

文章编号: 1001-0920(2013)07-1099-04

发电机和静止无功补偿器鲁棒非线性协调控制

丁青青¹, 刘艳红², 汤洪海³

(1. 清华大学 电机系, 北京 100084; 2. 郑州大学 电气工程学院, 郑州 450001; 3. 国家电网公司, 北京 100031)

摘要: 采用 Hamilton 函数方法研究发电机励磁和静止无功补偿器(SVC)的鲁棒协调控制问题. 首先建立系统的不确定非线性微分代数系统控制数学模型; 然后通过预置状态反馈完成系统的耗散 Hamilton 实现, 并基于耗散实现设计鲁棒非线性协调控制器. 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: 电力系统; 静止无功补偿器; 非线性微分代数系统; Hamilton 函数方法; 鲁棒协调控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Coordinated robust nonlinear control of synchronous generator and static var compensator

DING Qing-qing¹, LIU Yan-hong², TANG Hong-hai³

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China. Correspondent: LIU Yan-hong, E-mail: liuyh@zzu.edu.cn)

Abstract: By using the Hamiltonian function method, the robust coordinated control of synchronous generator and static var compensator(SVC) is investigated. Firstly, an uncertain nonlinear differential algebraic equation model is proposed for the power system. Then, the dissipative Hamiltonian realization of the system is completed by means of the pre-feedback control. Finally, based on the obtained Hamiltonian realization, a robust coordinated controller is proposed. Simulation results show that the proposed coordinated robust controller can effectively improve the transient stability of the power system.

Key words: power systems; static var compensator; nonlinear differential algebraic systems; Hamiltonian function method; robust coordinated control

0 引言

电力是能源支柱产业, 电力系统的安全稳定运行对国民经济和社会发展具有重大意义. 研究表明, 发电机励磁控制和静止无功补偿器(SVC)是提高电力系统暂态稳定性, 改善电能质量的重要手段^[1-2]. 近年来, 多种非线性分析和控制方法, 如反馈线性化方法^[3]、神经网络控制^[4]和 Hamilton 函数方法^[5]等被应用于发电机励磁控制和静止无功补偿器的研究, 取得了良好的控制效果.

为了充分利用系统的内在结构特性, 基于能量的 Hamilton 函数方法在电力系统镇定和鲁棒控制中得到了广泛的应用^[6-7]. 对于包含恒功率非线性负荷的电力系统, 文献[8]将 Hamilton 函数方法与反馈线性化方法相结合, 研究了多机多负荷电力系统以及包含

SVC 的电力系统基于非线性微分代数模型的反馈控制问题; 文献[9]采用阻尼注入方法研究了 SVC 与发电机励磁的协调控制问题. 由于电力系统在运行过程中不可避免地受到外部扰动的影响, 如何基于系统内在结构特性完成鲁棒控制器设计还有待研究.

本文采用 Hamilton 函数方法对包含 SVC 的电力系统的鲁棒协调控制问题进行研究. 首先建立系统的不确定非线性微分代数控制数学模型; 然后通过预置反馈完成系统的耗散 Hamilton 实现, 并基于系统耗散实现设计鲁棒非线性协调控制器; 最后通过仿真结果验证了所提出的控制方案的有效性.

1 动态模型

考虑图 1 所示单机无穷大输电系统, 在输电线路中间接入 TCR-FC 型 SVC 装置. 选取无穷大母线作为

收稿日期: 2012-03-08; 修回日期: 2012-05-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60974005); 教育部博士点基金项目(20094101120008); 河南省基础与前沿技术研究计划项目(092300410201).

作者简介: 丁青青(1964—), 女, 副教授, 从事灵活电力系统分析与控制等研究; 刘艳红(1970—), 女, 副教授, 从事非线性系统控制及电力系统应用的研究.

参考节点, 即令 $V_S \angle \theta_S = 1 \angle 0$. 该电力系统的控制数学模型由发电机动态、SVC 动态和母线潮流平衡方程组成.

