

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241092

基于关断角动态方程的直流输电后续换相失败 预测方法及优化控制

雷智威, 马俊鹏, 王顺亮, 焦宁, 刘天琪

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 高压直流输电系统受端交流故障后, 易发生后续换相失败, 严重影响系统安全运行。为提升抑制后续换相失败发生的能力, 提出了一种基于关断角动态方程的预测及优化控制方法。通过解析首次换相失败恢复阶段的直流电流与关断角动态特性, 建立了关断角动态微分方程, 并结合相图分析法揭示后续换相失败机理, 即当关断角降至阈值时其变化率持续为负, 导致换相失败。为提升对后续换相失败的抑制能力, 提出一种基于关断角动态方程的预测及优化控制方法。设计实时预测判据, 依据交流电压有效值及其变化率动态计算关断角趋势。同时, 提出动态补偿控制策略, 在定关断角控制中引入动态补偿环节实时修正参考值。基于 CIGRE 标准模型的仿真结果表明, 所提预测判据在三相/单相接地故障下的准确率显著优于传统方法, 所提出的优化控制策略能够有效地抑制后续换相失败的发生, 显著提升了系统的暂态稳定性。

关键词: 高压直流输电; 后续换相失败; 关断角补偿; 优化控制策略

Prediction method and optimal control of subsequent commutation failure in LCC-HVDC system based on dynamic extinction angle equation

LEI Zhiwei, MA Junpeng, WANG Shunliang, JIAO Ning, LIU Tianqi

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In line-commutated converter-based high-voltage direct current (LCC-HVDC) systems, subsequent commutation failures are prone to occur following AC faults at the receiving end, seriously threatening the secure operation of the systems. To enhance the capability of suppressing subsequent commutation failures, this paper proposes a predictive optimization control method based on the dynamic extinction angle equation. By analyzing the dynamic characteristics of DC current and extinction angle during the recovery phase following the initial commutation failure, a differential dynamic equation for the extinction angle is established. Using phase-plane analysis, the mechanism of subsequent commutation failure is revealed: when the extinction angle decreases to a critical threshold and its rate of change remains negative, commutation failure occurs. To improve the suppression capability, a predictive optimization control method based on the dynamic extinction angle equation is proposed. A real-time prediction criterion is designed to dynamically calculate the extinction angle trend using the effective AC voltage magnitude and its rate of change. Simultaneously, a dynamic compensation control strategy is developed, in which a compensation term is added to the fixed extinction angle control to continuously adjust the reference in real time. Simulation results based on the CIGRE benchmark model demonstrate that the proposed prediction criterion achieves significantly higher accuracy than conventional methods under both three-phase and single-phase grounding faults. Moreover, the proposed optimal control strategy effectively suppresses subsequent commutation failures and significantly enhances the system's transient stability.

This work is supported by the Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 52207216).

Key words: LCC-HVDC; subsequent commutation failure; extinction angle compensation; optimal control strategy

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(52207216)

0 引言

基于电网换相型换流器的高压直流输电(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)系统由于其传输容量大、传输距离远、能量损耗小、建设成本低等优势,被广泛地运用于我国区域间大功率电能的传输^[1-3]。

LCC-HVDC 系统采用的是不具备自关断能力的晶闸管,当其受端交流电网发生故障时,由于换流阀缺乏足够的换相支撑,系统将会发生换相失败(commutation failure, CF),导致受端直流闭锁,传输功率大幅波动^[4-6]。当交流系统发生严重故障时,若逆变器未能匹配首次换相失败(first commutation failure, FCF)恢复过程中的功率需求,会导致系统在首次换相失败后发生后续换相失败(subsequent commutation failure, SCF),直流功率持续波动,进而造成换流站连续闭锁,严重影响电力系统的安全运行^[7-8]。由于系统的自调节作用,在首次换相失败发生之后,换流阀通常会很快恢复正常换相;而后续换相失败所造成的问题更为突出^[9]。因此,亟需对后续换相失败进行精准预测与抑制。

由于逆变器的关断角与其换相电压存在明确的数学关系,所以大量关于换相失败的预测方法都是以换相电压的临界值作为预测判据。文献[10]从直流电流角度提出预测方法,其优点是对直流电流变化敏感,但未考虑换相电压其他复杂因素影响;文献[11]基于最小关断角进行预测,简单直观,但忽略了系统动态过程中其他参数的耦合作用。这些方法仅适用于首次换相失败预测,无法应用于后续换相失败场景。文献[12]通过离线测试,拟合了首次换相失败恢复之后到后续换相失败发生之前关断角的近似下降曲线,进而计算出了判断后续换相失败的临界换相电压,能够准确地预测后续换相失败的发生。然而这种方法依赖在不同程度故障下拟合出的下降斜率,增加了预测方法的测试成本。除了对于后续换相失败的预测以外,更多的研究工作聚焦于后续换相失败的抑制策略。而与增加额外的无功设备^[13]以及改进换流器拓扑^[14]等方法相比,以改进控制策略来抑制后续换相失败的方法经济性高、实现难度小,因而受到广泛关注。但现有改进控制策略仍存在通信依赖强、未考虑系统动态特性、计算复杂等问题。

改进控制的策略主要可以分为优化低压限流控制器(voltage-dependent current order limiter, VDCOL)的直流电流指令^[15-16]以及根据换相失败预测(commutation failure prevention, CFPREV)改变逆变器的触发角或关断角两类^[17-18]。除此之外,国内外

一些研究还指出,电流偏差控制(constant extinction angle control, CEC)对后续换相失败的发生也有较大的影响,因此也有研究针对该环节进行改进^[19]。

文献[15]通过增加虚拟电阻优化了 VDCOL 的启动电压门槛指令,提升了换相失败恢复期间直流电流动态变化的灵敏性;文献[16]设计了考虑故障严重程度的非线性动态 VDCOL 控制策略,通过提高直流电流响应速度来限制直流电流,从而降低发生连续换相失败概率。文献[17]分析了直流电压型 VDCOL 和交流电压型 VDCOL 各自的优势,提出了一种 VDCOL 转换控制策略,抑制了由于 VDCOL 过快响应而导致的后续换相失败故障。文献[18]基于系统稳态运行特性曲线,通过综合分析直流电流、换相电压幅值及相位偏移等关键参数,提出了一种动态关断角补偿控制策略。文献[19]分析了锁相环暂态、锁相环稳态以及换相电压相位三者对触发角信号引入的偏差,并提出了一种优化触发角偏差的补偿策略。文献[20]提出了一种自适应电流偏差控制器,通过动态调整故障恢复过程中的关断角增量来提高后续换相失败免疫力。然而,文献[15-17]针对直流电流指令的优化对于逆变器和整流器之间的通信依赖很强,当送受端距离较远时,此类优化控制的可靠性将会下降^[21]。而文献[18-20]针对关断角和触发角的优化补偿控制则存在未考虑系统动态特性、计算复杂以及参数整定依赖经验等不足。

