

文章编号: 1001-0920(2007)06-0702-05

一类关联电力系统的时滞相关分散 H 控制

刘碧玉^{a,b}, 桂卫华^b, 陈 宁^b

(中南大学 a. 数学科学与计算技术学院, b. 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 研究一类具有时滞的关联电力系统分散 H 控制问题, 给出了分散无记忆状态反馈控制器的构造方法. 结合 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法和时滞积分矩阵不等式技巧, 推导出此类系统时滞相关分散 H 控制的线性矩阵不等式充分条件. 关联电力系统的仿真实例表明了该方法的有效性.

关键词: 关联电力系统; 时滞; 分散 H 控制; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Delay-dependent decentralized H control for a class of interconnected power systems

LIU Bi-yu^{a,b}, GUI Wei-hua^b, CHEN Ning^b

(a. School of Mathematical Science and Computational Technology, b. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: LIU Bi-yu, E-mail: biyuliu@hotmail.com)

Abstract: The decentralized H control for a class of interconnected power system with time-delay is considered. The decentralized memoryless state feedback controllers are obtained. Combining the Lyapunov-Krasovskii functional approach and the delay integral inequality of matrices, the delay-dependent sufficient conditions for the existence of decentralized H control are presented in terms of linear matrix inequalities. The simulation example for interconnected power system shows the effectiveness of the given method.

Key words: Interconnected power system; Delay; Decentralized H control; LMIs

1 引言

在大规模关联电力系统中, 各种信号的采集、处理与传递不及时等因素引起的时间滞后(时滞)经常出现. 时滞有时会对电力系统的运行产生巨大影响, 是造成系统不稳定的一个重要因素, 在某些情形下, 甚至导致整个电力系统崩溃. 因此, 为保证电力系统的正常运行必须考虑时滞对电力系统的作用^[1-3].

近年来, 控制系统与时滞相关条件成为国内外的研究热点^[4-6], 其中多数成果是关于一般意义下的系统理论研究, 很少涉及到应用的实际例证. 本文将时滞相关的 H 分散控制理论应用于一类关联电力系统, 研究系统在关联时滞作用下 H 分散控制问题. 关联电力系统的分散 H 控制是在 H 空间(即 Hardy 空间)通过某些性能指标的无穷范数优化而获得具有鲁棒性能分散控制器的一种控制理论. 该问题已经受到了人们的普遍关注^[7-12]. 文献[7-12]虽然考虑了电力系统的 H 控制问题, 但没

有考虑时滞对系统的影响, 特别是关于关联电力系统时滞相关的分散鲁棒 H 控制的研究较为少见.

本文应用 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法, 结合时滞积分矩阵不等式技巧设计分散线性状态反馈控制器, 使得闭环系统渐近稳定, 且满足一定的 H 性能指标. 关联电力系统的仿真实例说明了该方法的有效性.

2 问题描述

考虑一类由 N 个区域组成的线性化关联电力系统^[8]

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + \sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(t - \tau_{ij}), \\ z_i(t) = C_i x_i(t) + D_i u_i(t), \\ x_i(t) = \phi_i(t), t \in [-\tau_{ij}, 0], \\ \tau_{ij} = \max_{i,j} \{ \tau_{ij} \}, i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2006-03-13; 修回日期: 2006-07-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60634020); 博士点基金项目(20050533028).

作者简介: 刘碧玉(1964—), 女, 湖南邵阳人, 教授, 博士, 从事大系统分散控制、鲁棒控制等研究; 桂卫华(1950—), 男, 湖北襄樊人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统的建模与优化控制等研究.

