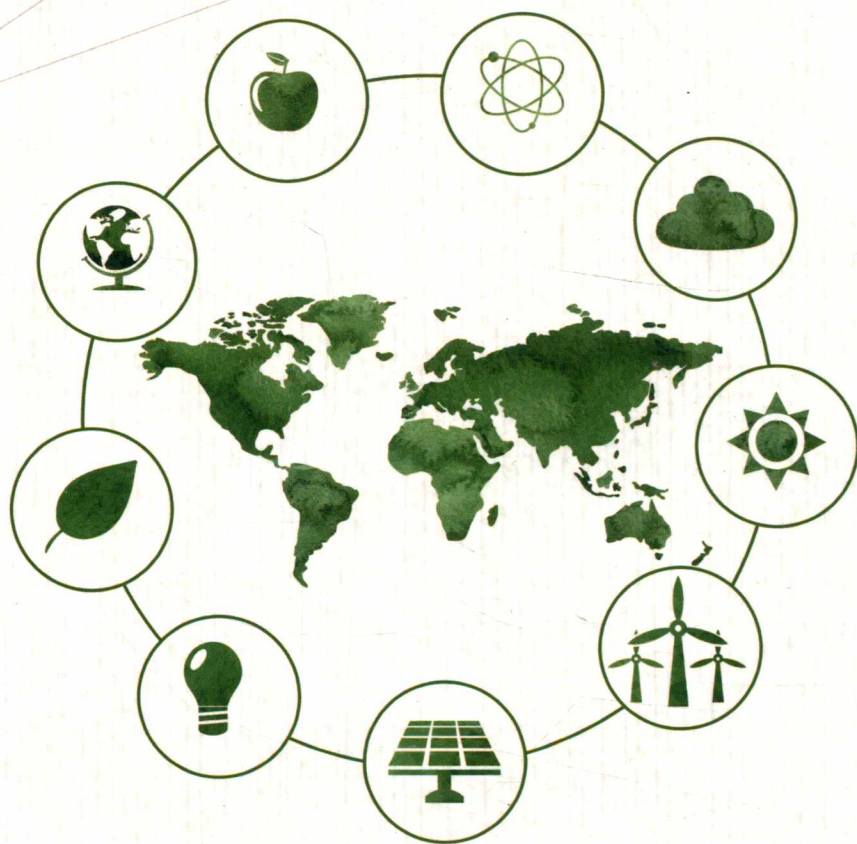


区域能源互联网 探索与实践

肖世杰 主 编

陈安伟 商全鸿 王凯军 李继红 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

区域能源互联网 探索与实践

肖世杰 主 编

陈安伟 商全鸿 王凯军 李继红 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

区域能源互联网探索与实践 / 肖世杰主编. —北京: 中国电力出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-5198-0687-3

I. ①区… II. ①肖… III. ①互联网络-应用-能源发展-研究-中国 IV. ①F426.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 083722 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 杨敏群 (010-63412531) 柳 璐

责任校对: 常燕昆

装帧设计: 左 铭 张俊霞

责任印制: 单 玲

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

版 次: 2017 年 11 月第一版

印 次: 2017 年 11 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 25.5

字 数: 349 千字

定 价: 105.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

编 委 会

主 编	肖世杰			
副主编	陈安伟	商全鸿	王凯军	李继红
委 员	陈锡祥	郑伟民	应 鸿	秦俊宁
	周 华	郭 峰	毛颖兔	张 弓
	周志芳	周自强	蔡 信	王 焱

编 写 组

组 长	郑伟民	孙 可		
副组长	沈 梁	张利军	马宇辉	
成 员	徐晨博	范娟娟	刘 强	孔晓昀
	邵炜平	叶 琳	张 静	段 光
	李晓春	王 苗	俞 静	杨 力
	陶轶群	黄锦华	傅旭华	王 蕾
	张西竹	叶承晋	孙轶恺	龙厚印
	姚 峰	冯 炯	涂克亮	袁 翔
	李 圆			

前 言

能源是经济社会的“血液”，是现代化的基石和动力，以煤等化石为主的能源结构和粗放的能源发展方式仍将维持一段时间，由此给人类的生存环境带来三大严峻挑战：一是资源紧张；二是环境污染；三是气候变化。中国目前已成为世界第一大能源生产国和消费国，仅煤炭消费量就占全球的 50%，同时，作为一个负责任的发展中国家，中国对能源环境问题高度重视，提出构建能源互联网，对于统筹能源资源开发、配置和利用，保障能源安全、高效、清洁供应，促进社会经济可持续发展具有重要意义。

