

基于观测器的汽轮发电机气门开度的时滞无关控制

孙妙平, 年晓红, 潘 欢

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 本文考虑了具有非线性关联作用的带中间再热器的汽轮发电机的数学模型, 研究了气门开度基于观测状态的时滞无关分散控制器的设计问题. 首先把非线性关联函数变换为子系统状态变量的二次有界不等式, 然后通过构造适当的Lyapunov泛函, 并利用线性矩阵不等式(LMI)的处理方法, 得到了使汽轮发电机组渐近稳定的LMI充分条件. 此外, 还提出了了控制器增益矩阵和观测器增益矩阵的求解算法. 最后以两机无穷大母线系统为例进行了仿真分析, 验证了该方法的有效性.

关键词: 气门开度; 时滞无关; 状态观测器; 线性矩阵不等式

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A

Observer-based delay-independent control for steam valves of steam turbo-generator

SUN Miao-ping, NIAN Xiao-hong, PAN Huan

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410004, China)

Abstract: A delay-independent decentralized controller based on the state observer is proposed for the steam valve opening of a turbo-generator. The design of this controller is based on the mathematical model of the turbo generator with reheater, which involves nonlinear interconnection function. The nonlinear interconnection function is first converted into a bounded quadratic inequality of the subsystem states; and then, by constructing a proper Lyapunov function and applying the linear matrix inequalities (LMI) method, we develop for the turbo-generator the sufficient condition of asymptomatic stability and determine the gain matrices for the controller and observer. Simulation has been performed in a two-machine infinite-bus power system; results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: steam valve opening; delay-independent; state observer; linear matrix inequality

1 引言(Introduction)

大型汽轮发电机组气门开度控制对提高电力系统的稳定水平有着十分重要的意义, 它不仅可以改善电力系统的大干扰稳定性, 还可改善小干扰稳定, 抑制低频振荡等^[1-4], 近年来引起了学者们的高度关注.

已有的关于气门控制的报道, 如文献[5-6]分别采用LMI方法和Ricatti方法设计了线性控制器, 文献[7-8]设计了非线性控制器, 文献[9]考虑输入约束特性下非线性自适应器的设计, 文献[10]采用backstepping方法得到鲁棒自适应控制器等. 这些文献中的控制策略都是采用状态信号进行设计的, 但是在多数情况下, 部分状态信息是不可测的, 有时甚至全部状态信息都不能测量, 这就需要设计观测器来重构状态信息.

同时, 随着基于同步相位测量单元(PMU)的广域测量系统(WAMS)在互联电力系统中的逐渐推广, 信

号的传输会产生时延, 时滞的大小与通信介质、路由、阻塞等因素有关, 有时可能高达几十甚至几百毫秒, 它的存在是引起系统不稳定的重要因素之一. 为了保证电力系统的正常运行, 必须考虑时滞对电力系统的影响^[11-14]. 电力系统中的时滞问题主要有两个方面, 非线性关联项中包含时滞和采用远方信号进行反馈的控制器中包含时滞, 在实际运行时, 如果系统失去同步, 将会很难确定时滞的大小和上界, 因此设计基于观测器的时滞无关的气门控制器将有着非常重要的实际意义.

已知基于观测器气门控制的报道很少^[15-16], 前者基于分散观测器设计了状态反馈控制器, 后者在此基础上设计了性能指标并进行优化, 但是他们均没有考虑时滞的影响. 而已有的基于观测器的非线性时滞关联系统控制器设计的理论研究的报道也并不多, 文献[17]也仅仅考虑了时滞存在于状态项中, 而并未考虑时滞存在于关联项的情形.

本文研究了具有状态时滞和非线性关联作用的汽轮发电机组成的多机电力系统气门开度的镇定问题, 基于观测状态设计了反馈控制器, 利用线性矩阵不等式(linear matrix inequalities, LMI)处理方法, 得到了使系统状态和观测误差渐近稳定的LMI条件, 并得到了控制器增益矩阵和观测器增益矩阵的求解算法。

2 多机电力系统动态模型(Dynamic model of multi-machine power system)

