DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.88　　**中图分类号**：TM723　　**文献标志码**：A

新型串联式混合桥臂 MMC 分析研究

张 熙，姚 江，钟启濠，刘国兵
(广东电网有限责任公司东莞供电局，东莞 523000)

摘要：高压柔性直流输电系统中，模块化多电平换流器 MMC(modular multilevel converter)有其独特优势。相比于 MMC，子模块与 IGBT 构成的混合桥臂 MMC 即 HL-MMC(hybrid-leg MMC)在相同的子模块数量下，输出电压电平数增加了 1 倍，输出电压谐波含量少，直流母线电压利用率提高了 1 倍。串联型 HL-MMC 即 SC-HL-MMC(series-connected HL-MMC)由 3 个单相 HL-MMC 构成，直流母线电压相同的情况下，子模块数量可减少 2/3。为了具备直流短路故障容错能力，采用由半桥子模块与全桥子模块构成的混合式 SC-HL-MMC，分析满足故障穿越的全桥子模块与半桥子模块的配比方案。为验证所提拓扑的有效性，搭建仿真模型。仿真结果表明：额定工况下，SC-HL-MMC 可输出稳定的谐波含量少的三相电压，直流短路故障工况下，SC-HL-MMC 能迅速阻断短路电流，验证了该拓扑的有效性。

关键词：串联式混合桥臂模块化多电平换流器；直流短路故障；柔性直流输电

Analysis of Novel Series-connected Hybrid-leg MMC

ZHANG Xi, YAO Jiang, ZHONG Qihao, LIU Guobing
(Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: In a high-voltage flexible DC power transmission system, the modular multilevel converter (MMC) has unique advantages. Compared with those of the ordinary MMC, the output voltage levels of a hybrid-leg MMC (HL-MMC) consisting of submodules (SMs) and IGBT are doubled, the harmonic content of output voltage is reduced, and the DC bus voltage utilization is also doubled under the condition of the same number of SMs. The series-connected HL-MMC (SC-HL-MMC) is composed of three single-phase HL-MMCs, and its number of SMs is reduced by 2/3 under the condition of the same DC bus voltage. To be equipped with a DC short-circuit fault-tolerant capability, a hybrid SC-HL-MMC consisting of half bridge SMs (HBSMs) and full bridge SMs (FBSMs) is applied, and the scheme of optimal ratio between FBSMs and HBSMs is analyzed to satisfy the short-circuit fault ride-through requirement. To verify the performance of the proposed topology, a simulation model is built. Simulation results show that the stable three-phase output voltage from the SC-HL-MMC contains less harmonic under the rated operation condition, and it can block the short-circuit current rapidly under the DC short-circuit fault condition, thereby verify the validity of this topology.

Keywords: Series-connected hybrid-leg modular multilevel converter (SC-HL-MMC); DC short-circuit fault; flexible DC power transmission

相较于交流输配电网，直流输配电网具有可靠性高、损耗低、造价低的优点[1]。模块化多电平变流器 MMC(modular multilevel converter)克服了电压源型变流器 VSC(voltage sourced converter)均压困难、开关频率高、损耗大、谐波电流大、单个 IGBT 器件耐压值低等缺点，具有开关频率低、谐波含量低、模块化制造等优点[2-3]。且 MMC 对开关器件的开通关断的时间一致性与耐压等级要求较低[4]。因此，MMC 成为了直流输配电领域的研究热点与趋势。

MMC 可由半桥子模块 HBSM(half bridge sub-module)级联而成，也可由全桥子模块 FBSM(full

收稿日期：2022-06-11；**修回日期**：2022-09-13，2022-10-17；
录用日期：2022-10-21；**网络首发日期**：2022-12-06

bridge sub-module)级联而成。由 HBSM 级联构成的 MMC 结构简单、控制简单、成本低且损耗小。由 FBSM 级联而成的 MMC 具有直流短路故障清除能力，但使用的器件数量比 HBSM 多 1 倍[5-7]。由钳位型双子模块级联而成的 MMC 所使用的器件数量介于 HBSM 与 FBSM 之间，且具备直流短路故障处理能力，但是钳位型双子模块封装复杂[8]。因此，文献[9-13]提出了混合型 MMC，如二极管钳位型子模块级联而成的 MMC，自阻型子模块级联而成的 MMC，单极性全桥子模块级联而成的 MMC，开关电容子模块级联而成的 MMC 等。但是这些拓扑的子模块制造封装难度及成本远高于 HBSM 与 FBSM。为了减少成本，适应超高压直流输配电场合，2009 年 ABB 公司提出了串联型 MMC，文献[14-16]也基于串联 MMC 提出了不同的串联型 MMC 拓扑。如文献[15]介绍的三相串联 MMC，相比于三相并联 MMC，在相同的直流母线电压工况下，所需子模块的数量减少了 1/3；文献[16]介绍的三相串联 MMC，所需子模块数量减少了 2/3。

