

智能电网技术综述

陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 沈杰

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Survey on Smart Grid Technology

CHEN Shu-yong, SONG Shu-fang, LI Lan-xin, SHEN Jie

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

ABSTRACT: In this paper the connotation of smart grid is expounded, the present research status of smart grid home and abroad as well as the practical significance of developing smart grid in China are summarized. As a reference for relative researchers, this paper analyzes the conditions to develop smart grid in China, and points out the key technological problems to be solved for the development of smart grid in the fields of power network topology, communication system, metering infrastructure, demand side management, intelligent dispatching, power electronic equipments, distributed generation integration etc..

KEY WORDS: smart grid; intelligent dispatching; demand side management; advanced metering infrastructure; energy-saving and pollutant emission reducing; distributed generation

摘要: 阐述了智能电网的内涵和特点, 总结了智能电网技术的国内外研究现状以及发展智能电网对中国的重要意义, 分析了我国发展智能电网的条件, 指出了建设智能电网在网络拓扑、通信系统、计量体系、需求侧管理、智能调度、电力电子设备、分布式电源接入等领域需要解决的关键技术问题。

关键词: 智能电网; 智能调度; 需求侧管理; 高级计量体系; 节能减排; 分布式发电

0 引言

当前, 节能减排、绿色能源、可持续发展成为各国关注的焦点^[1]。人类能源发展面临的第一挑战, 是以可再生能源逐步替代化石能源, 建造能源使用的创新体系, 以信息技术彻底改造现有的能源利用体系, 最大限度地开发电网体系的能源效率。因此期望通过一个数字化信息网络系统将能源资源开发、输送、存储、转换(发电)、输电、配电、供电、售电、服务以及蓄能与能源终端用户的各种电气设备和其它用能设施连接在一起, 通过智能化控制实

现精确供能、对应供能、互助供能和互补供能, 将能源利用效率和能源供应安全提高到全新的水平, 将污染与温室气体排放降低到环境可以接受的程度, 使用户成本和投资效益达到一种合理的状态。这就是智能电网的思想^[2-8]。

智能电网是经济和技术发展的必然结果, 具体是指利用先进的技术提高电力系统在能源转换效率、电能利用率、供电质量和可靠性等方面的性能。智能电网的基础是分布式数据传输、计算和控制技术, 以及多个供电单元之间数据和控制命令的有效传输技术^[9]。

针对智能电网技术, 美国和欧洲已经形成强大的研究群体, 研究内容覆盖发电、输电、配电和售电等环节, 许多电力企业也在如火如荼地开展智能电网建设实践, 通过技术与具体业务的有效结合, 使智能电网建设在企业生产经营过程中切实发挥作用, 最终达到提高运营绩效的目的^[10-12]。

随着我国特高压电网的建设和电力体制改革的不断深化, 智能电网也将成为我国电网发展的一个新方向^[13-16]。在宏观政策层面, 电力行业需要满足建设资源节约型和环境友好型社会的要求; 在市场化改革层面, 电能交易手段与定价方式正在改变, 市场供需双方的互动将越来越频繁, 电网必须能够灵活地支持各种电能交易。本文将综述智能电网的概念以及国内外研究现状, 结合我国能源分布及电网特点, 分析我国发展智能电网的条件和需要解决的关键技术问题, 以飨读者。

1 智能电网的概念

1.1 智能电网的含义

智能电网并没有一个确定的概念, 各个领域的

专家从不同角度阐述了智能电网的内涵, 并且随着研究和实践的深入对其不断细化。

天津大学余贻鑫院士给出如下定义^[3]: 智能电网是指一个完全自动化的供电网络, 其中的每一个用户和节点都得到实时监控, 并保证从发电厂到用户端电器之间的每一点上的电流和信息的双向流动。智能电网通过广泛应用的分布式智能和宽带通信, 以及自动控制系统的集成, 能保证市场交易的实时进行和电网上各成员之间的无缝连接及实时互动。

