



21 世纪电力系统及其自动化规划教材

发电厂电气主系统

许珉 杨宛辉 孙丰奇 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪电力系统及其自动化规划教材

发电厂电气主系统

许 珉 杨宛辉 孙丰奇 编

刘宝仁 主审



机械工业出版社

本书着重讲述了发电厂和变电所电气主系统的有关基本理论和设计方法。主要内容有：导体的发热与电动力，主要电气设备的工作原理及选择计算方法，电气主接线、厂用电及设计，配电装置，发电厂与变电所的二次接线，电力变压器和同步发电机的运行理论等。本书兼顾课程设计、毕业设计和工程实际设计的需要，在相应章节介绍了发电厂和变电所电气一次部分的设计方法，详细介绍了支持式管形母线的选择计算。本书还根据二次接线的新发展，介绍了微机保护与监控装置中的断路器控制回路。本书的特点是：重点突出，层次分明，例题习题丰富，力求概念阐述准确、清楚，公式推演全面，易于讲授，便于自学，注重与工程实际结合，实用性强。每章附有思考题与习题，书后附有常用电气设备的技术参数。

本书主要可作为普通高等学校电气工程及其自动化、电力系统及其自动化及相关专业的本科教材，也可作为从事发电厂和变电所的电气设计、施工、运行、管理以及相关工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

发电厂电气主系统/许珉等编. —北京：机械工业出版社，2006.5
21世纪电力系统及其自动化规划教材
ISBN 7-111-18531-5

I. 发... II. 许... III. ①发电厂 - 电气设备 - 教材②电厂电气系统 - 教材 IV. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 011234 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑：贡克勤 版式设计：冉晓华 责任校对：李秋荣
封面设计：王伟光 责任印制：杨 曦
北京机工印刷厂印刷
2006 年 6 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 18.5 印张 · 456 千字
定价：26.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68326294
编辑热线：(010) 88379711
封面无防伪标均为盗版

21世纪电力系统及其自动化规划教材

编委会

主任委员：熊信银

副主任委员：尹项根 韩学山 李庚银 刘宪林
李扬 陈少华 贡克勤 杨德先 (兼秘书)

委员：(以姓氏笔划排序)

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 尹项根 | 毛承雄 | 车仁飞 | 文明浩 | 文劲宇 |
| 叶俊杰 | 刘学东 | 刘宪林 | 孙丰奇 | 许珉 |
| 李扬 | 李庚银 | 吴耀武 | 陆继明 | 张利 |
| 张波 | 杨国旺 | 杨宛辉 | 杨淑英 | 杨德先 |
| 陈卫 | 陈少华 | 罗毅 | 房俊龙 | 易长松 |
| 赵书强 | 赵玉林 | 赵丽平 | 娄素华 | 栗然 |
| 盛四清 | 常鲜戎 | 梁振光 | 韩学山 | 游志成 |
| 熊信银 | 魏萍 | | | |

前 言

本书是针对高等教育本科电气工程及其自动化专业而编写的，可作为该专业“发电厂电气主系统”或“发电厂电气部分”课程的教学用书。本书根据电力工业的实际发展，在吸收了以往教材的长处，有关参考文献、工程设计资料内容和作者在教学中的研究成果的基础上编写而成。本教材的特点为

1) 重点突出，层次分明，例题习题丰富，力求概念阐述准确、清楚，公式推演全面，易于讲授，便于自学，章末附有思考题与习题，书后附有常用电气设备的技术参数。

2) 兼顾课程设计、毕业设计和工程实际设计的需要，在相应章节介绍了发电厂和变电所电气一次部分的设计方法，详细介绍了支持式管形母线的选择计算和实用短路电流（三相短路和不对称短路电流）的计算方法。

3) 注意新技术的发展，介绍了电气一次设计的新发展。根据二次接线的新发展，介绍了微机保护与监控装置中的断路器控制回路。

4) 注重与工程实际结合，尽可能多地讲授一些工程实际知识，实用性强。

本书由许珉任主编并统稿，杨宛辉任副主编。其中，第一、三、七章由杨宛辉编写，第四、十章、附录及第二章第二、三、四节和第八章第一、二、三、五节由孙丰奇编写，第五、六、九章及第二章第一节和第八章第四节由许珉编写。本书由刘宝仁主审，并提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心的感谢。

在本书编写过程中，郑州航空工业管理学院的华红艳、中原工学院的查丛梅和河北水利电力学院的鲁改凤等专家阅读了本书的部分书稿，并提出了宝贵意见和建议。河南省电力勘测设计院的程其先等专家、河南思达高科电力技术公司的卜海滨和贾明才等专家给予了大力支持。本书编写过程中还参阅了有关参考文献、国家标准、运行与设计技术规程等技术资料。在此，对有关作者一并表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中错误及不妥之处在所难免，恳请读者和同行批评指正。

