

## MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析

张建坡, 赵成勇

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 由于拓扑和调制策略的不同, 基于模块化多电平换流器的高压直流输电(MMC-HVDC)系统在直流侧发生故障时呈现出与两电平电压源型直流输电(VSC-HVDC)系统不同的故障特性。在 PSCAD/EMTDC 中搭建的仿真模型基础上, 首先分析了 MMC-HVDC 直流侧线路单极接地、断线和两极短路的故障特性及其对系统运行的影响; 然后针对半桥型子模块结构不能够双向阻断故障电流的问题, 对子模块拓扑进行了重新设计, 通过改变流经子模块电流方向, 实现了桥臂电容双向充电, 从而提供了续流二极管阻断电压; 最后对直流侧两极短路故障进行了仿真分析, 仿真结果表明, 改进拓扑有效地抑制了直流侧故障电流, 避免了交流断路器动作。

**关键词:** MMC-HVDC; 直流故障; 双向阻断; 故障分析; 高压直流输电; 仿真

**中图分类号:** TM 721.1; TM 46

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.006

## 0 引言

基于模块化多电平换流器的高压直流输电(MMC-HVDC)是一种以模块化拓扑、自关断器件和脉宽调制技术为基础的新型直流输电技术。由于换流器桥臂采用模块化拓扑, 从而避免了开关器件的直接串联, 对同一桥臂上器件开通、关断的一致性要求大幅降低, 同时具有输出电压电流谐波含量低、电平数量容易拓展、可向无源网络供电等诸多优点, 因此在新能源并网、电网互联、电力交易、城市配网增容及电能质量提高等方面都有着广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。

目前国内外对于 MMC-HVDC 的研究主要集中于系统稳态控制和交流侧故障分析方面, 文献[4-6]侧重于研究了 MMC 的调制策略和电容电压均衡控制, 文献[7-9]分析了 MMC 的环流问题以及控制方法, 文献[10-12]分析了在电网电压不平衡下抑制负序电流的控制策略, 文献[13]对直流侧两极短路故障时的直流电流变化进行了相应的理论分析和计算。在实际运行中, 直流线路发生各种故障是难免的, 而如何处理直流线路故障一直是基于电压源换流器型直流输电技术的一个难题。

当直流侧发生故障时, 往往伴随着过流和过压问题, 而作为 MMC-HVDC 的基本构成单元中的子模块, 主要组成器件是 IGBT, 其耐过压和过流能力不如晶闸管, 且价格相对昂贵, 因此在故障时必须进行合理的保护设计或选择不同运行方式实现系统的安全运行。对于半桥拓扑子模块, 在故障闭锁后由于反并联二极管的续流效应, 不能够阻断交流系统向直

流侧馈入故障电流, 因此只能依靠跳开交流断路器进行故障隔离, 从而造成系统停运。为了实现电流阻断能力, 文献[14]针对暂时故障, 采用了双晶闸管结构, 从而在闭锁 IGBT 后, 为交流侧和直流侧提供独立的短路电流路径, 实现了直流电流的自然衰减, 但是对于永久故障仍然需要跳开交流断路器进行故障隔离。文献[15]采用了全桥拓扑结构, 虽然实现了电流的阻断能力, 但存在器件过多问题。在文献[16]中, 为降低全桥子模块中 IGBT 的数量且同时具有直流闭锁能力, 对子模块拓扑也做出了改进, 提出了双箝位子模块 DCSCM(Double Clamp Sub Module), 但在结构上存在并联耦合, 且闭锁 IGBT 后, 上下桥臂电容呈现出并联和串联不同充电状态。

针对上述问题, 论文在分析直流侧 3 种故障特性的基础上, 针对传统半桥拓扑在直流侧故障时不能够闭锁直流电流问题, 设计了一种改进拓扑, 从而实现直流故障电流的快速抑制功能, 减少系统故障恢复时间, 提高系统故障穿越能力。

