



智能电网 与能源网融合技术

李立涅 郭剑波 饶宏 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

作者简介



李立涅，中国工程院院士，华南理工大学电力学院名誉院长、教授、博士生导师。我国著名电网技术专家、直流输电专家，参加和组织建设了我国第一条330kV交流输电工程、第一条500kV交流输电工程、第一条 ± 500 kV直流输电工程、我国第一条也是世界上第一条 ± 800 kV直流输电工程，为推动我国电网技术发展，尤其是直流输电技术从中国创造到中国引领做出重要贡献。获得国家科技进步奖特等奖1项（2017年，第一完成人）、一等奖1项、二等奖1项、省部级科技进步奖30余项；获得第十一届光华工程科技奖（2016年）、第五届全国优秀科技工作者（2012年）；发表学术论文180余篇，合作出版专著1部，授权专利30余项。

智能电网与能源网融合技术

主编 李立涅 郭剑波 饶 宏



机 械 工 业 出 版 社

面向我国能源技术革命的需求,结合国家战略发展的方向,智能电网拓宽其互联范围,与其他能源网深度融合已成为趋势,智能电网与能源网融合的技术发展方向和技术体系战略研究已成为能源行业研究的重点和热点。本书契合该背景展开研究,分为8章,内容包括智能电网与能源网发展现状与趋势,智能电网与能源网的融合模式,新材料新装备和信息通信的支撑技术,广域互联能源网、区域与用户级智能能源网和“互联网+”智能能源网3种典型的智能电网与能源网的融合场景分析,我国智能电网和能源网融合的技术发展路线。

本书可作为能源系统、电力系统、自动化技术、能源技术、能源政策以及能源金融等行业相关研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

智能电网与能源网融合技术/李立涅,郭剑波,饶宏主编. —北京:机械工业出版社,2018.4

ISBN 978-7-111-59489-5

I. ①智… II. ①李… ②郭… ③饶… III. ①智能控制-电网-数据融合 ②智能控制-能源-网络系统-数据融合 IV. ①TM76 ②TK01

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第056925号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:汤枫 责任编辑:汤枫

责任校对:张艳霞 责任印制:李飞

北京铭城印刷有限公司印刷

2018年4月第1版·第1次印刷

169mm×239mm·13.5印张·315千字

0001-2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-59489-5

定价:59.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:(010)88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:(010)88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

本书编委会

主任：李立涅 郭剑波 饶 宏

委员：蔡泽祥 张勇军 韩永霞 许爱东 蒋屹新

李 鹏 曾 嵘 张 波 庄池杰 王成山

王 丹 贾宏杰 肖立业 齐智平 刘超群

赵 强 宋燕敏 陈泽兴 刘 平

前 言

目前我国是世界上最大的能源消费国，传统的能源生产和消费模式已难以适应当前形势。在经济增速换挡、资源环境管理趋紧的形势下，推动能源革命势在必行、刻不容缓。2014年6月，习近平总书记在中央财经领导小组会议提出我国能源安全发展的“四个革命”和“一个合作”战略思想，包括能源消费、供给、技术和体制四个革命和国际能源合作，明确了能源革命的发展方向，深化了能源革命的内涵，同时希望借助能源革命大力推动新能源和可再生能源的发展，逐步建成多元化、低碳化、无碳化的智能、安全、清洁、高效的新能源系统，保障经济社会发展需求的能源供给。在能源革命的大背景下，国家正加紧推进能源改革，积极部署能源各个领域、各个产业的结构调整。《电力发展“十三五”规划》明确强调，电力规划的基本原则之一是智能高效、创新发展，通过加强系统集成优化、改进调度运行方式、提高电力系统效率、大力推进科技装备创新、探索管理运营新模式等方式，促进能源系统的转型升级。

此外，迅速发展的互联网行业正以巨大的力量逐步颠覆多个传统产业的生产和经营方式，能源行业的互联网化为能源革命带来了新的机遇和挑战。2016年2月，国家发改委发布《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》，明确了“互联网+”智慧能源的发展核心是能源互联网的建设，指出了“互联网+”智慧能源发展的指导思想：以改革创新为核心，以“互联网+”为手段，以智能化为基础，围绕构建绿色低碳、安全高效的现代能源体系，促进能源和信息深度融合，推动能源互联网新技术、新模式和新业态发展，推动能源领域供给侧结构性改革，支撑和推进能源革命。2016年4月，国家发改委、国家能源局发布《能源技术创新行动计划（2016~2030年）》，将能源互联网技术创新列为一项重点任务，并明确提出能源互联网架构设计、能源与信息深度融合、能源互联网衍生应用等3项具体创新行动。

