DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.93 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

桥臂复用 MMC 三相短路故障特性及穿越策略

张后谊[1]，李继凯[2]，徐玉韬[1]，闫 鑫[2]，冯起辉[1]
(1.贵州电网有限责任公司电力科学研究院，贵阳 550002；2.许继电气股份有限公司，许昌 461000)

摘要：随着模块化多电平换流器 MMC(modular multilevel converter)在工程实际中设备体积大、运行成本高等问题日益凸显,新型电力系统产生了 MMC 轻型化需求。桥臂复用型模块化多电平换流器 AM-MMC(arm multiplexing MMC)能提高子模块利用率，有效实现 MMC 轻型化，但因其拓扑复杂，且内部能量易受运行工况变化影响而波动，尤其在交流系统故障的情况下，能量波动更为剧烈甚至易复用出错，所以对 AM-MMC 的交流故障穿越能力的要求更高。针对故障情况最为严重的交流系统三相短路故障，分析了故障后换流器的故障特性，提出 1 种基于快速闭锁机制的故障电容优化配置策略，在故障期间复用模式调整与快速闭锁同步进行，实现 AM-MMC 在交流系统三相短路后的故障穿越。最后，为了验证所提策略，使用 MATLAB/Simulink 构建了单端仿真模型，仿真结果表明切换复用方式后闭锁能有效解决 AM-MMC 的三相短路故障穿越问题。

关键词：桥臂复用型模块化多电平换流器；轻型化；三相短路；故障穿越

Characteristics of Arm Multiplexing MMC under Three-phase Short-circuit Faults and Corresponding Fault Ride-through Strategy

ZHANG Houyi[1], LI Jikai[2], XU Yutao[1], YAN Xin[2], FENG Qihui[1]
(1. Electric Power Research Institute, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. Xuji Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: In practical engineering, the issues of large equipment volume and high operating costs increasingly highlight the demand for lightweight modular multilevel converters (MMCs) in new power systems. The arm multiplexing MMC (AM-MMC) can improve the utilization of submodules and effectively achieve lightweight MMC. However, due to its complex topology and susceptibility to fluctuations in internal energy caused by the changes in operating conditions, the energy fluctuations are more severe and even prone to reuse errors, especially in the event of AC system failures, increasing the requirements for the AC fault ride-through capability of AM-MMC. For the three-phase short-circuit fault of the AC system under the most serious fault condition, the fault characteristics of the converter after the fault are analyzed, and an optimal configuration strategy for the fault capacitor based on a fast blocking mechanism is proposed. During the fault period, the multiplexing mode adjustment and the fast blocking are carried out simultaneously to realize the fault ride-through of the AM-MMC after the three-phase short-circuit of the fault ride-through AC system. Finally, to validate the proposed strategy, a singleended simulation model was constructed using MATLAB/ Simulink. Simulation results demonstrate that re-locking the converter after switching the multiplexing mode can effectively resolve the three-phase short-circuit fault ride-through issue in the AM-MMC.

Keywords: Arm multiplexing modular multilevel converter (AM-MMC); lightweight; three-phase short-circuit; fault ride through

收稿日期：2024-04-03；**修回日期**：2024-09-12；**录用日期**：2024-11-23；**网络首发日期**：2024-12-23
基金项目：中国南方电网公司重点科技项目(GZKJXM20220041)；国家重点研发计划资助项目(2022YFE0205300)
This work is supported by Key Technology Projects of China Southern Power Grid Corporation under the grant GZKJXM 20220041; National Key R&D Program under the grant 2022 YFE0205300

近年来，基于电压源换流器的柔性直流输电技术快速发展，为全球智能联网和清洁能源并网提供了技术支撑，在与传统高压直流输电技术的角逐中逐渐体现出其独特的优势[1-2]。目前的换流器类型主要包括两电平换流器、三电平换流器和模块化多电平换流器 MMC(modular multilevel converter)。其中，模块化多电平换流器因其输出电压质量高、开关损耗小、输出电压等级和传输功率容量灵活可控，近年来在柔性直流输电系统中得到了广泛的应用[3-5]。

对比两电平和三电平换流器，MMC 在运行特性上具有明显的优势[6]，但是需要运用更多的电力电子开关和电容器等器件，使换流器设备体积、运行成本大幅增加[7-8]，因此对 MMC 进行轻型化研究需求迫切。文献[9]提出了 1 种子模块利用率更高的桥臂复用型模块化多电平换流器 AM-MMC(arm multiplexing MMC)，相比常规 MMC，AM-MMC 能大幅减少所需子模块数量并提高其利用率，使得 MMC 实现轻型化。文献[10]针对桥臂复用型 MMC 提出了 2 种混合型 AM-MMC HAM-MMC(hybrid AM-MMC)，研究表明 2 种 HAM-MMC 在减少了所需全桥子模块数量及成本的基础上，均具有直流故障电流清除和交流侧馈流阻断的能力。文献[11]对于 AM-MMC 单极接地故障穿越过程中能量不均衡的问题，提出了交替复用无闭锁故障穿越及直接环流控制策略，所提控制策略能增强均衡能量效果且能实现 HAM-MMC 无闭锁穿越单极接地故障。现有研究结果表明，AM-MMC 在进行交直电压变换与能量传输过程中效果良好，桥臂能量分布也能够平衡，在推进换流站轻型化的同时可有效降低附加投资。此外，针对 MMC 拓扑结构的多样化与运行性能优化，已有研究提出九边形 MMC 以及高低频混合型 MMC 等新型拓扑，为 MMC 轻型化与输出性能提升提供了新的实现途径[12-13]。

目前针对 AM-MMC 故障穿越能力的研究多集中于直流故障，通过全桥子模块的配置，AM-MMC 可具备直流故障限流能力，但鉴于 AM-MMC 相较于传统 MMC 具有更为复杂的结构和控制，在交流短路故障后若不进行正确有效的控制，则会产生复用出错、故障恶化等更为严重的后果，因此需对其交流故障穿越能力进行进一步研究。实际中，MMC-HVDC 交流系统故障时会出现故障点电流激增、桥臂电流过流等情况[14-15]。针对交流侧故障时严重过流的短路电流，文献[16]研究了 MMC 在不同运行工况下贡献的三序短路电流的计算方法，并提出了 1 种电流限幅与无功支撑结合的策略抑制 MMC 贡献的短路电流。文献[17]从原理上研究了 MMC-HVDC 三相短路故障后 MMC 提供的短路电流特性，以及影响该短路电流大小的因素。文献[18]分析了交流系统发生三相短路接地故障时 MMC 电容的放电过程，并提出了 1 种自适应控制策略以调节交流系统故障电流。目前，对柔性直流输电系统交流侧对称短路故障的研究多集中于对三相短路电流的计算，或者从改进控制方法的角度抑制换流器提供的短路电流。与此同时，针对电网电压不平衡工况下 MMC 运行与控制问题，文献[19-20]对相关控制策略进行了系统综述，为分析交流故障条件下 MMC 的控制方法提供了有益参考。与传统 MMC 不同，由于引入了桥臂选择开关，AM-MMC 各臂中投入的等效电容在不同复用模式下存在差异，因此 AM-MMC 的短路电流也与复用模式联系紧密。在三相短路故障极端工况下，若不对桥臂切换开关进行控制、不对故障后桥臂电容进行重分配，则会引入新的状态变化、加剧现有的故障状况，可能出现换臂出错、延长短路电流流通时间等更为严重的后果。因此，AM-MMC 实现交流对称故障穿越的关键在于锁定复用模式、防止故障恶化、优化电容配置，并为后续保护措施的实施创造稳定条件。

