

DOI: 10.7667/PSPC151678

多直流电压相互作用因子的解析表达方法

丁媛媛¹, 刘天琪¹, 高峰², 李保宏¹, 李旭涛², 田蓓²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 国网宁夏电力公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750000)

摘要: 为了定量考虑多直流系统中各直流系统之间的相互影响, 提出一种更切合实际的基于潮流雅克比矩阵的多馈入相互作用因子(Multi-infeed Interaction Factor)解析表达式。目前相互作用因子主要通过仿真方法进行求解, 其物理意义不明确。为此, 从系统潮流出发, 考虑交直流系统的共同影响, 提出一种新的 MIIF 解析表达式, 并验证了该方法的有效性。最后, 比较分析了现有的三种基于电路原理的 MIIF 解析表达式和文中所提的解析表达式, 从工程实用的角度给出了更具可行性的 MIIF 的计算建议。

关键词: 多馈入直流系统; 换流母线电压; 多直流交互影响; 雅克比矩阵; 交互作用因子

Multi-infeed interaction factor analytic expression

DING Yuanyuan¹, LIU Tianqi¹, GAO Feng², LI Baohong¹, LI Xutao², TIAN Bei²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Ningxia Electric Power Research Institute, Yinchuan 750000, China)

Abstract: In multi-infeed HVDC system, because the electrical distances among DC converter stations are relatively short, the interactions and mutual influences between DC systems or DC system and AC system are complex. Multi-infeed interaction factor (MIIF) can effectively reflect the interactions and mutual influences. MIIF currently is mainly solved by simulation method which physical meaning is not clear. Therefore, a more realistic Jacobian matrix analytic expression is proposed. The simulation results have verified its effectiveness. At last, three MIIF analytic expressions based on circuit theory and the proposed Jacobian matrix analytic expression are compared with the simulation method, and some feasible suggestions from the practical engineering perspective are offered.

Key words: multi-infeed HVDC; inverter bus voltage; DC systems interaction; Jacobian matrix; MIIF

0 引言

由于高压直流输电 HVDC(High Voltage Direct Current)系统具有传输容量大、损耗低、快速、控制灵活等优点, 在我国“西电东送”中得到了广泛的应用, 随着区域间电网联系的紧密, 电网将出现交直流并联系统和多馈入交直流系统的格局^[1-6]。对于上述系统, 交直流系统间以及各换流站间相互作用, 彼此影响着对方的工作特性。在交直流混合输电系统的各种问题中, 多馈入直流输电系统间的相互作用特性对整个系统的安全稳定运行有很大影响^[7-9], 特别是换流母线之间的电压相互影响关系是一个值得深入研究的课题。深入分析换流母线电压间的关系也有助于对交直流系统相关问题的理解和进一步的研究。

以电压相互影响为基础定义的多馈入直流相互作用因子(multi-infeed interaction factor, MIIF)能够反映各换流站间的相互影响关系, 它是 CIGRE WG B4-41 工作组提出的一种衡量多馈入交直流系统中直流换流站间相互作用的非常重要的一个指标^[10-15]。但是, 目前大多是用基于其定义的仿真方法求得 MIIF, 物理意义不明确^[16-17], 无法解释直流子系统之间相互作用的内在原因。这使得相互作用因子缺乏预见性^[18], 不能反映系统结构变化及相关因素对系统间相互作用的影响。

因此, 研究相互作用因子的内在物理意义, 探究其解析表达式与交直流系统相互作用及多馈入系统强度关系等课题具有重要意义。在对已有解析表达式分析的基础上, 提出一种更切合实际的基于潮流雅克比矩阵的 MIIF 解析表达式。并将得到 MIIF 的方法划分为三类, 分别是仿真法、节点阻抗矩阵

法和潮流降阶雅克比矩阵法。其中, 节点阻抗矩阵法根据其解析表达式的不同, 又分为阻抗法和导纳法; 潮流降阶雅克比矩阵法根据简化条件不同, 又分为基于有功变化为零的解析表达式和基于相角变化为零的解析表达式。由分析对比结果, 从工程实用的角度给出可行、合理的 MIIF 解析计算方法。

