

智能电网的研究进展及发展趋势

张文亮, 刘壮志, 王明俊, 杨旭升

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Research Status and Development Trend of Smart Grid

ZHANG Wen-liang, LIU Zhuang-zhi, WANG Ming-jun, YANG Xu-sheng

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The future development trend of electric power grid is smart grid, which include such features as flexible, clean, secure, economic, friendly and so on. The concept and function characteristics of smart grid are introduced in this paper firstly; then the progress of research on smart grid home and abroad as well as the relation between key technologies and smart grid are analyzed in detail, and it is pointed out that the Agent based distributed cooperation, control, simulation and decision-making, system integration of distributed energy, knowledge based comprehensive decision support are the key development trend of smart grid in future. The construction of smart grids in China is a very complicated system engineering, for this reason some concrete suggestions are made, such as fully taking advantages of integrated management, carrying out architectural design of smart grids in China; drafting pilot plans and implementation schemes; coordinating secure and economic operation of power generation, transmission and distribution; paying special attention to theoretical and technological innovation and application; overall considering the planning, construction, renovation and technology upgrading of power grid, to push the research and construction of smart grid in China actively and orderly.

KEY WORDS: smart grid; distributed energy resource; multi-agent technology; knowledge based decision support

摘要: 具有灵活、清洁、安全、经济、友好等性能的智能电网是未来电网的发展方向。首先介绍了智能电网的概念和功能特点, 详细分析了国内外智能电网的研究进展, 对重点关键技术与智能电网的关系进行了分析和讨论, 指出基于 Agent 的分布式协调、控制、仿真与决策技术, 分布式能源的系统集成以及基于知识的综合决策支持是未来智能电网技术发展的重要方向。中国特色智能电网的建设是一项高度复杂的系统工程, 为此文章提出了积极有序地推进智能电网研究及建设的具体建议, 包括: 发挥一体化管理优势; 开展我国智能电网架构设计; 制定试点方案及实施计划; 发输配

用电的协调安全与经济运行; 注重理论和技术创新与应用; 统筹考虑电网规划、建设、改造和技术升级等。

关键词: 智能电网; 分布式能源; 多 Agent 技术; 基于知识的决策支持

0 引言

随着全球资源环境压力的不断增大, 社会对环境保护、节能减排和可持续性发展的要求日益提高。同时, 电力市场化进程的不断推进以及用户对电能可靠性和质量要求的不断提升, 要求未来的电网必须能够提供更加安全、可靠、清洁、优质的电力供应, 能够适应多种能源类型发电方式的需要, 能够更加适应高度市场化的电力交易的需要, 能够更加适应客户的自主选择需要, 进一步提高庞大的电网资产利用效率和效益, 提供更加优质的服务。为此, 以美国和欧盟为代表的不同国家和组织不约而同地提出要建设灵活、清洁、安全、经济、友好的智能电网, 将智能电网视为未来电网的发展方向。

2009 年美国总统奥巴马上任伊始, 就提出了以智能电网为核心的美国能源战略。奥巴马政府把减少碳排放作为国家战略, 逐步建立碳排放交易体系, 实施温室气体总量控制: 一是大力发展可再生能源, 加强用户侧管理, 减少能源进口总量, 保障国家能源安全; 二是以建设智能电网为载体, 实施新能源产业战略, 实现美国经济振兴, 积极应对全球气候变暖和国际金融危机; 三是通过联邦经济刺激计划等手段, 对符合国家智能电网发展目标的企业给予资金支持和补贴, 引导企业在国家战略目标框架内开展智能电网研究与实践。2009 年 4 月 16 日美国政府公布智能电网技术投资计划, 希望推动智能电网的开发, 将划拨 34 亿 USD 用于智能电网技术开发, 划拨 6.15 亿 USD 用于智能电网的演示

项目，经认定后的智能电网示范项目，国家可给予上限达 50% 的项目补贴。

进入 21 世纪以来，我国经济持续快速发展，电力需求快速增长。作为一次能源的最大使用者，电力行业在减少温室气体排放、降低气候影响等方面更具有义不容辞的责任。这对于中国尤为重要。2008 年，中国的温室气体总排量居世界第二，在全世界污染最严重的前 20 个城市中，中国占了 16 个；此外，我国每年受火电废气排放带来的酸雨影响，直接损失过千亿元。开展节能减排，建设“资源节约型，环境友好型”社会就成为我国一项十分紧迫的任务。另外，随着数字经济和 IT 时代的发展，电力消费者对于供电可靠性、电能质量和电力服务的要求越来越高。尤其在当前全球金融危机蔓延亟需提振经济的局势下，加快电力生产、输送和消费方式的转变，推动电力行业发展模式的转变，带动相关产业发展就成为了具有全社会性的问题。为此，在 2009 年 5 月 20—22 日召开的特高压输电技术国际会议上，国家电网公司提出了要建设国际领先、中国特色的坚强智能电网。

尽管智能电网的研究与实践尚处于起步阶段，但是建设智能电网已经成为世界电力行业的一种美好愿景，必将进一步推动电力工业的变革与进步。本文将对智能电网的概念、功能特点、国内外研究进展及发展趋势进行简要分析，并对建设中国智能电网提出一些初步建议。

1 智能电网的概念及功能特点

美国电科院 EPRI 在 2000 年前后提出了 Intelligrid 的未来电网发展的概念，该英文术语译成中文的“智能电网”是比较贴切的，而美国能源部 DOE 当时称为 Grid-Wise，叫法有些不同，但含义和目的等大同小异。

欧洲则采用 Smart Grid 的称呼，在我国也同样译成“智能电网”，欧洲在 2006 年推出了研究报告^[1]，全面阐述了智能电网的发展理念和思路。美国能源部 DOE 在 2008 年也出版了一份报告^[2]，也采用了这个术语，目前智能电网(Smart Grid)这个称谓已被全世界普遍采用。

由于“智能电网”概念处于开始研究和开发阶段，各国、各研究机构、各电力公司、专家对该术语到底包含哪些技术、具有什么特性和功能、发挥什么作用等尚没有统一的意见，因此目前世界上也没有统一而明确的定义。

