

一类参数不确定系统的鲁棒镇定

张 敏¹, 刘京湘²

(1. 湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 长沙航空职业技术学院 电子信息工程系, 湖南 长沙 411100)

摘要: 给出了一类参数不确定性系统的鲁棒镇定方法, 首先对这类系统给出了一般描述, 即这种系统的系统阵、输入阵都包含不确定参数, 其非线性扰动项满足一定的约束条件. 其次讨论了上述系统的基于代数黎卡提方程的正定解的鲁棒镇定方法. 在应用方面, 以包含静止同步补偿器 (STATCOM) 的电力系统为例, 通过直接反馈线性化将上述系统转换为所讨论的线性系统. 仿真结果验证了所提方法的控制效果.

关键词: 参数不确定性; 非线性系统; 鲁棒镇定; 黎卡提方程; 静止同步补偿器

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Robust stabilization for a class of parametric uncertain systems

ZHANG Min¹, LIU Jing-xiang²

(1. School of Information and Electricity Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;

2. Department of Electronic Information Engineering, Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, Changsha Hunan 411100, China)

Abstract: The robust stabilization for a class of parametric uncertain systems, which contain a small nonlinear disturbance, was given. The model of the systems, where the nonlinear disturbance meets the given constraint, was generally described. The system and output matrices of the model contained uncertain parameters. The design of robust stabilization control of the systems was discussed based on the positive-defined solution of algebraic Riccati equation. The electric power system with static synchronous compensator (STATCOM) served as an example for application. The power system was transformed into the linear system with nonlinear disturbance via direct feedback linearization. The simulation results verify the effectiveness of the given controller.

Key words: parametric uncertainty; nonlinear system; robust stabilization; Riccati equation; static synchronous compensator

1 引言 (Introduction)

在实际控制过程中, 由于模型、测量的误差及其他因素, 不确定性会出现在控制系统中. 对这些不确定性给控制系统设计带来的问题的研究使鲁棒控制理论和方法得到了极大的发展^[1]. 众多研究者在各种不同模型中考虑不确定性的影响, 如文献[2~4]在时滞系统、文献[5]在采样系统中考虑了不确定性. 本文将考虑标称系统为线性系统, 并包含一个小的非线性扰动项的不确定系统, 这种系统特别适合于描述电力系统^[6]. 在以下的分析中将看到具有非线性特性的电力系统, 经由直接反馈线性化可补偿成为上述系统^[7]. 在第 2 节中将给出研究对象的一般描述和鲁棒镇定方法, 然后在第 3, 4 节将上述方法应用于包含静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 的单机-无穷大电力系统的励磁控制中, 最后给出了结论.

2 系统描述和鲁棒镇定 (System description and robust stabilization)

考虑由以下模型描述的控制对象:

$$\dot{x}(t) = [A + \Delta A(t)]x(t) + [B + \Delta B(t)]u(t) + G(t)g(x), \quad (1)$$

其中 $x \in \mathbb{R}^n$ 为状态向量, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为状态矩阵, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 为输入矩阵, $\Delta A(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\Delta B(t) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 分别表示状态矩阵和输入矩阵的不确定性, $g(x) \in \mathbb{R}^l$ 为与状态有关的非线性扰动, $G(t) \in \mathbb{R}^{n \times l}$ 为扰动矩阵.

设反映对象参数不确定性的矩阵 ΔA , ΔB 和扰动矩阵 $G(t)$ 可作以下结构分解:

$$\begin{cases} \Delta A(t) = LF(t)E_1, \\ \Delta B(t) = LF(t)E_2, \\ G(t) = L'F'(t)E'. \end{cases} \quad (2)$$

其中 $L \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $F \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $E_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $E_2 \in \mathbb{R}^{n \times m}$,