1 多馈入直流的相互作用因子

1.1 相互作用因子的定义及作用

多馈入直流交互作用因子(MIIF)是 CIGRE WG B4 工作组在 2008 年工作指南中提出的用于衡量多馈入直流输电系统中换流站间相互作用强弱的指标。它的定义为: 如图 1 所示, 在交流母线 i 上通过人为并联一个电抗元件, 使得母线 i 上产生一个 1% 的突变电压 ΔU_i , 观察母线 j 上电压变化的比例 ΔU_j , 这两个电压变化的比值即为多馈入交互作用因子(MIIF), 如式(1)所示。

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta U_j}{1\%U_i} \quad (1)$$

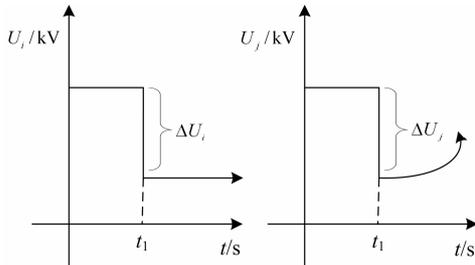


图 1 确定换流站之间相互作用因子

Fig. 1 Determining the MIIF between two buses

1.2 多馈入相互作用因子的取值范围

从 MIIF 的定义可以看出, 如果两个换流站母线之间的距离无穷远, 则 MIIF 等于 0; 如果两个换流站连接到同一个上母线, 则 MIIF 等于 1; MIIF 的取值范围在 0~1 之间, 电气距离相隔越远, MIIF 值越接近于 0, 电气距离相隔越近, MIIF 值越接近于 1, 其取值范围如图 2 所示。



图 2 相互作用因子的取值范围

Fig. 2 Range of MIIF

1.3 多馈入相互作用因子的不对称性

MIIF 具有不对称性, 即 $MIIF_{ij} \neq MIIF_{ji}$ 。比如

说, 在弱交流系统(ws-weak system)换流站母线上 1% 的电压降落, 不会在连接强交流系统(ss-strong system)的换流站母线上引起较大的电压降落, 所以 $MIIF_{ss,ws}$ 比较小; 反之, 强交流系统母线的电压降落会使得附近弱交流系统换流站母线电压大幅度下降, 于是得到相对较大的 $MIIF_{ws,ss}$ 。大量仿真也表明了相互作用因子的不对称性。

2 MIIF 的解析表达式

2.1 基于节点阻抗矩阵的多直流相互作用因子

首先, 对基于节点阻抗矩阵的相互作用因子解析表达式进行分析, 基于节点阻抗矩阵的相互作用因子可分为阻抗和导纳两种解析表达式。

2.1.1 基于阻抗的解析表达式

基于换流母线电压变化率的 MIIF 的定义, 一般可通过仿真或实验进行计算得到, 虽然该方法较为准确, 但是并未揭露多直流间相互作用的本质机理不明确。因此, 可根据定义考虑利用节点阻抗矩阵对 MIIF 进行解析式推导, 以便进一步对 MIIF 的物理实质进行研究。

根据 MIIF 的定义, 在换流母线 i 处投入的三相对称电抗器 Z_L , 其等值电路如图 3 所示。

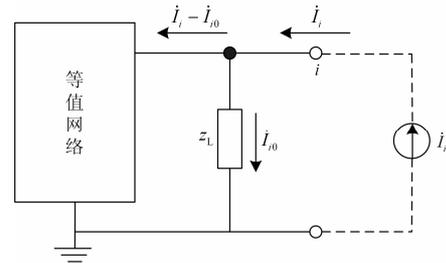


图 3 电抗器投入后节点等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit diagram after the reactor put into

此时网络阻抗矩阵将发生变化, 任一节点 p 的电压将其用原有矩阵元素表示为

$$\dot{U}_p = Z_{p1}\dot{I}_1 + \dots + Z_{pi}(\dot{I}_i - \dot{I}_{i0}) + \dots + Z_{pn}\dot{I}_n \quad (2)$$

对式(2)进行简化, 可得

$$\dot{U}_p = \sum_{m=1}^n Z_{pm}\dot{I}_m - Z_{pi}\dot{I}_{i0} \quad (3)$$

式中: \dot{I}_m 代表节点 m 的注入电流; n 为系统节点总数; Z_{pm} 为原阻抗矩阵中 p 节点与 m 节点间的互阻抗; Z_{pi} 为原阻抗矩阵中 p 节点与 i 节点的互阻抗。

