

# 静止无功补偿器的自适应逆推无源反馈控制设计

张 蕾<sup>1</sup>, 张爱民<sup>1</sup>, 韩九强<sup>1</sup>, 张 杭<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 通过将耗散系统理论和自适应逆推(adaptive backstepping)非线性控制算法相结合, 克服了无源反馈方法只能为输入输出相对阶为1的系统设计控制律的限制, 为带有静止无功补偿器的单机无穷大电力系统设计了鲁棒自适应控制器. 设计中兼顾了系统遭受不确定扰动以及阻尼系数难以精确测量情况下控制器的鲁棒性和自适应能力. 理论分析证明所提算法可保证系统内所有状态变量一致有界且渐近稳定, 系统误差全局渐近稳定. 仿真结果也表明, 所提算法使系统母线电压, 发电机功角以及转子角速度的暂态响应性能优于传统逆推算算法, 系统误差迅速收敛至零, 与理论证明结果一致.

**关键词:** 静止无功补偿器; 自适应逆推算算法; 鲁棒控制; 耗散系统  
**中图分类号:** TM712      **文献标识码:** A

## Adaptive backstepping passivity feedback control design for static volt-ampere reactive compensator

ZHANG Lei<sup>1</sup>, ZHANG Ai-min<sup>1</sup>, HAN Jiu-qiang<sup>1</sup>, ZHANG Hang<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;  
2. School of Electrical Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

**Abstract:** Based on the adaptive backstepping nonlinear control scheme and the dissipative system theory, the robust adaptive nonlinear controller is designed for the single-machine infinite-bus (SMIB) power system with static volt-ampere reactive (VAR) compensator (SVC), which eliminates the requirement of unity relative-degree in the passivity feedback scheme. In the design procedure, the uncertain disturbances and the uncertainty of damping coefficient are taken into account simultaneously. The theoretical analysis shows that all the states in the system are uniformly bounded and asymptotically stable, while the system errors are globally asymptotically stable. Simulation results show that the proposed method outperforms the classical backstepping method in the transient responses of bus voltage, generator power angle and angular velocity. System errors approach to zero rapidly, which is consistent with the theoretical analysis.

**Key words:** static volt-ampere reactive compensator; adaptive backstepping; robust control; dissipative system

### 1 引言(Introduction)

随着输电系统所需输送电能的不断提高, 电力系统的稳定性受到严峻考验. 为了使现有电力输电网络发挥应有的应用潜能, 节约资金和土地资源, 进一步提高电力系统的稳定性, 增大系统的暂态稳定裕度, 传统方法是在输电系统中装设电力系统稳定器(PSS). 但由于PSS容易引起电压波形的较大畸变, 且在大扰动情况下会导致系统电压不稳定, 严重时甚至会引起电压崩溃. 因此, 近年来随着电力电子技术的快速发展, 解决这一问题的新兴方案是在输电线路中装设柔性交流输电系统(FACTS)装置, 通过连续地调节无功补偿装置吸收或发出的无功功率, 以维持装设点处电压恒定, 提高电力系统的传输能

力, 从而改善远距离输电系统在小扰动情况下的静态稳定性和大扰动情况下的暂态稳定性. 静止无功补偿器(SVC)是一种应用广泛的并联型FACTS装置, 其工作原理是通过连续控制晶闸管的触发角来改变SVC接入系统的电纳值, 从而改变装置吸收或发出的无功功率, 使其具有稳定接入点电压的功能, 并通过SVC对母线电压的控制功能提高系统的暂态稳定性. SVC控制器是通过控制晶闸管触发角来实现上述作用的, 因此, 对SVC控制方法的研究是提高输电系统暂态稳定性的关键<sup>[1-3]</sup>.

在SVC控制的设计中遇到的问题有: 首先, SVC包含非线性电力电子器件, 在建模过程中不可能完全用确定函数来描述SVC系统的动态特性, 因此系

统模型中包含了非参数不确定性<sup>[4]</sup>;其次,在系统建模时忽略发电机阻尼绕组的动态,将阻尼绕组的影响包括在发电机机械阻尼系数中,因此转矩方程中的阻尼系数 $D$ 的不确定性,使系统模型中也含有参数不确定性;再次,系统在运行过程中受到不确定扰动的影响,这主要是由于系统工作条件的改变使得系统中的发电机转子和导纳受到不确定扰动的影响;最后,由于非线性谐波的存在,使得系统在运行时受到未建模扰动的影响,因此,在考虑SVC电力系统非线性特性和不确定特性的基础上用先进非线性控制算法设计SVC控制器,是现今研究的热点领域。

