

文章编号 :1674-8441(2011)10-0019-05

风电与电网协调发展的综合解决策略研究

谢国辉, 李琼慧, 吴永梅
(国网能源研究院, 北京 100052)

摘要: 促进风电与电网协调发展, 对破解风电并网难题、支撑大规模风电发展及提高电力系统运行的安全性和经济性具有重要意义。结合我国国情, 提出了风电与电网协调发展应建立一整套涵盖技术、管理和政策的综合解决策略的基本思路; 重点阐述了风电与电网协调发展的技术、管理和政策方面的解决策略; 以我国某省级电网为案例, 定量研究了综合解决策略对提高电力系统风电消纳能力的作用。

关键词: 规划; 风电; 消纳; 并网; 电力系统

中图分类号: TK81; TM614 **文献标志码:** A

Research on Comprehensive Solution of Coordinated Development of Wind Power and Grid

XIE Guohui, LI Qionghui, WU Yongmei
(State Grid Energy Research Institute, Beijing 100052, China)

Abstract: Acceleration of coordinated development of wind power and the transmission grid is of great significance in solving the problem of wind power integration to the grid, backing up large-scale wind power development and improving the safety and economical performance of the power system operation. Considering China's basic conditions, this paper proposes a comprehensive solution concerning the technology, management and policies for the coordinated development. Taking a provincial power grid as a study case, the paper studies effects of the comprehensive solution on increasing the capacity of wind power accommodation.

Keywords: planning; wind power; accommodation; integration; electric power system

0 引言

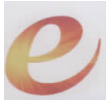
随着我国 8 个千万千瓦级风电基地规划的出台和风电装机规模的快速增长, 我国电网发展面临着前所未有的挑战^[1-2]。促进风电与电网协调发展, 对破解风电并网难题、支撑大规模风电发展、提高电力系统运行的安全性和经济性具有重要意义。

风力发电不稳定性和随机性的技术特点, 以及我国风电“大规模、高集中”的开发模式和“大容量、高电压、远距离”的输送模式^[3], 给电力系统规

划、电网调度运行等方面带来了巨大的挑战。

目前, 风电发展与电力系统的电源结构、网架结构、负荷特性、电网运行方式、调度计划安排、风电并网管理政策和激励机制等方面的不协调性逐渐显现, 需要借鉴国外先进理念和实践经验, 制定出一整套促进我国风电与电网协调发展的综合解决策略^[4-10]。这不仅需要研究关于风力发电特性技术层面的解决对策, 更应注重在管理和政策方面制定适应风电与电网协调发展的规划、调度运行管理等机制和措施。

收稿日期: 2011-07-20



1 技术层面的解决策略

我国风电规模化发展时间短,对风电出力的特性以及风电大规模并网对电力系统的影响还有待进一步研究。大规模风电并网运行的经验不足,现阶段实现风电与电网的协调发展还需要在风机运行控制技术、风电并网调度运行技术上有所突破,大力推进电网友好型风电厂和风电友好型电网建设。

1.1 电网友好型风电厂

随着风电装机规模的扩大,要实现风电大规模并网,就必然要求提高风机和风电场的技术水平,具备类似于常规电厂的可调、可控的功能。

电网友好型风电厂不是风电机组的简单叠加,而是一体化的有机整体。友好型的风电厂关键在于“厂”的概念,而不仅仅是“场”的空间概念。

电网友好型的风电厂应接近常规电厂的控制性能,具有可测、可控、可调的特征。通过优化设计风电厂控制系统、二次系统和辅助设备,将风电机组联接成为一个有机协调运作的整体。在电力系统的正常运行状态下,保持系统的安全稳定,不成为严重的干扰源;在电力系统告警、紧急状态下,不成为恶化系统运行状态的发生源;在电力系统恢复状态下,能帮助电力系统重建电压,不阻碍电力系统的恢复启动和电压恢复。

电网友好型风电厂应具备如表 1 所示的特性。

表 1 电网友好型风电厂特性

序号	特 性
1	具有有功和无功控制系统
2	具有提供频率控制和电压控制等辅助设施的特殊功能
3	在电压跌落或电网故障期间保持并网达到规定时间
4	提供调峰、调频、调压等辅助服务技术
5	具备风电功率预测能力
6	提供合格电能质量
7	具备安全、友好的数据通信系统
8	提供精确的电气仿真模型
9	保护方案和保护装置的整定满足要求

