第 50 卷 第 7 期：2747-2759 高电压技术 Vol.50, No.7: 2747-2759
2024 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231254

多馈入直流换相失败与同步电网交互影响机理研究评述

薛 峰[1,2]，彭慧敏[1,2]，王 玉[1,2]，薛禹胜[1,2]，刘庆龙[1,2]
（1. 国电南瑞科技股份有限公司，南京 211106; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院)，南京 211106）

摘 要：换相失败场景下交直流交互影响机理是多馈入直流系统安全稳定控制决策前提。从直流换相失败分类及机理、换相失败影响因素、换相失败评价指标及风险评估 4 个方面梳理了换相失败与同步电网交互影响机理研究现状，并从直-交、交-直两个角度分析了交直流电网的交互影响，最后介绍了基于受扰轨迹知识提取的交直流系统量化分析方法及应用现状，实例分析单直流换相安全评估方法推广至多直流连续换相失败的可行性，指出基于关断角受扰轨迹提取的量化分析方法能实现多馈入直流换相安全量化评估和换相安全性与系统稳定性的交互影响分析，后续应该理论分析多馈入直流换相失败场景下电压和频率跌落可接受性量化评估的适应性，在多维量化指标空间内，深入探讨同步电网多时间尺度复杂动态响应对多馈入直流换相安全的影响规律，揭示多馈入直流换相失败与同步电网动态响应相互作用机理。

关键词：多馈入直流；影响因素；评价指标；交互影响机理；轨迹动力学；直流换相安全裕度

Review on the Mechanism of the Interaction Between Multi-infeed HVDC Commutation Failure and Synchronous Grid

XUE Feng[1,2], PENG Huimin[1,2], WANG Yu[1,2], XUE Yusheng[1,2], LIU Qinglong[1,2]
(1. Nari Technology CO., Ltd., Nanjing 211106, China;
2. Nari Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract：The mechanism of AC-DC interaction is the premise of security and stability control decision of multi-infeed DC system under commutation failure. We review the research status of the interaction mechanism between commutation failure and synchronous power grid from following four aspects: the classification and mechanism of commutation failure, influencing factors of commutation failure, evaluation indexes of commutation failure, and risk assessment, and analyze the interaction influence of AC/DC power grid from the perspectives of DC-AC and AC-DC. Finally, the quantitative analysis method of AC-DC system based on trajectory dynamics and its application status are introduced. The feasibility of extending the commutation safety assessment method from single-HVDC systems to multi-infeed HVDC systems continuous commutation failure is analyzed with an example, and the key technical problems that should be solved in the follow-up study on the interaction mechanism between multi-infeed HVDC commutation failure and synchronous grid dynamic response are pointed out. The quantitative analysis method based on the extraction of the disturbance extinction angle trajectories can achieve quantitative evaluation of multi-infeed DC commutation safety and the interaction analysis between commutation safety and system stability. Subsequently, the adaptability of quantitative evaluation of voltage and frequency drop acceptability in multi-infeed DC commutation failure scenarios should be analyzed theoretically. In the multi-dimensional quantitative indicator space, the impact of complex dynamic responses at multiple time scales in synchronous power grids on the safety of multi-infeed DC commutation is investigated in detail, and the interaction mechanism between multi-infeed DC commutation failure and synchronous power grid dynamic response is revealed.

Key words：multi-infeed HVDC; influencing factors; evaluation indexes; interaction mechanism; trajectory dynamics; DC commutation safety margin

基金资助项目：国家重点研发计划(2021YFB2400900)。
Project supported by National Key R&D Program of China(2021YFB2400900).

0 引言

我国正处于能源转型发展的关键时期，特高压直流、新能源大力发展，电网跨区受电、源荷构成正发生巨大变化，华东、广东已形成了典型的多馈入直流系统。十四五期间特高压直流仍将进一步发展，建成数量相比十三五增加约 50%，多馈入直流系统规模持续攀升，多直流、交直流之间的交互影响日趋复杂[1]。

换相失败是采用半控型晶闸管直流系统的一种特殊运行状态，单次或少数次换相失败对直流系统本身影响不大，但换相失败下的直流功率骤降[2]，将对所馈入的同步电网产生巨大冲击。尤其是在多馈入直流系统中，单一交流故障可引发多直流换相失败，百毫秒内引起数千万千瓦(乏)的功率冲击在同步电网大范围传导。2021 年 11 月 12 日，华东电网某 1000 kV 线路故障跳闸，造成 7 回直流同时换相失败一次，系统功率波动超过 10 GW[3-4]。多馈入直流系统中交直流之间的强耦合特性使得换相失败问题更为复杂[5]，系统受扰后，多直流连锁换相失败等相继故障风险增大，严重威胁交直流电网安全稳定运行。

目前电网已呈现强时变非线性、高维特征，且该特征将会随着直流、新能源等电力电子设备占比的上升而更加凸显，电网特性与运行方式、设备本体控制策略、模型参数等多个因素均呈现强耦合非单调的关系，电力电子设备自身及其控制系统与交流电网动态交织，电网动态特性非常复杂[6]。现有的多馈入直流换相失败机理研究多将交流系统简化为理想电源[7-8]，无法真实反映交流系统的动态响应及其对直流换相失败的影响。

多馈入直流系统换相失败下交直流交互影响机理是多馈入直流系统安全稳定控制决策的前提。目前相关分析多是只能判断是否发生换相失败或者仅能根据是否发生换相失败来进行控制决策[9-10]，仍停留在定性分析层面，缺乏定量分析方法。在处理复杂的强时变非线性系统时，主要依据人工经验采用分档控制策略，多断面、多档位的相互耦合，使得控制策略非常复杂，调度灵活性受到非常大的制约[11]。因此，有必要系统地梳理目前多馈入直流换相失败方面的研究成果，为下一步多馈入直流换相失败与同步电网交互影响机理及交直流协调控制研究理清思路。

本文综述了目前多馈入直流换相失败机理分析的研究现状，梳理了换相失败场景下交直流之间的交互影响，介绍了基于受扰轨迹知识提取的交直流系统量化分析方法及应用现状，最后指明了多馈入直流换相失败与同步电网交互影响机理研究中亟需解决的关键问题。建议基于受扰轨迹知识提取研究思路，将单直流换相安全量化分析拓展到多馈入直流系统的多直流和连续换相失败换相安全量化分析，在此基础上，挖掘交直流系统复杂动态响应过程中多馈入直流换相失败与同步电网动态响应的相互作用机理。

1 多馈入直流换相失败机理分析

多馈入直流换相失败涉及两个方面，一是交直流故障扰动经交流网络耦合引起的换流站母线电压跌落和波形畸变使得直流电流、直流消耗无功大幅变化，引起换流站无功-电压特性变化，从而引发的(多)直流首次换相失败；二是(多)直流首次换相失败引发的有功、无功冲击和潮流转移导致换流站后续动态无功支撑不足引发的(多)直流后续换相失败。若不采取有效控制措施，多馈入直流换相失败最终将导致(多)直流传输有功和消耗无功连续剧烈变化，引起交流系统功角、电压和频率大幅偏离正常值，连续多次换相失败在直流换相保护作用下可能触发直流闭锁，甚至诱发交流系统稳定性问题。

多馈入直流换相失败交互影响如图 1 所示。

目前针对直流换相失败机理、评价和抑制的研究，均多是从关断角影响因素的角度来揭示直流换相失败机理，直接或间接地基于临界关断角的大小来设置评价标准，通过研究避免关断角减小的因素来确定抑制方法。对多馈入直流换相失败机理分析，更多的是局限于交流系统的电压跌落和畸变对直流系统的影响，对首次换相失败引发有功、无功冲击和潮流转移继而引发后续换相失败的机理分析，主要是借助时域仿真来实现。

