

智能输电系统在中国的发展

杨德昌¹, 李勇², Christian Rehtanz¹, 刘泽洪³, 罗隆福²

(1. 多特蒙德工业大学 电力系统与电力经济研究所, 多特蒙德 44227, 德国; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082; 3. 国家电网公司建设部, 北京市 西城区 100031)

Overview of Smart Transmission System in China

YANG De-chang¹, LI Yong², Christian Rehtanz¹, LIU Ze-hong³, LUO Long-fu²

(1. Institute for Power Systems and Power Economics, TU Dortmund University, Dortmund 44227, Germany;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China;
3. Construction Ministry of State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China)

ABSTRACT: With increasing development of nationwide power grid interconnection and construction of UHVAC/UHVDC power transmission projects, the construction of smart power transmission systems will be the vital task in China's power grid construction, however, traditional power transmission systems are indicative of certain limitation during the adaptation of them to the development of modern power grids. In this paper, the authors analyze the reasons of constructing smart power transmission systems, and propose the structure and functional characteristics in adaptation to smart power transmission systems in China. Firstly, the features and transmitted contents of power communication systems are presented; then the technical features of smart substations and the structure of integrated automation systems are analyzed; the core technologies for the construction of smart power transmission network are summarized; the basic functions, extended functions and alternate functions of power transmission control center are enumerated, and finally it is pointed out that the development of China's power transmission networks in the post-smart power grid era should be the problem to be considered in the planning and construction of smart power transmission systems.

KEY WORDS: smart transmission system; smart substation; smart transmission networks; transmission controlling center; post-smart grid era

摘要: 随着我国特高压建设和全国联网工程的不断推进,传统的输电系统在适应现代电网发展过程中出现一定的局限性,智能输电系统的建设将是我国电网建设的重要任务。文章分析了建设智能输电系统的动因,提出了适应于我国智能输电系统的结构和功能特点。首先介绍了电力通信系统的特点和传输的内容,然后分析了智能变电站的技术特征和集成自动化系统的结构,总结了建设智能输电网络的核心技术,列举了输电控制中心的基本功能、扩展功能和备用功能,

提出了后智能电网时代我国输电网的发展问题应该成为智能输电系统规划建设考虑的问题之一。

关键词: 智能输电系统; 智能变电站; 智能输电网络; 输电控制中心; 后智能电网时代

0 引言

我国电网正在逐步形成以大规模、大容量、超/特高压为特征的全国互联输电网。如何保证大规模输电网运行的安全、优质、高效以及实现与环境的和谐发展,是我国电网面临的头号挑战。我国提出的统一坚强智能电网概念,是以统一规划、统一标准、统一建设为原则,以特高压电网为骨干网架,各级电网协调发展,具有信息化、自动化、互动化特征的国家电网^[1-2]。统一坚强智能电网包括“三华”(华北、华中、华东)同步电网、西北和东北电网,涵盖所有电压等级,由发电、输电、变电、配电、用电、调度等环节有机组成,是坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的电网。其中,“统一”是前提,“坚强”是基础,“智能”是关键。统一性、坚强网架、智能化的高度融合,决定了我国电网未来的发展方向。

1 我国发展智能输电系统的动因

我国能源与负荷分布的矛盾决定了发展特高压是实现能源转移最为经济有效的方式。我国大力发展智能输电系统的主要动因是:

1) 目前,特高压电网的建设已经起步,对各种特高压设备和特高压线路的研究有待深入,输电一次系统相对薄弱,迫切需要强化^[3];

2) 我国电网实行分级调度,各区域电网已经

建立了广域测量系统,但基于全国联网的通信系统和动态广域测量系统还没有形成^[4];

3) 欧美国家主要发展分布式新能源直接接入到配电网中,而我国建设大型新能源基地直接接入输电网,因此输电网是我国能源转移的骨架;