## 1 MMC-HVDC 电路模型

## 1.1 MMC-HVDC 单端模型

图 1 为 MMC-HVDC 中单侧系统等效电路图, 以 a 相为例, 桥臂中的  $L_x$  代表 a 相上下桥臂的桥臂电感,  $R_s$ 、 $L_s$  分别为线路和变压器的等值电阻和电感。换流器直流侧的正负极母线相对于参考中性点 O 的电压分别为  $U_{dc,p}$  和  $U_{dc,n}$ 。直流侧正负极母线电压, 直流母线间电压  $U_{dc}$ , 上、下桥臂模块输出电压  $u_{a1}$ 、 $u_{a2}$  和阀侧交流电压  $u_a$  有式(1)所示约束关系。

$$\begin{cases} u_{a1} = 0.5 U_{dc} - u_a \\ u_{a2} = 0.5 U_{dc} + u_a \\ U_{dc,p} = |U_{dc,n}| \\ U_{dc,p} - U_{dc,n} = U_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2013-10-11; 修回日期: 2014-05-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013-AA050105)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2013AA050105)

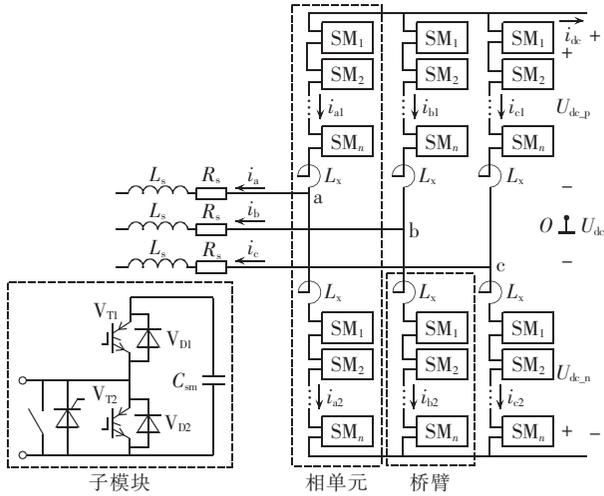


图 1 MMC 简化电路  
Fig.1 Simplified MMC circuit

### 1.2 系统仿真模型及稳态分析

为对系统特性进行仿真,在 PSCAD/EMTDC 搭建了图 2 所示两端 21 电平 MMC-HVDC 模型。直流电压  $U_{dc}=\pm 200\text{ kV}$ ,额定容量  $450\text{ MV}\cdot\text{A}$ ,MMC1 采用定直流电压、定无功功率控制,MMC2 采用定有功功率、定无功功率控制,有功定值为  $400\text{ MW}$ ,无功初始定值为  $0\text{ Mvar}$ 。系统控制策略采用同步旋转坐标系下的双闭环矢量电流控制,调制策略采用载波移相调制,载波频率为  $400\text{ Hz}$ 。

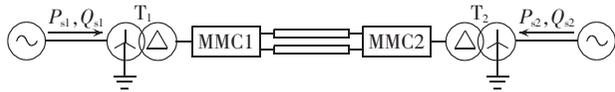


图 2 MMC-HVDC 仿真模型  
Fig.2 Simulation model of MMC-HVDC

图 3 分别是系统正常运行情况下桥臂电流、直流母线电流和电压仿真波形。

根据式 (1),在图 3(a)中,由于上、下桥臂对称性,交流电流在上、下桥臂进行均分,同时由于桥臂中存在直流分量,桥臂电流出现直流偏置;在图 3(b)中,正、负极直流母线电流具有大小相等的特点;在图 3(c)中,正、负极直流母线对地电压大小相等,其电位差为直流母线两极电压。

## 2 MMC 直流侧故障特性分析

系统实际运行中,由于机械外力、绝缘问题,直流侧可能发生的故障有断线故障、单极接地故障和两极短路故障,在仿真中假设故障发生在  $1\text{ s}$ ,距离两端换流站距离为  $50\text{ km}$ 。

### 2.1 断线故障特性分析

当直流侧发生断线故障时,中断了正常的功率传输,此时两端的故障特性与系统控制方式(定直流电压和定有功功率)和运行状态(整流和逆变状态)有着重要的关系。对于运行于逆变状态换流站而言,

