



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI GONGCHENG

电力工程

尹克宁 编著



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

中国电力出版社

中国电力出版社

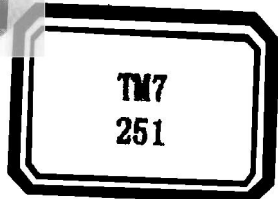
电力工程

中国电力出版社

中国电力出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUHUA JIAOCAI



DIANLI GONGCHENG

电力工程

编著 尹克宁

主审 杨以涵 李庚银



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书全面介绍了电力系统、电力网以及发电厂和变电所电气部分的基本知识、原理及其分析方法。全书共分为七章，主要内容包括电力系统概述、电力网及其稳态分析、发电厂和变电所的一次系统、电力系统短路、电力系统稳定、发电厂和变电所的二次系统、远距离输电等。

本书主要作为高等院校电气工程及其自动化专业的本科生、研究生教材，也可作为高职高专和函授教材，还可供电力行业以及高压电气设备制造行业中的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力工程/尹克宁编著. —北京: 中国电力出版社,
2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-7032-3

I. 电… II. 尹… III. 电力工程—高等学校—教材
IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 054110 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 5 月第一版 2008 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.5 印张 600 千字

定价 38.00 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

本书是根据笔者于 20 世纪 80 年代以及 2005 年先后三度出版的同名教材重新编著而成的。

原《电力工程》教材出版后,受到了广大读者的欢迎。在 20 多年中曾先后印刷了 11 次,读者遍及全国各地和各部门,并于 1992 年在全国高校优秀教材评选中荣获能源部优秀教材二等奖,2007 年被评为电力行业精品教材。同时,2006 年列为教育部“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”,本书正是因此而重新编著的。

本书基本上保持了前几版的内容与风格,但增加了近年来在我国电力工业飞速发展中所出现的一些新技术、新设备以及可持续发展所面临的新课题(如特高压交直流输电、节能降耗、节能减排、可再生能源发电、电子式互感器等)的介绍,还针对中性点接地、无功补偿、谐波治理、直流输电、FACTS 技术、环境保护等热点课题着重进行了介绍,并删除了部分陈旧内容。此外,笔者在总结了多年以来教学经验的基础上,吸取了广大读者提出的意见和建议,对印刷错误进行了改正、对文字进行了修饰润色,并增加了较多的复习思考题与习题,以利于教学的深化。

鉴于当前很多高校的专业课学时数有所紧缩,建议在使用本教材时除最基本内容外,可根据各专业方向的特点适当选学有关章节,其余内容可留待未来工作中继续学习、参考。

为便于教师授课与学生学习,本书随后将制作相应的多媒体课件,课件中对本书中的习题将给出标准答案。

华北电力大学杨以涵教授、李庚银教授对全书进行了审核,提出了许多宝贵的意见和建议,笔者在此表示最深切的感谢。此外,本书的编写还得到了西安交通大学、中国电力出版社等相关部门的大力支持,笔者谨在此一并表示衷心的感谢。

尽管本书已历经多次出版,但由于本书涉及面广,仍将有疏漏与不妥之处,恳请读者提出宝贵意见,批评指正(E-mail: yinkn@tom.com)。

笔 者

2008 年 1 月于西安交通大学

目 录

前言

第一章 电力系统概述	1
第一节 电力工业在国民经济中的地位和我国电力工业的发展.....	1
第二节 电力系统的组成和特点.....	2
第三节 发电厂的类型及其生产过程简介.....	6
第四节 电能的质量指标	16
第五节 电力系统的接线方式和电压等级	18
第六节 电力系统的负荷和负荷曲线	22
复习思考题与习题	26
第二章 电网及其稳态分析	27
第一节 电力线路的结构	27
第二节 输电线路的电气参数	36
第三节 电网参数计算中变压器参数的计算方法	52
第四节 输电线路的等值电路	59
第五节 电网电压计算	70
第六节 电力系统的无功平衡和电压调节	72
第七节 电力系统的有功平衡及频率调节	85
第八节 电网的功率损耗和电能损耗	91
第九节 电力系统潮流分布计算	99
第十节 输电线路导线截面的选择.....	116
第十一节 电力系统的中性点接地方式.....	119
第十二节 谐波对电力系统的影响及其治理.....	132
复习思考题与习题.....	143
第三章 发电厂和变电所的一次系统	147
第一节 电气主接线图.....	147
第二节 高压电器.....	157
第三节 配电装置的一般问题.....	178
第四节 屋内配电装置.....	182
第五节 屋外配电装置.....	187
第六节 成套配电装置和 SF ₆ 全封闭式组合电器	194
第七节 保护接地.....	200
复习思考题与习题.....	205
第四章 电力系统短路	207
第一节 概述	207

