



普通高等教育“十二五”规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



供用电系统

(第二版)



王晓文 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

供用电系统

(第二版)

王晓文 编
蔡元宇 全成浩 吴志宏 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材、普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

书中全面系统地介绍了供用电系统的基本知识、理论、计算方法及相关新技术。全书共七章，主要内容包括供电系统的接线、供电网络的等值电路、供电系统电网的潮流计算、供电系统的无功补偿和电压调整、工厂供电系统供电负荷的计算、短路电流计算、供电系统经济运行。书后附有部分思考题及习题答案、供用电系统常用术语中英文对照表。

本书主要作为普通高等院校电气工程及其自动化专业教材，也可作成人教育、函授、自考的辅导教材，还可供电力及相关行业工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

供用电系统/王晓文编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2011. 6

普通高等教育“十二五”规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-1773-4

I. ①供… II. ①王… III. ①供电-高等学校-教材 ②配电系统-高等学校-教材 IV. ①TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 104850 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 2 月第一版

2011 年 6 月第二版 2011 年 6 月北京第五次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14 印张 340 千字

定价 24.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
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

前 言

供用电系统是高等院校电气工程及其自动化专业的一门主干课。本书按工科院校四年制本科专业对供用电系统所需要的专业知识与技能进行编写。为了加强电气工程及其自动化专业的专业建设和推进学科发展,本书结合技术应用型本科的教学特点,将编写内容与供电设备课程进行了全面的整合,力求形成完整、连续的知识体系。本书在内容上为供电设备等后续专业课程构筑了够用、实用的知识平台,体现出知识先导的特点。

本书内容按照由浅入深的原则,全面介绍供用电系统基础知识,侧重基本原理、实用计算,力求知识面广、实用性强。全书共分七章,讲授约 80 学时。每章后附有思考题及习题,书后附有常用术语中英文对照表。

本书由沈阳工程学院王晓文编写。书稿由沈阳工程学院蔡元宇教授、辽宁省电力有限公司全成浩教授级高级工程师、沈阳工程学院吴志宏副教授主审,并提出了许多宝贵意见;在编写过程中还得到许多同行的大力帮助,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请专家和读者批评指正。

编 者

2011 年 3 月于沈阳

目 录

前言

绪论	1
第一节 电力系统概述	1
第二节 发电厂类型	4
第三节 变电所类型	9
第四节 电网的电压	12
第五节 供配电系统的接地	15
思考题及习题	21
第一章 供配电系统的接线	23
第一节 供配电网的接线方式	23
第二节 变电所主接线的基本形式	30
第三节 变电所主接线示例	37
第四节 工厂供配电系统的一次接线	40
思考题及习题	44
第二章 供配电网路的等值电路	46
第一节 供配电线路的等值电路和参数计算	46
第二节 变压器的等值电路和参数计算	51
第三节 电抗器的等值电路和参数计算	57
第四节 供配电网路的等值电路	57
思考题及习题	59
第三章 供配电系统电网的潮流计算	61
第一节 电网的电压计算	61
第二节 电网的功率损耗	66
第三节 开式网潮流计算	69
思考题及习题	78
第四章 供配电系统的无功补偿和电压调整	79
第一节 供配电系统的电压偏移与无功平衡	79
第二节 无功功率补偿	84
第三节 供配电系统的电压调整	87
思考题及习题	96
第五章 工厂供配电系统供电负荷的计算	98
第一节 负荷曲线与特征参数	98
第二节 计算负荷及有关系数	100
第三节 按需要系数法确定计算负荷	105

第四节	工业企业供配电系统功率因数的提高·····	112
第五节	负荷统计示例·····	116
思考题及习题·····		120
第六章	短路电流计算·····	122
第一节	概述·····	122
第二节	标幺值算法与短路电流计算步骤·····	124
第三节	供配电系统三相短路计算·····	131
第四节	同步发电机供电系统的三相短路电流计算·····	137
第五节	三相短路的实用计算·····	141
第六节	电动机对短路电流的影响·····	149
第七节	低压配电系统短路电流计算·····	150
第八节	配电网的不对称短路计算·····	154
第九节	短路电流的效应·····	163
第十节	限制短路电流的措施·····	167
思考题及习题·····		171
第七章	供配电系统经济运行·····	175
第一节	导线截面选择·····	175
第二节	变压器容量选择和经济运行·····	181
第三节	电能损耗计算和降损措施·····	184
第四节	有功功率经济分配·····	195
第五节	无功功率经济分配·····	198
思考题及习题·····		201
附录 A	架空线的主要技术参数·····	203
附录 B	周期分量等值时间曲线族·····	206
附录 C	矩形铝母线长期允许载流量·····	207
附录 D	部分思考题及习题答案·····	208
附录 E	供用电系统常用术语中英文对照表·····	210
参考文献·····		217

绪 论

第一节 电力系统概述

一、电力系统的构成

随着经济的不断发展,人们与电能的关系越来越密切,无论是工业、农业、交通运输还是日常生活都离不开电能。电能的生产和传送是在电力系统中进行的。众所周知,电能供应来自于发电厂,发电厂大都建设在有动力资源的地方。动力资源因种类不同分布于不同的地域,例如水能资源集中在江河流域水位落差较大的地方,热能资源则集中在盛产煤、石油、天然气的矿区。而使用电能的用户,一般集中在大城市、工业中心等,由于地理、历史等各种条件的限制,与动力资源所在地有一定距离。因此必须建立一个系统,为发电厂和用户架起一座桥梁,用于传输电能,这便是电力系统。

