



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

第五版

电力系统分析

DIANLI XITONG FENXI

韩祯祥 主编



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电力系统分析

(第五版)

主 编 韩祯祥
副主编 邱家驹



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

内容提要

本书分为7章,内容主要阐述电力系统基本知识、电力系统元件的特性和模型、电力系统潮流的计算分析方法、电力系统的有功功率和频率控制、电力系统的无功功率和电压控制、电力系统故障分析和电力系统稳定等。书后附有短路电流运算曲线。全书物理概念阐述清楚,语言精练,图文并茂,条理清楚,剪系统性强,理论与实践紧密结合。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化专业的教材,还可作为在电力系统工作的技术和科研人员的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析 / 韩祯祥主编. —5版. —杭州:
浙江大学出版社, 2013.1
ISBN 978-7-308-09827-4

I. ①电… II. ①韩… III. 电力系统—系统分析—
高等学校—教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第063931号

电力系统分析(第五版)

韩祯祥 主编

责任编辑 杜希武

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路148号 邮政编码310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排版 杭州中大图文设计有限公司

印刷 杭州长命印刷有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 25.5

字数 620千

版印次 2013年1月第5版 2013年1月第18次印刷

书号 ISBN 978-7-308-09827-4

定价 49.00元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88925591

前 言

本书是高等学校电气工程及其自动化专业的主流教材,自 1992 年出版以来,在全国各地高校的教学和培训中得到了广泛的采用,培养了数以万计的大学生,发挥了重要的经济和社会效益。

全书主要阐述电力系统基本知识、电力系统元件的特性和模型、电力系统潮流的计算分析方法、电力系统的有功功率和频率控制、电力系统的无功功率和电压控制、电力系统故障分析和电力系统稳定等。希望学生通过本课程的学习,对电力系统有一个完整的了解,学到从理论到设计和运行的全面知识。

本书第 1 章由邱家驹编写,第 2 章由赵礼生编写,第 3 章由黄民翔编写,第 4 章由杨莉编写,第 5 章由吴浩编写,第 6 章由吴国炎编写,第 7 章由王建全编写;韩祯祥、邱家驹负责主编工作。

由于编者水平和教学经验有限,书中错误和不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

2010 年 12 月

目 录

1 电力系统概述

1.1 电力系统及其发展	3
1.1.1 电力系统	3
1.1.2 电力系统发展简史和我国的电力系统	4
1.1.3 电力系统的负荷和负荷曲线	10
1.1.4 电力系统中的发电厂	13
1.1.5 电力网的结构与结线	14
1.1.6 电压等级和额定电压	15
1.1.7 电力系统运行的特点和要求	17
1.1.8 电力系统中性点接地方式	19
1.1.9 直流输电与柔性交流输电	20
1.2 电力系统基本元件概述	24
1.2.1 发电机	24
1.2.2 电力变压器	25
1.2.3 电力线路	26
1.2.4 无功功率补偿设备	36

2 电力系统元件数学模型

2.1 三相电力线路	41
2.1.1 电力线路电阻	41
2.1.2 电力线路电感	42
2.1.3 电力线路并联电导	46
2.1.4 电力线路并联电容	47
2.1.5 电力线路的稳态方程和等值电路	51
2.2 变压器	57
2.2.1 双绕组变压器等值电路	60
2.2.2 三绕组变压器等值电路	62
2.2.3 自耦变压器及其等值电路	66
2.3 同步发电机和调相机	71
2.3.1 同步发电机	71

2.3.2	同步调相机	75
2.4	无功功率补偿设备	76
2.4.1	并联电容器	77
2.4.2	并联电抗器	77
2.4.3	静止补偿器	78
2.5	电力系统负荷	79
2.6	多级电压电力系统	81
2.6.1	多级电压电力网的等值电路	81
2.6.2	三相系统的标么制	85
2.6.3	多电压级电力网等值电路参变数的标么值	87
2.6.4	具有非标准变比变压器的多电压级电力网等值电路	89