第二节	标么制	209
第三节	由“无限大”电力系统供电的简单电力网三相短路电流的计算	214
第四节	由同步发电机供电的简单电力网三相短路电流的计算	218
第五节	对称分量法	228
第六节	不对称故障的序网图	230
第七节	电力系统中各元件的负序电抗和零序电抗	234
第八节	电力系统不对称短路故障的计算	249
	复习思考题与习题	261
第五章	电力系统稳定	264
第一节	稳定性问题的提出及其基本概念	264
第二节	电力系统的静态稳定	265
第三节	电力系统的暂态稳定	269
第四节	电压稳定性的概念	276
	复习思考题与习题	278
第六章	发电厂和变电所的二次系统	279
第一节	概述	279
第二节	测量表计回路和互感器的配置	283
第三节	控制和信号回路	286
第四节	继电保护的一般问题	291
第五节	继电器	293
第六节	过电流保护	301
第七节	变压器的继电保护	312
第八节	输电线路的自动重合闸	322
	复习思考题与习题	327
第七章	远距离输电	328
第一节	概述	328
第二节	交流远距离输电线路的自然功率与传输容量	329
第三节	远距离输电线路的并联补偿与串联补偿	331
第四节	高压直流输电	335
第五节	柔性交流输电系统	349
第六节	远距离输电线路的环境保护	355
	复习思考题与习题	368
附录		369
附录一	多导线系统的磁链计算	369
附录二	考虑大地影响后多导线系统的电容算法	371
附录三	线路常用导线技术数据	373
附录四	单相接地电容电流的计算	377
附录五	短路电流运算曲线图	379
参考文献		384

第一章 电力系统概述

第一节 电力工业在国民经济中的地位和我国电力工业的发展

电力工业是国民经济的重要部门之一。它承担着把自然界提供的能源转换为供人们直接使用的电能,它既为现代工业、现代农业、现代科学技术和现代国防提供必不可少的动力,又和人民群众的日常生活有着密切的关系。电力又是工业的先行,电力工业的发展必须优先于其他的工业部门,整个国民经济才能不断前进。

据记载,世界上第一个发电厂是于1882年在美国纽约市建立的,机组容量只有30 kW。此后,随着生产和科学技术的进步,电力工业有了迅速的发展,特别是近半个世纪以来发展得更快。据统计,到1997年底为止,全世界的发电厂的总装机容量已达313300万kW,最高交流输电电压已超过1000 kV,最高直流输电电压已达到 ± 600 kV,最远输电距离已超过1000 km。从世界各国经济发展的进程来看,国民经济每增长1%,就要求电力工业增长1.3%~1.5%。因此,一些工业发达的国家几乎是每7~10年(个别的为5~6年)装机容量就要增长1倍。

我国具有丰富的能源资源。据最新统计,我国水能资源的蕴藏量为69400万kW(其中可开发利用的约为40200万kW),居世界首位。此外,煤的资源也很丰富。这些优越的自然条件为我国电力工业的发展提供了良好的物质基础。但是,旧中国的电力工业却是非常落后的,到1949年,全国的总发电装机容量还不到200万kW。新中国成立后,在党和政府的领导下,我国的电力工业有了很大的发展。到了1979年我国的发电装机容量和年发电量已分别为1949年的21倍和65倍,特别是进入1980年后,随着改革开放的深入,我国电力工业的发展更快,到1987年全国发电装机容量突破了1亿kW,2000年4月突破了3亿kW,2004年5月底,我国总发电装机容量已突破了4亿kW大关,达到40060万kW,2005年底达到了50841万kW,2007年底已突破了7亿kW,并早已跃升到世界的第二位。电力工业的发展为我国的国民经济的高速发展做出了巨大的贡献。

不仅如此,目前我国的电力工业已进入“大电网”、“大机组”、“特高压交、直流输电”、“电网调度自动化”、“状态检修”等新技术发展的新阶段,一些世界先进的高新技术,已在我国电力系统中得到了广泛的应用。举世无双的三峡水电厂(总装机容量为1820万kW)已经在2003年投产发电,预计在2009年全部机组发电后,将进一步促使全国统一电力系统的形成。500 kV的超高压直流输电线路已遍及全国各地,并将进一步促使全国统一电力系统的形成,而750 kV的超高压交流输电线路也已建成投运。 ± 500 kV超高压直流输电线路已投运和正建设中的共达6条以上,而且1000 kV的特高压交流输电与 ± 800 kV的特高压直流输电线路均已在建设中。所有这些,都表明我国电力工业在技术水平上正迈向世界的前列。

但是,随着近年来我国国民经济的高速发展与人民生活用电的急剧增长,电力工业的发展仍不能满足整个社会发展的需要,未能很好地起到先行的作用,仅以2004年夏季的供电

负荷高峰期为例,全国预计总共缺电 3000 万 kW 左右,有 24 个省区先后出现了拉闸限电的情况,这样的局面近年来虽已基本缓解,但仍未得到彻底的解决。

另外,由于我国人口众多,因此在按人口平均用电量方面,迄今不仅仍远远落后于一些发达国家,即使在发展中国家中也只处于中等水平,尚不及全世界平均人口用电量的一半。因而,要实现在 21 世纪初全面建设小康社会的要求,我国的电力工业必须持续地、稳步地大力发展,一方面是要大力加强电源建设,搞好“西电东送”,以确保电力先行,另一方面,要继续深化电力体制改革,实施厂网分开、竞价上网,并建立起符合社会主义市场经济法则的、规范的电力市场。

