

具备直流故障清除能力的 MMC 多电平子模块拓扑

常 非, 杨中平, 林 飞

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: MMC-HVDC 的直流故障处理能力直接关系到其在架空线领域和高压大容量场合的应用前景。因此, 提出了一种 MMC 改进拓扑, 其利用子模块电容电压形成反电动势来强制关断二极管, 快速地清除故障电流。详细分析了该拓扑直流故障清除原理和各功率器件的耐压情况, 并与其他拓扑进行了对比分析。最后采用 PSCAD/EMTDC 仿真验证了所提新型子模块拓扑的正确性和有效性。结果表明, 所提出的拓扑的主 IGBT 和保护 IGBT 的额定电压都仅为常规设计的 1/2, 可有效降低换流器成本。

关键词: 模块化多电平换流器; 高压直流输电; 直流故障; 子模块拓扑; 故障清除; 故障恢复

Multilevel Sub-module Topology of MMC with DC Fault Clearance Capability

CHANG Fei, YANG Zhongping, LIN Fei

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: DC fault clearance capacity of MMC-HVDC is directly related to the application of MMC-HVDC in the field of overhead lines and high voltage and large capacity applications. Consequently, we proposed a new kind of MMC improved topology. The capacitor voltage of the sub-module produced counter electromotive was used to forcibly eliminate the freewheeling effect of diodes, and to quickly remove the fault current. The principle of DC fault clearing and the voltage resistance of each power device are analyzed in detail, and the comparison with other topologies is also carried out. Moreover, the correctness and effectiveness of the new sub-module is verified by PSCAD/EMTDC simulation. The results show that the rated voltages of main IGBT and protection IGBT of the proposed topology are only half of the conventional design which can effectively reduce the cost of converter.

Key words: MMC; HVDC; DC fault; sub-module topology; fault clearance; system recovery

0 引言

模块化多电平换流器 (MMC) 技术的诞生, 称得上是柔性直流输电工程技术发展史上的重要里程碑。与常规的两电平或三电平换流器技术相比, MMC 模块化的级联结构易于达到高电压等级, 避免了器件直接串联所带来的静动态均压、开关损耗大、谐波含量高等缺陷。

MMC 技术的出现极大地提升了柔性直流输电工程的可行性, 促进了柔性直流输电技术的发展及其工程的推广应用^[1]。国内目前已投运的 MMC-HVDC 工程包括: 上海南汇工程 (17 MW/±30 kV, 电缆输电线, 用于风电并网); 南澳三端工程 (200 MW/±160 kV, 电缆+架空线输电线, 用于风电并网); 舟山五端工程 (400 MW/±200 kV, 电缆输电线, 用于风电并网); 厦门工程 (1 000 MW/±320 kV, 电缆输电线, 用于电网互联)。

架空输电线适用于高压大容量场合。但架空线所带来的直流故障问题必然会给 MMC 技术提出新的挑战。对于 MMC 而言, 线路故障会引起电压源换流器中出现比较大的过电流, 对换流器的功率器件安全产生严重威胁^[2-6], 必须及时切除故障。而基于半桥式子模块 (HBSM) 的常规 MMC 拓扑结构不具有短路故障切除能力。在短路故障情况下, 由于 MMC 中二极管的续流作用, MMC 将直接变成一个不控整流桥, 即使通过闭锁换流器控制脉冲关断所有开关器件, 整流桥的存在仍将导致短路电流经过 MMC 的续流二极管。如果不能迅速切除短路电流, 续流二极管将由于承受过电流而导致损坏。

基于全桥式子模块 (FBSM) 的 MMC 拓扑^[7]能够快速切除故障电流, 但换流器的成本和损耗都很高。与全桥式 MMC 相比, 基于钳位双子模块 (CDSM) 的 MMC 拓扑^[8]在一定程度上减少了附加功率器件的数量, 换流器损耗和器件成本也有所

