DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.9.224 **中图分类号**：TM721.1 **文献标志码**：A

抑制混合级联直流输电系统受端后续换相失败联合控制策略

周 楠，张 巍
(上海理工大学机械工程学院，上海 200093)

摘要：混合级联直流输电系统受端由电网换相换流器LCC(line commutated converter)和模块化多电平换流器MMC (modular multilevel converter)并联模块串联而成，此特殊结构已应用于实际工程。但由于LCC极难避免的首次换相失败以及受端LCC和MMC之间复杂的电气特性关系，抑制混合级联直流输电系统受端后续换相失败的控制策略成为难点。为此，提出了一种抑制混合级联输电系统后续换相失败联合控制策略，即将逆变侧LCC关断角的变化量转化为MMC发出的无功功率，并且进行合理的MMC无功功率分配，同时在LCC中加入非线性低压限流VDCOL(voltage dependent current order limiter)控制策略，以达到对混合级联直流输电系统后续换相失败的有效抑制。针对所提出的受端联合控制策略，在PSCAD中搭建对应的仿真模型并进行仿真分析，结果验证了所提方法的正确性以及对多种故障的适应性。

关键词：混合级联；后续换相失败；关断角；功率分配；低压限流；联合控制

Joint Control Strategy for Suppressing Subsequent Phase Change Failures at the Receiving End of Hybrid Cascaded DC Transmission Systems

ZHOU Nan, ZHANG Wei
(School of mechanical engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The receiving end of the hybrid cascaded DC transmission system adopts a series structure composed of a line commutated converter (LCC) and parallel-connected modular multilevel converter (MMC) modules. This special structure has been applied in practical engineering. However, due to the extremely unavoidable first phase change failure of LCCs and the complex electrical characteristic relationship between LCCs and MMCs at the receiving end, the control strategy for suppressing the subsequent phase change failure at the receiving end of the hybrid cascaded DC transmission system has become difficult. To this end, a joint control strategy for suppressing subsequent phase change failure in hybrid cascaded DC transmission systems is proposed, which is to convert the variation of the inverter-side LCC extinction angle into the reactive power issued by the MMC, and to carry out a reasonable reactive power allocation of the MMC, and at the same time, to add a nonlinear voltage dependent current order limiter (VDCOL) control strategy in the LCC to achieve effective suppression of subsequent phase change failures in the hybrid cascaded DC transmission system. A simulation model is constructed in PSCAD to analyze the proposed joint control strategy, and the correctness of the proposed method and its adaptability to multiple faults are verified.

Keywords: Hybrid cascade; subsequent phase change failure; extinction angle; power distribution; low-voltage current limiting; joint control

收稿日期：2024-09-13；**修回日期**：2024-11-14，2024-12-25；**录用日期**：2025-02-17；**网络首发日期**：2025-03-06
基金项目：上海市重点实验室开放基金资助项目(Z-2019-304-001)
This work is supported by Shanghai Key Laboratory Open Fund Funding Project under the grant Z-2019-304-001

随着时代的发展，传统高压直流输电技术HVDC(high voltage direct current)因其适用于远距

离大容量输电，具有线路造价低、线路损耗小等优点，已被广泛应用于实际工程中[1-2]。但由于 HVDC 中电网换相换流器 LCC(line commutated converter)的存在，使得线路存在换相失败的风险，可能会导致系统中断，使电网的稳定性受到严重影响[3]。为了应对这一挑战，模块化多电平换流器 MMC (modular multilevel converter)应运而生[4]，相较于传统高压直流输电系统 LCC-HVDC，模块化多电平换流器直流输电 MMC-HVDC 具有更好的可靠性和稳定性，不会发生换相失败[5]。但是 MMC 由于涉及更为复杂的电子器件和控制系统，其建造和维护成本较高[6]。

混合级联直流输电系统受端结合了传统 LCC 及 MMC 的优势，在降低运维成本的同时，因 MMC 在故障期间可以补偿无功功率，也降低了系统发生换相失败的可能性[7]。目前我国已经投入运行的白鹤滩特高压直流输电项目是世界上首个采用混合级联结构建造的直流输电工程，其可达到最大 ±800 kV/8 000 MW 的传输容量[8]。换相失败作为混合级联直流输电系统中一种常见的故障，由于 MMC 的无功功率调节能力有限，在严重交流故障下，系统第一次换相失败极其难以抑制。但第一次换相失败对电网造成的影响有限[9]，而后续换相失败严重时会引发直流闭锁[10]，对系统安全稳定运行危害极大，因此本文聚焦于混合级联直流输电系统后续换相失败的研究。目前针对抑制 LCC-HVDC 系统后续换相失败的研究已趋于成熟。文献[11]通过对触发角的预测，实现后续换相失败的抑制；文献[12]通过调节关断角的大小从而提高系统的稳定性；文献[13]通过改进非线性低压限流 VDCOL (voltage dependent current order limiter)，提高系统抵御故障的能力；文献[14]通过对电气量的顺序进行合理调节，实现系统后续换相失败的抑制；文献[15]提出了一种利用不对称故障的特性抑制后续换相失败的控制策略。

相较于传统 LCC-HVDC 系统，由于混合级联直流输电系统受端构造特殊，其受端 LCC 与多组并联而成的 MMC 串联形成的结构使得故障暂态过程极其繁复，其后续换相失败的研究也更复杂。文献[16]分析了混合级联直流输电系统发生后续换相失败的机理；文献[17]定量分析了混合级联直流输电系统的换相失败抑制能力及暂态电压稳定性；文献[18]对混合级联直流输电系统发生后续换相失败作出有效预测。当故障发生后，相较于普通高压直流输电系统，混合级联直流输电系统受端 MMC 可以快速补充系统所需的无功功率缺额，从而达到有效抑制系统后续换相失败的目的[19]。虽然关于混合级联直流输电系统后续换相失败的抑制策略已经有一些相关研究，如文献[19]通过增加 MMC 发出的无功功率来补偿系统无功功率缺额，从而起到抑制后续换相失败的作用；文献[20]提出了一种新型无功功率协调控制策略以抑制后续换相失败；文献[21]提出了一种基于混合级联直流输电系统故障安全域的控制策略，对系统后续换相失败进行有效抑制。但是以上文献中有关后续换相失败的抑制策略通常只针对 MMC 无功功率快速补偿及受端功率恢复速度进行研究，缺乏对 MMC 无功功率补偿效果、受端无功功率损耗及有功功率传输水平的综合考虑。

