

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190015

## 一种可阻断直流故障电流的双逆阻型 MMC 研究

杨波<sup>1,2</sup>, 庄俊<sup>2</sup>, 姚运昌<sup>1</sup>, 景妍妍<sup>1</sup>, 姚良忠<sup>2</sup>, 曲小慧<sup>1</sup>, 陈武<sup>1</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省储能变流及应用工程技术研究中心  
(中国电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 210003)

**摘要:** 可阻断直流故障电流的模块化多电平变流器(Modular Multilevel Converter, MMC)在高压直流输电工程中具有广泛的应用前景。提出一种可阻断故障电流的基于新型双逆阻型子模块(Dual Reverse Blocking Sub-Module, DRBSM)的 MMC 拓扑结构。在输出相同电平数的前提下, 与现有拓扑相比, DRBSM 型 MMC 具有较强的直流故障电流阻断能力和更低的功率损耗, 且 DRBSM 型 MMC 可直接移植半桥子模块(HBSM)型 MMC 拓扑的控制和调制策略。亦对该子模块结构的拓扑构成、运行原理及故障电流阻断机理进行分析。最后, 采用 PSCAD/EMTDC 仿真验证了该拓扑结构的可行性和有效性。

**关键词:** 高压直流输电; 模块化多电平换流器; 双逆阻型子模块; 故障电流阻断能力; 功率损耗

### A dual reverse blocking sub-module based MMC with DC fault current blocking capability

YANG Bo<sup>1,2</sup>, ZHUANG Jun<sup>2</sup>, YAO Yunchang<sup>1</sup>, JING Yanyan<sup>1</sup>, YAO Liangzhong<sup>2</sup>, QU Xiaohui<sup>1</sup>, CHEN Wu<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Engineering Technology Research Center for Energy Storage Conversion and Application,  
China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The Modular Multilevel Converter (MMC) with DC fault current blocking capacity has broad application prospects in High Voltage Direct Current (HVDC) transmission applications. This paper proposes a novel Dual Reverse Blocking Sub-Module (DRBSM) based MMC with DC fault current blocking capability. Under the same output voltage level, the DRBSM based MMC has a strong DC fault current blocking capability and less power losses compared with existing topologies. Moreover, the DRBSM based MMC can adopt the simple control and modulation strategy of the HBSM based MMC directly. This paper also analyzes the DRBSM structure, operation principle and DC fault current blocking mechanism. Finally, the feasibility and validity of the topological structure is verified by PSCAD/EMTDC simulation.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5500-201918249A-0-0-00), China Electric Power Academy Innovation Fund Project (No. NY83-18-007), and National Natural Science Foundation of China (No. 51677028).

**Key words:** high voltage direct current transmission; modular multilevel converter; dual reverse blocking sub-module; DC fault current blocking capability; power loss

## 0 引言

目前, 模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)以其开关频率低、功率损耗小、电能

质量佳等优点在柔性高压直流输电系统(High Voltage DC transmission, HVDC)中得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。

如何实现直流故障电流快速有效阻断是制约直流电网发展的瓶颈之一。由于直流电网是一个“低惯量”系统, 直流线路一旦故障, 故障将瞬间扩散至整个系统。直流故障电流没有自然过零点且要求在极短时间内实现故障电流阻断或直流故障线路切除, 因此对直流断路器的设计提出了极大的挑战。

**基金项目:** 国家电网公司科技项目资助(5500-201918249A-0-0-00); 中国电科院创新基金项目资助(NY83-18-007); 国家自然科学基金项目资助(51677028)

目前国内外已研制成功的高压直流断路器样机<sup>[5]</sup>, 仍难以达到高电压大容量直流电网的需求, 且缺乏工程运行试验。已投运的舟山五端柔性直流输电工程<sup>[6]</sup>、法国-西班牙 INELFE 柔性直流联网工程<sup>[7]</sup>、厦门柔性直流输电工程<sup>[8]</sup>以及鲁西背靠背柔性直流输电工程<sup>[9]</sup>等直流侧故障问题, 多依靠交流断路器来阻断故障线路, 该方法存在动作速度慢、重启动配合动作时序复杂、恢复时间长等缺点<sup>[10]</sup>。因此, 对于大容量、远距离的高压直流输电系统, 具有故障电流自阻断能力的 MMC 拓扑及运行控制策略是目前研究的热点<sup>[11]</sup>。

