

文章编号: 1001-0920(2001) 02-0172-06

电力系统有限时间励磁控制

王玉振, 秦化淑, 程代展, 洪奕光

(中国科学院系统科学研究所, 北京 100080)

摘要: 利用有限时间控制方法研究多机电力系统的励磁控制问题, 提出一种新的非线性鲁棒励磁控制设计方案。该控制方案收敛速度快, 对诸多不确定性因素具有强鲁棒性, 并且控制器中的量均为与电网参数和结构无关的局部可测量, 完全实现了分散控制。仿真结果表明, 该有限时间励磁控制方案的控制效果是令人满意的。

关键词: 有限时间控制; 齐次性; 励磁控制; 鲁棒性

中图分类号: O 231.2

文献标识码: A

Excitation Control of Power Systems with Finite-time Control Approach

WANG Yu-zhen, QIN Hua-shu, CHENG Dai-zhan, HONG Yi-guang

(Institute of Systems Science, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: Using the finite-time control approach, the excitation control of multi-machine systems is dealt with and a new excitation control strategy, finite-time excitation control strategy, is proposed. The finite-time excitation control strategy can improve systems' behaviors in several aspects such as high-speed convergence, high accuracy and robustness for some uncertainties. It is implemented via purely local measurement and independent of the parameters of power networks. Simulations demonstrate that the finite-time excitation control strategy is more effective than some other excitation controllers.

Key words: finite-time control; homogeneity; excitation control; robustness

1 引言

多机系统励磁控制是电力系统中最重要、研究最广泛的问题之一, 迄今已取得了许多重要的研究成果。文献[1]提出多机系统的线性最优励磁控制方案; 文献[2]基于现代微分几何和最优控制理论提出多机系统的非线性最优励磁控制方案。目前, 各种励磁控制方案(PID, PSS, 线性最优/次优控制, 非线性

最优控制等)都是基于模型结构和参数固定而设计的。实际上, 电力系统中总是存在不确定性因素, 诸如突然切除负荷、发电断开、大小扰动、参数和结构改变等。而上述控制方案采用的控制器都是光滑的, 在这类控制器的作用下, 励磁控制系统不可能在有限时间内稳定于平衡点。

有限时间镇定能使系统在有限时间内到达平衡

收稿日期: 2000-03-20; 修回日期: 2000-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(59837270, 69774008); 国家 973 基金项目(1998020308)

作者简介: 王玉振(1963—), 男, 山东肥城人, 博士生, 从事非线性控制研究; 秦化淑(1934—), 女, 四川五通桥人, 研究员,

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

点,且一般具有较好的鲁棒性和扰动抑制特性^[3,4]。本文将有限时间控制方法用于电力系统的多机励磁控制,设计出一种新的有限时间鲁棒励磁控制方案。

考虑如下 n 机电力系统

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega - \omega \\ \dot{\omega} = \frac{\omega}{H_i}(P_{mi} - P_{ei} - P_{Di}) \\ \dot{E}_{qi} = -\frac{1}{T_{d_{oi}}}E_{qi} + \frac{1}{T_{d_{oi}}}u_{fi} \end{cases} \quad (1.1)$$

其中

$$P_{ei} = G_{ii}E_{qi}^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{ij}E_{qj} \sin(\delta_i - \delta_j)$$

$$P_{Di} = \frac{D_i}{\omega}(\omega - \omega), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$E_{qi} = E_{\dot{q}} + I_{di}(x_{di} - x_{di})$$

δ_i 为转子角(rad), ω 为转子角速度(rad/s), $\omega = 2\pi f_0$, E_{qi} 为 q 轴内部暂态电压(p.u.), x_{di} 为 d 轴绕组自感抗(p.u.), x_{di} 为 d 轴绕组暂态电抗(p.u.), u_{fi} 为发电机励磁电路电压(p.u.), H_i 为发电机的惯性常数(s), D_i 为阻尼常数(p.u.), $T_{d_{oi}}$ 为励磁电路时间常数(s), P_{Di} 为阻尼功率(p.u.), P_{mi} 为机械功率(p.u.), p_{ei} 为发电机有功功率(p.u.), G_{ii} 为导纳常数, B_{ij} 为互导纳常数, I_{di} 为 d 轴电流。第 i 台单机由三阶模型给出。