本文在现有混合级联研究后续换相失败的基础上，提出了一种抑制混合级联直流输电系统后续换相失败联合控制策略，即将逆变侧 LCC 关断角的变化量转化为 MMC 发出的无功功率，并通过 MMC 间的合理无功功率分配，从而起到快速支撑故障期间逆变侧交流母线电压的效果，同时在 LCC 中加入 VDCOL 控制策略，在促进有功功率传输的同时，减少无功功率的损耗，以此实现对混合级联直流输电系统的后续换相失败抑制。针对本文提出的受端联合控制策略，基于 PSCAD 建立了电磁暂态仿真模型，并在模型中对联合控制策略进行分析。仿真结果表明，所提联合控制策略能够有效抑制混合级联直流输电系统受端的后续换相失败。

1　混合级联直流输电系统拓扑结构

图 1 为混合级联直流输电系统的拓扑结构，整

流站由 2 个 LCC 串联而成，逆变站采用的结构为高端的 1 个 LCC 串联低端 3 个并联的 MMC。图中：U_1 为整流站交流母线电压；T_1、T_2 为送端换流变压器；T_{S1}、T_{S2}、T_{S3}、T_{S4} 为受端换流变压器；U_{S1} 为逆变侧 LCC 交流母线电压；U_{S2} 为逆变侧 MMC1 的交流母线电压；U_{S3} 为逆变侧 MMC2 的交流母线电压；U_{S4} 为逆变侧 MMC3 的交流母线电压。

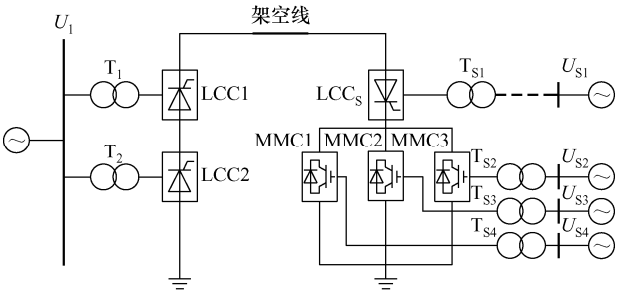


图 1 混合级联直流输电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of hybrid cascaded DC transmission system

2 混合级联直流输电系统后续换相失败机理分析

以混合级联直流输电系统受端交流侧发生三相短路故障为例，设置接地电感为 0.16 H，故障开始时间为 2.0 s，故障持续时间为 0.3 s，分析各电气量的变化过程，如图 2 所示。

阶段一，混合级联直流输电系统运行在正常状态。

此时整流侧所采取的控制方式为定电流控制，由于定关断角控制后可提高交流侧功率因数及逆变器的利用率[22]，因此逆变侧所采用的控制方式为定关断角控制。混合级联输电系统交流侧和直流侧之间不断交换无功功率，此时混合级联输电系统中的 MMC 模块能够有效供给换流器所需要的无功功率。

阶段二，混合级联直流输电系统发生第一次换相失败直至恢复。

混合级联直流输电系统受端交流侧发生三相短路故障后，逆变侧交流母线电压急剧下降，此时关断角降低到 0°，逆变侧 LCC 发生首次换相失败。此时换流阀发生短路，致使逆变侧 LCC 直流电流迅速增大，逆变侧 LCC 直流电压迅速降低。

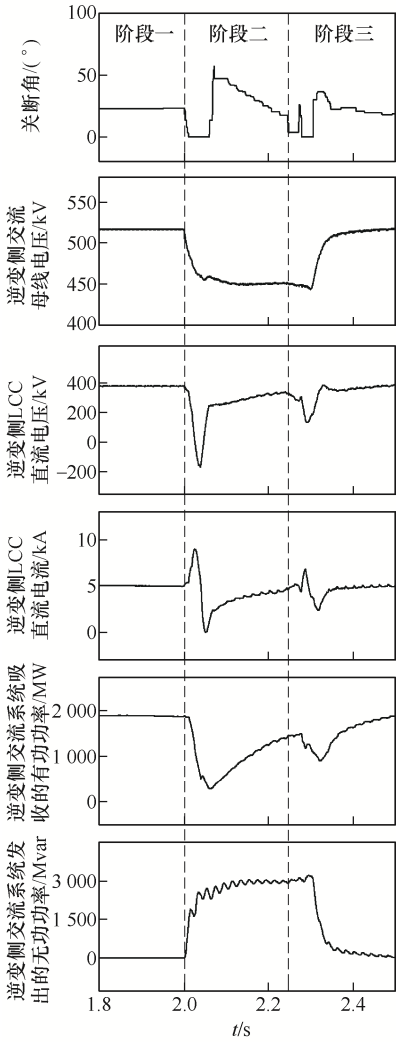


图 2 混合级联输电系统电气量变化过程

Fig. 2 Variation process of electrical quantities in hybrid cascade transmission system

逆变侧 12 脉动 LCC 换流器与交流系统间的无功功率交换值 Q_{ac} 与 U_{S1}、直流电流 I_d 和关断角 γ 的关系为

$$Q_{ac}=I_d\sqrt{\frac{72}{\pi^2}k_1^2U_{S1}^2-\left(\frac{6\sqrt{2}}{\pi}k_1U_{S1}\cos\gamma-\frac{6X_TI_d}{\pi}\right)^2} \tag{1}$$

式中：k_1 为逆变侧 LCC 换流变压器变比；X_T 为换

流变压器二次侧的等值换相电抗。

将 Q_{ac} 对 I_d 求偏导，可得

$$\frac{\partial Q_{ac}}{\partial I_d}=\sqrt{\frac{72}{\pi^2}k_1^2U_{S1}^2-\left(\frac{6X_TI_d}{\pi}-\frac{6\sqrt{2}}{\pi}k_1U_{S1}\cos\gamma\right)^2}\cdot\frac{\dfrac{6X_TI_d}{\pi}\left(\dfrac{6X_TI_d}{\pi}-\dfrac{6\sqrt{2}}{\pi}k_1U_{S1}\cos\gamma\right)}{\sqrt{\dfrac{72}{\pi^2}k_1^2U_{S1}^2-\left(\dfrac{6X_TI_d}{\pi}-\dfrac{6\sqrt{2}}{\pi}k_1U_{S1}\cos\gamma\right)^2}} \tag{2}$$