为了满足国民经济可持续发展的需求,按目前的计划,到“十一五”规划末期,全国装机将超过 8 亿 kW,到 2020 年全国装机将达到 12 亿 kW 左右,尽管这个任务是非常艰巨的,但我们坚信,在新世纪中,中国的电力工业必将持续、高速地发展,取得更加辉煌的成就。

第二节 电力系统的组成和特点

一、电力系统的形成和优越性

(一) 电力系统的形成

在电力工业发展的初期,发电厂都建设在用户附近,规模很小,而且是孤立运行的。随着生产的发展和科学技术的进步,用户的用电量和发电厂的容量都在不断增大。由于电能生产是一种能量形态的转换,发电厂宜于建设在动力资源所在地,而蕴藏动力资源的地区与电能用户之间又往往隔有一定距离。例如,水能资源集中在河流落差较大的偏僻地区,热能资源则集中在盛产煤、石油、天然气的矿区;而大城市、大工业中心等用电部门则由于原材料供应、产品协作配套、运输、销售、农副产品供应等原因以及各种地理、历史条件的限制,往往与动力资源所在地相距较远,为此就必须建设升压变电所和架设高压输电线路以实现电能的远距离输送。而当电能输送到负荷中心后,又必须经过降压变电所降压,再经过配电线路,才能向各类用户供电。

随着生产的发展和用电量的增加,发电厂的数目也不断增加。这样一来,一个个发电厂再保持孤立运行的状态就没有什么好处了。当一个个地理上分散在各处、原来孤立运行的发电厂通过输电线路、变电所等相互连接形成一个“电”的整体以供给用户用电时,就逐步形成了现代的电力系统。换句话说,电力系统就是由发电厂、变电所、输配电线路直到用户等在电气上相互连接的一个整体^①,它包括了从发电、输电、配电直到用电这样一个全过程。另外,还把由输配电线路以及由它所联系起来的各类变电所总称为电力网络(简称电力网),所以,电力系统也可以看作是由各类发电厂和电力网以及用户所组成的。

图 1-1 所示是现代高压电力系统单线接线图,该系统具有较大容量的水力发电厂、火力发电厂和热电厂。图中的水力发电厂由于容量较大、输电距离较远,所以把电压升高到 500 kV 后经线路送出。火力发电厂-1 的电能升压至 220 kV 后由线路送到变电所-3,并通过

① 按传统说法还有“动力系统”和“电力系统”的区别。动力系统还包括发电厂的热力部分(或核动力部分)和水力部分,而电力系统只包括从发电机起的发电厂电气部分以及变电所、线路、用户等,由于本书的重点是电气部分,故本书仅着重提出电力系统的概念。

线路与 220 kV 电力网相联系。所谓热电厂是指装有供热式汽轮发电机组的发电厂，它除了发电外，还兼向附近的工厂供热，这样可以提高热能利用的效率。由于它要兼供热，所以总是把热电厂建在用户附近，它除了用 10 kV 电压供给附近的地区用电外，还通过升压变压器与 220 kV 电力网相联系，以进行功率交换。火力发电厂-2 为建设在燃料产区的区域性火力发电厂，它所发出的电能主要通过 220 kV 线路送往负荷中心。图中由变电所-1、变电所-2 和火力发电厂-2 以及高压线路所构成的 220 kV 环形电力网是本系统的主要电力网，它是联系发电厂和用户的核心部分。

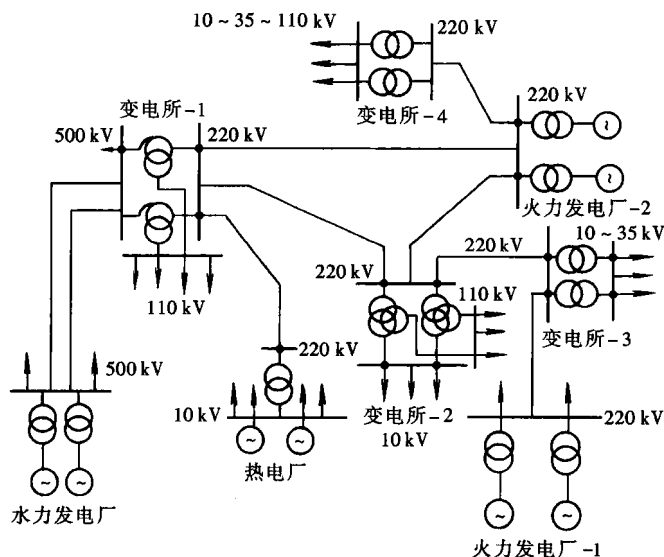


图 1-1 电力系统单线接线图

为了进一步了解电力系统的组成，就必须了解发电厂、电力网和变电所的组成、分类等情况。关于发电厂的类型及其生产过程将在第三节中介绍。这里先简单介绍一下电力网和变电所的类型。

