

文章编号: 1001-0920(2008)05-0567-04

基于哈密顿能量理论的发电机励磁与 ASVG 协调控制

谢争先¹, 梁志珊², 张化光¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 中国石油大学 机电工程学院, 北京 102249)

摘要: 针对含有先进静止无功发生器(ASVG)的单机无穷大系统,建立了 4 阶非线性状态空间数学模型. 基于 Hamilton 能量函数理论,设计了 ASVG 安装点电压与发电机励磁的新型非线性协调控制器. 数字仿真结果表明,在系统遭受到较大干扰的情况下,所设计的控制器可同时满足发电机励磁与 ASVG 装设处电压的暂态稳定性要求.

关键词: 协调控制; Hamilton 能量理论; 非线性励磁控制; 先进静止无功补偿器

中图分类号: TM31; TM76

文献标识码: A

Coordinated control of ASVG and generator excitation based on Hamiltonian energy theory

XIE Zheng-xian¹, LIANG Zhi-shan², ZHANG Hua-guang¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Faculty of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China. Correspondent: LIANG Zhi-shan, E-mail: lzs1960@yahoo.com.cn)

Abstract: The four order nonlinear unified state-space system model is established for a single-machine infinite-bus power system with advanced static var generator (ASVG). Based on Hamiltonian energy theory, the new non-linear coordinated controller is designed between the bus-voltage of system, where ASVG is installed, and synchronous machine excitation. Simulation results of the single-machine infinite-bus power system with ASVG show that the proposed controller can meet the requirement of transient stability of synchronous machine power angle and terminal voltage of ASVG for the studied power system with ASVG when subjected to the larger disturbance.

Key words: Coordinated control; Hamiltonian energy theory; Excitation control; ASVG

1 引言

先进静止无功发生器(ASVG)在电力系统电压快速调节、提高系统暂态稳定和阻尼系统功率振荡等方面发挥着越来越重要的作用^[1]. 发电机励磁控制也一直在电力系统稳定中发挥着重要作用. ASVG 与发电机励磁协调控制是一个很有研究价值的课题. 文献[2]提出了线性化鲁棒控制器设计,但没有考虑发电机的励磁特性. 文献[3]提出了发电机励磁与 FACTS 分散协调控制,但该方法仅适用于可控阻抗的器件,而不适用于具有一阶延时可控无功电流源器件. 文献[4]提出了 ASVG 的 Backstepping 的非线性控制器的设计,可提高系统暂态稳定性,但该文将发电机的暂态电势都假设为恒定不变的. 文献[5]提出 ASVG 的非线性控制器

的设计,可同时提高系统阻尼与电压控制精度,但在设计过程中出现了微分代数模型. 文献[1]提出了 ASVG 和发电机励磁的协调控制器的设计,考虑了电力系统的强非线性特性,但提出的模型过于复杂. 文献[6]对微分代数模型进行了深入研究和改进,避免出现微分代数模型,设计了 ASVG 无功电流与发电机励磁非线性控制器. 该方法首先要对原非线性系统进行精确线性化,然后针对线性化后的系统进行控制器设计. 而事实上,非线性系统的某些非线性特性对控制器的设计是有利的,因此,在设计中应充分加以利用. 已有的非线性控制方法不能从理论上证明控制器的闭环稳定性.

近年来,控制界对 Hamilton 能量系统理论进行了广泛的研究^[7]. 文献[8]从能量的观点出发,给

收稿日期: 2007-05-19; 修回日期: 2007-09-16.

基金项目: 教育部科学技术重点研究项目(104117).

作者简介: 谢争先(1973—),男,辽宁阜新,高级工程师,博士生,从事电力系统非线性控制、柔性交流输电系统的研究;张化光(1959—),男,吉林省吉林市人,教授,博士生导师,从事模糊控制、自适应控制等研究.

出了动态系统非线性闭环稳定控制器的设计方法. 本文针对包含 ASVG 的单机无穷大电力系统, 应用哈密顿系统理论设计系统稳定控制器.