直接反馈线性化方法(DFL)是一种典型的微分几何算法,算法特点是不需要进行复杂的非线性变换,简单实用,但该算法只适用于系统在工作点附近的线性化模型,并要求系统参数确切已知,这对于强非线性的电力系统模型来说,是一个苛刻的要求,且在电力系统受大扰动而工作点发生大范围波动的情况下算法无法保证系统的暂态稳定性<sup>[5]</sup>;因此,近年来更多的研究集中于应用adaptive backstepping方法来设计SVC的非线性控制器。由于该算法能够处理参数不确定性,且控制律设计时对原非线性系统不做任何线性化近似,以及能使系统具有较好的暂态性能等优点,在非线性和系统控制领域得到了广泛的关注<sup>[6-7]</sup>。现今adaptive backstepping算法在电力系统发电机励磁控制方面,有较为成熟的理论应用<sup>[8-9]</sup>。但在应用adaptive backstepping算法设计FACTS装置控制器方面还有许多需要解决的问题。文献[10]针对一般参数反馈型系统提出了一种扩展adaptive backstepping算法,并将其用于SVC电力系统的非线性控制。该算法在提高系统暂态稳定性和参数估计方面优于传统backstepping算法,但在控制器设计过程中并未考虑系统未建模扰动对系统响应的影响。由于adaptive backstepping方法本身并不具有鲁棒性,因此通常都是将其与鲁棒控制算法(例如无源性或耗散系统理论等)结合在一起使用。而无源性和耗散系统理论是基于直观物理概念来研究非线性系统稳定性的鲁棒控制理论,使用无源反馈方法设计控制律的前提是系统严格无源,也就是要求系统输入输出之间的相对阶为1且是最小相位的<sup>[11]</sup>。这极大地限制了算法的使用。文献[12-13]使用无源系统理论和adaptive backstepping算法,分别解决了SVC无穷大电力系统和晶闸管控制串联电容器(TCSC)无穷大电力系统的扰动抑制问题以及不确定参数的自适应估计问题。但文献中对控制器的稳定性问题并未做理论证明,在控制器设计过程中也并未论证克服无源反馈方法的相对阶为1的限制。

本文在上述研究基础上,将耗散系统理论和adaptive backstepping两种控制方法结合起来,克服

了无源反馈算法只能为输入输出相对阶为1的系统设计控制律的限制,并在阻尼系数不能精确测量及外部扰动未知的情况下,为带有SVC的单机无穷大电力系统设计了非线性鲁棒自适应控制器。本文提出的算法不对系统模型做任何线性化处理,并为系统不确定参数设计了自适应参数估计器,为不确定扰动设计了鲁棒控制器,从而增强了系统的暂态稳定性。设计过程中使用Lyapunov函数构造能量供给律,以抑制扰动对系统响应的影响。经过稳定性理论验证,该控制器可以保证闭环系统内所有信号均一致有界且渐近稳定,使系统满足Lyapunov稳定性。系统仿真结果表明,在阻尼系数不能精确测量以及扰动未知的情况下,SVC接入点母线电压,系统发电机功角及角速度能够迅速稳定,闭环系统误差能够快速收敛到零。系统的这些暂态响应曲线也表明了所设计算法的有效性。

## 2 SVC电力系统非线性鲁棒控制器设计 (Design of SVC nonlinear robust controller for power system)

### 2.1 系统模型(System dynamic model)

假设带有SVC的单机无穷大电力系统结构模型如图1所示。固定电容器-晶闸管控制电抗器(FC-TCR)型SVC单相结构模型如图2(a)所示,SVC装置传递函数模型如图2(b)所示。

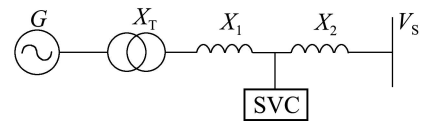
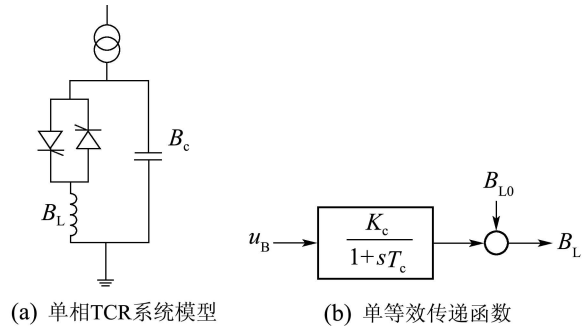


图1 SVC单机无穷大电力系统结构模型

Fig. 1 SVC single machine infinite system model



(a) 单相TCR系统模型

(b) 单等效传递函数

图2 单相FC-TCR型SVC系统模型

Fig. 2 Single phase FC-TCR SVC system model

建模时做如下假设:

- 1) 发电机采用经典二阶数学模型,且发电机暂态电势 $E'_q$ 恒定;
- 2) 原动机输入到发电机的机械功率 $P_m$ 恒定;
- 3) SVC采用FC-TCR型结构,并将其模拟为带输出限幅的比例放大延时环节,用以模拟功率放大和

移相触发的动态过程。

则根据系统结构模型和上述假设, SVC单机无穷大电力系统的动态数学模型可描述如下<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H}(P_m - P_e) - \frac{D}{H}(\omega - \omega_0) + w_1, \\ \dot{B}_L = \frac{1}{T_c}(-B_L + B_{L0} + K_c u_B) + w_2, \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$P_e = E'_q V_s B_L \sin \delta,$$

$$B_L = 1/X_1 + X_2 - X_1 X_2 (B_L - B_C),$$

$$X_1 = x'_d + X_T + X_L, \quad X_2 = X_L,$$

其中 $B_C$ 为固定电容器电纳值。

模型中各参数含义如下:  $\delta$ 为发电机转子角(rad);  $\omega$ 为发电机转子角速度(rad/s);  $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为同步角速度(rad/s);  $P_m$ 为原动机输出机械功率, 即发电机输入机械功率(pu);  $P_e$ 为发电机电磁功率(pu);  $D$ 为系统单位阻尼系数;  $H$ 为转子转动惯量(s);  $E'_q$ 为发电机 $q$ 轴的暂态电动势(pu);  $T_c$ 为SVC调节器时间常数(s);  $B_L$ 为SVC中电感的电纳(pu);  $B_{L0}$ 为电纳 $B_L$ 的初始值(pu);  $x'_d$ 为发电机 $d$ 轴暂态等效阻抗值(pu);  $X_L$ 为线路等效阻抗值(pu);  $X_T$ 为变压器等效阻抗值(pu);  $V_s$ 为无穷大母线电压(pu);  $K_c$ 为SVC调节器的放大系数;  $u_B$ 为SVC调节器的控制变量(pu);  $w = [w_1 \ w_2]^T$ 为不确定扰动向量,  $w_1$ 和 $w_2$ 为 $L_2$ 空间未知函数, 分别表示叠加在发电机转子与系统导纳上的不确定扰动。并且系统的运行平衡点设定为

