

基于联络通道电流检测的多馈入直流系统 同时换相失败预防控制

王凌尧¹, 姚伟¹, 杨程祥¹, 熊永新¹, 李程昊², 文劲宇¹

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要:受多馈入直流系统中各直流输电线路之间耦合特性影响,单一交流故障产生的谐波分量通过交流系统对多回直流线路进行干扰,易引发同时换相失败。基于换流器开关调制理论建立交流故障暂态过程中多馈入直流系统内谐波传变回路模型,分析谐波分量的产生机制和传变路径,分析交流故障导致多馈入直流系统发生同时换相失败的机理。将故障后多馈入直流系统内换相的动态演变过程划分为不同阶段,总结各阶段的换相特征发现,近端换流站发生换相失败后,通过交流侧联络通道扩散的故障电流分量引发同时换相失败的关键因素。提出基于联络通道电流检测的同时换相失败预防控制策略,通过检测联络通道异常电流使远端换流站对近端换流站发生的换相失败快速反应以减小发生同时换相失败的风险。以河南特高压多馈入直流系统为例进行仿真验证,仿真结果证明了所提控制策略的有效性。

关键词:特高压直流;多馈入直流系统;换相失败;换流器开关调制理论;联络通道;电流检测

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202205010

0 引言

特高压直流输电技术因具有输送容量大、输送距离远、线路损耗小等优点,已成为我国解决能源负荷中心逆向分布的重要手段。换相失败是特高压直流输电系统的常见故障之一,主要由受端电网的交流故障引起^[1]。换相失败会导致有功功率输送减少、直流电流增大、电力电子器件过热受损等危害。而在多馈入直流系统中,各直流落点的换流站间由交流电网和电气设备构成电气联络通道。因此由交流故障引起近端换流站换相失败LCF(Local converter Commutation Failure)所产生的异常电气量可通过联络通道波及远端的多条直流,引发同时换相失败CCF(Concurrent Commutation Failure)。CCF使故障范围被扩大,对交流电网造成更严重的功率冲击^[2]。因此,缓解多馈入直流系统CCF问题是交直流混联系统稳定控制中的重要课题^[3]。

多馈入直流系统中的耦合特性是引发CCF的关键因素,近年来有诸多文献构建相关指标,对多馈入直流系统中的耦合特性进行描述和衡量。CIGRE工作组提出了多馈入交互因子MIIF(Multi-Infeed Interaction Factor)的概念,通过仿真确定非故障母线与故障母线的电压跌落量比值来描述多馈入直流

系统两母线间的相互影响程度^[4]。受MIIF物理意义的启发,文献[5]提出采用多馈入直流系统网络等值阻抗矩阵来计算交直流系统电压耦合作用因子,但该指标仅单向考虑了故障母线通过联络通道对其他母线的电压拉低作用。文献[6]构造了无功潮流支撑系数来描述故障母线通过联络通道接受来自其他母线的无功补偿现象。然而以上对多馈入直流系统耦合特性的研究均基于基频电压、电流,所提多馈入直流系统换相失败评估指标也主要针对母线电压幅值降低这一影响因素。文献[7-8]通过仿真明确指出,电压波形畸变导致过零点位移,是远端换流站发生换相失败的根本原因,但并未进一步对谐波产生的原因和传变的过程进行研究。文献[9]针对谐波对多馈入直流系统换相影响的问题,建立了各直流接入点谐波频率下的节点导纳矩阵,通过分析谐波对换相电压幅值和相角的影响得到各次谐波电流引起换相失败的临界值,但未具体结合交流故障情境下谐波导致多馈入直流系统发生CCF的过程进行分析。因此,考虑交流故障下谐波的产生和传变过程的多馈入直流系统CCF机理有待进一步研究。

与传统直流系统相比,多馈入直流系统的耦合特性使其抑制换相失败的难度加大,现阶段基于控制优化思路的多馈入直流换相失败控制措施以换相失败预防CFPREV(Commutation Failure Prevention)控制和低压限流VDCOL(Voltage Dependent Current Order Limiter)控制为主。文献[10]提出了一种自适应调节故障线路CFPREV协调控制策略,在非故障线路的关断角减小时降低故障线路

收稿日期:2021-08-18;修回日期:2022-02-28

在线出版日期:2022-04-22

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5419-201924207A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(5419-201924207A-0-0-00)

CFPREV 控制器输出的触发角修正角度。文献[11]提出根据广域测量结果评估故障对各直流系统的影响,并依此调控 VDCOL 控制器输出的电流指令值。以上控制策略依赖于广域测量信号,传输延时影响其对换相失败的抑制效果。文献[12-13]考虑了多馈入直流系统中各直流对受端系统的无功冲击影响和各直流间无功交互影响强弱,按照各直流的恢复优先级顺序对 CFPREV 控制的启动门槛值进行差异化设置。文献[14]基于渐变恢复理论设计了一种 VDCOL 优化控制,通过延缓故障线路的直流功率恢复速度来降低其无功需求。但以上控制策略采用预先设置的固定值,限制了控制策略对故障暂态过程的跟随性。

本文针对交流故障暂态过程中产生的谐波在交流系统中传播并造成远端换流站发生换相失败的过程展开研究。基于换流器开关调制理论建立了交流故障暂态过程中多馈入直流系统内谐波传变回路模型,并对谐波产生的过程和传变路径进行详细分析。在考虑谐波传变的基础上,对交流故障导致多馈入直流系统发生 CCF 的机理进行分析。将故障后多馈入直流系统内换相的动态演变过程划分为不同阶段,对各阶段的特征进行总结,发现故障电流分量通过联络通道扩散是造成 CCF 的关键因素。根据以上分析提出了基于联络通道电流检测的 CCF 预防控制策略,使远端换流站通过检测由联络通道馈入母线的电流变化,对多馈入直流系统中发生的换相失败做出快速反应。该方法不依赖广域测量,具有速度快、灵敏度高的特点。以河南特高压多馈入直流系统为例进行仿真验证,仿真结果证明了所提控制策略可有效降低发生 CCF 的风险。

1 多馈入直流系统及其控制环节

1.1 河南特高压多馈入直流系统

2020 年底,青海—豫南(简称“青豫”)直流输电工程正式投入运行。自此河南电网形成了由哈密—郑州(“简称天中”)和青豫 2 条 ± 800 kV 特高压直流构成的多馈入直流系统。河南特高压多馈入直流系统的拓扑结构见附录 A 图 A1。其中,天中直流受端为常规的特高压直流单端馈入结构,经中州换流站 500 kV 母线接入交流电网。青豫南侧直流线路采用多端单层馈入结构,即将高端换流站 I、IV 和低端换流站 II、III 分别接入豫驻马店换流站内的 2 个 500 kV 母线。受端交流系统由等效阻抗与电源构成的戴维南模型进行等效替代。

在 PSCAD / EMTDC 中搭建河南特高压多馈入直流系统,网络参数如附录 A 表 A1 所示。本文以河南特高压多馈入直流系统为例进行理论推导和算例分析,所得多馈入直流系统 CCF 的分析结论对于多

馈入直流系统这一典型结构具有普适性,而非仅针对河南电网。

1.2 逆变侧 CFPREV 控制环节

天中直流与青豫直流的逆变侧控制方案除了参考 CIGRE HVDC 标准测试模型^[15]在逆变侧采用定电流和定关断角控制外,还增加了 CFPREV 控制环节,用作交流系统短路时对逆变器触发角进行快速调节的辅助控制。河南天中、青豫直流的 CFPREV 控制策略及工作原理见附录 B。CFPREV 相比于定电流和定关断角的常规阀组控制具有较快的反应速度,对后续换相失败具有较好的抑制作用。但在故障电气距离较远、电压变化较为轻微的场景下,依赖于快速电压检测的 CFPREV 的控制效果将受到限制^[16]。

