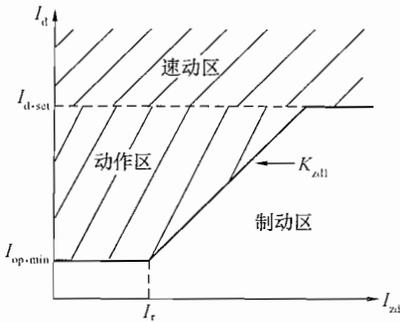


图 9-2-2 电动机比率制动特性曲线

式中  $I_d$ ——差动电流，A；

$I_{zd}$ ——制动电流，A。

3) 差动速断动作电流。差动速断动作电流一般取 3~8 倍额定电流的较低值，并在机端保护区内两相短路故障时有 1.2 的灵敏系数

$$K_{sen} = \frac{I_{k2 \cdot \min}}{n_{TA} \cdot I_{op}} \geq 1.2 \quad (9-2-10)$$

4) 灵敏系数

$$K_{sen} = \frac{I_{k2 \cdot \min}}{n_{TA} \cdot I_{op}} \geq 1.5 \quad (9-2-11)$$

式中  $I_{k2 \cdot \min}$ ——最小运行方式下电动机机端保护区内两相短路电流，A；

$n_{TA}$ ——电流互感器变比；

$I_{op}$ ——差动继电器动作电流，A，根据制动电流的大小在相应制动特性曲线上求得相应的动作电流。

(3) 对于电动机微机保护还应考虑：

1) 电动机过热保护

$$t = \frac{\tau}{\left(\frac{I_{eq}}{I_r}\right)^2 - 1.05^2} \quad (9-2-12)$$

式中  $\tau$ ——发热时间常数，s；

$I_{eq}$ ——等效运行电流，A；

$I_r$ ——电动机额定电流，A。

保护装置采用在一定的  $\frac{I_{eq}}{I_r}$ （等效运行电流与额定电流之比）过负荷条件下，允许过负荷的时间有多长来进行过负荷整定。保护装置自动计算发热时间常数  $\tau$ ，并确定一条反时限特性曲线（一般为 IEC 极端反时限特性曲线）。

整定计算方法：①若电动机厂家提供电动机在  $n$  倍额定负荷电流下，允许运行  $t$ ，或堵转电流为  $n$  倍额定电流时，允许堵转时间为  $t$ ，则直接整定过负荷系数  $k_{ol} = n$ ；过负荷时间  $t$ 。②按躲过起动电流整定，如 1.2 倍额定电流值，120s，直接起动结束时不发生过热报警信号（75% 过负荷跳闸值）为止。③若电动机在冷态时可连续起动两次，起动电流为  $n$

倍的额定电流，起动时间为  $t$ ，则发热时间常数

$$\tau = (n^2 - 1.05^2)t$$

可整定过负荷系数

$$k_{ol} = n, t = \frac{\tau}{[(n^2 - 1.05^2)]}, n = \frac{I_{cg}}{I_r}$$

2) 电动机负序电流保护（不平衡、断相、反相）

$$I_{op2} = kI_r \quad (9-2-13)$$

式中  $k$ ——负序电流保护系数， $k=0.2 \sim 1$ ；

$I_r$ ——电动机额定电流，A。

当只需要提供断相或反相保护时  $k=0.8 \sim 1$ ；

当需要提供灵敏的不平衡保护时  $k=0.2 \sim 0.8$ 。

具有外部短路闭锁的负序电流保护，动作时限  $t \geq 0.1s$ ，一般取  $t=0.4s$ 。

3) 起动时间过长保护。电动机在冷态情况下正常起动到起动完成时间，以保护监控装置实测时间，作为起动时间过长保护判据。

4) 堵转保护。由保护装置自动完成。

#### 9.2.4.3 设备选型原则

(1) 对 3kV 及以上的异步电动机和同步电动机的下列故障及异常运行方式，应装设相应的保护装置。

- 1) 定子绕组相间短路。
- 2) 定子绕组单相接地。
- 3) 定子绕组过负荷。
- 4) 定子绕组低电压。
- 5) 同步电动机失步。
- 6) 同步电动机失磁。
- 7) 同步电动机出现非同步冲击电流。
- 8) 相电流不平衡及断相。

(2) 对电动机绕组及引出线的相间短路，应装设相应的保护装置，并应符合下列规定。

1) 2MW 以下的电动机，宜采用电流速断保护；2MW 及以上的电动机，或电流速断保护灵敏系数不符合要求的 2MW 以下的电动机，应装设纵联差动保护。

保护装置可采用两相或三相式接线，并应瞬时动作于跳闸。具有自动灭磁装置的同步电动机，保护装置尚应瞬时动作于灭磁。

2) 作为纵联差动保护的后备，宜装设过电流保护。

保护装置可采用两相或三相式接线，并应延时动作于跳闸。具有自动灭磁装置的同步电动机，保护装置尚应延时动作于灭磁。

(3) 对电动机单相接地故障，当接地电流大于 5A 时，应装设有选择性的单相接地保护；当接地电流小于 5A 时，可装设接地检测装置。

单相接地电流为 10A 及以上时，保护装置应动作于跳闸；单相接地电流为 10A 以下时，保护装置宜动作于信号。

(4) 对电动机的过负荷应装设过负荷保护，并应符合下列规定。

1) 生产过程中易发生过负荷的电动机应装设过负荷保护。保护装置应根据负荷特性,带时限动作于信号或跳闸。

2) 起动或自起动困难、需防止起动或自起动时间过长的电动机,应装设过负荷保护,并应动作于跳闸。

(5) 对母线电压短时降低或中断,应装设电动机低电压保护,并应符合下列规定。

1) 下列电动机应装设 0.5s 时限的低电压保护,保护动作电压应为额定电压的 65% ~ 70%。

- a. 当电源电压短时降低或短时中断又恢复时,需断开的次要电动机。
- b. 根据生产过程不允许或不需自起动的电动机。

2) 下列电动机应装设 9s 时限的低电压保护,保护动作电压应为额定电压的 45% ~ 50%。

- a. 有备用自动投入机械的 I 类负荷电动机;
- b. 在电源电压长时间消失后需自动断开的电动机。
- c. 保护装置应动作于跳闸。

(6) 对同步电动机的失步应装设失步保护。失步保护宜带时限动作,对重要电动机应动作于再同步控制回路;不能再同步或根据生产过程不需再同步的电动机,应动作于跳闸。

(7) 对同步电动机的失磁,宜装设失磁保护。同步电动机的失磁保护应带时限动作于跳闸。

(8) 2MW 及以上以及不允许非同步的同步电动机,应装设防止电源短时中断再恢复时造成非同步冲击的保护。

保护装置应确保在电源恢复前动作。重要电动机的保护装置,应动作于再同步控制回路;不能再同步或根据生产过程不需再同步的电动机,保护装置应动作于跳闸。

(9) 2MW 及以上重要电动机,可装设负序电流保护。保护装置应动作于跳闸或信号。

(10) 当一台或一组设备由 2 台及以上电动机共同拖动时,电动机的保护装置应实现对每台电动机的保护。由双电源供电的双速电动机,其保护应按供电回路分别装设。

## 9.2.5 6 ~ 66kV 线路继电保护配置、整定计算

### 9.2.5.1 保护配置

6 ~ 66kV 线路的继电保护配置见表 9-2-7。

表 9-2-7 6 ~ 66kV 线路的继电保护配置

被线路保护	保护装置名称					
	无时限或带时限 电流电压速断	无时限电流 速断保护 <sup>①</sup>	带时限速断保护	过电流保护 <sup>②</sup>	单相接地保护	过负荷保护
单侧电 源放射式 单回线路	35 ~ 66kV 线 路装设	自重要配 电站引出的线路 装设	当无时限电流速 断不能满足选择性 动作时装设	装设	根据需 要 装设	装设

① 无时限电流速断保护范围,应保证切除所有使该母线残压低于 50% ~ 60% 额定电压的短路。为满足这要求,必要时保护装置可无选择地动作,并以自动装置来补救。

② 当过电流保护灵敏系数不满足要求时,采用低电压闭锁过电流保护或复合电压起动的过电流保护。

## 9.2.5.2 整定计算

6~10kV 线路的继电保护整定计算见表 9-2-8。

35~66kV 线路的继电保护整定计算见表 9-2-9。

表 9-2-8 6~10kV 线路的继电保护整定计算

保护名称	计算项目和公式	符号说明
过电流保护	<p>保护装置的动作电流（应躲过线路的过负荷电流）</p> $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \frac{I_{ol}}{K_r n_{TA}} \quad (A)$ <p>保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下线路末端两相短路电流校验）</p> $K_{sen} = \frac{I_{2k2 \cdot min}''}{I_{op}} \geq 1.3$ <p>保护装置的动作时限，应较相邻元件的过电流保护大一时限阶段，一般大 0.3~0.5s</p>	<p><math>K_{rel}</math>——可靠系数，用于电流速断保护时取 1.3；用于过电流保护时取 1.2；过负荷保护取 1.05~1.1；单相接地保护无时限时取 4~5，有时限时取 1.5~2；</p> <p><math>K_{con}</math>——接线系数，接于相电流时取 1，接于相电流差时取 <math>\sqrt{3}</math>；</p> <p><math>K_r</math>——继电器返回系数，取 0.9；</p> <p><math>n_{TA}</math>——电流互感器变比；</p> <p><math>I_{ol}^{(3)}</math>——线路过负荷（包括电动机起动所引起的）电流，A；</p>
无时限电流速断保护	<p>保护装置的动作电流（应躲过线路末端短路时最大三相短路电流<sup>①②</sup>）</p> $I_{op \cdot K} = K_{rel} K_{con} \frac{I_{2k3 \cdot max}''}{n_{TA}} \quad (A)$ <p>保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下线路始端两相短路电流校验）</p> $K_{sen} = \frac{I_{1k2 \cdot min}}{I_{op}} \geq 1.5$	<p><math>I_{2k2 \cdot min}</math>——最小运行方式下，线路末端两相短路稳态电流，A；</p> <p><math>I_{op}</math>——保护装置一次动作电流，A；</p> $I_{op} = I_{op \cdot K} \frac{n_{TA}}{K_{con}}$ <p><math>I_{2k3 \cdot max}''</math>——最大运行方式下线路末端三相短路超瞬态电流，A；</p> <p><math>I_{1k2 \cdot min}''</math>——最小运行方式下线路始端两相短路超瞬态电流<sup>④</sup>，A；</p>
带时限电流速断保护	<p>保护装置的动作电流（应躲过相邻元件末端短路时的最大三相短路电流或与相邻元件的电流速断保护的动作用电流相配合，按两个条件中较大者整定）</p> $I_{op \cdot K} \leq K_{rel} K_{con} \frac{I_{3k3 \cdot max}}{n_{TA}} \quad (A)$ <p>或</p> $I_{op \cdot K} \leq K_{co} K_{con} \frac{I_{op \cdot 3}}{n_{TA}} \quad (A)$ <p>保护装置的灵敏度系数与无时限电流速断保护的公式相同；</p> <p>保护装置的动作时限，应较相邻元件的电流速断保护大一个时限阶段，一般大 0.3~0.5s</p>	<p><math>K_{co}</math>——配合系数，取 1.1；</p> <p><math>I_{op \cdot 3}</math>——相邻元件的电流速断保护的一次动作电流，A；</p> <p><math>I_{3k3 \cdot max}</math>——最大运行方式下相邻元件末端三相短路稳态电流，A；</p> <p><math>I_{cx}</math>——被保护线路外部发生单相接地故障时，从被保护元件流出的电容电流，A；</p> <p><math>I_{c\Sigma}</math>——电网的总单相接地电容电流<sup>⑤</sup>，A；</p> <p><math>I_{L \cdot max}</math>——被保护线路最大负荷电流，A</p>
单相接地保护	<p>保护装置的一次动作电流（按躲过被保护线路外部单相接地故障时，从被保护元件流出的电容电流及按最小灵敏系数 1.3 整定）</p> $I_{op} \geq K_{rel} I_{cx} \quad (A)$ <p>和</p> $I_{op} \leq \frac{I_{c\Sigma} - I_{cx}}{1.3} \quad (A)$	
过负荷保护	<p>保护装置动作电流（应按线路最大负荷电流整定）</p> $I_{op \cdot K} \leq K_{rel} K_{con} \frac{I_{L \cdot max}}{K_r \cdot n_{TA}} \quad (A)$	

续表

保护名称	计算项目和公式	符号说明
低电压闭锁过电流保护	保护装置的动作电流整定同过电流保护。 保护装置的动作电压 $U_{op} = \frac{U_{L \cdot \min}}{K_r \cdot K_{rel}}$ 保护装置的动作时限同过电流保护	$U_{L \cdot \min}$ ——最低运行电压，（0.9 ~ 0.95）额定电压； $K_{rel}$ ——可靠系数，取 1.2
复合电压启动的过电流保护	保护装置的动作电流整定同过电流保护。 保护装置的相间动作电压： $U_{op} = \frac{U_{L \cdot \min}}{K_r \cdot K_{rel}}$ 负序动作电压 $U_{op} = \frac{K_{rel} \cdot U_{2ub \cdot \max}}{K_r}$ 保护装置的动作时限同过电流保护	$U_{2ub \cdot \max}$ ——电压互感器二次侧负序最大不平衡电压。 $K_{rel}$ ——可靠系数，取 1.5 ~ 2

① 如为线路变压器组，应按配电变压器整定计算；

② 当保证母线上具有规定的残余电压时，线路的最小允许长度计算式为

$$K_x = \frac{-\beta K_1 + \sqrt{1 + \beta^2 - K_1^2}}{\sqrt{1 + \beta^2}}$$

$$l_{\min} = \frac{X_{s \cdot \min}}{R_1} \cdot \frac{-\beta + \sqrt{\frac{K_{rel}^2 \alpha^2}{K_x^2} (1 + \beta^2) - 1}}{1 + \beta^2}$$

式中  $K_x$ ——计算运行方式下电力系统最小综合电抗  $X_{s \cdot \min}$  上的电压与额定电压之比； $\beta$ ——每千米线路的电抗  $X_1$  与有效电阻  $R_1$  之比； $K_1$ ——母线上残余相间电压与额定相间电压之比，其值等于母线上最小允许残余电压与额定电压之比，取 0.6； $R_1$ ——每 km 线路的有效电阻， $\Omega/\text{km}$ ； $X_{s \cdot \min}$ ——按电力系统在最大运行方式下，在母线上的最小综合电抗， $\Omega$ ； $K_{rel}$ ——可靠系数，一般取 1.2； $\alpha$ ——表示电力系统运行方式变化的系数，其值等于电力系统最小运行方式时的综合电抗  $X_{s \cdot \max}$  与最大运行方式的综合电抗  $X_{s \cdot \min}$  之比。

③ 电动机自启动时的过负荷电流按下式计算

$$I_{ol} = K_{ol} I_W = \frac{I_W}{\mu_k + Z_{pu \cdot II} + \frac{S_{rT}}{K_{st} S_{M\Sigma}}}$$

式中  $I_W$ ——线路工作电流，A； $K_{ol}$ ——需要自启动的全部电动机，在启动时所引起的过电流倍数； $\mu_k$ ——变压器阻抗电压相对值； $Z_{pu \cdot II}$ ——以变压器额定容量为基准的线路阻抗标么值； $S_{rT}$ ——变压器额定容量，kVA； $S_{M\Sigma}$ ——需要自启动的全部电动机容量，kVA； $K_{st}$ ——电动机启动时的电流倍数。④ 两相短路超瞬态电流  $I''_2$  等于三相短路超瞬态电流  $I''_3$  的 0.866 倍；

⑤ 电网单相接地电容电流计算，详见第 6 章。

表 9-2-9

35 ~ 66kV 线路的继电保护整定计算

保护名称	计算项目和公式	符号说明
无时限电流和电压速断	<p>按保护动作范围的条件整定</p> $I_{op \cdot K} = K_{con} \frac{I_b}{n_{TA} (X_{pu \cdot s} + X_{pu \cdot op})} \quad (A)$ $I_{op} = I_{op \cdot K} \frac{n_{TA}}{K_{con}} \quad (A)$ <p>灵敏系数 (电流部分)</p> $K_{sen} = \frac{I_{2k2 \cdot min}}{I_{op}}$ $U_{op \cdot K} = \frac{I_{op} \cdot X_{pu \cdot op} \cdot U_b}{I_k n_{TV}} \quad (V)$ $U_{op} = U_{op \cdot K} \cdot n_{TV}$ <p>灵敏系数 (电压部分)</p> $K_{sen} = \frac{U_{op}}{U_{rem \cdot max}} \geq 1.3 \sim 1.5$	<p><math>K_{con}</math>——接线系数, 接于相电流时 <math>K_{con} = 1</math>;</p> <p><math>n_{TA}</math>——电流互感器变比;</p> <p><math>I_b</math>——基准电流;</p> <p><math>X_{pu \cdot s}</math>——系统电抗标么值;</p> <p><math>X_{pu \cdot op}</math>——相当于电流元件或电压元件动作范围长度的线路电抗标么值</p> $X_{pu \cdot op} = X_{pu \cdot w} / K_{rel}$ <p><math>X_{pu \cdot w}</math>——被保护线路的电抗标么值;</p> <p><math>K_{rel}</math>——可靠系数取 1.1;</p> <p><math>n_{TV}</math>——电压互感器变比;</p> <p><math>U_b</math>——基准电压</p>
带时限电流和电压速断	<p>保护装置动作电流:</p> <p>(应与相邻元件的无时限电流速断保护的 动作电流相配合)</p> $I_{op \cdot K} = K_{con} \cdot K_{co} \cdot \frac{I_{op \cdot 3}}{n_{TA}} \quad (A)$ $I_{op} = I_{op \cdot K} \cdot \frac{n_{TA}}{K_{con}} \quad (A)$ <p>(并应躲过相邻元件末端的最大三相短路 电流)</p> $I_{op \cdot K} = K_{rel} \cdot K_{con} \cdot \frac{I_{3k3 \cdot max}}{n_{TA}} \quad (A)$ $I_{op} = I_{op \cdot K} \cdot \frac{n_{TA}}{K_{con}} \quad (A)$ <p>保护装置动作电压:</p> <p>(应与相邻元件的无时限电压速断保护的 动作电压相配合)</p> $U_{op \cdot K} = \frac{\sqrt{3} I_{op} X + U_{op \cdot 3}}{n_{TV} K_{co}} \quad (V)$ $U_{op} = U_{op \cdot K} \cdot n_{TV} \quad (V)$ <p>保护装置灵敏系数 (电流部分)</p> $K_{sen} = \frac{I_{2k2 \cdot min}}{I_{op}} \geq 1.3 \sim 1.5$ <p>保护装置灵敏系数 (电压部分)</p> $K_{sen} = \frac{U_{op}}{U_{rem \cdot max}} \geq 1.3 \sim 1.5$ <p>保护装置的動作时限, 应较相邻元件的 电流和电压速断保护大一时限阶段, 一般 时限取 0.3 ~ 0.5s</p>	<p><math>K_{con}</math>——接线系数, 接于相电流时 <math>K_{con} = 1</math>;</p> <p><math>n_{TA}</math>——电流互感器变比;</p> <p><math>K_{co}</math>——配合系数, 取 1.1;</p> <p><math>I_{op \cdot 3}</math>——相邻元件的无时限电流速断保护的一次 动作电流;</p> <p><math>K_{rel}</math>——可靠系数, 取 1.2 ~ 1.3;</p> <p><math>I_{3k3 \cdot max}</math>——系统最大运行方式时, 相邻元件末端的 三相短路电流;</p> <p><math>X</math>——被保护线路的电抗;</p> <p><math>U_{op \cdot 3}</math>——相邻元件的无时限电压速断保护的一次 动作电压 V;</p> <p><math>n_{TV}</math>——电压互感器变比;</p> <p><math>I_{2k2 \cdot min}</math>——最小运行方式下, 被保护线路末端两相 短路稳态电流 A;</p> <p><math>U_{rem \cdot max}</math>——最大运行方式下, 被保护线路末端三相 短路, 保护安装处的剩余电压 V</p>

