

基于系统浸入和流形不变自适应方法的 静止无功补偿器非线性鲁棒自适应控制方法

张蕾^{1†}, 张爱民¹, 韩九强¹, 张杭²

(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: 本文提出一种将系统浸入和流形不变(I&I)自适应控制方法与 L_2 -增益抑制鲁棒控制方法相结合的静止无功补偿器(SVC)的非线性鲁棒自适应控制方法. 所提方法首先通过参数估计误差和鲁棒控制律的设计, 使得所构造的表示参数估计误差函数的流形不变且吸引, 从而使参数估计误差在这一流形上收敛于零. 然后, 通过所设计的可调参数对参数估计误差的收敛性能进行控制, 以此来保证参数估计器对不确定参数的自适应估计能力. 最后, 采用自适应逆推算法推导鲁棒控制律, 并通过使不确定外部扰动满足从输入到输出的耗散性来保证系统对不确定扰动的鲁棒性. 仿真结果表明, 利用所提方法设计的SVC控制器和参数替换律在参数估计、发电机功角动态响应方面优于传统自适应逆推算法, 从而提高了输电系统的稳定水平.

关键词: 系统浸入和流形不变; L_2 -增益抑制; 静止无功补偿器; 输电系统
中图分类号: TM712 **文献标识码:** A

Static var-compensator nonlinear robust adaptive control method based on system immersion and manifold invariant methodology

ZHANG Lei^{1†}, ZHANG Ai-min¹, HAN Jiu-qiang¹, ZHANG Hang²

(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: We propose a novel static var-compensator (SVC) nonlinear robust adaptive control scheme based on system immersion and manifold invariant (I&I) adaptive method as well as the L -two gain restraint robust method. Firstly, a manifold that denotes the parameter estimation error is made invariant and attractive by the proposed estimation error and the robust control law. Thus the estimation error will converge to zero on this manifold. Then, an adjustable parameter is designed to control the convergence performance of the estimation error. Finally, the robust control law is deduced by adaptive backstepping. The robustness of the control system is guaranteed by the reduction of the disturbances from input to the regulated output. The simulation shows that for the estimation of the parameter and the dynamic response of the generator rotor angle, the proposed controller and the parameter update law are superior to the classical adaptive backstepping. Thus the stability of the power system is improved.

Key words: system immersion and manifold invariant; L -two gain restraint; static var-compensator; power transmission system

1 引言(Introduction)

输电系统是电力系统网络最重要的组成部分, 其稳定性水平是电力系统高效、稳定运行的基本保证^[1]. 而电力系统装机容量的不断增加和电网结构的日益复杂, 又对输电系统的有效传输容量和稳定性提出了更高的要求. 近年来, 随着电力电子技术和非线性控制技术的发展, 在输电线路中装设静止无功补偿器(static var-compensator, SVC), 并对其设计先进的控制算法是近年来提高输电系统稳定性水平的重要手段^[2].

近年来, 对于SVC控制算法的研究, 经历了从线性控制策略到非线性控制策略的转变; 而对于研究对象, 则经历了从系统在平衡点附近的近似线性化模型到非线性系统模型; 对于研究目标, 经历了从单一的电压恒定控制模式的控制目标, 到同时提高系统阻尼和系统暂态稳定性的多控制目标的发展过程^[3-6]. 通常, 含有SVC的电力输电系统的典型研究模型是单机无穷大(single machine infinity bus, SMIB)电力系统. 首先, 该电力系统是具有高度非线性的系统, 因此, 简单的线性化处理会消除这些非线性

性特性. 有研究表明, 非线性特性对于控制器设计以及系统响应不仅无害, 反而是有益的^[7]. 因此, 控制器设计时如果能保留这些非线性特性, 将更加适用于非线性系统模型, 会得到更好的动态响应. 其次, 电力系统在运行过程中不断受到来自内部和外界的干扰, 在发电机端转动轴上的扭矩干扰和励磁绕组上的电磁干扰使转子遭受不确定的扰动, 而负载的扰动会使系统导纳遭受不确定的扰动, 因此基于平衡点附近的线性化模型所设计的控制器, 当扰动致使系统状态发生大范围波动时, 控制器失效. 同时, 由于电力系统模型中的阻尼系数在实际应用中是不能被精确测量的, 因此不具有自适应估计能力的控制器, 往往因将其视为固定参数而导致控制器失效. 这样, 要使控制器具有不依赖于平衡点处线性化模型的稳定性和鲁棒性, 必须考虑系统的非线性特性以及系统中阻尼系数和扰动的不确定性对系统响应的影响.

