

未来智能电网控制中心面临的挑战和形态演变

王广辉, 李保卫, 胡泽春, 宋永华

(清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

Challenges and Future Evolution of Control Center Under Smart Grid Environment

WANG Guanghui, LI Baowei, HU Zechun, SONG Yonghua

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The development history of power control center is reviewed firstly. Considering the development trends of power sector and information industry, three aspects of facing challenges are analyzed at the macro level including diversified energy sources and resources, more flexible market and refined management, industry convergence and low-carbon development. Based on the analysis, this paper explores the future evolution of control pattern in the sight of information flow, and considers that the emergence and large-scale application of internet of things and cloud computing provide supporting technologies for the new control center.

KEY WORDS: smart grid; control center; information and communication technology; cloud computing; internet of things

摘要: 回顾了电网控制中心的发展历程, 结合电力和信息产业的发展趋势, 从宏观层面分析了智能电网控制中心面对的 3 方面挑战, 多样化能源和多元化资源、更灵活的市场与精细化的调控管理、产业融合与低碳发展。从信息流的角度探讨了未来智能电网控制形态的演变, 认为物联网和云计算的出现和大规模应用是新型控制中心的技术支撑。

关键词: 智能电网; 控制中心; 信息通信技术; 云计算; 物联网

0 引言

2000 年, 美国工程院携 30 多家美国职业工程协会, 评出 20 世纪对人类社会生活影响最大的 20 项工程技术成就, 电气化技术位居榜首^[1]。自 1882 年爱迪生建立第 1 个中央电厂, 电力以其廉价、便捷的优点, 迅速发展为主要的能源供应系统, 加速了工业化进程。然而, 在工业化过程中, 大量化石能源消耗造成的世界性能源短缺和环境危机, 严重制约着世界经济的可持续发展, 这迫使人们转变经济增长方式, 寻求能源开发和利用的新途径^[2-4]。

面对新能源发电的发展、分布式发电的接入和新型储能技术的应用^[5-6], 传统电力系统在运行控制方面面临前所未有的挑战。与此同时, 信息通信技

术的发展日新月异, 以前所未有的速度和深度向各行业渗透, 以互联网为基础的信息时代正改变着整个社会的面貌。充分利用信息通信技术的成果改造传统电力系统, 为解决能源和环境问题提供了新思路, 智能电网的提出迅速成为世界电力发展的新方向^[7-10]。2008 年爆发世界性的金融危机, 以美国为代表的西方国家以智能电网为经济复苏的契机, 推动了全球范围的建设热潮。由于经济发展水平、资源禀赋和电网发展阶段等的显著差异, 国内外在智能电网定义、发展重点和实施路线方面各不相同, 但信息通信技术与电力基础设施的融合得到了公认^[11-13]。

电力系统的智能变革首先需要先进的新型控制系统作支持。为解决电力系统运行控制的难题, 自 20 世纪 60 年代起, 借助数字电子计算机和通信技术进行电力系统监控, 成为保障电力系统安全运行的重要手段。1965 年美国东北部大停电, 事故调查委员会建议电力公司最大限度地利用数字电子计算机进行电力系统的规划运行, 推动了控制中心的建立^[14]。经过近半个世纪的发展, 以 SCADA/EMS 为代表的控制中心技术是传统电力系统控制形态的集中体现, 其功能和作用范围得到不断扩展。在新一轮的能源系统革新中, 信息通信技术作为“智能”的载体将广泛地渗透到电力系统的各个角落^[11,13,15], 成为电力系统的神经系统。伴随市场机制的推进和用户互动的实现, 电力和信息的多元、多向流动将彻底改变传统电力系统的运行形态^[16-18], 因此有必要从信息流的角度重新审视未来电网的控制形态。

1 控制中心的发展历程

20 世纪 50 年代, 模拟通信开始应用于发电机有功出力 and 线路潮流的实时采集, 调度员利用模拟计算机实施负荷频率控制(load-frequency control, LFC) 和经济调度(economic dispatch, ED)^[19]。60 年代, 数

