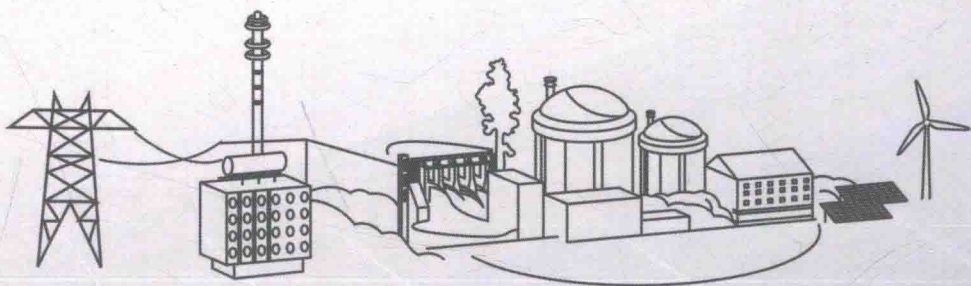


智能电网 柔性调控技术

ZHINENG DIANWANG ROUXING TIAOKONG JISHU

刘华伟 袁晓冬 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

非外借

智能电网 柔性调控技术

ZHINENG DIANWANG ROUXING TIAOKONG JISHU

刘华伟 袁晓冬 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以态势感知、优化决策、协调控制、负荷恢复等事故处置过程为主线,从区域电网、配电网、用户侧阐述了智能电网柔性调控的关键技术及相关装备,阐述了支撑智能电网柔性调控的通信组网、大数据应用与平台、信息安全防护等信息通信技术,并对未来智能电网柔性调控技术和装备进行展望。

本书是一本以柔性调控视角来介绍智能电网发展成果的专著,可供从事电网调度运行控制领域的设计、开发、运行维护等相关技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

智能电网柔性调控技术 / 刘华伟, 袁晓冬主编. —北京: 中国电力出版社, 2017.12
ISBN 978-7-5198-1584-4

I. ①智… II. ①刘… ②袁… III. ①智能控制—电网—电力系统调度 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 330819 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: 刘丽平 王蔓莉 (manli-wang@sgcc.com.cn)

责任校对: 王开云

装帧设计: 张俊霞 左 铭

责任印制: 邹树群

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2017 年 12 月第一版

印 次: 2017 年 12 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 18.25

字 数: 414 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 75.00 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 刘华伟 袁晓冬

编写组成员 袁宇波 李虎成 王建明 孙 蓉

张刘冬 朱道华 孙国强 汤 奕

卫志农



前 言

智能电网是建立在集成的、高速双向通信网络的基础上,通过先进的传感和测量技术、先进的设备技术、高效的控制方法以及智能的决策支持系统技术的应用,实现电网的安全、可靠、经济、高效、低碳运行,其主要特征包括自愈、互动、提供满足用户需求的电能质量、容许各种不同发电形式的接入、可市场化交易以及资产的优化高效运行。

随着电网规模的不断扩大和电力负荷的日益增长,建设适应新能源发展、更大范围内资源优化配置和多样化需求服务的全球能源互联网是未来智能电网的发展趋势。现阶段,由于特高压交直流电网建设、大规模新能源发展和电动汽车等多元化柔性负荷的接入,为电网带来了随机性、间歇性、波动性等多种不确定性因素,电源、电网和负荷间的构成形式、响应范围和交互模式日趋复杂,对电网规划、运行控制提出了巨大挑战。另外,诸如统一潮流控制器(UPFC)和虚拟同步机等电力电子技术和设备的快速发展和广泛应用,使得电网控制的柔性特征更加凸显、可控性逐步增强。可见,随着电源侧大量可再生能源的并网接入、电网侧复杂交直流混联系统的建设发展和负荷侧具备“源荷”双重特性的柔性负荷比例的增加,智能电网环境下的电源侧、电网侧和负荷侧均具备了柔性特征。通过柔性调控的形式进行协调发展、集成互补,是实现我国能源互联网战略规划的重要途径。

国网江苏省电力公司依托国家电网公司变电站智能设备检测技术、电能计量重点实验室、海上风电技术联合实验室和科技攻关团队,积极开展智能电网柔性调控技术研究与实践。2015年以来,220kV、500kV的UPFC示范工程、大规模源网荷友好互动系统工程、主动配电网综合示范工程、负荷侧虚拟同步机示范工程等先后在江苏试点应用,智能电网柔性控制技术在这些工程中发挥着显著作用。通过广域分布的电力资源通过实时动态匹配,多时间尺度参与调控,电网功率的动态平衡能力、电力系统的可靠性和灵活性随之增强,能源利用效率得到大幅提升。

