

基于扩展自适应 Backstepping 设计的 TCSC 非线性控制的新方法

付 俊, 赵 军

(东北大学 教育部流程工业综合自动化重点实验室 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 首先针对一般的参数反馈型非线性系统提出一种扩展自适应 Backstepping 方法. 该方法不仅保留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. 该方法可用于带有 TCSC (thyristor controlled series compensation) 的单机无穷大系统. 仿真结果表明, 该方法在系统响应和自适应速度方面优于传统的 Backstepping 方法.

关键词: 非线性控制; 扩展自适应 Backstepping; 电力系统; 灵活交流输电系统; 晶闸管控制串补

中图分类号: TM721

文献标识码: A

A new method based on extended adaptive backstepping for nonlinear control of TCSC

FU Jun, ZHAO Jun

(Key Laboratory of Process Industry Automation, Ministry of Education,

School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: A new extended adaptive backstepping algorithm for general nonlinear systems in parametric feedback form is proposed. The method preserves useful nonlinearities and the real-time estimation of uncertainty parameter but does not follow the classical certainty-equivalence principle in the design of the parameter estimator and dynamics feedback controller. The proposed method can be applied to a single-machine infinite-bus system with thyristor controlled series compensation (TCSC). Finally, simulation results are given to demonstrate that the proposed method provides better system response and higher speed of adaptation than the design based on classical adaptive backstepping.

Key words: nonlinear control; extended adaptive backstepping; power systems; flexible AC transmission systems; thyristor controlled series compensation

1 引言 (Introduction)

随着经济的飞速发展, 在各个领域, 特别是工业, 对电能有大量的需求, 又由于现有的电力系统的容量和电网结构的复杂, 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将变的越来越困难, 因此, 使电力系统以最大的能力去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主要问题所制约, 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典型问题^[1, 2]. 近年来, 灵活交流输电系统 (FACTS) 的出现除了提高现代电力系统的有效传输容量 (available transfer capacity) 之外, 也可以改善电力系统的稳定性能. 晶闸管控制串联补偿器

(TCSC) 作为灵活交流输电系统 (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被公认为是一种有效、经济的解决方案^[1-5]. 因此 TCSC 技术被广泛应用于国内外大中型发电厂^[1, 2, 4] 和与以发电、输电、供电等相关实际电力工程为背景的研究, 如伊敏-冯屯 500kV 输电工程和三峡-万县 500kV 输电工程^[5] 等.

对于 TCSC 控制, 传统的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^[6]. 最近, 文献[7]用神经网络逆系统方法对 TCSC 系统进行了大范围线性化来实现反馈信号本地化的 TCSC 控制, 但最终控制实现需要可测信号以及它们的导数信息, 而这些导数的信息很难在线获得. 而反馈线性

化方法虽然基于系统的非线性模型进行设计^[8],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,同时系统模型中又往往忽略了 TCSC 本身的动态过程,尽管将该方法与其它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。

近十几年来,Backstepping 方法受到许多学者的关注,已经成为一种非线性控制的有效方法^[9-14],该方法不仅能够保留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 的控制设计上,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. 最近,文献[12, 13]突破了遵循确定性等价原理的限制,提出了一种新的自适应 Backstepping 算法,但是它只适应于特殊的参数反馈型系统及“虚拟”控制系数为 1 的情形,限制了其在工程和实际应用中的范围。

本文针对一般的参数反馈型非线性系统提出一种扩展自适应 Backstepping 方法. 该方法使用渐近形式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. 并且针对带有 TCSC 的单机无穷大总线系统,使用该方法进行设计,得到的动态反馈控制器,除了含有对未知参数的实时在线估计外,在系统响应和自适应速度方面有更优越的性能. 理论分析和仿真结果均表明该方法的有效性。

2 扩展算法(Extended algorithm)

本节我们将扩展文献[12]中的算法到一般的非线性参数反馈型系统,使得其虚拟控制系数为反馈状态的函数,从而克服了其系数为 1 的限制。

2.1 问题描述(Problem statement)

考虑如下—类参数反馈型系统

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, \dots, x_i) + g_i(x_1, \dots, x_i)x_{i+1} + \varphi_i(x_1, \dots, x_i)^T \theta_i, \quad 1 \leq i \leq n. \quad (1)$$

其中: $x_{n+1} = u$, $x \in \mathbb{R}^n$ 是状态; $u \in \mathbb{R}$ 是系统输入; f, g 是光滑函数($g_i(x_1, \dots, x_i) \neq 0$); $\varphi_i(x_1, \dots, x_i)$ 是光滑向量场; θ_i 是未知常向量。

我们的控制目标是调节 x_1 到常数参考值 x_1^* 。

2.2 估计器设计(Estimator design)

