

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230227

计及换相动态的直流换相失败在线预警方法

李大虎¹, 周泓宇², 姚伟², 周悦¹, 饶渝泽¹, 文劲宇²

(1. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室
(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 单一直流换相失败易引发其相邻直流同时换相失败, 严重时将造成直流闭锁引发连锁故障, 开展多馈入直流换相失败预警研究及预防对保障电力系统安全稳定至关重要。提出了基于预测换相电压-时间面积的多馈入直流换相失败在线预警方法。首先, 通过解析直流换相过程中的交流电压、直流电流动态, 实现对换相电压-时间积分面积的实时预测。其次, 基于前述预测方法从单一直流系统到多馈入直流系统推导了直流输电换相失败预警系数, 并对该系数的主要参数进行了整定。然后将该系数引入换相失败预防控制环节为例说明其应用方式。最后, 在PSCAD/EMTDC平台中分别基于CIGRE HVDC模型及多馈入模型验证了所提直流换相失败预警系数的正确性及对换相失败预防的指导性。

关键词: 换相失败; 多馈入直流; 在线预警; 预防控制; 换相动态

Online early warning method of HVDC commutation failure considering commutation dynamics

LI Dahu¹, ZHOU Hongyu², YAO Wei², ZHOU Yue¹, RAO Yuze¹, WEN Jinyu²

(1. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: The commutation failure of a single HVDC can easily lead to the simultaneous commutation failure of its neighboring HVDCs, which in severe cases will cause HVDC blocking and chain failures. An online warning method for multi-infeed HVDC commutation failure based on the prediction of the commutation voltage-time integration area is proposed. First, by analyzing the AC voltage and DC current dynamics during the HVDC commutation process, real-time prediction of the commutation voltage-time integration area is achieved. Second, a HVDC transmission commutation failure warning factor is derived from a single HVDC system to a multi-infeed HVDC system based on the aforementioned prediction method. Then the main parameters of this factor are determined. Third, the application of this coefficient is illustrated by introducing it into the commutation failure prevention control. Finally, the correctness of the proposed warning coefficients for HVDC commutation failure and the guidance for commutation failure prevention are verified in the PSCAD/EMTDC platform based on the CIGRE HVDC model and the multi-infeed model.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52022035).

Key words: commutation failure; multi-infeed HVDC; online warning; prevention control; commutation dynamics

0 引言

换相失败(commutation failure, CF)是电网换相换流器型高压直流输电(line commutated converter

based high voltage direct current, LCC-HVDC)最常见的故障之一^[1]。在我国, 随着西电东送、西电中送战略的推进^[2], 我国华东电网、华中电网已经形成了多条直流同时接入的多馈入直流输电(multi-infeed high voltage direct current, MIFDC)系统^[3]。在同一地区, 由于多个直流换流站间存在强相互作用^[4], 一旦某条直流发生换相失败, 其临近直流的换相失败风险将大大增加^[5]。多条直流的严重换相失败将造成直流闭锁, 引发大规模潮流转移甚至发生连锁

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52022035); 国网湖北省电力有限公司科技项目资助(面向多特高压直流馈入和新能源基地发展的湖北新型电力系统运行与控制关键技术研究, 52150521000W)

故障^[6]。因此,快速、精准地评估直流换相失败风险,对换相失败及时预警、预防,对保障电网安全具有重要意义^[7]。

现有对换相失败风险评估与预警的方法大致可分为时域仿真与解析计算两类。对于前者,需要搭建详细的仿真模型并进行大量重复性的仿真工作,得到不同工况下的直流换相失败风险^[8-9]。然而,随着大规模新能源接入以及大电网跨区互联^[10],建模难度剧增且重复性仿真难以覆盖复杂多变的电网运行状态,其评估准确度及预警能力受限。

采用解析计算的方式可以有效避免大量的重复性工作。目前,最常见的用于量化换相失败风险的指标是多馈入交互影响因子(multi-infeed interaction factors, MIIF),通过比较 MIIF 与由换相失败临界电压计算的临界 MIIF 的大小,可以在一定程度上量化多馈入系统的换相失败风险^[11-14]。然而,基于 MIIF 的解析计算方法仅考虑了金属性接地故障的情形,难以适应实际电网中不同故障程度下的风险评估场景。文献[15]根据三相接地电感提出了故障水平来反映故障的严重程度,然而其无法展现某故障工况下直流抵御换相失败的能力。文献[16]提出了换相失败免疫因子,但其仅在对称故障场景下适用。文献[17-18]通过换相电压-时间面积定理实现对换相失败是否发生进行快速判别,然而其不仅缺乏对多馈入场景的分析,且无法量化换相失败的风险大小。文献[19-20]分别从直流电流、电压波形拟合、临界阻抗的角度对换相失败风险进行评估与预警,然而其均只针对首次换相失败,无法实现对后续换相失败风险的评估及预警。文献[21]考虑利用触发角偏差量衡量单相故障引发后续换相失败的风险,但忽略了换相过程中直流电压与交流电压的动态,其预警的准确性与及时性不足。综上所述,现有研究难以对多馈入直流系统的换相失败进行准确、及时的预警评估,且现有指标难以直接优化换流站现有的暂态控制策略,从而增强换相失败抵御能力。

基于以上研究,本文充分考虑换相过程中直流电流与交流电压动态,对换相电压-时间积分面积进行预测,以该面积为判据提出了单馈入直流系统换相失败预警系数;进一步结合电压耦合因子,将预警系数扩展到多馈入直流系统中,实现对多馈入系统每一单一直流的换相失败预警。最后,将系数应用于换流站现有的换相失败预防控制环节,以提升暂态过程中直流系统的换相失败抵御能力。基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建了单馈入与多馈入直流系统模型,对所提预警系数的有效性、及时性与应用场景进行了分析与验证。

