

• 新能源技术 •

风电经柔性直流输电系统接入电网研究综述^{*}

江 浩¹ 孙 瑜² 刘 辉¹ 吴林林¹ 王皓靖¹ 李蕴红¹ 徐海翔¹

(1. 国网冀北电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司) 北京 100045;

2. 国网冀北电力有限公司 北京 100053)

摘 要: 近年来,可再生能源特别是风电发展迅猛。对于距电网较远的风电场,经交流线路并网会引发并网点电压波动、故障穿越困难等技术问题。柔性直流输电(HVDC Flexible)为风电场,特别是距电网较远的风电场顺利接入系统提供了有力的支撑,因此越来越受到研究者的关注。文章总结了目前风电经柔性直流输电系统接入电网的相关文献,分双端和多端柔直两种拓扑,从控制策略、故障穿越和频率控制等方面展开综述。在此基础上,对现有研究进行了总结,并对未来可能的研究方向进行了展望。

关键词: 风电; 柔性直流输电; 多端柔直; 控制策略

中图分类号: TM721.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16308/j.cnki.issn1003-9171.2016.00.023

Literature Review of Wind Power Integrated into Power Systems With HVDC-Flexible

Jiang Hao¹ Sun Yu² Liu Hui¹ Wu Linlin¹ Wang Haojing¹ Li Yunhong¹ Xu Haixiang¹

(1. State Grid Jibei Electric Power Co. Ltd. Research Institute, North China Electric Power Research

Institute Co. Ltd., Beijing 100045, China;

2. State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100053, China)

Abstract: Renewable energy, especially wind energy, has developed rapidly in recent years. The integration of one wind farm located far away from the utility grid with AC transmission lines will cause the following problems, such as the voltage fluctuation of the point of common coupling (PCC) and the difficulty of fault ride-through (FRT). HVDC Flexible provides strong support for these wind farms. This paper summarizes related references about wind power integration through HVDC Flexible. The control strategies, FRT methods and frequency control methods are reviewed for both double-terminal and multi-terminal HVDC Flexible. Based on the existing research, this paper also proposes possible research and directions in the future.

Key words: wind power, HVDC Flexible, Multi-terminal HVDC Flexible, control strategy

0 引言

近年来,可再生能源特别是风电发展迅猛。风电接入电网的方式包括大规模、远距离集中式接入和分布式接入。然而对于距电网较远的风电场,经交流线路并网会引发并网点电压波动、故障穿越困难等技术问题。柔性直流输电(HVDC Flexible)为风电场,特别是距电网较远的风电场顺利接入系统提供了有力的支撑。与基于晶闸管的传统直流相比,柔性直流的优势包括

有功、无功的快速解耦控制,不需要额外的无功补偿设备以及可以为无源网络供电等,因此越来越受到研究者的关注^[1]。

目前中国已经建成了若干风电经柔性直流输电系统接入电网的具体工程,包括2011年投运的上海南汇柔直工程、2013年投运的广东南澳柔直工程、2014年投运的浙江舟山柔直工程等^[2]。从系统运行层面来看,由于柔直的控制更为灵活,因此与交流接入相比,风电经柔直系统接入电网时需要深入研究二者之间的配合及控制方法。

^{*} 国家电网公司科技项目(±500 kV 柔性直流电网快速恢复技术研究)

针对以上研究背景,本文总结了目前风电经柔性直流输电系统接入电网的相关文献,分双端和多端柔直两种拓扑,从控制策略、故障穿越和频率控制等方面展开综述。在此基础上,对现有研究进行了总结,并对未来可能的研究方向进行了展望。

1 风电经双端柔性直流系统接入电网

风电场经双端柔性直流系统接入电网的系统结构图如图 1 所示:

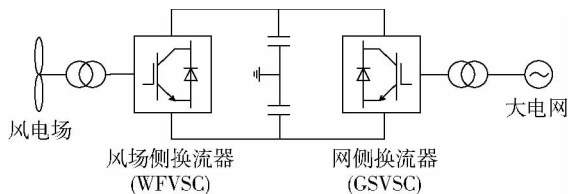


图 1 风电场经双端柔性直流系统接入电网的系统结构图

习惯上将图 1 中双端柔直系统的风场侧称为送端侧,电网侧称为受端侧;送受端的换流器分别称为风场侧换流器 (Wind Farm Voltage Source Converter, WFSVC) 和电网侧换流器 (Grid Side Voltage Source Converter, GFSVC)。下面从不同方面对风电经双端柔性直流系统接入电网的相关研究进行综述。

1.1 控制策略

柔直系统的 VSC 一般采用如图 2 所示的双闭环控制方法,由于柔直系统可以实现解耦控制,因此需要两个控制器以分别控制与有功/无功相关的物理量。根据不同的控制需求,柔直系统两端的 VSC 可以采取定直流电压/定有功功率、定交流电压/定无功功率等不同组合控制方式,控制更为灵活。

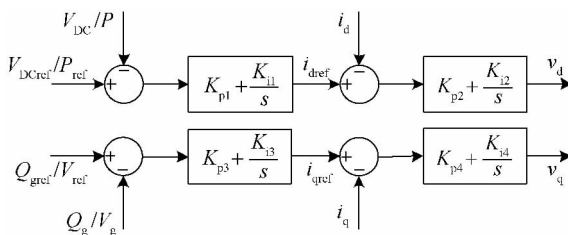


图 2 VSC 的双闭环控制框图

下面分别分析风电经双端柔性直流系统接入电网时电网侧和风场侧换流器的控制策略及与交流接入相比风电经柔直接入系统的优势。

1.1.1 电网侧换流器

由于柔直系统具有一定的无功支撑能力,因此柔直系统中 GSVSC 一般采用恒并网点交流电压+恒直流电压的控制方式,以提高系统静态和暂态电压稳定性。文献[3]指出,风电经交流线路接入系统时,风场有功出力的波动会导致并网点电压的波动;而经柔直接入系统时,可利用柔直的无功支撑能力减小并网点的电压波动,从而提高系统静态电压稳定性。文献[4]指出,当电网发生故障时,可以利用柔直系统为交流电压提供支撑,从而减小故障和恢复过程中交流电压的波动,提高系统暂态电压稳定性。

1.1.2 风场侧换流器

柔直系统中 WFSVC 一般采用恒交流电压幅值/相角的控制方式,目的是为风电提供稳定的交流电源。当风场侧和交流电网之间通过柔直系统连接时,柔直系统的隔离作用可以减轻电网侧扰动对风场的影响,同时还可以为风场侧提供一定的支撑。

文献[5]~[7]中均指出,风电场经交流线路并网情况下,当并网点附近发生短路时,会造成风电场侧电压降低,从而导致风机转子超速和电压振荡甚至发生失稳;而风电场经柔直系统并网情况下,当并网点附近发生短路时,柔直可以为风场提供无功支撑,从而避免风场侧由于电压过低出现风机转子超速或电压失稳,提高系统暂态稳定性。文献[8]中提出了一种电流环解耦控制的柔直控制策略,在风电场输出功率/本地负荷波动以及风场接入侧电阻参数变化情况下,均可保证风场侧电压稳定,进而保证风场具有良好的运行特性。

1.2 故障穿越

1.1.2 小节中提到,风电经柔直接入电网时,在并网点附近发生短路时,由于柔直的隔离作用,可以避免风场侧出现电压过低造成风机脱网。实际上,该情形下风机仍然发出有功,而由于并网点电压较低,柔直系统无法将有功全部送出,会导致柔直系统直流过压保护动作,影响整个系统的正常运行。为解决该问题,需要研究风电与柔直二者联合故障穿越方法。