首先,我们定义估计误差变量

$$z_i = \hat{\theta}_i - \theta_i + \beta_i(x_1, \dots, x_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

其中: $\hat{\theta}_i$ 为 θ_i 的估计, $\beta_i(\cdot)$ 为将设计的光滑函数。

其次,对(2)求导,得 z_i 动态为

$$\begin{aligned} \dot{z}_i = & \dot{\hat{\theta}}_i + \sum_{k=1}^i \frac{\partial \beta_i}{\partial x_k} [f_k(x_1, \dots, x_k) + \\ & g_k(x_1, \dots, x_k)x_{k+1} + \varphi_k(x_1, \dots, x_k)^T \cdot \\ & (\hat{\theta}_k + \beta_k(x_1, \dots, x_k) - z_k)] . \end{aligned} \quad (3)$$

参数刷新律选为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_i = & - \sum_{k=1}^i \frac{\partial \beta_i}{\partial x_k} [f_k(x_1, \dots, x_k) + \\ & g_k(x_1, \dots, x_k)x_{k+1} + \varphi_k(x_1, \dots, x_k)^T \cdot \\ & (\hat{\theta}_k + \beta_k(x_1, \dots, x_k))] . \end{aligned} \quad (4)$$

于是有误差动态

$$\dot{z}_i = - \sum_{k=1}^i \frac{\partial \beta_i}{\partial x_k} \varphi_k(x_1, \dots, x_k)^T z_k, \quad (5)$$

注意(5)是下三角结构。

最后,我们采用文献[12]中关于 $\beta_i(\cdot)$ 的定义与假设。

对于系统(5),通过如下关于 $\beta_i(\cdot)$ 的定义可使其对角项为半负定

$$\beta_i(\dots, x_i) = \int_0^{x_i} \kappa_i(\dots, \chi_i) \varphi_i(\dots, \chi_i) d\chi_i, \quad (6)$$

其中 $\kappa_i(\cdot)$ 是正函数. 假设如下:

假设 1 存在函数 $\kappa_i(\cdot)$ 和常 k_i 满足 $\kappa_i(\cdot) \geq k_i > 0$, 对于 $j = 1, \dots, i-1$, 有

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial x_j} = \delta_{ij}(x_1, \dots, x_i) \varphi_i(x_1, \dots, x_i), \quad (7)$$

其中: $\delta_{ij}(\cdot)$ 为存在的有界函数, $\beta_i(\cdot)$ 如(6)所给。

为了保证估计器的稳定特性,给出如下引理。

引理 1 对于系统(5),其中 $\beta_i(\cdot)$ 由(6)给出,并且假定对于所有 $i = 1, \dots, n$, 假设 1 成立,那么存在常数 $\varepsilon_i > 0$ 使得

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_i z_i^T z_i \right) \leq - \sum_{i=1}^n [\varphi_i(x_1, \dots, x_i)^T z_i]^2. \quad (8)$$

证 类似文献[12]。

注 1 因 $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i z_i^T z_i$ 是时间的减函数,故 z_i 有界. 对式(8)左右两端在 $(0, +\infty)$ 上积分,可知 $\varphi_i^T z_i$ 平方可积. 如果我们使得 $\varphi_i^T z_i$ 趋于 0, 从式(2)可知用 $\varphi_i^T (\hat{\theta}_i + \beta_i)$ 去估计式(1)中的 $\varphi_i^T \theta_i$ 是渐近估计。

2.3 控制器设计(Controller design)

本节通过设计控制器使得闭环系统就“输出” x_1

$-x_1^*$ 和“扰动” $\varphi_i^T z_i$ 是有限 L_2 增益稳定^[14] 的并且所有信号均有界. 这意味着 $\varphi_i^T z_i$ 将趋于 0, 从而得到希望平衡点的全局渐近稳定. 下面我们来递推设计这样的控制器.

第1步 定义 $\tilde{x}_1 = x_1 - x_1^*$, 其动态为

$$\dot{\tilde{x}}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 + \varphi_1(x_1)^T \theta_1. \quad (9)$$

将 x_2 视为虚拟控制并且定义

$$\tilde{x}_2 = x_2 - \xi_2(x_1, \hat{\theta}_1), \quad (10)$$

选择

$$\xi_2 = \frac{1}{g_1(x_1)} [-f_1(x_1) - \varphi_1(x_1)^T (\hat{\theta}_1 + \beta_1(x_1)) - \alpha_1(\tilde{x}_1, \hat{\theta}_1)], \quad (11)$$