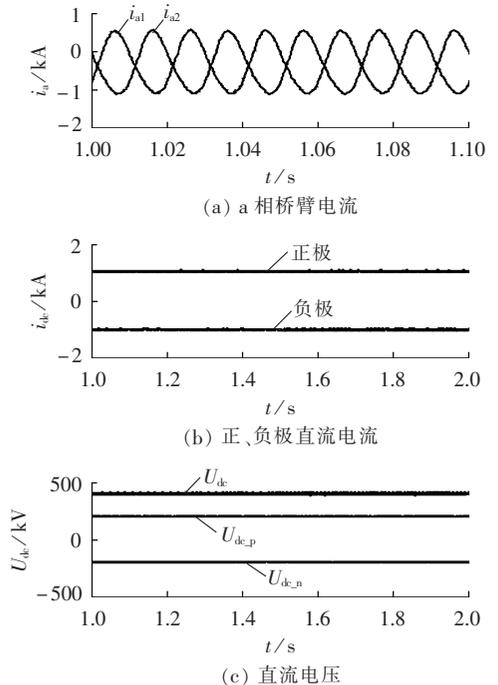


图 3 正常运行波形

Fig.3 Waveforms during normal operation

输出功率指令没有改变而此时输入功率为零,造成桥臂储能电容放电,进而电压下降。而对于运行于整流状态换流站而言,因为输出功率为零,造成功率瞬间不平衡,从而导致电容过度充电和电压上升。但无论是工作于整流状态还是逆变状态,只要故障后采取定直流电压控制,直流电压就能够维持稳定,此时两端系统可以不闭锁,在控制策略下转换为 STATCOM 模式,或待机状态。

### 2.2 单极接地故障特性分析

由于变压器阀侧绕组往往采用角形接线,当正极母线单极接地时,不能够与换流站交流侧构成电流回路,因此理论上不会出现接地电流,此时正极母线电压被拉为零电位,而负极母线对地电压加倍,正、负极直流母线电压差保持不变,如图 4(a)所示。对于阀侧交流电压而言,此时三相交流电压对地会出现直流偏置现象,如图 4(b)所示。考虑对地电容效应,当直流母线发生接地故障时,对地电容将通过接地点构成放电回路,直流侧会出现接地电流,伴随着电容放电过程结束,接地电流会逐渐衰减为零,此时正负极电流也恢复正常,如图 4(c)所示。根据图 4(d)可知,故障对阀侧交流电流没有产生影响。由于接地故障只是造成负极母线和阀侧交流电压对地直流偏置后果,从而对线路耐压和交流设备的绝缘能力提出了考验。如果能够满足绝缘要求,系统可以保持单极运行状态,或者考虑降压运行,以保持一定的有功功率传输。

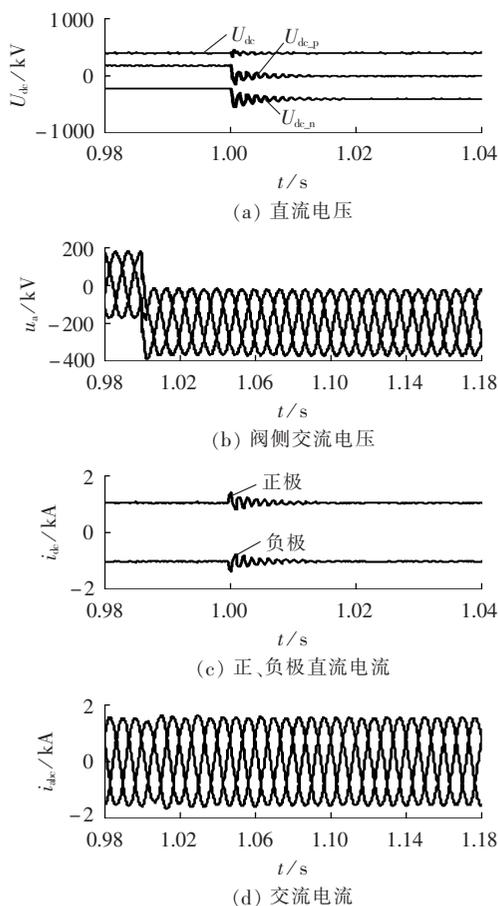


图 4 单极接地故障电压、电流波形  
Fig.4 Voltage and current waveforms during pole-to-ground fault

### 2.3 两极短路故障特性

两极短路故障作为直流侧最为严重的故障,整流换流站与逆变换流站间功率传输将立即终止,两侧换流站中桥臂子模块电容通过短路路径快速放电,因此直流极间电压会很快降低为零,桥臂电流和直流电流在短时间内迅速增大,如图 5(a)所示。最终两侧交流系统由于短路路径,伴随着储能电容放电完毕,近似发生三相短路故障,如图 5(b)所示,

