

大规模间歇性新能源并网控制技术综述

罗剑波^{1,2}, 陈永华^{1,2}, 刘 强^{1,2}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 大规模间歇性新能源并网控制是促进新能源开发利用的有效手段之一。从大规模间歇性新能源并网运行面临的诸多问题出发, 归纳总结了大规模间歇性新能源并网控制的关键技术。重点阐述了风电和光伏电站集群有功控制、大规模新能源基地无功电压控制、计及大规模新能源的在线安全稳定预警与控制决策、新能源与常规电源的协调控制、新能源与储能的协调控制等五个方面的研究成果, 并规划了需要进一步研究的技术路线。

关键词: 间歇性; 新能源; 并网; 控制

Overview of large-scale intermittent new energy grid-connected control technology

LUO Jian-bo^{1,2}, CHEN Yong-hua^{1,2}, LIU Qiang^{1,2}

(1. Nari Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. Nari Technology Development Limited Company, Nanjing 211106, China)

Abstract: Large-scale intermittent new energy grid-connected control technology is one of effective means to promote new energy exploitation. From the problems of large-scale intermittent new energy grid-connected operation, the key technologies are summarized. And then five technologies research are elaborated, which include wind and photovoltaic power cluster active power control, reactive power and voltage control for large-scale new energy base, on-line security pre-warning and control decision-making considering large-scale new energy, new energy and conventional power coordination control, new energy and energy storage coordination control. Finally, roadmaps about these technologies for further research are proposed.

Key words: intermittent; new energy; grid-connected; control

中图分类号: TM619 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0140-07

0 引言

近年来, 我国风力和光伏电站发展突飞猛进。2013年全国新增风电并网容量14 490 MW, 累计并网容量77 160 MW, 风力发电量134.9 TWh, 成为继火电、水电之后的第三大电源^[1]。2012年, 光伏行业虽然面临产能过剩严重问题及国际贸易中“双反”制约, 但国内市场仍保持增长势头, 当年光伏累计装机量达到8 020 MW, 新增装机量达到4.5 GW, 同比增长66.7%^[2]。

间歇性新能源快速发展的同时, 也存在不少问题: 新能源资源与负荷中心呈现明显逆向分布特点; “十二五”期间将建设河北、蒙东、蒙西、吉林、甘肃、山东、江苏、新疆和黑龙江等九大风电基地, 除山东和江苏外, 其余七大基地都属于“三北”地区, 电网就地消纳能力不足, 送出通道资源有限; 由于风电、光伏出力的随机性和不确定性, “弃风”、

“弃光”现象严重, 据统计, 2013年全国因“弃风”限电造成的损失电量达到16 231 GWh^[1]。

因此, 广大科研人员通过不断技术创新, 特别是通过加强对大规模间歇性新能源并网控制技术的研究、开发和应用, 有效缓解了上述问题。本文首先介绍大规模间歇性新能源并网运行面临的主要问题, 然后对目前大规模新能源并网运行控制技术研究成果进行了归纳和总结, 最后提出了下一步技术研究方向。

1 大规模新能源并网运行面临的问题

1.1 新能源送出受限

大规模新能源送出受限是一个长期存在的问题。在规划建设新能源基地时, 主要是从风、光资源情况、当地基础设施条件和土地利用条件来考虑, 未考虑相对落后的电网建设, 送出能力受限。并且国内新能源电站群大多数处于电网末端, 所接入的

电网架构相对薄弱, 而大规模风电的集中接入加剧了各类稳定问题, 导致实际送出能力低于其额定送出功率。

1.2 系统调频成本增加

国家标准^[3-4]虽对风电场和光伏电站并网运行时的频率范围进行了规范, 也涉及到频率调整控制问题, 但尚未明确风电场和光伏电站参与电网调频的具体要求, 目前国内电网频率调整主要还是由传统电厂分担。随着新能源并网容量在电网中的比重增加, 参与电网调频电源容量的比例显著下降, 需同步配套相应容量的调频电源^[5], 而配套这些备用调频电源增加了系统运行成本。