字计算机被引入电力系统, 远方终端单元(remote terminal unit, RTU)被开发用于电压、功率和开关状态的实时监测, 采集信息通过专线送到中央计算机进行必要的计算和自动发电控制(automatic generation control, AGC), 形成最早的数据采集与监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)^[14]。

1965年, 美国东北部大停电促使数字计算机更广泛地应用于电力系统监控。1967年, Dy Liacco博士提出电力系统安全控制的基本模式, 为电力调度控制中心明确了基本框架^[20]。到20世纪70年代, 控制中心在定位和功能上上了一个新台阶, 具有状态估计(status estimation, SE)、机组组合(unit commitment, UC)、事故分析和带安全约束的经济调度(security constrained economic dispatch, SCED)等功能模块。状态估计和其它网络分析软件(也称高级应用软件)的引入, 形成了完整意义的能量管理系统(energy management system, EMS)。

早期的控制中心采用专用计算机, 随着技术的进步, 通用计算机从大型机到小型机逐渐应用于电力系统安全控制。到20世纪80年代, 通过局域网(local area network, LAN)互联的UNIX工作站和PC机逐渐成为主流, SCADA系统也延伸到配电站和馈线, 逐渐形成了配电管理系统(distribution management system, DMS)。

20世纪90年代后半期以来, 欧美发达国家开始在电力行业打破垄断, 推行市场化改革。自上而下垂直一体化结构的电力公司逐步分化为发电、输电和配电公司, 电力体制改革给控制中心带来了2大改变: 控制中心的功能从能量管理扩展到市场和商务管理, 市场管理系统(market management system, MMS)和商务管理系统(business management system, BMS)成为控制中心的一部分; 控制中心的形态分化为具有不同市场功能、大小不一的多种控制中心^[14], 包括独立系统运营者(independent system operator, ISO)/区域输电组织(regional transmission organizations, RTO)、发电、输电和配电等控制中心。伴随控制中心的演进与扩展, 标准化日益重要, 国际大电网会议CIGRE进行了新一代能量管理系统/市场管理系统(EMS/MMS)的结构设计^[21]。

近年来, 我国在电力系统控制方面不断探索和创新: 文献[22]提出电网实时安全预警系统, 扩展了调度控制中心的功能; 文献[23]提出3维协调的新一代电网能量管理系统, 实现自动预警和辅助决策; 文献[24]对智能电网控制中心技术进行了展望;

文献[25]提出了基于网格服务的未来电力系统控制中心概念设计; 文献[26]通报了先进能量管理系统(AEMS)在上海系统的闭环试运行情况, 展现了其实现电力系统多重目标趋优运行的能力。

2 智能电网控制中心面临的挑战

2.1 多样化能源与多元化资源

可再生能源的充分利用是智能电网的首要任务, 欧盟、日本、澳大利亚和我国等都制定了雄心勃勃的可再生能源发展计划。风能、太阳能、海洋能等可再生能源发电丰富了传统的电力来源, 促使电源结构朝着日益多样化的方向发展^[4,12]。可再生能源发电的间歇性仍是制约其并网的主要原因, 目前间歇式能源并网容量与总装机容量之比一般在10%以下。微型电网提供了一种新的分布式能源组织方式, 可以整合分布式发电的优势, 并削弱其对电网的负面影响^[11]。分布式电源和微型电网的发展将改变传统配电网的单向潮流性质, 使得传统配电网从简单的辐射网变成有源的复杂网络。可再生能源开发需要与传统电源扩建相配合, 依靠准确的出力预测、负荷管理、储能支持和市场激励等, 发挥智能电网的调剂能力。为适应可再生能源的分散性和出力随机性特点, 未来能源供给体系将向分布式方向发展。多样化能源不同的出力特性, 分布式电源的接入, 要求控制中心具有强大的协调能力。