2 多馈入直流系统 CCF 机理

2.1 换相电压积分面积理论

换相电压积分面积理论是分析换相失败的常用方法,其相关内容简单介绍如下^[17]。

$$L_c I_d(t_2) + L_c I_d(t_1) \leq \int_{t_1}^{t_{2\max}} (U_c - U_b) dt \quad (1)$$

式中: L_c 为换相电感; t_1 为施加触发脉冲后的换相开始时刻; t_2 为待关断晶闸管内电流降至 0 的换相完成时刻; $t_{2\max}$ 为对应最小关断角的临界换相完成时刻; $I_d(t_1)$ 、 $I_d(t_2)$ 分别为 t_1 、 t_2 时刻的晶闸管内直流电流。不等式左侧表达式表示换相需求面积,记为 S_d ,在换相电抗不变时其值主要由晶闸管内直流电流决定。不等式右侧表达式表示系统能够提供的换相电压积分面积最大值,记为 $S_{\max}$,主要由换相电压波形及其过零时刻决定。只有当式(1)被满足时,换流器才能成功换相。

2.2 12 脉波换流器开关函数调制理论

由于换流器的开关特性具有离散性,直流电压可看作交流电压经开关函数调制得到,交流电流可看作直流电流经开关函数调制得到^[18],有如下对应关系:交流侧正序电压分量经换流器调制到直流侧形成频次减 1 的电压分量;交流侧负序电压分量经换流器调制到直流侧形成频次加 1 的电压分量;直流侧谐波电流经过换流器调制到交流侧,产生频次加 1 的正序谐波电流和频次减 1 的负序谐波电流。具体推导见附录 C 式(C1)—(C6)。在换流器的调制作用下,暂态过程中产生的谐波分量将在交直流侧循环传变,导致系统不稳定。

2.3 多馈入直流系统中谐波传变回路

在多馈入直流系统中的 LCF 是指在某换流母线附近发生的交流故障引起的该母线所连接换流站发生的换相失败。而故障线路换流站发生换相失败期间,所引发的电气量波动通过耦合通道导致故障线

路远端换流站发生换相失败的过程被称为CCF^[19]。仿真研究发现,多馈入直流系统中远端换流站发生CCF前,往往电压跌落程度较轻,而换相电压的谐波含量较高,不能提供足够的换相电压积分面积^[20]。故LCF产生的大量谐波通过联络通道扩散至远端线路,这是造成CCF的主要原因。下面将运用2.2节所述的换流器开关调制理论,对交流故障暂态过程多馈入直流系统中的谐波产生原理及其传变过程进行分析。

基于附录A图A1所示河南特高压直流拓扑,换相失败后谐波在多馈入直流系统中的传变回路如图1所示。图中: I_{d1} 、 I_{d2} 分别为流入换流变1、2绕组的直流电流; E_1 、 E_2 分别为与换流母线1、2相连交流系统的等效电动势; Z_{1h} 、 Z_{2h} 分别为与换流母线1、2相连交流系统的等值阻抗。在换流变1交流侧母线处设置接地故障(Z_{fault} 为故障点与母线1之间的等值阻抗),此时换流母线电压明显下降,引发换流站1发生换相失败,此时换流变1阀侧电流 I_{C1} 及直流分量 I_{df} 波形见附录D图D1。由于晶闸管具有单向导通性,换相失败后 I_{C1} 波形不再正负对称,而是偏向于纵轴一侧^[20],进而产生直流分量 I_{df} 。 I_{df} 流经换流变1阀侧绕组,从而改变换流变铁芯工作点,使其进入饱和区域,进而产生励磁涌流。由于该励磁涌流由故障引发,为与普通的励磁涌流相区别,以下简称为“故障涌流”^[20]。

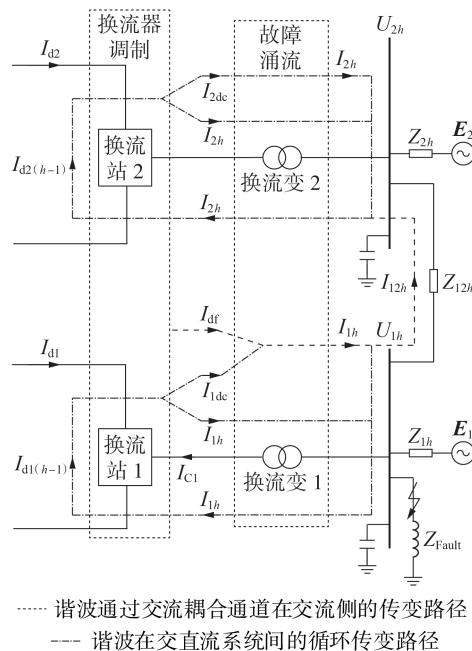


图1 换相失败后多馈入直流系统中的谐波传变回路
Fig.1 Harmonics propagation circuit in multi-infeed DC system after commutation failure

换流变1铁芯饱和引起的故障涌流将产生大量的低次谐波电流 I_{1h} 、 I_{1h} 作用于交流侧谐波阻抗,使换流变1交流母线处电压波形发生畸变,进而产生 h 次

谐波电压 U_{1h} 、 I_{1h} 、 U_{1h} 的波形见附录D图D2。由图可知,谐波次数越大,增长幅度越小,故2次谐波幅值最大^[21]。根据图1, U_{1h} 经过交流联络通道谐波阻抗 Z_{12h} 产生 h 次谐波电流 I_{12h} ,通过交流网络传变至远端换流变2处交流母线,使母线处电压波形发生畸变,进而产生 h 次谐波电压 U_{2h} 、 I_{12h} 、 U_{2h} 的波形见附录D图D3。

根据2.2节中所述的换流器开关函数调制理论, U_{1h} 、 U_{2h} 经交流侧正序谐波阻抗产生 h 次正序谐波电流 I_{1h} 、 I_{2h} ,经换流器调制回直流侧时将产生频次减1的电流分量,即在换流站1、2的直流侧分别产生 $h-1$ 次电流 $I_{d1(h-1)}$ 、 $I_{d2(h-1)}$,如图1中的点划线路径所示。附录D图D4为换流站1直流侧电流与电压中含有的各次交流分量幅值随时间变化的曲线。由图可知,换流站1直流侧电流与电压中含有较高幅值的基频交流分量,验证了交流侧2次正序谐波分量经换流器调制到直流侧变为基频交流分量这一分析结果。 $I_{d1(h-1)}$ 、 $I_{d2(h-1)}$ 再经过换流器调制回交流侧时,分别产生频次减1的负序分量和频次加1的正序分量,故直流侧的基频交流分量被调制回交流侧时将产生直流分量 I_{1dc} 、 I_{2dc} 和2次谐波正序分量。换流器调制产生的直流分量 I_{1dc} 、 I_{2dc} 流入换流变,导致故障涌流继续产生低次谐波电流,其与调制产生2次谐波正序分量共同作用于换流母线,进而产生谐波电压,参与谐波经换流器调制在交直流系统间循环传变过程中。

由于故障近端换流站发生LCF后,换流变故障涌流产生的谐波电流以2次谐波为主。本文以2次谐波电流为例,交流故障引发LCF后,所产生的谐波在多馈入直流系统间传变的过程见附录D图D5。

2.4 考虑谐波传变的CCF发生过程

本节分析考虑谐波传变的多馈入直流系统的CCF发生过程。由仿真分析可知,若交流故障引发多馈入直流系统CCF,则CCF往往出现在LCF后的1个周期(20 ms)内。设交流故障发生时刻为第1 s,交流故障发生后的1个周期内,对近端换流站和远端换流站的12次换相动态过程进行分析,见图2。

