

DIANLI XITONG WENTAI FENXI
YU JINGJI YUNXING

电力系统稳态分析与经济运行

杨建华 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

013038178

TM711
35

DIANLI XITONG WENTAI FENXI
YU JINGJI YUNXING

电力系统稳态分析与经济运行

杨建华 编著



TM 711
35



北航 C1644211



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

871830310

内容提要

全书分为五部分，分别阐述电力系统基本知识、电力系统基本元件的参数和数学模型（第1、2章），电力系统的运行特性、潮流计算和调控（第3、4章），电力系统的频率和电压调整（第5、6章），电力系统的经济运行分析（第7章），直流输电和柔性输电（第8章）。

全书物理概念阐述清楚，条理清晰，系统性强，理论与实践紧密结合，介绍了电力系统稳态分析领域的最近发展。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化专业的教材，还可作为电力系统运行、规划、设计和科研人员的重要参考书。

图书在版编目（CIP）数据

电力系统稳态分析与经济运行 / 杨建华编著. —北京：中国电力出版社，2013.4

ISBN 978-7-5123-4325-2

I. ①电… II. ①杨… III. ①电力系统—系统分析②电力系统运行 IV. ①TM711②TM732

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 071932 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013年4月第一版 2013年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 16印张 372千字

定价 48.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
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

电力系统稳态是指电力系统正常的、相对静止的运行状态。电力系统稳态分析主要涉及电力系统中各元件的参数与数学模型、电力系统的正常运行特性分析与潮流计算、电力系统运行调节与优化,是电力系统运行、规划、设计及控制的基础。

本书阐述了电力系统正常运行的分析,包括电力系统元件的数学模型、潮流计算、频率和电压调整、经济运行的基本理论和方法。

鉴于计算机的广泛应用,本书增强了采用计算机计算、分析电力系统稳态问题的内容。鉴于电力电子元件在电力系统中的大量使用和可再生能源发电的快速发展,本书对传统直流输电、轻型直流输电和柔性输电系统在结构和工作原理方面进行了介绍,对包含直流电源和直流负荷的交直流混联系统潮流算法进行了阐述。此外,除了电力系统最基本的稳态分析方法外,还简要介绍了相关的发展,并采用最新的国家或行业标准内涵。

本书各章列出了兼顾难易程度的思考题和习题,有利于有关内容的掌握和应用。

本课程的先修课程为电路、电磁场和电机学。

本书第5、6章由许跃进编写,第7.1~7.3节、第8.3节由耿光飞编写,第8.1节由耿光飞、杨建华编写,其余部分由杨建华编写。研究生傅裕参加了第8.2节的编写。全书由杨建华统稿。

限于编者水平,书中错误和不妥之处难免,请读者批评指正。

编 者

2012年12月



目 录

前言

第1章 电力系统的基本概念	1
1.1 电力系统概述.....	1
1.2 电力系统运行的特点和基本要求.....	9
1.3 电力系统电压等级.....	11
1.4 电力系统的负荷和负荷曲线.....	13
1.5 电力系统基本元件概述.....	16
1.6 电力系统的接线方式.....	30
1.7 电力系统中性点接地方式.....	32
小结.....	33
习题及思考题.....	33
第2章 电力网络的参数和等值电路	36
2.1 电力变压器的参数和等值电路.....	36
2.2 电力线路的参数和等值电路.....	41
2.3 电力网络等值电路.....	57
小结.....	69
习题及思考题.....	70
第3章 简单电力系统潮流计算与运行特性	72
3.1 电力网络的电压和功率损耗.....	72
3.2 电力线路的运行特性.....	77
3.3 辐射形电力网络中的潮流计算方法.....	80
3.4 闭式网络中的潮流计算.....	84
3.5 电力网络的电能损耗.....	98
小结.....	102

习题及思考题	103
第4章 潮流的计算机算法	107
4.1 节点电压方程和节点导纳矩阵	107
4.2 节点功率方程和节点分类	111
4.3 高斯—赛德尔法潮流计算	115
4.4 牛顿—拉夫逊法潮流计算	117
4.5 P-Q 分解法潮流计算	129
4.6 直流法潮流计算	136
4.7 配电网潮流计算	138
小结	142
习题及思考题	143
第5章 电力系统的有功功率平衡和频率调整	145
5.1 电力系统的有功功率平衡	145
5.2 电力系统的静态频率特性	149
5.3 电力系统的频率调整	154
小结	161
习题及思考题	161
第6章 电力系统的无功功率平衡和电压调整	163
6.1 电力系统无功功率的平衡	163
6.2 电压调整的必要性及电压管理	165
6.3 电压调整的措施	167
小结	179
习题及思考题	180
第7章 电力系统的经济运行	182
7.1 电力系统有功功率的经济分配	182
7.2 电力系统无功功率的最优分布	192
7.3 电力网络的经济运行	197
7.4 电力系统最优潮流简介	199
小结	202
习题及思考题	203
第8章 直流输电与柔性输电	205
8.1 直流输电的基本原理	205