其中 $\alpha_1(\cdot)$ 为将被设计的函数. 将(10)代入(9)并注意到(11)可得

$$\dot{\tilde{x}}_1 = -\alpha_1(\tilde{x}_1, \hat{\theta}_1) - \varphi_1(x_1)^T z_1 + g_1(x_1)\tilde{x}_2.$$

第2步 对(10)求导, 得

$$\dot{\tilde{x}}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 + \varphi_2(x_1, x_2)^T \theta_2 - \frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} \dot{x}_1 - \frac{\partial \xi_2}{\partial \hat{\theta}_1} \dot{\hat{\theta}}_1. \quad (12)$$

将 x_3 视为虚拟控制并定义

$$\tilde{x}_3 = x_3 - \xi_3(x_1, x_2, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2), \quad (13)$$

通过选择

$$\begin{aligned} \xi_3 = & \frac{1}{g_2(x_1, x_2)} \{-f_2(x_1, x_2) - \varphi_2(x_1, x_2)^T \cdot \\ & (\hat{\theta}_2 + \beta_2(x_1, x_2)) + \\ & \frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} [f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 + \varphi_1(x_1)^T (\hat{\theta}_1 + \beta_1(x_1))] + \\ & \frac{\partial \xi_2}{\partial \hat{\theta}_1} \dot{\hat{\theta}}_1 - \alpha_2(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2)\}, \end{aligned} \quad (14)$$

按此步骤递推, 直到“真实”控制出现.

第n步 $\tilde{x}_n$ 的动态为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_n = & f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u + \\ & \varphi_n(x_1, \dots, x_n)^T \theta_n - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_k} [f_k(x_1, \dots, x_k) + \\ & g_k(x_1, \dots, x_k)x_{k+1} + \varphi_k(x_1, \dots, x_k)^T \theta_k] - \\ & \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial \xi_n}{\partial \hat{\theta}_k} \dot{\hat{\theta}}_k. \end{aligned} \quad (15)$$

“真实”控制为

$$u = \frac{1}{g_n(x_1, \dots, x_n)} \{-f_n(x_1, \dots, x_n) - \varphi_n(x_1, \dots, x_n)^T \cdot$$

$$\begin{aligned} & (\hat{\theta}_n + \beta_n(x_1, \dots, x_n)) + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_k} [f_k(x_1, \dots, x_k) + \\ & g_k(x_1, \dots, x_k)x_{k+1} + \varphi_k(x_1, \dots, x_k)^T \cdot \\ & (\hat{\theta}_k + \beta_k(x_1, \dots, x_k))] + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial \xi_n}{\partial \hat{\theta}_k} \dot{\hat{\theta}}_k - \\ & \alpha_n(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_n)\}. \end{aligned} \quad (16)$$

因此, 闭环系统在新坐标 $(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n)$ 下化为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = -\alpha_1(\tilde{x}_1, \hat{\theta}_1) - \varphi_1(x_1)^T z_1 + g_1(x_1)\tilde{x}_2, \\ \dot{\tilde{x}}_2 = -\alpha_2(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2) + \frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} \varphi_1(x_1)^T z_1 - \\ \quad \varphi_2(x_1, x_2)^T z_2 + g_2(x_1, x_2)\tilde{x}_3, \\ \vdots \\ \dot{\tilde{x}}_n = -\alpha_n(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_n) + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_k} \cdot \\ \quad \varphi_k(x_1, \dots, x_k)^T z_k - \varphi_n(x_1, \dots, x_n)^T z_n. \end{cases} \quad (17)$$

我们的主要结果为:

定理1 存在 $\alpha_i(\cdot)$ 使得被误差动态(5)驱动的系统(17)在原点全局渐近稳定, 而且对于所有 $i=1, \dots, n$, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_i(x_i(t), \dots, x_i(t))^T z_i(t) = 0$.

证 考虑函数

$$V_1(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \tilde{x}_k^2, \quad (18)$$

