

# 基于 LMI 方法的 VSC-HVDC 多重模型阻尼控制器设计

宋瑞华, 周孝信

(中国电力科学研究院, 北京市 100085)

**摘要:** 电压源换流器式高压直流输电(VSC-HVDC)具有快速功率调整特性, 结合相应附加小信号阻尼控制策略可以提高系统的低频阻尼能力。基于线性矩阵不等式(LMI)的优化方法为电力系统阻尼控制提供了新的设计途径。文中采用 2 步 LMI 优化方法, 在建立系统多个运行点小信号模型基础上分别设计单一模型和多重模型运行点阻尼控制器, 以改善系统阻尼特性。在 PSASP 中对 3 机系统的时域仿真分析表明, 基于多重模型的阻尼控制器具有较强的适应性, 可在大范围运行条件下向系统提供足够的阻尼。

**关键词:** 高压直流输电; 电压源换流器; 小信号模型; 多重模型; 线性矩阵不等式; 阻尼控制; 暂态仿真

**中图分类号:** TM761; TM721.1

## 0 引言

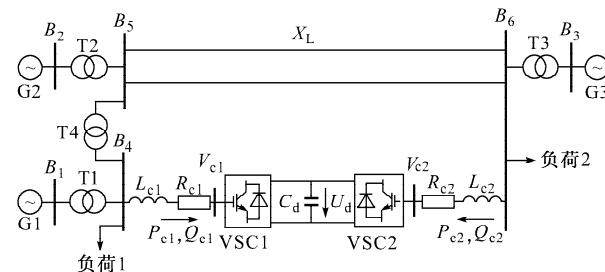
基于电压源换流器(VSC)的高压直流输电(VSC-HVDC)是近年来发展的新型高压直流输电(HVDC)技术, 其控制与运行方式灵活, 且输出电压的谐波较少<sup>[1-2]</sup>。当电力系统因扰动引起线路输送功率变化时, 由于 VSC-HVDC 具有快速功率调整特性, 通过适当地附加阻尼控制策略, 能够迅速调节直流输电功率, 缩短发电机因扰动引起的转子角摆动暂态过程, 从而使系统快速回归或转移到新的稳态运行点, 提高了交流系统的稳定性。

鲁棒控制技术已广泛应用于电力系统的阻尼控制研究, 如电力系统稳定器(PSS)、HVDC 附加阻尼控制器等。针对这类非线性系统的鲁棒性分析和综合问题, 在系统单个稳态运行点附近单一线性化模型基础上设计的控制器并不能确保在系统运行点转移后仍保持较好的控制性能; 而采用线性模型叠加不确定部分系统的线性矩阵不等式(LMI)设计方法<sup>[3]</sup>, 要求建立比较精确的线性模型, 才能设计出较好的系统性能, 不适合处理各模型之间差异较大的多重模型系统。本文通过引入中间变量建立了包括控制器在内的 VSC-HVDC 动态模型, 以及交直流并联多机系统在多个稳态运行点上的小信号多重模型, 使用具有闭环区域极点约束的 2 步 LMI 优化方法<sup>[4-5]</sup>, 尝试设计基于 VSC-HVDC 多重小信号模型

的反馈阻尼控制器, 以期望系统在大范围运行条件下呈现较强的阻尼特性。

## 1 VSC-HVDC 小信号模型

考虑如图 1 所示 VSC-HVDC 交直流并联输电系统。VSC-HVDC 的各个换流站的直流侧均并联电容, 因直流线路暂态过程的频率较高, 而电力系统机电暂态过程的低频振荡频率一般在 0.1 Hz~2 Hz, 可以忽略直流线路的暂态过程, 以并联电容  $C_d$  表示直流侧等效电容。



