

# 基于电压源换流器的高压直流输电系统的 阻尼特性与阻尼控制

宋瑞华, 周孝信

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Research on VSC-HVDC Damping Characteristics and Damping Control

SONG Rui-hua, ZHOU Xiao-xin

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** By use of complex torque analysis method, the electromagnetic torque of voltage source converter based HVDC (VSC-HVDC) system is approximately derived, the phenomena of electric damping decreasing or negative damping in AC/DC transmission system caused by fast power control of VSC-HVDC are quantitatively analyzed. On the basis of establishing a small signal model for AC/DC hybrid power grid in which the VSC-HVDC and its controller are included and by use of optimal control theory, an optimal damping controller is designed. Numerical simulation results of AC/DC hybrid power grid show that the supplementary damping control method is efficient.

**KEY WORDS:** voltage source converter; HVDC; negative damping; small signal model; supplementary damping control; optimal control

**摘要:** 利用复数力矩分析方法近似推导了基于电压源换流器高压直流输电(voltage source converter HVDC, VSC-HVDC)系统的电磁力矩, 定性分析了 VSC-HVDC 的快速功率控制可能会导致系统出现电气阻尼变弱或负阻尼现象。在建立包括 VSC-HVDC 及控制器在内的 AC/DC 混合系统的动态数学模型的基础上, 应用最优控制理论设计了最优阻尼控制器, 交直流并联系统数值仿真结果表明该附加阻尼控制方法的有效性。

**关键词:** 电压源换流器; 高压直流输电; 负阻尼; 小信号模型; 附加阻尼控制; 最优控制

## 0 引言

基于电压源换流器(voltage source converter,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB217904)。

The National Basic Research Program (973 Program)(2004CB217904)。

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技术, VSC 采用全控型开关器件和较高脉宽调制(pulse width modulation, PWM)频率, 其控制与运行方式灵活, 且输出电压的谐波较少<sup>[1]</sup>。目前 VSC-HVDC 的控制技术已取得许多研究成果, 如幅相控制<sup>[2-3]</sup>、dq 解耦控制<sup>[4-5]</sup>、逆模型控制<sup>[6]</sup>、线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)控制<sup>[7]</sup>、模糊控制<sup>[8]</sup>等, 其中 dq 解耦控制方法应用较多。VSC-HVDC 在运行范围内具有快速独立的有功和无功功率控制特性, 通过附加控制策略可以提高系统的阻尼能力, 阻尼效果优于同等容量并联型无功补偿设备如静止型动态无功补偿装置(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static compensator, STATCOM)等<sup>[9]</sup>。文献[6,10]将发电机和 VSC-HVDC 作为控制对象, 采用全状态反馈的最优控制方法取得较好阻尼效果; 文献[11-13]研究了在 VSC-HVDC 幅相控制结构中附加类似传统电力系统稳定控制器(power system stabilizer, PSS)的阻尼控制结构, 提高 VSC-HVDC 互联交流系统的低频阻尼能力。

传统 HVDC 的定功率控制可能导致系统出现负阻尼情况<sup>[14-15]</sup>, 而 VSC-HVDC 具有更加快速的功率控制特性, 也可能会导致系统阻尼减弱或出现负阻尼情况。本文近似定性分析了在 VSC-HVDC 与发电机紧耦合系统中, 快速功率控制导致系统出现阻尼减弱或负阻尼现象, 在建立包括控制器在内的 AC/DC 混合系统的动态模型基础上, 设计部分输出量反馈线性最优阻尼控制器, 在 VSC 的 dq 解耦控制器中附加直流有功增量和互联交流母线电压增

量的组合,期望交直流混合系统在较大运行范围内呈现较好的阻尼特性。

## 1 VSC-HVDC 的负阻尼特性

如图 1 所示的 VSC-HVDC 系统。图中:  $U_{c1}$ 、 $U_{c2}$  分别为两端的 VSC 端电压; 两端的换流变变比分别为  $1:n_{11}$  和  $n_{22}:1$ ;  $L_{c1}$ 、 $L_{c2}$  分别为两端换流变电感与换流电感之和,  $R_{c1}$ 、 $R_{c2}$  分别为两端 VSC 的等值功率损耗电阻;  $Q_{c1}$  为交流母线 B2 向 VSC1 传输的有功和无功功率;  $P_{c1}$ 、 $Q_{c1}$  分别为交流母线 B2 向 VSC1 传输的有功和无功。

