

文章编号: 1000-8152(2010)01-0047-06

## 包含SVC和非线性负荷的电力系统耗散实现与控制

刘艳红, 宋伟华, 王 杰

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 采用Hamilton函数方法研究了包含静止无功补偿器(SVC)和非线性负荷的电力系统的反馈控制问题. 首先建立了系统的非线性微分代数方程模型, 通过预置状态反馈完成了耗散Hamilton实现. 然后利用该耗散实现结构, 通过阻尼注入方式设计了基于能量的SVC非线性控制器. 本文所设计的控制器结构简单, 物理意义明确. 仿真结果表明该控制器能有效提高电力系统的暂态稳定性.

**关键词:** Hamilton函数方法; 静止无功补偿器; 电力系统; 预置反馈控制; 暂态稳定

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Dissipative Hamiltonian realization and feedback control of power systems with SVC and nonlinear loads

LIU Yan-hong, SONG Wei-hua, WANG Jie

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

**Abstract:** Using the Hamiltonian function method, this paper investigates the feedback control of power systems with static var compensator(SVC) and nonlinear loads. First, based on the nonlinear differential algebraic model of power system, a dissipative Hamiltonian realization is proposed via pre-feedback control. Then, by making use of the Hamiltonian realization structure, an energy-based SVC controller is constructed by the means of damping injection. The proposed controller has the advantage of simple structure and clear physical meaning. Simulation result shows that the control scheme can effectively improve the transient stability of the power system.

**Key words:** Hamiltonian function method; static var compensator; power systems; pre-feedback control; transient stability

### 1 引言(Introduction)

作为一种有效的电压支撑设备, 静止无功补偿器(static var compensator, SVC)在电力系统中得到了越来越广泛的应用. 如何通过先进控制手段更好地发挥SVC在电力系统稳定控制中的作用已成为重要的研究内容<sup>[1~3]</sup>. 文献[4~9]分别基于反馈线性化、非线性PID、backstepping等方法研究了包含SVC装置的电力系统控制问题, 取得了良好的控制效果. 但上述研究中采用的都是非线性微分方程模型, 该模型是在恒阻抗负荷条件下通过消去非线性微分代数系统模型中母线电压幅值和相位等代数变量转化而来的, 不能考虑更具实际意义的非线性负荷的影响.

考虑到非线性负荷的影响, Su等将反馈线性化方法和Hamilton函数方法相结合, 基于非线性微分

代数系统模型设计了非线性SVC控制器<sup>[15]</sup>. Hamilton函数方法的突出优点在于能够充分利用系统内在的结构特点完成控制器设计, 而且所设计的控制器结构简单、易于实现<sup>[10~14]</sup>, 但反馈线性化处理会造成系统内部结构的破坏. 注意到电力系统微分代数方程模型中代数约束方程表征的是系统内在的能量平衡特性, Liu等对非线性微分代数系统提出一种新的耗散Hamilton实现形式<sup>[16]</sup>, 讨论了常值耗散实现的条件和构造方法, 研究了包含非线性负荷的电力系统的耗散Hamilton实现问题<sup>[17]</sup>, 但包含SVC装置和非线性负荷的电力系统不满足常值耗散Hamilton实现条件, 如何通过反馈手段完成系统的耗散Hamilton实现并设计出简洁高效的反馈控制器, 还有待研究.

本文研究包含SVC装置和恒功率非线性负荷

收稿日期: 2008-11-10; 收修改稿日期: 2009-04-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60704004, 60974005); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20094101120008); 河南省杰出人才创新基金资助项目(074200510013); 河南省基础与前沿技术研究计划资助项目(092300410201).

的电力系统的耗散Hamilton实现和镇定控制问题. 首先通过预置状态反馈控制完成了系统的耗散Hamilton实现, 然后基于耗散Hamilton实现, 通过阻尼注入的方式设计了非线性SVC控制器. 由于充分利用了系统内在的结构特点, 本文所设计的控制器结构简单、物理意义明确、易于实现. 仿真结果证明该控制方案能有效提高电力系统的暂态稳定性.

