

多馈入直流输电系统换相失败研究综述

王嘉铭¹, 余浩², 陈武晖^{1*}

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏省 镇江市 212013;

2. 广东电网发展研究院有限责任公司, 广东省 广州市 510080)

Research on Commutation Failure in Multi-feed HVDC Transmission System

WANG Jiaming¹, YU Hao², CHEN Wuhui^{1*}

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu Province, China;

2. Guangdong Power Grid Development Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, Guangdong Province, China)

摘要: 常规高压直流输电系统存在换相失败的风险。对于多馈入直流输电系统而言, 由于各交直流系统间的互相作用影响, 单个直流回路发生换相失败可能会引起多条直流回路同时或者相继发生换相失败, 给电网的安全稳定运行带来威胁。从换相失败的机理出发, 引入多馈入交互作用因子来分析多馈入直流输电系统发生换相失败的影响因素和判据, 总结了目前抑制换相失败的手段和策略, 最后指出了在数学模型、换相失败耦合机理和抑制措施方面值得更深入的探讨和研究。

关键词: 多馈入直流输电系统; 换相失败; 多馈入交互作用因子

ABSTRACT: HVDC transmission systems present a risk of commutation failure. For multi-infeed HVDC transmission systems, due to the interaction between AC and DC systems, the commutation failure of a single inverter station may cause multiple inverter stations to fail at the same time or in succession, which poses a threat to the safe and stable operation of the power grid. Based on the mechanism of commutation failure, the multi-infeed interaction factor was introduced to analyze the influencing factors and criteria of commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems, and the current methods and strategies for suppressing commutation failure were summarized. Finally, it pointed out that the mathematical model, the commutation failure coupling mechanism and the suppression measures were worthy of further discussion and research.

KEY WORDS: multi-infeed HVDC transmission system; commutation failure; multi-infeed interaction factor

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0105300)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China(2016YFE0105300).

0 引言

随着我国直流输电技术的发展以及“西电东送、南电北送”战略工程的落实, 华东电网和南方电网已成为我国最大的多馈入直流输电系统。截至 2019 年年底, 已有 11 回直流输电线路馈入华东电网^[1], 另有 3 回在建中。根据规划, 在 2020 年广东电网将有 9 回或者更多的直流落点^[2]。届时, 中国将形成世界上容量最大、运行最复杂的多馈入直流输电系统。

换相失败是直流输电系统最常见的故障之一, 仅 2017 年 1—9 月, 我国华东地区因交流故障而导致的换相失败就有 20 次^[3]。换相失败会导致直流电压下降和直流电流上升, 当故障严重或者控制不得当时, 可能会造成直流闭锁而中断直流功率的传输^[4], 最终会危害到整个电网的稳定运行。多馈入直流输电系统相较于单馈入直流输电系统具有更大的容量和更灵活的运行方式, 由于各直流线路间的相互耦合, 以及交直流系统间的相互作用, 当交流系统发生故障时, 可能会引起多条直流线路发生同时或者相继换相失败, 给电网的安全稳定运行带来了新的问题^[5]。

换相失败问题的研究较为复杂, 本文根据多馈入直流输电换相失败的研究现状, 从换相失败的机理出发, 阐述了影响换相失败的因素, 总结换相失败的判据, 并讨论了换相失败的抑制措施和恢复策略, 最后指出了研究多馈入直流输电系统尚待解决的问题。

1 换相失败的机理

在换流器中，退出导通的阀在反向电压作用的时间过短，以至于退出换相的阀臂未能恢复阻断正向电压的能力，或者在反向电压期间换相过程未进行完毕，则在阀电压变为正向时，预定退出导通的阀重新导通，准备导通的阀被重新关闭，这个过程称为换相失败^[6]。

图1为6脉动逆变器原理图，以VT₁换相到VT₃为例，在P时刻给予VT₃触发电流，VT₃导通，由VT₁向VT₃换相，换相期间，VT₁电流逐渐减小，VT₃电流逐渐增加。

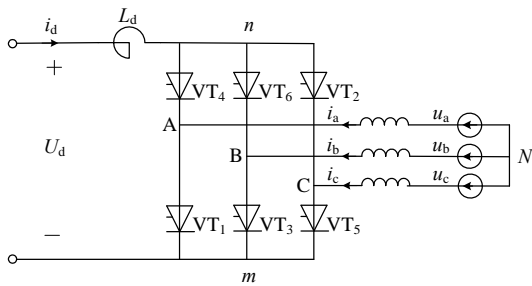


图1 6脉动逆变器原理图

Fig.1 Schematic of 6 pulse inverter

1) 若关断角过小，VT₁在承受正向电压前依旧残余载流子，VT₁没有完全关断，由于其承受反向电压的时间过短，VT₁没有恢复阻断正向电压的能力，则在其承受正向电压时，VT₁又重新导通，使得VT₁向VT₃换相失败。

