

高等院校教材

电力系统分析理论

刘天琪 邱晓燕 编著



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校教材

电力系统分析理论

刘天琪 邱晓燕 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据 1998 年教育部颁布的引导性专业目录宽口径精神, 针对强弱电结合形成的电气工程及自动化专业而作, 在内容组织上满足各专业的共同需要, 为学生学习相关专业知识和从事相关领域工作奠定坚实的理论基础。

全书内容包括: 电力系统概述和电力系统元件模型及参数计算, 电力网的电压和功率分布, 电力系统的频率调整和电压调整, 电力系统三相短路和不对称故障的分析计算, 电力系统的稳定性分析。

本书可以作为高等院校电气工程及自动化专业本科生教材, 也可供电力系统企事业单位和其他相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统分析理论/刘天琪, 邱晓燕编著. —北京: 科学出版社, 2005
(高等院校教材)

ISBN 7-03-014727-8

I. 电… II. ①刘… ②邱… III. 电力系统-分析-高等学校-教材
IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 003066 号

责任编辑: 段博原 朱海磊/责任校对: 包志虹

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 2 月第一次印刷 印张: 23

印数: 1—3 000 字数: 455 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

前 言

电力系统是一个由大量元件组成的复杂大系统。它的规划、设计、建设、运行和管理是一项庞大的系统工程。《电力系统分析理论》便是这项系统工程的理论基础,是电气工程及自动化专业的必修课,是技术理论课、基础理论课走向专业课学习和工程应用研究的纽带,具有承上启下的作用。本课程在整个专业教学和培养高质量人才计划中占有十分重要的地位。

本书根据 1998 年教育部颁布的基本专业目录和引导性专业目录的宽口径精神,针对强电与弱电专业相结合形成的专业范围更宽的电气工程及自动化专业而作。在内容组织上力图满足各专业方向的需要及各专业方向的特点,充分体现整合专业教材要求综合性和工程性两个重要特点,为学生进一步学习相关领域理论和从事相关领域工作奠定坚实的基础。

通过该课程的学习,既可让学生系统学习电力系统有关基础理论,为后续专业课程及相关专题的学习打下基础,又可培养学生综合运用基础知识解决工程实际问题的能力。

本书以我校自编教材《电力系统分析理论》为基础修编而成,并根据该教材在几届本科教学中的经验,增删修改了部分内容,使其更具有科学性和系统性。全书共分 8 章,第 1、2 章为电力系统概述和电力系统元件模型及参数计算;第 3、4、5 章为电力系统的稳态分析和电力系统的运行与调整;第 6、7 章为电力系统故障分析;第 8 章为电力系统的稳定性分析。第 1~5 章由刘天琪编写,第 6~8 章由邱晓燕编写,其中 6.3 节和 8.3.4 节由刘天琪和邱晓燕合编。刘天琪统编全书。

本书为电气工程及自动化专业本科教学用书,也可作为电力系统企事业单位和其他相关专业工程技术人员的参考用书。

本书的编写受到四川大学校级重点课程建设项目的资助,同时得到四川大学教务处和电气信息学院的大力支持,在此表示衷心地感谢。感谢刘辉乐、唐娟和刘群英等同学对书稿文字的校对,同时对本书所列参考书目的各位作者表示感谢。

由于编者水平有限、编写时间仓促,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者给予批评指正。

编 者

2004 年 6 月

目 录

前言

第1章 电力系统概述	1
1.1 电力系统及其发展	1
1.2 电力系统的负荷和负荷曲线	12
1.3 电力系统的额定电压和额定频率	16
1.4 电力系统的接线方式	18
1.5 电力系统运行的特点和要求	24
思考题与习题	26
第2章 电力系统元件模型及参数计算	27
2.1 系统等值模型的基本概念	27
2.2 输电线路的等值电路和参数计算	28
2.3 长距离输电线路的稳态方程和等值电路	39
2.4 变压器的等值电路和参数	46
2.5 发电机和负荷模型	55
2.6 电力系统的稳态等值电路	59
思考题与习题	68
第3章 电力网的电压和功率分布	70
3.1 网络元件的电压降落和功率损耗	70
3.2 开式电力网的电压和功率分布	75
3.3 简单闭式电力网的电压和功率分布	83
3.4 多级电压环网的功率分布	93
3.5 电力网的电能损耗	98
思考题与习题	106
第4章 电力系统有功功率和频率调整	109
4.1 有功平衡与频率调整	109
4.2 电力系统的频率特性	114
4.3 电力系统的频率调整	121
4.4 各类发电厂的合理组合	133
4.5 电力系统有功功率的最优分配	135
思考题与习题	147

