

坚强智能电网发展技术的研究

李兴源, 魏巍, 王渝红, 穆子龙, 顾威

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对目前电力运行环境的日趋复杂、电力体制改革的不断前进、电力市场的逐步形成、现有的电力设备亟待更新、能源利用率低、电能质量差、用户与电网公司交互作用少等诸多问题, 讨论了适合中国电网情况的智能电网的定义, 总结出了智能电网自愈、互动、优化、兼容、集成五大特点, 概括出了智能电网和传统电网的区别, 并详细介绍了构成智能电网的四大体系和建立智能电网的两大基础, 最后总结出智能电网是经济和技术发展的必然结果, 我国应加快智能电网的研究发展。

关键词: 智能电网; 自愈; 优化; 电力市场

Study on the development and technology of strong smart grid

LI Xing-yuan, WEI Wei, WANG Yu-hong, MU Zi-long, GU Wei

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: For the current situations that electrical power operation environment is more complex, the power organization reform constantly, the electricity market is formed step by step, the current electrical equipment is outdate, and for the so many problems that low energy efficiency, poor power quality, less interaction between customers and power grid company, this paper defines the smart grid that is suited to China's power grid situation, and summarizes five features for the smart grid such as self-healing, interactive, optimization, compatibility, integration and the differences between smart grid and traditional grid, then introduces the four systems of smart grid and two foundations before building the smart grid, and finally concludes that smart grid is the inevitable result for the economical and technological development. China should speed up the research and development for smart grid.

This work is supported by National Science and Technology Support Projects (No.2008BAA13B01), National Natural Science Foundation of China (No.50877050) and State Grid Corporation Science and Technology Projects.

Key words: smart grid; self-healing; optimization; electricity market

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)17-0001-07

0 引言

随着以特高压为骨干网架和以各级电网为分区的中国特色电网的形成, 风力发电、太阳能发电、燃料电池发电等分布式可再生能源发电资源数量的不断增加, 电力网络跟电力市场、用户之间的协调和交换越加紧密, 电能质量水平要求逐渐提高, 传统的电力网络以及控制措施已经难以支持如此多的发展要求^[1-5]。为此, 我国提出了发展坚强智能电网的设想, 实现对传统电网的升级换代以及电网运行、控制新思路的改革, 同时也为中国电力市场的真正形成打下良好的基础。

早在2006年, 以美国为首的西方发达国家就提出了《建设智能电网创新运营管理》的电网运行新思路, 主要是想通过传感器连接资产和设备, 提高数字化程度, 建立数据的整合体系和数据的接受体系, 并且利用已掌握的数据进行相关分析, 以优化运行和管理。特别是奥巴马政府成立后, 美国更是提出发展智能电网产业, 最大限度发挥美国国家电网的价值和效率, 逐步实现美国太阳能、风能、地热能的统一入网管理, 全面推进分布式能源管理, 创造世界上最高的能源使用效率^[6-8]。中国作为发展中国家的领头羊也在近些年提出了“互动电网”的概念, 主要是指在创建开放的系统和建立共享的信息模式的基础上, 通过电子终端在用户之间、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、

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2008BAA13B01); 国家自然科学基金项目(50877050); 国家电网公司科技项目

电讯、电视、远程家电控制和电池集成充电等的多用途开发。它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,使电网具备可靠、自愈、经济、兼容、集成和安全等特点。

但是,从坚强智能电网概念的发展可以看出,坚强智能电网并没有一个确定的解释。坚强智能电网究竟是什么,它与目前的电网区别是什么,它的结构是什么样的,主要技术组成有哪些,是否适合在不同国家的电网上实行,如何实行等一系列问题仍旧是当今研究的重点。本文针对上述问题,讨论了坚强智能电网的定义,总结出了坚强智能电网的五大特点,概括了坚强智能电网和目前电网的区别,最后详细介绍了组成坚强智能电网的四大体系和建立坚强智能电网的两大基础。

