第 50 卷 第 7 期：2735-2746　　高电压技术　　Vol.50, No.7: 2735-2746
2024 年 7 月 31 日　　High Voltage Engineering　　July 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240550

多馈入高压直流输电系统换相失败防御技术研究综述

贺之渊，高　冲，丁　骁，王成昊，李婷婷，吴凌锋
（先进输电技术全国重点实验室(国网智能电网研究院有限公司)，北京 102209）

摘　要：高压直流输电技术具有输送容量大、输电距离远、综合成本低的优势，在解决我国能源中心与负荷中心逆向分布问题上起到关键性作用，是中国实施“西电东送”重要战略支撑技术，占“西电东送”总容量 50%以上。经过 20 余年的应用和发展，中国逐步建成了多回直流线路接入同一地区的电网结构，形成了多馈入高压直流输电系统。多馈入直流系统虽然提高了系统运行方式的灵活性、扩大了输送容量，但是增加了系统结构的复杂性、导致系统安全稳定问题愈加突出。多馈入直流系统中，单一交流故障就有可能在大范围内引发多回直流换相失败，对系统造成千万千瓦的功率冲击，严重威胁电网安全稳定运行。换相失败造成的危害随着直流馈入数量和容量的增加越来越严重。该文围绕未来高比例新能源场景下多馈入直流换相失败难题，首先论述了多馈入高压直流输电系统的概念，分析了直流输电系统换相失败机理，然后从换流站级、换流器级及系统级 3 个层面对现有的换相失败防御技术进行综述，最后对未来换相失败防御技术的重点方向进行了展望，并给出相关建议。

关键词：高压直流输电；多馈入直流系统；换相失败；防御技术；换流阀

A Review of Commutation Failure Prevention Technology for Multi-infeed HVDC Transmission Systems

HE Zhiyuan, GAO Chong, DING Xiao, WANG Chenghao, LI Tingting, WU Lingfeng
(State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology, State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: HVDC transmission technology has the advantages of large transmission capacity, long transmission distance and low comprehensive cost, which plays a key role in solving the problem of reverse distribution of energy centers and load centers in China. It is an important strategic support technology for the implementation of “West-to-East Power Transmission” in China, accounting for more than 50% of the total capacity. After more than 20 years of application and development, China has built a power grid with multiple DC lines connected to the same area, forming a multi-infeed HVDC transmission system. Although this system improves the flexibility of the operation mode and expands the transmission capacity, the increasing complexity of its structure has made the system safe or stable problem more and more prominent. In the multi-infeed DC system, a single AC fault may cause multiple DC commutation failure in a wide range, causing tens of millions of kilowatts of power impact to the system and seriously threatening safety and stability of the power grid. The hazards caused by commutation failures are becoming more and more serious as the number and capacity of DC lines increase. Focusing on the problem of multi-infeed DC commutation failure in the future scenario of high proportion of new energy, this paper first explains the concept of multi-infeed HVDC transmission system, analyzes the commutation failure mechanism of DC transmission system, and then reviews the existing commutation failure prevention technologies from three levels, namely, station level, converter level, and system level. Finally, the prospects in the future commutation failure prevention technology is put forward, and relevant suggestions are given.

Key words: high-voltage direct current transmission; multi-infeed DC system; commutation failure; prevention technology; converter valves

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

基于电网换相换流器的高压直流输电技术(line-commutated-converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)具有输送容量大、输电距离远、综合成本低的优势，在解决我国能源中心与负荷中心逆向分布问题上发挥着关键性作用，是我国实施“西电东送”重要战略支撑技术，占“西电东送”总容量 50%以上。经过 20 余年的应用和发展，我国逐步建成了以 LCC-HVDC 为主流模式、多回直流线路接入用电负荷地区的电网架构，形成了多馈入高压直流(multi-infeed direct current, MIDC)输电系统。截至 2023 年，华东和广东电网接入的直流输电工程分别达到 13 条和 10 条，是世界范围内落点最为密集的多馈入直流系统。多馈入直流系统虽然提高了系统运行方式的灵活性、扩大了输送容量，但是增加了系统结构的复杂性，导致系统安全稳定问题愈加突出。

LCC 由晶闸管串联构成，只能控制开通，须借助电网提供反向电压才能可靠关断，当交流故障引起电压跌落时，导致反向电压不足又重新导通，就会发生换相失败。换相失败发生后，换流器中同一相的另一个桥臂触发开通后则会导致上下两个桥臂同时导通形成短路，导致直流功率跌落至零。同时，直流电流和触发角的大幅变化引发换流器无功波动，幅度达到换流容量的 40%~50%。单条直流发生换相失败后，随着交流故障的清除，一般在 200 ms 内恢复功率输送并稳定运行。多馈入直流系统内多个换流站间电气距离近，耦合作用强，系统中单一交流故障就能引发多回直流同时换相失败，故障期间多个换流站同时吸收大量无功，拉低受端电网交流电压，可引发区域性电压凹陷甚至失稳，对系统造成千万千瓦的功率冲击，严重威胁电网安全稳定运行。换相失败造成的危害随着直流馈入数量和容量的增加越来越严重[1]。

为避免多直流换相失败引起系统失稳，实际工程中主要采取的换相失败防御措施包括：(1)改善直流系统控制：通过检测交流电压跌落程度并增大关断角，可以避免部分换相失败，但是难以兼顾控制调节过程在多直流间产生的相互影响；(2)限制直流输送功率水平：通过降低直流换流站输送功率水平降低换相失败影响效力；(3)改进换流器拓扑：对逆变器拓扑改造，附加串并联电容、电感及全控型器件，补偿换相电压，提高功率因数以减少无功消耗，来降低换相失败风险；(4)系统电压支撑：在换流站安装 STATCOM、调相机等装置部分补偿交流电压，增加动态无功支撑能力。STATCOM 抗扰动能力较弱，调相机单位容量成本高，不能完全避免换相失败发生。然而，上述措施并未从源头有效遏制换相失败的产生，也无法有效阻断换相失败的网内传播，且缺乏有效的全方位综合防御技术，无法应对未来高比例新能源接入和更多直流接入的新型电网场景。

本文围绕未来高比例新能源场景下多馈入直流换相失败难题，分析了多馈入高压直流输电系统的原理，在认识运行机理的基础上从换流站级、换流器级及系统级 3 个层面对现有的换相失败防御技术进行综述。最后，从 5 个方面对未来换相失败防御技术进行了展望。

1 多馈入高压直流输电系统换相失败原理

1.1 多馈入高压直流输电系统

多馈入高压直流输电系统是一种电力负荷端能量集中处理系统，是我国大型交直流混联电网的重要组成部分。从区域电网范畴来看，我国目前最典型的多馈入高压直流输电系统为华东地区电网和广东地区电网，两者分别服务于我国最重要的经济活动区域。

