



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

电力工程

■ 主编 王艳松

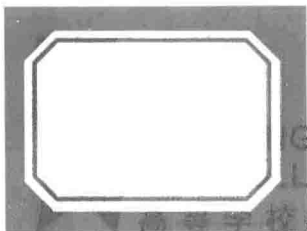


POWER ENGINEERING



中国石化大学出版社

割涂版 输密码



ENGINEERING MATERIALS
COLLEGE STUDENTS

教材

电力工程

主 编 王艳松

副主编 潘大伟

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电力工程/王艳松主编. —东营:中国石油大学出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-5636-3814-7

I. ①电… II. ①王… III. ①电力工程 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 220476 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 电力工程
作 者: 王艳松 潘大伟

责任编辑: 高 颖 秦晓霞 (电话 0532—86981531)

封面设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社 (山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 青岛锦华信包装有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社 (电话 0532—86981532, 0532—86983437)

开 本: 180 mm×235 mm 印张: 19.25 字数: 395 千字

版 次: 2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 31.00 元

内容提要

本书为中国石油大学(华东)“十二五”规划教材。

本书全面地介绍了电力系统、电力网络以及发电厂和变电所电气部分的基本知识、原理和分析方法。全书共分七章,主要包括:电力工程概述、电气设备工作原理及主接线、电力网络及其简单潮流计算、电力系统的短路电流分析与计算、发/变电站的二次系统、供配电系统的继电保护、电力系统过电压与电气接地等。

本书主要作为高等院校电气工程类专业和自动化类专业学生的教材,也可作为高职高专和函授学生的教材,亦可供相关领域的工程技术人员参考。

前言

Preface

电气工程及其自动化专业是电气信息类的强弱电结合的宽口径专业,“电力工程”是本专业的必修课程。本书是根据加强基础、拓宽专业知识面的教学改革而编写的,在内容上构建了电力工程和供用电的系统知识平台,是今后进一步加深、加宽专业学习和工程实践的基础。

本书以加强学生专业基础为目标,并结合社会需求,构建知识体系。本书的主要内容包括:电力工程概述、电气设备工作原理及主接线、电力网络及其简单潮流计算、电力系统的短路电流分析与计算、发/变电站的二次系统、供配电系统的继电保护、电力系统过电压与电气接地等。为了加深读者对本书内容的理解,本书每章均有思考题和习题。为了加强学生综合应用专业知识的分析和设计能力的培养,本书还有《电力工程课程设计》配套教材。

中国石油大学(华东)王艳松教授任本书主编,并负责全书的统稿工作。潘大伟担任副主编。全书共分七章,其中第一到第四章由王艳松编写,第五到第七章由潘大伟编写。本书在编写过程中得到了张丽霞副教授的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。同时,也向本书所引用参考资料的作者表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2012年6月

目 录

Contents

第一章 电力工程概述	1
第一节 电力系统的基本概念	1
第二节 发电厂的生产过程	7
第三节 电力系统的电能质量指标	19
第四节 电力系统中性点的运行方式	25
第五节 电力负荷与负荷曲线	30
第六节 电力工业发展概况及前景	34
思考题与习题	36
第二章 电气设备工作原理及主接线	37
第一节 概述	37
第二节 高压开关电器	38
第三节 高压熔断器	53
第四节 互感器	55
第五节 电气主接线	70
第六节 低压电器	84
第七节 高低压成套配电装置	92
思考题与习题	96
第三章 电力网络及其简单潮流计算	98
第一节 电力系统的接线方式	98
第二节 电力网元件参数和等值电路	105

第三节 电力网的电压计算	120
第四节 电网元件的功率损耗与功率分布计算	124
第五节 简单开式电力网络的潮流估算方法	129
第六节 简单闭式电力网络的潮流估算方法	137
第七节 降低网损的技术措施	142
思考题与习题	153
第四章 电力系统的短路电流分析与计算	157
第一节 概述	157
第二节 无限大容量系统的三相短路过程分析	159
第三节 不对称短路电流的分析与计算	167
第四节 电动机对短路冲击电流的影响	180
第五节 低压电网短路电流计算	181
第六节 短路电流的力效应和热效应	185
思考题与习题	193
第五章 发/变电站的二次系统	195
第一节 二次回路接线图	195
第二节 二次回路的操作电源	199
第三节 电气测量仪表和互感器的配置	201
第四节 断路器的控制和信号回路	204
第五节 变电所常用自动装置	209
第六节 变电站综合自动化简介	215
思考题与习题	223
第六章 供配电系统的继电保护	225
第一节 继电保护的基本知识	225
第二节 常用保护继电器	229
第三节 电力线路的电流保护	234
第四节 电力变压器的保护	246
第五节 高压电动机的保护	253
第六节 高压电容器的保护	257
思考题与习题	260