1 智能电网的概述

1.1 坚强智能电网的定义

由于发展环境和驱动因素不同,不同国家的电网企业和组织都在以自己的方式来理解智能电网,对智能电网进行研究和实践,各国智能电网发展的思路、路径和重点也各不相同。因此智能电网概念本身也在不断发展、丰富和明晰中。总的来说,智能电网指的是电力输配系统综合传统的和前沿的电力工程技术、复杂的感应和监控技术、信息技术和通讯技术以提高电网运行效率并支持客户端广泛的附加服务的新型电网。智能电网在广义上包括可以优先使用清洁能源的智能调度系统^[9]、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^[10-12]。

针对我国电力需求持续高速增长,电力资源和用电负荷分布极不均衡,输电过程损耗大,能源利用率低等多方面因素,我国将电网建设为以特高压为骨干网架,各级电网为分区的具有中国特色的电网。特别是特高压输电,它具有输电容量大、送电距离长、线路损耗低、工程投资省、走廊利用率高和联网能力强等特点,是输电技术的重要发展方向,对推动世界电力工业的创新发展具有重要意义。因此特高压的发展是建设智能电网的重要前提,本文提出的智能电网正是以特高压为网络实体基础的坚强智能电网。

本文大致把智能电网分为了三个层次:第一层次,实现对电网运行状态、资产设备状态和电力信息的更实时、更全面和更详细的监视,提高电网的可观测性;第二层次,提供先进的IT技术手段,实

现对电力企业信息的传输和集成;第三层次,在信息集成的基础上,进行高级分析实现提高可靠性、降低成本、提高收益和效率的目标。

1.2 智能电网的特点

本文根据智能电网具有的灵活性、易接入性、可靠性、经济性等多方面优点,将智能电网的主要特征归纳为:

(1) 自愈:对电网的运行状态进行连接的在线自我评估,并采取预防性的控制手段,及时发现、快速诊断和消除故障隐患;故障发生时,在没有或者少量人工干预下,利用分布式电源等设备自动进行恢复,能够快速隔离故障、自我恢复、避免大面积停电的发生。

(2) 互动:系统运行与批发、零售电力市场实现无缝连接,支持电力交易的有效开展,实现资源的优化配置;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。电网将使得用户可以更好地控制自己的用电设备/装置,无论是家庭用户还是工商业用户。电网将与智能建筑物的能源管理系统相连以帮助用户管理其能源使用并减少能耗开销。

(3) 优化:实现资产规划、建设、运行维护等全寿命周期环节的优化,合理地安排设备的运行与检修,提高资产的利用效率,有效地降低运行维护成本和投资成本,减少电网损耗。电网将在自然状态和计算机状态下更安全,新技术的配置将可以更好地识别和应对人为的和自然的侵害。

(4) 兼容:电网能够同时适应集中发电与分散式发电模式,实现与负荷侧的交互,支持风电等可再生能源的接入,扩大系统运行调节的可选资源范围,满足电网与自然环境和谐发展。标准化了的电力和通讯的界面接点将使得用户可以接连燃料电池、可再生能源发电及其他分散的电源,并以简单的“即插即用”方式来实现。

(5) 集成:通过不断的流程优化、信息整合、实现企业管理、生产管理、调度自动化与电力市场管理业务的继承,形成全面的辅助决策支持体系,支撑企业管理的规范化和精细化,不断提升电力企业的管理效率。

1.3 智能电网与目前电网的区别

从宏观上看,与传统电网管理运行模式相比,智能电网是一个完整的企业级信息框架和基础设施体系,它可以实现对电力客户、资产及运营的持续监视,提高管理水平、工作效率、电网可靠性和服务水平。传统的电力分配方式,类似于经济学上的计划经济,电力资源没有被合理配置,造成能源和

财富的损失, 而智能电网将基本杜绝此类的浪费, 它会把暂时不用的电卖给其他需要电力的人, 供和需都由电力资源市场决定。从微观上看, 与传统电网相比, 智能电网进一步优化各级电网控制, 构建结构扁平化、功能模块化、系统组态化的柔性体系结构, 通过集中与分散相结合, 灵活变换网络结构、智能重组系统结构、最佳配置系统效能、优化电网服务质量, 实现与传统电网截然不同的电网构成理念和体系。智能电网的和目前电网的具体区别如表 1 所示。