为了定量分析从首次换相失败恢复到后续换相失败发生过程中系统的动态变化规律,首先对首次换相失败恢复期间直流电流和关断角的动态特性进行了分析,建立了关断角的动态方程,并结合相位图说明了后续换相失败发生的机理;在此基础上提出了一种针对后续换相失败的预测判据,通过采集交流电压及其变化率来预测后续换相失败的风险;最后基于推导的关断角动态方程提出了一种抑制后续换相失败发生的优化控制策略,并通过 PSCAD/EMTDC 中的标准直流输电模型对预测判据的准确性和优化控制的有效性进行了验证。

1 系统特性描述

1.1 高压直流输电基本控制结构

高压直流输电系统基本电路结构如图 1 所示。其中整流侧和逆变侧均为由两个六脉动 LCC 换流阀串联构成的十二脉动 LCC 换流阀,两者之间经直流线路连接。整流侧和逆变侧的换流阀交流母线处均配备了交流滤波器和无功补偿器^[3]。

系统的控制结构如图 2 所示。整流侧采用定直流电流(constant current control, CCC)控制,其直流电流

参考信号由逆变侧给定。逆变侧配备了定直流电流控制、定关断角控制(constant extinction angle control, CEAC)以及电流偏差控制(current error control, CEA)。

对于整流侧而言,该控制算法通过实时比较直流电流给定值与实测值之间的偏差,经PI调节器运算后输出整流侧触发超前角控制指令 β_{rec} ,进而生成触发信号 α_{inv} 控制换流阀动作。对于逆变侧而言,CCC和CEAC两种控制策略分别将直流电流误差与关断角误差经过PI环节后生成逆变侧的触发超前角指令 β_{inv_C} 与 β_{inv_G} ,取两者中较大值作为逆变站实际的触发超前角,进而生成触发角信号控制换流阀工作。当逆变侧处于CCC模式下,直流电流同时受控于整流侧和逆变侧的控制器,而逆变侧的CCC中的参考指令比整流侧小(此处为0.1 p.u.)。CEC的作用是当直流电流指令与实际电流不相等时,实现CCC与CEAC两种控制策略的平滑过渡。而VDCOL将会调节直流电流指令进而降低直流电流以保证系统安全运行^[4]。

1.2 后续换相失败机理分析

在LCC换流阀换相的过程中,若刚退出换相过

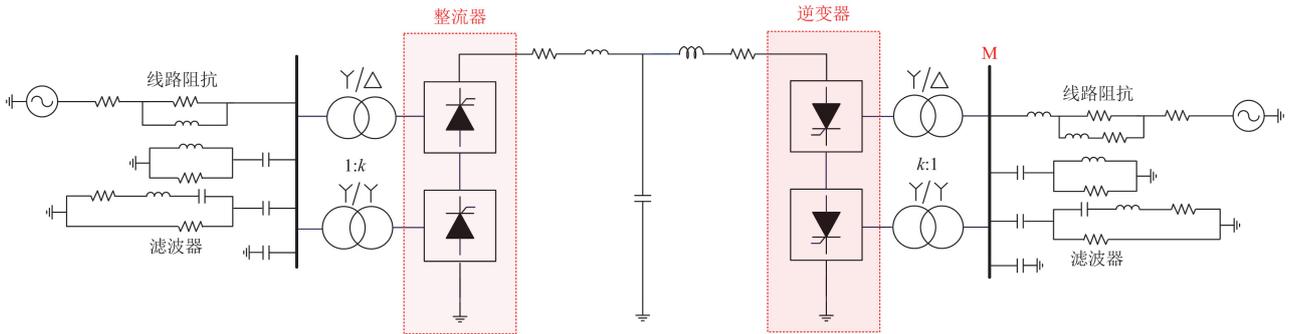


图1 高压直流输电拓扑图

Fig. 1 Topology of the LCC-HVDC system

当系统发生故障时,首先将会发生FCF,对应图3中的 t_1 时刻。然后在系统自调节作用下,关断角将会上升至 γ_{max} ,系统恢复正常换相,进入首次换相失败恢复期间,对应图3中的 t_2 时刻。

在此之后,逆变侧的控制系统陆续动作。VDCOL(从故障发生到投入的时间一般为10 ms^[22])与整流侧配合进而降低直流电流,且CEAC随之动作减小逆变侧换流阀触发角,系统关断角从 γ_{max} 开始不断降低。在此阶段中,关断角将在两个控制系统的配合作用下持续下降。当其达到参考值 γ_{ref} 附近时,若控制器配合得当,则关断角将会重新稳定在参考值附近,即对应图3中的蓝色实线。若控制器配合不当,如VDCOL输出直流电流上升过快或者CEAC降低触发角的速度无法适应故障下换流阀

程的阀尚未恢复阻断能力又重新承受正向压降,或者是在换流阀承受反向压降期间换相过程尚未完成,则该换流阀将在没有触发信号的情况下重新导通,这种现象称为换相失败^[8]。

定义换流阀组恢复正向阻断能力的电角度为最小关断角 γ_{min} (一般为 7.2° ^[17])。若逆变侧的关断角小于其最小关断角,则认为此时发生了换相失败^[10]。LCC-HVDC逆变侧的关断角与直流电流、交流电压以及触发超前角均有关,具体的计算公式为^[17]

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}I_{dc}X_c}{U_L} + \cos\beta\right) \quad (1)$$

式中: γ 为关断角; β 为触发超前角; I_{dc} 、 U_L 分别为直流电流与逆变侧交流母线的线电压有效值; X_c 为等效换相电抗。

交流故障发生后,系统关断角的变化过程以及控制器动作顺序如图3所示。其中红色实线表示系统在发生FCF后又发生了SCF故障;而蓝色实线则表示系统在发生FCF后恢复了稳定。

的无功需求,则关断角将会在到达参考值附近后继续降低。一旦关断角降低至小于其最小阈值 γ_{min} ,则会导致SCF发生^[23-24],对应图3中的红色实线,即在 t_3 时刻系统发生了后续换相失败。