则沿系统(17)的轨线, (18)的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & -\tilde{x}_1 \alpha_1(\tilde{x}_1, \hat{\theta}_1) - \tilde{x}_1 \varphi_1(x_1)^T z_1 + g_1(x_1)\tilde{x}_1 \tilde{x}_2 - \\ & \tilde{x}_2 \alpha_2(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2) - \tilde{x}_2 \varphi_2(x_1, x_2)^T z_2 + \\ & \tilde{x}_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} \varphi_1(x_1)^T z_1 + g_2(x_1, x_2)\tilde{x}_2 \tilde{x}_3 - \\ & \tilde{x}_n \alpha_n(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_n) - \tilde{x}_n \varphi_n \cdot \\ & (x_1, \dots, x_n)^T z_n + \tilde{x}_n \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_k} \varphi_k(x_1, \dots, x_k)^T z_k \leq \\ & -\tilde{x}_1 \alpha_1(\tilde{x}_1, \hat{\theta}_1) + g_1(x_1)\tilde{x}_1 \tilde{x}_2 - \\ & \tilde{x}_2 \alpha_2(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2) + g_2(x_1, x_2)\tilde{x}_2 \tilde{x}_3 - \\ & \tilde{x}_n \alpha_n(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_n) + \dots + \\ & \left(\sqrt{\frac{n}{4\gamma}} \tilde{x}_n \frac{\partial \xi_n}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\gamma}{n}} \varphi_1^T z_1 \right)^2 + \dots + \\ & \left(\sqrt{\frac{2}{4\gamma}} \tilde{x}_n \frac{\partial \xi_n}{\partial x_{n-1}} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}} \varphi_{n-1}^T z_{n-1} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{n}{4\gamma}} \tilde{x}_1 \right)^2 + \\ & \left(\sqrt{\frac{\gamma}{n}} \varphi_1^T z_1 \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{n-1}{4\gamma}} \tilde{x}_2 \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\gamma}{n-1}} \varphi_2^T z_2 \right)^2 + \dots + \\ & \left(\sqrt{\frac{1}{4\gamma}} \tilde{x}_n \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\gamma}{1}} \varphi_n^T z_n \right)^2 + \left[\left(\sqrt{\frac{n}{4\gamma}} \tilde{x}_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} \right)^2 + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\sqrt{\frac{\gamma}{n}} \varphi_1^T z_1 \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{n}{4\gamma}} \tilde{x}_3 \frac{\partial \xi_3}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\gamma}{n}} \varphi_1^T z_1 \right)^2 + \\ & \left(\sqrt{\frac{n-1}{4\gamma}} \tilde{x}_3 \frac{\partial \xi_3}{\partial x_2} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\gamma}{n-1}} \varphi_2^T z_2 \right)^2. \end{aligned} \quad (19)$$

通过如下设计 $\alpha_i(\cdot)$:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (c_1 + \frac{n}{4\gamma}) \tilde{x}_1, \\ \alpha_i &= g_{i-1}(x_1, \dots, x_{i-1}) \tilde{x}_{i-1} + (c_i + \frac{n-i+1}{4\gamma}) \tilde{x}_i + \\ & \sum_{k=1}^{i-1} \frac{n-k+1}{4\gamma} \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial x_k} \right)^2 \tilde{x}_i, i = 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $c_i > 0$, $\gamma > 0$ 是任意可调正常数, 所以有

$$\dot{V}_1 \leq - \sum_{k=1}^n c_k \tilde{x}_k^2 + \gamma \sum_{k=1}^n (\varphi_k(x_1, \dots, x_k)^T z_k)^2. \quad (21)$$

结合引理1, 选择正定函数为

$$V = V_1 + \gamma \sum_{i=1}^n \varepsilon_i z_i^T z_i.$$

由(8)和(21)易得 $\dot{V} \leq - \sum_{k=1}^n c_k \tilde{x}_k^2 \triangleq -W(\tilde{x}) \leq 0$, 由于 $W(\tilde{x})$ 是连续的和正定的, 由 LaSalle-Yoshizawa 定理^[9]可知, 平衡点 $\tilde{x} = 0$ 是全局渐近稳定的.

注2 当系统(1)中 $f_i(x_1, \dots, x_i) \equiv 0$, $g_i(x_1, \dots, x_i) \equiv 1$, 本文的定理1退化为文献[12]中的结果.

3 TCSC 递推设计 (Backstepping design for TCSC)

本节将利用第2节中扩展自适应 Backstepping 方法来设计带有 TCSC 的单机无穷大母线系统 (SMIB) 的 TCSC 非线性控制.

3.1 系统模型和控制目标 (System model and control objective)

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

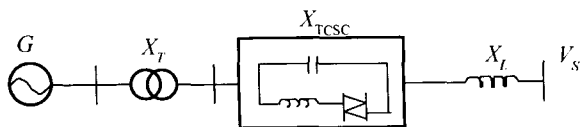


图1 单机无穷大系统结构

Fig. 1 Configuration of single machine to infinite bus system with TCSC

假设发电机用暂态电抗后的恒定电压源表示; 利用一阶惯性环节等效 TCSC 本身的动态过程, 则可建立 TCSC 控制系统的数学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} (P_m - E'_q V_s y_{TCSC} \sin \delta - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0)), \\ \dot{y}_{TCSC} = \frac{1}{T_{TCSC}} (-y_{TCSC} + y_{TCSC0} + u). \end{cases} \quad (22)$$

其中: δ 为发电机转子运行角, rad; ω 是发电机转子角速度, 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, s; T_{TCSC} 为 TCSC 的惯性时间常数, s; 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; $y_{TCSC} = 1/(X'_{d\Sigma} + X_{TCSC})$ 为整个系统的导纳, y_{TCSC0} 为其稳态值; X_{TCSC} 为 TCSC 的等值电抗; $X'_{d\Sigma} = X'_d + X_T + X_L$ 为外电抗; u 为 TCSC 的等效控制量. 其它无特殊说明的单位均为标么值. (δ_0 , ω_0 , y_{TCSC0}) 为对应变量的初始值.

