



普通高等教育“十三五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

现代电力系统

朱应敏 王维超 张大兴 编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电气工程、自动化专业规划教材

现代电力系统

朱应敏 王维超 张大兴 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

电力系统是集电厂、输配电网以及用户的一个庞大复杂系统。本书主要介绍了电力系统的基本知识、基本原理和基本方法。全书主要分为五部分 12 章, 其中: 第一部分为概述部分; 第二部分为发电, 主要包括化石能源发电、清洁能源发电和储能技术; 第三部分电力输运, 主要包括现代电网的网架、电力设备; 第四部分电力系统运行管理, 主要包括电力网络相关计算、电力系统的运行方式、电网调度管理、我国电网的运行管理; 第五部分电力交易, 主要包括市场经济学原理、电力市场交易原理、电力市场的运行及主要经济体电力市场架构。

本书文字叙述深入浅出, 内容取材精简易懂。可以作为电气工程及其自动化专业的基础课程教材, 或作为电力经济学类专业的辅导教材, 也可以作为电力工程类背景相关课程的参考资料。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电力系统 / 朱应敏等编. —北京: 电子工业出版社, 2017.1

ISBN 978-7-121-30595-5

I. ①现… II. ①朱… III. ①电力系统—高等学校—教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 297901 号

策划编辑: 陈晓莉

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 12.25 字数: 328 千字

版 次: 2017 年 1 月第 1 版

印 次: 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系及邮购电话: (010)88254888, (010)88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: chenxl@phei.com.cn。

前言

电能是一种最便于传输的能源形式,人们可以采用工业手段将其他能源转化为电能,通过电力网络将电能输运到其他地区,然后方便地转化成其他形式的能源以供应人类社会的生产和日常生活。电能具备的易于生产、输运和管理的特征,使其成为现代社会使用最广泛的能源形式。同时由于电能难以大规模存储,电力的分配和管理成为电力运行管理极其重要的环节。

电力工业可以被称为20世纪最伟大的工业成就之一,它集成了人类在电学、机械学、原子能科学、环境科学、计算机科学、经济学、管理学和法律等众多学科的发展成就,为工业、农业、新兴产业、服务业及人们的日常生活提供无处不在的能源供应,是现代社会的支柱性产业。从全景的角度来看,电力系统涵盖电力的生产、输运、运行管理和交易等多个方面,是一个极为复杂的系统。

传统电能主要来源于化石能源、核能和水力,随着社会对环境保护事业的关注,以风能和太阳能为代表的可再生能源在电力系统的应用日益提上日程。从电能特性上来说,可再生能源的生产有很强的波动性,并且可再生能源的入网,对传统电力系统的运行管理提出了巨大挑战;从经济性上来说,目前可再生能源的生产成本较传统能源昂贵,如何引导电力消费者选择可再生能源成为电力管理的一个重要议题。

本书集成了目前电力工业发展的最新成果,突出了可再生能源对电力生产、运行和管理的影响,从全局的角度对电力系统进行了系统的介绍。全书分为五个部分,其中前四个部分涉及电力系统的物理层面,第五部分涉及电力系统的经济层面。

第一部分:概述。该部分首先介绍了目前国内外的电力系统的发展历史,接着提供了电力系统涉及的基本定义和常识性术语,最后给出了电力系统运行的基本要求。

第二部分:发电。将目前常见的电力生产方式分为化石能源发电和清洁能源发电两类。化石能源发电包括火力发电、天然气及石油发电;清洁能源发电包括水力发电、核电、风电、太阳能发电。该部分阐述了各类型发电的基本原理和主要发电设备,并简单介绍了储能技术。

第三部分:电力输运。电力网是电力输运的物理载体,主要包括输电网和配电网。这一部分首先从电压等级的角度对输电网和配电网进行了划分,详细介绍了输配电网的功能和网架结构;接着讨论了分布式能源对电网的影响;本部分还涉及智能电网和高压电网的工作原理及常见电力设备的介绍。

第四部分:电力系统运行管理。电力系统运行管理的目的在于通过协调电力行业各个部门的生产经营方式,以保证各个环节安全、可靠并且有效地运行,电力系统的运行管理是基于电力网络中电力流的计算完成的。该部分首先给出了电力系统的最主要电力流的计算原理,包括潮流计算和短路电流计算,接着介绍了编制电力系统生产运行总体方案的电力系统运行方式,最后介绍了我国电力调度机构的主要工作方式和任务。

第五部分:电力交易。目前西方发达国家的电力交易是通过电力市场完成的,电力市场的设计基于经济学基本原理。这一部分简要阐述了与电力市场机制相关的经济学知识,在此基础上给出了电力市场化运行的基本原理,该部分还提供了西方主要国家电力市场的建设、新能源处理等方面的主要成果。

本书适用于大学二年级以上电力专业的本科学生,可以使他们对规模庞大的电力系统有一个全局性的理解,同时本书亦适用于涉及电力行业的政府、商业、教育及科研工作人员,本书对帮助他们了解电力系统的基本工作原理和商业运行规则有一定的意义。

