

文章编号:1671-6833(2007)03-0087-04

单机-SVC-无穷大系统机电模式阻尼特性分析

刘宪林, 王 鑫

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为了给静止无功补偿器(SVC)阻尼特性的研究提供更为严谨的理论依据,建立了考虑发电机阻尼绕组作用的单机-SVC-无穷大系统线性化直观模型(扩展模型),并针对不同情况计算系统的特征根,讨论影响SVC阻尼作用大小的有关因素。研究结果表明,当SVC有阻尼控制时,能向电力系统提供正阻尼;当SVC仅有电压控制时,对系统阻尼的影响很小;而当SVC同时有电压和阻尼控制时,增大电压控制增益,反而会削弱阻尼控制的作用;从提高系统阻尼的角度考虑,SVC的最佳安装地点在输电线路中点附近。

关键词: 电力系统; 小扰动; 模型; SVC; 阻尼

中图分类号: TM 712 **文献标识码:** A

0 引言

静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)作为 FACTS 家族中的重要成员,具有快速调节系统无功、维持节点电压稳定的功能,在电力系统中得到广泛应用^[1]。同时,SVC 在电力系统动态稳定性中的特性研究受到广泛重视^[2-6]。文献[6]利用单机-SVC-无穷大系统的扩展 Phillips-Heffron 模型(即扩展 $k_1 \sim k_6$ 模型),对 SVC 阻尼电力系统低频振荡的原理给出了解析解,为有关 SVC 的研究提供理论支持。不过,扩展 $k_1 \sim k_{12}$ 模型本身没有严格考虑同步电机阻尼绕组的作用,在某些情况下难免会有偏差。随着电力系统动态稳定分析要求的提高,有必要建立更加详细的数学模型,以深入研究 SVC 的阻尼特性。文献[7]提出计及阻尼绕组作用的单机无穷大系统小扰动直观模型(简称为 $c_1 \sim c_{12}$ 模型)。笔者在此基础上建立单机-SVC-无穷大系统的扩展 $c_1 \sim c_{12}$ 模型,并利用该模型进行特征根计算,绘制机电模式特征根的阻尼比曲线,讨论影响 SVC 阻尼的有关因素。

1 扩展 $c_1 \sim c_{12}$ 模型

未装设 SVC 的单机无穷大电力系统的非线性方程组为:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = [P_m - P_e - D_m(\omega - 1)]/T_i \\ \dot{\delta} = \omega_N(\omega - 1) \\ \dot{E}_d'' = [-E_d'' + (X_q - X_q'')I_{iq}]/T_{q0}'' \\ \dot{E}_q' = [E_{fd} - E_q' - (X_d - X_d')I_{id}]/X_{d0}' \\ \dot{E}_q'' = [-X_q'' - (X_d' - X_d'')I_{id} + E_q' + T_{d0}''E_q]/T_{d0}'' \\ \dot{E}_{fd} = G_e(s)(V_r - V_t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} V_{id} = E_d'' + X_q''I_{iq} \\ V_{iq} = E_q'' - X_d''I_{id} \\ V_t = \sqrt{V_{id}^2 + V_{iq}^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_e = V_{id}I_{id} + V_{iq}I_{iq} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_{iq} = (-E_d'' + V_t \sin \delta)/X_{d\Sigma}'' \\ I_{id} = (-E_q'' - V_t \cos \delta)/X_{d\Sigma}'' \end{cases} \quad (4)$$

式中: D_m 为机械阻尼系数; $G_e(s)$ 为自动励磁调节系统 AVR 的传递函数; $X_{d\Sigma}'' = X_d'' + X_e$; $X_{q\Sigma}'' = X_q'' + X_e$, X_e 为线路电抗; $\omega = d\omega/dt$, 余类推;其余符号含义遵从习惯用法。