代入系统稳态运行参数可知偏导数大于 0，可得随着直流电流的增大，换流站吸收的无功功率增加。

故障发生后整流侧的定电流控制模式迅速动作，使逆变侧 LCC 直流电流下降，因此，当系统发生第一次换相失败后，交流系统向逆变器发出的无功功率呈现先上升后下降的趋势。相较于传统高压直流输电系统，混合级联直流输电系统依靠其特殊的结构，通过 MMC 的无功补偿，虽然无法避免系统发生第一次换相失败，但是可以有效抑制逆变侧交流母线电压的进一步跌落。当逆变侧定电流控制输出的超前触发角超过定关断角控制输出的超前触发角时，逆变侧的控制方式由原来的定关断角控制模式切换为定电流控制模式。在混合级联直流输电系统第一次换相失败结束后，系统进入恢复过程，电流指令值在受端 LCC 中 VDCOL 的控制下迅速增大，逆变侧交流系统吸收的有功功率开始上升，保证了系统充分的功率传输。但由于此时逆变侧交流母线电压低于基准值，所以故障风险仍然存在，混合级联输电系统中的 MMC 模块所提供的无功功率不足以支撑逆变侧交流母线电压恢复至正常运行水平，需要系统补充无功功率缺额，这会导致逆变侧交流母线电压进一步跌落。随着逆变侧 LCC 直流电流的增大和逆变侧交流母线电压的减小，增加了关断角的跌落幅度，最终使得混合级联输电系统发生后续换相失败，即

$$\gamma=\arccos\left(\frac{\sqrt{2}X_TI_d}{k_1U_{S1}}+\cos\beta\right) \tag{3}$$

式中，β 为触发超前角。

阶段三，混合级联直流输电系统发生第二次换相失败直至恢复。

系统发生后续换相失败后，直流电流的变化过程与阶段二类似，逆变侧交流系统发出的无功功率都是先增大后减小。同样地，由于混合级联系统中 MMC 的存在，使得系统发生第二次换相失败后逆变侧交流母线电压的跌落减少。逆变侧的定电流控制重新切换为定关断角控制，随着系统各电气量达到稳定状态，后续换相失败也随之结束，混合级联直流输电系统的无功功率交换将逐渐趋于稳定。

由上述分析可知，造成混合级联输电系统受端发生后续换相失败的主要原因是首次换相失败恢复阶段中逆变侧控制方式由定关断角控制切换为定电流控制。关断角的变化使得系统产生大量的无功功率缺额，线路功率传输水平不足，虽然混合级联系统受端凭借其特殊的MMC结构使得故障严重程度有所减缓，但仍无法抑制后续换相失败的发生。因此，为了避免混合级联输电系统后续换相失败的发生，需要在第一次换相失败恢复阶段，通过对其系统的无功功率交换进行控制，将关断角维持在正常水平，同时要保证功率的充分传输，以此减小系统后续换相失败的发生概率，从而有利于保障混合级联直流输电系统稳定运行。

3　抑制后续换相失败的联合控制策略

结合第 2 节讨论，基于混合级联特高压直流输电系统受端的结构特性，本文充分发挥其结构优势，提出了一种结合基于关断角的 MMC 无功补偿策略和基于 LCC 的非线性 VDCOL 控制策略的受端无功联合控制策略。一是从关断角入手，由 MMC 补偿受端系统无功功率缺额；二是通过限制直流电流，保证直流功率的充分传输，从而抑制混合级联直流输电系统后续换相失败的发生。混合级联直流输电系统受端联合控制策略的总体框图如图 3 所示。

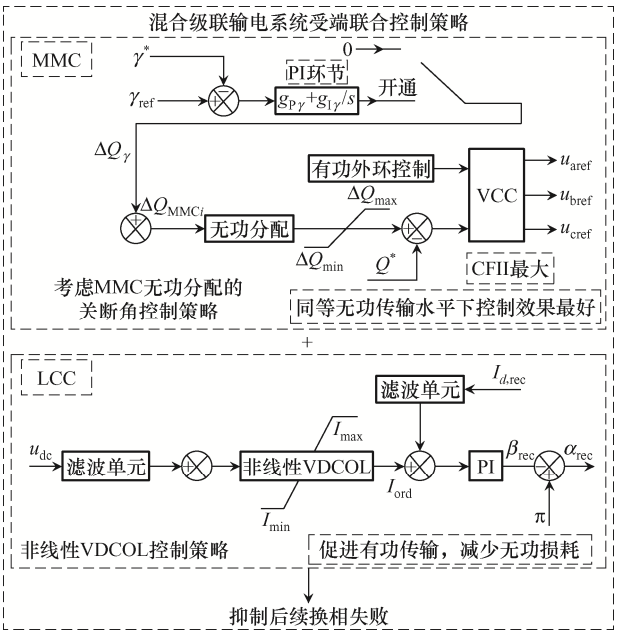


图 3 混合级联系统受端联合控制策略

Fig. 3 Joint control strategy for the receiving end of hybrid cascaded system

3.1 基于关断角的无功补偿策略

本节提出基于关断角的MMC无功功率分配控制策略，目的主要为把混合级联输电系统受端 LCC 关断角的变化量转化成 MMC 发出的无功功率值，以此来补偿LCC因换相失败产生的无功功率缺额，从而减小逆变侧交流母线电压的跌落幅度，保证其故障后的恢复，以此来抑制混合级联直流输电系统后续换相失败。具体控制流程如下。

(1)通过比例积分 PI(proportional integral)控制环节对混合级联直流输电系统受端 LCC 关断角的实际值 γ^*和参考值 γ_{ref}的变化进行分析计算，获得对应的无功功率补偿容量 ΔQ_γ。其中无功补偿量 $\Delta Q_\gamma=g_{\mathrm{P}\gamma}\Delta\gamma+g_{\mathrm{I}\gamma}\int\Delta\gamma\mathrm{d}t$，$g_{\mathrm{P}\gamma}$和 $g_{\mathrm{I}\gamma}$分别为混合级联直流输电系统受端关断角控制中 PI 环节的比例增益和积分增益。

(2)设置判断环节，从而控制关断角控制策略的投切。当判断环节监测到 $\gamma^*<\gamma_{\mathrm{ref}}$后，立即投入基于关断角的 MMC 无功分配控制策略，把无功功率补偿量按所提方法进行合理的无功功率分配，进而增加 MMC 无功功率输出，补偿因换相失败而产生大量无功缺额的逆变侧 LCC，防止逆变侧交流母线电压的进一步跌落，有效抑制了混合级联直流输电系统的后续换相失败。

3.1.1 考虑 MMC 间的无功功率分配原则

为了实现无功功率分配的最大化利用，达到最大化抑制混合级联直流输电系统后续换相失败的能力，提出 3 个并联 MMC 之间的无功分配原理。基于多馈入交互作用因子 MIIF (multi-infeed interaction factor)提出了混合级联直流输电系统相互作用因子 LMIF(LCC-MMC interaction factor)来计算混合级联系统中 LCC 和 MMC 之间的电压关系[23]，可表示为

$$L_{\mathrm{LM}i}=\frac{\Delta U_{\mathrm{L}}}{\Delta U_{\mathrm{M}i}}=\left|\frac{Z_{\mathrm{LM}i}}{Z_{ii}}\right| \tag{4}$$