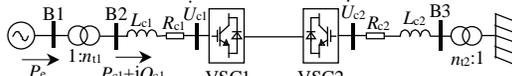


图 1 VSC-HVDC 系统模型

Fig. 1 Model of VSC-HVDC system

为了定性分析简便,作如下假设: ①发电机与 VSC-HVDC 直接耦合; ②不计锁相环(phase lock loop, PLL)的动态特性和 VSC 的 PWM 调制响应延迟; ③VSC 采用平均值模型; ④重点分析 VSC1 的快速功率控制的作用,由于 VSC2 为快速定直流电压控制,直流侧并联电容较大以及直流线路电感和电阻较小,可以近似认为 VSC1 直流侧电压不变。

VSC 在运行范围内的运行点可以在 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 VSC1 交流侧母线 B2 电压相角为参考的同步旋转参考  $d'q'$  坐标系中可以实现 VSC1 的  $d'q'$  解耦控制策略(在系统公共  $xy$  坐标中母线 B2 电压相量  $U_2^*$  为  $d'$  轴或  $q'$  轴)。VSC1 的参考  $d'q'$  坐标与发电机静止  $ab$  坐标、同步旋转  $dq$  坐标的关系如图 2 所示。图中变量的下标 0 表示  $t=0$  时刻。

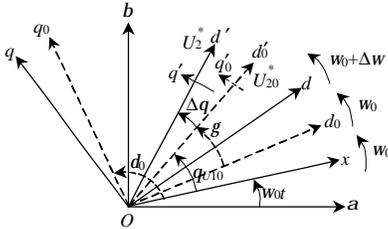


图 2 VSC1 参考  $d'q'$  坐标与发电机  $dq$  坐标关系

Fig. 2 Relationship between VSC1 reference  $d'q'$  and generator  $dq$  coordinate

如图 1 所示,在 VSC1 的参考  $d'q'$  坐标系中 VSC1 交流侧暂态标幺值模型为

$$\begin{cases} p i_{c1d} / \omega_0 = -(R_{c1} / L_{c1}) i_{c1d} + i_{c1q} + (U_2 - u_{c1d}) / L_{c1} \\ p i_{c1q} / \omega_0 = -i_{c1d} - (R_{c1} / L_{c1}) i_{c1q} - u_{c1q} / L_{c1} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $p = d/dt$  为微分算子;  $i_{c1d}$ 、 $i_{c1q}$  分别为 VSC1 的  $d'$ 、 $q'$  轴电流;  $u_{c1d}$ 、 $u_{c1q}$  为 VSC1 的  $d'$ 、 $q'$  轴电压;  $\omega_0 = 2\pi f_0$  为同步角速度;  $U_2$  为母线 B2 电压幅值。

以 VSC1 为例,采用如图 3 所示  $d'q'$  轴电流反馈解耦控制策略,可以独立控制交流母线 B2 与 VSC1 交换的有功和无功功率。图中:  $K_{p1}$ 、 $T_{i1}$ 、 $K_{p2}$  和  $T_{i2}$  为电流内环 PI 控制参数;  $K_{p3}$ 、 $T_{i3}$  为有功功率 PI 控制参数;  $K_{p4}$ 、 $T_{i4}$  为母线 B2 电压 PI 控制参数;  $P_{c1r}$  为有功功率参考值;  $U_{2r}$  为母线 B2 电压参考值;  $I_{c1dr}$ 、 $I_{c1qr}$  分别为电流内环参考值。控制器的动态方程为

$$\begin{cases} u_{c1d} = -[K_{p1} + 1/(pT_{i1})](I_{c1dr} - i_{c1d}) + L_{c1} i_{c1q} + U_2 \\ u_{c1q} = -[K_{p2} + 1/(pT_{i2})](I_{c1qr} - i_{c1q}) - L_{c1} i_{c1d} \\ I_{c1dr} = [K_{p3} + 1/(pT_{i3})](P_{c1r} - U_2 i_{c1d}) \\ I_{c1qr} = [K_{p4} + 1/(pT_{i4})](U_{2r} - U_2) \end{cases} \quad (2)$$