文献[8]提出了“互动电网”的概念, 指在创建开放的系统和建立共享的信息模式的基础上, 以智能电网技术为基础, 通过电子终端将用户之间、用户和电网公司之间形成网络互动和即时连接, 实现数据读取的实时、高速、双向的总体效果, 实现电力、电信、电视、远程家电控制和电池集成充电等的多用途开发。互动电网可以整合系统中的数据, 优化电网的管理, 将电网提升为互动运转的全新模式, 形成电网全新的服务功能, 提高整个电网的可靠性、可用性和综合效率。

根据 IBM 中国公司高级电力专家 Martin Hauske 的解释, 智能电网有 3 个层面的含义^[11]: 首先是利用传感器对发电、输电、配电、供电等关键设备的运行状况进行实时监控; 然后把获得的数据通过网络系统进行收集、整合; 最后通过对数据的分析、挖掘, 达到对整个电力系统运行的优化管理。

埃森哲认为, 智能电网利用传感、嵌入式处理、数字化通信和 IT 技术, 将电网信息集成到电力公司的流程和系统, 使电网可观测(能够监测电网所有元件的状态)、可控制(能够控制电网所有元件的状态)和自动化(可自适应并实现自愈), 从而打造更加清洁、高效、安全、可靠的电力系统。

总之, 智能电网就是通过传感器把各种设备、资产连接到一起, 形成一个客户服务总线, 从而对信息进行整合分析, 以此来降低成本, 提高效率, 提高整个电网的可靠性, 使运行和管理达到最优化。

1.2 智能电网的特点

根据相关文献^[2-4,7-8,13], 智能电网的特点如下:

1) 自愈和自适应。实时掌控电网运行状态, 及时发现、快速诊断和消除故障隐患; 在尽量少的人工干预下, 快速隔离故障、自我恢复, 避免大面积停电的发生。

2) 安全可靠。更好地对人为或自然发生的扰动

做出辨识与反应。在自然灾害、外力破坏和计算机攻击等不同情况下保证人身、设备和电网的安全。

3) 经济高效。优化资源配置, 提高设备传输容量和利用率; 在不同区域间进行及时调度, 平衡电力供应缺口; 支持电力市场竞争的要求, 实行动态的浮动电价制度, 实现整个电力系统优化运行。

4) 兼容。既能适应大电源的集中接入, 也支持分布式发电方式友好接入以及可再生能源的大规模应用, 满足电力与自然环境、社会经济和谐发展的要求。

5) 与用户友好互动。实现与客户的智能互动, 以最佳的电能质量和供电可靠性满足客户需求。系统运行与批发、零售电力市场实现无缝衔接, 同时通过市场交易更好地激励电力市场主体参与电网安全管理, 从而提升电力系统的安全运行水平。

2 国内外研究现状

2.1 国外研究现状

2.1.1 概述

2005 年, 一位名叫马克·坎贝尔的加拿大人发明了一种无线控制器, 这种控制器与大楼的各个电器相连, 让大楼里的电器互相协调, 减少了大楼在用电高峰期的用电量^[14]。坎贝尔实际上利用了群体行为(Swarm)原理。该技术仅是目前热门的智能电网技术中的一种。

欧美各国对智能电网的研究开展较早, 且已经形成强大的研究群体。由于各国的具体情况不同, 其智能电网的建设动因和关注点也存在差异。

美国主要关注电力网络基础架构的升级更新, 同时最大限度地利用信息技术, 实现系统智能对人工的替代。主要实施项目有美国能源部和电网智能化联盟主导的 GridWise 项目和 EPRI 发起的 Intelligrid 项目。

欧洲则重点关注可再生能源和分布式能源的发展, 并带动整个行业发展模式的转变。2005 年智能电网欧洲技术论坛成立。欧盟第 5 次框架计划(FP5)(1998—2002)中的“欧洲电网中的可再生能源和分布式发电整合”专题下包含了 50 多个项目, 分为分布式发电、输电、储能、高温超导体和其他整合项目 5 大类, 其中多数项目于 2001 年开始实施并达到了预期目的, 被认为是发展互动电网第一代构成元件和新结构的起点。其中主要项目有 Dispower、CRISP 和 Microgrids。