《智能电网柔性调控技术》一书首先介绍智能电网柔性调控的背景需求、发展历程和发展趋势;其次,从区域电网、配电网、用户侧三个方面依次介绍柔性协调控制技术,围绕态势感知、优化决策、协调控制、负荷恢复等事故处置过程进行关键技术阐述,并介绍相应的关键装备;然后,从通信组网技术、大数据应用与平台、信息安全防护技术、信息通信关键装备等方面,阐述实现智能电网柔性调控技术的基础;最后,从技术和装备两个方面对智能电网柔性调控技术进行展望。

本书旨在结合当下在区域电网、配电网、用户侧最前沿的柔性调控技术，总结和提炼智能电网发展成果，为专业人士提供技术参考，让更多关心中国智能电网发展的人士了解电网现状，共同推进智能电网的发展。本书在编写过程中，得到河海大学卫志农教授、孙国强副教授，东南大学汤奕副教授等专家的审阅，提出了很多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢！

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编写组

2017年10月



目 录

前言

1 概述	1
1.1 背景需求	1
1.2 发展历程	11
1.3 发展趋势	19
2 区域电网柔性协调控制技术	22
2.1 区域电网态势感知	22
2.2 区域电网优化决策	29
2.3 区域电网协调控制	50
2.4 区域电网负荷恢复	74
2.5 区域电网柔性调控关键装备	88
3 配电网柔性协调控制	105
3.1 技术架构	105
3.2 配电网主动感知	106
3.3 配电网全局优化	121
3.4 配电网协调控制	129
3.5 配电网自愈恢复	156
3.6 配电网柔性协调控制关键装备	170
4 用户侧柔性协调控制	181
4.1 技术构架	181
4.2 用户侧态势感知	183
4.3 用户侧优化决策	195
4.4 用户侧协调控制	210

4.5	用户侧负荷恢复	219
4.6	用户侧关键装备	222
5	智能电网柔性调控信息通信关键技术	230
5.1	基于多数据源的大数据应用与平台技术	230
5.2	智能电网柔性调控的信息安全防护技术	233
5.3	智能电网柔性调控通信关键技术	240
5.4	智能电网柔性调控的通信组网技术	264
5.5	信息通信关键装备	266
6	展望	268
6.1	智能电网柔性调控技术展望	268
6.2	智能电网柔性调控装备展望	273
	名词术语中英文对照	279
	参考文献	282



概 述

随着经济的发展、社会的进步，世界能源消费总量持续增长，能源与环境问题日益突出。与此同时，以风电、太阳能为代表的可再生能源大规模并网接入、特高压复杂交直流混联输电工程的有序建设以及电动汽车、需求响应等柔性负荷的发展，电力系统面临着新的机遇和挑战。智能电网的理念在这一背景下应运而生，并成为全世界电力工业积极应对未来能源挑战的一致共识，在此环境下，充分利用电源侧常规能源、大规模及分布式可再生能源和用户侧大规模柔性负荷等可调度资源，通过电源侧、电网侧与用户侧三者间多种友好形式交互，构建基于多场景的灵活快速、集中协调、分布自治的柔性调控模式。

本章分别从背景需求、发展历程以及发展趋势三个方面阐述智能电网环境下柔性协调控制技术的可行性及必要性。

1.1 背景需求

1.1.1 智能电网发展现状

由于经济发展状况、电网建设水平、内外部发展环境不同，世界各国在智能电网建设的远景和侧重点上各有差异，对智能电网概念的描述也不尽相同。美国将智能电网描述为通过利用数字技术提高电力系统的可靠性、安全性和运行效率，利用信息技术实现对电力系统运行、维护和规划方案的动态优化，对各类资源和服务进行整合重组。欧洲电力工业联盟提出智能电网通过采用创新性产品和服务，使用智能监测、控制、通信和自愈技术，有效整合发电方、用户或者同时具有发电和用电特性成员的行为和行动，以期保证电力供应持续、经济和安全。中国国家电网公司将其提出的坚强智能电网描述为以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强网架为基础，以通信信息平台为支撑，具有信息化、自动化、互动化特征，包含发电、输电、变电、配电、用电和调度各个环节，涵盖所有电压等级，实现电力流、信息流、业务流高度一体化融合的现代电网。

随着新一轮能源革命在全球范围内广泛推进，能源结构及清洁能源发电技术得到相应的调整与改善，新一代电力系统以广泛互联、智能互动、灵活柔性、安全可控为特征不断发展。目前，相比传统电力系统控制技术，智能电网环境下电力系统关键要素的演变过程如图 1-1 所示，具体体现在以下五个方面：

