

含MF2F式DC-DC换流器的直流系统故障隔离研究

随着直流输电技术的发展, 直流电网已初具雏形。由于现有直流输电工程具有不同的直流电压等级, 需要DC-DC换流器互联不同电压等级的直流输电系统。多端口面对面式换流器(Multiport Front to Front, MF2F)具有直流电压变换功能, 是互联不同电压等级直流输电系统的有效手段。由于基于电压源型换流器(Voltage Source Converter, VSC)的柔性直流输电技术不具备隔离直流故障能力, 直流线路任何一处发生直流故障都会导致换流器闭锁, 从而导致直流系统停运。针对含MF2F换流器的直流输电系统故障隔离问题进行研究, 在MF2F换流器各端口采用能隔离直流故障电流的自阻型子模块拓扑, 当任何端口出现直流故障时, 闭锁该端口的换流器触发信号即可阻断故障电流的传播, 健全端口则保持稳定运行。

苗 璐/广东电网有限责任公司电力调度控制中心

向 往 文劲宇/强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学)

0 引言

由于风电、太阳能等新能源具有随机性、波动性等特点, 常规的交流输电方案渐渐无法满足新能源并网的技术需求^[1-4]。而在风电接入、区域及异步电网互联等应用场合, 直流输电技术的优越性已得到论证, 因此直流输电及直流电网技术在近年来得到了电力工业界和学术界的高度重视^[5-8]。

由于目前的直流输电工程运行在多个直流电压等级, 若将不同电压等级的直流网络进行互联, 则需要应用DC-DC换流器^[9-11]。文献[12-13]研究了一种多端口面对面式换流器(Multiport Front to Front, MF2F), 该换流器可互联多个不同电压等级的直流输电系统, 且通过设计控制器可保证由MF2F换流器构成的直

流系统在功率失衡时, 无须人为干预即可自动保持功率平衡。但文献[12-13]尚未研究该类MF2F换流器的直流故障隔离功能。然而, 直流故障是电压源型直流输电系统必须考虑的一种非常严重的故障, 其对器件参数、线路绝缘、系统控制和保护配合都有着重要的影响。直流电网中任何一点发生直流故障必将波及整个直流电网, 降低直流电网的输电可靠性。

为解决含MF2F换流器直流输电系统的故障隔离问题, 本文将一种新型的自阻型子模块(Self-Blocking Sub Module, SBSM)^[14]运用到MF2F换流器各个端口中, 使MF2F换流器各端口可以隔离直流故障。在任何端口发生直流故障时, 闭锁该端口的换流器触发信号即可阻断故障向其他线路传播。最后通过PSCAD/EMTDC的多组仿真验证了MF2F隔离直流故障的有效性。

1 多端口面对面式DC-DC换流器

1.1 MF2F拓扑结构

图1为一个四端口MF2F换流器的拓扑结构。该MF2F主要包含四个模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC), 各个换流器通过MF2F内部交流母线互联, 每个端口都配有交流断路器。当某个端口输出直流电压与MF2F交流母线电压不匹配时, 可采用交流电压器匹配端口电压。

1.2 MF2F任意端口控制

图2为MF2F换流器任意端口的控制



苗 璐/博士研究生

关键词/Keywords

直流系统·
故障隔离·
MF2F换流器·
自阻型拓扑·

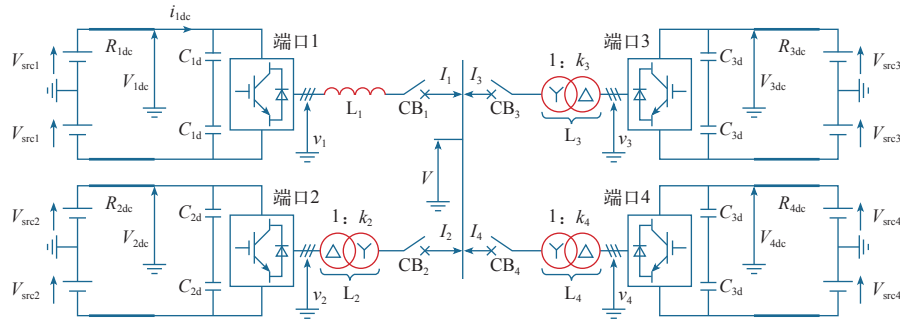


图1 多端口面对式DC-DC换流器拓扑结构

框图。MF2F各端口有三种控制模式：MF2F内部交流母线电压控制、MF2F端口直流功率控制和MF2F端口直流电压控制，分别定义这三种控制模式为“模式I”、“模式II”和“模式III”。由于这三种控制模式仅外环控制不同，因此在图2中这三种模式公用内环控制，仅通过开关信号来选择不同的外环控制。