4) 与欧美国家不同,我国电力市场仅存在于发电和输电之间,用户侧市场机制还未起步,难以形成以电价为反馈信号的电网与用户互动机制,限制了配电和用户侧智能电网的发展,而我国智能电网建设的显著特色是与特高压输电建设相结合^[5];

5) 由于环境因素的限制,输电网线路的传输能力需要大幅度的提高,在全国联网的初级阶段,输电网的主动防御事故和抵御事故冲击的能力还比较薄弱,容易引发大规模的电网事故。

结合我国能源分布的特点、特高压建设规划以及国外专家学者提出的智能输电系统的特点和结构^[6],本文提出的智能输电系统主要包括智能输电通信、智能变电站、智能输电网络、智能控制中心,其组成如图1所示。

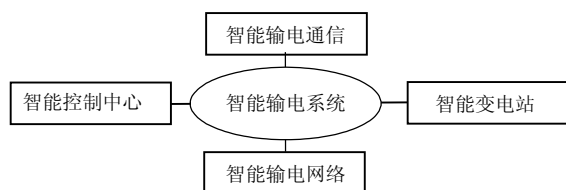


图1 智能输电系统组成

Fig. 1 Structure of the smart transmission system

2 智能输电通信

智能输电系统具有高速、全面集成的双向通信技术架构,使智能输电系统变成动态、交互、实时的功率交换网络。现代通信系统的开放式架构可以为智能变电站、智能控制中心、智能输电网络建立安全、可靠、实用、双向的信息交换平台^[7-9]。智能输电通信系统具有以下特征^[7]:

1) 高速率。支持输电系统新的保护和控制应用所需要的高速、实时通信;

2) 高带宽。支持输电系统开展新业务和新功能所需求的高带宽和高数据传输速率;

3) 高覆盖。支持所有相关场所的实时监视和控制功能;

4) 高可靠。部分网络损坏后,通信网仍能继续运行;

5) 大容量。为满足电网规模的不断扩大和电力系统实时的要求,智能装置对信息的抽样必须在

几ms内完成,导致通信网络交换数据的容量和抽样速率大幅度的增加;

6) 开放性。具有“即插即用”功能,使电网元件之间能够进行网络化的通信;

7) 统一性。可实现设备和设备之间、设备和系统之间、系统和系统之间的互操作功能。

3 智能变电站

智能变电站是智能输电系统的重要组成部分。文献[9]基于数字化变电站系统的基本结构和组网方案,提出具有高可靠性的数字化变电站系统结构,并通过探讨在数字化变电站中接入常规系统的技术方案,提出了智能变电站的简单模型。文献[10]总结了智能化变电站的技术特征,初步描述了智能化变电站的自动化系统结构和网络选型,并指出了建设智能化变电站面临的技术问题。在数字化变电站的基础上,本文提出的智能变电站的主要技术特征及内容为:

1) 信息采集数字化、共享化。数字化测量系统不仅增大了电气量的动态测量范围,而且有效的提高了测量精度。智能变电站采用文献[11]提出电力系统操作与运行标准体系,对原来分散的二次系统装置进行了信息集成及功能优化处理,统一了电力系统内各自动化系统的信息模型和信息交换模型,实现了信息的共享和设备的互操作。

2) 运行管理自动化、可视化。智能变电站运行管理系统包括:电力生产运行数据、状态记录统计无纸化;数据信息分层、分流交换自动化;变电站故障时能即时提供故障分析报告,指出故障原因,提出故障处理意见;能自动生成变电站设备检修报告,即常规的变电站设备“定期检修”改为“状态检修”。

3) 变电站设计一体化、紧凑化。数字化电气量测系统具有体积小、重量轻等特点,可以将其集成在智能开关设备系统中,按变电站机电一体化设计理念进行功能优化组合和设备布置,实现智能变电站设计一体化和设备的紧凑化^[12-13]。

