

全状态参数最优控制的鲁棒自适应励磁控制

谷志锋[†], 朱长青, 邵天章, 刘洪文, 刘 璞

(军械工程学院 车辆与电气工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 在backstepping励磁设计中, 虚拟控制函数的参数缺乏最优约束, 为了克服此不足, 通过坐标变换得到了新的励磁系统动态模型和参数替换律, 结合反馈线性化和最优控制策略, 在不确定参数和外部干扰两种条件下, 给出了具有全状态参数最优控制的鲁棒自适应励磁控制设计方法. 为了验证所提方法的正确性, 以具体军用电站励磁系统模型为例, 进行了仿真实验. 仿真结果表明该方法在保证系统鲁棒稳定性和 L_2 增益干扰抑制的同时, 可明显提高状态参数的收敛速度和优化控制能力.

关键词: 励磁系统; 鲁棒自适应最优控制; 军用移动电站; 改进型backstepping控制; L_2 增益干扰抑制

中图分类号: TM273 **文献标识码:** A

Robust adaptive control for the excitation system based on total-state-parameter optimum control

GU Zhi-feng[†], ZHU Chang-qing, SHAO Tian-zhang, LIU Hong-wen, LIU Pu

(Vehicle and Electric Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang Hebei 050003, China)

Abstract: In the traditional backstepping design of the excitation system, the parameters in the virtual control function are lack of restrain. In order to overcome this shortage, we transform the coordinates to obtain the new dynamic model and the parameter replacement law for the excitation system. When the uncertain parameters and the disturbances of the system are taken into account, we obtain the robust adaptive excitation control law with all state parameters in restrain. To validate the efficacy, we simulate the control of a military moving power station by applying the proposed method. Simulation results show that this method can guarantee the system robustness, suppress the L_2 gain disturbance, improve the convergence speed and achieve the total state-parameter optimum control.

Key words: excitation system; robust adaptive optimum control; military moving power station; improved backstepping control; L_2 -disturbance attenuation control

1 引言(Introduction)

军用电站电力网络主要由军用电站、变压器、传输线和用电装备(火炮、雷达等)等构成. 励磁系统由于可以保证军用电站的供电性能指标, 所以对于用电装备效能发挥具有重要意义. 用电装备工作具有冲击性、瞬时性和不确定性^[1], 导致军用电站电力网络具有较强的非线性、参数不确定性. 目前, 军用电站常采用PID励磁控制方式. 在大扰动、强冲击、非线性状况下, 这种控制方式在保证系统的鲁棒性和全状态参数最优控制方面存在不足.

文献[2-3]应用线性 H_∞ 理论对船舶电站电力网络鲁棒控制进行了研究, 但对励磁系统的非线性及参数不确定性考虑不足. 文献[4]采用非线性 H_∞ 和直接反馈线性化的控制方法, 对励磁与调速综合控制进行了研究, 但是加权系数需要多次调试. 针对励磁系统的

非线性和 L_2 增益抑制, 文献[5-9]采用精确反馈线性化、H-J不等式和哈密尔顿方法对励磁控制进行了研究, 但是励磁系统模型均是基于确定参数. 文献[10-12]采用backstepping设计方法, 结合励磁系统严格参数的反馈特点, 将一个高阶系统分解成一系列低阶系统, 递归构造了Lyapunov函数, 该设计方法依据Lyapunov稳定性理论, 但是虚拟控制函数的参数选取具有一定的任意性. 文献[13]结合最优控制、关系度等相关概念, 进行了励磁系统的全信息最优控制, 实现了非线性系统的最优控制.

本文首先通过对backstepping鲁棒控制设计方法进行改进, 得到了新坐标系 (e_1, \dots, e_n) 下的状态方程. 然后, 结合直接反馈线性化和最优控制等方法, 给出了严格参数励磁系统的综合全状态参数优化控制的鲁棒自适应控制策略. 最后, 结合具体军用电站励

磁系统参数进行了仿真研究. 仿真结果表明: 所提控制策略不仅能够保证军用电站励磁系统的鲁棒稳定性和 L_2 增益抑制, 同时由于采用直接反馈线性化和最优控制方法, 还能够有效控制各参量的变化速度, 最终达到最优自适应 L_2 增益抑制控制的目的.

2 非线性最优鲁棒自适应控制设计原理(The principle of the nonlinear robust adaptive optimal control design)

2.1 非线性系统描述(Description of the nonlinear system)

严参数反馈非线性不确定系统(1)可描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 + \phi_1^T(x_1)\theta, \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_2(x_1, x_2)x_3 + \phi_2^T(x_1, x_2)\theta, \\ \vdots \\ \dot{x}_i = f_i(x_1, \dots, x_i) + g_i(x_1, \dots, x_i)x_{i+1} + \varphi_i^T(x_1, \dots, x_i)\theta, \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)u + \varphi_n^T(x_1, \dots, x_n)\theta, \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^n$ 及 $u \in \mathbb{R}$ 分别为状态和输入变量; $\theta \in \mathbb{R}^p$, $1 < p \leq n$ 是未知参数向量; $f_i, g_i, i = 1, 2, \dots, n$ 是光滑函数, 且满 $f_i(0) = 0, g_i(x_1, x_2, \dots, x_i) \neq 0$; $\varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_i)$ 是光滑向量场, 且满足 $\varphi_i(0) = 0$.

