

电力光纤传感技术 及其工程应用

郭经红 陈 硕 吕立冬 梁 云 等 编著



科学出版社

电力光纤传感技术及其工程应用

郭经红 陈 硕 等 编著
吕立冬 梁 云

国家 863 项目“新型电力传感应用、信息感知与高效通信技术研究”

(2012AA050802)

国家电网公司重大科技项目“电力光纤传感、信息感知与光纤无线融合
通信技术研究”

资助

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书紧跟全球能源互联网发展趋势,简述光纤传感器的基本机理,强调光纤传感器的工程应用问题,重点介绍电力行业中电力开关柜、变压器、电抗器、刀闸开关、绝缘子、输电线路、电力通信光缆等健康监测常用的光纤传感器,如分布式光纤传感器、光纤光栅传感器等,以及智能变电站建设中必不可少的全光纤电流互感器等。

本书可作为电力工程技术人员和从事光电技术研究以及光纤传感器开发相应人员的培训教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力光纤传感技术及其工程应用/郭经红等编著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-050100-4

I. ①电… II. ①郭… III. ①电力系统—光纤传感器—研究
IV. ①TM73②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 233560 号

责任编辑:胡 凯 王腾飞 曾佳佳/责任校对:王 瑞

责任印制:张 伟/封面设计:许 瑞

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京数图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 10 月第一次印刷 印张:12

字数:250 000

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《电力光纤传感技术及其工程应用》编委会

主 编	郭经红	陈 硕	吕立冬	梁 云
编 委	刘占元	侯继彪	喻 强	孙海江
	卜宪德	姚继明	孙晓艳	张 浩
	田文锋	刘 川	虞 跃	李炳林
	张增华	刘世栋		

前 言

进入 21 世纪以来,全球气候变化剧烈、自然灾害频发、环境污染严重、传统能源短缺等问题日益突出。同时,经济的发展、社会的进步以及人类对能源安全、能源效率、能源需求的提高,给电网的发展和安全运行提出了更高的要求。依靠现代信息、通信和控制等技术,积极发展智能电网,适应可持续发展的要求,已经成为电力工业积极应对未来挑战的共同选择。智能电网发展对智能感知技术提出了更高要求,需要传感器和传感器网络立体化、网络化覆盖电网主要量测节点和设备,实时触摸电网的海量、动态信息,灵敏、精准地实现电网状态的泛在感知与量测、电网复杂现场环境数据的可靠传输与安全接入。

光纤的无源、抗电磁干扰、耐腐蚀、耐高温等特点非常切合其在电力行业的应用。目前,光纤光栅传感在开关柜温度监测、电流量测、电抗器温度/应力监测、变压器绕组温度监测、变压器油老化监测、复合绝缘子应力监测、杆塔拉力监测、大坝和风机叶片应力监测等领域已开展了前期研究。另外,国内外一些著名的电力设备生产商相继开发出了各种电压等级和精度的全光纤电流互感器,目前,已有数千台设备在智能变电站中开始推广应用。光时域反射仪已普遍应用于电力光纤通信线路故障识别与定位,相应重点光纤线路的监测数据还接入了电力信息管理系统,为电力通信业务的安全性、可靠性和实时性提供辅助服务。近年来针对电力光纤通信线路的雷击定位、覆冰预警、舞动和振动监测等新的技术方案报道层出不穷。拉曼光时域反射仪、布里渊光时域反射仪、布里渊光时域分析仪以及其与光纤光栅的联合传感技术在架空输电线路、杆塔、地理电缆、海底电缆、变压器、水电坝体等实体上得到试点应用,而且,在应用的深度和广度上还将会快速拓展。因此,电力光纤传感机理由单一机理向多机理、传感参量由单一参量或少参量向多参量发展,是电力设备、设施监测需求的多元化、多参量化造成的,只有这样才能基于足够多的传感信息得到更加准确的综合诊断结果,从而避免事件的误报、漏报对电网运行造成影响。

