

基于混合型 MMC 的柔性直流电网故障 穿越协同控制策略

李国庆, 王晓雪, 江守其, 辛业春, 王拓

(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(东北电力大学), 吉林省 吉林市 132012)

Coordinated Control Strategy of Fault Ride-through for DC Grid Based on Hybrid MMC

LI Guoqing, WANG Xiaoxue, JIANG Shouqi, XIN Yechun, WANG Tuo

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology

(Northeast Electric Power University), Ministry of Education, Jilin 132012, Jinlin Province, China)

ABSTRACT: A DC grid based on a hybrid modular multilevel converter (MMC) effectively achieves large-scale renewable energy integration, multi-energy complementarity, and friendly grid connection. Aiming at the problem that the traditional DC fault ride-through (FRT) scheme will cause the interruption of power transmission in the whole network, a novel DC FRT coordinated control strategy is proposed in this paper, which can quickly interrupt the fault current and avoid the MMC exiting operation. Based on the analysis of fault current composition and key influencing factors, for fault line MMC (FLMMC), a negative voltage control strategy adaptive to the change of fault current is proposed, which can improve the current attenuation speed and ensure reliable fault isolation. For non-fault line MMC (NFLMMC), considering the overvoltage and overcurrent risks of FLMMC, the coordinated current-limiting control method and parameter selection principle of NFLMMC is proposed, where the current-limiting performance can be adaptive to the voltage change of DC bus, to realize the rapid recovery of DC power grid while restraining fault current. Finally, a four-terminal DC grid simulation model is built using the RTLAB OP5600 real-time digital simulation platform. The simulation results show that the coordinated control strategy proposed in this paper can quickly interrupt DC fault current, shorten DC grid recovery time, and improve system security and stability.

KEY WORDS: DC grid; hybrid MMC; DC fault; negative voltage control; active current-limiting control (ACLC)

摘要: 基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流电网是实现大规模可再生能源

发电汇集、输送和并网的有效手段。针对传统直流故障穿越(fault ride-through, FRT)方案会引起全网功率传输中断的问题,提出一种新型的直流 FRT 协调控制策略,其可快速阻断故障电流并维持非故障线路换流站不退出运行。在分析故障电流组成及关键影响因素的基础上,针对故障线路 MMC (fault line MMC, FLMMC),提出了自适应于故障线电流变化的负压控制策略,该策略可以提升电流衰减速度,保证故障可靠隔离。针对非故障线路 MMC(non-fault line MMC, NFLMMC),考虑到 FLMMC 的过电流、过电压风险,提出了 NFLMMC 主动限流(active current-limiting control, ACLC)协同控制方法,设计了限流性能可自适应于直流母线电压变化的参数选取原则,在抑制故障电流的同时兼顾直流电网的快速恢复。最后,基于 RTLAB 实时数字仿真平台搭建了四端柔性直流电网仿真模型。仿真结果表明,所提协同控制策略能够快速阻断直流故障电流,缩短直流电网功率恢复时间,提高系统安全稳定性。

关键词: 直流电网; 混合型模块化多电平换流器; 直流故障; 负压控制; 主动限流控制

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0318

0 引言

基于模块化多电平换流器的柔性直流电网具有供电可靠性高、控制灵活、多电源供电和多落点受电等优势,具有良好的工程应用前景^[1-3]。与电缆相比架空线暴露在空气中,更容易发生短路故障^[4],且柔性直流电网阻尼小,直流故障电流可在几毫秒内上升至稳态值的 8~10 倍。相比点对点直流输电系统,直流电网多个换流站同时向故障点放电,故障影响范围进一步扩大。因此,直流故障电流阻断是柔性直流电网面临的严峻难题之一^[5-6]。

直流断路器(DC circuit breaker, DCCB)能够可靠隔离直流故障^[7],但为了避免换流器过流闭锁,DCCB 必须在几毫秒内切断数倍于额定电流的故障

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52207078); 国家自然科学基金联合基金项目(U2066208)。

Project Supported by the Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (52207078); the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U2066208).

电流并耗散大量能量, 研制成本高、能量损耗大成为限制 DCCB 发展的主要因素^[8-9]。通过换流器拓扑改造、自身控制处理故障电流是另一种有效方法^[10]。其中, 混合型模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)应用广泛, 由半桥子模块(half bridge sub-modules, HBSMs)和全桥子模块(full bridge sub-modules, FBSMs)混合级联而成^[11-13]。目前, 已投入运行的乌东德工程中的换流站均采用混合型 MMC。故障发生后, 闭锁换流站是最简单的控制方案, 但会使换流器出现不可控风险, 导致较长时间的功率传输中断^[14]。文献[15]提出了调整混合型 MMC 直流出口电压等于故障点残余电压, 终止电容向故障点放电的方案, 但该方法需要全网换流站退出运行, 进一步扩大故障影响范围。文献[16]提出在故障源侧清除短路电流的控制策略, 利用故障近端换流站主动吸收短路电流, 可以迅速限制短路电流至目标值, 但该情况下换流站内元器件存在过电流、过电压风险, 有必要进一步考虑非故障线路 MMC 参与故障限流, 以提高换流站安全运行裕度。

直流故障电流抑制主要可分为网侧限流和源侧限流两种方案, 前者是通过安装限流装置, 包括限流电抗器^[17]、故障限流器、带限流功能的潮流控制器等, 均需附加设备, 且存在制造困难、成本较高等问题。后者是设计合理的控制策略, 在不增加系统投资和损耗的情况下抑制故障电流。文献[18]提出引入虚拟阻抗抑制故障电流的方法, 可有效降低桥臂过流, 但不能限制故障后的子模块电容放电; 文献[19]提出一种将子模块电容旁路的控制方法, 能够有效衰减故障电流, 但直流电网的功率传输将被中断, 进一步扩大故障影响范围。文献[20]提出了一种改变子模块投入数目的紧急限流措施, 但控制过程中上下桥臂投入子模块数目相等, 这将导致交流出口电压跌落至零, 未考虑 MMC 对交流系统的电压支撑作用。上述方法均为直流故障穿越提供了技术支撑, 但未充分考虑直流电网场景下的故障电流组成特性, 尚未实现故障远端 MMC 与近端 MMC 的有效配合, 导致故障电流阻断过程较慢, 甚至造成非故障线路功率传输中断, 进一步扩大故障影响范围。因此, 有必要进一步挖掘混合型 MMC 的控制潜力, 合理设计不同换流站的协同控制策略, 对推动柔性直流电网发展具有重要意义。