尽管基于半桥型子模块(Half Bridge Sub-Module, HBSM)MMC 在柔性直流输电工程中被广泛应用, 但其不具备故障电流自阻断能力, 该拓扑结构无法通过闭锁换流器来阻断短路电流。因此, 国内外已提出多种具有故障电流自阻断能力的拓扑结构并对其分析比较。如全桥型子模块(Full Bridge Sub-Module, FBSM)和钳位型双子模块(Clamping Double Sub-Module, CDSM), 虽然具有较强的故障阻断能力, 但 FBSM 所用开关器件数量为 HBSM 的两倍, 导致 FBSM 型 MMC 的成本及损耗比 HBSM 型 MMC 高, 而 CDSM 的开关器件数量虽然只增加 25%, 但闭锁阶段两个子模块电容存在两种不同的连接方式, 导致子模块电容利用率不高, 直流故障电流阻断能力逊于 FBSM 型 MMC<sup>[12-13]</sup>。增强自阻型子模块(Self-Blocking Sub-Module, SBSM)的开关器件数量比 HBSM 增加 50%, 但在正常工作模式下, 新增加的 IGBT 始终处于导通状态, 存在较大的通态损耗<sup>[14]</sup>。逆阻型子模块(Reverse Blocking Sub-Module, RBSM)增加了一条由旁路吸收电容和二极管制成的故障电流阻断通路<sup>[15]</sup>, 改进型子模块(Improved Sub-Module, ISM)在 HBSM 的交流输出端口增加了阻断 IGBT 以及由吸收电容和二极管制成的吸收回路<sup>[16]</sup>, RBSM 和 ISM 共同存在的问题是, 在输出同等电平情况下, 额外增加了吸收电容, 增加了子模块体积与成本。T 型全桥子模块(T-type Full Bridge Sub-Module, TFSM)在正常工作模式下, 输出 5 种电平:  $\pm 2u_c$ 、 $\pm u_c$  和 0, 开关管控制较为复杂<sup>[17]</sup>。

本文在研究分析已有子模块的基础上, 针对以上问题, 提出了一种新型双逆阻型子模块(Dual Reverse Blocking Sub-Module, DRBSM)拓扑。在输出相同电平数的前提下, 故障电流自阻断能力及清除速度等同于 FBSM, 控制简单, 可直接采用 HBSM 型 MMC 的调制与控制策略, 且新增加的 RB-IGBT 功率器件在正常工作时并不一直导通, 功率损耗较低。本文将详细介绍该子模块拓扑的运行原理和故

障电流闭锁机理, 并通过仿真波形验证该子模块拓扑的特点。

## 1 双逆阻型子模块拓扑结构及运行原理

图 1 给出所提的 DRBSM 结构图。由图可知, 该 DRBSM 由两个逆阻型单元和两个钳位二极管  $D_2$ 、 $D_3$  构成。其中, 逆阻型单元由一个带反并联二极管的 IGBT、两个反并联的 RB-IGBT 和一个子模块电容组成。RB-IGBT 是将 IGBT 元胞结构与可耐高压的二极管元胞结构集成到一个芯片上, 相比于传统的 IGBT 串联二极管阻断电流的方式, RB-IGBT 具有反向阻断能力、总通态压降低、芯片制造成本低、总功耗低和电路结构简单等诸多优点<sup>[18-19]</sup>。目前, 富士电机采用混合隔离终端技术, 已研发出 1 700 V 的 RB-IGBT 模块<sup>[20]</sup>。 $C_1$ 、 $C_2$  为两个容值相同的子模块电容,  $u_c$  为子模块电容电压。

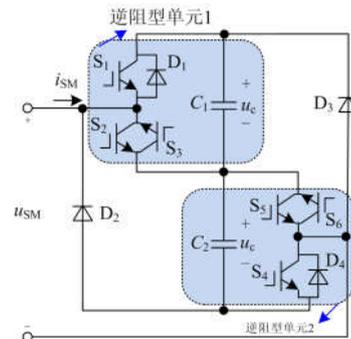


图 1 双逆阻型子模块拓扑结构

Fig. 1 Circuit configuration of DRBSM

DRBSM 有两种工作模式: 正常模式和闭锁模式。表 1 给出其对应的开关器件状态, 其中  $S_2$  和  $S_3$  的驱动信号同步,  $S_5$  和  $S_6$  的驱动信号亦同步。由于 DRBSM 包含两个电容, 正常模式下, DRBSM 输出  $0$ 、 $u_c$ 、 $2u_c$  三种工作状态。三种工作状态对应的电流通路如图 2 所示。其中虚线代表电流  $i_{SM} > 0$  的流向, 点线代表  $i_{SM} < 0$  的流向。正常工作时,  $D_2$  和  $D_3$  中无电流流过, DRBSM 可以等效为两个级联的逆阻型单元, 每个逆阻型单元包含一个 IGBT 模块和一个 RB-IGBT 模块。当逆阻型单元处于投入状态时, IGBT 模块( $S_1$  或  $S_4$ )导通, RB-IGBT 模块( $S_2$  与  $S_3$  或  $S_5$  与  $S_6$ )关断; 当逆阻型单元处于切除状态时, IGBT 模块关断, RB-IGBT 模块导通。因此, 逆阻型单元正常工作时的投切控制与 HBSM 相同, 即  $S_2$  和  $S_3$ 、 $S_5$  和  $S_6$  分别对应于 HBSM 的下管 IGBT 模块, 所以, 两个逆阻型单元可近似等效为两个 HBSM, 而 DRBSM 可近似等效为两个 HBSM 通过两个二极管级联, 则 HBSM 型 MMC 调制和控制策

略均可适用于 DRBSM 型 MMC, 减少了系统控制复杂度。闭锁模式下, 快速闭锁 DRBSM 中的所有 IGBT 模块和 RB-IGBT 模块, 不论子模块输入电流  $i_{SM}$  方向如何, DRBSM 中的两个子模块电容始终处于串联充电状态, 如图 3 所示, 与二极管一同构成阻断故障电流通路。当  $i_{SM} > 0$  时, 电流经  $D_1$ 、 $D_4$  向子模块电容  $C_1$ 、 $C_2$  充电, 如图 3(a)所示; 当  $i_{SM} < 0$  时, 电流经  $D_2$ 、 $D_3$  向子模块电容  $C_1$ 、 $C_2$  充电, 如图 3(b)所示。随着子模块电容电压的不断增大, 其提供的反向电压使电流通路中的二极管处于截止状态, 从而阻断故障电流。