相较于由 HBSM 构成的 MMC，HBSM 与 IGBT 构成的串联混合桥臂 MMC 即 SC-HL-MMC(series-connected hybrid-leg MMC)具有直流母线电压利用率提高 1 倍、所需器件少、成本低、输出电压电平数提高 1 倍、输出电压谐波含量低的优点。且 HL-MMC 中 IGBT 的开关频率与输出电流基波频率相同，开关频率低，损耗低。但发生直流短路故障时，HBSM 二极管在闭锁状态下可提供短路电流放电回路，不能有效阻断故障电流。FBSM 可控制输出负压实现穿越直流短路故障[16-17]。以 HBSM 与 FBSM 组合成的混合型 HF-MMC 能阻断直流短路故障电流回路[7]。文献[18]中总结了大量的 MMC 拓扑结构，认为半桥子模块与其他子模块混合级联构成的混合 MMC 具有直流故障处理能力，包括全桥子模块、钳位双子模块、串联双子模块等。在众多结构中，全桥子模块与半桥子模块混合构成的混合型 MMC 具有能够实现无闭锁故障穿越的优势，受到了广泛关注，该拓扑结构目前已在我国的昆柳龙三端混合直流输电工程中应用。本文参考了该方法，在 SC-HL-MMC 拓扑结构中子模块桥臂中采用 FBSM 与 HBSM 混合方式获得直流短路故障电流清除能力。

本文首先介绍了 SC-HL-MMC 的拓扑结构与工作原理、直流故障穿越能力、FBSM 与 HBSM 的配比。最后搭建了仿真模型验证了该拓扑的工作特性与直流故障穿越能力。

1　SC-HL-MMC 拓扑结构分析

1.1　SC-HL-MMC 拓扑结构

图 1(a)为 SC-HL-MMC 拓扑结构，图 1(b)为 A 相单元拓扑结构。SC-HL-MMC 由 3 个单相单元串联而成，每个单相单元与变压器的二次侧相连。每相单元上、下桥臂均包含 N 个子模块 SM(sub-module)。图中：L_{d} 为直流侧电抗；U_{dc} 为直流母线电压；i_{a} 为桥臂输出电流；i_{a1}~i_{a4} 为 SM 桥上、下桥臂电流及 IGBT 桥上、下桥臂电流；v_{a} 为桥臂输出电压；v_{a1}~v_{a2} 为 SM 桥上、下桥臂压降；S_1、S_2 为 IGBT 桥上、下桥臂的 IGBT；I_{d} 为直流母线电流；V_{A} 为 SM 桥臂的输出电压；V_{B} 为 IGBT 桥臂的输出电压。

1.2　SC-HL-MMC 工作原理分析

以图 1(b)所示的 A 相单元为例，桥臂输出电压 v_{a} 可表示为

$$v_{\mathrm{a}} = V_{\mathrm{A}} - V_{\mathrm{B}} \tag{1}$$

忽略桥臂等效电阻与等效电抗的压降，根据基尔霍夫电压定律，v_{a1} 与 v_{a2} 可分别表示为

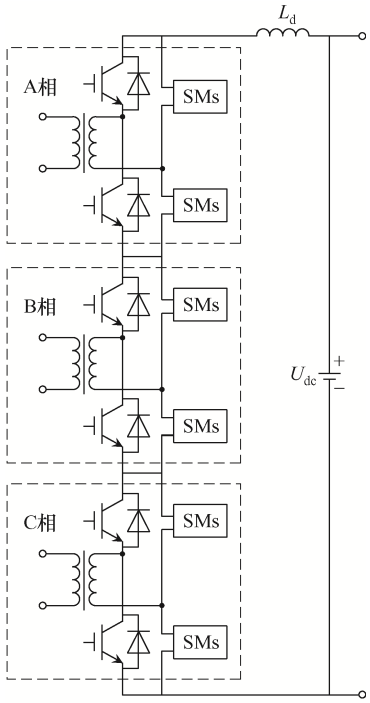
$$\begin{cases} v_{\mathrm{a1}} = \dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{6} - V_{\mathrm{A}} = \sum\limits_{n=0}^{n_{\mathrm{P}}} V_C \\ v_{\mathrm{a2}} = \dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{6} + V_{\mathrm{A}} = \sum\limits_{n=0}^{n_{\mathrm{N}}} V_C \end{cases} \tag{2}$$