电力网按其供电容量和供电范围的大小以及电压等级的高低可分为地方电力网、区域电力网以及超高压远距离输电网等三种类型。地方电力网是指电压不超过 110 kV、输电距离在几十千米以内的电力网，主要是城市、工矿区、农村等的配电网。区域电力网则把范围较广的地区的发电厂联系在一起，而且输电线路也较长、用户类型也较多。目前我国，区域电力网主要是电压为 220 kV 级的电力网，基本上各省（区）都有。超高压远距离输电网主要是由电压为 330~500 kV 及以上电压的远距离输电线路所组成。它担负着将远区发电厂的功率送往负荷中心的任务，同时往往还联系几个区域电力网，以形成跨省（区）的、全国的、甚至国与国之间的联合电力系统。

下面再谈谈变电所的类型。电力网中的变电所除了有升压、降压的分类方法外，还可分为系统枢纽变电所、地区变电所、中间变电所以及终端变电所等。枢纽变电所一般都汇集多个电源和大容量联络线，且容量较大，处于联系电力系统的各部分的中枢位置，地位重要，如图 1-1 中的变电所-1 和变电所-2 都属于这种类型。中间变电所则处于发电厂和负荷中心之间，从这里可以转送或抽引一部分负荷，见图 1-1 中的变电所-3。终端

变电所一般都是降压变电所，它只是负责供给局部地区的负荷而不承担转送功率，如图1-1中的变电所-4。

（二）系统联系的优越性与存在问题

实践表明，当各孤立运行的发电厂通过电力网连接起来形成并联运行的电力系统后，将在技术经济上带来很大好处，下面分别加以叙述。

1. 减少系统中的总装机容量

由于负荷特性、地理位置等的不同，电力系统中各发电厂孤立运行的最大负荷并不是同时出现的，因此系统的综合最大负荷常小于各个发电厂单独供电时的最大负荷的总和，从而相应的可减少系统中的总装机容量。

2. 合理利用动力资源，充分发挥水力发电厂的作用

如果不形成电力系统，很多能源就难以得到充分利用。例如，水力发电厂的出力决定于河流的来水情况，一年中的水流情况却是受自然条件影响而多变的，很难与电力负荷相适应，往往枯水季节出力不足，而在丰水季节却要弃水。当水力发电厂并入电力系统以后，则它的运行情况就可以与火电厂相互配合调剂。在丰水季节，可以让水力发电厂尽量多发电以减少火力发电厂的出力、节省燃料；在枯水季节，可以让水力发电厂担负尖峰负荷，火力发电厂则担负固定的基本负荷。这样既充分利用了水能资源，又提高了火力发电厂的运行效率，降低了煤耗。至于风力、太阳能等可再生能源的利用，都只有依靠电力系统才得以发挥其最大效益。

3. 提高供电的可靠性

通常，孤立运行的发电厂必须单独装设一定的备用容量，以防止机组检修或事故时中断对用户的供电。但当联成电力系统后，则随着系统容量的增大，不仅可以减少备用机组的台数与容量，提高设备的利用率，而且不同发电厂之间在电厂或线路故障时还可以相互支援，因而也提高了供电可靠性。

4. 提高运行的经济性

除了前述可以充分利用动力资源特别是可再生的能源资源外，在电力系统中还可以通过在各发电厂之间合理地分配负荷，使得整个系统的电能成本降低。另外，随着系统容量的增大，则有可能采用单台容量较大的大型发电机组，从而降低了单位千瓦的设备投资和运行损耗以及煤耗。以上这些因素都提高了系统运行的经济性。

从上述可知，随着系统联系的扩大，显著地提高了运行的可靠性与经济性。因此，不妨把电力事业的发展史就看成是电力系统不断扩展与增强联系的历史。但是，随着电力系统的日益壮大、联系的日益增强，由于一处发生故障而波及其他广大地区的情况也极易发生。这种事故波及现象可以说是连成系统后所带来的问题。近数十年，世界上发生的著名大停电事故都是由于事故波及所致。另外，系统短路容量也将随着系统容量的增大而不断增加，甚至达到设备所不能容许的程度。因此，如果不采用有效的措施，系统联系的增强将是有限度的。换句话说，并不是在所有场合下都是系统规模越大就越好，而且是应当区别不同情况以适当的方式、按照适当的程度来实现系统的联系才是最重要的。

二、电力系统的特点以及对电力系统的要求

（一）电力系统的特点

由于电能生产本身所固有的特点以及联成电力系统后所出现的问题，决定了电力系统与

其他工业部分有着许多不同特点，其中主要有以下几点。

(1) 电能不易储藏。由于电能生产是一种能量形态的转换，从而要求生产与消费同时完成。迄今为止尽管人们对电能的储存进行了大量的研究，并在一些新的储藏电能方式上（如超导储能、燃料电池储能等）取得了一定突破性的进展，但是仍未能解决经济而高效率的大容量储能问题。因此电能难于储存，可以说是电能生产的最大特点。

