

附加控制输入反演自适应滑模鲁棒励磁控制

谷志锋^{1,2†}, 孙晓云¹, 余志强¹, 朱长青²

(1. 石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 石家庄 050043;

2. 军械工程学院 车辆与电气工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为了提高一类非匹配不确定非线性系统的渐近稳定鲁棒控制能力, 简化传统反演自适应变结构控制计算, 通过引入变结构附加控制输入量, 降低子系统虚拟函数反演设计难度, 克服传统反演自适应 L_2 增益控制只能保证外部扰动对状态变量的影响小于干扰抑制系数, 而不能实现系统状态变量渐近稳定的不足, 且对外部干扰上界没有要求, 并给出附加控制输入反演自适应变结构鲁棒控制计算通式. 为了验证所提出控制的方法性能, 以典型谐波励磁系统为例, 对负载突增和单相接地故障两种工作状态进行仿真分析. 仿真结果表明, 相对于反演自适应 L_2 增益控制方式, 励磁系统状态变量渐近稳定能力得到增强, 且超调降低、稳定恢复速度加快, 对于提高军用电站谐波励磁系统稳定控制能力具有重要意义.

关键词: 附加控制输入; 反演滑模控制; 自适应滑模控制; 励磁控制; 谐波励磁; 滑模鲁棒控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Back-stepping adaptive sliding mode robust excitation control with additional control input

GU Zhi-feng^{1,2†}, SUN Xiao-yun¹, YU Zhi-qiang¹, ZHU Chang-qing²

(1. School of Electrical and Electrics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Vehicles and Electrical Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to improve the asymptotical stability for a kind of nonlinear systems with unmatched uncertainties and simplify the calculation of back-stepping adaptive sliding mode control, by adopting additional control input, the level of the subsystem virtual function designment difficulty is reduced, the asymptotical stabilisation of the state variables is realized, which can not be resolved using the traditional back-stepping adaptive L_2 -gain control method while the upper bound of the interference needn't to be considered, and the common formulas of the back-stepping adaptive sliding mode robust control with additional control input (BASMRC-ACI) is deduced. In order to test the performance of the proposed control method, taking the type harmonic excitation system for example, simulation experiments are performed in load increasing and ground fault states. Simulation results show that by the BASMRC-ACI, comparing with the back-stepping adaptive L_2 -gain control method, the asymptotical stability rate of the excitation system state variables is enhanced, overshoot is reduced and the convergence speed is improved, which is important for enhancing the dynamic stability of the harmonic excitation system.

Keywords: additional control input; back-stepping sliding model control; adaptive sliding model control; excitation control; harmonic excitation; sliding model robust control

0 引言

军用电站和受电装备(雷达、导弹、火炮等)构成一类负载冲击大、容量有限的交流独立电力系统(AC isolated power system, AC-IPS). 励磁控制是提高AC-IPS暂态和稳态品质的关键技术手段之一^[1-2]. AC-IPS的励磁控制系统具有显著的非匹配参数不确定和非线性特征^[3], 采用常规反演自适应控制存在计算

膨胀问题^[4]. 用于反演自适应滑模变结构控制(Back-stepping adaptive sliding mode control, BASMC)不仅可以有效适应非线性系统的非匹配不确定性特点, 还可以克服反演设计存在的计算膨胀问题, 在电力系统^[5]、快速反射镜^[6]、无人水下航行器^[7]、船舶航向^[8]等领域应用广泛, 且为独立电力系统励磁控制提供了很好的借鉴.

收稿日期: 2017-12-19; 修回日期: 2018-04-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51407196); 河北省自然科学基金面上项目(E2017506007).

责任编辑: 张维海.

†通讯作者. E-mail: gzfgohappy@163.com.

文献[9]提出了一种附加控制变量的反演 L_2 增益控制方法,使得不需要每个子系统虚拟函数设计都考虑 γ -耗散不等式;文献[10]改进了反演自适应 L_2 增益控制方法,使得不确定参数估计在一次求积分后即可完成.但是文献[9-10]只能保证干扰至关键状态量的 L_2 范数小于干扰增益 γ ,不能实现系统状态变量的渐近稳定.为了保证受扰系统的渐近稳定性,文献[11]采用将反演控制与变结构控制相结合的方式,对非线性系统的稳定控制进行了研究,但需要知道外部干扰上界;文献[12]采用分散自适应变结构控制方法实现了一类含非结构不确定性线性系统的参数估计和鲁棒控制,但要求不确定矩阵上界已知;文献[13-14]采用观测器与滑模控制相结合的方式,实现了一类非线性系统的参数估计和稳定控制.