1 单馈入直流系统换相失败预警

1.1 计及直流电流与交流电压动态的换相电压-时间面积

图 1 为 6 脉波换流器中晶闸管 VT3 向 VT5 换相等效电路,图 2 展示了其对应的换相过程。根据换相电压-时间面积定理(voltage-time area, VTA),若要实现成功换相,则需要满足式(1)的条件。

$$\begin{cases} S_{\max} \geq S_{\text{need}} \\ S_{\max} = \int_{t_1}^{t_{2\max}} (U_c - U_b) dt = \sqrt{2} E_{\text{aci}} (\cos \gamma_{\min} + \cos \alpha_i) \\ S_{\text{need}} = X_c I_d (t_{2\max}) + X_c I_d (t_1) = 2 X_c I_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_{\max} 为系统能够为换相提供的最大面积,称为最大换相提供面积; S_{need} 为稳态情况下换相最大需求面积; X_c 为换相电抗; t_1 与 $t_{2\max}$ 分别为触发时刻与换相电压积分面积最大的时刻; U_b 与 U_c 分别为 b 相与 c 相的换相电压; I_d 为直流电流; $I_d(t_1)$ 与 $I_d(t_{2\max})$ 分别为 t_1 与 $t_{2\max}$ 时刻的电流值,稳态情况下两者相等; E_{aci} 为逆变侧交流母线电压有效值; α_i 为逆变侧触发角; γ_{\min} 为保证换相成功的最小关断角。图 2 中 μ 为换相角,一般将低于 7° 视为换相失败。

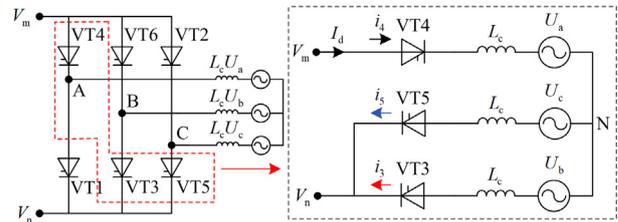


图 1 逆变侧 6 脉波换流器等效模型

Fig. 1 Equivalent model of 6-pulse converter at inverter side

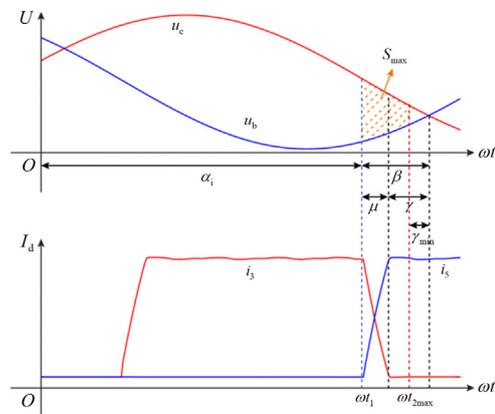


图 2 VT3-VT5 换相过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of VT3-VT5 commutation process

式(1)能够精确地评估稳态下系统的换相能力,但其并未计及暂态下直流换相电压变化趋势与直流电流变化。在暂态过程中,利用 E_{aci} 对最大换相提供面积进行动态预测,可得到预测最大换相提供面积 S_{Fmax} 为

$$S_{Fmax} = \sqrt{2}(E_{aci} + \frac{dE_{aci}(t_0)}{dt} \Delta t)(\cos \gamma_{min} + \cos \alpha_i) \quad (2)$$

式中, t_0 与 Δt 分别为预测起始时刻及预测时长。

对于 S_{need} , $I_d(t_1)$ 与 $I_d(t_{2max})$ 不再近似相等,换相期间直流电流变化量可认为是 ΔI_d , 因此 S_{need} 可修改为暂态换相最大需求面积 S_{Fneed} 。

$$S_{Fneed} = 2X_c I_d + X_c \Delta I_d \quad (3)$$

利用泰勒公式,忽略二阶以上微分项及余项,得到直流电流展开式为

$$I_d = I_d(t_0) + \frac{dI_d(t_0)}{dt}(t-t_0) + \frac{d^2 I_d(t_0)}{dt^2} \frac{(t-t_0)^2}{2} \quad (4)$$

在预测时间 Δt 内,直流变化量 ΔI_d 为

$$\Delta I_d = \frac{dI_d(t_0)}{dt} \Delta t + \frac{d^2 I_d(t_0)}{dt^2} \frac{\Delta t^2}{2} \quad (5)$$

因此,式(3)可以写为

$$S_{Fneed} = 2X_c I_d + X_c \left(\frac{dI_d(t_0)}{dt} \Delta t + \frac{d^2 I_d(t_0)}{dt^2} \frac{\Delta t^2}{2} \right) \quad (6)$$

式(2)与式(6)中 Δt 的确定原则为:正常工况下逆变器换相角 μ 的取值范围为 $20^\circ \sim 30^\circ$ (工频对应时长为 $1.1112 \sim 1.6677$ ms),故障时换相角 μ 受参数影响增大,因此选取 Δt 为 2 ms。

1.2 单馈入系统换相失败预警系数

不难看出,当式(7)条件得到满足时,即预示着下一时刻发生换相失败的概率极大。

$$S_{Fneed} > S_{Fmax} \quad (7)$$

为衡量换相失败发生的风险,提出应用于单馈入直流系统的换相失败预警系数(commutation failure warning coefficient, CFWC), K_{CFWC} 可表示为

$$K_{CFWC} = \frac{100}{(S_{max} - S_{need})_N} (S_{Fmax} - S_{Fneed}) \quad (8)$$

式中: $(S_{max} - S_{need})_N$ 为稳态额定工况下 S_{max} 与 S_{need} 之差,下标 N 表示额定值; K_{CFWC} 为单馈入直流系统的换相失败预警系数,数值越低换相失败风险越高,当 K_{CFWC} 下降到 0 时,换相最大提供面积将无法换相要求,换相失败即将发生的概率大。

可以看到, K_{CFWC} 的推导过程并未区分首次换相失败与后续换相失败,其在两者的预警中均适用。通过对 K_{CFWC} 的数值进行区间划分即可对应不同的预警程度。

2 多单馈入直流系统换相失败预警

同一地区同时馈入两条及以上直流形成的系统称为多馈入直流系统,其结构如图 3 所示。

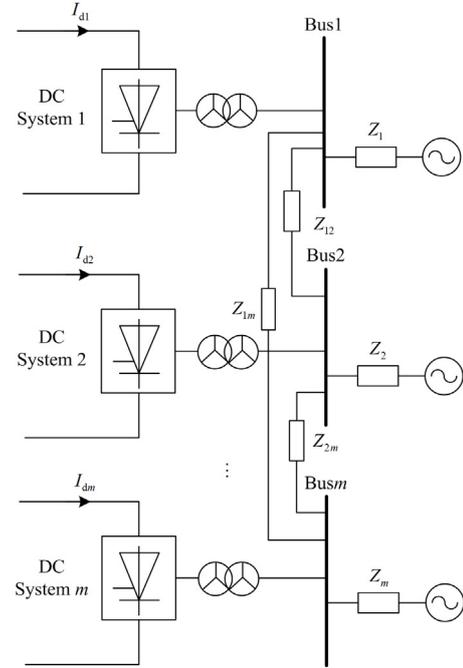


图 3 多馈入直流系统结构

Fig. 3 Multi-infeed HVDC system structure

在多馈入直流系统中,假设直流 i 连接的交流系统发生故障,则直流 j 的换相失败风险将同时由其本身的换相能力以及直流 i 对其的影响程度决定。由式(8)可得,对于直流 j 本身的换相失败风险 K_{CFWCjj} , 有

$$K_{CFWCjj} = \frac{100}{(S_{maxj} - S_{needj})_N} (S_{Fmaxj} - S_{Fneedj}) \quad (9)$$