根据目前收集到的资料和初步研究，简单地说，智能电网就是将信息技术、通信技术、计算机技术和原有的输、配电基础设施高度集成而形成的新型电网，它具有提高能源效率、减少对环境的影响、提高供电的安全性和可靠性、减少输电网的电能损耗等多个优点。

智能主要体现在：1) 可观测——量测、传感技术；2) 可控制——对观测状态进行控制；3) 嵌入式自主处理技术；4) 实时分析——从数据到信息的提升；5) 自适应；6) 自愈。

一般来说，智能电网具有以下功能特点^[2-8]：

1) 自愈——稳定可靠。自愈是实现电网安全可靠运行的主要功能，指无需或仅需少量人为干预，实现电力网络中存在问题元器件的隔离或使其恢复正常运行，最小化或避免用户的供电中断。通过进行连续的评估自测，智能电网可以检测、分析、响应甚至恢复电力元件或局部网络的异常运行。

2) 安全——抵御攻击。无论是物理系统还是计算机遭到外部攻击，智能电网均能有效抵御由此造成的对电力系统本身的攻击伤害以及对其他领域形成的伤害，一旦发生中断，也能很快恢复运行。

3) 兼容——发电资源。传统电力网络主要是面向远端集中式发电的，通过在电源互联领域引入类似于计算机中的“即插即用”技术(尤其是分布式发电资源)，电网可以容纳包含集中式发电在内的多种不同类型电源甚至是储能装置。

4) 交互——电力用户。电网在运行中与用户设备和行为进行交互，将其视为电力系统的完整组成部分之一，可以促使电力用户发挥积极作用，实现电力运行和环境保护等多方面的收益。

5) 协调——电力市场。与批发电力市场甚至是零售电力市场实现无缝衔接，有效的市场设计可以提高电力系统的规划、运行和可靠性管理水平，电力系统管理能力的提升促进电力市场竞争效率的提高。

6) 高效——资产优化。引入最先进的信息和监控技术优化设备和资源的使用效益，可以提高单个资产的利用效率，从整体上实现网络运行和扩容的优化，降低它的运行维护成本和投资。

7) 优质——电能质量。在数字化、高科技占主导的经济模式下，电力用户的电能质量能够得到有效保障，实现电能质量的差别定价。

8) 集成——信息系统。实现包括监视、控制、维护、能量管理(EMS)、配电管理(DMS)、市场运营

(MOS)、企业资源规划(ERP)和其他各类信息系统之间的综合集成,并实现在此基础上的业务集成。

2 智能电网的研究进展

2.1 国外研究进展

智能“自愈”电网的概念发源于美国电力基础设施战略防护系统(strategic power infrastructure defense system, SPID)^[3-5],该系统采用3层Multi-Agent结构:底层为反应层(包括发电、保护);中层为协作层(包括事件/警报过滤、模型更新、故障隔离、频率稳定、命令翻译);高层为认知层(事件预测、脆弱性评估、隐藏故障监视、网络重构、恢复、规划、通信)。SPID主要功能有脆弱性评估(电力和通信系统的快速在线评估)、故障分析(隐藏故障监视)、自愈战略(自适应卸负荷、发电、解列和保护)、信息和传感(卫星、因特网、通信系统监视和控制)等,用以防护来自自然灾害、人为错误、电力市场竞争、信息和通信系统故障、蓄意破坏等对电力设施的威胁。SPID是由美国国防部牵头,EPRI和华盛顿大学等单位参与、投资3000万USD、从1999年开始历时5a完成的一项前期工作,是美国就电力、电信、金融、交通等对国民经济影响巨大的复杂系统所开展的政府-工业-大学协同研究项目(government industry co-sponsorship of university research, GICUR)之一。整个项目将分阶段于2025年完成,最终达到具有承受、应对各种意外及快速恢复的自愈能力。

目前,美国、加拿大、澳大利亚以及欧洲各国都相继开展了智能电网相关研究,而其中最具代表性的是美国与欧洲。对于美国来说,对复杂大电网的安全稳定控制,即所谓的“自愈”能力,是其智能电网发展最初的驱动,虽然困难重重但至今仍然是最重要的研究课题;而对于欧洲智能电网的发展,严格的温室气体排放政策显然起到了更大的推动作用,分布式能源和可再生能源接入研究也相应获得了更多的支持。

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。在输电侧目前有EPRI、ABB、PJM等机构和企业开展相关研究,但其研究缺少整体性,且缺少实际的应用推广支撑。

2003年4月2—3日,美国65位来自电力公司、电力设备制造商、联邦和州政府官员、大学和国家实验室的高级专家汇聚一堂,讨论美国未来的电力系统。会后,于2003年6月以美国能源部输配电

办公室的名义发布了一份名为“Grid 2030——电力的下一个100年的国家设想”的报告^[9]。这份报告可谓是美国电力改革的纲领性文件,描绘了美国未来电力系统的设想,并确定了各项研发和试验工作的分阶段目标。2003年初到2004年历时18个月先期完成的综合能源及通信系统体系结构(integrated energy and communication architecture, IECSA)^[10-11],和随后延伸的智能电网体系结构(Intelligrid Architecture),都是由美国EPRI创建、GE公司管理,有UCA、SISCO、Lucent、EnerNex、Hypertek等公司参与的一个研究未来电力系统体系结构的国际科学合作项目。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^[12]。2004年,完成了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。其配电和用户侧的研究越来越呈现出相互耦合、密不可分的倾向。目前,EPRI的研究成果大多数都在配电和用户侧实施,这也与美国当前智能电网发展的大气候相吻合。

欧洲于2005年成立了欧洲智能电网论坛,目前,论坛已发表3份报告:《欧洲未来电网的愿景和策略》重点研究了未来欧洲电网的愿景和需求^[1];《战略性研究议程》主要关注优先研究的内容^[13];《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^[14]。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。

世界著名的IBM、Google、Intel、Siemens、Duke等公司也提出了自己的技术解决方案^[15-16],具有代表性的是IBM与ABB、GE、SBC等设备制造商联合提出了智能电网解决方案。IBM的“智能电网”解决方案涵盖了完整、规范的数据采集,基于IP协议的实时数据传输,应用服务无缝集成,完整、结构化的数据分析,有针对性的信息展现等5个层次。