2 预备知识^[3,5]

考虑动态系统

$$\dot{x} = f(x), \quad f(0) = 0, \quad x \in R^n \quad (2.1)$$

其中 $f: U_0 \rightarrow R^n$ 在原点的某开邻域 U_0 上连续,且使系统(2.1)的解满足前向唯一性。

定义 1 系统(2.1)的平衡点 $x = 0$ 称为(局部)有限时间稳定的,如果它是 Lyapunov 稳定的,且在原点的某一邻域 $U \subset U_0$ 内有限时间收敛。有限时间收敛是指:存在函数 $T: U \setminus \{0\} \rightarrow (0, \infty)$,使得对 $\forall x_0 \in U \setminus \{0\}$,以 x_0 为初值的系统(2.1)的前向唯一解 $x(t; 0, x_0)$ 有定义,且 $x(t; 0, x_0) \in U \setminus \{0\}, t \in [0, T(x_0))$,而

$$\lim_{t \rightarrow T(x_0)} x(t; 0, x_0) = 0 \quad (2.2)$$

其中 $T(x_0)$ 称为 x_0 的调整时间。当 $U = R^n$ 时,原点称为全局有限时间稳定平衡点。

定义 2 称非线性控制系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + G(x)u, \quad f(0) = 0 \\ G(0) = 0, \quad x \in R^n, \quad u \in R^m \end{cases} \quad (2.3)$$

的平衡点 $x = 0$ 能通过连续定常状态反馈有限时间

镇定,如果存在一个连续反馈律 $u = \mu(x)$,使得 $x = 0$ 成为相应闭环系统的(局部)有限时间稳定平衡点。

定义 3 称函数 $V(x)$ 关于扩张向量 $r = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ 是 σ 阶齐次的($\sigma > 0$),如果

$$\begin{aligned} V(\epsilon^r x_1, \dots, \epsilon^n x_n) &= \epsilon^\sigma V(x) \\ \forall \epsilon > 0, \quad r_i > 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

称(连续)向量场 $f(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x))^T$ 关于扩张向量 (r_1, r_2, \dots, r_n) 是 k 阶齐次的($k \leq R$),如果

$$\begin{aligned} f_i(\epsilon^r x_1, \dots, \epsilon^n x_n) &= \epsilon^{k+r_i} f_i(x) \\ i &= 1, 2, \dots, n, \quad \epsilon > 0, \quad r_i > 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

称系统(2.1)关于扩张向量 (r_1, r_2, \dots, r_n) 是 k 阶齐次的,如果其向量场 $f(x)$ 关于 (r_1, r_2, \dots, r_n) 是 k 阶齐次的。

为研究方便,记

$$\text{sig}(y)^\alpha = |y|^\alpha \text{sgn}(y), \quad \alpha > 0$$

其中 $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。易知

$$d|y|^{1+\alpha} dy = (1+\alpha) \text{sig}(y)^\alpha, \quad y \neq 0$$

3 三积分系统的有限时间反馈律

考虑三积分系统

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = x_3, \quad \dot{x}_3 = u \quad (3.1)$$

定理 1 反馈控制律

$$\begin{aligned} u(x) &= -l_3 \text{sig}(\text{sig}(x_3))^{\beta_1} - \\ &\quad \text{sig}(v(x_1, x_2))^{\beta_1} \frac{3\alpha-2}{(2\alpha-1)\beta_1} \end{aligned} \quad (3.2)$$