近年来, 自适应逆推方法作为一种处理具有不确定参数的非线性系统的有效控制方法, 在电力系统的同步发电机励磁控制、汽轮发电机主汽门开度控制、柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)等非线性控制方面^[8-9]得到了广泛应用. 但是, 由于传统自适应逆推方法是基于确定性-等价性原理的, 并且其参数估计器是通过在Lyapunov函数的微分式中消掉含有未知参数的项来得到的, 因此其参数估计器设计形式单一; 同时在控制律的递推步骤中, 由于对Lyapunov函数的微分运算, 引起了所谓“计算膨胀”的问题; 另外, 参数估计器仅能保证估计误差的有界收敛, 文献[10]已对该问题进行了分析. 因此, 为了解决传统自适应逆推存在的上述问题, 文献[11]提出了一种基于传统非线性控制理论中系统浸入和不变流形概念的一种模块化的新自适应控制方法, 其主要思路是将参数估计器的辨识和控制器的设计分开进行. 在这一文献中给出的参数估计方法突破了传统自适应逆推方法中参数估计形式单一且不可控的限制, 并同时给出了针对特殊下三角类型的系统, 替代传统自适应逆推算法的自适应控制方法. 这一方法在该文献中被命名为I&I(系统浸入和流形不变)自适应方法.

根据上述分析, 尽管将I&I自适应方法和逆推算法相结合, 可以对具有下三角数学模型的SMIB非线性系统, 求取其控制律和未知参数估计器, 但却并未考虑当系统中发电机转子和系统导纳遭受不确定扰动时, 控制器的鲁棒性和自适应性, 以及系统动态响应的稳定性问题.

L_2 -增益抑制是基于无源性和耗散系统理论的非线性鲁棒算法, 它与 γ -耗散的概念是等同的. 也

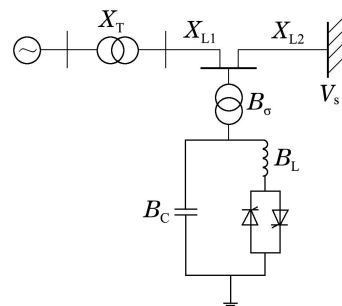
即, 如果一个非线性系统是 γ -耗散的, 那么就意味着该系统输入输出的 L_2 增益比值小于或等于 γ ($\gamma > 0$), 反之亦然. 这样, 使用 L_2 -增益抑制鲁棒方法来处理不确定扰动时, 通常都是通过构造能量存储函数, 使其满足耗散不等式, 来使得从扰动输入到控制输出是 γ -耗散的, 从而达到抑制不确定扰动对系统输出的影响的目的^[12-13].

综上所述, 本文在这些研究基础上, 将I&I自适应逆推方法和 L_2 -增益抑制鲁棒控制方法相结合, 为带有SVC的SMIB系统设计非线性鲁棒自适应控制器, 以改善系统动态响应, 提高输电系统的稳定性水平. 所设计的自适应估计器突破了传统确定性-等价性原理的限制, 参数估计器的设计不需要构造Lyapunov函数, 因此也就不需要对其求取微分, 从而避免了“计算膨胀”的问题. 具体设计过程如下: 首先构造一个表示参数估计误差函数的流形, 然后通过鲁棒控制律的设计使得该流形不变且吸引, 并通过参数估计误差的渐近稳定和指数收敛特性来保证参数估计器对不确定参数的自适应估计. 在鲁棒控制律的设计时, 采用 L_2 -增益抑制来消除系统不确定扰动对于系统输出响应的影响. 控制器设计同时考虑了系统阻尼系数不能精确测量和存在不确定扰动时的情况, 并且算法推导过程没有对系统模型做线性化处理, 从而在控制器的设计时, 保留了系统模型的非线性特性. 仿真结果表明, 所设计的控制器和参数替换律在参数估计和系统状态的动态响应方面优于传统自适应逆推算法.

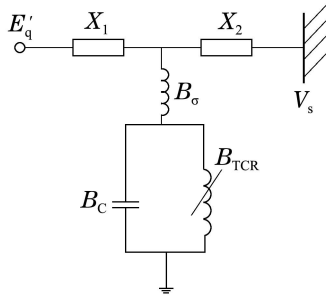
2 系统模型及控制目标(System model and control objective)

本文的研究对象是带有固定电容器-晶闸管控制电抗器(fixed capacitor-thyristor controlled reactance, FC-TCR)结构型SVC的SMIB, 其原理接线图和等效电路图分别如图1(a)和图1(b)所示.

在图1中, SVC装置在研究系统稳定性问题时可看作是并联在系统节点上的一个可变电纳, 通常建模为一阶惯性数学模型, 由传递函数推导其微分方程来分析系统动态过程, FC-TCR结构型SVC的等效传递函数模型如图2所示^[6,9,13].



(a) 原理接线图



(b) 等效电路图

图1 SVC单机无穷大电力系统结构模型

Fig. 1 SMIB with SVC construction model

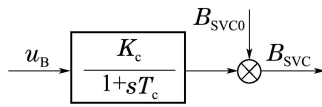


图2 FC-TCR型SVC等效传递函数

Fig. 2 FC-TCR type SVC equivalent transfer function

假设略去线路和SVC本身的电磁暂态过程, 并假定原动机输入到发电机的机械功率 P_m 恒定, 则带有SVC的SMIB系统数学模型可由式(1)所述的微分方程组来描述^[14-16]:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H}(P_m - P_e) - \frac{D}{H}(\omega - \omega_0) + w_1, \\ \dot{B}_{SVC} = \frac{1}{T_c}(-B_{SVC} + B_{SVC0} + K_c u_B) + w_2, \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} P_e &= E'_q V_s B_{sys} \sin \delta, \\ B_{sys} &= \frac{1}{X_1 + X_2 - X_1 X_2 (B_L - B_C)}, \\ X_1 &= x'_d + X_T + X_{L1}, \quad X_2 = X_{L2}. \end{aligned}$$

