



高职高专电气工程类专业“十二五”规划系列教材



供配电技术

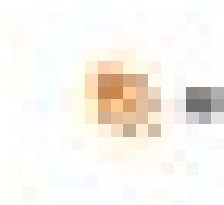
GONGPEIDIAN JISHU

■ 主编 蒋治国 马爱芳
■ 主审 倪依纯



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



中国电力出版社 供配电技术 第二分册



供配电技术

中国电力出版社

中国电力出版社 供配电技术 第二分册



高职高专电气工程类专业“十二五”规划系列教材

供配电技术

主 编	蒋治国	马爱芳			
副主编	程天龙	熊同强	陈 剑	夏春荣	
参 编	张 励	许亚宾	董 航		

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书介绍了企业和事业单位供电系统的基本知识和理论、计算方法、运行和管理。全书共11章,分别介绍了供电系统和电力系统的基本知识,内部供电系统,电力负荷计算及无功功率补偿,三相短路分析、短路电流计算及短路的效应,高低压电气设备的选择与校验,电力线路,供电系统的继电保护,变电所二次回路及自动装置,电气安全、防雷和接地,电气照明,供电系统的运行和管理等。在编写时注重追踪时代发展,力求反映供电领域的新技术和新产品。本书联系行业特点,循序渐进,在章节中穿插项目式教学思想,每章都配以丰富的例题,并附有小结、思考题和习题,便于自学和复习。

本书可作为高职高专院校电气工程、电气自动化、楼宇自动化、供用电技术、机电一体化等专业学生的教材,也可作为供电系统的运行与管理人员及工程技术人员的参考用书。

为配合教学,本书将同步开发多媒体教学课件和教学交流网站,并积极探索供电虚拟仿真学习系统的实现。

图书在版编目(CIP)数据

供配电技术/蒋治国 马爱芳 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2012.9
ISBN 978-7-5609-8129-1

I. 供… II. ①蒋… ②马… III. ①供电-高等职业教育-教材 ②配电系统-高等职业教育-教材 IV. TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 132137 号

供配电技术

蒋治国 马爱芳 主编

策划编辑: 谢燕群

责任编辑: 江 津

封面设计: 范翠璇

责任校对: 代晓莺

责任监印: 周治超

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编: 430074 电话: (027)81321915

录 排: 武汉佳年华科技有限公司

印 刷: 武汉首壹印务有限公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 24.75

字 数: 553 千字

版 次: 2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 39.80 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

“供配电技术”一直是电气工程类专业的必修课。近年来随着计算机、微电子技术、信息技术的快速发展,微机化、电子信息化、以弱控强、强弱结合的微机控制系统控制技术、远程控制技术已经成为电气工程等领域的科技人员必须掌握的重要知识。作为传统强电类课程的供配电技术也呈现出以强为主,强弱结合的趋势。

我们以往的课程,其基本内容以强电设计为核心,辅以继电控制等内容,学生虽能掌握供配电系统的基本知识,但课程知识落后,与实践脱节较多。本书力求追踪行业综合技术、总结教学实践成果,提高学生的实践能力、创新能力,旨在突出:强电与弱电紧密结合、以弱控强;硬件与软件紧密结合,内容涉及行业各个方面;紧跟国家标准和技术的发展,系统实用;内容编排上选择供用电行业、设计单位及企事业单位动力及拖动控制部门用人必备的内容。

本书在编写过程中力求做到重点突出,实践性强,章后附有小结、思考题和习题;在叙述上力求深入浅出,结合例题进行讲解,让学生便于学习和理解。通过学习,学生能了解供配电行业,掌握供配电系统的知识和理论,初步具备供配电系统的运行、管理和工程设计能力,以及分析和解决问题的能力。

本书旨在培养学生从事企业供配电系统和变电所设计、运行、维护与检修工作所必需的理论和职业技能,让学生了解供配电系统安全操作规程,能够承担变电所更新改造,供配电系统安装,接线与调试,供配电系统日常的运行维护及故障分析与处理等工作任务。

本书计划讲授 64~90 学时,各校可根据相关培养方案的教学要求做相应增减,有些章节和内容可通过自学、参观、实习或课程设计完成。

具体职业能力目标:

- * 能识读供配电系统电气安装图;
- * 会选择导线和电缆截面;
- * 能查阅电气工程手册获得相关信息;
- * 会计算线路上的电压损耗;
- * 会分析与处理常见线路故障;
- * 会选择电力变压器、高压开关柜及低压配电屏;
- * 会选择高、低压电气设备;
- * 能对变电所进行更新改造;
- * 能对供配电系统进行安装、接线与调试;
- * 能对供配电系统的故障进行诊断分析处理;
- * 能熟练使用各种仪器、仪表。

方法能力和社会能力目标:

- * 培养学生的沟通能力和团队协作精神;
- * 培养学生工作、学习的主动性;
- * 培养学生的创新能力;
- * 培养学生爱岗敬业的工作作风;
- * 培养学生的表达能力;
- * 培养学生自我发展的能力;
- * 培养学生的效率观念;
- * 培养学生的安全意识与环保意识。

本书由江苏联合职业技术学院蒋治国、湖北水利水电职业技术学院马爱芳任主编。全书共 11 章,其中第 1、2 章由江苏联合职业技术学院蒋治国编写,第 3 章由江苏省无锡交通高等职业技术学校许亚宾编写,第 4 章由长江工程职业技术学院程天龙编写,第 5 章由三峡电力职业学院熊同强编写,第 6 章由湖北水利水电职业技术学院陈剑编写,第 7 章由湖北水利水电职业技术学院张励编写,第 8 章由江苏联合职业技术学院夏春荣编写,第 9、10 章由湖北水利水电职业技术学院马爱芳编写,第 11 章由三峡电力职业学院董航编写,全书由蒋治国统稿。本书的编写得到众多单位和个人的大力帮助和支持,部分资料来源于网络,在此一并表示诚挚的谢意。

特别感谢江苏联合职业技术学院倪依纯担任本书主审,并提出了许多宝贵意见。

由于编者水平有限,书中难免有错漏之处,敬请同行、师生和读者批评指正(QQ 群:213877032),不胜感谢。

编 者

2012 年 7 月

目 录

第 1 章 供配电技术概述	(1)
1.1 供配电技术的基本知识	(1)
1.2 电力系统的额定电压	(8)
1.3 电力系统的中性点运行方式.....	(14)
1.4 电能的质量指标.....	(21)
1.5 电力系统和发电厂简介.....	(26)
小结	(31)
复习与思考题	(31)
第 2 章 企业内部供配电系统	(33)
2.1 企业内部供配电系统的概况.....	(33)
2.2 变电所的配置.....	(34)
2.3 变压器的类型及连接.....	(38)
2.4 变电所主要电气设备.....	(48)
2.5 变电所主接线.....	(81)
2.6 变电所的布置和结构.....	(91)
小结	(97)
复习与思考题	(98)
第 3 章 供配电系统负荷及其计算	(101)
3.1 供配电系统负荷的分级与负荷曲线	(101)
3.2 用电设备的设备容量	(107)
3.3 负荷计算的方法	(110)
3.4 功率损耗和电能损耗	(115)
3.5 用户负荷计算	(117)
3.6 尖峰电流的计算	(117)
3.7 功率因数和无功功率补偿	(118)
小结.....	(126)
复习与思考题.....	(126)
第 4 章 短路电流计算	(129)
4.1 短路概述	(129)
4.2 无限大容量供电系统三相短路分析	(132)
4.3 无限大容量供电系统三相短路电流的计算	(134)
4.4 两相短路和单相短路电流计算	(140)