第七章 电力系统过电压与电气接地	262
第一节 供电系统的雷电过电压	263
第二节 电力系统的内部过电压	277
第三节 接地和接零技术	290
思考题与习题	297
参考文献	298

第一章 电力工程概述

第一节 电力系统的基本概念

一、电力系统的组成

电能具有输送方便、控制灵活、转换容易、利用率高、清洁经济等诸多优点,是厂矿企业最主要的动力和社会生活不可缺少的能源。

电能从生产到供给用户使用,一般要经过发电、变电、输电、配电和用电几个环节。由发电厂、变电所、输电线路和电力用户连接而成的统一整体,称为电力系统。图 1-1 所示为简单的电力系统,该系统起着生产、输送、分配和消耗电能的作用。

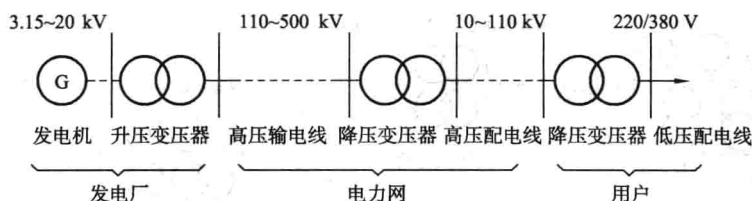


图 1-1 从发电厂到用户的送电过程示意图

发电厂是生产电能的工厂,可将煤、石油、天然气、水等一次能源转换成电能。发电厂可分为火、水、核、风、太阳、地热等发电厂。电能又称为二次能源。

电力网是连接发电厂和用户的中间环节,由变电所和各种不同电压等级的电力线路组成。按电压等级的高低和其供电范围的大小,电力网可分为地方电力网、区域电力网及超高压远距离输电网三种类型。地方电力网是指电压等级在 110 kV 及以下、供电半径在 150 km 以内的电力网;区域电力网是指电压等级在 220 kV 及以上、供电半径超过 100 km 的电力网;超高压远距离输电网是指电压等级为 330~500 kV 的电力网,一般由远距离输电线路连接而成。

变电所起着变换电压、交换和分配电能的作用,由电力变压器和配电装置组成,可分为区域变电所、地区变电所和终端变电所等。区域变电所是指由大电网供电,高压侧电压为 330~500 kV 的变电所,全所停电后,将引起整个系统解列甚至瓦解;地区变电所是指由发电厂或区域变电所供电,高压侧电压为 110~220 kV 的变电所,全所停电后,将使该地区中断供电;终端变电所是指主要由地区变电所供电,其高压侧为 10~110 kV 的变



电所,全所停电后,将使用户中断供电。用来接受和分配电能而不承担变换电压任务的场所称为配电所,通常又称开闭所。

电力用户消耗电能,将电能转换成其他形式的能量,又称为负荷。

电力系统加上发电厂的动力部分(火电厂的锅炉、汽轮机、热力管网等;水电厂的水库、水轮机、压力管道等)构成了动力系统。

随着国民经济的发展,用电量不断地增加,发电厂、输电线路、变压器等的容量和数量迅速增大,电力用户对电能的稳定性、可靠性的要求也愈来愈高。同时,由于用电的负荷中心在城市、大工业中心,而发电厂一般建在水力、热力资源的产地,例如丰富的水力资源集中在水流落差较大的偏僻地区,煤、石油、天然气等的矿区距离负荷中心也很远,因此,为了能满足不断增长的用电需要,保证用电质量,就需要在这些一次能源产地建立很大规模的火电厂、水电站,再通过输电线路将电能送往负荷中心。与建在大城市周围的发电厂相比,这样不仅节省了大量的燃料运输费用,而且杜绝了因燃料燃烧而导致的城市污染。为了能大容量、高质量、远距离地输送电能,还必须建设高压输电线路及相应的升压、降压变电所(或称变电站),这样才能将电能供给用户使用。