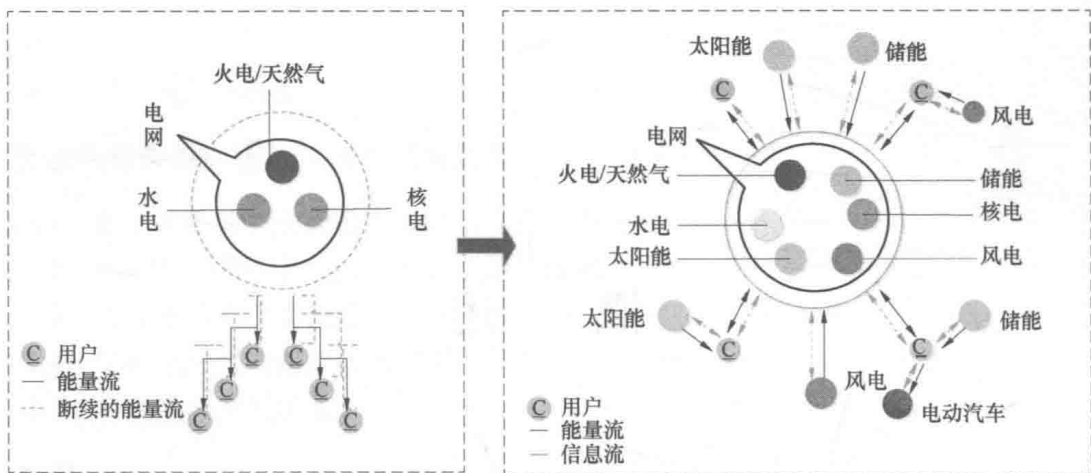


图 1-1 电力系统关键要素演变图

(1) 能源结构日趋多变。随着以风电、太阳能为主的可再生能源的大力发展，衍生出包括大规模集中并网以及分布式接入配电网等多种并网形式，使得电源结构日趋复杂多变，而智能电网柔性调控体系的实现有望在提高其消纳能力的同时平抑机组出力的波动性。

(2) 网架结构更加复杂，柔性逐步增强。以特高压交直流为主的大规模电网互联使得网络结构愈加复杂，同时随着电力电子技术和设备的发展和广泛应用，电网控制的柔性特征更加凸显，其可控性逐步增强。

(3) 能量流、信息流双向交互增强。传统电网的能量流和信息流是单向的，负荷侧往往充当的是能量的消耗单元和指令的执行单元。相比之下，智能电网柔性调控系统下的能量流和信息流则是双向的，互动性更强。

(4) 电力可中断负荷控制愈发精准。随着可中断负荷控制研究的深入和智能互动终端技术的发展，以提升电网动态平衡能力为目标的大规模可中断负荷精准化资源调度具备较强的工程实践意义。

(5) 柔性负荷呈现多元化。传统负荷（如工业负荷、非工空调负荷）能够根据政策、电价或主动申报来进行电力需求主动响应，具备虚拟电厂的特性；部分柔性负荷（如电动汽车、洗衣机、消毒柜等）的供电时间可以按计划进行变动，以可平移负荷的形式增强用户侧负荷的可控性；另外，电动汽车和储能装置逐渐接入用户侧，负荷逐步呈现柔性化、多元化的特点。

以下分别从电源、电网、负荷及信息通信技术的发展等角度具体介绍当前智能电网的发展现状。

1. 电源的发展

目前，电力工业主要的发电方式有火力（煤、石油或天然气）发电、水力发电、核能发电，这三种发电形式所占的份额因各国能源分布和构成的不同而各具特点。

我国电力工业发展迅速，传统发电方式的发展具有鲜明特色。截至 2016 年底，全国发电装机累计 16.51 亿 kW，同比增长 8.2%，其中：水电 3.3 亿 kW（含抽水蓄能 2669 万 kW），占全部装机容量的 20.2%；火电 10.5 亿 kW，同比增长 5.5%（其中煤电装机容量

94 624 万 kW，同比增长 5.1%；燃气 7011 万 kW，同比增长 6.2%），占全部装机容量的 64.0%；核电 3364 万 kW，同比增长 23.8%；并网风电 1.5 亿 kW，同比增长 12.8%；并网光伏发电 7631 万 kW（其中分布式光伏发电 1032 万 kW），同比增长 80.9%。传统发电装机容量增速趋缓，非化石能源装机比重持续提升。

我国新能源与可再生能源种类丰富、分布广泛，具有巨大的开发潜力。目前正着眼于大力发展风能、太阳能等可再生能源，在资源集中、开发条件适宜的地区采取集约化基地式的开发方式，建设大型可再生能源基地，在优先解决本地能源消纳的基础上，融入大电网，实现全国范围的消纳；同时，因地制宜开发建设小型风电、光伏发电、生物质能发电、地热能发电、海洋能发电等，使其就近并入电网消纳。