实现可再生能源对化石能源的替代利用, 需要多元化资源的支援与配合^[12], 包括需求侧管理、储能系统和电动汽车等。作为智能电网互动的核心内容, 需求响应(demand response, DR)是需求侧管理(demand side management, DSM)在竞争性电力市场的新发展^[27]。在市场激励机制和实时价格信号的引导下, 用户可以成为电网的重要调控资源。电网通过高级计量体系(advanced metering infrastructure, AMI)监控用户的用电行为, 实时发布电价信号引导用户需求, 在市场合约下智能地管理用电设备。在智能电网互动机制下, 电动汽车作为需求响应的重要组成部分, 通过协调有序充电或换电池集中充电模式形成“电能缓冲池”, 为可再生能源兼容利用提供支援。压缩空气储能、飞轮储能和化学储能等储能技术的不断进步, 为平滑负荷、提高能效和促进可再生能源利用提供了新的手段^[6]。可再生能源、分布式电源、微型电网、需求响应、储能系统和电动汽车等给智能电网带来了多样化、多元化的能源和资源, 要求智能电网控制中心具有更加开放的架

构、灵活的体系和强大的资源优化配置能力。

2.2 更灵活的市场与精细化调控管理

灵活的市场条件是智能电网社会效益得以发挥的必要条件。智能电网多样化、多元化能源和资源的有效配合和良性发展,需要更加开放、实时的市场环境支持。在高速双向通信和先进市场工具的支持下,通过实时电价快速反映电力供应与需求的关系,以刺激各种资源积极参与电网调控,是提高能源利用效率的重要途径^[18]。用户互动使得市场交易主体更加多元化,不仅包括传统的发电商、电网运营商和单纯以获利为目的的中间商、投资商与期货商,也包括各个分布式电源、微型电网和大量的普通用户。普通用户从单一的能源消费者变成能源消费和供给的复合体,用户具有更大的自主性来选择消费时段、消费电量,并可向电网回馈电能,市场主体的空前庞大给市场交易带来更大的灵活性,也使市场交易行为更加复杂,对市场分析工具、交易平台和实时调度系统的灵活性提出了更高的要求。

充分竞争的市场环境驱动电力公司提高效率、降低成本,实施精细化的调控和管理^[17]。充分利用物联网技术可实现对全网设备的运行参数和状态进行实时监测,通过数据挖掘和友好图形界面展示,帮助运行控制人员和管理者直观地把握电力系统的整体情况。各种高级应用软件对负荷变化、可再生能源不确定性、系统动态行为、安全隐患等进行跟踪分析,帮助发现系统的内在规律,预测发展趋势,并通过信息通信网络和现场智能设备,实施对各种可用资源的实时精确控制,将安全隐患消灭在萌芽状态。高级资产管理(advanced asset management, AAM)通过对设备的实时健康状况监测和从规划、设计、建设、运维到退役的生命周期备案,有针对性地安排检修计划,降低企业运行维护成本。智能电网的精细化调控和管理对控制中心的数据存储和处理能力提出了更高的要求,生产自动化系统与管理信息化系统的深度互动要求智能电网控制中心具有更高的集成性。

2.3 产业融合与低碳发展

智能电网是一个系统的革新,大规模基础设施改造推动电力企业、装备制造业和IT行业的重组和融合,形成智能电网产业链^[2,7],共同引导智能家居和低碳生活。智能电网的发展提供了广阔的市场,将打破传统的产业格局和业务范围,尤其体现于信息产业向电力行业的渗透。国外 SmartSynch 推出 SmartMeter 系统,AT&T 为智能电表提供无线通信

网络服务,Google 推出 Power Meter,IBM 与电力研究机构和电力企业合作开发智能电网解决方案。2010年2月,谷歌拿到了美国联邦能源管理委员会的批量能源交易许可,获准以市场价买卖电力,标志着IT企业的触角已深入到电力行业的核心领域。

应对气候变化是目前国际社会关注的焦点,碳减排已经成为大国政治博弈的工具和关系企业发展的现实问题。电力系统是能源和环境问题的集结点,我国面临着后京都时代的巨大减排压力,未来碳排放可能作为电力系统规划和运行的约束性指标和评价内容。环境税、碳交易市场的建立将迫使电力企业考虑碳成本并参与碳排放权交易,电力系统运行将由电力平衡约束转变为电力和碳排放的双重平衡约束^[28]。未来智能电网发展给电力企业带来了诸多的可能和挑战,各种不确定性因素和市场风险要求电力企业建立富于弹性、具有高可扩展性、可灵活配置的智能控制中心,以提高抵御风险的能力。