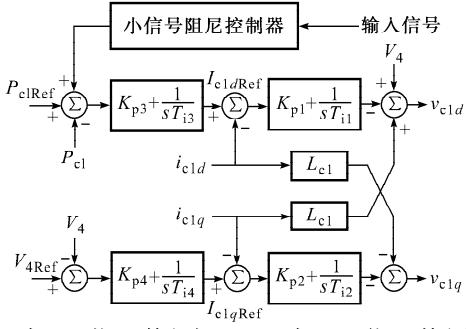
$V_{c1}, V_{c2}$  为 VSC 端电压;  $P_{c1}, Q_{c1}$  为整流站的输入有功和无功;  $P_{c2}, Q_{c2}$  为逆变站的输入有功和无功;  $L_{c1}, L_{c2}$  为 VSC 的换流电感;  $R_{c1}, R_{c2}$  为换流器等效损耗电阻;  $X_L$  为交流双回输电线路的等效电抗。

图 1 VSC-HVDC 交直流输电系统  
Fig. 1 VSC-HVDC/AC transmission system

VSC 在运行范围内运行点可以在  $PQ$  平面上四象限内快速移动, 相当于一个无转动惯量的同步电机。在以 VSC 交流侧母线电压相角为参考的同步旋转坐标系中, 采用  $dq$  轴电流反馈解耦控制策略, 可以独立控制 VSC 与交流系统交换的有功和无功<sup>[6-9]</sup>。

如图 1 所示 VSC-HVDC 的基本控制方式是整

流站 VSC1 为定有功和定交流电压控制, 逆变站 VSC2 为定直流电压和定交流电压控制, VSC1 的  $dq$  解耦控制结构如图 2 所示。



$i_{\text{cl}d}, i_{\text{cl}q}$  为 VSC1 的  $d, q$  轴电流;  $V_{\text{cl}d}, V_{\text{cl}q}$  为 VSC1 的  $d, q$  轴电压;  
 $I_{\text{cl}d\text{Ref}}, I_{\text{cl}q\text{Ref}}$  为 VSC1 的  $d, q$  轴电流定值;  $P_{\text{cl}\text{Ref}}$  为 VSC1 功率定值;  
 $V_{4\text{Ref}}$  为 VSC1 的交流母线  $B_4$  电压定值。

图 2 VSC1 的  $dq$  解耦控制结构

Fig. 2  $dq$  decoupling control structure of VSC1

VSC 交流侧的电容起滤波和无功补偿作用, 其无功补偿容量小, 可忽略滤波电容的工频分量。本文采用 2 状态 VSC 交流侧暂态模型, 在以交流母线  $B_4$  电压  $V_4$  的相角为参考的同步旋转坐标系中, VSC1 交流侧暂态标幺值模型为:

$$\begin{cases} \frac{1}{\omega_0} \frac{di_{\text{cl}d}}{dt} = -\frac{R_{\text{cl}}}{L_{\text{cl}}} i_{\text{cl}d} + \omega i_{\text{cl}q} + \frac{1}{L_{\text{cl}}} V_4 - \frac{1}{L_{\text{cl}}} v_{\text{cl}d} \\ \frac{1}{\omega_0} \frac{di_{\text{cl}q}}{dt} = -\omega i_{\text{cl}d} - \frac{R_{\text{cl}}}{L_{\text{cl}}} i_{\text{cl}q} - \frac{1}{L_{\text{cl}}} v_{\text{cl}q} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , 为同步角速度。

VSC1 的  $dq$  解耦控制器含有 4 个积分环节。为了便于写出控制器时域动态方程形式, 引入 4 个中间变量  $x_1 \sim x_4$ , 则控制器模型可以转化为如下 4 个代数方程和 4 阶状态方程:

$$\begin{cases} x_1 = -K_{\text{p}1}(I_{\text{cl}d\text{Ref}} - i_{\text{cl}d}) + L_{\text{cl}} i_{\text{cl}q} + V_4 - v_{\text{cl}d} \\ x_2 = -K_{\text{p}2}(I_{\text{cl}q\text{Ref}} - i_{\text{cl}q}) - L_{\text{cl}} i_{\text{cl}d} - v_{\text{cl}q} \\ x_3 = -K_{\text{p}3}(P_{\text{cl}\text{Ref}} - P_{\text{cl}}) + I_{\text{cl}d\text{Ref}} \\ x_4 = -K_{\text{p}4}(V_{4\text{Ref}} - V_4) + I_{\text{cl}q\text{Ref}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{i}l} K_{\text{p}1}} x_1 + \frac{L_{\text{cl}}}{T_{\text{i}l} K_{\text{p}1}} i_{\text{cl}q} + \frac{1}{T_{\text{i}l} K_{\text{p}1}} V_4 - \frac{1}{T_{\text{i}l} K_{\text{p}1}} v_{\text{cl}d} \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{i}2} K_{\text{p}2}} x_2 - \frac{L_{\text{cl}}}{T_{\text{i}2} K_{\text{p}2}} i_{\text{cl}d} - \frac{1}{T_{\text{i}2} K_{\text{p}2}} v_{\text{cl}q} \\ \frac{dx_3}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{i}3} K_{\text{p}3}} x_3 + \frac{1}{T_{\text{i}3} K_{\text{p}3}} I_{\text{cl}d\text{Ref}} \\ \frac{dx_4}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{i}4} K_{\text{p}4}} x_4 + \frac{1}{T_{\text{i}4} K_{\text{p}4}} I_{\text{cl}q\text{Ref}} \end{cases} \quad (3)$$

$B_4$  向 VSC1 传输的功率为:

$$S_{\text{cl}} = P_{\text{cl}} + jQ_{\text{cl}} = |V_4| i_{\text{cl}d} - j|V_4| i_{\text{cl}q} \quad (4)$$

式中:  $|V_4|$  表示母线  $B_4$  的电压幅值标幺值。

VSC1 注入母线  $B_4$  的电流为:

$$I_{\text{cl}} = -\frac{S_{\text{cl}}^*}{V_4^*} = -\frac{P_{\text{cl}} - jQ_{\text{cl}}}{V_{4\text{R}} - jV_{4\text{I}}} \quad (5)$$

式中:  $V_{4\text{R}}, V_{4\text{I}}$  为母线  $B_4$  电压在公共坐标下的实部和虚部。

逆变站 VSC2 定直流电压和定交流电压控制的  $dq$  解耦控制结构与图 2 类似。同样引入 4 个中间变量  $x_5 \sim x_8$ , 也可以转化为 4 个代数方程和 4 阶状态方程, 因方程形式相似, 本文不再列出。

直流侧电压波动反映了直流系统与交流系统交换有功变化的暂态过程。直流侧动态方程为:

$$C_d U_d \frac{dU_d}{dt} = P_{\text{vsc}1} + P_{\text{vsc}2} = v_{\text{cl}d} i_{\text{cl}d} + v_{\text{cl}q} i_{\text{cl}q} + v_{\text{c2d}} i_{\text{c2d}} + v_{\text{c2q}} i_{\text{c2q}} \quad (6)$$

式中:  $i_{\text{c2d}}, i_{\text{c2q}}$  为 VSC2 的  $d, q$  轴电流;  $v_{\text{c2d}}, v_{\text{c2q}}$  为 VSC2 的  $d, q$  轴电压。

至此建立了如图 1 所示系统的数学模型, 动态方程为发电机 G1~G3 的 3 阶方程、VSC1 与 VSC2 交流侧动态方程和控制器动态方程以及直流电压动态方程, 代数方程为母线  $B_1 \sim B_6$  的节点电流方程、发电机与网络接口方程和 2 个 VSC 控制器的 4 个中间变量代数方程, 负荷为恒阻抗模型, 数学模型用向量形式表示为:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, z, u) \\ g(x, z, u) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: 状态变量  $x$  为发电机的状态变量  $x_G = [\delta_i, \omega_i, E_{q_i}]^T$  ( $i=1, 2, 3$ ) 和 VSC-HVDC 的状态变量; 代数变量  $z$  为发电机电流  $z_G = [I_{iR}, I_{iI}]^T$ 、母线电压  $z_B = [V_{jR}, V_{jI}]^T$  ( $j=1 \sim 6$ ) 和 VSC-HVDC 的代数变量; 控制变量  $u = [P_{\text{cl}\text{Ref}}, V_{4\text{Ref}}, U_{\text{dRef}}, V_{6\text{Ref}}]^T$ ;  $V_{6\text{Ref}}$  为母线  $B_6$  电压定值;  $U_{\text{dRef}}$  为直流电压定值。

