



能源与电力分析年度报告系列

2016

国内外电网发展及新技术应用 分析报告

国网能源研究院 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



能源与电力分析年度报告系列

2016

国内外电网发展及新技术应用 分析报告

国网能源研究院 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《国内外电网发展及新技术应用分析报告》是能源与电力分析年度报告系列之一, 主要对 2015 年主要国家和地区的电网发展情况及新技术研发与应用情况进行研究和总结, 对电网发展趋势进行展望, 为关注能源电力行业发展的领导、专家、科技人员、能源行业从业人员及其他读者提供借鉴和参考。

本报告在广泛收集整理国内外主要能源电力相关统计机构统计信息与研究成果的基础上, 对典型国家和地区电网发展规模、技术进展及应用、安全可靠性和运行经济性、电力服务等进行研究和分析, 并对电网发展趋势进行了展望。

本报告适合电力行业尤其是电网企业从业人员、国家相关政策制定者、科研工作者及其他读者参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

国内外电网发展及新技术应用分析报告, 2016/国网能源研究院编著. —北京: 中国电力出版社, 2016. 12

(能源与电力分析年度报告系列)

ISBN 978-7-5198-0152-6

I. ①国… II. ①国… III. ①电网—研究报告—世界—2016 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 295408 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月北京第一次印刷

700 毫米×1000 毫米 16 开本 9.25 印张 109 千字

印数 0001—2000 册 定价 50.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
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

能源与电力分析年度报告

编 委 会

主 任	张运洲						
委 员	蒋莉萍	柴高峰	李伟阳	周原冰	李连存	邱忠涛	
	牛忠宝	李 英	王耀华	马 莉	单葆国	韩新阳	
	李琼慧	张 勇	李成仁	郑厚清	郑海峰	鲁 刚	

《国内外电网发展及新技术应用分析报告》

编 写 组

组 长	韩新阳						
副 组 长	胡 波	杨 倩					
指导专家	冯庆东						
成 员	白翠粉	何 博	代贤忠	张 岩	张 钰	李立理	
	杨 方	谢光龙	王 阳	柴玉凤	张 晨	张 钧	
	靳晓凌	王 伟	马 吉	张 闻	任梦媛	熊媛媛	

前言

国网能源研究院多年来紧密跟踪国内外电网政策、规划、标准、技术及示范工程的最新进展，开展广泛调研和对比分析研究，形成年度系列分析报告——《国内外智能电网发展分析报告》，为政府部门、电力企业和社会各界提供了有价值的决策参考和信息。2016年，对年度报告的内容进行优化调整，书名更新为《国内外电网发展及新技术应用分析报告》，为政府部门、电力企业和社会各界服务的宗旨不变。

本报告立足于服务电力行业尤其是电网企业从业人员、国家相关政策制定者、科研工作者及其他读者，主要从电网发展规模、技术进展及应用、安全可靠、运行经济性、电力服务等维度，对典型国家或地区的电网在近年来（主要是2015年）的发展进行比较分析，提炼出相关特点，并对未来电网的发展趋势进行了展望。

本报告共分为6章。第1章介绍了北美、欧洲、日本、中国、印度和巴西等主要国家和地区电网发展情况；第2章介绍了与电网相关的源网荷储等技术进展和应用情况；第3章梳理了2015年世界发生的大规模停电事故，并对主要国家和地区电网的安全现状进行了分析；第4章分析了主要国家和地区电网设备运行情况，并介绍了北美西部电网的输电效率；第5章分析了主要国家和地区电力行业服务水平和服务模式创新；第6章对国内外电网发展趋势进行了展望。

本报告概述部分由胡波、杨方主笔，第1章由胡波、张岩、

张闻主笔，第2章由杨倩、代贤忠、谢光龙、王阳、柴玉凤、张晨、王伟主笔，第3章由代贤忠、杨倩、张钧、靳晓凌主笔，第4章由何博、张钰、任梦媛主笔，第5章由白翠粉、马吉、熊媛媛主笔，第6章由胡波、韩新阳、李立理主笔。全书由胡波、杨倩统稿，由韩新阳、李立理、冯庆东校核。

