



国家电网公司
电力科技著作出版项目

智能电网关键技术丛书

智能配用电技术

中国电力科学研究院 组 编

盛万兴 主 编

梁 英 王 利 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网
电力科技著作出版

智能电网关键技术丛书

智能配用电技术

中国电力科学研究院 组 编

盛万兴 主 编

梁 英 王 利 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

针对目前智能配电与用电技术快速发展的趋势,以及我国在配电自愈控制、用电服务互动化、配用电信息交互等方面取得的重要进展,并结合作者自身研究成果及实践案例,特编写了本书。

全书共七章,主要内容包括智能配电与用电技术概述、智能配电网规划、智能配电模式与自愈控制、智能用电模式与服务互动化、配用电一体化通信、分布式发电与微电网技术、智能配用电实践与展望。

本书适合学习、研究及应用智能配电与用电技术的相关人员及关心配电与用电技术发展的人们参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能配用电技术 / 盛万兴主编; 中国电力科学研究院组编. —北京: 中国电力出版社, 2014.12

(智能电网关键技术丛书)

ISBN 978-7-5123-7683-0

I. ①智… II. ①盛… ②中… III. ①智能控制—配电系统 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 093314 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

*

2014 年 12 月第一版 2014 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 18 印张 314 千字

印数 0001—2000 册 定价 69.00 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

编 委 会

主 编 盛万兴

副 主 编 梁 英 王 利

编写人员 刘 伟 史常凯 寇凌峰 刘海涛

吴 鸣 梁惠施 李建芳 宋祺鹏

张 波 李二霞 段 青 刘科研

序

进入 21 世纪后,大规模开发利用化石能源带来的能源危机、环境危机凸显,建立在化石能源基础上的电力工业面临重大挑战,新一轮能源变革正在世界范围内蓬勃兴起。世界范围内电力系统面临如下问题:一是应对大型风能、太阳能等可再生能源发电快速增长对电网的挑战;二是适应小容量分布式电源、电动汽车等对用电结构产生变化的影响;三是适应政府节能减排管制和低碳经济发展的需要;四是网络技术向以能源体系为代表的实体经济渗透和新产业革命的推动。欧美发达国家从应对气候变化、保障能源供应安全、促进经济增长的需要出发,相继提出和建设智能电网。实际上,智能电网正是应对这些重大需求而产生的,是世界电力工业发展的新趋势。

我国高度重视智能电网研究和建设,国务院总理李克强 2014 年主持召开节能减排及应对气候变化工作会议时指出“控制能源消费总量,提高使用效率,调整优化能源结构,积极发展风电、核电、水电、光伏发电等清洁能源和节能环保产业,开工一批新项目,大力推广分布式能源,发展智能电网。”国家科学技术部 2012 年适时启动智能电网重大专题研究,大力推动智能电网关键技术研究和应用示范。国家电网公司 2009 年根据电网建设的整体需要和智能电网顶层设计,率先启动了智能电网的研究、应用示范与工程建设;开展了智能变电站的持续实践,研制完成了智能电网调度控制系统、输电线路状态监测系统并得到广泛应用;构建了规模大、数据处理能力强的用电信息采集系统及电动汽车充换电服务网络;建成了中新天津生态城、张北风光储输等一批智能电网综合示范工程。

实施智能电网发展战略不仅能使用户获得高安全性、高可靠性、高质量、高效率 and 价格合理的电力供应,还能提高国家的能源安全、改善环境、推动可

持续发展，同时能够激励市场不断创新，从而提高国家的经济竞争力。智能电网是新一轮能源革命的基础平台，对能源革命具有全局性和根本性的推动作用。未来的智能电网，适应大型风电、光伏发电及分布式电源大规模接入，形成广泛覆盖、清洁高效的电力资源配置体系，具有强大的电力资源配置能力；电力网、互联网、物联网等相互融合，构成功能灵活互动的社会公共服务平台，广泛支持配置社会公共服务资源；汇集和分析电力系统广域数据和知识，自动预判、识别电网典型故障和风险，保障电网安全可靠运行；促进用户与各类用电设备广泛交互、与电网双向互动，支撑智能家庭、智能楼宇、智能小区、智慧城市建设，推动生产、生活智慧化。

