

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

肖俊, 李兴源, 杨小兵

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了研究多馈入直流系统中换流母线电压之间的相互影响, 以交直流系统潮流计算为基础, 推导得出了多馈入直流系统换流母线电压相互影响的关系式。然后据此分析研究了某条或某几条换流母线附近发生故障是否会引起多个换流站同时换相失败, 并推导得到了相应的临界电气距离。最后, 以 CIGRE HVDC 标准模型为基础构建三馈入直流输电系统模型, 并用 PSCAD 进行仿真分析, 验证了换流母线电压相互影响关系式的合理性。

关键词: 多馈入直流; 换流母线电压; 相互影响; 换相失败; 临界电气距离

Abstract: For researching the interaction among converter buses in M IDC (Multi-Infeed Direct Current) system, the converter bus voltage interaction formula of M IDC is deduced based on power flow equation of AC/DC system. And then according to the formula whether the faults of one or several converter buses will lead to the occurrence of commutation failure in other direct current systems is analyzed, meanwhile the critical electrical distance is also deduced. At last a three-infeed HVDC (high voltage direct current) model is constructed according to the CIGRE HVDC, and then the model is simulated and analyzed by PSCAD. According to the result of simulation, it shows that the converter bus voltage interaction formula is reasonable.

Key words: multi-infeed HVDC; converter bus voltage; interaction; commutation failure; critical electrical distance

中图分类号: TM721.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0011-05

0 引言

由于高压直流 (High Voltage Direct Current HVDC) 输电在远距离、大容量输电和电力系统联网等方面的显著优势, 使其在中国“西电东送”和“全国联网”中发挥了重要作用。随着中国电网的建设和高压直流输电技术的发展, 多回直流输电线路落在同一个交流系统是不可避免的^[1]。由此, 便形成了多馈入直流输电系统 (Multi-Infeed Direct Current M IDC)。目前, 天广、三广及贵广 I、II 4 回直流落点广东, 葛南、龙政及宜华 3 回直流落点上海和常州, 多馈入高压直流输电系统已在中国南方电网和华东电网中形成。根据规划, 到 2015 年南方电网将有 7 回甚至更多的直流落点其中, 华东电网将有 8 回或者更多的直流落点其中, 届时将形成世界上落点最多、结构最复杂的交直流输电系统。

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目 (2004CB217907); 国家科技支撑计划项目 (2008BAA13B01)

在多馈入直流系统中, 各回系统相互影响, 一回或多回输电系统发生故障将不可避免地影响到其它各回输电系统。这种影响与各回系统自身强度、系统间的联系紧密程度都有关。然而, 到目前为止, 换流母线电压之间的相互影响还有待进一步研究^[2~5]。针对这一情况, 以交直流系统潮流计算为基础, 推导得出了多馈入直流系统各换流母线电压间相互影响的关系式。然后据此分析研究了某条或某几条换流母线附近发生故障是否会引起多个换流站同时换相失败, 并推导得到了相应的临界电气距离。最后, 以 CIGRE HVDC 标准模型^[6]为基础构建三馈入直流输电系统模型, 并用 PSCAD 进行仿真分析, 验证了换流母线电压相互影响关系式的合理性。

1 换流母线电压对换相失败的影响

当两个桥臂之间换相结束后, 刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内, 如果未能恢复阻断能力, 或者在反向电压期间换相过程一直未能进行完

毕,这两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换相,称之为换相失败。换相失败的本质是逆变器熄弧角 γ 小于阀固有极限熄弧角 γ_{min} ^[7]。

交流系统中换流母线电压变化是导致换相失败的主要原因,它主要从两方面影响换相过程:电压幅值和电压过零点相位移^[8]。在文献[9]中分别给出了电压幅值和电压过零点相位移对换相失败的影响如下。

在三相对称故障情况下,换流母线电压幅值降低。此时,存在某个临界电压降低,当换相电压降低的程度超过这个值就会引发换相失败,这里简称为临界电压降^[10],用 ΔU 表示。

$$\Delta U \approx 1 - \frac{X_c}{X_c + \cos\gamma_0 - \cos\gamma} \quad (1)$$

式中, X_c 为换相电抗 (pu); γ_0 为换流阀固有极限熄弧角; γ 为直流系统额定熄弧角。

不对称故障情况下,伴随电压幅值降低的同时换相电压过零点发生了相位移。此时,考虑过零点相位移的情况下,换相失败的临界电压降 ΔU 可表示为

$$\Delta U \approx 1 - \frac{X_c}{X_c + \cos(\gamma_0 + \phi) - \cos\gamma} \quad (2)$$

