

# 智能电网技术体系探讨

林宇锋, 钟金, 吴复立

(香港大学 电机与电子工程系, 中国香港特别行政区)

## Discussion on Smart Grid Supporting Technologies

LIN Yu-feng, ZHONG Jin, Felix Wu

(Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Hong Kong, Hong Kong SAR, China)

**ABSTRACT:** Power grid intellectualization is an important method to promote the development of renewable energy source and implement energy conservation and emission reduction. Along with the increasing development of power electronics, IT and communication technologies, the construction of smart grid is becoming an important development direction of electric power industry. At first the necessity of developing smart grid is demonstrated; then the required performance of smart grid are introduced, including self-government and self-healing ability, defensive quality, compatibility of power grid, high efficient operation and management, outstanding quality and friendliness, convenience of power transaction. It is pointed out that to implement smart grid it is necessary to strengthen the research and development in two respects, i.e., the basic technologies and realization of functions. Basic technologies for smart grid mainly contain four issues, namely power equipments, measurement and communication devices, information management system, decision-making and control theory; the realization of functions mainly contain five issues, namely smart control centre, smart substations, smart transmission and distribution lines, smart relay protection system and smart demand side management. Finally, the performance appraisal system is briefly dissertated in power grid performance, economic effect and social effect. Solution of above-mentioned problems will contribute to the deep study and application of smart grid.

**KEY WORDS:** smart grid; smart control centre; smart substation; smart transmission and distribution line; smart relay protection; smart demand side management

**摘要:** 电网智能化是促进可再生能源发展、实现节能减排的重要手段。随着电力电子、IT、通信等技术的不断发展,智能电网将成为电力工业的重要发展方向。文章首先论证发展智能电网的必要性;介绍智能电网的性能要求,包括:自治和自愈能力、防御能力、电网兼容性、高效运营和管理、优

质和友好性、电力交易的方便性。指出智能电网的实现需要加强基础技术和功能实现2方面的研发;基础技术主要包括电力设备、量测和通信设备、信息管理系统、决策与控制理论4个方面;功能实现则主要包括智能控制中心、智能变电站、智能线路、智能保护系统、智能需求侧管理5个方面。最后从电网性能、经济效益、社会效益3方面简要论述智能电网的绩效评价体系。上述问题的解决将有助于对智能电网的深入研究和应用。

**关键词:** 智能电网; 智能控制中心; 智能变电站; 智能线路; 智能保护系统; 智能需求侧管理

## 0 引言

电网是关系到国民经济命脉的基础产业和公用事业。现代电网的发展已经迎来机遇与挑战并存的关键期。一方面,电网需要应对日益严峻的资源环境压力,实现大范围的资源优化配置,提高全天候运行能力,满足能源结构调整的需要,适应电力体制改革;另一方面,输配电、发电、信息化、数字化等技术的进步也为解决这一系列问题提供了坚实的技术支持。因此,智能电网成为现代电力工业发展的必由之路。

智能电网(smart grid)也叫知识型电网(intelli grid)或者现代电网(modern grid),是有机融合了信息、数字等多种前沿技术的输配电系统;其发展目标是建设节能、环保、高效、可靠、稳定的现代化电网。目前,多个国家和地区针对该课题启动了一系列研究。

美国对智能电网的研究起步较早。美国电科院(EPRI)于2002年发起了知识型电网研究;并于2004年发布了针对电网智能化的知识型电网体系(IntelliGrid Architecture),为通信和计算机技术在智能电网中的应用提出了一系列标准和技术指引。美

国能源部于2003年7月对美国到2030年的电网建设做出了远景规划<sup>[1]</sup>；2004年1月又针对该规划提出了路线图<sup>[2]</sup>。在2005财年初期，美国国会通过了GridWorks和GridWise 2项研发计划以支持路线图的实现<sup>[3-4]</sup>，前者主要针对“硬件”，包括电缆导线、变电站、保护系统和电力电子等领域；后者主要针对“软件”，指的是信息系统集成技术和数字技术等电力系统中的应用。2007年，美国能源部对现代电网的性能、特点、技术要求和评价指标做出了系统的阐述<sup>[5]</sup>。根据《2007 能源独立与安全法案》，美国能源部、美国环境保护署、美国国家标准和技术研究院等机构联合组建了联邦智能电网工作小组(smart grid task force)，以协调美国政府相关机构的运作，借此推动智能电网相关技术的发展和运用。

