

基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法

陈树勇¹, 李新年², 余军¹, 李涛¹, 吕鹏飞¹, 印永华¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085; 2. 东北电力学院, 吉林省 吉林市 132012)

A METHOD BASED ON THE SIN-COS COMPONENTS DETECTION MITIGATES COMMUTATION FAILURE IN HVDC

CHEN Shu-yong¹, LI Xin-nian², YU Jun¹, LI Tao², LÜ Peng-fei¹, YIN Yong-hua¹

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China; 2. North East Electric Power Institute, Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: The mechanism of commutation failure of DC-AC converter was studied and the theory of commutation failure prediction control module of Three Gorges-Guangdong HVDC system was analysed. The u_0 detector of CFPREV acts very slowly upon crossing zero of AC voltage and under the condition of three-phase faults $abc-ab$ transformation detection has very limited improvement of commutation failure, a new method based on an idea of sin-cos components detector is presented to mitigate commutation failure in multi-infeed HVDC systems. This method predicts quickly ac faults in terms of two components on the rotational reference frame synchronized with the ac system frequency. After detecting the fault, an additional angle is deduced from the firing order at the inverter station, which in practice enlarges the commutation margin. A dual-infeed HVDC model based on PSCAD/EMTDC is built and the simulation results show that it is very effective in reducing the probability of commutation failure in MIDC.

KEY WORDS: Power system; HVDC; Commutation failure; Sin-cos components detect; PSCAD/EMTDC software

摘要: 分析了高压直流(HVDC)换相失败的机理及发生换相失败的原因,介绍了三-广直流输电工程换相失败预测控制模块,针对其中 u_0 检测在交流电压过零时故障启动慢和 $abc-ab$ 坐标变换在三相故障时不能有效地预防换相失败的问题,提出了一种基于 sin-cos 分量检测的改进方法,并利用 PSCAD/EMTDC 软件建立了双馈入直流系统模型,该方法将单相交流电压分解为两个以基波频率旋转的分量,可快速地判断交流系统故障,一旦检测到故障,立即减小触发角,从而增加换相裕度,避免换相失败的发生。仿真结果表明:该方法能够在单相接地故障和三相故障时有效地减少多馈入直流系统发生换相失败的几率。

关键词: 电力系统; 高压直流输电; 换相失败; 正弦-余弦分量检测; PSCAD/EMTDC 软件

1 引言

换相失败是高压直流(HVDC)输电系统逆变器最常见的故障之一,它将导致直流电压降低、输送功率减少、电流增大、换流阀寿命缩短、换流变压器直流偏磁及逆变侧弱交流系统过电压等不良后果。若换相失败后控制不当,还会引发后继的换相失败,最终导致直流停运。HVDC 换相失败的主要原因是由于交流电压幅值降低、直流电流突增或交流换相电压过零点相角偏移等^[1-2]。

防止换相失败主要有以下 2 种方法:

(1) 增大正常运行时整定的关断角 γ , 但增大 γ 是以消耗无功为代价的;

(2) 在检测到将要发生换相失败时,将触发角 α 减小,以增加换相裕度,减少换相失败的发生。

文献[3]提出一种判别换相失败的方法,但对换相失败应采取的措施分析不够。文献[4]仅针对单相接地故障,通过解析计算并根据 Δu 确定出理想的触发角,从而预防换相失败。文献[5]将三-常直流输电工程中的换相失败预测控制模块应用于单馈入直流系统中,取得了一定效果。

随着西电东送和全国联网,三-广和贵-广直流陆续投运,在原有天-广直流的基础上,南方电网已形成了多直流馈入系统^[6]。将新的直流输电线路融入到已有的交-直流系统中将会出现新的问题^[7-9],若各直流输电系统交流换流母线间的电气联系较强时,逆变侧交流系统故障后,换流母线电压的跌

落容易引发与交流系统相连的直流系统发生换相失败, 甚至是多回直流系统同时换相失败和连续换相失败^[10]; 在严重的交流故障下, 多回直流的连续换相失败将导致直流不能正常恢复, 甚至威胁到系统的安全稳定运行。针对大扰动, 文献[11]研究了采用非线性控制改善多馈入直流系统的连续换相失败。文献[12]通过对含有多馈入直流的交、直流混合电网 HVDC 建模的研究, 为仿真分析多直流逆变站连锁换相失败问题提供了新的思路。

