

ZHINENG DIANWANG JISHU

智能电网技术

刘振亚 / 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

ZHINENG DIANWANG JISHU

智能电网技术

刘振亚/主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

智能电网是当前全球电力工业关注的热点,涉及从发电到用户的整个能源转换过程和电力输送链,成为未来电网的发展方向。本书在借鉴国内外相关领域研究成果的基础上,结合正在开展的研究实践工作,对智能电网的概念、主要领域和关键技术、工程实践进行了较为系统、全面的介绍。

全书共分七章。第一章概要介绍智能电网的基本知识和国内外的研究现状,第二章至第七章分别介绍智能电网基础技术、大规模新能源发电及并网技术、智能输电技术、智能配电网技术、智能用电技术、智能电网实践与展望。附录中对目前智能电网技术标准体系及部分智能电网国际组织与研究机构进行了简要介绍。

本书主要供电力系统管理人员和技术人员使用,也可供政府部门、企事业单位以及高等院校相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能电网技术/刘振亚主编. —北京:中国电力出版社, 2010.4

ISBN 978-7-5123-0262-4

I. ①智… II. ①刘… III. ①智能控制-电力系统
IV. ①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第054611号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010年4月第一版 2010年7月北京第三次印刷

710毫米×980毫米 16开本 24.5印张 420千字

印数4001-9000册 定价72.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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

《智能电网技术》

编 委 会

主 编 刘振亚

副 主 编 郑宝森 陈月明 舒印彪 曹志安
栾 军 李汝革 潘晓军

编委会成员 王 敏 时家林 孙 昕 张丽英
吴玉生 刘广迎 葛正翔 赵庆波
张启平 王相勤 孙吉昌 郭剑波
黄 强 葛国平 王益民 李向荣
张智刚 周永兴 刘建明 张文亮
肖世杰 张运洲 王海啸

编写组组长 王益民

编写组副组长 沈 江 姚国平 于永清 吴维宁
刘建明

编写组成员 胡学浩 王海宁 冯庆东 王明俊
白晓民 戴慧珠 张东霞 于钦刚
章欣 潘毅 徐征 王英涛
刘军 周飞 田世明 李永亮
刘明松 李晓磊 张晶 迟永宁
于之虹 姚建国 赵丙镇 马思宁
李祥珍 葛旭波 靳晓凌 张义斌
谢伟 张健 张爱军 李毅松
林弘宇 刘长义

序

当前，国际国内的经济形势、能源形势正在发生深刻变化，新一轮的世界能源变革已经拉开序幕。欧美发达国家从发展清洁能源、应对气候变化、保障能源安全、促进经济增长的需要出发，相继提出发展智能电网，并将其作为国家战略的重要组成部分，智能化成为目前世界电力发展的新趋势。

我国高度重视智能电网建设，温家宝总理在 2010 年政府工作报告中强调：“大力开发低碳技术，推广高效节能技术，积极发展新能源和可再生能源，加强智能电网建设。”

面对新形势、新挑战，国家电网公司根据我国能源结构以煤为主、能源资源与生产力逆向分布、能源开发加速向西部北部转移和以风电为代表的清洁能源迅猛发展的基本国情，结合世界电网发展的新趋势，提出了加快建设以特高压电网为骨干网架，各级电网协调发展，以信息化、自动化、互动化为特征的坚强智能电网的战略目标。与欧美国家发展智能电网重在配电、用电环节以及电网的技术改造上有所不同的是，国家电网公司提出的坚强智能电网，突出强调了坚强网架与智能化的有机统一，这已经得到国内外的广泛认同。

目前，我国坚强智能电网建设工作正在加快推进，在规划编制、标准制定、理论研究、设备研制、关键技术攻关、试验能力

建设等方面取得了重要阶段性成果，一批具有世界领先水平的示范工程正在加快建设。电网的功能和形态正在发生深刻变革，传统的输电网络正在向综合配置能源、产业、信息等各类资源，带动智能家居、智能交通、智能社区、智能城市发展的智能化电网转变。一场以智能电网为重要标志的新的能源革命正在悄然向我们走来。

