

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.01.002

多馈入直流系统换相失败抵御能力评价与提升方法综述

辛业春, 黄韬宇, 王拓, 赫羽朋, 甘效罗, 李国庆

(东北电力大学(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室), 吉林 吉林 132012)

摘要:多馈入直流(multi-infeed direct current, MIDC)系统换相失败抵御能力的评价与提升方法,对实际电网系统换相失败特性的测试、评估难题的解决以及换相失败防御技术在电网规划与运行中的应用具有重要意义,因此文中对其进行系统科学的归纳和总结。首先,阐述 MIDC 系统以及换相失败的基本定义,分析不同类型故障对换相失败的影响,梳理其关键影响因素,并总结现有换相失败判据;其次,综述目前已有的换相失败抵御能力评价方法;然后,从无功补偿优化、控制保护优化以及换流器拓扑改进等 3 个方面对现阶段 MIDC 系统换相失败抵御能力提升方法进行综述;最后,明确了未来需要重点关注以下方向:采用归一化的效果评价方式,在具备标准意义的仿真平台上开展可重复的校检,形成系统性、综合性的换相失败抵御能力评价方法,并提出包括换流站级、换流器级和系统级的多层次协同提升策略。

关键词:高压直流输电;多馈入直流(MIDC)系统;换相失败;抵御能力;评价方法;防御技术

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2026)01-0013-13

0 引言

基于电网换相换流器的高压直流输电(line commutation converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)技术具有系统调节迅速、输送容量巨大、运行稳定、经济性好等优点,已成为我国实施西电东送战略的重要支撑技术^[1-5]。

换相失败是 LCC-HVDC 系统中常见故障之一,通常由交流侧故障引发。一旦发生换相失败,将导致直流传输功率减小、直流电压下降、直流电流上升等电气特性变化^[6-10]。在多馈入直流(multi-infeed direct current, MIDC)系统中,由于多直流线路之间存在耦合与交互作用,交流故障可能引发多回直流线路同时或相继发生换相失败^[11-14]。

相比单馈入直流输电系统, MIDC 系统不仅提升了系统运行的灵活性和输送容量,也显著增加了系统结构的复杂性^[15]。交流故障引起的电压跌落通过交流网络传播,影响各直流换流站换相电压,造成其幅值跌落、相位偏移及波形畸变,进而导致各直流传输有功功率剧烈波动和无功功率消耗大幅增加,最终造成换相失败,对系统的安全稳定性造成巨大威胁^[16]。故障期间,多个换流站同时吸收大量无功功率,造成受端交流电压大幅跌落,随着直流馈入数量的增加,换相失败对系统造成的危害越来越严重^[17-18]。

因此,开展 MIDC 系统换相失败抵御能力评价与提升方法研究,不仅可为实际电网中换相失败特

性的测试提供参考,也为解决 MIDC 系统换相失败抵御能力评估难题提供理论依据。该研究有助于降低 MIDC 系统发生换相失败的概率,减小其对复杂电网的影响,进而提升实际电网系统的安全性和稳定性,对换相失败防御技术的发展与实际电网系统的规划与运行具有重要意义。

因此文中对相关研究进行系统性归纳和总结。首先,明确了 MIDC 系统结构,并对换相失败定义及分类进行梳理。其次,归纳不同故障类型对换相失败的影响,分析 MIDC 系统换相失败的影响因素,总结现有换相失败判据及抵御能力评价指标。随后,综述当前 MIDC 系统换相失败抵御能力提升方法,主要包括无功补偿优化、控制保护优化以及换流器拓扑改进。最后,指出未来在 MIDC 系统换相失败抵御能力评价与提升方面亟须解决的关键问题。

1 MIDC 系统及换相失败的定义

1.1 MIDC 系统

MIDC 系统是指多回直流换流器馈入同一条换流母线或连接到电气距离较近的换流母线上,由受端交流系统与逆变侧的多回直流换流器共同构成的系统。简化的 MIDC 系统结构如图 1 所示,其中 $U_m(m=1,2,\dots,i,\dots,j,\dots,h)$ 为逆变侧各交流母线电压; E_m 为各直流线路逆变侧对应的交流等值电源; Z_m 为各直流线路受端交流系统的戴维南等效阻抗; $Z_{mn}(m \leq n; m=1,2,\dots,h-1; n=2,3,\dots,h)$ 为逆变侧各换流母线之间的耦合阻抗。通过这些耦合阻抗,各

收稿日期: 2025-06-20; 修回日期: 2025-09-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2400900)

直流受端母线在电气上紧密联系。

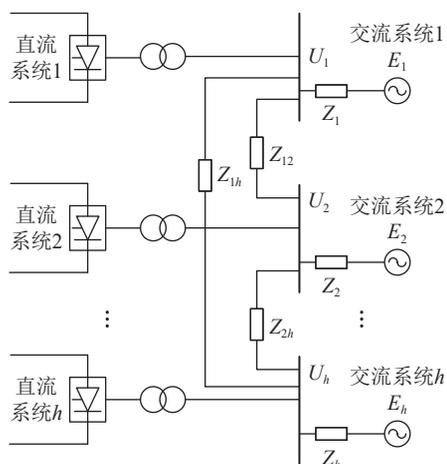


图1 MIDC系统简化结构

Fig.1 Simplified structure of MIDC

1.2 换相失败的分类及定义

换相失败指的是在换流阀的换相过程中, 预计关断的换流阀在反向电压作用下未能及时恢复阻断能力或者换相过程未能完成, 导致预定关断的换流阀再次导通的现象。文中针对 MIDC 系统, 从单直流换相失败到多直流换相失败, 分别介绍换相失败的定义及分类。

1.2.1 单直流换相失败

对于单直流换相失败, 主要从阀级层面进行说明。根据一个工频周期内换相情况的差异, 可将换相失败分为阀级首次换相失败、阀级连续换相失败以及阀级 2 次不连续换相失败^[19]。结合图 2 可以更好地说明阀级换相失败的定义及分类。其中, U_d 为直流电压; I_d 为直流电流; U_a, U_b, U_c 为三相交流侧电压; $V_{T1} \sim V_{T6}$ 为换流阀。

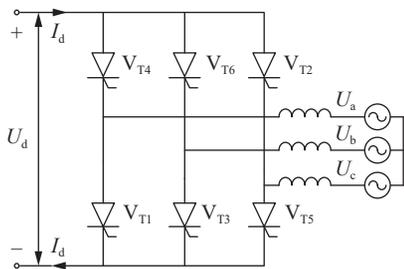


图2 六脉动换相电路示意

Fig.2 Schematic of a six-pulse commutation circuit

阀级首次换相失败: 换流阀 V_{T1} 向换流阀 V_{T3} 的换相不成功, 直到下一个周期时, 换流阀 V_{T1} 才有可能恢复其阻断能力。

阀级连续换相失败: 换流阀 V_{T1} 向换流阀 V_{T3} 的换相不成功, 在下一个周期时, 故障换流阀 V_{T3} 仍未能正常导通^[20-21]。

阀级 2 次不连续换相失败: 换流阀 V_{T1} 向换流

阀 V_{T3} 的换相不成功, 在下一个周期时, 换流阀 V_{T1} 成功导通, 但是因为换流阀 V_{T1} 不满足换流阀的换相条件, 在相邻的周期中再次未能导通^[19]。

1.2.2 多直流换相失败

在 MIDC 系统中, 由于多直流线路间存在紧密的电气耦合, 单一直流系统的换相失败可能会导致其他直流线路发生换相失败。根据不同换流站换相失败发生的时序性, 可将其分为同时换相失败与相继换相失败^[22-23]。

同时换相失败: 交流系统的故障引起的换流母线电压跌落与波形畸变, 直接导致 2 个及以上的换流站在同一时间发生换相失败。其主要原因在于逆变侧的各换流站之间的电气距离较近, 一旦出现交流系统故障, 可能同时使得多个换流站换流母线电压跌落和波形畸变, 进而引发同时换相失败^[24]。该现象表现为在极短时间内多条直流线路发生换相失败, 其产生的直流功率波动、换相电压跌落和波形畸变会影响系统的安全稳定。

