

文章编号: 1001-0920(2006)10-1163-04

## TCSC 控制的一种新自适应 Backstepping 方法

付 俊<sup>1</sup>, 冯佳昕<sup>2</sup>, 赵 军<sup>1</sup>

(1. 东北大学 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2 上海财经大学 信息管理与工程学院, 上海 200433)

**摘 要:** 针对带有 TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator) 的单机无穷大电力系统, 提出一种新的 TCSC 自适应非线性控制 Backstepping 方法。该方法不仅保留了系统的非线性特性和对未知参数的实时在线估计, 而且突破了经典的确定性等价性原理来设计参数估计器和动态反馈控制器。仿真结果表明, 与基于传统自适应 Backstepping 得到的控制设计相比较, 这种新方法在系统响应和自适应速度方面具有更优越的性能, 从而为工程应用提供了一种有效的选择。

**关键词:** 非线性控制; 新自适应 Backstepping; 电力系统; 灵活交流输电系统; 晶闸管控制串联补偿  
**中图分类号:** TP13 **文献标识码:** A

## Novel Adaptive Backstepping Method for TCSC Control

FU Jun<sup>1</sup>, FENG Jia-xin<sup>2</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2 School of Information Management and Engineering, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China. Correspondent: FU Jun, Email: fuziling@126.com)

**Abstract** A novel adaptive Backstepping method for the nonlinear control of a single machine infinite bus power system with TCSC is developed. The method preserves useful nonlinearities and the real-time estimation of unknown parameters but does not follow the classical certainty-equivalence principle in the design of the parameter estimator and dynamic feedback. The simulation results demonstrate that the proposed method provides better properties of stability and parameter estimation than the design based on classical adaptive Backstepping.

**Key words:** Nonlinear control; Novel adaptive Backstepping; Power systems; Flexible AC transmission systems; Thyristor controlled series compensation

### 1 引 言

经济的飞速发展使得在各个领域, 特别是工业, 对电能有着大量的需求。由于现有电力系统的容量和电网结构的复杂性, 从经济和生态的角度出发, 增加新的传输线和扩展现有的传输系统都将变得越来越困难, 因此, 使电力系统以最大的能力传输电能是非常必要的。然而, 长距离、重负荷区域间的交流传输系统通常被一些典型问题所制约, 如过负荷传输

会影响静态稳定性; 由于扰动会导致失去同步的暂态稳定等<sup>[1,2]</sup>。近年来, 灵活交流输电系统 (FACTS) 的出现除了可提高现代电力系统的有效传输容量之外, 也可以改善电力系统稳定性能。晶闸管控制串联补偿器 (TCSC) 作为柔性交流输电系统 (FACTS) 中重要成员之一, 对其控制, 即晶闸管控制串联补偿来解决上述问题是一种有效、经济的解决方案<sup>[1-5]</sup>。因此 TCSC 技术被广泛应用于国内外大中型发电

收稿日期: 2005-07-11; 修回日期: 2005-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60574013, 60274009); 高等学校博士学科点专项科研项目 (20020145007); 辽宁省自然科学基金项目 (20032020)。

作者简介: 付俊 (1979—), 男, 内蒙古乌盟人, 博士生, 从事非线性鲁棒控制及其在电力系统中的应用等研究; 赵军 (1957—), 男, 辽宁海城人, 教授, 博士生导师, 从事复杂非线性系统结构、切换系统等研究。

厂<sup>[1-3]</sup>和以发电、输电、供电等相关实际电力工程为背景的研究,如三峡-万县 500 kV 输电工程<sup>[4]</sup>等

对于 TCSC 控制,传统方式是对系统模型近似线性化,没有考虑系统的非线性特性<sup>[6]</sup>。而反馈线性化方法虽然基于系统的非线性模型进行设计<sup>[7,8]</sup>,但它不仅对原系统进行了线性化,而且要求系统有精确的数学模型,因此它不具备对参数和结构变化的鲁棒性;同时系统模型中往往忽略了 TCSC 本身的动态过程,尽管将该方法与其他鲁棒控制方法结合可望解决参数不确定性问题,但最终所设计的控制器是基于线性化后的系统模型<sup>[9]</sup>。