2) 若VT₁在承受反向电压期间换相并没有结束，即VT₁电流并没有减小到其维持电流以下，则当VT₁承受正向电压时，VT₁继续导通，VT₃由于承受反向电压而关断，导致VT₁向VT₃换相失败。

给予VT₄触发电流，VT₂向VT₄换相，VT₄导通，此时VT₁和VT₄同时导通，则A相发生短路，导致直流侧短路，无法传输直流功率。之后给予VT₅触发电流，由于VT₅承受反向电压，VT₅不能导通。接着给予VT₆触发脉冲，VT₄向VT₆换相，此时直流侧电流恢复正常。这是一次换相失败，VT₁导通了一个周波，VT₂到VT₄再到VT₆换相正常。

上述1)的产生机理是与晶闸管的物理结构和动态特性有关。晶闸管的关断有一定的时延，晶

间管中载流子在反向电压作用下，通过迁移、扩散和复合重新建立电势壁垒^[7]，直到完全恢复阻断能力。但若晶闸管在关断的过程中被重新施加正向电压，即使门极没有触发电流，晶间管中仍有正向电流流过而导通^[8]，从而发生换相失败。

综上所述，关断角不能太小，否则会导致换相失败。一般认为， $\gamma < \gamma_{min}$ 则会发生换相失败。 γ_{min} 为晶闸管固有的临界关断角，为载流子复合开关建立P-N结阻挡层，以恢复正向阻断能力所必需的时间对应的电角度^[9]，一般取 $\gamma_{min}=7^\circ$ 。换相失败多发生在逆变器中，整流器很少发生换相失败，因为整流侧换流阀在直流电流关断后很长一段时间内均承受反向电压，不存在再导通的物理条件，只有当触发电路发生故障时整流器才会发生换相失败。

2 影响换相失败的因素

多馈入直流输电系统模型如图2所示，各交流系统之间通过耦合阻抗^[10]来表示。

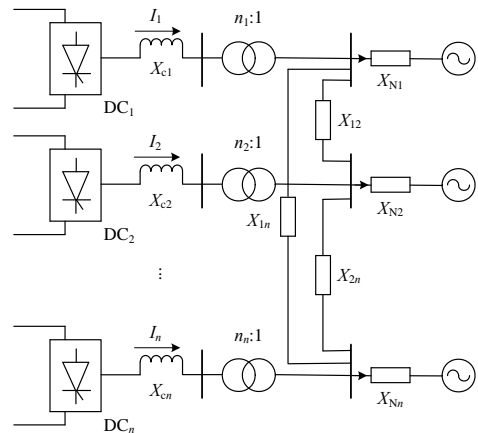


图2 多馈入直流输电系统模型

Fig.2 Model of multi-infeed HVDC system

逆变站n的关断角为

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

式中： n_n 为换流变压器变比； I_n 为直流电流； X_n 为换流阻抗 X_{cn} 和交流系统阻抗 X_{Nn} 归算到换流器内的等效换相阻抗； β_n 为超前触发角； U_n 为逆变站n换流母线上的电压，此电压还受其他逆变站换流母线的电压和与其他逆变站之间的耦合阻抗影响。 U_n 应表示为

$$U_n = \left(\frac{E_n}{X_{Nn}} + \frac{U_1}{X_{1n}} + \frac{U_2}{X_{2n}} + \dots + \frac{U_{n-1}}{X_{(n-1)n}} - \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_n \right) \cdot \left(\frac{1}{X_{Nn}} + \frac{1}{X_{1n}} + \frac{1}{X_{2n}} + \dots + \frac{1}{X_{(n-1)n}} \right)^{-1} \quad (2)$$

换相失败的本质是 $\gamma < \gamma_{\min}^{[11]}$ 。由式(1)和(2)可看出,影响多馈入直流输电系统换相失败的因素有本地的换流母线电压、换流变压器变比、直流电流、换相电抗、超前触发角、交流系统等值阻抗,还有与之耦合的其他逆变站换流母线电压和耦合阻抗等。

换相失败的最主要原因是换流母线电压的跌落^[12]。由于各个换流母线电压通过逆变器耦合会相互影响,所以为了方便研究多馈入直流输电系统各个换流站之间电压的相互作用,CIGRE WG B4 提出了多馈入交互作用因子(multi-infeed interaction factor, MIIF),其定义为:当换流母线 i 投入对称三相电抗器,使得该母线上的电压下降 1% 时,换流母线 j 的电压变化率为

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

式中: ΔU_j 为换流母线 j 的电压变化量; U_{i0} 为投入电抗器前的母线电压。

显然 $0 \leq M_{\text{IIF}ji} \leq 1$, $M_{\text{IIF}ji}$ 越大,则换流站 i 与换流站 j 间的相互作用越强^[15]。多馈入交互作用因子 MIIF 可以表示逆变站之间的电气耦合程度,研究影响 MIIF 的因素,即可研究逆变站之间是否会发生同时或者相继换相失败。文献[13-14]也指出,增加交互作用因子,会增加同时换相失败的风险。