3 电力系统潮流计算

3.1	简单电力系统正常运行分析	97
3.1.1	电力线路的电压损耗与功率损耗	97
3.1.2	变压器中的功率损耗与电压损耗	99
3.1.3	辐射形网络的分析计算	100
3.1.4	电力网的电能损耗	103
3.2	复杂电力系统潮流计算基础	105
3.2.1	节点电压方程与节点导纳矩阵和阻抗矩阵	105
3.2.2	功率方程和节点分类	109
3.3	高斯—塞德尔法潮流计算	111
3.4	牛顿—拉夫逊法潮流计算	114
3.4.1	牛顿—拉夫逊法简介	114
3.4.2	牛顿—拉夫逊法计算潮流	115
3.4.3	牛顿—拉夫逊法计算潮流的有关问题	120
3.5	P-Q分解法	125
3.6	直流法潮流计算与开断处理	134
3.6.1	直流法潮流计算	134
3.6.2	直流法潮流计算的开断处理	136

4 电力系统的有功功率和频率控制

4.1	频率和有功功率控制的必要性	141
4.2	电力系统的有功功率平衡	142
4.2.1	电力系统有功负荷的变化	142
4.2.2	备用容量	143
4.3	电力系统的频率特性	144
4.3.1	电力系统负荷的静态频率特性	144
4.3.2	发电机组的频率特性	146

4.3.3	电力系统的功率频率静态特性	152
4.3.4	联合电力系统的功率频率特性	153
4.4	电力系统的频率调整	154
4.4.1	频率的一次调整	154
4.4.2	频率的二次调整	156
4.5	电力系统的自动调频方法	157
4.5.1	积差调节法	158
4.5.2	联合电力系统的调频	160
4.6	电力系统有功负荷的经济分配	163
4.6.1	发电设备的经济特性	164
4.6.2	等微增率准则	164
4.6.3	火电厂之间的负荷经济分配	168
4.6.4	水火电厂之间负荷的经济分配	170
4.7	电力系统网损微增率的计算	172
4.8	自动发电控制	173
4.9	机组的经济组合	175
5	电力系统的无功功率和电压控制	
5.1	电力系统的无功功率平衡	181
5.1.1	无功功率和电压的关系	181
5.1.2	无功功率电源、负荷及损耗	182
5.1.3	无功功率的平衡	184
5.2	电力系统的电压控制	185
5.2.1	电压控制的必要性	185
5.2.2	中枢纽点电压管理	185
5.2.3	应用发电机调节电压	188
5.2.4	改变变压器变比调压	189
5.2.5	应用无功功率补偿装置调节电压	193
5.2.6	线路串联电容补偿改善电压质量	195
5.2.7	复杂系统的电压无功控制和调压措施的组合	198
5.3	电力系统无功功率的最优分布	200
5.3.1	无功功率的最优分配	200
5.3.2	无功功率的最优补偿	201
5.3.3	自动电压控制	202
6	电力系统故障分析	
6.1	基本概念	207
6.2	同步电机的数学模型	208
6.2.1	电压方程和磁链方程	210

6.2.2	坐标变换	213
6.2.3	用 $d, q, 0$ 坐标表示的同步电机方程式	215
6.2.4	标么制表示的派克方程式	218
6.2.5	同步发电机的稳态运行	222
6.3	同步电机三相短路电磁暂态过程	224
6.3.1	无阻尼绕组同步电机突然三相短路	225
6.3.2	有阻尼绕组同步电机三相短路	238
6.3.3	强行励磁对同步电机三相短路的影响	251
6.3.4	短路电流最大瞬时值和有效值	254
6.3.5	异步电动机的三相短路电流	256
6.4	电力系统三相短路实用计算	258
6.4.1	三相短路起始次暂态电流的计算	258
6.4.2	复杂电力系统起始次暂态电流的计算	267
6.4.3	应用运算曲线计算三相短路电流周期分量	270
6.5	电力系统不对称运行分析方法—对称分量法	275
6.5.1	对称分量法及其应用	275
6.5.2	同步电机负序和零序阻抗	279
6.5.3	异步电动机和综合负荷的负序及零序阻抗	279
6.5.4	三相变压器零序参数和等值电路	280
6.5.5	电力线路零序参数和等值电路	287
6.5.6	电力系统的零序等值网络	294
6.6	电力系统不对称短路分析	295
6.6.1	各种不对称短路的故障点电流和电压	295
6.6.2	不对称短路时网络中电流和电压的分布	302
6.6.3	复杂电力系统简单不对称短路电流的计算	307
6.6.4	应用运算曲线计算任意时刻的不对称短路电流	308
6.7	电力系统非全相运行	311
6.8	电力系统复杂故障分析概述	317

