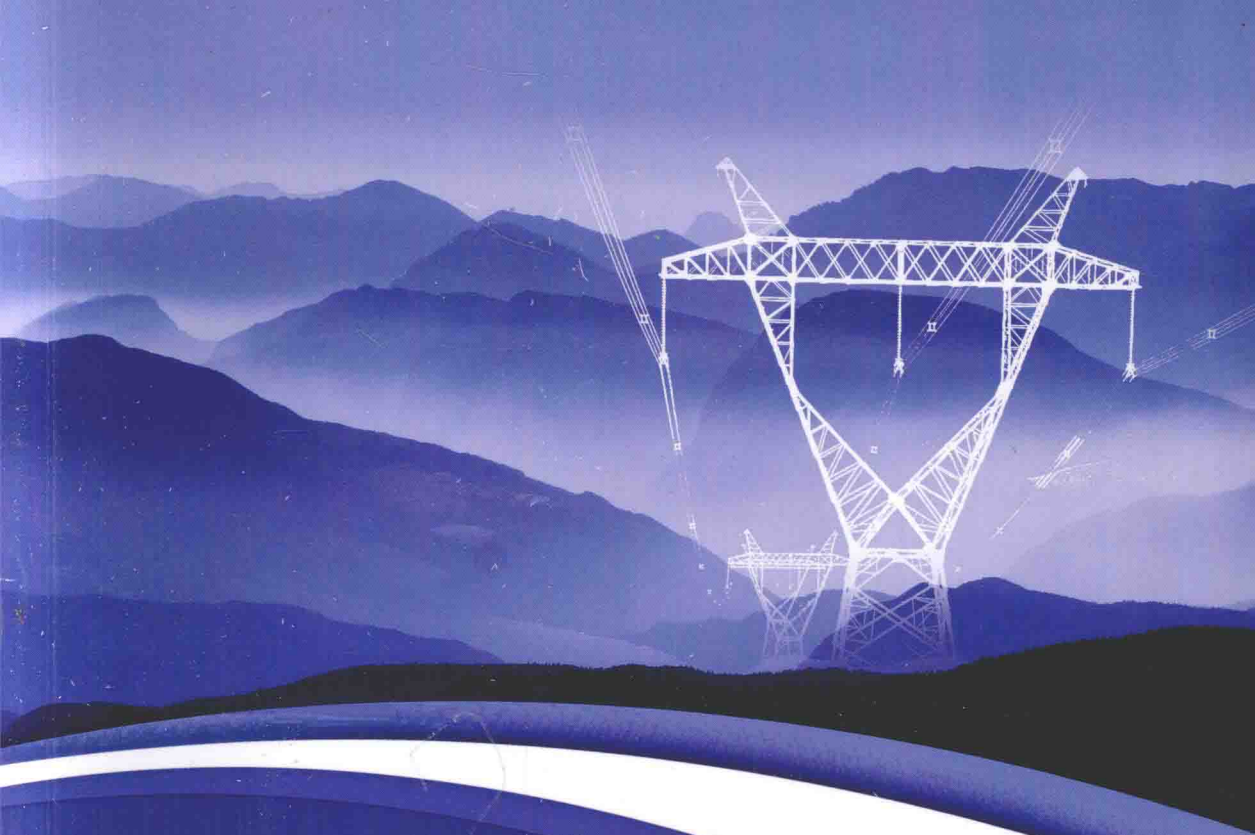




智能配电网 自愈控制技术

葛亮 等 编著

ZHINENG PEIDIANWANG
ZIYU KONGZHI JISHU



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

智能配电网 自愈控制技术

葛 亮 秦红霞 赵凤青 等 编著

ZHINENG PEIDIANWANG

ZIYU KONGZHI JISHU



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

自愈是智能配电网的重要特征,实现配电网自愈运行是提高供电可靠性、经济性和供电质量的关键。智能配电网自愈控制技术,旨在实现含分布式电源和微电网在内的配电网自愈运行,得到了国内外电力行业的普遍关注,也是我国统一坚强智能电网技术支撑体系研究的重要内容。

本书从智能配电网概述入手,引入了智能配电网自愈控制的概念,回顾了自愈控制技术发展历程,简介了配电网故障自愈控制的常见模式,介绍了智能配电网自愈控制的技术内涵、实施基础和智能配电网自愈控制系统架构,从主站、终端、保护、分布式电源和微电网、通信、测试六个方面详述了智能配电网自愈控制技术内容,并结合实际工程案例,介绍自愈控制的实现过程。