在本报告的调研、收资和编写过程中，得到了院领导和国家电网公司联办、研究室、发展部、安质部、营销部、科技部、国际部等部门专家和领导的悉心指导和无私帮助，在此表示衷心感谢！

限于作者水平，加之收集国外信息及数据存在一定难度，虽然进行了广泛调研收资，并对书稿进行了反复研究推敲，但难免仍会存在疏漏与不足之处，恳请读者谅解并批评指正！

编 著 者

2016年11月

目 录

前言

概述 1

1 电网发展概况 9

1.1 综述 9

1.2 北美联合电网 13

1.2.1 电源、负荷发展情况 13

1.2.2 电网结构 15

1.2.3 跨境互联及交易情况 17

1.2.4 “两个替代”情况 17

1.2.5 规划和政策 20

1.3 欧洲互联电网 22

1.3.1 电源、负荷发展情况 22

1.3.2 电网结构 23

1.3.3 跨境互联及交易情况 25

1.3.4 “两个替代”情况 25

1.3.5 规划和政策 29

1.4 日本电网 29

1.4.1 电源、负荷发展情况 29

1.4.2 电网结构 30

1.4.3	“两个替代”情况	31
1.4.4	规划和政策	32
1.5	中国电网	33
1.5.1	电源、负荷发展情况	33
1.5.2	电网结构	35
1.5.3	跨境互联及交易情况	36
1.5.4	“两个替代”情况	36
1.5.5	规划和政策	37
1.6	其他电网	38
1.6.1	印度电网	38
1.6.2	巴西电网	39
1.7	小结	40

2 技术进展及应用 42

2.1	主要国家技术发展规划	42
2.2	标准制定	44
2.3	重点技术进展及应用	46
2.3.1	输变电技术	46
2.3.2	电网运行控制技术	54
2.3.3	配用电技术	59
2.3.4	储能技术	63
2.3.5	电网与互联网融合技术	66
2.4	小结	69

3 电网安全可靠分析 71

3.1	大规模停电事故	71
3.2	主要国家和地区大电网安全现状	73

3.2.1	美国电网	73
3.2.2	欧洲电网	73
3.2.3	日本电网	75
3.2.4	中国电网	75
3.3	主要国家和地区电网可靠性	77
3.3.1	美国电网	77
3.3.2	英国电网	78
3.3.3	日本电网	78
3.3.4	中国电网	80
3.3.5	主要国家和地区电网供电可靠性指标对比 ...	85
3.4	典型停电事件分析	86
3.4.1	网络攻击引发乌克兰大停电事件分析	86
3.4.2	其他停电事件分析	88
3.5	小结	93

4 电网运行经济性分析 96

4.1	典型国家和地区电网线损率分析	96
4.2	典型国家和地区输电网宏观利用效率分析	97
4.3	北美西部电网输电效率情况介绍	101
4.3.1	评估方法与指标介绍	102
4.3.2	电网输电效率概况	105
4.4	小结	112

5 电力服务分析 113

5.1	电力行业服务水平	113
5.2	主要国家和地区电力服务特点	115
5.2.1	美国	115

5.2.2	欧洲	116
5.2.3	日本	117
5.2.4	中国	117
5.3	典型电力企业服务水平	118
5.3.1	美国南方电力公司	118
5.3.2	美国杜克能源公司	120
5.3.3	英国国家电网公司	121
5.3.4	中国国家电网公司	123
5.4	电力服务模式创新	125
5.4.1	创新的方式方法	125
5.4.2	创新的典型案例	126
5.5	小结	128

6 展望 130

参考文献	134
------------	-----

概 述

推动能源系统的清洁化、低碳化、高效化和智能化转型，是减少环境污染，应对全球气候变化的重要途径。基于此，全球有 164 个国家和地区制定了可再生能源发展目标，约 145 个国家和地区颁布了可再生能源支持政策。同时，在全球新一轮科技产业变革中，互联网理念、技术与能源产业深度融合，正在推动能源新技术、新模式和新业态的兴起。