第 5 章 电力系统无功功率和电压调整	149
5.1 电压调整的必要性	149
5.2 电力系统的无功功率平衡	150
5.3 电力系统的电压管理与调整	159
5.4 利用发电机和变压器调压	166
5.5 无功功率补偿调压	178
* 5.6 电力系统综合调压	187
5.7 电力系统无功功率的最优分配	189
思考题与习题	194
第 6 章 电力系统三相短路的分析计算	197
6.1 短路的一般概念	197
6.2 恒定电势源电路的三相短路	199
6.3 同步发电机的基本方程	204
6.4 同步电机的三相短路	221
6.5 电力系统三相短路的实用计算	231
思考题与习题	252
第 7 章 电力系统简单不对称故障的分析计算	257
7.1 对称分量法在不对称短路计算中的应用	257
7.2 电力系统各序网络	263
7.3 简单不对称短路的分析计算	274
7.4 不对称短路时网络中电流和电压的计算	282
7.5 非全相断线的分析计算	289
思考题与习题	293
第 8 章 电力系统运行稳定性概论	299
8.1 稳定性的基本概念	299
8.2 电力系统的机电特性	300
8.3 电力系统静态稳定性	311
8.4 电力系统的暂态稳定性	337
思考题与习题	354
参考书目	357
附录 短路电流周期分量计算曲线数字表	358

第 1 章 电力系统概述

1.1 电力系统及其发展

1.1.1 电力系统

电能是现代社会中最重要、最方便的能源。电能具有许多优点,它可以方便地转化为别种形式的能,例如机械能、热能、光能、化学能等;它的输送和分配易于实现;它的应用规模也很灵活。因此,电能被日益广泛地应用于工农业、交通运输业以及人民的日常生活中。以电作为动力,可以促进工农业生产的机械化和自动化,保证产品质量,大幅度提高劳动生产率。还要指出,提高电气化程度,以电能代替其他形式的能量,是节约总能源消耗的一个重要途径。

发电厂把别种形式的能量转换成电能,电能经过变压器和不同电压的输电线路输送并被分配给用户,再通过各种用电设备转换成适合用户需要的别种能量。这些生产、输送、分配和消费电能的各种电气设备连接在一起而组成的整体称为电力系统。如果把火电厂的汽轮机、锅炉、供热管道和热用户,水电厂的水轮机和水库等动力部分也包括进来,就称为动力系统。采用水电的动力系统和电力系统的简单示意图如图 1-1 所示。电力系统中输送和分配电能的部分称为电力网,它包括升压变压器和降压变压器,以及各种电压等级的输电线路。电力系统和电力网的元件构成如图 1-2 所示。

