

中等专业学校试用教材

工厂供电

成都无线电机械学校 主编

机械工业出版社

编 者 的 话

本书是根据第一机械工业部一九七七年十二月在北京召开的中专教材座谈会及一九七八年一月在湘潭召开的中专工业电气自动化和电机制造两专业教材会议制订的《工厂供电》教材编写大纲编写的。

在编写过程中，我们力求以马列主义、毛泽东思想为指导，运用唯物辩证法来阐述问题，注意体现加强基础的精神和贯彻理论联系实际的原则，文字叙述尽量通俗易懂，便于自学。

本书着重讲述中小型工厂供电系统运行维护所必须的基本理论和基本知识，并讲述了供电设计计算的一些基本内容。

全书共分九章。首先扼要地介绍了工厂供电系统的概况及有关知识；接着系统地讲述了电力负荷的分级及负荷的计算，电能节约及移相电容器的选择，短路电流及其计算，变配电所的一次接线及高低压电器的结构原理和选择，电力线路及其计算，各种保护装置及二次系统，工厂自备电源，防雷、接地及电气安全等；最后讲述了工厂供电系统的自动化及新技术在供电系统中的应用。为便于学生复习和练习，每章末附有思考题和作业题。

本书可作为中专工业电气自动化专业的试用教材。全书内容按 100 学时考虑。如教学时数较少时，正文中标题后标有 * 号的章节可作为学生课外自学内容。本书也可供大专有关专业的师生和工厂的电气技术人员参考。

本书由成都无线机械学校刘介才同志担任主编。芜湖机械学校顾淑霞同志和内蒙古工业学校王彻同志参加了编写，分别编写了第三章和第七章。

本书经一九七八年六月在成都召开的《工厂供电》教材审订会议集体审订。参加教材审订会议的代表有：国营国光电子管厂技术员徐学泉、国营宏明无线电器材厂技术员马开芸、国营西南专用材料厂工人潘国安、国营新兴仪器厂技术员张金元、四机部第十一设计院技术员陈才敏、福建机电学校教师林松、内蒙古工业学校教师焦凤兰、成都无线机械学校教师袁先志、钟国光、龚云卿等。本书最后由主编整理定稿。

在编写过程中，不少单位和同志给予了大力支持和帮助。在此，我们谨向有关单位和同志表示衷心的感谢！

限于我们的思想水平和业务水平，书中一定会有不少缺点和错误，恳切希望使用本书的师生和广大读者批评指正。

一九七八年十月

目 录

第一章 概论

- § 1-1 工厂供电的意义及课程的任务 1
- § 1-2 工厂供电的有关知识 1
- § 1-3 电力系统的电压和频率 4
- § 1-4 电力系统的中性点运行方式 6
- 复习思考题·作业题 9

第二章 工厂的电力负荷和电能节约

- § 2-1 供电的要求及负荷的分级10
- § 2-2 三相用电设备组计算负荷的确定11
- § 2-3 单相用电设备组计算负荷的确定17
- § 2-4 工厂总计算负荷的确定18
- § 2-5 尖峰电流的计算22
- § 2-6 节约电能的意义和措施23
- § 2-7 移相电容器的选择、装设和运行维护25
- 复习思考题·作业题32

第三章 短路电流

- § 3-1 短路的原因、后果及其形式34
- § 3-2 无限大容量电力系统发生三相短路时的物理过程及有关物理量35
- § 3-3 三相短路电流的计算38
- § 3-4 两相短路电流的计算44
- § 3-5 短路电流的效应45
- 复习思考题·作业题48

第四章 工厂变配电所及其一次系统

- § 4-1 工厂变配电所的任务和类型49
- § 4-2 工厂变配电所的主接线图50
- § 4-3 工厂变配电所的一次设备53
- § 4-4 电力变压器及其选择和调压70
- § 4-5 电流互感器和电压互感器75
- § 4-6 工厂变配电所的位置、布置、结构和安装图81
- § 4-7 工厂变配电所一次设备的运行维护89

- 复习思考题·作业题92

第五章 工厂电力线路

- § 5-1 工厂电力线路的任务和分类93
- § 5-2 工厂电力线路的接线方式93
- § 5-3 工厂电力线路的结构和敷设96
- § 5-4 导线和电缆截面的选择计算107
- § 5-5 工厂电力线路的运行维护116
- 复习思考题·作业题118

第六章 工厂供电系统的保护装置及二次系统

- § 6-1 保护装置的任务和要求119
- § 6-2 熔断器保护120
- § 6-3 自动开关保护124
- § 6-4 供电线路的继电保护127
- § 6-5 电力变压器的继电保护141
- § 6-6 控制回路和信号设备147
- § 6-7 绝缘监察装置和测量仪表150
- § 6-8 工厂供电系统二次回路的原理图和安装图152
- 复习思考题·作业题157

第七章 工厂自备电源

- § 7-1 工厂自备发电机组并列运行的条件和方法158
- § 7-2 工厂自备发电机的励磁装置161
- § 7-3 工厂自备发电机的功角特性及并列运行的稳定性166
- 复习思考题170

第八章 防雷、接地和电气安全

- § 8-1 雷和防雷171
- § 8-2 接地和接零179
- § 8-3 电气安全187
- 复习思考题·作业题191

第九章 工厂供电系统的自动化及新技术的应用

- § 9-1 电力线路的自动重合闸装置192
- § 9-2 备用电源自动投入装置196

§ 9-3 供电系统的远动化	197
§ 9-4 晶体管继电保护	200
§ 9-5 可控硅在供电系统中的应用	203
§ 9-6 电子计算机在供电系统中的应 用	204
复习思考题	205

附 录

附表 1 汉语拼音字母的读音	206
附表 2 电工系统图常用的图形符号	207
附表 3 电气平面图常用的图形符号	209
附表 4 用电设备组的需要系数、二项 式系数及功率因数	211
附表 5 各类工厂的全厂需要系数及功 率因数	212
附表 6 LJ 型铝绞线的主要技术数据	212
附表 7 SJL ₁ 型部分 10kV 电力变压器的 主要技术数据	213
附表 8 移相电容器的主要技术数据	214
附表 9 移相电容器的比补偿容量	215
附表 10 短路电流计算图	216
附表 11 导体在正常和短路时的最高允 许温度	217
附表 12 SN ₁₀ ⁸ -10 型高压少油断路器的 主要技术数据	217
附表 13 RM10 型低压熔断器的主要技术 数据	217
附表 14 RT0 型低压熔断器的主要技术 数据	217
附表 15 DW10 型低压自动开关的主要 技术数据	218