电力系统是由发电机、变压器、输配电线路和电力用户的电气装置连接而成的整体,它完成了发电、输电、变电、配电、用电的任务。电力系统加上热力发电厂中的热动力装置、热能用户和水电厂的水动力装置,也就是加上锅炉、汽轮机、水库、水轮机及原子能发电厂的反应堆等,称为动力系统。电力系统中各种电压等级的变电所及输配电线路组成的统一体,称为电力网(简称电网)。电网的主要任务是输送与分配电能,并根据需要改变电压。图 0-1 所示为动力系统、电力系统和电网的示意图。图中用单线表示三相导体。

二、电力系统的发展

1831 年法拉第发现电磁感应定律后,很快出现了原始的交流发电机、直流发电机和直流电动机。由于当时电机制造和电力输送技术的发展集中于直流电,原始的电力线路输送的就是 100~400V 低压直流电,因输电电压低、输送功率小、距离近,所以应用不多。

到了 1882 年,法国人德普勒将水电厂发出的电输送到慕尼黑以驱动水泵,采用直流输电线路,电压为 1500~2000V,输送功率约 2kW,输电距离为 57km,这被视为是世界上第一个电力系统。

生产的发展对输送功率和输送距离提出了进一步要求,以致直流输电已不能适应需要。1885 年随着变压器和异步电动机的相继问世,实现了单相交流输电。1891 年在制成三相异步电动机、三相变压器的基础上又实现了三相交流输电。

1891 年在法兰克福举行的国际电工技术展览会上,俄国人多里沃·多勃列沃列斯基展出的输电系统奠定了近代输电技术的基础。该系统从拉芬镇到法兰克福全长 175km,安装在拉芬镇的水轮发电机组功率为 230kW,电压为 95V,转速为 150r/min。升压变压器将电压升高到 25000V,电功率经直径为 4mm 的铜线输送至法兰克福,用两台降压变压器将电压降低到 112V,其中一台变压器供电给白炽灯,另一台变压器供电给异步电动机,以驱动一台功率为 75kW 的水泵。这标志着电力系统的发展取得了重大突破,是现代电力系统的雏形。

随着生产技术的发展,科学的进步,人们逐步掌握了三相交流电,汽轮发电机组不久便

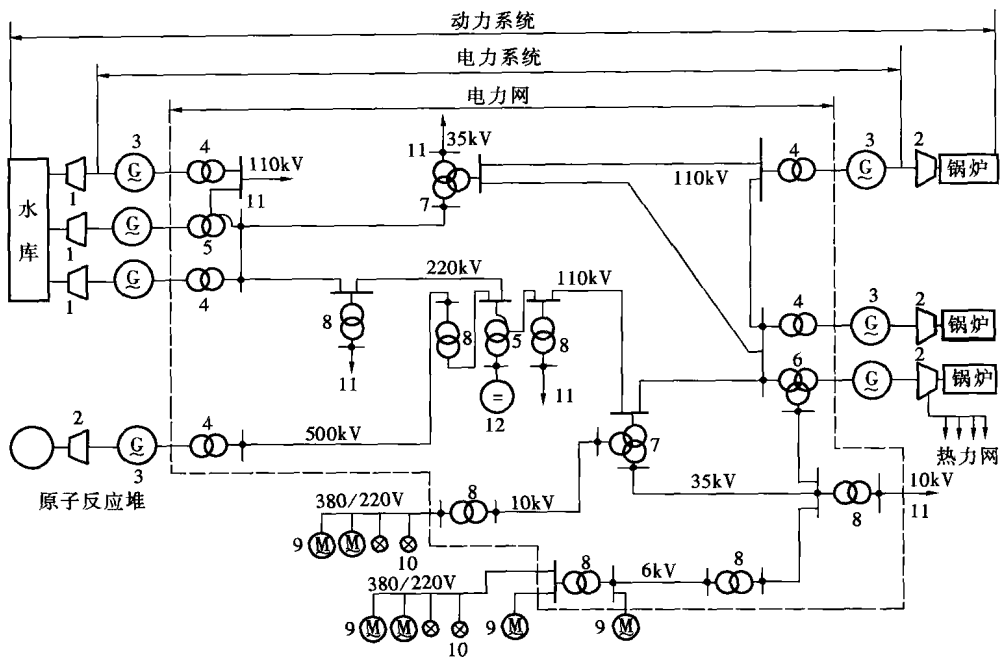


图 0-1 动力系统、电力系统、电网的示意图

1—水轮机；2—汽轮机；3—发电机；4—升压双绕组变压器；5—升压自耦变压器；6—升压三绕组变压器；7—降压三绕组变压器；8—降压双绕组变压器；9—电动机；10—电灯；11—负荷（泛指）；12—调相机

代替了以蒸汽机为原动力的发电机组，三相交流发电机、变压器和电动机等设备的性能指标不断提高。发电厂之间出现了并列运行，输电电压、输电功率、输电距离日益提高。各国逐步将一个个孤立运行的发电厂、变电所用线路连接起来，形成规模更大的电力系统。三相交流电力系统的优越性，使其取代了低压直流输电。数十年间，大电力系统不断涌现，甚至出现了全国性和跨国性的电力系统。

现在，有些电力系统的输电距离达到数千公里，系统容量达数亿千瓦，同步发电机并列运行的稳定性对电力系统可靠运行的威胁越来越大。虽然各国在解决交流系统稳定运行方面进行了大量的研究工作，也解决了许多工程实际问题，但交流输电由感抗所带来的固有困难和局限性，在生产实际中也逐渐地被人们所认识，于是，高压直流输电技术又重新为人们所重视。高压大容量可控汞弧阀与可控整流器的问世，为高压直流输电的发展创造了条件。许多国家已相继出现了超高压交、直流输电的大型电力系统。