式中：ΔU_{L}为混合级联直流输电系统受端 LCC 的交流电压变化量；$\Delta U_{\mathrm{M}i}$为混合级联直流输电系统受端第 i 个 MMC 的交流电压变化量；$Z_{\mathrm{LM}i}$为 LCC 的交流母线与第 i 个 MMC 的交流母线之间的等效互阻抗；Z_{ii}为第 i 个 MMC 对应的等效自阻抗。$L_{\mathrm{LM}i}$表示受端 LCC 和第 i 个 MMC 之间的电压相互作用，$L_{\mathrm{LM}i}$越大，受端 LCC 和第 i 个 MMC 之间的电压相互作用越强。

第 i 个 MMC 交流母线处的电压稳定系数 VSF(voltage stability factor)[24]可以表示为

$$V_{\mathrm{M}i}=\frac{\Delta U_{\mathrm{M}i}}{\Delta Q_{\mathrm{M}i}} \tag{5}$$

式中：$\Delta Q_{\mathrm{M}i}$为注入混合级联直流输电系统受端第 i 个 MMC 的无功功率变化量；$\Delta U_{\mathrm{M}i}$为由 ΔQ_i引起的第 i 个 MMC 的交流电压变化量。

由式(4)和式(5)可得，由 $\Delta Q_{\mathrm{M}i}$引起的受端 LCC 的交流电压变化量可表示为

$$\Delta U_{\mathrm{LM}i}=L_{\mathrm{LM}i}V_{\mathrm{M}i}\Delta Q_{\mathrm{M}i} \tag{6}$$

由式(6)可以看出，逆变侧 LCC 交流母线电压与第 i 个 MMC 的无功功率有关。因此提出无功功率相互作用因子 RIF(reactive power interaction factor)，以表示逆变侧 LCC 交流母线电压和第 i 个 MMC 之间输出无功功率的影响关系，由式(6)变形得到 RIF 的表达式为

$$R_{\mathrm{LM}i}=\frac{\Delta U_{\mathrm{LM}i}}{\Delta Q_{\mathrm{M}i}}=L_{\mathrm{LM}i}V_{\mathrm{M}i} \tag{7}$$

3 个并联 MMC 的无功功率分配原则为

$$\Delta Q_{\mathrm{MMC}i}=\frac{R_{\mathrm{LM}i}}{\sum_{i=1}^{k}R_{\mathrm{LM}i}}\Delta Q_{\gamma} \tag{8}$$

式中：$\Delta Q_{\mathrm{MMC}i}$为第 i 个 MMC 输出的无功功率；k 为 MMC 的数量。

计算每个MMC的无功功率参考变化并输入至外部控制器。

为了进一步比较不同无功控制策略下抑制系统后续换相失败的效果，利用换相失败免疫指数 CFII (commutation failure immunity index)来验证该控制策略的有效性，CFII 广泛应用于评估系统换相失败缓解能力的大小[25]，可表示为

$$C_{\mathrm{F}}=\frac{U_{\mathrm{N}}^2}{L_{\mathrm{f}}\omega P_{\mathrm{N}}}\times 100\% \tag{9}$$

式中：U_{N}为逆变侧 LCC 交流母线的额定电压；L_{f}为换相失败临界电感；ω为电网角频率；P_{N}为额定功率。较大的 CFII 表明系统具有较强的换相失败缓解能力，因此本文采用此指标评估系统换相失败性能。

基于关断角的MMC无功功率分配策略最大化利用了受端 3 个并联 MMC 输出的无功功率。在补充了受端 LCC 的无功功率缺额的同时，也达到了最好的换相失败抑制效果，即 CFII 最大。

3.2 基于非线性 VDCOL 的直流电流控制策略

混合级联输电系统逆变侧一般采用传统 VDCOL 控制，即线性化控制，在系统直流侧电压下降到参考值后，启动该控制方式，通过降低直流电流指令值，利用整流侧的定电流控制方式对直流电流起到降低效果，从而起到减少无功功率损耗、抑制系统发生换相失败的作用[26]。传统 VDCOL 控制方式的部分特性曲线如图 4 中虚线 *AB* 所示。当系统处于正常运行状态时，直流电流指令值为额定值 I_{N}，如图 4 中直线 *BD* 所示。当系统的直流电压 U_{dc}低于 $0.9U_{\mathrm{N}}$时，VDCOL 模块开始动作，依照系统直流侧的实际运行电压 U_{dc}实时进行直流电流指令的调节，如图 4 中折线段 *BAC* 所示。当直流侧电压 U_{dc}低于 $0.4U_{\mathrm{N}}$后，通过限制直流电流指令值在 $0.55I_{\mathrm{N}}$水平，从而保持充分的功率输送能力，如图 4 中直线 *AC* 所示。

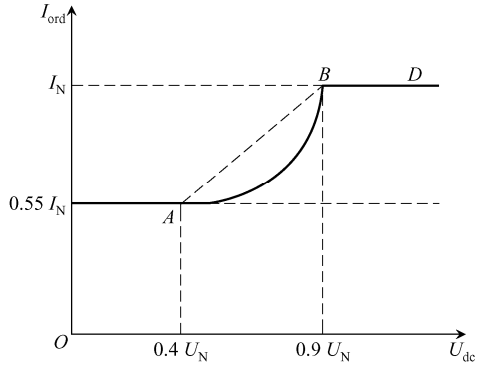


图 4　非线性 VDCOL 设计图

Fig. 4 Diagram of nonlinear VDCOL design

虽然传统VDCOL控制策略在混合级联系统发生换相失败后起到了一定作用，但在实际应用中面临电流指令的灵敏度调节能力有限的缺陷，系统会产生额外的无功功率损耗以及功率传输不足等问题，在故障发生后可能会出现系统遭遇连续换相失败的现象[27]。基于以上讨论，本文采用了一种非线性的 VDCOL 控制策略，其部分运行特性如图 4 中弧线 *AB* 所示。

该非线性 VDCOL 控制策略的具体求解过程如下。

将弧线 *AB* 看作是一个长轴为 1.0，短轴为 0.9 的椭圆的 1/4 圆弧，该椭圆的方程可以表示为

$$\frac{(U_{\mathrm{dc}}-0.4)^2}{0.5^2}+\frac{(I_{\mathrm{ord}}-1)^2}{0.45^2}=1 \tag{10}$$

式中，I_{ord}为电流指令值，其表达式为

$$I_{\mathrm{ord}}=1-\sqrt{0.45^2-0.81(U_{\mathrm{dc}}-0.4)^2} \tag{11}$$

综上，U_{dc}与 I_{ord}的关系式为

$$I_{\mathrm{ord}}=\begin{cases}1.00\ \text{p.u.} & U_{\mathrm{dc}}\geqslant 0.90\ \text{p.u.}\\ 1-\sqrt{0.45^2-0.81(U_{\mathrm{dc}}-0.4)^2} & 0.40\ \text{p.u.}\leqslant U_{\mathrm{dc}}<0.90\ \text{p.u.}\\ 0.55\ \text{p.u.} & U_{\mathrm{dc}}<0.40\ \text{p.u.}\end{cases} \tag{12}$$

