

基于双半桥重构型故障阻断子模块的新型混合模块化 多电平变换器

耿治, 肖扬

(苏州大学轨道交通学院, 江苏 苏州 215131)

摘要: 直流故障会对模块化多电平变换器(MMC)的可靠运行产生不利影响,并损坏 MMC 内的器件。基于具有阻断能力子模块(SM)的直流故障处理是一种有效保护方法。本文详细分析了几种能够实现直流故障阻断的 SM 类型。研究表明,三电平阻断 SM 在直流故障处理方面优于其他类型 SM。随后,本文提出了一种双半桥重构型三电平阻断 SM。通过三电平特性,所提 SM 能够输出传统全桥 SM(FBSM)两倍的工作电压。此外,该 SM 还具备 FBSM 两倍的阻断能力。与现有的三电平 SM 不同,所提 SM 的正负端通过两个串联逆阻型开关连接。由于这一结构,采用所提 SM 的 MMC 在相似成本的情况下,可以进一步降低运行损耗。仿真结果验证了所提 SM 的可行性。

关键词: 子模块; 直流故障; 故障电流清除; 模块化多电平变换器; 高压直流

A Novel Hybrid Modular Multilevel Converters Based on Dual Half-bridge Reconstructed Submodule for Fault Blocking

GENG Zhi, XIAO Yang

(School of Rail Transportation, Soochow University (SUDA), Jiangsu Suzhou 215131, China)

Abstract: The DC faults can impose adverse influence on reliable operation of modular multilevel converter (MMC) and damage the elements in MMC. The DC fault handling based on the SM with blocking capability is an effective protection method. In this paper, several kinds of SM capable of DC fault blocking are analyzed in detail. The study results show that the three-level blocking SM are superior to other types of blocking SM in the handling of DC fault. Afterward, a dual half-bridge reconstructed three-level blocking SM is proposed in this paper. With the three-level feature, the proposed SM can output twice the operating voltages of the conventional full-bridge SM (FBSM). Moreover, the SM can provide twice the blocking capability of the FBSM. Different from the existing three-level SM, the positive and negative ends of the proposed SM are connected by two cascaded reverse-blocking switches. Owing to this structure, the MMC with the proposed SM can further reduce operating loss on the basis of the similar costs as the MMC with the existing three-level SM. Finally, the feasibility of the proposed SM is verified by simulation results.

Keywords: sub module; DC fault; fault current clearance; modular multilevel converter; high-voltage direct current

0 引言

随着对高压高质量输电的需求日益增加,模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)因其灵活的结构和低谐波输出^[1-4],成为高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电的首选^[5-8]。由于功率和电压等级较高,MMC 外部故障,如直流

侧短路故障,将严重损坏 MMC 的运行性能以及器件安全。因此,直流故障的保护措施对 MMC 的可靠性和安全性至关重要^[9-11]。

与直流断路器相比,具备直流故障电流阻断能力的子模块(submodule, SM)是一种更为灵活且实施性强的直流短路故障处理方案。当发生直流短路故障时,SM 中的电容器提供的反向电压有助于

收稿日期:2025-02-25

基金项目:江苏省基础研究计划自然科学基金——青年基金(BK20240808, BK20220499);江苏省卓越博士后计划(2024ZB659)。

清除故障电流。此外,阻断能力与故障电流的极性相关。如果故障电流为正,传统的半桥子模块(half-bridge submodule, HBSM)能够输出足够的电压来清除故障电流,但 HBSM 无法阻断负向故障电流。为此,不同的 SM 拓扑结构相继被提出来处理负向故障电流。根据输出的最大工作电压和清除负向故障电流的反向电压,现有的 SM 可分为 3 类:类型 1:单工作电压和单反向电压;类型 2:双工作电压和单反向电压;类型 3:双工作电压和双反向电压。

文献[12–14]中报道了多种隶属于类型 1 的 SM。全桥 SM(full-bridge submodule, FBSM)是最常见的能阻断故障电流的 SM^[12]。文献[13]中的单极性电压全桥 SM(voltage full bridge submodule, UFBSM)进一步减少了 FBSM 中的 IGBT 数量。尽管 UFBSM 能够输出与 FBSM 相同的工作电压和反向电压,但其电流路径同样减少,不利于子模块的损耗均衡。与 FBSM 相比,文献[14]中的 3/4 桥 SM(three quarters bridge submodule, TQBSN)同样减少了一个 IGBT,但增加了 RCD 吸收回路来阻断故障电流。无论拓扑如何,这 3 种 SM 最多只能输出单个电容器电压作为工作电压和反向阻断电压。

类型 2 的 SM 主要包括:钳位双 SM(clamp double submodule, CDSM)^[15]、切换电容型 SM (switching capacitive submodule, SCSM)^[16]、混合连接 SM (mixed connection submodule, MCSM)^[17]和不对称双 SM (asymmetrical double submodule, ADSM)^[18]。这些 SM 内部都包含两个电容器。因此,这些 SM 输出的最大工作电压是双倍的电容电压。相比与类型 1 中的 SM 需要两个相同 SM 来实现双倍工作电压,这些 SM 能够有效节省功率器件。然而,这些 SM 提供的反向电压依然是单个电容电压,与类型 1 SM 相比并未得到改进。在这种情况下,SM 中的一个电容器并未得到充分利用。

为了克服类型 2 中 SM 的不足,文献[19–22]提出了第 3 类 SM。文献[19]中的跨接 SM(cross-connected submodule, CCSM)包含两个 FBSM,因此,CCSM 的功能是 FBSM 的双倍。其原理简单,但该 SM 的成本较高。然而,文献[20]中的串联双 SM (series double submodule, SDSM)、文献[21]中的三电平 SM (three-level submodule, TLSM)和文献[22]中的简化双全桥 SM (simplified full-bridge double submodule, S-FBDSM)使用的 IGBT 数量少于 CCSM。在这 3 种 SM 中,两个 HBSM 通过两个联接单元串联连接,每个联接单元包含一个二极管、一个 IGBT 和其反向二极管。在 SDSM 中,两个 IGBT 串联承受双倍电