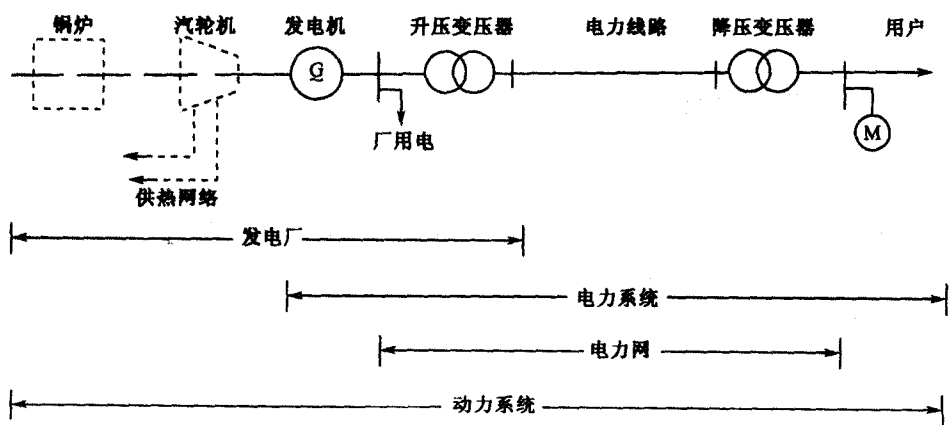


图 1-1 动力系统、电力系统和电力网示意图

供电范围的大小和电压等级的高低可分为地区电力网、区域电力网以及超高压远距离输电网络等类型。按电力网的功能又常常将其分为传输网和配电网。地区电力网通常是指电压等级在 110kV 及以下、输送距离在几十千米内的电力网,主要完成一般城市、工矿区、农村电力的分配。区域电力网则把范围较广地区的发电厂和负荷联系在一起,而且输电线路较长,用户类型也较多,其主要任务是较大容量的电力传输。目前我国,区域电网主要是 220kV 电压等级的电力网。超高压远距离输电网络主要由电压为 330kV、550kV 及以上电压等级的远距离输电线路组成(包括超高压直流输电线路),它们担负着将远距离大容量发电厂的电能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,甚至国与国之间的联合电力系统。

3. 变电所

变电所是电力网的重要组成部分,它的任务是汇集电源、升降电压、分配电能。它除了可以按升压、降压分类外,还可以按设备布置的地点分为户外变电所和户内变电所、箱式变电所和地下变电所等。若按变电所的容量和重要性又可分为枢纽变电所、中间变电所和终端变电所。枢纽变电所一般容量较大,处于联系电力系统各部分的中枢位置,地位重要,如图 1-2 中 A 为枢纽变电所。中间变电所则处于发电厂和负荷中心之间,从这里可以转供一部分负荷,如图 1-2 中的变电所 B。终端变电所一般是降压变电所,它只负责供应一个局部地区或某些用户的负荷而不承担功率的转送,如图 1-2 中的变电所 C 和 D。

1.1.3 电力工业的发展

1. 国际电力工业发展简史

1) 概况

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。世界上第一台火力发电机组是 1875 年建于巴黎北火车站的直流发电机,用于照明供电。1879 年,美国旧金山实验电厂开始发电,这是世界上最早出售电力的电厂。1882 年,美国纽约珍珠街电厂建成发电,装有 6 台直流发电机,总容量为 670 kW,以 110 V 直流为电灯照明供电。到 1980 年,世界电力工业经过约 100 年的发展,全世界发电装机总容量达到 20.24 亿 kW,年发电量达到 82 473 亿 kW·h。

火力发电始终在所有的电能中占最大的比重。按照热力学原理,不断提高蒸汽温度和压力可以提高蒸汽的热效率。现在蒸汽温度已达 650℃,蒸汽压力已达 352 大气压。汽轮发电机制造技术的发展,体现在单机容量的不断增大。目前,世

世界上最大的汽轮发电机是瑞士 BBC 公司为美国制造的 1 300MW 机组, 1972 年投入运行。最大的火力发电厂是原苏联的别列佐夫 - 1 火电厂, 其中安装了 8 台 800MW 的汽轮发电机组。

水电的发展是水能开发的结果。早期一般都是小型水电厂, 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, 水电厂的建设规模越来越大。目前, 世界上最大的水轮发电机组是最早安装在美国大古力水电厂三厂、巴西伊泰普水电厂和我国三峡水电厂的 700MW 机组; 目前已投入运行的最大水电厂是巴西巴拉那河上的伊泰普水电厂, 装有 18 台 700MW 机组, 总容量为 12 600MW。我国三峡水电厂全部投入运行后, 将是世界上最大的水电厂, 装有 26 台 700MW 机组, 总容量为 18 200MW。

核电的发展大致可分为三个阶段: 20 世纪 50 年代中期到 60 年代初期为试验阶段(1954~1960), 这一阶段主要是反应堆选型。世界上第一台核电机组于 1954 年 4 月在莫斯科市近郊奥勃宁斯克核电厂投入运行。在第二阶段(1961~1968), 核电的经济性可以与常规火电竞争, 进入商业实用阶段。1969 年后, 核电进入工业推广阶段, 不但工业发达国家大力建设核电厂, 许多发展中国家也开始发展核动力。到 1995 年末, 全世界有 30 个国家和地区拥有核电站, 429 台核电机组在运行, 装机容量 363 622MW; 最大的核电站是加拿大的布鲁斯核电站, 装机容量为 7 276MW, 装有 8 台重水堆机组; 最大的核电机组是立陶宛伊格纳林核电站 1 500 MW 轻水石墨堆机组。

