

1-15-2024

Rapid recovery after bipolar short-circuit fault of hybrid MMC in distribution network

Mingming SHI

Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China

Ruihuang LIU

Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China, 826842878@qq.com

Yubo YUAN

Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China

Chenyu ZHANG

Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China

Xiaodong YUAN

Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

See next page for additional authors

Recommended Citation

SHI, Mingming; LIU, Ruihuang; YUAN, Yubo; ZHANG, Chenyu; YUAN, Xiaodong; and YU, Jianyu (2024)

"Rapid recovery after bipolar short-circuit fault of hybrid MMC in distribution network," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 38: Iss. 5, Article 12.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.012

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol38/iss5/12>

This Scientific Research is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology. For more information, please contact dlxb04@163.com.

Rapid recovery after bipolar short-circuit fault of hybrid MMC in distribution network

Authors

Mingming SHI, Ruihuang LIU, Yubo YUAN, Chenyu ZHANG, Xiaodong YUAN, and Jianyu YU

配电网混合型 MMC 双极短路故障后快速恢复策略

史明明, 刘瑞煌, 袁宇波, 张宸宇, 袁晓冬, 喻建瑜

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:故障清除后模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的快速恢复技术是柔性直流配电技术的重要研究内容。本文针对子模块混合型 MMC 故障后由于子模块电容电压不均导致的故障恢复过电流问题,提出了一种桥臂过电流抑制策略,避免解锁过程中桥臂子模块过电流的发生,使得解锁过程能够稳定可靠进行;在此基础上,还研究了基于桥臂电流前馈的子模块电容电压快速均衡方法,可促进换流器解锁时桥臂子模块电容电压快速重新稳定至额定值,有利于提高换流器直流侧电压恢复速度;最后,在 MATLAB/Simulink 环境中搭建了单端混合型 MMC 仿真模型,验证了所提控制方法的有效性和可行性。

关键词:混合型 MMC;故障闭锁;过电流抑制;故障恢复;子模块电容电压

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.012 中图分类号:TM726 文章编号:1673-9140(2023)05-0121-08

Rapid recovery after bipolar short-circuit fault of hybrid MMC in distribution network

SHI Mingming, LIU Ruihuang, YUAN Yubo, ZHANG Chenyu, YUAN Xiaodong, YU Jianyu

(Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: The rapid recovery technology after fault clearing based on modular multilevel converter is an important research content of flexible DC power distribution technology. For the sub-module hybrid MMC, a bridge arm overcurrent suppression strategy is proposed to avoid the occurrence of secondary overcurrent of the bridge arm, so that the unlocking process could be carried out stably and reliably; at the same time, a fast sub-module capacitor voltage equalization method based on bridge arm current feedforward is studied. The recovery control could also ensure that the capacitor voltage of the sub-module of the bridge arm is quickly stabilized to the rated value when the converter is unlocked, which greatly improves the recovery speed of the converter. Finally, a single-ended hybrid MMC simulation model is built in MATLAB/Simulink to verify the effectiveness and feasibility of the proposed control method.

Key words: hybrid MMC; fault blocking; overcurrent suppression; fault recovery; capacitor voltage of submodule

随着分布式光伏规模的不断扩大以及电动汽车数量的日益增加,配电网中直流属性的源、荷占比大幅上升,直流配电网相比于交流配电网更容易

接纳分布式新能源和直流负荷^[1-6]。但由于直流配电网阻抗远小于交流配电网,使得直流故障发展速度更快;另外,大面积的新能源并网也使利用架空

收稿日期:2022-08-08;修回日期:2023-03-24

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2021027)

通信作者:刘瑞煌(1994—),男,硕士,工程师,主要从事交直流配电网研究;E-mail:826842878@qq.com

线路变得越来越迫切,而架空线路也更容易出现短接故障^[7]。因此,为提高直流配电系统的安全性,换流器必须具有直流故障阻断能力。

现有直流配电工程中换流器一般采用基于半桥子模块(half-bridge sub-module, HBSM)的模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC),但是直流侧发生短路故障时HBSM闭锁也无法清除或阻断故障。因此,研究人员提出了多种具有故障自阻断能力的子模块^[8-9],当换流器闭锁后利用子模块切入到故障回路的负极性电容转移吸取能量,从而达到阻断故障的目的。然而,这类子模块都会增加换流器成本或系统复杂度。为了获得较好的经济性,HBSM和全桥子模块(full-bridge sub-module, FBSM)混合型MMC拓扑被提出^[10],通过合理配置桥臂内FBSM和HBSM的比例,可以使得换流器具备直流故障阻断能力的同时还兼顾经济性,已在贵州中压五端柔性直流配电示范工程中得到应用。