容电压,这可能导致电压分布不均,其中一个 IGBT 可能承受全部电压,从而损坏该器件。而 TLSM 和 S-FBDSM 避免了两个 IGBT 的直接串联连接,确保每个 IGBT 和二极管最多承受单个电容电压。由于两个电容器得到了充分利用,这些 SM 的工作电压和反向电压最高可达双倍电容电压。

将 3 种类型子模块输出的工作电压,最大工作电压,阻断负向故障电流的反向电压 U_o 、 U_m 和 U_r 以及每个 U_m 和 U_r 电压等级所消耗的开关器件数量进行对比可得:除类型 1 外,其他类型的 SM 均为三电平 SM。在类型 1 中,尽管 UFBSM 和 TQBSM 具有相同数量的 IGBT 和二极管,TQBSM 引入了额外的 RCD 电路。因此,UFBSM 在成本上更具优势。在类型 2 中,CDSM、MCSM 和 ADSM 的 IGBT 和二极管总数也相同。然而,CDSM 比其他两种 SM 少一个 IGBT,但多一个二极管。由于 IGBT 的成本高于二极管,CDSM 是更具经济性的选择。在类型 3 中,SDSM、TLSM 和 S-FBDSM 使用相同数量的开关器件。此外,考虑到每个电压等级的 U_m 和 U_r 所消耗的开关器件,类型 1 中的 UFBSM 以及类型 3 中的 SDSM、TLSM 和 S-FBDSM 具有一定优势。然而,两个 UFBSM 可以实现一个 SDSM、TLSM 或 S-FBDSM 的功能。两个 SM 意味着需要两个旁路开关。因此,文献[17–19]中的 3 种类型 3 子模块是处理直流故障的首选方案。

根据上述分析,本文提出了一种能够实现直流故障阻断的 SM。类似于现有 SM (如 SDSM、TLSM 和 S-FBDSM),所提子模块通过重构双 HBSM,实现输出三个电压等级以进行正常运行,并提供双倍反向电压来处理直流故障电流。另外,采用所提 SM 的 MMC 与文献[20–22]中的三电平 SM 的 MMC 成本相似,但低于采用类型 1 和类型 2 SM 的 MMC。更为关键地是,相比于其他子模块所构建的 MMC,所提 SM 进一步降低了 MMC 的运行损耗。

1 双半桥重构型子模块与 MMC 运行原理

1.1 双半桥重构型子模块结构

根据上述分析,将多个 HBSM 通过联接单元级联的架构可以提高开关器件和电容器的利用率。因此,本文所提的双半桥重构型子模块(double half-bridge reconstructed submodule, DRSM)如图 1 所示,DRSM 运行状态见表 1。DRSM 将两个 HBSM 重新组合构造并移除其中两个 IGBT。相比于文献[20–22]中的三电平 SM,连接单元则重置为 3 种不同器件的串联,其中 T_s 和 T_o 表示一个逆阻型 IGBT 单元。

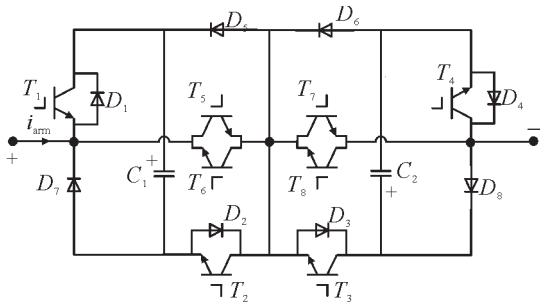


图1 双半桥重构型子模块结构
Fig. 1 Sun-module structure of DRSM

表1 DRSM运行状态
Table 1 Operation state of DRSM

模式	状态	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	输出电压
正常运行	1	1	1	1	1	0	0	0	0	$U_{c1}+U_{c2}$
	2	1	1	0	1	0	0	1	0	U_{c1}
	3	0	1	1	1	1	0	0	0	U_{c2}
	4	0	0	0	0	1	0	1	0	0
	5	0	0	0	0	0	1	0	1	0
阻断	6	0	0	0	0	0	0	0	0	$U_{c1}+U_{c2}$
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	$-U_{c1}-U_{c2}$

根据表1中的开关信号,所提 DRSM 中 i_{arm} 的流电路径如图2所示。

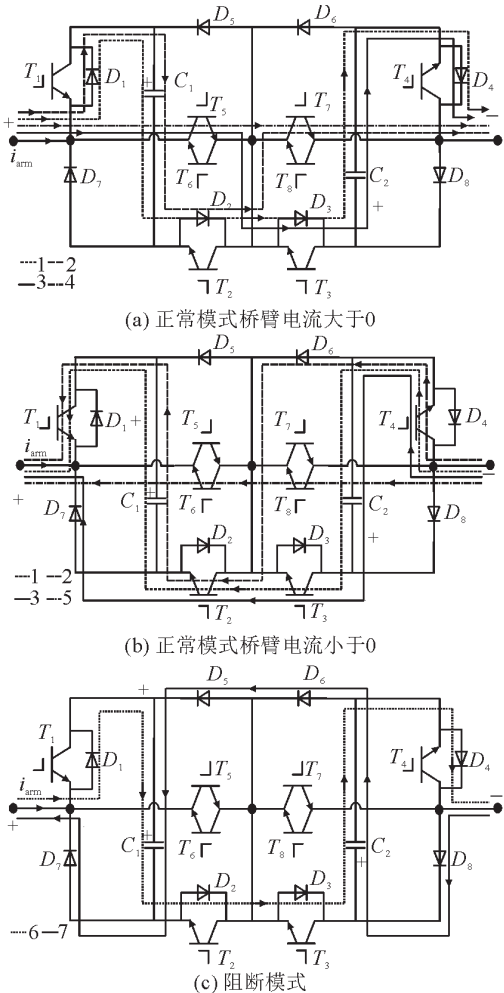


图2 双半桥重构型子模块内电流路径
Fig. 2 Current path in DRSM

如表1、图2(a)和图2(b)所示,在 i_{arm} 的正、负区间内,所提 DRSM 均可以输出3种电压:0、 U_c (U_{c1} 或 U_{c2}) 和 $2U_c$ ($U_{c1}+U_{c2}$)。如果发生直流故障,SM 中的所有 IGBT 将被闭锁。 i_{arm} 的路径如图2(c)所示, $2U_c$ 可用于阻断故障电流。