在首次换相失败恢复到后续换相失败发生的过程中,VDCOL与CEAC等控制环节已经开始动作,这些控制环节是预测和抑制后续换相失败发生的关键因素。同时在此过程中,整流侧采用CCC,若逆变侧也采用CCC,则直流电流的大小同时受到整流站和逆变站的控制,控制指令不唯一将会导致直流电流波动,加剧后续换相失败发生的风险,逆变侧在首次换相恢复期间应避免采用CCC^[22]。因此,对于后续换相失败发生过程的分析主要考虑VDCOL和CEAC的影响^[12]。

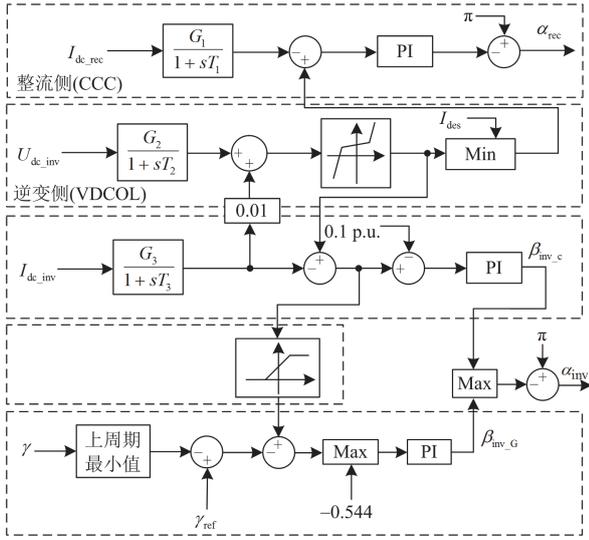


图2 高压直流输电控制结构图

Fig. 2 Control structure diagram of the LCC-HVDC system

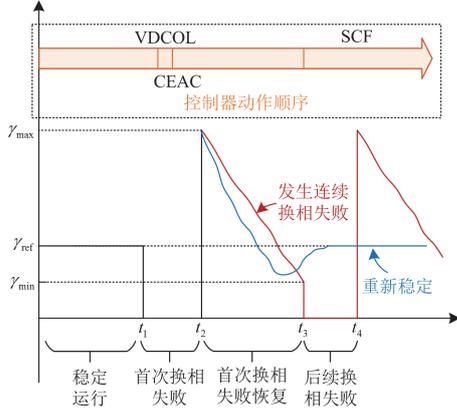


图3 故障过程中换相失败恢复过程及控制器动作顺序

Fig. 3 Commutation failure recovery process and controller action sequence during a fault

2 暂态过程关断角动态特性分析

2.1 首次换相失败恢复过程直流电流动态特性

VDCOL控制器的控制结构和控制特性如图4所示, 输出的直流电流指令满足:

$$I_{ord} = \begin{cases} I_{dh} I_{dn} & U_{dc}^* > U_{dh} \\ (aU_{dc}^* + b)I_{dn} & U_{dl} \leq U_{dc}^* \leq U_{dh} \\ I_{dl} I_{dn} & U_{dc}^* < U_{dl} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{ord} 为直流电流指令; U_{dc}^* 为经补偿后的直流线路中点电压的标么值; a 和 b 分别表示 VDCOL 中直流电流指令所满足斜线的斜率及截距; I_{dn} 表示直流电流的额定值; I_{dh} 、 I_{dl} 分别为直流电流指令标么值的上、下限; U_{dh} 和 U_{dl} 分别为直流电压的上、下限。

当首次换相失败恢复后, VDCOL 已经开始动

作, 因此其输出的电流指令运行在图4中红色实线部分, 即随着 U_{dc}^* 的变化单调递增。

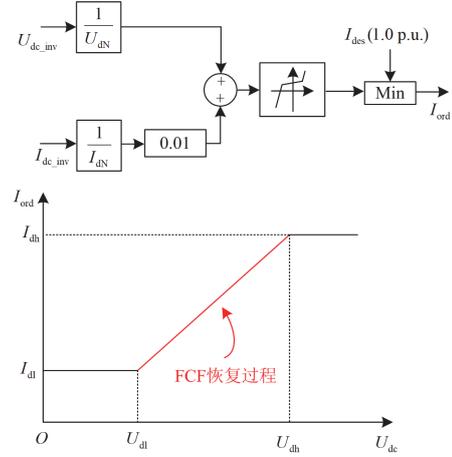


图4 VDCOL 的控制结构及其控制特性

Fig. 4 Structure of VDCOL control and its control characteristics

对于所研究的十二脉动 LCC 逆变器, 其直流电压 U_{dc} 可以表示为^[25]

$$U_{dc} = \frac{3\sqrt{2}kU_L}{\pi} (\cos \gamma + \cos \beta) \quad (3)$$

式中, k 表示变压器变比。

图4中经补偿后的直流线路中点电压的标么值为

$$U_{dc}^* = \frac{3\sqrt{2}kU_L}{U_{dn}\pi} (\cos \gamma + \cos \beta) + 0.01 \frac{I_{dc}}{I_{dn}} \quad (4)$$

式中, U_{dn} 表示直流电压的额定值。

在首次换相失败恢复到后续换相失败发生之间, 换流阀已恢复正常换相, 换相电压保持为较低值, VDCOL 输出基本不变, 直流电流的变化较小, 因此可以忽略直流电流的动态特性^[26]。结合式(2)和式(3), 可得

$$I_{dc} \approx I_{ord} = \frac{3\sqrt{2}U_L k (\cos \gamma + \cos \beta) a I_{dn}}{\pi U_{dn} (1 - 0.01a)} + \frac{b I_{dn}}{1 - 0.01a} \quad (5)$$

2.2 触发超前角以及关断角动态特性

根据 CEAC 控制结构, 系统的触发超前角表示为

$$\beta = (k_p + k_i/s)(\gamma_{ref} - \gamma) \quad (6)$$

式中, k_p 和 k_i 为控制器参数。

由式(6)可知, 若能够将触发超前角 β 用关断角 γ 表示, 则可得关断角的动态方程。事实上, 触发超前角 β 与直流电流、交流电压、关断角均有关, 即^[27]

$$\cos \beta = \cos \gamma - \frac{\sqrt{2}X_c}{U_L k} I_{dc} \quad (7)$$

进而结合式(5)一式(7)有

$$\arccos\left(\frac{1-C_1}{1+C_1}\cos\gamma - \frac{C_2}{(1+C_1)U_L}\right) = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(\gamma_{\text{ref}} - \gamma) \quad (8)$$