文献[15]得出结论:直流落点间的联系阻抗 Z_{ij} 越小,交互作用因子 $M_{\text{IIF}ji}$ 、 $M_{\text{IIF}ij}$ 越大,即直流落点间的电气距离越近,直流线路间的相互作用就越强,越容易发生同时换相失败;交流系统等值阻抗 Z_{nj} 越大, $M_{\text{IIF}ji}$ 越大,即线路 j 对应的交流系统强度越小,其他直流线路对线路 j 的影响就越大。文献[16]分析了直流控制方式对交互作用因子的影响,得出结论:当直流线路采用定电流或定直流电压控制方式时,电压间的相互作用弱;当直流线路采用定功率或定关断角控制方式时,电压间的相互作用强。文献[17]分析了交流

系统负荷特性对相互作用因子的影响,得出结论:有功负荷越大,相互作用因子就越小,无功负荷越大,相互作用因子就越大;当系统采用恒阻抗负荷时,相互作用因子最小,采用恒电流负荷时次之,采用恒功率负荷时,相互作用因子最大。

在多馈入直流输电系统中,由于传统的单馈入短路比无法考虑到各个直流回路之间的互相影响,在 MIIF 的基础上,综合考虑交流系统强度和各个逆变站间的电气耦合联系,CIGRE 工作组提出了多馈入短路比的概念。该定义与 MIIF、各个回路的直流功率等因素有关,表述了多馈入直流输电系统中交直流相互作用的强度。通过研究表明,增加多馈入短路比能降低本地换相失败的风险^[13]。

交流系统故障是引起换相失败的重要原因,如三相接地故障导致的换流母线电压幅值降落,或交流系统不对称故障导致的电压相角前移。文献[18]通过换相电压时间面积来表述这 2 种现象导致的关断角变小,从而引起换相失败。另外,谐波引起的电压畸变也是影响逆变器换相失败的原因。换流站滤波器的投切方式不当可能会引起换流站之间谐波交互影响,进而引起谐波不稳定,接着造成换流器交流母线电压畸变,使系统发生换相失败^[19]。文献[20-22]通过分析得出结论:电压波形中的低次谐波导致的电压畸变是多馈入直流输电系统发生后续换相失败和异常换相失败的根本原因,且谐波对逆变器换相失败的影响主要通过改变换相电压的幅值和相位。

3 换相失败的判据

对于逆变器内部故障,即触发电路工作不可靠引起的换相失败,可通过检测叠加于直流电流中的 50 Hz 交流分量是否超过其整定值,或通过换流阀出口侧的直流电流 I_d 与换流变压器阀侧的交流电流经整流后的数值 I_a 进行比较来判断^[23]。通过分析换流变压器阀侧电流波形即可准确判别出换相失败,结合换流母线电压还可精确判断出发生换相失败的换流阀^[24],此方法也被应用在电磁暂态仿真中^[25-26]。

对于换流阀外电路故障引起的换相失败,常用的判别方法主要有关断角判断法和最小电压降

落法。关断角判断法是利用换相失败的本质来判断的，通过比较换流器关断角和引起换相失败的临界关断角的大小来判断是否发生换相失败。此方法主要应用在电磁暂态仿真中，用于晶闸管建模仿真研究。最小电压降落法是通过比较换相电压降落与引起换相失败的临界电压降落大小来判断是否发生换相失败。文献[27]推导出了发生三相交流故障下和不对称故障情况下的电压降落公式 ΔU ，并计算出其临界电压降落数值。此方法多用于机电暂态仿真中，但准稳态模型大多假设交流系统是无穷大的，且此方法忽略电压畸变造成的影响，所以具有一定局限性。文献[28]提出了一种考虑不对称故障时多馈入直流系统换相失败的快速识别判据，该判据基于准稳态模型，不仅考虑到故障时换相电压幅值降低的问题，也考虑到不对称故障时负序电压分量造成的换相电压角度偏移问题，提高了直流系统换相失败的判别准确度。

此外，换相电压时间面积方法在换相失败的研究中也较为广泛。换相电压时间面积指的是换相期间交流线电压与时间轴所围成的面积，若交流系统故障后实际所能提供的换相面积小于换流器完成换相过程所需要的换相面积，则换流器会因为关断角过小而造成换相失败，以此来作为换相失败的判据^[29-30]。

为了评估换相失败的风险，文献[31]提出了换相失败免疫指标(commutation failure immunity index, CFII)来衡量系统发生换相失败的免疫力。该指标与线电压额定值、换相失败临界阻抗、直流额定功率有关，该指标越小，说明系统抵御换相失败的免疫力越弱，越容易发生换相失败，此指标多用于仿真验算中。