$L' \in \mathbb{R}^{n \times d}, F' \in \mathbb{R}^{l \times 1}, E' \in \mathbb{R}^{1 \times l}, F(t), F'(t)$ 为包含勒贝格(Lebesgue)可测元素的未知函数阵,且

$$F^T(t)F(t) \leq I, F'^T(t)F'(t) \leq I, \quad (3)$$

而 L, E_1, E_2, L', E' 为已知常数矩阵,且有

$$E_2^T E_2 = R > 0. \quad (4)$$

注1 对于本文中所研究的对象(1),考虑两种不确定性,即参数不确定性和扰动不确定性,分别由系统矩阵、输入矩阵和扰动矩阵中的相应项 $\Delta A, \Delta B, G$ 来表征.这种模型可广泛地应用于不确定性系统的鲁棒镇定问题中,并可在许多实际系统中表示参数不确定性.此模型在电力系统的稳定性控制中有重要应用.

注2 对系统中出现的扰动项,设 $g = g(x)$,且存在常数矩阵 W ,使

$$\|g(x)\| \leq \|Wx(t)\|. \quad (5)$$

对于上述控制对象,其鲁棒镇定问题的提法如下:对满足不确定界(3)~(5)的系统(1),设计线性反馈控制规律 $u(t) = -Kx(t)$,使所得到的闭环系统在所有允许的运行点的邻域内一致渐进稳定.在此情形下就说系统(1)可经由控制器 K 鲁棒镇定,相应的闭环系统是鲁棒稳定的.

引理1^[8] 设 X, Y, F 为适当维数的实矩阵,并且 $FF^T \leq I$,则对任给 $\varepsilon > 0$,有

$$XFY + Y^T F^T X^T \leq \frac{1}{\varepsilon^2} X^T X + \varepsilon^2 Y Y^T.$$

引理2^[9] 设 G, L_G, E_G, F_G 为适当维数的实矩阵,并且 $F_G F_G^T \leq I$,则对任给的满足 $\varepsilon^2 E_G^T E_G < I$ 的 $\varepsilon > 0$,有

$$(G + L_G F_G E_G)(G + L_G F_G E_G)^T \leq G(I - \varepsilon^2 E_G^T E_G)^{-1} G^T + \frac{1}{\varepsilon^2} L_G L_G^T.$$

引理3^[10] 设 $C = C^T, E = E^T, D$ 为适当维数的矩阵,则分块矩阵

$$F = \begin{bmatrix} C & D \\ D^T & E \end{bmatrix}$$

正定的充分必要条件为

$$E > 0, C - DE^{-1}D^T > 0,$$

或者 $C > 0, E - D^T C^{-1}D > 0$.

由以上引理,可得本文的主要结论:

定理 考虑系统(1),其不确定性满足(2)~(5).若下列代数黎卡提(Riccati)方程

$$A^T P + PA + PBB^T P - r^{-2} B_p^T R^{-1} B_p + r^2 E_1^T E_1 + W^T W + Q = 0 \quad (6)$$

存在正定解,则系统可经由线性反馈控制

$$u(t) = -Kx(t) \quad (7)$$

鲁棒镇定,其中 $K = r^{-2} R^{-1} (B^T P + r^2 E_2^T E_1)$, Q 为正定矩阵,且

$$B_p = B^T P + r^2 E_2^T E_1, \quad (8)$$

$$\bar{B}\bar{B}^T = r^{-2} LL^T + G(I - \lambda^2 E'^T E') + \lambda^{-2} L' L'^T. \quad (9)$$

r, λ 为给定,且满足 $0 < r, \lambda < 1, \lambda^2 E'^T E' < I$.

因篇幅所限,定理证明从略.

注3 控制器(7)为线性控制器,控制对象亦为线性模型,其非线性项 $g(x)$ 作为一种扰动处理,并满足(5).控制器(7)的设计算法如下:

- 1) 用状态方程(1)描述被控对象;
- 2) 对不确定性矩阵进行结构分解,如式(2)~(5);
- 3) 构造代数黎卡提方程(6);
- 4) 分别按照 $0 < r < 1$ 和 $\lambda^2 E'^T E' < I$ 的原则选择参数 r, λ ,此时,黎卡提方程有解^[11];
- 5) 求解黎卡提方程,得其正定解 P ,即可得到系统的鲁棒控制器.