1.1 直流换相失败分类及机理

晶闸管为主的电网换相换流器直流(line-commuted converter HVDC, LCC-HVDC)换相失败本质是晶闸管缺乏自关断能力，在电流降为零和反向偏置电压作用自关断前，直流关断角已达到或低于极限关断角。因此可能在换流母线电压跌落、直流电流突增或交流换相电压过零点相角偏移等情况下发生换相失败。文献[12-14]分析传统直流输电

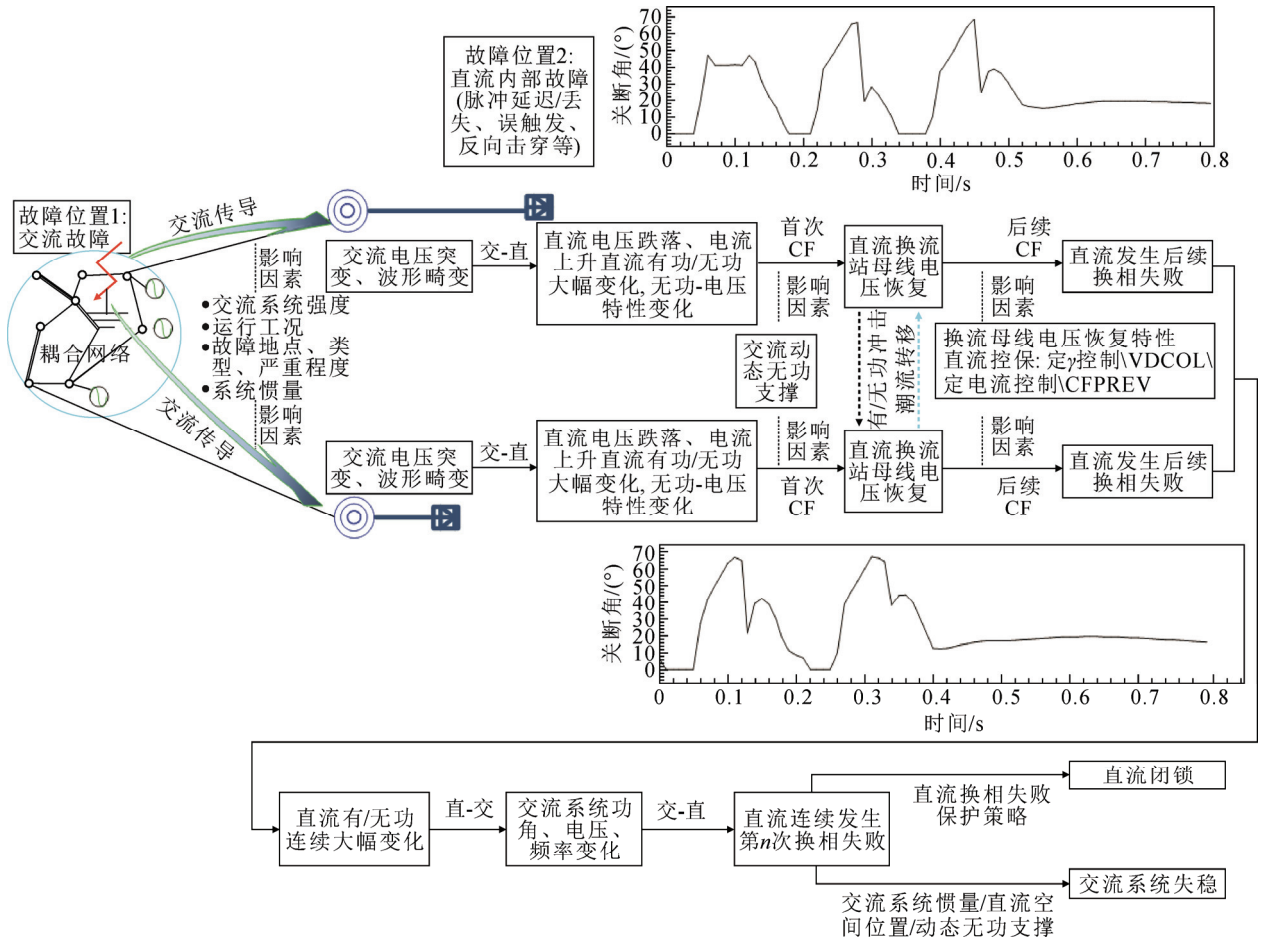


图 1　多馈入直流换相失败交互影响示意图

Fig.1　Schematic diagram of the interaction effect of multi-infeed DC commutation failure

系统换相失败机理，文献[15-17]进一步分析了电压跌落、不对称故障、谐波对换相失败影响的机理。在研究直流输电传输特性时，通常采用直流准稳态模型，忽略换流器暂态过程，只计及了交流正序基波和直流分量。直流准稳态模型下的关断角计算如式(1)：

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}\omega L_{\mathrm{r}} I_{\mathrm{d}}}{U_{\mathrm{L}}} + \cos\beta\right) - \varphi \tag{1}$$

式中：L_{r}、U_{L}分别为阀侧换相电感、换相母线电压有效值；I_{d}为直流电流；β为超前触发角；ω为基波角频率；φ为发生不对称故障时交流电压的过零点偏移角度。

由式(1)可知，交流故障引起直流电压跌落、直流电流增大、超前触发角减小、换相电压过零点偏移直接导致关断角减小，可能引发直流换相失败。此外，谐波、励磁涌流等可能导致基波电压畸变、关断时间减小，间接诱发换相失败[18]。

直流换相失败表现为晶闸管缺乏自关断能力，是直流的一种不正常运行状态。在电力工程界研究直流换相失败，是指“因换相失败引起功率波动过程”[1]，更侧重诱发 200 ms 的直流换相失败(直流传输功率缺额)而非阀体本身一个周波内的换相失败，关注的是直流换相失败引起无功需求和电压大幅波动、潮流转移对交流系统安全稳定性的影响，尤其是多直流换相失败、连续换相失败引发的直流闭锁对系统的巨大功率冲击，以及交直流系统恢复不协调引起的无功不平衡甚至电压失稳风险。

根据发生直流换相失败的直流数量及次数，现有研究一般将直流换相失败分为 3 类：首次换相失败、连续换相失败和多直流换相失败。文献[12]将换相失败根据发生的次序分为首次换相失败和后续换相失败。直流首次换相失败恢复后，直流再次因换相失败引起一次或多次直流功率波动的现象，一般称为“连续换相失败[19]”或“后续换相失败[20]”。首次换相失败主要与故障时刻有关，该时段内的直流电压跌落、直流电流增大、超前触发角减小、基

波电压畸变等因素均可诱发直流换相失败[21]。后续换相失败主要是逆变器无功电压特性与交流系统强度、控制特性和交流保护动作不协调，导致换相电压幅值过或低恢复缓慢、直流电流过大、超前触发角波动过大而诱发[22]。文献[19,23-25]进一步分析了后续换相失败或连续换相失败的机理，文献[5,20]分析了多馈入直流相继换相失败机理。首次换相失败引起的直流功率波动，对交流系统造成冲击，间接引发了逆变器无功电压特性与逆变侧交流系统强度、逆变器控制特性和交流保护动作等的不协调，导致时域上直流控制响应在换相条件上连续或者断续失效。

对于直流首次换相失败，常采用静态参数表征故障对换相失败的影响，如临界电压[22]等；对于后续换相失败，多关注其自身换相电压恢复过慢、直流电流过大和超前触发角波动等因素[24]。在多馈入直流系统的研究中，忽视了由于交直流复杂动态响应交互耦合引发的多直流同时/连续/相继换相失败问题。