2.2 全状态参数最优控制的鲁棒自适应控制原理(Principle of the robust adaptive control based on the state parameters restrained)

全状态参数最优控制的鲁棒自适应控制方法将综合考虑各子系统虚拟控制函数的设计参数, 并形成最优控制鲁棒控制律.

上述严参数反馈非线性不确定系统具有明显的下三角结构, 每一个等式可以看作一个子系统.

第1步 对于第1个子系统, 定义误差变量 $e_1 = x_1$, 其动态为 $\dot{e}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 + \phi_1^T(x_1)\theta$.

将 x_2^* 视为虚拟控制, 选择镇定函数为

$$x_2^* = \frac{1}{g_1(x_1)}[-f_1(x_1) - \phi_1^T(x_1)\hat{\theta} - m_1e_1],$$

其中: m_1 为设计常数; $\hat{\theta}$ 为 θ 的估计值.

当估计误差 $\tilde{\theta}$ 定义为 $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$, 误差变量 e_2 定义为 $e_2 = x_2 - x_2^*$ 时, e_1 动态可以表示为

$$\dot{e}_1 = -m_1e_1 + \phi_1^T(x_1)\tilde{\theta} + g_1(x_1)e_2. \quad (2)$$

取 Lyapunov 函数 $V_1 = \frac{e_1^2}{2}$. 此函数沿系统(2)求导

得 $\dot{V}_1 = e_1\dot{e}_1$.

第2步 对 V_1 增广得 $V_2 = \frac{e_1^2}{2} + \frac{e_2^2}{2}$, 其中:

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{x}_2^* = \\ & f_2 + g_2x_3 + \phi_2^T\theta - \frac{\partial x_2^*}{\partial x_1}\dot{x}_1 - \frac{\partial x_2^*}{\partial \hat{\theta}}\dot{\hat{\theta}} = \\ & f_2 + g_2x_3 + \phi_2^T\theta - \frac{\partial x_2^*}{\partial x_1}(f_1 + g_1x_2 + \phi_1^T\theta) - \frac{\partial x_2^*}{\partial \hat{\theta}}\dot{\hat{\theta}}, \end{aligned} \quad (3)$$

则 V_2 沿系统(2)-(3)求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2\dot{e}_2 = \\ & -m_1e_1^2 + e_1\phi_1^T(x_1)\tilde{\theta} + e_2[g_1e_1 + f_2 + g_2x_3 + \\ & \phi_2^T\theta - \frac{\partial x_2^*}{\partial x_1}(f_1 + g_1x_2 + \phi_1^T\theta) - \frac{\partial x_2^*}{\partial \hat{\theta}}\dot{\hat{\theta}}]. \end{aligned}$$

定义 $e_3 = x_3 - x_3^*$. x_3^* 为 x_3 的虚拟控制, 取值为

$$x_3^* = \frac{1}{g_2}[-g_1e_1 - f_2 - \phi_2^T\hat{\theta} + \frac{\partial x_2^*}{\partial x_1}(f_1 + g_1x_2 + \phi_1^T\hat{\theta}) + \frac{\partial x_2^*}{\partial \hat{\theta}}\dot{\hat{\theta}} - m_2e_2]. \quad (4)$$

将 x_3^* 代入 \dot{V}_2 则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2\dot{e}_2 = \\ & -m_1e_1^2 - m_2e_2^2 + e_1\phi_1^T\tilde{\theta} + e_2\phi_2^T\tilde{\theta} - \\ & e_2\frac{\partial x_2^*}{\partial x_1}\phi_1^T\tilde{\theta} + g_2e_2e_3. \end{aligned}$$

将式(4)代入式(3)可得

$$\dot{e}_2 = -m_2e_2 + \phi_2^T\tilde{\theta} + g_2e_3 - g_1e_1 - \frac{\partial x_2^*}{\partial x_1}\phi_1^T\tilde{\theta}.$$

照此推导, 可得第 i 步的结论为

$$V_i = \sum_{j=1}^i \frac{e_j^2}{2}, \quad (5)$$

$$\dot{e}_i = f_i + g_ix_{i+1} + \phi_i^T\theta - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial x_j^*}{\partial x_j}(f_j + g_jx_{j+1} + \phi_j^T\theta) - \frac{\partial x_i^*}{\partial \hat{\theta}}\dot{\hat{\theta}}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= -\sum_{j=1}^i m_j e_j^2 + \sum_{j=1}^i e_j \phi_j^T \tilde{\theta} - \\ & \sum_{k=2}^i \sum_{j=1}^{k-1} e_k \frac{\partial x_k^*}{\partial x_j} \phi_j^T \tilde{\theta} + g_i e_i e_{i+1}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{e}_i = -m_i e_i + \phi_i^T \tilde{\theta} + g_i e_{i+1} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial x_i^*}{\partial x_j} \phi_j^T \tilde{\theta}. \quad (8)$$

第 n 步 全系统的 Lyapunov 函数

$$V_n = V_{n-1} + \frac{1}{2}e_n^2 + \frac{1}{2}\tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta},$$

求导得

$$\dot{V}_n = \dot{V}_{n-1} + e_n \dot{e}_n + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}}. \quad (9)$$