相继换相失败: 交流系统故障首先导致故障近端的换流站发生换相失败, 随后, 近端的换流站换相失败引起的功率波动使故障远端的换流站亦发生换相失败^[25-26]。其根本原因在于 MIDC 系统中多直流线路之间存在交互与耦合关系。一旦受端交流电网发生故障, 各换流站出现交流侧母线电压大幅跌落与畸变、直流电流增大等现象, 可能首先引发某一回直流发生换相失败。而在故障恢复过程中, 由于换流站吸收大量无功功率, 导致母线电压出现二次跌落, 进而导致其他换流站相继发生换相失败^[27-28]。

2 MIDC 系统换相失败影响因素分析

对在运直流输电系统换相失败事件进行统计分析, 发现交流系统故障是导致换相失败的主要原因, 占比接近 90%。此类故障会引发换流母线电压的大幅跌落与波形畸变、直流电流增大以及相位角偏移等现象, 进而影响换相过程的正常完成^[29]。阀控系统异常(换流阀的误触发、不触发以及电子设备的脉冲丢失等)也会导致直流系统发生换相失败。但根据实际运行统计数据, 由阀控系统故障引发的换相失败占比较小, 仅约为 10%。

不同的交流故障事件对于换相失败的发生具有显著影响, 导致换相失败的交流故障事件与故障类型、故障位置、故障发生时刻、故障持续时间与保护动作过程均密切相关。

2.1 故障事件对换相失败的影响

2.1.1 故障类型

交流系统常见故障主要包括三相短路故障、单相接地故障、相间短路故障。不同故障类型会引起交流电压幅值、相位发生变化,进而对换相过程产生差异化影响^[27]。

(1) 三相短路故障。

在三相短路故障情况下,交流系统仍保持对称运行状态。此时,逆变站的关断角表达式为:

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

式中: U_L 为逆变侧换流母线线电压有效值; I_d 为 LCC 直流电流; K 为换流变压器变比; X_c 为逆变侧 LCC 等值换相电抗; β 为提前触发角。

在三相故障情况下,即交流系统发生对称故障时,三相交流电压将同步跌落,进而导致直流系统发生换相失败。

(2) 单相接地或相间短路故障。

在单相接地或相间短路故障情况下,交流系统处于不对称运行状态,此时逆变站的关断角表达式为:

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2}KI_d X_c}{U_L} + \cos \beta \right) - \varphi \quad (2)$$

式中: φ 为换相电压的相位偏移角。

交流系统发生不对称故障时,一方面会引起交流电压跌落,另一方面会导致相电压过零点的相位角发生偏移,进而影响关断角的大小。二者的共同作用使得故障期间的实际关断角小于临界关断角,从而引发直流系统的换相失败^[27]。

2.1.2 故障位置

在 MIDC 系统中,不同电气位置发生的故障所引起的换流母线电压跌落、波形畸变是导致换相失败的主要原因^[28-29]。交流节点发生故障,会引发直流换流母线电压跌落,通常采用电压交互作用因子 (voltage interaction factor, VIF) 进行分析^[30]。如图 3 所示, VIF 定义为在交流节点 i 投入对称三相电抗器,使其电压下降 1% 时,换流站母线 j 的电压变化率。图 3 中, Z_x 为交流节点 i 投入的对称三相电抗器; $I_i - I_{i0}$ 为交流节点 i 注入系统的电流; I_{i0} 为流过对称三相电抗器的电流; I_i 为流过交流节点 i 的电流。VIF 的表达式见式(3)。

$$V_{ji} = \frac{\Delta U_j}{1\% U_{i0}} \quad (3)$$

式中: V_{ji} 为节点 i 与母线 j 的 VIF; U_{i0} 为投入对称三相电抗器前节点 i 的交流电压; ΔU_j 为换流站母线

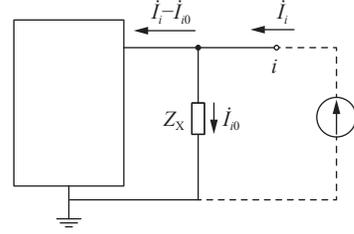


图 3 计算 VIF 等值电路

Fig.3 Equivalent calculation circuit of VIF

j 产生的压降。

结合文献[30],可推导得到 V_{ji} 的表达式为:

$$V_{ji} = \frac{\Delta U_j}{1\% U_{i0}} = \left| \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} \right| \quad (4)$$

因此可知,不同交流节点互阻抗和自阻抗之比不同,导致在发生故障后, MIDC 系统中换流母线的电压跌落程度不同,进而对是否发生换相失败产生显著影响。因此,故障位置是影响 MIDC 系统是否发生换相失败的关键影响因素之一。

2.1.3 故障发生时刻

对于相同严重程度故障, MIDC 系统在一个工频周期内不同故障时刻对是否引发换相失败存在显著差异。为此,诸多文献通过分析故障发生时刻对直流系统换流母线临界换相电压降的影响,进而分析故障时刻对换相失败的影响^[31]。

故障发生时刻的影响主要考虑两种情形:故障发生在换相起始时刻前和换相过程中。不同故障时刻会改变引发换相失败的最小换流母线电压降落阈值,进而对换相失败发生与否产生一定影响。

(1) 故障发生在换相起始时刻前。

如果故障发生在换相起始时刻前,引发换相失败的最小换流母线电压降落量 ΔU 表达式为:

$$\Delta U = 1 - \frac{I_{dm}}{I_{dN}} \times \frac{\cos \alpha + \cos \gamma_0}{\cos \alpha + \cos \gamma_{min}} \quad (5)$$

式中: I_{dN} 为直流电流有效值的额定值; I_{dm} 为交流系统发生故障后的直流电流; α 为触发角; γ_{min} 为临界关断角; γ_0 为起始关断角。

由式(5)可知,故障发生在换相过程起始时刻前,若不计故障后直流电流的变化,此时最小换流母线电压降落 ΔU 为定值,说明故障发生在换相过程起始前的任意时刻,最小换流母线电压降落保持不变。

(2) 故障发生在换相过程中。

如果故障发生在换相过程中,引发换相失败的最小换流母线电压降落量 ΔU 表达式为:

$$\Delta U = 1 - \frac{\left(\frac{I_{dm}}{I_{dN}} - 1\right) \cos \alpha + \frac{I_{dm}}{I_d} \cos \gamma_0 + \cos(\alpha + \theta)}{\cos(\alpha + \theta) + \cos \gamma_{min}} \quad (6)$$

式中： θ 为交流故障时刻与触发脉冲发出时刻间的角度差。

由式(6)可知，当故障发生在换相过程中时，临界换相压降 ΔU 随 θ 的增大而增大，说明故障时刻对换相失败的发生具有显著影响^[32]。当 $\theta=0$ 时，临界换相压降 ΔU 最小，其表达式与式(5)一致。

综上所述，故障时刻对 MIDC 系统是否发生换相失败存在影响^[33-34]。

2.1.4 故障持续时间与保护动作过程

交流故障切除瞬间，直流控制系统往往无法及时响应。若此时出现电压相位前移，则会造成最大换相面积减小，对换相过程不利。如果故障切除前直流电流较大，可能会出现换相面积的最大提供量小于需求量的情况，从而引发故障切除时的换相失败。其中，换相电压的相位偏移角由交流故障直接决定，而直流电流则随着不同故障演化阶段下控制系统的响应情况变化，与故障持续时间密切相关。因此，故障持续时间对是否发生换相失败存在影响。

在实际系统中，某一单相短路故障可能引发直流首次换相失败。如果此故障为瞬时性故障，由于其持续时间较短，系统保护与重合闸配合可以快速切除故障。故障点的消失使直流系统逐渐恢复，避免引发连续换相失败。若此故障为永久性故障，在保护动作切除故障后，直流系统在逐渐恢复的过程中，重合闸动作会使交直流系统再次受到故障冲击，可能引发连续换相失败。由此可见，瞬时性故障和永久性故障对直流输电系统是否发生换相失败存在显著影响。不同的故障持续时间与保护动作过程导致了是否引发直流换相失败的显著差异。此外，还应考虑主保护拒动时后备保护的影响。