晶闸管控制的电感-固定电容型(TCR-FC: Thyristor-Controlled Reactor Fix Capacitor)静止无功补偿器如图1、图2所示,等效导纳为^[2]:

$$\bar{Y}_{SVC} = [1 - T(\alpha)]/jX_L - 1/jX_C \quad (5)$$

式中: $T(\alpha) = (2\alpha - \sin 2\alpha)/\pi - 1$, α 为 TCR 的触发电角, $\pi/2 < \alpha < \pi$, $0 < T(\alpha) < 1$ 。不失一般性,可取 $X_C = X_L$, 则有:

$$\bar{Y}_{SVC} = -T(\alpha)/jX_C \quad (6)$$

收稿日期:2007-03-15;修订日期:2007-06-12

作者简介:刘宪林(1955-),男,河南洛阳人,郑州大学教授,博士,主要从事电力系统分析与控制方面的教学和研究工作。

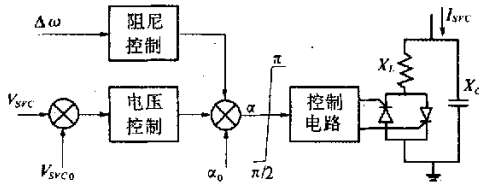


图1 TCR-FC型SVC

Fig. 1 TCR-FC Type SVC

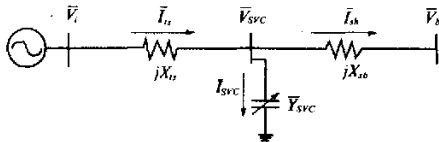


图2 装设SVC的单机无穷大系统

Fig. 2 A single-machine infinite-bus power system installed with a SVC

由图2可有:

$$\begin{cases} \bar{I}_{ab} = \bar{I}_a - \bar{V}_{SVC} \bar{V}_{SVC} \\ \bar{I}_{SVC} = jX_{ab} \bar{I}_{ab} + \bar{V}_b = jX_{ab} \bar{I}_a - jX_{ab} \bar{V}_{SVC} \bar{V}_{SVC} + \bar{V}_b \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{由式(7)可得: } \bar{V}_{SVC} = (jX_{ab} \bar{I}_a + \bar{V}_b) / C \quad (8)$$

$$\text{式中: } C = 1 + jX_{ab} \bar{V}_{SVC} = 1 - T(\alpha) X_{ab} / X_C.$$

$$\text{因此可得: } \bar{V}_t = jX_a \bar{I}_a + \bar{V}_{SVC} = j\bar{X} \bar{I}_a + \bar{V}_b / C \quad (9)$$

$$\text{式中: } X = X_a + X_{ab} / C.$$

式(9)表明,装设SVC后,发电机到无穷大系统母线的等效联系电抗为 X ,系统母线电压则等效为 \bar{V}_b / C ,由此重新写出发电机端电流方程为

$$\begin{cases} I_{q\gamma} = [-E_d'' + V_b \sin \delta / C] / X_{q\gamma}'' \\ I_{d\gamma} = [E_q'' - V_b \cos \delta / C] / X_{d\gamma}'' \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{式中: } X_{d\gamma}'' = X_d'' + X; X_{q\gamma}'' = X_q'' + X.$$

用式(10)替换式(4),与式(1)~(3)联立,得到装设SVC且计及同步发电机阻尼绕组作用的单机无穷大系统非线性模型.将其在工作点处线性化并作拉氏变换,然后消去中间变量,得

$$\begin{cases} \Delta \omega = (\Delta P_m - \Delta P_e) / (D_m + T_f s) \\ \Delta \delta = \omega_N \cdot \Delta \omega / s \\ \Delta E_q'' = \Delta \delta c_{11} c_{10} / (1 + c_{11} T_{q0}'' s) \\ \Delta E_q' = \Delta E_{fd} - c_3 \Delta E_q'' - c_4 \Delta \delta - K_q \Delta \alpha / (1 + T_{d0}' s) \\ \Delta E_q' = c_9 [(1 + T_{d0}' s) \Delta E_q' - c_8 \Delta \delta] / (1 + c_9 T_{d0}'' s) \\ \Delta E_{fd} = G_e(s) (\Delta V_t - \Delta V_f) \\ \Delta P_e = c_1 \Delta \delta + c_2 \Delta E_q'' + c_{12} \Delta E_q' + K_p \Delta \alpha \\ \Delta V_t = c_5 \Delta \delta + c_6 \Delta E_q' + c_7 \Delta E_q'' + K_s \Delta \alpha \end{cases} \quad (11)$$

式中: $K_p = [\partial P_e / \partial \alpha]_0$, $K_q = [\partial E_q' / \partial \alpha]_0$, $K_s = [\partial V_t / \partial \alpha]_0$; $c_1 \sim c_{12}$ 为线性化系数,其算式见文献[7].