为全面介绍国内外智能电网发展历程，系统阐述智能电网概念、研究领域及关键技术，总结我国在智能电网相关领域中的技术成果与实践经验，为今后中国智能电网建设提供有益参考，国家电网公司面对不同的读者对象，分别组织编写了《智能电网技术》和《智能电网知识读本》。

本书的出版，凝聚了我国电力系统众多老领导、老专家和广大工程技术人员的汗水和心血。希望更多关心智能电网的读者和有志于投身智能电网技术领域的专家、学者和工程技术人员，能从本书中吸取有益的知识，共同打造我国智能电网的美好未来！

刘振亚

2010年3月

前 言

进入 21 世纪以来,发展低碳经济、建设生态文明、实现可持续发展,成为人类社会的普遍共识。世界能源发展格局因此发生重大而深刻的变化,新一轮能源革命的序幕已经拉开。

发展清洁能源、保障能源安全、解决环保问题、应对气候变化,是本轮能源革命的核心内容。作为能源供应的重要环节,电网对于清洁能源的发展至关重要,其发展模式也因此面临巨大的挑战和重大的抉择。国内外电力行业和研究机构积极开展了一系列创新性的探索和实践,智能电网的理念逐渐萌发形成,成为全球电力工业应对未来挑战的共同选择。

我国的电力工作者顺应形势变化,把握历史机遇,在加快推进特高压电网建设的同时,高度重视智能电网技术研究和工程实践,培育出一批具有国际先进水平、引领电网发展的科技成果,为建设智能电网奠定了坚实的基础。国家电网公司以求真务实的态度、开拓创新的思维,提出加快建设以特高压电网为骨干网架,各级电网协调发展,以信息化、自动化、互动化为特征的坚强智能电网,得到世界范围的普遍认同和赞赏,中国正在成为世界智能电网理论与实践的引领者。

智能电网建设是一项高度复杂的系统工程,国内外对于智能电网的发展重点和实施路线存在不同的理解,根本原因是各国在经济社会发展水平、能源禀赋特点和电网发展阶段等方面存在较大差异。我国正处于工业化、城镇化加速发展阶段,经济社会持续高速发展,电力需求将长期保持快速增长,预计到 2020 年,我国的用电需求和发电装机容量均将为现有水平的 2 倍以上。我国能源结构以煤为主,煤炭资源主要分布在北部、西部地区,而能源消费需求主要集中在经济较为发达的中东部地区。同时,国际能源问题日趋政治化,使加快发展清洁能源成为我国的重要国家战略。近年来,我国风能、太阳能等清洁能源发展迅猛,预计到 2020 年,我国清洁能源装机容量将达到 5.7 亿 kW,占总装机容量的 35%左右。国

民经济的快速发展、能源供应与消费的逆向分布特征以及清洁能源发电的高速增长,对电网的安全性、灵活适应性以及大规模资源优化配置能力等提出了革命性的挑战。只有加快建设坚强智能电网,才能满足经济高速发展、清洁能源大规模利用的需要。

建设智能电网,关系经济社会发展和国计民生,是开发利用清洁能源、建设科学合理的能源利用体系的迫切要求,是满足经济社会可持续发展要求的重大选择,是时代赋予中国电力工业的历史性重任。中华民族的智慧先贤曾经说过,“士不可以不弘毅,任重而道远”,非弘不能胜其重,非毅无以致其远。建设智能电网,更加需要我们坚定理想、忠诚使命、凝心聚智、开拓创新,实现我国电网从传统电网向高效、经济、清洁、互动的现代电网的升级和跨越,为经济社会又好又快发展提供强大支撑。

随着智能电网建设的逐步开展,迫切需要能够系统阐述智能电网概念、介绍关键技术的专著。为此,国家电网公司组织相关专家和技术人员,编写了《智能电网技术》。希望本书的出版,能够为智能电网建设提供技术指导和借鉴。

本书以智能电网技术为主线,系统阐述了智能电网基础技术、研发及应用领域、实践与展望,力求清晰完整、严谨有序。在编写过程中吸收了国家电网公司在智能电网技术研究和工程实践取得的一批重要成果,对于目前尚未完全成熟的理论和技术,从电网智能化的需要出发,进行了适度的前瞻性描述。

