

# 模块化多电平换流器改进型子模块拓扑仿真研究

李欢<sup>1</sup>, 田新成<sup>2</sup>, 张建坡<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071001; 2. 唐山供电公司, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 针对模块化多电平换流器高压应用和高电平输出时子模块数量过多问题, 研究了堆叠式两电平和多电平输出子模块拓扑特点。在总结不同改进类型子模块拓扑特点基础上, 定性比较了各种拓扑在直流侧短路故障时所具有的故障电流抑制能力差异性。针对串联双子模块拓扑, 设计了基于全控和半控整流方式的混合充电策略。以改进型拓扑为例, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了两端有源 MMC-HVDC 系统, 对不同于子模块拓扑的直流侧故障抑制特性以及串联双子模块拓扑启动策略的有效性进行了分析验证。

**关键词:** 模块化多电平换流器; 改进拓扑; 故障电流抑制; 串联双子模块; 混合充电

## Simulating research of improved topologies of modular multilevel converter

LI Huan<sup>1</sup>, TIAN Xincheng<sup>2</sup>, ZHANG Jianpo<sup>1</sup>

(1. North China Electric Power University, Baoding 071001, China;

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

**Abstract:** Firstly, for the large number of sub module (SM) caused by high voltage applications and high level output of modular multilevel converter (MMC), cascaded two levels (CTL) and multi-level output SM topologies are studied. Secondly, the characteristics of different types of improved SM topologies are summarized and qualitative comparison of their different DC link fault blocking capability is conducted. Then a hybrid self-startup strategy based on full controlled and half controlled rectifier is designed for the serial connected double sub module topology. Lastly, MMC-HVDC with two active terminals in the PSCAD/EMTDC software is built based on these improved topologies, and DC link fault suppressing characteristics of different SM topologies and the startup strategy are analyzed and verified.

**Key words:** MMC; improved topologies; fault current blocking; serial connected double sub module; hybrid charge

中图分类号: TM72

文章编号: 1674-3415(2016)02-0095-07

## 0 引言

尽管模块化多电平换流器较开关型换流器在损耗、谐波、模块化程度上有着显著优势<sup>[1-3]</sup>, 但该技术还带有固有局限性。由于受单个模块输出电压限制, 当 MMC 应用于高压电能变换及电能输送领域时, 不得不依靠大量子模块串联来达到相应电压等级, 增加了系统控制难度和装置占地面积。同时对于传统半桥子模块拓扑, 在直流侧发生故障时, 尽管可以闭锁所有 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistors), 但是由于 IGBT 反并联续流二极管为短路电流提供了通路, 使得故障电流不能被阻断, 从而不具备直流短路电流闭锁能力。在直流断路器技术不成熟时只能依靠交流断路器切断故障电流, 存在故障响应时间较长, 恢复机制较复杂问题<sup>[4-5]</sup>。

为了解决机械开关的弊端, 文献[6-8]提出一种在交流侧或直流侧串联全桥子模块拓扑形式, 虽然提高了系统直流故障抑制能力, 但也带来器件较多, 控制复杂问题。为了减少系统直流侧故障概率, 当前直流输电工程不得不采用价格昂贵的直流电缆作为传输介质, 限制了成本较低架空线路的应用。

借助换流器自身控制和拓扑实现直流侧短路故障抑制, 具有无需机械开关动作、系统恢复速度快等优点。文献[9]通过在半桥子模块保护晶闸管旁反向并联同样的晶闸管, 形成双晶闸管拓扑。当故障闭锁后, 两个晶闸管交替触发导通, 形成旁路效应, 为交流侧和直流侧提供各自独立短路电流路径, 利用线路能耗实现直流故障电流清除。而故障清除期间, 交流侧则呈现出三相短路状态, 且对于永久故障仍需触发交流断路器。文献[10-16]利用闭锁后桥