1.3 系统调峰能力不足

大规模风电接入导致电网等效负荷峰谷差变大, 客观上需要增大调峰容量; 风电的反调节特性进一步加大对系统调峰容量的需求^[5]。在我国风电大规模集中式开发、外送通道受限、抽水蓄能和储能电站等调峰装备尚未能够充分经济运行的情况下, 常规能源参与风电调峰成为当前的主要选择。然而, 从我国风电资源开发集中的“三北”地区来看, 传统电源中火电比重较大, 水电、抽水蓄能和燃气等调节能力好的电源比例低, 电源调峰能力不足^[6]。

1.4 无功/电压问题突出

新能源发展初期, 由于场站数量少、容量小且处于电网末端, 其电压影响往往局限于新能源场站内, 对系统电压影响有限。但随着大规模新能源集中接入电网, 给电网带来了不可忽视的电压问题, 严重影响了电力系统的正常运行。大量风机的集中并网, 功率集中送出可能导致电网的静态电压失稳; 非故障状态时, 风电出力的随机性与波动性, 会导致电网潮流的不确定, 无功需求变化幅度大, 变化速度快, 导致电压波动过大; 某个风电场因故障脱网时, 由于线路轻载和无功补偿设备未能快速动作, 区域电压在故障切除后出现“骤升”, 进而导致临近风电场由于过电压保护动作而连锁脱网^[7], 形成大规模风机连锁脱网故障^[8-9]。

1.5 电网稳定特性受到影响

大容量高电压等级的大规模风电并网会对电网稳定特性产生一定的影响。系统故障时, 风电机组可能因为电压越限或转速越限导致保护动作而跳闸, 而导致系统遭受失去大量风电功率的二次冲击^[10]。大量接入系统的双馈风电机组在电网发生故障期间以及故障清除后的前期可提高同步机组的功率极限, 但在故障清除后的后期同步机组的功率极限降低, 不利于同步机组功角的快速恢复稳定^[11]。

2 大规模新能源并网运行协调控制技术

大规模新能源并入电网时存在的诸多问题同时很大限度地制约了新能源自身的发展, 各大新能源基地都出现了不同程度的弃风弃光现象。大规模新能源并网运行协调控制是缓解大规模新能源发电与电网消纳矛盾的重要手段之一, 本节主要总结性地介绍了五个方面的技术内容。

2.1 风电场、光伏电站集群有功控制

风电场、光伏电站集群有功控制是在满足电网安全约束的前提下, 对风电场、光伏电站群进行控制, 从而充分利用电网接纳风电、光伏能力, 提高集群运行的经济性, 有效解决风电、光伏分散控制导致的资源浪费、协调困难等问题, 达到提高风电、光伏利用率的目的。目前, 国内针对风电场、光伏电站群有功控制开展了大量工作, 取得了很多实用的研究成果。

国网电力科学研究院提出了大型集群风电有功智能控制技术^[12-13]的控制框架和控制策略, 根据各风电场风资源的时空差异, 利用风风互补特性, 提出风电场间的协调控制方法, 通过对各风电场出力的优化控制, 实现风电出力的最大化。按照四层架构设计开发的WPSCS-1000大型集群风电有功智能控制系统在甘肃酒泉风电基地实现应用, 解决了甘肃大规模风电开发初期的电网运行安全问题。国网电力科学研究院和清华大学提出了多时间尺度协调控制^[14-15], 提升电网消纳新能源能力。吉林电网结合自身实际情况做了一些探索^[16], 根据风电功率预测数据、电网负荷预测数据和省间联络线计划, 结合不同风电场有功出力对区域电网安全约束影响的敏感性高低, 安排风电场的发电计划。