按照通式(6)-(7),将 \dot{e}_n 及 \dot{V}_{n-1} 代入式(9)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_n = & -\sum_{j=1}^{n-1} m_j e_j^2 + \sum_{j=1}^{n-1} e_j \phi_j^T \tilde{\theta} - \\ & \sum_{k=2}^{n-1} \sum_{j=1}^{k-1} e_k \frac{\partial x_k^*}{\partial x_j} \phi_j^T \tilde{\theta} - \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} + \\ & e_n [g_{n-1} e_{n-1} + f_n + g_n u + \phi_n^T \theta - \\ & \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial x_n^*}{\partial x_j} (f_j + g_j x_{j+1} + \phi_j^T \theta) - \frac{\partial x_n^*}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}}]. \quad (10) \end{aligned}$$

取反馈控制律和参数替换律分别为

$$u = \frac{1}{g_n} [-g_{n-1} e_{n-1} - f_n - \phi_n^T \hat{\theta} - m_n e_n + u_{f1} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial x_n^*}{\partial x_j} (f_j + g_j x_{j+1} + \phi_j^T \hat{\theta}) + \frac{\partial x_n^*}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}}], \quad (11)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = [(\sum_{j=1}^{n-1} e_j \phi_j^T - \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} e_k \frac{\partial x_k^*}{\partial x_j} \phi_j^T) \Gamma]^T. \quad (12)$$

为了进行后续最优控制推导,在式(11)中引入了控制量 u_{f1} .

在新坐标 (e_1, \dots, e_n) 下,可得闭环系统:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -m_1 e_1 + \phi_1^T \tilde{\theta} + g_1 e_2, \\ \dot{e}_2 = -m_2 e_2 + \phi_2^T \tilde{\theta} - g_1 e_1 - \frac{\partial x_2^*}{\partial x_1} \phi_1^T \tilde{\theta} + g_2 e_3, \\ \vdots \\ \dot{e}_i = -m_i e_i + \phi_i^T \tilde{\theta} - g_{i-1} e_{i-1} - \\ \quad \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\partial x_i^*}{\partial x_j} \phi_j^T \tilde{\theta} + g_i e_{i+1}, \\ \vdots \\ \dot{e}_n = -m_n e_n + u_{f1} + \phi_n^T \tilde{\theta} - g_{n-1} e_{n-1} - \\ \quad \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial x_n^*}{\partial x_j} \phi_j^T \tilde{\theta}, \\ \dot{\hat{\theta}} = (\sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} e_k \frac{\partial x_k^*}{\partial x_j} \phi_j^T - \sum_{j=1}^{n-1} e_j \phi_j^T) \Gamma. \end{cases} \quad (13)$$

将式(11)代入式(10)得 $\dot{V}_n = -\sum_{j=1}^n m_j e_j^2 + u_{f1} e_n$.

评价1 当 $u_{f1} = K e_n$,且 $m_j > 0, K < 0$ 时,由于 $\dot{V}_n = -\sum_{j=1}^{n-1} m_j e_j^2 - (-K + m_n) e_n^2 \leq 0$,所以此控制律可实现系统稳定,且最终 $e_j \rightarrow 0$.此鲁棒控制设计与传统基于Lyapunov稳定的backstepping设计方法一致.由于 $m_j, -K$ 可以为大于零的任意数,所以在控制过程中,并没有考虑全状态参数 e_1, \dots, e_n 的综合优化控制问题.

评价2 当选择 $m_j = f(e_j) (j = 1, 2, \dots, n)$,且 $K = 0$,例如: $f(e_j) = |k_j| e_j^2$,可提高 e_j 的收敛速度.由于 m_j 同样为大于零的任意数,故在控制过程中,并

没有考虑全状态参数 e_1, \dots, e_n 的综合优化控制问题.

式(13)采用直接反馈线性化变换可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 = \dot{z}_1 = z_2 &= -m_1 e_1 + \phi_1^T \tilde{\theta} + g_1 e_2, \\ \dot{z}_2 = z_3 &= -m_1 \dot{e}_1 + \phi_1^T \dot{\tilde{\theta}} + g_1 \dot{e}_2, \\ &\vdots \\ \dot{z}_n &= f(z_1, \dots, z_n) + v, \end{aligned}$$

其中 $f(z_1, \dots, z_n)$ 为新坐标 (z_1, \dots, z_n) 的线性函数,可得线性状态方程: $\dot{Z} = AZ + Bv$,其中 $Z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_n]^{-1}$.

当取二次性能指标为

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (Z^T Q Z + v R v^T) dt = J_{\min}$$

时,所设计的最优励磁控制器能够在动态过程中,保证 z_1, \dots, z_n 及 v 的平方和对时间积分达到极小值.当选取恰当的 Q, R 矩阵,可得最优控制律 $V = R^{-1} B^T \cdot PZ$.其中 P 为如下黎卡提方程的解:

$$A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0.$$

由于 v 表达式中包含 u_{f1} ,所以可得到 u_{f1} 的大小.将 u_{f1} 代入式(11)可以得最终的控制律 u .

评价3 依据最优控制理论,当有最优解时,系统是稳定的,且有 $\dot{V}_n = -\sum_{j=1}^n m_j e_j^2 + u_{f1} e_n \leq 0$,当取 $m_j > 0$ 时,可得: $u_{f1} e_n \leq 0$.由于此时在保证系统鲁棒稳定性的同时考虑了全状态参量 (z_1, \dots, z_n) 的优化控制,此方法即文章提出的综合全状态参数的鲁棒自适应最优控制(RAOC)设计方法.相对于评价1、评价2的设计方法,此方法具有提高控制全状态参数收敛速度和实现综合最优控制的双重优势.