表 1 智能电网和目前电网的区别
Tab. 1 Difference between smart grid and traditional power grid

特征	目前	将来
激励/包括电力用户	电价不透明, 缺少实时定价, 选择很少。	充分的电价信息, 实时定价, 有许多方案和电价可供选择。
提供发电/储能	集中发电占优, 少量 DG, DR, 储能或可再生能源。	大量“即插即用”的分布式电源补助集中发电。
使市场化成为可能	有限的趸售市场, 未很好的集成。	成熟, 健壮, 很好的趸售市场。
满足电能质量需要	关注停运, 不关心电能质量。	电能质量需保证, 有各种各样的质量/价格方案可供选择。
优化	很少计及资产管理。	电网的智能化同资产管理软件深度集成。
自愈	扰动发生时保护资产。	防止断电, 减少影响。
抵御攻击	对恐怖袭击和自然灾害脆弱	具有快速恢复能力。

2 智能电网的技术组成和功能

智能电网主要由四大体系构成, 分别是高级计量体系、高级配电运行体系、高级输电运行体系和高级资产管理体系。要形成上述四大体系, 智能电网还必须具备两大基础, 分别是灵活的网络结构和集成的通讯系统。

2.1 高级计量体系

高级计量体系 AMI (Advanced Metering Infrastructure) 是一个使用智能电表通过多种通信介质, 按需或以设定的方式测量、收集并分析用户用电数据、能够提供开放式双向通信的系统, 是智能电网的基础信息平台。AMI 可以实现电力供应商和用户的互动交流, 电力供应商能精确地知道用户的用电规律, 从而对需求和供应有一个更好的平衡, 并且支持实时电价, 用户可根据电价变化, 选择用电时间, 利用其分布式发电与储能设备参与削峰填谷, 使用户由被动的电力消费者变为配电网运行控

制的积极参与者。

由于 AMI 能够提供更多更精确的用户侧数据, 文献[13]利用 AMI 数据来提高对配电网状态评估的准确性。文献[14]介绍了 AMI 系统的结构、通信介质和协议, 以及其主要特色, 并给出了应用实例。文献[15]针对 AMI 系统的网络安全进行分析, 并给出了解决方案。文献[16]提出将 AMI 系统和配电网管理系统 (DMS) 相互整合, 以提高电力企业的供电效率和可靠性。

总而言之, AMI 授权给用户, 使系统同负荷建立起联系, 并让用户能够支持电网的运行, 同时与电网友好的电器 (GFAs) 也可以帮助电网提高设备利用率和防止停电事故的发生。AMI 与智能电网其它组成部分的关系如图 1 所示。

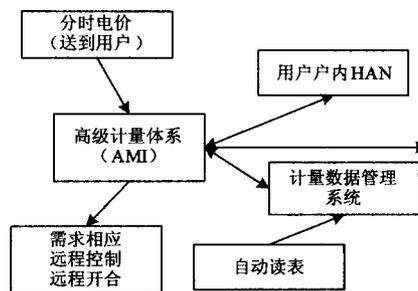


图 1 AMI 的功能结构关系图

Fig.1 The relationship among functional structure of AMI

2.2 高级配电运行体系

高级配电运行体系 ADOI (Advanced Distribution Operation Infrastructure) 主要的作用是使“自愈”功能得以实现。主要包括高级配电自动化、配电快速仿真与模拟、分布式电源运行、AC/DC 微网运行、新兴电力电子装置、配电 SCADA、配电地理系统 (GIS) 七个部分。各部分之间的关系