1.2 DRSM-MMC 拓扑结构与运行原理

实际上,每个 MMC 桥臂中的子模块只需部分为阻断子模块即可处理直流故障。此外,阻断子模块通常比 HBSM 使用更多的开关器件。因此,包含 HBSM 和阻断子模块的混合 MMC 方案,不仅能够有效处理直流故障,而且可以降低 MMC 成本。图3展示了由 HBSM 和所提 DRSM 组成的混合 MMC。其中,RHSM 和 RD SM 分别表示 HBSM 和 DRSM 的冗余子模块。

图4展示了包含所提子模块的混合 MMC 控制方案。如图4所示,混合 MMC 的控制方案与传统 MMC 类似,唯一的区别在于 DRSM 的开关信号分配方式。此时,包含 DRSM 在内的所有子模块开关信号由电容电压均衡算法决定,具体流程如下:所有 HBSM 与 DRSM 的电容电压采样送入电容电压均衡算法,值得注意的是每个 DRSM 内两个电容电压均需送入采样。然后,均衡算法对所有电容电压大小进行排序,并根据桥臂电流方向决定子模块的插入或是旁路状态。例如,如果桥臂电流为正,电容电压较高的电容器应旁路,防止电容电压进一步升高,而电容电压较低的电容器应插入,使电容电压升高,实现各电容电压的平衡。其中,电容器旁路状态意味着为子模块分配的控制信号为0,电容器插入状态则意味子模块控制信号为1。由于 HBSM 的功率器件开关信号互补,因此可由子模块分配的控制信号直接确定各器件的开关信号。对于每个 DRSM,电压均衡算法会同时分配两个控制信号,这两个控制信号需要结合表1生成每个器件的开关信号。例如,当 DRSM 获得开关信号为0和1,那么意味着 U_{c1} 过高与 U_{c2} 过低,电容 C_1 应当旁路与 C_2 应当插入,那么 DRSM 对应输出 U_{c2} ,即表1的状态3,各器件开关信号按照状态3配置。

当图3所示的混合 MMC 发生直流侧短路故障,故障电流通过直流侧、桥臂与交流侧形成回路。假设故障电流 i_{dc-f} 流经 B 相上桥臂、A 相下桥臂与交流侧 A、B 线路形成故障回路,那么 i_{dc-f} 模型为

$$(L_j + L_s) \frac{di_{dc-f}}{dt} + R_j i_{dc-f} = \frac{U_{sb} - U_{sa}}{2} - \frac{U_{bu} + U_{al}}{2} \quad (1)$$