在多馈入直流输电系统中，可用临界耦合导纳来判断换相失败的故障类型。文献[32]提出了弱耦合临界导纳 Y_{wc} 、弱交互作用因子 M_w 、强耦合临界导纳 Y_{sc} 、强交互作用因子 M_s 。分析发现，当耦合导纳小于 Y_{wc} 时，交互作用因子MIIF较小，逆变站之间相互作用较弱，本地逆变站故障不会引起远端逆变站发生换相失败；当耦合阻抗大于 Y_{sc} 时，交互作用因子MIIF较大，逆变站

之间联系较强，会同时发生换相失败，且同时恢复；当耦合阻抗介于 Y_{wc} 和 Y_{sc} 之间时，逆变站之间会互相引发换相失败，但恢复情况复杂，远端逆变站会出现相继换相失败，本地逆变站会一次性恢复^[32]。

目前多馈入直流输电系统换相失败风险的评估方法大多是借助暂态仿真工具进行扫描计算，此方法计算量大，耗时长，且不能满足系统运行时灵活多变的需求，难以用来快速判别换相失败。针对此问题，文献[33-37]从系统静态电压的稳态特性出发，基于节点阻抗矩阵、电压相互作用因子等指标来表示多馈入直流系统各母线电压间的相互耦合作用，推导出同时换相失败的判据。

4 换相失败的抑制措施

换相失败会导致直流电压下降、直流电流上升、直流功率下降，严重时可能会造成直流侧闭锁。在多馈入直流输电系统中，若两直流回路的电气距离较近，可能会造成同时或者相继换相失败，给交直流系统的稳定性带来危险。因此，采取适当的预防手段来避免或者减少换相失败的发生及合理的控制策略来防止相继换相失败的发生非常有必要。

4.1 控制策略

1) 提前触发脉冲控制。

由式(1)可看出，换相失败的根本原因是关断角过小，则可通过增加 β 或者 γ 的整定值来降低发生换相失败的概率，但是此方法会减少系统的传输容量、增大换流器消耗的无功功率，因此该方法是以牺牲经济性为代价的。为了解决这个问题，提出了提前触发脉冲的控制方法。当系统发生交流故障时，控制模块检测此故障是否会引起换相失败，把检测值减去其阈值然后转化为相应的角度，减小触发角 α ，从而提前触发脉冲，维持了换相裕度，避免换相失败。此方法既增大了 γ ，又保证了系统的经济性，因此是现在高压直流输电系统中常用的控制策略。

换相失败的预测技术是此控制方式的核心。文献[38]提出了换相失败预防(commutation failure prevention, CFPREV)控制模块，该模块通

过检测零序电压的大小来判断单相故障发生与否,检测三相电压通过 $abc-\alpha\beta$ 变换得到的电压旋转矢量的幅值大小来判断三相故障的发生与否。文献[39]研究发现零序检测的速度受故障时刻影响,在电压过零时动作较慢,为了解决此问题,在文献[38]的基础上增加了 $\sin-\cos$ 分量检测法判别的换相失败预测(commutation failure prediction, CFPRED)控制模块。 $\sin-\cos$ 检测法在电压过零附近的动作快于零序电压检测法,且 $\sin-\cos$ 分量也可以检测三相交流故障,因此可以和 $abc-\alpha\beta$ 检测互为备用。文献[40]提出了一种功率分量检测法(power component detection, PCD),它通过将单相和三相接地故障下电压的零序、 $\alpha\beta$ 分量与电流的零序、 $\alpha\beta$ 分量分别相乘,得到功率的零序分量和 $\alpha\beta$ 分量。PCD 方法以功率分量检测交流故障,并以电压和电流分量作为附加判断标准,对检测单相和三相故障更敏感,比单独采用电压分量检测方法更可靠。

但是,在换流母线电压严重下降时,光靠提前触发脉冲控制不能一定保证换相成功,文献[41]基于 CFPREV,提出了一种基于直流电流预测控制方法抑制换相失败。此方法在检测到交流系统故障时,除了会相应地减小触发角 α ,还会通过整流站电流控制器减小直流电流,恢复换流母线电压,协助降低换流器发生换相失败的概率。另外,文献[42-45]引入了模糊控制器,通过基于自适应的模糊控制方法,根据不同的故障情况选择最优的控制模式,输出触发角的提前量和相应的直流电流预测值,降低逆变器换相失败的概率。

2) 低压限流控制。

低压限流单元(voltage dependent current order limiter, VDCOL)主要作用是在系统交流电压跌落到一定值后,反应到换流器直流侧直流电压下降时,强制性地减小直流电流指令值,使得在系统故障以及换相失败恢复期间以低电压小电流的方式运行,减小换流器直流功率以及对交流系统的无功需求,降低多直流回路间的相互影响,帮助直流系统从故障中快速恢复^[46]。