本文将在分析三-广直流控制系统中换相失败的预测功能(CFPREV)基础上, 提出一种用 sin-cos 分量检测判别交流故障以有效避免换相失败的改进方法(CFPRED)。该方法能在电压过零故障时快速启动, 且在三相故障时对预防换相失败有明显效果, 可有效解决原有 CFPREV 启动慢的缺点。文中最后利用 PSCAD/EMTDC^[13]建立双馈入直流模型, 重点研究了双馈入直流系统中逆变站交流系统故障下两站发生换相失败的情况以及采用 CFPRED 后对两站换相失败的改善。

2 换相失败的机理分析

当2桥臂之间换相结束后, 若刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内未能恢复阻断能力, 或在反向电压期间换相过程一直未能进行完毕, 则这2种情况在阀电压转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, 该现象被称为换相失败。导致换相失败的各因素之间的相互关系为

$$g = b - m \quad (1)$$

式中 g 为关断角; b 为越前触发角; m 为换相角。

由式(1)可见, g 角直接取决于 b 角和 m 角。

晶闸管实际需要的关断角 g_{\min} 通常在 $6^\circ \sim 9^\circ$ 之间, 实际运行时, 因需要考虑串联连接的晶闸管之间存在的电压分布不平衡、器件特性的变化以及安全裕度等, 一般整定值为 $g \approx 18^\circ$ 。此时, 触发越前角 b 是由直流输电的控制器决定的, 而 $b = 180^\circ - a$, 因此最终都要落实到对 a 的控制。

g 决定于多个因素, 其计算式为

$$g = \arccos(\sqrt{2}I_d X_C / U_V + \cos b) \quad (2)$$

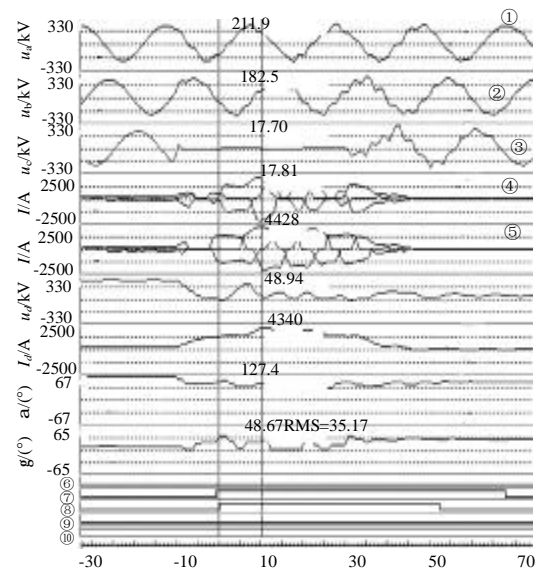
式中 I_d 为直流电流; X_C 为换相电抗; U_V 为换流变压器交流系统侧电压折算到阀侧的电压。

当逆变侧交流系统发生不对称故障并使换相线电压过零点前移角度 f 时, 逆变器关断角为

$$g = \arccos(\sqrt{2}I_d X_C / U_V + \cos b) - f \quad (3)$$

由式(3)可以看出: 因交流电压降低、直流电流增大或换相线电压过零点前移都会导致 g 减少; 若 $g > g_{\min}$, 则逆变器就可能发生换相失败。

图1为三-广直流鹅城站发生换相失败时的实测瞬时波形。2004年3月15日, 在鹅-横甲线靠近鹅城侧c相交流线路上制造单相接地故障, 直流双极在交流扰动后恢复正常。从录波图上看, c相故障后, 直流电压幅值 u_d 从490kV跌至70kV, 直流电流从正常运行时的400A上升至4300A, 直流保护系统检测到换相失败时间为64ms。从阀侧交流电流波形可以看出: 交流系统故障, 直流发生单次换相失败后, 又发生2次连续换相失败。在此期间一些换流阀长期过流, 这将影响换流器的运行寿命, 甚至损坏。



注: 图中①~③为逆变站换流母线三相电压; ④为三相 Y/Y 阀侧交流电流; ⑤为三相 Y/D 阀侧交流电流; ⑥为功率回降信号; ⑦为换相失败信号; ⑧为低电压启动信号; ⑨为闭锁信号; ⑩为解锁信号。

图1 三-广直流鹅城交流单相故障下换相失败录波图
Fig. 1 Three Gorges-Guangdong HVDC TFR during a single-phase fault at Echeng