2008年3月,美国科罗拉多州一座小城波尔得建成了美国第一座智能电网城市^[14]。目前美国多个州都对此项技术表示出浓厚的兴趣,并开始设计智能电网系统,通用电气、IBM、西门子、谷歌、英特尔等信息产业龙头也瞄上了此间的商机,都已投入智能电网业务。英国、瑞典均在积极规划推动智能电网,意大利及美国已率先试行。

2.1.2 美国的研究及实践

2006年,美国IBM公司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^[15]。电力公司可以通过使用传感器、计量表、数字控件和分析工具,自动监控电网,优化电网性能、防止断电、更快地恢复供电,消费者对电力使用的管理也可细化到每个联网的装置。

2009年2月,IBM与地中海岛国马耳他签署协议——双方将建立一个“智能公用系统”,以实现该国电网和供水系统的数字化,其中包括在电网中建立一个传感器网络^[15]。IBM将提供搜集分析数据的软件,帮助电厂发现机会,降低成本及碳排放量。

谷歌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,谷歌与通用电气对外宣布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^[8]。2009年2月10日,谷歌表示已开始测试名为谷歌电表(PowerMeter)的用电监测软件。该公司还向美国议会进言,要求在建设智能电网时采用非垄断性标准^[15]。

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。美国还将集中对落后的电网系统进行升级换代,建立美国横跨四个时区的统一电网,逐步实现太阳能、风能、地热能的统一入网管理^[15]。

美国能源部西北太平洋国家实验室正在协助建立电网智能化联盟并进行实地示范,如近期完成的高级需求响应网络太平洋西北电网智能化试验台。在该项目中,通过英维思控制器(Invensys Controls)将家庭网关设备连接到装有IBM软件的新型高级仪表和可编程恒温器上,将112个家庭与实时电力价格信息联系起来。最终结果表明,参与者节约了约10%的能源费用,并且需求响应良好^[15]。

加州已完成第一阶段试验性200万户小区先进

电表系统(advanced metering infrastructure, AMI)的安装,初步分析显示,节省电力可达16%~30%^[15]。

2.1.3 欧洲的研究及实践

2006年欧盟理事会的能源绿皮书《欧洲可持续的、竞争的和安全的电能策略》明确强调,智能电网技术是保证欧盟电网电能质量的一个关键技术和发展方向。目前英、法、意等都在加快推动智能电网的应用和变革,意大利的有关电网2001年已经率先实现了智能化。

文献[10]提到,法国电力公司日前正在美国诺福克试验一种特动态能源储存系统,它有助于电网协调来自北海的间歇性风电,法国电力公司同意与瑞士ABB公司之间的交易,即使用ABB公司SVC Light的“聪明电网”技术。该系统将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的配电网络负荷。ABB称该系统将储存风电多余电力在高峰时期使用。该项目是个协作研究、发展和示范项目,SVC设施预计在2009年末投入使用。

2.2 国内研究现状

虽然我国还没有从国家层面制定智能电网的发展战略,但在很多方面的研究成果已经为发展智能电网奠定了一定的基础。

华东电网公司于2007年在国内率先开展了智能电网可行性研究,并设计了2008—2030年“三步走”的行动计划,在2008年全面启动了以高级调度中心项目群为突破的第一阶段工作,以整合提升调度系统、建设数字化变电站、完善电网规划体系、建设企业统一信息平台为4条主线,力争到2010年全面建成华东电网高级调度中心,使电网安全控制水平、经营管理水平得到全面提升^[13]。

