

特色专业

普通高等教育

电气类

国家级特色专业系列规划教材

电力系统分析基础

主 编 滕 云

副主编 程 祥 隋玉秋

李学斌 李家珏



科学出版社

普通高等教育电气类国家级特色专业系列规划教材

电力系统分析基础

主 编 滕 云

副主编 程 祥 隋玉秋
李学斌 李家珏

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书分4篇,共15章。第1篇包括第1~4章,介绍电力系统的基本概念,电力的生产方式,电力系统网络、电源和负荷的数学模型;第2篇包括第5~9章,介绍电力系统潮流的简单计算,复杂电力系统潮流的计算机算法,电力系统的有功功率及频率调整和无功功率及电压调整,电力系统的经济运行;第3篇包括第10~12章,介绍电力系统对称故障分析,电力系统元件的序阻抗和等值电路,电力系统不对称故障分析;第4篇包括第13~15章,介绍电力系统稳定性的基本概念,电力系统的静态及暂态稳定性。

本书可作为普通高等学校电气工程及其自动化专业、自动化专业及相关专业的教材,也可作为成人(函授)高等教育、高职高专教育的教材,还可供从事电力系统工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析基础 / 滕云主编. —北京:科学出版社,2017.8

普通高等教育电气类国家级特色专业系列规划教材

ISBN 978-7-03-054045-4

I. ①电… II. ①滕… III. ①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(2017)第182773号

责任编辑:余江 张丽花 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:霍兵 / 封面设计:迷底书装

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>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年8月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:461 000

定价:49.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书为高等院校“电力系统分析”课程的教材。在取材方面，力求讲清基本概念和基本理论，并注意介绍国内外先进科学技术和本学科的发展方向。在保证学科系统性和完整性的同时，也适当介绍我国电力系统的现状和有关技术政策。通过本书四大篇幅的叙述，循序渐进地对电力系统进行分析，对读者掌握和应用有关内容有很大的帮助。

在本书编写过程中，编者结合了在沈阳工业大学讲授课程的教学经验，参考了国内外有关书籍，并吸取了相关书籍的使用经验。本书适用于不同层次、不同类型的院校，满足学科发展和人才培养的需求。

本书分4篇，共15章。

第1篇主要介绍电力系统的基本概念和必要的基础知识，包括4章。第1章为电力系统的基本概念，第2章为电力的生产方式，第3章为电力网络的数学模型，第4章为电力系统电源和负荷的数学模型。

第2篇主要对电力系统的运行状况进行更全面的分析，其核心是潮流计算，包括5章。将电力系统看成是电能生产、输送、分配和消费的统一整体，根据安全、优质和经济供电的要求，进行系统在正常稳态运行的分析计算，并研究对其运行状态进行调整和改善的原理与方法。其中，第5章为电力系统潮流的简单计算，第6章为复杂电力系统潮流的计算机算法，第7章为电力系统的有功功率和频率调整，第8章为电力系统的无功功率和电压调整，第9章为电力系统的经济运行。

第3篇是将电路分析的方法应用于电力系统的短路电流计算，包括3章。系统中的各元件，被当作电路元件来处理，并用等值电路代替，电流电压是分析计算的基本物理量。其中，第10章为电力系统对称故障（三相短路）分析，第11章为电力系统元件的序阻抗和等值电路，第12章为电力系统不对称故障分析。

第4篇主要讲述电力系统的稳定性，对突然短路后的暂态现象的物理分析，功率是分析计算的基本物理量，其重点是发电机功率特性的分析计算，包括3章。其中，第13章为电力系统稳定性的基本概念，第14章为电力系统静态稳定性，第15章为电力系统暂态稳定性。

本书第1~5章、第14章由滕云编写，第10~13章由程祥编写，第7~9章由隋玉秋编写，第6章由李学斌编写，第15章由李家珏编写。全书由滕云任主编。

由于编者的水平有限，书中难免有不妥之处，还请读者批评和指正。

编 者

2017年6月

目 录

第 1 篇

第 1 章 电力系统的基本概念	1
1.1 电力系统发展历史	1
1.2 我国电力系统发展概述	8
1.3 电力系统的基本组成及其特性	11
1.4 本书主要内容	18
第 2 章 电力的生产方式	20
2.1 电力生产过程	20
2.2 电力系统结线和中性点运行方式	27
第 3 章 电力网络的数学模型	31
3.1 电力线路的参数和数学模型	31
3.2 变压器的数学模型	42
3.3 标么值	49
第 4 章 电力系统电源和负荷的数学模型	54
4.1 复功率	54
4.2 同步发电机的稳态方程式和相量图	54
4.3 同步发电机回路电压和磁链方程	57
4.4 派克变换及 $dq0$ 坐标下的发电机基本方程	59
4.5 同步发电机的转子运动方程	66
4.6 电力负荷的数学模型	70