随着电网的发展, 我国出现了多馈入直流系统。与传统的单馈入直流系统相比, 多馈入直流输电系统中除了存在更复杂的交直流相互作用外, 各子直流系统之间还存在各种复杂的相互影响^[10,12]。某一直流逆变侧的交流系统故障可能引起换相失败, 进而引起直流系统传输功率及与逆变侧交流系统交换的无功功率的波动。直流输电系统有功功率的改变会影响发电机功角, 无功功率的改变会影响交流系统电压等。在多馈入直流输电系统中, 某一直流输电系统的无功功率波动会影响邻近交流母线电压, 从而影响到其它直流端的有功功率和无功功

率传送, 进而影响自身交流母线电压, 这些相互作用因素使得多馈入直流输电系统换相失败更为复杂。因此必须采取相应措施减少换相失败的发生。

3 换相失败的预测逻辑

换相裕度不足将使 g 减小, 最终导致熄弧时间不足是引发换相失败的根本原因, 而增大正常运行整定的 g 则需要消耗更多的无功功率。三-广直流控制系统中的换相失败预测模块较好地解决了这个矛盾, 它的主要思想是: 当检测到交流系统故障可能引发换相失败时, 在逆变侧 a 中减去一定角度, 实现提前触发。这样即可在故障时起到增大 g 的作用, 又可保证正常运行的经济性。

换相失败预测控制模块 (CFPREV) 包括 2 个部分: ①检测零序电压来判断单相故障; ②基于 $abc-ab$ 坐标变换来检测三相故障。

当逆变侧交流系统发生单相接地故障时, 换流母线电压中出现零序分量为

$$u_0 = u_a + u_b + u_c \quad (4)$$

$abc-ab$ 坐标变换是用一个旋转矢量来表示三相交流电压, 为

$$u_a = \frac{2}{3}u_a - \frac{1}{3}(u_b + u_c) \quad (5)$$

$$u_b = \frac{\sqrt{3}}{3}(u_b - u_c) \quad (6)$$

式中 u_a 和 u_b 为 $u_{\alpha\beta}$ 矢量在 $a-b$ 平面 a 轴和 b 轴上对应的 2 个分量, 三相对称分量经变换后在 $a-b$ 平面得到一个以角速度 w 旋转的矢量。

图 4 给出的 ab_{SUM} 为旋转矢量的幅值, 可由式 (7)计算得到为

$$u_{ab} = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (7)$$

当交流系统发生故障时, 若 ab_{SUM} 与故障前该量的差 $ab_{SUM_FILT} >$ 设定值, 则启动控制模块, 并将该差值通过变化转换为一角度, 最终从逆变站的 a 中减去该角度。

在三-广直流输电工程中, CFPREV 是在快速 DSP 中执行, 其执行周期是 $80\mu s$, 对于 50Hz 系统, 此值转换成角度仅为 1.44° , 对于逆变站交流系统故障导致的电压跌落, CFPREV 可以快速反应。因此, 它不但可以避免单馈入直流系统的逆变站交流系统引起的换相失败, 而且可以预防由于某一直流子系统换相失败引起交流扰动导致的其他直流系统发生同时和连续换相失败。

在研究中发现, 用 u_0 瞬时值检测单相接地故障时, CFPREV 的动作速度受故障时刻影响, 即在电压峰值时动作快, 而在过零时动作慢。为了解决在电压过零附近动作慢的问题, 本文在原有基础上增加 sin-cos 分量检测法判别^[14], 图 4 给出了改进后的逻辑图(改进 CFPREV 称为 CFPRED)。sin-cos 分量检测的相关公式为

$$v = |v| \cos(q + Y) = a \cos q + b \sin q \quad (8)$$

$$a = v \cos q - v' \sin q \quad (9)$$

$$b = v \sin q + v' \cos q \quad (10)$$

$$|v| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (11)$$

式中 q 为旋转参考坐标, 且 $w = dq/dt$ (w 为正弦电压的角频率), Y 为相角, $v' = (dv/dt)/w = -a \sin q + b \cos q$; a 和 b 为正弦、余弦分量的幅值。

当交流系统发生故障时, 电压瞬时跌落, 用 $|v|$ 与故障前该量的差作为故障判据, 差值 $U_{DIFF_MAX} >$ 设定值, 说明将产生换相失败, 启动控制模块。

式(9)、(10)可用图 2(a)的方块图表示, 为了滤除高次谐波和噪声, 在末端加一滤波环节。图 2(b)给出了 sin-cos 分量检测电压的暂态响应, 在电压过