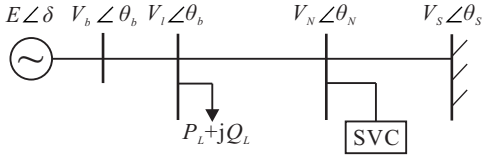


图 1 包含 SVC 的电力系统结构

1) 发电机和 SVC 动态方程为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{M}(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{M}(P_m - P_e) + \omega_1, \\ \dot{E}'_q = \phi(\cdot) + \frac{1}{T'_{d0}}E_{fd} + \omega_2, \\ \dot{B}_L = \frac{1}{T_C}(-B_L + B_{L0} + K_C u_B) + \omega_3. \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{x'_d - x_q}{2x_q x'_d} V_b^2 \sin(2(\delta - \theta_b)) + \\ &\quad \frac{1}{x'_d} E'_q V_b \sin(\delta - \theta_b), \\ \phi(\cdot) &= -\frac{x_d}{x'_d T'_{d0}} E'_q + \frac{x_d - x'_d}{x'_d T'_{d0}} V_b \cos(\delta - \theta_b). \end{aligned}$$

2) 同步电机机端母线和负荷母线需满足的功率平衡方程为

$$\begin{aligned} g_b &= \frac{x'_d - x_q}{2x_q x'_d} V_b^2 \sin(2(\theta_b - \delta)) + \\ &\quad \frac{1}{x'_d} E'_q V_b \sin(\theta_b - \delta) + B_{bN} V_b V_N \sin(\theta_b - \theta_N) + \\ &\quad B_{bl} V_b V_l \sin(\theta_b - \theta_l) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} h_b &= \frac{x'_d + x_q}{2x_q x'_d} V_b^2 - B_{bb} V_b^2 - \frac{1}{x'_d} E'_q V_b \cos(\delta - \theta_b) - \\ &\quad \frac{x'_d - x_q}{2x'_d x_q} V_b^2 \cos(2(\theta_b - \delta)) - B_{bN} V_b V_N \times \\ &\quad \cos(\theta_b - \theta_N) - B_{bl} V_b V_l \cos(\theta_b - \theta_l) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} g_l &= B_{lb} V_l V_b \sin(\theta_l - \theta_b) + \\ &\quad B_{lN} V_l V_N \sin(\theta_l - \theta_N) - P_L = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} h_l &= -B_{ll} V_l^2 - B_{lb} V_l V_b \cos(\theta_l - \theta_b) - \\ &\quad B_{lN} V_l V_N \cos(\theta_l - \theta_N) - Q_L = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} g_N &= B_{Nb} V_N V_b \sin(\theta_N - \theta_b) + \\ &\quad B_{Nl} V_N V_l \sin(\theta_N - \theta_l) + \\ &\quad B_{NS} V_N V_S \sin \theta_N = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} h_N &= -B_{NN} V_N^2 - B_{Nb} V_N V_b \cos(\theta_N - \theta_b) - \\ &\quad B_{Nl} V_N V_l \cos(\theta_N - \theta_l) - \\ &\quad B_{NS} V_N V_S \cos \theta_N = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

其中: ω_1 、 ω_2 和 ω_3 为机械功率、励磁回路和 SVC 调节回路有界扰动, 其他变量的定义参阅文献 [9].