本文提出一种附加控制输入反演自适应滑模控制(Back-stepping adaptive sliding mode robust control with additional control input, BSMRC-ACI)方法. BSMRC-ACI不仅没有反演自适应 L_2 增益控制^[12-13]中函数与函数导数积为零的约束,同时保留了虚拟函数设计时不需要考虑 γ -耗散不等式的优势,而且渐近稳定控制能力得到增强.3次谐波励磁系统BSMRC-ACI仿真结果表明,在负载突增和接地故障状态下,通过将反演自适应控制和变结构控制相结合,在快速励磁切换控制作用下,可实现状态量 $\Delta\delta$ 、 $\Delta\omega$ 、 $\Delta E'_q$ 的渐近稳定控制.研究成果对提高谐波励磁系统暂态稳定性具有重要意义.

1 反演自适应滑模控制原理

1.1 非线性系统描述

一类含有干扰输入的非匹配不确定非线性系统可以描述为

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 + \phi_1^T(x_1)\theta + \varepsilon_1, \quad (1)$$

⋮

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, \dots, x_i) + g_i(x_1, \dots, x_i)x_{i+1} + \phi_i^T(x_1, \dots, x_i)\theta + \varepsilon_i, \quad (2)$$

⋮

$$\dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u + \phi_n^T(x_1, \dots, x_n)\theta + \varepsilon_n, \quad (3)$$

其中: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^p$ 及 $u \in \mathbf{R}$ 分别是状态和输入变量; $\theta \in \mathbf{R}^p$ ($1 < p \leq n$)是未知参数向量; f_i, g_i ($i = 1, 2, \dots, n$)是光滑函数,且满足 $f_i(0) = 0, g_i(x_1, \dots, x_i) \neq 0$; $\phi_i(x_1, \dots, x_i)$ 是光滑向量场,且满足 $\phi_i(0) = 0$; ε_i 是随机扰动量,且上界未知.

1.2 反演自适应滑模控制实现

定义 $e_1 = x_1$,取虚拟控制 x_2^* 为

$$x_2^* = \frac{-f_1(x_1) - m_1 e_1}{g_1(x_1)}, \quad (4)$$

其中控制系数 $m_1 > 0$.

由式(1)和(4)得

$$\dot{e}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 + \phi_1^T(x_1)\theta + \varepsilon_1, \quad (5)$$

$$\dot{e}_2 = -\frac{\partial x_2^*}{\partial x_1} \dot{e}_1 + f_2 + g_2 x_3 + \phi_2^T \theta + \varepsilon_2, \quad (6)$$

其中 e_2 为误差变量,满足 $e_2 = x_2 - x_2^*$.

定义 $V_2 = e_1^2 + e_2^2/2$,取虚拟控制 x_3^* 为

$$x_3^* = \frac{1}{g_2} \left[-g_1 e_1 - f_2 - m_2 e_2 + \frac{\partial x_2^*}{\partial x_1} (f_1 + g_1 x_2) \right], \quad (7)$$

其中控制系数 $m_2 > 0$.

由式(2)和(7)得

$$\dot{e}_2 = -m_2 e_2 + \phi_2^T \theta + g_2 e_3 - g_1 e_1 - \frac{\partial x_2^*}{\partial x_1} \phi_1^T \theta + \varepsilon_2 - \frac{\partial x_2^*}{\partial x_1} \varepsilon_1, \quad (8)$$

其中 e_3 为误差变量,满足 $e_3 = x_3 - x_3^*$.

采用上述虚拟函数设计方法可得

$$\dot{e}_i = -m_i e_i + \phi_i^T \theta + g_i e_{i+1} - g_{i-1} e_{i-1} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial x_i^*}{\partial x_j} \phi_j^T \theta + \varepsilon_i - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial x_i^*}{\partial x_j} \varepsilon_j, \quad (9)$$

其中控制系数 $m_i > 0$.

定义误差变量 $e_n = x_n - x_n^*$,取反馈控制律为

$$u = \frac{1}{g_n} \left[-g_{n-1} e_{n-1} - f_n - m_n e_n + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial x_n^*}{\partial x_j} (f_j + g_j x_{j+1}) - u_{\text{ad}} \right]. \quad (10)$$

其中:控制系数 $m_n > 0, u_{\text{ad}}$ 为附加控制输入.