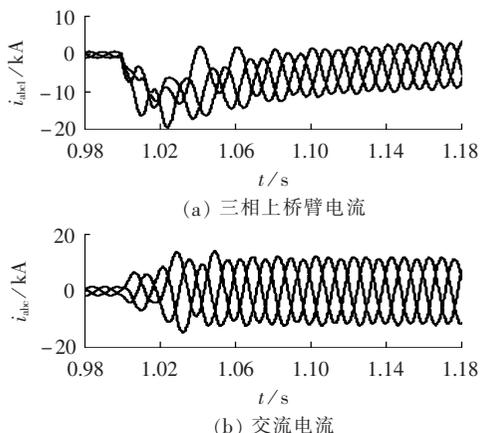


图 5 两极短路故障下电流波形  
Fig.5 Current waveforms during pole-to-pole fault

从而对交流系统和直流系统产生严重的危害。

## 3 故障抑制分析

直流侧单极接地故障和断线故障相对于系统运行而言,故障严重程度不是很大,可以采用改变控制策略以减少对系统的影响,而两极短路故障影响要大得多,只能靠闭锁换流器来实现系统保护。本文以直流侧两极短路故障为例,分别对传统半桥和改进拓扑 MMC-HVDC 直流侧故障抑制性能进行仿真分析。考虑延时性,系统在 1.002 s 闭锁换流器,对于半桥型拓扑在 1.1 s 跳开交流断路器。

### 3.1 半桥拓扑故障抑制分析

图 6 为基于传统半桥子模块拓扑结构 MMC-HVDC 两极短路故障仿真波形。

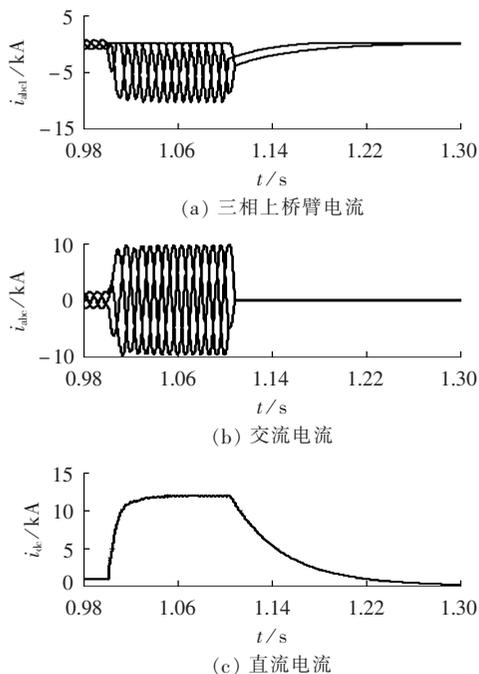


图 6 两极短路电流波形

Fig.6 Waveforms of pole-to-pole fault current

从图 6(a)可以看出,在闭锁换流器前,由于两极短路造成了桥臂投入模块电容的直接短路,模块电容快速放电,导致桥臂电流上升。在 IGBT 闭锁而交流断路器动作前,系统近似处于不控整流状态。由于反并联二极管的续流作用,当桥臂电流大于零时,桥臂电流流经模块电容,对电容进行充电操作,而当桥臂电流小于零时,电流通过保护晶闸管,子模块处于旁路状态。当桥臂电容电压之和大于交流电压幅值而桥臂电流大于零时,二极管由于偏置的缘故,不能够导通,从而导致总有半个周期电流为零,因此桥臂电流出现了偏置,如图 6(a)所示。从图 6(b)可以看出,由于 IGBT 闭锁,交流侧出现近似三相短路故障特性,过流程比较大,当断路器跳开后,交流电流为零。

在图 6(c)中,由于直流电流等于三相桥臂电流之和,而两极短路造成了桥臂投入模块电容的直接放电效果,因此直流电流随着桥臂电流增大也在上升。在系统闭锁后,由于切断了桥臂电容的放电回路,因此直流电流上升幅度变小,此时直流电流主要由交流侧馈入。随着断路器动作,切断了交流系统向直流侧馈入短路电流路径,此时三相桥臂构成并联结构,对于直流侧可以等效为一个电阻和电感串联电路,构成  $RL$  一阶动态电路。在电感初始电流作用下开始一阶系统的零输入响应,从而直流电流呈现出指数形式变化规律并最终衰减为零。