智能电网技术的发展将是一个渐进而漫长的过程,本书仅是对现有研究和实践成果的总结,随着智能电网建设的深入开展,必将会有大量的新技术不断涌现,需要我们密切跟踪和深入研究。

由于编写时间仓促,书中难免有疏漏之处,敬请批评指正。

编者
2010年3月

目 录

序
前言

第一章 智能电网概述 1

- 第一节 电网的发展及面临的挑战..... 1
- 第二节 智能电网的理念和驱动力..... 6
- 第三节 智能电网研究现状..... 8
- 第四节 坚强智能电网..... 11

第二章 智能电网基础技术 17

- 第一节 传感与量测技术..... 17
- 第二节 电力电子技术..... 38
- 第三节 超导技术..... 55
- 第四节 仿真分析及控制决策技术..... 68
- 第五节 信息与通信技术..... 82

第三章 大规模新能源发电及并网技术 101

- 第一节 大规模新能源发电..... 101
- 第二节 大规模储能..... 113
- 第三节 大规模新能源发电集中并网..... 125

第四章 智能输电网技术 142

- 第一节 先进输电技术..... 142
- 第二节 智能变电站..... 168

第三节	智能电网调度技术·····	190
第四节	输电线路状态监测技术·····	220
第五章	智能配电网技术	225
第一节	高级配电运行自动化·····	225
第二节	高级配电管理自动化·····	229
第三节	高级配电自动化支撑技术·····	234
第四节	配电网定制电力技术·····	243
第五节	智能配电网规划·····	249
第六节	分布式发电与微电网技术·····	256
第六章	智能用电技术	279
第一节	概述·····	279
第二节	高级量测体系·····	283
第三节	用电信息采集·····	287
第四节	智能家居与智能楼宇/小区·····	295
第五节	电动汽车充放电技术·····	304
第六节	需求响应·····	310
第七节	双向互动服务门户·····	319
第七章	智能电网实践与展望	326
第一节	特高压交直流示范工程·····	326
第二节	上海世博园智能电网综合示范工程·····	333
第三节	用电信息采集系统工程·····	346
第四节	其他试点工程·····	350
第五节	智能电网应用展望·····	353
附录 A	智能电网技术标准体系·····	360
附录 B	智能电网国际组织与研究机构·····	368
附录 C	专业名词中英文对照表·····	373
参考文献	·····	375



第一章 智能电网概述

电网是电力网的简称，通常是指联系发电与用电，由输电、变电、配电设备及相应的二次系统等组成的统一整体。现代电网是目前世界上结构最复杂、规模最大的人造系统和能量输送网络。

进入 21 世纪以来，随着世界经济的发展，能源需求量持续增长，环境保护问题日益严峻，调整和优化能源结构，应对全球气候变化，实现可持续发展成为人类社会普遍关注的焦点，更成为电力工业实现转型发展的核心驱动力。在此背景下，智能电网成为全球电力工业应对未来挑战的共同选择。

第一节 电网的发展及面临的挑战

发展，是人类文明进步的永恒主题和不竭动力。电网的建设历程，始终是求进步、谋发展的探索过程，始终是依靠科技进步和技术创新迎接挑战、实现超越的实践过程。100 多年来，电力工业从无到有，经历了不同时代的变迁、不同技术发展路线的选择和不同经营管理模式的实践，取得了令人瞩目的巨大成就，成为国民经济的基础产业和重要的公用事业，在经济社会发展中具有举足轻重的地位。

一、电网的发展历程

作为清洁、高效的二次能源，电力的应用遍及人类生产和生活的各个领域，电气化成为社会现代化水平和文明进步的重要标志。

（一）电网发展概述

1831 年，法拉第提出了著名的电磁感应定律。次年，法国物理学家皮克斯研制成功世界上第一台发电机，并在巴黎公开展示。1866 年西门子发明了自励式直流发电机，1876 年贝尔发明了电话，1879 年爱迪生发明了电灯。这三大发明与瓦特发明蒸汽机具有同样的划时代意义，从此开创了电气化的新纪元。