2.2 大规模新能源基地的无功电压控制

大规模新能源基地无功电压控制按照“分层分区, 就地平衡”原则, 统筹大规模新能源基地各类无功设备, 充分利用各类设备之间的性能差异, 控制区域内各节点电压在规定的范围内, 保证区域电网电压安全。针对大规模新能源基地无功电压控制问题, 各大高校和科研院所也展开了大量研究并取得不少成果。

天津大学、华北电力大学、清华大学和国网电力科学研究院都提出了新能源场站内无功电压协调控制技术^[17-21], 新能源场站内的无功电压协调控制技术以风电机组(光伏逆变器)和无功设备的无功特性为基础, 通过设计类似AVC的控制系统来协调控制场内无功设备, 保证新能源场站出口电压安全。清华大学还提出了新能源场群无功电压控制技

术^[22-23]，它是以新能源场群汇集升压站为电压控制中枢点，以各新能源场升压变压器的高压侧电压为约束，协调变电站内与所连接新能源场站的无功调节装置出力，以保证整个地区电压的安全稳定。清华大学和山东大学提出了结合功率预测的无功电压控制技术^[24-25]，将预测结果引入控制策略，从多时间尺度上，结合不同无功设备的响应时长，利用大容量静态调节设备对风电场的无功电压进行大幅调节，动态调节设备补偿小幅波动，并在暂态过程中提供电压支撑。此外，为了防止风机连锁脱网，清华大学提出了无功电压预防控制技术，通过无功优化来保证系统无功充裕和布局合理，建立了带风电场安全约束条件的无功优化模型，以最大化风电安全接纳量和最小化系统网损为目标，采用Benders分解算法求解该优化模型，保证系统电压在正常情况下和N-1脱网后均能满足安全性要求^[7]。

虽然大规模新能源基地的无功电压控制技术在研究上取得不少成果，但在实际工程中仍然没有大量的推广应用，特别是实际投产中应用到风机无功控制的更少。

2.3 计及大规模新能源的在线安全稳定预警与控制决策

在线安全稳定预警与控制决策作为智能调度系统的功能模块之一，近年来获得了广泛应用^[26-28]。随着大规模新能源的接入，需要在静态、暂态、动态安全稳定评估程序中加入风光静态与动态模型，对风电、光伏发电进行动态等值；将新能源电站加入候选控制措施集，计及新能源电站的涉网性能指标，并考虑执行周期内风电波动对于稳定性结果的影响。当前省调侧含新能源的中低压网络大多未建模，影响了安全稳定评估的准确度，需要综合利用SCADA信息、控制装置采集信息和典型离线方式数据，采用规划算法，实现含新能源中低压网络与主网的拼接，提升电网安全稳定评估的准确度。国网电力科学研究院提出超短期风功率预测应用于在线安全稳定预警系统的方法，指出了应用于在线安全稳定预警系统的超短期风功率预测在时间和空间上需要满足的技术条件^[29]。

随着大规模新能源的接入，电网运行状态的不确定性增加和可预测性降低，传统的根据确定性的准则进行电网运行控制，难以妥善协调电网运行的安全性与经济性，需要在在线安全稳定综合防御技术工程应用的基础上开展电网运行安全风险在线评估^[30]。