考虑到 AM-MMC 的复用结构使得其在交流故障下的等效电容与故障回路更为复杂，因此针对工程实际中对电网造成影响最大的三相短路故障，AM-MMC 系统的三相短路故障穿越问题亟待解决。快速闭锁机制可以最大程度地限制故障电流，防止损坏扩散，本文基于快速闭锁机制提出 1 种针对 AM-MMC 发生交流三相短路后的故障电容优化

配置策略。首先阐述了 AM-MMC 的基本拓扑结构、工作原理及其在轻型化方面的优点，针对 AM-MMC 三相短路故障特性展开进一步分析；然后在故障期间同步进行复用模式调整与快速闭锁，将 AM-MMC 桥臂开关状态切换为“上上上”复用，实现 AM-MMC 在交流系统三相短路后的故障穿越；最后利用仿真平台搭建模型，验证所提故障穿越策略的有效性。

1　桥臂复用型 MMC 的拓扑结构及工作原理

1.1　AM-MMC 的拓扑结构

常规MMC三相单元结构相同,均由同相的上、下两桥臂构成，6 个桥臂中每个桥臂都有 N 个子模块。运行过程中，为保证直流侧电压恒定，每相单元恒有 N 个子模块处于投入状态，即

$$N_{\mathrm{p}j(j=\mathrm{a,b,c})}+N_{\mathrm{n}j(j=\mathrm{a,b,c})}=N \tag{1}$$

式中：$N_{\mathrm{p}j}$ 为上桥臂投入子模块数；$N_{\mathrm{n}j}$ 为下桥臂投入子模块数。

当 $N_{\mathrm{p}j}<N_{\mathrm{n}j}$ 时，上桥臂的空闲子模块数($N-N_{\mathrm{p}j}$)较多，则将上桥臂部分空闲子模块重新分配给下桥臂一同参与调制，从而减少下桥臂所需子模块数量。同理，当 $N_{\mathrm{p}j}>N_{\mathrm{n}j}$ 时，下桥臂的空闲子模块数($N-N_{\mathrm{n}j}$)较多,则将下桥臂部分空闲子模块重新分配给上桥臂一同参与调制,从而减少上桥臂所需子模块数量。将参与重新划分的部分空闲子模块单独组成 1 个桥臂，称为“复用桥臂”，各时刻的 $N_{\mathrm{p}j}$、$N_{\mathrm{n}j}$ 需求不同，可分时段对复用桥臂进行复用，图 1 所示为桥臂复用型模块化多电平换流器拓扑。

AM-MMC 的三相单元结构相同，都包含上桥臂、复用桥臂、下桥臂、桥臂电感和 2 个交流侧桥臂切换开关。上、下桥臂与复用桥臂经各相交流连接端口 j_1、j_2(j_1、j_2=a, b, c)连接，通过控制桥臂切换开关 K_{j1}、K_{j2} 连接至交流电网。3 个桥臂分别包含 u、m、l 个串联子模块，则每相单元所需子模块数为 $u+m+l$ 个。当 $u=m=l=N/2$ 时，每相所需子模块总数最少，仅需 $3N/2$ 个子模块，子模块利用率提升至 66.7%。而常规 MMC 每相单元包含 $2N$ 个子模块，子模块利用率仅为 50%。相比而言，桥臂复用型 MMC 可以减少子模块投入数，提高子模块利用率，有效实现 MMC 轻型化。

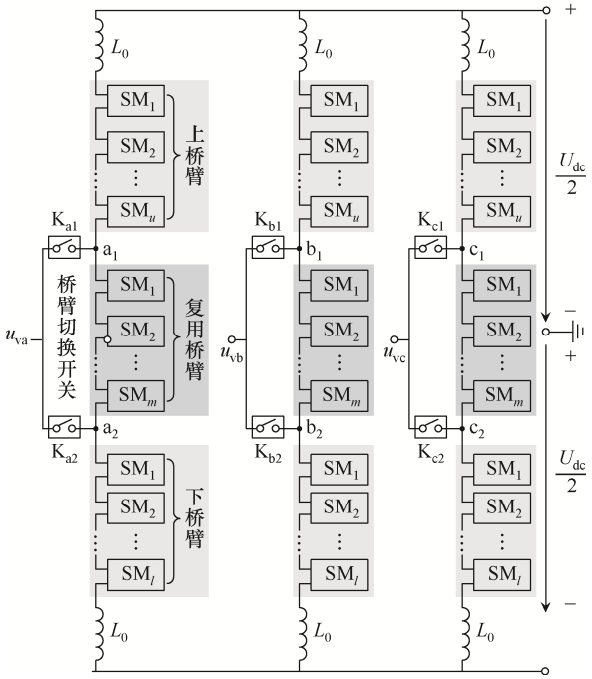


图 1　AM-MMC 拓扑结构

Fig. 1 AM-MMC topology

1.2　AM-MMC 的工作原理

通过控制各相 2 个桥臂切换开关的通断，AM-MMC 相单元的运行方式在上桥臂复用和下桥臂复用模式中来回切换。图 2 给出了 a 相单元运行时对应的 2 种复用方式。当交流相电压 $u_{\mathrm{va}}>0$ 时，处于下桥臂复用模式，K_{a1} 导通、K_{a2} 关断，此时上桥臂输出[0, u]电平电压，复用桥臂和下桥臂组成等效下桥臂提供输出所需电平[l, $l+m$]；当交流相电压 $u_{\mathrm{va}}<0$ 时，处于上桥臂复用方式，K_{a1} 关断、K_{a2} 导通，此时复用桥臂和上桥臂组成等效上桥臂提供输出所需电平[u, $u+m$]，下桥臂输出[0, l]电平电压。a 相等效上桥臂输出电压 u_{pa} 和等效下桥臂输出电压 u_{na} 分别为

$$\begin{cases} u_{\mathrm{pa}}=\begin{cases} u_{ua}+u_{ma} & \text{上桥臂复用模式} \\ u_{ua} & \text{下桥臂复用模式} \end{cases} \\ u_{\mathrm{na}}=\begin{cases} u_{la} & \text{上桥臂复用模式} \\ u_{ma}+u_{la} & \text{下桥臂复用模式} \end{cases} \end{cases} \tag{2}$$

式中，u_{ua}、u_{ma}、u_{la} 分别为 a 相上桥臂、复用桥臂、

下桥臂电压。此时，a 相等效上桥臂处于投入状态的子模块数 N_{pa} 和等效下桥臂处于投入状态的子模块数 N_{na} 分别为

$$\begin{cases} N_{\mathrm{pa}}=\begin{cases} N_{ua}+N_{ma} & \text{上桥臂复用模式} \\ N_{ua} & \text{下桥臂复用模式} \end{cases} \\ N_{\mathrm{na}}=\begin{cases} N_{la} & \text{上桥臂复用模式} \\ N_{ma}+N_{la} & \text{下桥臂复用模式} \end{cases} \end{cases} \tag{3}$$