4) 控制系统远程化、智能化。智能控制和保护系统是智能变电站最显著的特点,也是与数字化变电站监视控制系统的升级,智能变电站通过接收控制中心的远程指令,实现跨变电站、区域电网的保护和自动协调控制。

智能变电站包括智能化的一、二次设备,网络化的操作平台和集成化的自动化系统,其结构如图

2所示。智能化变电站的主要一次设备和二次设备都为智能设备,具备可与其他设备交互参数、状态和控制命令等信息的通信接口,并且设备间信息传输的方式为网络通信。

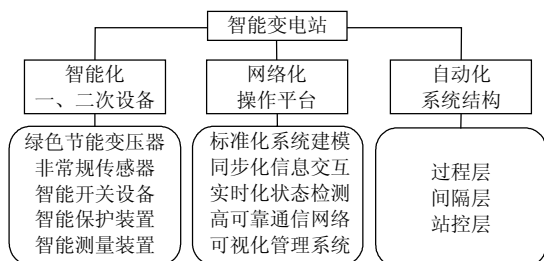


图2 智能变电站系统结构

Fig. 2 Structure of smart substation

智能化变电站的基本结构继承了数字化变电站分层分布式的特点,其功能在逻辑上被分配到过程层、间隔层和站控层,在这3层中有10类逻辑接口,分别接入过程总线和变电站总线^[14]。为满足不同场合下的数据流要求以及可靠性的原则,文献[9]提出了过程总线的4种组网原则和变电站总线的2种组网方案。未来数字化变电站集成自动化系统结构如图3所示,它指明了我国智能变电站的发展方向和建设模式。