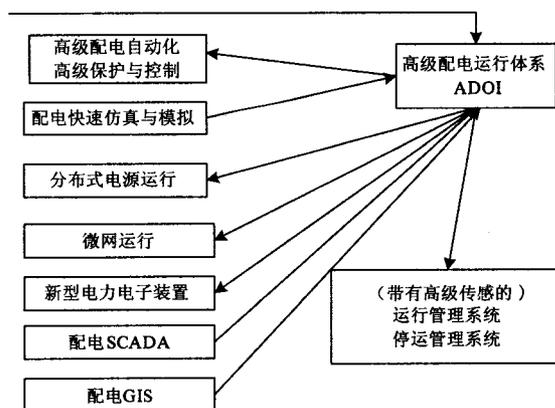


图 2 ADOI 的功能结构关系图

Fig.2 The relationship among functional structure of ADOI

如图 2 所示。本文着重介绍配电快速仿真模块、分布式电源接入以及微网的运行。

配电快速仿真模块是含风险评估、自愈控制和优化的高级软件系统（包括 EMS、DMS 等功能）。它为智能电网提供数学支持和预测能力。主要能够实现电网运行状态估计、连续优化系统性能、提供比实时快速的预测仿真、把市场和政策对系统安全性和可靠性的影响量化等功能。

在智能电网中，改进的互联标准将使各种各样的发电和储能系统更容易接入。各种不同容量的分布式发电（如光伏发电、风电）和储能系统（如先进的电池系统、蓄能式混合动力交通工具和燃料电池）在所有的电压等级上都可以互联^[17~24]。多台分布式发电机组间通过通信系统连接起来可形成一个可调度的“虚拟电厂”（Virtual Power Plant）。

文献[25]讨论了带有分布式发电的智能电网的运行和控制，为了提高智能电网运行的灵活性和控制能力，研究了分布式发电的电压和稳定控制的方式。文献[26]介绍了储能系统在智能电网中的重要角色，认为很有必要研究分布式发电与储能系统整合的可行性和效率，以及其对电网和传统电厂的影响，很有必要发展储能系统的标准化控制策略以及储能系统与电网接口处的先进的电力电子转换器。文献[27]介绍了带有综合负荷的虚拟电厂的基本原理，研究了基于多智能体系统的虚拟电厂的最优控制。

微网指接有分布式电源的配电子系统，是一个预先设计好的孤岛，主网脱离后可孤立正常运行，维持所有或部分重要用电设备的供电。微电网与大电网是有机整体，可以灵活连接、断开，既可与大电网联网运行，也可在电网故障或需要时与主网断开单独运行。微电网采用了大量先进的现代电力技术，如快速的电力电子开关与先进的变流技术、高效的新型电源及多样化的储能装置等，可以提高重要负荷的供电可靠性，满足用户定制的多种电能质量需求，更好地发挥分布式电源的作用。

文献[28]设计了一个包括控制智能体、分布式能源智能体、用户智能体、数据库智能体的多智能体系统（Multi-Ggent System），通过仿真，表明当停电发生时，该多智能体系统能使微网从当地电网中断开，这说明该多智能体系统能够用于微网运行的管理。文献[29]分析了在智能电网环境下，电力孤岛中的分布式发电（DG）的运行和控制。在电力孤岛中，分布式发电由原来的 PQ 模式变为 V-f 模式，2 个不同的控制器被分别用来控制 DG 节点的电压和频率。通过 DIGSILENT 软件的仿真，可以

看出电力孤岛中的 DG 能够分享孤岛中的有功和无功，从而迅速恢复系统电压和频率。

2.3 高级输电运行体系

高级输电运行体系 ATOI（Advanced Transportation Operation Infrastrucsture）主要实现输电智能化，强调的是阻塞管理和降低大规模停运风险。主要包括输电阻塞管理、输电 SCADA、WAMS、输电 GIS 技术、EMS 高级报警可视化、输电系统仿真与模拟等。各部分之间的关系如图 3 所示。其中阻塞管理、输电 SCADA、WAMS 和输电 GIS 技术是核心。