中国电力科学研究院在智能电网关键技术研究、国际国内标准制定、试验检测能力建设等方面开展了卓有成效的科研工作，为了总结相关技术成果和实践经验，推动我国智能电网技术进步，为我国智能电网建设提供有益的参考，特组织专家编写了本套丛书。

本套丛书的编撰出版，凝聚了电网一线科研工作者的汗水和心血。通过本套丛书的出版，希望更多的人士关注、关心智能电网并投身于智能电网的研究和建设中来，共同打造一个安全高效、清洁环保、友好互动的智能电网，并推动构建智能便捷的生产生活新模式。

A handwritten signature in black ink, reading '周孝信' (Zhou Xuebin). The signature is fluid and cursive, with the characters '周' and '信' being more prominent.

2014 年 11 月

前言

我国自 2009 年正式启动智能电网技术研究和试点示范工作以来,在智能电网关键技术研究、国际国内标准制定、应用示范工程及试验检测能力建设等方面取得了一系列重大成果。为总结智能电网技术研究与应用成果,分析我国智能电网技术发展趋势,与电力科技教育、电力企业及产业公司分享研究成果,中国电力科学研究院组织专家编写了本套丛书。

本套丛书在编写原则上,突出以智能电网诸环节关键技术为核心,优选丛书选题;在内容定位上,突出技术先进性、前瞻性和实用性,并涵盖了智能电网相关技术领域的新知识、新方法、新技术、新设备(系统);在写作方式上,做到深入浅出,既有深入的理论分析和技术解剖,也有典型案例介绍和效果分析。

本套丛书涵盖输变电、配用电及储能等智能电网技术,按照专业技术领域分成 7 个分册。即《输电线路建设技术》《智能高压设备》《智能配用电技术》《智能电网用电技术》《智能电网与电动汽车》《智能电网广域监测分析与控制技术》《大规模储能技术及其在电力系统中的应用》。既可作为电力企业运行管理专业员工系统学习智能电网技术的专业书籍,也可作为高等院校电气自动化专业师生的教学、学习用书,同时还可供智能电网产品研发工程师参考,实现一书多用。

本分册是《智能配用电技术》,主要内容:第一章智能配电与用电技术概述,介绍了国内外智能电网的发展情况、智能配用电系统的构成及特点、智能配用电技术的发展趋势。第二章智能配电网规划,简要介绍了传统配电网规划的特点、内容、方法、技术手段,并在此基础上详细介绍了基于供电可靠性的配电网规划、含分布式电源的配电网优化规划、考虑大规模充放电设施接入的配电网规划等智能配电网规划方法和关键技术。第三章智能配电模式与自愈控制,简要介绍了智能配电的定义、功能和构成,详细介绍了由供电单元层、网络层、通信层、信息平台层及高级分析与控制层构成的智能配电模式,阐述了 110kV、

35 (66) kV 智能变电站技术、配电自动化技术、智能配电台区技术及智能配电网自愈控制技术。第四章智能用电模式与服务互动化,从分析智能用电发展需求与内涵出发,论述智能用电的业务模式与技术实现模式,在此基础上对用户用电信息采集、智能小区与智能楼宇、智能用电服务互动化等方面支撑技术进行了介绍。第五章配用电一体化通信,在概述配用电一体化通信体系的基础上,详细介绍了适用于智能配用电的主要有线、无线通信技术。第六章分布式发电与微电网技术,其中分布式发电与并网部分主要介绍了分布式发电的技术类型、典型并网方式、对配电网运行的影响及关键技术,微电网技术主要介绍了微电网的定义、基本结构和功能、微电网的仿真分析及运行控制等关键技术。第七章智能配用电实践与展望,简要介绍了国内外智能配用电建设的典型案例,从直流配电、能源互联网、大数据技术三方面探讨了智能配用电技术的发展方向。