2 利用 Hamilton 函数方法设计系统稳定器仿射非线性动态系统

$$\dot{x} = f(x) + G(x)u, \quad (1)$$

$$y = h(x). \quad (2)$$

其中: $x \in R^n$ 为状态向量; $u \in R^m$ 为输入向量; $y \in R^p$ 为输出向量; $f: R^n \rightarrow R^n$ 为光滑向量场; $G: R^n \rightarrow R^{n \times m}$ 为光滑矩阵函数; $h: R^n \rightarrow R^p$ 为光滑函数; x_e 为该系统的渐近稳定平衡点.

设 $H(x)$ 为系统的一个 Hamilton 能量函数, ∇H 为 $H(x)$ 的梯度, 可将式(1)表示为

$$\dot{x} = (J - R) \nabla H + G(x)u(t). \quad (3)$$

其中: $J(x)$ 为反对称矩阵, $R(x)$ 为半正定矩阵, 且系统(3) 是零状态可检测的. 则存在如下控制策略:

$$u = -KG^T(x) \nabla H, \quad (4)$$

这里 K 为正定矩阵. 渐近稳定闭环反馈系统为

$$\dot{x} = [J(x) - R(x) - G(x)KG^T(x)] \nabla H. \quad (5)$$

令 $\tilde{H}(x) = H(x) - H(x_e) > 0$, 则

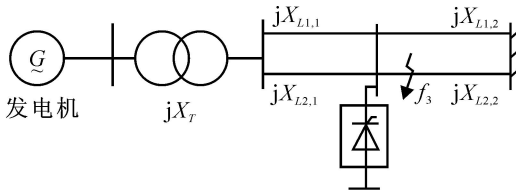
$$\begin{aligned} \dot{\tilde{H}}(x) = & (\nabla H^T)(-R)(\nabla H) + \\ & (G^T(x) \nabla H)^T (-K)(G^T(x) \nabla H). \end{aligned} \quad (6)$$

由正定矩阵 K 和半正定矩阵 R 可知 $\dot{\tilde{H}}(x) < 0$, 故 $\tilde{H}(x)$ 是闭环系统(6) 的 Lyapunov 函数. 由式(3) 的零状态可检测性, 系统(5) 在平衡点 x_e 处渐近稳定^[8].

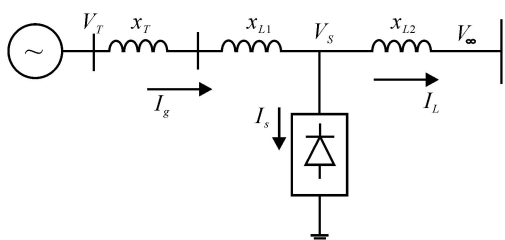
3 基于 Hamilton 能量函数理论的 ASVG 与励磁的协调稳定控制策略

3.1 系统动态系统模型

在输电线中间装有 ASVG 的单机无穷大系统



(a) 系统结构



(b) 等值电路图

图 1 具有 ASVG 的单机无穷大系统示意图

如图 1 所示. 在控制器的设计中, 发电机采用如下 3 阶模型:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{H} \omega + \frac{\omega_0}{H} P_{m0} - \frac{\omega_0}{H} P_e \\ \dot{E}_q = -\frac{1}{T_{d0}} \left[\frac{x_d}{x_d} E_q - \frac{(x_d - x_d') V}{x_d} \cos \delta \right] + E_1 + \frac{1}{T_{d0}} u_f. \end{cases} \quad (7)$$

其中: δ 为功角, ω 为转速, P_{m0} 为输入机械功率, P_e 为电磁功率, ω_0 为同步转速, D 为阻尼系数, H 为机组惯性常数, E_q 为交轴暂态电势, E_q' 为交轴电势, u_f 为励磁电压, T_{d0} 为直轴暂态短路时间常数, x_d 为机组直轴电抗, x_d' 为机组直轴暂态电抗, I_{dg} 为直轴电流, I_{qg} 为交轴电流.

ASVG 采用一阶延时可控无功电流源模型. dq 轴坐标系定义为: d 轴始终与接入点电压向量同向, q 轴超前 90° , 从而 ASVG 输出电流只含 q 轴分量.

$$\dot{I}_s = -\frac{1}{T_s} (I_s - I_{s0}) + \frac{K_s}{T_s} u_s. \quad (8)$$

其中: T_s 为 ASVG 环节时间常数, K_s 为放大倍数.

