

# 模块化多电平换流器子模块拓扑设计及其控制

张建坡<sup>1</sup>, 蒋 畅<sup>1</sup>, 田新成<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071001; 2. 国网唐山供电公司, 河北 唐山 063000)

**摘要:**根据直流故障电流切断位置不同,首先分析基于交流断路器、直流断路器和模块化多电平换流器子模块拓扑的3种故障抑制技术方案及其特点。然后从切断故障电流角度出发,利用双向可控开关对半桥拓扑进行改进设计以抑制直流故障,并与传统半桥子模块相结合构成混合双子模块拓扑以降低单位电平成本和运行损耗。同时研究在闭锁期间混合双子模块内部电容不均衡充电所导致的电容电压不平衡问题及其应对策略。最后在PSCAD/EMTDC中搭建两端仿真模型,对混合双子模块拓扑直流故障抑制特性及电容电压控制策略进行仿真验证。

**关键词:**直流故障;模块化多电平换流器;混合双子模块;电压平衡

**中图分类号:**TM 46

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.012

## 0 引言

基于半桥子模块的模块化多电平换流器 HBSM-MMC (Modular Multilevel Converter based on Half Bridge Sub Module) 拓扑是极具技术优势的电压源型换流器拓扑之一,与其他电力电子换流器相比,其在中高压电能变换应用领域具有易扩展性,电压、电流输出波形质量高,谐波含量低,功率器件之间不需动态均压等技术优势<sup>[1-5]</sup>。但是由于二极管的续流效应会导致 HBSM-MMC 应用于高压直流输电时缺乏直流侧短路故障电流抑制能力,因此不利于采用成本较低的架空线路。

交直流断路器是一种隔离直流故障的可行解决方案,但是此方案需要在系统交流侧、直流侧安装额外的设备和器件,这会导致系统成本、功率损耗和占地面积的增加。另外交流断路器的响应速度慢,而直流断路器在高电压、高功率应用场合技术仍然不是很成熟,仍处于开发和实验阶段<sup>[6]</sup>。实现直流故障电流阻断的另一种方案是对现有子模块拓扑进行改进,其相关研究内容引起国内外学者们的广泛关注,已有多种具有故障阻断能力的自阻型子模块拓扑被提出<sup>[7-15]</sup>。如 ALSTON 公司设计的基于全桥拓扑级联和 IGBT 串联的变桥臂拓扑、基于单极全桥和半桥子模块的混合桥臂单极拓扑、基于全桥子模块和半桥子模块的混合桥臂双极拓扑、利用箝位开关构成的箝位双子模块 CDSM (Clamp Double Sub Module) 和串联双子模块 SDSM (Series Double Sub Module) 拓扑等。上述自阻型拓扑在直流故障时通过闭锁 IGBT 对储能电容充电,在充电回路中形成反向

偏置电压,最终关断续流二极管,切断电流。通过上述过程,储存在电抗器中的能量可以被电容吸收,而不需要额外的放电功率器件消耗能量,从而抑制故障电流。

自阻型拓扑虽然具有抑制直流故障电流的能力,但同时也存在额外附加功率器件所带来的运行损耗较大的问题。针对上述问题,本文在分析直流故障抑制机理的基础上,利用双向可控开关对传统半桥拓扑进行改进,设计改进的半桥拓扑以实现直流故障抑制;借鉴混合拓扑构成的思想,与传统半桥拓扑组合成混合子模块拓扑,从而降低单位电平所需功率器件数量及其运行损耗;针对混合子模块拓扑构成直流输电系统的自励启动和子模块内电容电压平衡问题进行分析并研究应对策略。

## 1 模块化多电平换流器子模块拓扑

为实现直流侧故障抑制,换流器在系统闭锁后必须具备以下2个功能:能够切断交流电网向直流侧馈入故障电流路径,耗散掉直流网络电感储能。对于图1(a)所示的半桥子模块拓扑,闭锁后子模块处于旁路状态,不具备直流故障抑制能力。如果在桥臂电流双向流动下能实现模块电容级联充电,则在电容电压作用下,二极管最终会处于反向偏置状态,切断直流故障电流,同时还能将故障回路中的部分磁场能转换为电场能。