随着典型多馈入直流结构在华东、广东电网的快速形成，多馈入直流换相失败机理，不再局限于单纯交流对直流影响而诱发的直流换相失败，还包括以换流母线为媒介的“交-直-交-直”(即故障下先是交流影响直流，进一步直流动态响应再经交流网络传导影响本直流或其他直流)动态响应交互耦合而诱发的后续/相继换相失败。多种换相失败形式交织，不同稳定性问题时空强耦合，定性地分析多馈入直流间交互影响，无法准确地反映多馈入直流换相失败“交-直-交-直”整个复杂动态过程的交互影响规律和机理，也无法指导后续的运行控制及协调优化。

1.2 多馈入直流换相失败影响因素

故障引起的电压跌落通过交流网络耦合影响各直流换流站换相电压，从而使得各直流换相电压幅值跌落、相位及波形畸变，导致(多)直流首次换相失败，各直流传输有功和消耗无功大幅变化、换流站无功-电压特性变化。

文献[26]将多馈入直流换相失败影响因素概括为：交流系统电压支撑强度、无功支撑能力、负荷模型等因素，但目前对交流系统强度的影响分析仍停留在基于阻抗矩阵的静态解析分析。文献[20]进一步将多直流换相失败影响因素概括为：多馈入直流换流母线间的电气耦合强度、故障的地点、时刻及严重程度、直流功率输送水平、控制器参数等。文献[24,27-28]分析了控制切换、控制参数不合理和控制特性耦合对后续换相失败的影响，但忽视了具体控制系统及参数和具体运行工况对复杂耦合交互影响的动态响应差异。文献[5]推导了计及控制系统响应的逆变站无功功率表达式，解析相邻LCC-HVDC无功交换特性，采用多馈入交互作用因子衡量直流换流母线电压的交互影响程度，但忽略了实际系统动态特性、直流控制及电网非线性因素的影响。

除了故障期间引起的电压跌落通过交流网络耦合影响各直流换流站电压等诱发直流换相失败外，各直流换相失败期间引起的有功和无功冲击，以及由此引起的交流网络潮流转移，会进一步影响各直流的换流站电压恢复特性，在直流控制及电网非线性因素影响作用下，可能会引发后续的多直流连续换相失败。因此，除了可能诱发单直流换相失败的所有因素外，还应重点关注反映系统电压耦合特性的交流系统强度、动态无功支撑能力、故障位置及严重程度、负荷模型等因素对多馈入直流同时首次换相失败的影响，以及反映直流运行水平、控制性能和交流系统抵御有功无功冲击、潮流转移网络响应特性等因素对多馈入直流相继/连续换相失败的影响。

1.3 多馈入直流换相失败评价指标

根据换相失败分类，换相失败的评价指标各有侧重。首次换相失败主要关注是否发生换相失败，连续换相失败侧重于评估连续换相失败的严重程度以及发生连续换相失败的风险，多馈入直流系统关注是否发生多直流换相失败。

首次换相失败评价指标分为两类，一是确定换相过程中是否存在换相失败的轨迹安全性指标，如关断角判据[29]、换相电压面积判据[30]，二是用于指导控制和运行的参数安全性指标，如临界换相电压判据[31-32]、直流电流判据[33]、电压谐波判据[34]、换相失败免疫因子[35]。关断角判据通过比较换流阀关断角与设定的临界关断角大小判断是否发生换相失败，临界换相电压判据通过比较换流母线电压与发生换相失败所需最小电压间的大小来判断是否发生换相失败。但目前所有的轨迹安全指标都是静态地比较某时刻断面的关断角与设定的临界关断角大小，不具备定量分析意义，无法评估整个换相过程换相失败的程度，而参数安全指标由于缺乏单调连

续定量的轨迹安全指标指导极限搜索，难以协调参数极限求解中的精度和速度。

目前连续换相失败评价主要是换相失败次数[36]和换相失败持续时间两个轨迹安全性指标，均没有反映各次换相失败的影响程度和换相失败严重程度，难以准确评估连续换相失败的严重程度。

多直流换相失败评价从反映换流站间交流母线电压相互作用和交流电网强度两方面提出了多馈入交互因子[37]、广义短路比[38-39]、同时换相失败交互因子[40]3 大类参数安全性指标。但短路比类指标本质表征系统静态电压稳定性，只能间接反映多直流发生换相失败的风险。多馈入交互因子类指标仅反映换流站间交流母线电压作用大小，无法直接评估多直流是否换相失败。同时换相失败交互因子类指标忽略换相失败后交直流动态响应，可静态识别多直流同时换相失败的交流系统范围。目前所有的多直流换相失败评价指标均是从静态角度，依据某一类因素抽取特征，忽略了“交-直-交-直”交互动态响应的影响。

大量的仿真分析及实际工程换相失败案例表明，除了换流交流母线电压幅值跌落的大小外，电压幅值跌落的速率也是引发直流换相失败的重要因素[15]。因此，理想的换相失败评价指标，应该是直接基于换流阀关断角受扰曲线进行评价，除了能反映换流阀关断角与设定的临界关断角大小外，还应该能体现换流阀关断角的变化率。文献[41]基于机电暂态仿真的关断角轨迹，首次提出了一种适用于单直流换相失败的量化评估方法。该量化指标的提取并不依赖某一具体工况和场景，也不依赖影响换相失败的某重要因素，直接针对计及所有影响因素的数值仿真关断角曲线抽取直流换相安全量化特征，反映了观察时间窗口内，直流换相安全的严重程度。

1.4　多馈入直流换相失败风险评估

目前多馈入直流换相失败风险评估，主要通过解析法计算对应关断角判据或最小电压判据下的多馈入短路比、多馈入交互因子指标临界值，通过比较两者大小判别是否会导致直流系统发生换相失败或快速识别多直流换相失败风险区。如文献[42]基于最小电压判据提出了临界电压关联因子，通过各母线电压关联因子与临界电压关联因子的大小，快速识别可能导致多直流同时换相失败的交流系统范围。文献[43]基于故障期间直流关断角与系统节点阻抗的关系，提出了一种多直流换相失败的临界阻抗边界快速识别方法。也有学者将多馈入换流站同时换相失败时的直流换流母线临界电压作为衡量电网抵御换相失败能力的指标[44]。上述静态解析方法计算快速、物理意义清晰，但忽略了换相失败发生后交直流系统动态响应特性和动态支撑能力的影响，且只能给出存在多直流换相失败风险及区域范围，是否真的发生多直流换相失败，仍有待于数值仿真验证。

为提高解析方法换相失败风险评估的准确性，文献[45-46]考虑直流电流动态特性影响，通过对故障期间暂态直流电流近似解析改进换相失败临界电压计算方法，提出了计及直流动态特性的换相失败识别方法，通过归一化思想提出了一种换相失败风险程度量化评估指标。为计及直流控制影响，文献[47]提出了基于广义节点电压交互作用因子的风险区域快速识别方法，构建考虑直流控制影响的广义节点电压交互作用因子指标。这些指标侧重静态解析下的预判，更多的是针对电压耦合引发的首次换相失败风险评估，而非基于完整关断角受扰轨迹的评估，也无法完整反映多馈入直流换相失败与同步电网动态响应交互影响。但可作为一种初筛手段，可快速识别多直流换相失败风险区，减少详细数值仿真的扰动场景数。

对于多馈入直流连续换相失败的风险评估，目前研究较少。主要难点在于交流系统受直流换相失败引起的传输有功和消耗无功冲击、以及由此引起的潮流转移后无功-电压特性指标变化，必须依赖于完整的数值仿真。同时，经换流母线电气耦合表现的“交-直-交-直”影响(如各直流逆变器无功电压特性与逆变侧交流系统强度、逆变器控制特性和交流保护动作不协调)而诱发的后续直流换相失败风险评估，缺乏相应的指标量化交流冲击和潮流转移动态过程对直流的影响。