是系统(3.1)的一个全局连续的有限时间控制器。其中

$$\begin{aligned} v(x_1, x_2) &= \\ &= -l_2 \text{sig}(l_1 \text{sig}(x_1)^\beta + \text{sig}(x_2)^{\beta/\alpha})^{\frac{2\alpha-1}{\beta}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$\beta > 1, \beta > 0, 2/3 < \alpha < 1$, 且 $l_i > 0 (i = 1, 2, 3)$ 为事先选定的适当大的正数。

证明 取 $\beta > 1$, 记

$$\begin{aligned} w(x_1, x_2) &= \text{sig}(v(x_1, x_2))^{\frac{\beta}{2\alpha-1}} \\ \mathcal{Q}(x) &= \text{sig}(x_3)^{\frac{\beta}{2\alpha-1}} - w(x_1, x_2) \\ W(x) &= \int_{v(x_1, x_2)}^{x_3} \mathcal{Q}(x) dx_3 \end{aligned}$$

容易证明: $w(x_1, x_2)$ 是 C^1 的; $\mathcal{Q}(x)$ 关于扩张向量 $(1, \alpha, 2\alpha-1)$ 是 β 阶齐次的; 当 $x_3 = v(x_1, x_2)$ 时, $W(x)$ 是非负的。由文献[5]知, $v(x_1, x_2)$ 是双积分系统 $\{x_1 = x_2, x_2 = v\}$ 的一个有限时间控制器; 由文献[6]知, 存在 C^1 正定函数 $V_0(x_1, x_2)$, 使得 $V_0(x_1, x_2)$ 关于扩张向量 $(1, \alpha)$ 是 $\beta + 2\alpha - 1 (> 1)$ 阶齐次

的,且当 $x = 0$ 时,有

$$v_0(x_1, x_2) \triangleq \dot{V}_0(x_1, x_2) \Big|_{(3.3)} = \frac{\partial V_0}{\partial x_1} \begin{bmatrix} x_2 \\ v(x_1, x_2) \end{bmatrix} < 0 \quad (3.4)$$

用(3.1)_d表示系统(3.1)在状态反馈律(3.2)下构成的闭环系统。取函数 $V(x) = W(x) + V_0(x_1, x_2)$, 易知 $V(x)$ 是正定的,关于扩张向量 $(1, \alpha, 2\alpha - 1)$ 是 $\beta + 2\alpha - 1$ 阶齐次的,且

$$\begin{aligned} \dot{\hat{V}}(x) \Big|_{(3.1)_d} = & \hat{V}(x_1, x_2, x_3) - l_3 \mathcal{Q}(x) \text{sig}(\text{sig}(x_3))^{\beta_1} - \\ & \text{sig}(v)^{\beta_1} \frac{3\alpha - 2}{(2\alpha - 1)\beta_1} \end{aligned} \quad (3.5)$$

关于扩张向量 $(1, \alpha, 2\alpha - 1)$ 是 $\beta + 3\alpha - 2$ 阶齐次的。其中

$$\begin{aligned} \hat{V}(x_1, x_2, x_3) = & \frac{\partial W}{\partial x_1} x^2 + \frac{\partial W}{\partial x_2} x^3 + v_0(x_1, x_2) + \\ & \frac{\partial V_0}{\partial x_2} (x_3 - v(x_1, x_2)) \end{aligned} \quad (3.6)$$

可以证明,当 $\forall x = 0$ 时, $\dot{\hat{V}}(x) \Big|_{(3.1)_d} < 0$ 。因此, $x = 0$ 是系统(3.1)_{e1}的渐近稳定平衡点。另外,不难验证系统(3.1)_{e1}关于扩张向量 $(1, \alpha, 2\alpha - 1)$ 是 $k (= \alpha - 1 < 0)$ 阶齐次的。由文献[3]知,定理1成立。