在我国，自 1882 年在上海建立第一个发电厂至 1949 年的 60 余年间，电力工业的发展非常缓慢。1949 年建国之初，全国总装机容量为 184.9 万 kW，年发电量仅 43 亿 kW·h，在世界上居第 25 位。

新中国成立后，我国电力工业发展迅速。1957 年底，第一个五年计划完成时，全国总装机容量为 464 万 kW；1978 年，全国装机容量 5712 万 kW；2000 年，全国总装机容量突破了 3 亿 kW，年发电量达到 13 556 亿 kW·h；到 2008 年底，全国总装机容量达到 7.925 3 亿 kW，年发电量达到 34 334 亿 kW·h。火电机组最大单机容量 106 万 kW，水电机组最大单机容量 70 万 kW。

近年来,伴随着电力工业发展步伐不断加快,我国电网规模也不断扩大。目前全国已经形成了东北电网、华北电网、华东电网、华中电网、西北电网和南方电网六个跨省的大型区域电网。2009年1月6日,我国自主研发、设计和建设的具有自主知识产权的1000kV交流输电工程晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程正式投入运行;2010年6月18日±800kV云广特高压直流输电工程全面竣工投产。国家电网初步形成特高压及500kV跨区联网,也标志着我国在电压等级、电力技术、装备制造及电网建设方面进入世界领先行列。

未来,我国将以“始终坚持节约优先、加快促进绿色发展、建设坚强智能电网、推进体制科学创新”为基本途径,构建“安全、经济、绿色、和谐”的现代电力系统。

三、电力系统的基本要求

(一) 电力系统运行的特点

1. 电能生产、输送与使用的同时性

现阶段,电能尚不能大量地廉价储存,发、输、变、配及用电是在同一瞬间进行的,每时每刻的发电量取决于同一时刻用户的用电量和输送过程的损耗,其中的任一环节出现故障,都会影响电力系统的运行。

2. 与生产及人们生活的密切相关性

由于电能与其他能源之间转换方便,宜于大量生产、集中管理、远距离输送、自动控制等,因此使用电能较其他能源有显著优点,得到了广泛应用。电能供应不足或中断,将直接影响各部门生产和人民的正常生活,甚至危及人身和设备的安全,造成十分严重的后果。

3. 过渡过程的瞬时性

发电机、变压器、电力线路、电动机等元件的投入或退出都在瞬间完成。电能输送所需的时间仅千分之几甚至百万分之几秒。电力系统从一种运行方式过渡到另一种运行方式的过渡过程更是非常短促。因此,正常运行和故障情况所进行的调整和切换操作,要求非常迅速。电力系统运行必须采用自动化程度高、能迅速而准确动作的继电保护及自动装置和自动监测设备。

(二) 对电力系统的基本要求

1. 满足用电需求

满足国民经济各部门及人民生活不断增长的用电需求,保障供给是电力部门的重要任务。电力工业的发展速度,应超前于其他部门的发展速度,起到先行作用,应竭力避免由于缺电而使工业企业不能充分发挥生产能力的情况,尽量满足用户的用电需要。

2. 安全可靠地供电

电力生产遵循安全第一、预防为主的原则。这就要求加强电力系统各元件和设备的管理,经常进行监测、维护,并定期进行预防性试验和检修,定期更新设备,使设备处于完好的运行状态;提高工作人员素质,严格执行各项规章制度,不断提高运行水平,防止事故的发生。一旦发生事故,应能迅速和妥善处理,防止事故扩大,做到迅速恢复供电。因为,供电中断将使工农业生产停顿、人们生活秩序混乱,对某些用户甚至会造成产品报废、设备损坏以及危及人身安全等严重后果。突然停电给国民经济造成的损失远远超过电网本身的损失。因此,要确保安全可靠的供电。

电力系统中发生事故是导致供电中断的主要原因,但要杜绝事故的发生非常困难。由于各种用户对供电可靠性的要求不一样,可以将负荷按重要程度分为三类,以此决定保证供电

的顺序和系统接线方式。

一类负荷——中断供电将造成人身事故或重大设备损坏，且难以修复，给国民经济带来重大损失。在正常运行和故障情况下，系统接线方式必须有足够的可靠性和灵活性，保证对用户的连续供电。一类负荷要求有两个或两个以上独立电源供电，电源间应能自动切换，以便在任一电源发生故障时，对这类用户的供电不致中断。

二类负荷——中断供电将造成大量减产和废品，以致损坏生产设备，在经济上造成重要损失。二类负荷需双回线路供电；当双回线路供电有困难时，允许由一回专用线路供电。

三类负荷——不属于一、二类负荷的用户均属于三类负荷。三类负荷对供电无特殊要求，允许较长时间停电，可用单回线路供电，但也不能随意停电。

3. 保证电能质量

电能的质量指标主要是电压、频率和波形等变化不得超出允许范围。电压容许变化范围为额定电压的 $\pm 5\%$ ；频率的允许偏差为 $50\text{Hz} \pm (0.2 \sim 0.5)\text{Hz}$ ；波形应为正弦波，畸变率要十分小。电能质量合格，用电设备能正常工作并具有最佳的技术经济效果；如果变动范围超过允许值，虽然尚未中断供电，但已严重影响到产品质量和数量，甚至会造成人身危害和设备故障，同时对电力系统本身的运行也有危险。因此，必须通过调频及调压措施来保证频率和电压的稳定。