其中: $x_i(t) \in R^{n_i}$ 为第 i 个区域的状态向量; $u_i(t) \in R^{m_i}$ 为第 i 个区域的控制输入向量; $w_i(t) \in R^{p_i}$ 为第 i 个区域的负载扰动输入; $z_i(t) \in R^{l_i}$ 为第 i 个区域的控制输出向量; $A_i, B_i, C_i, D_i, \tau_{ij}$ 和 A_{ij} 是具有适当维数的常数矩阵; $\tau_{ij} \geq 0$ 是系统的关联项滞后时间, $\tau_{ij} = \max\{\tau_{ij}\}$; $\phi_i(t)$ 是定义在 $[-\tau_{ij}, 0]$ 上的实值连续的初值函数. 所有变量及其物理意义参见文献[8].

分散 H 控制问题描述为: 已知常数 $\gamma > 0$, 设计分散状态反馈控制器 $u_i(t) = K_i x_i(t) (i = 1, 2, \dots, N)$, 使得闭环系统

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i K_i x_i(t) + \\ \quad w_i(t) + \sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(t - \tau_{ij}), \\ z_i(t) = C_i x_i(t) + D_i K_i x_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

满足以下性质:

- 1) 闭环系统(2) 是内部渐近稳定的.
- 2) 从外部扰动 $w_i(t)$ 到被控输出 $z_i(t)$ 的传递函数 $G_z(s)$ 的 H 范数不超过给定的常数 $\gamma > 0$, 即在零初始条件 $x_i(t) = 0, t \in [-\tau_{ij}, 0], i = 1, 2, \dots, N$ 下, 有

$$\|z(t)\|_2 \leq \gamma \|w(t)\|_2, \quad \forall w(t) \in L_2[0, \infty]. \quad (3)$$

其中

$$z(t) = (z_1^T(t), \dots, z_N^T(t))^T, \\ w(t) = (w_1^T(t), \dots, w_N^T(t))^T.$$

$$\begin{bmatrix} (1, 1)_i & R_{1i} & \dots & R_{Ni} & P_i A_{i1} & \dots & P_i A_{iN} & P_i & -I_i & A_{i1}^T R_{1i} & \dots & A_{iN}^T R_{Ni} \\ R_{1i} & -R_{1i} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ R_{Ni} & 0 & \dots & -R_{Ni} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_{i1}^T P_i & 0 & \dots & 0 & -Q_{i1} & \dots & 0 & 0 & 0 & A_{i1}^T R_{1i} & \dots & A_{iN}^T R_{Ni} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ A_{iN}^T P_i & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -Q_{iN} & 0 & 0 & A_{iN}^T R_{1i} & \dots & A_{iN}^T R_{Ni} \\ P_i & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & -I_i & 0 & A_{i1}^T R_{1i} & \dots & A_{iN}^T R_{Ni} \\ I_i R_{1i} A_i & 0 & \dots & 0 & I_i R_{1i} A_{i1} & \dots & I_i R_{1i} A_{iN} & I_i R_{1i} & -R_{1i} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ N_i R_{Ni} A_i & 0 & \dots & 0 & N_i R_{Ni} A_{i1} & \dots & N_i R_{Ni} A_{iN} & N_i R_{Ni} & 0 & 0 & \dots & -R_{Ni} \end{bmatrix} < 0, \quad (6)$$

其中

$$(1, 1)_i = P_i A_i + A_i^T P_i + \sum_{j=1}^N Q_{ij} - \sum_{j=1}^N R_{ji} + C_i^T C_i,$$

则关联未控系统(5) 内部渐近稳定, 且在零初始条件下, 对于任意非零的 $w_i(t) \in L_2[0, \infty)$ 有

$$\|z(t)\|_2 \leq \gamma \|w(t)\|_2.$$

证明 选择如下 Lyapunov-Krasovskii 泛函:

$$V(x_i) =$$

具有以上性质的控制器 $u_i(t)$ 称为系统(1) 的分散 H 控制器. 不等式(3) 反映了系统对外部扰动的抑制能力, 因此 也称为系统对外部扰动的抑制程度. 越小, 表明系统的性能越好.