2009年2月28日,作为华北公司智能化电网建设的一部分——华北电网稳态、动态、暂态三位一体安全防御及全过程发电控制系统在京通过专家组验收^[16]。这套系统首次将以往分散的能量管理系统、电网广域动态监测系统、在线稳定分析预警系统高度集成,调度人员无需在不同系统和平台间频繁切换,便可实现对电网综合运行情况的全景监视并获取辅助决策支持。此外,该系统通过搭建并网电厂管理考核和辅助服务市场品质分析平台,能有效提升调度部门对并网电厂管理的标准化和流程化水平。

在输电网建设方面,2006年底交流特高压示范工程奠基,2008年8月正式建成投运。我国电网优

化配置资源的能力明显增强。

在控制系统新技术方面, 由中国电力科学研究院等单位承担、周孝信院士担任首席科学家的国家 973 计划项目“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”研究人员开展了基于智能和专家系统的电力系统故障诊断和恢复控制技术研究, 为智能型的电力系统动态调度与控制提供了基本的分析工具, 开发成功电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统平台, 为新的智能化电网运行控制开发提供了系统的研发平台^[17-19]。

国家电网公司推行了 SG186 一体化平台建设, 山东、浙江、江苏、上海等各省(市)电力公司都在积极推动用电信息采集系统、营销业务系统信息化项目建设等项目, 并取得了突出成果。

在可再生能源发电方面, 国家也启动了多项 863 高技术研究发展计划项目, 在“十一五”期间, 在三大先进能源技术领域设立重大项目和重点项目, 包括: 以煤气化为基础的多联产示范工程, MW 级并网光伏电站系统, 太阳能热发电技术及系统示范等项目。

2.3 建设智能电网对我国具有重要意义

受国际金融危机的影响, 我国电力需求暂时放缓, 这在客观上为调整和优化电力和能源结构提供了有利条件和机遇。

智能电网为相关企业提高运行效率及可靠性、降低成本描绘了一个蓝图^[15]。通过对电力生产、输送、零售各个环节的优化管理, 可以节省电费、实现智能管理、具有更强的可靠性和使用效率、增加可再生能源的使用、支持混合动力车的接入, 以及使家电设备智能化。以智能电网的建设促进优化企业管理、全面节能减碳, 确实是值得参考的做法。

目前, 智能电网在国外先进电网企业的实施和应用已经为企业带来了卓著的价值回报^[15]。意大利主要电力运营商于 2001 年安装和改造了 3000 万台智能电表, 建立起智能化计量网络, 节省了约 5 亿欧元管理成本, 客户服务成本降低 40% 以上。

《纽约时报》刊文称, 美国能源部西北太平洋国家实验室的研究结果表明, 仅使用数字工具设定家庭温度及融入价格信息, 能源消耗每年可缩减 15%。若推广使用需求侧监控系统 20 a, 则在建设、维护、运营电厂、变电站和电网方面将节省 700 亿美元, 这其中 40% 的费用节省于发电, 相当于 30 个大型燃煤电站无需投建。

可见, 智能电网除了能更灵活有效地调配电力供需, 还通过利用先进电子电表所提供的实时用电信息来改变用户的用电行为模式, 引导用户节约用电, 另外也透过差异电价, 进一步降低尖峰用电, 避免增建电厂的庞大投资。

有专家认为中国实施智能电网改造初期投资只需要 3000~5000 亿元, 但是其对变压器、智能终端、网络管理技术等行业有较大的拉动作用。如果扩大投资规模, 中国将可能成为主导全球互动电网变革的领先国家^[8]。

根据当前中国电网企业的发展状况和特点, 在进行智能电网试点时, 应先重点关注电力生产运行, 从条件比较成熟的地域和业务着手^[11], 制定适宜的策略和实施步骤, 选择适宜的范围或试点^[11]。

在技术层次上应重点关注生产运行相关数据采集和信息集成/共享, 具体包括^[11]:

1) 在数据采集上, 可以结合电网新建和改造, 增加对设备状态数据的实时采集, 同时充分利用巡检过程记录的数据、设备检修和试验产生的数据、营销系统的部分数据等。通过作业管理与生产管理系统配合建设, 有效提高生产业务数据的获取。