第 2 篇

第 5 章 电力系统潮流的简单计算	77
5.1 电力线路和变压器运行状况的计算	77
5.2 辐射形和环形网络中的潮流分布	86
5.3 电力系统的潮流控制	99
第 6 章 复杂电力系统潮流的计算机算法	104
6.1 电力网络方程	104
6.2 功率方程及其迭代解法	110
6.3 牛顿-拉弗森法潮流计算	118
第 7 章 电力系统的有功功率和频率调整	125
7.1 电力系统频率调整的必要性	125

7.2	电力系统中有功功率的平衡	126
7.3	电力系统的频率调整	132
第 8 章	电力系统的无功功率和电压调整	146
8.1	电压调整的必要性	146
8.2	电力系统中无功功率的平衡	148
8.3	电力系统的电压调整	151
8.4	调压措施的比较和组合	163
第 9 章	电力系统的经济运行	165
9.1	电力网的能量损耗和损耗率	165
9.2	有功功率负荷最优分配的目标函数	165
9.3	有功功率负荷最优分配的等耗量微增率准则	168
9.4	无功功率的最优分布	171

第 3 篇

第 10 章	电力系统对称故障(三相短路)分析	177
10.1	电力系统故障概述	177
10.2	无限大功率电源供电的三相短路电流分析	180
10.3	同步发电机空载情况下突然三相短路分析	186
10.4	短路电流初始值和稳态有效值	193
第 11 章	电力系统元件的序阻抗和等值电路	198
11.1	对称分量法在不对称故障分析中的应用	198
11.2	同步发电机的负序和零序电抗	205
11.3	变压器的零序电抗和等值电路	208
11.4	输电线路的零序阻抗	214
11.5	零序网络的构成	224
第 12 章	电力系统不对称故障分析	226
12.1	不对称短路时故障处的短路电流和电压	226
12.2	非全相运行的分析计算	239

第 4 篇

第 13 章	电力系统稳定性的基本概念	245
13.1	电力系统稳定性概述	245
13.2	静态稳定的概念	248
13.3	暂态稳定的概念	251
13.4	电压稳定性的概念	254
第 14 章	电力系统静态稳定性	257
14.1	小扰动法原理	257
14.2	小扰动法分析简单系统静态稳定	260
14.3	阻尼作用对静态稳定的影响	263

14.4	自动调节励磁系统对静态稳定的影响	265
14.5	多机系统的静态稳定近似分析	267
14.6	提高系统静态稳定性的措施	271
第 15 章	电力系统暂态稳定性	274
15.1	暂态稳定性分析的基本假设	274
15.2	简单系统的暂态稳定性	275
15.3	发电机组自动调节系统对暂态稳定的影响	287
15.4	提高暂态稳定性的措施	290
参考文献	297

第 1 篇

第 1 章 电力系统的基本概念

1.1 电力系统发展历史

19 世纪 70 年代, 电力的发明和应用掀起了第二次工业化高潮, 成为世界发生的三次科技革命之一, 从此电力改变了人们的生活。20 世纪出现的大规模电力系统是人类工程科学史上最重要的成就之一。它将自然界的一次能源通过发电动力装置转化成电力, 再经输电、变电和配电将电力供应到各用户, 电力系统与人们的生产、生活、科学研究和社会文明的建设息息相关, 已成为现代文明社会的重要物质基础。

中国电力系统发展已有一百多年, 随着装机容量不断增加、输电电压不断提高、并网面积不断扩大, 中国电力技术已经站在世界电力技术的前列。新能源的使用、超/特高压线路的建设以及智能电网的实施不断推动着电力系统迈向高效化、绿色化、智能化。

1.1.1 世界电力发展简史

1600 年, 英国的吉尔伯特发现摩擦琥珀可以生电, 他把经过摩擦后能吸引小物体的物体称为“electric”, 意思是“琥珀体”, 这就是西文中“电”的词根来源。

1800 年, 伏特发明第一个化学电池, 人们开始获得连续的电流, 这是人类迈向电气化时代的开始。这时电的使用只有发电和用电, 没有变电、输电和配电环节。

1866 年, 德国的西门子制成第一台使用电磁铁的自激式发电机, 标志着制造大容量发电机技术的突破, 也为早期电力系统的形成奠定了基石。随着电机制造技术的发展和电能应用范围的扩大, 生产对电的需要的迅速增长, 发电厂应运而生。

1882 年, 爱迪生在纽约建成世界上第一座正规发电厂, 为附近居民供电, 这也是最早出现的配电线路。

1882 年, 德普勒在慕尼黑博览会上展示了一条 1~2kV 电压、57km 的直流输电线路。这是输电线路的开始, 但是由于线路损耗较大, 用户使用过高电压不方便, 难以推广。