通常情况下阻尼系数 D 难以精确测量, 因此其中不可避免包含一定的不确定性, 现假设 D 为不确定常参数, 从而 $\theta_2 = -D/H$ 亦为不确定常参数.

令 $x_1 = \delta - \delta_0$, $x_2 = \omega - \omega_0$, $x_3 = y_{TCSC} - y_{TCSC0}$, 则系统(22)可以写成如(1)的参数反馈型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 + \varphi_1(x_1)^T \theta_1, \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 + \varphi_2(x_1, x_2)^T \theta_2, \\ \dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) + g_3(x_1, x_2, x_3)u + \\ \varphi_3(x_1, x_2, x_3)^T \theta_3, \end{cases} \quad (23)$$

其中

$$\begin{cases} f_1(x_1) = 0; g_1(x_1) = 1; \varphi_1(x_1)^T = 0; \\ f_2(x_1, x_2) = \frac{\omega_0}{H} [P_m - E'_q V_s y_{TCSC0} \sin(x_1 + \delta_0)]; \\ g_2(x_1, x_2) = -\frac{\omega_0}{H} E'_q V_s \sin(x_1 + \delta_0); \\ f_3(x_1, x_2, x_3) = -\frac{1}{T_{TCSC}} x_3; \\ g_3(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{T_{TCSC}}; \\ \varphi_2(x_1, x_2) = x_2; \\ \varphi_3(x_1, x_2, x_3) = 0. \end{cases} \quad (24)$$

我们的控制目标是将系统状态 x_1 调节到零 (即 $x_1^* = 0$). 又由于 $\varphi_1(x_1)$ 使得式(23)的结构特殊化, 从而状态 x_2 最终亦为零, 同时易得 x_3 亦有界, 从而确保系统同步运行.

3.2 TCSC 自适应控制律设计 (Design of adaptive control law for TCSC)

下面我们将考虑单机无穷大电力系统模型 (22) 中阻尼系数 D 不能精确测量的情况下 TCSC 的非线性设计.

首先,考虑估计误差

$$z_2 = \hat{\theta}_2 - \theta_2 + \beta_2(x_1, x_2), \quad (25)$$

通过(6)选择 $\beta_2(\cdot)$

$$\beta_2(x_1, x_2) = \frac{1}{2} k x_2^2, \quad (26)$$

再结合(4)和(5),得

$$\dot{z}_2 = -k x_2^2 z_2. \quad (27)$$

显然,对任何常数 $k > 0$,假设 1 和引理 1 均成立.按第 2 节的设计过程,闭环系统(23) 在新坐标 $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3)$ 下化为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = -\alpha_1(\tilde{x}_1) + \tilde{x}_2, \\ \dot{\tilde{x}}_2 = -\alpha_2(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \hat{\theta}_2) - \varphi_2(x_1, x_2)^T z_2 + g_2(x_1, x_2) \tilde{x}_3, \\ \dot{\tilde{x}}_3 = -\alpha_3(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \hat{\theta}_2) + \frac{\partial \xi_3}{\partial x_2} \varphi_2(x_1, x_2)^T z_2. \end{cases} \quad (28)$$

按照(18)定义函数

$$V_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \tilde{x}_k^2. \quad (29)$$

其沿系统(28)轨迹的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & -\tilde{x}_1 \alpha_1(\tilde{x}_1) + \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 - \tilde{x}_2 \alpha_2(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \hat{\theta}_2) + \\ & g_2(x_1, x_2) \tilde{x}_2 \tilde{x}_3 - \tilde{x}_2 \varphi_2(x_1, x_2)^T z_2 - \\ & \tilde{x}_3 \alpha_3(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \hat{\theta}_2) + \tilde{x}_3 \frac{\partial \xi_3}{\partial x_2} \varphi_2(x_1, x_2)^T z_2 \leq \\ & -\tilde{x}_1 \alpha_1(\tilde{x}_1) + \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 - \tilde{x}_2 \alpha_2(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \hat{\theta}_2) + \\ & g_2(x_1, x_2) \tilde{x}_2 \tilde{x}_3 + \frac{\gamma}{2} (\varphi_2(x_1, x_2)^T z_2)^2 + \\ & \frac{1}{2\gamma} \tilde{x}_2^2 - \tilde{x}_3 \alpha_3(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \hat{\theta}_2) + \\ & \frac{\gamma}{2} (\varphi_2(x_1, x_2)^T z_2)^2 + \frac{1}{2\gamma} \left(\frac{\partial \xi_3}{\partial x_2} \right)^2 \tilde{x}_3^2. \end{aligned} \quad (30)$$