1875年，世界上第一座火电厂在巴黎北火车站建成；1879年，美国旧金山电厂建成并开始出售电力。从19世纪80年代开始，随着具有工业规模的发电厂的建设，电能开始得到大规模利用。1882年，爱迪生建成世界上第一座具有工业意义的发电厂——纽约市珍珠街发电厂，装有6台共900hp^①的直流发电机，并通过110V电缆，为6200盏白炽灯供电，最大送电距离为1.6km。到1913年，全世界的年发电量已达500亿kWh。电力工业作为独立的工业部门，进入人类的生产活动领域。

由于电以光速传输，电能难以大量存储，电力的生产与消费必须同时完成，因此必须在发电厂和用户之间建设输电线路以实现电能的传输。1873年，法国的弗泰内在维也纳国际博览会上，首次进行了远距离电能输送技术的试验。1874年，俄国的皮罗茨基建立了输送功率为4.5kW的直流输电线路，并于1876年将低压直流电沿铁路轨道输送了3.6km。1882年，法国物理学家德普勒完成了有史以来第一次真正意义上的远距离直流输电试验，他通过长度57km的电报线（直径为4.5mm的钢线），以1500~2000V电压，将安装在米斯巴赫煤矿的直流发电机发出的电能，输送到慕尼黑明兴国际博览会，为1台驱动装饰喷泉水泵的电动机供电。19世纪80年代以后，交流输电开始走上历史舞台。1886年，威斯汀豪斯在美国麻省进行了电压为3kV、距离为1.2km的交流输电示范演示；同年，在意大利的塞奇建成电压为2kV、长度为17英里^②的交流输电线路。1888年，俄国的多布罗沃斯基提出三相交流制，效率较高的三相异步电机随之问世，交流输电的优越性逐渐显现。1891年，由劳芬至明兴河畔的世界上第一条三相交流高压输电线路——法兰克福线路在德国投入运行，总长175km，电压为15.2kV。进入20世纪以后，交流输电的优越性更加明显，特别是直流发电机被三相交流发电机取代后，采用直流电源和负荷串联方式的直流输电很快被交流输电所取代。直到20世纪50年代，大功率汞弧阀问世，采用交直流换流方式的直流输电技术才再次得到工程应用。至20世纪六七十年代，电力电子技术和微电子技术迅速发展，并在直流输电工程中得到广泛应用，促使直流输电技术得到较快发展。

人类最早建设发电厂的目的在于照明，电厂安装直流发电机，直接为串联弧光灯供电，供电半径仅为1~2km。从19世纪末到20世纪初的10年里，电动机

① 1hp=735.5W。

② 1英里=1609.3m。

械成为工业生产中机械设备的主要拖动装置，面对不断增长的需求，电力开始集中供应，通过高压输电网，将不同发电厂连成整体，形成地区电网。随着用电量的不断增长和对供电可靠性要求的日益提高，人们一方面研制更大容量的发电设备，建设大型发电厂；另一方面不断提高输电电压等级，扩大电网规模，将初期发展时分散的孤立小电网联成统一或联合的大电网，以增加电力供应能力，提高供电可靠性。从 20 世纪 30 年代开始，随着水电资源的大力开发和高压输电技术的不断进步，各工业发达国家积极开展 110~400kV 线路建设，超高压输电线路开始出现。

20 世纪 50 年代后，电力工业快速发展，电压等级不断提高，电网规模日益扩大，特别是 20 世纪 70 年代以后，百万千瓦乃至千万千瓦等级装机容量的大型水电站、火电厂和核电站的建成，促进了超/特高压输电和互联电力系统的发展，电力工业进入以大机组、大电厂、超/特高压输电、大规模互联电网为特点的新时期。1952 年，世界上第一条 380kV 交流输电线路在瑞典投运；1964 年，第一条 500kV 交流输电线路在苏联投运；1965~1969 年，加拿大、苏联和美国先后建成 735、750kV 和 765kV 线路。随后，一些国家还开展了特高压交流输电技术的研究。1985 年，苏联 1150kV 特高压输电线路投入试验运行；2009 年，世界上第一条商业化运行的 1000kV 特高压交流输电线路在中国投运。