2.4 新能源与常规电源的协调控制

针对新能源与常规电源的协调，早期研究一般

以新能源出力最大化为目标，然而随着新能源并网规模的不断增加，人们发现为了消纳新能源而增加的系统备用容量，特别是为适应新能源的波动性而导致火电机组的工作点偏离最佳煤耗点或不得不频繁启停机组，从而抵消了部分新能源的环保效益，极端情况下甚至适得其反^[31]。另外，在利益分配上，为了接纳更多的新能源，火电机组频繁调整出力和启停状态，在一定程度上损害了火电机组的利益，如果缺乏合理的利润分配方案或者经济补偿方案，火电机组将失去参加协调控制的意愿^[32]。由此可见，新能源与常规电源的协调控制目标不应是单一的新能源出力最大化，还应综合其他因素。清华大学研究指出优先调度风电但允许少量弃风将显著提高中国风火互济系统整体效益，该模式优于全额接纳风电的模式^[33]。华北电力大学提出发电总成本最小、污染气体排放量最少和运行风险最小这三个协调控制目标之间存在一定的冲突，需要在三个目标之间进行协调权衡，选取最合适的控制方案^[34]；同时，吉林省电网的实践和清华大学的研究表明，针对风功率误差随时间尺度缩短不断减少的特点，进一步考虑多时间尺度的风电和火电协调控制，可以将控制分为5个层次，分别为机组组合确定、日前计划编制、滚动计划编制、实时计划编制和实时调度控制，逐级消除风力发电预测偏差，解决未来7d、日前、日内风电有功出力和燃煤火电机组的协调控制问题^[35]。

中国风资源与负荷中心逆向分布的特点客观上形成了含集群风电的多电源联运源端系统，其中最典型的是风火联运源端系统，针对这一情况，清华大学在最新研究中提出在调度中心和源端发电单元之间建立有功优化运行层，对局部分散的风电场和火电机组进行协调控制，从而提高源端电力的控制灵活性，充分利用消纳空间以提高风电利用率，并指出异特性多类型机组联运的控制复杂性问题、强刚性风火联运源端系统应对新能源发电波动性难题是实现源端系统有功优化运行的关键难题^[36]。

2.5 新能源与储能的协调控制

新能源出力的随机性和不确定性，且目前功率预测精度不高，使得新能源难以像常规电源那样参与电网调度控制，这也制约着新能源的发展。近年来，储能技术的快速发展为解决大规模新能源并网问题提供了新的思路。目前，储能在新能源并网中的研究集中在平滑新能源出力、抑制新能源爬坡率、计划跟踪、调峰、调频、大规模新能源与储能联合发电系统的广域协调控制等几个方面。

近年来，高等院校、科研院所和电力公司对储

能在新能源并网中的应用做了一些有益的探索和尝试:有研究提出利用超级电容和蓄电池组成的混合储能来分别抑制新能源输出功率不同周期的波动^[37-38];通过对风电场出力数据进行统计分析,得到风电出力的时域分布规律,利用储能平滑风电出力的控制策略^[39];考虑未来风电功率波动对储能冲放电行为的影响,提出一种超前控制策略,对风电功率的短期波动有很好的平滑效果^[40];还有研究提出利用风储联合发电系统优化控制抑制风电爬坡率,以满足国家风电并网标准中规定的风电有功功率变化^[41]。此外,在大规模新能源与储能联合发电系统的广域协调控制方面,有的提出一种计及风险约束的风储广域协调调度策略,实现风电、储能、常规机组的广域协调^[42];有的设计出一种分散控制为主、协调控制为辅的控制模式^[43]。

由于经济性问题,储能尚未在电力系统中大规模应用,目前投入运行的主要在国家张北风光储输电示范工程^[44],储能控制具备平滑风光出力、消峰填谷、跟踪计划发电、参与系统调频四种功能,这为大规模储能在新能源并网领域的推广提供了一定的借鉴。

3 大规模新能源并网运行协调控制技术下一步的研究工作

上述大规模新能源并网协调控制技术的研究成果,从具体的应用实践来看,对消纳大规模新能源起到了非常积极有效的作用。为进一步提升消纳能力,还需要进一步开展以下几个方面的研究工作。

3.1 高载能负荷参与协调控制

针对大规模新能源迅速发展和电网消纳能力不足的突出矛盾,利用接入电网的大容量高载能负荷所具有的调节能力,研究高载能负荷参与协调控制,依据新能源的波动特性、常规电源、电网和高载能负荷的调节特性,将新能源出力波动分解到不同时间尺度进行控制。高载能负荷参与协调控制是在“网-源”、“源-源”协调控制基础上进一步提高新能源消纳能力的一种新的解决途径,对促进大规模新能源的发展具有重要的意义。