### 3.2 改进拓扑故障抑制分析

在直流侧发生故障且闭锁后,由图 1 可知:当上、下桥臂电流都大于零的时候,桥臂电流对投入模块电容进行充电,从而在电容电压作用下能够限制短路电流;而当上、下桥臂电流都小于零时,由于 IGBT 闭锁、保护晶闸管导通,上、下桥臂等效为短路状态。因此当桥臂电流小于零时,只要改变反向桥臂电流路径,并且仍然能够保证对电容充电操作,就可以达到限制短路电流目的。本文在不改变传统 MMC 中子模块间串联连接方式前提下,对其进行了改进,拓扑电路如图 7 所示。

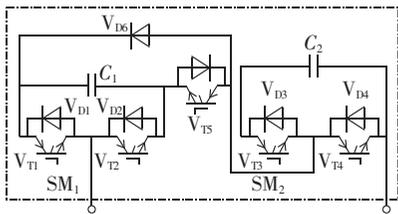


图 7 改进串联子模块拓扑

Fig.7 Improved topology of series sub-module

正常运行时因为  $V_{T5}$  恒导通,而箝位二极管  $V_{D6}$  由于电容电压作用处于反向偏置状态,所以 2 个子模块  $SM_1$  和  $SM_2$  间为串联连接方式,与传统 MMC 相比,2 个子模块具有相互独立工作状态,控制策略、调制策略和均压策略都没有不同。

当直流侧发生故障的时候,系统闭锁,此时桥臂电流流通路径如图 8 所示。在电流大于零时,桥臂模块电容  $C_1$  和  $C_2$  处于串联充电状态,而在桥臂电流小

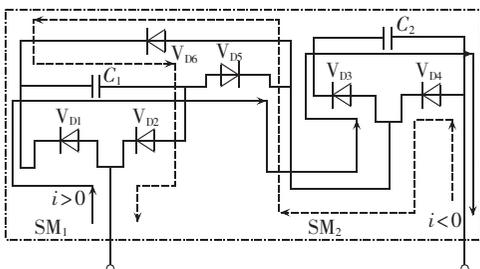


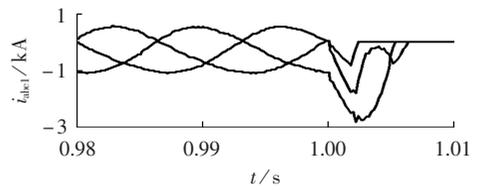
图 8 改进子模块拓扑桥臂电流路径

Fig.8 Arm current path of improved sub-module

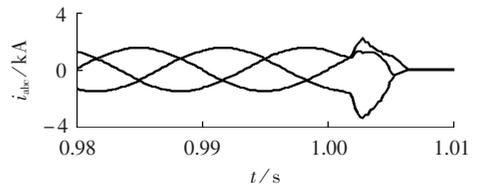
于零时,  $C_1$  充电,  $C_2$  旁路,从而保证至少有 1 个模块电容处于充电状态,在实现故障电流阻断能力的前提下,避免了文献[16]中当桥臂电流为负时子模块电容并联连接。

正常运行情况下,与 DCSM 拓扑工作机理一样,2 种拓扑都呈现出子模块间串联连接形式。在闭锁后,模块电容  $C_1$  处于充电状态,电压会有所抬升。对于 DCSM 拓扑,由于此时有 2 个电容处于并联充电,因此电容电压上升幅度会相对小一些。考虑到正常运行时电容电压波动范围和选择器件裕度要求,电容电压的抬升不会给器件带来过压问题,因此  $V_{T5}$ 、 $V_{D5}$  参数选择可以与子模块中其他器件参数相同,保证拓扑器件一致性。如果电容电压升高幅度较大,可以考虑在直流侧配置平波电抗器来限制短路电流,或者改进故障检测方法,尽快向 IGBT 发出闭锁脉冲信号,以减少电容放电时间。

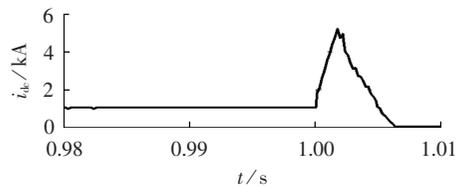
在图 9(a)中,改进串联拓扑闭锁换流器后,由于桥臂电容充电效应,桥臂电流迅速衰减,从而实现了桥臂器件过流保护。图 9(b)中,在桥臂模块电容电压作用下,二极管快速处于反向偏置状态,因此交流电流同时也衰减为零,从而避免依靠交流断路器来切断故障电流。在图 9(c)中,由于切断了交流侧