7 电力系统稳定性

7.1	电力系统稳定性概述	323
7.2	同步发电机组的机电模型	325
7.2.1	同步发电机组的转子运动方程式	325
7.2.2	同步发电机的电磁功率	328
7.3	电力系统静态稳定	338
7.3.1	静态稳定分析的基本方法	338
7.3.2	简单电力系统的静态稳定分析	342
7.3.3	多机电力系统的静态稳定分析	354

7.4 电力系统暂态稳定	355
7.4.1 简单系统暂态稳定性分析的等面积定则	356
7.4.2 暂态稳定性分析的数值积分方法	360
7.4.3 暂态稳定分析的李雅普诺夫直接法浅述	369
7.5 提高电力系统稳定性的措施	373
7.5.1 发电机励磁调节系统	373
7.5.2 原动机的调节特性	373
7.5.3 开关设备和继电保护	374
7.5.4 输电线	375
7.5.5 改善系统的结构和采用中间补偿设备	377
7.5.6 变压器中性点经小电阻接地	378
7.5.7 电气制动	379
7.5.8 切除部分发电机及部分负荷	380
7.5.9 直流输电和柔性交流输电装置对稳定的影响	380
7.5.10 系统暂态稳定破坏后的措施	381
7.6 电力系统的电压稳定	383
附录 短路电流运算曲线	387
参考书目	395

1

电力系统概述

1.1 电力系统及其发展

1.1.1 电力系统

发电机把石化能、水能、核能、风能和太阳能等转化为电能，电能经变压器、变换器和电力线路输送并分配到用户，在那里经电动机、电炉和电灯等设备又将电能转化为机械能、热能和光能等。这些生产、变换、输送、分配、消费电能的发电机、变压器、变换器、电力线路及各种用电设备等联系在一起组成的统一整体称为电力系统，如图1.1所示。