$$[\delta_0 \ \omega_0 \ B_{L0}]^T.$$

## 2.2 模型变换(Model transformation)

首先分别进行变量和参数替换, 为此令

$$x_1 = \delta - \delta_0, \quad x_2 = \omega - \omega_0, \quad x_3 = B_L - B_{L0},$$

$$k_1 = \omega_0/H, \quad k_2 = \omega_0 E'_q V_s/H, \quad k_3 = 1/T_c.$$

并假设上述参数 $k_1, k_2, k_3$ 均为已知常数。模型中由于阻尼系数 $D$ 在实际应用中不易被精确测量, 因此将 $D$ 作为未知常参数, 使用自适应控制方法对其进行参数估计。在此令未知参数变量为 $\theta = -D/H$ , 则经过上述替换后, 系统模型(1)可表示如下:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (2.1)$$

$$\dot{x}_2 = \theta x_2 + k_1 P_m - k_2 (x_3 + B_{L0}) \sin(\delta_0 + x_1) + w_1, \quad (2.2)$$

$$\dot{x}_3 = k_3 (-x_3 + K_c u_B) + w_2. \quad (2.3)$$

假设系统的调节输出表示为:  $y = [q_1 x_1 \ q_2 x_2]^T$ , 其中 $q_1, q_2$ 为非负权重系数, 这两个参数可由控制器设定, 用以协调状态变量 $x_1$ 和 $x_2$ 的比重。可见, 系统(2)是含有未知参数且存在不确定扰动的非线性系统。对系统(2)使用无源反馈方法设计鲁棒控制器的

关键在于构造耗散系统能量储存函数 $V(x)$ , 使其在能量供给率函数为 $S = \gamma^2 \|w\|^2 - \|y\|^2$ 时, 系统满足耗散性。即构造能量储存函数 $V(x)$ , 使 $T > 0$ 时下列耗散不等式成立:

$$V(x(t)) - V(x(0)) \leq \int_0^T (\gamma^2 \|w\|^2 - \|y\|^2) dt. \quad (3)$$

若满足式(3), 则可表明从扰动到系统调节输出的 $L_2$ 增益小于或等于 $\gamma$ ,  $\gamma$ 为扰动衰减系数。本文假设在控制器的作用下系统不确定扰动 $w_1$ 和 $w_2$ 将具有相同的扰动衰减系数 $\gamma$ 。

## 2.3 基于耗散系统理论的无源反馈分析 (Feedback passification analysis based on dissipative system theory)

非线性系统能够使用无源反馈方法设计反馈控制律的前提是系统的相对阶为1。对于上述SVC单机无穷大电力系统(2), 下面计算其输入输出的相对阶。

首先求取输出 $y_1 = q_1 x_1$ 对于系统(2)的输入之间的相对阶:

对于系统(2)的确定部分组成的非线性系统, 将其与标准形式 $\dot{x} = f(x) + g(x)u$ 进行比较可得到

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \theta x_2 + k_1 P_m - k_2 (x_3 + B_{L0}) \sin(\delta_0 + x_1) \\ -k_3 x_3 \end{bmatrix},$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_3 K_c \end{bmatrix}.$$

对于输出 $y = q_1 x_1$ , 由Li导数运算法则可求得

$$L_g L_f^0 h(x) = L_g h(x) = [q_1 \ 0 \ 0][0 \ 0 \ k_3 K_c]^T = 0,$$

$$L_g L_f h(x) = [0 \ q_1 \ 0][0 \ 0 \ k_3 K_c]^T = 0,$$

$$L_g L_f^2 h(x) = k_2 k_3 K_c q_1 \sin(\delta_0 + x_1).$$

由上述计算结果可见, 当 $\delta_0 \neq 0, q_1 \neq 0, x_1 = 0$ 时, 有 $L_g L_f^2 h(x) \neq 0$ , 即系统在平衡点 $[x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [0 \ 0 \ 0]^T$ 处具有相对阶3。

同样可求得对于输出 $y = q_2 x_2$ , 系统在平衡点 $[x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [0 \ 0 \ 0]^T$ 处具有相对阶2, 因此系统不能直接采用无源反馈方法求取系统的控制律。为了解决这一问题, 本文将adaptive backstepping方法与无源反馈方法结合起来, 设计系统控制律: 首先, 对于由式(2.1)所表示的系统的一阶子系统, 将 $x_2$ 视作虚拟控制输入, 则根据相对阶的定义, 可知虚拟输入 $x_2$ 到输出之间的相对阶为1。因此可使用无源反馈方法通过构造能量储存函数得到这一虚拟控制的控制律; 然后对于由式(2.1)和式(2.2)所构成的系统的二阶子系统, 将 $x_3$ 视作虚拟控制输入, 而虚拟控制 $x_3$ 到输出之间的相对阶也为1, 因此同样可通过无

源反馈方法得到虚拟控制 $x_3$ 的控制律; 最后, 对于整个三阶非线性系统(2), 采用上述无源反馈方法可求得系统的“真实”控制律. 由上述分析可知, 所提算法克服了无源反馈算法对系统模型要求输入输出相对阶为1的限制. 下面将详述使用所提算法设计系统鲁棒控制律和参数自适应估计器的过程.

