

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.012

多馈入直流输电系统继发性换相失败影响因素分析

张 军¹, 潘爱强², 吴金龙¹, 王先为¹

(1. 西安许继电力电子有限公司, 西安 710075; 2. 国家电网上海电力公司, 上海 200437)

摘要: 继发性换相失败给多馈入直流输电(MIDC)系统的安全运行带来严重威胁, 针对继发性换相失败影响因素的研究有着非常重要的意义。首先根据换流器工作原理并结合MIDC系统结构特点研究了继发性换相失败的发生机理; 然后对继发性换相失败的两个因素: 换相失败引起交流电压的变化和多馈入直流输电系统耦合关系进行了详细的分析; 最后在PSCAD/EMTDC中建立了MIDC系统模型, 仿真分析了典型工况下MIDC系统继发性换相失败的影响因素。根据仿真结果, 多馈入系统中交流故障、多馈入系统电压交互影响因子和多馈入短路比共同决定了继发性换相失败的发生。

关键词: 多馈入直流输电系统; 继发性换相失败; 交流故障; 多馈入系统电压交互影响因子; 多馈入短路比

Analysis on Factors Impacting Followed Commutation Failure in MIDC Transmission System

ZHANG Jun¹, PAN Aiqiang², WU Jinlong¹, WANG Xianwei¹

(1. Xi'an XJ Power Electronics Technology Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: In MIDC system, safety and stability of whole AC power system might be impacted seriously by followed commutation failure. It is important to research on factors of this fault. In this paper, the mechanism of followed commutation failure in multi-infeed HVDC transmission system is analyzed according to the operation and structure of MIDC system firstly. Then, based on the analysis results, AC voltage fluctuation by commutation failure and coupling of multi-infeed transmission HVDC system is studied respectively as the impact factors of followed commutation failure. Finally, a multi-infeed HVDC transmission system model is established in PSCAD/EMTDC, and the process of followed commutation failure in MIDC system under typical operation condition is presented. Comprehensive simulation results show that followed commutation failure in MIDC system would be codetermined by AC fault, MIIF and MSCR.

Key words: multi-infeed HVDC transmission system; followed commutation failure; AC system fault; multi-infeed critical short circuit ratio; multi-infeed interaction factor

0 引言

随着技术的进步和国民经济的不断发展, 高压直流输电线路将会继续增加, 将会出现多条直流输电线路同时向同一地区电网馈入电能, 在该区域形成多馈入直流输电系统^[1]。与单馈入直流输电系统

不同, 在多馈入直流输电系统中当一条线路发生换相失败后, 除可能造成自身换流器损坏和落点处电网波动外, 还可能会引起相邻换流站发生继发性换相失败, 从而给整个地区的电力系统安全稳定带来威胁^[2]。因此对多馈入直流输电系统继发性换相失败发展过程的研究有着非常重要的意义。

继发性换相失败的发生过程是非常复杂的, 交

收稿日期: 2015-12-11; 修回日期: 2016-01-23

基金项目: 国家电网科技项目(5209401350BW)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5209401350BW).

直流系统之间相互作用关系、直流系统的控制方式、交流系统强度、MIDC 系统之间耦合关系等都可能引起继发性换相失败发生^[3-5]。文[6]以灵敏度分析法和节点阻抗矩阵法为换相失败判据, 分析了故障阻抗与换相电压的关系; 文[7]研究了直流系统联络阻抗、直流功率、系统等值阻抗等因素对多馈入系统短路比的影响; 文[8]研究换相失败对交流系统和直流系统的影响, 并对比与直流闭锁对系统的影响; 文[9]研究了影响多馈入直流输电系统换相失败的换相电压和耦合导纳的关系。以上文献并没有针对多馈入直流输电系统继发性换相失败机理和发展过程进行详细的分析与仿真研究。

文中首先根据换流器运行原理和多馈入系统特性研究继发性换相失败发生机理, 在此基础上分析了 MIDC 系统中继发性换相失败的影响因素, 首先对换相失败引发的交流电压变化进行了分析, 然后通过多馈入交互影响因子(MIIF)和多馈入短路比(MSCR) 来分析 MIDC 系统对继发性换相失败的影响。最后在 PSCAD 软件中建立多馈入直流输电仿真模型, 通过对多馈入直流输电系统中典型工况的仿真来研究继发性换相失败的影响因素和发展过程, 为 MIDC 系统继发性换相失败预防提供依据。

1 换相失败机理分析

1.1 有源逆变器换相失败机理

基于晶闸管的逆变器在换相过程中需要交流电网提供足够的换相电压^[10-12], 在换相过程中交流电压需要满足以下关系

$$S_v = \int_{\pi-\beta}^{\pi-\gamma_{\min}} u_v(\omega t) d\omega t > |S| = 2L_r |I_d| \quad (1)$$

式(1)中: S_v 为换相过程中交流电压能提供的最大电压时间面积; S 为换相过程逆变器需要的换相时间面积; u_v 为交流线电压; L_r 为换相电感; I_d 为直流电流; β 和 $\gamma_{\min}$ 分别为逆变器的触发超前角和换流器自身需要的最小关断角。当逆变器换相过程中不能满足式(1)要求时, 换相失败。

