

基于电压源换流器的高压直流输电小信号动态建模及其阻尼控制器设计

郑超, 周孝信

(中国电力科学研究院, 北京市海淀区 100085)

Small Signal Dynamic Modeling and Damping Controller Designing for VSC Based HVDC

ZHENG Chao, ZHOU Xiao-xin

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

ABSTRACT: Voltage source converter (VSC) based HVDC (VSC-HVDC) is a new transmission technology which can improve the power system stability with its fast and independent capability to control the active and reactive power. The small signal dynamic model of VSC-HVDC is established in this paper. This model is general for including three parts, i.e., the small signal model for VSC, for VSC-HVDC inner dc system and for control system of VSC-HVDC. Taking the VSC's active power reference as input signal and active power of VSC-HVDC parallel ac line as output signal and using the system identification method, the opened-loop transfer function between the two signal is got from their frequency response. Based on the opened-loop transfer function, VSC-HVDC damping controller is designed in terms of pole assignment technology. Eigenvalue analysis and nonlinear simulation for a VSC-HVDC/AC parallel system verify that VSC-HVDC equipped with the designed damping controller can suppress the low frequency oscillation effectively.

KEY WORDS: Power system; Voltage source converter; VSC-HVDC; Small signal dynamic modeling; Damping controller; Low frequency oscillation

摘要: 基于电压源换流器(VSC)和脉宽调制(PWM)技术的新型高压直流输电(VSC-HVDC), 具有快速、灵活的有功功率和无功功率控制能力, 能够改善系统的稳定性。文中建立了VSC-HVDC的小信号动态模型, 该模型包括VSC与交流系统接口的线性化方程、VSC-HVDC内部直流系统动态过程的线性化方程以及控制系统线性化方程3个部分, 具有一般

性。以VSC的有功功率整定值为输入, VSC-HVDC并联交流输电线路的有功功率为输出, 通过对系统频率响应的辨识, 得到了两者间的开环传递函数。在此基础上, 利用极点配置技术, 设计了单输入单输出结构的VSC-HVDC附加阻尼控制器。对一VSC-HVDC/AC交直流并联输电系统特征根的分析及非线性仿真表明, 配备该阻尼控制器的VSC-HVDC能有效地抑制系统低频振荡, 增加系统阻尼。

关键词: 电力系统; 电压源换流器; 新型高压直流输电; 小信号动态建模; 阻尼控制器; 低频振荡

1 引言

由于一次能源分布不均匀, 电力系统中发电机常常需要经过长距离输电线路与系统中其它发电机并列运行。当系统受到小扰动后, 发电机转子间会发生低频振荡, 输电线路的功率也发生相应的振荡。若此时系统缺乏足够的阻尼, 振荡将得以维持。增加系统振荡阻尼的一种有效方法是在发电机上装设电力系统稳定器(PSS)^[1-3], 通过对发电机励磁系统的调节, 形成一个与转子转速偏差同相位的电磁力矩增量, 从而为振荡提供附加的阻尼力矩^[4-5]。灵活交流输电系统(FACTS)的出现, 为从输电环节中施加控制以增加系统振荡阻尼提供了新的手段^[6]。静止无功补偿器(SVC)^[7-9]、静止无功发生器(STATCOM)^[10-12]、可控串联补偿器(TCSC)^[13-16]以及统一潮流控制器(UPFC)^[17-21]等装置, 在配置适当阻尼控制器的情况下, 均能够有效地抑制系统振荡, 增加系统阻尼。

新型高压直流输电(VSC-HVDC)是基于电压源换流器(VSC)和绝缘栅双极晶体管(IGBT)发展起来的一项新型输电技术。该输电技术可向无源网络供

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金项目(2004CB217900)。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2004CB217900).

电、不会出现换相失败、换流站间无需通信以及易于构成多端直流系统等^[22-23]。此外,与基于相控换流器(PCC)技术的传统高压直流输电(HVDC)^[24-26]不同,由全控型器件构成的电压源换流器具有2个控制自由度^[27-28],可以同时且独立地控制其与交流系统交换的有功功率和无功功率。因此,VSC-HVDC既可以实现与HVDC相似的有功功率调制,又可实现与STATCOM相似的无功功率调制。

本文建立了VSC-HVDC小信号动态模型,该模型中包括了电压源换流器、内部直流系统以及控制系统所对应的线性化方程,具有一般性。通过对VSC有功功率整定值和VSC-HVDC并联交流线路有功功率之间频率响应的系统辨识,求得了两者的开环传递函数;在此传递函数的基础上,利用极点配置技术,设计了VSC-HVDC的附加阻尼控制器。系统特征根分析以及非线性仿真结果验证了VSC-HVDC附加阻尼控制器的有效性。