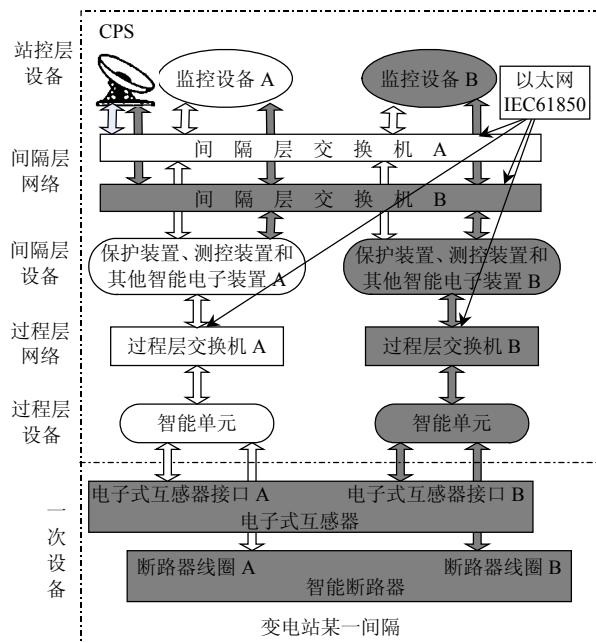


图3 未来数字化变电站集成自动化系统结构

Fig. 3 Imaginable architecture of integrated automation in smart substation

4 智能输电网络

4.1 智能输电网络技术

智能输电网络分为智能输电网络设备和智能

输电网络管理,其组成如图4所示。智能输电网络技术主要包括新型复合导线技术、柔性交流输电技术、柔性直流输电技术、特高压输电技术。

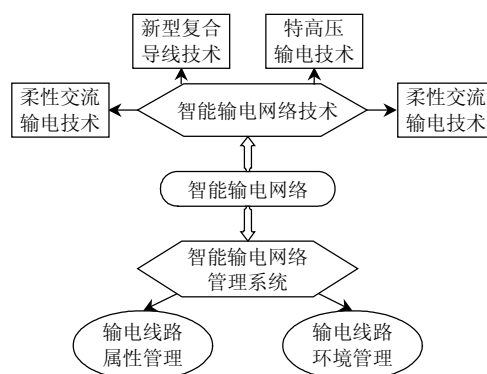


图4 智能输电网络组成

Fig. 4 Composition of smart transmission networks

新型复合导线技术主要包括高温超导技术和碳纤维复合材料技术。超导技术总的发展趋势是:加强超导机理和应用技术的研究,探索临界温度更高、性能更优良的新超导材料,进一步探明超导材料特别是高温超导材料的性能和物理特性,以及高温超导材料的合成与加工^[15-16]。基于碳纤维技术的复合导线,具有重量轻、强度大、耐腐蚀、耐高温、线损低、弛度低等优点,因此,不仅可以提供更高的载流容量,减少传输中电力的损耗,还可以有效减少导线数量和高度,节省用地,减少有色金属资源消耗,有助于构造安全、环保、高效、节约的智能输电网络^[17-18]。

柔性交流输电技术(flexible AC transmission systems, FACTS)是将电力电子技术、微处理机技术和控制技术等高新技术应用于输变电系统,以提高输电系统的可靠性、可控性、运行性能和电能质量,并获得大量节电效益的新型综合技术。FACTS技术的重要作用体现在:提高输电线路资源的利用率;提高电网的安全稳定性、可控性和运行经济性;优化整个输电网的运行状况,以实现全系统的优化控制^[19-21]。

柔性直流输电技术(voltage source converter based HVDC, VSC-HVDC)较之传统直流输电技术具有设计紧凑化、模块化,易于移动、安装、调试和维护,易于扩展和实现多端直流输电等优点^[22]。

4.2 智能输电网络管理系统

智能输电网络管理系统具有输电线路属性管理和输电线路状况管理功能。输电线路属性管理包括输电导线的型号、线路长度、绝缘子种类和数目、

金具、杆塔的高度和数目等；输电线路状况管理主要包括线路走廊经过地区的水文、气候、地质情况等，可以通过建立输电网地理信息系统实现输电网属性和运行环境动态观测，在此基础上构建动态多维虚拟化地理信息平台，实现智能输电系统在地理信息范畴的智能化。

5 智能控制中心

随着特高压建设和全国联网工作的不断推进，我国电网将呈现特高电压等级和大范围交直流混合互联的结构，传统的输电控制模式和方法，已不能满足电网发展的要求，因此，必须加快基于智能输电电网的控制中心的建设^[5]。

输电电网控制中心是智能输电系统的中枢，智能输电系统控制中心利用全局的信息，通过信息的有效利用，提高控制中心的分析能力、决策能力和智能化水平。目前，国内各个区域电网都建立了广域测量保护系统，初步实现了电网的动态监控，部分区域电网已经开始了高级调度中心的建设^[23]，这些都为智能输电控制中心的建设创造了条件。文献[6]提出了适用于北美电网的智能输电电网控制中心的特点。在此基础上，文献[5]提出了面向中国智能输电电网的智能控制中心的概念，并详细的分析了其特征和技术革新的内容。

智能输电控制中心的功能分为基本功能、扩展功能和备用功能，其功能流程见图 5。

基本功能主要包括广域同步信息采集、实时数据分析、在线报警服务、智能故障诊断、广域稳定控制、优化辅助决策等。同步数据采集系统可以实时的采集输电网新增节点和现有节点电流、电压、功率和相角，并通过通信系统传递到控制中心，以实现输电电网的快速模拟和仿真；实时数据分析系统通过对广域的数据进行分析、推理，判断电网实时的运行状态以及预测评估电网未来的状态，形成电网安全分析控制体系；在线报警服务包括实时故障报警和预测故障提示，在线报警系统采用可视化技术，实现人机的互动；智能故障诊断系统包括故障类型、故障原因、故障定位等；广域稳定控制根据不同的故障类型对各个相应的控制器发布指令，进行广域的协调控制；优化辅助决策系统利用故障后的网络重构实现运行方式的优化安排，降低输电系统的损耗，实现输电电网的经济运行。