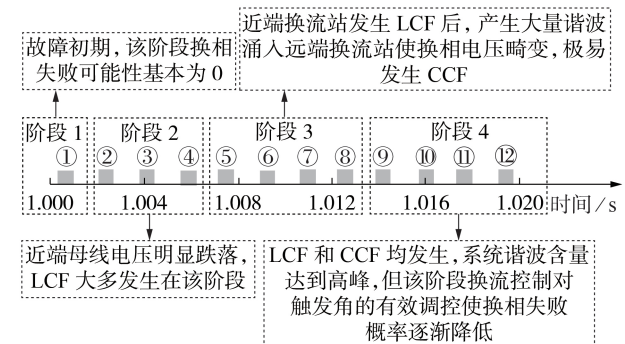


图2 考虑谐波传变的多馈入直流系统CCF发生过程

Fig.2 Occurring process of CCF considering harmonics propagation in multi-feed DC system

将12次换相分配于4个阶段内,在阶段1—4下分别取近端换流站和远端换流站的一个典型换相过程进行仿真,仿真结果分别如图3、4所示。图中, u_a 、 u_b 、 u_c 、 $S_{\max}$ 和 u'_a 、 u'_b 、 u'_c 、 $S'_{\max}$ 分别为稳态运行时和故障暂

态情况下的换相电压和最大换相电压积分面积(均为标么值,后同)。虚线型阶跃曲线为稳态运行时的阀组触发脉冲,其从0跃升至1为换相过程开始时刻,对应触发角 α ,实线型阶跃曲线为故障暂态过程中的阀组触发脉冲,对应触发角 α' 。

阶段1包含故障发生后的第一次换相。从图3(a)中近端换流站在阶段1的换相示意图可以看出,近端换流母线电压跌落程度较轻,对换相影响不大, $S'_{\max}$ 下降为稳态值的84%,在该阶段发生换相失败的可能性基本为0。阶段2包含故障发生后的第2—4次换相。在故障经过一段时间的发展后,近端换流母线的电压已有明显跌落,近端换相电压出现明显形变,故近端换流站的首次换相失败大多发生在阶段2。由图3(b)可知,近端换流站在阶段2的 $S'_{\max}$ 下降为稳态值的62%,发生了LCF。而在LCF发生前,远端换流站受到的影响不大。阶段3包含故障发生后的第5—8次换相,在阶段2中近端换流站发生了LCF后,产生的大量低次谐波通过交流耦合通道涌入远端换流站因此远端换流站在阶段3极有可能发生CCF。例如图4(c)中的故障远端换流阀组在阶段2的 $S'_{\max}$ 下降为稳态值的75%,发生了LCF。阶段4包含故障发生后的第9—12次换相,在LCF与CCF均已发生后,该阶段的谐波含量与直流电流已达到较高水平。然而该阶段的阀组控制已将触发控制提前以增大换相裕度,如图3(d)和图4(d)所示,可以明显看出触发脉冲的阶跃时刻提前,带来的影响是近、远端换流站的 $S'_{\max}$ 分别增长为1.3倍稳态值和1.23倍稳态值,该阶段发生换相失败的概率逐渐降低。需要注意的是,图2中仅展示了在故障发生后一个周期内,近端换流站发生首次换相失败后,引发的电气量变化通过交流耦合传播至某一远端换流站,引发首次CCF的过程。而多个换流站内发生多次换相失败的情况较为复杂,图2中暂未考虑。

由本节分析可知,在阶段2近端换流站发生换相失败后,产生的谐波分量通过联络通道扩散至远端换流站,使远端换流站在阶段3面临换相失败的风险。因此,通过联络通道扩散的故障电流分量是导致CCF的重要环节和判据。如果能及时检测到联络通道电流中的故障分量,并对远端换流站的触发角进行提前控制,则可降低阶段3发生CCF的概率。

2.5 联络通道电流特性

在交流系统短路故障暂态过程中,联络通道电流的变化特征与故障母线的电压变化特征一致。即若发生不对称故障,则故障母线电压与其相连的联络通道上的电流均将产生零序分量;而若发生对称故障,则无零序分量。由于近端母线与远端母线间的电压差增大,联络通道电流幅值增高。将联络通道三相瞬时电流标么值代入附录B式(B2)、(B3)计

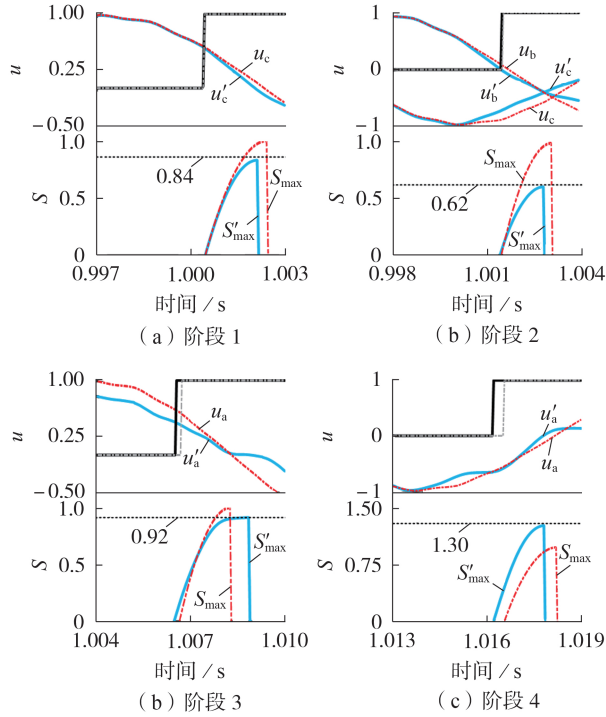


图3 近端换流站内LCF发生的动态过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of dynamic process of LCF occurred in local converter station

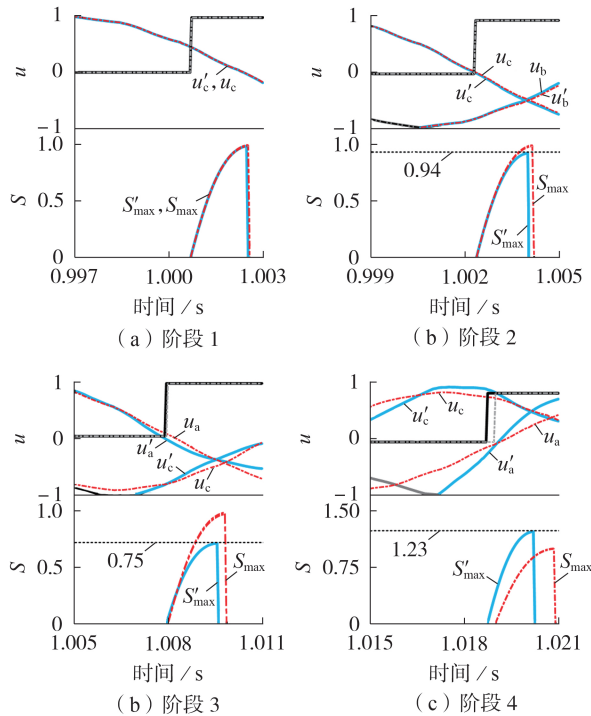


图4 远端换流站内CCF发生的动态过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of dynamic process of CCF occurred in remote converter station

算,得到的联络通道电流 $\alpha\beta$ 分量 $I_{\alpha\beta}$ 幅值也将升高。将 $I_{\alpha\beta}$ 幅值与稳态值作差,得到的故障分量 $|I_{\alpha\beta}|-1$ 综合表征了联络通道电流幅值的增长幅度。而在任何故障类型下,非故障母线的电压均体现为对称故障的特征。

在a相接地故障与三相接地故障下,对故障母线电压 U_1 、远端母线电压 U_2 和通过联络通道馈入远端母线电流 I_{12} 的基频值、零序分量、 $\alpha\beta$ 分量进行计算,上述变量均为标么值。2种故障类型下各故障分量的波形如附录E图E1(a)、(b)所示。由图可知,各故障分量的计算结果验证了理论分析结论的正确性。