4. 保证电力系统运行的经济性

电能生产的规模很大。在其生产、输送和分配过程中，本身消耗的能源占国民经济能源中的比例相当大，因此，最大限度地降低每生产 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 电能所消耗的能源和降低输送、分配电能过程的损耗，是电力部门的一项极其重要的任务。电能成本的降低不仅意味着能源的节省，还将降低各用电部门成本，对整个国民经济带来很大的好处。现在最广泛的做法是实行电力系统的经济运行。按照最优化原则分配各发电厂、发电机组之间的发电出力及输电和配电路径，充分利用水力资源，尽可能采取节能降耗措施，力争取得整个现代电力系统最大的、综合的经济效益。

应当指出，以上要求是互相关联的，而且通常是相互矛盾、相互制约的。因此，要综合考虑，满足任何一项要求时，须兼顾其他要求。

第二节 发电厂类型

电力系统的起点就是发电厂，它是整个系统的能量源头。而发电厂的能量来源又是什么呢？那就是煤炭、石油、天然气、水利等，这些随自然界演化生成的动力资源是能量的直接提供者，称为一次能源。电能是由一次能源转换而成，称为二次能源。

发电厂是生产电能的核心，担负着把不同种类的一次能源转换成电能的任务。依据使用的一次能源的不同，发电厂被分成许多类型。例如，燃烧煤、石油、天然气发电的火力发电厂，利用水能发电的水力发电厂，利用核能发电的核动力电厂等。为了节约能源资源，还正在开发新的发电能源，如潮汐发电、地热发电、太阳能发电、风力发电等。目前全世界的电源构成中，火力发电设备容量占的比重最大，超过 60% ；水电设备容量约占 20% ，核能发电设备容量约占 16% 。火力发电仍是主要的发电方式。

一、火力发电厂

火力发电厂一般简称为火电厂，是以煤、石油、天然气等作为燃料的发电厂。燃料在锅炉中燃烧时的化学能被转换为热能，再借助汽轮机等热力机械将热能变换为机械能，并由汽轮机带动发电机将机械能变换为电能。

火力发电厂按其作用可分为单纯发电的和既发电又兼供热的两种类型。前者指一般的火力发电厂，后者指供热式火力发电厂（或称热电厂）。一般火力发电厂应尽量建设在燃料基地或矿区附近，将发出的电能用高压线路送往用电负荷中心。这样既避免了燃料的长途运输，提高了能量输送的效益，还防止了对城市地区的环境污染，通常把这种火力发电厂称为“坑口电厂”。坑口电厂是当前和今后建设大型火力发电厂的主要发展方向。热电厂的建设是为了提高热能的利用率，由于它要兼顾供热，所以必须建设在大城市或工业区的附近。