由于编写时间仓促,书中难免存在疏漏之处,恳请各位专家和读者提出宝贵意见,使之不断完善。

编 者

2014 年 12 月

目 录

序
前言

第一章 智能配电与用电技术概述	1
第一节 智能电网	1
第二节 智能配用电系统	5
第二章 智能配电网规划	11
第一节 配电网规划基础	11
第二节 智能配电网规划	21
第三章 智能配电模式与自愈控制	42
第一节 智能配电概述	42
第二节 智能变电站	47
第三节 配电自动化	56
第四节 智能配电台区	72
第五节 智能配电网自愈控制	77
第四章 智能用电模式与服务互动化	100
第一节 智能用电模式	100
第二节 用户用电信息采集	113
第三节 智能小区与智能楼宇	127
第四节 智能用电服务互动化关键技术基础	132
第五章 配用电一体化通信	157
第一节 配用电一体化通信体系	157
第二节 有线通信技术	167
第三节 无线通信技术	179
第六章 分布式发电与微电网技术	184
第一节 分布式发电与并网	184

第二节 微电网技术	201
第七章 智能配用电实践与展望	214
第一节 国外智能配用电系统建设典型案例	214
第二节 国内智能配用电系统建设实践	219
第三节 智能配用电技术发展展望	255
参考文献	267
索引	274

智能配电与用电技术概述

2009年以来,智能电网技术成为国际电力发展的热点,在我国以及欧美一些国家,发展智能电网已上升至国家战略层面,成为能源供应安全、新一轮能源变革和应对气候变化的重要载体,也成为增加国家需求、推动经济发展的重要手段之一。

第一节 智能电网

一、国外智能电网发展

1. 国外智能电网实践

国外电力企业智能电网的应用实践工作主要集中在配电和用户侧。世界著名的国际商用机器公司(IBM)、谷歌(Google)、英特尔(Intel)、西门子(Siemens)等公司都提出了自己的技术解决方案。在配用电领域,国外电力公司开展了大量的智能化实践,包括智能表计、用户电压控制、动态储能等。例如:意大利电力公司(ENEL)和法国电力公司(EDF)通过安装智能双向电能表,使用户跟踪自己的用电情况,并能进行远程控制。2005年美国EPRI发布的分布式自治实时架构(DART)自动化系统架构研究成果也大部分在配电和用户侧实施。

《欧洲未来电网发展策略》提出了欧洲智能电网的发展重点和路线图。其优先关注的重点领域包括:① 优化电网的运行和使用;② 优化电网基础设施;③ 大规模间歇性电源集成;④ 信息和通信技术;⑤ 主动的配电网;⑥ 新电力市场的地区、用户和能效。

澳大利亚由国家电力委员会从2007年开始在全国范围内推行AMI项目,引入分时电价,使用户能够更好地管理电能消耗。为实现低碳社会,日本政府于2009年3月公布了包括推动普及可再生资源以及次时代汽车等政策在内的政府发展战略方案。目前,日本东京电力公司的电网被认为是世界上唯一接近

于智能电网的系统。通过光纤通信网络，它正在逐步实现对系统范围的 6kV 中压馈线（已呈网络拓扑）的实时量测和自动控制（采样率每分钟一次）。韩国政府于 2009 年 3 月 27 日宣布，韩国计划在 2011 年前建立一个智能电网综合性试点项目。届时能提高韩国利用环保能源的能力。韩国知识经济部决定，从 2009～2012 年，投入 2547 亿韩元开发商用化技术，并将名称定为“绿色电力 IT”。西班牙电力公司（ENDESA）开展智能城市和自动抄表工作，主要是为了满足太阳能等分布式能源的接入，共投资 3150 万欧元，当地政府出资 25%，于 2009 年 4 月启动，用 4 年的时间完成了智能城市建设。2009 年 6 月 8 日，荷兰首都阿姆斯特丹（Amsterdam）宣布选择埃森哲（Accenture）公司帮助其完成第一个欧洲“智能城市（Smart City）”计划。美国 Xcel Energy 公司从 2008 年起在科罗拉多州的一个 9 万人的小镇波尔得（Boulder）建设全美第一个“智能电网”城市。