3.2 计及大规模新能源的交直流混联实时调峰控制

随着特高压交直流建设的推进^[45-46],新能源的跨区送出和消纳成为可能,需要研究含大规模新能源的交直流混联实时调峰控制。以交直流混联通道的在线输电能力作为安全稳定约束条件,以新能源电站并网有功功率限制量、可中断负荷限制量、AGC机组有功调整量,以及与联合调峰控制量相关的网损等加权值之和为目标函数,将交直流混合电

网作为一个整体,统一配置有功备用、充分利用交直流混合电网大范围优化调控发电资源的能力,提高新能源接纳水平。

3.3 新能源在线评估考核

为了更好地对大规模新能源进行协调控制,需要对新能源涉网性能和对电网的安全稳定性进行在线评估,并根据在线评估结果,实时更新大规模新能源协调控制措施。在线评估考核指标应至少包含功率预测精度指标、调节性能指标和控制性能代价比指标。

3.4 新能源场站综合控制系统

新能源场站功率控制系统是大规模新能源协调控制的执行单元,其控制性能直接影响大规模新能源协调控制是否能够达到预期目标。遗憾的是目前运行的新能源场站功率控制系统性能往往难以达到预期,尤其是风电场功率控制系统,有功限功率控制时常越限,无功电压控制时风机一般不参与,这些都影响电网接纳新能源的能力。因此,迫切需提升新能源场站的控制能力,建议从如下两个方面开展工作:一是进一步加强风电场功率控制系统的研究和应用,提升其性能,同时改变风电场功率控制系统由风机制造企业垄断的局面,促进其技术进步;二是研究新型的新能源场站控制装置并推广应用,该装置应实现新能源场站有功控制、无功电压控制、安全稳定控制的一体化,一方面解决新能源接入电网的安全稳定紧急控制问题,另一方面作为新能源场站功率控制系统的补充,与新能源场站功率控制系统协调配合,共同组成新能源场站的综合控制系统,从而提高新能源场站的控制性能。

3.5 大规模新能源集中接入的无功电压紧急协调控制

新能源机组高电压穿越能力不足、无功补偿设备性能参差不齐并且缺乏协调、新能源所接电网薄弱等一系列因素导致大规模新能源接入地区暂态电压安全问题突出,容易诱发大规模连锁脱网事故。如何对电压进行控制,防止连锁脱网事故是近几年研究热点之一。现有研究大多从事前预防控制和单一设备紧急控制的角度开展,还需要加强紧急情况下多个无功源之间的协调控制技术研究,并且构建无功电压紧急控制系统。

4 结语

大规模间歇性新能源并网运行协调控制从技术上有效缓解了新能源发电与电网消纳之间的矛盾。但随着新能源的快速发展,电网对新能源的消纳能力必须得到更加快速的提升,新能源并网控制技术