式中: U_{sa} , U_{sb} , U_{bu} 和 U_{al} 分别表示 A, B 相电压与 B 相上桥臂电压, A 相下桥臂电压。

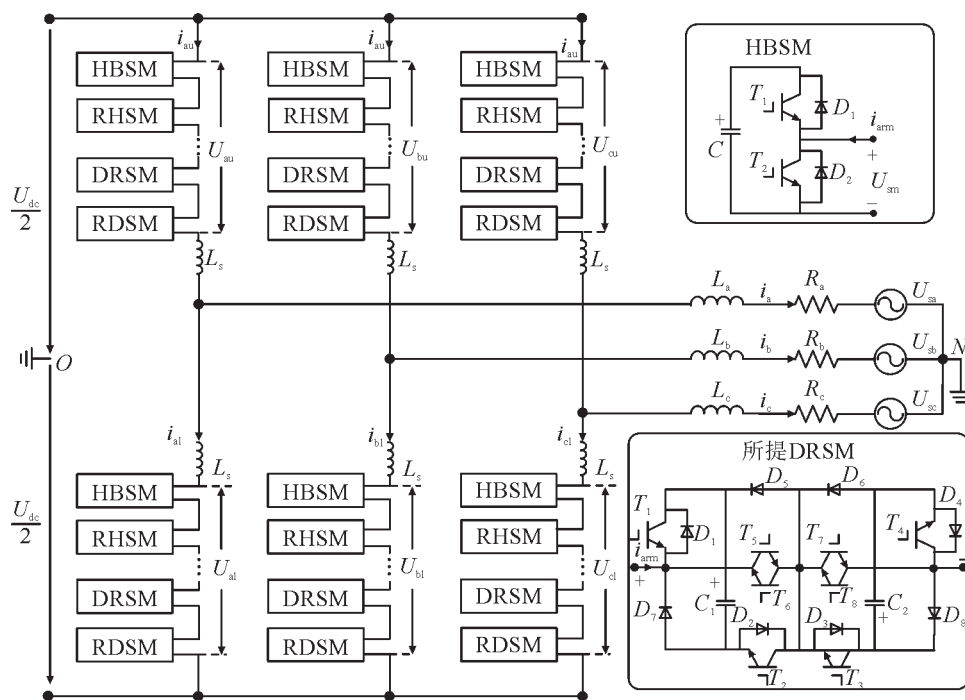


图3 配备DRSM的混合MMC拓扑
Fig. 3 Hybrid MMC topology with the proposed SM

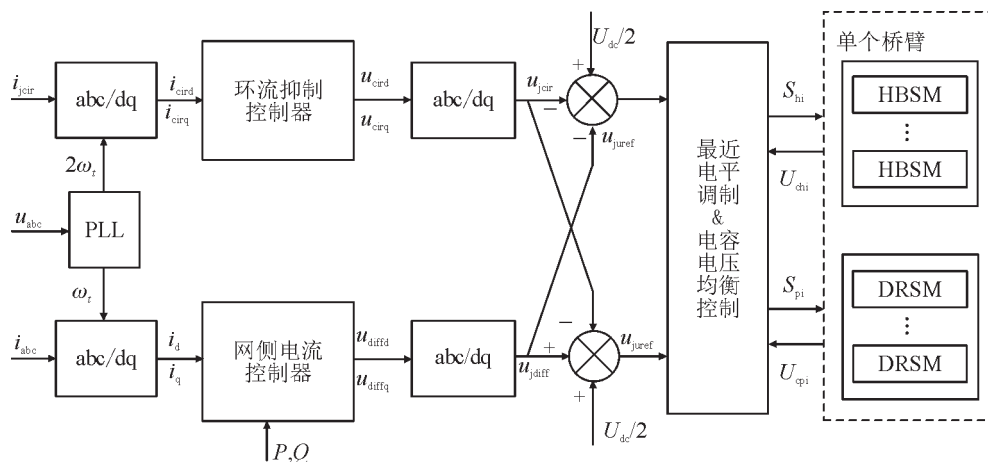


图4 配备DRSM的混合MMC控制方案
Fig. 4 Control scheme for hybrid MMC with the proposed SM

当考虑相电压、线电压与MMC调制关系,式(1)中 L_j 和 R_j 影响较小,并将桥臂电压表示为桥臂能够提供的反向电压之和且认定各桥臂内电容电压近似相等,则式(1)可表示为

$$L_s \frac{di_{dc,f}}{dt} = \frac{\sqrt{3}}{4} m N_{sum} U_c - N_{BLC} U_c \quad (2)$$

式中: U_c 表示各桥臂内电容电压; N_{sum} 表示每个桥臂内包含的运行子模块总数; N_{BLC} 表示每个桥臂能够输出的反向电压数量; $N_{sum} U_c$ 表示故障前的直流侧电压,此处表示故障前交、直流侧的调制关系。

由式(2)可得如下结论:

1)每个桥臂应当至少输出 $0.433 N_{sum}$ 个反向电压方可阻断直流故障电流;

2)当桥臂能够输出的反向电压越多,直流故障电流阻断效果越好;

3)当直流故障前的子模块工作电压越高,在相同子模块配置情况下,故障电流阻断速度越快。

2 DRSM-MMC性能分析

2.1 DRSM-MMC成本

FBSM结构简单,是最为常见的阻断子模块。因此,常规混合MMC通常由HBSM和FBSM构建组成。为了实现故障电流可靠、有效阻断,常规混合MMC内FBSM数量可高于 $0.433 N_{sum}$,FBSM与HBSM的比例可设为1:1^[23-24]。假设每个桥臂内的SM数量为 $2N(N_{sum}=2N)$,则HBSM和FBSM的数量

均为 N 。基于这一比例以及不同混合 MMC 输出相同的工作电压和反向电压,可以确定混合 MMC 中不同 SM 数量。结合前文分析,类型 1 中的 UFBSM、类型 2 中的 CDSM,以及类型 3 中的 SDSM、TLSM 和 S-FBDSM 在各自种类中表现优越。因此,装备这些 SM 的混合 MMC 的成本与包含 DRSM 的混合 MMC 的成本进行了比较。由于 TLSM、SDSM 和 S-FBDSM 相似,该比较选择了 TLSM。在传统 MMC 中, N 个 HBSM 和 N 个 FBSM 可以输出 $2N$ 个电容电压作为工作电压,并提供 $2N$ 个电容电压和 N 个电容电压以阻断正、负故障电流。因此,包含不同 SM 的 MMC 配置和成本如表 2 所示。其中,DRSM 所采用的阻断型 IGBT(T_5 和 T_6)的成本等效为一个 IGBT 模块^[25]。

表 2 不同混合 MMC 成本
Table 2 Cost of different hybrid MMC

类别	MMC ₁		MMC ₂		MMC ₃		PMMC	
	HBSM	UFBSM	HBSM	CDSM	HBSM	TLSM	HBSM	PSM
SM	N	N	0	N	N	$0.5N$	N	$0.5N$
IGBT	$5N$		$5N$		$5N$		$5N$	
Diode	$6N$		$7N$		$6N$		$6N$	
C	$2N$		$2N$		$2N$		$2N$	
ByS	$2N$		N		$1.5N$		$1.5N$	

在表 2 中, C 表示电容, ByS 表示位于每个 SM 输出端并联的旁路开关,用于旁路故障 SM。PMMC 表示配备所提 DRSM 的混合 MMC。同时, 4 种 MMC 的成本对比进一步展示在图 5 中。

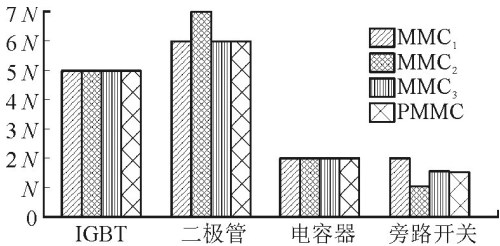


图 5 不同混合 MMC 成本对比
Fig. 5 Cost comparison of different hybrid MMC

如表 2 和图 5 所示, 4 种 MMC 在 IGBT 和电容方面的消耗量是相同的。MMC₁ 使用的旁路开关比 MMC₃ 和 PMMC 多 $0.5N$ 个。MMC₂ 使用了最多的二极管, 但旁路开关最少。这是因为双工作电压和单反向电压的特性使得 MMC₂ 仅由 CDSM 构成, 没有 HBSM。MMC₃ 和 PMMC 消耗更多的 $0.5N$ 个旁路开关, 但比 MMC₂ 少使用了 N 个二极管。考虑到旁路开关和二极管的成本, MMC₃ 和 PMMC 在成本上优于其他 MMC, 这与前文结论一致, 即类型 3 中的 SM 是处理直流故障的首选方案。