利用定理1,可得系统(3.1)的一个简单的有限时间反馈控制律

$$u = -k_1 x_3^{3/5} - k_2 (x_1 + x_2^{9/7})^{1/3} \quad (3.7)$$

其中 k_1 和 k_2 是适当大的正数。

4 有限时间励磁控制

注意到系统(1.1)中每台机器的模型都是类似的,于是可为每台发电机(子系统)构造一个控制器,其状态中包含其它电机或电网的有关信息。

考虑第 i 个子系统

$$\dot{x}_i = f_i(x) + g_i(x)u_i, \quad 1 \leq i \leq n \quad (4.1)$$

其中

$$x_i = \begin{bmatrix} \delta_i \\ \omega \\ E_{qi} \end{bmatrix}, \quad f_i(x) = \begin{bmatrix} \omega - \omega \\ \frac{\omega}{H_i} (P_{mi} - P_{ei} - P_{Di}) \\ -E_{qi} / T_{d0i} \end{bmatrix}$$

$$g_i(x) = [0, 0, 1/T_{d0i}], \quad u_i = u_{fi}$$

选取“虚拟”输出

$$y_i = h_i(x) = \delta_i - \delta_0 \quad (4.2)$$

则可取如下坐标变换

$$\begin{cases} z_{i1} = h_i(x) = \delta_i - \delta_0 \\ z_{i2} = L_{f_i} h_i(x) = \omega - \omega \\ z_{i3} = L_{f_i}^2 h_i(x) = \frac{\omega}{H_i} (P_{mi} - P_{ei} - P_{Di}) \end{cases} \quad (4.3)$$

将式(4.1)变换为^[2]

$$\dot{z}_{i1} = z_{i2}, \quad \dot{z}_{i2} = z_{i3}, \quad \dot{z}_{i3} = v_i \quad (4.4)$$

其中

$$v_i = \frac{\omega}{H_i} \left[\frac{1}{T_{d0i}} I_{qi} E_{qi} - E_{qi} \dot{I}_{qi} \right] - \frac{D_i \omega}{H_i^2} (P_{mi} - P_{ei} - P_{Di}) - \frac{\omega}{H_i T_{d0i}} I_{qi} u_i \quad (4.5)$$

I_{qi} 是 q 轴电流。根据式(3.7),取

$$v_i = -k_{i1} z_{i3}^{3/5} - k_{i2} (z_{i1} + z_{i2}^{9/7})^{1/3} \quad (4.6)$$

为系统(4.4)的有限时间控制律,其中 k_{i1} 和 k_{i2} 为取定的适当大常数,一般由实际问题决定。由式(4.5), (4.6)和(4.3)得第 i 台发电机的有限时间励磁控制律为

$$\begin{aligned} u_{fi} = & u_i = \\ & E_{qi} - T_{d0i} E_{qi} \frac{\dot{I}_{qi}}{I_{qi}} - \\ & \frac{T_{d0i} D_i}{H_i I_{qi}} (P_{mi} - P_{ei} - P_{Di}) + \\ & k_{i1} \frac{T_{d0i}}{I_{qi}} \left(\frac{H_i}{\omega} \right)^{2/5} (P_{mi} - P_{ei} - P_{Di})^{3/5} + \\ & k_{i2} \frac{T_{d0i} H_i}{I_{qi} \omega} [\delta_i - \delta_0 + (\omega - \omega)^{9/7}]^{1/3} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

该控制方案具有以下特点:

- 1) 在控制方案(4.7)中,所有的变量和参数都能局部得到,因此式(4.7)是一个分散控制方案;
- 2) 式(4.7)不涉及电网参数,因此对电网结构和参数的变动具有鲁棒性。

5 鲁棒性讨论

5.1 对有界干扰的鲁棒性

考虑多机系统(1.1)受外部干扰的情况。假设第 i 个子系统中包含一有界干扰 $d(t)$, 则

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega - \omega \\ \dot{\omega} = \frac{\omega}{H_i} (P_{mi} - P_{ei} - P_{Di}) \\ \dot{E}_{qi} = -\frac{1}{T_{d0i}} E_{qi} + \frac{1}{T_{d0i}} u_{fi} + d(t) \end{cases} \quad (5.1)$$

在坐标变换(4.3)的作用下,系统(5.1)变为

$$\dot{z}_{i1} = z_{i2}, \quad \dot{z}_{i2} = z_{i3}, \quad \dot{z}_{i3} = v_i + \hat{d}(t) \quad (5.2)$$