非线性 VDCOL 控制策略框图如图 3 所示，其中的非线性 VDCOL 模块的表达式如式(12)所示，输入非线性 VDCOL 模块的 U_{dc} 经计算后得到指令值 I_{ord}。

在故障恢复前期，即直流电压较低时，位于图 4 中弧线 *AB* 前半段，此时圆弧斜率较小，直流电流增长速度较慢，减少了系统的无功损耗；在故障恢复后期，即直流电压较高时，位于图 4 中弧线 *AB* 后半段，此时圆弧斜率较大，直流电流的增长幅度较为明显，混合级联直流输电系统的有功功率得以补充，使得系统尽快恢复至正常运行水平。

综上所述，基于 MMC 功率分配的关断角无功控制策略可以提升换流电压恢复水平，使得逆变侧在同等无功功率输出下实现无功支撑效果的最大化。基于逆变侧 LCC 处的非线性 VDCOL 控制策略可以更好地调节直流电流恢复速度，从而减少无功功率损耗，促进有功功率传输。因此，结合受端 LCC 和 MMC 的结构优势，本文提出的抑制混合级联直流输电系统受端后续换相失败的联合控制策略在促进有功功率传输、减少无功功率损耗的同时，能在同等无功功率的传输水平下使得控制效果最好，充分发挥其抑制后续换相失败的作用，提高电网稳定水平。

4 算例仿真

为了验证所提联合控制策略对混合级联输电系统逆变侧后续换相失败抑制的有效性，在 PSCAD 中使用图 1 所示的系统模型进行仿真，系统主要参数见表 1。基于 LCC 与 MMC 间电气距离较近的场景进行分析，若电气距离增加，则 MMC 的无功功率补偿效果会减弱[28]。

4.1 不同故障类型下系统暂态特性对比

通过仿真分析对比不采用控制策略和考虑联合控制策略的不同点，特别考虑在不同故障形式下 2 种控制方式的系统暂态特性对比分析，其中案例 1 不采取任何控制策略，案例 2 采取本文所提联合控制策略。

表 1 混合级联直流输电系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of hybrid cascaded DC transmission system

器件	参数	数值
逆变侧 LCC	额定有功功率/MW	2 000
	交流系统电压/kV	525
	直流电压/kV	380
	变压器变比	525/170
	关断角额定值/(°)	17
	额定容量/MVA	1 000
逆变侧 MMC	额定有功功率/MW	667
	直流电压/kV	380
	变压器变比	525/208

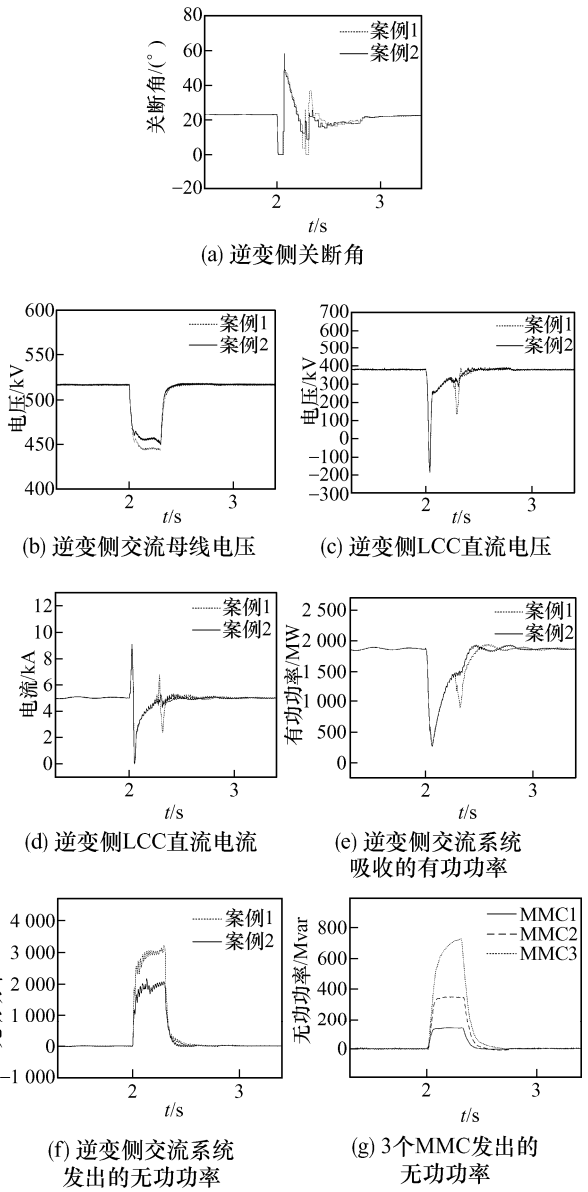
4.1.1 三相故障下系统暂态特性对比

工况 1：混合级联直流输电系统受端设置三相接地短路故障，故障点位置如图 1 加粗虚线部分所示，即逆变侧交流母线处，故障发生时刻为 2.00 s，接地故障电感设置为 0.16 H，故障持续时间为 0.30 s。图 5 为三相故障下系统暂态特性对比。

当混合级联直流输电系统受端发生三相接地短路故障时，对比无控制策略和采用联合控制策略的系统暂态特性曲线，由图 5(a)可以看出，当系统无故障运行时，混合级联输电系统逆变侧的关断角维持在安全稳定区间，关断角为 22° 左右。在不采用任何控制策略时，由于故障较为严重，系统关断角在故障发生后第一次跌落至 0 后，于 2.28 s 处再次跌落至 0，系统发生了后续换相失败。而在采用联合控制策略后，当系统在 2.00 s 时发生故障后，尽管第一次换相失败无法避免，但在第一次换相失败恢复期间，特别是 2.29 s 后，关断角不再发生跌落，开始稳定回升，直至恢复正常水平。

采用联合控制策略后，由图 5(b)、(c)、(g)可知，在关断角无功补偿策略的作用下，故障发生后，受端 3 个 MMC 迅速响应，并按其无功分配策略规定值有序输出无功功率，快速补偿了受端 LCC 所需要的无功功率缺额，一定程度上减缓了逆变侧交流母线电压的跌落幅度。在第一次换相失败恢复时期，所提无功控制策略在第一时间对逆变侧交流母线电压作出强有力的支撑，从而极大地优化了受端 LCC 换流站的工作条件，有效抑制关断角的