注 过电流保护、单相接地保护、过负荷保护见 6 ~ 10kV 线路继电保护整定计算。

### 9.2.5.3 设备选型原则

(1) 3~66kV 线路的下列故障或异常运行，应装设相应的保护装置。

- 1) 相间短路。
- 2) 单相接地。
- 3) 过负荷。

(2) 3~10kV 线路装设相间短路保护装置，宜符合下列要求。

1) 电流保护装置应接于两相电流互感器上，同一网络的保护装置应装在相同的两相上。

2) 后备保护应采用远后备方式。

3) 下列情况应快速切除故障：

- a. 当线路短路使发电厂厂用母线或重要用户母线电压低于额定电压的 60% 时。
- b. 线路导线截面积过小，线路的热稳定不允许带时限切除短路时。

4) 当过电流保护的时限不大于 0.5~0.7s 时，且无上述第 3 条所列的情况，或无配合上的要求时，可不装设瞬动的电流速断保护。

(3) 3~10kV 线路装设相间短路保护装置，应符合下列规定。

1) 对单侧电源线路可装设两段电流保护，第一段应为不带时限的电流速断保护，第二段应为带时限的过电流保护，保护可采用定时限或反时限特性的继电器。对单侧电源带电抗器的线路，当其断路器不能切断电抗器前的短路时，不应装设电流速断保护，此时，应由母线保护或其他保护切除电抗器前的故障。

保护装置应仅在线路的电源侧装设。

2) 对双侧电源线路，可装设带方向或不带方向的电流速断和过电流保护。当采用带方向或不带方向的电流速断和过电流保护不能满足选择性、灵敏性或速动性的要求时，应采用光纤纵联差动保护作主保护，并应装设带方向或不带方向的电流保护作后备保护。

对并列运行的平行线路可装设横联差动作主保护，并应以接于两回线路电流之和的电流保护作为两回线路同时运行的后备保护及一回线路断开后的主保护及后备保护。

(4) 3~10kV 经低电阻接地单侧电源线路，除应配置相间故障保护外，还应配置零序电流保护。零序电流保护应设二段，第一段应为零序电流速断保护，时限应与相间速断保护相同；第二段应为零序过电流保护，时限应与相间过电流保护相同。当零序电流速断保护不能满足选择性要求时，也可配置两套零序过电流保护。零序电流可取自三相电流互感器组成的零序电流滤过器，也可取自加装的独立零序电流互感器，应根据接地电阻阻值、接地电流和整定值大小确定。

(5) 35~66kV 线路装设相间短路保护装置，应符合下列要求。

1) 电流保护装置应接于两相电流互感器上，同一网络的保护装置应装在相同的两相上。

2) 后备保护应采用远后备方式。

3) 下列情况应快速切除故障。

- a. 当线路短路使发电厂厂用母线或重要用户母线电压低于额定电压的 60% 时。
- b. 线路导线截面积过小，线路的热稳定不允许带时限切除短路时。
- c. 切除故障时间长，可能导致高压电网产生电力系统稳定问题时。

d. 为保证供电质量需要时。

(6) 35 ~ 66kV 线路装设相间短路保护装置, 应符合下列要求。

1) 对单侧电源线路可采用一段或两段电流速断或电压闭锁过电流保护作主保护, 并以带时限的过电流保护作后备保护。

当线路发生短路时, 使发电厂厂用母线或重要用户母线电压低于额定电压的 60% 时, 应快速切除故障。

2) 对双侧电源线路, 可装设带方向或不带方向的电流电压保护。

当采用电流电压保护不能满足选择性、灵敏性或速动性的要求时, 可采用距离保护或光纤纵联差动保护装置作主保护, 应装设带方向或不带方向的电流电压保护作后备保护。

3) 对并列运行的平行线路可装设横联差动作主保护, 并应以接于两回线路电流之和的电流保护作为两回线路同时运行的后备保护及一回线路断开后的主保护及后备保护。

4) 经低电阻接地单侧电源线路, 可装设一段或两段三相式电流保护; 装设一段或两段零序电流保护, 作为接地故障的主保护和后备保护。

(7) 3 ~ 66kV 中性点非直接接地电网中线路的单相接地故障, 应装设接地保护装置, 并应符合下列规定。

1) 在发电厂和变电站母线上, 应装设接地监视装置, 并应动作于信号。

2) 线路上宜装设有选择性的接地保护, 并应动作于信号。当危及人身和设备安全时, 保护装置应动作于跳闸。

3) 在出线回路数不多, 或难以装设选择性单相接地保护时, 可采用依次断开线路的方法寻找故障线路。

4) 经低电阻接地单侧电源线路, 应装设一段或两段零序电流保护。

(8) 电缆线路或电缆架空混合线路, 应装设过负荷保护。保护装置宜带时限动作于信号; 当危及设备安全时, 可动作于跳闸。

## 9.2.6 6 ~ 10kV 母线分段断路器继电保护装置、整定计算

### 9.2.6.1 保护配置

6 ~ 10kV 母线分段断路器的继电保护配置见表 9-2-10。

### 9.2.6.2 整定计算

6 ~ 10kV 母线分段断路器的继电保护整定计算见表 9-2-11。

表 9-2-10

6 ~ 10kV 母线分段断路器的继电保护配置

被保护设备	保护装置名称		备注
	电流速断保护	过电流保护	
不并列运行的分段母线	仅在分段断路器合闸瞬间投入, 合闸后自动解除	装设	对出线不多的 II、III 级负荷供电的配电站母线分段断路器, 可不设保护装置

表 9-2-11

6~10kV 母线分段断路器的继电保护整定计算

保护名称	计算项目和公式	符号说明
过电流保护	<p>保护装置的动作电流（应躲过任一母线段的最大负荷电流）</p> $I_{op.K} = K_{rel} K_{con} \frac{I_1}{K_r n_{TA}} \quad (\text{A})$ <p>保护装置的灵敏系数（按最小运行方式下母线两相短路时，流过保护安装处的短路电流校验。对后备保护，则按最小运行方式下相邻元件末端两相短路时，流过保护安装处的短路电流校验）</p> $K_{sen} = \frac{I_{k2 \cdot \min}}{I_{op}} \geq 1.3$ $K_{sen} = \frac{I_{3k2 \cdot \min}}{I_{op}} \geq 1.2$ <p>保护装置的动作时限，应较相邻元件的过电流保护大一时限阶段，一般大 0.3~0.5s</p>	<p><math>K_{rel}</math>——可靠系数，用于过电流保护时取 1.2，用于电流速断时取 1.3；</p> <p><math>K_{con}</math>——接线系数，接于相电流时取 1，接于相电流差时取 <math>\sqrt{3}</math>；</p> <p><math>K_r</math>——继电器返回系数，取 0.9；</p> <p><math>I_1</math>——一段母线最大负荷（包括电动机自起动引起的）电流，A；</p> <p><math>n_{TA}</math>——电流互感器变化；</p> <p><math>I_{k2 \cdot \min}</math>——最小运行方式下母线两相短路时，流过保护安装处的稳态电流，A；</p> <p><math>I_{3k2 \cdot \min}</math>——最小运行方式下相邻元件末端两相短路时，流过保护安装处的稳态电流，A；</p> <p><math>I_{op}</math>——保护装置一次动作电流，</p>
电流速断保护	<p>保护装置的动作电流（应按最小灵敏系数 1.5 整定）</p> $I_{op.K} \leq \frac{I''_{k2 \cdot \min}}{1.5 n_{TA}}$	<p><math>A, I_{op} = I_{op.K} \frac{n_{TA}}{K_{con}}</math></p> <p><math>I''_{k2 \cdot \min}</math>——最小运行方式下母线两相短路时，流过保护安装处的超瞬态电流<sup>①</sup>，A</p>

① 两相短路超瞬态电流  $I''_{k2}$  等于三相短路超瞬态电流  $I''_{k3}$  的 0.866 倍，三相短路超瞬态电流即对称短路电流初始值。

9

### 9.2.7 微机电流、电压保护整定计算

有关电流、电压保护的整定计算在微机电流、电压保护中均适用，其时限整定原则也相同。其中仅  $K_{rel}$ 、 $K_r$  系数不同，一般  $K_{rel} = 1.05 \sim 1.2$ ， $K_r = 0.85 \sim 0.95$ ，其时限阶段  $\Delta t = 0.3 \sim 0.5\text{s}$ 。但应按具体厂家产品样本或使用说明书中的规定值为准。反时限过电流保护的电流—时间曲线如图 9-2-3 所示，其中的 IEC 标准反时限曲线为常用曲线。

### 9.2.8 微机保护中电流互感器的选择

微机保护装置动作电流是由电流互感器二次电流提供的，因此选用电流互感器时除按额定电流、额定电压、短时热电流和动稳定电流选择外，还应考虑电流互感器的变比、综合误差、限值系数值和额定容量。

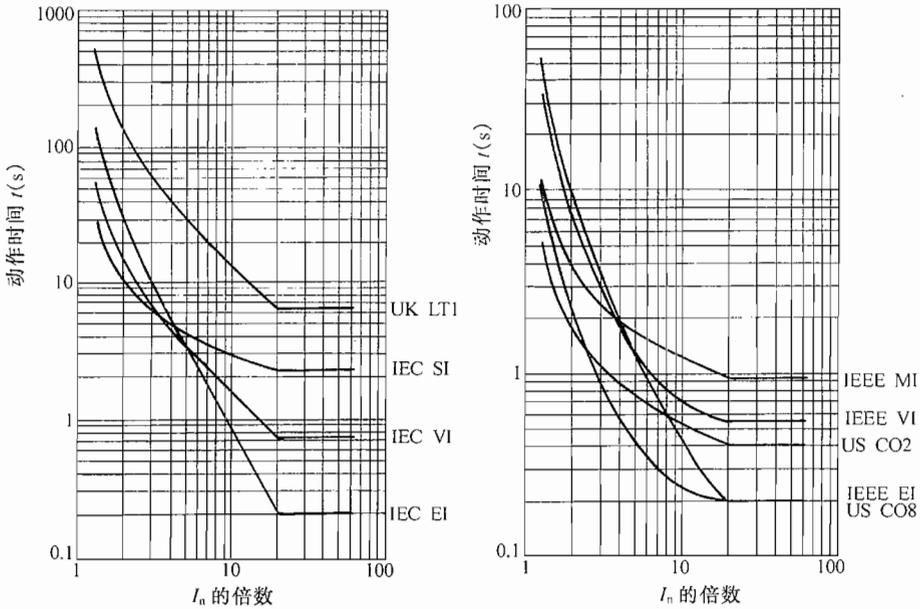
电流互感器保护级为 5P 级和 10P 级两种，对于微机电流保护装置则可选用 10P 级的电流互感器，对于微机差动保护装置应选用 5P 级的电流互感器。

P 类电流互感器性能根据 DL/T 866—2004《电流互感器、电压互感器选择及计算导则》验算的步骤如下。

(1) 一般选择验算。一般选择验算可按下列条件进行：

1) 电流互感器的额定准确限值一次电流  $I_{pol}$  应大于保护校验故障电流  $I_{pcf}$ ，必要时，还应考虑互感器暂态饱和影响。即准确限值系数  $K_{alf}$  应大于  $KK_{pcf}$ （ $K$  为用户规定的暂态系数，

$KK_{\text{per}}$ 为故障校验系数)。



IEC/UK 曲线  
时间常数  $TMS = 1$

$$\text{IEC S1 标准反时限 } t = TMS \times \left[ \frac{0.14}{\left(\frac{I}{I_n}\right)^{0.02} - 1} \right]$$

$$\text{IEC V1 非常反时限 } t = TMS \times \left[ \frac{13.5}{\left(\frac{I}{I_n}\right) - 1} \right]$$

$$\text{IEC E1 极端反时限 } t = TMS \times \left[ \frac{80}{\left(\frac{I}{I_n}\right)^2 - 1} \right]$$

$$\text{UK LTI 长时反时限 } t = TMS \times \left[ \frac{120}{\left(\frac{I}{I_n}\right) - 1} \right]$$

IEEE/US 曲线  
时间常数  $TD = 7$

$$\text{IEEE M1 标准反时限 } t = \frac{TD}{7} \times \left[ \frac{0.0515}{\left(\frac{I}{I_n}\right)^{0.02} - 1} + 0.114 \right]$$

$$\text{IEEE V1 非常反时限 } t = \frac{TD}{7} \times \left[ \frac{19.61}{\left(\frac{I}{I_n}\right)^2 - 1} + 0.491 \right]$$

$$\text{IEEE E1 极端反时限 } t = \frac{TD}{7} \times \left[ \frac{28.2}{\left(\frac{I}{I_n}\right)^2 - 1} + 0.1217 \right]$$

$$\text{US CO8 反时限 } t = \frac{TD}{7} \times \left[ \frac{5.95}{\left(\frac{I}{I_n}\right)^2 - 1} + 0.18 \right]$$

$$\text{US CO2 短时反时限 } t = \frac{TD}{7} \times \left[ \frac{0.02394}{\left(\frac{I}{I_n}\right)^{0.02} - 1} + 0.01694 \right]$$

图 9-2-3 反时限过电流保护的电流—时间曲线  
 $I_n$ —电流基准值;  $I$ —通过保护的电流

2) 电流互感器额定二次负荷  $R_{bn}$  应大于实际二次负荷  $R_b$ 。

按上述条件选择的电流互感器可能尚有潜力未得到合理利用。在系统容量很大, 而额定二次电流选用 1A, 以及采用电子式仪表和微机保护时, 经常遇到  $K_{alf}$  不够但二次输出容量有裕度的情况。因此, 必要时可进行较精确验算, 如按额定二次极限电动势或实际准确限值系数曲线验算, 以便更合理的选用电流互感器。

(2) 按额定二次极限电动势验算。

1) P 类电流互感器的额定二次极限电动势 ( $E_{sl}$ ) 为 (二次负荷仅计及电阻)

$$E_{sl} = K_{alf} I_{sn} (R_{ct} + R_{bn}) \quad (9-2-14)$$

式中  $K_{\text{alf}}$ ——准确限值系数；  
 $I_{\text{sn}}$ ——额定二次电流；  
 $R_{\text{ct}}$ ——电流互感器二次绕组电阻；  
 $R_{\text{bn}}$ ——电流互感器额定负荷。

上述各参数制造部门应在产品说明书中标明。

2) 继电保护动作性能校验要求的二次感应电动势 ( $E_s$ ) 为

$$E_s = KK_{\text{pcf}} I_{\text{sn}} (R_{\text{ct}} + R_b) \quad (9-2-15)$$

$$K_{\text{pcf}} = \frac{K_{\text{alf}}}{K} = \frac{I_{\text{pcf}}}{I_{\text{pn}}}$$

式中  $K_{\text{pcf}}$ ——保护校验系数，与继电保护动作原理有关；  
 $K$ ——给定暂态系数，不宜低于2，一般取2；  
 $R_b$ ——电流互感器实际二次负荷。

其他同式9-2-12。

3) 电流互感器的额定二次极限电动势应大于保护校验要求的二次感应电动势，即

$$E_{\text{sl}} \geq E_s \quad (9-2-16)$$

4) 所选电流互感器的准确限值系数  $K_{\text{alf}}$  应符合下式要求

$$K_{\text{alf}} \geq \frac{KK_{\text{pcf}}(R_{\text{ct}} + R_b)}{R_{\text{ct}} + R_{\text{bn}}} \quad (9-2-17)$$

## 9.3 变配电站自动装置及综合自动化的设计要求

### 9.3.1 自动重合闸

1. 3~110kV 电力网中自动重合闸装置

3~110kV 电力网中，在下列情况下，应装设自动重合闸装置。

(1) 3kV 及以上的架空线路和电缆与架空的混合线路，当用电设备允许且无备用电源自动投入时。

(2) 旁路断路器和兼作旁路的母联或分段断路器。

2. 单侧电源线路的自动重合闸方式的选择

对单侧电源线路的自动重合闸方式的选择应符合下列规定。

(1) 采用一次重合闸。

(2) 当电力网由几段串联线路构成时，宜采用重合闸前加速保护动作或顺序自动重合闸。

3. 自动重合闸装置

自动重合闸装置，应符合下列要求：

(1) 手动或通过遥控装置将断路器断开或将断路器投入故障线路上而随即由保护装置将其断开时，自动重合闸均不应动作。

(2) 自动重合闸装置在装置的某些元件损坏以及断路器触点粘住或拒动等情况下，均不应使断路器多次重合。

(3) 断路器处于不正常状态不允许实现自动重合闸时，应将自动重合闸装置闭锁。

### 9.3.2 备用电源和备用设备的自动投入装置

#### 1. 可装设情况

下列情况可装设备用电源或备用设备的自动投入装置（以下简称自动投入装置）：

- (1) 由双电源供电的变配电站，其中一个电源经常断开作为备用。
- (2) 变配电站内有互为备用的母线段。
- (3) 变配电站内有备用变压器。
- (4) 变配电站内有两台所用变压器。
- (5) 生产过程中某些重要机组有备用机组。

#### 2. 自动投入装置要求

- (1) 保证备用电源有电压、工作回路断开后才投入备用回路。
- (2) 工作回路上的电压，不论因何原因消失时，除有闭锁信号外，自动投入装置均应延时动作。
- (3) 手动断开工作回路时，不起动自动投入装置。
- (4) 保证自动投入装置只动作一次。
- (5) 备用电源自动投入装置动作后，如投到故障上，必要时，应使保护加速动作。
- (6) 备用电源自动投入装置中，可设置工作电源的电流闭锁回路。

### 9.3.3 自动低频减载装置

(1) 电力网中变配电站和配电站，根据电力系统运行要求，应装设有足够数量的自动低频减载装置。

当因事故发生功率缺额时，应由自动低频减载装置断开一部分次要负荷。

(2) 自动低频减载装置的动作频率和动作时间整定值，以及应断开的负荷容量，应根据电力系统运行方式和故障时可能发生的功率缺额确定。

(3) 在短路及自动重合闸或备用电源自动投入装置动作时电源中断的过程中，电动机反馈造成频率和电压的降低；当自动低频减载装置可能误动作时，应采取相应的防止误动作的措施。

### 9.3.4 变配电站综合自动化的设计原则及远方监控的接口要求

#### 9.3.4.1 变配电站综合自动化的设计原则

变配电站综合自动化设计应遵循如下原则：

- (1) 提高变配电站安全生产水平，技术管理水平和供电质量。
- (2) 使变配电站运行方便、维护简单，提高劳动生产率和营运效益，实现减人增效。
- (3) 减少二次设备间的连接，节约控制电缆。
- (4) 减少变配电站设备的配置，避免设备重复设置，实现资源共享。
- (5) 减少变配电站占地面积，降低工程造价。

变配电站计算机监控系统的选型应做到安全可靠、经济适用、技术先进、符合国情。应采用具有开放性和可扩充性，抗干扰性强的、成熟可靠的产品。变配电站综合自动化系统应实现对变配电站可靠、合理、完善的监视、测量、控制、运行管理，并具备遥测、遥信、遥调、遥控等全部的远动功能，具有与调度通信中心计算系统交换信息的能力。

#### 9.3.4.2 系统结构

- (1) 变配电站计算机监控系统宜由站控层和间隔层两部分组成，并用分层、分布、开

放式网络系统实现连接。

(2) 站控层由计算机网络连接的计算机监控系统主机或/及操作员站和各种功能站构成，提供所内运行的人机联系界面，实现管理控制间隔层设备等功能，形成全所监控、管理中心，并可与远程调度通信中心通信。