## 2 包含SVC和非线性负荷的电力系统动态模型(Dynamic model of power systems with SVC and nonlinear loads)

考虑图1所示具有非线性负荷的单机无穷大输电系统, 在输电线路中接入了TCR-FC型SVC装置<sup>[15]</sup>. 设 $V_S \angle \theta_S = 1 \angle 0$ 为参考节点.

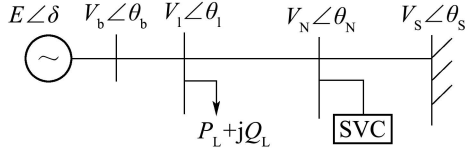


图1 具有SVC和非线性负荷的电力系统结构图

Fig. 1 Circuit configuration of power systems with SVC and nonlinear load

假定发电机暂态电势 $E'_q$ 和输入机械功率 $P_m$ 恒定, 忽略线路与SVC装置的电磁暂态过程, 则图1所示电力系统的控制数学模型可用下面非线性微分代数方程表示:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{H}(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{H}(P_m - P_e), \\ \dot{B}_L = \frac{1}{T_C}(-B_L + B_{L0} + K_C u_B), \\ 0 = g_b(\delta, \theta_b, V_b, \varphi_1, V_1, \theta_N, V_N), \\ 0 = h_b(\delta, \theta_b, V_b, \varphi_1, V_1, \theta_N, V_N), \\ 0 = g_1(\delta, \theta_b, V_b, \varphi_1, V_1, \theta_N, V_N), \\ 0 = h_1(\delta, \theta_b, V_b, \varphi_1, V_1, \theta_N, V_N), \\ 0 = g_N(\delta, \theta_b, V_b, \varphi_1, V_1, \theta_N, V_N), \\ 0 = h_N(\delta, \theta_b, V_b, \varphi_1, V_1, \theta_N, V_N). \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{x'_d - x_q}{2x'_d x_q} V_b^2 \sin 2(\delta - \theta_b) + \frac{1}{x'_d} E'_q V_b \sin(\delta - \theta_b), \\ g_b &= \frac{x'_d - x_q}{2x'_d x_q} V_b^2 \sin 2(\theta_b - \delta) + \frac{1}{x'_d} E'_q V_b \sin(\theta_b - \delta) + B_{bN} V_b V_N \sin(\theta_b - \theta_N) + B_{b1} V_b V_1 \sin(\theta_b - \theta_1), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_b &= \frac{x'_d + x_q}{2x'_d x_q} V_b^2 - \frac{x'_d - x_q}{2x'_d x_q} V_b^2 \cos 2(\theta_b - \delta) - \frac{1}{x'_d} E'_q V_b \cos(\delta - \theta_b) - B_{bN} V_b V_N \cos(\theta_b - \theta_N) - B_{bb} V_b^2 - B_{b1} V_b V_1 \cos(\theta_b - \theta_1), \\ g_1 &= B_{1b} V_1 V_b \sin(\theta_1 - \theta_b) - P_L + B_{1N} V_1 V_N \sin(\theta_1 - \theta_N), \\ h_1 &= -B_{11} V_1^2 - B_{1b} V_1 V_b \cos(\theta_1 - \theta_b) - B_{1N} V_1 V_N \cos(\theta_1 - \theta_N) - Q_L, \\ g_N &= B_{Nb} V_N V_b \sin(\theta_N - \theta_b) + B_{N1} V_N V_1 \sin(\theta_N - \theta_1) + B_{NS} V_N \sin \theta_N, \\ h_N &= -B_{NN} V_N^2 - B_{Nb} V_N V_b \cos(\theta_N - \theta_b) - B_{N1} V_N V_1 \cos(\theta_N - \theta_1) - B_{NS} V_N \cos \theta_N. \end{aligned}$$