将分散于各地的各种类型的发电厂,通过输电线路、变电所与用户连接成一个整体,就是现代的电力系统。图 1-2 所示为大规模电力系统示意图。

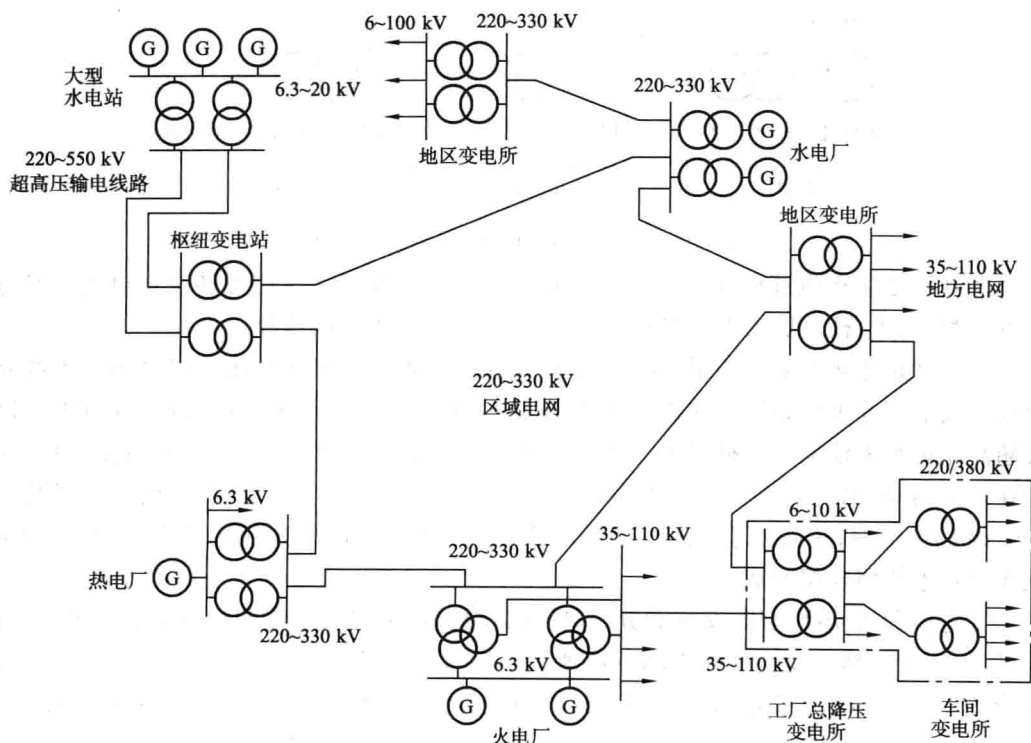


图 1-2 电力系统示意图

电力系统联网运行,在技术和经济上具有十分明显的优越性。

(1) 可以减少系统的总装机容量。

由于不同地区的生产、生活及时差、季差情况等存在差异,它们的最大负荷不会同时出现,因此,联网后的最高负荷小于原有各电网最高负荷之和,这样就可以减少全网系统的总装机容量,从而节约电力建设投资。

(2) 可以减少系统的备用容量。

为了防止发电机组发生故障或检修时中断对用户的供电,电力系统必须装设一定的备用容量。由于备用容量在电力系统中是可以互用的,所以电力系统越大,它在总装机容量中所占的比重就越小。

(3) 可以提高供电的可靠性。

联网后,由于各发电厂之间的备用容量可以相互支援,互为备用,而系统中所有发电厂的设备同时故障和检修的概率很小,因此,电力系统越大,抵抗事故的能力越强,供电的可靠性越高。

(4) 可以安装大容量的机组。

大容量机组效率高、占地面积少、投资和运行费用低。但是,孤立运行的电厂或容量较小的电力系统,因没有足够的备用容量,不允许采用大机组,否则一旦机组因事故或检修退出工作,将造成大面积停电,给国民经济带来严重损失。电网互联后,由于拥有足够的备用容量,从而为安装大容量机组创造了条件。