在系统稳态运行点  $p_i = (x_{i0}, z_{i0}, u_{i0})$  对式(7)进行线性化, 通过求解代数方程消去中间变量  $\Delta z$ , 得到系统的小信号状态空间方程为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A_i(p_i) \Delta x + B_i(p_i) \Delta u \\ \Delta y = C_i(p_i) \Delta x + D_i(p_i) \Delta u \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $i=1, 2 \dots, l$ ;  $l$  为稳态运行点个数;  $\Delta y$  为系统输出量, 即小信号阻尼控制器的输入控制量。

在建模过程中采用发电机绝对功角和不计机械阻尼, 故  $A_i$  有双重零根, 选取 G3 为参考发电机, 模型可以降 2 阶; 若近似考虑发电机阻尼特性, 可以略去励磁绕组动态方程进一步降阶。

## 2 LMI 方法配置多重模型系统闭环极点

如图 1 所示系统在多个稳态运行点进行线性化, 可以建立多个如式(8)所示的小信号状态空间模型。

阻尼控制器设计目的是寻找一个输出反馈控制器  $\Delta u(s) = K \Delta y(s)$ , 使得闭环系统的全部极点落在指定的复平面区域内, 以满足系统暂态性能指标要求。假设所设计的控制器可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_c = A_c x_c + B_c \Delta y \\ \Delta u = K x_c \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $x_c$  为控制器的状态变量。

控制器由 3 个矩阵变量  $A_c, B_c, K$  决定, 采用 2 步 LMI 优化方法来设计所求的控制器:

1) 考虑线性时不变系统的多重模型:

$$\Delta \dot{x} = A_i \Delta x + B_i \Delta u \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (10)$$

设所求静态状态反馈控制器为  $\Delta u(s) = K \Delta x(s)$ , 则闭环系统为:

$$\Delta \dot{x} = A_{CL,i} \Delta x \quad (11)$$

式中:  $A_{CL,i} = A_i + B_i K$ 。

给定复平面区域  $D$ :

$$D = \{s \in \mathbf{C} \mid f_D(s) = L + sM + sM^T < \mathbf{0}\} \quad (12)$$

若所有的  $A_{CL,i}$  的特征值落在区域  $D$  内, 充要条件是存在一个对称正定矩阵  $X \in \mathbf{R}^{n \times n}$ , 使得:

$$M_D(A_{CL,i}, X) = L \otimes X + M \otimes (A_{CL,i}X) + M^T \otimes (A_{CL,i}X)^T < \mathbf{0} \quad (13)$$

式中:  $\otimes$  表示矩阵的 Kronecker 乘积。

引进替换变量  $Y = KX$  转换成线性 LMI 约束, 若  $X^*, Y^*$  是最优解, 则所求的静态状态反馈矩阵为:

$$K = Y^* (X^*)^{-1} \quad (14)$$

2) 把矩阵  $K$  作为已知变量代入式(9), 则包括输出反馈控制器闭环系统的状态方程为:

$$\dot{x}_{CL} = A_{CL,i} x_{CL} \quad (15)$$

式中:  $x_{CL} = [\Delta x, x_c]^T$ 。

假设该输出反馈控制器的控制效果与前面的全状态反馈控制器等效, 即  $t \rightarrow \infty$  时,  $x_c \rightarrow \Delta x$ , 从而引入一个新的状态变量向量  $\bar{x}_{CL} = [\Delta x, \Delta x - x_c]^T$ , 则闭环系统可以转换成:

$$\dot{\bar{x}}_{CL} = \bar{A}_{CL,i} \bar{x}_{CL} \quad (16)$$

若所有  $\bar{A}_{CL,i}$  的特征值落在区域  $D$  内, 充要条件是存在一个对称正定矩阵  $X \in \mathbf{R}^{n \times n}$ , 使得:

$$M_D(\bar{A}_{CL,i}, X) = L \otimes X + M \otimes (\bar{X} \bar{A}_{CL,i}) + M^T \otimes (\bar{X} \bar{A}_{CL,i})^T < \mathbf{0} \quad (17)$$