(3) 间隔层由工控网络/计算机网络连接的若干个监控子系统组成，在站控层及网络失效的情况下，仍能独立完成间隔设备的就地监控功能。

(4) 站控层与间隔层可直接连接，也可通过前置层设备连接。前置层可与调度通信中心通信。

(5) 站控层设备宜集中设置。间隔层设备宜按相对集中方式分散设置，当技术经济合理时也可按全分散方式设置或全集中方式设置。

#### 9.3.4.3 网络结构

(1) 计算机监控系统的站控层和间隔层可采用统一的计算机网络，也可分别采用不同网络。当采用统一的网络时，宜采用国际标准推荐的网络结构。

(2) 站控层宜采用国际标准推荐的标准以太网。站控层系统应具有良好的开放性。

(3) 间隔层宜采用工控网，它应具有足够的传送速率和极高的可靠性。间隔层监控子系统间宜实现直接通信。

(4) 网络拓扑宜采用总线形或环形，也可采用星形。站控层与间隔层之间的物理连接宜用星形。

(5) 当站控层和间隔层采用同一网络时，宜分层或分段布置结点，使网络能力及通信负荷率满足要求。

(6) 110kV 及以下变配电站可采用单网。

(7) 变配电站计算机网络应具有与国家电力数据网连接的能力，按要求实现所内调度自动化、保护、管理等多种信息的远程传送。

9

#### 9.3.4.4 硬件设备

(1) 计算机监控系统的硬件设备宜由以下几部分组成。

1) 站控层设备。包括主机或/及操作员站、工程师站（变配电站可不设专用工程师站）、远动通信设备、与电能管理系统的接口以及公用接口等。

2) 网络设备。包括网络连接装置、光/电转换器、接口设备和网络连线、电缆、光缆等。

3) 间隔层设备。包括 I/O 单元、控制单元、间隔层网络、与站控层网络的接口和继电保护通信接口装置等。

(2) 站控层主机配置应能满足整个系统的功能要求及性能指标要求，主机容量应与变配电站的规划容量相适应。应选用性能优良、符合工业标准的产品。

(3) 操作员站应满足运行人员操作时直观、便捷、安全、可靠的要求。

(4) 应设置双套远动通信设备，远动信息应直接来自间隔层采集的实时数据。远动接口设备应满足 DL/T 5002—2005《地区电网调度自动化设计技术规程》、DL/T 5003—2005《电力系统调度自动化设计技术规程》的要求，其容量及性能指标应能满足变配电站远动功能及规约转换要求。

(5) 应设置 GPS 对时设备，其同步脉冲输出接口及数字接口数量应满足系统配置要求，I/O 单元的对时精度应满足事件顺序记录分辨率的要求。

(6) 打印机的配置数量和性能应能满足定时制表、召唤打印、事故打印等功能要求。

(7) 网络媒介可采用屏蔽双绞线、同轴电缆、光缆或以上几种方式的组合，通过户外的长距离通信应采用光缆。

(8) 间隔层设备包括中央处理器、存储器、通信及 I/O 控制等模块。I/O 测控单元应按电气单元配置，应模块化、标准化、容易维护、更换，允许带电插拔。

(9) 当采用前置层设备连接方式时，前置机宜冗余设置。

(10) 保护通信接口装置可分散设置，保护通信接口装置应能实现与间隔层各种保护装置的通信。

#### 9.3.4.5 软件系统

(1) 变配电站计算机监控系统的软件应由系统软件、支持软件和应用软件组成。

(2) 软件系统的可靠性、兼容性、可移植性、可扩充性及界面的友好性等性能指标均应满足系统本期及远景规划要求。

(3) 软件系统应为模块化结构，以方便修改和维护。

(4) 系统软件应为成熟的实时多任务操作系统并具有完整的自诊断程序。

(5) 数据库的结构应适应分散分布式控制方式的要求，并应具有良好的可维护性，并提供用户访问数据库的标准接口。

(6) 网络软件应满足计算机网络各结点之间信息的传输、数据共享和分布式处理等要求，通信速率应满足系统实时性要求。

(7) 应配置各种必要的工具软件。

(8) 应用软件必须满足系统功能要求，成熟、可靠，具有良好的实时响应速度和可扩充性。

(9) 远动遥信设备应配置远传数据库和各级相关调度通信规约，以实现与调度端的远程通信，两套设备应能实现通道故障时，备用通道自动切换。

(10) 当设有前置机时，前置机宜配置数据库和远动规约处理软件，完成实时数据的处理和与调度通信中心的数据通信。站控层网络应按 TCP/IP 协议通信；间隔层网络宜采用有关国标或 IEC 标准协议通信。

(11) 与调度实时通信的应用层协议宜采用相关的电力国家标准、行业标准及国际标准。在该接口配置时，应能适应国家电力数据网建成后的各种远程访问需要。

#### 9.3.4.6 远方监控接口要求

(1) 变配电站自动化系统与调度所或控制中心自动化系统间通信的基本要求。

1) 应选择可靠的通道与上级计算机联系，通道可采用电力线载波、微波、光纤、公用电话网、导引电缆、音频及无线电等。

2) 通信的接口应能满足各级调度要求的下列通信方式：

- a. 异步串行半双工。
- b. 异步串行全双工。
- c. 同步串行半双工。
- d. 同步串行全双工。

3) 应按上级调度（或控制中心）的要求：设置与调度端通信的硬、软件模块，其功能和技术指标应满足与调度之间的信息传送要求，并选用调度通信的标准规约或计算机通信的

标准规约。

4) 应能正确接受上级站计算机下达的各项命令，并向上级站上送变配电站的实时工况、运行参数及调度、管理必需的有关信息。

(2) 变配电站主控级计算机与单元控制级、微机型保护或其他自动装置间通信的基本要求：

1) 当采用分布式系统结构时，其相互间的通信接口宜按本地现场总线考虑（也可采用局域网连接），选择符合国际标准或工业标准的电气接口特性。这些接口的通信规约、信息格式、数据传输速率、传输介质和传输距离等，在国际标准未正式颁布前，应符合 IEC 870-5-103 或 101 规约《保护通信配套标准》的相关条款要求。

2) 当采用点对点串行通信星形链路结构时，其相互间的通信接口应符合异步或同步串行数据传输通信方式的要求，目前接口标准可符合美国电子工业协会的下述标准：

- a. RS-232-C（采用串行二进制数据交换的数据终端与数据通信设备之间的接口）。
- b. RS-423-C（非平衡电压数字接口电路的电气特性）。
- c. RS-422-A（平衡电压数字接口电路的电气特性）。
- d. RS-485（差分 20mA 电流环）。

一般情况下宜采用 RS-232-C 和 RS-485 接口标准。

(3) 自动化系统宜具备接受卫星、无线电台或电网调度自动化系统校正同步时钟精度的设备。

### 9.3.5 变配电站控制室的布置的一般要求

#### 9.3.5.1 控制室的布置

(1) 主控制室的控制屏和保护屏可采用合在一室的布置或将控制屏与继电器屏分室布置的形式。中小型变配电站一般采用前者。

(2) 控制室的布置一般有  $\Pi$  型、 $\Gamma$  型或直列式布置，主环正面宜采用直列式布置，超过 9 块屏时，也可采用弧形布置。主变压器、母线设备及中央信号装置的控制屏，应布置在主环正面。35kV 及以上的线路控制屏、线路并联电抗器、串联补偿电容器及无功补偿装置的控制屏，应根据规划确定布置在主环正面或侧面。

(3) 电度表及记录仪表应布置在抄表方便的地方。直流屏布置在控制室时，可布置在主环侧面，也可布置在便于操作的主环以外的地方。继电保护和自动装置屏一般布置在主环以外，放在主环的后面。

(4) 计算机或微处理机及辅助设备宜布置在与主控制室相通的单独房间中，该房间应能满足计算机微处理机的运行要求。屏幕显示器宜放在主环正面或值班操作台上。

#### 9.3.5.2 控制屏（屏台）及继电器屏的屏面布置

(1) 控制屏（屏台）的布置应满足下列要求：

- 1) 监视、操作和调节方便，模拟接线清晰。相同安装的单位，其屏面布置应一致。
- 2) 测量仪表尽量与模拟接线相对应，A、B、C 相按纵向排列，为便利运行监视，同类安装单位功能相同的仪表，一般布置在相对应的位置。主环内每侧各屏光字牌的高度应一致。光字牌宜放置在屏的上方，要求上部取齐；当放置在中间时，要求下部取齐。

3) 对屏台分开的结构，经常监视的常测仪表、操作设备放在台上，一般常测仪表及光字牌宜布置在屏上，测量仪表宜布置在屏电气主接线模拟线上。

4) 操作设备宜与安装单位的模拟接线相对应, 功能相同的操作设备, 应布置在相对应的位置上, 为避免运行人员误操作, 操作方向全站必须一致。

5) 采用灯光监视时, 红、绿灯分别布置在控制开关的右上侧和左上侧。

6) 屏面设备之间的距离应满足设备安装及接线的要求。800mm 宽的屏或台上, 每行控制开关不宜超过 5 个 (强电小开关和弱电开关除外), 一般为 4 个。操作设备的中心线离地面不应低于 600mm (调节手轮除外), 经常操作的设备宜布置在离地面 800 ~ 1500mm 处。

7) 设计屏台和屏面布置时, 应考虑屏背面安装端子排不超过制造厂允许的数量。为便于接线, 屏背每侧端子排距地不宜低于 350mm。

(2) 继电器屏面的布置应满足下列要求:

1) 调试方便, 安全可靠, 屏面布置适当紧凑。

2) 相同安装单位的屏面布置宜对应一致, 不同安装单位的继电器装在一块屏上, 宜按照纵向划分, 其布置宜对应一致。

3) 设备或元件装设两套主保护装置时, 宜分别布置在不同屏上。

4) 组合式继电器插件箱, 宜将相同出口继电器的保护装置装在一个插件箱内。

5) 各屏上设备装设高度横向应整齐一致, 避免在屏后装设继电器。各屏上继电器宜集中布置, 安装水平高度应一致, 其安装中心线离地面不宜低于 600mm。

6) 试验部件与连接片, 安装中心线离地面不宜低于 300mm。

7) 对正面不开门的继电器屏, 屏的下面离地 250mm 处宜设有孔洞, 供实验时穿线之用。

8) 继电器屏背面宜设双门。

## 变配电站操作电源<sup>①</sup>

### 10.1 系统设计

#### 10.1.1 直流电源

1. 发电厂、变电站内应设置向控制负荷和动力负荷等供电的直流电源。
2. 220V 和 110V 直流电源应采用蓄电池组。48V 及以下的直流电源可采用由 220V 或 110V 蓄电池组供电的电力用 DC/DC 变换装置。
3. 正常运行方式下, 每组蓄电池的直流网络应独立运行, 不应与其他蓄电池组有任何直接电气连接。
4. 蓄电池组正常应以浮充电方式运行。
5. 铅酸蓄电池组不应设置端电池; 镉镍碱性蓄电池组设置端电池时, 宜减少端电池个数。

#### 10.1.2 系统电压

1. 发电厂、变电站直流电源系统电压应根据用电设备类型、额定容量、供电距离和安装地点等确定合适的系统电压。直流电源系统标称电压应满足下列要求:
  - (1) 专供控制负荷的直流电源系统电压宜采用 110V, 也可采用 220V。
  - (2) 专供动力负荷的直流电源系统电压宜采用 220V。
  - (3) 控制负荷和动力负荷合并供电的直流电源系统电压可采用 220V 或 110V。
  - (4) 全厂(站)直流控制电压应采用相同电压, 扩建和改建工程宜与已有厂(站)直流电压一致。
2. 在正常运行情况下, 直流母线电压应为直流电源系统标称电压的 105%。
3. 在均衡充电运行情况下, 直流母线电压应满足下列要求:
  - (1) 专供控制负荷的直流电源系统, 不应高于直流电源系统标称电压的 110%。
  - (2) 专供动力负荷的直流电源系统, 不应高于直流电源系统标称电压的 112.5%。
  - (3) 对控制负荷和动力负荷合并供电的直流电源系统, 不应高于直流电源系统标称电压的 110%。
4. 在事故放电末期, 蓄电池组出口端电压不应低于直流电源系统标称电压的 87.5%。

#### 10.1.3 蓄电池组

1. 蓄电池型式选择应符合下列要求:
  - (1) 直流电源宜采用阀控式密封铅酸蓄电池, 也可采用固定型排气式铅酸蓄电池。
  - (2) 小型发电厂、110kV 及以下变电站可采用镉镍碱性蓄电池。

① 本章第 10.1 ~ 第 10.6 节均引自 DL/T 5044—2014《电力工程直流电源系统设计技术规程》; 第 10.7 节引自《工业与民用配电设计手册(第三版)》。

(3) 核电厂常规岛宜采用固定型排气式铅酸蓄电池。

2. 铅酸蓄电池应采用单体为2V的蓄电池，直流电源成套装置组柜安装的铅酸蓄电池宜采用单体为2V的蓄电池，也可采用6V或12V组合电池。

3. 蓄电池组数配置应符合下列要求：

110kV及以下变电站宜装设1组蓄电池，对于重要的110kV变电站也可装设2组蓄电池。

#### 10.1.4 充电装置

1. 充电装置型式宜选用高频开关电源模块型充电装置，也可选用相控式充电装置。

2. 1组蓄电池时，充电装置的配置应符合下列规定：

(1) 采用相控式充电装置时，宜配置2套充电装置。

(2) 采用高频开关电源模块型充电装置时，宜配置1套充电装置，也可配置2套充电装置。

3. 2组蓄电池时，充电装置的配置应符合下列规定：

(1) 采用相控式充电装置时，宜配置3套充电装置。

(2) 采用高频开关电源模块型充电装置时，宜配置2套充电装置，也可配置3套充电装置。

#### 10.1.5 接线方式

1. 1组蓄电池的直流电源系统接线方式应符合下列要求：

(1) 1组蓄电池配置1套充电装置时，宜采用单母线接线。

(2) 1组蓄电池配置2套充电装置时，宜采用单母线分段接线，2套充电装置应接入不同母线段，蓄电池组应跨接在两段母线上。

(3) 1组蓄电池的直流电源系统，宜经直流断路器与另一组相同电压等级的直流电源系统相连。正常运行时，该断路器应处于断开状态。

2. 2组蓄电池的直流电源系统接线方式应符合下列要求：

(1) 直流电源系统应采用两段单母线接线，两段直流母线之间应设联络电器。正常运行时，两段直流母线应分别独立运行。

(2) 2组蓄电池配置2套充电装置时，每组蓄电池及其充电装置应分别接入相应母线段。

(3) 2组蓄电池配置3套充电装置时，每组蓄电池及其充电装置应分别接入相应母线段。第3套充电装置应经切换电器对2组蓄电池进行充电。

(4) 2组蓄电池的直流电源系统应满足在正常运行中两段母线切换时不中断供电的要求。在切换过程中，2组蓄电池应满足标称电压相同，电压差小于规定值，且直流电源系统均处于正常运行状态，允许短时并联运行。

3. 蓄电池组和充电装置应经隔离和保护电器接入直流电源系统。

4. 铅酸蓄电池组不宜设降压装置，有端电池的镉镍碱性蓄电池组应设有降压装置。

5. 每组蓄电池应设有专用的试验放电回路。试验放电设备宜经隔离和保护电器直接与蓄电池组出口回路并接。放电装置宜采用移动式设备。

6. 220V和110V直流电源系统应采用不接地方式。

### 10.1.6 网络设计

1. 直流网络宜采用集中辐射形供电方式或分层辐射形供电方式。

2. 下列回路应采用集中辐射形供电：

(1) 直流应急照明、直流油泵电动机、交流不间断电源。

(2) DC/DC 变换器。

(3) 热工总电源柜和直流分电柜电源。

3. 下列回路宜采用集中辐射形供电：

(1) 发电厂系统远动、系统保护等。

(2) 发电厂主要电气设备的控制、信号、保护和自动装置等。

(3) 发电厂热控控制负荷。

4. 分层辐射形供电网络应根据用电负荷和设备布置情况，合理设置直流分电柜。

5. 直流分电柜接线应符合下列要求：

(1) 直流分电柜每段母线宜由来自同一蓄电池组的 2 回直流电源供电。电源进线应经隔离电器接至直流分电柜母线。

(2) 对于要求双电源供电的负荷应设置两段母线，两段母线宜分别由不同蓄电池组供电，每段母线宜由来自同一蓄电池组的 2 回直流电源供电，母线之间不宜设联络电器。

(3) 公用系统直流分电柜每段母线应由不同蓄电池组的 2 回直流电源供电，宜采用手动断电切换方式。

6. 当采用环形网络供电时，环形网络应由 2 回直流电源供电，直流电源应经隔离电器接入，正常时为开环运行。当 2 回电源由不同蓄电池组供电时，宜采用手动断电切换方式。

## 10.2 直流负荷

### 10.2.1 直流负荷分类

1. 直流负荷按功能可分为控制负荷和动力负荷，并应符合下列规定：

(1) 控制负荷包括下列负荷：

1) 电气控制、信号、测量负荷。

2) 热工控制、信号、测量负荷。

3) 继电保护、自动装置和监控系统负荷。

(2) 动力负荷包括下列负荷：

1) 各类直流电动机。

2) 高压断路器电磁操动合闸机构。

3) 交流不间断电源装置。

4) DC/DC 变换装置。

5) 直流应急照明负荷。

6) 热工动力负荷。

2. 直流负荷按性质可分为经常负荷、事故负荷和冲击负荷，并应符合下列规定：

(1) 经常负荷包括下列负荷：

- 1) 长明灯。
- 2) 连续运行的直流电动机。
- 3) 逆变器。
- 4) 电气控制、保护装置等。
- 5) DC/DC 变换装置。
- 6) 热工控制负荷。
- (2) 事故负荷包括下列负荷：
  - 1) 事故中需要运行的直流电动机。
  - 2) 直流应急照明。
  - 3) 交流不间断电源装置。
  - 4) 热工动力负荷。
- (3) 冲击负荷包括下列负荷：
  - 1) 高压断路器跳闸。
  - 2) 热工冲击负荷。
  - 3) 直流电动机起动电流。

### 10.2.2 直流负荷统计

1. 直流负荷统计应符合下列规定：

(1) 装设 2 组控制专用蓄电池组时，每组负荷应按全部控制负荷统计。

(2) 装设 2 组动力和控制合并供电蓄电池组时，每组负荷应按全部控制负荷统计，动力负荷宜平均分配在 2 组蓄电池上。其中直流应急照明负荷，每组应按全部负荷的 60% 统计，对变电站和有保安电源的发电厂可按 100% 统计。

(3) 事故后恢复供电的高压断路器合闸冲击负荷应按随机负荷考虑。

(4) 两个直流电源系统间设有联络线时，每组蓄电池应按各自所连接的负荷统计，不能因互联而增加负荷容量的统计。

2. 事故停电时间应符合下列规定：

(1) 与电力系统连接的发电厂，厂用交流电源事故停电时间应按 1h 计算。

(2) 不与电力系统连接的孤立发电厂，厂用交流电源事故停电时间应按 2h 计算。

(3) 有人值班的变电站，全站交流电源事故停电时间应按 1h 计算。

(4) 无人值班的变电站，全站交流电源事故停电时间宜按 2h 计算。

3. 事故初期（1min）的冲击负荷应按下列原则统计：

(1) 备用电源断路器应按备用电源实际自投断路器台数统计。

(2) 低电压、母线保护、低频减载等跳闸回路应按实际数量统计。

(3) 电气及热工的控制、信号和保护回路等应按实际负荷统计。

4. 事故停电时间内，恢复供电的高压断路器合闸电流应按断路器合闸电流最大的一台统计，并应与事故初期冲击负荷之外的最大负荷或出现最低电压时的负荷相叠加。

5. 直流负荷统计计算时间应符合表 10-2-1 的规定。

表 10-2-1 直流负荷统计计算时间表

序号	负荷名称		经常	事故放电计算时间						
				初期	持续 (h)					随机
					1min	0.5	1.0	1.5	2.0	
1	控制、保护、 监控系统	发电厂和有人值班变电站	√	√		√				
		无人值班变电站	√	√				√		
		孤立发电厂	√	√				√		
2	高压断路器跳闸			√						
3	高压断路器自投			√						
4	恢复供电高压断路器合闸									√
5	氢（空） 密封油泵	200MW 及以下机组		√		√				
		300MW 及以上机组		√					√	
6	直流润 滑油泵	25MW 及以下机组		√	√					
		50 ~ 300MW 机组		√		√				
		600MW 及以上机组		√			√			
7	交流不间 断电源	发电厂		√		√				
		变电站	有人值班		√		√			
			无人值班		√				√	
		孤立发电厂		√				√		
8	直流长明灯	发电厂和有人值班变电站	√	√		√				
		孤立发电厂	√	√				√		
9	直流应 急照明	发电厂和有人值班变电站		√		√				
		无人值班变电站		√				√		
		孤立发电厂		√				√		
10	DC/DC 变换装置	采用一体化电源向通信负荷供电的变电站	√	√						