因此, 对于节点 i , 则有^[19]

$$\dot{U}_i = \sum_{m=1}^n Z_{im}\dot{I}_m - Z_{ii}\dot{I}_{i0} \quad (4)$$

式中, Z_{ii} 代表节点 i 的自阻抗。

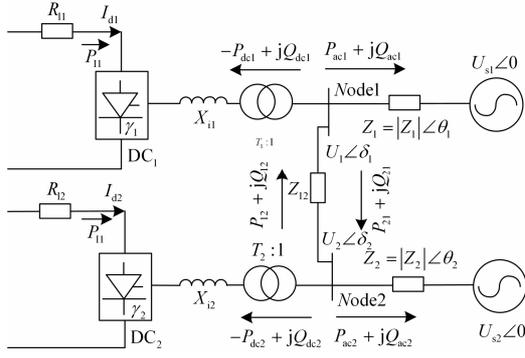


图5 两馈入直流简化模型
Fig. 5 A simplified 2-infeed HVDC system

图中符号说明如下:

X_{11} 、 X_{12} 为变压器折算到二次侧的阻抗; T_1 、 T_2 为变压器变比; P_{dc1} 、 jQ_{dc1} 、 P_{dc2} 、 jQ_{dc2} 为直流1、2注入交流系统的有功、无功; P_{ac1} 、 jQ_{ac1} 、 P_{ac2} 、 jQ_{ac2} 为交流系统接受直流1、2注入的有功、无功; P_{11} 、 P_{12} 为直流1、2输送的有功; P_{12} 、 jQ_{12} 为节点1、2间的联络功率; $Z_1 = |Z_1|∠\theta_1$ 、 $Z_2 = |Z_2|∠\theta_2$ 为交流侧等值阻抗; $U_{s1}∠0$ 、 $U_{s2}∠0$ 、 $U_1∠\delta_1$ 、 $U_2∠\delta_2$ 为电源1、2以及节点1、2电压; R_{11} 、 R_{12} 、 I_{d1} 、 I_{d2} 为直流线路电阻及电流。

在稳态时有

$$P_{dci} = U_{di} I_{di} \quad (16)$$

式中, $i=1, 2$ 为下标(下同), U_{di} 为逆变侧直流电压, 且

$$U_{di} = U_{doi} \cos(\gamma_i) - \sqrt{2} K_m X_i I_{di} = 1.35 E_{LL} B T_i \cos(\gamma_i) - \frac{3 B X_i I_{di}^2}{\pi} \quad (17)$$

式中: U_{doi} 为理想空载电压; γ_i 为逆变侧熄弧角; K_m 为系数; E_{LL} 为变压器线电压有效值(一次侧); $B=2$ 为桥数。将式(17)代入式(16)中得

$$\begin{cases} P_{dci} = 1.35 E_{LL} B T_i \cos(\gamma_i) I_{di} - \frac{3 B X_i I_{di}^2}{\pi} \\ Q_{dci} = P_{dci} \frac{2\mu_i + \sin(2\gamma_i) - \sin(2\gamma_i + 2\mu_i)}{\cos(2\gamma_i) - \cos(2\gamma_i + 2\mu_i)} \end{cases} \quad (18)$$

式中, μ_i 为叠弧角。

交流侧有

$$\begin{cases} P_{dci} = \frac{U_i^2 \cos(\theta_i) - U_{si} U_i \cos(\theta_i + \delta_i)}{|Z_i|} \\ Q_{dci} = \frac{U_i^2 \sin(\theta_i) - U_{si} U_i \sin(\theta_i + \delta_i)}{|Z_i|} \end{cases} \quad (19)$$

则稳态时, 对于直流系统有

$$\Delta P_{dci} = P_{li} - P_{dci} \quad (20)$$

对交流系统有

$$\begin{cases} \Delta P_{aci} = P_{ij} + P_{dci} - P_{aci} \\ \Delta Q_{aci} = Q_{ij} - Q_{dci} - Q_{aci} \end{cases} \quad (21)$$

则联立式(20)和式(21), 并将其线性化后, 选取 ΔI_d 、 $\Delta \delta$ 及 ΔU 为状态变量, 得到双馈入直流线性化模型如下^[21]