在工业界和学术界的推动下，根据可再生能源和分布式发电的发展要求，欧盟于2005年成立了欧洲智能电网技术论坛(SmartGrids European Technology Platform)<sup>[6]</sup>。该论坛为2020年的欧洲电力工业发展做出远景规划，并指出未来的欧洲电网应满足如下要求：柔性应对用户需求；方便用户和可再生能源进入电网；安全可靠地满足用户对电能质量的差异化需求；具有高效的能源管理能力；实现电源的即插即用。

近年来，智能电网在中国也逐步得到了重视<sup>[7-12]</sup>。华东电网公司于2008年提出建设愿景，准备从2008年到2030年，分3个阶段逐步建成智能电网；并于2008年和2009年先后启动了“华东高级调度中心项目群建设”和“华东多适应性智能电网规划体系”。2009年2月，华北电网公司的“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”通过专家组验收。科技部的“973计划”也已经提供专门资助，对高渗透率微网的复杂动态行为及其运行进行研究。

从研究现状和产业化进程来看，各个国家和地区的侧重点不完全相同。美国侧重于推广信息化、新能源、新材料和新元件，并已将其应用在需求侧管理、配电网重构、分布式发电管理等方面<sup>[13-18]</sup>。欧洲侧重于推广分布式发电，比如微电网(micro grid)组网及运行、分布式发电控制、需求侧管理等<sup>[19-21]</sup>。中国的研究起步相对较晚，从大电网和中低压电网2个角度同时切入，已经完全成熟并产业化的成果相对较少。智能电网的建设和发展是一个

多学科交叉的崭新学术领域，需要从多个角度统揽问题<sup>[22-24]</sup>。本文从以下4个角度对智能电网的技术体系进行总结：1) 发展智能电网的必要性及其性能要求；2) 基础技术；3) 功能实现；4) 绩效评价体系。

## 1 发展智能电网的必要性及智能电网的性能要求

### 1.1 概述

电网的安全、稳定和高效运行对于任何一个国家的可持续发展都具有重要意义。一个现代化的电网必须从根本上保证国家能源安全、优化资源配置、带动上下游产业链发展、体现电网企业社会责任、提高电网企业资产利用率和投资效益、适应能源结构变化和体制改革要求。因此，在电网发展和建设过程中，有必要提高科技投入，早日实现电网的智能化。

智能电网的性能特征体现了它与传统电网的区别，可以总结为以下6个方面：自治和自愈能力、防御能力、电网兼容性、高效运营和管理、优质和友好性、电力交易的方便性。

### 1.2 自治和自愈能力

自治和自愈能力是指电网维持自身稳定运行、评估薄弱环节和应对紧急状态的能力<sup>[25-27]</sup>。目前电网的安全稳定计算和紧急预案制定仍以离线分析为主，其分析结果往往偏于保守，且无法在任何时刻都符合电网的实际运行情况。在智能电网中，电网将具备更强的自我管理和自我恢复能力，主要体现在以下几点：1) 电网能够自动合理安排运行方式，协调国家、大区、省级、地县各级电网，根据潮流、负荷、气象条件等情况确定运行参数；2) 电网具有在线安全稳定分析能力，能快速对自身状态进行评估，明确电网安全稳定的薄弱环节并自动提出解决方案；3) 有快速的反应能力，力保电力系统三道防线；4) 能针对实际情况修改或制定黑启动方案。

### 1.3 防御能力

防御能力是指电网抵御外部破坏的能力。外部破坏包括自然力、人为、恐怖主义、战争等因素<sup>[28]</sup>，因此，智能电网应从2方面提高防御能力：1) 抵御物理破坏的能力，要求当系统失去多台发电机、多台变压器或多条主要线路以后，电网仍能维持稳定运行并向关键负荷稳定地输送电力。2) 维护信息安全的能力，要求当系统的控制中心、微机保护、