3 应用——包含静止同步补偿器的单机无穷大电力系统 (Application – one-machine infinite-bus power system with STATCOM)

本节将前一节的控制器应用于包含静止同步补偿器^[12]的电力系统镇定控制中. STATCOM 是新一代无功补偿设备,应用于电力系统可有效地提高电力系统运行的稳定性.我们将首先给出包含 STATCOM 的单机-无穷大系统模型,然后引进直接反馈线性化(DFL)技术,将系统化成上节的控制对象,最后给出其鲁棒镇定控制器.

3.1 系统模型(System model)

图1为具有 STATCOM 的单机无穷大系统及其等值电路. STATCOM 由电压逆变器、电压支撑电容、连接电抗器或变压器等部分组成.若从系统级

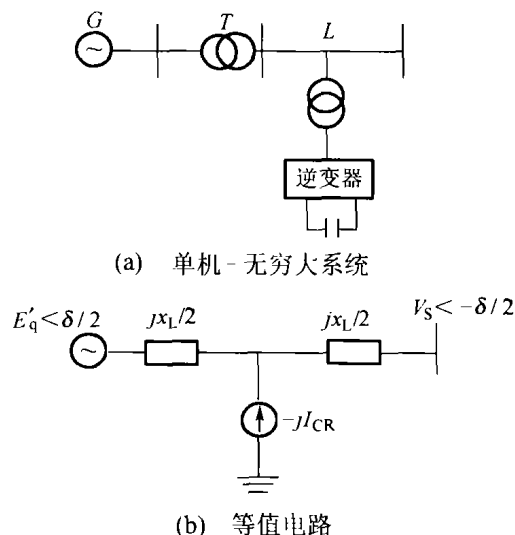


图1 包含 STATCOM 的单机-无穷大系统及其等值电路
Fig. 1 One-machine infinite-bus power system with STATCOM and its equivalent circuit

的角度来处理 STATCOM, 可将其等效为一个无功电流源, 并接于输电线路的电气中点, 由电路理论, 不难得到以下关系:

$$V = E'_q \cos \frac{\delta}{2} + \frac{x_L}{4} I_{CR}.$$

发电机采用二阶简化模型(摇摆方程), 可得包含 STATCOM 的单机无穷大系统动态模型为

$$\dot{\delta} = \omega, \quad (10)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{M}\omega + \frac{\omega_0}{M}(P_m - P_e). \quad (11)$$

电路动态方程

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_{d0}}E'_q + \frac{1}{T'_{d0}}u_f. \quad (12)$$

发电机输出电磁有功功率和无功功率分别为

$$P_e = E'_q V \cdot \frac{2 \sin \frac{\delta}{2}}{X_L} = \frac{E'^2_q}{X_L} \sin \delta + \frac{1}{2} E'_q I_{CR} \sin \frac{\delta}{2}, \quad (13)$$

$$Q_e = -E'_q V \cdot \frac{2 \cos \frac{\delta}{2}}{x_L} = -\frac{2}{x_L} E'^2_q \cos^2 \frac{\delta}{2} - \frac{1}{2} E'_q I_{CR} \cos \frac{\delta}{2}. \quad (14)$$

其他代数方程分别为

$$E_q = E'_q - (x_d - x'_d) I_d, \quad (15)$$

$$I_q = V \frac{2 \cos \frac{\delta}{2}}{X_L} = \frac{2}{X_L} E'_q \cos^2 \frac{\delta}{2} + \frac{1}{2} I_{CR} \cos \frac{\delta}{2}, \quad (16)$$

$$I_d = V \frac{2 \sin \frac{\delta}{2}}{X_L} = \frac{E'_q}{X_L} \sin \delta + \frac{1}{2} I_{CR} \sin \frac{\delta}{2}, \quad (17)$$

$$E_q = x_{ad} I_f. \quad (18)$$

式中: δ 为发电机功角; ω 为发电机转速; P_m 为输入机械功率; P_e 为电磁功率; ω_0 为同步转速; D 为阻尼系数; M 为机组惯性常数; E'_q 为交轴暂态电势; E_q 为交轴电势; u_f 为励磁电压; T'_{d0} 为直轴暂态短路时间常数; x_d 为机组直轴电抗; x'_d 为机组直轴暂态电抗; x_L 为线路(含变压器)电抗; Q 为无功功率; I_f 为励磁电流; I_d 为直轴电流; I_q 为交轴电流; x_{ad} 为机组励磁绕组和定子绕组互电抗。