8.2 交直流混联系统潮流算法简介	218
8.3 柔性输电系统的基本概念	222
小结	226
习题及思考题	227
附录 A 分裂导线电感的计算	228
附录 B 分裂导线电容的计算	231
附录 C 架空线路的电晕临界电压和损耗	232
附录 D 架空线路的导线性能	234
附录 E 线性方程组的求解方法	239
附录 F 稀疏技术的运用	246
参考文献	250

第 1 章

电力系统的基本概念

Basic Concepts of Electric Power Systems

本章介绍电力系统的基本知识和电力系统的基本组成情况。

1.1 电力系统概述

Introduction to Electric Power Systems

1.1.1 电力系统的组成

电能是现代社会中最重要的二次能源，它能够方便而经济地从一次能源（如煤炭、石油、天然气、水力、核能、风力、太阳能、地热、海洋能等）中转换而来，并且可以方便地转化为其他形式的能量，例如，机械能、热能、光能、化学能等。发电厂把一次能源转换成电能，电能经过变压器和不同电压等级的电力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其他形式能量。这些由发电机、变压器、电力线路和用电设备组成的统一整体称为电力系统，有时也简称为系统，如图 1-1 所示，其任务是电能的生产、输送、分配和消费。

在电力系统中，通常将输送和分配电能的部分称为电力网络，简称为电力网或电网。电力网是电力系统中除去发电机和用电设备的剩余部分，包括升、降压变压器和各种电压等级的电力线路。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则属于与电能生产相关的动力部分。按照传统的定义，包括电力系统和发电厂动力部分在内便构成了动力系统。然而，目前习惯上电力系统与电力网络的含义基本相通，动力系统这个名称很少使用。

随着电工技术和新能源发电技术的发展，直流输电作为一种补充的输电方式得到了实际应用。在交流电力系统内或者在两个交流电力系统之间嵌入直流输电系统，便构成了交直流混联系统。

此外，在实际工程中，还有几个术语与电力系统相关。例如，联合电力系统，又称为互联系统，它是指两个或两个以上的电力系统用线路连接后形成的更大电力系统；输电网，亦称送电网，它是由若干输电线路组成的将许多电源点与许多供电点连接起来的网络，主要完成把电能从发电中心输送到负荷中心的作用；配电网，它是指从输电网接受电能，再分配给各用户的电网。广义的电力系统包括原动机、发电机、电力网络、负荷及控制、测量、继电保护、自动装置等。

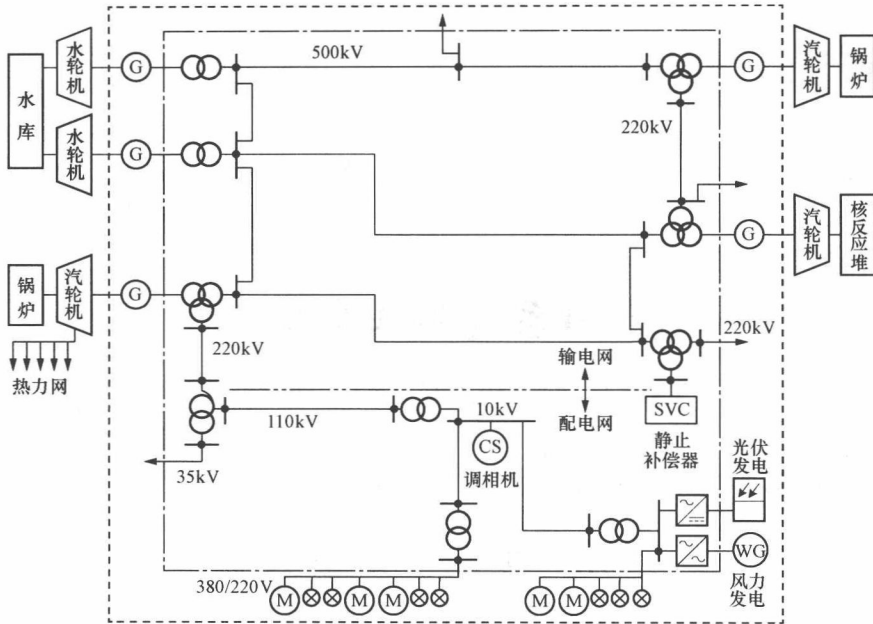


图 1-1 电力系统示意图

1.1.2 电力系统的基本参量和接线图

对一个电力系统规模和大小的描述，通常需要以下几个参量：

(1) 总装机容量。

电力系统总装机容量指该系统中实际安装的发电机组额定有功功率的总和，以千瓦 (kW)、兆瓦 (MW)、吉瓦 (GW)、太瓦 (TW) 为单位计。例如，截至 2012 年底，我国电力系统总装机容量为 1145GW。

