

直流输电系统换相失败研究综述

袁 阳¹, 卫志农¹, 雷 霄², 王华伟², 孙国强¹

(1. 河海大学 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 分析了直流输电系统换相失败机理, 介绍了多馈入直流(MIDC)输电系统中与换相失败相关的多馈入交互作用因子(MIIF); 通过分析逆变器系统运行时与关断角密切相关的系统参数和电气量, 归纳了影响直流输电系统换相失败的主要影响因素; 介绍了用以判断换相失败的主要判别方法, 同时给出了耦合阻抗、MIIF 及有效短路比判别 MIDC 输电系统中不同换流站是否同时发生换相失败的方法; 总结了换相失败的抑制措施以及换相失败后系统的恢复策略。

关键词: 直流输电; 多馈入直流输电系统; 换相失败; 逆变器; 故障恢复

中图分类号: TM 721.1; TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.025

0 引言

HVDC 电能输送容量大, 同时兼顾传输损耗低、输电功率调节或反转迅速灵活、输电可靠性高、非同步联络能力强等优点, 因此在远距离、大区域的电网互联及大容量输电等方面应用广泛^[1]。我国将形成规模庞大、形式复杂的多馈入直流 MIDC (Multi-Infeed Direct Current) 输电系统^[2]。

作为高压直流输电系统最为常见的典型系统故障, 换相失败会引起直流电压下降和直流电流短时增大等影响系统运行的不利因素; 连续的换相失败容易引起直流系统降额运行, 甚至造成阀组闭锁或极闭锁^[3]。随着 MIDC 规模的增大及直流落点间电气距离的减小, 受端交流系统故障时, 可能引起多回直流同时或相继换相失败; 当交流故障严重时, 多回直流换相失败的发生可能导致直流功率传输中断, 严重威胁直流系统的安全稳定运行^[4]。

文献[5-6]较为详细地分析了 HVDC 系统中逆变器换相失败的主要影响因素, 在对其灵敏度分析的基础上, 综合整理了逆变器发生换相失败的一般规律, 对换相失败的抑制或预防控制措施提供了一定的研究基础; 文献[1]对于换相失败主要探讨了其影响因素, 包括故障后恢复对换相失败的影响; 文献[7]则分析了国内外直流输电系统换相失败相关问题, 从换相失败的机理、影响因素和判断依据出发, 探讨了针对换相失败的预防控制策略, 并指出研究的主要问题, 然而由于年限等因素, 其对单馈入直流输电系统换相失败的整理分析亦不够全面, 对 MIDC 系统

的研究较少涉及, 与此同时近年来的相关研究现状也值得进一步梳理。为此, 本文将从以下方面分析、整理或归纳直流输电换相失败相关研究内容。

a. 机理分析: 从换相失败的定义出发, 根据其最根本的判据, 即关断角 γ 小于固有极限关断角 $\gamma_{\min}$ 时逆变器发生换相失败, 通过逆变侧直流及换流母线电压波形来研究有关电气物理量之间的数学关系。同时, 引述目前用以研究 MIDC 系统的基于节点阻抗矩阵的多馈入交互作用因子 MIIF (Multi-Infeed Interaction Factor)。

b. 影响因素: 以换相失败机理分析为依据, 分析和梳理影响换相失败尤其是逆变器换相失败的宏观影响因素, 同时简要归纳目前尚未全面研究的 MIDC 系统中换相失败的主要影响因素。

c. 判据研究: 鉴于换相失败的固有特点和其众多的影响因素, 换相失败判据研究亦有多种形式, 而其应用场合和判定准确性却有差异。

d. 处理方式: 为了尽量避免或减少换相失败的危害, 据引发换相失败的故障类型及直接影响因素的不同特征, 其处理方式从换相失败的抑制措施和换相失败后的恢复策略两方面予以归纳表述。

1 换相失败机理分析

换相失败的定义: 在换流器中, 刚退出导通的阀, 在反向电压作用的一段时间内, 若其换相过程未进行完毕或阻断能力未能恢复, 则阀侧电压变为正向时, 被换相的阀都将向原来预定退出导通的阀倒换相, 这称为换相失败^[5]。就交直流输电系统的整流器和逆变器而言: 整流器的运行方式及运行状态使其中电流关断即退出导通的阀在较长时间内处于反向电压; 而直流输电系统换相失败故障大都由逆变器阀的工作状况导致^[8], 并且在处于同一换流桥的两阀同时导通的时间内, 直流电流短时增大, 逆变

收稿日期: 2012-12-03; 修回日期: 2013-09-27

基金项目: 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG025-2012); 国家自然科学基金资助项目(51277052, 511-07032, 61104045)

Project supported by State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG025-2012) and the National Natural Science Foundation of China(51277052, 51107032, 61104045)