图2主要包括交流电压控制、有功功率控制、直流电压控制、内部平衡控制、外部平衡控制、电流内环控制和底层触发控制，其中前三种控制为MF2F各端口的的基本控制模式。为了实现MF2F的内部功率自动平衡，在“模式II”端口和“模式III”端口上还装设了内部平衡控制；对于工作在“模式I”和“模式II”的端口，还增加了外部平衡控制来平衡端口与外部直流系统间的功率传输。

图2中， V_{dpu} 、 V_{qpu} 为MF2F换流器内部公共交流母线电压 d 、 q 分量的标幺值； V_{dref} 、 V_{qref} 为交流母线电压 d 、 q 分量指令值； I_{dlim} 为 d 轴电流限幅值（文中取1.1(pu)）； $I_{drefOri}$ 为在没有附加控制的情况下，常规控制输出的 d 轴电流指令值； ΔI_{dref} 、 ΔI_{dref_Vdc} 分别为内部平衡控制、外部平衡控制输出的 d 轴电流指令值增加量； M_d 、 M_q 均为系统调制比； F_{mode} 为三种控制模式的切换开关。

2 MF2F直流故障隔离控制

2.1 含自阻型子模块的MF2F换流器

为解决含MF2F DC-DC换流系统的直流故障隔离功能，本文将各端口的子模块采用具备阻断直流故障功能的SBSM。图3为含SBSM的MF2F换

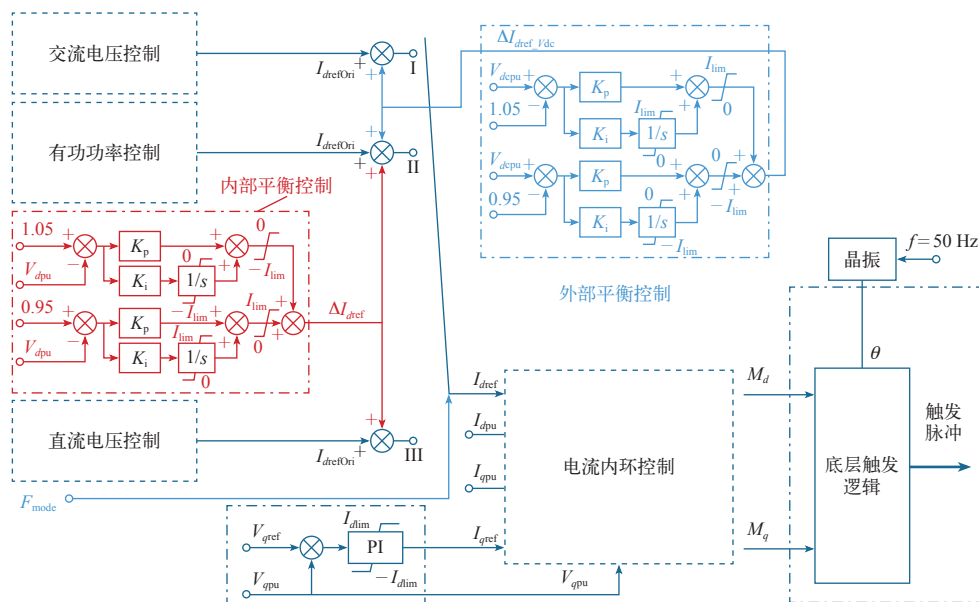


图2 MF2F任意端口控制器

流器拓扑结构。

SBSM子模块在正常运行过程中可以保持均压效果良好,而在故障后可以维持其子模块电容电压几乎不变。且通过闭锁相应的换流器IGBT器件,使故障电流立即下降为零,达到快速阻断直流故障的功能。同时,该种子模块还能在不开断交流侧断路器的前提下快速重合闸,具有较大的工业应用价值。