附表 16 变压器宽面推进的变压器室主 要尺寸	218
附表 17 架空裸导线最小允许截面和直 径	219
附表 18 电力电缆型号的组成和含 义	219
附表 19 橡皮绝缘线和塑料绝缘线的型 号、名称和敷设条件	219
附表 20 按环境和敷设方式选择导线和 电缆	220
附表 21 绝缘导线芯线最小允许截 面	220
附表 22 BBLX、BBX、BLV、BV 等型 单芯绝缘导线穿管选择	221
附表 23 绝缘导线明敷、穿钢管和穿塑 料管时的允许载流量	221
附表 24 户内明敷及穿管的铝、铜芯绝 缘导线的电阻和电抗	223
附表 25 RM10 和 RT0 型熔断器的保护 特性曲线	223
附表 26 GL- ₁₀ ¹⁰ / ₂₀ 系列电流继电器的主要 技术数据	224
附表 27 各种电气装置要求的接地电阻 值	225
附表 28 户外架空铝导线“相—零回路” 单位长度阻抗值	226
附表 29 变压器 400V 侧单相阻抗值	226
附表 30 本书所用的角注文字符号及其 写法和读法	226

第一章 概 论

§ 1-1 工厂供电的意义及课程的任务

我们知道,电力是现代工业的主要动力。我国要在本世纪内建设成为农业、工业、国防和科学技术现代化的伟大的社会主义强国,就必须贯彻“电力先行”的方针,加快电力工业建设的步伐,以适应新时期总任务的需要。

现代工业生产之所以广泛采用电力作动力,这是由于电力的能源广泛,输送简单,取之方便,用之价廉,而且可以远距离控制、调节和测量,为实现生产自动化创造了良好的条件。

在工厂里,电力虽然是工业生产的主要动力,但是它所消耗的费用在产品成本中所占的比重(除电化工业外),一般很小。例如在机械工业中,电费开支仅占产品成本的5%左右。就投资额来看,有些机械工厂在供电设备上的投资,也仅占总投资的5%左右。由此可见,电力在工业生产中的重要性,并不在于电力在产品成本中或投资总额中所占的比重多少,而在于工业生产实现电气化以后,可以大大增加生产,提高产品质量,提高劳动生产率,降低生产成本,减轻工人的劳动强度,改善工人的劳动条件,有利于实现生产自动化。

本课程的任务,主要是讲述中小型机械类工厂内部的电力供应问题,使学生初步掌握中小型工厂供电系统包括变配电所和供配电线路运行维护所必需的基本理论和基本知识,并了解工厂供电的简单设计计算方法。

§ 1-2 工厂供电的有关知识

一、工厂供电系统的概况

一般中型工厂的电源进线电压是6~10kV,先经过高压配电所,然后由高压配电线路将电能输送给各车间变电所,降低成一般用电设备所需的电压(如380/220V)。

图1-1是一个比较典型的中型工厂供电系统的电气主接线示意图。图1-2是上述工厂供电系统的平面布线示意图。为了使图形简单清晰,电气主接线图和平面图上的三相线路只用一根线来表示,即绘成单线图形式。还必须说明,这里绘出的主接线图未表示出线路上的各种开关电器(除母线和低压联络线上装设的开关外)。关于国家标准规定的部分电工系统图形符号(GB312-64)和电气平面图图形符号(GB313-64)分别列在附录表2和表3中,供参考。

由以上两图可以看出,这个厂的高压配电所有两条6~10kV的电源进线($l-1$ 、 $l-2$)[⊖],分别接在高压配电所的两段母线上。这两段母线间装有一个分段隔离开关,形成所谓“单母线分段制”。当任一条高压电源线发生故障或进行检修而被切除后,可利用分段隔离开关来恢复对整个配电所(特别是其重要负荷)的供电,即分段隔离开关闭合后由另一条高压电源

[⊖] 这里的 l 是“线路”(英文 line)的国际通用符号。

线供电给整个配电所。

这个高压配电所有四条高压配电线（1-3~1-6）供电给三个车间变电所，其中1号和3号都只装有一台主变压器，而2号装有两台，并分别由两段母线供电，其低压侧采用高压配电所那样的单母线分段制。对重要负荷可由两段母线交叉供电。所有车间变电所的低压侧，都有低压联络线相互联接，以提高供电系统运行的可靠性和灵活性。

对于小型工厂，一般只设一个简单的降压变电所，相当于图1-1中的一个车间变电所。用电量在100kW以下的小型工厂，通常采用低压供电，因此只需设置一个低压配电间就行了。

对于大型工厂及某些电源进线电压为35kV及以上的中型工厂，一般经过两次降压，也就是电源进厂以后，先经总降压变电所，将35kV及以上的电压降为6~10kV电压，然后通过高压配电线将电能送到各个车间变电所，再降到一般低压用电设备所需的电压。但也有的35kV进线的工厂，只经一次降压，直接降为低压，供用电设备使用。这种供电方式，叫做高压深入负荷中心的直配方式。