3 未来智能电网控制中心的形态演变

3.1 智能电网的控制形态面临转变

20世纪60年代以来,信息通信技术的进步始终是驱动电力系统控制水平提升的重要因素。智能电网为电力设备植入芯片智能,通过网络互联形成灵活互动的智能系统。信息网与电力网的集成使得信息流的分配和管理日益重要。在智能电网条件下,用户既是电能消费者也是电能生产者,传统单向的电力流和资金流转变为双向和多向,电力流的协调控制和资金流的计费结算集中表现为信息流的处理、分配和作用过程^[24]。通过物联网和云计算对智能电网进行资源整合,整个智能电网演变为互联“超级计算机”的结构,形成庞大的电力和信息资源池。智能电网的控制形态更多地体现为人与信息的交互,智能电网面向用户类似于PC操作平台,各种功能和业务类似于窗口应用程序,用户只需通过键盘和鼠标进行定制、操作和管理,而自然用户界面的发展将促使人机交互更加简便、直观和人性化。谷歌基于网络的操作系统 Chrome 是互联网领域的雏形,在电力系统整合信息通信资源,打造智能电网广域操作系统是一个有望在不久的将来实现的解决方案。随着物联网和云计算的快速发展和成功应用,基于物联网/云服务(internet of things/cloud service, IoT/CS)的新型控制中心可能成为未来电网的控制形态。

3.2 物联网和云计算是新型控制中心的技术支撑

智能电网是电力技术与信息通信技术集成的

革命性成果，各种先进通信技术为智能电网开辟了信息通道，标准化的推进为电力系统互操作性和信息安全提供了保障。物联网和云计算的最新发展正在重塑未来智能电网的控制形态。

物联网解决了智能电网的信息来源问题，依靠物联网获得发、输、变、配、用各环节的全景信息，可为智能电网各项功能奠定数据基础。物联网透过传感设备和通信网络将任意物品纳入互联网，物品在互联网中表现为唯一标识和信息属性。根据欧盟第7框架射频识别(radio frequency identification, RFID)和物联网研究项目组的定义^[29]，物联网遵守标准的、可互操作的通信协议，构成具有自配置能力的、动态的全球网络基础架构。在发电领域，物联网技术可用于机组运行监控、大坝监测与水情预报、风电厂预测等；在输电环节，可用于输电线路监测、巡检、现场作业管理、状态检修、安全预警和输电走廊保护等；在变电环节，可用于油色谱、局部放电在线监测、状态检修等；在配电环节，可用于停电管理、智能故障预警和抢修、配网线路监测等；在用电环节，可用于智能用电设备管理、用电信息采集、电能质量监测、电动汽车充放电管理等。作为智能电网的神经末梢，物联网将在电力建设、生产管理、运行维护、安全监控、资产管理、智能家居、用户交互和服务拓展等各方面发挥巨大作用^[30]。

现有的SCADA系统、新兴的广域量测系统(wide area measurement system, WAMS)、高级量测体系AMI和设备状态在线监测系统都将成为智能电网物联网的组成部分。未来广域、实时、精细的电网运行数据、相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)高频量测数据、用户用电数据和状态检测数据等，给智能电网运行信息的存储和处理带来重大挑战。为弥补现有电力系统计算和信息处理平台的不足，电力系统云计算^[31-32]平台应运而生。云计算代表一种大规模、分布式的计算模式，通过Internet整合广域异构的IT资源，形成虚拟、可动态扩展的计算资源池，可为各种分析计算任务提供强大的存储和计算能力。

