

LVRT 控制策略及风电场继电保护研究综述

钟 显¹ 樊艳芳¹ 常喜强² 魏 威³ 苏洪兴⁴

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 国网新疆电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830006;

3. 国网新疆乌鲁木齐电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;

4. 国网湖南新晃电力有限责任公司, 湖南 怀化 419200)

摘要: 对当前国内外风电系统 LVRT 控制策略及风电场继电保护问题进行了综述。首先分析不同类型风电机组的 LVRT 控制策略, 讨论其对保护的影响, 其次分析了风电机组和风电场的故障特征, 最后讨论了风电场内集电线路、风电场送出线路的故障特征和相应的保护策略。针对传统风电场继电保护的适应性问题, 建议构建满足风电机组本体保护条件和风电并网技术要求, 并兼顾各类风电机组 LVRT 实现方式和附加硬件结构的风电机组 LVRT 协调控制策略, 进一步在该协调控制策略作用下进行风电场的继电保护研究, 开发适用于风电场集电线路、送出线路保护新原理与新技术, 解决风电场继电保护面对的问题。

关键词: LVRT; 风电场; 继电保护; 协调控制策略; 集电线; 送出线

Abstract: The current LVRT control strategy and relay protection of wind farms at home and abroad are summarized. Firstly, the LVRT control strategies for different types of wind turbines are analyzed, and their impacts on the protection are discussed. Secondly, the fault characteristics of wind turbines and wind farms are analyzed. Finally, the fault characteristics of collecting power lines in wind farms and outgoing lines of wind farms are also discussed as well as the corresponding protection strategies. Aiming at the suitability of traditional relay protection for wind farms, it is suggested to construct a coordinated control strategy which not only considers WTG body protection condition and wind power technology requirements, but also gives a consideration to the means of LVRT realization and additional hardware structure of various types of wind turbines. And then, the research goes further into the relay protection of wind farms under the proposed coordinated control strategy, and it will develop the new applicable principles and technologies for collecting power lines and outgoing lines of wind farms, which can effectively solve the relay protection problems faced by wind farms.

Key words: LVRT; wind farm; relay protection; coordinated control strategy; collector wires; outgoing line

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0014-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.004

0 引言

继电保护是电网安全稳定运行的第一道防线,能够在故障发生时快速可靠地识别并有效地隔离故障,对遏制系统运行状况的进一步恶化,保障电能高效稳定的传输和利用都具有重要的意义。近年来,中国风电发展迅速,其装机规模已达到世界第一,不同于欧洲分散式风电发展模式,中国风电发展具有集群开发、弱电网接入、长距离外送的特点。其大规模应用,必然带来集中接入、远距离传输以及风电场

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51467019)

内部集电线路网络化等问题,从而改变电力系统的运行特征。

风机具备低电压穿越(low-voltage ride through, 简称 LVRT)能力是《风电场接入电力系统技术规定》要求, LVRT 控制策略作用下风电接入系统的继电保护问题属于智能电网的兼容性范畴。对接入点而言,规模化的风电场对系统运行的影响,已不能象早期小型风电接入一样被完全忽略掉,这已不仅仅是风电调度的问题,继电保护所面临的故障特征同样也发生了显著的变化。同时,大型风电场内部的机组和机群越来越多地采用 35 kV 电压等级以网络的形式汇集电能,传统的配电网保护原理和装置能否满足风电场内部集电线路的要求以及风电场送出

线传统保护的适应性,也是必须给予重要关注考虑的问题。

从风电系统继电保护面对的问题、风电机组 LVRT 控制策略、风电场的故障特征、风电场集电线路与风电场送出线路的继电保护 4 个方面,对目前国内外的相关研究热点及成果进行了回顾和分析,并提出 LVRT 控制策略下的风电场继电保护研究,以期能对风电场的相关继电保护问题研究有所助益。