2012 年 10 月,我们联合南京大学召开了“光纤传感技术及其在智能电网中的应用国际研讨会”。国内外知名的专家和工程师参加了本次研讨会,汇报了光纤传感技术在电力行业应用研究和试点的成果,对一些具有挑战性的关键技术和工程应用问题展开了深入讨论,并对光纤传感器未来在电力行业的推广应用充满了期待。未来的智能电网,将是网架坚强、广泛互联、高度智能、开放互动的“能源互联网”,我们有理由相信,光纤传感产业将在电力行业得到迅猛发展。

本书的编写人员全部是电力系统内一线工程师和科研人员，在光纤传感技术及其电力应用领域有着丰富的理论和实践经验，承担或主要参与了多项国家 863 或国家电网公司重大科技项目。本书简述了光纤传感技术的基础理论，重点突出光纤传感技术的电力工程应用研究，方便电力行业从业人员更好地从工程应用角度去研究适合具体电力工程应用的光纤传感技术。由于智能电网的相关技术发展十分迅速，而成书时间仓促且编者水平有限，书中难免会有疏漏之处，敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 智能电网简介	1
1.1 智能电网概述	1
1.1.1 传统电网与智能电网	1
1.1.2 智能电网的定义与技术特征	2
1.1.3 智能电网与能源互联网的国外发展现状	3
1.2 我国坚强智能电网的发展与实践	5
1.2.1 坚强智能电网的基本内涵	6
1.2.2 坚强智能电网的发展目标和发展方向	7
1.2.3 坚强智能电网各个环节的建设实践	8
1.2.4 能源互联网的发展趋势	10
1.3 面向智能电网应用的智能感知技术	11
1.3.1 智能电网中的传感器及传感网技术	11
1.3.2 智能电网中的通信网络技术	12
1.3.3 研究智能感知技术的作用及其意义	12
参考文献	13
第 2 章 光纤与光纤器件	15
2.1 光纤	15
2.1.1 光纤结构	15
2.1.2 光纤分类	15
2.1.3 光纤接头	18
2.2 光纤器件	20
2.2.1 无源光纤器件	21
2.2.2 有源光纤耦合器件	23
2.3 本章小结	28
参考文献	29
第 3 章 全光纤电流互感器	30
3.1 电子式互感器综述	30
3.1.1 电子式互感器的特点	30
3.1.2 电子式互感器的研究现状	31

3.1.3 电子式互感器的发展趋势	31
3.2 电子式电流互感器	32
3.2.1 低功率铁心线圈电流互感器	33
3.2.2 空心线圈电流互感器	34
3.2.3 基于低功耗铁心线圈和空心线圈的组合式电流互感器	36
3.3 光纤电流互感器基本原理	38
3.3.1 工作原理	38
3.3.2 主要特点	42
3.3.3 关键技术	43
3.4 光纤电流互感器结构及安装方式	44
3.4.1 基本结构组件	44
3.4.2 安装	49
3.5 光纤电流互感器检测及维护	57
3.5.1 型式试验	57
3.5.2 例行试验	68
3.6 现场维护	72
3.7 光学电压互感器	73
3.8 本章小结	75
参考文献	76
第4章 电力光纤通信线路故障监测设备技术	77
4.1 光时域反射技术	77
4.1.1 系统结构	77
4.1.2 原理介绍	78
4.1.3 光时域反射仪的性能参数	80
4.1.4 电力光缆监测系统	82
4.2 相干光时域反射技术	84
4.2.1 相干探测技术	84
4.2.2 频移键控技术	86
4.2.3 高速数据处理技术	87
4.2.4 激光器跳频技术	88
4.3 本章小结	88
参考文献	89
第5章 频分复用相干光时域反射仪	91
5.1 频分复用探测光的产生	91