发电技术的发展促进了输电技术的发展。高压输电技术第一次出现于 1882 年, 德普勒(Marcel De Pree)用装在米斯巴赫煤矿的功率为 3hp^① 的直流发电机, 以 1 500~2 000V 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, 昔日直流技术的地位受到交流的挑战, 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、95/15 200V 的变压器; 线路末端法兰克福建造了两座 13 800/112V 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,

① hp: 英制马力, 1hp = 745.700W。

厂内安装了一台容量为1 000kW、电压为2 500V的交流发电机,通过升压变压器把电压提高到10kV,经12km的输电线送到伦敦市区四个变电所,再降为2 400V,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;哈萨克的埃巴斯图兹火电厂至乌拉尔的1 150kV特高压输电线已投入运行,线路长1 300km,开创了输电电压的新纪录。

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年代东山再起,在20世纪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。据1995资料统计,运行中的最高电压直流输电线路是1986年投运的,即巴西伊泰普水电站至圣保罗的1200kV(± 600 kV)线路,全长为850km,输送能力为6300MW。

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,如原苏联统一电力系统与部分欧亚国家的电力系统互联,这些国家包括波兰、捷克、保加利亚、罗马尼亚、德国、匈牙利、蒙古、芬兰、挪威、土耳其、希腊等。这个电力系统横跨欧亚大陆,跨越距离东西7 000km,南北3 000km,是目前世界上最大的联合电力系统。

电力系统的发展还体现在自动化水平的提高。目前世界各国电力调度中心和区域调度中心均配置了功能强大的现代化电力调度自动化系统,保证了电力系统的安全稳定和经济运行。

2) 发电量、发电装机容量及其地区分布

据联合国能源统计资料,1999年世界总发电量为147 640亿kW·h,其中火电占63.7%,水电占17.5%,核电占17.2%,地热及其他能源发电占1.6%;发电量和装机容量的地域分布不均,其中北美洲和欧洲的发电量占世界总发电量的61.8%,亚洲占29.4%,而南美洲、非洲和大洋洲的发电量之和仅占8.8%;装机容量的地区分布也呈相似的格局。表1-1为近20年世界发电量和装机容量的地区分布状况。从世界发电量的变化可看出,20世纪80年代的年增长率为3.1%,而90年代以来年增长率下降为2.1%;但在亚洲,80年代年增长率为6.3%,90年代为6.5%,仍维持较高的增长速度。

表 1-1 世界发电量和装机容量的地区分布

地 区	1980	1985	1990	1996
发 电 量/亿 kW·h				
非 洲	1 884	2 315	3 188	3 715
北美洲	28 452	31 683	36 794	42 578
南美洲	2 719	3 525	4 460	6 002
亚 洲	13 383	17 805	25 705	39 691
欧 洲	21 868	24 810	28 043	40 968
大洋洲	1 228	1 538	1 902	2 189
原苏联	12 939	15 441	17 464	—
世 界	82 473	97 117	117 738	135 143
装机容量/万 kW				
非 洲	4 453	5 855	7 299	9 411
北美洲	74 304	84 561	88 351	96 090
南美洲	6 847	9 108	11 666	13 460
亚 洲	33 344	45 084	61 106	88 952
欧 洲	53 498	61 575	68 495	98 983
大洋洲	3 295	4 197	4 500	4 871
原苏联	26 676	31 489	34 368	—
世 界	202 417	241 869	275 785	311 767

注:1) 亚洲、欧洲数据中 1990 年以前未包括原苏联,故原苏联的数据单独列出。2) 资料来源,联合国历年 Energy Statistics Yearbook。

