第 49 卷 第 2 期：691-701 高电压技术 Vol.49, No.2: 691-701
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211470

基于 MMC 子模块两级主动控制的直流短路限流方法

王振浩，赵鑫雨，王朝斌，孙银锋，王　尉，李国庆
（东北电力大学现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室，吉林 132012）

摘　要：模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)直流侧故障后短路电路急剧上升，严重影响直流电网安全。为限制故障电流，提出一种基于子模块两级主动控制的直流短路限流控制方法(submodule two-stage active control，STAC)，通过两段故障检测判据和预设最大短路电流，构造关于直流电流的分段函数 K，其输出决定减投子模比例，故障后降低直流电压抑制短路电流，同时设计适应于不同运行条件换流站 MMC 的控制参数，并且仅通过控制动作限流不产生额外成本。STAC 不影响系统正常运行，限流过程维持功率传输。最后在四端直流电网中对 STAC 限流效果及其性能进行仿真分析。结果表明，所提限流方法能有效抑制故障电流，流经直流断路器故障电流降低 49.7%，桥臂电流峰值降低 23.15%，故障后 100 ms 恢复直流电压。
关键词：MMC；直流故障；故障检测；子模块控制；故障限流

DC Short Circuit Current-limiting Method Based on MMC Submodule Two-stage Active Control

WANG Zhenhao, ZHAO Xinyu, WANG Chaobin, SUN Yinfeng, WANG Wei, LI Guoqing
(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Northeast Electric Power University, Ministry of Education, Jilin 132012, China)

Abstract: The short circuit current rises sharply after the DC-link fault of the modular multilevel converter (MMC), which seriously affects the safety of the DC grid. In this paper, a submodule two-stage active control (STAC) is proposed for this issue. According to the two-stage fault detection criterion and the preset maximum short-circuit current, the piecewise function K of the direct current is constructed, which output decides to reduce the proportional coefficient of the cast sub-mode to reduce the DC voltage and suppress the short-circuit current. In addition, the control parameters of MMC converter which under various conditions are designed for economize the cost of current limiting control strategy. The STAC does not affect the normal operation of the system and it can maintain power transmission during current limiting. Finally, the current limiting effect and performance of STAC are simulated and analyzed in the four-terminal DC grid. The results show that the current limiting method proposed in this paper effectively suppresses the fault current. The fault current flowing through the DC circuit breaker is reduced by 49.7%, the peak current of the bridge arm is reduced by 23.15%, and the DC voltage is restored 100ms after the fault.
Key words: MMC; DC fault; fault detection; sub-module control; current-limiting

0　引言

随着世界能源供给结构的不断改变和我国全产业升级的持续推进，保证能源供应和促进互联互通是国家实现高质量发展的重要保证[1-4]。由于我国传统能源、可再生能源等分布特点，基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter，MMC)的柔性直流电网因其适用远距离传输和大规模并网，同时MMC的模块化结构具有可以适应不同电压水平、减少滤波设备等特点，是未来发展的必然趋势[5-6]。

但是由于柔性直流电网低阻尼、低惯性的特征，使直流故障后，短路电流上升极快、峰值高，严重威胁柔直电网的可靠性[7-10]。目前对于处理柔直电网故障电流的方法主要采用控保系统与直流断路器(DC circuit breaker，DCCB)协同配合来隔离线路上的短路故障，但是兼顾清除故障电流、能量耗散和快速中断能力的断路器技术难度高[11]，也必定增加整个电网建设投资。

有效解决上述问题的关键是故障限流技术[12]。常见方法是在换流器和线路之间设置直流电抗器，

基金资助项目：国家重点研发计划(2018YFB0904600)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2018YFB0904600).

在故障后可以提高短路电流放电时间常数为断路器工作提供更多时间，但是过大的直流电抗器必然影响系统稳定运行[13]。近年来诸多新型限流装置的提出也有良好的限流效果：文献[14]提出了一种超导限流器，通过故障后高阻限流，但造价过高的问题使其在工程应用中尚不成熟。文献[15]提出的结合限流电感通低频、阻高频等特点的混合式限流器，可适用于高压大功率场合，但都缺乏与 DCCB 协同配合的策略，难以达到良好限流效果。文献[16]提出一种具备限流功能的断路器，通过增加限流、旁路支路抑制短路电流提高断路器开断能力，但复杂拓扑结构会影响断路器可靠性及使用寿命。各种限流装置的配置可以有效抑制故障电流，但整体看来难以满足制造成本低、使用可靠的工程应用需求。

诸多限流方案也聚焦于利用 MMC 高可控性，通过 MMC 的模块化特征和调制参考信号对直流电压的影响抑制短路电流[17-18]。文献[19]提出一种基于调节比例积分微分控制器(proportion integration differentiation，PID)控制器的主动限流方法，但依赖于使用死区和闭环控制，会在限流中导致延迟。文献[20]提出了基于桥臂电压控制的主动限流方案，针对不同交流出口特性设计了控制参数选取原则。文献[21]提出一种通用紧急限流措施，通过在故障后减少子模块投入限制电容放电抑制短路电流，但未考虑桥臂电流过载和保证交直流侧功率传输限制问题。上述方法为充分开发 MMC 自身限流能力与限流控制结合开阔了思路，且基于 MMC 自身控制的主动限流方案不会产生额外成本，避免传导损耗及维护需求，同时准确可靠的启动策略保证限流控制只在故障后动作，不影响系统正常运行。

针对上述问题，本文结合故障后减投子模块的思想提出一种基于 MMC 子模块两级主动控制的直流短路限流方法(submodule two-stage active control，STAC)，通过设置适应于不同运行条件换流站的限流器控制参数，根据两段故障检测判据和预设最大短路电流启动限流控制，使得 MMC 阀控制器减投子模块比例限制故障电流。最后通过换流站基本控制参数与适配的限流控制器参进行对比，分析二者相关性，构建了四端柔性直流电网模型，对所设计限流方案进行仿真验证和性能分析。

1 直流短路故障分析

MMC 直流侧短路后分为 3 个阶段：电容放电阶段、交流侧瞬态馈入阶段和交流侧稳态馈入阶段。电容放电发生在故障后和 MMC 闭锁前，此阶段中子模块 SM 电容中的能量短时内释放，直至桥臂电流达到 MMC 内部保护阈值换流器自动闭锁开始交流馈入阶段。

图 1 是 MMC 在直流侧短路后内部子模块电容放电阶段的等效电路，其中 u_c 为子模块电容电压，$2C_0/N$ 为放电阶段单相等效电容，N 为子模块投入个数，$2L_{arm}$、$2R_{arm}$ 分别为单相桥臂等效电感、等效电阻，L_{dc}、R_{dc} 分别为换流器至短路点的限流电感、线路电感之和以及线路电阻，R_f 为故障电阻。

由于在柔性直流电网中，直流侧双极短路是系统中最严重的故障。故障后 10 ms 内，故障电流上升速率极大，过电流的主要来源是近端 MMC 的电容放电，交流侧馈入电流较少可以忽略。故障后，MMC 内部每一相都存在放电回路，子模块电容持续放电，直流出口电压 U_{dc} 也迅速降低，但是 MMC 控制结构在此暂态过程中仍可以由下层控制调节子模块投切，决定每相子模块投入数量 N。

