

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.01.007

低全桥比例混合型 MMC 换流器直流故障穿越方法

刘晨旭¹, 何柏娜¹, 冯汝明², 高磊¹, 李祖元¹, 代维汉¹(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司
内蒙古电力科学研究院分公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 柔性直流输电工程广泛采用模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC), 混合型 MMC 故障清除速度与全桥子模块(full bridge sub-module, FBSM)占比密切相关。针对双极短路故障清除过程中半-全桥子模块能量吸收不平衡导致子模块电压越限的问题, 文中设计适用于低比例全桥混合型 MMC 的能量辅助隔离支路, 通过闭锁前旁路半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM)降低子模块释放的能量, 降低 FBSM 暂态能量吸收负担, 抑制 FBSM 过电压。为缩短故障清除时间, 文中提出双支路协同运行策略, 端口侧并联暂态能量吸收支路, 辅助吸收故障暂态能量, 加速故障清除。基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建双端混合型 MMC 柔性直流输电系统模型, 验证所提方案的有效性。仿真结果表明, 文中提出的双支路协同运行策略能够有效抑制子模块过电压, 缩短故障清除时间, 降低混合型 MMC 故障快速自清除的运行成本。

关键词: 模块化多电平换流器(MMC); 故障穿越; 子模块过电压; 故障暂态能量; 加速故障清除; 双支路协同运行策略

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2026)01-0072-11

0 引言

随着电力电子技术的发展, 模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)凭借其独特优势已成为远距离、大规模柔性直流输电系统的首选, 并在实践中得到推广^[1-5]。目前, 直流故障的快速清除和隔离是阻碍 MMC 柔性直流电网发展的关键技术难题之一^[6-9]。相较于传统交流系统, 直流系统阻尼低且直流电流无过零点, 导致故障电流上升率大、峰值高^[10-14], 易对系统造成损害且故障清除难度大。因此, 研究故障快速清除方案对提高柔性直流输电系统稳定性至关重要。

我国昆柳龙柔性直流输电工程采用混合型 MMC 实现故障快速自清除。低比例混合型 MMC 在故障清除后易出现全桥子模块(full bridge sub-module, FBSM)过电压闭锁现象^[15-16], 影响系统正常运行。为减小直流故障对柔性直流输电系统的影响, 国内外学者对故障快速清除及子模块电压均衡策略已有一定研究。文献^[17]利用 MMC 调压控制策略减少阀侧子模块投入数量, 达到清除故障电流的目的, 但预充电电容会向故障点提供短路电流, 清除速率低。文献^[18]利用 FBSM 调制波下移的方法快速清除故障电流, 但故障清除速率取决于 FBSM 占比, 经济性差。为解决故障清除过程过度

依赖 FBSM 的问题, 文献^[19]提出一种具备故障自清除能力的子模块拓扑, 但该子模块在故障穿越期间闭锁, 无法实现换流站交流侧无功功率的不间断传输。文献^[20]提出串联双电容子模块与半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM)的混合型 MMC, 但在故障穿越期间子模块电容存在击穿风险。文献^[21]通过并联混合型 MMC 中的 FBSM 分支, 实现不同线路故障的选择性清除, 但难以平衡不同分支间子模块电容电压和功率, 易引起桥臂间电压不平衡, 影响系统稳定运行。

上述研究均未充分考虑故障清除时子模块能量吸收不平衡的问题。在实际运行中, 系统恢复过程存在由能量吸收不平衡引起的功率、电流波动, 会造成换流器误闭锁, 影响系统恢复运行。故研究基于子模块能量平衡关系的故障快速清除和隔离策略, 对降低直流故障对线路的损害程度、保障系统稳定运行极其重要。

文中针对故障暂态能量快速清除, 以及故障清除过程中仅由 FBSM 吸收半-全桥子模块释放的能量所引起的 FBSM 过电压问题, 提出双支路协同运行策略。首先, 基于半-全桥子模块能量吸收平衡关系设计能量辅助隔离支路, 隔离闭锁前 HBSM 电容释放的能量, 抑制 FBSM 过电压。其次, 在正负极间并入暂态能量吸收支路, 吸收线路故障暂态能量, 与故障隔离切换支路协同运行, 缩短故障清除时间。

收稿日期: 2025-09-11; 修回日期: 2025-10-16

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME057)

1 混合型 MMC 基本原理及控制策略

1.1 混合型 MMC 运行原理

半-全桥混合型 MMC 结构如图 1 所示^[22], 换流器为三相六桥臂对称分布, 每个桥臂由 N 个子模块与 1 个桥臂电抗器构成。其中, R_0 为桥臂等效电阻; L_0 为桥臂电抗器等效电感; C_0 为子模块电容; U_c 为子模块电容电压有效值; U_{dc} 为直流侧电压。MMC 交流侧中, u_{va} 、 u_{vb} 、 u_{vc} 为三相输出电压; i_{va} 、 i_{vb} 、 i_{vc} 为三相输出电流; i_{pa} 、 i_{pb} 、 i_{pc} 为三相上桥臂电流; i_{na} 、 i_{nb} 、 i_{nc} 为三相下桥臂电流; u_{pa} 、 u_{pb} 、 u_{pc} 为三相上桥臂电压; u_{na} 、 u_{nb} 、 u_{nc} 为三相下桥臂电压; FBSM $_m$ 、HBSM $_g$ 分别为第 m 个 FBSM、第 g 个 HBSM, m 、 g 分别为 FBSM、HBSM 编号; VD $_n$ 为第 n 个二极管, n 为二极管编号; VT $_z$ 为第 z 个绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT), z 为开关阀编号。

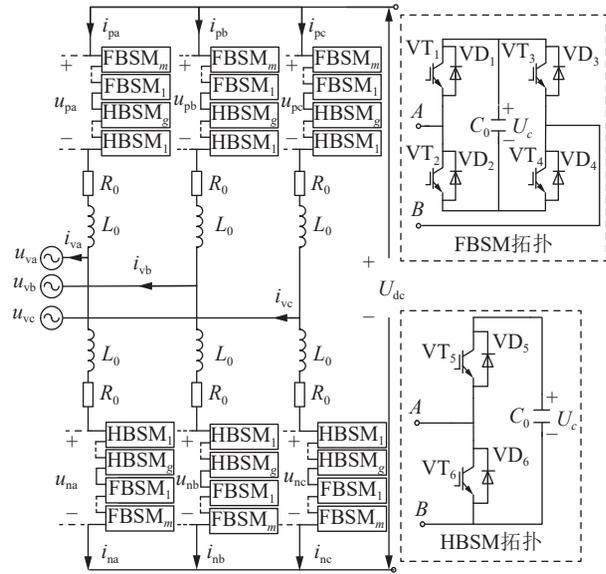


图 1 混合型 MMC 拓扑

Fig.1 Hybrid MMC topology

在半-全桥混合型 MMC 正常运行工况下, HBSM 与 FBSM 均可输出零电平或负电平, 换流站端口直流侧电压 U_{dc} 由 N 个子模块输出电压之和决定。特殊工况及故障穿越期间, FBSM 可以实现负压输出, 运行方式更灵活。可以通过控制上下桥臂中半-全桥子模块的动态投切, 满足不同功率和电压需求。