### 3 基于adaptive backstepping的鲁棒控制器设计(Robust controller design based on adaptive backstepping)

#### 3.1 控制器设计(Controller design)

本节使用adaptive backstepping算法与无源反馈方法相结合为上述SVC系统设计自适应鲁棒控制器. 通过使虚拟控制与输出的相对阶为1, 从而可使用无源反馈方法设计虚拟控制律, 用以稳定子系统的暂态响应. 设计时每一步骤中都要设计能量储存函数和候选Lyapunov函数(CLF), CLF函数中包含了子系统的误差状态变量和不确定扰动项, 因此根据Lyapunov稳定性判据, 控制器可保证系统的解全局一致有界且渐近稳定. 并在最后一步推导中得到系统的控制律.

**Step 1** 首先, 对于由式(2.1)所表示的系统的一阶子系统, 将 $x_2$ 视作虚拟控制输入. 其中间控制律用 $x_2^*$ 表示; 对于由式(2.1)和式(2.2)所构成的系统的二阶子系统, 将 $x_3$ 视作虚拟控制输入, 其中间控制律用 $x_3^*$ 表示. 因此定义系统误差函数为

$$e_1 = x_1, \quad (4)$$

$$e_2 = x_2 - x_2^*, \quad (5)$$

$$e_3 = x_3 - x_3^*. \quad (6)$$

对式(4)进行微分可得到

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_2 = e_2 + x_2^*. \quad (7)$$

定义第1个CLF如下:

$$V_1 = \sigma e_1^2/2, \quad \sigma > 0. \quad (8)$$

这样, 根据无源反馈方法, 求取虚拟控制 $x_2$ 的中间控制律为 $x_2^* = -c_1 x_1$ , 其中常数 $c_1 > 0$ .

对式(8)进行微分可得到

$$\dot{V}_1 = \sigma e_1 \dot{e}_1 = \sigma c_1 e_1^2. \quad (9)$$

**Step 2** 对于由式(2.1)和式(2.2)所构成的系统的二阶子系统. 定义第2个CLF如下:

$$V_2 = V_1 + e_2^2/2. \quad (10)$$

同时, 定义包含不确定扰动项 $w_1$ 的能量供给率函数

$$S_1 = \dot{V}_2 + (\|y\|^2 - \gamma^2 \|w_1\|^2)/2. \quad (11)$$

将式(7)–(8)(10)代入式(11)中, 整理后可得

$$\begin{aligned} S_1 = & \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{1}{2}(q_1^2 x_1^2 + q_2^2 x_2^2 - \gamma^2 w_1^2) = \\ & -\alpha e_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2} w_1 - \frac{e_2}{\gamma}\right)^2 - \frac{1}{4} \gamma^2 w_1^2 + e_2 [\beta_1 x_1 + \\ & \beta_2 x_2 + \theta x_2 + k_1 P_m - k_2 (x_3 + B_{L0}) \sin(\delta_0 + x_1)], \end{aligned} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} \alpha = \sigma c_1 - \frac{1}{2} q_1^2 - \frac{1}{2} q_2^2 c_1^2, \\ \beta_1 = \frac{c_1}{\gamma^2} - \frac{c_1}{2} q_2^2 + \sigma, \\ \beta_2 = \frac{1}{\gamma^2} + \frac{1}{2} q_2^2 + c_1. \end{cases} \quad (13)$$

若要使这个二阶子系统满足式(3)表示的耗散不等式, 则等式(12)右边应不大于零. 因此参数的选取要使得 $\alpha > 0$ . 同时可以通过无源反馈设计得到虚拟控制输入 $x_3$ 的中间控制律为

$$x_3^* = \frac{\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \hat{\theta} x_2 + k_1 P_m}{k_2 \sin(\delta_0 + x_1)} - B_{L0}. \quad (14)$$

式(14)中, 由于 $\theta$ 为未知变量, 因此式中使用 $\theta$ 的估计值 $\hat{\theta}$ . 将 $x_3^*$ 代入式(12)中, 整理可得

$$S_1 = -\alpha e_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2} w_1 - \frac{e_2}{\gamma}\right)^2 - \frac{1}{4} \gamma^2 w_1^2 + e_2 \tilde{\theta} x_2, \quad (15)$$

其中 $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 为参数估计器误差.

**Step 3** 这一步对整个三阶非线性系统(2), 求取最终控制律 $u_B$ . 基于上一步中得到的式(10)所示的CLF, 增加估计器的误差项来构造新的CLF, 因此第3个CLF可构造如下:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} e_3^2 + \frac{1}{2\rho} \tilde{\theta}^2, \quad (16)$$

其中: 参数 $\rho > 0$ 为自适应控制器的增益. 首先求取 $e_3$ 的微分:

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 = & k_3(-x_3 + k_c u_B) + w_2 - \\ & \frac{1}{k_2} \left( \frac{\beta_1 x_2 + (\beta_2 + \hat{\theta}) x_2 + \hat{\theta} x_2}{\delta_{\sin}} - \right. \\ & \left. \frac{(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \hat{\theta} x_2 + k_1 P_m) x_2 \delta_{\cos}}{\delta_{\sin}^2} \right), \end{aligned} \quad (17)$$

式中:  $\delta_{\sin} = \sin(\delta_0 + x_1)$ ,  $\delta_{\cos} = \cos(\delta_0 + x_1)$ .