电网是能源资源优化配置的重要平台和服务经济社会发展的重要基础设施。近年来，世界主要国家和地区的电力系统在电源、电网、负荷、储能（即源网荷储）等环节，以及纵贯各环节的信息通信等方面都得到了创新发展，技术不断进步、模式持续创新，在能源转型中发挥了越来越重要的作用。本报告从电网发展、技术进展及应用、安全可靠、运行经济性、电力服务等维度，全方位跟踪分析 2015 年世界主要国家和地区电网领域的发展情况，总结其发展特征和规律。

（一）电网发展概况

2015 年，世界各国家和地区全社会用电量超过 20 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ，各国家和地区间电力交换量超过 1.4 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。从电网结构看，主要发达国家用电需求总体平稳，电网结构已较为成熟，线路长度变化不大。印度、巴西等发展中国家电网发展较快，印度 765kV 线路长度同比增长 60.6%，400kV 线路长度同比增长 140.4%。中国电网发展步伐放缓，新增 220kV 及以上输电线路 31 508km，增幅 5.4%。

总体来看，近年来电网发展呈现以下几个特点。

世界主要国家和地区电网的互联化进一步加强。截至 2015 年，美国与加拿大之间通过 35 条输电线路实现互联，与墨西哥之间的互联也出台了相关规划，正逐步增强；欧洲电网发展实现统筹规划，已建立统一电力市场，调度运行方面也建立了协调机制；日本成立了广域系统运行协调机构，以全国的视角统筹电网规划、建设和运行。加强电网互联程度，能够增加电力系统稳定性，提升电网大范围优化配置资源的能力，促进清洁能源消纳。

跨境交易电量不断攀升。得益于可再生能源的快速发展、资源禀赋和用电负荷分布特点的差异、跨境交易政策的推动，以及互联电网网架和交易机制的不断完善，跨境电力电量交易持续上升。未来，随着各地区电网的广泛互联，以及政策和交易机制的进一步完善，跨境电力交易将成为能源贸易的主要形式之一。

通过机制创新解决可再生能源消纳问题。德国、西班牙和丹麦的清洁能源发电比重较高，但基本不存在弃风、弃光的问题，其根本原因在于欧洲电网的互联通道容量充足和电力市场的一体化。中国近几年出现的弃风、弃光问题，主要是可再生能源规划建设速度过快、用电需求增速放缓、市场机制不够灵活等多方面原因所致。

电气化水平迈上新台阶，但尚有很大潜力。2014 年，世界电能占终端能源消费比重达到 18.4%。分国家看，发展中国家电能替代水平有较大提升空间。发达国家电气化水平较高，2014 年日本电能占终端能源消费比例为 27.7%，远高于印度（14.7%）、巴西（18.6%）等发展中国家。中国由于大力推动电能替代战略，电能占比达到 20.4%，比 2000 年增长近 1 倍，但与日本等国家的先进水平相比，仍有较大提升空间。分行业看，交通等行业的电能替代仍需挖潜。工业、商业和居民领域的电能消费占比较高，分别达

到 26.4%、50.5%和 21.5%，但交通领域不足 1%，随着电动汽车、电气化铁路的发展普及，电能替代在交通领域的潜力巨大。

（二）技术进展及应用

近年来，能源电力的技术创新与应用进入了高度活跃期，各国能源电力技术发展规划频繁出台，多项技术标准得以制定并发布，多个联盟、技术委员会成立，以推进相关领域的标准化工作，电网各领域多项技术研发及应用取得进展。

各国相继出台能源领域技术规划，其中能源清洁、低碳利用技术创新是各国关注焦点。美国的《全面能源战略》强调加快发展低碳技术，支持可再生能源发展。日本的《能源环境技术创新战略 2050》提出能源系统集成、节能、储能、可再生能源发电及碳固定与利用五大重点推进的技术创新领域。韩国的《能源新产业与核心技术研发战略（2015—2017）》支持电动车、环保能源城镇、零能耗大楼等绿色低碳技术和项目。中国密集出台系列技术发展规划，《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》提出营造开放共享的能源互联网生态体系，建设基于互联网的绿色能源灵活交易平台；《能源技术革命创新行动计划（2016—2030 年）》与《能源技术革命重点创新行动路线图》制定能源技术创新体系和路线图，《“十三五”国家科技创新规划》提出未来五年大力发展清洁低碳、安全高效的现代能源技术。