近年来，我国对引领经济发展新常态做出重要部署，大力实施创新驱动发展战略，推进“互联网+”行动计划，促进能源结构调整。国家“十三五”规划提出创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念以及进一步深化电力体制改革，这都为能源互联网的发展提供了有利的外部环境。

2015 年 9 月习近平总书记在联合国发展峰会上倡导探讨构建全球能源互联网，推动以清洁和绿色方式满足全球电力需求。这是对传统能源发展观的历史超越和重大创新，开启了世界能源发展的新格局。全球能源互联网集能源传

输、资源配置、信息交互、智能服务、市场交易于一体，是未来能源网的基本形态。加快构建全球能源互联网，既是推动全球电网互联、实现世界能源互联互通的必然要求，也是推动能源、信息、交通融合发展的内在需要。这一年里，围绕构建全球能源互联网，从战略构想的提出到获得国际共识，从描绘蓝图愿景到逐步落地实施，国家电网公司等积极推进能源互联网建设。时任国家电网公司董事长的刘振亚在其著作《全球能源互联网》中，对全球能源互联网相关的能源、经济、环境、技术等方面进行了系统性研究和论述。2015年12月，由国家电网公司投资的“全球能源互联网集团有限公司”成立；2016年3月，全球能源互联网发展合作组织在北京成立；2016年9月，G20杭州峰会上，全球能源互联网作为推动基础设施互联互通的重要内容，纳入二十国集团工商峰会会议报告，全球能源互联网进入全面发展的新阶段。在能源互联网的探索与实践过程中，应充分结合区域性经济因素、地理因素、区域能源需求和供给环境等多种条件，统筹规划能源互联网战略布局。建设能源互联网是一个逐步推进的过程，不可能一蹴而就。本书创新性地提出区域能源互联网概念，探讨因地制宜地建设区域能源互联网，充分发挥地方区域的能动性，以点带面，逐步推进区域间互联互通，最终实现能源资源的广泛互联和深度融合。

浙江省能源资源禀赋、能源供需情况的主要特征为：其一，浙江省是我国沿海经济大省，能源需求旺盛，同时浙江省又是“无油、缺煤、少电”的资源小省，能源储量匮乏，

能源瓶颈制约与经济社会发展的矛盾日益突出；其二，浙江省的能源消费结构中，煤炭、石油、天然气等化石能源占绝大部分，其中碳排放及污染最为严重的煤炭消费占到全部能源消费的七成，能源消费结构的优化迫在眉睫；其三，浙江省积极开发水能、太阳能、核能、风能、海洋能、生物质能等，是我国清洁能源利用品种最为丰富的省份之一；其四，浙江智能电网稳步推进，电能替代快速发展，信通技术创新应用，在能源互联网领域积累了大量的经验；其五，作为特高压电网的典型受端，浙江省在全国率先迈入交直流混联的特高压时代，投运特高压工程 4 条，建设运营水平走在全国前列。因此，浙江省作为发展区域能源互联网的样本具有典型的代表意义。

本书以中国能源发展现状及面临的挑战为背景，以浙江省为例，分析得出发展区域能源互联网是破解能源问题的有效途径。在对能源互联网研究的基础上，提出了区域能源互联网是在具有一定相似性的区域中，以电为核心、智能电网为基础、清洁能源为主导，采用先进的信息通信技术和电力电子技术，将电、气、热等能源网络中生产、传输、存储、消费等环节有机互联，以实现能源统筹优化配置、多能耦合互补，清洁、高效、经济、便捷的一体化智慧能源生态系统，并进一步阐述了区域能源互联网的框架体系、构建方式和演化路线。同时，本书认为区域能源互联网是全球能源互联网的有机组成部分，能够有效承接和推动全球能源互联网的发展。

本书所论述的区域能源互联网理念和发展思路，参考了

国内外一些专家学者和研究机构的相关成果，结合了浙江省在发展区域能源互联网过程中的探索实践与成功案例，希望能够为广大从事能源互联网工作的人士提供帮助。

全书共分为八章：第一章阐述了能源发展现状与面临的形势；第二、三章在能源互联网研究的基础上，提出了区域能源互联网的定义、组成和框架体系，并阐述了区域能源互联网与全球能源互联网的关系；第四～七章从实施清洁替代、推动电能替代、建设特高压电网、应用信息通信技术等方面对区域能源互联网的要素进行了详细阐述，并辅以浙江省优秀实践案例；第八章探索性地提出了区域能源互联网“三段式”演化路线，提炼了“四维”驱动因素，分析了浙江省能源互联网演化路线，并在此基础上总结了区域能源互联网发展的保障措施。