2 VSC-HVDC 小信号动态建模

2.1 VSC 与交流系统接口线性化方程

图1所示为双端VSC-HVDC的动态模型,其中 X_c 为换流变压器的漏抗; R_c 代表换流变压器的电阻以及VSC的等效损耗; C_d 为直流电容; r_d 、 l_d 分别为直流输电线路的等效电阻和电感;VSC交流侧有功、无功以及换流器侧的有功功率分别为 P_s 、 Q_s 、 P_c ;下标1和2分别代表与VSC₁和VSC₂相对应的物理量。

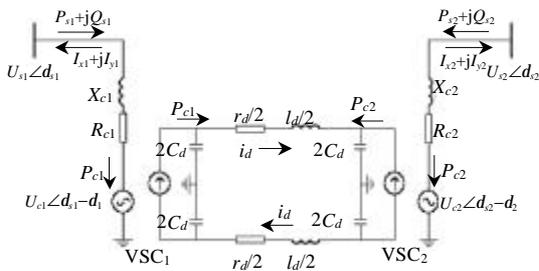


图1 双端VSC-HVDC的动态模型

Fig. 1 Dynamic model of two-terminal VSC-HVDC

采用脉宽调制(PWM)技术的VSC具有2个控制变量:调制比 M 和相对于VSC交流母线电压的移相角度 d ,其输出交流电压的基波分量为

$$\dot{U}_c = \frac{mM}{\sqrt{2}} u_d \angle d_s - d \quad (1)$$

式中 u_d 为VSC直流侧电压; m 为与PWM方式相关的直流电压利用率; d_s 为交流母线电压 \dot{U}_s 在同步旋转 x - y 坐标系中的角度,可以表示为

$$\tan d_s = U_{sy} / U_{sx} \quad (2)$$

其中 U_{sx} 、 U_{sy} 分别为 \dot{U}_s 在实轴 x 和虚轴 y 上的相应分量,以下各物理量下标 x 和 y 的含义均与此相同。

将式(2)代入式(1),可得换流器出口电压的实部和虚部分别为

$$\begin{cases} U_{cx} = \frac{mM}{\sqrt{2}} u_d \left(\frac{U_{sx}}{U_s} \cos d + \frac{U_{sy}}{U_s} \sin d \right) \\ U_{cy} = \frac{mM}{\sqrt{2}} u_d \left(\frac{U_{sy}}{U_s} \cos d - \frac{U_{sx}}{U_s} \sin d \right) \end{cases} \quad (3)$$

在电力系统动态分析中,VSC对交流系统的影响可以通过VSC向其交流母线注入的电流来体现。该注入电流取决于作用在换流变压器上的电压降,其计算公式为

$$\dot{i} = (\dot{U}_c - \dot{U}_s) / (R_c + jX_c) \quad (4)$$

令 $Y = 1 / \sqrt{R_c^2 + X_c^2}$, $a = \arctan(R_c / X_c)$,由式(4)可得VSC注入其交流母线电流的实部和虚部为

$$\begin{cases} I_x = Y(U_{cx} - U_{sx}) \sin a + Y(U_{cy} - U_{sy}) \cos a \\ I_y = Y(U_{cy} - U_{sy}) \sin a - Y(U_{cx} - U_{sx}) \cos a \end{cases} \quad (5)$$

