

# SVC 电压控制与阻尼调节间的相互作用机理

刘 隽<sup>1</sup>, 李兴源<sup>1</sup>, 汤广福<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川省 成都市 610065;  
2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Interrelations Between SVC Voltage Control and Damping Control

LIU Jun<sup>1</sup>, LI Xing-yuan<sup>1</sup>, TANG Guang-fu<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;  
2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Dynamic interaction between voltage and damping control loops of static var compensator (SVC) controller was studied by computing the electromagnetic torque in a single machine infinite-bus (SIMB) power system. It is revealed that voltage and damping control gains of SVC are interrelated in restriction of each other in order to get positive synchronous torque and damping torque simultaneously. The influence of SVC controller parameters on the system damping of the 36-bus system presented in PSASP program was also analyzed by the eigen-value theory. The conclusion is that the voltage control gain and time constant can impact the system damping, but damping control gain can only vary the damping characteristic of the power system for improving some low damp oscillation modes. The time domain simulation results validated the conclusion.

**KEY WORDS:** electromagnetic torque; damp; static var compensator; oscillation mode

**摘要:** 通过对含静止无功补偿器(static var compensator, SVC)的单机无穷大(single machine infinite-bus, SIMB)系统进行电磁转矩计算, 从理论上分析 SVC 的电压控制和阻尼调节之间的相互作用关系, 既要保证同时为系统提供正的同步转矩和阻尼转矩, 电压控制增益和阻尼控制增益的取值需满足一定的限制关系。通过对 PSASP 中 36 节点系统进行特征值分析, 从广义阻尼的角度分析 SVC 控制参数对系统阻尼的影响。分析结果表明, 电压控制增益和时间常数可改变系统的总阻尼, 阻尼控制增益只能对系统的阻尼特性进行重新配置, 从而改善系统的弱阻尼区间振荡模式。仿真验证了上述结论的有效性。

**基金项目:** 国家重点基础研究专项经费项目(2004CB217907); 国家自然科学基金项目(50595412)。

Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China(2004CB217907); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50595412).

**关键词:** 电磁转矩; 阻尼; 静止无功补偿器; 振荡模式

## 0 引言

随电网互联规模的增大, 功率振荡问题也越来越突出, 一般认为, 发电机的电磁转矩由同步转矩和阻尼转矩构成, 前者与发电机转子角偏移成比例, 通常与发电机的第 1 摆暂态稳定相关; 后者与发电机转速偏移成比例, 通常与系统中普遍存在的长时间、大范围的低频振荡即动态稳定性相关<sup>[1]</sup>。因此现在越来越多的研究都在关注如何提高系统的阻尼转矩。

文献[2]的研究证明弱联络线会大幅度降低互联系统的电磁阻尼, 从而降低了整个系统的动态稳定性, 通过增加系统的联络线数目, 可提高区域电力系统的电磁阻尼转矩, 进而提高系统的动态稳定。文献[3-5]从理论上证明了基于物理意义的阻尼转矩分析与基于数学意义上的系统特征值分析的等价性, 从而为阻尼转矩分析给出了更为严格的理论依据, 并给出了多机系统的阻尼转矩的计算方法。文献[6-9]经研究证明, 在自动电压调节器(auto-matic voltage regulator, AVR)的基础上附加转速、功角、功率, 或附加远方机组任意信号的复杂多变量励磁控制方式下, 系统的总阻尼保持守恒。由此, 产生疑问: 总阻尼守恒情况下, 系统的阻尼转矩是如何增加的, 会对其他振荡模式的阻尼产生何种影响, 对于这个问题文献[6]提到了阻尼竞争, 解释了在阻尼控制中, 若要增加某一模式的阻尼, 必然以牺牲其他模式的阻尼为代价。如果出现在机电模式和电磁模式之间的阻尼竞争, 就可能造成功角稳定与电压摇摆的效果难以兼顾。文献[10]中从传递函