2.2 DRSM-MMC 损耗

由于高压 MMC 的开关频率较低, MMC 的主要

损耗为功率开关的通态损耗。

MMC 的损耗与 SM 的类型相关, 因为在不同类型的 SM 中, 桥臂电流的流电路径不同。此外, 桥臂电流在 SM 的不同状态下也会流经不同的开关。不同的路径意味着流通的功率开关数量不同。值得注意的是, SM 的损耗与电流路径上开关的数量成正比。为了简化 MMC 的损耗研究, 计算 SM 的平均损耗, 记作 P_{avg} 。表 3 列出了不同 SM 在每种状态下的损耗及 P_{avg} 。 P_d 和 P_i 分别表示二极管的损耗和 IGBT 的损耗。

表 3 不同子模块损耗
Table 3 Loss of different SM

Term	HBSM	UFBSM	CDSM	TLSM	DRSM
$U_{c1}+U_{c2}$	—	—	$3P_d$	$4P_d$	$4P_d$
$i_{arm}>0$	U_{c1}	—	P_i+2P_d	P_i+3P_d	P_i+2P_d
	U_{c2}	P_d	$2P_d$	P_i+3P_d	P_i+2P_d
	0	P_i	P_i+P_d	$2P_i+2P_d$	$2P_i$
$U_{c1}+U_{c2}$	—	—	$3P_i$	$4P_i$	$4P_i$
$i_{arm}<0$	U_{c1}	—	$2P_i+P_d$	$3P_i+P_d$	$3P_i+P_d$
	U_{c2}	P_i	$2P_i+P_d$	$3P_i+P_d$	$3P_i+P_d$
	0	P_d	P_i+P_d	$2P_i+2P_d$	$2P_i$
P_{sum}	$2P_i+2P_d$	$4P_i+4P_d$	$12P_i+12P_d$	$16P_i+16P_d$	$16P_i+10P_d$
P_{avg}	$0.5(P_i+P_d)$	P_i+P_d	$1.5(P_i+P_d)$	$2(P_i+P_d)$	$2P_i+1.25P_d$

结合表 2 中 SM 的配置和表 3 中的 P_{avg} , 4 种 MMC 的损耗如图 6 所示。在图 6 中, 纵轴内 P 分别表示 IGBT 和二极管的损耗, 并分别表示 P_i 和 P_d 。

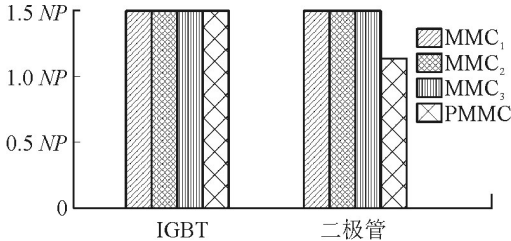


图 6 不同混合 MMC 损耗对比
Fig. 6 Loss comparison of different hybrid MMC

如图 6 所示, 4 种 MMC 中的 IGBT 损耗是相同的。此外, MMC₁–MMC₃ 的总损耗也相同。然而, PMMC 中的二极管损耗减少了 25%。由于二极管损耗较低, 采用 DRSM 的 MMC 总损耗有所降低。考虑到与 MMC₁ 和 MMC₂ 相比的成本优势, 以及与 MMC₃ 相比更低的损耗性能, PMMC 是一种有前景的混合 MMC, 能够有效阻断直流故障。

2.3 开关器件电压应力

如图 2 所示, T_2 和 T_3 、 RT_1 (T_5 和 T_6) 和 RT_2 (T_7 和 T_8) 分别是串联连接的。相互串联能够承受双倍电容电压, $2U_c$ 。然而, 串联组中的各功率开关可能存在通断延迟。如果功率器件异步开关, 则其中一个功率器件将承受整个 $2U_c$ 的电压, 这可能会损坏器

件。对于 T_2 和 T_3 , 正如图 2(c) 所示, 在状态 7 中, T_2 和 T_3 将共同承受 $2U_c$ 。根据表 1, T_2 和 T_3 在状态 1 和 3 下同时导通。当 $i_{arm} < 0$ 且状态 1 或 3 切换到状态 7 时, T_2 和 T_3 的异步关断不会导致过电压。当 T_2 比 T_3 先关断时, 二极管 D_5 可以将 T_2 钳位, 如图 7(a) 所示。这样, T_2 只承受单个电容电压。当 T_3 比 T_2 先关断时, 如图 7(b) 所示, T_3 也只承受单个电容电压。当表 1 中的状态 4 和 5 切换到状态 1、6 或 7

时, 在 i_{arm} 的正半周期内, RT_1 和 RT_2 必须同时关断, 以承受状态 1、6 或 7 所施加的 $2U_c$ 。如果 RT_1 和 RT_2 异步关断, 相关情况如图 7(c)–7(f) 所示。类似于图 7(a) 和 (b) 中的情况, RT_1 或 RT_2 也可以通过二极管钳位至单个电容。即使串联的功率器件之间存在关断延迟, 运行状态切换至承受 $2U_c$ 的状态时, 各器件不会出现过电压现象。此时, 器件串联不会影响器件寿命。