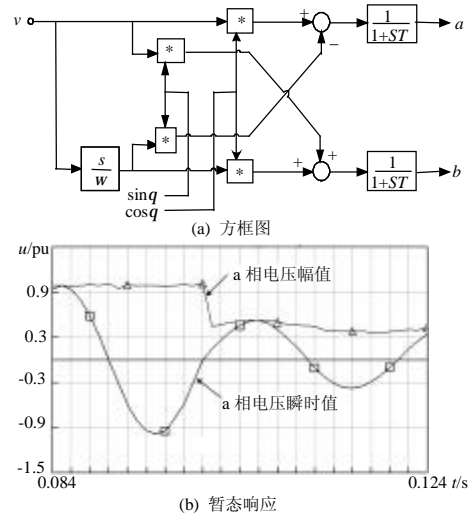


图 2 交流电压幅值检测

Fig. 2 AC voltage amplitude detector

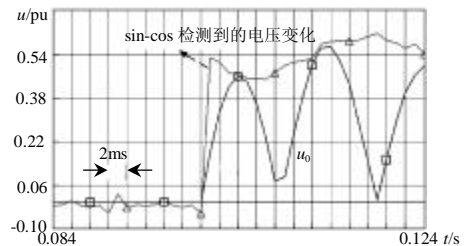


图 3 2 种检测方法的比较

Fig. 3 The comparison of two methods

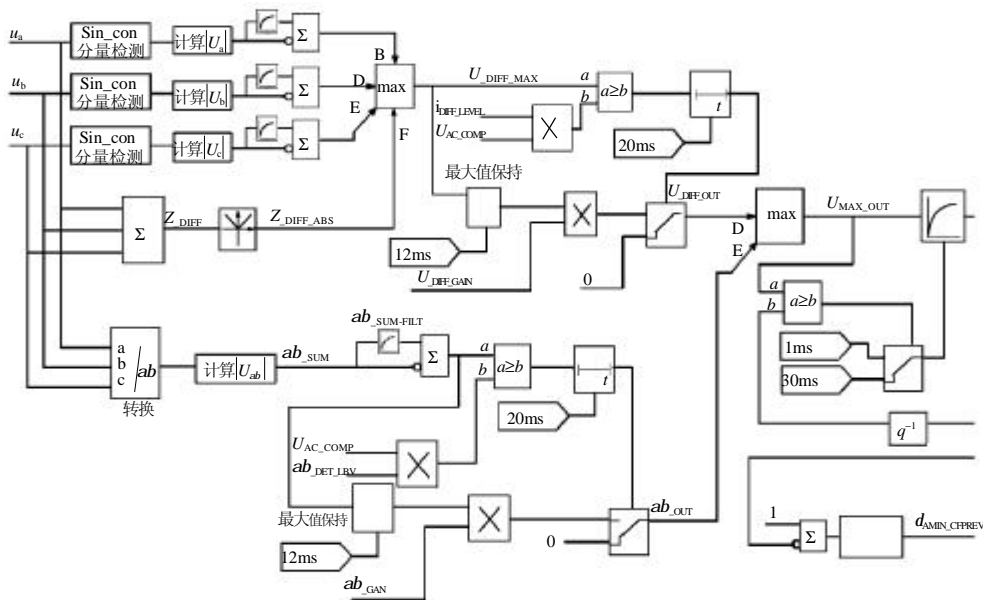


图 4 换相失败预测控制模块 (CFPRED)

Fig. 4 Commutation failure prediction control module

零故障时，其变化在 1ms 可到达最大值。而从图 3 可以看出，基于 u_0 检测大约需 4ms，而且电压变化慢。因此 sin-cos 检测在电压过零附近动作快。但考虑到 u_0 检测在电压峰值动作快，所以在换相失败预测逻辑中保留了该部分。sin-cos 分量也可检测三相交流故障，因此可和 abc-ab 检测互为后备，将 sin-cos 分量检测的输出 U_{DIFF_OUT} 和 abc-ab 变换检测的输出 ab_OUT (见图 4) 的最大值作为 U_{MAX_OUT} 。为了使最终的输出更为平滑，在 U_{MAX_OUT} 后增加一滤波环节，可根据 U_{MAX_OUT} 的变化趋势选择不同的滤波时间常数。最终将滤波后的值通过 arcos 转换为一角度，并从逆变站的触发角中减去该角度。本文重点分析了上述 2 种故障检测方法在单相和三相故障中的应用，这 2 种方法对于相间故障也是适用的。