从以上分析可知，配电所的任务是接受电能和分配电能，而变电所的任务是接受电能、变换电压和分配电能，两者的区别主要在于变电所多了变换电压的电力变压器。

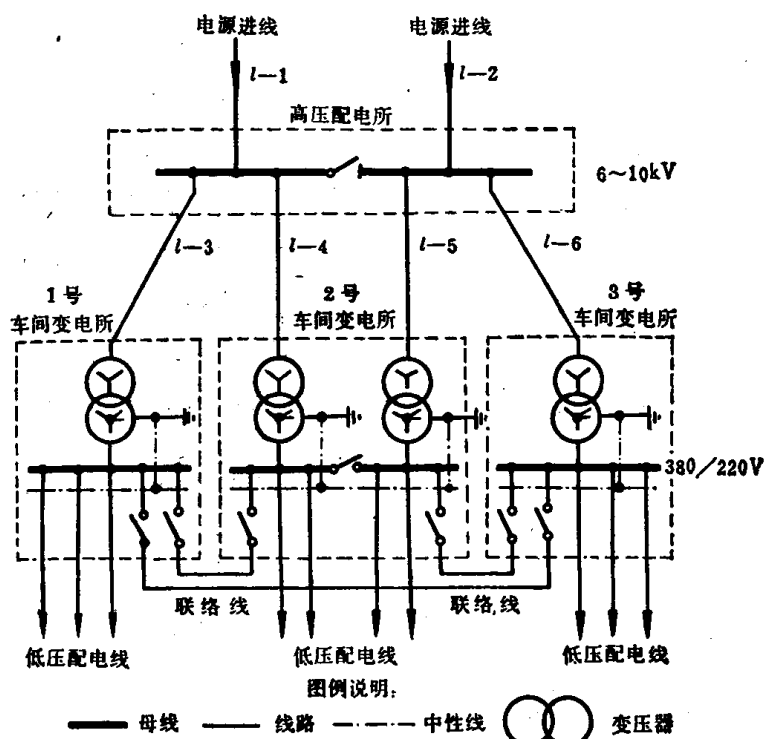


图1-1 中型工厂供电系统主接线示意图

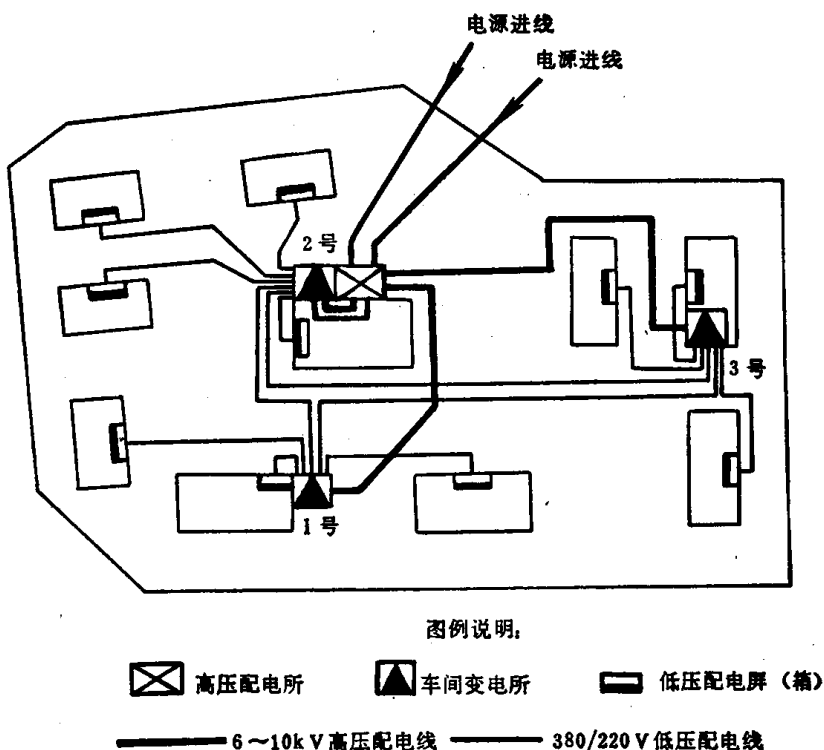


图1-2 中型工厂供电系统平面布线示意图

二、发电厂和电力系统简介*

由于电力的生产、输送、分配和使用的全过程，实际上是在同一瞬间实现的，这个全过程是一个紧密联系的整体，所以我们在这里除了要简述工厂供电系统的概况外，还要简介发电厂和电力系统的基本知识，使大家了解工厂供电系统电源方面的情况，有利于更好地做好工厂供电工作。

(一) 发电厂：

发电厂又称发电站，是将自然界蕴藏的各种能源转换为电能的工厂。

发电厂按它所利用的能源不同，可分为火力发电厂、水力发电厂、原子能发电厂以及风力发电厂、地热发电厂、太阳能发电厂等类型。根据我国的能源情况，水力资源特别丰富，居世界第一位，煤炭、石油等燃料的蕴藏量也居于世界前列，因此我国确定实行水电火电并举，在有水力资源的地方，多搞水电，大中小并举，大型为骨干，多搞中小型的方针^①。

火力发电厂简称火电厂或火电站。它利用燃料的化学能来生产电能。我国的火电厂目前仍以燃煤为主。为了提高燃煤效率，现代火电厂多把煤块粉碎成煤粉燃烧。煤粉在锅炉的炉膛内完全燃烧，将锅炉内的水烧成高温高压的蒸汽，推动汽轮机转动，使与它联轴的发电机旋转发电。现代火电厂一般都考虑了“三废”（废渣、废液、废气）的综合利用，并且不仅发电而且供热。这种兼供热的火电厂，称为热电厂或热电站。

水力发电厂简称水电厂或水电站。它利用水流的位能来生产电能。当控制水流的闸门打开时，水流沿进水管进入水轮机蜗壳室，冲动水轮机，带动发电机发电。由于水电站的发电容量与水电站所在地点上下游的水位差（即水头）和流过水电站水轮机的水量（即流量）的乘积成正比，所以建设水电站，必须用人工的方法来提高水位。最常用的办法，就是在河流上建筑一个很高的拦河坝，形成水库，提高上游水位，使坝的上下游形成尽可能大的落差。电站就建在堤坝的后面。这种水电站，叫做坝后式水电站。我国一些大型水电站差不多都属于这种类型。另一种提高水位的办法，是在具有相当坡度的弯曲河段上游筑一低坝，拦住河水，然后利用沟渠或隧道，将水直接引至建设在河段末端的水电站。这种水电站，叫做引水式水电站。还有一种水电站，是上述两种方式的综合，由高坝和引水渠或隧道分别提高一部分水位。这种水电站，叫做混合式水电站。

原子能发电厂，简称原子电站。它的生产过程基本上与火电厂相同，只是以原子反应堆（原子锅炉）代替了燃煤锅炉，以少量的“原子燃料”代替了大量的煤炭。由于原子能是取之不尽、用之不竭的巨大能源，原子电站的建设有其重要的经济和科学研究的价值，所以我国规划在近期内也要建设原子电站。

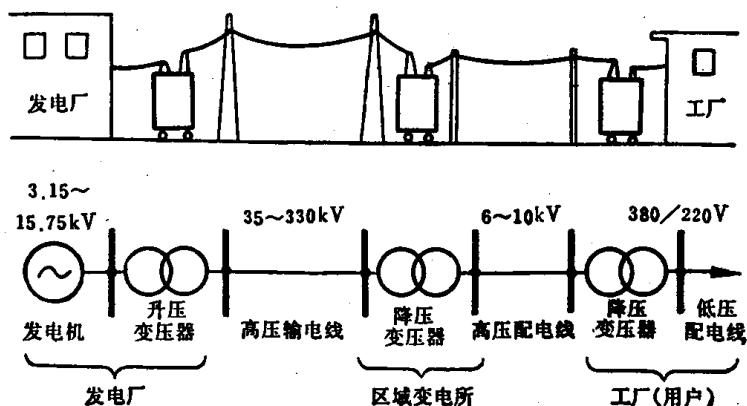


图1-3 从发电厂到用户的输电过程示意图

① 参看1977年11期《红旗》杂志上钱正英《电力要先行》一文。

(二) 电力系统:

为了充分利用动力资源,减少燃料运输,降低发电成本,因此有必要在有水力资源的地方建造水电站,而在有燃料资源的地方建造火电厂。但是这些有动力资源的地方,往往离用电中心地区较远,所以必须用高压输电线路进行远距离输电,如图 1-3 所示。

由各种电压的电力线路将一些发电厂、变电所和电力用户联系起来的一个发电、输电、变电、配电和用电的整体,叫做电力系统。电力系统中各级电压的电力线路及其联系的变电所,就叫做电力网。电力网往往按电压等级来区分,如说 10 kV 电力网、380/220 V 电力网等。这里的电力网实际指的是电气线路。

建立大型电力系统,可以更经济合理地利用动力资源(首先充分利用水力资源),减少电能损耗,降低发电成本,保证供电质量(即电压和频率合乎规范要求),并大大提高供电的可靠性,有利于整个国民经济多快好省地发展,有利于四个现代化的早日实现。

§ 1-3 电力系统的电压和频率

一、概述

电力系统中的所有电气设备都是在一定的电压和频率下工作的。电力系统的电压和频率直接影响电气设备的运行。例如电动机接在电力系统中,若系统电压低于电动机额定电压,则由于电动机的电磁转矩是同工作电压的平方成正比关系,所以工作电压降低了 10% (对额定电压) 时,电磁转矩就只有额定转矩的 81%,降低得更多;为了维持一定的负荷转矩,则电动机转速要下降,增大电磁转矩,引起绕组电流增大,从而使电动机发生过热现象,影响使用寿命。若系统频率低于电动机额定频率,则电动机的转速也要下降。所以,电压和频率是衡量电力系统供电质量的两个基本参数。

二、交流电压和频率的国家标准

(一) 频率标准:

我国规定,一般电力设备交流电压的额定频率为 50Hz (周/秒)。电力系统频率的偏差不得超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

(二) 电压标准:

我国规定的交流电力网和电力设备的额定电压如表 1-1 所列。由表 1-1 可以看出:

1. 用电设备的额定电压,与电力网(即电力线路)的额定电压相同。实际上,线路上各点的电压都略有不同,如图 1-4 所示,因为沿线都有电压降。但是成批生产的用电设备,其额定电压不可能按使用处线路的实际电压来制造,而只能按线路的额定电压 $U_{\ominus}$ 来制造。所以用电设备的额定电压必须与线路的额定电压相等。

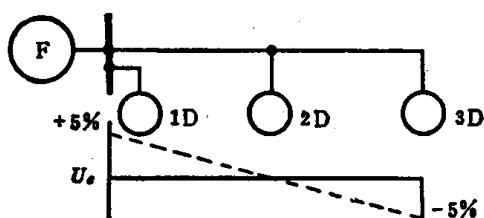
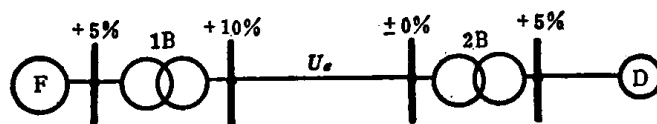
2. 发电机的额定电压高于线路额定电压 5%。这是由于电力线路一般允许的电压偏移是 $\pm 5\%$,即整个线路允许有 10% 的电压降。为了维持线路的平均电压在额定值,所以线路首端,也就是发电机的电压应较线路额定电压高 5%,而线路末端的电压则可较线路额定电压低 5%,如图 1-4 所示。

3. 电力变压器一次线圈的额定电压,有的高于线路额定电压 5%,有的则与线路额定

$\ominus$ 角注 e 是“额定”(eding)的汉语拼音缩写。关于汉语拼音字母的读音,参看附录表 1。关于本书所用的角注文字符号及其写法和读法,参看附录表 30。

表1-1 交流电力网和电力设备的额定电压 (摘自GB156-59)

电力网和用电设备 额定电压	发电机额定电压	电力变压器额定电压	
		一次线圈	二次线圈
单位为“伏”(V)			
220/127	230	220/127	230/133
380/220	400	380/220	400/230
单位为“千伏”(kV)			
3	3.15	3及3.15	3.15及3.3
6	6.3	6及6.3	6.3及6.6
10	10.5	10及10.5	10.5及11
—	15.75	15.75	—
35	—	35	38.5
60	—	60	66
110	—	110	121
154	—	154	169
220	—	220	242
330	—	330	363

图1-4 用电设备和发电机的额定电压
F—发电机 D—电动机图1-5 电力变压器的额定电压
1B、2B—变压器

电压相同。当变压器直接与发电机相联，如图1-5中的变压器1B，这时它的一次线圈额定电压应与发电机额定电压相同，即高于同级线路额定电压5%。当变压器不与发电机相联，而是连接在线路上时，如图1-5中的变压器2B，这时可把它看作是线路的用电设备，因此其一次线圈额定电压应与线路额定电压相同。

4. 电力变压器二次线圈的额定电压，有的高于线路额定电压10%，有的又只高于线路额定电压5%。这是因为变压器二次线圈的额定电压，是其空载时的电压（一次线圈在额定电压下），而变压器在满载时，它的线圈内有大约5%的阻抗电压降。因此，如果变压器二次侧供电线路比较长（如为较大的高压电网），则变压器二次线圈的额定电压，一方面要考虑补偿变压器内部5%的阻抗电压降，另一方面要考虑变压器满载时二次电压还要高于线路额定电压5%，以补偿线路上的压降，所以它要比线路额定电压高10%，如图1-5中变压器1B。如果变压器二次侧供电线路不太长（如为低压电网，或直接供电给用电设备），则变压器二次线圈的额定电压，只需高于线路额定电压5%，仅考虑补偿变压器内部压降，如图1-5中变压器2B。

三、工厂供电系统采用的电压级

一般工厂采用的高压配电电压是 6 或 10 kV。从技术经济指标来看,最好采用 10 kV。如果工厂拥有相当数量的 6 kV 用电设备,或者供电电源的电压就是 6 kV,那么采用 6 kV 电压作为工厂配电电压也是合理的。3 kV 作高压配电电压的技术经济指标很差,不宜采用。如果工厂拥有相当数量的 3 kV 用电设备时,可以采用 10/3.15 kV 的中间变压器,这时 3 kV 电压不是作为工厂高压配电的电压,而是作为对 3 kV 用电设备直接供电的电压。