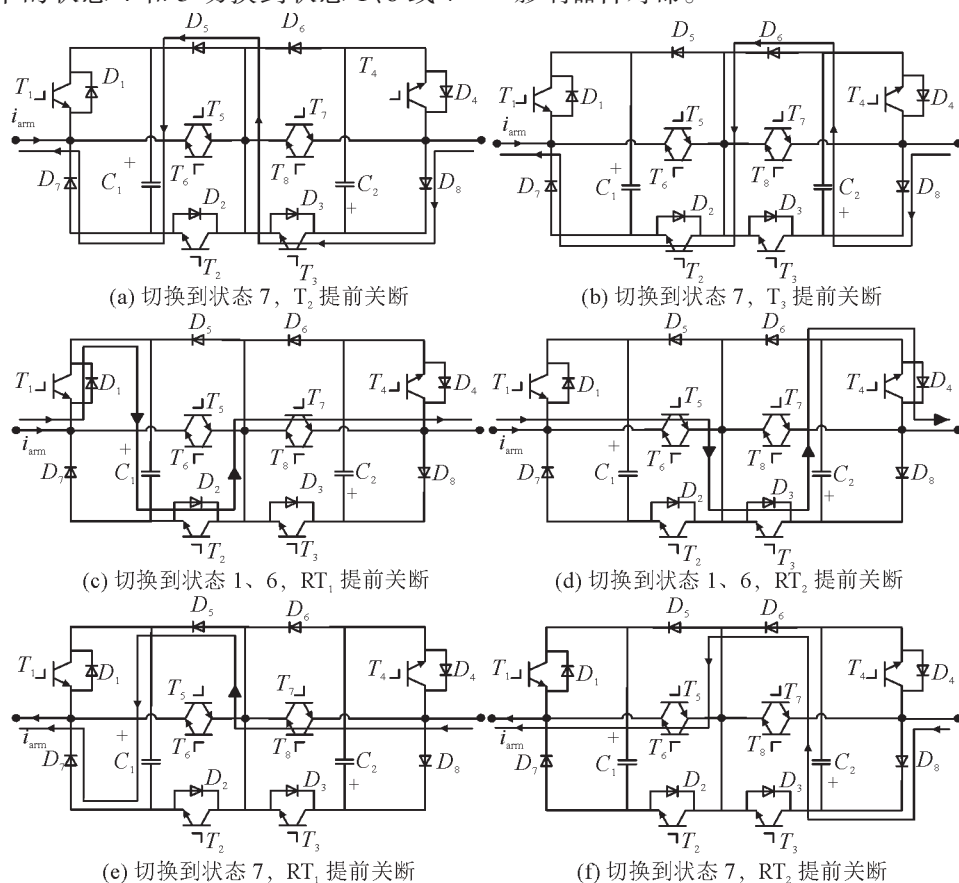


图7 开关不同步下电流路径

Fig. 7 The current path under non-synchronous operation

3 仿真验证

为了验证 DRSM 的性能, 在 Matlab/Simulink 中

搭建了 MMC-HVDC 系统。其结构和参数如图 8 所示。根据表 2, 图 8 中的每个 MMC 臂上装备了 16 个 HBSM 和 8 个 DRSM。

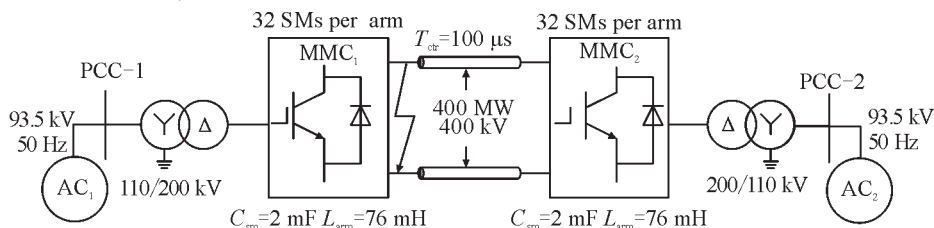


图8 基于DRSM-MMC的柔性HVDC系统

Fig. 8 VSC HVDC system based on DRSM-MMC

3.1 DRSM-MMC正常运行

图 9 展示了采用 DRSM 的 MMC 的正常运行性能。图 9(a) 和图 9(b) 为直流电流和直流电压。当 DRSM 在正常模式下运行时, 直流电流、电压保持稳

定。图 9(c) 和图 9(d) 为交流侧电流和交流侧电压。在 MMC 的正常运行中, 三相电流、电压保持正弦规律。如图 9(e) 所示, 上、下桥臂的电容电压相互平衡。因此, DRSM 能够确保 MMC 正常运行。