4 仿真和测试结果

4.1 仿真模型

图 5 为一测试用双馈入直流输电系统，2 个直流输电子系统均采用 CIGRE 标准测试系统的参数。该模型基本保留了实际多馈入直流的内在结构和各种响应特征，也使分析变得简明，其有效性已被许多研究所证实^[15-16]。在此模型的基础上，本文将重点研究在直流子系统 1 逆变站（以下简称为站 1）换流母线发生单相接地和三相故障时两站逆变器换相失败的情况以及采用 CFPRED 和 VDCOL 策略对两站发生换相失败的改善。

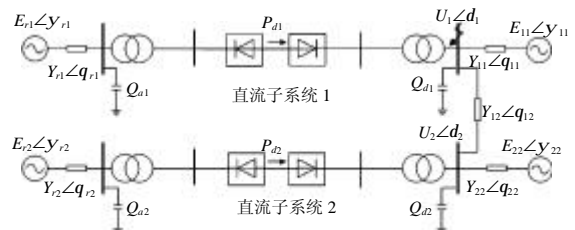


图 5 双馈入直流输电系统简化模型

Fig. 5 Simplified dual infeed HVDC systems model

4.2 模型中的直流控制系统

(1) 直流控制方式。假定各直流输电子系统的整流侧采用定电流控制，逆变侧采用定关断角控制，且两侧均采用 PI 调节器。

(2) 低压限流控制。为使直流系统在扰动期间具有良好的性能并避免发生换相失败，在整流侧和逆变侧的定电流控制器中均设有低电压减电流 (VDCOL) 环节。

4.3 故障测试

本文通过对仿真模型中的站 1 换流母线施加单相接地故障和三相故障来测试换相失败预测模块在双馈入直流系统中换相失败的效果，如图 3 所示。仿真时故障点接有可调电感，以模拟距换流母线不同距离下的交流故障情况。

图 6 给出了直流子系统 1 和 2 的逆变站换流母线电压 u 、电压变化量最大值 U_{DIFF_MAX} 及 CFPRED 输出 d_{AMIN_CFPREV} 的波形，9.1s 时站 1 换流母线发生单相接地故障，持续 0.1s 后切除故障。故障后，站 1 的 a 相电压瞬时跌落， U_{DIFF_MAX} 瞬时上升，由于

站 2 离故障点较远, $U_{2U_DIFF_MAX}$ 变化量较小。图 6 中 d_{2AMIN_CFPREV} 较 $U_{2U_DIFF_MAX}$ 输出平滑, 是由于其间增加了一滤波环节(见图 4)。两站的 d_{AMIN_CFPREV} 都将从最终的触发角中减去, 实现提前触发。三相故障时和单相接地时基本相同。

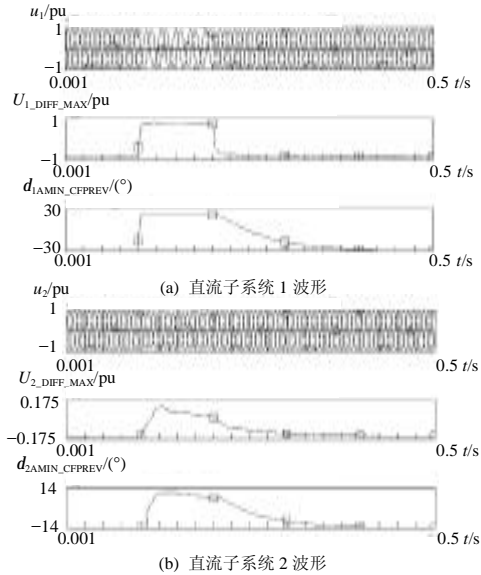


图 6 站 1 单相接地故障时两站逆变器侧交流电压 u 、 U_{DIFF_MAX} 、 d_{AMIN_CFPREV}

Fig. 6 Inverter bus voltage, U_{DIFF_MAX} , d_{AMIN_CFPREV} of two inverter stations during a single-phase fault at the inverter bus of station 1