目前风电与柔直联合故障穿越的控制方法主要包括降压法和升频法两类,两种控制策略均通过 WFSVC 实现,具体控制框图如图 3 和图 4

所示。

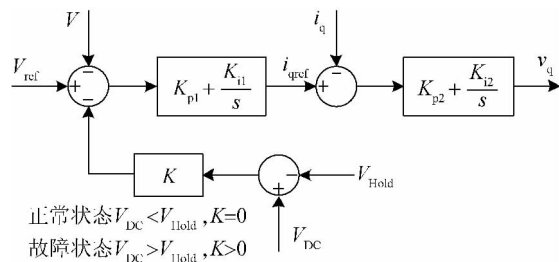


图3 WFVSC 降压法控制框图

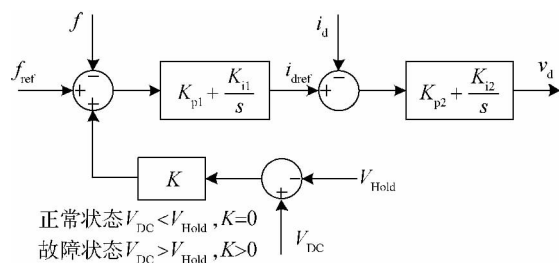


图4 WFVSC 升频法控制框图

文献[9]中利用降压法实现风电和柔直系统的联合故障穿越。当WFVSC检测到直流电压超过一定限值后,将减小风场侧交流电压幅值的参考值,从而降低风场侧交流电压。文献[9]中采用“可控去磁”控制方法以减轻交流侧电压骤降对风机轴系造成的影响。文献[10]则利用升频法实现联合故障穿越。当WFVSC检测到直流电压超过一定限值后,将增加风场侧交流电压频率的参考值,使风场侧频率升高。与此同时,风机在检测到风场侧频率超过一定限值后,将减小其有功功率参考值,从而降低输出的有功功率。

文献[11]提出利用模块化卸荷电路(Dynamic Braking Resistor, DBR)与降压法/升频法相结合的协调控制方法。该方法可以克服单纯使用DBR导致的成本高、占地大等问题,综合利用DBR及风场和柔直系统的控制能力,获得较为理想的故障穿越效果。文献[12]则分析了降压法/升频法对经柔直并入电网的异步风机和双馈风机的影响,当两种风电机组的低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)能力较强时,可采用降压法,而LVRT能力较弱时,可采用升频法,但对异步风机而言,需要提前确定频率变化量,对双馈风机则需要加强对转子变流器的保护。

1.3 频率控制

目前电网中的风机一般采用最大功率点跟

踪控制(Maximum Power Point Tracking, MPPT),因此在无附加控制情况下,风机不参与系统调频。

为使风机参与系统调频以提高系统频率稳定性,现有文献提出了多种类型的附加调频控制器(Ancillary Frequency Controller, AFC),包括惯性控制、下垂控制和阶跃控制等^[11],其中惯性控制和比例控制的控制框图如图5和图6所示。

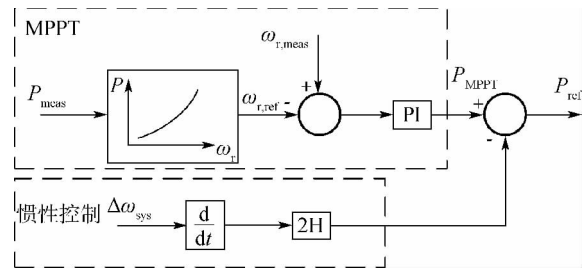


图5 风机惯性控制 AFC 控制框图

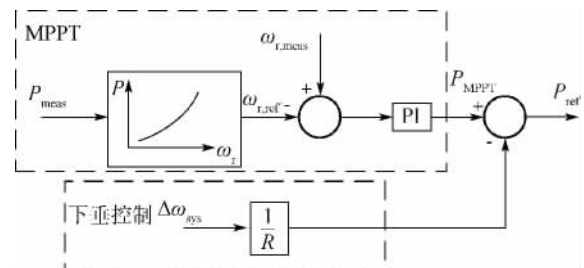


图6 风机下垂控制 AFC 控制框图

对于通过柔直接入电网的风电场,由于柔性直流的隔离作用,风机无法直接获得电网频率信息,因此无法判断何时应参与系统调频。文献[14]将电网侧频率信息利用通信传递至风电场,采用比例控制和下垂控制相结合的AFC使风机参与系统调频。同时,文献[14]中WFVSC采用定风场侧频率控制,频率参考信号为电网频率,因此当电网频率发生变化时,WFVSC也会同时调整风场侧频率,利用风机转子动能参与系统调频。