编 者

目 录

前言

| | | | |
|--------------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 | 1 | 第五章 导体的发热与电动力 | 107 |
| 第一节 电力工业发展概况 | 1 | 第一节 概述 | 107 |
| 第二节 发电厂和变电所的基本类型 | 6 | 第二节 导体发热和散热的计算 | 108 |
| 第三节 发电厂和变电所电气设备简述 | 14 | 第三节 导体的长期发热与载流量 | 111 |
| 思考题 | 15 | 第四节 导体的短时发热 | 114 |
| 第二章 开关电器和互感器的原理 | 16 | 第五节 导体短路的电动力 | 118 |
| 第一节 开关电器 | 16 | 第六节 大电流封闭母线的发热和电动力 | 124 |
| 第二节 电流互感器 | 26 | 思考题与习题 | 128 |
| 第三节 电压互感器 | 33 | 第六章 电气设备的选择 | 130 |
| 第四节 新型互感器简介 | 40 | 第一节 电气设备选择的一般条件 | 130 |
| 思考题 | 40 | 第二节 导体与电缆的选择 | 134 |
| 第三章 电气主接线 | 42 | 第三节 支柱绝缘子与穿墙套管的选择 | 144 |
| 第一节 对电气主接线的基本要求 | 42 | 第四节 高压断路器和隔离开关的选择 | 147 |
| 第二节 电气主接线的基本接线形式 | 44 | 第五节 高压熔断器的选择 | 148 |
| 第三节 发电厂和变电所主变压器的选择 | 54 | 第六节 限流电抗器的选择 | 150 |
| 第四节 限制短路电流的方法 | 58 | 第七节 互感器的选择 | 153 |
| 第五节 发电厂和变电所的典型电气主接线 | 61 | 第八节 支持式管形母线的选择 | 159 |
| 第六节 电气主接线设计 | 65 | 思考题与习题 | 171 |
| 第七节 电气主接线的可靠性计算 | 72 | 第七章 配电装置 | 173 |
| 思考题与习题 | 78 | 第一节 概述 | 173 |
| 第四章 厂(所)用电 | 80 | 第二节 屋内配电装置 | 177 |
| 第一节 概述 | 80 | 第三节 屋外配电装置 | 183 |
| 第二节 厂用电源及厂用电接线的基本形式 | 82 | 第四节 成套配电装置 | 188 |
| 第三节 发电厂和变电所的厂(所)用电典型接线分析 | 87 | 第五节 发电机、变压器与配电装置的连接 | 192 |
| 第四节 厂(所)用变压器的选择 | 92 | 第六节 发电厂和变电所的电气总平面布置 | 195 |
| 第五节 厂用电动机的选择和自启动校验 | 98 | 思考题 | 200 |
| 思考题与习题 | 106 | 第八章 发电厂与变电所的二次接线 | 201 |

| | | | | | |
|---------------------|--------------------|-----|-----------------------|---------------|-----|
| 第一节 | 发电厂和变电所的控制方式 | 201 | 第五节 | 自耦变压器的工作原理与运行 | 236 |
| 第二节 | 电气二次接线图 | 203 | 第六节 | 变压器的并列运行 | 245 |
| 第三节 | 断路器控制回路 | 209 | 思考题与习题 | | 248 |
| 第四节 | 微机保护与监控装置中的断路器控制回路 | 214 | 第十章 同步发电机的运行 | | 249 |
| 第五节 | 中央信号 | 218 | 第一节 | 同步发电机的参数及其额定值 | 249 |
| 思考题 | | 224 | 第二节 | 同步发电机的正常运行 | 254 |
| 第九章 电力变压器的运行 | | 225 | 第三节 | 同步发电机的特殊运行方式 | 260 |
| 第一节 | 变压器的温升与温度计算 | 225 | 第四节 | 同步发电机的非正常运行方式 | 265 |
| 第二节 | 变压器的绝缘老化 | 230 | 思考题 | | 269 |
| 第三节 | 变压器的正常过负荷 | 231 | 附录 常用电气设备的技术参数 | | 270 |
| 第四节 | 变压器的事故过负荷 | 235 | 参考文献 | | 288 |

第一章 绪 论

第一节 电力工业发展概况

一、由两个指标看电力工业在国民经济中的作用

纵观 20 世纪的社会和经济发展，一个突出特点是，电力的使用已渗透到社会经济、生活的各个领域。由于电力具有便于转换能源型式、能高度集中和无限划分、清洁干净和易于控制、可大规模生产和远距离输送等特性，使电力发展和应用的程度，即一个国家的电气化程度，成了衡量其国民经济发展水平和社会现代化水平高低的重要标志之一。

特别是在进入以信息、电子、生物技术为代表，从集中到分散，从等级结构到网络结构，从简单选择到多种选择的 21 世纪，电力将继续发挥其他能源形式所不能替代的作用，人们对电力的依赖程度将更高，对电力供应的数量和品质也将提出更大、更高的要求。电力工业在国民经济中的作用可以用两个世界公认的指标来说明。

1. 电力弹性系数“ E ”

电力工业是基础产业，是社会公共事业，具有投资大、技术密集，建设周期长，产、供、销同时完成等特点。为满足国民经济和人民生活用电逐渐增长的需要，电力工业必须在供需之间保持一个相适应的比例关系，这就是电力弹性系数“ E ”，它的定义如下：

$$E = \frac{\text{若干年内电力平均增长率}}{\text{若干年内国民经济总产值增长率}}$$

根据世界各国经济发展的经验和我国的实践，专家普遍认为“ E ”的标准必须大于 1.2。近数十年的资料说明， E 直接反映了这一阶段国民经济发展速度，世界各工业发达国家在各发展阶段它总是大于 1。而且它越大，说明这一阶段的国民经济发展速度越快，因此 E 也叫电力超前系数。比如美国在 1950 年至 1980 年间的 $E = 1.67$ ；英国在 1970 年至 1980 年间的 $E = 2.38$ 等。我国在 1966 年之后的很长时间内 $E < 1$ ，这就是为什么那段时间是我国严重供电时期，当时由于电力不足严重制约了国民经济的发展和人民生活水平的提高。

自提出从 1985 年至 2000 年 15 年间我国国民经济总产值翻两番的宏伟目标以来，国家充分重视到由于电力工业的发展滞后，从而拖国民经济后腿的现象。在 20 世纪 90 年代以后，我国的电力平均每年新增装机容量 17000MW，实现装机容量 8 年翻一番，到 1997 年基本缓解了近 50 年的持续缺电局面。但是，到本世纪初又出现了电力紧张的状态，这是由于我国国民经济持续高速度增长，人民生活水平进一步提高，电力生产增长速度不能满足需要的结果，如 1998 年、1999 年的电力弹性系数分别为 0.36 和 0.87。所以，近年来电力建设速度又进一步加快，可见电力工业在国民经济中的作用是多么重要。