表 1 双逆阻型子模块的开关状态

Table 1 Switching states of DRBSM

模式	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$u_{SM}$	$i_{SM}$
正常模式	1	0	0	1	0	0	$+2u_c$	-
	1	0	0	0	1	1	$+u_c$	-
	0	1	1	1	0	0	$+u_c$	-
	0	1	1	0	1	1	0	-
闭锁模式	0	0	0	0	0	0	$+2u_c$	$>0$
	0	0	0	0	0	0	$-2u_c$	$<0$

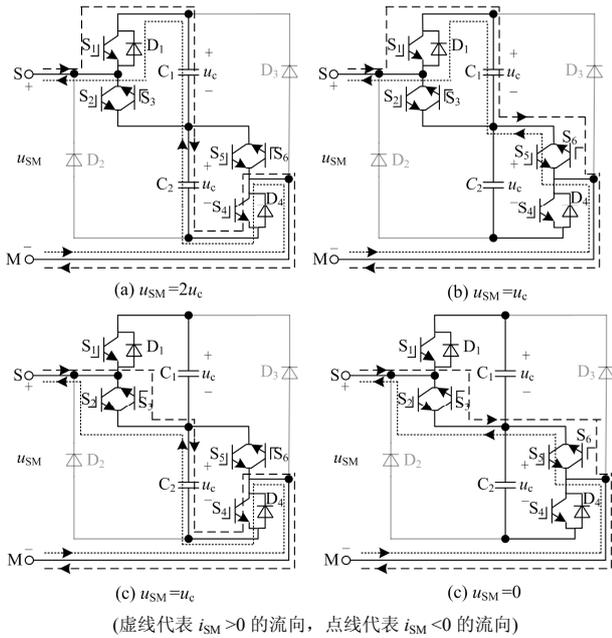


图 2 正常模式下的电流流路径  
Fig. 2 Current paths under normal operation

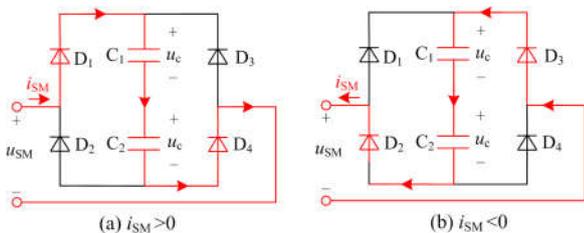


图 3 闭锁模式下的双逆阻型子模块电流路径  
Fig. 3 Current loop of DRBSM under blocked

## 2 DRBSM 型 MMC 闭锁直流故障分析

双极短路故障是 MMC-HVDC 换流站内影响最恶劣的故障之一<sup>[21]</sup>, 因此本文针对双极短路故障时 DRBSM 型 MMC(DRBSM-MMC)直流侧故障电流闭锁机理进行分析。

图 4 给出三相 DRBSM-MMC 拓扑结构图, 每相包含上下两个桥臂, 共 6 个桥臂。由于每个 DRBSM 子模块包含两个电容单元, 因此每个桥臂由  $N/2$  个子模块与一个桥臂电抗器  $L_0$  串联组成。 $U_{dc}$  为直流侧母线电压,  $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$  分别为三相交流相电压, O 点表示零电位参考点, P、N 分别为直流母线正极和负极。

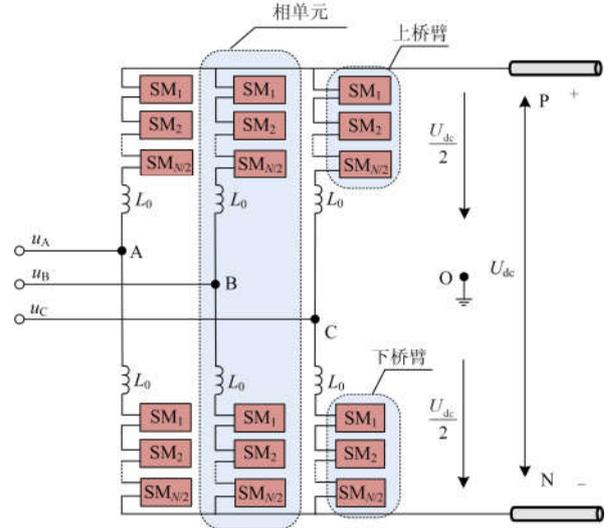


图 4 三相 DRBSM-MMC 的拓扑结构图  
Fig. 4 Three-phase DRBSM-MMC topology

当系统正常运行时, MMC 上下桥臂投入运行的子模块个数之和为  $N$ , 且子模块的投切状态由电容电压均衡排序算法决定, 子模块单个电容平均电压  $U_c$  和线电压  $u_{AB}$  与直流侧母线电压  $U_{dc}$  的关系分别为

$$U_c = \frac{U_{dc}}{N} \quad (1)$$

$$u_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{2} M U_{dc} \quad (2)$$