此外,对于SVC有

万方数据

$$\begin{cases} V_{SVCd} = (V_b \sin \delta - I_{q\gamma} X_{ab}) / C \\ V_{SVCq} = (V_b \cos \delta + I_{d\gamma} X_{ab}) / C \\ V_{SVC} = \sqrt{V_{SVCd}^2 + V_{SVCq}^2} \end{cases} \quad (12)$$

$$\Delta V_{SVC} = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E_q'' + K_3 \Delta E_q' + K_4 \Delta \alpha \quad (13)$$

$$\text{式中: } K_1 = [\partial V_{SVC} / \partial \delta]_0, K_2 = [\partial V_{SVC} / \partial E_q'']_0,$$

$$K_3 = [\partial V_{SVC} / \partial E_q']_0, K_4 = [\partial V_{SVC} / \partial \alpha]_0.$$

设SVC的控制方程为^[6]

$$\alpha = \alpha_0 + C_v (V_{SVC0} - V_{SVC}) + C_w \omega_N \Delta \omega \quad (14)$$

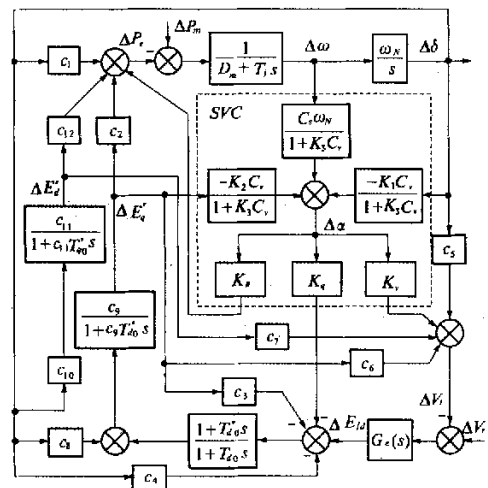
增量化后可得

$$\Delta \alpha = -C_v \Delta V_{SVC} + C_w \omega_N \Delta \omega \quad (15)$$

将其与(3)式联立则有

$$\Delta \alpha = \frac{-K_1 C_v \Delta \delta - K_2 C_v \Delta E_q'' - K_3 C_v \Delta E_q' + C_w \omega_N \Delta \omega}{1 + K_4 C_v} \quad (16)$$

式(11)与(16)联立即为装设SVC且计及同步发电机阻尼绕组作用的单机无穷大系统线性化模型,即扩展 $c_1 \sim c_{12}$ 模型,其框图如图3所示.

图3 扩展 $c_1 \sim c_{12}$ 模型Fig. 3 Extended $c_1 \sim c_{12}$ model

2 SVC的阻尼特性分析

进行系统的特征分析时,复特征根以共轭对的形式出现,即: $\lambda = \sigma \pm j\omega$

每对复特征根对应于一个振荡模式,当求出系统的机电模式时,即可计算机电模式阻尼比为

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}$$

机电模式阻尼比决定低频振荡的衰减特性,一定程度上反映了系统阻尼低频振荡的能力^[8].

设单机-SVC-无穷大系统的算例参数为:

$$X_d = 1.2, X_d' = 0.15, X_d'' = 0.13, X_q = 1.2, X_q' = 0.13, T_f = 8 \text{ s}, T_{d0}' = 8.940 \text{ s}, T_{d0}'' = 0.093 \text{ s}, T_{q0}'' = 0.150 \text{ s},$$

$T_e = 0.01$ s, $D_m = 0$, $X_{ia} = 0.37$, $X_{ib} = 0.37$, $X_c = 1$, $C_v = 5$, $C_s = 0.95$. 初始条件 $V_{i0} = V_{svco} = V_{b0} = 1$ pu, P_{e0} 可变. 下面将根据不同情况计算系统的机电模式, 绘制机电模式阻尼比曲线, 进而分析 SVC

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{E}_d'' \\ \Delta \dot{E}_q'' \\ \Delta \dot{E}_q' \\ \Delta \dot{E}_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-D}{T_j} - \frac{K_p C_s}{T_j(1+K_2 C_v)} & \frac{-c_1}{T_j} + \frac{K_p K_1 C_s}{T_j(1+K_3 C_v)} & \omega_N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{c_{10}}{T_{j0}''} & 0 & 0 \\ \frac{-K_q C_s}{T_{d0}''(1+K_3 C_v)} & \frac{-c_8}{T_{d0}''} - \frac{c_4}{T_{d0}''} + \frac{K_q K_1 C_v}{T_{d0}''(1+K_3 C_v)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_q C_s}{T_{d0}''(1+K_3 C_v)} & \frac{-c_4}{T_{d0}''} + \frac{K_q K_1 C_v}{T_{d0}''(1+K_3 C_v)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_e K_v C_s}{T_e(1+K_3 C_v)} & \frac{-c_5 K_e}{T_e} + \frac{K_e K_v K_1 C_v}{T_e(1+K_3 C_v)} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E_d'' \\ \Delta E_q'' \\ \Delta E_q' \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.1 SVC 阻尼控制对系统阻尼的影响

为研究 SVC 阻尼控制对系统阻尼的影响, 计算不同 SVC 阻尼控制增益 C_s 下的系统特征根, 绘制机电模式阻尼比曲线如图 4 所示.