(1) 风力发电。目前，风电是除水电以外技术最成熟、开发成本最低的可再生能源。截至 2016 年底，9 个国家的装机容量超过 10GW，全球风电累计装机容量 486.8GW，如图 1-2 所示；仅 2016 年全球风电新增装机容量超过 54.6GW，累计装机容量增长 12.6%。2016 年，我国新增风电装机 23.4GW，占全球新增装机容量的 42.8%。凭借 2016 年风电的卓越表现，我国累计风电装机容量达到 168.7GW，超越欧盟的装机总量。

截至 2016 年，全球风电累计装机容量如图 1-2 所示。

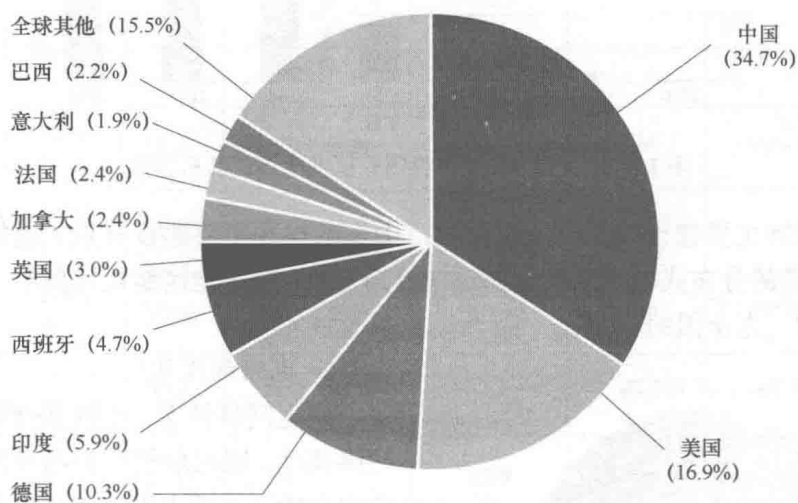


图 1-2 截至 2016 年全球风电累计装机容量

(2) 光伏发电。近年来，全球光伏发电产业增长迅猛，规模不断扩大。据国际能源署光伏电力系统项目发布的统计数据，2016 年全球光伏新增装机容量至少达 75GW，截至 2016 年底全球光伏累计装机量已达 300GW，已有 24 个国家迈过 GW 大关，6 个国家累计装机容量超过 10GW，4 个国家超过 40GW。2016 年，我国新增光伏装机容量 34.5GW，累计装机容量高达 78.1GW，已经跃居世界首位。截至 2016 年底，江苏省光伏发电机组装机容量 546 万 kW，位于全国前列，预计“十三五”期间达到 900 多万 kW。图 1-3 和图 1-4 分别展示了 2011~2016 年光伏发电新增装机容量及累计装机容量。

光伏应用主要以大型地面电站为主，但分布式比例已迅速提高。2015 年，我国分布式光伏发电区域分布情况如图 1-5 所示，全国累计光伏装机容量超过 100 万 kW 的省区达

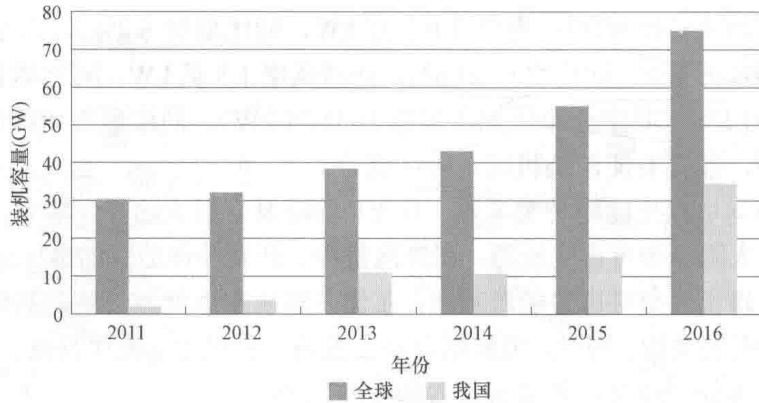


图 1-3 2011~2016 年光伏发电新增装机容量

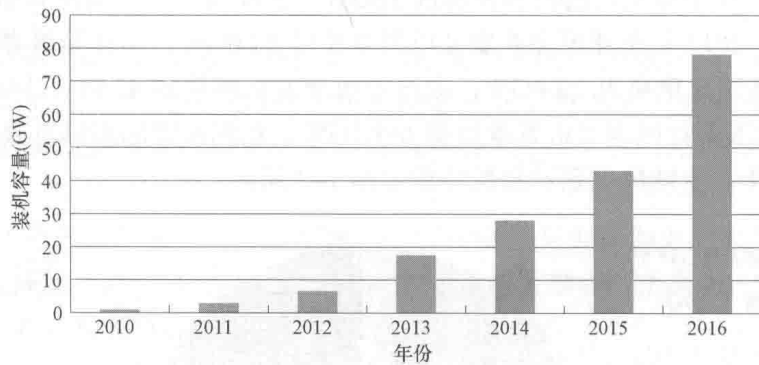


图 1-4 2011~2016 年我国光伏发电累计装机容量

11 个，西部地区主要建设集中式地面电站，中东部地区主要建设分布式电站，江苏、浙江、山东、安徽的分布式电站规模已超过 100 万 kW。华东地区装机比例最大，总装机容量 301.7 万 kW，占全国的 64%。

