

# 基于结构保持模型的多 SVC 协调控制

何 斌, 张秀彬

(上海交通大学电气工程系, 上海市 闵行区 200240)

## Coordinated Control for Multi-SVCs Based on Structure Preserving Model of Power System

HE Bin, ZHANG Xiu-bin

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

**ABSTRACT:** For the nonlinear differential algebraic system, this paper gives a new idea of generalized quasi Hamiltonian system and relevant control strategy based on the generalized Hamiltonian system theory. And this idea is applied to a structure preserving multimachine power system with static var compensators (SVC). Based on the structure of the system, a prefeedback method is used to transform the system into a quasi Hamiltonian system. Accordingly the coordinated control law of SVC is designed with the Hamiltonian function, which can not only be regarded as the transient energy function of structure preserving model with SVCs, but also have the properties of Lyapunov function. The Hamiltonian function has precise mathematical meaning and specific physical meaning. Simulation results demonstrate the proposed method is effective in enhancing the transient stability.

**KEY WORDS:** generalized Hamiltonian realization; structure preserving model; nonlinear differential algebraic system; static var compensator; multi-machine power system

**摘要:** 针对非线性微分代数系统, 在广义 Hamilton 系统理论的基础上, 提出广义拟 Hamilton 系统的概念及相关控制策略从而实现该系统的镇定, 并将其应用于含有多个 SVC 的结构保持多机电力系统中。根据系统结构, 通过预反馈的方法完成拟 Hamilton 实现。在此基础上设计了相应的 SVC 协调控制器。所得 Hamilton 函数不仅可以看作是含有 SVC 控制结构保持模型的暂态能量函数, 而且具有 Lyapunov 函数的特性, 既保证了数学上的严密性, 又有明确的物理意义。仿真结果说明所提方法对增强暂态稳定的有效性。

**关键词:** 广义 Hamilton 实现; 结构保持模型; 非线性微分代数系统; 静止无功补偿器; 多机电力系统

## 0 引言

在电力系统稳定控制研究中, 大多模型具有保持结构的复杂非线性微分代数模型<sup>[1-7]</sup>。在这类模型

中, 电力网络结构保持, 负载可以计入静态或动态特性, 发电机可以计入凸极效应。因此研究应用于非线性微分代数系统(nonlinear differential-algebraic system, NDAS)控制设计与实现的方法很必要<sup>[8-15]</sup>。文献[10]提出了微分代数系统中Hamilton系统的定义及简单控制方法。但由于函数矩阵逆的存在, 其Hamilton实现很困难, 励磁控制也只是利用了其特殊的情况。本文为减小微分代数系统中Hamilton实现的难度, 提出拟Hamilton系统的概念和相应的控制策略, 用本文的拟Hamilton系统同样可以得到文献[10]的励磁控制方法。

现有的SVC控制方法<sup>[16-19]</sup>大多针对单机无穷大系统, 并不考虑发电机间的相互连接, 很难将这些方法扩展到多机系统中。因此有必要研究在多机系统中多SVC的协调控制<sup>[20-21]</sup>, 以保证多机系统的稳定运行。本文利用拟Hamilton系统进行多机系统中的多SVC协调控制器设计。所得的Hamilton函数是结构保持模型下含有SVC控制效果的暂态能量函数。通过仿真说明所提方法的正确性与控制律对增强暂态稳定的有效性。

## 1 微分代数系统的拟 Hamilton 实现

考虑如下非线性微分代数系统:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\mathbf{u} \\ \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{f}: R^n \times R^l \rightarrow R^n$ ;  $\mathbf{g}: R^n \times R^l \rightarrow R^{n \times m}$ ;  $\boldsymbol{\sigma}: R^n \times R^l \rightarrow R^l$  为光滑映射;  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$  为状态(微分)向量;  $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_l)^T \in R^l$  为限制(代数)向量;  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T \in R^m$  为输入向量。