如果工厂拥有 35 kV 的大型用电设备,或者厂区的环境条件和设备条件允许采用 35 kV 架空线路和较经济的电气设备时,则可采用 35 kV 作为高压配电电压深入工厂负荷中心,并经车间变电所直接降为低压用电设备的电压。这种高压深入负荷中心的直配方式,可以节省一级中间变压,大大简化供配电系统,节约有色金属,降低电能损耗,提高供电质量,因此有推广的价值。

工厂的低压配电电压,通常采用 380/220 V。只有在容易发生触电或有易燃易爆危险的场所,才考虑采用 220/127 V。至于更低的 36 V 或 12 V 电压,则是再经过一次降压来获得的,一般用于安全照明。

§ 1-4 电力系统的中性点运行方式

一、概述

在三相交流电力系统中,发电机和变压器的中性点有三种运行方式:一种是中性点不接地,一种是中性点直接接地,还有一种是中性点经消弧线圈接地。

我国 3~10 kV 系统,大多采取中性点不接地的运行方式。按水电部制订的《电力设备接地设计技术规程》(SDJ8-76)规定:3~60 kV 系统,当单相接地电流大于一定数值时(3~10 kV 电网中接地电流大于 30 A,20 kV 及以上电网中接地电流大于 10 A 时),则应采取中性点经消弧线圈接地的运行方式。110 kV 及以上的系统 and 380/220 V 的低压配电系统,则一般采取中性点直接接地的运行方式。

电力系统中性点不同的运行方式,对电力系统的运行特别是在发生单相接地时有明显的影响,因此有必要予以讨论。

二、中性点不接地的电力系统

图 1-6 是中性点不接地系统在正常运行时的电路图和向量图。

由于任意两个导体隔以绝缘介质时,就形成电容,因此三相交流电力系统中的相与相之间及相与地之间都存在着一定的电容。为了讨论问题简化起见,我们在这里假设图 1-6 a 所示的三相系统是对称的,而且把相与地之间的分布电容都用集中电容 C 来表示,同时未考虑相间电容。

系统正常运行时,三个相的相电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 是对称的,三个相的对地电容电流 i_{C0} 也是平衡的。因此三个相的电容电流之和为零,没有电流在地中流动。每个相对地的电压,就等于其相电压。

系统发生一相接地时,故障相对地的电压为零,而其他两完好相对地的电压则升高到相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,即升高到线电压。如图 1-7 a 所示,假设 C 相完全接地时,它对地的电压为零,可认为在接地处得到一个与正常时相电压 $\dot{U}_C$ 大小相等、方向相反的电压 $-\dot{U}_C$ 。因此 C

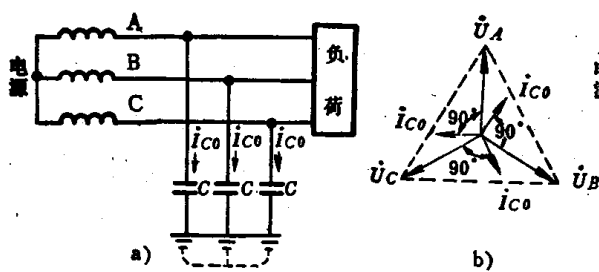


图1-6 正常运行时的中性点不接地系统
a) 电路 b) 向量图

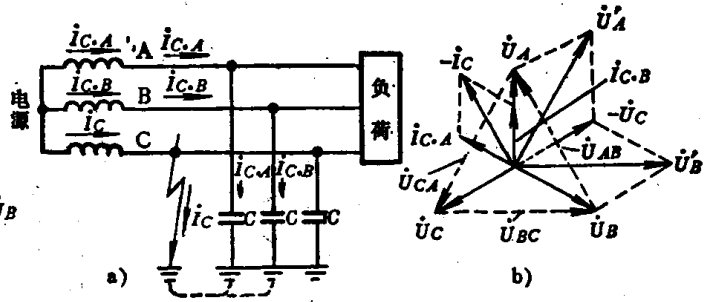


图1-7 一相接地时的中性点不接地系统
a) 电路 b) 向量图

相接地时, 各相对地的电压 $\dot{U}'_A$ 、 $\dot{U}'_B$ 、 $\dot{U}'_C$ 应分别为原来正常时各相对地电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 与 $-\dot{U}_C$ 的向量和, 即

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_A - \dot{U}_C = \dot{U}_{AC}$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC}$$

$$\dot{U}'_C = \dot{U}_C + (-\dot{U}_C) = 0$$

从图 1-7 b 的向量图可以看出, $\dot{U}'_A$ 与 $\dot{U}'_B$ 之间的相位差角为 60° , $U'_A = U'_B = \sqrt{3}U_\phi$ 。

由于 C 相接地时, A、B 两相对地的电压都增大到 $\sqrt{3}$ 倍, 因此 A、B 两相的对地电容电流也都增大到 $\sqrt{3}$ 倍, 即 $I_{C-A} = \sqrt{3}I_{C0}$, $I_{C-B} = \sqrt{3}I_{C0}$ 。而 C 相的对地电容电流是零, 因为 C 相对地的电容被短路了。

按一般习惯, 将从电源到负荷的方向取作各相电流的正方向, 则如图 1-7 a 所示, 得

$$I_C = -(I_{C-A} + I_{C-B})$$

从图 1-7 b 的向量图可知: $I_C = \sqrt{3}I_{C-A}$; 而 $I_{C-A} = \sqrt{3}I_{C0}$, 所以

$$I_C = 3I_{C0} \quad (1-1)$$

上式说明: 一相接地的电容电流是正常运行时每相对地电容电流的 3 倍。

正常运行时每相对地电容电流 $I_{C0} = U_\phi / x_c$; 每相对地的容抗 $x_c = 1 / \omega C$ 。因此一相接地的电容电流为:

$$I_C = 3U_\phi \omega C \quad (1-2)$$

上式说明: 一相接地的电容电流与相电压、频率及相对地间的电容有关, 而这电容则与电网的结构 (电缆或架空线路) 及长度有关。

在实际设计中, 常采用下列经验公式计算一相接地的电容电流:

$$I_C = \frac{U(l_K + 35l_L)}{350} \text{ (A)} \quad (1-3)$$

式中 U ——线路的线电压 (kV);

l_K ——同一电压 U 的具有电的联系的架空线路总长度 (km);

l_L ——同一电压 U 的具有电的联系的电缆线路总长度 (km)。

在不完全接地 (即经过一些接触电阻接地) 时, 故障相对地的电压将大于零而小于相电压, 而其他两完好相对地的电压则大于相电压而小于线电压, 接地电容电流也比较小。