臂电容充电效应，分别设计了不同改进型子模块拓扑，实现了续流二极管可靠截止，阻断了交直流侧故障电流，但对于各种改进子模块拓扑的故障抑制特性尚未进行对比分析。

针对上述问题，首先总结了学术界和工业界对模块化多电平换流器子模块拓扑的研究工作及其改进方案；然后根据直流侧故障闭锁后，桥臂充电回路中电容个数的不同，定性对比分析了各种拓扑对直流侧故障的抑制能力；最后针对串联双子模块拓扑构成的直流输电系统设计了自励充电启动策略。

### 1 模块化多电平换流器子模块拓扑

当 MMC 应用于高压大容量领域时，子模块个数会随着输出电平数量增多而急剧增加，造成电容电压均衡控制和触发控制复杂。为减少子模块个数，ABB 公司提出了一种如图 1 所示级联型两电平子模块拓扑(Cascaded Two Level, CTL)<sup>[17]</sup>。

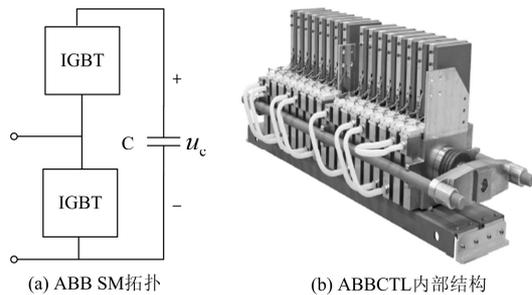


图 1 ABB CTL 和 SM 拓扑  
Fig. 1 Topology of ABB CTL and SM

CTL 与半桥子模块拓扑区别在于每相桥臂采用了若干个具有短路失效模式的压接式 IGBT 串联形式的阀组，而不是单一 IGBT(如图 1(b)所示，8 个 IGBT 构成一个阀组，类似于 MMC 中一个 IGBT)。由于 IGBT 串联，子模块输出电压不再受单个 IGBT 可承受电压限制，因而输出电压可以设计得较高(相当于半桥拓扑的 8 倍电压输出)，减少了子模块个数。当子模块中 IGBT 或其反并联二极管发生故障，故障时释放的能量将使开关内金属小板迅速融化，并与硅片形成稳定合金，等效于被导线短路，保证故障器件仍然维持可靠导通状态，避免了半桥子模块拓扑利用旁路开关切除故障子模块。故障后子模块总输出电压保持不变，而各个串联 IGBT 承受电压会有所上升。由于 IGBT 的短路失效模式和串联均压技术仅为 ABB 等少数公司掌握，所以在一定程度上影响到此种拓扑的推广和应用。

为解决输出电平数较高时子模块数量过多问题，文献[18]在半桥拓扑基础之上提出了一种如图 2

所示的新型多电平拓扑。

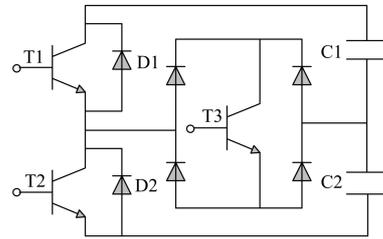


图 2 多电平子模块拓扑  
Fig. 2 Topology of multilevel sub module

该子模块主要由三个 IGBT 和两个电容组成，相对半桥结构，中间配置了一个小型的 H 桥。当 T3 导通时，无论电流方向如何，半桥中间路径都会处于导通状态，起到了双向开关作用。该子模块拓扑可以实现 0,  $u_c$  和  $2u_c$  三个电平输出，因此在相同电平输出时，子模块个数也随之减少，换流阀总体积相应降低。但是该拓扑也存在一定缺陷，一方面运行损耗会相应增加，另一方面此种拓扑虽然可以增加单个子模块输出电平个数，但只是将原本由一个子模块输出电平数量进行了划分，因此单个模块输出电压大小与半桥拓扑相比没有改变，在相同直流电压输出情况下，对减少模块个数意义不是很大。并且上面电容电压存在不能够单独输出问题，造成模块数量较多时均压复杂。而对于一些低压应用场合，此种拓扑可以利用较少的模块而增加有效电平输出，进而获得较高的电压电流波形质量。