侧直流电压和直流输送功率均为零^[9]。

对逆变器换相过程进行分析,其电压波形如图 1 所示, u_a, u_b, u_c 为交流侧三相电压瞬时值; U_d 为逆变侧直流电压; $\alpha, \beta, \gamma, \mu$ 分别为触发延迟角、触发超前角、关断角和换相角; ①—⑥分别表示逆变器换流阀 1—6 的导通情况。系统正常运行时, β 由直流输电系统的极控制层的控制器决定, 与 α, γ, μ 的相互关系为^[7,10]:

$$\beta = \pi - \alpha = \mu + \gamma \quad (1)$$

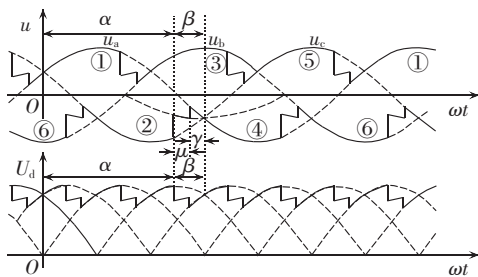


图 1 逆变器电压波形

Fig.1 Voltage waveforms of inverter

理想状态下,若换相电压突然下降,可假定直流电流和触发角为常值,进而认为逆变器换相过程所必需的换相电压时间面积 A 保持不变(见图 2)^[11],即:

$$A = \int_{\alpha}^{\alpha+\mu} \frac{\sqrt{2} E}{2} \sin \omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2} E}{2} (\cos \alpha + \cos \gamma) \quad (2)$$

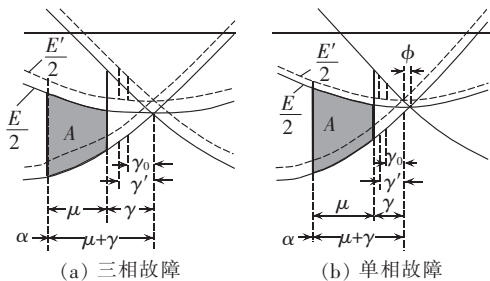


图 2 换相电压跌落对逆变器换相过程的影响

Fig.2 Impact of commutating voltage drop on commutation process of inverter

相关文献研究表明,关断角 γ 与触发超前角 β 、换流变压器变比 k 、逆变侧直流电流 I_d 、等效换相电抗 X_c 、逆变器交流侧母线电压有效值 U_L 的相互关系为:

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2} k I_d X_c}{U_L} + \cos \beta \right) \quad (3)$$

当系统发生不对称故障引起电压波形相角偏移 ϕ 时,有如下关系式:

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\sqrt{2} k I_d X_c}{U_L} + \cos \beta \right) - \phi \quad (4)$$

一般认为换流器中,只有阀运行的关断角 γ 小于其固有极限关断角 $\gamma_{\min}$ 时逆变器发生换相失败,其中晶闸管 $\gamma_{\min}$ 是晶闸管元件中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,对应的电角度通常在 10° 左右^[5]。考虑到施加于可控

硅元件上电压和电流的变化,晶闸管间的电压不平衡、器件特性变化以及安全裕度等,在系统实际运行时, HVDC 中逆变器运行关断角的整定值通常为 $\gamma \approx 18^\circ$ 。

阀运行的关断角 γ 与换流阀的电气量及其外部电路条件密切相关。若以 X_{cpu} 为换相电抗的标幺值,文献[11]给出了引起逆变器换相失败的交流母线有效电压跌落的临界值计算公式。

a. 三相接地故障时,交流系统电压波形仅出现了母线电压降落而无电压相角偏移:

$$\Delta U = 1 - \frac{I_d'}{I_d} \frac{X_{\text{cpu}}}{X_{\text{cpu}} + \cos \gamma_0 - \cos \gamma} \quad (5)$$

b. 单相接地故障时,交流系统电压波形出现了母线电压降落和电压相角偏移:

$$\Delta U = 1 - \frac{I_d'}{I_d} \frac{X_{\text{cpu}}}{X_{\text{cpu}} + \cos(\gamma_0 + \phi) - \cos \gamma} \quad (6)$$

其中, γ_0 为引起换相失败的逆变器临界运行关断角,

$$\text{电压相角偏移 } \phi = \frac{\pi}{6} - \arctan \frac{\sqrt{3}/2}{1/2 + 1/(1 - \Delta U)}。$$

目前 MIDC 系统中对换相失败机理研究较少,较为相关且显著的是基于节点阻抗矩阵的 MIIF 研究,MIIF 用于衡量 MIDC 系统中换流站之间相互作用的强弱(MIIF 越大表示换流站间的相互作用越强)^[12]。MIIF_{ji} 定义为:投入对称三相电抗器,使换流母线 i 处电压下降 1% 时,换流母线 j 处电压相应的变化率:

$$\text{MIIF}_{ji} = \frac{\Delta U_i \%}{1 \% \cdot U_{i0}} \quad (7)$$

其中, U_{i0} 为投入电抗器前换流母线 i 处电压。当母线 i 与 j 输送功率相近且 $\text{MIIF}_{ji} \leq 0.15$ 时,可认为直流子系统之间的相互作用近似为 0,一般视其为单馈入直流输电系统进行分析处理^[13]。MIIF 分析涉及的耦合关系实质上包含了系统有效短路比 ESCR (Effective Short Circuit Ratio)、直流传输功率、逆变站之间的电气距离等^[14]。文献[12]导出 MIIF 与换流母线处投入的对称三相电抗器大小无关,只与受端交流系统的参数有关,与节点自阻抗 Z_{ii} 和互阻抗 Z_{ij} 的关系为:

$$\text{MIIF}_{ji} = |Z_{ij} / Z_{ii}| \quad (8)$$

此外,文献[15]基于与交流输电线路并联运行的 MIDC 系统简单模型,通过理论分析推导出了换相电压和耦合导纳间的关系表达式,为 MIDC 系统换相失败的研究提供了一定的分析方法。