由式(3)和(10)得

$$\dot{e}_n = -m_n e_n - g_{n-1} e_{n-1} - u_{\text{ad}} + \phi_n^T \theta - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial x_n^*}{\partial x_j} \phi_j^T \theta + \varepsilon_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial x_n^*}{\partial x_j} \varepsilon_j. \quad (11)$$

定义滑模面

$$s = \sum_{i=1}^n c_i e_i. \quad (12)$$

其中: $c_i = \kappa_i(|e_i|) + \sigma_i > 0, \kappa_i(|e_i|)$ 为关于 e_i 的 K 类函数, $\sigma_i > 0$.

取Lyapunov函数

$$V_n = \frac{s^2}{2} + \frac{\Gamma^{-1} \tilde{\theta}^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{\tilde{d}_i^2}{2\gamma_i}. \quad (13)$$

其中: $\tilde{\theta}$ 为 θ 的估计误差向量, $\hat{\theta}$ 为 θ 的估计值,满足

$\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$; Γ 为增益系数矩阵; $\tilde{d}_i = d_i - \hat{d}_i$ 为 d_i 的估计误差, \hat{d}_i 为 d_i 的估计值, d_i 为 ε_i 的上界, 即 $|\varepsilon_i| < d_i$, 且 d_i 的大小未知 (更接近于实际).

由式(5)、(6)、(9)、(11)和(13)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_n = & s \left\{ - \sum_{i=1}^n c_i m_i e_i + \sum_{i=1}^{n-1} c_i g_i e_{i+1} - \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^n \left[c_i \left(\sum_{k=i+1}^n \frac{\partial x_k^*}{\partial x_i} - 1 \right) \varepsilon_i \right] - c_n u_{ad} \right\} + \\ & s \sum_{i=1}^n c_i \phi_i^T \theta - s \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} c_j \frac{\partial x_k^*}{\partial x_j} \phi_j^T \theta - \\ & \dot{\theta} \Gamma \tilde{\theta}^T - \sum_{i=1}^n \gamma_i^{-1} \tilde{d}_i \dot{\hat{d}}_i - \sum_{i=1}^{n-1} c_i g_i e_i. \end{aligned} \quad (14)$$

取参数自适应律和控制律分别为

$$\begin{aligned} u_{ad} = & c_n^{-1} \left[\alpha \operatorname{sgn}(s) + \varsigma(s) - \sum_{i=1}^n c_i m_i e_i + \right. \\ & \sum_{i=1}^{n-1} c_i g_i e_{i+1} - \sum_{i=1}^{n-1} c_i g_i e_i - \\ & \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} c_j \frac{\partial x_k^*}{\partial x_j} \phi_j^T \hat{\theta} + \sum_{i=1}^n c_i \phi_i^T \hat{\theta} + \\ & \left. \sum_{i=1}^n c_i \left(\sum_{k=i+1}^n \frac{\partial x_k^*}{\partial x_i} - 1 \right) \hat{d}_i \operatorname{sgn}(s) \right], \end{aligned} \quad (15)$$

$$\dot{\theta} = \Gamma^T \left[\sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} c_i \frac{\partial x_k^*}{\partial x_j} \phi_j^T - \sum_{i=1}^n c_i \phi_i^T \right]^T, \quad (16)$$

$$\dot{\hat{d}}_i = \gamma_i c_i \left(\sum_{k=i+1}^n \frac{\partial x_k^*}{\partial x_i} - 1 \right) \operatorname{sgn}(s). \quad (17)$$

其中: $s\varsigma(s) \geq 0, \varsigma(0) = 0$.

将式(15)~(17)代入(4)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\alpha s \operatorname{sgn}(s) - s\varsigma(s) - \\ & \sum_{i=1}^n \left[c_i \left(\sum_{k=i+1}^n \frac{\partial x_k^*}{\partial x_i} - 1 \right) \hat{d}_i |s| \right] + \\ & \sum_{i=1}^n \left[c_i \left(\sum_{k=i+1}^n \frac{\partial x_k^*}{\partial x_i} - 1 \right) d_i |s| \right] - \\ & \sum_{i=1}^n \left[c_i \left(\sum_{j=1}^{k-1} \frac{\partial x_k^*}{\partial x_j} - 1 \right) \tilde{d}_i |s| \right] = \\ & -\alpha s \operatorname{sgn}(s) - s\varsigma(s) < 0. \end{aligned} \quad (18)$$

因此, 参数自适应律(16)、(17)和控制律(10)、(15)可以保证非线性系统(1)渐近稳定.