式中:  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$ 为同步频率;  $P_m$ 为机械功率;  $H$ 和 $D$ 分别为惯性系统和阻尼系数;  $x_d$ 和 $x_q$ 分别为发电机 $d$ 轴和 $q$ 轴同步电抗;  $x'_d$ 为 $d$ 轴暂态电抗;  $T'_{d0}$ 为 $d$ 轴暂态开路时间常数;  $E'_q$ 为 $x'_d$ 后电势;  $P_L$ 和 $Q_L$ 分别为负荷有功和无功功率;

$$B_{NN} = -(B_{bN} + B_{N1} + B_C - B_L).$$

令 $x = [\delta, \omega, B_L]^T$ 为状态变量,  $z = [\theta_b, B_b, \theta_1, V_1, \theta_N, V_N]^T$ 为代数变量,

$$\begin{aligned} f(x, z) &= [f_1, f_2, f_3]^T, \\ f_1 &= \omega - \omega_0, \\ f_2 &= \frac{\omega_0}{H} [P_m - \frac{D}{\omega_0}(\omega - \omega_0) - P_e], \\ f_3 &= -\frac{1}{T_C} (B_L - B_{L0}), \\ \sigma &= [g_b, g_1, h_b, h_1, g_N, h_N]^T, \\ g(x, z) &= [0, 0, 1]^T, \end{aligned}$$

$u = \frac{K_C}{T_C} u_B$ 为控制输入, 则式(1)所示包含SVC和非线性负荷的电力系统控制数学模型可以表示为下面非线性微分代数系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, z) + g(x, z)u, \\ 0 = \sigma(x, z). \end{cases} \quad (2)$$

## 3 包含SVC和非线性负荷的电力系统耗散Hamilton实现(Dissipative Hamiltonian realization of the power systems with SVC and nonlinear loads)

基于Hamilton函数方法进行控制器设计的关键步骤是完成受控系统的耗散Hamilton实现. 本节首

先给出非线性微分代数系统耗散Hamilton实现的定义和条件, 然后通过预置反馈控制完成包含 SVC 和非线性负荷的电力系统的耗散Hamilton实现.

**定义 1**<sup>[16]</sup> 对非线性微分代数系统(2), 如果存在连续可微函数 $H(x, z)$ 使得系统可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = (J(x, z) - R(x, z)) \frac{\partial H(x, z)}{\partial x} + g(x, z)u, \\ 0 = \sigma(x, z) = \frac{\partial H(x, z)}{\partial z}. \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $J(x, z)$ 为反对称矩阵,  $R(x, z)$ 为半正定矩阵, 则系统(3)称为非线性微分代数系统(2)的耗散Hamilton实现. 相应地,  $H(x, z)$ 称为Hamilton函数,  $T(x, z) = J(x, z) - R(x, z)$ 为结构矩阵. 如果 $T(x, z)$ 中各元素为常数, 则称(3)为常值耗散Hamilton实现.

在基于Hamilton函数方法的电力系统控制研究中, 最常见的耗散Hamilton实现形式为常值耗散实现<sup>[10~14]</sup>. 根据庞加莱引理, 对非线性微分代数系统的常值耗散Hamilton实现, 有如下结论<sup>[17]</sup>:

**引理 1** 非线性微分代数系统(3)存在常值耗散Hamilton实现的条件是下面矩阵方程成立

$$\begin{cases} T^{-1} \frac{\partial f(x, z)}{\partial x} = \left( \frac{\partial f(x, z)}{\partial x} \right)^\top T^{-\top}, \\ T^{-1} \frac{\partial f(x, z)}{\partial z} = \left( \frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial x} \right)^\top, \\ \left( \frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z} \right)^\top = \frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z}. \end{cases} \quad (4)$$

并且常数矩阵 $T$ 可以分解为 $T = J - R$ , 其中 $J$ 为反对称矩阵,  $R$ 为半正定矩阵.

引理1表明非线性微分代数系统存在常值耗散实现时向量函数 $f(x, z)$ ,  $\sigma(x, z)$ 以及结构矩阵 $T$ 之间必须满足的关系. 根据引理1还可以选择可逆结构矩阵 $T$ , 并通过求解偏微分方程组

$$\begin{cases} T \frac{\partial H(x, z)}{\partial x} = f(x, z), \\ \frac{\partial H(x, z)}{\partial z} = \sigma(x, z) \end{cases} \quad (5)$$

得到相应的Hamilton函数, 完成系统的耗散Hamilton实现.