2. 发电能源在一次能源总消费中的比例“ γ ”

发电能源在一次能源总消费中的比例“ γ ”的定义是

$$\gamma = \frac{\text{国民经济中电能生产所需要的一次能源消耗量}}{\text{国民经济中一次能源总消耗量}}$$

所谓一次能源是指直接由自然界采用的能源，如：煤、石油、天然气、水利资源、核原料等。二次能源是由一次能源经加工转换而获得的另一种形态的能源，如电力、煤气、蒸汽、焦炭等。

γ 值反映了用电比重，也反映了该国的经济发展水平，因 γ 值越大说明能源的使用效率越高。美国的一个研究小组对 20 个部门的 350 种产品及服务行业进行统计分析，结果是这些部门的 γ 值每提高 2%，则单位产值所消耗的能源将降低 18%。工业发达国家的 γ 值一般大于 30%，如美国目前的 γ 值为 50%，我国 2000 年 γ 值达到 35%。由此可见，国民经济越发达，电力不足造成的损失也就越大，越是经济发达的国家，它对电的依赖性也就越强。

二、我国电力工业发展概况

我国自 1882 年有电力以来至 1949 年底，经过 67 年发展装机容量只达到 185 万 kW，年发电量 43 亿 kW·h，分别居世界第 21 位和第 25 位。

新中国成立以后，电力工业的发展可以分为 1950~1978 年和 1978 年以后两个阶段。在 1950~1978 年期间，新中国的建立为电力工业的发展创造了有利条件。1978 年后，中国开始实行改革开放政策，电力工业更是以前所未有的速度向前发展。目前，比较完备的电力工业体系已经初步建立，技术装备水平正在逐步提高。除去我国台湾省和港、澳地区外，已经形成华北（北京、天津、山西、河北及部分内蒙古）、东北（黑龙江、吉林、辽宁及部分内蒙古）、华东（上海、江苏、浙江、安徽）、华中（河南、湖北、湖南、江西）、西北（陕西、甘肃、青海、宁夏）、川渝（四川、重庆）和南方联营（广东、广西、云南、贵州）7 个跨省、市区电网，以及山东、福建、海南、乌鲁木齐和拉萨 5 个独立的省级电网，跨省、跨大区电网的互联正在逐步实现。除西北电网最高电压等级为 330 kV 外，其他跨省电网和山东电网已建成 500 kV 主网架。全长 146km 的青海官亭—兰州东 750kV 输电示范工程在 2005 年 10 月投运，这是我国首条电压等级最高、世界海拔最高的输变电工程。2003 年全国总装机容量达到 38450 万 kW，年发电量 19080 亿 kW·h，从 1996 年起，我国发电机装机容量和年发电量均居世界第二位，2004 年全国总装机容量达到 44700 万 kW，2004 年电力弹性系数达到 1.6。

至 2004 年底，我国最大的汽轮发电机组容量 90 万 kW，安装在外高桥第二发电厂；最大的水轮机组容量 70 万 kW，安装在三峡水力发电厂；最大的核电机组容量 100 万 kW，安装在岭澳核电厂。目前我国最大的火力发电厂是北仓港电厂，装机容量 300 万 kW，单机容量 60 万 kW；最大的水力发电厂是三峡水力发电厂，总装机容量 1820 万 kW，单机容量 70 万 kW，年均发电量 847 亿 kW·h；我国最大的核能发电厂是岭澳核电厂，装机容量 200 万 kW，单机容量 100 万 kW；最大的抽水蓄能电厂是广州抽水蓄能电厂，装机容量 240 万 kW，单机容量 30 万 kW。这些也说明我国电力工业已进入大机组、大电厂、大电网、超高压、高度自动化的发展时期和向跨大区联网、推进全国联网的新阶段。

三、我国电力工业目前存在的主要问题

我国电力工业取得了突飞猛进的发展，但离国民经济发展的要求仍然有很大的距离，目

前存在的主要问题有：

1. 电力工业内部结构性矛盾突出

电网建设滞后于电源建设，电网结构薄弱；电网的输电与配电、高压与低压、一次与二次环节之间的配置还不够协调，不同程度地影响着电网的安全稳定和经济运行。水能资源没有得到充分的开发利用，开发利用率为 25% 左右，尤其是调节性能好的大型水电站比重偏小。电网调峰能力普遍不足。

2. 电力发展水平和电气化程度仍然很低

目前，我国 30 万 kW 及以上机组占火电装机容量的比重为 40% 左右，洁净煤发电、核电、超临界机组、高压直流输电等先进技术应用还比较少，供电煤耗、线损率都比先进国家高。我国人均拥有发电装机容量和人均发电量，均不到世界平均水平的一半，仅为发达国家的 1/6 ~ 1/10。

3. 环境保护的任务十分繁重

我国能源资源以煤炭为主，在电源结构方面今后相当长的时间内将继续维持燃煤机组为主的基本格局。目前还有相当部分火电厂没有采取脱硫措施，火电厂的二氧化硫污染排放尚未得到有效控制，这已成为电力工业实施可持续发展战略的制约因素。

4. 电力工业管理体制还不能适应新时期发展的需要

目前我国电力企业在经营管理上存在着效率低、服务差的问题。电力市场壁垒阻碍着电力资源的优化配置，电价形成机制不能充分反映市场的供需关系，制约了电力消费的有效增长和电网的发展，也妨碍了节约用电和环境保护技术的推广应用，影响了农村经济的发展和农民生活水平的提高。