式中：n_{P}、n_{N} 分别为 SM 桥中上、下桥臂处于投入状态的子模块数量；V_C 为 SM 母线电容电压。

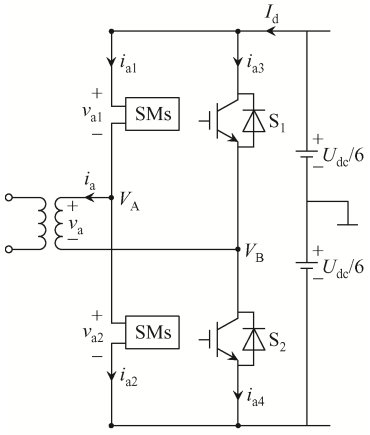
V_C 的表达式及 n_{P}、n_{N} 应满足的条件分别为

$$V_C = \frac{U_{\mathrm{dc}}}{3N} \tag{3}$$

$$N = n_{\mathrm{P}} + n_{\mathrm{N}} \tag{4}$$



(a)SC-HL-MMC拓扑结构



(b)A相单元拓扑结构

图 1 SC-HL-MMC 拓扑结构

Fig. 1 Topology of SC-HL-MMC

随着 SC-HL-MMC 中子模块数量逐渐增加,输出电压逐渐逼近正弦波。为了简化分析，可认为输出电压为正弦波，并假设输出电压为

$$\begin{cases} v_{\mathrm{a}} = V_m \sin(\omega t + \theta) \\ v_{\mathrm{b}} = V_m \sin\left(\omega t + \theta - \dfrac{2}{3}\pi\right) \\ v_{\mathrm{c}} = V_m \sin\left(\omega t + \theta + \dfrac{2}{3}\pi\right) \end{cases} \tag{5}$$

式中：ω 为输出电压角频率；θ 为 SC-HL-MMC 中输出电压的相位；V_m 为输出电压幅值，可表示为

$$V_m = m\frac{U_{\mathrm{dc}}}{3} \tag{6}$$

式中，m 为调制比。

当调制比 m=1 时,图 1(b)中,半桥桥臂中 IGBT 器件 S_1、S_2 互补导通。当 v_{a}<0 时，S_1 闭合、S_2 断开；当 v_{a}>0 时，S_1 断开、S_2 闭合，因此 V_{B} 可表示为

$$V_{\mathrm{B}} = \begin{cases} -\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{6} & v_{\mathrm{a}} > 0 \\ \dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{6} & v_{\mathrm{a}} < 0 \end{cases} \tag{7}$$

由式(1)、式(5)和式(7)可知，SM 桥臂输出电压 V_{A} 可表示为

$$V_{\mathrm{A}} = \begin{cases} -\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{6} + V_m \sin(\omega t + \theta) & v_{\mathrm{a}} > 0 \\ \dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{6} + V_m \sin(\omega t + \theta) & v_{\mathrm{a}} < 0 \end{cases} \tag{8}$$

由式(5)、式(7)和式(8)可知，V_{A}、V_{B} 及 A 相输出电压 v_{a} 的理想波形如图 2 所示。

图 2(a)所示的 V_{A} 波形中，T 为 SC-HL-MMC 输出电压周期，$t \in [0, T/2]$ 时，波形包含 N+1 个电平，$t \in [T/2, T]$ 时，波形同样包含 N+1 个电平。即图 2(c)所示的 v_{a} 波形包含 2N+1 个电平,随着 SM 数量的增加，v_{a} 波形趋近于正弦波，谐波含量逐步减少。