其中,  $M$  为电压调制比,  $0 < M \leq 1$ , 一般情况下,  $M$  取值 0.8~0.9。

当系统发生双极短路故障时, 即直流母线正负极 P 端和 N 端短接, 子模块闭锁前, 子模块电容放电是造成故障过电流的主要原因<sup>[22]</sup>, 子模块闭锁后, 子模块等效电路如图 3 所示, 交流侧馈入的电流给子模块电容充电, 当放电回路上下桥臂所有子

模块电容电压之和大于交流侧线电压时，由于二极管的单向导通性直接阻断了直流故障电流，此时三相 MMC 中的电流路径如图 5 所示。其中， $L_{dc}$ 、 $R_{dc}$  分别为直流母线线路正负极两端的电感和电阻， $R_F$  为直流侧短路等效电阻。

为了简化分析，本节以 A、B 两相为例，分析 DRBSM-MMC 闭锁短路时的故障电流机理。当桥臂电流  $i_A > 0$  时，如图 5(a)所示，电流从 A 端口流入，流通过程为 A→ $L_0$  (A 相下桥臂电感)→ $N/2$  个  $D_1$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_4$  (A 相下桥臂)→ $L_{dc}$ 、 $R_{dc}$ (N 端直流线路阻抗)→ $R_F$ (直流侧短路电阻)→ $L_{dc}$ 、 $R_{dc}$ (P 端直流线路阻抗)→ $N/2$  个  $D_1$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_4$  (B 相上桥臂)→ $L_0$  (B 相上桥臂电感)→B。此时电流通路中串联了  $N$  个  $D_1$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_4$ ，由基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff voltage law, KVL)可得

$$u_{AB} = N(u_{D1} + u_{D4}) + 2NU_C + u_{RL} \quad (3)$$

其中，设  $u_{RL}$  为短路回路桥臂电感和直流线路阻抗上的电压之和。把式(1)、式(2)代入式(3)中可得

$$u_{D1} + u_{D4} = \frac{1}{N} \left[ \left( \frac{\sqrt{3}}{2} M - 2 \right) U_{dc} - u_{RL} \right] < 0 \quad (4)$$

此时，无论  $M$  如何设计，二极管  $D_1$ 、 $D_4$  两端电压之和恒小于 0，二极管反偏截止。因此，当桥臂电流  $i_A > 0$  时，本文所提出的 DRBSM 型 MMC 可快速阻断直流故障电流。

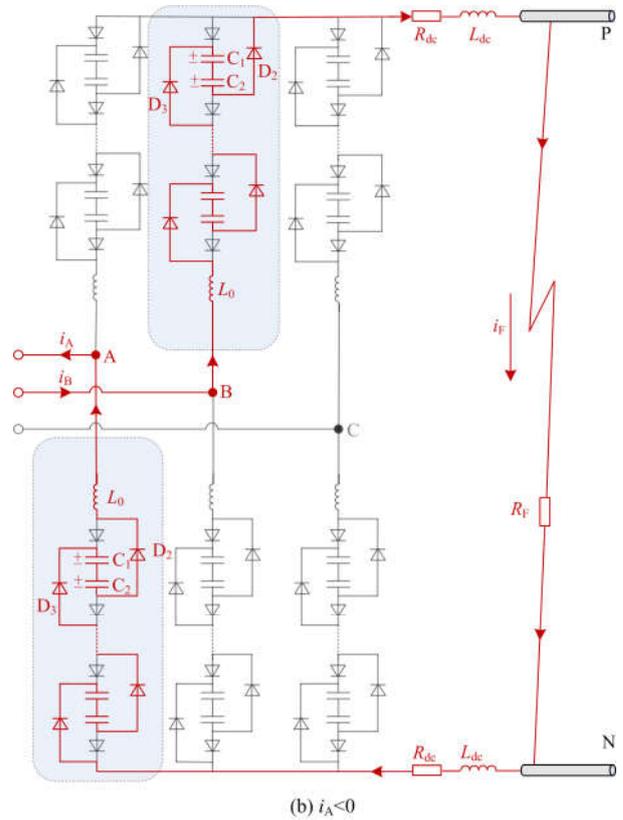
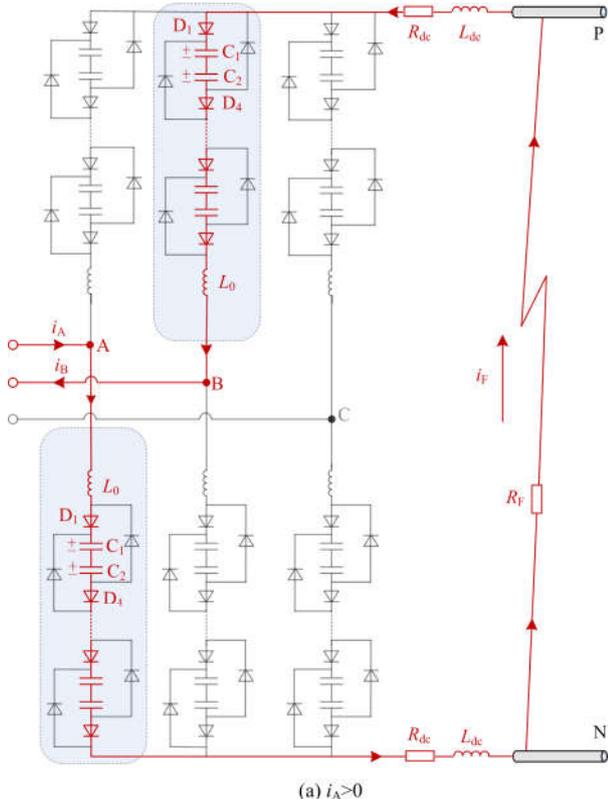