(2) 年发电量。

电力系统年发电量指该系统中所有发电机组全年实际发出电能的总和，以千瓦时 (kWh)、兆瓦时 (MWh)、吉瓦时 (GWh)、太瓦时 (TWh) 为单位计。例如，2012 年全国电力系统年发电量为 4977TWh。

(3) 最大负荷。

电力系统最大负荷指规定时间内，系统总有功功率负荷的最大值，以 kW、MW、GW 为单位计。

(4) 额定频率和最高电压等级。

电力系统中所有交流电气设备都是按照指定的频率和电压制造的，这个指定的频率和电压称为额定频率和额定电压。当电气设备在额定频率和额定电压下运行时，将具有最好的技术性能和经济效果。按照国家标准，我国大陆所有交流电力系统的额定频率为 50Hz，该频率也称为工频。电力系统最高电压等级是指该系统中最高的电压等级电力线路的额定电压。在图 1-1 所示系统中，其交流最高电压等级为 500kV。

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，如图 1-1 所示。电气接线图是指用单线图来显示系统中发电机、变压器、母线、线路、负荷等元件

(有的还包括开关设备、熔断器)之间的电气连接关系。此外,还会用到系统地理接线图,它主要表示系统中各个发电厂和变电站的真实地理位置、电力线路的路径,以及它们之间的连接关系。图 1-2 所示为华北 500kV 电力系统地理接线图。

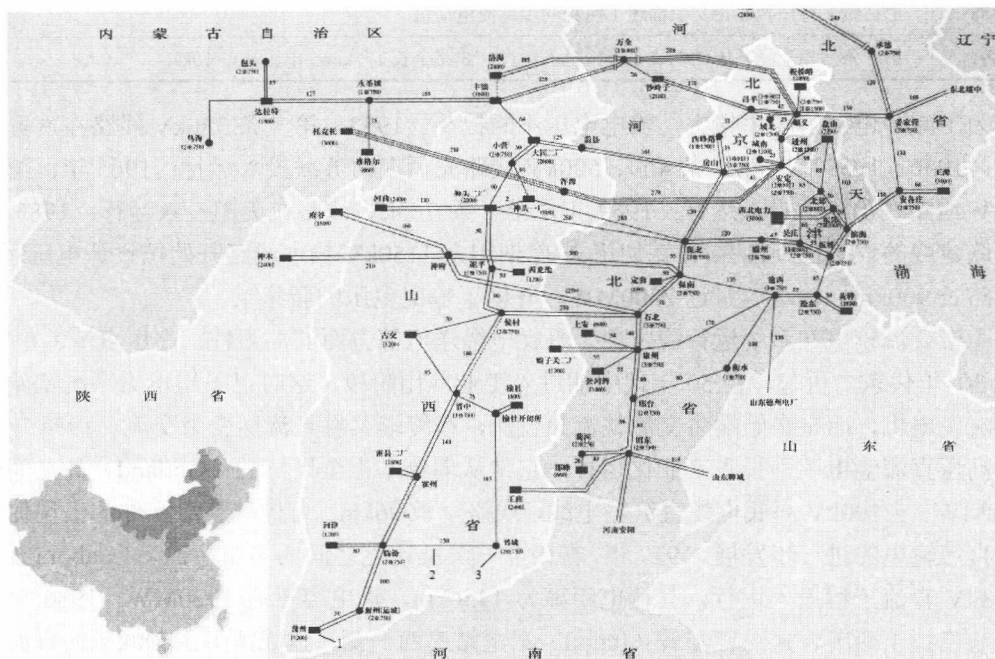


图 1-2 华北电力系统地理接线图

1.1.3 电力系统发展概况和我国的电力系统

1.1.3.1 电力系统发展概况

1831 年法拉第发现了电磁感应定律,促进了发电机和电动机的发明,电能得以生产和使用。1982 年被认为是电力系统的元始年,如表 1-1 所示。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。1885 年电力变压器得到实际应用,直流技术逐渐被交流技术代替。接下来的几十年间,三相交流系统的优越性不断体现出来,输送功率、输送电压、输送距离日益增大,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、合并成联合电力系统。这些互联系统有的甚至跨越国界,如俄罗斯电力系统与部分欧亚国家的电力系统互联,横跨欧亚大陆,跨越距离东西约 7000km,南北约 3000km。

表 1-1 早期电力系统的关键事件

年份	关键事件
1831	法拉第发现了电磁感应定律
1882	在英国、美国三座初具规模的发电厂投产,包括蒸汽机驱动直流发电机和水力直流发电机组;第一次高压输电技术出现在德国,线路长度为 59km,电压为直流 1500~2000V,被认为是世界上第一个电力系统

续表

年份	关键事件
1885	电力变压器得到实际应用
1888	尼古拉·特斯拉在论文中描述了两相同步感应电动机
1891	第一条三相交流高压输电线在德国投入运行，线路全长 178km，电压超过 10kV