式中: S_{maxj} 为直流 j 最大换相提供面积; S_{needj} 为直流 j 稳态换相最大需求面积; S_{Fmaxj} 为直流 j 预测最大换相提供面积; S_{Fneedj} 为直流 j 暂态换相最大需求面积。而直流 i 故障对直流 j 的影响 K_{CFWCji} 可通过直流 i 的换相失败预警系数进行折算,如式(10)所示。

$$K_{CFWCji} = hK_{CFWCii} + y = h \frac{100}{(S_{maxi} - S_{needi})_N} (S_{Fmaxi} - S_{Fneedi}) + y \quad (10)$$

式中, h 、 y 分别为折算系数。

为实现对 K_{CFWCji} 的快速求解,引入实用化的交直流系统电压耦合因子 $F_{ADVCFji}$ 及简化的临界耦合因子 $F_{SCADVCFj}$ [22], 可分别表示为

$$F_{\text{ADVCF}_{ji}} = \left| \frac{Z_{ji}}{Z_{ii}} \right| \quad (11)$$

$$F_{\text{SCADVCF}_{j}} = 1 - \frac{X_{kj} \% I_{dj}^*}{\cos \gamma_{\min} + \cos \alpha_j} \quad (12)$$

式中: Z_{ji} 为直流 i 与直流 j 之间的互阻抗; Z_{ii} 为直流 i 的自阻抗; $X_{kj} \%$ 为直流 j 的换流变压器短路电抗的百分比; I_{dj}^* 为直流 j 的运行电流标么值。

$F_{\text{ADVCF}_{ji}}$ 表示两直流的耦合程度, 其值越大, 两直流的相互作用越强。当直流 i 受端交流母线处发生三相金属性接地短路故障时, 如果 $F_{\text{ADVCF}_{ji}} > F_{\text{ADVCF}_{j}}$, 则直流 j 会发生换相失败。因此可定义直流耦合梯度 $\Delta F_{\text{ADVCF}_{ji}}$ 为

$$\Delta F_{\text{ADVCF}_{ji}} = F_{\text{ADVCF}_{ji}} - F_{\text{SCADVCF}_{j}} \quad (13)$$

$\Delta F_{\text{ADVCF}_{ji}}$ 越大, 则直流 i 对直流 j 的换相影响越大。由 $K_{\text{CFWC}_{ji}}$ 、 $K_{\text{CFWC}_{jj}}$ 、 $K_{\text{CFWC}_{ii}}$ 的定义可知: 稳态时, 无换相失败发生, $K_{\text{CFWC}_{ji}}$ 与 $K_{\text{CFWC}_{jj}}$ 均为 100; 当 $\Delta F_{\text{ADVCF}_{ji}}$ 为 0 时, 直流 i 与直流 j 的换相失败几乎不会相互影响, 因此可假设 $K_{\text{CFWC}_{ii}} = 50$ 时 $K_{\text{CFWC}_{jj}}$ 仍大于 85。可将上述两个条件代入式(10)对 h 、 y 进行求解, 可得

$$\begin{cases} 100 = h \times 100 + y \\ 85 - \Delta F_{\text{ADVCF}_{ji}} = h \times 50 + y \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\Delta F_{\text{ADVCF}_{ji}}$ 越大, 则直流 i 对直流 j 的换相影响越大, 且当 $\Delta F_{\text{ADVCF}_{ji}}$ 为 0 时, 直流 i 与直流 j 的换相失败几乎不会相互影响。求解时取 $h = 0.28$, $y = 72$ 。

为保证在多馈入直流系统中每一单一直流对直流 j 的换相影响能最快体现, 定义直流 j 的最终换

相失败预警系数 K_{CFWC_j} 为: 所有对直流 j 产生影响的直流(含直流 j 本身及其他直流)折算得到的预警系数最小值, 可表示为

$$K_{\text{CFWC}_j} = \min[K_{\text{CFWC}_{j1}}, \dots, K_{\text{CFWC}_{jj}}, \dots, K_{\text{CFWC}_{jm}}] \quad (15)$$

在多馈入直流系统中, 每一单一直流仅需采集本地信号, 通过预先设置的折算系数, 可根据 K_{CFWC_j} 评估出各条直流的换相失败风险, 实现风险预警。

3 预警系数在换相失败预防中的应用

通过前两节的分析可知, 本文所提换相失败预警系数可根据暂态过程中的电压、电流特征预知换相失败风险, 因此其不仅可以在系统层面进行预警, 也可在控制层面改善现有控制的响应特性。以换相失败预测控制环节(commutation failure prevention, CFPREV)为例说明预警系数的应用, CFPREV 的核心思想在于: 当控制系统检测到交流故障时立刻提前触发, 用交流电压检测值减去相应阈值再转化为触发角提前量输出, 从而增大换相裕度以抑制换相失败。原始 CFPREV 启动阈值 U_{level1} 、 U_{level2} 为恒定常数, 在部分工况下, 其值过大会导致 CFPREV 启动慢, 换相失败预防能力降低; 其值过小则会存在频繁启动的风险。因此可利用 K_{CFWC_i} 对启动阈值进行自适应调节, 改善其预防换相失败的效果。

优化后的 CFPREV 启动阈值为

$$\begin{cases} U_{\text{wcl1}} = U_{\text{level1}} \times \frac{K_{\text{CFWC}_i}}{100} \\ U_{\text{wcl2}} = U_{\text{level2}} \times \frac{K_{\text{CFWC}_i}}{100} \end{cases} \quad (16)$$

式中, U_{wcl1} 与 U_{wcl2} 分别为优化后不对称故障与对称故障的 CFPREV 启动阈值。优化后的 CFPREV 控制模块如图 4 所示, 粉红色区域为改进的 CFPREV 启动阈值。图中, k_1 、 k_2 为对称和不对称故障检测对应的角度增益。