四、我国电力工业今后的发展方针

1. 充分开发水电

水利资源是大自然给予我们的一种便宜、绿色的可再生能源，我国水能资源丰富，河流水能资源技术可开发装机容量 4.93 亿 kW，经济可开发装机容量 3.95 亿 kW，是世界上水力资源比较丰富的国家。至 2004 年我国的水电装机容量已达 1 亿 kW，水电装机容量居世界第二位，已开发的水电约为经济可开发资源的 25% 左右，但这一水电开发率比发达地区如北美的 60%、欧洲的 50% 低得多。21 世纪是中国水电大发展的时期，西部大开发和“西电东送”战略任务将支撑着我国水电事业的腾飞，中国水电技术也将因此走在世界前列。在坚持可持续发展和保持生态环境的前提下，我国水电开发的基本思路定为：主要开发调节性能好、水能指标优越的大型水电站，并因地制宜开发中小型水电站；重点水电站开发与流域梯级开发相结合；重点开发黄河上游、长江中上游、红水河、澜沧江中下游和乌江等流域；推进国家“西电东送”战略和支持中西部及少数民族地区的水电开发；在煤炭短缺、水能资源丰富的地区，选择一批小河流进行连续梯级开发；根据各个电网的调峰能力情况，有选择地开发抽水蓄能发电。

根据“长江流域水力资源复查”结果显示，在我国当前技术水平条件下，长江流域可开发利用的水电资源装机容量为 256272.9MW，当前长江上再建两个三峡工程的计划已经启动。

黄河上游水电开发将要建设的最大项目是拉西瓦水电站工程，规划安装 6 台 70 万 kW 机组，容量为 420 万 kW。

到2010年,也就是中国开始水电建设100年时,水电装机容量力争达到1.55亿kW以上,我国的水电装机容量将超过美国居世界第一,完成从资源第一大国到生产第一大国的转变。2011~2049年,全国总装机将约为15亿kW,水电开发率达到85%~90%,装机约4.3亿kW。届时,中国的水电技术将达到世界领先水平,进一步由生产数量上的第一大国,成为数量、质量、科技、管理、效益等方面全面领先、真正意义上的水电第一大国。

2. 大型火电基地建设

我国有丰富的煤炭资源,储量7241亿t(吨)。在我国电源结构中,现在火电设备容量占总装机的75%以上,在相当长的时期内,火电建设仍然是主要的。我国火电建设的重点是:积极采用高参数、大容量、高效率、高调节性、节水型,以装机容量600MW以上为主的设备;大力开发清洁煤燃烧技术,以减轻对环境的压力;鼓励热电联产和热、电、冷技术的推广,以提高能源综合利用率;积极支持和花大力气建设矿口电厂,建设煤炭基地的电站群,发挥规模经济效益,而且可以变送煤为送电以减轻对运输的压力,同时也可减轻对经济发达地区的环境压力。

3. 适当发展核电形成我国自己的核电生产能力

核电是一种安全清洁的能源,利用它可以大大地节约煤和减少污染。一个1000MW的火电厂一天燃烧的煤是9600t,而相应1000MW的核电厂,一天只要3300g的 U_{235} ,同样容量的电厂其用燃料量竟相差300万倍。而且,煤资源的开发满足不了需要的增长一直是一个难以解决的问题,到目前为止作为技术成熟、可大规模建设以替代部分燃煤火电站、减少对大气环境污染的只能是核电站。

目前中国已形成了浙江秦山、广东大亚湾、岭澳和江苏田湾等核电基地。其中:大亚湾核电站是我国引进国外资金、设备和技术建设的第一座大型商用核电站,是装机容量 2×90 万kW压水堆核电站;1994年4月投入运行的秦山第一核电站,是中国第一座依靠自己的力量设计、建造和运营管理的30万kW压水堆核电站;秦山第二核电站,是我国自主设计、建造、运营的首座 2×60 万kW压水堆核电站;中国与加拿大合作的秦山第三核电站工程是我国首座商用重水堆核电站工程,建造总装机容量为 2×72.8 万kW核电机组;岭澳核电厂计划装机容量 4×100 万kW,目前第一期两台机组已投产;中国与俄罗斯合作的田湾核电站工程,厂区按4台百万千瓦级核电机组规划,并留有再建2~4台的余地。一期建设 2×106 万kW的俄罗斯AES-91型压水堆核电机组已投产。

4. 优化发电能源结构

我国常规能源结构中,以煤炭为主,在电力能源消费构成中,煤电电量占75%左右,这给环境等带来极大压力,需努力改变电源结构,调整和优化能源结构。除了上述加快水电、核电建设外,还要尽可能多地利用天然气等优质能源发电。天然气为常规燃料中的优质能源,从世界范围内的能源消耗来看,天然气比重在逐年上升,燃料用天然气的发电厂也越来越多。由于我国探明的天然气储量不断增加,因此,在发电能源结构上要尽可能优化,即多采用一些天然气发电,特别在我国沿海等地要扩大建设规模。在油气田产区和通天然气管道的地区将适当发展一些高效率的燃气联合循环电站,既适应电网调峰需要,又能提高发电的能源利用效率,还可降低建设造价。