1.2 风电友好型电网

促进风电与电网协调发展,不仅要求风电厂在技术性能方面具有电网友好型的特性,还要求电力系统在发电、输电、变电、配电、用电和调度等环节进行智能化建设和改造,提升电网对风电大规模

集中式并网的适应能力。

风电友好型电网应具备坚强的网架结构,能够适应大规模风电接入、送出的需要,通过发挥电网大范围资源优化配置能力和用户多样化服务,调动更广泛的系统弹性资源,满足大规模风电并网和市场消纳的需要,具有如下关键特性。

(1) 具备坚强的网架结构。风电友好型电网将形成结构坚强的受端电网和送端电网,电网承载能力显著加强,形成“强交、强直”特高压输电网络,实现可再生能源的跨区域、远距离、大容量、低损耗、高效率输送,区域间电力交换能力明显提升,有效缓解我国能源资源和生产力分布不平衡的矛盾。

(2) 实现高度智能化的电网调度。风电友好型电网将全面建成横向集成、纵向贯通的智能电网调度技术支持系统^[11-14],满足各级电网调度和集中监控的要求,实现大电网连锁事件条件下的在线智能分析、预警、决策,各类新型发输电技术设备的高效调控和特高压交直流混合电网的精益化控制,实现智能电网的调度一体化运行。

(3) 充分调动用户侧弹性资源。在分布式大容量储能技术得到广泛应用的基础上^[15],风电友好型电网通过构建智能用电互动平台,建立完善需求侧管理、分布式电源综合利用管理系统等,满足合理调配用户充电时段、统计分析客户充电等需求,实现客户有序充放电、平衡电网负荷等应用,满足最大限度消纳风电等具有间歇性、波动性出力特性电源的需要。

2 管理层面的解决策略

2.1 我国风电规模化发展亟待解决的管理问题

我国风电规模化发展的历史较短,对于大规模风电并网管理经验不足,目前还没有出台国家层面的基于大规模风电的并网导则、风电并网管理规范,风机并网检测、风电监控系统的建设、风功率预测的管理、风电调度运行管理刚刚起步,风电规划与电网规划以及其他电源规划脱节。因此,现阶段实现风电与电网的协调发展必须要在风电的规划管理、项目管理、并网调度运行管理、并网标准及技术规范管理以及并网检测认证管理上有所突破。



2.2 适应风电大规模发展的五大管理机制

当前，导致我国风电大规模并网难的原因之一在于管理，包括相关规划不协调，配套项目审批核准及建设不同步，并网运行管理不到位，相关技术标准不一致和并网检测认证体系缺乏等。要实现风电与电网的协调发展，必须形成一套行之有效的管理机制，建立从规划、建设、运行到标准、检测认证的完整管理机制。

2.3 规划协调管理是五大机制的核心

规划协调管理机制是实现风电与电网协调发展的前提^[16-17]。没有规划协调管理机制，风电与电网的协调发展将无从谈起；建设协调管理机制是协调发展的内在要求；运行协调管理机制是协调发展的具体体现，标准管理和检测认证管理是协调发展的技术保障。促进风电与电网协调发展的管理策略如图 1 所示。

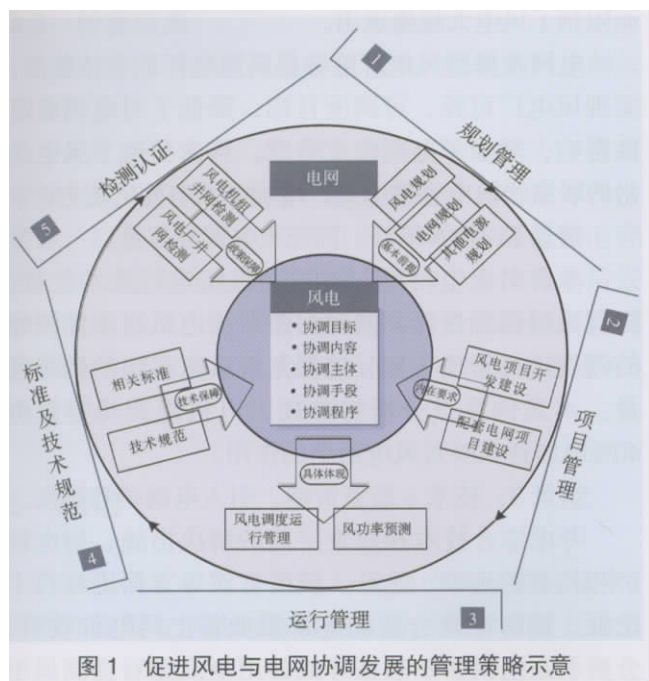


图 1 促进风电与电网协调发展的管理策略示意

3 政策层面的解决策略

我国风电规模化发展刚刚起步，当前的风电发展激励政策侧重对开发环节的激励，缺乏对输配及用电环节的补偿与激励，缺乏鼓励电网企业收购清洁能源上网电力的激励，缺乏鼓励用户购买绿色电力的激励，没有形成包括发电、并网、用电在内的