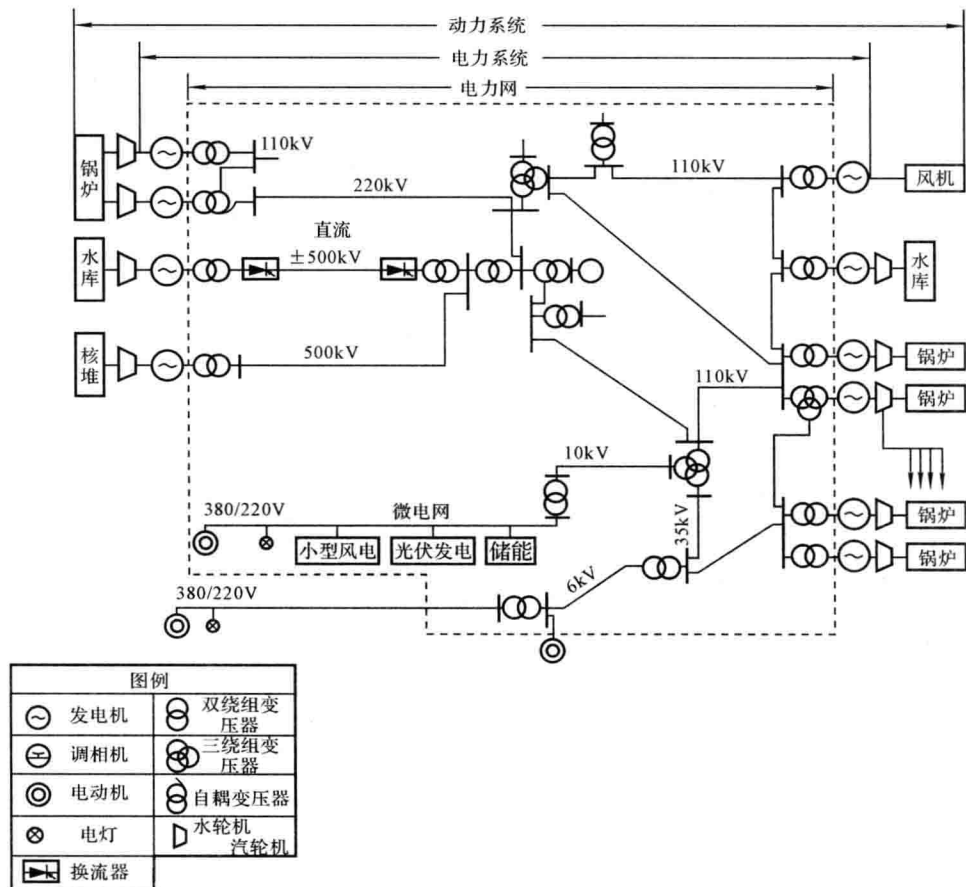


图 1.1 动力系统、电力系统和电力网示意图

与“电力系统”一词相关的还有“电力网”和“动力系统”。前者指电力系统中除发电机和用电设备外的部分；后者指电力系统和“动力部分”的总和。所谓“动力部分”，包括火力发电厂的

锅炉、汽轮机、热力网和用热设备,水力发电厂的水库和水轮机,核电厂的反应堆等。所以电力网是电力系统的组成部分,而电力系统则是动力系统的组成部分。三者的关系也示于图 1.1 中。

1.1.2 电力系统发展简史和我国的电力系统

1. 电力系统的发展简史

从 1831 年法拉第发现了电磁感应定律,到 1875 年巴黎北火车站发电厂的建立,电真正进入了实用的阶段。

火力发电始终在所有的电能中占最大的比重,它按照热力学原理,用不断提高蒸汽温度和压力的途径来提高蒸汽的热效率。高温高压火力发电机组按蒸汽的压力与温度参数又分为亚临界、超临界和超超临界发电机组。蒸汽压力大于 300 大气压,温度大于 600°C 的称为超超临界机组。超超临界燃煤发电机组煤耗低、环保性能好、技术含量高,是目前国际上最先进的燃煤发电机组,也是国际上燃煤发电机组的发展方向。我国首台国产单机容量为 100 万 kW 的超超临界机组 2005 年在浙江玉环电厂投入运行。图 1.2 为国产 100 万 kW 的超超临界机组。

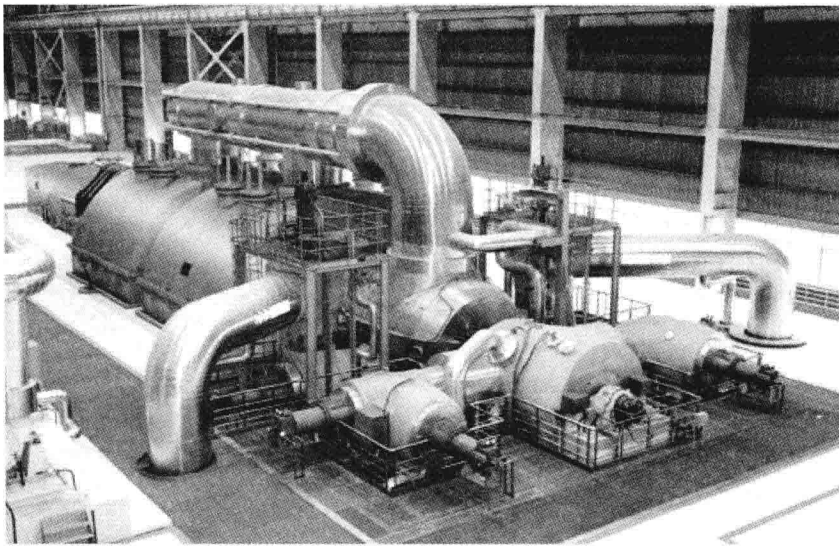


图 1.2 100 万 kW 的超超临界发电机组

水电的发展是水能开发的结果,早期一般都是小型水电站,随着用电需要的增长和水电建设技术的提高,逐步向中型和大型发展。近二三十年来,由于超高压输电技术和水轮发电机制造水平的提高,水电站的建设规模越来越大。目前,世界上最大的水轮发电机组的单机容量为 70 万 kW。2008 年 10 月,我国三峡水电站建设完工,站内共安装了 26 台 70 万 kW 的机组,总容量达 1820 万 kW,是世界上最大的水电站。此前最大的水电站是巴西巴拉那河上的伊泰普水电站,装有 18 台 70 万 kW 的机组,总容量 1260 万 kW。另外,三峡地下电站的 6 台 70 万 kW 的机组也在建设中,完工后三峡电站总装机容量将达 2240 万 kW。图 1.3 为三峡水电站。