华东地区电网的直流馈入情况如表 1，除±500 kV 葛洲坝—南桥直流和±800 kV 白鹤滩—江苏直流受端换流站分别采用 CLCC 和 LCC/VSC 外，其余受端换流站皆采用 LCC。此外，在华东地区电网内部，上海电网自身形成了一个规模较小的多馈入高压直流输电系统，包括±500 kV 葛洲坝—南桥、±500 kV 宜都—华新、±500 kV 团林—枫泾、±800 kV 复龙—奉贤 4 条直流，具备典型的多馈入系统形态特征。

广东地区电网的直流馈入情况如表 2，除±800 kV 乌东德—柳州—龙门直流受端换流站采用 VSC 外，其余受端换流站皆采用 LCC。

多条直流既可以馈入同一电压等级交流电网，也可以不同电压等级分层馈入交流电网，多馈入落点之间的交流母线经由耦合阻抗形成关联。多馈入落点之间电气距离越小，换相失败问题越突出。

1.2 多馈入高压直流输电系统换相失败

单馈入直流系统换相失败原因已经有比较成熟的结论，即外因引发的关断角不足。馈入点逆变站的关断角可表示为：

表 1　华东地区电网直流馈入情况

Table 1　DC infeed in East China

序号	直流输电工程	落点省份	工程参数	落点换流器类型
1	葛洲坝—南桥	上海	±500 kV/1.2 GW	CLCC
2	宜都—华新	上海	±500 kV/3 GW	LCC
3	团林—枫泾	上海	±500 kV/3 GW	LCC
4	龙泉—政平	江苏	±500 kV/3 GW	LCC
5	复龙—奉贤	上海	±800 kV/6.4 GW	LCC
6	锦屏—苏南	江苏	±800 kV/7.2 GW	LCC
7	溪洛渡—浙西	浙江	±800 kV/8 GW	LCC
8	灵州—绍兴	浙江	±800 kV/8 GW	LCC
9	晋北—南京	江苏	±800 kV/8 GW	LCC
10	锡盟—泰州	江苏	±800 kV/10 GW	LCC
11	昌吉—古泉	安徽	±1100 kV/12 GW	LCC
12	白鹤滩—江苏	江苏	±800 kV/8 GW	LCC/VSC
13	白鹤滩—浙江	浙江	±800 kV/8 GW	LCC

表 2　广东地区电网直流馈入情况

Table 2　DC infeed in Guangdong Province of China

序号	直流输电工程	落点省份	工程参数	落点换流器类型
1	楚雄—广州	广东	±800 kV/5 GW	LCC
2	大理—深圳	广东	±800 kV/5 GW	LCC
3	普洱—广州	广东	±800 kV/5 GW	LCC
4	荆州—惠州	广东	±500 kV/3 GW	LCC
5	天生桥—广州	广东	±500 kV/1.8 GW	LCC
6	昆明—安顺—肇庆	广东	±500 kV/3 GW	LCC
7	兴仁—深圳	广东	±500 kV/3 GW	LCC
8	昭通—从化	广东	±500 kV/6.4 GW	LCC
9	乌东德—柳州—龙门	广东	±800 kV/8 GW	VSC
10	闽粤联网背靠背	广东	±100 kV/2 GW	LCC

$$\gamma_n = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}n_n I_n X_n}{U_n} + \cos\beta_n\right) - \varphi \tag{1}$$

$$\varphi = \arctan\frac{\Delta U}{\sqrt{3}(2-\Delta U)} \tag{2}$$

式中：n_n为换流变压器变比；I_n为直流电流；U_n为换流母线电压；β_n为超前触发角；X_n=X_{Nn}/(2n_n)+X_{cn}；X_{Nn}为交流系统阻抗；X_{cn}为换流阻抗；X_n为 X_{Nn}和 X_{cn}归算到换流变阀侧后的等值换相阻抗；φ为交流电网发生不对称故障时换相电压偏移角，系统对称时为 0；ΔU为不对称故障时相电压跌落值。

根据式(1)，可以归纳出引发直流换相失败的主要因素有：

1）交流侧换流母线电压 U_n大幅下降。

2）超前触发角β_n降低。

3）直流电流过大。

4）交流系统发生不对称故障引起换相电压的相角漂移[2]。

5）换流器系统内部故障，例如换流器触发电路工作不可靠造成触发脉冲不能准确适时为晶闸管分配脉冲。

另外，谐波引起的电压畸变[3-4]、换流站滤波器投切不当[5]等也可能引起换相失败。根据实际工程的统计分析，交流系统故障引发的换相失败占比接近 90%，为主要原因。

形成多馈入直流系统之后，换相失败的原因将变得更加复杂。一回直流发生换相失败有可能会引起其他直流的换相失败，各直流之间的电气耦合关系成为多回直流是否同时发生换相失败的重要因素。多馈入高压直流输电系统换相失败，是一个在交流与直流系统间反复交替传播，并导致故障影响范围逐渐扩大的复杂非线性动态过程。

在多馈入直流输电系统中，各受端换流母线电压受各交流电网间相互耦合影响，为便于研究耦合影响作用，CIGRE 工作组提出了多馈入交互作用因子(multi-infeed interaction factor，MIIF)指标[6]：换流母线 i 处投入三相对称电抗器使其电压下降 1% 时，换流母线 j 处电压相对变化率，表达式如下：

$$M_{\mathrm{IIF}ji} = \frac{\Delta U_j}{1\%U_i} \tag{3}$$

式中：ΔU_j为换流母线 j 电压变化量；U_i为电抗器投入前换流母线 i 的电压。文献[7]指出直流落点间耦合阻抗越小，则 $M_{\mathrm{IIF}ji}$越大。文献[8]指出直流系统采取定电流或定电压控制时，多馈入直流系统交流电压间的相互作用最弱；采取定功率或定关断角控制时，交流电压间的相互作用最强。文献[9]指出负荷对多馈入交互作用因子的影响：无功负荷越大，$M_{\mathrm{IIF}ji}$越大；有功负荷越大，$M_{\mathrm{IIF}ji}$越小。$M_{\mathrm{IIF}ji}$越大表示换流站间的耦合作用越强，即本地换流母线电压下降时，其他直流受端换流母线电压也随之大幅下降，增加了同时换相失败的风险；当 $M_{\mathrm{IIF}ji}$≤0.15 时，可认为各直流系统间相互作用近似为 0。

与单馈入直流相比，多馈入系统中多条直流围绕交互作用因子产生交流系统应力耦合、多换流站控制耦合以及电网拓扑结构因素耦合，但对系统中某一特定换流站而言，换相失败的发生还是由式(1)决定。