数据库、信息和通信系统等设备受到信息战层面的攻击时，电网仍能保持正常运行。

#### 1.4 电网兼容性

电网兼容性是指电力系统能够开放性地兼容各种类型设备的能力。电网涉及的产业链较长，包括发电、燃料、环保、需求侧、装备制造等领域，因此，一个开放的、高兼容性的电网对于各产业的充分发育、增加就业岗位、促进节能减排具有重要意义。电网的兼容性应包括以下 3 个方面：1) 兼容一次设备，包括特高压、FACTS、传统能源、清洁能源、储能装置等；2) 兼容二次设备，包括保护、测量、控制和通信装置、软件等；3) 推动标准化，实现即插即用。

#### 1.5 高效运营和管理

高效运营和管理是指电网提高设备利用率、减少线损、降低运营成本的能力。目前，电网建设和运行存在以下几个问题：1) 电网往往要被动地适应负荷，因此部分设备和输电通道的全年利用率不高；2) 配电网线损较大，配电网的设备和运行亟需优化；3) 检修以定期检修为主，检修计划的安排不能完全与设备状态匹配。在智能电网中，在合理规划电网的基础上，将会引入先进的信息管理系统和监控技术，并适时引入状态检修和需求侧管理，从而提升资产利用率，优化电网的投资，降低企业成本。

#### 1.6 优质和友好性

优质和友好性是指电网与需求侧、发电商、环境和谐相处的能力。在智能电网中，电网、发电商、需求侧将会形成互动的关系；需求侧和发电商将可以互相选择，而智能电网将为其提供完成交易的信息处理平台和物理载体。此外，环保因素在电力调度和消费中的影响将会上升。智能电网的优质和友好性主要包括以下几方面：1) 针对电网、需求侧和发电商建立支持各方互动的可视化操作界面；2) 吸纳需求侧和分布式电源主动参与电网的运行和交易；3) 建立健全的信息发布体系，尽量避免消息不对称；4) 提高电能质量；5) 对用户的差异化需求提供个性化服务；6) 采用合理机制，提高清洁能源的竞争力，促进节能减排。

#### 1.7 电力交易的方便性

电力交易的方便性要求电网能在任何交易机制下快速、及时、准确地处理电力交易合约。目前，电力交易体制和电力能源结构正在发生变革。

在交易体制方面，一些国家和地区已在电力交易中引入竞争机制。我国也正在探索如何建立适合我国国情的电力交易制度。2009 年的《政府工作报告》指出要“继续深化电价改革，逐步完善上网电价、输配电价和销售电价形成机制，适时理顺煤电价格关系”。同时，中国电监会也已着手建立双边交易试点。

在电力能源结构方面，清洁能源在发电量中的比重将会提高。我国于 2005 年颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，规定电网公司必须“全额收购其电网覆盖范围内可再生能源并网发电项目的上网电量”。2007 年颁布的《节能发电调度办法(试行)》要求电网公司应优先调度低煤耗机组。2007 年 8 月颁布的《可再生能源中长期发展规划》指出，力争到 2020 年使可再生能源消费量达到能源消费总量的 15%。2007 年 10 月颁布的《核电中长期发展规划(2005—2020 年)》指出，到 2020 年核电运行装机容量争取达到 4000 万 kW。

因此，智能电网既要适应现有的电力交易制度，也要为未来的发展留有裕度；其主要功能如下：1) 支持电力市场，能够公正、快速、准确地处理各种交易合约；2) 快捷简便的业务结算能力；3) 建立需求侧响应机制和开放性平台，吸引需求侧和分布式电源参与电力交易；4) 具有系统升级能力，以适应进一步改革的需要。

## 2 智能电网的基础技术

### 2.1 概述

智能电网的构建将有赖于多项基础技术的发展、推广和应用。本文从以下 4 个角度归纳建设智能电网所需的基础技术：电力设备、量测与通信设备、信息管理系统、决策与控制理论。此外，为提高基础技术的易用性，加快推广速度，扩大应用范围，在研究过程中应注意 2 点：1) 加强标准化建设，提高兼容性，实现即插即用；2) 实现集成化和小型化，减小设备体积和占地面积。