方程(10)~(12)组成了包含 STATCOM 的单机-无穷大电力系统数学模型。

3.2 直接反馈非线性补偿(Direct feedback nonlinear compensation)

对系统模型(10)~(12), 引入反馈非线性补偿^[7], 以消去系统非线性. 对系统(13)求导, 并考虑到(12), (14), (15), (17), 同时令 $\Delta P_e = P_e - P_m$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{P}_e &= \frac{1}{T'_{d0}} \{ [u_f + (x_d - x'_d) I_d] I_q - P_m - \\ &\quad \frac{1}{2} T'_{d0} Q_e \omega + \frac{1}{2} T'_{d0} I_{CR} E'_q \sin \frac{\delta}{2} \} - \frac{1}{T'_{d0}} \Delta P_e + \\ &\quad \left(\frac{1}{x_L} E'_q \dot{E}'_q \sin \delta - \frac{1}{x_L} E'^2_q \sin \frac{\delta}{2} \cdot \omega \right). \end{aligned} \quad (19)$$

令

$$\begin{aligned} u &= I_q u_f + (x_d - x'_d) I_d I_q - P_m - \frac{1}{2} T'_{d0} Q_e \omega + \\ &\quad \frac{1}{2} T'_{d0} E'_q I_{CR} \sin \frac{\delta}{2}, \end{aligned} \quad (20)$$

由 $\dot{P}_e = \Delta \dot{P}_e$, 式(19)成为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_e &= -\frac{1}{T'_{d0}} \Delta P_e + \frac{1}{T'_{d0}} u + \\ &\quad \left(\frac{2}{x_L} E'_q \dot{E}'_q \cos \frac{\delta}{2} - \frac{1}{x_L} E'^2_q \omega \right) \sin \frac{\delta}{2}. \end{aligned}$$

于是在直接反馈非线性补偿规律(20)下, 系统模型被补偿为

$$\dot{\delta} = \omega, \quad (21)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{M}\omega - \frac{\omega_0}{M} \Delta P_e, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{P}_e &= -\frac{1}{T'_{d0}} \Delta P_e + \frac{1}{T'_{d0}} u + \left(\frac{2}{x_L} E'_q \dot{E}'_q \cos \frac{\delta}{2} - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{x_L} E'^2_q \cdot \omega \right) \sin \frac{\delta}{2}. \end{aligned} \quad (23)$$

注4 在模型(21)~(23)中, u 是新的控制量. 所得非线性补偿器(20)为动态补偿器, 它包含 STATCOM 无功电流的微分量. 对于单机-无穷大系统总有 $\delta < \pi$, 因而由式(19)可知 $I_q \neq 0$, 所以补偿器(20)必为非奇异. 采用这种补偿器能使系统的暂态过程缩短. 但式(23)中的最后一项的非线性经由上述直接反馈非线性补偿无法消除. 在此情形下, 对系统(21)~(23)利用第2节给出的鲁棒控制, 来确保包含 STATCOM 的单机-无穷大电力系统的暂态稳定。

3.3 系统的鲁棒镇定控制(Robust stabilization for the system)

在电力系统中, 当线路发生故障时, 线路电抗将发生变化. 此时, 反映到系统中的有关参数将包含不确定因素. 设 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [\delta \ \omega \ \Delta P]^T$, 考虑上述各种不确定因素, 则包含 STATCOM 的单机-无穷大电力系统将成为在第2节中所描述的带有非线性扰动项(与状态有关)的参数不确定系统:

$$\dot{x}(t) = [A + \Delta A(t)]x + [B + \Delta B(t)]u + G(t)g[x(t)], \quad (24)$$