2.2 故障工况下的控制方法

在含SBSM的MF2F换流器中,当系统检测到直流故障时,MF2F换流器将闭锁故障端口的IGBT器件,使MF2F换流器的公共交流母线不向故障点提供短路电流。若为暂时性的故障,则MF2F换流

器故障端口的交流断路器保持闭合状态,确保系统在故障清除后可以继续运行;若为永久性的故障,则MF2F换流器故障端口的交流断路器将断开,将故障端口与其余端口隔离开来,保证其余端口的正常功率传输。

3 仿真系统及控制

3.1 仿真系统拓扑结构

为验证所提出的直流故障隔离方法的有效性,本文针对多端直流输电系统在PSCAD/EMTDC平台上进行了仿真验证,如图4所示。图4中,MF2F换流器各个端口及外部换流器的电压、功率等参数详见文献[13]。

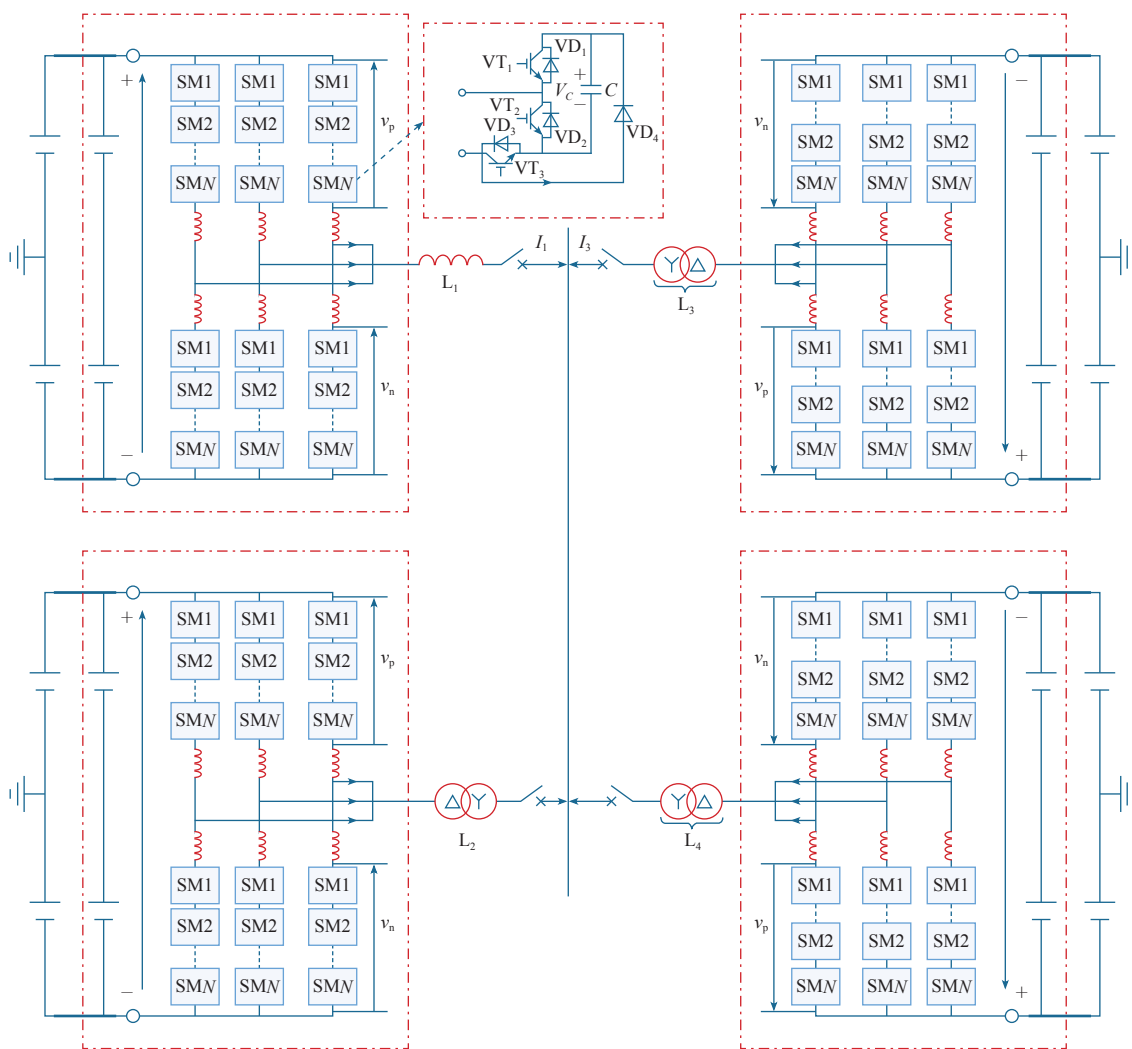


图3 含自阻型子模块的MF2F换流器

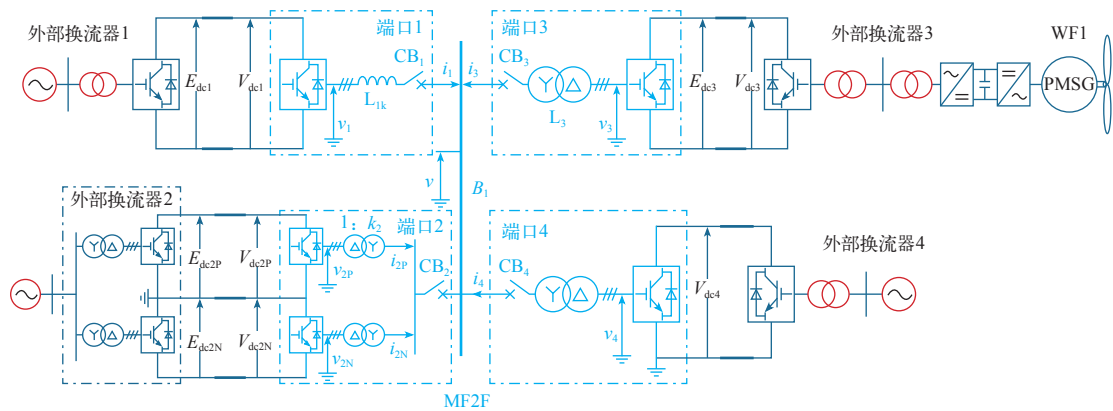


图4 仿真系统拓扑

图4中，MF2F端口1、端口4分别连接对称单极直流输电系统，端口2与双极性直流输电系统相连，端口3连接不对称单极系统。在正常工况下，端口1和端口2从MF2F中吸收1 000 MW直流功率，端口3和端口4注入1 000 MW直流功率。记MF2F端口1、端口3和端口4分别为port1、port3和port4；记端口2正极、负极分别为port2P、port2N。

3.2 系统总体控制