由图 2(a)~(c)可见，由于 IGBT 桥臂的存在，输出电压 v_{a} 的幅值可达 U_{dc}/3,文献[15]介绍的串联型 MMC 的输出电压幅值最高可达 U_{dc}/6，即 SC-HL-MMC 的直流母线电压利用率增加了 1 倍。在直流母线电压相同且子模块数量相同的情况下，SC-HL-MMC 子模块的耐压值为传统串联型 MMC 的 1/2；在直流母线电压相同且子模块耐压值相同的情况下，SC-HL-MMC 所需的子模块数量较少。因此，SC-HL-MMC 的子模块成本较低。由图 2(c)可见，v_{a} 的电压波形包含了 2N+1 个电平，串联型 MMC 的输出电压波形仅包含 N+1 个电平，即 SC-HL-MMC 输出电压波形正弦度更高，谐波含量少。引入的 IGBT 桥臂的开关频率较低，在 1 个周

期内，上、下桥臂的 IGBT 仅导通 1 次，动态均压容易，为 IGBT 串联创造了条件。在相同的母线电压下，传统 SC-MMC 与 SC-HL-MMC 的工作状态见表 1。

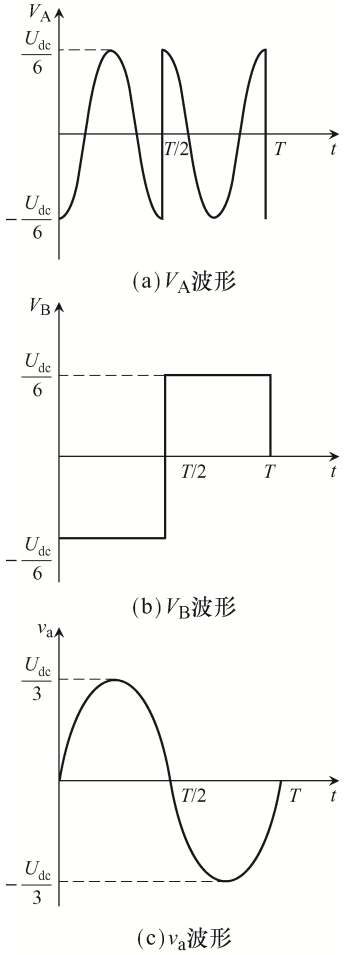


图 2　V_A、V_B、v_a 波形

Fig. 2 Waveforms of V_A, V_B and v_a

表 1　SC-MMC 与 SC-HL-MMC 的工作状态

Tab. 1 Operation modes of SC-MMC and SC-HL-MMC

MMC 拓扑	子模块数量	输出电平数量	输出电压幅值
SC-MMC	$6N$	N+1	$U_{dc}/6$
SC-HL-MMC	$6N$	$2N$+1	$U_{dc}/3$

2　SC-HL-MMC 直流故障穿越与子模块配置

柔性直流输电网存在发生直流短路故障的概率，当发生直流双极短路故障时，图 1(a)所示 SC-HL-MMC 的等效电路如图 3 所示。图中：v_{ra}、v_{rb}、v_{rc} 为三相交流输出电压整流后的电压；v_{la}、v_{lb}、v_{lc} 为三相单元中子模块电容提供的阻断电压。

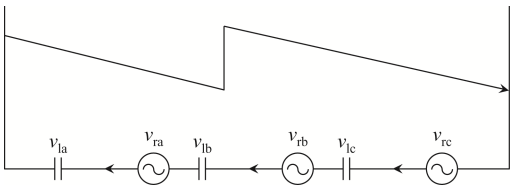


图 3　SC-HL-MMC 直流短路故障后等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of SC-HL-MMC under DC short-circuit fault

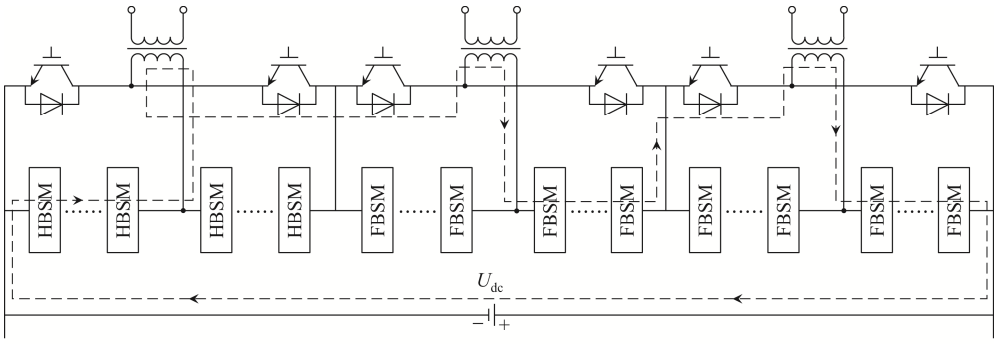
由图 3 可见，发生直流双极短路故障时，等效于三相交流电压通过整流后经过直流侧闭合。为了顺利阻断短路电流，子模块需提供的电压幅值为