注 1. 表中“√”表示具有该项负荷，应予以统计的项目。  
2. 通信用 DC/DC 变换装置的事故放电时间应满足通信专业的要求，一般为 2 ~ 4h。

6. 直流负荷统计时的负荷系数应符合表 10-2-2 的规定。

表 10-2-2 直流负荷统计负荷系数表

序号	负荷名称	负荷系数
1	控制、保护、继电器	0.6
2	监控系统、智能装置、智能组件	0.8
3	高压断路器跳闸	0.6

续表

序号	负荷名称	负荷系数
4	高压断路器自投	1.0
5	恢复供电高压断路器合闸	1.0
6	氢(空)密封油泵	0.8
7	直流润滑油泵	0.9
8	变电站交流不间断电源	0.6
9	发电厂交流不间断电源	0.5
10	DC/DC 变换装置	0.8
11	直流长明灯	1.0
12	直流应急照明	1.0
13	热控直流负荷	0.6

## 10.3 保护与监控

### 10.3.1 保护

1. 蓄电池出口回路、充电装置直流侧出口回路、直流馈线回路和蓄电池试验放电回路等应装设保护电器。

2. 保护电器选择应符合下列规定：

(1) 蓄电池出口回路宜采用熔断器，也可采用具有选择性保护的直流断路器。

(2) 充电装置直流侧出口回路、直流馈线回路和蓄电池试验放电回路宜采用直流断路器，当直流断路器有极性要求时，对充电装置回路应采用反极性接线。

(3) 直流断路器的下级不应使用熔断器。

3. 直流电源系统保护电器的选择性配合原则应符合下列要求：

(1) 熔断器装设在直流断路器上一级时，熔断器额定电流应为直流断路器额定电流的 2 倍及以上。

(2) 各级直流馈线断路器宜选用具有瞬时保护和反时限过电流保护的直流断路器。当不能满足上、下级保护配合要求时，可选用带短路短延时保护特性的直流断路器。

(3) 充电装置直流侧出口宜按直流馈线选用直流断路器，以便实现与蓄电池出口保护电器的选择性配合。

(4) 2 台机组之间 220V 直流电源系统应急联络断路器应与相应的蓄电池组出口保护电器实现选择性配合。

(5) 采用分层辐射形供电时，直流柜至分电柜的馈线断路器宜选用具有短路短延时特性的直流塑壳断路器。分电柜直流馈线断路器宜选用直流微型断路器。

(6) 各级直流断路器配合采用电流比表述，应符合表 10-3-1 ~ 表 10-3-7 的规定。

表 10-3-1 集中辐射形系统保护电器选择性配合表（标准型）

网络图							
L <sub>2</sub> 电缆电压降		$\Delta U_{p2} = 3\% U_n$ (110V 系统) $\Delta U_{p2} = 2\% U_n$ (220V 系统)			$\Delta U_{p2} = 5\% U_n$ (110V 系统) $\Delta U_{p2} = 4\% U_n$ (220V 系统)		
下级断路器							
S <sub>2</sub> /S <sub>3</sub> 电流比		2A	4A	6A	2A	4A	6A
蓄电池组							
110V 系统 200 ~ 1000Ah		10 (20A)	7 (32A)	6.5 (40A)	8 (16A)	5 (20A)	5 (32A)
220V 系统 200 ~ 2400Ah		17 (40A)	12 (50A)	10.5 (63A)	12 (25A)	7 (32A)	6 (40A)

- 注 1. 蓄电池组出口电缆 L1 压降按  $0.5\% U_n \leq \Delta U_{p1} \leq 1\% U_n$ ，计算电流为 1.05 倍蓄电池 1h 放电率电流（取  $5.5I_{10}$ ）；
2. 电缆 L2 计算电流为 10A；
3. 断路器 S2 采用标准型 C 型脱扣器直流断路器，瞬时脱扣范围为  $7I_n \sim 15I_n$ ；
4. 断路器 S3 采用标准型 B 型脱扣器直流断路器，瞬时脱扣范围为  $4I_n \sim 7I_n$ ；
5. 断路器 S2 应根据蓄电池组容量选择微型断路器或塑壳断路器，直流断路器分断能力应大于断路器出口短路电流；
6. 括号内数值为根据 S<sub>2</sub>/S<sub>3</sub> 电流比，推荐选择的 S2 额定电流。

表 10-3-2 分层辐射形系统保护电器选择性配合表（标准型）

网络图							
L <sub>2</sub> 、L <sub>3</sub> 电缆电压降		$\Delta U_{p2} = 3\% U_n$ $\Delta U_{p3} = 1\% U_n$			$\Delta U_{p2} = 5\% U_n$ $\Delta U_{p3} = 1.5\% U_n$		
下级断路器							
S <sub>3</sub> /S <sub>4</sub> 电流比		2A	4A	6A	2A	4A	6A
蓄电池组							
110V 系统 200 ~ 1000Ah		12 (25A)	10 (40A)	10 (注 6)	11 (25A)	8 (32A)	8 (注 6)
220V 系统 200 ~ 1600Ah		19 (40A)	14 (注 6)	13 (注 6)	16 (32A)	10 (40A)	9 (注 6)

- 注 1. 蓄电池组出口电缆 L1 压降按  $0.5\% U_n \leq \Delta U_{p1} \leq 1\% U_n$ ，计算电流为 1.05 倍蓄电池 1h 放电率电流（取  $5.5I_{10}$ ）；
2. 电缆 L2 计算电流：110V 系统为 80A，220V 系统为 64A。电缆 L3 计算电流为 10A；
3. 断路器 S3 采用标准型 C 型脱扣器直流断路器，瞬时脱扣范围为  $7I_n \sim 15I_n$ ；
4. 断路器 S4 采用标准型 B 型脱扣器直流断路器，瞬时脱扣范围为  $4I_n \sim 7I_n$ ；
5. 断路器 S2 为具有短路短延时保护的断路器，短延时脱扣值为  $10 \times (1 \pm 20\%) I_n$ ；
6. 根据电流比选择的 S3 断路器额定电流不应大于 40A，当额定电流大于 40A 时，S3 应选择具有短路短延时保护的微型直流断路器；
7. 括号内数值为根据上、下级断路器电流比计算结果，推荐选择的上级断路器额定电流。

表 10-3-3 分层辐射形系统保护电器选择性配合表 (一)

网络图							
L2、L3 电缆电压降		$\Delta U_{p2} = 3\% U_n$ $\Delta U_{p3} = 1\% U_n$			$\Delta U_{p2} = 5\% U_n$ $\Delta U_{p3} = 1.5\% U_n$		
下级断路器							
S <sub>2</sub> /S <sub>3</sub> 电流比		2A	4A	6A	2A	4A	6A
蓄电池组							
110V 系统 200 ~ 1000Ah		4 (16A)	4 (16A)	3 (20A)	4 (16A)	3 (16A)	3 (20A)
220V 系统 200 ~ 1600Ah		6 (16A)	5 (20A)	4 (25A)	5 (16A)	4 (16A)	3 (20A)
下级断路器							
S <sub>3</sub> /S <sub>4</sub> 电流比		16A	20A	25A	32A	40A	16A 20A 25A 32A 40A
蓄电池组							
110V 系统 200 ~ 1000Ah				3			3
220V 系统 200 ~ 1600Ah		3 (63A)		3 (100A)	3 (125A)		3 (63A) 3 (100A) 3 (125A)

- 注 1. 蓄电池组出口电缆 L1 电压降按  $0.5\% U_n \leq \Delta U_{p1} \leq 1\% U_n$ , 计算电流为 1.05 倍蓄电池 1h 放电率电流 ( $5.5I_{10}$ );
2. 电缆 L2 计算电流: 110V 系统为 80A, 220V 系统为 64A, 电缆 L3 计算电流为 10A;
3. 断路器 S2 采用 GMSFB 型直流断路器, 短路短延时整定范围为  $5I_n \sim 7I_n$ ;
4. 断路器 S3 采用 GM5-63/CH 型直流断路器, 瞬时脱扣值为  $12I_n \sim 15I_n$ ;
5. 断路器 S4 采用 GM5-63/CL 型直流断路器, 瞬时脱扣值为  $7I_n \sim 10I_n$ ;
6. 括号内数值为根据上、下级断路器电流比计算结果, 推荐选择的上级断路器额定电流。

表 10-3-4 分层辐射形系统保护电器选择性配合表 (二)

网络图							
L2、L3 电缆电压降		$\Delta U_{p2} = 3\% U_n$ $\Delta U_{p3} = 1\% U_n$			$\Delta U_{p2} = 5\% U_n$ $\Delta U_{p3} = 1.5\% U_n$		
下级断路器							
S <sub>3</sub> /S <sub>4</sub> 电流比		2A	4A	6A	2A	4A	6A
蓄电池组							
110V 系统 200 ~ 1000Ah		6 (16A)	6 (25A)	6 (40A)	5 (16A)	5 (20A)	5 (32A)
220V 系统 200 ~ 1600Ah		9 (20A)	8 (32A)	7 (40A)	7.5 (16A)	6 (25A)	5 (32A)

续表

蓄电池组		下级断路器									
		$S_2/S_3$ 电流比									
		16A	20A	25A	32A	40A	16A	20A	25A	32A	40A
110V 系统	200Ah	6	5	4	3	2.5	5	4	3	2.5	2
		(100A)					(80A)				
	300~500Ah	7.5	6	5	4	3	5.5	4.5	4	3	2.5
		(125A)					(100A)				
	600~1000Ah	9	7	5.5	4.5	3.5	6	5	4	3	2.5
		(140A)					(100A)				
220V 系统	200~300Ah	6	5	4	3	2.5	4	4	3	2.5	2
		(100A)					(80A)				
	400~1000Ah	7.5	6	5	3.5	3	5	4	3	2.5	2
		(125A)					(80A)				
	1200~1600Ah	8	6.5	5.5	4	3.5	6	4	4	3	2
		(140A)					(100A)				

- 注 1. 蓄电池组出口电缆 L1 压降按  $0.5\% U_n \leq \Delta U_{pl} \leq 1\% U_n$ ，计算电流为 1.05 倍蓄电池 1h 放电率电流（取  $5.5I_{10}$ ）；
2. 电缆 L2 计算电流：110V 系统为 80A，220V 系统为 64A，电缆 L3 计算电流为 10A；
3. 断路器 S2 采用 NDM2ZB 直流断路器，短延时脱扣值为  $10 \times (1 \pm 20\%) I_n$ ，瞬时脱扣值为  $18 \times (1 \pm 20\%) I_n$ ；
4. 断路器 S3 采用 NDB2Z-C (G) 型直流断路器，瞬时脱扣值为  $13 \times (1 \pm 10\%) I_n$ ；
5. 断路器 S4 采用 B 型直流断路器，瞬时脱扣范围为  $4I_n \sim 7I_n$ ；
6. 括号内数值为根据上、下级断路器电流比计算结果，推荐选择的上级断路器的额定电流。

表 10-3-5 直流电源系统蓄电池出口保护电器选择性配合表

蓄电池容量范围 (Ah)		200	300	400	500	600	800	900
短路电流 ( $\Delta U_{pl} = 0.5\% U_n$ ) (kA)		2.74	4.08	5.38	6.66	8.16	10.76	12.07
熔断器	额定电流 (A)	125~400		224~500		500	500	
断路器	额定电流 (A)	125~400		225~500		500	500	
	短时耐受电流 (kA)	$\geq 3.00$	$\geq 4.50$	$\geq 5.50$	$\geq 7.00$	$\geq 8.50$	$\geq 11.00$	$\geq 12.50$
蓄电池容量范围 (Ah)		1000	1200	1500	1600	1800	2000	2400
短路电流 ( $\Delta U_{pl} = 0.5\% U_n$ ) (kA)		13.33	16.31	20.00	21.49	24.48	27.29	32.31
熔断器	额定电流 (A)	630	700	1000	1000	1000	1250	1400
断路器	额定电流 (A)	630	700	1000	1000	1000	1250	1600
	短时耐受电流 (kA)	$\geq 13.50$	$\geq 16.50$	$\geq 20.00$	$\geq 21.50$	$\geq 25.00$	$\geq 27.50$	$\geq 32.50$

- 注 1. 蓄电池出口保护电器的额定电流按  $\geq 5.5I_{10}$  或按直流柜母线最大一台馈线断路器额定电流的 2 倍选择，两者取大值；
2. 当蓄电池出口保护电器选用断路器时，应选择仅有过载保护和短延时保护脱扣器的断路器，与下级断路器按延时时间配合，其短时耐受电流不应小于表中相应数值，短时耐受电流的时间应大于断路器短延时保护时间加断路器全分闸时间。

表 10-3-6

直流断路器内阻参考值表

壳架电流 (A)	63 (微型断路器)											
额定电流 (A)	2	4	6	10	16	20	25	32	40	50	63	
单极内阻 (mΩ)	365	123	45	18	6.2	3.9	3.1	2.3	2.1	1.9	1.9	
壳架电流 (A)	63 (塑壳断路器)											
额定电流 (A)	10	16	20	25	32	40	50	63				
单极内阻 (mΩ)	8.2	8	5	3.6	3.1	3.1	2.2	0.8				
壳架电流 (A)	125 (塑壳断路器)											
额定电流 (A)	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125		
单极内阻 (mΩ)	6	5.5	4.5	4.1	3	2.1	2	0.4	0.3	0.3		
壳架电流 (A)	250 (塑壳断路器)						400 (塑壳断路器)					
额定电流 (A)	125	140	160	180	200	225	250	225	250	315	350	400
单极内阻 (mΩ)	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
壳架电流 (A)	630 (塑壳断路器)				63 (带短延时保护微型断路器)							
额定电流 (A)	400	500	630	16	20	25	32	40				
单极内阻 (mΩ)	0.2	0.2	0.2	8.7	6.5	5.5	5.2	4.3				

表 10-3-7

单芯 (铜) 电缆直流电阻参考值表 (20℃)

标称截面 (mm <sup>2</sup> )	16	25	35	50	70	95	120
内阻 (mΩ/m)	1.150	0.727	0.524	0.387	0.268	0.193	0.153
标称截面 (mm <sup>2</sup> )	150	185	240	300	400	500	630
内阻 (mΩ/m)	0.124	0.099	0.075	0.060	0.047	0.037	0.028

4. 各级保护电器的配置应根据直流电源系统短路电流计算结果, 保证具有可靠性、选择性、灵敏性和速动性。

### 10.3.2 测量、信号和监控要求

1. 直流电源系统宜装设下列常测表计:

(1) 直流电压表宜装设在直流柜母线、直流分电柜母线、蓄电池回路和充电装置输出回路上。

(2) 直流电流表宜装设在蓄电池回路和充电装置输出回路上。

2. 直流电源系统测量表计宜采用  $4\frac{1}{2}$  位精度数字式表计, 准确度不应低于 1.0 级。

3. 直流电源系统重要故障信号宜采用干接点输出, 硬接线接入监控系统。直流电源系统信息宜符合表 10-3-8 的规定。

表 10-3-8

直流电源系统信息表

序号	名称	直流柜或就地		发电厂、变电站监控系统	
		开关量	模拟量	开关量	模拟量
1	蓄电池及其回路（按每组蓄电池统计）				
1.1	蓄电池组出口电压	—	√	—	√（*）
1.2	蓄电池组电流	—	√	—	√（*）
1.3	蓄电池浮充电流	—	√	—	√
1.4	蓄电池试验放电电流	—	√	—	△
1.5	单体蓄电池电压（1~N）	—	√	—	△
1.6	单体蓄电池内阻（1~N）	—	△	—	△
1.7	蓄电池组或蓄电池室温度	—	√	—	△
1.8	蓄电池组过充电	△	—	△	—
1.9	单只蓄电池电压异常	√	—	√	—
1.10	蓄电池组出口断路器状态	√	—	√	—
1.11	蓄电池组出口断路器故障跳闸	√	—	√（*）	—
1.12	蓄电池组出口熔断器熔断	√	—	√（*）	—
1.13	蓄电池组出口熔断器异常	△	—	△	—
1.14	蓄电池组巡检装置故障	√	—	√	—
1.15	蓄电池组巡检装置通信异常	√	—	√	—
2	充电装置（按每套充电装置统计）				
2.1	充电装置输出直流电压	—	√	—	√（*）
2.2	充电装置输出直流电流	—	√	—	√（*）
2.3	充电装置浮充电压设定值	—	△	—	△
2.4	充电装置均充电压设定值	—	△	—	△
2.5	充电装置交流电源电压	—	△	—	△
2.6	充电装置交流电源电流	—	△	—	△
2.7	充电装置运行状态（浮充、均充）	√	—	√	—
2.8	充电装置防雷器故障	△	—	△	—
2.9	充电装置故障总信号	√	—	√（*）	—
2.10	充电装置整流模块过热	△	—	△	—
2.11	充电装置交流输入电源异常	√	—	√	—
2.12	充电装置交流侧断路器状态	√	—	△	—
2.13	充电装置交流电源自动切换	√	—	√	—
2.14	充电装置直流侧断路器状态	√	—	√	—
2.15	充电装置直流侧断路器故障跳闸	√	—	√	—
3	直流母线及绝缘监测装置（按每套装置统计）				
3.1	直流母线电压	—	√	—	√（*）
3.2	直流母线正对地电压	—	√	—	△
3.3	直流母线负对地电压	—	√	—	△

续表

序号	名称	直流柜或就地		发电厂、变电站监控系统	
		开关量	模拟量	开关量	模拟量
3.4	直流母线正对地电阻	—	√	—	△
3.5	直流母线负对地电阻	—	√	—	△
3.6	直流电源系统接地支路编号	—	√	—	√
3.7	直流母线电压异常（过压或欠压）	√	—	√（*）	—
3.8	直流电源系统接地	√	—	√（*）	—
3.9	直流母线绝缘异常（绝缘电阻降低或接地）	√	—	√	—
3.10	绝缘监测装置故障	√	—	√	—
3.11	绝缘监测装置通信异常	√	—	√	—
3.12	交流窜电故障报警	√	—	√	—
3.13	直流电源合环故障报警	√	—	√	—
3.14	硅堆调压装置异常（保护或故障）	√	—	√	—
4	直流电源系统微机监控装置和直流馈线				
4.1	直流电动机主回路电流	—	√	—	√
4.2	直流馈线断路器状态	√	—	√	—
4.3	直流馈线断路器故障跳闸	√	—	√	—
4.4	直流母线联络断路器合闸报警	√	—	√（*）	—
4.5	母线联络断路器和分段断路器状态	√	—	√	—
4.6	直流馈线断路器故障跳闸总告警	√	—	√（*）	—
4.7	微机监控装置故障	√	—	√	—
4.8	微机监控装置通信异常	√	—	√	—
5	DC/DC 变换装置				
5.1	DC/DC 装置输入电压	—	√	—	√
5.2	DC/DC 装置输出电压	—	√	—	√
5.3	DC/DC 装置输出电流	—	√	—	√
5.4	DC/DC 装置故障	√	—	√	—
5.5	DC/DC 装置模块过热	√	—	△	—
5.6	DC/DC 装置限流保护动作	√	—	△	—
5.7	DC/DC 装置电源侧断路器状态	√	—	√	—
5.8	DC/DC 装置电源侧断路器故障跳闸	√	—	√	—
5.9	DC/DC 装置负荷侧断路器状态	√	—	√	—
5.10	DC/DC 装置负荷侧断路器故障跳闸	√	—	√	—

注 1. 表中“√”表示该项应列入，“△”表示该项在有条件时或需要时可列入。

2. 表中“\*”表示采用硬接线传送的信息。

3. 智能变电站采用一体化电源系统时，可取消硬接线传送信息。

4. 直流电源系统应按每组蓄电池装设 1 套绝缘监测装置，装置测量准确度不应低于 1.5 级。绝缘监测装置测量精度不应受母线运行方式的影响。绝缘监测装置应具备下列功能：

(1) 实时监测和显示直流电源系统母线电压、母线对地电压和母线对地绝缘电阻。

- (2) 具有监测各种类型接地故障的功能，实现对各支路的绝缘检测功能。
- (3) 具有自检和故障报警功能。
- (4) 具有对两组直流电源合环故障报警功能。
- (5) 具有交流窜电故障及时报警并选出互窜或窜入支路的功能。
- (6) 具有对外通信功能。