自 20 世纪 60 年代末开始,世界各国相继发展大容量机组。美国的最大单机容量为 1 300MW、原苏联为 1 200MW、日本为 1 000MW。但是进入 80 年代以来这种发展趋势明显下降,单机容量不再增大,相应的电站容量也趋于稳定。据统计世界上现在装机容量达到 300MW 或以上的电站共有 31 座,其中独联体国家有 9 座,南非 6 座,日本和美国各 5 座,德国 2 座,波兰、英国、法国和加拿大各 1 座。

3) 发电量和装机容量构成

1996 年末全世界年发电量超过 2 000 亿 kW·h 的国家有 12 个,其发电量的总和约占世界总发电量的 71.3%。如按国家排序,美国当年的净发电量为 34 599.7 亿 kW·h,居世界首位;90 年代初期居第四位的中国在 1994 年和 1996 年分别超过俄罗

斯和日本,上升到第二位;日本居第三;俄罗斯排第四位;韩国在1995年超过乌克兰,排在第十二位。表1-2为1996年这些国家发电量和装机容量的构成情况。

表1-2 1996年一些国家发电量和装机容量构成

序号	国家	发电量 /亿 kW·h	其中			装机容量 /万 kW	其中		
			水电/%	火电/%	核电/%		水电/%	火电/%	核电/%
1	美国	34 599.7	10.0	70.5	19.5	78 350.2	12.5	74.6	12.9
2	中国	10 793.6	17.3	81.4	1.3	23 654.2	23.5	75.6	0.9
3	日本	10 121.5	8.8	61.3	29.9	23 373.7	19.0	62.7	18.3
4	俄罗斯	8 472.0	19.5	68.8	11.7	21 085.7	20.7	69.2	10.1
5	加拿大	5 557.1	63.5	20.8	15.7	11 361.2	58.0	27.6	14.4
6	德国	5 444.4	4.9	65.5	29.6	11 544.3	7.7	72.5	19.8
7	法国	4 840.0	13.3	8.6	78.1	12 074.0	20.8	23.5	55.7
8	印度	4 323.4	17.0	81.1	1.9	9 680.3	21.8	75.9	2.3
9	英国	3 273.5	1.4	71.3	27.3	7 046.0	5.8	76.6	17.6
10	巴西	2 898.2	91.7	7.5	0.8	6 075.6	87.3	11.6	1.1
11	意大利	2 414.1	19.5	80.5	0	6 814.6	29.2	70.8	0
12	韩国	2 275.5	2.3	65.2	32.5	3 923.9	7.9	67.6	24.5

4) 用电量及其构成

20世纪以来,世界上约有半数以上的国家和地区电力生产和消费仍处于很低的水平,工业发达国家与发展中国家人均用电量存在着很大差距。据国际能源机构(IEA)1997年对全球用电状况的统计分析,该年度世界电力总消费量为128 264亿 kW·h,其中以工业发达国家为主体的经济合作与发展组织(OECD)29个成员国的电力消费量占到65.2%,但其人口总数仅占全球人口的19.3%;而人口总数占世界人口80.7%的非OECD国家(其中大部分是发展中国家),其电力消费量仅占世界总消费量的34.8%。另据联合国1996年对世界204个国家和地区人均年用电量的统计分析,低于100kW·h的国家和地区有30个,在101~1 000kW·h之间的有53个,在1 001~10 000kW·h之间的有109个,超过10 000kW·h的有10个,除维尔京群岛外,其余9个国家的排列顺序是:挪威(38 300kW·h/人)、冰岛(18 934kW·h/人)、加拿大(17 455kW·h/人)、瑞典(16 421kW·h/人)、芬兰(15 515kW·h/人)、科威特(15 368kW·h/人)、卢森堡(15 075kW·h/人)、美国(12 981kW·h/人)、卡塔尔(11 362kW·h/人)。

总用电量的绝对值逐年增长,而行业用电逐年下降,这是20世纪90年代以来

世界各国用电水平变化的总趋势。一些国家 1997 年用电构成的情况如表 1-3 所示。中国和韩国的行业用电在 60% 以上,比 90 年代初期有所下降,其余大部分发达国家的行业用电量均在 50% 以下。形成这种情况的主要原因是:各国均对工业和其他产业部门的发展比例进行了调整,产业结构发生明显变化;工业内部产品结构变化,减少了单位产值电耗高的产品;各生产部门大量采用先进的工艺过程和自动化系统;生活水平提高,使家庭生活、商业及其他用电量的比重逐年增大。