函数 $\alpha_i(\cdot)$ 设计如下:

$$\begin{cases} \alpha_1 = c_1 \tilde{x}_1, \\ \alpha_2 = \tilde{x}_1 + (c_2 + \frac{1}{2\gamma}) \tilde{x}_2, \\ \alpha_3 = g_2(x_1, x_2) \tilde{x}_2 + \left[c_3 + \frac{1}{2\gamma} \left(\frac{\partial \xi_3}{\partial x_2} \right)^2 \right] \tilde{x}_3. \end{cases} \quad (31)$$

其中 c_1, c_2, c_3, γ 为任意正可调整常数,从而

$$\dot{V}_1 \leq -c_1 \tilde{x}_1 - c_2 \tilde{x}_2 - c_3 \tilde{x}_3 + \gamma (x_2 z_2)^2.$$

结合(27) 和定理 1 易知, $V = V_1 + \frac{\gamma}{2k} z_2^2$ 是系统(28)

的李雅普诺夫函数.

由(16)(31) 并结合 $\tilde{x}_i$ 的定义和(4)(24),系统的参数估计器和动态反馈控制器分别为:

$$\begin{aligned} u = & x_3 + T_{\text{TCSC}} \left\{ \frac{\partial \xi_3}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial \xi_3}{\partial x_2} \left[\frac{\omega_0}{H} (P_m - E'_q V_s \gamma_{\text{TCSC}} \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \sin(x_1 + \delta_0)) - \frac{\omega_0}{H} E'_q V_s x_3 \sin(x_1 + \delta_0) + \right. \right. \\ & \left. \left. x_2 \left(\hat{\theta}_2 + \frac{k}{2} x_2^2 \right) \right] + x_2 \hat{\theta}_2 / \left[\frac{\omega_0}{H} E'_q V_s \sin(x_1 + \delta_0) \right] - \right. \\ & \left. \left(c_3 + \frac{1}{2\gamma} \left(\frac{\partial \xi_3}{\partial x_2} \right)^2 \right) (x_3 - \xi_3) + \right. \\ & \left. \left[\frac{\omega_0}{H} E'_q V_s \sin(x_1 + \delta_0) \right] (x_2 + c_1 x_1) \right\}, \end{aligned}$$

其中 ξ_3 可从(14) 得到.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_2 = & -k x_2 \left[\frac{\omega_0}{H} (P_m - E'_q V_s \gamma_{\text{TCSC}} \sin(x_1 + \delta_0)) - \right. \\ & \left. \frac{\omega_0}{H} E'_q V_s x_3 \sin(x_1 + \delta_0) + x_2 \left(\hat{\theta}_2 + \frac{k}{2} x_2^2 \right) \right]. \end{aligned}$$

4 仿真结果 (Simulation results)

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)设计的控制器的作用效果进行了比较.仿真参数为 $H = 4$, $\delta_0 = \pi/3$, $E'_q = 1.08$, $\omega_0 = 314.159$, $V_s = 1$, $P_m = 1.0$, $k = 80$, $\gamma = 10$, $c_1 = 0.8$, $c_2 = 0.5$, $c_3 = 0.5$, $T_{\text{TCSC}} = 0.1$, $X'_{d\Sigma} = 0.94$, $X_{\text{TCSC}} = -0.1$.图 2 是初始值为 $x_1(0) = 0.3488$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 1.1905$ 的 3 种控制方法下的 x_1 - x_2 相轨迹比较,从图可知本文提出的新方法一定程度上有“拟合”全息控制器的作用,系统很快的进入稳定状态.系统的响应速度能被通过调节增益 k 来增快和减慢,用以满足实际的需求.图 3 是系统参数估计的比较,反映了两种自适应机制的特性,本文的方法可以更接近真值.与基于传统的自适应 Backstepping 设计一样^[10,11],本文提出的方法同样可以承受大扰动而使系统同步运行.图 4 是系统在 0.1 秒到 0.2 秒发生三相对地短路情形下系统状态变量的动态曲线.值得指出的是自适应速度直接和增益 k 相关联,这个性质是基于传统 Backstepping 设计所没有的,这是由于 $\beta_2(\cdot)$ 的选择而得到含有 k 的误差动态所致.