为了减少电网的功率损失，输电电压不断提高。1952，第一条 380kV 线路在瑞典投入运行；1956、1959 年，第一条 400、500kV 线路先后在前苏联投入运行；1965 年，第一条 735kV 线路在加拿大投入运行；1969 年，第一条 765kV 线路在美国投入运行；1985 年，前苏联建成的埃基巴斯图兹-科克切塔夫-库斯坦奈 1150kV 输电线路开始按设计电压运行，该线路长 900km，输送容量达 2500MW，开创了输电电压的新纪录。

由于交流输电在系统运行稳定性、海底电缆送电等方面的局限性，高压直流输电在 20 世纪 30 年代东山再起，在 50 年代中期进入工业应用阶段。这时已不用电力系统初始阶段的直流发电机，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，第一座高压直流输电工程投入工业化运行，它是从瑞典本土至果特兰（Gotland）岛之间的一条 20MW、±100kV 海底电缆直流输电线，线路全长 96km。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。1979 年，在南非—莫桑比克之间的卡布拉巴萨（Cabora Bassa）±533kV 直流工程投入运行，其输电距离为 1456km，输电容量达 1920MW。1986 年，在巴西与巴拉圭两国合建的伊泰普（Itaipu）水电站巴西一侧，建成两条 ±600kV 的直流输电线路至圣保罗，分别长 785km 和 806km，每条线路输送功率均为 3150MW。

在发电技术领域，火力发电、水力发电与核能发电一起构成世界电能的三大支柱。但随着环保要求的增强和化石能源的短缺，风能、太阳能、生物质能、海洋能发电等可再生能源发电技术逐渐成为开发重点。从 1992 年以来，全世界风力发电累计装机容量的年增长率一直高于 15%；从 2000 年以来，累计装机容量年平均增长率甚至达到 30% 左右。国际可再生能源机构（International Renewable Energy Agency）2013 年预计，到 2030 年，包括太阳能、风能等在内的可再生能源在全球能源份额中的比例将从目前的 16% 提高至 30%。

近几年，以能源多元化、清洁化为方向，以优化能源结构、推进能源战略转型为目标，各国的能源发展格局、电力供需状况、电力发展方式正在发生着深刻变化。以清洁能源和智能电网为特征的新一轮能源变革正在全球范围推进。新形势下，电网除具备电能输送载体和能源优化配置平台功能外，更有可能通过能源流与信息流的全面集成与融合，成为影响现代社会高效运转的“中枢系统”。目前，在世界范围内兴起的智能电网（Smart Grid）是指用先进的通信、信息、网络、传感器等一切可以应用的先进技术和传统的电网技术相结合，对发、输、配、用电进行全面的实时监控，使电力系统具有一种思维、分析、判断、决策、控制的功能，实现对整个电力系统运行的优化管理，使得电网能更安全、稳定、高质、高效，更人性化的运行。

经过几十年的快速发展，电力系统规模不断扩大。但随着社会对电力依赖的增强，超大规模电力系统的弊端也日益显现：成本高，运行难度大，难以适应用户越来越高的安全、可靠性、多样化的供电需求。近年来，世界范围内接连发生的几次大面积停电事故后，传统大规模电网暴露出了其脆弱性。同时，以风力发电、光伏电池等可再生能源发电单元和

微型燃气轮机为代表的分布式电源的发展已成为人们关注的热点。分布式电源主要是指布置在电力负荷附近,能源利用效率高且与环境兼容,可提供电、热(冷)的发电装置,如微型燃气轮机、太阳能光伏发电、燃料电池、风力发电和生物质能发电等。为充分发挥分布式发电技术的作用,建立微电网(Microgrid)是一种十分有效的途径。微电网是一种由负荷和微型电源共同组成的系统,它可同时提供电能和热量;微电网内部的电源主要由电力电子器件负责能量的转换,并提供必需的控制;微电网相对于外部大电网表现为单一的受控单元,并同时满足用户对电能质量和供电安全等要求。微电网既可以联网运行,又可以孤岛运行,能保证在恶劣天气下对用户供电。微电网在满足多种电能质量要求和提高供电可靠性等方面有诸多优点,使它完全可以作为现有骨干电网的一个有益而又必要的补偿。

1.1.3.2 我国的电力系统

1882年7月,中国第一个发电厂在上海投入运行,该发电厂安装一台12kW的蒸汽发电机组,供照明用电。到中华人民共和国成立前夕,全国总装机容量只有1850MW,年发电量4.3TWh,总装机容量和发电量分别居世界第21位和25位。

从1949年到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)总装机容量达到57.12GW,年发电量达到256.6TWh,总装机容量和发电量分别跃居世界第8位和7位。截至2012年底,全国总装机容量达到1.144TW,比上年增长8.3%;全年发电量达到4940TWh,同比增长4.6%。目前,我国年发电量和总装机容量均居世界第一位。新中国总装机容量的增长情况如图1-3所示,年发电量的增长情况如图1-4所示^①。