根据式(1), 触发超前角、换相电抗、直流电流和交流线电压等 4 个因素都可能会导致换相失败的发生。只有交流线电压是控制器不可控或快速调节的, 在实际工况中, 换相失败的发生一般都是由交流系统故障引起的。其中交流线电压幅值跌落和波形畸变都可能会导致换相失败的发生。

1.2 继发性换相失败机理

多馈入直流输电系统中多条直流输电线路同时向该地区的电网馈入电能, 每一个逆变站可以等

效为一个发电机, 见图 1, 逆变站之间通过耦合阻抗相互连接, 图 1 中 Z_{12} 、 Z_{23} 和 Z_{13} 分别为 3 条直流输电系统的耦合阻抗, 该值和逆变站之间的距离有关。 E_1 、 E_2 和 E_3 分别为 3 条逆变交流侧电网电压。多馈入直流输电系统见图 1。

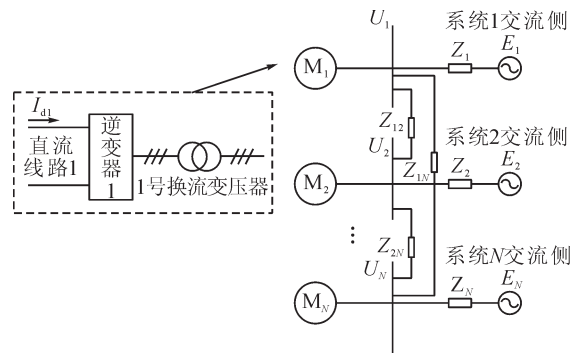


图 1 多馈入直流输电系统示意图

Fig. 1 Diagram of multi-infeed HVDC system

当一个换流站换相失败发生后, 其交流系统会发生电压波动和谐波导致的波形畸变。由于多馈入系统之间存在耦合关系, 相邻换流站的交流侧也可能发生电压波动和波形畸变, 进而导致继发性换相失败发生。继发性换相失败发生机理见图 2。

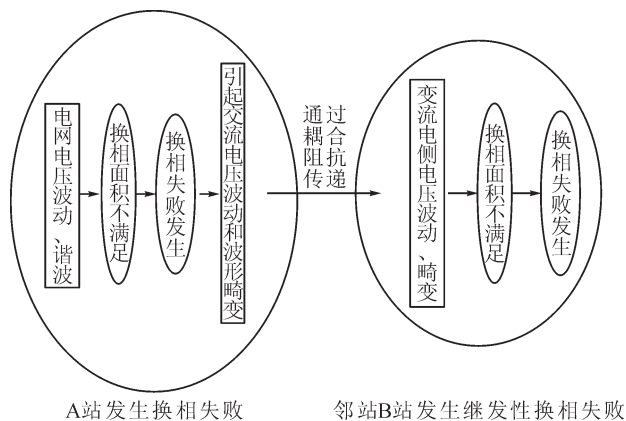


图 2 多馈入直流输电系统继发性换相失败机理

Fig. 2 Mechanism of followed commutation failure in multi-infeed HVDC system

从图 2 中可以得到, 多馈入直流输电系统继发性换相失败主要是由于逆变站发生换相失败后, 导致相邻逆变站发生交流电压波动和波形畸变, 使该站的换相面积关系不满足式(1)的要求^[13-15]。因此多馈入直流输电系统继发性换相失败过程中有两个关键因素: ①逆变器发生换相失败引起交流电压的变化; ②通过多馈入系统耦合关系引起相邻逆变站交流电压的变化。

2 MIDC 系统中逆变侧交流电压之间的关系

多馈入直流输电系统中多条直流线路之间存在

相互影响。图1中所述的多馈入直流输电系统的节点导纳矩阵和等效阻抗矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1} + \sum_{n=1, n \neq j}^N \frac{1}{Z_{1n}} & \cdots & -\frac{1}{Z_{i1}} & \cdots & -\frac{1}{Z_{1N}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{Z_{i1}} & \cdots & \frac{1}{Z_i} + \sum_{n=1, n \neq i}^N \frac{1}{Z_{in}} & \cdots & -\frac{1}{Z_{iN}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{Z_{N1}} & \cdots & -\frac{1}{Z_{Ni}} & \cdots & \frac{1}{Z_N} + \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{Z_{Nn}} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$Z_{eq} = Y^{-1}. \quad (3)$$

在图1中多馈入系统母线电压 U_i 和其他 $N-1$ 条直流输电系统交流电压之间存在以下关系

$$\left(\frac{1}{Z_i} + \sum_{n=1, n \neq i}^N \frac{1}{Z_{in}}\right)U_i = (I_i + \frac{E_i}{Z_i} + \sum_{n=1, n \neq i}^N \frac{U_n}{Z_{in}}). \quad (4)$$