模型中的各参数含义如下: δ 为发电机转子角(rad); ω 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(p.u.); P_e 为发电机电磁功率(p.u.); B_{SVC0} 为SVC系统电纳的初始值(p.u.) B_C 为TCR并联电容等效电纳(p.u.); x'_d 为发电机d轴暂态等效阻抗值(p.u.); X_{L1} , X_{L2} 为输电线路等效阻抗值(p.u.); V_s 为无穷大母线电压(p.u.); 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(p.u.); T_c 为SVC调节器时间常数(s); B_L 为SVC中电感的电纳(p.u.); X_T 为变压器等效阻抗值(p.u.); K_c 为SVC调节器的放大系数; u_B 为SVC调节器的控制变量(p.u.); B_σ 为SVC系统变压器等效电纳(p.u.); B_{SVC} 为SVC系统等效电纳(p.u.).

在系统模型(1)中, $w = [w_1 \ w_2]^T$ 为施加在发电机转子与系统导纳上的不确定扰动, w_1 和 w_2 为 L_2 空

间未知函数, 且满足 $|w_i(t)| \leq h_i$, h_i 为一正数. 将系统的运行平衡点表示为 $[\delta_0 \ \omega_0 \ B_{SVC0}]^T$.

首先, 对式(1)所表示的系统进行变量和参数替换, 令

$$\begin{aligned} x_1 &= \delta - \delta_0, \quad x_2 = \omega - \omega_0, \quad x_3 = B_{SVC} - B_{SVC0}, \\ k_1 &= \frac{\omega_0}{H}, \quad k_2 = \frac{\omega_0 E'_q V_s}{H}, \quad k_3 = \frac{1}{T_c}, \quad \theta = -\frac{D}{H}, \\ \delta_{\sin} &= \sin(\delta_0 + x_1), \quad \delta_{\cos} = \cos(\delta_0 + x_1), \end{aligned}$$

则式(1)所表示的系统模型可整理为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \theta x_2 + k_1 P_m - k_2 (x_3 + B_{SVC0}) \delta_{\sin} + w_1, \\ \dot{x}_3 = k_3 (-x_3 + K_c u_B) + w_2. \end{cases} \quad (2)$$

根据上述假设条件, 式(2)中的参数 k_1, k_2, k_3 均为已知常数. 由于系统模型(1)中的阻尼系数 D 是不能精确测量的, 因此模型(2)中的对应的参数 θ 也为不确定参数.

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, 用以协调输出响应中状态变量 x_1 和 x_2 的比重.

对于上述式(2)表示的具有未知参数和不确定扰动的系统, 设计SVC控制器的目标是, 首先为阻尼系数设计自适应参数替换律. 然后通过非线性鲁棒自适应控制律的设计, 使得式(2)表示的系统中的变量 x_1, x_2 和 x_3 有界, 并收敛到新的平衡点, 也就是将发电机功角和角速度调节至新平衡点.

3 鲁棒自适应控制律设计(Robust adaptive control law design)

3.1 参数估计器设计(Parameter estimator design)

首先, 根据I&I自适应方法, 为不确定阻尼系数构造自适应参数估计器.

令参数估计误差为

$$z = \hat{\theta} - \theta + \beta(x_1, x_2), \quad (3)$$

其中: $\hat{\theta}$ 是 θ 的估计值, $\beta(x_1, x_2)$ 为一光滑函数.

对式(3)求导, 并将式(2)代入, 整理后可得到如下的参数估计误差的导数:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \dot{\hat{\theta}} + \sum_{k=1}^2 \frac{\partial \beta}{\partial x_k} \times \dot{x}_k = \\ &= \dot{\hat{\theta}} + \frac{\partial \beta}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial \beta}{\partial x_2} (\theta x_2 + k_1 P_m - \\ & \quad k_2 (x_3 + B_{SVC0}) \delta_{\sin} + w_1). \end{aligned} \quad (4)$$

构造只含有 z 的微分函数并保留不确定项 w_1 , 将自适应参数替换律设计为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}} &= -\frac{\partial \beta}{\partial x_1} x_2 - \frac{\partial \beta}{\partial x_2} ((\hat{\theta} + \beta) x_2 - \\ & \quad k_1 P_m + k_2 (x_3 + B_{SVC0}) \delta_{\sin}). \end{aligned} \quad (5)$$

再将所设计的参数替换律式(5)代入式(4)中,得

$$\dot{z} = -\frac{\partial\beta}{\partial x_2}(zx_2 - w_1). \quad (6)$$

注1 由于在参数估计误差中引入函数 $\beta(x_1, x_2)$, 从而使所提的控制方法突破传统的确定性-等价性原理, 不需要去构造Lyapunov函数, 并根据其微分式来设计参数估计器, 克服了传统自适应逆推方法参数估计形式单一的缺陷.