SMB Smart Grid Strategic Group（SG3）正在起草智能电网标准体系框架和中长期行动路线图，SG3 按照通用技术领域和专业技术领域描述了智能电网标准体系框架，确定了核心标准，并制定了行动路线图。其中，通用技术领域包括通信、安全和规划；专业技术领域包括输电网管理、配电网管理/微电网、智能变电站自动化、分布式能源、高级量测、智能家居、商业/工业/分布式电源用户能量管理、能量存储、电力传输、资产管理、大规模发电、电力交易。就微电网技术领域，SG3 智能电网路线图描述了微电网的特征、并网和离网状态下应具备的功能，列举了通过变电站自动化可实现的包括功率平衡和黑启动在内的微电网典型用例，梳理了与微电网相关的通信和信息方面的在编标准，提出了在需求侧响应、CIM 与 IEC 61850 融合、Web 服务以及分布式能源并网方面急需通过制定标准进行规范的内容。

智能电网是世界各国专家公认的现代电力供应系统，不同的国家对于智能电网研究的侧重有所不同，不过都对电力通信有较高的要求。智能电网是全球能源优化配置的重要战略规划，是电网发展的高级目标，欧美等国家都针对智能电网建设制订了相关规划。国外智能电网的研究主要侧重于配电和用电侧，美国电科院（EPRI）推动的 IntelliGrid 研究计划致力于开发智能电网架构，目标是为未来的电网建立一个全面、开放的技术体系，支持电网及其设备间的通信与信息交换。其主要研究对象为用户侧和电网直接的信息交换，因此其智能电网主要放在调度和电力市场业务的建设。2004 年，完成了综合能源及通信系统体系结构（IECSA）研究；2005 年发布的成果中包含了 EPRI 称为“分布式自治实时架构（DART）”的自动化系统架构。2006 年，美国 IBM 公司

曾与全球电力专业研究机构、电力企业合作开发了智能电网解决方案。这一方案类似于电力系统的“中枢神经系统”，电力公司通过大量传感器、计量装置和分析工具，自动监控优化电网性能，同时用户也可以及时地了解电网信息。意大利电力公司和法国电力公司（EDF）通过安装智能电能表，使用户及时了解电网供电信息和自己的用电情况，并能进行远程控制；美国诺福克应用了ABB公司的SVC Light动态能源储存系统，以提高风电使用率，减轻风电对电网的影响。

2. 智能电网有关国际组织动态

近几年，国际知名组织给予智能电网高度关注，分别成立工作组开展智能电网技术及标准的研究与制定，其中 IEC 智能电网研究工作组的具体情况如图 1-1 所示，CIGRE 智能电网研究工作组的具体情况如图 1-2 所示。