谷歌(Google)已宣布了一个与太平洋煤气和电力公司(PG&E)的测试合作项目。2008年9月,Google与通用电气联合发表声明,宣布他们正在共同开发清洁能源业务,核心是为美国打造国家智能电网。同时强调,21世纪的电力系统必须结合先进

的能源和信息技术，而这正是通用电气和谷歌的优势领域。目前美国大约有 1.3 亿块电表，倘若包括计算机、传感器和网络系统的投资在内，实现市场转型，这项改革将拉动超过万亿美元以上的投资，对美国的信息产业也是一个巨大的机会。

值得一提的是，2009 年 1 月 25 日美国白宫最新发布的《复苏计划尺度报告》宣布：将铺设或更新 3000 英里输电线路，并为 4000 万美国家庭安装智能电表——美国将推动智能电网的整体革命。

西门子(Simens)公司预期未来智能电网将整合分布式电源和各种储能元件，实现厂站自动化、智能表计化、负荷可控化以及楼宇(可作为负荷、电源和储能设备)自动化，并通过 IP/以太网实现电网各成员间的通信网络，具有自适应、自优化和自愈功能，为用户提供安全可持续和高效率的电力供应。Simens 公司认为智能电网具有 4 个特性：1) 柔性，满足用户需求；2) 易接入，保证所有用户的连接通畅，尤其对于可再生能源和高效、零或低碳排放的本地发电；3) 可靠，保障和提高供电的安全性和质量；4) 经济，通过改革及竞争调节实现最有效的能源管理。2004 年，西门子收购了丹麦 Bonus 公司，从此进入风电市场并持续不断扩大其生产能力。西门子公司在丹麦投入运行的风电接入控制系统可以使风电接入被有效控制，并参与电网的调频，对电网的影响从负面转向正面。风电是可控的、可以调节的，不是发多少就接入多少，而是要按照电网的要求来发电，不仅考虑风机的最大效益，而且要实现机网的最大程度协调。此外，要做好风电预测，并与调度计划编制相结合，充分发挥输电网的资源优化配置作用。

在输电侧，作为美国电力市场典型的独立系统运行商(independent system operator, ISO)，PJM 负责美国 13 个州的电网调度运行和电力市场组织，因此其智能电网实施主要侧重于调度和电力市场业务建设。PJM 目前主要从同步相量技术和高级控制中心(AC2)着手开展智能输电网研究工作^[17]。

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表，使用户跟踪自己用电情况，并能进行远程控制。

意大利电力公司是意大利国内最大的电力公司和第二大天然气运营商，为了满足电动汽车、太

阳能等分布式能源接入的要求，ENEL 公司在智能电网方面开展了互动式配电能源网络及自动抄表管理系统的研究和应用工作。2008 年 7 月 1 日启动了由 ENEL 牵头负责，欧盟 11 个国家的 25 个合作伙伴联合承担的 ADRESS 项目，该项目总预算 1600 万欧元，其中欧盟资助 900 万欧元，项目计划于 2012 年结束。其目的是开发互动式配电能源网络，实现主动式需求，即居民及小商业用户主动参与到电力市场及电力服务中。自动抄表管理系统从 2001 年开始实施，至 2008 年累计安装了 3180 万块智能电表，覆盖面已达 95%，其余部分 2011 年前完成。该系统 2008 年进行了 2.6 亿次远程抄表、1200 万次远程管理操作。每块智能电表费用 70 欧元(包含相关后台系统和安装调试费用)。该项目投入 21 亿欧元。安装该系统后，每年节约 5 亿欧元，实际管理线损由 3%降低到 1%。

法国电网公司(RTE)在智能电网方面的工作刚刚起步。法国计划将风电装机容量由目前的 2.5GW 提升到 2010 年的 5GW，提高 100%，到 2020 年达到 20GW，比目前提高 300%。RTE 选择和阿海珅(AREVA)旗下的输配电公司 T&D 合作发展智能型风力发电网络。根据法国能源监管条例要求，用户可每周或每月向 RTE 了解用电数量，也可通过远程访问的方式直接读取计量数据。为此，RTE 开展了广泛的表计及相关业务处理工作，开发了 T2000 系统，设立了 7 个远程读表中心，主要包括表计、结算及出单(发票)等功能。远程读表中心将数据汇总到总部表计及结算系统(ISU Metering)，进行相关结算以及出单处理。随着 T2000 的应用，错误率逐年下降，实时出单的比例逐年上升，提高了效率，减少了纠纷。2008 年 RTE 公司实时出单率已经达到 99.0%。

法国电网输送公司(ERDF)在智能电网方面的工作主要集中在自动抄表管理系统(automated meter management, AMM)。2008—2017 年，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，这种节能型的智能电表能使用户跟踪自己的用电情况，并能远程控制电能消耗量。更换工程的总投资为 40 亿欧元。

EDF 在美国诺福克应用了 ABB 公司的 SVC Light 动态能源储存系统，它有助于电网协调来自北海的间歇性风电，以提高风电使用率，减轻风电对电网的影响。该系统使用高技术的锂离子电池和

超导体电力晶体管均衡连接风电场配电网负荷,将储存风电多余的电力以便在高峰时期使用。该项目是个协作研究、发展和示范类的项目,SVC设施预计将在2009年末投入使用。SVC Light系统可以改善配电系统的安全性、容量和灵活性。

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高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)项目,引入分时电价(基于时间间隔计量),使用户能够更好地管理电能消耗,澳大利亚政府推行电力市场的改革不仅仅是为了提高供电效率,而且通过改善电价制度,提高对能耗的控制以及减少温室气体排放,此项目正在进行中。

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接入,以及适应西班牙政府在2007年8月出台的相关法律要求:到2014年,所有的配网运营商都必须有自动抄表管理系统运行;截止到2018年,所有机电式电表都要更换为智能电表。ENDESA公司总计有1550万户电表,目前已经有1万只智能电表进行示范安装,电表更换计划已启动。由ENDESA公司牵头,与当地政府合作在西班牙南部城市Puerto Real开展了智能城市项目试点,主要包含智能发电(分布式发电)、智能化电力交易、智能化电网、智能化计量、智能化家庭,共投资3150欧元,当地政府出资25%,于2009年4月启动,计划用4年的时间完成智能城市建设。该项目涉及9000个用户、1个变电站以及5条中压线路、65个传输线中心。