同年, 法国的高兰德和英国的吉布斯制成了第一台 3000V/100V 的二次发电机, 即早期的变压器, 推动了交流系统的建立。

1885 年, 特斯拉发明多相电流和多相传电技术, 即现在全世界广泛应用的 50~60Hz 交流电传送电力的方法。

1891 年, 法国劳芬水电站至德国法兰克福的三相高压输电线路建成, 这是世界上第一条交流高压输电系统。此后不过 10 年左右, 交流输电技术中便几乎全部采用了三相制。

1893年，芝加哥世博会上威斯汀豪斯用两台多相交流电机为整个展区供电。从此交流系统取代直流系统进入人类社会，为电力工业的兴起及扩大电能应用提供了巨大的推动力。

1913年，全世界的年发电量达500亿kW·h，电力工业已作为一个独立的工业部门，进入人类的生产活动领域。

1925年，美国制成第一台10万kW的汽轮发电机组，机组容量的增加大力推动了电力工业的发展。

1934年，美国建成的大古力水电站于1951年完成装机容量197.4万kW，是当时世界上最大的水电站。

1935年，美国首次将输电电压等级从110~220kV提高到287kV，出现了超高压输电线路。

1954年，苏联建成世界上第一座核电站奥布灵斯克核电站，发电量5000kW。核电站开始在全世界兴起。

1954年，瑞典本土与哥特兰岛之间建成世界第一个±100kV商用海底直流电缆输电工程，高压直流输电开始走入人们的视线。

1959年，苏联建成500kV，长850km的三分裂导线输电线路。

1985年，苏联首次建成1150kV的特高压输电线路，输电距离890km，标志着电力系统迈向特高压级别。

2010年，中国的向家坝-上海±800kV输电工程投运，这是世界上第一个特高压直流输电工程，同时也是电流最大、容量最大、距离最长的直流工程。至今，世界已有100多项直流输电工程投运，电力系统进入交、直流混合输电阶段。

今天，电力系统为人类生活各行各业提供电能，已经成为生产、生活中不可或缺的一部分。从太空上看地球，世界各地的灯光点亮夜空，构成一幅绚丽的图案。

1.1.2 中国电力系统发展简史

1879年5月，上海虹口装设的直流发电机供电弧光灯在外滩点燃，是中国使用电照明的开始。

1882年，上海电光公司在上海乍浦路创建了中国第一个发电厂，当时仅供附近照明用电，没有高压线路。到1897年已建成5条供路灯的输电线路，1900年线路全长已达18km，用电缆架空敷设，输电电压最高达2500V，全市有12个配电站。这是中国最早形成的输配电网。

1897年，第一家由中国人在上海创办的电厂——南市电厂建成。在此期间，武昌、唐山、大沽、杭州、苏州、长沙等地，一批官办、商办电厂陆续出现。当初的南市电厂如今已成为上海世博会的“未来城市馆”。

1912年建成的昆明石龙坝水电站是我国第一座水电站，并从此水电站至昆明万钟街变电所，架设了中国最早的一条22kV中压输电线路。这台机组历经100年至今仍在运行。新中国成立前中国电网的发展多是在日军占领下的东北、华北地区，其间分别建成了44kV、66kV、110kV、154kV的输电线路。到1949年底，全国35kV及以上输电线路仅6475km，

变电容量 346 万 $\text{kV} \cdot \text{A}$ 。

1954 年,从丰满水电站到虎石台变电所,由我国自行设计、施工的第一条 220kV 高压输电线路建成,全长 369.25km。国内电力系统开始蓬勃发展。

1975 年,西藏羊八井地热电站始建,1986 年总装机容量 1.3 万 kW,是迄今为止我国最大的地热电站。

1981 年,我国自行设计、施工,全套国产设备的全国第一条 500kV 平顶山姚孟电厂——武昌凤凰山变电所的超高压输电线路投入运行,我国成为世界第八个拥有这种超高压线路的国家。1985 年,全国年发电总量已达 4000 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,装机容量为 8000 万 kW,升至世界第 5 位。

1989 年,我国第一条 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路(葛洲坝—上海,1080km)建成并投入运行,形成我国第一个跨大区的联合电力系统。

2009 年,我国第一条交流特高压输电线路——晋东南至北荆门 1000kV 特高压交流输电线路正式投入运行。

2010 年,我国自主设计建设的世界第一条特高压直流输电线路——云南楚雄至广东增城 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路正式竣工投产,是迄今世界直流输电领域电压等级最高的项目。

2011 年,宁东—山东 $\pm 660\text{kV}$ 直流输电工程实现双极投运,这是目前世界上首个 $\pm 660\text{kV}$ 电压等级的直流输电工程,也是我国新电压等级自主化水平最高的直流输电工程。