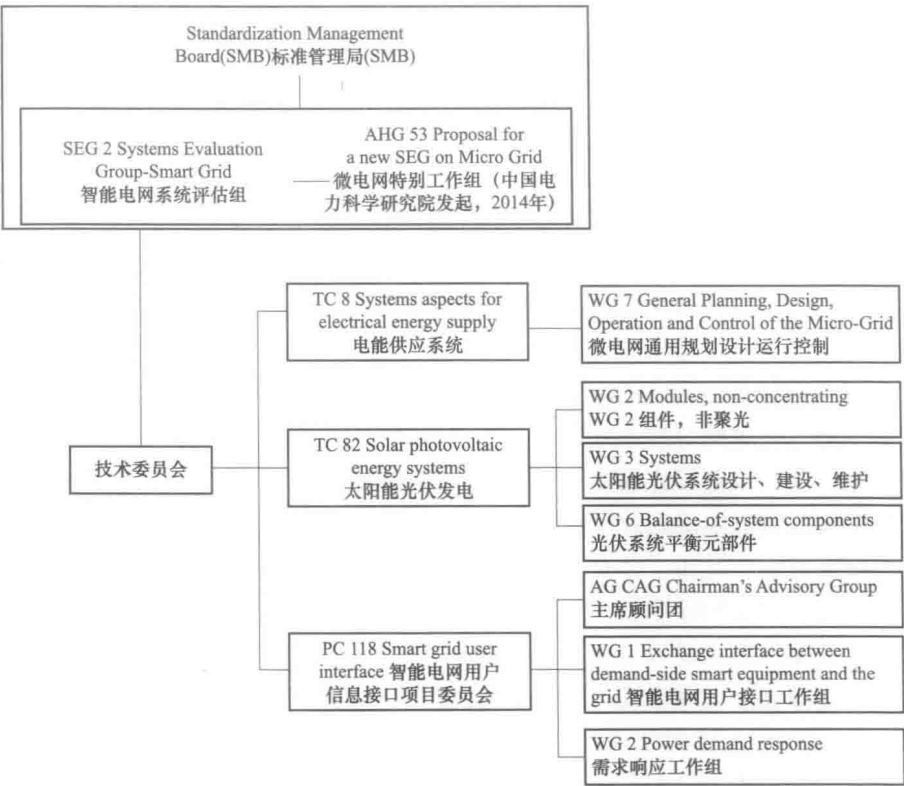


图 1-1 IEC 智能电网研究工作组的组成

二、中国坚强智能电网发展

2010年,国家电网公司提出建设以特高压电网为骨干网架,各级电网协调发展,具有信息化、自动化、互动化特征的坚强智能电网为战略目标。经过近几年的发展,我国在智能电网的标准制定、关键技术研发、示范试点工程等方面取得了较大的进展,智能电网将承载和推动第三次工业革命,加速推进以清洁能源和坚强智能电网为标志的全球能源互联网发展。



图 1-2 CIGRE 智能电网研究工作组

我国发展智能电网与其他国家有所差别,国外智能电网主要侧重于配电领域,我国更加关注智能输电网,保证大电网的安全、可靠运行,提升大电网的抗灾能力。同时,我国还在积极开展智能变电站、智能台区、电动汽车站充换电站和智能电能表等方面的工作。

1. 智能电网标准制/修订

2010年,国家电网公司发布《智能电网技术标准体系》,其构建原则是系统性、逻辑性、开放性。该标准体系包括8个专业分支、26个技术领域、92个标准系列和若干项具体标准、规范,内容涵盖综合与规划、发电、输电、变电、配电、用电、调度、通信信息等。

国家电网公司制定的配用电技术标准主要涵盖配电自动化、智能用电、分布式电源与微电网等技术领域。在配电自动化技术方面,发布了技术规范、功能规范、验收规范等方面的系列标准;在智能用电技术方面,发布了用户用电信息采集、智能电能表及电动汽车充电设施等方面的系列标准;在分布式电源并网标准方面,发布了分布式电源并网及其运行控制、储能系统接入电网及其运行控制等方面的标准。

2. 智能电网关键设备(系统)规划

为支撑智能电网建设,国家电网公司组织编制了《智能电网关键设备(系统)研制规划》,该规划对发电、输电、变电、配电、用电、调度、通信信息等7个环节,将所需关键设备分为34个技术专题,按研制进程分为已有、在研和待研三个类别,共梳理186项关键设备。