完整的激励政策体系。对制造企业、发电企业的激励和补偿政策较多，对电网企业的激励和补偿政策缺乏。因此，现阶段需要在风电并网激励政策上有所突破。

通过相关的政策及其保障措施可持续推进风电并网消纳工作，结合我国实际情况，目前促进风电与电网协调发展的政策，其解决策略的着力点在于完善需求侧管理、促进低谷时段风电消纳的上网电价机制和电网投资成本回收机制。

3.1 加强需求侧管理，推动风电多样化利用

由于目前储热技术的成本远低于储电成本，为充分利用低谷风电，丹麦大部分终端用户配备了电锅炉、热泵等电采暖设备，将低谷剩余的风电转化为热能供暖，有些还通过储热装置，变储电为储热，大大减少了低谷弃风^[18-19]。我国风力资源多集中在东北和西北这些冬季采暖期长、采暖负荷较大的地区，如果将风电场的建设与地区供热结合，在原有供热锅炉的供热区域或新增的供热区域，试点电采暖，对于提高风电消纳、减少煤炭消耗都具有重要意义。结合用户侧电力需求管理，推动风电多样化利用，积极探索用户侧利用低谷电能的方式，也是提高风电利用率的重要途径。

3.2 积极开展风电低谷电价试点

充分调动更广泛的电力需求侧资源的关键在于电价激励^[20]。国外风电大国依托其成熟的电力市场，充分发挥风电运营成本低的优势，实现了风电的充分消纳。随着我国风电规模的扩大，低谷风电弃风限电问题日益突出。我国可借鉴西班牙、丹麦的风电电价模式，遵循不打破现行上网电价体系、衔接现行风电标杆上网电价的基本原则，试点风电低谷上网电价。初步考虑，风电低谷上网电价由 2 个部分构成：一部分为政府补贴电价（即当地火电机组脱硫标杆电价与当地所属风资源区风电并网标杆电价的差价），维持不变；另一部分为低谷电价，可根据低谷风电特定用途倒算，如采用低谷风电供电锅炉采暖的，可按不高于采用燃煤锅炉采暖成本倒算，也可采用风电边际电量成本计算。

3.3 建立和完善风电接网补贴标准

2007 年公布的《可再生能源电价附加收入调配暂行办法》（发改价格[2007]44 号）规定风电接网补偿标

准为：50 km 以内 0.01 元 / (kW·h)，50~100 km 0.02 元 / (kW·h)，100 km 以上 0.03 元 / (kW·h)。此补偿标准过低，不利于发挥电网企业加强配套电网建设的积极性^[21]。应进一步完善风电接网投资成本测算和分摊办法等，适当提高风电接网费用的补贴标准，将可再生能源接入系统补偿标准提高到 50 km 以内 0.02 元 / (kW·h)，50~100 km 0.04 元 / (kW·h)，超过 100 km 的在 0.04 元 / (kW·h) 的基础上每增加 50 km 增加 0.02 元 / (kW·h)。对于大型风电基地送出工程，应单独核定其输电价格。

4 实证研究

为验证技术、管理、政策等解决策略在促进风电与电网协调发展中的作用，模拟不同策略及其组合，研究我国某省级电网 2011 年风电装机规模为 2 400 MW 情况下，不同解决策略对提高风电消纳能力的作用。

4.1 基础数据

该省按实际供电区域共分为 9 个，其中每个供电区域又分为若干个供热区域，分区之间存在电气联系，如图 2 所示。2011 年该省将有 41 台抽凝式供热机组，总容量达到 9 360 MW。6 台纯凝火电机组，总容量达到 3 060 MW；具有多年调节性能水电站，总容量达到 1 000 MW，分布在 D 和 F 分区，主要参与整个区域电网调峰；风电主要分布在 A 和 E 地区，风电容量分别达到 2 200 MW 和 200 MW。C 和 D 区是主要负荷中心。