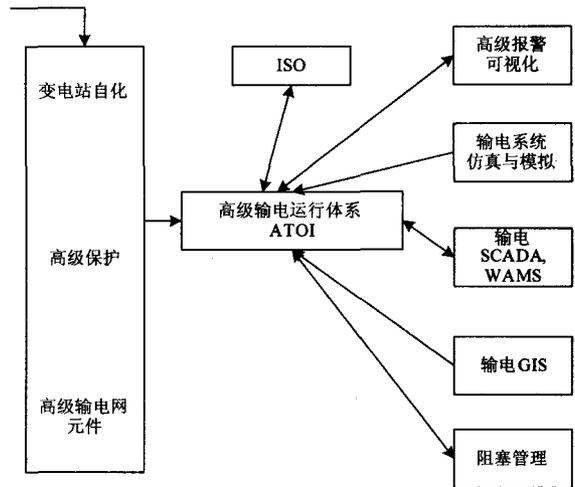


图 3 ATOI 功能结构关系图

Fig.3 The relationship among functional structure of ATOI

输电阻塞管理的方法就是通过消减或者调整，重新进行电力分配。传统的阻塞管理方法主要分为两类：①在考虑各种约束的基础上，直接利用最优潮流来计算最优发电计划；②采用分布计算方法，首先得到无约束中标计划，随后根据约束条件调整不同节点处的机组出力，以满足电网运行的安全性要求。文献[30]将阻塞成本的合理分摊与一种新型的金融输电权相结合以进行阻塞管理。文献[31]应用最优潮流计算在 POOL 模式和双边模式下的阻塞费用。文献[32]提出了基于报价的传输阻塞管理模型。文献[33]用风险效用取代购电费用最小作为区域阻塞管理的目标函数，提出了全新的基于风险的区域阻塞管理算法。文献[34]提出了跨大区电力市场双边交易的阻塞管理数学模型和实用计算方法。文献[35]提出了基于灵敏度的启发式算法以求解阻塞问题，不需考虑收敛性，但约束条件过多时可能失效。智能电网将把上述所有的阻塞管理的方法输入到建立好的控制平台，实时选择最优目标函

数和最优的运行方案来控制线路潮流, 最终实现输电运行最优化。

输电 WAMS/SCADA 是随着 GPS 技术民用化而迅速发展起来的一项新技术, 同步对时体系是 WAMS 系统最为显著的特征之一, 这使得在 WAMS 系统主站对广域电力系统进行同步观测成为可能。WAMS 系统在电力系统中的应用可以分为两类: 1) 取代常规 SCADA/EMS 系统建立新的电力系统数据测量平台; 2) 以基于 WAMS 的数据测量平台为前提, 开发在常规 SCADA/EMS 测量系统平台上难以进行的应用功能, 如电力系统状态估计、电力系统暂态过程跟踪与暂态稳定性预测、电力系统区间低频振荡模式在线辨识、电力系统降阶模型辨识、电力系统潮流计算和电力系统广域阻尼控制等等^[36-39]。

电力 GIS 是利用计算机技术、网络技术将电网分布、台帐及实时信息按其实际空间位置表达给客户, 集空间查询统计、运行维护、分析管理等功能于一体的应用系统, 是一种直接融入现代电力生产经营活动之中的、全新的信息化管理工具。作为信息技术和电力系统的紧密结合, GIS 在电力领域中的应用具体表现为整个国家的电力输电线路、电厂、电站及相关设备的综合建库, 反映电网运行的实时信息, 综合管理信息系统 (MIS), 形成大型的综合计算网络平台, 极大地提高了电网的管理和维护效率。它主要的功能有六个, 分别为: ①地理信息查询; ②台帐查询; ③业务数据查询; ④统计; ⑤系统数据维护; ⑥用户管理。除了上述六大主要功能, GIS 可供浏览相关标准、规范、反措、技术报告及新闻, 并通过交流平台, 为用户提供及时、全面、准确的信息。