式中, ϕ 为过零点的位移角度,当 $\phi=0$ 时即为式(1)的形式。研究认为,在换相失败中起决定性作用的是换相电压幅值的降低而不是电压过零点漂移^[9]。

2 多馈入直流系统换流母线电压之间的相互影响

在多馈入直流系统中,直流与直流系统间、交流与直流系统间相互影响。一个系统发生故障可能不仅导致自身的直流系统发生换相失败,甚至可能引发多个直流系统发生换相失败。一个故障是否会引发多个直流系统同时发生换相失败不仅与各系统自身强度有关,而且与各系统间的耦合强度有关。由于交流系统换流母线电压的变化是导致换相失败的主要原因,因此可以通过研究多馈入直流系统换流母线间的电压影响关系来分析一条换流母线(或多条换流母线)附近发生故障是否会引发其他多个换流站同时发生换相失败。

多馈入直流输电系统的潮流计算属于交直流输电系统潮流计算。归纳目前已经提出的各种交直流电力系统潮流算法,可以基本上分成两大类:联合求解法及交替求解法^[11]。联合求解法将交流系统潮流

方程组和直流系统的方程组联立起来,统一求解出交流及直流系统中所有未知变量。而交替求解法则将交流系统潮流方程组和直流系统的方程组分开来求解,求解直流系统方程组时各换流站的交流母线电压由交流系统潮流的解算结果提供;而在进行交流系统潮流方程组的解算时,将每个换流站处理成接在相应交流节点上的一个等效的有功、无功负荷,其数值则取自直流系统潮流的计算结果。这样交替迭代计算,直到收敛。由于交流和直流系统方程组在迭代过程中分别单独进行求解,计算交流系统潮流,就可以采用任何一种有效的交流潮流算法。至于直流系统方程组,则可以仍用牛顿法求解。若交流潮流采用快速解耦法模型,则交替求解算法就变成依次迭代求解下列三个方程组^[11]。

$$d = J_{dc} \Delta x \quad (3)$$

$$\Delta P / U = B' \Delta \theta \quad (4)$$

$$\Delta Q / U = B'' \Delta U \quad (5)$$

其中, d 为直流系统中每个换流器所对应的方程组, x 为直流系统变量向量 $x = [U_d, I_d, K_d, \cos\theta_d, \varphi]^T$, $J_{dc} = \frac{\partial d}{\partial x}$ 。系数矩阵 B'' 由节点导纳矩阵的虚部构成。矩阵 B' 与 B'' 阶数不同,且其元素在节点导纳矩阵虚部的基础上进行了相应的修改^[11]。

交替求解法将交流和直流系统方程组分开求解,在求解过程中分别把分界线上的电压及注入无功功率近似地看成是恒定的,忽略了彼此的耦合。当交流系统较强时换流站交流母线电压对注入无功功率变化并不敏感,其收敛特性是非常好的。鉴于此,在用交替求解法计算交直流系统潮流时,近似地只对交流系统进行一次潮流计算而不对直流系统进行潮流计算且不再继续往后迭代。此时在计算交流系统潮流时直流系统等效成有功、无功负荷。经过这一近似化简之后,交直流系统的潮流计算由依次迭代求解式(3)、(4)、(5)变为只对式(4)、(5)进行一次计算。

对于如图 1 所示的 n 馈入直流输电系统,根据式(5)有

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ U_1 \\ \Delta Q_2 \\ U_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdots & B_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

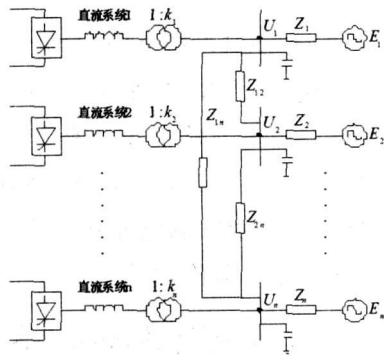


图 1 多馈入直流系统简化模型

其中, $\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_n$ 为各换流母线电压的幅值变化量, $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_n$ 为各换流母线处的无功变化量, B_{ij} 为导纳 Y_{ij} 的虚部。