2　交直流电网交互影响研究

在交直流混联系统中，直流换相失败引起换流站交流母线节点无功-电压特性变化。首次换相失败引起的直流功率波动对交流系统造成功率冲击，间接造成了逆变器无功电压特性与逆变侧交流系统强度、逆变器控制特性和交流保护动作等的不协调，进而诱发连续换相失败。而多直流换相失败导致的大幅功率冲击，反过来会影响交流系统的同步稳定

性，引起交流系统电压、电流和功率等状态量发生大幅度、周期性振荡变化，进而通过交流网络耦合影响其它直流换流母线节点无功电压特性的变化，诱发多直流的连续换相失败风险甚至导致同步电网机组失步。

本章换相失败场景下交直流电网交互影响包含两方面：一是直流换相失败对同步电网动态响应的影响；二是直流换相失败引起的交流同步电网动态响应对后续直流换相失败的影响。暂不讨论直流换相失败对交流电网三道防线、新能源的影响[2]，本节对新能源也仅限于动态交互响应影响。

2.1 直流换相失败对同步电网动态响应影响

直流换相失败对同步电网的影响主要体现在有功、无功冲击和电压波形畸变方面。实际工程中分析直流换相失败对同步电网动态响应影响时，直流模型采用一种忽略了换流器本身暂态过程的准稳态模型。通过图 2 含开关控制的两端直流输电主回路模拟换相失败，换相失败发生后接在同一相的上下桥臂同时导通将直流侧短路[48]。

图 2 中，$E_r\cos\alpha$ 和 $E_i\cos\beta$ 分别为整流侧和逆变侧等效电流源电压，α 和 β 分别为对应控制角；U_{dr} (d_{xr})和U_{di} (d_{xi})分别为整流侧和逆变侧直流电压(换相电抗)；R_d (L_d)和 I_d 分别为直流线路电阻(电抗)和直流电流。直流正常换相时，控制开关 FLAGCF 取值为 0；当发生换相失败时 FLAGCF 取值为 1，直流侧短路模拟直流传输功率中断。而控制开关 FLAGCF 的取值依据仿真中的换流母线电压、直流电流、直流控制器输出的超前触发角由式(1)计算关断角，依据计算关断角与设置的临界关断角大小判别直流换相失败。由图 2 可知，当换相失败发生后正常的直流传输功率突然中断，对应传输直流功率的换流站无功消耗消失，由此对连接于交流网络的整流侧和逆变侧交流节点产生一个较大的有功和无功冲击。同时，直流换相失败恢复期间无功消耗的增大叠加恢复期间低电压下无功补偿送出无功的不足，进一步加剧了对交流侧的无功冲击[49]。

文献[11,50]采用等面积法则分析了不同直流传输功率水平下多回直流换相失败引发送端系统失稳的可能模式，指出多直流换相失败影响交流系统稳定性的关键因素是直流换相失败过程功率总和、等效换相失败时间、系统运行方式等，并提出延长重合闸时间及送端切机等安全稳定控制措施应对多直流同时换相失败给送端系统带来的冲击。文献[51]深度剖析直流送端近区交流系统电压、频率波动特性，近区机组与直流系统功率联动特性，以揭示多直流同时换相失败对送端电网的影响程度，文献[52]采用直流换相安全裕度与同步稳定裕度分析了直流换相失败与同步电网动态响应的交互影响，并在两维的换相安全裕度-稳定裕度平面内分析控制措施对两种安全约束的影响。现有研究除文献[52]外，大多停留在定性的机理分析，主要局限于对功角、电压、频率的影响分析，缺少对振荡等动态响应影响的定量分析，影响规律的分析也不直观。

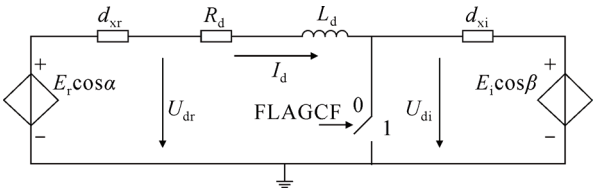


图 2 两端直流输电主回路模型示图

Fig.2 Two ends of the HVDC transmission main circuit model diagram

连续换相失败导致的功率冲击除了通过耦合电压影响直流换流站的电压和动态无功支撑而诱发后续直流换相失败外，通过多直流功率冲击的叠加甚至可能影响交流系统同步稳定性[53]，而同步电网机组的功角、电压和电流及功率等状态量的大幅度、周期性振荡变化反过来又影响直流系统后续的换相安全性。直流换相失败与交流同步电网动态响应交互耦合影响，必须定量分析整个动态过程的影响对象和影响程度，从而定量界定某类控制措施对两种不同安全稳定约束的作用，为考虑两种安全稳定性约束的协调提供理论支撑。

2.2 交流电网动态响应对直流换相失败影响

交流电网动态响应主要通过交流电网中的功率冲击、潮流转移耦合影响换流站交流母线电压的跌落和振荡，以及电压波形畸变，从而引发直流换相失败。文献[54]基于两机系统研究了送端电网机群摇摆对近区特高压直流功率恢复特性的影响，揭示了受机群振荡直流换流母线电压跌落导致直流功率恢复过程中再次出现塌陷，对交流输电通道形成二次冲击影响交流薄弱断面输电能力的现象。文献[55]建立了送端系统容量与交流侧母线电压关系，分析了送端系统对直流换相失败的影响特性，随着系统容量增加，直流换相失败的风险降低。

目前分析交流电网动态响应对直流换相失败影响，一般从电压角度，通过交流故障下引起换流母线电压的跌落分析对直流换相失败影响[45-46,56]，很少涉及功角、振荡等多安全约束问题复杂场景下的研究。由于缺乏有效的量化指标，交流电网动态响应对直流换相失败影响的研究，大多基于静态的临界电压或临界电压关联因子等定性度量两者间的影响程度。文献[52]借助直流换相安全裕度与同步稳定裕度可以方便分析直流换相失败与同步电网动态响应的交互影响，但交流电网动态响应对多直流换相失败的影响，以及多直流换相失败之间的影响仍有待进一步研究。

3　基于受扰轨迹知识提取的交直流系统量化分析

3.1　同步电网的量化分析方法

基于受扰轨迹知识提取的量化分析思想来源于同步功角稳定性量化分析算法的启发，主要思想是将高维模型描述的研究对象经过完整数值积分得到高维受扰轨迹，再通过特定变换规则将高维轨迹完整保熵映射到若干组两维系统轨迹，然后从每一组低维映射轨迹上进行量化知识提取，以解决同步功角稳定性量化[57]。基于受扰轨迹的量化分析思路，可以计及交直流系统各种复杂模型及故障场景的影响，目前已在交流系统中较为成熟的应用，涉及功角[57]、电压[58]、频率[59]和振荡[60]等相关方向的分析与控制。

同步功角稳定性量化分析基于扩展等面积准则将多机系统受扰轨迹分群，通过互补群惯量中心-相对运动变换保稳映射到时变的单机映像轨迹，基于等值单机映像系统的功率-转角曲线和等面积准则，得到各摆次的稳定裕度，采用所有等值单机系统裕度取小原则，整体还原得到多机系统功角稳定量化结果，具体计算方法详见文献[57]。采用一组包含偏移门槛值和可接受最大持续时间的二元表描述暂态电压和频率偏移可接受性，文献[58-59]分别给出了暂态电压和频率偏移可接受性裕度指标。在同步功角稳定分析基础上，进一步以映象系统轨迹上的动态中心点处的动能及最远点处的势能来反映该模式在过去半摆中的振荡总能量，以两者组成的能量序列反映该空间振荡模式的时变性[60]。

基于轨迹裕度的灵敏度分析，可以协调参数极限求解的精度和速度，快速搜索参数极限，求取任意参数的参数裕度指标，实现参数安全性评估。进一步可以分析同步安全稳定的交互影响，实现考虑同步功角、电压和频率稳定性的协调优化控制[61-63]。