式中, C_1 与 C_2 为与系统参数有关的系数, 具体为

$$\begin{cases} C_1 = \frac{6aX_c I_{\text{dn}}}{\pi U_{\text{dn}}(1-0.01a)} \\ C_2 = \frac{\sqrt{2}bX_c I_{\text{dn}}}{k(1-0.01a)} \end{cases} \quad (9)$$

对式(8)两边求导可得

$$\frac{\left(\frac{d\gamma}{dt} C_3 \sin\gamma - \frac{dU_L}{dt} \frac{C_4}{U_L^2}\right)}{\sqrt{1-(C_3 \cos\gamma - \frac{C_4}{U_L})^2}} = k_i(\gamma_{\text{ref}} - \gamma) - k_p \frac{d\gamma}{dt} \quad (10)$$

式中, $d\gamma/dt$ 和 dU_L/dt 分别表示关断角和交流电压的导数。系数 C_3 和 C_4 分别表示为

$$\begin{cases} C_3 = \frac{1-C_1}{1+C_1} \\ C_4 = \frac{C_2}{1+C_1} \end{cases} \quad (11)$$

由式(10)可得到关断角的动态方程, 即

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{k_i(\gamma_{\text{ref}} - \gamma) + \frac{C_4}{U_L^2} \frac{dU_L}{dt} \sqrt{1-(C_3 \cos\gamma - \frac{C_4}{U_L})^2}}{k_p + \frac{C_3 \sin\gamma}{\sqrt{1-(C_3 \cos\gamma - \frac{C_4}{U_L})^2}}} \quad (12)$$

根据式(12), 可以得到在关断角变化到某一特定值时, 其变化率 $d\gamma/dt$ 由系统控制参数、交流电压 U_L 以及交流电压的导数 dU_L/dt 共同决定。

如果在首次换相失败恢复之后, 关断角变化率 $d\gamma/dt$ 始终小于零, 则关断角将会持续减小直至小于换流阀载流子复合所需要的最小关断角 γ_{min} , 进而发生后续换相失败。

3 后续换相失败预测方法

由上文的分析可知, 首次换相失败恢复过程中, 交流电压有效值及其当前时刻的变化率为决定关断角动态特性的关键因素。因此可以基于式(12), 并结合故障过程中这两个变量的特性来预测后续换相失败发生的风险。

3.1 后续换相失败暂态过程分析

作为一种分析非线性系统暂态稳定性的经典方法, 相图可以很方便地描述系统的暂态特性以及稳定点的位置^[28]。根据式(12)绘制不同的交流电压以及交流电压变化率下的 $d\gamma/dt - \gamma$ 曲线, 如图 5 所示。

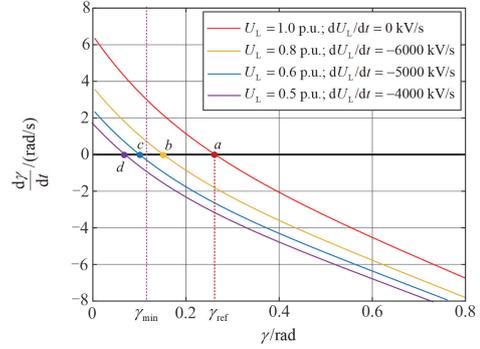


图 5 故障过程中不同时刻关断角的相图曲线

Fig. 5 Phase portraits of extinction angle at different moments during a fault

图 5 中红色实线表示系统处于稳态, 相图曲线与横轴的交点(a 点)即稳定点, 所对应的关断角为 γ_{ref} , 此时逆变侧在 CEAC 作用下关断角维持为 γ_{ref} 。交流系统发生故障后, 在短暂的首次换相失败之后恢复正常换相。图 5 中不同曲线对应于首次换相失败恢复后的不同时刻。

以黄色实线为例, 系统的稳定点(b 点)所对应的 γ 大于 γ_{min} , 即关断角不会持续降低至 γ_{min} , 因此不会发生后续换相失败故障。而当系统运行在紫色实线上时, 其稳定点(d 点)所对应的 γ 小于 γ_{min} , 表明在这种情况下, 首次换相失败恢复过程中 γ 将会不断降低直到小于 γ_{min} , 进而发生后续换相失败故障。

从关断角的动态变化趋势来看, 当 $\gamma = \gamma_{\text{min}}$ 时有 $d\gamma/dt < 0$, 表明关断角 γ 减小至其最小关断角时仍会持续降低, 则将会发生后续换相失败。

3.2 后续换相失败预测判据

由上文的分析可知, LCC 逆变器是否会发生后续换相失败的关键在于, 当关断角降低至 γ_{min} 时, 关断角的导数 $d\gamma/dt$ 是否小于零。因此, 定义预测后续换相失败是否发生的判据 C_{SCF} 为

$$C_{\text{SCF}} = \frac{k_i(\gamma_{\text{ref}} - \gamma_{\text{min}}) + \frac{C_4}{U_L^2} \frac{dU_L}{dt} \sqrt{1-(C_3 \cos\gamma_{\text{min}} - \frac{C_4}{U_L})^2}}{k_p + \frac{C_3 \sin\gamma_{\text{min}}}{\sqrt{1-(C_3 \cos\gamma_{\text{min}} - \frac{C_4}{U_L})^2}}} \quad (13)$$

C_{SCF} 反映了由当前时刻的交流电压及其变化率在 $\gamma = \gamma_{\min}$ 时刻所决定的逆变器关断角的变化趋势。具体的预测流程如图 6 所示。

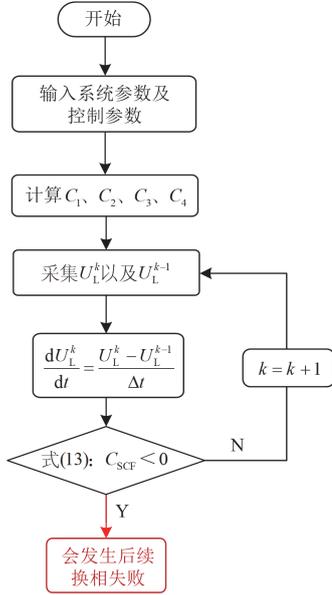


图 6 后续换相失败预测流程图

Fig. 6 Flowchart of subsequent commutation failure prediction

首先根据系统参数计算 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 ，然后由测量环节给出当前时刻以及上一时刻的交流电压有效值 U_L^k 、 U_L^{k-1} ，进而计算出当前时刻交流电压的变化率 dU_L^k/dt ， Δt 为采样间隔时间。将 U_L^k 与 dU_L^k/dt 代入式(13)中，实时计算后续换相失败预测判据 C_{SCF} ，并根据其判断系统后续换相失败风险。若 C_{SCF} 小于零，则认为当关断角减小至 γ_{\min} 后仍会降低，系统将会发生后续换相失败；反之，则不会。