### 2 具有直流故障抑制能力子模块拓扑分析

利用直流故障闭锁后储能电容充电效应，为续流二极管提供反向电压，迫使二极管截止，阻断故障电流，基于此原理，国内外学者开展了子模块拓扑的研究工作，提出了各种改进拓扑类型。

#### 2.1 改进子模块拓扑

Alstom 等公司将 STATCOM 中广泛使用的全桥子模块拓扑(Full Bridge Sub Module, FBSM)引入柔性直流输电领域<sup>[10]</sup>。该拓扑可以闭锁直流侧短路电流，但与 MMC 半桥型子模块结构相比，由于 IGBT 数量增加了一倍，全桥子模块拓扑代价不菲。文献[11]利用两个半桥子模块拓扑和引导开关，设计了如图 3(c)所示 5 电平跨接拓扑(Five Level Cross Connected Sub Module, FLSM)。考虑到负电平输出对于直流输电应用意义不大，为减少功率器件个数，文献[13]在全桥拓扑基础上，通过减少功率器件 T3(T4)，提出了图 3(b)所示单极全桥拓扑(Unipolar Full Bridge Sub Module, UFSM)。在文献[12]中，作者同样提出如图 3(d)所示类似于单极全桥拓扑的两

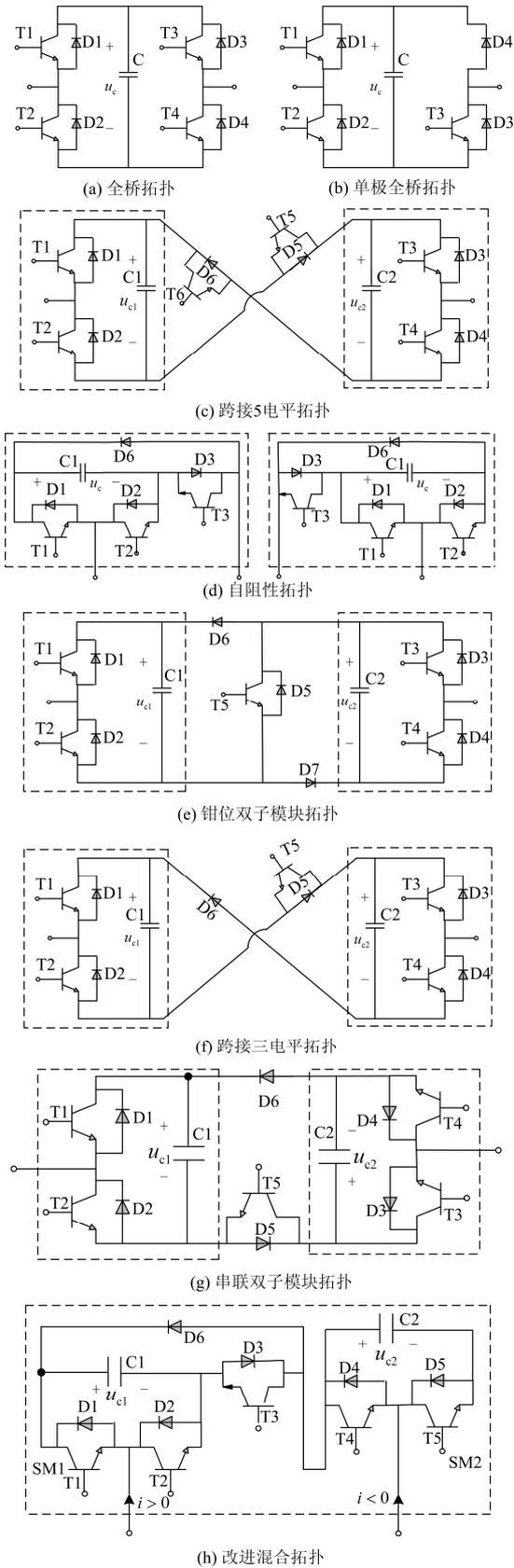


图3 具有直流故障阻断能力子模块拓扑

Fig. 3 SM topologies with DC link fault blocking capability

种自阻性子模块拓扑(Self Blocked Sub Module, SBSM)。与半桥子模块拓扑相比,上述改进拓扑仍然存在器件过多和能耗较大问题。为了进一步减少所需功率器件数量,MMC创始人 Rainer Marquardt 也对子模块拓扑做出了改进,在全桥拓扑中加入钳位开关 T5,提出了箝位双子模块拓扑(Clamp Double Sub Module, CDSM),如图 3(e)所示<sup>[14]</sup>。当桥臂电流方向不同时,CDSM 中 C1 和 C2 存在串联和并联不同充电状态问题。为解决闭锁后 CDSM 拓扑中电容 C1 和 C2 并联充电问题,文献[13]通过对 5 电平拓扑改进,设计了如图 3(f)所示 3 电平跨接形式拓扑(Three Level Cross Connected Sub Module, TLSCM),而文献[15-16]则提出了图 3(g)所示串联形式双子模块拓扑(Serial Connection Double Sub Module, SDSM)和图 3(h)所示改进混合子模块拓扑(Improved Hybrid Sub Module, IHSM)。