式中，N_{ua}、N_{ma}、N_{la} 分别为 a 相上桥臂、复用桥臂、下桥臂所需投入子模块数。将各桥臂等效为电压源，不同运行模式下 AM-MMC 相单元等效电路见图 3。假设交流输出电压和电流不含任何谐波[21]，则可定义 a 相电压和电流分别为

$$\begin{cases} u_{\mathrm{va}}(t)=U_{\mathrm{vm}}\sin(\omega t) \\ i_{\mathrm{va}}(t)=I_{\mathrm{vm}}\sin(\omega t-\phi) \end{cases} \tag{4}$$

式中：U_{vm} 为 AM-MMC 交流输出相电压幅值；ω 为角频率，工频 50 Hz 下其值为 100π rad/s；φ 为功率因数角。忽略桥臂电感压降，由图 3 中的 KVL 方程可得 a 相等效上桥臂和等效下桥臂电压表达式分别为

$$\begin{cases} u_{\mathrm{pa}}(t)=\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{2}-u_{\mathrm{va}}(t)=\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{2}[1-m_{\mathrm{a}}\sin(\omega t)] \\ u_{\mathrm{na}}(t)=\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{2}+u_{\mathrm{va}}(t)=\dfrac{U_{\mathrm{dc}}}{2}[1+m_{\mathrm{a}}\sin(\omega t)] \end{cases} \tag{5}$$

式中：U_{dc} 为 AM-MMC 直流输出电压；m_{a} 为电压调制比，定义 $m_{\mathrm{a}}=\dfrac{2U_{\mathrm{vm}}}{U_{\mathrm{dc}}}$。a 相等效桥臂投入子模块数为

$$\begin{cases} N_{\mathrm{pa}}=\mathrm{round}\left(\dfrac{u_{\mathrm{pa}}^{*}}{U_{\mathrm{cn}}}\right)=\dfrac{N}{2}-\mathrm{round}\left(\dfrac{u_{\mathrm{va}}^{*}}{U_{\mathrm{cn}}}\right)= \\ \quad \mathrm{round}\left[\dfrac{1-m_{\mathrm{a}}\sin(\omega t)}{2}N\right] \\ N_{\mathrm{na}}=\mathrm{round}\left(\dfrac{u_{\mathrm{na}}^{*}}{U_{\mathrm{cn}}}\right)=\dfrac{N}{2}+\mathrm{round}\left(\dfrac{u_{\mathrm{va}}^{*}}{U_{\mathrm{cn}}}\right)= \\ \quad \mathrm{round}\left[\dfrac{1+m_{\mathrm{a}}\sin(\omega t)}{2}N\right] \end{cases} \tag{6}$$

式中：round 为取整函数；U_{cn} 为子模块电容电压额定值；u_{pa}^{*}、u_{na}^{*} 分别为等效上、下桥臂参考电压。由式(5)和式(6)可知，对 AM-MMC 交流侧输出电压 $u_{\mathrm{v}j}$(j=a, b, c)进行控制可以转化为对各相等效上、下桥臂电压的控制 $u_{\mathrm{p}j}$、$u_{\mathrm{n}j}$，进而转化为对等效上、下桥臂子模块投入个数的控制。

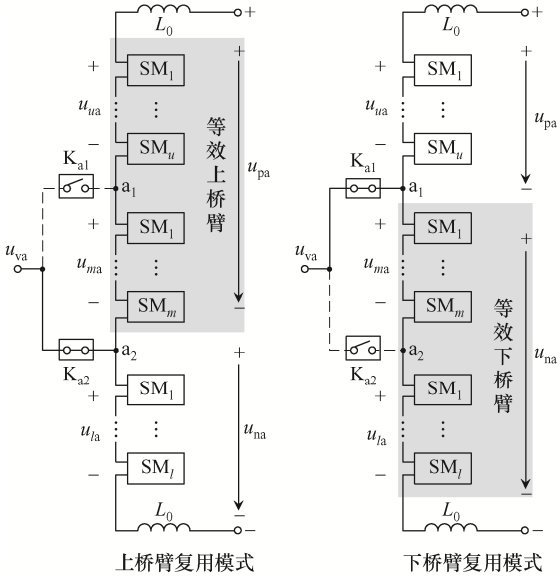


图 2 AM-MMC 相单元运行模式

Fig. 2 Operation mode of AM-MMC phase unit

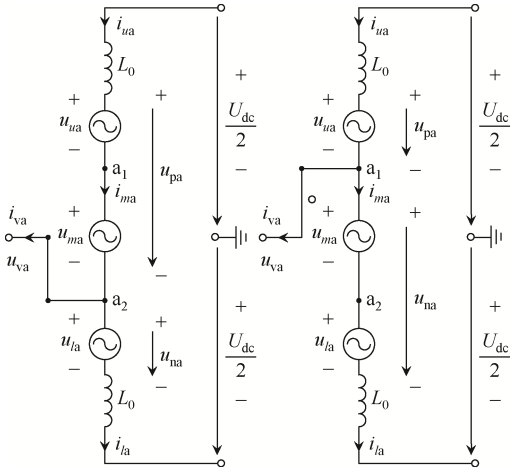


图 3 AM-MMC 相单元等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of AM-MMC phase unit

2 公共连接点处三相短路故障特性分析

2.1 换流器提供的短路电流

当柔直系统交流电网短路故障时，交流系统和换流器均向短路故障点处提供短路电流，如图 4 所示，此时故障点处总的短路电流 i_{k} 为换流器提供的短路电流 i_{k}' 与交流系统提供的短路电流 i_{k}'' 的叠加，

即 $i_k = i'_k + i''_k$。

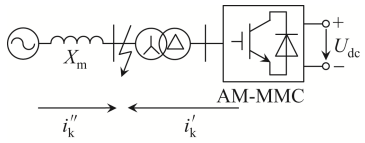


图 4　PCC 处短路后故障点电流

Fig. 4 Current at fault point after short-circuit at PCC

当换流器出口处即柔直系统公共连接点 PCC (point of common coupling)处发生三相短路故障时，故障后换流器暂态过程时间很短，可忽略不计，其输出短路电流仍可视为正序稳态电流。且发生三相短路故障后，系统依然三相对称，各电气量只存在正序分量，因此可以 a 相等效正序基波短路电流为例分析换流器贡献的三相稳态短路电流，具体为

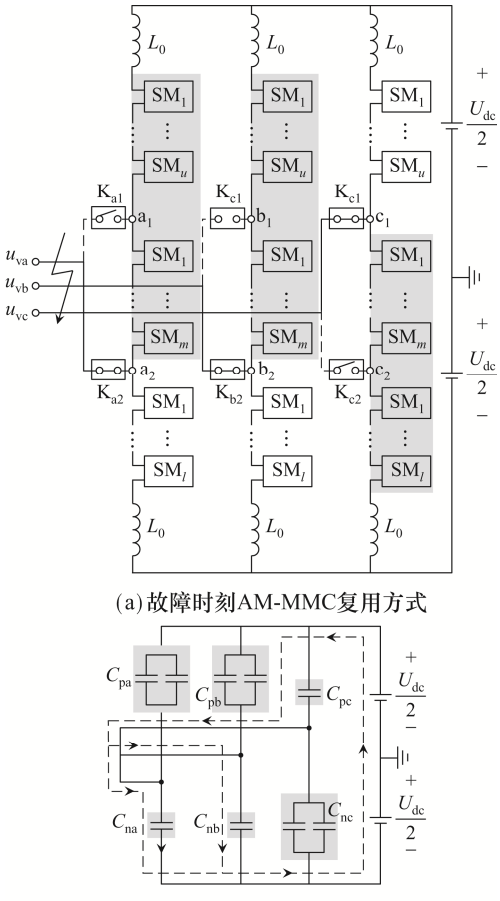
$$i'_k(t) = I'_k \cos(\omega t + \phi'_k) \tag{7}$$