由于时间仓促、作者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，欢迎广大专家、读者提出宝贵意见和建议。

作 者
2017 年 9 月于杭州

目 录

前言

第一章 能源发展现状及面临的形势 1

第一节 能源发展现状 3

第二节 能源发展形势 39

第二章 能源互联网 49

第一节 能源互联网的定义与特征 51

第二节 能源互联网的国际研究与进展 56

第三节 能源互联网的中国倡议 63

第四节 能源互联网的关键技术 67

第五节 能源互联网的市场形势 82

第三章 区域能源互联网 85

第一节 区域能源互联网的基本概念 87

第二节	区域能源互联网的框架体系	93
第三节	区域能源互联网的规划设计	101
第四节	区域能源互联网承接全球能源互联网	106
第五节	智慧能源全用户公共服务平台	114

第四章 实施清洁替代 119

第一节	清洁替代实现能源可持续利用	121
第二节	区域能源互联网对清洁替代的新要求 ...	126
第三节	建设主动配电网服务清洁替代	135

第五章 推动电能替代 191

第一节	电能替代转变能源消费模式	193
第二节	区域能源互联网对电能替代的新要求	199
第三节	发展电动汽车推动电能替代	204

第六章 建设特高压电网 231

第一节	特高压电网承载区域能源互联	233
第二节	区域能源互联网对特高压电网的 新要求	237
第三节	特高压电网建设发展成就	241
第四节	多端柔性直流输电的浙江实践	244
第五节	电网控制运行精细化保障特高压发展	253