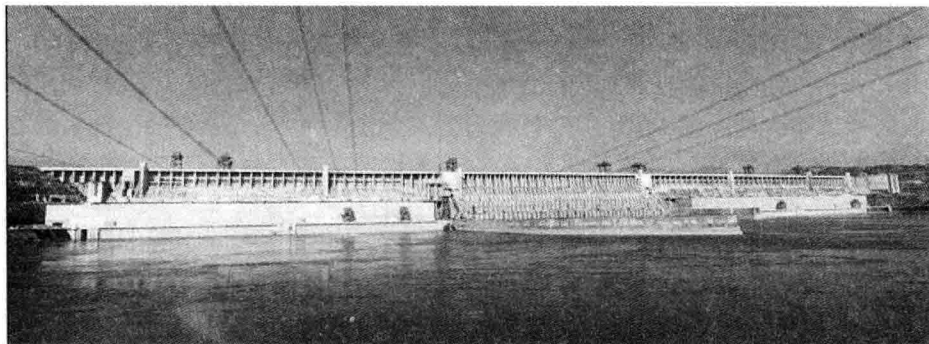


图 1.3 三峡工程大坝(发电机组安装在坝体内)

核能已成为人类使用的重要能源,核电是电力工业的重要组成部分。由于核电不造成对大气的污染排放,积极推进核电建设,对保障能源供应与安全,保护环境具有重要的意义。

核电站的开发与建设开始于 20 世纪 50 年代。1954 年,前苏联建成电功率为 5 MW 的实验性核电站,1957 年美国建成电功率为 90 MW 的希平港原型核电站。这些成就证明了利用核能发电的技术可行性。国际上把上述实验性和原型核电机组称为第一代核电机组。

20 世纪 60 年代后期,在试验性和原型核电机组基础上,陆续建成电功率在 300 MW 以上的压水堆、沸水堆和重水堆等核电机组,它们在进一步证明核能发电技术可行性的同时,使核电的经济性也得以证明,它可与火电、水电相竞争。截至 2008 年底,世界上共有约 439 座核电反应堆在运行,总共装机容量为 3.72 亿 kW。核电占世界总发电量的份额约为 14%,有 16 个国家的核能发电超过总发电量的 1/4。目前世界上最大的核电厂是日本福岛第一沸水堆核电厂,总装机容量 454.6 万 kW。上述机组绝大部分是在这段时期建成的,称为第二代核电机组。

1979 年以前,人们普遍认为核电是安全清洁的能源。1979 年和 1986 年分别发生在美国三里岛和前苏联切尔诺贝利核电站的严重事故的负面影响,使核电发展进入低潮,社会公众增大了对核电安全性的顾虑,电业投资者也放慢了投资步伐。但相反地也促进了对更安全、更经济及单机容量更大的核电机组的研制。今天,第三代核电机组已经诞生,如欧洲的 EPR 机组、日本的 NP. 21 型核电机组、俄罗斯的 WWER 型和美国西屋的 AP 型机组。它们都属于第三代核电机组,单机容量均在 100 万 kW 上下,最大的达 170 万 kW。

发电技术的发展促进了输电技术的发展。

第一次高压输电技术出现于 1882 年,德普勒(Marcel De Pree)用装在米斯巴赫煤矿的功率为 3hp 的直流发电机,以 1500~2000V 电压,沿 57km 的电报线(直径为 4.5mm 的钢线),把电能输送到慕尼黑国际博览会,供电给一台电动机,使装饰喷泉的水泵转动。这个输电系统虽小,却可以认为是世界上第一个电力系统。早期采用的是直流输电,要提高效率,必须提高电压,可是当时高压直流发电机和电动机的制造面临难以解决的困难。