式(1)的匹配初始条件为  $(\mathbf{x}_0, \mathbf{z}_0)$  满足

$$\sigma(\mathbf{x}_0, \mathbf{z}_0) = 0 \quad (2)$$

假设  $\mathbf{f}$ 、 $\mathbf{g}$ 、 $\sigma$  在开环连通集  $\Omega \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^l$  上充分光滑，且  $\sigma$  对  $\mathbf{z}$  的 Jacobian 阵在  $\Omega$  上满秩：

$$\text{rank}[\partial_{\mathbf{z}}\sigma(\mathbf{x}, \mathbf{z})] = l, \forall (\mathbf{x}, \mathbf{z}) \in \Omega \quad (3)$$

其中， $\partial_{\mathbf{z}}\sigma(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \partial\sigma/\partial\mathbf{z}$ 。

系统在  $\Omega$  上有平衡点： $\exists(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*) \in \Omega$ ，满足

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*) = 0, \sigma(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*) = 0 \quad (4)$$

假设式(2)~(4)满足，并且存在一个  $C^\infty$  函数  $H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^l \rightarrow \mathbb{R}$ ，一个结构矩阵  $\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  和 2 个适当维的矩阵函数  $\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ 、 $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  在开集  $\Omega$  满足如下方程：

$$\begin{cases} \mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\partial_{\mathbf{x}}H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \\ \partial_{\mathbf{z}}H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\sigma(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\mathbf{g}^T\partial_{\mathbf{x}}H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \end{cases} \quad (5)$$

则式(1)可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\partial_{\mathbf{x}}H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\mathbf{u} \\ \partial_{\mathbf{z}}H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\sigma(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\mathbf{g}^T\partial_{\mathbf{x}}H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \\ \sigma(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中， $\partial_{\mathbf{x}}H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \left[ \frac{\partial H}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial H}{\partial x_n} \right]^T$ 。

式(6)称为广义拟 Hamilton 系统，函数  $H(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  称为式(6)的 Hamilton 函数，且如果  $\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  可以分解为  $\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) - \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ ，其中  $\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  是反对称矩阵， $\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  是半正定矩阵，则式(6)是式(1)的一个耗散拟 Hamilton 实现。如果  $\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  是一个正定矩阵，则式(6)称为式(1)的一个严格耗散拟 Hamilton 实现。

沿着耗散拟 Hamilton 系统式(6)的轨迹对 Hamilton 函数  $H(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  进行求导得

$$\begin{aligned} \dot{H}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = & -\frac{\partial^T H(\mathbf{x}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \frac{\partial H(\mathbf{x}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{x}} + \\ & \frac{\partial^T H(\mathbf{x}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) [\mathbf{u} + \mathbf{B}^T(\mathbf{x}, \mathbf{z})\dot{\mathbf{z}}] \end{aligned} \quad (7)$$

**定理 1** 假设式(2)~(4)满足，如果非线性微分代数系统式(1)有耗散拟 Hamilton 实现式(6)，且 Hamilton 函数  $H(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  在平衡点  $(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)$  有严格极小值，则系统式(1)在控制律式(8)下在平衡点  $(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)$  是渐进稳定的。

$$\mathbf{u} = -\mathbf{B}^T(\mathbf{x}, \mathbf{z})\dot{\mathbf{z}} - \mathbf{K}\mathbf{g}^T\partial_{\mathbf{x}}H(\mathbf{x}, \mathbf{z}), \mathbf{K} > 0 \quad (8)$$

证明：根据式(7)、(8)有

$$\dot{H}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = -\frac{\partial^T H(\mathbf{x}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{g}\mathbf{K}\mathbf{g}^T] \frac{\partial H(\mathbf{x}, \mathbf{z})}{\partial \mathbf{x}} \leq 0 \quad (9)$$

根据 Lyapunov 稳定性的定义，由假设条件知，函数  $H(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  对闭环系统式(1)、(8)而言是一个 Lyapunov 函数，且在控制律式(8)的作用下，系统在平衡点  $(\mathbf{x}^*, \mathbf{z}^*)$  处渐进稳定。