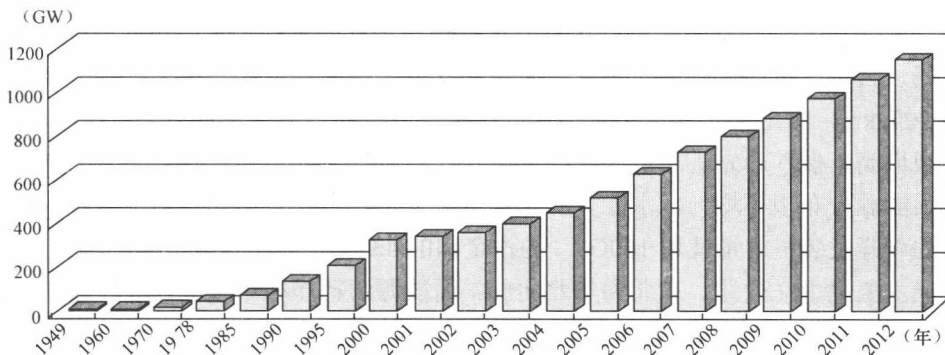


图 1-3 新中国总装机容量增长情况

1954年,新中国首条220kV高压线路投入运行,该线路起自丰满水电站,经虎万台变电站至抚顺市西南的李石寨变电站;1972年我国第一条330kV超高压输电线路——刘天关线(刘家峡—天水—关中)投入运行;1981年我国第一条500kV超高压输电线路——平武线(平顶山—武汉)投入运行;2005年我国第一条750kV超高压交流示范工程在西北电网投入运行,该工程包括青海官亭至甘肃兰州东的750kV输电线路141km,750kV变电站两座;2009年我国第一条1000kV特高压交流试验示范工程(晋东南—南阳—荆门)正式投入商业运行,这是我国首个特高压工程,由我国自主研发、设计、制造和建设,线路全长640km。

① 数据摘自:[1]中国大百科全书(第二版),北京:中国大百科全书出版社,2009。[2]中国电力企业联合会年度报告。

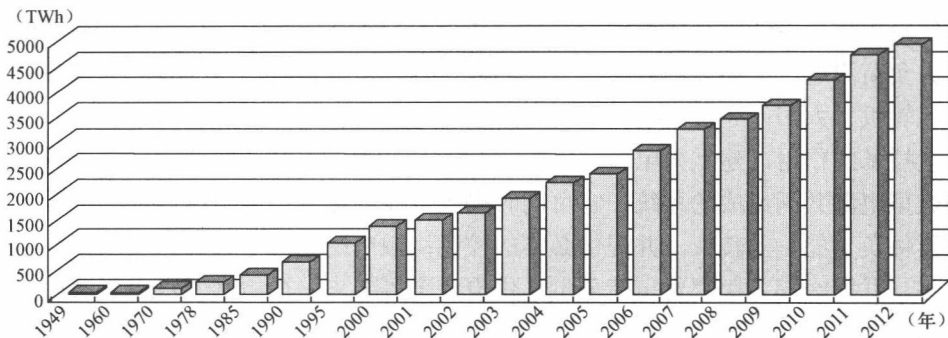


图 1-4 新中国年发电量增长情况

1988 年，中国自行设计和建造的±100kV 高压直流输电线路投入运行，该线路从浙江省的镇海到舟山岛，全长 53.1km，其中海底电缆 11km；1990 年，我国第一条±500kV 超高压直流输电线路投入双极运行，该线路自葛洲坝水电厂到上海，全长为 1080km；2009 年，世界首条±800kV 云南—广东特高压直流输电线路单极投产，2010 年双极投产，该工程西起云南楚雄州禄丰县，东至广州增城市，线路全长 1438km，额定输送容量 5000WM；也是在 2010 年，四川—上海±800kV 特高压直流输电工程相继建成投运，线路全长约 2000km；同年，世界上首个±660kV 直流输电工程建成投运，2011 年双极投产，该工程西起银川东换流站，东至青岛换流站，线路经过宁夏、陕西、山西、河北、山东等五省（区），长度 1335km；2011 年，该工程扩建项目正式投产，将单回线路输送能力提高到 5000 万 MW；2012 年，锦屏—苏南±800kV 特高压直流工程投入运行，工程起于四川西昌锦屏换流站，途经四川、云南、重庆、湖南、湖北、浙江、安徽、江苏八省市，止于江苏苏州换流站，全长约 2059km，额定输送容量 7200MW，这是目前世界上输送容量最大、送电距离最远、电压等级最高、技术最先进的直流输电工程。