本文考虑 N 台带中间再热器的汽轮发电机组成的多机电力系统的气门控制问题, 考虑到传输延时的特性, 每台发电机动态模型如下^[3,6]:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} \cdot \\ \quad G_{ij} g_{ij}(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})), \\ y_i(t) = C_i x_i(t), \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_i^T(t) = [\Delta\delta_i(t) \ \omega_i(t) \ \Delta P_{Mi}(t) \ \Delta X_{Ei}(t)]$ 为第 i 台发电机的状态向量, 分别表示转子运行角增量、角速度、机械功率增量和气门开度增量; $\Delta\delta_i(t) = \delta_i(t) - \delta_{i0}$; $\Delta P_{Mi}(t) = P_{Mi}(t) - P_{Mi0}$; $\Delta X_{Ei}(t) = X_{Ei}(t) - X_{Ei0}$, 而 δ_{i0} , δ_{j0} , P_{Mi0} 和 X_{Ei0} 均表示初始状态; $u_i(t)$ 为第 i 台发电机的功率控制输入向量, $y_i(t) = \Delta\delta_i(t)$ 为第 i 台发电机的输出向量; τ_{ij} 是第 i 台发电机和第 j 台发电机的关联项滞后时间, 且满足:

$$0 \leq \tau_{ij} \leq \tau_{\max} \leq \infty, \quad (2)$$

其中: $\tau_{\max}$ 是正矢量, 分别代表最大延时的时间; $g_{ij}(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij}))$ 为第 i 台发电机和第 j 台发电机之间的非线性关联函数, 表示为

$$g_{ij}(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})) = \sin(\delta_i(t) - \delta_j(t - \tau_{ij})) - \sin(\delta_{i0} - \delta_{j0}), \quad (3)$$

各系数矩阵表示如下:

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D_i}{2H_i} & \frac{\omega_0}{2H_i}(1 - F_{IP_i}) & \frac{\omega_0}{2H_i}F_{IP_i} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{Mi}} & \frac{K_{Mi}}{T_{Mi}} \\ 0 & -\frac{K_{Ei}}{T_{Ei}R_i\omega_0} & 0 & -\frac{1}{T_{Ei}} \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{Ei}} \end{bmatrix}, \quad \bar{G}_{ij} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\omega_0 \dot{E}_{qi} \dot{E}_{qj} B_{ij}}{2H_i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C_i = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

其余各参数的含义如下: p_{ij} 为0或1, 为1时表示第 i 台

发电机和第 j 台发电机之间有电气上的连接; H_i 为第 i 台发电机的转动惯量; F_{IP_i} 为第 i 台发电机的中间级功率分配系数; D_i 为第 i 台发电机的阻尼系数; T_{Mi} , K_{Mi} 分别为第 i 台汽轮发电机的时间常数和增益; T_{Ei} , K_{Ei} 分别为第 i 台发电机调速器的时间常数和增益; R_i 为第 i 台发电机的调节系数; B_{ij} 为第 i 台发电机和第 j 台发电机之间的节点导纳矩阵; ω_0 为同步角速度; $\dot{E}_{qi}$, $\dot{E}_{qj}$ 分别为第 i 台发电机和第 j 台发电机的暂态电势(本文讨论气门控制, 均可看作常数)。

3 基于观测器的时滞无关控制器的设计(The design of delay-independent controller based on observer)

为了方便后面的推导, 首先对非线性关联函数 $g_{ij}(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij}))$ 作如下变化:

$$\begin{aligned} g_{ij}(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})) &= \sin(\delta_i(t) - \delta_j(t - \tau_{ij})) - \sin(\delta_{i0} - \delta_{j0}) = \\ &= -2\cos\beta_i(\delta)\sin\frac{\delta_i(t) - \delta_j(t - \tau_{ij}) - (\delta_{i0} - \delta_{j0})}{2} = \\ &= -2\cos\beta_i(\delta)\sin\frac{W_i x_i(t) - W_j x_j(t - \tau_{ij})}{2}, \end{aligned}$$

其中: $\beta_i(\delta) = [\delta_i(t) - \delta_j(t - \tau_{ij}) + \delta_{i0} - \delta_{j0}]/2$, $W_i = W_j = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$.

因此有

$$\begin{aligned} g_{ij}^T(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij}))g_{ij}(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})) &= \\ 4\cos^2\beta_i(\delta)\sin^2[W_i x_i(t) - W_j x_j(t - \tau_{ij})]/2 &\leq \\ [W_i x_i(t) - W_j x_j(t - \tau_{ij})]^2 &\leq \\ x_i^T(t)W_i^T W_i x_i(t) + & \\ x_j^T(t - \tau_{ij})W_j^T W_j x_j(t - \tau_{ij}). & \end{aligned} \quad (4)$$

在实际运行的电力系统中, 常常不能直接测量式(1)的全部状态, 但可以要求系数矩阵(A_i , B_i)完全可控, (A_i , C_i)完全可观测. 现对每台发电机进行基于观测状态的反馈控制, 因为本文研究的是 N 台汽轮发电机的气门控制问题, 同种类型的发电机之间的协调效果并不明显, 因此若引入远方观测状态作为反馈信号, 不仅对系统的动态性能改善不大, 还会增加系统不稳定的因素. 故设计控制率为

$$u_i(t) = -K_i \hat{x}_i(t), \quad (5)$$

其中: K_i 为控制增益矩阵, $\hat{x}_i(t)$ 为 $x_i(t)$ 的观测状态, 由如下的动态方程描述:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i(t) = A_i \hat{x}_i(t) + B_i u_i(t) + L_i[y_i(t) - \hat{y}_i(t)] + \\ \quad \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} G_{ij} g_{ij}(\hat{x}_i(t), \hat{x}_j(t - \tau_{ij})), \\ \hat{y}_i(t) = C_i \hat{x}_i(t), \end{cases} \quad (6)$$

其中 L_i 为观测器增益矩阵.

