

高等职业教育机电系列精品教材
校企“双元”合作开发新形态教材

供配电技术

GONGPEIDIAN JISHU

主 编	张晓伟	许艳华	
副主编	崔丽华	王胜辉	段运鑫
	刘煜辉	闫 峰	代俊杰
主 审	马建民	杨一平	



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书共分为 17 个项目,内容包括电力系统图的绘制、高低压电力线路的敷设、变电所的电源引入装置的选型、企业变电所、进线柜、计量柜(CT 柜)、电压互感器柜(PT 柜)、出线柜、联络柜、隔离柜、低压馈线柜、补偿柜、低压负荷柜、防雷和接地、变电所倒闸操作、电力变压器、继电保护智能柜。

本书既可作为高等职业院校电气自动化、机电一体化、供配电技术等专业的教材,也可供相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

供配电技术 / 张晓伟,许艳华主编. — 上海:上海交通大学出版社, 2024. 3
ISBN 978-7-313-29785-3

I. ①供… II. ①张… ②许… III. ①供电系统 ②配电系统 IV. ①TM72

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2024)第 001679 号

供配电技术

GONGPEIDIAN JISHU

主 编:张晓伟 许艳华

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:三河市骏杰印刷有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

字 数:370 千字

版 次:2024 年 3 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-29785-3

定 价:49.90 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:16.75

印 次:2024 年 3 月第 1 次印刷

电子书号:ISBN 978-7-89424-594-6

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0316-3662258

本书的编写参考《中华人民共和国职业教育法》，依据高等职业教育的要求和教学特点，结合供配电技术的发展趋势和人才培养要求，遵循理论联系实际原则，在吸取国内外同类教材编写经验的基础上，更加注重理论知识的系统性和工程施工的实用性。在内容编排上，注重理论教学和工程实际相结合，力求做到突出重点，实践性强。全书引用电气工程新设备、新知识、新工艺，融入现代供电技术的最新应用，使学生能够掌握电力系统的基础知识和理论，提升供配电系统的运行、管理和工程设计以及分析问题、解决问题的能力。

本书的特点如下：

- (1) 重视基础知识和基本原理的阐述，理论知识以“必需、够用”为度，强调实际应用。
- (2) 讲解简明扼要，深入浅出，富于启发性、实用性。
- (3) 教学内容采用项目化教学，图文并茂，通俗易懂。
- (4) 配置大量的工程实例，贴近实际工作岗位。
- (5) 书中的电气元件图形和文字符号均符合最新国家标准。

本书计划讲授 72 学时，由于各个学校培养方案不同，对学生供配电知识和能力的要求不同，各高校可以根据教学要求做相应增减，部分项目可通过自学、参观、实习或课程设计等形式完成。

本书由许昌职业技术学院张晓伟、许艳华担任主编，由许昌职业技术学院崔丽华、王胜辉、段运鑫、刘煜辉，许昌中意电气科技有限公司闫峰，河南中烟工业有限责任公司许昌卷烟厂代俊杰担任副主编。全书由张晓伟负责统稿和编写组织工作，由许昌职业技术学院马建民、杨一平担任主审。国家电网有限公司李明辉高级工程师对本书的编写工作提出了很多宝贵意见和建议，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中的不足之处敬请各位读者批评指正。

编 者

项目一

1

电力系统图的绘制	1
----------------	---

知识链接	2
------------	---

一、动力系统、电力系统、电力网的概念	3
二、发电厂的分类	3
三、输配电线路和变电所	8
四、电力系统的参数额定值	11
五、电力系统的主要参数指标	14

习题	20
----------	----

项目二

2

高低压电力线路的敷设	21
------------------	----

知识链接	23
------------	----

一、架空电力线路	23
二、车间线路的结构和敷设	28
三、架空导线截面的选择	29
四、电缆线路的结构	33
五、电缆线路的敷设	37
六、架空线路的运行和维护	39

习题	48
----------	----

项目三

3

变电所电源引入装置的选型	49
--------------------	----

知识链接	51
------------	----

一、高压熔断器	51
二、母线、绝缘子	53
三、限流电抗器	54
四、避雷器	56

习题	63
----------	----

项目四

4

企业变电所	64
知识链接	66
一、企业变电所的组成	66
二、变电所的布置	68
三、变电所的结构	69
四、高压开关柜	75
五、低压配电柜	81
习题	84

项目五

5

进线柜	85
知识链接	89
一、高压断路器	89
二、高压负荷开关	92
习题	95

项目六

6

计量柜(CT 柜)	96
知识链接	100
一、互感器	100
二、电气测量仪表	104
习题	110

项目七

7

电压互感器柜(PT 柜)	111
知识链接	115
一、三相五柱式电压互感器接线图	115
二、绝缘监察装置	117
习题	120

项目八

8

出线柜	121
知识链接	126
一、接地开关的定义	126
二、接地开关的结构形式	127
三、接地开关的功能	127
四、接地开关的类型	127
五、接地开关使用注意事项	127
习题	135

项目九

9

联络柜	136
知识链接	141
一、双回路电源	141
二、双回路电源的应用条件	141
三、双电源供电和双回路供电的区别	142
四、高压断路器	142
习题	147

项目十

10

隔离柜	148
知识链接	151
一、高压隔离开关	151
二、常见的高压隔离开关	152
习题	156

项目十一

11

低压馈线柜	157
知识链接	160
一、低压熔断器	160
二、低压刀开关	161
三、低压断路器	163
习题	167

项目十二

12

补偿柜	168
知识链接	171
一、功率因数和无功功率补偿	171
二、并联电容器补偿	173
习题	180

项目十三

13

低压负荷柜	181
知识链接	183
一、低压配电柜	183
二、常见的低压开关柜	185
习题	188

项目十四

14

防雷和接地	189
知识链接	191
一、触电的危害和防护	191
二、过电压和防雷	192
三、防雷设备	194
四、防雷保护	195
五、电气装置的接地	198
六、接地装置	203
七、接地电阻	205
习题	211

项目十五

15

变电所倒闸操作	212
知识链接	214
一、供电系统的倒闸操作	214
二、变配电所的送电操作	219
三、变配电所的停电操作与拉合隔离开关的次序	220
四、保障安全措施的实施流程	220
习题	224

项目十六

16

电力变压器 225

知识链接 227

一、变压器的功能 227

二、变压器的工作原理 228

三、变压器的型号含义 229

四、变压器的常用类型 230

五、变压器的结构 230

习题 238

项目十七

17

继电保护智能柜 239

知识链接 241

一、继电保护基础 241

二、常用的保护继电器 243

三、电流保护的接线方式 251

四、电网相间短路的电流电压保护 252

习题 256

附录 考核评价表 257

参考文献 258



项目一 电力系统图的绘制



项目导读

电能可以方便地转换为其他形式的能量(如光能、热能、机械能等),能够大规模生产,远距离输送和分配,易于调节、操作和控制。电能的使用十分方便和经济,在终端使用时是相对清洁的能源。电能是现代社会使用最广、需求增长最快的能源,在技术进步和社会经济发展中起着极其重要的作用。电力工业是国民经济的一项基础工业,它是一种将煤、石油、天然气、水能、核能、风能、太阳能等一次能源转换成电能这种二次能源的工业。电力工业是国民经济发展的先行产业,其发展水平是反映一个国家经济发展程度的重要标志。