2 换相失败的主要影响因素

上文从逆变器发生换相失败的最为根本条件 ($\gamma < \gamma_{\min}$) 以及与之密切相关的换相电压时间面积的角度来揭示交直流系统换相失败机理,同时,系统运行时的关断角 γ 与其是否发生换相失败的系统各参数有直接的联系,通常可用其对 γ 的灵敏度来衡量各参数对逆变器换相失败的影响^[6]。

由式(3)、(4)可知,换流母线电压和 β 对 γ 的灵敏度为正, k 、 I_d 和 X_c 对 γ 的灵敏度为负;逆变器稳态运行时,阀控制系统中 β 和 γ 的设定值过小也是交流故障是否导致逆变系统换相失败的重要因素^[16-17]。

通过以上分析,结合系统实际运行过程,可以简要归纳换相失败的其他主要影响因素如下。

2.1 逆变系统内部因素

引发换相失败的逆变系统内部因素主要是与触发脉冲控制方式有关的触发脉冲故障,例如丢失触发脉冲等,HVDC换流器有分相触发和等间隔触发2种基本方式^[18]:分相触发易于交直流系统中产生过量的谐波电压或电流,影响逆变器换相;等间隔触发能够产生等相位间隔的触发信号,对逆变器换相过程影响较小,相对前者而言更有利于系统稳定。

2.2 逆变侧换流母线电压下降及下降方式

电网实际运行中,文献^[17]将其电压下降分为电压的瞬时跌落和较慢速的下降2种主要形式。换流母线电压非跌落式下降时,HVDC控制系统一般能够通过其快速作用抑制换相失败发生;逆变器换相失败通常是由于逆变侧换流母线电压的突然跌落引起,与逆变站电气距离很远的交流电网短路故障也极有可能引发换相失败。引起逆变系统换流母线电压跌落的逆变侧交流系统故障主要有对称与不对称故障,分别以交流系统三相和单相故障为典型。

a. 交流系统三相故障。交流系统不会引起换相电压过零点相位偏移,此时逆变器是否发生换相失败主要考虑其换相电压变化(下降)的速度和幅值:交流系统故障时,若 ΔU_L 较小,恒关断角控制作用使 γ 基本保持不变, μ 增量亦不明显,通常不会引起换相失败;若 ΔU_L 较大,换相角大幅增加,或 γ 因下一换相失败过程影响而变小,均可能引发换相失败^[16]。

b. 交流系统单相故障。同上类似,换相失败发生与否,与交流系统母线电压下降速度、幅值以及交流控制系统的控制性能等均有关系;此外,逆变侧交流系统中不对称故障导致换相电压相角偏移,也是换相失败的重要影响因素^[19]。

2.3 交流系统强弱及故障点电气距离

传统 HVDC 是以交流系统提供换相电流(相间短路电流)的有源输电网络,相对于具有足够短路比 SCR(Short Circuit Ratio)的受端交流系统,弱受端交流系统故障情况下,换相电压的大幅且快速下降不利于逆变系统成功换相,更容易引发、甚至导致连续的换相失败^[19-21];与此同时,较小的故障点电气距离会加剧逆变系统换相过程的换相电压下降。

2.4 故障合闸角

系统运行及仿真研究表明,交流系统母线三相短路故障时,逆变系统换相过程受故障合闸角影响较

小^[17];单相接地故障时,若逆变侧交流系统母线电压跌落值接近引起逆变器换相失败的临界值(式(6)), 90° 及 270° 故障合闸角引发换相失败的几率最大^[3]。

为此可认为,对于永久性故障,应从系统控制方式(不限于换相失败预防控制,包括系统闭锁及恢复等)去考虑其对换相电压时间面积的影响,对一般的较多引起逆变系统换相失败的瞬时性故障而言,除了对称与不对称故障等方面考虑其对交流系统母线电压波形、降落和关断角的影响外,也应着重分析研究不同故障类型下,其发生时刻、持续时间对逆变系统阀间换相的影响。此外,HVDC稳态运行时直流系统输送功率越大,逆变侧交流系统故障时,换相失败发生的几率越高,但就 HVDC 输送功率本身而言,其大小对逆变系统换相过程影响有限^[22]。

2.5 MIDC 系统中的影响因素

a. 耦合阻抗:交流系统故障情况下,MIDC 系统中多个逆变站间同时或相继发生换相失败,与其之间的电气耦合关系(可用耦合阻抗大小来衡量)密切相关^[10,15,21,23]。逆变站间的耦合阻抗越大,交流系统故障点处的逆变器发生换相失败的几率越大,而这种情况下 MIIF 越小,不同逆变器同时换相失败的几率越小^[24]。

b. 滤波器投切及谐波不稳定:交直流系统滤波器的投切操作,通常伴随着逆变站谐波的产生,MIDC 系统中,谐波的交互影响可能引起交流系统的谐波不稳定,继而造成某些逆变站谐振,致使直流输电系统逆变侧交流系统母线电压波形严重畸变、换相电压过零点偏移,影响换相过程,诱发换相失败^[25];尤其在 HVDC/MIDC 系统降功率运行时,滤波器投切对换相失败的影响作用更为显著^[26]。