为了转换成线性 LMI 约束, 可选择矩阵变量  $X$  为如下形式:

$$X = \text{diag}(X_1, X_2)$$

式中:  $X_1$  和  $X_2$  均为对称正定矩阵。

引进替换变量  $Y_1 = X_2 A_C$  和  $Y_2 = X_2 B_C$ , 转换成线性 LMI 约束, 若  $X_1^*, X_2^*, Y_1^*, Y_2^*$  是最优解, 则所求输出反馈控制器的矩阵变量为:

$$\begin{cases} A_C = (X_2^*)^{-1} Y_1^* \\ B_C = (X_2^*)^{-1} Y_2^* \end{cases} \quad (18)$$

## 3 VSC-HVDC 多重模型阻尼控制器设计与非线性仿真

VSC-HVDC 参数如下: 交流侧功率基值  $S_B = 100$  MVA, 选取直流侧的功率基值  $P_{dB} = 100$  MW, 直流电压基值为额定运行直流电压  $U_{dB} = 140$  kV, 直流侧基值为  $I_{dB} = P_{dB}/U_{dB}$ ,  $Z_{dB} = U_{dB}/I_{dB}$ , 直流电容的标幺值  $C_d^* = 0.12$ 。VSC 交流侧参数如下:  $L_{c1} = L_{c2} = 0.25$ ,  $R_{c1} = R_{c2} = 0.05$ 。VSC1 控制器参数如下:  $K_{p1} = K_{p2} = 0.3$ ,  $T_{i1} = T_{i2} = 0.03$ ,  $K_{p3} = 1.0$ ,  $T_{i3} = 0.005$ ,  $K_{p4} = 1.0$ ,  $T_{i4} = 0.002$ 。VSC2 控制器参数如下:  $K_{p5} = K_{p6} = 0.3$ ,  $T_{i5} = T_{i6} = 0.03$ ,  $K_{p7} = 4.0$ ,  $T_{i7} = 0.002$ ,  $K_{p8} = 1.0$ ,  $T_{i8} = 0.002$ 。

发电机 G1 参数如下:  $S_n = 1000$  MVA,  $X_d = 1.217$ ,  $X_d' = 0.349$ ,  $X_q = 0.60$ ,  $T_J = 9.014$ ,  $D = 0$ ; 发电机 G2 参数如下:  $S_n = 2000$  MVA,  $X_d = 0.75$ ,  $X_d' = 0.306$ ,  $X_q = 0.611$ ,  $T_J = 8.393$ ,  $D = 0$ ; 发电机 G3 参数如下:  $S_n = 5000$  MVA, 其他参数同 G2; 变压器参数如下:  $X_{T1} = 0.10$ ,  $X_{T2} = 0.10$ ,  $X_{T3} = 0.06$ ,  $X_{T4} = 0.05$ ; 双回交流输电线路参数如下:  $0.0094 + j0.2504$ ; 负荷为:  $P_1 = 2.0 + j0.4$ ,  $P_2 = 3.0 + j0.5$ 。

应用隐式梯形积分数值计算方法编制了二端口 VSC-HVDC 的动态模型, 在 PSASP 中使用用户自定义编程接口, 实现与 PSASP 程序交替计算(见:中国电力科学研究院 1999 年编写的《PSASP 6.0 用户自定义模型和程序接口用户手册》); 借助 MATLAB 中 LMI 工具箱辅助设计了各阻尼控制器, 利用 PSASP 的用户自定义模块接口搭建各阻尼控制器进行非线性仿真。

如图 1 所示 3 机 2 区域互联系统, 若  $B_5-B_6$  输电线路的  $X_L$  较大, 虽然 VSC-HVDC 两端采用定母线  $B_4, B_6$  电压控制, 系统在受到扰动后仍呈现较弱阻尼特性, 系统的振荡模式为 G1, G2 对 G3 区域间振荡和 G1 对 G2 区域内振荡。

选择 VSC1 侧发电机 G1 的功率增量  $\Delta P_{e1}$  作为阻尼控制器输入信号, 以期望闭环系统的阻尼比  $\xi > 0.05$ , 且闭环系统所有极点实部  $\text{Re } \lambda_i < -0.1$ , 设计了各阻尼控制器进行闭环仿真, 仿真结果经 Prony 分析比较, 如表 1 所示。