本书可供输配电相关专业的研究人员、规划设计人员和工程人员参考,也可作为智能配电网自愈控制相关的产品和系统研发人员提供有益帮助。

图书在版编目(CIP)数据

智能配电网自愈控制技术/葛亮等编著. —北京:中国电力出版社, 2016. 6

ISBN 978 - 7 - 5123 - 8933 - 5

I. ①智… II. ①葛… III. ①智能控制—配电系统—自动控制 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 033388 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 6 月第一版 2016 年 6 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 13 印张 220 千字

印数 0001—2000 册 定价 52.00 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

智能电网是未来电网的发展方向，近几年来国内外智能电网的研究和发展带动了整个电力系统的技术进步。智能配电网作为智能电网的重要组成部分，可以有效支撑分布式能源的接入，为用户提供更加安全、可靠、优质、高效和环保的服务，已成为电力领域一大研究热点。自愈是智能配电网的重要特征，自愈控制技术是实现智能配电网自愈的关键，备受国内外电力行业和研发单位的关注。

本书编者结合长期进行电力系统保护产品及自动化系统的研发和工程经验，分析和总结了智能配电网自愈技术的发展历程，从工程实践角度介绍了智能配电网自愈控制涉及的环节和关键技术。期望为读者全面了解自愈控制的基本概念、系统架构、关键技术和发展方向提供参考，为智能配电网的建设和发展尽绵薄之力。

本书的大部分内容和研究成果来源于实际产品研发或工程项目，包括多个国家级、省部级科研项目和公司内部项目等，尤其是书中有关主站技术的内容，主要借鉴了国家“863”计划课题相关的智能配电网自愈控制示范工程项目成果。配电终端、保护、微电网等方面的内容也多是实际项目中整理的关键技术和实践要点。本书章节安排如下：

第1章概述，主要介绍本书编写的背景；

第2章智能配电网自愈控制技术，主要概述配电网自愈控制技术的发展历程及各种模式，介绍自愈控制系统的总体架构、关键技术；

第3~8章分别从自愈控制涉及的技术环节：主站、终端、保护、分布式电源和微电网控制、通信和测试等几个方面，系统地描述自愈控制关键技术，并针对每个环节中的一些难点，结合编者的实践经验介绍了解决方案。

本书由葛亮、秦红霞、赵凤青等编著，葛亮负责统稿与审核。彭丽媛、谭志海、刘云、孙秋鹏、吉小鹏、许健、翁磊、彭世宽、谢晓冬、康泰峰参与了本书部分内容的编写，王家华、罗海波、金强、李继晟、刘志超、袁海涛等为

涛等为本书提供了部分素材。另外，还要感谢董旭柱博士及参与“863”课题智能配电网关键技术研究的其他相关单位和专家对本书编写的大力支持。本书的编写还借鉴参考了一些公开发表的研究成果，以及网络资料，在参考文献中已注明，在此表示感谢！

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免有疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2015 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 智能电网	1
1.2 智能配电网	6
1.3 智能配电网自愈控制	10
参考文献	11
第 2 章 智能配电网自愈控制技术	14
2.1 配电网自愈控制技术发展历程	14
2.2 配电网故障自愈控制的主要模式	17
2.3 智能配电网自愈控制系统	25
2.4 智能配电网自愈控制实践的关键技术	27
2.5 智能配电网新技术对自愈控制的影响	38
参考文献	41
第 3 章 自愈控制主站	42
3.1 自愈控制主站系统总体设计	42
3.2 自愈控制主站关键技术及实现	49
3.3 智能配电网自愈控制主站技术实践案例	81
参考文献	87
第 4 章 自愈控制终端	88
4.1 配电网终端设备	88
4.2 基于终端的自愈控制技术与实现	94
4.3 分布式智能自愈控制案例	118
参考文献	123
第 5 章 智能配电网保护技术	124
5.1 传统配电网继电保护技术概述	124
5.2 智能配电网保护技术与实现	126
参考文献	142