如果  $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 0$ ，则整个闭环系统可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) - \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\mathbf{K}\mathbf{g}^T(\mathbf{x}, \mathbf{z})]\partial_{\mathbf{x}}H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \\ \partial_{\mathbf{z}}H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\sigma(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \\ \sigma(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

这种形式与常微分系统的 Hamilton 形式相似<sup>[19]</sup>，而文献中的控制器设计就是利用了  $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 0$  时的  $\partial_{\mathbf{z}}H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{z})\sigma(\mathbf{x}, \mathbf{z})$ ，可见用本文提出的拟 Hamilton 同样可以得到相同的励磁控制器。

## 2 含有 SVC 的多机系统的耗散拟 Hamilton 实现

考虑一个含有  $n$  台发电机， $n+m+1$  个节点， $p(p < m)$  台 SVC 和非线性无功负载的电力系统模型<sup>[13]</sup>。发电机采用两阶模型，忽略转移电导的作用。用  $i$  或  $j=1, \dots, n$  表示发电机末节点， $n+1$  节点为平衡节点，用  $k$  或  $l=n+2, \dots, n+m+1$  表示负荷节点。SVC 装设在节点  $n+2$  到  $n+p+1$ 。 $\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_{ij}] = [j\mathbf{B}_{ij}]$  是节点导纳阵， $\mathbf{B}_{ij}$  为连接节点  $i$  和  $j$  的电纳。第  $i$  台发电机的内电压向量、末端点电压向量和第  $k$  个负荷节点的电压向量分别用  $E_{qi} \angle \delta_i$ 、 $U_i \angle \theta_i$ 、 $U_k \angle \phi_k$  表示。所有相位角均相对于平衡节点而言。

第  $k$  个负荷节点的有功和无功功率分别用  $P_k^d$  和  $Q_k^d$  表示。设有功功率为常数，无功功率可用该节点电压的非线性函数表示， $Q_k^d = Q_k^d(U_k)$ 。

第  $i$  台发电机的方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 & i = 1, \dots, n \\ M_i \dot{\omega}_i = \omega_0 [P_i^m - P_i^e - D_i(\omega_i - \omega_0) / \omega_0] \end{cases} \quad (11)$$

其中，

$$P_i^e = \frac{x'_{di} - x_{qi}}{2x_{qi}x'_{di}} U_i^2 \sin[2(\delta_i - \theta_i)] + \frac{1}{x'_{di}} E'_{qi} U_i \sin(\delta_i - \theta_i)$$

式中： $\omega_i$  为发电机角速度； $\omega_0 = 2\pi f_0$  为同步转速； $f_0$  为同步频率； $D_i$  为阻尼系数； $M_i$  为惯性常数； $x_{di}$ 、 $x_{qi}$  为发电机直轴和交轴同步电抗； $x'_{di}$  为直轴暂态电抗； $E'_{qi}$  为暂态电抗后的交轴电压； $P_i^m$  为机械功率为常数； $T'_{doi}$  为直轴暂态开路时间常数。

采用TCR-FC型SVC补偿装置,将SVC看成一个可控电抗器,第 $k$ 个节点的SVC模型用如下—阶惯性环节表示:

$$T_{Rk} \dot{B}_{Lk} = -B_{Lk} + B_{Lk0} + K_{Rk} u_{Rk}, \quad k = n+2, \dots, n+p+1 \quad (12)$$

式中:  $B_{Lk}$  为SVC 可调电感的电纳;  $B_{Lk0}$  为电纳  $B_{Lk}$  的初始值;  $T_{Rk}$  为SVC 的惯性时间常数;  $K_{Rk}$  为SVC 调节系统放大倍数;  $u_{Rk}$  为控制量;  $B_{Ck}$  为SVC 的固定电容电纳;  $B_{Ck} + B_{Lk}$  为SVC 的等值电纳。