2 谐波励磁系统的反演自适应滑模控制

谐波励磁系统数学模型^[15]可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -\theta x_2 - \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) x_3 - \end{aligned} \quad (19)$$

$$\beta_1 x_3 [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin(\delta_0)] + \varepsilon_1, \quad (20)$$

$$\dot{x}_3 = v + \varepsilon_2. \quad (21)$$

其中: $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T = [\delta - \delta_0, \omega - \omega_0, E'_q - E'_{q0}]^T$; $(\delta_0, \omega_0, E'_{q0})$ 为起始稳定工作点; $\theta = D/M, D$ 为阻尼系数, M 为惯性时间常数; ε_1 综合考虑了力矩干扰输入和模型不确定性; ε_2 表征了励磁扰动和外部干扰; $u = K_u^{-1} \{T_{d0} v + T_{d0} \beta_2 x_3 + E_{f0} - K_A A_{30} - T_{d0} \beta_3 [\cos(\delta_0 + x_1) - \cos \delta_0]\}$ 为励磁控制输入.

定义误差变量 $e_1 = x_1, e_2 = x_2 - x_2^*, e_3 = x_3 - x_3^*$, 取虚拟控制 x_2^* 和 x_3^* 分别为

$$x_2^* = -m_1 e_1, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3^* = & \frac{-x_{30} \cos(\delta_0 + x_1) x_2 + x_2}{\sin(\delta_0 + x_1)} + \\ & \frac{m_1 m_2 x_2 + (m_1 + m_2)(-\theta x_2 + \varepsilon_1)}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} - \\ & \frac{x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin(\delta_0)]}{\sin(\delta_0 + x_1)} - x_3 - \\ & \frac{\cos(\delta_0 + x_1) x_2 (e_1 + m_1 x_2 + m_2 e_2)}{\beta_1 \sin^2(\delta_0 + x_1)} - \\ & \frac{x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin(\delta_0)]}{\sin^2(\delta_0 + x_1)}. \end{aligned} \quad (23)$$

其中: $m_1 > 0, m_2 > 0$.

取 Lyapunov 函数 $V_2 = (e_1^2 + e_2^2)/2$, 由式(19)、(22)、(23)可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 = & -x_2 \theta - \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) x_3 + \varepsilon_1 + m_1 x_2 - \\ & \beta_1 x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin(\delta_0)]. \end{aligned} \quad (24)$$

取控制律

$$\begin{aligned} v = & \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) e_{n-1} - \\ & m_3 e_3 - u_{ad} + \frac{m_1 m_2 x_2}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} - x_3 + \\ & \frac{[-x_{30} \cos(\delta_0 + x_1) x_2 + x_2]}{\sin(\delta_0 + x_1)} + \\ & \frac{(m_1 + m_2) x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin(\delta_0)]}{\sin(\delta_0 + x_1)} - \\ & \frac{\cos(\delta_0 + x_1) x_2 [e_1 + m_1 x_2 + m_2 e_2]}{\beta_1 \sin^2(\delta_0 + x_1)} - \\ & \frac{x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin(\delta_0)]}{\sin^2(\delta_0 + x_1)}, \end{aligned} \quad (25)$$

由式(21)、(22)和(25)可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 = & \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) e_2 - m_3 e_3 - u_{ad} + \\ & \frac{(m_1 + m_2)(\theta - \varepsilon_1)}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} \theta + \varepsilon_2. \end{aligned} \quad (26)$$

定义滑模面

$$s = \sum_{i=1}^3 c_i e_i, \quad (27)$$

取 Lyapunov 函数

$$V_3 = \frac{s^2}{2} + \frac{\tilde{\theta}^2}{2\rho} + \sum_{i=1}^2 \frac{\tilde{d}_i^2}{2\gamma_i}, \quad (28)$$

其中: $\tilde{d}_i = d_i - \hat{d}_i$ 为 ε_i 的估计误差, d_i 为 ε_i 的上界, 且大小未知; $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$, $\hat{\theta}$ 为 θ 的估计值.