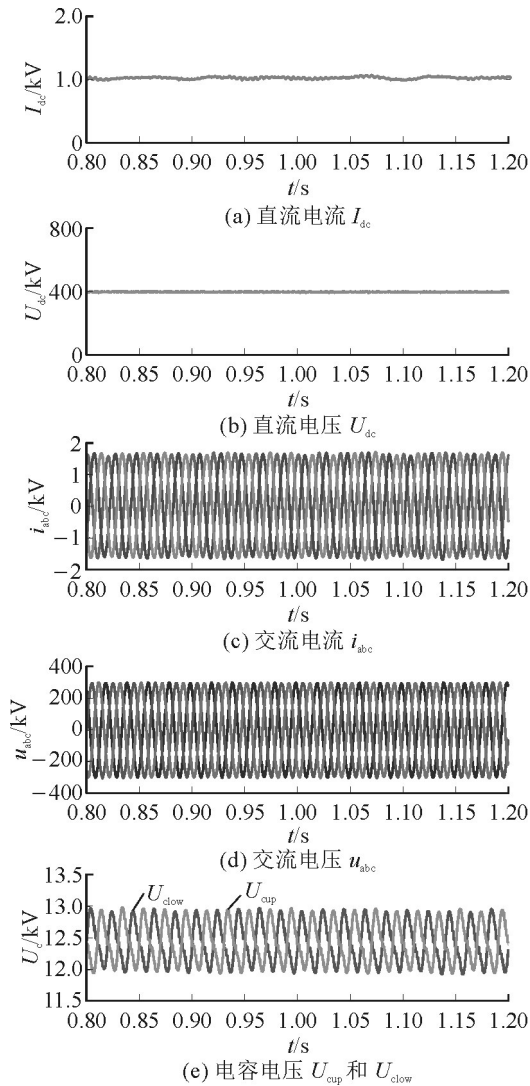


图9 正常运行仿真结果

Fig. 9 Simulation results of normal operation

3.2 DRSM-MMC直流阻断运行

图10为采用DRSM的MMC处理直流故障的性能。为了对比,传统由HBSM和FBSM组成的MMC(CMMC)用作对照。直流短路故障发生在1.0 s,所有SM在1.001 s闭锁。故障发生后,图10(a)中的直流电流急剧上升。此外,图10(b)中的直流电压因故障而大幅下降。在SM闭锁后,图10(a)中的直流电流从峰值迅速下降至0。图10(b)中的直流电压也最终变为0。与直流电流类似,图10(c)中的交流电流也经历了先增加再下降至0的过程。然而,图10(d)中的交流电压在短暂振荡后恢复至正常状态。这是因为图8中的MMC交流侧与交流电网连接。故障清除后,交流电压恢复。直流和交流电流的显著增加也使得电容电压上升至更高的值,如图10(e)所示。随着电流减少至0,所有电容电压保持恒定。如图10(a)–10(e)所示,PMCM和

CMMC的故障处理性能基本相同,这表明所提DRSM能够有效地应对直流故障。

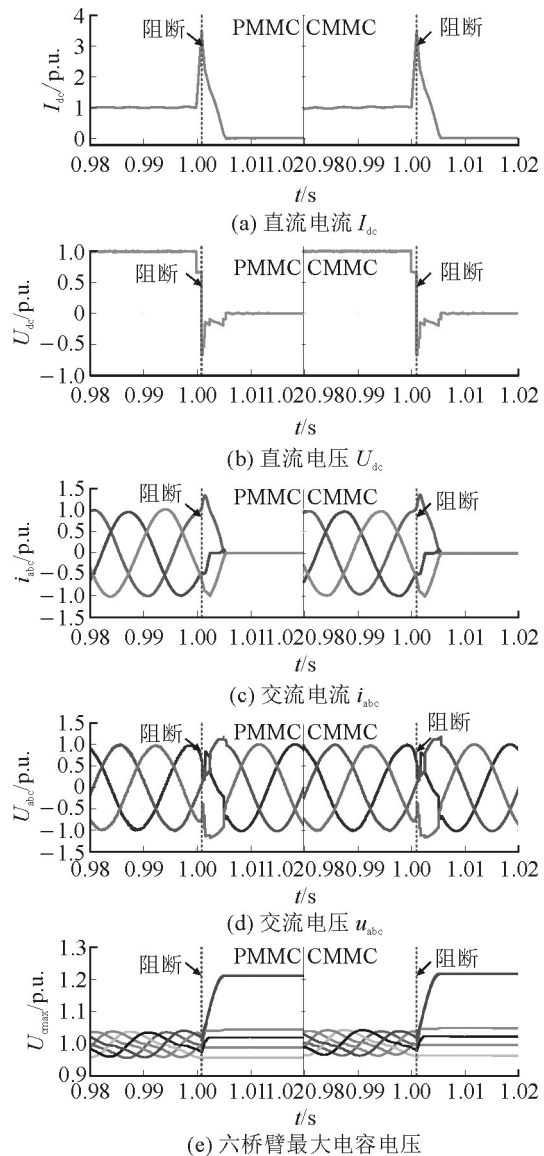


图10 阻断运行仿真结果

Fig. 10 Simulation results of blocking operation

4 结语

本文提出了一种具有直流故障处理能力的SM。该SM采用了两个HBSM通过连接单元重构的拓扑架构。通过这种方式,所提SM可以输出3种类型的工作电压,并且输出双倍电压作为反向阻断电压,工作电压与阻断电压输出能力分别是FBSM的1.5倍和2倍。基于这一特点,采用所提SM的MMC比采用第1、2类SM的MMC成本更低。由于桥臂电流可以通过所提SM两端口之间串联的功率开关,PMCM的运行损耗相比其他三电平SM组成的MMC能够进一步降低。文中的对比结果突出了