换流站之间的协调控制是系统发生故障时能否保证系统稳定性的重要因素^[47]。在多馈入直流

输电系统中,主要采用 VDCOL 控制使发生换相失败的直流回路协调恢复,减少回路间的相互影响,防止后续的换相失败。常规的 VDCOL 根据交流或者直流电压来调节直流电流指令,电流指令随着电压呈线性变化,由于电压故障检测具有一定滞后性和延迟性,直流电流往往不能迅速减小,不利于抑制首次换相失败的发生和换流母线电压的快速恢复。因此,可从改进直流电流的动态变化特性出发,灵活地调整直流电压和电流的变化,从而优化 VDCOL 的控制方法。文献[48]提出了一种电流指令速动的控制方法,结合功率分量检测法,当检测到交流故障时,迅速地减小电流指令,提高了直流电流的响应速度,帮助换相成功。文献[49]提出一种虚拟电阻电流限制的控制方法,此方法将考虑虚拟电阻后的电压作为 VDCOL 的输入,反映了故障情况及系统恢复过程中直流电流的动态变化特征,有效地抑制了系统发生连续换相失败。文献[50-52]设计了变斜率 VDCOL 控制器,将常规的电压电流线性关系的恢复特性改进为变速率的恢复特性,在恢复过程中根据不同的电压水平设置成不同的电流恢复速率,对电流实行了动态调节,能有效地抑制后续的换相失败及改善系统的恢复性能。

4.2 硬件设备

1) 无功补偿装置。

无功补偿装置用来补偿直流输电系统换流器所需的无功功率,抑制了由于交流母线电压严重下降时引起的换相失败。应当根据不同交流系统的强度配置不同类型的无功补偿设备。当与强交流系统相连时,可装设电容器和交流滤波器满足换流器的无功需求,但其调节速度较慢,且投切时会导致换流母线电压暂态波动。当与弱交流系统相连时,可考虑安装静止无功补偿装置。常用的设备有静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)和同步调相机。

SVC 损耗少、可靠性高、调节速度快,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,是提高直流输电系统故障后的恢复能力及稳定交流系统电压的有效手段。

STATCOM 比 SVC 更灵活,响应速度、运行范围宽。由于 STATCOM 的动态性能好,能快速控制无功功率,它可以有效抑制交流母线电压振荡、稳定系统暂态电压^[53],降低由于电压波动而引起的换相失败概率。文献[54]考虑投入 SVC 和 STATCOM 2 种动态无功补偿装置,提出了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、布点和容量,更好地降低了多馈入直流输电系统中多回直流同时发生换相失败的风险。

与 SVC 和 STATCOM 等电力电子装置相比,同步调相机既能够为系统提供短路容量,增强受端交流系统强度,又具有更好的无功出力特性,抑制了系统暂态过电压和多回直流同时发生换相失败的概率,提高了交流系统的稳定性^[55]。同步调相机多用于连接弱交流系统的逆变站,逆变侧交流系统强度越弱,同步调相机对换相失败的影响效果越明显^[56]。国外已有多个国家通过在直流换流站装设同步调相机来提高系统稳定性。根据国家电网公司规划,在“十三五”期间,将在多回特高压直流的送、受端加装同步调相机^[57]。

2) 直流限制器。

平波电抗器为早期常用的直流限制器,它可以有效地限制暂态直流电流的上升。但是由于考虑到响应速度等动态调节特性,采用的电抗不能太大,无法满足日益增长的电力系统短路容量的需求,所以平波电抗器对于抑制直流电流的能力有限^[58]。

随着新材料和电力电子技术的发展,涌现出了许多新型的直流限流器,主要包括超导限流器和电力电子限流器。

超导限流器利用本身的高速动态响应特性,当电力系统正常运行时,超导体的电阻几乎为零,对系统正常运行时无影响;当系统发生短路故障时,超导体表现为高电阻,可以迅速地限制短路电流。但是由于超导限流器的技术不太成熟、造价昂贵,所以目前没有大规模应用于实际工程。

电力电子限流器又叫固态限流器。它利用电力电子期间固态开关的特性,可以实现限流阻抗的快速投切,不仅限制了短路故障电流值,还减

少了断开引起的暂态过电压。随着电力电子器件性能的提高,不同拓扑结构的电力电子限流器也在不断地深入研究中。

4.3 新型换流器

1) 电压源换流器。

传统的高压直流输电技术采用的是晶闸管,它可以控制换流阀的开通,但不能控制阀的关断。当换流器所连接的交流系统较弱时,或者当交流系统受到扰动时,不能向换流器提供足够的换相电流和可靠的换相电压,换流器容易发生换相失败。采用柔性直流输电技术可以减小甚至避免换相失败的发生。电压源换流器(voltage source converter, VSC)以全控器件代替晶闸管,采用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)技术,它可以不依赖交流系统独自运行,实现有功和无功功率的独立控制,必要时还可以为交流系统提供无功功率。近年来随着混合高压直流输电系统的发展,无论是何种多馈入拓扑结构,都可以利用 VSC 的无功调节能力,动态地调节电网换相型换流器(line commutated converter, LCC)交流母线,来降低 LCC 换相失败的概率。