第七章 应用信息通信技术 285

第一节 信息通信技术支撑能源互联 287

第二节 区域能源互联网对信息通信的新要求 289

第三节 信息通信技术助力能源智慧互联 296

第八章 区域能源互联网的演化与展望 349

第一节 区域能源互联网演化路线 351

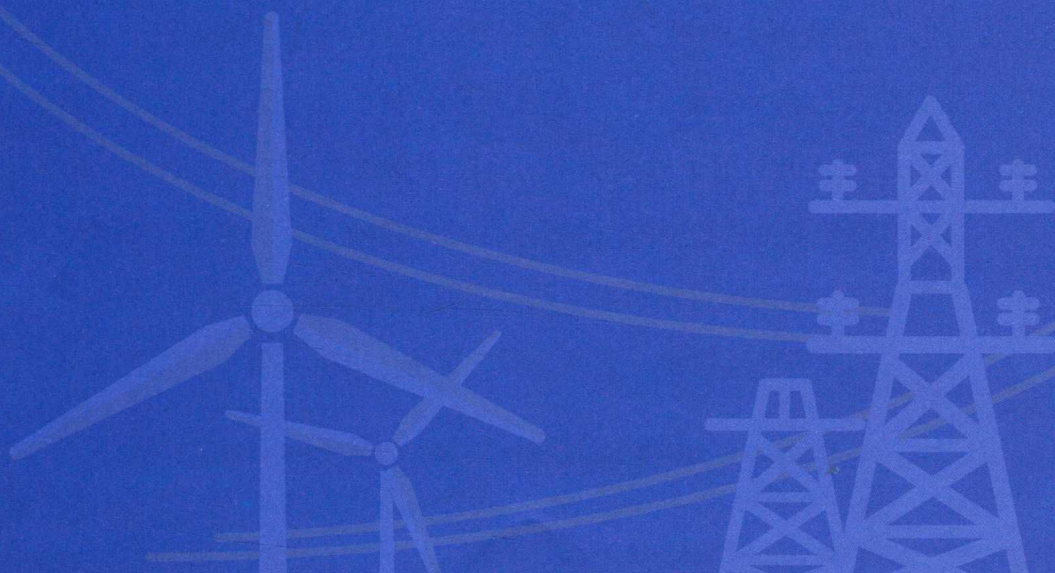
第二节 区域能源互联网“四维”驱动因素 363

第三节 区域能源互联网发展的保障措施 382

参考文献 386

第一章

能源发展现状及面临的形势





第一节 能源发展现状

一、能源基本态势

（一）能源资源

全球能源资源丰富，但分布不均。截至 2015 年底，全球煤炭、石油、天然气剩余探明可采储量分别为 8915 亿吨、2394 亿吨、187 万亿米³，折合标准煤共计 1.2 万亿吨，分别占 51.8%、27.9%、20.3%。按照世界平均开采强度，全球煤炭、石油、天然气储采比为 114、50.7、52.8 年。化石能源在全球分布很不均衡：约 95% 的煤炭分布在欧亚大陆、亚太、北美等地区，约 80% 的石油分布在中东、北美和中南美，70% 以上的天然气分布在欧亚大陆和中东地区，具体分布情况如图 1-1 所示。全球水能、风能、太阳能等清洁能源^①资源非常丰富，根据世界能源理事会（World Energy Council, WEC）估算，全球清洁能源资源每年的理论可开发量超过 150 000 万亿千瓦·时，按照发电煤耗（标准煤）300 克/（千瓦·时）计算，约合 45 万亿吨标准煤，相当于全球化石能源剩余探明可采储量的 38 倍。从清洁能源分布来看，水能资源主要分布在年径流量丰富的亚洲、南美洲、北美洲、非洲中部的的主要流域；风能资源主要分布在北极及其附近地区与亚洲、欧洲和北美洲的高纬度地区；太阳能资源主要分布在赤道附近的中低纬度地区，如东非、北非、中东、澳大利亚、智利北部等地区。

① 清洁能源主要包括水能、风能、太阳能、核能、海洋能、生物质能等。

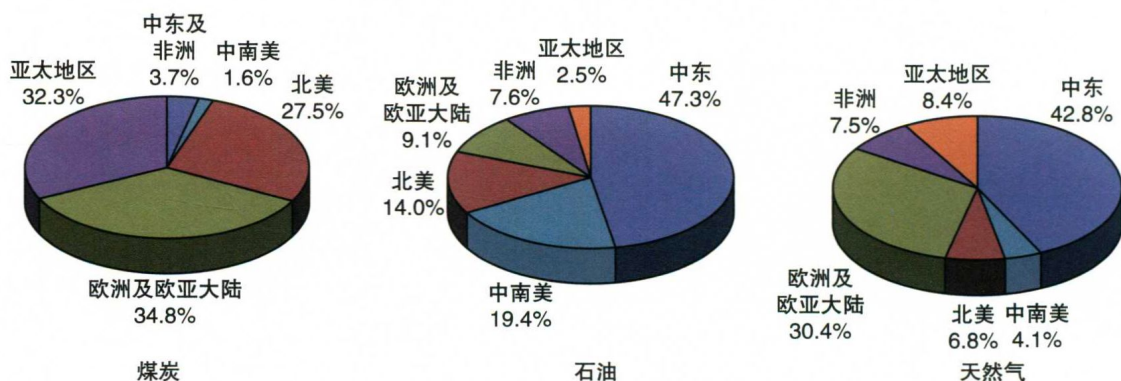


图 1-1 2015 年世界煤炭、石油、天然气资源分布情况

资料来源：BP，世界能源统计年鉴（2016）。

中国化石能源以煤炭为主，分布相对集中。截至 2015 年底，中国煤炭剩余探明可采储量为 1145 亿吨，占世界煤炭资源的 12.8%，石油、天然气剩余探明可采储量分别为 25 亿吨、3.8 万亿米³，仅占世界资源的 1.1%、2.1%；三者采储比分别为 31、12、28 年。中国化石能源分布相对集中，煤炭资源主要分布在东北、华北、华南、西北和滇藏地区；石油资源集中分布在渤海湾、松辽、塔里木、鄂尔多斯、准噶尔、珠江口、柴达木和东海陆架八大盆地；天然气资源主要分布在塔里木、四川、鄂尔多斯、东海陆架、柴达木、松辽、莺歌海、琼东南和渤海湾九大盆地。

全国清洁能源丰富，开发潜力巨大。① 水能。中国可开发的水能资源位居世界第一位，主要分布在长江、黄河的中上游，雅鲁藏布江的中下游，珠江、澜沧江、怒江和黑龙江上游等流域。据 2005 年全国水力资源复查成果，中国大陆水力资源理论蕴藏量在 1 万千瓦及以上河流有 3886 条，江河水能理论蕴藏容量 6.94 亿千瓦、理论蕴藏年发电量 6.08 万亿千瓦·时；技术可开发装机容量 5.42 亿千瓦，年发电量 2.47 万亿千瓦·时；经济可开发容量 4.02 亿千瓦，经济可开发年发电量 1.75 万亿千瓦·时。② 太阳能。中国太阳能资源丰富，陆地每年接受的太阳能辐射能相当于 2.4 万亿吨标准煤，2/3 的国土面积的地区日照时数大



