



智能电网控制技术及其发展

韩民晓

华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206

摘要 从智能电网的目标出发,论述了智能电网中控制技术的作用。在分析智能电网特征的基础上,论述了智能电网控制技术的主要内容。本文系统地给出了信息技术、电力电子技术、储能技术及仿真与试验技术等与电网控制密切相关的关键技术,并在此基础上,论证了这些技术在实现电网控制中的作用。

关键词 智能电网;控制;信息技术;电力电子技术;储能技术;仿真

中图分类号 TM7, TM1

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)23-0113-05

A Review Smart Grid Control Technology

HAN Minxiao

Electric and Electronic School, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract The role of smart grid control is discussed based on the goal of smart grid in this paper. The main features of smart grid, the content and main tasks of smart grid control are reviewed, with an analysis of some key technologies such as information technology, power electronics, energy storage and simulation technologies. Information technologies including optical fiber communications, WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks), WLAN (Wireless Local Area Network), WPAN (Wireless Personal Area Network), and PLC are the foundation for the dynamic real-time sensing and controlling of power system. Stream media technology, GIS and GPS will also find their uses in future smart grids. Power electronics, which combine the semiconductor device, circuit topologies and system control technologies, will play key roles in the development of renewable generation, power flow control, power system stability control and power quality control. Energy storage is the fundamental strategy for energy balancing and controlling. Potential energy storage techniques for smart grid are discussed in the paper. Simulation and testing technologies will also be developed at the same time with the development of smart grid. Finally, the relationship between the above key technologies and smart grid control and the prospect of power grid in the future are highlighted.

Keywords smart grid; control; information technology; power electronics; energy storage; simulation

0 引言

电能已在人类能源利用方式中占有很高的比例,随着电力交通技术、可再生能源利用技术的发展,这一比例还将大幅提高^[1-3]。全球范围内的能源、环境问题的突出,迫使人们对电网这个大规模、高密度、强动态的能源收集、传输与分配系统,提出更可靠、更高效、更可控的要求,智能电网的概念应运而生^[4-10]。具体来讲,智能电网发展的驱动力与以下因素密不可分^[11]:① 整合可再生能源、分布式能源,实现新能源发电的“友好”并网;② 提高大电网安全性、可靠性、供电质量;③ 提高发电和用电效率;④ 满足电力负荷变化,特别是电动

汽车发展带来的挑战;⑤ 提高电网的经济性,降低电网建设和运行成本;⑥ 实现信息互动,提高服务水平。

总之,满足电能需求,保证供电的安全性、可靠性、经济性、电能质量、环保约束,实现与用户的互动和增值服务已成为对电网发展的基本要求。智能电网正是通过不同层面、不同时间尺度对电能的控制满足上述要求的。智能电网通过信息感知、信息分析、预测推演、指令执行形成完整的信息流与能量流的协调控制。电能的高效、精确转换与控制构成智能电网实现其功能的基本环节。本文主要综述近期有关智能电网的探讨和最新发展动态,论述智能电网控制技术的实现及

收稿日期:2010-11-03;修回日期:2010-11-15

基金项目:高等学校学科创新引智计划项目(B08013)

作者简介:韩民晓,教授,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用,电子信箱:hanminxiao@ncepu.edu.cn

其发展。简要介绍智能电网的内涵与中国智能电网的理念,分析智能电网的控制技术体系,并针对未来智能电网建设、运行过程中能够发挥重要作用的控制技术进行探讨,重点从信息、控制、电力电子、储能及仿真等方面对智能电网控制相关技术及其发展趋势进行论述。

1 智能电网对控制技术的要求

目前,由于各国根据自身国情对智能电网的需求和考虑不尽相同,智能电网尚未有一个统一、明确的定义。在美国,智能电网的提出源于传统电网在供电可靠性方面的差距以及对信息产业提振的需求,因此,其智能电网强调信息技术的应用^[12]。欧洲诸国及日本则主要从可再生能源发展需求角度提出智能电网,其特征在于电网对可再生能源发电的兼容性^[8-9]。中国则依据自身电网发展的规律,提出坚强智能电网的概念,突出跨区域资源优化配置和能源多元利用的特色^[11,13]。广义上讲,智能电网包括可以优先使用可再生能源的智能调度系统、可以动态定价的智能计量系统以及通过调整发电、用电设备功率优化负荷平衡的智能技术系统。电能不仅从集中式发电厂流向输电网、配电网直至用户,同时电网中还遍布太阳能、风能、燃料电池、电动汽车、超导储能等各种形式的新能源和储能设备;此外,高速、双向的通信系统实现了控制中心与电网设备之间的信息交互,高级的分析工具和决策体系保证了智能电网的安全、稳定和优化运行。