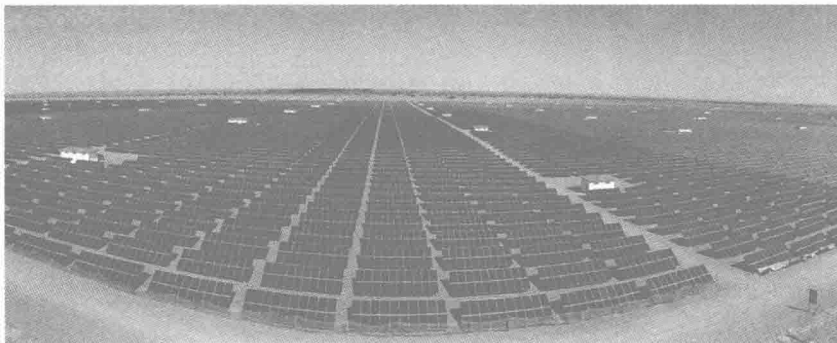
我国的电力系统发展起步晚、速度快。今天,不管在技术研究还是设备制造方面,都已经走在世界电力科技的前列。

1.1.3 电力工业的发展趋势

1. 可再生能源发电

随着节能减排、绿色环保的理念深入人心,电力工业也在迈向绿色化。不断涌现的可再生能源发电方式是避免资源枯竭、实现可持续发展的有效方式,也是解决偏远地区用电的有效途径。

截至 2016 年初,全球已有 173 个国家制定了可再生能源发展目标,146 个国家出台了支持政策。世界有多个城市、社区以及企业率先展开迅速壮大的“100%可再生能源”行动,在推动全球能源转型中发挥着至关重要的作用。图 1.1 为大规模光伏电站和风力发电场。



视频



视频



图 1.1 大规模光伏电站和风力发电场

2. 分布式电源和主动配电网

分布式发电指为满足终端用户的特殊要求，接在用户侧附近的小型发电系统。分布式发电与储能装置的联合系统即为分布式电源。微电网将分布式电源、负荷、储能装置及控制等结合，形成一个单一可控的独立供电系统。微电网与配电网或互联运行，或独立运行，当配电网出现故障而微电网与其解列时，仍能维持微电网自身的正常运行。

主动配电网(Active Distribution Networks, ADN)主要由分布式电源、储能装置、负载状态估测和管理系统等组成，并通过变电站和上一级电网连接。分布式电源相对于传统的大型集中式发电机组而言，是位于用户侧，能够优先满足用户自身需求，且具有独立运行或接入配电网能力的电源。直接接入配电网也决定了分布式电源的功率要远远小于集中式的大型发电机组。分布式电源可能是多种多样的，包括使用传统化石能源的柴油机发电、微型燃气轮机，以及使用可再生能源和新型能源的小水电、地热发电、风力发电、光伏发电、光热发电、燃料电池发电、生物质发电等。分布式发电的接入是主动配电网最显著的特征，CIGRE C6.11 工作组的调查表明，正是分布式发电可预见的持续发展使配电网向主动型转变，并将被广泛的接受。

储能装置的种类很多，主要包括抽水蓄能、飞轮储能、压缩空气储能、蓄电池储能、超级电容储能、超导线圈储能等。能量的储存形式有机械能、电化学能、电能等，不管是哪一种形式的能量的大量和长期储存，至今为止对人类都是难题。满足要求的能量储存容量、密度、效率储能系统，对世界可再生能源和分布式发电的快速发展具有重要意义。

在主动配电网中除了有传统意义上的、一般的用电负载之外，还有一类能与配电网管理系统互动的主动需求(Active Demand)负载，配电网管理系统可以根据这类用户的要求(包括价格等)做出最优的调度，达到网损小、电价低，称为基于用户的配电网需求方管理方式，即需求侧管理。

配电网状态估测系统的任务是收集配电网各处传感器的信息，通过计算能够掌握配电网各个局部和整体的状态，为配电网管理系统提供管理的依据。

配电网管理系统通过收集各个分布式电源、储能装置的报价信息，对其输出有功/无功功率发出指令，通过本地控制器控制分布式系统的运行，以达到配电网整体的优化管理。主动电网区别于传统配电网的重要特征之一，就是对网上的每一要素(分布式电源、储能装置等)做到可知、可控，通过主动的管理实现电压的协调控制、对潮流的管理、故障时的网络重构等。

相对于传统配电网，主动配电网的特点主要有：①主动配电网可以接入分布式电源；②主动配电网可以运行在并网和孤岛两种模式下；③当电网发生故障时，分布式电源可以对电网起到支撑的作用；④主动配电网具有数据采集和通信功能；⑤主动配电网可以对分布式电源、负载的电压、潮流等进行主动的管理；⑥当电网发生故障时，主动配电网可以对网络进行再构建。