进入 19 世纪 80 年代以后,随着电力变压器的实际应用,直流技术的地位受到交流技术的挑战,并被其代替。1891 年 8 月 25 日,世界上第一条三相交流高压输电线在德国投入运行。在该线始端劳奋水电厂安装了一台 230kVA、90V 的三相交流发电机和一台 200kVA、95/15200V 的变压器;线路末端法兰克福建造了两座 13800/112V 降压变压器,其中一座供慕尼黑国际电工展览会用电,另一座供 100hp 三相异步电动机,输电效率达 80%。

最早形成的交流电力系统出现在伦敦,发电厂厂址在远离市区的伊尔福德,厂内安装了一台容量为 1000kW、电压为 2500V 的交流发电机,通过升压变压器把电压提高到 10000V,经 12km 的输电线送到伦敦市区四个变电所,再降为 2400V,经配电变压器降为 100V 向用户供电。

为了减少线路的功率损失,提高输电电压是一个有效的方法,因此输电技术的发展始终伴随输电电压的不断提高。随着大容量水电厂、矿口火电厂和核电厂的建设,从 20 世纪 50 年代开始,330kV 及以上超高压输电线路得到了很快的发展。1969 年,美国第一条 765kV 线路投入运行。1985 年,前苏联建成从埃基巴斯图兹—科克切塔夫—库斯坦奈的 1150 kV 特高压输电线路,总长 900km,开创了输电电压的新纪录。但该线路运行了不长一段时间后,由于无电可送,便降压运行了。2009 年 1 月 6 日,我国自主研发、设计和建设的晋东南—南阳—荆门的 1000kV 特高压交流试验示范工程正式投运,这是目前世界上电压最高的输变电工程。图 1.4 为 1000kV 特高压试验示范工程输电线路,导线采用八分裂导线,两边相的相间距离达 32m。

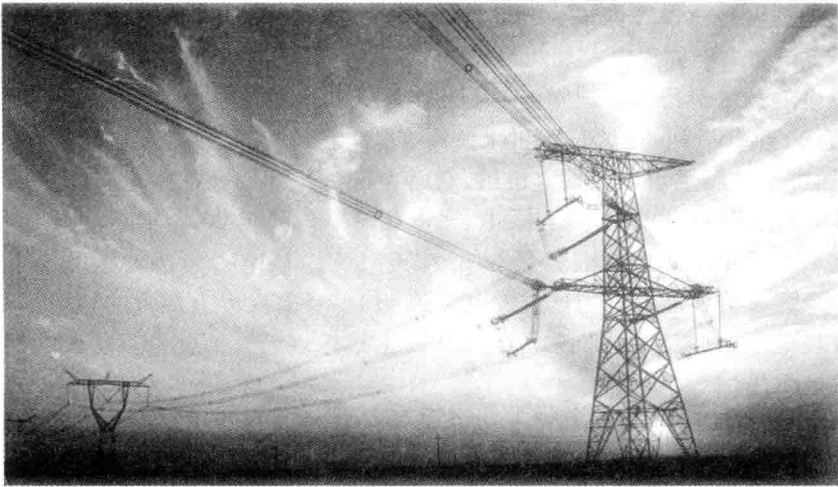


图 1.4 1000kV 特高压交流线路

由于交流输电在海底电缆送电、运行稳定性等方面的局限性,直流输电在 20 世纪 30 年代又东山再起,在 50 年代中期进入工业应用阶段。这时已不用原来的直流发电机,而是在始端将交流整流为直流,在终端又将直流逆变为交流。1954 年,瑞典在本土与果特兰岛之间建成了世界上第一条工业性直流输电线(海底电缆),采用汞弧阀作为变流装置。可控硅整流元件的出现促进了高压直流输电的进一步发展。在已运行的直流输电工程中,巴西伊泰普(Itaipu)水电厂的直流输电工程为最,它包括两个独立的双极系统,每个系统额定输出容量为 3150MW,额定电压为 ± 600 kV。