此外,当短路故障清除后,MMC应能做到快速重启以恢复供电,但由于闭锁时各子模块充放电能量不同导致子模块电容电压不再均衡,在解锁瞬间桥臂会出现较大的过冲电流,可能导致MMC二次闭锁,因此需要对解锁后出现的桥臂过电流进行抑制。

文献[11]针对单极接地故障,分析表明故障后重新恢复正常的速度取决于换流器的相关参数,并设计了一种附加控制器以加速故障恢复过程,从而降低对换流器参数依赖。文献[12]采用桥臂阻尼和谐振开关相配合以进行故障清除及恢复,部分增加了换流站建设成本。文献[13]一方面通过改进双有源桥(dual active bridge, DAB)型直流变压器的开关电容来阻断其放电通路,另一方面分析了直流电压波动的机理,并将波动量引入到传统的电压外环中,从而加快了故障后系统恢复速度,但该方法仅对错位双子模块(clamp double sub-module, CDSM)的MMC具有适用性。

本文针对HBSM和FBSM混合型MMC故障阻断恢复,提出一种桥臂过电流抑制策略,抑制子模块绝缘栅双极晶体管(insulated-gate bipolar transistor, IGBT)的过电流现象,避免出现二次闭锁;在此基础上,研究一种基于桥臂电流前馈控制的子模

块电容电压快速均衡方法,以促进换流器解锁后子模块电容电压快速恢复到额定值;然后详细分析所提桥臂过电流抑制策略以及子模块电容电压快速均衡方法的基本原理;最后,通过仿真验证所提控制策略的可行性与有效性。

1 HBSM和FBSM混合型MMC

1.1 拓扑结构

HBSM和FBSM混合型MMC的拓扑结构如图1所示,换流器采用伪双极接线方式,每相由上下2个桥臂组成,各桥臂含有 N 个子模块,均由 N_F 个FBSM和 N_H 个HBSM混合级联而成。 $u_j(j=a, b, c)$ 为交流系统相电压, L_s 和 L_a 分别代表网侧电抗和桥臂电抗, i_{vj} 和 i_{nj} 分别代表 j 相上下桥臂电流, U_{dc} 为直流侧电压, I_{dc} 为直流侧电流。

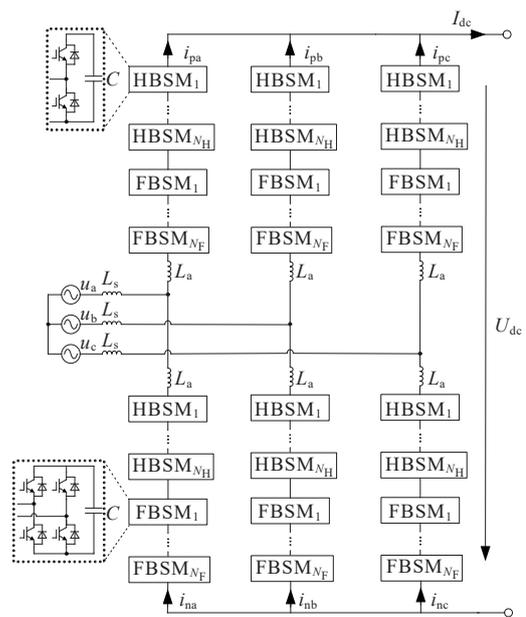


图1 HBSM和FBSM混合型MMC拓扑

Figure 1 Topology of the hybrid MMC

1.2 子模块配比原则

考虑到直流线路最严重的故障为双极短路故障,故本文主要以双极短路故障为例展开讨论。

当直流侧发生双极短路故障时,由于子模块电容释放能量导致桥臂电流会增长过快,为了防止模块IGBT因电流过大而产生损坏,需要对整个换流器闭锁以实现故障阻断。而清除故障电流需要满足以下2个条件:①故障电流在合理的时间内恢复

到阈值内;②闭锁后能够阻断交流系统向故障点的馈流路径^[14],其潜在馈流路径如图 2 所示。

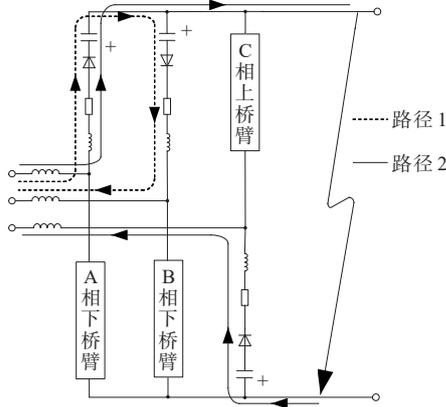


图 2 交流系统潜在馈流路径

Figure 2 Potential feeding paths of AC system

故障被阻断后由于故障电路中存在电容、电感和续流二极管,因此条件 1 很容易满足。对于条件 2,只要满足任一相两桥臂电压之和大于交流线电压峰值即可。同时,考虑到 FBSM 中电容在故障发展阶段由于释放能量而在闭锁时刻其电压低于额定值,引入放电系数 λ 来表示闭锁时刻 FBSM 中电容电压与稳态运行时电压之比,则有:

$$2 \times (\eta N) \times \lambda U_{cf} \geq \sqrt{3} U_m \quad (1)$$

式中, η 为 FBSM 数量占总模块数量的比例系数; U_m 为交流出口相电压峰值; U_{cf} 为全桥子模块电容稳态电压。

从而可得:

$$\eta \geq \frac{\sqrt{3} U_m}{2N\lambda U_{cf}} \quad (2)$$

假设 MMC 直流侧电压为 ± 10 kV,即 $U_{dc}=20$ kV,子模块电容额定电压 $U_c=2.5$ kV,因此可取子模块数量为 8。设放电系数 $\varepsilon=0.9$,则根据式 (2) 可得 η 至少为 0.41,本文取 $\eta=0.5$,即单个桥臂中含 FBSM 与 HBSM 数量相同。

2 故障后快速恢复控制

2.1 桥臂过电流抑制

HBSM 和 FBSM 混合型 MMC 闭锁后, FBSM 电容反极性放置在故障电流路径中,由于吸收短路故障能量其电压会升高,而 HBSM 电容电压将保持

闭锁时刻值不变。因此,当 MMC 解锁时同一桥臂中不同类子模块的电容电压值会存在差异,各相之间的子模块电容电压也会不同。如果此时对所有子模块直接给予解锁触发信号,会形成桥臂电容电压差异进而引起过冲电流,有损坏 IGBT 的风险。因此,应将解锁后的桥臂电流限制在适当阈值范围内,以防止因过流而再次被闭锁造成故障恢复失败。

为了平稳安全地解锁混合型 MMC,本文提出如图 3 所示的桥臂过电流抑制策略,其中 u_{pj_ref} 为基本调制波; $U_{BAL_ref,i}$ 为电容电压均衡控制环路输出,其控制环路如图 4(a) 所示; U_{AV_ref} 为电容电压平均控制环路输出,其控制环路如图 4(b) 所示; Δi_{oc} 为桥臂电流采样差值; ΔU_{oc} 为桥臂参考电压修正项; K_{oc} 为过电流抑制系数。从图 3 可见,过流抑制系数 K_{oc} 越大,得到的桥臂电压参考值修正量 ΔU_{oc} 值也越大,则对调制波的修正也越大,可以更好地降低桥臂过电流。但是 K_{oc} 并非越大越好,由于系统调制比限制,若调制波的变化量过大会产生过调制等问题。

该桥臂过电流抑制策略的工作原理为:首先为每个桥臂设置一个电流阈值上限和下限,如果桥臂电流超过电流阈值,过流系数 K_{oc} 由标志位设置判断;如果桥臂电流没有超过当前阈值,则附加控制不工作。如果桥臂电流大于 0 且超出阈值上限 I_{th} 时则置位 +1 标志,桥臂电压参考值加上修正项 ΔU_{oc} ,即各子模块处于的状态为充电,以降低充电电流;如果桥臂电流小于 0 且其值低于阈值下限 $-I_{th}$ 则置位 -1 标志,并从桥臂电压参考值中减去校正项 ΔU_{oc} ,即各子模块处于的状态为放电,以降低放电电流。然后将逻辑判断得到的修正项叠加在桥臂电压参考波 u_{arm_ref} 上,桥臂电压参考值修正量 ΔU_{oc} 的表达式为