下面讨论包含SVC和非线性负荷的电力系统的常值耗散Hamilton实现问题. 首先, 直接验证可知

$$\frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z} = \left[ \frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z} \right]^\top.$$

考虑到对实际电力系统, 总有 $V_b, V_1, V_N > 0$ , 令

$$v_b = \ln V_b, v_1 = \ln V_1, v_N = \ln V_N.$$

令 $z = [\theta_b, v_b, \theta_1, v_1, \theta_N, v_N]^\top$ , 则有

$$\frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z} = \left[ \frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z} \right]^\top$$

成立. 又由于

$$\frac{\partial f(x, z)}{\partial z} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\omega_0}{H} a_{21} - \frac{\omega_0}{H} a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial x} = \begin{bmatrix} a_{21} & 0 & 0 \\ a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -e^{2v_N} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} a_{21} &= -\frac{x'_d - x_q}{x'_d x_q} e^{2v_b} \cos 2(\delta - \theta_b) - \frac{1}{x'_d} E'_q e^{v_b} \cos(\delta - \theta_b), \\ a_{22} &= \frac{x'_d - x_q}{x'_d x_q} e^{2v_b} \sin 2(\delta - \theta_b) + \frac{1}{x'_d} E'_q e^{v_b} \sin(\delta - \theta_b), \end{aligned}$$

故有

$$\frac{\partial f(x, z)}{\partial z} = T \left( \frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial x} \right)^\top, \quad (8)$$

其中

$$T = \begin{bmatrix} 0 & t_1 & 0 \\ -\frac{\omega_0}{H} & t_2 & 0 \\ 0 & t_3 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$t_1, t_2, t_3$ 为待定参数. 由于 $T$ 不可逆, 不能根据引理1直接完成系统的耗散Hamilton实现.

考虑下面预置状态反馈:

$$u_B = \frac{B_{L0}}{2T_C e^{2v_{N0}}} (e^{2v_N} - e^{2v_{N0}}) + \phi. \quad (10)$$

其中 $v_{N0} = \ln V_{N0}$ ,  $V_{N0}$ 为SVC安装点母线电压在稳态时的幅值.

在上述反馈控制作用下, 闭环系统成为

$$\begin{cases} \dot{x} = \tilde{f}(x, z) + g(x, z)\phi, \\ 0 = \sigma(x, z), \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$\begin{aligned} \tilde{f} &= [f_1, f_2, \tilde{f}_3]^\top, \\ \tilde{f}_3 &= -\frac{1}{T_C} [B_L + B_{L0} + \frac{B_{L0}}{2e^{2v_{N0}}} (e^{2v_N} - e^{2v_{N0}})]. \end{aligned}$$

直接计算可得

$$\frac{\partial \tilde{f}(x, z)}{\partial z} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\omega_0}{H} a_{21} - \frac{\omega_0}{H} a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{B_{L0}}{T_C e^{2v_{N0}}} e^{2v_N} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

且存在矩阵

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} 0 & t_1 & 0 \\ -\frac{\omega_0}{H} & t_2 & 0 \\ 0 & t_3 & -\frac{B_{L0}}{T_C e^{2v_{N0}}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

满足方程

$$\frac{\partial \tilde{f}(x, z)}{\partial z} = \tilde{T} \left( \frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial x} \right)^\top.$$

选择  $t_1 = \frac{\omega_0}{H}$ . 由于

$$\frac{\partial \tilde{f}(x, z)}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{\omega_0}{H} \frac{\partial P_e}{\partial \delta} - \frac{D}{H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_C} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

要使  $\tilde{T}$  可逆且  $\tilde{T}^{-1} \frac{\partial \tilde{f}(x, z)}{\partial x}$  为对称矩阵, 须有

$$t_2 = -\frac{D\omega_0}{H^2}, t_3 = 0.$$

至此得到了一个结构矩阵. 进一步, 矩阵  $\tilde{T}$  可分解为  $\tilde{T} = J - R$ , 其中

$$J = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_0}{H} & 0 \\ -\frac{\omega_0}{H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D\omega_0}{H^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{B_{L0}}{T_C e^{2v_{N0}}} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

显然  $J$  为反对称矩阵. 由于  $T_C$  为 SVC 装置的量测、控制、触发等环节的综合惯性时间常数, 故  $T_C > 0$ ,  $R$  为半正定矩阵.