通过对比分析欧美国家对智能电网的定义,可以总结出智能电网具有以下特征^[14-16]。

1) 自愈。实时掌握电网运行状态,预测电网运行趋势,及时发现、快速诊断故障隐患和预防故障发生;故障发生时,在没有或少量人工干预下,能够快速隔离故障、自我恢复,避免大面积停电的发生。

2) 兼容。电网能够同时适应集中式发电和分布式发电模式,实现与负荷侧的交互,支持各种清洁、绿色、可再生能源的接入,满足电网与自然环境的协调发展。

3) 优化。优化发电、输电、配电与用电等各个环节,提高能源的利用效率,降低运行、维护和投资成本。

4) 互动。实现与用户的智能互动,有效开展电力交易,实现资源的优化配置,提供最佳的电能质量和供电可靠性。

5) 集成。实现监测、控制、保护、维护、调度和电力市场管理等数字化信息系统的全面集成,形成全面的辅助决策体系。

研究者发现,为实现具备上述特征的智能电网,必须满足下述控制方面的要求:①在初期就能检测电网问题并实施校正措施;②接受更大量的数据信息并做出响应;③系统能够快速恢复;④迅速适应电网变化并进行拓扑重构;⑤为运行人员提供高级的可视化辅助系统。

智能电网的最终目标是有效整合并综合利用电力系统的稳态、动态、暂态运行信息,实现电力系统正常运行的方式转换、在线监测、优化、预警、动态安全分析,紧急状态下的协调控制,事故状态下的电网故障智能化辨识及其恢复等

功能^[17-25]。

正如在智能电网提出时所要求的,可再生能源发电并网成为智能电网控制的重要内容。依据接入方式的不同,总体上可将可再生能源发电并网分为规模化集中并网和分布式大数量并网两类。两者对电网的影响不同,并网控制需要考虑的因素不同。对规模化可再生能源并网而言,当其所占系统装机容量比例较小时,其出力波动容易被系统中其他机组调频能力所吸收。而就目前中国规模化可再生能源电厂的发展趋势来看,超过区域总装机50%的可能性是存在的。随着可再生能源电源装机的增加,动态频率问题、局部有功功率不平衡问题尤为突出。基于电力电子技术和储能技术采用广域监测与控制,将成为解决规模化可再生能源发电并网问题的重要手段。可再生能源应用的另一种重要方式为,小容量、低电压、大数量分散设置于用户或负荷附近,形成分布式电源应用方式,这种方式包括负荷波动与可再生能源电源出力波动的双随机过程。电压偏差、电压波动与闪变等电能质量问题突出,并网支路的潮流变化大,对主网的不利影响明显。为此,人们提出在区域电网与主网连接处并联设置储能装置,通过与分布式电源区域内其他电源的协调控制,构成相对稳定的局部小电网或微电网,再与主网连接,实现分布式可再生能源有效控制和利用。

分析电力系统在扰动下的动态行为,确定适当的对策、预防事故的发生或避免事故的扩大是智能电网控制的核心内容之一。信息与通信、智能分析技术及电力电子技术的发展促进了智能电网控制决策技术的进步和控制能力的提高。

2 智能电网控制相关技术及其发展

智能电网控制的实现远非只是控制技术自身的问题,信息与通信、电力电子、储能、仿真与试验等技术是实现智能电网控制不可或缺的技术,以下主要针对这些技术,论述其特性及发展趋势。

2.1 信息技术

建立功能强大、高度融合的信息系统是实现智能电网的基础^[11,26]。高速、双向、实时、集成的通信系统使智能电网成为一个动态、实时信息和电力交换互动的大型基础设施。当通信系统建成后,智能电网通过连续不断地自我监测和校正,应用先进的信息技术,实现其自愈特征。信息系统还可通过监测各种扰动,重新分配潮流,避免事故的扩大。高速双向通信系统使得各种不同的智能电子设备(IEDs)、智能电表、控制中心、电力电子设备及其保护系统,以及用户进行网络化的通信,提高对电网的控制能力和服务的水平。对于通信技术而言,需要重点发展两个方面的技术:①开放的通信架构,使之形成一个“即插即用”的环境,保证电网元件之间能够进行网络化通信;②统一的技术标准,使所有的传感器、智能电子设备及应用系统之间实现无缝通信,也就是信息在所有这些设备和系统之间能够得到完全理解,实现设备和设备、设备和系统之间、系统和系统之间的互操作功能。