$$\Delta U_{oc} = K_{oc} \Delta i_{oc} \quad (3)$$

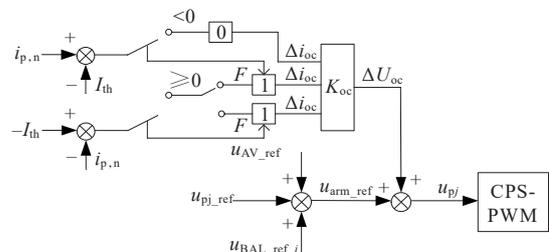


图 3 桥臂过电流抑制策略

Figure 3 Arm overcurrent suppression strategy

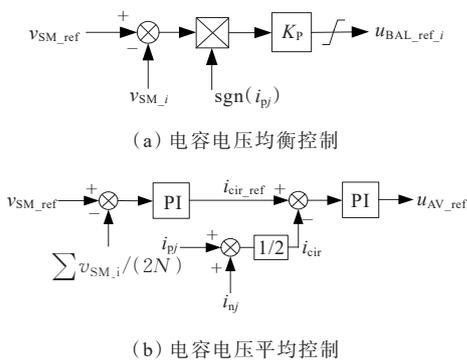


图4 传统子模块电容均压控制

Figure 4 Traditional submodule voltage balancing control

2.2 电容电压快速恢复控制

换流器解锁时会发生桥臂过电流,但子模块电容电压恢复到稳态值可以通过调节桥臂电流实现。因此,为使换流器电容电压水平在解锁后短时间内恢复到稳态值,可在电压均衡控制中加入基于桥臂电流的前馈控制,以 j 相上桥臂为例,图5为改进的电容电压快速均衡方法。解锁时,将每个子模块的电容电压采样差值 $\Delta v_{SM,i}$ 送入迟滞控制器,筛选出采样差值不符合滞环宽度的子模块(将迟滞宽度设置为10 V),辅以附加前馈控制。同时,附加前馈控制会根据不同子模块的电压大小确定 K_R 的正负,如果MMC解锁时子模块电容电压低于额定值,附加前馈应增加桥臂电压调制波系数为正;如果MMC解锁时子模块电容电压高于额定值,附加前馈须降低桥臂电压调制波系数为负,以保证子模块可以正确实现功率调节。

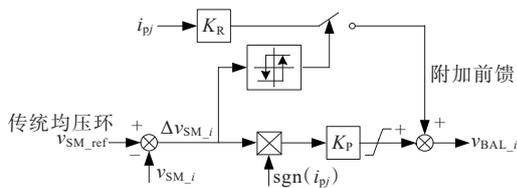


图5 改进的子模块电容均压控制

Figure 5 Improved voltage balancing control

因此,整个控制环的输出电压为

$$u_{BAL,i} = K_p \cdot (v_{SM,ref} - v_{SM,i}) \cdot \text{sgn}(i_{pj}) + K_R \cdot i_{pj} \quad (4)$$

式中, $u_{BAL,i}$ 为整个控制环路的输出电压; i_{pj} 为 j 相上桥臂电流; $v_{SM,ref}$ 为单个子模块电容电压的参考值; $v_{SM,i}$ 为第 i 个子模块电容电压的实时采样值; K_p 为比例控制器的比例增益系数; K_R 为前馈补偿环节的前馈系数; $\text{sgn}(x)$ 为符号函数。

注入到第 i 个子模块中的瞬时功率为

$$P_{pj,i}(t) = K_p \cdot \Delta v_{SM,i} \cdot \text{sgn}(i_{pj}) \cdot i_{pj} + K_R \cdot i_{pj}^2 = P_{add1} + P_{add2} \quad (5)$$

式中, P_{add1} 为比例控制器闭环调节所附加的补偿功率,其原理为传统均压环; P_{add2} 为设置的附加电流前馈环节的补偿功率,它辅助均压环使子模块电容电压恢复到额定值。

3 仿真实验

为了验证所提桥臂过流抑制策略的有效性,在MATLAB/Simulink中搭建了 ± 10 kV/2.5 MW的单端混合型MMC系统,仿真系统结构及主要参数如图6和表1所示。

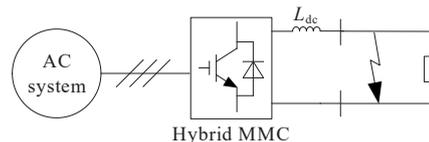


图6 仿真模型示意

Figure 6 Simulation model diagram

表1 仿真的主要参数

Table 1 Main parameters of the simulation

仿真参数	单位	数值
交流侧电压 U	kV	10
额定直流电压 U_{dcn}	kV	± 10
额定有功功率 P_n	MW	2.5
桥臂SM数量 N	个	8
FBSM数量 N_{FB}	个	4
桥臂SM电容 C	μF	3 000
桥臂电抗 L_a	mH	20
平波电抗器 L_{dc}	mH	30

在0.5 s时,双极短路故障发生于距离换流器10 km处。经过2 ms的检测延迟后,所有开关器件在0.502 s闭锁,而在29 ms后解锁使混合型MMC恢复正常工作。图7为加入传统桥臂电流抑制策略的仿真结果,其仅靠调节PI进行重启电流抑制^[15]。图7(a)为故障后直流输出电流波形。双极短路故障发生后,子模块电容放电导致直流输出电流迅速上升,在0.502 s内达到最大值810 A,子模块闭锁故障电流经过6.2 ms降至0 A。短路故障清除后,直流开关在0.53 s闭合,MMC在0.531 s解锁复位恢复送电。从图7(b)~(c)可以看出在解锁之初交流侧