取参数自适应律和控制律为

$$\dot{\hat{\theta}} = \rho \left[-c_2 x_2 + \frac{c_3(m_1 + m_2)}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} \right], \quad (29)$$

$$\dot{\hat{d}}_1 = \gamma_1 \left[c_2 - \frac{c_3(m_1 + m_2)}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} \right] \text{sgn}(s), \quad (30)$$

$$\dot{\hat{d}}_2 = \gamma_2 c_3 \text{sgn}(s), \quad (31)$$

$$u_{\text{ad}} = c_3^{-1} \left[\alpha \text{sgn}(s) - \sum_{i=1}^3 c_i m_i e_i + c_1 e_2 - c_2 \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) e_3 - c_2 e_1 + c_2 \hat{d}_1 + c_3 \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) e_2 - c_2 x_2 \hat{\theta} + f(s) + \frac{c_3(m_1 + m_2)(\hat{\theta} - \hat{d}_1)}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} + c_3 \hat{d}_2 \right]. \quad (32)$$

其中: $f(s) = ks$, $s f(s) \geq 0$, $f(0) = 0$; $\alpha \geq 0$.

由式(22)~(32)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -\alpha \text{sgn}(s) - s f(s) - \left[c_2 - \frac{c_3(m_1 + m_2)}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} \right] \hat{d}_1 |s| + \\ & \left[c_2 - \frac{c_3(m_1 + m_2)}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} \right] d_1 |s| - \left[c_2 - \frac{c_3(m_1 + m_2)}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} \right] \tilde{d}_1 |s| + \\ & c_3 d_2 |s| - c_3 \hat{d}_2 |s| - c_3 \tilde{d}_2 |s| = \end{aligned}$$

$$-\alpha \text{sgn}(s) - s f(s) \leq 0. \quad (33)$$

因此, 参数自适应律式(29)~(31)和控制律(25)、(32)可保证励磁系统渐近稳定.

3 仿真实验与结果分析

分别在负载突增和接地故障两种工作状态下, 对反演自适应 L_2 增益控制^[9]和BASMRC-ACI进行仿真和对比. 谐波励磁发电机额定功率为200 kW, 纵轴电抗 $x_d = 1.25(\text{p.u.})$, 纵轴瞬态电抗 $x'_d = 0.221(\text{p.u.})$, 惯性时间常数 $M = 2.03 \text{ s}$, 纵轴瞬变时间常数 $T'_{d0} = 1.03 \text{ s}$. 初始负载为50 kW, 初始稳定运行工作点为: $E'_{q0} = 1.008(\text{p.u.})$, $\delta_0 = 0.089 \text{ rad}$, $\omega_0 = 1.0(\text{p.u.})$.

3.1 负载突增时的仿真对比

在0.5 s时, 谐波励磁发电机负载突然增加为150 kW, 加载后的运行点为: $E'_{q0} = 1.041(\text{p.u.})$, $\delta_0 = 0.183 \text{ rad}$, $\omega_0 = 1.0(\text{p.u.})$. 反演自适应 L_2 增益控制^[9-10]仿真参数为 $\kappa_1(|e_1|) = e_1^2$, $\kappa_2(|e_2|) = 2e_2^2$, $\kappa_3(|e_3|) = |e_3|$; 自身与自身导数积在系统原点不为零的函数为 $f(e_3) = 2|e_3| + \cos e_3$; $c_1 = 5$, $c_2 = 2$, $c_3 = 9$, $M_h = 1.4$, $q_1 = 0.4$, $q_2 = 0.6$, $\gamma = 0.5$, $\rho = 1$. 仿真结果如图1所示.

采用BASMRC-ACI时, 仿真参数为: $m_1 = 1$, $m_2 = 2$, $m_3 = 1$; $\kappa_1(|e_1|) = 2e_1^2$, $\kappa_2(|e_2|) = e_2^4$, $\kappa_3(|e_3|) = e_3^2$; $c_1 = 1$, $c_2 = 3$, $c_3 = 7$; $M_h = 1.4$; $\gamma_1 = 0.25$, $\gamma_2 = 0.001$; $\rho = 0.3$; ε_1 和 ε_2 为白噪声, 噪声功率分别为0.1和0.2. 仿真结果如图2所示.