根据不同阶段模块内部电流流向及 IGBT 开关状态, FBSM、HBSM 分别呈现不同的工作状态, 如表 1、表 2 所示。

1.2 双极短路故障机理分析

MMC-高压直流 (high voltage direct current,

表 1 FBSM 工作状态

Table 1 Various working states of FBSM

状态	VT ₁	VD ₁	VT ₂	VD ₂	VT ₃	VD ₃	VT ₄	VD ₄
正投入	1	0	0	0	0	0	1	0
	0	1	0	0	0	0	0	1
负投入	0	0	1	0	1	0	0	0
	0	0	0	1	0	1	0	0
闭锁	0	1	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	1	0	0	1	0
切除	0	1	0	0	1	0	0	0
	0	0	0	1	0	0	1	0
	1	0	0	0	0	1	0	0
	0	0	1	0	0	0	0	1

表 2 HBSM 工作状态

Table 2 Various working states of HBSM

状态	VT ₅	VD ₅	VT ₆	VD ₆	电流流向
闭锁	0	1	0	0	A→B
	0	0	0	1	B→A
投入	0	1	0	0	A→B
	1	0	0	0	B→A
切除	0	0	1	0	A→B
	0	0	0	1	B→A

HVDC) 输电系统的双极短路故障是一种极其危险且常见的故障, 其示意如图 2 所示。双极短路故障电流的发展分为 2 个阶段: 换流站闭锁前, 子模块电容放电, 导致直流侧故障电流迅速上升; 闭锁后, HBSM 旁路, FBSM 电容只充电不放电, 短路电流衰减至 0^[23]。

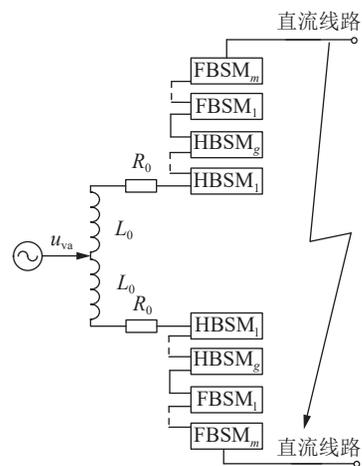


图 2 双极短路故障示意

Fig.2 Schematic diagram of bipolar short-circuit fault

MMC 闭锁前, MMC 子模块保持故障前投切状态^[24], 子模块均放电, 闭锁前等效电路如图 3 所示。其中, R_{dc} 为直流线路等效电阻; L_{dc} 为直流线路等效电感; $i_{dc}(t_{0-})$ 为闭锁前直流短路电流; $u_c(t_{0-})$ 为

闭锁前直流侧电压; $i_{dc}(t)$ 为 MMC 闭锁前 t 时刻的故障电流有效值; $I_{dc}(s)$ 为 MMC 闭锁前频域中故障电流瞬时值。

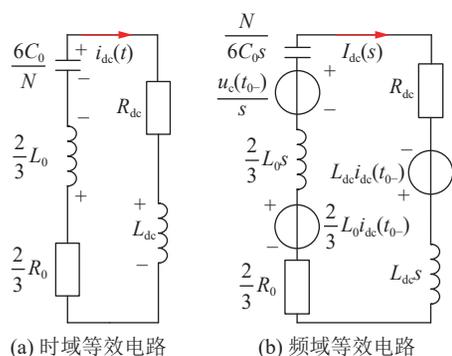


图3 MMC 闭锁前等效电路

Fig.3 Mathematical model of equivalent circuit before MMC blocking

图3 中同一相单元的 $2N$ 个子模块电容 C_0 可以等效为一个等效电容 C_{eq} , 根据储能相等可得:

$$\frac{1}{2} C_{eq} U_{dc}^2 = 2N \frac{1}{2} C_0 U_c^2 \quad (1)$$

MMC 闭锁前 $U_{dc} = NU_c$, 代入式(1)可得:

$$C_{eq} = \frac{2C_0}{N} \quad (2)$$

由图3 可知, $I_{dc}(s)$ 频域表达式为:

$$I_{dc}(s) = \frac{s \left(L_{dc} + \frac{2}{3} L_0 \right) i_{dc}(t_{0-}) + u_c(t_{0-})}{s^2 \left(L_{dc} + \frac{2}{3} L_0 \right) + \left(R_{dc} + \frac{2}{3} R_0 \right) s + \frac{N}{6C_0}} \quad (3)$$

对式(3)进行拉氏反变换求解, 得到式(4)的闭锁前双极短路故障电流时域表达式。

$$i_{dc}(t) = \frac{1}{\sin \theta_{dc}} i_{dc}(t_{0-}) e^{-\frac{t}{\tau_{dc}}} \sin(\omega_{dc} t - \theta_{dc}) + \frac{3u_c(t_{0-})}{(3L_{dc} + 2L_0)\omega_{dc}} e^{-\frac{t}{\tau_{dc}}} \sin(\omega_{dc} t) \quad (4)$$

式中: τ_{dc} 为闭锁前等效回路时间常数, 通过式(5)计算; ω_{dc} 为闭锁前直流故障分量的角频率, 通过式(6)计算; θ_{dc} 为闭锁前直流故障分量的初始相位角, 通过式(7)计算。

$$\tau_{dc} = \frac{4L_0 + 6L_{dc}}{2R_0 + 3R_{dc}} \quad (5)$$

$$\omega_{dc} = \sqrt{\frac{2N(2L_0 + 3L_{dc}) - C_0(2R_0 + 3R_{dc})^2}{4C_0(2L_0 + 3L_{dc})^2}} \quad (6)$$

$$\theta_{dc} = \arctan(\tau_{dc} \omega_{dc}) \quad (7)$$

MMC 闭锁后, FBSM 提供反电势, 通过负电压控制策略迅速清除故障线路电流, 等效拓扑电路如图4 所示。其中, C'_{eq} 为 MMC 闭锁后桥臂中 FBSM 的等效电容; $i'_{dc}(t)$ 为 MMC 闭锁后故障电流有效值; VD_H 为闭锁后 HBSM 等效二极管。

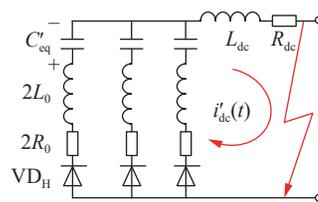


图4 MMC 闭锁后等效拓扑电路

Fig.4 Equivalent topology circuit after MMC blocking

MMC 闭锁后等效回路中等效电容 C'_{eq} 减小, 闭锁后等效电容 C'_{eq} 计算式为:

$$C'_{eq} = \frac{2C_0 N_F}{N^2} = \frac{2C_0 k}{N} \quad (8)$$

式中: N_F 为 FBSM 子模块数; k 为 FBSM 占比, $k = N_F/N$ 。

MMC 闭锁后双极短路故障时频域等效电路如图5 所示, MMC 闭锁前后等效电容大小不同, 其中, $k \neq 1$ 。图中, $i_{dc}(t_f)$ 为闭锁瞬间 t_f 时刻直流短路电流有效值; $u_c(t_f)$ 为闭锁瞬间 t_f 时刻直流侧电压有效值; $I'_{dc}(s)$ 为 MMC 闭锁后频域中故障电流瞬时值。

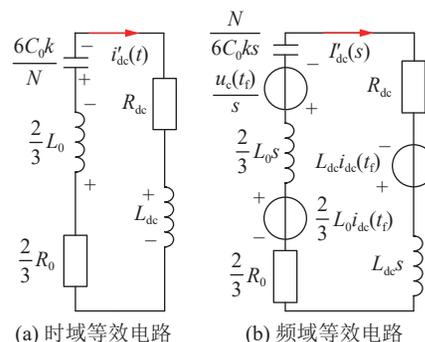


图5 MMC 闭锁后等效电路数学模型

Fig.5 Mathematical model of equivalent circuit after MMC blocking

t_f 时刻闭锁瞬间, 故障电流瞬时值的频域表达式如式(9)所示。

$$I'_{dc}(s) = \frac{s \left(L_{dc} + \frac{2}{3} L_0 \right) i_{dc}(t_f) - u_c(t_f)}{s^2 \left(L_{dc} + \frac{2}{3} L_0 \right) + \left(R_{dc} + \frac{2}{3} R_0 \right) s + \frac{N}{6C_0 k}} \quad (9)$$