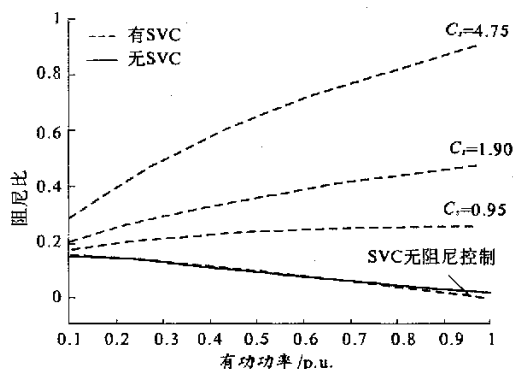


图 4 不同阻尼控制下的机电模式阻尼比曲线

Fig. 4 Curves of mechanic-electrical mode damping proportion in different damping controls

由图 4 可以看出, 当 SVC 无阻尼控制时, SVC 对系统阻尼基本无影响. 添加阻尼控制以后, 随着阻尼控制增益 C_s 的增大, 系统的机电模式阻尼比也增大, SVC 阻尼系统低频振荡的能力增强. 因此, 在 SVC 触发角上下限范围内, 适当提高增益 C_s 可得到更为有效的 SVC 阻尼控制.

2.2 SVC 电压控制对系统阻尼的影响

按照 SVC 仅有电压控制和 SVC 同时具有电压、阻尼控制两种情况, 计算不同电压控制增益 C_v 下的系统特征根, 绘制机电模式阻尼比曲线如图 5 所示.

由图 5 可以看出:

万方数据

的阻尼特性.

设励磁系统为一阶惯性环节, 即 $G_e(s) = K_e / (1 + T_e s)$, 令 $\Delta P_m = 0$, $\Delta U_r = 0$, 则扩展 $c_1 \sim c_{12}$ 模型的齐次状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \frac{-c_{12}}{T_j} & \frac{-c_{12}}{T_j} + \frac{K_p K_2 C_v}{T_j(1+K_3 C_v)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{c_{11} T_{j0}''} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_9 T_{d0}''} - \frac{c_3}{T_{d0}''} + \frac{K_q K_2 C_v}{T_{d0}''(1+K_3 C_v)} & \frac{1}{T_{d0}''} & -\frac{1}{T_{d0}''} \\ 0 & \frac{c_3}{T_{d0}''} + \frac{K_q K_2 C_v}{T_{d0}''(1+K_3 C_v)} & -\frac{1}{T_{d0}''} & \frac{1}{T_{d0}''} \\ \frac{-c_7 K_e}{T_e} & \frac{-c_6 K_e}{T_e} + \frac{K_e K_v K_2 C_v}{T_e(1+K_3 C_v)} & 0 & \frac{1}{T_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \\ \Delta E_d'' \\ \Delta E_q'' \end{bmatrix} \quad (17)$$

(1) 当 SVC 仅有电压控制时, 无论如何提高 SVC 的电压控制增益, 对系统阻尼影响都很小.

(2) 当 SVC 同时有电压控制和阻尼控制时, SVC 可以向系统提供正阻尼. 保持阻尼控制增益 C_s 大小不变, 随着电压增益 C_v 的增大, SVC 的阻尼作用逐渐减小.

分析结果表明, 单纯提高 SVC 电压控制的增益, 并不能改善系统的阻尼, 甚至还会削弱阻尼控制的作用.