从电能难于储存的这个特点出发，在运行时就要求经常保持电源和负荷之间的功率平衡；在规划设计与电源建设时则要求确保电力先行，否则其他工厂即使建成也因缺电而无法投产。再者，由于发电和用电同时实现，还使得电力系统的各个环节之间具有十分紧密的相互依赖关系。不论变换能量的原动机或发电机，或输送、分配电能的变压器、输配电线路以及用电设备等，只要其中的任何一个元件故障，都将影响到电力系统的正常工作。

(2) 电能生产与国民经济各部门和人民生活有着极为密切的关系。现代工业、农业、交通运输业等都广泛用电作为动力来进行生产，可以把电力系统视为各工业企业共同的“动力车间”。此外，在人民的日常生活中还广泛使用着各种家用电器。随着现代化的进展，各部门中电气化的程度将愈来愈高。尤其是随着信息化社会的发展，各个部门对电力的依赖程度都非常高。因而，电能供应的中断或不足，不仅将直接影响国防与工农业生产、交通，造成人民生活紊乱，在某些情况下甚至会酿成极其严重的社会性灾难。历史上一些大停电事故的教训，都证实了这一点。

(3) 暂态过程十分短暂。由于电是以光速传播的，所以运行情况发生变化所引起的电磁方面和机电方面的暂态过程都是十分迅速的。电力系统中的正常操作（如变压器、输电线路的投入运行或切除）是在极短时间内完成的；用户的电力设备（如电动机、电热设备等）的启停或负荷增减也是很快的；电力系统中出现的故障（如短路故障、发电机失去稳定等）及其发展进程都是极其短暂的，往往只用微秒（ μs ）、毫秒（ ms ）甚至纳秒（ ns ）来计量时间。因此，不论是正常运行时所进行的调整和切换等操作，还是故障时为切除故障或为把故障限制在一定范围内以迅速恢复供电所进行的一系列操作，仅仅依靠人工操作是不能达到满意的效果的，甚至是不可能的，必须采用先进的信息控制技术和各种自动装置来迅速而准确地完成各项调整和操作任务。电力系统的这个特点给运行、操作带来了许多复杂的课题。

(4) 电力系统的地区性特点较强。由于各个电力系统的电源结构与其资源分布情况和特点有关，而负荷结构却与工业布局、城市规划、电气化水平、人均用电量等有关，至于输电线路的电压等级、线路配置等则与电源负荷间的距离、负荷的集中程度等有关，因而各个电力系统的组成情况将不尽相同，甚至可能很不一样。例如：有的系统是以水力发电厂为主，而有的系统则是以火力发电厂或核能发电厂为主（或完全没有水力发电厂）；有的系统电源与负荷距离近、联系紧密，而有的系统却正好相反，等等。因而，在系统规划设计与运行管理时，必须针对系统特点从实际出发来进行，如果盲目地搬用其他系统或国外系统的一些经验而不加以具体分析，则必将违反客观规律，酿成错误。

(二) 对电力系统的要求

从电力系统上述特点出发，根据电力工业在国民经济中的地位和作用，决定了对电力系统有下列基本要求。

(1) 最大限度地满足用户的用电需要，为国民经济的各个部门提供充足的电力。为此，首先应按照电力先行的原则做好电力系统的规划设计，认真搞好电力建设，以确保电力工业

的建设优先于其他的工业部门。其次还要加强现有设备的维护,以充分发挥潜力,确保电力工业得以优先发展。

(2) 保证供电的可靠性。这是电力系统运行中的一项极为重要的任务。运行经验表明,电力系统中的整体性事故往往是由于局部性事故扩大而造成的。所以为保证供电的可靠性:首先要保证系统各元件的工作可靠性,这就需要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,防止误操作的发生,在事故发生后应及时采取措施以防止事故扩大。

应当指出,要绝对防止事故的发生是不可能的,而各种用户对供电可靠性的要求也是不一样的。因此,必须根据实际情况区别对待那些不同类型的用户。对于某些重要用户(如某些矿井,连续生产的化工厂、钢铁厂,市政中心和交通枢纽,军事设施,医院等),停电将会带来人身危险、设备损坏和产生大量废品以及社会生活混乱等严重后果时,则在任何情况下都必须确保供电不致发生中断。而对于一些次要用户,则可以容许不同程度的短时停电。

(3) 保证电能的良好质量。这主要是指维持电压和频率以及波形偏差不超出一定的范围,具体详见本章第四节。

(4) 保证电力系统运行的经济性。这要致力于使电能在生产、输送和分配过程中效率高、损耗小、能效高,以期最大限度地降低电能成本,并实现节能减排。电能成本的降低不仅意味着能源的节省,还将影响到各用电部门成本的降低,因而给整个国民经济所带来的好处是很大的。

把上述各点归纳起来可知:保证对用户不间断地供给充足、优质而又价廉的电能,这就是电力系统的基本任务。

第三节 发电厂的类型及其生产过程简介

众所周知,电能是由一次能源转换而得的,所以发电厂的类型一般根据一次能源来分类。以往,电力系统中主要是水力发电厂和火力发电厂,从20世纪60年代以来,核能发电厂的建设逐年增加,在一些国家的电力系统中已占据有很大的比重。另外,根据节能减排的要求,目前我国正大力开发可再生能源(如风力、太阳能等)发电。下面将主要介绍这几类发电厂的简况。但是,考虑到能源资源对电能生产的重大影响,首先需要对一次能源资源的有关情况作一个简要介绍。