5. 直流电源系统宜按每组蓄电池组设置一套微机监控装置。微机监控装置应具备下列功能：

(1) 具有对直流电源系统各段母线电压、充电装置输出电压和电流及蓄电池组电压和电流等的监测功能。

(2) 具有对直流电源系统各种异常和故障报警、蓄电池组出口熔断器检测、自诊断报警以及主要断路器/开关位置状态等的监视功能。

(3) 具有对充电装置开机、停机和充电装置运行方式切换等的监控功能。

(4) 具有对设备的遥信、遥测、遥调及遥控功能。

(5) 具备对时功能。

(6) 具有对外通信功能，通信规约宜符合现行行业标准 DL/T 329—2010《基于 DL/T 860 的变电站低压电源设备通信接口》的有关规定。

6. 每组蓄电池宜设置蓄电池自动巡检装置。蓄电池自动巡检装置宜监测全部单体蓄电池电压，以及蓄电池组温度，并通过通信接口将监测信息上传至直流电源系统微机监控装置。

7. 对无人值班变电站直流监控系统，除应符合本章 10.3.2 第 5 条的规定外，还宜具备下列功能：

(1) 具有统一数据信息平台，可实时监测各种运行状态，支持可视化运行维护。

(2) 具有智能告警、信息综合分析、自诊断及远程维护等功能。

## 10.4 设备选择

### 10.4.1 蓄电池组

1. 蓄电池个数的选择应符合下列规定：

(1) 无端电池的铅酸蓄电池组，应根据单体电池正常浮充电电压值和直流母线电压为 1.05 倍直流电源系统标称电压值确定。

(2) 有端电池的镉镍碱性蓄电池组，应根据单体电池正常浮充电电压值和直流母线电压为 1.05 倍直流电源系统标称电压值确定基本电池个数，同时应根据该电池放电时允许的最低电压值和直流母线电压为 1.05 倍直流电源系统标称电压值确定整组电池个数。

(3) 蓄电池个数应满足在浮充电运行时直流母线电压为  $1.05U_n$  的要求，蓄电池个数应按下式计算：

$$n = 1.05 \frac{U_n}{U_f} \quad (10-4-1)$$

式中  $n$ ——蓄电池个数；

$U_n$ ——直流电源系统标称电压，V；

$U_f$ ——单体蓄电池浮充电电压，V。

(4) 蓄电池需连接负荷进行均衡充电时, 蓄电池均衡充电电压应根据蓄电池个数及直流母线电压允许的最高值选择单体蓄电池均衡充电电压值。单体蓄电池均衡充电电压值应符合下列要求:

- 1) 对于控制负荷, 单体蓄电池均衡充电电压值不应大于  $1.10U_n/n_0$ 。
- 2) 对于动力负荷, 单体蓄电池均衡充电电压值不应大于  $1.125U_n/n_0$ 。
- 3) 对于控制负荷和动力负荷合并供电, 单体蓄电池均衡充电电压值不应大于  $1.10U_n/n_0$ 。

(5) 应根据蓄电池个数及直流母线电压允许的最低值选择单体蓄电池事故放电末期终止电压。单体蓄电池事故放电末期终止电压计算式为

$$U_m \geq 0.875U_n/n \quad (10-4-2)$$

式中  $U_m$ ——单体蓄电池放电末期终止电压, V。

(6) 蓄电池参数选择应符合表 10-4-1 ~ 表 10-4-3 的规定。

表 10-4-1 固定型排气式和阀控式铅酸蓄电池组的单体 2V 电池参数选择数值表

系统标称	浮充电压 (V)	2.15		2.23		2.25	
电压 (V)	均充电压 (V)	2.30		2.33		2.33	2.35
220	蓄电池个数	104	107 (*)	103	104 (*)	104	103 (*)
	浮充时母线电压 (V)	223.6	230	229.7	231.9	234	231.8
	均充时母线电压 (%)	108.7	111.9	109.1	110.2	110.15	110
	放电终止电压 (V)	1.85	1.80	1.87	1.85	1.85	1.87
	母线最低电压 (%)	87.5	87.6	87.6	87.5	87.5	87.6
110	蓄电池个数	52	53 (*)	52 (*)	53	52 (*)	52
	浮充时母线电压 (V)	111.8	114	116	118.2	117	117
	均充时母线电压 (%)	108.7	110.8	110.2	112.3	110.2	111.1
	放电终止电压 (V)	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
	母线最低电压 (%)	87.5	89.1	87.5	89.1	87.5	87.5

注 (\*) 为推荐值。

表 10-4-2 阀控式密封铅酸蓄电池组的组合 6V 和 12V 电池参数选择数值表

系统标称电压 (V)	组合电池电压 (V)	电池个数	浮充电压 (V)	浮充时母线电压 (%)	均充电压 (V)	均充时母线电压 (%)	放电终止电压 (V)	母线最低电压 (%)
220	6	34	6.75	104.3	7.05	109	5.7	88.1
		34+1 (2V)		105.3		110		87.6
	12	17	13.50	104.3	14.10	109	11.4	88.1
		17+1 (2V)		105.3		110		87.6
110	6	17+1 (2V)	6.75	106.4	6.99	108	5.55	87.5
		17		104.3		7.05		109
	10	10+1 (4V)	11.25	104.3	11.75	109	9.25	87.5
	12	8+1 (8V)	13.50	104.3	14.10	109	11.10	87.5

表 10-4-3 镉镍蓄电池组的电池参数选择数值表

系统标称 电压 (V)	浮充电压 (V)	1.36	1.38	1.39	1.42	1.43	1.45
	均充电压 (V)	1.47	1.48		1.52	1.53	1.55
220	浮充电池个数	170	167	166	162	161	159
	母线浮充电压 (V)	231.2	230.5	230.7	230	230	230.6
	均充电池个数	164	163		159	158	156
	母线均充电压 (%)	109.1	109.7		109.9	109.9	109.9
	整组电池个数	180					
	放电终止电压 (V)	1.07					
	母线最低电压 (%)	87.6					
110	浮充电池个数	85	83		81	80	79
	母线浮充电压 (V)	115.6	114.5	115.4	115	114.4	114.6
	均充电池个数	82	81		79		78
	母线均充电压 (%)	109.6	109		109.2	110	110
	整组电池个数	90					
	放电终止电压 (V)	1.07					
	母线最低电压 (%)	87.6					

2. 蓄电池浮充电压应根据厂家推荐值选取，当无产品资料时可按下列规定选取：

- (1) 固定型排气式铅酸蓄电池的单体浮充电电压值宜取 2.15 ~ 2.17V。
- (2) 阀控式密封铅酸蓄电池的单体浮充电电压值宜取 2.23 ~ 2.27V。
- (3) 中倍率镉镍碱性蓄电池的单体浮充电电压值宜取 1.42 ~ 1.45V。
- (4) 高倍率镉镍碱性蓄电池的单体浮充电电压值宜取 1.36 ~ 1.39V。

3. 单体蓄电池放电终止电压应根据直流电源系统中直流负荷允许的最低电压值和蓄电池的个数确定，但不得低于蓄电池规定的最低允许电压值。

4. 单体蓄电池均衡充电电压应根据直流电源系统中直流负荷允许的最高电压值和蓄电池的个数确定，但不得超出蓄电池规定的电压允许范围。

5. 蓄电池容量选择应符合下列规定：

- (1) 满足全厂（站）事故全停电时间内的放电容量。
- (2) 满足事故初期（1min）直流电动机启动电流和其他冲击负荷电流的放电容量。
- (3) 满足蓄电池组持续放电时间内随机冲击负荷电流的放电容量。

6. 蓄电池容量选择的计算应符合下列规定：

- (1) 按事故放电时间分别统计事故放电电流，确定负荷曲线。
- (2) 根据蓄电池型式、放电终止电压和放电时间，确定相应的容量换算系数  $K_C$ 。
- (3) 根据事故放电电流，按事故放电阶段逐段进行容量计算，当有随机负荷时，应叠加在初期冲击负荷或第一阶段以外的计算容量最大的放电阶段。

(4) 选取与计算容量最大值接近的蓄电池标称容量  $C_{10}$  或  $C_5$  作为蓄电池的选择容量。

(5) 蓄电池容量计算应采用下列方法:

1) 蓄电池容量阶梯计算法计算公式为

第一阶段计算容量

$$C_{c1} = K_k \frac{I_1}{K_c} \quad (10-4-3)$$

第二阶段计算容量

$$C_{c2} \geq K_k \left[ \frac{1}{K_{c1}} I_1 + \frac{1}{K_{c2}} (I_2 - I_1) \right] \quad (10-4-4)$$

第三阶段计算容量

$$C_{c3} \geq K_k \left[ \frac{1}{K_{c1}} I_1 + \frac{1}{K_{c2}} (I_2 - I_1) + \frac{1}{K_{c3}} (I_3 - I_2) \right] \quad (10-4-5)$$

第  $n$  阶段计算容量

$$C_{cn} \geq K_k \left[ \frac{1}{K_{c1}} I_1 + \frac{1}{K_{c2}} (I_2 - I_1) + \dots + \frac{1}{K_{cn}} (I_n - I_{n-1}) \right] \quad (10-4-6)$$

随机负荷计算容量

$$C_r = \frac{I_r}{K_{cr}} \quad (10-4-7)$$

将  $C_r$  叠加在  $C_{c2} \sim C_{cn}$  中最大的阶段上, 然后与  $C_{c1}$  比较, 取较大者, 即为蓄电池的计算容量。

式中  $K_k$ ——可靠系数, 取 1.40;

$C_{c1} \sim C_{cn}$ ——蓄电池 10h (或 5h) 放电率各阶段的计算容量, Ah;

$I_1 \sim I_n$ ——各阶段的负荷电流, A;

$K_{c1}$ ——各计算阶段中全部放电时间的容量换算系数, 1/h;

$K_{c2}$ ——各计算阶段中除第 1 阶梯时间外放电时间的容量换算系数, 1/h;

$K_{c3}$ ——各计算阶段中除第 1、第 2 阶梯时间外放电时间的容量换算系数, 1/h;

$K_{cn}$ ——各计算阶段中最后 1 个阶梯放电时间的容量换算系数, 1/h;

$C_r$ ——随机负荷计算容量, Ah;

$I_r$ ——随机负荷电流, A;

$K_c$ ——初期 (1min) 冲击负荷的容量换算系数, 1/h;

$K_{cr}$ ——随机 (5s) 冲击负荷的容量换算系数, 1/h。

2) 蓄电池可靠系数是由裕度系数、老化系数和温度修正系数构成的, 经计算, 可靠系数 = 裕度系数  $\times$  老化系数  $\times$  温度修正系数 =  $1.15 \times 1.10 \times 1.10 \approx 1.4$ 。当蓄电池的环境温度低于第 10.6.2、第 10.6.3 节的规定时, 应考虑调整蓄电池温度修正系数。

7. 蓄电池容量换算系数见表 10-4-4 ~ 表 10-4-10。

表 10-4-4 GF 型 2000Ah 及以下固定型排气式铅酸蓄电池的容量换算系数表

放电终止电压 (V)	不同放电时间的 $K_c$ 值																	
	5s	1min	29min	0.5h	59min	1.0h	89min	1.5h	119min	2.0h	179min	3.0h	4.0h	5.0h	6.0h	7.0h	479min	8.0h
1.75	1.010	0.900	0.590	0.580	0.467	0.460	0.402	0.400	0.332	0.330	0.261	0.260	0.220	0.180	0.162	0.140	0.124	0.124
1.80	0.900	0.780	0.530	0.520	0.416	0.410	0.354	0.350	0.302	0.300	0.241	0.240	0.190	0.170	0.150	0.130	0.115	0.115
1.85	0.740	0.600	0.430	0.420	0.355	0.350	0.323	0.320	0.262	0.260	0.211	0.210	0.175	0.160	0.140	0.122	0.107	0.107
1.90		0.400	0.330	0.320	0.284	0.280	0.262	0.260	0.221	0.220	0.180	0.180	0.165	0.140	0.125	0.114	0.102	0.102
1.95		0.300	0.228	0.221	0.200	0.192	0.180	0.180	0.160	0.160	0.130	0.130	0.124	0.110	0.108	0.100	0.088	0.088

表 10-4-5 GFD 型 3000Ah 及以下固定型排气式铅酸蓄电池（单体 2V）的容量换算系数表

放电终止电压 (V)	不同放电时间的 $K_c$ 值																	
	5s	1min	29min	0.5h	59min	1.0h	89min	1.5h	119min	2.0h	179min	3.0h	4.0h	5.0h	6.0h	7.0h	479min	8.0h
1.75	1.010	0.890	0.630	0.620	0.477	0.470	0.395	0.392	0.323	0.320	0.272	0.270	0.220	0.190	0.160	0.148	0.130	0.130
1.80	0.900	0.740	0.530	0.520	0.416	0.410	0.356	0.353	0.292	0.290	0.251	0.250	0.205	0.170	0.142	0.130	0.115	0.115
1.85	0.740	0.610	0.420	0.410	0.345	0.340	0.286	0.283	0.271	0.270	0.221	0.220	0.180	0.144	0.130	0.118	0.104	0.104
1.90	—	0.470	0.330	0.320	0.275	0.271	0.252	0.250	0.221	0.220	0.191	0.190	0.155	0.124	0.102	0.094	0.084	0.084
1.95	—	0.280	0.180	0.221	0.185	0.182	0.173	0.171	0.166	0.166	0.150	0.150	0.150	0.104	0.087	0.077	0.068	0.068

表 10-4-6 阀控式密封铅酸蓄电池（贫液）（单体 2V）的容量换算系数表

放电终止电压 (V)	不同放电时间的 $K_c$ 值																	
	5s	1min	29min	0.5h	59min	1.0h	89min	1.5h	119min	2.0h	179min	3.0h	4.0h	5.0h	6.0h	7.0h	479min	8.0h
1.75	1.540	1.530	1.000	0.984	0.620	0.615	0.482	0.479	0.390	0.387	0.291	0.289	0.234	0.195	0.169	0.153	0.135	0.135
1.80	1.450	1.430	0.920	0.900	0.600	0.598	0.476	0.472	0.377	0.374	0.282	0.280	0.224	0.190	0.166	0.150	0.132	0.132
1.83	1.380	1.330	0.843	0.823	0.570	0.565	0.458	0.455	0.360	0.357	0.272	0.270	0.217	0.184	0.160	0.145	0.127	0.127

续表

放电终止电压 (V)	不同放电时间的 $K_c$ 值																		
	5s	1min	29min	0.5h	59min	1.0h	89min	1.5h	119min	2.0h	179min	3.0h	4.0h	5.0h	6.0h	7.0h	479min	8.0h	
1.85	1.340	1.240	0.800	0.780	0.558	0.540	0.432	0.428	0.347	0.344	0.263	0.262	0.214	0.180	0.157	0.140	0.123	0.123	0.123
1.87	1.270	1.180	0.764	0.755	0.548	0.520	0.413	0.408	0.336	0.334	0.259	0.258	0.209	0.177	0.155	0.137	0.120	0.120	0.120
1.90	1.190	1.120	0.685	0.676	0.495	0.490	0.383	0.381	0.323	0.321	0.254	0.253	0.200	0.170	0.150	0.131	0.118	0.118	0.118

表 10-4-7 阀控式密封铅酸蓄电池 (贫液) (单体 6V 和 12V) 的容量换算系数表

放电终止电压 (V)	不同放电时间的 $K_c$ 值																		
	5s	1min	29min	0.5h	59min	1.0h	89min	1.5h	119min	2.0h	179min	3.0h	4.0h	5.0h	6.0h	7.0h	479min	8.0h	
1.75	2.080	1.990	1.010	1.000	0.708	0.700	0.513	0.509	0.437	0.435	0.314	0.312	0.243	0.200	0.172	0.157	0.142	0.142	0.142
1.80	2.000	1.880	1.000	0.990	0.691	0.680	0.509	0.504	0.431	0.429	0.307	0.305	0.239	0.198	0.170	0.155	0.140	0.140	0.140
1.83	1.930	1.820	0.988	0.979	0.666	0.656	0.498	0.495	0.418	0.416	0.299	0.297	0.234	0.197	0.168	0.153	0.138	0.138	0.138
1.85	1.810	1.740	0.976	0.963	0.639	0.629	0.489	0.487	0.410	0.408	0.297	0.295	0.231	0.196	0.167	0.152	0.136	0.136	0.136
1.87	1.750	1.670	0.943	0.929	0.610	0.600	0.481	0.479	0.401	0.399	0.291	0.289	0.220	0.194	0.165	0.149	0.133	0.133	0.133
1.90	1.670	1.590	0.585	0.841	0.576	0.571	0.464	0.462	0.389	0.387	0.281	0.279	0.211	0.189	0.160	0.143	0.127	0.127	0.127

表 10-4-8 阀控式密封铅酸蓄电池 (胶体) (单体 2V) 的容量换算系数表

放电终止电压 (V)	不同放电时间的 $K_c$ 值																		
	5s	1min	29min	0.5h	59min	1.0h	89min	1.5h	119min	2.0h	179min	3.0h	4.0h	5.0h	6.0h	7.0h	479min	8.0h	
1.80	1.230	1.170	0.820	0.810	0.530	0.520	0.430	0.420	0.333	0.330	0.251	0.250	0.196	0.166	0.144	0.127	0.116	0.116	0.116
1.83	1.120	1.060	0.740	0.730	0.500	0.490	0.390	0.380	0.313	0.310	0.231	0.230	0.190	0.162	0.138	0.120	0.114	0.114	0.114
1.87	1.000	0.940	0.670	0.660	0.460	0.450	0.376	0.370	0.292	0.290	0.221	0.220	0.180	0.156	0.134	0.117	0.110	0.110	0.110
1.90	0.870	0.860	0.650	0.600	0.430	0.424	0.360	0.350	0.276	0.274	0.211	0.210	0.172	0.150	0.130	0.116	0.102	0.102	0.102
1.93	0.820	0.790	0.550	0.540	0.410	0.400	0.320	0.310	0.262	0.260	0.191	0.190	0.165	0.135	0.118	0.105	0.099	0.099	0.099

表 10-4-9 中倍率 GNZ 型 200Ah 及以上碱性镉镍蓄电池（单体 1.2V）的容量换算系数表

放电终止电压 (V)	不同放电时间的 $K_c$ 值															
	30s	1min	29min	0.5h	59min	1.0h	1.5h	119min	2.0h	2.5h	179min	3.0h	239min	4.0h	299min	5.0h
1.00	2.460	2.200	1.320	1.310	0.845	0.840	0.690	0.603	0.600	0.550	0.521	0.520	0.480	0.480	0.460	0.460
1.05	2.120	1.830	1.040	1.030	0.699	0.690	0.600	0.542	0.540	0.480	0.461	0.460	0.430	0.430	0.400	0.400
1.07	1.900	1.720	0.880	0.870	0.648	0.640	0.560	0.492	0.490	0.440	0.411	0.410	0.380	0.380	0.360	0.360
1.10	1.700	1.480	0.770	0.760	0.567	0.560	0.480	0.422	0.420	0.390	0.371	0.370	0.350	0.350	0.330	0.330
1.15	1.550	1.380	0.710	0.700	0.507	0.500	0.440	0.392	0.390	0.360	0.341	0.340	0.320	0.320	0.290	0.290
1.17	1.400	1.280	0.680	0.670	0.478	0.470	0.410	0.371	0.370	0.340	0.311	0.310	0.280	0.280	0.260	0.260
1.19	1.300	1.200	0.650	0.640	0.456	0.450	0.390	0.351	0.350	0.320	0.291	0.290	0.260	0.260	0.240	0.240

表 10-4-10 中倍率 GNZ 型 200Ah 以下碱性镉镍蓄电池（单体 1.2V）的容量换算系数表

放电终止电压 (V)	不同放电时间的 $K_c$ 值													
	30s	1min	5min	10min	15min	20min	29min	0.5h	59min	1.0h				
1.00	3.00	2.75	2.20	2.00	1.87	1.70	1.55	1.54	1.04	1.03				
1.05	2.50	2.25	1.91	1.75	1.62	1.53	1.39	1.38	0.98	0.97				
1.07	2.20	2.01	1.78	1.64	1.55	1.46	1.31	1.30	0.94	0.93				
1.10	2.00	1.88	1.63	1.50	1.41	1.33	1.22	1.21	0.91	0.90				
1.15	1.91	1.71	1.52	1.40	1.32	1.25	1.14	1.13	0.87	0.86				
1.17	1.75	1.60	1.45	1.35	1.28	1.20	1.09	1.08	0.83	0.82				
1.19	1.60	1.50	1.41	1.32	1.23	1.16	1.06	1.05	0.80	0.79				

### 10.4.2 充电装置

1. 充电装置的技术特性应符合下列要求:

- (1) 满足蓄电池组的充电和浮充电要求。
- (2) 为长期连续工作制。
- (3) 具有稳压、稳流及限压、限流特性和软启动特性。
- (4) 有自动和手动浮充电、均衡充电及自动转换功能。
- (5) 充电装置交流电源输入宜为三相输入, 额定频率为 50Hz。
- (6) 1 组蓄电池配置 1 套充电装置的直流电源系统时, 充电装置宜设置 2 路交流电源。

1 组蓄电池配置 2 套充电装置或 2 组蓄电池配置 3 套充电装置时, 每个充电装置宜配置 1 路交流电源。

(7) 充电装置的主要技术参数应符合表 10-4-11 的规定。

表 10-4-11 充电装置的主要技术参数表

项目	型式	相控型	高频开关电源模块型
	稳压精度		$\leq \pm 1\%$
稳流精度		$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 1\%$
纹波系数		$\leq 1\%$	$\leq 0.5\%$

(8) 高频开关电源模块的基本性能应符合下列要求:

1) 在多个模块并联工作状态下运行时, 各模块承受的电流应能做到自动均分负载实现均流; 在 2 个及以上模块并联运行时, 其输出的直流电流为额定值时, 均流不平衡度不应大于额定电流值的  $\pm 5\%$ 。

2) 功率因数不应小于 0.90。

3) 在模块输入端施加的交流电源符合标称电压和额定频率要求时, 在交流输入端产生的各高次谐波电流含有率不应大于 30%。

4) 电磁兼容应符合现行国家标准 GB/T 19826—2014《电力工程直流电源设备通用技术条件及安全要求》的有关规定。

2. 充电装置额定电流的选择应符合下列规定:

(1) 满足浮充电要求, 其浮充电输出电流应按蓄电池自放电电流与经常负荷电流之和计算。

(2) 满足蓄电池均衡充电要求, 其充电输出电流应按下列条件选择:

1) 蓄电池脱离直流母线充电时, 铅酸蓄电池应按  $1.0I_{10} \sim 1.25I_{10}$  选择; 镉镍碱性蓄电池应按  $1.10I_5 \sim 1.25I_5$  选择;

2) 蓄电池充电同时还向经常负荷供电时, 铅酸蓄电池应按  $1.0I_{10} \sim 1.25I_{10}$  并叠加经常负荷电流选择; 镉镍碱性蓄电池应按  $1.10I_5 \sim 1.25I_5$  并叠加经常负荷电流选择。

3. 高频开关电源模块选择配置原则应符合下列规定:

(1) 1 组蓄电池配置 1 套充电装置时, 应按额定电流选择高频开关电源基本模块。当基本模块数量为 6 个及以下时, 可设置 1 个备用模块; 当基本模块数量为 7 个及以上时, 可设置 2 个备用模块。

(2) 1 组蓄电池配置 2 套充电装置或 2 组蓄电池配置 3 套充电装置时, 应按额定电流选

择高频开关电源基本模块，不宜设备用模块。

(3) 高频开关电源模块数量宜根据充电装置额定电流和单个模块额定电流选择，模块数量宜控制在3~8个。

4. 充电装置及整流模块选择的计算应满足下列要求。

(1) 应满足浮充电要求，浮充输出电流应按蓄电池自放电电流与经常负荷电流之和计算。浮充输出电流计算公式为

$$\text{铅酸蓄电池: } I_r \geq 0.01I_{10} + I_{jc} \quad (10-4-8)$$

$$\text{镉镍碱性蓄电池: } I_r \geq 0.01I_5 + I_{jc} \quad (10-4-9)$$

(2) 应满足蓄电池充电要求，充电时蓄电池脱离直流母线，充电输出电流计算公式为

$$\text{铅酸蓄电池: } I_r = 1.0I_{10} \sim 1.25I_{10} \quad (10-4-10)$$

$$\text{镉镍碱性蓄电池: } I_r = 1.0I_5 \sim 1.25I_5 \quad (10-4-11)$$

(3) 应满足蓄电池均衡充电要求，蓄电池充电时仍对经常负荷供电，均衡充电输出电流计算公式为

$$\text{铅酸蓄电池: } I_r = 1.0I_{10} \sim 1.25I_{10} + I_{jc} \quad (10-4-12)$$

$$\text{镉镍碱性蓄电池: } I_r = 1.0I_5 \sim 1.25I_5 + I_{jc} \quad (10-4-13)$$

式中  $I_r$ ——充电装置额定电流，A；

$I_{10}$ ——铅酸蓄电池10h放电率电流，A；

$I_{jc}$ ——直流电源系统的经常负荷电流，A；

$I_5$ ——镉镍碱性蓄电池5h放电率电流，A。

(4) 高频开关电源的模块配置和数量选择计算公式为

1) 每组蓄电池配置一组高频开关电源时，其模块选择计算式为

$$n = n_1 + n_2 \quad (10-4-14)$$

a. 基本模块的数量计算式为

$$n_1 = \frac{I_r}{I_{me}} \quad (10-4-15)$$

b. 附加模块的数量计算式为

$$n_2 = 1 \text{ (当 } n_1 \leq 6 \text{ 时)} \quad (10-4-16)$$

$$n_2 = 2 \text{ (当 } n_1 \geq 7 \text{ 时)} \quad (10-4-17)$$

2) 一组蓄电池配置两组高频开关电源或两组蓄电池配置三组高频开关电源时，其模块选择计算式为

$$n = \frac{I_r}{I_{me}} \quad (10-4-18)$$

式中  $n$ ——高频开关电源模块选择数量，当模块选择数量不为整数时，可取邻近值；

$n_1$ ——基本模块数量；

$n_2$ ——附加模块数量；

$I_r$ ——充电装置电流，A；

$I_{me}$ ——单个模块额定电流，A。

5. 充电装置的输出电压和电流调节范围应满足蓄电池放电末期和充电末期电压的要求，并符合表10-4-12的规定。

表 10-4-12 充电装置的输入输出电压和电流调节范围表

交流输入		相 数		三 相	
		额定频率		50 × (1 ± 2%) Hz	
		额定电压		380 × (85% ~ 120%) V	
直 流 输 出	额 定 值	电 压		220V 或 110V	
		电 流		10A、20A、30A、40A、50A、60A、80A、100A、160A、 200A、250A、315A、400A、500A	
	恒 流 充 电 范 围	电 压 调 节 范 围	阀控式铅酸蓄电池	(90% ~ 120%) $U_n$	
			固定型排气式铅酸蓄电池	(90% ~ 135%) $U_n$	
镉镍碱性蓄电池			(90% ~ 135%) $U_n$		
		电 流 调 节 范 围	(20% ~ 100%) $I_n$		
直 流 输 出	浮 充 电 范 围	电 压 调 节 范 围	阀控式铅酸蓄电池	(95% ~ 115%) $U_n$	
			固定型排气式铅酸蓄电池	(95% ~ 115%) $U_n$	
			镉镍碱性蓄电池	(95% ~ 115%) $U_n$	
				电 流 调 节 范 围	(0 ~ 100%) $I_n$
	均 衡 充 电 范 围	电 压 调 节 范 围	阀控式铅酸蓄电池	(105% ~ 120%) $U_n$	
			固定型排气式铅酸蓄电池	(105% ~ 135%) $U_n$	
			镉镍碱性蓄电池	(105% ~ 135%) $U_n$	
		电 流 调 节 范 围	(0 ~ 100%) $I_n$		

注  $U_n$  为直流电源系统标称电压,  $I_n$  为充电装置直流额定电流。

充电装置输出电压的选择计算式为

$$U_r = nU_{cm} \quad (10-4-19)$$

式中  $U_r$ ——充电装置的额定电压, V;

$n$ ——蓄电池组单体个数;

$U_{cm}$ ——充电末期单体蓄电池电压, V, 固定型排气式铅酸蓄电池为 2.70V; 阀控式铅酸蓄电池为 2.40V; 镉镍碱性蓄电池为 1.70V。

6. 充电装置回路设备的选择应符合表 10-4-13 的规定。

表 10-4-13 充电装置回路设备选择表

充电装置额定电流 (A)	10	20	25	30	40	50	60	80
熔断器及隔离开关额定电流 (A)	63						100	
直流断路器额定电流 (A)	32			63			100	
电流表测量范围 (A)	0 ~ 30			0 ~ 50		0 ~ 80		0 ~ 100
充电装置额定电流 (A)	100	120	160	200	250	315	400	500
熔断器及隔离开关额定电流 (A)	160			200	300		400	630
直流断路器额定电流 (A)	225					400		630
电流表测量范围 (A)	0 ~ 150			0 ~ 200	0 ~ 300		0 ~ 400	0 ~ 500

注 充电装置额定电流不包括备用模块。

### 10.4.3 电缆

1. 直流电缆的选择和敷设应符合现行国家标准GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》的有关规定。直流电源系统明敷电缆应选用耐火电缆或采取了规定的耐火防护措施的阻燃电缆。控制和保护回路直流电缆应选用屏蔽电缆。

2. 蓄电池组引出线为电缆时，电缆宜采用单芯电力电缆，当选用多芯电缆时，其允许载流量可按同截面单芯电缆数值计算。蓄电池电缆的正极和负极不应共用一根电缆，该电缆宜采用独立通道，沿最短路径敷设。

3. 蓄电池组与直流柜之间连接电缆截面的选择应符合下列规定：

(1) 蓄电池组与直流柜之间连接电缆长期允许载流量的计算电流应大于事故停电时间的蓄电池放电率电流。

(2) 电缆允许电压降宜取直流电源系统标称电压的0.5%~1%，其计算电流应取事故停电时间的蓄电池放电率电流或事故放电初期（1min）冲击负荷放电电流二者中的较大值。

4. 高压断路器合闸回路电缆截面的选择应符合下列规定：

(1) 当蓄电池浮充运行时，应保证最远一台高压断路器可靠合闸所需的电压，其允许电压降可取直流电源系统标称电压的10%~15%。

(2) 当事故放电直流母线电压在最低电压值时，应保证恢复供电的高压断路器能可靠合闸所需的电压，其允许电压降应按直流母线最低电压值和高压断路器允许最低合闸电压值之差选取，不宜大于直流电源系统标称电压的6.5%。

5. 采用集中辐射形供电方式时，直流柜与直流负荷之间的电缆截面选择应符合下列规定：

(1) 电缆长期允许载流量的计算电流应大于回路最大工作电流。

(2) 电缆允许电压降应按蓄电池组出口端最低计算电压值和负荷本身允许最低运行电压值之差选取，宜取直流电源系统标称电压的3%~6.5%。

6. 采用分层辐射形供电方式时，直流电源系统电缆截面的选择应符合下列规定：

(1) 根据直流柜与直流分电柜之间的距离确定电缆允许的电压降，宜取直流电源系统标称电压的3%~5%，其回路计算电流应按分电柜最大负荷电流选择。

(2) 当直流分电柜布置在负荷中心时，与直流终端断路器之间的允许电压降宜取直流电源系统标称电压的1%~1.5%。

(3) 根据直流分电柜布置地点，可适当调整直流分电柜与直流柜、直流终端断路器之间的允许电压降，但应保证直流柜与直流终端断路器之间允许总电压降不大于标称电压的6.5%。

7. 直流柜与直流电动机之间的电缆截面的选择应符合下列规定：

(1) 电缆长期允许载流量的计算电流应大于电动机额定电流。

(2) 电缆允许电压降不宜大于直流电源系统标称电压的5%，其计算电流应按2倍电动机额定电流选取。

8. 2台机组之间220V直流电源系统应急联络断路器之间采用电缆连接时，互联电缆电

压降不宜大于直流电源系统标称电压的 5%，其计算电流可按负荷统计表中 1.0h 放电电流的 50% 选取。

9. 直流电源系统电缆截面的选择计算应符合下列规定：

(1) 电缆截面应按电缆长期允许载流量和回路允许电压降两个条件选择，计算式为

$$I_{pc} \geq I_{cal} \quad (10-4-20)$$

$$S_{cac} = \frac{\rho \cdot 2LI_{ca}}{\Delta U_p} \quad (10-4-21)$$

式中  $I_{pc}$ ——电缆允许载流量，A；

$I_{cal}$ ——回路长期工作计算电流，A；

$S_{cac}$ ——电缆计算截面积， $\text{mm}^2$ ；

$\rho$ ——电阻系数，铜导体  $\rho = 0.0184 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，铝导体  $\rho = 0.031 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；

$L$ ——电缆长度，m；

$I_{ca}$ ——允许电压降计算电流，A；

$\Delta U_p$ ——回路允许电压降，V。

(2) 允许电压降计算电流应按表 10-4-14 的规定计算，取  $I_{ca1}$  和  $I_{ca2}$  中的较大值。

(3) 回路允许电压降应按表 10-4-15 的规定计算。

表 10-4-14 直流电源系统不同回路的计算电流

回路名称	回路计算电流和计算公式	备注	
蓄电池回路	$I_{ca1} = I_{d,1h}$ $I_{ca2} = I_{c,h0}$	$I_{cal}$ ——回路长期工作计算电流 $I_{d,1h}$ ——事故停电时间的蓄电池放电率电流 $I_{ca2}$ ——回路短时工作计算电流 $I_{c,h0}$ ——事故初期 (1min) 冲击放电电流	
充电装置输出回路	$I_{ca1} = I_{ca2} = I_{cn}$	$I_{cn}$ ——充电装置额定电流	
直流负荷馈线	直流电动机回路	$I_{ca1} = I_{nm}$ $I_{ca2} = I_{stm} = K_{stm} I_{nm}$	$I_{nm}$ ——电动机额定电流 $I_{stm}$ ——电动机启动电流 $K_{stm}$ ——电动机启动电流系数 2.0
	断路器合闸回路	$I_{ca2} = I_{cl}$	$I_{cl}$ ——合闸线圈合闸电流
	交流不间断电源输入回路	$I_{ca1} = I_{ca2} = I_{Un}/\eta$	$I_{Un}$ ——装置的额定功率/直流电源系统标称电压 $\eta$ ——装置的效率
	直流应急照明回路	$I_{ca1} = I_{ca2} = I_e$	$I_e$ ——照明馈线计算电流
直流负荷馈线	控制、保护和监控回路	$I_{ca1} = I_{ca2} = I_{cc}$ $I_{ca1} = I_{ca2} = I_{cp}$ $I_{ca1} = I_{ca2} = I_{cs}$	$I_{cc}$ ——控制馈线计算电流 $I_{cp}$ ——保护馈线计算电流 $I_{cs}$ ——信号馈线计算电流
	直流分电柜回路	$I_{ca1} = I_{ca2} = I_d$	$I_d$ ——直流分电柜计算电流
	DC/DC 变换器输入回路	$I_{ca1} = I_{ca2} = I_{Tn}/\eta$	$I_{Tn}$ ——变换器的额定功率/直流电源系统标称电压 $\eta$ ——变换器的效率
	直流电源系统应急联络回路	$I_{ca1} = I_{ca2} = I_L$	$I_L$ ——负荷统计表中 1h 放电电流的 50%
直流母线分段回路	$I_{ca1} = I_{ca2} = I_L$	$I_L$ ——全部负荷电流的 60%	

表 10-4-15 直流电源系统不同回路允许电压降计算公式

回路名称	允许电压降 $\Delta U_p$ (V)	备 注	
蓄电池回路	$0.5\% U_n \leq \Delta U_p \leq 1\% U_n$	1. $U_n$ 为直流电源系统标称电压 2. 蓄电池回路电流按事故停电时间的蓄电池放电率电流计算 3. 分电柜负荷电流可按 220V 系统 $80A \times 0.8$ 、110V 系统 $100A \times 0.8$ 计算 4. 集中辐射形供电的直流柜到终端回路负荷电流按 10A 计算 5. 分层辐射形供电的分电柜到终端回路负荷电流按 10A 计算	
直流柜至直流分电柜回路	$\Delta U_p = 3\% U_n \sim 5\% U_n$		
直流 负 荷 馈 线	直流电动机回路		$\Delta U_p \leq 5\% U_n$ (计算电流取 $I_{c2}$ )
	断路器合闸回路		$\Delta U_p = 3\% U_n \sim 6.5\% U_n$
	交流不间断电源回路		$\Delta U_p = 3\% U_n \sim 6.5\% U_n$
	应急照明回路		$\Delta U_p = 2.5\% U_n \sim 5\% U_n$
	DC/DC 变换器回路		$\Delta U_p = 3\% U_n \sim 6.5\% U_n$
	集中辐射形供电的直流柜到终端回路		$\Delta U_p = 3\% U_n \sim 6.5\% U_n$
分层辐射形供电的分电柜到终端回路	$\Delta U_p = 1\% U_n \sim 1.5\% U_n$		
直流电源系统应急联络回路	$\Delta U_p \leq 5\% U_n$		

注 1. 计算断路器合闸回路电压降应保证最远一台断路器可靠合闸。环形网络供电时，应按任一侧电源断开的最不利条件计算。

2. 环形网络供电的控制、保护和信号回路的电压降，应按直流柜至环形网络最远断开点的回路计算。

#### 10.4.4 蓄电池试验放电装置

1. 试验放电装置的额定电流应符合下列要求：

(1) 铅酸蓄电池应为  $1.10I_{10} \sim 1.30I_{10}$ 。

(2) 镉镍碱性蓄电池应为  $1.10I_5 \sim 1.30I_5$ 。

2. 试验放电装置宜采用电热器件或有源逆变放电装置。

#### 10.4.5 直流断路器

1. 直流断路器应具有瞬时电流速断和反时限过电流保护，当不满足选择性保护配合时，可增加短延时电流速断保护。

2. 直流断路器的选择计算应符合下列规定：

(1) 直流断路器额定电压应大于或等于回路的最高工作电压。

(2) 直流断路器额定短路分断电流及短时耐受电流，应大于通过断路器的最大短路电流。

(3) 断路器额定电流。

1) 充电装置输出回路断路器额定电流应按充电装置额定输出电流选择，计算式为

$$I_n \geq K_k I_m \quad (10-4-22)$$

式中  $I_n$ ——直流断路器额定电流，A；

$K_k$ ——可靠系数，取 1.2；

$I_m$ ——充电装置额定输出电流，A。

2) 直流电动机回路断路器额定电流计算式为

$$I_n \geq I_{nm} \quad (10-4-23)$$

式中  $I_n$ ——直流断路器额定电流，A；

$I_{nm}$ ——电动机额定电流, A。

3) 高压断路器电磁操动机构合闸回路断路器额定电流计算式为

$$I_n \geq K_{c2} I_{cl} \quad (10-4-24)$$

式中  $I_n$ ——直流断路器额定电流, A;

$K_{c2}$ ——配合系数, 取 0.3;

$I_{cl}$ ——高压断路器电磁操动机构合闸电流, A。

4) 控制、保护、监控回路断路器额定电流应按下列要求选择, 并选取大值:

a. 断路器额定电流计算式为

$$I_n \geq K_c (I_{cc} + I_{cp} + I_{cs}) \quad (10-4-25)$$

式中  $I_n$ ——直流断路器额定电流, A;

$K_c$ ——同时系数, 取 0.8;

$I_{cc}$ ——控制负荷计算电流, A;

$I_{cp}$ ——保护负荷计算电流, A;

$I_{cs}$ ——信号负荷计算电流, A。

b. 上、下级断路器的额定电流应满足选择性配合要求, 选择性配合电流比宜符合表 10-3-1 ~ 表 10-3-5 的规定。

c. 上、下级断路器选择性配合时应符合下列要求:

(a) 对于集中辐射形供电的控制、保护、监控回路, 直流柜母线馈线断路器额定电流不宜大于 63A; 终端断路器宜选用 B 型脱扣器, 额定电流不宜大于 10A;

(b) 对于分层辐射形供电的控制、保护、监控电源回路, 分电柜馈线断路器宜选用二段式微型断路器, 当不满足选择性配合要求时, 可采用带短延时保护的微型断路器; 终端断路器选用 B 型脱扣器, 额定电流不宜大于 6A;

(c) 环形供电的控制、保护、监控回路断路器可按照集中辐射形供电方式选择;

(d) 当断路器采用短路短延时保护实现选择性配合时, 该断路器瞬时速断整定值的 0.8 倍应大于短延时保护电流整定值的 1.2 倍, 并应校验断路器短时耐受电流值。