并以(21)~(23)作为其标称系统. 式中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -D/M & \omega_0/M \\ 0 & 0 & -1/T'_{d0} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T'_{d0} \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \gamma \end{bmatrix}, g = \sin \frac{\delta}{2},$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}, \Delta B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\mu \end{bmatrix},$$

$$\gamma = \frac{2}{x_L} E'_q \dot{E}'_q \cos \delta - \frac{1}{x_L} E'^2_q.$$

系统的不确定性可有如下分解:

$$\Delta A = LFE_1, \Delta B = LEF_2, G = L'F'E'. \quad (25a)$$

且

$$\begin{cases} L = [0 & 0 & |\mu|_m]^T, F = [0 & 0 & \mu/|\mu|_m], \\ E_1 = \text{diag}(1, 1, 1), E_2 = [0 & 0 & -1]^T, \\ L' = [0 & 0 & |\gamma|_m]^T, \\ F' = \left[\frac{\gamma}{|\gamma|_m} \right], E' = 1, F^T F \leq I, F'^2 \leq 1. \end{cases} \quad (25b)$$

此外,还有

$$\|g(x)\| \leq \|W_1 x\|, W_1 = [1 \ 0 \ 0]. \quad (26)$$

由式(23)看出,不确定量 γ 实际上是一种在输电线路上的功率流动,应是有界的.这种有界性与机组励磁系统有关.由于机组强行励磁的作用,在最严重的情形下,励磁电压将上升5倍,考虑式(12),有

$$|\dot{E}'_q| \leq \left| [u_f - E_q] \frac{1}{T'_{d0}} \right| \leq 4 |E_q|_{\max} \frac{1}{|T'_{d0}|_{\min}}$$

由此得出

$$\begin{aligned} |\gamma| &\leq \left| E'_q \dot{E}'_q \frac{2}{x_L} \cos \delta \right| \leq \\ &\left| E'_q \dot{E}'_q \frac{2}{x_L} \right| \leq \frac{4}{|T'_{d0}|} |P_e|_{\max}. \end{aligned} \quad (27)$$

显然,满足分解式(25),以及不确定界满足(26), (27)的系统(24),就是满足式(2)~(5)的三阶参数不确定系统(1),因而可适用第2节中的鲁棒镇定控制.

由以上分析,可对包含静止同步补偿器的单机-无穷大电力系统的鲁棒镇定控制作以下叙述:

经由直接反馈非线性补偿(20),系统模型化为式(21)~(23),或更一般地成为包含不确定参数的模型(24),且满足式(25)~(27).于是系统有鲁棒控制

$$u = -Kx \quad (28)$$

使系统在所有运行点的邻域内渐进稳定,式中

$$K = r^{-2} R^{-1} (B^T P + r^2 E_2^T E_1). \quad (29)$$

其中 P 是代数黎卡提方程

$$\begin{aligned} A^T P + PA + P \bar{B} \bar{B}^T P - r^{-2} B_p^T R^{-1} B_p + \\ r^2 E_1^T E_1 + W^T W + Q = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

的对称正定解.式中 $B_p, \bar{B}$ 如第2节中定理所定义.

4 仿真研究(Simulation study)

考虑图1的系统,用以考察前述的鲁棒镇定控制的效果,以及 STATCOM 在电力系统稳定控制中的作用.系统参数如下: $x_d = 1.75$ pu, $x'_d = 0.24$ pu, $x_L = 0.66$ pu, $T'_{d0} = 7.1$ s, $D = 5$ pu, $M = 6.9$, $\omega_0 = 314.16$ rad/s, $x_{ad} = 1.71$ pu,励磁系统输出电压限制 $-3 \leq u_f \leq 5$,无穷大母线电压 $V_n = 1$ pu,时间常数 T'_{d0} 的扰动界为 $\Delta T'_{d0}|_{\max} = 0.12 T'_{d0}$.