文献[14]提出的方法需要将电网侧频率信息传递至风电场,该通信过程存在时延且有可能出现故障,从而影响频率控制效果。为解决该问题,文献[15]提出了一种无需通信的控制方法,该方法利用直流电容电压 U_{DC} 传递系统频率信息。当电网频率变化时,GSVSC调整直流电容电压 U_{DC} 的值,感知到 U_{DC} 发生变化后,WFVSC改变风场侧频率,使风机参与系统调频,同时电容电

压的变化也可以为调频做出了一定贡献。文献[16]提出了模拟发电机惯性的VSC辅助调频控制器,不改变风场侧的频率,仅利用电容电压的变化参与系统调频。文献[17]同样利用直流电容电压 U_{DC} 传递电网侧频率信息,但与文献[15]不同,WFVSC并不根据 U_{DC} 改变风场侧频率,而是通过将 U_{DC} 的偏差作为附加信号,改变风电场的功率参考值,使其参与系统频率控制。文献[18]则综合了文献[15]~[17]的多种控制方法,提出了直流电容惯性控制、风场侧变频控制和风场侧功率控制三种控制相协调的控制方法。

2 风电经多端柔性直流系统接入电网

多端柔性直流输电(Multi-terminal HVDC Flexible)是指3个以上(含3个)换流站通过串、并或混联等方式连接起来的柔性直流输电系统^[17]。与双端柔直系统相比,多端柔直系统可以实现多点供电和受电,运行控制也更为灵活,因此得到广泛的关注。风电经由四端柔直接入系统的一种拓扑结构如图7所示:

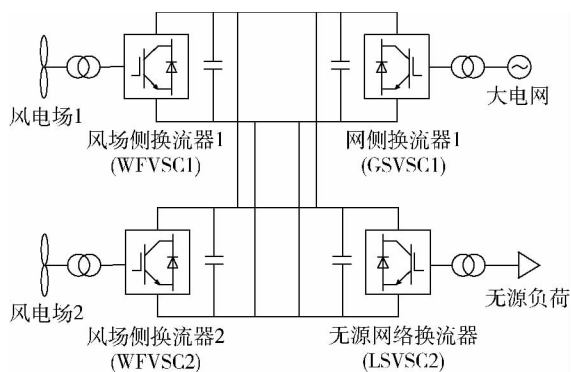


图7 风电经由四端柔直接入系统的一种拓扑结构

下面从不同方面对风电经多端柔性直流系统接入电网的相关研究进行综述。

2.1 控制策略

对多端柔直系统而言,直流侧电压的控制策略至关重要,这是由于柔直系统有功过剩/不足会造成直流侧电压升高/降低,进而影响柔直系统的正常运行。由于多端柔直连接的无源网络一般采用恒交流电压幅值/相角控制方式,为负荷提供稳定的电源,因此多端柔直的直流电压控制一般由大电网负责,有的控制策略也会利用风电场参与直流电压控制。根据直流电压控制策略的不同,可将多端柔性直流系统换流器的控制

策略分为:单换流站定直流电压控制、主从控制、下垂控制和集中式控制几类^[18],下面分别展开叙述。

2.1.1 单换流站定直流电压控制

文献[21]和文献[22]均采用单换流站定直流电压控制作为多端柔直系统的直流电压控制策略。该控制策略是指多端柔直系统其中的一个换流站采用定直流电压控制,其他换流站采取定有功或其他控制,不负责控制直流电压。该策略下采用定直流电压控制的换流站将负责整个多端柔直系统的有功平衡。由于风电场功率存在波动性和间歇性,因此一般选择与大电网相连的换流站应用定直流电压控制。该控制策略简单实用,但其缺点也很突出:如果定直流电压控制的换流站出现故障,则整个柔直系统将无法正常运行,系统可靠性较低。为克服该缺点,可采用主从控制实现直流侧电压控制。