图 5 闭锁模式下的 MMC 电流路径  
Fig. 5 Current loop of MMC under blocked

同理，当桥臂电流  $i_A < 0$  时，即电流从 A 端口流出时，流通过程为 B→ $L_0$  (B 相上桥臂电感)→ $N/2$  个  $D_3$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_2$  (B 相上桥臂)→ $L_{dc}$ 、 $R_{dc}$ (P 端直流线路阻抗)→ $R_F$ (直流侧短路电阻)→ $L_{dc}$ 、 $R_{dc}$  (N 端直流线路阻抗)→ $N/2$  个  $D_3$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $D_2$  (A 相下桥臂)→ $L_0$  (A 相下桥臂电感)→A。此时电流通路中共串联  $N$  个  $D_2$ 、 $D_3$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ ，由 KVL 得

$$-u_{AB} = N(u_{D2} + u_{D3}) + 2NU_C + u_{RL} \quad (5)$$

把式(1)、式(2)代入式(5)中可得

$$u_{D2} + u_{D3} = -\frac{1}{N} \left[ \left( \frac{\sqrt{3}}{2} M + 2 \right) U_{dc} + u_{RL} \right] < 0 \quad (6)$$

此时，二极管  $D_2$ 、 $D_3$  因承受反向电压而快速截止，可得，当桥臂电流  $i_A < 0$  时，本文所提出的 DRBSM MMC 可直接阻断直流故障电流。

综上所述，当 DRBSM 型 MMC 工作在闭锁模式下，无论桥臂电流方向如何，两个子模块电容  $C_1$  和  $C_2$  始终处于串联充电状态，子模块电容利用率高。

对于不同子模块类型的 MMC 来说，区别在于闭锁后放电回路的三相等效总电容  $C_0$  和每个子模块投入的反向电容电压之和  $U_{c0}$ ，由文献[23]可知， $C_0$  越小和  $U_{c0}$  越大，对应的子模块拓扑的故障闭锁

能力越强。为了比较不同子模块类型的 MMC 故障闭锁能力, 在统一输出相同  $N+1$  电平数下, 子模块中单个电容值为  $C$ , 计算  $C_0$  和  $U_{c0}$  如表 2。

表 2 不同子模块三相等效  $C_0$  和  $U_{c0}$  对比

Table 2 Comparison of  $C_0$  and  $U_{c0}$  among SMs

SM	$C_0$	$U_{c0}$
FBSM	$3C/(2N)$	$2NU_c$
CDSM	$2C/N$	$NU_c$
SBSM	$3C/(2N)$	$2NU_c$
ISM	$3C/(2N)$	$2NU_c$
RBSM	$3C/(2N)$	$2NU_c$
DRBSM	$3C/(2N)$	$2NU_c$

对于 FBSM、SBSM 及 DRBSM 构成的 MMC, 闭锁后放电回路的  $C_0$  和  $U_{c0}$  均相等, 而对于 CDSM 型 MMC, 其放电回路的  $C_0$  是其他拓扑类型的两倍,  $U_{c0}$  是其他拓扑类型的一半, 因此, DRBSM 型 MMC 具有和 FBSM 型 MMC 相同的故障电流阻断能力, 强于 CDSM 型 MMC 的故障电流阻断能力。对于 RBSM 和 ISM 构成的 MMC, 闭锁后放电回路的等效  $C_0$  和  $U_{c0}$  均与 DRBSM 构成的 MMC 相等, 但是, RBSM 和 ISM 额外增加了吸收电容, 子模块闭锁后需先给吸收电容充电, 建立其故障回路的反向电压, 因此, RBSM 和 ISM 型 MMC 的故障电流阻断效果要弱于 DRBSM 型 MMC。在输出相同  $N+1$  电平数下, 不同子模块类型换流器每个桥臂所需器件数量如表 3 所示。由表 3 可知, 本文所提出的 DRBSM 型 MMC 相比于基于其他类型子模块的 MMC 能减少所使用的器件数量。

表 3 基于不同子模块的 MMC 每桥臂所需器件数量

Table 3 Comparison of device numbers of different types of MMC in one arm

类型	子模块数量	IGBT	RB-IGBT	二极管	电容	总数
FBSM	$N$	$4N$	0	$4N$	$N$	$9N$
CDSM	$N/2$	$2.5N$	0	$3.5N$	$N$	$7N$
SBSM	$N$	$3N$	0	$4N$	$N$	$8N$
ISM	$N$	$3N$	0	$4N$	$2N$	$9N$
RBSM	$N$	$N$	$2N$	$2N$	$N$	$7N$
DRBSM	$N/2$	$N$	$2N$	$2N$	$N$	$6N$