我国能源分布极不均匀，水能资源大部分集中在西南、中南和西北地区，仅四川和云南两省的可开发装机容量就达 160GW，约占全国的 43%；煤炭能源集中在华北和西北地区；陆地风能主要集中在西北、东北和华北北部。而能源消耗却相对集中在经济发达的东部沿海地区，仅北京、上海、江苏、广东等 7 个省、直辖市的电力消费就占全国电力消费总量的近 40%。因此，我国能源资源与能源需求呈逆向分布，“西电东送、南北互供、全国联网”是我国电网的发展战略。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，全国形成东北、华北、华东、华中、西北和南方电网六大跨省区域电网，如图 1-5 所示，全国大部分地区已形成了 500kV 为主（西北地区为 330kV）的电网主网架，六大区域电网全部实现互联，我国电网规模居世界第一位。

火电一直是我国主要的发电方式。1956 年，淮南田家庵电厂投产我国第一台国产火电机组，额定容量 6MW。2006 年浙江玉环电厂国产 1000MW 机组投产，该机组是我国最大的汽轮发电机组。我国目前最大火力发电厂是内蒙古托克托电厂，安装 8 台 600MW 火电机组，2006 年 8 号机组建成移交生产，至此，总装机容量 4800MW 机组全部投产发电。截至 2012 年底，全国火电总装机容量达到 819.17GW，年发电量达到 3910.8TWh。

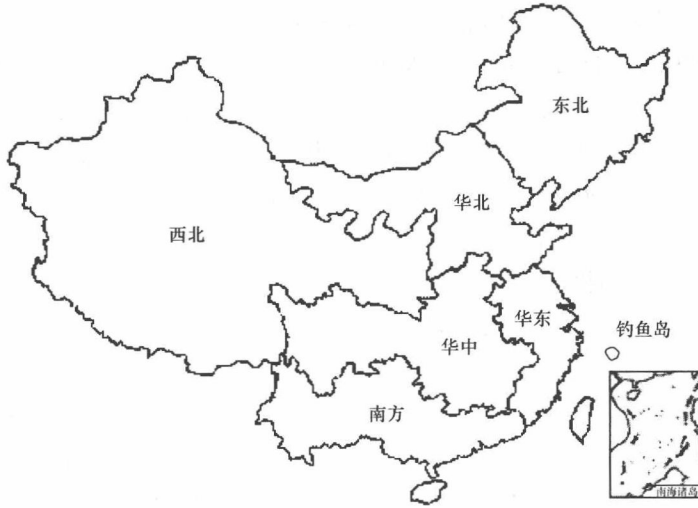


图 1-5 全国区域电网划分图

中国水能资源居世界首位，理论蕴藏量 676GW，年发电量 592 TWh，其中可开发装机容量 378GW，年发电量 192TWh，居世界首位。1994 年三峡水电站开工兴建，该水电站共计划安装 32 台 700MW 水轮发电机组，其中左岸厂房 14 台，右岸厂房 12 台，右岸山体内地下厂房 6 台，另外还有 2 台 50MW 的电源机组，总装机容量 22500MW，年发电量近 100GWh，这是目前世界最大的水电站。2003 年三峡水电站第一台机组投运，2008 年左、右岸厂房 26 台机组全部建成投入运行；2011 年，地下电站的首台 700MW 机组正式并网发电；2012 年 7 月，最后一台 700MW 机组正式并网发电，三峡水电站全面建成投产，累计发电量超过 560TWh。三峡水电站向华中、华东和南方电网送电，并促进全国联网的实现。截至 2012 年底，全国水电总装机容量达到 248.9GW，居世界第一；年发电量达到 864.1TWh。

我国民用核电起步相对较晚。1983 年，我国第一座核电站——300MW 秦山核电站一期工程开工建设，1991 年并网发电，结束了我国大陆无核电的历史。随后，我国首座 1000MW 压水堆核电站于 1994 年投产发电；截至 2012 年底，全国在运核电装机容量达到 12.57GW，年发电量达到 98.2TWh。

根据风能资源普查结果，我国离地 50m 高度陆地上风能资源潜在开发量为 2.38TW，近海 5~25m 水深范围内风能资源潜在开发量约为 200GW。“三北”地区（华北、东北和西北）以及东南沿海地区、沿海岛屿潜在风能资源开发量约占全国的 80%。20 世纪 80 年代中后期，我国的小型风力发电机组形成了规模化生产的能力。第一个并网风电场是 1986 年建成的山东荣成风电场。进入 21 世纪，我国风力发电发展迅速。风电装机由 2000 年的 340MW，增加到 2008 年的 8390MW，特别是 2005 年以来连年实现翻倍增长。2009 年，位于上海近海地区的我国第一座海上风电场首批 3 台 3MW 机组并网发电，该风电场安装 34 台 3MW 风电机组，总装机容量达 102MW；2010 年，该海上风电场全部风力发电机正式并网。截至 2012 年底，全国并网风电总容量达到 60.83GW，跃居世界第一。年发电量达到 100.4TWh。