1.3　高比例新能源场景下的换相失败

在直流换相的过程中实际上是交流系统相间短路电流提供了直流输电系统换相过程中需要的换相电流。因此，交流系统支撑强度决定了系统所能

提供的换相电流，交流系统越弱系统越容易发生换相失败。

常规水、火电的故障电流约为其额定电流的3~5倍，是系统故障电流即短路容量的主要贡献者。风力发电通常存在两种模式：双馈异步风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)的转子Crowbar电路动作之后，转子侧变流器被短路，转子电流在很短时间变为0，输入系统的短路电流会非常小；而永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator，PMSG)输出短路电流受到投切卸荷电阻和网侧变流器影响，会被限制在一定范围内。光伏发电中，逆变器在故障期间的最大短路电流被限制在特定值。此外，风电、光伏等新能源发电通常采用低电压等级并网，与直流换流站之间的电气距离较大，加之提供的故障电流有限，对换流母线短路电流影响较小。

当新能源大规模纳入受端电网，且对传统常规水、火电机组出现显著替代(30%甚至 50%以上)，交流系统的短路容量会明显变小，系统抵御换相失败的能力才会变弱。目前实际电网中暂未出现这种情况，不过仿真分析表明，当新能源大规模入网，由于新能源站故障穿越特性，其对交流系统的电压恢复支撑有限，且新能源机组不提供短路电流或者提供的短路电流很小，使得故障后直流恢复特性变差，系统更易再次发生换相失败，新能源站也可能再次进入故障穿越，从而导致系统反复振荡，恢复缓慢，甚至失稳。

2 换相失败防御技术研究现状综述

为了解决多馈入高压直流输电系统换相失败防御问题，需要从3个方面展开：首先是揭示多馈入高压直流输电系统换相失败传播规律，然后突破多馈入直流换相失败综合性防御技术，包括换流站级、换流器级和系统级防御，最后是通过具有标准性的仿真平台对协同防御技术效果进行准确评价。

2.1 防御技术理论基础研究

在多馈入直流系统中，某一换流站发生故障，由于交流系统的耦合作用影响，原则上各换流站都将产生变动，这一变化过程包含了3个层次。首先，是电网动态响应对直流换相失败的影响机制，研究主要关注电压、功角稳定性及换流阀动态关断特性对直流换相失败的影响规律。其次，是直流换相失败功率冲击对交流系统同步稳定性的影响机制，研究直流换相失败时空分布特性对交流电网安全稳定性的影响规律。最后是“直-交-直”间的复杂耦合途径及发展的影响机制，主要聚焦多馈入直流与交流同步电网安全稳定性的耦合机理研究。目前，换相失败防御技术理论研究大多还停留在第一个层面，其主要结论见本文第2章。为了支撑换流站级、换流器级及系统级换相失败综合性防御方法的实现，亟需弄清交流-直流复杂耦合机制，揭示换相行为与多馈入系统稳定性之间的内在关联规律。

2.2 换流站级防御技术研究

换相失败的换流站级防御首先需要对换相失败进行检测或预测，然后采取适当的换流站级控制策略来抑制换相失败或连续换相失败的发生，提高故障后系统的恢复能力。控制策略既包括了换流站内部控制优化策略，又包括了换流站外部装置支撑策略。

2.2.1 检测与预测

为对多馈入直流输电系统换相失败问题进行深入研究，准确检测或预测换相失败的发生是基本前提。前文已知，换相失败的本质是换流阀实际关断角小于临界关断角导致无法正常关断，因此检测换相失败发生的最常见方法是判断关断角小于临界关断角。但是在工程中，关断角实际值难以准确测量，作为换相失败的判据具有一定局限性。对此，许多学者提出了一些其他的换相失败检测方法。

发生换相失败的主要原因是交流故障导致换流母线电压的下降。因此通过判断换相电压跌落值与临界电压跌落值间的关系，可以预测是否发生换相失败。文献[10]推导了引起换相失败的电压跌落临界值，表达式为式(4)。

$$\Delta U = 1 - \frac{I'_{\mathrm{d}}}{I_{\mathrm{d}}} \cdot \frac{X_{\mathrm{c}}}{X_{\mathrm{c}} + \cos(\gamma_0 + \varphi) - \cos\gamma_{\min}} \tag{4}$$

式中：I'_{d}为故障后直流电流；I_{d}为故障前直流电流；X_{c}为换相电抗标幺值；γ_0为故障前关断角；$\gamma_{\min}$为临界关断角；φ为相位偏移角，三相对称故障时为0，单相故障时可由式(2)计算。当交流系统发生故障后，若电压跌落值大于式(4)所得理论值时，预测会发生换相失败。利用电压跌落值预测系统是否发生换相失败，实现简单，但是该结论分析过程中假设交流电网为强系统且没有考虑控制系统动态响应特性，因此难适用于如今多直流馈入弱交流系统的应用场合。

文献[11]提出换相失败预防(commutation fail-

ure prevention, CFPREV)控制模块，通过检测零序分量大小判断是否发生单相故障，检测 $\alpha\beta$ 分量幅值大小判断是否发生三相故障，以此预测是否发生换相失败。但是在交流电压过零点时零序电压检测启动慢，文献[12]在 CFPREV 控制模块基础上增设 sin-cos 分量检测，sin-cos 分量检测在交流过零点启动快于零序电压检测，且可用于检测三相交流故障，与 $\alpha\beta$ 分量检测可互为备用。文献[13]提出功率分量检测法(power component detection, PCD)，在 CFPREV 基础上引入电流的零序、$\alpha\beta$ 分量，与电压各分量相乘得到功率的零序分量、$\alpha\beta$ 分量。PCD 利用功率各分量预测是否发生换相失败，较仅考虑电压、电流一种电气量的检测法，具有更高灵敏度、更快检测速度。文献[14]提出一种基于阀电压或阀电流的换相失败检测方法，当阀电压持续为零的时间或阀电流持续非零的时间大于交流系统基波周期时，检测到换相失败的发生。

文献[15]通过分析故障合闸角对换相失败的影响机理，提出基于换相电压时间面积的预测方法，但是没有考虑直流电流的变化导致预测结果偏乐观。对此，文献[16]在原基础上考虑直流电流变化和故障合闸角影响，提出一种临界换相电压的计算方法，有效提高理论分析临界换相电压值的计算精度，提高换相失败预测的准确度。文献[17]通过分析故障时刻对换相失败的影响，故障时刻越小，换相失败发生风险越高，提出一种基于临界故障时刻的换相失败预测方法，并利用牛顿插值法推导出临界故障时刻计算方法。在考虑电压、电流变化基础上，又引入时间因素，进一步提高预测换相失败的准确性。