2) 在信息集成方面, 重点关注调度业务信息与生产管理信息的集成, 建设调度综合数据平台, 实现调度业务相关信息的共享, 然后与第三、四安全分区中的生产业务数据集成, 为数据分析和优化打下基础。其中模型和信息标准的建立十分关键。

3 建设智能电网涉及的关键技术

3.1 坚强而灵活的网络拓扑

坚强、灵活的电网结构是未来智能电网的基础。我国能源分布与生产力布局很不平衡, 无论从当前还是从长远看, 要满足经济社会发展对电力的需求, 必须走远距离、大规模输电和大范围资源优化配置的道路。特高压输电能够提高输送容量、减少输电损耗、增加经济输电距离, 在节约线路走廊占地、节省工程投资、保护生态环境等方面也具有明显优势。因此, 发展特高压电网, 构建电力“高速公路”, 成为必然的选择。

如何进一步优化特高压和各级电网规划, 做好特高压交流系统与直流系统的衔接、特高压电网与各级电网的衔接, 促进各电压等级电网协调发展、送端电网和受端电网协调发展、城市电网与农村电网协调发展、一次系统和二次系统协调发展, 成为

需要解决的关键问题。

随着电网规模的扩大,互联大电网的形成,电网的安全稳定性与脆弱性问题越来越突出,对主网架结构的规划设计要求相应地提高。只有灵活的电网结构^[20]才能应对冰灾、战争等突发灾害性事件对电网安全的影响。

3.2 开放、标准、集成的通信系统

智能电网需要具有实时监视和分析系统目前状态的能力:既包括识别故障早期征兆的预测能力,也包括对已经发生的扰动做出响应的能力。智能电网也需要不断整合和集成企业资产管理和电网生产运行管理平台,从而为电网规划、建设、运行管理提供全方位的信息服务。因此,宽带通信网,包括电缆、光纤、电力线载波和无线通信,将在智能电网中扮演重要角色^[21]。这也是 GridWise 和 IntelliGrid 项目的重要研究内容。

智能电网的发展对网络安全提出了更高的要求,这一问题需要格外注意。目前美国 EPRI 的合作伙伴 PowerWec、EEI、NERC 以及爱达荷州实验室正致力于信息安全问题的研究。

3.3 高级计量体系和需求侧管理

电网的智能化需要电力供应机构精确得知用户的用电规律,从而对需求和供应有一个更好的平衡。目前我国的电表只是达到了自动读取,是单方面的交流,不是双方的、互动的交流。由智能电表以及连接它们的通信系统组成的先进计量系统能够实现诸如远程监测、分时电价和用户侧管理等的更快和准确的系统响应。

将来随着技术的发展,智能电表还可能作为互联网路由器,推动电力部门以其终端用户为基础,进行通信、运行宽带业务或传播电视信号的整合。这里涉及到用户门户(customer portal)技术,作为美国 Intelligrid 项目的重要研究内容之一,该项研究致力于设计与目前用户使用的提供“非能源服务”的协议相连接的接口。

3.4 智能调度技术和广域防护系统

智能调度是未来电网发展的必然趋势,调度的智能化是对现有调度控制中心功能的重大扩展^[22-27]。调度智能化的最终目标是建立一个基于广域同步信息的网络保护和紧急控制一体化的新理论与新技术,协调电力系统元件保护和控制、区域稳定控制系统、紧急控制系统、解列控制系统和恢复控制系统等具有多道安全防线的综合防御体系^[9,28]。智

能化调度的核心是在线实时决策指挥,目标是灾变防治,实现大面积连锁故障的预防。

智能化调度的关键技术包括:

- 1) 系统快速仿真与模拟(fast simulation and modeling, FSM)^[29]。
- 2) 智能预警技术。
- 3) 优化调度技术。
- 4) 预防控制技术,事故处理和事故恢复技术(如电网故障智能化辨识及其恢复)。
- 5) 智能数据挖掘技术。
- 6) 调度决策可视化技术。