(5) 可以合理利用动力资源,提高系统运行的经济性。

水电厂的生产受季节的影响大,丰水期水量过剩,枯水期水量短缺。组成大型电力系统后,水、火电厂联合运行,可以灵活调整各电厂的发电量,提高电厂设备的利用率。例如,在丰水期让水电厂多发电,火电厂少发电并适当安排机组检修;而在枯水期让火电厂多发电,水电厂少发电并安排检修。这样互相调节后,可以充分利用水利资源,减少煤炭消耗,从而提高电力系统运行的整体经济效益。此外,水电厂进行增减负荷的调节比较简单,宜作为调频厂,因而有水电厂的系统调频问题比较容易解决。

(6) 可以提高电能质量。

电力系统容量越大,因负荷波动所引起的系统频率和电压的波动就越小,电能质量也就越好。

为了表示电力系统中各个元件之间的相互连接关系,通常采用电气接线图和地理接线图。电气接线图主要用单线图来显示系统中各个发电厂和变电所的发电机、变压器、母线、线路、开关等元件之间的电气连接关系,通常称为电气主接线图。地理接线图主要表示系统中各个发电厂和变电所的真实地理位置、电力线路的路径以及它们之间的相互连接关系。图 1-3 所示为按地图比例绘制的某地区电力系统(主要部分)地理接线图,通过地理接线图可以对系统的主要情况有一个比较清晰的了解。

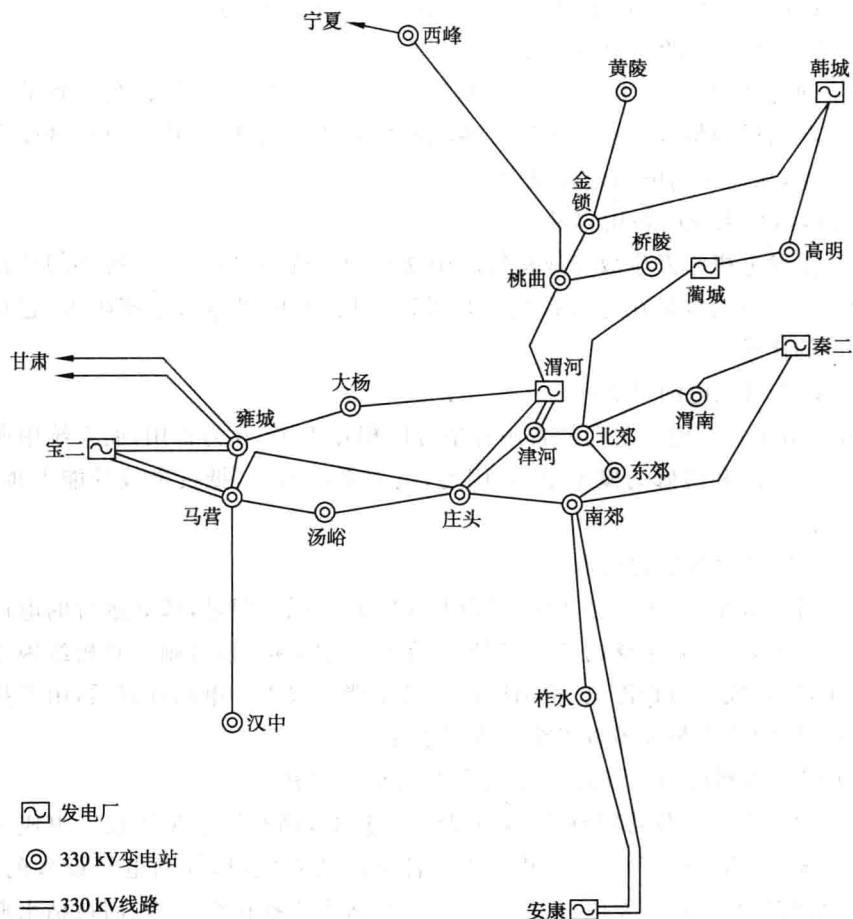


图 1-3 某区域电网地理接线图(单线图)