### 1.1 改进型拓扑设计

二极管  $D_2$  不控续流效应导致半桥子模块旁路,从而交流侧持续向直流侧短路点馈入故障电流,因此如果将器件  $D_2$  替换为可控器件,可以切断故障电流。双向可控开关可以实现双向电流控制,目前应用于 ABB 所提的混合高压直流断路器拓扑中<sup>[16]</sup>。本文借鉴文献<sup>[17-18]</sup>的思想,利用双向可控开关替换图1(a)中的  $IGBT_2$ ,从而闭锁切断反向电流形成类似改进子模块 ISM (Improved Sub Module),其拓扑

收稿日期:2018-08-12;修回日期:2019-04-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2015-AA050603)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA050603)

如图1(b)所示。为解决电流瞬间阻断所带来的过压问题,同时也为降低单位电平所需功率器件数量,与半桥拓扑重新组合构成混合双子模块 HDSM (Hybrid Double Sub Module),其拓扑如图1(c)所示。

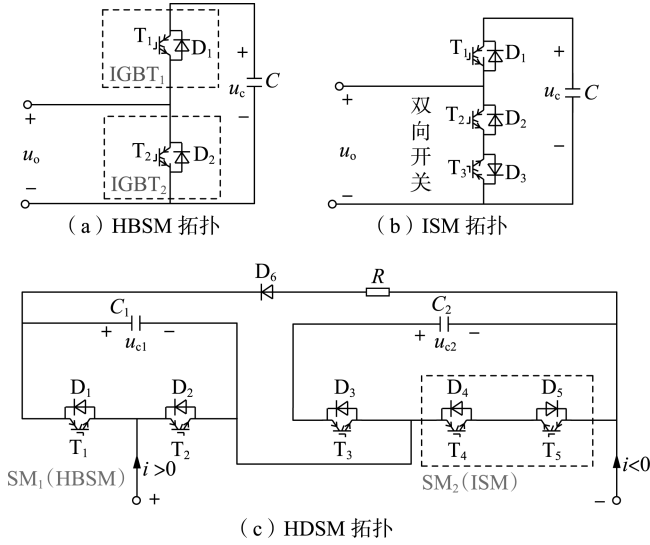


图1 子模块拓扑

Fig.1 SM topologies

表1为HDSM在正常情况下 $T_4$ 、 $T_5$ 作为双向可控开关时的开关状态表。

表1 HDSM 开关状态

Table 1 Switch states of HDSM

| 工作状态               | $S_{T1}$ | $S_{T2}$ | $S_{T3}$ | $S_{T4}$ | $S_{T5}$ | $u_o$             |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------|
| $SM_1$ 投入          | 1        | 0        | 0        | 1        | 1        | $u_{c1}$          |
| $SM_2$ 投入          | 0        | 1        | 1        | 0        | 0        | $u_{c2}$          |
| $SM_1$ 、 $SM_2$ 旁路 | 0        | 1        | 0        | 1        | 1        | 0                 |
| $SM_1$ 、 $SM_2$ 投入 | 1        | 0        | 1        | 0        | 0        | $u_{c1} + u_{c2}$ |
| 闭锁( $i > 0$ )      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | $u_{c1} + u_{c2}$ |
| 闭锁( $i < 0$ )      | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | $-u_{c1}$         |