所提 SM 的优点。此外,在 MMC-HVDC 中的仿真研究验证了所提 SM 在正常运行和阻断运行中的有效性。

参考文献

- [1] Y WANG Z Y, J. FU, A novel strategy on smooth connection of an offline MMC station into MTDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 568-574.
- [2] J ZHU J H W, M. WAN. Small-signal modeling and analysis of MMC under unbalanced grid conditions based on linear time-periodic (LTP) method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 205-214.
- [3] M AHMADIJOKANI M M S S S, K. AL-HADDAD. A back-stepping control method for modular multilevel converters[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2021, 68(1): 443-453.
- [4] REDDY G A, A. SHUKLA, Circulating current optimization control of MMC[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2021, 68(4): 2798-2811.
- [5] DING Tao, ZENG Ziyu, QIN Boyu, et al. Quantifying cyber attacks on industrial MMC - HVDC control system using structured pseudospectrum[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 4915-4920.
- [6] S YANG W X Z Z, J. WEN, A single-end protection scheme for hybrid MMC HVDC grids considering the impacts of the active fault current-limiting control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2001-2013.
- [7] ZHU Meng, LI Weixing, LIANG Xiaodong, et al. Stepwise voltage drop and transient current control strategies to enhance fault ride-through capability of MMC-HVDC connected DFIG wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2127-2137.
- [8] B LI Z X W H, D. XU. Interface algorithm design for power hardware-in-the-loop emulation of modular multilevel converter within high-voltage direct current systems[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2021, 68(12): 12206-12217.
- [9] 李国庆, 王晓雪, 江守其, 等. 基于混合型 MMC 的柔性直流电网故障穿越协同控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4817-4825.
LI Guoqing, WANG Xiaoxue, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategy of fault ride-through for DC grid based on hybrid MMC[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4817-4825.
- [10] 朱雯清, 赵西贝, 赵成勇. 一种嵌套型 MMC 拓扑及其直流故障穿越策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8434-8443.
ZHU Wenqing, ZHAO Xibei, ZHAO Chengyong. Research on topology and fault ride-through strategy of converter embedded MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8434-8443.
- [11] 陈力绪, 袁帅, 严俊, 等. 考虑多端协同的柔性直流电网直流故障保护和恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8164-8176.
CHEN Lixu, YUAN Shuai, YAN Jun, et al. DC fault protection and recovery strategy for VSC-HVDC grid considering multi-terminal cooperation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8164-8176.
- [12] C ZHAO F G L W, Y. LI. Modulation index design of full-bridge MMC for capacitor voltage ripples reduction under single-line-to-ground faults conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1775-1784.
- [13] X YU Y W J X L, K. WANG. A novel hybrid-arm bipolar MMC topology with DC fault ride-through capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1404-1413.
- [14] A. SALEKI, M. B. TAVAKOLI A. SHAHIRINIA. Suggesting hybrid HB and three-quarter-bridge MMC-based HVDC systems: protection and synchronous stability under DC faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 2693-2703.
- [15] Y XUE Z X, G. TANG. Self-start control with grouping sequentially precharge for the C-MMC-based HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 187-198.
- [16] A A ELSEROUGI A M M, S. AHMED. A switched-capacitor submodule for modular multilevel HVDC converters with DC-fault blocking capability and a reduced number of sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 313-322.
- [17] R ZENG L X Y, B W WILLIAMS. Operation of a hybrid modular multilevel converter [J]. IEEE Trans. Power Electron, 2015, 30(3): 1137 - 1146.
- [18] A NAMI, J LIANG, F DIJKHUIZEN, et al. Modular multilevel converters for HVDC applications: review on converter cells and functionalities[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2015, 30(1): 18-36.
- [19] E C MATHEW M B G, A. SHUKLA. A generalized cross-connected submodule structure for hybrid multilevel converters[J]. IEEE Trans Ind. Appl. 2016, 52(4): 3159 - 3170.
- [20] ZHANG J, C. ZHAO. The research of SM topology with DC fault tolerance in MMC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1561-1568.
- [21] R LI, J E. FLETCHER, L XU, et al. A hybrid modular multilevel converter with novel three-level cells for DC fault blocking capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 2017-2026.
- [22] Y MENG Y Z W K D, WANG X. Novel submodule topology with large current operation and DC-fault blocking capability for MMC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1542-1551. (下转第 142 页)

- [16] 郑志宇, 李雅倩, 谢雪景, 等. 基于全寿命周期成本的电压暂降治理设备综合配置规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 128-134.
ZHENG Zhiyu, LI Yaqian, XIE Xuejing, et al. Allocation plan of voltage sags mitigation devices based on life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 128-134.
- [17] 阚力丰, 李华强, 李春海. 基于供需协调的电压暂降综合治理策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(6): 90-95.
KAN Lifeng, LI Huaqiang, LI Chunhai. Comprehensive management strategy for voltage sags based on coordination of supply and demand[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(6): 90-95.
- [18] 王晶, 徐爱亲, 翁国庆, 等. 动态电压恢复器控制策略研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 145-151.
WANG Jing, XU Aiqin, WENG Guoqing, et al. A survey on control strategy of DVR[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 145-151.
- [19] 余小闯. 动态电压恢复器的补偿策略研究与仿真分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [20] X. LI, D. WU, J. HE, et al. An improved method of particle swarm optimization for path planning of mobile robot[J]. Journal of Control Science and Engineering, 2020(1): 1-12.
- [21] RATNAWEERA A, HALGAMUGE S K, WATSON H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 240-255.
- [22] POHJANHEIMO P, LEHTONEN M. Equipment sensitivity to voltage sags-test results for contactors, PCs and gas discharge lamps[C]//10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No. 02EX630). [S.l.]: IEEE, 2002: 559-564 vol. 2.
- [23] DJOKIC S Z, STOCKMAN K, MILANOVIC J V, et al. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494-505.
- [24] XU Yonghai, WU Yafen, ZHANG Mengmeng, et al. Sensitivity of programmable logic controllers to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 2-10.
- [25] MUNIZ L M, MANANA M, ZOBAA A F, et al. Portable test platform for evaluating voltage dip immunity of industrial robots and components in the automotive industry[C]//6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). [S. l.]: IET, 2012: 1-4.
- 作者简介:**
崔婷婷(2001—), 女, 硕士研究生, 从事电能质量分析与控制研究。E-mail: c18138879744@163.com。
钟庆(1978—), 男, 通信作者, 教授, 从事电力系统运行分析与控制、电能质量分析与控制等研究。E-mail: epqzhong@scut.edu.cn。
梁怡雪(1999—), 女, 硕士研究生, 从事电能质量分析与控制研究。E-mail: 791562226@qq.com。
汪清(1987—), 女, 高级工程师, 从事电能质量监测与治理技术工作。
王钢(1966—), 男, 教授, 研究方向为电力系统控制与保护、电网规划与可靠性、高压直流输电技术等。E-mail: wanggg@scut.edu.cn。
汪隆君(1982—), 男, 讲师, 研究方向为电力系统可靠性与规划等。E-mail: epwlj@scut.edu.cn。

(上接第97页)

- [23] CUI Shenghui, SUL S K. A comprehensive DC short-circuit fault ride through strategy of hybrid modular multilevel converters (MMCs) for overhead line transmission[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(11): 7780-7796.
- [24] J HU K X L, R. ZENG. Analysis and enhanced control of hybrid-MMC-based HVDC systems during asymmetrical DC voltage faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1394-1403.
- [25] Y SONG Y L X B, W. WANG. An improved submodule topology of MMC with fault blocking capability based on reverse-blocking insulated gate bipolar transistor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 1559-1568.
- 作者简介:**
耿治(1991—), 讲师, 研究方向为柔性直流输电运行拓扑与控制。E-mail: zhigeng@suda.edu.cn。
肖扬(1992—), 副教授, 研究方向为无线电能传输、特种电源。E-mail: yangxiao@suda.edu.cn。