3.2　直流换相安全的量化分析方法

文献[41]基于机电暂态仿真的关断角轨迹，提出了一种基于关断角轨迹的直流换相失败的量化评估方法。依据直流换相成功与否，挖掘其量化特征。对换相成功的关断角轨迹，用关断角轨迹的最小值与换相失败关断角判据的差值量化评估特征。对换相失败的关断角轨迹，选择关断角等于关断角判据处的一阶灵敏度作为量化评估特征，通过改进其边界处的连续性，保证临界换相失败处光滑连续，抽取直流换相安全量化特征，如图 3 所示。

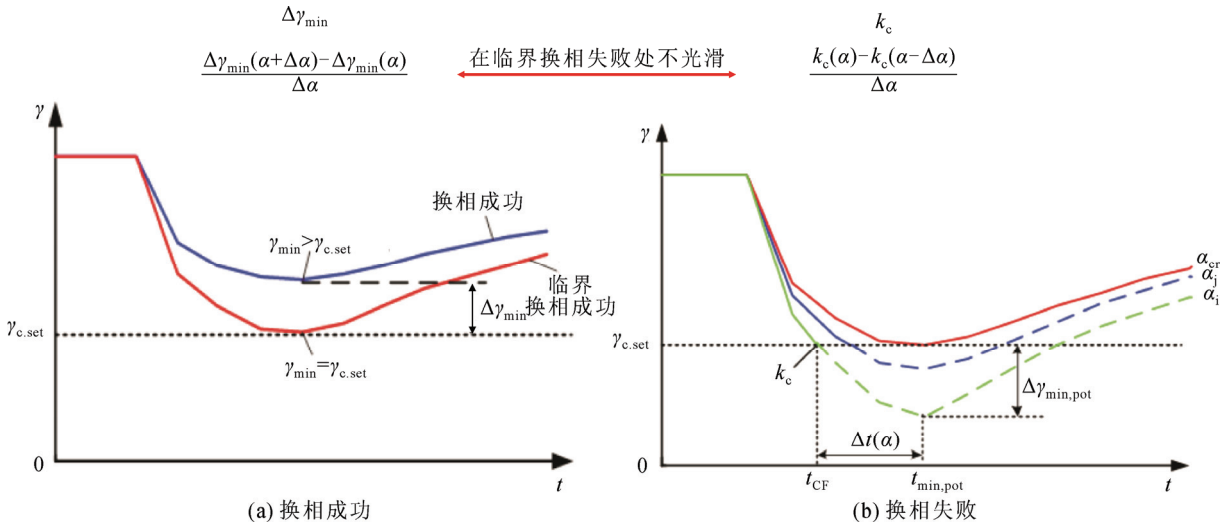


图 3　单直流换相安全量化特征抽取

Fig.3　Single DC commutation safety quantization feature extraction

标幺化后的直流换相安全量化指标如式(2)。

$$\sigma=\begin{cases}\dfrac{\Delta\gamma_{\min,\mathrm{pot}}}{\gamma_{\mathrm{c,set}}}=\dfrac{\lambda k_{\mathrm{c}}}{\gamma_{\mathrm{c,set}}}\times 100\%, & \text{换相失败}\\ \dfrac{\Delta\gamma_{\min}}{\gamma_{\mathrm{ref}}-\gamma_{\mathrm{c,set}}}\times 100\%, & \text{换相成功}\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\Delta\gamma_{\min,\mathrm{pot}}$ 为潜在关断角最小值；λ为折算系数；k_{c} 为关断角轨迹在 $\gamma_{\mathrm{c,set}}$ 处的一阶灵敏度；$\gamma_{\mathrm{c,set}}$ 为临界关断角；γ_{ref} 为稳态关断角设定值；$\Delta\gamma_{\min}$ 为关断角轨迹最小值与临界关断角的差。

由于直接针对受扰后的关断角曲线进行直流换相安全量化，所有影响关断角的因素(如换相母线电压、直流电流、超前触发角及其变化、以及引起这些参数量变化的因素)及相互耦合作用(如交直流系统强度、电气耦合强度等)均体现在受扰后关断角的动态响应曲线上。基于时域仿真可以得到任意复杂扰动场景下的关断角受扰轨迹,从而实现直流换相安全量化，度量直流换相失败的严重程度。目前工程中检测换相失败的方法有预测型[64-65]和实测型两种，实测型通过比较各阀电流结束时刻与换相电压过零时刻的间隔对应的角度来计算关断角[24]，仿真或测量方法的差异只影响轨迹的精度(由此影响直流换相安全裕度数值结果)，不影响基于关断角轨迹的直流换相失败量化评估方法本身的应用。

图 4 给出了某实际多馈入交直流系统给定某故障发生 4 回直流换相失败场景下的关断角曲线。

发生换相失败的 4 回直流关断角曲线分别标记为γ_1，γ_2，γ_3，γ_4(故障场景为某 500 kV 出线边开关单相拒动，0.35 s 后清除，0.6 s 后所有直流关断角基本恢复，此处只给出 0.6 s 之前的曲线段)。

根据式(2)的直流换相安全量化指标计算式，由图 4 给出的 4 回直流的关断角曲线，可计算出各直流各次换相失败的换相安全裕度(0.1 s 内三相故障近区直流换相失败，关断角小于 7°。0.1~0.35 s 内单相拒动，故障清除后部分直流出现连续换相失败)。表 1 给出了直流各次换相安全裕度、换相失败起止时刻、以及换相失败恢复后的首次安全裕度。其中换相失败恢复后的首次安全裕度是指从最后一次换相失败恢复后开始,关断角最低点对应的裕度，以γ_4为例，即为箭头标注位置对应关断角计算出来的换相安全裕度。

由表 1 的直流换相安全裕度可知，除关断角曲线γ_1，其他均存在两次直流换相失败，换相失败最

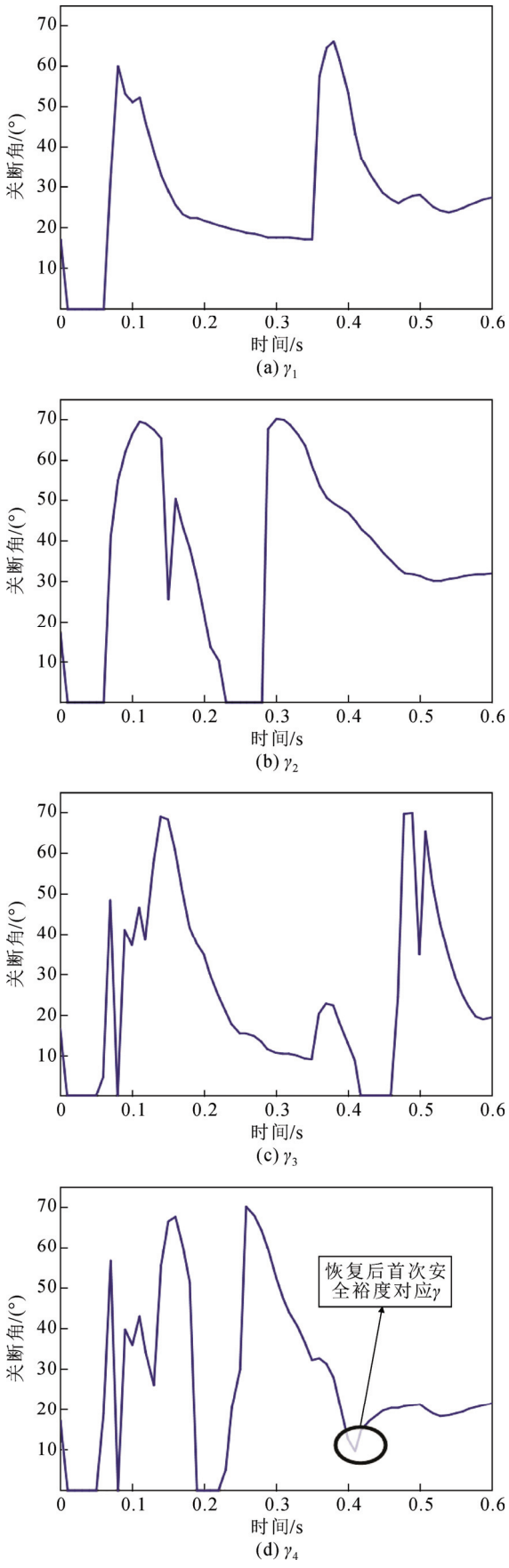


图 4 多馈入直流换相失败的关断角曲线

Fig.4 Multi-infeed DC commutation failure extinction angle curve

表 1　直流换相安全裕度及起止时刻、恢复后首次安全裕度

Table 1　DC commutation safety margin and start-stop time, first safety margin after recovery