知识目标

- (1)了解电力系统的基本结构。
- (2)了解电力系统中的发电厂、电力线路、供电所、变电所、配电所的电压变化关系。
- (3)掌握电力系统的功能。



技能目标

- (1)能描述电力系统的组成及功能。
- (2)能识读电力系统图。



思政目标

- (1)具有严谨的工作态度及安全意识。
- (2)提升团队协作、独立思考、分析问题、自主学习的能力。



项目分析

一个完整的电力系统(见图 1-1 和图 1-2)的主要组成部分是变电站和电力线路,变电站又分为升压变电站和降压变电站,电力线路又分为输电线路和配电线路。本项目以图片的形式说明电力系统的设备之间的电压变换关系。

图 1-2 直观地说明了电力系统的电压变化关系,是先升压、后降压的过程,通过电压变化把电能输送给用户。

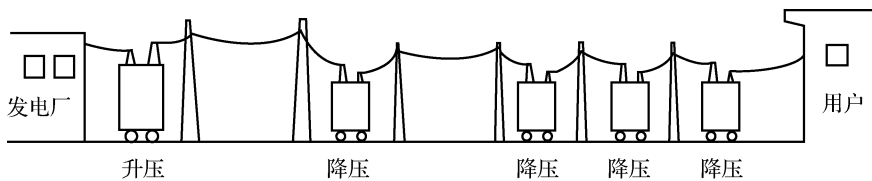


图 1-1 电力系统的组成

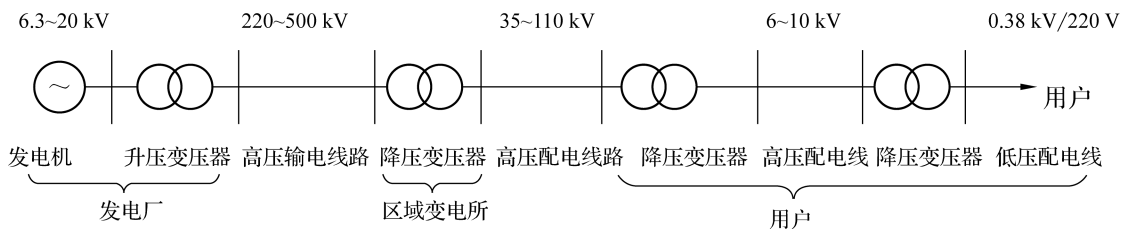


图 1-2 电力系统的电压变化关系

任务布置

1. 任务描述

通过参观总变电站、各分变电站、开闭所和变电所认识电力系统,学习各组成部分的作用,绘制一个从发电厂开始的 800 kV/380 V 变电过程的高低压电力系统的系统结构图。

2. 寻找队友

自由组合,3 人为一组,选出组长并进行任务分工,将分工情况填入表 1-1。

表 1-1 项目一小组成员及分工情况

小组成员	姓 名	学 号	任 务 分 工
组长			
成员			

3. 小组讨论

在进行具体工作前,需掌握电力系统的结构、功能及各部分的作用。请各组收集相关资料,回答下列问题。

引导问题 1:电力系统的基本结构是什么?

引导问题 2:简述电力系统的组成、功能。

知识链接

为了能充分利用动力资源,降低发电成本,发电厂往往远离城市和电能用户,这就需要输送和分配电能,将发电厂发出的电能经过升压、输送、降压和分配,最终送到用户,即构成一个完整的电力系统。

一、动力系统、电力系统、电力网的概念

电能的生产、输送、分配和使用的全过程,实际上是同时进行、在同一时间完成的,但电能不能大量储存,因此各环节必须连成一个整体,即发电厂任何时刻生产的电能等于该时刻用电设备消耗的电能与输送、分配中损耗的电能之和。

(1)动力系统是指电力系统加上发电厂的“动力部分”。动力部分包括水力发电厂的水库、水轮机,热力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用电设备,以及核电厂的反应堆等,它是将电能、热能的生产与消费联系起来的纽带。

(2)电力系统是由发电厂的发电部分、变电所、电力线路和电能用户组成的一个整体,它的功能是完成电能的生产、输送和分配。电力系统的发电厂并列运行,共同向电力系统提供电能。

(3)电力网是电力系统的一个组成部分,而电力系统又是动力系统的一个组成部分。

这三者的关系如图 1-3 所示。

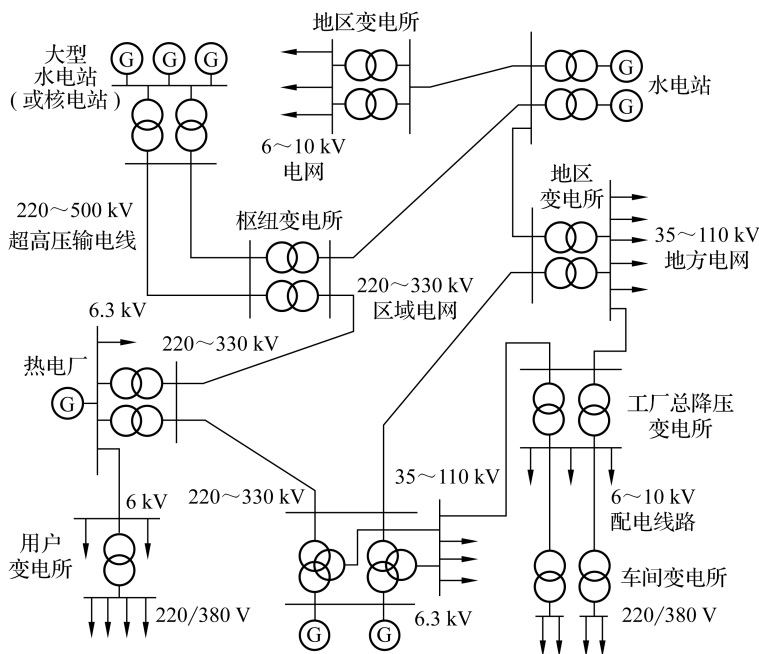


图 1-3 动力系统、电力系统、电力网关系示意图

二、发电厂的分类

发电厂又称发电站,是将自然界蕴藏的各种一次能源转换为电能(二次能源)的企业。

根据所利用的一次能源的不同,发电厂分为火力发电厂、水力发电厂和核能发电厂,此外,还有风力发电厂、地热发电厂、潮汐发电厂和太阳能发电厂等类型。

1. 火力发电厂

火力发电厂简称火电厂,它利用燃料的化学能来生产电能。我国的火电厂以燃煤为主。为了提高燃煤效率,都将煤块粉碎成煤粉燃烧。煤粉在锅炉的炉膛内充分燃烧,将锅炉内的水烧成高温高压的蒸汽,推动汽轮机叶片旋转,带动发电机旋转发电,煤产生的废气从烟囱排出。火力发电厂的发电过程如图 1-4 所示。