本书由西北电力专科学校王维超副教授提议,由西安电子科技大学机电工程学院系统测试与分析研究中心组织编写。其中第一、第二、第五部分由朱应敏副教授组织撰写,第二部分由张大兴副教授组织撰写,第四部分由王维超副教授组织撰写。本书的撰写参考了国内外的研究成果,这些成果是本书主要学术思想的源泉,在此对涉及的专家和研究人员表示衷心的感谢。感谢国家自然科学基金项目(51306134)和西安电子科技大学优秀教材重点资助项目(AJ1405)的资助。在全书的编写过程中,国家电网陕西省电力公司的胡堃高级工程师提供了大量的专业建议,本研究中心的在读研究生黄艳琛、李若云、李非在本书的编写过程中付出了艰苦的努力,在此表示衷心的感谢。

由于编者的学术水平及对电力经济政策的理解程度有限,书中难免存在一定的错误和不当之处,在此恳请读者批评指正。

编者

2016年11月于西安

目 录

第一部分 现代电力系统概述

第1章 绪论	3
1.1 电力系统的结构	3
1.2 电力工业的发展史	3
1.2.1 世界电网发展	3
1.2.2 中国电力工业的发展	4
1.2.3 我国的电力体制改革历程	5
1.3 电力系统的接线图和基本参量	6
1.3.1 电力系统接线图	6
1.3.2 基本参量	7
1.3.3 电压等级	8
1.4 电力系统运行的基本要求	12
第一部分习题	13

第二部分 发 电

第2章 化石能源发电	14
2.1 化石能源发电厂	14
2.1.1 概述	14
2.1.2 设备	16
2.1.3 天然气和石油发电	21
第3章 清洁能源发电	23
3.1 水力发电厂	23
3.1.1 概述	23
3.1.2 水轮机	25
3.2 核能发电厂	28
3.2.1 核电厂发展史	28
3.2.2 核电的优越性	28
3.2.3 核电厂的类型和工作原理	29
3.2.4 压水堆结构和工作原理	30
3.2.5 先进压水堆核电站	33
3.2.6 核安全	34
3.3 风能发电	34
3.3.1 风能发电概述	34
3.3.2 风力发电的工作原理	36
3.3.3 风力发电设备	38
3.3.4 风力发电控制系统的基本要求	41
3.4 太阳能光伏发电	42

3.4.1 概述	42
3.4.2 太阳能光伏发电原理	42
3.4.3 太阳能光伏发电系统	44
3.5 储能技术	45
3.5.1 概述	45
3.5.2 热储能	46
3.5.3 抽水蓄能	47
3.5.4 电化学储能	48
第二部分习题	49

第三部分 电力输运

第4章 现代电网的网架结构	50
4.1 输电网	52
4.2 配电网	55
4.2.1 高压配电网的结线方式	56
4.2.2 中压配电网的结线方式	58
4.2.3 低压配电网的结线方式	61
4.2.4 配电网运行特点及基本要求	62
4.2.5 分布式发电并网的影响	62
4.2.6 智能配电网	64
4.3 特高压输电技术	65
4.3.1 特高压输电技术的发展	65
4.3.2 交流特高压输电的系统特性	65
4.3.3 直流特高压输电的系统特性	67
4.3.4 交流/直流特高压输电的使用场合	69
第5章 电力设备	71
5.1 输变电设备	71
5.1.1 输电线路	71
5.2 配电开关设备	78
5.2.1 互感器	78
5.2.2 重合器	80
5.2.3 GIS 组合电器	82
第三部分习题	86

第四部分 电力系统运行管理

第6章 电力网络相关计算	88
6.1 电力系统各元件数学模型	88
6.1.1 发电机组的数学模型	88
6.1.2 变压器数学模型	89
6.1.3 电力线路数学模型	91
6.2 电力系统潮流	92
6.2.1 简单电力系统潮流计算	93

6.2.2	复杂电力系统潮流的计算机算法	95
6.3	短路电流计算	103
6.3.1	概述	103
6.3.2	短路故障的基本算法	103
6.3.3	复杂故障的工程计算	107
6.4	PSASP潮流计算程序	108
6.4.1	PSASP潮流计算简介	108
6.4.2	PSASP 6.2潮流计算	110
6.5	PSASP短路电流计算程序	113
6.5.1	PSASP短路电流计算简介	113
6.5.2	PSASP7.0短路电流计算	113
第7章	电力系统的运行方式	118
7.1	电力系统运行方式	118
7.1.1	运行方式的基本职能	118
7.1.2	运行方式分类	119
7.1.3	正常运行方式	120
7.2	运行的核心内容	124
7.2.1	电力网络的简化	124
7.2.2	电力网络相关计算	125
7.3	电网运行管理	126
7.3.1	电网损耗管理	126
7.3.2	新设备启动管理	126
7.3.3	保护设备及安全自动装置的整定	126
第8章	电网调度管理	128
8.1	电网调度管理概述	128
8.2	电网调度组织机构	129
8.3	电网调度的主要内容	130
8.3.1	负荷预测	130
8.3.2	倒闸操作	131
8.3.3	监督和执行计划用电	131
8.4	电网经济调度	131
8.5	电网的安全运行	132
8.6	电网事故处理	133
8.7	电能质量监督	134
8.8	电网调度管理自动化	135
8.9	清洁能源电力系统调度	138
8.9.1	新能源电力系统调度的特点	138
8.9.2	新能源电力系统调度模型	139
8.9.3	新能源电力系统优化调度	140
第9章	我国电网的运行管理	141
9.1	国家电网管理体制的发展史	141
9.1.1	计划经济时期“政企合一”的电力管理体制	141
9.1.2	发电市场逐步放开及监管职能萌芽的电力管理体制	143