对式(9)进行拉氏反变换求解, 得到闭锁后双极短路故障电流时域表达式, 如式(10)所示。

$$i'_{dc}(t) = \frac{1}{\sin \theta'_{dc}} i_{dc}(t_f) e^{-\frac{t}{\tau'_{dc}}} \sin(\omega'_{dc} t - \theta'_{dc}) - \frac{3u_c(t_f)}{(3L_{dc} + 2L_0)\omega'_{dc}} e^{-\frac{t}{\tau'_{dc}}} \sin(\omega'_{dc} t) \quad (10)$$

式中: τ'_{dc} 为闭锁后等效回路时间常数, 通过式(11)计算; ω'_{dc} 为闭锁后直流故障分量的角频率, 通过式(12)计算; θ'_{dc} 为闭锁后直流故障分量的初始相位角, 通过式(13)计算。

$$\tau'_{dc} = \frac{4L_0 + 6L_{dc}}{2R_0 + 3R_{dc}} \quad (11)$$

$$\omega'_{dc} = \sqrt{\frac{2N(2L_0 + 3L_{dc}) - C_0k(2R_0 + 3R_{dc})^2}{4C_0k(2L_0 + 3L_{dc})^2}} \quad (12)$$

$$\theta'_{dc} = \arctan(\tau'_{dc}\omega'_{dc}) \quad (13)$$

由图 5 可知,直流故障短路电流包含电感续流分量和电容放电分量,二者方向相反,故直流故障短路电流可衰减至 0,衰减时间 T_0 计算如下:

$$T_0 = \frac{\theta'_{dc}}{\omega'_{dc}} = \frac{\arctan(\tau'_{dc}\omega'_{dc})}{\omega'_{dc}} \quad (14)$$

当换流器参数与线路参数保持不变时, τ'_{dc} 恒定, T_0 与 ω'_{dc} 呈负相关。由 ω'_{dc} 的表达式可知,随着 FBSM 占比的增加, ω'_{dc} 变大,故障电流衰减至 0 的时间缩短。由此得到,混合型 MMC 故障自清除时间及故障电流幅值均与 FBSM 占比有关。

1.3 混合型 MMC 全桥占比分析

为实现直流故障穿越, FBSM 须承受零直流电压时的桥臂电压负峰值^[25-26]。常规混合型 MMC 中,若全桥占比降低,则须提高 FBSM 电压至额定电压的 η 倍,以满足短时运行的桥臂电压需求,即:

$$U_{fc} = \frac{k_1}{k_2} U_{cn} = \eta U_{cn} \quad (15)$$

式中: U_{fc} 为单个 FBSM 的运行电压; k_1 为全桥占比降低前的 FBSM 占比; k_2 为全桥占比降低后的 FBSM 占比; U_{cn} 为单个子模块的额定电压。

由于 FBSM 可输出负电平,因此混合型 MMC 具有高交流电压调制比的配置能力。交流电压调制比 M_{ac} 计算式为:

$$M_{ac} = \frac{2U_m}{U_{dcn}} \quad (16)$$

式中: U_m 为交流侧基波相电压幅值; U_{dcn} 为换流器直流侧额定电压。

直流电压调制比 M_{dc} 为 U_{dc} 的标么值:

$$M_{dc} = \frac{U_{dc}}{U_{dcn}} = \frac{U_{dc}}{NU_{cn}} \quad (17)$$

若直流电流方向不变,为防止 HBSM 持续充放电,需要通过子模块闭锁或切除等方法旁路 HBSM,仅投入 FBSM,以确保系统在 HBSM 旁路期间的正常运行。因此,桥臂电流过零点存在期间,当 FBSM 的运行电压 $U_{fc}=U_{cn}$ 时,直流调制比 M_{dc} 达到最小值 M_{dcmin} ,根据式(17)可得:

$$M_{dcmin} = \frac{U_{dcmin}}{U_{dcn}} = \frac{N_F U_{fc}}{NU_{cn}} = k \quad (18)$$

式中: U_{dcmin} 为直流侧电压最小值。

以 a 相为例,根据式(16)、式(17)可得桥臂电压 u_{arm} 运行范围为:

$$\frac{U_{dcn}(M_{dc} - M_{ac})}{2} \leq u_{arm} \leq \frac{U_{dcn}(M_{dc} + M_{ac})}{2} \quad (19)$$

由此可得直流电压运行范围与全桥占比关系为:

$$k \geq \left| \frac{(M_{dc} - M_{ac})U_{cn}}{2U_{fc}} \right| \quad (20)$$

当 M_{dc} 运行于 $(-1, -M_{dcmin})$ 和 $(M_{dcmin}, 1)$ 时,桥臂正压由 HBSM 与 FBSM 共同承担,桥臂负压仅由 FBSM 承担,由桥臂电压负峰值决定全桥占比。此时 $M_{dc} < M_{ac}$,直流电压运行范围与全桥占比的关系为:

$$M_{dc} \geq M_{ac} - 2\eta k \quad (21)$$

为保证 MMC 可运行于直流调制比为 $-M_{dcmin}$ 、 M_{dcmin} 的两种运行状态,全桥比例 k_{F1} 和 k_{F3} 须满足式(22)。

$$\begin{cases} M_{dc} \leq 2\eta k_{F1} - M_{ac} & \text{桥臂正压} \\ M_{dc} \geq M_{ac} - 2\eta k_{F3} & \text{桥臂负压} \end{cases} \quad (22)$$

式中: k_{F1} 为桥臂电压为正时,运行于 $-M_{dcmin}$ 时的全桥比例; k_{F3} 为桥臂电压为负时,运行于 M_{dcmin} 时的全桥比例。

桥臂电流过零点消失时,直流电压调制比 $M_{dc} \in (-M_{dcmin}, M_{dcmin})$ 。此时仅 FBSM 承受电压,桥臂电压峰值决定全桥占比,直流电压运行范围与全桥占比关系为:

$$\begin{cases} M_{dc} \leq 2\eta k - M_{ac} & \text{桥臂正压} \\ M_{dc} \geq M_{ac} - 2\eta k & \text{桥臂负压} \end{cases} \quad (23)$$

MMC 输出直流电压为零时 ($M_{dc}=0$), k_{F2} 须至少为:

$$k_{F2} = \frac{M_{ac}}{2\eta} \quad (24)$$

式中: k_{F2} 为直流电压输出为 0 时的全桥比例。

假设 $M_{ac}=1$,由式(21)—式(24)可以得到图 6 所示直流电压运行区间与全桥占比的关系。

由图 6 可知,当 MMC 输出直流电压为 0 时,常规设计中 MMC 的 FBSM 占比至少为 50%; FBSM 占比为 40%~50% 时,则 FBSM 须升压 1.25 倍; FBSM 占比大于 75% 时,则可在全电压范围内运行。故障穿越期间 $M_{dc} < 0$, M_{dc} 越小,故障清除速度越快。基于上述分析可知, FBSM 比例减少,子模块电压运行范围扩大,低比例 FBSM 在故障穿越期间易出现过电压。