近十几年来,Backstepping 方法受到许多学者的关注,已成为一种非线性控制的有效方法<sup>[10]</sup>,该方法不仅保留了一些有用的非线性项,而且相关 Lyapunov 函数和反馈控制律的设计都是系统的。特别是对于系统模型具有未知参数时,应用自适应 Backstepping 可以得到动态反馈控制器,其未知参数被实时在线刷新。文献[11]将该方法应用于 TCSC 的控制设计,完整保留了系统的非线性特性,这点是上述线性化方法所没有的。传统的自适应律的设计是基于确定性等价原理

本文首次基于文献[12,13]中的新非线性控制和自适应思想,对于工程中常用的带有 TCSC 的单机无穷大电力系统的二阶模型<sup>[14]</sup>,提出了 TCSC 非线性控制的一种新方法。该方法不仅保留了系统的非线性特性和对未知参数的实时在线估计,而且突破了经典的确定性等价性原理来设计参数估计器和动态反馈控制器

### 2 预备知识

意大利学者 Astolfi 和墨西哥学者 Ortega 在 2003 年提出了一种不遵守确定性等价原理的自适应机制<sup>[12]</sup>,可简单描述为:

考虑系统

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

其中:状态  $x \in R^n$ , 系统输入  $u \in R^m$ , 未知常参数  $\theta \in R^p$ 。假设  $f(x^*, \theta) = 0$ ,  $x^*$  是将被镇定的平衡点

假设存在一个参数化控制律  $u^* = \alpha(x, \theta)$ , 使得  $x = x^*$  是系统(1)的全局渐近稳定平衡点。现在考虑系统

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, \hat{\theta} + \eta) + g(x)\alpha(x, \hat{\theta} + \eta), \\ \dot{\hat{\theta}} &= \eta(x, \hat{\theta}), \end{aligned} \quad (2)$$

和误差变量  $z = \hat{\theta} - \theta + \eta(x)$ , 于是,自适应控制问题就等价于选择  $\eta(\cdot)$  和  $\eta(\cdot)$  使得系统(2)的轨迹有界,并且

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \{g(x)[\alpha(x, \hat{\theta} + \eta(x)) - \alpha(x, \theta)]\} = 0,$$

那么系统(2)就渐近地被“浸入”(asymptotical immersion)到当  $u = u^*$  的系统(1),因此平衡点  $x^*$  是渐近稳定的

显然,在这种框架下,自适应镇定问题可以变成两个任务:1) 寻找一个全息控制器使得闭环系统稳定,而且具有特定的鲁棒特性;2) 找到一种鲁棒自适应机制能渐近地重构全息控制律,同时保持整个系统的稳定性

注 1 系统(2)的控制律不再遵循确定性等价原理,因为用  $\hat{\theta} + \eta(x)$  替代了  $\theta$  其中除了(2)的第一个方程引入了比例行为外,  $\eta(x)$  还引入了积分行为。因此这种自适应机制通常看成是非线性比例-积分自适应<sup>[15]</sup>。

### 3 系统模型和控制目标

考虑带有 TCSC 的单机无穷大母线系统 (SM B),系统结构如图 1 所示

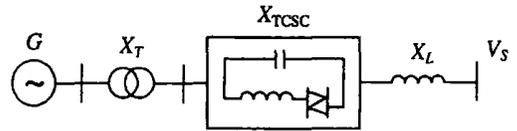


图 1 带有 TCSC 的单机无穷大系统结构

若略去线路和 TCSC 本身的电磁暂态过程,假定发电机暂态电势  $E_q$  和机械输入功率  $P_m$  恒定,则安装 TCSC 的单机无穷大系统可用以下非线性状态方程表示:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega - \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{\omega}{H} \left[ P_m - \frac{D}{\omega} (\omega - \omega) - \frac{E_q V_s}{X_1 + X_2 + X_{TCSC}} \sin \delta \right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $\delta$  为发电机转子运行角(rad);  $\omega$  为发电机转子角速度(rad/s);  $P_m$  为原动机输出的机械功率;  $H$  为发电机转子的转动惯量;  $D, E_q$  分别为阻尼系数和发电机  $q$  轴暂态电势;  $V_s$  为无穷大母线电压;  $X_1, X_2$  为输电线路电抗;  $X_{TCSC}$  为控制变量,表示 TCSC 的等效电抗;  $\delta_0, \omega_0$  为对应变量的初始值。其他无特殊说明的单位均为标么值