式中：I'_k 为换流器输出短路电流幅值，以 PCC 处电压相位为参考相位；φ'_k 为换流器输出短路电流相对于换流器出口 PCC 处母线电压的相位。换流器贡献的短路电流幅值和相位与故障类型、故障发生距离、系统控制方式、换流器运行工况等多方因素紧密相关，因此需对其幅值与相位分别进行分析。后文所提短路电流特指换流器提供的短路电流，而非短路点处的总短路电流。

2.2 故障电流回路

与常规 MMC 发生三相短路故障时类似，当 AM-MMC 出口处即柔直系统公共连接点处三相短路发生后，故障相桥臂中处于投入状态的子模块电容向短路点放电，等效桥臂以及交流故障点构成 i'_k 通路。若不闭锁换流器，则等效桥臂处于投入状态的子模块电容向短路点放电，处于切除状态的子模块经二极管流通短路电流，严重的桥臂过电流情况难以控制；若直接闭锁换流器，则各桥臂电压间存在的压差会对子模块电容充电，直至桥臂子模块电容电压被充至最大时桥臂电流才能减为 0，加之 AM-MMC 的桥臂开关在故障期间仍会自动保持切换，会给闭锁过程造成更大阻碍。

假设故障发生时刻桥臂开关状态如图 5(a)所示，则理想状态下立即闭锁后电容充电回路如图 5(b)所示。上复用模式时 C_p 较大而 C_n 较小，下复用模式时 C_p 较小而 C_n 较大，图 5(b)中以多个电容并联来代表该复用下较大的桥臂等效电容，以单个电容代表此时较小的桥臂等效电容。当故障时刻复用方式为“上上下”时，理想状态下立即闭锁 AM-MMC，各桥臂电容值小的电容其电压也小，直流侧等效电源会对每相较小的等效桥臂电容进行充电直至最大电压，即短路电流分别经过各相“下下上”等效桥臂形成充电回路，此时桥臂电容电压最小回路决定最终闭锁成功的时间。



(a) 故障时刻AM-MMC复用方式

(b) 闭锁后电容充电回路

图 5　“上上下”复用方式下理想闭锁后充电回路

Fig. 5 Ideal blocking charging circuit in “upper-upper-lower” multiplexing mode

2.3 故障后的等效电容

与传统 MMC 不同的是，由于引入了桥臂选择开关，AM-MMC 各臂中投入的电容数量有差异，无论是闭锁前向短路点放电的放电电流，还是闭锁后直流侧充电续流的充电电流，均与各相等效桥臂

对应的等效电容有关。PCC 处发生三相短路后，以 a 相为例分析故障时不同复用方式下的故障等效电容。运行于上桥臂复用模式时，等效上桥臂共有 N 个子模块，其中 N_{pa} 个子模块处于投入状态，则故障时刻投入的 N_{pa} 个子模块电容参与故障回路电流的产生。此时等效下桥臂共有 $N/2$ 个子模块，故障时刻处于投入状态的 N_{na} 个子模块电容参与生成故障回路电流。

故障后至 AM-MMC 闭锁前的调制策略相比故障前无明显畸变[22]，根据电容均压控制，可将等效上桥臂子模块分成 N/N_{pa} 个组，每组恒有 N_{pa} 个排序算法对各组子模块电容电压大小进行排序并按需投入。则可将等效上桥臂看作由 N/N_{pa} 组电容并联构成，每组包含 N_{pa} 个串联电容，同理可将等效下桥臂看作由 $N/(2N_{na})$组电容并联组成，每组包含 N_{na} 个串联电容。a 相单元运行于下桥臂复用模式时的故障等效电容同理可得，此处不再赘述。不同复用模式下的故障等效电容结构如图 6 所示，假设每个子模块电容均为 C，则等效上桥臂电容 C_{pa} 和等效下桥臂电容 C_{na} 可分别表示为

$$\begin{cases} C_{pa}=\begin{cases}\dfrac{NC}{N_{pa}N_{pa}} & \text{上桥臂复用}\\ \dfrac{N/2C}{N_{pa}N_{pa}} & \text{下桥臂复用}\end{cases}\\ C_{na}=\begin{cases}\dfrac{N/2C}{N_{na}N_{na}} & \text{上桥臂复用}\\ \dfrac{NC}{N_{na}N_{na}} & \text{下桥臂复用}\end{cases}\end{cases} \tag{8}$$

为便于分析，等效上下桥臂投入的子模块数 N_{pa}、N_{na} 不必为整数，将式(3)和式(6)中取整函数省去并代入式(8)得

$$\begin{cases} C_{pa}=\begin{cases}\dfrac{4C}{[1-m_a\sin^2(\omega t)]N} & \text{上桥臂复用}\\ \dfrac{2C}{[1-m_a\sin^2(\omega t)]N} & \text{下桥臂复用}\end{cases}\\ C_{na}=\begin{cases}\dfrac{2C}{[1+m_a\sin^2(\omega t)]N} & \text{上桥臂复用}\\ \dfrac{4C}{[1+m_a\sin^2(\omega t)]N} & \text{下桥臂复用}\end{cases}\end{cases} \tag{9}$$

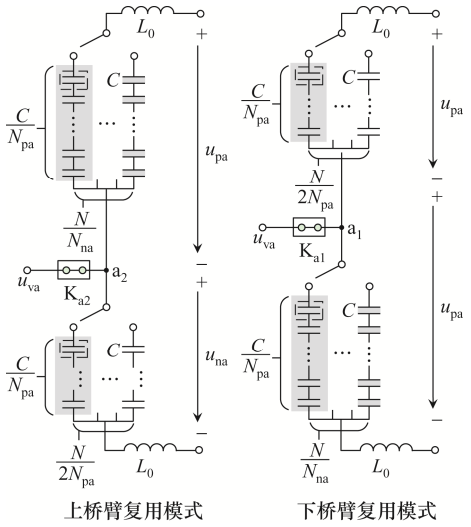


图 6 AM-MMC 故障后等效电容

Fig. 6 Equivalent capacitance of AM-MMC after fault

等效上桥臂电容 C_{pa} 和等效下桥臂电容 C_{na} 串联构成 a 相等效电容，即

$$C_a=\frac{C_{pa}C_{na}}{C_{pa}+C_{na}}=\begin{cases}\dfrac{4C}{N[3+2m_a\sin(\omega t)+3m_a^2\sin^2(\omega t)]} & \text{上桥臂复用}\\ \dfrac{4C}{N[3-2m_a\sin(\omega t)+3m_a^2\sin^2(\omega t)]} & \text{下桥臂复用}\end{cases} \tag{10}$$

b 相和 c 相的等效电容可同理推出，三相等效电容大小相同，仅相位不同，互差 π/3。

3 PCC 处三相短路故障穿越控制策略

为缩短 PCC 处发生三相短路期间 AM-MMC 的闭锁耗时并加速故障后的系统恢复，本文针对 AM-MMC 独有的桥臂开关选择结构，基于快速闭锁机制的故障电容优化配置策略，在故障期间调整桥臂复用模式与快速闭锁换流器同步进行，保证故障期间顺利闭锁。