2.2.2　换流站级控制策略

1）CFPREV 控制优化

CFPREV 控制模块可能对其他直流系统的正常换相产生影响。文献[10]提出的 CFPREV 控制器，在检测到交流故障后，通过将交流电压检测值与设定阈值之间的差值转化为触发角提前量，从而增加换相裕度，降低换相失败发生概率。但是提前触发将导致逆变器吸收的无功功率增加，受端交流系统电压进一步下降，在多馈入直流背景下，可能提高了其他直流逆变器换相失败发生概率。文献[18]对 CFPREV 控制进行改进，提出一种基于直流电流预测控制的换相失败抑制策略，改进 CFPREV 控制可输出直流电流指令值，取与 VDCOL 输出值之间输出最低值，对逆变侧直流电流控制，有利于抑制换相失败、改善系统恢复特性。文献[19]针对文献[18]中直流电流预测设定值 $I_{\mathrm{d_PREV}}$ 计算公式中参数 k 存在随机性，提出基于直流电流模糊预测控制的换相失败预防策略，其中直流电流模糊预测控制模块克服参数 k 的随机性，控制时长 T 设置模块克服系统恢复缓慢问题。文献[20]认为 CFPREV 控制提前触发可能导致多馈入直流系统中其他换流站换相失败风险增加，考虑交直流无功交互特性基础上，对 CFPREV 控制启动电压值差异化设置优先级指标；又考虑换相失败时直流功率冲击和对整体的无功影响，对 CFPREV 控制启动电压值优化设置。优化后 CFPREV 控制降低换相失败时功率冲击和改善了交直流无功交互特性。文献[21]针对 CFPREV 控制灵敏度受限、提前补偿量精度低、固定阈值缺乏灵活性，提出一种基于直流电流、交流电压预测的换相失败预防策略(commutation failure prevention based on current and voltage prediction，CFPCVP)，相对 CFPREV 灵敏度、预防精度更高，对触发角进行补偿修正，更利于抑制换相失败。文献[22]认为交流故障后 4~15 次电压谐波成分累计含量高于 2、3 次谐波含量，仅考虑后者将增大换相失败风险，对此提出考虑换相电压多次谐波分量的换相失败抑制策略，以更精准的临界换相条件控制提前触发，响应速度快，对电压畸变灵敏度更高，具有良好的抗噪能力，抵御换相失败能力强于传统 CFPREV 控制。

2）VDCOL 控制优化

低压限流控制(voltage dependent current limiting, VDCOL)是一种保护机制，用于在直流输电系统中防止因直流侧电压下降导致的换相失败。文献[23]为提高故障反应灵敏度，使控制系统快速反应，提出功率分量检测法 PCD。为减少提前触发导致的逆变侧无功压力，提出一种基于电流指令速动的控制方法，将提前触发任务转至整流侧，限制了直流电流的增长，有助于逆变器换流母线电压恢复，有利于降低换相失败的概率。文献[24]根据故障时直流电压、电流特性，提出一种基于虚拟电阻的电流限制控制方法，将考虑虚拟电阻后的电压作为 VDCOL 输入，提高 VDCOL 故障反应灵敏度，迅速降低直流电流指令值，降低电流对换流阀的冲击，有效提高抵御连续换相失败的能力。文献[25]提出一种基于虚拟电感的连续换相失败抑制策略，当交流系统故障时，虚拟电感迅速感应电流变化，将感

应电压作用到 VDCOL，迅速减小直流侧电流，降低阀电流应力，有效抑制双馈入直流输电系统连续换相失败发生，改善各电气量恢复特性。基于虚拟电阻、虚拟电感的换相失败抑制方法，对电流指令的调节未充分考虑故障下直流电流和交流电压的动态变化所带来的换相失败风险。文献[26]通过换相面积需求量与供给量之差，建立起直流电流增大和换相电压降低对换相过程影响的耦合关系，引入虚拟换相窗 Δt，提出基于虚拟换相面积缺乏量 A_{ins}^{*} 的连续换相失败抑制方法，利用 A_{ins}^{*} 的动态变化对直流电流指令进行调节，可快速响应直流电压与换相电压，提高抵御换相失败的能力。但没有给出 Δt 时长求解方法。文献[27]提出一种基于虚拟锁相电压的换相失败抑制策略，通过检测虚拟锁相电压和实际电压间差值以快速发出换相失败预警，然后经附加触发角控制和逆变侧改进 VDCOL 控制将差值转为对应触发角附加值与电流指令值，可抑制轻度故障下首次换相失败发生和严重故障下连续换相失败故障发生，提升系统鲁棒性。

3）其他控制优化

文献[28]系统阐述了定电压控制与定关断角控制原理，通过实际工程仿真模型验证，指出定关断角控制抵御换相失败能力略高于定电压控制；定电压控制时换相失败恢复过程更快。文献[29]指出电流偏差控制(current error controller，CEC)斜坡函数斜率取值越小越利于直流功率恢复；取值越大越利于抵御首次换相失败。于是提出一种自适应 CEC 控制器，根据故障严重程度对斜率动态调整，提高抵御连续换相失败的能力。文献[30]指出交流不对称故障后，实际超前触发角表现出周期性波动特征，易引起连续换相失败，于是提出一种基于滞环控制的连续换相失败抑制方法，对触发角指令进行补偿，减小实际触发角的波动，降低连续换相失败发生的概率。文献[31]指出故障恢复期间 VDCOL 作用使逆变器关断角大于额定值，换相裕度高；CEC 作用时，斜率取值可能使关断角减小，导致后续换相失败。对此提出一个抑制连续换相失败的关断角动态补偿控制方法，避免 CEC 作用时关断角过小，降低了连续换相失败风险，提高了逆变器功率传输能力。文献[32]提出了一种基于交流故障快速检测的换相失败抑制策略，利用电压周期采样点突变进行故障选相，计算换相电压最大偏移量对锁相环补偿修正，控制提前触发以提高换流阀关断裕度，有效提高单相故障后抵御换相失败的能力。文献[33]提出两种针对整流侧交流故障引起逆变器换相失败的抑制方法，即通过改进整流侧触发角来抑制直流电压快速上升；通过减小电流裕度和基于换相面积缺乏量对整流侧电流指令值改进以抑制直流电流的快速上升。

4）交流系统加强

除了换流阀内部控制优化，还可以寻求功率支撑设备，实现换流阀外部控制优化。文献[34]对新一代大容量调相机分别落点直流送受端展开研究，指出新一代调相机可增强直流送端电网的短路容量和支撑能力，有效提升各直流受端多馈入短路比，提高多馈入直流电网的电压、功率稳定水平，大大降低同时换相失败风险。文献[35]分析了采用不同无功补偿装置时，不同安装地点和交流故障严重程度情况下，多馈入直流系统直流恢复速度；利用动态无功-电压灵敏度确定最佳补偿地点，为实际多馈入直流工程提供了实用布点方案。文献[36]基于直流距离耦合度指标，采用基于分解的多目标进化算法和熵权法对动态无功补偿装置的类型、布点和容量进行了优化。文献[37]以降低多回直流同时换相失败风险为控制目标，考虑故障随机性，提出了静止同步补偿器(static synchronous compensator，STATCOM)的最优配置方案。文献[38-39]在考虑直流各子系统间相互作用的换相失败抵御效果指标基础上，给出同步调相机(synchronous condenser，SC)最佳补偿位置。