中国光伏发电潜力巨大。据估算，我国陆地表面年均接受太阳总辐射量相当于 1.7×10^{12} t 标煤。太阳能总辐射资源分布特征是西部大于东部、高原大于平原、内陆大于沿海、干燥区大于湿润区，内蒙古西部、青海中部、西藏西南部是直接辐射资源最丰富地区；全国总面积的 2/3 地区年日照时间超过 2000h，年太阳辐射总量高于 $500\text{kJ}/\text{cm}^2$ 。2008 年中国太阳能光伏阵列年产量 2000MW，占全球产量的 30% 以上，居世界第一。2009 年，我国首座 10MW 级光伏并网发电特许权项目在甘肃敦煌开工建设，2010 年实现并网发电。目前，大容量光伏发电进入并网投产阶段，截至 2012 年底，并网太阳能发电容量达 3.28GW，比上年增长 47.8%；年发电量达到 3.5TWh。

生物质能开发利用、垃圾发电也有较大发展。据估算，我国生物质原料资源的年产出 8.99×10^8 t 标煤，其中有机废弃物年产出 4.74×10^8 t，边际性土地年产出 4.25×10^8 t。2006 年 12 月，我国第一个国家级生物质发电示范项目——国能单县生物质发电工程 1 台 25MW 机组投产。截至 2011 年底，并网生物质发电装机达到 4.3639GW，年发电量达到 19.121TWh。

截至 2012 年底，全国总装机容量达到 1144.91GW，其中水电、核电、并网风电、并网光伏发电设备容量占总装机容量的比重分别为 21.7%、1.1%、5.3% 和 0.3%；年发电量达到 4977.4TWh，其中水电、核电、并网风电、并网光伏发电量所占比重分别为 17.4%、2.0%、2.0% 和 0.1%。近几年全国各种类型发电机组装机容量变化情况如图 1-6 所示。

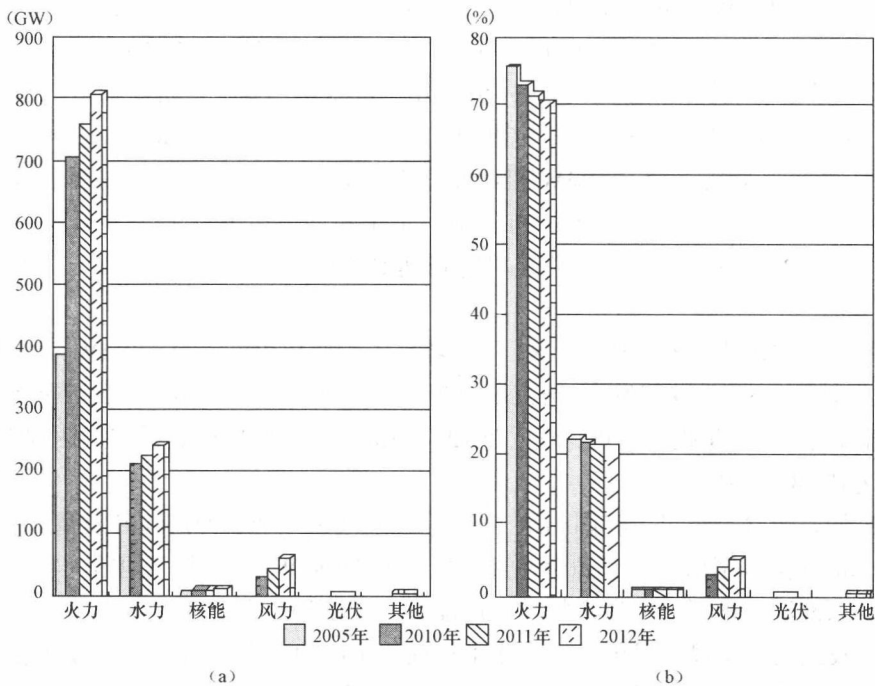


图 1-6 全国各种类型发电机组装机容量变化情况

(a) 安装容量；(b) 比例

注：其他，包括地热、生物质及垃圾等发电形式。

2004 年，云南电网通过 110kV 河口变电站向越南老街变电站送电，开启了中国向东南亚送电、售电的历史。2007 年，国家电网公司第一个国际直流输电项目——中俄 500kV 直流背靠背联网工程黑河换流站开工，2012 年 4 月正式投入商业运营。该换流站与俄罗斯远

东电网 500kV 阿穆尔变电站和黑龙江电网 500kV 兴福变电站相连接, 本期换流容量 750MW。

农村电气化水平是国家电气化的重要组成部分, 农村电力工程在农村社会和农村经济发展中具有不可替代的重要作用。新中国成立后, 电力工业贯彻为农业、农民、农村经济服务的方针, 致力于解决广大农村、牧区和边远山区, 以及缺能无电地区的用电问题, 大力提高乡、村及农户的通电水平, 实现农村电气化。改革开放以来, 农电步入发展快车道。截至 2011 年底, 国家电网公司服务范围县域售电量达到 1630TWh, 占总售电量的 53.1%。2003—2011 年, 国家电网公司县域电网售电量和人均电量分别增长了 1.9 倍和 2.3 倍。