在此大背景下，本书对智能电网与能源网融合的必要性和技术特性和技术发展方向体系等一系列问题展开研究。在探究智能电网与能源网的融合模式方面，编者认为，可以从电力行业、其他能源行业和互联网行业等不同视角，看

待形成智能电网 2.0、互联能源网和“互联网+”能源网 3 种融合模式。不同的融合模式，代表不同行业市场竞争的结果，是在国家政策、行业需求、关键技术以及地域限制等因素的综合影响下形成的。智能电网与能源网的融合，可以促进能源供给侧优化能源结构、提升可再生能源比例，消费侧实现多能互补、提高能源综合利用效率以及市场侧还原能源商品属性。

新材料新装备和信息通信技术是智能电网与能源网融合的物理基础和关键技术。一方面，新材料新装备的研发，为打造更加安全可靠、高效经济、绿色环保的智能电网及其与能源网的融合提供了坚实的保障；另一方面，以移动互联网、物联网、云计算和大数据为代表的信息通信技术的发展，极大地促进了能源系统的智能化和自动化，加速了智能电网与能源网的融合。在智能电网与能源网融合的趋势下，结合不同地域环境优势，开展合适的智能电网与能源网的融合模式建设，形成广域互联能源网、区域与用户级智能能源网和“互联网+”智慧能源的典型应用场景。本书分析了这些典型应用场景的现状、发展趋势、形态特征、技术需求和技术发展方向。最终结合我国能源系统的发展现状，基于对技术需求和技术发展方向的论述，提出我国 2020 年、2030 年以及 2050 年智能电网与能源网融合的形态演变及关键发展技术。

本书第 1 章、第 2 章和第 8 章由华南理工大学蔡泽祥、张勇军、韩永霞、陈泽兴和刘平执笔，第 3 章由中国科学院电工研究所肖立业和齐智平执笔，第 4 章由南方电网科学研究院许爱东、蒋屹新和李鹏执笔，第 5 章由中国电力科学研究院刘超群、赵强和宋燕敏执笔，第 6 章由天津大学王成山、王丹和贾宏杰执笔，第 7 章由清华大学曾嵘、张波和庄池杰执笔。全书由李立涅、郭剑波和饶宏统筹和校对。

本书得到了中国工程院重大咨询项目（2015-ZD-09-09）的大力支持，在此深表谢意。由于编写时间及编者水平所限，书中疏漏及谬误之处在所难免，还望读者不吝赐教。

编 者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 能源转型面临的挑战	1
1.1.1 能源结构亟待转型	1
1.1.2 新能源消纳面临瓶颈	3
1.1.3 能源利用效率亟待提升	4
1.1.4 能源系统独立运行的局限性问题	5
1.2 能源技术取得的突破	7
1.2.1 新能源成本的快速降低	7
1.2.2 能源领域新材料取得的新突破	9
1.2.3 互联网技术在能源领域的应用优势	10
1.3 智能电网与能源网融合的优越性	11
1.3.1 推动能源供给革命，提高新能源消纳能力	11
1.3.2 推动能源消费革命，提高能源综合利用效率	12
1.3.3 推动能源体制革命，提供市场化所需技术支撑	13
1.4 本章小结	13
参考文献	14
第 2 章 智能电网与能源网的融合模式	15
2.1 国内外发展现状	15
2.2 融合模式的三种形态	19
2.2.1 视角 A：智能电网 2.0	20
2.2.2 视角 B：互联能源网	22
2.2.3 视角 C：“互联网+”能源网	25
2.2.4 融合模式的异同	27
2.3 融合模式的支撑技术	28