1 风电系统继电保护问题的提出

风电不同于常规能源,随机性、波动性很大,运行方式多变,目前大规模集群风电的并网运行,给系统的安全稳定运行、风电接入系统的保护配置带来巨大挑战。为保护风电场及其接入系统的安全稳定运行,风电机组本体、风电场集电线路、风电场送出线、集群风电场送出线都将必须结合风电特性配置保护。

前期调研结果发现,中国风电机组、风电场及其接入系统的保护整定配置方面存在配置不合理,各部分保护配合不协调等问题。主要表现为电网继电保护以“维护系统稳定”为目标,要求风电场按照国标 GB/T 19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》执行:电力系统发生不同类型故障,风电场并网电压跌至 20% 标称电压时,风电场内的风电机组应保证不脱网连续运行 625 ms。并且要求风电场在 LVRT 过程中提供无功功率(电压)支撑,其动态响应时间不大于 75 ms,持续时间应不少于 550 ms。而风机本体电气量保护以“保护风机”为目标,二者之间存在一定的矛盾。当电网发生故障造成电压跌落时,风机本体保护以保护风机为目标采取切除风机的简单作法,以及风电场集电线路、风电场/群送出线的保护由于在整定配置时对风电运行特性及其对保护的影响考虑较少,有可能误动或拒动,会导致大量风电机组脱网,严重影响电网电压和频率的稳定,造成短时间内局部电网指标大幅波动,带来系统稳定问题。近年来中国甘肃酒泉、新疆等风电基地多次发生的因电网小故障造成大面积风机集中脱网事故,直接威胁到电网整体安全稳定运行案例,也说明了风电保护存在的问题。

2 风电场 LVRT 控制策略研究现状

电网电压跌落与恢复时,不同类型风电机组的 LVRT 实现方式不尽相同^[1]。电网电压跌落期间,电磁转矩降低造成定速异步风电机组转速不断增加,因而定速异步风电机组 LVRT 的最简单方法是利用快速变桨减小输入机械转矩,限制转速上升^[2]。在附加硬件方面,异步风电机组利用串联制动电阻(SDBR)^[3]、串联动态电压恢复器(DVR)^[4]、改进型功率逆变方案^[5]等来提高 LVRT 能力。双馈风电机组具有特殊的结构和运行控制方式,在电压跌落期间双馈风电机组的暂态过程更加复杂,威胁也更大。其 LVRT 不仅需要解决功率不平衡引起的直流母线电压的突增,还要避免转子过电流损坏电力电子器件以及抑制电磁转矩衰减导致的转速上升。目前双馈风电机组 LVRT 的典型实现方案主要包括^[6-10]:转子 Crowbar 保护、直流母线电压控制、定子电压动态补偿、短暂中断的控制策略等。电压跌落时永磁直驱风电机组的主要问题是输出功率不平衡引起的直流母线电压上升,可通过储存或消耗多余能量的方法解决功率平衡问题来抑制冲击电压^[11-12]。还有直驱风电机组通过减小机侧换流器输入功率^[13-14]、增大网侧换流器输出功率能力^[27]等方案来提高 LVRT 能力。

研究风电机组 LVRT,还必须考虑风电机组本体保护配合和无功功率控制策略与 LVRT 之间的关系。文献[15]指出风电机组本体保护配置不协调对风电机组的 LVRT 将产生直接的影响,当系统或者相邻风电场内部发生故障时,在系统保护或相邻风电场内部保护动作切除故障之前,风电机组已经脱网,无法实现保护的选择性,但是具体怎样整定没有讨论。文献[16]分析了某风电场风电机组现有的电压越限保护和频率越限保护与国标规定的风电并网运行要求不协调,电网故障时会导致风机本体保护先动作,造成风机大量脱网并引发系统连锁故障。由此可见风电机组具备 LVRT 能力后,需要在兼顾风电机组自身保护和 LVRT 并网要求前提下,合理有效地进行风电机组本体保护配置。文献[17-18]研究指出风电场加装动态无功补偿装置,能有效帮助风电机组在故障后恢复电压,帮助风电机组提高 LVRT 能力。文献[19]在此基础上仿真分