式(4)中: U_i 分别为3个逆变站交流母线电压; I_i 为交流母线 i 电流。从式(4)中可以看出,在图1所示的多馈入直流输电系统中交流母线电压同时受到其他换流站交流母线电压的影响。

当系统 i 交流侧存在幅值为 U_{im} 的 m 次谐波电压时,系统 j 交流侧谐波电压受其影响便可以表示为

$$U_{jm} = \frac{U_{im}}{Z_{jm}} \left(\frac{1}{Z_{jm}} + \sum_{n=1, n \neq j}^N \frac{1}{Z_{jnm}}\right)^{-1} = \frac{U_{im}}{Z_{jm}} Y_{jm}^{-1}. \quad (5)$$

式(5)中: Z_{jm} 表示 m 次谐波对应的谐波阻抗值; Y_{jm} 为节点 j 对应的 m 次谐波下的节点导纳; U_{jm} 为系统 j 交流电压中的 m 次谐波电压的幅值。

从上述式(4)、(5)可以看出,在多馈入直流输电系统中,逆变器交流侧母线电压波形和谐波都会影响到其他换流站的电压波动和谐波。

为了研究多馈入系统之间换相失败的影响关系,采用多馈入交互影响因子(MIIF)来衡量系统电压之间的相互作用关系,MIIF可以表示为^[16-18]

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta U_i}{1\% U_{iN}} = \left| \frac{Z_{eqji}}{Z_{eqii}} \right|. \quad (6)$$

式(6)中: Z_{eqii} 为式(4)中所述的等效阻抗矩阵中的等效自阻抗; Z_{eqji} 为第 i 回母线和第 j 回母线之间的等效互阻抗; $MIIF_{ji}$ 表示第 i 条直流输电线路母线电压的变化引起的系统 j 母线电压的变化情况。

结合式(5)、(6)可以得出,当多馈入系统中第 i 条直流输电系统交流电压发生波动和谐波扰动时,多馈入系统中第 j 条直流输电系统交流电压波动为

$$\Delta U_j \% = \frac{\Delta U_i}{U_{iN}} MIIF_{ji} \times 100\%. \quad (7)$$

式(7)中: U_{iN} 为第 i 条直流输电系统额定电

压的幅值; $\Delta U_j \%$ 为 j 系统中交流电压幅值跌落的百分比。

根据式(1)可以求出 j 系统交流电压时间面积为

$$S_{vj} = \int_{\pi-\beta}^{\pi-\gamma_{min}} \left[\left(1 - \frac{\Delta U_i}{U_{iN}} MIIF_{ji} \times 100\%\right) u_i(\omega t) + \sum_{n=2}^N \frac{U_{lm}}{Z_{jnm}} \left(\frac{1}{Z_{jm}} + \frac{U_{lm}}{Z_{jnm}} \sum_{n=1, n \neq j}^N \frac{1}{Z_{jnm}}\right)^{-1} (m\omega t) \right] d\omega t. \quad (8)$$

式(8)中: S_{vj} 为 j 条直流输电系统逆变器交流电压时间面积。 S_{vj} 受 $MIIF_{ji}$ 和 ΔU_i 影响, $MIIF_{ji}$ 越小电压时间面积的减小量就越小,第 j 条直流输电系统继发性换相失败发生的概率就越小。

当发生两相电压短路故障时,其中存在线电压零值情况,式(8)中 $\Delta U_i/U_{iN}=1$,则 S_{vj} 大幅度减小,极易发生继发性换相失败;单相接地故障中, $\Delta U_i/U_{iN}=0.423$,属于比较严重的故障,当 $MIIF_{ji}$ 比较大的情况下,继发性换相失败时比较容易发生。而对于电压跌落故障, $0 < \Delta U_i/U_{iN} < 0.3$ 且 $MIIF_{ji}$ 足够小,就能够避免继发性换相失败的发生。

多馈入直流输电系统中,采用多馈入短路比(MSCR)来衡量多馈入系统相对强度与多馈入系统之间的耦合关系^[19-20]。 $MSCR_i$ 的定义为

$$MSCR_i = \frac{U_i^2/Z_{eqii}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^N (Z_{eqji}/Z_{eqii}) P_{dj}}. \quad (9)$$

式(9)中, P_{di} 为第 i 条回路直流额定功率。 $MSCR_i$ 越大,表明第 i 条直流输电系统抵御干扰能力越强。根据相关文献和标准^[21-22],文中以 $MSCR_i > 3$ 为强系统,以 $MSCR_i < 3$ 为弱系统或者极弱系统,不同的系统强度对于 $MIIF$ 也有不同的要求。