降低。但由于附加的 IGBT 和二极管在故障期间要承受子模块的电容电压, 造成选择功率器件时, 需要考虑较高耐压值, 导致额外成本依然很高。增强自阻型子模块(SBSM)的 MMC 拓扑^[3,9-11]附加的 IGBT 和二极管在故障期间仍需要承受子模块电容电压。二极管嵌位式单子模块(DCSSM)的 MMC 拓扑^[2], 直流侧含有 2 个电容, 可使得附加的保护 IGBT 和二极管在故障期间仅需要承受子模块电容电压的 1/2, 额外成本低, 具有良好的经济效益。直流侧 2 个电容通过简单的电阻均压硬件电路来保证电压均衡。进一步, 将 2 个二极管嵌位式单子模块进行组合, 提出了二极管嵌位式双子模块^[2](DCDSM)。与二极管嵌位式单子模块相比, 二极管嵌位式双子模块的交流输出电压提升了 1 倍, 因此同等电压等级所需的子模块数目会降低 1/2。

文献[12-13]研究分析了 3L-NPC 型子模块的 MMC 拓扑, 但该拓扑不具有直流故障清除的能力。

本文仍沿用 MMC 改进拓扑的思路, 提出一种二极管箝位型多电平子模块(DCMSM)的 MMC 拓扑, 不仅具有直流故障清除的能力, 而且在功率器件成本和换流器损耗方面具有更高的经济性, 能够满足未来高压大容量的发展要求。

1 二极管箝位型多电平子模块

1.1 二极管箝位型多电平子模块的结构

二极管续流效应是 HBSM 无法清除直流故障的原因。为了避免这种续流效应, 本文提出了一种二极管箝位型多电平子模块, 其结构如图 1 所示。这种子模块在 3L-NPC 的基础上, 附加了 1 个保护 IGBT (S5) 和 2 个保护二极管 (D5 和 D8), 主功率器件 (S1 和 D1、S2 和 D2、S3 和 D3、S4 和 D4、D6 和 D7) 并没有变化。保护功率器件 S5 和 D5 串联在桥臂当中, 并且与主功率器件的串联方向相反。保护二极管 D8 将子模块负极与子模块电容中点连接起来 (C1 和 C2 电容值相等)。图 1 中, i_{br} 为桥臂电流, u_c 为子模块电容电压。

在 MMC 正常运行时, S5 始终开通, D8 始终截止。S5 和 D5 轮流导通, 形成桥臂电流通路。DCMSM 的开关状态和输出电压关系如表 1 所示, 其中 1 表示开通, 0 表示关断。

1.2 脉冲调制和电容电压平衡控制

由表 1 可知, 在正常运行下, DCMSM 的工作方式与 3L-NPC 型子模块非常类似。因此, 主功率

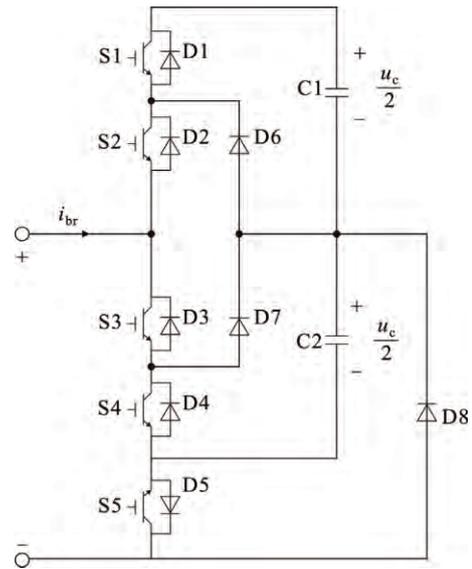


图 1 DCMSM 的结构图

Fig.1 Structure diagram of DCMSM

表 1 DCMSM 开关状态和输出电压关系

Table 1 Relationship between switching state and output voltage of DCMSM

换流器的状态	S1	S2	S3	S4	S5	输出电压
正常状态	1	1	0	0	1	u_c
	0	1	1	0	1	$\frac{u_c}{2}$
	0	0	1	1	1	0
闭锁状态	0	0	0	0	0	u_c 或
						$-\frac{u_c}{2}$

器件 (S1、S2、S3 和 S4) 完全可以采用 3L-NPC 型子模块的调制方法^[12-13], 这里就不再赘述。C1 和 C2 采用文献[14-15]提出的基于比例积分(PI)调节器的控制方法来解决电容电压均衡问题。

1.3 直流故障清除原理

当发生直流故障时, 应该立即闭锁所有 IGBT 的脉冲^[16-17]。子模块二极管 (D1、D2、D3、D4、D5 和 D8) 会将子模块电容 (C2 或串联后的 C1 与 C2) 引入桥臂当中, 利用电容电压来迫使导通的二极管反向截止, 从而切断故障电流通路。