表 1 系统运行点和振荡模式

Table 1 System operating conditions and damping modes

$P_{G1}$	$P_{G2}$	$P_{cl}$	无附加 阻尼控制		单一模型 阻尼控制		多重模型 阻尼控制	
			$\xi$	$f/\text{Hz}$	$\xi$	$f/\text{Hz}$	$\xi$	$f/\text{Hz}$
2.0	1.0	0.5	0.044	0.349	0.098	0.344	0.181	0.348
			0.014	0.643	0.096	0.636	0.196	0.682
1.0	3.0	0.5	0.047	0.328	0.097	0.326	0.181	0.325
			0.017	0.627	0.099	0.641	0.251	0.653
3.0	2.0	0.5	0.053	0.272	0.157	0.253	0.196	0.261
			0.032	0.621	0.121	0.627	0.213	0.667
2.0	3.0	0.8	0.051	0.296	0.123	0.280	0.189	0.287
			0.023	0.623	0.137	0.612	0.243	0.655

通过 2 步 LMI 优化设计和 Hankel 范数降阶, 得到 4 阶多重模型控制器的传递函数形式为:

$$K(s) = \frac{-0.05851(s-5069)(s-1.703)}{(s+24.46)(s+2.607)} \cdot \frac{(s^2 + 58.99s + 5165)}{(s^2 + 324.1s + 49400)} \quad (19)$$

假设系统处于表 1 中稳态运行点 3, 0.5 s 时在  $B_5-B_6$  其中一回线路中间发生持续 0.2 s 三相接地短路故障, 系统暂态响应分别如图 3~图 5 所示, 为了防止 VSC 在故障时功率超载, 输出附加功率限制在  $-0.15\sim0.15$ 。

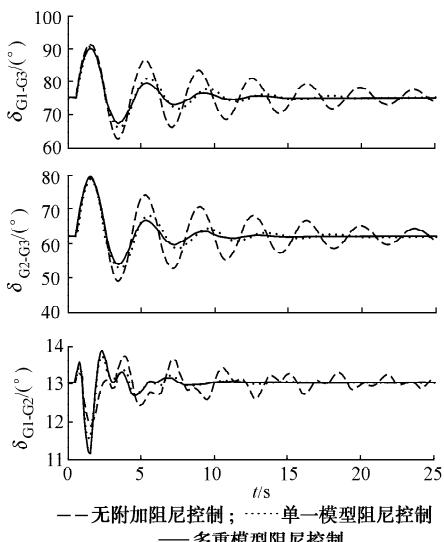


图 3 三相故障时发电机功角

Fig. 3 Power angle for a three-phase fault

从仿真结果可以看出, VSC-HVDC 采用常规控制时, 系统在大扰动下虽然是稳定的, 但阻尼较弱, 而在附加较小阻尼功率控制下, VSC-HVDC 互联区域间的振荡在 2~3 个周期内就能平息下来, 区域内的振荡也能很快稳定下来; 多重模型阻尼控制器在不同运行点呈现较好的阻尼特性, 比单一模型阻尼控制器的阻尼效果好。由此可见, VSC-HVDC 快速