在第 $i$ 个发电机节点( $i=1, \dots, n$ ), 有、无功功率平衡方程:

$$0 = g_i = \frac{x'_{di} - x_{qi}}{2x'_{di}x_{qi}} U_i^2 \sin[2(\delta_i - \theta_i)] + \frac{1}{x'_{di}} E'_{qi} U_i \sin(\delta_i - \theta_i) + \sum_{j \neq i}^{n+1} U_i U_j B_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i) + \sum_{k=n+2}^{n+m+1} U_i U_k B_{ik} \sin(\phi_k - \theta_i) \quad (13)$$

$$0 = h_i = -\frac{x'_{di} + x_{qi}}{2x'_{di}x_{qi}} U_i^2 + \frac{1}{x'_{di}} E'_{qi} U_i \cos(\theta_i - \delta_i) + \frac{x'_{di} - x_{qi}}{2x'_{di}x_{qi}} U_i^2 \cos[2(\theta_i - \delta_i)] + \sum_{j=1}^{n+1} U_i U_j B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + \sum_{k=n+2}^{n+m+1} U_i U_k B_{ik} \cos(\theta_i - \phi_k) \quad (14)$$

在第 $k$ ( $k = n+2, \dots, n+p+1$ )个负荷节点, 有、无功功率平衡方程:

$$0 = g_k = \sum_{i=1}^{n+1} U_i U_k B_{ik} \sin(\theta_i - \phi_k) + \sum_{l \neq k}^{n+m+1} U_k U_l B_{kl} \sin(\phi_l - \phi_k) - P_k^d \quad (15)$$

$$0 = h_k = (B_{kk} + B_{Ck} + B_{Lk}) U_k^2 + \sum_{i=1}^{n+1} U_k U_i B_{ki} \cos(\theta_i - \phi_k) + \sum_{l \neq k}^{n+m+1} U_k U_l B_{kl} \cos(\phi_l - \phi_k) - Q_k^d(U_k) \quad (16)$$

在第 $k$ ( $k = n+p+2, \dots, n+m+1$ )个负荷节点, 有、无功功率平衡方程:

$$0 = g_k = \sum_{i=1}^{n+1} U_i U_k B_{ik} \sin(\theta_i - \phi_k) + \sum_{l \neq k}^{n+m+1} U_k U_l B_{kl} \sin(\phi_l - \phi_k) - P_k^d \quad (17)$$

$$0 = h_k = B_{kk} U_k^2 + \sum_{i=1}^{n+1} U_k U_i B_{ki} \cos(\theta_i - \phi_k) + \sum_{l \neq k}^{n+m+1} U_k U_l B_{kl} \cos(\phi_l - \phi_k) - Q_k^d(U_k) \quad (18)$$

将整个系统用紧凑的向量形式表示:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ M \dot{\omega} = \omega_0 [P_m - P_e - D(\omega - \omega_0) / \omega_0] \\ T_R \dot{B}_L = -B_L + B_{L0} + K_R u_R \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\delta, E'_q, \theta, \varphi, U) \\ \mathbf{0} = \mathbf{h}(\delta, E'_q, \theta, \varphi, U) \end{cases} \quad (19)$$

由隐函数理论可知,为满足 $(\mathbf{g}, \mathbf{h})$ 对 $(\theta, \varphi, U)$ 的Jacobian 矩阵非奇异,假设将系统限制在某个邻域内,以此邻域内的点为初值的轨迹是光滑的。

上述系统并不满足拟Hamilton系统的结构,在此通过引入适当的预反馈完成拟Hamilton实现。基于式(19)的结构和拟Hamilton系统的定义,引入如下预反馈:

$$K_{Rk} u_{Rk} = (B_{Lk} - B_{L0k}) + T_{Rk} u_{2k} - \frac{K_{1k} - 1}{2} (U_k^2 - U_k^{*2}) - K_{2k} (B_{Lk} - B_{Lk}^*) \quad (20)$$