3.1 故障快速闭锁

由 AM-MMC 三相短路故障特性可知，在故障后无闭锁的情况下，各桥臂电容会向故障点放电导致桥臂电流激增。且 PCC 处发生三相接地短路，因故障点距离换流器太近，无法装设断路器，只能通

过快速闭锁故障换流站限制换流器提供的短路电流 i'_k，闭锁后故障回路开路，不再存在 i'_k。

若直接在故障后闭锁换流器，不对桥臂开关进行控制，则频繁的切换会使各桥臂电压存在一定的波动，产生的压差会对桥臂电容进行短时、间歇地充电，导致闭锁过程中产生间断性的桥臂电流。为保证换流器顺利闭锁，需要在故障后将桥臂开关保持在某一状态直至故障清除。故障后至换流器闭锁前存在一段响应过程，该过程时间较短，通常只有几毫秒。由于实际中闭锁响应时间无法确定，因此故障后至闭锁前期间的放电回路难以得知。

3.2 等效电容配置优化

发生 AM-MMC 三相短路故障后，若要成功实现换流器快速闭锁，避免换流器闭锁后再次出现间断充电电流，则需锁定当前桥臂复用状态，在故障期间不再进行桥臂开关的切换操作，使其维持在同一种复用状态。为缩短换流器闭锁时间，需优化故障后的等效电容配置，通过复用方式的切换增大闭锁后充电回路中各相桥臂中较小的电容电压，使得复用桥臂与电容电压小的桥臂进行复用，以此提高最小容压，缩短闭锁耗时。

本文采用在故障期间切换换流器复用方式并保持的策略，将 AM-MMC 在故障期间切换为“上上上”模式，即同为上桥臂复用。以故障时刻的复用方式为“上上下”为例，假设故障后立即切换复用模式，将换流器切换为“上上上”复用方式如图 7 所示。

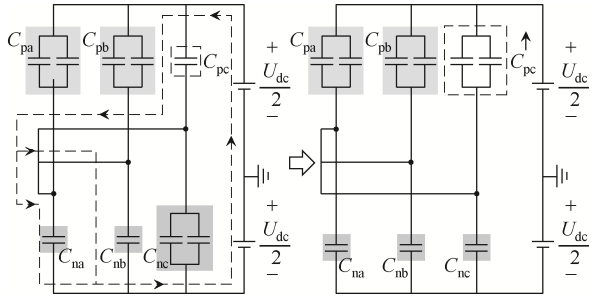


图 7　切换至“上上上”复用方式的等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit when switching to “upper-upper-upper” multiplexing mode

由三相短路后的故障特性可知，发生短路后的 AM-MMC 各桥臂电容会先向故障点放电，然后经过一段毫秒级闭锁响应时间对换流器实行闭锁，闭锁后会对各相电容电压较小的等效桥臂充电，直至桥臂子模块电容电压被充至最大时桥臂电流才能减为 0。以故障时刻复用方式为“上上下”为例，锁定此刻的复用模式，各相较小的等效桥臂电容为“下，下，上”，则闭锁后 a 相等效下桥臂电流 i_{na}、b 相等效下桥臂电流 i_{nb}、c 相等效上桥臂电流 i_{pc} 的充电续流时间最长、衰减至 0 最慢，三相较小的等效桥臂电容电压 u_{na}、u_{nb}、u_{pc} 闭锁后充电至最大值。由图 7 可知，若故障时刻立即切换为“上上上”复用方式，则 c 相最小电容 C_{pc} 将增大。此时无论具体闭锁后的充电回路如何，各相中电容电压较小的等效桥臂不会同为“上”，则切换为“上上上”模式后至少能增大其中一相的最小容压。切换为“上上上”复用方式能提高等效桥臂最小电容电压，图 8 所示为三相短路故障期间的穿越策略框图。

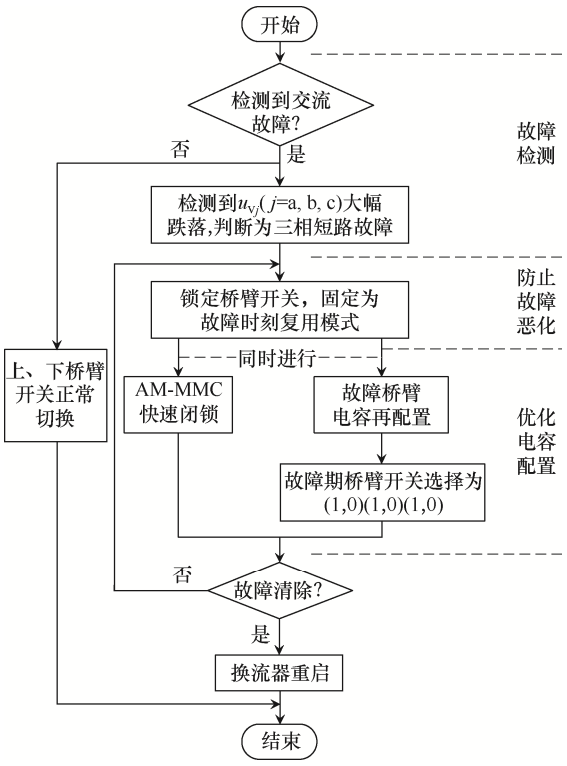


图 8　AM-MMC 三相短路故障穿越策略控制框图

Fig. 8 Control block diagram of AM-MMC three-phase short-circuit fault ride-through strategy

4 仿真分析

本文运用 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建了单端 AM-MMC 仿真模型，对交流侧发生的三相短路故障进行仿真分析，以验证所提故障穿越策略，模型参数见表 1，仿真模型如图 9 所示。

表 1 系统额定参数

Tab. 1 Rated parameters of system

参数	数值
额定容量 S_n/ MV·A	3.4
额定直流功率 P_{dc}/ MW	3
额定直流电压 U_{dc}/ kV	±10
额定交流电压 U_{sn} / kV	10
子模块额定电压 U_{cN}/ V	833
子模块电容 C/ mF	3
调制比 m_a	0.816 5
桥臂子模块数 N	12
桥臂电感 L/mH	4.6

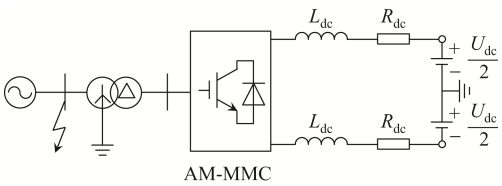


图 9 单端仿真模型

Fig. 9 Single-ended simulation model

设置在 t=1.0 s 时发生三相短路故障，在 1.5 s 时切除，故障持续时间为 0.5 s。故障前后换流站交流侧电压、电流波形如图 10(a)、(b)所示，上桥臂开关 K_1 状态如图 10(c)所示，下桥臂开关状态 K_2 为 K_1 取反。由于换流器的实际闭锁时间与多个因素有关，因此本文设置 AM-MMC 在故障 5 ms 后闭锁，无切换闭锁换流器的交流电流波形如图 11 所示。

由图 10 可知，故障时刻各相桥臂开关状态为 (0, 1) (0, 1) (1, 0)，即复用方式为“上上下”。故障期间交流母线电压突降，交流短路电流激增。为防止短路故障后过流，换流器内环电流设置了限幅控制，故障期间阀侧电流上升至 1.5 p.u.。图 11 中，在 1.005 s 时 AM-MMC 闭锁，但因桥臂开关仍在不停切换，闭锁过程中存在间断的充电电流，所以 t=1.417 s 时才彻底闭锁。