2.1.2 主从控制

所谓主从控制,是指在多端柔直系统中选取一个换流站作为主控站控制直流电压,其他换流站中的一个或多个换流站作为从控站,在主控站退出时按照优先顺序负责直流电压的控制。文献[23]中选取与大电网相连的两个换流站采用主从控制策略:其中VSC1为主控站,正常运行时采用定直流电压控制;VSC2为从控站,正常运行时为定有功控制,当检测到直流电压超过允许范围后转为定直流电压控制。文献[24]采用的控制策略与文献[23]相同,该策略可以提高柔直系统的可靠性,同时各换流站之间无须通讯,利用直流电压信号自动转换控制模式。但需要区分主换流站故障和交流侧故障,以避免在交流侧故障穿越时多个换流站同时采取定直流电压控制导致的系统运行问题。

2.1.3 下垂控制

前两种控制模式下直流侧电压的控制一般都是由一个换流站完成的,对该换流站有功平衡能力有较高要求。下垂控制利用柔直系统中的多个换流站实现直流电压的控制,因此可以减轻对单个换流站有功平衡能力的要求,同时下垂控制利用本地直流电压作为反馈信号,各换流站之间无须通信即可实现良好的控制效果。

对下垂控制而言,如何确定多端柔直各换流站的下垂系数是至关重要的问题。文献[25]指

出,将各换流站控制器的下垂系数之比设为与直流电阻比值相同即可实现全系统的网损最小,但在换流站重载时需要调整送端风场侧换流站的下垂系数,避免其电压过高。文献[26]以最小化扰动与直流电压之间传递函数的最大幅值为优化目标,同时考虑系统控制输入量约束,求解优化问题以计算各换流站的下垂系数。该文献还指出,系统中任一换流站的下垂系数都会影响整个系统的稳定性。文献[27]借鉴了文献[26]的思想,将该优化问题转化为鲁棒控制中的线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequalities, LMI)问题进行求解,使多端柔直系统对于风速变化和交流侧故障具有良好的鲁棒性能。

2.1.4 集中式控制

本节中的集中式控制是指多端柔直系统中,每隔一段时间由系统级控制器集中计算各换流站直流电压参考值,之后统一下发给各换流站进行控制。文献[28]以最小化网损为优化目标,同时考虑系统电压约束,采用最速下降法求解系统各换流站直流电压参考值。文献[29]采用协方差矩阵进化算法求解柔直系统的最优潮流问题,该问题的约束包括直流电压约束、 $N-1$ 安全约束、直流线路容量约束等,每隔5 s集中下发各站直流电压参考值。

文献[30]将集中式控制与下垂控制相结合,以网损最小为目标,求解含换流站节点直流电压约束的优化问题,得到各换流站节点的直流参考电压值,在此基础上根据功率分配与直流电阻关系计算得到各换流器的下垂系数。但在实际运行中,需要考虑风电功率的波动性,当风电出力变化达到一定阈值后重新求解该优化问题,以减轻系统的计算负担。

2.2 故障穿越

与双端柔直相比,含风电多端柔直系统的联合故障穿越可供选择的控制策略较多,但基本思想与双端柔直相同,即通过提高电网侧换流站输出功率和降低风场侧输入功率以避免直流侧电压过高。文献[31]利用电阻作为卸荷电路,以消耗电网交流侧发生故障时的多余能量。该方法简单实用,但对卸荷电阻的要求较高。文献[32]采用升频法/降压法实现多端柔直的故障穿越,指出采用降压法时需注意风机和柔直换流站之间的配合问题,避免风机由于误认为风场侧低电