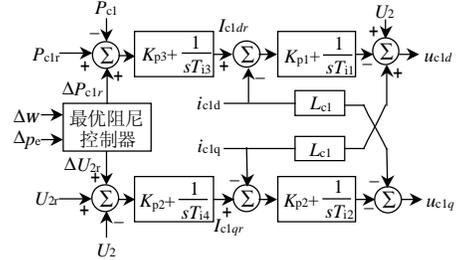


图 3 VSC1 的  $d'q'$  解耦控制结构

Fig. 3  $d'q'$  decoupling control structure for VSC1

交流母线 B2 向 VSC1 传输的功率为

$$S_{c1} = P_{c1} + jQ_{c1} = U_2 i_{c1d} - jU_2 i_{c1q} \quad (3)$$

对式(1)~(3)进行线性化,消去中间变量  $\Delta I_{c1dr}$ 、 $\Delta I_{c1qr}$ 、 $\Delta u_{c1d}$  和  $\Delta u_{c1q}$ ,可得 VSC1 的  $d'q'$  轴电流增量为

$$\begin{cases} \Delta i_{c1d} = K_d(p, K_{p1}, T_{i1}, K_{p3}, T_{i3}) \Delta U_2 \\ \Delta i_{c1q} = K_q(p, K_{p2}, T_{i2}, K_{p4}, T_{i4}) \Delta U_2 \end{cases} \quad (4)$$

由于 VSC1 采用快速功率控制,控制参数  $T_{i1}$  和  $T_{i3}$  取值较小,因此对微小扰动频率  $m(p = jm)$ ,式(4)中系数  $K_d(p, K_{p1}, T_{i1}, K_{p3}, T_{i3})$  可以近似简化为

$$K_d(p, K_{p1}, T_{i1}, K_{p3}, T_{i3}) \approx -i_{c1d0} / U_{20} \quad (5)$$

式(5)物理意义为: VSC1 相当于一个有功部分近似恒定的负荷,  $U_2$  受到扰动时, VSC1 在快速定功率控制下企图防止 B2 向 VSC1 传输的有功功率波动:

$$\Delta P_{c1} = U_{20} \Delta i_{c1d} + i_{c1d0} \Delta U_2 \rightarrow 0 \quad (6)$$

设发电机转子除做同步旋转外有一微小的频

率  $m$  的正弦扰动, 发电机轴系的角位移为<sup>[14-15]</sup>

$$\Delta d = A \sin m t @ \Delta q \quad (7)$$

则  $p \Delta d = A m \cos m t @ \Delta w$ ; 根据同步电机速度电势性质, 由于发电机和 VSC-HVDC 系统紧耦合, VSC1 交流母线电压  $U_1$  的幅值和相位摄动为

$$\begin{cases} \Delta U_1 = \Delta w y_0 \\ \Delta q_{U1} = \Delta q \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $y_0 = \sqrt{y_{d0}^2 + y_{q0}^2}$  为定子绕组稳态磁链的幅值。在假设③中认为 PLL 可以快速跟踪电压相位, 可以忽略相位摄动的影响作用, 发电机的电磁力矩的增量为

$$\begin{aligned} \Delta T_e &= -y_{q0} \Delta i_d + y_{d0} \Delta i_q = \\ & n_{t1} [-y_{q0} \quad y_{d0}] \begin{bmatrix} \cos g & -\sin g \\ \sin g & \cos g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{c1d} \\ \Delta i_{c1q} \end{bmatrix} = \\ & n_{t1} y_0 [\sin(g-h) \quad \cos(g-h)] \rightarrow \\ & \leftarrow \begin{bmatrix} K_d(p, K_{p1}, T_{i1}, K_{p3}, T_{i3}) \\ K_q(p, K_{p2}, T_{i2}, K_{p4}, T_{i4}) \end{bmatrix} \Delta U_1 \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\Delta i_d$ 、 $\Delta i_q$  分别为发电机定子  $d$ 、 $q$  绕组的电流增量;  $g = q_{U10} - (d_0 - \pi/2)$ ;  $h = q_{y0} - (d_0 - \pi/2)$ ,  $q_{y0}$  为定子绕组稳态磁链在稳态时同步坐标下的相位。由发电机定子电压方程可近似认为磁链  $\Psi$  相位落后机端电压  $U_1$  相位  $90^\circ$ , 可得发电机的电磁力矩增量为

$$\begin{aligned} \Delta T_e &= n_{t1} y_0 K_d(p, K_{p1}, T_{i1}, K_{p3}, T_{i3}) \Delta U_1 \approx \\ & -n_{t1}^2 y_0^2 i_{c1d0} / U_{20} \Delta w \end{aligned} \quad (10)$$