2.3 L₂增益抑制控制原理(Principle of the L₂-disturbance attenuation)

第2.1节中的严参数反馈非线性不确定系统,当设定性能评价指标、引入干扰时,可表示为式(14):

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X) + g(X)u + \phi^T(X)\theta + \varepsilon, \\ y = [q_1 x_1 \ q_2 x_2 \ \dots \ q_n x_n]^T, \end{cases} \quad (14)$$

其中 y 为评价系统性能的评价信号.

L₂增益抑制问题就是要设计状态反馈控制律 $u(x)$ 使得闭环系统渐近稳定,且满足对于任意 T ,系统存在

$$\int_0^T \|y(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|\varepsilon(t)\|^2 dt, \quad (15)$$

γ 为给定正数.当满足式(15)时,系统的评价信号对输入信号具有小于或等于 γ 的L₂增益干扰抑制能力.

定义

$$H = \dot{V}_n + \frac{1}{2} (\|y(t)\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon(t)\|^2),$$

依据上文推导, 可得

$$H = - \sum_{j=1}^n m_j e_j^2 + u_{f1} e_n + \frac{1}{2} (\|y(t)\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon(t)\|^2), \quad (16)$$

其中 u_{f1} 按照评价3给出的全状态参数的鲁棒自适应最优控制方法得到。

当取

$$u_{f1} = u'_f - \frac{1}{2e_n} \sum_{j=1}^n (q_j x_j)^2, \quad \frac{1}{2} \|y(t)\|^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (q_j x_j)^2$$

时, 可得 $H = - \sum_{j=1}^n m_j e_j^2 + u'_f e_n - \frac{1}{2} \gamma^2 \|\varepsilon(t)\|^2$, 由评价3知 $u_{f1} e_n \leq 0$ 。

由于 $u'_f = u_{f1} + \frac{1}{2e_n} \sum_{j=1}^n (q_j x_j)^2$, 所以, 在采用全状态参数的鲁棒自适应最优控制方法求得 u_{f1} 的基础上, 可求得 u'_f , 并可能存在以下两种情况:

a) 当 $u'_f e_n \leq 0$ 时, 则有

$$H = - \sum_{j=1}^n m_j e_j^2 + u'_f e_n - \frac{1}{2} \gamma^2 \|\varepsilon(t)\|^2 \leq 0.$$

由于 $H = \dot{V}_n + \frac{1}{2} (\|y(t)\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon(t)\|^2)$, 所以有 $2\dot{V}_n \leq \gamma^2 \|\varepsilon(t)\|^2 - \|y(t)\|^2$ 。

令非线性系统(14)的存储函数为 $V(X) = 2V_n$, 则

$$\dot{V}(X) = 2\dot{V}_n \leq \gamma^2 \|\varepsilon(t)\|^2 - \|y(t)\|^2. \quad (17)$$

由于 $V_n = V_{n-1} + \frac{1}{2} e_n^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \geq 0, V(0) = 0$, 则式(17)求积分可得式(15), 即满足 L_2 增益干扰抑制。

b) 当 $u'_f e_n > 0$ 时, 此时 u_{f1} 不再采用全状态参数的鲁棒自适应最优控制方法计算, 可以直接取 $u'_f = -K e_n (K > 0)$, 可得

$$u_{f1} = -K e_n - \frac{1}{e_n} \sum_{j=1}^n (q_j x_j)^2,$$

最终得

$$\dot{V}_n = - \sum_{j=1}^n m_j e_j^2 + u'_f e_n - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (q_j x_j)^2 \leq 0,$$

$$H = - \sum_{j=1}^n m_j e_j^2 + u'_f e_n - \frac{1}{2} \gamma^2 \|\varepsilon(t)\|^2 < 0,$$

即 $H = \dot{V}_n + \frac{1}{2} (\|y(t)\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon(t)\|^2) < 0$, 所以有 $2\dot{V}_n < \gamma^2 \|\varepsilon(t)\|^2 - \|y(t)\|^2$ 。同样取非线性系统(14)的存储函数为 $V(X) = 2V_n$, 则式(17)求积分同样可得式(15), 即满足 L_2 增益干扰抑制。

评价 4 当 $u'_f = -K e_n$, 且 $m_j > 0, K < 0$ 时, 由于 $\dot{V}_n = - \sum_{j=1}^n m_j e_j^2 + u'_f e_n - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (q_j x_j)^2 < 0$, 所以此控制律可实现系统稳定, 且最终 $e_j \rightarrow 0$, 同时可以实现 $\int_0^T \|y(t)\|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|\varepsilon(t)\|^2 dt$, 即最终实现 L_2 增益抑制。当选择 $m_j = f(e_j), j = 1, 2, \dots, n$, 且 K

$= 0$, 例如: $f(e_j) = |k_j| e_j^2$, 可提高 L_2 增益抑制的速度。

因此, 当满足 L_2 增益抑制时, 控制律、参数替换律分别为

$$u = \frac{1}{g_n} [-g_{n-1} e_{n-1} - f_n - \phi_n^T \hat{\theta} + \frac{\partial x_n^*}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} - m_n e_n + u'_f + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial x_n^*}{\partial x_j} (f_j + g_j x_{j+1} + \phi_j^T \hat{\theta}) - \frac{1}{2e_n} \sum_{j=1}^n (q_j x_j)^2], \quad (18)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = [(\sum_{j=1}^{n-1} e_j \phi_j^T - \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} e_k \frac{\partial x_k^*}{\partial x_j} \phi_j^T) \Gamma]^T, \quad (19)$$