压而向系统提供无功,削弱降压法的控制效果。

2.3 频率控制

多端柔直系统中风场和柔直参与系统频率控制的基本方法与双端柔直中基本相同,包括改变直流电压、改变风场侧频率和改变风机功率参考值。文献[33]将文献[16]中提出的方法由双端柔直推广到多端柔直,将电网频率信号引入直流电压控制,利用电容电压的变化参与系统调频,但并不改变风场侧频率和风机功率参考值。该方法对于多端柔直系统而言,需要配置较大的电容才能发挥作用。文献[34]同样根据电网频率调整直流电压的参考值,同时还将电网频率信号传递至风场侧,通过风机自身的比例AFC参与系统调频。文献[35]则利用GSVSC实现根据电网频率调整直流电压的参考值,同时利用WVSC调整风场频率,以使柔直系统参与系统频率控制。

3 总结与展望

本文对风电经柔性直流输电系统接入电网的相关研究进行了综述,对已有研究和未来研究方向展望如下:

(1) 目前含风电柔直系统的研究内容相对集中,主要包括控制策略、故障穿越和频率控制等方面,还有待开展更为全面和深入的研究,例如含风电柔直系统的快速恢复技术以及调度控制技术。

(2) 目前研究柔直系统故障穿越时考虑的故障类型基本是电网侧故障,对直流侧和风场侧故障的研究较为薄弱,需要考虑多种类型故障情况下联合系统的故障穿越技术。

(3) 随着电力电子技术的进步,多端柔直系统的高级形态——柔直电网越来越受到研究者的关注。多端柔直和柔直电网的区别可以参考文献[36],柔直电网的运行控制方法仍有待进一步的研究。

综上,风电经柔直接入电网方向仍有很多值得探索的研究内容。相信随着风电等新能源和电力电子技术的不断发展,柔直系统必将在消纳新能源方面发挥更为重要的作用。

参考文献

- [1] 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):1-10.