另外还包括应急指挥系统^[30-31]以及高级的配电自动化等相关技术,其中高级的配电自动化包含系统的监视与控制、配电系统管理功能和与用户的交互(如负荷管理、量测和实时定价)^[3]。

3.5 高级电力电子设备

电力电子技术在发电、输电、配电和用电的全过程均发挥着重要作用^[32]。现代电力系统应用的电力电子装置几乎全部使用了全控型大功率电力电子器件、各种新型的高性能多电平大功率变流器拓扑和 DSP 全数字控制技术。

目前我国在电力电子技术领域与国外的主要差距是:国内不能制造全控电力电子器件;大功率变流器制造技术水平较低,装置可靠性差;电力电子全数字控制技术水平还处于初级阶段;应用系统控制技术和系统控制软件水平较低;缺乏重大工程经验积累等^[32]。

3.6 可再生能源和分布式能源接入

在发展智能电网时,如何安全、可靠地接入各种可再生能源电源和分布式能源电源也是面临的一大挑战^[33-39]。

分布式能源包括分布式发电和分布式储能,在许多国家都得到了迅速发展。分布式发电技术包括:微型燃气轮机技术、燃料电池技术、太阳能光伏发电技术、风力发电技术、生物质能发电技术、海洋能发电技术、地热发电技术等。分布式储能装置包括蓄电池储能、超导储能和飞轮储能等^[32]。

风能、太阳能等可再生能源在地理位置上分布不均匀,并且易受天气影响,发电机的可调节能力比较弱,需要有一个网架坚强、备用充足的电网支撑其稳定运行。随着电网接入风电量的增加,风电厂规划与运行研究对风电场动态模型的精度和计算速度提出了更高的要求^[9]。

文献[9]介绍了分布式能源领域的最新进展。在过去的十几年中, 燃料电池技术发展非常快, 但要使燃料电池成为一种可靠的能源, 还需要解决很多问题。风能和太阳能作为分布式能源的重要组成部分, 都具有波动性和间歇性的特点, 对可靠供电造成冲击。通过改进天气预报的准确性, 可以更加准确地预测分布式发电的变化情况, 通过合理调度减小其波动对电网的影响。

4 结语

由于各个国家能源和用户分布以及电网情况各不相同, 各国对智能电网的认识和理解并不统一, 但利用现代信息技术、控制技术实现电网的智能化已成为普遍的共识。

我国与欧美等发达国家不同, 国外智能电网研究更多地关注配电领域, 而我们的首要任务是满足不断增长的电能需求, 需要更多地关注智能输电领域, 结合特高压电网的建设和发展, 提升驾驭大电网安全运行的能力, 保证电网的安全可靠和稳定运行。应该统筹输电网发展和配电网信息化建设等工作, 提出我国智能电网的定义和规划, 逐步建成具有中国特色的智能电网。

发展智能电网是一项长期的系统性工程, 需要有相应的政策法规密切配合, 还必须兼顾与现有系统的集成。

智能电网的利益相关者主要是国家、电网公司、用户、发电商、设备制造商等。国家对能源、电网的期望是节能减排, 提高能源利用效率。电网公司主要关注电网运营的安全性、可靠性和经济性。用户关注电费支出和用电可靠性。因此智能电网的目标是提高电网运营的安全性、可靠性和经济性, 降低用户电费支出, 提高能源利用效率, 实现节能减排。