2.3.1 材料装备技术	29
2.3.2 信息通信技术	32
2.4 融合模式的典型场景	32
2.4.1 广域互联能源网	33
2.4.2 区域与用户级智能能源网	33
2.4.3 “互联网+”智慧能源	34
2.5 本章小结	34
参考文献	35
第3章 新材料新装备支撑技术	38
3.1 提升电能传输效率的新型材料与装备	38
3.1.1 超导材料与装备	38
3.1.2 新型导电材料	43
3.1.3 特高压设备绝缘防护	47
3.2 促进可再生能源消纳的新型储能材料与装备	48
3.2.1 储能技术的基本类型	48
3.2.2 储能材料与装置的技术发展方向	48
3.3 未来先进电工装备的新型电工磁性材料	51
3.3.1 电工磁性材料的基本类型	51
3.3.2 电工磁性材料的技术发展方向	55
3.4 未来电力电子化能源系统的新型半导体材料和器件	57
3.4.1 宽禁带半导体材料的基本类型	57
3.4.2 宽禁带半导体材料与器件的技术发展方向	65
3.5 推进能源系统发展的智能（功能）材料	67
3.5.1 非线性绝缘材料	68
3.5.2 自愈合绝缘材料	69
3.6 本章小结	71
参考文献	71
第4章 信息通信支撑技术	74
4.1 促进透明电网的信息感知技术	74
4.1.1 芯片级传感技术	74
4.1.2 芯片化保护控制技术	76

4.1.3	光纤传感网络技术	78
4.1.4	泛在网络技术	78
4.1.5	感知信息技术的发展方向	81
4.2	适应分布式处理的信息处理技术	83
4.2.1	云计算技术	83
4.2.2	大数据应用技术	86
4.2.3	高性能计算技术	89
4.2.4	信息处理技术的发展方向	90
4.3	面向智能决策的信息交互技术	91
4.3.1	人工智能技术	91
4.3.2	虚拟现实技术 (VR)	93
4.3.3	物联网技术	96
4.3.4	移动互联网技术	100
4.3.5	信息交互技术的发展方向	102
4.4	保障能源系统可靠性的信息安全技术	103
4.4.1	云计算信息安全技术	103
4.4.2	物联网信息安全技术	104
4.4.3	能源工业控制系统安全技术	106
4.4.4	信息安全技术的发展方向	109
4.5	本章小结	110
	参考文献	110
第5章	广域互联能源网	113
5.1	电力发展趋势	113
5.1.1	电力需求预测	113
5.1.2	电力供应预测	115
5.1.3	可再生能源发电预测	117
5.1.4	电力流和输电需求预测	118
5.2	广域互联能源网的形态特征	120
5.3	广域互联能源网的技术需求	121
5.3.1	远距离输电能力提升的技术需求	122
5.3.2	大电网安全稳定运行的技术需求	122

5.3.3 大规模可再生能源集中消纳的技术需求	123
5.4 远距离输电能力提升的技术发展方向	124
5.4.1 特高压交流输电技术	124
5.4.2 特高压直流输电技术	126
5.5 大电网安全稳定运行的技术发展方向	127
5.5.1 基于运行轨迹的电力系统稳定分析与控制	127
5.5.2 新一代特高压交直流仿真平台	129
5.5.3 交直流大电网系统保护技术	133
5.5.4 气象及能源大数据综合利用	136
5.6 大规模可再生能源集中消纳的技术发展方向	138
5.6.1 柔性直流输电技术	138
5.6.2 大容量储能技术	139
5.6.3 适应大规模可再生能源接入的大电网调度技术	140
5.7 本章小结	146
参考文献	146
第6章 区域与用户级智能能源网	147
6.1 现状及发展趋势	147
6.2 智能能源网的形态特征	148
6.3 区域与用户级智能能源网的技术需求	151
6.3.1 多能流耦合的关键支撑技术与设备	151
6.3.2 多能流耦合的规划设计技术	157
6.3.3 高比例可再生能源就地消纳的技术需求	159
6.3.4 终端能源利用效率提升的技术需求	159
6.4 多能流耦合的技术发展方向	160
6.4.1 电-气耦合技术	160
6.4.2 电-热耦合技术	161
6.4.3 电-氢耦合技术	163
6.4.4 互联信息保障技术	164
6.5 多能流耦合规划设计技术的发展方向	164
6.6 高比例可再生能源就地消纳的技术发展方向	165
6.6.1 可再生能源发电功率预测技术	165