工程应用中各换流站出口直流母线都配置有直流电抗器，来源于邻端 MMC 的故障电流极小，同时兼顾整个直流电网稳定，故障后邻端 MMC 电压降落非常有限。基于以上分析，结合图 1 得到故障后电容放电阶段等效电路图，如图 2 所示，其中，

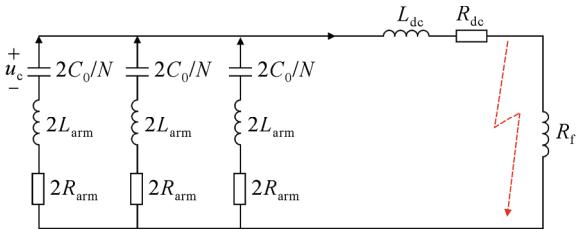


图 1 MMC 电容放电阶段

Fig.1 MMC at the capacitive discharge stage

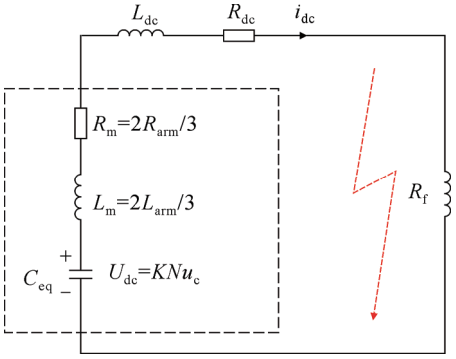


图 2 电容放电等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of capacitors discharge

C_{eq}、R_m、L_m 分别为 MMC 等效电容、电阻、电抗，i_{dc} 为直流电流，U_{dc} 为直流母线电压，K 为定义的关于 i_{dc} 的函数。

由等效电路得到微分方程

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}i_{dc}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{U_{dc}}{L_{eq}}-\dfrac{R_{eq}}{L_{eq}}i_{dc}\\[2ex]\dfrac{\mathrm{d}U_{dc}}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{1}{C_{eq}}i_{dc}\end{cases}\tag{1}$$

式中：$L_{eq}=L_m+L_{dc}$；$R_{eq}=R_m+R_{dc}+R_f$；$C_{eq}=3\times 2C_0/N$。如果 t=0 时发生故障，假设故障前直流母线电压 U_{dc} 等于初始值 U_0，直流电流 i_{dc}=I_0，则可以得到：

$$U_{dc}(t)=U_0\mathrm{e}^{\frac{-t}{\tau}}\left(\cos(\omega t)+\frac{1}{\omega\tau}\sin(\omega t)\right)-\frac{I_0}{\omega C_{eq}}\mathrm{e}^{-t}\sin(\omega t)\tag{2}$$

$$i_{dc}(t)=I_0\mathrm{e}^{\frac{-t}{\tau}}\left(\cos(\omega t)-\frac{1}{\omega\tau}\sin(\omega t)\right)+\frac{U_0}{\omega\tau R_{eq}/2}\mathrm{e}^{-t}\sin(\omega t)\tag{3}$$

式中：ω、τ 分别为振荡角频率和衰减时间常数；I_0 为故障前直流电流，这都取决于电路原有参数和换流站运行状态，无法预测和定量分析。

但是可以假设在故障后几 ms 内电容放电阶段可视为电容电压几乎不变，则

$$i_{dc}(t)=\frac{U_0-\mathrm{e}^{\frac{-2t}{\tau}}\left(U_0-I_0R_{eq}\right)}{R_{eq}}\tag{4}$$

对式(4)求导并做一阶泰勒展开得到

$$i_{dc}(t)\approx I_0+\frac{2t}{\tau}\left(\frac{U_0}{R_{eq}}\right)=I_0+\frac{U_0t}{L_{eq}}\tag{5}$$

直流电流 i_{dc} 的大小取决于故障时 U_0 和等效电感 L_{eq}，其中 U_0 可以在 MMC 在故障后的暂态过程中，由子模块投入数量改变，定义的关于 i_{dc} 的函数 K 可以降低阀控制器给出的桥臂单元投入的子模块数，通过改变 U_0 使得 MMC 主动抑制短路电流。

2 限流控制方案与分析

2.1 限流控制方案

半桥型 MMC 的控制策略中控制回路采用闭环控制，外环控制器将 MMC 有功功率或交流和直流电压维持在设定值，外环输出直流电流参考值 I_{dcref} 为内环控制提供输入，经比例–积分控制(PI)环节输出直流电压参考值 U_{dcn}，结合环流抑制控制器(circulating current suppressing controller, CCSC)输出差模电压 U_{diff} 参与子模块投切控制，调制阶段采用最近电平逼近调制(nearest level modulation, NLM)。在常规控制产生上下桥臂投入子模块个数 N_{ref} 之后，结合本文设计基于子模块两级控制的限流控制器输出 K 确定故障后减投子模块比例，之后电容均压控制环平衡电容电压，经调制后触发信号决定各子模块投入或切除，实现降低直流侧电压限制故障电流。

限流控制器设计如图 3 所示，在系统稳态运行时，直流电流变化率 $\mathrm{d}i_{dc}/\mathrm{d}t$ 几乎不变，线路电压和直流出口电压 U_{dc} 也在额定值运行，同时限流电感电压 U_L 不会发生变化。定义的关于 i_{dc} 的函数 K 为一分段函数，其中 $i_{max,set}$ 为设定的保证 MMC 不闭锁运行最大短路电流，α、β、λ为预设比例系数。t_0 为直流侧故障发生时刻，t_C 为故障检测 2 输出信号时间，一般设置 1~2 ms 延迟，也是限流控制器模式选择切换时间，t_B 为直流断路器 DCCB 动作时间，计算式为

$$K=\begin{cases}\left(1-\alpha i_{dc}\right)\lambda\dfrac{\mathrm{d}i_{dc}}{\mathrm{d}t},t_0<t<t_C\\[2ex]1-\beta\left(i_{max,set}-i_{dc}\right),t_C<t<t_B\end{cases}\tag{6}$$

当直流侧发生短路故障，直流电流 i_{dc} 迅速上升，故障线路电压立即下降，在故障检测 $t_0<t<t_C$ 阶段，当电流变化超过设定阈值 $\mathrm{d}i_{th}/\mathrm{d}t$，故障检测 1 输出电流变化率 $\mathrm{d}i_{dc}/\mathrm{d}t$，其中 λ(0<λ<1)根据不同换流站交流侧出口要求和不同运行条件设定。

限流控制器输出由稳态值 K=1 切换至 $K=\left(1-\alpha i_{dc}\right)\lambda\mathrm{d}i_{dc}/\mathrm{d}t$，降低子模块投入比例限制短路电流。在直流出口故障后 i_{dc} 基本呈线性上升，对在采样周期内的 i_{dc} 数据集合求导，得到的电流变化率 $\mathrm{d}i_{dc}/\mathrm{d}t$ 可以满足限流控制器要求实现初步限流。

随着短路电流持续增大，在 $t_C<t<t_B$ 阶段，整个放电回路中电感电容必然产生较大振荡，特别是电缆线路情况下，如果故障位置发生在线路中段，则 i_{dc} 振荡更加明显，$\mathrm{d}i_{dc}/\mathrm{d}t$ 作为限流器输入的参考变量很难为减投比例系数 K 稳定支持，进而严重影响 STAC 限流效果。