线性化方程式(3)和(5),可得VSC与交流系统接口的线性化方程为

$$\begin{aligned} \Delta U_{cx} = & \frac{mM}{\sqrt{2}} \left(\frac{U_{sx}}{U_s} \cos d + \frac{U_{sy}}{U_s} \sin d \right) \Delta u_d + \\ & \frac{m}{\sqrt{2}} u_d \left(\frac{U_{sx}}{U_s} \cos d + \frac{U_{sy}}{U_s} \sin d \right) \Delta M + \\ & \frac{mM}{\sqrt{2}} u_d \left(-\frac{U_{sx}}{U_s} \sin d + \frac{U_{sy}}{U_s} \cos d \right) \Delta d + \\ & \frac{mM}{\sqrt{2}} u_d \left(\frac{U_{sy}^2 \cos d}{U_s^3} - \frac{U_{sx} U_{sy} \sin d}{U_s^3} \right) \Delta U_{sx} + \\ & \frac{mM}{\sqrt{2}} u_d \left(\frac{U_{sx}^2 \sin d}{U_s^3} - \frac{U_{sx} U_{sy} \cos d}{U_s^3} \right) \Delta U_{sy} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{cy} = & \frac{mM}{\sqrt{2}} \left(\frac{U_{sy}}{U_s} \cos d - \frac{U_{sx}}{U_s} \sin d \right) \Delta u_d + \\ & \frac{m}{\sqrt{2}} u_d \left(\frac{U_{sy}}{U_s} \cos d - \frac{U_{sx}}{U_s} \sin d \right) \Delta M + \\ & \frac{mM}{\sqrt{2}} u_d \left(-\frac{U_{sy}}{U_s} \sin d - \frac{U_{sx}}{U_s} \cos d \right) \Delta d - \\ & \frac{mM}{\sqrt{2}} u_d \left(\frac{U_{sy}^2 \sin d}{U_s^3} + \frac{U_{sx} U_{sy} \cos d}{U_s^3} \right) \Delta U_{sx} + \end{aligned}$$

$$\frac{mM}{\sqrt{2}}u_d \left(\frac{U_{sx}^2 \cos d}{U_s^3} + \frac{U_{sx}U_{sy} \sin d}{U_s^3} \right) \Delta U_{sy} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta I_x = Y \sin a \Delta U_{cx} + Y \cos a \Delta U_{cy} - \\ \quad Y \sin a \Delta U_{sx} - Y \sin a \Delta U_{sy} \\ \Delta I_y = -Y \cos a \Delta U_{cx} + Y \sin a \Delta U_{cy} + \\ \quad Y \cos a \Delta U_{sx} - Y \sin a \Delta U_{sy} \end{cases} \quad (8)$$

式(6)、(7)表明 VSC 输出电压的扰动量由直流系统、控制系统以及交流系统共同决定。

2.2 直流系统内部动态线性化方程

由式(1)和(4)可见, VSC 的直流侧电压直接影响 VSC 的输出电压, 进而影响 VSC 向其交流母线注入的电流。因此, 计及 VSC-HVDC 直流系统内部动态过程是十分必要的。直流系统内部的动态元件包括 VSC 直流侧电容以及输电线路的等效电感。由图 1 所示的交、直流两侧功率平衡关系以及直流电压平衡关系, 可得直流系统内部动态方程为

$$\begin{cases} R_{dB} C_d u_{d1} \frac{du_{d1}}{dt} = P_{c1} - i_d u_{d1} \\ R_{dB} C_d u_{d2} \frac{du_{d2}}{dt} = P_{c2} + i_d u_{d2} \\ \frac{l_d}{R_{dB}} \frac{di_d}{dt} = u_{d1} - u_{d2} - r_d i_d \end{cases} \quad (9)$$

式中 u_{d1} 、 u_{d2} 分别为 VSC₁ 和 VSC₂ 的直流侧电压; i_d 为直流输电线路电流; P_{c1} 、 P_{c2} 为两端 VSC 注入直流系统的有功功率; R_{dB} 为直流系统的基准阻抗^[29]。线性化方程式(9)可得

$$\begin{cases} \Delta \dot{u}_{d1} = \frac{1}{R_{dB} C_d} \left(\frac{1}{u_{d1}} \Delta P_{c1} - \frac{P_{c1}}{u_{d1}^2} \Delta u_{d1} - \Delta i_d \right) \\ \Delta \dot{u}_{d2} = \frac{1}{R_{dB} C_d} \left(\frac{1}{u_{d2}} \Delta P_{c2} - \frac{P_{c2}}{u_{d2}^2} \Delta u_{d2} + \Delta i_d \right) \\ \Delta \dot{i}_d = \frac{R_{dB}}{l_d} (\Delta u_{d1} - \Delta u_{d2} - r_d \Delta i_d) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\Delta P_c = -(\Delta U_{cx} I_x + \Delta U_{cy} I_y + U_{cx} \Delta I_x + U_{cy} \Delta I_y)$ (11)

2.3 控制系统线性化方程

VSC-HVDC 中每个 VSC 可以各自独立地控制其交流无功功率或交流母线电压, 但直流网络的有功功率必须保持平衡, 即输入直流网络的有功功率应当等于输出直流网络的有功功率加上网络损耗。在 VSC 换流站间无通信的条件下, 为实现有功功率的自动平衡, 需选择一端 VSC 控制其直流电压。通过控制直流电压达到整定值来实现其与交流系统交换有功功率的自动调节, 充当整个 VSC-HVDC 系