2 FBSM 过电压分析

输电系统中暂态能量 $E(t)$ 以 t_0 为起始时刻,描述 t 时刻某元件的能量吸收或释放情况^[27-28]。故障电流增大主要是由于半-全桥子模块闭锁前释放能

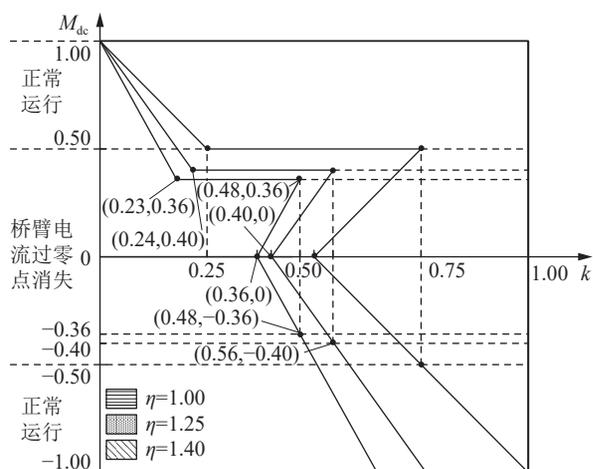


图6 直流电压运行区间与全桥占比关系

Fig.6 The relationship between direct current voltage and the proportion of the bridge

量,子模块能量释放路径如图7所示。

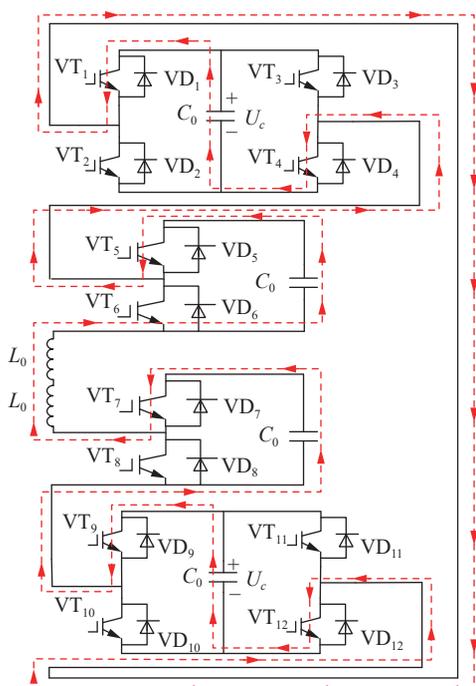


图7 子模块能量释放路径

Fig.7 Sub-module energy discharge circuit

假设 t_0 时刻发生双极短路故障, t_1 时刻(2 ms 时)检测到故障,桥臂 j 的桥臂电压 $u_{arm,j}$ 、桥臂电流 $i_{arm,j}$ 均反向,式(25)为桥臂 j 的桥臂能量 $\Delta E_{arm,j}$ 和桥臂电流 $i_{arm,j}$ 计算式,其中 $j=a, b, c$ 。

$$\begin{cases} \Delta E_{arm,j} = \int_{t_0}^{t_1} u_{arm,j}(t) i_{arm,j}(t) dt \\ i_{arm,j} = \frac{-I'_{dc}}{3} \pm \frac{i_{vj}}{2} \end{cases} \quad (25)$$

故障清除后 FBSM 电压变化量 Δu_c 为:

$$\Delta u_c = \sqrt{U_{fc}^2 + \frac{\Delta E_{arm,j}}{N_F C_0}} - U_{fc} \quad (26)$$

由式(26)可知,故障期间子模块升压的主要影

响因素是全桥占比以及子模块电容值。

实际工程应用中,故障穿越期间子模块电容电压在 1~1.4 p.u.之间波动^[29-30]。当子模块电容高于 1.4 p.u.时,MMC 触发子模块误闭锁^[31-32]。文中以此为依据设计子模块过电压抑制方案。

3 直流故障穿越策略

3.1 双支路协同运行策略

为快速清除线路故障暂态能量并抑制子模块过电压,实现直流故障穿越。文中提出双支路协同运行策略,以 a 相为例,系统拓扑如图 8 所示,其中红色部分为文中所提方法新增拓扑, L_p 、 C_p 分别为滤波电感和滤波电容; L_d 、 C_d 分别为回路电感和回路电容; R_l 为回路电阻; R_d 为暂态能量吸收支路耗能电阻。

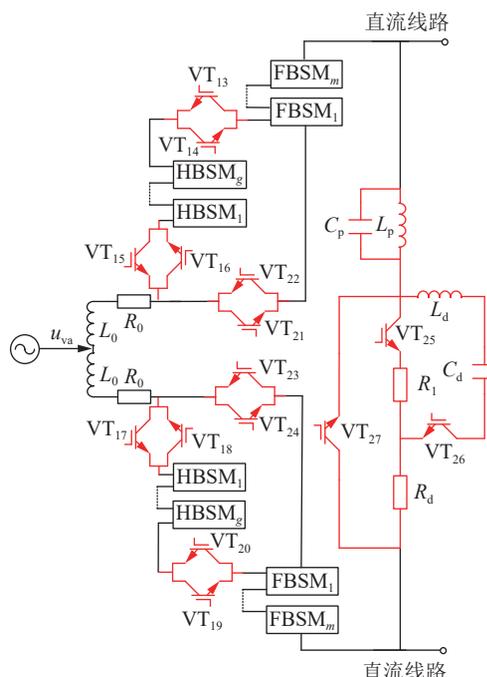


图8 系统拓扑

Fig.8 System topology

通过能量辅助隔离支路,故障期间切除 HBSM,降低故障暂态能量。同时,隔离支路中 FBSM 与暂态能量吸收支路配合,协同吸收线路暂态能量,双支路协同运行策略如图 9 所示。

3.2 子模块过电压抑制方案

故障清除过程中, FBSM 须额外吸收 HBSM 释放的能量,可能导致 FBSM 过电压^[33-34]。因此,文中提出能量辅助隔离支路,在子模块闭锁前,通过隔离 HBSM 减少桥臂子模块释放的暂态能量,隔离支路拓扑如图 10 所示。