图4的仿真系统中，当受端系统发生直流故障时，MF2F换流器将无法消纳端口3送出的风电功率，因此，需要在端口3上安装如图2所示的内部平衡控制。在MF2F换流器内部功率无法消纳时，通过内部平衡的控制，使端口3及其相连的换流器直流电压上升，同时，使与之相连的外部换流器3降低风电场交流端电压，从而降低外部换流器3传输的风电功率。

各个端口及换流器的控制模式如下表所示。MF2F端口1控制内部交流母线电压，外部换流器1用于控制相连电缆的直流电压；外部换流器2定功率控制，可灵活调节该端口的潮流，MF2F端口2用于直流电压控制，控制相连接电缆的直流电压；外部换流器3用于定交流电压控制，维持风场

表 仿真系统控制方式

换流器	端口1	端口2	端口3	端口4
控制模式	定交流电压	定直流电压	定直流电压	定直流功率
换流器	外部换流器1	外部换流器2	外部换流器3	外部换流器4
控制模式	定直流电压	定直流功率	定交流电压	定直流电压

的稳定运行，MF2F端口3用于定直流电压控制；外部换流器4用于定直流电压控制，维持相应端口的直流电压，MF2F端口4用于直流功率控制，灵活调节相应端口的潮流。

当MF2F端口1发生故障时，由于交流母线电压控制端口故障，则导致MF2F将无法正常运行，因此本文在MF2F端口2~端口4上设置了如图2所示的内部平衡控制。

若故障发生在端口2，则与MF2F端口2相连的直流电缆将出现电压崩溃，为此，在外部换流器2上安装相应的功率协调控制器，在故障时调节外部换流器2上的功率指令值，使系统恢复正常运行。