### 2.2 电力设备

智能电网应具有灵活坚强的拓扑，因此需要研究更为先进的电力设备，主要包括电源和储能技术、输配电技术、电力电子技术、高效能源材料技术 4 大类。

1) 电源和储能技术。目前世界各国的能源结构均在调整中，以求提高能源利用效率，避免由于化

石能源的大量消耗造成严重的环境污染。今后电源技术将集中于核能、风能、太阳能、生物质能、氢能、燃料电池等清洁能源技术,以及洁净煤燃烧技术、高参数超超临界机组、超临界大型循环流化床、多联产系统技术、超级电容器、飞轮储能等方面。

2) 输配电技术。在电网网架建设中,既要发展大容量远距离低损耗输电技术,也要研究分布式供能技术以缓解输电网压力。输配电技术主要集中于特高压交直流输电、特高压绝缘、高温超导、微型电网等方面。

3) 电力电子技术。主要包括耐高压大电流电力电子器件,轻型直流输电,以及固态变压器、固态断路器、统一潮流控制器、静止无功补偿器、TCSC、有源滤波器、动态电压恢复器、静止同步补偿器等 FACTS 装置。

4) 高效能源材料技术。主要包括太阳能电池相关材料,燃料电池关键材料,大容量储氢、高效二次电池材料,超导关键材料及制备技术,以及高效能量转换等。

### 2.3 量测与通信设备

量测设备和通信设备相辅相成,共同为系统运行、保护以及设备监测和维修提供依据;两者既可能相互独立,也可能集成为一体。前者侧重于实时、准确地测量和就地处理各种电气量和非电气量,后者侧重于实现高速、大容量的实时动态信息交互。

量测系统包括 3 部分: 1) 需求侧量测: 主要具有家电控制、电能质量分析、防偷电、功率和用电量测量、实时电价处理、成本控制、自备电源监测等功能; 2) 电网侧量测: 主要具有同步相位测量、广域测量、动态设备监测、系统安全稳定监测等功能; 3) 发电侧量测: 主要用于监测发电厂的出力、设备状态、履约状况、煤耗和排放等。

通信系统的研究主要包括 4 方面: 1) 通信方式的多样化,合理使用 Internet、光纤、卫星、无线、3G、传感器网络等通信方式; 2) 精确的数据对时和同步能力; 3) 重视电磁兼容,降低对外部的辐射和电磁干扰; 4) 提高抵御外部通信干扰的能力。

### 2.4 信息管理系统

智能电网中的信息管理系统应主要包括采集与处理、分析、集成、显示、信息安全 5 个功能。

1) 信息采集与处理。主要包括详尽的实时数据采集系统、分布式的数据采集和处理服务、智能电子设备(intelligent electronic device, IED)资源的

动态共享、大容量高速存取、冗余备用、精确数据对时等。

2) 信息分析。对经过采集、处理和集成后的信息进行业务分析,是开展电网相关业务的重要辅助工具。纵向包括“发电-输电-配电-需求侧”4级产业链业务分析和“国家-大区-省级-地县”4级电网信息分析。横向包括发电计划、停电管理、资产管理、维护管理、生产优化、风险管理、市场运作、负荷管理、客户关系管理、财务管理、人力资源管理等业务模块分析。

3) 信息集成。智能电网的信息系统在纵向上要实现产业链信息集成和电网信息集成,横向上要实现各级电网企业内部业务的信息集成。为此有必要借鉴或利用面向服务架构(service-oriented architecture, SOA)、IEC 61850、IEC 61968、IEC 61970 等系统架构或标准,开发高效标准化的信息集成系统。

4) 信息显示。为各类型用户提供个性化的可视化界面,需要合理运用平面显示、三维动画、语音识别、触摸屏、地理信息系统(GIS)等视频和音频技术。

5) 信息安全。智能电网必须明确各利益主体的保密程度和权限,并保护其资料和经济利益。因此,必须研究复杂大系统下的网络生存、主动实时防护、安全存储、网络病毒防范、恶意攻击防范、网络信任体系与新的密码等技术。