第 6 章 分布式电源和微电网的控制技术	143
6.1 分布式能源与微电网	143
6.2 储能与分布式电源协调控制技术	147
6.3 微电网并网切换技术	149
6.4 微电网并网控制技术	154
6.5 微电网离网控制技术	158
6.6 孤岛保护技术	160
参考文献	163
第 7 章 智能配电网通信技术	164
7.1 智能配电网的通信网络需求	164
7.2 智能配电网通信特点	166
7.3 配电通信网结构	167
7.4 智能配电网通信技术	168
7.5 智能配电网通信标准	169
7.6 IEC 61850 在配电通信中的应用	172
参考文献	181
第 8 章 自愈控制系统测试	182
8.1 自愈控制系统测试技术概述	182
8.2 主站功能仿真测试	187
8.3 基于 RTDS 的动模仿真测试	191
参考文献	200

概 述

1.1 智 能 电 网

进入 21 世纪以来,人类社会正经历深刻的变革。以互联网为代表的信息革命、以机器人为代表的工业革命,以及以新能源为代表的能源革命将深刻地改变人类社会的生产生活方式。能源是人类赖以生存和发展的基础,而电能作为最清洁、便利的能源形式,是国民经济的命脉。电能占终端能源消费的比重代表电力替代煤炭、石油、天然气等其他能源的程度,是衡量一个国家终端能源消费结构和电气化程度的重要指标。2011 年世界大国中,日本电能占终端能源消费的比重最高,达到了 25.7%。2012 年中国电能占终端能源消费比重达到 22.6%,低于日本、韩国、法国、西班牙,高于巴西、俄罗斯、印度。国际能源署(IEA)研究表明,提高电气化水平是全球能源系统发展的驱动力。世界电力增长超过所有其他终端能源品种,在过去的 30 多年,电能占终端能源消费比重从 9% 提高到 17%,2050 年前将提升至 25% 以上,这意味着电能消费还有很大的提升空间^[1,2]。

电力生产的过程就是大规模地将各种类型的一次能源转换为容易输送和方便转换的电能,并输送分配的过程。电网作为电力生产的关键环节,是国家社会生产和人民生活的命脉。智能电网是当今世界电力系统发展变革的最新动向。近年来,世界各国特别是美国和欧洲各国在智能电网方面开展了大量的研究与实践。自智能电网概念传入中国以来,国内电网企业、高校、研究机构等纷纷启动智能电网相关研究,并取得了令人瞩目的成就。但由于各个国家的国情和发展阶段不同,大家对智能电网具体内涵与技术框架的定义不尽相同,侧重点也有所差别。

1.1.1 国外智能电网

以美国来说,美国在本世纪初启动了未来电网研究,目的是解决美国电网由于设施陈旧、基础架构老化等导致的输电阻塞,市场效率低,二次系统与通信信息技术发展脱节等问题。2001年美国电力研究协会(Electric Power Research Institute, EPRI)启动“IntelliGrid”研究,致力于为未来电网建立一个全面、开放的技术体系,支持电网及其设备间的信息交换。其最主要的研究成果是IntelliGrid框架,即通过开放、标准、基于需求的方法实现数据和设备整合,允许不同设备和系统互操作。2003年美加大停电后,美国决心开展智能电网研究,利用信息技术对陈旧老化的电力设施进行彻底改造^[3,4]。

2007年12月美国颁布《能源独立与安全法案》,法案首次明确了智能电网的概念^[5,6]:“智能电网是一个通过双向电力流和信息流网络将分布式电源(Distributed Generation DG)、高电压网络、储能装置、智能家居、电动汽车等智能体有机连接在一起的现代电力网络,实现发电、输电、配电和用电的全方位监控、保护和优化运行。”由此确立了美国国家层面的电网现代化政策。

2008年国际金融危机是美国智能电网研究的一个转机。能源产业是美国拉动内需和科技创新的最佳结合点。创造一个超越互联网革命的新能源产业革命,以此拉动美国和全球经济的转型,成为奥巴马新政的重要选项。为此,奥巴马提出了推动智能电网发展的新能源计划:着重对电网进行升级换代,建立横跨四个时区的统一电网;最大限度发挥电网的价值和效率,逐步实现太阳能、风能、地热能的统一入网管理;全面推进分布式能源管理,创造世界上最高的能源使用效率^[7,8]。