电气阻尼系数为

$$D_e = -n_{t1}^2 y_0^2 i_{c1d0} / U_{20} < 0 \quad (11)$$

可见在 VSC-HVDC 与发电机紧耦合系统中, VSC 采用快速功率控制会导致电气负阻尼问题。

## 2 VSC-HVDC 小信号模型

考虑如图 4 所示 VSC-HVDC 交直流并联输电系统。其中:  $P_{c2}$ 、 $Q_{c2}$  分别为交流母线 B3 向 VSC2 的输入有功和无功功率;  $X_L$  为单回交流输电线路的

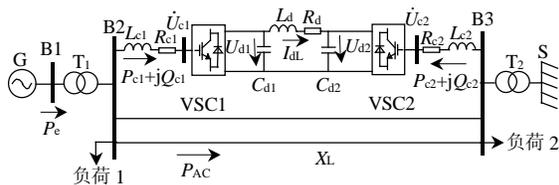


图 4 VSC-HVDC 交直流并联系统

Fig. 4 VSC-HVDC/AC transmission system

电抗;  $C_{d1}$ 、 $C_{d2}$  分别为直流两侧并联的电容;  $U_{d1}$ 、 $U_{d2}$  分别为 VSC1、VSC2 直流侧电压;  $I_{dL}$  为直流线路电流;  $L_d$ 、 $R_d$  分别为直流线路的电感和电阻。VSC-HVDC 的控制方式: VSC1 为有功功率  $P_{c1}$  和交流母线 B2 电压  $U_2$  控制, VSC2 为直流电压  $U_{d2}$  和交流母线 B3 电压  $U_3$  控制。

VSC1 的  $d'q'$  解耦控制结构如图 3 所示, 控制器含有 4 个积分环节, 为便于写出控制器时域动态方程形式, 引入 4 个中间变量  $x_1 : x_4$ , 则控制器模型可以表示为

$$\begin{cases} x_1 = -K_{p1}(I_{c1dr} - i_{c1d}) + L_{c1} i_{c1q} + U_2 - u_{c1d} \\ x_2 = -K_{p2}(I_{c1qr} - i_{c1q}) - L_{c1} i_{c1d} - u_{c1q} \\ x_3 = -K_{p3}(P_{c1r} - P_{c1}) + I_{c1dr} \\ x_4 = -K_{p4}(U_{2r} - U_2) + I_{c1qr} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{1}{T_{i1} K_{p1}} x_1 + \frac{L_{c1}}{T_{i1} K_{p1}} i_{c1q} + \frac{1}{T_{i1} K_{p1}} U_2 - \frac{1}{T_{i1} K_{p1}} u_{c1d} \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{1}{T_{i2} K_{p2}} x_2 - \frac{L_{c1}}{T_{i2} K_{p2}} i_{c1d} - \frac{1}{T_{i2} K_{p2}} u_{c1q} \\ \frac{dx_3}{dt} = -\frac{1}{T_{i3} K_{p3}} x_3 + \frac{1}{T_{i3} K_{p3}} I_{c1dr} \\ \frac{dx_4}{dt} = -\frac{1}{T_{i4} K_{p4}} x_4 + \frac{1}{T_{i4} K_{p4}} I_{c1qr} \end{cases} \quad (13)$$

VSC1 注入交流母线 B2 的电流为

$$\dot{\mathcal{K}}_{c1} = -\dot{S}_{c1}^* / U_2 = -(P_{c1} - jQ_{c1}) / (U_{2x} - jU_{2y}) \quad (14)$$

式中:  $U_{2x}$ 、 $U_{2y}$  分别为母线 B2 电压在公共坐标下的实部和虚部。

VSC2 的控制结构与图 3 类似, 同样引入 4 个中间变量  $x_5 : x_8$ , 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, 如图 4 所示直流侧动态方程可以表示为

$$\begin{cases} C_{d1} \frac{dU_{d1}}{dt} = \frac{(u_{c1d} i_{c1d} + u_{c1q} i_{c1q})}{U_{d1}} - I_{dL} \\ L_d d \frac{I_{dL}}{dt} = U_{d1} - U_{d2} - R_d I_{dL} \\ C_{d2} \frac{dU_{d2}}{dt} = \frac{(u_{c2d} i_{c2d} + u_{c2q} i_{c2q})}{U_{d2}} + I_{dL} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $i_{c2d}$ 、 $i_{c2q}$  分别为 VSC2 的同步旋转参考坐标  $d''$  和  $q''$  轴电流;  $u_{c2d}$ 、 $u_{c2q}$  分别为 VSC2 的  $d''$  和  $q''$  轴电压。至此建立了图 4 所示 AC/DC 系统的数学