统的有功平衡换流器。其它 VSC 可在容量允许范围内整定有功功率。

与有源网络连接时, VSC-HVDC 中电压源换流器可以选择的控制方式有以下 4 种:

- (1) 定交流有功功率 P_s 、交流无功功率 Q_s 控制;
- (2) 定交流有功功率 P_s 、交流母线电压 U_s 控制;
- (3) 定直流电压 u_d 、交流无功功率 Q_s 控制;
- (4) 定直流电压 u_d 、交流母线电压 U_s 控制。

本文均采用比例积分(PD)调节型控制器, 有功功率、无功功率、交流母线电压以及直流电压控制器的结构分别如图 2(a)~(d)所示。其中 K_P 、 K_Q 、 K_U 、 K_u 、 T_P 、 T_Q 、 T_U 、 T_u 分别为相应控制器比例系数和积分时间常数, T_{mP} 、 T_{mQ} 、 T_{mU} 、 T_{mu} 为测量环节时间常数; x_i ($i=1,2,\dots$) 为测量环节输出的中间变量; d_0 、 M_0 和 Δd 、 ΔM 分别为调节器输出的稳态值和调节量; P_{dmp} 为附加控制器的输出信号; 下标 ref 为相应物理量的整定值。

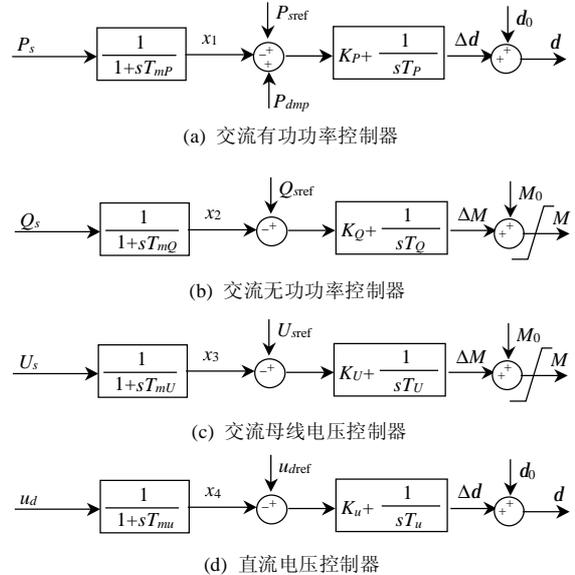


图 2 VSC-HVDC 控制系统

Fig. 2 Control system of VSC-HVDC

线性化有功功率控制器对应的动态方程可得

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_1 = \frac{1}{T_{mP}} (\Delta P_s - \Delta x_1) \\ \Delta \dot{d} = -\frac{1}{T_P} (\Delta P_{dmp} - \Delta x_1) - \frac{K_P}{T_{mP}} (\Delta P_s - \Delta x_1) \end{cases} \quad (12)$$

式中 $-\Delta P_s = \Delta U_{sx} I_x + \Delta U_{sy} I_y + U_{sx} \Delta I_x + U_{sy} \Delta I_y$ 。同理可得无功功率、交流母线电压以及直流电压控制系统对应的线性化动态方程, 分别对应式(13)~(15)。

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_2 = \frac{1}{T_{mQ}} (\Delta Q_s - \Delta x_2) \\ \Delta \dot{M} = -\frac{1}{T_Q} \Delta x_2 - \frac{K_Q}{T_{mQ}} (\Delta Q_s - \Delta x_2) \\ -\Delta Q_s = \Delta U_{sy} I_x - \Delta U_{sx} I_y + U_{sy} \Delta I_x - U_{sx} \Delta I_y \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_3 = \frac{1}{T_{mU}} (\Delta U_s - \Delta x_3) \\ \Delta \dot{M} = -\frac{1}{T_U} \Delta x_3 - \frac{K_U}{T_{mU}} (\Delta U_s - \Delta x_3) \\ \Delta U_s = U_{sx} \Delta U_{sx} / U_s + U_{sy} \Delta U_{sy} / U_s \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_4 = \frac{1}{T_{mu}} (\Delta u_d - \Delta x_4) \\ \Delta \dot{d} = -\frac{1}{T_u} \Delta x_4 - \frac{K_u}{T_{mu}} (\Delta u_d - \Delta x_4) \end{cases} \quad (15)$$