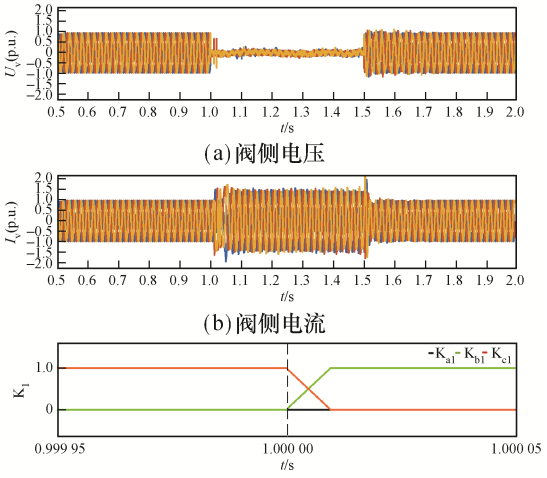


图 10 t=1.0 s 时三相短路故障波形

Fig. 10 Waveforms under three-phase short-circuit fault at t=1.0 s

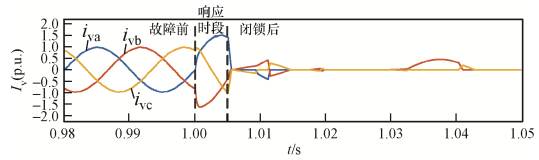


图 11 故障时刻为 1 s 时的仅闭锁时阀侧电流

Fig. 11 Valve-side current when only locked at the 1 s fault moment

由于切换 AM-MMC 桥臂开关也需要响应时间，因此设置在 t=1.005 0 s 时将 AM-MMC 复用方式由故障时刻的“上上下”切换为“上上上”，图 12 所示为切换复用方式后闭锁对应的阀侧电流。由图可知，故障时刻复用方式为“上上下”时，切换为“上上上”复用方式后能够避免闭锁过程中的间断性充电，桥臂电流迅速减至 0，在 t= 1.005 4 s 完全闭锁，实现迅速闭锁。图 13、14 分别给出了仅闭锁和切换复用后闭锁的各相等效桥臂电流波形，图 15、16 分别给出了仅闭锁和切

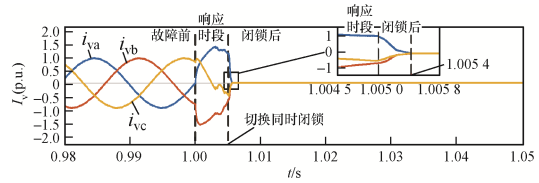


图 12 故障时刻为 1 s 时的切换至“上上上”复用方式后闭锁的阀侧电流

Fig. 12 Valve-side current for blocking after switching to “upper-upper-upper” multiplexing mode at the 1 s fault moment

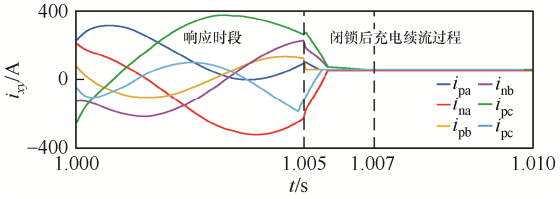


图 13　故障时刻为 1 s 时的仅闭锁时等效桥臂电流

Fig. 13 Equivalent bridge arm current when only locked at the 1 s fault moment

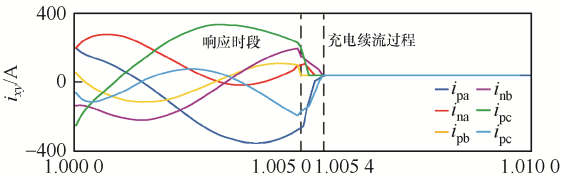


图 14　故障时刻为 1 s 时的切换至“上上上”复用方式后闭锁的等效桥臂电流

Fig. 14 Equivalent bridge arm current for blocking after switching to “upper-upper-upper” multiplexing mode at the 1 s fault moment

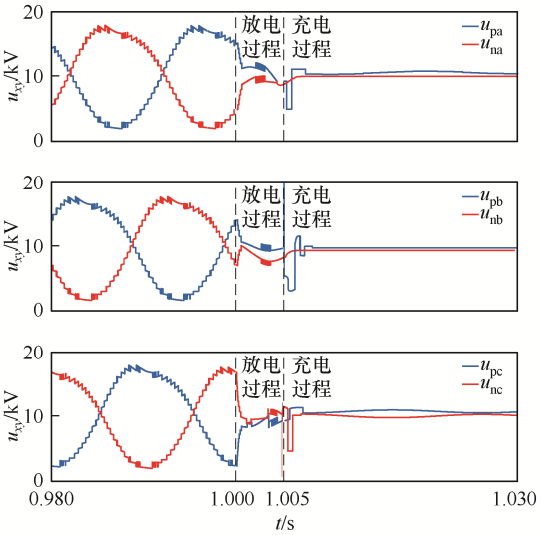


图 15　故障时刻为 1 s 时的仅闭锁时等效桥臂电压

Fig. 15 Equivalent bridge arm voltage when only locked at the 1 s fault moment

换复用后闭锁的各相等效桥臂电压波形，所得仅闭锁情况下的 AM-MMC 充电续流回路与前文所述一致。

设置在 t=0.95 s 时发生三相短路故障，在 1.45 s 时故障切除，故障持续时间为 0.5 s。故障前后换流站交流侧电压、电流波形如图 17(a)、(b)所示，上桥臂开关 K_1 状态如图 17(c)所示，下桥臂开关状态 K_2 为 K_1 取反。同样设置在故障 5 ms 后闭锁 AM-MMC，无切换采用直接闭锁换流站的交流电流波形如图 18 所示。

由图 17 可知，故障时刻各相桥臂开关状态为

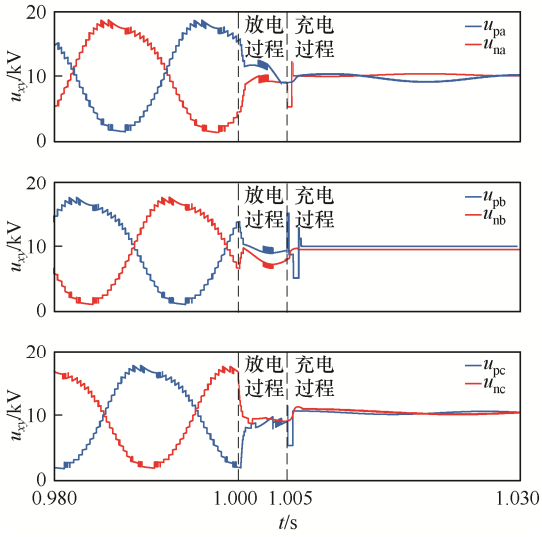


图 16　故障时刻为 1 s 时的切换至“上上上”复用方式后闭锁的等效桥臂电压

Fig. 16 Equivalent bridge arm voltage for blocking after switching to “upper-upper-upper” multiplexing mode at the 1 s fault moment