4.5 短路电流的效应	(141)
小结	(146)
复习与思考题	(147)
第5章 电气设备的选择	(148)
5.1 电气设备选择的一般原则	(148)
5.2 高压开关电器的选择	(149)
5.3 互感器的选择	(153)
5.4 母线的选择	(154)
5.5 低压熔断器的选择	(155)
5.6 低压断路器过流脱扣器的选择和整定	(157)
小结	(161)
复习与思考题	(162)
第6章 电力线路	(163)
6.1 电力线路的接线方式	(163)
6.2 导线和电缆选择的一般原则	(167)
6.3 按允许载流量选择导线和电缆截面	(170)
6.4 按允许电压损失选择导线和电缆截面	(172)
6.5 按经济电流密度选择导线和电缆截面	(178)
6.6 电力线路的结构和敷设	(179)
小结	(193)
复习与思考题	(194)
第7章 供配电系统的继电保护	(196)
7.1 继电保护的基本知识	(196)
7.2 常用机电型继电保护装置	(202)
7.3 电力线路的继电保护	(203)
7.4 电力变压器的继电保护	(217)
7.5 高压电动机的继电保护	(229)
7.6 6~10 kV 电容器的继电保护	(232)
7.7 配电系统微机保护	(233)
小结	(239)
复习与思考题	(240)
第8章 变电所的二次回路和自动装置	(242)
8.1 二次回路概述	(242)
8.2 操作电源	(243)
8.3 高压断路器控制回路	(247)
8.4 电气测量仪表与绝缘监察装置	(254)
8.5 中央信号回路	(263)

8.6 二次回路安装接线图	(264)
8.7 自动重合闸装置和备用电源自动投入装置	(269)
8.8 变电所综合自动化	(276)
小结	(280)
复习与思考题	(280)
第9章 电气安全、防雷和接地	(282)
9.1 电气安全	(282)
9.2 过电压和防雷	(288)
9.3 电气装置的接地	(301)
小结	(314)
复习与思考题	(315)
第10章 电气照明	(317)
10.1 电气照明概述	(317)
10.2 常用照明光源和灯具	(323)
10.3 照度计算	(338)
10.4 照明供电系统	(344)
小结	(347)
复习与思考题	(348)
第11章 供配电系统的运行和管理	(350)
11.1 节约电能	(350)
11.2 电压偏差与调节	(356)
11.3 电压波动、闪变与抑制	(357)
11.4 谐波与抑制	(358)
11.5 变、配电所的运行和维护	(364)
11.6 电力线路的运行和维护	(365)
11.7 带电作业	(369)
小结	(370)
复习与思考题	(371)
附录	(372)
参考文献	(387)

第 1 章 供配电技术概述

1.1 供配电技术的基本知识

1.1.1 供配电技术的定义、要求

电能是现代人们生产和生活的重要能源,它属于二次能源。发电厂将一次能源(如煤、油、水、原子能等)转换成电能。电能的输送、分配简单经济,便于控制、调节和测量,易于转换为其他形式的能量(如机械能、光能、热能等)。因此,电能在现代化工农业生产及整个国民经济生活中得到广泛应用。让我们从身边的供电系统说起,思考两个问题:

(1) 人们使用的电从哪里来? 电力容量够不够?

(2) 如何保证安全用电?

在电气技术领域,通常将电分为强电和弱电两种。

一般 220V/50Hz 及以上的交流电称为强电,波形如图 1-1。

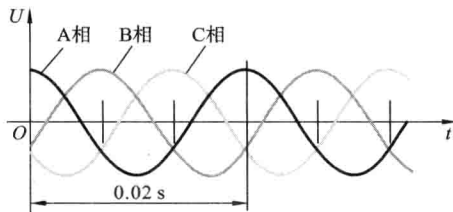


图 1-1 三相交流电波形图

弱电系统主要有两类:一类是国家规定的安全电压等级和控制电压等级低的电压,有交流与直流之分,如 24 V 直流控制电源、应急照明灯备用电源等;另一类是载有语音、图像、数据等信息的信息源,如电话、电视、计算机的信息等。

供电系统在传递电能(强电)时,需要二次电路、保护电路等弱电系统。随着供电技术的发展,电力载波通信等弱电系统已进入寻常百姓家。

供配电技术系统是电力系统的重要组成部分。所谓供配电技术,是指各类企事业单位(工厂)所需电能的供应和分配的技术,也称工厂供电的技术。

电能用户的类型很多,主要有工业用户、农业用户、商业用户和生活用电用户等,现代工厂是电能的主要用户。据统计,工厂用电量占全国发电量的 50% 以上。电能作为现代工业的主要能源具有明显的优点:电能既易于由其他形式的能量转换而来,也易于转换为其他形式的能量;电能的输送和分配既简单经济,又便于控制、调节和