其中, $\hat{d}(t) = 2I_{qi}d(t)$, v_i 由式(4.5) 给出。由 $d(t)$ 的有界性知, 存在常数 $W > 0$, 使得 $|\hat{d}(t)| \leq W$ 。为讨论方便, 用式(3.2) 构造系统(4.4) 的一个更为一般的有限时间控制律。在式(3.2) 中, 令 $0 < \beta_1 < 1$,

$$\alpha = \frac{2 - \beta_1}{3 - 2\beta_1}, \text{ 则有}$$

$$v_i = -k_1 \text{sig}(z_{i3})^{\beta_1} - k_2 \text{sig}(\text{sig}(z_{i1} + \text{sig}(z_{i2})^{1/\alpha})^{2\alpha-1})^{\beta_1} \quad (5.3)$$

不难发现, 式(4.6) 是(5.3) 的一个特例($\beta_1 = 3/5, \alpha = 7/9$)。同样, 利用式(5.3) 可设计一个新的有限时间励磁控制方案(参见式(4.7) 的推导)。

下面利用更为一般的励磁控制方案来分析此类控制器对有界干扰的鲁棒性。

对于系统(5.2), 仍使用式(5.3)。显然, 当 $k_2 |z_{i1}|^{2(\alpha-1)\beta_1} > W$ 时, 式(5.3) 仍有效。如果选取 $(2\alpha - 1)\beta_1 = 1$ (即光滑控制器), 必须选择相当大的 k_2 来保持 $k_2 |z_{i1}|^{2(\alpha-1)\beta_1} > W$ 在平衡点附近成立, 此时可能的稳定误差范围为 $|z_{i1}| > (W/k_2)^{\frac{1}{2(\alpha-1)\beta_1}}$ 。然而式(5.3) 不是光滑的, 而是一种有限时间控制器, 其中 $0 < (2\alpha - 1)\beta_1 < 1$ ($0 < \beta_1 < 1, 2/3 < \alpha < 1$)。由 $k_2 |z_{i1}|^{2(\alpha-1)\beta_1} > W$, 知 $|z_{i1}| < (W/k_2)^{\frac{1}{2(\alpha-1)\beta_1}}$ ($0 < (2\alpha - 1)\beta_1 < 1$)。换言之, 可能的稳定误差范围是 $|z_{i1}| < (W/k_2)^{\frac{1}{2(\alpha-1)\beta_1}}$, 而不必选取太大的 k_2 来保持 $k_2 |z_{i1}|^{2(\alpha-1)\beta_1} > W$ 成立。由此可见, 有限时间励磁控制方案对有界干扰具有较强的鲁棒性。

5.2 对参数摄动的鲁棒性

假设第 i 台电机(子系统) 的参数 H_i 具有摄动 ΔH , 其模型为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega - \omega \\ \dot{\omega} = \frac{\omega}{H_i + \Delta H} (P_{mi} - P_{ei} - P_{Di}) \\ \dot{E}_{qi} = -\frac{1}{T_{d_{oi}}} E_{qi} + \frac{1}{T_{d_{oi}}} u_{fi} \end{cases} \quad (5.4)$$

在坐标变换(4.3) 的作用下, 式(5.4) 变为

$$\begin{cases} \dot{z}_{i1} = z_{i2} \\ \dot{z}_{i2} = z_{i3} - \frac{\Delta H}{H_i + \Delta H} z_{i3} \\ \dot{z}_{i3} = v_i + \frac{D_i \Delta H}{H_i (H_i + \Delta H)} z_{i3} \end{cases} \quad (5.5)$$

令 $\theta = \frac{\Delta H}{H_i + \Delta H}$, $z_{i3} - \theta z_{i3} = \hat{z}_{i3}$, 则式(5.5) 可表示为

$$\begin{cases} \dot{z}_{i1} = z_{i2}, \quad \dot{z}_{i2} = \hat{z}_{i3} \\ \dot{\hat{z}}_{i3} = (1 - \theta) v_i + \frac{D_i}{H_i} \hat{\theta}_{i3} \end{cases} \quad (5.6)$$