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{dc} \\ \Delta P_{ac} \\ \Delta Q_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{D1} & J_{D\delta} & J_{DU} \\ J_{P1} & J_{P\delta} & J_{PU} \\ J_{Q1} & J_{Q\delta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中,

$$\begin{bmatrix} J_{D1} & J_{D\delta} & J_{DU} \\ J_{P1} & J_{P\delta} & J_{PU} \\ J_{Q1} & J_{Q\delta} & J_{QU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\partial P_{dc} / \partial I_d & 0 & -\partial P_{dc} / \partial U \\ \partial P_{dc} / \partial I_d & -\partial P_{ac} / \partial \delta & \partial (P_{dc} - P_{ac}) / \partial U \\ -\partial Q_{dc} / \partial I_d & -\partial Q_{ac} / \partial \delta & -\partial (Q_{dc} + Q_{ac}) / \partial U \end{bmatrix}$$

考虑直流电流不变, 即 $\Delta I_d = 0$ 。则式(22)退化为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{ac} \\ \Delta Q_{ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\delta} & J_{PU} \\ J_{Q\delta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (23)$$

2.2.1 基于有功变化为零的解析表达式

在小扰动分析无功电压关系时, 有研究假设 $\Delta P_{ac} = 0$ ^[22-23], 则式(23)为

$$\begin{cases} \Delta Q_{ac} = J_R \Delta U \\ J_R = J_{QU} - J_{Q\delta} J_{P\delta}^{-1} J_{PU} \end{cases} \quad (24)$$

根据MIIF的原始定义: 换流母线 i 接入感性负载后造成无功变化 ΔQ_i , $\Delta Q_m = 0, m=1, \dots, n, m \neq i$, 引起换流母线 j 与 i 的变化之比。则MIIF为

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} = \frac{\sum_{m=1}^n (J_R^{-1})_{j,m} \Delta Q_m}{\sum_{m=1}^n (J_R^{-1})_{i,m} \Delta Q_m} = \frac{(J_R^{-1})_{j,i}}{(J_R^{-1})_{i,i}} \quad (25)$$

2.2.2 基于相角变化为零的解析表达式

因为无功与电压关系更为紧密, 所以当电压出现波动时, $\Delta P_{ac} = 0$ 的假设在实际系统中不易出现, 现将假设 $\Delta P_{ac} = 0$ 改进为假设 $\Delta \delta = 0$, 则式(23)为

$$\Delta Q_{ac} = J_{QU} \Delta U \quad (26)$$

同理可得

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} = \frac{(J_{QU}^{-1})_{j,i}}{(J_{QU}^{-1})_{i,i}} \quad (27)$$

式(25)、式(27)给出了基于降阶雅克比矩阵的多馈入直流相互作用因子的计算解析表达式,分析式(25)可知,降阶矩阵 J_R^{-1} 的元素 $(J_R^{-1})_{ji}$ 与 $(J_R^{-1})_{ii}$ 是决定换流站之间的电压相互强度影响的因素,其大小由交流系统与直流系统共同决定。

3 MIIF 的计算方法相互比较分析

本文将得到 MIIF 的方法划分为三类,分别是仿真法、节点阻抗矩阵法和潮流降阶雅克比矩阵法,其中节点阻抗矩阵法根据表达式的不同,分为阻抗法和导纳法,潮流降阶雅克比矩阵法根据简化条件不同可以分为有功变化为零和相角变化为零两种方法。

仿真法根据定义能够直接并且准确地得到 MIIF 数值,但是该方法物理意义不明确,无法解释直流子系统之间相互作用的内在原因,不能反映系统结构变化及相关因素对系统间相互作用的影响且缺乏预见性。

基于节点阻抗的 MIIF 解析法从一定程度上能够反映多馈入直流系统换流母线电压间的相互关系,并且能应用到较为简单的系统中,其计算速度快,可以根据不同的系统参数选择阻抗法和导纳法,准确度也较高。但是该方法没有计及直流系统和无功补偿设备对 MIIF 值的影响。比如在逆变站换流母线装设有同步调相机或静止无功发生装置,当存在扰动时,其他直流换流母线电压下降后,由于补偿设备的作用,该换流母线电压不变。如果按照该方法的定义,在无功补偿设备装设前后,由于交流系统保持不变,其他母线的电压跌落对于此换流母线的影 响是不变的,显然具有局限性。