4.4 测试结果

在站 1 换流母线处施加一单相接地故障, 故障电抗在 0.0H 到 0.16H 之间变化, 站 1 故障相电压从 0.0 pu 变化到 0.92 pu。从 9.1s 到 9.108s, 以步长为 2ms 施加故障, 研究不同时刻故障对换相失败的影响。图 7 给出了单相接地故障的测试结果。由图 7 可见, 站 1 应用 CFPRED 后对 2 站换相失败都有较大的改善, 尤其是 2 站同时换相失败的情况, 其改善更显著。但在 9.106s 时刻, 投入 CFPRED 对站 1 换相失败没有改善, 因为此时阀已开始换相, 提前触发不能避免换相失败。在单相故障时, 投入 VDCOL 功能还可以有效地避免 2 站发生连续换相失败。

图 8 给出了 9.1s 时在站 1 换流母线处模拟单相经不同阻值电抗接地时, 投入 CFPRED 对 2 站换流母线故障相电压的影响。由图可见, 投入 CFPRED 能有效地避免换相失败, 从而可改善换流母线电压。

图 9 给出了三相故障的测试结果。由图可知, CFPRED 能在三相故障时有效地减少发生换相失败(尤其是 2 站同时换相失败)的几率。但在逆变站近

端三相故障时, 即使投入 VDCOL, 也不能避免站 1 发生连续换相失败。图 10 给出了 9.1s 模拟三相经

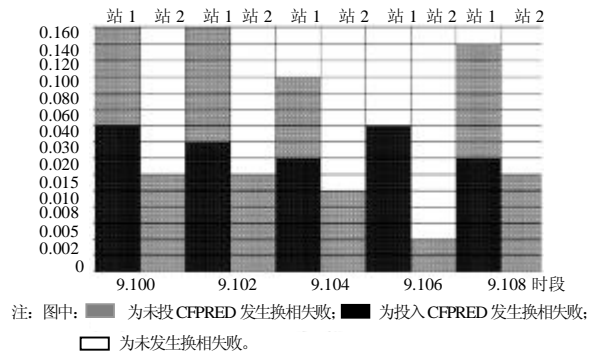


图 7 站 1 换流母线单相接地故障投入 CFPRED 时对换相失败的改善

Fig. 7 Improvement of commutation failure during inverter single-phase faults of station 1 by applying CFPRED

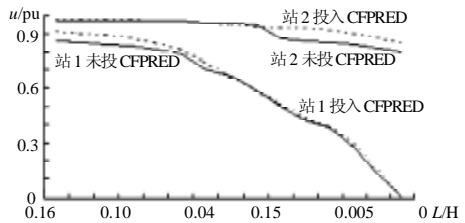


图 8 站 1 换流母线单相接地故障时 CFPRED 对两站换流母线电压的影响

Fig. 8 Effect of inverter bus voltage of two stations during single-phase faults in station 1 by applying CFPRED

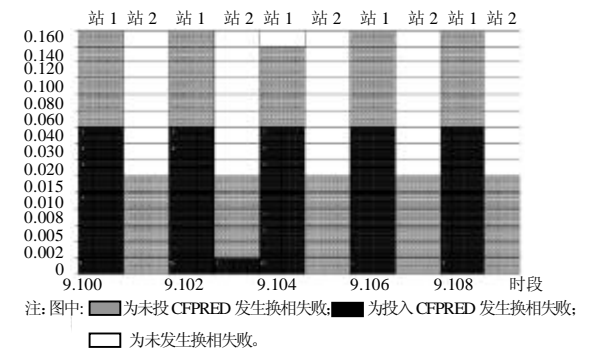


图 9 站 1 换流母线三相接地故障时 CFPRED 对换相失败的改善

Fig.9 Improvement of commutation failure during inverter three-phase faults of station 1 by applying CFPRED

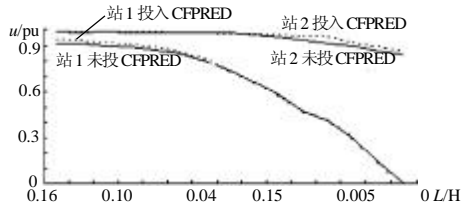


图 10 站 1 换流母线三相故障时 CFPRED 对两站换流母线电压的影响

Fig. 10 Effect of inverter bus voltage of two stations during three-phase faults in station 1 by applying CFPRED