光纤通信技术和无线通信技术构成未来智能电网的基本通信方式,电力线路载波及电力特种光缆将获得一定程度应用。光纤通信技术中的复用技术、长距离传输技术、自动交换光网络技术、分组传送网技术等将成为该领域的重要技术发展方向。传统的数字微波通信还将作为电力系统的主要通信方式,另外卫星通信、移动宽带通信也将在业务辅助支持领域获得应用。

参数量测技术是信息系统的感知环节,是实现智能电网控制功能的基本组成部件,先进的参数量测技术获得数据并将其转换成数据信息,以供智能电网的各方面使用。通过参数量测可以评估电网设备的健康状况和电网的完整性,进行表计的读取、消除电费估计、管理用电、减轻电网阻塞以及实现与用户的沟通。通过智能电表可实现对用户相关参数的测量及控制。通过相量测量单元(PMU)、广域测量系统(WAMS)、元件动态监测、各种先进的传感器及通信技术等实现系统快速仿真、智能预控、智能恢复等功能。

空间信息技术和流媒体(stream media)技术作为当代信息技术的最新成就,将在智能电网的信息处理中发挥重要作用。空间信息技术包括地理信息系统(GIS)、遥感技术及全球定位系统(GPS)。流媒体技术则指在互联网中使用流方式传输技术的连续时基媒体。

信息技术应用中,结合电力系统的知识获取与数据挖掘、数据仓库与在线联机分析处理将构成智能电网中信息处理的关键内容和技术难点。

2.2 电力电子技术

电力电子设备以其灵活性、精确性和快速性,成为智能电网的有效执行单元,在智能电网控制中发挥重要作用^[27-29]。电力电子技术包括器件、电路与系统3个层次。其中器件的发展和整个电力电子技术的基石。所谓“完美”的大功率器件到目前为止还未出现,但新的器件不断获得应用,给电能的灵活控制带来新的更好的手段。这些器件虽然特性各异,但依据控制方式可分为不可控、半控和全控器件。在过去的20多年里,电力电子器件,特别是全控型器件得到快速发展。目前市场销售的IGBT反向阻断电压可达6.5kV,正向工作电流达600A或5kV/2kA。4kHz/4.5kA的IGCT已获得广泛应用。新材料、新工艺的功率器件还将不断出现,为大容量、低功耗、高频率应用提供了新的可能。

电力电子电路拓扑的发展与其应用场合密切相关。电力电子技术在电力系统中的应用,主要为处理大容量、高电压电能,对电磁兼容特性及电能质量提出了较高要求。因此,级联技术得到快速发展。实现高压大容量的级联技术可分为3类:①基于器件的直接串联方式;②多电平方式;③变压器多重化方式。由于静态与动态均压问题,基于器件的直接串联方式一直未得到很好应用。目前,特高压直流输电技术的发展,为大量功率器件的串联提供了技术支持,随着动态均压技术的发展,器件串联方式也将以其结构简单、控制方便、造价较低的特点获得广泛应用。基于变压器的多重化技术具

有使电力电子设备与电网间隔离的作用,易于有效提高设备容量,但存在多重变压器占地大、成本高、磁非线性导致的过电压和过电流问题,因此,使其应用受到限制。多电平方式又分为二极管钳位型多电平、飞跨电容型、H桥级联型及DC/DC模块级联型等多种方式。其中H桥级联方式基于相同的单元电路设计,易于实现模块化,已经在中压变频驱动等领域获得应用,也必将在智能电网控制设备中发挥作用。

表1为电力电子技术在智能电网中应用示例,涵盖电能产生、传输、分配与应用各个领域。特别需要指出的是,可再生能源发电中的电能变换装置主要是电力电子技术的应用,因此,可再生能源发电并网性能的好坏在很大程度上取决于电力电子换流装置及其控制策略。

基于高耐压、大电流、低开关损耗的电力电子器件,实现高可靠性、高灵活性的多电平拓扑及高压直流输电(HVDC)、柔性交流输电系统(FACTS)的协调控制将成为电力电子技术在智能电网中应用的难点问题,需要长期开展研究工作。