### 2.5 决策与控制理论

在智能电网中,电网决策与控制的实时性、易用性、互操作性将大大提高,因此对以下几方面技术提出了新的要求: 1) 快速负荷和气象预测技术; 2) 快速安全稳定计算方法、判据和控制策略; 3) 高性能计算方法和设备,如并行计算、云计算、海量存储、系统容错等; 4) 快速仿真和建模; 5) 超短期潮流分析; 6) 故障定位; 7) 合理应用新型人工智能技术,比如分散式智能代理、智能感知技术、自组织网络技术、虚拟现实技术等; 8) 开发个性化人机交互界面及其内核技术,融合多媒体、计算机图形学、数据库设计、实时分布系统、生物特征识别技术等; 9) 针对电网智能化展开电力规划的研究。

## 3 智能电网的功能实现

### 3.1 概述

智能电网各项功能的实现,有赖于在完善各项基础技术的基础上,将其有效应用到电网运作的各

环节,实现分散控制和集中控制的协调。本文从智能控制中心、智能变电站、智能线路、智能保护系统、智能需求侧管理 5 个角度介绍智能电网的功能。

### 3.2 智能控制中心

智能控制中心是现有的 EMS、DMS、SCADA、虚拟电厂(virtual power plant)等技术的再升级和结合,主要具有以下功能:可视化互操作平台、预测功能、交易与调度功能、快速安全稳定分析功能、智能保护整定、预警报警与事故处理、虚拟电厂、镜像备用等。在研究中还应根据分层分区的原则,明确不同级别控制中心的权责和功能,进行有针对性的设计。

1) 可视化互操作平台。该平台能利用多媒体技术显示潮流、电压、功角、稳定裕度、故障位置、变电站和线路运行、发电厂状态等信息,监视控制中心各功能模块,实现个性化信息披露,接收运行人员指令。

2) 预测功能。以高性能通信和信息处理为依托,与气象部门、水利部门等相关部门联合,实现信息的短时甚至超短时预测;主要包括负荷预测(包括系统负荷和节点负荷)、气象预测(比如气温、降雨、覆冰、雷击、台风、极端天气)、可再生能源的出力预测等功能。

3) 交易与调度功能。该功能包括数据管理、机组调度、电网协调、信息披露等。数据管理用于处理机组状态、电网拓扑、实时电网模型、预测参数、检修计划、电力交易基础数据(如双边合约、竞价上网、节能调度、可再生能源扶持政策、金融和约等)等信息。电网调度功能会在各种数据的基础上,经过阻塞管理、安全校核、网损管理等流程后实现优化决策。电网协调功能是在综合处理各级智能控制中心的决策后,协调各级电网的运行,对网间交易、机组组合、出力分配、安全校核、AGC、备用等方面进行优化协调。信息披露功能则在服从相关保密和监管条例的前提下,对发电计划、购电成本、网间交易、能耗排放、阻塞情况、预测参数以及其他必要的信息进行及时准确的披露。

4) 快速安全稳定分析功能。目前的电力系统安全稳定分析主要以离线分析为主,不能完全反映系统的真实情况。在智能电网中,应推动安全稳定分析的在线化和实时化。该功能首先利用高性能量测和通信系统得到拓扑、潮流、频率、电压、设备实时模型等信息;然后据此进行状态估计和在线建

模分析;最后确定当前系统的安全稳定性。

5) 智能保护整定。目前的保护整定以离线整定为主。在智能电网中,将在快速安全稳定分析、实时网络拓扑和参数、实时负荷特性的基础上计算出母线、线路、变压器保护和安全自动装置的定值。

6) 预警报警与事故处理。根据紧急程度,智能控制中心将做出相应的预警(如稳定裕度不足、弱阻尼、备用不足、极端天气)、报警(如功率、电压、频率越限、失步、振荡、非主动解列、故障)和事故处理(如保护协调、低频低压减载、连锁切机、主动解列、再同步等)。

7) 虚拟电厂。是将某个区域的分布式电源合并作为一个电厂参与电网运行,从而实现有效调度管理的技术。利用该技术能提高分布式电源的渗透率,吸引分布式电源参与电力交易和需求侧响应。

8) 镜像备用。在某些特殊情况下,控制中心可能失去部分或全部功能,因此有必要为控制中心的信息建立实时镜像,在紧急情况下用镜像取代原控制中心的功能。

### 3.3 智能变电站

智能变电站将整合变电站自动化、地理信息系统、SCADA 等技术,并兼容微网和虚拟电厂;能与控制中心实现高性能通信;在控制中心授予的权限范围内进行控制和建模。智能变电站主要具有 4 种能力:自治、实时建模、协调、操作自动化。