扩展功能主要包括：1) 与变电站控制的结合；

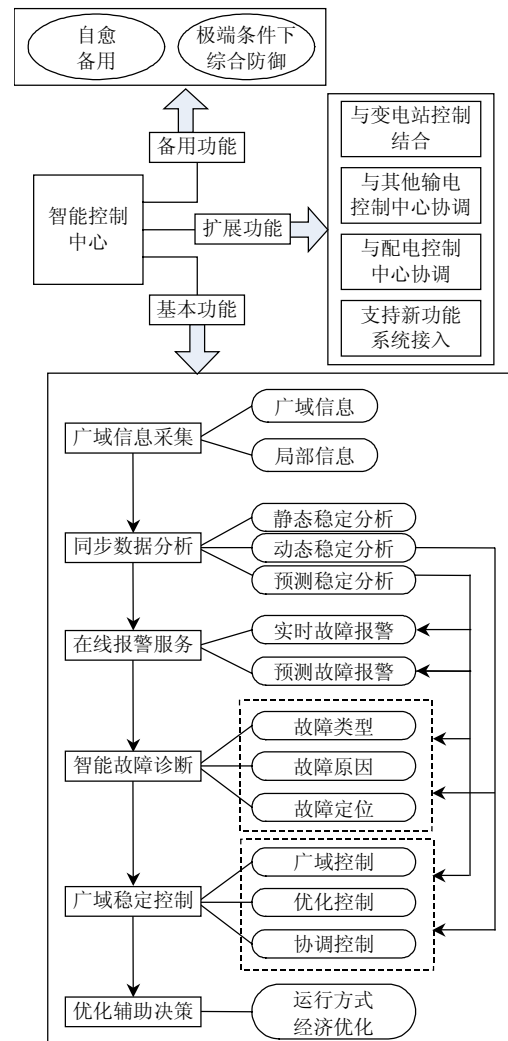


图 5 输电控制中心功能示意图

Fig. 5 Functions of smart controlling centre

2) 与同级和上级输电电网控制中心的优化协调；3) 与配电网控制和发电调度系统的协调；4) 新功能系统的接入。文献[24]分析了变电站和控制中心两级分布式网络建模技术、状态估计技术及多级控制中心的分布式建模、拼接技术和等值技术。文献[25]建立了基于国调和网调两级协调的自动电压协调优化控制系统结构。由于配电网的结构复杂，信息量大，并且随着各种储能装置和用户友好型电器的广泛推广，配电网内可控资源越来越丰富，基于配电网和输电网进行全局分析和协调控制将是未来电网控制调度中心的重要任务。电网的建设和发展是一个持续的过程，随着研究的不断深入，输电控制中心将会承担越来越多的功能，因此控制中心必须有升级能力和可接入新系统的能力。

备用功能主要包括控制中心的自愈和备用功能、突发自然灾害和战争条件下控制中心的综合防御能力。变电站分布式建模和分布式状态估计的实

现以后,图、模、库分布存储于各站中,为控制中心的异地快速拼接提供了可能,未来的输电系统控制中心可以随时快速建立多个异地备用控制中心,保证了自愈能力和综合防御能力^[25]。

6 后智能电网时代输电电网发展问题

目前现有智能电网的概念和特点涵盖了电网所有能想到的优点,按照国家电网公司的规划,我国将在 2020 年建成建成统一的坚强智能电网,而电力系统的发展是一个持续的过程,智能电网只是电力系统发展的一个阶段,因此,如何做好智能输电系统的规划和建设,对后智能电网时代输电电网的发展具有重要意义和深远影响。

(1) 后智能电网时代不是智能电网范伟的延伸,而是包括管理技术、网架结构和电网设备的全面升级以及电力市场的全面自由和开放,因此,智能输电系统的建设不应仅仅考虑技术和设备层面,还应考虑未来开放电力市场层面的影响。