c. MIIF 与 SCR:考虑到 MIDC 直流输电系统相互作用对逆变器换相过程的影响^[27],若 $MIIF_i$ 越大,则当直流子系统 i 处逆变器换流母线发生短路故障时,逆变站 i, j 就越有可能同时换相失败^[12,21]。MIIF 主要受直流子系统对应交流系统强度及与故障交流系统耦合的电气距离的影响,而几乎不受故障交流系统强度的影响^[21,27]。直流子系统的多馈入短路比,受该条直流子系统对应交流系统强度的影响最大,受与之耦合的电气距离影响次之。文献^[23]推导出了换流母线电压相互影响的表达式,在此基础上推导得出换相失败时的临界电气距离,它与交流系统强度、故障情况下交流母线电压下降程度,以及逆变系统间的电气耦合等因素有关。文献^[28]认为逆变站间的电气距离对其是否同时发生换相失败也有一定影响。当电气距离较近时,扰动容易造成异常的系统动态行为,引发换相失败^[15]。

3 换相失败的判据研究

逆变系统内部故障的判定,可通过检测叠加于 I_d

的 50 Hz 交流分量是否超过其设定值,或通过换流阀出口侧 I_d 与换流变压器阀侧电流的比较来判断,然而在实际直流输电工程运行中此类故障很少出现^[29]。

对于阀外电路故障等因素引起的逆变器换相失败,其判定应依据本质特征,即 $\gamma < \gamma_{\min}$,且阀电流连续、阀电压为零,借助仿真手段以得到较准确的结论^[30]。常用的判别方法主要有关断角(熄弧角)判断法、最小电压降落法、相位比较法^[18]、直流电压过零法以及小波故障诊断方法等。

关断角判断法是以换相失败的本质来判断换相失败,主要应用于电磁暂态仿真软件中晶闸管建模仿真研究^[4,8];最小电压降落法在假定无穷大交流系统前提下基于换流器准稳态方程而得,三相及单相故障情况下结果见式(5)、(6),该法在含直流准稳态模型的机电暂态仿真程序中应用广泛^[5,8,30],但其推导过程忽略了故障下电压波形畸变对换相失败的影响,易造成误判^[10],且假定此过程中直流电流和触发角仍为常值,准确性不充足;直流电压过零法通过实时采样逆变器换流桥的直流电压,将换流桥两端直流电压是否过零作为换相失败判据,但偏于保守^[4,8,31]。

直流输电系统逆变器换相失败时,与直流线路短路故障情况下的 U_d 和 I_d 暂态变化过程基本一致,从而难以以常规信号检测及处理方式对其分析、诊断和辨别^[32]。小波变换的多分辨率分析 MRA (Multi-Resolution Analysis) 特性,能够表征和分析时频域信号局部特征。在交直流输电系统中,对故障信号进行小波变换、对直流电流 I_d 进行 MRA 及能量统计可知:直流线路发生短路故障时, I_d 会产生丰富的暂态高频分量;而换相失败故障时, I_d 在低频段(包括基频和二倍频)具有较高的分量,据此可以此类特征作为区分以上 2 种故障的判据^[33-34]。

此外,在换相电压检测上,可将换流阀晶闸管的输入电压作为判断依据。文献[24]提出快速确定某故障时刻换相失败临界阻抗的方法,它以最小关断角为判据,推得换流母线电压间相互影响关系的数学表达式,进而得到了换相失败时的临界电气距离。

MIIF 快速判断直流系统换相失败的方法,以节点阻抗矩阵对 MIIF 进行定义,结合最小熄弧角判断法的分析,提出了一种基于 MIIF 快速判断 MIDC 系统换相失败的方法:若以 CMIIF_{ji} 代表其临界 MIIF 大小,第 i 回逆变侧交流母线发生三相金属性短路故障时,如果 $\text{MIIF}_{ji} \geq \text{CMIIF}_{ji}$,则认为母线 i 和 j 会同时发生换相失败^[12]。另有通过定义弱耦合临界阻抗 X^{wc} 和强耦合临界阻抗 X^{sc} 来判断换相失败:当逆变站间的耦合阻抗大于 X^{wc} 时,单逆变电站换相失败不会造成与之耦合的逆变电站换相失败的发生;当耦合阻抗小于 X^{sc} 时,耦合的逆变电站则会同时发生换相失败,

系统故障后也可同时恢复;当其介于 X^{wc} 和 X^{sc} 之间时,耦合的逆变电站会互相引发换相失败,但故障后不同逆变电站的恢复过程较为复杂^[27]。

4 换相失败的处理方式

换相失败机理分析是基础,换相失败影响因素及其判据研究为支撑,换相失败预防控制措施是目的。考虑到目前传统直流输电方式中换相失败现象不可避免,因此将换相失败的处理方式分为换相失败的抑制措施及换相失败后的恢复策略。

4.1 换相失败的主要抑制措施

4.1.1 利用无功补偿维持换相电压稳定

HVDC 运行时需要消耗大量无功功率,采用动态无功补偿装置对其(特别是与弱交流系统相连时)进行无功补偿,增大系统有效短路比,以降低逆变电站换流母线电压对暂态故障的灵敏度,在一定程度上维持直流系统换相电压稳定,减小交流系统母线电压大幅度下降时逆变器换相失败的发生几率^[10,35]。