一般火力发电厂多采用凝汽式汽轮发电机组，故又称为凝汽式火力发电厂，其生产过程如图 0-2 所示。

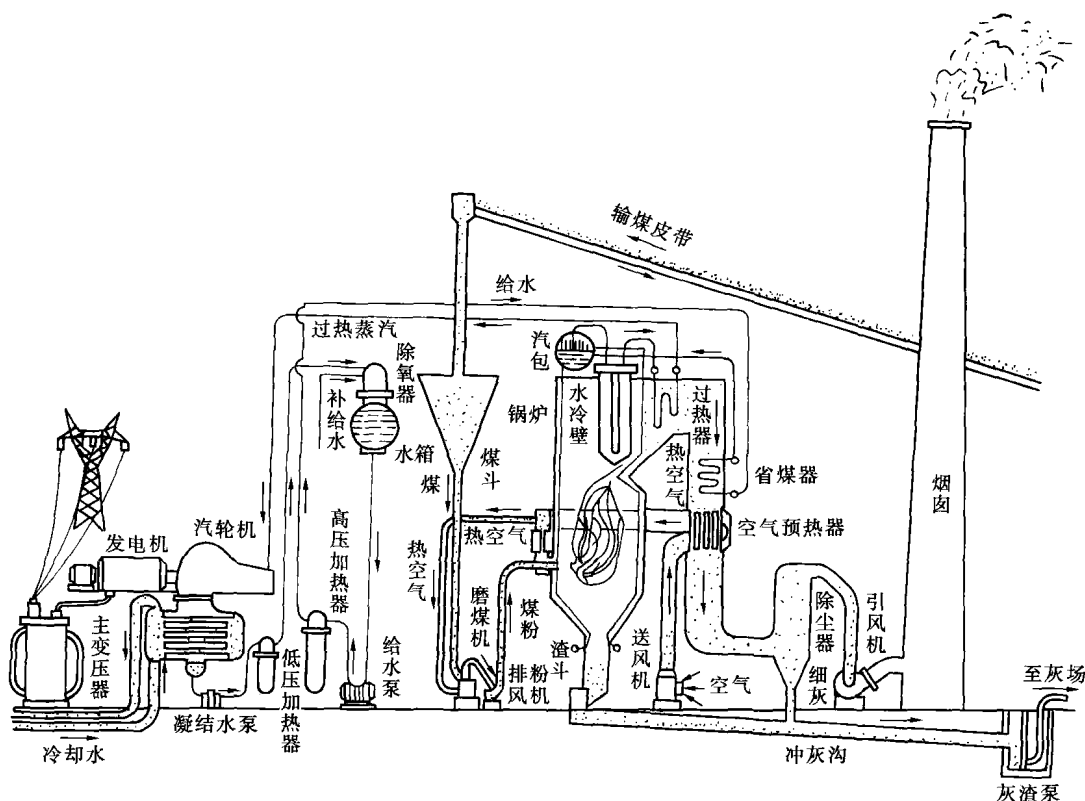


图 0-2 凝汽式火力发电厂生产过程示意图

煤先由输煤皮带运送到锅炉房的煤斗中，再经煤斗进入磨煤机被磨成煤粉，在热空气的输送下，经喷燃器送入锅炉燃烧室内燃烧。助燃空气由送风机先送入空气预热器加热为热空气，其中一部分热空气进入磨煤机以干燥和输送煤粉，另一部分热空气则进入燃烧室助燃。在燃烧室内，燃料着火燃烧并放出热量，其热量的一部分将传给燃烧室四周的水冷壁，并在流过水平烟道内的过热器及尾部烟道内的省煤器、空气预热器时，继续把热量传给蒸汽、水和空气；而被冷却后的烟气则经除尘器除去飞灰，由引风机从烟囱排入大气。另外，通常用

水把由锅炉下部排出的灰渣和由除尘器下部排出的细灰冲到灰渣泵房,经灰渣泵排往储灰场。

水、蒸汽是把热能转化成机械能的重要工质。净化后的给水,先送入省煤器预热,继而进入汽包再降入水冷壁管中吸收燃烧室的热能后蒸发成蒸汽。水冷壁中产生的蒸汽在流经过热器时进一步吸收烟气的热量而变为过热蒸汽,然后通过主蒸汽管道被送入汽轮机。进入汽轮机的蒸汽膨胀做功,推动汽轮机的转子旋转,将热能变为机械能,汽轮机带动发电机旋转,将机械能变为电能。在汽轮机内做完功的排汽将进入凝汽器内放出汽化热而凝结为水,凝结水再由凝结水泵经由低压加热器加热送入除氧器。除氧后的水由给水泵打入高压加热器加热进一步提高温度后再进入锅炉。以后又重复上述过程,并不断地产生出热能。

将汽轮机的排汽冷却为水是由循环水泵把冷却水送入凝汽器来实现的。冷却水经循环水泵打入凝汽器的循环水管中,在吸收了蒸汽的热量后,又经排水管排出,从而将热量带走。通常,由于循环水系统带走很大一部分热量,因此,一般凝汽式发电厂的效率是不高的,目前比较先进的指标也只达到 30%~40%。

为了提高这种发电厂的效率,人们自然会想到能否尽量减少被循环水所带走的热量,而把做过功的蒸汽(乏汽)中所含的热量充分利用起来。这就是发展供热式发电厂的原因。供热式发电厂与凝汽式发电厂不同的地方只是在汽轮机的中段抽出了供热能用户的蒸汽,而这些蒸汽实际上已经在汽轮机中做了部分功,再把这些蒸汽引到给水加热器去加热供热力用户的用水,或把蒸汽直接送给热力用户。这样一来,进入凝汽器内的蒸汽量就大大减少了。于是循环水所带走的热量消耗也就相应地减少了,从而提高了热效率。现代化大型供热式发电厂的效率可达 60%~70%以上。从供电和供热的全局来看,可节约燃料 20%~25%。由于供热网络不能太长,所以供热式发电厂总是建设在热力用户附近。此外,供热式发电厂的发电出力还与热力用户的需热量有关。当需热量多时,发电厂必须相应多发电;需热量少时,则发电出力也减少。因而,供热式发电厂在电网中的运行方式远不如凝汽式发电厂灵活。

火力发电厂发展的主要趋势是采用高温、高压(亚临界、超临界)、大容量机组(目前世界上最大机组容量已达 1300MW)以及建设大容量的火力发电厂,这样可以显著地提高火力发电厂的效率。

二、水力发电厂

水力发电厂是利用河流所蕴藏的水能资源来发电。水能资源是最干净、廉价的能源。水力发电厂的容量大小决定于上下游水位差(简称水头)和流量大小。因此,水力发电厂往往需要修建拦河大坝等水工建筑物以形成集中的水位差,并依靠大坝形成具有一定容积的水库以调节水库的流量。根据地形、地质、水能资源特点等的不同,水力发电厂可分为坝式水电厂、引水式水电厂、混合式水电厂和抽水蓄能电厂。

坝式水电厂的水头是由挡水大坝抬高上游水位而形成。若厂房布置在坝后,则称之为坝后式水电厂,如吉林的小丰满水电厂、浙江的新安江水电厂。若厂房起挡水坝的作用,承受上游水的压力,则称之为河床式水电厂,如葛洲坝水电厂。

引水式水电厂的水头由引水道形成。这类水电厂的特点是具有较长的引水道,如天生桥二级水电厂,设计水头 176m,引水隧洞长达 9555m。

混合式水电厂的水头由坝和引水道共同形成。这类电厂除坝具有一定高度外,其余与引水式电厂相同。

抽水蓄能电厂是一种特殊的水电厂，当电网中的电力负荷处于高峰时段，电厂放水发电；电力负荷处于低谷时段，利用电网的多余电能将下游水库的水抽至上游水库，转变为势能形态储蓄起来，达到储蓄和调节电能的目的，如广州抽水蓄能电厂。