对于HDSM最直接、最简单的方法是利用闭锁模式实现直流故障电流抑制。但根据表1,HDSM在桥臂电流小于0的情况下具有输出负电平特性,而HDSM的正电平输出特性则不受桥臂电流方向的约束。根据上述分析,当桥臂电流大于0时,桥臂子模块电容处于串联充电状态,可以闭锁正向桥臂电流,所以只要解决桥臂电流小于0时的抑制问题。本文借鉴文献[19]提出的全桥拓扑直流故障抑制思想,利用HDSM桥臂电流小于0的负电平输出特性将直流电压降低为0,从而阻断小于0的桥臂电流,实现故障电流的双向抑制。以模块化多电平换流器定功率侧为例,其控制逻辑如图2所示。图中, $u_{c\_Ref}$ 、 $u_{c\_Avg}$ 分别为电容电压参考值和平均值。

## 1.2 经济性分析

从图1(c)和表1可以看出,HDSM零电平输出路径为 $T_2(D_2) \leftrightarrow T_4(D_4) \leftrightarrow T_5(D_5)$ ,导通路径中

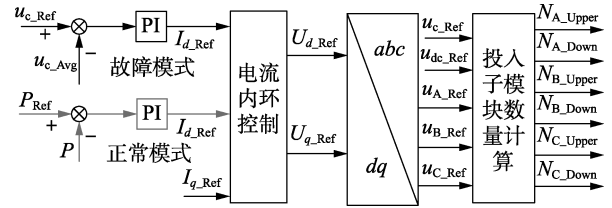


图2 控制逻辑图

Fig.2 Control logical diagram

功率器件数量为3个。其1电平输出路径有2条:一条是 $T_1(D_1) \leftrightarrow C_1 \leftrightarrow T_4(D_4) \leftrightarrow T_5(D_5)$ ,功率器件数量为3个;另一条是 $T_2(D_2) \leftrightarrow T_3(D_3) \leftrightarrow C_2$ ,功率器件数量为2个。而双1电平输出路径为 $T_1(D_1) \leftrightarrow C_1 \leftrightarrow T_3(D_3) \leftrightarrow C_2$ ,导通路径中功率器件数量为2个。相较于图3所示的其他双子模块拓扑,由于实现电容双向充电而加入的箝位开关在正常工作期间处于导通状态,所以导通路径中功率器件数量无论子模块输出何种电平都保持为3个,因而本文所设计的混合拓扑在运行损耗方面小于并联和串联型双子模块拓扑。

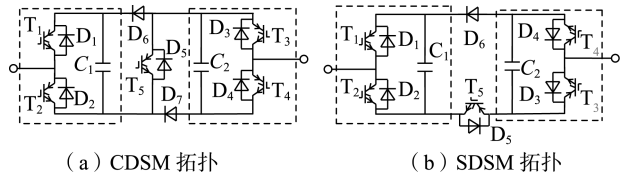


图3 双子模块拓扑

Fig.3 Double SM topologies

从功率器件数量上来看,HDSM与SDSM、CDSM双子模块拓扑所需功率器件数量相等。由于双向可控开关为2个常规IGBT的串联组合,在正常工作期间其两端电压为电容电压 $u_{c2}$ ,因此从耐压角度出发, $T_4$ 和 $T_5$ 的额定电压可选为 $T_3$ 额定电压的1/2,而当前低电压IGBT的价格要小于高电压IGBT,因而在器件成本方面也具有一定的成本优势。表2给出了HDSM与其他类型拓扑在成本和运行损耗方面的定性比较,其中以2个半桥子模块为1个基本计量单位。表中损耗项从左至右分别为旁路、1电平和双1电平输出相对能耗,成本、损耗均为标么值。

表2 不同拓扑比较

Table 2 Comparison among different topologies

| 拓扑   | 成本   | 损耗          | 反压输出   |
|------|------|-------------|--------|
| HBSM | 1    | 1/1/1       | 0      |
| CDSM | 1.25 | 1.5/1.5/1.5 | $u_c$  |
| SDSM | 1.25 | 1.5/1.5/1.5 | $2u_c$ |
| HDSM | 1    | 1.5/1.25/1  | $u_c$  |