注2 在式(3)中引入函数 $\beta(x_1, x_2)$ 的作用是塑造一个目标流形, 并使这一流形对于被控系统来说是不变和吸引的^[11]. 这样就可使流形 $M = \{(x, \hat{\theta}) \in \mathbb{R}^1 \times \mathbb{R}^1 | \hat{\theta} - \theta + \beta(x_1, x_2) = 0\}$ 不变且吸引, 也即在这一不变流形上, 参数估计误差按指数规律收敛于零.

注3 使得参数估计误差 z 指数收敛, 可设计 $\beta = \rho \int_0^{x_2} \varphi(x_1, \chi) d\chi$, 其中 ρ 为正数.

为了证明参数估计器的渐近稳定性和参数估计误差的指数收敛性, 则需由上述所设计的参数替换律(5)和参数估计误差有效期(3), 推导出下面的引理.

引理1 假设参数估计误差导数表达式(6)中, 函数 β 设计为 $\beta(x_1, x_2) = -\frac{1}{2}\rho x_2^2$, $\rho \geq \frac{\eta}{h_1^2}$, $\eta > 0$. 并构造函数 $V(z) = \frac{1}{2}z^2$, 则对 $V(z)$ 微分可得到其导数表达式为

$$\begin{aligned} \dot{V}(z) = z\dot{z} &= -\frac{\partial\beta}{\partial x_2}(z^2x_2 - zw_1) = \\ &-\rho(zx_2 - \frac{w_1}{2})^2 - \frac{\rho w_1^2}{4} \leq \\ &-\rho(zx_2 - \frac{h_1}{2})^2 - \frac{\eta}{4} \leq 0. \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知, 有如下3个结论: a) 对于系统(2)的所有控制输入 u_B , 有 $z(t) \in L_\infty$ 且 $z(t)x_2(t) \in L_2$. b) 根据LaSalle's不变集定理可知, 所构造的估计误差导数式(6)的所有轨线将收敛到不变集 $E = \{(x, z) \in \mathbb{R}^1 \times \mathbb{R}^1 : zx_2 = 0, zw_1 = 0\}$ 中, 这也就意味着 $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t)x_2(t) = 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = 0$ 成立, 也即所设计的参数估计误差是渐近稳定和指数收敛的. c) 从I&I自适应控制理论的角度来看, $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = 0$ 成立, 意味着由式(3)所定义的参数估计误差所对应的参数形式的流形

$$M = \{(x, \hat{\theta}) \in \mathbb{R}^1 \times \mathbb{R}^1 | \hat{\theta} - \theta + \beta(x_1, x_2) = 0\}$$

对于式(2)所表示的系统是不变和吸引的.

3.2 鲁棒自适应控制器设计(Robust adaptive controller design)

在这一部分中, 将使用前述的自适应估计器和逆推方法推导鲁棒控制律 u_B , 并采用 L_2 -增益抑制鲁棒控制方法来消除不确定扰动对系统响应的影响. 从而, 达到使闭环系统中所有的状态变量响应轨线

有界, 以及使扰动输入 w_1 和 w_2 与控制输出之间满足 L_2 -增益抑制, 也即控制系统具有鲁棒性的控制目标.

从引理1中可推断出, 轨线有界和扰动抑制这两个控制目标意味着要求 $z(t)x_2(t)$ 和 $z(t)h_1(t)$ 收敛到0. 下面给出控制器设计的递推过程.

首先, 定义系统状态误差函数为

$$e_1 = x_1 - x_1^*, \quad (8)$$

$$e_2 = x_2 - x_2^*, \quad (9)$$

$$e_3 = x_3 - x_3^*, \quad (10)$$

其中 x_1^* , x_2^* 和 x_3^* 为递推过程中的“虚拟控制变量”.

第1步 根据系统(2), 对式(8)求导, 可得

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_2 = e_2 + x_2^*. \quad (11)$$

在这个一阶子系统, 将 x_2^* 视作该子系统的虚拟控制变量, 则根据Lyapunov稳定性理论, x_2^* 可设计为

$$x_2^* = -c_1 x_1, \quad (12)$$

其中 $c_1 > 0$.

第2步 这一步将对系统(2)中前两个式子组成的子系统, 采用 L_2 -增益抑制理论来消除系统的不确定扰动对系统输出响应的影响, 使扰动 w_1 对于调节输出是 γ -耗散的.