由此,可以得到一组方程式:

$$\frac{\Delta Q_j}{U_j} = B_{j1} \Delta U_1 + B_{j2} \Delta U_2 + \dots + B_{jn} \Delta U_n \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

对于非故障系统 j 假设 $\Delta Q_j / U_j = 0$ 即可得到第 j 条换流母线电压幅值的变化量与其他系统换流母线电压幅值变化量 $\Delta U_i (i=1, 2, \dots, n, i \neq j)$ 的关系式。

$$\Delta U_j = -\frac{B_{j1}}{B_{jj}} \Delta U_1 - \frac{B_{j2}}{B_{jj}} \Delta U_2 - \dots - \frac{B_{jn}}{B_{jj}} \Delta U_n \quad (8)$$

对于 n 馈入直流输电系统, 根据上式可以列出所有非故障系统 (m 个) 对应换流母线电压幅值变化量 ΔU_j 的表达式, 共 m 个。在这 m 个方程中, 故障系统换流母线电压幅值变化量 $\Delta U_i (n-m$ 个) 为已知量, 非故障系统换流母线电压幅值的变化量 $\Delta U_j (m$ 个) 为待求量。通过解这个方程组便可以求解出当某一个 (或多个) 系统发生故障其换流母线电压幅值变化 ΔU_i 时, 非故障系统换流母线电压幅值变化量 ΔU_j 。

下面以三馈入系统为例来说明求解的过程。对于三馈入直流输电系统, 有:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta Q_1}{U_1} &= B_{11} \Delta U_1 + B_{12} \Delta U_2 + B_{13} \Delta U_3 \\ \frac{\Delta Q_2}{U_2} &= B_{21} \Delta U_1 + B_{22} \Delta U_2 + B_{23} \Delta U_3 \\ \frac{\Delta Q_3}{U_3} &= B_{31} \Delta U_1 + B_{32} \Delta U_2 + B_{33} \Delta U_3 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

假设系统 1 处发生某种故障导致其换流母线电压幅值改变 ΔU_1 , 为已知量。系统 2、系统 3 均未发生故障, 但是受系统 1 的影响, 其换流母线电压幅值也会有一定的改变, 改变值为 ΔU_2 和 ΔU_3 , 为待求量。

对于系统 2 有

$$\frac{\Delta Q_2}{U_2} = B_{21} \Delta U_1 + B_{22} \Delta U_2 + B_{23} \Delta U_3 \quad (10)$$

假设 $\Delta Q_2 / U_2 = 0$, 则有

$$\Delta U_2 = -\frac{B_{21}}{B_{22}} \Delta U_1 - \frac{B_{23}}{B_{22}} \Delta U_3 \quad (11)$$

对于系统 3, 有

$$\frac{\Delta Q_3}{U_3} = B_{31} \Delta U_1 + B_{32} \Delta U_2 + B_{33} \Delta U_3 \quad (12)$$

假设 $\Delta Q_3 / U_3 = 0$, 则有

$$\Delta U_3 = -\frac{B_{31}}{B_{33}} \Delta U_1 - \frac{B_{32}}{B_{33}} \Delta U_2 \quad (13)$$

综合式 (11)、(13), 得

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_2 &= -\frac{B_{21}}{B_{22}} \Delta U_1 - \frac{B_{23}}{B_{22}} \Delta U_3 \\ \Delta U_3 &= -\frac{B_{31}}{B_{33}} \Delta U_1 - \frac{B_{32}}{B_{33}} \Delta U_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

求解该方程组, 可得

$$\Delta U_2 = \frac{B_{23} B_{31} - B_{21} B_{33}}{B_{22} B_{33} - B_{23} B_{32}} \Delta U_1 \quad (15)$$

$$\Delta U_3 = \frac{B_{32} B_{21} - B_{31} B_{22}}{B_{33} B_{22} - B_{32} B_{23}} \Delta U_1 \quad (16)$$