其中 u'_f 可依据上文中 a)、b) 两种情形, 分别计算求得。

3 移动电站励磁系统数学模型(Mathematical model of the moving power station excitation system)

带有不确定参数的移动电站励磁系统仿射非线性数学模型可表示为下式^[11]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -\theta x_2 - \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) x_3 - \beta_1 x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin \delta_0], \\ \dot{x}_3 &= -\beta_2 x_3 - \beta_3 [\cos \delta_0 - \cos(\delta_0 + x_1)] + \frac{1}{T_{d0}} u, \end{aligned}$$

其中:

$$\beta_1 = \frac{\omega_0 V_S}{M x_d}, \beta_2 = \frac{1}{T'_d}, \beta_3 = \frac{x_d - x'_d V_S}{T'_{d0} x_d}, \theta = \frac{D}{M}, X = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [\delta - \delta_0 \ \omega - \omega_0 \ E'_q - E'_{q0}]^T.$$

阻尼系数 D 通常难以确定, 可看作不确定系数。

采用综合全状态参数的鲁棒自适应最优控制方法进行励磁控制设计的步骤如下:

第1步 取 $e_1 = x_1, x_2^* = -m_1 e_1, e_2 = x_2 - x_2^*$, 得 $\dot{e}_1 = -m_1 e_1 + e_2$ 。

第2步 取 $V_1 = \frac{e_1^2}{2}, V_2 = \frac{e_1^2}{2} + \frac{e_2^2}{2}$, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = \\ & -m_1 e_1^2 + e_2 \{e_1 - x_2 \theta - \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) x_3 - \beta_1 x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin \delta_0] + m_1 x_2\}. \end{aligned} \quad (20)$$

取

$$x_3^* = \frac{1}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} \{e_1 - x_2 \theta - \beta_1 x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin \delta_0] + m_1 x_2 - m_2 e_2\}, \quad (21)$$

得

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_2^* = -m_2 e_2 - e_1 - x_2 \tilde{\theta} - \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) e_3.$$

第3步 取

$$V_3 = V_2 + \frac{e_3^2}{2} + \frac{1}{2\rho} \tilde{\theta}^2, \quad e_3 = x_3 - x_3^*,$$

得

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + e_3 \dot{e}_3 + \frac{1}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}}.$$

将式(20)–(21)代入 \dot{V}_3 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -\sum_{j=1}^2 m_j e_j^2 + \tilde{\theta} e_2 x_2 - \frac{1}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} - \\ & \frac{(-\hat{\theta} + m_1 + m_2)x_2 \tilde{\theta}}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} + \\ & e_3 \{-\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)e_2 - \beta_2 x_3 - \\ & \beta_3 [\cos \delta_0 - \cos(\delta_0 + x_1)]\} + \frac{u}{T_{d0}} - \dot{x}_3^* \}. \end{aligned}$$

取励磁控制律和参数替换律为式(22):

$$\begin{aligned} u = & T_{d0} \{ \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)e_2 + \beta_2 x_3 + \\ & \beta_3 [\cos \delta_0 - \cos(\delta_0 + x_1)] - \\ & \frac{1}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} \{ x_2 - \beta_1 x_{30} \cos(\delta_0 + x_1)x_2 + \\ & m_1 m_2 x_2 - \hat{\theta} x_2 + (-\hat{\theta} + m_1 + m_2) \times \\ & \{-\hat{\theta} x_2 - \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)x_3 - \\ & \beta_1 x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin \delta_0] \} \} + \\ & \frac{1}{\beta_1 \sin^2(\delta_0 + x_1)} \{ x_2 \cos(\delta_0 + x_1) \{-\hat{\theta} x_2 + \\ & e_1 - \beta_1 x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin \delta_0] + \\ & m_1 x_2 + m_2 e_2 \} \} - m_3 e_3 + u_{f1} \}, \quad (22) \\ \dot{\tilde{\theta}} = & \rho [-e_2 x_2 - \frac{(-\hat{\theta} + m_1 + m_2)x_2}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)}], \end{aligned}$$

可得 $\dot{V}_3 = -\sum_{j=1}^3 m_j e_j^2 + u_{f1} e_3$ 及下述状态方程:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= -m_1 e_1 + e_2, \\ \dot{e}_2 &= -m_2 e_2 - e_1 - x_2 \tilde{\theta} - \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) e_3, \\ \dot{e}_3 &= \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) e_2 - m_3 e_3 + u_{f1} - \\ & \frac{(-\hat{\theta} + m_1 + m_2)x_2 \tilde{\theta}}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)}. \end{aligned}$$

在新的坐标下, 通过直接反馈线性化可得

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 = \dot{e}_1 = -m_1 e_1 + e_2, \\ \dot{z}_2 = z_3 = -m_1 \dot{e}_1 + \dot{e}_2 = \\ (m_1^2 - 1)e_1 - (m_1 + m_2)e_2 - \\ \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)e_3 - x_2 \tilde{\theta}, \\ \dot{z}_3 = -x_2 \dot{\tilde{\theta}} + (m_1^2 - 1)\dot{e}_1 - (m_1 + m_2)\dot{e}_2 - \\ \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)\dot{e}_3 = \\ (m_1^2 - 1)z_2 + v. \end{cases}$$