综上所述，不同的交流故障事件(故障类型、故障位置、故障发生时刻、故障持续时间与保护动作过程)对于换相失败的发生具有重要的影响。然而大多数研究采用稳态电气参数来计算换相失败的相关电气量，并未充分考虑故障暂态过程中直流电流动态特性对换流阀换相过程的影响。直流电流的暂态响应特性与各换流阀组的换相过程紧密相关，表明直流系统换相失败是涉及多方面的暂态过程，仅通过各稳态电气参数的计算式判断换相失败具有一定的局限性。此外，由于直流电力电子设备的控制响应速度快，忽略其影响将会产生较大误

差，降低判断结果的准确性。

2.2 多直流间交互作用对换相失败的影响

在 MIDC 系统中，由于多直流线路之间存在交互作用与耦合关系，换相失败的影响因素日益复杂，除 2.1 节中的影响因素外，换相失败的发生还受到换流母线间的电气耦合特性、故障传递特性等因素影响^[35]。

2.2.1 多直流交互作用对同时换相失败的影响

为量化多馈入换流母线电压交互影响，国际大电网会议中 CIGRE WG B4 工作组提出了多馈入交互因子(multi-infeed interaction factor, MIIF)。其表达式为：

$$M_{MIIF} = \frac{\Delta U_p}{1\%U_q} \quad (7)$$

式中： M_{MIIF} 为 MIIF； ΔU_p 为换流站 p 母线电压降落量； U_q 为换流站 q 母线电压。

M_{MIIF} 越大，表明换流站 p 和换流站 q 之间的电压耦合特性越强，在交流系统发生故障时，多直流线路同时发生换相失败风险越高^[36-37]。在 MIDC 系统中，考虑到各个直流间的电气耦合特性，在 MIIF 的基础上，CIGRE 工作组进一步提出了多馈入短路比的概念，用于表征 MIDC 系统的整体强度。多馈入短路比越小，多直流系统间的交互作用越强，MIDC 系统发生换相失败的概率越高。

2.2.2 多直流交互作用对相继换相失败的影响

故障传递特性是指当 MIDC 系统中某一条直流子系统发生换相失败时，会通过交流网络向其他子系统传递显著的电压扰动，从而影响电网的稳定性。交流故障引起的电压跌落通过交流网络传播，导致各直流换相电压幅值跌落、相位偏移及波形畸变，从而引起各直流传输有功功率骤降和无功消耗大幅变化，最终发生相继换相失败。

在故障传播过程中，谐波分量传递也是造成 MIDC 系统发生相继换相失败的一个重要原因。文献[38]通过对换相电压进行傅里叶分解的定量分析指出，谐波是造成换流母线电压跌落和畸变的重要原因。此时尽管各换流站母线电压均受到影响，但初始节点可能仅有一回直流发生换相失败，而在其故障恢复过程中，由于无功功率的供需不平衡，该换流母线可能出现二次电压跌落。由于各换流站间多类型直流设备存在耦合关系，进而可能引起其他换流站相继发生换相失败。文献[39]表明，在 MIDC 系统中，每个换流站本身均可视为一个谐波源。某一换流站产生的谐波分量不仅会引起自身换流母线的电压畸变，也会导致其他换流母线的电

压畸变。各换流站间的谐波相互作用越强,多直流系统间的电气耦合效应越显著,多种直流设备的复杂交互作用对相继换相失败的影响越大。但谐波分量在 MIDC 系统中的传递特性及其对换相失败的影响机制研究尚浅,须进一步深入研究。

3 MIDC 系统换相失败抵御能力评价方法

为定量评价 MIDC 系统对换相失败的抵御能力,首先需要明确其判据。目前常见的换相失败判据包括换相电压判据、换相面积判据、关断角判据、阀电压和阀电流判据。然而这些判据难以同时兼顾实用性与准确性。同时,现有的 MIDC 系统换相失败抵御能力评价指标具有局限性,所考虑的故障场景不够全面,无法直观地反映特定故障范围内系统的整体响应特性。

3.1 换相失败判据

(1) 换相电压判据。该判据通过比较换流器换流母线电压 U 与临界换流母线电压 U_{cr} 的大小进行判断,若 $U < U_{cr}$, 则判定发生换相失败。该判据简单且容易实现,目前普遍应用于实际工程中,但其忽略了系统实际运行中电压波形畸变的影响,而缺乏一定准确性。

(2) 换相面积判据。该判据基于电压-时间积分面积,即比较实际换相面积 S 与临界换相面积 S_{cr} 的大小进行判断,若 $S < S_{cr}$, 则判定发生换相失败。但其依赖于高精度的实时电压波形,在工程应用中实现难度较大^[40]。

(3) 关断角判据。换流阀需要在关断后维持约 $400 \mu s$ 的去离子时间以恢复阻断能力,对应电角度约为 7° , 定义为临界关断角 γ_{min} 。在仿真测试中,若 $\gamma < \gamma_{min}$, 则判定发生换相失败。在实际工程应用中,关断角难以直接测量^[41],限制了其在线应用。

(4) 阀电压和阀电流判据。观测阀电压、阀电流波形,若预定退出导通的阀电压、阀电流未能正常关断(表现为阀电压连续为零,阀电流呈现不连续的变化特点),则判定换流器发生换相失败。从理论上来说,该判据最为精准,能直接反映换相过程的异常。然而,由于换流阀本体通常未配置阀电压、阀电流传感器,相关信号难以获取,其实用性受到一定限制^[42]。

换相失败判据如表 1 所示。现有换相失败判据难以兼顾工程上的实用性与准确性。精确的换相失败判据方法约束前提较多,增大了在实际工程应用的难度,且在一定程度上限制其判断的速度。因此,在实际工程中,需要综合考虑判据方法的实

用性与准确性,依据换相失败定义和器件恢复特性,选择关断角准则为主判据,同时考虑系统的外电气特性,选择阀电压、阀电流波形为辅助判据。

表 1 换相失败判据比较

Table 1 Comparison of commutation failure criteria

判据方式	优点	缺点
换相电压	简单易实现	忽略波形畸变影响,缺乏一定准确性
换相面积	易判别	依赖实时电压波形,实际工程实现难度大
关断角	较为高效	关断角提取存在一定难度
阀电压和阀电流	较为精准	监测困难,工程实用性受限

3.2 MIDC 系统换相失败抵御能力评价指标

为定量评价 MIDC 系统对换相失败的抵御能力,目前研究常采用换相失败免疫因子指标(commutation failure immunity index, CFII)和换相失败概率指标(commutation failure probability index, CFPI)作为评估指标^[43-44]。

3.2.1 CFII

CFII 的表达式为:

$$C_{CFII} = \frac{V_{ac}^2}{Z_{max} P_{dc}} \quad (8)$$

式中: V_{ac} 为逆变侧换流母线的额定线电压; P_{dc} 为直流线路的额定功率; Z_{max} 为三相故障情况下对应的换相失败临界阻抗。其求取方法为在一个工频周期内均匀设置多个故障时刻点,在每个时刻分别投入不同大小的电抗,通过仿真获得每个时间点对应的直流系统不发生换相失败的临界阻抗,随后取各临界阻抗的最大值,即得 Z_{max} 。由 CFII 的定义可知,故障下的临界阻抗越大,CFII 的数值越大,表明换流器抵御换相失败的能力越强,系统发生换相失败的概率越低^[45]。针对仿真计算 CFII 时存在耗时长且计算量较大的问题,文献^[46]提出一种基于曲线拟合的快速 CFII 计算方法,以提升评估效率。该方法仅针对三相短路故障,尽管此类故障最易造成换相失败,但在实际电网中的发生几率远低于单相接地故障;同时,该方法仅局限于逆变侧换流母线故障,极大地影响了其适用范围,无法全面直观地反映系统换相失败抵御能力^[47-48]。

针对 MIDC 系统,文献^[43]提出了本地换相失败免疫因子指标(local commutation failure immunity index, LCFII)与同时换相失败免疫因子指标(concurrent commutation failure immunity index, CCFII),分别用于评估 MIDC 系统对本地单回直流