测量,有利于实现生产过程的自动化。现代社会的信息技术和其他高新技术都是在电能应用的基础之上建立的,因此电能在现代工业生产及整个国民经济生活中应用极为广泛。

供配电技术对现代工业的重要性不仅仅在于电能在产品成本中的比重,而且还在于安全、可靠、优质的电能供应可大大地提高劳动生产率、提高产品的质量、降低生产成本、减轻工人的劳动强度、改善工人的劳动条件等。因此,提高供配电技术对工厂来说显得意义重大。

要使电能更好地服务于现代工业生产和国民经济建设,作为主要电能用户的工厂必须做好工厂的供电工作,满足以下基本要求。

(1) 安全:在电能的供应、分配和使用中,必须保证人身安全和设备安全,不应发生人身事故和设备事故。

(2) 可靠:满足电能用户对供电连续性的要求,不应出现违背用户意愿的中断供电。

(3) 优质:满足电能用户对电压和频率等质量的要求。

(4) 经济:供电系统的投资少,运行费用低,并尽可能采用新技术和其他能源的综合利用。

在供电过程中,要合理地处理局部与全局、当前与长远的关系,既考虑局部和当前的利益,又照顾到全局和长远的发展,在目前我国电能还比较紧缺的条件下,这一点就显得尤为重要。

在现实生产生活中有许多用电设备(称为负载),按其用途分:动力用电设备(传动)、照明用电设备(采光)、工艺用电设备(电解、冶炼、电焊、热处理)、电热用电设备(加温、取暖、烘干、空调)、试验用电设备(试验、校验、检测)和控制计算设备(控制器、计算机)等。

供配电即电能的供应和分配。工厂、企业及人们生活所需要的电能,绝大多数是由公共电力系统供给的。用户用电设备所消耗的电能是电力系统中发电机生产供给的。发电厂多数建造在煤、水资源丰富的地方。电能用户是分散的,且往往远离发电厂,这样就出现了一个电能输送系统(输电);为了实现电能的经济传输和满足用电设备对工作电压的要求,又出现了一个变换电压系统(变电);将电能送到工矿企业区之后,还存在对用户合理分配电能的系统(配电)。

(1) 发电厂是生产电能的企业。它将非电形式的能量转化成电能,即利用其他能量如化学能、水位能、机械能、热能、风能、核能等变换成电能。

(2) 变配电所。变电所的任务是接受电能、变换电压和分配电能,即受电—变压—配电。

配电所的任务是接受电能和分配电能,但不改变电压,即受电—配电。

变电所可分为升压变电所和降压变电所两大类。升压变电所一般建在发电厂,主要任务是将低电压变换为高电压;降压变电所一般建在靠近负荷中心的地点,主要任务是将高电压变换为一个合理电压等级的电压。降压变电所根据其在电力系统中

的地位和作用,可分为枢纽变电站、地区变电所和工业企业变电所等。

有些工厂把变电所和配电所合建在一起,构成所谓的变配电所。这样做可以节约投资,方便运行管理和维护,但这种方式必须满足一定的条件才能使用。

(3) 电力线路。电力线路的作用是输送电能,并把发电厂、变配电所和电能用户连接起来。

水力发电厂须建在水力资源丰富的地方,火力发电厂一般也建在燃料产地,即所谓的“坑口电站”,因此,发电厂一般距电能用户均较远,需要多种不同电压等级的电力线路,将发电厂生产的电能源源不断地输送到各级电能用户。通常把电压在35kV及以上的高压电线称为送电线路,而把10kV及以下的电力线路称为配电线路。电力线路按其传输电流的种类可分为交流线路和直流线路;按其结构及敷设方式又可分为架空线路、电缆线路及户内配电线路。

(4) 电能用户。电能用户又称电力负荷。在电力系统中,一切消费电能的用电设备均称为电能用户。用电设备分别将电能转换为机械能、热能和光能等不同形式的适于生产、生活需要的能量。