二、电力系统的基本参数

描述电力系统发展规模常用的基本参数有装机容量、年发电量,另外最大负荷、工频、最高电压等级等也是电力系统的基本参数。

(1) 总装机容量:指系统中所有发电机组额定有功功率的总和,以 MW 和 GW 计。其中,1 GW=10³ MW(100 万千瓦),1 MW=10³ kW(1 000 千瓦)。

(2) 年发电量:指系统中所有发电机组全年发出电能的总和,以 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 、 $\text{GW} \cdot \text{h}$ 、 $\text{TW} \cdot \text{h}$ 计。其中, $1 \text{ MW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ (千度), $1 \text{ GW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ MW} \cdot \text{h}$ (100 万度), $1 \text{ TW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ GW} \cdot \text{h}$ (10 亿度), $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1$ 度。

(3) 最大负荷:指规定时间(一天、一月或一年)内电力系统总有功功率负荷的最大值,以 MW 和 GW 计。

(4) 额定频率:我国规定的交流电力系统的额定频率为 50 Hz。

(5) 最高电压等级:指电力系统中最高电压等级电力线路的额定电压,以 kV 计。

三、电力系统的特点及对它的基本要求

1. 电力系统运行的特点

1) 电能的生产和使用是同时完成的

到目前为止,大容量电能的储存问题还没有解决,因而电能的生产和使用是同时完成的。这就是说,任一时刻,系统中的发电量取决于同一时刻用户的用电量,因此,必须保持电能的生产、输送和使用处于一种动态的平衡状态,这是电力系统中的一个最突出的特点。当供用电出现不平衡时,系统运行的稳定性就会变坏。电力系统是一个由发电机、电力网及用户组成的整体,系统中任意一个元件、任意一个环节设计不当,或保护不完善、操作失误、电气设备出现故障等,都会影响到系统的正常运行。例如,1965 年美国纽约的第一次大停电就是由其东部电力系统中一个继电器的误动作引起的。

2) 过渡过程十分短暂

电能以电磁波的形式传播,传播速度为 3×10^5 km/s,电力系统中的过渡过程是十分短暂的。例如开关的切换操作、电网的短路等过程,都是在很短的时间内完成的,系统中的过渡过程的时间以毫秒或微秒计。因此,为保证电力系统的正常运行和故障情况下所进行的调整及切换操作非常迅速,必须设置比较完善的自动控制与保护系统,对系统进行灵敏而迅速的监视、测量和保护,以把由系统的切换、操作或故障引起的系统的变化限制在一定的范围之内。

3) 电力系统有较强的地域性特点

我国地域辽阔,自然资源分布很广,使得我国的电源结构有很强的地域特点,如有的地区以火电为主,有的地区以水电为主。另外,各地域的经济情况不一样,工业布局、城市规划、电气化水平等也不相同,如常说的“西电东送”、“北煤南运与西煤东运”、“西气东输”、“南水北调”等就是这种地区特色的具体写照。我国的火电占总发电量的 70%、水电占 22%、核电占 6%,火电与水电的比例随季节的不同而稍有变化,因而必须针对不同地区的特点,在对电力系统规划设计、运行管理、布局及调度时,进行全面的考虑。

4) 与国民经济关系密切

电力工业与国民经济现代化关系密切,只有国家实现了电气化,才能实现国民经济的现代化。电能为国民经济各部门提供动力,也是人们的物质文化生活现代化的基础。随着国民经济的发展和人民生活现代化进程的加快,国民经济各部门电气化、自动化的水平愈来愈高,因而任何原因引起的供电不足或中断都会直接影响到各部门的正常生产,造成人民生活紊乱。2001 年 2 月 22 日,我国辽宁电网由于“雾闪”(实质是环境污染严重,在大雾中形成的“污闪”)造成大面积停电,损失电量超过 9×10^6 kW·h,间接损失也十分严重,许多工厂停工,铁路、公路、航运受影响或停运,电视台停播,直接影响到相