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。该计划包括可再生能源使用、下一代节能设备、消减CO₂的排放量等内容。与其它城市需要花费数十年来升级其基础设施不同,阿姆斯特丹计划在2012年完成第一轮投资,使它成为率先且被最广泛接受“智能城市”概念的地区之一。

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。其主要技术路线是:构建配电网实时高速双向通信网络;建设能够远程监控、准实时数据采集和通信,以及优化性能的“智能”变电站;安装可编程居家控制装置和全面自动化居家能源使用所必需的系统;并整合基础设施,

支持小型风电和太阳能发电、混合电力汽车、电池系统等分布式发电储能技术。这是当前国际上最为系统的“智能配用电”实践^[18]。

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、次世代汽车等政策在内的政府发展战略原案。原案主要由太阳能发电世界第一节能计划、快速普及生态汽车、低碳物流社会、实现资源大国计划等3大部分构成。太阳能发电计划将向学校等公共设施以及工厂、住宅、写字楼等集中引进太阳能发电和节能设备。为了进一步加快太阳能发电的普及速度,电力公司还推出新的政策来收购家庭等处利用太阳能发电所产生的电力。其中还包括被称为智能电网的次世代电力网络的实证试验,为电动汽车配备快速充电器等。

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内6kV中压馈线(已呈网络拓扑)的实时量测和自动控制(每分钟采样1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。届时能提高该国利用环保能源的能力。韩国知识经济部认为这种电网能将普通电线和IT技术以及卫星通信系统结合起来,可实时监控电力需求和输出。韩国知识经济部将大力推进利用IT技术将电网智能化的商用化。知识经济部与韩电KDN签署了绿色电力信息商用化技术开发协议。韩国知识经济部决定,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”。绿色电力IT是在发电站、送电塔、电线杆、家电产品上安装传感器,生产、流通各种电力信息的技术。电力IT的主要技术包括智能型能源管理系统、基于IT的大容量电力输送控制系统、智能型送电网络监视及运营系统、能动型远程信息处理和电力设备状态监视系统、电线通信普及技术等。韩国希望在未来20a内能将绿色能源在总能源中所占的比率由2.4%提高到11%。智能电网将会是这项工作的一部分。

目前国际上已启动智能电网的标准化研究工作。国际电工委员会(International Electro-technical Commission, IEC)标准化管理委员会(standardization management board, SMB)组织成立的第三战略工作组——智能电网国际战略工作组,于2009年4月

29—30日在法国巴黎召开了首次会议。会议的目的是系统研究现有标准，提出智能电网的标准研究框架。会后战略工作组已开始与 IEC 各专业委员会联系，首先提出与智能电网有关的标准列表，经初步评估和分析后征集各专业委员会意见，并将在9月份的会议上研究讨论建立智能电网标准框架。

美国政府计划投资 1000 万 USD，授权美国国家标准技术研究院(NIST)制定智能电网标准。NIST 已提出了智能电网标准 3 步走计划。美国电科院 EPRI 同时从 NIST 拿到了数百万美金的合同，用于制定智能电网初步框架的标准。美国能源部已经于 2009 年 5 月 18 日发布了第一批与智能电网相关的 16 个重要标准。美国电机电力工程师协会(IEEE)协同 NIST，于 2009 年 6 月 3—5 日在加州召开专门会议，制定智能电网的标准和互操作原则，这个计划简称“IEEE P2030”，并希望这个标准成为全球标准。

2.2 国内研究进展

国内开展智能电网的体系性研究虽然稍晚，但在智能电网相关技术领域开展了大量的研究和实践，在输电领域，多项研究应用达到国际先进水平，在配用电领域，智能化应用研究也正在积极探索。结合国际电网技术发展方向和我国电网发展特点，国家电网公司重点组织开展了新型能源接入、特高压输电、大电网运行控制、数字化变电站与数字化电网、灵活交直流输电及储能、电网防灾减灾与城乡电网安全可靠供电、电网环保与节能等方面的研究，培育出一批具有国际先进水平、引领电网发展的科技成果，在特高压输电技术、电网广域监测分析保护控制技术、电网频率质量控制技术、稳态/暂态/动态三位一体安全防御技术和自动电压控制技术等方面处于国际领先地位。

国家电网公司大力推进特高压电网、“SG186”工程、一体化调度支持系统、资产全寿命周期管理、电力用户用电信息采集系统和电力通信等建设，打造坚强电网，强化优质服务，为智能电网建设奠定了扎实的基础。目前，1000 kV 交流输变电工程(即晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程)已正式投入运行，特高压系统和设备运行平稳，全面验证了特高压交流输电的技术可行性、设备可靠性、系统安全性、设计和施工方案的先进性以及环境的友好性，实现了我国在远距离、大容量、低损耗的特高压核心技术和设备国产化上的重大突破。

以宽带网络为主要标志的电网信息基础设施已具规模，骨干网络覆盖全部网省公司，基于同步数字体系(SDH)光传输网的电力统一时间系统取得重大突破。数据交换体系建设加快，实现了统计数据等关键信息的及时上报、自动汇总和动态发布，各种生产自动化系统获得广泛应用，大大提高了生产自动化水平。

自主研发的能量管理系统(EMS)等在省级以上调度机构得到了广泛应用，全部地区级以上电力调度机构均配置了电网调度自动化系统，引入了电能量计费系统和广域测量系统，新规则下的电力市场交易技术支持系统正在建设之中。变电站实现了计算机监控和无人、少人值守，地理信息系统(GIS)已开始应用于输电、变电和配电管理等业务。

以提高信息化水平和生产效率为目标的生产运营管理信息系统，如电网生产运行管理系统、设备检修管理、变电站建设视频监控系统等，在电网生产管理业务方面发挥了重要作用；以提高经济效益、优质服务为中心的电力客户服务系统，如集中抄表计费、用电查询等系统，直接提供了高效快捷的客户服务，电力负荷管理、电力营销管理等现代化管理手段得以广泛应用。