迫切需要更加深入地研究,并朝着智能化的方向发展,新能源场站业主、风机制造企业、无功补偿设备厂商、电网公司、科研院所和大专院校的科研人员还需要付出更多的努力。

参考文献

- [1] 李俊峰, 蔡丰波, 乔黎明, 等. 2014 年中国风电发展报告[R]. 北京: 中国循环经济协会可再生能源专业委员会, 2014: 30-34.
LI Jun-feng, CAI Feng-bo, QIAO Li-ming, et al. 2014 China wind power review and outlook[R]. Beijing: Chinese Renewable Energy Industries Association (CREIA), 2014: 30-34.
- [2] 李俊峰, 王斯成, 王勃华, 等. 2013 年中国光伏发展报告[R]. 北京: 中国资源综合利用协会可再生能源专业委员会 (CREIA), 2013: 28-36.
LI Jun-feng, WANG Si-cheng, WANG Bo-hua, et al. Annual review and outlook for China solar PV industry 2013[R]. Beijing: Chinese Renewable Energy Industries Association (CREIA), 2013: 28-36.
- [3] GBT 19964-2012 光伏电站接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [4] GB/T19963-2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [5] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
ZHANG Li-ying, YE Ting-lu, XIN Yao-zhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [6] 国家电力监管委员会. 风电、光伏发电情况监管报告[R]. 北京: 国家电力监管委员会, 2011.
- [7] 丁涛, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 抑制大规模连锁脱网的风电汇集区域电压预防控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 7-12.
DING Tao, GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, et al. A voltage control strategy for preventing cascading trips of large-scale wind power in centralized area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 7-12.
- [8] 叶希, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电机组连锁脱网事故机理初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 11-17.
YE Xi, LU Zong-xiang, QIAO Ying, et al. A primary analysis on mechanism of large scale cascading trip-off of wind turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 11-17.
- [9] 穆钢, 王健, 严干贵, 等. 双馈型风电机组近满载工况下连锁脱网事件分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 35-40.
MU Gang, WANG Jian, YAN Gan-gui, et al. Cascading trip-off of doubly-fed induction generators from grid at near full-load condition in a wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 35-40.
- [10] 范高锋, 赵海翔, 戴慧珠. 大规模风电对电力系统的影响和应对策略[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(7): 44-48.
FAN Gao-feng, ZHAO Hai-xiang, DAI Hui-zhu. The impact and countermeasure of large scale wind power on power system[J]. Power Systems and Clean Energy, 2008, 24(7): 44-48.
- [11] 于强, 孙华东, 汤涌, 等. 双馈风电机组接入对电力系统功角稳定性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3399-3405.
YU Qiang, SUN Hua-dong, TANG Yong, et al. Impact on angle stability of power system with doubly fed induction[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3399-3405.
- [12] 李雪明, 行舟, 陈振寰, 等. 大型集群风电有功智能控制系统设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 59-63.
LI Xue-ming, XING Zhou, CHEN Zhen-huan, et al. Design of large clusters of wind power active intelligent control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 59-63.
- [13] 行舟, 陈永华, 陈振寰, 等. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略: (一) 风电场之间的协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 20-23.
XING Zhou, CHEN Yong-hua, CHEN Zhen-huan, et al. A control strategy of active power intelligent control system for large cluster of wind farms part one coordination control for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 20-23.
- [14] 薛峰, 常康, 汪宁渤. 大规模间歇式能源发电并网集群协调控制框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 45-53.
XUE Feng, CHANG Kang, WANG Ning-bo. Coordinated control frame of large-scale intermittent power plant cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 45-53.
- [15] 张伯明, 吴文传, 郑太一, 等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 1-6.
ZHANG Bo-ming, WU Wen-chuan, ZHENG Tai-yi, et al. Design of a multi-time scale coordinated active power dispatching system for accommodating large scale wind power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 1-6.
- [16] 郑太一, 冯利民, 王绍然, 等. 一种计及电网安全约束的风电优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 71-74.
ZHENG Tai-yi, FENG Li-min, WANG Shao-ran, et al. An optimized wind power dispatching method considering security constraints in the power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 71-74.
- [17] 赵利刚, 房大中, 孔祥玉, 等. 综合利用 SVC 和风力发电机的风电场无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 45-50.
ZHAO Li-gang, FANG Da-zhong, KONG Xiang-yu, et al. A strategy of reactive power control for wind farm