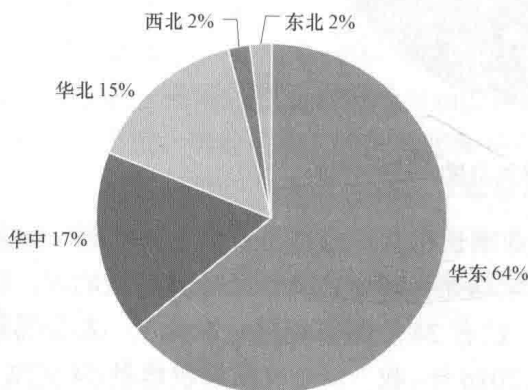


图 1-5 2015 年我国分布式光伏发电区域分布情况

2. 电网的发展

从电网特性看，电网基础设施本身具有网络属性，联网规模大有利于发挥其经济性和安全性。美国电网、加拿大和墨西哥部分电网已经组成北美互联电网，欧洲大部分国家也形成了互通互联的电网络局，俄罗斯、巴西和印度也形成了全国性的互联电网。1978 年以来，中国经济的快速发展带动了用电需求持续增长，为满足大规模投产和用电负荷的需要，电网规模不断扩大，从城市小电网、省级电网、区域电网，再逐步发展到全国联网（未含台湾）。在此过程中，电网输电技术不断发展，其中特高压输电技术具有输送容量大、距离远、效率高的特点，可以满足大容量、远距离的跨区联网要求，可有效缓解我国能源与负荷分布不均问题，增强电网运行的灵活性和可靠性，提升大规模清洁能源

源安全并网的消纳能力，在保障社会综合经济效益的同时有利于保护生态环境。

2009年1月6日，中国首个特高压工程1000kV晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程成功投运。“十二五”期间，我国在特高压交直流输电的试验研究、关键技术、装备制造、技术标准等领域取得全面突破。截至2016年4月，国家电网公司和南方电网公司共投运特高压工程9项。“十三五”期间，国家电网公司在建的特高压工程基本概况如表1-1所示。

表 1-1 国家电网公司在建特高压工程基本概况

序号	工程名称	类型	简名	线路长度 (km)	电压等级 (kV)	变电/换流容量 (万 kVA/万 kW)	投运时间 (年)
1	宁东—浙江特高压工程	直流	灵州—绍兴	1720	±800	800×2	2016
2	内蒙古锡盟—山东特高压输变电工程	交流	锡盟线	2×730	1000	1500	2016
3	蒙西—天津南特高压工程	交流	蒙天线	2×608	1000	2400	2016
4	淮南—南京—上海特高压交流输变电工程	交流	淮南—南京—上海	2×780	1000	1200	2016
5	酒泉—湖南特高压输电工程	直流	酒泉—湘潭	2383	±800	800×2	2017
6	榆横—潍坊特高压工程	交流	榆潍线	2×1049	1000	1500	2017
7	晋北—江苏特高压输电工程	直流	晋北—南京	1119	±800	800×2	2017
8	锡盟—江苏省泰州特高压工程	直流	锡盟—泰州	1641	800	1000×2	2017
9	上海庙—山东特高压工程	直流	上海庙—临沂	1238	±800	1000×2	2017
10	扎鲁特—青州特高压输电工程	直流	扎鲁特旗—青州	1200	±800	1000×2	2017
11	雅中—江西特高压输电工程	直流	盐源—抚州	1701	±800	1000×2	2018
12	准东—皖南特高压输电工程	直流	昌吉—宣城	3324	±1100	1200×2	2018

另外，配电网直接面向电力用户，是保障电力“落得下、用得上”的关键环节，是服务民生的重要基础设施。2013年7月，国务院常务会议提出加强城市配电网建设，这是近年来在国家层面第一次将配电网建设作为投资方向。2015年9月，国家能源局又发布《配电网建设改造行动计划（2015~2020年）》，期间配电网建设改造投资不低于2

万亿元。预计到 2020 年, 高压配电网变电容量达到 21 亿 kVA、线路长度达到 101 万 km, 分别是 2014 年的 1.5 倍、1.4 倍, 中压公用配电变压器容量达到 11.5 亿 kVA、线路长度达到 404 万 km, 分别是 2014 年的 1.4 倍、1.3 倍。