3. 智能电网工程建设

自 2009 年以来,国家电网公司开展了多个综合示范工程和专项示范工程建设,具有代表性的综合示范工程有天津中新生态城、上海世博园、江西共青城等智能电网工程,专项工程包括配电自动化工程、用户用电信息采集系统建设、分布式电源与微电网接入工程等。其中,60 余个大中城市开展了配电自动化工程建设,用户用电信息采集覆盖率达到 50%。

第二节 智能配用电系统

智能配用电系统是智能电网的重要组成部分,国外智能电网发展重点关注配电和用电环节。清洁能源的发展和用户多元化用电需求,对我国智能配用电技术提出新的挑战。

一、智能配用电系统构成

智能配用电系统是指利用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,构建安全可靠、节能高效、灵活互动的配用电网络,实现对配电网、用电侧的统一数据采集、监控、保护、控制及优化,实现分布式电源、电动汽车及多样性负荷的即插即用,在系统构成上具有网架坚强、灵活、装备智能可靠、信息双向互动、数据高度集成的特点,在功能实现上具有配电自愈控制、用电友好互动的特征。

智能配用电系统由网络结构层、设备层、信息通信层和分析控制层构成,如图 1-3 所示。

(1) 智能配用电系统具有坚强灵活的网络结构。随着经济社会的发展,配电网规模不断扩大、结构日益复杂,大量分布式电源/储能装置/微电网、电动汽车等多样性负荷接入配电网,需要构建坚强灵活的配电网架;另外,随着大量可再生能源发电及储能装置接入配电网运行,改变了传统的配电系统辐射网络供电的单向潮流特点,配电网潮流将呈现多电源、双向潮流、环网供电等特征,因此对配电网网架结构规划及供电模式提出了更高的要求。

(2) 智能配用电系统具有智能可靠的装备。配用电系统装备包括变电站、配电线路设备、配电台区设备、用电设备、分布式电源并网设备等,类型多,高可靠供电需求对配电设备的实用性、可靠性、智能化提出了更高的要求,配用电装备应具备较高的功能集成、标准化设计与升级支持能力,实现设备间的互联互通。

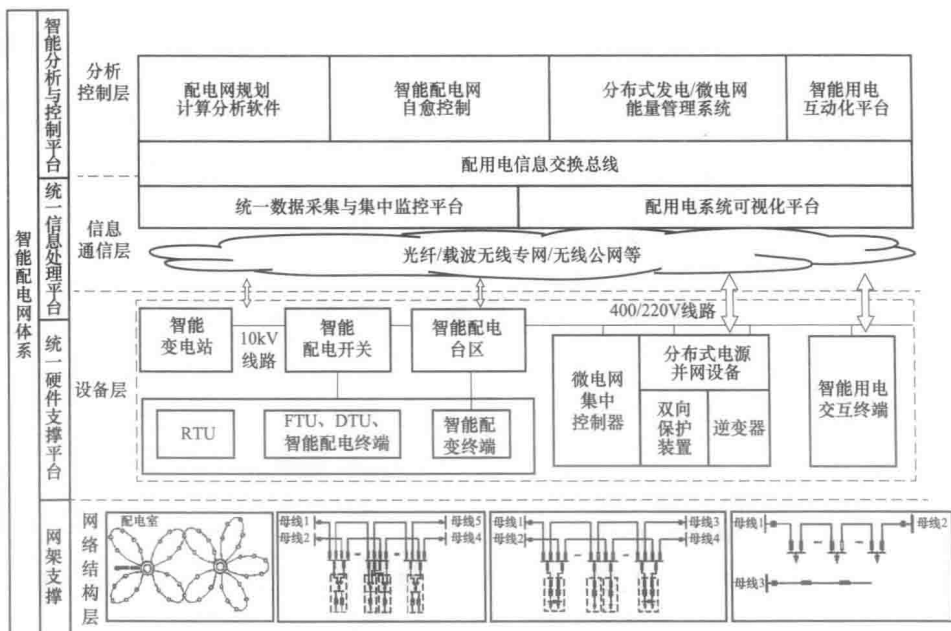


图 1-3 智能配用电系统

(3) 智能配用电系统具有标准的信息交换功能。配用电系统的信息具有数据量大以及分布面广的特点，智能配电网运行、管理数据量大、业务杂，配电智能分析需要统一信息资源的支撑，消除信息孤岛，建立统一信息支撑平台，具备较强的海量数据处理能力和信息交互能力，以满足配电网调控一体化和智能配电应用等需求。