9.1.3 市场化改革取向下的电力监管体制	146
9.2 国网的“三集五大”管理体系简介	151
9.2.1 “三集五大”内容	151
第四部分习题	153
第五部分 电 力 交 易	
第 10 章 市场经济学原理	155
10.1 市场的供给和需求	155
10.1.1 需求	156
10.1.2 供给	156
10.1.3 市场在资源配置中的作用	157
10.2 生产企业的成本和收益	157
10.3 市场类型	158
10.3.1 自由竞争市场	158
10.3.2 垄断型市场	159
10.3.3 介于自由竞争和垄断之间的市场	160
第 11 章 电力交易	161
11.1 电力市场供求机制	162
11.1.1 电力需求	162
11.1.2 电的供应	164
11.1.3 电力市场的均衡	164
11.2 电力市场的形成	165
11.2.1 电力市场结构	165
11.2.2 交易方式	166
11.3 电力市场价格机制	167
11.3.1 电力市场的节点电价计算方法	167
11.3.2 节点边际电价的计算方法	168
11.3.3 输电阻塞管理	168
11.3.4 输电权	169
11.3.5 电价对电力市场的影响	169
11.4 电力市场的辅助服务	170
第 12 章 电力市场	171
12.1 国外电力市场模式的发展	171
12.1.1 美国电力市场	171
12.1.2 英国电力市场	177
12.2 清洁能源处理	181
12.2.1 碳排放处理	182
12.2.2 配额制	184
第五部分习题	185
参考文献	186

第一部分 现代电力系统概述

人类社会文明离不开能源,与远古时代相比,技术进步和社会发展都与能源的使用量相关。随着时代进步,人类消耗的能源不断增长。有效的能源使用需要将自然界储存的能源转化为能源使用者可以使用的、价格稳定且供应恒定的能源形式。电能可以有效地满足这一要求,因此是现代工业中最重要能源供给形式之一。电力系统是能源生产者和消费者之间最灵活、最方便的载体,具有以下特别属性:

(1) 电力系统能将其他能源形式,如机械能、核能、热能等通过转换装置可以高效且便于控制地转化成电能,电能也可以方便且经济地转化成机械能、热能、光能等其他能源;

(2) 输电线路可以长距离经济地输送电能,目前绝大部分国家都有广泛分布且互相连通的电力系统;

(3) 原则上讲,新型可再生能源可以较为方便地并入电网,从这些间歇性能源获得的能量可以通过电力系统得到经济有效的利用;

(4) 电力作为一种能源载体的主要不足是不能够大量地储存,电力的生产和消费需要实时平衡。

广义的电力系统是发电、输配电和用电设备采用一定结构和运行模式构成的统一整体。电力系统的运行包含电力的生产、电力输运、电力的调度管理、电力交易等环节。

1. 电力生产

发电系统是生产电能的系统,又称发电厂,即将自然界中一次能源(如煤、石油、水等天然能源)转换为电能。根据利用一次能源的不同,可以分为常规发电方式和可再生能源发电方式两类。常规发电方式包括火力发电、水力发电、核能发电等。火力发电使用的一次能源是煤、石油、天然气等,它的主要动力设备是锅炉和汽轮机;水力发电利用的一次能源即江河的水,其主要的动力设备是水工建筑物和水轮机;核能发电使用的一次能源是天然核原料中能产生核裂变的铀同位素——铀 235,以及可产生核聚变的氢同位素——氘(又称重氢),其主要动力设备则是核反应堆和汽轮机。各发电厂的主要电气设备都是发电机、变压器和开关设备等。

常规发电方式一般会带来环保问题,火力发电产生大量二氧化碳排放,进而造成温室效应;水电站的建设需要建造大型水库,会对自然生态环境造成影响;核能发电可能存在安全隐患,其产生的放射性废物的存储也会对环境产生一定压力。在此基础上,很多国家开始鼓励可再生能源的发电,可再生能源发电通常包括风力、太阳能、地热能等。

2. 电力输运

电力输运环节将发电厂生产的电能经过输配电系统输送至用户。输电系统的功能是将发电机产生的电能变压(和变流)、输送至负荷中心。它有变压器、整流/逆变器、输电线路(即变换和输送电能设备)等部分,称输电网络。