定义状态观测误差为

$$e_i(t) = x_i(t) - \hat{x}_i(t), \quad (7)$$

则状态和观测误差组成的闭环系统描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = (A_i - B_i K_i) x_i(t) + B_i K_i e_i(t) + \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} G_{ij} g_{ij}(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})), \\ \dot{e}_i(t) = (A_i - L_i C_i) e_i(t) + \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} G_{ij} h_{ij}(e_i(t), e_j(t - \tau_{ij})), \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} h_{ij}(e_i(t), e_j(t - \tau_{ij})) = \\ \sin(\delta_i(t) - \delta_j(t - \tau_{ij})) - \sin(\hat{\delta}_i(t) - \hat{\delta}_j(t - \tau_{ij})). \end{aligned}$$

根据式(4)的推导过程, 可得

$$\begin{aligned} h_{ij}^T(e_i(t), e_j(t - \tau_{ij})) h_{ij}(e_i(t), e_j(t - \tau_{ij})) \leq \\ e_i^T(t) W_i^T W_i e_i(t) + e_j^T(t - \tau_{ij}) W_j^T W_j e_j(t - \tau_{ij}), \end{aligned} \quad (9)$$

下记: $A_{ic} = A_i - B_i K_i$, $A_{io} = A_i - L_i C_i$.

本文研究的主要问题描述为: 合理设计控制增益矩阵 K_i 和观测器增益矩阵 L_i , 使得式(8)所示的系统渐近稳定, 且结论与时滞无关.

设 $x(t) = [x_1^T(t) \ x_2^T(t) \ \cdots \ x_N^T(t)]^T$, $e(t) = [e_1^T(t) \ e_2^T(t) \ \cdots \ e_N^T(t)]^T$, 选取Lyapunov泛函为

$$\begin{aligned} V(x, e) = \sum_{i=1}^N \left\{ \begin{bmatrix} x_i(t) \\ e_i(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P_i & 0 \\ 0 & Q_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i(t) \\ e_i(t) \end{bmatrix} + \right. \\ \left. \sum_{j=1, j \neq i}^N \int_{t-\tau_{ij}}^t p_{ij} \begin{bmatrix} x_j(\xi) \\ e_j(\xi) \end{bmatrix}^T \omega_{ij} \begin{bmatrix} x_j(\xi) \\ e_j(\xi) \end{bmatrix} d\xi \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中:

$$\omega_{ij} = \begin{bmatrix} \alpha_{ij} W_j^T W_j & 0 \\ 0 & \beta_{ij} W_j^T W_j \end{bmatrix},$$

而 P_i 和 Q_i 为正定对称矩阵, α_{ij} 和 β_{ij} 为任意正常数.

则 $V(x, e)$ 沿系统(8)的任意轨线对时间 t 的导数, 经过整理后为

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, e) \leq \\ \sum_{i=1}^N [x_i^T(t) (P_i A_{ic} + A_{ic}^T P_i) x_i(t) + \\ x_i^T(t) P_i B_i K_i e_i(t) + e_i^T(t) K_i^T B_i^T P_i x_i(t) + \\ x_i^T(t) P_i \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} G_{ij} g_{ij}(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})) + \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} g_{ij}^T(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})) G_{ij}^T P_i x_i(t) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_i^T(t) (Q_i A_{io} + A_{io}^T Q_i) e_i(t) + \\ e_i^T(t) Q_i \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} G_{ij} h_{ij}(e_i(t), e_j(t - \tau_{ij})) + \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} h_{ij}^T(e_i(t), e_j(t - \tau_{ij})) G_{ij}^T Q_i e_i(t) + \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} [\alpha_{ij} x_j^T(t) W_j^T W_j x_j(t) + \\ \beta_{ij} e_j^T(t) W_j^T W_j e_j(t) - \\ \alpha_{ij} x_j^T(t - \tau_{ij}) W_j^T W_j x_j(t - \tau_{ij}) - \\ \beta_{ij} e_j^T(t - \tau_{ij}) W_j^T W_j e_j(t - \tau_{ij})]]. \end{aligned} \quad (11)$$