数和阻尼转矩 2 个方面分析了 SVC 电压控制和阻尼控制之间的负相互作用存在。采用固定电压控制方式的 SVC 不会增加系统的阻尼转矩, 但可增加系统的同步转矩, 从而来提高系统的暂态稳定性<sup>[11-12]</sup>。SVC 若采用带附加阻尼控制的电压调制方式, 可改善系统的阻尼状态<sup>[11-15]</sup>。但从广义阻尼的角度出发, 即由小扰动分析理论可知, 系统的所有特征值之和为状态矩阵的对角线元素之和, 这恰为系统所有振荡模式的阻尼之和<sup>[16-20]</sup>; 而 SVC 控制模型的引入, 使整个系统的状态方程增加 1 阶, 如果增加的 1 阶在状态方程对角线元素上有贡献, 则可改变系统的总阻尼。

本文基于上述思想, 首先计算电磁转矩的量化表达式, 分析 SVC 的控制对其产生的影响及控制参数之间的相互限制关系。并从广义阻尼角度研究 SVC 电压控制和阻尼控制之间的相互作用, 揭示 SVC 在控制参数变化情况下的阻尼转移; 并验证 SVC 对弱阻尼区间振荡模式的效果, 最后进行仿真验证。

## 1 系统同步转矩和阻尼转矩的计算

本文采用文献[11]提出的方法计算系统的同步转矩和阻尼转矩系数。系统的电磁转矩可描述为

$$\Delta T_e(s) = K_e(s)\Delta\delta(s) \quad (1)$$

令  $s=j\omega$ , 代入式(1), 则有  $\Delta T_e(j\omega) = T_s(j\omega)\Delta\delta(j\omega) + T_d(j\omega)\Delta\omega(j\omega)$ 。由此得出系统的同步转矩系数和阻尼转矩系数分别为

$$T_s(j\omega) = \text{Re}[K_e(j\omega)] \quad (2)$$

$$T_d(j\omega) = (1/\omega)\text{Im}[K_e(j\omega)] \quad (3)$$

考虑图 1 所示的由 1 台同步发电机、1 台 SVC 组成的单机无穷大系统, SVC 加装在整个系统的电气中心, 相当于在母线 A 处并联了一个可变电抗, 即改变了整条线路的等效阻抗。

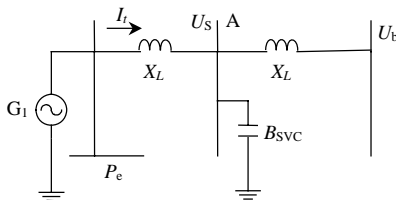


图 1 含 1 个 SVC 的单机无穷大系统简图

Fig. 1 Diagram of SMIB power system with SVC

发电机的 2 阶线性化模型(不考虑励磁系统的影响)为

$$\begin{cases} \Delta\dot{\delta} = \Delta\omega \\ \Delta\dot{\omega} = (-\Delta P_e - D\Delta\omega)/M \end{cases} \quad (4)$$

SVC 的 1 阶电压控制模型<sup>[16-17]</sup>为

$$\Delta B_{\text{SVC}} = K_{\text{SVC}}(-\Delta U_s + K_M \Delta\omega)/(1 + sT_{\text{SVC}}) \quad (5)$$

式中:  $K_{\text{SVC}}$ 是电压控制增益;  $T_{\text{SVC}}$ 是电压控制时间常数;  $K_M$ 是附加阻尼控制增益, 当  $K_M=0$ , 则为定电压控制方式。SVC 附加阻尼控制的输入可采用当地功率信号, 此信号可由发电机转速进行重构, 为分析问题方便, 假定了一个最简单的比例关系。

发电机的电磁转矩可表示为

$$T_e = \psi_d I_q + \psi_q I_d = E'_q I_q - (X'_d - X_q) I_d I_q \quad (6)$$

假定  $E'_q$  保持恒定, 将式(6)线性化为

$$\Delta T_e = (E'_q - (X'_d - X_q) I_{d0}) \Delta I_q - (X'_d - X_q) I_{q0} \Delta I_d \quad (7)$$