析了安装在双馈风电机组出口升压变压器高压侧的 SVC 在风电机组故障穿越期间,能够提高风电机组的出口电压,并增大向系统提供的短路电流,显然 SVC 作用不能忽略。

分析可见:目前文献研究的主要是如何实现各类型风电机组的 LVRT,而对 LVRT 控制策略对风电系统故障特征的影响缺乏深入的研究。显然风电机组 LVRT 使得在电力系统故障分析中计及风电机组的故障输出变得更加重要,并且为了实现 LVRT 所采用的附加硬件及控制会造成故障期间风电机组暂态特性发生变化,使得风电接入系统的故障分析变得更加困难。

3 风电机组和风电场的故障特征分析

对于继电保护尤其是快速动作的主保护而言,主要关注风电机组提供短路电流的能力。另外,由于距离保护等保护的能与系统的等效正负序阻抗密切相关,风电机组和风电场的等效正负序阻抗特征也应该得到足够的重视。

文献[20-21]分别根据磁链平衡方程和频域分析法理论推导得出了双馈发电机的短路电流计算公式,但未考虑 Crowbar 保护电路对短路电流的影响。文献[22-23]通过电磁暂态仿真软件研究了双馈型发电机 Crowbar 保护发挥作用后短路电流强制分量和自由分量的衰减规律,其结论与理论分析结果吻合。文献[24-25]所关注的问题并不是双馈风电机组的短路电流,研究了不平衡电压和电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程,但 LVRT 功能的设计以及电压跌落情况下双馈发电机的性能研究对故障特征的分析具有一定的参考作用。

永磁直驱同步发电机短路电流相关研究比较少,文献[26]通过仿真分析发现采用全功率变频器的直驱式风电机组在三相对称短路故障情况下,变频器可以实现故障的有效隔离,其注入电网的短路电流是可以控制的。文献[27]认为短路电流可以按照不超过并网换流器额定电流来考虑。文献[28-31]是在进行永磁直驱同步发电机 LVRT 控制研究时,给出了电网故障时的仿真波形。经过比较发现,电网故障后的短路电流随着不同风电机组采用不同的控制策略而具有明显的不同,这也给继电保

护的整定带来了巨大的障碍。

以上分析可见:双馈和直驱风电机组的 LVRT 控制策略将直接影响机组故障特征,目前 Crowbar 保护已得到充分的考虑,但是故障情况下变流器限流限压控制环节、不对称故障时消除负序分量影响、风电机组发无功控制、风电场动态无功补偿装置影响等 LVRT 综合控制策略考虑不够充分,具有 LVRT 能力风电机组故障特征研究缺乏深入,尤其是永磁直驱风电机组故障特征并未得到充分研究。

4 风电场继电保护研究

大规模风电场内部以及机群之间广泛采用 35 kV 电压等级组成集电网络,通过风电场送出线路直接与并网点相连接。集电网络与配电网具有相同的网络结构,但针对辐射型配电网设计的继电保护直接应用于风电场集电网络保护时会存在适应性问题,对于风电场送出线路传统保护的适应性也值得进一步探讨。

4.1 风电场集电线路保护

文献[32-33]论述了对于快速动作的保护必须考虑潮流反向的影响而在必要时装设方向式过流保护,在其整定时也必须考虑风电场馈出的短路电流。文献[34]指出风电场接入辐射型配电网,会造成接入母线的下一级输电线路电流速断保护范围增大,从而使得保护造成失去选择性,同时也会造成该母线上一级输电线路定时限电流速断保护范围缩小。文献[35]利用继电保护测试设备和实际的继电保护装置,仿真研究了过电流保护受风电场影响的情况。由于感应电机故障之后仅能提供短时故障电流,反时限过电流保护可能因为故障电流的衰减而不能正确动作。文献[36-37]提出了能够自适应故障类型、短路电流水平以及风电出力的自适应保护,通过自适应保护动作时间来保证隔离故障以及风电场的可靠稳定运行。