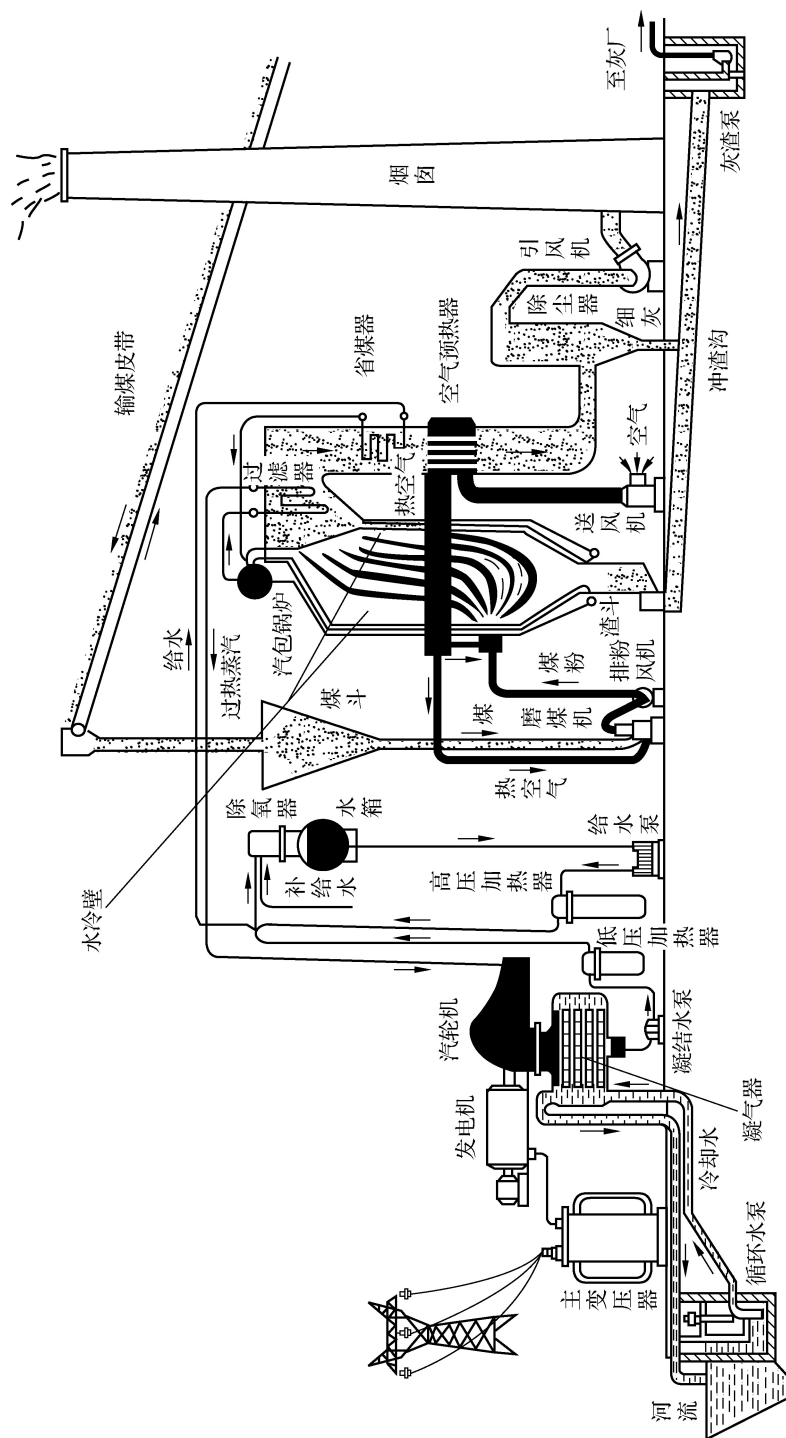


图 1-4 火力发电的过程

火力发电能量转换过程如图 1-5 和图 1-6 所示。

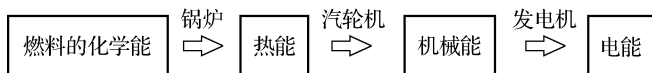


图 1-5 火力发电能量转换过程 1



图 1-6 火力发电能量转换过程 2

现代火电厂一般根据环保要求考虑了“三废”(废水、废汽、废渣)的综合利用;有的不仅发电,而且供热。兼供热能的火电厂称为热电厂。

2. 水力发电厂

水力发电厂简称水电厂或水电站,是把水的位能和动能转换成电能的企业,它利用水流的位能来生产电能。基本生产过程:从河流较高处或水库内引水,利用水的压力或流速冲动水轮机旋转,将水能转变成机械能,然后由水轮机带动发电机旋转,将机械能转换为电能。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。其常见的发电方式有坝后式和河床式两种,如图 1-7 和图 1-8 所示。

3. 核能发电厂

核能(原子能)发电厂通称核电站,它主要是利用原子核的裂变能来生产电能。其能量转换过程如图 1-9 所示。

核裂变过程中,中子撞击铀原子核的原子时会产生核裂变,原子核会分裂成碎片而释放出大量能量,分裂的结果又产生更多中子,因此造成更多的铀原子分裂,连锁分裂反应产生巨大的能量。核裂变过程如图 1-10 所示。

核电站的生产过程与火电厂基本相同,只是以核反应堆(俗称原子锅炉)代替燃煤锅炉,以少量的核燃料代替大量的煤炭。核子反应炉心内的铀原料分裂产生巨大热能,气体或液体冷却剂可将这些热量带到蒸汽发电机。核能发电系统如图 1-11 所示。