2) 电容换相换流器。

电容换相换流器是在常规的 LCC 换流阀和换流变压器之间串联了一个电容,由此串联电容的端电压会叠加于原来的换相电压上。文献[59]通过证明得知,叠加了一个串联电容的附加电压后,换流器的换相电压会滞后于交流母线电压一个角度 θ 。因此换流器会有一个足够大的关断角,来保证退出导通的阀臂在反向电压的作用下有足够的恢复时间来恢复阻断正向电压的能力,保证换相的正常进行,减少发生换相失败的概率。

5 多馈入直流输电系统换相失败亟待研究的问题

5.1 数学模型问题

采用电磁暂态仿真,可采用详细模型对系统的换相失败进行准确的研究,但是由于电磁暂态仿真的运行时间过长,且仿真规模也受到限制,难以对大规模交直流系统采用详细模型进行换相失败的研究。随着新能源的发展,交直流混合电

网有着强非线性、强复杂性的特征,而机电暂态仿真中的换流器模型都是基于准稳态理论推导出的,并不适用于系统发生不对称故障的情况,也很难反映交流电压幅值、对称性和谐波含量对换流器换相失败的影响,因此难以用于如今新能源系统中换相失败的暂态特性分析。因此,如何将基于详细模型的电磁暂态仿真和基于准稳态模型的机电暂态仿真联系起来,建立一个既能详细地分析换流器换相过程的暂态特性,又能适用于大规模新能源交直流混合电网的仿真速度和规模的精确而又完善的数学模型,是多馈入直流输电系统换相失败研究的重点和难点。

5.2 换相失败耦合机理问题

基于 LCC 的单馈入直流输电系统换相失败的机理分析已比较清楚,多馈入直流输电系统中影响同时换相失败的因素也有初步的研究。但是随着柔性直流输电技术的发展,电网中出现了 VSC 等多种电力电子装置,由于多馈入混合直流输电系统的强非线性特征,导致传统的各个直流回路间的相互影响分析不再全部适用。新能源电力电子装置具有不同的暂态特性,使得导致多直流回路发生换相失败的耦合机理及影响因素变得复杂。因此,研究新能源电力电子设备对换流器的影响过程、交直流混联电力系统的换相失败耦合机理及暂态传递特性,是如今尚待解决的难点之一。

5.3 换相失败的抑制手段问题

目前换相失败的抑制措施较多。当单一直流回路发生换相失败时,如何抑制其他直流回路发生相继换相失败;发生同时换相失败后如何快速依次恢复多个逆变站的直流功率;发生换相失败后,若直流闭锁反应到交流线路上时,会引起交流系统电压和功角振荡,如何维持交流电网稳定。对于这些问题,随着自控技术和电力电子技术的发展,新型的抑制措施应逐步完善和突破。从优化控制策略的角度出发,可从协调优化目标、进行分布式控制方面考虑;从硬件器件的角度出发,近年来基于电力电子器件提出对传统换流器的拓扑进行改造,提高了换相失败的免疫力,值得深入研究。

6 结论

相比于单馈入直流输电系统而言,多馈入直流输电系统更灵活,对多馈入直流输电系统换相失败的研究对于电网的安全稳定运行具有重大的意义。从换相失败的机理出发,讨论了多馈入直流输电系统换相失败的影响因素、判据及抑制措施等,得出以下结论:

1)引起换相失败的根本原因是逆变器关断角过小,而影响多馈入直流输电系统换相失败的主要因素有:多馈入直流交互作用因子、多馈入短路比、换流母线电压、交流系统强度、耦合阻抗、谐波等。

2)抑制换相失败的措施主要从控制策略、硬件设备、新型换流器 3 方面入手。常用的控制策略有提前触发脉冲控制和低压限流控制。这些措施在换相失败的预防、避免相继换相失败及换相失败后的协调恢复方面都有良好的应用。

3)多馈入直流输电系统更为复杂,而其数学模型、换相失败耦合机理的研究仍需进一步完善。随着电力电子技术和控制技术的发展,新型换流器的拓扑结构不断升级,换相失败抑制措施上的改进和创新也是未来探索的方向。