下面给出故障清除原理的解析分析, 大致思路是: 在 IGBT 闭锁后, 根据桥臂电流的方向, 分析 MMC 的实际电路结构, 进而求解处于导通状态的二极管的电压, 判断是否满足二极管关断条件, 在此基础上分析故障电流清除过程。

当桥臂电流 $i_{br} < 0$ 时, S5 关断时需要切除电流。

当 5 个 IGBT 都关断后，子模块内部的电流通路由 3 只二极管 (D3、D4 和 D8) 和电容 (C2) 构成，如图 2(a)所示。图 2(b)为 MMC 内部的电流通路示意图。设直流线路电压为 U_{dc} ，每个桥臂包含子模块数目为 N ，则每个电流通路中都分别含有 $2N$ 个 D3、D4、D8 和 C2 串联在电路中。根据 KVL 定律，可以得到

$$u_{L-L}(t) = 2N(u_{D3}(t) + u_{D4}(t) + u_{D8}(t) + u_{C2}(t)) \quad (1)$$

式中： $u_{L-L}(t)$ 为交流系统线电压； $u_{D3}(t)$ 、 $u_{D4}(t)$ 、 $u_{D8}(t)$ 、 $u_{C2}(t)$ 分别为 D3、D4、D8、C2 上的电压， $u_{C2}(t) = U_{dc} / (2N)$ 。3 只二极管 (D3、D4 和 D8) 的电压之和可以表示为

$$u_{D3}(t) + u_{D4}(t) + u_{D8}(t) = \frac{u_{L-L}(t) - U_{dc}}{2N} \quad (2)$$

根据调制原则，交流系统线电压的峰值 $U_{L-L} < \sqrt{3}U_{dc} / 2$ ，因此得到

$$u_{D3}(t) + u_{D4}(t) + u_{D8}(t) < 0 \quad (3)$$

式(3)表明，D3、D4 和 D8 承受反向电压，因而能够截断电流通路，从而清除故障电流。

类似地，当桥臂电流 $i_{br} > 0$ 时，S5 关断时无需切除电流。当 5 个 IGBT 都关断后，子模块内部的电流通路由 3 只二极管 (D1、D2 和 D5) 和 2 个电容 (C1、C2) 构成，如图 2(c)所示。图 2(d)为 MMC 内部的电流通路示意图，每个电流通路中都分别含有 $2N$ 个 D1、D2、D5、C1 和 C2 串联在电路中，其电压根据 KVL 定律满足

$$-u_{L-L}(t) = 2N(u_{D1}(t) + u_{D2}(t) + u_{D5}(t) + u_{C1}(t) + u_{C2}(t)) \quad (4)$$

且电容电压满足： $u_{C1}(t) = u_{C2}(t) = U_{dc} / (2N)$ ，则 3 只二极管 (D1、D2 和 D5) 的电压之和可表示为

$$u_{D1}(t) + u_{D2}(t) + u_{D5}(t) = \frac{-u_{L-L}(t) - 2U_{dc}}{2N} \quad (5)$$

显然可得

$$u_{D1}(t) + u_{D2}(t) + u_{D5}(t) < 0 \quad (6)$$

同理，D1、D2 和 D5 承受反向电压而快速截止，清除故障电流。

综上所述，基于 DCMSM 的 MMC 拓扑具备直流故障清除的能力。

1.4 直流故障恢复原理

在故障电流清除后，通过解除保护 IGBT (S5) 的脉冲封锁就能够将 MMC 再次置于不控整流状态，对应的电路结构如图 3 所示。一般情况下，故障清除过程中，各 IGBT 闭锁速度是很快的，故障

清除过程也比较短，子模块电容电压基本会维持在额定值附近。但考虑到实际装置中的各类损耗和电容放电回路的影响，子模块电容电压会有一些的损失。如果子模块电容电压很低，在 $i_{br} > 0$ 时，子模块电容将会充电，电路如图 3(a)所示。直至子模块电容电压达到 $U_{L-L} / (2N)$ 时，子模块电容不再充电，所有子模块都被 S5、D3 和 D4 旁路，电路如图 3(b)所示。MMC 转为不控整流状态，会在直流极间形成整流电压。

等到直流极电压达到整流电压后，就可以继续解除主功率器件 (S1、S2、S3 和 S4) 的脉冲封锁，MMC 就能够恢复正常运行，逐步抬升功率，恢复到故障前的状态。