一、一次能源与电力生产

一次能源,可以说与粮食和水一样,是人类赖以生存以及支撑现代社会文明的主要物质基础之一。从原始社会起,人类就是通过消耗能量而生活,并进行各种社会活动的,目前世界上可以利用的一次能源资源主要为化石能源(煤、石油、天然气)、可再生能源(水能、风能、太阳能等)以及核能源等,电能主要通过这些一次性能源转换而生产出来。能源形态与电能生产的相互关系,可简略地用图1-2表示。

由于电能可以很容易转变为其他能量形态(如机械能、热能、光能、化学能等),其转换过程中的损耗极小,电能还可以高效率地实现远距离的大容量输送。所有这些优点,都使电能在整个社会的能源消耗中所占比重愈来愈大,尤其是随着家用电器的普及与信息技术的发展其作用日益突出,今后人类对电能的需要将与日俱增。

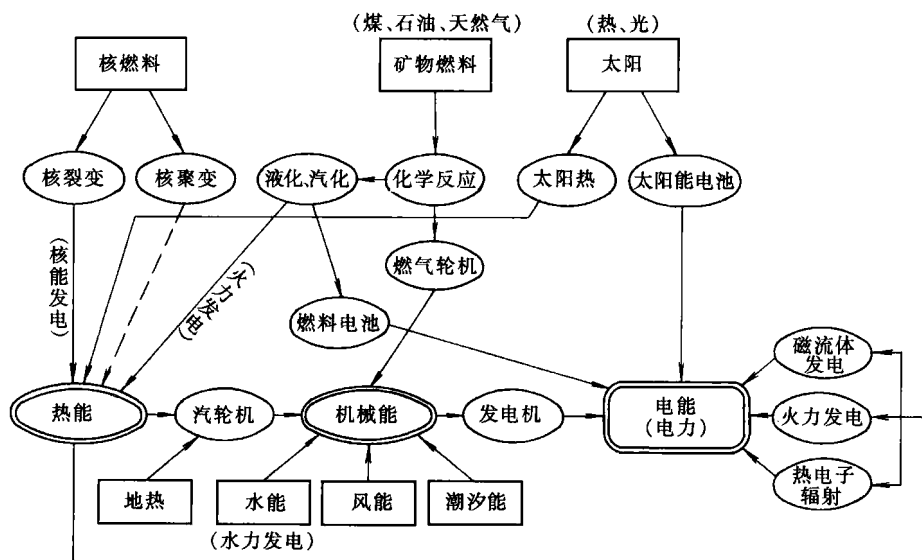


图 1-2 能源形态与电能生产的相互关系

但是，地球上的一次能源资源的储存量是有限的，如不注意节约与合理使用，必有一天人类将面临能源枯竭的危险。因此，在 21 世纪中，对节约能源与开发新能源特别是对可再生能源利用的研究，将是人类社会的可持续发展所面临的一项重大的课题。

二、火力发电厂

火力发电厂是以煤、石油、天然气等作为燃料，燃料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转换为机械能，并由汽轮机带动发电机将机械能变为电能。迄今为止，在世界上的绝大多数国家中，火力发电厂在系统中所占的比重都是较大的，据统计，全世界发电厂的总装机容量中，火力发电厂占了 70% 以上。迄今，我国的发电厂总装机容量中，火电厂占 75% 以上。

火力发电厂所用燃料种类较多。煤既是基础能源资源，优质煤还是冶金、化工等部门所必需的，我国目前的方针是尽量利用低质煤来发电。在世界上其他一些国家，由于燃料供求关系等原因，也有不少火力发电厂主要是用石油或天然气作燃料的。我国的煤矿资源极其丰富，根据我国的能源政策，在相当一段时期内，火力发电厂的燃料将主要用煤。但是，用燃煤来发电，不仅需要的燃煤量大，而且排出的烟尘（主要是具有温室效应的 CO_2 气体以及 SO_2 气体）等废弃物都极易污染环境，而按环保部门的要求，对这些废弃物进行处理则是一项繁重的任务。相对而言，用石油及天然气发电，在环保方面的问题就要少一些。

火力发电厂按其作用来分有单纯发电的和既发电同时又兼供热的这样两种类型，前者即指一般的火力发电厂，后者称为兼供热式火力发电厂（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，将发出的电用高压线路送往负荷中心，这样既避免了燃料的长途运输、提高了能量输送的效益（燃料中的灰分、杂质可就地处理而不必为此耗费运力），而且还防止了对大城市周围地区的环境污染。通常把这种火力发电厂称为“矿口火力发电厂”，这是我国建设大型火力发电厂（特别是烧劣质煤的火力发电厂）的主要方向。热电厂的建设是为了提高热能的利用效率，它由于要兼供热，所以必须建在大城市或工业区附近。