由 z_1, z_2, z_3 构成的线性方程组为

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & m_1^2 - 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v = AZ + Bv.$$

由线性系统理论知识可知, 系统可控性的判定矩阵 D 为

$$D = [B \ AB \ A^2 B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & m^2 - 1 \end{bmatrix}.$$

由于 $\det D = -1 \neq 0$, 所以研究的线性系统完全可控. 依据最优控制原理, 当取最优性能指标为 $J = \int_0^\infty (Z^T Q Z + v^T R v) dt = J_{\min}$ 时, 在选择矩阵 Q, R 的数值后, 可得最优控制律 $v = R^{-1} B^T P Z$, 其中 $Z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$, 并能保证系统稳定, 其中 P 为黎卡提方程 $A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0$ 的解.

由上述推导可知: $e_1 = x_1, e_2 = x_2 + m_1 x_1$, 所以可得以下关系式:

$$\begin{cases} z_1 = e_1 = x_1, \\ z_2 = -m_1 e_1 + e_2 = x_2, \\ z_3 = -m_1 \dot{e}_1 + \dot{e}_2 = \dot{x}_2. \end{cases}$$

因此, 最优控制保证了 $z_1 = \delta - \delta_0, z_2 = \omega - \omega_0, z_3 = \dot{\omega}$, v 平方的积分和最小.

依据 v 与 u_{f1} 关系, 可得式(23):

$$\begin{aligned} u_{f1} = & \frac{1}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} [-v + (m_1 + m_2)m_2 e_2 + \\ & (m_1 + m_2)e_1 + (m_1 + m_2)x_2 \tilde{\theta}] + \\ & (m_1 + m_2)e_3 + \frac{x_2^2 \rho}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} [-e_2 - \\ & \frac{(-\hat{\theta} + m_1 + m_2)}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)}] - \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) e_2 + \\ & m_3 e_3 + \frac{(-\hat{\theta} + m_1 + m_2)}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} x_2 \tilde{\theta}. \quad (23) \end{aligned}$$

将式(23)代入式(22), 可得控制律 u .

评价5 采用综合全状态参数的鲁棒自适应最优控制策略时, 综合考虑了 $e_1, e_2, \dot{e}_1, \dot{e}_2$ 的加权收敛速度, 并保证 $J = \int_0^\infty (Z^T Q Z + v^T R v) dt = J_{\min}$. 考虑 L_2 增益干扰抑制控制时, 励磁系统非线性不确定模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\theta x_2 - \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)x_3 - \\ \beta_1 x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin \delta_0] + \varepsilon_1 \\ \dot{x}_3 = -\beta_2 x_3 - \beta_3 [\cos \delta_0 - \cos(\delta_0 + x_1)] + \\ \frac{1}{T_{d0}} u + \varepsilon_2, \end{cases}$$

其中: $[x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [\delta - \delta_0 \ \omega - \omega_0 \ E'_q - E'_{q0}]^T$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别代表转矩干扰和励磁绕组电磁干扰。

当评价信号为 $y = q_1^2 x_1^2 + q_2^2 x_2^2 + q_3^2 x_3^2$ 时, 取能量存储函数 $V(X) = 2V_3$,

$$H = \dot{V}_3 + \frac{1}{2}(\|y(t)\|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon(t)\|^2).$$

由第2.3节知: 满足 L_2 增益抑制时的控制律为

$$\begin{aligned} u = & T_{d0} \{ \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) e_2 + \beta_2 x_3 + \\ & \beta_3 [\cos \delta_0 - \cos(\delta_0 + x_1)] - \\ & \frac{1}{\beta_1 \sin(\delta_0 + x_1)} \{ x_2 - \beta_1 x_{30} \cos(\delta_0 + x_1) x_2 + \\ & m_1 m_2 x_2 - \dot{\hat{\theta}} x_2 + (-\hat{\theta} + m_1 + m_2) \times \\ & \{ -\hat{\theta} x_2 - \beta_1 \sin(\delta_0 + x_1) x_3 - \\ & \beta_1 x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin \delta_0] \} \} + \\ & \frac{1}{\beta_1 \sin^2(\delta_0 + x_1)} \{ x_2 \cos(\delta_0 + x_1) \{ -\hat{\theta} x_2 + \\ & e_1 - \beta_1 x_{30} [\sin(\delta_0 + x_1) - \sin \delta_0] + \\ & m_1 x_2 + m_2 e_2 \} \} - m_3 e_3 + u'_f - \frac{1}{e_n} \sum_{j=1}^3 (q_j x_j)^2 \}. \end{aligned}$$

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

为验证提出的综合全状态参数的鲁棒自适应最优控制效果, 对移动电站电力网络进行了仿真试验. 励磁系统模型的参数为: $x_d = 1.25$ p.u.(纵轴电抗), $x'_d = 0.221$ p.u.(纵轴瞬态电抗), $M = 2.05$ s(转动惯量), $T'_{d0} = 1.05$ s(纵轴瞬变时间常数). 系统稳态运行工况为: $\delta_0 = 25.2^\circ$, $\omega_0 = 1$ p.u., $E'_{q0} = 1.0$ p.u.. 由于阻尼系数难以精确测定, 设其值在 $1 \sim 5$ p.u., 常规PID控制中, 阻尼系数取3 p.u.. 选择 $\Gamma = \rho = 1$, 加权系数 $q_1 = 0.4$, $q_2 = 0.2$, $q_3 = 0.4$, 干扰抑制常数 $\gamma = 2.0$.