$$v_{la}+v_{lb}+v_{lc}\geqslant 2V_m \tag{9}$$

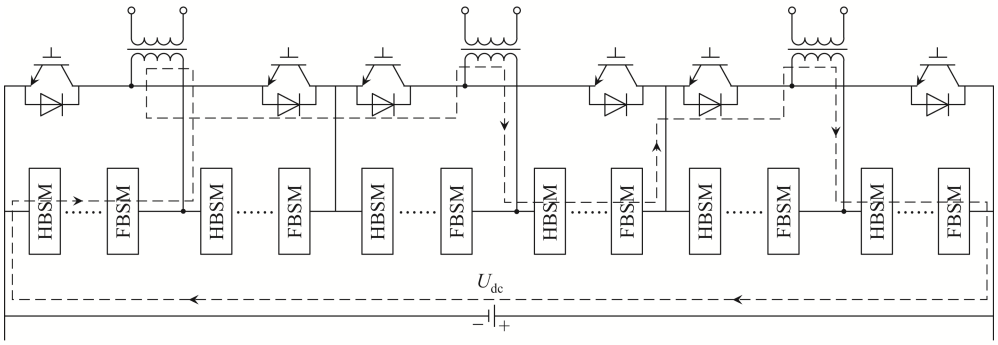
HBSM 有 2 种工作模式，分别为输出电压 0、V_C；FBSM 有 3 种工作模式，分别为输出电压 0、V_C、$-V_C$。HBSM 不提供负电压，因此 HBSM 不能有效阻断直流短路故障。在 HBSM 与 FBSM 构成的混合型 SC-HL-MMC 中，FBSM 的数量用 N_s 表示，则

$$N_sV_C\geqslant 2V_m=2\frac{U_{dc}}{3}=2NV_C \tag{10}$$

SC-HL-MMC 中，仅 2/3 的 HBSM 替换为 FBSM，即可阻断直流短路电流。图 4 所示为 HBSM 与 FBSM 构成的 2 种混合型 SC-HL-MMC 拓扑结构，图中虚线为当输出电压 v_a 和 v_b 为正、v_c 为负时，发生直流短路故障时的电流路径。图 4(a)中 a、b 两相桥臂的 HBSM 替换为 FBSM，a、b 相桥臂与 c 相桥臂为不对称结构；图 4(b)中 a、b、c 三相桥臂 HBSM 与 FBSM 混合分布，FBSM 数量为 HBSM 数量的 2 倍，三相桥臂为对称结构。



(a)不对称型



(b)对称型

图 4 具有直流短路故障容错能力的 SC-HL-MMC 拓扑

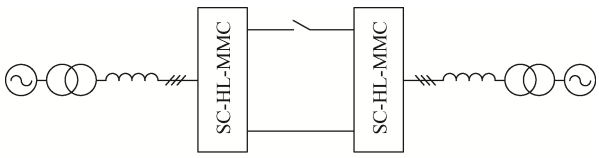
Fig. 4 Topology of SC-HL-MMC with DC short-circuit fault-tolerant capability

3 仿真分析

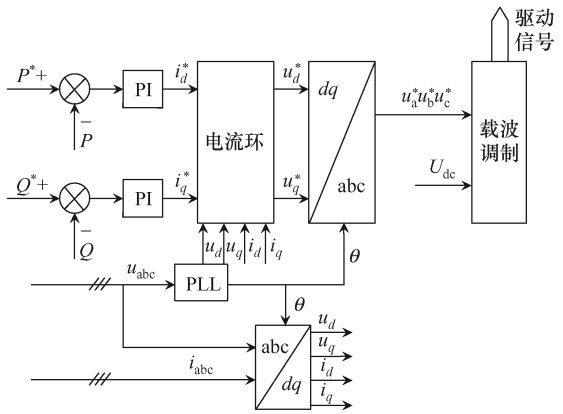
为验证 SC-HL-MMC 的工作性能，本文搭建如图 5(a)所示仿真模型，其控制策略如图 5(b)所示[7]。图中，SC-HL-MMC 采用对称性混合结构，每相桥臂包含 2 个 HBSM 与 4 个 FBSM。直流母线电压为 300 kV，子模块的耐压值为 16.67 kV，子模块电容为 2 160 μF。