1) 自治能力。变电站能在必要时调整 AVR (automatic voltage regulator)的定值以减小线损、提高电能质量和电压稳定性。在智能电网中,分布式发电渗透率将增加,微网、虚拟电厂等技术将逐步得到应用,配网中 AVR 的调整方式将适应这个趋势。

智能检修是智能变电站的重要特点。它能监测分析变电站设备(如变压器、母线、避雷器、隔离开关和断路器、互感器等)的状态,实现状态检修,从而优化资产使用和节约人力成本。

此外,智能变电站还能实现预警报警、自动故障诊断和处理等功能。

2) 实时建模能力。变电站能实时监测辖区运行状态,辨识设备和网络模型,从而为控制中心提供决策依据。

3) 协调能力。变电站应服从控制中心指令,因此应有专门的系统协调变电站自治和控制中心指令之间的关系。

4) 操作自动化。变电站能在微机的控制下取代操作人员进行倒闸、开闭地刀等操作。

### 3.4 智能线路

在智能线路中,基础设施技术水平将会提高,在线监控和智能检修会投入应用。

1) 基础设施。特高压、HVDC、VSC-HVDC、FACTS、高温超导等技术会更多地投入使用,从而使线路获得更高的输电容量。合理利用其中的某些设备可以实现提高电能质量、阻尼系统振荡等功能。

2) 远程监控和智能检修。目前的线路检修经常需要检修人员实地勘察,这将消耗大量的人力物力并具有一定的危险性。智能电网能实时远程监测线路上的电压、电流、功率、频率、覆冰、绝缘、污闪、植被、弧垂、杆塔应力、设备状态等;并利用相关信息实现状态检修,进行故障定位、自动融冰等操作。

### 3.5 智能保护系统

传统保护装置的定义大多采用人工现场设置的方式。而智能保护装置能实时接收控制中心的整定结果,从而更及时准确地配合电网的运行,并节省人力成本。此外,多代理技术也有望得到应用<sup>[29]</sup>。

### 3.6 智能需求侧管理

该功能融合了高级量测体系(advanced metering infrastructure)、微网、定制电力(custom power)等技术。

1) 高级量测体系。该体系包括智能电表、通信、电表数据管理3个系统。借助该体系能实现智能需求侧管理,比如用电状况收集、需求侧/电网双向通信、实时电价响应、智能家电控制、虚拟电厂和微网控制、防偷电等任务<sup>[30]</sup>。

2) 微网。微网技术是由分布式电源、负荷以及其他监控、保护装置组成的小型发配电系统,其中还可能包括换流器、储能设备等;既能并入大电网运行,也能实现孤岛运行<sup>[31-34]</sup>。利用微网技术可以提高电网的可靠性和电能质量,吸引用户参与需求侧响应。

3) 定制电力。利用电力电子装置等设备,根据用户的差异化需求提供个性化服务。

## 4 智能电网的绩效评价体系

智能电网的绩效评价体系包括电网性能、经济效益、社会效益3个方面。

电网性能包括可靠性和电能质量2方面。可靠

性是指电网向用户持续供电的能力,包括充足性和安全2项指标。电能质量包括电压质量、电流质量、供用电质量3个大方面,每个方面都有一系列细化的指标。

经济效益包括价格水平和资产利用效率2方面。电价水平包括上网电价、输配电价、销售电价、排污费等指标。资产利用效率包括设备利用小时数、阻塞状况、设备服务年限、线损率等指标。