参考文献

- [1] 钱君霞, 罗建裕, 江叶峰, 等. 适应特高压电网运行的江苏源网荷毫秒级精准切负荷系统深化建设[J]. 中国电力, 2018, 51(11): 104-109.
Qian J X, Luo J Y, Jiang Y F, et al. Deepening construction of Jiangsu source-network-load millisecond-level precise load control system suitable for UHV power grid operation[J]. Electric Power, 2018, 51(11): 104-109.
- [2] 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 H, Zhu J, Li Y H, 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.
- [3] 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 Y, Zheng C Y. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 499-513.
- [4] 陆翌, 刘博, 童凯, 等. 混合双馈入直流系统中 VSC-HVDC 对 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的影响[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(9): 1-7.
- Lu Y, Liu B, Tong K, et al. Impact of VSC-HVDC on the commutation failure immunity of LCC-HVDC in dual-infeed hybrid HVDC system[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(9): 1-7.
- [5] 段锐敏, 闫涵, 文俊, 等. 混合直流异步联网系统建模与仿真分析[J]. 分布式能源, 2017, 2(6): 52-58.
- Duan R, Yan H, Wen J, et al. Modeling and simulation analysis of hybrid DC asynchronous interconnection system, Distributed Energy, 2017, 2(6): 52-58.
- [6] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46.
- Lin L X, Zhang Y, Zhong Q, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46.
- [7] 吕明超. 多馈入直流输电系统换相失败研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- Lü M C. Commutation failure research in multi-infeed HVDC systems[D]. Jinan, China: Shandong University, 2016.
- [8] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- Wang Z A, Liu J J. Power Electronics Technology [M]. Beijing, China: Mechanical Industry Press, 2009.
- [9] 袁阳, 卫志农, 雷霄, 等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147.
- Yuan Y, Wei Z N, Lei X, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.
- [10] 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 P, Lin W F, Sun H D, 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.
- [11] 项玲, 郑建勇, 胡敏强. 多端和多馈入直流输电系统中换相失败的研究[J]. 电力系统自动化, 2005(11): 29-33.
- Xiang L, Zheng J Y, Hu M Q. Study on commutation failure in MTDC and MIDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 29-33.
- [12] 肖俊, 李兴源, 杨小兵. 多馈入直流系统换流母线电压之间的相互影响及其同时换相失败的研究[J]. 四川电力技术, 2009, 32(4): 11-15.
- Xiao J, Li X Y, Yang X B. Study on voltage interaction among converter buses and simultaneous commutation failure in multi-infeed direct current system[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009, 32(4): 11-15.
- [13] 刘建, 李兴源, 傅孝韬, 等. 多馈入短路比及多馈入交互作用因子与换相失败的关系[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 20-25.
- Liu J, Li X Y, Fu X T, et al. Relationship of multi-infeed short circuit ratio and multi-infeed interaction factor with commutation failure[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 20-25.
- [14] Rahimi E, Gole A M, Davies J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 26(1): 378-384.
- [15] 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 Y, Tang Y. Analysis of influencing factors of multi-infeed HVDC system interaction factor[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 794-799.
- [16] 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 X Y, Han M X, Liu C R. Impact of control modes on voltage interaction between multi-infeed AC-DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 58-63.
- [17] 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 J, Li X Y. 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.
- [18] 孙志媛, 梁小冰, 孙艳. 基于 EMTDC 的多馈入直流输电系统仿真研究[J]. 电网技术, 2006(S2): 295-298.
- Sun Z Y, Liang X B, Sun Y. Simulation study of multi-infeed HVDC system based on EMTDC[J]. Power