首先根据系统(2), 求取 e_2 的导数:

$$\dot{e}_2 = \theta x_2 + k_1 P_m - k_2(x_3 + B_{\text{SVC0}})\delta_{\sin} + w_1 + c_1 x_2. \quad (13)$$

然后, 根据耗散系统理论^[12]来构造表示扰动 w_1 的能量供给与能量耗散关系的函数 S_1 :

$$S_1 = (\frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2)' + \frac{1}{2}(\|y\|^2 - \gamma^2\|w_1\|^2). \quad (14)$$

将输出 $y = [q_1 x_1 \quad q_2 x_2]^T$ 以及式(11)-(13)代入式(14)中, 整理后可得

$$\begin{aligned} S_1 = &-\alpha e_1^2 - \frac{1}{2}(\gamma w_1 - \frac{e_2}{\gamma})^2 - \frac{1}{4}\gamma^2 w_1^2 + \\ &e_2[\eta_1 x_1 + \eta_2 x_2 + \theta x_2 + k_1 P_m - \\ &k_2(x_3 + B_{\text{SVC0}})\delta_{\sin}], \end{aligned} \quad (15)$$

其中:

$$\alpha = c_1 - \frac{1}{2}q_1^2 - \frac{1}{2}q_2^2 c_1^2,$$

$$\eta_1 = \frac{c_1}{2\gamma^2} - \frac{c_1}{2}q_2^2 + 1,$$

$$\eta_2 = \frac{1}{2\gamma^2} + \frac{1}{2}q_2^2 + c_1.$$

若要想使这一二阶子系统对于扰动 w_1 是 γ -耗散的, 则需要通过设计虚拟控制变量 x_3^* , 使得式(15)满足 $S_1 \leq 0$. 于是, 根据上一部分中所设计的基于I&I自适应方法的参数估计器, 可将虚拟控制变量 x_3^* 设

计为

$$x_3^* = \frac{\eta_1 x_1 + \eta_2 x_2 + (\hat{\theta} + \beta)x_2 + k_1 P_m}{k_2 \delta_{\sin}} - B_{\text{SVC}0}. \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)中, 并根据式(3)所定义的参数估计误差, 可将式(15)整理为

$$S_1 = -\alpha e_1^2 - \frac{1}{2}(\gamma w_1 - \frac{e_2}{\gamma})^2 - \frac{1}{4}\gamma^2 w_1^2 - e_2 x_2 z. \quad (17)$$

注4 上述引理1得出的表达式 $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t)x_2(t) = 0$ 代入式(17), 可得到 $S_1 \leq 0$. $S_1 \leq 0$ 意味着在上述设计的参数估计 $\hat{\theta}$ 和虚拟控制变量 x_3^* 的作用下, 可以保证系统(2)中前两个子式组成的子系统对于扰动 w_1 是 γ -耗散的.

第3步 这一步对于式(2)所表示的三阶系统, 采用逆推方法求取整个系统的控制律 u_B , 并在 L_2 -增益抑制鲁棒控制的基础上, 消除不确定扰动 w_1 和 w_2 对于输出响应的影响.

首先根据系统(2), 求 e_3 的导数:

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 = & k_3(-x_3 + K_c u_B) + w_2 - \\ & \frac{1}{k_2} \left(\frac{\eta_1 x_2 + (\eta_2 + \hat{\theta} + \beta)\dot{x}_2 + (\hat{\theta} + \dot{\beta})x_2}{\delta_{\sin}} - \right. \\ & \left. \frac{(\eta_1 x_1 + \eta_2 x_2 + (\hat{\theta} + \beta)x_2 + k_1 P_m)x_2 \delta_{\cos}}{\delta_{\sin}^2} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

然后, 根据耗散系统理论来构造表示扰动 w_1 和 w_2 的能量供给与能量耗散关系的函数 S_2 :

$$S_2 = \left(\frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}e_3^2 \right)' + \frac{1}{2}(\|y\|^2 - \gamma^2 \|w_1\|^2). \quad (19)$$

将输出 $y = [q_1 x_1 \ q_2 x_2]^T$ 以及式(11)–(13)和式(18)代入式(19)中, 整理后可得

$$\begin{aligned} S_2 = & -\alpha e_1^2 - \frac{1}{2}(\gamma w_1 - \frac{e_2}{\gamma})^2 - \frac{1}{4}\gamma^2 w_1^2 - e_2 z x_2 + \\ & e_3 \left\{ k_3(-x_3 + K_c u_B) - \frac{1}{k_2} \left\{ \frac{1}{\delta_{\sin}} [\eta_1 x_2 + (\eta_2 + \hat{\theta} + \beta) \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. (x_2 \hat{\theta} + k_1 P_m - k_2(x_3 + B_{\text{SVC}0})\delta_{\sin}) + (\hat{\theta} + \dot{\beta})x_2 \right] - \right. \\ & \left. \frac{1}{\delta_{\sin}^2} [(\eta_1 x_1 + \eta_2 x_2 + (\hat{\theta} + \beta)x_2 + k_1 P_m)x_2 \delta_{\cos}] \right\} \right\}. \end{aligned} \quad (20)$$