基于潮流分析雅克比矩阵的 MIIF 解析法考虑了设备的有功与无功性能,更加准确地衡量换流母线之间的电压相互影响,并且该解析式得到的 MIIF 值是由交流系统与直流系统共同决定的,物理意义更加明确。基于潮流分析雅克比矩阵的方法适用于复杂系统和简单系统,但是该方法需要的数据多且计算复杂,所以对其做了一定的简化处理,进行了基于有功变化为零 $\Delta P_{ac} = 0$ 和相角变化为零 $\Delta \delta = 0$ 的假设。简化处理后的解析表达式仍然较为复杂,这是该方法的不足之处。

4 仿真分析

4.1 有效性验证

在如图 6 所示某实际多馈入直流系统中,对文

中所提的基于相角为零的雅克比矩阵解析表达式进行有效性验证,直流 1 和直流 2 的额定运行功率均为 3 000 MW。在系统拓扑确定的情况下,根据式(27)可以计算得出 $MIIF_{21}$ 为 0.695 2, $MIIF_{12}$ 为 0.745 8。下面将通过仿真得到该系统 MIIF 的实测值。

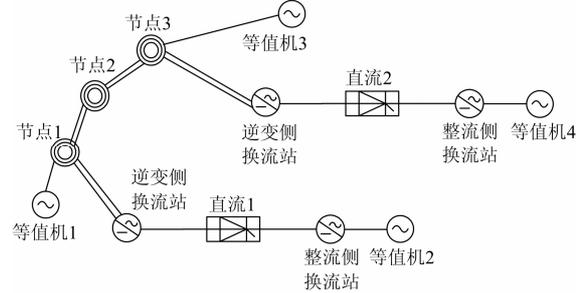


图 6 仿真拓扑结构图

Fig. 6 Simulation topology diagram

在 2 s 时,在母线 1 上并联一个对称三相电抗器,使得母线 1 上电压有效值下降约为 1%。为了减小交流母线电压有效值纹波对 MIIF 的影响,所以在信号之前加一个 FFT 模块,取 FFT 模块出来的直流电压信号作为各母线电压有效值。此为场景 1,仿真结果如图 7 所示。

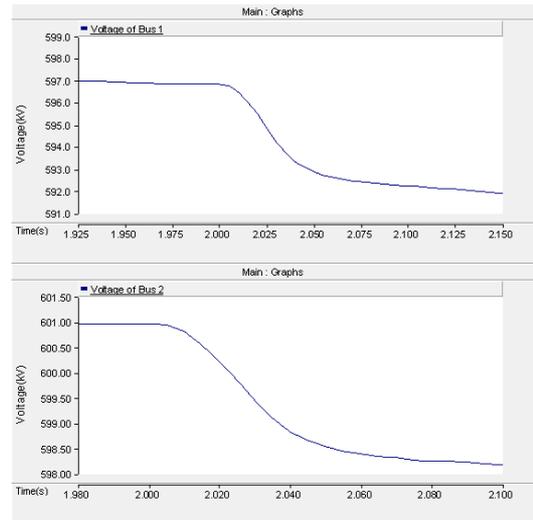


图 7 场景 1 母线 1 和母线 2 的电压降落

Fig. 7 Voltage drops in bus 1 and bus 2 of case 1

从图 7 中可以看出,母线 1 的电压从 596.737 kV 降低到了 591.906 kV,母线 2 的电压从 600.929 kV 降低到了 597.835 kV,利用式(1)进行计算得到 $MIIF_{21}$ 实测值为 0.640 4,根据式(27)得到解析表达式计算值为 0.695 2,误差为 8.55%,在接受的范围内。

在 2 s 的时候,在母线 2 上并联一个对称三相电抗器,使得母线 2 上电压有效值下降约为 1%。

此为场景 2, 仿真结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 母线 2 的电压从 600.954 kV 降低到了 597.048 kV, 母线 1 的电压从 596.734 kV 降低到了 574.044 kV, 利用式(1)进行计算得到 $MIIF_{12}$ 实测值为 0.688 9, 根据式(27)得到解析表达式计算值为 0.745 8, 误差为 8.26%, 在接受的范围内。