式中:  $K_{1k} > 1$ ;  $K_{2k}$  为正数;  $U_k^*$ 、 $B_{Lk}^*$  为工作点(平衡点)。

**定理2** 在预反馈控制律式(20)的作用下,非线性微分代数系统式(19)有耗散拟Hamilton实现。

证明:将式(20)带入式(19),有

$$\dot{x}_{1i} = (J_{1i} - R_{1i}) \psi_{1i} \quad (21)$$

$$\dot{x}_{2k} = -R_{2k} \psi_{2k}(B_{Lk}, U_k) + u_{2k} \quad (22)$$

其中,

$$x_{1i} = [\delta_i, \omega_i]^T; \quad x_{2k} = B_{Lk}; \quad \psi_{1i} = \begin{bmatrix} -(P_i^m - P_i^e) \\ M_i(\omega_i - \omega_0) \end{bmatrix};$$

$$J_{1i} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 / M_i \\ -\omega_0 / M_i & 0 \end{bmatrix}; \quad R_{1i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \bar{M}_i \end{bmatrix};$$

$$R_{2k} = 1 / T_{Rk}; \quad \bar{M}_i = M_i^{-2} D_i \omega_0;$$

$$\psi_{2k}(B_{Lk}, U_k) = \frac{K_{1k} - 1}{2} (U_k^2 - U_k^{*2}) + K_{2k} (B_{Lk} - B_{Lk}^*).$$

重写式(21)和(22)有

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 - R_1 & \\ & -R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ G \end{bmatrix} u_2 \\ \mathbf{g}(x, z) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}(x, z) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (23)$$

紧凑写为

$$\begin{cases} \dot{x} = (J - R)\psi + G'u_2 \\ \sigma(x, z) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (24)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= [\mathbf{x}_{11}^T, \dots, \mathbf{x}_{1n}^T]^T; \quad \mathbf{u}_2 = [u_{2(n+2)}, \dots, u_{2(n+p+1)}]^T; \\ \mathbf{x}_2 &= [x_{2(n+2)}, \dots, x_{2(n+p+1)}]^T; \quad \mathbf{z} = [\boldsymbol{\theta}^T, \boldsymbol{\varphi}^T, \mathbf{U}^T]^T; \\ \mathbf{J}_1 - \mathbf{R}_1 &= \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{11} - \mathbf{R}_{11} & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{J}_{1n} - \mathbf{R}_{1n} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{R}_2 &= \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{2(n+2)} & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{R}_{2(n+p+1)} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \mathbf{I}_{p \times p} \circ \end{aligned}$$

选择 Hamilton 函数为

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = H_1(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + H_2(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \quad (25)$$

其中,

$$\begin{aligned} H_1(\mathbf{x}, \mathbf{z}) &= \\ & \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{2\omega_0} (\omega_i - \omega_0)^2 - \sum_{i=1}^n P_i^m (\delta_i - \delta_i^*) - \\ & \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_{di}'} E_{qi}' [U_i \cos(\delta_i - \theta_i) - U_i^* \cos(\delta_i^* - \theta_i^*)] - \\ & \sum_{i=1}^n \frac{(x_{di}' - x_{qi})}{4x_{di}' x_{qi}'} \{U_i^2 \cos[2(\delta_i - \theta_i)] - \\ & U_i^{*2} \cos[2(\delta_i^* - \theta_i^*)]\} + \sum_{i=1}^n \frac{x_{di}' + x_{qi}'}{4x_{di}' x_{qi}'} (U_i^2 - U_i^{*2}) + \\ & \sum_{k=n+2}^{n+m+1} P_k^d (\phi_k - \phi_k^*) + \sum_{k=n+2}^{n+m+1} \int_{V_k^*}^{V_k} \frac{1}{U} Q_k^d(U) dU - \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} [U_i U_j B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - \\ & U_i^* U_j^* B_{ij} \cos(\theta_i^* - \theta_j^*)] - \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=n+2}^{n+m+1} [U_i U_k B_{ik} \cos(\theta_i - \phi_k) - \\ & U_i^* U_k^* B_{ik} \cos(\theta_i^* - \phi_k^*)] - \\ & \frac{1}{2} \sum_{k=n+2}^{n+m+1} \sum_{l=n+2}^{n+m+1} [U_k U_l B_{kl} \cos(\phi_k - \phi_l) - \\ & U_k^* U_l^* B_{kl} \cos(\phi_k^* - \phi_l^*)] - \\ & \frac{1}{2} \sum_{k=n+2}^{n+p+1} (B_{Ck} + B_{Lk}^*) (U_k^2 - U_k^{*2}); \end{aligned}$$