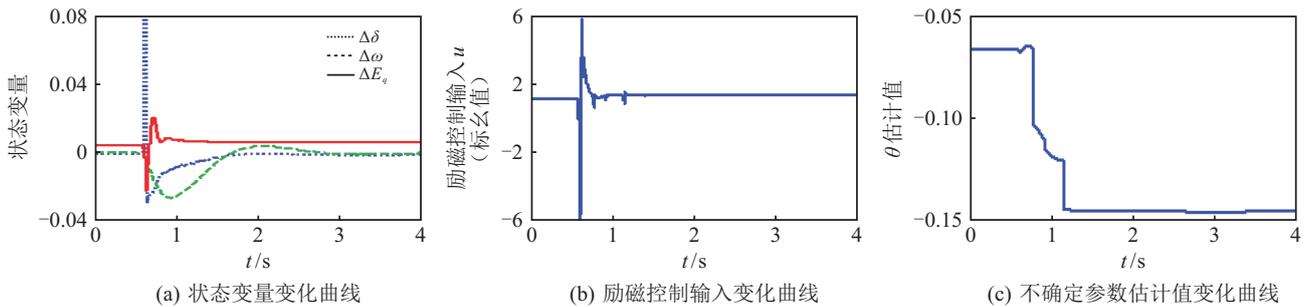


图1 负载突加时,反演自适应 L_2 增益控制仿真曲线

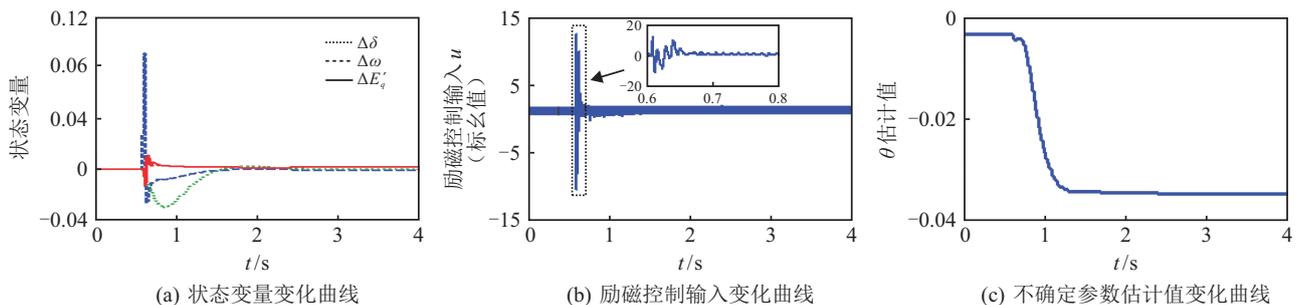


图2 负载突加时, BASMRC-ACI控制仿真曲线

比较图1与图2可知:当受外部干扰和不确定参数的影响时,在负载变换前后,反演自适应 L_2 增益控制只能保证外部扰动对状态量的影响小于干扰抑制系数 γ ,所以 $\Delta E'_q$ 并不能等于零;而采用BASMRC-ACI时,可以保证状态变量趋近于滑模面 $s = 0$,使得误差变量 $e_i \rightarrow 0$,最终保证 $\Delta E'_q$ 收敛于零.仿真结果表明: $\Delta E'_q$ 超调由0.02减小为0.01; $\Delta\delta$ 稳定时间由0.7s减少至0.4s; $\Delta\omega$ 稳定时间由1.2s减少至0.7s,且

超调较小;不确定参数 θ 估计过程更快、更光滑,励磁系统的渐近稳定能力得到了增强.

3.2 单相接地故障时的仿真对比

在0.5s时,谐波励磁发电机发生单相接地故障,0.6s后恢复正常运行.反演自适应 L_2 增益控制和BASMRC-ACI的仿真参数与3.1节相同.反演自适应 L_2 增益控制仿真结果如图3所示. BASMRC-ACI仿真结果如图4所示.