5. 加强新能源发电的开发力度

加强新能源发电的开发力度是世界各国共同的发展趋势。我国新能源资源丰富,被称为

绿色能源的太阳能、风能、地热能、潮汐能及生物质能等开发前途非常广阔。

根据专家预测，太阳能将成为本世纪人类的主要能源，其中利用太阳能发电的方向是肯定的。我国太阳能利用的前景是非常可观的。

被称为“蓝天白煤”的风力资源，是一种取之不尽，又不会产生任何污染的可再生能源。在新能源发电中，风力发电在技术上比较成熟，并具备了进行较大规模开发的条件。据专家估计，地球上的风能资源约为每年 200 万亿 kW·h，目前已被开发的只是微不足道的一部分。仅 1% 的地面风力，就能满足全世界对能量的需求，可见其潜力多么巨大！近几年来世界各国风力发展很快，德国的风电装机容量已达到 1000 万 kW，甚至超过了水电。我国风力资源丰富，实际可开发利用的风能资源储量为 2.53 亿 kW，目前已形成生产 30 万台 100 ~ 5000W 独立运行小型风力发电机组的能力，在内蒙古已有 60 万居住在偏远地区的牧民，用风力发电解决了生活、生产用电。我国广阔的海域也具有丰富的风能源，东南沿海及其附近岛屿是风能资源丰富地区，开发海域风力发电的前景非常可观。目前，我国已建成 40 个风电场，总装机容量近 60 万 kW，规划到 2010 年将达到 5 GW。风力发电正向大型化发展，国外最大的风力发电机单机容量已达 3000kW，大型化的优点是使单位发电量的投资明显下降，目前是我国风力发电的大发展时期。

用城市大量的垃圾发电，既可充分利用能源，又可减轻环境的污染，这些也是在今后的电力发展中应予以重视的。

6. 大力发展电网

21 世纪最初 20 年，是我国电力发展的关键时期，而重点是加强电网建设，21 世纪的电网互联将会得到更快的发展，其中包括跨大区联网和全国联网，以及跨国输电和联网，以便形成全国乃至更大范围（跨国或跨地区）内的电力市场。

总体来看，目前我国电网还是比较薄弱的，在我国的电网建设中，要实施抓两头带中间的策略。重点要抓好两头，一头是大型电厂、能源基地的电力外送与全国联网以及跨国联网建设；另一头是农村电网建设与城市配电网的建设。而中间，则主要是指 220 kV 电网及各网省电力公司范围内 500 kV 电网网架的建设，也需要进一步完善和加强。

我国电网发展的基本思路和实施的步骤是：一要以三峡电网为中心，推进全国联网；二是要配合大型水电站和火电基地的建设，进一步加大“西电东送”和“北电南送”的力度，实现以送电为主的“送电型”联网；三是在不断加强各大区自身电网结构的基础上，在适当的时机和地点按照利益均沾、互惠互利的原则，采用交流或直流，实现以联网效益为主的“效益型”联网，并把“送电型”联网与“效益型”联网有机地结合起来，把全国联网与加强各地区电网自身网架的建设结合起来，最后推进全国联网的形成和发展。与此同时还要重视发展我国电网与周边国家电网的互联。

7. 开发和节约并重

在开发能源的同时，还必须节约能源。在民众中要牢固树立节约资源，建立资源节约型国民经济体系和资源节约型社会，推进节约型社会建设的观念，要进行节能政策引导，让人们在生活中养成节能意识、形成节能习惯。目前，我国能源消费浪费的现象还极为严重，全社会大力节能节电的空间大、意义深远，必须引起全民高度重视。同时，在开发能源时要努力提高能源利用率，第一要努力提高电力在终端能源中的供应水平，目前我国终端能源消费中，电力不到 11%，低于世界平均水平的 16%，与发达国家 20% 左右更有很大差距；第二

是大力加强电力需求管理，电力部门要投资节电工程，使之成为比新建电厂更为经济、更为清洁的替代方案；第三是支持发展热电联产；气、热、电、冷联产新技术，以及推广采用超临界机组、联合循环机组等新技术；第四是大量退役低效、高耗、高污染的小型凝汽式机组和超期服役机组，改造中高压机组，使火电机组的热效率由目前 29% 左右提高到 35% 左右。

8. 高度重视环境保护

众所周知，环境保护、保持生态平衡，是可持续发展战略的重要条件，环保措施必须认真贯彻到电力建设与生产中去。煤炭在我国的能源中约占 75%，而其总产量的 35% 以上用于发电。燃煤电厂是二氧化硫 SO_2 、氮氧化物 NO_x 、二氧化碳 CO_2 和粉尘物等大气污染源之一。若一台锅炉每天烧煤 2000t，就有 120t 的 SO_2 排入大气。 SO_2 将引起酸雨，腐蚀材料，毁坏庄稼。燃煤的产生 CO_2 ，它将引起温室效应，使地球两极冰山融化，导致地球陆地变小，威胁人类的未来。燃煤产生的 NO_x 会破坏臭氧层，造成紫外线对地面生物的强烈辐射，危害生物。煤燃烧后的渣滓煤灰形成的灰场占用了大量的不能生长植物的田地，也造成对环境的污染。因此在电力建设中，除了上述发展水电、核电、再生能源外，还必须继续关停效率低、煤耗高、污染严重的小火电机组，同时要积极开展燃煤电厂的脱硫技术和清洁燃煤技术，减少燃煤电厂的污染。

第二节 发电厂和变电所的基本类型

由于电能不能大量储存，这就决定了电能生产的特点是发电、输电和用电是在同一瞬间完成的，即发电厂生产出的电能必须立即送到用户消费。大部分大型发电厂都远离用户，发电厂生产的电能需要经过变压器升压和高压输电线路远距离输送，再经过降压变电所若干次降压后才为用户所用。发电厂、输电线路、变电所、用户构成了电力系统不可缺少的统一整体。