而在欧洲,电网建设的驱动因素可以归结为市场、安全与电能质量、环境三方面。欧洲电力企业受到来自开放的电力市场的竞争压力,电力需求趋于饱和,亟须提高用户满意度,争取更多用户^[9]。因此提高运营效率、降低电力价格、加强与客户互动就成为了欧洲智能电网建设的重点之一。与美国用户一样,欧洲电力用户也对电力供应和电能质量提出了更高的要求。而对环境保护的极度重视,则造成欧洲智能电网建设比美国更为关注可再生能源的接入。

2005年欧盟委员会成立了智能电网的技术论坛,通过专家委员会、工作组的活动并组织有关会议讨论,提出欧洲智能电网愿景框架。2006年欧盟委员会发布《欧洲未来电网的远景和策略》,强调欧洲已经进入一个新能源时代,能源政策最重要的目标是供电的可持续性、竞争性和安全性。作为欧洲2020年及后续的电力发展目标,未来欧洲电网应满足灵活性、可接入性、可靠性和

经济性的需求。2007 年欧盟委员会发布《欧洲未来电网的战略性研究议程》，讨论了智能配电系统、智能运行和负荷管理、智能电网资产管理、欧洲智能互联电网、智能电网技术框架体系 5 个研究领域及任务，并在欧盟有关正式文件中落实了上述领域的研发投资手段。2008 年欧盟委员会发布《欧洲未来电网的战略部署文件》，主要强调部署和实施。该方案在原有远景和框架研究的基础上进一步落实了智能电网建设的战略规划，具体提出了智能电网各研究领域的技术架构、规章制度、标准、风险和机会、成本和收益、环境影响和社会效益^[10]。

《欧洲未来电网的远景和策略》中给出了智能电网的定义：能够高效地应对未来欧洲电网出现的新挑战和机遇，给所有用户和利益相关者带来效益的电网；能充分开发利用欧洲范围内的大型集中式发电和小型分布式电源，为所有用户提供高效可靠、灵活、易接入和经济的电能；通过全网范围内的互操作保证电网运行的安全和经济；实现终端用户参与电力市场运作和与电网间的灵活互动^[11]。欧洲智能电网的核心目标是实现可持续发展和电力高效传输，主要目标是通过智能电网建设向用户提供高度可靠、经济有效的电能；充分利用大型集中发电和小型分布式电源，提高电网公司运营效率、降低电力价格、加强与客户互动，应对来自市场、安全与电能质量、环境 3 个方面的压力。欧洲智能电网具有 4 个典型特征，即灵活、易接入、可靠、经济。实现智能电网优化运行所需技术包括 5 个方面：①配电网技术；②新型输电技术；③广域通信，保护网络化、在线服务和需求响应；④新型电力电子技术；⑤储能装置^[12]。

1.1.2 国内智能电网

在我国，由于国情、发展阶段及资源分布的不同，智能电网和美国、欧洲的智能电网相比在内涵及发展的方向、重点等诸多方面有明显的中国特色。在国际智能电网研究与建设大潮的影响下，以国家电网和南方电网为代表的中国电网企业及相关科研机构基于中国的实际情况开展了大量的技术研究和试点建设，提出了中国版的智能电网架构和技术路线。

2009 年 5 月 21 日，国家电网公司在“2009 特高压输电技术国际会议”上提出了名为“坚强智能电网”的发展规划，随后又完善为“统一坚强智能电网”，即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，利用先进的通信、信息和控制技术，构建以信息化、自动化、数字化、互动化为特征的国际领先、自主创新、中国特色的坚强智能电网。其基本特征是技术上体现信息化、数字化、自动化、互动化，管理上体现集团化、集约化、精益

化、标准化。信息化是坚强智能电网的基本途径，体现为对实时和非实时信息的高度集成、分析与利用，为智能决策提供支撑；数字化是坚强智能电网的实现基础，清晰表述电网对象、结构、特性及状态，实现各类信息的精确高效采集与传输；自动化是坚强智能电网发展水平的直观体现，依靠高效的信息采集传输和集成应用，实现电网自动运行控制与管理水平提升；互动化是坚强智能电网的内在要求，通过信息的实时沟通及分析，实现电力系统各个环节的良性互动与高效协调，提升用户体验，促进电能的安全、高效、环保应用。坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动是坚强智能电网的基本内涵。坚强可靠是指拥有坚强的网架、强大的电力输送能力和安全可靠的电力供应；经济高效是指提高电网运行和输送效率，降低运营成本，促进能源资源的高效利用；清洁环保是指促进可再生能源发展与利用，减少化石能源消耗，提高清洁电能终端能源消费中的比重，降低能耗并减少排放；透明开放是指为电力市场化建设提供透明、开放的实施平台，提供高品质的附加增值服务；友好互动是指灵活调整电网运行方式，友好兼容各类电源和用户接入与退出，激励电源和用户主动参与电网调节^[13]。