由图 1 所示电路可求得相关电流、电压的 dq 轴分量:

$$I_d = \frac{E'_q(1 - B_{\text{SVC}} X_L) - U_b \cos \delta}{(X'_d + X_L)(1 - B_{\text{SVC}} X_L) + X_L} \quad (8)$$

$$I_q = \frac{U_b \sin \delta}{(X_q + X_L)(1 - B_{\text{SVC}} X_L) + X_L} \quad (9)$$

$$U_{sd} = (X_q + X_L) I_q \quad (10)$$

$$U_{sq} = E'_q - I_d (X'_d + X_L) \quad (11)$$

线性化可得

$$\Delta I_d = k_{c1} \Delta\delta + k_{c2} \Delta B_{\text{SVC}} \quad (12)$$

$$\Delta I_q = k_{q1} \Delta\delta + k_{q2} \Delta B_{\text{SVC}} \quad (13)$$

$$\Delta U_s = k_{s1} \Delta\delta + k_{s2} \Delta B_{\text{SVC}} \quad (14)$$

式中:  $k_{c1} = \frac{\partial I_d}{\partial \delta} > 0$ ;  $k_{c2} = \frac{\partial I_d}{\partial B_{\text{SVC}}} < 0$ ;  $k_{q1} = \frac{\partial I_q}{\partial \delta} > 0$ ;

$k_{q2} = \frac{\partial I_q}{\partial B_{\text{SVC}}} > 0$ ;  $k_{s1} = \frac{U_{sd0}}{U_{s0}} (X_q + X_L) k_{q1} - \frac{U_{sq0}}{U_{s0}} (X'_d +$

$X_L) k_{c1} < 0$ ;  $k_{s2} = \frac{U_{sd0}}{U_{s0}} (X_q + X_L) k_{q2} - \frac{U_{sq0}}{U_{s0}} (X'_d +$

$X_L) k_{c2} > 0$ 。

结合式(12)、(13), 整理式(7)为

$$\Delta T_e = k_{v1} \Delta\delta + k_{v2} \Delta B_{\text{SVC}} \quad (15)$$

式中:  $k_{v1} = E'_q k_{q1} - (X'_d - X_q)(I_{d0} k_{q1} + I_{q0} k_{c1})$ ;  $k_{v2} = E'_q k_{q2} - (X'_d - X_q)(I_{d0} k_{q2} + I_{q0} k_{c2})$ ; 系数  $k_{v1}$ 、 $k_{v2}$  都是正实数,  $k_{v1}$  决定了系统初始的同步转矩; 而系统的电磁转矩的变化主要取决于 SVC 的控制方式。

如果采用定电压控制方式, 即  $K_M=0$ , 则结合式(5)、(14)可得

$$\Delta B_{\text{SVC}} = -K_{\text{SVC}} k_{s1} \Delta\delta / (1 + sT_{\text{SVC}} + K_{\text{SVC}} k_{s2}) \quad (16)$$

代入式(15)中, 有

$$\Delta T_e = (k_{v1} - k_{v2} \frac{K_{\text{SVC}} k_{s1}}{1 + sT_{\text{SVC}} + K_{\text{SVC}} k_{s2}}) \Delta\delta \quad (17)$$

根据式(2)、(3), 推导出同步转矩和阻尼转矩系数:

$$T_s = k_{v1} + \frac{-k_{v2}k_{s1}K_{SVC}(1 + K_{SVC}k_{s2})}{(1 + K_{SVC}k_{s2})^2 + T_{SVC}^2} \quad (18)$$

$$T_d = \frac{k_{v2}k_{s1}K_{SVC}T_{SVC}}{(1 + K_{SVC}k_{s2})^2 + T_{SVC}^2} \quad (19)$$

由于式(18)中的  $k_{s1} < 0$ ,  $k_{s2} > 0$ ,  $k_{v2} > 0$ , 且电压控制增益和时间常数都为正, 可知, SVC采用电压控制相比较SVC加入之前, 可为系统增加正的同步转矩; 由式(19)可知, 同时也会产生一个负的阻尼转矩, 只不过从量化的表达式来看, 由于  $T_{SVC}$  很小; 而且分母  $K_{SVC}$  的数量级比分子大, 随着  $K_{SVC}$  的增大, 产生的负的阻尼转矩系数减小, 则2条因素使增加的负阻尼转矩系数整个量值很小, 可忽略不计(尤其是当考虑系统中的阻尼系数  $D$  时, 这种作用表现得不明显)。