可以看到，本文提出的换相失败预测方法通过实时监测系统运行状态，基于动态关断角变化轨迹进行超前预测，评估后续换相失败发生的风险。该方法可以在后续换相失败发生之前给控制系统发送保护信号，进而避免后续换相失败的发生。

4 基于后续换相失败预测判据的优化控制

由上文的分析可知，后续换相失败发生的原因是当关断角不断减小至接近 γ_{\min} 时， $d\gamma/dt$ 仍然小于零，因此，若能通过控制手段改变 C_{SCF} 的大小，使其输出量维持正值工作区间，可有效预防后续换相失败现象的发生。

如果在 CEAC 的参考值 γ_{ref} 上叠加补偿量 $\Delta\gamma$ ，根据式(13)可知，当补偿量满足一定条件时， γ_{\min} 处

关断角的变化率大于零，则可以避免后续换相失败故障的发生。基于这种思想并结合式(13)，提出了一种抑制后续换相失败的优化控制策略，如图 7 所示。

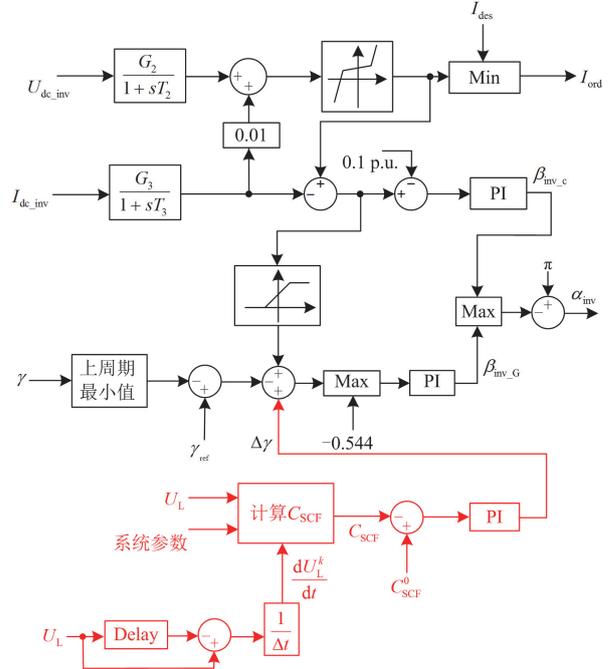


图 7 抑制后续换相失败的优化控制

Fig. 7 Optimal control for suppressing the subsequent commutation failure

图 7 中， C_{SCF}^0 为稳态时所计算出的后续换相失败判据，具体计算为

$$C_{SCF}^0 = \frac{k_i(\gamma_{ref} - \gamma_{\min})}{k_p + \frac{C_3 \sin \gamma_{\min}}{\sqrt{1 - (C_3 \cos \gamma_{\min} - \frac{C_4}{U_L^0})^2}}} \quad (14)$$

式中， U_L^0 为稳态时系统逆变侧交流线电压有效值。

由图 7 可知，关断角 γ 的动态补偿量 $\Delta\gamma$ 由 C_{SCF}^0 与当前时刻 C_{SCF} 之间的误差经过 PI 控制器得到，表示为

$$\Delta\gamma = (C_{SCF}^0 - C_{SCF})(k_p^c + k_i^c/s) \quad (15)$$

式中， k_p^c 与 k_i^c 为控制器参数。

由式(15)可知，当系统处于稳态时，计算出的 C_{SCF} 与 C_{SCF}^0 相等，该控制策略不会影响系统的正常运行；而当发生故障后，所提控制策略可以在暂态过程中对关断角进行动态补偿，从而有效抑制后续换相失败的发生。

5 仿真验证

为了验证所提后续换相失败预测判据和优化控制策略的准确性与有效性，在 PSCAD/EMDTSC 中，以 CIGRE Benchmark HVDC 标准直流输电模型作为测试对象，其结构与图 2 一致，具体的系统参数与文献[29]中一致。

在本节的测试中，在交流母线 M 处设置三相接地故障以及单相接地故障，并改变三相故障和单相故障中接地过渡电阻的大小，验证了所提后续换相失败预测方法与优化控制策略在不同故障类型和故障严重程度下的有效性。

5.1 三相接地故障下所提预测方法的准确性验证

设置交流侧于 1 s、1.004 s、1.008 s、1.012 s、1.016 s、1.020 s 时刻发生三相接地故障，故障持续时间为 0.5 s。验证在不同的过渡电阻 R_f 和不同故障时间下所提方法的准确性。记录所提方法预测的 SCF 发生时刻与实际 SCF 发生时刻之间的时间裕度，结果如图 8 所示。

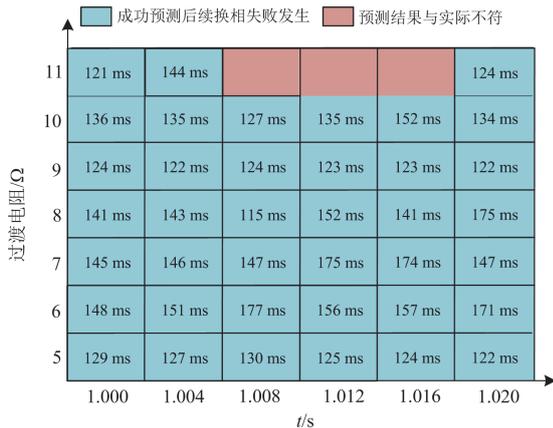


图 8 三相接地故障下所提预测方法的测试结果

Fig. 8 Test results of the proposed prediction method during a three-phase ground fault

图 8 中，蓝色方块表示成功预测了 SCF 的发生，红色方块表示预测结果与实际不符；而蓝色方块中的时间表示所提方法预测 SCF 发生到系统实际发生 SCF 之间间隔的时间裕度。

由图 8 可以看到，在不同的过渡电阻以及不同故障时间条件下进行测试，结果表明所提预测方法能够较为准确地预测到 SCF 的发生，准确率达到 92.85%，验证了理论分析的正确性。