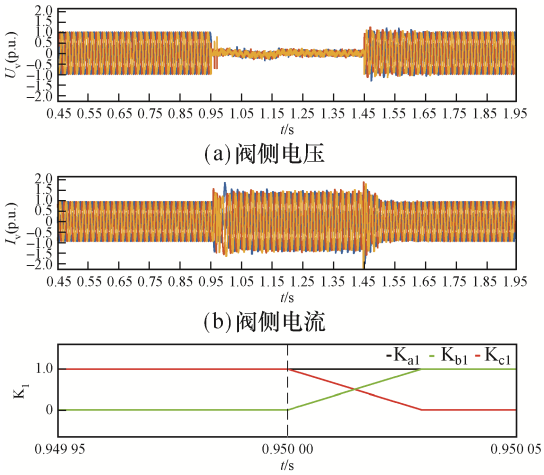


图 17　t=0.95 s 时三相短路故障波形

Fig. 17 Waveforms under three-phase short-circuit fault at t=0.95 s

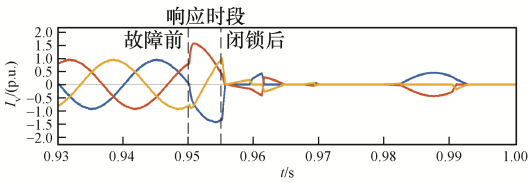


图 18　故障时刻为 0.95 s 时的仅闭锁时阀侧电流

Fig. 18 Valve-side current when only locked at the 0.95 s fault moment

(1, 0) (1, 0) (0, 1)，即复用方式为“下下上”。故障期间交流母线电压突降，交流短路电流上升至1.5 p.u.。图 18 中，在 0.955 s 时换流器闭锁，但由于桥臂开关仍在不停切换，闭锁过程中存在间断的充电电流，t=0.993 s 时才彻底闭锁。

设置在 t=0.955 s时将 AM-MMC 复用方式由故障时刻的“下下上”切换为“上上上”，图 19 所示为切换复用方式后闭锁对应的阀侧电流。由图可知，故障时刻复用方式为“下下上”时，切换为“上上上”复用方式后能够避免闭锁过程中的间断性充电，桥臂电流迅速减至 0，在 t=0.955 6 s 时完全闭锁，实现迅速闭锁。图 20 和图 21 分别给出了仅闭锁和切换复用后闭锁的各相等效桥臂电流波形，图 22 和图 23 分别给出了仅闭锁和切换复用后闭锁的各相等效桥臂电压波形。所得仅闭锁情况下的 AM-MMC 充电续流回路与前文所述一致，此时各相较小的等效桥臂电容为“上，上，下”，则闭锁后 a 相等效上桥臂电流 i_{pa}、b 相等效上桥臂电流 i_{pb}、c 相等效下桥臂电流 i_{nc} 充电续流时间最长、衰减至 0 最慢，三相较小的等效桥臂电容电压 u_{pa}、u_{pb}、u_{nc} 闭锁后存在短暂充电。而切换复用后闭锁缩短了充电续流时间，实现了快速闭锁。

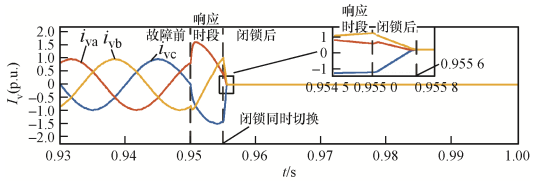


图 19 故障时刻为 0.95 s 时的切换至“上上上”复用方式后闭锁的阀侧电流

Fig. 19 Valve-side current for blocking after switching to “upper-upper-upper” multiplexing mode at the 0.95 s fault moment

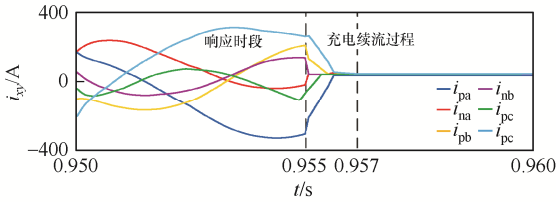


图 20 故障时刻为 0.95 s 时的仅闭锁时等效桥臂电流

Fig. 20 Equivalent bridge arm current when only locked at the 0.95 s fault moment

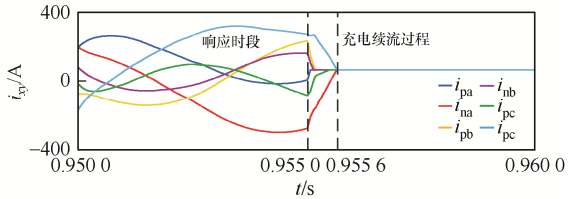


图 21 故障时刻为 0.95 s 时的切换至“上上上”复用方式后闭锁的等效桥臂电流

Fig. 21 Equivalent bridge arm current for blocking after switching to “upper-upper-upper” multiplexing mode at the 0.95 s fault moment

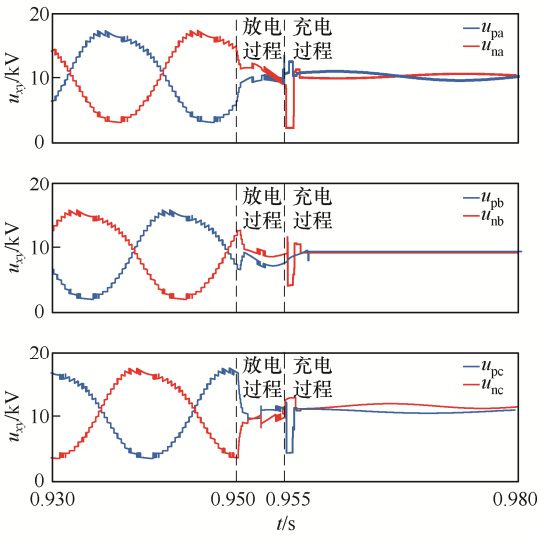


图 22 故障时刻为 0.95 s 时的仅闭锁时等效桥臂电压

Fig. 22 Equivalent bridge arm voltage when only locked at the 0.95 s fault moment

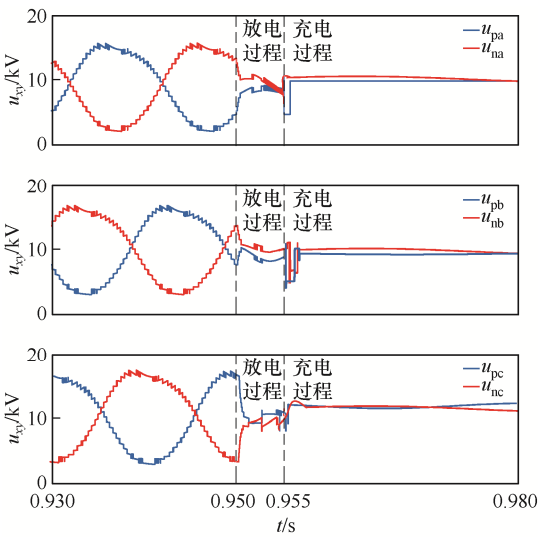


图 23 故障时刻为 0.95 s 时的切换至“上上上”复用方式后闭锁的等效桥臂电压

Fig. 23 Equivalent bridge arm voltage for blocking after switching to “upper-upper-upper” multiplexing mode at the 0.95 s fault moment

5 结论

本文研究了桥臂复用型MMC在交流系统发生三相短路故障时换流器的故障特性，提出了在故障期间切换 AM-MMC 复用方式后闭锁的故障穿越策略，并通过 MATLAB/Simulink 仿真验证了所提穿越策略的有效性，所得结论如下。

(1)通过在 AM-MMC 闭锁期间将桥臂开关维持在同一状态可以有效避免闭锁过程中的间断性充电现象。

(2)通过在 AM-MMC 故障期间将桥臂开关切换至“上上上”复用方式，能够有效缩短闭锁耗时，实现迅速闭锁。

将 AM-MMC 切换至“上上上”复用方式后闭锁换流器可有效实现三相短路故障穿越，所提策略是否适用于 AM-MMC 的不对称短路故障穿越及切换至其他复用方式后闭锁是否有效有待后续进一步研究。

参考文献：

[1] Shu Hongchun, Ren Min, Tian Xincui, et al. Strategies for improving ride-through capability of three-terminal HVDC system under AC side fault [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 150: 109074.