3 基于联络通道电流检测的换相失败控制

由于远端换流站距离故障点的电气距离较远,电压跌落程度较轻,其CFPREV控制难以及时启动,无法对CCF进行有效预防^[22]。而相比于远端母线电压,联络通道电流与近端母线电压变化较为同步,对联络通道电流的故障分量检测不仅满足CCF预防检测的灵敏性和速动性要求,同时不依赖广域测量,克服了传输延时所带来的问题。因此,本文设计了基于联络通道电流检测的多馈入直流系统CCF抑制策略。即远端换流站通过对联络通道电流进行零序分量分析和 $\alpha\beta$ 分量分析,可对多馈入直流系统中发生的各种类型交流故障进行有效检测,并快速调控触发角,增大换相裕度,降低CCF发生的概率。

基于联络通道电流检测的CCF预防控制策略如图5所示。图中: i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 为经过标么处理的联络通道三相电流瞬时值; I_{tie} 为通过交流联络通道馈入天中直流换流站的电流; $3I_0$ 为 I_{tie} 的零序分量; I_{th} 为 I_{tie} 的故障判断阈值; S_0 、 $S_{\alpha\beta}$ 分别为 I_{tie} 的零序分量和 $\alpha\beta$ 分量检测使能标志位信号,其值为0表示相应检测分量未超过阈值,该模块不生成触发角调节指令,其值为1表示相应检测分量超过阈值,该模块将生成触发角调节指令; $\Delta\alpha_0$ 、 $\Delta\alpha_{\alpha\beta}$ 为根据相应故障检测分量生成的触发角调节指令; γ_1 为该换流站各阀组在本周期的最小关断角; $\Delta\alpha_1$ 为基于联络通道电流检测

输出的触发角提前量指令; $\Delta\alpha_{CFP}$ 为该站点CFPREV输出的触发角提前量指令; α_{ord} 为该逆变侧直流控制模块生成的触发角指令; α_{oi} 为最终送往换流器触发控制模块的触发角指令。

对联络通道馈入换流母线处的电流 I_{tie} 进行实时采集,计算零序分量和 $\alpha\beta$ 分量。若故障分量越过了故障判断阈值,则相应的分量检测使能标志位置1,将对应的分量乘以系数 k 作为触发角提前量。在输出根据异常分量生成的最大触发角提前量之前,需对该站的关断角状态和CFPREV输出情况进行判断。若发生阀电流层面的换相失败,则欲关断晶闸管在该轮换相周期的剩余时间内将持续导通,其所在半桥的换相过程中断,直到下一个周期才可能恢复。故在此期间实测的 $\gamma_1=0$ 。设 γ_{min} 为一极小值0.001,当 $\gamma_1<\gamma_{min}$ 时,认为CCF已发生,中断 $\Delta\alpha_1$ 的输出。设 γ_{sta} 为一个略高于稳态关断角的数值,当 $\gamma_1>\gamma_{sta}$ 时,认为系统已进入恢复阶段,同样中断 $\Delta\alpha_1$ 的输出,避免过多无功消耗。同时,该控制策略仅工作于交流短路故障发生后至故障远端换流站CFPREV启动前这一段时间,用于补偿远端换流站CFPREV启动过慢的缺点。一旦故障远端换流站的CFPREV控制器启动,本文所提控制策略应立即停止输出。因此需采集 $\Delta\alpha_{CFP}$ 的输出并与一个极小值做比较,若 $\Delta\alpha_{CFP}$ 大于该值,则说明该线路CFPREV已启动,需中断 $\Delta\alpha_1$ 的输出,避免多个触发角提前量叠加导致的触发角过小。触发角过小会显著增大换流站的无功消耗,不利于系统恢复。

故障分量判断阈值 I_{th} 应由联络通道强度决定。两换流母线之间的联络通道越强,意味着联络通道的等值阻抗越小,在同样故障工况下产生的电流故障分量越大,需要将故障判断阈值 I_{th} 设置得更高,以防止小扰动下故障分量轻易越限使换相失败控制器误动作,威胁到系统的稳定运行。目前国际上普遍采用的衡量直流落点间耦合强度的指标 λ_{MHFji} 如式(2)所示^[23]。

$$\lambda_{MHFji} = \Delta U_j / \Delta U_i = Z_{eqji} / Z_{eqii} \quad (2)$$

式中: ΔU_j 为在近端母线 i 受到扰动发生 ΔU_i 的电压

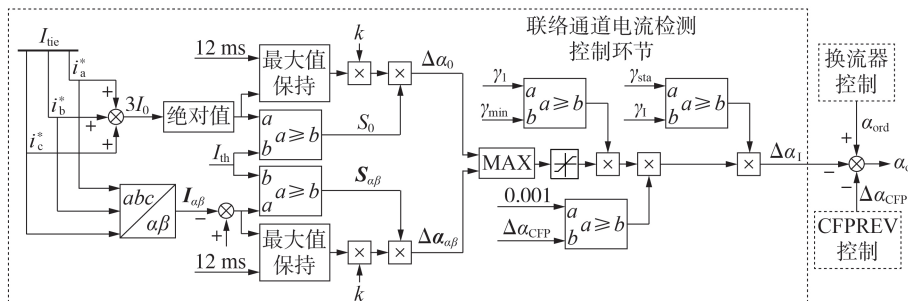


图5 基于联络通道电流检测的CCF预防控制策略

Fig.5 CCF prevention control strategy based on detection of tie-line current

变化时远端母线 j 由于交流通道耦合作用而产生的电压波动; Z_{eqii} 、 Z_{eqji} 分别为受端系统经多端口戴维南等值后近端母线 i 的等效自阻抗、近端母线 i 和远端母线 j 的等效互阻抗,其表明交流侧联络通道强度是由受端交流网络的结构参数决定的。 λ_{MIFji} 的取值范围为 $[0, 1]$, 两换流母线间联络通道越强, λ_{MIFji} 越大, 符合故障判断阈值 I_{th} 的设置需求。

因此, 当基于联络通道强度 λ_{MIFji} 设置近端母线 i 上换相失败控制的启动阈值 I_{th} 时, 将 I_{th} 设置近端母线 i 与多馈入直流系统中其余母线间耦合通道强度的最大值, 以防止小干扰下该控制策略误动, 如式 (3) 所示。

$$I_{thi} = \max \{ Z_{eqji} / Z_{eqii} \} \quad j \neq i \quad (3)$$

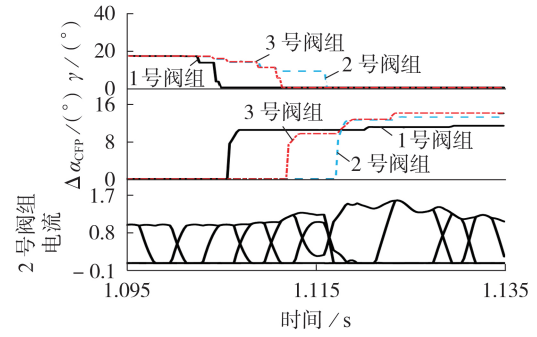
根据上述分析, 设置输出系数 k 为 CFPREV 控制中的常用值 0.24。同时, 由于联络线电流的 $\alpha\beta$ 分量在联络通道较强时可以达到很高的数值, 而触发角提前量不可过高。因此需要根据系统短路比 λ_{MSCR} 在 $\Delta\alpha_1$ 输出前增加限幅环节, 当 $\lambda_{MSCR} < 3$ 时, 弱系统的限幅值设为 8° ; 当 $\lambda_{MSCR} \geq 3$ 时, 强系统的限幅值设为 5° 。