3 关联电力系统的时滞相关分散 H 控制

本节导出关联电力系统(1) 可分散状态反馈镇定的充分条件, 并给出分散稳定化控制律的设计方法. 为此首先引入下列引理:

引理 1^[13] 若 $y(t)$ 为 R^n 上具有连续一阶导数的向量值函数, 则对任意对称正定矩阵 $W > 0$, 任意常数 $h > 0$ 满足不等式

$$-h \int_{t-h}^t \dot{y}^T(s) W \dot{y}(s) ds \\ [y^T(t) \quad y^T(t-h)] \begin{bmatrix} -W & W \\ W & -W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(t) \\ y(t-h) \end{bmatrix} < 0. \quad (4)$$

3.1 关联未控系统的 H 性能分析

首先考虑如下关联未控系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + w_i(t) + \\ \quad \sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(t - \tau_{ij}), \\ z_i(t) = C_i x_i(t). \end{cases} \quad (5)$$

定理 1 对于给定的常数 $\gamma > 0, \tau_{ij} > 0$, 若存在正定矩阵 $P_i > 0, Q_{ij} > 0, R_{ij} > 0$, 使得如下 LMIs 成立:

$$\begin{bmatrix} (1, 1)_i & R_{1i} & \dots & R_{Ni} & P_i A_{i1} & \dots & P_i A_{iN} & P_i & -I_i & A_{i1}^T R_{1i} & \dots & A_{iN}^T R_{Ni} \\ R_{1i} & -R_{1i} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ R_{Ni} & 0 & \dots & -R_{Ni} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ A_{i1}^T P_i & 0 & \dots & 0 & -Q_{i1} & \dots & 0 & 0 & 0 & A_{i1}^T R_{1i} & \dots & A_{iN}^T R_{Ni} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ A_{iN}^T P_i & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & -Q_{iN} & 0 & 0 & A_{iN}^T R_{1i} & \dots & A_{iN}^T R_{Ni} \\ P_i & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & -I_i & 0 & A_{i1}^T R_{1i} & \dots & A_{iN}^T R_{Ni} \\ I_i R_{1i} A_i & 0 & \dots & 0 & I_i R_{1i} A_{i1} & \dots & I_i R_{1i} A_{iN} & I_i R_{1i} & -R_{1i} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ N_i R_{Ni} A_i & 0 & \dots & 0 & N_i R_{Ni} A_{i1} & \dots & N_i R_{Ni} A_{iN} & N_i R_{Ni} & 0 & 0 & \dots & -R_{Ni} \end{bmatrix} < 0, \quad (6)$$

沿系统(5) 对 $V(x_i)$ 求导, 且由引理 1 和 Schur 补引理可证定理 1 成立.

对于系统(5), 定理 1 给出了一个新的时滞相关有界实引理, 即 H 性能分析的一个充分条件.

3.2 控制器的设计

根据上述时滞相关定理, 对于关联电力系统

(1), 基于分散状态反馈控制器 $u_i(t) = K_i x_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 给出时滞相关 H 控制的充分条件.

定理 2 对于给定的常数 $\alpha > 0$, $\beta_{ij} > 0$, 若存

$$\begin{bmatrix} \alpha_{i1} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & A_{i1} X_i & \dots & A_{iN} X_i & \dots & \alpha_i (X_i A_i^T + Y_i^T B_i^T) & \dots & \beta_{ij} (X_i A_i^T + Y_i^T B_i^T) & \dots & X_i C_i^T + Y_i^T D_i^T \\ \mathbf{0} & -4\bar{R}_{1i} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & -4\bar{R}_{Ni} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ X_i A_{i1}^T & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & -\bar{Q}_{i1} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \alpha_i X_i A_{i1}^T & \dots & \beta_{ij} X_i A_{i1}^T & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots \\ X_i A_{iN}^T & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & -\bar{Q}_{iN} & \mathbf{0} & \alpha_i X_i A_{iN}^T & \dots & \beta_{ij} X_i A_{iN}^T & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -I_i & \alpha_i I_i & \dots & \beta_{ij} I_i & \dots & \mathbf{0} \\ \alpha_i (A_i X_i + B_i Y_i) & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \alpha_i A_{i1} X_i & \dots & \alpha_i A_{iN} X_i & \alpha_i I_i & -\bar{R}_{1i} & \dots & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_{ij} (A_i X_i + B_i Y_i) & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \beta_{ij} A_{i1} X_i & \dots & \beta_{ij} A_{iN} X_i & \beta_{ij} I_i & \mathbf{0} & \dots & -\bar{R}_{Ni} & \dots & \mathbf{0} \\ C_i X_i + D_i Y_i & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \dots & -I_i \end{bmatrix} < 0, \tag{7}$$