除此之外，预测故障发生时刻与实际故障发生时刻之间存在比较充足的时间裕度，说明所提预测方法具有一定的速动性，有利于故障保护措施及时动作以降低故障发生的可能性。

同时，在三相对称接地故障下，为了验证所提

预测方法的优势，将该方法与文献[12]中所提预测方法进行比较。在文献[12]所提方法中，判断系统是否发生 SCF 的交流电压临界值为 0.451 p.u.。即当逆变侧交流电压下降至 0.451 p.u.以下时，认为将会发生 SCF。

两种方法预测的 SCF 发生时刻到 SCF 实际发生时刻之间的时间裕度对比结果如表 1 所示。

表 1 三相接地故障下两种预测方法的准确性对比验证

Table 1 Comparative validation accuracy of two prediction methods during a three-phase ground fault

过渡电阻/Ω	故障发生时间/s	文献[12]中方法的时间裕度/ms	所提方法的时间裕度/ms
5	1.00	117	129
11	1.00	108	121

从表 1 可以看出，当交流母线发生三相接地故障时，两种方法均能预测到 SCF 的发生。但是所提方法的时间裕度更大，更有利于保护措施的紧急启动，因此更具优势。

5.2 单相接地故障下所提预测方法的准确性验证

分别设置交流侧于 1 s、1.004 s、1.008 s、1.012 s、1.016 s、1.020 s 时刻发生单相接地故障，故障持续时间为 0.5 s。验证在不同的过渡电阻和不同故障时间所提方法的准确性。记录所提方法预测的 SCF 发生时刻与 SCF 发生时刻之间的时间裕度，结果如图 9 所示。

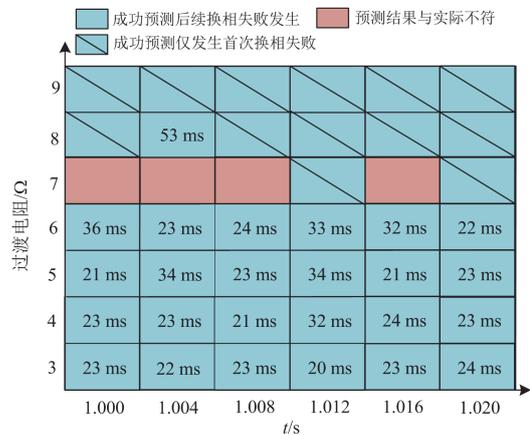


图 9 单相接地故障下所提预测方法的测试结果

Fig. 9 Test results of the proposed prediction method during a single-phase ground fault

图 9 中，没有时间的蓝色方块表示成功预测了仅发生 FCF，而未发生 SCF 的情况。

可以看到，在不同的过渡电阻以及一个工频周期内不同的故障时间测试下，所提预测方法对于单相接地故障具有较好的预测性能，能够较为准确地预测到 SCF 是否发生，预测的准确率达到 90.47%。

在单相不对称接地故障下, 比较文献[12]中的预测方法与本文方法的优劣, 对比结果如表 2 所示。

表 2 单相接地故障下两种预测方法准确性的对比验证

Table 2 Comparative validation of the accuracy of two prediction methods during a single-phase ground fault

过渡电阻/ Ω	故障发生时间/s	文献[12]中方法的时间裕度/ms	所提方法的时间裕度/ms
3	1.00	未能预测 SCF	23
5	1.00	未能预测 SCF	21

从表 2 可以看出, 当交流母线发生单相接地故障时, 文献[12]中的方法未能预测到 SCF 的发生, 与实际不符; 而所提方法能够在 SCF 发生之前准确地预测到其发生, 并具有一定时间裕度。

5.3 优化控制策略有效性验证

5.3.1 三相接地故障下控制系统暂态性能测试

设置 1 s 时刻交流母线 M 处发生三相阻性接地故障, 持续时间为 0.5 s, 过渡电阻分别为 20Ω 、 5Ω , 测试所得到的系统未启动优化控制与采用优化控制的关断角 γ 以及直流电压 U_{dc} 分别如图 10 和图 11 所示。

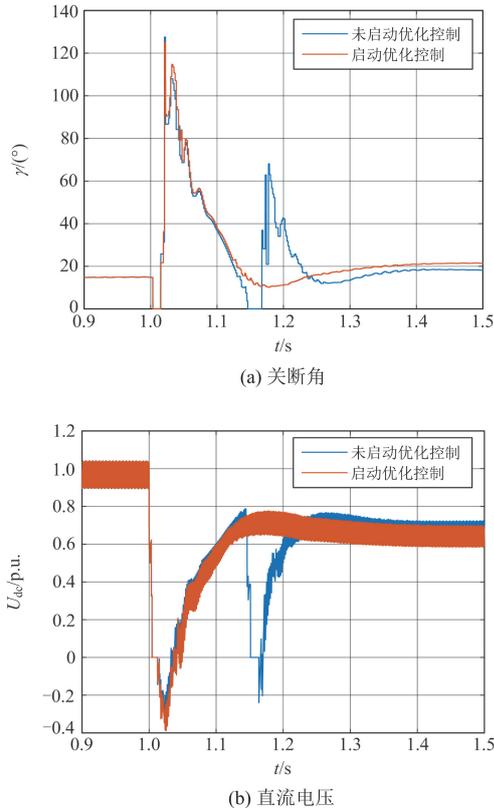


图 10 三相接地故障下所提控制策略的测试结果($R_f = 20 \Omega$)
Fig. 10 Test results of the proposed control strategy during a three-phase ground fault ($R_f = 20 \Omega$)

图 10 中的测试结果表明, 当原系统在交流母线发生过渡电阻为 50Ω 的三相接地故障时, 在首次换相失败故障后将会发生后续换相失败, 导致关断角降低为 0° , 直流电压迅速下降为零; 而启动所提的优化控制后, 系统能在首次换相失败之后恢复稳定运行, 不会发生后续换相失败, 提高了系统的暂态稳定性, 验证了所提优化控制策略在对称故障下的有效性。

图 11 的测试结果表明, 当原系统在交流母线发生过渡电阻为 5Ω 的严重三相接地故障时, 在启动所提优化控制后, 系统依然能在首次换相失败之后恢复稳定运行, 不会发生后续换相失败, 验证了所提策略在不同严重程度对称故障下的有效性。