本文提出了一种新型的柔性直流电网 FRT 协同控制策略。在分析故障电流组成及影响因素基础上, 分别设计了 FLMMC 和 NFLMMC 的主动限流控制策略。通过在 FLMMC 直流出口建立负压, 使

其主动吸收故障电流, 迅速将故障线电流限制至机械开关开断范围, 以实现直流故障的快速阻断。但此时能量均向 FLMMC 中汇集, 可能导致换流阀出现过电流、过电压风险, 为此设计了 NFLMMC 主动限流的协同抑制方法, 在维持功率传输的同时, 减少非故障线路换流站向 FLMMC 的放电, 提高换流站运行安全性, 进一步缩小故障影响范围。最后, 基于四端柔性直流电网仿真模型对所提方法的效果及其对功率恢复的影响进行了分析验证。

1 柔性直流电网结构及故障特性分析

采用混合型 MMC 的四端高压直流电网如图 1 所示。其中, 换流站 1、3、4 采用定有功/无功功率控制, 换流站 2 采用定直流电压/无功功率控制。直流电网采用对称双极带金属回线的主接线方式, 架空线始末端均配有高速机械开关(high speed switch, HSS), 以实现直流故障的快速隔离。

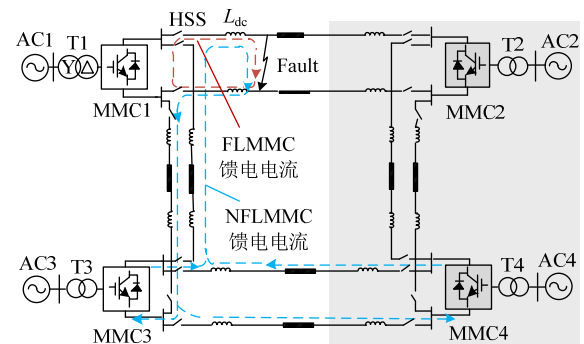


图 1 四端直流电网

Fig. 1 Four-terminal DC grid

所有换流站均采用混合型 MMC, 其拓扑结构如图 2 所示。其中下标 H 代表半桥阀段, 下标 F 代表全桥阀段, N_H 和 N_F 分别为某相桥臂中半桥子模块数目和全桥子模块数目, SM 为子模块; $u_j(j=a, b, c)$ 表示交流系统相电压, i_j 表示交流相电流, L_{arm} 表示桥臂电感, u_{jp} 和 u_{jn} 分别为某相的上、下桥臂电压, 其中 p 表示上桥臂, n 表示下桥臂, U_{dc} 为直流电压, I_{dc} 为直流线路电流; T_1 — T_4 表示子模块中的 IGBT 器件, D_1 — D_4 表示子模块中的二极管器件。

假设 t_0 时刻发生如图 1 所示故障, 故障电流 I_{dc_line} 由两部分组成, 分别为来自 FLMMC 的放电电流 I_1 和来自 NFLMMC 的相邻线路电流 I_{31} , 他们之间的关系如式(1)所示。

$$I_{dc_line} = I_1 + I_{31} \quad (1)$$

当直流侧发生短路故障, 各个换流站的故障特性基本一致, 双极短路和单极接地短路故障特性也基本相同, 仅以单极接地故障为例, 分析单个换流站的故障机理和短路电流影响因素。

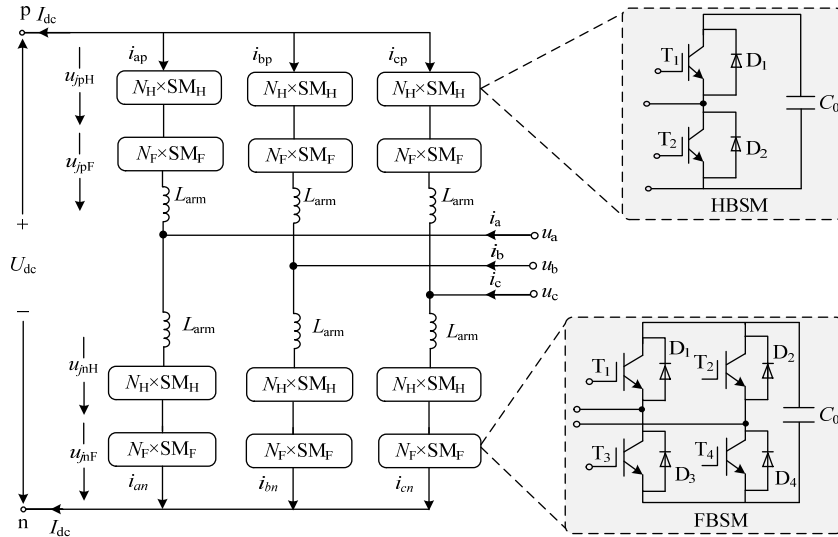


图 2 混合型 MMC 主拓扑电路
Fig. 2 Topology circuit of hybrid MMC

故障极 MMC 通过短路点、大地与系统的接地极直接形成回路，桥臂故障电流有两个来源：一是子模块电容放电形成的直流分量，二是交流系统注入的三相短路分量，前者是主要来源。电容放电电流可以表示为式(2)^[21]：

$$I_{dc}(t) = e^{-\delta t} \left\{ \frac{U_{dc}}{L_s} \sin(\omega t) - \frac{I_0}{\omega} [\delta \sin(\omega t) - \omega \cos(\omega t)] \right\} \quad (2)$$