2007 年，华东电网公司启动了高级调度中心、统一信息平台等智能电网试点工程，目前，先行开展的高级调度中心项目一期工作已通过验收。上海市电力公司在 2008 年开展了智能配电网研究，重点关注智能表计、配电自动化以及用户互动等方面。此外，华北电网公司也于 2008 年启动了数字电表等用户侧的智能电网相关实践。

综上所述，以数字化、自动化为特征的各类应用已覆盖了电网规划、设计、建设、运行、调度和维护等各个方面，信息技术的应用领域深入到电网生产运行、经营和管理的各个环节，取得了诸多标志性成果。但是，现有电网生产各应用系统都是基于本业务或本部门的需求，存在不同的平台、不同的应用系统、不同的数据格式，难以从整个电网公司生产全流程的角度来考虑数据的使用，这导致电力公司内部不同的系统信息资源分散，横向不能共享，上下级间纵向贯通困难。这些系统虽然有丰富的信息资源，却形成了以纵向层次多、横向系统多为主要特征的“信息孤岛”。就厂站端的应用系统来说，存在着规约繁杂、信息承载率低、信息不完整、信息杂乱、系统联调复杂、数据采集资源重复

浪费等问题。目前还有一些生产所需信息没有纳入计算机应用系统,电力企业的生产自动化系统与管理信息系统处于相互分离状态,彼此不能有效结合,不能实现管控一体化,数据信息不能集成共享,不利于实现电网企业的综合管理。在数字化变电站的建设方面,目前国内还没有形成统一的体系结构,对数字化一次设备的计量、检验及验证也缺乏统一的标准,迫切需要制定相关技术标准来规范数字化变电站的建设和数字化一次设备的入网试验、计量检验和验证。

2009年5月21日,国家电网公司刘振亚总经理在2009年特高压输电技术国际会议上宣布了建设中国坚强智能电网的发展战略,明确提出: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,利用先进的通信、信息和控制等技术,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;通过电力流、信息流、业务流的高度一体化融合,实现多元化电源和不同特征电力用户的灵活接入和方便使用,极大提高电网的资源优化配置能力,大幅提升电网的服务能力,带动电力行业及其它产业的技术升级,满足我国经济社会全面、协调、可持续发展要求。这一重大战略决策必将有力地推动中国智能电网的研究和建设,尤其在当前金融危机严重影响我国经济的特殊时期更具有重大的意义。

3 智能电网的发展趋势

3.1 基于MAS的分布协调/自适应控制

传统的监视控制方式,由相对集中的系统独立运营(ISO)、地区输电管理机构(regional transmission organization, RTO)、EMS、区域EMS、DMS、厂站自动化,以及大量分布的继电保护、稳定补救、现场控制器、就地无功补偿、其他智能控制等共同组成而各司其能。这些诸多应用系统和装置,不仅相互协调不够,还存在一些诸如隐藏故障、脆弱性和适应性问题。特别是在分秒必争的紧急状态下,基于离线研究“事先整定、实时动作”的分布执行装置,往往不适应系统的变化,更难以实现高风险时主动解列灵活分区情况下的分布控制功能。

目前上述应用系统大都是基于数据收集与监控系统(SCADA)体系结构的。一个位于控制中心的主站,从位于子站的一系列远方终端装置获取信

息。虽然SCADA体系结构提供了可以接受的性能和可靠性,但是这种体系结构还是存在一些缺点,比如系统的灵活性以及开放信息访问。

近年来,许多制造厂商推出了各种智能电子设备(intelligent electric device, IED),这些IED可以执行各种不同的功能,比如保护、控制以及检测。局域网的应用也日益增多。它们可用于连接不同的IED和控制系统,同时允许访问其它系统的数据,比如数据库和企业资源管理系统(ERP)的数据,或者异地系统的数据。但是,如何用一个合适的系统结构来管理数量巨大的信息,仍然没有得到很好的解决。许多厂商已经开发出了基于客户/服务器模式和网络技术的各种不同的系统,但是这些系统仍然不够灵活,它们经常将检测功能集中起来,对网络带宽要求很高。而且许多只是一个厂商的解决方案,这样就限制了多种不同厂家设备的集成。

目前面向服务体系结构(service-oriented architecture, SOA)的系统应用也日益广泛,SOA是新一代的企业应用架构,它通过业务、技术与管理这3个维度的架构模型,解决了业务、技术和管理的应用问题,从而带来了业务上的灵活性、技术上的高效率和管理上的可治理。基于SOA的系统具有松耦合、便于复用、架构灵活、节约投资及增强业务敏捷性等优点,但是在系统的智能性、实时性方面还难以满足控制系统的要求。

当前计算机科学发展一个显著趋势就是计算范型从以算法为中心转移到以交互为中心。智能Agent技术就是这一个潮流之下的产物^[19-22]。Agent是一类粒度大、智能度高、具有一定自主的理性行为的实体,多Agent系统(multi-agent system, MAS)就是由这样一组彼此间存在着协调、协作或竞争关系的Agent组成的系统。MAS系统试图用Agent来模拟人的理性行为,通过描述Agent之间理性交互而不是事先给定的算法来刻画一个系统。智能Agent是一种技术,但更重要的是一种方法论,它为大规模、分布式和具有适应性的复杂系统的实现提供了一种全新的途径,比如电力系统、智能机器人、电子商务、分布式信息获取、过程控制、智能人机交互、个人助理等等。MAS系统具有很强的伸缩性,而且允许遗留系统之间实现互联和互操作,从而可以最大限度地保护用户资源。目前MAS系统是人工智能领域非常活跃的研究方向,并且在广泛的领域具有非常高的应用前景。