关地区人们的正常生活。

2. 对电力系统的基本要求

电力系统的基本任务是为国民经济和人民生活提供充足、可靠、经济且质量好的电能,这也是对电力系统最基本的要求。

1) 保证连续可靠的供电

电力工业必须优先于其他工业部门的发展而发展,只有电力工业先行发展,国民经济才能有计划、按比例地发展,人民物质文化生活现代化才有可靠的保证。这一点是在国家工业建设、设计规划时应优先考虑的问题。另外,还要对电力系统的运行加强现代化管理,提高现有设备的运行、维护质量,保证电力系统正常运行,还必须进行科学的用电调度,保证为国民经济各部门和人民生活提供充足的电力。

运行经验表明,电力系统中的大型事故往往是由局部性事故放大而造成的,所以为保证供电的可靠性,首先要保证各元件的工作可靠性,这就要求搞好设备的正常运行维护和定期的检修试验;其次要提高运行水平,防止误操作发生,在事故发生后及时采取措施以防事故扩大。

应当指出,要绝对防止事故的发生是不可能的,各种用户对供电可靠性的要求也是不一样的。按对供电可靠性的要求可以将负荷分为三级。

(1) 一级负荷:中断供电将造成人身伤亡,重大设备损坏,重大产品报废,或在政治、经济上造成重大损失。一级负荷应由两个或两个以上独立的电源供电。

(2) 二级负荷:中断供电将造成主要设备损坏,大量产品报废,重点企业大量减产,或在政治、经济上造成较大损失。二级负荷应由两回线路供电。

(3) 三级负荷:所有不属于一级和二级的一般电力负荷。三级负荷对供电电源无特殊要求。

2) 保证良好的电能质量

电力系统不仅要满足用户对电能的需要,还要保证电能有良好的质量。只有这样,才能保证产品的质量,才能保证设备、人身的安全。电能的质量指标是以电压、频率和波形来衡量的。例如,给定的允许电压偏移为额定值的 $\pm 5\%$,给定的允许频率偏移为 $\pm (0.2 \sim 0.5) \text{ Hz}$,各次谐波畸变率满足要求。

3) 保证电力系统运行的经济性

通过降低发电厂的煤耗,降低电网的能量损耗,可以降低电能生产、输送的成本。合理的规划、设计,合理的调度,可以实现发电厂和电力网的经济运行。例如,使水电厂能充分利用水能,避免弃水;使火力发电厂中经济性能好的多发电,并避免频繁开停机;使功率在系统中合理分布,以降低电能输送、分配中的损耗等等。另外,提高发电厂本身的效率、减少厂用电,也是提高系统运行经济性的重要方面。

除此以外,环境保护问题受到人们的日益关注。在火力发电厂中产生的各种污染物质,包括二氧化硫、氧化氮、飞灰等排放量的限制,也将成为对电力系统运行的要求。

第二节 发电厂的生产过程

发电厂简称电厂或电站,是将一次能源转换为电能(二次能源)的工厂。发电厂按其
所用能源划分,主要有火力发电厂、水力发电厂及核能发电厂等。其他如风力发电、太阳
能发电、地热发电、潮汐发电和生物质能等也已在某些场合得到开发和应用。

一、火力发电厂

利用燃料的化学能来生产电能的工厂称为火力发电厂,简称火电厂。迄今为止,火
电厂仍是世界上电能生产的主要方式。在发电设备总装机容量中,火力发电的装机容量
约占 70% 以上。我国和世界各国的火电厂所使用的燃料大多以煤炭为主,其他可以使用的
燃料还有天然气、燃油(石油)及工业和生活废料(垃圾)等,其中燃烧垃圾的火电厂有
利于环境保护,其发展极为引人注目。

火电厂在将一次能源转换为电能的生产过程中要经过三次能量转换。首先,通过燃
烧将燃料的化学能转变为热能,再经过原动机把热能转变为机械能,最后通过发电机将
机械能转变为电能。