电流和桥臂存在严重的过流问题。三相桥臂的电流波形如图 7(c)所示。故障发生后和混合型 MMC 解锁后,桥臂会产生严重的过电流。一是由于故障发生后子模块电容器的放电作用,二是由于混合型 MMC 解锁时桥臂上的半桥和全桥子模块电压不平衡。

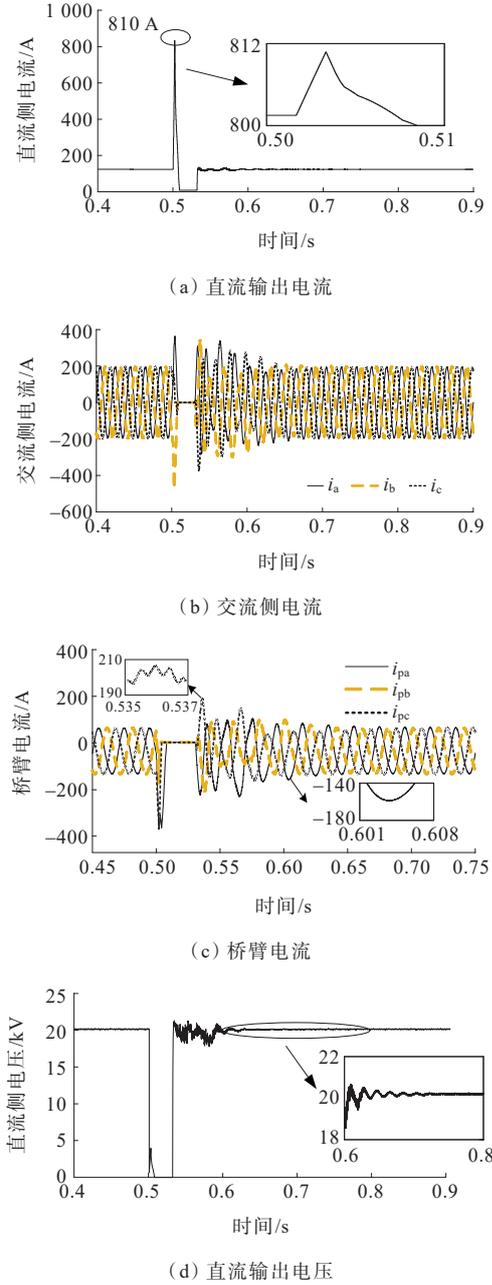


图 7 传统控制下短路故障时混合型 MMC 的响应曲线
 Figure 7 Response curves of hybrid MMC under short-circuit fault under traditional control

3.1 桥臂过电流抑制仿真分析

为了防止桥臂电流在解锁后超出 IGBT 的安全阈值而误关断,加入过电流抑制方法后的三相桥臂电流仿真波形如图 8 所示,其中桥臂电流的阈值设置为 140 A。从图 8 中可以看出,在加入图 3 的限流方法之后,解锁之后的桥臂电流能稳定在安全阈值范围之内,验证了该控制策略的有效性。