## 2 电容电压均衡控制

### 2.1 电容电压不平衡分析

根据图1,当混合子模块拓扑闭锁后桥臂电流小于0时,由于 $C_2$ 处于旁路, $C_1$ 处于充电状态,电

路中能量绝大部分被  $C_1$  吸收,从而导致混合子模块中产生电容电压差异的问题。通过降低故障回路能量或减小电容  $C_1$  吸收能量可在一定程度上解决这个问题,因此通过在直流侧串联限流电抗抑制闭锁前故障电流上升速率,或如图 1(c) 所示在闭锁后充电回路中串入平衡电阻  $R$  (类似桥臂阻尼器) 可降低电容吸收能量<sup>[20]</sup>。串联较大电阻虽有利于故障回路电能吸收,但可能会导致双控开关瞬间过电压和电阻发热严重问题,因此在选择平衡电阻  $R$  时首先要满足双控开关过电压要求。根据式(1)可以近似计算得到平衡电阻最大取值  $R_{\max}$ 。

$$R_{\max} \lambda_1 I_T + u_{c1} = \lambda_2 U_T \quad (1)$$

其中,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为 IGBT 电流、电压过载系数;  $U_T$ 、 $I_T$  分别为  $T_3$  的额定电压、电流。

子模块发热量与其工作时等效电阻吸收电能紧密相关。以 A 相桥臂中某个 HDSM 为例,故障抑制期间混合模块等效电阻吸收电能如式(2)所示。虽然其相较于半桥拓扑增加了平衡电阻能耗,但考虑到传统半桥拓扑闭锁后投入保护晶闸管,此时在断路器动作前交流侧处于三相短路状态,桥臂电流比较大,而动作后直流侧故障电路以桥臂电流为初始值,转换为一阶 RL 零输入响应,电流自然衰减,因此无论从故障电流持续时间还是幅值角度出发,混合拓扑中平衡电阻的加入对冷却系统影响不是很大,能够满足整个换流站散热要求。

$$\Delta W_{\text{HDSM}} = \int_{t_0}^{t_1} (i_{a1}^2 R_{\text{eq}} + i_{a1}^2 R) dt \quad (2)$$

其中,  $t_0$  为闭锁时刻;  $t_1$  为桥臂电流衰减到 0 的时刻;  $i_{a1}$  为 A 相桥臂电流;  $R_{\text{eq}}$  为子模块等效电阻。

## 2.2 HDSM-MMC 充电策略

HBSM-MMC 系统自励启动一般采取不控和全控整流 2 个阶段。但对于 HDSM-MMC, 根据 2.1 节的分析, 在闭锁期间  $C_1$  和  $C_2$  存在电容不均衡充电问题造成电容电压的差异, 同时充电回路中的电容数量也大于传统半桥拓扑, 因而不控整流充电结束后电容电压较低, 不适宜立即转换为全控整流。

为实现电容电压平衡, 在不控整流结束后, 由于 HBSM 电压较高, 可以利用 HBSM 的零电平输出状态辅助完成充电。但由于  $C_1$ 、 $C_2$  充电时间保持一致, 第 1 阶段充电造成的电容电压差异仍然不能够消除。而此时 HBSM 和 ISM 电容电压较高, 可以考虑采取电容电压排序算法对桥臂子模块电容电压进行均衡处理。当 HBSM 和 ISM 电容电压趋于一致后, 转换为全控整流方式建立直流母线电压。充电流程如图 4 所示。

## 3 仿真验证

为了验证混合拓扑的故障抑制能力, 本文在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 5 所示的 MMC-HVDC