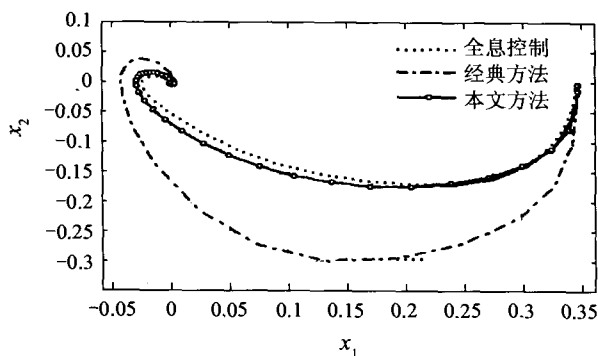


图2 系统相轨迹的比较

Fig. 2 Comparison of phase trajectories

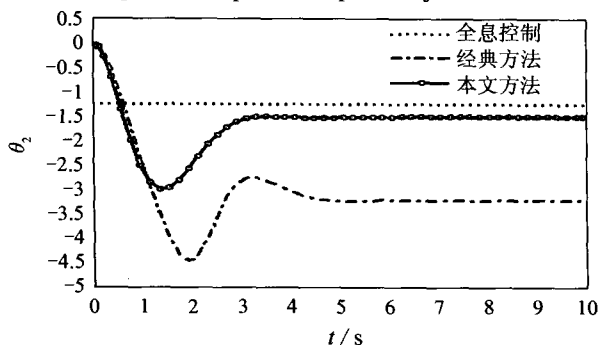


图3 两种参数估计的比较

Fig. 3 Comparison of two parameter estimations

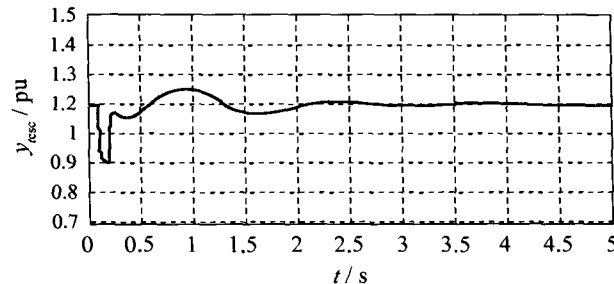
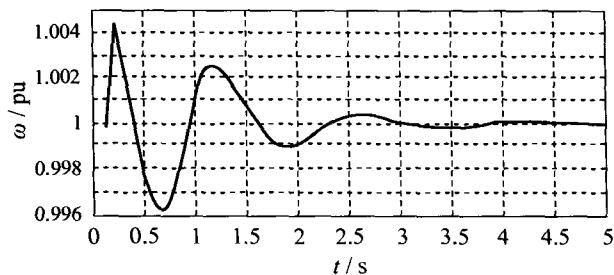
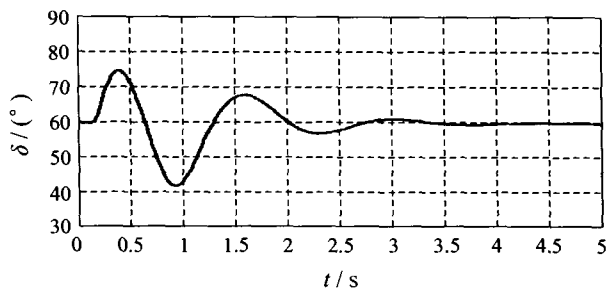


图4 在0.1s~0.2s发生三相对地短路故障下系统状态的动态曲线

Fig. 4 Time history of system states under a three phase short circuit to ground fault from 0.1 s ~ 0.2 s

5 结论(Conclusion)

本文针对一般的参数反馈型非线性系统,提出了一种扩展自适应 Backstepping 方法;作为该法在带有 TCSC 单机无穷大系统中的应用,得到了一种 TCSC 非线性控制的新方法.新的 TCSC 控制律和传统的 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,从而满足工程上的需求.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.该扩展算法亦适用单机无穷大母线系统的其他模型控制问题(如励磁控制和汽轮发电机主汽门开度控制)和(相应的在系统建模时适当假设下)多机系统的情形来实现分散控制.