(2) 智能输电系统的建设与特高压相结合,客观上满足了我过未来 10 年电网的发展要求,但在后智能电网时代如何发挥特高压输电线路的联络线作用也是值得研究的问题。

(3) 智能电网时代和后智能电网时代,俄罗斯远东电网和南亚电网将分别接入国家电网和南方电网,因此,必须制定与国际接轨的智能输电系统标准模型和运营服务模式^[26]。

(4) 通过对智能输电系统结构和特点的分析,可初步规划符合我国国情的,以智能通信系统为基础、以特高压为大区电网输电骨架、以高压输电为区域电网核心的中国输电系统示意图如图 6 所示。

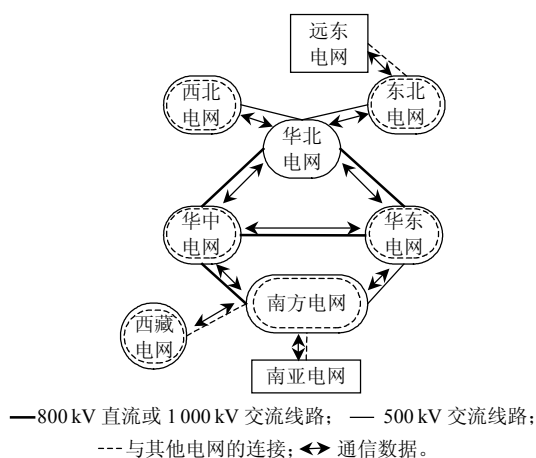


图 6 我国智能输电系统远景规划图

Fig. 6 The future diagram of smart transmission system in China

7 结语

智能输电系统的建设和发展需要科学谋划和布局,计算机技术、信息技术的发展为智能输电系统的建设提供了技术支持,大型能源基地建设、分布式电源的开发、特高压输电电网建设、配电网改造都将对未来输电系统的结构、控制方式产生影响。网架灵活合理、控制实时可靠、运行经济优化的智能输电系统,对实现全国范围内资源的优化配置具有重要意义。

参考文献

- [1] 刘振亚. 2009 年国家电网公司 2009 年年中会议上的讲话[N]. 国家电网报, 2009-07-21.
- [2] 中华人民共和国中央政府门户网站. 国家电网: 2020 年全面建成统一“坚强智能电网” [EB/OL]. 2009-02-03. http://www.9hum.com/jrzg/2009-05/21/content_1321530.htm
- [3] 舒印彪, 胡毅. 交流特高压输电线路关键技术的研究及应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 1-6.
Shu Yinbiao, Hu Yi. Research and application of the key technologies of UHV AC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 1-6(in Chinese).
- [4] 许树楷, 谢小荣, 辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-48.
Xu Shukai, Xie Xiaorong, Xin Yaozhong. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-48(in Chinese).
- [5] 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. Smart control center for chinese smart transmission grids[J]. Journal of Electric Power System Science and Technology, 2009, 24(2): 2-7(in Chinese).
- [6] Jiang Zhenghua, Li Fangxing, Qian Wei, et al. A vision of smart transmission grids[C]. IEEE PES General Meeting, Calgary, Alberta, Canada, 2009.
- [7] 丁道齐. 未来型电力系统的广域测量和通信[J]. 电力系统通信, 2004, 25(11): 1-6.
Ding Daoqi. The wide - area measurement and telecommunications of future type electric power system[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2004, 25(11): 1-6(in Chinese).
- [8] 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(1): 1-9.
Ding Daoqi. Integrative electric power and communication system architecture[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2008, 29(1): 1-9(in Chinese).
- [9] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 73-77.
Zhang Peichao, Gao Xiang. System architecture of digitized substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77(in Chinese).
- [10] 孙一民, 李延新, 黎强. 分阶段实现数字化变电站系统的工程方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 90-93.
Sun Yimin, Li Yanxin, Li Qiang. A grading solution for building digital station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 90-93(in Chinese).