2.4 高级资产管理体系

高级资产管理体系 AAMI (Advanced Asset Management Infrastructure) 主要实现电力资产管理, 大大改进电网的运行和效率。主要分为四个层次: ①用户层; ②业务逻辑层; ③应用服务层; ④系统服务层。主要的管理分为: 设备资产管理、缺陷管理、发电计划及项目管理、检修管理、备品备件及工器具管理等。限于篇幅, 本文不再一一详细介绍, 利用图 4 表示出 AAMI 的应用功能。

综上所述, 当今的智能电网由上述四个体系构成: AMI 授权给用户, 使系统同负荷建立起联系, 并使用户能够支持电网的运行; ADOI 使系统可自愈; ATOI 强调阻塞管理; AAMI 大大地改善资产管理。

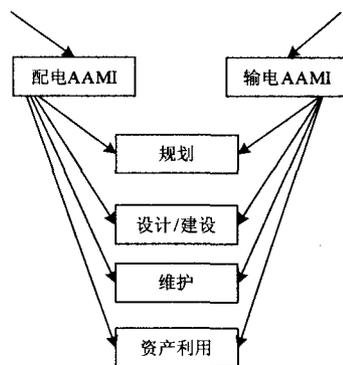


图 4 AAMI 功能结构关系图

Fig.4 The relationship among functional structure of AAMI

2.5 智能电网的基础设施

为了构建上述四大体系, 智能电网必须具备两个重要的基础设施, 分别是灵活的电网结构和集成的通讯系统。

灵活的可重构的配电网拓扑, 是未来智能电网的基础。它需使系统在经历故障时, 把故障影响范围局限在最小范围, 并可迅速通过其他连接恢复对其他部分的供电。因此, 它必须具备现有电网不具备的两个条件: ①综合考虑终端电网 (分布式电源、电力调节设备、无功补偿设备和用户能量管理系统) 控制和总体配电系统控制, 以达到系统性能的优化, 取得期望的稳定性和电能质量^[40]; ②支持高比重的分布式电源, 以提高系统的整体性、效率和灵活性。通过协同的分布式控制, 可以利用分布式电源来优化系统性能; 并在发生重大系统故障时可利用他们进行局部供电 (微型电网)。

智能电网是通过以光纤、电力线通信 (BPL)、无线通信为载体, 在更广的范围实现更多信息和应用的连接和集成, 使数据在发电、输电、配电和用户等不同主体及各类应用系统之间实现高速双向通信。它能够允许各种各样的物理媒介的嵌入, 并且可以兼容分散式信息和集中式信息, 从而把数据通讯网络和智能设备集成为一体。智能电网还大力发展和实施被使用者、供应商和其他主体广泛接受的通信标准, 该标准可以使不同系统和不同主体能够相互识别、交换信息并协调运行, 目前诸如需求侧响应、电力线通信 (BPL) 等通信标准已经研究成功, 进一步的标准化工作仍在进行中。

3 结论

(1) 智能电网和传统电网相比, 具有自愈、互动、兼容、优化、集成五大优点;