分布式电源的接入是主动配电网最大的特点，它为可再生能源的利用打开了大门，这与今后能源发展的大趋势适应，有助于环境保护、经济的可持续发展。分布式电源在距离上更接近负载，可以就近为其提供电力，这对于减少线路损耗、提高功率因数、改善用户端电压等都是有利的。尤其是当分布式电源接入配电网末端时，可以改善末端的电能质量。当电网发生故障时，分布式电源对电网的支撑作用，有利于故障的恢复，可以提高供电可靠性。由于主动配电网能运行在并网和孤岛两种模式下，当电网发生故障时主动配电网也可以不依赖电网而独立运行，这也提高了供电的可靠性。主动配电网的孤岛运行模式还适用于远离电网的离岛、边远地区，减少了长距离输电的投资和线路损耗。主动配电网对潮流进行积极的管理也可以使得网络的负荷降低，在不增加配电网硬件投资的情况下，提高配电网的容量，提高设备利用率和投资效益。

分布式电源的接入也为配电网带来了很多问题。分布式电源的供电往往是波动的、不连续的，如风力发电、光伏发电都会受到季节、时间、气象的影响，而且发电量的预测精度较差。分布式电源接入的位置和发电量的变化，使潮流的方向、大小都不同于传统配电网而难以把握。作为分布式电源的接口，大量电力电子装置的接入也给配电网带来谐波、电磁干扰等电能质量问题。为了实现配电网的主动管理，还需要投资建设通信等基础设施。因此主动配电网必须应对挑战，解决分布式电源大量接入后的继电保护、潮流管理、电压控制、电能质量管理、供电可靠性等问题。

3. 智能电网

2001年，美国电力科学研究院(EPRI)提出智能电网(Smart Grid)的概念：利用传感器对发电、输电、配电、供电等关键设备的运行状况进行全面的实时监控，然后把获得的数据通过网络系统进行收集、整合，最后通过数据的分析、挖掘，对整个电力系统运行实现优化管理。

2007年，美国能源部西北太平洋国家实验室完成了一项智能电网试验。试验结果显示：建设现代化的智能电网将使美国每年能耗降低10%，温室气体排放量减少25%，并节省800亿美元新建电厂的费用。

2008年，在美国科罗拉多州的波尔得这个拥有94000多人的小城市，建成了全美洲乃至全世界的第一个智能电网城市。

2009年，特高压输电技术国际会议在北京召开。会议期间，国家电网公司在世界范围内率先提出坚强智能电网发展战略，并全面启动相关研究和实践。2009年因此成为我国乃至世界智能电网发展元年。坚强智能电网发展战略是与世界经济、科技发展潮流相吻合的。

2010年，中国科学院第十五次院士大会上，确定追求智能发展成为一种新的趋势和潮流，这种潮流在不断创造新的经济增长点、新的市场、新的就业形态。智能电网正是智能

发展潮流在能源领域的体现。

《中国电力与能源》书中指出：“智能电网是全球范围内智能发展趋势深入推进的突出标志，同时也是正在孕育发展的新一轮能源变革的重要特征。”发展智能电网，已成为抢占未来低碳经济制高点的重要战略措施，而中国率先提出并全面启动智能电网战略，让中国在发展低碳经济的道路上先行一步。坚强智能电网战略的提出，还与全球对能源供应、发展新能源的诉求密切相关。

人类社会进入 21 世纪以来，能源短缺、资源紧张、气候变化等问题日益突出，全球在能源安全、能源效率、能源环境等方面面临重大挑战。通过坚强智能电网的建设，在全国范围优化配置能源资源，并大幅提高电力系统接纳新能源的能力，正是该项战略对如何保障能源安全、促进新能源发展的有力回应。

1.1.4 电力市场与能源互联网

1. 电力市场

20 世纪 80 年代开始，世界上许多国家陆续进行着电力工业的市场化改革，其主要目标是打破传统电力工业的垄断运营模式，厂网分开，开放电网。实现竞争，进而降低发电成本，提高服务质量，促进电力工业的发展。到目前为止，这种电力市场的改革还未能建立非常成功的样板，各种模式都还处在不断探索、不断完善的过程中。

1) 世界各国的电力市场化进程

近百年来，电力行业在世界各国都是传统的垄断性行业。电力市场化的目的是打破垄断，促进竞争。因此，电力行业是电力市场化改革的对象，各国的政府是推动者，走向电力市场的第一步几乎都是各国的政府以立法的形式强制电力工业重组。

实行电力市场化最早的国家是智利，起步于 20 世纪 70 年代末。1982 年智利正式颁布了新的电力法，以法律的形式确立了输电系统向所有发电厂及用户开放的原则，打破了地区垄断，正式启动了合同电力交易及实时电力交易的方式，把电力企业推向了竞争市场。

英格兰电力市场化开始于 1987 年政府颁布的《电力法》，并于 1990 年 4 月撤销了垄断经营的中央发电局(CEGB)，将发电、输电、配电的功能分开，按国家电网公司，3 个发电公司和 12 个地区售电公司的模式运作。