能量辅助隔离支路有 2 种工作模式:换流器

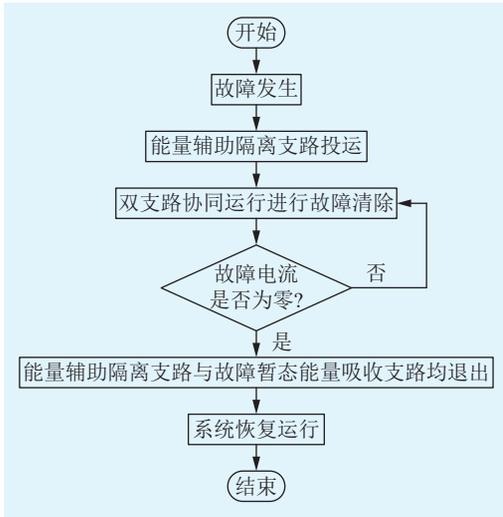


图 9 双支路协同运行策略

Fig.9 Dual-branch cooperative operation strategy

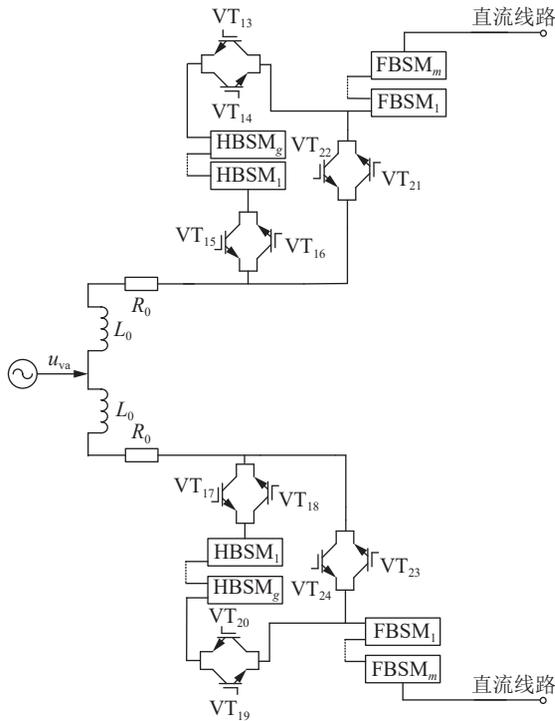


图 10 能量辅助隔离支路

Fig.10 Auxiliary isolation switching branch

正常工作时, VT_{13} — VT_{20} 导通, VT_{21} — VT_{24} 关断, 此时桥臂子模块为半-全桥混合型; 故障发生至闭锁前, VT_{13} — VT_{20} 关断的同时 VT_{21} — VT_{24} 导通, 隔离 HBSM 并阻断 HBSM 能量释放, 此时桥臂均为 FBSM; 检测到故障清除后, VT_{13} — VT_{20} 导通, VT_{21} — VT_{24} 关断, 切换至正常工作状态。

3.3 故障暂态能量清除方案

FBSM 由于吸收了桥臂以及输电线路中存储的故障暂态能量, 导致子模块过电压。为快速吸收故障暂态能量以降低过电压, 加速故障自清除, 文中

提出暂态能量吸收支路, 拓扑如图 11 所示。

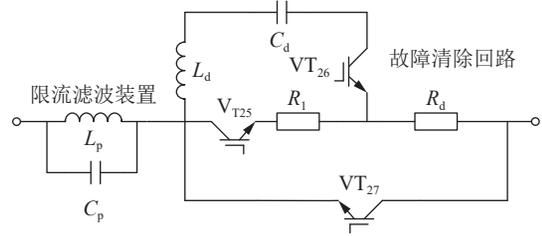


图 11 故障暂态能量吸收支路拓扑

Fig.11 Fault transient energy absorption branch topology

暂态能量吸收支路具有隔离故障、限流滤波、加速故障自清除 3 种功能。假设 t_0 时刻发生双极短路故障, t_1 时刻检测到故障, 能量吸收支路投入。故障电流经限流滤波装置限制短路电流并抑制故障谐波分量, 然后通过故障清除回路吸收线路暂态能量, 实现故障快速清除。

检测到短路故障后, 暂态能量吸收支路投入, 经回路电阻 R_1 分流消耗部分暂态能量, 同时回路电感 L_d 与回路电容 C_d 吸收容性暂态能量, 最后经耗能电阻 R_d 消耗暂态能量, 等效电路如图 12 所示。其中, $I(t)$ 为流入暂态能量吸收支路的总电流, 流入 R_1 的电流为 $I_1(t)$, 流入 L_d 的电流为 $I_2(t)$, $I'(t)$ 为流入 R_d 的电流。

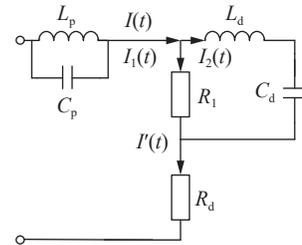


图 12 暂态能量吸收支路等效电路

Fig.12 Transient energy absorption branch equivalent circuit

暂态能量吸收支路等效阻抗 Z_F 为:

$$Z_F = \frac{L_p C_p}{L_p + C_p} + \frac{R_1 \sqrt{L_d^2 + C_d^2}}{R_1 + \sqrt{L_d^2 + C_d^2}} + R_d \quad (27)$$

暂态能量支路投入后, 直流短路故障电流 I_{dcF} 频域表达式为:

$$I_{dcF}(s) = \frac{s \left(L_{dc} + \frac{2}{3} L_0 \right) i_{dc}(t_f) - u_c(t_f)}{s^2 (L_{eq} + L_F) + (R_{eq} + R_F) s + \frac{N}{6C_0 k} + \frac{1}{C_F}} \quad (28)$$

式中: L_{eq} 、 R_{eq} 分别为直流线路与桥臂的等效电感和等效电阻; L_F 、 R_F 、 C_F 分别为支路阻抗 Z_F 中的电感分量、电阻分量和电容分量。

对式(28)进行拉氏反变换可得暂态能量支路投入后的直流故障分量角频率 ω_{dcF} 为:

$$\omega_{dcF} = \sqrt{\frac{2(C_F N + 6C_0 k)(3L_{eq} + 3L_F) - C_0 k(3R_{eq} + 3R_F)^2}{4C_0 k(3L_{eq} + 3L_F)^2}} \quad (29)$$

L_F 、 R_F 相较于 L_{eq} 、 R_{eq} 可忽略不计, 故暂态能量支路投入后 ω_{dcF} 增大。由 1.2 节可知, 当换流器参数与线路参数不变时, 暂态能量支路投入后的故障电流衰减时间与直流故障分量角频率呈负相关。因此, 暂态能量支路投入后故障电流衰减时间缩短, 从而加速了故障清除。

直流电抗器、桥臂电感及输电线路中的的暂态能量通过 L_d 、 C_d 、 R_1 以及 R_d 完成吸收和消耗, 暂态能量的吸收和消耗如式(30)所示。

$$\begin{cases} E_d(t) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{C_d U_d^2(t)}{2} + \frac{L_d I_2(t) dI_2(t)}{dt} dt \\ Q(t) = \int_{t_1}^{t_2} I_1^2(t) R_1 + (I'(t))^2 R_d dt \end{cases} \quad (30)$$

式中: $E_d(t)$ 为 L_d 、 C_d 吸收的暂态能量; $Q(t)$ 为 R_d 、 R_1 消耗的暂态能量; t_2 为第一个故障清除周期完成的时刻。

若上一个故障清除周期内故障暂态能量未被完全吸收, 则一部分残余故障暂态能量经 VT_{27} 再次注入故障清除回路, 进入下一故障清除周期, 另一部分故障暂态能量由换流器侧子模块吸收。残余暂态能量 $\Delta E_{faultL}(t)$ 为:

$$\Delta E_{faultL}(t) = \Delta E_{fault}(t_0) - E_d(t) - Q(t) \quad (31)$$

式中: $\Delta E_{fault}(t_0)$ 为故障暂态能量初始值。

4 仿真实验

为验证文中所提子模块过电压抑制方案与直流故障清除方案的有效性, 基于 PSCAD/EMTDC 搭建 ± 500 kV 双端半-全桥混合型 MMC-HVDC 系统, 仿真模型拓扑结构如图 13 所示。其中, AC1 为送端交流侧电源; AC2 为受端交流侧电源; T_{AC1} 为送端升压变压器; T_{AC2} 为受端降压变压器; MMC1 为送端换流器; MMC2 为受端换流器。

图 13 中 MMC1 采用定直流电压、定无功控制, MMC2 采用定有功、定无功控制, 模型参数如表 3 所示。文中采用子模块数为 400, FBSM 数为 180, HBSM 数为 220, FBSM 占比为 45%。

4.1 能量辅助隔离支路

文中设置 $t=2.0$ s 时送端 MMC 端口直流侧发生双极短路故障, 经 2 ms 后闭锁。通过对比图 14 中能量辅助隔离支路投入前后故障电流变化, 验证旁路 HBSM 释放的能量对故障电流的影响。