对系统(5.6) 仍使用有限时间控制律(4.6), 则

$$v_i = -k_{i1} z_{i3}^{3/5} - k_{i2} (z_{i1} + z_{i2}^{9/7})^{1/3} - \frac{k_{i1}}{(1 - \theta)^{3/5}} \hat{z}_{i3}^{3/5} - k_{i2} (z_{i1} + z_{i2}^{9/7})^{1/3} \quad (5.7)$$

相应的闭环系统为

$$\begin{cases} \dot{z}_{i1} = z_{i2}, \quad \dot{z}_{i2} = \hat{z}_{i3} \\ \dot{\hat{z}}_{i3} = -\hat{k}_{i1} \hat{z}_{i3}^{3/5} - \hat{k}_{i2} (z_{i1} + z_{i2}^{9/7})^{1/3} + \frac{D_i}{H_i} \hat{\theta}_{i3} \end{cases} \quad (5.8)$$

其中, $\hat{k}_{i1} = (1 - \theta)^{2/5} k_{i1}, \hat{k}_{i2} = (1 - \theta) k_{i2}$ 。易知 $\frac{D_i}{H_i} \hat{\theta}_{i3}$

在平衡点附近是有界的, 可将 $\frac{D_i}{H_i} \hat{\theta}_{i3}$ 视为有界干扰。现选取适当大的 k_{i1} (或 \hat{k}_{i1}), 类似于第 5.1 节的讨论, 不难发现式(4.6) 对系统(5.6) 仍有效, 或者说式(4.7) 对系统(5.4) 仍有效。由此可见, 有限时间励磁控制器对参数摄动具有鲁棒性。

5.3 对光滑未建模动态的鲁棒性

设第 i 台电机包含一光滑未建模动态 $f(\delta_i, \omega, E_{qi})$, f 有界且在平衡点处 $f = 0$, 其模型为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega - \omega \\ \dot{\omega} = \frac{\omega}{H_i} (P_{mi} - P_{ei} - P_{Di}) \\ \dot{E}_{qi} = -\frac{1}{T_{d_{oi}}} E_{qi} + \frac{1}{T_{d_{oi}}} u_{fi} + f(\delta_i, \omega, E_{qi}) \end{cases} \quad (5.9)$$

在坐标变换(4.3) 的作用下, 式(5.9) 变为

$$\dot{z}_{i1} = z_{i2}, \quad \dot{z}_{i2} = z_{i3}, \quad \dot{z}_{i3} = v_i + F \quad (5.10)$$

其中, $F = 2I_{qi}f$ 。当设计光滑控制器(例如线性控制器 $v_i = -k_{i1} z_{i3} - k_{i2} (z_{i1} + z_{i2})$) 时, 必须选取相当大的 k_{i1} 和 k_{i2} 来抑制光滑不确定项 F 的影响, 以保证系统收敛到指定的范围。然而, 当采用有限时间控制器(4.6), 即取

$$v_i = -k_{i1} z_{i3}^{3/5} - k_{i2} (z_{i1} + z_{i2}^{9/7})^{1/3} \quad (5.11)$$

时, 闭环系统

$$\begin{cases} \dot{z}_{i1} = z_{i2}, \quad \dot{z}_{i2} = z_{i3} \\ \dot{z}_{i3} = v_i = -k_{i1} z_{i3}^{3/5} - k_{i2} (z_{i1} + z_{i2}^{9/7})^{1/3} \end{cases}$$

关于扩张向量 $(1, \alpha, 2\alpha - 1)$ 是 $k = \alpha - 1$ ($\alpha = 7/9$) 阶齐次的, 且

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{F(\epsilon z_{i1}, \epsilon^\alpha z_{i2}, \epsilon^{2\alpha-1} z_{i3})}{\epsilon^{k+2\alpha-1}} = 0$$