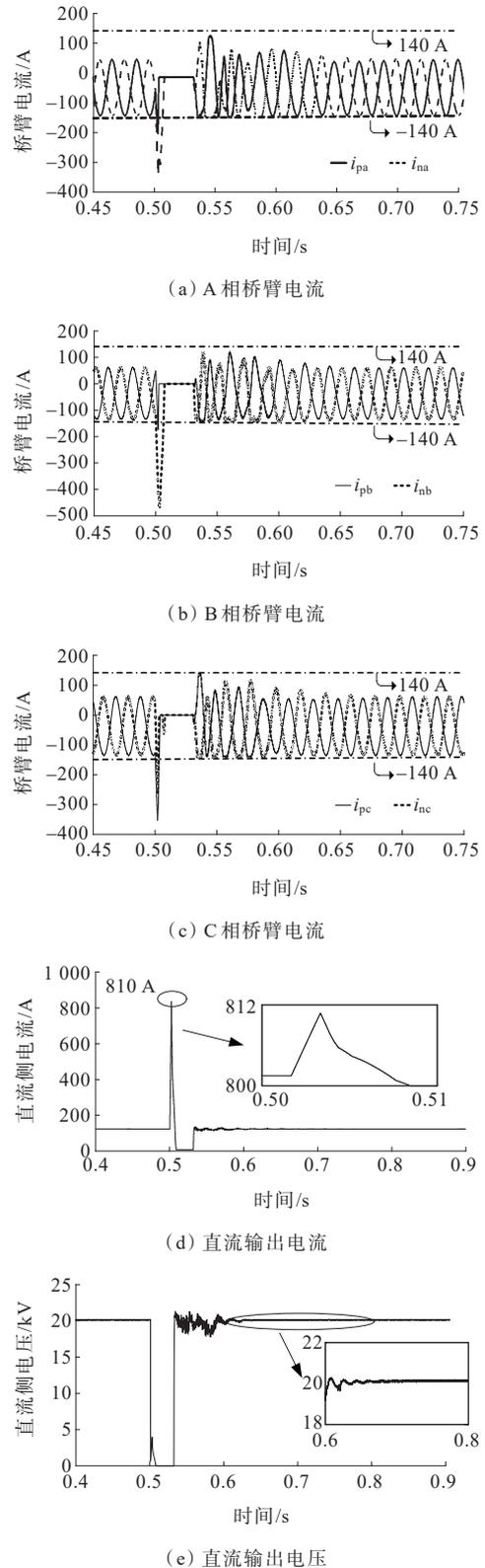


图 8 本文控制下短路故障时混合型 MMC 的响应曲线
 Figure 8 The response curve of hybrid MMC under the control of this paper

以图7(c)中实线框中的2处过流为例来说明所提限流控制的正确性。同时从图7(c)中可知,A相上桥臂电流 i_{pa} 在0.603 0~0.603 6 s时,电流值超过了设定的桥臂电流阈值下限,此时系统投入限流控制桥臂电压参考值中减去修正项以减少该桥臂投入的放电子模块个数,限流控制投入前后的桥臂子模块电压如图9(a)、(b)所示。图9(c)、(d)为C相上桥臂电流 i_{pc} 在越过门槛上限值后,桥臂电压在投入限流控制前后的电压波形。从图9中可以看出,C相桥臂电压在桥臂电流超过设定的阈值上限后会提高桥臂充电子模块个数,仿真结果与理论分析保持一致。

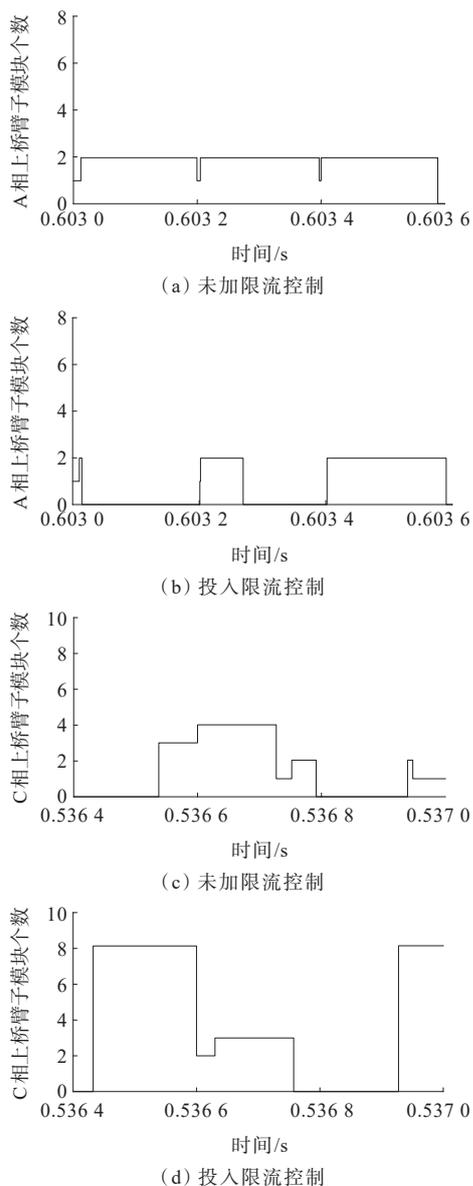


图9 限流控制投入前后A相和C相上桥臂模块个数

Figure 9 The number of upper arm modules of A-phase and C-phase before and after the current limiting control is switched on

3.2 电容电压快速恢复控制仿真分析

无任何附加控制投入时换流器A相上桥臂子模块电容电压波形如图10(a)所示。在换流器闭锁后全桥子模块电容反极性串联在故障回路中阻断交流源的馈流,其电容电压由于吸收故障回路中的能量会有所上升,HBSM电容电压保持闭锁前的值不变。注意到A相下桥臂中的FBSM电容电压在闭锁后上升的幅度相对于上桥臂的FBSM来说很小,这是因为A相上桥臂故障电流峰值大于下桥臂电流(如图8所示),最终上桥臂电容电压能在0.7 s稳定在额定值。换流器A相下桥臂子模块电容电