$$H_2(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \sum_{k=n+2}^{n+p+1} \frac{1}{2K_{2k}} \psi_{2k}^2 + \sum_{k=n+2}^{n+p+1} \frac{(K_{1k} - 1)}{8K_{2k}} (U_k^2 - U_k^{*2})^2.$$

通过验证可知条件 Hamilton 函数  $H(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  满足式(2)。

$$\begin{cases} (\mathbf{J} - \mathbf{R}) \partial_x H = \mathbf{f} \\ \partial_z H = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \mathbf{G}^T \partial_x H \end{cases} \quad (26)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) &= - \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n+m} & & & \\ & U_1^{-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & U_{n+m+1}^{-1} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) &= \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{(2n+m) \times 1} & \dots & \mathbf{O}_{(2n+m) \times 1} \\ \frac{K_{11} U_{n+2}}{K_{21}} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{K_{1p} U_{n+p+1}}{K_{2p}} \\ \mathbf{O}_{(m-p) \times 1} & \dots & \mathbf{O}_{(m-p) \times 1} \end{bmatrix} \circ \end{aligned}$$

因此系统式(19)可以转化为耗散拟 Hamilton 函数。

Hamilton 函数中  $H_1(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  其实就是暂态分析直接法中不含 SVC 时的暂态能量函数, 平衡点处的能量函数在其稳定邻域内是严格极小的。而  $H_2(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  代表了由于 SVC 的动态产生的暂态能量函数, 它在稳定点达到最小值零。由此可知 Hamilton 函数  $H(\mathbf{x}, \mathbf{z})$  可以看作是含有 SVC 控制的暂态能量函数, 在平衡点处是有严格极小值的。但由于未考虑到 SVC 的容量限制, 因此尚不能用于暂态稳定的分析。

根据定理 1, 可得到控制律

$$u_{2k} = -K_{3k} \psi_{2k} (B_{Lk}, U_k) - \frac{K_{1k}}{K_{2k}} U_k \dot{U}_k \quad (27)$$

其中,  $K_{3k} > 0$ , 使系统式(19)渐进稳定。

### 3 仿真分析

为验证设计控制律的有效性, 仿真采用经典的四机系统, 如图 1 所示。

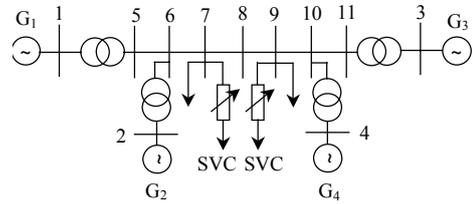


图 1 含有多 SVC 的四机系统  
Fig. 1 Four-machine power system with SVCs

有关的数据见文献[22], 定常阻尼系数取为  $D_i = 3, i = 1, 2, 3, 4$ , 为体现协调控制的效果, 采用常规的 PIDSVC 控制器作为比较对象。每个 SVC 的容量均设成  $\pm 100\text{Mvar}$ 。稳态时联络线传输功率为  $413\text{MW}$ 。节点 7 的稳态电压为  $0.9916\text{pu}$ , 节点 9

的稳态电压为 1.0027pu。

假设故障发生在节点 6 处,系统在 0.1s 发生三相短路故障,0.2s 故障消失。图 2 为发电机 1、2、3 相对于发电机 4 的功角差变化曲线,图 3、4 分别为节点 7 和 9 的电压变化曲线。