1.5 具有直流故障清除能力的 MMC 拓扑的特性

本节主要研究本文提出的 MMC 拓扑在功率器件耐压水平、功率器件成本、换流器损耗这 3 个方面的特性，以说明提出的拓扑在应用过程中的选型、成本等问题。

在分析功率器件成本、换流器损耗特性时，以基于半桥式子模块的常规 MMC 为基准，便于分析各类具有直流故障清除能力 MMC 拓扑的额外成本和损耗。与半桥式 MMC 相比，各类具有直流故障清除能力的 MMC 拓扑都额外地增加了某些功率器件。在研究功率器件耐压水平、功率器件成本、换流器损耗特性时，着重研究这些额外器件带来的影响。由于二极管在成本和损耗方面远低于 IGBT，故这里只考虑额外 IGBT 所带来的影响。

表 2 对几种典型的具有直流故障清除能力的 MMC 改进拓扑进行了对比，其中换流器损耗以 HBSM 损耗作为基准值。

这里与文献[2]中提出的目前最有优势的 DCDSM 拓扑进行对比说明。从表 2 可以看出，在

表 2 具有直流故障清除能力 MMC 改进拓扑的对比

Table 2 Comparison of several MMC improved topologies with DC fault clearing capability

参数	SM 总数	主 IGBT 总数	保护 IGBT 总数	主 IGBT 额定电压	保护 IGBT 额定电压	换流器损耗标幺值
HBSM	6N	12N	—	U_{dc}/N	—	1
FBMSM	6N	24N	—	U_{dc}/N	—	1.61
CDSM	3N	12N	3N	U_{dc}/N	U_{dc}/N	1.31
SBSM	6N	12N	6N	U_{dc}/N	U_{dc}/N	1.42
DCSSM	6N	12N	6N	U_{dc}/N	$U_{dc}/(2N)$	1.39
DCDSM	3N	12N	6N	U_{dc}/N	$U_{dc}/(2N)$	1.39
DCMSM	6N	24N	6N	$U_{dc}/(2N)$	$U_{dc}/(2N)$	1.36