再次跌落。



(a) 逆变侧关断角

(b) 逆变侧交流母线电压　(c) 逆变侧LCC直流电压

(d) 逆变侧LCC直流电流　(e) 逆变侧交流系统吸收的有功功率

(f) 逆变侧交流系统发出的无功功率　(g) 3个MMC发出的无功功率

图 5　三相故障下系统暂态特性对比

Fig. 5 Comparison of system transient characteristics under three-phase faults

在故障发生后，不论是否采用控制策略，逆变侧 LCC 直流电流均会迅速抬升，峰值突破 9 kA，之后迅速跌落至 0，逆变侧交流母线电压快速下跌，波动幅度较大。在 2.06 s 时，系统处于第一次换相失败恢复时刻，在无控制策略下，虽然逆变侧 LCC 直流电流开始恢复至正常水平，但是在 2.28 s 左右时，其再次达到 7 kA 左右峰值水平，导致后续换相失败的发生。而此时采用联合控制策略的逆变侧 LCC 直流电流在第一次换相失败恢复后得到有效控制，不再发生激增现象，从而有效缓解关断角的降低幅度，抑制了后续换相失败的发生。

综上可知，本文所提联合控制策略能在一定程度上有效抑制混合级联输电系统受端发生三相故障后的后续换相失败。

4.1.2　单相故障下系统暂态特性对比

工况 2：混合级联直流输电系统受端设置单相接地短路故障，故障发生时刻为 2.00 s，接地故障电感设置为 0.127 8 H，故障持续时间为 0.30 s。图 6 为单相故障下系统暂态特性对比。

由图 6(a)、(b)、(d)可知，当混合级联直流输电系统受端发生单相接地短路故障后，虽然故障严重程度有所减弱，但是不管是否采用控制策略，逆变侧交流母线电压均会快速下跌，直流电流均会快速增加，逆变侧关断角跌至 0，导致系统发生第一次换相失败。对比无控制策略和采用联合控制策略的系统暂态特性曲线，由图 6(c)、(g)得出，采用联合控制策略后，在关断角控制策略的作用下，受端 3 个 MMC 在系统发生第一次换相失败后，迅速增加其输出的无功功率，补偿受端 LCC 的无功功率缺额，有效抑制了逆变侧交流母线电压的后续跌落，避免了混合级联输电系统受端 LCC 换流站后续换相失败的发生，其受端系统稳定性大幅度增强。但是当系统不采用任何控制策略时，逆变侧交流母线电压在 2.30 s 左右下降至 485 kV 附近，系统发生后续换相失败。

在受端 LCC 处引入非线性 VDCOL 控制策略后，虽然在故障发生后短时间内流过受端 LCC 换流站的直流电流最大值超过 7 kA，但在第一次换相失败结束后，逆变侧 LCC 直流电流开始迅速降低，在持续约 0.15 s 后恢复到故障前的正常运行水平，基本稳定在额定值附近。

综上可知，本文所提联合控制策略能在一定程度上有效抑制混合级联输电系统受端发生单相故障后的后续换相失败。

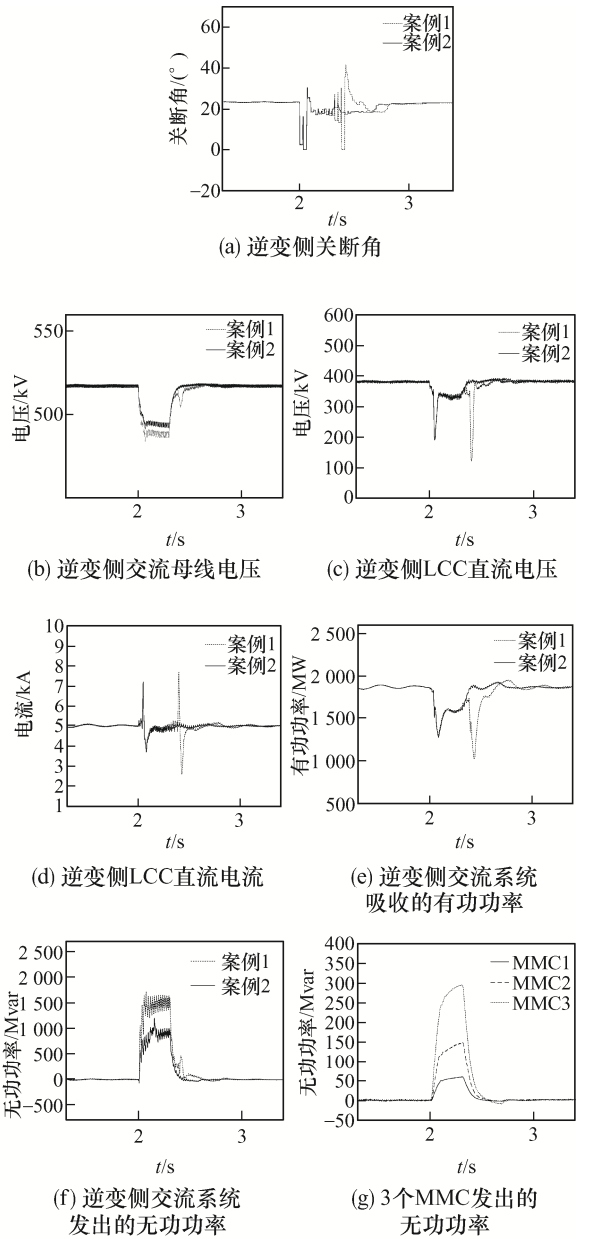


图 6 单相故障下系统暂态特性对比

Fig. 6 Comparison of system transient characteristics under single-phase faults

4.2 MMC 无功功率分配及非线性 VDCOL 有效性验证

为验证本文所提联合控制策略的优越性，设置案例 3，即采用文献[21]中的联合控制策略，分别对本文所提 MMC 无功功率分配控制策略及非线性 VDCOL 控制策略的有效性进行验证。

4.2.1 MMC 无功功率分配有效性验证

图 7 为三相故障发生后，在案例 3 的联合控制策略作用下 3 个 MMC 输出的无功功率。可以看出，当系统发生故障后，由于 3 个 MMC 都工作于定无功功率控制方式下，此时输出的无功功率相同，输出的总无功功率为 1 217 Mvar。而在案例 2 中，因为考虑了 MMC 无功功率分配，3 个 MMC 输出的无功功率从原来的功率均分状态转为输出无功功率指定值，但输出的总无功功率不变。