式 (15)、(16) 即为三馈入系统的换流母线电压影响关系式, 其中 ΔU_1 为故障系统 1 换流母线电压幅值变化量, ΔU_2 和 ΔU_3 为非故障系统 2、3 换流母线电压幅值的变化量。

3 换相失败与临界电气距离的分析

根据式 (1)、(2), 知道对于换流站是否发生换相失败存在一个临界电压降, 用 ΔU_{max} 表示。当换流母线电压降低的程度超过这个值时, 就会发生换相失败。多馈入直流系统中, 某条 (或某几条) 换流母线附近发生故障时, 与其相应的直流系统是否会发生换相失败以及其他直流系统是否会同时发生换相失败均取决于它们的换流母线电压降低的程度是否超过临界电压降 ΔU_{max} 。因此, 可以借助上面得到的换流母线电压相互影响关系式来分析某条 (或某几条) 换流母线附近发生故障时, 是否会引起其他直流系统同时发生换相失败。

现以三馈入系统为例, 说明如何判断换相失败是否发生以及多个换流站同时发生换相失败时临界电气距离的求解。

假设系统 1 换流母线附近发生某种故障 (系统 2、3 未发生故障) 导致其换流母线电压幅值改变 ΔU_1 , 通过比较 ΔU_1 与 ΔU_{max} 就可以知道直流系统 1 是否会发生换相失败。若 $\Delta U_1 < \Delta U_{max}$, 则不会发生换相失败, 若 $\Delta U_1 > \Delta U_{max}$, 则会发生换相失败。那么受系统 1 的故障影响, 直流系统 2、3 是否会发生换相失败呢? 根据式 (15)、(16), 可以方便地求得当系统 1 换流母线电压幅值改变 ΔU_1 时, 系统 2、3 处换流母线电压幅值的改变量 ΔU_2 、 ΔU_3 。通过比较 ΔU_2 、 ΔU_3 与临界电压降 ΔU_{max} , 就可以判断直流系统 2、3 是否会发生换相失败。

那么受系统 1 故障影响, 直流系统 2、3 发生换相失败时的临界电气距离是多少呢? 根据式 (15)、(16), 将 ΔU_2 、 ΔU_3 分别取为临界电压降 ΔU_{max} , 其对应着直流系统 2、3 是否发生换相失败的临界状态。此时有

$$\Delta U_2 = \Delta U_{max} = \frac{B_{23} B_{31} - B_{21} B_{33}}{B_{22} B_{33} - B_{23} B_{32}} \Delta U_1 \quad (17)$$

$$\Delta U_3 = \Delta U_{max} = \frac{B_{32} B_{21} - B_{31} B_{22}}{B_{33} B_{22} - B_{32} B_{23}} \Delta U_1 \quad (18)$$

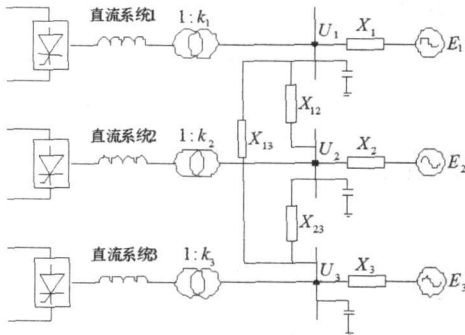


图 2 三馈入直流系统简化模型

为计算简便, 假设各支路均为纯感性, 如图 2 所示。分别求解式 (17)、(18), 可得临界电气距离如下。

$$X_{12cr} = \frac{A_1 (\Delta U_1 - \Delta U_{max})}{B_1 \Delta U_{max} - C_1 \Delta U_1} \quad (19)$$

$$X_{13cr} = \frac{A_2 (\Delta U_1 - \Delta U_{max})}{B_2 \Delta U_{max} - C_2 \Delta U_1} \quad (20)$$