### 2.2 直流故障抑制能力分析

图 4 是直流侧两极短路时,故障电流的流通过程。其中  $m_{j1}$ ,  $m_{j2}$  分别为上下桥臂中处于充电状态电容个数,  $j \in \{a, b, c\}$ 。

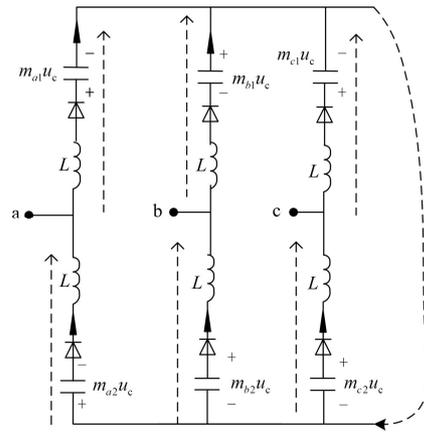


图4 闭锁后桥臂电流路径

Fig. 4 Arm current path after blocked

为了分析各种不同子模块拓扑闭锁能力,引入故障电流抑制系数,如式(1)所示<sup>[16]</sup>,其中  $U_L$ ,  $U_{ph}$  分别为阀侧交流线电压和相电压幅值。

$$\lambda = \frac{\sum u_c}{U_L} = \frac{(m_{j1} + m_{j2})u_c}{\sqrt{3}U_{ph}} = \frac{(m_{j1} + m_{j2})u_c}{0.5\sqrt{3}Nu_c} = \frac{(m_{j1} + m_{j2})}{0.5\sqrt{3}N} \quad (1)$$

根据图 3 和图 4 可知,对于 FBSM, UFBSM、FLSM、TLSCM、SBSM 和 SDSM,上下桥臂中处于充电状态子模块电容个数分别为  $N$ ,因此故障抑制

系数为式(2)所示。

$$\lambda = \frac{\sum u_c}{U_L} = \frac{(m_{j1} + m_{j2})u_c}{\sqrt{3}U_{ph}} = \frac{2N}{0.5\sqrt{3}N} = 2.31 \quad (2)$$

而对于 CDSM 和 IHSM, 由于上下桥臂处于充电状态子模块电容个数分别为  $0.5N$ , 所以故障抑制系数为式(3)所示。

$$\lambda = \frac{\sum u_c}{U_L} = \frac{(m_{j1} + m_{j2})u_c}{\sqrt{3}U_{ph}} = \frac{N}{0.5\sqrt{3}N} = 1.15 \quad (3)$$

通过上述分析, 各种改进子模块拓扑故障抑制系数都大于 1, 保证了桥臂等效直流电压(充电状态电容电压之和)大于交流电压幅值, 从而迫使续流二极管截止, 实现了直流故障电流抑制效果。