其中

$$\alpha_{i1} = A_i X_i + X_i A_i^T + B_i Y_i + Y_i^T B_i^T + \sum_{j=1}^N \bar{Q}_{ij},$$

则关联电力系统 (1) 可分散镇定, 且在零初始条件下, 对于任意非零的 $x_i(t) \in L_2[0, \infty)$ 有 $\|z_i(t)\|_2^2$

$\leq \alpha_i \|x_i(t)\|_2^2$, 相应的分散 H 控制器为

$$u_i(t) = Y_i X_i^{-1} x_i(t).$$

证明 采用状态反馈控制 $u_i(t) = K_i x_i(t)$, 代入关联电力系统 (1), 相当于系统 (5) 中的 A_i, C_i 分别用 $A_i + B_i K_i, C_i + D_i K_i$ 取代, 再由定理 1 和 Schur 补引理可证定理 2 成立.

注 1 根据以上方法, 类似可考虑系统中存在参数不确定性的情形.

4 仿真实例

考虑一个两区域线性化关联电力系统, 取类似文献 [8] 中的参数, 并假设它们之间关联信号的传递存在着常数时滞 $\tau_{ij} > 0$, 即

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_1(t), \\ \dot{x}_1(t) &= -23.25 x_1(t) - 16.07 E_{q1}(t) + 23.50 x_2(t - \tau_{12}) - 17.04 E_{q2}(t - \tau_{12}), \\ \dot{E}_{q1}(t) &= -0.3467 x_1(t) - 0.2802 E_{q1}(t) + 0.2 E_{f1}(t) + 0.3412 x_2(t - \tau_{12}) + 0.0196 E_{q2}(t - \tau_{12}), \\ \dot{x}_2(t) &= x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= -26.75 x_2(t) - 30.1 E_{q2}(t) + 27.05 x_1(t - \tau_{21}) + 8.67 E_{q1}(t - \tau_{21}), \\ \dot{E}_{q2}(t) &= -0.176 x_2(t) - 0.3 E_{q2}(t) + 0.167 E_{f2}(t) + 0.1719 x_1(t - \tau_{21}) + 0.1085 E_{q1}(t - \tau_{21}). \end{aligned} \tag{8}$$

在对称正定矩阵 $X_i > 0, \bar{Q}_{ij} > 0, \bar{R}_{ij} > 0$ 和任意矩阵 Y_i , 使得如下的 LMIs 成立:

其中: $\delta_i(t)$ 为第 i 个发电机的功角, $\omega_i(t)$ 为第 i 个发电机的相对转速, $E_{qi}(t)$ 为第 i 个发电机的 q 轴暂态电压, $E_{fi}(t)$ 为励磁绕组等值电动势.