风电场 35 kV 集电系统由于采用中性点不接地或经消弧线圈接地,未配或所配的小电流选线装置选线正确率低,无法及时发现单相接地隐患,容易导致故障扩大化。文献[38]建议优先选用性能优异的行波选线装置,并要求在选线告警的基础上增加选线跳闸功能。为了能够快速切除单相接地故障,风电场 35 kV 集电系统增设接地变压器,改造为小

电阻接地系统,需要进一步研究集电线路、接地变压器的零序电流保护配置和配合问题。

4.2 风电场送出线路保护

为了单相重合闸以及距离保护判断故障相别等的需要,还需保护具备故障选相的能力。文献[39]对具备LVRT能力双馈式风电场送出线路保护进行动作性能测试,实验结果表明电流差动保护(分相稳态量差动和故障分量差动元件)均可正确判断区内外故障,但保护灵敏度降低;相量故障分量方向元件、正序方向元件和负序方向元件受风电接入影响很大;对称分量选相和相电流差突变量选相元件的故障相别判断出现错误。文献[40]分析了双馈式风电场由于送出线的保护安装处电压与电流主要频率分量不一致,导致基于工频傅氏算法的相量距离保护元件的动作性能受到严重影响,而基于解微分方程算法距离保护宜在风电场送出线路的距离保护中使用。文献[41]分析了异步发电机对送出线距离Ⅲ段保护动作特性的影响,指出根据保护安装处的电压和电流计算得到的异步发电机阻抗特性为负电阻和正电抗特性,由此在阻抗平面上其轨迹可能落入第2象限,从而降低了距离Ⅲ段保护的裕度。文献[42]针对中国西北大规模风电基地输送实际采用可控串补和可控电抗器,提出一种考虑风电波动性的基于综合阻抗的输电线路纵联保护新原理,仿真结果表明该原理具有较好的性能和对风电送出线保护的适用性。文献[43]提出一种大规模风电场送出线距离保护的自适应整定方法,根据测量电压、电流以及风电场开机情况,自适应地调整距离保护的整定值,从而消除风电场输出功率的波动性对并联网络线距离保护的影响。

综上所述可见:作为一种特殊的电源形式,风电对输电网继电保护具有一定的负面影响,或者说传统的继电保护原理并非都能够适应风电的接入。风电保护方面的研究大多针对单个风电场设备或单个风电场送出线展开研究,没有对大规模风电场、风电场群及接入系统的保护配置展开深入研究。风电场具备LVRT能力后其故障特征将发生很大变化,传统的继电保护设备在大规模风电接入电网系统中能否正确工作,尚无系统的分析研究。目前少数的研究也是针对双馈式风电场展开,对于直驱式风电场以及多种机型混合式风电场、风电场群现有保护的動作特性及配置配合关系需要进一步开展研究,并

对现有保护原理和目前已有研究的智能保护新原理在风电场保护中的适应性问题展开进一步探讨。

5 结论及展望

随着中国大规模风电的建设发展,未来电网中风电电源的比例将会进一步上升。从目前的研究现状看,对于大规模风电对继电保护的影响在国内外并没有一个统一的看法,LVRT控制策略作用下风电场继电保护研究相关工作也未系统地展开。需从以下几个方面来进一步展开研究工作:

1) LVRT协调控制策略研究。根据风电机组结构、无功控制方式研究风电机组本体保护与国标要求的LVRT相互关系机理,构建满足风电机组本体保护条件和风电并网技术要求并兼顾各类风电机组LVRT实现方式和附加硬件结构的风电机组LVRT综合协调控制策略。

2) LVRT协调控制策略作用下的风电机组故障特征研究是解决继电保护问题的基础。就现状看,集中于不同类型风机的LVRT控制策略研究,但没有对附加控制——LVRT协调控制策略对风电系统故障特征的影响开展深入的研究。

3) LVRT协调控制策略作用下风电场集电线路、送出线路保护原理的应用开发。在不同的LVRT控制策略下风电故障特征将发生很大变化,传统的继电保护设备在大规模风电接入电网系统中能否正确工作,尚无系统的分析研究。