如果 SVC 采用带附加阻尼控制的电压调制方式, 即  $K_M \neq 0$ , 由式(5)、(14)可整理得到

$$\Delta B_{SVC} = \frac{-K_{SVC}k_{s1}\Delta\delta + K_{SVC}K_M\Delta\omega}{1 + sT_{SVC} + K_{SVC}k_{s2}}, \text{代入式(15)中可}$$

$$\text{得: } \Delta T_e' = \Delta T_e + \frac{k_{v2}K_{SVC}K_M}{1 + sT_{SVC} + K_{SVC}k_{s2}} s\Delta\delta。$$

同理可推导出系统的同步转矩系数和阻尼转矩系数分别为

$$T_s' = T_s + \frac{k_{v2}K_{SVC}K_M T_{SVC}}{(1 + K_{SVC}k_{s2})^2 + T_{SVC}^2} \quad (20)$$

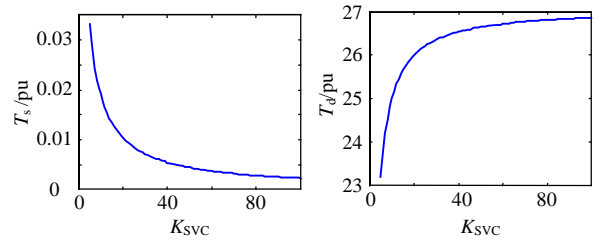
$$\text{式中 } dT_s = \frac{k_{v2}K_{SVC}K_M T_{SVC}}{(1 + K_{SVC}k_{s2})^2 + T_{SVC}^2}。$$

$$T_d' = T_d + \frac{k_{v2}K_{SVC}K_M (K_{SVC}k_{s2} + 1)}{(1 + K_{SVC}k_{s2})^2 + T_{SVC}^2} \quad (21)$$

$$\text{式中 } dT_d = \frac{k_{v2}K_{SVC}K_M (K_{SVC}k_{s2} + 1)}{(1 + K_{SVC}k_{s2})^2 + T_{SVC}^2}。$$

式(20)、(21)中, 等式右侧第2项都大于0, 由此可发现, 当SVC采用附加阻尼控制时, 与电压控制相比, 附加产生了正的同步转矩增量  $dT_s$  和阻尼转矩增量  $dT_d$ 。当保持阻尼控制增益  $K_M$  不变, 改变电压控制增益  $K_{SVC}$  可得到同步转矩系数和阻尼转矩系数的变化规律, 具体如图2所示,  $K_{SVC}$  对2种附加转矩系数的作用是相反的。  $dT_s$  大于0, 但变化速度慢; 而  $dT_d$  为正, 增加速度较快。综合式(18)、(19), 可知叠加后, 系统的同步转矩和阻尼转矩随电压控制增益的增加而增加, 阻尼转矩的变化更为明显。

保持电压控制增益和时间常数不变, 改变阻尼

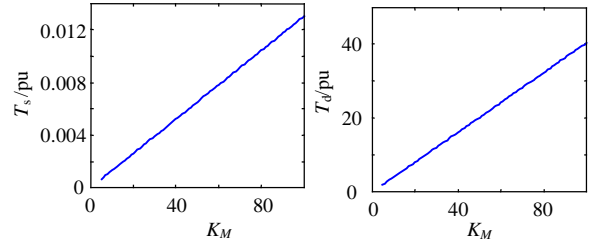


(a)  $T_s$  随  $K_{SVC}$  的变化规律 (b)  $T_d$  随  $K_{SVC}$  的变化规律

图2  $T_s$ 、 $T_d$  随  $K_{SVC}$  的变化规律

Fig. 2 Characteristic of  $T_s$  and  $T_d$  with  $K_{SVC}$  changed

控制增益的大小, 可得到  $dT_s$  与  $dT_d$  的变化量随  $K_M$  变化的规律, 如图3所示, 虽然两者都随  $K_M$  的增大而增大, 但前者增长速度远没有后者增长的快(参看纵坐标的数量级), 即阻尼控制增益  $K_M$  的变化对阻尼转矩影响较大。