4.1.2 采用较大的平波电抗器

交流系统故障时,直流电压下降情况下,施加于 HVDC 的平波电抗可在一定程度上抑制直流线路电容的放电电流,一般逆变侧平波电抗器的电感量可比整流侧稍大^[18]。但平波电抗器的设定值还需考虑 HVDC 的响应速度等系统动态性能,对换相失败的抑制作用有限。

4.1.3 减小换流变压器的短路电抗

作为逆变系统换相阻抗的组成之一,换流变压器短路电抗的降低利于直流系统换相过程;由换相过程分析可知,减小换相角(或增大关断角)可降低换相失败发生的可能性;然而换相失败发生时,过小的短路电抗不利于换流变压器及换流器运行,其设定值一般在 15% 左右^[18]。

4.1.4 采用适当的控制方式

a. 等间隔触发脉冲控制方式:逆变侧交流系统不对称故障时,这种控制方式有利于系统稳定性,相对于分相触发方式而言,可在一定程度上减小换相失败的发生几率^[6]。

b. 增发触发脉冲控制:触发脉冲次序的优化调整,对换相的发展过程有一定的控制作用^[16]。文献[36]认为逆变器单次换相失败造成的直流短路时间不应超过交流系统基波周期,对于较弱的受端交流系统,因其控制作用可能产生较大扰动,故不宜采用。

c. 逆变器定关断角控制:将测得的各阀运行的实际关断角与其整定值比较,由式(1)可知,通过调整 α ,一般可使逆变器阀的关断角运行于整定值附近,从而可维持换相裕度,降低换相失败的发生几率;但当交流电压大幅下降时,换相角大幅增大,减小 α

也难以维系恒定关断角运行,引发换相失败^[19]。

d. 增大 β 或 γ 的整定值:由灵敏度分析可见,增大 β 可有效降低换相失败发生的可能性,但它以降低直流系统传输功率、增大无功消耗,即降低 HVDC 经济性为代价^[37]。

e. 以上述措施为基础的辅助控制方式:预测控制技术^[11,37],如基于逆变侧零序电压分量检测单相故障、 $abc/\alpha\beta$ 坐标变换判定三相故障以及交直流电流比较,提前触发以增加换相裕度,尽量避免换相失败的换相失败预测控制模块 CFPREV (Commutation Failure PREvention)^[38];增加 $\sin-\cos$ 分量检测的 CFPREV 以解决原预测控制模块在交流电压过零点附近不敏感的问题^[10];逆变器故障在交流侧的频谱特性的研究表明提高交流系统低频特性通常有利于减少换相失败的发生,且这种控制方式不依赖于系统类型^[36];通过谐波检测制定关断角的整定值以建立其闭环控制^[39]等。文献[40-42]则分析和设计了通用自适应模糊控制方法以应对系统操作变化及不同故障下的最优控制方式(包括 PI 参数、论域大小及模糊控制规则)的选择列表等。

4.1.5 人工换相

HVDC 的换流器换相过程依赖于所连交流系统的换流母线电压,使换相阀可靠导通或关断的自然换相角 α 为 $15^\circ\sim 165^\circ$;人工换相(亦称强迫换相)是一种可使换流器在换相周期任意期望点换相的方式^[36]。其基本原理是把适当的附加电压叠加于原换相电压,使退出导通的阀有足够长的时间(相位角)处于反向电压作用下,以保证阀阻断能力的恢复^[43],减少发生换相失败^[6,18,37]。主要的人工换相方法有利用辅助阀、叠加谐波电压和电容器换相换流器 CCC (Capacitor Commutated Converter) 3 种^[44]。

4.2 换相失败后的恢复策略

整流器定电流控制、逆变器定关断角控制,以及直流线路平波电抗作用,可在多数的系统故障时抑制直流电流突增,有利于逆变系统换相过程,即使发生换相失败,一般情况下不需要马上实行闭锁保护,系统也可自行恢复,适当措施的介入,更助于加速其恢复过程。然而,故障较为严重时,应立即采取相应的故障控制措施,避免或减少连续换相失败的发生,以降低其对直流输电系统的影响。

4.2.1 依赖于电压的电流限制

交流系统故障时,逆变器换相电压降低而电流增大,易发生换相失败;依赖于电压的电流限制 VDCOL (Voltage Dependent Current Order Limit)^[45]是当逆变器交流电压严重下降(反映到直流电压严重下降)时,通过控制系统作用保持低电压小电流运行,降低直流功率、无功消耗,有利于交流系统电压

维系和逆变器换相过程^[8]。VDCOL 作用的时间尺度上对交流系统故障引发换相失败而言较大,对单次换相失败的抑制作用有限,更有助于相对较长时间故障情况下连续换相失败的控制和故障后直流系统恢复。

4.2.2 连续换相失败的发展控制

逆变器 2 次连续换相失败,直流电压极性倒转,过电流致使工频交流介入直流回路中;此时应将电流从故障阀转移到旁通对以尽量减少故障阀中流过直流故障电流的时间;旁通对的作用使得逆变器交流侧中与之相连的交流相接入直流回路,直流回路短路、阀组闭锁以减少交流系统故障时换流变压器造成的直流偏磁^[16];逆变器多次连续换相失败难以自行恢复时,换流阀闭锁和旁通,待交流电压恢复后,直流系统重新启动、运行^[8]。