配(用)电系统的功能是将送至负荷中心的电能经过配电变压器和配电线路再变压、分配给各电力用户的用电设备(即电力负荷)使其消费电能。其中不含电力负荷的部分称

配电网络。

在电力系统中,通常将输送、交换和分配电能的设备称为电力网,它由变电所和各种不同电压等级的电力线路组成,可分为地方电力网、区域电力网及超高压远距离输电网三种类型。地方电力网的电压输送功率小,输电距离短,多为 110kV 以下,主要供电给地方负荷。一般工矿企业、城市和农村乡镇配电网属于这种类型。区域电力网的电压为 10kV 以上,输送功率大,输电距离长,主要供电给大型区域性变电所。目前我国,区域电力网主要是 20kV 级的电力网。超高压远距离输电网的电压为 330~500kV,它的主要任务是把远处发电厂生产的电能输送到负荷中心,同时还联系若干区域电力网形成跨省(区)的大电力系统,如我国的东北、华北、华中、华东、西北和南方等电力网就属于这种类型。电压为 110kV 的电力网属于地方网还是区域网,要视其在电力系统中的作用而定。

3. 电力系统运行管理

电力系统的主体结构包含发电设施、变电设施、输电、配电线路和电力负荷等。通过电网网络节点互相连接以实现不同地区之间的电能交换和调节。电力系统中网络节点交织密布,有功潮流、无功潮流、高次谐波、负序电流等以光速在全系统范围内传播。它既能输送大量电能,创造巨大财富,也能在瞬间造成重大的灾难性事故。

电力系统的运行常用运行状态来描述,主要分为正常状态和异常状态。正常状态又分为安全状态和警戒状态,异常状态又分为紧急状态和恢复状态。电力系统运行包括了所有这些状态及其相互间的转移。电力系统运行管理的基本要求是保证电能生产与消费过程的正常进行以及事故状态下的紧急处理,从而安全可靠地向用户供应质量合格、价格便宜的电能。

电力调度是为了保证电网安全稳定运行、对外可靠供电、各类电力生产工作有序进行而采用的一种有效的管理手段。电力调度的具体工作内容是依据各类信息采集设备反馈回来的数据信息、或监控人员提供的信息,对电网安全、经济运行状态进行判断,通过电话或自动系统发布操作指令,指挥现场操作人员或自动控制系统进行调整,从而确保电网持续安全稳定运行。

4. 电力交易与电力市场

电力产品是当代人类社会生活的必需品。19 世纪末到 20 世纪,世界各国电力工业都经历了长足的进步,发达国家电力消费量平均每 10 年增加 2 倍。电力是国民经济的基础性产业和重要的公用事业,具有自然垄断特性。从 20 世纪 80 年代开始,传统电力管理模式也受到新自由主义经济思想的挑战,电力放松监管成为一种趋势。西方主要国家开始了电力工业市场化改革,引入竞争机制来提高运营效率。

电力工业市场化改革的核心是建立有效的电力市场模式,将电力作为一种商品在市场中由购电者和售电者进行交易,通过电力市场对电力资源进行优化配置,提高电力工业的运营效率,增加社会福利。电力市场以发电商、配电商、终端用户和系统操作者为主体,通过电网这个市场载体所构成。电力市场可以分为电力批发和零售市场,实行现货交易和金融合约交易。

第 1 章 绪 论

1.1 电力系统的结构

传统的电力系统是由生产电能、变换和输送电能、分配电能、消费电能等一系列环节组成的整体。从功能上可划分为集中发电系统，高压、中低压输电和配电系统以及用户三个部分，其基本结构图如图 1-1 所示。其中送出电的一部分称为送电端，接收电能的一侧称为受电端。

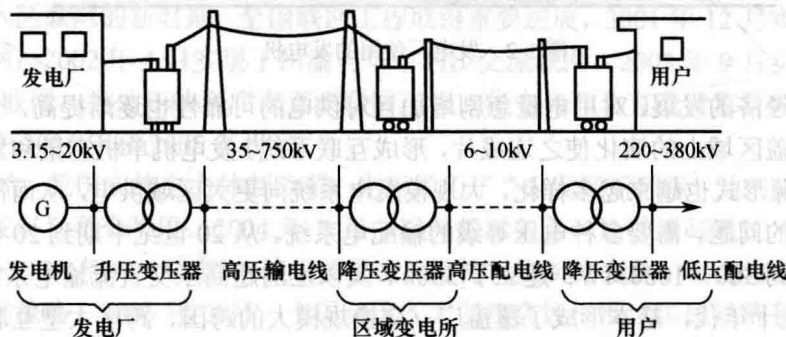


图 1-1 电力系统基本组成

1.2 电力工业的发展史

1.2.1 世界电网发展

电力系统是人类创建的最巨大、最复杂的工程系统之一，它提供的产品是现代社会发展的重要支柱。世界电力工业发展主要经历了 4 个阶段，分别为孤立电网时期、小电网时期、大电网时期与数字电网时期。