社会效益包括环保和安全生产2方面。环保包括煤耗、污染物和温室气体排放、清洁能源渗透率等指标。安全生产包括电磁兼容、辐射、噪声、人身安全等方面的指标。

## 参考文献

- [1] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. "Grid 2030" a national vision for electricity's second 100 years[EB/OL]. <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>.
- [2] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. National electric delivery technologies roadmap [EB/OL]. <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>.
- [3] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. GridWise action planning[EB/OL]. <http://www.oe.energy.gov/htm>.
- [4] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. GridWorks multi-year planning[EB/OL]. <http://www.oe.energy.gov/htm>.
- [5] United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution. National electric delivery technologies roadmap [EB/OL]. <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>.
- [6] European Commission. European SmartGrids technology platform [EB/OL]. <http://www.smartgrids.eu/?q=node/27>.
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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.
- [12] 李岚峰. 华北公司智能电网建设取得新成果[Z/OL]. <http://www.indaa.com.cn>.
- [13] Hart D G. Using AMI to realize the smart grid[C]. Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2008.
- [14] Kulyk R, Kerbel M. Method and apparatus for managing an energy consuming load[EB/OL]. <http://www.Freepatentsonline.com/y2008/0015742.html>.
- [15] Lamonica M. Google and GE team up on clean-energy policy, tech [EB/OL]. [http://news.cnet.com/8301-11128\\_3-10044239-54.html](http://news.cnet.com/8301-11128_3-10044239-54.html).
- [16] Woody T. IBM to build world's first national smart utility grid [EB/OL]. <http://greenwombat.Blogs.fortune.cnn.com/2009/02/04/ibm-to-build-worlds-first-national-smart-utility-grid/>.
- [17] IBM Institute for Business Value. 2007 IBM energy and utilities global residential/ small business consumer survey selected results [EB/OL]. [http://www-935.ibm.com/services/us/gbs/bus/pdf/2007\\_ibv\\_consumer\\_survey\\_results\\_v1\\_1212a.pdf](http://www-935.ibm.com/services/us/gbs/bus/pdf/2007_ibv_consumer_survey_results_v1_1212a.pdf).
- [18] Rogai S. TELEGESTORE project progress & results[EB/OL]. <http://www.ieee-isplc.org/2007/docs/keynotes/rogai.pdf>.
- [19] Mcdermott M. 5.3 million smart meters to be installed by Southern California Edison[EB/OL]. <http://www.treehugger.com/files/2008/09/southern-california-edison-smart-connect-smart-meter-program.php>.
- [20] Richard M G. Efficiency is crucial to a green future [EB/OL]. [http://www.Treehugger.com/files/2007/01/efficiency\\_cruc.php](http://www.Treehugger.com/files/2007/01/efficiency_cruc.php).
- [21] Commission of the European Communities. GREEN PAPERS a European strategy for sustainable, competitive and secure energy [EB/OL]. [http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy/doc/2006\\_03\\_08\\_gp\\_document\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy/doc/2006_03_08_gp_document_en.pdf)
- [22] O'neill R. Smart grids sound transmission investments[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(5): 104-102.
- [23] Xcel Energy. Xcel energy smart grid a white paper [EB/OL]. <http://smartgridcity.xcelenergy.com/media/pdf/SmartGridWhitePaper.pdf>.
- [24] Novosel D. Emerging technologies in support of smart grids [C]. Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2008.
- [25] 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).
- [26] Amin M. Challenges in reliability, security, efficiency, and resilience of energy infrastructure: Toward smart self-healing electric power grid[C]. Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2008.
- [27] 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(增刊 2): 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).
- [28] 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).
- [29] 陈振宇, 王钢, 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).
- [30] Moresco J. PG&E installs its 2.3 millionth smart meter [EB/OL]. <http://www.redherring.com/home/26026>.
- [31] 伍磊, 袁岳, 季佩, 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).
- [32] 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).
- [33] 丁明, 严流进, 茆美琴, 等. 分布式发电中燃料电池的建模与控制[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 8-13.  
Ding Ming, Yan Liujin, Mao Meiqin, et al. Modeling and control of fuel cells in distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 8-13(in Chinese).
- [34] 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).



林宇锋

收稿日期: 2009-05-11。

作者简介:

林宇锋(1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为智能电网、新能源应用、电力系统运行与控制, E-mail: yflin@eee.hku.hk;

钟金(1973—), 女, 博士, 助理教授, 主要研究方向为智能电网、电力市场、微网、分布式电源, E-mail: jzhong@eee.hku.hk;

吴复立(1944—), 男, 博士, 讲座教授, 研究方向为电力系统分析与控制。

(责任编辑 沈杰)