因此增加第 2 段限流，限流电感电压会在系统发生直流故障后短时间内上升，系统正常运行时无变化，当检测线路限流电感电压变化率 $\mathrm{d}U_L/\mathrm{d}t$ 超过设定阈值，同时接受到线路保护动作信号，STAC 第 2 阶段控制激活，切换限流控制器输出为

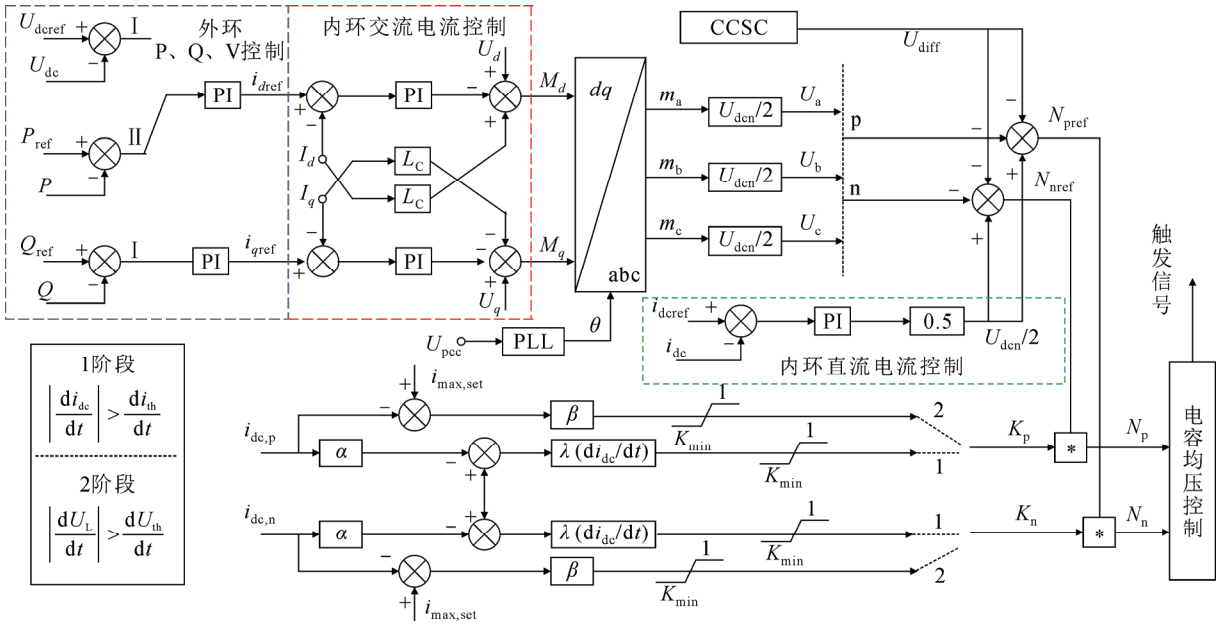


图 3 基于子模块两级主动控制的限流控制原理图

Fig.3 Diagram of current limiting control based on submodule two-stage active control

$K=1-\beta\left(i_{\mathrm{max,set}}-i_{\mathrm{dc}}\right)$，子模块减投比例进一步下降限制故障电流。

其中限流电感电压变化采用单端量进行故障检测，不会受通信延迟影响，检测阈值越小检测速度越快，越大则会提高检测准确度，由于故障后限流电感电压会立刻升高，第 2 阶段限流可能会过早投用，为兼顾检测速度和抗干扰能力[22-23]，限流电感电压变化率检测阈值取 0.25。基于文献[20]主动限流参数选取原则，为保证 IGBT 器件安全及保证清除故障阶段 MMC 不发生闭锁，$i_{\mathrm{max,set}}$ 选取为 2 倍的额定电流 I_{N}，即

$$i_{\mathrm{max,set}}=2I_{\mathrm{N}} \tag{7}$$

STAC 限流控制器投入同步于 DCCB 的动作时序，直流电网线路保护检测到直流故障，向故障线路两端 DCCB 发送跳闸命令，STAC 在 DCCB 成功开断之前持续输出适应性的减投比例抑制故障电流，可以有效减少 DCCB 最大开断电流。当 DCCB 断开故障线路之后，线路保护信号及 1 阶段电流变化率检测值不再满足 STAC 启动判据，MMC 立即切换至正常控制模式，STAC 退出并恢复正常子模块控制投切，整个系统功率和电压逐渐恢复至正常运行状态。

故障后 STAC 启动，降低直流电压限制短路电流的同时，交流侧出口电压也会跌落，虽然已经预设最大短路电流来保证 MMC 不闭锁，但是交流大电网与换流器之间电压差的增大，必然导致交流电网至换流器间功率传输大幅增加，因此为兼顾桥臂安全和增加功率不超过允许最大瞬变功率，保证限流同时 MMC 可以不间断运行，需要设置 K 最低输出限制。

2.2 STAC 控制参数分析

根据式(6)可以看出直流故障电流的变化与 STAC 的控制参数有关，λ对应换流站不同运行条件设计，α与其配合决定故障后检测时间段内限流效果，而β是在故障检测后进一步抑制故障电流的关键参数。为了分析控制参数与限流灵敏度和限流程度关系，在一单端系统中进行分析验证，换流站参数与表 1 中 MMC2 一致，设置在 t=1 s 时发生永久性短路故障，故障后 MMC 不闭锁。表 1 中，P、Q 分别为有功、无功功率。

图 4 是在只有 1 阶段投用情况下，故障电流与控制器参数的关系。在无限流措施下故障电流会无限制的快速上升，而 STAC 可以有效地抑制故障电流。λ参数的设计是为了适配不同换流站，减小λ取值可以更大程度抑制故障电流上升，同样增大α也有良好的抑制效果，但在整个限流过程中λ的灵敏度更高，影响程度更大。

图 5 是在控制器 1 阶段相同参数情况下(λ=0.001 5，α=0.006)，故障检测后的限流效果对比。结果表明，1~1.002 s 限流过程中，故障电流曲线重

表 1　直流系统主要参数

Table 1　Main parameters of DC power grid

参数名称	不同换流站的参数取值			
	MMC1	MMC2	MMC3	MMC4
控制策略	P=–1000 MW，Q=0	P=500 MW，Q=0	P=500 MW，Q=0	U_{dc}=550 kV，Q=0
联结变变比	230/290	230/290	230/290	230/290
子模块数	200	200	200	200
桥臂电感/mH	50	30	30	30
子模块电容/mF	15	15	10	15
STAC 参数	λ=0.0015，α=0.06，β=0.5	λ=0.0015，α=0.06，β=0.5	λ=0.0015，α=0.06，β=0.5	λ=0.003，α=0.03，β=0.2