5) 直流分电柜电源回路断路器额定电流应按直流分电柜上全部用电回路的计算电流之和选择, 并应符合下列规定:

a. 断路器额定电流计算式为

$$I_n \geq K_c \sum (I_{cc} + I_{cp} + I_{cs}) \quad (10-4-26)$$

式中  $I_n$ ——直流断路器额定电流, A;

$K_c$ ——同时系数, 取 0.8;

$I_{cc}$ ——控制负荷计算电流, A;

$I_{cp}$ ——保护负荷计算电流, A;

$I_{cs}$ ——信号负荷计算电流, A。

b. 上一级直流母线馈线断路器额定电流应大于直流分电柜馈线断路器的额定电流, 电逐级差宜符合选择性规定。若不满足选择性要求, 可采用带短路短延时特性直流断路器。

6) 蓄电池组出口回路熔断器或断路器额定电流应选取以下两种情况中电流较大者, 并应满足蓄电池出口回路短路时灵敏系数的要求, 同时还应按事故初期 (1min) 冲击放电流校验保护动作时间。蓄电池组出口回路熔断器或断路器额定电流应按下列公式确定:

- a. 按事故停电时间的蓄电池放电率电流选择，熔断器或断路器额定电流计算式为

$$I_n \geq I_1 \quad (10-4-27)$$

式中  $I_n$ ——直流熔断器或断路器额定电流，A；

$I_1$ ——蓄电池 1h 或 2h 放电率电流，A。可按厂家资料选取，无厂家资料时，铅酸蓄电池可取  $5.5I_{10}$  (A)，中倍率镉镍碱性蓄电池可取  $7.0I_5$  (A)，高倍率镉镍碱性蓄电池可取  $20.0I_5$  (A)，其中， $I_{10}$  为铅酸蓄电池 10h 放电率电流， $I_5$  为镉镍碱性蓄电池 5h 放电率电流。

- b. 按保护动作选择性条件选择，熔断器或断路器额定电流应大于直流母线馈线中最大断路器的额定电流，计算式为

$$I_n > K_{c4} I_{n, \max} \quad (10-4-28)$$

式中  $I_n$ ——直流熔断器或断路器额定电流，A；

$K_{c4}$ ——配合系数，一般取 2.0，必要时可取 3.0；

$I_{n, \max}$ ——直流母线馈线中直流断路器最大的额定电流，A。

#### (4) 直流断路器的保护整定。

- 1) 直流断路器过负荷长延时保护的约定动作电流可按下列公式确定：

- a. 断路器额定电流和约定动作电流系数计算式为

$$I_{DZ} = KI_n \quad (10-4-29)$$

式中  $I_{DZ}$ ——断路器过负荷长延时保护的约定动作电流，A；

$K$ ——断路器过负荷长延时保护热脱扣器的约定动作电流系数，根据断路器执行的现行国家标准分别取 1.3 或 1.45；

$I_n$ ——对于断路器过负荷电流整定值不可调节的断路器，可为断路器的额定电流，对于断路器过负荷电流整定值可调节的断路器，可取与回路计算电流相对应的断路器整定值电流，A。

- b. 上、下级断路器的额定电流或动作电流和电流比可按下列公式确定：

$$I_{n1} \geq K_{ib} I_{n2} \text{ 或 } I_{DZ1} \geq K_{ib} I_{DZ2} \quad (10-4-30)$$

式中  $I_{n1}$ 、 $I_{n2}$ ——上、下级断路器额定电流或整定值电流，A；

$K_{ib}$ ——上、下级断路器电流比系数，可按表 10-3-1 ~ 表 10-3-4 的规定选取；

$I_{DZ1}$ 、 $I_{DZ2}$ ——上、下级断路器过负荷长延时保护约定动作电流。

- 2) 直流断路器短路瞬时保护（脱扣器）整定值应符合下列规定：

- a. 短路瞬时保护（脱扣器）整定计算公式：

- (a) 按本级断路器出口短路，断路器脱扣器瞬时保护可靠动作整定计算式为

$$I_{DZ1} \geq K_n I_n \quad (10-4-31)$$

- (b) 按下一级断路器出口短路，断路器脱扣器瞬时保护可靠不动作整定计算式为

$$I_{DZ1} \geq K_{ib} I_{DZ2} > I_{D2} \quad (10-4-32)$$

式中  $I_{DZ1}$ 、 $I_{DZ2}$ ——上、下级断路器瞬时保护（脱扣器）动作电流，A；

$K_n$ ——额定电流倍数，脱扣器整定值正误差或脱扣器瞬时脱扣范围最大值；

$I_n$ ——断路器额定电流，A；

$K_{ib}$ ——上、下级断路器电流比系数，可按表 10-3-1 ~ 表 10-3-4 的规定选取；

$I_{dz}$ ——下一级断路器出口短路电流, A。

b. 当直流断路器具有限流功能时, 可按下列式计算:

$$I_{DZ1} \geq K_n I_{DZ2} / K_{XL} \quad (10-4-33)$$

式中  $I_{DZ1}$ 、 $I_{DZ2}$ ——上、下级断路器瞬时保护(脱扣器)动作电流, A;

$K_n$ ——额定电流倍数, 脱扣器整定值正误差或脱扣器瞬时脱扣范围最大值;

$K_{XL}$ ——限流系数, 其数值应由产品厂家提供, 可取 0.60~0.80。

c. 断路器短路保护脱扣范围值及脱扣整定值应按照直流断路器厂家提供的数据选取, 如无厂家资料, 可按表 10-3-1、表 10-3-2 规定的数值选取。

d. 灵敏系数校验应根据计算的各断路器安装处短路电流校验各级断路器瞬时脱扣的灵敏系数, 还应考虑脱扣器整定值的正误差或脱扣范围最大值后的灵敏系数。灵敏系数校验计算公式为:

$$I_{DK} = U_n / [n(r_b + r_1) + \sum r_j + \sum r_k] \quad (10-4-34)$$

$$K_L = I_{DK} / I_{DZ} \quad (10-4-35)$$

式中  $I_{DK}$ ——断路器安装处短路电流, A;

$U_n$ ——直流电源系统额定电压, 取 110 或 220, V;

$n$ ——蓄电池个数;

$r_b$ ——蓄电池内阻,  $\Omega$ ;

$r_1$ ——蓄电池间连接条或导体电阻,  $\Omega$ ;

$\sum r_j$ ——蓄电池组至断路器安装处连接电缆或导体电阻之和,  $\Omega$ ;

$\sum r_k$ ——相关断路器触头电阻之和,  $\Omega$ ;

$K_L$ ——灵敏系数, 不宜低于 1.05;

$I_{DZ}$ ——断路器瞬时保护(脱扣器)动作电流, A。

3) 直流断路器短路短延时保护(脱扣器)选择应符合下列规定:

a. 当上、下级断路器安装处较近, 短路电流相差不大, 下级断路器出口短路引起上级断路器短路瞬时保护(脱扣器)误动作时, 上级断路器应选用短路短延时保护(脱扣器);

b. 各级短路短延时保护时间整定值应在保证选择性前提下, 根据产品允许时间级差, 选择其最小值, 但不应超过直流断路器允许短时耐受时间值。

#### 10.4.6 熔断器

1. 直流回路采用熔断器作为保护电器时, 应装设隔离电器。

2. 蓄电池出口回路熔断器应带有报警触点, 其他回路熔断器也可带有报警触点。

3. 熔断器的选择应符合下列规定:

(1) 额定电压应大于或等于回路的最高工作电压。

(2) 额定电流应大于回路的最大工作电流, 最大工作电流的选择应符合下列要求:

1) 蓄电池出口回路熔断器应按事故停电时间的蓄电池放电率电流和直流母线上最大馈线直流断路器额定电流的 2 倍选择, 两者取较大值。

2) 高压断路器电磁操动机构的合闸回路可按 0.2~0.3 倍的额定合闸电流选择, 但熔断器的熔断时间应大于断路器固有合闸时间。

(3) 断流能力应满足安装地点直流电源系统最大预期短路电流的要求。

#### 10.4.7 隔离开关

1. 额定电压应大于或等于回路的最高工作电压。
2. 额定电流应大于回路的最大工作电流，最大工作电流的选择应符合下列要求：
  - (1) 蓄电池出口回路应按事故停电时间的蓄电池放电率电流选择。
  - (2) 高压断路器电磁操动机构的合闸回路可按 0.2 ~ 0.3 倍的额定合闸电流选择。
  - (3) 直流母线分段开关可按全部负荷的 60% 选择。
3. 断流能力应满足安装地点直流电源系统短时耐受电流的要求。
4. 隔离开关宜配置辅助触点。

#### 10.4.8 降压装置

1. 降压装置宜由硅元件构成，应有防止硅元件开路的措施。
2. 硅元件的额定电流应满足所在回路最大持续负荷电流的要求，并应有承受冲击电流的短时过载和承受反向电压的能力。

#### 10.4.9 直流柜

1. 直流柜宜采用加强型结构，防护等级不宜低于 IP20。布置在交流配电间内的直流柜防护等级应与交流开关柜一致。
2. 直流柜外形尺寸的宽 × 深 × 高宜为 800mm × 600mm × 2200mm。
3. 直流柜正面操作设备的布置高度不应超过 1800mm，距地高度不应低于 400mm。
4. 直流柜内采用微型断路器的直流馈线应经端子排出线。
5. 直流柜内的母线宜采用阻燃绝缘铜母线，应按事故停电时间的蓄电池放电率电流选择截面，并进行额定短时耐受电流校验和按短时最大负荷电流校验，其温度不应超过绝缘体的允许事故过负荷温度。蓄电池回路设备及直流柜主母线的选择应满足表 10-4-16 和表 10-4-17 的要求。

表 10-4-16 固定型排气式和阀控式密封铅酸蓄电池回路设备选择

蓄电池容量 (Ah)	100	200	300	400	500	600
回路电流 (A)	55	110	165	220	275	330
电流测量范围 (A)	±100	±200		±300	±400	
放电试验回路电流 (A)	12	24	36	48	60	72
主母线铜导体截面积 (mm <sup>2</sup> )	50 × 4			60 × 6		
蓄电池容量 (Ah)	800	1000	1200	1500	1600	1800
回路电流 (A)	440	550	660	825	880	990
电流测量范围 (A)	±600	±800		±1000		
放电试验回路电流 (A)	96	120	144	180	192	216
主母线铜导体截面积 (mm <sup>2</sup> )	60 × 6			80 × 8		
蓄电池容量 (Ah)	2000	2200	2400	2500	2600	3000
回路电流 (A)	1100	1210	1320	1375	1430	1650
电流测量范围 (A)	±1500			±2000		
放电试验回路电流 (A)	240	264	288	300	312	360
主母线铜导体截面积 (mm <sup>2</sup> )	80 × 8			80 × 10		

注 容量为 100Ah 以下的蓄电池，其母线最小截面积不宜小于 30mm × 4mm。

表 10-4-17 中倍率镉镍碱性蓄电池回路设备选择

蓄电池容量 (Ah)	10	20	30	50	60	80	100
回路电流 (A)	7	14	21	35	42	56	70
熔断器及隔离开关额定电流 (A)	63					100	
直流断路器额定电流 (A)	32			63			100
电流测量范围 (A)	±220		±40		±50	±100	
放电试验回路电流 (A)	2	4	6	10	12	16	20
主母线铜导体截面积 (mm <sup>2</sup> )	30×4					50×4	

6. 直流柜内的母线及其相应回路应能满足直流母线出口短路时额定短时耐受电流的要求。当厂家未提供阀控铅酸蓄电池短路电流时, 直流柜内元件应符合下列要求:

- (1) 阀控铅酸蓄电池容量为 800Ah 以下的直流电源系统, 可按 10kA 短路电流考虑。
- (2) 阀控铅酸蓄电池容量为 800 ~ 1400Ah 的直流电源系统, 可按 20kA 短路电流考虑。
- (3) 阀控铅酸蓄电池容量为 1500 ~ 1800Ah 的直流电源系统, 可按 25kA 短路电流考虑。
- (4) 阀控铅酸蓄电池容量为 2000Ah 的直流电源系统, 可按 30kA 短路电流考虑。

(5) 阀控铅酸蓄电池容量为 2000Ah 以上时, 应进行短路电流计算。蓄电池短路电流计算应符合下列要求:

- 1) 直流电源系统短路电流计算电压应取系统标称电压 220V 或 110V。
- 2) 短路计算中不计及充电装置助增电流及直流电动机反馈电流。
- 3) 如在蓄电池引出端子上短路, 则短路电流计算式为

$$I_{\text{bk}} = \frac{U_n}{n(r_b + r_1)} \quad (10-4-36)$$

式中  $I_{\text{bk}}$ ——蓄电池引出端子上的短路电流, kA;

$U_n$ ——直流电源系统标称电压, V;

$n$ ——蓄电池个数;

$r_b$ ——蓄电池内阻, mΩ;

$r_1$ ——蓄电池连接条的电阻, mΩ。

- 4) 如在蓄电池组连接的直流母线上短路, 则短路电流计算式为

$$I_k = \frac{U_n}{n(r_b + r_1) + r_c} \quad (10-4-37)$$

式中  $I_k$ ——蓄电池组连接的直流母线上的短路电流, kA;

$U_n$ ——直流电源系统标称电压, V;

$n$ ——蓄电池个数;

$r_b$ ——蓄电池内阻, mΩ;

$r_1$ ——蓄电池组连接条电阻, mΩ;

$r_c$ ——蓄电池组端子到直流母线的连接电缆或导线电阻, Ω。

- (6) 蓄电池组电阻及出口短路电流参考数值表。

参考数值见表 10-4-18 ~ 表 10-4-20。

表 10-4-18 阀控式密封铅酸蓄电池组电阻及出口短路电流值

蓄电池容量 (Ah)	连接条数量、类型及电阻			蓄电池组的电池数量及其电阻 (含连接条) (mΩ)					短路电流 (kA)
	数量	连接条电阻 (mΩ)		110V			220V		
				51 个	52 个	53 个	103 个	104 个	
200	1	硬连接	0.015	34.425	35.100	35.755	69.525	70.200	3.134
		软连接	0.0382	35.608	36.306	37.004	71.914	72.612	3.030
300	1	硬连接	0.015	23.205	23.660	24.115	46.865	47.320	4.649
		软连接	0.0382	24.388	24.886	25.384	49.250	49.733	4.420
400	1	硬连接	0.015	17.595	17.940	18.285	35.535	35.880	6.132
		软连接	0.0382	18.778	19.146	19.514	37.925	38.293	5.745
500	1	硬连接	0.015	14.229	14.508	14.787	28.737	29.016	7.582
		软连接	0.0382	15.412	15.714	16.016	31.127	31.429	7.000
600	2	硬连接	0.0075	11.603	11.830	12.057	23.433	23.660	9.298
		软连接	0.0191	12.194	12.433	12.672	24.627	24.866	8.847
800	2	硬连接	0.0075	8.798	8.970	9.142	17.768	17.940	12.263
		软连接	0.0191	9.389	9.573	9.757	18.963	19.146	11.491
900	2	硬连接	0.0075	7.854	8.008	8.162	15.862	16.061	13.736
		软连接	0.0191	8.445	8.611	8.777	17.507	17.223	12.774
1000	2	硬连接	0.0075	7.115	7.254	7.393	14.369	14.508	15.164
		软连接	0.0191	7.706	7.857	8.008	15.563	15.714	14.000
1200	4	硬连接	0.0038	5.802	5.915	6.029	11.717	11.830	18.597
		软连接	0.0095	6.097	6.217	6.336	12.314	12.433	17.693
1500	3	硬连接	0.005	4.743	4.836	4.929	9.246	9.672	22.746
		软连接	0.0127	5.137	5.238	5.339	10.376	10.476	21.000
1600	4	硬连接	0.0038	4.399	4.485	4.571	8.884	8.970	24.526
		软连接	0.0095	4.695	4.787	4.879	9.482	9.573	22.979
1800	6	硬连接	0.0025	3.868	3.943	4.018	7.808	7.887	27.896
		软连接	0.0064	4.065	4.144	4.223	8.209	8.289	26.544
2000	8	硬连接	0.0019	3.463	3.531	3.599	6.994	7.062	31.153
		软连接	0.0048	3.611	3.682	3.753	7.292	7.363	29.875
2400	6	硬连接	0.0025	2.933	2.990	3.047	5.923	5.980	36.789
		软连接	0.0064	3.129	3.191	3.252	6.321	6.715	34.472
3000	8	硬连接	0.0019	2.341	2.387	2.433	4.728	4.774	46.840
		软连接	0.0048	2.489	2.538	2.587	5.026	5.075	44.057

注 1. 同容量 110V (52 个电池) 和 220V (104 个电池) 蓄电池组的出口短路电流相同。

2. 同容量、同电压的蓄电池组, 蓄电池个数不同时, 短路电流有差异。

表 10-4-19 固定型排气式铅酸蓄电池内阻及出口短路电流值

GF、GM 系列				GFD 系列			
蓄电池容量 (Ah)	一片正极板容量 (Ah)	蓄电池内阻 (mΩ)	短路电流 (kA)	蓄电池容量 (Ah)	一片正极板容量 (Ah)	蓄电池内阻 (mΩ)	短路电流 (A)
800	100	0.285	7.298	600	100	0.387	5.375
1000		0.228	9.122	800		0.290	7.172
1200		0.190	10.947	1000		0.232	8.966
1400		0.163	12.760	1200		0.193	10.777
1600		0.143	14.545	1500		0.200	10.400
1800		0.127	16.378	1875		0.160	13.000
2000		0.114	18.246	2000		0.150	13.867
2400	125	0.121	17.190	2500	125	0.120	15.600
2600		0.112	18.570	3000		0.100	20.800
2800		0.104	20.000				
3000		0.097	21.440				

表 10-4-20 镉镍碱性蓄电池的一般性能

项目名称		开启式			密封式
		袋式		高倍率	
		低倍率	中倍率		
-18℃时的放电容量 (Ah)%		≥50	≥60	≥70	≥70
电压	额定电压 (V)	1.20			
	浮充电压 (V)	1.47~1.50	1.42~1.45	1.38±0.02	
	均衡充电电压 (V)	1.52~1.55		1.47~1.48	
内阻 (mΩ)		0.15~0.20	0.10	0.03~0.06	0.03~0.04
放电时间	0.20C <sub>5</sub> (A) -1.00 (V)	4h45min			
	1.0C <sub>5</sub> (A) -0.90 (V)		50min	60min	60min
	5.0C <sub>5</sub> (A) -0.80 (V)			4min	8min
	10C <sub>5</sub> (A) -0.80 (V)				2min
自放电 (28 昼夜)%		<20	<20	<30	<35
使用寿命	循环 (次)	>900	>900	>500	>400
	浮充运行 (年)	>20	>20	>15	>5
短路电流			15.3A/Ah	58A/Ah	

7. 直流柜体应设有保护接地, 接地处应有防锈措施和明显标志。直流柜底部应设置接地铜排, 截面面积不应小于 100mm<sup>2</sup>。

8. 蓄电池柜内的隔架距地最低不宜小于 150mm, 距地最高不宜超过 1700mm。

9. 直流柜及柜内元件应符合现行国家标准 GB/T 19826—2014《电力工程直流电源设备通用技术条件及安全要求》的有关规定。

#### 10.4.10 直流电源成套装置

1. 直流电源成套装置包括蓄电池组、充电装置和直流馈线。根据设备体积大小，可合并组柜或分别设柜，其相关技术要求应符合 DL/T 5044—2014《电力工程直流电源系统设计规程》的有关规定。

2. 直流电源成套装置宜采用阀控式密封铅酸蓄电池、高倍率镉镍碱性蓄电池或中倍率镉镍碱性蓄电池。蓄电池组容量应符合下列规定：

- (1) 阀控式密封铅酸蓄电池容量应为 300Ah 以下。
- (2) 高倍率镉镍碱性蓄电池容量应为 40Ah 及以下。
- (3) 中倍率镉镍碱性蓄电池容量应为 100Ah 及以下。

#### 10.4.11 DC/DC 变换装置

1. DC/DC 变换装置的技术特性应满足下列要求：

- (1) 应为长期连续工作制，并具有稳压性能，稳压精度应为额定电压值的  $\pm 0.6\%$ 。
- (2) 直流母线反灌纹波电压有效值系数不应超过 0.5%。
- (3) 具有输入异常和输出限流保护功能，故障排除后可自动恢复工作。
- (4) 具有输出过电压保护功能，故障排除后可人工恢复工作。
- (5) 当用于通信电源时，杂声电压和其他技术参数还应符合现行行业标准 YD/T 637—2006《通信用直流—直流变换设备》的有关规定。