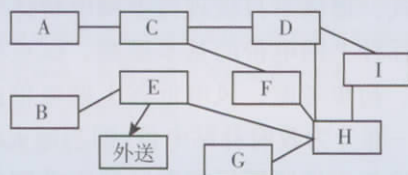


图 2 某省级电网拓扑

4.2 情景设置

考虑技术、管理和政策的解决策略设置不同情景，如表 2 所示。

基准情景：不采取任何技术、管理和政策解决策略，模拟分析在现有边界条件下风电消纳能力。

情景 1：技术策略，提高省内联络线输电能力。

表 2 各种情景考虑的边界条件

策略	火电调峰能力	省内联络线容量约束	增加电锅炉、电热泵	增加外送电需求
基准情景	40%	900 MW	-	-
情景 1	40%	1 500 MW	-	-
情景 2	50%	900 MW	-	-
情景 3	40%	900 MW	10 个 50 MW、转换效率 95% 的电锅炉；10 个 50 MW、转换效率 300% 的电热泵	-
情景 4	40%	900 MW	-	增加 5% 需求
情景 5	50%	1 500 MW	10 个 50 MW、转换效率 95% 的电锅炉；10 个 50 MW、转换效率 300% 的电热泵	增加 5% 需求

目前，我国大部分风电厂不能实现可控制和可调度。实际调度运行中，为保障电网安全、平抑联络线功率波动，需要控制联络线功率稳定极限，从而限制了风电大规模送出。

电网友好型风电厂能够提高风电厂的整体性能，实现风电厂可控、可调度目标，降低了对电网稳定性影响，增加了电网稳定裕度，从而松弛了风电送出的联络线输电容量约束，增加了风电外送能力。

情景 2：技术策略，深挖火电调峰容量。

考虑对火电（特别是供热）机组进行技术改造，提高机组调峰性能，同时加强对火电机组深度调峰的调度运行管理，充分挖掘常规火电机组的调峰容量。本案例重点分析将常规火电机组调峰容量由 40% 增加到 50% 对风电消纳的作用。

情景 3：技术 + 政策策略，引入电锅炉和热泵。

考虑综合技术和政策层面的解决措施，对电锅炉和热泵的选型、选址、调度方式等方面进行技术论证，同时配套合适的电采暖低谷上网电价政策，分析引入电锅炉、热泵等低谷用电设施对提高风电消纳能力的作用。

情景 4：管理 + 政策策略，扩大风电消纳范围。

考虑综合管理和政策层面的解决措施，加强对风电跨省、跨区消纳的规划管理和调度运行管理，同时配套风电外送电价政策及电网配套投资成本回收政策等，分析扩大风电消纳范围对提高风电消纳能力作用。