3 典型工况继发性换相失败仿真分析

3.1 换相失败对交流电压的影响

换相失败监测方法见图3。

根据图3所示的方法,建立每一条直流线路逆变器换相失败监测系统。

从式(1)得到换相面积裕量

$$S_c = S_v - 2L_r I_d |. \quad (10)$$

当 $S_c < 0$,换相失败发生,监测结果显示“0”;当 $S_c > 0$,换相过程顺利进行,监测结果显示“1”。

3.2 交流故障引起的继发性换相失败

该节对典型工况进行仿真分析,通过算例的计算结果来分析继发性换相失败的发展过程。

在仿真模型中,三馈入直流输电系统的参数见表1。

经过计算,多馈入短路比 $MSCR$ 值见表2。

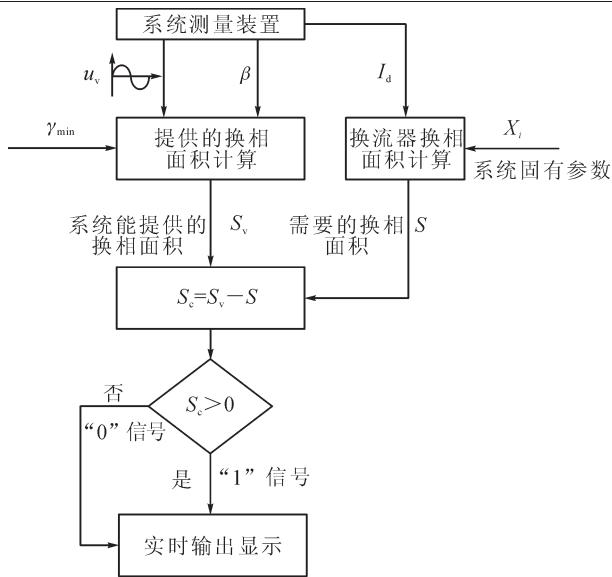


图3 换相失败监测方法示意图

Fig. 3 Diagram of commutation failure real-time monitoring

表1 多馈入系统阻抗

Table 1 Impedance of multi-infeed HVDC system p.u.

参数	Z_1	Z_2	Z_3	Z_{12}	Z_{23}	Z_{13}
数值	0.4	0.4	0.4	1.0	10.0	10.0

表2 多馈入短路比 MSCR

Table 2 MSCR of multi-infeed HVDC system

参数	$MSCR_1$	$MSCR_2$	$MSCR_3$
数值	2.476 6	2.476 6	2.476 6

经过计算,多馈入交互影响因子 $MIIF$ 值见表3。

表3 多馈入交互影响因子 $MIIF$ Table 3 $MIIF$ of multi-infeed HVDC system

参数	$MIIF_{12}$	$MIIF_{21}$	$MIIF_{23}$	$MIIF_{32}$	$MIIF_{13}$	$MIIF_{31}$
数值	0.279	0.279	0.038	0.047	0.038	0.047

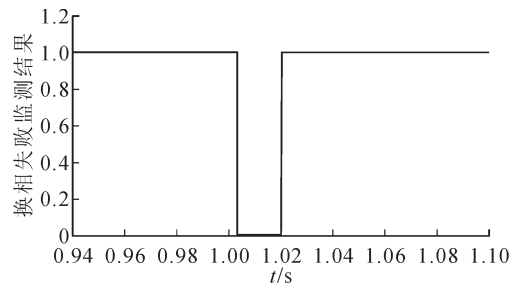
从表2的计算结果可以看出,3条直流输电系统的多馈入短路比是一致的,表明3条直流输电系统在多馈入系统中抵御干扰的能力是相同的。

从表3的计算结果可以看出, $MIIF_{32}$ 和 $MIIF_{31}$ 比较小,表明系统3交流电受到系统1和系统2交流电压的影响小。 $MIIF_{21}$ 远大于 $MIIF_{31}$,当系统1发生换相失败时,系统2继发性换相失败发生概率比系统3高。

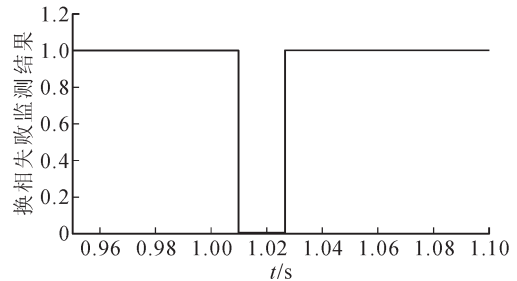
3.2.1 单相电压跌落故障引起的继发性换相失败

系统1逆变器交流系统中出现单相电压幅值跌落故障时,3条直流输电线路逆变站换相失败监测输出结果见图4。

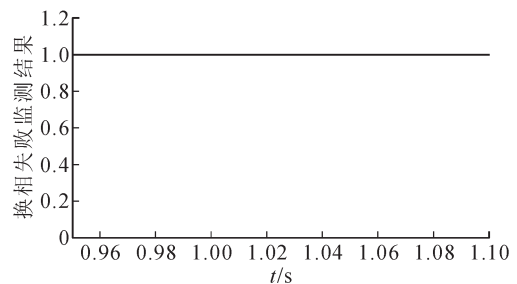
图4中所示为换相失败监测结果,当输出结果为高电平即“1”时,表示当前换相过程顺利进行;当