围绕能源互联网、动力电池等领域制定并发布多项技术标准，日本和中国成立联盟或技术委员会，推进了相关领域的标准化工作。2015 年以来，能源互联网国际标准 IEEE 1888 发布，电动汽车电池更换系统首个 IEC 标准发布，美国发布乘用车无线充电相关标准，中国发布了新版的电动汽车充电接口及通信协议系列标准。日本成立联盟，推进智能电网标准国际化；中国筹建全国微电网与分布式电源并网标准化技术委员会，为微电网与分布式电源并网领域的标准化工

作提供统一规划和顶层设计。

电网技术在多个领域取得突破并推广应用。近年来在电力需求持续增长、能源系统向绿色低碳转型、互联网向电网领域深度渗入的驱动下，电网各领域技术创新与应用高度活跃。输变电领域，特高压输电技术和工程应用取得突出进展，柔性直流输电多项示范工程投运或在建；电网运行控制领域，虚拟同步机逐步进入工程应用阶段，同步调相机性能和适用性提高，统一潮流控制器多个工程投运；配用电领域，主动配电网理论研究和应用持续推进，无线充电技术进入量产化应用；储能逐渐进入商业化运行阶段；电网与互联网融合领域，大数据和区块链推动了电力行业技术创新，以及运营和管理方式变革。

（三）电网安全可靠分析

电网与新能源技术、互联网技术、信息技术不断融合，电力安全受到的影响因素越来越多，面对的攻击类型也越来越多样化。2015年以来，国际上发生了包括乌克兰、土耳其、美国华盛顿及日本东京等在内的多起停电事故，特别是出现了因网络攻击导致的停电事故，引发了业界对电网安全的新思考。

完善的协调调度机制能更好地保障电网安全。欧洲逐步加强对所属输电运营商的协调调度和管理，得益于此，2015年3月31日土耳其停电，没有波及欧洲互联电网其他国家。日本也成立了全国性的机构协调各个调度机构的运营，旨在打破电力供应的地区局限性，解决电网间联系不强、难以大范围利用发电资源进行相互支援等问题，实现电力安全稳定供应。中国实行电网集中统一调度机制，中国电网持续保持安全稳定运行，近年来无大面积停电事故发生。

大规模可再生能源的接入给电网安全运行带来了新挑战。欧洲、中国都存在可再生能源大规模发展带来的安全运行问题，但表现形式不同。在英国，可再生能源并网带来电力潮流大规模调整，需要提高

欧洲电网输电能力，避免输电阻塞、过载运行、事故时的潮流转移等问题带来的大面积停电；在中国，随着可再生能源并网容量持续快速增长，系统调峰、调频问题突出，可再生能源消纳矛盾严重，对电力系统调节能力提出了更高要求，电网安全稳定运行存在压力。

电力市场的开放环境在一定程度上增加了电网安全运行的压力。在欧洲，电力市场相关法规对电网运行安全与应急处置的保障力度不足，随着欧洲统一能源市场建设，这一问题对欧洲电网安全运行的影响进一步凸显；在美国，电力市场机制引入后，电网规划运行管理受经济利益驱动，电网阻塞、近稳定极限运行等不确定性因素增多，也带了潜在的安全威胁；在中国，发电权进一步放开，重要跨省跨区输电线路潮流可能频繁大幅度变化，给电网调度运行带来新的挑战，社会资本投资运营的增量配电和售电业务，可能由于专业技术能力、管理经验不足等原因，给电网安全运行、供电安全质量带来风险。

电力系统的网络安全问题开始显现。乌克兰电力系统遭受网络攻击引发大面积停电，警示电力等基础设施可能成为网络攻击的重点目标之一。“物理隔离”一旦绕过，电力调配指令可能被恶意篡改，将可能造成很大的破坏力。随着大量新能源和分布式电源接入、增量配电和售电业务放开，各类投资主体增多且快速向电网末端延伸，加大了电力系统监控和安全统一管理的难度，电网安全风险更严峻。