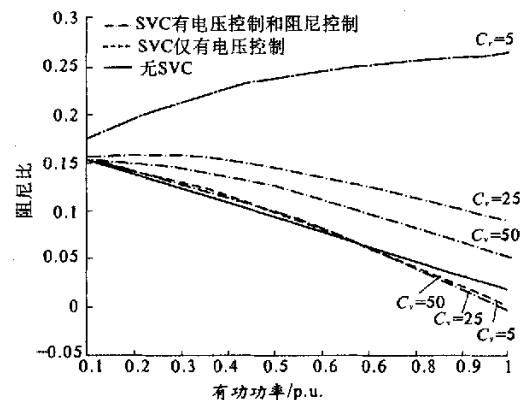


图 5 不同电压控制下的机电模式阻尼比曲线

Fig. 5 Curves of mechanic-electrical mode damping proportion in different voltage controls

2.3 SVC 安装地点对系统阻尼的影响

对同一 SVC, 假定其被装设在输电线路的不同位置, 分别计算系统的特征根, 并绘制机电模式阻尼比曲线如图 6.

由图 6 可以看出, 当 SVC 被装设在线路中点时, 其阻尼作用最为明显; 装设在无穷大母线近端时, 阻尼作用次之; 装设在发电机近端时, 阻尼作

用最差,在发电机有功轻载时,SVC 甚至会削弱系统的阻尼.因此,从提高系统阻尼的角度考虑,SVC 的最佳安装地点在线路中点附近.

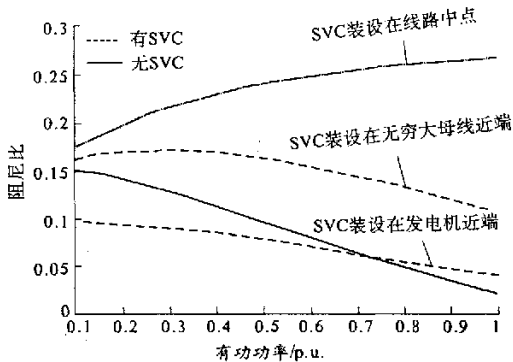


图6 不同安装地点 SVC 机电模式阻尼比曲线

Fig.6 Curves of mechanic - electrical mode damping proportion in different installation sites

3 结论

笔者建立了单机-SVC-无穷大系统及发电机阻尼绕组作用的小扰动模型,即扩展 $c_1 \sim c_{12}$ 模型.基于此模型,计算系统特征根,绘制机电模式阻尼比曲线,得出以下结论:

(1) SVC 的阻尼控制能向电力系统提供正阻尼,且阻尼控制增益越大,SVC 的阻尼电力系统低频振荡的效果越好.

(2) 当 SVC 仅有电压控制时,对系统阻尼的影响很小;当 SVC 有电压和阻尼控制时,增大电压控制增益,反而会削弱阻尼控制的作用.

(3) 从提高系统阻尼的角度考虑,SVC 的最佳安装地点在输电线路中点附近.

Mechanic - electrical Mode Damping Analysis of a Single - machine - SVC - infinite - bus System

LIU Xian - lin, WANG Xin

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to understand the damping effectiveness of Static Var Compensator (SVC) more comprehensively, the linearized model of the single - machine - SVC - infinite - bus system has been established with the effect of damper windings of synchronous machine considered (extended model). Based on this model, Eigenvalues are calculated in different conditions and damping characteristics of SVC are discussed. The research indicates: SVC with damping control can provide positive damping to the power system; SVC with voltage control only is nearly nothing with damping. For SVC with voltage control and damping control together, the higher gain of voltage control will reduce the damping effectiveness. Considering the damping effectiveness, the middle of transmission line is the best installation site of SVC.

Key words: power system; small disturbance; model; SVC; damping

参考文献:

- [1] MATHUR R M, VARMA R. Thyristor - based FACTS controllers for electrical transmission system [M]. New York: IEEE Press, 2002.
- [2] HAMMAD A E. Analysis of power system stability enhancement by static var compensator [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1(4): 222 - 227.
- [3] PADIYAR K R, VARMA R K. Damping torque analysis of static var system controllers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 458 - 465.
- [4] DE OLIVEIRA S E M. Synchronizing and damping torque coefficients and power system steady - state stability as affected by static var compensators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 109 - 119.
- [5] ZHOU E Z. Application of static var compensators to increase power system damping [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(2): 655 - 661.
- [6] 王海风, 李乃湖, 陈 珩, 等. 静止无功补偿器阻尼电力系统振荡 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 190 - 195.
- [7] 刘宪林, 柳 焯, 姜和恭. 考虑阻尼绕组作用的单机无穷大系统线性化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 41 - 45.
- [8] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [9] 刘宪林, 李艳军. 计及水力系统详细模型的多机系统暂态稳定计算 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25(4): 90 - 93.