2.3 储能技术

电力的特征决定了目前技术条件下,电力的产生、输配与消费必须同时完成。然而,随着电力工业的发展,这一过程面临巨大挑战:①大容量火电机组、核电机组不断增加,这些机组调节特性弱,使电力系统趋于“僵直化”。温室效应的加剧和居民生活水平的提高,电化率的提高和空调负荷的增加导致负荷率逐年下降,负荷峰谷差进一步加大。负荷削峰填谷的“平准化”问题更加突出。②敏感电力负荷不断增加,对供电质量的要求不断提升。自动化生产线、基于网络信息的金融系统可能因为供电短时中断或暂降等电能质量问题造成无法估量的损失。主电网灾变情况下,保证重要负荷供电的连续性显得尤为重要。③可再生能源并网发电得到快速发展。太阳能、风能、波浪能等依赖于自然能的电源表现出极强的随机性。电力系统承受负荷波动和电源出力波动的双随机过程的作用,使电力系统比以往更需要基于储能技术的功率的平衡和稳定控制^[11,29]。

大容量可变速抽水蓄能技术得到迅速发展和应用,飞轮储能随着新材料、新工艺及超导磁悬浮技术得到普遍关注;以NAS电池、液硫电池为代表的新型电池得到快速发展并在电网中获得应用。一直被认为可能为电力领域带来革命性变化的超导技术也以超导磁储能系统(SMES)的形式在储能领域发挥作用,超级电容则以其功率密度大、充放电寿命周期长在小容量系统中获得应用。储能技术在一定程度上改变电能产生、传输与利用的模式,成为能量缓冲、平衡及后备的重要手段,是改变电能利用的有效途径。由于上述3方面的挑战突出,当今电力系统对储能技术提出更为迫切的要求,储能技术的发展正在或即将在上述3方面问题的解决中发挥重要作用。电动汽车作为未来智能电网必须面对的挑战,一方面对电动汽车的充电站建设提出新的要求,另一方面电动汽车电池储能作用的利用可能会对电力系统的运行与控制带来新的途径。储能技术应用过程中如何实现储能容量的优

表 1 电力电子技术在智能电网控制中的应用

Table 1 Application of power electronics in smart grid control

电力电子设备	电网环节与接入方式	智能控制的电网参数与指标	应用功能
逆变器 可变速抽水蓄能	发电系统 并联接入	有功,无功,电压,频率	可再生能源发电并网,LFC
静止无功补偿器(SVC) 静止无功发生器(STATCOM)	输电系统 并连接入	节点无功,电压	电压稳定控制
可控串联补偿器(TCSC) 静止串联同步补偿器(SSSC) 线间潮流控制器(IPFC)	输电系统 串联接入	线路等效阻抗,压降	潮流控制,电压控制,提高电网传输能力,改善系统的动态性能
统一潮流控制器(UPFC)	输电系统 混联接入	节点电压,线路等效阻抗, 两端功角差	潮流控制,电压控制,提高电网传输能力,改善系统的动态性能
电压源型高压直流输电(VSC-HVDC)	两端接入 不同系统	节点有功,无功	孤岛供电,城市配电网的增容改造,交流系统间的互联,大规模风力发电场并网
配网静止无功发生器(DSTATCOM) 有源电力滤波器(APF)	配电系统 并联接入	电压波动指标,谐波指标	无功补偿与谐波控制
动态电压调节器(DVR) 固态切换开关(SSTS)	配电系统 串联接入	电压暂降指标	电压质量控制
统一电能质量调节器(UPQC)	配电系统 混联接入	电压暂降指标,谐波指标	综合电能质量控制

化配置、如何实现储能设备的有效利用都是未来智能电网控制中需要解决的问题。

到目前为止,廉价、高效、长寿命、环境负担小的储能设备还未出现。在未来相当一段时期内,基于新材料、新结构、新变换方式的储能技术将会得到不断发展,不同领域储能设备的融合利用将成为重要的研发方向。