又因为对任意的 $\varepsilon > 0$, 适当维数的常数矩阵 H 和 Z 以及向量 x 和 y , 有^[18]

$$2x^T H Z y \leq \varepsilon^{-1} x^T H H^T x + \varepsilon y^T Z^T Z y. \quad (12)$$

根据式(4)和式(12)可得

$$\begin{aligned} x_i^T(t) P_i \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} G_{ij} g_{ij}(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})) + \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} g_{ij}^T(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})) G_{ij}^T P_i x_i(t) \leq \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} \{ \alpha_{ij}^{-1} x_i^T(t) P_i G_{ij} G_{ij}^T P_i x_i(t) + \\ \alpha_{ij} g_{ij}(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})) g_{ij}^T(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})) \} \leq \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} \{ \alpha_{ij}^{-1} x_i^T(t) P_i G_{ij} G_{ij}^T P_i x_i(t) + \\ \alpha_{ij} [x_i^T(t) W_i^T W_i x_i(t) + \\ x_j^T(t - \tau_{ij}) W_j^T W_j x_j(t - \tau_{ij})] \}. \end{aligned} \quad (13)$$

再根据式(9)和式(12)可得

$$\begin{aligned} e_i^T(t) Q_i \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} G_{ij} h_{ij}(e_i(t), e_j(t - \tau_{ij})) + \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} h_{ij}^T(x_i(t), x_j(t - \tau_{ij})) G_{ij}^T Q_i e_i(t) \leq \\ \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} \{ \beta_{ij}^{-1} \lambda_{ij} e_i^T(t) Q_i Q_i e_i(t) + \\ \beta_{ij} [e_i^T(t) W_i^T W_i e_i(t) + \\ e_j^T(t - \tau_{ij}) W_j^T W_j e_j(t - \tau_{ij})] \}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 λ_{ij} 为 $G_{ij} G_{ij}^T$ 的最大特征值.

并且有

$$\begin{aligned} x_i^T(t) P_i B_i K_i e_i(t) + e_i^T(t) K_i^T B_i^T P_i x_i(t) \leq \\ \gamma_i x_i^T(t) P_i B_i B_i^T P_i x_i(t) + \gamma_i^{-1} e_i^T(t) K_i^T K_i e_i(t). \end{aligned} \quad (15)$$

把式(13)–(15)代入式(11)可得

$$\dot{V}(x, e) \leq \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} x_i^T(t) \\ e_i^T(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_i & 0 \\ 0 & \bar{U}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i(t) \\ e_i(t) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

其中:

$$\begin{aligned}\bar{X}_i &= A_{ic}^T P_i + P_i A_{ic} + \gamma_i P_i B_i B_i^T P_i + \\ &\quad \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} \alpha_{ij}^{-1} P_i G_{ij} G_{ij}^T P_i + \theta_i^{-1} W_i^T W_i, \\ \bar{U}_i &= A_{io}^T Q_i + Q_i A_{io} + \gamma_i^{-1} K_i^T K_i + \\ &\quad \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} \beta_{ij}^{-1} \lambda_{ij} Q_i Q_i + \sigma_i W_i^T W_i,\end{aligned}$$

而

$$\begin{aligned}\theta_i^{-1} &= \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} (\alpha_{ji} + \alpha_{ij}), \\ \sigma_i &= \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} (\beta_{ji} + \beta_{ij}).\end{aligned}$$

很显然, 只要 $\bar{X}_i < 0$ 和 $\bar{U}_i < 0$ 同时成立, 就有 $\dot{V}(x) < 0$, 那么式(8)所示的系统就能渐近稳定, 问题完毕. 接下来, 本文讨论控制器增益和观测器增益的设计问题.

首先, 要使 $\bar{X}_i < 0$, 就等价于使

$$P_i^{-1} \bar{X}_i P_i^{-1} < 0. \quad (17)$$

把矩阵 $\bar{X}_i$ 的表达式代入式(17), 并利用Schur补定理, 且记 $Y_i = P_i^{-1}$, $K_i Y_i = M_i$, 可得

$$\begin{bmatrix} X_i & Y_i W_i^T \\ W_i Y_i & -\theta_i I \end{bmatrix} < 0, \quad (18)$$

其中 $X_i = Y_i A_i^T + A_i Y_i - B_i M_i - M_i^T B_i^T + \gamma_i B_i B_i^T + \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} \alpha_{ij}^{-1} G_{ij} G_{ij}^T$.