图 6 所示为输出有功功率为 300 MW、无功功率为 100 Mvar 时，SC-HL-MMC 输出的三相电压与三相电流波形。

由图 6(a)可见，每相电压共包含 13 个电平，与前文描述的电平数为 $2N+1$ 相符，即 SC-HL-MMC 的输出电平数为传统 MMC 的 2 倍，输出电压正弦度高，谐波含量小。输出电压幅值为 100 kV，为传统 MMC 的 2 倍，直流母线电压利用率高。由于 SC-HL-MMC 采用串联结构，子模块耐压值一定的情况下，所需的子模块数量较少，制造成本较低。



(a)SC-HL-MMC接线示意

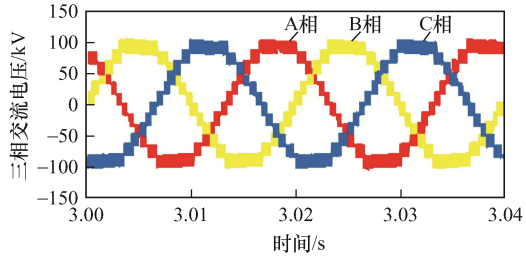


(b)SC-HL-MMC控制策略框图

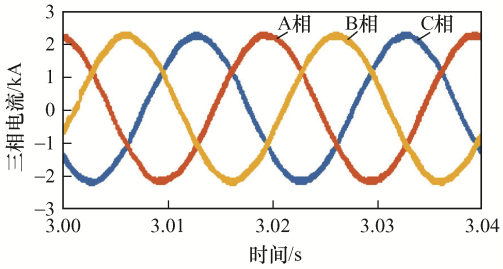
图 5 仿真系统示意

Fig. 5 Schematic of simulation system

因此，SC-HL-MMC 适用于高压直流输电系统或超高压直流输电系统。



(a)SC-HL-MMC输出电压



(b)SC-HL-MMC输出电流

图 6　SC-HL-MMC 输出电压、电流波形

Fig. 6 Waveforms of output voltage and output current of SC-HL-MMC

图 7 所示为 A 相单元 IGBT 桥上、下桥臂的电流波形。由图 7 可见，IGBT 桥上、下桥臂的开关器件的开关频率为三相输出电流的频率，开关频率低，开关损耗低。

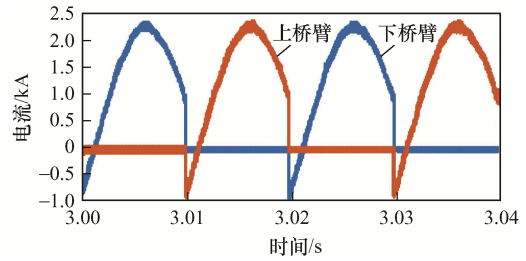


图 7　IGBT 桥上、下桥臂电流

Fig. 7 Current across IGBT upper and lower bridge arms

图 8 所示为 SC-HL-MMC 中某相单元中子模块的电容电压波形。由图 8 可见，各子模块的电容电压在 15.0~17.5 kV 之间，波动在 10%以内。

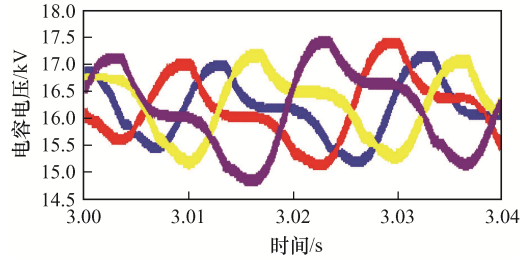
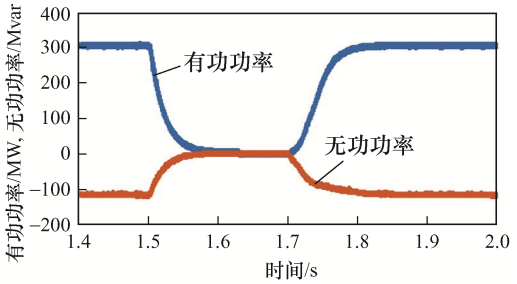