(2) 智能电网由 AMI、ADOI、ATOI、AAMI

四大体系构成，它们之间的密切配合实现现代电网的优化运行；

(3)灵活的电网拓扑和集成的通讯系统是智能电网的基础设施，在配电网规划中应该尽早考虑；

(4)大力发展智能电网是形成真正的、健康的、科学的电力市场的重要基础；

(5)智能电网是经济和技术发展的必然产物，我们应该大力加强对智能电网的研究和发展。

参考文献

- [1] 余贻鑫, 奕文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 1-7.
YU Yi-xin, LUAN Wen-peng. Smart Grid[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(1): 1-7.
- [2] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 32(9): 1-5.
XIAO Shi-jie. Consideration of Technology for Constructing Chinese Smart Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 32(9): 1-5.
- [3] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, (20): 31-36.
WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Study on Some Key Problems Related to Distributed Generation Systems[J]. Power System and Clean Energy, 2008, (20): 31-36.
- [4] 王道普. 超高压电力系统无功平衡与电压调整[J]. 高电压技术, 2007, (1): 13-18.
WANG Dao-pu. Reactive Power Balance and Voltage Regulation of EHV Power System[J]. High Voltage Engineering, 2007, (1): 13-18.
- [5] 徐敏杰, 吴俊勇, 胡兆光, 等. 电力市场环境基于多智能体的多目标电网规划方法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 1-5.
XU Min-jie, WU Jun-yong, HU Zhao-guang, et al. Multi-Agent Based Multi-objective Network Planning in Power Market Environment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 1-5.
- [6] 魏巍, 李兴源, 徐娇, 等. 传统变电站接入燃料电池发电系统的动态特性[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 72-77.
WEI Wei, LI Xing-yuan, XU Jiao, et al. Dynamic Characteristics of Connecting Traditional Substations With Fuel Cell Generation System[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 72-77.
- [7] 魏巍, 李兴源, 廖萍, 等. 含分布式电源的电力系统多代理故障恢复新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 89-94.
WEI Wei, LI Xing-yuan, LIAO Ping, et al. A New Multi-agent Fault Restoration Method for Power System with Distribution Generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 89-94.
- [8] 徐娇, 李兴源. 异步风力发电机的简化RX模型及其潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 22-26.
XU Jiao, LI Xing-yuan. A Simplified RX Model of Asynchronous Wind Generators and Load Flow Analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2008, 32(1): 22-26.
- [9] Deepak D. Smart Distributed Control of Power Systems[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA):2008.
- [10] Roger L K. Information Services for Smart Grids[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA):2008.
- [11] Damir N. Emerging Technologies in Support of Smart Grids[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA):2008.
- [12] Miroslav B. Emerging Technologies in Transmission Networks[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA):2008.
- [13] Baran Mesut, McDermott T E. Distribution System State Estimation Using AMI Data[A]. in: IEEE Power Systems Conference and Exposition[C]. 2009.
- [14] SUI Hui-bin, WANG Hong-hong, LU Ming-shun, et al. An AMI System for the Deregulated Electricity Markets [A]. in: IEEE Industry Applications Society Annual Meeting[C]. 2008.
- [15] Cleveland F M. Cyber Security Issues for Advanced Metering Infrastructure (AMI)[A]. in: IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century[C]. 2008.
- [16] Uluski R W. Interactions Between AMI and Distribution Management System for Efficiency/reliability Improvement at a Typical Utility[A]. in: IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century[C]. 2008.
- [17] Christian F, Stephan E, Jörg K, et al. High Voltage Ride-through of DFIG-based Wind Turbines[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA):2008.
- [18] Geza J. Wind Turbine Generator Low Voltage Ride Through Requirements and Solutions[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA):2008.
- [19] Allen H. Advanced Power Conditioning System Technologies For high-megawatt Fuel Cell Power Plants[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA):2008.
- [20] Wayne S. DOE's SECA and Future Gen Programs: Progress and Plans[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA):2008.
- [21] David N, Gerry A, Danielle S. Outlook and Application Status of the Rolls-royce Fuel Cell Systems SOFC[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA):2008.
- [22] Kazushige M, Minoru S, Hirohisa A. R&D and