因此,为满足风电并网技术规程,提高风电系统稳定运行能力,LVRT协调控制策略作用下风电场继电保护研究显得尤为重要。

参考文献

- [1] 张兴,张龙云,杨淑英,等.风力发电低电压穿越技术综述[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(2):1-8.
- [2] Abbey C, Joos G. Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage Stability [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, USA, 2005.
- [3] Andrew C, David J A, Alan J. Fault Ride-through of Large Wind Farms Using Series Dynamic Braking Resistors [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 966-975.

- [4] Ananthababu P, Trinadha B, Ramcharan K. Performance of Dynamic Voltage Restorer (DVR) against Voltage Sags and Swells Using Space Vector PWM Technique [C]. International Conference on Advances in Computing Control and Telecommunication Technologies, Karnataka, IEEE, 2009: 206 - 210.
- [5] 张元栋, 秦世耀, 李庆, 等. 笼型异步风电机组低电压穿越改造方案的比较研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(1): 235 - 241.
- [6] Niiranen J. Voltage Dip Ride Through of a Doubly-fed Generator Equipped with an Active Crowbar [C]. Proceedings of Nordic Wind Power Conference, Sweden, 2004.
- [7] 李建林, 赵栋利, 李亚西, 等. 适合于变速恒频双馈感应发电机的 Crowbar 对比分析 [J]. 可再生能源, 2006(5): 57 - 60.
- [8] Janos Rajda, Anthony William Galbraith, Colin David Schauder. Device, System and Method for Providing a Low-voltage Fault Ride-through for a Wind Generator Farm. United States, US.
- [9] 贺益康, 何鸣明, 赵仁德, 等. 双馈风力发电机交流励磁用变频电源拓扑浅析 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 105 - 112.
- [10] Petersson A, Lundberg S, Thiringer T. A DFIG Wind Turbine Ride-through System: Influence on the Energy Production [J]. Wind Energy 2005 8(3): 251 - 263.
- [11] Haque M E, Negnevitsky M, Muttaqi K M. A Novel Control Strategy for a Variable-speed Wind Turbine with a Permanent-magnet Synchronous Generator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(1): 331 - 339.
- [12] Abbey G, Joos G. Super Capacitor Energy Storage for Wind Energy Applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 769 - 776.
- [13] Yang Xiaoping, Duan Xianfeng, Feng Fan, et al. Low Voltage Ride-through of Directly Driven Wind Turbine With Permanent Magnet Synchronous Generator [C]. Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, China, 2009: 1 - 5.
- [14] Abedini A, Nasiri A. PMSG Wind Turbine Performance Analysis During Short Circuit Faults [C]. IEEE Canada Electrical Power Conference. Montreal, Canada, IEEE, 2007: 160 - 165.
- [15] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 具有低电压穿越能力的风
- 电接入电力系统继电保护的配合 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 1 - 7.
- [16] 毕天姝, 李彦宾, 马丽红, 等. 风场及其送出线保护配置与整定研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 45 - 50.
- [17] Molinas M, Jon Are Suul. Low Voltage Ride Through of Wind Farms with Cage Generators: STATCOM versus SVC [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1104 - 1117.
- [18] 陈伟伟, 李凤婷, 张玉, 等. 风电 T 接双电源系统对距离保护的影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 108 - 114.
- [19] 熊小伏, 张涵轶, 欧阳金鑫. 含 SVC 双馈风电机组暂态输出特计算模型 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 38 - 43.
- [20] 石一辉, 鲁宗相, 闵勇, 等. 双馈感应发电机三相短路电流解析系统继电保护的配合 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 1 - 7.
- [21] Vicatos M S, Tegopoulos J A. Transient State Analysis of a Doubly-fed Induction Generator Under Three Phase Short Circuit [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, 6(1): 62 - 68.
- [22] 关宏亮, 赵海翔, 刘燕华, 等. 风力发电机组对称短路特性分析 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 61 - 64.
- [23] Kawady T, Feltes C, Erlich I, et al. Protection System Behavior of DFIG Based Wind Farms for Grid-faults with Practical Considerations [C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1 - 6.
- [24] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 85 - 91.
- [25] 胡家兵, 贺益康, 郭晓明, 等. 不平衡电压下双馈异步风力发电系统的建模与控制 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 47 - 56.
- [26] 栗然, 高起山, 刘伟. 直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性 [J]. 电网技术, 2011, 35(10): 153 - 158.
- [27] Morren J, Pierik J T G, de Haan S W H. Voltage Dip Ride-through of Direct-driven Wind Turbines [C]. Proceedings of 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004: 934 - 938.
- [28] 赵紫龙, 吴维宁, 王伟. 电网不对称故障下直驱风电机组低电压穿越技术 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 87 - 91.