5.2 传统的频分复用方案	94
5.2.1 基于双频复用探测的相干光时域反射仪	94
5.2.2 基于三频复用探测的相干光时域反射仪	100
5.2.3 基于四频复用探测的相干光时域反射仪	105
5.2.4 多频复用的探测光与本振光同步扫频的相干光时域反射仪	110
5.2.5 四频复用的探测光与本振光同步扫频法	115
5.2.6 结合时分复用技术的频分复用相干光时域反射仪	117
5.3 定时随机跳频方案	128
5.3.1 方案简介	128
5.3.2 系统实验	129
5.3.3 结果讨论	131
5.4 本章小结	132
参考文献	132
第6章 输电线路分布式温度/应力监测设备技术	135
6.1 分布式光纤温度和应力传感原理	135
6.1.1 拉曼光时域反射技术	135
6.1.2 布里渊光时域反射技术	136
6.1.3 布里渊光时域分析技术	139
6.2 实验模拟研究	139
6.2.1 雷击定位	141
6.2.2 覆冰监测	144
6.2.3 舞动监测	146
6.3 工程试点应用	146
6.3.1 OPGW 线路状态及环境监测	146
6.3.2 水电大坝监测	154
6.3.3 海底电缆温度/应力监测	156
6.4 电力应用亟待解决的问题	157
6.5 本章小结	159
参考文献	159
第7章 光纤光栅传感技术	161
7.1 光纤光栅传感机理	161
7.2 光纤光栅分类	162
7.3 光纤光栅的电力传感应用	163
7.4 本章小结	170

参考文献	171
第 8 章 电力光纤传感技术	173
8.1 全球能源互联网发展对传感技术的迫切需求	173
8.2 电力光纤传感技术的发展趋势	176
索引	179

第1章 智能电网简介

1.1 智能电网概述

当前,世界各国为应对气候变化、保障能源安全,日益重视发展清洁能源和提高能源利用效率,世界能源发展呈现出清洁化、低碳化、高效化的新趋势。欧美发达国家普遍加快了新能源、新材料、信息网络技术、节能环保等高新技术研究和新兴产业的发展。作为实现低碳电力的基础与前提,智能电网技术近年来在很多国家得到快速发展,并有力促进了电网的智能化。智能电网已成为下一代电网发展的新趋势,未来还将建设“互联网+”智慧能源网^[1]。我国电力工业也面临着新的形势,能源发展格局、电力供需状况、电力发展方式正在发生着深刻变化。通过互联网技术将设备数据化,并将所有主体自由连接,进而打造能源互联网的“操作系统”,来统筹管理各种资源,产生显著区别于原有能源系统的业态和商业模式,促进能源的市场化、高效化和绿色化,促进大众创新创业。

1.1.1 传统电网与智能电网

为了应对全球气候变暖,降低对化石能源的依赖程度,实现能源产业的可持续发展,世界能源发展格局正发生着重大而深刻的变化。新一轮的世界能源变革的序幕已经拉开。本轮能源变革的目标是通过科技创新,实现以低碳能源为核心的低碳经济。目前电力工业是全球最主要的二氧化碳排放源(45%的二氧化碳来自电力生产)。因此,实现电力清洁生产,降低电力输送损耗,提高电能在终端能源消费中的比例,全面优化电力生产、输送、消费全过程,将有助于推动低碳电力、低碳能源乃至低碳经济的发展。在此过程中,智能电网在推动电力清洁生产,促进电力高效利用,以及保障可靠电力供应等方面将发挥重要作用,这已经成为世界电网发展的必然趋势。因此,世界主要发达国家纷纷把发展智能电网作为抢占未来低碳经济制高点的一项重要战略措施,掀起了一场全球范围的智能电网建设热潮。

传统电网是一个刚性系统,电源的接入与退出、电能量的传输等都缺乏弹性,致使电网没有动态柔性及可组性;垂直的多级控制机制反应迟缓,无法构建实时、可配置、可重组的系统;系统自愈、自恢复能力完全依赖于实体冗余;对客户的服务简单、信息单向;系统内部存在多个信息孤岛,缺乏信息共享。虽然局部的自动化程度在不断提高,但信息的不完善和共享能力的薄弱,使得系统中多个自