对选定的结构矩阵  $\tilde{T}$ , 通过求解偏微分方程(5), 可以得到下面 Hamilton 函数

$$H(\delta, E'_q, \theta, v, \varphi) = \frac{H}{2\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 + P(\cdot), \quad (17)$$

其中  $\frac{H}{2\omega_0} (\omega - \omega_0)^2$  为系统动能,  $P(\cdot)$  为系统势能,

$$P(\cdot) =$$

$$\begin{aligned} & -P_m \delta - P_L \theta_1 - Q_L v_1 - \frac{1}{x'_d} E'_q e^{v_b} \cos(\delta - \theta_b) - \\ & \frac{x'_d - x_q}{4x_q x'_d} e^{2v_b} \cos 2(\delta - \theta_b) - \frac{1}{2} B_{bb} e^{2v_b} + \\ & \frac{x_d + x_q}{4x_q x'_d} e^{2v_b} - B_{bN} e^{v_b + v_N} \cos(\theta_b - \theta_N) - \\ & B_{b1} e^{v_b + v_1} \cos(\theta_b - \theta_1) - B_{1N} e^{v_1 + v_N} \cos(\theta_1 - \theta_N) - \\ & \frac{1}{2} B_{11} e^{2v_1} - \frac{1}{2} B_{1NN} e^{2v_N} - B_{NS} e^{v_N + v_S} \cos \theta_N + \\ & \frac{e^{2v_{N0}}}{B_{L0}} \left[ \frac{1}{2} B_L^2 - B_L B_{L0} - \frac{B_L B_{L0}}{2e^{2v_{N0}}} (e^{2v_N} - e^{2v_{N0}}) \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

至此完成了包含 SVC 和非线性负荷的电力系统的耗散 Hamilton 实现. 由于  $H(x, z)$  是电力系统中储存的总能量, 该函数在系统平衡点处取得局部极小<sup>[18]</sup>.

**注 1** 包含 SVC 和非线性负荷的电力系统的平衡点由  $\omega_0$ ,  $P_m$ ,  $B_{L0}$  以及发电机励磁确定. 预置状态反馈(10)不改变系统的平衡点.

#### 4 基于耗散 Hamilton 实现的 SVC 反馈控制 (Feedback stabilization of SVC based on the dissipative Hamiltonian realization)

对完成耗散 Hamilton 实现的包含 SVC 和非线性负荷的电力系统, 可以通过阻尼注入的方式方便地完成镇定控制器设计. 具体地, 可选择

$$\phi = -Kg^\top \frac{\partial H(x, z)}{\partial x} = \frac{KV_{N0}^2}{B_{L0}} [-B_L + B_{L0} + \frac{B_{L0}}{2V_{N0}^2} (V_N^2 - V_{N0}^2)], \quad (19)$$

其中  $K > 0$  为反馈增益.

选择  $\tilde{H}(x, z) = H(x, z) - H(x_0, z_0)$  作为系统的 Lyapunov 函数, 其中  $H(x_0, z_0)$  为平衡点处的函数值. 则在反馈控制(19)作用下, 沿闭环系统轨线有

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{H}}(x, z) &= \left( \frac{\partial H(x, z)}{\partial x} \right)^\top (J - R - gKg^\top) \frac{\partial H(x, z)}{\partial x} = \\ & -\frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 - \frac{V_{N0}^4}{B_{L0}} \left( \frac{B_{L0}}{T_R V_{N0}^2} + \frac{K}{T_C^2} \right) \\ & (-B_L + B_{L0} + \frac{B_{L0}}{2V_{N0}^2} (V_N^2 - V_{N0}^2))^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (20)$$

由于

$$\begin{aligned} S &= \{(x, z) : \dot{\tilde{H}}(x, z) = 0, \sigma(x, z) = 0\} = \\ & \{(x, z) : \omega = \omega_0, P_m = P_e, -B_L + B_{L0} + \\ & \frac{B_{L0}}{2V_{N0}^2} (V_N^2 - V_{N0}^2) = 0, \sigma(x, z) = 0\}, \end{aligned} \quad (21)$$

集合 $S$ 仅包含系统的平衡点. 根据非线性微分代数系统的LaSalle不变集原理<sup>[19]</sup>, 知闭环系统渐近稳定.