2. DC/DC 变换装置在选择时应满足馈线短路时直流断路器的可靠动作，并具有选择性。DC/DC 电源系统配置应符合下列规定：

- (1) 总输出电流不宜小于馈线回路中最大直流断路器额定电流的 4 倍。
- (2) 宜加装储能电容。
- (3) 馈线断路器宜选用 B 型脱扣曲线的直流断路器。

3. 每套 DC/DC 变换装置的直流电源宜采用单电源供电。

### 10.5 设备布置

#### 10.5.1 直流设备布置

1. 对单机容量为 200MW 级及以上的机组，直流柜宜布置在专用直流配电间内，直流配电间宜按单元机组设置。对于单机容量为 125MW 级及以下的机组、变电站，直流柜可布置在电气继电器室或直流配电间内。

2. 包含蓄电池的直流电源成套装置柜可布置在继电器室或配电间内，室内应保持良好通风。

3. 直流分电柜宜布置在该直流负荷中心附近。

4. 直流柜前后应留有运行和检修通道，通道宽度应符合现行行业标准 DL/T 5136—2012《火力发电厂、变电站二次接线设计技术规程》的有关规定。

5. 直流配电间环境温度宜为 15~30℃，室内相对湿度宜为 30%~80%，不得凝露，温度变化率应小于 10℃/h。

6. 发电厂单元机组蓄电池室应按机组分别设置。全厂（站）公用的 2 组蓄电池宜布置在不同的蓄电池室。

7. 蓄电池室内应设有运行和检修通道。通道一侧装设蓄电池时，通道宽度不应小于

800mm；两侧均装设蓄电池时，通道宽度不应小于1000mm。

### 10.5.2 阀控式密封铅酸蓄电池组布置

1. 阀控式密封铅酸蓄电池容量在300Ah及以上时，应设专用的蓄电池室。专用蓄电池室宜布置在0m层。

2. 胶体式阀控式密封铅酸蓄电池宜采用立式安装，贫液吸附式的阀控式密封铅酸蓄电池可采用卧式或立式安装。

3. 蓄电池安装宜采用钢架组合结构，可多层叠放，应便于安装、维护和更换蓄电池。台架的底层距地面为150~300mm，整体高度不宜超过1700mm。

4. 同一层或同一台上的蓄电池间宜采用有绝缘的或有护套的连接条连接，不同一层或不同一台上的蓄电池间宜采用电缆连接。

### 10.5.3 固定型排气式铅酸蓄电池组和镉镍碱性蓄电池组布置

1. 固定型排气式铅酸蓄电池组和容量为100Ah以上的中倍率镉镍碱性蓄电池组应设置专用蓄电池室。专用蓄电池室宜布置在0m层。

2. 蓄电池应采用立式安装，宜安装在瓷砖台或水泥台上，台高为250~300mm。台与台之间应设运行和检修通道，通道宽度不得小于800mm。蓄电池与大地之间应有绝缘措施。

3. 中倍率镉镍碱性蓄电池组的端电池宜靠墙布置。

4. 蓄电池有液面指示计和比重计的一面应朝向运行和检修通道。

5. 在同一台上的蓄电池间宜采用有绝缘的或有护套的连接条连接，不在同一台上的电池间宜采用电缆连接。

6. 蓄电池裸露导电部分之间的距离应符合下列规定：

(1) 非充电时，当两部分之间的正常电压超过65V但不大于250V时，不应小于800mm。

(2) 当电压超过250V时，不应小于1000mm。

(3) 导线与建筑物或其他接地体之间的距离不应小于50mm，母线支持点间的距离不应大于2000mm。

## 10.6 专用蓄电池室对相关专业的要求

### 10.6.1 专用蓄电池室的通用要求

1. 蓄电池室的位置应选择在无高温、无潮湿、无振动、少灰尘、避免阳光直射的场所，宜靠近直流配电间或布置有直流柜的电气继电器室。

2. 蓄电池室内的窗玻璃应采用毛玻璃或涂以半透明油漆的玻璃，阳光不应直射室内。

3. 蓄电池室应采用非燃性建筑材料，顶棚宜做成平顶，不应吊天棚，也不宜采用折板或槽形天花板。

4. 蓄电池室内的照明灯具应为防爆型，且应布置在通道的上方，室内不应装设开关和插座。蓄电池室内的地面照度和照明线路敷设应符合现行行业标准DL/T 5390—2014《发电厂和变电站照明设计技术规定》的有关规定。

5. 基本地震烈度为7度及以上的地区，蓄电池组应有抗振加固措施，并应符合现行国家标准GB 50260—2013《电力设施抗震设计规范》的有关规定。

6. 蓄电池室走廊墙面不宜开设通风百叶窗或玻璃采光窗，采暖和降温设施与蓄电池间的距离不应小于750mm。蓄电池室内采暖散热器应为焊接的钢制采暖散热器，室内不允许有法兰、丝扣接头和阀门等。

7. 蓄电池室内应有良好的通风设施。蓄电池室的采暖通风和空气调节应符合现行行业标准 DL/T 5035—2004《火力发电厂采暖通风与空气调节设计技术规程》的有关规定。通风电动机应为防爆式。

8. 蓄电池室的门应向外开启，应采用非燃烧体或难燃烧体的实体门，门的尺寸宽×高不应小于750mm×1960mm。

9. 蓄电池室不应有与蓄电池无关的设备和通道。与蓄电池室相邻的直流配电间、电气配电间、电气继电器室的隔墙不应留有门窗及孔洞。

10. 蓄电池组的电缆引出线应采用穿管敷设，且穿管引出端应靠近蓄电池的引出端。穿金属管外围应涂防酸（碱）油漆，封口处应用防酸（碱）材料封堵。电缆弯曲半径应符合电缆敷设要求，电缆穿管露出地面的高度可低于蓄电池的引出端子200~300mm。

11. 包含蓄电池的直流电源成套装置柜布置的房间，宜装设对外机械通风装置。

#### 10.6.2 阀控式密封铅酸蓄电池组专用蓄电池室的特殊要求

1. 蓄电池室内温度宜为15~30℃。

2. 当蓄电池组采用多层叠装且安装在楼板上时，楼板强度应满足荷重要求。

#### 10.6.3 固定型排气式铅酸蓄电池组和镉镍碱性蓄电池组专用蓄电池室的特殊要求

1. 蓄电池室应为防酸（碱）、防火、防爆的建筑，入口宜经过套间或储藏室，应设有储藏硫酸（碱）液、蒸馏水及配制电解液器具的场所，还应便于蓄电池的气体、酸（碱）液和水的排放。

2. 蓄电池室内的门、窗、地面、墙壁、天花板、台架均应进行耐酸（碱）处理，地面应采用易于清洗的面层材料。

3. 蓄电池室内温度宜为5~35℃。

4. 蓄电池室的套间内应砌水池，水池内外及水龙头应做耐酸（碱）处理，管道宜暗敷，管材应采用耐腐蚀材料。

5. 蓄电池室内的地面应有约0.5%的排水坡度，并应有泄水孔。蓄电池室内的污水应进行酸碱中和或稀释，并达到环保要求后排放。

### 10.7 交流操作电源的设计要求

交流操作电源主要是供给控制、合闸和分励信号等回路使用。交流操作的电源为交流220V，它有两种形式。

#### 10.7.1 常用的交流操作电源

常用的交流操作电源接线见图10-7-1所示。图中两路电源（工作和备用）可以进行切换，其中一路由电压互感器经100/220V变压器供给电源，而另一路由所用变压器或其他低压线路经220/220V变压器（也可由另一段母线电压互感器经100/220V变压器）供给电源。两路电源中的任一路均可作为工作电源，另一路作为备用电源。控制电源采用不接地系统，并设有绝缘检查装置。

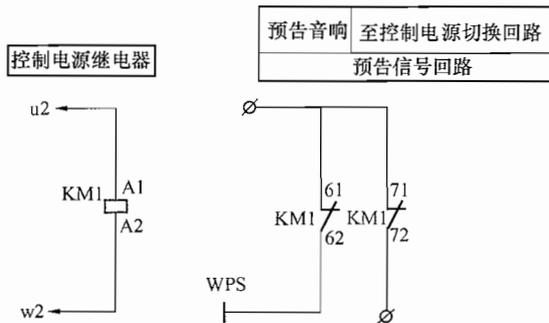
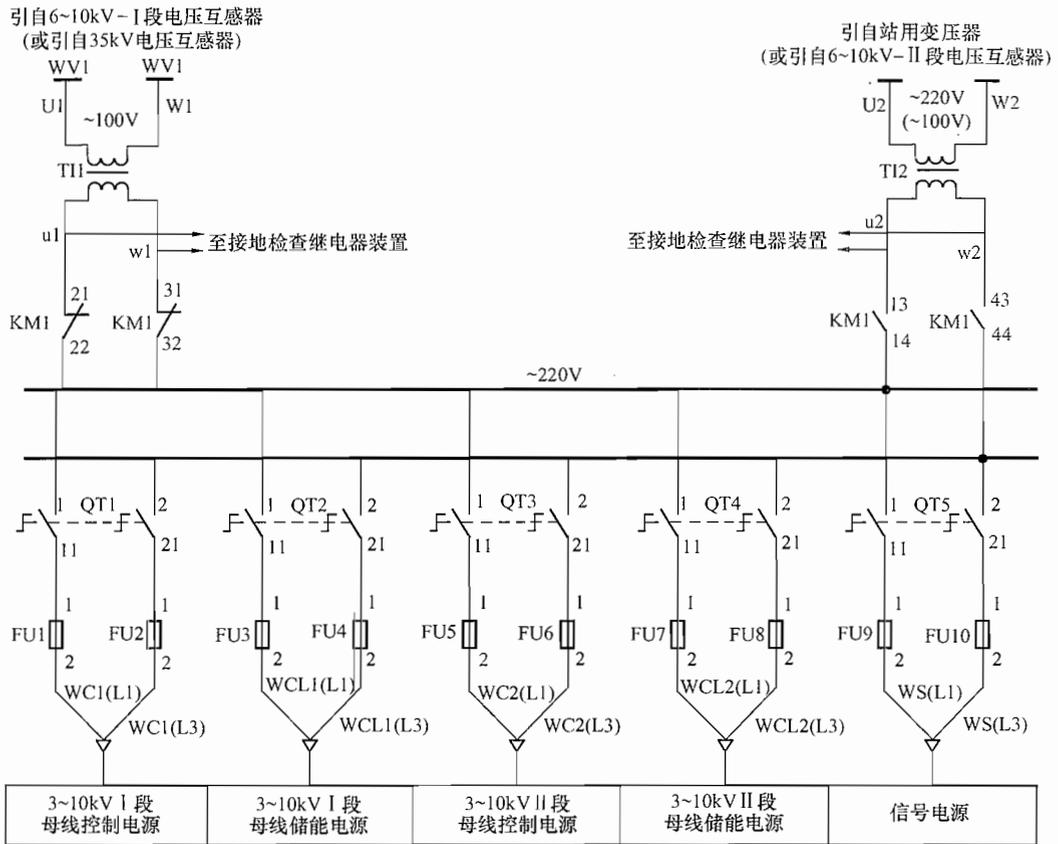


图 10-7-1 交流操作电源接线图

T11、T12—中间变压器，BK-400 型；KM1—中间继电器，CA2-DN122MLA1-D22 型；  
 QT1~QT5—组合开关，HZ15-10/201 型；FU1~FU10—熔断器，RL6-25/10 型

### 10.7.2 带 UPS 的交流操作电源

#### 10.7.2.1 概述

由于上述方式获得的电源是取自系统电压，当被保护元件发生短路故障时，短路电流很大，而电压却很低，断路器将会失去控制、信号、合闸以及分励脱扣的电源。所以交流操作的电源可靠性较低。随着交流不间断电源技术的发展和成本的降低，使交流操作应用交流不间断电源（UPS）成为可能。这样就增加了交流操作电源的可靠性。

由于操作电源比较可靠，继电保护则可以采用分励脱扣器线圈跳闸的保护方式，不再用电流脱扣器线圈跳闸的保护方式，从而可免去交流操作继电保护两项特殊的整定计算，即继电器强力切换接点容量检验和脱扣器线圈动作可靠性校验。带 UPS 的交流操作电源接线见图 10-7-2。

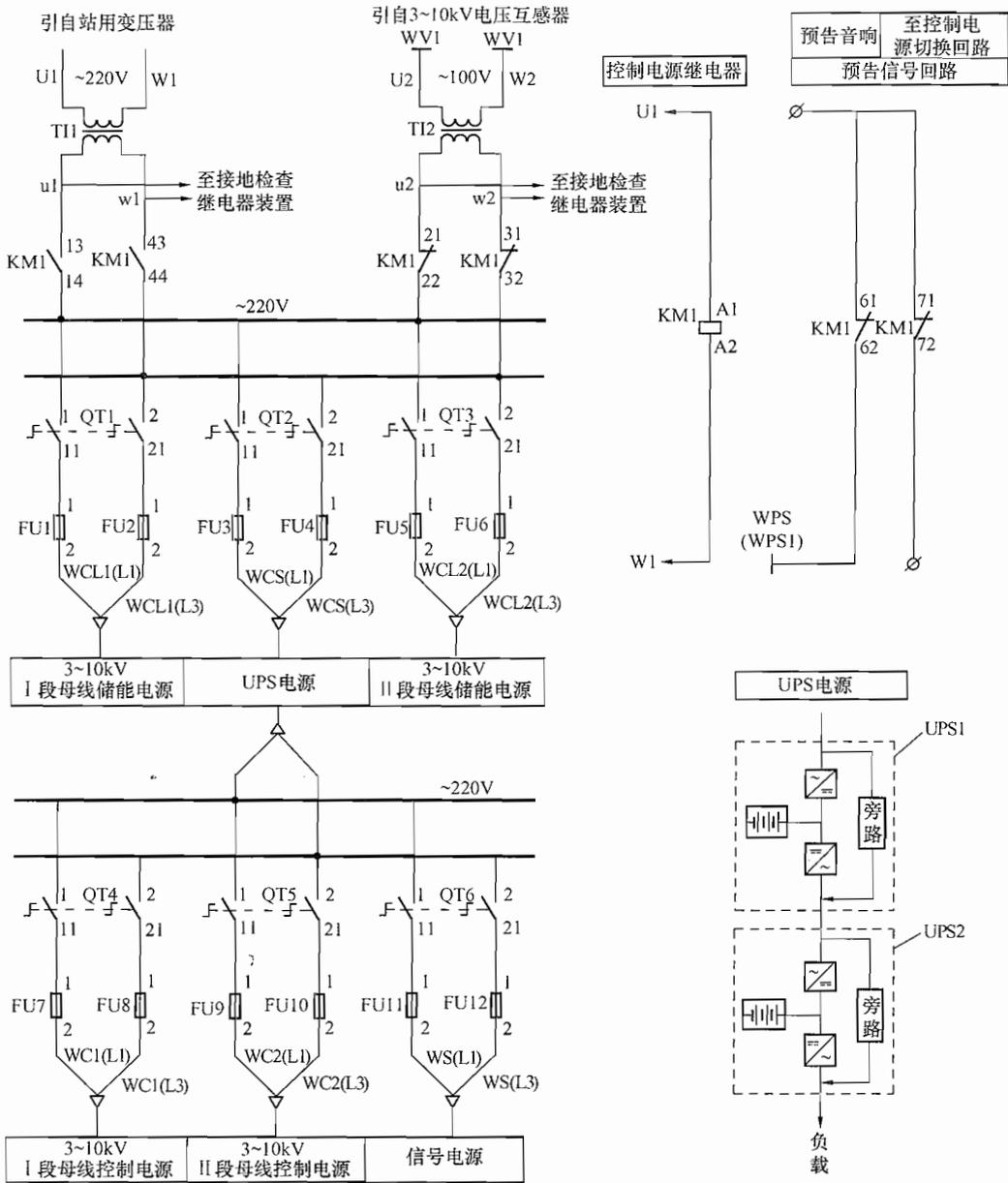


图 10-7-2 带 UPS 的交流操作电源接线图

T11、T12—中间变压器，BK-400 型；KM1—中间继电器，CA2-DN122MLA1-D22 型；  
QT1~QT6—组合开关，HZ15-10/201 型；FU1~FU12—熔断器，RL6-25/10 型

10

从图中可以看到,当系统电源正常时,由系统电源小母线向储能回路、控制及信号回路(通过 UPS 电源)供电,同时可向 UPS 电源进行充电或浮充电。当系统发生故障时,外电源消失,由 UPS 电源向控制回路及信号回路供电,使断路器可靠跳闸并发出信号。

### 10.7.2.2 UPS 电源的选择

(1) UPS 的形式及工作原理简述。小容量(5kVA 以下)的 UPS 电源分为后备式和在线式两种。作为交流操作的控制、保护、信号电源应选用在线式的 UPS 电源,其工作原理框图如图 10-7-3 所示。

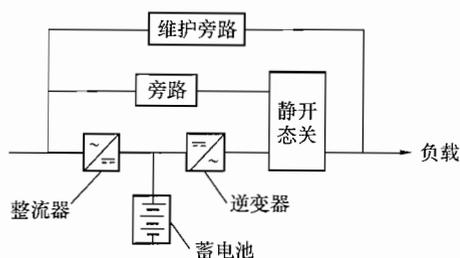


图 10-7-3 在线式 UPS 原理框图

UPS 首先由系统电源供电,经调制、整流、稳压将交流 220V 转换为直流,并给蓄电池充电,然后由逆变器将直流电转换成交流电,并保证输出电源的电压及频率能满足负载的要求,同时控制逻辑与静态开关做不间断的通信,跟踪旁路输出电压。当系统电源发生故障时,整流器不再输出任何电源,由蓄电池放电给逆变器,再由逆变器将蓄电池放出的直流电转换成交流电。若逆变器出现故障、过载等情况时,逆变器自动与负载

断开,通过旁路向负载供电。如 UPS 系统需要进行维护,则由维护旁路向负载供电。

(2) UPS 电源容量的选择。当系统电源发生故障时,由 UPS 提供控制、操作及信号电源,而不考虑储能电源的容量,所以 UPS 电源容量主要考虑以下几个方面的负载:

- 1) 由系统电源供电时,正常的控制操作及信号回路所消耗的容量  $C_1$ 。
- 2) 当系统发生故障时,两台断路器同时分闸所消耗的容量  $C_2$ 。
- 3) 系统电源正常供电或发生故障时一台断路器的合闸电磁铁的额定容量  $C_3$ 。

正常操作时所需容量为

$$C = K_{rel}(C_1 + C_3) \quad (10-7-1)$$

事故操作时所需容量为

$$C' = K_{rel}(C_2 + C_3) \quad (10-7-2)$$

式中  $K_{rel}$  ——可靠系数取 1.1 ~ 1.2。

取两式中较大者作为 UPS 的选择容量。考虑到交流操作的经济性和实用性,UPS 电源的容量不宜超过 3kVA。

带 UPS 电源方案一般适用于民用建筑供电系统中,当一次接线简单且断路器台数不多时选用,同时也不考虑分段断路器自投及出线自动重合闸装置。值得注意的是 UPS 电源作为开关柜的控制、保护及信号电源,对配电装置正确动作,尽快切除故障回路起着极为重要的作用。因此,UPS 电源本身的可靠性及运行维护的合理性非常重要。为了进一步增加 UPS 电源的可靠性,可使用两套 UPS 电源装置。两套 UPS 装置可并联也可串联使用。当两套 UPS 装置并联时,需采取并联闭锁措施。

(3) UPS 电源系列型谱。UPS 电源的输出电流等级和输出容量的系列型谱见表 10-7-1。

表 10-7-1

UPS 型 谱 表

输出电流 (A)	输出容量 (kVA)		输出电流 (A)	输出容量 (kVA)	
	单相 (220V)	三相 (380V)		单相 (220V)	三相 (380V)
0.5	0.11		10.0	2.20	6.60
1.0	0.22		15.0	3.30	9.90
2.0	0.44	1.32	20.0	4.40	13.2
5.0	1.10	3.30	30.0	6.60	19.8