参考文献

- [1] 康重庆, 陈启鑫, 夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7.
Kang Chongqing, Chen Qixin, Xia Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7(in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 余贻鑫, 梁文鹏. 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).
- [4] 余贻鑫. 面向 21 世纪的智能配电网[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(6): 14-16.
Yu Yixin. Intelli-D-Grid for the 21st century[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2(6): 14-16(in Chinese).
- [5] 陈建民, 周健, 蔡霖. 面向智能电网愿景的变电站二次技术需求分析[J]. 华东电力, 2008, 36(11): 37-38.
Chen Jianmin, Zhou Jian, Cai Lin. Substation secondary technology demand analysis for intelligent grid vision[J]. East China Electric Power, 2008, 36(11): 37-38(in Chinese).
- [6] 王明俊. 自愈电网与分布式电源[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).
- [7] 王明俊. 突出自愈功能的智能电网[J]. 动力与电气工程, 2007(2): 12-16.
- [8] 武建东. 全面推互动电网革命 拉动经济创新转型[EB/OL]. 2009-02-03. <http://www.chinapower.com.cn/article/1146/art1146899.asp>.
- [9] 李亚楼, 周孝信, 林集明, 等. 2008 年 IEEE PES 学术会议新能源发电部分综述[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 1-7.
Li Yalou, Zhou Xiaoxin, Lin Jiming, et al. A review of new energy power generation part in 2008 IEEE PES general meeting[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 1-7(in Chinese).
- [10] 法国电力公司试验智能电网提高风电使用率[EB/OL]. 2009-01-19. <http://www.chinapower.com.cn/newsarticle/1082/new1082991.asp>.
- [11] IBM 论坛 2009, 点亮智慧的地球[EB/OL]. <http://www-900.ibm.com/cn/forum2009/wisdom.shtml>.
- [12] 柳明, 何光宇, 沈沉, 等. IECSCA 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 IECSCA project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 99-104(in Chinese).
- [13] 帅军庆. 创新发展 建设智能电网: 华东高级调度中心项目群建设的实践[J]. 中国电力企业管理, 2009(4): 19-21.
- [14] 何华峰. 电网的智能革命[EB/OL]. 2009-03-04. http://blog.caijing.com.cn/topic_article-5-331.shtml.
- [15] 蒋明桓. 关于“智能电网”与“智慧能源”情况汇编[G/OL]. 2009-03-17. <http://www.china5e.com/subject/subjectshow.aspx?subjectid=97&classv=&pageid=1>.
- [16] 李岚峰. 华北公司智能电网建设取得新成果[Z/OL]. 2009-03-07. <http://www.indaa.com.cn>.
- [17] 刘文博, 张伯明, 吴文传, 等. 在线静态电压稳定预警与预防控制系统[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 6-11.
Liu Wenbo, Zhang Boming, Wu Wenchuan, et al. An on-line early warning and preventive control system for static voltage stability [J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 6-11(in Chinese).
- [18] 宋新立, 汤涌, 卜广全, 等. 大电网安全分析的全过程动态仿真技术[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 23-28.
Song Xinli, Tang Yong, Bu Guangquan, et al. Full dynamic simulation for the stability analysis of large power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 23-28(in Chinese).
- [19] 田芳, 李亚楼, 周孝信, 等. 电力系统全数字实时仿真装置[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 17-22.
Tian Fang, Li Yalou, Zhou Xiaoxin, et al. Advanced digital power