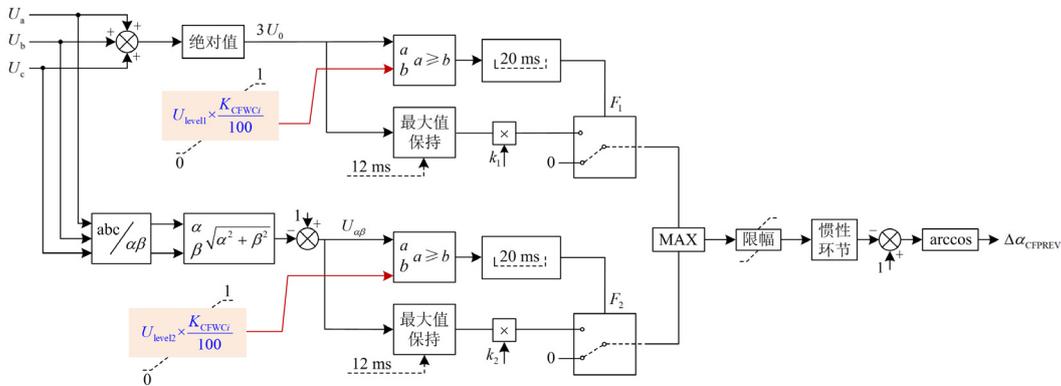


图 4 应用换相失败预警系数改进的换相失败预防控制器

Fig. 4 Improved CFPREV controller based on KCFWC

值得说明的是, 本文研究的重点在于如何对单馈入以及多馈入直流的换相失败进行在线预警。所提预警系数 K_{CFWC} 由换相失败原理进行推导, 与具体控制无关。因此在熄弧角控制时无论采用瑞典通用电气还是西门子的控制技术路线^[23], 该系数都具有通用性。本文所提改进 CFPREV 仅为对所提换相失败预警系数应用的一种案例。具体为利用预警系数动态调整 CFPREV 的启动阈值, 在换相失败风险高时降低启动阈值, 以使 CFPREV 更早地减少触发角进而增大换相裕度。除此之外, 预警系数 K_{CFWC} 或具有较多其他的应用场景, 如根据预警水平动态改进低压限流控制环节 (voltage dependent current order limiter, VDCOL) 的启动阈值, 在直流规划设计阶段利用预警系数评估直流换相失败抵御水平, 在换相失败发生后利用预警系数追溯事故过程等。

4 算例分析

由式(8)可知, 换相失败预警系数 K_{CFWC} 小于等于 100, 因此可将换相失败风险根据预警系数值进行划分, 本文以等分法为例将预警系数 K_{CFWC} 值与换相失败风险对应, 具体的换相失败预警风险划分如表 1 所示。

表 1 换相失败预警风险划分

Table 1 Risk division of commutation failure warning

换相失败预警系数	换相失败风险	换相失败预警状态
$K_{CFWC} > 85$	超低风险	无预警状态
$75 < K_{CFWC} \leq 85$	低风险	轻度预警状态
$50 < K_{CFWC} \leq 75$	中风险	中度预警状态
$25 < K_{CFWC} \leq 50$	高风险	高度预警状态
$K_{CFWC} \leq 25$	超高风险	严重预警状态

4.1 单馈入直流输电系统换相失败预警

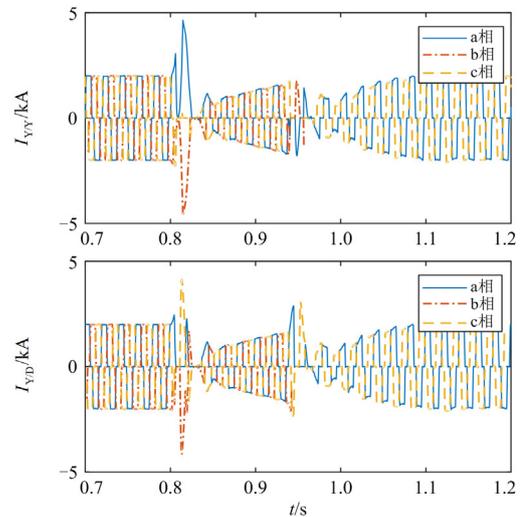
在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建标准 CIGRE HVDC 单馈入系统模型, 系统参数与标准参数保持一致^[24]。仿真设置: 0.8 s 时逆变侧交流母线经 0.2 H 电感三相接地, 故障持续时间为 0.2 s。

逆变站换流变压器阀侧电流如图 5 所示, $I_{Y/Y}$ 表示 Y/Y 接线变压器阀侧电流, $I_{Y/D}$ 表示 Y/D 接线变压器阀侧电流。由图 5 可以看到, 故障后直流系统发生了两次换相失败, 首次换相失败的发生时刻为 0.8053 s。逆变侧熄弧角及换相失败预警得分如图 6 所示。可以看到仅利用稳态信息方法(紫色点线)计算得出的 K_{CFWC} 在 0.8065 s 时过零点, 与仿真结果差异大; 考虑电流变化情况后, K_{CFWC} 在 0.8052 s 经过零点, 与仿真结果吻合; 进一步考虑电压变化趋势后, K_{CFWC} 在 0.8047 s 经过零点, 提前预测换相失败。同时考虑电压与电流特性的预警方法(蓝线)

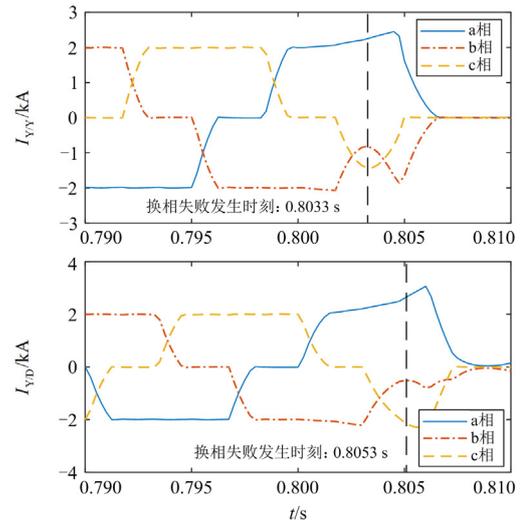
可以最快地反映换相失败的预警风险, 不同预警分数对应的时刻分别为 75: 0.8025 s, 50: 0.8034 s, 25: 0.8041 s, 0: 0.8047 s, 均小于 0.8053 s。

为验证预警系数 K_{CFWC} 的普适性, 分别在对称及不对称故障下进行遍历仿真, 0.8 s 时逆变侧交流母线经不同电感 L_f 三相/单相接地, 故障持续时间为 0.2 s。不同 K_{CFWC} 得分下的预警时刻以及换相失败发生时刻结果如表 2、表 3 所示。