式中：\$L_s\$ 为三相桥臂等效电感、限流电感和短路点至换流器间的线路电感之和；\$I_0\$ 为直流电流初始值，为电流衰减系数；\$\omega\$ 为电流角频率，由电路参数决定。

系统参数确定情况下，故障电流大小由故障发生时刻直流电流初始值 \$I_0\$ 和 MMC 直流出口电压 \$U_{dc}\$ 共同决定，其中 \$I_0\$ 取决于系统稳定运行工况，难以控制，而 \$U_{dc}\$ 可利用混合型 MMC 的自身调控能力进行调节。基于上述分析，分别设计了 FLMMC 负压控制策略和 NFLMMC 主动限流协同控制策略，下面进行详细介绍。

2 FLMMC 负压控制策略设计

FLMMC 新型负压控制方法的设计思路为：利用全桥子模块在直流侧建立负压，抑制 FLMMC 放电电流的同时，主动吸收 NFLMMC 放电电流 \$I_{s1}\$，从而快速阻断故障线路电流 \$I_{dc_line}\$。以下将从两个方面进行阐述：混合型 MMC 的电压调节自由度分析和负压控制策略设计。

2.1 混合型 MMC 的电压调节自由度

全桥子模块的存在使得 MMC 能够在较大范围内调节直流电压。定义直流电压调制比 \$m_{dc}\$，其表

达式为

$$m_{dc} = \frac{U_{dc}}{U_{dcn}} (m_{dcmin} \leq m_{dc} \leq 1) \quad (3)$$

忽略桥臂电感的分压作用，上、下桥臂电压^[22]可分别表示为

$$\begin{cases} u_{pj} = m_{dc} \frac{U_{dcn}}{2} - u_j \\ u_{nj} = m_{dc} \frac{U_{dcn}}{2} + u_j \end{cases} \quad (4)$$

结合式(3)(4)，混合型 MMC 上、下桥臂电压的运行范围为

$$\frac{U_{dcn}(m_{dcmin} - m_{ac})}{2} \leq \{u_{pj}, u_{nj}\} \leq \frac{U_{dcn}(1 + m_{ac})}{2} \quad (5)$$

式中 \$m_{ac}\$ 表示交流电压调制比。

由式(5)可以看出，全桥子模块的存在使得 \$m_{dc}\$ 能够在较大范围内调节直流电压，如图 3 所示。\$m_{dcmin}\$ 是依据混合型 MMC 内全桥子模块与半桥子模块比例确定的最小调制比。系统按额定电压运行时，\$m_{dc}=1\$；系统降直流电压运行时，\$0 < m_{dc} < 1\$；MMC 直流电压输出为 0 时，\$m_{dc}=0\$；MMC 负压运行时，\$m_{dcmin} < m_{dc} < 0\$。

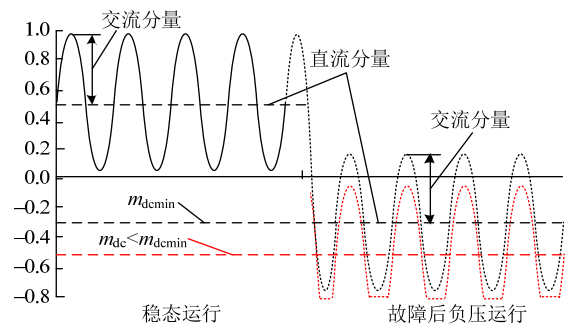


图 3 降低直流分量前后桥臂参考电压示意图
Fig. 3 Reference wave before and after reducing DC component of bridge arm

2.2 负压控制策略设计

混合型 MMC 交直流侧输出电压可以实现解耦控制，且桥臂参考电压中的直流分量存在一定的调节裕度，故可在实现降低直流电压的同时不影响 MMC 的交流出口特性。基于以上分析设计系统控制框图如图 4 所示。其中 i_d^* 和 i_q^* 分别表示有 d 轴和 q 轴电流参考值； i_d^* 和 i_q^* 分别表示 d 轴和 q 轴电流； u_d^* 和 u_q^* 分别表示 d 轴和 q 轴电压； θ 表示锁相环相位； $u_{j,c}$ 表示环流控制环节产生的电压；下标_ref 表示对应变量的参考值。

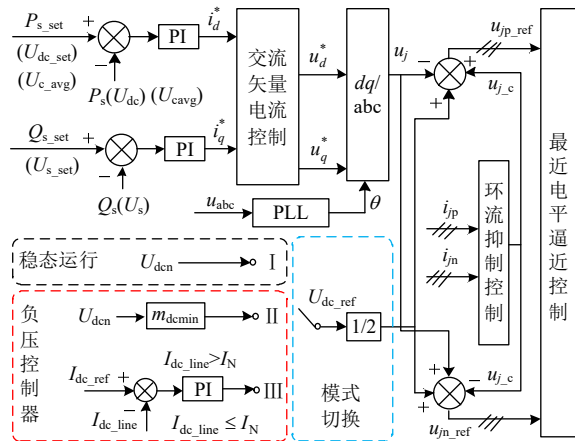


图 4 负压控制框图

Fig. 4 Negative voltage control block diagram

FLMMC 控制器结构由极控制器和阀控制器两部分构成，其中极控制器包括交流控制回路和直流控制回路。

交流控制回路中采用的是具有 d 轴和 q 轴电流解耦控制的经典矢量控制策略，外环用于控制有功类控制量(直流电压 U_{dc} 、实际功率 P_s 或平均子模块电压 $U_{c,avg}$)和无功类控制量(交流电压 U_s 或无功功率 Q_s)为给定值，输出信号通过交流电流矢量控制和派克变换得到桥臂电压的交流参考波形。

直流控制回路中，有 3 个模式可以选择。

1) 模式 I: 稳态运行模式。选择额定直流电压 U_{dcn} 作为直流电压参考值，即 $U_{dc,ref}=U_{dcn}$ ，如图 4 黑色虚线框所示。

2) 模式 II: 最大负压控制模式。传统的电压置零控制方法是将 U_{dc} 控制为零，与故障点之间形成零压差，从而抑制电容放电。但在直流电网中，各换流站均需采取电压置零控制才能彻底阻断故障电流，这时全网功率传输都将中断。为解决以上问题，本文利用混合型 MMC 的最大负压能力，阻断本站电容放电的同时，将远端换流站馈入电流引入近端换流站，从而快速阻断故障电流。