通常情况下阻尼系数  $D$  难以精确测量,因此其中不可避免地包含一定的不确定性,现假设  $D$  为不确定常参数,从而  $\theta = -D/H$  亦为不确定常参数

令  $x_1 = \delta - \delta_0, x_2 = \omega - \omega_0$ , 则系统(3)可写成如下的参数反馈型:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + \mathcal{Q}(x_1)^T \theta, \\ \dot{x}_2 &= u + \mathcal{Q}(x_1, x_2)^T \theta, \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\mathcal{Q}(x_1) = 0, \mathcal{Q}(x_1, x_2) = x_2,$$

$$u = \frac{\omega}{H} \left[ P_m - \frac{E_d V_s}{X_1 + X_2 + X_{TCSC}} \sin(\delta_0 + x_1) \right] \quad (5)$$

本文的控制目标是调节状态  $x_1$  到零。由于  $\mathcal{Q}(x_1)$  使得式(4)的结构特殊化,从而状态  $x_2$  最终亦为零,即确保系统同步运行。

#### 4 TCSC 控制设计

下面将考虑单机无穷大电力系统模型(3)中阻尼系数  $D$  不能精确测量的情况下 TCSC 的非线性设计。

##### 4.1 估计器设计

首先,定义估计误差变量(从(5)知  $\theta$  无需估计)

$$z_2 = \hat{\theta} - \theta + \beta_2(x_1, x_2), \quad (6)$$

对(6)求导,得其动态为

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 = & \dot{\hat{\theta}} + \frac{\partial \beta_2(x_1, x_2)}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial \beta_2(x_1, x_2)}{\partial x_2} [u + \\ & \mathcal{Q}(x_1, x_2) (\hat{\theta} + \beta_2(x_1, x_2) - z_2)] \end{aligned} \quad (7)$$

其次,选择参数刷新律为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}} = & - \frac{\partial \beta_2(x_1, x_2)}{\partial x_1} x_2 - \frac{\partial \beta_2(x_1, x_2)}{\partial x_2} [u + \\ & \mathcal{Q}(x_1, x_2) (\hat{\theta} + \beta_2(x_1, x_2))] \end{aligned} \quad (8)$$

从而得

$$\dot{z}_2 = - \frac{\partial \beta_2(x_1, x_2)}{\partial x_2} \mathcal{Q}(x_1, x_2) z_2 \quad (9)$$

选择  $\beta_2(x_1, x_2) = \frac{1}{2} k x_2^2$ ,  $k$  为任意正常数。于是估计误差的动态变为

$$\dot{z}_2 = - k x_2^2 z_2 \quad (10)$$

最后,选取函数  $V_1 = \frac{1}{2} z_2^2$ , 其对时间的导数为

$$\frac{d}{dt} (V_1(t)) = - k (x_2 z_2)^2 \quad (11)$$

由(11)知,  $V_1$  是时间的减函数,所以  $z_2$  有界;对(11)两端在  $(0, +\infty)$  上积分,可知  $x_2 z_2$  平方可积,从而  $x_2$  亦有界;最后从(10)可知  $z_2$  渐近趋于 0,即从(6)可知  $\hat{\theta} + \beta_2(\cdot)$  渐近估计  $\theta$ 。

##### 4.2 控制器设计

下面进行递推设计来得到控制器

Step 1: 对于系统(4),定义  $\tilde{x}_1 = x_1 - x_1^*$  (由控制目标可知常数  $x_1^*$  为 0), 其动态为

$$\dot{\tilde{x}}_1 = \dot{x}_1 = x_2, \quad (12)$$

把  $x_2$  作为虚拟控制,定义  $\tilde{x}_2 = x_2 - \xi_2(x_1)$ , 选择

$$\xi_2(x_1) = -\alpha(\tilde{x}_1), \quad (13)$$

$\alpha(\cdot)$  为待定设计函数  $\tilde{x}_1$  的动态可表示为:

$$\dot{\tilde{x}}_1 = -\alpha(\tilde{x}_1) + \tilde{x}_2 \quad (14)$$

Step 2:  $\tilde{x}_2$  的动态可由下式给出:

$$\dot{\tilde{x}}_2 = \dot{x}_2 - \frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} x_1, \quad (15)$$