从表 2、表 3 可以看到, K_{CFWC} 均能在换相失败发生前下降至 0, 对换相失败具有预测作用; 对于未发生换相失败的工况(绿色区域), K_{CFWC} 同样起到预警作用, 可根据其变化特点(如变化速率慢)进行区分应用。



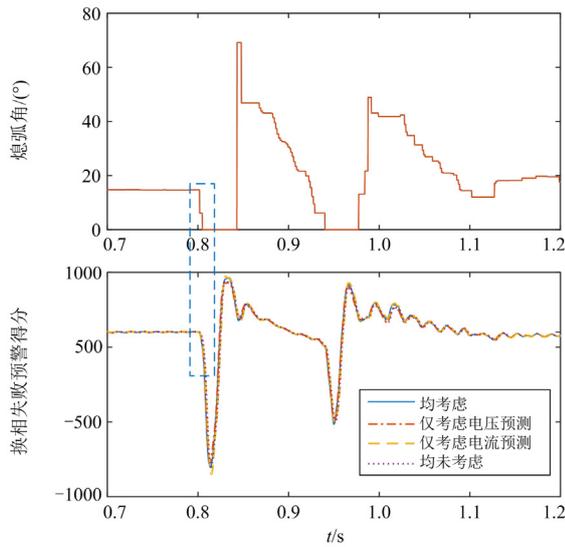
(a) 换流变压器阀侧电流示意图



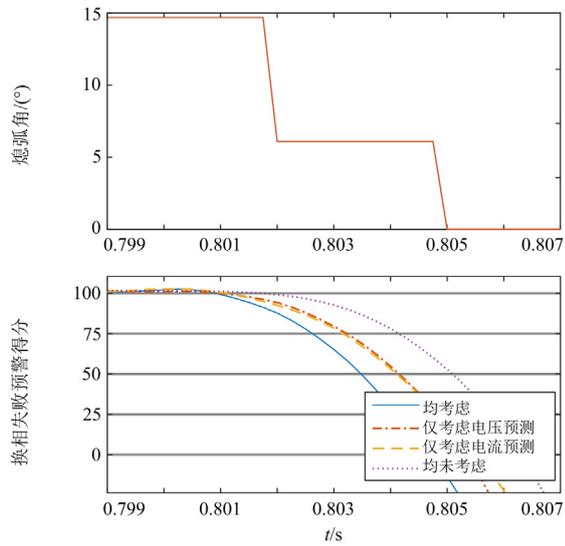
(b) 故障初始时刻换流变压器阀侧电流

图 5 换流站阀侧电流示意图

Fig. 5 Valve side current of converter station



(a) 单馈入系统熄弧角及换相失败预警得分



(b) 故障初始时刻熄弧角及换相失败预警得分

图 6 单馈入系统熄弧角及换相失败预警得分

Fig. 6 Extinction angle and KCFWC of single-infeed HVDC

表 2 三相故障下 K_{CFWC} 遍历结果

Table 2 K_{CFWC} traversal results under three-phase fault

L_f/H	K_{CFWC} 预警时刻/s				换相失败 发生时刻/s
	75	50	25	0	
0.2	0.8026	0.8034	0.8041	0.8047	0.8053
0.4	0.8033	0.8045	0.8054	0.8057	0.8055
0.6	0.8041	0.8054	0.8061	0.8064	0.8083
0.8	0.8049	0.8063	0.8069	0.8073	0.8095
1.0	0.8054	0.8071	0.8075	0.8079	0.8097
1.2	0.8078	0.8103	0.8119	0.8136	未发生

表 3 单相故障下 K_{CFWC} 遍历结果

Table 3 K_{CFWC} traversal results under single-phase fault

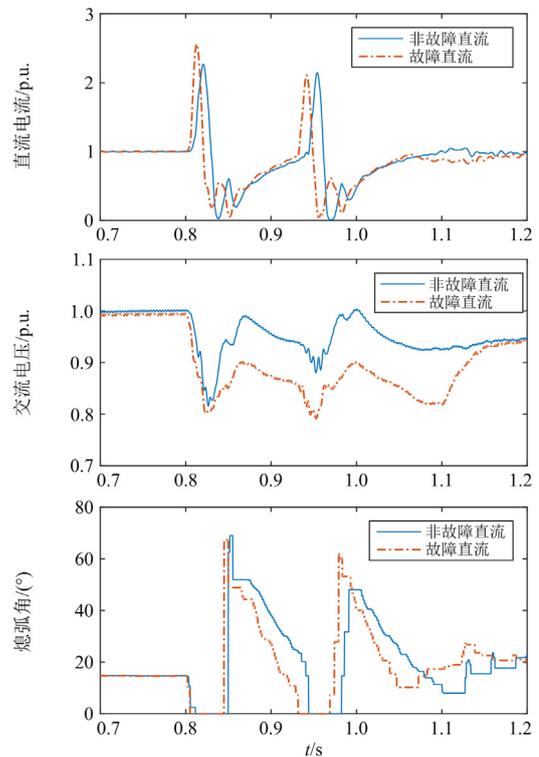
L_f/H	K_{CFWC} 预警时刻/s				换相失败 发生时刻/s
	75	50	25	0	
0.1	0.8028	0.8037	0.8042	0.8047	0.8069
0.3	0.8041	0.805	0.8059	0.8066	0.8071
0.5	0.8049	0.8082	0.809	0.8095	0.8101
0.7	0.8061	0.8089	0.8095	0.8099	0.8116
0.9	0.808	0.8093	0.8098	0.8101	0.8116
1.1	0.8121	0.8138	0.8153	0.8171	未发生

4.2 多馈入直流输电系统换相失败预警

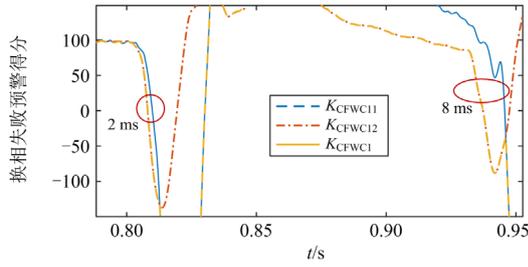
在 PSCAD/EMTDC 上基于 CIGRE HVDC 模型搭建如图 3 所示的由两条直流形成的多馈入直流输电系统, 各直流系统参数、交流系统参数与 CIGRE HVDC 标准模型保持一致, 两直流的自阻抗为 $Z_{11} = Z_{22} = 0.02857 \text{ p.u.}$, 互阻抗为 $Z_{12} = Z_{21} = 0.011 \text{ p.u.}$ 。