励磁控制进入稳态后, 在0.6 s时出现0.1 s的短路故障扰动, 且励磁系统存在干扰 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$. 其中扰动 ε 为不确定量, 但属于一类可描述集合, 即 $\varepsilon \in L_2 = \{ \varepsilon(t) \mid \int_0^t \varepsilon^2(t) dt < \infty \}$, L_2 包含有限能量信号. 当采用传统PID控制时, 发电机状态响应曲线如图1所示(图形中的励磁电压包含了随机扰动量 ε_2).

当仿真参数为 $m_1 = m_2 = m_3 = 3$, $\rho = 1$, $Q = I$, $R = 1$, 阻尼系数取3 p.u.时, 采用综合全状态参数的鲁棒自适应最优励磁控制(RAOEC), 发电机状态响应曲线如图2所示.

当仿真参数 $m_1 = 4$, $m_2 = 5$, $m_3 = 3$, $\rho = 1$, $Q = \text{diag}\{9, 2, 1\}$, $R = 1$, 阻尼系数取3 p.u.时, 采用综合全状态参数的鲁棒自适应最优控制(RAOEC), 发电机状态响应曲线如图3所示.

当仿真参数 $m_1 = 4$, $m_2 = 5$, $m_3 = 3$, $\rho = 1$,

$Q = \text{diag}\{9, 2, 1\}$, $R = 1$, 阻尼系数取7 p.u.时, 采用综合全状态参数的鲁棒自适应最优控制(RAOEC), 发电机状态响应曲线如图4所示.

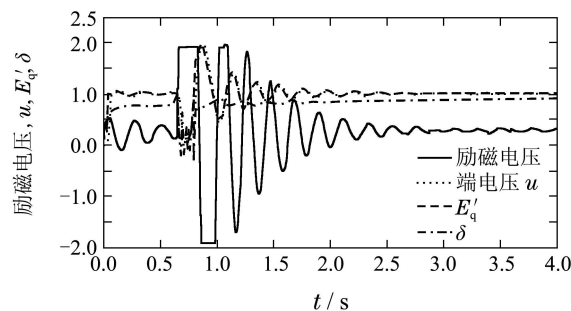


图1 PID控制方式下, 发电机的状态变化曲线
Fig. 1 The state variation curve of the generator with PID control methods

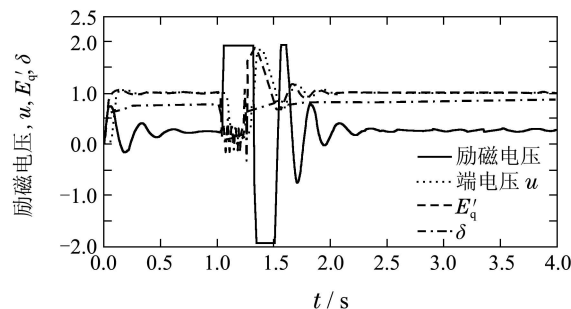


图2 RAOEC控制方式下, 发电机的状态变化曲线
Fig. 2 The state variation curve of the generator with RAOEC control methods

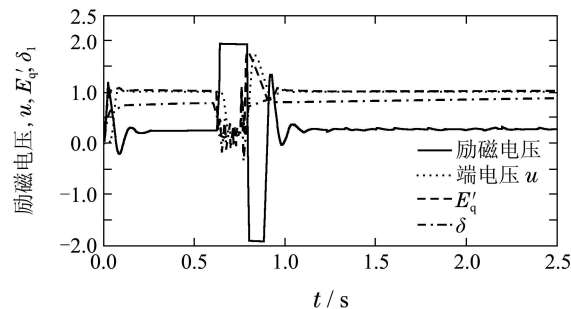


图3 RAOEC控制方式下, 发电机的状态变化曲线
Fig. 3 The state variation curve of the generator with RAOEC control methods

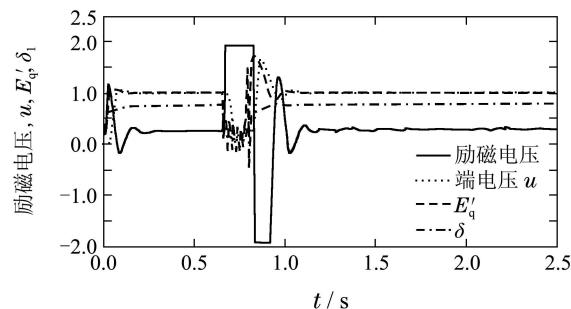


图4 RAOEC控制方式下, 发电机的状态变化曲线
Fig. 4 The state variation curve of the generator with RAOEC control methods

比较图1-2可知: 当出现扰动和干扰时, 传统PID控制周期较长, 而RAOEC方式控制迅速, 且励磁系统的功角和端电压能够快速恢复稳定。

比较图2-3可知: 当选择不同的控制参数 Q, R 时, 状态参数的收敛速度明显加快, 充分体现了控制参数对控制效果的影响, 并能保证状态变化积分最小。

比较图3-4可知: 阻尼系数作为不确定系数, 取不同值时, 由于采用了鲁棒自适应控制方法, 各状态变量的动态变化曲线相差不大, 充分体现了RAOEC对具有不确定系数控制系统的自适应能力。