结合(4),式(15)为

$$\dot{\tilde{x}}_2 = u + x_2 \theta - \frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} x_2 \quad (16)$$

选择

$$\begin{aligned} u = & -\alpha(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) - x_2 [\hat{\theta} + \\ & \beta_2(x_2)] + \frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} x_2, \end{aligned} \quad (17)$$

从而,由(14), (16)和(17)可得在  $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)$  坐标下的闭环系统为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1 = & -\alpha(\tilde{x}_1) + \tilde{x}_2, \\ \dot{\tilde{x}}_2 = & -\alpha(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) - x_2 z_2 \end{aligned} \quad (18)$$

选择函数  $V_2 = \frac{1}{2} \tilde{x}_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{x}_2^2$ , 沿系统(18)的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -\tilde{x}_1 \alpha(\tilde{x}_1) + \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 - \\ & \tilde{x}_2 \alpha(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) - \tilde{x}_2 x_2 z_2 \\ & - \tilde{x}_1 \alpha(\tilde{x}_1) + \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 - \tilde{x}_2 \alpha(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) + \\ & \frac{1}{2\epsilon} (\tilde{x}_2)^2 + \frac{\epsilon}{2} (x_2 z_2)^2. \end{aligned}$$

设计如下的  $\alpha(\cdot)$ :

$$\begin{aligned} \alpha(\tilde{x}_1) = & c_1 \tilde{x}_1, \\ \alpha(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = & \tilde{x}_1 + \left( c_2 + \frac{1}{2\epsilon} \right) \tilde{x}_2, \end{aligned} \quad (19)$$

其中:  $c_1, c_2, \epsilon$  为任意可调正常数。所以

$$\dot{V}_2 = -c_1 \tilde{x}_1^2 - c_2 \tilde{x}_2^2 + \frac{\epsilon}{2} (x_2 z_2)^2 \quad (20)$$

从而选择正定函数

$$V = \frac{\epsilon}{2k} V_1 + V_2, \quad (21)$$

结合(11)和(20), (21)的时间导数为

$$\dot{V} = - \sum_{k=1}^2 c_k \tilde{x}_k^2 \triangleq -W(\tilde{x}) \leq 0$$

由于  $W(\tilde{x})$  的连续性和正定性,由 LaSalle-Yoshizawa 定理<sup>[10]</sup>可知闭环系统的平衡点  $\tilde{x} = 0$  是渐近稳定的。

最后,由(8), (13), (17)和(19)以及  $\beta_2(\cdot)$  的定义,可得参数不确定系统(4)控制律和参数刷新律分别为

$$\begin{aligned} u = & -c_1 x_2 + x_2 \left( \hat{\theta} + \frac{1}{2} k x_2^2 \right) - \\ & x_1 - \left( c_2 + \frac{1}{2\epsilon} \right) (c_1 x_1 + x_2), \\ \dot{\hat{\theta}} = & -k x_2 \left[ u + x_2 \left( \hat{\theta} + \frac{1}{2} k x_2^2 \right) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

从而,由(5)和(22)可得带有 TCSC 的单机无穷大系统(3)的控制律为

$$X_{TCSC} = - (X_1 + X_2) + \frac{\omega E_q V_s \sin(\delta_0 + x_1)}{P_m H} \cdot \frac{1}{u}$$

### 5 仿真结果

根据上文的设计结果,对如图 1 所示的带有 TCSC 的单机无穷大总线系统进行仿真,并将本文提出的 TCSC 非线性设计与基于传统的自适应 Backstepping 设计的控制器和全息 Backstepping (假设被估计参数已知)<sup>[10]</sup>设计的控制器的作用效果进行了比较 仿真参数为

$$H = 4, \delta_0 = \pi/3, \omega = 314.159, V_s = 1, P_m = 1.0, E_q = 1.08, c_1 = 0.8, c_2 = 0.5, k = 80, \epsilon = 10$$