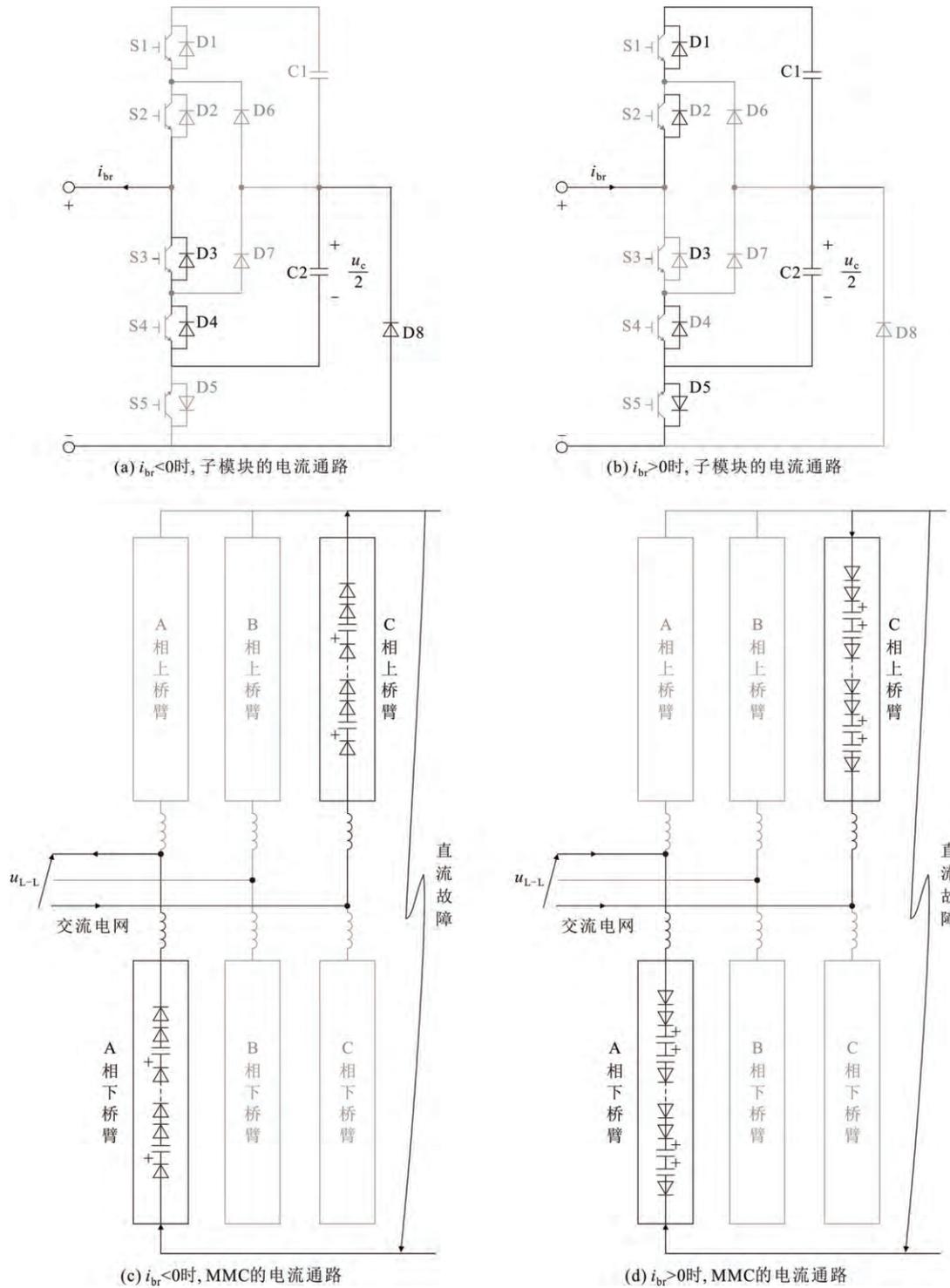


图 2 故障清除过程中, 基于 DCMSM 的 MMC 的电流通路

Fig.2 In the process of fault clearing, the current path of MMC based on DCMSM

DCMSM 拓扑方案中, 保护 IGBT 的数目和耐压水平与 DCDSM 拓扑方案一致; 主 IGBT 的数目为 DCDSM 拓扑方案的 1 倍, 但耐压水平却仅为 DCDSM 拓扑方案的 1/2。目前, 同等电流等级下, 额定电压分别为 1 700、3 300 V 的 IGBT 成本 (包括 IGBT 器件及其驱动电路) 之比约为 1 : 3。因此,

即使主 IGBT 数量增加 1 倍, DCMSM 拓扑方案所增加的成本也仅约为 DCDSM 拓扑方案的 66%。实际 MMC-HVDC 工程中换流器可能包含上千个子模块, 因此总体成本会有显著降低。在损耗方面, 本文提出的 DCMSM 拓扑方案可进一步降低器件开关频率, 故其损耗进一步减小。

综上, 本文提出的 DCMSM 拓扑方案初始投资成本较低, 具有良好的经济优势。

2 仿真分析

为了验证本文提出的 MMC 拓扑的有效性, 建立了 10 MVA/±40 kV 的 MMC-HVDC 仿真系统。由于本节主要关注单换流器的故障清除和恢复机理, 仿真系统采用了单边的 MMC, 另一侧的 MMC 用直流电阻代替, 如图 4 所示。另外, 由于研究主要关注故障之后的动态过程, 为了提高仿真效率, 仿真中每个桥臂只采用 4 个子模块级联。

在系统稳定之后, 3 s 时, 引入直流双极短路故障 (瞬时性, 持续时间 0.01 s), 考虑故障检测与保护逻辑单元动作, 设定换流器闭锁时间为故障发生

后的 5 ms, 也即 3.005 s。图 5 为直流短路电流波形。图 5 表明, 换流器闭锁后将使直流短路电流迅速降为 0。换流器完全进入闭锁状态后, 保持此状态 200 ms, 使得故障线路完全去能和充分去游离, 确保闪络弧道消失, 使绝缘性能恢复到原有水平。经过充分去游离过程后, 即 3.2 s 时, 故障极在零功率模式下开始解锁并试图建立系统直流电压, 如图 6 所示, 直流电压成功建立意味着故障为暂时性故障并且已经清除, 线路重新具备了正常输电的条件, 系统重启成功。如果故障极无法正常建立直流电压, 则意味着故障弧道可能仍然存在, 系统重启失败; 如果再次重启依然失败, 则控制系统判定故障为永久性故障, 需要停运系统进行沿线排查和检修。图 7、图 8 分别为系统三相交流电流和系统有功传输。可以看出, 换流器闭锁后, 系统三相交流电流迅速降至 0, 交流系统不再向故障点馈入短路电流, 且系统有功传输为 0。