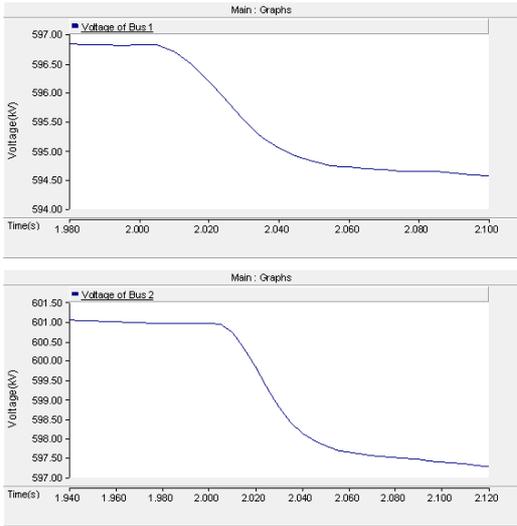


图 8 场景 2 母线 1 和母线 2 的电压降落

Fig. 8 Voltage drops in bus 1 and bus 2 of case 2

根据上述的 MIIF 实测值和计算值对比结果可知, 基于相角为零的雅克比矩阵解析表达式具有一定有效性。

4.2 计算方法对比验证

以 CIGRE 标准系统为基础在 PSCAD 中构建双馈入直流系统, 直流系统逆变侧接于相邻的同侧, 逆变侧换流母线通过耦合电抗连接, 如图 9 所示。直流系统整流侧采用定电流控制, 逆变侧采用定熄弧角控制。

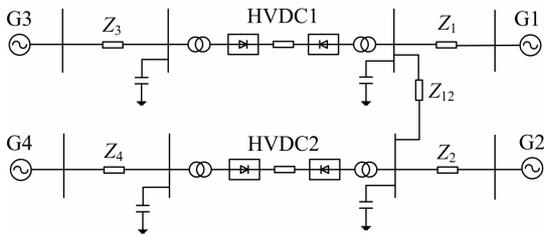


图 9 仿真拓扑结构图

Fig. 9 Simulation topology diagram

采用文献[24]的系统的初始运行参数, 交流系统等值阻抗 $Z_1 = Z_2 = 5.498 4 + j20.466 \Omega$, 耦合阻抗 $Z_{12} = 0.894 9 + j43.964 1 \Omega$ 。在 3 s 时, 在母线 1 上并联一个对称三相电抗器, 使得母线 1 上电压有效

值下降约为 1%。为了减小交流母线电压有效值纹波对 MIIF 的影响, 所以在信号之前加一个 FFT 模块, 取 FFT 模块出来的直流电压信号作为各母线电压有效值。此为场景 1, 仿真结果如图 10 所示。

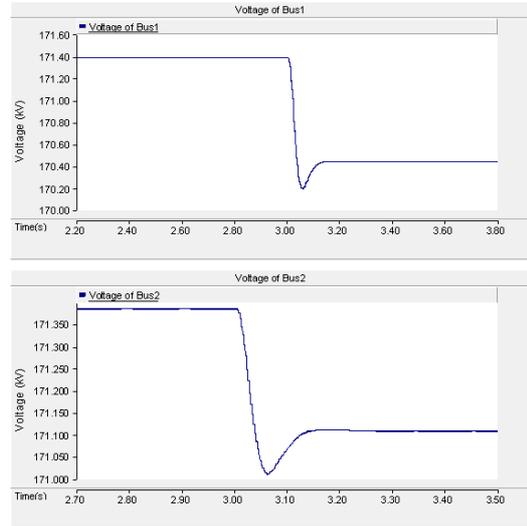


图 10 场景 1 母线 1 和母线 2 的电压降落

Fig. 10 Voltage drops in bus 1 and bus 2 of case 1

从图 10 中可以看出, 母线 1 的电压从 171.42 kV 降低到了 170.20 kV, 母线 2 的电压从 171.38 kV 降低到了 171.01 kV, 利用式(1)进行计算得到 $MIIF_{21}$ 为 0.303 3。