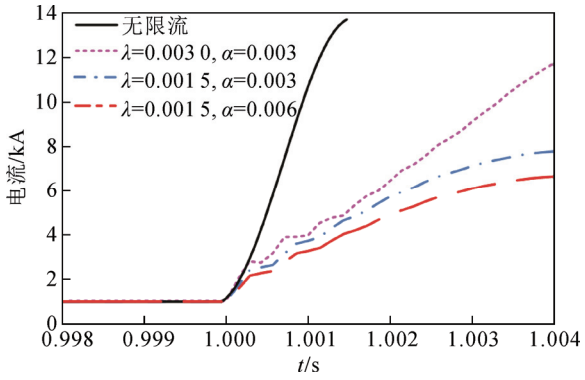


图 4　阶段 1 限流后的故障电流

Fig.4　Fault current after phase 1 limitation

合度较高，即改变 β 取值不会影响 1 阶段限流能力，验证了 2 阶段故障检测阈值取值合理性。同时 β 越小限流效果更明显，可以更大程度地抑制故障电流。

2.3　STAC 可靠性验证

限流控制器设计的根本目的是在限制短路电流的同时不影响系统正常运行、避免误动作对系统产生冲击和避免对控制系统产生重大修改，本节将在 2.2 节的单端系统中继续分析换流站基本控制环节是否对限流过程有影响，表 2 为 4 组对比实验的具体控制参数。

在上述系统中做了 4 组仿真分析对比，其中 A 是基本组，A 组分别与 B 组、C 组、D 组对比分析 CCSC 参数变化、内环交流控制参数变化、STAC 有效性，同样设置在 t=1 s 时发生永久性双极短路并且故障期间换流器不闭锁。

仿真对比结果如图 6 所示。其中 1、2 分别是 STAC 的不同限流阶段。由图 6(a)可以看出，改变 CCSC 的控制参数会对其输出参考电压产生影响，进而影响参考调制信号，本质上是改变了 MMC 内相电流使故障电流发生变化，但这并不会降低

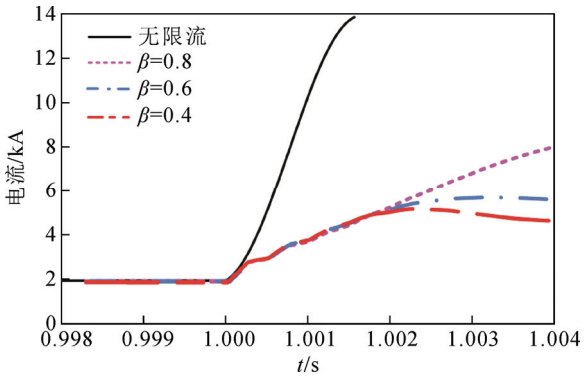


图 5　阶段 2 限流后的故障电流

Fig.5　Fault current after phase 2 limitation

表 2　控制参数

Table 2　Parameters of controller

分组	内环交流电流控制器的 PI 参数	CCSC 的 PI 参数	STAC
A	K_p=6.24, T_i=0.04	K_p=2.44, T_i=0.68	λ=0.0015, α=0.06, β=0.5
B	K_p=6.24, T_i=0.04	K_p=3.90, T_i=0.26	λ=0.0015, α=0.06, β=0.5
C	K_p=9.36, T_i=0.02	K_p=2.44, T_i=0.68	λ=0.0015, α=0.06, β=0.5
D	K_p=9.36, T_i=0.04	K_p=2.44, T_i=0.68	不启用

STAC 的限流效果，同时 STAC 的控制结构也不会对环流的抑制有影响。

对图 6(b)中 A、C 对比组的电流曲线进行分析，改变内环交流电流控制环节控制参数 STAC 的限流效果，即在不同控制要求下的换流站设置 STAC 不影响系统正常运行。实际上与电容放电时间相比，输出电流控制回路的响应较慢，而故障电流快速上升激活了 STAC 进入限流模式。

由图 6(c)可以看出，STAC 的限流效果明显，在故障电流初始阶段有效抑制电流上升速率，同时在第 2 阶段进一步抑制短路电流，直至断路器切断故障电流。值得注意的是，D 组中内环控制参数与 C 组一致，仍然不会影响 STAC 的限流作用，进一步验证了本文所设计限流控制不会影响换流器的基本控制结构，同时适应于不同控制方式的半桥型 MMC 换流站。实际上故障电流限制也受调制频率影响，随着调制频率增加，阀控制器可以对调制参考信号更快响应。

综上，本文提出的限流控制方法无需对 MMC 原有的控制器参数进行改动，具有良好的适应性。STAC 可以实现可靠投用，同时 2 阶段输出实现稳定限流，进一步验证了限流控制器 1 阶段检测可以适应各种非故障运行条件，保证子模块数量只会在

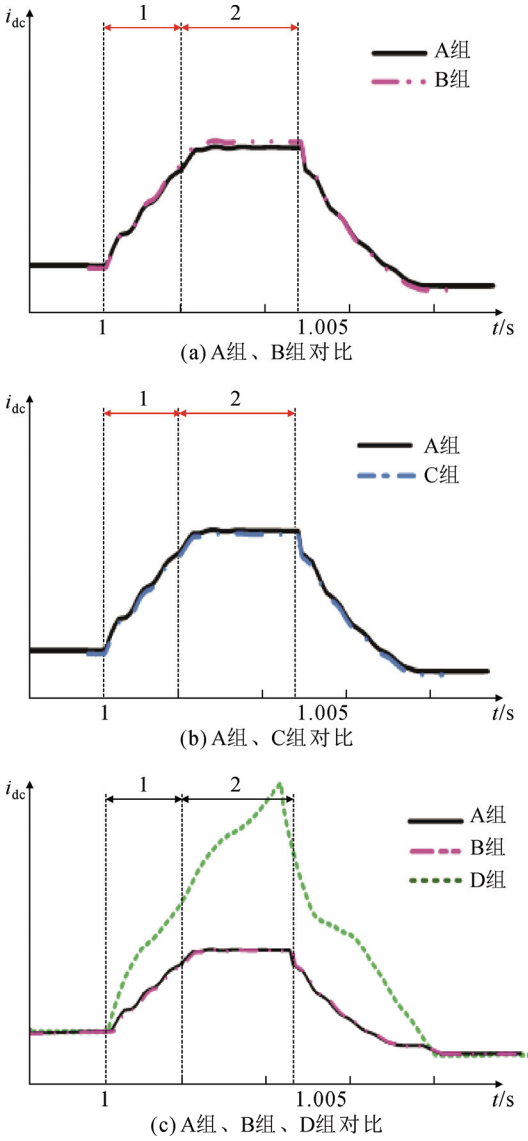


图 6 单端系统下不同控制参数限流对比

Fig.6 Comparison of current limiting with different control parameters in single ended system