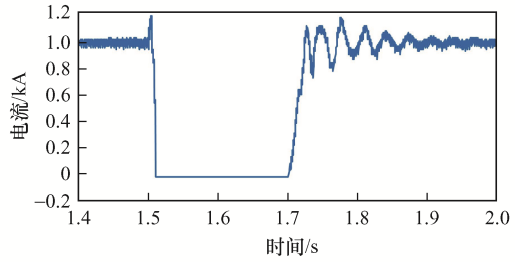
图 8　子模块电容电压波形

Fig. 8 Waveforms of capacitive voltage of submodule

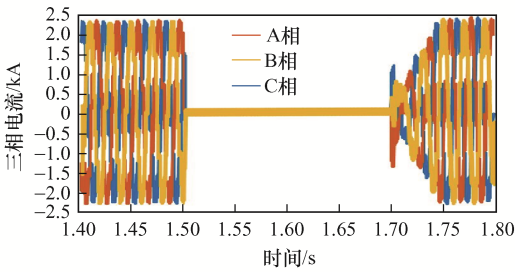
图 9 所示为输出有功功率为 300 MW、无功功率为 100 Mvar 时的功率、电流、电压波形，1.5 s 时发生直流极间短路故障，1.7 s 时直流极间短路故障被清除，系统恢复正常工作。由图 9 可见，当检测到故障发生后，IGBT 桥的上、下桥臂迅速关断，直流母线电流在 FBSM 提供的负压作用下，迅速阻断为 0，SC-HL-MMC 输出三相电流迅速降为 0。



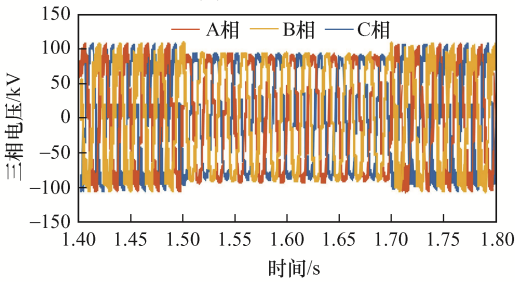
(a)有功功率与无功功率



(b)直流母线电流



(c)三相电流



(d)三相电压

图 9　故障穿越下 SC-HL-MMC 的输出波形

Fig. 9 Output waveforms of SC-HL-MMC under fault ride-through

4 结语

本文介绍了 1 种混合桥臂 MMC 拓扑结构，该拓扑的直流母线电压利用率高，在相同直流母线电压和子模块数量下，子模块压降仅为传统 MMC 的 1/2，输出电压电平数为传统 MMC 的 2 倍，输出电压谐波含量低。串联型混合桥臂 MMC(即 SC-HL-MMC)中，单相单元的上、下桥臂总压降为母线电压的 1/3，所需子模块数量较少，制造成本低，适用于高压输电网。为了使 SC-HL-MMC 具有直流短路故障穿越能力，本文介绍了 HBSM 与 FBSM 组成的混合型 SC-HL-MMC，当 FBSM 的数量为 HBSM 的 2 倍时，SC-HL-MMC 可有效阻断直流短路故障电流。

参考文献：

[1] 雷顺广, 束洪春, 李志民. 基于桥臂功率特征的全−半混合型柔性直流输电线路保护[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3563-3575.
Lei Shunguang, Shu Hongchun, Li Zhimin. Full-half bridge hybrid VSC-HVDC transmission line protection method based on power characteristics of bridge arms [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3563-3575. (in Chinese)

[2] Xiang Wang, Yang Ruizhang, Lin Chang, et al. A cascaded converter interfacing long-distance HVDC and back-to-back HVDC systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 4109- 4121.