电能来源于发电厂，1875 年，法国巴黎建成世界上第一座火力发电厂，标志着电力时代的到来。1882 年，爱迪生在纽约建成世界上第一座商用发电厂（装机容量为 660kW，采用 1.6km 110V 直流电缆输电），标志着电力成为一种商品，如图 1-2 所示。在电力工业发展初期，由于经济等方面限制，对电能需求量不大，发电厂一般选择建在用户附近且规模较小，电力供应覆盖区域也很小，电力系统是小型的孤立系统。1885—1886 年，西屋公司建成了第一个交流输电系统，1895 年又建成了 35km 的尼亚加拉大瀑布电厂（安装有 3 台 3675kW 水机组）至布法罗的输电线路，使电力既用于照明，又用于电力拖动。19 世纪末至 20 世纪中期，电力工业经过数十年的发展，形成了以交流发电和输配电技术为主导的电网，然而直到第二次世界大战结束，电力系统都属于初级阶段。该阶段电网单机容量不超过 200MW，交流输电占主导，输电电压较低，最高为 220kV，电网规模以城市电网、孤立电网和小型电网为主，规模不大。运行技术还处于起步阶段，电网故障并导致停电属常规性事件。

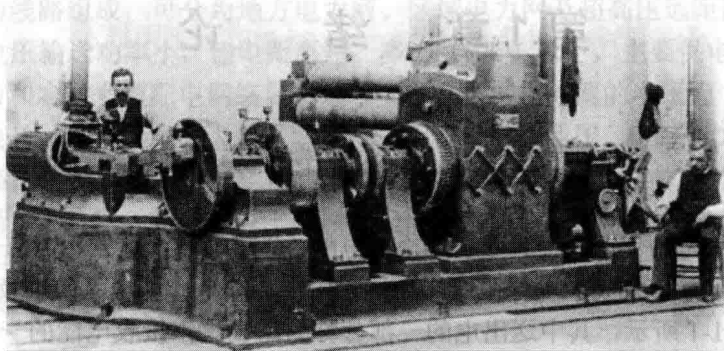


图 1-2 发电厂使用的发电机

随着技术和经济的发展,对用电量急剧增加且对供电的可靠性也逐渐提高,小的孤立电力系统在规模和覆盖区域上的演化使之连成片,形成互联系统。发电机单机容量和发电效率越来越高,使用的能源形式也越来越多样化,大规模发电系统向更大区域供电,从而需要在技术上解决远距离送电的问题,需要多种电压等级的输配电系统。从 20 世纪中期到 20 世纪末,发电机组单机容量达到 300~1000MW;建立了 330kV 及以上的超高压交直流输电系统。欧洲、北美在 20 世纪八九十年代,基本形成了覆盖广、交换规模大的跨国、跨区大型互联电网。随着时间推移,电力系统不断扩张增长,产生了非常高效的发电和输配电系统,电力可以被输送至上千千米之外而损耗很小,优质高效的电力系统使得终端用户可以获得优质、安全和经济的电力供应。

进入 21 世纪以来,各国开始大力发展数字电力。所谓的数字电力是指通过宽带多媒体信息网络、GIS 等基础平台,充分利用国家空间数据基础设施、政府和各行业的宏观经济数据,整合电力信息资源,对行业内部人、财、物三大要素和业务进行管理,对发输供配用电全过程实时控制。数字电力的建设重点有二:一是通信传输网基础设施建设;二是应用系统建设。目前,各国在数字电力上逐渐走向成熟,电力系统的智能化也得到了很大的发展。

1.2.2 中国电力工业的发展

中国有电的历史几乎与国际同步。1879 年,上海公共租界点亮了中国第一盏电灯,随后 1882 年在上海创办了中国第一家公用电业公司——上海电气公司,从此中国翻开了电力工业的第一页。但中国在 1949 年前电力工业发展缓慢,与世界电力工业相比落后很多,至新中国成立时,全国发电装机容量仅有 1850MW,全国只有少数大中城市有电,电网规模很小,电压等级繁多。

1970—1980 年是中国电网的一个特殊发展时期。期间,省级电网的完善和跨省电网交织进行。1970 年后,随着电网的发展,很多地区逐步由孤立的 110kV、220kV 电网互联形成 220kV 或 330kV 的全省乃至跨省电网。至 1980 年,我国严重缺电的局面已持续近 20 年。由于电源的增长落后于电力需求的增长,导致集中资金用于电源建设以解决供需矛盾,从而忽视了输、配电网络的建设,“重发轻供不管用”导致电网的发展落后于电源的发展,严重削弱了电力系统安全稳定运行的基础。1982 年中国的第 1 条 500kV 输电线路投入运行以来,500kV 的线路