故障后严格根据 STAC 输出值实现增减，避免引起暂态过电压及均压控制问题。

3 仿真验证

为了进一步验证所提 STAC 在直流电网中的限流效果，在仿真软件中搭建了如图 7 所示的 550 kV 四端直流电网。

各换流站均为半桥型 MMC 拓扑，故障期间都不闭锁，各换流站均配置本文所设计的限流控制器，架空线路采用频域向量模型，系统主要参数如表 1 所示。

3.1 限流效果分析

首先对比无限流措施(方案 1)、增加限流电抗器

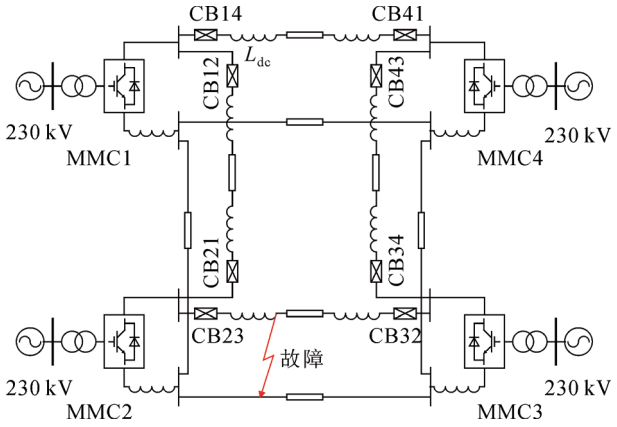


图 7 四端直流电网

Fig.7 Four-terminal DC grid

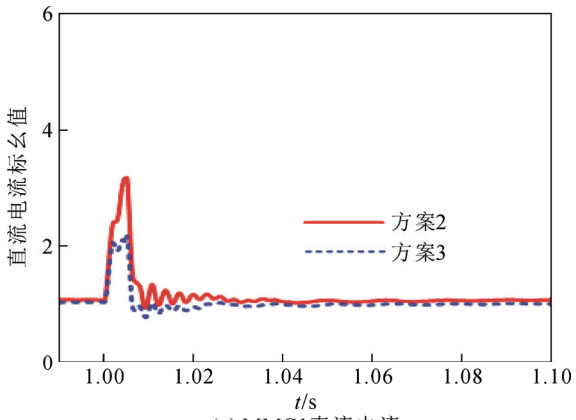
电感(方案 2)以及本文所提出的 STAC(方案 3)3 种方案，分析故障电流特性，验证限流效果，以上 3 种情况均设置 t=1 s 时在架空线 Line23 近 MMC2 端口处发生双极短路故障，故障检测识别时间为 1 ms，在配置相同的 DCCB 条件下，DCCB 在故障 5 ms 后开断，清除故障电流，仿真结果如图 8 所示，标幺值的基准值取直流电网额定电压、额定功率。

在方案 1、2 中，从故障发生到 DCCB 清除故障电流过程中，只有限流电抗器和各桥臂电感限制故障电流，而在方案 3 中，在 t_0~t_C、t_C~t_B 阶段 STAC 与限流电抗器和桥臂电感共同限制故障电流，其中对比方案 2、3 可以明显看出，STAC 在有效抑制故障故障电流的同时可以避免由于过大的限流电抗器引起的系统振荡和稳定性问题，也可建设性地减少换流站投资以及占地面积。

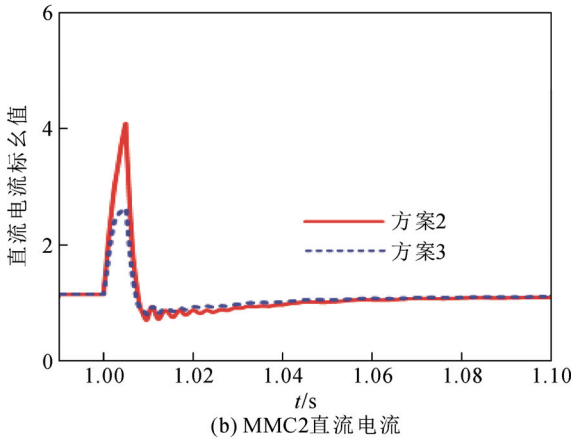
就故障清除时间而言，方案 1、3 几乎在相同时间 t_1 和 t_2 清除故障电流，而通过增大限流电感限流的方案 2 使得 DCCB 清除故障时间 t_3 较长，因为清除故障期间能量的耗散主要由故障清除时间和 DCCB 避雷器电流决定，所以设计的限流措施可以降低故障电流和加快故障清除速度，故障后能量的耗散也会相应减少，有利于延长避雷器使用寿命。

对于 DCCB 开断电流，方案 1 中断路器成功开断电流已然达到 14.7 kA，对应断路器设计和开断容量有更高要求，方案 3 中 DCCB 开断时故障电流较 1 降低了 49.7%，较增大限流电抗器的方案 2 降低了 36.4%。

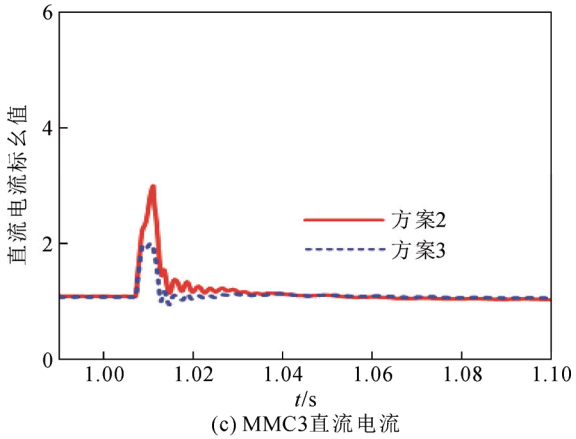
同时注意到与 2.3 节仿真结果对比，在四端网络中直流电流会有一定变化，但非故障端换流站的馈流一般小于 20%，不会影响限流效果，故障电流



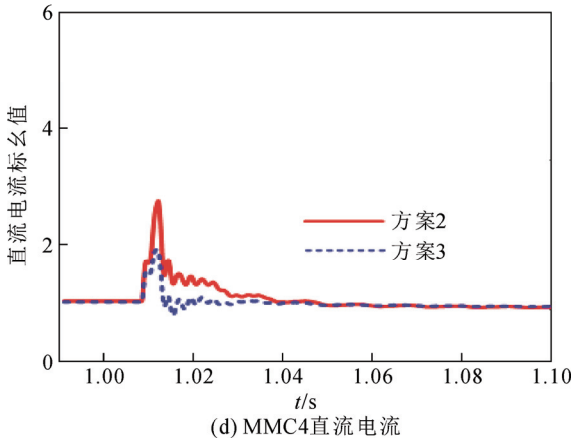
(a) MMC1直流电流



(b) MMC2直流电流



(c) MMC3直流电流



(d) MMC4直流电流

图 8　MMC 直流母线电流对比

Fig.8　Comparison of MMC DC bus currents

仍被限制。因此设计的方案 3 限流方法可以适应于经济性和可靠性兼备的 DCCB 清除故障方案。

图 9 为流经断路器 CB23 电流对比，其中 t_1、t_2、t_3 分别为方案 1、2、3 清除故障电流时间。在故障检测阶段，从方案 1、2 中可以看出，方案 1 中较小的限流电抗器使得直流故障电流的上升率明显高于方案 2，理论上较高的电流上升率有利于提高检测灵敏，同时提高故障检测速度有利于 STAC 的控制灵活性，避免限流控制器输出接近下限阈值限流。2.3 节分析验证了 STAC 能适应换流站不同控制，反之也不会影响其故障检测。

在故障检测阶段，方案 3 的 1 阶段限流准时投实现了良好的限流效果，这是因为对应于子模块投切的 μs 级，限流控制器也在故障瞬间启动减投子模块一定比例 K。实际上第 1 阶段限流是配合故障检测，适应不同故障检测时间；如果故障检测判据与限流控制器第 2 阶段启动判据同时满足，则在第 2 阶段更大程度地限制故障电流。

故障后 STAC 在故障后瞬间降低直流侧电压限制故障电流，会导致交流侧出口电压降低，进而交流电流和桥臂电流增加甚至过流，同时根据系统安全运行的要求和保证 DCCB 可以中断故障电流，整个故障检测、清除过程桥臂电流和交流电流不应超过最大允许电流，上文基于最大允许瞬变功率的分析很好地限制 K 下限，保证了限流效果。可实际上，由直流故障引起的桥臂电流瞬变等问题还受故障电路初始条件、直流故障线路参数和恢复期间电容充电等因素影响，瞬变电流最大值也难以精确求解，所以本文预设的最大短路电流等参数仍具一定保守性，对于交流侧电压要求不高的场景仍可以更大限度地限制故障电流。