负压控制器作用下，桥臂参考电压中的直流分

量减小，交流分量整体向下平移，如图 3 所示。若直流电压降低量超过 MMC 中负压子模块能够建立负压的限值，会引起交流电压参考波的畸变，如图 3 中 $m_{dc} < m_{dcmin}$ 时所示。为降低直流电压的同时不影响 MMC 交流出口特性， m_{dcmin} 由全桥子模块与半桥子模块比例确定：

$$m_{dcmin} = \frac{N_H - N_F}{N_H + N_F} \quad (6)$$

式中： N_H 为某相桥臂中半桥子模块数目； N_F 为该相中全桥子模块数目。交流控制回路和直流控制回路共同作用下的上、下桥臂参考电压分别为

$$\begin{cases} u_{pj} = m_{dcmin} \frac{U_{dcn}}{2} - u_j \\ u_{nj} = m_{dcmin} \frac{U_{dcn}}{2} + u_j \end{cases} \quad (7)$$

3) 模式 III: 直流电流控制模式。 $I_{dc, line}$ 被迅速降至额定值附近后，直流线路上的元器件已脱离过流风险，若一直利用最大负压“吸收”短路电流容易出现 $I_{dc, line}$ 过零反向增大的现象，不利于 HSS 的可靠开断。因此，可将直流电流参考值 $I_{dc, ref}$ 设置为 0，在与测量的直流故障线路电流 $I_{dc, line}$ 进行比较后，通过 PI 控制器对差值进行控制，产生所需的负压参考值，如图 4 红色虚线框所示。在这种情况下， $U_{dc, ref}$ 将不再是常数，而是自适应于直流电流变化的时变值，由以下方程式动态确定：

$$U_{dc, ref} = (I_{dc, ref} - I_{dc, line}) \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \quad (8)$$

模式 II 与模式 III 的相互配合具有明显优势，既能利用最大负压快速降低 $I_{dc, line}$ ，缩短故障阻断时间，又能够兼顾 PI 调节的无差性，让 $I_{dc, line}$ 维持在 HSS 开断电流范围内，有利于 HSS 的可靠开断。但在故障阻断过程中短路电流均被引入 FLMMC 的桥臂中，使其内部功率器件存在过电流和过电压风险，威胁换流站的安全稳定运行。

3 NFLMMC 主动限流协同控制策略设计

为了减少相邻线路的放电电流对 FLMMC 安全稳定运行的影响，提出了一种适用于 NFLMMC 的主动限流协同控制方法，在确保 NFLMMC 不退出运行的情况下抑制馈入故障线路的电流。

基于桥臂电压控制的主动限流方法控制框图如图 5 所示。故障发生后，FLMMC 采取负压控制；NFLMMC 切换至主动限流协同控制，其直流侧电压降为 αU_{dc} 。主动限流控制框图如图 5 所示。其中 N 为单个桥臂子模块数量； U_c 为子模块电容电压。

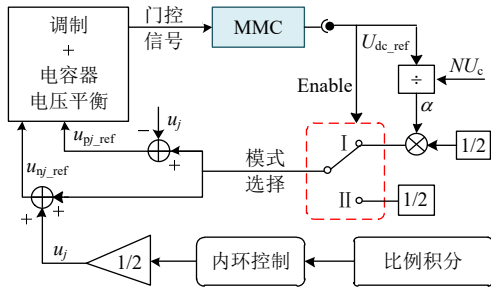


图 5 主动限流控制框图

Fig. 5 Diagram of active current-limiting control

交流系统抗干扰能力较强，短时的低电压对其影响较小。因此，可以根据故障期间直流母线电压的大小自适应地调整直流电压参考值，从而实现针对多重因素(故障类型、故障发生位置等)具有自适应的限流效果，也能够自动响应 FLMMC 的负压变化，减少换流站过电压、过电流风险，并兼顾直流电网的快速恢复。基于以上分析 α 值由式(9)确定。

$$\alpha = \frac{U_{dc}}{NU_c} \quad (9)$$

直流故障穿越的协同配合控制策略流程如图 6 所示。故障发生后，FLMMC 以故障电流作为控制目标，利用混合型 MMC 建立负压的能力阻断故障电流向短路点的放电，将原本馈入故障点的能量以给予模块电容充电的形式消纳。

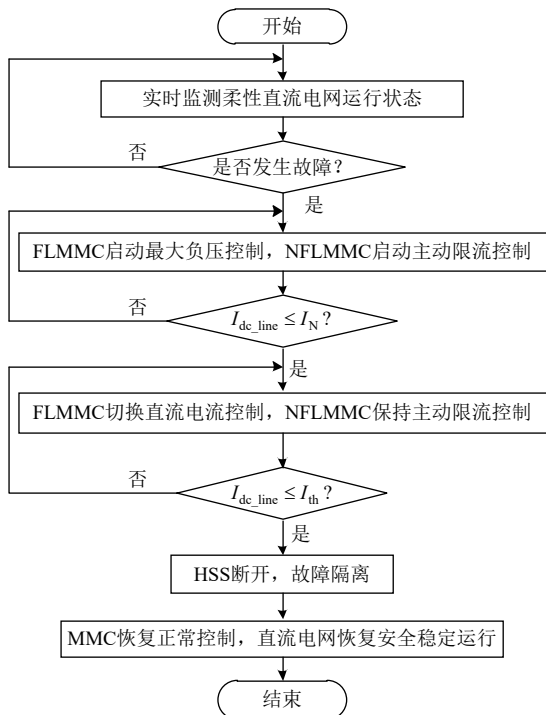


图 6 柔性直流电网直流故障穿越流程

Fig. 6 DC FRT process of DC grid

4 算例分析

为验证本文所提柔性直流电网故障穿越协同

控制策略的有效性，在 Matlab/simulink 中搭建了如图 1 所示的四端柔性直流电网，并利用 RT-LAB OP5600 进行仿真，系统主要参数如表 1 所示，稳态运行时各个换流站额定功率见表 2。