4 仿真验证

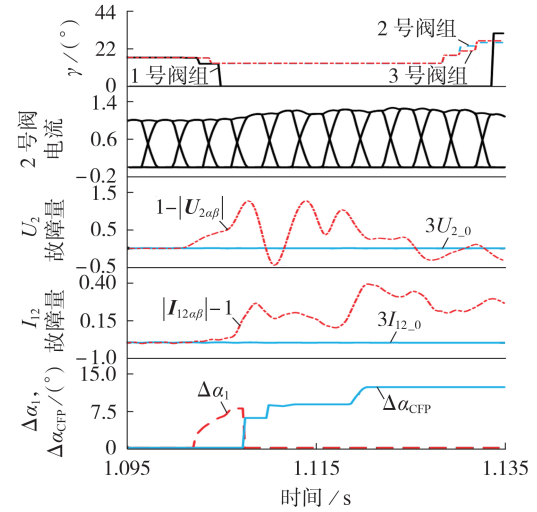
在 PSCAD / EMTDC 中搭建河南特高压多馈入直流系统模型, 验证所提基于联络通道电流检测的 CCF 预防控制策略的有效性。如附录 A 图 A1 所示, 设天中直流换流器为换流器 1; 青豫直流高端、低端换流器分别为换流器 2、3。在换流站 1 母线远端设置三相接地短路故障, 故障点与母线之间的等值电感值为 0.4 H, 故障发生时刻为 1.1 s, 0.1 s 后故障切除。

本文所提控制策略投入前、后多馈入直流系统中各换流站的换相情况如图 6 所示。图中: $U_{2,0}$ 、 $I_{12,0}$ 分别为 U_2 、 I_{12} 的零序分量; $I_{12\alpha\beta}$ 、 $U_{2\alpha\beta}$ 分别为 I_{12} 、 U_2 的 $\alpha\beta$ 分量。将换流站 1、2、3 阀组简称为 1、2、3 号阀组, 2 号阀组电流为标么值, 后同。如图 6(a) 所示, 在 CFPREV 控制下, 3 个换流站所装配的 CFPREV 均在 LCF 发生后启动, 该故障造成换流站 2、3 相继发生 CCF。如图 6(b) 所示, 若加入基于联络通道电流检测控制, 换流站 2、3 可避免发生 CCF。依然以换流站 2 为例进行说明: 在 1.103 s 时检测到 $I_{12\alpha\beta}$ 幅值超过阈值, 则输出触发角提前量指令, 迅速增大换相裕度; 在 1.07 s 时 CFPREV 检测到 $U_{2\alpha\beta}$ 幅值超过阈值, 输出触发角提前量指令 $\Delta\alpha_{CFP}$, 则触发角调节权转移至 CFPREV, $\Delta\alpha_1$ 停止输出。

为了进一步验证该控制策略的有效性, 对所提控制策略进行遍历仿真。在 $[1.100, 1.109]$ s 内设天中直流换流变交流侧母线附近发生持续时间为 0.1 s 的交流故障, 3 个换流站的换相失败情况见附



(a) 仅采用 CFPREV 控制



(b) 加入基于联络通道电流检测控制

图 6 CCF 抑制效果验证

Fig.6 Verification of CCF mitigation effect

录 F 图 F1。采用了所提 CCF 预防控制策略后, 大量黑色圆圈变为浅灰色, 说明所提策略可以有效降低青豫直流发生 CCF 的概率, 将故障影响范围限制在天中直流内部。由于青豫直流 2 个受端换流站参数接近, 本文仅展示高端换流站所连交流母线附近在 $[1.100, 1.109]$ s 之间发生持续时间为 0.1 s 的交流故障时, 3 个换流站的换相失败情况, 如附录 F 图 F2 所示。采用所提 CCF 预防控制策略后, 部分深灰色圆圈变为浅灰色, 部分黑色圆圈变为深灰色, 说明所提策略可以在较轻故障下减小换流站 3 发生 CCF 的概率, 在较严重故障下减小换流站 1 发生 CCF 的概率。

5 结论

本文基于换流器开关调制理论建立了故障暂态过程中多馈入直流系统的谐波传变回路模型。在考虑谐波传变的影响基础上, 对多馈入直流系统的 CCF 机理进行分析, 并设计了一种基于联络通道电流检测的 CCF 预防控制策略。本文所得结论如下:

1) 近端线路发生 LCF 后, 换相失败产生的谐波分量通过交流联络通道扩散至远端换流站, 并在换流器调制作用下形成交直流侧谐波反馈回路, 对直

流侧换相电流和交流侧换相电压均造成干扰,增大CCF发生的风险;

2)在考虑谐波传变的基础上,将故障后多馈入直流系统内12次换相的动态演变过程划分为不同阶段进行分析,发现在阶段2通过联络通道扩散的故障电流分量是导致阶段3发生CCF的关键环节;

3)设计了基于联络通道电流检测的CCF预防控制策略,远端换流站通过检测由联络通道馈入母线的电流变化,能够对多馈入直流系统中发生的换相失败做出快速反应,进而使系统降低发生CCF的风险;

4)通过在PSCAD/EMTDC中搭建河南特高压多馈入直流系统模型,对该控制策略的有效性进行验证,结果证明该策略能够在交流系统故障后正确动作,有效降低了CCF发生的概率。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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/OL]. 高电压技术. (2021-07-23)[2022-01-25]. <http://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210532>.
- [2] 印月,刘天琪,艾青,等.预防多馈入直流输电系统换相失败的直流功率控制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(11):107-113.
YIN Yue, LIU Tianqi, AI Qing, et al. DC power control method for preventing commutation failure in multi-DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11):107-113.
- [3] 王少辉,唐飞,向农.华东电网多直流同时换相失败仿真分析[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(12):16-21.
WANG Shaohui, TANG Fei, XIANG Nong. Commutation failure simulation analysis of East China power grid multiple HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12):16-21.
- [4] 夏成军,王真,杜兆斌.考虑直流系统控制方式的多馈入交互作用因子实用计算方法[J]. 电网技术,2017,41(11):3532-3540.
XIA Chengjun, WANG Zhen, DU Zhaobin. Practical calculation method for multi-infeed interaction factor considering HVDC system control modes[J]. Power System Technology, 2017, 41(11):3532-3540.
- [5] 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):3429-3436,3670.
SHAO Yao, TANG Yong. A fast assessment method for evaluating commutation failure risk of multi-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12):3429-3436, 3670.
- [6] 刘济豪,郭春义,刘羽超,等.基于无功潮流分析的多馈入直流输电耦合作用[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):153-159.
LIU Jihao, GUO Chunyi, LIU Yuchao, et al. Coupling effect in multi-infeed direct current transmission system based on reactive power flow analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):153-159.
- [7] 许汉平,杨炜晨,张东寅,等.考虑换相失败相互影响的多馈入高压直流系统换相失败判断方法[J]. 电工技术学报,2020,35(8):1776-1786.
XU Hanping, YANG Weichen, ZHANG Dongyin, et al. Commutation failure judgment method for multi-infeed HVDC systems considering the interaction of commutation failures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8):1776-1786.
- [8] 雷霄,孙栩,王薇薇,等.多馈入系统直流间耦合程度量化表征方法[J]. 中国电力,2021,54(9):66-73.
LEI Xiao, SUN Xu, WANG Weiwei, et al. A characterization method for coupling relation in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power, 2021, 54(9):66-73.
- [9] 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.
- [10] 李程昊,谭阳琛,熊永新,等.特高压直流多馈入系统换相失败预防协调控制[J]. 电网技术,2019,43(10):3532-3542.
LI Chenghao, TAN Yangchen, XIONG Yongxin, et al. Coordinated control of UHVDC multi-infeed system for commutation failure prevention[J]. Power System Technology, 2019, 43(10):3532-3542.
- [11] 曾琦,李兴源,冯明,等.基于广域测量系统的多馈入直流低压限流单元的协调控制方法[J]. 高电压技术,2017,43(4):1168-1174.
ZENG Qi, LI Xingyuan, FENG Ming, et al. Coordinated control method of VDCOLs in MIDC system based on the widearea measurement system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4):1168-1174.
- [12] 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):50-57.
- [13] 王玉,刘福锁,雷杰,等.对称故障下基于直流电流变化的后续换相失败风险预判及风险等级划分[J]. 电力自动化设备,2021,41(12):130-135,142.
WANG Yu, LIU Fusuo, LEI Jie, et al. Risk prediction and risk level classification of subsequent commutation failure under symmetrical fault based on change of DC current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12):130-135, 142.
- [14] 郭利娜,刘天琪,李兴源.抑制多馈入直流输电系统后续换相失败措施研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):95-99.
GUO Lina, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11):95-99.
- [15] 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/OL]. 中国电机工程学报. (2021-03-29)[2022-01-25]. <http://doi.org/10.13336/j.0258-8013.pcsee.202182>.
- [16] 李程昊,刘遵义,石光,等.换相失败预测控制对特高压直流运行影响分析及改进[J]. 全球能源互联网,2018,1(5):618-625.
LI Chenghao, LIU Zunyi, SHI Guang, et al. Analysis of influence and improvement of commutation failure prevention for UHVDC transmission systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5):618-625.
- [17] 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/OL]. 电网技术. (2021-06-23)[2022-01-25]. <http://doi.org/10.13336/j.1000-3673.pst.2021.0945>.
- [18] 魏羽,刘天琪,晏小彬,等.高压直流输电系统直流偏磁下的谐波不稳定判据研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(17):139-144.
WEI Yue, LIU Tianqi, YAN Xiaobin, et al. Study of harmonic