综上所述，换流站级防御技术的核心目标是稳定单一换流站。在换流站级内部防御方面，以控制增大关断角或者限制直流输送功率水平为代价，提出频率、无功、电压等补充控制策略，可降低换相失败负面效力，但通常由于可行性缺陷或效果不佳难以应用到实际工程中；在换流站级外部支撑方面，通过相应换流站安装静态无功补偿器、调相机等装置部分补偿交流电压，可以增加动态无功支撑能力。然而，上述两方面的措施都只能有限程度地降低换相失败发生概率，不能根本上避免换相失败的发生。

2.3 换流器级防御技术研究

换相失败的换流器级防御针对的是换流器本体。LCC-HVDC 中换流器换相过程需要交流系统提供换相电压和换相电流，正常工况下换流阀可靠导通或关断的触发角范围为 15°~165°。为使换流器在换相周期任意期望点换相，可将适当附加电压叠加于原换相电压，增加换相面积供给量，提高换相失

败抵御能力。通常在换流阀与交流系统间串联电容(或变流链)或在阀臂上串入可控子模块。通过在换流阀与换流变之间串联电容，构成串联电容换相换流器(capacitor commutated converter，CCC)，将电容电压附加在换相电压上，使电压过零点滞后，保证退出导通的阀有足够长的反向电压作用时间以恢复正向阻断能力，减小换相失败的概率。但是故障时直流电流的快速变化可能导致三相电容电压的不对称度超标，反而增加换相失败风险；CCC 发生换相失败，故障相电容会单方向持续充电，引起电容过电压而导致 CCC 持续换相失败。因此必须对电容电压充放电加以控制。文献[40]将 CCC 换流器中串联电容替换为反并联晶闸管全桥子模块(anti-parallel thyristor full bridge submodule，APT-FPSM)，提出一种增强型电容换相换流器(enhanced capacitor commutated converter，ECCC)拓扑。文献[41]将 ECCC 中 APT-FBSM 替换为级联的全桥子模块(full-bridge sub-module，FBSM)，提出串联电压换相换流器(series voltage commutated converter，SVCC)。ECCC、SVCC 均可降低换相失败发生概率，避免 CCC 失去自恢复能力的问题；同时，SVCC 相对 ECCC，降低了变流链子模块器件的电压、电流应力。

针对 ECCC 原控制策略受故障检测延迟时间影响而抵御换相失败能力的问题，文献[42]提出一种 ECCC 换流器的新型协调控制策略。新策略与原策略本质不同在于，原策略仅在故障检测后才投入电容，而新策略在正常运行和故障期间，子模块电容均投入。因此新策略可减少换流器的无功消耗，进一步提升 ECCC 抵御换相失败能力，具有更好的故障恢复能力；在双馈入系统背景下，还可以降低临近系统换相失败的概率。

除换流阀与交流网侧间串联变流链以外，还可以附加串联电阻。文献[43]提出基于可控串联电阻(controllable series resistor，CSR)的换相失败抑制措施，串联电阻可提高换相电压幅值、减小换相电压超前相位并抑制直流电流增加，有效抑制换相失败的发生。该方法相较于换相失败防御模块少了工频变压器，相较于桥式可控串联电容方案少了一半的功率器件，因此大大降低了成本。

另外一种拓扑改进方式是在阀臂上附加可控子模块或串并联全控型开关器件。文献[44]提出一种 LCC-HVDC 改进拓扑(enhanced line commutated converter，ELCC)，在原阀臂上串联接入新型可控子模块，以增大换相电压而辅助换相。但新型可控子模块采用全控型器件 IGBT，存在经济成本高、与晶闸管容量匹配等问题。为此，文献[45]提出一种由晶闸管构成的半控型 H 桥子模块拓扑结构，降低成本，易与阀臂晶闸管容量匹配。文献[46]提出一种由晶闸管和可关断管串联而成的混合换流阀(hybrid series converter valve，HSCV)，并基于开关器件特性，对器件选型、动态均压支路设计等进行系统分析。ELCC、半控 H 桥子模块和 HSCV 均提高了直流输电系统抵御换相失败的能力；HSCV 抵御能力强于前两者，较于 ELCC 更具有经济性。

文献[47]提出一种新型具有可控关断能力的电网换相换流器(controllable line commutated converter，CLCC)拓扑。CLCC 为全控和半控器件混联结构，可以通过全控型器件将主支路电流转移至辅助支路，待主支路晶闸管关断能力恢复完毕，再利用全控型器件将桥臂电流关断，以快速完成桥臂间换相。CLCC 桥臂电流只在桥臂内部主辅支路切换，因此谐波特性与 LCC 相同，无需改变滤波器设计；并且 CLCC 具有自关断能力，无需减小触发角来避免换相失败，且可短时运行 0 关断角工况，为交流系统故障时提供短时无功支撑，因此可删除换相失败预测控制模块；CLCC 换流站总损耗略高于 LCC 换流站，但显著低于 VSC 换流站，且可完全抵御交流故障引起的换相失败，因此经济性更优；CLCC 在直流线路故障时，可快速降低直流电流至 0，故障清除后可快速恢复直流功率。目前 CLCC 已在葛南直流改造工程中正式落地，解决了交流系统故障引发的换相失败问题。文献[48]在考虑器件差异性和阻断特性基础上提出一种半控和全控器件串联的结构。通过分析电流通路对耦合关断过程建模并分析作用机制，提出一种考虑器件阻断特性的半控和全控器件串联的协调配合策略，即对 IGBT 关断时刻合理选择以改善晶闸管关断特性，可提高双馈入直流输电系统抵御换相失败的能力。

为解决晶闸管无法自关断导致换相失败问题，还可以将逆变器更改为基于自关断器件 IGCT 的电流源型主动换相换流器(actively commutated converter，ACC)和基于全控型器件 IGBT 的电压源型换流器(voltage source converter，VSC)拓扑。文献[49]针对 ACC 研究现状进行调研，指出 ACC 可避免换相失败并对无源网络进行供电；实现有功、无功功率的控制。

但 IGCT 驱动电路损耗大，ACC 造价高，效率低于 LCC，同时控制策略复杂，因此 ACC 的应用还需要进一步深入探讨。基于 VSC 的直流输电技术，又称“柔性直流输电技术”。柔性直流输电系统相对于 LCC-HVDC 没有无功补偿问题和换相失败问题等，但其损耗、设备造价较高，因此对于超大容量、远距离直流输电，仍需考虑常规直流输电技术的应用。