其中:

$$A_1 = X_2 X_{13} X_{23} + X_2 X_3 X_{23} + X_2 X_3 X_{13}$$

$$B_1 = X_{13} X_{23} + X_3 X_{23} + X_3 X_{13} + X_2 X_{13} + X_2 X_3$$

$$C_1 = X_2 X_3$$

$$A_2 = X_3 X_{12} X_{23} + X_2 X_3 X_{23} + X_2 X_3 X_{12}$$

$$B_2 = X_{12} X_{23} + X_2 X_{23} + X_2 X_{12} + X_3 X_{12} + X_2 X_3$$

$$C_2 = X_2 X_3$$

X_{12cr} 、 X_{13cr} 分别为换流母线 1 附近发生故障时引起直流系统 2、3 换相失败时的临界电气距离。由式 (19)、(20) 可知, 临界电气距离 X_{12cr} 、 X_{13cr} 与系统自身强度 X_2 、 X_3 , 非故障系统 2、3 间电气联系强度 X_{23} , 其它非故障系统 3、2 与故障系统 1 间电气联系强度 X_{13} 、 X_{12} 及故障大小 ΔU_1 均有关系。

4 换流母线电压相互影响关系式的仿真验证

前面已经分析得到了换流母线电压相互影响关系式以及换流母线电压与换相失败的关系, 并以此为基础推导得到了临界电气距离的表达式。其中, 换流母线电压相互影响关系式是后续推导的基础, 其准确与否是后续工作的关键, 因此下面通过仿真软件 PSCAD 仿真分析换流母线电压相互影响关系式的准确性。

以标准直流输电系统 CIGRE HVDC 为基础建立三馈入直流输电系统模型, 且为计算方便各联络线均取为纯感性 $Z_{12} = jX_{12}$ 、 $Z_{23} = jX_{23}$ 、 $Z_{13} = jX_{13}$, 如图 2 所示。在此模型基础上通过 PSCAD 仿真分析在不同故障情况、不同电气距离情况下, 换流母线电压相互影响关系式的计算值和实际值之间的误差。

方案 1: 取 $X_{12} = X_{23} = X_{13} = \omega L = 15.708 \Omega$ ($L = 0.05H$), Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为标准直流输电系统的默认值 $5.4985 + j0.4660 \Omega$ 。t=3 s 时在系统 1 换流母线处并联电感 L 引起系统无功扰动改变 U_1 的运行幅值, 根据相应的 ΔU_1 通过式 (15) 计算得出换流母线 1 故障发生后系统 2 换流母线处的电压幅值 U_2 并和实际运行值 U_2' 进行比较。

将上述线路参数代入式 (15), 得

$$\Delta U_2 = 0.5828 \Delta U_1 \quad (21)$$

于是可由换流母线 1 附近故障所引起的 ΔU_1 计算出换流母线 2 电压幅值的变化量 ΔU_2 进而求得换流母线 2 的电压幅值 U_2' , 如表 1 所示。

图 3、4 表示在 t=3 s 时换流母线 1 处并联电感 L 引起系统无功扰动, 换流母线 1、2 处的电压幅值。L 取值不同引起的无功扰动大小也不同, 换流母线 1、2 处电压下降幅值也随之不同。

表 1 中, L 为换流母线 1 处的并联电感, 表示对系统 1 的无功扰动, 代表故障; U_1 、 U_1' 为故障前后换

流母线 1 处的电压; $\Delta U_1 = U_1 - U'_1$ 为故障后换流母线 1 电压幅值的变化量; U_2 、 U'_2 为故障前后换流母线 2 处的电压; ΔU_2 为故障后换流母线 2 电压幅值的变化量, 根据式 (21) 求得; $U''_2 = U_2 - \Delta U_2$ 为故障后换流母线 2 处电压的计算值。