相对基于 SCADA、客户/服务器的分布式控制与自动化系统以及基于 SOA 的应用系统, 基于 Agent 的系统具有很多的优点。系统的每一个功能或者任务(比如每一个 IED 的管理), 可以封装为一个独立的 Agent, 从而使系统高度模块化。Agent 之间是一种松散的组合, 它们之间通信是通过消息的传递而不是通过程序的调用(本地或远程); 同时, 由于采用目录服务机制, 通过添加新的 Agent, 系统很容易增加新的功能, 而且这些功能可以被其它 Agent 所用。对于那些本来就具有分布式结构的控制与自动化系统(如电力系统、过程控制等), 特别适合采用多 Agent 系统体系结构。较之传统的控制系统, 这种基于 Agent 的系统可以使系统的每一个成员具有更大的自治性。

MAS 的分布协调理念可广泛应用于各级 EMS、DMS、厂站自动化系统之间的分布协调控制。

3.2 分布式能源的系统集成

分布式能源主要包括分布式发电、分布式储能和具有潜在功率产品价值的需求侧负荷响应资源。除面向电网的抽水储能电站外, 3 者不仅同属供用电范畴, 彼此之间的联系也很密切。如分布式发电与分布式储能组成功能互补的微网, 并可参与需求响应资源的负荷响应程序等。

1) 分布式发电。

和电网发电不同, 可以视为虚拟负荷的分布式发电设备直接由用户控制启停。即使接入配电系统, 也可不参与自动发电控制, 甚至在配网侧安装逆功率继电器, 正常时不向电网注入功率。

由分布式发电机组构成的微网, 既可与主网相连也可象孤岛那样自治运行。此外, 由于技术和自然原因, 小型的分布式发电机组不可能持久稳定运行, 其产品只能是能量(kWh)而不是功率(kW)。因此, 除需研究解决将 DG 接入主网所引发的有关问题外, 还需研究解决微网许多特殊的运行问题, 如应对 DG 不同业主的分布决策, 微网自由化市场下对 DG 的智能控制, 以及 DG 除向网络售电外的其他任务(如就地供热、保持当地电压一定水平、主网故障时为当地重要负荷提供后备等)^[23-26]。

由于这些问题具有分布自主和不定因素等诸多特点, 很难采用集中控制管理。因此, 具有分布式问题求解(distributed problem solving, DPS)特点的 MAS 技术, 自然成为解决微网问题的一个新途径^[23]。

2) 分布式储能。

由分布式发电和蓄电池(uninterruptible power supply, UPS)分布式储能组成的微网接入主网时, 当地负荷同时从主网和本地微电源获取功率, 并能排除电网扰动保证电能质量。主网供电中断时, 微网能平滑地过渡到孤岛运行, 随后再重新接入主网。

显然, UPS 的储能能力(或者说支持主网停电时间的长短)取决于蓄电池容量的大小。此外, 这种直接面向用户的分布式储能设备, 本身具有一定的损耗。随着这类用户的不断增加, 总投资和损耗将大幅度上升。解决这一问题的办法, 就是统一由供方在馈线上安装能令众多用户受益、具有储能和补偿能力的电能质量调整器(power quality conditioner, PQC)。基于电力电子技术的 PQC, 是动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR)和配电静止同步补偿器(distribution static synchronous compensator, DSTACOM)的总称。

DVR 或串联接入的 PQC 的作用是: 当配网瞬间发生失压、欠压或过压扰动时予以补偿, 防止系统对馈线上的负载产生影响。DSTACOM 或并联接入的 PQC 作用是: 当用户因非线性负载产生谐波、感性负载大或发生闪变时予以补偿, 防止这些扰动通过配网影响到其他用户。若同时串并联接入 PQC, 则兼有上述双向补偿功能。PQC 用于解决瞬间扰动和波形畸变问题时, 采用适当容量的电容器作为储能设备就已足够。但若要求 DVR 不仅补偿瞬间失压, 而且起到 UPS 作用, 因 DVR 与系统具有有功功率交换, 其储能设备就必须采用高能蓄电池或超导蓄能设备, 并相应扩大逆变器的容量。

智能电网所关注的不仅是风险环境下的自愈, 还包括向用户提供安全优质的电力。因此, 电力电子技术在智能电网中的应用, 不仅促使分布式发电与分布式储能相结合提供自愈基础, 还一并解决了无功调压、瞬间扰动和波形畸变等电能质量问题。

3) 需求响应资源。

对电网而言, 分布式发电的启停可以看成是虚拟负荷的减少和增加。同样, 负荷的减少和增加也可等效于虚拟发电的增减。随着电力市场的深入发展, 负荷相当于潜在的功率产品的价值正在日益凸现。当前, 需求响应资源正从需求侧管理向需求侧竞价(demand side bidding, DSB)发展^[27]。用户能够通过改变自己的用电方式主动参与市场竞争, 获得相应的经济利益, 而不象以前那样被动地按所定价

格行事。

DSB 产品的用途除与发电商之间的双边合同外,还包括各种形式的辅助服务(频率控制、电压控制、备用和黑启动)、参与可中断供电合同或峰谷电价计划、在平衡市场中竞价增减出力以及缓解输配电阻塞等。

智能电网的任务在于实现需求响应资源的系统集成,使之在正常、紧急和恢复状态下协调运行。这除了需要研发有关 DSB 市场的各种应用,诸如辅助服务、输电约束、供电合同、平衡市场以及现货市场外,还需要研发正常、紧急、恢复状态下的各种运行软件,诸如正常状态下的直接负荷控制、固定负荷消费水平、按通知减负荷、分布式发电参与负荷响应程序、缓解输配电阻塞,紧急状态下的频率控制、电压控制、备用和黑启动等。

3.3 快速仿真决策技术

基于事件响应的快速仿真决策,既不同于传统预防性控制的静态安全分析和安全对策,也较基于 PMU 的广域测量系统所组成的动态安全评估(dynamic security assessment, DSA)有所发展,主要增加故障发展快速仿真的实时预测功能,为调度员提供紧急状态下的决策支持。

快速仿真与模拟(fast simulation and modeling, FSM)是含风险评估、自愈控制与优化的高级软件系统(包涵广义的 EMS、DMS 等功能)。它为智能电网提供数学支持和预测能力(而不只是对紧急情况做出反应的能力),以期达到改善电网的稳定性、安全性、可靠性和运行效率的目的。