在 3 s 的时候, 在母线 2 上并联一个对称三相电抗器, 使得母线 2 上电压有效值下降约为 1%。此为场景 2, 仿真结果如图 11 所示。

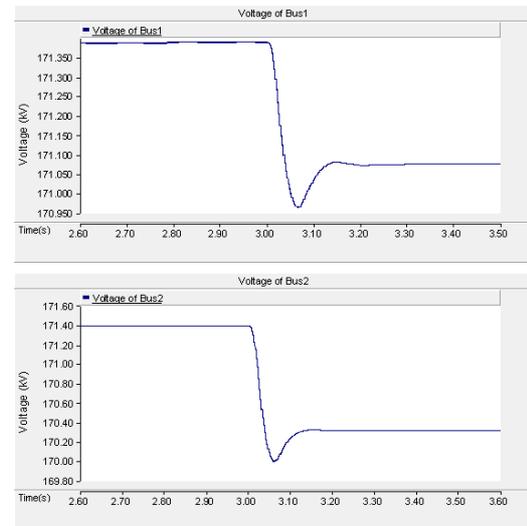


图 11 场景 2 母线 1 和母线 2 的电压降落

Fig. 11 Voltage drops in bus 1 and bus 2 of case 2

从图 11 中可以看出, 母线 2 的电压从 171.40 kV 降低到了 170.00 kV, 母线 1 的电压从 171.39 kV 降低到了 170.96 kV, 利用式(1)进行计算得到 $MIIF_{12}$ 为 0.307 1。

再根据式(9)、式(15)、式(25)、式(27)的计算方法计算 $MIIF_{21}$ 和 $MIIF_{12}$, 与仿真结果比较, 得到结果如表 1 所示。

表 1 相互作用因子计算比较

Table 1 MIIF calculations comparison

		$MIIF_{21}$		$MIIF_{12}$	
仿真结果		0.303 3		0.307 1	
		计算结果	误差	计算结果	误差
基于节点 阻抗矩阵 解析法	阻抗法	0.327 3	7.9%	0.327 3	6.6%
	导纳法	0.481 9	58.8%	0.481 9	56.9%
基于潮流 分析雅克 比矩阵法	$\Delta P_{ac} = 0$	0.332 4	9.6%	0.346 6	12.8%
	$\Delta \delta = 0$	0.330 9	9.1%	0.330 8	7.7%

由表 1 可以看出, 基于节点阻抗矩阵的多直流相互作用因子计算方法和基于潮流分析雅克比矩阵法的多直流相互作用因子计算方法都有一定的误差。

基于雅克比矩阵法虽然较为复杂, 但相对于节点阻抗矩阵导纳法误差较小。其中, $\Delta P_{ac} = 0$ 的假设条件在实际系统中不易出现, 所以相较于 $\Delta \delta = 0$ 简化条件下的结论误差较大, 但是两者的误差都在接受范围内, 实际情况应按具体选择简化条件。且该计算方法体现了 MIIF 值是由交流系统与直流系统共同决定的, 物理意义更加明确。

在基于节点阻抗矩阵的方法中, 导纳法误差较大, 阻抗法误差较小, 该方法计算简单, 其阻抗法精确性较高, 适用于简单等值系统, 但该方法不能表现出直流对 MIIF 值的影响, 有一定局限性。

5 结束语

对三类获取 MIIF 的方法进行了详细阐述, 分别是基于定义的仿真法、节点阻抗矩阵法和潮流降阶雅克比矩阵法, 提出一种更切合实际的基于潮流雅克比矩阵的 MIIF 解析表达式。其中, 仿真法可以直接得到 MIIF 的准确值; 节点阻抗矩阵法根据其解析表达式的不同, 又分为阻抗法和导纳法, 适用于简单系统; 潮流降阶雅克比矩阵法根据简化条件不同, 又分为基于有功变化为零的解析表达式和基于相角变化为零的解析表达式, 解析式由交直流系统共同决定, 物理意义更加明确。比较分析了不同解析表达式与仿真法的差异。最后从工程实用的角度给出了具有可行性的 MIIF 的计算建议, 并通

过 PSCAD 仿真验证了文中所提基于相角变化为零潮流雅克比矩阵的 MIIF 解析表达式的有效性。

但是, 由于所有解析法在推导过程中都没有考虑 MIIF 的定义是在换流母线电压降落 1%的基础上, 它们对 MIIF 解析表达式的研究都有一定的局限性, 在研究多直流电压相互作用因子时, 如何在解析表达式中量化 1% 的电压降落还有待深入研究。