(a)系统1换相失败监测结果



(b)系统2换相失败监测结果



(c)系统3换相失败监测结果

图4 电压跌落故障中换相失败监测结果

Fig. 4 Simulation result of commutation failure real-time monitoring by single-phase voltage sags fault

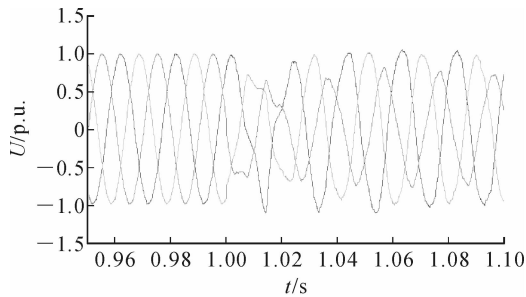
输出结果为低电平即“0”时,表示相应时刻发生了换相失败。根据图4(a)所述可知,当系统1逆变站由于交流电压跌落在1.04 s时刻发生了一次换相失败后;根据图4(b)所述可知,当系统2逆变站由于受到系统1的影响在1.08 s时刻发生了一次换相失败;而系统3逆变站并没有发生换相失败。

单相电压跌落故障过程中多馈入系统3条直流输电系统交流线电压波形见图5。

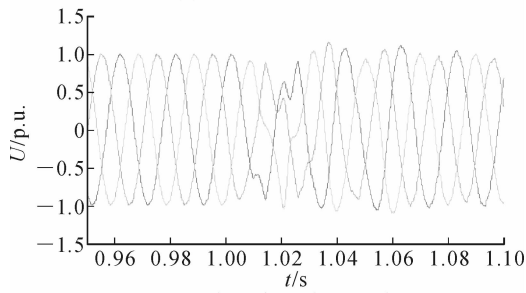
系统1发生换相失败后,经过控制器调节进入降功率运行状态,但是系统处于不平衡运行中。在换相失败引起交流侧电压波动外,还会在交流系统中产生谐波进而导致波形畸变。

交流侧的电压波动和波形畸变,通过耦合阻抗传递到系统2交流侧,导致其交流电压波动与波形畸变,系统2逆变站发生继发性换相失败。

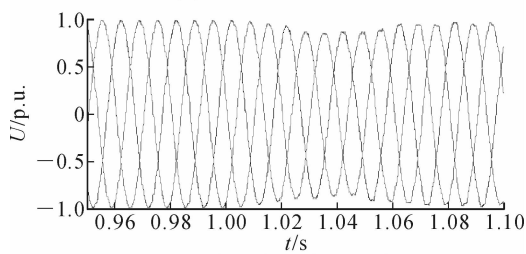
系统1、2交流侧的电压波动和谐波,通过耦合阻抗传递到系统3交流电压中。由于系统3和系统1、2电压相互交互影响因子比较小,系统3逆变器换相过程顺利进行。



(a)系统1交流线电压波形



(b)系统2交流线电压波形



(c)系统3交流线电压波形

图5 电压跌落故障中逆变器交流线电压波形

Fig. 5 Line voltage by single-phase voltage sags fault

3.2.2 两相短路故障引起的继发性换相失败

系统1逆变侧交流系统中出现两相故障时,3条直流输电线路逆变站换相失败监测输出结果见图6。

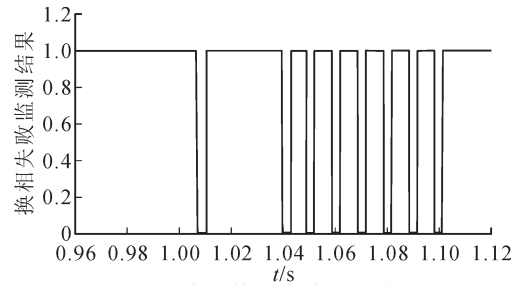
在图6中高电平即“1”信号表示该站当前换相过程顺利进行;反之,低电平即“0”信号表示该时刻换相失败发生。根据图6(a)所示,系统1.004s时刻发生换相失败,同时从1.04s时刻开始,系统1逆变站连续发生多次换相失败;根据图6(b)、(c)所述,系统2、3逆变站在1.004s时刻都发生了一次换相失败。

两相短路故障发生后,多馈入系统中3条直流输电系统交流线电压波形见图7。

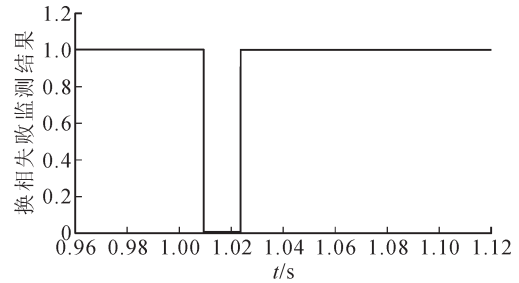
在两相短路故障中,由于故障比较严重,系统1无法通过控制器进行调节,交流系统发生严重的电压波形与波形畸变,传递到系统2和系统3逆变器交流侧,导致交流电压发生严重波动。如式(13)所述,将会导致系统2、3的交流电压时间面积大幅度减小,从而导致继发性换相失败。