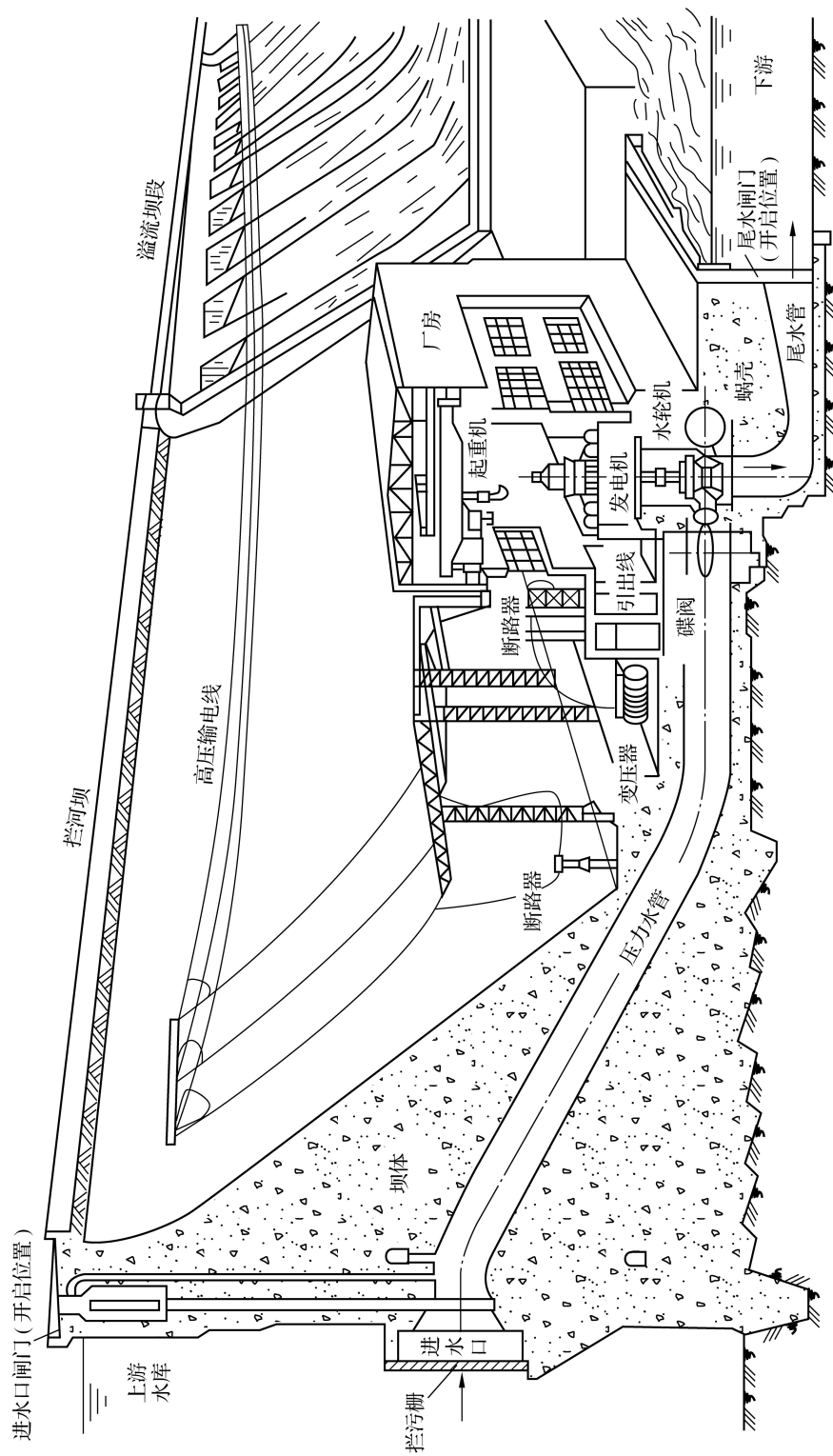


图 1-7 坝后式水电站

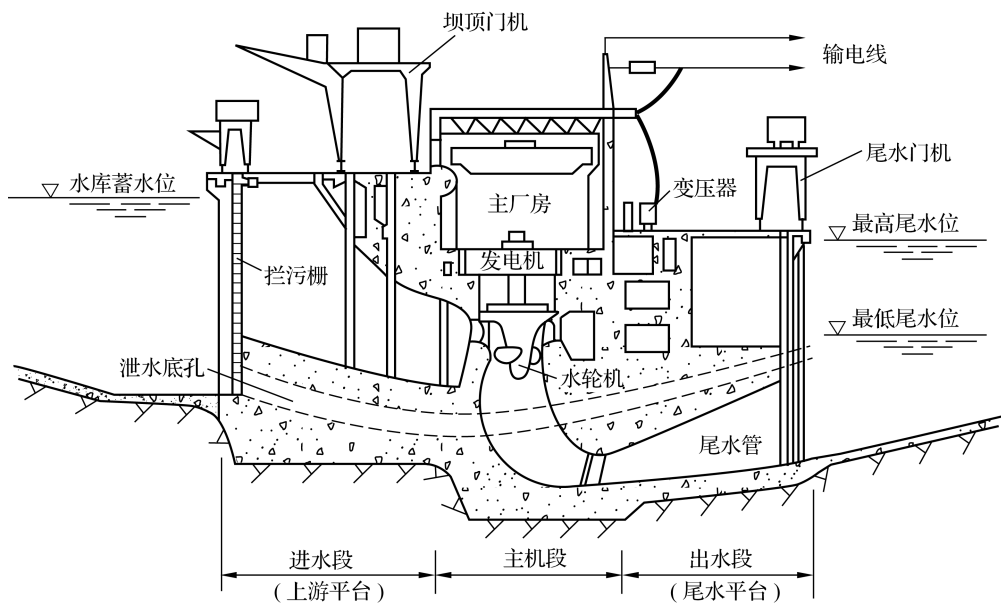


图 1-8 河床式水电站

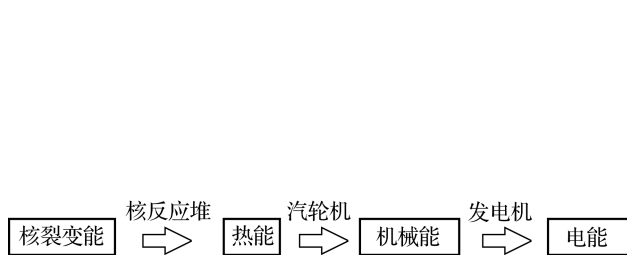


图 1-9 核电站能量转换过程

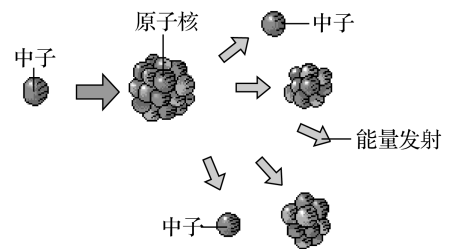


图 1-10 核裂变过程

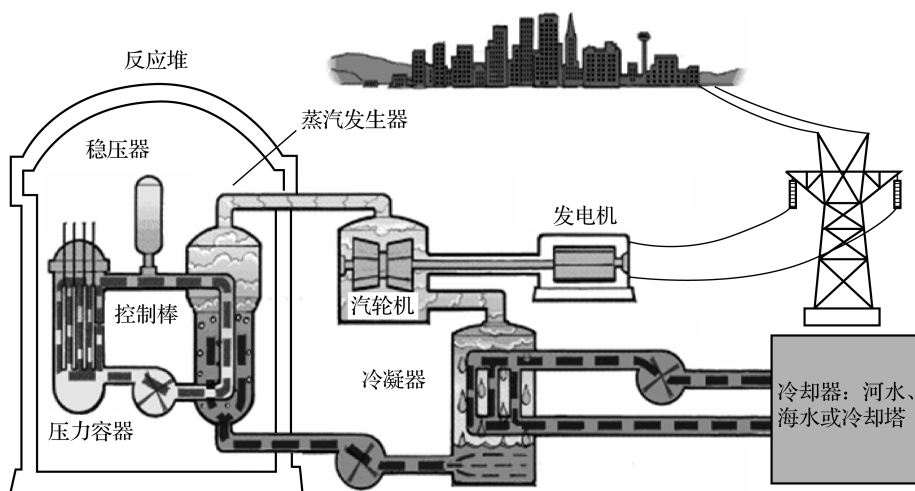


图 1-11 核能发电系统

4. 风力发电厂

风力发电厂利用风力的动能来生产电能。它建在有丰富风力资源的地方。电力电子技术在风力发电技术中起到了重要作用,尤其是电力电子技术对于恒定速度/可变速度风力涡轮机与电网的接口技术至关重要。变速风力发电机组根据风速变化,使机组保持最佳叶尖速比,从而获得最大风能。另外,变速风力发电机组与电网实现了柔性连接,大大减少了机械冲击和对电网的冲击,采用变速风力发电机组已成为风力发电机组的主流。风力发电的结构和原理如图 1-12 所示。

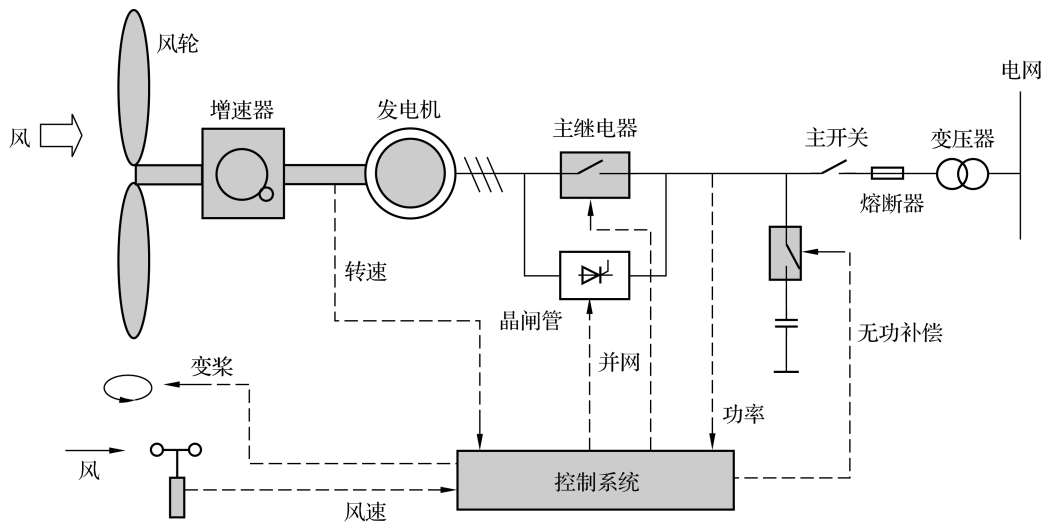


图 1-12 风力发电的结构和原理

5. 地热发电厂

地热发电厂利用地球内部蕴藏的大量地热能来生产电能,它建在有足够地热资源的地方。

6. 太阳能发电厂

太阳能发电厂利用太阳光能或太阳热能来生产电能。利用太阳光能发电,是指通过光电转换元件(如光电池等)直接将太阳光能转换为电能,这已广泛应用于人造地球卫星和宇航装置上。