值得指出的是,尽管在自适应律的设计中  $c_1, c_2, \epsilon, k$  为任意正常数时均可使误差动态系统渐近稳定,但由仿真实验可知,  $c_1, c_2$  取不大于 1 的常数且  $|c_1 - c_2| < 0.5, \epsilon = 10$  且  $\epsilon/(2k) < 0.1$  可得到理想的仿真效果

图 2 是初始值为  $x_1(0) = 0.3488, x_2(0) = 0$  的 3 种控制器方法下的相轨迹比较,从图可知本文提出的新方法在一定程度上有重新获得全息控制器的性能,对参数的变化并不敏感,使系统很快进入稳态实现同步运行.系统的响应速度能通过调节增益  $k$  来增快或减慢,以满足实际需求

图 3 是系统参数估计的比较,反映了两种自适

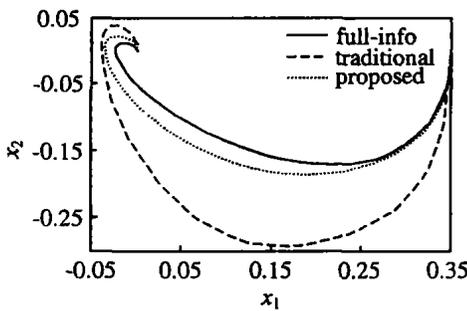


图 2 在不同控制器作用下系统相轨迹的比较

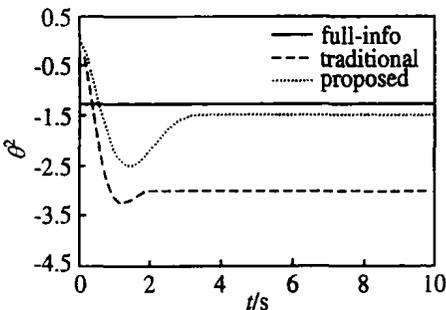


图 3 两种参数估计的比较

应机制的特性,显然本文方法更接近真值 需要指出的是,自适应速度直接与增益  $k$  相关联,这个性质是基于传统 Backstepping 设计所没有的,这是由于  $\beta_2(\bullet)$  的选择而得到含有  $k$  的误差动态所致

### 6 结 论

本文针对带有 TCSC 的单机无穷大电力系统提出了一种 TCSC 非线性控制的自适应 Backstepping 方法 除了完整保留系统的非线性特性外,与传统的 Backstepping 方法比较,系统的响应速度和自适应速度均可由设计误差动态时强加的增益进行调节来满足工程上的需求 同时,在控制器设计过程中,重点考虑了系统中的阻尼系数不确定性,并给出其动态估计 仿真结果验证了理论分析的有效性,即该控制器在提高系统稳定性和参数估计方面优于传统的 Backstepping 控制器

### 参考文献(References)

[1] Lei X, Li X, Povh D. A Nonlinear Control for Coordinating TCSC and Generator Excitation to Enhance the Transient Stability of Long Transmission Systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2001, 59(2): 103-109

[2] 张津. 可控串联补偿装置的研究现状[J]. *电力情报*, 2002, 2: 61-63  
(Zhang J. Current Researches Status on TCSC [J]. *Information on Electric Power*, 2002, 2: 61-63)

[3] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. *现代鲁棒控制理论与应用* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003  
(Mei S W, Shen T L, Liu K Z. *Modern Robust Control Theory and Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003)

[4] 郭春林, 童陆园. 多机系统中可控串补(TCSC)抑制功率振荡的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(6): 1-6  
(Guo C L, Tong L Y. Application of TCSC to Damp Oscillations in Multimachine Systems[J]. *Proc of the CSEE*, 2004, 24(6): 1-6)

[5] Balarko Chaudhuri, Bikash C Pal. Robust Damping of Multiple Swing Modes Employing Global Stabilizing Signals with a TCSC [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2004, 19(1): 499-506

[6] Son K M, Park J K. On the Robust LQG Control of TCSC for Damping Power System Oscillations [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2000, 15(4): 1306-1312