与此同时，直流输电工程建设也得到迅速发展。从 1954 年瑞典果特兰岛高压直流输电工程投入工业化运行以来，至 2008 年底，全世界投入运行的高压直流工程总数已超过 76 个，总容量超过 70 000MW，其中 $\pm 450\sim\pm 600\text{kV}$ 直流输电工程有 20 多个。

纵观电力工业 100 多年的发展历程，不难发现电网发展的客观规律。一是与电源的开发密切相关，电源的建设极大地促进和推动了电网的发展。这是由电网的基本功能定位所决定的，即电网首先是电力传输的物理载体，电力需求决定了电网的发展方式。二是规模经济特征突出，孤立电网逐步发展成为规模较大的互联电网，其核心的驱动力是效率的提高和服务的提升。

（二）中国电网的发展

中国电力工业的发展几乎与欧美同步。1882 年，由英国人成立的上海电气公司在上海建设了中国第一座发电厂，并于当年 7 月 26 日开始供电。

自 1882 年上海外滩点燃 15 盏弧光灯，到装机容量和年发电量居世界第二位，中国的电力工业已经走过 120 多年的发展历程。

在新中国成立前的 60 多年里, 中国的电力工业发展缓慢, 技术装备落后。到 1949 年底, 全国发电装机容量 185 万 kW, 年发电量仅有 43 亿 kWh, 在世界各国中分别排名第 21 位和第 25 位。

新中国成立后, 中国的电力工业发展迅速。截至 2009 年底, 全国装机容量达到 8.7 亿 kW, 其中, 水电、火电、核电、风电装机容量分别达到 19 679 万、65 205 万、908 万、1613 万 kW; 全社会年用电量达到 3.64 万亿 kWh。全国装机容量和年发电量居世界第二位, 水电装机容量居世界第一位。

中国当代电网的建设, 始于新中国成立之后。1954 年, 我国自行设计、施工的 220kV 高压输电线路建成; 1972 年, 我国第一条 330kV 超高压输电线路建成; 1981 年, 我国第一条 500kV 超高压输电线路投运, 成为世界上第八个拥有 500kV 超高压输电线路的国家; 2009 年, 1000kV 特高压交流输电线路投运, 使中国成为当今世界交流输电电压等级最高的国家。

中国直流输电研究和工程建设起步虽晚, 但发展迅速。1987 年, 全部采用中国自主技术的舟山直流输电工程投入运行, 开始了直流输电在我国的应用和发展。2009 年底, 额定容量 5000MW 的 ± 800 kV 云南—广东特高压直流输电工程成功实现单极投产, 额定容量 6400MW 的 ± 800 kV 四川向家坝—上海特高压直流输电示范工程带电调试成功, 中国成为当今世界直流输电电压等级最高的国家。

中国电网的发展, 同样遵循了电网发展的客观规律。大型水电站和煤电基地的建设, 有力地推动了超/特高压交直流输电和大规模联网, 电网规模经历了从地区级电网发展到省级电网, 再通过省间联网形成跨省区域性电网, 并逐渐形成了全国联网。随着未来中国电网的发展, 特别是华北—华东—华中同步电网的形成, 中国电网将成为世界上电压等级最高、技术水平最高和规模最大的交直流混合电网。

二、电网面临的挑战

近年来, 世界政治经济形势和能源发展格局发生了深刻变化, 以电力为中心的新一轮能源革命的序幕已经拉开。人们开始重新审视电网的功能定位, 除电力输送等传统功能之外, 电网更是资源优化配置的载体, 是现代综合运输体系和网络经济的重要组成部分, 电网的发展也因此面临前所未有的机遇与挑战。

(一) 环境和能源

目前, 能源供应主要依赖化石能源。一方面, 化石能源是不可再生能源, 终将由于不断的消耗而逐渐枯竭; 另一方面, 化石能源的大量开发利用, 造成了环

境污染和大量温室气体排放。

世界经济的发展、人口的增加以及城市化进程的加速，导致全球能源需求总量迅猛增加。由能源消耗所产生的环境问题日趋突出，引发了国际社会对能源安全和生态安全的普遍担忧。

提高能源利用效率，发展清洁能源，优化调整能源消费结构，降低对化石能源的依赖程度，已成为世界各国解决能源安全和环保问题、应对全球气候变化的共同选择。而将清洁能源转化为电能，是开发利用清洁能源的最主要途径。