从目前的发展趋势来看,基于 Agent 的快速仿真决策是未来发展的重要方向。

3.4 基于知识的综合决策支持

未来智能电网面对的数据和信息将日益复杂并呈几何级增长,同时各种信息之间的关联程度也将越来越紧密。例如:调度部门内部的各个职能部门间的信息已经越来越紧密关联,互通互动;实时信息与离线信息、动态信息与静态信息、运行信息与管理信息、技术信息与经济信息等均更加紧密关联;调度人员既直接对电网运行实施调度控制职能,也需要其他职能部门的支持和配合,需要信息互通。此外电网运行中还包括其他一些相关知识和信息,如天气预报、雷电观测、离线计算、历史事件、专家知识以及电网运行规程和调度员经验等。

如何有效地从上述海量信息中获取、发布、共

享、管理和利用知识资源,消除信息孤岛和知识孤岛,建立实现广域、多层次的知识资源共享的智能电网知识管理系统,通过知识流与电力流、信息流和业务流的高度一体化融合,实现基于知识的高效的电网智能调度运行与控制,是未来智能电网的必由之路。

4 对我国发展智能电网的建议

在当前的国内外经济社会形势下,建设中国智能电网对于促进节能减排,发展低碳经济,拉动内需,带动相关产业发展,改善民生,保障经济社会和谐发展,彰显大国责任具有重要意义,因此是国家能源战略的必然选择。

智能电网建设是一项高度复杂的系统工程,不仅要解决众多的技术难题,还需要深入研究与之配套的宏观政策、社会经济、发展战略、市场机制、经营管理等方面的软科学问题,在此提出下列建议:

1) 发挥一体化管理优势,积极有序推进智能电网研究及建设。建议以国家宏观政策为导向,立足于世界电力发展技术的前沿,从我国电力行业实际需求出发,坚持统一设计、整体推动、试点先行、逐步推广的方针,依托科技创新和管理创新,充分调动系统内外资源,形成前瞻研究、试点应用、大范围推广梯级推进机制,建立技术标准和管理标准体系,建设贯穿于电力行业全领域、全过程、全寿命的广域全景分布式一体化架构,建成符合我国能源战略和企业发展要求的智能电网。

2) 开展我国智能电网架构设计。建议立足我国电网自身的特点和现有的信息、控制、管理系统发展水平,综合考虑未来相关技术的发展方向,参考国外的研究成果,提出我国发展智能电网的构架和体系,保证我国智能电网具备可靠、灵活、开放的特点,能够同时满足电网规划建设、运行控制、资产管理、用户管理等方面的需要。

3) 制定试点方案及实施计划。建议在遵循所制定的智能电网发展路线图基础上,开展智能调度、数字化变电站、在线安全稳定分析和预警等关键技术研究及试点,初步建设高级调度中心,统一网络数据模型,实现具有可视化功能的电网在线监测与预警系统,提升辅助决策能力。选择区域、省网公司进行智能电网建设试点,评估试点效果,积累相关经验。在此基础上,配合特高压电网建设进程,选取先进适用技术,在国家电网公司系统内逐

步推广应用, 推动智能电网的全面实施。

4) 统筹考虑电网规划、建设、改造和技术升级。建议我国在特高压输电系统的基础上, 在电网建设和引入信息、控制等技术过程中, 统筹考虑电网规划、建设、改造和技术升级, 实现整个电网在运行控制和管理维护上的智能化, 达到电网更安全、经济环保的目的。

5) 输配电网与用电的协调调度与控制。研究利用信息系统和智能终端控制, 通过提高负荷功率因数、优化电源及用电负荷安排等, 实现从发电、输电、配电到终端用户的协调调度与优化运行, 提高系统的安全稳定水平, 满足可靠供电的要求。建议重点开展协调调度的相关通信和信息支撑技术、电网稳定运行理论及在线安全稳定控制技术、提高电力系统稳定性的控制策略和预防系统崩溃的控制技术及相关仿真技术研究。

6) 发、输、配、用电的协调安全与经济运行。协调安全与经济运行是智能电网建设的重要目标。建议我国在智能电网研究中, 充分利用信息技术、仿真和分析技术, 在统一的电力系统模型内将电网安全协调和经济运行结合起来分析和监控, 提高电网安全性和经济性, 建设资源节约型、环境友好型电网。

7) 注重理论和技术的创新与应用。理论和技术的创新与应用是实现智能电网的必由之路。建议研究新型输电技术(采用 FACTS、VSC-HVDC、超导输电等)以提高系统运行灵活性和经济性; 研究广域通信技术实现网络自动化、在线服务和需求侧管理(DSM); 研发用户电力技术(DSTATCOM、APF、DVR、SSTS 等)提高供电可靠性和供电质量; 研发电力储能技术解决可再生能源间歇性供电问题; 研究采用参数量测技术监视设备健康状态与网络状态、支持继电保护、计量电能; 研究电网稳定运行理论及在线监测、预警新技术, 为智能电网分析提供科学的理论依据; 研究利用决策支持技术增强各级运行人员的决策能力。

8) 形成完整的智能电网规范和标准体系。建立统一的规则和标准体系是我国智能电网建设的关键环节, 也是智能电网能够正常运行的基本保证。建议由国家电网公司统一部署, 通过组织各方面的研究力量集中科研攻关, 把电力工业的标准、通信标准集成到电力系统的架构中, 形成完整的智能电网规范和标准体系。最终目标是实现从发电到

用电各个环节中相关信息的集成与共享。

9) 研究建立电网综合知识支撑体系。研究如何构建电网综合知识支撑体系, 研究如何通过知识流提供知识服务, 从而实现与电网各智能应用系统协同, 辅助实现知识创新、协同工作、问题解决和决策支持, 更好地保证电网的安全、稳定、经济、优质运行, 推动一体化管理向深度方向发展, 最大限度地提高决策效率, 提升服务质量, 实现电网综合资源利用和增值服务。

10) 建立智能电网试验基地。智能配电网对配电系统运行方式、经济性、管理、可靠性和服务质量将产生重大的影响, 必须充分吸收以前配网自动化的经验教训, 通过实验对相关技术、系统和设备等进行测试和验证。同时由于分布式电源及微网并网对于配电网系统的影响重大, 如孤岛效应的控制、双向保护技术等, 仅理论分析对于配电网系统的影响研究是不够的, 而且智能配电网的建设也是一个不断开发和完善的过程, 必须有一个智能电网实验基地提供支撑。