6.6.2 主动配电网(能量管理)技术	166
6.6.3 直流配电网与直流微网技术	168
6.6.4 分布式储能技术	169
6.7 终端能源利用效率提升的技术发展方向	170
6.7.1 需求侧综合管理技术	170
6.7.2 智能能源网运行优化技术	171
6.8 本章小结	172
参考文献	173
第7章 “互联网+”智慧能源	175
7.1 现状及发展趋势	175
7.2 “互联网+”智慧能源的形态特征	177
7.3 “互联网+”智慧能源的技术需求	178
7.3.1 能源生产智慧化的技术需求	178
7.3.2 能源网络智慧化的技术需求	179
7.3.3 能源消费智慧化的技术需求	179
7.4 能源生产智慧化的技术发展方向	180
7.4.1 基于互联网的能源生产信息公共服务网络	180
7.4.2 基于大数据的生产调度智能化	180
7.4.3 支持可再生能源消纳和分布式能源接入能源网络	181
7.4.4 多能流生产协同的分析控制技术	181
7.4.5 虚拟发电厂技术	181
7.5 能源网络智慧化的技术发展方向	181
7.5.1 透明电网/能源网	181
7.5.2 泛在信息能源网	183
7.5.3 基于互联网的能量管理技术	184
7.6 能源消费智慧化的技术发展方向	186
7.6.1 基于互联网的能源交易	186
7.6.2 基于互联网的用能设施的推广	188
7.6.3 基于互联网的能源领域商业新模式	190
7.7 本章小结	193
参考文献	193

第 8 章 我国智能电网与能源网融合的技术路线	194
8.1 我国能源体系分析	194
8.2 能源利用体系的演变	195
8.3 智能电网、能源网融合定位及形态的演变	197
8.4 智能电网与能源网融合的关键技术	198
8.5 智能电网与能源网融合的形态演变及技术路线	199
8.6 本章小结	199
参考文献	202

第1章 绪 论

由常规能源大量使用带来的气候变化和环境恶化等严峻问题，迫使我国在能源生产和消费方面向多元化、清洁化、高效化和市场化方向发展，能源结构转型面临前所未有的巨大压力，但也为解决我国能源分布失衡、能源使用效率低下，实现能源商品化带来历史机遇。

电网和能源网是能源传输和消纳的重要载体。我国智能电网和以天然气、冷热网为主的能源网已具备规模，但二者相互独立运行，且在新能源消纳、能量存储、调峰能力和能源利用效率等方面存在局限性。新技术和新材料带来的发展机遇是打通多元能源网的转换渠道，使智能电网和能源网的深度融合、优势互补以及资源的优化配置成为可能，最终实现能源利用模式变革，推动经济与社会可持续发展。

本章具体介绍我国能源开发与利用所面临的挑战和机遇，以能源供给革命、能源消费革命、能源体制改革支撑作用为着眼点，分析和探讨基于智能电网与能源网融合实现能源技术革命的必要性的重要性。

1.1 能源转型面临的挑战

1.1.1 能源结构亟待转型

目前人类社会仍以煤炭、石油、天然气三大化石能源作为主要能源供应来源。据《BP 世界能源统计年鉴》2017 版^①数据显示，2016 年，三大化石能源在全球能源消费中占比 85.5%，在我国占了 87%，能源消费结构如图 1-1 所示，可见目前三大化石能源在能源消费中仍占优势地位。随着人类对化石燃料的不断开采，化石能源将不可避免地面临枯竭。同时，伴随化石能源使用所带来的