令 $x = [\delta, \omega, E'_q, B_L]^\tau$ 为状态变量; $z = [\theta_b, V_b, \theta_l, V_l, \theta_N, V_N]^\tau$ 为代数变量; $u = [E_{fd}, u_B]^\tau$ 为控制输入; $f = [f_1, f_2, f_3, f_4]^\tau$, $f_1 = \omega - \omega_0$, $f_2 = \frac{\omega_0}{M} \left[P_m - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) - P_e \right]$, $f_3 = \phi(\cdot)$, $f_4 = -\frac{1}{T_C} (B_L - B_{L0})$; $\sigma = [g_b, h_b, g_l, h_l, g_N, h_N]^\tau$; $g = [g_1, g_2]$, $g_1 = \left[0, 0, \frac{1}{T'_{d0}}, 0 \right]^\tau$, $g_2 = \left[0, 0, 0, \frac{K_C}{T_C} \right]^\tau$; $\tilde{g}(x, z) = [\tilde{g}_1, \tilde{g}_2, \tilde{g}_3]$, $\tilde{g}_1 = [0, 1, 0, 0]^\tau$, $\tilde{g}_2 = [0, 0, 1, 0]^\tau$, $\tilde{g}_3 = [0, 0, 0, 1]^\tau$; $\varpi = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]^\tau$. 则式 (1) ~ (7) 所示电力系统控制数学模型可表示为如下的不确定非线性微分代数系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, z) + g(x, z)u + \tilde{g}(x, z)\varpi, \\ 0 = \sigma(x, z). \end{cases} \quad (8)$$

2 标称系统反馈耗散 Hamilton 实现

采用 Hamilton 函数方法进行非线性微分代数系统鲁棒控制器设计的关键是将系统表示为如下的耗散 Hamilton 系统^[10]:

$$\begin{cases} \dot{x} = (J(x, z) - R(x, z)) \frac{\partial H(x, z)}{\partial x} + \\ \quad g(x, z)u + \tilde{g}(x, z)\varpi, \\ 0 = \sigma(x, z) = \frac{\partial H(x, z)}{\partial z}. \end{cases} \quad (9)$$

其中: $J(x, z)$ 为反对称矩阵, $R(x, z)$ 为半正定矩阵, $H(x, z)$ 为系统的 Hamilton 函数. 令 $T(x, z) = J(x, z) - R(x, z)$ 为结构矩阵, 则 Hamilton 函数满足

$$\begin{cases} T(x, z) \frac{\partial H(x, z)}{\partial x} = f(x, z), \\ \frac{\partial H(x, z)}{\partial z} = \sigma(x, z). \end{cases} \quad (10)$$

在电力系统控制研究中, 最常采用的耗散实现形式为常值耗散^[6-10]. 假设 $T(x, z)$ 为可逆定常矩阵, 存在连续函数满足式 (10) 的条件是如下的矩阵方程成立:

$$\begin{cases} T^{-1} \frac{\partial f(x, z)}{\partial x} = \left(\frac{\partial f(x, z)}{\partial x} \right)^\tau T^{-T}, \\ T^{-1} \frac{\partial f(x, z)}{\partial z} = \left(\frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial x} \right)^\tau, \\ \frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z} = \left(\frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z} \right)^\tau. \end{cases} \quad (11)$$

对于包含 SVC 的电力系统, 直接验证可知

$$\frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z} \neq \left(\frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z} \right)^\tau.$$

考虑到对于实际系统总有 $V_b, V_l, V_N > 0$, 令 $v_b = \ln V_b$, $v_l = \ln V_l$, $v_N = \ln V_N$. 仍记 $z = (\theta_b, v_b, \theta_l, v_l, \theta_N, v_N)^\tau$, 则有 $\frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z} = \left(\frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial z} \right)^\tau$. 取

$$T = \begin{bmatrix} 0 & t_1 & 0 & 0 \\ -\frac{\omega_0}{M} & t_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{x_d - x'_d}{T'_{d0}} & 0 \\ 0 & t_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

则有 $\frac{\partial f(x, z)}{\partial z} = T \left(\frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial x} \right)^\tau$. 其中: t_1, t_2, t_3 为待定

参数. 因为 T 不可逆, 所以不能直接完成系统的耗散 Hamilton 实现. 考虑如下的预置反馈控制:

$$\begin{cases} E_{fd} = \bar{E}_{fd} + v_1, \\ u_B = \frac{B_{L0}}{2K_B e^{2v_{N0}}} (e^{2v_N} - e^{2v_{N0}}) + v_2. \end{cases} \quad (13)$$