然后, 要使 $\bar{U}_i < 0$, 根据Schur补定理, 并记 $Q_i L_i = N_i$, 有

$$\begin{bmatrix} U_i & Q_i \\ Q_i & -v_i I \end{bmatrix} < 0, \quad (19)$$

其中: I 为适当维数的单位矩阵,

$$\begin{aligned}U_i &= A_i^T Q_i + Q_i A_i - C_i N_i - N_i^T C_i^T + \\ &\quad \gamma_i^{-1} K_i^T K_i + \sigma_i W_i^T W_i, \\ v_i^{-1} &= \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} \beta_{ij}^{-1} \lambda_{ij}.\end{aligned}$$

综上所述, 控制器增益矩阵和观测器增益矩阵的求解算法可以设计为: 先求式(18)的可行解, 得到 Y_i 和 M_i 后, 求得控制器增益矩阵为 $K_i = M_i Y_i^{-1}$; 然后把上一步得出的 K_i 代入式(19), 并求解其可行解, 得到 Q_i 和 N_i 后, 求得观测器增益矩阵为 $L_i = Q_i^{-1} N_i$.

设计完毕.

推论 1 对文献[15-16]中给出的不考虑时滞的观测器, 且不考虑时滞对关联系统的影响时, 应用他们相同的Lyapunov函数, 按照本文的设计方法, 可得

使 $\bar{X}_i < 0$ 和 $\bar{U}_i < 0$ 同时成立的两个条件分别为

$$\begin{bmatrix} \tilde{X}_i & Y_i W_i^T \\ W_i Y_i & -\tilde{\theta}_i \end{bmatrix} < 0, \quad (20)$$

其中:

$$\begin{aligned}\tilde{X}_i &= Y_i A_i^T + A_i Y_i - B_i M_i - M_i^T B_i^T + \\ &\quad \gamma_i B_i B_i^T I_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} \alpha_{ij}^{-1} G_{ij} G_{ij}^T, \\ \tilde{\theta}_i^{-1} &= \sum_{j=1, j \neq i}^N p_{ij} (\alpha_{ji} + \beta_{ji} + \alpha_{ij} + \beta_{ij}), \\ \begin{bmatrix} \tilde{U}_i & Q_i \\ Q_i & -v_i I \end{bmatrix} &< 0,\end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$\tilde{U}_i = A_i^T Q_i + Q_i A_i - C_i N_i - N_i^T C_i^T + \gamma_i^{-1} K_i^T K_i.$$

显然, 文献[15-16]给出的是 N 台汽轮发电机组成的关联大电力系统渐近稳定的LMI条件, 当发电机台数增多时, 分步骤求解的两个LMI维数将会非常大. 而本文所设计的方法中, 只需求解多组维数固定的LMI的可行解, 比该文献的结果更简单, 更具有一般性.

4 电力系统仿真(Power system simulation)

用于仿真的电力系统如图1所示, 第3台发电机为平衡机, 即 $\dot{E}_{q3} = 1 \angle 0^\circ$, 并以该发电机为参考.

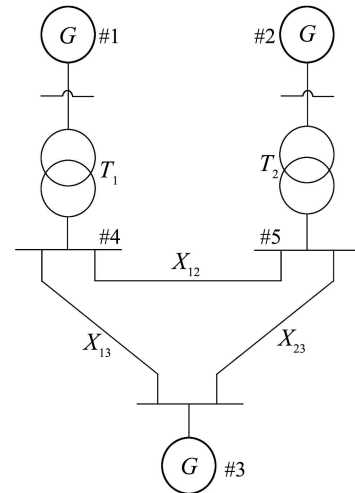


图1 两机无穷大母线系统示意图

Fig. 1 A two-machine infinite bus power system

从图1可以看出: $p_{12} = p_{21} = 1$, $p_{13} = p_{31} = 1$, $p_{23} = p_{32} = 1$.

各参数取值为^[6]

$$\begin{aligned}x_{d1} &= 1.863, \quad \dot{x}_{d1} = 0.257, \quad x_{T1} = 0.129, \\ \dot{T}_{d01} &= 16.9 \text{ s}, \quad H_1 = 4 \text{ s}, \quad D_1 = 5, \\ k_{c1} &= 1, \quad x_{d2} = 2.36, \quad \dot{x}_{d2} = 0.319,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_{T2} &= 0.11, \quad \dot{T}_{d02} = 7.96 \text{ s}, \quad H_2 = 5.1 \text{ s}, \\
 D_2 &= 3, \quad k_{c2} = 1, \quad \omega_0 = 314.159, \\
 F_{IP1} &= F_{IP2} = 0.3, \quad K_{M1} = K_{E1} = 1, \\
 K_{M1} &= K_{M2} = 1 \text{ rad/s}, \quad R_1 = R_2 = 0.05, \\
 T_{M1} &= T_{M2} = 0.35 \text{ s}, \quad T_{E1} = T_{E2} = 0.1 \text{ s}, \\
 x_{12} &= 0.55, \quad x_{13} = 0.53, \quad x_{23} = 0.6, \\
 x_{ad1} &= x_{ad2} = 1.712.
 \end{aligned}$$