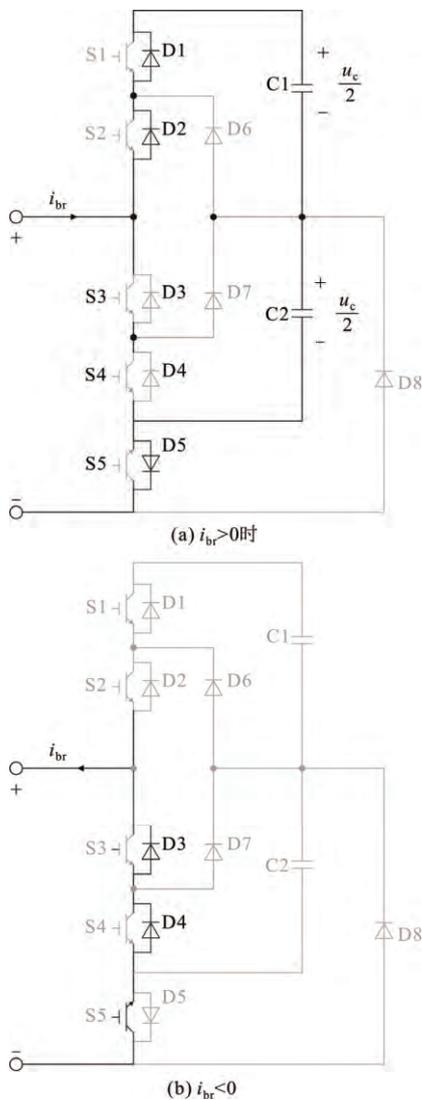


图 3 故障恢复过程中, DCMSM 的电流通路

Fig.3 In the process of fault recovery, the current path of DCMSM

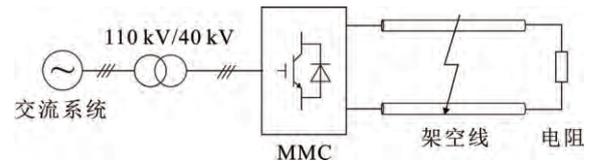


图 4 仿真系统结构图

Fig.4 Structure of simulation system

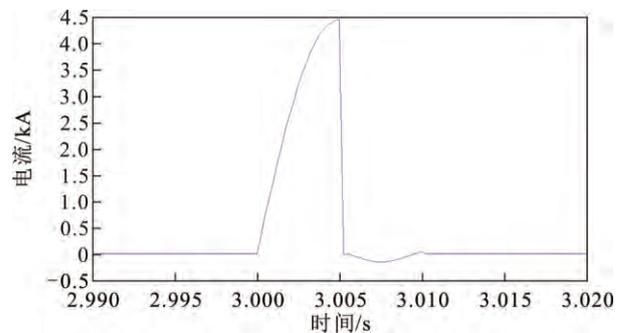


图 5 直流短路电流

Fig.5 DC short circuit current

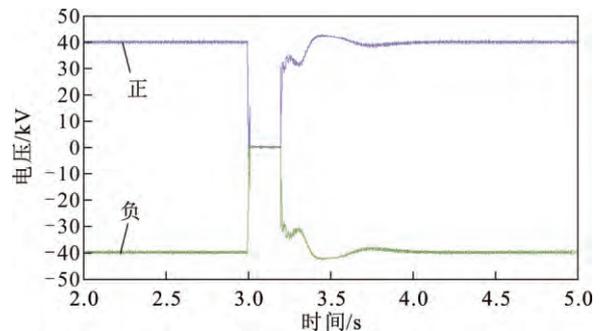


图 6 正、负直流母线电压

Fig.6 Positive and negative DC bus voltages

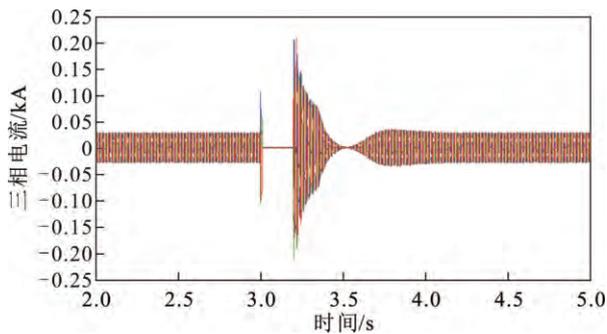


图7 系统三相电流

Fig.7 Three-phase current of the system

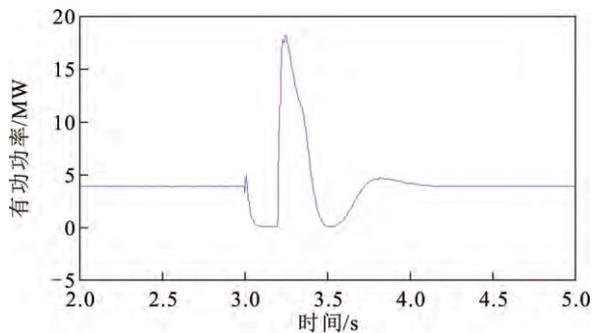


图8 系统有功传输

Fig.8 Active power of the system

3 结论

1) 本文提出了一种二极管箝位型多电平子模块(DCMSM)的 MMC 拓扑, 该拓扑利用子模块电容电压形成反电动势来强制关断二极管, 快速地清除故障电流。

2) 该拓扑能够降低约 1/3 换流器成本, 并能进一步降低其损耗, 具有良好的经济优势。

参考文献 References

- [1] 汤广福, 贺之渊, 庞 辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.

- [5] 赵成勇, 陈晓芳, 曹春刚, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 82-87.
ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.
- [6] 丁云芝, 苏建徽, 周 建. 基于钳位双子模块的 MMC 故障清除和重启能力分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 97-103.
DING Yunzhi, SU Jianhui, ZHOU Jian. Analysis on fault current limitation and self-recovery of MMC based on clamp double sub-module[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 97-103.
- [7] International Electrotechnical Commission. High-voltage direct current(HVDC) transmission using voltage sourced converters(VSC)[R]. UK: International Electrotechnical Commission, 2011.
- [8] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C]//Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Jeju, Korea: IEEE, 2011: 1425-1431.
- [9] 赵鹏豪, 王朝亮, 许建中, 等. 一种具有直流故障穿越能力的 MMC 子模块拓扑[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3441-3446.
ZHAO Penghao, WANG Chaoliang, XU Jianzhong, et al. A sub-module topology of MMC with DC fault ride-through capability[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3441-3446.
- [10] 王 一, 刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2312-2319.