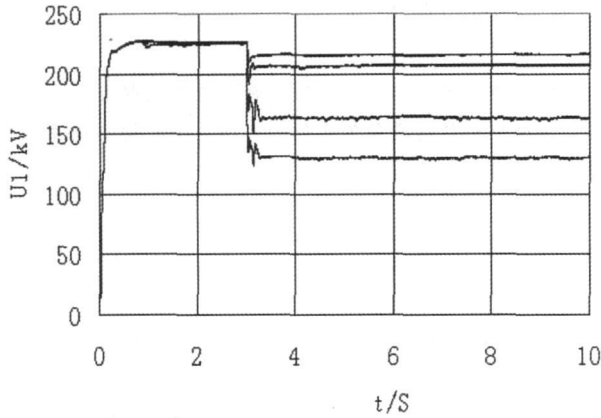


图 3 直流系统 1 换流母线电压 U_1

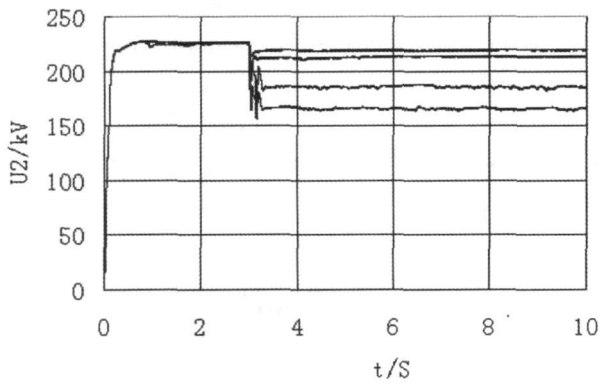


图 4 直流系统 2 换流母线电压 U_2

表 1 故障后直流系统 2 换流母线电压的计算

L'/H	0.05	0.10	0.50	1.00
U_1/kV	226.0			
U'_1/kV	130.00	163.00	207.25	215.75
$\Delta U_1/kV$	96.00	63.00	18.75	10.25
U_2/kV	226.0			
$\Delta U_2/kV$	55.95	36.72	10.93	5.97
U'_2/kV	165.50	185.50	213.25	219.40
U''_2/kV	170.05	189.28	215.07	220.03
相对误差 ($U''_2 - U'_2$)/ U'_2 (%)	22.75	2.04	0.85	0.29

方案 2: 改变联络线的长度, 取 $X_{12} = X_{23} = X_{13} = \omega L = 62\ 831\ 9\ \Omega$ ($L=0.2H$), Z_1 、 Z_2 、 Z_3 仍为标准直流输电系统的默认值 $5\ 498\ 5 + j20\ 466\ 0\ \Omega$ 。其他同方案 1。根据式 (15) 计算故障后换流母线 2 处的电压 U''_2 。

将线路参数代入式 (15), 得:

$$\Delta U_2 = 0.2588 \Delta U_1 \quad (22)$$

于是可以计算得到相应的 ΔU_2 和 $\Delta U''_2$, 如表 2 所示。

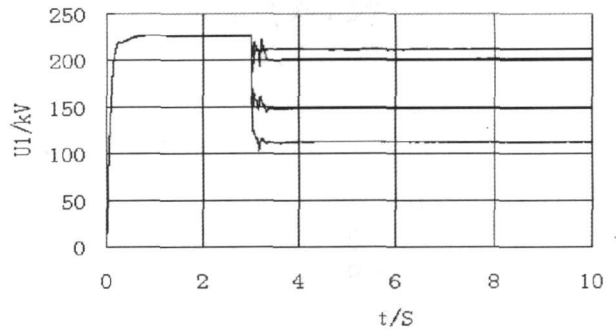


图 5 直流系统 1 换流母线电压 U_1

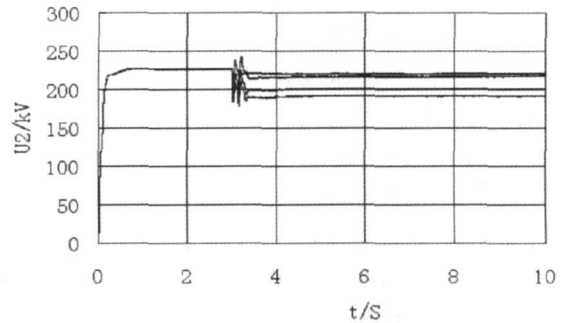


图 6 直流系统 2 换流母线电压 U_2

同样, 图 5、6 表示在 $t=3\ s$ 时换流母线 1 处并联电感引起系统无功扰动, 换流母线 1、2 处的电压幅值。L 取值不同引起的无功扰动大小也不同, 换流母线 1、2 处电压下降幅值也随之不同。

表 2 故障后直流系统 2 换流母线电压的计算

$L'(H)$	0.05	0.10	0.50	1.00
$U_1(kV)$	226.0			
$U'_1(kV)$	112.50	149.25	201.50	212.50
$\Delta U_1(kV)$	114.10	77.35	25.10	14.10
$U_2(kV)$	226.0			
$\Delta U_2(kV)$	29.53	20.02	6.50	3.65
$U'_2(kV)$	191.60	201.50	217.30	221.00
$U''_2(kV)$	197.10	206.58	220.10	222.95
相对误差 ($U''_2 - U'_2$)/ U'_2 (%)	2.87	2.52	1.29	0.88