若要使扰动 w_1 和 w_2 对系统(2)的调节输出是 γ -耗散的, 则需要通过控制变量 u_B 的设计, 使得式(20)满足 $S_2 \leq 0$. 于是可设计 u_B 为

$$\begin{aligned} u_B = & \frac{1}{K_c} x_3 + \frac{1}{K_c k_2 k_3 \delta_{\sin}} (\eta_1 x_2 + (\eta_2 + \hat{\theta} + \beta) \cdot \\ & ((\hat{\theta} + \beta)x_2 + k_1 P_m - k_2(x_3 + B_{\text{L}0})\delta_{\sin}) + \\ & (\hat{\theta} + \dot{\beta})x_2) + \frac{x_2 \delta_{\cos}}{K_c k_2 k_3 \delta_{\sin}^2} (\eta_1 x_1 + \eta_2 x_2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\hat{\theta} + \beta)x_2 + k_1 P_m) - \\ & \frac{e_3}{K_c k_3} \left(\frac{\eta_2 + \hat{\theta} + \beta}{k_2 \delta_{\sin} \gamma} \right)^2 - \frac{e_3}{K_c k_3 \gamma^2}. \end{aligned} \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)中, 并根据式(3)所定义的参数估计误差表达式, 可将式(20)整理为

$$\begin{aligned} S_2 = & -\alpha e_1^2 - \frac{1}{2}(\gamma w_1 - \frac{e_2}{\gamma})^2 - \left(\frac{1}{2}\gamma w_1 - \right. \\ & \left. \frac{(\eta_2 + \hat{\theta} + \beta)e_3}{\gamma k_2 \delta_{\sin}} \right)^2 - \frac{1}{2}(\gamma w_2 - \frac{e_3}{\gamma})^2 - \\ & \left(e_2 - \frac{e_3(\eta_2 + \hat{\theta} + \beta)}{k_2 \delta_{\sin}} \right) z x_2. \end{aligned} \quad (22)$$

注5 将上述引理1得出的表达式 $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t)x_2(t) = 0$ 代入式(17), 可得出 $S_2 \leq 0$. $S_2 \leq 0$ 意味着在上述设计的参数估计 $\hat{\theta}$ 和控制变量 u_B 的作用下, 可以保证被控系统(2)对于扰动 w_1 和 w_2 的输出响应均是 γ -耗散的.

4 仿真结果及分析(Simulation results and analysis)

输电系统的稳定性水平主要体现在受扰情况下系统中的发电机功角的动态响应性能, 因此, 为检验本文设计的SVC非线性鲁棒控制律和参数估计器的有效性, 这里采用MATLAB软件的Simulink工具, 对带有不确定扰动和未知参数 θ 的非线性系统(2), 在本文所设计的控制器作用下的功角响应进行仿真, 并将仿真结果与参考文献[17]中基于Lyapunov稳定理论的传统自适应逆推方法(classical adaptive backstepping method)在同样的初始条件下的仿真结果进行了比较. 假设扰动建模为 L_2 空间函数

$$w_1 = e^{-2t} \sin(5t), \quad w_2 = e^{-2t} \cos(5t),$$

被控对象为带有SVC的SMIB系统, 其结构如图1所示, 其中各参数设置如下^[9, 12, 16]:

$$\begin{aligned} H = & 5.9, \quad V_s = 1.0, \quad E'_q = 1.08, \quad P_m = 1.0, \\ \omega_0 = & 314.159 \text{ rad/s}, \quad \delta_0 = 58.15^\circ, \quad T_c = 0.02, \\ K_c = & 1.0, \quad X_1 = 0.84, \quad X_2 = 0.52, \\ B_{\text{svc}0} = & 0.814, \quad B_L - B_C = 0.3, \quad \rho = 0.1, \\ \gamma = & 10, \quad c_1 = 2, \quad q_1 = 0.6, \quad q_2 = 0.4. \end{aligned}$$

仿真结果分析如下:

系统状态初始值的选取依据文献[9, 15]设置为下面的非零初始条件: $x_1(0) = 0.3488$, $x_2(0) = 0$. 图3是在上述参数设置和初始条件的情况下, 状态变量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的状态空间相轨迹响应图. 由图3可见, 本文所提方法能使得系统相轨迹动态响应迅速稳定, 并收敛于新的平衡点.

图4是本文所提方法和传统自适应逆推方法在参数估计方面的比较. 在本文仿真中, 参数 θ 的值设为 -0.18 . 由图4可见, 本文方法在收敛速度和估计

误差精度方面均优于传统自适应参数估计方法.