同时, 定义包含不确定扰动项 $w_1$ 和 $w_2$ 的新能量供给率函数如下:

$$S_2 = \dot{V}_3 + \frac{1}{2} (\|y\|^2 - \gamma^2 \|w_1\|^2 - \gamma^2 \|w_2\|^2). \quad (18)$$

将式(16)–(17)代入式(18)中, 整理后可得

$$\begin{aligned} S_2 = & \\ S_1 + e_3 \dot{e}_3 + & \frac{1}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} - \frac{1}{2} \gamma^2 w_2^2 = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\alpha e_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2}w_1 - \frac{e_2}{\gamma}\right)^2 - \frac{1}{4}\gamma^2 w_1^2 - \frac{1}{2}\gamma^2 w_2^2 + \\
& e_3 w_2 + \frac{1}{\rho}\tilde{\theta}\dot{\theta} + e_2\tilde{\theta}x_2 + e_3\{k_3(-x_3 + k_c u_B) - \\
& \frac{1}{k_2}[(\beta_1 x_2 + (\beta_2 + \hat{\theta})(\theta x_2 + k_1 P_m - \\
& k_2(x_3 + B_{L0})\delta_{\sin} + w_1) + \dot{\theta}x_2)/\delta_{\sin} - \\
& \frac{(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \hat{\theta}x_2 + k_1 P_m)x_2\delta_{\cos}}{\delta_{\sin}^2}]\}. \quad (19)
\end{aligned}$$

注意: 由 $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 可得到 $\dot{\tilde{\theta}} = -\dot{\hat{\theta}}$ . 将其代入上式可得

$$\begin{aligned}
S_2 = & -\alpha e_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2}w_1 - \frac{e_2}{\gamma}\right)^2 - \left(\frac{\gamma}{2}w_1 + \frac{(\beta_2 + \hat{\theta})e_3}{k_2\delta_{\sin}\gamma}\right)^2 - \\
& \left(\frac{\gamma}{2}w_2 - \frac{e_3}{\gamma}\right)^2 - \frac{1}{4}\gamma^2 w_2^2 + \left(\frac{\beta_2 + \hat{\theta}}{k_2\delta_{\sin}\gamma}e_3\right)^2 + \left(\frac{e_3}{\gamma}\right)^2 - \\
& \frac{1}{\rho}\tilde{\theta}\dot{\theta} + e_2\tilde{\theta}x_2 - \frac{(\beta_2 + \hat{\theta})e_3\tilde{\theta}x_2}{k_2\delta_{\sin}} + e_3\{k_3(-x_3 + \\
& k_c u_B) - \frac{1}{k_2}[(\beta_1 x_2 + (\beta_2 + \hat{\theta})(\theta x_2 + k_1 P_m - \\
& k_2(x_3 + B_{L0})\delta_{\sin} + \dot{\theta}x_2)/\delta_{\sin} - \\
& \frac{(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \hat{\theta}x_2 + k_1 P_m)x_2\delta_{\cos}}{\delta_{\sin}^2}]\}. \quad (20)
\end{aligned}$$

若要使整个三阶系统满足式(3)表示的耗散不等式, 则式(20)等式右边应不大于零. 因此参数的选取要使得 $\alpha > 0$ . 同时可以通过无源反馈设计得到系统控制输入 $u_B$ 的控制律为

$$\begin{aligned}
u_B = & \frac{1}{k_c}x_3 + \frac{1}{k_c k_2 k_3}[\beta_1 x_2 + (\beta_2 + \hat{\theta})(\hat{\theta}x_2 + \\
& k_1 P_m - k_2(x_3 + B_{L0})\delta_{\sin} + \dot{\theta}x_2)/\delta_{\sin} - \\
& \frac{(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \hat{\theta}x_2 + k_1 P_m)x_2\delta_{\cos}}{\delta_{\sin}^2} - \\
& \frac{e_3}{k_c k_3} \left(\frac{\beta_2 + \hat{\theta}}{k_2\delta_{\sin}\gamma}\right)^2 - \frac{e_3}{k_c k_3 \gamma^2}]. \quad (21)
\end{aligned}$$

同时得到不确定参数 $\theta$ 的参数估计器为

$$\dot{\hat{\theta}} = \rho \left(e_2 - \frac{(\beta_2 + \hat{\theta})e_3}{k_2\delta_{\sin}}\right)x_2. \quad (22)$$

式(20)在反馈控制律(21)和参数估计器(22)的作用下, 可整理为如下形式:

$$\begin{aligned}
S_2 = & \dot{V}_3 + \frac{1}{2}(\|z\|^2 - \gamma^2 \|w_1\|^2 - \gamma^2 \|w_2\|^2) = \\
& -\alpha e_1^2 - \left(\frac{\gamma}{2}w_1 - \frac{e_2}{\gamma}\right)^2 - \left(\frac{\gamma}{2}w_1 - \frac{(\beta_2 + \hat{\theta})e_3}{k_2\delta_{\sin}\gamma}\right)^2 - \\
& \left(\frac{\gamma}{2}w_2 - \frac{e_3}{\gamma}\right)^2 - \frac{1}{4}\gamma^2 w_2^2. \quad (23)
\end{aligned}$$

由上式可看出, 只需选择参数 $\sigma$ 使得式(13)中 $\alpha \geq 0$ 就可使 $S_2 \leq 0$ , 从而保证了系统满足耗散不等式(3), 因此由所提算法所求得系统控制律可保证系统中不确定扰动具有不大于 $\gamma$ 的 $L_2$ 增益, 以保证系统对于不确定扰动的鲁棒性. 下面对稳定性进行理论证明.