关断角曲线	换相失败次数	换相起始时刻 t_b/s	换相结束时刻 t_e/s	换相安全裕度/%	恢复后首次安全裕度/%
γ_1	第 1 次	0.0025	0.0650	−100.00	33.86
γ_2	第 1 次	0.0025	0.0650	−100.00	100.00
	第 2 次	0.2225	0.2825	−19.79	100.00
γ_3	第 1 次	0.0025	0.0650	−100.00	100.00
	第 2 次	0.4125	0.4675	−16.02	100.00
γ_4	第 1 次	0.0025	0.0600	−100.00	25.06
	第 2 次	0.1825	0.2325	−100.00	25.06

严重的是关断角曲线 γ_4，其第 2 次直流换相安全裕度最小(等于−100.00%)且换相失败恢复后首次换相安全裕度最小(等于 25.06%)，基于关断角轨迹的直流换相安全裕度指标不同于其它的直流换相失败评价指标，它直接量化给出各直流不同时段的换相失败的安全程度，准确地量化评估了直流换相失败本身的严重程度。

直流换相失败引起的有功变化对同步电网功角稳定的影响，可基于 P-δ 平面分析换相失败引起的有功变化对主导映象摆次面积的影响[41,52]。

3.3　基于受扰轨迹知识提取的量化分析方法应用现状

自 2006 年薛禹胜院士在学术界提出《时空协调的大停电防御框架》[61-63]后，基于受扰轨迹的稳定性量化分析思想已成功应用于国内 D5000 系统同步稳定性领域的量化评估及协调优化控制。文献[66]分析了实现大电网安全稳定综合防御系统工程应用的关键技术，介绍了电网安全稳定时空协调防御框架下研发的工程实施与应用，文献[67]根据综合防御系统特点，用系统化方法进行工程设计，阐述了设计思路和内容。

近几年薛院士提出的基于受扰关断角轨迹的直流换相安全量化分析方法[41,52]，进一步将量化评估及时空协调优化控制思路扩展到交直流混联系统领域。但该方法目前仍处于理论研究阶段，尚未实现工程应用，目前该方法仅对单直流的场景进行了充分研究，在多馈入直流场景下的适应性仍有待进一步论证。文献[52]基于直流换相安全裕度及同步安全稳定裕度，分析了同步安全和直流换相安全两种约束的相关性，并在功角裕度-直流换相安全裕度两维平面上分析了具体控制措施对两种裕度的交互影响及协调决策，但主要侧重于功角与直流换相安全的交互影响，较少涉及电压和频率安全交互影响。

4　交互影响机理研究亟需解决的关键问题

目前多馈入直流换相失败与同步电网动态响应的相互作用机理研究，已经解决了 3 方面的问题：一是验证了通过基于受扰轨迹知识提取的量化评估方法，适用于直流换相安全量化分析。二是基于关断角受扰轨迹提出的直流换相安全裕度指标可以准确反映直流换相失败的严重程度，满足参数空间裕度计算要求。三是基于直流换相安全裕度指标分析了换相安全性与系统稳定性的交互影响，实现了换相安全控制与系统同步稳定控制间的协调。

由于多馈入交直流系统中首次、连续、多馈入直流的不同换相失败形式交织，功角、电压、频率安全问题和直流换相安全不同安全稳定性问题强耦合，使得复杂场景下多馈入直流换相失败与同步电网动态响应的相互作用机理提取难度增大，后续交互影响机理研究亟需解决以下关键问题：

1）对多直流及连续直流换相失败的量化评估，采用与首次换相失败一致性的判定标准，将多直流场景按多个单直流分开计算换相安全裕度，直接将单直流换相安全评估方法推广至多馈入直流系统的多直流和连续换相失败的适应性，需要从理论分析角度阐明论证。

2）目前电压和频率安全稳定分析，采用二元表描述暂态电压和频率偏移可接受性，通过直流换相失败场景下电压和频率跌落可接受性量化评估指标，部分反映多馈入交直流系统的电压和频率安全稳定，但未来电力系统日渐“电力电子化[68]”，多馈入直流换相失败场景下电压和频率跌落可接受性量化指标的适应性仍有待研究完善。

3）多馈入直流换相失败与同步电网安全稳定性的多时间尺度响应的“交-直-交-直”耦合特性复杂，亟需研究同步电网复杂动态响应对多馈入直流换相安全的影响规律，剖析交直流恢复过程中后续换相失败发生机理，揭示换相失败在多直流间的演化传播途径及机理，识别找出降低多馈入直流换相失败概率的路径。

5　结论

本文从直流换相失败分类及机理、交互影响因素、评价指标及风险评估 4 个方面梳理了多馈入直流换相失败与同步电网动态响应交互影响机理研究

现状，从交流对直流、直流对交流两个角度分析了换相失败场景下交直流间的交互影响，并介绍了基于受扰轨迹知识量化提取的交直流系统量化分析方法及应用，得到如下结论：

1）目前主要从反映关断角大小的影响因素的角度来揭示直流换相失败机理。对有/无功冲击和潮流转移引发后续换相失败的机理，主要限于分析恢复特性的影响因素，对多馈入换相失败机理，更多局限于分析耦合电压跌落和畸变的影响。交流同步电网的动态特性影响考虑不足，缺乏时域上定量反映直流换相安全严重程度的指标以及量化潮流转移等动态过程对直流换相失败影响的指标。

2）交直流系统交互影响研究，主要局限于对功角、电压、频率的影响分析，缺少计及动态响应的对复杂场景下的振荡现象的定量影响分析。

3）基于受扰轨迹知识提取的量化分析方法适用于直流换相安全量化分析，基于关断角受扰轨迹的直流换相安全裕度能准确反映直流换相失败的严重程度，基于单直流换相安全裕度指标能分析换相安全性与系统稳定性的交互影响。

4）后续多馈入直流换相失败与同步电网动态响应相互作用机理研究，应重点攻关：理论分析单直流换相安全评估方法推广至多直流连续换相失败的适应性，研究完善多馈入直流换相失败场景下电压和频率跌落可接受性量化指标的适应性，研究同步电网复杂动态响应对多馈入直流换相安全的影响规律。

参考文献 References

[1] 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.

[2] MIRSAEIDI S, TZELEPIS D, HE J H, et al. A controllable thyristor-based commutation failure inhibitor for LCC-HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 3781-3792.

[3] 吕鹏飞. 交直流混联电网下直流输电系统运行面临的挑战及对策[J]. 电网技术，2022，46(2)：503-510.
LV Pengfei. Research on HVDC operation characteristics under influence of hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 503-510.

[4] 邱 威，贺静波，樊小伟，等. 应对特高压直流大扰动的稳定措施综述[J]. 电网技术，2022，46(8)：3049-3065.
QIU Wei, HE Jingbo, FAN Xiaowei, et al. Overview on stability measures for large disturbances of UHVDC[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3049-3065.