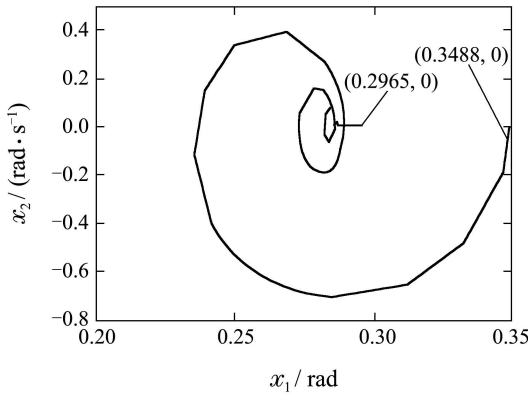


图3 系统状态空间轨迹
Fig. 3 State space trajectory

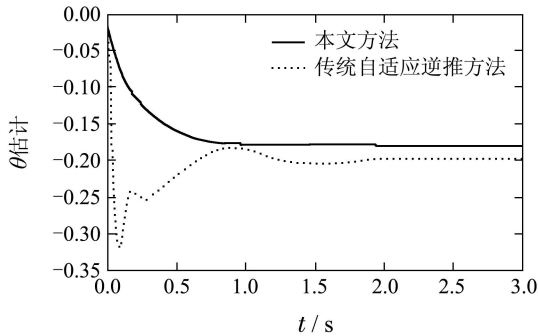


图4 未知参数估计性能比较
Fig. 4 Comparisons of uncertain parameter estimation

图5和图6分别是系统在遭受不确定扰动 w_1 和 w_2 情况下,将可调参数设置为 $\gamma = 10$,且系统状态初始值为 $x_1(0) = 0.3488, x_2(0) = 0, x_3(0) = 0$ 时系统状态 x_1 和 x_2 的暂态响应曲线.由式(1)中的系统模型可知, x_1 表示发电机功角与功角初值的差值, x_2 表示发电机转子角速度与初始角速度的差值.则由图5和图6可见,在本文所设计的控制律和参数估计器的作用下,系统状态变量 x_1 和 x_2 动态响应轨线对于扰动响应快,且能够迅速收敛于新平衡点,并达到稳定.而在传统自适应逆推方法作用下的状态变量轨线响应慢,且需要较长时间振荡才能收敛到新的平衡点.

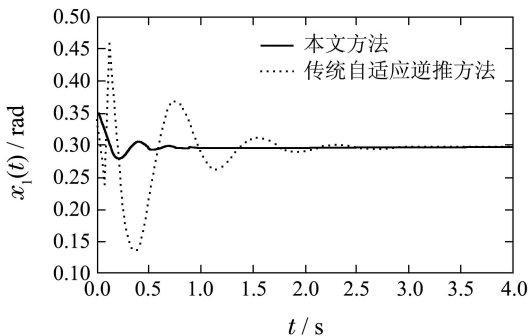


图5 $\gamma = 10$ 时状态变量 x_1 时间响应曲线
Fig. 5 Response of state x_1 when $\gamma = 10$

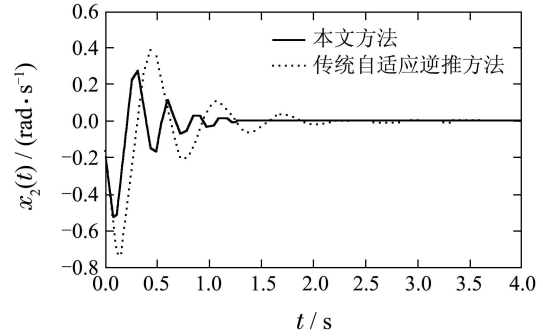


图6 $\gamma = 10$ 时状态变量 x_2 时间响应曲线
Fig. 6 Response of state x_2 when $\gamma = 10$

图7和图8分别为保持上述参数设置,并将可调参数 γ 设置为不同值时,系统状态 x_1 和 x_2 的暂态轨线响应曲线.当扰动输入对输出满足 γ -耗散时, γ 称为扰动衰减系数.理论上 γ 值越小,系统控制性能越好,系统轨线的收敛速度越快.从图7和图8可以看出,系统状态 x_1 和 x_2 的动态轨线响应速度最快的是 $\gamma = 5$,其次是 $\gamma = 10$,最慢的是 $\gamma = 20$;而达到新的稳定值的时间则依次降低.因此,结果符合 γ 值越小,系统状态轨线的收敛速度越快这一理论结果.根据不同的控制要求,这一参数可以方便地调节.

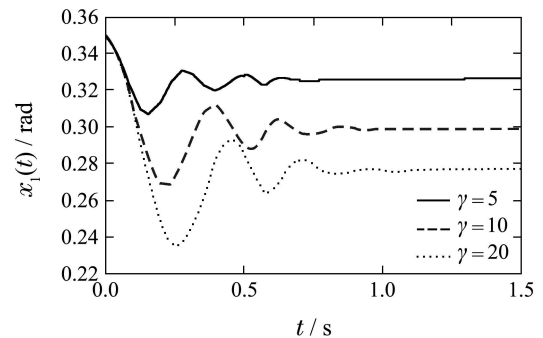


图7 γ 取值不同时状态变量 x_1 时间响应曲线
Fig. 7 Response of state x_1 in different γ

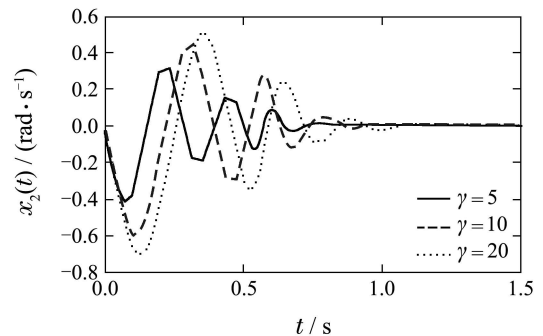


图8 γ 取值不同时状态变量 x_2 时间响应曲线
Fig. 8 Response of state x_2 in different γ

上述结果证明了,在有不确定扰动和不确定阻尼系数同时存在的情况下,系统中发电机功角在本文所设计的鲁棒自适应控制器的作用下,能够保持同

步运行, 从而证明了所设计控制器具有鲁棒性和自适应性, 提高了输电系统受扰情况下的稳定性水平.