- Deployment of Residential Fuel Cell Cogeneration Systems in Japan[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA):2008.
- [23] Kurt R, Bernhard L. Improving Security of Power System Operation Applying DG Production Forecasting Tools[A].in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA):2008.
- [24] Christophe K, Nouredine H, Bertrand R, et al. Distribution Grid Security Management with High DG Penetration Rate: Situation in France and Some Future Trends[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. Pittsburgh(USA): 2008.
- [25] Zhang X P. A Framework for Operation and Control of Smart Grids with Distributed Generation[A]. in: IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century[C]. 2008.
- [26] Mohd A, Ortjohann E, Schmelter A, et al. Challenges in Integrating Distributed Energy Storage Systems into Future Smart Grid[A]. in: IEEE International Symposium on Industrial Electronics[C].2008.
- [27] Dimeas A L, Hatziaargyriou N D. Agent Based Control of Virtual Power Plants[A]. in: International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems[C]. 2007.
- [28] Pipattanasomporn M, Feroze H, Rahman S. Multi-agent Systems in a Distributed Smart Grid: Design and Implementation[A]. in: IEEE Power Systems Conference and Exposition[C]. 2009.
- [29] Chowdhury S P, Chowdhury S, Ten C F, et al. Operation and Control of DG Based Power Island in Smart Grid Environment[A]. in: CIRED Seminar: Smart Grids for Distribution[C]. 2008.
- [30] 李立颖, 彭建春, 江辉, 等. 一种综合阻塞成本分摊与金融输电权的阻塞管理方法[J]. 继电器, 2005, 33 (3): 1-5.
LI Li-ying, PENG Jian-chun, JIANG Hui, et al. A Congestion Management Method Integrating the Allocation of Congestion Costs with Financial Transmission Rights[J]. Relay, 2005, 33 (3) : 1-5.
- [31] Paolo Marannino, Riccardo Vailati, Fabio Zanellini, et al. OPF Tools for Optimal Pricing and Congestion Management in a Two Sided Auction Market Structure[A]. in: IEEE Porto Power Tech Conference[C]. Porto (Portugal) :2001.275 - 281.
- [32] 汤玉东, 郝君, 吴军基, 等. Pool 模式下基于报价的传输阻塞管理[J]. 继电器, 2004, 32 (9) : 12-15.
TANG Yu-dong, HAO Jun, WU Jun-ji, et al. Transmission Ccongestion Management in Power Pool Based on Bidding[J]. Relay, 2004, 32 (9) : 12-15.
- [33] 葛朝强, 李扬, 唐国庆. 基于风险的区域阻塞管理[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (8) : 27 - 31.
- GE Zhao-qiang, LI Yang, TANG Guo-qing. Risk Based Regional Congestion Management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (8) : 27-31.
- [34] 张永平, 焦连伟, 倪以信, 等. 区域电力市场双边交易阻塞管理实用计算方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (14) : 18-23.
ZHANG Yong-ping, JIAO Lian-wei, NI Yi-xin, et al. A Practical approach for Inter-regional Bilateral contracts Congestion Management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (14) : 18 - 23.
- [35] 王秀丽, 甘志, 雷兵, 等. 输电阻塞管理的灵敏度分析模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (4) : 10-13.
WANG Xiu-li, GAN Zhi, LEI Bing, et al. Sensitivity Analysis Approach to Transmission Congestion Management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (14) : 18-23.
- [36] 陈树恒, 李兴源. 基于 WAMS 的交直流并联输电系统模型辨识算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 4 (1) : 45-49.
CHEN Shu-heng, LI Xing-yuan. Model Identification in AC/DC Parallel Transmission System Based on WAMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 4 (1) : 45-49.
- [37] 陈树恒, 李兴源. 基于 WAMS 的低频振荡模式在线辨识算法[J]. 继电器, 2007, 35 (20) : 17-22.
CHEN Shu-heng, LI Xing-yuan. An Algorithm for Identifying Low Frequency Oscillation Modes on Line Based on WAMS[J]. Relay, 2007, 35 (20) : 17-22.
- [38] 刘红超, 雷宪章, 李兴源. 互联电力系统中 PSS 的全局协调优化[J]. 电网技术, 2006, 8 (6) : 61-67.
LIU Hong-chao, LEI Xian-zhang, LI Xing-yuan, et al. Global Coordinated Optimization of PSS in Interconnected Power Systems[J]. Power System Technology, 2006, 8 (6) : 61-67.
- [39] 颜泉, 李兴源, 王路, 等. 基于 PMU 的多馈入交直流系统的分散协调控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 18(4) : 60-65.
YAN Quan, LI Xing-yuan, WANG Lu, et al. Decentralized Coordinating Control of Multi-infeed AC/DC Power System Based on PMU[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 18 (4) : 60-65.

收稿日期: 2009-06-18

作者简介:

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 中国电机工程学会理事, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等;

魏巍 (1984-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制、分布式发电;

王渝红 (1971-), 女, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统分析。 E-mail : hansia@vip.sina.com