换相失败和多回直流同时换相失败的抵御能力。LCFII 的大小取决于受端系统的电网强度,受端系统的电网强度越高,LCFII 的取值越大,导致 MIDC 系统对本地换相失败的抵御能力越强。应用仿真方法计算 LCFII 时存在计算量较大且耗时长的问题,文献[28]推导了 MIDC 系统中 LCFII 的解析表达式。该表达式可快速而准确地确定系统的相关电气参数对本地换相失败抵御能力的影响,但是忽略了直流系统一次元件和二次控制参数的影响^[49-50],导致其在复杂工况下的适用性受限。针对此问题,文献[51]基于 MIDC 系统的潮流方程,提出了 LCFII 的快速计算方法。该方法能够一定程度上满足换相失败抵御能力评价方法对计算效率的需求,具有较好的理论价值和工程实用性,但指标的建立过程忽略了谐波交互作用与传递特性的影响,导致其评估的准确性具有一定缺陷。

3.2.2 CFPI

CFPI 是指同一故障水平下,在一个工频周期内均匀选取 100 个故障起始时刻,分别施加故障并统计直流系统发生换相失败的次数与总次数的比值。CFPI 越小,表明直流系统对换相失败的抵御能力越强^[52-53]。CFPI 虽可以弥补 CFII 的不足,但其在一般情况下是针对某一确定故障严重程度、故障类型、故障位置,采用多次仿真的方式获取统计结果,计算成本较高,且难以全面反映多维故障场景下的系统脆弱性。文献[45]提出了换相失败概率面积比指标,通过对比不同系统配置下换相失败概率曲线所围成的面积,量化系统整体的换相失败风险,从而在一定程度上弥补了 CFPI 仅关注单一故障条件的不足。文献[54]提出了基于贝叶斯网络的 MIDC 系统相继换相失败概率推断方法,建立包含换流母线压降、直流变化率、电压总畸变率 3 个证据指标的概率函数,以计算 MIDC 系统相继换相失败的概率,实现对 MIDC 系统换相失败抵御能力的评估。

4 MIDC 系统换相失败抵御能力提升方法

现阶段常用的 MIDC 系统换相失败抵御能力提升方法分为无功补偿优化、控制保护优化以及换流器拓扑改进。不同的 MIDC 系统换相失败抵御能力提升方法比较如表 2 所示。

4.1 无功补偿优化

无功补偿优化是提升 MIDC 系统换相失败抵御能力的重要手段。通常配置无功补偿装置,可根据换流器的无功功率需求提供动态无功支撑,在一

表 2 换相失败抵御能力提升方法比较

Table 2 Comparison of improvement methods for commutation failure resistance ability

方法	主要方式	特点
无功补偿优化	静止无功补偿器、静止同步补偿器、同步调相机	不同的无功补偿设备性能存在差异,依据实际系统需求进行配置
控制保护优化	提前触发控制、低压限流控制	较为经济、实用,但有效性与适用范围受限
换流器拓扑改进	电容换相换流器、新型电网换相换流器、全控开关器件	易应用于实际工程,但经济成本高

定程度上维持交流系统电压稳定性,减少换流母线电压幅值降落,从而降低换流器发生换相失败的风险。不同的无功补偿装置性能不同,换流站的无功补偿装置应根据不同交流系统的强度以及实际需求进行配置。目前常见的换流站无功补偿设备包括:静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)以及同步调相机等。

SVC 目前的发展已经十分成熟,具备电压调节速度快、系统可靠性高、功率损耗小等优点,可以抑制交流母线故障时的暂态过电压,保证换相的顺利进行,是提高 MIDC 系统换相失败抵御能力的有效手段^[55]。

STATCOM 相较于 SVC 具有更加灵活的优势,其系统响应速度较快、故障率较低,可以在一定程度上抑制由于交流故障而导致的电压跌落,降低由于电压跌落而导致系统发生换相失败的概率,以提升系统换相失败抵御能力^[56-57]。

同步调相机与 SVC 和 STATCOM 等无功补偿装置相比,具有更良好的电压无功支撑能力和工程实用性,能够有效抑制系统发生多回直流换相失败^[58]。文献[59]考虑各直流间的电气耦合特性,给出了同步调相机的最佳补偿位置,以提升 MIDC 系统换相失败抵御能力。文献[60]表明同步调相机能够有效提高系统的电压无功支撑能力,进而提升 MIDC 系统换相失败抵御能力。目前多个国家已在实际电网中部署调相机,以提高系统的安全稳定性,降低系统发生换相失败的概率,对电网系统的规划与运行具有重要工程意义^[61]。

在 MIDC 系统中,由于多类型直流设备存在耦合关系,无功补偿装置的安装类型、安装位置等将显著影响其补偿效果^[21]。文献[57]考虑投入 SVC 和 STATCOM 两种动态无功补偿装置,提出一种动态无功补偿配置方法,通过优化多个动态无功补偿装置的类型、位置和容量,更好地降低了多馈入直

流输电系统中多回直流发生换相失败的概率,并提升了 MIDC 系统换相失败抵御能力。

尽管无功补偿优化可以提升 MIDC 系统换相失败抵御能力,但不同无功补偿设备性能存在差异,所以换流站功率补偿设备应依据交流系统强度以及实际系统需求进行配置。随着高比例新能源的大量接入,无功补偿优化设备一方面提高了系统运行的成本,另一方面各设备间的交互影响限制了其电网工程实用性。

4.2 控制保护优化

将 MIDC 系统换相失败抵御能力提升方法的控制保护优化分为首次和后续换相失败进行分析。

4.2.1 首次换相失败的控制保护优化

提前触发控制是目前最为常见的首次换相失败的控制保护优化方法。其核心思想为:当控制系统检测到可能会引发系统发生换相失败的交流故障时,减小逆变器的延迟触发角,提高换流阀的换相裕度,保障系统的安全稳定性。换相失败的根本原因是关断角 γ 小于固有临界关断角 γ_{\min} ,理论上可通过提高关断角的额定值以降低换相失败风险,但此方法会提高换流器无功消耗,影响系统运行效率。相比之下,提前触发脉冲控制可以有效解决这一问题,因此是目前实际系统中最常用的控制策略。

换相失败的预测技术是此控制方式的核心。文献[56]提出换相失败预防(commutation failure prevention, CFPREV)控制,但该技术未深入考虑 MIDC 系统各直流间的电气耦合特性,须结合系统运行特点对其进行优化。文献[62]提出一种 MIDC 系统换相失败的协调控制策略。通过减少 MIDC 系统非故障侧换流器的无功需求,避免因换相电压下降引起其他直流系统发生首次换相失败,提升 MIDC 系统首次换相失败抵御能力。

4.2.2 后续换相失败的控制保护优化

低压限流控制是目前最为常见的后续换相失败控制保护优化方法。其核心思想为:当交流系统发生故障导致换流母线电压降低到预设值时,触发低压限流指令,减少换流站的无功消耗,削弱多回直流间的相互作用,促进换相过程,使直流系统快速从故障中恢复^[63]。

在 MIDC 系统中,低压限流控制主要用于降低各直流回路间的相互影响,抑制 MIDC 系统发生换相失败。常规的低压限流控制依据交流或直流电压水平调节直流电流指令。但由于电压故障检测存在一定的滞后性,往往在故障已对换相过程产生不良影响后才启动限流措施,难以迅速减小直流

电流。

针对这一问题,文献[64]提出一种电流指令驱动的控制方法,通过减小直流电流,促进换相过程的顺利进行。文献[65]提出一种基于交替恢复策略的低压限流控制策略,其核心思想是使不同直流线路的功率交替恢复,避免由于无功需求的大量提升引发后续换相失败,降低 MIDC 系统发生换相失败的概率。文献[66]对比了定关断角控制和定电压控制对换相失败抵御能力的影响,结果表明采用定关断角控制的系统在换相失败抵御能力方面略优于定电压控制。

总体而言,控制保护优化是目前提升 MIDC 系统换相失败抵御能力最经济、实用的方法。但受限于 MIDC 系统复杂的电气耦合特性以及系统故障扰动的不确定性,现有控制策略的效果仍受多种因素制约。不同的故障发生时刻会影响 MIDC 系统换相失败抵御能力,在三相严重故障条件下,此类控制策略的改善效果不显著。因此,其适用范围和有效性仍存在一定局限。