3.3 $MIIF$ 和 $MSCR$ 对继发性换相失败的影响

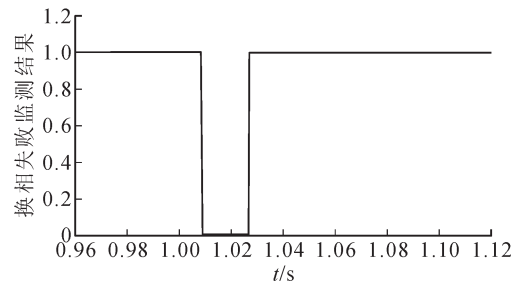
为了分析 $MIIF$ 对继发性换相失败的影响情



(a)系统1换相失败监测结果



(b)系统2换相失败监测结果



(c)系统3换相失败监测结果

图6 两相短路故障中换相失败监测结果

Fig. 6 Simulation result of commutation failure real-time monitoring by two phase short-circuit fault

况,只改变直流输电线路之间的耦合关系 Z_{ij} ,从而导致 $MIIF$ 随之改变。

工况与3.2.1节相同,系统1发生单相电压跌落故障,计算出不同多馈入交互影响因子 $MIIF$ 条件下的继发性换相失败发展情况,结果见表4。

根据计算结果可以看出,随着多馈入交互影响因子 $MIIF$ 的增加,继发性换相失败发生概率就越高。对于仿真算例来说,在3.2.1工况下 $MIIF_{21}$ 和 $MIIF_{31}$ 大于0.0726时,系统2和系统3继发性换相失败发生的概率比较高。

从式(11)、(14)、表1、2可以看出, $MIIF$ 的大小对于系统 $MSCR$ 的影响是有限的, $MSCR$ 主要和系统的等效阻抗 Z_{eqi} 有关,因此在表1的参数中,只改变 Z_2 来分析系统 $MSCR$ 对继发性换相失败的影响。

工况与3.2.1节相同,系统1发生单相电压跌落故障,计算出不同多馈入短路比 $MSCR$ 条件下的继发性换相失败发展情况,结果见表5。

通过对比表5可以得到,当 $MSCR_2=2.4766$ 时, $MIIF_{21}>0.0726$ 的情况下,系统2发生继发性换相失败;而当 $MSCR_2=4.3437$ 时, $MIIF_{21}=0.1646$ 情况下,

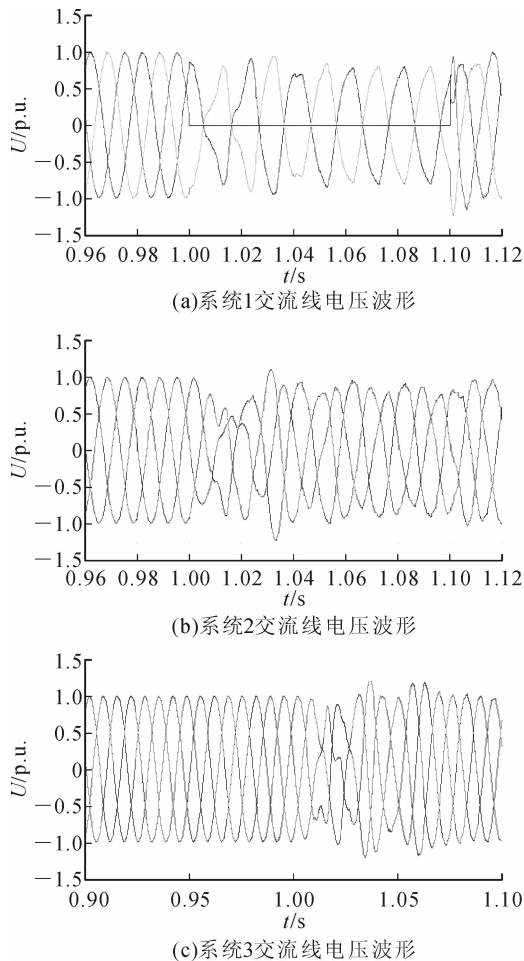


图7 两相短路故障中交流线电压波形

Fig. 7 Line voltage by two phase short-circuit fault

表4 $MIIF$ 对继发性换相失败的影响Table 4 Followed commutation failure effected by $MIIF$

系统 2			系统 3		
$MIIF_{21}$	$MIIF_{23}$	换相失败 监测结果	$MIIF_{31}$	$MIIF_{32}$	换相失败 监测结果
0.072 6	0.034 6	1	0.029 3	0.036 1	1
0.089 0	0.034 7	0	0.031 9	0.036 7	1
0.115 0	0.034 8	0	0.035 1	0.037 6	1
0.162 6	0.038 0	0	0.039 8	0.042 7	1
0.279 1	0.038 4	0	0.047 4	0.047 3	1
0.278 1	0.049 0	0	0.064 2	0.059 4	0
0.277 4	0.055 9	0	0.073 4	0.067 2	0
0.276 6	0.065 0	0	0.085 8	0.077 3	0
0.297 0	0.078 0	0	0.104 9	0.092 3	0
0.320 9	0.097 3	0	0.134 1	0.115 2	0
0.349 6	0.130 1	0	0.184 9	0.151 0	0