⊖ 角注 ϕ 是“相”、“相位”的国际通用符号。 U_ϕ 表示“相电压”。这里 $U_\phi = U_A = U_B = U_C$ 。

必须指出：当中性点不接地的系统中发生一相接地时，三相用电设备的工作并未受到影响，因为系统的线电压的量值仍维持不变，且仍具有 120° 的相位差，这从图 1-7 b 可以看出。

上面所说的系统一相接地时另两相对地电压将升高到 $\sqrt{3}$ 倍，实际上对线路绝缘没有多大危险，因为中性点不接地系统中，相与地间的绝缘就是按线电压考虑的。但是这种线路还是不允许在一相接地的情况下长期运行，因为如果另一相又发生接地时，就形成两相接地短路，要产生很大的短路电流，可能严重地损坏线路设备。因此在中性点不接地的系统中，应该装设专门的接地保护，在发生一相接地时，给予报警信号，以提醒值班人员注意，及时处理。

按我国有关规程规定：中性点不接地的系统发生一相接地故障时，允许暂时继续运行两小时。运行维修人员应争取在两小时内查出接地故障，予以检修；如有备用线路，就应将负荷转移到备用线路上去。在经过两小时后接地故障尚未消除时，就应该切除此故障线路。

三、中性点直接接地的电力系统

图 1-8 是中性点直接接地系统在一相接地时的情形。这种系统的一相接地，就造成单相短路，用符号 $d^{(1)}\ominus$ 表示。单相短路电流 $I_d^{(1)}$ 比线路正常负荷电流大得多，通常要使线路的熔断器熔断，或继电保护装置动作，使开关跳闸，将短路部分切除，使系统的其他部分恢复正常运行。

中性点直接接地的系统在发生一相接地时，其他两相对地的电压并不增大，这与中性点不接地的系统不同。因此这类系统中的电气设备的绝缘只需按相电压考虑，而无需按线电压考虑。这对 110 kV 及以上的超高压系统，是很有经济技术价值的。因为高压电器特别是超高压电器的绝缘问题，是影响其设计和制造的关键问题。绝缘要求的降低，实际就降低了高压电器的造价，同时改善了高压电器的性能，所以超高压系统一般都采取中性点直接接地的方式。

对低压系统来说，中性点接地和中性点不接地，对人身安全是有差别的。中性点不接地系统在发生一相接地故障时，人接触其他两完好相中的任一相线，感受的电压就比中性点直接接地系统在同样故障下的电压高 73% 以上，比较危险。所以低压 380/220 V 系统，其中性点是采取直接接地的。但中性点不接地系统，人接触一相时，流过人体的电流仅是接地电容

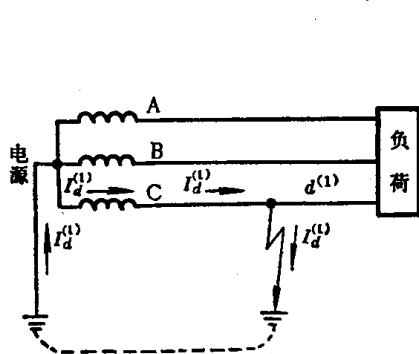


图1-8 中性点直接接地系统

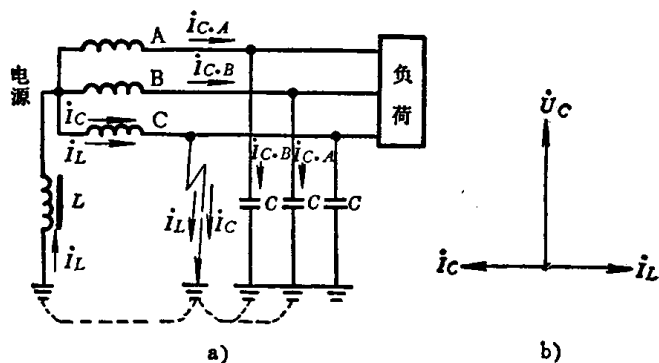


图1-9 中性点经消弧线圈接地的系统

a) 电路 b) 向量图

$\ominus$ d 是“短路”(duanlu)的汉语拼音缩写；右上角 (1) 表示“单相”。

电流,从这方面来说,其危险性又较小。所以有些要求安全条件较高的场所(如井下),其低压220/127V系统又采取中性点不接地的方式。

四、中性点经消弧线圈接地的接地系统

图1-9是中性点经消弧线圈接地的系统在一相接地时的情形。

消弧线圈实际上就是铁芯线圈,它的电阻很小,感抗很大。

当系统发生一相接地时,通过接地点的电流是接地电容电流 I_c 与流过消弧线圈的电感电流 I_L 之和,如图1-9a所示。由于这两个电流互差 180° 相位差,所以它们在接地点互相补偿,如图1-9b所示。如果 $I_L = I_c$,则接地点没有电流流过,因而不会发生电弧。当然,流过消弧线圈的电流 I_L 在实际上不太可能完全补偿接地电容电流 I_c ,但可以使补偿后剩余的电流达到最小值,从而使接地点不致产生断续电弧。如果接地点有断续电弧产生,就可能使线路发生电压谐振现象,因为一般的线路,既有电感,又有电容,单相接地时形成一个电压谐振电路。电压谐振可使线路上出现危险的过电压,可能造成整个线路上绝缘薄弱地点的绝缘击穿。断续电弧所引起的过电压危险性,是随着线路电压的升高而增大的。电力系统的中性点经消弧线圈接地后,如前所述,能够消除接地点的断续电弧,因而能够避免出现过电压,所以35kV系统多采取中性点经消弧线圈接地的运行方式。

在中性点经消弧线圈接地的三相系统中,与中性点不接地的系统一样,允许在发生一相接地故障时暂时继续运行两小时,在此时间内,应积极查找故障;在暂时无法消除故障时,应设法将负荷转移到备用线路上去。

中性点经消弧线圈接地的系统,在一相接地时,其他两相对地的电压要升高到 $\sqrt{3}$ 倍,即升高到线电压,与中性点不接地的系统情况相同。

中性点不接地的系统和中性点经消弧线圈接地的系统,通常叫做小接地电流系统。而中性点直接接地的系统,则叫做大接地电流系统。

复习思考题

- 1-1 工业电气自动化专业为什么要开设工厂供电课程?工厂供电在工业生产中有何作用?
- 1-2 为什么变压器的额定一次电压,有的高于相应的电网额定电压5%,有的等于相应的电网额定电压?
- 1-3 为什么变压器的额定二次电压,有的高于相应的电网额定电压5%,有的高于相应的电网额定电压10%?
- 1-4 中性点不接地的三相系统在发生一相接地时,为什么允许短时运行,但又不允许长期运行?