4 算例仿真

对于MF2F式DC-DC换流器，当其各个端口均采用前文所述的具备阻断直流故障电流能力的换流器拓扑时，在检测到端口发生直流故障后，通过闭锁该端口的换流器触发信号即可阻断线路的直流故障向非故障线路传播。

加入具备阻断直流故障电流能力的换流器拓扑后，为验证MF2F换流器具有隔离故障功能，在图4的系统中进行直流故障仿真。3 s时，MF2F换流器端口2直流侧发生正极接地故障；3.4 s时，MF2F换流器端口1发生极对极故障。

图5给出了系统直流故障工况仿真曲线。3 s时，端口2电缆正极性出现了极对地短路故障，当系统检测到 i_{dc2P} 高于2倍额定值时，闭锁端口2的IGBT器件；3.4 s时，端口1发生极对极直流故障，

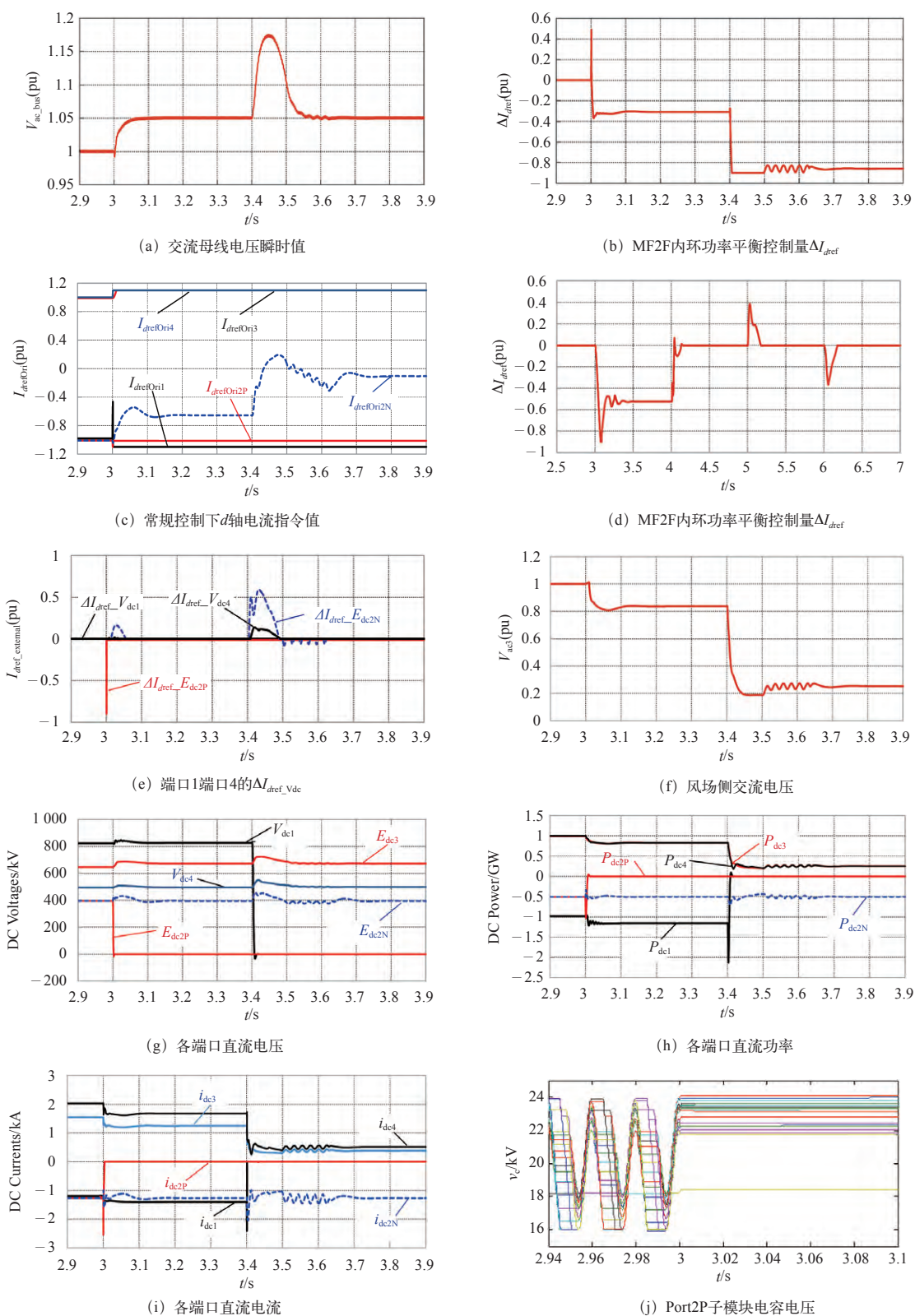


图5 含MF2F换流器的多端直流输电系统直流故障下系统仿真曲线

当检测到故障电流高于2倍额定值时，闭锁端口1的IGBT器件。

正常工况下，port2P和port1均为MF2F换流器吸收功率端口，当port2P和port1闭锁时，MF2F

换流器内部会出现过功率。由此,公共交流母线电压会上升至上限值1.05(pu),如图5a所示。图2中的内部平衡控制会产生一个负的 ΔI_{dref} ,如图5b所示。

$I_{drefOri3}$ 和 $I_{drefOri4}$ 会上升至上限饱和值1.1(pu),而 $I_{drefOri2N}$ 保持在未饱和的状态,如图5c所示。 I_{dref3} 和 I_{dref4} 的值根据系统运行状态而定,而 I_{dref2N} 保持-1(pu)的状态。

连接风场的换流器安装了相应的平衡控制器,其交流电压会在3 s后下降,如图5f所示。

图5i为MF2F换流器各端口直流侧电流。当port2P和port1的故障电流超过2倍额定值时,其IGBT器件会被闭锁。图5j为port2P的A相桥臂子模块电容电压。当IGBT闭锁时,电容电压保持在故障前状态。

从图5中可以看出,MF2F换流器具备隔离直流故障的功能,MF2F换流器甚至可以在失去平衡端口的工况下保持正常运行。

5 结束语

针对多端直流输电系统直流故障电流隔离问题,本文将MF2F换流器各端口采用能够隔离直流故障的自阻型MMC,设计控制策略使任何端口出现直流故障,通过闭锁该端口的换流器触发脉冲来阻断故障线路直流故障的传播。而健全端口在内部平衡控制器、外部平衡控制器作用下保持稳定运行。最后通过仿真表明,在故障端口闭锁期间,故障直流线路不会影响系统其他非故障部分的正常运行,使系统可靠性大大提高。

参考文献

- [1] 王志新,吴杰,徐烈,等.大型海上风电场并网VSC-HVDC变流器关键技术[J].中国电机工程学报,2013(19):14-27.
- [2] 刘吉臻.大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J].中国电机工程学报,2013(16):1-8.