若定义状态变量为

$$\begin{aligned} x_1(t) &= (\delta_1(t) \quad \omega_1(t) \quad E_{q1}(t))^T, \\ x_2(t) &= (\delta_2(t) \quad \omega_2(t) \quad E_{q2}(t))^T, \end{aligned}$$

控制变量为 $u_1(t) = E_{f1}(t), u_2(t) = E_{f2}(t)$, 且考虑在每个子系统中存在负载扰动输入 $w_i(t)$ 和输出 $z_i(t)$, 则式 (8) 可写成如式 (1) 的模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + w_i(t) + \sum_{j=1}^2 A_{ij} x_j(t - \tau_{ij}), \\ z_i(t) = C_i x_i(t) + D_i u_i(t). \end{cases} \tag{9}$$

其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -23.25 & 0 & -16.07 \\ -0.3467 & 0 & -0.2802 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.2 \end{bmatrix},$$

$$A_{11} = 0, A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 23.5 & 0 & -17.04 \\ 0.3412 & 0 & 0.0196 \end{bmatrix},$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 27.05 & 0 & 8.67 \\ 0.1719 & 0 & 0.1085 \end{bmatrix}, A_{22} = 0$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -26.75 & 0 & -30.1 \\ -0.176 & 0 & -0.3 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.167 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} w_1 &= [0.1 \quad 0.1 \quad 0.1]^T, w_2 = [0.2 \quad 0.2 \quad 0.2]^T, \\ C_1 &= 0.3I, C_2 = 0.1I, \\ D_1 &= 0.01[1 \quad 1 \quad 1]^T, D_2 = 0.01[-1 \quad 1 \quad 1]^T. \end{aligned}$$

设计控制器 $u = (u_1, u_2)^T$ 等于反馈增益矩阵与状态变量的乘积. 考虑时滞电力系统 (9) 的 H 控制问题, 取增益 $\gamma = 1$, 根据定理 2, 求解 LMI (7) 可得电力系统 (9) 的分散 H 控制器为

$$u_1(t) = K_1 x_1(t), u_2(t) = K_2 x_2(t), \quad (10)$$

最大时滞为 $\tau = 1$ s. 如果取增益下界 $\gamma = 0.5$, 解出满足系统 H 特性所需要的最大时滞为 $\tau = 0.6$ s. 以时滞 0.6 s 为例, 当 H 增益下界 $\gamma = 0.5$ 时, 求解 LMI(7) 可得控制器的增益矩阵为

$$K_1 = [-6268.4 \quad -2369.2 \quad 4796.7],$$

$$K_2 = [-17511 \quad -5499 \quad 9608].$$

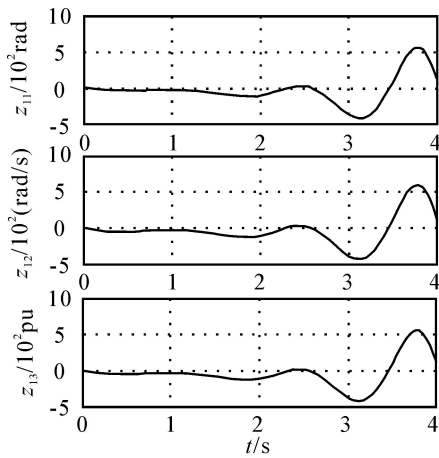
其他变量矩阵为

$$X_1 = \begin{bmatrix} 0.013 & -0.039 & -0.0025 \\ -0.039 & 0.3236 & 0.1095 \\ -0.0025 & 0.1095 & 0.0505 \end{bmatrix},$$

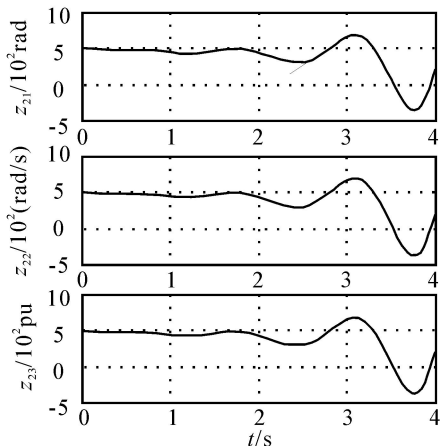
$$Y_1 = [-1.0362 \quad 3.3 \quad -1.6839],$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} 0.0183 & -0.0841 & -0.0149 \\ -0.0841 & 0.6771 & 0.2343 \\ -0.0149 & 0.2343 & 0.1063 \end{bmatrix},$$