作业题

1-1 试确定图1-10所示供电系统中电力变压器1B的一、二次线圈的额定电压和送电线路1-1、1-2的额定电压。

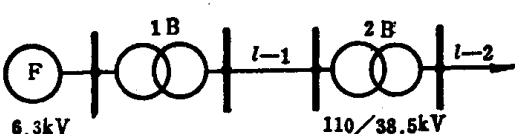


图1-10 作业1-1的图

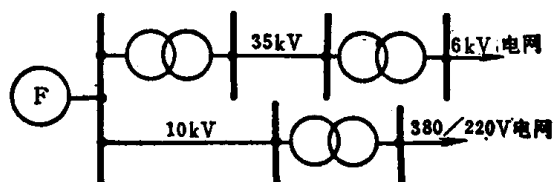


图1-11 作业1-2的图

第二章 工厂的电力负荷和电能节约

§ 2-1 供电的要求及负荷的分级

一、供电的基本要求

供电，就是对电力用户即电力负荷供应电能。

供电工作与其他动力工作一样，应达到以下基本要求：

(一) 安全：在电能的供应、分配和使用中，不应发生人身事故和设备事故。

(二) 可靠：应满足电力负荷对供电可靠性的要求。

(三) 经济：供电系统的投资少，运行费用低，并尽量减少有色金属消耗量。

(四) 合理：应合理地处理局部和全局、当前和长远的关系，既照顾局部和当前的利益，又要有全局观点，能顾全大局，适应发展。例如计划供电和节约用电问题，就不能只考虑一个单位或一个工厂的局部利益，更要有全局观点。

供电工作要能很好地为电力负荷服务，达到上述“安全、可靠、经济、合理”的要求，就必须了解电力负荷的性质及其对供电可靠性的要求。

二、电力负荷的分级

电力负荷按其重要性及其中断供电在政治上和经济上所造成的损失或影响的程度，分为下列三级：

(一) 一级负荷：

1. 中断供电将造成人身伤亡者；

2. 中断供电将在政治、经济上造成重大损失者，如重大设备损坏、重大产品报废、用重要原料生产的产品大量报废、国民经济中重点企业的连续生产过程被打乱需要长时间才能恢复等；

3. 中断供电将影响有重大政治、经济意义的用电单位的正常工作者，如重要交通枢纽、重要通信枢纽、重要宾馆、经常用于国际活动的大量人员集中的公共场所等用电单位中的重要电力负荷。

(二) 二级负荷：

1. 中断供电将在政治、经济上造成较大损失者，如主要设备损坏、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；

2. 中断供电将影响重要用电单位的正常工作者，如交通枢纽、通信枢纽等用电单位中的主要电力负荷，以及中断供电将造成大量人员集中的大型影剧院、大型体育馆、大型商店等重要公共场所秩序混乱者。

(三) 三级负荷：

一般电力负荷，不属于一级、二级负荷者。

三、各级负荷的供电要求

一级负荷，要求供电系统无论是正常运行还是发生事故时，都应保证其连续供电。因此对一级负荷，应由两个独立的电源供电，并按生产的需要和允许停电的时间，采用双电源互相自动地或手动地切换的接线，或采用双电源分组同时供电的接线。如果一级负荷不大时，则可采用蓄电池、自备发电机等设备，或者从邻近的单位取得第二个独立电源。这里所说的两个“独立电源”是指其中任一个电源发生故障或停电检修时，都不致影响另一个电源继续供电。例如图 1-1 中的两条电源进线 1-1 和 1-2 是由两个电源点或一个电源点的两段母线分别供电，因此这个工厂配电所的接线是适用于一级负荷的。在这种情况下下的 2 号车间变电所，又有低压联络线作备用，所以也适用于一级负荷。

二级负荷，应由双回路供电。当采用双回路有困难时（如在边远地区），则允许采用一条 6 kV 及以上专用架空线供电。

三级负荷，无特殊的供电要求。

电力负荷按重要程度分级的目的，在于正确地反映电力负荷对供电可靠性的要求，以便根据国家电力供应的实际情况，恰当地选择供电方案和运行方式，满足多快好省地建设社会主义的需要。这里必须指出：负荷分级只是相对的，同当时当地电力供应的情况密切相关，而且要从全局出发，考虑到政治的影响。例如某些担负援外任务的工厂，若停止供电，经济损失不一定很大，但影响援外任务的完成，有损我国的声誉，因此这类工厂应列为二级甚至一级负荷。又如有些中小型机械厂，若停止供电，从本厂来看可能造成大量减产，但从一个地区来看，这种减产算不得“大量”，因此这类工厂一般可列为三级负荷。

§ 2-2 三相用电设备组计算负荷的确定

一、概述

为了正确地选择供电系统中的各组成元件（包括电力变压器、开关设备及导线电缆等），有必要进行电力负荷的统计计算，以确定供电系统中各个环节的电力负荷的大小。

按发热条件选择供电系统中各组成元件而需要计算的负荷功率或负荷电流，称为计算负荷。有功计算负荷就写作 P_{js} 。根据计算负荷选择的电气设备或导线电缆，如果以计算负荷长期运行时，其发热温度就不会超过允许值。通常采用负荷最大的半小时（30min $\ominus$ ）平均值来作计算负荷，这个计算负荷又叫半小时最大负荷，因此 P_{js} 也可以写作 P_{30} 。

供电系统在运行中也可能出现短时（1~2s $\ominus$ ）最大负荷，如电动机的起动电流等，但从发热观点考虑，不能算作计算负荷。这种短时最大负荷叫做尖峰负荷。尖峰负荷电流写作 I_{jf} 。

计算负荷是供电设计计算的基本依据。计算负荷确定得是否合理，直接关系到电器和导线的选择是否合理。如计算负荷确定过大，将使电器和导线选得过大，造成投资和有色金属的浪费；如计算负荷确定过小，又将使电器和导线运行时产生过热，引起绝缘过早老化，甚至烧毁，以致发生事故，给国家造成很大的损失。由此可见，正确地确定计算负荷具有很大的意义。

$\ominus$ min 是国际单位制中时间“分”（英文 minute）的代号。

$\ominus$ s 是国际单位制中时间“秒”（英文 second）的代号。

但是, 由于影响电力负荷变化的因素较多, 所以确定计算负荷不可能具有高度的准确性。我们只有加强调查研究, 才能使负荷计算尽可能地接近实际。此外, 在确定计算负荷时, 要根据情况留有一定的余地, 以适应生产发展的要求。