4.3 换流器拓扑改进

换流器拓扑改进主要包括电容换相换流器、新型电网换相换流器以及全控型开关器件换流器。

4.3.1 电容换相换流器

文献[63]提出在换流阀与交流系统间串联电容,构成串联电容换相换流器(capacitor commutation converter, CCC)。其核心思想为:将电容电压叠加在换相电压上,使换相电压过零点发生偏移,进而导致换流器的关断角大于临界关断角,降低交流故障时系统发生换相失败的概率。但是由于故障时直流电压、电流等电气量的波动可能造成串联电容电压不平衡,引发换流器发生换相失败。目前实际工程中,美国的 Rapid City 直流输电工程和巴西的 Rio Madeira 直流输电工程均采用 CCC 拓扑改进以提升系统对换相失败的抵御能力,提高系统的安全性^[67]。

为改善 CCC 在故障条件下因电容电压不平衡而引发换相失败的问题,文献[68]提出一种基于反并联晶闸管全桥子模块的增强型电容换相换流器(enhanced capacitor commutation converter, ECCC)拓扑,该拓扑有助于增强电容电压的可控性,在一定程度上降低系统换相失败的概率,进一步提升换相失败抵御能力。

4.3.2 新型电网换相换流器

根据当前 LCC 的研究及应用情况,仅依靠无功补偿和控制保护策略均无法完全抵御换相失败。这

是由 LCC 换流阀的固有属性决定的。要从根本上解决换相失败问题,需采用新型电网换相换流器(controllable line commutation converter, CLCC)。文献[69]提出一种新型具有可控关断能力的 CLCC 拓扑。其核心思想为:利用全控型器件将系统主支路的阀电流转移至辅助支路,待主支路中半控器件(晶闸管)恢复关断能力后,再通过全控型器件关断桥臂电流,从而完成换相过程。该机制有效增大了换相裕度,避免了换相失败。CLCC 具备换流阀的自主关断能力,不用通过增大关断角来避免换相失败,同时还可交流系统提供无功及电压支撑,有利于提升 MIDC 系统对换相失败的抵御能力。目前,CLCC 拓扑已在葛南直流输电工程中正式投入运行,有效降低了换相失败的概率,验证了其工程可行性与优越性^[70]。

文献[47]提出一种增强型电网换相换流器(enhanced line commutation converter, ELCC)拓扑。其核心思想为:在换流阀的原有阀臂上串联新型可控子模块,通过增大换相电压以促进换相过程的正常进行,进而提升 MIDC 系统换相失败抵御能力。但新型可控子模块采用全控型器件绝缘栅双极型晶体管,存在经济成本高、难以与晶闸管容量匹配等问题。

4.3.3 全控型开关器件换流器

除 4.3.1 节和 4.3.2 节所述换流器拓扑改进方案外,文献[71]提出一种增强型 LCC-HVDC 拓扑。其核心思想为:在换流阀的桥臂上串联全控型全桥子模块,从而增大换相裕度,降低由于交流系统故障而引发的系统换相失败概率,并减少交流故障期间有功功率传输的跌落幅度。然而,由于该方案依赖全控型电力电子器件,存在经济成本较高的问题,所以难以大规模应用于实际工程中。文献[72]提出将换流器替换为基于自关断器件集成门极换流晶闸管的电流源型换相换流器(actively commutation converter, ACC)和基于全控型绝缘栅双极型晶体管的电压源型换流器(voltage source converter, VSC)拓扑,可以有效提升 MIDC 系统换相失败抵御能力。

5 MIDC 系统换相失败中亟待解决的问题

5.1 换相失败抵御能力评价方法中亟待解决的问题

由于多直流间的复杂电气耦合特性以及多回换流站间的相互影响,MIDC 系统面临直流功率大幅波动的问题,这不仅给系统带来较大冲击,还影

响交流系统的同步稳定性。现有 MIDC 系统换相失败抵御能力评价方法及其评价指标存在局限性,仿真验证以及评价标准不统一,难以全面评估系统的实际性能问题。未来的研究重点是提出一种系统性、综合性的 MIDC 系统换相失败抵御能力评价方法。

目前采用 CFII 和 CFPI 作为评估 MIDC 系统换相失败抵御能力的指标,但这些指标未能全面覆盖所有故障情况,无法直观地反映换相失败抵御能力。为全面评估换相失败抵御能力,亟须开发一个能够综合考虑各种故障事件影响的新指标。基于对换相失败特性的分析,构建一个能够反映 MIDC 系统换相失败关键特征的仿真测试事件集,有效减少仿真测试量,使其更适用于实际工程应用,并提出基于概率分析的 MIDC 系统换相失败抵御能力评价方法,从而验证换相失败仿真测试事件集的合理性与适用性。

此外,现阶段针对不同工况采用不同的验证方式,在兼顾仿真速率和精确性的同时,导致了评价标准的混乱^[21]。未来的实际工程应用中,需要综合考虑各故障类型、故障位置、故障时刻、故障持续时间与保护动作过程等因素,采用归一化的评价方式,在标准化的仿真平台上进行可重复校验,形成系统性、综合性的 MIDC 系统换相失败抵御能力评价方法。这将为实际电网系统的换相失败特性测试提供参考,并为解决评估 MIDC 系统换相失败抵御能力的难题提供重要理论支撑。仿真平台的建立需要综合考虑实际 MIDC 系统的复杂程度与规模大小,将软件仿真与硬件实验平台相结合,综合实时数字仿真与动态物理仿真的优势,建立数字物理混合仿真平台,用于 MIDC 系统换相失败抵御能力的评估,从而为实际电网工程的规划运行提供指导。

5.2 换相失败抵御能力提升方法中亟待解决的问题

现阶段提升 MIDC 系统换相失败抵御能力的方法中,无功补偿优化能够有效减小 MIDC 系统发生换相失败的可能性,提高系统的稳定性。然而,不同的无功补偿设备性能各异,需要依据交流系统的强度以及实际需求来合理配置功率补偿设备。随着高比例新能源的大量接入,虽然无功补偿优化的功率补偿设备提高了系统运行成本,然而各设备间的交互影响限制其电网工程实用性。控制保护优化相对于无功补偿优化具有更好的经济性、实用性,但由于 MIDC 系统复杂的电气耦合特性以及故障扰动下不同时刻的影响,控制保护优化在三相故

障时的效果不显著,其适用范围受到一定限制。对于换流器拓扑改进,虽然能一定程度上提升换相失败抵御能力,但也增加了系统建设成本,且相关技术尚未完全成熟。

随着新型电力系统的构建深化,新能源大规模接入受端电网,因其短路容量较低,导致系统换相失败抵御能力变弱,进一步限制了 MIDC 系统换相失败的抵御能力提升。为解决这一问题,未来的研究应聚焦于系统性解决方案,包括换流站级、换流器级和系统级的提升方法。

(1) 换流站级。核心思想是预测换相失败并采取合适的控制策略,如增大关断角或限制直流功率输送水平以提升 MIDC 系统换相失败抵御能力。通过利用先进的电力电子装置参与换流站级协同控制,可以增强新能源与受端电网的交互作用,进而提高 MIDC 系统换相失败抵御能力以及实际电网系统的安全稳定性。

(2) 换流器级。通过改进换流器拓扑,研究适用于 MIDC 系统的新型换流阀,以应对多种直流设备之间复杂的交互作用,减少多条直流线路发生同时或相继换相失败的问题,从而提升 MIDC 系统换相失败抵御能力。

(3) 系统级。从系统整体控制层面出发,基于多直流功率协调,考虑 MIDC 系统复杂的电气耦合特性和各直流回路及多类型直流设备间的交互影响,通过协调控制故障线路和非故障线路的直流传输功率,降低换相失败的概率,从而提升 MIDC 系统换相失败抵御能力。

综上所述,通过换流站级、换流器级和系统级的综合提升方法,可以有效避免单一交流故障引起的电压跌落或其他问题,防止多直流线路发生同时或相继换相失败,进而提高 MIDC 系统换相失败抵御能力和实际电网系统的安全稳定性。这对于换相失败防御技术和实际电网系统的规划与运行具有重要意义。

6 结论

文中从 MIDC 系统换相失败特性分析、换相失败抵御能力评价方法以及抵御能力提升方法等多维度,对 MIDC 系统换相失败相关研究进行了详细综述,并指出了该领域中尚待解决的关键问题。主要结论如下:

(1) 明确了 MIDC 系统的基本结构特征,并围绕其运行特点,从单直流换相失败扩展到多直流换相失败,详细阐述了换相失败定义及分类方式。

(2) 归纳了不同故障事件对换相失败的影响,深入分析了 MIDC 系统换相失败的关键因素,总结了现阶段常见的换相失败判据,并综述了目前已有的 MIDC 系统换相失败抵御能力评价的相关指标。

(3) 从无功补偿优化、控制保护优化以及换流器拓扑改进等 3 个方面对现阶段 MIDC 系统换相失败抵御能力提升方法进行综述,对比了各类方法的优缺点并指明其应用场景。

(4) 指出了未来研究的重点方向是构建能够全面直观地评价换相失败抵御能力的指标,进而实现对 MIDC 系统换相失败抵御能力的评估以及未来高比例新能源场景下的 MIDC 系统换相失败抵御能力系统性提升方法。

参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2011: 124-127.
ZHAO WanJun. HVDC transmission engineering technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 124-127.
- [2] 王玲, 文俊, 崔康生, 等. 多馈入直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(8): 56-65.
WANG Ling, WEN Jun, CUI Kangsheng, et al. Research survey of commutation failure in MIDC transmission systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(8): 56-65.
- [3] 黄劭睿, 刘昕宇, 高熠莹, 等. 新能源基地经 LCC-HVDC 送出系统动态交互机制及暂态过电压风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(12): 139-151.
HUANG Jierui, LIU Xinyu, GAO Yiyang, et al. Dynamic interaction mechanism and transient overvoltage risk assessment of renewable energy base connected via LCC-HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 139-151.
- [4] 李兰芳, 王子莹, 李奇南, 等. 构网型柔性直流输电系统同步控制方法研究综述[J]. 浙江电力, 2025, 44(12): 91-106.
LI Lanfang, WANG Ziyang, LI Qinan, et al. Review of synchronization control methods for grid-forming VSC-HVDC transmission systems[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(12): 91-106.
- [5] 甘效罗, 王拓, 杨明城, 等. 基于扰动程度自适应切换的 LCC-HVDC 数字-物理混合仿真 DIM 接口算法[J]. 电力建设, 2025, 46(11): 71-82.
GAN Xiaoluo, WANG Tuo, YANG Mingcheng, et al. Adaptive switching algorithm for digital physical hybrid simulation DIM interface of LCC-HVDC based on disturbance degree[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(11): 71-82.
- [6] 林圣, 刘健, 刘磊, 等. 基于控制保护的高压直流输电系统换相失败抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6045-6058.
LIN Sheng, LIU Jian, LIU Lei, et al. A review of commutation

- failure suppression methods for HVDC systems based on control protection measures[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(19): 6045-6058.
- [7] 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 modeling and interaction stability analysis of LCC-HVDC based on modularization[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(10): 84-94.
- [8] 辛业春, 刘奇, 王拓, 等. 抑制 LCC-HVDC 后续换相失败的改进型电流偏差控制策略[J]. *电力建设*, 2024, 45(3): 97-106.
XIN Yechun, LIU Qi, WANG Tuo, et al. An improved current deviation control strategy for suppressing subsequent commutation failure of LCC-HVDC[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(3): 97-106.
- [9] 赵化时, 黄耀辉, 宋智强, 等. 含 LCC/MMC 交直流混联系统的状态估计及不良数据检测[J]. *中国电力*, 2024, 57(11): 62-69.
ZHAO Huashi, HUANG Yaohui, SONG Zhiqiang, et al. State estimation and bad data detection in hybrid AC/DC systems with LCC/MMC[J]. *Electric Power*, 2024, 57(11): 62-69.
- [10] 张怡静, 丁浩寅, 时艳强, 等. VSC-HVDC 系统宽频振荡 z 域阻抗判据研究[J]. *浙江电力*, 2024, 43(7): 103-110.
ZHANG Yijing, DING Haoyin, SHI Yanqiang, et al. Research on a z-domain impedance criterion for wideband oscillation of the VSC-HVDC transmission system[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(7): 103-110.
- [11] 王增平, 刘席洋, 李林泽, 等. 多馈入直流输电系统换相失败边界条件[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(10): 12-19.
WANG Zengping, LIU Xiyang, LI Linze, et al. Boundary conditions of commutation failure in multi-infeed HVDC systems[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(10): 12-19.
- [12] 徐岩, 刘泽锴, 应璐曼. 混合 MIDC 馈入下的工频变化量阻抗方向保护动作特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(5): 14-20.
XU Yan, LIU Zekai, YING Luman. Performance of impedance directional protection based on variation of power-frequency components in hybrid multi-infeed HVDC system[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(5): 14-20.
- [13] 沈舒仪, 王国腾, 但扬清, 等. 频率偏差与电压刚度约束下多馈入直流优化调度方法[J]. *中国电力*, 2025, 58(3): 132-141.
SHEN Shuyi, WANG Guoteng, DAN Yangqing, et al. Optimal scheduling method for multi-infeed receiving-end power grids under frequency deviation and voltage stiffness constraints[J]. *Electric Power*, 2025, 58(3): 132-141.
- [14] 张强, 李娜, 吴继平, 等. 含多馈入直流的受端电网大功率缺额智能处理技术研究及应用[J]. *电力建设*, 2025, 46(5): 47-55.
ZHANG Qiang, LI Na, WU Jiping, et al. Research and application of intelligent processing technology for high-power shortage in receiving end power grid with multiple DC inputs[J]. *Electric Power Construction*, 2025, 46(5): 47-55.
- [15] 周保荣, 洪潮, 饶宏, 等. 广东多直流输电换相失败对电网稳定运行的影响[J]. *南方电网技术*, 2017, 11(3): 18-24.
ZHOU Baorong, HONG Chao, RAO Hong, et al. Influence of simultaneous commutation failure of Guangdong multiple HVDC on power system secure operation[J]. *Southern Power System Technology*, 2017, 11(3): 18-24.
- [16] YIN X G, ZHANG Z, LI Z X, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(2): 1-13.
- [17] HE J, TANG Y, ZHANG J, et al. Fast calculation of power oscillation peak value on AC tie-line after HVDC commutation failure[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(4): 2194-2195.
- [18] 葛俊, 贺之渊, 杨杰, 等. 先进输电技术的发展与趋势[J]. *新型电力系统*, 2023, 1(2): 132-144.
GE Jun, HE Zhiyuan, YANG Jie, et al. Development and prospect of advanced transmission technology in new power system[J]. *New Type Power Systems*, 2023, 1(2): 132-144.
- [19] 刘席洋, 王增平, 乔鑫, 等. 交直流混联电网换相失败分类及抑制措施研究综述[J]. *智慧电力*, 2020, 48(6): 1-7, 34.
LIU Xiyang, WANG Zengping, QIAO Xin, et al. Review on classification and mitigation measures of commutation failures in AC-DC hybrid power grids[J]. *Smart Power*, 2020, 48(6): 1-7, 34.
- [20] LIU L, LIN S, SUN P Y, et al. A calculation method of pseudo extinction angle for commutation failure mitigation in HVDC[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(2): 777-779.
- [21] 李培平, 周泓宇, 姚伟, 等. 多馈入结构背景下的高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. *电网技术*, 2022, 46(3): 834-850.
LI Peiping, ZHOU Hongyu, YAO Wei, et al. Review of commutation failure on HVDC transmission system under background of multi-infeed structure[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(3): 834-850.
- [22] 景柳铭, 王宾, 董新洲, 等. 高压直流输电系统连续换相失败研究综述[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(9): 116-123.
JING Liuming, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Review of consecutive commutation failure research for HVDC transmission system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(9): 116-123.
- [23] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. *电网技术*, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(4): 985-991.
- [24] 刘席洋, 王增平, 郑博文, 等. LCC-HVDC 故障恢复型连续换相失败机理分析与抑制措施[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(10): 3163-3172.