按照普遍定义，云计算可通过网络以按需定制、易扩展的方式获得所需资源，包括IT基础设施(infrastructure as a service, IaaS)、平台支持(platform as a service, PaaS)和软件服务(software as a service, SaaS)。提供资源的网络称为“云”，“云”中的资源对于使用者是无限扩展的，并可以随时获取、按需分配、随时扩展、按用付费。云计算通过虚拟化技术

对计算能力、存储和交互能力等进行统一组织和分配，从而提高IT基础设施的利用率、降低单位使用成本；通过建立专业化的安全中心，保障用户的数据安全；通过服务标准化达成广泛的信息互通、共享和互操作性；通过宽带网实现随时随地的可获得性。云计算推动了信息通信服务向规模化、集约化和专业化方向发展，必能以其廉价、优质、便捷的优势变革传统的电力系统信息通信体系。未来智能电网控制中心需要解决海量数据的存储和处理、庞大的计算量、业务的灵活部署和调度、资源的统一管理和弹性扩容、系统的升级和平滑迁移、数据共享和信息安全等问题。云计算的开放、集成、高效、按需定制、易扩展等特性为智能电网各项功能的实现提供了可能^[31-32]。

近年来，云计算在商业领域已有不少成功的案例，并迅速向各行业渗透。Amazon、Google、IBM、微软和Yahoo等大公司都是云计算的先行者并取得了显著效益，其它行业和部门迅速跟进，国网信息通信公司顺势而为，积极推进电力系统物联网和云计算的试点和推广。物联网和云计算的结合，为解决智能电网信息采集、处理、存储和分配提供了技术条件。预计在不久的将来，基于IoT/CS的智能电网广域操作系统可能成为现实。

4 结论

本文在总结控制中心的发展历史和智能电网带来的挑战的基础上，探讨了未来智能电网控制形态的演变。认为未来电力系统的调控和管理更多地表现为人与信息的交互过程，信息通信技术的快速发展，尤其物联网和云计算的出现和大规模应用，为打造电力系统广域操作系统，建立基于IoT/CS的智能电网控制中心提供了可能。

随着智能电网概念的提出和实践，新的理念越来越深刻地影响着电力行业的变革，虽然这个过程可能相当漫长，但未雨绸缪，早做思考和应对，已经成为大家的共识。特别是长期从事EMS研究的专家和学者，已经开始关注云计算等在电力系统中的实际应用，这是令人振奋的事情。本文提出的观点是前瞻性思考的尝试，可以为电力工作者提供思路参考，深入的内容有待在实践过程中不断探索。

参考文献

- [1] Greatest engineering achievements of the 20th century [EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Greatest_Engineering_Achievements_of_the_20th_Century.
- [2] 宋永华, 杨霞. 以智能电网解决21世纪电力供应面临的挑战[J]. 电力技术经济, 2009(6): 1-8.