根据上述参数,可得发电机#1和#2的各系数矩阵如下:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.625 & 27.48 & 11.781 \\ 0 & 0 & -2.85 & 2.857 \\ 0 & -0.637 & 0 & -10 \end{bmatrix}, \\
 A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.392 & 20.56 & 9.24 \\ 0 & 0 & -2.857 & 2.857 \\ 0 & -0.637 & 0 & -10 \end{bmatrix},$$

$$G_{12} = G_{13} = [0 \quad -27.49 \quad 0 \quad 0]^T,$$

$$G_{21} = G_{23} = [0 \quad -23.1 \quad 0 \quad 0]^T,$$

$$B_1 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 10]^T,$$

$$B_2 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 10]^T,$$

$$C_1 = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0],$$

$$C_2 = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

未加控制前,两台发电机均不稳定,但是(A_i, B_i)是完全可控,且(A_i, C_i)是完全可观测的,现用本文提出的方法对其进行控制.再根据关联矩阵 G_{ij} 的取值,有

$$\lambda_{12} = \lambda_{13} = 27.49^2, \quad \lambda_{21} = \lambda_{23} = 23.1^2,$$

并取常数分别为:

$$\gamma_i = 10, \quad \alpha_{ij} = 720.22, \quad \beta_{ij} = 16.82.$$

利用MATLAB中的Lmiedit工具箱,求得式(18)的可行解为

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 210.59 & -160.04 & -4.52 & -22.01 \\ -160.04 & 282.27 & 21.18 & -67.08 \\ -4.52 & 21.18 & 41.56 & -75.45 \\ -22.01 & -67.08 & -75.45 & 371.63 \end{bmatrix},$$

$$M_1 = [25.28 \quad 284.51 \quad 202.35 \quad -288.75],$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 272.41 & -202.26 & -7.58 & -33.82 \\ -202.26 & 388.89 & 37.90 & -115.54 \\ -7.58 & 37.90 & 60.99 & -88.10 \\ -33.82 & -115.54 & -88.10 & 473.37 \end{bmatrix},$$

$$M_2 = [34.75 \quad 352.74 \quad 246.69 \quad -379.05].$$

则有

$$K_1 = M_1 Y_1^{-1} = [1.58 \quad 1.67 \quad 5.54 \quad 0.74],$$

$$K_2 = M_2 Y_2^{-1} = [1.20 \quad 1.24 \quad 3.86 \quad 0.31].$$

把上面求出来的 K_1 和 K_2 代入式(19),并求其可行解为

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 9.18 & -0.27 & 0.24 & 0.78 \\ -0.27 & 0.02 & 0.07 & 0.10 \\ 0.24 & 0.07 & 3.92 & 1.08 \\ 0.78 & 0.10 & 1.08 & 1.48 \end{bmatrix},$$

$$N_1 = [36.10 \quad 8.27 \quad -9.93 \quad -12.71]^T,$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 8.99 & -0.32 & 0.19 & 0.66 \\ -0.32 & 0.03 & 0.09 & 0.10 \\ 0.19 & 0.09 & 3.76 & 0.99 \\ 0.66 & 0.10 & 0.99 & 1.40 \end{bmatrix},$$

$$N_2 = [35.38 \quad 8.06 \quad -8.81 \quad -11.05]^T,$$

则有

$$L_1 = Q_1^{-1} N_1 =$$

$$[76.75 \quad 1950.78 \quad 7.88 \quad -188.25]^T,$$

$$L_2 = Q_2^{-1} N_2 =$$

$$[56.28 \quad 1231.87 \quad -0.49 \quad -124.74]^T.$$

加上基于状态观测器的反馈控制后,利用上面得到的控制率,取 $\tau_{12} = 1 \text{ s}$, $\tau_{21} = 2 \text{ s}$,初始值设为 $[1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T$.则反馈后的状态轨线图2(#1发电机)和图3(#2发电机)所示.

观测误差的状态轨线图4(#1发电机)和图5(#2号发电机)所示.