情景 5：综合解决策略。

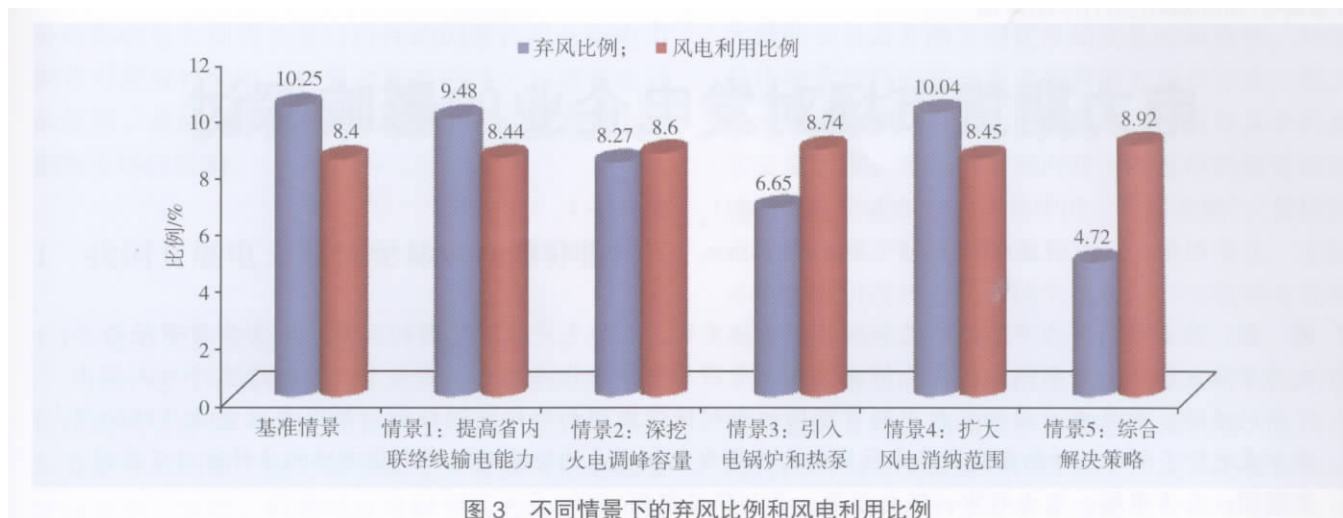


图 3 不同情景下的弃风比例和风电利用比例

综合考虑技术、管理、政策的解决策略，分析充分发挥电网友好型风电和风电友好型坚强智能电网的功能，综合利用管理策略和经济激励政策，研究其对提高风电消纳能力的作用。

4.3 计算结果

综上，6种情景风电弃风比例和风电利用比例如图3所示。

计算结果表明：①提高联络线输电能力、提高常规火电机组调峰能力、增加电锅炉、热泵等弹性资源，以及扩大风电消纳范围等都能够降低风电弃风比例，提高风电消纳能力。②综合解决策略情景下的风电弃风比例最低，较基准情景降低幅度达到5%以上；风电利用比例最高，较基准情景增加近0.5个百分点。

5 结语

本文研究了促进风电与电网协调发展的技术、管理和政策方面的综合解决策略。技术层面上提出了电网友好型风电和风电友好型电网的基本概念及其关键特性；管理层面上提出了加强规划管理、项目管理、运行管理、标准及技术规范管理和检测认证管理等几个方面的策略；从激励政策层面提出了加强需求侧管理、试点低谷电价机制和完善风电上网补贴标准等策略。实际省级电网的算例表明，不同解决策略都能够降低风电弃风比例和提高风电的利用效率，但效果有所不同，应根据实际情况采用综合解决策略，最大程度提高风电的利用率。此

外，提高风电消纳能力需要额外付出成本，不同解决策略对应的投资成本存在差异，如何量化研究不同解决策略的投资成本，进而开展风电消纳能力的综合效益分析是今后进一步研究的方向。

参考文献

- [1] 张运洲,白建华,辛颂旭.我国风电开发及消纳相关重大问题研究[J].能源技术经济,2010,22(1):1-6.
- [2] 白建华,辛颂旭,贾德香,等.中国风电开发消纳及输送相关重大问题研究[J].电网与清洁能源,2010,26(1):14-17.
- [3] 王卿然,谢国辉,张粒子.含风电系统的发用电一体化调度模型[J].电力系统自动化,2011,35(5):15-18.
- [4] 辛颂旭,白建华,郭雁珩.甘肃酒泉风电特性研究[J].能源技术经济,2010,22(12):16-20.
- [5] 陈贺,李隽,韩丰,等.我国风电大规模集中开发有关问题探讨[J].能源技术经济,2011,23(1):11-15.
- [6] 黄怡,张义斌,孙强,等.适应我国风电高速发展的举措建议[J].能源技术经济,2010,22(3):18-21,39.
- [7] 周原冰,王乾坤,方彤,等.西班牙风电发展的经验与启示[J].能源技术经济,2010,22(4):9-14.
- [8] 莫勋.影响西北区域风电产业发展的几个问题[J].能源技术经济,2010,22(10):7-11,15.
- [9] 朱洪英.风电工程设计中的重要环节及应注意的问题[J].能源技术经济,2010,22(1):36-39.
- [10] 周原冰,王乾坤,方彤.欧洲风电并网研究项目概述[J].能源技术经济,2010,22(8):18-22.
- [11] 柳一兵,赵晓华.智能电网发展的机制及其对电网自动化技术的影响

(下转第33页)