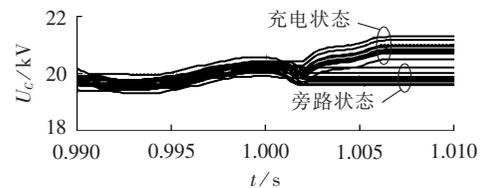
(a) 三相上桥臂电流



(b) 交流电流



(c) 直流电流



(d) 模块电容电压

图 9 两极短路波形

Fig.9 Waveforms during pole-to-pole fault

向直流侧馈入故障电流通路,与图 6(c)相比,直流电流很快衰减为零,从而加快了故障清除时间。图 9(d)是 a 相上桥臂 20 个子模块电容电压波形,可以看出,在闭锁后处于  $C_1$  位置模块电容电压在充电效应下有所升高,而处于  $C_2$  位置模块电容电压由于旁路缘故,在闭锁后保持不变。

图 10 是改进串联拓扑与 DCSM 拓扑直流侧故障抑制效果及电压、电流比较仿真图。

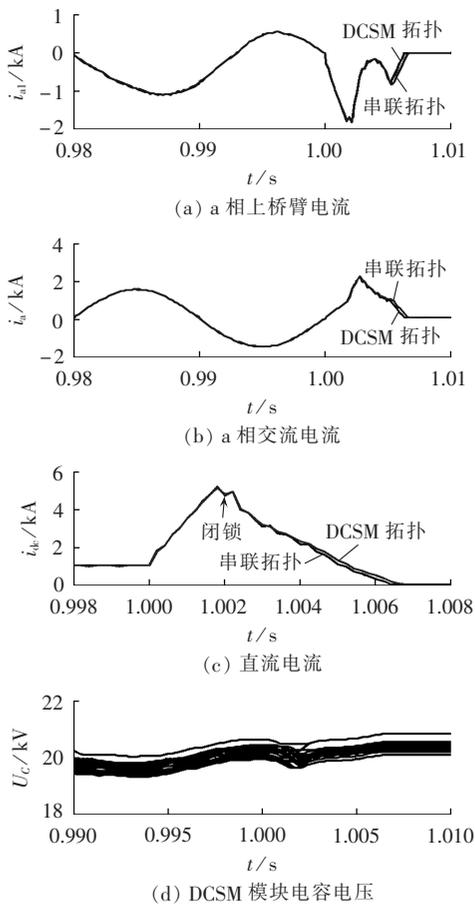


图 10 2 种拓扑故障抑制效果比较

Fig.10 Comparison of fault suppression effect between two topologies

对比图 9(d)和 10(d)可以看出,相对于 DCSM 拓扑,由于闭锁后改进串联拓扑中只有 1 个电容处于充电状态,因此从能量守恒的角度,处于  $C_1$  位置电容电压要高于 DCSM 中电容电压。而从故障电流抑制效果而言(直流电流衰减为零和交流电流衰减为零所需时间),在图 10(a)、(b)、(c)中,改进串联拓扑比 DCSM 拓扑抑制效果稍好,但是差别不是很大(相差大约 0.4 ms)。

## 4 结论

本文在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型的基础上,分析总结了 MMC-HVDC 直流侧 3 种故障类型的故障特性及对系统运行的影响。通过分析半桥型

拓扑在系统闭锁后不能够实现直流侧故障电流阻断的机理,对 MMC 子模块拓扑进行了改进,利用箝位二极管达到了桥臂电容双向充电目的,进而提供续流二极管反向偏置电压。仿真结果表明,新拓扑利用二极管的阻断特性实现了对直流侧故障电流的有效抑制,从而解决了 MMC 半桥型拓扑通过触发交流断路器进行故障隔离的问题。