其中: $v_{N0} = \ln V_{N0}$, V_{N0} 为平衡状态下 N 点的电压; v_1 和 v_2 为新的控制输入; \bar{E}_{fd} 为与期望平衡点对应的励磁输入电压, 有

$$\bar{E}_{fd} = \frac{x_d}{x'_d} E'_{q0} - \frac{x_d - x'_d}{x'_d} e^{v_{b0}} \cos(\delta_0 - \theta_{b0}).$$

在预置反馈控制作用下, 闭环系统成为

$$\begin{cases} \dot{x} = \tilde{f}(x, z) + g(x, z)v + \tilde{g}(x, z)\omega, \\ 0 = \sigma(x, z). \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\nu = [\nu_1, \nu_2]^T$ 为新的控制输入, 而

$$\begin{aligned} \tilde{f} &= [f_1, f_2, \tilde{f}_3, \tilde{f}_4]^T, \quad \tilde{f}_3 = \phi(\cdot) + \frac{1}{T'_{d0}} \bar{E}_{fd}, \\ \tilde{f}_4 &= -\frac{1}{T_C} \left[B_L - B_{L0} - \frac{B_{L0}}{2e^{2v_{N0}}} (e^{2v_N} - e^{2v_{N0}}) \right]. \end{aligned}$$

令

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} 0 & t_1 & 0 & 0 \\ -\frac{\omega_0}{M} & t_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{x_d - x'_d}{T'_{d0}} & 0 \\ 0 & t_3 & 0 & -\frac{B_{L0}}{T_C e^{2v_{N0}}} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

则有 $\frac{\partial \tilde{f}(x, z)}{\partial z} = \tilde{T} \left(\frac{\partial \sigma(x, z)}{\partial x} \right)^T$. 选择 $t_1 = \omega_0/M$, $t_2 = -D\omega_0/M^2$, $t_3 = 0$, 则矩阵 \tilde{T} 可逆并满足

$$\tilde{T}^{-1} \frac{\partial \tilde{f}(x, z)}{\partial x} = \left[\tilde{T}^{-1} \frac{\partial \tilde{f}(x, z)}{\partial x} \right]^T,$$

且矩阵 \tilde{T} 可分解为 $\tilde{T} = J - R$. 其中

$$J = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\frac{\omega_0}{M} & M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

其中 $R_{22} = \frac{D\omega_0}{M^2}$, $R_{33} = \frac{x_d - x'_d}{T'_{d0}}$, $R_{44} = \frac{B_{L0}}{T_C e^{2v_{N0}}}$. 显然 J 为反对称矩阵. 由于 $x_d > x'_d$, R 为半正定矩阵.

对于选定的结构矩阵 \tilde{T} , 通过求解矩阵方程 (10) 可以得到相应的 Hamilton 函数如下:

$$\begin{aligned} H(\cdot) &= \\ &\frac{M}{2\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 - P_m \delta - P_L \theta_l - Q_L v_l - \\ &\frac{1}{x'_d} E'_q e^{v_b} \cos(\delta - \theta_b) + \frac{x_d E_q'^2}{2x'_d (x_d - x'_d)} - \\ &\frac{x'_d - x_q}{4x'_d x_q} e^{2v_b} \cos 2(\delta - \theta_b) - \\ &\frac{1}{x_d - x'_d} \bar{E}_{fd} E'_q - \frac{1}{2} B_{bb} e^{2v_b} + \end{aligned}$$

$$\frac{x'_d + x_q}{4x'_d x_q} e^{2v_b} - B_{bN} e^{v_b + v_N} \cos(\theta_b - \theta_N) -$$

$$B_{bl} e^{v_b + v_l} \cos(\theta_b - \theta_l) - B_{NS} e^{v_N + v_S} \cos \theta_N -$$

$$\frac{1}{2} B_{NN} e^{2v_N} - \frac{1}{2} B_{ll} e^{2v_l} - B_{Nl} e^{v_N + v_l} \cos(\theta_N - \theta_l) +$$

$$\frac{1}{2B_{L0}} e^{2v_{N0}} (B_L^2 - 2B_L B_{L0}) - \frac{1}{2} (B_L e^{2v_N} - e^{2v_{N0}}). \quad (17)$$