(4) 智能配用电系统具有数据高度集成的智能分析功能。高可靠、高效的供用电需求要求实现配电网自愈控制、安全预警、智能调度、用电互动化等功能，因此需构建统一、实用的智能分析平台。配电网直接面对用户，易受到各种因素的影响，智能配电网应具备自愈、高效、优质的特征以保证较高的供电可靠性、供电质量和配电设备利用率，因此需要实用的智能决策支持手段，以满足大规模复杂配电网的运行优化分析需求。

二、智能配用电系统特点

配用电系统直接面向用户，担负着分配电能、服务客户的重要任务，具有点多面广、构成复杂等特点。智能配用电系统是智能电网的重要组成部分，以灵活、可靠、高效的配电网网架结构和高可靠性、高安全性的通信网络为基础，支持自适应的故障处理和自愈，可满足高渗透率的分布式电源和储能元件接入

的要求,满足用户提高电能质量的要求。智能配电网的特征如下。

(1) 兼容性好。智能配电网具有很好的兼容性,在大电源的集中接入和支持分布式发电方式的接入这两种接入模式下,都可以保持良好的运行状态。此外,智能配电网允许可再生能源的广泛应用,从而可以减少不可再生能源的使用,让电力能源更加清洁环保,有利于环境友好型社会的建设。

(2) 自愈能力强。在故障出现时,智能配电网根据运行状态的监控情况,自动检测配电网故障,当找出发生故障的部位后,快速将其隔离并分析其故障原因,根据故障原因采取相应的应对措施,消除安全隐患,自动进行恢复。较强的自愈能力可以减少停电现象的发生。

(3) 安全可靠。配电网不是独立存在的,因此必然会受到外界因素的扰动,这种扰动有可能是由雷电、风雨等自然现象造成的,也可能是人为因素造成的。智能配电网可以自动分析扰动的起因,并产生相应的动作,消除这些扰动,从而保障电网、人身和设备的安全。

(4) 电能质量高。利用先进的电力电子技术、电能质量在线监测和补偿技术,实现电压、无功的优化控制,保证电压合格;实现对电能质量敏感设备的不间断、高质量、连续性供电。

(5) 资产利用率高。实时、在线监测主要设备状态,实施状态检修,延长设备使用寿命;支持配电网快速仿真和模拟,合理控制潮流,降低损耗,充分利用系统容量;减少投资、减少设备折旧,使用户获得更廉价的电力。

(6) 可实现与用户之间的良好互动。通过智能表计和用户通信网络,支持用户需求响应,积极创造条件,让拥有分布式发电单元的用户在用电高峰时向电网送电,为用户提供更多的附加服务,服务理念实现从以电力企业为中心向以用户为中心的转变。

三、智能配用电技术的发展趋势

国外智能电网的发展关注在配用电环节,注重分布式电源接入、智能电表、用电互动化等技术研究与应用。我国智能配电技术发展趋势是攻克配用电系统建模与智能分析、自愈控制与智能调度、配用电通信及信息化等技术并进行系统集成;着重提高配电网技术的系统性、集成性及智能化水平;提高配电网供电可靠性、运行效率和资产利用率;提高供电能力和改善供电质量;进一步降低电能损耗;显著提高配电网安全预警及灾害应对能力。

1. 配电网规划

(1) 分布式电源/储能元件/微电网接入配电网的规划理论方法已成为配电网规划的重要内容。在智能电网建设的背景下,考虑分布式电源接入以及自愈性的