电力系统由发电厂、电力网及电能用户组成。它们之间的相互关系如图1-2所示

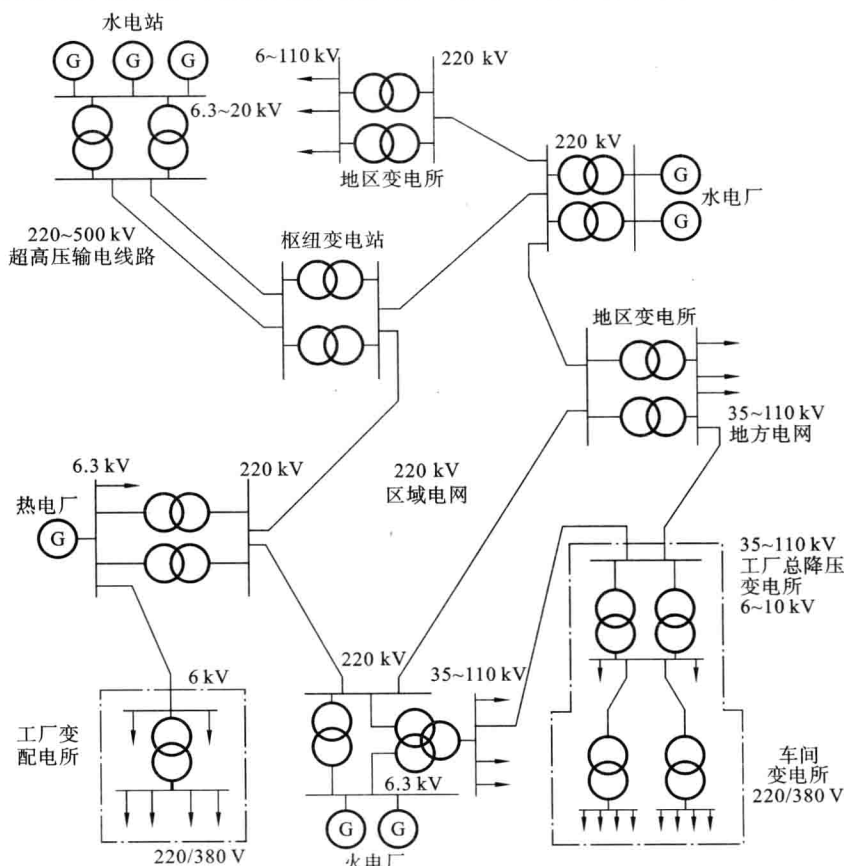


图 1-2 电力系统示意图

示。由于三相交流电力装置中各相连接方法相同,所接的电气设备也一样,因此,主接线图通常以单线图形式出现,表示电气设备的连接方式。

从发电厂发出的电能,除了供给附近用户(工业企业用户)直接配用电之外,一般都要经过升压变电所将发电机发出的电压升高,采用高电压进行电力传输。输电线路的电压越高,则输送相同功率电能的距离越远,同样的导线截面可输送的功率就越大。输送功率一定时,提高输电电压就减小了输电线路中的电流,从而减少了线路上的电能损耗和电压损失。表 1-1 所示为输电电压与输送距离及输送功率的大致关系。

表 1-1 各级电压电力线路合理的输送功率和距离

线路电压/kV	线路结构	输送功率	输送距离/km
0.22	架空线路	≤ 50 kW	≤ 0.15
0.22	电缆线路	≤ 100 kW	≤ 0.2
0.38	架空线路	≤ 100 kW	≤ 0.25
0.38	电缆线路	≤ 175 kW	≤ 0.35
6	架空线路	≤ 2000 kW	3~10
6	电缆线路	≤ 3000 kW	≤ 8
10	架空线路	≤ 3000 kW	5~15
10	电缆线路	≤ 5000 kW	≤ 10
35	架空线路	2000~15000 kW	20~50
60	架空线路	3500~30000 kW	30~100
110	架空线路	10000~50000 kW	50~150
220	架空线路	100~500 MW	200~300
330	架空线路	200~1000 MW	200~600
500	架空线路	1000~1500 MW	300~1000
750	架空线路	>150 万 kW	>1000
1000	架空线路	>200 万 kW	>1000