一、发电厂的基本类型

发电厂是把各种一次能源，如燃料的化学能、水能、核能、太阳能和其他能源转换成二次能源，即电能的工厂。按照发电厂所消耗一次能源的不同，发电厂有：

1. 火力发电厂

以煤炭、石油、天然气等为燃料的发电厂称为火力发电厂。火力发电厂按其工作情况的不同又可以分为以下几类：

(1) 凝汽式火电厂 在这类电厂中，煤粉、石油等在锅炉的炉膛里燃烧、使锅炉水冷壁管流淌的、经化学处理过的软化水被加热成过热蒸汽，经饱和蒸汽管道送到汽轮机，推动汽轮机旋转，将热能转换成机械能。汽轮机带动发电机旋转，再将机械能转换成电能。做过功的蒸汽，排入凝汽器内的管道，被流入凝汽器里的循环水冷却成水，又经凝结水泵、给水泵打压重新送回锅炉使用。由于在凝汽器中，大量的热量被循环水带走，故一般凝汽式火电厂的效率都比较低，即使是现代高温高压或超高温高压的凝汽式火电厂，效率也只有 30% ~ 40%。

(2) 热电厂 热电厂除了发电以外，还向用户供热。它与凝汽式火电厂不同之处主要是

从汽轮机中间段抽出一部分做过功的蒸汽供给热用户使用，或经热交换器将水加热后，供给用户热水。这样，可以减少被循环水带走的热量损失，提高总效率。热电厂的总效率可达60%~70%。

(3) 燃气轮机发电厂 燃气轮机发电厂中的燃气轮机与凝汽式火电厂的汽轮机工作原理相似，所不同的是燃气轮机的工质是高温高压的气体而不是蒸汽。这些作为工质的气体可以用清洁煤技术将煤炭转化成的清洁煤气，也可以是天然气等。图 1-1 是整体煤气化联合循环 (Integrated Gasification Combined Cycle, 简称为 IGCC) 基本流程图。在这里作为工质的气体是由煤经过清洁煤技术转化成的清洁煤气。

煤气化的生产过程如下：煤在加压煤气炉中与氧和水蒸气反应生成 CO 、 H_2 、 CH_4 (乙炔) 等可以燃烧的气体，这个反应在高温下进行，因而需要一部分煤与 O_2 燃烧形成高温条件，以使煤气化能顺利进行。从加压煤气炉出来的煤气含有灰分等杂质，所以称为粗煤气，粗煤气进入煤气清洁系统经净化处理生成清洁煤气，清洁煤气进入燃气轮机的燃烧室中燃烧做功。

燃气轮机的工作过程是，空气被压气机连续地吸入和压缩，压力升高后流入燃烧室与清洁煤气混合成高温燃气，燃烧产生的高温高压气体进入燃气轮机中膨胀做功，燃气轮机再带动发电机发电，做功后的气体的压力降低排出。这种单纯用燃气轮机驱动发电机的电厂的热效率只有 35%~40%。因为燃气轮机循环的工质最高温度比蒸汽动力循环高，它最后的排出温度还很高，为提高效率，再采用燃气—蒸汽联合循环系统。即燃气轮机的热排气进入余热锅炉，加热锅炉中的水产生高温高压蒸汽，送到蒸汽汽轮机中去做功，从而带动发电机再次发电。联合循环系统的热效率可达 56%~85%。

上述生产过程中，煤的气化过程需要空气和蒸汽，在联合循环中空气可以从燃气轮机的压气机中抽气供给，蒸汽可以从汽轮机或锅炉中抽气供给，这样就把煤的气化与联合循环的主要部件组成一个有机整体，故称为整体煤气化联合循环。采用清洁煤技术的 IGCC 电站，对提高发电厂的效率和环境保护，无疑意义是巨大的。

2. 水力发电厂

水电站是将水的位能和动能转换成电能的工厂，也称水电站。根据水利枢纽布置的不同，水电站的类型可以分为堤坝式、引水式、混合式等。

(1) 堤坝式水电站 由于水的位能和动能是与水流量及水的落差 (也称为水头) 成正比的，它直接影响到水电站的总装机容量。在水流量一定的情况下，要提高水电站的总装机容量必须提高水头。但是许多河流水位的落差沿河流是分散的，为提高落差就需要在河流的上游修建拦河坝，将水积蓄、提高水头，进行发电。这种水电站就叫做堤坝式水电站，通常这类水电站又细分为坝后式和河床式两种。