ASVG 安装点电压与 ASVG 输出电流之间的关系为

$$V_s = \frac{1}{X_1 + X_2} G + \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} I_s, \quad (9)$$

其中 X_1 为含变压器的线路电抗.

相关代数方程见文献[6]. 有功功率方程为

$$P_e = \frac{V}{G} E_q V_s \sin \delta, \quad (10)$$

其中

$$G = \sqrt{(X_2 E_q)^2 + (X_1 V)^2} + 2 X_1 X_2 E_q V \cos \delta. \quad (11)$$

对式(9) 求导数得

$$\dot{V}_s = \frac{1}{X_1 + X_2} \left(\frac{\partial G}{\partial \delta} \dot{\delta} + \frac{\partial G}{\partial E_q} \dot{E}_q \right) + \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} \dot{I}_s. \quad (12)$$

定义 $\tilde{x} = x - x_0$, 由式(9) 得

$$\begin{aligned} \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} \dot{I}_s = & -\frac{1}{T_s} \left(\tilde{V}_s - \frac{\tilde{G}}{X_1 + X_2} \right) + \\ & \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} \frac{K_s}{T_s} u_s. \end{aligned} \quad (13)$$

将式(13) 代入(12), 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_s = & -\frac{1}{T_s} \tilde{V}_s + \frac{1}{T_s} \frac{\tilde{G}}{X_1 + X_2} + \frac{K_s}{T_s} \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} u_s + \\ & \frac{1}{X_1 + X_2} \left(\frac{\partial G}{\partial \delta} \dot{\delta} + \frac{\partial G}{\partial E_q} \dot{E}_q \right). \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial} = \frac{-X_1 X_2 V E_q \sin}{G}, \\ \frac{\partial G}{\partial E_q} = \frac{X_2^2 E_q + X_1 X_2 V \cos}{G}. \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

设 $x = [E_q \ V_s]^T$, 组合式(7) 和(14), 得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -b_2 x_2 + P - \frac{b_1 x_3 x_4 \sin x_1}{G}, \\ \dot{x}_3 = -b_4 \tilde{x}_3 + \frac{b_1 b_4 b_8 x_4}{G} (X_2^2 x_3 + \frac{1}{b_8} \cos x_1) + v_1, \\ \dot{x}_4 = -b_6 \tilde{x}_4 + b_6 b_7 \tilde{G} + v_2. \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$\nabla H = \begin{bmatrix} -P + \frac{b_1 x_3 x_4 \sin x_1}{G} \\ \tilde{x}_3 - \frac{b_1 b_8 x_4}{G} (X_2^2 x_3 + \frac{1}{b_8} \cos x_1) \\ \frac{b_1 b_8}{b_7} \tilde{x}_4 - b_1 b_8 \tilde{G} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

3.2.2 励磁与 ASVG 协调的稳定控制规律设计 系统输出方程为

其中

$$\begin{cases} v_1 = b_3 \cos x_1 - \frac{b_1 b_4 b_8 x_4}{G} (X_2^2 x_3 + \frac{1}{b_8} \cos x_1) + E_1 + \frac{1}{T_{d0}} u_f, \\ v_2 = \frac{K_s}{T_s} \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} u_s - b_6 b_7 \tilde{G} + \frac{1}{X_1 + X_2} (\frac{\partial G}{\partial} + \frac{\partial G}{\partial E_q} \dot{E}_q); \\ P = \frac{0}{H} P_{m0}, \quad b_1 = \frac{0V}{H}, \quad b_2 = \frac{D}{H}, \\ b_4 = \frac{x_d}{T_{d0} x_d}, \quad b_5 = \frac{(x_d - x_d')V}{T_{d0} x_d}, \quad b_6 = \frac{1}{T_s}, \\ b_7 = \frac{1}{X_1 + X_2}, \quad b_8 = \frac{1}{X_1 X_2 V}; \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = G^T(x) \nabla H = \\ \begin{bmatrix} \tilde{x}_3 - \frac{b_1 b_8 x_4}{G} (X_2^2 x_3 + \frac{1}{b_8} \cos x_1) \\ \frac{b_1 b_8}{b_7} \tilde{x}_4 - b_1 b_8 \tilde{G} \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (23)$$