2.4 系统级防御技术研究

换相失败的系统级防御针对国内实际受端大电网，从系统层面提出具备工程可行性的换相失败防御技术。主要分为协调稳定控制和系统规划设计两条技术路线。

协调稳定控制是通过设计直流换相安全和系统稳定的协调控制方案，在交流频率协调和直流功率协调等方面实现优化，提高直流换相过程的安全裕度。文献[49]通过引入直流换相失败后的恢复能力指标 S_i、直流恢复对其他直流无功支撑的影响指标 F_i 和直流恢复紧迫性指标 N_i，定义直流恢复优先级指标 $R_i=N_iS_iF_i$，根据 R_i 由小到大，对各直流 CFPREV 控制器门槛值差异化取值，按优化顺序依次启动 CFPREV，可有效降低连续换相失败风险，降低换相失败对交流系统的功率冲击。文献[50]研究了电气距离相距较远的两个系统关联谐振，提出一种多回直流之间的协调控制策略，该策略消除了模式谐振现象，提高了系统动态稳定性。文献[51]对 MIDC 系统协调控制技术进行了综述，针对集中协调控制方法在实际工程应用中存在的问题，探讨了协调控制应用于 MIDC 系统所面临的技术问题和未来研究方向。

系统规划设计是研究多馈入系统电网拓扑，在基础网架拓扑上模拟不同的网架规划设计方案，综合考虑换相失败防御和稳定控制措施，研究电网结构对多直流馈入电网换相失败严重程度以及暂态稳定性的影响，提出具备防御能力的受端电网结构。南方电网公司结合直流输电新技术，综合考虑直流投运年限、落点附近负荷类型与密集程度、落点相互间电气耦合程度，探索了多直流馈入电网直流改造方案，提出了防御受端电网多直流换相失败的常规直流升级改造方法[52-54]。南方电网科学研究院综合考虑电网未来扩展趋势，研究了多直流馈入电网各类交流故障对交流和直流系统动态特性影响，从减小多直流同时换相失败的交流故障范围和无功电压稳定性角度出发，提出了考虑复杂安全稳定约束的交直流同步电网分区互联和动态无功优化配置技术，完成验证和效果评估[55-57]。

2.5 防御技术效果评估和仿真验证研究

为了适应换相失败研究的不同场景，现阶段的仿真手段是针对不同的研究目标，灵活地采用机电暂态建模，电磁暂态建模和机电-电磁暂态混合建模中的一种或几种，以求做到仿真规模和仿真精度的折中与平衡，这造成了目前换相失败防御效果仿真验证中评价标准的混乱。

随着高压直流输电系统电压等级、容量、数量的不断增大，其日趋复杂的动态行为进一步给多馈入直流系统模型及仿真带来了两个突出问题：(1)为了缩短仿真时间，目前一般采用基于平均值的连续模型对多端直流系统进行仿真研究。此类无法反映功率单元的充放电过程和换流器内部暂态过程，系统等效性和相似性不足。(2)系统和换流器由数千条控制光纤连接，各功率单元控制信号相互独立，难以采用常规直流串联等效的数字仿真方式进行实验，仅能采用全规模物理模拟仿真方法，但物理实验又无法达到全规模交直流混合电网等效模拟的要求。

因此，兼容实时数字仿真与动态物理仿真的优点，建立数字物理混合仿真系统用于换相失败防御技术效果评估，是未来多馈入直流系统仿真技术发展的主要趋势。在器件的物理等效方面，针对不同电压/功率等级晶闸管的非线性开关暂态特性差异，提出基于电容补偿、电压切换的组合电路动态等效方法，可以实现晶闸管开关暂态过程一致性的动态模拟；在换流器的物理等效方面，基于等时间常数原则，建立换流器的物理等效模拟相似判据，并采用集中参数电路代替分布参数电路的方式，目标在于实现换流器桥臂串联器件的物理等效模拟。

3 换相失败防御技术展望

多馈入高压直流输电系统是一个复杂系统。多馈入高压直流输电系统换相失败是一个在交流与直流系统间反复交替传播，并导致故障影响范围逐渐扩展的复杂多因素非线性动态过程。目前，单一工程和技术方法已不足以明显降低换相失败风险，未来主要是提出系统性解决方案。

3.1 多馈入高压直流输电系统标准场景

实际系统中换相失败案例分析固然有助于了解真实电网的换相失败过程，但孤立和偶然的案例无法用于归纳出可重复验证的理论机制，也无法用

于换相失败防御技术的标准化评价。在多馈入高压直流输电系统标准场景方面，亟需参考国内典型直流落点密集区域电网网架，提取多馈入高压直流输电系统特征参数。通过对电网拓扑内重要站点进行全面故障分析，统计并分析电网拓扑内不同故障时全网直流换相失败严重程度，并量化可反映换相失败严重程度的影响因子，最后构建多馈入高压直流输电系统标准场景，提出能对标国内实际受端大电网的系统规模与运行特性的标准模型。

多馈入高压直流输电系统标准模型研究的主要目标是：(1)完成不同系统参数和运行状态下单一类型换相失败的系统性分析；(2)实现不同防御技术在同一场景下的对比验证。

3.2　换流站级防御技术

外部支撑方面，面向未来大规模新能源接入的多馈入直流系统场景，可以利用换流站近区新能源站配置的电力电子装置参与换流站级控制，强化新型电源与受端电网交互作用，通过快速响应实现电力电子装置对直流系统的紧急功率支援，用于降低连续换相失败的发生概率。内部防御方面，基于对系统换相及恢复过程特定影响因子的特征，提出抵御直流输电系统换相失败的多维优化控制及功率快速恢复方法，减少单直流换相失败对交流系统有功无功冲击的持续时间与幅度，减少换相失败对系统带来的影响，进一步降低连续换相失败的发生概率。

3.3　换流器级防御技术

换相失败归根结底是换流器这种装置的固有缺陷，通过提出可控换相的新型换流器拓扑，研制出适用于高压及特高压工程并兼容新建和在运工程的新型换流阀，彻底解决由交流系统故障或多馈入直流耦合引发的换相失败问题，提高多馈入系统高比例新能源接纳能力。

3.4　系统级防御技术

从整个系统的角度寻找具备工程可行性的换相失败防御方法，主要分为系统规划设计和协调稳定控制两条技术路线。第 1 条技术路线，是从电网架构设计层面，提出防御多直流换相失败的交直流混联电网结构设计优化方法，形成防御受端电网多直流换相失败的常规直流升级改造和分区互联方案，缩小交流故障导致常规直流发生连续换相失败的范围；第 2 条技术路线，是从系统整体控制层面，提出基于多直流系统功率协调及混联电网安全稳定优化控制的换相失败防御方法，提升交直流混联电网的换相失败抵御能力。按照控制层级，第 2 条技术路线又分两种切入点：一个是以多馈入直流控保系统协调为切入点，充分考虑多馈入直流系统中不同直流间的电气耦合作用，研究通过对故障线路与非故障线路的直流传输功率进行协调控制以降低系统换相失败发生风险，进而提出基于多直流系统功率协调控制的换相失败防御方法。另一个是以系统稳定控制措施为切入点，以典型拓扑中各类故障量化分析结果为基础，研究多直流换相安全与电压安全的协调优化控制方法、多直流换相安全与功角暂态及振荡稳定的协调优化控制方法，建立多馈入交直流混联电网安全稳定综合量化评估体系与协调优化控制决策机制。