表 1-3 1997 年一些国家的用电构成

国家	全国用电量 /亿 kW·h	其中/%				
		工业	交通运输	农业	家庭生活	商业及其他
美国	32 593	36.1	0.1	—	32.9	30.9
中国	11 039	73.0	1.9	6.2	11.3	7.6
日本	9 239	46.1	2.3	0.4	26.4	24.8
俄罗斯	8 144	45.7	7.8	9.6	36.9	
德国	4 829	47.1	3.5	1.6	27.1	20.7
加拿大	4 965	45.6	0.9	2.0	27.2	24.3
法国	3 816	40.4	2.8	0.7	31.2	24.8
英国	3 175	35.6	2.4	1.2	32.9	27.9
意大利	2 537	50.8	3.2	1.7	23.1	21.2
韩国	2 229	60.2	0.8	1.9	14.6	22.6

2. 我国电力系统发展简史

我国的电力工业起步很早,始于 1882 年,至今已有 123 年历史,但发展缓慢。早在 1882 年德波列茨进行第一次高压输电试验时,在上海就已出现了我国第一个火力发电厂。该电厂 1882 年 7 月 26 日开始发电,这是由英国人在上海投资兴建的,机组容量 12kW。直至 1949 年,全国的总装机容量仅达 185 万 kW,年发电量仅达 43 亿 kW·h,分别位居世界第 21 位和 25 位。

新中国成立后,我国电力工业迅速发展。到 1978 年,全国电力装机容量已达 5 712 万 kW,比 1949 年增长 30 倍;年发电量 2 566 亿 kW·h,增长近 59 倍。改革开放后,我国电力工业连续跃上两个台阶:1987 年,电力装机容量达 1 亿 kW,1995 年突破 2 亿 kW。至 1996 年,全国发电设备容量达 2.36 亿 kW,年发电量达 10 793 亿 kW·h,发电设备装机容量和年发电量均位居世界第二,电力的供应可基本满足现代工业、现代农业、现代科学技术和现代国防日益增长的要求。但是人均用电量才 900kW·h/(人·年),只相当于世界平均水平的 1/3。

至2000年底,全国装机容量在1000MW及以上的火电厂有71座,(其中包括1座核电厂),水电厂17座。我国拥有世界第一的水能资源,新中国成立后,我国进行了大规模的水电开发。据初步统计,全国已经建成和正在建设的大中型水电站约220座,其中装机容量超过1000MW的大型水电站就有20座。举世瞩目的长江三峡水电站将有26台700MW机组,总装机容量达到18200MW,为当今世界上最大的水电站。2003年7月10日,三峡水电站首台机组正式并网发电;同年11月22日,首批6台机组并网发电,截至目前,共有8台机组投入运行,总装机容量达到5600MW,总容量位居全国第一,日发电量高达1.15亿kW·h。截至2004年6月底,三峡电站累计发电230亿度。三峡电厂投产之日正是我国能源紧张之时,它有效缓解了华东、华中、川渝地区电力供应的紧张局面。此外,核能发电方兴未艾。20世纪90年代初相继投产的秦山核电站和大亚湾核电站填补了我国核电空白。风能、太阳能、地热能等新能源发电也取得突破性进展。

1980~2003年全国总装机容量和年发电量如表1-4和表1-5所示。2002年全社会用电量分类如表1-6所示。

表1-4 1980~2003年全国总装机容量 (单位:万kW)

年份	总装机容量	水电装机容量	火电装机容量	核电
1980	6 587	2 032	4 555	
1981	6 913	2 193	4 720	
1982	7 236	2 296	4 940	
1983	7 644	2 416	5 228	
1984	8 012	2 560	5 452	
1985	8 705	2 641	6 064	
1986	9 382	2 754	6 628	
1987	10 290	3 019	7 271	
1988	11 550	3 270	8 280	
1989	12 664	3 458	9 206	
1990	13 789	3 605	10 184	
1991	15 147	3 788	11 359	
1992	16 653	4 068	12 585	
1993	18 501	4 489	13 802	210
1994	19 990	4 906	14 874	210
1995	21 722	5 218	16 294	210
1996	23 654	5 558	17 886	210