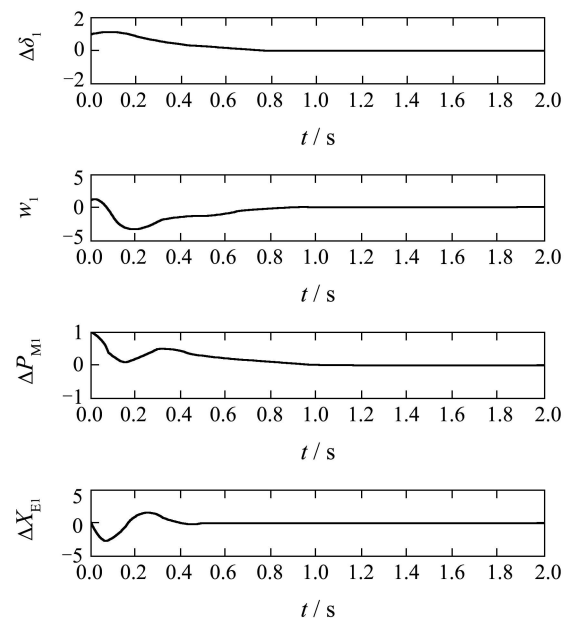


图2 受控后#1发电机的状态轨线图

Fig. 2 The state trajectories for the #1 generator after decentralized feedback based on observer

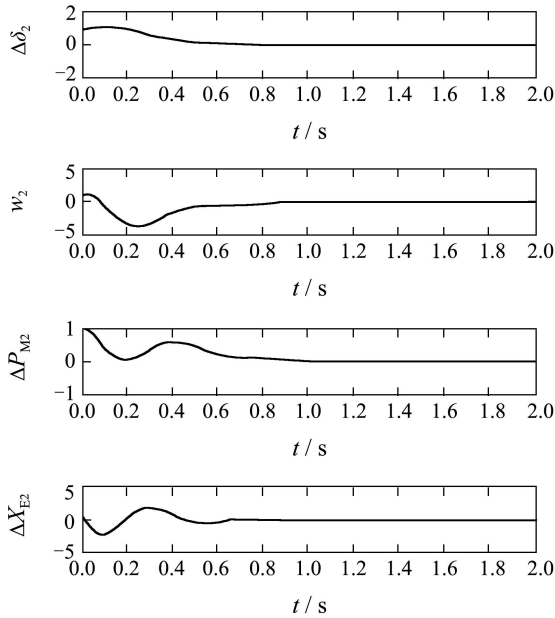


图3 受控后#2发电机的状态轨线图

Fig. 3 The state trajectories for the #2 generator after decentralized feedback based on observer

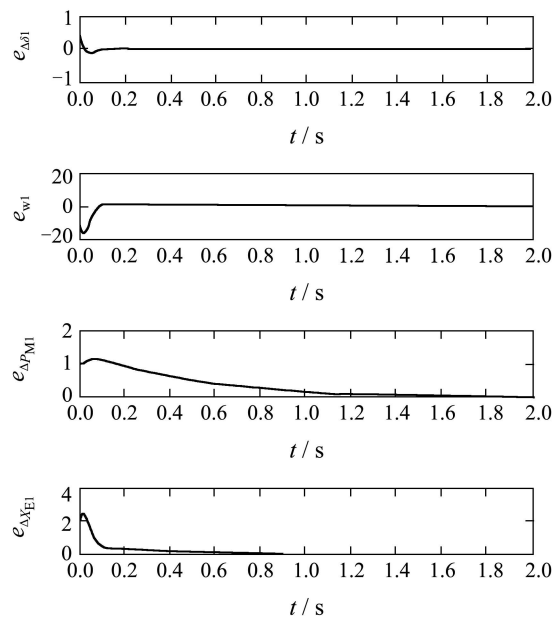


图4 #1发电机的观测误差轨线图

Fig. 4 The observation errors trajectories for the #1 generator

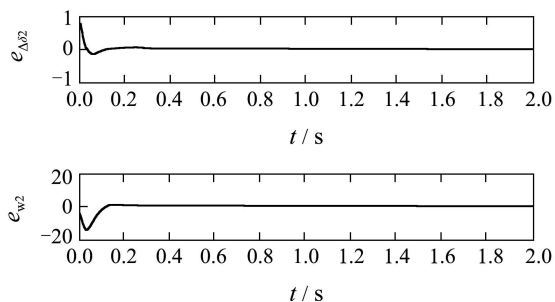


图5 #2发电机的观测误差轨线图

Fig. 5 The observation errors trajectories for the #2 generator

通过取不同的常数时滞时间和不同的初始状态, 本文还作了很多其他的仿真工作, 限于篇幅, 其结果不再一一列出. 同一仿真条件下, 只有时滞时间不同时, 输出曲线基本一致, 可见所设计的控制器是时滞无关的. 所有仿真结果中, 观测误差在2s内就已经为0, 系统状态也在2s内镇定, 控制效果显著.