动化系统是割裂的、局部的、孤立的，不能构成一个实时的有机统一整体，所以整个电网的智能化程度较低。

与传统电网相比，人们设想中的智能电网将进一步拓展对电网全景信息（指完整的、正确的、具有精确时间断面的、标准化的电力流信息和业务流信息等）的获取能力，以坚强、可靠、通畅的实体电网架构和信息交互平台为基础，以服务生产全过程为需求，整合系统各种实时生产和运营信息，通过加强对电网业务流实时动态的分析、诊断和优化，为电网运行和管理人员提供更为全面、完整和精细的电网运营状态图，并给出相应的辅助决策支持，以及控制实施方案和应对预案，最大限度地实现更为精细、准确、及时、绩优的电网运行和管理。

与传统电网相比，智能电网将进一步优化各级电网控制，构建结构扁平化、功能模块化、系统组态化的柔性体系架构，通过集中与分散相结合，灵活变换网络结构、智能重组系统架构、最佳配置系统效能、优化电网服务质量，实现与传统电网截然不同的电网构成理念和体系。

由于智能电网可及时获取完整的电网信息，因此可极大地优化电网全生命周期管理的技术体系，承载电网企业社会责任，确保电网实现最优技术经济比、最佳可持续发展、最大经济效益、最优环境保护，从而优化社会能源配置，提高能源综合投资及利用效益。

1.1.2 智能电网的定义与技术特征

为了满足经济社会发展的新需求和实现电网的升级换代，以欧洲联盟（简称欧盟）和美国为代表的一些组织和国家提出了智能电网概念，政府部门、电力企业、电气设备生产商和 IT 业界厂商也纷纷响应。智能电网被认为是当今世界电力系统发展变革的新的制高点，也是未来电网发展的大趋势^[2]。

由于能源特点、电网特质以及社会需求的差异，各国对智能电网的定义不尽相同。如何正确认识智能电网，制定符合本国能源经济需要的电网发展路线，并明确具体的技术需求和突破点，是建设智能电网的关键^[3]。

1998 年，美国电力科学研究院（EPRI）推出了复杂交互式网络/系统（CIN/SI），可以认为这是美国智能电网的雏形。21 世纪初，EPRI 正式提出“IntelliGrid”概念，并启动了相关项目，而美国能源部（DOE）当时则提出了“GridWise”。虽然二者称谓不同，但内涵和目标基本一致。此后，在 2004~2005 年，美国智能电网研究开始蓬勃发展，DOE 先后发布了“Grid 2030”“国家输电技术路线图”等，阐述了美国未来国家电网远景和技术战略，开展了“GridWise”和“现代电网（MGI）”等项目，随后几年中，美国电力企业开始在智能电网领域开展了一系列探索。

在欧洲,则采用了“Smart Grid”。为了应对近年来欧洲电力设施老化、跨欧电力市场建设,以及日益增长的可再生能源并网发电的挑战,欧洲委员会于2005年正式成立智能电网(Smart Grids)欧洲技术论坛,希望把电网转换成用户和运营商互动的服务网,提高欧洲输配电系统的效率、安全性及可靠性,并为分布式和可再生能源的大规模应用扫除障碍。2006年,论坛提出了智能电网远景,之后制定了战略研究议程,指导欧盟及其各国开展相关项目,推进智能电网的实现。

与“IntelliGrid”和“GridWise”相比,“SmartGrid”更被电力业界和学术流派所认同。“smart”最传神的内涵是“巧”,具有聪明(intelligent)和灵活(flexible)两方面含义。灵活是指具有坚强可靠特质的灵活性,富有可持续性和应变能力。坚强平台和先进技术的有机协调才能充分提升“巧”的能力。因此,如果一味强调智能(intelligence)而忽视对物理基础的夯实,智能电网建设将会走向误区,“intelligence”也只能是一种空中楼阁式的梦想,而缺乏现实可行性。建设智能电网,并不是说现在的电网就不具备智能性,事实上,电力工作者一直在为电网的智能化而努力。今后一段时间内,信息化、自动化和互动化将作为智能电网的主要特征而为人们所关注。

信息化、自动化、互动化是统一坚强智能电网的基本技术特征。信息化是统一坚强智能电网的实施基础,实现实时和非实时信息的高度集成、共享与利用;自动化是统一坚强智能电网的重要实现手段,依靠先进的自动控制策略,实现电网运行控制自动化水平的全面提高与管理水平的全面提升;互动化是统一坚强智能电网的内在要求,实现电源、电网和用户资源的友好互动和相互协调^[4]。