由式(6)~(8)、(10)~(15)即可构成双端VSC-HVDC的小信号线性化模型,写成矩阵形式为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{U}_s \\ \Delta \mathbf{I} &= \mathbf{C} \Delta \mathbf{X} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{U}_s \end{aligned} \quad (16)$$

式中 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 为系数矩阵;

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{I} &= [\Delta I_{sx1}, \Delta I_{sy1}, \Delta I_{sx2}, \Delta I_{sy2}]^T; \\ \Delta \mathbf{U}_s &= [\Delta U_{sx1}, \Delta U_{sy1}, \Delta U_{sx2}, \Delta U_{sy2}]^T; \\ \Delta \mathbf{X} &= [\Delta u_{d1}, \Delta u_{d2}, \Delta i_d, \Delta d_1, \Delta M_1, \Delta d_2, \\ &\quad \Delta M_2, \Delta x_{1i}, \Delta x_{1j}, \Delta x_{2i}, \Delta x_{2j}]^T \end{aligned}$$

其中, $\Delta x_{1i}, \Delta x_{1j}, \Delta x_{2i}, \Delta x_{2j}$ 分别为 VSC₁ 和 VSC₂ 选用控制器测量环节的输出中间变量。

3 VSC-HVDC 阻尼控制器设计

在交直流并联输电系统中,利用与交流线并联运行的直流系统附加阻尼控制可以有效地抑制系统的低频振荡。通常附加阻尼控制器的设计方法有极点配置法、相位和增益裕度法以及 H 无穷大法等。其中极点配置法是应用根轨迹法则,将一对主导极点移动到 s 平面中新的指定位置^[30]。

设 VSC-HVDC 交直流并联输电系统中, VSC 有功功率整定值 P_{sref} 与并联交流线路有功功率 P_{ac} 间的开环传递函数以及附加阻尼控制器的传递函数分别为 $G(s)$ 和 $H(s)$ 。由 $G(s)$ 和 $H(s)$ 构成的闭环系统如图 3 所示,其传递函数 $G_c(s)$ 为

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{1 - G(s)H(s)}$$

若闭环系统特征根配置的目标选为 I_0 , 则 $H(I_0)$ 必

满足式(17)所对应的幅值和相位关系。

$$\begin{cases} |H(I_0)| = 1/|G(I_0)| \\ \arg(H(I_0)) = -\arg(G(I_0)) \end{cases} \quad (17)$$

因此,利用极点配置技术设计 VSC-HVDC 阻尼控制器的步骤为:

(1) 以 VSC-HVDC 中 VSC 有功功率的整定值为输入信号、并联交流线路有功功率为输出信号,计算系统的频率响应;

(2) 通过对频率响应的系统辨识^[31], 求取两信号间的开环传递函数 $G(s)$;

(3) 依据选定的 I_0 和式(17), 设计附加阻尼控制器 $H(s)$ 以补偿 $G(I_0)$ 的幅值与相位。

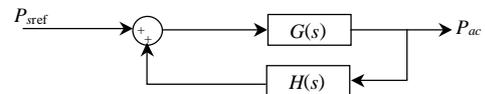


图 3 VSC-HVDC 闭环控制系统

Fig. 3 Closed-loop control system for VSC-HVDC

4 仿真算例

算例系统如图 4 所示,该系统中等值发电机经 VSC-HVDC 交直流并联输电系统向负荷供电,并与主网络连接。发电机采用 E'_q 、 E''_q 、 E''_d 变化的 5 阶模型,负荷采用电压静特性模型, VSC-HVDC 中电压源换流器 VSC₁ 采用定交流有功、交流无功功率控制, VSC₂ 采用定直流电压、定交流无功功率控制。发电机、交流网络、VSC-HVDC 主电路及其控制器参数如下: 发电机参数为 $x_d=0.75$ 、 $x'_d=0.306$ 、 $x''_d=0.196$ 、 $x''_q=0.196$ 、 $T'_{d0}=5.95$ 、 $T^2_{d0}=0.05$ 、 $T^2_{q0}=0.05$ 、 $T_J=25$ 。网络参数为 $X_{T1}=0.14$ 、 $X_{T2}=0.06$ 、 $R_{ac}=0.0187$ 、 $X_{ac}=0.501$ 。VSC-HVDC 主电路及控制器参数为 $R_{c1}=R_{c2}=0.02$ 、 $X_{c1}=X_{c2}=0.04$ 、 $B_c=-0.05$ 、 $R_d=0.2744$ 、 $l_d=0.02\text{H}$ 、 $C_d=400\mu\text{F}$ 、 $K_P=1.5$ 、 $T_P=0.1$ 、 $K_Q=1$ 、 $T_Q=0.1$ 、 $K_u=0.4$ 、 $T_u=0.1$ 、 $T_{mP}=T_{mQ}=0.01$ 。