$$Y_2 = [-0.3651 \quad 0.4794 \quad -6.945].$$

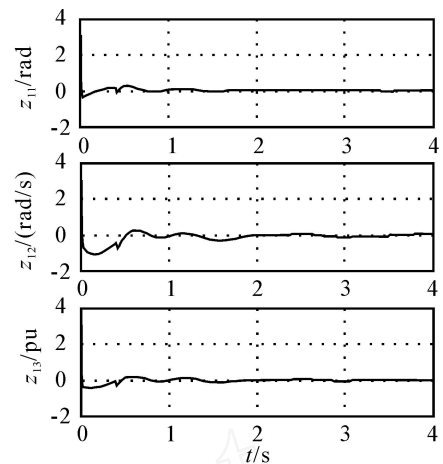


(a) 第1个机组的输出

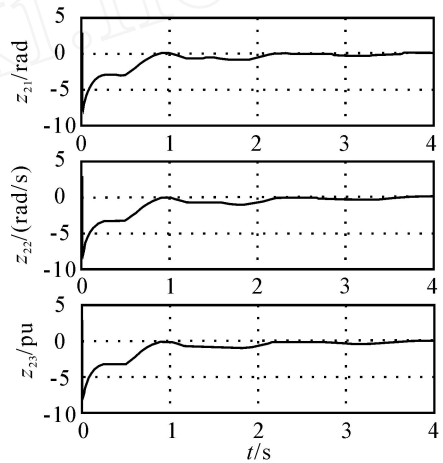


(b) 第2个机组的输出

图 1 电力系统未受控制之前的输出



(a) 第1个机组的输出



(b) 第2个机组的输出

图 2 电力系统在分散 H 控制下的状态轨线

$$\bar{Q}_{11} = \begin{bmatrix} 0 & -0.0016 & -0.004 \\ -0.0016 & 0.0162 & 0.0394 \\ -0.004 & 0.0394 & 0.1073 \end{bmatrix},$$

$$\bar{Q}_{12} = \begin{bmatrix} 0.0875 & -0.7008 & -0.2311 \\ -0.7008 & 5.6135 & 1.8528 \\ -0.2311 & 1.8528 & 0.6155 \end{bmatrix},$$

$$\bar{Q}_{22} = \begin{bmatrix} 0.0001 & -0.0018 & -0.0001 \\ -0.0018 & 0.016 & 0.0016 \\ -0.0001 & 0.0016 & 0.0035 \end{bmatrix},$$

$$\bar{Q}_{21} = \begin{bmatrix} 0.0418 & -0.0301 & 0.0552 \\ -0.0301 & 0.0408 & -0.0003 \\ 0.0552 & -0.0003 & 0.1845 \end{bmatrix},$$

$$\bar{R}_{11} = \begin{bmatrix} 0.9415 & -0.021 & 0.546 \\ -0.021 & 3.9063 & 2.0204 \\ 0.546 & 2.0204 & 1.9157 \end{bmatrix},$$

$$\bar{R}_{12} = \begin{bmatrix} 1.0597 & -0.5899 & 0.9238 \\ -0.5899 & 5.6217 & 1.0226 \\ 0.9238 & 1.0226 & 1.8273 \end{bmatrix},$$

$$\bar{R}_{21} = \begin{bmatrix} 0.9415 & -0.021 & 0.546 \\ -0.021 & 3.9063 & 2.0204 \\ 0.546 & 2.0204 & 1.9157 \end{bmatrix},$$

$$\bar{R}_{22} = \begin{bmatrix} 1.0597 & -0.5899 & 0.9238 \\ -0.5899 & 5.6217 & 1.0226 \\ 0.9238 & 1.0226 & 1.8273 \end{bmatrix}.$$

分别给出关联电力系统的输出轨线如图 1, 图 2 所示.