系统 2 并没有发生继发性换相失败。

因此当系统自身的多馈入短路比 $MSCR_i$ 比较大时,系统抵御外界干扰的能力比较强,继发性换相失败发生概率比较小,对 $MIIF$ 的要求也相对不

表5 系统 2 中继发性换相失败与 $MSCR$ 的关系Table 5 Followed commutation failure effected by $MSCR$

$Z_2/p.u.$	$MSCR_2$	$MIIF_{21}$	$MSCR_{23}$	换相失败 监测结果
0.20	4.343 7	0.164 6	0.033 9	1
0.22	3.970 2	0.179 3	0.034 4	1
0.27	3.410 1	0.207 1	0.035 5	0
0.33	2.850 0	0.245 0	0.037 1	0
0.40	2.476 6	0.279 1	0.038 5	0

是很严苛。

4 结论

1)交流故障严重程度影响继发性换相失败发生概率,两相短路、三相短路等交流系统故障极容易引起继发性换相失败。

2)多馈入短路比 $MSCR$ 和多馈入交互影响因子 $MIIF$ 同时影响继发性换相失败的发生。 $MIIF$ 越大,继发性换相失败发生的概率就越高。 $MSCR$ 越大,继发性换相失败概率低。

3)为了降低多馈入直流输电地区继发性换相失败发生的概率,可以通过减小系统之间的 $MIFF$ 或增加系统的 $MSCR$ 。

4)弱系统中对 $MIIF$ 的要求比强系统严格,改善 $MSCR$ 对于继发性换相失败的预防效果更明显;因此在多馈入直流输电地区继发性换相失败预防措施中应首先考虑改善 $MSCR$ 。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京:中国电力出版社, 2013.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage AC & DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [2] 朱韬析, 宁武军, 欧开健. 直流输电系统换相失败探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 116-120.
ZHU Taoxi, NING Wujun, OU Kaijian. Discussion on commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 116-120.
- [3] 刘俊磊, 王 钢, 李海锋, 等. HVDC 系统换相失败对交流电网继电保护影响的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 111-118.
LIU Junlei, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Mechanism analysis of HVDC commutation failure influence on AC power network relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 111-118.
- [4] 陈建斌, 周保荣, 熊 卿, 等. 溪洛渡直流工程换相失败特性及相关因素分析[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 48-52.
CHEN Jianbin, ZHOU Baorong, XIONG Qing, et al. Analy-

- sis on the characteristics of commutation failure and its related factors of Xiluodu-Guangdong HVDC project[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(6):48-52.
- [5] 康青. 动态无功补偿设备在高压直流输电换相失败中的应用研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- KANG Qing. Applied research of dynamic reactive power compensation device in HVDC commutation failure[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2014.
- [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 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.
- [7] 肖俊, 李兴源, 张英敏, 等. 多馈入直流系统换相失败分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(5):139-147.
- XIAO Jun, LI Xingyuan, ZHANG Yingmin, et al. Study on the commutation failure in multi-infeed HVDC system[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2014, 46(5):139-147.
- [8] 郭小江, 汤涌, 郭强, 等. CIGRE多馈入直流短路比指标影响因素及机理[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9):69-74.
- GUO Xiaojiang, TANG Yong, GUO Qiang, et al. Influence factors and theory for CIGRE MISC index[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9):69-74.
- [9] 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.
- [10] 刘济豪, 郭春义, 刘文静, 等. 基于改进换相面积的直流输电换相失败判别方法[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(1):15-21.
- LIU Jihao, GUO Chunyi, LIU Wenjing, et al. Commutation failure detective method based on improved commutation area in HVDC[J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(1):15-21.
- [11] 韩民晓. 高电压直流输电原理与运行[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- HAN Minxiao. Principle and operation of HVDC transmission[M]. Beijing:China Machine Press, 2013.
- [12] 王兆安. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- WANG Zhao'an. Power electronic technology[M]. Beijing:China Machine Press, 2009.
- [13] 刘宏, 焦连伟. 转移函数应用于变流器的谐波分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9):108-113.
- LIU Hong, JIAO Lianwei. Harmonic analysis using transfer function on the converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9):108-113.
- [14] 李裕能. 开关函数法用于变流装置的谐波分析[J]. 电网技术, 2000, 24(6):18-20.
- LI Yuneng. Harmonics analysis of applying switching function method to current converter[J]. Power System Technology, 2000, 24(6):18-20.
- [15] 徐政. 多基频交直流互联系统的谐波特性研究[J]. 电工技术学报, 1996, 11(4):22-26.
- XU Zheng. The harmonics characteristics of multi-frequency AC/DC interconnected system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1996, 11(4):22-26.
- [16] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- WANG Zhao'an. Harmonic suppression and reactive power compensation[M]. Beijing:China Machine Press, 2010.
- [17] 王刘拴. ± 800 kV 特高压直流输电谐波特性的研究[D]. 广州:广东工业大学, 2014.
- WANG Liushuan. Harmonic characteristic research on ± 800 kV UHVDC transmission system[D]. Guangzhou:Guangxi University, 2014.
- [18] 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.
- [19] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31):1-8.
- LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31):1-8.
- [20] 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.
- [21] 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.
- GUO Chunyi, ZHANG Yanpo, ZHAO Chengyong, et al. Impact of STATCOM on the operating characteristics of double-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25):99-106.
- [22] KRISHAYYA P C S, ADAPA R, HOLM M, et al. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities. Part I: AC/DC system (下转第84页)