参考文献

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [3] 郭小江, 马世英, 卜广全, 等. 多馈入直流系统协调控制综述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 9-15.
GUO Xiaojiang, MA Shiyong, BU Guangquan, et al. A survey on coordinated control of multi-infeed HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 9-15.
- [4] 陈江澜, 张蓓, 兰强, 等. 特高压交直流混合电网协调电压控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 21-27.
CHEN Jianglan, ZHANG Pei, LAN Qiang, et al. Research on strategy and simulation of coordinated automatic voltage control for UHVDC/AC hybrid grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 21-27.
- [5] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33, 6.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33, 6.
- [6] 徐殿国, 刘瑜超, 武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 1-12.
XU Dianguo, LIU Yuchao, WU Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 1-12.
- [7] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究的综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.
SHAO Yao, TANG Yong. Current situation of research on multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30.
- [8] 丁茂生, 王辉, 舒兵成, 等. 含风电场的多直流送出电网电磁暂态仿真建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 1-8.
DING Maosheng, WANG Hui, SHU Bingcheng, et al. Electromagnetic transient simulation model of multi-send

- HVDC system with wind plants[J]. Power System Protection and Control, 2015, 46(23): 1-8.
- [9] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统下垂控制 P-V 特性曲线时域分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 408-415.
LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. Time-domain analysis of P-V characteristic for droop control strategy of VSC-MTDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 408-415.
- [10] CIGRE Working Group B4.41. Systems with multiple DC infeed[R]. Paris: CIGRE, 2008.
- [11] NAYAK R N, SASMAL R P. AC/DC interactions in multi-infeed HVDC scheme: a case study[C] // IEEE Power Conference, India, IEEE: 2006: 5.
- [12] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81.
XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.
- [13] 李从善, 刘天琪, 刘利兵, 等. 直流多落点系统自抗扰附加阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 10-17.
LI Congshan, LIU Tianqi, LIU Libing, et al. An auto-disturbance rejection controller of multi-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 10-17.
- [14] 李兴源, 魏巍, 王渝红, 等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 1-7.
LI Xingyuan, WEI Wei, WANG Yuhong, et al. Study on the development and technology of strong smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 1-7.
- [15] 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, 81.
GUO Xiaojiang, TANG Yong, GUO Qiang, et al. Influence factors and theory for CIGRE MISCRA index[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 69-74, 81.
- [16] 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 multiinfeed interaction factor in south grid commutation failure research[J]. Relay, 2007, 35(9): 26-31.
- [17] 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.
- [18] 金小明, 周保荣, 管霖, 等. 多馈入直流交互影响强度的评估指标[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 98-102.
JIN Xiaoming, ZHOU Baorong, GUAN Lin, et al. HVDC-interaction-strength index for the multi-infeed-HVDC power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 98-102.
- [19] 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.
- [20] ZHOU Shengjun, QIAO Guangyao, HE Chuan, et al. Research on the voltage interaction of multi-infeed HVDC system and interaction factor[J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2015, 3(4): 41-48.
- [21] 陈修宇, 韩民晓, 刘崇茹. 直流控制方式对多馈入交直流系统电压相互作用的影响[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 58-63.
CHEN Xiuyu, HAN Minxiao, LIU Chongru. Impact of control modes on voltage interaction between multi-infeed AC-DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 58-63.
- [22] 陈修宇. 多馈入直流系统电压相互作用及其影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
CHEN Xiuyu. The voltage interaction in multi-infeed HVDC systems and its influence[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [23] AIK D L H, ANDERSSON G. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1318.
- [24] 肖俊, 李兴源. 多馈入和多端交直流系统相互作用因子及其影响因素分析[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 1-7.
XIAO Jun, LI Xingyuan. Analysis on multi-infeed interaction factor of multi-infeed AC/DC system and multi-terminal AC/DC system and its influencing factor[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 1-7.

收稿日期: 2015-10-31; 修回日期: 2015-12-28

作者简介:

丁媛媛(1993-), 女, 硕士研究生, 从事高压直流输电、电力系统稳定与控制等研究; E-mail: scu_dy@163.com

刘天琪(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、新能源并网方式研究。

(编辑 葛艳娜)