表 1 列出了在相同电平输出情况下( $N+1$  电平), 各种子模块拓扑所需器件个数及其两极短路故障抑制系数。

表 1 不同子模块比较

Table 1 Comparison between different sub module topologies

	IGBT	二极管	电容	抑制系数
FBSM	$4N$	$4N$	$N$	2.31
UFBSM	$3N$	$4N$	$N$	2.31
CDSM	$2.5N$	$3.5N$	$N$	1.15
FLSM	$3N$	$3N$	$N$	2.31
TLSM	$2.5N$	$3N$	$N$	2.31
SBSM	$3N$	$4N$	$N$	2.31
SDSM	$2.5N$	$3N$	$N$	2.31
IHSM	$2.5N$	$3N$	$N$	1.15

### 3 SDSM-MMC 充电策略

充电起动的控制是 MMC-HVDC 应用的关键问题。MMC 首次运行前需要将子模块电容充电, 保证换流器正常解锁时每相桥臂电压与直流侧电压差值较小, 减小交直流侧的冲击电流。在文献[19-20]中, 借助不控整流和全控整流充电, 实现了两电平和基于半桥拓扑 MMC 充电启动; 文献[21]设计了基于 CDSM 拓扑的 MMC 启动策略; 针对 IHSM 拓扑, 文献[16]设计了基于半控和不控整流方式的启动策略, 而 SDSM 拓扑的启动策略尚未研究。根据图 4, 对于 SDSM 拓扑, 在不控整流充电阶段, 充电回路中处于充电状态的电容个数为  $2N$ , 因此只能充电至传统半桥子模块拓扑的一半电压, 与正常电压差值比较大。

为实现系统的正常启动, 借鉴文献[16,21]中的启动方法, 首先第一阶段利用不控整流对三相桥臂中所有子模块电容充电, 根据阀侧电压与桥臂模块

电容电压关系式(4)(其中  $u_c$  为电容额定电压,  $u_{ck}$  为电容电压), 此时电容只能充电至半桥拓扑电压 50% 左右。

$$U_L = \sqrt{3}U_{ph} = \sqrt{3} \frac{1}{2} Nu_c = \sum_{k=1}^{2N} u_{ck} \quad (4)$$

然后为了减少充电回路中电容个数, 将上下桥臂中子模块分别分成两个大组, 其中上桥臂为第一个大组, 下桥臂为第二个大组, 每相桥臂中的子模块又等分为两个小组。由于此时模块电容储存了部分能量, 第二阶段可以利用子模块旁路工作状态减少充电回路中子模块个数。

第一组:  $\{(A_{11} A_{12}) (B_{11} B_{12}) (C_{11} C_{12})\}$

第二组:  $\{(A_{21} A_{22}) (B_{21} B_{22}) (C_{21} C_{22})\}$

实际中 MMC 三相桥臂和上下桥臂具有结构和参数的对称性和一致性, 因此本文以上桥臂子模块充电过程为例对第二个充电阶段进行说明。

利用控制系统旁路三相中的任何一相桥臂, 比如 B 相桥臂, 同时旁路 A 相和 C 相上桥臂中的第一小组子模块  $A_{11}$  和  $C_{11}$ , 保证充电回路中电容个数为  $0.5N$ 。根据式(4), 在阀侧交流电压作用下, 第二小组子模块  $A_{12}$  和  $C_{12}$  可以充电至额定电压。当达到额定值时, 旁路 A 相和 C 相中的第二小组子模块  $A_{12}$  和  $C_{12}$ , 同时闭锁第一小组子模块  $A_{11}$  和  $C_{11}$ , 对其充电至额定值。最后旁路 A 相或者 C 相桥臂, 采用相同过程对 B 相上桥臂中两个小组子模块  $B_{11}$  和  $B_{12}$  分别充电至额定值, 其充电启动流程如图 5 所示。