稳态运行时,发电机输出的有功功率 $P_g=1.0\text{pu}$, VSC₁ 的有功、无功功率整定值为 $P_{sref}=0.45\text{pu}$, $Q_{sref}=0\text{pu}$, VSC₂ 的直流电压、无功功率整定值为 $u_{dref}=1.888\text{pu}$, $Q_{sref}=-0.1\text{pu}$, 负荷吸收的功率 $S_l=0.4+j0.15\text{pu}$ 。利用小扰动特征根分析可得该系统对应于机电振荡的特征根为 $\lambda = -0.079+j3.28$, 相应的阻尼比 $\zeta=0.024$, 系统呈现出弱阻尼。

以 VSC₁ 有功功率整定值为输入信号,交流线路有功功率为输出信号的系统幅频、相频响应曲线如图 5 所示。对该频率响应辨识得到的开环传递函

数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{7.621s^3 + 281.7s^2 + 276.9s + 5077}{s^4 + 38.16s^3 + 559.9s^2 + 495.5s + 5841} \quad (18)$$

$G(s)$ 的波特图如图 6 所示，其极点为 $I_1 = -19 + j13.493$ ， $I_2 = -0.0799 + j3.278$ ，其中主导极点 I_2 与系统特征根计算相一致。

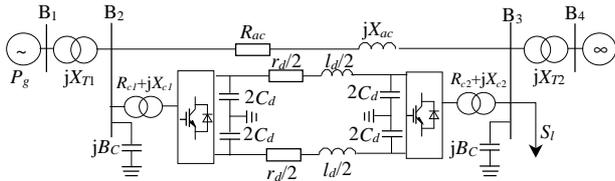


图 4 VSC-HVDC 交直流并联输电系统
Fig. 4 VSC-HVDC/AC parallel power system

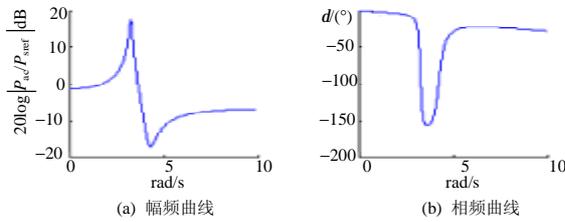


图 5 频率响应曲线
Fig. 5 Curves of frequency response

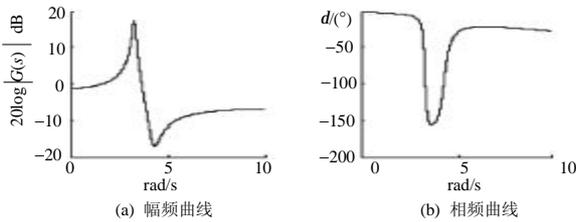


图 6 辨识传递函数的波特图
Fig. 6 Bode curve of identification transfer function

将经附加阻尼控制器反馈后的闭环系统主导特征根选为 $I_0 = -0.64 + j3.1$ ，对应振荡频率为 0.5Hz，阻尼比为 0.2。将 I_0 代入 $G(s)$ 有

$$|G(I_0)| = 1.266$$

$$\arg(G(I_0)) = 44.11^\circ$$

因此，附加阻尼控制的传递函数应当满足

$$|H(I_0)| = 0.79$$

$$\arg(H(I_0)) = -44.11^\circ$$

采用图 7 所示的附加阻尼控制器结构，满足幅值和相位条件的控制器参数整定值为： $K_{VSC} = 0.916$ 、 $T_w = 10$ 、 $T_{dmp} = 0.26$ 、 $P_{max} = 0.1$ 、 $P_{min} = -0.1$ 。

配置阻尼控制器后，系统的机电振荡特征根为 $-0.628 + j3.142$ ，已达到所设定的目标。

图 8 为母线 B_2 发生三相非金属性短路时的仿真结果。故障接地电抗为 0.05pu，起始时间为 1s，持续时间 0.1s。仿真结果表明：附加阻尼控制的 VSC-HVDC 能够显著地增加系统阻尼，抑制系统振荡。