3 鲁棒协调控制器设计

对于完成耗散 Hamilton 实现的电力系统, 选择评价函数

$$\eta = r g^T(x, z) \frac{\partial H(x, z)}{\partial x} =$$

$$r \begin{bmatrix} -\frac{1}{x_d - x'_d} \left(\phi(\cdot) + \frac{1}{T'_{d0}} \bar{E}_{fd} \right) \\ \frac{K_C}{T_C} \left[\frac{e^{2v_{N0}}}{B_{L0}} (B_L - B_{L0}) - \frac{1}{2} (e^{2v_N} - e^{2v_{N0}}) \right] \end{bmatrix}, \quad (18)$$

其中 $r = \text{diag}\{r_1, r_2\} > 0$ 为权重系数. 该函数反映了发电机内电势、母线电压和相角、SVC 等效电纳以及装设点母线电压与稳态值的偏差, 具有明确的物理意义. 取反馈控制律

$$\nu = -\frac{1}{2} \left(r^T r + \frac{1}{\gamma^2} I \right) g^T(x, z) \frac{\partial H(x, z)}{\partial x}, \quad (19)$$

则闭环系统成为

$$\begin{cases} \dot{x} = \left[J - R - \frac{1}{2} g \left(r^T r + \frac{1}{\gamma^2} \right) g^T \right] \frac{\partial H(x, z)}{\partial x} + \tilde{g} \omega = \\ \quad \tilde{f}(x, z) + \tilde{g} \omega, \\ 0 = \frac{\partial H(x, z)}{\partial z}, \\ \eta = r g^T \frac{\partial H(x, z)}{\partial x}. \end{cases} \quad (20)$$

显然, 闭环系统也是耗散 Hamilton 系统. 注意到

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^T \tilde{f} + \frac{1}{2\gamma^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^T \tilde{g} \tilde{g}^T \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{2} h^T h = \\ - \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^T \left[R + \frac{1}{2\gamma^2} (g r^T r g^T - \tilde{g} \tilde{g}^T) \right] \frac{\partial H}{\partial x}, \end{aligned} \quad (21)$$

如果 $R + \frac{1}{2\gamma^2} [g r^T r g^T - \tilde{g} \tilde{g}^T] \geq 0$, 即

$$\gamma^2 \geq \max \left\{ \frac{M^2}{2D\omega_0}, \frac{1 - T_{d0}'^2}{2T_{d0}' (x_d - x'_d)}, \frac{e^{2v_{N0}} (K_C^2 - T_C^2)}{2B_{L0} T_C} \right\}, \quad (22)$$

则

$$\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^T \tilde{f} + \frac{1}{2\gamma^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^T \tilde{g} \tilde{g}^T \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} h^T h \leq 0, \quad (23)$$

从而有

$$\dot{H}(x, z) \leq \frac{1}{2} \{ \gamma^2 \|\omega\|^2 - \|\eta\|^2 \}, \quad (24)$$

故闭环系统从干扰到评价信号的 L_2 增益小于等于 γ .

当 $\omega = 0$ 时, 有 $\dot{H}(x, z) \leq 0$, 即该函数将沿系统

轨线衰减至其能量最低点. 进一步, 集合 $S = \{(x, z) : \dot{H}(x, z) = 0, \sigma(x, z) = 0\}$ 在所考虑的系统运行区域内仅包含平衡点 (x_0, z_0) , 由 LaSalle 不变集原理^[11]可知闭环标称系统渐近稳定.

4 仿真

为了验证控制效果, 将本文所提出的控制器与常规控制方案进行仿真对比研究. 常规控制方案中发电机采用 PSS+AVR, SVC 采用 PID 控制, 其结构和参数见文献 [1], 干扰抑制水平 $\gamma = 4.5$. 假设发电机侧变压器高压侧在 $t = 0$ s 时发生三相短路故障, $t = 0.2$ s 时故障切除. 在 $t = 0.5$ s 输入机械功率时出现 5% 的上升扰动, $t = 1$ s 时恢复. 仿真结果如图 2 和图 3 所示, 实线为协调鲁棒控制下的响应曲线, 虚线为常规控制下的响应曲线.