- operation using SVC and DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 45-50.
- [18] 栗然, 唐凡, 刘英培, 等. 双馈式风电场改进的恒电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 79-85. LI Ran, TANG Fan, LIU Ying-pei, et al. Improved constant voltage control strategy of DFIG based wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 79-85.
- [19] 乔颖, 陈惠粉, 鲁宗相, 等. 双馈风电场自动电压控制系统设计及应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 15-22. QIAO Ying, CHEN Hui-fen, LU Zong-xiang, et al. Design and application of automatic voltage control system in doubly-fed induction generator wind farms[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 15-22.
- [20] 李东东, 王凯凯, 叶辰升. 采用双馈机组的风电场无功功率控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 37-42. LI Dong-dong, WANG Kai-kai, YE Chen-sheng. Reactive power control research of wind farm adopting doubly-fed induction generators[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 37-42.
- [21] 陈宁, 何维国, 钱敏慧, 等. 风电场无功电压控制系统设计和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 32-36. CHEN Ning, HE Wei-guo, QIAN Min-hui, et al. Design and application of reactive power control system for wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 32-36.
- [22] 陈惠粉, 乔颖, 鲁宗相, 等. 风电场群的无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 78-83. CHEN Hui-fen, QIAO Ying, LU Zong-xiang, et al. Study on reactive power and voltage coordinated control strategy of wind farm group[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 78-83.
- [23] 陈惠粉, 张毅威, 闵勇, 等. 集群双馈风电场的分次调压控制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 7-13. CHEN Hui-fen, ZHANG Yi-wei, MIN Yong, et al. Graded voltage control strategy for clustering wind farms based on doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 7-13.
- [24] 陈惠粉, 乔颖, 闵勇, 等. 风电场动静态无功补偿协调控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 248-254. CHEN Hui-fen, QIAO Ying, MIN Yong, et al. Study on coordinated control strategy of dynamic and static reactive compensation in wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 248-254.
- [25] 王洪涛, 刘雪芳, 俞志皓, 等. 含风电场群的区域电网两层多阶段电压协调控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 1-7. WANG Hong-tao, LIU Xue-fang, YUN Zhi-hao, et al. Two-tier and multi-stage voltage coordination control method for regional power grid with wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 1-7.
- [26] 李碧君, 许剑冰, 徐泰山, 等. 大电网安全稳定综合协调防御的工程应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 25-30. LI Bi-jun, XU Jian-bing, XU Tai-shan, et al. Engineering application of integrated and coordinated defense technology of large power system security and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 25-30.
- [27] 徐泰山, 薛禹胜, 李碧君, 等. 暂态稳定在线预警故障集的自适应筛选[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 1-4. XU Tai-shan, XUE Yu-sheng, LI Bi-jun, et al. On-line adaptive contingency screening for early-warning of transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 1-4.
- [28] 王昊昊, 徐泰山, 李碧君, 等. 自适应自然环境的电网安全稳定协调防御系统的应用设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 143-151. WANG Hao-hao, XU Tai-shan, LI Bi-jun, et al. Design of coordinated prevention system in self-adapting natural environment for safety and stability of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 143-151.
- [29] 常康, 丁茂生, 薛峰, 等. 超短期风电功率预测及其在安全稳定预警系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 19-24, 30. CHANG Kang, DING Mao-sheng, XUE Feng, et al. Ultra-short-term wind power prediction and its application in early-warning system of power systems security and stability[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 19-24, 30.
- [30] 李碧君, 方勇杰, 徐泰山. 关于电网运行安全风险在线评估的评述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 171-177. LI Bi-jun, FANG Yong-jie, XU Tai-shan. Review on online operational security risk assessment of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 171-177.
- [31] 王彩霞, 乔颖, 鲁宗相. 考虑风电效益的风火互济系统旋转备用确定方式[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 16-21. WANG Cai-xia, QIAO Ying, LU Zong-xiang. A method for determination of spinning reserve in wind-thermal power systems considering wind power benefits[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 16-21.
- [32] 谭忠富, 宋艺航, 张会娟, 等. 大规模风电与火电联合外送体系及其利润分配模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 63-70. TAN Zhong-fu, SONG Yi-hang, ZHANG Hui-juan, et al. Joint delivery system of large-scale wind power and thermal power generation and its profit distribution model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 63-70.
- [33] 王彩霞, 乔颖, 鲁宗相, 等. 低碳经济下风火互济系统日前发电计划模式分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 111-117.