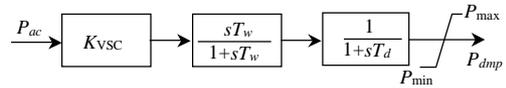


图 7 VSC-HVDC 附加阻尼控制器
Fig.7 supplementary damping controller of VSC-HVDC

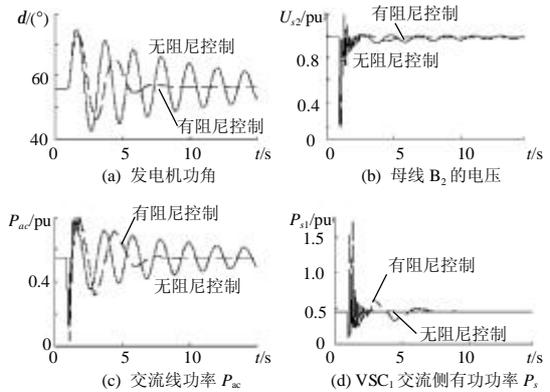


图 8 VSC-HVDC 附加阻尼控制的效果

Fig. 8 Effect of VSC-HVDC supplementary damping control

5 结论

本文建立了具有一般性的 VSC-HVDC 小信号动态模型，该模型包括 VSC 与交流系统接口线性化方程、直流系统内部动态线性化方程、VSC-HVDC 控制系统线性化方程。通过系统辨识和极点配置技术，设计了单输入单输出结构的 VSC-HVDC 附加阻尼控制器。系统特征根分析以及非线性时域仿真表明，利用附加阻尼控制器对 VSC-HVDC 输送的有功功率进行调制，可以显著增加系统的振荡阻尼，有效地抑制系统振荡。

参考文献

- [1] 朱方, 刘增煌, 高光华. 电力系统稳定器对三峡电力系统暂态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 20-22. Zhu Fang, Liu Zenghuang, Gao Guanghua. The influence of PSS upon transient stability of the three gorges electric power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 55-60.
- [2] 牛振勇, 杜正春, 方万良, 等. 基于进化策略的多机系统 PSS 参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 22-27. Niu Zhenyong, Du Zhengchun, Fang Wanliang, et al. Parameter optimization of mult-machine power system stabilizers using evolutionary strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 22-27.
- [3] 芦晶晶, 郭剑, 田芳, 等. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-34. Lu Jingjing, Guo Jian, Tian Fang, et al. Power system oscillation mode analysis and parameter determination of PSS based on Prony method [J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 31-34.
- [4] P Kundur, M Klein, G J Rogers, et al. Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability [J]. IEEE Trans on, PS, 1989, 614-621.
- [5] 倪以信, 陈寿孙, 张宝林. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [6] 韩英铎, 王仲鸿, 林孔兴, 等. 电力系统中的三项前沿课题—柔性