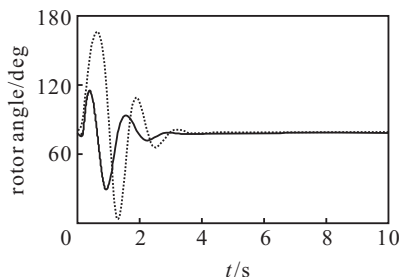


图 2 发电机功角响应曲线

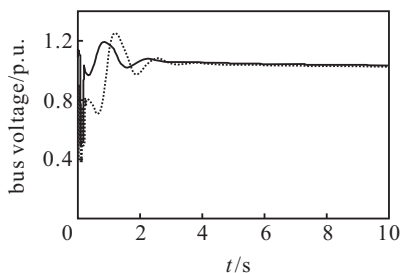


图 3 SVC 安装处母线电压响应曲线

从仿真结果可以看出, 与常规控制方案相比, 本文设计的鲁棒协调控制器能更加有效地抑制发电机功角和母线电压的振荡, 大大提高系统的暂态稳定性.

5 结论

本文采用 Hamilton 函数方法研究了包含 SVC 的电力系统鲁棒非线性协调控制问题. 研究结果表明, 基于 Hamilton 函数方法进行鲁棒控制器设计, 能有效克服 HJI 不等式难以求解的问题. 此外, 由于该方法能够充分利用系统内在的结构特点完成控制器设计, 在增强系统阻尼、改善动态特性方面具有较大优势.

参考文献(References)

[1] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 404-426.
(Lu Q, Mei S W, Sun Y Z. Nonlinear control of power systems[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 404-406.)

[2] Cong L, Wang Y, Hill D. Transient stability and voltage regulation enhancement via coordinated control of generator excitation and SVC[J]. Int J of Electrical Power & Energy Systems, 2005, 27(2): 121-130.

[3] 马幼捷. SVC与发电机励磁协调非线性控制[J]. 电工技术学报, 1998, 13(4): 1-4.
(Ma Y J. The nonlinear control of SVC cooperate with the excitation system of generator[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 1998, 13(4): 1-4.)

[4] 马兆兴, 万秋兰, 李洪美, 等. 基于神经网络的 SVC 电压稳定性控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 67-71.
(Ma Z X, Wan Q L, Li H M, et al. A voltage stability control method of SVC based on neural network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 67-71.)

[5] 谢争先, 梁志珊, 张化光. 基于哈密顿能量理论的发电机励磁与ASVG协调控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(5): 567-570.
(Xie Z X, Liang Z S, Zhang H G. Coordinated control of ASVG and generator excitation based on Hamiltonian energy theory[J]. Control and Decision, 2008, 23(5): 567-570.)

[6] Ortega R, Galaz M, Astolfi A, et al. Transient stabilization of multimachine power systems with nontrivial transfer conductances[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(1): 60-75.

[7] 张利军, 孟杰, 兰海, 等. 带有 SMES 和电力推进负载的舰船电力系统鲁棒协调控制[J]. 控制与决策, 2012, 26(12): 1808-1812.
(Zhang L J, Meng J, Lan H, et al. Robust coordinated control for ship power systems with SMES and power thruster loads[J]. Control and Decision, 2012, 26(12): 1808-1812.)

[8] Su J, Chen C. Static Var compensator control for power systems with nonlinear loads[J]. IEE Proc—Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(1): 78-82.

[9] 何斌, 张秀彬, 赵兴勇. 多机系统中励磁与SVC的协调控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 152-159.
(He B, Zhang X B, Zhao X Y. Coordinated control of excitation and SVC in multi-machine power system[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12): 152-159.)

[10] 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.

[11] Wang H, Yung C, Chang F. H_∞ control for nonlinear descriptor systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(11): 1919-1925.