已逐步成为各入电网的骨干网架和跨省、跨地区的联络线。至此中国的输电电压等级为 500kV、330kV、220kV、110kV、63kV、35kV（其中 63kV 仅限于东北部分地区，330kV 仅限于西北地区的电网）。至 1989 年，中国形成了 7 个跨省电网：东北电网、华北电网、华东电网、华中电网、西北电网、川渝电网、南方互联电网（含香港电网和澳门电网）。期间，山东电网、福建电网、海南电网、乌鲁木齐电网、拉萨电网、台湾电网等仍为孤立运行的省级电网。

1989 年 9 月，华中、华东电网之间的±500kV 超高压直流输电工程（1.2GW）投入运行，在中国首次实现非同步跨区联网，标志着中国从省际联网向跨区联网迈进了一大步。2003 年随着华中到华东第二条±500kV 直流输电线路（3GW）的投运，使华中—华东的输电能力已达到 4.2GW。

2001 年 5 月，东北华北电网通过一条 500kV 线路实现区间同步交流联网，标志着中国电网进入了跨区联网的新时期，全国联网工程取得重要进展，2001 年 12 月实现了福建与华东同步交流联网；2002 年 4 月实现了川渝与华中同步交流联网。2003 年 9 月实现了华中与华北 500kV 交流联网；另外三峡至广东直流联网工程、华中与西北直流背靠背联网工程现已开工建设，分别在 2004 年和 2005 年投运。

2002 年开始，我国实施电力体制改革，先后经历了“先发展后环保、边污染边治理”、“调整结构、情节发展”两个阶段。2004 年 6 月，国务院常务会讨论并原则通过《能源中长期发展纲要（2004—2020 年）》（草案）。该纲要提出，坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的战略。2006 年 3 月，十届全国人大四次会议批准《国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》。该纲要明确电力工业要坚持提高能源效率、重视生态环境保护、加强电网建设、优化发展火电、有序开发水电、积极推进核电建设、适度发展天然气发电、鼓励新能源发电、带动装备工业技术进步、加强国际合作、深化电力体制改革的基本方针。2011 年年初，《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》明确提出，推动能源生产和利用方式变革，构筑安全稳定经济清洁的现代能源产业体系。这其中，特高压、智能电网建设全面纳入国家发展战略，上升为国家意志。2014 年，国内电力工业持续健康发展，装机总量及发电量进一步增长，非化石能源比重首次超过 25%，火电发电量负增长，设备利用小时创新低。

1.2.3 我国的电力体制改革历程

新中国成立以来，针对不同发展时期，我国电力行业经历了一系列的体制和机制的改革，可以分为以下三个阶段。

第一阶段（1949—2002 年）：由垂直一体化的“一元”办电向多元办电过渡。这一阶段的主导思想是政企分开，省为实体，统一调度，联合上网，集资办电。在这一时期内，我国完成了由“一元”办电向多元办电的过渡，电力市场形成投资主体多元化，电力工业发展迅速，发电装机容量和年发电量均已跃居世界第二位。但是，1949—2002 年的改革探索没有从根本上解决我国当时电力工业发展中遇到的电力供应不足等诸多问题，这就为下一阶段的电力体制改革提供了内部根本动因。

第二阶段（2002—2015 年）：电力市场改革化。2002 年，国务院发布《国务院关于印发电力体制改革方案的通知》（以下简称“5 号文”），标志着电力体制改革的开始。本次改革对国家电力工业实现了横、纵双向分拆，实行“厂网分开”，重组发电企业和电网企业，将国家电力公司重组为两家电网公司和五家发电公司，奠定了中国电力工业的新格局。随后组建国家电监会，按照国务院授权，行使电力监管行政执法职能，并统一履行全国电力市场监管职责，由