### 3.2 系统稳定性理论证明(Theoretical verification)

首先, 令 $V(x, t) = 2V_3(x, t)$ , 可以得到

$$\dot{V} = 2\dot{V}_3 \leq \gamma^2 \|w_1\|^2 + \gamma^2 \|w_2\|^2 - \|y\|^2. \quad (24)$$

将式(24)两边积分, 可得下面的耗散不等式:

$$\begin{aligned}
V(x(t)) - V(x(0)) \leq & \int_0^T (\gamma^2 \|w_1\|^2 + \gamma^2 \|w_2\|^2 - \|y\|^2) dt. \quad (25)
\end{aligned}$$

式(25)所示的耗散不等式表明从不确定扰动到输出具有不大于 $\gamma$ 的 $L_2$ 增益. 同时, 由式(7)(12)和式(17)可得闭环系统误差如下所示:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - c_1 e_1, \\ \dot{e}_2 = (c_1 q_2^2 - \sigma - c_1 \tilde{\theta})e_1 - \left(\frac{1}{\gamma^2} + \frac{1}{2}q_2^2 - \tilde{\theta}\right)e_2, \\ \dot{e}_3 = \frac{c_1(\beta_2 + \hat{\theta})\tilde{\theta}}{k_2\delta_{\sin}}e_1 - \frac{(\beta_2 + \hat{\theta})\tilde{\theta}}{k_2\delta_{\sin}}e_2 - \\ \left[\left(\frac{\beta_2 + \hat{\theta}}{k_2\delta_{\sin}\gamma}\right)^2 + \frac{1}{\gamma^2}\right]e_3. \end{cases} \quad (26)$$

根据式(20)构造如下正定函数:

$$\begin{aligned}
W(d_n, \tilde{w}_m) = & \alpha d_1^2 + \left(\frac{\gamma}{2}\tilde{w}_1 - \frac{d_2}{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\gamma}{2}\tilde{w}_1 - \frac{(\beta_2 + \hat{\theta})d_3}{k_2\delta_{\sin}\gamma}\right)^2 + \\
& \left(\frac{\gamma}{2}\tilde{w}_2 - \frac{d_3}{\gamma}\right)^2 + \frac{1}{4}\gamma^2 \tilde{w}_2^2, \quad (27)
\end{aligned}$$

其中:  $n = 1, 2, 3$ ;  $m = 1, 2$ ;  $[d_1 \ d_2 \ d_3]^T$ 为系统误差平衡点,  $\tilde{w}_1$ 和 $\tilde{w}_2$ 分别表示 $w_1$ 和 $w_2$ 的上确界.

由于在平衡点处系统状态维持不变, 因此 $d_1, d_2, d_3$ 为常数且与运行时间无关. 而非线性系统(2)可知,  $w_1$ 和 $w_2$ 为 $L_2$ 空间未知函数, 即 $\int_0^\infty \|w_m\|^2 < +\infty$ , 其中 $m = 1, 2$ . 因此 $w_1$ 和 $w_2$ 的上确界是存在的, 分别为 $\tilde{w}_1$ 和 $\tilde{w}_2$ .

由式(27)可见, 函数(27)对于变量 $d_1, d_2, d_3$ 和 $\tilde{w}_1, \tilde{w}_2$ 均满足时间域上的Lipschitz连续, 且由式(24)可得

$$\dot{V}(x, t) \leq -W(d_n, \tilde{w}_m) \leq 0.$$

由LaSalle-Yoshizawa定理可知, 系统(26)的所有解全局一致有界且渐近稳定; 系统平衡点是全局一致渐近稳定的. 用公式描述, 即: 当 $\tilde{w}_1, \tilde{w}_2 \rightarrow 0, d_1, d_2, d_3 \rightarrow 0$ 时,

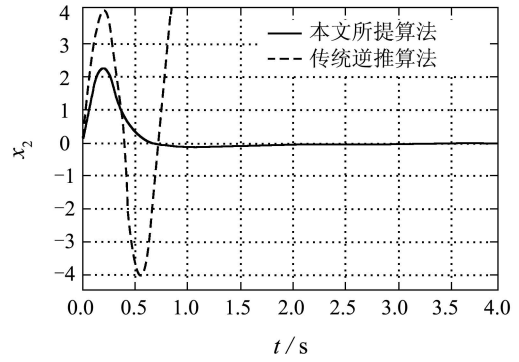
$$\lim_{t \rightarrow \infty} W(d_n, \tilde{w}_m) = 0. \quad (28)$$

稳定性分析: 由模型变量替换可知,  $x_1$ 表示的是发电机功角与功角初值的差值,  $x_2$ 表示的是发电机转子角速度与初始角速度的差值,  $x_3$ 表示的是SVC输出导纳与导纳初值的差值. 因此 $x_1, x_2$ 均收敛到零, 说明电力系统发电机功角和转子角速度在控制器和自适应估计器的作用下回到初值并稳定运行;  $x_3$ 有界说明SVC系统输出导纳到达一个有界稳态值并稳定运行. 因此本文所设计的鲁棒控制器算法可以使得SVC单机无穷大电力系统发电机功角稳定, 角速度稳定, SVC系统输出等效导纳有界且稳定. 亦即在系统遭受不确定扰动以及含有参数不确定的情况下, 控制律和参数估计器可保证SVC电力系统的暂态稳定性.