(a)  $T_s$  随  $K_M$  的变化规律 (b)  $T_d$  随  $K_M$  的变化规律

图3  $T_s$ 、 $T_d$  随  $K_M$  的变化规律

Fig. 3 Characteristics of  $T_s$  and  $T_d$  with  $K_M$  changed

综合考虑式(18)~(21), 因为在2种控制方式下, 都能为系统提供正的同步转矩; 若需要为系统提供恒为正的阻尼转矩, 则需要保证式(21)恒为正, 由此可得出阻尼增益和电压控制增益的有效限制范围, 即

$$K_M > -\frac{k_{s1}T_{SVC}}{K_{SVC}k_{s2} + 1} \quad (22)$$

由此可见, 电压控制和阻尼控制的控制参数彼此制约, 其取值还与系统的运行方式有关。为显著改善系统的阻尼特性, 需要综合考虑电压控制增益  $K_{SVC}$  和时间常数  $T_{SVC}$  的取值。因此在实际的控制器设计时要考虑这个限制因素。

## 2 SVC 的控制参数对系统阻尼的影响

由第1节中的模型描述可得到系统状态方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{B}_{SVC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_{21}}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_{23}}{M} \\ \frac{K_{SVC}k_{s1}}{T_{SVC}} & -\frac{K_{SVC}K_M}{T_{SVC}} & -\frac{K_{SVC}k_{s2} + 1}{T_{SVC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta B_{SVC} \end{bmatrix} \quad (23)$$

由特征值分析可知对角线元素之和表示总阻尼大小, 即

$$\sum \sigma = -\frac{D}{M} - \frac{K_{SVC}k_{s2} + 1}{T_{SVC}} \quad (24)$$

因为  $K_{SVC} > 0$ ,  $k_{s2} > 0$ , 较之无 SVC 时, 参数  $K_{SVC}$  和  $K_M$  决定了总阻尼的变化;  $T_{SVC}$  越小, 总阻尼越大;  $K_{SVC}$  越大, 总阻尼越大。从状态方程和式(13) 可发现附加阻尼控制增益  $K_M$  不会影响系统的总阻尼大小, 只是对非对角线元素产生影响, 合理配置  $K_M$  的大小可改善系统的极点配置及阻尼协调的能力。

以中国电力科学研究院综合程序(PSASP)中 36 节点系统为例, SVC 加在 500kV 联络线母线 11 上, 如图 4 所示, 进行特征值分析计算。通过调节发电机 1 的出力, 及 SVC 相邻联络线受端负荷大小, 使系统出现一个区间振荡模式, 观察 SVC 在不同控制参数下的系统振荡模式特性。

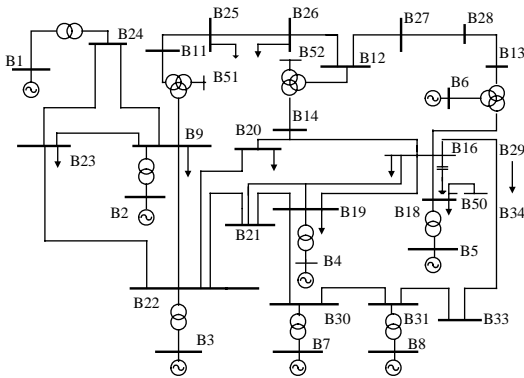


图 4 PSASP 中 36 节点系统  
Fig. 4 Power system with 36 buses in PSASP

同样可根据第 1 节得到的  $K_{SVC}$  和  $K_M$  的限制范围进行取值, 涉及参数的具体意义见式(14), 可通过对系统状态方程进行线性化来求得。

(1)  $K_M = 0$ , 保持  $K_{SVC} = 15$ , 改变  $T_{SVC}$ , 算出系统所有的特征值并与加入 SVC 之前的计算结果进行比较, 这里只列出弱阻尼区间振荡模式的变化情况, 如表 1 所示, 其中广义阻尼即为所有特征值实部之和。