- instability criterion under DC magnetic bias in HVDC system [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 139-144.
- [19] RAHIMI E, GOLE A M, DAVIES J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 378-384.
- [20] 郑涛, 国兴超, 胡鑫, 等. 逆变侧换流变压器故障性涌流产生机理及其对差动保护的影响 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 39-45.
- ZHENG Tao, GUO Xingchao, HU Xin, et al. Fault inrush current generation mechanism of inverter-side converter transformer and its influence on differential protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 39-45.
- [21] 刘对, 李晓华, 蔡泽祥, 等. 计及变压器铁芯饱和的 LCC-HVDC 输电系统谐波不稳定性评估与应用 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 85-91.
- LIU Dui, LI Xiaohua, CAI Zexiang, et al. Harmonic instability evaluation of LCC-HVDC transmission system considering transformer core saturation and its application [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 85-91.
- [22] 李晓华, 张陈泽宇, 蔡旺延, 等. 基于三相同时刻采样值算法的 HVDC 换相失败预测改进 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 170-176.

LI Xiaohua, ZHANG Chenzeyu, CAI Wangyan, et al. Improvement of HVDC CFPREV based on a three phase simultaneity sampling values algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 170-176.

- [23] 蔡国伟, 史一明, 郭小江, 等. 基于节点耦合距离的多直流馈入系统落点选取方法 [J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1962-1969.
- CAI Guowei, SHI Yiming, GUO Xiaojiao, et al. DC dropping location selection in multi-infeed DC transmission system based on node coupling distance [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1962-1969.

作者简介:



王凌尧

王凌尧(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为特高压交直流混联电网的稳定运行分析与控制 (E-mail: lingrao@hust.edu.cn);

姚伟(1983—), 男, 教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为交直流混联电网稳定性分析、新能源电力系统稳定分析与控制 (E-mail: w.yao@hust.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Prevention control of concurrent commutation failure of multi-infeed DC system based on tie-line current detection

WANG Lingrao¹, YAO Wei¹, YANG Chengxiang¹, XIONG Yongxin¹, LI Chenghao², WEN Jinyu¹

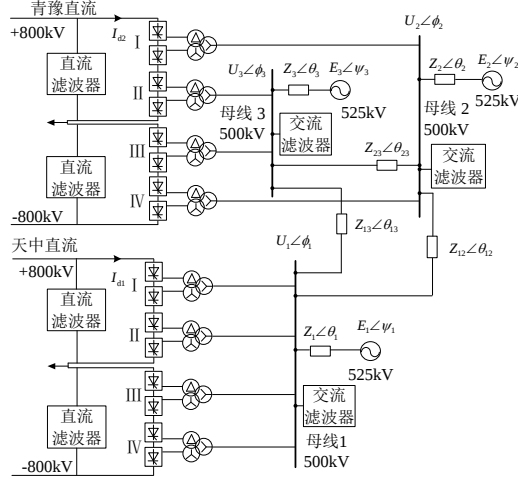
(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Due to the coupling characteristics among DC transmission lines in multi-infeed DC system, the harmonic components induced by an AC fault interfere with multiple DC lines through AC system, which easily leads to CCF (Concurrent Commutation Failure). The model of harmonics propagation circuit in the multi-infeed DC system during AC fault transient process is established based on converter switching modulation theory. The generation mechanism and propagation path of harmonic components are analyzed, and the mechanism of CCF caused by AC fault in multi-infeed DC system is deduced. The dynamic commutation process after the fault is divided into several stages, and the characteristics of each stage are concluded. It is found that the harmonic currents spreading through the tie-line in AC side can be a vital factor of CCF. A CCF prevention control strategy based on tie-line current detection is proposed, which makes the remote converter station react quickly to the commutation failure of local converter station by detecting the abnormal current of tie-line current to reduce the risk of CCF. Taking Henan multi-infeed UHVDC (Ultra High Voltage Direct Current) system as an example, the effectiveness of the proposed strategy is verified by the simulation results.

Key words: UHVDC; multi-infeed DC system; commutation failure; converter switching modulation theory; tie-line; current detection

附录 A



注: $Z_i \angle \theta_i$ 和 $E_i \angle \psi_i$ 为各馈入点处的等效交流系统阻抗和电动势; $U_i \angle \phi_i$ 为换流母线电压;
 $Z_{ij} \angle \theta_{ij}$ 为换流母线间联络通道的等值阻抗。

图 A1 河南特高压多馈入直流系统示意图

Fig.A1 Diagram of Henan multi-infeed UHVDC system

表 A1 多馈入直流系统网络参数

Table A1 Network parameters of multi-infeed DC system

参数	数值	参数	数值	参数	数值
Z_1/Ω	$0.64+j7.36$	Z_{12}/Ω	$5.74+j65.65$	λ_{MSCRi}	3.787
Z_2/Ω	$2.17+j24.77$	Z_{13}/Ω	$7.33+j83.83$	λ_{MSCRi}	2.721
Z_3/Ω	$2.18+j24.94$	Z_{23}/Ω	$1.46+j16.72$	λ_{MSCRi}	2.694

注: λ_{MSCRi} 为第 i 个馈入点的多馈入短路比, 其表征该落点附近的交流网架强度。

附录 B

逆变侧 CFPREV 控制策略框图如图 B1 所示。图中, u_a^* 、 u_b^* 、 u_c^* 分别为经过标幺化的母线三相电压瞬时值, 稳态时幅值为 1 p.u.; α_{ord} 为换流器控制环节计算出的触发角度指令。CFPREV 控制模块通过检测交流故障引起的母线电压变化来生成对应的触发角提前量 $\Delta\alpha_{CFP}$, 并将其输出至触发控制模块与 α_{ord} 作差, 使触发角进一步减小, 得到最终的触发角指令 α_{oi} 对晶闸管进行触发。