### 3 仿真分析

为了验证本文提出的 DRBSM 型 MMC 系统闭锁直流故障电流的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 下搭建了 21 电平双端 MMC-HVDC 仿真模型, 如图 6 所示。主要仿真参数为: 系统额定容量为 400 MVA, 交流电压为 220 kV, 变压器变比为 220/210, 直流电压为  $\pm 200$  kV, 每个桥臂含有 20 个子模块, 子模块电容

电压为 20 kV, 桥臂电感为 0.036 H, 子模块电容为 3 000  $\mu$ F, 两换流器之间的直流线路为 100 km, 直流线路电阻和电感分别为 0.015  $\Omega$ /km 和 0.1 mH/km。仿真采用常规 HBSM 型 MMC 中的最近电平逼近调制策略和电容电压排序的均衡控制算法。

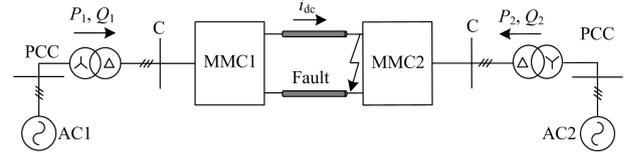
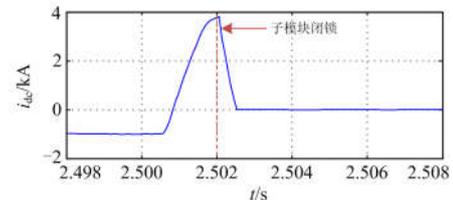


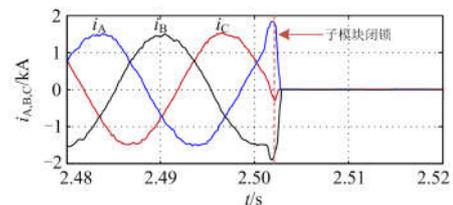
图 6 仿真系统结构图

Fig. 6 Structure of simulation system

假定系统在 2.5 s 时直流侧发生双极短路故障, 故障发生在 MMC2 换流器直流侧, 考虑到系统反应延迟等诸多因素, MMC1 换流器在 2 ms 后实现闭锁。图 7 分别给出了发生双极短路故障时, 直流侧输出电流  $i_{dc}$  和交流侧三相交流相电流  $i_{A,B,C}$  的电流波形。从图中可以看出, 2.5 s 之前, 即正常工作模式下, 直流侧输出电流  $i_{dc} = -1$  kA。2.5 s 时发生双极短路故障, 由于子模块电容放电和交流侧馈能,  $i_{dc}$  迅速增大。2 ms 后, 换流器闭锁,  $i_{dc}$  在极短的时间内衰减至零, 故障清除; 交流侧相电流  $i_{A,B,C}$  也迅速降为零, 阻断交流侧能量继续向故障点馈入。



(a) 直流侧输出电流波形



(b) 交流侧相电流波形

图 7 双极短路故障下 MMC1 直流侧和交流侧电流波形

Fig. 7 Current waveforms of MMC1 under pole to pole fault

图 8 为基于 DRBSM 的 MMC-HVDC 系统在双极短路故障下的电压波形。图 8(a) 为直流侧输出电压  $U_{dc}$  的波形, 在正常工作模式下, 系统工作在  $\pm 200$  kV 恒压输出模式, 故障发生后, 直流侧输出电压迅速降为零。如图 8(b) 所示, 故障闭锁前, A 相上桥臂电压是以正弦波为基准的 21 电平阶梯波, 故障闭锁后, 桥臂电压中的直流分量为零, 只剩下

交流分量成分。图 8(c)和图 8(d)分别展示了 A 相上桥臂和下桥臂各子模块电容电压的波形，换流器闭锁前，子模块电容电压基本在 20 kV 附近波动，换流器闭锁后，子模块电容提供的反向电动势大于交流侧线电压峰值，电容的放电回路被阻断，并且电容的充电回路已经被闭锁，因此，各子模块电容电压基本保持不变，有利于系统重新启动时直流母线电压的建立。