由图 14 可知, 能量辅助隔离支路投入后, 故障

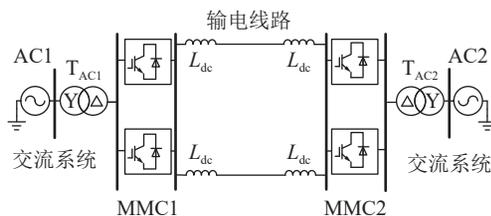


图 13 MMC-HVDC 系统模型

Fig.13 MMC-HVDC system model

表 3 系统参数

Table 3 System parameters

参数	数值
额定频率 f /Hz	50
交流电压 U_{ac} /kV	380
额定功率 P_N /MW	400
桥臂电感 L_{ϕ} /mH	100
桥臂子模块电容 C_0 / μ F	3 000
直流母线电压 U_{dc} /kV	± 500

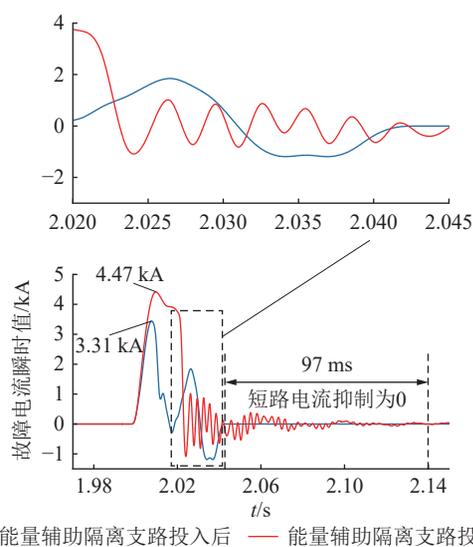


图 14 能量辅助隔离支路投入前后故障电流

Fig.14 Fault current before and after the energization of the auxiliary isolation switching branch

电流峰值由 4.47 kA 降至 3.31 kA, 隔离 HBSM 能有效限制故障电流峰值。同时桥臂故障电流清除时间由原来的 140 ms 缩短至 43 ms。低比例全桥 MMC 中 HBSM 释放的能量为故障暂态能量的主要部分, 故障电流峰值随闭锁前 HBSM 释放能量的增加而增大。

文中基于 45% 全桥占比的低比例混合型 MMC, 通过比较旁路 HBSM 前后 FBSM 电容电压变化, 验证子模块过电压抑制方案, 能量辅助隔离支路投入后子模块电容电压波形如图 15 所示。其中, U_{HBSM} 为 HBSM 电压; U_{FBSM} 为 FBSM 电压。

由图 15(a)可知, 能量辅助隔离支路投入前,

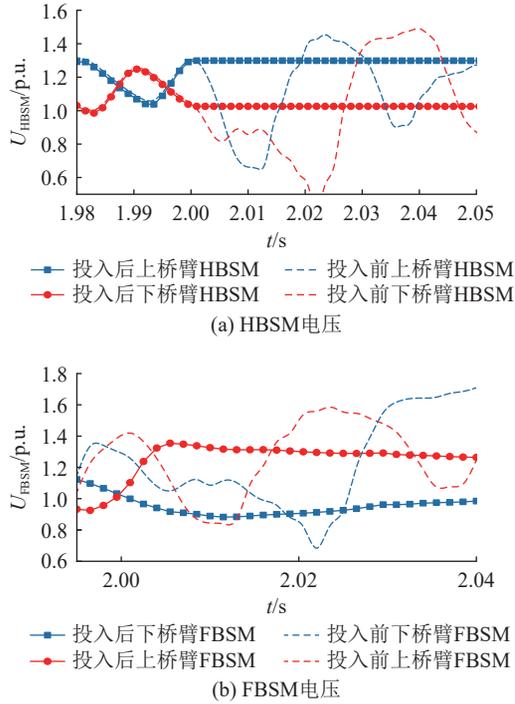


图 15 能量辅助隔离支路投入前后子模块电容电压
Fig.15 The capacitance voltage of the sub-module before and after the energization of the auxiliary isolation switching branch

HBSM 电容电压大于 1.4 p.u., 超出安全运行范围, 投入后电容电压稳定至 1.3 p.u., 在隔离和切换过程中未出现暂态过电压。由图 15(b)可知, 能量辅助隔离支路投入后, 上桥臂 FBSM 电容电压呈稳态上升趋势, 承压最大值由 1.59 p.u.降至 1.35 p.u.; 下桥臂 FBSM 电容电压呈平缓下降趋势, 承压最大值由 1.71 p.u.降至 1.15 p.u.。FBSM 电容电压运行范围由 0.6~1.71 p.u.降至 0.8~1.4 p.u., 半-全桥子模块电容过电压得到有效抑制, 系统稳定性有所提升。

4.2 暂态能量吸收支路

MMC 闭锁前, 随着交流侧电流馈入及子模块电容放电, 桥臂电感及线路电抗器储存能量增大。闭锁后, 系统释放储存的能量, 导致故障暂态能量增大, 故障电流清除时间延长。为验证故障暂态能量清除方案的有效性, 当系统检测到故障投入暂态能量吸收支路时, 暂态能量吸收支路开始吸收故障暂态能量并清除故障电流, 直流线路故障电流仿真结果如图 16 所示。

由图 16 可知, 暂态能量吸收支路投入前, 故障电流呈周期性上下波动的衰减趋势; 投入后, 故障电流呈平缓衰减趋势, 电流峰值由 4.57 kA 降至 2.66 kA, 故障清除时间由 140 ms 缩短至 82 ms。暂态能量吸收支路由限流滤波装置和故障清除回路组成, 其中限流滤波装置有效抑制了故障电流周期

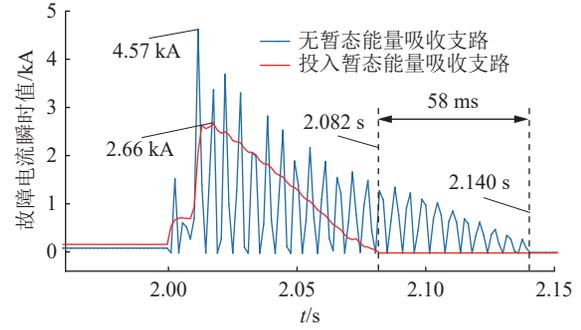


图 16 直流线路故障电流

Fig.16 Fault currents in direct current transmission lines 分量; 故障清除回路充分吸收故障暂态能量, 缩短了故障清除时间。

4.3 双支路协同运行

由上文研究结果可知, 能量辅助隔离支路虽然可以有效抑制子模块电容过电压, 但仍存在故障电流峰值较大的问题; 暂态能量吸收支路通过吸收故障暂态能量, 虽有效抑制了故障电流峰值, 加速了故障自清除, 但故障清除速度有待提升。为加速故障自清除并抑制子模块过电压, 文中提出双支路协同运行策略, 双支路协同运行前后故障短路电流的仿真结果如图 17 所示。

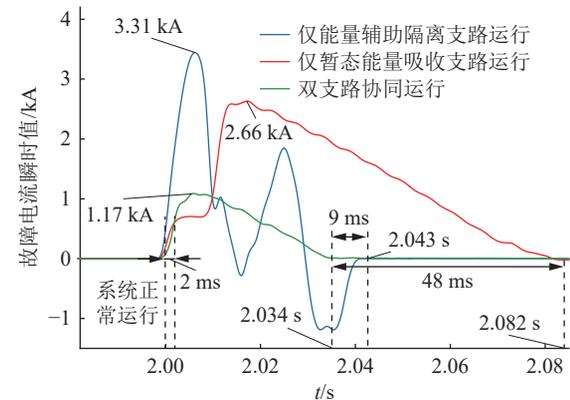


图 17 双支路协同运行前后直流故障短路电流
Fig.17 DC fault short-circuit current before and after the two-branch cooperative operation