由表 1 可见, 虽然系统广义阻尼随时间常数的

表 1 不同时间常数下系统振荡特性  
Tab. 1 Oscillation characteristics of different time constants

$T_{SVC}/s$	特征值(弱阻尼模式)	阻尼比/pu	广义阻尼/pu
无 SVC	-0.001 588+j4.807 065	0.033	-759.255
0.5	-0.001 616+j4.805 121	0.033 6	-1 031.73
0.1	-0.001 616+j4.805 121	0.033 6	-1 036.23
0.01	-0.001 616+j4.805 121	0.033 6	-1 123.43
0.001	-0.001 616+j4.805 121	0.033 6	-2 023.73

降低而增加, 但由于  $K_M = 0$ , 系统的低频振荡模式没有得到改善。

(2)  $K_M = 5$ , 保持  $T_{SVC} = 0.01$ , 改变  $K_{SVC}$ , 特征值的具体情况如表 2 所示。

表 2 不同电压增益下的系统振荡特性  
Tab. 2 Oscillation characteristics of different voltage gain

$K_{SVC}$	特征值(弱阻尼模式)	阻尼比/pu	广义阻尼/pu
无 SVC	-0.001 588+j4.807 065	0.033 0	-759.255
15	-0.003 735+j4.803 437	0.077 8	-1 126.61
25	-0.005 323+j4.802 330	0.110 8	-1 131.36
50	-0.009 975+j4.799 740	0.207 8	-1 139.80

可见随着电压增益  $K_{SVC}$  的增加, 广义阻尼逐渐增加, 这和式(24)分析得到的结论是一致的; 而且随  $K_{SVC}$  的增加, 系统低频振荡模式的阻尼比有了显著的增加。

(3) 保持  $K_{SVC} = 15$ ,  $T_{SVC} = 0.01$  不变, 改变  $K_M$ , 特征值的具体情况如表 3 所示。

表 3 不同阻尼增益下的系统振荡模式特性

Tab. 3 Oscillation characteristics of different damping gain

$K_M$	特征值(弱阻尼模式)	阻尼比/pu	广义阻尼/pu
无 SVC	-0.001 588+j4.807 065	0.033 0	-759.255
5	-0.003 735+j4.803 437	0.077 8	-1 123.43
15	-0.008 962+j4.800 231	0.186 7	-1 123.43
25	-0.015 722+j4.797 601	0.327 7	-1 123.43
50	-0.039 944+j4.798 621	0.832 4	-1 123.43

由表 3 可看出,  $K_M$  的增加显著改善了弱区间振荡模式的阻尼比, 但系统的总阻尼不变。

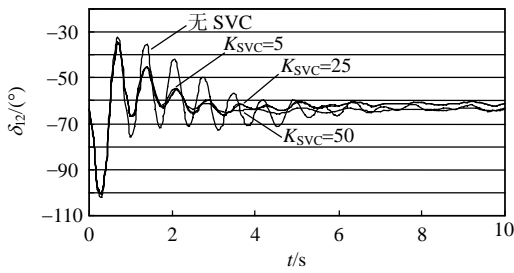
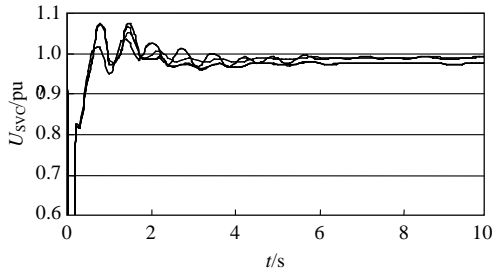
由此可见, 阻尼控制的加入不会改变系统的广义阻尼; 但对系统关键振荡模式的阻尼贡献随着阻尼控制增益  $K_M$  的增加而增加, 这是因为系统的阻尼转矩随着  $K_M$  的增加而增加。若想显著改善系统的阻尼特性,  $K_M$  的取值还要综合考虑式(22)所示的限制关系。