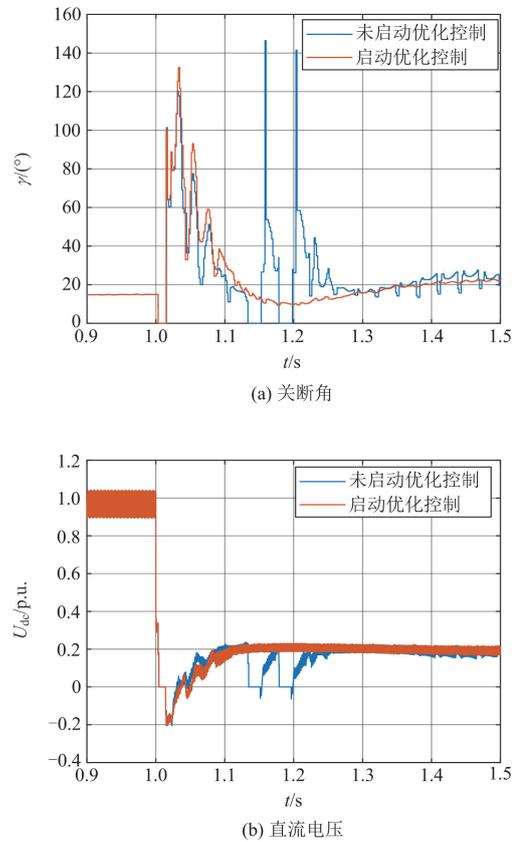


图 11 三相接地故障下所提控制策略的测试结果($R_f = 5 \Omega$)
Fig. 11 Test results of the proposed control strategy during a three-phase ground fault ($R_f = 5 \Omega$)

5.3.2 单相接地故障下控制系统暂态性能测试

设置 1 s 时刻交流母线 M 处发生单相阻性接地故障, 持续时间为 0.5 s, 过渡电阻分别为 50Ω 、 5Ω , 测试得到系统未启动优化控制与启动优化控制的关断角 γ 以及直流电压 U_{dc} 结果分别如图 12 与图 13 所示。

测试结果表明, 原系统在交流母线发生过渡电

阻为 50Ω 的单相接地故障时, 在首次换相失败故障之后将会发生多次后续换相失败, 导致关断角持续降低为 0° , 直流电压多次大幅度波动; 而启动所提优化控制后, 将不会发生后续换相失败, 关断角始终在最小关断角上方波动, 直流电压也不会降为零。

而当原系统在交流母线发生过渡电阻为 5Ω 的单相接地故障时, 在故障后的很短时间内多次发生换相失败, 导致关断角降为 0° , 直流电压持续波动; 而启动所提优化控制后, 虽然直流电压仍会波动, 但关断角在首次换相失败之后便不会再降为 0° 。说明

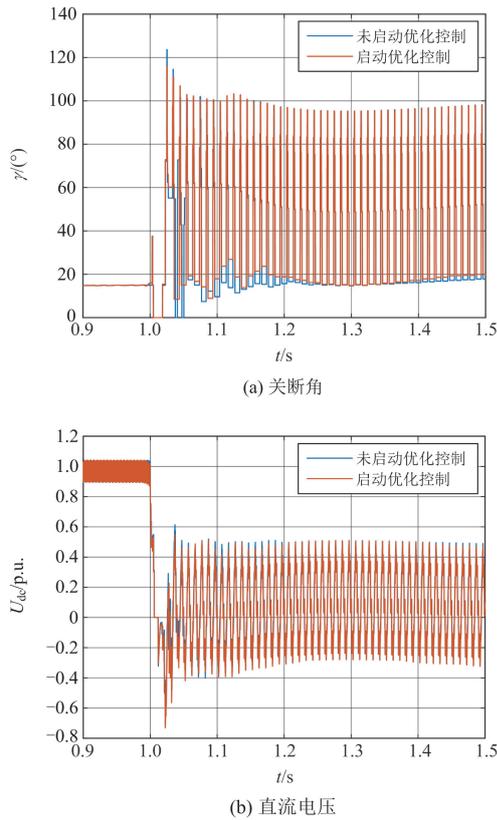


图 12 单相接地故障下所提控制策略的测试结果($R_f = 50 \Omega$)

Fig. 12 Test results of the proposed control strategy during a single-phase ground fault ($R_f = 50 \Omega$)

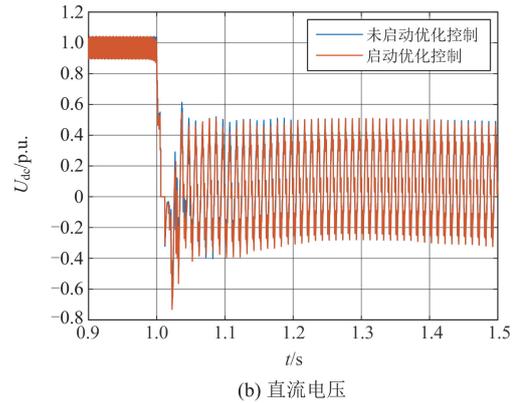
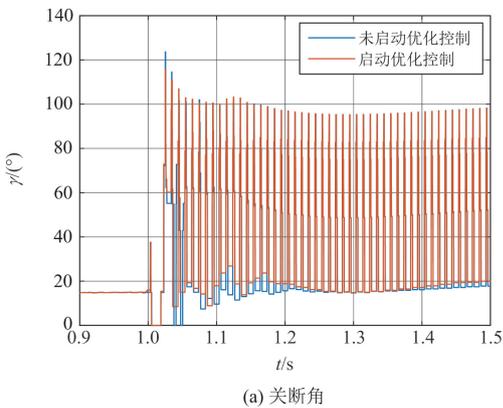


图 13 单相接地故障下所提控制策略的测试结果($R_f = 5 \Omega$)

Fig. 13 Test results of the proposed control strategy during a single-phase ground fault ($R_f = 5 \Omega$)

即使交流侧发生不对称故障, 所提优化控制策略仍具有一定的可靠性, 可以降低发生后续换相失败的风险, 提高系统的稳定性。

6 结论

通过理论分析得到了在首次换相失败恢复期间 LCC-HVDC 逆变侧关断角的动态方程, 并结合相图分析法阐明了后续换相失败的发生机理。在此基础上, 提出了针对后续换相失败的预测判据以及一种抑制后续换相失败发生的优化控制策略, 通过仿真验证了判据的准确性与控制策略的有效性, 主要结论如下。

1) 首次提出了在大扰动下 LCC-HVDC 逆变侧的关断角 γ 的暂态数学模型, 从 γ 的动态方程的角度阐明了后续失败发生的机理, 即首次换相失败恢复期间, 当关断角在控制器作用下持续降低至其最小阈值时, 关断角的导数仍然小于零, 因此它将继续减小进而导致再一次发生换相失败故障。与现有研究相比, 更深入准确地解释了换相失败过程。所提预测判据突破传统方法局限, 基于动态方程构建, 速动性和准确性显著提升, 为电力系统紧急保护提供更可靠的依据。