可见 H 控制的镇定效果在约前 4 s 就已经达到, 所以这里提出的控制方法是有效的.

5 结 语

本文研究了一类具有时滞的关联电力系统分散 H 控制问题. 应用 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法, 结合时滞积分矩阵不等式技巧, 导出使闭环系统渐近稳定, 且满足一定的 H 性能指标与时滞相关的 LMIs 充分条件, 并给出了分散状态反馈控制器的构造方法. 关联电力系统的仿真示例说明了该方法的有效性.

参考文献(References)

- [1] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
(Lu Q, Sun Y Z. Nonlinear control of power systems [M]. Beijing: Science Press, 1993.)
- [2] 余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定性理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
(Yu Y X, Wang C S. Stability theory and method of power systems[M]. Beijing: Science Press, 1999.)
- [3] Kundur P. Power system stability and control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [4] Park P G. A delay-dependent stability criterion for systems with uncertain time-invariant delays[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(4): 876-877.
- [5] Fridman E, Shaked U. An improved stabilization method for linear time-delay systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(11): 1931-1937.
- [6] Wu M, He Y, She J H, et al. Delay-dependent criteria for robust stability of time-varying delay systems [J]. Automatica, 2004, 40(8): 1435-1439.
- [7] 吴捷, 柳明. 非线性控制在电力系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(1): 15-22.
(Wu J, Liu M. Nonlinear control and its application in power system [J]. Control Theory and Applications, 2002, 19(1): 15-22.)
- [8] Li G J, Lie T T, Soh C B, et al. Decentralized H control for power system stability enhancement[J]. Int J of Electrical Power and Energy Systems, 1998, 20(7): 453-463.
- [9] Li G J, Lie T T, Soh C B, et al. Design of state-feedback decentralized nonlinear H controllers in power systems [J]. Int J of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(8): 601-610.
- [10] Zribi M, Mahmoud M S, Karkoub M, et al. H - controllers for linearised time-delay power systems[J]. IEE Proc of the General Transmission Distribution, 2000, 147(5): 401-408.
- [11] Li S R, Lu Q, Sun Y H. Nonlinear H stabilizers design for power systems[C]. Proc of IEEE Conf on Industrial Technology. Shanghai, 1996: 748-752.
- [12] Lu Q, Sun Y. Nonlinear stabilizing control of multimachine systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1957-1962.
- [13] Han Q L. Absolute stability of time-delay systems with sector-bounded nonlinearity [J]. Automatica, 2005, 41(12): 2171-2176.
- [4] Krstic M, Kanellakopoulos L, Kokotovic P V. Nonlinear adaptive control design [M]. New York: Wiley Interscience, 1995.
- [5] Polycarpou M M, Mears M J. Stable adaptive tracking of uncertain systems using nonlinearly parameterized on-line approximators [J]. Int J Control, 1998, 70(3): 363-384.
- [6] Wang W Y, Chan M L, Lee T T, et al. Adaptive fuzzy control for strict-feedback canonical nonlinear systems with H tracking performance [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics — Part B: Cybernetics, 2000, 30(6): 878-885.
- [7] Yang Y S, Feng G, Ren J S. A combined backstepping and small-gain approach to robust adaptive fuzzy control for strict-feedback nonlinear systems [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics — Part A: Systems and Humans, 2004, 34(3): 406-420.
- [8] Zhou S S, Feng G, Feng C B. Robust control for a class of uncertain nonlinear systems: Adaptive fuzzy approach based on backstepping [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 151(1): 1-20.
- [9] Kanellakopoulos I, Kokotovic P V, Morse A S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1991, 36(11): 1241-1253.
- [10] Wang D, Huang J. Adaptive neural network control for a class of uncertain nonlinear systems in pure-feedback form [J]. Automatica, 2002, 38(8): 1365-1372.

(上接第 701 页)