#### 4 仿真结果与分析(Simulation results and analysis)

为检验算法的有效性, 对上述理论论证过的算法进行数字仿真. 采用MATLAB中的M函数对控制器进行设计, 对带有不确定扰动的非线性系统(2)进行仿真. 其参数设置如下:  $H = 8, w_0 = 314, c_1 = 0.8, \gamma = 2, \rho = 5, \sigma = 1, q_1 = 0.6, q_2 = 0.4, E'_q = 1, V_s = 1, \delta_0 = 0.5, K_c = 1, T_c = 1$ . 并与未结合使用耗散系统理论的Backstepping算法设计的控制器做了仿真比较. 图3(a)和3(b)分别为状态变量 $x_1$ 和 $x_2$ 的时间响应曲线. 从图中可看出, 对于带有SVC的单机无穷大电力系统, 本文所提算法可以很快稳定发电机功角和转子角速度.

仿真过程中, 通过对不同参数设置的响应曲线进行分析比较, 发现对系统响应稳定性影响最大的参数为扰动衰减系数 $\gamma$ .  $\gamma$ 值越小, 系统稳定速度越快, 对系统稳定性的影响越显著. 另外, 如果 $\gamma$ 值设置过大, 可能引起系统响应不稳定和振荡. 图4是SVC接入点系统电压响应曲线. 由图4可知, 虽然两种算法均可迅速稳定系统电压, 但本文所提算法在响应速度和减小电压振荡方面优于传统Backstepping方法. 最后, 对系统误差式(26)进行仿真, 得到系统误差 $e_1, e_2, e_3$ 的时间响应曲线分别如图5(a), 5(b)和5(c)所示. 由图可知, 3个误差变量均迅速收敛至零, 与理论证明一致.



(b) 状态变量 $x_2$ 时间响应

图3 系统状态变量响应

Fig. 3 System states variables response

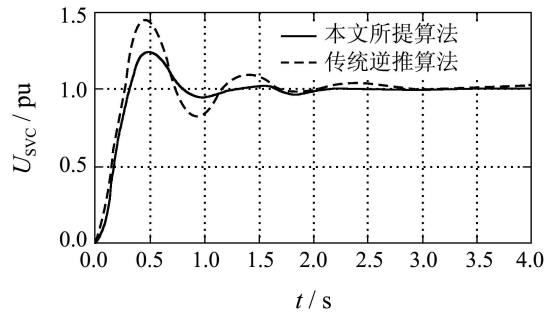
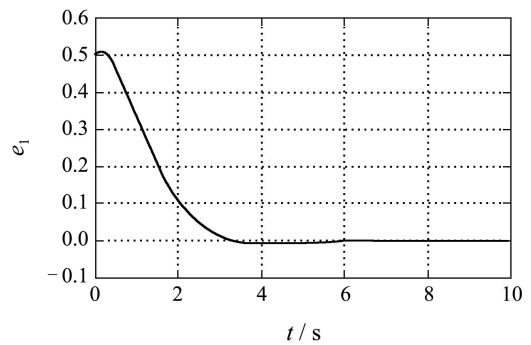
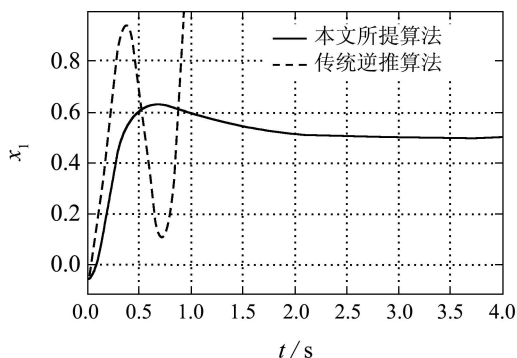


图4 SVC接入点系统电压响应

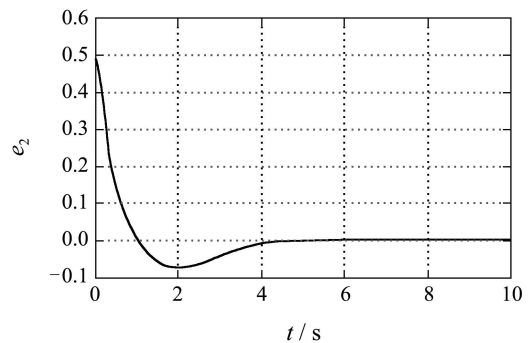
Fig. 4 System voltage response in SVC connect point