仿真设置: 0.8 s 时, 直流系统 2 的母线 Bus2 经 0.3 H 电感三相接地, 故障持续时间为 0.3 s。直流系统特性及换相失败预警得分如图 7 所示。其中, 直流系统 1 为非故障直流, 直流系统 2 为故障直流。

可以看到, 故障直流与非故障直流均发生了两次换相失败, 但前者换相失败出现时间较后者提前。相较于故障直流, 非故障直流电气量变化滞后且变化幅度较小。由此导致仅利用非故障直流换流站信



(a) 直流系统特性



(b) 非故障直流换相失败预警系数得分

图 7 两馈入系统特性及换相失败预警系数得分

Fig. 7 Dual-infeed system characteristics and score of KCFWC

号进行预警(K_{CFWC11})相对滞后,且灵敏度不足。利用故障直流换流站信号折算对非故障直流进行预警,可以提前非故障直流的预警时间。由于后续换相失败相对首次换相失败电气量变化幅度小,利用故障直流换流站信号折算对非故障直流进行后续换相失败预警优势更加突出。

进一步通过遍历仿真验证所提 K_{CFWC} 在多馈入系统中的适用性。仿真设置:0.8 s 时,直流系统 2 的母线 Bus2 经不同电感三相接地,故障持续时间为 0.3 s。首次换相失败(first commutation failure, FCF)与后续换相失败(subsequent commutation failure, SCF)的预警时刻与直流系统 1 发生换相失败时刻的结果如表 4 所示。

表 4 多馈入系统中非故障直流预警与换相失败情况

Table 4 Non-fault HVDC early warning and commutation failure in multi-infeed system

L_f/H	$K_{CFWC11} = 50$		$K_{CFWC11} = 50$		直流 1 换相失败	
	预警时刻/s		预警时刻/s		发生时刻/s	
	FCF	SCF	FCF	SCF	FCF	SCF
0.1	0.8054	0.9291	0.8045	0.9277	0.8055	0.935
0.2	0.8071	0.9582	0.8063	未发生	0.8101	未发生
0.3	0.8082	0.9418	0.8068	0.9344	0.8151	0.9472
0.4	0.8085	0.9822	0.8069	未发生	0.8151	未发生
0.5	0.8088	0.9572	0.8071	0.9508	0.8151	0.9635
0.6	0.8105	0.9611	0.8084	0.9545	0.8224	0.967
0.7	0.8108	0.9629	0.8087	0.9562	0.8224	0.969
0.8	0.811	未发生	0.8088	未发生	0.8225	未发生
0.9	0.8138	未发生	未发生	未发生	未发生	未发生
1.0	0.816	未发生	未发生	未发生	未发生	未发生

可以看到,无论首次换相失败还是后续换相失败,利用故障直流信息进行折算预警灵敏度更高,且换相失败预测的准确性更高。所提 K_{CFWC} 预警的灵敏性、有效性和准确性得以验证。

进一步基于 CIGRE HVDC 模型搭建如图 3 所示的由 3 条直流形成的多馈入直流输电系统,各直流系统参数、交流系统参数与 CIGRE HVDC 标准

模型保持一致,各直流的自阻抗为 $Z_{11} = Z_{22} = Z_{33} = 0.02857 \text{ p.u.}$,直流 1、2 间互阻抗为 $Z_{12} = Z_{21} = 0.005 \text{ p.u.}$,直流 2、3 间互阻抗为 $Z_{23} = Z_{32} = 0.008 \text{ p.u.}$,直流 1、3 间互阻抗为 $Z_{23} = Z_{32} = 0.013 \text{ p.u.}$ 。

仿真设置:0.8 s 时,直流 2 的母线 Bus2 经 0.3 H 电感三相接地,故障持续时间为 0.3 s。直流系统特性及直流 1 换相失败预警得分如图 8 所示。其中,直流 2 为故障直流,直流 1、3 为非故障直流。

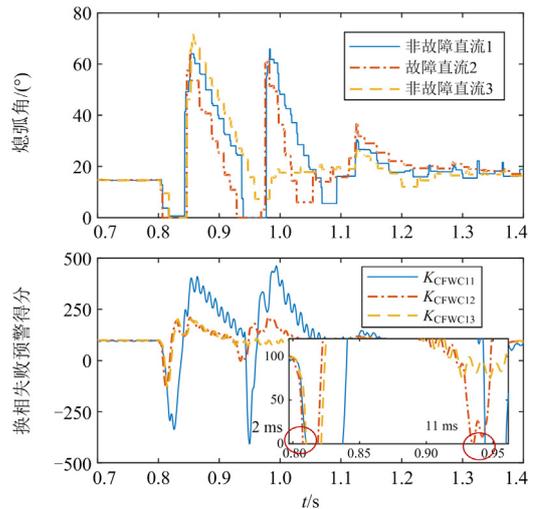


图 8 三馈入系统熄弧角及换相失败预警系数得分

Fig. 8 Three-infeed system characteristics and score of KCFWC

根据仿真结果可以看到,距离故障直流越近的非故障直流换相失败情况越严重。此外,对于非故障直流 1 而言,利用故障直流信息对其换相失败情况进行预警,相较于仅利用自身信息预警首次换相失败与后续换相失败,预警时刻分别提前了 2 ms 与 11 ms。验证了所提预警方法在超过两回直流且电气距离较近工况下具有一定的有效性。

4.3 K_{CFWC} 优化 CFPREV 启动阈值

根据第 3 节的分析,分别在 CIGRE HVDC 模型中配置原始的 CFPREV 以及图 4 所示利用 K_{CFWC} 改进的 CFPREV,CFPREV 中 U_{level1} 、 U_{level2} 、 k_1 、 k_2 分别为 0.04、0.15、0.05、0.05。

仿真设置:1 s 时刻,逆变侧交流母线经 0.8 H 电感单相接地,故障持续时间为 0.3 s。原始 CFPREV 与改进 CFPREV 作用特性对比如图 9 所示。

可以看到,根据熄弧角特性,原始 CFPREV 发生了换相失败,而改进 CFPREV 成功预防了换相失败的发生。其主要原因为原始 CFPREV 的不对称故障启动电压阈值 U_{level1} 为恒定值,不随故障特征而变化,其检测到的零序电压 $3U_0$ 第一个峰值未到达