结合预置反馈控制(10)和控制律(19), 可以得到本文的主要结论:

**定理 1** 包含SVC和非线性负荷的电力系统的一个基于能量的镇定控制器为

$$u_B = \frac{B_{L0}}{2T_C V_{N0}^2} (V_N^2 - V_{N0}^2) + \frac{K V_{N0}^2}{B_{L0}} [-B_L + B_{L0} + \frac{B_{L0} V_N^2}{2V_{N0}^2} (V_N^2 - V_{N0}^2)]. \quad (22)$$

**注 2** 与文献[15]基于反馈线性化和Hamilton函数方法的SVC控制器相比, 控制器(22)结构更简单, 物理意义更明确, 更易实现.

### 5 仿真(Simulation)

为了验证控制效果, 基于MATLAB电力系统仿真平台对常规PID控制器和本文提出的控制器进行仿真比较研究. 在仿真中选择的发电机参数为:

$$x'_d = 0.296, x'_q = 0.474, \\ H = 3.7 \text{ s}, D = 0;$$

SVC参数为:

$$T_C = 0.1 \text{ s}, B_{L0} = 0.2;$$

反馈增益 $K = 20$ .

在仿真过程中, 假设发电机侧变压器高压侧在 $t = 0 \text{ s}$ 时发生三相短路故障,  $t = 0.2 \text{ s}$ 时故障切除, 仿真结果如图2和图3所示, 其中虚线为PID控制器作用下的响应曲线, 实线为本文基于能量的SVC非线性控制器作用下的响应曲线.

从仿真结果可以看出本文所设计的非线性SVC控制器能够更加有效地改善系统的功角稳定性和电压稳定性, 与常规PID控制器相比响应速度快, 超调量小, 能更好地提高电力系统的暂态稳定性.

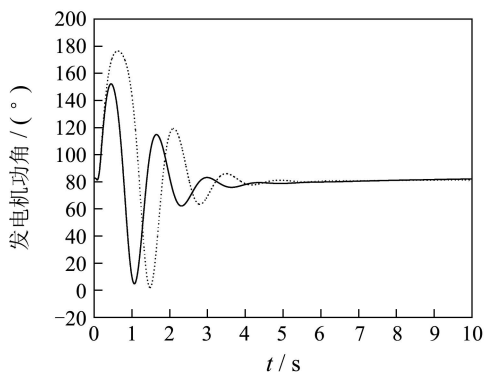


图 2 发电机功角响应曲线

Fig. 2 Responses of the rotor angle

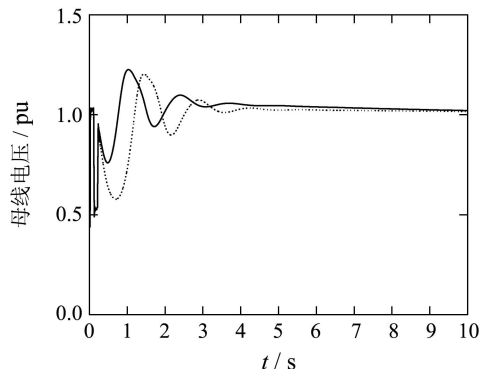


图 3 SVC安装处母线电压响应曲线

Fig. 3 Response of the SVC bus voltage

### 6 结论(Conclusion)

本文采用Hamilton函数方法研究了包含SVC和非线性负荷的电力系统的非线性控制问题. 由于该系统的非线性微分代数方程模型不满足常值耗散Hamilton实现条件, 首先通过预置状态反馈控制完成系统的耗散实现, 然后基于耗散实现设计了SVC装置的非线性控制器. 本文所设计的控制器结构简单, 物理意义明确, 易于实现, 充分体现了Hamilton函数方法在复杂非线性系统控制器设计中的优点, 具有重要的工程应用价值.