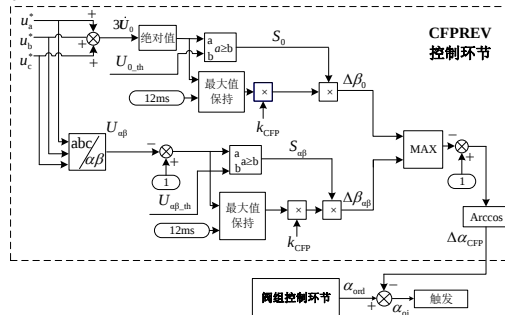


图 B1 逆变侧 CFPREV 控制策略

Fig.B1 CFPREV control strategy at inverter side

CFPREV 的故障检测算法分为并行的 2 个部分。图 B1 中的上半部分为零序分量检测，用于检测包括单相接地和两相接地短路在内的不对称接地故障。

$$|3U_0| = |U_a + U_b + U_c| \quad (B1)$$

由式(B1)可知，稳态时母线电压零序分量 $|3U_0|$ 应为 0。当发生交流系统不对称接地故障时，若 $|3U_0|$ 的幅值超过零序分量阈值 U_{0_th} (例如工程经验值 0.15 p.u.)，零序分量检测标志位 S_0 被置 1，否则 S_0 保持为 0。当零序分量检测标志位置 1 时，取 12 ms 内零序分量 $|3U_0|$ 的最大幅值，乘以一个比例系数 k_{CFP} 生成触发角提前量指令 $\Delta\beta_0$ (余弦值)，被输送到 MAX 选择模块等待输出。图 B1 下半部分对三相电压进行 Clark 变换，如式(B2)一(B4)所示。

$$\begin{cases} U_\alpha = \frac{2}{3}U_a - \frac{1}{3}(U_b + U_c) \\ U_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}(U_b - U_c) \end{cases} \quad (B2)$$

$$U_{\alpha\beta} = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2} \quad (B3)$$

将式(B2)代入式(B3)可得：

$$U_{\alpha\beta} = \sqrt{2[(U_a - U_b)^2 + (U_b - U_c)^2 + (U_c - U_a)^2]/9} \quad (B4)$$

由(B4)可知稳态时 $U_{\alpha\beta}$ 应等于交流电压幅值 1 p.u.。在交流系统短路故障时，将 $U_{\alpha\beta}$ 稳态值与实测值作差得到故障分量 $1-U_{\alpha\beta}$ 综合表征了母线三相电压跌落程度。若故障分量 $1-U_{\alpha\beta}$ 超过检测阈值 ABZ_LEVEL(例如工程经验值 0.15 p.u.)，则该部分检测输出标志位信号 $S_{\alpha\beta}$ 被置 1，否则 $S_{\alpha\beta}$ 保持为 0。当 $U_{\alpha\beta}$ 分量检测标志位信号为 1 p.u.时，取 12 ms 内故障分量 $1-U_{\alpha\beta}$ 的最大值乘以一个比例系数 k_{CFP} ，生成触发角提前量指令 $\Delta\beta_{\alpha\beta}$ (余弦值)，被输送到 MAX 选择模块等待输出。由式(B4)可知， $U_{\alpha\beta}$ 幅值由交流电压的正序分量和负序分量计算得到，不含零序分量。因此，在 CFPREV 控制中，零序分量检测和 $U_{\alpha\beta}$ 分量检测需相互配合才能有效覆盖各类交流短路故障的快速检测。

附录 C

换流器对交直流电压、电流调制过程的数学模型为：

$$\begin{cases} u_{dc} = u_a S_{ua} + u_b S_{ub} + u_c S_{uc} \\ i_a = i_{dc} S_{ia} \\ i_b = i_{dc} S_{ib} \\ i_c = i_{dc} S_{ic} \end{cases} \quad (C1)$$

式中： S_{ia} 、 S_{ib} 、 S_{ic} 和 S_{ua} 、 S_{ub} 、 S_{uc} 分别为电流、电压开关函数。换流器交流侧电压可表示为：

$$\begin{cases} u_a = U_{an} \cos(\omega_n t + \alpha_{an}) \\ u_b = U_{bn} \cos(\omega_n t + \alpha_{bn}) \\ u_c = U_{cn} \cos(\omega_n t + \alpha_{cn}) \end{cases} \quad (C2)$$

式中： ω_n 为 n 次交流分量角速度； α_{an} 、 α_{bn} 、 α_{cn} 分别为 n 次三相交流分量的相位。用对称分量法对式(C2)中的三相电压进行重新表达，并代入式(C1)中，考虑换相重叠角 μ ，取傅里叶分解的首项，可得交流侧正序电压分量经换流器调制到直流侧形成频次减 1 的电压分量为：

$$\frac{3U_n^+}{2} A_u \cos[(\omega_n - \omega)t + \alpha_n^+] = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\mu}{2} \times U_n^+ \cos[(\omega_n - \omega)t + \alpha_n^+] \quad (C3)$$

式中： A_u 为傅里叶分解第一项系数。交流侧负序电压分量经换流器调制到直流侧形成频次加 1 的电压分量：

$$\frac{3U_n^-}{2} A_u \cos[(\omega_n + \omega)t + \alpha_n^-] = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\mu}{2} \times U_n^- \cos[(\omega_n + \omega)t + \alpha_n^-] \quad (C4)$$

式 (C3)、(C4) 所示电压分量幅值相同。

下面推导换流器将直流侧谐波分量调制到交流侧的过程，假设直流侧中有交流信号 i_d 为：

$$i_d = I_{dn} \cos(\omega_{dn} t + \varphi_{dn}) \quad (C5)$$

将式(C5)代入式(C1)中得到交流侧三相电流表达式，对其进行傅里叶展开，取第一项有：

$$\begin{cases} i_a = \frac{\sqrt{3} \sin \mu}{\pi \mu} I_{dn} (\cos \alpha + \cos \beta) \\ i_b = \frac{\sqrt{3} \sin \mu}{\pi \mu} I_{dn} \left[\cos \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ i_c = \frac{\sqrt{3} \sin \mu}{\pi \mu} I_{dn} \left[\cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \end{cases} \quad (C6)$$

式中： $\alpha = (\omega_{dn} + \omega)t + \varphi_{dn}$ ； $\beta = (\omega_{dn} - \omega)t + \varphi_{dn}$ 。由式(C6)可知，直流侧谐波电流经过换流器调制到交流侧，产生频次加 1 的正序谐波电流和频次减 1 的负序谐波电流。

附录 D

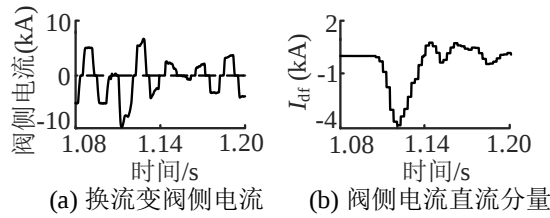


图 D1 换相失败后换流变 1 阀侧电流波形及其直流分量

Fig.D1 Waveform and DC component of current at valve side of Converter Transformer 1 after commutation failure

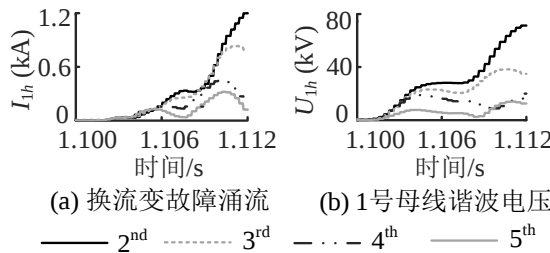


图 D2 换流变 1 铁芯饱和和故障涌流引起的低次谐波分量及母线 1 谐波电压波形

Fig.D2 Waveforms of low-order harmonic components of fault inrush current and harmonic voltages of Bus 1 induced by inrush current caused by Converter Transformer 1 saturated