由 $\dot{H}(x) = 0$, 可得该动态系统收敛于最大的不变子集 $\{x \mid R^4 / x_2 = 0; x_d x_3 = (x_d - x_d')V \cos x_1; x_4 = V_{d0}\}$, 此不变子集为系统(16) 和(23) 的平衡点. 选择正定矩阵 K , 则由式(4) 可得如下虚拟控制:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \{ \tilde{x}_3 - \frac{b_1 b_8 x_4}{G} (X_2^2 x_3 + \frac{1}{b_8} \cos x_1) \} \\ k_2 \{ \frac{b_1 b_8}{b_7} \tilde{x}_4 - b_1 b_8 \tilde{G} \} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

$$\begin{cases} E_1 = -\frac{(x_d - x_d')V}{T_{d0} x_d} \cos 0, \\ \tilde{V}_s = V_s - V_{s0}, \quad \tilde{G} = G - G_0. \end{cases} \quad (18)$$

3.2 励磁和 ASVG 协调控制镇定系统

3.2.1 构造 Hamilton 能量函数

构造如下 Hamilton 能量函数:

$$H(x) = \frac{1}{2} x_2^2 - P x_1 - b_1 b_8 x_4 \tilde{G} + \frac{1}{2} \tilde{x}_3^2 + \frac{b_1 b_8}{2b_7} \tilde{x}_4^2. \quad (20)$$

考虑到 $\frac{\partial H}{\partial x_1} = -P$, 易得 $H(x) = 0$. 可将原系统动态模型表示为如下受控 Hamilton 能量系统的形式:

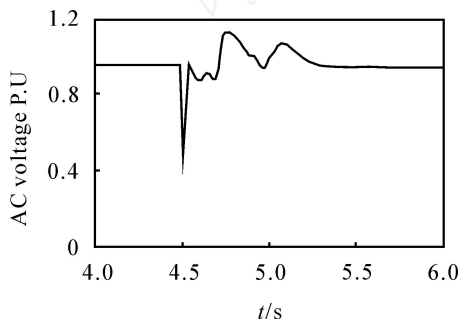
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{E}_q \\ \dot{V}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{b_6 b_7}{b_1 b_8} \end{bmatrix} \nabla H +$$

将式(24) 代入(17) 可得励磁与 ASVG 协调控制, 即

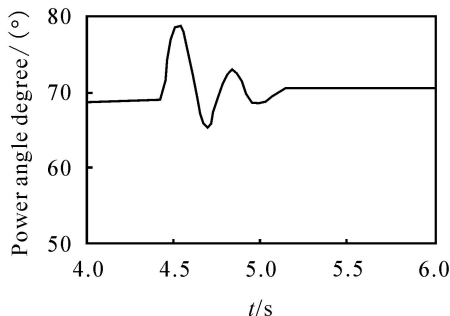
$$\begin{cases} u_f = T_{d0} \{ -k_1 [\tilde{E}_q - \frac{b_1 b_8 V_s}{G} (X_2^2 E_q + \frac{1}{b_8} \cos)] - b_3 \cos - \frac{b_1 b_4 b_8 V_s}{G} (X_2^2 E_q + \frac{1}{b_8} \cos) + E_1 \}, \\ u_s = \frac{T_s (X_1 + X_2)}{K_s X_1 X_2} \{ -k_2 [\frac{b_1 b_8}{b_7} \tilde{V}_s - b_1 b_8 \tilde{G}] + b_6 b_7 \tilde{G} + \frac{1}{X_1 + X_2} (\frac{X_1 X_2 V E_q \sin}{G} + \frac{X_2^2 E_q + X_1 X_2 V \cos}{G} (\frac{x_d}{T_{d0} x_d} E_q - \frac{(x_d - x_d')V}{T_{d0} x_d} \cos + E_1 + \frac{1}{T_{d0}} u_f)) \}. \end{cases} \quad (25)$$