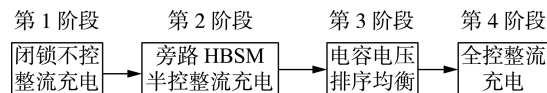


图 4 HDSM-MMC 启动流程图

Fig.4 Startup flowchart of HDSM-MMC

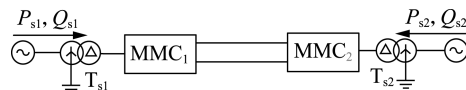


图 5 两端仿真模型

Fig.5 Two-terminal simulation model

仿真模型, 系统参数如表 3 所示。表中, 变压器漏感抗、桥臂电抗为标么值。设置直流侧两极短路故障点距离两端换流站 50 km, 在 1 s 时发生故障。仿真过程中, 取  $\lambda_1 = \lambda_2 = 2$ 、IGBT 额定电压  $U_T$  等于子模块电容电压  $u_c = 20$  kV、直流电流  $I_{dc} = 1$  kA、交流电流幅值  $I_{ac-m} = 1.5$  kA, 由此可近似估算出  $R_{\max}$  :

$$R_{\max} = \frac{\lambda_2 U_T - u_c}{\lambda_1 I_T} \approx \frac{20}{2(I_{dc}/3 + I_{ac-m}/2)} = 9.23 (\Omega)$$

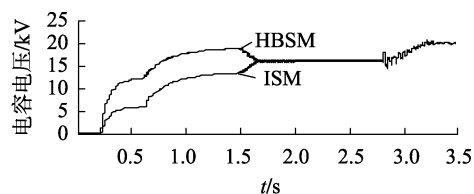
表 3 主电路参数

Table 3 Main circuit parameters

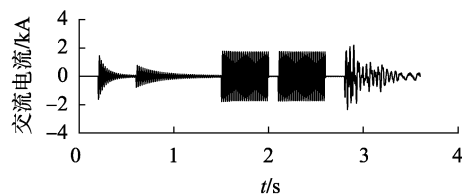
| 参数        | 参数值       | 参数              | 参数值 |
|-----------|-----------|-----------------|-----|
| 直流电压/kV   | $\pm 200$ | 桥臂子模块数          | 20  |
| 额定有功功率/MW | 400       | 子模块电容值/mF       | 3   |
| 交流侧电压/kV  | 210       | 桥臂电抗            | 0.1 |
| 变压器变比     | 210:220   | 子模块电压 $u_c$ /kV | 20  |
| 变压器漏感抗    | 0.1       |                 |     |

## 3.1 HDSM-MMC 启动分析

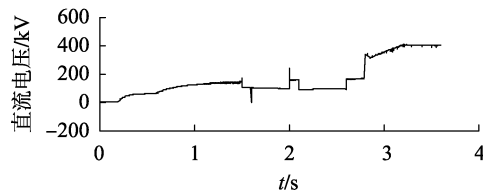
图 6 为 HDSM-MMC 启动时的仿真波形。从图 6 可以看出, 经过第 1 阶段的不控整流和旁路 HBSM



(a) A 相上桥臂电容电压



(b) A 相交流电流



(c) 直流母线电压

图 6 HDSM-MMC 启动时的仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms at HDSM-MMC start-up

的半控整流, HBSM 电容电压变化为  $0 \rightarrow 12 \text{ kV} \rightarrow 18 \text{ kV}$ , 而 ISM 电容电压变化为  $0 \rightarrow 6 \text{ kV} \rightarrow 12 \text{ kV}$ , 此时电容电压之间存在不平衡现象。在电容电压排序均衡控制下, HBSM、ISM 电容电压稳定在  $16 \text{ kV}$  左右。最后经过全控整流充电, 所有子模块电容将被充电至额定电压  $20 \text{ kV}$ , 从而建立起换流器侧直流母线电压。

### 3.2 直流故障抑制特性分析

图7为采用SDSM、HDSM和CDSM拓扑时直流侧故障闭锁效果比较图。可见由于闭锁后故障回路中投入充电电容数量存在差异, SDSM拓扑下储能电容等效直流电压大于CDSM和HDSM, 所以故障电流衰减到0所需时间最少。而对于CDSM和HDSM, 虽然故障闭锁后回路中处于充电状态电容数相同, 理论上故障抑制能力相等, 但是由于闭锁路径中HDSM只有电容 $C_1$ 充电吸收电能, 而CDSM中2个电容同时并联充电, 所以半桥子模块电容电压高于CDSM电容电压, 故障回路中直流等效电压较高, 抑制效果稍微优于CDSM拓扑。