5 结论 (Conclusion)

本文研究了数学模型包含非线性关联作用和状态时滞的带中间再热器的汽轮发电机组成的多机电力系统基于观测器的气门开度的时滞无关控制器的设计问题, 应用LMI的理论方法得出了适应该模型和观测器误差方程的时滞无关的渐近稳定条件, 并设计了控制器增益矩阵和观测器增益矩阵的求解算法. 当发电机台数 N 较多时, 文献[15–16]中求解的矩阵维数将会特别大, 而本文采用三角变换等已有方法, 把非线性关联项变换成了每个子系统第一个状态变量的二次约束条件, 故给出的是 N 个相互独立的LMI条件, 每个LMI的维数不因发电机台数增加而增大. 仿真结果表明本文的设计方案是有效的.

参考文献(References):

- [1] 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.
(SUN Yuanzhang, JIAO Xiaohong, SHEN Tielong. *Nonlinear Robust Control of Power System*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.)
- [2] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
(NI YiXin, CHEN Shousun, ZHANG BAOLin. *Theory and Analysis of Dynamic Power System*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)
- [3] KUNDER P. *Power Systems Stability and Control*[M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [4] 王玉振. 广义Hamilton控制系统理论—实现、控制与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
(WANG Yuzhen. *Generalized Hamilton Control System Theory-Realization, Control and Application*[M]. Beijing: Science Press, 2007.)

- [5] SILJAK D D, ZECEVIC A I. Robust decentralized turbine/governor control using linear matrix inequalities[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, 17(3): 715 – 722.
- [6] WANG Y Y, HILL D J, GUO G X. Robust decentralized control for multi-machine power systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1998, 45(3): 271 – 279.
- [7] GUO Y, HILL D J, WANG Y Y. Nonlinear decentralized control of large-scale power systems[J]. *Automatica*, 2000, 36(9): 1275 – 1289.
- [8] ZI Z R, FENG G, CHENG D Z. Nonlinear decentralized saturated controller design for power systems[J]. *IEEE Transacation on Control System Technology*, 2003, 11(4): 539 – 547.
- [9] 孙丽颖, 赵军. 考虑输入约束的发电机汽门非线性自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 601 – 606.
(SUN Liying, ZHAO Jun. Nonlinear adaptive control for the turbo steam valve with input constraints[J]. *Control Theory & Application*, 2009, 26(6): 601 – 606.)
- [10] LI W L, LIU S R, JIANG G Y. Adaptive robust backstepping design for turbine valve controller[C] // *Proceedings of the 6th World Congress on Control and Automation*. Dalian: [s.n.], 2006, 2: 7439 – 7443.
- [11] 刘碧玉, 桂卫华, 陈宁. 一类关联电力系统的时滞相关分散 H_∞ 控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(6): 702 – 706.
(LIU Biyu, GUI Weihua, CHEN ning. Delay-dependent decentralized H_∞ control for a class of interconnected power systems[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(6): 702 – 706.)
- [12] YU X F, TOMSOVIC K. Application of linear matrix inequalities for load frequency control with communication delays[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(3): 1508 – 1515.
- [13] DOU C X, JIA Q Q, JIN S J, et al. Delay-independent decentralized stabilizer design for large interconnected power systems based on WAMS[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2007, 29(10): 775 – 782.
- [14] BALARKO C, RAJAT M, BIKASH C P. Wide-area measurement based stabilizing control of power systems considering signal transmission delay[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2004, 19(4): 1971 – 1979.
- [15] DHBAIBI S, TLILI A S, BRAIEK N B. Decentralized observer based on feedback control for interconnected nonlinear systems: Application to multi-machine power systems[J]. *Journal of Automation & System Engineering*, 2008, 2(1): 1 – 17.
- [16] TLILI A S, BRAIEK N B. Decentralized observer based guaranteed cost control for nonlinear interconnected systems[J]. *International Journal of Control and Automation*, 2009, 2(2): 29 – 45.
- [17] 佟绍成, 王巍. 一类非线性时滞互联系统模糊分散输出反馈控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(10): 1108 – 1113.
(TONG Shaocheng, WANG Wei. Fuzzy decentralized output feedback control for a class of interconnected systems with time-delay[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(10): 1108 – 1113.)
- [18] SILVIU I N, ROGELIO L. On the passivity of linear delay systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(3): 460 – 464.

作者简介:

孙妙平 (1978—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为关联电力系统的稳定性研究与控制和时滞系统控制, E-mail: miaoping-sun@mail.csu.edu.cn;

年晓红 (1965—), 男, 博士生导师, 目前研究方向为多智能体系统的网络化控制和电机传动控制, E-mail: xhnian@mail.csu.edu.cn;

潘欢 (1983—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为时滞系统控制、多智能体协调控制和复杂网络控制, E-mail: ph0303@126.com.