火电厂使用的原动机可以是凝汽式汽轮机、燃气轮机或内燃机,其中内燃机一般只
在农村和施工工地上使用。我国大部分火电厂采用凝汽式汽轮发电机,称为凝汽式火力
发电厂。图 1-4 所示为凝汽式火力发电厂生产过程示意图。由图 1-4 可见,原煤首先由
输煤传送带送入煤斗中,为了提高煤的燃烧效率,将煤斗中的原煤送入磨煤机磨成煤粉,
然后由排粉风机将煤粉随同热空气经喷燃器送入锅炉燃烧室内燃烧。燃烧时产生的热
量使燃烧室四周水冷壁管中的水变成蒸汽,此蒸汽再通过过热器进一步吸收烟气的热量
而变为高压高温的过热蒸汽。过热蒸汽经过主汽管道进入汽轮机,该蒸汽在喷管里膨胀
而高速冲动汽轮机的转子旋转,将热能变成了机械能。汽轮机带动联轴的发电机发电,
机械能就变成了电能。将在汽轮机中做了功的蒸汽送往冷凝器凝结成水,经除氧器除
氧、加热器加热后,由给水泵送进省煤器预热、重新送回锅炉,即完成了水的重复使用。

燃烧室中产生热量的另一部分用于加热过热器中的蒸汽,其余的热量由燃烧后形成
的烟气携带,穿过省煤器、空气预热器,将热量传递给蒸汽、水和空气后,经除尘器除尘,
由引风机抽出,通过烟囱排入大气中,而炉渣和除尘器下部的细灰通过冲灰沟水流,由灰
渣泵抽出,排往厂外的灰场。

由于煤的燃烧实质上是在氧化过程中产生化学能的过程,因而利用石油、天然气及
其他可燃燃料的化学能也能生产电能,其性质也属于火力发电厂的范畴。

凝汽式火力发电厂的主要缺点是其热效率不高,原因是做过功的蒸汽仍含有热量,
这部分热量由循环水带走而变成热损失,使发电厂的效率只能达到 30%~40%,其中
70% 左右的燃料热量未加利用而损耗掉了。

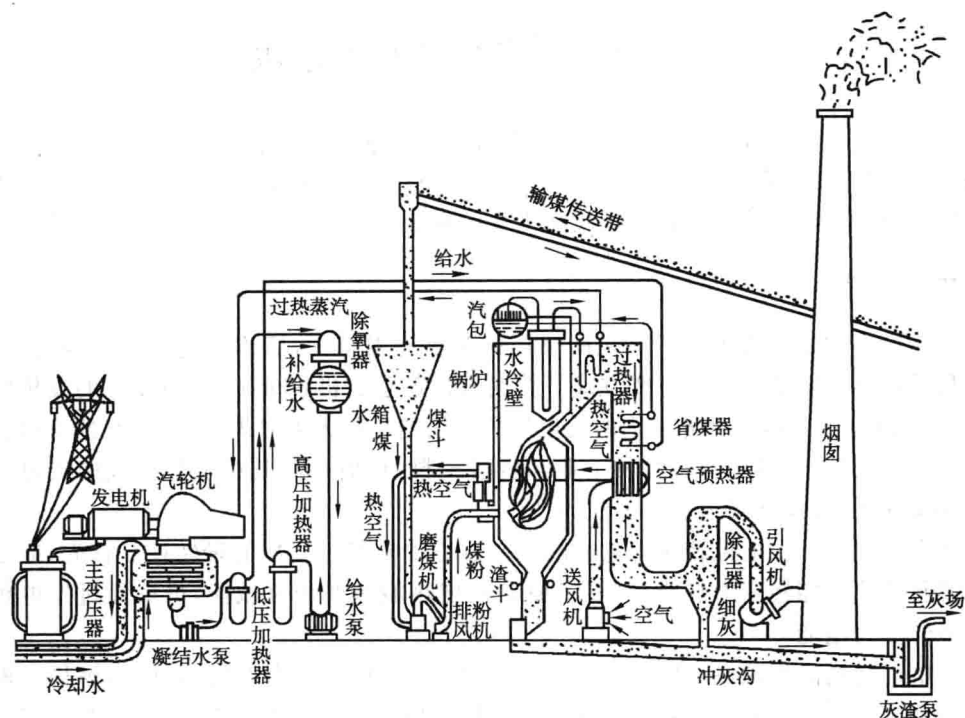


图 1-4 凝汽式火电厂生产示意图

单一生产电能的火电厂应尽量建在燃料产地、矿区附近,这样的电厂也称矿口电厂或坑口电厂,它的生产不会对城市造成污染,同时也避免了燃料的长途运输。

发电兼供热的火电厂称热电厂或热电站。热电厂一般建在大城市及工业区附近,以提高热能的利用率。热电厂的效率较高,一般可达 60%~70%。这是由于在热电厂中,可以从汽轮机中抽出蒸汽供给热用户,这就使得进入冷凝器中的蒸汽大大减少,使循环水带走的热损耗大大降低。