参数	数值
额定交流电压 U_N/kV	230
单极换流站变压器变比 $K/(kV/kV)$	230/166
额定频率 f/Hz	50
额定直流电压 U_{dc}/kV	± 320
FBSMs: HBMSs	4:1
桥臂 SM 电容/ μF	6000
桥臂电抗/ mH	24
直流线路电抗 $L_{dc}/(mH/km)$	0.4
仿真步长/ μs	25

换流站	参数	数值
MMC1	有功功率/MW	200
	无功功率/Mvar	150
MMC2	有功功率/MW	400
	无功功率/Mvar	300
MMC3	有功功率/MW	400
	无功功率/Mvar	300
MMC4	有功功率/MW	200
	无功功率/Mvar	150

在 $t=5.0s$ 时，设置 MMC1 出口发生双极短路故障，定义直接与故障点相连的换流站 MMC1、MMC2 为 FLMMC1、FLMMC2，相邻线路中的换流站 MMC3、MMC4 定义为 NFLMMC3、NFLMMC4。

4.1 不同控制策略下的直流故障电流阻断效果对比

4.1.1 零压控制策略仿真效果分析

直流侧双极短路故障发生后，四端电网中的 MMC 皆切换至零压控制模式，将直流侧电压控制为 0，与故障点之间实现零压差，从而抑制电容放电，阻断故障电流。如图 7 所示为零压控制下的系统动态特性。

从图 7(a)中可以看出，故障发生后，短路电流可达额定电流的 8~10 倍，MMC 转换控制模式为零压控制后，短路电流能够被有效抑制，并于 $t=5.37s$ 出现过零点。从图 7(b)中可以看出， $t=5.002s$ 时刻，直流电网中各母线电压被控制在 0 值附近波动，电网功率传输中断，换流站皆退出运行。

零压控制策略能够有效抑制子模块电容放电，制造直流电流过零点，有利于可靠阻断故障电流，但该过程需要全网 MMC 退出运行，将造成电网功率传输中断，进一步扩大故障影响范围，且故障电流阻断过程较慢，不利于系统的快速恢复。

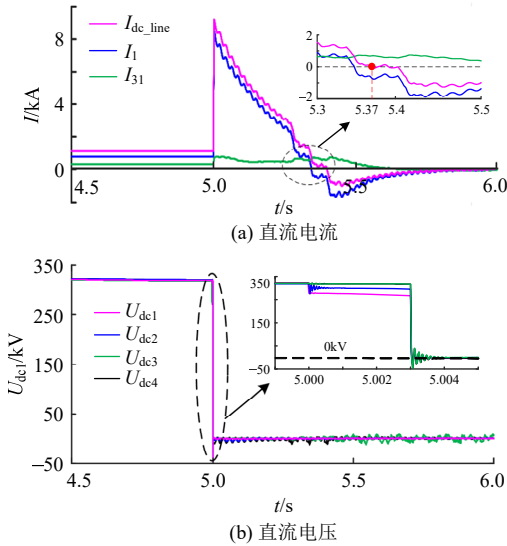


图 7 零压控制下的系统参数

Fig. 7 System parameters under zero voltage control

4.1.2 负压控制策略仿真效果分析

本节针对 NFLMMC 未启动主动限流控制的情景进行分析, $t=5.002s$, FLMMC 接收信号后启动如图 4 所示负压控制模式, 以 FLMMC1 为例, 图 8 为负压控制下的系统动态特性。 I_{dc_line} 为 I_{31} 和 I_1 的叠加, 故障发生后的短时间内, I_1 占主导地位, 这与第一节中的分析一致。

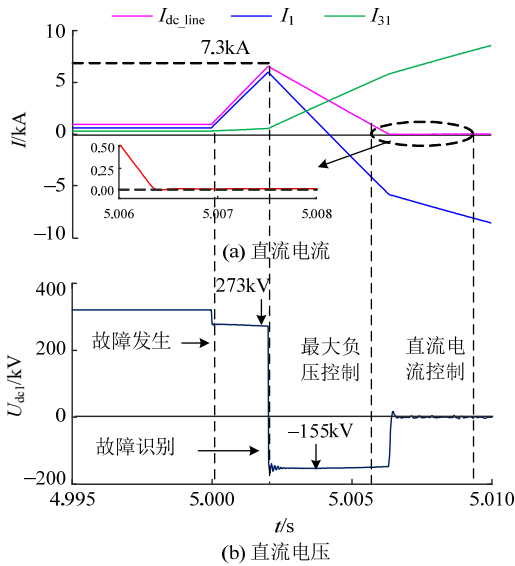


图 8 负压控制下的系统参数

Fig. 8 System parameters under negative voltage control

故障发生后, FLMMC1 侧直流母线电压跌落至 273kV, 直流故障电流 I_{dc_line} 在 2ms 内增长至 7.3kA。负压控制分 2 个环节进行, 最大负压模式有效抑制 I_{dc_line} , 待其下降至电流额定值附近, FLMMC 启动直流电流控制, 将 I_{dc_line} 限制在设置值附近。从图 8(a)中可以看出, $t=5.007s$ 直流电流被迅速限制至 0 值附近波动, 当 I_{dc_line} 满足式(10), 则 HSS 动作隔离故障。

$$I_{dc_line} \leq I_{th} \tag{10}$$

式中: I_{th} 表示 HSS 能够开断的直流电流最大值。目前, 昆柳龙工程中选用的 HSS 最大直流电流开断能力为 15A。仿真结果显示, 本文所提控制策略能够满足这一要求。

负压控制下 FLMMC1 的交流出口电流如图 9 所示。由于 m_{dc_min} 选取的是保持交流波形不畸变下的最小调制比, 因而内环控制器输出参考波形与稳态时几乎保持一致, 即合理降低桥臂电压直流分量能够在实现直流故障电流阻断的同时保证良好的交流出口特性。