### 3 仿真实验

对所采用的 36 节点系统, 设定 SVC 安装在母线 11 处, 安装出口处发生了时间为 100 ms 的三相短路接地故障。

SVC 采用带附加阻尼控制的电压调制策略, 保持阻尼控制增益  $K_M = 25$  不变, 改变电压控制增益  $K_{SVC}$ , 令其分别为 5、25、50, 来观察系统的动态特性, 图 5、6 分别为发电机功角  $\delta_{12}$  与 SVC 母线电压  $U_{SVC}$  的变化曲线。

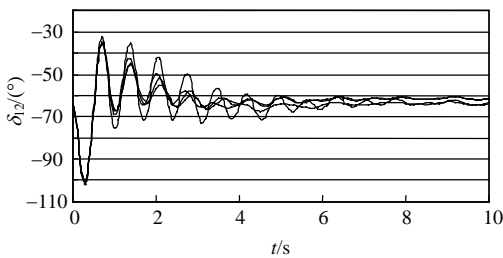
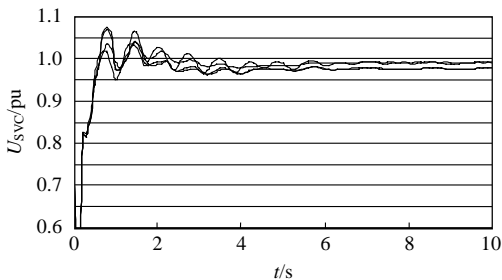
由图 5、6 可见, 随  $K_{SVC}$  的增加, 发电机功角曲线的阻尼效果增加, 这和第 1 节分析得到的结论

图5 改变 $K_{SVC}$ 的发电机功角曲线Fig. 5 Power angle curves with  $K_{SVC}$  changed图6 改变 $K_{SVC}$ 的SVC母线电压曲线Fig. 6 SVC bus voltage curves with  $K_{SVC}$  changed

一致, 即 $K_{SVC}$ 增加, 系统的阻尼转矩增加; 但电压曲线在恢复过程的初期出现了明显的超调现象, 恰恰是 $K_{SVC}$ 最小时, 电压控制效果最好, 即此时对应的同步转矩增加的最多。可见 $K_{SVC}$ 的取值大小对阻尼转矩和同步转矩的作用是相反的。

然后, 保持 $K_{SVC}=20$ 不变, 改变阻尼控制增益 $K_M$ , 分别为5、25、50, 系统在上述参数作用下的动态性能如图7、8所示。

由图7、8可发现, 虽然 $K_{SVC}$ 不变, 系统的总阻尼不变; 但随 $K_M$ 的增加, 系统的同步转矩和阻尼转矩都增大, 所以发电机2的功角特性和电压特

图7 改变 $K_M$ 的发电机功角曲线Fig. 7 Power angle curves with  $K_M$  changed图8 改变 $K_M$ 的SVC母线电压曲线Fig. 8 SVC bus voltage curves with  $K_M$  changed

性都有所改善。

## 4 结论

(1) 若要保证 SVC 的电压控制效果和阻尼控制效果, 需要合理选择控制参数的值。本文通过电磁转矩的计算, 得出了可同时得到正的同步转矩和阻尼转矩的控制增益取值范围。此法可用于多机系统的控制中。