智能电网是适应未来发展并寄托人们美好愿望的现代先进电力系统的统称,并且首先应当是一个坚强的电网。坚强是智能电网的基础,智能是坚强电网充分发挥作用的关键,两者相辅相成、协调统一。灵活性贯穿于电力系统全过程,如灵活接入可再生能源(包括大规模和分布式)、灵活安排运行方式、让用户灵活安排用电。同样,坚强可靠网架也是电网安全灵活运行的保障。

1.1.3 智能电网与能源互联网的国外发展现状

解决能源安全与环保问题,应对气候变化,是国外发展智能电网最主要的共性动因。大力发展清洁能源和电气化交通是各发达国家实现能源独立、保证能源安全和保护环境、应对气候变化的重要途径。抢占产业制高点,创造新的经济增长点与就业岗位,是国外主要发达国家发展智能电网的共性经济动因。美国的高尔文电力行动计划有关研究指出,推广智能电网技术能够创造众多新的经济增长点,仅是大规模部署应用分布式发电和储能技术就有望在2020年之前为美国带来100亿美元/年的经济增长(按照2020年分布式发电装机占总

装机的 10%估计)。

由于国情不同,各国和各地区发展智能电网的基础和侧重点有所不同。就发展智能电网的基础来看,美国和欧洲的电网设施普遍陈旧,需要通过电网升级改造,提高系统可靠性,避免美加“8·14”大停电和欧洲“11·4”大停电等类似事故再次发生;对日本而言,其电力系统的自动化水平较高,可靠性和效率已经达到了较高水平。就各国和各地区发展智能电网近中期侧重解决的问题来看,美国主要侧重于加大现有网络基础设施的投入,积极发展清洁能源,推广可插电式混合动力汽车,实现分布式电源和储能的并网运行;欧洲主要侧重于研究和解决电网对风电,尤其是大规模海上风电的消纳、分布式能源并网、需求侧管理等问题;日本主要侧重于研究和解决分布式光伏发电和风能发电的大规模并网问题,以及电动汽车和电网的互动问题^[3]。

2007 年 12 月,美国国会颁布了《能源独立与安全法案》,其中的第 13 号法令为智能电网法令,该法案用法律形式确立了智能电网的国策地位,并就定期报告、组织形式、技术研究、示范工程、政府资助、协调合作框架、各州职责、私有线路法案影响以及智能电网安全性等问题进行了详细和明确的规定。

2009 年 2 月,美国国会颁布了《复苏与再投资法案》,确定投资 45 亿美元用于智能电网项目资助、标准制定、人员培养、能源资源评估、需求预测与电网分析等,并将智能电网项目配套资金的资助力度由 2007 年的 20% 提高到 50%。

2009 年 7 月,美国能源部向国会递交了第一部《智能电网系统报告》,制定了由 20 项指标组成的评价指标体系,对美国智能电网的发展现状进行了评价,并总结了发展过程中遇到的技术、商业以及财政等方面的挑战。

2006~2008 年,欧盟依次发布了《欧洲未来电网的愿景与战略》《战略性研究计划》《战略部署文件》三份战略性文件,构成了欧盟的智能电网发展战略框架。就其主要成员国来看,英国 2009 年依次发布了《英国可再生能源发展战略》《英国低碳转型计划》两份战略性文件。德国 2009 年发布了名为《新思路、新能源——2020 年能源政策路线图》的战略性文件。

日本于 2009 年 4 月公布了《日本发展战略与经济增长计划》,其中包括太阳能发电并网、未来日本智能电网实证试验、电动汽车快速充电装置等与智能电网密切相关的内容。日本电气事业联合会在 2009 年 7 月表示,将全面开发“日本版智能电网”。韩国在 2008 年发布了“绿色能源工业策略”,推出了“韩国版智能电网”设想。