三、输配电线路和变电所

1. 高压送电电力线路

送电线路的任务是输送电能,并联络各发电厂,变电站(所)使之并列运行,实现电力系统联网,并能实现电力系统间的功率传递。高压输电线路是电力工业的“大动脉”,是电力系统的重要组成部分。我国输电线路的电压等级有 35 kV、66 kV、110 kV、154 kV、220 kV、330 kV、500 kV、750 kV、800 kV、1 000 kV 等。把发电厂生产的电能经过升压变压器输送到电力系统中,降压变压器的电力线路和用电单位的 35 kV 及以上的高压电力线路称为送电线路。高压送电线路如图 1-13 所示。

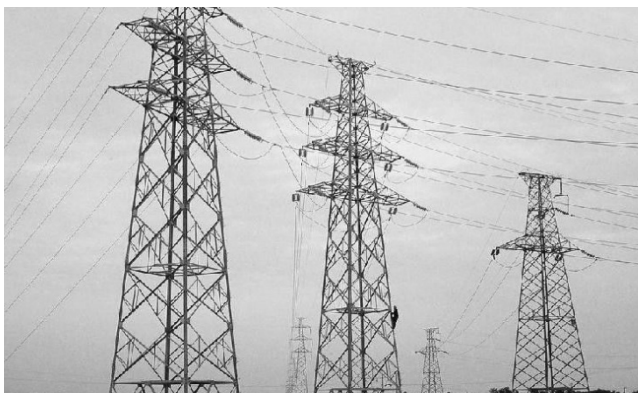


图 1-13 高压送电线路

2. 总降压变电所

总降压变电所为企业电能供应的枢纽。它将 35~110 kV 的外部供电电源电压降为 6~10 kV 高压配电电压,供给高压配电所、车间变电所和高压用电设备使用。总降压变电所如图 1-14 所示。



图 1-14 总降压变电所

3. 高压配电所

高压配电所集中接收 6~10 kV 电源电压,再分配到附近各车间变电所或建筑物变电所和高压用电设备。一般负荷分散、厂区大的大型企业设置高压配电所。高压配电所室外部分和室内部分如图 1-15 和图 1-16 所示。

4. 企业变电所

企业变电所是电力系统的电能用户,也是电力系统的重要组成部分。企业变电所的室内部分和室外下线部分如图 1-17 和图 1-18 所示。



图 1-15 高压配电所室外部分



图 1-16 高压配电所室内部分



图 1-17 企业变电所的室内部分



图 1-18 企业变电所的室外下线部分

5. 配电线路

配电线路分为 6~10 kV 厂内高压配电线路和 380/220 V 厂内低压配电线路。高压配电线路将总降压变电所与高压配电所、车间变电所或建筑物变电所和高压用电设备连接起来。低压配电线路将车间变电所的 380/220 V 电压送至各低压用电设备。配电线路如图 1-19 所示。



图 1-19 配电线路

6. 车间变电所或建筑物变电所

车间变电所或建筑物变电所将 6~10 kV 电压降为 380/220 V 电压,供低压用电设备使用。车间变电所如图 1-20 所示。

7. 用电设备

用电设备按用途可分为动力用电设备、工艺用电设备、电热用电设备、试验用电设备和照明用电设备等。

对于某个具体的供配电系统,可能上述各部分都有,也可能只有其中的几个部分,这主要取决于电力负荷的大小和厂区的大小。不同的供配电系统,不仅组成不完全相同,而且相同部分的构成也会有较大的差异。通常大型企业都设总降压变电所,中小型企业仅设全厂 6~10 kV 变电所或配电所,某些特别重要的企业还设自备发电厂作为备用电源。



图 1-20 车间变电所

四、电力系统的参数额定值

1. 电压额定值

(1)额定电压(U_N)。能使受电器(电动机、白炽灯等)、发电机、变压器等正常工作的电压称为电气设备的额定电压。当电气设备按额定电压运行时,一般可使其技术性能和经济效果达到最好。

(2)平均额定电压。工程实际中,电网由始端到末端的各处电压是不一样的,离电源越远处的电压越低,并且随用户负荷的变化而变化。图 1-21 表示由一台变压器通过配电线路对三个用户供电,电网的额定电压为 U_N ,由于线路上有电压损失,必然出现 $U_1 > U_N$ 、 $U_3 < U_N$ 及 $U_2 \approx U_N$ 的情况,即该线路各处电压都不相等。在供电设计尤其是在短路电流计算时,为了简化计算且使问题的处理在技术上合理,习惯上用线路的平均额定电压(U_{av})来表示电力网的电压。 U_{av} 是指电网始端的最大电压(变压器最大空载电压)和末端受电设备额定电压的平均值。例如,额定电压为 10 kV 的电网,其平均额定电压为

$$U_{av} = \frac{11 + 10}{2} = 10.5(\text{kV}) \quad (1-1)$$

在电力系统中,各种标准电压等级的平均额定电压(kV)分别为 0.23、0.4、6.3、10.5、37、115、230 等。供电线路上电压的变化如图 1-21 所示。

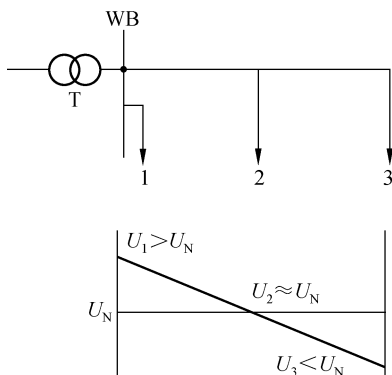


图 1-21 供电线路上电压的变化

①电力线路的额定电压。电力线路(或电网)的额定电压等级是国家根据国民经济发展的需要及电力工业的水平,经全面技术经济分析后确定的。它是确定各类用电设备额定电压的基本依据。

②用电设备的额定电压。用电设备运行时电力线路上要有负荷电流流过,因而在电力线路上引起电压损耗,造成电力线路上各点电压略有不同。但成批生产的用电设备,其额定电压不可能按使用地点的实际电压来制造,而只能按线路首端与末端的平均电压,即电力线路的额定电压 U_N 来制造。因此,规定用电设备的额定电压与同级电力线路的额定电压相同。

③发电机的额定电压。由于电力线路允许的电压损耗为 $\pm 5\%$,即整个线路允许有 10% 的电压损耗,因此,为了维护线路首端与末端平均电压的额定值,线路首端(电源端)电压应比线路额定电压高 5% ,而发电机是接在线路首端的,所以规定发电机的额定电压比同级线路额定电压高 5% ,用以补偿线路上的电压损耗,如图 1-22 所示。

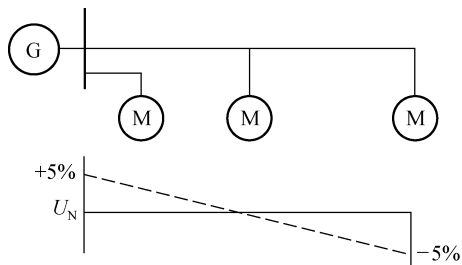


图 1-22 用电设备和发电机的额定电压

④电力变压器的额定电压。

a. 电力变压器一次绕组的额定电压。若电力变压器直接与发电机相连,如图 1-23 中的变压器 T1,则其一次绕组的额定电压应与发电机额定电压相同,即比同级线路额定电压高 5% 。