## 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.  
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [2] GEMMELL B, DORN J, RETZMANN D, et al. Prospects of multi-level VSC technologies for power transmission[C]// IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chicago, USA: IEEE, 2008: 1-16.
- [3] 韦延方,卫志农,孙国强,等. 一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):1-9.  
WEI Yanfang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. New HVDC power transmission technology: MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 1-9.
- [4] 管敏渊,徐政,潘伟勇,等. 最近电平逼近调制的基波谐波特性解析计算[J]. 高电压技术,2010,36(5):1327-1332.  
GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Weiyong, et al. Analytical calculation of fundamental wave and harmonic characteristics for nearest level modulation[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1327-1332.
- [5] 管敏渊,徐政. MMC 型 VSC-HVDC 系统电容电压的优化平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(12):9-14.  
GUAN Minyuan, XU Zheng. Optimized capacitor voltage balancing control for modular multilevel converter based VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 9-14.
- [6] 何大清,蔡旭. 模块化多电平变流器的限幅控制和混合调制[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):63-66.  
HE Daqing, CAI Xu. Limitation control and hybrid modulation of modularized multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 63-66.
- [7] 杨晓峰,王晓鹏,范文宝,等. 模块组合多电平变换器的环流模型[J]. 电工技术学报,2011,26(5):21-27.  
YANG Xiaofeng, WANG Xiaopeng, FAN Wenbao, et al. Circulating current model of modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 21-27.
- [8] 杨晓峰,郑琼林. 基于 MMC 环流模型的通用环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(18):59-65.  
YANG Xiaofeng, ZHENG Qionglin. A novel universal circulating current suppressing strategy based on the MMC circulating current model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 59-65.
- [9] 谢妍,陈柏超,陈耀军,等. 新型模块化多电平换流器串联电抗器的功能与取值分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):55-59.  
XIE Yan, CHEN Baichao, CHEN Yaojun, et al. Function analysis and parameter selection for series reactor of modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 55-59.

- [10] 刘钟淇,宋强,刘文华. 采用 MMC 变流器的 VSC-HVDC 系统故障态研究[J]. 电力电子技术,2010,44(9):67-71.  
LIU Zhongqi,SONG Qiang,LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,44(9):67-71.
- [11] 袁旭峰,高璐,程时杰. VSC-HVDC 三相不平衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):1-5.  
YUAN Xufeng,GAO Lu,CHENG Shijie. Unbalanced three-phase control strategy of VSC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(9):1-5.
- [12] 魏晓云,孙辉,魏晓光,等. 改善电能质量的电压源换流器高压直流输电不平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报,2011,31(9):8-14.  
WEI Xiaoyun,SUN Hui,WEI Xiaoguang,et al. Control strategy about power quality improvement for VSC-HVDC under unbalanced AC grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(9):8-14.
- [13] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过流分析[J]. 中国电机工程学报,2010,31(1):1-7.  
WANG Shanshan,ZHOU Xiaoxin,TANG Guangfu,et al. Analysis of sub module over current caused by DC pole to pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2010,31(1):1-7.
- [14] LI X Q,SONG Q,LIU W H,et al. Protection of nonpermanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(1):483-490.
- [15] Alstom Grid. HVDC-VSC transmission technology of the future [J]. Alstom Grid,2011(1):13-17.
- [16] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C]//2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE). Jeju,Korea:IEEE,2011:1425-1431.

#### 作者简介:



张建坡

张建坡(1973-),男,河北保定人,讲师,博士研究生,主要研究方向为高压直流输电与柔性输配电技术(E-mail:zhangjianpo@126.com);

赵成勇(1964-),男,浙江丽水人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为高压直流输电与柔性输配电技术、电能质量分析与控制(E-mail:chengyongzhao@ncepu.edu.cn)。

## Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC

ZHANG Jianpo,ZHAO Chengyong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

**Abstract:** The DC-link fault characteristics of MMC-HVDC system are different from those of two-level VSC-HVDC system because of different topologies and modulation methods. Based on the simulation model established with PSCAD/EMTDC,the DC-link fault characteristics of line-to-ground,broken line and line-to-line,as well as their effects on system operation,are analyzed. The topology of half-bridge sub-module is improved to block the fault current in both directions,which,by changing the arm current path,charges the arm capacitor in both directions to set the blocking voltage of free-wheel diode. Simulation is carried out for the line-to-line fault and results show that,the improved topology suppresses the DC-link fault current effectively to prevent the trip of AC circuit breaker.

**Key words:** MMC-HVDC; DC-link fault; bidirectional blocking; failure analysis; HVDC power transmission; computer simulation