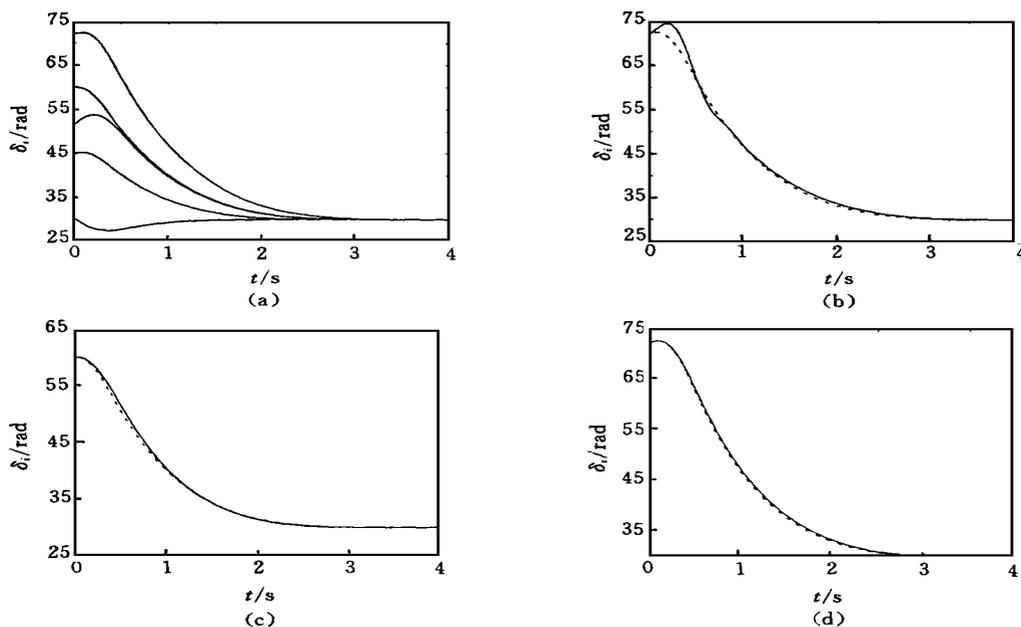


图1 仿真结果

- (a) 第1台~第5台电机仿真结果
 (b) 第2台电机受正弦信号干扰的仿真
 (c) 第3台电机参数摄动时的仿真
 (d) 第2台电机含未建模动态时的仿真

由文献[3]知,闭环系统(5.10)和(5.11)仍是有限时间稳定的。因此, k_{i1} 和 k_{i2} 没有必要选得很大,亦即所得到的有限时间励磁控制器对光滑不确定项具有鲁棒性。

6 数字仿真

为检验有限时间励磁控制方案(4.7)的可行性和有效性,选取文献[2]中的6机系统为例进行仿真。系统的结构及有关数据参见文献[2],其中第6台电机是一个同步补偿机,而第1台电机本身表示一个单机无穷大系统。在式(4.7)中,取 $k_{i1} = 50$, $k_{i2} = 100$, $i = 1, 2, \dots, 6$, $\omega = 100\pi$, $P_{m1} = 1$, $P_{m2} = \dots$, $P_{m6} = 0.6$ 。仿真结果如图1所示。

图1(a)表明,有限时间励磁控制器(4.9)使系统收敛速度很快。收敛速度快、精度高是本文控制器的优点之一。在图1(b)中,假定第2台电机的第3个状态方程受一正弦信号的干扰,实线为第2台电机受干扰后的动态反应。在图1(c)中,假定第3台电机的参数 H_3 具有一摄动 $\Delta H_3 = 20$,实线为第3台电机的相应动态反应。在图1(d)中,假定第2台电机