- System Technology, 2006, 30(S2): 295-298.
- [19] 任景, 李兴源, 金小明, 等. 多馈入高压直流输电系统中逆变器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 J, Li X Y, Jin X M, et al. Simulation study on commutation failure caused by switching AC filters of inverter stations in multi-infeed HVDC system[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 17-22.
- [20] 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 T, Lü M C, Lou J, et al. Analysis on potential anomalous commutation failure in multi-in feed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 705-711.
- [21] 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 F, Liu T Q, Zhou S J, et al. Mechanism and quantitative analysis method for HVDC commutation failure resulting from harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4888-4894.
- [22] 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 L, Wen J, Li Y N, 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.
- [23] 陈红军. 高压直流输电系统故障及控制策略[J]. 华中电力, 2001(5): 5-8.
- Chen H J. HVDC transmission system faults and its control tactics[J]. Central China Electric Power, 2001, 14(5): 5-8.
- [24] 李新年, 刘耀, 朱艺颖, 等. 华北电网直流多馈入系统动态特性实时仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 75-80.
- Li X N, Liu Y, Zhu Y Y, et al. Real-time simulation of dynamic performance of multi-infeed UHVDC transmission system to be connected to North China power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 75-80.
- [25] 李新年, 易俊, 李柏青, 等. 直流输电系统换相失败仿真分析及运行情况统计[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 266-271.
- Li X N, Yi J, Li B Q, et al. Simulation analysis and operation statistics of commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 266-271.
- [26] 李新年, 李涛, 刘耀, 等. 华东多直流馈入系统换相失败仿真研究[J]. 电力建设, 2014, 35(12): 77-83.
- Li X N, Li T, Liu Y, et al. Simulation research on multi-infeed HVDC commutation failure in East China Power Grid[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12): 77-83.
- [27] 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.
- [28] 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.
- Zhang Y T, Qiu L P, Shi H B, et al. Fast detection method of commutation failure in multi infeed DC system considering the effect of unbalanced fault[J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 38(16): 4759-4767.
- [29] 汪隆君, 王钢, 李海锋, 等. 交流系统故障诱发多直流馈入系统换相失败风险评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 9-14.
- Wang L J, Wang G, Li H F, et al. Risk evaluation of commutation failure in multi-infeed HVDC systems under AC system fault conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 9-14.
- [30] 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.
- Wang G, Li Z K, Huang M, et al. Influence of initial fault voltage angle on commutation failure identification in a HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 49-54.
- [31] Rahimi E. Commutation failure in single-and multi-infeed HVDC systems[C]//8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2006). IET, 2006.
- [32] 程道卫, 刘天琪, 张金, 等. 多落点直流输电系统换相失败影响因素的仿真分析[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 59-64.
- Cheng D W, Liu T Q, Zhang J, et al. Simulative analysis on factors impacting commutation failure in multi-terminal HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 59-64.
- [33] 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 Y, Tang Y. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 108-114.
- [34] 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 Z, Zhou B R, Hong C, 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.
- [35] 肖浩, 李银红, 于芮枝, 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 H, Li Y H, Yu R Z, 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.
- [36] 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 Z P, Liu X Y, Li L Z, et al. Boundary conditions of commutation failure in multi-infeed HVDC systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 12-19.
- [37] 邵瑶, 汤涌. 一种快速评估多馈入直流系统换相失败风险的方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3429-3436.
- Shao Y, Tang Y. A fast assessment method for evaluating commutation failure risk of multi-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3429-3436.
- [38] Zhang L, Dofnas L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C]// International Conference on Power System Technology. IEEE, 2002.
- [39] 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 S Y, Li X N, Yu J, 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.
- [40] Guo C Y, Liu Y C, Zhao C Y, 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.
- [41] 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 Y, Wei Z N, Wang H W, et al. A DC current predictive control based method to decrease probability of commutation failure[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 565-570.
- [42] Bauman J, Kazerani M. Commutation failure reduction in HVDC systems using adaptive fuzzy logic controller[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1995-2002.
- [43] Sun Y Z, Peng L, Ma F, et al. Design a fuzzy controller to minimize the effect of HVDC commutation failure on power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1): 100-107.
- [44] Farrag E. Design of an adaptive neuro fuzzy inference control system for the unified power-flow controller [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 27(1): 53-61.
- [45] 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 K, Sun G Q, Wei Z N, 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.
- [46] 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(S1): 1-10.
- Guo C Y, Zhao J, Liu W, et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 1-10.
- [47] 蔡明, 陈涛, 张松光, 等. 多端柔性直流输电系统的功率协调控制策略[J]. 广东电力, 2019, 32(6): 101-107.
- Cai M, Chen T, Zhang S G, et al. Power coordinated control strategy for multi-terminal VSC-HVDC transmission system[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(6): 101-107.
- [48] 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 Y C, Guo C Y, Xu W H, et al. A control method to reduce commutation failure probability in HVDC power transmission[J]. Power System Technology,

- 2015, 39(1): 76-82.
- [49] 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 C Y, Li C H, Liu C C, 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.
- [50] 冯明, 李兴源, 李妮, 等. 基于 Simplex 算法的高压直流输电分段变速率 VDCOL 研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(4): 162-167.
- Feng M, Li X Y, Li N, et al. Study of HVDC piecewise variable rate VDCOL based on simplex algorithm[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(4): 162-167.
- [51] 刘磊, 王渝红, 李兴源, 等. 基于模糊控制的变斜率 VDCOL 控制器设计[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1814-1818.
- Liu L, Wang Y H, Li X Y, et al. Design of variable slope VDCOL controller based on fuzzy control[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1814-1818.
- [52] 文俊, 李佳琪, 王玲, 等. MIDC 输电系统后续换相失败的抑制措施研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 39(4): 79-88.
- Wen J, Li J Q, Wang L, et al. Design of variable slope VDCOL controller based on fuzzy control[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 39(4): 79-88.
- [53] 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 C Y, Zhang Y P, Zhao C Y, et al. Impact of STATCOM on the operating characteristics of double-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 99-106.
- [54] 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 S H, Tang F, Liu D C, 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.
- [55] 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): 222-229.
- Wang Q, Li T R, Tang X B, 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): 222-229.
- [56] 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 Q, Sha J B, Yang P C, 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.
- [57] 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 Y T, Zhang Y C, Zhou Q Y, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 22-28.
- [58] 陈刚, 江道灼, 吴兆麟. 固态短路限流器的研究与发展[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 89-94.
- Chen G, Jiang D Z, Wu Z L. Research and development of solid state fault current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 89-94.
- [59] 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 S Y. Study of capacitor commuted converter and automatically tuned AC filters[D]. Beijing, China: North China Electrical Power University, 2014.

收稿日期: 2019-08-22。

作者简介:



王嘉铭

王嘉铭(1996), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流输电技术, jiaming_wang1996@163.com;



陈武晖

陈武晖(1974), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制, 本文通信作者, whchen@mail.ujs.edu.cn。

(责任编辑 辛培裕)