5 总结(Conclusions)

本文针对严参数反馈非线性不确定系统, 通过将传统的backstepping鲁棒控制设计方法进行了改进, 得到了新坐标系 (e_1, \dots, e_n) 下的模型和自适应参数替换律, 然后结合直接反馈线性化和最优控制理论, 提出了综合全状态参数最优控制自适应鲁棒控制方法, 然后采用此方法对存在干扰和不确定性参数的军用电站励磁系统进行了控制仿真分析。仿真结果表明全状态参数最优自适应鲁棒控制方法能够有效保证系统的鲁棒性和干扰抑制能力, 并通过改变 Q, R 最优控制参数, 还能够提高系统全状态变量的收敛速度, 较传统单纯以系统稳定为控制目的的鲁棒控制方法, 增加了全状态参数优化控制的效果。

参考文献(References):

- [1] 谷志锋, 朱长青, 邵天章, 等. 基于气隙磁场定向的无传感器交流跟踪励磁控制研究 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 52 - 56.
(GU Zhifeng, ZHU Changqing, SHAO Tianzhang, et al. Study on the AC tracking excitation based on the sensorless air-gap field oriented technology [J]. *Electric Power Automachine Equipment*, 2011, 31(10): 52 - 56.)
- [2] 黄曼磊. 鲁棒控制理论及应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 125 - 138.
(HUANG Manlei. *Theory and Application of the Robust Control* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007: 125 - 138.)
- [3] 黄曼磊. 船舶电站同步发电机 H_∞ 调压器的仿真研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(2): 162 - 166.
(HUANG Manlei. Simulation research on H_∞ voltage regulator for synchronous generator of a ship power station [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2004, 25(2): 162 - 166.)
- [4] 黄曼磊, 宋克明, 魏志达. 柴油发电机组非线性 H_2/H_∞ 调速器的研究 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(8): 873 - 878.
(HUANG Manlei, SONG Keming, WEI Zhida. Nonlinear H_2/H_∞ speed regulator for a diesel-generator set [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(8): 873 - 878.)
- [5] 张敏, 罗安, 王华昕. 基于线性化的发电机励磁鲁棒控制器 [J]. 电工技术学报, 2002, 17(2): 84 - 87.
(ZHANG Min, LUO An, WANG Huaxin. A robust controller for excitation of generator based on linearization [J]. *Transaction of China Electrotechnical Society*, 2002, 17(2): 84 - 87.)
- [6] 张秀华, 张庆灵, 谢彦红. 一类鲁棒非线性励磁控制器设计的新方法 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 30(1): 17 - 19.
(ZHANG Xiuhua, ZHANG Qingling, XIE Yanhong. New approach to design of nonlinear robust excitation controller [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2010, 30(1): 17 - 19.)
- [7] 蒋铁铮, 陈陈, 曹国云. 同步发电机励磁非线性预测控制技术 [J]. 控制与决策, 2005, 20(4): 467 - 470.
(JIANG Tiezheng, CHEN Chen, CAO Guoyun. Nonlinear predictive control of synchronous machine excitation [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(4): 467 - 470.)
- [8] 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: 257 - 270.
(LU Qiang, MEI Shengwei, SUN Yuanzhang. *The Nonlinear Control of the Power System* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 257 - 270.)
- [9] 孙元章, 焦晓红, 申铁龙. 电力系统非线性鲁棒控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 92 - 134.
(SUN Yuanzhang, JIAO Xiaohong, SHEN Tielong. *Nonlinear Robust Control of the Power System* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 92 - 134.)
- [10] 李啸鹏, 李文涛, 徐俊华, 等. 不确定性电力系统鲁棒自适应励磁控制 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 13 - 17.
(LI Xiaopeng, LI Wentao, XU Junhua, et al. Robust adaptive excitation control for uncertain power system [J]. *Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and its Automation*, 2011, 23(3): 13 - 17.)
- [11] 张蕾, 张爱民, 韩九强, 等. 静止无功补偿器的自适应逆推无源反馈控制设计 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 298 - 304.
(ZHANG Lei, ZHANG Aimin, HAN Jiuqiang, et al. Adaptive backstepping passivity feedback control design for static volt-ampere reactive compensator [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(3): 298 - 304.)
- [12] 王冰, 季海波, 陈欢, 等. 汽轮发电机励磁与汽门协调无源性控制 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 14 - 18.
(WANG Bing, JI Haibo, CHEN Huan, et al. The coordinated passivity techniques for the excitation and steam valving control of generator [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2004, 24(5): 14 - 18.)
- [13] 刘辉, 李啸鹏, 韦化. 基于目标全息反馈法的发电机非线性励磁控制设计 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 14 - 18.
(LIU Hui, LI Xiaopeng, WEI Hua. Nonlinear excitation control for generator unit based on NCOHF [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2007, 27(1): 14 - 18.)

作者简介:

谷志锋 (1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为军用电站非线性鲁棒控制技术研究, Email: gzfgohappy@163.com;

朱长青 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为野战电力支持技术研究, Email: Zhunei@163.com;

邵天章 (1967-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为移动电站抗干扰技术研究, Email: Stz_ordance@163.com;

刘洪文 (1972-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为移动电站测试技术研究, Email: Lhw_1972@163.com;

刘璞 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为移动电站励磁系统非线性控制技术研究, Email: Lp.kaku@163.com.