由于没有使用 PSS 给电力系统加入稳定阻尼,故障后系统的稳定主要依靠发电机的固有阻尼和 SVC 的控制。从图中可见,因为采用了多机系统 SVC 协调控制策略,相比 PID 方法,不仅电压的稳定效果得到了改善,而且发电机的功角稳定性也得到了相应的增强。协调控制是从多机系统整体上考虑系统的稳定,因此所得的控制律在稳定系统功角和电压方面有相对较好的性能。仿真的结果也说明控制策略式(27)对提高系统的暂态稳定和动态性能很有效。

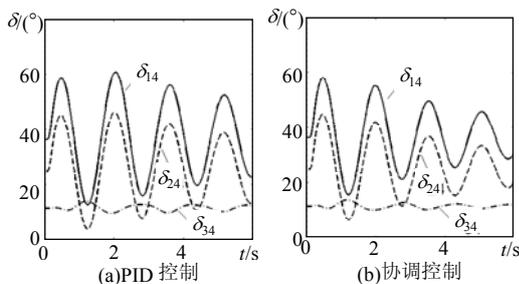


图 2 发电机功角响应曲线  
Fig. 2 Rotor angle response of the system

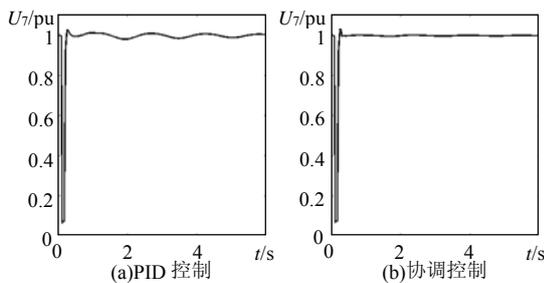


图 3 节点 7 的电压曲线  
Fig. 3 The voltage curve of bus 7

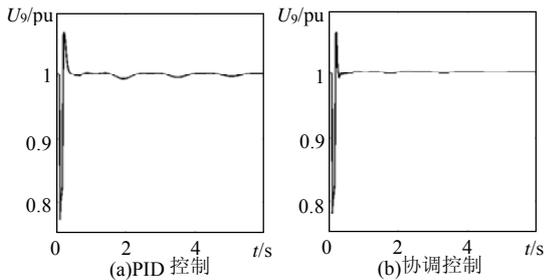


图 4 节点 9 的电压曲线  
Fig. 4 The voltage curve of bus 9

## 4 结论

提出拟 Hamilton 系统的概念和相关的控制策略,并将一个含有多 SVC 的结构保持模型下的多机系统转化为拟 Hamilton 系统,设计了多 SVC 的协调控制器,使 SVC 的设计不再拘泥于单机系统,而是从多机的角度,保证了系统的稳定性。仿真结果说明所提方法的正确性和控制律在提高系统暂态稳定及动态性能上的有效性。

## 参考文献

- [1] 徐光虎,王杰,陈陈,等. 基于微分代数模型的 AC/DC 系统非线性控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 53-57.  
Xu Guanghu, Wang Jie, Chen Chen, et al. Design of nonlinear controller for AC/DC power system based on differential algebraic models[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 53-57(in Chinese).
- [2] 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 CSEE, 2003, 23(12): 84-88(in Chinese).
- [3] 王杰,阮映琴,傅乐,等. 计及动态负荷的电力系统静止无功补偿器(SVC)与发电机励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 24-29.  
Wang Jie, Ruan Yingqin, Fu Le, et al. The nonlinear control of SVC and excitation of generators in power systems with dynamic loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 24-29(in Chinese).
- [4] Hashmani A A, Wang Youyi, Lie T T. Enhancement of power system transient stability using a nonlinear coordinated excitation and TCPS controller[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(3): 201-214.
- [5] Tsolas N A, Arapostathis A, Varaiya P P. A structure preserving energy function for power system transient stability analysis[J]. IEEE Transactions on circuits and systems, 1985, CAS-32 (10): 1041-1049.
- [6] Zou Y, Yin M H, Chiang H D. Theoretical foundation of the controlling UEP method for direct transient-stability analysis of network-preserving power system models[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundam. Theory Appl., 2003, 50 (10): 1324-1336.
- [7] 殷明慧,邹云. 电力系统结构保持模型相关不稳定平衡点方法的理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 32-37.  
Yin Minghui, Zou Yun. The theoretical analysis of controlling UEP method in network structure preserving power system model [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 32-37(in Chinese).
- [8] Van Der Schaft A J. L<sub>2</sub>-gain and passivity techniques in nonlinear control[M]. Berlin: Springer-Verlag Press, 2000.
- [9] 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.
- [10] Escobar G, van der Schaft A J, Ortega R. A Hamilton viewpoint in the modeling of switching power converters[J]. Automatica, 1999, 35(3): 445-452.
- [11] Sun Y Z, Liu Q J, Song Y H, et al. Hamiltonian modeling and nonlinear disturbance attenuation control of TCSC for improving power system stability[J]. IEE Proc. -Control Theory Appl., 2002,