2) 提出了一种后续换相失败预测判据, 该判据能够准确评估系统下一时刻后续换相失败风险, 相比现有的研究, 所提方法速动性和准确性更强, 有利于电力系统的紧急保护动作。

3) 所提控制策略基于上述预测判据动态补偿 CEAC 的参考值, 进而改善首次换相失败恢复期间关断角的动态特性, 预防后续换相失败的发生。该策略能够有效抑制在不同接地故障下后续换相失败的发生, 提高了系统的暂态稳定性。

参考文献

- [1] BO Z, LIN X, WANG Q, et al. Developments of power system protection and control[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 1-8.
- [2] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. *电网技术*, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(4): 1-9.
- [3] 王顺亮, 刘海军, 谢洋, 等. 基于模块化思想的 LCC-HVDC 改进小信号建模及交互稳定性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(10): 84-94.
WANG Shunliang, LIU Haijun, XIE Yang, et al. Improved small signal modelling and interaction stability analysis of LCC-HVDC based on modularization[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(10): 84-94.
- [4] 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.
- [5] 王轩, 魏宏, 欧朱建, 等. 一种抑制 HVDC 换相失败的 STATCOM 补偿方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(5): 135-142.
WANG Xuan, WEI Hong, OU Zhujian, et al. A STATCOM compensation scheme for suppressing commutation failure in HVDC system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(5): 135-142.
- [6] SHAO Y, TANG Y. Fast evaluation of commutation failure risk in multi-infeed HVDC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 646-653.
- [7] 王春明, 刘兵. 区域互联多回直流换相失败对送端系统的影响[J]. *电网技术*, 2013, 37(4): 1052-1057.
WANG Chunming, LIU Bing. Affects of commutation failure in multi-circuit HVDC transmission system interconnecting regional power grids on AC power system at sending end[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(4): 1052-1057.
- [8] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素综述[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(2): 499-513.
TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(2): 499-513.
- [9] HANSEN A, HAVEMANN H. Decreasing the commutation failure frequency in HVDC transmission systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(5): 1022-1026.
- [10] 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.
- [11] OUYANG J, ZHANG Z, LI M, et al. A predictive method of LCC-HVDC continuous commutation failure based on threshold commutation voltage under grid fault[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(1): 118-126.
- [12] LEE H J, SON G T, YOO J I, et al. Effect of a SFCL on commutation failure in a HVDC system[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, 23(3): 1051-1054.
- [13] GUO C, YE Q, CHE X, et al. Subsequent commutation failure suppression control for LCC-HVDC system based on fuzzy clustering[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2024: 1-9.
- [14] GUO C, LI C, ZHAO C, et al. An evolutionary line-commutated converter integrated with thyristor-based full-bridge module to mitigate the commutation failure[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 32(2): 967-976.
- [15] 郭春义, 李春华, 刘羽超, 等. 一种抑制传统直流输电连续换相失败的虚拟电阻电流限制控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(18): 4930-4937.
GUO Chunyi, LI Chunhua, LIU Yuchao, et al. A DC current limitation control method based on virtual-resistance to mitigate the continuous commutation failure for conventional HVDC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(18): 4930-4937.
- [16] 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.
- [17] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(13): 63-72.
- [18] 朱龙臻, 牛翀, 王志冰, 等. 一种抑制连续换相失败的关断角动态补偿控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(22): 7621-7631.

- ZHU Longzhen, NIU Chong, WANG Zhibing, et al. An extinction angle dynamic compensation control method for suppressing continuous commutation failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7621-7631.
- [19] 赵君, 李晓华, 王玉麟, 等. 基于触发角偏差补偿的连续换相失败抑制措施[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 210-216.
- ZHAO Jun, LI Xiaohua, WANG Yulin, et al. Continuous commutation failure suppression strategy based on firing angle deviation compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 210-216.
- [20] 夏海涛, 周小平, 洪乐荣, 等. 一种抑制后续换相失败的自适应电流偏差控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4345-4355.
- XIA Haitao, ZHOU Xiaoping, HONG Lerong, et al. An adaptive current deviation control method for suppressing following commutation failures[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4345-4355.
- [21] 戴志辉, 刘自强, 杨明玉, 等. 基于暂态行波幅值积分的柔性直流电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6578-6592.
- DAI Zhihui, LIU Ziqiang, YANG Mingyu, et al. Pilot protection for flexible DC grids based on amplitude integral of transient wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6578-6592.
- [22] 张真. 高压直流输电系统换相失败预测与抑制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- ZHANG Zhen. Research on prediction and suppression method for commutation failure of high voltage DC transmission system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [23] 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. Commutation failure prediction for hybrid cascaded HVDC system[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 3053-3066.
- [24] 李宽, 黄强, 吕学宾, 等. 抑制高压直流系统后续换相失败的定关断角控制改进方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 109-119.
- LI Kuan, HUANG Qiang, LÜ Xuebin, et al. Enhanced extinction angle control for subsequent commutation failure mitigation in HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 109-119.
- [25] MIRSAEIDI S, DONG X, TZELEPIS D, et al. A predictive control strategy for mitigation of commutation failure in LCC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 160-172.
- [26] 周长春, 徐政. 直流输电准稳态模型有效性的仿真验证[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 36-39.
- ZHOU Changchun, XU Zheng. Simulation verification of effectiveness of quasi steady state model of DC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 36-39.
- [27] 王羽丰, 李凤婷, 尹纯亚. 换相失败期间送端系统暂态有功建模及其支撑策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 177-187.
- WANG Yufeng, LI Fengting, YIN Chunya. Transient active power modeling of a sending system and its support strategy during commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 177-187.
- [28] PAN D, WANG X, LIU F, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 8(2): 1019-1033.
- [29] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. A benchmark model for HVDC system studies[C] // International Conference on AC and DC Power Transmission, September 17-20, 1991, London, UK: 374-378.

收稿日期: 2024-03-31; 修回日期: 2024-09-25

作者简介:

雷智威(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电的暂态稳定性分析及控制; E-mail: zwl0718@126.com

马俊鹏(1990—), 男, 副教授, 研究方向为并网变换器建模及控制、高压直流输电系统建模及分析。E-mail: junpeng_ma@163.com

(编辑 许威)