[5] 欧阳金鑫，叶俊君，张 真，等. 电网故障下多馈入直流输电系统相继换相失败机理与特性[J]. 电力系统自动化，2021，45(20)：93-102.
OUYANG Jinxin, YE Junjun, ZHANG Zhen, et al. Mechanism and characteristics of successive commutation failure of multi-infeed HVDC transmission system under power grid fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 93-102.

[6] 陈国平，李明节，许 涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化，2018，42(22)：2-10.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao. System protection and its key technologies of UHV AC and DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 2-10.

[7] REHMAN B, LIU C R, LI H, et al. Analysis on local and concurrent commutation failure of multi-infeed HVDC considering inter-converter interaction[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(4): 1050-1059.

[8] 张超明. 多馈入直流输电系统相继换相失败机理及控制策略研究[D]. 南京：东南大学，2020.
ZHANG Chaoming. Research on the mechanism and control strategy of successive commutation failure in multi infeed DC system[D]. Nanjing, China: Southeast University, 2020.

[9] 李兆伟，吴雪莲，曹 路，等. 抑制直流连续换相失败的调相机紧急控制[J]. 电力系统自动化，2018，42(22)：91-97.
LI Zhaowei, WU Xuelian, CAO Lu, et al. Emergency control of synchronous condenser to suppress DC continuous commutation failure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 91-97.

[10] 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.

[11] 贾俊川，张 健，仲悟之，等. 应对多回并列直流换相失败的送端系统安全稳定控制措施研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(21)：6320-6327.
JIA Junchuan, ZHANG Jian, ZHONG Wuzhi, et al. Research on the security and stability control measures of the sending side system coping with multiple parallel-operation HVDCs simultaneous commutation failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6320-6327.

[12] 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.

[13] 郭春义，赵 剑，刘 炜，等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报，2018，38(增刊 1)：1-10.
GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Supplement1): 1-10.

[14] 林 圣，雷雨晴，刘 健，等. HVDC 送端系统故障引发受端换相失败分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(5)：1669-1679.
LIN Sheng, LEI Yuqing, LIU Jian, et al. Analysis of receiving-side commutation failure mechanism caused by HVDC sending-side system fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1669-1679.

[15] 赵成勇，叶蕴霞，展瑞琦，等. 电压跌落影响换流阀晶闸管可靠关断的机理研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(12)：4505-4515.
ZHAO Chengyong, YE Yunxia, ZHAN Ruiqi, et al. Research on the mechanism of the voltage drop affecting the reliable turn-off of the thyristor in converter valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12):

4505-4515.

[16] 代书龙，何启皓，汪娟娟，等. 单相接地时 LCC-HVDC 换相失败时序机理研究[J]. 电网技术，2023，47(9)：3770-3780.
DAI Shulong, HE Qihao, WANG Juanjuan, et al. Time series mechanism of LCC-HVDC commutation failure in single phase grounding[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3770-3780.

[17] 金　璇，杨万开，徐永海. UHVDC 分层接入方式谐波对换相失败影响的研究[J]. 电网技术，2021，45(9)：3763-3771.
JIN Xuan, YANG Wankai, XU Yonghai. Commutation failure impacted by harmonics in UHVDC split connection grid system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3763-3771.

[18] RAO Y F, CUI W, LI C H, et al. Evaluation method for HVDC commutation failure caused by inrush current[C]// 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). Chengdu, China: IEEE, 2019: 531-536.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 浙江大学发电教研组. 直流输电[M]. 北京：水利电力出版社，1985：180-184.
Zhejiang University Power Generation Teaching and Research Group. DC Transmission[M]. Beijing, China: Water Resources and Electric Power Press, 1985: 180-184.

[22] 王　峰，刘天琪，由新红，等. 基于暂态直流电流预测的换相失败临界电压瞬时值判据[J]. 高电压技术，2021，47(1)：129-137.
WANG Feng, LIU Tianqi, YOU Xinhong, et al. Critical instantaneous voltage of commutation failure based on transient DC current prediction[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 129-137.

[23] 曾　亮，李永丽，张云柯，等. 逆变侧交流系统不对称故障引发 HVDC 系统连续换相失败的机理及抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报，2019，39(11)：3159-3167.
ZENG Liang, LI Yongli, ZHANG Yunke, et al. Research on mechanism and control strategy of continuous commutation failures in HVDC system caused by asymmetrical fault in inverter-side AC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3159-3167.

[24] 刘　磊，林　圣，刘　健，等. 控制器交互不当引发后续换相失败的机理分析[J]. 电网技术，2019，43(10)：3562-3568.
LIU Lei, LIN Sheng, LIU Jian, et al. Mechanism analysis of subsequent commutation failures caused by improper interaction of controllers[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3562-3568.

[25] 周博昊，李凤婷，尹纯亚. 高压直流输电系统后续换相失败风险评估及抑制方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(5)：143-151.
ZHOU Bohao, LI Fengting, YIN Chunya. Risk evaluation and suppression methods for subsequent commutation failure of HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 143-151.

[26] 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.
TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 499-513.

[27] 汪娟娟，黄梦华，傅　闯. 交流故障下高压直流运行特性及恢复策略研究[J]. 中国电机工程学报，2019，39(2)：514-523.
WANG Juanjuan, HUANG Menghua, FU Chuang. Research on operational characteristics and recovery strategy of HVDC under AC fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 514-523.

[28] LI Y J, WANG J J, LI Z L, et al. VDCOL parameters setting influenced by reactive power characteristics of HVDC system[C]// International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies. Chengdu, China: IEEE, 2016: 364-370.

[29] 宋新立，吴小辰，刘文焯，等. PSD-BPA 暂态稳定程序中的新直流输电准稳态模型[J]. 电网技术，2010，34(1)：62-67.
SONG Xinli, WU Xiaochen, LIU Wenzhuo, et al. New quasi-steady-state HVDC models for PSD-BPA power system transient stability simulation program[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 62-67.

[30] 朱仁龙，周小平，罗　安，等. 基于电压时间换相面积预测的换相失败抑制方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(3)：156-163.
ZHU Renlong, ZHOU Xiaoping, LUO An, et al. Commutation failure mitigation method based on voltage-time commutation area prediction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 156-163.

[31] 苏常胜，尹纯亚，李凤婷. 基于直流电流动态上升的高压直流输电系统换相失败分析[J]. 电力自动化设备，2023，43(3)：204-209.
SU Changsheng, YIN Chunya, LI Fengting. Commutation failure analysis in HVDC transmission system based on DC current dynamic rise[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 204-209.

[32] 王　峰，刘天琪，李兴源，等. 考虑直流电流上升及交流电压下降速度的换相失败分析[J]. 电力系统自动化，2016，40(22)：111-117.
WANG Feng, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Commutation failure analysis considering DC current rise and AC voltage drop speed[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 111-117.

[33] 陈光侵，傅　闯，张勇军. 基于阀电流特征的高压直流换相失败检测方法[J]. 电力系统自动化，2018，42(23)：86-91，119.
CHEN Guangqin, FU Chuang, ZHANG Yongjun. Detection method of HVDC commutation failure based on characteristic of valve current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 86-91, 119.

[34] 赵　彤，吕明超，娄　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.

[35] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure in single- and multi-infeed HVDC systems[C]//8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission. London, UK: IET, 2006: 182-186.

[36] 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.

[37] 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.

[38] DE TOLEDO P F, BERGDAHL B, ASPLUND G. Multiple infeed short circuit ratio-aspects related to multiple HVDC into one AC network[C]// 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference &

Exposition: Asia and Pacific. Dalian, China: IEEE, 2005: 1-6.