[3] 薛国清, 贵献国, 李雄. 适用于 HVDC 和 HVAC 高效稳定互联的 MMC 双端口电网形成控制[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 287-297.
Xue Guoqing, Gui Xianguo, Li Xiong. MMC dual-port grid-forming control for efficient and stable interconnection of HVDC and HVAC [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 287-297. (in Chinese)

[4] 胡宏, 陈浩, 丁浩寅, 等. 特高压混合级联多端直流输电系统的协调控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 42-51.
Hu Hong, Chen Hao, Ding Haoyin, et al. Coordinated control strategy for hybrid cascaded UHVDC system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 42-51. (in Chinese)

[5] 夏长江, 韩民晓, 耿治, 等. MMC子模块故障后线电压恢复容错控制策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 2-9.
Xia Changjiang, Han Minxiao, Geng Zhi, et al. Fault-tolerant control strategy of line voltage recovery after MMC sub-modules fault [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 2-9. (in Chinese)

[6] 苏见燊, 郭敬东, 金涛. 柔性直流电网中直流故障特性分析及线路故障重启策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 352-359.
Su Jianshen, Guo Jingdong, Jin Tao. DC fault characteristics and line fault recovery strategy in flexible DC power network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 352-359. (in Chinese)

[7] 张建忠, 陈桂, 张雅倩, 等. 混合型 MMC 非闭锁型直流短路故障穿越策略分析和比较[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 41-47, 63.
Zhang Jianzhong, Chen Gui, Zhang Yaqian, et al. Analysis and comparison of non-blocking DC short circuit fault ride-through strategies for hybrid MMC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 41-47, 63. (in Chinese)

[8] Gomis-Bellmunt O, Sau-Bassols J, Prieto-Araujo E, et al. Flexible converters for meshed HVDC grids: From flexible AC transmission systems (FACTS) to flexible DC grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 2-15.

[9] Ghat M B, Patro S K, Shukla A. The hybrid-legs bridge converter: A flexible and compact VSC-HVDC topology [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2808-2822.

[10] 杨光源, 周诗嘉, 彭光强, 等. 一种增加辅助子模块的 MMC 改进混合调制控制策略[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 74-82.
Yang Guangyuan, Zhou Shijia, Peng Guangqiang, et al. Improved hybrid modulation strategy for MMC with auxiliary sub-modules [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 74-82. (in Chinese)

[11] 石绍磊, 李彬彬, 张毅, 等. 模块化多电平型高压 DC/DC 变换器的研究[J]. 电源学报, 2015, 13(6): 110-116, 123.
Shi Shaolei, Li Binbin, Zhang Yi, et al. Research on modular multilevel high voltage DC/DC converter [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(6): 110-116, 123. (in Chinese)

[12] 陈阳, 王晗, 朱淼, 等. 基于混合子模块与全桥臂电感的三端口模块化多电平变流器: 简化建模与电网互联控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1641-1657.
Chen Yang, Wang Han, Zhu Miao, et al. Three-port MMC with hybrid submodules and full arm inductor scheme: Simplified modeling and grid interconnection control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1641-1657. (in Chinese)

[13] Qanbari T, Tousi B. Single-source three-phase multilevel inverter assembled by three-phase two-level inverter and two single-phase cascaded H-bridge inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 5204-5212.

[14] Li Gen, An Ting, Liang Jun, et al. Studies of commutation failures in hybrid LCC/MMC HVDC systems [J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 193-204.

[15] 王春义, 郝全睿, 高峰, 等. 三相串联 MMC 直流换流站在交流故障下的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 16-25.
Wang Chunyi, Hao Quanrui, Gao Feng, et al. Control of three-phase series-connected MMC based HVDC station under unbalanced grid conditions [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 16-25. (in Chinese)

[16] Farr E M, Trainer D R, Idehen O E, et al. The series bridge converter (SBC): AC faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 4467-4471.

[17] 武鸿, 王跃, 薛英林, 等. 适用多功率的最近电平调制下 MMC 子模块开路故障诊断策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 233-245.
Wu Hong, Wang Yue, Xue Yinglin, et al. A diagnosis strategy for open-circuit submodule faults in MMCs under nearst level modulation suitable for different powers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39 (1): 233-245. (in Chinese)

[18] 徐雨哲. 面向直流输电的 MMC 性能提升与轻型化技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
Xu Yuzhe. Performance improvement and weight reduction technology of MMC for HVDC transmission [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)



张熙

作者简介：

张熙(1990—)，男，本科，工程师。研究方向：基建工程建设。E-mail：190600558@qq.com。

姚江(1981—)，男，通信作者，本科，工程师。研究方向：基建工程建设。E-mail：3469134513@qq.com。

钟启濠(1993—)，男，硕士，工程师。研究方向：电力电子与控制，变电继保。E-mail：835063137@qq.com。

刘国兵(1992—)，男，本科，助理工程师。研究方向：基建工程管理。E-mail：764800288@qq.com。

(责任编辑：耿越)