澳大利亚政府在 1991 年成立了国家电网局以推动电力市场。后来正式建立了国家电网管理委员会来监管电网运营。1992 年该委员会颁布了“国家电网规约”，规定 3 万 kW 以上的发电厂和 1 万 kW 以上的用户都可以作为规约的成员单位自由地在国家电网进行交易。

瑞典的电力市场化过程开始于 1990 年，但关键性的一步是瑞典议会在 1994 年通过了新的《电力法案》，并于 1995 年元月颁布实施。

美国电力市场化由 1992 年乔治·布什总统批准的《能源法案》开始，以电网开放为标志。

2) 我国的电力工业改革

我国电力工业改革的总体目标是打破垄断，引入竞争，提高效率，降低成本，健全电价机制，优化资源配置，促进电力发展。推进全国联网，构建政府监管下的政企分开、公平竞争、开放有序、健康发展的电力市场体系。

为了引入竞争，2002年3月，全国电网组建为国家电网公司和南方电网公司。在发电环节引入竞争机制，实现“厂网分开”，成立了中国华能集团公司、中国大唐集团公司、中国华电集团公司、中国国电集团公司和国家电力投资集团公司等五大发电集团公司，它们成为市场的主要参与者，并受国家能源局的监管。电力监管机构统一履行全国的电力监管职责。其监管对象主要包括发电企业、输电企业、供电企业和电力用户。目前，发电环节已经初步形成竞争格局。2016年，我国开展售电侧改革试点工作，全国成立了近千家电网终端售电企业。

3) 电力市场化进程的主要研究内容

虽然电力市场已经有所进展，但是在市场结构、电价体系和交易机制等方面仍缺乏必要的理论和方法。而且世界各国由于政治和经济体制的不同，很难相互借鉴，更不能照搬。我国电力市场需要研究的问题有以下几个方面。

(1) 电力市场的结构和运营模式。除了厂网分开，输电网服务是电力市场不同于其他商品市场的关键部分。它包含若干个要素，这些要素的不同组合将形成不同的电力市场结构。如何构成适合我国国情的电力市场，使之适于过渡、易于操作、利于竞争、便于监督等是非常关键的问题。

(2) 电价理论。电价理论是电力市场的核心理论之一，它包括电能成本、输电成本、辅助服务成本等的量化和分摊。

(3) 交易形式。电力交易可以采取双边合同和竞价上网的形式。但是电力市场以何种形式为主，或这两种形式各占多大份额，也是电力市场需要研究的关键问题。

(4) 电力市场运营的分析与模拟。为了在瞬息万变的电力市场运营条件下对电力系统的运行情况，特别是运行的安全性和可靠性及时做出判断，需要开发一个高效的、综合性的电力市场运营分析、模拟和评估系统。

2. 能源互联网

随着电压等级提升、联网规模扩大、自动化程度增强，世界电网发展已经进入坚强智能电网发展阶段，而全球能源互联网是坚强智能电网发展的高级阶段。能源互联网的核心就是以清洁能源为主导，以特高压电网为骨干网架，各国各洲电网广泛互联，能源资源全球配置，各级电网协调发展，各类电源和用户灵活接入的坚强智能电网。

全球能源互联网是基于全球能源观，统筹全球能源资源开发、配置和利用的重要载体。依托先进的特高压输电和智能电网技术，构建连接北极地区风电基地、赤道地区太阳能发电基地和各洲大型可再生能源基地与主要负荷中心的全球能源互联网，打造网架坚强、广泛互联、高度智能、开放互动的全球能源配置平台，能够有力推动世界能源的可持续发展。

构建全球能源互联网主要包括洲内联网、洲际联网和全球互联三个发展阶段：第一阶段，2020年前推动形成共识，到2030年启动大型清洁能源基地建设，加强洲内电网互联；第二阶段，到2040年，各洲主要国家电网实现互联，“一极一道”等大型能源基地开发和跨洲联网取得重要进展；第三阶段，到2050年，基本建成全球能源互联网，逐步实现清洁能源占主导的目标。

构建全球能源互联网，需要全球范围的紧密合作、破除壁垒，建立相互依存、互信互

利的组织机制，建成高效运转的运行机制和市场机制，实现政府、企业、社会 and 用户的广泛参与及合作多赢，保障全球能源互联网安全经济运行，并可以带来显著的环境效益、经济效益和社会效益。在全球能源互联网加快发展情景下，预计 2050 年全球清洁能源比重达到 80%，能够保障能源可持续供应，并有效控制全球碳排放、降低供电成本、取得跨洲联网、拉动经济等综合效益。

全球能源互联网推动能源发展方式转变，使能源发展摆脱资源、时空和环境约束，实现清洁能源的高效开发、利用，推动清洁能源成为主导能源，让人人享有充足能源供应。推动经济发展方式转变，促进经济向创新驱动、全面协调、质量提升方向转型，为世界经济注入新活力，带来新繁荣。其发展将深刻影响人类的生产生活方式，社会发展质量、社会管理效率和自然环境水平都将获得大幅提升，创造人类的美好新生活。