2009年南方电网提出“实事求是研究推进智能电网建设”的总体思路，以提高供电可靠率为总抓手，促进电网规划、建设、运行、服务、技术、管理等各方面的全面协调可持续发展；大力加强各级电网的建设，促进各电压等级电网的协调发展，不断提升电网的技术水平，增强驾驭复杂大电网的能力；坚持“以客户为中心”的理念，持续优化业务流程、提高服务能力和服务水平；积极推动节能减排新技术的开发，做好技术储备，为接入新能源提供良好的条件。

自2009年正式启动智能电网建设以来，我国的智能电网建设发展迅速，取得了丰硕的成果，全面突破从发电到用电各技术领域的核心技术，推动我国电网技术在国际上由“跟随者”向“引领者”的转变。尤其是“十二五”期间，我国智能电网进入全面建设阶段，通过并验收了多个智能电网示范工程项目，比如江西共青城智能电网综合示范工程、上海嘉定安亭充换电站工程、湖南韶山智能电网综合建设工程、重庆新能源汽车充换电站、西藏大规模光伏发电并网智能化工程和全钒液流电池储能应用试点工程等。这些示范工程项目的相关技术整体上达到国内先进水平，其中智能电网相关系统集成及可视化、多能源联合调控、电动汽车双枪快充及自动换电、全钒液流电池检测评价等技术都达到了国内领先水平。2013年，国家主席习近平提出“一带一路”战略构

想,作为服务经济社会发展的重要基础,电网建设更是基础设施建设的重中之重。建设坚强智能电网,实现电网高水平互联互通,对于促进能源资源优化配置,实现能源安全发展、清洁发展、绿色发展具有重要意义。

最近,随着能源互联网概念的提出,专家认为未来的智能电网就是能源互联网^[14]。能源互联网将代表未来信息与能源—电力技术深度融合的必然趋势,是新一代工业革命大潮的重要标志,也是智能电网的重要组成部分和未来发展前沿。它以互联网思维与理念构建的新型信息—能源融合“广域网”,它以大电网为“主干网”,以微电网、分布式能源等能量自治单元为“局域网”,以开放对等的信息—能源一体化架构真正实现能源的双向按需传输和动态平衡使用,因此可以最大限度的适应新能源的接入。2013年12月国家电网公司在科技日报发文明确指出,未来的智能电网就是“能源互联网”。2014年2月和6月国家电网公司于南京和北京召开“智能电网承载第三次工业革命”研讨会,中国电科院于2014年6月启动了“能源互联网技术架构”方面的基础性、前瞻性项目研究。2014年7月,IEEE电力与能源协会年会在美国华盛顿特区举行,国家电网公司发表署名文章“构建全球能源互联网,服务人类社会可持续发展”。

目前,随着新一轮电改方案逐步落实,市场进一步打开,再加上国内打造智能微电网的新兴产业竞争激烈,我国智能电网发展空间将在一定程度上得到拓展。为此,2015年,国家电网公司计划完成6类41项智能电网创新示范工程建设任务,其中包括支持新能源开发工程、支撑分布式电源应用工程、促进便捷用电工程、推动电动汽车发展工程、服务智慧城市建设工程和提升电网智能化工程等^[15]。

此外,有分析指出,未来的10~20年将是我国智能电网建设的主要时期,智能电网总投资规模预计接近4万亿元^[16]。随着智能电网进入全面建设的重要阶段和我国城镇化建设的进一步推进,城乡配电网的智能化建设将全面拉开,智能电网及智能成套设备、智能配电、控制系统三大领域将迎来黄金发展期。

由上述可知,尽管各国智能电网的发展不同,其概念和内涵有所差别,但总体来说,智能电网的概念涵盖了提高电网科技含量,提高能源综合利用效率,提高电网供电可靠性,促进节能减排,促进新能源利用,促进资源优化配置等,最终实现电网效益和社会效益的最大化。从中可以看出,智能电网首先是一种国家发展战略,其次才是一门行业技术,代表着未来电网发展方向。