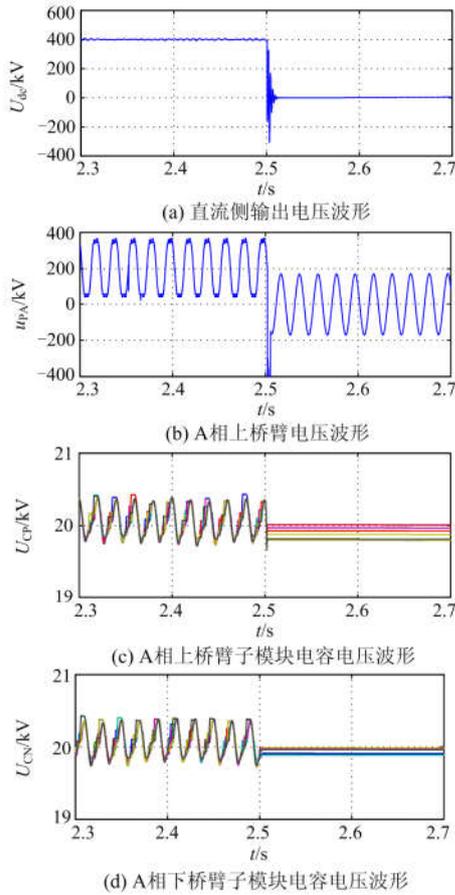


图 8 双极短路故障下 MMC 电压波形

Fig. 8 Voltage waveforms under pole to pole fault

图 9 为 A 相上桥臂第一个子模块中的 RB-IGBT 模块(S<sub>2</sub> 和 S<sub>3</sub>)正常工作时，在一个工频周期内的电压和电流波形。由图 9 可知，在正常工作模式下，S<sub>2</sub> 和 S<sub>3</sub> 未处于一直导通状态，同理，S<sub>5</sub> 和 S<sub>6</sub> 亦未处于一直导通状态，其导通或关断控制逻辑由 MMC 的电容电压均衡算法决定。图 10 为 A 相上桥臂第一个子模块中的钳位二极管 D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub> 和电容 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 的电流波形。由图 10(a)可知，子模块的钳位二极管只有在闭锁状态下会有电流流过，在正常工作时无电流流过，验证了 DRBSM 在正常模式下，可以等效为两个逆阻型单元级联。图 10(b)展示了短路故

障发生后，子模块电容放电导致直流侧故障电流迅速增大，在子模块闭锁后，短路故障电流给子模块电容充电，此时 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 的电流波形相同。因此，子模块闭锁后，C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 处于串联充电状态，子模块电容利用率高。

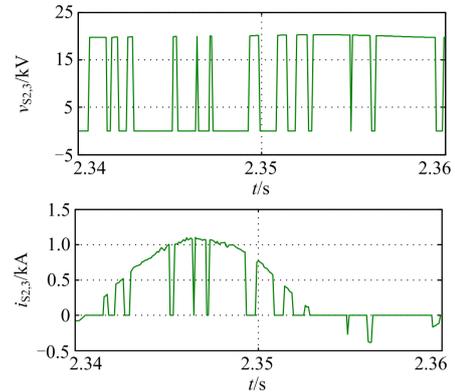


图 9 RB-IGBT 模块(S<sub>2</sub> 和 S<sub>3</sub>)电压和电流波形

Fig. 9 Voltage and current waveforms of RB-IGBT (S<sub>2</sub> and S<sub>3</sub>)

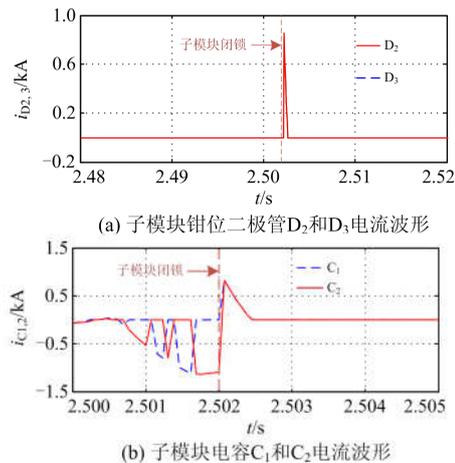
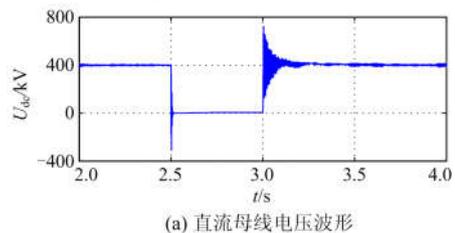


图 10 子模块钳位二极管 D<sub>2,3</sub> 及电容 C<sub>1,2</sub> 电流波形

Fig. 10 Current waveforms of D<sub>2,3</sub> and C<sub>1,2</sub> in DRBSM

当直流侧输出电流降为零时，需要判断故障是否为永久性故障，若为非永久性故障，则延迟一段时间，在故障清除后重新投入换流器，可以重建直流母线电压和恢复系统功率传输。图 11 分别给出了在双极短路故障切除后，换流器在 3 s 时重新投入的直流母线电压 U<sub>dc</sub> 和系统传输功率的波形。从图



(a) 直流母线电压波形

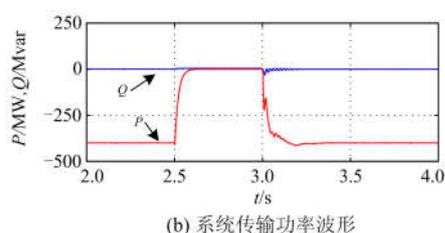


图 11 系统重新启动后 MMC 电压和功率波形

Fig. 11 MMC voltage and power waveforms after system restart

中可以看出, 故障切除后, 3 s 时重新投入 MMC1 换流器, 直流母线电压和系统功率传输可以恢复到正常工作状态。

## 4 结论

本文提出了一种新型具有阻断直流故障电流能力的 DRBSM 拓扑, 与其他 MMC 拓扑相比, 在输出相同电平数的前提下, 该 MMC 系统子模块电容得到高效利用, 具有较强的故障电流清除能力。此外, 在正常工作模式下, 可继续采用 HBSM 型 MMC 的调制和控制策略, 控制简单。仿真结果验证了 DRBSM 型 MMC 的可行性和有效性。因此, 本文所提的 DRBSM 型 MMC 结构在高压直流输电领域具有较大的应用价值。