- Song Yonghua, Yang Xia. Smart grid: the solution to challenges of power supply in the 21st century[J]. Electric Power Technologic Economics, 2009(6): 1-8(in Chinese).
- [3] 胡兆光. 中国特色的低碳经济、能源、电力之路初探[J]. 中国能源, 2009(11): 16-19.
- [4] Xia Y, Yonghua S, Guanghui W, et al. A comprehensive review on the development of sustainable energy strategy and implementation in China[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(2): 57-65.
- [5] 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).
- [6] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
- Zhang Wenliang, Qiu Ming, Lai Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9(in Chinese).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 胡学浩. 智能电网: 未来电网的发展态势[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 1-5.
- Hu Xuehao. Smart grid: a development trend of future power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 1-5(in Chinese).
- [10] 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).
- [11] 丁道齐. 复杂大电网安全性分析: 智能电网的概念与实现[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [12] 何光宇, 孙英云. 智能电网基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [13] 钟金, 郑睿敏, 杨卫红, 等. 建设信息时代的智能电网[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 12-18.
- Zhong Jin, Heng Ruimin, Yang Weihong, et al. Construction of smart grid at information age[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 12-18(in Chinese).
- [14] WU F F, MOSLEHE K, BOSE A. Power system control center: past, present and future[J]. Proceedings of IEEE, 2005, 93(11): 1890-1908.
- [15] 苗新, 张恺, 田世明, 等. 支撑智能电网的信息通信体系[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 8-13.
- Miao Xin, Zhang Kai, Tian Shiming, et al. Information communication system supporting smart grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 8-13(in Chinese).
- [16] 林宇锋, 钟金, 吴复立. 智能电网技术体系探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 8-14.
- Lin Yufeng, Zhong Jin, Felix Wu. Discussion on smart grid supporting technologies[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 8-14(in Chinese).
- [17] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
- Yu Yixin, Luan Wenpeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of CSEE, 2009, 29(34): 1-8(in Chinese).
- [18] 殷树刚, 张宇, 拜克明. 基于实时电价的智能用电系统[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 11-16.
- Yin Shugang, Zhang Yu, Bai Keming. A smart power utilization system based on real-time electricity prices[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 11-16(in Chinese).
- [19] Dy Liacco T E. Control centers are here to stay[J]. Computer Applications in Power, IEEE, 2002, 15(4): 18-23.
- [20] Dy Liacco T E. The adaptive reliability control system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, PAS-86(5): 517-531.
- [21] 傅书遍. 2008 电网控制中心新技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 1-7.
- Fu Shuti. Summary on 2008 new technologies for power grid control centers[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 1-7(in Chinese).
- [22] 孙宏斌, 胡江溢, 刘映尚, 等. 调度控制中心功能的发展: 电网实时安全预警系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 1-7.
- Sun Hongbin, Hu Jiangyi, Liu Yingshang, et al. Evolution of the power dispatching control center: real time power security early warning system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 1-7(in Chinese).
- [23] 张伯明, 孙宏斌, 吴文传. 3 维协调的新一代电网能量管理系统 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 1-6.
- Zhang Boming, Sun Hongbin, Wu Wenchuan. New generation of EMS with 3-dimensional coordination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 1-6(in Chinese).
- [24] 张伯明, 孙宏斌, 吴文传, 等. 智能电网控制中心技术的未来发展[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 21-28.
- Zhang Boming, Sun Hongbin, Wu Wenchuan, et al. Future development of control center technologies for smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 21-28(in Chinese).
- [25] 周华锋, 吴复立, 倪以信. 基于网格服务的未来电力系统控制中心概念设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 1-6.
- Zhou Huafeng, Felix Wu, Ni Yixin. Conceptual design for grid service-based future power system control centers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 1-6(in Chinese).
- [26] 卢强, 何光宇, 梅生伟, 等. AEMS 及其在上海电网试运行[J]. 中国科学(E 辑: 技术科学), 2008(3): 476-480.
- [27] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
- Zhang Qin, Wang Xifan, Wang Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106(in Chinese).
- [28] 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).
- [29] Cluster of European Research Projects on the Internet of Things (CERP-IoT). Internet of things strategic research roadmap[R/OL]. http://ec.europa.eu/information_society/policy/rfid/documents/in_cerp.pdf.
- [30] 刘建明. 物联网在智能电网中的应用[J]. 物联网研发动态, 2010(1): 35-40.
- [31] 杨旭昕, 刘俊勇, 季宏亮. 电力系统云计算初探[J]. 四川电力技术, 2010, 33(3): 71-76.
- [32] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 云计算: 构建未来电力系统的核心计算平台[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 1-8.
- Zhao Junhua, Wen Fushuan, Xue Yusheng, et al. Cloud computing: implementing an essential computing platform for future power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 1-8(in Chinese).



王广辉

收稿日期: 2011-06-10.

作者简介:

王广辉(1968), 男, 博士研究生, 研究方向为能源政策、低碳电力, E-mail: wangguanghui@sgcc.com.cn;

李保卫(1985), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统优化运行、低碳电力, E-mail: sbwkbq@gmail.com;

胡泽春(1979), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统安全性分析、优化运行和电压稳定;

宋永华(1964), 男, 教授, 英国皇家工程院院士,

IEEE Fellow, 主要从事电力系统的建模、仿真、故障诊断、优化控制以及调度决策方面的研究工作。

(责任编辑 李兰欣)