[2] Silva B, Moreira C L, Leite H, et al. Control strategies for AC fault ride through in multiterminal HVDC grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 395- 405.

[3] 余祖泳, 张振, 王毅, 等. 轻型化 MMC 子模块配置方法及其控制策略[J/OL]. 电源学报, 2023: 1-13. (2023-10-24)[2024-04-03]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DYXB20231023003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
Yu Zuyong, Zhang Zhen, Wang Yi, et al. Submodule configuration method and control strategy for MMC lightweight [J/OL]. Journal of Power Supply, 2023: 1-13. (2023-10-24)[2024-04-03]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DYXB20231023003&dbname=CJFD&dbcode= CJFQ.(in Chinese)

[4] 谈竹奎, 徐玉韬, 谢百明, 等. 向无源端网络供电的多端 MMC-HVDC 控制策略研究[J]. 电力大数据, 2019, 22(10): 1-8.
Tan Zhukui, Xu Yutao, Xie Baiming, et al. Research on multi-terminal MMC-HVDC control strategy for powering passive networks [J]. Power Systems and Big Data, 2019, 22(10): 1-8. (in Chinese)

[5] 摆世彬, 田志浩, 王峰, 等. 基于准 PR 调节器的模块化多电平变流器输电控制方法[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 74-80.
Bai Shibin, Tian Zhihao, Wang Feng, et al. Transmission control method for modular multilevel converter based on quasi PR regulator [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 74-80. (in Chinese)

[6] 陈桂. 柔性直流输电系统模块化多电平换流器的端口特性及故障穿越研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
Chen Gui. Investigation on port characteristics and fault ride through of modular multilevel converters in flexible DC transmission systems [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)

[7] Soomro J B, Kumar D, Chachar F A, et al. An enhanced AC fault ride through scheme for offshore wind-based MMC-HVDC system [J]. Sustainability, 2023, 15(11): 8922.

[8] Yang Ruixiong, Fang Ke, Chen Jianfu, et al. A novel protection strategy for single pole-to-ground fault in multi-terminal DC distribution network [J]. Energies, 2023, 16(6): 2921.

[9] 王琛, 陶建业, 王毅, 等. 桥臂复用型模块化多电平换流器的拓扑及控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3373-3385.
Wang Chen, Tao Jianye, Wang Yi, et al. Research on topology and control of arm multiplexing modular multilevel converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3373-3385. (in Chinese)

[10] 王琛, 陶建业, 王毅, 等. 半桥–全桥子模块混合型桥臂复用 MMC 的拓扑及故障穿越策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8297-8309.
Wang Chen, Tao Jianye, Wang Yi, et al. Research on topology and fault ride-through strategy of hybrid arm multiplexing MMC composed of HBSMs and FBSMs [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8297-8309. (in Chinese)

[11] 李宇薇, 王毅, 高玉华, 等. 桥臂复用模块化多电平变流器单极接地故障无闭锁穿越及能量均衡[J]. 电工技术学报, 2025: 40(1): 190-202.
Li Yuwei, Wang Yi, Gao Yuhua, et al. Pole-to-ground

fault riding-through and energy balance of arm-multiple-xing MMC [J]. Transactions of China Electrote- chnical Society, 2025: 40(1): 190-202. (in Chinese)

[12] 程启明, 杜婷伟, 程尹曼, 等. 九边形模块化多电平变换器的解耦模型与控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4037-4051.
Cheng Qiming, Du Tingwei, Cheng Yinman, et al. Decoupling model and control strategy of nonagonal modular multilevel converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4037-4051. (in Chinese)

[13] 侯玉超, 郭祺, 涂春鸣, 等. 面向输出性能优化的高低频混合型模块化多电平变换器及其调控策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4467-4479.
Hou Yuchao, Guo Qi, Tu Chunming, et al. A high and low frequency hybrid modular multilevel converter for output performance optimization and its control strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4467-4479. (in Chinese)

[14] Liu Xinyu, Xu Zheng, Wang Guoteng, et al. Accurate estimation on AC short-circuit current for grid-connected MMC-HVDC system considering FRT and various control modes [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 136: 107683.

[15] Huang Hanqing, Wang Zengping. MMC-HVDC AC side line protection based on positive sequence fault component current ratio [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(19): 4375-4385.

[16] 茆书睿, 徐政, 杨健, 等. 交流系统短路故障下 MMC 对短路电流的影响及抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 134-149.
Mao Shurui, Xu Zheng, Yang Jian, et al. Influence analysis and control strategy of MMC on AC short circuit current under short circuit fault of AC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 134-149. (in Chinese)

[17] 卜广全, 李英彪, 王姗姗, 等. MMC对交流系统三相短路故障短路电流影响的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6303-6312.
Bu Guangquan, Li Yingbiao, Wang Shanshan, et al. Analysis of the short-circuit current of MMC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6303-6312. (in Chinese)

[18] Wang Xi, Chen Zhen, Zhang Yinming, et al. The short-circuit fault current impact mechanism and adaptive control strategy of an MMC-HVDC [J]. Processes, 2023, 11(3): 837.

[19] 江友华, 陈芳, 赵乐, 等. 不平衡电网电压条件下 MMC 控制策略综述[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 74-87.
Jiang Youhua, Chen Fang, Zhao Le, et al. Review of control strategies for modular multilevel converter under unbalanced grid voltage[J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 74-87. (in Chinese)

[20] Cui Shenghui, Lee H J, Jung J J, et al. A comprehensive AC-side single-line-to-ground fault ride through strategy of an MMC-based HVDC system [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1021-1031.

[21] 高玉华, 王琛, 王毅, 等. 基于半波交替的轻型化 MMC 拓扑及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 149-159.
Gao Yuhua, Wang Chen, Wang Yi, et al. Topology and control strategy of light-weight modular multilevel converter with half-wave alternating [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 149-159. (in Chinese)

[22] 顾诚. 柔性直流电网换流变阀侧接地故障暂态特性及保护策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
Gu Cheng. Research on transient characteristics and protection strategies of grounding faults at the valve side of transformer in flexible DC grids [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)



张后谊

作者简介：

张后谊(1995—)，男，硕士，工程师。研究方向：电网稳定性分析，微电网优化运行。Email：1614559912@qq.com。

李继凯(1989—)，男，通信作者，本科，工程师。研究方向：电力电子技术。Email：lijikai1989@126.com。

徐玉韬(1982—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：柔性配电网。Email：yutaoxu @126.com。

闫鑫(1989—)，男，本科，中级工程师。研究方向：中压配网柔性直流换流器，融冰装置和隔直装置。Email：jdyanxin @163.com。

冯起辉(1994—)，男，硕士，工程师。研究方向：电力系统自动化，电力电子技术。Email：fonqeeh@163.com。

(责任编辑：孙美菊)