从近年的发展来看,快速发展的互联网不仅深刻改变了人们的生活和工作方式,也改造和颠覆着诸多传统行业。随着我国提出“互联网+”行动计划,如何利用互联网思维和技术来改造传统能源工业,引起了能源和信息行业的普遍关注。能源互联网正是能源和互联网深度融合的产物,已经成为当前国际学术界和产业

界关注的新焦点,也是能源行业继智能电网后又一前沿发展方向和重要课题。

国际上前期已经率先开展了以“能源互联网”为主题的相关研究。当前,对能源互联网的典型认知方式主要有以下4种。

(1) **Energy Internet**: 2008年美国国家科学基金资助了FreeDM项目,侧重于能源网络结构的表述。该认知方式立足于电网,借鉴互联网开放、对等的理念和架构,形成以骨干网(大电网)、局域网(微网)及相关连接网络为特征的新型能源网。在技术层面,重点研发融合信息通信系统的分布式能源网络体系结构。

(2) **Internet of Energy**: 2008年德国联邦经济技术部与环境部发起了E-Energy项目,提出建设Internet of Energy并实施6个示范项目。这一认知方式侧重于信息互联网的表述。该认知方式将信息网络定位为能源互联网的支持决策网,通过互联网进行信息收集、分析和决策,从而指导能源网络的运行调度。

(3) **Intenergy**: 这种认知方式强调互联网技术和能源网络的深度融合,以日本的电力路由器为典型代表。该方式采用区域自治和骨干管控相结合的方式,实现能源和信息的双向通信。其中,信息流用于支持能源调度,能源流用于引导用户决策,以实现可再生能源的高效利用。

(4) **Multi Energy Internet**: 这一认知方式强调电、热、化学能的联合输送和优化使用,以英国、瑞士等国的能源发展方向为典型代表。

2011年,里夫金的《第三次工业革命》将能源互联网作为第三次工业革命的核心之一,产生了广泛影响。2012年,国内开展了一系列关于能源互联网的讨论和初步研究,中国工程科技发展战略研究院将能源互联网列入中国战略性新兴产业,国家电网公司提出了全球能源互联网构想,并成立了GEI国际组织。2015年4月,香山科学会议以“能源互联网:前沿科学问题与关键技术”为主题召开了第523次学术讨论会。

1.2 我国坚强智能电网的发展与实践

中国能源资源分布和电力需求的发展很不平衡,需要在更大范围内实现能源资源的优化配置,这是中国能源发展战略的出发点。“坚强”被赋予智能电网的“中国特色”,源于两个现实因素:一是输电侧尚处于“爬坡”发展阶段;二是配电侧和用户侧基础薄弱^[5-7]。

从输电侧看,首先,中国经济社会正处于快速发展阶段,作为国民经济基础产业的电力工业发展空间巨大。而中国电网发展长期滞后,以适度超前为发展原则的输电网建设,必须形成坚强的网架结构,才能够具备优化能源资源配置的能力。然后,中国的能源结构以及能源资源与负荷中心分布相逆的特性,

决定了能源的远距离、大规模输送是必然趋势。最后,中国太阳能、风能等资源大多远离能源消费中心,必须走大规模集中开发的发展道路,通过大电网在全国范围内消纳。

在配电侧和用户侧,要求不断提高电力可靠性和电能质量,满足用户对供电性能和多元化的需求。但是,中国电力市场目前仅存在于发电与输电之间,尚未形成以电价为反馈信号的电网与客户的互动机制,配电侧和用电侧形成有效的智能电网尚需时日。

2008年以来,我国非常注重对世界电网智能化发展趋势的关注和跟踪。2009年5月,在北京召开的“2009特高压输电技术国际会议”上,国家电网公司发布了我国坚强智能电网发展战略,发展特高压技术、建设坚强智能电网在会上达成广泛共识。

总的来看,在特高压取得重大突破的基础上,国家电网公司准确把握国内外形势,从保障我国能源安全、优化能源结构、促进节能减排和提高公司服务水平的要求出发,提出了建设坚强智能电网的战略部署,在国内外引起了积极反响和高度认可,引领和推动了国内智能电网发展,并在理论创新、实践工作、关键设备研制、科研和标准体系建设等方面积极开展工作。