- system simulator[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 17-22 (in Chinese).
- [20] 孙元章. 重视布局灵活性[EB/OL]. 2008-03-26. <http://news.bjx.com.cn/html/20080326/115924.shtml>.
- [21] 丁道齐. 一体化的电力与通信系统体系结构[J]. 电力系统通信, 2008, 29(183): 1-9.
Ding Daoqi. Integrative electric power and communication system architecture[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2008, 29(183): 1-9(in Chinese).
- [22] 姚建国, 杨胜春, 高宗和, 等. 电网调度自动化系统发展趋势展望[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 7-11.
Yao Jianguo, Yang Shengchun, Gao Zonghe, et al. Development trend prospects of power dispatching automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 7-11(in Chinese).
- [23] 傅书逸. 2007年IEEE PES 学术会议电网调度自动化部分综述与讨论[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 31-37.
Fu Shuti. Summary and discussion on 2007 IEEE PES general meeting (power system dispatch automation part)[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 31-37(in Chinese).
- [24] 廖斌, 仇宏祥. 标准化的智能电网提升电网安全[J]. 上海电力, 2006(6): 584-587.
- [25] 杨胜春, 姚建国, 高宗和, 等. 基于调度大二次系统的智能化电网调度辅助决策的研究[J]. 电网技术, 2006, 20(S2): 176-180.
Yang Shengchun, Yao Jianguo, Gao Zonghe, et al. Intelligent dispatching decision-making system based on integration of power dispatching automation system[J]. Power System Technology, 2006, 20(S2): 176-180(in Chinese).
- [26] 丁道齐. 深入研究复杂电网动态行为特征 构建中国特高压电网安全保障[J]. 中国电力, 2008, 41(8): 1-7.
Ding Daoqi. In-depth study the complex grid dynamic action characteristic to set up China UHV grid safety guarantee[J]. Electric Power, 2008, 41(8): 1-7(in Chinese).
- [27] 任江波, 郭志忠. 电网自愈控制中的状态估计模式研究[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 59-63.
Ren Jiangbo, Guo Zhizhong. A study on state estimation mode for self-healing control of power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 59-63(in Chinese).
- [28] 陈振宇, 王翎, 李海峰, 等. 基于智能多代理技术的广域电网协调保护系统[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 42-45.
Chen Zhenyu, Wang Gang, Li Haifeng, et al. A MAS-based coordinated protection system for wide area power network[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 42-45(in Chinese).
- [29] 刘新东, 江全元, 曹一家. 基于广域测量数据的快速暂态仿真技术[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 46-49.
Liu Xindong, Jiang Quanyuan, Cao Yijia. Fast transient stability simulation based on PMU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 46-49(in Chinese).
- [30] 范明天, 刘思革, 张祖平, 等. 城市供电应急管理研究与展望[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 38-41.
Fan Mingtian, Liu Sige, Zhang Zuping, et al. A research and review on the emergency management of power supply in urban power network[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 38-41(in Chinese).
- [31] 田世明, 陈希, 朱朝阳, 等. 电力应急管理平台研究[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 26-30.
Tian Shiming, Chen Xi, Zhu Chaoyang, et al. Study on electric power emergency management platform[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 26-30(in Chinese).
- [32] 钱照明. 我国电力电子与电力传动发展的大好机遇[J]. 变频器世界, 2008(7): 40-46.
Qian Zhaoming. Great opportunity for development of power electronics and electrical drive in China[J]. The World of Inverters, 2008(7): 40-46(in Chinese).
- [33] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-106.
Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-106(in Chinese).
- [34] 伍磊, 袁越, 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).
- [35] 张玲, 王伟, 盛银波. 基于清洁能源发电系统的微网技术[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 40-43.
Zhang Ling, Wang Wei, Sheng Yinbo. Microgrid technology based on clean energy power generation system[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(1): 40-43(in Chinese).
- [36] 赵岩, 胡学浩. 分布式发电对配电网电压暂降的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 5-9.
Zhao Yan, Hu Xuehao. Impacts of distributed generation on distribution system voltage sags[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 5-9(in Chinese).
- [37] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
Chi Yongning, Liu Yanhua, Wang Weisheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81(in Chinese).
- [38] 林莉, 孙才新, 王永平, 等. 大容量风电场接入后电网电压稳定性的计算分析与控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 41-46.
Lin Li, Sun Caixin, Wang Yongping, et al. Calculation analysis and control strategy for voltage stability of power grid with large capacity wind farm interconnected[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 41-46(in Chinese).
- [39] 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).



陈树勇

收稿日期: 2009-03-09.

作者简介:

陈树勇(1960—), 男, 博士, 教授, 《电网技术》编辑部主任;

宋书芳(1965—), 女, 编审, 《电网技术》编辑部副主任;

李兰欣(1976—), 女, 高级工程师, 《电网技术》编辑部责任编辑;

沈杰(1979—), 女, 《电网技术》编辑部责任编辑。

(责任编辑 杜宁)