3. 负荷的发展

随着国家经济发展和人民生活水平的提高, 用电结构已经并将继续发生根本性变化, 电网峰谷差日益增大。我国的峰谷比一般为 1:0.7、美国的峰谷比为 1:0.25, 日本、德国、英国、法国和俄罗斯的峰谷比分别为 1:0.4、1:0.2、1:0.35、1:0.35 和 1:0.52, 一般发展中国家的峰谷比是 1:0.63。以 2016 年为例, 国家能源局发布 7 月份全社会用电量等数据, 数据显示全社会用电量 5523 亿 kWh, 同比增长 8.2%。随着各地用电量的持续攀升, 用电峰值不断被刷新。负荷尖峰问题在江苏省更加突显, 7 月 25 日, 江苏省最大调度用电负荷突破 9000 万 kW 大关, 达到 9238 万 kW, 成为历史新高。用电尖峰将直接导致电网负荷率下降, 峰谷差增大, 使得电力系统运行的效率下降, 损耗增加, 安全性和可靠性降低, 而且由于尖峰带来的备用容量提高使得用电成本大幅度增加, 不利于建设节能减排社会。因此削峰填谷、优化电力负荷曲线是亟待解决的问题。

随着新理论、新技术、新材料的快速发展, 负荷特性也在逐步演变。一方面, 传统负荷也能够根据激励或者电价来进行电力需求响应, 具备虚拟电厂或能效电厂的特性; 另一方面, 具有与电网双向互动能力的电动汽车、储能等带有源荷双重特征的新型负荷中的占比不断上升。上述两类负荷可以主动响应电网需求并在一定范围内进行用电调整, 确保电网安全、经济、可靠运行。柔性负荷指的是能够主动参与电网运行控制, 可以与电网双向互动, 并且具备需求弹性的可调节或可转移的负荷, 如空调、电动汽车、储能等设备。

(1) 电动汽车。

电动汽车不仅是电能的使用者, 同时也可以作为移动的、分布式储能单元接入电网。与其他负荷相比, 电动汽车可作为电能双向交易者, 在电网谷荷时以低廉的电价购入电能, 满足自身使用需要; 在峰荷时高价卖出电能或充当备用电源以获取利润。电动汽车不但能够起到更好的削峰填谷的作用, 而且还能作为系统的旋转备用。2016 年, 全球电动汽车销量骤增到 72.9 万辆。其中, 我国电动汽车销售达到 31 万辆, 销售量为全球最高; 美国约 16 万辆, 欧洲 20 万辆。截至 2016 年底, 我国电动汽车保有量约 109 万辆, 预计到 2020 年纯电动汽车和插电式混合动力汽车市场保有量将达到 500~1000 万辆, “十二五”期间我国电动汽车生产及销售情况如图 1-6 所示。随着新能源汽车规模的不断扩大, 完善公共充电设施是重中之重。2009 年, 国家电网公司推出了关于电动汽车充电设施推广的一系列计划, “十二五”期间累计建设换电站 1549 座、充电桩 24 万个, 预计到 2020 年国内充换电站数量将达到 1.2 万座, 充电桩达到 450 万个。图 1-7 为“十二五”期间国家电网公司建设充电桩和换电站情况。

(2) 储能设备。

储能技术的应用可以为电力系统增加具有“存储”电能的设备, 使原来几乎完全“刚性”的系统变得“柔性”起来, 电网运行的安全性、经济性、灵活性也因此得到大幅提高。储能设备在电力系统中的应用场景及作用如表 1-2 所示。