大型发电厂的建设和高压输电线路的架设使电力系统的规模也日益扩大。初期发展的分散的、孤立的小系统逐渐发展、合并成统一的或联合的大系统。这些系统有的甚至跨越国界和洲界,如俄罗斯统一电力系统与部分欧亚国家的电力系统互联。这个电力系统横跨欧亚大陆,跨越距离东西 7000km,南北 3000km,是目前世界上最大跨度的联合电力系统。

电力系统的发展还体现在自动化水平的提高。目前世界上几乎所有的电力系统监视和控制中心都装备有电子计算机系统,它们具有对系统进行自动监视、安全分析和安全控制,

实行经济调度和调度员培训等功能,保证了系统运行的安全性和经济性。

2. 我国的电力系统

1882年7月26日,上海电气公司一台12kW的蒸汽发电机组发电,点亮了上海南京路上15盏弧光灯。这是中国的第一座发电厂,是中国电力工业的开端。

到中华人民共和国成立前夕,全国发电装机容量只有185万kW,年发电量43亿kWh,人均年用电量只有9kWh,发电装机容量和发电量分别居世界第21位和25位。

到1978年,在不到30年的时间里,全国(不含中国香港、澳门和台湾地区,下同)发电装机容量达到5712万kW,年发电量达到2566亿kWh,发电装机容量和发电量分别跃居世界第8位和7位。

至2008年底,全国发电装机容量达到7.9亿kW,全国全年发电量3.4万亿kWh,均列世界第2位。发电装机容量逐年增长如图1.5所示。

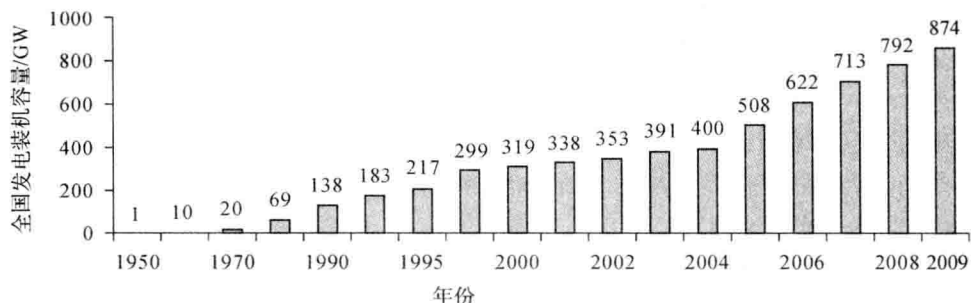


图 1.5 我国发电装机容量逐年增长图

20世纪80年代开始,中国电力工业进入大机组、高电压、大电网阶段。

目前,大陆除西藏自治区外已形成6大跨省电网(如图1.6),即东北、华北、华东、华中、西北和南方电网,西藏电网与主网的互联工程也正在实施中。

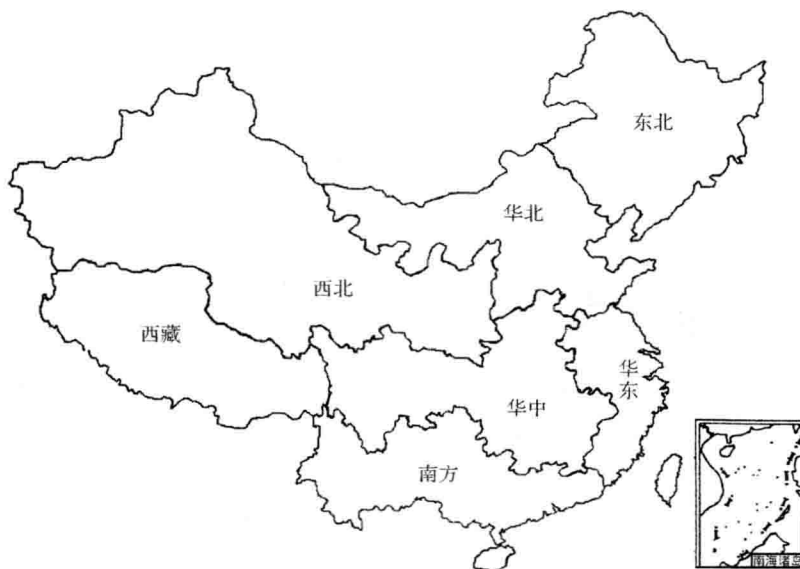


图 1.6 中国电网分布图

500kV 输电网络已成为电网的主干网络,西北电网的 750kV 输变电工程已投入运行,连接晋东南—荆门的 1000kV 特高压输变电工程已于 2009 年 1 月投入运行。