中国农网的供电可靠性有待进一步提升。从户均停电次数、户均停电时间看，中国全口径供电可靠性水平低于英国、法国、德国等国家，但市中心供电可靠性水平与这些国家的全口径可靠性水平接近。可见，农村电网是中国供电可靠性的薄弱环节。

（四）电网运行经济性分析

电网运行经济性指标是衡量一个国家或地区电力行业生产技术和管理水平的重要指标，既受负荷分布密度和经济发展水平等外部因素

影响，也受电源负荷分布特征和电网发展所处阶段等内部因素影响。日本、德国等国家，经济发达，电网结构紧凑，电源与负荷分布相一致，其电网的经济性水平较高。印度、巴西等发展中国家，经济仍处于快速增长阶段，国土面积大，且电源与负荷距离较远，电网运行经济性水平较低。

从线损率指标看，印度、巴西等国土面积大的发展中国家电网线损率较高，反映了两个国家在输配电网运行管理、防窃电等方面仍与发达国家存在较大差距；中国近年来线损率总体呈现下降趋势，远低于印度、巴西，与世界先进水平接近。

从输电网利用率看，日本、德国、法国等发达国家高压输电网宏观利用效率基本稳定，并维持在较高水平，近年来在经济发展周期影响下呈现出一定的波动性；印度等发展中国家高压输电网宏观利用效率较低；北美西部电网输电通道的利用效率较高；中国部分经济发达省市输电网的利用效率接近世界先进水平。

（五）电力服务分析

总体来看，伴随能源变革、电力市场化改革、“互联网+”及相关能源技术进步，能源电力行业加速向清洁化、低碳化、市场化、互联化、互动化转型，业务服务以满足用户多样化、个性化需求为导向，呈现定制、多元、智能等特征。

用户对电力企业服务的关注度不断提升，信任度和满意度总体维持在良好级别。2015年，用户对节能家居产品、家用电源设备等产品和服务的关注度均比上年有所提升。业务服务的数字化可以有效提升服务质量，是提高用户信任度和满意度的重要手段。随着竞争的日益激烈，电力企业不断创新服务模式，比如提供额外家庭产品服务、将价值主张延伸到综合能源、提供融资计划或维护服务等。2015年，用户对电力企业的服务信任度和满意度与上年持平，总体良好。

供电企业采取优质供电服务、灵活电价服务、创新服务方式等多种措施，促进整体竞争力的提升。在优质供电服务方面，英国电力企业采用《服务行为规范》，对服务水准、供电质量和可靠性进行了规范；法国通过社会中介机构评价供电服务质量，并将其作为对基层供电部门的考核指标。在灵活电价服务方面，发达国家均制定了灵活丰富的电价策略，充分利用需求侧管理手段提高工作效率，用户可根据需要选择适合的电价策略，并通过需方响应节约用能费用。在创新服务方式方面，美国田纳西州查塔努加市电力公司打造“光纤+智能电网”，创新光纤网络服务新模式；中国国家电网公司电子商城上线运营，集充换电设施监控、信息服务、消费结账、车辆服务、生活服务等业务于一体的车联网智能平台也初具规模。

用户对电力服务关注度不断提高，催生了新的合作模式和服务模式。从电力服务提供商看，互联网企业、科技公司积极布局能源领域售电、能源云服务等业务，形成跨界融合创新，拓展服务渠道。阿里云与阳光电源开展战略合作，推出了智能光伏云 iSolarCloud 服务。苹果公司的子公司 Apple Energy 获得售电许可。Oracle 收购了已经在大数据、云计算领域有着深厚基础的节能数据分析公司 Opower。从电力服务模式看，能源融资渠道和方式、新能源电站资产全寿命周期管理、综合性能源交易平台、智能化用能方式等方面都在创新。融资方面，如 SPI 推出的“绿能宝”、中广核推出的“光伏宝”、协鑫新能源正在筹建的太阳能电站 YieldCo 金融平台等；资产管理方面，如远景能源推出的阿波罗光伏全生命周期管理云平台，阳光电源与阿里云联合推出的智慧光伏云 iSolarCloud 等；交易平台方面，如美国的 Solarcity 公司、普乐士发布的“全民光伏 PV Plus”等；智能用能方面，如谷歌的 Nest、小米的智能家居等。