若变压器不与发电机相连,而是连接在线路上,在电力系统的末端,相当于电网的负载,

如图 1-23 中的变压器 T2,则可将变压器看作线路上的用电设备,因此其一次绕组的额定电压应与线路额定电压相同。

b. 变压器二次绕组的额定电压。变压器二次绕组的额定电压是指变压器一次绕组接上额定电压而二次绕组开路时的电压,即空载电压。而变压器在满载运行时,二次绕组内约有 5% 的阻抗电压降。电力变压器二次绕组额定电压均高出 10%,用来补偿正常负载时变压器内部阻抗和线路阻抗所造成的电压损失。

如果变压器二次侧供电线路很长(如较大容量的高压线路),则变压器二次绕组额定电压,一方面要考虑补偿变压器二次绕组本身 5% 的阻抗电压降,另一方面要考虑变压器满载时输出的二次电压要满足线路首端高于线路额定电压的 5%,以补偿线路上的电压损耗。所以,变压器二次绕组的额定电压要比线路额定电压高 10%,如图 1-23 中的变压器 T1。

如果变压器二次侧供电线路不长(如为低压线路或直接供电给高、低压用电设备的线路),则变压器二次绕组的额定电压,只需高于其所接线路额定电压的 5%,即仅考虑补偿变压器内部 5% 的阻抗电压降,如图 1-23 中的变压器 T2。

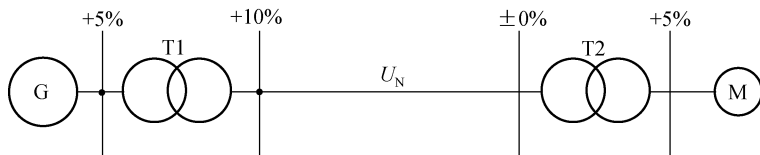


图 1-23 电力变压器一、二次额定电压说明图

2. 电流额定值

电气设备的额定电流是指在一定的基准环境下,允许连续通过设备的长时最大工作电流。在该电流的作用下,设备的载流部分与绝缘的最高温度不超过规定的允许值。我国采用的基准环境温度如下:

电力变压器和电器(周围空气温度):	40 °C。
发电机(冷却空气温度):	35~40 °C。
裸导线、绝缘导线和裸母线(周围空气温度):	25 °C。
电力电缆空气中敷设:	30 °C。
直埋敷设:	25 °C。

对于发电机和变压器等,还规定了它们的额定容量,其条件与额定电流相同。由于发电机由原动机拖动,只提供有功功率,所以发电机的额定容量用有功功率(kW 或 MW)与功率因数来表示。

电力变压器作为供电设备,其容量若用有功功率表示,则不能反映其针对不同功率因数的供电能力。显然,负荷功率因数低时,其有功输出降低,要维持一定的有功功率则必须增大总电流,所以电力变压器的额定容量常用视在功率表示,这样便于各种设计参数的确定。计算或使用,在一定的功率因数条件下,它允许的有功功率输出也就被限定了。

3. 容量额定值

用电设备的铭牌上都有一个“额定功率”,但是由于各用电设备的额定工作条件不同(有的是长期工作制,有的是反复短时工作制),这些铭牌上规定的额定功率不能直接相加来

作为用户的电力负荷,而必须首先换算成同一工作制下的额定功率,然后才能相加。经过换算至同一工作制下的“额定功率”称为设备容量,用 P_e 表示,即

$$S_e = U_e I_e \quad (1-2)$$

$$P_e = U_e I_e \cos \varphi_e \quad (1-3)$$

五、电力系统的主要参数指标

供电质量的主要指标有电压、频率、波形、供电可靠性。

1. 电压

电压以电压偏差、电压波动与闪变来衡量。

电压偏差是指电压偏离额定电压的幅度,一般以百分数表示,即

$$\Delta U \% = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100 \% \quad (1-4)$$

式中, $\Delta U \%$ 为电压偏差百分数; U 为实际电压; U_N 为额定电压。

我国规定了供电电压允许偏差,如表 1-2 所示,要求供电电压的电压偏差不得超过允许偏差。

表 1-2 电压允许偏差

线路额定电压 U_N	电压允许偏差
35 kV 及以上	$\pm 5 \%$
10 kV 及以下	$\pm 7 \%$
220 V	$+7 \%, -10 \%$

(1) 电压降与电压损失。当三相交流电流(或功率)在线路中流过时,线路上会产生电压降。终端有一集中负荷的三相线路,如图 1-24 所示。设各相负荷平衡,则可以终端相电压 U_2 为基准,作出一相的电压相量图。

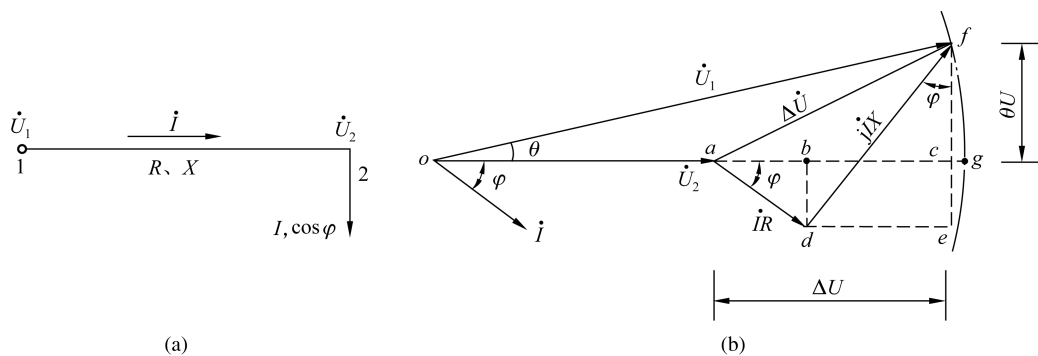


图 1-24 计算线路上的电压降和电压损失

(a) 电路图; (b) 相量图

图 1-24 中始端电压 U_1 与终端电压 U_2 的相量差称为电压降,用 ΔU 表示。取 ΔU 在 U_2 水平方向的投影 ΔU 为电压降的水平分量, ΔU 在 U_2 垂直方向上的投影 θU 为电压降的垂直分量,则有

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= ab + bc = IR \cos \varphi + IX \sin \varphi \\ \theta U &= ef - ce = IX \cos \varphi - IR \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

因此,该系统的电压关系式为

$$U_1 = U_2 + \Delta U = (U_1 + \Delta U) + j\theta U \quad (1-6)$$

或

$$U_1^2 = (U_2 + \Delta U)^2 + \theta^2 U^2 = (U_2 + IR \cos \varphi + IX \sin \varphi)^2 + (IX \cos \varphi - IR \sin \varphi)^2 \quad (1-7)$$

若以功率的形式表示,则为

$$U_1^2 = \left(U_2 + \frac{PR}{U} + \frac{QX}{U} \right)^2 + \left(\frac{PX}{U} - \frac{QR}{U} \right)^2 \quad (1-8)$$