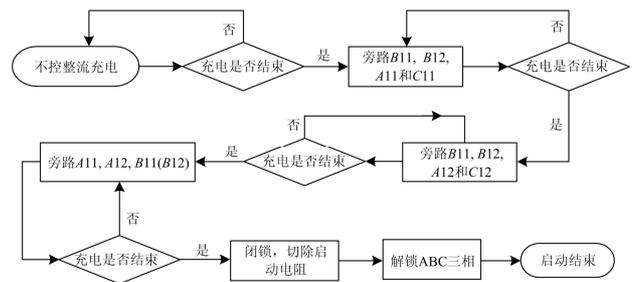


图 5 SDSM-MMC 启动流程

Fig. 5 Self startup chart of SDSM-MMC

### 4 仿真分析

为对比分析各种子模块拓扑的故障抑制能力和验证基于串联双子模块拓扑启动策略的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 搭建了图 6 所示两端 MMC-HVDC 模型进行仿真分析。电网电压 210 kV, 变压器变比为 210/220, 直流电压  $U_{dc} = \pm 200$  kV, 为降低仿真时间, 每相桥臂子模块个数为 20 个, 电容电压为 20 kV。

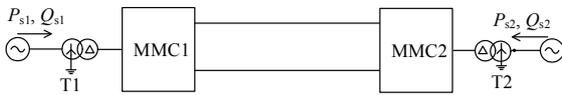


图 6 两端仿真模型

Fig. 6 Two-terminal simulating model

#### 4.1 SDSM-MMC 启动分析

在不控整流阶段, 由于充电回路中有 40 个子模块, 根据式(4)可知电容电压只能充电至 8 kV 左右, 如图 7(a)所示。在半控整流充电阶段, 通过选择投切不同的子模块组, 使充电回路中电容个数减少为 10 个, 利用交流电压交替充电至 20 kV。随后闭锁所有子模块, 在零电流下切除启动电阻, 重新解锁系统并逐渐增加有功功率输出, 从而完成启动过程, 如图 7(b)、图 7(c)。

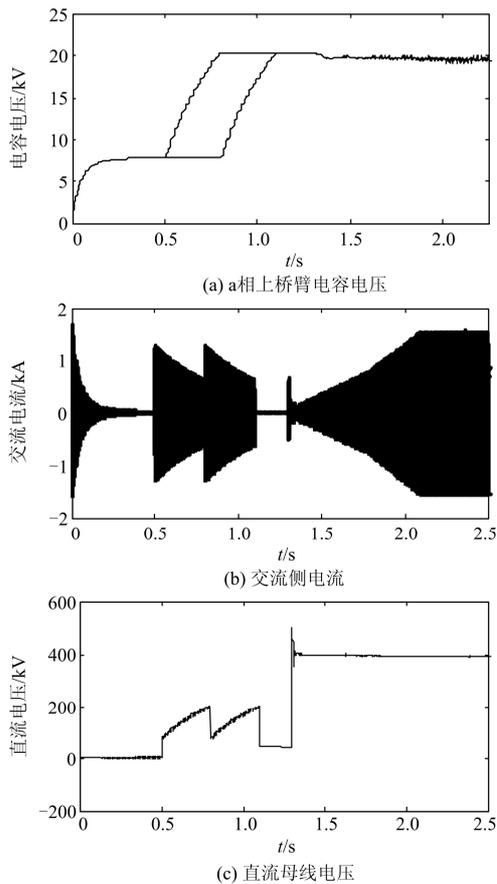


图 7 SDSM-MMC 启动

Fig. 7 Self startup of SDSM-MMC

#### 4.2 不同子模块拓扑故障抑制比较分析

针对子模块拓扑故障抑制能力的不同, 以 CDSM、SDSM 和 IHSM 三种子模块拓扑为例进行仿真分析。直流侧在 1 s 发生两极短路故障, 延时 2 ms 闭锁。

对于 SDSM 和 CDSM 拓扑, 由于子模块的两个电容 C1 和 C2 在双向桥臂电流作用下都处于充电状态, 因此子模块内部电容电压之间差异较小, 如图 8(a)、图 8(b)所示。对于 IHSM 拓扑, 闭锁后充电路径中只有 C1 位置电容处于充电状态, 而 C2 位置电容处于旁路, 导致了子模块内部电容电压差异比较大, 如图 8(c)所示。同时从图 8 可以看出, 由于闭锁后 IHSM 拓扑中处于充电状态电容个数少于 SDSM 和 CDSM 拓扑, 因此从能量守恒角度而言, IHSM 中处于 C1 位置电容电压要高于 CDSM 和 SDSM 中电容电压。