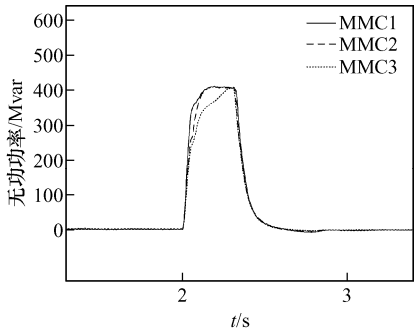


图 7 案例 3 下的 MMC 无功功率输出

Fig. 7 Reactive power output of MMCs under Case 3

在案例 2、案例 3 下的联合控制策略均能抑制系统发生后续换相失败。为进一步验证本文所提联合控制策略的优越性，基于混合级联直流输电系统模型，在 PSCAD 中用不同的接地电感容量来模拟短路故障容量的大小，即故障的严重程度会随着接地电感的减小而增加。模拟混合级联直流输电系统受端交流侧发生三相接地故障，故障持续时间为 0.30 s，后续逐渐减小接地故障电感，对受端 LCC 发生交流故障时，模拟系统在不同故障严重程度下的情况进行仿真。仿真步长设置为 15°，绘制出 CFII 曲线[29]。图 8 为在不同故障严重程度下，混合级联直流输电系统受端交流侧发生三相接地故障的 CFII 曲线。

由图 8 可知，案例 3 中由于不考虑 MMC 功率分配，CFII 较低，当考虑 MMC 功率分配后，即案例 2，CFII 有所提升，系统换相失败缓解能力增强，在总无功功率输出量不变的情况下，得到了最大的换相失败缓解效果，验证了本文所提控制策略的有效性。

4.2.2 非线性 VDCOL 控制策略有效性验证

图 9 为 2 种案例下的系统部分暂态特性。可以看出，在第一次换相失败恢复前期，即逆变侧交流母线电压偏低时，案例 2 在非线性 VDCOL 的作用

下电流指令值维持在较低水平，由于电流的缓慢增长，减少了 LCC 的无功功率损耗，逆变侧交流系统发出的无功功率也随之降低。而在故障恢复后期，案例 2 中响应更快的电流指令值为系统提供了更充足的有功功率支撑，逆变侧交流系统吸收的有功功率增多，使得系统迅速恢复至正常运行状态。

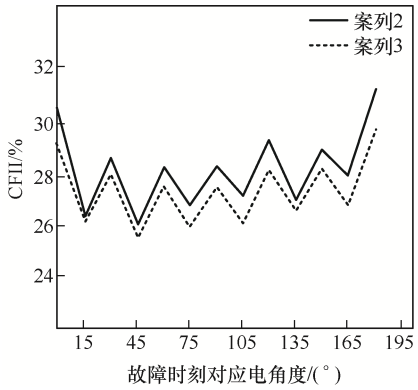


图 8　不同无功控制方式下 CFII 曲线

Fig. 8 CFII curves under different reactive power control modes

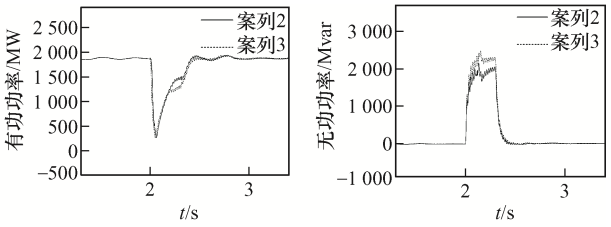


图 9　2 种案例下的系统部分暂态特性

Fig. 9 Partial transient characteristics of the system under two cases

通过以上仿真分析可知，采用本文所提联合控制策略后，在混合级联系统受端故障恢复时期，系统在促进有功功率输送、减少无功功率消耗的同时，能实现在同等无功功率传输水平下使控制效果最好。

5　结论

为了有效抑制混合级联直流输电系统受端发生故障后可能会引发的后续换相失败现象，本文提出了一种结合基于 LCC 的非线性 VDCOL 策略和基于MMC功率分配的关断角无功补偿策略的混合级联输电系统受端联合控制策略，从而对系统的后续换相失败起到抑制作用。利用 PSCAD 搭建对应的仿真实验模型，对本文所提的控制策略进行了仿真及验证，所得结论如下。

(1)将 MMC 功率分配的关断角无功补偿策略和非线性 VDCOL 控制策略相结合，混合级联系统受端发生故障后，该策略能有效抑制关断角的再次跌落，使得功率快速平稳恢复，从而有效抑制系统后续换相失败。

(2)基于 MMC 的关断角无功控制策略可以在总无功功率输出量不变的情况下，得到最大的换相失败缓解效果，而采用非线性VDCOL控制策略后，能更好地调节直流电流恢复速度。采用本文所提联合控制策略后，在混合级联系统受端故障恢复时期，系统在促进有功功率输送、减少无功功率消耗的同时，能实现在同等无功功率的传输水平下使控制效果最好。

参考文献：

[1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
Zhao Wanjun. HVDC Transmission Engineering Technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. (in Chinese)

[2] 游仕洪, 周俊, 程华, 等. 用于不同线路拓扑高压直流电网高效互联的直流模块化多电平变换器设计[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 245-256.
You Shihong, Zhou Jun, Cheng Hua, et al. Design of DC modular multilevel converter for interconnection of HVDC networks with different line topologies [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 245-256. (in Chinese)

[3] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 156-167.
Wang Yongping, Zhao Wenqiang, Yang Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167. (in Chinese)

[4] 文劲宇, 张浩博, 向往, 等. 面向新型电力系统的柔性直流换流器统一控制架构[J]. 中国电机工程学报, 2024,

44(18): 7068-7083.
Wen Jinyu, Zhang Haobo, Xiang Wang, et al. Unified high voltage direct current converter control dedicated for new power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7068- 7083. (in Chinese)

[5] 徐政, 肖晃庆, 张哲任. 柔性直流输电系统[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
Xu Zheng, Xiao Huangqing, Zhang Zheren. Flexible DC Transmission System [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017.

[6] Nami A, Liang Jiaqi, Dijkhuizen F, et al. Modular multilevel converters for HVDC applications: Review on converter cells and functionalities [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 18-36.

[7] 郭春义, 赵成勇, 彭茂兰, 等. 一种具有直流故障穿越能力的混合直流输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4345-4352.
Guo Chunyi, Zhao Chengyong, Peng Maolan, et al. A hybrid HVDC system with DC fault ride-through capability [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4345-4352. (in Chinese)

[8] 雷霄, 杨立敏, 朱艺颖, 等. 白鹤滩–江苏特高压混合级联直流工程数模仿真平台构建及特性研究[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 434-442.
Lei Xiao, Yang Limin, Zhu Yiying, et al. Digital-analog hybrid simulation platform construction and characteristic research of Baihetan-Jiangsu hybrid cascaded UHVDC project [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 434-442. (in Chinese)

[9] 郭春义, 赵剑, 刘炜, 等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 1-10.
Guo Chunyi, Zhao Jian, Liu Wei, et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 1-10. (in Chinese)

[10] 刘磊, 林圣, 刘健, 等. 控制器交互不当引发后续换相失败的机理分析[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3562-3568.
Liu Lei, Lin Sheng, Liu Jian, et al. Mechanism analysis of subsequent commutation failures caused by improper interaction of controllers [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3562-3568. (in Chinese)