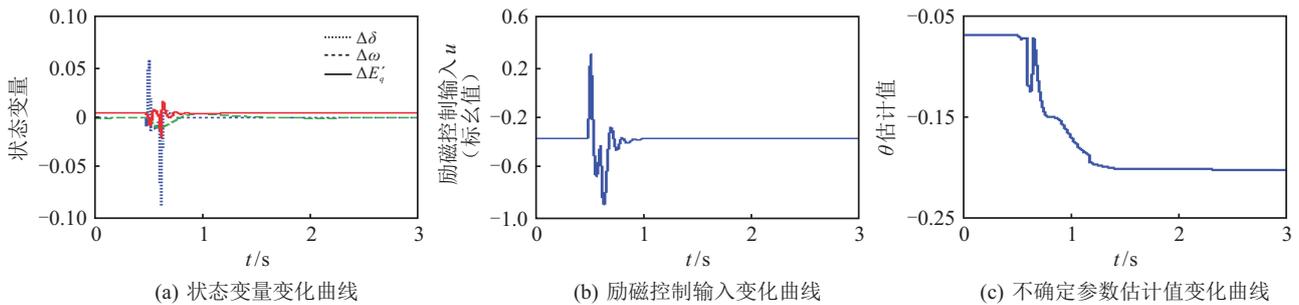


图3 单相接地故障时,反演自适应 L_2 增益控制仿真曲线

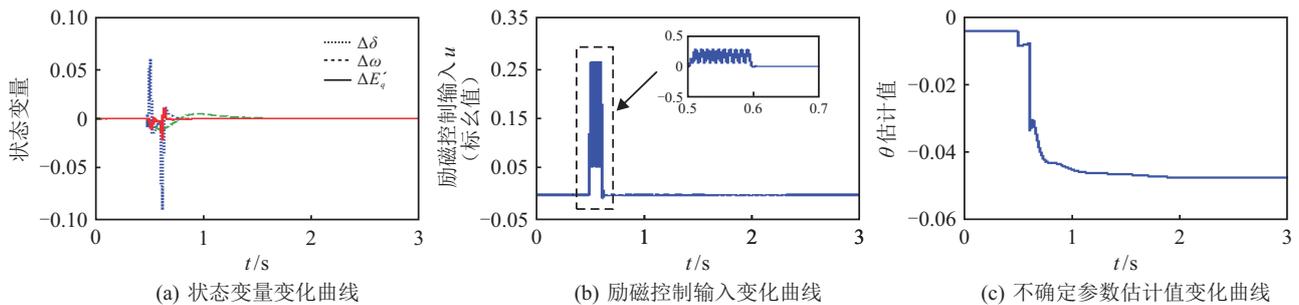


图4 单相接地故障时, BASMRC-ACI控制仿真曲线

图3和图4的仿真结果表明:单相接地故障前后,受外部干扰和不确定参数影响,采用反演自适应 L_2 增益控制时,因为只能保证外部扰动至状态量的增益小于 γ ,所以 $\Delta E'_q$ 并不能收敛于零点;而BASMRC-ACI可实现状态变量趋近于滑模面 $s = 0$ 和误差变量 $e_i \rightarrow 0$,所以 $\Delta E'_q$ 在单相接地故障前后收敛至零点,且受BASMRC-ACI的高频快速切换控制作用, $\Delta E'_q$ 、 $\Delta\delta$ 稳定速度和 θ 估计速度均明显加快.仿真结果表明,BASMRC-ACI对于提高谐波励磁系统单相接地故障后的稳定恢复能力具有重要意义.

4 结论

本文针对一类含干扰输入和不确定参数的严参数反馈非线性系统,提出了一种BASMRC-ACI的稳定控制新方法,并给出了计算通式. BASMRC-ACI通过在反演自适应控制中引入附加控制输入,使得只需在反演设计最后一步统一考虑 γ -耗散不等式即可,克服了常规反演自适应各子系统虚拟函数设计时都要考虑 γ -耗散不等式的不足,简化了计算;通过与变

结构控制相结合,能够实现非线性系统状态变量的渐近稳定,克服了传统反演自适应 L_2 增益控制只能保证外部扰动对状态量的影响小于干扰抑制系数 γ ,而不能实现系统状态变量渐近稳定的不足.3次谐波励磁系统BASMRC-ACI的仿真结果表明,相对于反演自适应 L_2 增益控制,状态变量 $\Delta\delta$ 、 $\Delta\omega$ 、 $\Delta E'_q$ 的稳定速度、超调和渐近稳定能力得到了很大程度的提高,充分表明了该方法的有效性和优点,为提高谐波励磁系统暂态稳定控制能力提供了一种新途径.

参考文献(References)

[1] 谷志锋, 朱长青, 邵天章. 分布式多输入系统的自律鲁棒自适应分散控制[J]. 控制与决策, 2014, 29(12): 1545-1552.
(Gu Z F, Zhu C Q, Shao T Z. Autonomous robust adaptive decentralized control for distributed multi-input system[J]. Control and Decision, 2014, 29(12): 1545-1552.)
[2] 谷志锋, 朱长青, 胡树杰, 等. 机电复合调速系统反演自适应 L_2 增益控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10):