[29] 胡书举,李建林,许洪华. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 73-77.

[30] 姚俊,廖勇,庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 91-96.

[31] 蔺红,晁勤. 电网故障下直驱式风电机组建模与控制仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 189-195.

[32] 文玉玲. 风电场短路特性及对电网继电保护影响的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2009.

[33] 苏常胜,李凤婷,武宇平. 双馈风电机组短路特性及对保护整定的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 86-91.

[34] 杨国生,李欣,周泽昕. 风电场接入对配电网继电保护的影响与对策[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 87-91.

[35] Comech M P, Montanes M A, Garcia M G. Overcurrent Protection Behavior Before Wind Farm Contribution [C]. The 14th IEEE Mediterranean Electro technical Conference, MELECON, Acacia 2008: 762-767.

[36] Jang S I, Choi J H, Kim J W, et al. An Adaptive Relaying for the Protection of a Wind Farm Interconnected with Distribution Networks [C]. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, Dallas 2003: 296-302.

[37] 文玉玲,晁勤,吐尔逊·伊布拉音. 关于风电场适应性继电保护的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 47-51.

[38] 何世恩,董新洲. 大规模风电接入对继电保护的影响与

对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21-27.

[39] 张保会,王进,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(四)——风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 1-6.

[40] 张保会,张金华,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 1-6.

[41] 李生虎,贾树森,孙莎莎. 风电系统距离 III 段保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 31-35.

[42] 何世恩,索南加乐,杨铨,等. 适应于酒泉风电送出的 750kV 线路纵联保护原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 87-91.

[43] Pradhan A K, Joos G. Adaptive Distance Relay Setting for Lines Connecting Wind Farms [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 206-213.

[44] 樊艳芳,钟显,常喜强,等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.

作者简介:

钟显(1989), 硕士研究生, 主要研究方向为集群风电并网技术及其继电保护;

樊艳芳(1971), 副教授、硕士生导师, 主要研究方向为新能源并网技术及电力系统保护与控制研究;

常喜强(1976), 高级工程师, 主要从事电力系统分析与控制、调度自动研究;

魏威(1985), 学士, 主要从事电网调度与控制工作;

苏洪兴(1990), 学士, 主要从事电力系统继电保护工作。

(收稿日期: 2015-04-28)

(上接第9页)

[11] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[12] 颜伟,张海,兵田甜. 交直流系统的动态无功优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(29): 43-46.

[13] 陈树勇,逢博,陈得治,等. 新疆电网多送出直流输电系统运行特性分析[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 102-107.

[14] 樊艳芳,钟显,常喜强,等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.

作者简介:

常喜强(1976), 高级工程师, 从事电力系统分析与控制、调度运行控制工作;

樊艳芳(1971), 副教授、硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

张锋(1978), 高级工程师, 从事电力系统分析与控制、调度运行控制工作;

王衡(1984), 工程师, 从事电力系统分析与控制工作;

郑少鹏(1985), 工程师, 从事电力系统分析与控制工作;

魏威(1985), 学士, 主要从事电网调度与控制工作;

钟显(1989), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2015-06-24)