- [11] 汤效军. 改革开放 30 年电力线载波通信的回顾与展望[J]. 电力系统通信, 2009, 30(195): 26-32.
Tang Xiaojun. Review and prospect of power line carrier communication during the 30 years of reform and opening up[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(195): 26-32 (in Chinese).
- [12] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-71.
Gao Xiang, Zhang Peichao. Main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71(in Chinese).
- [13] 曾庆禹, 李国龙. 变电站集成技术的发展: 现代紧凑型变电站[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 60-67.
Zeng Qingyu, Li Guolong. Evolution of integrated technique of substation: modern compact substation[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 60-67(in Chinese).
- [14] IEC 61850. Communication networks and systems in substations[S]. 2004.
- [15] 金建勋, 郑陆海. 高温超导材料与技术的发展及应用[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(4): 612-627.
Jin Jianxun, Zheng Luhai. Development and applications of high temperature superconducting material[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(4): 612-627(in Chinese).
- [16] 世界风力发电网. 高温超导技术将引领电力新时代[EB/OL]. 2009-10-12. <http://www.86wind.com/info/detail/6-10967.html>.
- [17] 张国光. 碳纤维复合芯导线在电力传输线路上的应用[J]. 山西电力, 2008(4): 43-45.
Zhang Guoguang. Application of aluminum conductor composite core in electric power transmission line[J]. Shanxi Electric Power, 2008(4): 43-45(in Chinese).
- [18] 杨宁. ACCC 碳纤维复合导线在我国的应用前景分析[J]. 电气应用, 2008, 27(5): 50-52.
Yang Ning. Analysis of application prospect of ACCC in China[J]. Electrotechnical Application, 2008, 27(5): 50-52(in Chinese).
- [19] Divan D, Sastry J. Controllable network transformers[C]. 39th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece, 2008.
- [20] 陈辉祥. 柔性交流输电技术的发展及其应用[J]. 广东电力, 2002, 15(6): 11-14.
Chen Huixiang. Development and applications of flexible AC transmission systems[J]. Guangdong Electric Power, 2002, 15(6): 11-14(in Chinese).
- [21] 邢士辉. 柔性交流输电技术的现状及未来[J]. 电力建设, 2005, 26(8): 21-23.
Xing Shihui. Current status and future of AC flexible transmission technology[J]. Electric Power Construction, 2005, 26(8): 21-23 (in Chinese).
- [22] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-9.
Xu Zheng, Chen Hairong. Review and applications of VSC HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-9(in Chinese).
- [23] 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.
- [24] Sun Hongbin, Li Pang, Zhang Boming, et al. Design of a hierarchical network remodeling system based on IEC 61970 for electrical power control centers in China[C]. IEEE PES General Meeting, Pittsburgh, USA, 2008.
- [25] 马韬韬, 郭创新, 朱传柏, 等. 一种电网智能控制中心架构研究[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(2): 15-19.
Ma Taotao, Guo Chuangxin, Zhu Chuanbai, et al. A novel architecture of power grid control center[J]. Journal of Electric Power System Science and Technology, 2009, 24(2): 15-19(in Chinese).
- [26] 国际电力网. 我国电网跨国互联“南北开花”[EB/OL]. 2007-8-13. <http://www.in-en.com/power/html/power-200720070814116407.html>.

收稿日期: 2009-12-10。

作者简介:

杨德昌(1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为交直流混合电力系统的稳定控制、广域保护、智能电网, E-mail: yang.dechang.cau@gmail.com;

李勇(1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为基于新型换流变压器的直流输电系统新理论, 电能质量控制与电能经济管理技术, 及相关的



杨德昌

HVDC 和 FACTS 技术;

Christian Rehtanz(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大电网稳定控制与安全评估、HVDC 和 FACTS 控制技术、电力系统广域监视、控制与保护以及智能电网方面的研究工作;

刘泽洪(1961—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事特高压输电工程的建设管理和技术研究工作;

罗隆福(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电能质量的管理和高压直流输电新理论及其应用的研究工作。

(编辑 蒋毅恒)