式中, $P = UI \cos \varphi$, $Q = UI \sin \varphi$, U 为相电压。

式(1-7)同样适用于三相对称系统,此时电压均为线电压,功率均为三相功率。

电压降两个分量的表达式分别为

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} \quad (1-9)$$

$$\theta U = \frac{PR - QX}{U} \quad (1-10)$$

在工程实际中,特别是在工矿企业的供电系统中,一般只注重电压幅值的大小,而电压相位角 θ 只在讨论系统稳定性时才予以重视。从图 1-24(b)中可以看出,由于 θ 很小, $ac \approx ag$, 以 ac 代替 ag 所引起的误差一般达不到 ag 的 5%, 在实际应用中也是如此。这样,式(1-6)就简化为

$$U_1 = U_2 + \frac{PR + QX}{U} \quad (1-11)$$

在高压供电系统中,线路电阻较小。如果忽略电阻的影响,即令 $R \approx 0$, 则式(1-11)可进一步简化为

$$U_1 = U_2 + \frac{QX}{U} \quad (1-12)$$

由式(1-5)可以得出,当 $R \approx 0$ 时,电压降的水平分量 ΔU 只与线路无功功率有关,电压降的垂直分量只与有功功率有关,这是高压电网的重要特点。所以,改善系统的无功功率分布,减少企业配电线路中的无功功率输送,可以减少系统电压降,提高企业供电系统的电压质量。

将上述电压降的概念推广,电压降即线路两端电压的相量差 $\Delta U = U_1 - U_2$, 而线路两端电压的幅值差 $\Delta U = U_1 - U_2$ 称为电压损失,它近似等于电压降的水平分量。电压损失常用它对额定电压 U_N 的百分比来表示,称为电压损失百分值。其表达式为

$$\Delta U \% = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100 \% \quad (1-13)$$

(2)电压偏移及危害。电力负荷的大小是变动的,当负荷增大时,电网内电压损失增大,使用电设备的端电压降低;反之则升高。因此,用电设备的端电压是随电力负荷的变化而变化的,这种缓慢变化的、实际电压 U

$\delta U > 0$ 为正偏移, $\delta U < 0$ 为负偏移。与电压损失一样, 电压偏移一般也用它对额定电压的百分比来表示, 称为电压偏移百分值。其表达式为

$$\delta U \% = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100 \% \quad (1-15)$$

用电设备所承受的实际电压若偏离其额定电压, 运行特性即恶化。对于白炽灯, 若在 $90\%U_N$ 下运行, 其使用期限有所增加, 但光通量降为额定电压时的 68% 左右; 反之, 在 $110\%U_N$ 下运行时, 其光通量增加 40%, 但使用期限大大缩短。对于感应电动机, 其转矩与电压的平方成正比, 当电压降低 10% 时, 转矩则降至 81%, 使电动机难以带负荷起动。电焊机的电压偏移也仅允许在有限的 5%~10% 范围内, 否则将影响焊接质量。

按照《供配电系统设计规范》(GB 50052—2009) 的规定, 正常运行情况下, 用电设备端子处电压偏移的允许值如下:

①电动机: $\pm 5\%$ 额定电压。

②照明灯: 一般工作场所为 $\pm 5\%$ 额定电压; 在远离变电所的小面积一般工作场所, 难以满足上述要求时为 $+5\%$ 额定电压、 -10% 额定电压, 如应急照明、道路照明和警卫照明等。

③其他无特殊规定的用电设备: $\pm 5\%$ 额定电压。变压器分接头开关设置在 -5% 额定电压的位置, 在非工作班时为了防止电压过高, 可切除部分变压器, 改用低压联络线供电; 对于两台主变压器并列运行的变电所, 在负荷轻时切除一台变压器, 同样可以起到降低过高压的作用, 并可与变压器的经济运行综合考虑。

④采用无功功率补偿装置。由于用户存在大量的感性负荷, 供电系统产生大量的相位滞后的无功功率, 降低功率因数, 增加系统的电压降; 采用并联电容器法可以产生相位超前的无功功率, 减小了线路中的无功输送, 也就减小了系统的电压降。

⑤采用有载调压变压器。利用有载调压变压器可以根据负荷的变动及供电电压的实际水平而实现有效的带负荷调压, 在技术上有较大的优越性, 但一般只应用于大型枢纽变电所, 它可使一个地区内大部分用户的电压偏移符合规定。对于个别电压质量要求高的重要负荷, 可考虑设置小型有载调压变压器。

不同电压等级的电压波动允许值如表 1-3 所示。

表 1-3 不同电压等级的电压波动允许值

额定电压/kV	电压波动允许值($\Delta U\%$)
10 及以下	2.5
35~110	2.0
220 及以上	1.6

2. 频率

频率的质量以频率偏差来衡量。我国采用的额定频率为 50 Hz, 在正常情况下, 频率的允许偏差根据电网的装机容量而定; 在事故情况下, 频率允许偏差更大。频率的允许偏差如表 1-4 所示。

表 1-4 频率的允许偏差

运 行 情 况	容 量	频率允许偏差/Hz
正常运行	300 万千瓦及以上	±0.2
	300 万千瓦以下	±0.5
非正常运行		±1.0

3. 波形

1) 波形的质量

波形的质量是以正弦电压波形畸变率来衡量的。

在理想情况下,电力系统中的发电机发出的电压,一般可认为是 50 Hz 的正弦波,但是由于系统中有各种非线性元件存在,在系统中和用户处的线路中出现了高次谐波,使电压或电流波形发生一定程度的畸变,除基波外,还有各项谐波。例如,荧光灯、高压汞灯、高压钠灯等气体放电灯及交流电动机、电焊机、变压器和感应电炉等,都要产生高次谐波电流。最为严重的是晶闸管等大型整流设备和大型电弧炉,它们产生的高次谐波电流最为突出,是造成电力系统中谐波干扰最主要的“谐波源”。

2) 高次谐波

高次谐波是指对周期性非正弦波形按傅立叶方法分解后所得到的频率为基波频率整数倍的所有高次分量,而基波频率就是 50 Hz。高次谐波简称“谐波”。

4. 供电可靠性

供电可靠性是以对用户停电的时间及次数来衡量的。它常用供电可靠率 K_{rel} 表示,即用实际供电时间与统计期全部时间的比值的百分数表示。其表达式为

$$K_{\text{rel}} = \frac{T_y}{T_s} \times 100\% \tag{1-16}$$

$$T_y = T_s - T_t \tag{1-17}$$

$$T_t = \sum_{i=1}^n t_i \tag{1-18}$$

式中, T_y 为统计期实际供电时间之和, h; T_s 为统计期全部时间, h; T_t 为统计期内停电时间之和, h; t_i 为统计期内每次停电时间, h。

停电时间应包括事故停电、计划检修停电及临时性停电时间。

项目实施

1. 制订计划

(1) 制订工作计划,并将其填入表 1-5。

表 1-5 项目一工作计划

序 号	工 作 内 容	负 责 人

(2)将操作过程中所需的工具、耗材等信息填入表 1-6。

表 1-6 项目一工具、耗材表

序 号	名 称	型 号 与 规 格	数 量	备 注

2. 进行决策

(1)每人阐述工作计划。

(2)组员之间进行提问与答疑,选出最佳工作计划。

3. 任务实施

按照企业变电所的布置原则,本组确定最佳工作计划;完成企业变电所设计与布置;完成企业变电所设计教学工单,如表 1-7 所示。

表 1-7 项目一教学工单

教学工单			
课程名称	供配电技术		
时 间			
班 级		姓 名	
任务名称	企业变电所设计与布置		
设备与器材			
任务目标 要求			
任务实施的方法、过程			
发现的问题 及解决办法			
教师评价			