- 1723-1730.
(Gu Z F, Zhu C Q, Hu S J, et al. Back-stepping adaptive L_2 gain control of electromechanical governed system[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 1723-1730.)
- [3] 陈龙胜, 王琦. 一类非仿射非线性不确定系统自适应鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(2): 256-261.
(Chen L S, Wang Q. Adaptive robust control for a class of uncertain non-affine nonlinear system[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(2): 256-261.)
- [4] Wu P, Wang Q Y, Feng X Y. Automatic train operation based on adaptive terminal sliding mode control[J]. Int J of Automation and Computing, 2015, 12(5): 142-148.
- [5] 王新枝, 夏立, 张超. 考虑负荷动态模型的船舶电力系统暂态电压稳定分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(10): 2231-2236.
(Wang X Z, Xia L, Zhang C. Transient voltage stability analysis for ship power system considering load dynamic model[J]. J of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(10): 2231-2236.)
- [6] 田福庆, 李克玉, 王珏, 等. 压电驱动快速反射镜的自适应反演滑模控制[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 65-69.
(Tian F Q, Li K Y, Wang J, et al. Adaptive backstepping sliding mode control of a steering mirror driven by piezoelectric actuator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 65-69.)
- [7] 杨永彬, 赵贺伟, 李涵. 基于反演设计的无人水下航行器自适应二阶滑模控制[J]. 海军工程大学学报, 2016, 31(5): 152-158.
(Yang Y B, Zhao H W, Li H. Adaptive second order sliding mode control of UUV based on backstepping design[J]. J of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2016, 31(5): 152-158.)
- [8] 田佰军, 刘正江, 郑云峰. 考虑暂态/稳态性能的船舶航向保持控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(8): 640-645.
(Tian B J, Liu Z J, Zheng Y F. Robust course-keeping control for ships with the prescribed transient/steady performance[J]. J of Harbin Engineering University, 2016, 37(8): 640-645.)
- [9] 谷志锋, 朱长青, 邵天章, 等. 含 K 类函数和附加控制量的自适应 L_2 励磁控制[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(5): 257-264.
(Gu Z F, Zhu C Q, Shao T Z, et al. Adaptive L_2 excitation control with K -class functions and additional control variable [J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(5): 257-264.)
- [10] 谷志锋, 朱长青, 邵天章, 等. 不确定参数快估反演自适应最优 L_2 增益控制[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(11): 1909-1916.
(Gu Z F, Zhu C Q, Shao T Z, et al. Back-stepping optimal L_2 -gain control with rapid adaption of uncertain parameter[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(11): 1909-1916.)
- [11] 余向阳, 南海鹏, 余娟, 等. 自适应积分逆推滑模励磁控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 74-77.
(Yu X Y, Nan H P, Yu J, et al. Adaptive integral backstepping sliding mode generator excitation control[J]. Proc of the CSEE, 2009, 29(13): 74-77.)
- [12] 张翼超, 周徐昌, 周浩. 倾斜转弯鱼雷的分散自适应变结构控制[J]. 兵工学报, 2013, 34(14): 1469-1473.
(Zhang Y C, Zhou X C, Zhou H. Decentralized adaptive variable structure control for bank-to-turn torpedo[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(14): 1469-1473.)
- [13] 米阳, 马超, 符杨, 等. 基于滑模观测器的孤岛风柴混合电力系统 SVC 滑模补偿控制器设计[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 178-186.
(Mi Y, Ma C, Fu Y, et al. Design of SVC sliding mode compensation controller in isolated wind-diesel hybrid power system based on sliding mode observer[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 178-186.)
- [14] Ramzi T, Adel K, Mouhamed F M, et al. Back-stepping control for an induction motor using an adaptive sliding rotor-flux observer[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 93: 1-15.
- [15] 谷志锋, 朱长青, 邵天章, 等. 独立电力系统非线性鲁棒控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2017: 47-57.
(Gu Z F, Zhu C Q, Shao T Z, et al. Isolated power system nonlinear robust control[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2017: 47-57.)

作者简介

谷志锋 (1979—), 男, 副教授, 博士, 从事电力系统非线性稳定控制技术的研究, E-mail: gzfgohappy@163.com;

孙晓云 (1972—), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统非线性鲁棒控制及仿真技术等研究, E-mail: xy_tddx_72@163.com;

余志强 (1977—), 男, 副教授, 从事电力系统储能技术及控制技术的研究, E-mail: Zhiqiang_yu@163.com;

朱长青 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事武器系统分散电力支持技术等研究, E-mail: Zhunei@163.com.

(责任编辑: 齐 霖)