我们这里只介绍目前供电设计中普遍采用的两种确定计算负荷的方法——需要系数法和二项式系数法。

二、按需要系数法确定计算负荷

(一) 基本公式:

用电设备组的计算负荷, 是指用电设备组从配电线路上取用的半小时最大负荷。而用电设备组的那么多设备实际上不一定都同时运行, 运行的那些设备又不太可能都同时满负荷, 因此用电设备组的计算功率一般都小于设备组的总容量。

按需要系数法确定三相用电设备组的有功计算负荷 P_{js} 时, 就是将三相用电设备的设备容量乘以一个需要系数, 即:

$$P_{js} = K_x \cdot P_s (\text{kW}) \quad (2-1)$$

式中 P_s ——设备总容量 (不计备用设备的容量), kW;

K_x ——需要系数, 它与用电设备的工作性质、设备台数、设备效率和线路损耗等因素有关。

附录表 4 列出了各种用电设备组的需要系数值, 供参考。

必须注意: 附录表 4 中的需要系数值是设备台数较多时的数据, 因此一般比较低, 例如机床组的需要系数平均只有 0.2 左右。如果设备台数较少时, 则需要系数值就应适当地取大。

如果只有一两台设备, 则需要系数可取为 1, 即有功计算负荷可认为等于设备容量。相应地, 在设备台数较少时, 功率因数也应当适当地取大。

利用公式 (2-1) 确定了三相用电设备组有功计算负荷 P_{js} 以后, 必要时可按下式确定无功计算负荷 Q_{js} :

$$Q_{js} = P_{js} \cdot \tan \varphi (\text{kVAR}) \quad (2-2)$$

可按下式确定视在计算负荷 S_{js} :

$$S_{js} = \sqrt{P_{js}^2 + Q_{js}^2} (\text{kVA}) \quad (2-3)$$

或
$$S_{js} = \frac{P_{js}}{\cos \varphi} (\text{kVA}) \quad (2-4)$$

可按下式确定计算电流 I_{js} :

$$I_{js} = \frac{S_{js}}{\sqrt{3} U_e} (\text{A}) \quad (2-5)$$

或
$$I_{js} = \frac{P_{js}}{\sqrt{3} U_e \cdot \cos \varphi} (\text{A}) \quad (2-6)$$

式中 U_e ——三相用电设备的额定电压 (kV);

$\cos \varphi$ 和 $\tan \varphi$ ——用电设备组的平均功率因数及对应的正切值 (参看附录表 4)。

例 2-1 已知一小批生产的冷加工机床组, 拥有电压为 380 V 的三相交流电动机 7kW——3 台, 4.5kW——8 台, 2.8kW——17 台, 1.7kW——10 台。试求其计算负荷。

解 此机床组电动机的总容量为:

$$P_s = 7 \times 3 + 4.5 \times 8 + 2.8 \times 17 + 1.7 \times 10 = 122 \text{ kW}$$

查附录表 4 得 $K_x = 0.16 \sim 0.2$, 取 $K_x = 0.2$, 又 $\cos \varphi = 0.5$, $\tan \varphi = 1.73$ 。

因此可由式 (2-1) 求得有功计算负荷:

$$P_{js} = K_x \cdot P_s = 0.2 \times 122 = 24.4 \text{ kW}$$

由式 (2-2) 求得无功计算负荷:

$$Q_{js} = P_{js} \cdot \tan \varphi = 24.4 \times 1.73 = 42.2 \text{ kVAR}$$

由式 (2-4) 求得视在计算负荷:

$$S_{js} = \frac{P_{js}}{\cos \varphi} = \frac{24.4}{0.5} = 48.8 \text{ kVA}$$

由式 (2-5) 求得计算电流:

$$I_{js} = \frac{S_{js}}{\sqrt{3} U_n} = \frac{48.8}{\sqrt{3} \times 0.38} = 74.5 \text{ A}$$

(二) 设备容量 P_s 的计算:

公式 (2-1) 中的设备容量 P_s , 不包括备用设备容量在内, 且与用电设备组的工作性质有关。

1. 对于一般长期和短时工作制的用电设备组, 包括一般电动机和电灯, 设备容量就是其铭牌容量 (额定容量 P_n)。

2. 对于反复短时工作制的用电设备组, 设备容量就是将设备在某一暂载率下的铭牌容量 (额定容量 P_n 或 S_n) 统一换算到一个新的暂载率下的功率。其中“暂载率”是在一个工作周期内工作时间 t 与工作周期 T (工作时间与停歇时间之和) 的比值, 用符号 ε 表示, 即 $\varepsilon = t/T$ 。

(1) 对电焊机组, 就要换算到 $\varepsilon = 100\%$, 因此 $\ominus$

$$P_s = \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{100}}} \cdot S_n \cdot \cos \varphi = \sqrt{\varepsilon_n} \cdot S_n \cdot \cos \varphi \quad (2-7)$$

式中 ε_n ——与 S_n 相对应的暂载率 (计算中用小数);

ε_{100} ——其值为 100% 的暂载率 (计算中用 1.00);

$\cos \varphi$ ——满载 (S_n) 时的功率因数。

(2) 对吊车电动机组, 就要换算到 $\varepsilon = 25\%$, 因此 $\ominus$

$$P_s = \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{25}}} \cdot P_n = 2 \sqrt{\varepsilon_n} \cdot P_n \quad (2-8)$$

式中 ε_n ——与 P_n 相对应的暂载率 (计算中用小数);

ε_{25} ——其值为 25% 的暂载率 (计算中用 0.25)。

例 2-2 有一台吊车电动机, $\varepsilon = 15\%$ 时的铭牌容量为 18 kW, $\cos \varphi = 0.7$, 采用 380 V 三相供电。试计算其计算电流。

解 按式 (2-8), 将容量换算到 $\varepsilon = 25\%$, 因此求得设备容量:

$$P_s = 2 \sqrt{\varepsilon_n} \cdot P_n = 2 \times \sqrt{0.15} \times 18 = 14 \text{ kW}$$

因只有 1 台, 可认为 $P_{js} = P_s = 14 \text{ kW}$ 。

$\ominus$ 式 (2-7) 和式 (2-8) 都是按同一周期等效发热条件进行换算的。由于热量 $Q = 0.24 I^2 R t$, 故 $I^2 \propto 1/t$, 或 $I \propto 1/\sqrt{t}$ 。而 $P \propto I$, $\varepsilon \propto t$, 所以 $P \propto 1/\sqrt{\varepsilon}$ 。由此不难推导出上述两式。[注: $\propto$ 是数学上的“正比”符号。]