知识拓展

1. 高压直流输电技术

高压直流输电技术用于通过架空线和海底电缆远距离输送电能;同时在一些不适于用传统交流连接的场合,它也被用于独立电力系统间的连接。

高压直流输电用于远距离或超远距离输电,因为它相对传统的交流输电更经济。

应用高压直流输电系统,电能等级和方向均能得到快速精确的控制,这种性能可提高它所连接的交流电网性能和效率,直流输电系统已经得到普遍应用。

高压直流输电是将三相交流电通过换流站整流变成直流电,然后通过直流输电线路送往另一个换流站逆变成三相交流电的输电方式。它基本上由两个换流站和直流输电线路组成,两个换流站与两端的交流系统相连接。

直流输电线路造价低于交流输电线路,但其换流站造价比交流变电站高得多。一般认为,架空线路超过 600~800 km,电缆线路超过 40~60 km 时直流输电较交流输电经济。随着高电压大容量可控硅及控制保护技术的发展,换流设备造价逐渐降低,直流输电近年来发展较快。我国长 1 100 km 左右的葛洲坝—上海±500 kV 输送容量的直流输电工程,已经建成并投入运行。此外,全长 1 907 km 的向家坝—上海直流输电工程也已经完成,于 2010 年 7 月 8 日投入运行。该线路是当时世界上距离最长的高压直流输电项目。

2. 柔性直流输电技术

柔性直流输电技术与基于相控换相技术的电流源换流器型高压直流输电不同,柔性直流输电中的换流器为电压源换流器(VSC),其最大的特点在于采用了可关断器件(通常为 IGBT)和高频调制技术。通过调节换流器出口电压的幅值和与系统电压之间的功角差,可以独立地控制输出的有功功率和无功功率。这样,通过对两端换流站的控制,就可以实现两个交流网络之间有功功率的相互传送,同时两端换流站还可以独立调节各自所吸收或发出的无功功率,从而对所联的交流系统给予无功支撑。

柔性直流输电是构建智能电网的重要装备,与传统方式相比,柔性直流输电在孤岛供电、城市配电网的增容改造、交流系统互联、大规模风电场并网等方面具有较强的技术优势,是改变大电网发展格局的战略选择。

柔性直流输电还将面临如何实现高电压、大功率、架空线使用、混合结构直流输电等方面的挑战。将通过进一步的研究和试点,使该技术在大规模风电场接入系统、实现区域联网提高供电可靠性、缓解负荷密集地区电网运行压力等更多领域得到应用。



大国工匠

火箭“心脏”焊接人高凤林

高凤林是中国航天科技集团公司第一研究院 211 厂发动机车间班组长,35 年来,他几乎都在做着同样一件事,即为火箭焊“心脏”——发动机喷管焊接。有的实验,需要在高温下持续操作,焊件表面温度达几百摄氏度,高凤林却咬牙坚持,双手被烤得鼓起一串串水疱。因为技艺高超,曾有人开出“高薪加两套北京住房”的诱人条件聘请他,高凤林却说,我们的成果打入太空,这样的民族认可的满足感用金钱买不到。

极致:焊点宽 0.16 mm,管壁厚 0.33 mm。

“长征五号”火箭发动机的喷管上,就有数百根几毫米的空心管线。管壁的厚度只有 0.33 mm,高凤林需要通过 3 万多次精密的焊接操作,才能把它们编织在一起,焊缝细到接近头发丝,而长度相当于绕一个标准足球场两周。

专注:为避免失误,练习十分钟不眨眼。

高凤林说,在焊接时要紧盯着微小的焊缝,一眨眼就会有闪失。“如果这道工序需要 10 分钟不眨眼,那就 10 分钟不眨眼。”

坚守:35 年焊接 130 多枚火箭发动机。

高凤林说,每每看到我们生产的发动机把卫星送到太空,就有一种成功后的自豪感,这种自豪感用金钱买不到。

正是这份自豪感,让高凤林一直以来都坚守在这里。35 年,130 多枚长征系列运载火箭在他焊接的发动机的助推下,成功飞向太空。这个数字,占到我国发射长征系列火箭总数的一半以上。

匠心:用专注和坚守创造不可能。

火箭的研制离不开众多的院士、教授、高工,但火箭从蓝图落到实物,靠的是一个个焊接点的累积,靠的是一位位普通工人的咫尺匠心。

专注做一样东西,创造别人认为不可能的可能,高凤林用 35 年的坚守,诠释了一个航天匠人对理想信念的执着追求。



项目练习

练习绘制电力系统的组成结构图和电力系统的电气控制框图。



习

题

- (1)简述电力系统的组成。
- (2)简述供配电系统的组成。
- (3)常见的发电形式有哪些?
- (4)电气设备的额定电压指什么?
- (5)我国常用的电压等级有哪些?
- (6)什么是设备的容量?
- (7)供电质量的主要指标有哪些?
- (8)电力系统运行的特点有哪些?



项目二 高低压电力线路的敷设



项目导读

供配电线路是电力系统的重要组成部分,担负着传输电能的任务。本项目介绍高低压线路的敷设、种类的选择及供配电线路的运行维护等方面的知识和技能,使学生对供配电线路施工、运行和维护有明确的认识,为今后从事供配电线路维护方面的工作奠定基础。



知识目标

- (1)掌握高低压电力线路的类型及导线截面的选择。
- (2)掌握高低压配电线路敷设方式及要求。



技能目标

- (1)具备高压电力线路的设计、敷设、检修能力。
- (2)具备低压线路安装图制图、读图能力。



思政目标

- (1)提高安全用电意识。
- (2)养成严谨的工作态度。
- (3)提升团队协作、独立思考、分析问题、自主学习的能力。
- (4)具有组织管理能力、创新能力。



项目分析

本项目主要介绍高低压电力线路的结构形式和运行维护方法。图 2-1、图 2-2 所示高压电力线路中导线、金具、杆塔之间的连接关系为杆塔上固定有横担,横担上固定有高压瓷瓶,高压瓷瓶上固定有导线。图 2-3、图 2-4 所示低压电力线路中导线、金具、杆塔之间的连接关系为杆塔上固定有横担,横担上固定有高压瓷瓶,高压瓷瓶上固定有导线。高压和低压电力线路组成结构大致相同,只是元器件的耐压等级有区别。

1. 高压电力线路的结构

高压电力线路的结构如图 2-1 所示。



图 2-1 高压电力线路的结构

2. 高压电力线路的接线

高压电力线路的接线如图 2-2 所示。



图 2-2 高压电力线路的接线

3. 低压电力线路的结构

低压电力线路的结构如图 2-3 所示。

4. 低压电力线路的接线

低压电力线路的接线如图 2-4 所示。

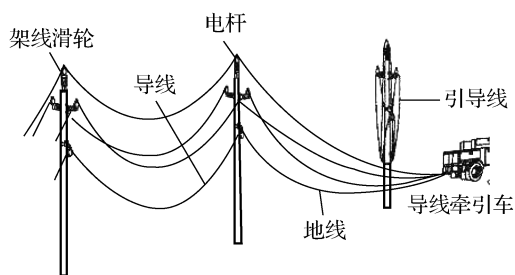


图 2-3 低压电力线路的结构

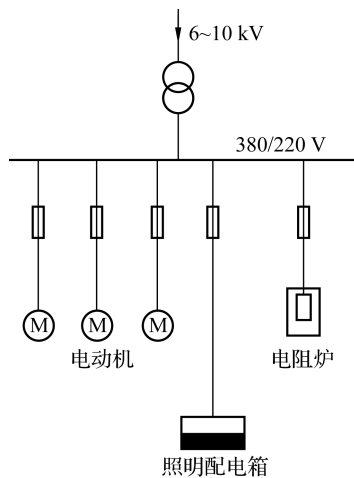


图 2-4 低压电力线路的接线