- LIU Xiyang, WANG Zengping, ZHENG Bowen, et al. Mechanism analysis and mitigation measures for continuous commutation failure during the restoration of LCC-HVDC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(10): 3163-3172.
- [25] 王超, 李兴源, 冯明, 等. 抑制多馈入直流输电系统相继换相失败的协调恢复控制策略[J]. *电测与仪表*, 2016, 53(13): 19-24.
- WANG Chao, LI Xingyuan, FENG Ming, et al. Coordinated recovery strategy for inhibiting continuous commutation failures in multi-infeed HVDC transmission system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2016, 53(13): 19-24.
- [26] 王黎欣, 方勇杰, 徐海波, 等. 相继换相失败对基于相位角的失步解列判据的影响机理[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(9): 71-77, 123.
- WANG Lixin, FANG Yongjie, XU Haibo, et al. Mechanism analysis of successive commutation failures influence on out-of-step splitting criterion based on phase angle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(9): 71-77, 123.
- [27] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(2): 499-513, 647.
- TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(2): 499-513, 647.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 陈政, 周保荣, 洪潮, 等. 基于临界阻抗边界的多馈直流系统同时故障风险评估[J]. *电网技术*, 2013, 37(3): 874-878.
- CHEN Zheng, ZHOU Baorong, HONG Chao, et al. Critical impedance boundary-based risk assessment on simultaneous faults in multi-infeed DC transmission system[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(3): 874-878.
- [31] 李程昊, 刘畅, 张振安, 等. 计及换相失败预测控制和故障合闸角的 HVDC 换相失败分析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(3): 56-63, 76.
- LI Chenghao, LIU Chang, ZHANG Zhen'an, et al. Analysis of commutation failure in HVDC power transmission system considering prediction control of commutation failure and initial fault angle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(3): 56-63, 76.
- [32] 田大川. 提升高压直流输电系统换相失败抑制能力的直流控制关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- TIAN Dachuan. Research on key technologies of LCC-HVDC control to enhance the commutation failure suppression capacity[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [33] 徐敬友, 谭海燕, 孙海顺, 等. 考虑直流电流变化及交流故障发生时刻影响的 HVDC 换相失败分析方法[J]. *电网技术*, 2015, 39(5): 1261-1267.
- XU Jingyou, TAN Haiyan, SUN Haishun, et al. Research on method to analyze commutation failure in HVDC power transmission system considering the impact of DC current variation and occurrence moment of AC fault[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(5): 1261-1267.
- [34] 宋金钊, 李永丽, 曾亮, 等. 高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(22): 2-13.
- SONG Jinzhao, LI Yongli, ZENG Liang, et al. Review on commutation failure of HVDC transmission system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(22): 2-13.
- [35] 吴萍, 林伟芳, 孙华东, 等. 多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J]. *电网技术*, 2012, 36(5): 269-274.
- WU Ping, LIN Weifang, SUN Huadong, et al. Research and electromechanical transient simulation on mechanism of commutation failure in multi-infeed HVDC power transmission system[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(5): 269-274.
- [36] 陈修宇, 韩民晓, 刘崇茹. 直流控制方式对多馈入交直流系统电压相互作用的影响[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(2): 58-63.
- CHEN Xiuyu, HAN Minxiao, LIU Chongru. Impact of control modes on voltage interaction between multi-infeed AC-DC system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(2): 58-63.
- [37] 辛焕海, 章枫, 于洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(3): 633-647.
- XIN Huanhai, ZHANG Feng, YU Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3): 633-647.
- [38] 王峰, 刘天琪, 周胜军, 等. 谐波对 HVDC 系统换相失败的影响机理及定量分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(19): 4888-4894.
- WANG Feng, LIU Tianqi, ZHOU Shengjun, et al. Mechanism and quantitative analysis method for HVDC commutation failure resulting from harmonics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(19): 4888-4894.
- [39] 赵彤, 吕明超, 姜杰, 等. 多馈入高压直流输电系统的异常换相失败研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(3): 705-711.
- ZHAO Tong, LÜ Mingchao, LOU Jie, et al. Analysis on potential anomalous commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(3): 705-711.
- [40] 张彦涛, 邱丽萍, 施浩波, 等. 考虑不对称故障影响的多馈入直流系统换相失败快速判别方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(16): 4759-4767, 4980.

- ZHANG Yantao, QIU Liping, SHI Haobo, et al. Fast detection method of commutation failure in multi infeed DC system considering the effect of unbalanced fault[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(16): 4759-4767,4980.
- [41] SHAO Y, ZHOU Q Y, SUN Y J, et al. A simplified index of fast evaluation of commutation failure risk in multi-infeed HVDC systems[C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Guangzhou, China. IEEE, 2019: 42-47.
- [42] 王玉, 侯玉强, 刘福锁, 等. 考虑多直流协调恢复的换相失败预测控制启动值优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(22): 85-90, 158.
- WANG Yu, HOU Yuqiang, LIU Fusuo, et al. Optimization method for startup threshold of commutation failure prediction control considering coordinated recovery of multi-infeed HVDC systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(22): 85-90,158.
- [43] 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.
- [44] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure in single- and multi-infeed HVDC systems[C]//The 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission. London, UK. London: IET, 2006: 182-186.
- [45] 王庆, 沙江波, 杨鹏程, 等. 同步调相机对 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的影响研究[J]. *电工电能新技术*, 2018, 37(5): 29-36.
- WANG Qing, SHA Jiangbo, YANG Pengcheng, et al. Study of impact of SC on ability to defend commutation failure of LCC-HVDC[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2018, 37(5): 29-36.
- [46] 陈修宇. 多馈入直流系统电压相互作用及其影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- CHEN Xiuyu. The voltage interaction in multi-infeed HVDC systems and its influence[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [47] 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.
- [48] 陈斌超, 周小平, 罗安, 等. 改进型串联电压换相换流器及其控制策略[J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 4057-4065.
- CHEN Binchao, ZHOU Xiaoping, LUO An, et al. Improved series voltage commutation converter and its control strategy [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(10): 4057-4065.
- [49] 侯灵犀, 魏应冬, 张树卿, 等. 抑制高压直流换相失败的串联电压换相变流器及控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(22): 6481-6491.
- HOU Lingxi, WEI Yingdong, ZHANG Shuqing, et al. Series voltage commutated converter to suppress HVDC commutation failure and its control strategy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(22): 6481-6491.
- [50] 郑宽, 沈沉, 刘锋. 降低多回 HVDC 同时换相失败风险的交直流混联受端系统 STATCOM 配置方案[J]. *电网技术*, 2018, 42(2): 564-570.
- ZHENG Kuan, SHEN Chen, LIU Feng. Configuration scheme of STATCOM for mitigating simultaneous commutation failure risk of multi-infeed HVDC links[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(2): 564-570.
- [51] CHEN X Y, GOLE A M, GUO C Y. A fast calculation method for the local commutation failure immunity indices in single- and multi-infeed HVDC systems[C]//11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham. London: IET, 2015: 1-6.
- [52] 王成山, 余旭阳. 基于能量函数的暂态稳定概率分析方法[J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(6): 5-9.
- WANG Chengshan, YU Xuyang. Transient stability probability analysis method based on fitting curve[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(6): 5-9.
- [53] 沙江波. 同步调相机对分层接入 UHVDC 的换相失败抑制作用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- SHA Jiangbo. Study on suppression effect of synchronous condenser on commutation failure of UHVDC system under hierarchical connection mode[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [54] 邹小兵, 陈武晖, 邹仁凯, 等. 基于贝叶斯网络多馈入直流系统相继换相失败概率推断[J]. *电网技术*, 2024, 48(3): 1253-1262.
- ZOU Xiaobing, CHEN Wuhui, ZOU Renkai, et al. Probability inference of successive commutation failure of multi-DC system based on Bayesian network[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(3): 1253-1262.
- [55] 殷威扬, 刘宝宏, 马世英, 等. 中俄背靠背换流站直流系统与静止无功补偿器的协调运行[J]. *电网技术*, 2007, 31(12): 57-62.
- YIN Weiyang, LIU Baohong, MA Shiying, et al. Coordinated operation of HVDC/SVC in China-Russia back-to-back converter station[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(12): 57-62.
- [56] 郭春义, 张岩坡, 赵成勇, 等. STATCOM 对双馈入直流系统运行特性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(25): 99-106, 16.
- GUO Chunyi, ZHANG Yanpo, ZHAO Chengyong, et al. Impact of STATCOM on the operating characteristics of double-infeed HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(25): 99-106,16.
- [57] 周仕豪, 唐飞, 刘涤尘, 等. 考虑降低多馈入直流换相失败风险的动态无功补偿配置方法[J]. *高压技术*, 2018, 44(10): 3258-3265.
- ZHOU Shihao, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Dynamic reactive power compensation configuration method for reducing the