1.2 智能配电网

智能配电网 (smart distribution grid, SDG) 是智能电网中配电网部分的内容, 它以配电网高级自动化技术为基础, 通过应用和融合先进的测量和传感技术、控制技术、计算机和网络技术、信息与通信等技术, 利用智能化的开关设备、配电终端设备, 在坚强电网架构和双向通信网络的物理支持以及各种集成高级应用功能的可视化软件支持下, 允许可再生能源和分布式发电单元的大量接入和微电网运行, 鼓励各类不同电力用户积极参与电网互动, 以实现配电网在正常运行状态下完善的监测、保护、控制、优化和非正常运行状态下的自愈控制, 最终为电力用户提供安全、可靠、优质、经济、环保的电力供应和其他附加服务^[17]。

1.2.1 智能配电网的特点

智能配电网与传统配电网相比, 具有以下功能特征^[18]:

(1) 自愈能力。自愈是指 SDG 能够及时检测出已发生或正在发生的故障并进行相应的纠正性操作, 使其不影响对用户的正常供电或将其影响降至最小。自愈主要是解决供电不间断问题, 是对供电可靠性概念的发展, 其内涵要大于供电可靠性。例如目前的供电可靠性管理不计及一些持续时间较短的断电, 但这些供电短中断往往会使一些敏感的高科技设备损坏或长时间停运。

(2) 具有更高的安全性。SDG 能够很好地抵御战争攻击、恐怖袭击与自然灾害的破坏, 避免出现大面积停电; 能够将外部破坏限制在一定范围内, 保障重要用户的正常供电。

(3) 提供更高的电能质量。SDG 实时监测并控制电能质量, 使电压有效值和波形符合用户的要求, 既能够保证用户设备的正常运行又不影响其使用寿命。

(4) 支持分布式能源 (Distributed Energy Resource, DER) 的大量接入。这是 SDG 区别于传统配电网的重要特征。在 SDG 里, 不再像传统电网那样, 被动地硬性限制 DER 接入点与容量, 而是从有利于可再生能源足额上网、节省整体投资出发, 积极地接入 DER 并发挥其作用。通过保护控制的自适应以及系统接口的标准化, 支持 DER 的“即插即用”。通过 DER 的优化调度, 实现对各种能源的优化利用。

(5) 支持与用户互动。与用户互动也是 SDG 区别于传统配电网的重要特

征之一。主要体现在两个方面：一是应用智能电表，实行分时电价、动态实时电价，让用户自行选择用电时段，在节省电费的同时，为降低电网高峰负荷作贡献；二是允许并积极创造条件让拥有 DER（包括电动车）的用户在用电高峰时向电网送电。

（6）对配电网及其设备进行可视化管理。SDG 全面采集配电网及其设备的实时运行数据以及电能质量扰动、故障停电等数据，为运行人员提供高级的图形界面，使其能够全面掌握电网及其设备的运行状态，克服目前配电网因“盲管”造成的反应速度慢、效率低下问题。对电网运行状态进行在线诊断与风险分析，为运行人员进行调度决策提供技术支持。

（7）更高的资产利用率。SDG 实时监测电网设备温度、绝缘水平、安全裕度等，在保证安全的前提下增加传输功率，提高系统容量利用率；通过对潮流分布的优化，减少线损，进一步提高运行效率；在线监测并诊断设计的运行状态，实施状态检修，以延长设备使用寿命。

（8）配电管理与用电管理的信息化。SDG 将配电网实时运行与离线管理数据高度融合、深度集成，实现设备管理、检修管理、停电管理以及用电管理的信息化。

1.2.2 智能配电网现状

智能配电网已经在全世界配电网的实际应用中成为现实。在北美、在欧洲，智能电网的真正重点都在于配电网。

目前，欧洲配电网已经处于较成熟的阶段，负荷增长缓慢，电网发展的最根本出发点是推动欧洲的可持续发展，减少能源消耗及温室气体排放。围绕该出发点，欧洲的智能配电网目标是支撑可再生能源以及分布式能源的灵活接入，以及向用户提供双向互动的信息交流等功能。欧盟计划在 2020 年实现清洁能源及可再生能源占其能源总消费 20% 的目标，并完成欧洲电网互通整合等核心变革内容。