- 149(4): 278-284.
- [12] Wang Y, Cheng D, Li C, et al. Dissipative Hamiltonian realization and energy-based  $L_2$ -disturbance attenuation control of multimachine power systems [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 2003, 48 (8): 1428-1433.
- [13] 郝晋, 王杰, 陈陈, 等. 基于 Hamilton 系统理论的结构保持多机电力系统非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 6-12.  
Hao Hao Jin, Wang Jie, Chen Chen, et al. Nonlinear excitation control of multi-machine power system with structure preserving models based on Hamiltonian system Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 6-12(in Chinese).
- [14] 马进, 席在荣, 梅生伟, 等. 基于 Hamilton 能量理论的发电机气门与励磁非线性稳定控制器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 88-93.  
Ma Jin, Xi Zairong, Mei Shengwei, et al. Nonlinear stabilizing controller design for the steam-valving and excitation system based on Hamiltonian energy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 88-93(in Chinese).
- [15] Mei S, Shen T, Hu W, et al. Robust  $H_\infty$  control of a Hamiltonian system with uncertainty and its application to a multi-machine power system[J]. IEE Proc. -Control Theory Appl., 2005, 152(2): 202-210.
- [16] Su J, Chen C. Static Var compensator control for power systems with nonlinear loads[J]. IEE Proc. -Gener. Transm. Distrib., 2004, 151(1): 78-82.
- [17] 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(in Chinese).
- [18] 栗春, 姜齐荣, 王仲鸿. 增强系统阻尼并保证电压精度的 SVC 非线性控制器[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(6): 35-42.  
Li Chun, Jiang Qirong, Wang Zhonghong. Design of nonlinear controller for SVC to damp power system oscillations as well as regulate voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(6): 35-42(in Chinese).
- [19] 孙元章, 刘前进, 宋永华, 等. FACTS的PCH与自适应 $L_2$ 增益控制 (一) 理论篇[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 1-6.  
Sun Yuanzhang, Liu Qianjin, Song Yonghua, et al. PCH models of FACTS with adaptive  $L_2$ -gain control Part One Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 1-6(in Chinese).
- [20] 邹振宇, 江全元, 曹一家, 等. 基于规范形方法的多台 SVC 交互影响分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(8):12-17.  
Zou Zhengyu, Jiang Quanyuan, Cao Yijia, et al. Interaction analysis among multiple SVC controllers in power system based on normal form[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(8): 12-17(in Chinese).
- [21] 江全元, 邹振宇, 吴昊, 等. 基于相对增益矩阵原理的柔性交流输电系统控制器相互影响分析[J]. 中国电机工程学报, 25(11): 23-28.  
Jiang Quanyuan, Zou Zhenyu, Wu Hao, et al. Interaction analysis of FACTS controllers based on RGA principle[J]. Proceedings of the CSEE, 25(11): 23-28(in Chinese).
- [22] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

收稿日期: 2007-02-16。

作者简介:

何 斌(1980—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为耗散控制, 电力系统的稳定与控制, jackbh@sina.com;

张秀彬(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统的稳定与控制。

(编辑 王剑乔)