的第3个状态方程中包含某一非线性光滑不确定性项 f ,仿真中令 $f = E q_2 + \sin(\delta_2)$,实线为第2台电机相应的动态反应。

图1(b)~图1(d)表明,当系统含有不确定性因素时,有限时间励磁控制器相应的动态曲线波动很小,因此该控制器对若干不确定性因素具有较强的鲁棒性。

7 结论

本文基于有限时间控制方法,提出一种新的励磁控制方案——有限时间励磁控制。该控制方案具有以下特点:

- 1) 收敛速度快;
- 2) 对若干不确定性因素有较强的鲁棒性;
- 3) 可实现分散控制;
- 4) 控制器独立于电网的结构和参数。

本文提出的设计原则和方法,为有限时间稳定理论在大型电力系统中的应用提供了一种有用的模式。

(下转第194页)

类似地,可得出 $\frac{\partial E_r(k)}{\partial K_r}$, $\frac{\partial E_{\theta_1}(k)}{\partial K_{\theta_1}}$, $\frac{\partial E_{\theta_2}(k)}{\partial K_{\theta_2}}$, $\frac{\partial E_{\theta_e}(k)}{\partial K_{\theta_e}}$ 。

4 仿真实验

以二级倒立摆系统为对象,对上述基于模糊组合变量的自适应加权控制方法,在初始摆角为 10° 的条件下进行仿真实验,仿真结果如图 1 所示。

仿真结果表明,本文算法可使二级倒立摆系统稳定,具有良好的鲁棒性。与文献[4]的方法相比,当摆角度大于 5° 时,文献[4]的方法不能使二级倒立摆系统稳定,显然本文算法优于文献[4]的算法。

5 结论

本文针对多变量非线性系统,提出一种基于模糊组合变量的自适应加权控制方法。根据输入变量之间的内在联系,利用模糊逻辑系统构造模糊组合变量,利用模糊组合变量降低模糊逻辑系统的维数,并根据模糊组合变量对控制决策的贡献大小赋予不同的权重,实现对多变量非线性系统的控制。为进一

步改善模糊控制方法的动态特性,利用反向传播算法对量化系数和加权系数进行学习,有效地解决了多变量模糊控制系统难以设计和实现多维控制器的问题。对所提出的方法进行了仿真实验,实验结果证明了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] Furuta K, Hiroyuki K, Kosuge K. Digital control of double inverted pendulum on an inclined rail[J]. Int J Contr, 1980, 32(5): 907-924.
- [2] 王立新. 自适应模糊系统与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [3] Xiao Jun, Zhang Shi, Xu Xinhe. A weighted fuzzy control of double inverted pendulum[A]. The 3rd Asian Control Conf[C]. Shanghai, 2000. 1160-1163.
- [4] Fuyan Cheng, Guomin Zhong, Youshan Li *et al.* Fuzzy control of a double-inverted pendulum[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 79(3): 315-321.
- [5] G V S Raju, Jun Zhou. Adaptive hierarchical fuzzy controller[J]. IEEE Trans on Syst, Man & Cyb, 1993, 23(4): 973-980.

(上接第 176 页)

参考文献:

- [1] Q Lu. Stabilization of large scale power system by means of decentralized optimal control [A]. Cigre/IFAC Sym[C]. Florence, 1983. 38-83.
- [2] Q Lu. Decentralized nonlinear optimal excitation control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1957-1962.
- [3] Bhat S P, Bernstein D S. Finite-time stability of homogeneous systems[A]. Proc of ACC [C]. Albuquerque, 1997. 2513-2514.
- [4] Bhat S P, Bernstein D S. Continuous finite-time stabilization of the translation and rotational double integrators[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1998, 43(5): 678-682.
- [5] Y Hong, J Huang, Y Xu. On an output feedback finite-time stabilization problem[A]. Proc of IEEE CDC[C]. Phoenix, 1999. 1302-1307.
- [6] L Rosier. Homogeneous Lyapunov function for homogeneous continuous vector field[J]. Syst Contr Lett, 1992, 19(4): 467-473.
- [7] D Cheng, T J Tarn, A Isidori. Global external linearization of nonlinear systems via feedback[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1985, 30(8): 808-811.