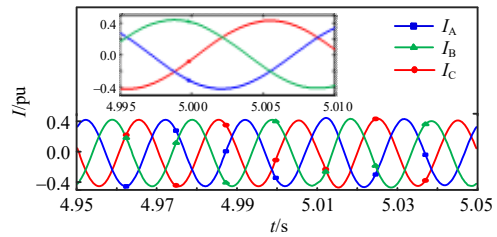


图 9 负压控制前后交流电流动态特性

Fig. 9 Dynamic characteristics of AC current before and after negative voltage control

图 10 表示故障穿越过程中的系统参数。5.01s 故障线路切除, 负压控制退出后系统开始恢复运行。

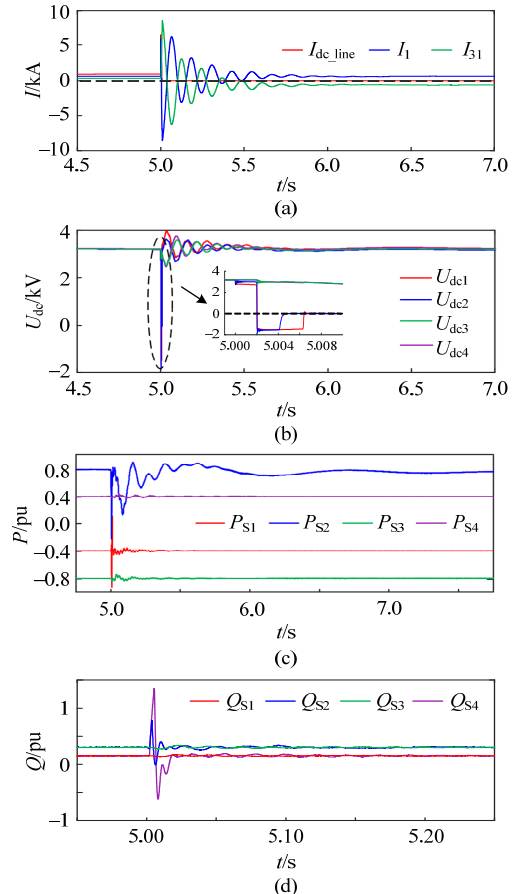


图 10 功率恢复过程系统参数

Fig. 10 Power recovery process system parameters

仿真结果显示,故障发生后,FLMMC1、FLMMC2 的功率传输中断了一段时间;NFLMMC3、NFLMMC4 降压运行,仍然保持一定的功率传输能力。故障隔离后,剩余的能量被重新分配到其他健康线路,系统迅速恢复。

4.2 故障穿越过程中换流站安全性分析

本节分析 NFLMMC 不动作,FLMMC 采取负压控制实现故障穿越过程中对 FLMMC 内桥臂电流、电容电压的影响。FLMMC1、FLMMC2 桥臂电流如图 11 所示。该过程中,桥臂电流峰值可达 -3.9kA 。张北工程选用的 IGBT 额定值为 $4.5\text{kV}/3\text{kA}$,因此负压控制下 FLMMC 中的元器件将承受电流冲击。

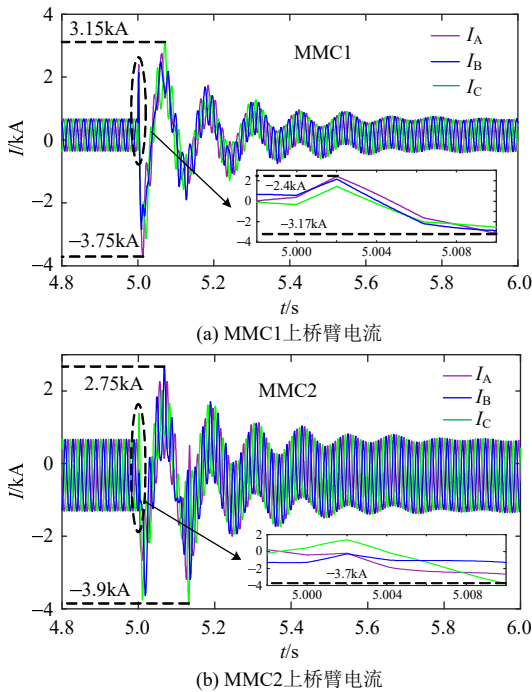


图 11 负压控制过程中各换流站桥臂电流动态特性
Fig. 11 Dynamic characteristics of arm current in each station during negative voltage control

IGBT 过电压能力有限,若 IGBT 故障则可能导致子模块损坏。子模块电容电压如图 12 所示。观察可知,子模块电容电压峰值可达额定值的 1.32 倍,扰动过程中最大子模块电容电压超过额定工况的 1.2 倍,子模块存在过压风险。

负压控制导致故障电流馈入换流站是造成桥臂电流、电容电压升高的主要原因。仿真结果显示, I_{31} 占馈入电流的主要部分。因此,进一步考虑 NFLMMC 参与故障限流是非常有必要的。

4.3 NFLMMC 主动限流控制策略仿真结果分析

故障发生后,NFLMMC3、NFLMMC4 采用图 5 所示主动限流控制。图 13(a)(b)为 NFLMMC3、NFLMMC4 有、无限流措施时直流母线电压动态特