(a) 误差变量 $e_1$ 响应



(a) 状态变量 $x_1$ 时间响应



(b) 误差变量 $e_2$ 响应

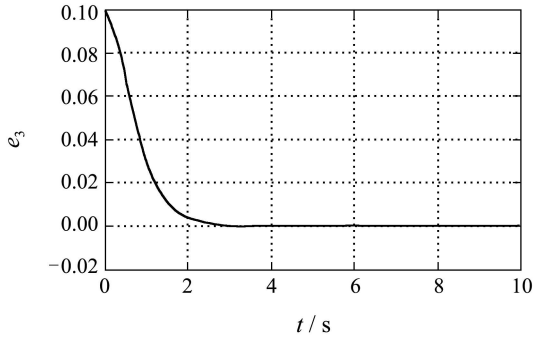
(c) 误差变量 $e_3$ 响应

图5 系统误差状态响应

Fig. 5 Response of system error

## 5 结论(Conclusion)

本文针对带有不确定参数和不确定扰动的SVC单机无穷大电力系统设计了鲁棒自适应非线性控制器. 通过将耗散系统理论和adaptive backstepping算法相结合, 克服了无源反馈算法只能对输入输出相对阶为1的系统设计反馈控制律的限制, 为三阶SVC电力系统设计了鲁棒自适应反馈控制律. 本文所提算法不需对非线性系统模型做任何线性化处理, 设计中采用Lyapunov函数来构造能量供给率函数, 并同时为不确定参数设计了自适应参数估计器. 最后通过理论和仿真验证了所提算法的有效性, 并同时证明了在系统遭受不确定扰动以及含有参数不确定的情况下, 控制器和参数估计器也可以保证SVC电力系统的暂态稳定性. 另外, 本文所提算法也可用于其他FACTS装置控制器的设计, 如晶闸管控制串联电容器(TCSC)、静止同步补偿器(STATCOM)等, 具有广泛的应用前景.

## 参考文献(References):

- [1] CONGA L, WANG Y, HILL D J. Transient stability and voltage regulation enhancement via coordinated control of generator excitation and SVC[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2005, 27(2): 121 – 130.
- [2] MATHUR R M, VARMA R K. 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: 190 – 230. (MATHUR R M, VARMA R K. *Thyristor-Based Facts Controllers for Electrical Transmission Systems*[M]. XU Zheng, translate. Beijing: China Machine Press, 2005: 190 – 230.)
- [3] KARIMI A, FELIACHI A, CHOUDHRY M A. On an SVC backstepping damping nonlinear controller design for power systems[C] // *Proceedings of the 2007 International Institute for Research and Education in Power System Dynamics (iREP) Symposium, 2007 iREP Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control-VII. Revitalizing Operational Reliability*. Charleston, SC, USA: [s.n.], 2007: 1 – 8.
- [4] FUNAKI T, NAKAGAWA K, HIKIHARA T. The origin of nonlinear phenomena in TCR-SVC associated with parametric excitation of intrinsic oscillation and external excitation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2008, 55(9): 2952 – 2958.
- [5] WANG Y, CHEN H, ZHOU R. A nonlinear controller design for SVC to improve power system voltage stability[J]. *IEEE Transactions on Electrical Power and Energy Systems*, 2000, 22(7): 463 – 470.
- [6] SWPULCHRE R, JANKOVIC M, KOKOTOVIC P V. *Constructive Nonlinear Control*[M]. London: Springer, 1997: 229 – 239.
- [7] ZHOU J, WEN C Y, ZHANG Y. Adaptive backstepping control of a class of uncertain nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(10): 1751 – 1757.
- [8] ROOSTA A R, GEROGES D, SAID N H. Nonlinear control for power systems based on a backstepping method[C] // *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*. New York: IEEE, 2001: 3037 – 3042.
- [9] LEE S S, LI S Y, PARK J K. Nonlinear adaptive back-stepping controller design for power systems stabilizer in multi-machine power systems[C] // *American Control Conference*. New York: IEEE, 2008: 2504 – 2509.
- [10] 付俊, 赵军. 基于扩展自适应Backstepping设计的TCSC非线性控制的新方法[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 355 – 361. (FU Jun, ZHAO Jun. A new method based on extended adaptive backstepping for nonlinear control of TCSC[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 355 – 361.)
- [11] 冯纯伯, 张侃健. 非线性系统的鲁棒控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 115 – 130. (FENG Chunbo, ZHANG Kanjian. *Robust Control for Nonlinear Systems*[M]. Beijing: Science Press, 2003: 115 – 130)
- [12] LI W L, LIU S R, JING Y W. Nonlinear robust control based on adaptive backstepping design for static VAR compensator[C] // *Proceedings of the 23th Chinese Control Conference*. Wuxi: East China University of Science & Technology Press, 2004: 1250 – 1253.
- [13] 李文磊, 张智焕, 井元伟, 等. 基于自适应Backstepping设计的TCSC非线性鲁棒控制器[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(1): 154 – 160. (LI Wenlei, ZHANG Zhihuan, JING Yuanwei, et al. Nonlinear robust control based on adaptive backstepping design for TCSC[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(1): 154 – 160.)
- [14] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 212 – 228. (LU Qiang, MEI Shengwei, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control of Power Systems*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 212 – 228.)

## 作者简介:

张蕾 (1981—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为柔性交流输电系统非线性鲁棒控制算法, E-mail: zhang.lei.724@stu.xjtu.edu.cn;

张爱民 (1962—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为非线性控制理论及应用、高压直流输电和交流输电控制保护研究以及电子设备EMS分析, E-mail: zhangam@mail.xjtu.edu.cn;

韩九强 (1951—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能检测理论及应用、图像信息融合与模式识别、嵌入式技术与智能仪器仪表, E-mail: jqhan@mail.xjtu.edu.cn;

张杭 (1962—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为智能电器、电力系统控制与保护以及电力电子技术, E-mail: zhangh@mail.xjtu.edu.cn.