3.5　换相失败防御技术效果评价方法

基于多馈入高压直流输电系统标准场景，建立用于换相失败防御技术效果验证的仿真平台，才能对重要站点进行全面故障分析，模拟不同交直流故障时标准模型全域换相失败严重程度，研究换相失败过程特征评估指标。并针对不同的换相失败防御技术，提出归一化的效果评价方法，形成换相失败抵御效果测试方案，这样才能实现多种换相失败防御技术效果在统一物理场景下的可校验。

4　结论

本文主要从换流站级、换流器级及系统级 3 个层面对现有的换相失败防御技术进行了综述，并分 5 个方面对未来换相失败防御技术进行了展望，得到结论如下：

1）在运和新建直流工程大量采用 LCC 换流器形成了多馈入直流输电系统，单一防御技术已经不足以明显降低系统换相失败风险，未来的研究方向是提出综合性防御方案。

2）多馈入直流系统换相失败综合性防御方案以换流器级、换流站级、系统级 3 个层级的防御技术为主要架构，3 者互为嵌合又相互统一。

3）多馈入直流系统换相失败综合性防御方案效果的验证需要基于统一物理场景，通过归一化的效果评价方法，在具备标准意义的仿真平台进行可重复的校检。

参考文献　References

[1] 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.

[2] 孙志媛. 基于 EMTDC 的多馈入直流输电系统换相失败的研究[D]. 南宁：广西大学，2007.
SUN Zhiyuan. Research on commutation failure of multi-infeed DC transmission system based on EMTDC[D]. Nanning, China: Guangxi University, 2007.

[3] 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.

[4] 王 玲，文 俊，李亚男，等. 谐波对多馈入直流输电系统换相失败的影响[J]. 电工技术学报，2017，32(3)：27-34.
WANG Ling, WEN Jun, LI Yanan, et al. The harmonic effects on commutation failure of multi-infeed direct current transmission systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 27-34.

[5] 任 景，李兴源，金小明，等. 多馈入高压直流输电系统中逆变站滤波器投切引起的换相失败仿真研究[J]. 电网技术，2008，32(12)：17-22.
REN Jing, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Simulation study on commutation failure caused by switching ac filters of inverter stations in multi-infeed hvdc systems[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 17-22.

[6] CIGRE Working Group B4.41. Systems with multiple DC infeed[R]. Paris, France: CIGRE, 2008.

[7] 邵 瑶，汤 涌. 多馈入直流系统交互作用因子的影响因素分析[J]. 电网技术，2013，37(3)：794-799.
SHAO Yao, TANG Yong. Analysis of influencing factors of multi-infeed HVDC system interaction factor[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 794-799.

[8] 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.

[9] 肖 俊，李兴源，多馈入和多端交直流系统相互作用因子及其影响因素分析[J]. 电网技术，2014，38(1)：1-7.
XIAO Jun, LI Xingyuan. Analysis on multi-infeed interaction factor of multi-infeed AC/DC system and multi-terminal AC/DC system and its influencing factor[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 1-7.

[10] THIO C V, DAVIES J B, KENT K l. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.

[11] ZHANG L, DOFNAS L. A novel method to mitigateCommutation failures in HVDC systems[C]//International Conference on Power System Technology. [S.l.]: IEEE, 2002: 51-56.

[12] 陈树勇，李新年，余 军，等. 基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J]. 中国电机工程学报，2005，25(14)：1-6.
CHEN Shuyong, LI Xinnian, YU Jun, et al. A method based on the sin-cos components detection mitigates commutation failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14), 1-6.

[13] GUO C, LIU Y, ZHAO C, et al. Power component fault detection method and improved current order limiter control for commutation failure mitigation in HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1585-1593.

[14] 邹 亮，刘 涛，赵 彤，等. 基于阀电压或阀电流的 HVDC 换相失败故障诊断[J]. 电网技术，2014，38(12)：3453-3458.
ZOU Liang, LIU Tao, ZHAO Tong, et al. Diagnosis of commutation failure in HVDC transmission systems based on voltage or current of converter valve[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3453-3458.

[15] 王 钢，李志铿，黄 敏，等. HVDC 输电系统换相失败的故障合闸角影响机理[J]. 电力系统自动化，2010，34(4)：49-54+102.
WANG Gang, LI Zhikeng, HUANG Min, et a1. Influence of initial fault angle on commutation failure identification in a HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 49-54.

[16] 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. HVDC commutation failure analysis method considering the influence of DC current change and AC fault occurrence time[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1261-1267.

[17] 张艳霞，卢静怡，张富贺，等. 基于临界故障时刻的换相失败预测方法[J]. 电网技术，2021，45(10)：4066-4075.
ZHANG Yanxia, LU Jingyi, ZHANG Fuhe, et al. Commutation failure prediction considering critical fault moment[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4066-4075.

[18] 袁 阳，卫志农，王华伟，等. 基于直流电流预测控制的换相失败预防方法[J]. 电网技术，2014，38(3)：565-570.
YUAN Yang, WEI Zhinong, WANG Huawei, et al. A DC current predictive control based method to decrease probability of commutation failure[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 565-570.

[19] 高 楷，孙国强，卫志农，等. 基于直流电流模糊预测控制的换相失败预防策略[J]. 电网技术，2015，39(9)：2498-2504.
GAO Kai, SUN Guoqiang, WEI Zhinong, et al. A DC current fuzzy predictive control based strategy to decrease probability of commutation failure[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2498-2504.

[20] 汤 奕，郑晨一，王 玉，等. 考虑交直流无功交互特性的换相失败预测控制优化方法[J]. 电力系统自动化，2020，44(21)：50-57.
TANG Yi, ZHENG Chenyi, WANG Yu, et al. Optimization method for commutation failure prevention control considering AC/DC reactive power interaction characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 50-60.

[21] 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.
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.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 郭春义，李春华，刘羽超，等. 一种抑制传统直流输电连续换相失败的虚拟电阻电流限制控制方法[J]. 中国电机工程学报，2016，36(18)：4930-4937，5117.

GUO Chunyi, LI Chunhua, LIU Yuchao, et al. A DC current limitation control method based on virtual-resistance to mitigate the continuous commutation failure for conventional HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4930-4937, 5117.

[25] 陆翌，童凯，宁琳如，等. 基于虚拟电感的双馈入直流输电系统连续换相失败的抑制方法[J]. 电网技术，2017，41(5)：1503-1509.
LU Yi, TONG Kai, NING Linru, et al. A method mitigating continuous commutation failure for double-infeed HVDC system based on virtual inductor[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1503-1509.

[26] 刘　磊，林　圣，何正友. 基于虚拟换相面积缺乏量的 HVDC 系统连续换相失败抑制策略[J]. 中国电机工程学报，2018，38(18)：5361-5368.
LIU Lei, LIN Sheng, HE Zhengyou. A novel method based on virtual commutation area insufficient to mitigate the continuous commutation failure for HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5361-5368.