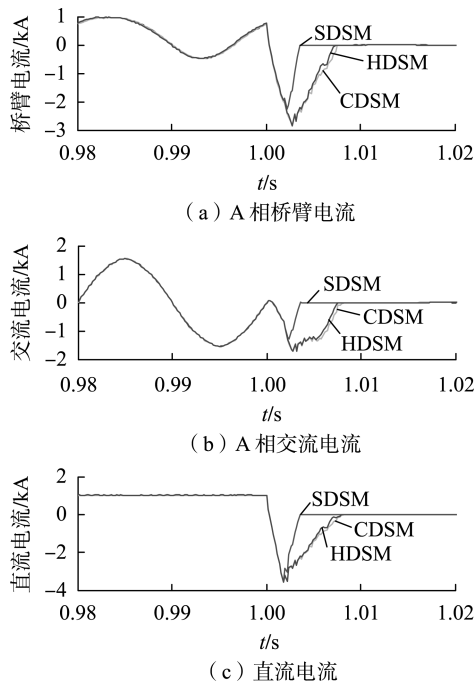


图7 直流故障闭锁效果比较

Fig.7 Comparison of DC fault blocking effect

直流故障非闭锁时的仿真波形如图8所示。从图8可以看出, 在直流故障后利用HDSM电流小于0时的负电平输出特性, 上桥臂电压和下桥臂电压具有大小相等极性相反特性, 因此故障期间直流电压近似为0, 避免了闭锁换流器。故障结束后系统恢复正常控制, 交直流电流和电压恢复正常。

图9为平衡电阻 $R$ 对电容电压和双向开关两端电压的影响波形。在未加平衡电阻的情况下, 从图9(a)可以看出, 换流器工作于整流状态时, 混合拓

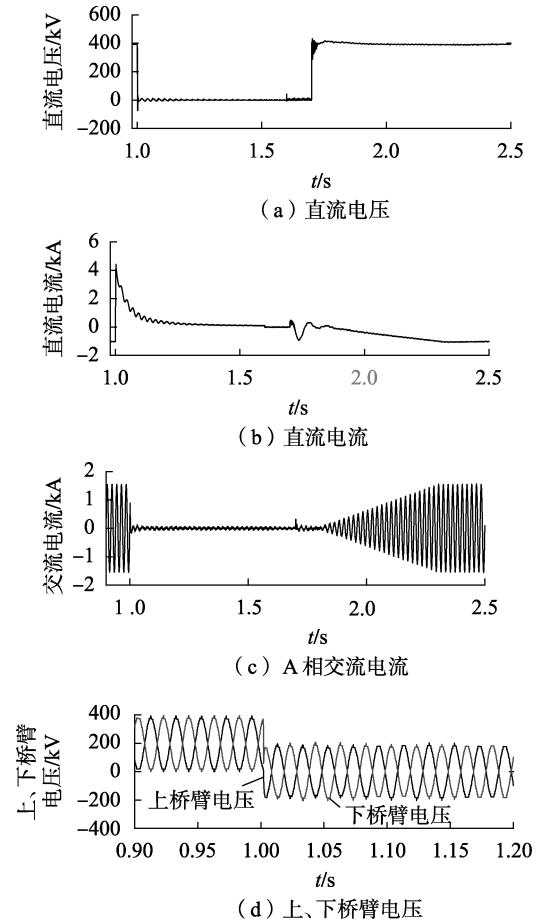


图8 直流故障非闭锁时的仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms when DC fault unblocking