由图 17 可知, 能量辅助隔离支路单独运行时, 故障清除时间约 43 ms, 故障电流峰值高达 3.31 kA; 暂态能量吸收支路单独运行时, 故障电流最大值为 2.66 kA, 故障清除时间约 82 ms; 采用双支路协同运行时, 故障电流峰值降至 1.17 kA, 故障清除时间缩短至 34 ms, 有效抑制了故障电流, 实现了故障快速自清除。

文中采用 45% 低比例全桥故障清除方案与常规 50% 全桥故障清除方案进行对比, 对比效果如图 18 所示。

由图 18 可知, 故障电流均在故障发生瞬间骤

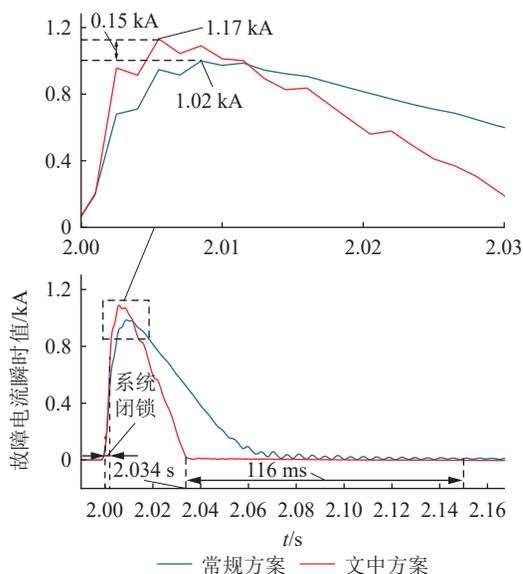


图 18 文中方案与常规方案对比

Fig.18 The comparison between the solution in this paper and the conventional solution

升,达到峰值后逐渐下降。文中所提方案中,故障电流经 34 ms 衰减至 0。相较于常规方案(衰减时间约 150 ms),文中所提方案显著缩短了故障清除时间,有效提高了系统对故障电流的快速响应能力。

5 结论

文中以低比例全桥混合型 MMC 为研究对象,针对 FBSM 电容电压越限问题,设计子模块过电压抑制方案;基于故障后暂态能量变化,设计清除方案,并提出基于双支路协同运行的故障穿越策略,实现了故障快速自清除及子模块过电压抑制。主要结论如下:

(1) 文中设计的能量辅助隔离支路可缩小故障穿越期间换流站内子模块电容电压运行范围。通过闭锁前旁路 HBSM,隔离 HBSM 电容释放的能量,降低系统内故障暂态能量,有效抑制 FBSM 过电压,降低混合型 MMC 故障快速清除运行成本。

(2) 文中所提双支路协同运行策略通过端口侧暂态能量吸收支路与隔离支路协同运行,协助吸收故障暂态能量,加速故障清除。仿真结果表明,双支路协同运行可以有效抑制故障电流峰值,缩短故障清除时间。

致谢

本文得到山东省研究生优质教育教学资源项目(SDYAL2022114)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 饶宏,周月宾,李巍巍,等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.

RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.

[2] 王硕,何柏娜,程婷,等. MMC-HVDC 双极故障条件下自适应限流控制策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 53-63.

WANG Shuo, HE Baina, CHENG Ting, et al. Adaptive current limiting control strategy for MMC-HVDC under bipolar fault conditions[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 53-63.

[3] 马秀达,卢宇,田杰,等. 柔性直流输电系统的构网型控制关键技术与挑战[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 1-11.

MA Xiuda, LU Yu, TIAN Jie, et al. Key technologies and challenges of grid-forming control for flexible DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 1-11.

[4] 郑征,魏梦雨,李绍令,等. 基于李雅普诺夫直接法的 MMC 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 35-46.

ZHENG Zheng, WEI Mengyu, LI Shaoling, et al. MMC control strategy based on a direct Lyapunov method[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 35-46.

[5] 马为民,李明,薛英林,等. 大容量电压源型逆变器在新型电力系统构建中的关键技术和创新展望[J]. 电力建设, 2025, 46(10): 1-11.

MA Weimin, LI Ming, XUE Yinglin, et al. Key technologies and innovation prospects of large-capacity voltage-sourced inverter in the construction of new power systems[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(10): 1-11.

[6] 吴丽丽,茆美琴,施永. 含主动限流控制的 MMC-HVDC 电网直流短路故障电流解析计算[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 785-797.

WU Lili, MAO Meiqin, SHI Yong. Analytical calculation of DC short-circuit fault current of modular multi-level converter-HVDC grid with active current limiting control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 785-797.

[7] PANDEY A, MOHANTY S R. Graph convolutional network based fault detection and identification for low-voltage DC microgrid[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(3): 917-926.

[8] 于吉,尹项根,赖锦木,等. 电网不对称故障下 MMC 自适应相功率均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 1-12.

YU Ji, YIN Xianggen, LAI Jinmu, et al. Adaptive leg-balancing control strategy of an MMC in an asymmetric AC grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 1-12.

[9] 彭茂兰,冯雷,王宇,等. 基于桥臂调制波调整的多端柔直系统直流过电压抑制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(4): 171-181.

PENG Maolan, FENG Lei, WANG Yu, et al. DC overvoltage suppression strategy for MMC-MTDC based on bridge arm modulated wave adjustment[J]. Electric Power, 2024, 57(4): 171-181.

[10] 雷顺广,束洪春,李志民. 基于桥臂功率特征的全-半混合型柔性直流输电线路保护[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3563-3575.