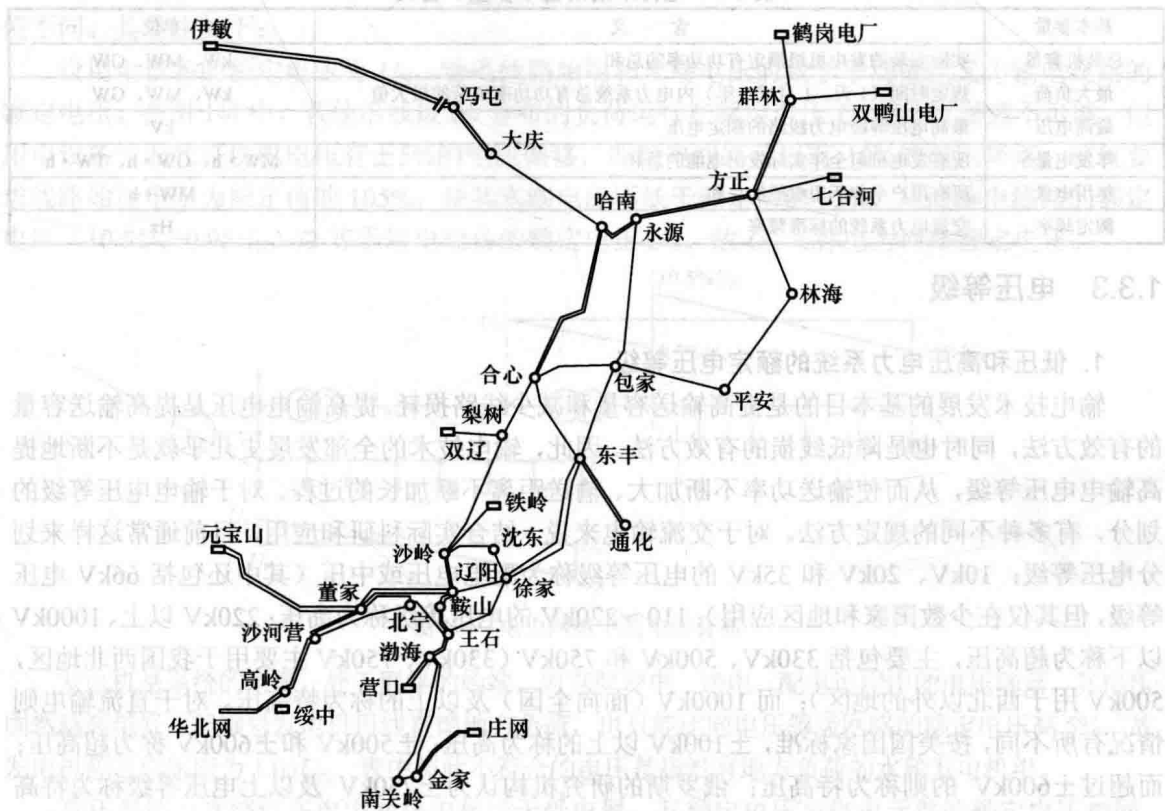
国家发改委负责电力投资审批权和定价权。经过十几年的快速发展,中国电力产业得到较大发展,特别是在发电侧实现了充分竞争,彻底扭转了电力供需紧张的局面。但是,由于市场在电力资源配置中的作用发挥不够,我国电力系统仍然面临一些亟待解决的问题:交易机制缺失、资源利用效率不高、价格关系没有理顺、市场化定价机制尚未完全形成、政府职能转变不到位、各类规划协调机制不完善、发展机制不健全、新能源和可再生能源开发利用面临困难、立法修法工作相对滞后等问题。因此,深化电力体制改革就成为了一项紧迫的任务,事关我国能源安全和经济社会发展全局。

第三阶段(2015年至今):新一轮电改。2015年3月《关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发〔2015〕9号)文》(以下简称“9号文”)的发布开启了我国新一轮的电改。本次电改以市场化方向为指导,提出了“管住中间、放开两头”这一新的体制架构,以建立有效竞争的现代电力市场体系。“管住中间”是指对具有自然垄断属性的输配电网环节加强政府监管、实行政府定价,确保电网公平开放、市场公平交易,有利于更好实现电网科学规划、发挥电网规模效益、提高管理效率。“放开两头”是指在发电侧和售电侧实行市场开放准入,引入竞争,放开用户选择权,形成“多买—多卖”的市场格局,价格由市场形成,发挥市场配置资源的决定性作用。为了认真贯彻落实9号文的精神,在9号文发布的8个半月之后,国家发改委与能源局进一步发布了指导新一轮电力体制改革的六大配套文件,即《关于推进输配电价改革的实施意见》、《关于推进电力市场建设的实施意见》、《关于电力交易机构组建和规范运行的实施意见》、《关于有序放开发用电计划的实施意见》、《关于推进售电侧改革的实施意见》、《关于加强和规范燃煤自备电厂监督管理的指导意见》。同时,为了指导和促进各省稳步开展电力交易,国家能源局之后在六大配套文件的基础上组织发布了《电力市场监管办法(征求意见稿)》、《电力市场运营基本规则(征求意见稿)》、《电力中长期交易基本规则(征求意见稿)》。9号文和六大配套文件及三个实施细节以市场化布局,分别在各个电力市场各个领域和环节对我国新一轮电力体制改革系统地提出了科学合理的新一轮电力市场化改革路径及具体措施,有效保障我国电力工业由计划经济模式向市场经济的逐步过渡,通过公开无歧视放开电网两头引入竞争,极大发挥市场配置资源的作用来还原电力的商品属性,构建电力市场有效竞争的市场结构和体系,从而有效推动我国能源战略发展的体制革命发展。