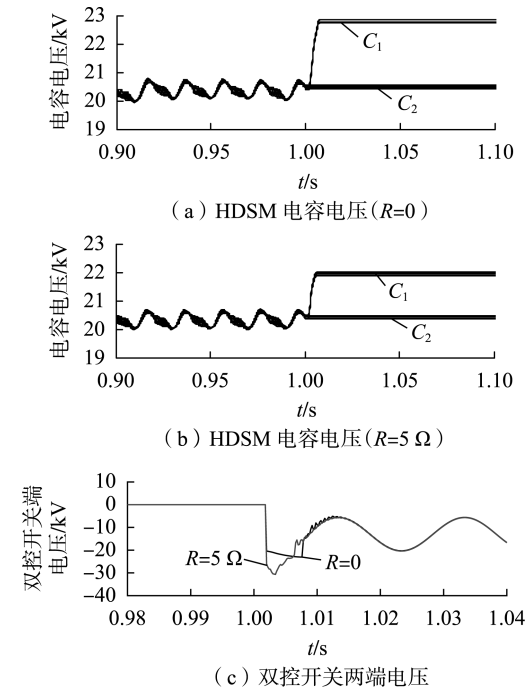


图9 有平衡电阻的仿真波形

Fig.9 Simulative waveforms with balancing resistor

扑中HBSM电容 $C_1$ 两端电压较高, 而ISM电容 $C_2$ 两端电压由于旁路近似保持不变。平衡电阻的加入

(近似取最大电阻值的  $1/2$ ), 避免了  $C_1$  电压过度升高, 降低了模块内电容电压的不平衡程度, 同时也加快了故障抑制速度。从图 9(c) 可以看出, 双控开关两端电压有所升高, 但仍然保持在 2 倍电压范围内。

#### 4 结论

(1) 针对传统半桥拓扑的模块化多电平换流器构成输电系统直流侧故障电流抑制问题, 本文采用了双向可控开关替代半桥拓扑中的 IGBT, 并与 HBSM 构成了混合子模块拓扑, 在实现直流故障抑制的同时也降低了单位电平功率器件数量和运行损耗。

(2) 分析了混合拓扑闭锁阶段和自励充电阶段电容充电时间差异所导致的电容电压不平衡问题及相应的应对措施。同时利用负电平输出特性, 将故障后直流电压控制为 0, 达到了直流故障抑制效果。仿真结果表明所设计的拓扑实现了直流故障抑制效果, 所提控制策略在一定程度上也解决了混合拓扑中电容电压不均衡问题。