模型，动态方程为发电机的 3 阶动态方程、VSC1 和 VSC2 交流侧动态方程、控制器动态方程以及直流侧动态方程，代数方程为母线 B1、B2 和 B3 的节点电流方程、发电机与网络接口方程和控制器的中间变量代数方程，负荷为恒阻抗模型，数学模型可用向量形式表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中：状态变量  $\mathbf{x}$  为发电机的状态变量  $\mathbf{x}_G = [d \ w \ E'_q]^T$  和 VSC-HVDC 的状态变量  $i_{c1d}$ 、 $i_{c1q}$ 、 $i_{c2d}$ 、 $i_{c2q}$ 、 $x_i (i=1:8)$ 、 $U_{d1}$ 、 $U_{d2}$ 、 $I_{d1}$ ；代数变量  $\mathbf{z}$  为发电机电流  $\mathbf{z}_G = [I_{Gx} \ I_{Gy}]^T$ 、母线电压  $\mathbf{z}_B = [U_{ix} \ U_{iy}]^T (i=1:3)$  和 VSC-HVDC 的代数变量；控制变量为  $\mathbf{u} = [P_{clr} \ U_{2r} \ U_{d2r} \ U_{3r}]^T$ ，其中  $U_{d2r}$  为 VSC2 直流电压参考值， $U_{3r}$  为母线 B3 电压参考值。

在系统稳态运行点  $\mathbf{p}_i = (\mathbf{x}_{i0}, \mathbf{z}_{i0}, \mathbf{u}_{i0})$  对式(16)进行线性化，通过求解代数方程消去中间变量  $\Delta \mathbf{z}$ ，得到系统的小信号状态空间方程为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_i(\mathbf{p}_i) \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_i(\mathbf{p}_i) \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{y} = \mathbf{C}_i(\mathbf{p}_i) \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}_i(\mathbf{p}_i) \Delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (17)$$

式中： $\mathbf{A}_i(\mathbf{p}_i)$ 、 $\mathbf{B}_i(\mathbf{p}_i)$ 、 $\mathbf{C}_i(\mathbf{p}_i)$ 和 $\mathbf{D}_i(\mathbf{p}_i)$ 分别为稳态运行点  $\mathbf{p}_i$  的系统线性状态空间方程系数矩阵。

### 3 输出反馈最优阻尼控制器设计

设计阻尼控制器的目的是交直流混合系统在干扰或故障下的暂态过程快速且平稳，应用线性最优控制理论，在实施控制的当地可测量的系统变量作为反馈变量，即采用部分输出量反馈最优控制器在实际应用中较容易实现。

如式(17)交直流混合系统的线性化状态空间模型，选择发电机的输出量  $\Delta \mathbf{y} = [\Delta \mathbf{w} \ \Delta P_e]^T$  为阻尼控制器的输入量，假设所设计最优阻尼控制器可表示为

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{K} \Delta \mathbf{y} \quad (18)$$

式中： $\mathbf{K}$  为反馈系数； $\Delta \mathbf{u}$  分别为  $\Delta P_{clr}$  和  $\Delta U_{2r}$ 。控制器的设计目标为求解出反馈系数  $\mathbf{K}$ ，使得二次型性能指标为极小

$$\min J = \int_0^{\infty} [\Delta \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \Delta \mathbf{x} + \Delta \mathbf{u}^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}] dt \quad (19)$$

式中： $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  为给定权矩阵。根据最优控制理论，上述问题的求解可以转化为求解 Levine-Athans 方程组<sup>[16]</sup>，应用直接迭代法求解该方程组，分别得到最优控制规律为

$$\Delta P_{clr} = k_1 \Delta \mathbf{w} + k_2 \Delta P_e \quad (20)$$

$$\Delta U_{2r} = k_3 \Delta \mathbf{w} + k_4 \Delta P_e \quad (21)$$

式中： $k_i (i=1:4)$  为最优反馈比例系数。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真参数