- [3] 肖创英,汪宁渤,丁坤,等.甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J].中国电机工程学报,2010,30(10):1-7.
- [4] 白建华,辛颂旭,贾德香.我国风电大规模开发面临的规划和运行问题分析[J].电力技术经济,2009,21(2):7-11.
- [5] 孙蔚,姚良忠,李琰,等.考虑大规模海上风电接入的多电压等级直流电网运行控制策略研究[J].中国电机工程学报,2015,35(4):776-785.
- [6] 温家良,吴锐,彭畅,等.直流电网在中国的应用前景分析[J].中国电机工程学报,2012,32(13):7-12.
- [7] 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.
- [8] 姚良忠,吴婧,王志冰,等.未来高压直流电网发展形态分析[J].中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
- [9] Falcones S, Ayyanar R, Mao X. A DC-DC multiport-converter-based solid-state transformer interating distributed generation and storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2192-2203.
- [10] Matsuo H, Lin W, Kurokawa F, et al. Characteristics of multiple-input DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2004, 51(3): 625-531.
- [11] Kenzelmann S, Rufer A, Dujic D, et al. Isolated DC-DC structure based on modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronic, 2015, 30(1): 89-98.
- [12] 苗璐,林卫星,姚良忠,等.多端口背靠背式直流-直流换流系统[J].中国电机工程学报,2015,35(5):1024-1031.
- [13] 苗璐,林卫星,姚良忠,等.多端口直流-直流变换器功率自动平衡控制[J].中国电机工程学报,2016.
- [14] 向往,林卫星,文劲宇,等.一种能够阻断直流故障电流的新型子模块拓扑及混合型模块化多电平换流器[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5174-5179.

(收稿日期:2015-06-04) EA