3. 特高压交直流输电

高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)是利用直流电路具有无感抗、容抗也不起作用、无同步问题等优点而采用的大功率远距离直流输电，常用于海底电缆输电，非同步运行的交流系统之间的联络等方面。高压直流输电具有线路输电能力强、损耗小、两侧交流系统不需同步运行、发生故障时对电网造成的损失小等优点，特别适合用于长距离点对点大功率输电。同时在一些不适用于传统交流连接的场合，它也被用于独立电力系统间的连接。

特高压(Ultra High Voltage, UHV)是指 $\pm 800\text{kV}$ 及以上直流和 1000kV 及以上交流电压等级。特高压电网建设，是构建全球能源互联网的重要和关键组成部分。

特高压输电具有远距离、大容量和低损耗等特点，是我国西电东送的主要途径。从特高压的发展格局上看，我国 2011~2015 年特高压规划为建设“三横三纵一环网”特高压骨干网架，把内蒙古、陕西、河北的风电、煤电通过三条纵向的特高压通道送往华北、华中和华东地区；把北部的煤电和西南的水电，通过三条横向特高压通道送往华北、华中和长三角地区，形成西电东送、北电南送的资源配路格局。截至 2015 年，我国完成了两条示范工程特高压线路和“三交四直”的建设，西北地区(包括甘肃、内蒙古和新疆等)初显战略布局。但是输电容量远不足以完成全部西电东送的要求，2016~2020 年特高压建设进一步向西北倾斜。

2016~2020 年，我国将重点优化西部(西北+川渝藏)、东部(“三华”+东北三省+内蒙古)两个特高压同步电网，形成送、受端结构清晰的“五横五纵”29 条特高压线路的格局。

跨区输电规模从目前的 1.1 亿 kW 提高到 3.7 亿 kW，特高压建设线路长度和变电容量分别达到 8.9 万 km 和 7.8 亿 kW。

1.2 我国电力系统发展概述

1.2.1 我国的发电资源分布

我国具有丰富的能源资源。水力资源的蕴藏量(不包括台湾)为 676GW，居世界首位，其中可利用的资源约有 378GW，主要集中在西南和西北，包括长江、金沙江、澜沧江、怒

江和红水河的中上游以及黄河的上游。煤、石油和天然气资源也很丰富。煤的预测量约为4500Mt，其中90%集中在陕西、山西及内蒙古。可利用的风力、太阳能资源主要分布在东南沿海、新疆、甘肃、内蒙古东部和东北。这些优良的自然条件为我国电力工业的发展提供了物质基础。

根据全国900多个气象站对陆地上离地10m高度资料进行估算，全国平均风功率密度为 $100\text{W}/\text{m}^2$ ，风能资源总储量约32.26亿kW，可开发和利用的陆地上风能储量有2.53亿kW，近海可开发和利用的风能储量有7.5亿kW，共计约10亿kW。如果陆上风电年上网电量按等效满负荷2000小时计，每年可提供5000亿kW·h电量，海上风电年上网电量按等效满负荷2500小时计，每年可提供1.8万亿kW·h电量，合计2.3万亿kW·h电量。我国风能资源丰富，开发潜力巨大，必将成为未来能源结构中一个重要的组成部分。

太阳能是一种清洁的、环保的可再生能源。太阳能发电成为目前备受关注的焦点之一。

我国属于太阳能资源丰富的国家之一，全国总面积2/3以上地区年日照时数大于2000小时，年辐射量在 $5000\text{MJ}/\text{m}^2$ 以上。据统计资料分析，我国陆地面积每年接收的太阳辐射总量为 $3.3\times 10^3\sim 8.4\times 10^3\text{MJ}/\text{m}^2$ ，相当于 2.4×10^4 亿吨标准煤的储量。

1.2.2 我国电力系统发展现状

从1882年上海建立了第一个发电厂，到1949年，全国的总装机容量仅有185万kW，年发电量为43亿kW·h。到1998年的全国装机容量达2.7729亿kW，年发电量为11577亿kW·h，分别是1949年的150倍和269倍，当时已跃居世界第二位。

截至2016年底，全国发电装机容量已经达到约16.5亿kW。其中，火电10.5388亿kW、水电3.3211亿kW、风电1.4864亿kW、太阳能发电0.7742亿kW、核电0.3364亿kW。图1.2为2016年我国电力系统装机容量的组成图。