- WANG Cai-xia, QIAO Ying, LU Zong-xiang, et al. Day-ahead dispatch mode for wind-thermal power system in low-carbon economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 111-117.
- [34] 卢锦玲, 苗雨阳, 张成相, 等. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 25-31.
- LU Jin-ling, MIAO Yu-yang, ZHANG Cheng-xiang, et al. Power system optimal dispatch considering wind farms based on improved multi-objective particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 25-31.
- [35] 郑太一, 范国英, 孙勇, 等. 大规模风电接入电网多目标电源的协调控制[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3091-3095.
- ZHENG Tai-yi, FAN Guo-ying, SUN Yong, et al. A coordinated control strategy for multiple power sources under grid-integration of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3091-3095.
- [36] 叶希, 鲁宗相, 乔颖, 等. 风火联运源端系统有功优化运行多时空尺度分层协调思路[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 7-14.
- YE Xi, LU Zong-xiang, QIAO Ying, et al. The hierarchical coordinating idea of wind and thermal power bundling transmitter system over multiple spatial and temporal scales[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 7-14.
- [37] 张冰冰, 邱晓燕, 刘念, 等. 基于混合储能的光伏波动功率平抑方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 103-109.
- ZHANG Bing-bing, QIU Xiao-yan, LIU Nian, et al. Research on the method for balancing fluctuant PV power based on hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 103-109.
- [38] 刘霞, 江全元. 风光储混合系统的协调优化控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 95-100.
- LIU Xia, JIANG Quan-yuan. An optimal coordination control of hybrid wind/photovoltaic/energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 95-100.
- [39] 袁铁江, 陈洁, 刘沛汉, 等. 储能系统改善大规模风电场出力波动的策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 47-53.
- YUAN Tie-jiang, CHEN Jie, LIU Pei-han, et al. Strategy of improving large-scale wind farm output fluctuation based on energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 47-53.
- [40] 娄素华, 吴耀武, 崔艳昭, 等. 电池储能平抑短期风电功率波动运行策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 17-22.
- LOU Su-hua, WU Yao-wu, CUI Yan-zhao, et al. Operation strategy of battery energy storage system for smoothing short term wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 17-22.
- [41] 王颖, 张凯锋, 付嘉渝, 等. 抑制风电爬坡率的风储联合优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 17-23.
- WANG Ying, ZHANG Kai-feng, FU Jia-yu, et al. Optimization control method of wind/storage system for suppressing wind power ramp rate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 17-23.
- [42] 黄杨, 胡伟, 闵勇, 等. 计及风险备用的大规模风储联合系统广域协调调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 41-47.
- HUANG Yang, HU Wei, MIN Yong, et al. Risk-constrained coordinative dispatching for large-scale wind-storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 41-47.
- [43] 陆秋瑜, 胡伟, 闵勇, 等. 集群风储联合系统广域协调优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3132-3140.
- LU Qiu-yu, HU Wei, MIN Yong, et al. Wide-area coordinated optimization control of cluster wind-ess integrated systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3132-3140.
- [44] 高明杰, 惠东, 高宗和, 等. 国家风光储输电示范工程介绍及其典型运行模式分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 59-64.
- GAO Ming-jie, HUI Dong, GAO Zong-he, et al. Presentation of national wind/photovoltaic/energy storage and transmission demonstration project and analysis of typical operation modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 59-64.
- [45] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 90-122.
- LIU Zhen-ya. Ultra-high voltage AC & DC GRID[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [46] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
- LIU Zhen-ya, ZHANG Qi-ping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.

收稿日期: 2014-06-09

作者简介:

罗剑波(1963-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制、新能源并网控制等。
E-mail: luojianbo@sgepri.sgcc.com.cn

陈永华(1979-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制、新能源并网控制等;

刘强(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制、新能源并网控制等。