在以上参数下,前述的直接反馈非线性补偿模型中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.725 & 54.53 \\ 0 & 0 & -0.141 \end{bmatrix}, \Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.141 \end{bmatrix}, \Delta B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\mu \end{bmatrix}.$$

选择 $|P_e| = 1.5$ pu. 可得有关不确定性参数的约束条件

$$|\mu| \leq 0.015, T'_{d0}|_{\min} = 6.248, |\gamma| \leq 0.96.$$

在黎卡提方程(30)中,选择 $r = 0.2, \lambda = 0.95$, $Q = \text{diag}(525, 18, 2100)$ 解出黎卡提方程,并由 $K = [k_1 \ k_2 \ k_3] = r^{-2} R^{-1} (B^T P + r^2 E_2^T E_1)$ 可得系统的鲁棒镇定控制律为

$$u = -42.34\delta - 15.48\omega - 6.53\Delta P_e.$$

由(20)得系统的励磁控制为

$$\begin{aligned} u_f = \frac{1}{I_q} [v_f - (x_d - x'_d) I_d I_q - P_m - \\ \frac{1}{2} T'_{d0} Q_e \omega + \frac{1}{2} T'_{d0} E'_q I_{CR} \sin \frac{\delta}{2}] \end{aligned}$$

上述控制器的控制效果由仿真结果给出,在仿真计算中,考虑系统以下运行过程:第一步,系统正常运行;第二步,在 $t_1 = 0.1$ s时,STATCOM 与线路连接点(即线路中点)发生三相对称短路故障;第三步,在 $t_2 = 0.2$ s时故障消失,系统恢复到故障前运行状态.在上述运行过程中,对以下两种情形进行仿真,第一种情形为 STATCOM 只提供固定无功电流,即直接反馈非线性补偿律为静态的($\frac{dI_{CR}}{dt} = 0$);第二种情形为 STATCOM 除提供固定无功电流以外,在系统暂态时,还使直接反馈非线性补偿为动态的($\frac{dI_{CR}}{dt} \neq 0$).两种情形的故障前稳态运行点均为 $\delta_0 = 60.78^\circ$, $P_{m0} = 1.1$ pu, $V_0 = 1.0$ pu. 图2给出了暂态过程中发电机功角、输出电磁功率和输出电压仿

真曲线. 图中虚线为第一种情形, 实线为第二种情形.

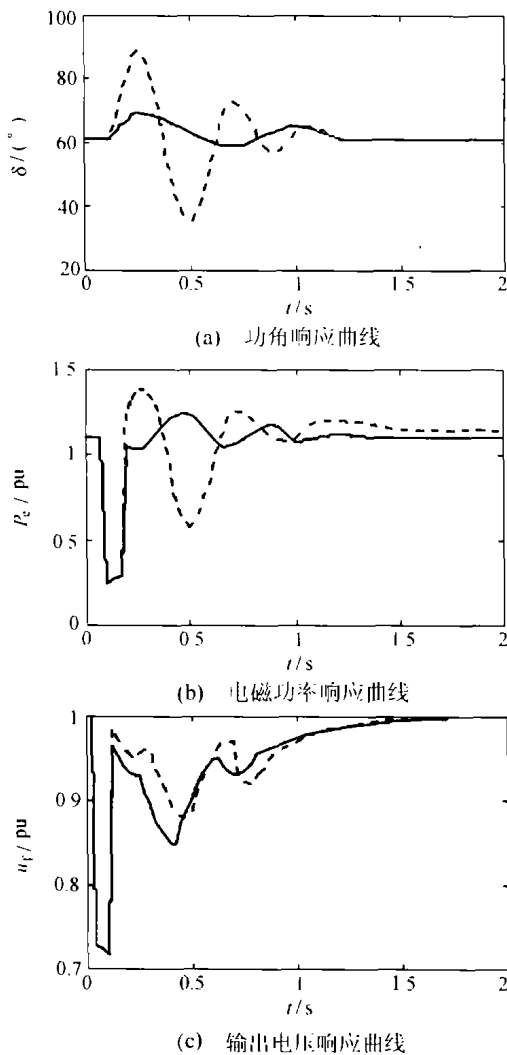


图2 仿真结果

Fig. 2 Simulation result

仿真结果显示, 所给控制器在两种不同的情形下, 均能使系统镇定. 但与第一种情形相比较, 第二种情形(即考虑 STATCOM 的无功电流的变化, 使直接反馈非线性补偿为动态的)能提供更快的响应速度, 使机组运行达到稳态的时间更为缩短, 既由 STATCOM 为系统提供了更大的阻尼.