坝后式水电站：这种水电站的厂房建在坝后，全部水头的压力由坝体承受，水库的水由

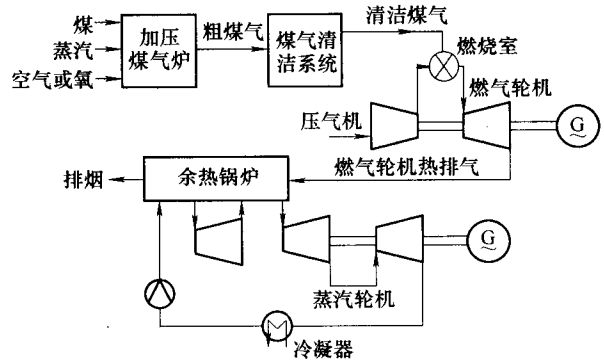


图 1-1 整体煤气化联合循环 (IGCC) 基本流程图

压力水管引入厂房，推动水轮发电机发电。坝后式水电站适合于高、中水头的场合，其布置情况如图 1-2 所示。著名的三峡水电站就是采用坝后式的布置方式。

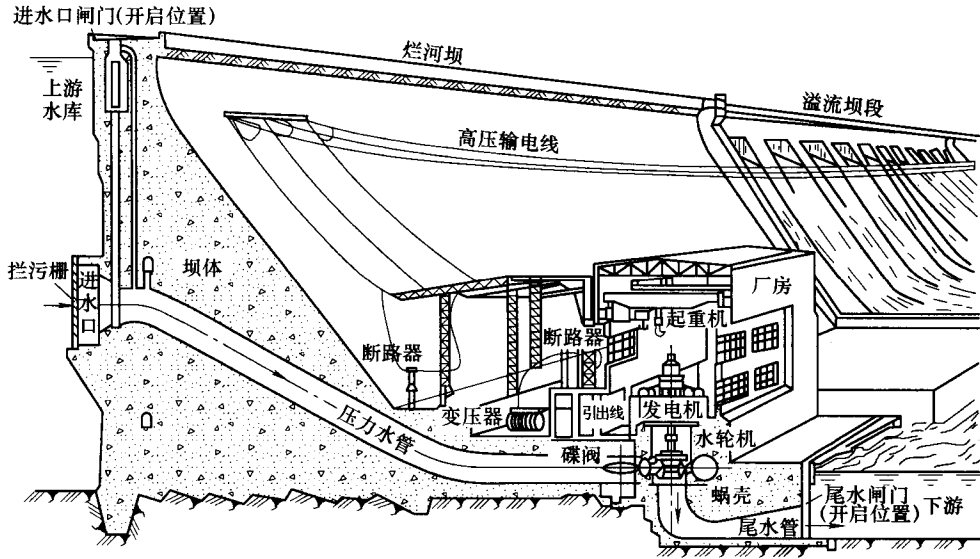


图 1-2 坝后式水电站示意图

河床式水电站：这种水电站的厂房和挡水堤连成一体，厂房也起挡水作用。由于厂房修建在河床中，故称河床式。河床式水电站的水头一般较低，大都在 20~30m 以下，其布置情况如图 1-3 所示。

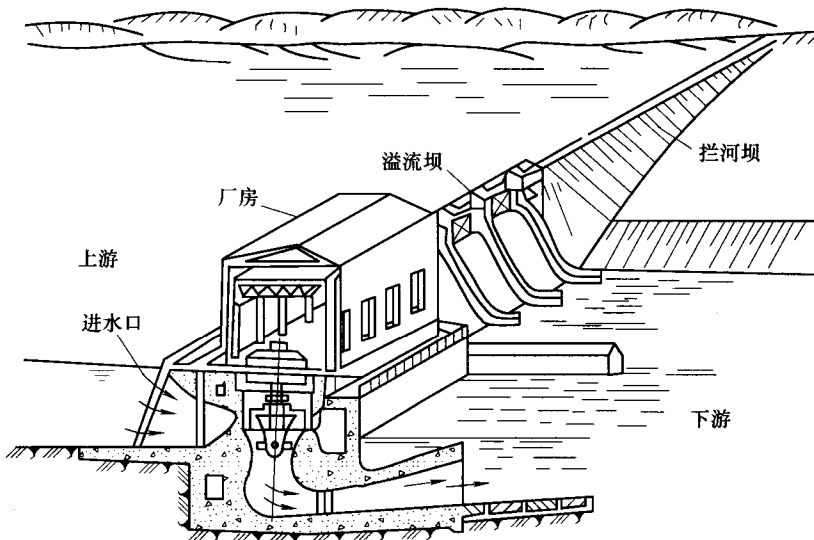


图 1-3 河床式水电站示意图

(2) 引水式水电站 这种水电站建筑在山区水流湍急的河道上或河床坡度较陡的地段，由引水渠道提供水头，一般不需要修建堤坝，或只修低堰，适用于水头比较高的情况。引水式水电站的布置如图 1-4 所示。

(3) 混合式水电站 这种类型的水电站是在适合开发的河段拦河筑坝，坝上游河段的落差由坝积蓄，而压力引水道集中坝下游河段的落差，水电站的水头是这两部分落差之和。这就是混合开发模式，而由这种集中落差方式修建的水电站称为混合式水电站，它具有堤坝式和引水式两种水电站的特点。

3. 抽水蓄能电站

抽水蓄能电站也是一种水电站，但它又不同于常规的水电站，抽水蓄能是由电能生产特点而产生的一种特殊形式的能源。由于电能不能储存，所以发电厂的出力必须随着负荷的变化而及时调整，过去这些调整是靠承担调峰的火电厂或

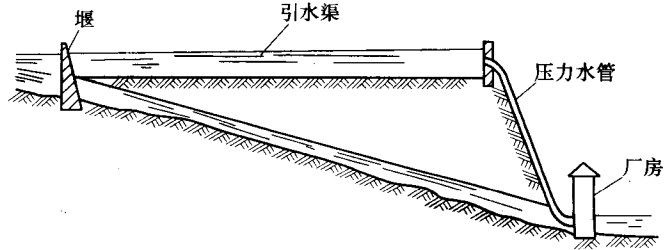


图 1-4 引水式水电站示意图

水电站来完成的。随着电力系统容量的增大、单机容量的增大、核电站所占比重的增大，而利用它们调峰（频繁地起停）很不经济。再加上枯水季节水电站调节能力的下降，在以火电、核电为主的电力系统中，系统的调峰填谷问题十分突出，这使得具有水轮机-发电机和电动机-水泵两种可逆的工作方式的抽水蓄能电站在近几年来得到迅速的发展。

这种水电站有两个水库，即上库和下库。夜晚或周末抽水蓄能电站的机组作为电动机运行，利用电力系统富余的电能将下库的水抽到上库，以位能的形式将电能储存起来，使得抽水蓄能电站成为目前人工的可以大量储蓄能源的重要方式。同时，由于它吸收了低负荷时的电能，使得火电机组可以保持在热效率比较高的工况下运行，提高了它们的经济性和电力系统的稳定性，即起到填谷的作用，这是以往任何调峰电厂（包括水电厂）无法具备的功能。在电力系统的峰荷期间，抽水蓄能电站的机组又作为发电机运行，将上库的水放下来通过水轮机发电，用以担任电力系统峰荷中的尖峰部分，即起到调峰作用。