一般火力发电厂多采用凝汽式汽轮发电机组，故又称为凝汽式发电厂，其生产过程示意图如图 1-3 所示。

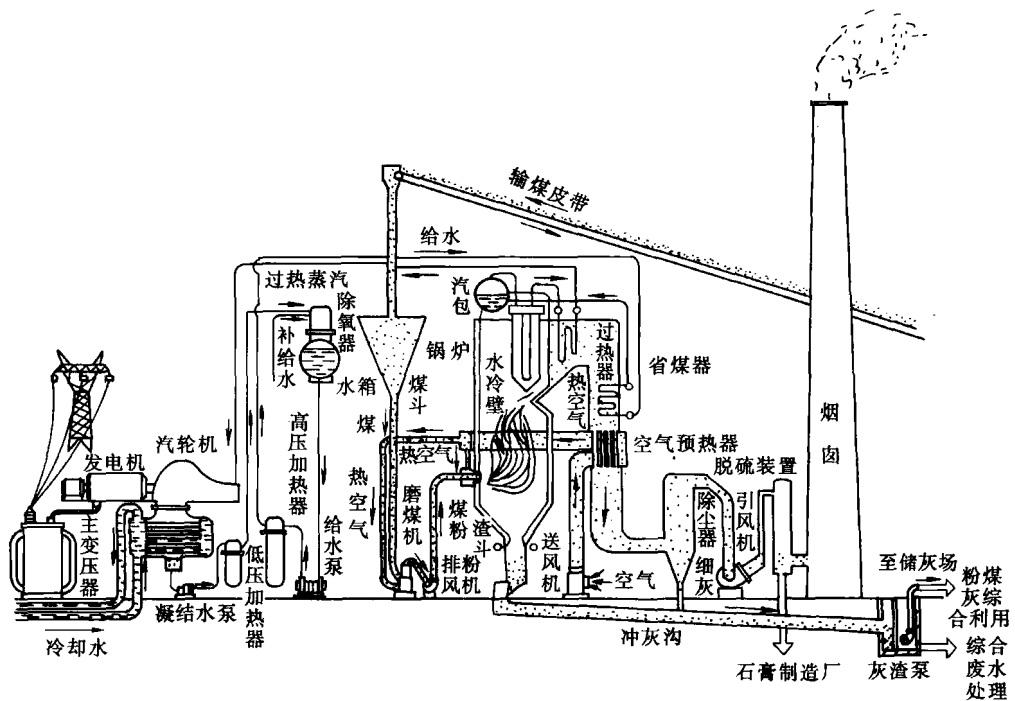


图 1-3 凝汽式发电厂生产过程示意图

煤先由输煤皮带运送到锅炉房的煤斗中，再由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，再经灰渣泵排往储灰场。

在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，将机械能再变为电能。在汽轮机内做功后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，进一步提高温度后送入锅炉，不断地重复上述过程以连续生产出电能。

将汽轮机的排汽冷凝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，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能，因此一般凝汽式发电厂的热效率是不高的，目前比较先进的指标也只能达到 37%~40%，很少有超过 40%的。

为了提高这种发电厂的热效率，人们自然想到能否尽量减少被循环水所带走的热能，而

把做过功的蒸汽中所含的热能也充分利用起来,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的不同的地方,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一部分功,再把这些蒸汽引到一个给水加热器去加热供用户的热水,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的减少,从而提高了热效率。据报道,现代化大型供热电厂的热效率可达60%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,为了使供热式发电厂维持较高的热效率,当需要热量多时,发电厂必须相应多发电;需要热量少时,则应减少发电出力。因而,这类发电厂在电力系统中的运行方式远不如凝汽式发电厂灵活。

另外,火力发电机组退出运行与再度投入运行,不仅要消耗启动能量,而且要花费不少时间。以5万kW的小型机组为例,由冷状态启动到带满负荷要6h,热状态启动也要4.5h。因此火力发电机组不适于频繁地启动、停止,使它在系统中适应运行方式突然变化的能力受到一定限制。

为了提高热效率,目前火力发电厂均向高温(530℃以上)、高压(8.83~23.54 MPa)的大容量机组(600 MW以上)以及超临界参数机组方向发展。目前世界上最大的火力发电机组容量已达1300 MW。

近年来我国在一些经济发达地区,还发展了用燃气轮机发电的火力发电厂,燃气轮机是燃烧天然气等燃料的一种热力发电机组。燃气轮机的起动速度快,既可作为调峰电源承担日负荷曲线的尖峰负荷,又可作为系统事故或容量不足时的紧急备用机组,或作为系统中的移动电源使用。总之,它的使用增强了系统电源的运行灵活性和可靠性。另外,近年来还推广了燃气—蒸汽联合循环的运行方式,它可进一步提高火力发电厂的热效率。

三、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、价廉的可再生能源。

水力发电厂(简称水电厂)的发电出力(容量)可估算为

$$P_{sf} = 9.81QH\eta \quad (1-1)$$

式中 P_{sf} ——水电厂可能的发电出力(容量), kW;