- Conference and Exposition(T & D).Yokahama:IEEE,2002:1-5.
- [3] LEE J H, MA J H, KIL G S. The development of 28.5 kV class solid insulated switchgear[C]//CIGRE 20th International Conference on Electricity Distribution.Prague:IEEE, 2009:1-4.
- [4] 刘志远,耿英三. 真空开关技术新动态[J]. 高压开关行业通讯,2010(2):28-36.
- LIU Zhiyuan,GENG Yingsan. The new technical developments of vacuum switch[J]. High Voltage Switchgear Review,2010(2):28-36.
- [5] 钟恒强. 固体绝缘环网柜在配网中压领域的技术现状及市场前景分析[J]. 电气应用,2011(17):60-63.
- ZHONG Hengqiang. Analysis of the technology status and market prospect of solid insulated switchgear in the distribution power system[J]. Electrotechnical Application, 2011,(17):60-63.
- [6] 李建基. 固封真空断路器及其固封绝缘开关柜[J]. 江苏电器,2008(9):64.
- LI Jianji. Solid insulated vacuum circuit breaker and solid insulated switchgear[J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2008(9):64.
- [7] SHIMIZU T,KINOSHITA S,MAKISHIMA S,et al. Material and simulation technology for solid insulated switchgear [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya:IEEE, 2003:1194-1197.
- [8] SATO J,SHIOIRI T. Investigation of long-term reliability for solid insulated switchgear[C]//Proceedings of the IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D).Orlando:IEEE, 2012:1-4.
- [9] 汤伟,张建宏,王振良,等. 环氧树脂绝缘浇注件表面金属涂层末端结构设计的探讨[J]. 高压电器,2014,50(12):137-140.
- TANG Wei, ZHANG Jianhong, WANG Zhenliang, et al. Study on the terminal structure design of metal-coating for epoxy resin casting insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2014,50(12):137-140.
- [10] 翟鹏飞. 12 kV 固体绝缘环网开关设备的研究与开发[D].保定:华中电力大学,2013.
- ZHAI Pengfei. Research and develop on 12 kV solid insulated switchgear[D]. Baoding: North China Electric Power University,2013.
- [11] 赵博,张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- ZHAO Bo,ZHANG Hongliang. The application of Ansoft12 in the field of engi-neering[M]. Beijing: China Water Power Press,2010.
- [12] 国家电网公司企业标准 Q/GDW730—2012 12 kV 固体绝缘环网柜技术条件[S].2012.
- China State Grid Corporation Standard Q/GDW730—2012 Specification for 12 kV solid-insulated ring main units[S]. 2012.
- [13] 陈玉,成永红,阴玮,等. 环氧及其复合材料气固界面快脉冲闪络特性[J]. 西安交通大学学报,2008,42(6):703-707.
- CHEN Yu,CHENG Yonghong,YIN Wei,et al. Flashover property of pure epoxy and composites along the gas-solid interface under fast pulse[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2008,42(6):703-707.
- [14] LORKOWSKA B,FLORKOWSKI M,ROEHRICH J,et al. Modeling of PD mechanism in non-uniform field at high pressure[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(12):2662-2667.
- [15] 汪汛,邱毓昌,张乔根,等. 冲击电压作用下绝缘子表面电荷的积聚[J]. 高电压技术,2002, 28(8):7-8.
- WANG Feng,QIU Yuchang,ZHANG Qiaogen,et al. Charge accumulation on insulator surface under BIL[J]. High Voltage Engineering,2002,28(8):7-8.
- [16] 庞骁刚. 开关柜局部放电原因分析和处理[J]. 云南电力技术,2011,39(4):56-58.
- PANG Xiaogang. Analysis and processing reason of switch cabinet partial discharge[J]. Yunnan Electric Power,2011, 39(4):56-58.
- 孔国威(1985—),男,博士,主要从事高压真空开关、环网配电开关设备等方向研究。

(上接第78页)

interaction phenomena[R]. France:CIGRE,1997.

张军(1986—),男,硕士,研究方向为直流输电系统分析、过电压与绝缘配合设计(通信作者)。

潘爱强(1984—),男,硕士,研究方向为电力系统自动化、

电能质量等。

吴金龙(1981—),男,硕士,研究方向为柔性直流输电系统分析与控制技术。

王先为(1985—),男,博士,主要从事电力自动化研究工作。