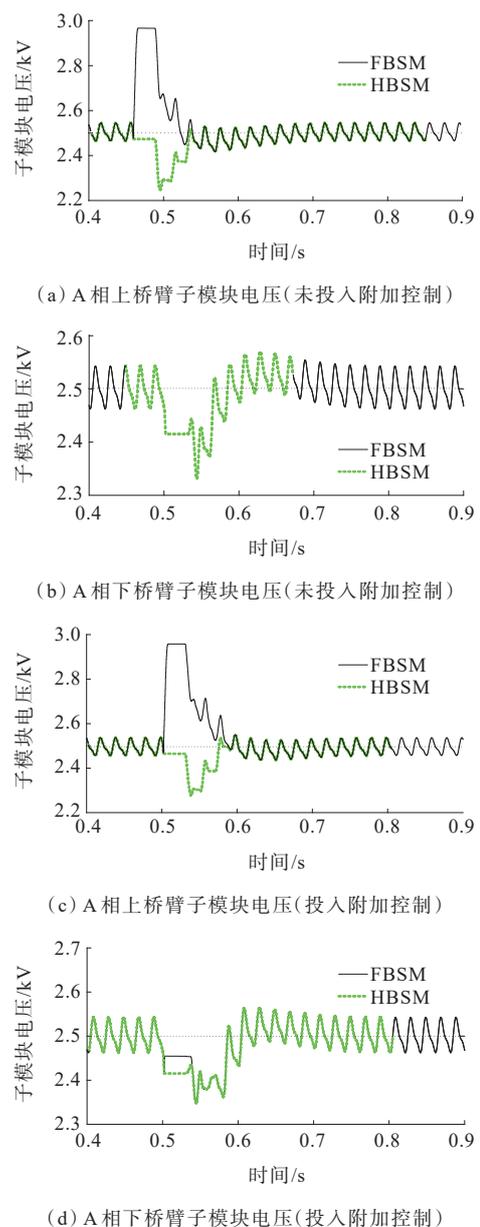


图10 限流控制投入前后A相子模块电容电压波形

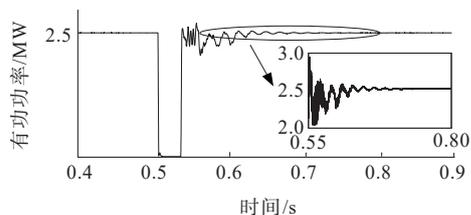
Figure 10 Submodule capacitor voltages of phase A without additional control

压波形如图10(b)所示,换流器解锁后在原有子模块均压环的作用下,下桥臂子模块电容电压经过195 ms的调节时间,也能在0.725 s稳定在额定值且子模块间的电容电压保持了均衡。

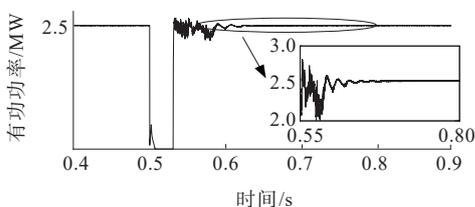
在均压环中加入基于桥臂电流的前馈环节后,桥臂电容电压有了较快的均衡效果。如图10(c)、(d)所示,当前馈系数 K_R 取20时A相上桥臂子模块电容电压能够在0.64 s恢复至额定值,恢复速度加快了35%,A相下桥臂子模块电容电压在换流器解锁后也能够经过140 ms的暂态过程,在0.67 s恢复到2.5 kV的额定值,恢复速度加快了28%。同时也应注意到,当子模块电容电压恢复到滞环控制器设置的宽度之内后,附加前馈控制便退出运行,由电压均衡控制中的比例控制器负责子模块电容电压的调节,保证了MMC正常运行。

从图7(a)与图8(d)的改进前后直流端口电流比较,以及图7(d)与图8(e)的改进前后直流端口电压比较可以看出,子模块的快速均衡也加快了MMC输出电压/电流快速恢复到稳定值。同时需要说明的是,由于MMC直流侧电压是由桥臂子模块电容电压共同叠加作用的结果,从直流侧电压/电流宏观波形上看,多个模块电容电压叠加会掩盖子模块电容电压快速均衡的暂态过程(如电流波形),只有将波形放大才能看出一些效果(如电压波形),如图8中所示。

系统有功功率波形如图11所示,可以看出未加



(a) 未加入控制的有功功率输出



(b) 加入控制的有功功率输出

图11 系统有功功率波形

Figure 11 System active power waveform

控制时系统约在0.73 s恢复稳定传输,而加入控制时系统约在0.69 s恢复稳定传输。

4 结语

本文针对适用于直流配电网的HBSM和FBSM混合型MMC,在其故障解锁后恢复策略方面做了如下工作:提出了解锁后桥臂过电流抑制控制策略,通过调节充放电电子模块数量来避免了换流器恢复过程中潜在的二次过流问题,保证解锁过程的安全平稳进行,仿真结果显示可以将桥臂电流从原来的290 A限制到140 A的阈值范围内。在此基础上,还研究了子模块电容电压快速恢复均衡的方法,在传统的子模块均压环中加入基于桥臂电流的前馈环节,增强了解锁后子模块电容电压的均衡恢复效果,保证了换流器解锁后直流电压能快速进入稳态。