Q ——用于发电的河川流量, m^3/s ;

H ——水电厂上、下游的水位差(又称落差), m;

η ——水轮发电机组的效率。

通常,水轮机及发电机组的综合效率值 η 一般为0.85左右,因而式(1-1)可以进一步简化为

$$P_{sf} = (8 \sim 8.5)QH \quad (1-2)$$

水力发电厂可能的发电出力(容量)的大小决定于上下游的水位差(简称水头)和流量的大小,可用式(1-1)和式(1-2)估算。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河川流量。根据地形、地质、水能资源特点等的不同,水力发电厂的形式是多种多样的,例如有坝后式、河床式、引水式、地下式、坝内式等。

由式(1-1)、式(1-2)可知,水力发电厂的生产过程要比火力发电厂简单。下面以坝

后式水电厂为例来进行介绍,如图1-4所示。由拦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,水轮机转子再带动发电机转子旋转,使机械能变成了电能。而做功后的水则经过尾水管排往下游。发电机发出的电则经变压器升压后由高压输电线路送入系统。由于水力发电厂的生产过程较简单,故它所需的运行维护人员较少,且易于实现全盘自动化。再加之水力发电厂不消耗燃料,所以它的电能成本要比火力发电厂低得多。此外,水力发电机组的效率较高、承受变动负荷的性能较好,故在系统中的运行方式较为灵活;水力发电机组起动迅速,在事故时能有力地发挥其后备作用。再者,随着水力发电厂的兴建往往还可以同时解决发电、防洪、灌溉、航运等多方面的问题,从而实现河流的综合利用,使国民经济取得更大的效益。水力发电厂的另一个优点是不像火力发电厂、核能发电厂那样存在环境污染问题。而且,水能资源是属于可再生利用的清洁能源,这种发电方式对节能减排有利。但是,由于水力发电厂需要建设大量的水工建筑物,所以相对于火力发电厂来说,建设投资较大,工期较长,特别是水库还将淹没一部分土地,带来淹没损失,从而给农业生产带来一定不利影响,并存在库区移民安置等难题。加之水力发电厂的运行方式还受气象、水文等条件的影响有丰水期、枯水期之别,发电出力不如火电厂稳定,也给电力系统的运行带来一定不利因素。更不可忽视的是,随着大型水电工程的兴建,还在一定程度上破坏了自然界的生态平衡,并有可能破坏生态环境,造成更加深远的影响,所有这些都是水力发电厂存在的问题。

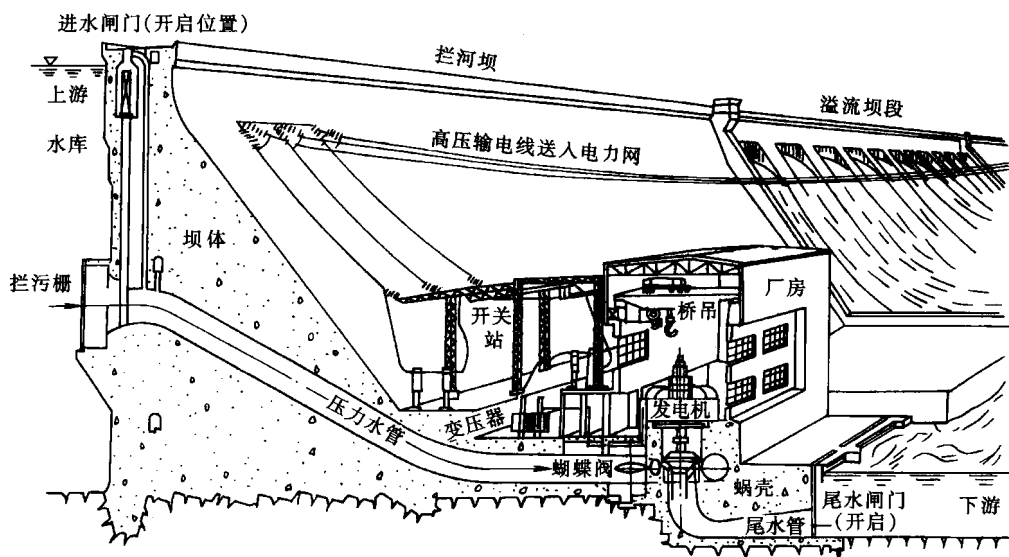


图 1-4 水力发电厂生产过程示意

如前所述,我国具有极其丰富的水能资源,尽管近年来,已建成并投运了不少大中型水力发电厂,举世无双的三峡水电厂也已于2003年发电。但迄今我国水力资源的开发率仅为25%左右,仍有大量的水力资源有待开发。反之,世界上一些工业发达国家的水能资源却基本上开发殆尽。据规划,今后准备在金沙江、长江以及黄河上游、大渡河、澜沧江、雅鲁江等河流上将建设许多个大型水力发电基地,并以这些基地为中心,依靠超高压交直流输电线路建立起若干个跨省的现代化大电网。迄今,我国水电总装机容量已突破1亿kW,位居