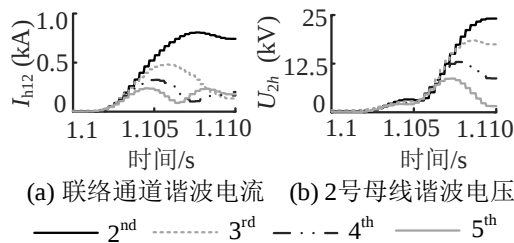


图 D3 联络通道谐波电流及母线 2 谐波电压波形

Fig.D3 Harmonic current of tie-line and harmonic voltages of Bus 2

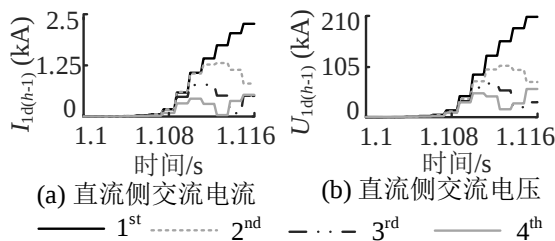


图 D4 经换流器调制在换流站 1 直流侧产生的交流分量

Fig.D4 AC components at DC side of Converter 1 through converter modulated

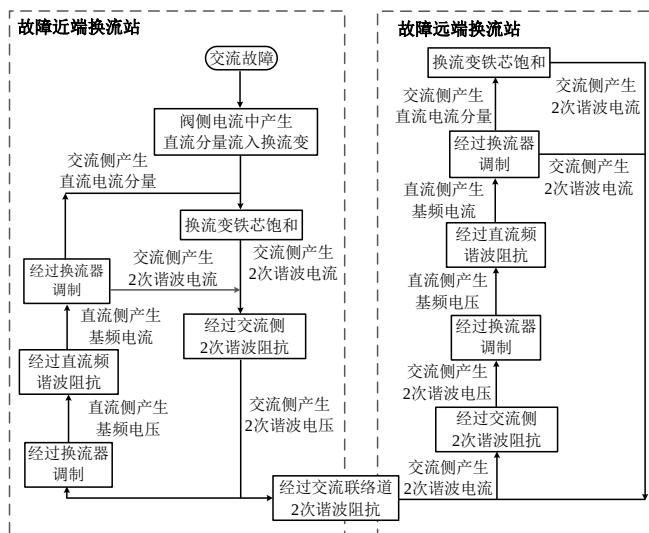
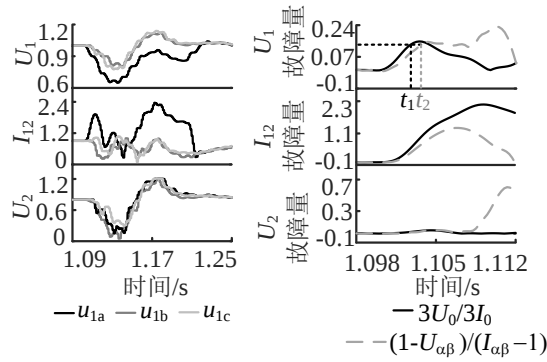
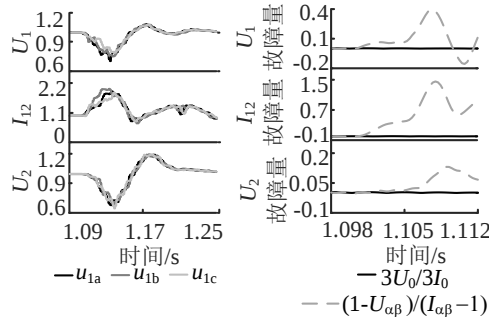


图 D5 换相失败产生的 2 次谐波在多馈入直流系统中传变流程

Fig.D5 Flowchart of transfer process of secondary-order harmonic induced by commutation failure in multi-infeed DC system



(a) 不对称故障

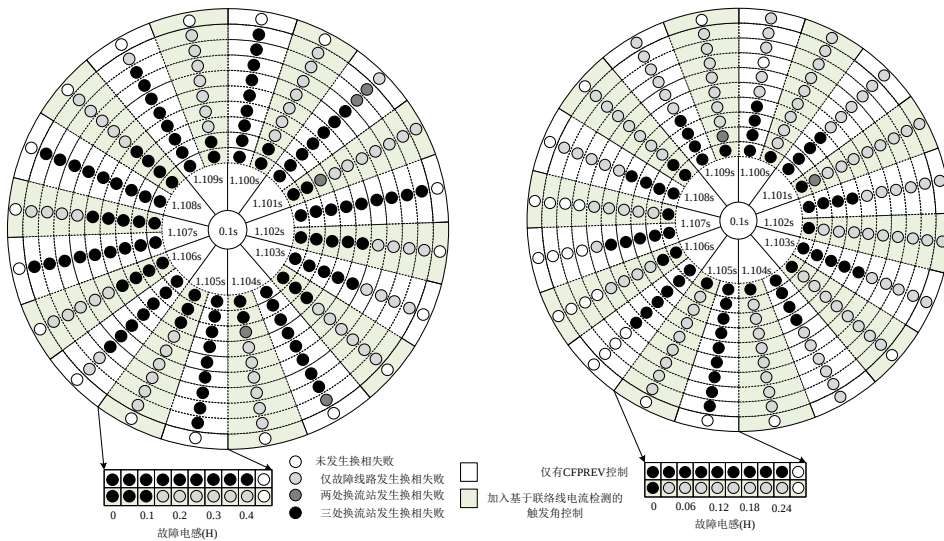


(b) 对称故障

图 E1 不同故障类型下近端母线电压、联络通道电流、远端母线电压波形

Fig.E1 Waveforms of local bus voltage, tie-line current and remote bus voltage under various types of fault

附录 F

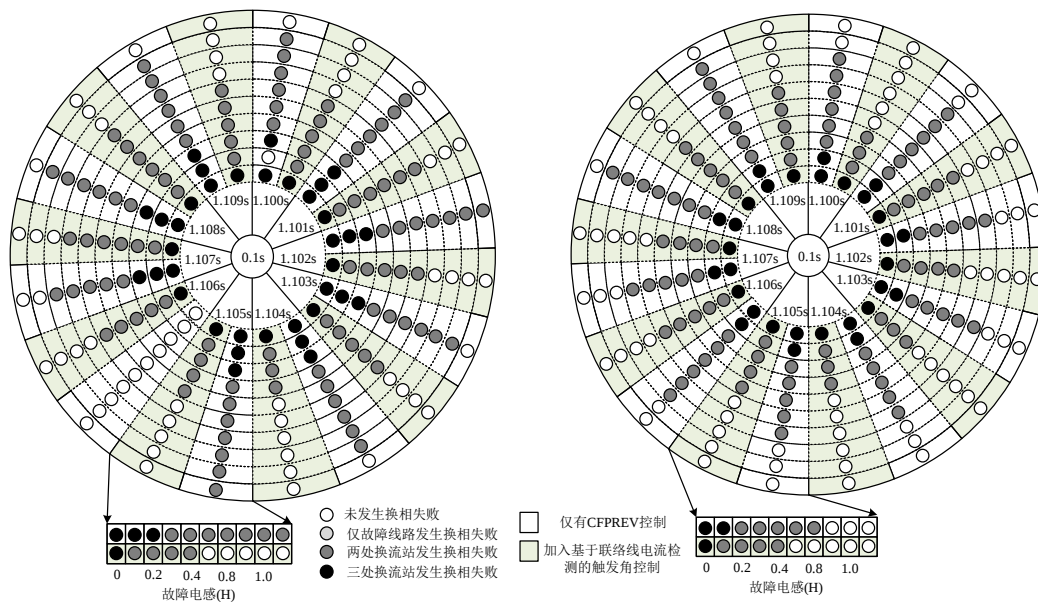


(a) 天中直流发生三相对称故障

(b) 天中直流发生单相不对称故障

图 F1 所提策略在天中直流故障下的有效性

Fig.F1 Effectiveness of proposed strategy under faults in Tianzhong DC system



(a) 青豫直流发生三相对称故障

(b) 青豫直流发生单相不对称故障

图 F2 所提策略在青豫直流故障下的有效性

Fig.F2 Effectiveness of proposed strategy under faults in Qingyu DC system