[27] 程帆，姚良忠，王志冰，等. 一种基于虚拟锁相电压的换相失败抑制策略[J]. 中国电机工程学报，2020，40(9)：2756-2766.
CHENG Fan, YAO Liangzhong, WANG Zhibing, et al. A commutation failure mitigation strategy based on virtual phase lock loop voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2756-2765.

[28] 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.

[29] 夏海涛，周小平，洪乐荣，等. 一种抑制后续换相失败的自适应电流偏差控制方法[J]. 中国电机工程学报，2019，39(15)：4345-4356.
XIA Haitao, ZHOU Xiaoping, HONG Lerong, et al. An adaptive current deviation control method for suppressing following commutation failures[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4345-4355.

[30] 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)：3159-3168.
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.

[31] 朱龙臻，牛　翀，王志冰，等. 一种抑制连续换相失败的关断角动态补偿控制方法[J]. 中国电机工程学报，2021，41(22)：7621-7631.
ZHU Longzhen, NIU Chong, WANG Zhibing, et al. An extinction angle dynamic compensation control method for suppressing continuous commutation failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7621-7630.

[32] 郑睿娜，汪娟娟，文兆新，等. 基于交流故障快速检测的高压直流换相失败抑制方法[J]. 电网技术，2022，46(3). 851-859.
ZHENG Ruina, WANG Juanjuan, WEN Zhaoxin, et al. A method based on fast fault detection of inverter-side AC system to suppress the commutation failure in HVDC system[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 851-859.

[33] 陈晓龙，齐晓情，李永丽，等. 整流侧交流系统故障引发逆变器换相失败的原因分析及抑制方法研究[J]. 电网技术，2023，47(2)：793-805.
CHEN Xiaolong, QI Xiaoqing, LI Yongli, et al. Research on cause analysis and suppression methods of inverter commutation failure caused by the AC system fault at rectifier side[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 793-805.

[34] 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.

[35] 张红丽，刘福锁，李　威. 动态无功补偿装置提高多馈入直流恢复的布点方法[J]. 电力系统自动化，2016，40(5)：133-138.
ZHANG Hongli, LIU Fusuo, LI Wei. Site selection for dynamic reactive power compensation and improvement of recovery from commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 133-138.

[36] 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]. 高电压技术，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.

[37] 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.

[38] 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.

[39] WANG Qiang, LI Tianran, TANG Xiaobo, et al. Study on the site selection for synchronous condenser responding to commutation failures of multi-infeed HVDC system[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 1413-1418.

[40] 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.

[41] 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.

[42] 郭春义，刘博，赵成勇. 增强型电容换相换流器直流输电系统的新型换相失败抑制协调控制方法[J]. 中国电机工程学报，2019，39(18)：5298-5307，5576.
GUO Chunyi, LIU Bo, ZHAO Chengyong. A novel coordinated control strategy to mitigate the commutation failure for enhanced capacitor commutated converter based HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5298-5307, 5576.

[43] 夏海涛，周小平，陈斌超，等. 抑制高压直流输电系统换相失败的可控串联电阻[J]. 电网技术，2023，47(6)：2539-2548.
XIA Haitao, ZHOU Xiaoping, CHEN Binchao, et al. Controllable series resistor for commutation failure mitigation in LCC-HVDC system[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2539-2548.

[44] 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): 811-819.

[45] 李春华，孙宝奎，赵成勇，等. 半控型 H 桥子模块提高 HVDC 换相失败免疫力的机理[J]. 中国电机工程学报，2016，36(9)：2419-2427.
LI Chunhua, SUN Baokui, ZHAO Chengyong, et al. Mechanism of semi-controlled H-bridge sub-module to improve commutation failure immunity of HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2419-2427.

[46] 展瑞琦，叶蕴霞，夏嘉航，等. 混合串联换流阀抑制换相失败的作用原理及动态均压电路参数设计[J]. 中国电机工程学报，2022，42(9)：3385-3398.
ZHAN Ruiqi, YE Yunxia, XIA Jiahang, et al. The action principle of hybrid series converter valve against commutation failure and the design of dynamic voltage equalizing circuit parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3385-3397.

[47] 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，2023，43(5)：1940-1950.
GAO Chong, HE Zhiyuan, YANG Jun, et al. A novel controllable line commutated converter topology and control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1940-1950.

[48] 展瑞琦，叶蕴霞，夏嘉航，等. 半控和全控器件串联的耦合关断模型及协调配合策略[J]. 中国电机工程学报，2023，43(10)：3949-3962.
ZHAN Ruiqi, YE Yunxia, XIA Jiahang, et al. Coupled Turn-off Model and Coordination Strategy of Semi-controlled and Fully-controlled Devices in Series[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3949-3962.

[49] 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)：1053-1069.
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): 1053-1069.

[50] 李　鹏，吴小辰，张　尧，等. 南方电网多直流调制控制的交互影响与协调[J]. 电力系统自动化，2007，31(21)：90-93.
LI Peng, WU Xiaochen, ZHANG Yao, et al. Interaction and coordination of modulation controllers of multi-infeed HVDC in CSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 90-93.

[51] 郭小江，马世英，卜广全，等. 多馈入直流系统协调控制综述[J]. 电力系统自动化，2009，33(，3)：9-15.
GUO Xiaojiang, MA Shiying, BU Guangquan, et al. Survey on coordinated control of multi-infeed DC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 9-15.

[52] 李新年，陈树勇，庞广恒，等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化，2015，39(6)：134-140.
LI Xinnian, CHEN Shuyong, PANG Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery for East China multi-infeed high-voltage direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 134-140.

[53] 马　静，刘天琪，李兴源，等. 基于多代理的多馈入直流输电换相失败协调预防研究[J]. 电工电能新技术，2015，34(3)：61-65+80.
MA Jing, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Method of coordinated prevention of commutation failure based on multi-agent in MIDC[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(3): 61-65, 80.

[54] 刘华钢，刘　兵，陈　钊，等. 跨区多条直流连续多次、同时换相失败冲击及抑制措施[J]. 高电压技术，2016，42(10)：3315-3320.
LIU Huagang, LIU Bing, CHEN Zhao, et al. Impact and suppression measures of repeated and simultaneous commutation failure in multiple HVDC power transmission system between two regional power grids[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3315-3320.

[55] 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.

[56] 朱泽翔，李诗旸，张建新，等. 南方电网多直流协调稳定控制系统实现与验证[J]. 南方电网技术，2020，14(12)：10-16.
ZHU Zexiang, LI Shiyang, ZHANG Jianxin, et al. Implement and verification of multi-DC coordinated stability control system in China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 10-16.

[57] 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.



贺之渊(通信作者)
1977—，男，博士，教授级高工
研究方向为柔性直流输电和大功率电力电子试验技术研发及应用
E-mail: hezhiyuan@geiri.sgcc.com.cn

HE Zhiyuan
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-04-09　修回日期　2024-06-09　　编辑　陈　蔓