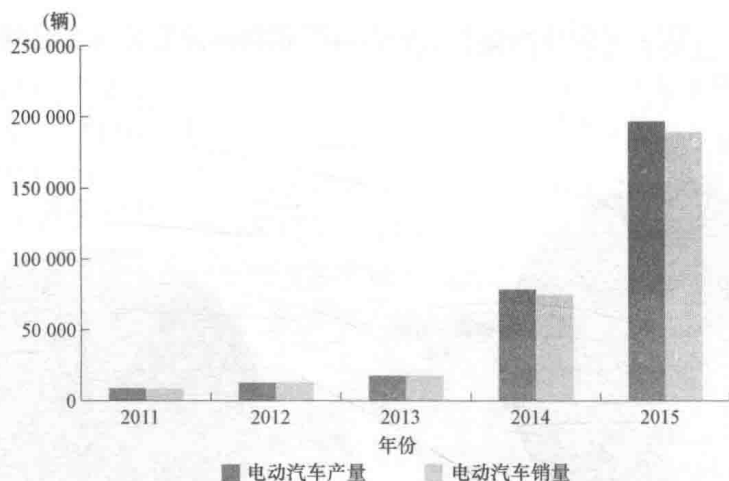


图 1-6 “十二五”期间我国电动汽车生产及销售情况

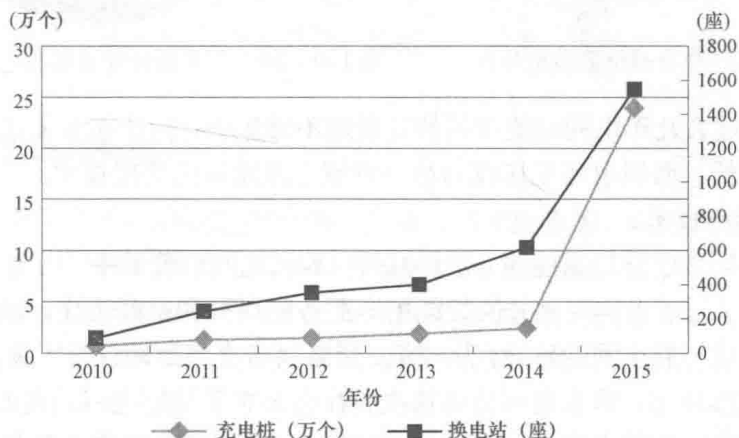


图 1-7 “十二五”期间国家电网公司建设充电桩和换电站情况

表 1-2 储能设备的应用场景及作用

应用场景	作用
发电系统	能量管理、削峰填谷、负荷跟踪、负荷调节
输配电系统	电压控制、电能质量改善、系统可靠性提高、资源利用率提高
辅助服务	频率控制、旋转备用管理、备用容量管理
新能源利用	可再生能源发电控制和系统集成、错峰发电、可再生能源储备
用户	不停电应用、穿透功率管理、外购电力优化、无功/电压支撑

电力系统中常用的储能技术主要有抽水蓄能技术、压缩空气储能技术、蓄电池储能技术、超导储能技术、超级电容储能技术和飞轮储能技术。近年来，储能技术得到飞速发展，截至 2015 年底，全球累计运行储能项目（不含抽水蓄能、压缩空气和储热）327 个，装机规模 946.8MW。预计到 2020 年，全球储能总装机规模将达 14.5~24.2GW。截至 2015 年底，中国累计运行储能项目（不含抽水蓄能、压缩空气和储热）118 个，累计装机规模 105.5MW，占全球储能项目总装机的 11%，年复合增长率（2010~2015 年）为 110%，是