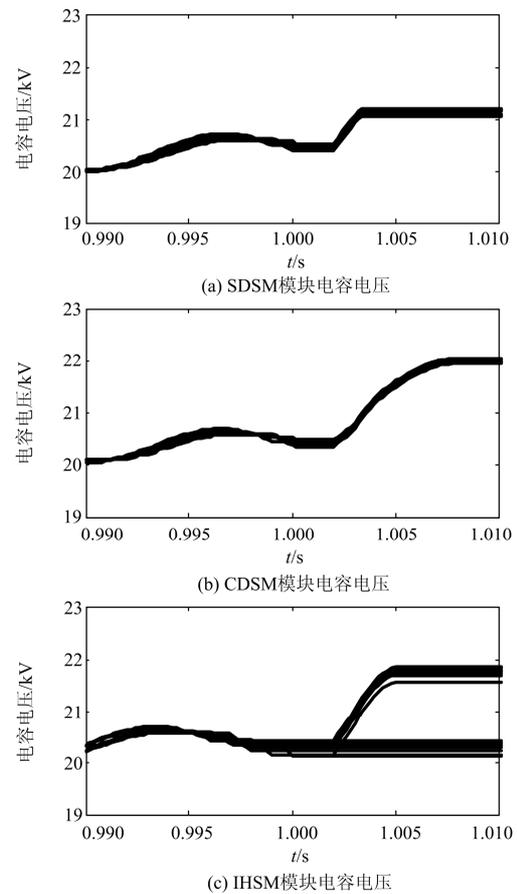


图 8 SDSM, CDSM 与 IHSM 拓扑电容电压

Fig. 8 Capacitor voltage of SDSM, CDSM and IHSM topologies

当直流侧发生两极短路故障时, 不同拓扑充电回路中子模块个数存在差异, 导致了故障抑制能力的不同。图 9(a)、(b)、(c)分别是 SDSM、CDSM 和 IHSM 拓扑直流侧故障抑制效果仿真图。对于 CDSM 和 IHSM, 虽然充电回路中电容个数相同(都为  $N$ ), 但是由于 IHSM 电容电压较高, 因此从故障电流抑制效果而言(直流电流衰减为零所需时间),

要稍微好于 CDSM。而对于 SDSM，尽管单个子模块电容电压值低于 CDSM 和 IHSM，而充电回路中电容个数却为  $2N$ ，因此 SDSM 拓扑故障抑制效果比较明显。

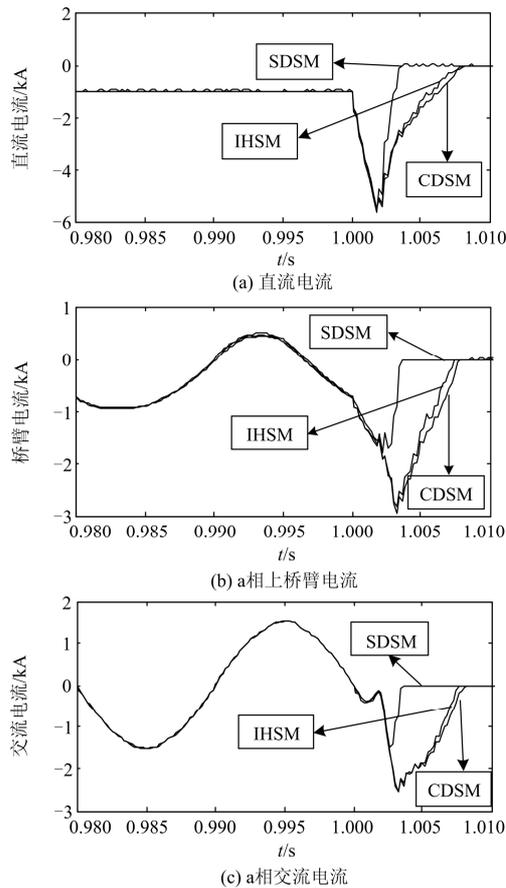


图 9 SDSM, CDSM 与 IHSM 故障抑制效果比较  
Fig. 9 Blocking effect comparison between SDSM, CDSM and IHSM