英国目前正在加大安装智能电表，准备扩大现有的基础设施和继续推进试点工程建设，为以后大规模的研发提供方案和数据支持。并计划在下一阶段大量发展分布式能源和清洁能源，同时增加智能家居、智能家庭、嵌入式储存和分布发电以及虚拟电池的应用，并通过智能设计和强化电压设计等提高整个电网的自动化、智能化和控制力。

法国以更好地接纳清洁能源为目标，并计划到 2020 年风电达到 20GW，比目前提高 300%，同时，法国配电公司（Electricite Reseau Distribution

France, ERDF) 将逐步把居民目前使用的普通电表全部更换成智能电表, 推进以智能电表为核心的用户端技术服务。在德国, 全境到处都建设了风力发电机组, 其太阳能热利用和光伏发电技术也是处于世界领先地位的。

目前德国启动了不少的示范工程, 大力发展清洁能源, 太阳能发电、风力发电、生物质能发电、地热发电、水力发电五项可再生能源贡献电力的比重不断增加。

意大利特别重视节能应用以及智能电网的相关建设, 通过历时 5 年(自 2005 年起)的持续建设, 意大利已经将智能电表的全国覆盖率提升至 85% 以上, 成为目前全球智能表计覆盖比率最高的国家。意大利在智能配电网方面还积极开展互动式配电能源网络及自动抄表管理系统的研究与应用工作; 放弃核能; 重点推进电动汽车和太阳能接入并网的相关工作和用户侧的数据利用工作^[19,20]。

在北美, 尤其是美国, 其驱动力主要与峰荷的提高和基础设施老化的供电安全性有关。例如, 在 2012 年的超级风暴桑迪之后, 纽约州和新泽西州州长为基础设施强化和升级制定了数十亿美元的投资计划。新泽西州的电力和天然气公共服务公司提出了能源强化计划, 将在 10 年内投资 39 亿美元, 以提高和强化脆弱的变电站, 提高对智能电网技术故障的检测和应对, 并加强或埋藏配电路等。目前, 美国电网正经历着巨大的变革, 其智能配电网建设在许多方面都有进步, 比如高级量测体系 (Advanced Metering Infrastructure, AMI), 包括智能电表、通信网络和信息管理系统, 正在提高公共事业的运作效率, 为电力客户提供信息以更有效地控制能源消费。据估计, 截止到 2015 年, 美国将安装 6500 万个智能仪表, 超过电力客户的 1/3。在美国俄克拉荷马州天然气与电力公司, AMI 与家用终端显示技术相结合, 大大降低了电站的峰值需求。美国的智能配电网的应用可以实现自动定位、隔离故障。2012 年 7 月 5 日, 美国查特努加市曾遭受严重风暴袭击, 但很快通过使用自动馈电开关恢复了一半居民的供电。通信方面, 美国智能配电网技术的应用增加了传统公用事业机构数据通信的挑战。虽然美国也在使用光纤电缆, 但基于无线电频率的网状网络已经使 AMI 和配电自动化部署在北美成为领先技术, 许多美国市政公用设施也使用微波或无线网络广域通信的 AMI 回程和配电应用。为了满足高速、高安全性需求, 西部电力协调委员会使用安全的光纤广域网, 建成了与国家空中交通管制网络同一水平、发送同步相量测量装置 (Phasor Measurement Unit, PMU) 数据不到 30 ms 的电网控制中心。同时, 通信的高要求也促进

了关键基础设施的更换。另外,日益严重的环境问题和技术价格的降低导致分布式能源被越来越多地采用,包括分布式发电、电动汽车及能量存储。分布式能源在美国发电量的比重非常小,但在未来 10 年中,其安装规模和速度将有所增加,特别是在政策和可持续性配额制鼓励的地区^[21]。