WANG Yi, LIU Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2312-2319.
- [11] 王朝亮, 许建中, 赵成勇, 等. 基于单钳位型子模块的 MMC 及拓扑改进方案[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 74-80.
WANG Chaoliang, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, et al. MMC based on single-clamp sub-module and improved topology schemes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 74-80.
- [12] SOLAS E, ABAD G, BARRENA J A. Modular multilevel converter with different submodule concepts-part I: capacitor voltage balancing method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4525-4535.
- [13] SOLAS E, ABAD G, BARRENA J A. Modular multilevel converter with different submodule concepts-part II: experimental validation and comparison for HVDC application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4536-4545.
- [14] BENDRE A, VENKATARAMANAN G, ROSENE D, et al. Modeling and design of a neutral-point voltage regulator for a three-level diode-clamped inverter using multiple-carrier modulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(3): 718-726.
- [15] CHATURVEDI P, JAIN S, AGARWAL P, et al. Carrier-based neutral point potential regulator with reduced switching losses for three-level diode-clamped inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 613-624.
- [16] 李云丰, 安 婷, 丁 骁, 等. 电网电压不平衡 MMC-HVDC 无锁相环控制策略[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 105-111.
LI Yunfeng, AN Ting, DING Xiao, et al. Control strategies of MMC-HVDC in the absence of PLL under unbalanced grid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 105-111.
- [17] 林环城, 王志新, 史 莉, 等. 基于分层控制的模块化多电平变流器模型预测控制方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 143-152.
LIN Huancheng, WANG Zhixin, SHI Li, et al. Model predictive control method of modular multilevel converter based on hierarchical control[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 143-152.



CHANG Fei

Ph.D. candidate

Corresponding author

常 非(通信作者)

1986—, 男, 博士生

研究方向为柔性输电

E-mail: 14117397@bjtu.edu.cn

收稿日期 2016-06-21 修回日期 2016-08-09 编辑 程子丰