5 结论(Conclusions)

本文提出一种将I&I自适应方法和 L_2 -增益抑制相结合, 并使用逆推方法设计的SVC鲁棒自适应控制器, 以抑制不确定扰动和不确定阻尼系数对于系统响应的影响, 从而提高输电系统的稳定性水平. 所提算法在参数估计器设计中, 不须遵循传统自适应理论的确定性-等价性原理, 因此不需要设计Lyapunov函数来保证参数估计器的稳定性, 而其稳定性由参数估计误差的渐近稳定和指数收敛性来保证. 在控制律设计时, 采用逆推方法和 L_2 -增益抑制鲁棒理论来消除不确定扰动对于系统响应的影响. 所提算法的推导过程不须对系统模型做线性化处理, 从而使系统的非线性特性保留到所设计的控制器中. 仿真结果也证明了所提算法在存在不确定扰动和不确定阻尼系数时, 可以保证控制器具有鲁棒性和自适应性, 并在参数估计的收敛速度和估计精度方面优于传统自适应逆推方法, 提高了SVC输电系统的稳定性水平. 该方法也可扩展用于其他FACTS装置的控制策略研究中, 并可用于研究非线性参数化模型的自适应鲁棒控制以及其他带有不确定性的非线性系统的自适应鲁棒控制中.

参考文献(References):

- [1] 赵晋泉, 孙晓明, 龚成明, 等. 含FACTS元件的电力系统电压稳定评估 [J]. 电力系统自动化, 2011, 16(35): 21 – 26.
(ZHAO Jinquan, SUN Xiaoming, GONG Chengming, et al. Voltage stability estimation of the power system with FACTS component [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 16(35): 21 – 26).
- [2] ROBAK S. Robust SVC controller design and analysis for uncertain power systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(2): 1280 – 1290.
- [3] FLORES P, JUAN D X, ORTUZAR M, et al. Static var compensator and active power filter with powerinjection capability, using 27-level inverters and photovoltaic cells [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(1): 130 – 138.
- [4] KARIMI A, CHOUDHRY M A, FELIACHI A. Coordinated backstepping controls for power system stability enhancement [C] // *Proceeding of the 40th North American Power Symposium*. Morgantown, USA: IEEE, 2008: 1 – 8.
- [5] 刘艳红, 宋伟华, 王杰. 包含SVC和非线性负荷的电力系统耗散实现与控制 [J]. 控制理论与应用, 2010, 17(1): 47 – 52.
(LIU Yanhong, SONG Weihua, WANG Jie. Dissipative Hamiltonian realization and feedback control of power systems with SVC and nonlinear loads [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 17(1): 47 – 52).
- [6] 徐先勇, 罗安, 方璐, 等. 静止无功补偿器的新型最优非线性比例积分电压控制 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 80 – 86.
(XU Xianyong, LUO An, FANG Lu, et al. New optimal nonlinear PI voltage controller for SVC [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2009, 29(1): 80 – 86.)
- [7] ALVES J E R, PILOTTO L A S, WATANABE E H. Thyristor-controlled reactors nonlinear and linear dynamic analytical models [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(1): 338 – 346.
- [8] RUI Y, DONG Z Y, SAHA T K, et al. A power system nonlinear adaptive decentralized controller design [J]. *Automatica*, 2010, 46 (1): 330 – 336.
- [9] FU J, ZHAO J. Robust control of SVC: a new adaptive backstepping method [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2006, 26(10): 7 – 11.
- [10] KARAGIANNIS D, ASTOLFI A. Nonlinear adaptive control of systems in feedback form: an alternative to adaptive backstepping [J]. *Systems & Control Letters*, 2008, 57(1): 733 – 739.
- [11] ALESSANDRO A, ROMEO O. Immersion and invariance: a new tool for stabilization and adaptive control of nonlinear systems [J]. *Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(4): 590 – 606.
- [12] 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, 2008.
(MEI Shengwei, SHEN Tielong, LIU Kangzhi. *Modern Robust Control Theory and Application* [M]. Beijing: Tsinghua Press, 2008.)
- [13] 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.
(LU Qiang, MEI Shengwei, SUN Yuanzhang. *Nonlinear Control for Power System* [M]. Beijing: Tsinghua Press, 2008.)
- [14] ALVES J E R, LUIZ J, PITOTTO A S, et al. Thyristor-controlled reactors nonlinear and linear dynamic analytical models [J]. *IEEE Transactions on Power Deliver*, 2008, 23(1): 338 – 346.
- [15] 傅俊, 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, 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.)
- [16] 孙丽颖. 基于backstepping方法的电力系统非线性鲁棒自适应控制设计 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
(SUN Liying. *Design of nonlinear robust adaptive control for power systems based on backstepping method* [D]. Shenyang: Northeast University, 2009).
- [17] SUN L Y, TONG S C, LIU Y. Adaptive backstepping sliding mode H_∞ control of static var compensator [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(5): 1178 – 1185.

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, 博士生导师, 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.