水力发电厂的生产过程要比火力发电厂简单，如图 0-3 所示。

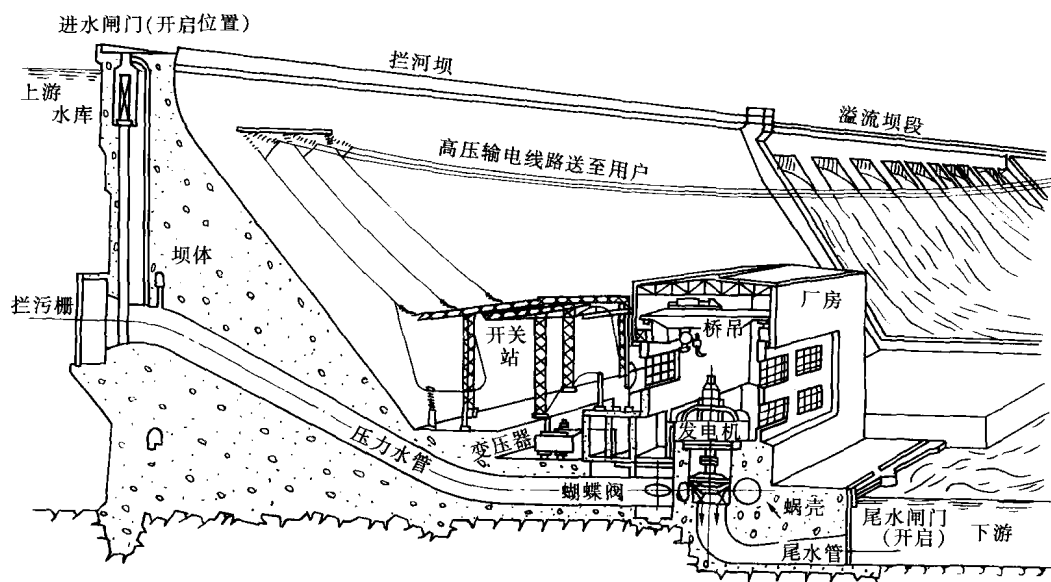


图 0-3 水力发电厂生产过程示意图

由挡河坝维持在高水位的水，经压力水管进入螺旋形蜗壳推动水轮机转子旋转，将水能变为机械能。水轮机带动发电机旋转，机械能再变为电能。做完功的水则经过尾水管排往下游，发电机发出的电能则经过变压器升压后由高压输电线路送出。由于水力发电厂的生产过程比较简单，运行维护人员较少，易于实现自动化；水力发电厂不需要消耗燃料，它的电能生产成本比火力发电厂低，且效率较高；水力发电机组承受变动负荷的性能较好，因此在系统中的运行方式较为灵活。水力发电机组起动迅速，在事故时能充分地发挥其备用作用。随着水力发电厂的兴建，往往可以同时解决发电、防洪、灌溉和航运等多方面的问题，实现河流的综合利用，使国民经济取得更大的综合效益。但是由于水力发电厂需建设大量的水工建筑物，相对于火力发电厂来说，建设投资比较大，建设工期比较长，占用劳力比较多。特别是水库还将淹没一部分土地，给农业生产带来一定不利影响，还存在移民问题。另外，水力发电厂的运行方式受气象和水文等条件的影响，有丰水期和枯水期之别，会给电网的运行带来一定的不利因素。

水力发电厂按其运行方式可分为无调节水电厂和有调节水电厂。无调节水电厂的水库库容小，不能对径流进行调节，直接引用河中径流发电，所以也称其为径流式水电厂。有调节水电厂可利用水库对径流进行重新分配，按调节周期长短，又可分为日调节、周调节、季调节、年调节和多年调节水电厂。

三、原子能发电厂

原子能的利用是现代科学技术的一项重大成就。从 20 世纪 40 年代原子弹的出现起，原子能就逐渐被人们所掌握并陆续被用到工业和交通等许多部门，从而为人类提供了一种新的

巨大的能源。

由于煤、石油和天然气等燃料的储量有限，它们又是重要的化工原料，一些国家的水能资源已基本开发殆尽，因此从 20 世纪 50 年代起某些国家就转向研究原子能发电。从 1954 年世界上第一个原子能发电厂建成至 2010 年底，全世界已有几十个国家先后建成四百多个原子能发电机组，总装机容量已超过 3.9 亿 kW。正在建设或已定货的原子能发电厂的总容量更大。一些资源贫乏的发达国家由于受到“能源危机”的冲击，迫使他们不得不走原子能发电的道路，这是促使原子能发电厂迅速发展的主要原因。

原子能发电的基本原理是把原子核裂变所产生的原子能转变为热能，将水加热为蒸汽，然后同一般火力发电厂一样，用蒸汽推动汽轮机，再带动发电机发电。原子能发电厂与火力发电厂在构成上的主要区别是：前者用核蒸汽发生系统（反应堆、蒸汽发生器、泵和管道）来代替后者的蒸汽锅炉。