热电厂受热负荷条件的限制不能大量兴建,主要还是要提高凝汽式发电厂的效率,其有效途径是采用高温、高压、大容量的发电机组。

二、水力发电厂

水力发电厂是利用江河水流的位能来生产电能的工厂,也叫做水电厂或水电站。其生产过程是通过水轮机把水的位能转化为机械能,最后通过发电机将机械能转化为电能。

水电厂的发电容量取决于水流的位能差(落差)和水流的流量:

$$P=9.8QH\eta$$

式中, P 为水电厂的总发电功率, kW; Q 为通过水轮机的水流量, m^3/s ; H 为上、下水位的

落差, m ; η 为水电厂的效率, 在 0.85 左右。

由上式可以看出, 在流量一定的条件下, 水流落差愈大, 水电厂出力就愈大。为了充分利用水力资源, 应尽量抬高水位。水电厂按抬高水位的方式可分为堤坝式、引水式和混合式等。

1. 堤坝式水电厂

堤坝式水电厂采用修筑拦河堤坝的形式来抬高水位, 形成发电水头。根据厂房位置的不同, 堤坝式水电厂又可分为坝后式和河床式两种。

如果将厂房建在坝后, 就是坝后式水电厂, 其厂房本身不承受水的压力, 如图 1-5 所示。我国的三门峡、刘家峡、丹江口等水电厂就属于坝后式水电厂。

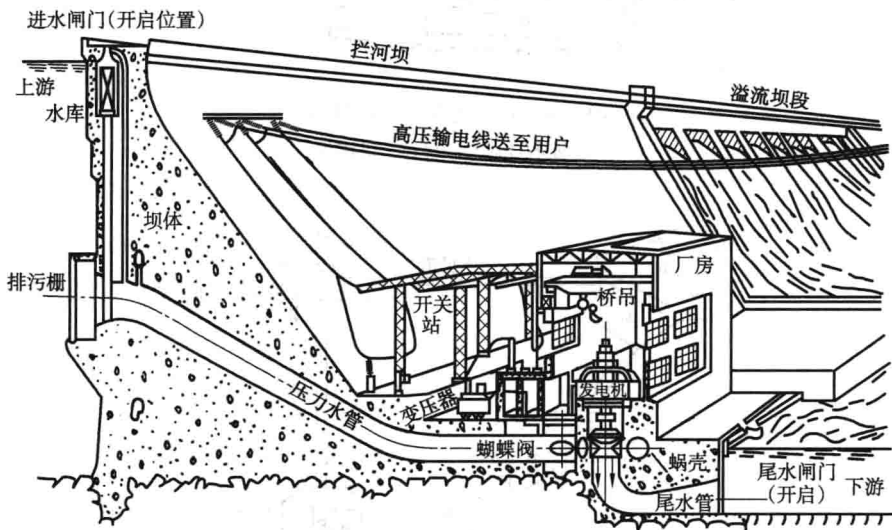


图 1-5 堤坝式水电厂生产示意图

如图 1-5 所示, 由拦河坝将水位抬高, 水流由高水位流向低水位, 经过压力水管进入水轮机, 推动水轮机转子旋转, 水轮机转子再带动同轴发电机发电, 将机械能变成电能。水流对水轮机做功后, 经尾水管排往下游。

河床式水电厂一般建在河道平缓区段, 水头一般在 20~30 m, 堤坝和厂房建在一起, 厂房成为挡水建筑物的一部分, 库水直接由厂房进水口引入水轮机, 如图 1-6 所示。我国的葛洲坝水电厂就属于此类。

2. 引水式水电厂

引水式水电厂一般建于河流上游坡度较大的区段, 用修隧道或渠道的方法形成水流的落差, 用来发电, 如图 1-7 所示。山区小水电厂常采用此种形式。

还有一种专门用来调节不同时段负荷用的抽水蓄能水电厂, 它是在水电厂的下游建一种储水水库, 当电网上负荷很低的时候, 将蓄水库中的水抽回上游水库变成水的位能,