- LEI Shunguang, SHU Hongchun, LI Zhimin. Full-half bridge hybrid VSC-HVDC transmission line protection method based on power characteristics of bridge arms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3563-3575.
- [11] JIANG S Q, WANG T, LI G Q, et al. DC fault current clearance coordinated control strategy for DC grid with hybrid MMC[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 161: 110189.
- [12] 王智博, 田野, 朱义东. 新型旁路型 MMC 子模块及其直流故障穿越策略[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2): 255-264. WANG Zhibo, TIAN Ye, ZHU Yidong. New bypass MMC sub-module and its DC fault ride-through strategy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 255-264.
- [13] 刘宇昂, 戴志辉, 杨明玉, 等. 柔性直流电网故障电流复合抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 93-101. LIU Yuang, DAI Zhihui, YANG Mingyu, et al. Composite fault-current suppression strategy for flexible DC grids[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 93-101.
- [14] 周国梁, 高丽萍, 梁言桥, 等. 柔性直流输电系统多端异构通用化阻抗建模与分析[J]. 中国电力, 2025, 58(3): 73-85. ZHOU Guoliang, GAO Liping, LIANG Yanqiao, et al. Multi-terminal heterogeneous generalized impedance modeling and analysis of MMC-MTDC transmission systems[J]. Electric Power, 2025, 58(3): 73-85.
- [15] 刘晓军, 吴星儒, 胡晓晨, 等. 采用电流增量关联度的柔直配电网双端量保护[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(6): 1-11. LIU Xiaojun, WU Xingru, HU Xiaochen, et al. Dual-terminal protection of flexible DC distribution lines using current increments correlation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(6): 1-11.
- [16] 刘思奇, 胡鹏飞, 王栋, 等. 基于 MMC 主动限流的 VSC-HVDC 双极短路故障控保协同策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(10): 192-202. LIU Siqi, HU Pengfei, WANG Dong, et al. Collaborative control and protection strategy for bipolar short-circuit fault in VSC-HVDC based on active MMC current limiting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 192-202.
- [17] 陈晓龙, 韩小文, 李斌, 等. 基于源网配合的 MMC 直流电网自适应故障清除方案[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6537-6550. CHEN Xiaolong, HAN Xiaowen, LI Bin, et al. An adaptive fault clearing scheme for MMC DC grid based on source-network coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6537-6550.
- [18] 魏子文, 王琛, 王毅, 等. 基于负直流电压控制的 MMC 快速无闭锁故障穿越策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1611-1621. WEI Ziwen, WANG Chen, WANG Yi, et al. A fast non-blocking fault ride-through strategy for MMC based on negative DC voltage control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1611-1621.
- [19] 焦艳丽, 樊小朝, 常喜强, 等. 具有直流故障自清除能力的改进 MMC 子模块[J]. 山东电力技术, 2023, 50(4): 51-57. JIAO Yanli, FAN Xiaochao, CHANG Xiqiang, et al. Improved MMC submodule with DC fault self-cleaning ability[J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(4): 51-57.
- [20] 马文忠, 王昊, 王玉生, 等. 子模块混合型 MMC 直流输电系统的优化设计及其直流故障穿越策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 80-90. MA Wenzhong, WANG Hao, WANG Yusheng, et al. Optimization design and DC fault traversal strategy of submodule hybrid MMC DC transmission system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(9): 80-90.
- [21] CHEN Y Y, PAN S Z, HUANG M, et al. MMC-MTDC transmission system with partially hybrid branches[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2021, 5(2): 124-132.
- [22] 陆翌, 吴俊健, 裘鹏, 等. 基于桥臂等效电容的全桥子模块型 MMC 快速仿真方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 47-54. LU Yi, WU Junjian, QIU Peng, et al. A rapid simulation method for full-bridge sub-module MMC based on bridge arm equivalent capacitance[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 47-54.
- [23] 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.
- [24] ZHANG J R, HE B N, CUI R X, et al. Novel adaptive reclosing scheme of MMC-HVDC transmission lines based on phase synchronization compensation control[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(9): 1836-1848.
- [25] 张紫如, 付富豪, 赵西贝, 等. 采用高低阀接线的嵌套型 MMC 拓扑及其直流故障穿越策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 154-164. ZHANG Ziru, FU Fenghao, ZHAO Xibei, et al. Topology and DC fault ride-through strategy of embedded modular multi-level converter with high-/ low-voltage valve connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 154-164.
- [26] 李国庆, 王晓雪, 江守其, 等. 基于混合型 MMC 的柔性直流电网故障穿越协同控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4817-4825. LI Guoqing, WANG Xiaoxue, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategy of fault ride-through for DC grid based on hybrid MMC[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4817-4825.
- [27] 严俊, 陈力绪, 许建中, 等. 基于暂态能量流的 MMC-HVDC 系统故障建模及仿真分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 20-33. YAN Jun, CHEN Lixu, XU Jianzhong, et al. Fault modeling and simulation analysis method of MMC-HVDC system based on transient energy flow[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(3): 20-33.

[28] 胡凯凡, 茆美琴, 何壮, 等. 直流短路故障下基于暂态能量抑制的 MMC-HVDC 电网主电路电感参数优化[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(5): 1680-1690.
HU Kaifan, MAO Meiqin, HE Zhuang, et al. Optimization of inductance parameters of main circuit for MMC-HVDC grid based on transient energy suppression under DC short-circuit faults[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(5): 1680-1690.

[29] ZHOU H Y, YAO W, ZHOU M, et al. Active energy control for enhancing AC fault ride-through capability of MMC-HVDC connected with offshore wind farms[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(3): 2705-2718.

[30] 路茂增, 苏田田, 赵艳雷, 等. 混合型 MMC 器件损耗分布与电容纹波电压综合优化方法[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(11): 157-163.
LU Maozeng, SU Tiantian, ZHAO Yanlei, et al. Comprehensive optimal method of device loss distribution and capacitor voltage ripple for hybrid modular multi-level converter[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(11): 157-163.

[31] 许树楷, 周月宾, 杨柳, 等. 应用于远距离架空线直流输电的混合 MMC 直流故障清除方式比较分析[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(2): 3-13.
XU Shukai, ZHOU Yuebin, YANG Liu, et al. Analysis and comparison of the fault-clearing approaches for hybrid MMCs in HVDC system with long-distance overhead lines[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(2): 3-13.

[32] GANJI R, SINGH J. A modified modular multilevel converter

to reduce the second order ripples in the submodule capacitor voltage: Design and analysis[J]. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2024, 52(7): 3357-3384.

[33] ZHANG H B, XIANG W, WEN J Y. Dual grid-forming control with energy regulation capability of MMC-HVDC system integrating offshore wind farms and weak grids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(1): 261-272.

[34] 赵静波, 李文博, 朱鑫要, 等. 考虑电容电压平衡的混合型 MMC 调制波分配策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(6): 63-72.
ZHAO Jingbo, LI Wenbo, ZHU Xinyao, et al. Hybrid MMC modulation wave distribution control strategy considering capacitor voltage balance[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 36(6): 63-72.

作者简介:



刘晨旭

刘晨旭(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为模块化多电平换流器与柔性直流输电(E-mail: 952245010@qq.com);

何柏娜(1977), 女, 博士, 副教授, 通信作者, 研究方向为电力系统暂态特性分析及高电压绝缘;

冯汝明(1989), 男, 硕士, 工程师, 从事新能源并网技术、电力系统过电压、新型储能技术工作。

DC fault ride-through method of hybrid MMC with low FBSM ratio

LIU Chenxu¹, HE Baina¹, FENG Ruming², GAO Lei¹, LI Zuyuan¹, DAI Weihai¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Inner Mongolia Power Research Institute Branch, Hohhot 010020, China)

Abstract: The modular multilevel converter (MMC) is widely used in flexible direct current projects. The fault clearance speed of hybrid MMCs is closely related to the proportion of full bridge sub-modules (FBSMs). To address the issue of sub-module overvoltage caused by unbalanced energy absorption between half bridge sub-modules (HBSMs) and FBSMs during the clearance of a bipolar short-circuit fault, this paper designs an energy-assisted isolation branch suitable for hybrid MMCs with a low FBSM ratio. By bypassing the HBSMs before blocking, the energy released by the submodules is reduced, thereby lessening the transient energy absorption burden on the FBSMs and suppressing FBSM overvoltage. To shorten the fault clearance time, this paper proposes a dual-branch coordinated operation strategy. A transient energy absorption branch is connected in parallel at the port side to assist in absorbing the fault's transient energy and accelerate fault clearance. A two-terminal hybrid MMC-based flexible direct current transmission system model is built on the PSCAD/EMTDC platform to verify the effectiveness of the proposed scheme. Simulation results show that the proposed dual-branch coordinated operation strategy can effectively suppress sub-module overvoltage, shorten the fault clearance time, and reduce the operational cost associated with rapid self-clearing of faults in hybrid MMCs.

Keywords: modular multilevel converter (MMC); fault ride-through; sub-module overvoltage; fault transient energy; accelerate fault clearance; dual-branch cooperative operation strategy

(编辑 陈雯嘉)