4 仿真分析

为了验证以上结论,用如图1所示的具有ASVG的双回线单机对无穷大系统进行动态仿真.系统的等效参数设为: $x_d = 0.22$, $H = 6.7$, $D = 1$, $x_{L1} = 0.2$, $x_{L2} = 0.3$, $x_T = 0.1$, $P_m = 0.9$, $T_{d0} = 10$, $V = 0.95$. 控制反馈增益分别为: $k_1 = 0.08$, $k_2 = 0.055$. 系统故障如图1所示: $t = 4.5$ s时,线路2在靠近ASVG安装处发生3相短路; $t = 4.625$ s时,开关动作切除故障.图2给出了发电机转子角和ASVG安装处电压波形图.由仿真结果可知,在大扰动情况下,发电机转子角和ASVG安装处电压,在基于Hamilton能量函数理论构造的励磁与ASVG非线性控制器作用下,能迅速趋向相应的故障后系统平衡状态,保持系统渐近稳定,从而验证了控制器的有效性.



(a) ASVG接入点的电压 (标么值)



(b) 发电机的功角曲线

图2 具有ASVG系统故障的仿真曲线

5 结论

本文利用Hamilton能量函数理论的动态系统非线性稳定器的设计方法,设计了发电机励磁与ASVG非线性协调控制器.仿真结果表明,在系统受到较大干扰的情况下,所设计的控制器可同时满足发电机励磁与ASVG装设处电压的暂态稳定性要求.

不同于其他非线性控制器的设计方法,基于Hamilton能量函数理论设计非线性稳定控制器的方法,避开了直接构造Lyapunov函数的困难,通过将励磁与ASVG动态系统表示为Hamilton能量系

统,从而利用Hamilton能量函数理论设计励磁与ASVG的非线性稳定器.在设计发电机励磁与ASVG控制器的过程中,没有用到任何线性化方法.因此控制器的实现策略充分利用了原动态系统的非线性特性,综合控制器可从理论上保证闭环系统稳定,同时又可满足发电机励磁与ASVG装设处电压的协调稳定性.

参考文献(References)

- [1] Cong L, Wang Y. Coordinated control of generator excitation and STATCOM for rotor angle stability and voltage regulation enhancement of power systems [J]. Proc of the IEE, 2002, 149(6): 659-666.
- [2] Rahim A H M A, AFBaiyat S A, Acmaghrabi H M. Robust damping controller design for a static compensator [J]. Proc of the IEE, 2002, 149(4): 491-496.
- [3] Chen H, Andersson G, Versatile A. Approach for the control of facts equipment in multi-machine power system [J]. Electrical Power and Energy Systems, 1995, 17(3).
- [4] 李文磊, 井元伟, 刘晓平, 等. 基于自适应逆推设计的STATCOM非线性鲁棒控制 [J]. 东北大学学报, 2003, 24(3): 221-224.
(Li Wen-lei, Jing Yuan-wei, Liu Xiao-ping, et al. Nonlinear robust control based on adaptive backstepping design for STATCOM [J]. J of Northeastern University, 2003, 24(3): 221-224.)
- [5] 谢小荣, 崔文进, 唐义良, 等. STATCOM与发电机励磁的协调控制 [J]. 电力系统自动化, 2001, 3(10): 19-22.
(Xie Xiao-rong, Cui Wen-jin, Tang Yi-liang, et al. Coordinated control of STATCOM and generator excitation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 3(10): 19-22.)
- [6] 顾丽鸿, 王杰. STATCOM与发电机励磁非线性控制器设计 [J]. 华东电力, 2006, 34(9): 1-5.
(Gu Li-hong, Wang Jie. Design of non-linear controllers for STATCOM and generator excitation [J]. East China Electric Power, 2006, 34(9): 1-5.)
- [7] Escobar G, Schaft A J van der, Ortega R. A hamiltonian viewpoint in the modeling of switching power converters [J]. Automatica, 1999, 35(3): 445-452.
- [8] 马进, 席在荣, 梅生伟, 等. 基于Hamilton能量理论的发电机汽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 Zai-rong, Mei Sheng-wei, et al. Nonlinear stabilizing control design for the steam-valving and excitation system based on Hamiltonian energy theory [J]. Proc of the CSEE, 2002, 22(5): 88-93.)