- 输电技术, 智能控制, 基于 GPS 的动态安全分析与监测系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(7): 1-6.
- Han Yingduo, Wang Zhonghong, Lin Kongxing et al. Three new front subjects in power systems-FACTS, intelligent control and dynamic security analysis and monitor system based on GPS[J]. Journal of Tsinghua University(Sci&Tech), 1997, 37(7): 1-6.
- [7] 杨晓东, 房大中, 刘长胜, 等. 阻尼联络线低频振荡的 SVC 自适应模糊控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 55-60.
- Yang Xiaodong, Fang Dazhong, Liu Changsheng, et al. An adaptive SVC fuzzy controller for damping tie-link low frequency oscillation [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 55-60.
- [8] 马幼捷, 周雪松. 静止无功补偿器非线性控制对系统功角稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 84-88.
- Ma Youjie, Zhou Xuesong. Study on nonlinear SVC control for improving power system stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 84-88.
- [9] 陆超, 谢小荣, 童陆园, 等. 使用直接神经动态规划方法的 SVC 附加阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 8-12.
- Lu Chao, Xie Xiaorong, Tong Luyuan, et al. SVC supplement damping control using direct neural dynamic programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 8-12.
- [10] 粟春, 马晓军, 姜齐荣, 等. STATCOM 提高系统暂态稳定及阻尼的动模试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 37-40.
- Li Chun, Ma Xiaojun, Jiang Qirong, et al. Transient stability enhancement and damping improvement by statcom-physical experimental study[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 37-40.
- [11] 张敏, 罗安, 何早红. 包含静止无功发生器的电力系统吸引域[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 25-28.
- Zhang Min, Luo An, He Zaohong. The domain of attraction for power system with STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 25-28.
- [12] 王强, 姜齐荣, 沈斐, 等. 迭代学习控制用于 STATCOM 阻尼区域间振荡的研究[J]. 电网技术, 1999, 23(3): 1-5.
- Wang Qiang, Jiang Qirong, Shen Fei, et al. Using iterative learning control to damp power swing with the help of STATCOM[J]. Power System Technology, 1999, 23(3): 1-5.
- [13] 郭春林, 童陆园. 基于在线辨识的可控串补自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 7-12.
- Guo Chunlin, Tong Luyuan. Self-tuning phase-compensation control based on online identification of TCSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 7-12.
- [14] 郭春林, 童陆园. 多机系统中可控串补(TCSC)抑制功率振荡的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 1-6.
- Guo Chunlin, Tong Luyuan. Application of TCSC to damp oscillations in multi-machine systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 1-6.
- [15] 徐桂芝, 武守远, 王宇红, 等. 用 TCSC 装置抑制电力系统低频振荡的研究[J]. 电网技术, 2004, 26(15): 45-47.
- Xu Guizhi, Wu Shouyuan, Wang Yuhong, et al. Damping low frequency oscillation in power system by TCSC[J]. Power System Technology, 2004, 26(15): 45-47.
- [16] 苏建设, 柯宁, 陈陈. 提高暂态稳定的励磁与 FACTS 协调策略设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 6-10.
- Su Jianshe, Ke Ning, Chen Chen. Coordinated design of generator excitation and FACTS for transient stability enhancement [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 6-10.
- [17] 颜伟, 朱继忠, 徐国禹. UPFC 线性最优控制方式的研究对暂态稳定性的改善[J]. 中国电机工程学报, 2000(1), 45-49.
- Yan Wei, Zhu Jizhong, Xu Guoyu. Enhancement of power system stability using linear optimal control strategy of UPFC [J]. Proceedings of the CSEE, 2000(1): 45-49.
- [18] Wang Haifang. A unified model for the analysis of facts devices in damping power system oscillations-part iii: unified power flow controller[J]. IEEE Transaction on Power Deliver, 2000, 15(3): 978-983.
- [19] 颜伟, 朱继忠, 孙洪波, 等. UPFC 的潮流控制与暂态稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 57-61.
- Yan Wei, Zhu Jizhong, Sun Hongbo, et al. Study of power flow control and transient stability with UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 57-61.
- [20] 王海风, 李敏, 陈珩. 装有统一潮流控制器的多机电力系统 Phillips-Heffron 模型及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 6-10.
- Wang Harfeng, Li Min, Chen Heng. Phillips-Heffron model of a multi-machine power system installed with a unified power flow controller and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(2): 6-10.
- [21] 张扬, 毛雪雁, 徐政. 用于电网稳态和暂态分析的统一潮流控制器模型[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 30-33.
- Zhang Yang, Mao Xueyan, Xu Zheng. UPFC models for power system steady-state and dynamic analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 30-33.
- [22] Asplund G, Eriksson K, Svensson K. DC transmission based on voltage source converters[C]. CIGRE SC14 Colloquium, South Africa, 1997.
- [23] 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 source converter—a new generation of HVDC technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 47-51.
- [24] 陆治国, 任震, 王官洁. 背靠背高压直流输电系统的稳态仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 23-25.
- Lu Zhiguo, Ren Zhen, Wang Guanjie. Steady state simulation of back to back HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 23-25.
- [25] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 混合交直流电力系统的非线性调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 1-6.
- Yang Weidong, Xu Zheng, Han Zhenxiang. A nonlinear modulation strategy for hybrid AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 1-6.
- [26] 戚庆茹, 焦连伟, 严正, 等. 高压直流输电动态相量建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 28-32.
- Qi Qingru, Jiao Lianwei, Yan Zheng et al. Modeling and simulation of HVDC with dynamic phasor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 28-32.
- [27] 王冠, 徐政, 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 HVDC-VSC and its hybrid simulation technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 4-8.
- [28] 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 and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22.
- [29] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC 稳态特性与潮流算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 1-5.
- Zheng Chao, Zhou Xiaoxin, Li Ruomei et al. Study on the steady characteristic and algorithm of power flow for VSC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 1-5.
- [30] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [31] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计-MATLAB 语言及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

收稿日期: 2005-08-15.

作者简介:

郑超 (1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制、新型高压直流输电;
周孝信 (1940-), 男, 中国科学院院士, IEEE Fellow, 从事电力系统分析的研究工作。

(责任编辑 喻银凤)