性对比,图 13(c)(d)为有、无限流措施时 NFLMMC 向故障线路的放电情况。

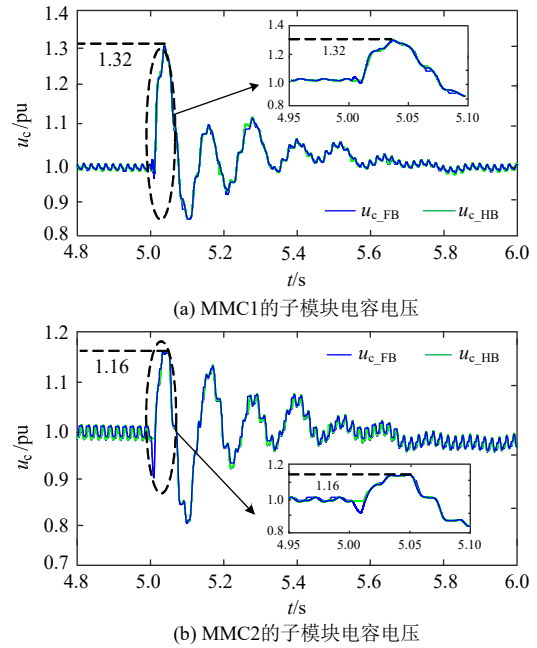


图 12 负压控制过程中各换流站子模块电容电压动态特性

Fig. 12 Dynamic characteristics of capacitor voltage in sub-modules of each station during negative voltage control

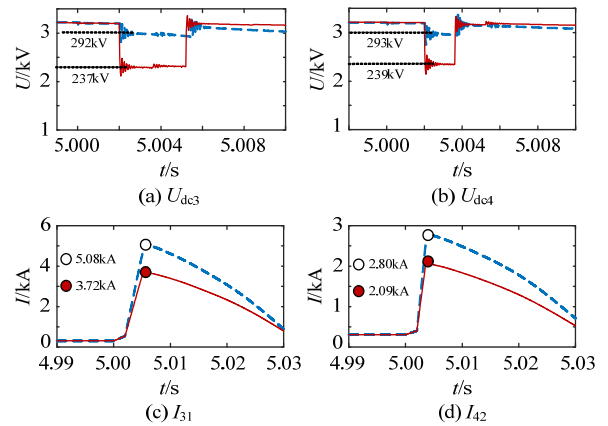


图 13 有、无限流措施直流电流、直流电压对比
Fig. 13 Comparison of DC current and DC voltage with or without current limiting measures

可以看出,NFLMMC 主动限流控制一定程度上限制了电容放电。故障发生后 6ms,NFLMMC3 的放电电流 I_{31} 由无限流措施时的 5.08kA 降至 3.72kA ,降低了 26.8%;NFLMMC4 的放电电流 I_{42} 由 2.80kA 降至 2.09kA ,降低了 25.4%,限流效果明显。

NFLMMC 主动限流控制使 I_{dc_line} 能够更快被抑制,如图 14(a)(b)所示。FLMMC1 侧的故障线路电流 I_{dc_line1} 降至 I_{th} 的时间由无限流时的 5.0065s ,缩短为 5.005s ,FLMMC2 侧由 5.0045s 缩短至 5.003s ,有效缩短了故障电流阻断时间。图 14(c)(d)

表示 FLMMC1、FLMMC2 直流出口电流。主动限流控制后，馈入 FLMMC1 的电流减少 27.8%，馈入 FLMMC2 的电流减少 5%，限流效果明显。

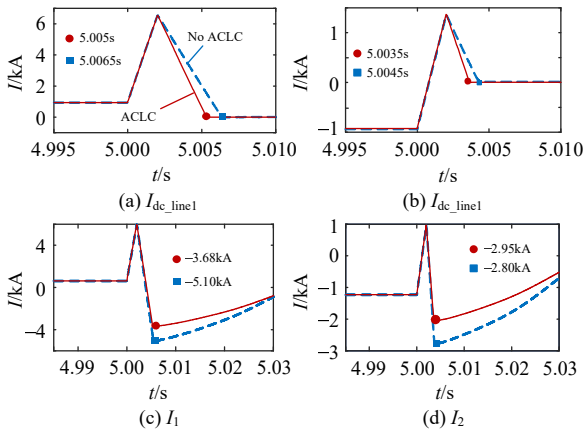


图 14 有、无限流措施各换流站出口直流电流对比
Fig. 14 Comparison of DC current at the outlet of each station with or without current limiting measures

图 15(a)(b)表示采取主动限流控制后的换流站桥臂电流情况。其中，FLMMC1 桥臂电流峰值由 3.75kA 降至 3.3kA，FLMMC2 桥臂电流峰值由 3.9kA 降至 2.1kA，有效缓解了故障期间 IGBT 的过电流应力。

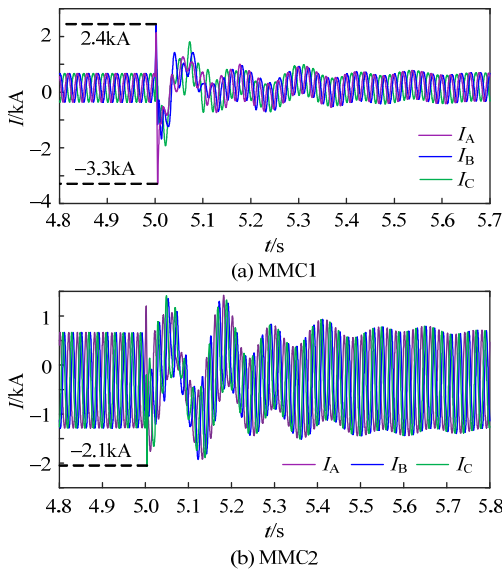


图 15 NFLMMC 限流后各换流站桥臂电流
Fig. 15 Arm current of each station after NFLMMC current limiting

图 16 表示采取主动限流后 FLMMC 子模块电容电压的最大值、最小值和平均值。可以看出，由于限流措施降低了馈入近端换流站的电流，缩短了故障清除时间，所以故障穿越期间子模块电容电压峰值由 1.32 倍额定电压降为 1.19 倍额定电压，降压效果明显。且故障期间子模块电容电压适当升高，能够更好地支撑交流系统，有利于故障后系统的恢复。

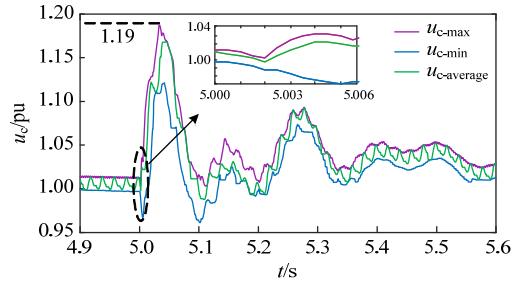


图 16 NFLMMC 限流后的子模块电容电压
Fig. 16 Dynamics of capacitor voltage after NFLMMC current limiting