由于用户用电设备的额定电压一般在 10 kV 以下,例如,目前企业中生产用的高压电动机的额定电压有 6 kV 和 10 kV 两种,低压电动机多用额定电压 380 V 及以下电压,因此,一般在工业集中的地区都建立地区降压变电所,将 110~220 kV 电压降为 35~60 kV 电压,然后将电能输送到较远的工业企业用户的总降压变电所,如变电所附近有工业企业,亦允许部分直接降为 6~10 kV。

对于用电量较大的企业,如大型矿山、冶金联合企业、铝厂及大型冶炼厂等,则采用 110 kV(220 kV)电压直接对企业送电。这对于减少网络电能损耗和电压损失有十分重大的意义。

1.1.2 供配电系统概述

供配电系统既复杂又重要,其主要特点是供电范围广,负荷类型多且操作频繁,

厂房环境(建筑物、管道、道路、高温及尘埃等)复杂,低压线路较长等。因此,选择供电方式时,应力求简单,供电可靠和经济,线路运行安全和方便,以及适应周围环境。运行经验表明,供电系统如果接线复杂,不仅会增加投资,使继电保护和自动装置配合困难,维护不方便,而且会因串联电路元件故障而产生的事故也增多,处理事故和恢复供电的操作也会更复杂。

对于一般中小型工厂的供电系统而言,虽然其具体形式多样,但电源进线电压一般是 10 kV 或 35 kV,其常用的形式可以归结为以下几种。

(1) 工厂从公共电网取得电源,电能先经高压配电所集中,再由高压配电线路将电能分配到各车间变电所,车间变电所将高压电能转换为用电设备所需要的低压电能(如 220/380V),如图 1-3 所示。在同一电压等级连接的铜排或铝排称为母线,大都采用矩形或圆形截面的裸导线或绞线。母线的作用是汇集、分配和传送电能,图 1-3 所示水平方向线就是母线。

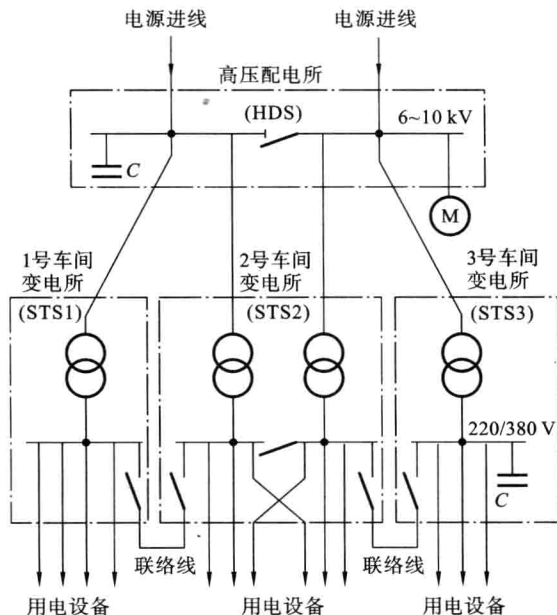


图 1-3 具有高压配电所的供电系统

(2) 对于大型工厂或电源进线电压在 35 kV 及以上的中型工厂,电能一般要经过两次降压。电能首先经工厂总降压变电所降压(其中装有较大容量的电力变压器,将 35 kV 及以上的电压降为 6~10 kV 的配电电压),然后通过高压配电线路送到各车间变电所,经过再次降压供电给用电设备,如图 1-4 所示。