自 1993 年从葛洲坝至上海的第一条±500kV 直流输电线路投产后,高压直流输电在我国得到多处应用。随着三峡电站的建成,三峡至华东电网的两条±500kV 直流线路和三峡至广东的一条±500kV 直流线路也先后建成并投入运行。此外,南方电网还有一条±500kV 天(生桥)—广和两条贵(州)—广直流线路。

西南地区溪洛渡和向家坝水电站至上海以及云南至广东的±800kV 特高压直流线路工程已正式投入运行,是目前世界上最高电压的直流输电工程,前者西起四川宜宾,东至上海奉贤,途径 8 省市,四次跨越长江,输送距离达 1907km,额定输送容量 640 万 kW,最大可达 700 万 kW。

直流输电除承担“西电东送”的任务外,还起到网络连接的作用。连接西北 330kV 交流电网和华中 500kV 交流电网的灵宝“背靠背”直流输电工程是我国第一个直流联网工程,该工程采用 120kV 单极结构,已投入运行。

中国的发电技术制造水平近年来得到提高,30 万 kW 和 60 万 kW 机组国内已经可以批量生产,60 万 kW 超临界机组也正在合作制造,合作建造 25MPa/600℃ 超临界 100 万 kW 机组的技术方案已经确定。

建设中的三峡水电站位于华中地区,已于 2009 年完工,是世界上最大的水电站。电站安装 26 台 70 万 kW 的机组,总装机容量为 1820 万 kW,年发电量近 900 亿 kWh。电站将向华中、华东和华南电网送电,并促进全国联网的实现。

1991 年投产的秦山核电厂的第一台 30 万 kW 的核电机组是我国自己设计和建造的,它结束了中国内地无核电的历史。随后,秦山第二、第三核电厂、大亚湾核电厂、岭澳核电厂和田湾核电厂相继投产,至 2008 年底,核电机组的总容量达 900 万 kW。按照我国核电发展规划,到 2020 年,核电装机容量争取达到 4000 万 kW 或更多,占总装机容量的 5% 以上。已开工的山东海阳核电厂,计划装机 8 台 AP-1000 型 125 万 kW 的第 3 代核电机组,建成后,总装机容量将达 1000 万 kW,届时将是世界上最大的核电厂。图 1.7 为秦山核电站。

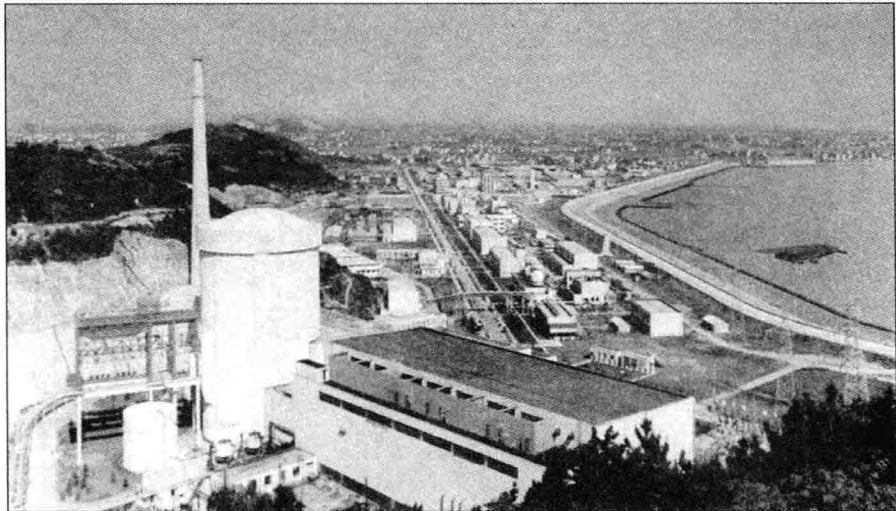


图 1.7 秦山核电站