① https://www.bp.com/zh_cn/china/reports-and-publications/_bp_2017-_.html

碳排放及其他污染问题已对自然环境造成巨大压力并严重威胁着全球生态。

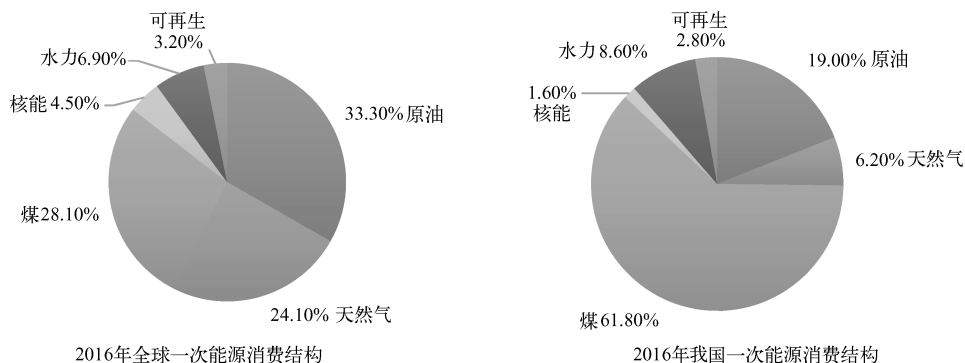


图 1-1 2016 年全球/我国一次能源消费结构

近年来，世界各国对能源资源与环境问题关注密切，不断扩大各类燃料运用范围和推广新的实用性技术。美国的页岩革命开启了石油和天然气资源大规模开发的局面，可再生能源开发利用的技术进步也支撑了以风能与太阳能为代表的可再生能源迅猛发展。据《BP 世界能源统计年鉴》2017 版显示，由于全球经济持续低迷，2015 年全球一次能源消费仅增长 1.0%，增速明显缓慢。但是从整体的能源结构来看，全球能源结构正在从以煤炭为主转向以更低碳能源为主。其中，可再生能源是所有能源中增长最快的部分，增幅达 12%。相比之下，煤炭这种含碳量最高的化石燃料的使用量连续两年出现急剧下滑，跌幅达 1.7%，主要原因是中美两国需求的减少。

另一方面，能源需求增长缓慢和燃料结构的转变，对碳排放影响重大。2016 年来自能源消费的二氧化碳排放仅增长了 0.1%，2016 年因此成为碳排放保持稳定甚至下滑趋势的连续第三个年头。

从能源市场来看，我国的经济增长正在放缓且正经历结构转型，但是，我国仍保持其作为世界上最大能源消费国、生产国和净进口国的角色。据《BP 世界能源统计年鉴》2017 版显示，2016 年我国能源消费增长 1.3%，增速不足过去 10 年平均水平 5.3% 的四分之一。但是，我国占全球能源消费量的 23%，仍居首位。在化石能源中，消费增长最快的是天然气（7.7%），其次是石油（2.7%）和煤炭（-1.6%），三种化石能源的增长率均低于其各自近 10 年的平均水平。在非化石能源中，太阳能消费增长最快（71.5%），其次是风能（29.4%）和核能（24.5%），水电在过去一年中增长了 4.0%，为 2011 年以来

增长最慢的一年。

由此可见,我国的能源结构正在持续改进,尽管煤炭仍是我国能源消费的主导燃料(占比 61.8%),但已是历史最低值,并且我国已超越美国,成为世界上最大的可再生能源消费国。在减排方面,2016 年我国二氧化碳排放降低了 0.7%,远低于 4.2%的近 10 年平均增速水平。

2016 年,全球能源在结构转型上朝正确的方向迈进了一步,但要实现能源结构完全低碳化发展,面临的挑战仍然很大。我国提出能源结构优化和能源清洁化两大目标,即到 2030 年,非化石能源在一次能源消费中的比重提高到 20% 左右,二氧化碳排放达到峰值且努力达到顶峰,要实现这些目标,我国的能源系统仍需进一步转型升级。

1.1.2 新能源消纳面临瓶颈

新能源包括太阳能、生物质能、风能、地热能、波浪能、洋流能、潮汐能以及海洋表面与深层之间的热循环等。新能源理论储量都十分可观^①,但其资源普遍存在分散、间歇、能量密度低等问题。当前,风电和光伏发电已具商业开发竞争力,其他新能源的利用技术尚不成熟,商业应用尚待时日。

近年来,随着各个国家相应政策的支持以及关键技术的逐渐成熟,世界新能源发展速度加快。据《BP 世界能源统计年鉴》2017 版显示,2016 年世界可再生能源继续保持最快的增长速度,增长了 12%,虽然低于 15.7%的可再生能源 10 年平均增长水平,但这仍是有史以来最大的年增加量(增加了 5500 万 t 油当量,超出煤炭消耗量的减少量)。我国可再生能源消费全年增长 33.4%,仅仅 10 年间,我国可再生能源消费在全球总量中的份额便从 2%提升到了 2016 年的 20.5%。

与此同时,由于我国在新能源建设过程中主要关注资源而忽视市场,风电、光伏等新能源行业普遍遭遇并网难问题,造成规模过剩,导致发电难以送出,弃风、弃光问题突出。为解决我国新能源并网问题,2017 年,国家发改委、国家能源局印发《解决弃水弃风弃光问题实施方案》,制定了可再生能源消纳的全方位解决方案,使问题得到了一定程度的改善。根据我国能源局公布的统计数据^②显示,2017 年,全国弃风电量 419 亿 kW·h,弃风率 12%,同比下降 5.2 个

① <http://www.chinapower.com.cn/informationzxbg/20161213/71455.html>

② http://www.nea.gov.cn/2018-01/24/c_136921015.htm