(3) 小型工厂可以只装设一个降压变电所,将 6~10 kV 的电源降为用电设备所需的降为 220/380V 低压电源,如图 1-5 所示。

(4) 35 kV 进线的工厂可以采用高压深入负荷中心的直配方式。即将 35 kV 的线路直接引入靠近负荷中心的车间变电所,只经一次降压。这样可以省去一级中间

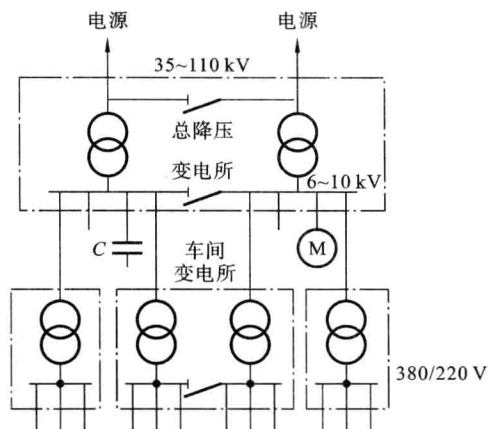


图 1-4 采用两次降压的供配电系统简图

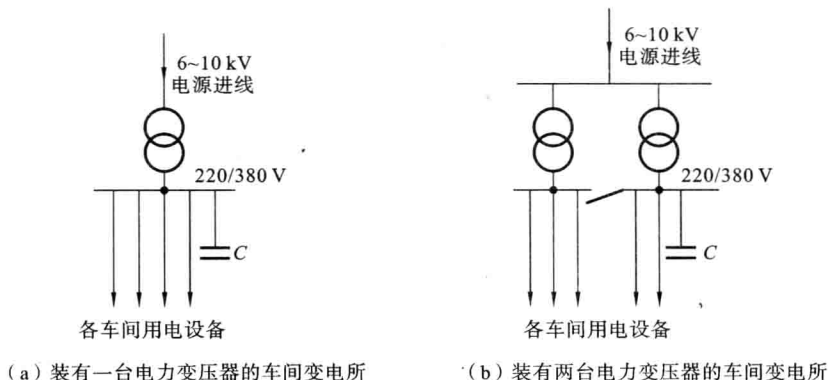


图 1-5 有一个降压变电所的一次变压供配电系统

变压,从而简化供电系统的接线,降低电压损耗和电能损失,节约有色金属,提高供电质量。但这种供电方式要求厂区必须有能满足这种条件的“安全走廊”,否则不宜采用,以确保安全,如图 1-6 所示。

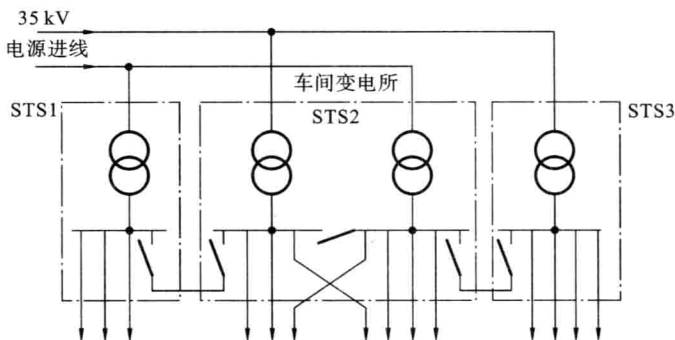


图 1-6 采用高压深入负荷中心直配方式的供配电系统简图

(5) 比较小的工厂可以采用由公共低压电网直接接线获得所需要的低压电

源,如图 1-7 所示。这样的工厂不需要建立变电所,而只需要设立一个低压配电室即可。

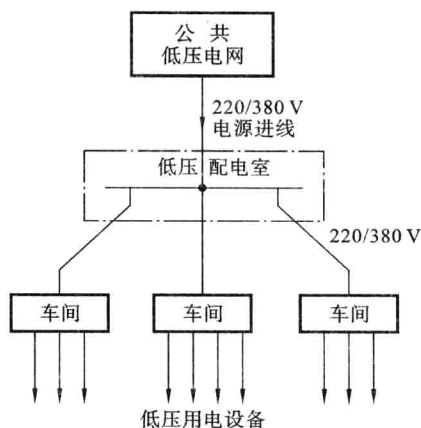


图 1-7 低压进线的小型供配电系统简图

1.1.3 工厂的自备电源

工厂的电源绝大多数是由公共电网供给的,但在下述情况下,工厂可建立自备发电厂:① 距离电网太远,由电网供电有困难;② 本厂生产及生活需要大量热能,建立自备热电厂既可以提供电能又可以提供热汽和热水;③ 本厂有大量重要负荷,需要独立备用电源,但从电网取得有困难;④ 本厂或地区有可供利用的能源。