于 2000 小时，太阳能年辐射量超过 6000 兆焦/米²。从太阳能年辐射分布来看，太阳能资源主要集中在西藏自治区、青海省、新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区南部、山西省、陕西省北部、河北省、山东省、辽宁省、吉林省西部、云南省中部和西南部、广东省东南部、福建省东南部、海南岛东部和西部以及台湾省西南部等广大地区。西藏自治区西北部太阳能年辐射量最高达 8400 兆焦/米²，是世界太阳能资源最丰富的地区之一。③ 风能。中国风能丰富地区主要分布在西北、华北和东部的草原或戈壁，以及东部和东南沿海及岛屿等地区。风能丰富地区一般无常规能源生产，在时间上冬春季风大、降雨量少；夏季风小，降雨量大，与水电有很好的互补性。中国陆地 70 米高度风功率密度达到 150 瓦/米² 以上的风能资源技术可开发量为 72 亿千瓦，200 瓦/米² 以上的风能资源技术可开发量为 50 亿千瓦。④ 核能。截至 2016 年，中国核电总装机容量 3364 万千瓦，核电发电量 2132 亿千瓦·时。⑤ 海洋能。中国潮汐能资源蕴藏量约为 1.1 亿千瓦，可开发总装机容量 2179 万千瓦，年发电量可达 624 亿千瓦·时，主要分布在福建、浙江、江苏等省的沿海地区。

浙江省化石能源匮乏，清洁能源相对丰富。截至 2015 年底，浙江省已探明的煤炭储量为 0.4 亿吨，陆域内迄今尚未发现有开采价值的油气资源，但浙江省清洁能源相对化石能源较为丰富。① 水能。根据 2013 年浙江省水力资源的复查结果，浙江省可开发水电装机容量约 862 万千瓦。② 太阳能。浙江省太阳能资源属于第三类地区，每平方米年辐照总量约 1124~1368 千瓦·时，年平均日照时数为 1650~2105 小时，累计年平均日照时数在 6 小时以上的可利用天数为 153~200 天。③ 风能。浙江省陆地风能资源理论储量为 2100 万千瓦，技术可开发量 130 万千瓦以上，主要分布在海岛及沿海滩涂和山脊；海上风能资源技术可开发量为 1515 万千瓦，占全省风能技术开发量的 92%，开发前景较好。④ 核能。截至 2015 年底，浙江省核电装机容量 657 万千瓦，占全国同期核电总量的 24.1%。⑤ 海洋能。浙江省海洋能资源丰富，是中国潮汐能和潮



流能资源密集地区之一。根据 2009 年浙江省潮汐能资源复查结果, 全省具备开发条件的潮汐电站厂址有 19 处, 潮汐能资源总量约 849 万千瓦, 技术可开发量 120 万千瓦。浙江省潮流能资源理论储量为 709 万千瓦, 占全国的 50% 以上, 其中 96% 分布在舟山地区。

(二) 能源生产

世界能源生产总量稳步上升, 生产结构不断调整。化石能源支撑着世界经济的发展, 在化石能源生产中, 石油占据着最重要的地位, 其次是煤炭和天然气。据 BP 世界能源统计年鉴 (2016) 显示, 1980~2015 年, 世界石油产量从 30.9 亿吨增至 43.6 亿吨, 增长了 41.1%, 年均增长率为 1.0%; 天然气产量从 14 348 亿米³增长至 35 386 亿米³, 增长了 1.5 倍, 年均增长率为 2.7%; 煤炭产量从 38.4 亿吨增长至 78.6 亿吨, 增长了 1.0 倍, 年均增长率为 2.1%。风能、太阳能等清洁能源发展迅猛。根据 2016 年全球能源互联网高端论坛会议数据, 2000~2015 年, 全球风能、太阳能发电装机容量分别由 1793 万、125 万千瓦增长到 4.33 亿、2.27 亿千瓦, 分别增长了 23、175 倍, 年均增长率分别达到 24.0%、41.0%。但由于基数小, 风能、太阳能等清洁能源比重仍然较低, 占全球一次能源供应总量的比重不足 5%。

中国能源生产总量稳健增长, 清洁能源比重平稳上升。1980~2016 年, 中国能源生产总量从 6.4 亿吨标准煤增至 34.6 亿吨标准煤, 增长 4.4 倍。2011 年, 中国能源生产总量已连续位居世界第一。中国能源产量的增长分为三个阶段: 第一阶段是 1980~2000 年, 增长平稳, 年均增长率 3.95%; 第二阶段是 2001~2011 年, 增速加快, 年均增长率 8.72%; 第三阶段是 2012~2016 年, 增长放缓, 每年增长率低于 5%。2000 年之前, 煤炭、石油合计产量占能源生产总量的 95%; 2000 年之后, 清洁能源比重逐步上升, 2015 年达到 14.5%。能源生产结构逐步优化, 煤炭产量在 2014 年首次下降, 石油产量逐年下降, 天然气占比快