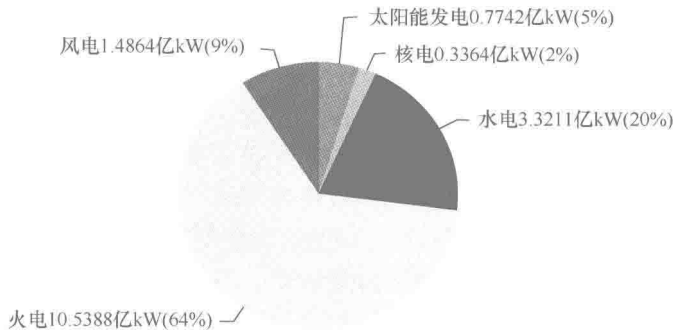


图 1.2 2016 年我国电力系统装机容量的组成

2016年，我国全年发电量59111亿kW·h。其中火力发电量43958亿kW·h，水力发电量10518亿kW·h，核能发电量2127亿kW·h，风力发电量2113亿kW·h。

图1.3为近年来我国电力装机容量图。

截至2016年底，全国电力装机的十大省份分别是：内蒙古1.1044亿kW、山东1.0942亿kW、广东1.0452亿kW、江苏1.0160亿kW、四川0.9108亿kW、云南0.8442亿kW、浙江0.8331亿kW、新疆0.7751亿kW、山西0.7640亿kW、河南0.7218亿kW。

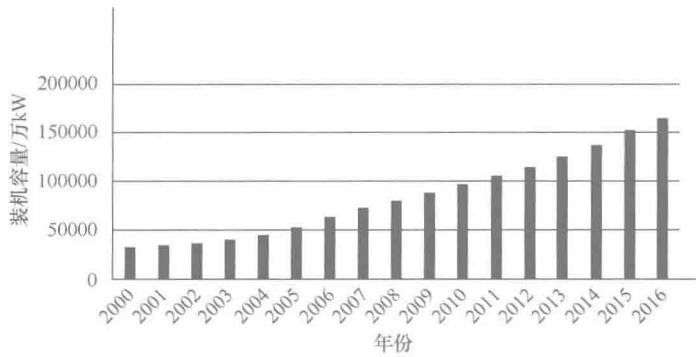


图 1.3 近年来我国电力装机容量

截至 2016 年底，全国火电装机十大省份分别是：山东 9540 万 kW、江苏 8727 万 kW、广东 7742 万 kW、内蒙古 7609 万 kW、河南 6431 万 kW、山西 6329 万 kW、浙江 6062 万 kW、安徽 4915 万 kW、河北 4510 万 kW、新疆 4376 万 kW。

全国核电装机 3364 万 kW，其中广东 938 万 kW、福建 762 万 kW、浙江 657 万 kW、辽宁 448 万 kW、广西 217 万 kW、江苏 212 万 kW、海南 130 万 kW。

全国并网太阳能发电 7742 万 kW，十大太阳能发电大省分别是：新疆 934 万 kW、甘肃 686 万 kW、青海 682 万 kW、内蒙古 638 万 kW、江苏 546 万 kW、宁夏 526 万 kW、山东 455 万 kW、河北 443 万 kW、安徽 345 万 kW、浙江 338 万 kW。

全国并网风电 1.5 亿 kW，全国十大风电省份分别是：内蒙古 2557 万 kW、新疆 1776 万 kW、甘肃 1277 万 kW、河北 1188 万 kW、宁夏 942 万 kW、山东 839 万 kW、山西 771 万 kW、云南 737 万 kW、辽宁 695 万 kW、江苏 561 万 kW。

全国水电装机达到 3.3 亿 kW(含抽水蓄能 2669 万 kW)，全国十大水电省份分别是：四川 7246 万 kW、云南 6096 万 kW、湖北 3663 万 kW、贵州 2089 万 kW、广西 1663 万 kW、湖南 1553 万 kW、广东 1410 万 kW、福建 1304 万 kW、青海 1192 万 kW、浙江 1154 万 kW。

目前，我国电力系统的华北、华中、华东、东北、西北、南方六个区域各级电网网架不断完善，配电网供电能力、供电质量和装备水平显著提升，智能化建设取得突破，农村用电条件得到明显改善，全面解决了无电人口用电问题。

我国电力发展方针是：优化发展火电，鼓励建设能耗低、大容量的高效环保发电机组，推进节能减排，积极发展热电联产，提高能源效率，减少对环境的污染；积极开发水电，促进水电的科学经济利用；加快发展核电，核电是清洁高效能源，污染少、温室气体接近零排放，是优化能源结构的优先选择；大力发展风电和可再生能源；加强电网建设，立足于节约发电资源，以确保安全为基础，实现更大范围的资源优化配置。加快区域和省级输电网架建设，提高电力资源综合利用效率以及区域电网间与省电网间电力电量的交换和相互支持能力，发挥大电网在市场备用、电力电量互补、水火互济等方面的效益，提高电网整体的运行效率。

预计到 2020 年，全社会用电量将达到 6.8 万亿~7.2 万亿 kW·h，全国发电装机容量为 20 亿 kW，人均装机突破 1.4kW，人均用电量 5000kW·h 左右，接近中等发达国家水平，电能占终端能源消费比重达到 27%。