U_{level1} , 即 CFPREV 未启动; 而改进 CFPREV 的不对称故障启动电压阈值 U_{wcl1} 根据预警程度自适应变化, 在 1.0035 s 左右 $3U_0$ 超过 U_{wcl1} , CFPREV 启动向外输出补偿角度。相较于原始 CFPREV, 改进后的 CFPREV 提前了约 6 ms 启动换相补偿, 成功预防了换相失败的发生。 K_{CFWC} 在控制中的适用性得以验证。

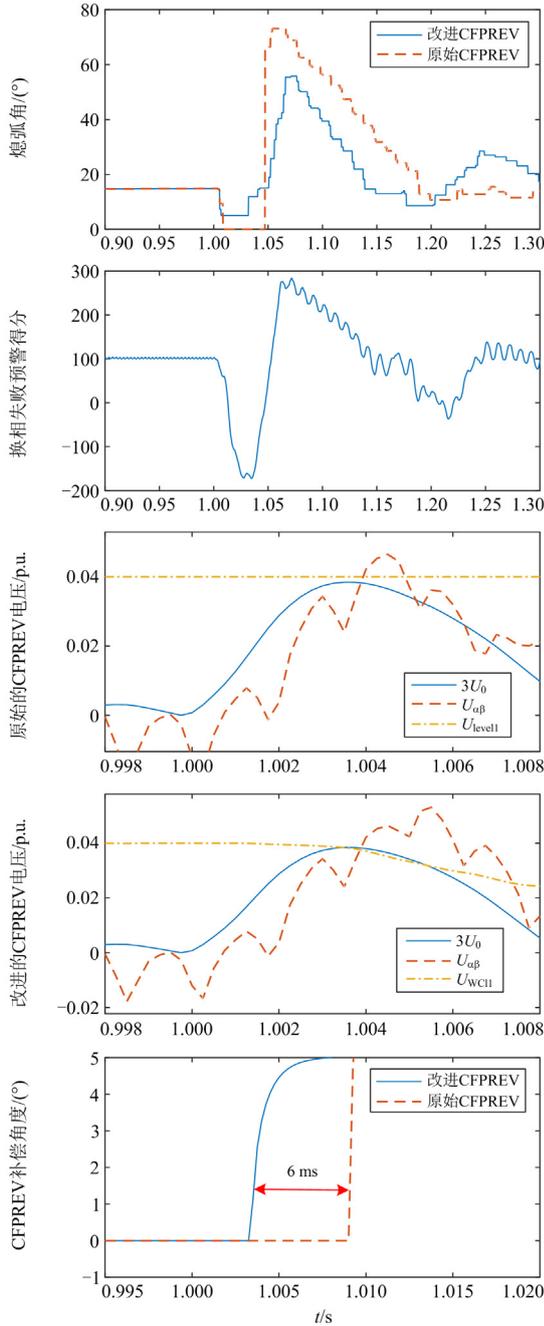


图9 原始 CFPREV 与改进 CFPREV 作用特性对比

Fig. 9 Comparison of the action characteristics of the original CFPREV and the enhanced CFPREV

本文进一步将所提基于预警系数的 CFPREV 改进方法分别与文献[25]所提考虑故障直流电流的 CFPREV 改进方法、原始 CFPREV 方法进行对比, 得到不同 CFPREV 控制下的换相失败情况, 如图 10 所示。

仿真设置: 在逆变站交流侧母线处设置三相短路故障, 故障持续时间为 0.05 s, 从 1 s 开始以 1 ms 为步长逐渐改变故障发生时刻, 当故障电抗从 0.75 H 到 1.40 H 变化时, 可得预防控制的效果如图 10(a)所示; 在逆变站交流侧母线处设置单相短路故障, 故障持续时间为 0.05 s, 从 1 s 开始以 1 ms 为步长逐渐改变故障发生时刻, 同时当故障电抗从 0.05 H 到 0.7 H 变化时, 可得预防控制效果如图 10(b)所示。可以看到, 相较于文献[25]所提改进控制策略, 本文所提控制策略可以提升系统的换相失败抵御能力, 但效果并不明显。这是因为本文重点放在换相失败的预警上, 对于预警后的控制并未进行更精确的分析与设计。

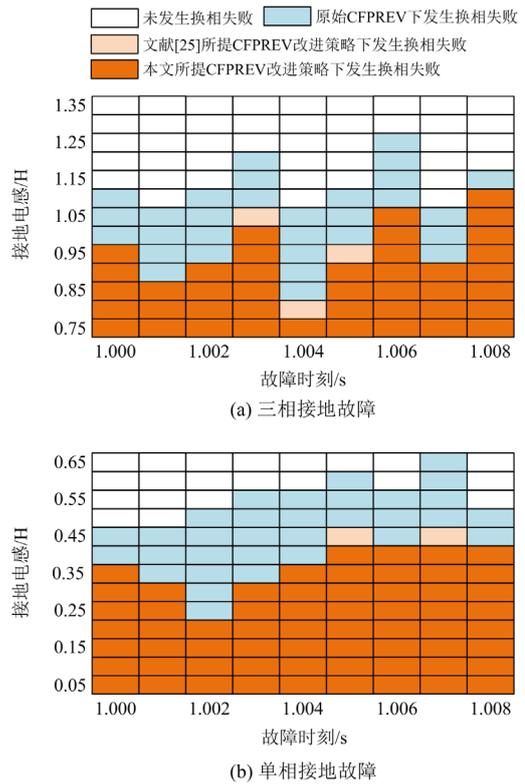


图 10 不同 CFPREV 控制策略下换相失败情况

Fig. 10 Effectiveness of commutation failure prevention with different CFPREV controls

5 结论

本文基于电压-时间面积定理提出了一种换相失败在线预警方法, 并通过搭建的单馈入、多馈入

模型对指标的性能以及应用方式进行了仿真分析与验证, 相关结论如下。

1) 通过同时考虑暂态期间换相电流变化与换相电压变化趋势对电压-时间面积定理进行了改进, 使其对换相失败具有预测能力, 并通过百分化处理提出了适用于单馈入直流的换相失败预警系数 K_{CFWC} 。

2) 将 K_{CFWC} 向多馈入系统进行了扩展, 利用电压耦合因子将每一单一直流的 K_{CFWC} 向其他直流进行折算, 以评估故障直流引发非故障直流换相失败的风险。仿真结果表明无论是首次换相失败或是后续换相失败, 利用故障直流信息进行折算预警, 具有更高的灵敏度, 且换相失败预测的准确性更高。