参考文献:

- [1] 李博通,杨昕陆,李斌,等.采用故障阻断型换流器的直流配电网故障处理技术综述[J].电力系统自动化,2020,44(5):101-113.
LI Botong, YANG Xinlu, LI Bin, et al. Overview on fault processing technology for DC distribution network based on fault blocking converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 101-113.
- [2] 李霞林,郭力,黄迪,等.直流配电网运行控制关键技术研究综述[J].高电压技术,2019,45(10):3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049.
- [3] 熊雄,季宇,李蕊,等.直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J].中国电机工程学报,2018,38(23):6802-6813+7115.
XIONG Xiong, JI Yu, LI Rui, et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6802-6813+7115.
- [4] 王守相,刘琪,薛士敏,等.直流配电系统控制与保护协同关键技术及展望[J].电力系统自动化,2019,43(23):23-30.
WANG Shouxiang, LIU Qi, XUE Shimin, et al. Key

- technologies and prospect for coordinated control and protection in DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(23):23-30.
- [5] 周步祥,刘治凡,黄河,等.计及多种充电模式的电动汽车充电站有序充电双层优化策略[J].电测与仪表,2021,58(3):15-22.
ZHOU Buxiang, LIU Zhifan, HUANG He, et al. A bi-layer optimal strategy for coordinated charging of electric vehicle charging station considering multiple charging modes[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3):15-22.
- [6] 张鑫宇,樊艳芳,马健,等.基于拟合电流斜率特性的柔性直流配电线路纵联保护方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(18):128-136.
ZHANG Xinyu, FAN Yanfang, MA Jian, et al. Pilot protection method for flexible DC distribution lines based on fitted current slope characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18):128-136.
- [7] 杨仁焯,王霄鹤,陈晴,等.机组协同一分布卸荷的风电场-柔直并网系统故障穿越方法[J].电力系统自动化,2021,45(21):103-111.
YANG Renxin, WANG Xiaohu, CHEN Qing, et al. Fault ride-through method of flexible HVDC transmission system for wind farm integration based on coordination of wind turbines and distributed braking resistors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21):103-111.
- [8] 刘永岗,严建海,韩肖清,等.低压直流配电系统在农村地区的应用研究[J].供用电,2021,38(1):17-24.
LIU Yonggang, YAN Jianhai, HAN Xiaoqing, et al. Research on application of low voltage DC distribution system in rural areas[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(1):17-24.
- [9] MARQUARDT R. Modular Multilevel Converter topologies with DC-Short circuit current limitation[C]//8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, Korea, 2011:1425-1431.
- [10] QIN J C, SAEEDIFARD M, ROCKHILL A, et al. Hybrid design of modular multilevel converters for HVDC systems based on various submodule circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1):385-394.
- [11] 郑眉,陈骞,宋远见,等.模块化组合式直流变压器的单极接地故障特性和恢复策略研究[J].高压电器,2021,57(9):50-57.
ZHENG Mei, CHEN Qian, SONG Yuanjian, et al. Research on single-pole ground fault characteristics and recovery strategy of MCT[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9):50-57.
- [12] 倪翰文,李庚,鲍刚,等.基于能量平衡的模块化多电平变换器调制方法[J].电网与清洁能源,2022,38(7):9-15+24.
NI Hanwen, LI Geng, BAO Gang, et al. A modulation method of modular multilevel converter based on energy balance[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7):9-15+24.
- [13] 陈景文,周媛,李晓飞,等.光储直流微网混合储能控制策略研究[J].智慧电力,2022,50(1):14-20+87.
CHEN Jingwen, ZHOU Yuan, LI Xiaofei, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid[J]. Smart Power, 2022, 50(1):14-20+87.
- [14] 贺永杰,向往,周家培,等.LCC-MMC串联型混合直流输电系统小信号建模[J].电工技术学报,2021,36(7):1492-1506.
HE Yongjie, XIANG Wang, ZHOU Jiabei, et al. Small-signal modelling of LCC-MMC series hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7):1492-1506.
- [15] 张倩,立梓辰,赵博文,等.基于五端MMC-MTDC系统的协调启动和故障恢复启动控制策略[J].分布式能源,2022,7(2):70-80.
ZHANG Qian, LI Zichen, ZHAO Bowen, et al. Coordinated startup and fault recovery starts control policy based on five-terminal MMC-MTDC system[J]. Distributed Energy, 2022, 7(2):70-80.