- risk of commutation failure in multi-infeed DC system[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(10): 3258-3265.
- [58] 王强, 李天然, 唐小波, 等. 应对多馈入直流换相失败的同步调相机布点方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(1): 222-227. WANG Qiang, LI Tianran, TANG Xiaobo, et al. Method of site selection for synchronous condenser responding to commutation failures of multi-infeed DC system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(1): 222-227.
- [59] 简文, 周自强, 唐飞, 等. 抑制多馈入直流换相失败的同步调相机优化配置方法[J]. *高电压技术*, 2021, 47(1): 169-177. JIAN Wen, ZHOU Ziqiang, TANG Fei, et al. Optimal configuration of synchronous condensers for suppressing multi-infeed DC commutation failure[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(1): 169-177.
- [60] 赵静波, 孟侠, 朱鑫要. 同步调相机对受端省级电网运行影响及控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(20): 25-32. ZHAO Jingbo, MENG Xia, ZHU Xinyao. Research on synchronous condenser's influences on receiving-end provincial grid and its control strategy[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(20): 25-32.
- [61] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. *电网技术*, 2017, 41(1): 22-28. WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(1): 22-28.
- [62] 李程昊, 谭阳琛, 熊永新, 等. 特高压直流多馈入系统换相失败预防协调控制[J]. *电网技术*, 2019, 43(10): 3532-3542. LI Chenghao, TAN Yangchen, XIONG Yongxin, et al. Coordinated control of UHVDC multi-infeed system for commutation failure prevention[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(10): 3532-3542.
- [63] 李娟, 朱龙臻, 俎立峰, 等. 一种抑制后续换相失败的电流偏差控制参数整定方法[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(4): 235-244. LI Juan, ZHU Longzhen, ZU Lifeng, et al. A current deviation control parameter tuning method to suppress subsequent commutation failure[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(4): 235-244.
- [64] 刘羽超, 郭春义, 许韦华, 等. 一种降低直流输电换相失败概率的控制方法[J]. *电网技术*, 2015, 39(1): 76-82. LIU Yuchao, GUO Chunyi, XU Weihua, et al. A control method to reduce commutation failure probability in HVDC power transmission[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(1): 76-82.
- [65] 郭利娜, 刘天琪, 李兴源. 抑制多馈入直流输电系统后续换相失败措施研究[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(11): 95-99. GUO Lina, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(11): 95-99.
- [66] 赵书强, 董沛毅, 蒲莹, 等. 逆变侧控制策略对换相失败影响的研究[J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3840-3848. ZHAO Shuqiang, DONG Peiyi, PU Ying, et al. Research on influence of inverter side control strategy on commutation failure[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3840-3848.
- [67] 周思玉. 电容换相换流器自调谐滤波器特性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014. ZHOU Siyu. Study of capacitor commutated converter and automatically tuned AC filters[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [68] 赵成勇, 蒋碧松, 郭春义, 等. 一种基于反并联晶闸管全桥子模块的新型电容换相换流器[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(4): 1167-1177. ZHAO Chengyong, JIANG Bisong, GUO Chunyi, et al. An enhanced capacitor commutated converters based on an anti-parallel thyristor full bridge submodule[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(4): 1167-1177.
- [69] 高冲, 贺之渊, 杨俊, 等. 新型可控电网换相换流器拓扑及其控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023(5): 1940-1949. GAO Chong, HE Zhiyuan, YANG Jun, et al. A novel controllable line commutated converter topology and control strategy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023(5): 1940-1949.
- [70] 贺之渊, 高冲, 丁骁, 等. 多馈入高压直流输电系统换相失败防御技术研究综述[J]. *高电压技术*, 2024, 50(7): 2735-2746. HE Zhiyuan, GAO Chong, DING Xiao, et al. A review of commutation failure prevention technology for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(7): 2735-2746.
- [71] NI X J, ZHAO C Y, GUO C Y, et al. Enhanced line commutated converter with embedded fully controlled sub-modules to mitigate commutation failures in high voltage direct current systems[J]. *IET Power Electronics*, 2016, 9(2): 198-206.
- [72] 李子欣, 徐飞, 赵成勇, 等. 面向高压直流输电的电流源型主动换相换流器研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(3): 1053-1068. LI Zixin, XU Fei, ZHAO Chengyong, et al. Research review of current-source type actively commutated converter for high voltage direct current transmission systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(3): 1053-1068.

作者简介:



辛业春

辛业春(1982),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为柔性直流输电技术、输变电运行状态在线监测(E-mail: xinyechun@163.com);
黄韬宇(2000),男,硕士,通信作者,研究方向为高压直流输电技术;
王拓(1995),男,博士,研究方向为交直流电力系统分析。

A surplus power absorption strategy in MMC-MTDC systems based on master-slave energy control

WANG Luo¹, WANG Ning¹, ZHANG Qianmao¹, QIN Liangdong¹, ZHANG Jianpo², WU Yunrui²

(1. Economic Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050022, China;

2. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Modular multilevel converter based multi-terminal direct current (MMC-MTDC) systems rely on energy-dissipating devices to handle surplus power caused by AC-side faults at the receiving-end, which suffers from poor economic efficiency and significant energy waste. To fully exploit the inherent surplus power absorption capability of MMC-MTDC systems and reduce dependence on energy-dissipating devices. A master-slave energy coordination strategy is proposed for interactive power absorption among multiple converter stations. Firstly, an MMC-MTDC control model is established, and the feasibility of surplus power absorption through energy-based control is analyzed. Subsequently, a three-dimensional energy model of the MMC is introduced to achieve decoupled energy control for each pole of the converter stations. Based on a simplified MMC-MTDC system model, active energy control schemes are designed for different types of converter stations. Furthermore, inspired by the master-slave control concept, a timing-based energy coordination logic is developed to address various AC-side fault scenarios at different receiving-end stations and two categories of surplus power levels, thereby enabling coordinated utilization of available energy margins across multiple converter stations. Finally, a MMC-MTDC system is implemented in PSCAD/EMTDC for simulation validation. Results demonstrate that the proposed strategy effectively coordinates multiple converter stations energy control without requiring energy-dissipating devices. The strategy can adapt to diverse surplus power conditions and successfully achieve fault ride-through.

Keywords: AC-side fault; surplus power; modular multilevel converter based multi-terminal direct current (MMC-MTDC); energy control; master-slave coordination; timing-based control logic

(编辑 吴昊)

(上接第 25 页)

A review on evaluation and improvement methods for commutation failure resistance ability in multi-infeed direct current system

XIN Yechun, HUANG Taoyu, WANG Tuo, HE Yupeng, GAN Xiaoluo, LI Guoqing

(Northeast Electric Power University (Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education), Jilin 132012, China)

Abstract: The evaluation and improvement methods for commutation failure resistance ability in multi-infeed direct current (MIDC) system are of great significance for testing commutation failure characteristics, addressing assessment challenges, and applying commutation failure defense technology in power system planning and operation. Therefore, a systematic and scientific summary and generalization are conducted in this paper. Firstly, the fundamental definitions of MIDC system and commutation failure are presented, analyzes the impacts of various fault types on commutation failure, identifies key influencing factors, and summarizes existing commutation failure criteria. Secondly, the existing evaluation methods of commutation failure resistance ability are also reviewed. Then, the current improvement methods of commutation failure resistance ability in MIDC system are summarized from three aspects: reactive power compensation optimization, control and protection optimization, and converter topology improvement. Finally, the key issues that need to be focused on in the future mainly include: adopting a normalized effect evaluation method, conducting repeatable calibration on a simulation platform with standard significance, forming a systematic and comprehensive improvement method for the commutation failure resistance ability in MIDC system, and establishing a multi-level coordinated enhancement strategy encompassing converter station level, converter level and system level.

Keywords: high voltage direct current transmission; multi-infeed direct current (MIDC) system; commutation failure; resistance ability; evaluation method; defense technology

(编辑 吴昊)