## 参考文献

- [1] 陆羿, 李继红, 裘鹏, 等. 基于电容电压波动的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 158-164.  
LU Yi, LI Jihong, QIU Peng, et al. Capacitor voltage balancing algorithm for modular multilevel converters based on voltage fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 158-164.
- [2] YAO Z, ZHANG Q, CHEN P, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection Control Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [3] 李国庆, 付贵, 王斯忱, 等. MMC 柔性直流输电系统网侧故障时紧急功率支援控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 107-112.  
LI Guoqing, FU Gui, WANG Sichen, et al. Emergency power support control for MMC flexible HVDC transmission system during AC fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 107-112.
- [4] 杨晓峰, 林智钦, 郑琼林, 等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 1-14.  
YANG Xiaofeng, LIN Zhiqin, ZHENG Qionglin, et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-14.
- [5] 魏晓光, 高冲, 罗湘, 等. 柔性直流输电网用新型高压直流断路器设计方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 95-101.  
WEI Xiaoguang, GAO Chong, LUO Xiang, et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 95-101.
- [6] 邓旭, 王东举, 沈扬, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站内部暂态过电压[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 111-119.  
DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang, et al. Research on transient overvoltage for converter station of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 111-119.
- [7] DENNETIERE S, SAAD H, CLERC B, et al. Validation of a MMC model in a real-time simulation platform for industrial HIL tests[C] // Proceedings of 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 25-30, 2015, Denver, USA: 1-5.
- [8] 阳岳希, 贺之渊, 周杨, 等. 厦门±320 kV 柔性直流输电工程的控制方式和运行性能[J]. 智能电网, 2016, 4(3): 229-234.  
YANG Yuexi, HE Zhiyuan, ZHOU Yang, et al. Control mode and operating performance of Xiamen ±320 kV VSC-HVDC project[J]. Smart Grid, 2016, 4(3): 229-234.
- [9] 刘大鹏, 程晓绚, 苟锐锋, 等. 异步联网工程柔性直流换流站过电压与绝缘配合[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 104-108.  
LIU Dapeng, CHEN Xiaoxuan, GOU Ruifeng, et al. Overvoltage and insulation coordination for MMC-HVDC asynchronous project[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 104-108.
- [10] CANDELARIA J, JEADO P. VSC-HVDC system protection: a review of current methods[C] // IEEE Power Systems Conference and Exposition, March 20-23, 2011, Phoenix, AZ, USA: 1-7.
- [11] 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.
- [12] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended DC-bus applications[C] // 9th International Power Electronics Conference (IPEC), June 21-24, 2010, Sapporo, Japan: 502-507.
- [13] 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), May 30-June 3, 2011, Jeju, Korea: 1425-1431.
- [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): 5171-5179.  
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): 5171-5179.
- [15] 杨晓峰, 薛尧, 陈博伟, 等. 具有直流故障阻断能力的逆阻型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1177-1187.  
YANG Xiaofeng, XUE Yao, CHEN Bowei, et al. Reverse blocking modular multilevel converter with DC fault blocking capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1177-1187.
- [16] 郝瑞祥, 杨晓峰, 薛尧, 等. 一种具有直流故障限流能力的模块化多电平换流器[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 172-180.  
HAO Ruixiang, YANG Xiaofeng, XUE Yao, et al. A novel modular multilevel converter with DC fault current limiting capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 172-180.
- [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): 3577-3585.
- [18] 张广银, 沈千行, 张须坤, 等. 逆阻型绝缘栅双极晶体管研究进展[J]. 半导体技术, 2016, 41(10): 721-729.  
ZHANG Guangyin, SHEN Qianxing, ZHANG Xukun, et al. Research and development of reverse blocking technology for IGBT[J]. Semiconductor Technology, 2016, 41(10): 721-729.
- [19] YANG X, XUE Y, CHEN B, et al. Reverse blocking sub-module based modular multilevel converter with DC fault ride-through capability[C] // Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 18-22, 2016, Milwaukee, USA: 1-7.
- [20] LU D H, OGINO M, SHIRAKAWA T, et al. 1700 V reverse-blocking IGBTs with V-groove isolation layer for multi-level power converters[C] // Proceedings of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, September 18-19, 2012, Birmingham, UK: 815-821.
- [21] 祁欢欢, 陆振纲, 陈静, 等. 基于模块化多电平的统一潮流控制器换流器和直流侧故障特征分析及保护配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 59-68.  
QI Huanhuan, LU Zhengang, CHEN Jing, et al. Converter and DC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 59-68.
- [22] 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电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.  
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- [23] 李斌, 李晔, 何佳伟. 具有直流故障清除能力的 MMC 子模块关键性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2114-2122.  
LI Bin, LI Hua, HE Jiawei. Research on the key properties of MMC sub-modules with DC fault eliminating capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2114-2122.

收稿日期: 2019-01-04; 修回日期: 2019-05-16

作者简介:

杨波(1977—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为储能应用、电力电子装置研制和直流输电技术; E-mail: yangbo@epri.sgcc.com.cn

庄俊(1985—), 男, 通信作者, 硕士, 主要研究方向为电力电子装置研制、直流输电和可再生能源发电技术; E-mail: zhuangjun@epri.sgcc.com.cn

姚运昌(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电技术。E-mail: 2234521435@qq.com

(编辑 魏小丽)