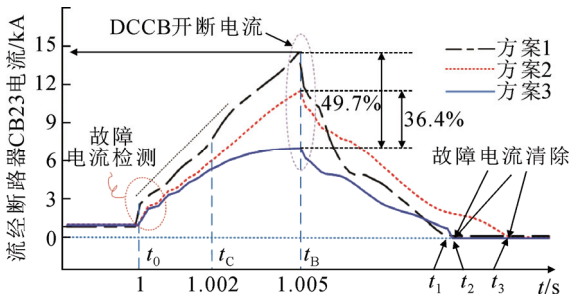


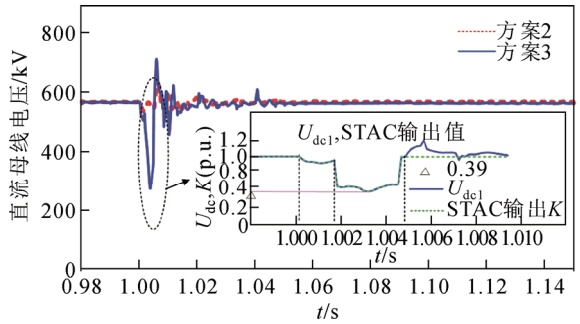
图 9　流经断路器 CB23 电流对比

Fig.9　Comparison of current flowing through circuit breaker CB23

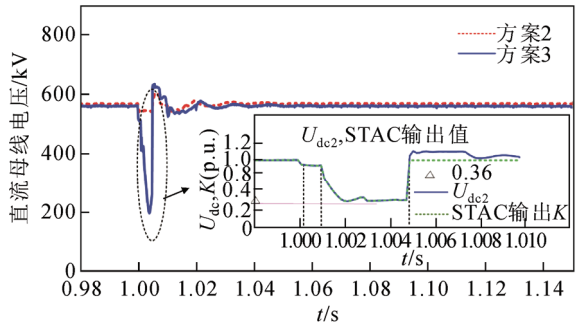
3.2 直流电网中 STAC 限流性能分析

本节给出方案 3 与常规控制下方案 2 的性能对比结果，具体分析限流控制在系统稳态运行、故障清除和故障后不同阶段的适应性、准确性和速动性。

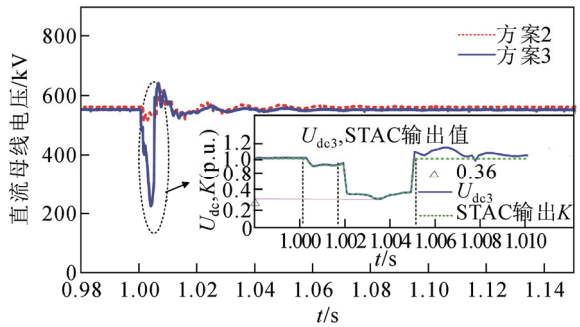
图 10 是四端直流电网各换流站的直流电压故障前后仿真结果，可以看到较方案 2，方案 3 中各换流站 MMC 在故障后启动 STAC 使直流电压明显降低，并在 1.005 s 断路器开断后在一定范围内延长了电压恢复的时间。其中 MMC2、MMC3 的限流控制器参数相同，电压变化几乎一致，有效地抑制发生在 Line23 端口处的故障电流，电压最大降至 200 kV，是额定运行时的 36%，在故障后 100 ms 恢复电压水平。



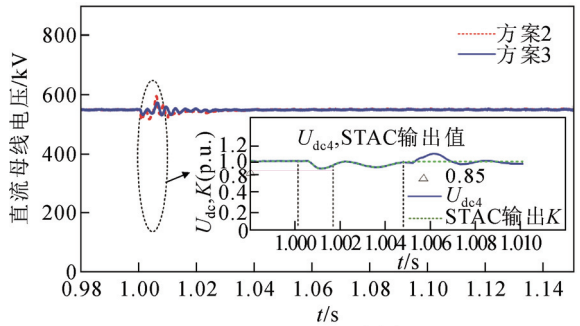
(a) MMC1电压



(b) MMC2电压



(c) MMC3电压



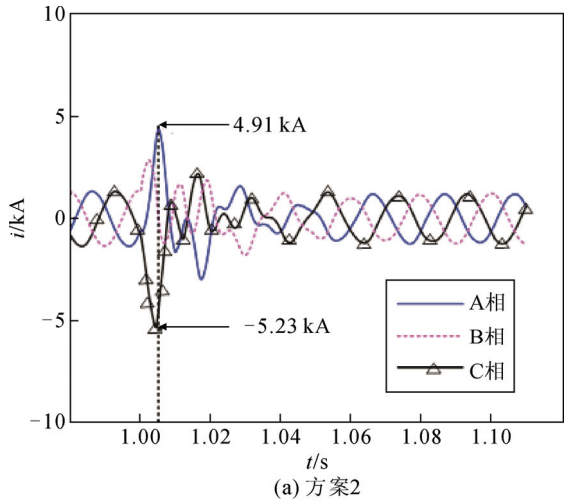
(d) MMC4电压

图 10 故障前后 MMC 直流母线电压对比

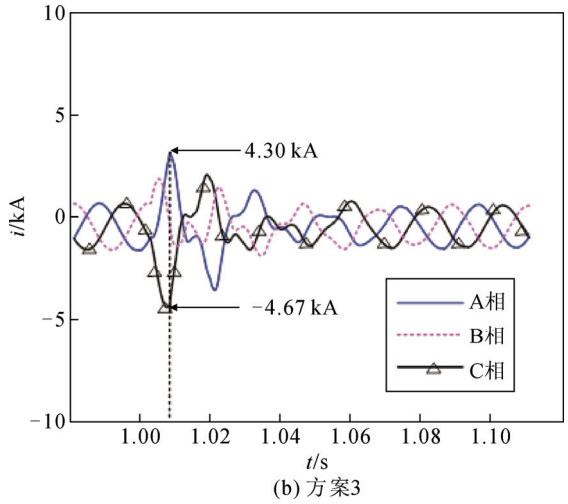
Fig.10 Comparison of MMC DC bus voltage before and after fault

可以观察到因 MMC1、MMC4 的限流控制器参数不同电压变化也呈现不同特点，特别是 MMC4 作为定直流电压控制换流站，当β=0.2 时，在整个故障清除过程中仍基本维持电压水平，并在 50 ms 后完全恢复至稳态电压，证明限流控制器参数选取合理。其中 MMC2 不同于其他换流站，在故障后 1 ms 就进入 2 阶段限流，这是因为故障发生在 Line23 端口处，其出口处限流电抗器的电压变化最大，迅速触发 2 阶段限流启动判据，证明启动判据设置合理。

图 11 给出故障后 MMC2 交流侧电流变化，A 相和 C 相电流峰值分别由 4.91、–5.23 kA 降为 4.3、4.67 kA，保证良好的交流出口特性，维持故障后功率传输。