[11] 王渝红, 陈立维, 曾琦, 等. 特高压直流分层接入方式下预防换相失败的协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 160-170.
Wang Yuhong, Chen Liwei, Zeng Qi, et al. Coordinated control strategy for preventing commutation failure in a UHVDC system hierarchically connected to an AC grid [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 160-170. (in Chinese)

[12] 王玉麟, 李晓华, 李昊, 等. 一种抑制连续换相失败的定关断角加速控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 56-66.
Wang Yulin, Li Xiaohua, Li Hao, et al. A constant extinction angle acceleration control method for suppressing continuous commutation failure [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 56-66. (in Chinese)

[13] 曹善康, 魏繁荣, 林湘宁, 等. 一种基于自适应电压限值的换相失败抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 165-175.
Cao Shankang, Wei Fanrong, Lin Xiangning, et al. A commutation failure suppression strategy based on adaptive voltage limits [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 165-175. (in Chinese)

[14] Xie Qi, Xiao Xianyong, Zheng Zixuan, et al. An improved reactive power control strategy for LCC-HVDC to mitigate sending end transient voltage disturbance caused by commutation failures [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 146: 108706.

[15] Tian Dachuan, Xiong Xiaofu, Xiao Chao. Early warning and inhibition of HVDC subsequent commutation failure during recovery process under grid fault [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 1051-1062.

[16] 李欣然, 陈海鹏. 混合级联型高压直流输电系统后续换相失败机理[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(5): 101-112.
Li Xinran, Chen Haipeng. Mechanism of subsequent phase commutation failure in hybrid cascaded HVDC transmission system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,

2025, 37(5): 101-112. (in Chinese)

[17] 王鹤, 付禹铭, 边竞, 等. 混合级联直流输电系统换相失败抵御能力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8009-8023.
Wang He, Fu Yuming, Bian Jing, et al. Research on evaluation method of commutation failure resilience in hybrid cascade HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8009-8023. (in Chinese)

[18] 王鹤, 邱腾飞, 潘禹含, 等. 混合级联型 HVDC 系统的后续换相失败预判方法[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 3053-3066.
Wang He, Qiu Tengfei, Pan Yuhan, et al. Subsequent phase commutation failure prediction for hybrid cascaded HVDC system [J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 3053-3066. (in Chinese)

[19] 樊鑫, 郭春义, 杜夏冰, 等. 特高压混合级联直流输电系统抑制逆变站后续换相失败的无功功率调控方法[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3443-3452.
Fan Xin, Guo Chunyi, Du Xiabing, et al. Reactive power coordinated control approach for suppressing subsequent commutation failure of inverter station in hybrid cascaded UHVDC system [J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3443-3452. (in Chinese)

[20] Zhou Bohao, Li Bin, He Jiawei, et al. A novel mitigation strategy of subsequent commutation failures in the hybrid cascaded LCC-MMC HVDC transmission system [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 148: 108969.

[21] 王鹤, 郭家治, 边竞, 等. 基于故障安全域的混合级联直流输电系统后续换相失败抑制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1352-1371.
Wang He, Guo Jiazhi, Bian Jing, et al. Subsequent commutation failure suppression strategy for hybrid cascaded HVDC system based on fault security region [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1352-1371. (in Chinese)

[22] 张勇军. 高压直流输电原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
Zhang Yongjun. Principle and Application of HVDC Transmission [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)

[23] 邵瑶, 汤涌. 采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 108-114, 11.
Shao Yao, Tang Yong. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 108-114, 11. (in Chinese)

[24] 肖浩, 李银红, 段献忠, 等. 计及 LCC-HVDC 交直流系统静态电压稳定的综合短路比强度指标[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4008-4017.
Xiao Hao, Li Yinhong, Duan Xianzhong, et al. Integrated short circuit ratio strength index based on the static voltage stability of the LCC-HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4008-4017. (in Chinese)

[25] Rahimi E, Gole A M, Davies J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 378-384.

[26] 史玉杰, 武娜, 杜欣慧. HVDC 故障恢复特性的分析及改善措施[J]. 电测与仪表, 2016, 53(9): 94-99.
Shi Yujie, Wu Na, Du Xinhui. The analysis of HVDC fault recovery characteristics and enhancement methodologies [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(9): 94-99. (in Chinese)

[27] 孟庆强, 刘泽洪, 洪乐荣, 等. 一种抑制连续换相失败的非线性 VDCOL 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 119-127.
Meng Qingqiang, Liu Zehong, Hong Lerong, et al. A suppression method based on nonlinear VDCOL to mitigate the continuous commutation failure [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 119-127. (in Chinese)

[28] 李佳, 夏勇军, 严才, 等. 混合多馈入直流系统 VSC-HVDC 和滤波器的无功协调控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 100-106.
Li Jia, Xia Yongjun, Yan Cai, et al. Reactive power coordinated control of VSC-HVDC and filter in hybrid multi-feed HVDC system [J]. Electric Power Automation

(下转第 350 页)

dance model based online inductance identification method of permanent magnet synchronous motor decoupled from rotor position error [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(2): 439-451. (in Chinese)

[23] Wang Qiwei, Wang Gaolin, Zhao Nannan, et al. An impedance model-based multiparameter identification method of PMSM for both offline and online conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 727-738.

[24] 陈赓, 杨淑英, 张兴. 考虑磁饱和效应的永磁同步电机在线参数辨识[J]. 电源学报, 2026, 24(4): 303-312, 339.
Chen Geng, Yang Shuying, Zhang Xing. Online parameter identification of permanent magnet synchronous motor considering magnetic saturation effect [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(4): 303-312, 339. (in Chinese)



姜雅飞

作者简介：

姜雅飞(1983—)，男，通信作者，本科，高级实验师。研究方向：新型控制理论在电力电子设备中的应用。E-mail：jiangyafei2021@163.com。

葛扬(1991—)，男，中国电源学会会员，博士，讲师。研究方向：新型控制理论在电力电子设备中的应用。E-mail：gy@xaut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)

(上接第 235 页)

Equipment, 2021, 41(6): 100-106. (in Chinese)

[29] 倪晓军, 赵成勇, 许韦华, 等. 降低直流输电换相失败概率的改进拓扑及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 811-820.
Ni Xiaojun, Zhao Chengyong, Xu Weihua, et al. An improved topology to decrease the commutation failure in LCC-HVDC and its control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 811-820. (in Chinese)



周楠

作者简介：

周楠(1998—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：高压直流输电技术。E-mail：222221558@st.usst.edu.cn。

张巍(1983—)，男，博士，讲师。研究方向：电力系统运行与控制。E-mail：zw19830904@usst.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)