2.4 仿真与实验技术

电力系统仿真是指根据实际电力系统建立物理或数学模型,进行计算和试验,研究电力系统在规定时间内的工作行为和特征^[1]。电力系统仿真在电力系统规划、设计、运行、试验和培训中发挥重要作用。在智能电网环境下,HVDC、FACTS、安全稳定装置等应用于电力系统,仿真问题呈多时间尺度、强非线性、高精度的要求。一些新的仿真算法和新的仿真平台不断出现。机电暂态-电磁暂态混合仿真技术能够合理模拟电力电子设备的快过程与传统机电设备的慢过程。分网并行计算则将大规模电力系统分割为若干子网络,不同子网络进行并行计算,各子网间保持合理的通信数据流量,从而实现对大规模电网的实时甚至超实时计算。随着智能电网对仿真技术要求的发展,快速仿真算法研究、仿真基础数据研究、仿真模型研究、大规模电力系统数字实时仿真研究、电网可视化技术等依然是仿真技术研究的热点问题。

试验与测试技术是检测智能电网控制策略是否有效,控制过程与结果是否满足相关标准的重要环节,也是控制设备付诸实施的必经环节。基本的试验与测试平台已经在以往的电力系统控制策略研究中发挥了重要作用。智能电网的实施对试验与测试条件提出了更高的要求。平台的智能化、柔性化与示范作用将在智能电网控制策略研究中发挥重要作用。

3 智能电网控制的实现

智能电网一方面是电气技术、新能源技术及信息技术推动力的产物,另一方面又对这些技术领域提出新的挑战。智能电网体现了未来电网发展的愿景,其既定目标的实现主要依靠技术进步^[23-25]。

因此,智能电网控制技术体系融合了先进设备制造技术、信息与通信技术、标准与试验评估技术等众多技术(图1),其中信息与通信技术是实现智能电网控制功能的“中枢神经”,电力电子与储能技术扮演智能电网控制的“执行机构”,而标准与试验评估则构成智能电网控制得以顺利实施的制度与管理层面的“保障”。

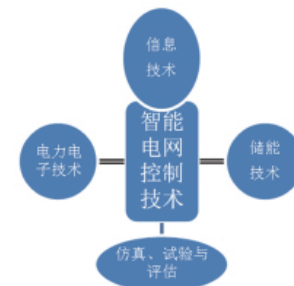


图 1 智能电网控制技术的构成
Fig. 1 Configuration of smart grid control

4 展望

智能电网已成为未来电网的代名词^[30-33],因此,智能电网的控制也代表着未来电网的控制。电力系统已成为大规模、多尺度、非线性的复杂大系统,电网未来的发展使该系统更为庞大、复杂,高可靠性、高度兼容性和高效、互动、自愈等特征对该系统的控制提出更高要求。因此,智能电网控制将始

终作为电网建设和运行的核心问题和热点问题一直存在。随着信息技术、电力电子技术及储能技术的发展,有关智能电网控制的研究和开发将会不断进步,在未来高可靠性、高效率、高智能化电网的建设和运行中发挥关键作用。

参考文献(References)