1.2 电力系统运行的特点和基本要求

Characteristics and Basic Requirements of Power System Operation

1.2.1 电力系统的运行特点

电力系统是由电能的生产、输送、分配和消费的各环节组成的一个整体。与别的工业系统相比较, 电力系统的运行具有如下的明显特点:

(1) 电能不能大量存储。

电能的生产、输送、分配和消费实际上是同时进行的。电力系统中, 发电厂在任何时刻发出的功率必须等于该时刻用电设备所需的功率、输送和分配环节中的功率损失之和。

(2) 电力系统的工况的改变非常短促。

电力系统的所有电气设备的投入或退出都是在一瞬间完成, 其工况改变过程只有微妙到毫秒数量级, 电能的传播速度与电磁波的速度相同, 电力系统从一种运行状态到另一种运行状态的过渡极为迅速。

(3) 与国民经济的各部门及人民生活有着极为密切的关系。

电是最方便的能源, 各行各业都离不开它, 因此, 供电的中断也将影响国民经济的各部门, 供电的突然中断会带来严重的后果。

1.2.2 对电力系统运行的基本要求

依据电能生产、输送、分配和使用的特点, 对于电力系统运行的传统基本要求可以概括为安全、优质和经济。在当前经济可持续发展的大环境下, 对电力系统运行还应提出环保的基本要求。

(1) 保证电力系统运行的安全可靠。

保证安全可靠地发、供电是对电力系统运行的首要要求。根据用户对供电可靠性的不同要求及中断供电在对人身安全、经济损失上所造成的影响程度, 目前我国将负荷分为以下三级:

1) 一级负荷。对这一级负荷中断供电的后果是极为严重的。例如, 可能发生危及人身

安全的事故；使工业生产中的关键设备遭到难以修复的损坏，以致生产秩序长期不能恢复正常，造成国民经济的重大损失；影响重要用电单位的正常工作，在政治或军事上造成重大影响；造成环境严重污染；造成重要公共场所秩序混乱等。在一级负荷中，当中断供电将造成重大设备损坏或发生中毒、爆炸和火灾等情况的负荷，以及特别重要场所的不允许中断供电的负荷，应视为一级负荷中特别重要的负荷。

2) 二级负荷。对这一级负荷中断供电将在经济上造成较大损失，影响较重要用电单位的正常工作等。

3) 三级负荷。不属于第一、二级的，停电影响不大的其他负荷都属于第三级负荷，如工厂的附属车间，小城镇和农村的公共负荷等。对这一级负荷的短时供电中断不会造成重大的损失。

对于以上三个级别的负荷，可以根据不同的具体情况分别采取适当的技术措施来满足它们对供电可靠性的要求。

(2) 保证合乎要求的电能质量。

频率和电压是电气设备设计和制造的基本技术参数，也是衡量电能质量的两个基本指标。我国采用的额定频率为 50Hz，国家标准规定，正常运行时允许的频率偏差为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ，系统容量较小时偏差可以放宽到 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。用户供电电压的允许偏差也有相应的标准，按照国家标准规定，电力系统正常运行条件下供电电压对系统额定电压的允许偏差如表 1-2 所示。电压和频率超出允许偏移时，不仅会造成废品和减产，还会影响用电设备的安全，严重时甚至会危及整个系统的安全运行。

表 1-2 供电电压的允许偏差

供电电压	允许偏差
35kV 及以上	正负偏差的绝对值之和不超过系统额定电压的 10%；如果供电电压上、下偏差同号（均为正或负）时，按较大的偏差绝对值作为衡量依据
20kV 及以下	$\pm 7\%$
220V 单相	+7%、-10%
其他用电设备当无特殊规定时	$\pm 5\%$

此外，相关国家标准还对三相电压不平衡度、电压闪变、谐波的电压与电流限值等作出了相应规定。

(3) 保证系统运行的经济性。

电能生产的规模很大，消耗的能源在国民经济能源总消耗中占的比重很大。为了提高电力系统运行的经济性，必须尽量地降低发电厂的煤耗率、厂用电率和电网的电能损耗率，充分利用水能。这就是说，要求在电能的生产、输送和分配过程中减少耗费，提高效率。

(4) 保证对生态环境有害影响的最小化。

目前，我国火电厂装机占总装机容量的发电用一次能源仍以煤炭为主，煤炭燃烧会产生大量的二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、粉尘和废渣等，这些排放物都会对生态环境造成有害影响。因此，限制污染物的排放量，使电能生产符合环境保护标准，也是对电力系