### 5 结论

1) 堆叠式两电平和多电平子模块拓扑可以在一定程度上减少模块化多电平换流器高压应用时所需子模块数量，增加有效电平输出。

2) 各种改进型子模块拓扑，在不改变调制策略、均压策略的前提下均实现了直流故障电流的阻断能力，避免了利用交流断路器切断故障电流，缩短了故障恢复时间。

3) 指出了各种改进型子模块拓扑的特点，并根据闭锁后故障回路中充电电容个数的差异，定性比较了不同拓扑故障抑制能力和相同电平输出下所需功率器件个数。

4) 针对串联双子模块拓扑构成的直流输电系

统，设计了有效的混合自励充电启动策略，能够实现系统的充电启动。

### 参考文献

[1] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.  
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.

[2] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.  
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.

[3] 杨煜, 孙大卫, 谢小荣, 等. 模块化多电平换流器型柔性直流系统的等效仿真方法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 43-48.  
YANG Yu, SUN Dawei, XIE Xiaorong, et al. Comparative study on the accelerated models of MMC-based VSC-HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 43-48.

[4] 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.

[5] 李笑倩, 刘文华, 宋强, 等. 一种具备直流清除能力的 MMC 换流器改进拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6389-6397.  
LI Xiaoqian, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. An enhanced MMC topology with DC fault clearance capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6389-6397.

[6] XUE Y L, XU Z, TU Q R. Modulation and control for a new hybrid cascaded multilevel converter with DC blocking capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2227-2237.

[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] ADAM G P, WILLIAMS B W. New emerging voltage source converter for high-voltage application: hybrid multilevel converter with DC side H-bridge chain links[J].

- IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(4): 765-773.
- [9] 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.
- [10] Alstom Grid. HVDC-VSC transmission technology of the future[J]. Alstom Grid, 2011(1): 13-17.
- [11] NAMI A, WANG L, DIJKHUIZEN F. Five level cross connected cell for cascaded converters[C] // European Power Electronics and Applications Conference (EPE), France, 2013.
- [12] 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.
- [13] QIN Jiangchao, SAEEDIFARD M, ROCKHILL A, et al. Hybrid design of modular multilevel converters for HVDC systems based on various sub module circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 1-10.
- [14] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C] // Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference, 2011: 1425-1431.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] JACOBSON B, KARLSSON P, ASPLUND G, et al. VSC-HVDC transmission with cascaded two-level converters[C] // Cigré Session, Paris, 2010.
- [18] 赵成勇, 李路遥, 翟晓萌, 等. 一种新型模块化多电平换流器子模块拓扑[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 21-26.
- ZHAO Chengyong, LI Luyao, ZHAI Xiaomeng, et al. New scheme of sub-module topology for modular multilevel converter[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 21-26.
- [19] 裘鹏, 黄晓明, 唐庚, 等. 一种新的柔性直流输电系统远端启动策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 100-106.
- QIU Peng, HUANG Xiaoming, TANG Geng, et al. The simulations of sub module topologies of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 100-106.
- [20] 楚遵方, 李耀华, 王平. 柔性直流输电系统中模块化多电平变流器的直流侧充电策略分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 136-142.
- CHU Zunfang, LI Yaohua, WANG Ping. Analysis of charging strategy by DC grid of modular multilevel converter in high voltage direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 136-142.
- [21] 薛英林, 徐政. 基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 1-7.
- XUE Yinglin, XU Zheng. Start control for the MMC HVDC system based on clamp double sub module[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 1-7.

收稿日期: 2015-04-03; 修回日期: 2015-05-19

作者简介:

李欢(1995-), 男, 本科, 研究方向为电气工程及其自动化; E-mail: 1091306530@qq.com

田新成(1982-), 男, 工程师, 从事调度自动化和配电自动化系统工作; E-mail: txc\_ncepu@163.com

张建坡(1973-), 男, 通信作者, 讲师, 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

(编辑 张爱琴)