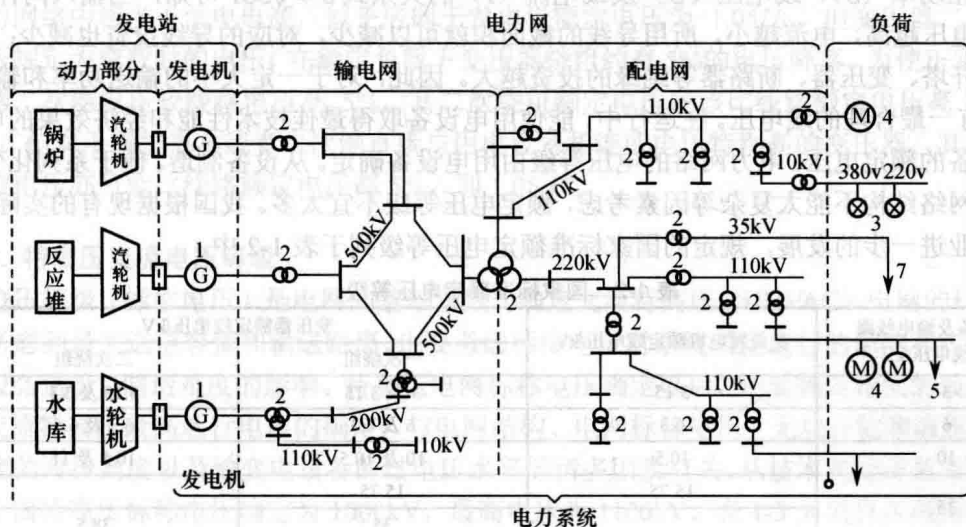
1.3 电力系统的接线图和基本参量

1.3.1 电力系统接线图

电力系统的接线图包括地理接线图和电气接线图,是对电力系统概貌的宏观展现。其中地理接线图表示电力系统中发电厂、变电站的地理位置,电力线路的路径,以及它们之间连接的图形;电气接线图表示发电、输电、配电、用电过程中主要设备电气连接的图形。图1-3(a)所示的是电力系统地理接线图,图1-3(b)所示的是电力系统电气接线图。



(a) 2007 年东北 500kV 电力系统地理接线图



(b) 电力系统和电力网络示意图

图 1-3 电力系统接线图

1.3.2 基本参量

电力系统的基本参量、单位及其含义如表 1-1 所示。

表 1-1 电力系统的基本参量、含义

基本参量	含 义	单 位
总装机容量	实际安装的发电机组额定有功功率的总和	kW、MW、GW
最大负荷	规定时间（1天、1月或1年）内电力系统总有功功率负荷的最大值	kW、MW、GW
最高电压	最高电压等级电力线路的额定电压	kV
年发电量	所有发电机组全年实际发出电能的总和	MW·h、GW·h、TW·h
年用电量	所有用户全年所用电能的总和	MW·h
额定频率	交流电力系统的标准频率	Hz

1.3.3 电压等级

1. 低压和高压电力系统的额定电压等级

输电技术发展的基本目的是提高输送容量和减少线路损耗。提高输电电压是提高输送容量的有效方法，同时也是降低线损的有效方法。因此，输电技术的全部发展史几乎就是不断地提高输电电压等级，从而使输送功率不断加大、输送距离不断加长的过程。对于输电电压等级的划分，有多种不同的规定方法。对于交流输电来说，结合实际科研和应用，目前通常这样来划分电压等级：10kV、20kV 和 35kV 的电压等级称为配电电压或中压（其中还包括 66kV 电压等级，但其仅在少数国家和地区应用）；110~220kV 的电压等级称为高压；220kV 以上、1000kV 以下称为超高压，主要包括 330kV、500kV 和 750kV（330kV、750kV 主要用于我国西北地区，500kV 用于西北以外的地区）；而 1000kV（面向全国）及以上的称为特高压。对于直流输电则情况有所不同，按美国国家标准， $\pm 100\text{kV}$ 以上的称为高压； $\pm 500\text{kV}$ 和 $\pm 600\text{kV}$ 称为超高压；而超过 $\pm 600\text{kV}$ 的则称为特高压；俄罗斯的研究机构认为 $\pm 750\text{kV}$ 及以上电压等级称为特高压；我国一般认为 $\pm 800\text{kV}$ 及以上电压等级称为特高压。

由三相功率（ S ）、线电压（ U ）及线电流（ I ）的关系式 $S = \sqrt{3}UI$ 可知，当输入同样大小功率时，电压越高，电流越小，所用导线的截面积就可以减少，对应的导线投资也减少；但电压越高，杆塔、变压器、断路器等绝缘的投资越大。因此，对于一定大小的输送功率和输送距离，应该有一最合理的线电压。在运行中，能使用电设备取得最佳技术性能和经济效果的电压，称用电设备的额定电压。电力网络的电压等级由用电设备确定。从设备制造、便于系列化生产，以及电力网络结构不能太复杂等因素考虑，额定电压等级不宜太多。我国根据现有的实际情况和电力工业进一步的发展，规定的国家标准额定电压等级列于表 1-2 中。

表 1-2 国家标准额定电压等级

用电设备及输电线路 额定线电压/kV	交流发电机额定线电压/kV	变压器额定线电压/kV	
		一次绕组	二次绕组
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
35	15.75	15.75	
		35	38.5
(60) (即将淘汰)		(60)	(66)
110		110	121
(154) (即将淘汰)		(154)	(169)
220		220	242
330		330	345 及 363
500		500	525 及 550
750		750	787.5 及 825