运用隐式梯形积分数值计算方法编写 VSC-HVDC 暂态模型的计算程序，在 PSASP 中进行混合步长仿真<sup>[17]</sup>。如图 4 所示系统，选取系统基准容量为 100MVA，发电机额定容量为 1333MVA，系统参数如表 1 所示。为防止 VSC1 在暂态过程发生功率过载，附加最优阻尼控制器的输出信号  $\Delta P_{clr}$  限制在  $-0.2 \sim 0.2$  pu 之间， $\Delta U_{2r}$  限制在  $-0.05 \sim 0.05$  pu 之间。

表 1 系统参数  
Tab. 1 Parameters of system

$x_d$ /pu	$x'_d$ /pu	$x_q$ /pu	$T'_{do}$ /s	$T_j$ /s	$x_{T1}$ /pu	$x_{T2}$ /pu	$x_l$ /pu
0.75	0.306	0.611	5.950	8.393	0.10	0.06	0.218
$R_l$ /pu	$B_c$ /pu	$L_{c1}$ /pu	$x_l$ /pu	$L_{c2}$ /pu	$R_{c2}$ /pu	$C_{d1}$ /pu	$C_{d2}$ /pu
0.056	0.195	0.15	0.05	0.15	0.05	0.078	0.078
$L_d$ /pu	$R_d$ /pu	$P_{c1}$ /pu	$U_1$ /pu	$U_2$ /pu	$U_3$ /pu	负荷 1/pu	负荷 2/pu
$2.55 \times 10^{-4}$	0.026	0.50	1.04	1.004	0.974	1.0+j0.6	3.0+j1.0
$K_{p12}$ /pu	$T_{i12}$ /s	$K_{p3}$ /pu	$T_{i3}$ /s	$K_{pu}$ /pu	$T_{i4}$ /s	$K_{pl}$ /pu	$T_{il}$ /s
0.16	0.025	0.5	0.008	0.6	0.005	5.0	0.005

注：VSC2 的电流内环、交流电压控制参数与 VSC1 相同，直流电压 PI 控制参数为  $K_{pu}$  和  $T_{il}$ 。

### 4.2 线路中间发生三相短路

假设一回交流输电线路中间发生持续 0.2 s 三相接地短路故障，仿真结果如图 5 所示。在 VSC 的定交流母线电压控制下，故障期间两端的 VSC 在功率运行范围内向系统发出最大无功，以维持互联交流母线电压为控制参考值，但 VSC 的无功调节能力有限，故障期间母线电压仍有较大跌落。故障解除后，在无附加阻尼控制下，如图 5(d)所示系统呈现弱阻尼特性，而在附加最优阻尼控制下，交直流系统各变量能够快速回归故障前状态。

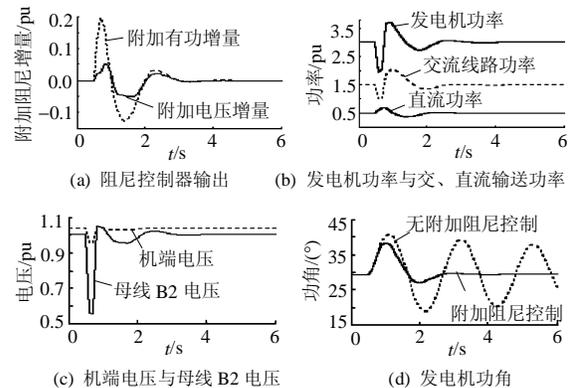


图 5 单回交流线路中间三相短路

Fig. 5 Response for three-phase fault at the middle of one AC transmission line

### 4.3 单回交流线路断线

假定一回交流输电线路跳开, 仿真结果如图 6 所示。VSC1 在定功率控制下直流输送功率基本维持稳态值不变, 扰动前双回线路功率平稳地转移到单回交流线上。因发电机的输出功率维持不变, 而发电机与系统间交流电抗增大, 发电机功角相应增加。