根据原子反应堆型式不同，原子能发电厂可分为几种类型。图 0-4 为目前使用较为广泛的轻水堆型（包括沸水堆型和压水堆型）原子能发电厂的生产过程示意图。

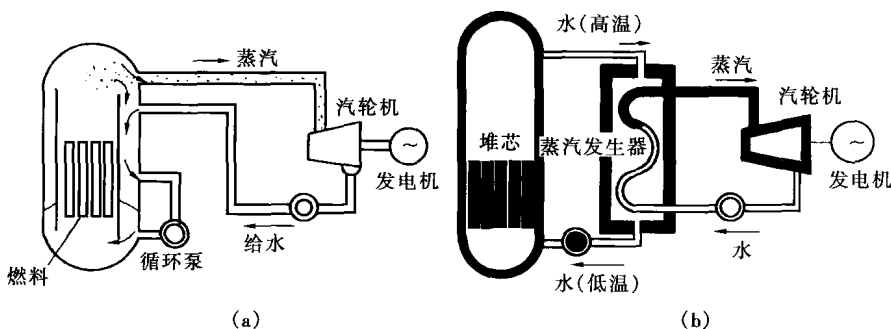


图 0-4 原子能发电厂生产过程示意图

(a) 沸水堆型反应堆；(b) 压水堆型反应堆

这两种反应堆是用水作为载热剂。在沸水堆内，水被直接变成蒸汽，它的系统构成较为简单，但有可能使汽轮机等设备受到放射性污染，以致使这些设备的运行、维护和检修复杂化。为了避免这个缺点，可采用压水堆型反应堆。这里，增设了一个蒸汽发生器，从反应堆里引出的高温水在蒸汽发生器内将热量传给另一个独立回路的水，将之加热成高温蒸汽以推动汽轮发电机组旋转。由于在蒸汽发生器内两个回路的水是完全隔离的，所以就不会造成对汽轮机等设备的放射性污染。

原子能发电厂的主要优点之一是可以大量节省煤、石油和天然气等燃料。例如，一座装机容量为 500MW 的火力发电厂每年至少要消耗 150 万 t 煤；而同容量的原子能发电厂每年只消耗 600kg 的铀燃料，可以避免大量的燃料运输。原子能发电厂的另一个特点是燃烧时不需要空气助燃。所以，原子能发电厂可以建设在地下、山洞里、水下或空气稀薄的高原地区。从发电厂的投资和发电成本来看，原子能发电厂所需的固定投资虽较火力发电厂要高，但长年的燃料费和维护费则比火力发电厂要低，它的规模越大则生产每千瓦时电能的投资费用下降越多。

原子能发电厂的主要问题是放射性污染。尽管在发电厂建设时已采取了相应的措施，但放射性污染事故仍不断发生，有的还比较严重。例如，美国的西西里核电站事故、前苏联的

切尔诺贝利核电站事故。显然，只有更好地解决了污染的防护问题和放射性废弃物的处理问题，原子能发电厂的建设才可能得到更大的发展。我国在建设原子能发电厂方面也取得了可喜的成果，浙江秦山核电站、广东大亚湾核电站均已建成投产。

目前，尽管世界上对原子能发电厂的建设（主要是其安全性）存在着争论，但是在“能源危机”的冲击下，对一些资源贫乏的发达国家来说，别无选择，唯有继续执行建设原子能发电厂的计划。因此，预计在今后相当长的一段时间内，对原子能发电的有关技术、措施的研究，仍将继续是人们所关注的中心课题之一。

四、地热发电厂

地下水在地表深处被加热成蒸汽或热水即构成了地热资源。根据地质条件不同，热水温度约在几十度到几百度，如我国西藏羊八井地热电厂水温约为 150°C 。利用这种低温热能发电有两种方式：一种是通过减压扩容法将地下热水变为低压蒸汽，供汽轮机做功；另一种是用地下热水加热低沸点的特殊工质，使其变成气体对汽轮机做功。

五、潮汐电厂

海水涨潮、落潮包含着巨大的动能和势能，利用这种能量发电就是所谓的潮汐电厂。潮汐发电需要建设拦潮堤坝，因而要求一定的地形条件、足够的潮汐潮差、较大的容水区。理想的建厂地点是海岸边或河口地区，可以拦蓄较大水量，少花费投资。

六、风力发电厂

虽然风能在一定程度上讲取之不尽，但质量差。为了取得稳定的电能一般与蓄电池并联运行。大型风力发电机的研制方向是提高可靠性和降低成本。国外比较重视风能发电。近年我国也鼓励风力发电，并给予优惠政策。

第三节 变 电 所 类 型

在电力系统不同电压等级的电网间，电压的升高或降低是通过变压器完成的。安装变压器及开关、测量、保护与控制设备的地方称为变电所。为了保持电压质量，有些变电所还设置了电力系统所需要的电力电容器、静止补偿装置或调相机等无功补偿设备。

变电所的类型按其地位和作用、电压、结构型式的不同等有不同的分类。

一、按在电网中的地位和作用划分

（一）升压变电所

用于升高电压的变电所称为升压变电所（或称升压站），作用是将发电机电压变换成 35kV 以上各级电压，利用高压输电线路把电能送到需要地点，向用户供电。升压变电所一般设在发电厂内，称为发电厂升压站；此外也有设在适当远离发电厂地点的。

（二）降压变电所

用于降低电压的变电所称为降压变电所。其作用是将输电线路的高电压降低，通过各级配电线路把电能分配给用户使用。按照降压变电所在系统中的地位不同，分为枢纽变电所、中间变电所、地区变电所、终端变电所，如图 0-5 所示。

1. 枢纽变电所

枢纽变电所位于电力系统的枢纽点，连接电力系统超高压和高压、中压的几个部分，汇集多个电源和大容量联络线，电压为 $330\sim 500\text{kV}$ 。枢纽变电所的特点是：电压等级高，变