从发展阶段来看,国内外的智能电网发展都处于起步阶段。国外发达国家对智能电网的研究起步时间相对稍早,但是真正开展实质性的大规模投资和建设也只是近一两年的事情,因此,在以智能电网为核心的新一代电网技术革命中,我国和国外发达国家处于同一起跑线上。这将有助于我国电网实现跨越式发展,建成有我国特色的世界一流电网。

从发展动因来看,我国和国外发达国家存在显著的不同,主要表现在:一是我国能源资源与需求逆向分布的国情要求提高电网大范围资源优化配置能力;二是我国以煤为主的能源结构与清洁发展之间的矛盾;三是我国电力需求的快速增长要求电力企业高效运营和创新发展;四是电网自身发展要求处理好网架等基础设施建设与信息化、自动化、互动化等先进技术应用之间的关系。因此,我国的智能电网建设任务更加艰巨,面临的技术、经济、政策问题也更为复杂。

1.2.1 坚强智能电网的基本内涵

坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动是统一坚强智能电网的基本内涵^[1]。坚强可靠,具有坚强的网架结构、强大的电力输送能力和安全可靠的电力供应;经济高效,提高电网运行和输送效率,降低运营成本,促进能源资源和电力资产的高效利用;清洁环保,促进可再生能源发展与利用,降低能源消耗和污染物排放,提高清洁电能在终端能源消费中的比重;透明开放,电网、

电源和用户的信息透明共享,电网无歧视开放;友好互动,实现电网运行方式的灵活调整,友好兼容各类电源和用户接入与退出,促进发电企业和用户主动参与电网运行调节。

1.2.2 坚强智能电网的发展目标和发展方向

坚强智能电网的总体发展目标是:建成以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强电网为基础,以信息化、自动化、互动化为特征的自主创新、国际领先的现代电网^[1]。

(1) 具备强大的资源优化配置能力。智能电网建成后,将形成结构坚强的受端电网和送端电网,电力承载能力显著加强,形成“强交、强直”特高压输电网络,实现大水电、大煤电、大核电、大可再生能源的跨区域、远距离、大容量、低损耗、高效率输送,区域间电力交换能力明显提升,有效缓解我国能源资源和生产力分布不平衡的矛盾。

(2) 具备良好的安全稳定运行水平。坚强智能电网的安全稳定性和供电可靠性将进一步提升,电网运行将完全满足《电力系统安全稳定导则》等各项要求,各级防线之间紧密协调,具备抵御突发性事件和严重故障的能力,有效避免大范围连锁故障的发生,显著提高用户供电可靠率。

(3) 适应并促进清洁能源发展。坚强智能电网建成后,将突破风电机组功率预测和动态建模、低电压穿越和有功无功控制、常规机组快速调节等技术领域,大容量储能技术等得到推广应用,清洁能源发电及其并网运行控制能力显著提升,满足能源消费结构调整的国家战略要求,实现大规模集中与分散开发模式并存的清洁能源大规模开发利用,使清洁能源成为更加经济、高效、可靠的能源供给方式。

(4) 实现高度智能化的电网调度。坚强智能电网将全面建成横向集成、纵向贯通的智能电网调度技术支持系统,满足各级电网调度和集中监控的要求,实现大电网连锁事件条件下的在线智能分析、预警、决策,各类新型发输电技术设备的高效调控和特高压交直流混合电网的精益化控制,实现智能电网的调度一体化运行。

(5) 满足电动汽车等新型电力用户的电力服务要求。坚强智能电网包括建成完善的电动汽车配套充放电基础设施网络,形成科学合理的电动汽车充电站布局,充电站基础设施满足电动汽车行业发展和消费者的需要,电动汽车与电网的高效互动得到全面应用。分布式大容量储能技术得到广泛应用。

(6) 实现电网资产高效利用和全寿命周期管理。建成电网资产全寿命周期管理体系、财务管控体系和成本考核体系,建立资产全寿命周期管理模式,实现电