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 Jin. Current researches status on TCSC [J]. *Information on Electric Power*, 2002, (2): 61-63.)
- [3] 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.
- [4] 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 Shenwei, SHEN Tielong, LIU Kangzhi. *Modern Robust Control Theory and Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [5] 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 Chunlin, TONG Luyuan. Application of TCSC to damp oscillations in multi-machine systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(6): 1-6.)
- [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] 戴先中, 张凯峰, 陆翔. 采用本地信号的可控串联电容补偿神经网络逆系统控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(7): 35-40.
(DAI Xianzhong, ZHANG Kaifeng, LU Xiang. Neural network inverse based TCSC control strategy using only local measurements [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(7): 35-40.)
- [8] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社,

1993.
(LU Qiang, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control of Power Systems* [M]. Beijing: Science Press, 1993.)
- [9] KRSTIC M, KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P. *Nonlinear and Adaptive Control Design* [M]. New York: John Wiley & Sons, INC, 1995.
- [10] HU W, MEI S, et al. Nonlinear adaptive decentralized stabilizing control of multi-machine systems [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2002, 133(2-3): 519-532.
- [11] WENLEI LI, YUANWEI JING, GEORGI M, et al. Robust nonlinear control of TCSC for power system via adaptive backstepping design [C]// *IEEE Conference on Control Applications 03 Conference*. Turkey: IEEE Press, 2003.
- [12] KARAGIANNIS D, ASTOLFI A. Nonlinear adaptive control of systems in feedback form: An alternative to adaptive Backstepping [C]// *IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications*. Osaka, Japan: [s. n.], 2004.
- [13] 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.
- [14] KHALIL H. *Nonlinear Systems (3rd edition)* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2002.

作者简介:

付俊 (1979—), 男, 东北大学信息科学与工程学院博士研究生, 研究方向为电力系统鲁棒非线性控制、电力系统混杂全局控制, E-mail: fuziling@126.com;

赵军 (1957—), 男, 东北大学信息科学与工程学院教授, 博士生导师, 1991 年于东北大学信息科学与工程学院获博士学位, 1998—1999 年作为高级访问学者赴美国 Illinois (Urbana-Champaign) 研修, 从 2003 年 10 月至 2005 年 5 月作为高级访问学者在香港城市大学研修. 现为中国自动化学会控制理论委员会委员, 《控制理论与应用》编委, 研究方向: 复杂非线性系统的结构研究, 混杂系统、切换系统稳定性研究.

(上接第 350 页)

- [4] 席裕庚, 张纯刚. 一类动态不确定环境下机器人的滚动路径规划[J]. *自动化学报*, 2002, 28(2): 161-175.
(XI Yugeng, ZHANG Chungang. Rolling path planning of mobile robot in a kind of dynamic uncertain environment[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(2): 161-175.)
- [5] CHENG P, SHEN Z, LAVALLE S M. RRT-based trajectory design for autonomous automobiles and spacecraft[J]. *Archives of Control Sciences*, 2001, 11(3-4): 167-194.
- [6] LAVALLE S M, KUFFNER J J. Rapidly-exploring random tree: Progress and prospects. [C]//DONALD B R, LYNCH K M, RUS D, editors, *Algorithmic and Computational Robotics: New Directions*, Wellesley, MA: A K Peters, Ltd, 2001: 293-308.

作者简介:

樊晓平 (1961—), 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器人控制, 虚拟现实技术, 智能交通系统等, 已发表有关论文 100 余篇, E-mail: xpfan@mail.csu.edu.cn;

李双艳 (1979—), 女, 硕士, 主要研究方向为机器人路径规划, 智能控制等;

瞿志华 (1963—), 博士, 教授, 博士生导师, 长江学者讲座教授, 美国中佛罗里达大学 (University of Central Florida) 教授, IEEE 高级会员, 主要研究方法为机器人控制, 非线性系统理论, 鲁棒控制等, 已发表有关论文 300 余篇.

(上接第 354 页)

- [7] WANG G X, LIU Y W, HE Z, et al. The lifting technique for sampled-data systems: useful or useless [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005, 31(3): 491-494.
- [8] CHEN T W, FRANCIS B A. H_∞ -optimal sampled-data control: computation and design [J]. *Automatica*, 1996, 32(2): 223-228.
- [9] 王广雄, 刘彦文, 何朕, 等. H_∞ 离散化的 MATLAB 程序 [J]. *电机与控制学报*, 2004, 8(4): 316-318.
(WANG Guangxiong, LIU Yanwen, HE Zhen, et al. H_∞ discretization using MATLAB [J]. *Electric Machines and Control*, 2004, 8(4): 316-318.)
- [10] SAFONOV M G, LIMEBEER D J N, CHIANG R Y. Simplify-

ing the H_∞ theory via loop-shifting, matrix-pencil, and descriptor concepts [J]. *Int J of Control*, 1989, 50(6): 2467-2488.

作者简介:

王广雄 (1933—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 H_∞ 控制理论及应用, 控制系统的鲁棒设计, E-mail: gxwang@hope.hit.edu.cn;

刘彦文 (1976—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为采样系统和鲁棒控制系统设计;

何朕 (1972—), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为 H_∞ 控制、广义系统.