5 结论

本文在分析混合型 MMC 直流电网故障电流组成及影响因素的基础上，提出了一种基于 FLMMC 负压控制与 NFLMMC 主动限流控制的故障穿越协同配合方案。其中，FLMMC 负压控制策略可充分利用混合型 MMC 的电压调控能力，有效抑制本站电容放电的同时，主动吸收相邻线路放电，将故障线路电流迅速降至 HSS 开断范围，保证了故障的快速、可靠隔离。NFLMMC 主动限流协同控制可在故障发生后快速降低直流母线电压，有效抑制远端换流站向 FLMMC 的放电，降低了近端换流站内元器件的过电流、过电压应力。

本文所提出的协同控制策略实现了非故障线路换流站不退出运行下的直流故障穿越，在提高系统安全稳定性的同时，减小故障影响范围，缩短了直流电网功率恢复时间。

参考文献

- [1] 高磊, 吕敬, 蔡旭. 如东海上风电柔直送出系统的中频振荡特性分析[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3495-3506.
GAO Lei, LÜ Jing, CAI Xu. Analysis of mid-frequency oscillation characteristics in Rudong MMC-HVDC system for offshore wind farms[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3495-3506(in Chinese).
- [2] 李贤育, 姚良忠, 程帆, 等. 适用于海上风电送出的 DR-MMC 混合直流电网自适应下垂控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2871-2880.
LI Xianyu, YAO Liangzhong, CHENG Fan, et al. Self-adaptive droop control strategy of DR-MMC hybrid DC grid for offshore wind power transmission[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2871-2880(in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).
- [4] LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. A review of the protection for the multi-terminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 21.

- [5] 辛业春, 刘熠, 江守其, 等. 计及零直流电压控制的混合型 MMC-HVDC 输电系统短路电流计算方法[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2820-2828.
XIN Yechun, LIU Yi, JIANG Shouqi, et al. Short-circuit current calculation method for FHMMC-HVDC transmission systems with zero DC voltage control[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2820-2828(in Chinese).
- [6] 邓文军, 刘麒麟, 张英敏, 等. 张北柔直电网单极接地故障短路电流计算方法及接地策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 4050-4059.
DENG Wenjun, LIU Qilin, ZHANG Yingmin, et al. Short circuit current calculation method and grounding strategy of pole-to-ground fault in zhangbei flexible DC power grid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4050-4059(in Chinese).
- [7] WANG Wenyuan, BARNES M, MARJANOVIC O, et al. Impact of DC breaker systems on multiterminal VSC-HVDC stability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 769-779.
- [8] 陶彩霞, 王文博, 李泰国, 等. 基于电容换流的限流型混合式直流断路器[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5138-5146.
TAO Caixia, WANG Wenbo, LI Taiguo, et al. Current limiting hybrid DC circuit breaker based on capacitor commutation[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5138-5146(in Chinese).
- [9] 黄亚峰, 周 银, 严干贵, 等. 基于电容换流的限流型高压直流断路器[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3098-3108.
HUANG Yafeng, ZHOU Yin, YAN Gangui, et al. Current-limiting high-voltage DC circuit breaker based on capacitor commutation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3098-3108(in Chinese).
- [10] QIN Jiangchao, 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] LIN Weixing, JOVICIC D, NGUEFEU S, et al. Full-bridge MMC converter optimal design to HVDC operational requirements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1342-1350.
- [12] 张桂红, 王琛, 张祥成, 等. 一种适用于直流配电网中半桥-全桥混合型 MMC 的全电平逼近调制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 75-83.
ZHANG Guihong, WANG Chen, ZHANG Xiangcheng, et al. A full-level modulation strategy for half bridge-full bridge hybrid MMC in DC distribution grids[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6): 75-83(in Chinese).
- [13] ZENG Rong, XU Lie, YAO Liangzhong, et al. Design and operation of a hybrid modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1137-1146.
- [14] XU Jianzhong, ZHAO Penghao, ZHAO Chengyong. Reliability analysis and redundancy configuration of MMC with hybrid submodule topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 2720-2729.
- [15] XIANG Wang, LIN Weixing, XU Lie, et al. Enhanced independent pole control of hybrid MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 861-872.
- [16] XU Jianzhong, ZHAO Xibei, JING Hao, et al. DC fault current clearance at the source side of HVDC grid using hybrid MMC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 140-149.
- [17] 李岩, 龚雁峰. 多端直流电网限流电抗器的优化设计方案[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 120-126.
LI Yan, GONG Yanfeng. Optimal design scheme of current limiting reactor for multi-terminal DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 120-126(in Chinese).
- [18] 张帆, 许建中, 苑宾, 等. 基于虚拟阻抗的 MMC 交、直流侧故障过电流抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2103-2113.
ZHANG Fan, XU Jianzhong, YUAN Bin, et al. Over current suppression control for AC and DC faults of modular multilevel converters based on virtual impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2103-2113(in Chinese).
- [19] CWIKOWSKI O, WICKRAMASINGHE H R, KONSTANTINOU G, et al. Modular multilevel converter DC fault protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 291-300.
- [20] 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(in Chinese).
- [21] 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(in Chinese).
- [22] 李少华, 王秀丽, 李泰, 等. 混合式 MMC 及其直流故障穿越策略优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1849-1858.
LI Shaohua, WANG Xiuli, LI Tai, et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1849-1858(in Chinese).



李国庆

在线出版日期: 2024-01-29。

收稿日期: 2023-03-09。

作者简介:

李国庆(1963), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统安全性与稳定性分析、控制与决策、柔性直流输电技术, E-mail: lgq@ncepu.edu.cn;

江守其(1991), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源联网控制技术、柔性直流输电技术, E-mail: jsq@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 宋钰龙
实习编辑 赵梓含)