(2) SVC 同时采用电压控制和阻尼控制, 整体上可增加系统的同步转矩和阻尼转矩; 而阻尼转矩随电压控制增益和阻尼控制增益变化而改变的更为明显。

(3) 调节 SVC 的电压控制增益和时间常数可改变系统的总阻尼; 改变阻尼控制增益可配置系统的阻尼分配, 有效改善区间振荡模式。

上述分析为实际工程中的 SVC 电压控制与阻尼控制的参数协调提供了理论分析依据, 具体量化的参数关系和实际装置的容量与具体现场运行情况有关。

## 参考文献

- [1] Kundur P, Paserba J, Ajarapu V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(3): 1387-1401.
- [2] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.  
Yu Yixin, Li Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11(in Chinese).
- [3] Swift F J, Wang H F. The connection between modal analysis and electric torque analysis in studying the oscillation stability of multi-machine power systems[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1997, 19(5): 321-330.
- [4] Shaltout A A, Feilat A R A. Damping and synchronizing torque computation in multimachine power systems[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1992, 7(1): 280-286.
- [5] Feilat E A, Younan N, Grzybowski S. Estimating the synchronizing and damping torque coefficients using Kalman filtering[J]. Electric Power Systems Research, 1999, 52(1): 145-149.
- [6] 郝正航, 陈卓, 戴培培, 等. 多机系统多变量励磁控制下的阻尼守恒阻尼竞争与阻尼协调[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(4): 39-42.  
Hao Zhenghang, Chen Zhuo, Dai Peipei, et al. Damping competition and damping coordination of additional excitation control in multi-machine power systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25(4): 39-42(in Chinese).
- [7] 杨浩, 文劲宇, 李刚, 等. 多功能柔性功率调节器运行特性的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 19-24.  
Yang Hao, Wen Jinyu, Li Gang, et al. Investigation on operation characteristics of multi-functional flexible power conditioner

- [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 19-24(in Chinese).
- [8] 李刚, 程时杰, 文劲宇, 等. 利用多功能柔性功率调节器提高电力系统稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 1-6.  
Li Gang, Cheng Shijie, Wen Jinyu, et al. Power system stability enhancement by the flexible power conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 1-6(in Chinese).
- [9] 赵书强, 常鲜戎, 贺仁睦, 等. PSS 控制过程中的借阻尼现象与负阻尼效应[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 7-11.  
Zhao Shuqiang, Chang Xianrong, He Renmu, et al. Borrow damping phenomena and negative damping effect of PSS control [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 7-11(in Chinese).
- [10] Wang H F. Interaction analysis and co-ordination of SVC voltage and damping control[C]. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, London, 2000.
- [11] Parniani M, Iravani M R. Voltage control stability and dynamic interaction phenomena of static var compensators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1592-1597.
- [12] Barocio E, Messina A R. Analysis of nonlinear modal interaction in stressed power systems with SVCs[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA, 2002.
- [13] You R, Nehrir M H. A systematic approach to controller design for SVC to enhance damping of power system oscillations[C]. IEEE Power Systems Conference and Exposition, New York, USA, 2004.
- [14] Mathur R M. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [15] Wang H F, Swift F J, Li M. A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations part II: Multi-machine power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1355-1362.
- [16] 王海风, 李乃湖, 陈珩, 等. 静止同步串联补偿器阻尼电力系统振荡(上)-理论分析[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 190-195.  
Wang Haifeng, Li Naihu, Chen Heng, et al. Static var compensator in damping power system oscillations part I: Theoretical analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 190-195(in Chinese).
- [17] 杜正春, 刘伟, 方万良, 等. 小干扰稳定性分析中一种关键特征值计算的稀疏实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 17-21.  
Du Zhengchun, Liu Wei, Fang Wanliang, et al. A sparse method for the calculation of critical eigenvalue in small signal stability analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 17-21(in Chinese).
- [18] 杜正春, 刘伟, 方万良, 等. 小干扰稳定性分析中按阻尼比递增的关键特征值子集计算[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 7-12.  
Du Zhengchun, Liu Wei, Fang Wanliang, et al. Calculation of critical eigenvalues with increasing damping ratios in small signal stability analysis[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 7-12(in Chinese).
- [19] Oliveira S E M. Synchronizing and damping torque coefficients and power system steady-state stability as affected by static var compensators[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1994, 9(1): 109-119.
- [20] 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 supplementary damping control using direct neural dynamic programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 8-12(in Chinese).

收稿日期: 2007-09-18。

作者简介:

刘 隽(1979—), 女, 博士研究生, 从事电力系统稳定和控制及 FACTS 在电力系统应用等方面的研究工作, jiaqi1018-79@163.com;

李兴源(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作;

汤广福(1966—), 男, 教授级高工, 中国电力科学院电力电子应用技术研究所所长, 从事 FACTS 及 HVDC 相关技术的研究。

(编辑 谷 子)