- [1] Markus B. A vision of the future grid [J]. *Power Engineering Review, IEEE*, 2001, 21(12): 10-12.
- [2] Ganrity T F. Smart grid[J]. *IEEE Power & Energy Magazine, IEEE*, 2008, 6(2): 38-45.
- [3] McDonald J. Leader or follower: Developing the smart grid business case [EB/OL]. [2010-11-01], http://www.gedigitalenergy.com/multilin/journals/issues/Spring09/Leader_or_follower.pdf.
- [4] Nourai A, Schafer C. Changing the electricity game [J]. *IEEE Power & Energy Magazine, IEEE*, 2009, 7(4): 42-47.
- [5] Ipakchi A, Albuyeh F. Grid of the future[J]. *IEEE Power & Energy Magazine, IEEE*, 2009, 7(2): 52-62.
- [6] Collier S E. Ten steps to a smarter grid[C]. Rural electric power conference, Fort Collins, CO, 2009-05-12.
- [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. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2009, 25(1): 7-11.
- [8] 栗原郁夫など.「日本型スマートグリッドにむけた課題と展望」[C]. シンポジウム S24, 平成 22 年電気学会, 東京, 2010. Ikuro Kurihara. Smart grid related subjects and development in Japan[C]. Proceedings of IEE Japan Symposium, S24, Tokyo, Japan, 2010.
- [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. *Power System Technology*, 2009, 33(14): 1-5.
- [10] 何光宇, 孙英云. 智能电网基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009. He Guangyu, Sun Yingyun. The basis of the smart grid [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [11] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010. Liu Zhenya. Smart grid technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [12] 国际电力网. 美国智能电网技术和特点 [EB/OL]. 2010-02-20, <http://www.sgcc.com.cn/gjhz/gjlddt/217642.shtml>. International Power Grids. Smart grid technology and its features in America [EB/OL]. 2010-02-20, <http://www.sgcc.com.cn/gjhz/gjlddt/217642.shtml>.
- [13] 张娜. 袁懋振:实事求是研究推进智能电网建设[J/OL]. 能源, [2010-11-01], <http://www.inengyuan.com/fmgs/article/2010-04-29/0000000414s.shtml>. Zhang Na. Yuan Maozhen: Research To Promote Smart Grid Follow A Practical And Realistic Approach[J/OL]. *Energy*, [2010-11-01], <http://www.inengyuan.com/fmgs/article/2010-04-29/0000000414s.shtml>.
- [14] 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. Ding Daoqi. Safety analysis of complex large grid: The concept and implementation of smart grid [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [15] 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. *Power System Technology*, 2009, 33(8): 1-7.
- [16] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 10-15. Chang Kang, Xue Feng, Yang Weidong. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(17): 10-15.
- [17] 孙宏斌, 张伯明, 吴文传, 等. 面向中国智能输电网的智能控制中心 [J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(2): 2-7. Sun Hongbin, Zhang Boming, Wu Wenchuan, et al. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2009, 24(2): 2-7.
- [18] 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. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(17): 21-28.
- [19] Widergren S E. 智能电网: 改造电力系统 [J]. 南方电网技术, 2010, 4(1): 1-10. Widergren S E. *Southern Power System Technology*, 2010, 4(1): 1-10.
- [20] 余贻鑫. 智能电网的技术组成和实现顺序[J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 1-5. Yu Yixin. *Southern Power System Technology*, 2009, 3(2): 1-5.
- [21] 张文亮, 刘壮志, 王明俊, 等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 1-11. Zhang Wenliang, Liu Zhuangzhi, Wang Mingjun, et al. *Power System Technology*, 2009, 33(13): 1-11.
- [22] 谌嘉图. 智能电网各项功能的实现 [J]. 智能电网技术专题, 2009(11): 46-47. Chen Jiatu. *Technical Reports on Smart Grid Technique*, 2009(11): 46-47.
- [23] 朱涛. 智能电网及其关键技术探讨 [J]. 云南电力技术, 2009, 37(4): 18-19. Zhu tao. *Yunnan Electric Power*, 2009, 37(4): 18-19.
- [24] 李乃湖, 倪以信, 孙舒捷, 等. 智能电网及其关键技术综述[J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 1-7. Li Naihu, Ni Yixin, Sun Shujie, et al. *Southern Power System Technology*, 2010, 4(3): 1-7.
- [25] 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, Wu Xiali. *Power System Technology*, 2009, 33(12): 8-14.
- [26] 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, Zheng Ruimin, Yang Weihong, et al. *Power System Technology*, 2009, 33(13): 12-18.
- [27] 荆平, 郭剑波, 赵波, 等. 电力电子技术在智能电网中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 1-6. Jing Ping, Guo Jianbo, Zhao Bo, Zhou Fei, et al. *Power System Technology*, 2009, 33(15): 1-6.
- [28] 徐政. 智能电网中的电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010. Xu Zheng. The application of power electronics in smart grid[M]. Beijing: Mechanic industry Press, 2010.
- [29] 韩民晓, 尹忠东, 徐永海, 等. 柔性电力技术——电力电子在电力系统中的应用[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2007. Han Minxiao, Yin Zhongdong, Xu Yonghai, et al. Flexible electric power technology: The application of power electronics in power system [M]. Beijing: China Water Power Press, 2007.
- [30] 周渝慧, 胡文杰, 许蔚, 等. 智能电网——21 世纪国际能源新战略[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2009. Zhou Yuhui, Hu Wenjie, Xu Wei, et al. Smart grid: New strategy for the 21st century international energy[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2009.
- [31] 王明俊. 智能电网热点问题探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 9-16. Wang Mingjun. *Power System Technology*, 2009, 33(18): 9-16.
- [32] 王哲. 智能电网涉及的关键技术 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(205): 41-43. Wang Zhe. *Telecommunications for Electric Power System*, 2009, 30(205): 41-43.
- [33] 施婕, 艾芊. 智能电网实现的若干关键技术问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 1-4. Shi Jie, Ai Qian. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(19): 1-4.

(责任编辑 刘志远)