- [14] 李英,毛继兵,李成仁. 电价改革及电力企业需要关注的问题[J]. 电力技术经济, 2002, 14(6): 12-15.
- [15] 张瑞友, 韩水, 张近朱, 等. PJM 节点边际电价计算方法及其应用[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(11): 1033-1035.
- [16] 张哲, 江长明, 许晓菲, 等. 基于节点电价的阻塞管理理论在华北电网的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 81-86.
- [17] 赵晓莉. 基于小波最小二乘法支持向量积模型的系统边际电价预测[J]. 上海电力学院学报, 2009, 25(3): 284-287.
- [18] 陈显圣, 陈刚. 基于序列理论的电力系统边际电价预测方法[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(7): 50-54.
- [19] 李郁侠, 赵军科, 段凌剑, 等. 混沌理论和快速 BP 神经网络在边际电价预测中的应用[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2005, 38(6): 77-81.
- [20] Tong Wu, Ziad Alaywan, Alex D Papalexopoulos. Locational marginal price calculations using the distributed-slack power-flow formulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20: 1188-1190.
- [21] Pandey S N, Tapaswi S, Srivastava L. Locational marginal price projection using a novel RBFNN approach in spot power market[C]// Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008.
- [22] 李郁侠, 石晓俊, 段凌剑, 等. 基于相似搜索和神经网络的次日边际电价预测[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2005, 38(5): 120-123.
- [23] 周登波, 严正, 杨建林, 等. 准稳态灵敏度方法在节点边际电价计算中的应用[J]. 现代电力, 2010, 27(2): 82-86.
- [24] Lu Ning. Power system modeling using Petri nets [D]. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, 2002.
- [25] 马莉. 电力市场环境下发电公司的报价策略研究[J]. 电力技术经济, 2004, 16(2): 42-46.
- [26] 丁乐群, 王艳波, 周波, 等. 电力市场中发电商市场力的博弈分析[J]. 电力技术经济, 2006, 18(6): 28-31.
- [27] 叶泽, 曹永泉. 电力市场容量投资机制评价与选择[J]. 电力技术经济, 2007, 19(5): 29-34.
- [28] 吉兴全, 文福拴. 电力市场环境下发电和输电规划协调问题综述[J]. 电力技术经济, 2008, 20(3): 18-23.

丁梦娜 (1989—), 女, 河北保定人, 在读本科生, 主要从事电力市场方面的研究。E-mail: dingmengna@126.com

王晓冬 (1979—), 男, 河北保定人, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究。E-mail: wangxiaodongbd@163.com

陈亮 (1984—), 男, 河北黄骅人, 博士, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究。E-mail: ch.lg@163.com

(责任编辑 / 樊爱霞)

(上接第 23 页)

- [11] 响[J]. 能源技术经济, 2010, 22(11): 25-30.
- [12] 张红斌, 李敬如, 杨卫红, 等. 智能电网试点项目评价指标体系研究[J]. 能源技术经济, 2010, 22(12): 11-15.
- [13] 李立理, 张义斌, 葛旭波. 美国智能电网发展模式的系统分析[J]. 能源技术经济, 2011, 23(2): 27-35.
- [14] 王雪, 张义, 李立理, 等. 韩国绿色增长战略与智能电网[J]. 能源技术经济, 2010, 22(11): 31-35.
- [15] 魏晓霞, 刘士玮. 国外分布式发电发展情况分析及其启示[J]. 能源技术经济, 2010, 22(9): 58-61, 65.
- [16] 易海琼, 李隽. 基于序优化理论的电源规划方法研究[J]. 能源技术经济, 2010, 22(8): 11-17, 65.
- [17] 黄平, 陶伟, 刘学, 等. 电网规划研究平台的框架设计[J]. 能源技术经济, 2010, 22(3): 10-17.
- [18] 丹麦气候变化政策委员会. 绿色能源——丹麦通往无化石燃料的能源系统之路[R]. 2010.
- [19] 丹麦能源署. 丹麦风力发电[R]. 2009.
- [20] 时璟丽. 关于在电力市场环境下建立和促进可再生能源发电价格体系的研究[J]. 中国能源, 2008, 30(1): 23-27.
- [21] 王建东, 汪宁渤, 马彦宏, 等. 风电接入费用分摊机制综述及机理探讨[J]. 现代电力, 2010, 27(4): 35-39.

谢国辉 (1981—), 男, 福建漳州人, 博士, 主要从事电力系统优先调度、可再生能源并网运行管理、电力市场等方面的研究。

E-mail: xieguohui@sgeri.sgcc.com.cn

李琼慧 (1969—), 女, 湖南新化人, 硕士, 国家注册咨询工程师, 高级工程师, 主要从事能源战略规划、电力行业规划、能源电力需求预测、新能源规划及新能源并网技术经济评价、新能源产业政策等领域的研究。E-mail: liqionghui@sgeri.sgcc.com.cn

吴永梅 (1976—), 女, 河北保定人, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统优先调度、新能源并网、运行管理等领域的研究。

E-mail: wuyongmei@sgeri.sgcc.com.cn

(责任编辑 / 盛夏)