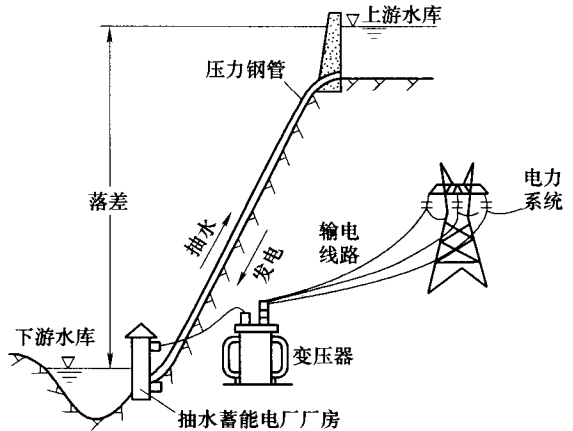


图 1-5 抽水蓄能电站示意图

正是由于抽水蓄能电站的机组具有这两种可逆的工作方式，而且它具有起停灵活、迅速、跟踪负荷变化的能力强、承卸负荷迅速灵活等特点，它除了在电力系统中起到调峰填谷作用外，还以比较低的成本，为系统提供紧急事故备用、调频、调相、快速负荷跟踪等功能。目前发达国家抽水蓄能电站发展越来越快，美国、日本抽水蓄能电站的总装机容量已经超过了 2000 万 kW，据不完全统计，世界抽水蓄能电站总容量超过了 1 亿 kW。图 1-5 所示的为抽水蓄能电站示意图，它可以是堤坝式，也可以是引水式。

4. 核电厂

核电厂发电的原理与火电厂相似，都要有一个热源，将水加热成蒸汽，进而推动汽轮机旋转并带动发电机转动而发出电能。不同的是核电厂所用的热源不是煤或石油，它的热源是

原子核的裂变能。

核反应堆中的核原料铀-235的原子核，在低速中子的轰击下会产生裂变反应，即原子核发生分裂，并释放出可观的热能用于发电。而且由于铀-235的原子核在裂变的同时还能放出中子，这些中子又使其他的铀-235原子核发生裂变，这种能自发保持下去的链式裂变反应保证了核电厂的正常运转。由于一个原子核裂变过程中放出的中子多于两个，当反应堆维持在某一个功率水平运行时，裂变数也应该处于一个平衡值，此时每次裂变所产生的中子，只要有一个参与再裂变就行了，否则过多的中子将使反应堆里的能量释放太快，若不加控制会产生像核爆炸那样的危险效果。因此，多余的中子必须用反应堆中的控制棒加以吸收，即实现可控核裂变链式反应。

另外，核裂变中刚产生的中子还不能立即被利用。这是因为这种中子的速度太快，使之与原子核发生反应的概率太小，为此必须将刚产生的快速中子的速度减慢。能够使中子有效减速的材料叫慢化剂，目前适合做慢化剂的材料有普通的纯净水、重水和石墨等介质。

根据所使用的慢化剂和冷却剂，核反应堆可以分为以下几种：

轻水堆：以普通的水，也叫做轻水作为慢化剂和冷却剂。轻水堆又分为压水堆和沸水堆。它们分别以高压欠热轻水以及沸腾轻水作慢化剂和冷却剂。

重水堆：重水堆以重水作慢化剂，重水或沸腾轻水作冷却剂。重水的分子式与普通水相同（ H_2O ），但是重水中的氢为重氢，其原子核中多含有一个中子，获得重水比较困难。

石墨气冷堆及石墨沸水堆：它们均以石墨作慢化剂，分别以二氧化碳（或氦气）及沸腾轻水作冷却剂。

液态金属冷却快中子堆：液态金属冷却快中子堆没有慢化剂，通常以液态金属钠作冷却剂。

目前，世界上的核电厂以轻水堆核电厂最多，据统计至1998年底，压水堆核电厂约占核电厂总容量的56%，沸水堆核电厂占23%。下面以轻水堆核电厂，即压水堆和沸水堆核电厂为例简单说明核电厂的工作原理。

(1) 压水堆核电厂 压水堆核电厂的示意图如图1-6所示。压水堆核电厂里的核燃料，被加工成燃料芯块以组件的形式安装在反应堆里。在反应堆里还安装有控制棒（内装中子吸收体），通过控制它在堆芯中的位置，达到控制压水堆的快速变化反应。为提高核电厂运行可靠性，一般压水堆核电厂将整个系统分为一回路系统、二回路系统和三回路系统。

一回路系统是一个闭路的强制循环回路，冷却水由冷却剂主泵（又称压水堆主泵或主循环水泵）驱动，形成压力为15MPa左右的蒸馏水，它循环于反应堆内部与蒸汽发生器之间。由图1-6可见，水在反应堆芯部时吸收燃料元件裂变时释放的热量，被加热到300℃以上，而后水进入一回路的另一个重要设备，即蒸汽发生器的U形管里。一回路水的压力和温度都高，它在U形管里面流动，二回路水的压力低，在管外流动，吸收一回路水的热量而被加热成蒸汽。一回路水把热量传给二回路水后，本身温度降低，它再经主泵返回反应堆，再次吸收燃料发出来的热量使燃料得到冷却。这样周而复始的循环流动，重复地吸收和交换热量，使堆芯得以冷却，使二回路产生蒸汽。

在一回路系统里还有一个稳压器，它是一个圆柱形的耐压罐，是为了保持一回路的压力恒定而设置的安全措施。它的上部充以气体（或是水蒸汽），下部是和一回路管道相通的水。一旦一回路中的压力有波动，罐上部具有压缩性的气体就能补偿这个压力的变化。