对于重要负荷不多的工厂,作为解决第二电源的措施,发电机的原动力可用柴油机或其他小型动力机械。对于大型工厂,符合上述条件的一般建设热、电并供的热电厂,机组台数不超过两台,容量一般不超过 25000 kW/台。

对于有重要负荷的工厂,除了需要正常的供电电源外,还需要设置应急电源。常用的应急电源有柴油发电机组。对于特别重要的负荷如计算机系统,则除设柴油发电机组外,还须另设不停电电源,也称不间断电源(uninterrupted power supply, UPS)。在频率和电压稳定性要求较高的场合,宜采用稳频稳压式不停电电源。

1. 柴油发电机组

它利用柴油机作为原动力拖动发电机进行发电。

2. 交流不停电电源

它又称为交流不间断电源,主要由整流器(UR)、逆变器(UV)和蓄电池(GB)等三部分组成,如图 1-8 所示。

当公共电网正常工作时,交流电经晶闸管整流器转换为直流电,对蓄电池充电。当公共电网突然停电时,电子开关(静态开关)在保护装置的作用下自动进行切换,使 UPS 投入工作,蓄电池放电,经逆变器转换为交流电对重要负荷供电。

柴油发电机组能在公共电网停电 10~15 s 内启动并接上负荷,双电源供电切换

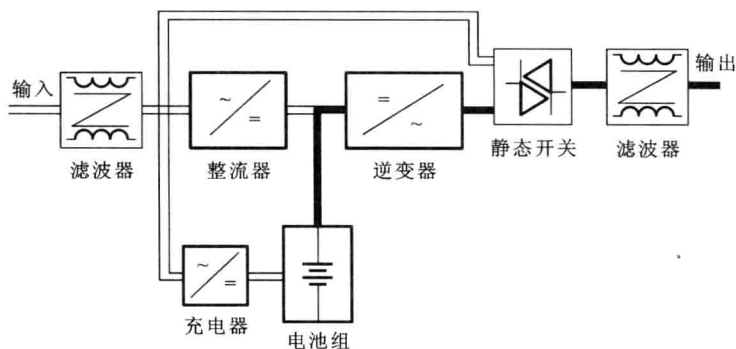


图 1-8 不停电电源组成示意图

要 0.6 s 左右,后备式 UPS 的切换时间为 2~10 ms,在线式 UPS 切换时间为 0。用户可以根据需要选择。

1.2 电力系统的额定电压

1. 额定电压的含义

为了使电力设备的生产实现标准化、系列化,各元件合理配套,电力系统中发电机、变压器、电力线路及各种设备等都是按规定的额定电压进行设计和制造的。所谓额定电压,就是指能使各类电气设备处在设计要求的额定或最佳运行状态工作的电压。

额定电压的确定与电源分布、负荷中心的位置、国家经济及科学技术的发展水平以及电力设备的制造水平等因素有关,应经过充分的论证,由国家主管部门确定。

电力系统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。电压和频率是衡量电力系统电能质量的两个基本参数。《全国供用电规则》规定,一般交流电力设备的额定频率为 50 Hz,此频率一般称为“工频”,频率偏差不得超过 ± 0.2 Hz,频率的调整主要依靠发电厂。企业供电系统提高电能质量主要是指提高供电电压质量。

如果设备的端电压与其额定电压有偏差,则设备的工作性能和使用寿命将受到影响,总的经济效果会下降。

(1) 感应电动机的端电压比其额定电压低 10% 时,由于电动机电磁转矩与其端电压平方成正比,因此实际转矩可能降低 20%,而负荷电流将增大 5%~10%,电动机的温升提高 10%~15%,绝缘老化加快。这不但缩短电动机的使用寿命,而且还会影响产品质量,减少产量。电压质量对同步电动机的影响与对感应电动机的影响基本相同。

(2) 电压偏移对白炽灯的影响最为显著。当白炽灯的端电压降低 10% 时,发光效率将下降 30% 以上,灯光明显变暗,照度降低。若端电压升高 10%,发光效率将提高 1/3,但使用寿命会明显缩短。荧光灯等气体放电灯的端电压偏低时,灯管不易