全球的 6 倍之多。2015 年全球储能装机分布情况和我国储能设备在电网中应用场景分别如图 1-8 和图 1-9 所示。

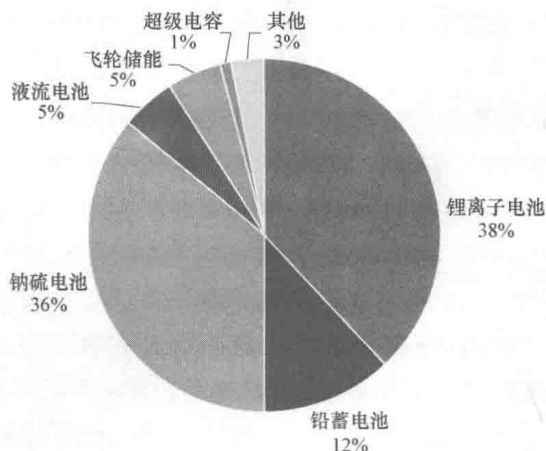


图 1-8 2015 年全球储能装机分布

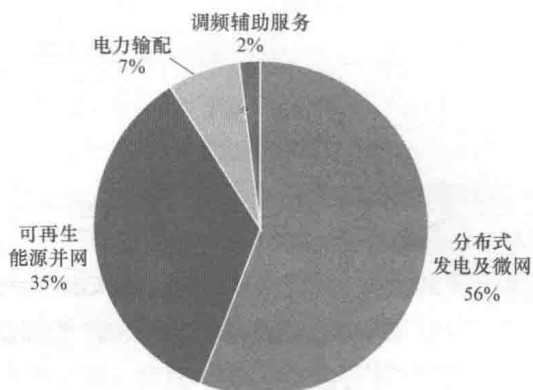


图 1-9 2015 年我国储能设备在电网中应用场景分布

总体来说，过去几年电网储能市场的发展还不够集中。预计在未来几年，电网储能市场将迎来快速增长，而锂电池正在成为这一领域飞速发展的突破技术。

(3) 智能用电技术。

世界发达国家基于发展新能源、节能减排、提高电网运营效率、改善供电服务质量等需要，陆续开展了与需求响应相关的智能用电服务的研究和实践工作。近年来，我国制定了一系列计划推动智能电网的建设，从政策、后备科研支撑层面保证了灵活互动的智能用电技术的发展。2009 年，国家电网公司首次向社会公布了智能电网的发展计划。2011 年，国家科技部开展国家高技术研究发展计划（863 计划）智能电网重大专项的研究，其中有相当大的比例是涉及智能用电方面的研究。2012 年，国家科技部发布《智能电网重大科技产业化工程“十二五”专项规划》，提出“十二五”期间我国将建设 5~10 个智能电网示范城市、50 个智能电网示范园区。智能小区、智能楼宇和智能园区的建设成为中国典型的智能用电实践。2010 年，国家电网公司首次在河北、北京、上海和重庆 4 个省市开展智能楼宇和智能小区试点工程建设，建成 2 个智能楼宇和 6 个智能小区。2011 年，甘肃白银、山东东营以及江苏南京等地开始建设国内首批智能园区，开展大用户能效监测、管理方案的实践。截至 2013 年底，国家电网公司已在 17 个省级公司建设 28 个智能小区，在上海、重庆、浙江建设 3 个智能楼宇。除此之外，国家电网公司构建了居民能效优化管理平台，该平台包括用户管理、设备管理、负荷查询等功能，同时推出用户“智电生活”手机 APP，实现居民智能化设备管理，为用户手机提供家用电器用电信息实时查询功能，引导居民改善用电习惯，在优化家庭用电方式的同时参与系统调峰。

以国网江苏省电力公司为例，该公司自 2009 年大力开展负荷柔性调控研究及实践以来，建成了全国最大的用电信息采集（含负荷控制系统）系统，实现全省工业、商业及居民用户用电信息的全采集；部署了面向全省公共楼宇大规模空调负荷有序削峰/虚拟调峰子系统。同时，通过免费发放节能插座，完成苏南地区 40 万户居民大功率用电设备调控试点；建成了面向负荷调控决策分析的有序用电辅助决策系统，可以实现高压专变用户、

公共楼宇用户以及居民用户的负荷调控计划有序安排、调控方案智能决策和调控全过程监控,可实现负荷的精准化控制。

4. 智能电网信息通信技术的发展

随着智能电网的发展、企业精益化管理及供电服务要求的不断提升,在物联网、人工智能、云计算、大数据等新技术的支撑下,电网生产、经营和服务模式发生变革,监控采集、移动作业、视频监控及用户互动等需求爆发式增长;随着“两个替代”与能源变革的深入推进,对分布式光伏、充电桩、储能等实时控制的需求逐步显现,对中低压电网实时感知的需求逐步加速。

未来,智能电网将研发以大数据、云计算、人工智能、物联网技术为代表的信息通信和智能电网融合应用的关键技术,推动电网生产运行全过程自动化、智能化,实现实时动态感知、全程在线交互;强化开发电网和企业运营类分析决策应用,推动电网运营全环节数字化、智慧化,实现全面风险预警、实时科学决策;推动电力数据融合,将经营管理、生产控制和公共服务等领域业务全面贯通,数据集中共享,推动业务模式创新和新型业态发展。

1.1.2 面临的机遇和挑战

伴随着全球化、市场化进程的加快和各类新兴技术的发展,电力系统也面临着新的机遇。在电网侧,统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)、基于电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)的高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)等先进电力电子装置的参与可以实现功率潮流调节,提高有效传输效率,大大提高了系统的可控性、可靠性以及灵活性。

在用户侧,随着分布式电源、储能、电动汽车、需求响应等多种新型用电形式的出现,电力用户由消费者逐步转变为消费者和供应者的双重身份。通过灵活的电力网络、高效设备和信息网络相连,形成高效完整的用电和信息服务网络;通过电网和用户的灵活双向互动实现电力资源的最佳配置。

另外,随着可再生能源发电、特高压工程和柔性负荷的快速发展,电力系统运行与控制面临着挑战。在区域电网方面,大规模特高压直流集中馈入带来的动态无功补偿不足问题越来越突出,存在着巨大的电压失稳风险;单回直流线路受电比例较大,一旦因设备故障、外力破坏、灾害、故障闭锁等原因而停运发生双极闭锁将导致电网频率急剧下降,严重情况下可能导致电网大范围停电或稳定事故,存在频率失稳风险。传统的应对措施主要是通过机组一次调频、自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)调节以及负荷快切,但对于一次调频和AGC方式,一方面由于本地电网调频电源能力已逐步逼近极限,调节的空间已不大;另一方面,深度调节容易引起局部短期超稳定限额运行,影响电网的安全稳定运行。对于传统的负荷快切方式,主要通过对于变电站出口处的开关直接进行拉闸限电,虽然可在短时间内将负荷控制到位,但由于负荷类型没有进行细分,无法保留用户保安电源、核心生产性设备等重要负荷,对用户影响较大,特别是当控制负荷量大时会产生较大的社会影响。可见,传统单向刚性的调节方式已不能适应特高压电网安全运行的要求,电力系统动态平衡能力调控手段亟待提高。