[39] LEE D H A, ANDERSSON G. An equivalent single-infeed model of multi-infeed HVDC systems for voltage and power stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 303-312.

[40] XIAO H, LI Y H, ZHU J, et al. Efficient approach to quantify commutation failure immunity levels in multi-infeed HVDC systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(4): 1032-1038.

[41] TAO Q, XUE Y S. Quantitative assessment for commutation security based on extinction angle trajectory[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(2): 328-337.

[42] 肖 浩，李银红，于芮技，等. 影响多馈入直流系统换相失败的电网薄弱区域快速识别方法[J]. 中国电机工程学报，2016，36(7)：1781-1789.
XIAO Hao, LI Yinhong, YU Ruiji, et al. A rapid identification method of weak areas in power grid based on commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1781-1789.

[43] 何朝荣，李兴源. 影响多馈入高压直流换相失败的耦合导纳研究[J]. 中国电机工程学报，2008，28(7)：51-57.
HE Chaorong, LI Xingyuan. Study on mutual admittance and commutation failure for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 51-57.

[44] 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.

[45] 叶 全，郭春义. 多馈入直流输电系统换相失败风险区域识别(一)：计及故障期间直流电流动态特性的换相失败判别方法[J]. 中国电机工程学报，2023，43(21)：8182-8192.
YE Quan, GUO Chunyi. Commutation failure risk areas identification for multi-infeed HVDC system (part Ⅰ): a method to discriminate the commutation failure considering the dynamic change of DC current under fault condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8182-8192.

[46] 叶 全，郭春义. 多馈入直流输电系统换相失败风险区域识别(二)：换相失败风险量化评估及风险区域快速识别[J]. 中国电机工程学报，2023，43(23)：8999-9009.
YE Quan, GUO Chunyi. Risk area identification of commutation failure in multi-infeed HVDC system (part Ⅱ): quantitative assessment of commutation failure risk and rapid identification of risk area[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 8999-9009.

[47] 李国庆，王 拓，辛业春，等. 多馈入直流受端电网换相失败风险区域快速识别方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(1)：140-152.
LI Guoqing, WANG Tuo, XIN Yechun, et al. A rapid identification method for commutation failure risk area in multi-infeed high voltage direct current receiving-end power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 140-152.

[48] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 高压直流输电系统机电暂态仿真建模技术导则：GB/T 40580—2021[S]. 北京：中国标准出版社. 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Technical guide for modeling HVDC transmission systems in electromechanical transient simulations: GB/T 40580—2021[S]. Beijing, China: Standards Press of China. 2021.

[49] 屠竞哲，张 健，曾 兵，等. 直流换相失败及恢复过程暂态无功特性及控制参数影响[J]. 高电压技术，2017，43(7)：2131-2139.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, ZENG Bing, et al. HVDC transient reactive power characteristics and impact of control system parameters during commutation failure and recovery[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2131-2139.

[50] 屠竞哲，张 健，王建明，等. 大规模直流异步互联系统受端故障引发送端稳定破坏的机理分析[J]. 中国电机工程学报，2015，35(21)：5492-5499.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, WANG Jianming, et al. Mechanism analysis on the sending-side instability caused by the receiving-side contingencies of large-scale HVDC asynchronous interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5492-5499.

[51] 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.

[52] 薛禹胜，陶 琪. 直流换相安全性与混联系统同步稳定性的量化分析与协调控制[J]. 电力系统自动化，2020，44(23)：11-19.
XUE Yusheng, TAO Qi. Quantitative analysis and coordination control for DC commutation security and synchronism stability of AC/DC hybrid power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 11-19.

[53] TU J Z, ZHANG J, BU G Q, et al. Analysis of the sending-side system instability caused by multiple HVDC commutation failure[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4): 37-44.

[54] 顾卓远，张 健，易 俊，等. 送端系统机群摆动对直流功率恢复特性影响研究[J]. 电网技术，2018，42(7)：2030-2037.
GU Zhuoyuan, ZHANG Jian, YI Jun, et al. Study on impacts of generator cluster swing in sending-end grid on DC recovery characteristics[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2030-2037.

[55] 李笑宇，刘洪波. 送端系统容量占比对直流换相失败的影响及应对[J]. 中国电机工程学报，2019，39(增刊 1)：72-76.
LI Xiaoyu, LIU Hongbo. The influence of the proportion of the capacity of the transmitter system on the failure of DC commutation and its countermeasures[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(Supplement1): 72-76.

[56] 叶蕴霞. 反向电压对直流换流阀关断特性的影响研究[D]. 北京：华北电力大学，2022.
YE Yunxia. Research on the influence of reverse voltage on the turn-off characteristics of DC converter valve[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2022.

[57] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京：江苏科学技术出版社，1999.
XUE Yusheng. Quantitative study of general motion stability and an example on power system stability[M]. Nanjing, China: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1999.

[58] 薛禹胜，徐泰山，刘 兵，等. 暂态电压稳定性及电压跌落可接受性[J]. 电力系统自动化，1999，23(14)：4-8.
XUE Yusheng, XU Taishan, LIU Bing, et al. Quantitative assessments for transient voltage security[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 4-8.

[59] 徐泰山，薛禹胜. 暂态频率偏移可接受性的定量分析[J]. 电力系统自动化，2002，26(19)：7-10.
XU Taishan, XUE Yusheng. Quantitative assessments of transient frequency deviation acceptability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 7-10.

[60] 刘庆龙，薛禹胜，陈国平. 基于轨迹模式空间解耦及模式能量序列的振荡分析：(二)算法及应用[J]. 电力系统自动化，2019，43(13)：21-28.
LIU Qinglong, XUE Yusheng, CHEN Guoping. Oscillation analysis

based on trajectory modes decoupled in space and mode-energy-sequence: part two algorithm and application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 21-28.

[61] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架：(一)从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化，2006，30(1)：8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part Ⅰ from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.

[62] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架：(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化，2006，30(2)：1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part Ⅱ reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.

[63] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架：(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J]. 电力系统自动化，2006，30(3)：1-10，106.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part Ⅲ optimization and coordination of defense-lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10, 106.

[64] 王渝红，寇　然，宋瑞华，等. 基于多判据预测的特高压直流分层接入系统换相失败抑制策略[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1304-1313.
WANG Yuhong, KOU Ran, SONG Ruihua, et al. Commutation failure suppression strategy based on multi-criteria prediction in UHVDC hierarchical connection system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1304-1313.

[65] 周泓宇，姚　伟，李程昊，等. 一种可降低首次换相失败风险的预测型低压限流控制[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3179-3189.
ZHOU Hongyu, YAO Wei, LI Chenghao, et al. A predictive voltage dependent current order limiter with the ability to reduce the risk of first commutation failure of HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3179-3189.

[66] 李碧君，许剑冰，徐泰山，等. 大电网安全稳定综合协调防御的工程应用[J]. 电力系统自动化，2008，32(6)：25-30.
LI Bijun, XU Jianbing, XU Taishan, et al. Engineering application of integrated and coordinated defense technology of large power system security and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 25-30.

[67] 李碧君，徐泰山，薛禹胜，等. 大电网安全稳定综合协调防御系统的工程设计方法[J]. 电力系统自动化，2009，33(23)：90-93，102.
LI Bijun, XU Taishan, XUE Yusheng, et al. Engineering design method of integrated and coordinated defense system of large power system security and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 90-93, 102.

[68] 袁小明，张美清，迟永宁，等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J]. 中国电机工程学报，2022，42(5)：1904-1916.
YUAN Xiaoming, ZHANG Meiqing, CHI Yongning, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1904-1916.



薛　峰(通信作者)
1971—，男，博士，研究员级高工，博导
主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制
E-mail: xue-feng@sgepri.sgcc.com.cn

XUE Feng
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-07-11　修回日期　2023-08-24　编辑　陈　蔓