5 结论(Conclusion)

本文中研究的系统模型可用以描述一类参数不确定系统, 尤其适合于电力系统. 同时, 对一类非线性系统, 通过直接反馈线性化, 可将其补偿为上述参数不确定线性系统. 而其中不能经由直接反馈线性化消去的非线性项可作为一种扰动来处理, 当然这样做必须满足一定的约束条件. 对于所给参数不确定线性系统, 第2节定理给出了一种线性反馈鲁棒镇定控制方法. 在定理的证明过程中, 应用李雅普诺

夫直接法说明了所设计的状态反馈控制能使系统渐进稳定. 这表明, 对所允许的系统参数不确定性, 上述控制具有鲁棒性. 将上述鲁棒镇定应用于包含静止同步补偿器的单机-无穷大电力系统的励磁控制中. 仿真实例显示了这种鲁棒镇定控制的效果和 STATCOM 对电力系统稳定性的作用是明显的.

参考文献(References):

- [1] 吴敏, 桂卫华. 现代鲁棒控制[D]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1998.
(WU Min, GUI Weihua. *Modern Robust Control* [M]. Changsha: Press of Central-South University of Technology, 1998.)
- [2] 孙继涛, 张银萍. 变系数微分方程的稳定性[J]. 控制理论与应用; 1998, 15(4): 642 - 645.
(SUN Jitao, ZHANG Yinping. On the stability of linear differential equation with varying coefficients [J]. *Control Theory & Applications*, 1998, 15(4): 642 - 645.)
- [3] SILVIU I N, SOUZA C E, LUE D, et al. Robust exponential stability of uncertain systems with time-varying delays [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(5): 743 - 748.
- [4] MAGDI S M. Linear parameter-varying time-delays systems stability and L_2 -gain controllers [J]. *Int J Control*, 2000, 73(6): 481 - 494.
- [5] EZZINE Jelel. Robust stability bounds for sampled-data systems: the unstructured perturbation [C] // *Proc of the American Control Conference*, Seattle: [s. n.], 1995, 3353 - 3357.
- [6] WANG Youyi, DAVID J. Hill, GUO Guoxiao. Robust decentralized control for multimachine power systems [J]. *IEEE Trans on Circuit and System-1*, 1998, 45(3): 271 - 279.
- [7] WANG Y, DAVID J Hill, RICHARD H Middleton, et al. Transient stability enhancement and regulation of power systems [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1993, 8(2): 620 - 627.
- [8] KHARGONEKAR P P, PETERSEN I R, ZHOU K. Robust stabilization of uncertain systems: quadratic stabilizability and H_∞ control theory [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(4): 356 - 361.
- [9] WANG Y, XIE L, de SOUZA C Eouza. Robust control of a class of uncertain nonlinear systems [J]. *System Control Letter*, 1992, 19(6): 139 - 149.
- [10] KREINDLER E. Condition for nonnegativeness of partitioned matrices [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1972, 17(5): 147 - 158.
- [11] XIE L, FU M, de SOUZA C E. H_∞ control and quadratic stabilization of systems with parameter uncertainty via output feedback [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(5): 1253 - 1256.
- [12] 孙元章, 赵枚, 黎雄, 等. STATCOM 控制的电力系统稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(11): 1 - 5.
(SUN Yuanzhang, ZHAO Mei, LI Xiong, et al. Transient stability analysis for power system with STATCOM [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(11): 1 - 5.)

作者简介:

张 敏 (1963 —), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统控制理论与技术、非线性系统分析与控制, E-mail: zm0313@163.net;

刘京湘 (1956 —), 男, 高级讲师, 研究方向为机械电子工程.