[7] 卢强, 孙元章. *电力系统非线性控制* [M]. 北京: 科学出版社, 1993  
(Lu Q, Sun Y Z. *Nonlinear Control of Power Systems* [M]. Beijing: Science Press, 1993)

(下转第 1171 页)

般极值搜索算法中存在的系统输出“颤动”现象和控制量的来回切换问题, 极大地改善了系统的动态性能

## 6 结 语

利用退火回归神经网络极值搜索算法实现了在代价函数不满足算法要求或者不能严格知晓代价函数的数学表达形式的情况下, 求解出  $n$  人非合作的动态博弈问题的纳什均衡解, 同时将退火回归神经网络与极值搜索算法相结合, 摒弃了一般极值搜索算法所采用的正弦激励信号, 从而解决了原始算法中存在的输出量“颤动”现象和控制量来回切换问题, 拓宽了极值搜索算法的应用范围。该解算方法设计简单, 对于求解  $n$  人非合作的动态博弈问题的纳什均衡解具有较强的实际指导意义。

## 参考文献(References)

- [1] Basar T. *Dynamic Noncooperative Game Theory* [M]. Philadelphia: SIAM, 1999.
- [2] Um it Ozguner, Perkins W. A Series Solution to the Nash Strategy for Large Scale Interconnected System [J]. *Automatica*, 1977, 13(2): 313-315.
- [3] Basar T. Equilibrium Solution in Two-person Quadratic Decision Problems with Static Information Structures [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1975, 20(3): 320-328.
- [4] Moschini G C. Nash Equilibrium in Strictly Competitive Game: Live Play in Soccer[J]. *Economics Letters*, 2004, (85): 365-371.
- [5] Wang H H, Yueng S, Krstic M. Experimental Application of Extremum Seeking on an Axial-flow Compressor [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Philadelphia, 1998: 1989-1993.
- [6] Krstic M, Wang H. Design and Stability Analysis of Extremum Seeking Feedback for General Nonlinear Systems [A]. *Proc of the 36th Conf on Decision and Control* [C]. San Diego, 1997: 1743-1748.
- [7] 郑大钟. *线性系统理论* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.  
(Zheng D Z. *Linear Systems Theory* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990.)
- [8] Tang W S, Wang J. A Recurrent Neural Network for Minimum Infinity-norm Kinematic Control of Redundant Manipulators with an Improved Problem Formulation and Reduced Architecture Complexity [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 2001, 31(1): 98-105.
- [9] Pan Y, Ozguner U, Acanman T. Stability and Performance Improvement of Extremum Seeking Control with Sliding Mode [J]. *Control*, 2003, 76(3): 968-985.
- [8] Zhou X X, Liang J. Nonlinear Adaptive Control of TC-SC to Improve the Performance of Power Systems [J]. *IEE Proc Gener Trans Distrib*, 1999, 146(3): 301-305.
- [9] Gan D, Qu Z, Cai H. Multimachine Power System Excitation Control Design via Theories of Feedback Linearization Control and Nonlinear Robust Control [J]. *Int J of System Science*, 2000, 31(4): 519-527.
- [10] Krstic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P. *Nonlinear and Adaptive Control Design* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [11] Li W L, Jing Y W, Dimirovski G M, et al. Nonlinear Robust Control Based on Adaptive Backstepping Design for Thyristor Controlled Series Compensation [A]. *IEEE CCA '03 Conf* [C]. Turkey, 2003.
- [12] Astolfi A, Ortega R. Immersion and Invariance: A New Tool for Stabilization and Adaptive Control of Nonlinear Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(4): 590-606.
- [13] Karagiannis D, Astolfi A. Nonlinear Adaptive Control of Systems in Feedback Form: An Alternative to Adaptive Backstepping [A]. *IFAC Symposium on Large Scale Systems* [C]. Osaka, 2004: 71-76.
- [14] Hingorani N G, G Yuyi L. *Understanding FACTS* [M]. New York: IEEE Press, 2000.
- [15] Ortega R, Astolfi A, Barabanov N. Nonlinear PI Control of Uncertain Systems: An Alternative to Parameter Adaptation [J]. *Systems and Control Letters*, 2002, 47(3): 259-278.

(上接第 1166 页)