不同阻值电抗故障时,投入 CFPRED 对 2 站换流母线电压的影响,由图可以看出,其影响和单相接地故障时基本相同。

5 结论

本文在三-广直流控制系统中采用的 CFPREV 原理分析的基础上,针对其中 u_0 检测在交流电压过零时故障启动慢和 $abc-ab$ 坐标变换在三相故障时不能有效地预防换相失败的问题,提出一种基于 $\sin\text{-}\cos$ 分量检测的改进方法。并重点研究了 CFPRED 在多馈入直流系统中对 2 站换相失败的改善,该方法有效地减少换相失败。仿真结果表明,该方法在单相接地故障和三相故障下都能有效地预防换相失败和连续换相失败的发生且可减少 2 站同时发生换相失败的几率,而且对 2 站逆变站换流母线电压也有一定的改善。可为实际运行系统 CFPREV 的参数整定提供技术支持。

参考文献

- [1] Thio C V, Davies J B, Kent K I. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [2] Kristmundsson G M, Carroll D P. The effect of AC systems frequency spectrum on commutation failure in HVDC inverter[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1990, 5(2): 1121-1128.
- [3] 吴红斌, 丁明, 刘波. 交直流系统暂态仿真中换流器的换相过程分析[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 11-14.
Wu Hongbin, Ding Ming, Liu Bo. Analysis on commutation process of converters in transient simulation of hybrid AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(17): 11-14.
- [4] Arne Hansen, Henrik havemann. Decreasing the commutation failure frequency in hvdc transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1022-1026.
- [5] Lidong Zhang, Lars Dofans. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C]. 2002 International Conference on Power System Technology Proceedings. Kunming, China, 2002: 51-56.
- [6] 管秀鹏, 孙元章, 赵国梁, 等. 南方电网西电东送暂态功率传输极限研究[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 1-5.
Guan Xiupeng, Sun Yuanzhang, Zhao Guoliang *et al.* Resarch on transient power transfer limit of power transmission from west China to east via south China electric power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 1-5.
- [7] 徐政. 含多个直流换流站的电力系统中交直流相互作用特性综述[J]. 电网技术, 1998, 22(2): 16-19.
Xu Zheng. AC/ DC and DC/ DC interactions of multiple HVDC links terminating in the same AC system[J]. Power System Technology, 2000, 22(2): 16-19.
- [8] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 多馈入交直流电力系统研究中的相关问题[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 13-17.
Yang Weidong, Xu Zheng, Han Zhenxiang. Special issues and suggestion on multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 13-17.
- [9] 毛晓明, 吴小辰. 南方交直流并联电网运行问题分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 6-13.
Mao Xiaoming, Wu Xiaochen. Analysis on operational problems in south China AC-DC hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 6-13.
- [10] 蔡泽祥, 朱浩骏, 白雪峰, 等. 多馈入直流输电系统的动态特性及稳定控制与分析[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(5): 1-8.
Cai Zexiang, Zhu Haojun, Bai Xuefeng *et al.* Dynamic characteristics, stability control and analysis of multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(5): 1-8.
- [11] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 混合交直流电力系统的非线性调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 1-6.
Yang Weidong, Xu Zheng, Han Zhenxiang. A nonlinear modulation strategy of hybrid AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 1-6.
- [12] 毛晓明, 管霖, 张尧, 等. 含有多馈入直流的交直流混合电网高压直流建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 68-73.
Mao Xiaoming, Guan Lin, Zhang Yao *et al.* Researches on HVDC modeling for AC/DC hybrid grid with multi-infeed HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 68-73.
- [13] 林良真, 叶林. 电磁暂态分析软件包PSCAD/EMTDC[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65-66.
Lin Liangzhen, Ye Lin. An introduction to PSCAD/EMTDC[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 65-66.
- [14] Tamai S, Naitoh H, Ishiguro F *et al.* Fast and predictive HVDC extinction angle control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1977, 12(3): 1268-1275.
- [15] Denis L H A, Andersson G. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1318.
- [16] Denis L H A, Andersson G. Power stability analysis of multi-infeed hvdc system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 923-931.

收稿日期: 2005-02-17。

作者简介:

陈树勇 (1960-), 男, 教授, 研究方向为电力系统自动化及风力发电;

李新年 (1977-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化;

余军 (1971-), 男, 博士研究生, 主要从事直流输电和电力系统仿真工作;

李涛 (1977-), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统及其自动化;

吕鹏飞 (1979-), 男, 硕士, 主要研究方向为轻型直流输电和高压直流输电的研究;

印永华 (1949-), 男, 教授级高工, 博士生导师, 主要研究方向为交/直流输电系统仿真分析。