适应清洁能源开发、输送和消纳的发展需求，提高电网的安全可靠性、灵活适应性和资源优化配置能力，已成为当今电网面临的紧迫任务。

（二）安全可靠与经济高效

随着能源结构的优化调整和清洁能源的快速发展，电能在终端能源消费中所占比例日益提高，经济社会发展对电能的依赖程度日益增强。

电网规模日益扩大，一方面有利于提高资源优化配置能力，有利于大规模可再生能源的接入和传输；另一方面，电网运行与控制的复杂程度越来越高，发生大面积停电的风险也日益加大，对实现电能的安全传输和可靠供应提出重大挑战，电网的坚强可靠成为普遍关注的焦点。

促进电力清洁生产，降低电力输送损耗，全面优化电力生产、输送和消费全过程，成为电网发展的必然选择。经济高效的电网必将极大地推动低碳电力、低碳能源乃至低碳经济的发展。

（三）电网开放与优质服务

分布式发电及电动汽车的快速发展和广泛使用，对于利用可再生能源，减少化石能源消耗，以及实现能源梯级利用和提高能效具有十分重要的意义。同时，电力用户的身份定位也悄然转变，从单纯的电力消费者转变为既是电力消费者，又是电力生产者。

市场化改革的深入和用户身份的重新定位，使电力流和信息流由传统的单向流动模式向双向互动模式转变。信息的透明共享，电网的无歧视开放既体现了对价值服务的认同，同时也成为电网无法回避的挑战。

电网的透明开放为电网自身的运营发展提供了巨大的机遇，用户的积极、广泛参与对于电网优化资产效能，提高安全水平，降低运营成本具有重要意义，使电网构建新型商业模式、提供电力增值服务以及拓展战略发展空间成为可能，但同时也对电网友好兼容各类电源和用户接入，提供高效优质服务提出了更高

的要求。

（四）技术创新与高效管理

当前，新一轮世界能源革命的序幕已经拉开，其目标就是实现以智能电网为核心的低碳能源。推动技术创新，实现高效管理，已经成为电网迎接发展与挑战的必然选择。

在科技发展日新月异的今天，将先进技术与传统电力技术有机高效融合，实现技术转型，全面提高资源优化配置能力，保障安全、优质和可靠的电力供应，提供灵活、高效和便捷的优质服务，是新形势下电网面临的新课题。

同时，电网的形态和功能定位正在发生深刻变化，电网发展任务更加繁重，亟须推进体制机制创新，转变发展模式，优化业务布局，提高运营效率，实现管理转型，以适应生产力发展对生产关系变革提出的客观要求。

第二节 智能电网的理念和驱动力

进入 21 世纪以来，国内外电力及相关行业开展了一系列研究与实践，对未来电网的发展模式进行了积极思考与探索。

一、智能电网的理念

智能电网是将先进的传感量测技术、信息通信技术、分析决策技术和自动控制技术与能源电力技术以及电网基础设施高度集成而形成的新型现代化电网。

智能电网的智能化主要体现在：① 可观测——采用先进的传感量测技术，实现对电网的准确感知；② 可控制——可对观测对象进行有效控制；③ 实时分析和决策——实现从数据、信息到智能化决策的提升；④ 自适应和自愈——实现自动优化调整和故障自我恢复。

传统电网是一个刚性系统，电源的接入与退出、电能量的传输等都缺乏弹性，使电网动态柔性及重组性较差；垂直的多级控制机制反应迟缓，无法构建实时、可配置和可重组的系统，自愈及自恢复能力完全依赖于物理冗余；对用户的服务简单，信息单向；系统内部存在多个信息孤岛，缺乏信息共享，相互割裂和孤立的各类自动化系统不能构成实时的有机统一整体。整个电网的智能化程度较低。

与传统电网相比，智能电网将进一步优化各级电网控制，构建结构扁平化、功能模块化、系统组态化的柔性体系架构，通过集中与分散相结合的模式，灵活