而在中国,由于经济仍然快速增长,其驱动力主要是应对电力需求的增长。早期由于投资严重不足,制约了智能配电网的发展,但目前智能电网发展投资力度加大,智能配电网技术已经得到了较为广泛的应用。配电网自动化建设的有力推进,使得全国约 300 个城市的配电网智能化水平提高,供电可靠性明显改善^[22]。例如,近年,辽宁沈阳供电公司结合沈阳市智慧城市发展规划,完善智能服务系统,推广智能路灯,加快推进智能电网建设。国网北京电力于 2014 年启动了为期四年的配电网专项建设改造工程^[23],最终目标是实现网架结构、光纤通信和配电自动化水平、装备水平等方面的全面提升,打造国际一流的智能配电网。2015 年 1 月,国家高技术研究发展计划(863 计划)“智能电网关键技术研发(一期)”项目——“智能配电网自愈控制技术与开发”课题在广东佛山成功验收。项目中的自愈系统是南方电网投运的全国首个智能配电网自愈控制系统^[24],可在 0.12s 内切除故障,项目成功运转后,示范区内配电网 2s 内可实现转供电,供电可靠率达 99.999%,处于国际领先水平,并有效解决分布式能源大量接入配电网带来的控制保护、运行问题。2015 年 3 月底,河南省成立低碳智能农村电网工程研究中心,大力开发高效利用太阳能资源的农村家用自备光伏发电系统,光伏产业循环经济相关技术研究,为我国分布式光伏智能配电网产业技术进步,最终实现全面赶超国际先进水平提供技术支撑^[25]。2015 年,西宁市配电网核心区智能化改造工程也进入准备阶段,这项历时 3 年的优化配电网供电能力工程项目,已全面进入“十二五”电网发展最后收官之际。至此,西宁市智能化配电网将全新“亮相”,西宁城市配电网挤进国际先进水平的配电网的行列^[26,27]。

当然,智能配电网的发展是一个长期的过程,目前面临着各种挑战^[28,29]:

(1) 采用新技术的基础设施大量增加,迫切需要更深地挖掘其功能、风险等,需要运行人员更多的专业知识,需要构建更灵活的网架结构。

(2) 标准化的缺乏,比如通信方面,标准和协议的缺乏会阻碍数据的顺利交换,不利于系统优化,降低系统效率;电力系统设备之间互联标准的缺乏,使得系统不能从全局来考虑协调运行。

(3) 大数据的管理。我们已经进入大数据时代,智能配电网将会产生大量

的数据,但各种层面上的信息垄断与信息孤岛严重阻碍了信息共享,不利于系统更先进更精细化的管理,同时大量的数据也造成了新的数据安全问题。

(4) 储能。目前,电网储能还处于开发和配置的初期阶段,很难评价哪一种储能技术对智能电网是最适宜的,但是从可再生能源使用角度看,高效、长寿命、可靠、价格合理、有较长放电持续时间的化学电池的开发是当前最迫切的。

(5) 能源效率、需求响应和负荷控制。我国现行电价是扭曲的,低电价很难通过智能电网来刺激居民用户进行需求响应,由于电价低致使投资回收不确定,影响需求响应的获得和分布式电源投资的不确定性。

1.3 智能配电网自愈控制

智能配电网是智能电网的重要组成部分,自愈控制作为智能配电网的“免疫系统”,是保证智能配电网实现智能化运行的重要环节。

“自愈”概念源于医学领域,是指人体和其他生命体在遭遇外来侵害或出现内在变异等危害生命情况下,维持个体存活的一种生命现象,具有自发性、非依赖性和作用持续性等显著特点。之后,“自愈”概念被引入工程领域,如通信领域的双环“自愈”,通过通信网络拓扑结构上的双环热备用保证较高的通信可靠性、使整个通信系统表现出很强的自我修复能力。系统论中定义自愈为“系统察觉自身状态,并在无人干预的情况下,进行适当调整以恢复常态的性质”。“电网自愈”是随智能电网的概念而提出的,“自愈”是智能电网的核心特征。

智能配电网的“自愈”能力是指智能配电网可以准确预测缺陷状态和及时警报已经发生的故障状态,并实施对应的可靠措施,使配电网不会大范围停止正常供电或将其停电范围降到最低程度。自愈控制技术主要是解决一个问题,即“不间断供电”,通过信息系统及辅助设备实时监测电网的运行状态,及时预测设备缺陷情况,快速消除安全隐患和自主排除电网故障^[30]。

目前智能配电网自愈控制还没有统一的定义。智能配电网自愈控制可以描述为:在配电网的不同层次和区域内实施充分协调且技术经济优化的控制手段与策略,实现配电网在不同状态下的安全、可靠与经济运行,即在正常情况下预防事故发生,实现运行状态优化;在故障情况下可以快速切除故障,同时实现自动负荷转供;在外部停运情况下,可以实现与外部电网解列,孤岛运行,