#### 参考文献:

- [1] 王长亮, 许建中, 赵成永. 基于单箝位型子模块的 MMC 及拓扑改进方案[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 74-80.  
WANG Changliang, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong. MMC based on single-clamp sub-module and improved topology schemes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 74-80.
- [2] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 5051-5063.  
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 5051-5063.
- [3] 张建坡, 田新成, 尹秀艳. 模块化多电平换流器直流输电控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 103-108.  
ZHANG Jianpo, TIAN Xincheng, YIN Xiuyan. Control strategy of MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 103-108.
- [4] 孙树, 朱晋, 刘文龙. 一种具有故障隔离能力的 MMC-HVDC 换流站子模块拓扑研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 120-125.  
SUN Xu, ZHU Jin, LIU Wenlong. Fault-isolated sub-module topology of MMC-HVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 120-125.
- [5] 李欢, 田新成, 张建坡. 模块化多电平换流器子模块拓扑仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 95-101.  
LI Huan, TIAN Xincheng, ZHANG Jianpo. Simulating research of SM topologies of modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 95-101.
- [6] 荣命哲, 杨飞, 吴翊. 直流断路器电弧研究的新进展[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 1-9.  
RONG Mingzhe, YANG Fei, WU Yi. New developments in switching arc research in DC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 1-9.
- [7] ADAM G P, AHMED K H, FINNEY S J, et al. New breed of network fault-tolerant voltage-source-converter HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 335-346.
- [8] LI X Q, SONG Q, LIU W H. Protection of nonpermanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 483-490.
- [9] ALSTOM Grid. HVDC-VSC: transmission technology of the future[R]. [S.l.]: Alstom Grid, 2011.
- [10] NAMI A, WANG L, DIJKHUIZEN F. Five level cross connected cell for cascaded converters[C]//European Power Electronics and Applications Conference. Lille, France: IEEE, 2013: 1-9.
- [11] 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): 5171-5180.  
XIANG Wang, LIN Weixing, WEN Jinyu, et al. A new topology of sub-modules with DC fault current blocking capability and a new type of hybrid MMC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5171-5180.
- [12] 阳莉汶, 江伟, 王渝红. 具有直流故障阻断能力的电容嵌位子模块拓扑及其特性[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 172-178.  
YANG Liwen, JIANG Wei, WANG Yuhong. Capacitor-embedded sub module topology with DC fault blocking capability and its characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 172-178.
- [13] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C]//2011 IEEE Asia 8th International Conference Power Electronics and ECCE (ICPE & ECCE). Jeju, Korea: IEEE, 2011: 1425-1431.
- [14] 张建坡, 赵成勇, 孙海峰, 等. 模块化多电平换流器改进拓扑结构及其应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 173-180.  
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, SUN Haifeng, et al. The improved topology of modular multilevel converter and application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 173-180.
- [15] 张建坡, 赵成勇. 模块化多电平换流器子模块拓扑仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 106-112.  
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong. The simulations of sub module topologies of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 106-112.
- [16] 刘高任, 许烽, 徐政, 等. 适用于直流电网的组合式高压直流断路器[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 70-77.  
LIU Gaoren, XU Feng, XU Zheng, et al. An assembled HVDC breaker for HVDC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 70-77.
- [17] 索之闻, 李庚银, 迟永宁, 等. 一种基于子模块混合型模块化多电平换流器的高压大功率 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3577-3585.  
SUO Zhiwen, LI Gengyin, CHI Yongning, et al. A cell-hybrid modular multilevel converter based high-voltage high-power DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3577-2585.
- [18] 杨晓峰, 薛尧, 郑琼林. 采用逆阻型子模块的新型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1885-1891.  
YANG Xiaofeng, XUE Yao, ZHENG Trillion Q. Novel modular mul-

tilevel converter with reverse blocking sub-modules [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7):1885-1891.

- [19] 李少华,王秀丽,李泰,等. 混合式MMC及其直流故障穿越策略优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7):1850-1859.

LI Shaohua, WANG Xiuli, LI Tai, et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7):1849-1859.

- [20] 薛英林,徐政. C-MMC直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21):63-70.

XUE Yinglin, XU Zheng. DC fault ride through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21):63-70.

#### 作者简介:



张建坡

张建坡(1973—),男,河北保定人,讲师,博士,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);

蒋畅(1996—),女,湖南长沙人,硕士,主要研究方向为高压直流输电与柔性输配电技术(**E-mail**: jiangchang\_sum@126.com);

田新成(1982—),男,河北唐山人,工程师,硕士,主要研究方向为调度自动化和配电自动化系统。

## Design of sub module topologies and their control for modular multilevel converter

ZHANG Jianpo<sup>1</sup>, JIANG Chang<sup>1</sup>, TIAN Xincheng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071001, China;

2. State Grid Tangshan Power Corporation, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** Firstly, according to the different cutting off positions of DC link fault current, three possible fault suppressing techniques based on AC circuit breaker, DC circuit breaker and modular multilevel converter sub module topology and their respective features are summarized. Secondly, from the perspective of cutting off the fault current, the double direction controllable switch is used to improve half bridge sub module to achieve DC fault suppression. Subsequently, combined with traditional half bridge sub module, HDSM (Hybrid Double Sub Module) topology is designed to reduce the unit level cost and operating loss. Moreover, the problem of HDSM internal capacitor voltage imbalance caused by the unbalanced charging during blocking and its countermeasures are analyzed. Finally, a two-terminal simulation model is built in PSCAD/EMTDC to verify the effectiveness of HDSM DC link fault suppressing characteristics and capacitor voltage control strategies.

**Key words:** DC fault; MMC; hybrid double sub module; voltage balance