- [2] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化 2013, 37(15): 3-44.
- [3] 魏晓光, 汤广福, 魏晓云, 等. VSC-HVDC 控制器抑制风电场电压波动的研究[J]. 电工技术学报 2007, 22(4): 150-156.
- [4] 孟令龙, 刘文霞, 张建华. 基于柔性直流技术的风电场并网系统电压稳定研究[J]. 现代电力 2014, 31(4): 14-18.
- [5] 魏晓光, 迟永宁, 魏晓云, 等. 换相高压直流输电改善异步发电机风电场暂态电压稳定性的研究[J]. 电工技术学报 2008, 23(5): 100-107.
- [6] 范心明, 管霖, 夏成军, 等. 风电接入对系统频率影响及风电调频技术综述[J]. 高电压技术 2013, 39(2): 497-504.
- [7] 饶成诚, 王海云, 王维庆, 等. 基于储能装置的柔性直流输电技术提高大规模风电系统稳定运行能力的研究[J]. 电力系统保护与控制 2014, 42(2): 1-7.
- [8] 廖勇, 王国栋. 双馈风电场的柔性高压直流输电系统控制[J]. 中国电机工程学报 2012, 32(28): 7-15.
- [9] Feltes C, Wrede H, Koch F W, et al. Enhanced Fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems 2009, 24(3): 1537-1546.
- [10] Xu L, Yao L Z, Sasse C. Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems 2007, 22(3): 976-984.
- [11] 李琦, 宋强, 刘文华, 等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. 电网技术 2014, 38(7): 1739-1745.
- [12] 厉璇, 宋强, 刘文华, 等. 风电场柔性直流输电的故障穿越方法对风电机组的影响[J]. 电力系统自动化 2015, 39(11): 31-36.
- [13] 谷俊和, 刘建平, 江浩. 风电接入对系统频率影响及风电调频技术综述[J]. 现代电力 2015, 32(1): 46-51.
- [14] Liu H Z, Chen Z. Contribution of VSC-HVDC to frequency regulation of power systems with offshore wind generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion 2015, 30(3): 918-926.
- [15] Phulpin Y. Communication-free inertia and frequency control for wind generators connected by an HVDC-Link[J]. IEEE Transactions on Power Systems 2012, 27(2): 1136-1137.
- [16] Zhu J B, Campbell D B, Adam G P, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems 2013, 28(2): 1277-1287.
- [17] Junyent-Ferré A, Pipelzadeh Y, Green T C. Blending HVDC-Link Energy Storage and Offshore Wind Turbine Inertia for Fast Frequency Response[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy 2015, 6(3): 1059-1066.
- [18] 李宇骏, 杨勇, 李颖毅. 提高电力系统惯性水平的风电场和 VSC-HVDC 协同控制策略[J]. 中国电机工程学报 2014, 34(34): 6021-6031.
- [19] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报 2013, 33(10): 8-17.
- [20] Liang J, Jing T J, Gomis B O, et al. Operation and control of multiterminal HVDC transmission for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2011, 26(4): 2596-2604.
- [21] 朱晓东, 周克亮, 程明, 等. 大规模近海风电场 VSC-HVDC 并网拓扑及其控制[J]. 电网技术 2009, 33(18): 17-24.
- [22] 陈树勇, 徐林岩, 孙棚, 等. 基于多端柔性直流输电的风电并网控制研究[J]. 中国电机工程学报 2014, 32(25): 32-38.
- [23] 吴俊宏, 艾芊. 多端柔性直流输电系统在风电场中的应用[J]. 电网技术 2009, 33(4): 22-27.
- [24] 陈海荣, 徐政. 适用于 VSC-MTDC 系统的直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化 2006, 30(19): 28-33.
- [25] Abdel-Khalik A S, Massoud A M, Elserougi A A, et al. Optimum power transmission-based droop control design for multi-terminal HVDC of offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems 2013, 28(3): 1537-1546.
- [26] Prieto-Araujo E, Bianchi F D, Junyent-Ferre A, et al. Methodology for droop control dynamic analysis of multiterminal VSC-HVDC grids for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2011, 26(4): 2476-2485.
- [27] Egea-Alvarez A, Bianchi F, Junyent-Ferre A, et al. Voltage control of multiterminal VSC-HVDC transmission systems for offshore wind power plants: design and implementation in a scaled platform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2013, 60(6): 2381-2391.
- [28] Pinto R T, Bauer P, Rodrigues S F, et al. A novel distributed direct-voltage control strategy for grid integration of offshore wind energy systems through MTDC network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2013, 60(6): 2429-2441.
- [29] Rodrigues S, Pinto R T, Bauer P, et al. Optimal power flow control of VSC-based multiterminal DC network for offshore wind integration in the North Sea[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 2013, 1(4): 260-268.
- [30] 李程昊, 詹鹏, 文劲宇, 等. 适用于大规模风电并网的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化 2015, 39(11): 1-7.
- [31] Meer A, Hendriks R L, Kling W L, et al. Combined sta-

bility and electro-magnetic transients simulation of offshore wind power connected through multi-terminal VSC-HVDC [C]//Power and Energy Society General Meeting ,July 25-29 2010 ,Denver: IEEE 2015.

[32]Silva B ,Moreira C L ,Leite H ,et al. Control strategies for AC fault ride through in multiterminal HVDC grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,2014 ,29 (1) : 395-405.

[33]Zhu J B ,Guerrero J M ,Hung W ,et al. Generic inertia emulation controller for multi-terminal voltage-source-converter high voltage direct current systems [J]. IET Renewable Power Generation 2014 8(7) : 740-748.

[34]Li C H ,Zhan P ,Wen J Y ,et al. Offshore wind farm in-

tegration and frequency support control utilizing hybrid multi-terminal HVDC transmission [J]. IEEE Transactions on Industry Applications 2014 27(8) : 2788-2797.

[35]Silva B ,Moreira C L ,Phulpin Y ,et al. Provision of inertial and primary frequency control services using offshore multiterminal HVDC networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy 2012 3(4) : 800-808.

[36]汤广福 ,罗湘 ,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术 [J]. 中国电机工程学报 2013 33(10) : 8-17.

收稿日期:2016-10-17

作者简介:江浩(1987—) ,男 ,博士 ,研究方向为电力系统稳定与控制。

(本文编辑 杜秋平)