(a) 方案2



(b) 方案3

图 11 MMC2 交流侧电流

Fig.11 AC side current of MMC2

图 12 是 MMC2 各相桥臂电流对比。相比于无限流措施方案 2 桥臂电流峰值(3.93 kA)，STAC 限流桥臂电流峰值(3.02 kA)下降 23.15%。这是因为方案 2 中桥臂电流的增加主要是由快速上升的故障电流引起的，而经过限流后的桥臂电流减小了在整个故障期间对各子模块的电流应力。本文设置各换流站 MMC 不闭锁，如果不施加限流控制抑制故障电流，当桥臂电流过大导致 MMC 闭锁时，交流电流馈入，故障电流会持续增大，导致故障恶化，功率传输中断。因此，方案 3 的限流控制措施能够保护桥臂安全，保证直流侧故障后 MMC 的功率传输。

图 13 为故障前后各 MMC 功率动态曲线，系统在 1.2 s 左右重新恢复稳定运行，实现在整个故障期间 MMC 安全穿越运行。由于故障后 200 ms 左右功率传输恢复稳定，同时配合柔性直流换流站本身优越的潮流响应速度，为直流线路过载后备保护争取时间，电网可以更可靠地通过潮流调控消除可能出现的直流线路过载问题。

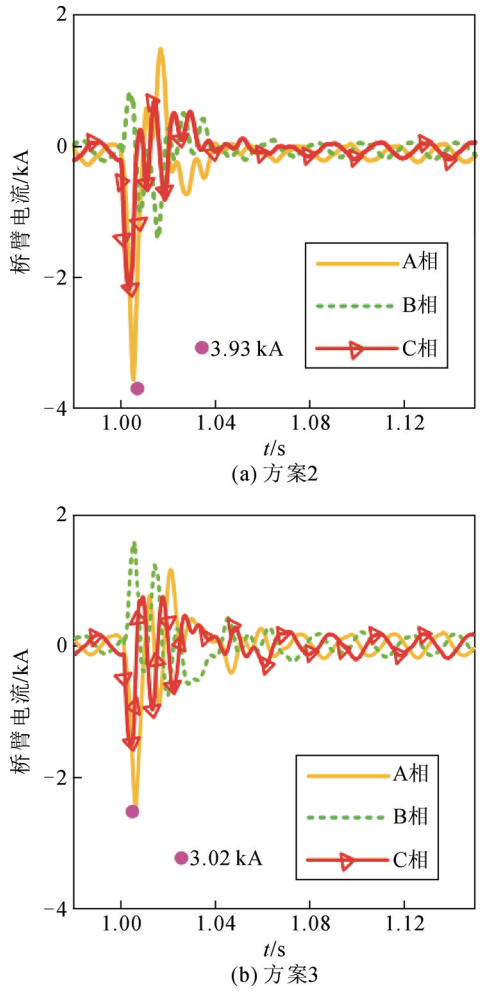


图 12　故障前后桥臂电流变化

Fig.12　Change of arm current before and after fault

图 14 是 MMC2 中 A 相桥臂子模块电容平均电压对比图，其中 u_{pa}、u_{na} 分别为 A 相桥臂上下桥臂子模块电压。在 t=1 s 故障发生后，方案 2 中所有子模块电容电压明显下降至 510 kV 左右，电容持续放电导致故障电流持续上升；而在方案 3 中，限流控制器在故障后启动，有效减少了子模块投入比例，电容电压会显著上升，基本保持在 520~590 kV 之间，这就意味着在故障后电容释放能量更少，有效减小故障电流，同时提高子模块平均电压还可以显著提高故障清除后子模块电容充电时间，可以看出故障后 100 ms 电容电压恢复到稳态运行水平，同步于直流电网系统电压恢复。

4　结论

1）本文提出的基于子模块两级主动控制的 MMC 直流短路限流方法，通过两段故障检测判据和预设最大短路电流启动限流控制，分段限流能够适应不同运行条件换流站并且具备良好可靠性，保证其只在故障后投用。

2）在四端直流电网中验证限流效果，与无限流控制措施下相比有效降低 DCCB 开断电流

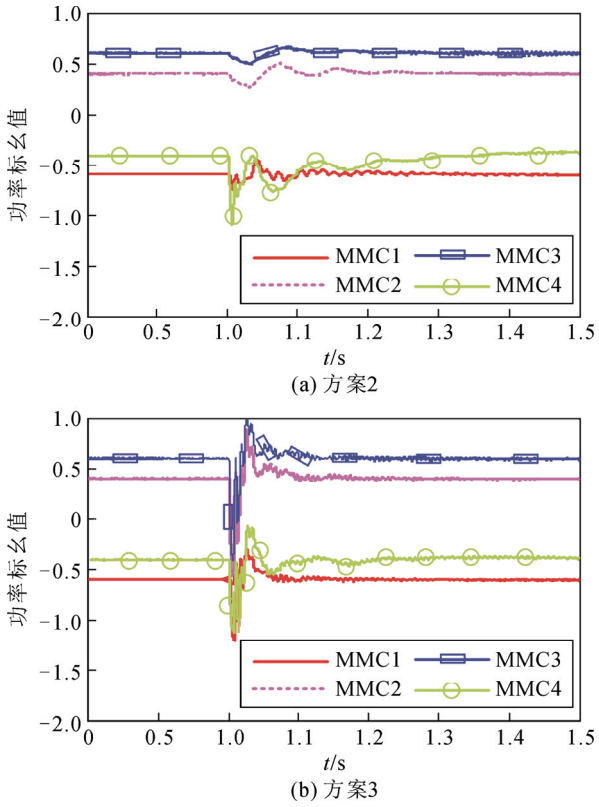
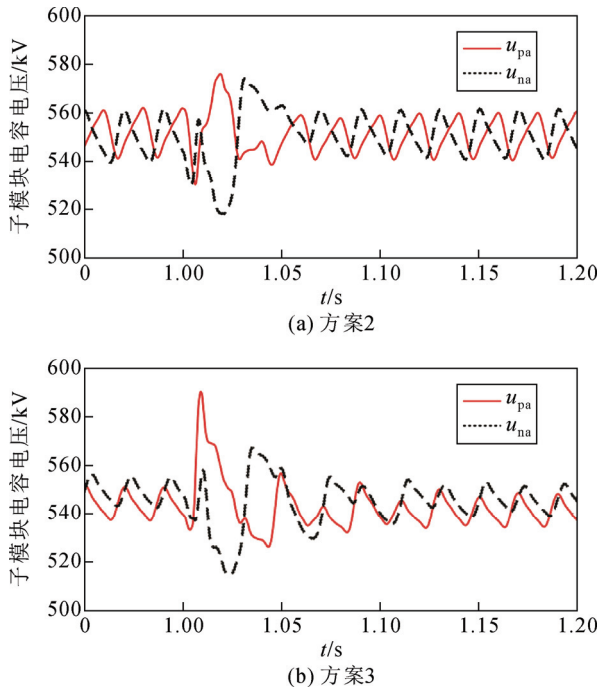


图 13　故障前后各 MMC 功率动态曲线

Fig.13　Power dynamic curve of each MMC before and after fault



(a) 方案2

(b) 方案3

图 14 故障前后子模块电容平均电压(A 相)

Fig.14 Average voltage of sub-module capacitor(phase A)

49.7%，故障后桥臂电流峰值降低 23.15%，故障后 100 ms 恢复直流电压。

3）与附加限流装置相比，降低了成本、减少稳态损耗及维护需求，仅通过故障期间减少子模块投入比例，在不影响直流电网正常运行的同时保证故障清除阶段的功率传输。

4）STAC 适应性的控制参数与直流电网映射关系可以拓展，具有一定工程应用价值，可综合考虑涉及系统元件参数和不同限流措施的协同配合。

参考文献 References

[1] 徐 政，刘高任，张哲任. 柔性直流输电网的故障保护原理研究[J]. 高电压技术，2017，43(1)：1-8.
XU Zheng, LIU Gaoren, ZHANG Zheren. Research on fault protection principle of DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 1-8.