另外, 特别建议: 1) 建设中国智能电网城市示范工程; 2) 在大力发展特高压输电技术的同时, 适时开展超导输电研究及应用。

5 结论

虽然当前智能电网的概念尚未统一, 各国发展智能电网的驱动力和侧重点各不相同, 但是对于采用先进的通信、信息和控制技术来提高电网的智能化程度已达成共识。基于 Agent 技术的分布式协调、控制、仿真与决策, 分布式能源的系统集成以及基于知识的综合决策知识技术是未来智能电网技术发展的重要趋势。

智能电网的研究和建设是一项高度复杂的系统工程, 我国智能电网的研究和建设应在博采众家之长的基础上, 充分发挥一体化管理优势和自主创新精神, 因地制宜, 建设具有中国特色的智能电网。

参考文献

- [1] European Commission. European technology platform smart-grids: Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future [EB/OL]. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf.
- [2] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. The smart grid: An introduction[EB/OL]. [http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages\(1\).pdf](http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages(1).pdf).
- [3] Liu C C, Jung J, Heydt G T, et al. Conceptual design of the strategic

- power infrastructure defense (SPID) system[J]. IEEE Control System Magazine, 2000, 20(4): 40-52.
- [4] Amin M. Toward self-healing energy infrastructure systems [J]. IEEE Computer Applications in Power, 2001, 14(1): 20-28.
- [5] 王明俊. 自愈电网与分布能源[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 1-7.
Wang Mingjun. Self-healing grid and distributed energy resource [J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 1-7(in Chinese).
- [6] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网[J]. 中国电力, 2008, 41(6): 19-22.
Xie Kai, Liu Yongqi, Zhu Zhizhong, et al. The vision of future smart grid[J]. Electric Power, 2008, 41(6): 19-22(in Chinese).
- [7] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7-11.
Yu Yixin, Luan Wenpeng. Smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(1): 7-11(in Chinese).
- [8] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
Chen Shuyong, Song Shufang, Li Lanxin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7(in Chinese).
- [9] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. Grid2030: A national vision for electricity's second 100 years [EB/OL]. http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/Elec_Vision_2-9-4.pdf.
- [10] Electric Power Research Institute. The integrated energy and communication systems architecture volume I: User guidelines and recommendations[EB/OL]. http://intelligrid.epri.com/docs/IECSA_VolumeI.pdf.
- [11] 柳明, 何光宇, 沈沉, 等. IECSA 项目介绍[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 99-104.
Liu Ming, He Guangyu, Shen Chen, et al. Brief introduction to the IECSA project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 99-104(in Chinese).
- [12] Electric Power Research Institute. Intelligrid: Smart power for the 21st century[EB/OL]. <http://my.epri.com/portal/server.pt?space=CommunityPage&cached=true&parentname=ObjMgr&parentid=2&control=SetCommunity&CommunityID=405>.
- [13] European Commission. Strategic research agenda for Europe's electricity networks of the future[EB/OL]. http://www.smartgrids.eu/documents/sra/sra_finaldraftversion_18Dec2006.pdf.
- [14] European Commission. Strategic deployment document for Europe's electricity networks of the future[EB/OL]. <http://www.smartgrids.eu/>.
- [15] IBM. Smart power for a smart planet[EB/OL]. http://www.ibm.com/ibm/ideasfromibm/us/smartplanet/topics/utilities/20081124/smart_erplanet_energy.pdf.
- [16] The Energy Policy Initiatives Center, University of San Diego School of Law. San Diego smart grid study-final report[EB/OL]. http://www.gridwise.org/pdf/061017_SDSmartGridStudyFINAL.pdf.
- [17] PJM. PJM manual 01 control center and data exchange requirements [EB/OL]. <http://www.pjm.com/Media/documents/manuals/m01-redline.pdf>.
- [18] Xcel Energy. SmartGridCityTM: Design plan for Boulder, Colo [EB/OL]. http://smartgridcity.Xcelenergy.com/media/pdf/Smart_Grid_City_DesignPlan.pdf.
- [19] 史忠植. 智能主体及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-9.
- [20] Wooldridge M, Jennings N R. Intelligent agents: Theory and practice[J]. The Knowledge Engineering Review, 1995, 10(2): 115-152.
- [21] Jennings N R, Sycara K, Wooldridge M. A roadmap of agent research and development[J]. Int Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 1998, 1(1): 275-306.
- [22] 盛万兴, 杨旭升. 多 Agent 系统及其在电力系统中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 16-26.
- [23] Dimeas A, Hatziargyriou N. A multi-agent system for microgrids [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, USA, 2004.
- [24] 伍磊, 袁岳, 季侃, 等. 微型电网及其在防震减灾中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 32-36.
Wu Lei, Yuan Yue, Ji Kan, et al. Microgrid and its application in earthquake prevention and disaster reduction[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 32-36(in Chinese).
- [25] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.
Li Bin, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88(in Chinese).
- [26] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.
Huang Wei, Sun Changhui, Wu Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18(in Chinese).
- [27] 周明, 李庚银, 倪以信. 电力市场下电力需求侧管理实施机制初探[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 5-11.
Zhou Ming, Li Gengyin, Ni Yixin. A preliminary research on implementation mechanism of demand side management under electricity market[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 5-11(in Chinese).



收稿日期: 2009-05-27.

作者简介:

张文亮(1954—), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为高电压技术、智能电网, E-mail: wlzhang@epri.ac.cn;

刘壮志(1970—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统技术经济分析、智能电网, E-mail:

liuzhzh@epri.ac.cn;

王明俊(1931—), 男, 中国电力科学研究院咨询委员, 原副总工程师, 长期从事电力系统自动化研究工作, E-mail: mjwang@epri.ac.cn;

杨旭升(1968—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统自动化、电力市场以及人工智能技术在电力系统中的应用, E-mail: xusheng_yang@epri.ac.cn 或 yxshlz@163.com.

(责任编辑 李兰欣)