4.2.3 采用保护控制措施

交流系统故障较为严重时,逆变器发生换相失败而难以自行恢复,会进一步造成连续换相失败的发生,对直流输电系统的运行极为不利;根据连续换相失败故障所产生的后果^[46],目前国家电网公司投运的直流工程均配有相应的换相失败保护措施^[22]。

此外,电容器换相换流器及全可控的绝缘栅双极晶体管(IGBT)等新型换流器的发展和应用可以大幅减少甚至完全避免交直流输电系统换相失败的发生,但其发展和应用还受到诸如容量等限制^[47-48]。

MIDC 系统中,当其他参数一定时,增大非故障交流系统强度有利于避免同时换相失败,而增大故障交流系统强度对于避免同时换相失败基本无效^[20]。因此,结合单馈入直流系统可知,对 MIDC 系统而言,增大故障交流系统强度可有效抑制当地换相失败的发生;增大非故障交流系统强度及耦合电气距离对当地换相失败影响甚微,但可降低多站同时发生换相失败的几率;在条件允许的前提下,降低直流系统输电功率,可以有效缓解直流子系统间的不利影响,一定程度上增加了逆变系统的换相裕度。

5 换相失败尚待研究的问题

a. 模型及影响因素:换相失败影响因素之间也存在很多联系,不可片面和孤立地看待和研究某一影响因素的判据和应对措施;适用于换相失败研究的换流器数学模型建立比较困难,目前尚未有针对性的模型研究;就其仿真模型而言,CIGRE 直流输电标准测试系统较为准确,可以适用于换相失败的仿真研究,但对于多馈入系统,尚未有可以准确用来揭示其换相失败机理及仿真测试的标准测试系统模型。

b. 换相失败判据:单馈入直流系统的换相失败判据研究较为细致和详尽,同时为多馈入直流换相

失败的研究提供了必要的理论支撑;但鉴于后者的复杂性,换相失败的考虑和分析范畴除了在单个逆变站及其故障因素外,逆变站之间的相互影响造成多个逆变器同时或者相继换相失败的主导因素及其判据也需进一步研究。MIIF 为 MIDC 系统间的一个综合指标,从其定义来看是对系统正常运行点附近的线性化,应用范围还有待考究,对其参考应用时,还需具体分析各个直流落点之间的电气距离过小、受端交流系统强度较弱等因素的影响。

c. 换相失败的抑制措施及换相失败后的恢复策略:对此已有较多研究文献,而且工程实际应用也有一定效果,应继续研究更为高效的控制措施,诸如控制系统解耦和分布式控制等方面的研究;同时,针对 MIDC 系统换相失败方面的适用度,以及尚未关注的新问题的挖掘、处理及控制措施,尤其是直流子系统间的协调优化目标及优化控制策略更值得深入研究。

研究 MIDC 系统的复杂情况,逆变站的耦合程度、谐波等不利因素,与故障时阀的导通关断状态、故障时间、位置及类型、故障前各相电压的相位等有关。目前还没有相关文献对此谐波电流进行解析研究。此外,应在克服逆变侧交流系统有功不足带来的功角稳定,以及直流恢复过程中大量无功需求带来的电压稳定等问题的同时,考虑通过各直流控制保护系统间的协调控制策略及其参数优化方法,减少直流换相失败发生的几率。

6 结论

换相失败发生的根本原因是逆变器运行关断角小于其固有极限关断角;引发逆变器换相失败的主要因素包括换流母线电压、触发超前角、换流变压器变比、直流电流、换相电抗等;换相失败的判断方法主要有关断角判断法、最小电压降落法、相位比较法、直流电压过零法、小波故障诊断方法等,但其判断应用场合和判定准确性却有差异;本文据此分析和归纳了换相失败的抑制措施和换相失败后的恢复策略。MIDC 系统换相失败的机理、判据乃至抑制措施和恢复策略的研究已取得了一定的成果,但其换相失败研究模型、机理及影响因素,以及在此基础上的换相失败抑制措施或恢复策略的研究体系仍需进一步研究和完善。

参考文献:

[1] 邵瑶,汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究综述[J]. 电网技术, 2009,33(17):24-30.
SHAO Yao,TANG Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Technology,2009,33(17):24-30.
[2] 邵瑶,汤涌,郭小江,等. 2015 年特高压规划电网华北和华东地