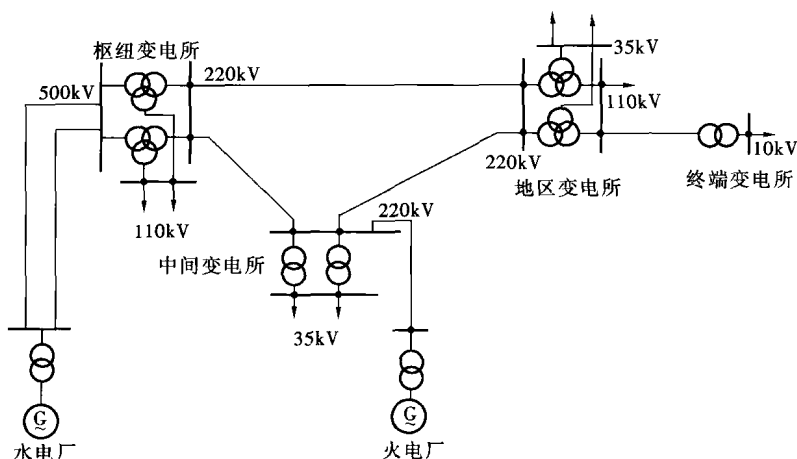


图 0-5 降压变电所类型示意图

电容量大，出线回路多；全所停电后，将引起系统解列，甚至出现瘫痪。

2. 中间变电所

中间变电所高压侧以交换潮流为主，起系统交换功率的作用，或使长距离输电线路分段；一般汇集2~3个电源，电压为220~330kV，同时又降压供给当地用电。这样的变电所起中间环节的作用，称为中间变电所。全所停电后，将引起区域网络解列。

3. 地区变电所

地区变电所高压侧电压一般为110~220kV，是以对地区用户供电为主的变电所，这是一个地区或城市的主要变电所。全所停电后，仅使该地区中断供电。

4. 终端变电所

终端变电所在输电线路的终端，接近负荷点，高压侧电压为35~110kV，经降压后直接向用户供电的变电所，即为终端变电所。全所停电后，只是用户受到损失。

另外，将终端变压器后边中压配电网的电压（如10kV）降为380V用户电压，是由台式变压器或箱式变压器来完成的，不设变电所。

二、按电压高低划分

1. 大型变电所

大型变电所的电压等级为330kV及以上。一般所区占地较大、建构物较多、自动化水平要求高，如枢纽变电所。

2. 中型变电所

中型变电所的电压等级为220kV和110kV。一般所区占地略小，也有屋内型，将高压输电电压变为高压配电电压，生产现场常称一次变电所。

3. 小型变电所

小型变电所的电压等级为110kV及以下。一般设为屋内型，占地少，将高压配电电压降为中压配电电压，生产现场常称二次变电所。

三、按变电所的结构型式划分

1. 屋外式变电所

屋外式变电所除仪表、继电器、控制设备、直流电源等二次设备放在屋内外，变压器和

开关设备等主要大型设备均放在屋外。通常电压较高的变电所大多为屋外式，如 220kV 及以上电压的变电所。屋外式变电所外观图如图 0-6 所示。

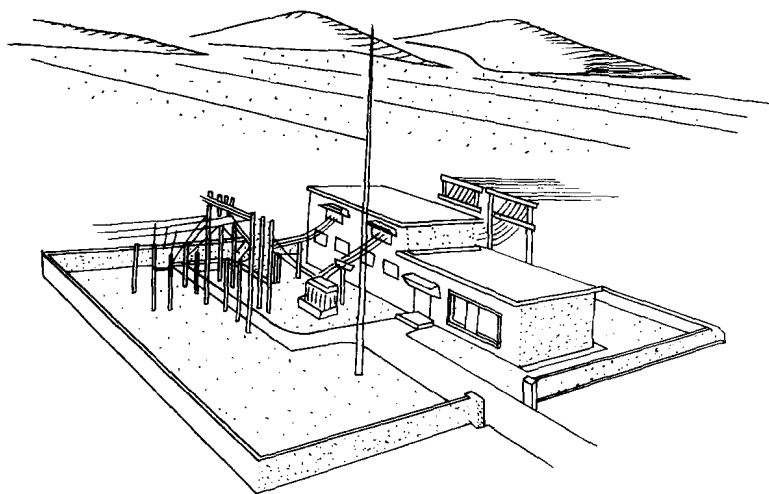


图 0-6 屋外式变电所外观图

2. 屋内式变电所

屋内式变电所的所有设备均放在屋内。由于采用了多层立体式布置和户内式设备，因而减少了占地面积。这种变电所，一般都位于市内居民密集地区和对环境美观有要求的市区，或位于海岸、盐湖、化学工厂及其他空气污秽地区。近年来，由于 SF₆ 组合电器的大量应用，屋内变电所的电压等级逐渐升高，有些 220kV 变电所也采用屋内式。

3. 地下式变电所

地下式变电所又可分为“下地”和“入洞”两类，全部设备均设置在地下构筑物或洞室内，以适应城市建设或战备的要求。这种变电所，占地面积更小，但工程量大、造价较高，故仅适用于有特殊要求的场所，重点要解决好通风与防火问题。

4. 箱式变电所

改革开放以来，人们生活水平提高，家用电器普及很快；城市住宅开发飞跃发展，形成建筑物密集、高层的特点。对供电的要求是用电量大、可靠性高，还要求供电设施与周围的环境协调，供电模式先进、合理、灵活。因此，传统的变电所已经不适应现代住宅小区，取而代之的是箱式变电所（箱变）。

箱式变电所构造大体上是一个箱式结构，设有高压开关小室、变压器小室及低压配出开关小室三个部分，可安装 1250kV·A 及以下变压器。箱式变电所特点是：占地面积小；工厂化生产、速度快、质量好；施工速度快，仅需现场施工基础部分；外形美观，能与住宅小区环境协调一致；适应性强，具有互换性，便于标准化、系列化；维护工作量大，节约投资。因此，无论在国外还是国内，箱式变电所都受到重视与欢迎，得到普遍地应用。