功率调整特性结合附加有功阻尼控制可以加强 VSC-HVDC 互联系统两端区域间的低频阻尼能力, 对局部区域内振荡也有一定的抑制作用。

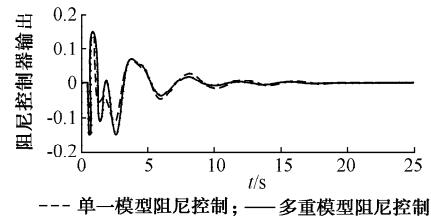


图 4 阻尼控制器输出

Fig. 4 Output of damping controller

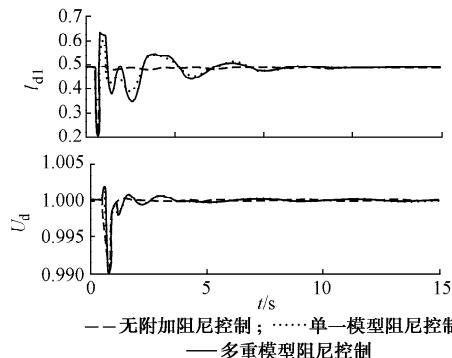


图 5 直流电流和直流电压动态响应

Fig. 5 Response of  $I_d$  and  $U_d$  to a three-phase fault

## 4 结语

本文通过引入中间变量方法建立 VSC-HVDC 动态模型, 应用隐式梯形积分数值计算方法编制模型, 通过暂态仿真分析验证了该模型的正确性。采用 LMI 优化方法设计单一模型和多重模型附加有功阻尼控制器。通过时域仿真分析, 结果表明多重模型控制器具有较强的适应性和较好的阻尼控制效果。由于在控制器设计过程中计及发电机动态方程, 对较大规模的系统, 基于 LMI 方法设计反馈控制器与系统模型同阶, 阶数较高不易实现, 因此保性能低阶控制器的设计需要进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] ASPLUND G, ERIKSSON K, SVENSSON K. HVDC light-DC transmission based on voltage source converters. ABB Review, 1998, 1(1): 4-9.
- [2] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯. 轻型高压直流输电技术的发展与展望. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.  
LI Gengyin, LU Pengfei, LI Guangkai. The new development and review for HVDC light. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.
- [3] 杨秀, 陈陈, 王西田. 基于 LMI 技术的交直流输电系统中 HVDC 阻尼控制器的设计. 继电器, 2004, 32(17): 20-22.  
YANG Xiu, CHEN Chen, WANG Xitian. Robust control

- design in AC/DC system based on LMI technique. Relay, 2004, 32(17): 20-22.
- [4] XUE C F, ZHANG X P, GODFREY K R. Design of STATCOM damping control with multiple operating points: a multimodel LMI approach. IEE Proceedings: Generation, Transmission & Distribution, 2006, 153(4): 375-382.
- [5] 俞立. 鲁棒控制: 线性矩阵不等式处理方法. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- YU Li. Robust control: linear matrix inequality method. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [6] 陈谦, 唐国庆, 胡铭. 采用  $dq0$  坐标的 VSC-HVDC 稳态模型与控制器设计. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 61-66.
- CHEN Qian, TANG Guoqing, HU Ming. Steady-state model and controller design of a VSC-HVDC converter based on  $dq0$ -axis. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 61-66.
- [7] 赵成勇, 李金丰, 李广凯. 基于有功和无功独立调节的 VSC-HVDC 控制策略. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 20-24.
- ZHAO Chengyong, LI Jinfeng, LI Guangkai. VSC-HVDC control strategy based on respective adjustment of active and reactive power. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(9): 20-24.
- [8] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 适用于电压源型高压直流输电的控制策略. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 39-44.
- HU Zhaoqing, Mao Chengxiong, LU Jiming. A novel control strategy for voltage sourced converters based HVDC. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 39-44.
- [9] 陈海荣, 徐政. 适用于 VSC-MTDC 系统的直流电压控制策略. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 28-33.
- CHEN Hairong, XU Zheng. A novel DC voltage control strategy for VSC based multi-terminal HVDC system. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19), 28-33.

宋瑞华(1972—),男,博士研究生,研究方向为电力电子技术。E-mail: songrh@epri.ac.cn

周孝信(1940—),男,博士生导师,中国科学院院士, IEEE Fellow,从事电力系统分析的研究工作。

## Design of VSC-HVDC Multi-model Damping Controller Based on LMI Method

SONG Ruihua, ZHOU Xiaoxin

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

**Abstract:** VSC based HVDC technology features fast power regulation capability, which can increase the electromechanical damping of a system with additional small signals damping control. LMI technique is a new approach in the power system damping controller design. Based on a multi operating-points model, a two-step LMI optimization method is applied in the design of single and multi-model damping controller. Simulation results on a PSASP three-machine system demonstrate that a multi-model based controller is robust in a relatively wide range of operating conditions.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217904).

**Key words:** HVDC; voltage source converter (VSC); small signal model; multi-model; linear matrix inequality (LMI); damping control; transient simulation