区多馈入直流输电系统的换相失败分析[J]. 电网技术,2011,35(10):9-15.
SHAO Yao,TANG Yong,GUO Xiaojian,et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems in North China and East China power grids planned for UHV power grids in 2015[J]. Power System Technology,2011,35(10):9-15.
[3] 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 al. Influence of initial fault voltage angle on commutation failure identification in a HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(4):49-54,102.
[4] 吴萍,林伟芳,孙华东,等. 多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J]. 电网技术,2012,36(5):269-274.
WU Ping,LIN Weifang,SUN Huadong,et al. Research and electromechanical transient simulation on mechanism of commutation failure in multi-infeed HVDC power transmission system [J]. Power System Technology,2012,36(5):269-274.
[5] 欧开健,任震,荆勇,等. 直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2003,23(5):5-8,25.
OU Kaijian,REN Zhen,JING Yong,et al. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 1:commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003,23(5):5-8,25.
[6] 任震,欧开健,荆勇,等. 直流输电系统换相失败的研究(二)——避免换相失败的措施[J]. 电力自动化设备,2003,23(6):6-9.
REN Zhen,OU Kaijian,JING Yong,et al. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 2:measures against commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(6):6-9.
[7] 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 Lingxue,ZHANG Yao,ZHONG Qing,et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Power System Technology,2006,30(17):40-46.
[8] 艾飞,李兴源,李伟,等. HVDC 换相失败判据及恢复策略的研究[J]. 四川电力技术,2008,31(4):10-13.
AI Fei,LI Xingyuan,LI Wei,et al. The criterion and restoration measure of HVDC commutation failure[J]. Sichuan Electric Power Technology,2008,31(4):10-13.
[9] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京:科学出版社,2010:58-69.
[10] 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.
[11] THIO C,DAVIES J,KENT K. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1996,11(2):946-957.
[12] 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.
[13] CIGRE Working Group B4.41. Systems with multiple DC in-

- feed[R]. Paris, France: CIGRE, 2008.
- [14] 吴冲, 李兴源, 何朝荣. 多馈入直流交互作用因子在换相失败研究中的应用[J]. 继电器, 2007, 35(9): 26-31.
- WU Chong, LI Xingyuan, HE Chaorong. Application of multi-infeed interaction factor in South Grid commutation failure research[J]. Relay, 2007, 35(9): 26-31.
- [15] 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.
- [16] 罗隆福, 周金萍, 李勇, 等. HVDC 换相失败典型暂态响应特性及其抑制措施[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 5-9, 36.
- LUO Longfu, ZHOU Jinping, LI Yong, et al. Typical transient response of HVDC commutation failure and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 5-9, 36.
- [17] 洪潮. 直流输电系统换相失败和功率恢复特性的工程实例仿真分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1): 1-7.
- HONG Chao. Simulation analysis on the commutation failure and power recovery characteristic of an actual DC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1): 1-7.
- [18] 黄玉东. 高压直流输电换相失败的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
- HUANG Yudong. Study on the communication failure in HVDC transmission lines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [19] 王智冬. 交流系统故障对特高压直流输电换相失败的影响[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 25-29, 38.
- WANG Zhidong. Impact of AC system fault on UHVDC commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 25-29, 38.
- [20] 艾飞, 李兴源, 王晓丽, 等. 交流系统强度与所联直流输电系统换相失败关系研究[J]. 四川电力技术, 2009, 32(3): 1-4, 35.
- AI Fei, LI Xingyuan, WANG Xiaoli, et al. Research on relationship of commutation failures between AC system strength and related DC transmission system[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009, 32(3): 1-4, 35.
- [21] 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 Jian, LI Xingyuan, FU Xiaotao, 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.
- [22] 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 Xinnian, YI Jun, LI Baiqing, et al. Simulation analysis and operation statistics of commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 266-271.
- [23] 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, 64.
- XIAO Jun, LI Xingyuan, YANG Xiaobing. 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, 64.
- [24] 刘建, 李兴源, 吴冲, 等. HVDC 系统换相失败的临界指标[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 8-12.
- LIU Jian, LI Xingyuan, WU Chong, et al. Research on critical index of commutation failure in HVDC system[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 8-12.
- [25] 张汝莲, 赵成勇, 卫鹏杰, 等. 直流馈入后交流线路故障对换相失败瞬态特征的影响[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 82-87.
- ZHANG Rulian, ZHAO Chengyong, WEI Pengjie, et al. Influence of AC line faults on HVDC commutation failure transient characteristics in DC/AC interconnected power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 82-87.
- [26] 任景, 李兴源, 金小明, 等. 多馈入高压直流输电系统中逆变器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 system[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 17-22.
- [27] 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, 29(11): 29-33.
- XIANG Ling, ZHENG Jianyong, HU Minqiang. Study on commutation failure in MTDC and MIDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 29-33.
- [28] ZHOU Changchun, XU Zheng. Study on commutation failure of multi-infeed HVDC system[C]//International Conference on Power System Technology, 2002, Proceedings. PowerCon 2002. [S.l.]: IEEE, 2002: 2462-2466.
- [29] 郑传材, 黄立滨, 管霖, 等. ± 800 kV 特高压直流换相失败的 RTDS 仿真及后续控制保护特性研究[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 14-20.
- ZHENG Chuancail, HUANG Libin, GUAN Lin, et al. RTDS-based simulation of commutation failure in ± 800 kV DC power transmission and research on characteristics of subsequent control and protection[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 14-20.
- [30] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24.
- HE Chaorong, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Simulation analysis on commutation failure criteria for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24.
- [31] 董曼玲, 谢施君, 贺恒鑫, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 逆变器自定义定关断角控制的实现[J]. 南方电网技术, 2009, 3(1): 36-40.
- DONG Manling, XIE Shijun, HE Hengxin, et al. Realization of self-defined control module for constant extinction angle control in PSCAD/EMTDC[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(1): 36-40.
- [32] 林凌霄, 张尧, 钟庆, 等. 基于小波能量统计法的 HVDC 换相失败故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 61-64.
- LIN Lingxue, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Fault diagnosis of commutation failures in the HVDC system based on a method of wavelet energy statistics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 61-64.
- [33] 徐松林, 黄少先. 基于小波能量谱和灰色综合关联度的 HVDC 换相失败故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 85-89.
- XU Songlin, HUANG Shaoxian. Fault diagnosis of commutation failures in the HVDC system based on the wavelet energy spectrum and grey comprehensive relationship degree[J]. Power