3) 以将 K_{CFWC} 应用于改进换相失败预防控制 CFPREV 为例, 设计了 K_{CFWC} 在控制中的应用方案。仿真结果表明相较于原始 CFPREV, 改进后的 CFPREV 能够根据故障动态自适应地提前触角的补偿时刻, 增强其换相失败的预防能力。

目前本文仍存在以下不足: 1) 在多馈入直流系统中, 故障发生后, 各直流(如直流 j) 只需采集本地的电气信号即可计算出自身的预警系数 K_{CFWCj} 以及对其他直流的影响 K_{CFWCij} ; 但由于通信延时, 本地直流 j 对相邻直流 i 的影响 K_{CFWCij} 难以快速地应用在直流 i 的控制改进上, 因此其应用场景还需进一步挖掘; 2) 对于利用所提 K_{CFWC} 的改进 CFPREV 或其他控制环节, 还需要进一步分析与设计; 3) 换相失败预警系数对于换相失败风险区间的划分有待进一步细分。

下一步工作将研究如何利用预警系数 K_{CFWC} 进一步提升多馈入直流系统的换相失败抵御能力。

参考文献

- [1] 周泓宇, 李培平, 姚伟, 等. 抑制直流后续换相失败的电化学储能有功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 70-79.
- ZHOU Hongyu, LI Peiping, YAO Wei, et al. Active power control strategy of electrochemical energy storage for mitigating subsequent DC commutation failures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 70-79.
- [2] 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.
- [3] 胡加伟, 王彤, 王增平. 直流闭锁后系统暂态稳定紧急协同控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 43-52.
- HU Jiawei, WANG Tong, WANG Zengping. Collaborative emergency control strategy of system transient stability after DC blocking[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 43-52.
- [4] YANG B, LIU B, ZHOU H., et al. A critical survey of technologies of large offshore wind farm integration: summary, advances, and perspectives[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(2): 233-264.
- [5] 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.
- [6] 周泓宇, 姚伟, 李佳, 等. 基于电流电压预测的直流输电换相失败预防策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5948-5959, 6169.
- ZHOU Hongyu, YAO Wei, LI Jia, et al. Commutation failure prevention strategy of HVDC based on current and voltage prediction[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5948-5959, 6169.
- [7] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021 年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 121-128.
- YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of the 2021 Texas blackout accident and its implications for power grid planning and management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 121-128.
- [8] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 2015 年特高压规划电网华北和华东地区多馈入直流输电系统的换相失败分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 9-15.
- SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems in North China and East China power grids planned for UHV power grids in 2015[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 9-15.
- [9] ZHOU H, YAO W, AI X, et al. Comprehensive review of commutation failure in HVDC transmission systems[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 205: 107768.
- [10] 周泓宇, 姚伟, 左文平, 等. 海上风电直流单极接地故障下容错运行的组网方案与控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4835-4848.
- ZHOU Hongyu, YAO Wei, ZUO Wenping, et al. Networking scheme and control of fault-tolerant operation of offshore wind power DC single-pole ground fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4835-4848.
- [11] 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.
- [12] 邵瑶, 汤涌. 一种快速评估多馈入直流系统换相失败风险的方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3429-3436, 3670.
SHAO Yao, TANG Yong. A fast assessment method for evaluating commutation failure risk of multi-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3429-3436, 3670.
- [13] ZHOU H, YAO W, AI X, et al. Coordinated power control of electrochemical energy storage for mitigating subsequent commutation failures of HVDC[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107455.
- [14] XIAO H, LI Y, GOLE A M, et al. Computationally efficient and accurate approach for commutation failure risk areas identification in multi-infeed LCC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 5238-5253.
- [15] 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.
- [16] 肖浩, 朱佳, 李银红, 等. 多馈入直流系统换相失败免疫水平快速确定方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2711-2717.
XIAO Hao, ZHU Jia, LI Yinhong, et al. Study on rapid determination method of commutation failure immunity levels for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2711-2717.
- [17] 钟文梁, 刘健, 林圣. 考虑换相电压多次谐波分量的换相失败抑制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 301-314.
ZHONG Wenliang, LIU Jian, LIN Sheng. A commutation failure suppression strategy considering multiple harmonic components of commutation voltage[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 301-314.
- [18] WEI Z, YUAN Y, LEI X, et al. Direct-current predictive control strategy for inhibiting commutation failure in HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2409-2417.
- [19] YAO W, WANG L, ZHOU H, et al. Harmonics interaction mechanism and impact on extinction angles in multi-infeed HVDC systems[J/OL]. IEEE Transactions on Power Delivery: 1-13[2023-03-23]. DOI: 10.1109/TPWRD.2023.3243412
- [20] LI G, ZHANG S, JIANG T, et al. A method of detecting commutation failure in multi-infeed HVDC systems based on critical failure impedance boundary[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, IL, USA: 1-5.
- [21] 赵盛, 李博通, 李斌, 等. 单相跳闸对换相过程的影响机理及连续换相失败抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 17-24, 55.
ZHAO Sheng, LI Botong, LI Bin, et al. Influence mechanism of single-phase tripping on commutation process and suppression strategy of continuous commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 17-24, 55.
- [22] 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.
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.
- [23] 王海军, 黄义隆, 周全. 高压直流输电换相失败响应策略与预测控制技术路线分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 124-131.
WANG Haijun, HUANG Yilong, ZHOU Quan. Analysis of commutation failure response strategies and prediction control technology in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 124-131.
- [24] 李瑞鹏, 李永丽, 陈晓龙. 一种抑制直流输电连续换相失败的控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5029-5042, 5300.
LI Ruipeng, LI Yongli, CHEN Xiaolong. A control method for suppressing the continuous commutation failure of HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5029-5042, 5300.
- [25] 欧阳金鑫, 张真, 肖超. 直流输电系统换相失败预防控制改进策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 14-21.
OUYANG Jinxin, ZHANG Zhen, XIAO Chao. Improved prevention and control strategy of commutation failure in HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 14-21.

收稿日期: 2023-03-08; 修回日期: 2023-05-15

作者简介:

李大虎(1978—), 男, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统安全稳定管理; E-mail: 6517562@qq.com

周泓宇(1997—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为交直流混联电网稳定分析与控制; E-mail: ee.henry_zhou@foxmail.com

姚伟(1983—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为交直流混联电网稳定性分析与控制、新能源电力系统稳定分析与控制等。E-mail: w.yao@hust.edu.cn

(编辑 许威)