表 2 中各项的含义与表 1 相同。

从仿真结果可以看到, 换流母线电压相互影响关系的计算值和实际值之间的误差是较小的, 且故障越小, 计算精度越高。通过仿真说明了前述推导所得的换流母线电压相互影响关系式是合理的。

5 结 论

(下转第 64 页)

了定期预防性试验的不足,但是同时也还存在一些问题;如谐波分析法的软件处理误差问题。对设备绝缘进行在线检测的最终目的是为了及时、准确地掌握电力系统运行中设备的绝缘状况,因此仅仅通过在线检测获得设备的绝缘参数的结果是远远不够的,还要对这些结果进行综合性的分析与诊断。但是,目前的在线检测方法仍往往局限于将设备的绝缘参数与单一、静态标准进行比较,没有使在线检测的优势得到充分发挥。对于对比分析同一设备高压下在线测量值与低压下停电预防性测量值的差距及影响在线检测值的因素及程度也是目前研究工作中一大问题。另外,应用于介质损耗因数分析的谐波分析法因现场各种原因而存在频谱泄漏的问题,那么如何在软件上进行改进,提高电流传感器稳定性和测量精度,采用数字信号传输,提高抗干扰能力,从而消除由于频谱泄漏

而带来的误差也是目前思考解决的课题之一。

参考文献

- [1] 朱德恒. 严璋高压绝缘 [M]. 北京:清华大学出版社, 1992.
- [2] 严璋. 电气绝缘在线检测技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
- [3] 王乃庆. 绝缘在线监测技术的实用性、经济性和可靠性 [J]. 电网技术, 1995, 19(11): 54—56, 60.
- [4] 成永红. 电力设备绝缘检测与诊断 [M]. 中国电力出版社. 2001: 65—79.
- [5] 蔡国雄. 介质损耗测量的过零点电压比较法 [J]. 电网技术, 1995, 19(10): 1—5.

(收稿日期: 2009—04—27)

(上接第 15 页)

通过前面的理论分析以及仿真验证,可以得到以下结论。

(1) 分析了换流母线电压对换相失败的影响。换流母线电压变化是导致换相失败的主要原因,它主要从两方面影响换相过程:电压幅值和电压过零点相位移,得到了换相失败发生时的临界电压降。当换相电压降低的程度超过这个值就会引发换相失败。

(2) 推导得出了换流母线电压间相互影响的表达式。并以此为基础推导得到了换相失败时的临界电气距离,它与系统自身的强度、故障大小以及与其它系统间的电气联系强度等均有关系。

(3) 最后,通过仿真验证了根据换流母线电压相互影响关系式计算所得的换流母线电压与实际电压误差是较小的,且故障越小,非故障系统离故障系统电气距离越远计算精度越高。在工程上具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 林凌霄,张尧,钟庆,宗秀红. 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.
- [2] 王晶芳,王智冬,李新年,胡涛,蒋卫平,王明新,向孟奇,李焕明. 含特高压直流的多馈入交直流系统动态特性仿真 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 97—102.
- [3] 林伟芳,汤涌,卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7—12.
- [4] 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.

- [5] 凌晓波,刘蓓,王冲. 高压直流输电系统多落点及研究现状 [J]. 上海电力, 2008, (1): 72—74.
- [6] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [7] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电 [M]. 北京:电力工业出版社, 1982.
- [8] Lidong Zhang, Lars Dofnas. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems [C]. Proceedings Power Conference 2002, 1, 51—56.
- [9] 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, 30(10): 259—298.
- [10] Changchun Zhou, Zheng Xu. Study on commutation failure of multi—infed HVDC system [C]. International Conference on Power System Technology, 2002, 2462—2466.
- [11] 诸骏伟. 电力系统分析 [M]. 北京:水利电力出版社, 1995.

作者简介:

肖俊 (1983—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

李兴源 (1945—),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE 高级会员,从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作;

杨小兵 (1981—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009—05—10)