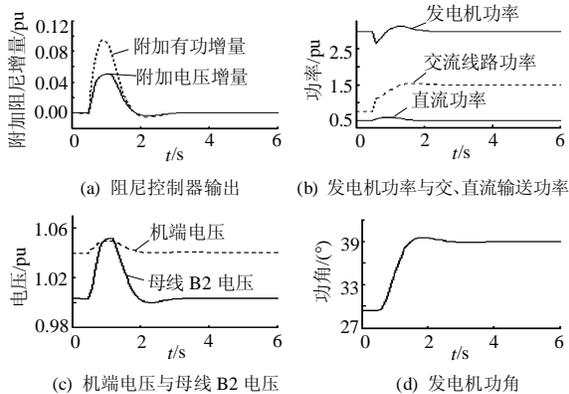


图 6 单回交流线路断开仿真结果  
Fig. 6 Response for opening one AC transmission line

### 4.4 直流输电功率阶跃

VSC1 功率定值阶跃增加 0.8 pu, 系统动态响应如图 7 所示。若发电机维持输出功率不变, 直流功率增加则交流线路输送功率相应减少, 在附加阻尼控制下, 交直流系统平稳地转移到新稳态运行点上。

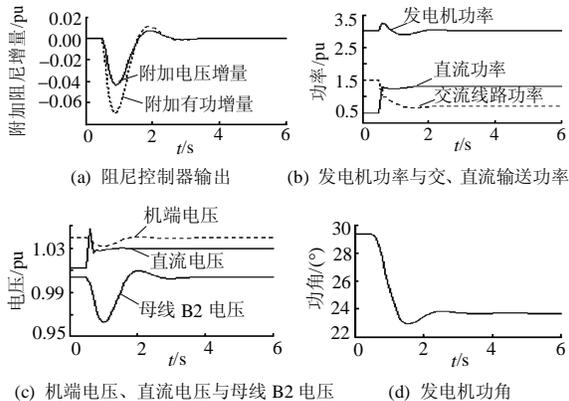


图 7 直流输送功率阶跃 0.8 pu 仿真曲线  
Fig. 7 Response for increasing 0.8 pu active power of DC transmission

## 5 结论

(1) VSC-HVDC 具有快速功率控制的技术优点, 但在常规定功率控制下, 本文通过复数力矩方法分析表明可能导致互联交流系统出现阻尼变弱

或负阻尼问题。

(2) 运用最优控制理论, 在 VSC 的快速控制结构中附加联合阻尼控制策略, 仿真结果表明可在较大运行范围内向系统提供足够的阻尼。

## 参考文献

- 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电——一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.  
Wen Jun, Zhang Yigong, Han Minxiao, et al. HVDC based on voltage sourced converters—a new generation of HVDC technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 47-51(in Chinese).
- 王冠, 蔡晔, 张桂斌, 等. 高压直流输电电压源换流器的等效模型及混合仿真技术[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 4-8.  
Wang Guan, Cai Ye, Zhang Guibin, et al. Equivalent model of VSC-HVDC and its hybrid simulation technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 4-8(in Chinese).
- 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.  
Zhang Guibin, Xu Zheng, Wang Guangzhu. Steady-state model for VSC based HVDC and its controller design[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22(in Chinese).
- 尹明, 李庚银, 牛同义, 等. VSC-HVDC 连续时间状态空间模型及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 34-39.  
Yin Ming, Li Gengyin, Niu Tongyi, et al. Continuous-time state-space model of VSC-HVDC and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 34-39(in Chinese).
- 宋瑞华, 周孝信. 基于 LMI 方法的 VSC-HVDC 多重模型阻尼控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 16-20.  
Song Ruihua, Zhou Xiaoxin. Design of VSC-HVDC multi-model damping controller based on LMI method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 16-20(in Chinese).
- 李国栋, 毛承雄, 陆继明, 等. AC/DC 混合输电系统分散协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 38-42.  
Li Guodong, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al. Decentralized coordinated control of the AC/DC hybrid transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 38-42(in Chinese).
- Farag A, Durrant M, Werner H, et al. Robust control of a VSC HVDC terminal attached to a weak AC system[C]. IEEE Conference on Control Applications, Istanbul, 2003.
- Vrionis T D, Koutiva X I, Vovos N A, et al. Study of an HVDC link based on VSCs using a fuzzy control system[C]. IEEE Power Tech Conference, Bologna, Italy, 2003.
- Johansson S G, Asplund G, Erik Jansson, et al. Power system stability benefits with VSC DC-transmission system[C]. Cigre Session, Paris, France, 2004.
- 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 一种新的优化协调控制在轻型直流输电中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 41-49.  
Hu Zhaoqing, Mao Chengxiong, Lu Jiming. Application of a novel optimal coordinated control to HVDC light[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 41-49(in Chinese).
- Lu W X, Ooi B T. Simultaneous inter-area decoupling and local area damping by voltage source HVDC[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001.

(下转第 37 页 continued on page 37)