[2] 杨赛昭，向 往，文劲宇. 架空柔性直流电网线路故障保护综述[J]. 中国电机工程学报，2019，39(22)：6600-6616.
YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu. Review of DC fault protection methods for the MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6600-6616.

[3] 贺之渊，陆晶晶，刘天琪，等. 柔性直流电网故障电流抑制关键技术与展望[J]. 电力系统自动化，2021，45(2)：173-183.
HE Zhiyuan, LU Jingjing, LIU Tianqi, et al. Key technologies and prospect of fault current suppression in flexible DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 173-183.

[4] PEREZ M A, CEBALLOS S, KONSTANTINOU G, et al. Modular multilevel converters: recent achievements and challenges[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2021, 2: 224-239.

[5] 潘 垣，陈立学，袁 召，等. 针对直流电网故障的限流与限能技术研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(6)：2006-2015.
PAN Yuan, CHEN Lixue, YUAN Zhao, et al. Research on current limiting and energy limiting technology for DC power grid fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 2006-2015.

[6] 杜晓磊，郭庆雷，吴延坤，等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(9)：164-173.
DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei demonstration project of MMC-HVDC grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 164-173.

[7] 李国庆，宋祯子，王国友. 具有直流故障阻断能力的 MMC 不对称型全桥子模块拓扑[J]. 高电压技术，2019，45(1)：12-20.
LI Guoqing, SONG Zhenzi, WANG Guoyou. Asymmetric full bridge sub-module topology of MMC with DC fault blocking capability[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 12-20.

[8] 王渝红，傅云涛，曾 琦，等. 柔性直流电网故障保护关键技术研究综述[J]. 高电压技术，2019，45(8)：2362-2374.
WANG Yuhong, FU Yuntao, ZENG Qi, et al. Review on key techniques for fault protection of flexible DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2362-2374.

[9] 严 胜，罗 湘，贺之渊. 直流电网核心装备及关键技术展望[J]. 电力系统自动化，2019，43(3)：205-215.
YAN Sheng, LUO Xiang, HE Zhiyuan. Prospect of core equipment and key technology for DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 205-215.

[10] 杨悦民，许超群，刘宇畅，等. 基于 IGCT 复合模块直串接集中电阻的 400 kV 直流耗能装置原理与研制[J]. 高电压技术，2022，48(4)：1510-1517.
YANG Yuemin, XU Chaoqun, LIU Yuchang, et al. Principle and development of 400 kV DC energy dissipation device based on IGCT composite module directly connected to concentrated resistance[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1510-1517.

[11] 王渝红，王 媛，曾 琦，等. 阻容式直流断路器及其在柔直系统中的应用[J]. 高电压技术，2019，45(1)：1-11.
WANG Yuhong, WANG Yuan, ZENG Qi, et al. Resistor and capacitor based DC circuit breaker and its application in flexible DC system[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 1-11.

[12] MARTINEZ-VELASCO J A, MAGNUSSON J. Parametric analysis of the hybrid HVDC circuit breaker[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 84: 284-295.

[13] 江守其，李国庆，辛业春，等. 大规模风电接入的柔性直流电网故障电流协同抑制方法[J]. 电力系统自动化，2020，44(23)：125-134.
JIANG Shouqi, LI Guoqing, XIN Yechun, et al. Coordinated suppression method for fault current of flexible DC power grid integrated with large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 125-134.

[14] 郭铭群，乐 波，田园园，等. 柔性直流电网换流器子模块续流过电压机理分析及抑制策略[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3264-3272.
GUO Mingqun, LE Bo, TIAN Yuanyuan, et al. Mechanism analysis and suppression method of continuous overvoltage of converter submodules in MMC-based DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3264-3272.

[15] 官二勇，董新洲，冯 腾. 一种固态直流限流器拓扑结构[J]. 中国电机工程学报，2017，37(4)：978-985.
GUAN Eryong, DONG Xinzhou, FENG Teng. A solid DC current limiter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 978-985.

[16] 王振浩，张力斌，成 龙，等. 一种具备限流功能的混合式高压直

流断路器[J]. 电网技术，2021，45(5)：2042-2049.
WANG Zhenhao, ZHANG Libin, CHENG Long, et al. Hybrid high voltage DC circuit breaker with current limiting function[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 2042-2049.

[17] PIRHADI A, BINA M T. Design of DC-side fault current limiter for MMC-HVDC systems: safety of the MMC along with frequency stability[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(13): 2419-2429.

[18] 樊　强，赵西贝，赵成勇，等. 模块化多电平换流器自适应故障限流控制策略[J]. 电力系统自动化，2021，45(17)：126-133.
FAN Qiang, ZHAO Xibei, ZHAO Chengyong, et al. Adaptive fault current limiting control strategy for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 126-133.

[19] LI R, XU L, HOLLIDAY D, et al. Continuous operation of radial multiterminal HVDC systems under DC fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 351-361.

[20] 李国庆，杨　勇，辛业春，等. 基于桥臂电压控制的 MMC 直流短路主动限流方法[J]. 电网技术，2021，45(1)：144-152.
LI Guoqing, YANG Yong, XIN Yechun, et al. Active current-limiting method of MMC to handle DC short-circuit based on bridge arm voltage control[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 144-152.

[21] 倪斌业，向　往，周　猛，等. 柔性直流电网紧急限流控制策略研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(11)：3527-3536.
NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on the emergency current-limiting control in VSC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3527-3536.

[22] 戴志辉，刘雪燕，刘自强，等. 基于限流电抗电压积分值的环状柔性直流配电网保护方案[J]. 电力自动化设备，2020，40(12)：104-112.
DAI Zhihui, LIU Xueyan, LIU Ziqiang, et al. Protection scheme for ring flexible DC distribution grids based on integration of current-limiting reactance voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 104-112.

[23] 祁晓敏，裴　玮，李鲁阳，等. 基于限流电感电压的多端交直流混合配电网直流故障检测方案[J]. 电网技术，2019，43(2)：537-545.
QI Xiaomin, PEI Wei, LI Luyang, et al. DC Fault detection scheme for multi-terminal hybrid AC/DC distribution network based on current-limiting inductor voltage[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 537-545.



王振浩
1964—，男，教授
主要从事输变电设备运行状态在线监测与诊断以及柔性直流输电方面的研究工作
E-mail: zhenhaowang@126.com

WANG Zhenhao
Professor



赵鑫雨
1996—，男，硕士生
主要从事柔性直流输电方面的研究工作
E-mail: 419961016@qq.com

ZHAO Xinyu



王朝斌(通信作者)
1990—，男，博士生
主要从事电能质量控制、柔性直流输电方面的研究工作
E-mail: 15948699059@163.com

WANG Chaobin
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期　2021-09-03　修回日期　2022-05-04　　编辑　程子丰