### 参考文献(References):

- [1] 卢强, 郑健超, 薛禹胜. 面向21世纪的电力新理论与新技术[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 5-10. (LU Qiang, ZHENG Jianchao, XUE Yusheng. New theories and techniques of power systems facing the new century[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(1): 5-10.)
- [2] 周孝信, 郭剑波, 胡学浩. 提高交流500 kV线路输电能力的实用化技术和措施[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 1-6. (ZHOU Xiaoxin, GUO Jianbo, HU Xuehao. Engineering technologies and measures for improving the transmitting capability of 500 kV transmission lines[J]. *Power System Technology*, 2001, 25(3): 1-6.)
- [3] 何大愚. 21世纪中的四项重大电网技术及其相关关系的发展展望[J]. 电网技术, 1997, 21(11): 16-22. (HE Dayu. Prospects of four important power system technology and its mutualities in 21 century[J]. *Power System Technology*, 1997, 21(11): 16-22.)
- [4] 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.)
- [5] WANG Y, CHEN H, ZHOU R. A nonlinear controller design for SVC to improve power system voltage stability[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2000, 22: 463-470.
- [6] 邱宇, 陈学允. 用于静止无功补偿器的非线性PID控制器[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 41-44. (QIU Yu, CHEN Xueyun. The new nonlinear PID controller for SVC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(11): 41-44.)

- [7] WANG J J, FU C, ZHANG Y. SVC control system based on instantaneous reactive power theory and fuzzy PID[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(4): 1658 – 1665.
- [8] ALI K, ALI F, MUHAMMAD A. On an SVC backstepping damping nonlinear controller design for power[C] // *Proceedings of 2007 iREP Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control-VII, Revitalizing Operational Reliability*, Charleston, SC, USA: [l.n.], 2007: 19 – 24.
- [9] ZHOU E Z. Application of static var compensators to increase power system damping[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, PWRS-8: 655 – 661.
- [10] ORTEGA R, VAN DER SCHAFT A J, MASCHKE B, et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems[J]. *Automatica*, 2002, 38(4): 585 – 596.
- [11] XI Z R, CHENG D Z, LU Q, et al. Nonlinear decentralized controller design for multimachine power systems using Hamiltonian function method[J]. *Automatica*, 2002, 38(3): 527 – 534.
- [12] XI Z R, CHENG D Z. Passivity-based stabilization and H control of the Hamiltonian control systems with dissipation and its application to power systems[J]. *International Journal of Control*, 2000, 73(18): 1686 – 1691.
- [13] WANG Y Z, CHENG D Z, LI C W, et al. Dissipative Hamiltonian realization and energy-based L2 disturbance attenuation control of multi-machine power systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(8): 1428 – 1433.
- [14] WANG Y Z, CHENG D Z, LIU Y H, et al. Adaptive  $H_\infty$  excitation control of multimachine power systems via the Hamiltonian function method[J]. *International Journal of Control*, 2004, 77(4): 336 – 350.
- [15] SU J, CHEN C. Static var compensator control for power systems with nonlinear loads[J]. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2004, 151(1): 78 – 82.
- [16] LIU Y H, LI C W, WU R B. Feedback control of nonlinear differential algebraic systems using Hamiltonian function method[J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2006, 49(4): 436 – 445.
- [17] LIU Y H, LI J Y, LI C W. Dissipative Hamiltonian realization of multi-machine multi-load power systems[C] // *Proceedings of 16th IEEE International Conference on Control Applications*, Singapore, 2007: 940 – 945.
- [18] 刘筌, 汪静. 电力系统暂态稳定的能量函数分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.
- [19] WANG H S, YUNG C F, CHANG F R.  $H_\infty$  control for nonlinear descriptor systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(11): 1919 – 1925.

#### 作者简介:

刘艳红 (1970—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事非线性系统控制、微分代数系统控制及电力系统控制等方面的研究, E-mail: liuyh@zzu.edu.cn;

宋伟华 (1981—), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统非线性控制及其仿真研究, E-mail: houxi2000@163.com;

王杰 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能控制、网络信息安全等方面的研究, E-mail: wj@zzu.edu.cn.