续表

年份	总装机容量	水电装机容量	火电装机容量	核电
1997	25 424	5 973	19 241	210
1998	27 729	6 507	20 988	210
1999	29 877	7 297	22 343	210
2000	31 899	7 935	23 754	210
2001	33 861	8 301	25 314	210
2002	35 300	8 455	26 420	370
2003	38 450	9 217	28 564	619

表 1-5 1980~2003 年全国总年发电量 (单位: 亿 kW·h)

年份	总发电量	水电	火电	核电
1980	3 006.27	582.11	2 424.16	
1981	3 092.69	655.46	2 437.23	
1982	3 276.78	743.99	2 532.79	
1983	3 514.39	863.57	2 650.82	
1984	3 769.91	867.84	2 902.07	
1985	4 106.90	923.74	3 183.15	
1986	4 495.71	944.80	3 550.00	
1987	4 973.21	1 000.07	3 927.60	
1988	5 450.65	1 091.50	4 360.60	
1989	5 846.80	1 184.54	4 662.21	
1990	6 213.18	1 263.50	4 949.68	
1991	6 774.94	1 248.45	5 526.49	
1992	7 541.89	1 314.66	6 227.23	
1993	8 364.29	1 507.43	6 831.96	24.90
1994	9 278.78	1 667.86	7 470.49	140.43
1995	10 069.48	1 867.72	8 073.43	128.33
1996	10 793.58	1 869.18	8 781.01	143.39
1997	11 342.04	1 945.71	9 249.45	144.18
1998	11 576.97	2 042.95	9 388.12	141.01
1999	12 331.41	2 129.27	10 047.37	148.33
2000	13 684.82	2 431.34	11 079.36	167.37
2001	14 838.56	2 611.08	12 044.78	174.72

续表

年份	总发电量	水电	火电	核电
2002	16 400.36	2 710.09	13 420.00	250.00
2003	19 080.10	2 829.79	15 800.06	437.00

表 1-6 2002 年全社会用电量分类

指 标 名 称	2002 年累计 /亿 kW·h	2001 年累计 /亿 kW·h	比去年同期增长 /%	用电结构 /%
全社会用电总计	16 200	14 683	10.3	100.00
一、农林牧渔水利业合计	780	762	2.4	4.81
二、工业合计	11 670	10 490	11.2	72.04
1. 轻工业	2 520	2 211	14.0	15.56
2. 重工业	9 150	8 278	10.5	56.48
三、地质普查和勘探业	10	10	0	0.06
四、建筑业	160	145	10.3	0.99
五、交通运输邮电通讯业	330	293	12.6	2.04
六、商业饮食物资供销仓储业	520	456	14.0	3.21
七、城乡居民生活用电合计	1980	1839	7.7	12.22
1. 城市居民	1 140	1 066	6.9	7.04
2. 乡村居民	840	773	8.7	5.19
八、其他事业	750	688	9.0	4.63

在输电线路建设方面,1982年1月华中电网首项,也是全国最早建成投产的500kV输变电工程,即河南平顶山—湖北双河—武昌输变电工程的投产,标志着我国开始步入超高电压时代,500kV线路已逐渐成为各大电力系统的骨架。自行设计和建造的第一条±100kV直流高压输电线已于1988年投入运行,该线路从浙江镇海到舟山岛,全长53.1km(其中海底电缆11km)。自葛洲坝水电站到上海南桥的±500kV高压直流输电线路已于1989年建成,全长1 080km,将华中和华东两大系统连接起来。到2001年底输电线路总长达781 854km,其中500kV线路31 486km,330kV线路9 177km,220kV线路135 935km,110kV线路220 051km;总变电容量达1 117 710MVA,其中500kV变电容量117 310MVA,330kV变电容量15 270MVA,220kV变电容量340 260MVA,110kV变电容量402 380MVA。

目前我国已基本上进入大电网、大电厂、大机组、高电压输电、高度自动控制的新时代。电网发展的主要标志是:

(1)东北、华北、华东、华中电网装机容量均超过30 000MW,华东、华中电网甚