- System Protection and Control,2012,40(3):85-89.
- [34] 张尧,林凌雪,钟庆. HVDC 换相失败小波故障诊断方法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2007,35(10):172-177.
- ZHANG Yao,LIN Lingxue,ZHONG Qing. Fault diagnosis based on wavelet for commutation failures in HVDC[J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition, 2007,35(10):172-177.
- [35] 周长春,徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术,2003,27(11):19-21.
- ZHOU Changchun,XU Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to ac system with weak strength[J]. Power System Technology,2003,27(11):19-21.
- [36] 王渝红. 交直流混合运行系统中的换相失败研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
- WANG Yuhong. Inverter commutation failure study in HVDC/AC hybrid system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2008.
- [37] TAMAI S,SATO M,YAMAJI K,et al. Fast and predictive HVDC extinction angle control[J]. IEEE Trans on Power Systems,1997, 12(3):1268-1275.
- [38] ZHANG L,DOFNAS L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C]//International Conference on Power System Technology,2002. Proceedings. PowerCon 2002. Kunming,China:[s.n.],2002:51-56.
- [39] SATO M,YAMAJI K,SEKITA M. Development of a hybrid margin angle controller for HVDC continuous operation[J]. IEEE Trans on Power Systems,1996,11(4):1792-1798.
- [40] BAUMAN J,KAZERANI M. Commutation failure reduction in HVDC systems using adaptive fuzzy logic controller[J]. IEEE Trans on Power Systems,2007,22(4):1995-2002.
- [41] SUN Y,PENG L,MA F,et al. Design a fuzzy controller to minimize the effect of HVDC commutation failure on power system [J]. IEEE Trans on Power Systems,2008,23(1):100-107.
- [42] MOHAMED E,GHANIM A. Design of an adaptive neurofuzzy inference control system for the unified power-flow controller [J]. IEEE Trans on Power Delivery,2012,27(1):53-61.
- [43] JOVICIC D. Thyristor-based HVDC with forced commutation[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2007,22(1):557-564.
- [44] 富强. 特高压直流输电换相机理的分析与仿真[D]. 北京:华北电力大学,2006.
- FU Qiang. Analysis and simulation on the communication principle in UHVDC transmission system[D]. Beijing:North China Electric Power University,2006.
- [45] 杨汾艳,徐政. 直流输电系统典型暂态响应特性分析[J]. 电工技术学报,2005,20(3):45-52.
- YANG Fenyang,XU Zheng. Typical transient responses in HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(3):45-52.
- [46] ZHENG X,TAI N,YANG G,et al. A transient protection scheme for HVDC transmission line[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2012,27(2):718-724.
- [47] 许加柱,罗隆福,李勇,等. 采用新型换流变压器及其滤波系统对换相失败的影响[J]. 电力自动化设备,2008,28(2):10-14.
- XU Jiazhong,LUO Longfu,LI Yong,et al. Influence of novel converter transformer and its filter system on commutation failure [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(2):10-14.
- [48] 尚荣艳. 新型换流变压器及其滤波系统对直流输电换相的影响研究[D]. 长沙:湖南大学,2008.
- SHANG Rongyan. Influence of novel converter transformer and its filter system on commutation in DC transmission[D]. Changsha:Hunan University,2008.

作者简介:

袁 阳(1986-),男,江苏徐州人,博士研究生,研究方向为电力系统运行、分析与控制(**E-mail**:yy860618@163.com);

卫志农(1962-),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等(**E-mail**:wzn_nj@263.net);

雷 霄(1985-),男,湖南常德人,工程师,硕士,主要研究方向为直流输电工程控制保护系统分析与仿真(**E-mail**:leixiao@epri.sgcc.com.cn);

王华伟(1971-),男,山东潍坊人,高级工程师,硕士,主要研究方向为直流输电系统仿真和电磁暂态(**E-mail**:whw3000@epri.sgcc.com.cn);

孙国强(1978-),男,江苏江阴人,副教授,博士,研究方向为电力系统运行分析与控制(**E-mail**:hhsunguoqiang@163.com)。

Survey of commutation failures in DC transmission systems

YUAN Yang¹,WEI Zhinong¹,LEI Xiao²,WANG Huawei²,SUN Guoqiang¹

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education,Hohai University, Nanjing 210098,China;2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: The mechanism of commutation failure in DC transmission system is analyzed and the MIIF (Multi-Infeed Interaction Factor) of MIDC (Multi-Infeed Direct Current) transmission system, relevant to commutation failure, is introduced. The system parameters and electric parameters, closely relevant to the extinction angle in the operation of invert system, are analyzed and the main influencing factors of commutation failure in DC transmission system are summarized. The main methods of commutation failure judgment are introduced and three criteria are given for detecting if commutation failure is synchronously occur in different inverter stations of MIDC transmission system: coupling impedance, MIIF and effective short circuit ratio. The suppression measures and system recovery strategies after commutation failure are summarized.

Key words: DC power transmission; MIDC system; commutation failure; electric inverters; fault recovery