

# 计及时滞影响的电力系统稳定器的 $H_\infty$ 控制

蔡超豪<sup>1</sup>, 赵敏<sup>2</sup>, 郝福忠<sup>3</sup>

(1. 沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 沈阳职业技术学院, 辽宁 沈阳 110045;  
3. 河南省电力公司安阳供电公司, 河南 安阳 455000)

**摘要:** 研究了计及时滞影响的电力系统稳定器(PSS)的  $H_\infty$  控制。基于  $H_\infty$  鲁棒控制理论和线性矩阵不等式处理方法, 利用 Matlab/LMI 工具箱, 以联接到远方系统的发电机为例, 进行了时滞系统 PSS 的  $H_\infty$  控制器设计。应用 Pade 逼近法近似时间延迟, 采用 Matlab/Simulink 技术进行数字仿真。仿真及分析表明, 所设计的 PSS 具有很好的对时滞的不敏感性, 可以抑制振荡, 提高电力系统的稳定性。

**关键词:** 时滞; 电力系统稳定器;  $H_\infty$  控制; 线性矩阵不等式

## $H_\infty$ control of PSS in consideration of time-delay

CAI Chao-hao<sup>1</sup>, ZHAO Min<sup>2</sup>, HAO Fu-zhong<sup>3</sup>

(1. Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China; 2. Shenyang Technical College, Shenyang 110045, China;  
3. Henan Anyang Power Supply Company, Anyang 455000, China)

**Abstract:** The paper presents the design of  $H_\infty$  control of PSS in consideration of time-delay by LMI technique. Based on MATLAB/LMI toolbox, the design of  $H_\infty$  PSS for single machine distant power system is completed. By using of MATLAB/simulink and pade approximation, the simulation and analysis show that the controller can not only endure the time-delay, but also raise the dynamic stability of power system.

**Key words:** Time-delay; PSS;  $H_\infty$  Control; LMI

中图分类号: TM712; TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)24-0019-05

## 0 引言

应用 PSS 抑制系统低频振荡是一种经济有效的方法。传统的 PSS 设计, 一般基于本地测量信号, 信号传输的时间延迟(时滞)影响很小, 可以忽略不计。但是随着互联电力系统规模的不断扩大, 仅靠本地反馈信号的控制, 不能很好地抑制互联电网的区间低频振荡, 应用广域信号进行控制效果较好。因此开展基于广域测量系统 WAMS (wide area measurement system) 的 PSS 控制的研究具有重大的理论和实际意义<sup>[1,2]</sup>。

WAMS 给电力系统带来新的契机, 也带来了新的问题, 信号在 WAMS 中传输存在着明显的时滞。控制系统中时滞的存在往往导致系统的不稳定和性能变差, 所以在引入 WAMS 的同时, 必须考虑时滞的影响。在工程实际中, 时滞通常是可以估计其上界  $d^*$  的, 并不要求在任意时滞下都能保持系统稳定, 仅对时滞  $d \leq d^*$  能保持系统稳定就可(称为时滞依赖稳定性)。线性矩阵不等式(LMI)理论是研究时滞影

响的基本理论之一, 本文采用 LMI 理论来研究存在时滞影响的电力系统稳定器  $H_\infty$  控制的设计。为了方便起见, 以下将存在信号传输时滞影响的系统称为时滞系统(time-delay system), 将计及时滞影响、应用  $H_\infty$  控制理论设计的 PSS 称为时滞系统  $H_\infty$ -PSS。

实际运行的工程系统都会受到不确定性的影响, 机电系统就是这样一类典型的具有不确定性的系统。一般的 PSS 设计由于忽视了系统的不确定性, 往往难以达到预期的性能指标。本文采用  $H_\infty$  现代鲁棒控制理论<sup>[3]</sup>来进行 PSS 的设计, 它以某一闭环传递函数的  $H_\infty$  范数作为性能指标谋求最优化, 在系统建模和控制器设计过程中考虑了不确定性的影响, 因而所设计的 PSS 具有很好的鲁棒性, 能满足期望的性能指标。

## 1 时滞系统的输出反馈 $H_\infty$ 控制

### 1.1 性能分析

考虑以下广义状态时滞系统

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_d\mathbf{x}(t-d(t)) + \mathbf{B}_1\mathbf{w}(t) + \\ &\quad \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t) \\ z(t) &= \mathbf{C}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{11}\mathbf{w}(t) + \mathbf{D}_{12}\mathbf{u}(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}_2\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{21}\mathbf{w}(t) \\ x(t) &= 0, t \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}(t) \in R^n$  是系统的状态向量,  $\mathbf{u}(t) \in R^p$  是控制输入,  $\mathbf{w}(t) \in R^r$  是有限能量的外部扰动,  $z(t) \in R^m$  是被控输出,  $y(t) \in R^q$  是测量输出,  $d(t)$  是满足如下条件的时滞:

$$0 \leq d(t) < \infty, \quad \dot{d}(t) \leq \bar{m} < 1 \quad (2)$$

而  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{A}_d$ 、 $\mathbf{B}_1$ 、 $\mathbf{B}_2$ 、 $\mathbf{C}_1$ 、 $\mathbf{C}_2$ 、 $\mathbf{D}_{11}$ 、 $\mathbf{D}_{12}$ 、 $\mathbf{D}_{21}$  是已知的实常数矩阵,  $(\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}_2$ ) 能稳定,  $(\mathbf{C}_2$ 、 $\mathbf{A}$ ) 能检测。如果时滞系统(1)的状态不是直接可测量的, 则需要采用输出反馈控制器。考虑由以下状态方程实现的动态输出反馈  $H_\infty$  控制器

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= \mathbf{A}_c x_c(t) + \mathbf{B}_c y(t) \\ u(t) &= \mathbf{C}_c x_c(t) + \mathbf{D}_c y(t) \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $x_c(t) \in R^k$  是控制器的状态向量,  $\mathbf{A}_c$ 、 $\mathbf{B}_c$ 、 $\mathbf{C}_c$  和  $\mathbf{D}_c$  是待定的实常数矩阵, 控制器的参数矩阵为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_c & \mathbf{C}_c \\ \mathbf{B}_c & \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

由时滞系统(1)和控制器(3)构成的闭环系统为:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\mathbf{x}}}(t) &= \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{x}}(t) + \bar{\mathbf{A}}_d\bar{\mathbf{x}}(t-d(t)) + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{w}(t) \\ u(t) &= \bar{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{x}}(t) + \bar{\mathbf{D}}\mathbf{w}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{W}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{X}\mathbf{A}^T + \mathbf{A}\mathbf{X} & \mathbf{X}\mathbf{C}_1^T & \mathbf{B}_1 & \mathbf{A}_d & \mathbf{X} \\ \mathbf{C}_1\mathbf{X} & -\gamma\mathbf{I} & \mathbf{D}_{11} & 0 & 0 \\ \mathbf{B}_1^T & \mathbf{D}_{11}^T & -\gamma\mathbf{I} & 0 & 0 \\ \mathbf{A}_d^T & 0 & 0 & -(1-\bar{m})\mathbf{Q} & 0 \\ \mathbf{X} & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{Q}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{W}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_3 & 0 & 0 \\ \mathbf{W}_4 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T\mathbf{Y} + \mathbf{Y}\mathbf{A} + \mathbf{Q} & \mathbf{Y}\mathbf{B}_1 & \mathbf{C}_1^T & \mathbf{Y}\mathbf{A}_d \\ \mathbf{B}_1^T\mathbf{Y} & -\gamma\mathbf{I} & \mathbf{D}_{11}^T & 0 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{D}_{11} & -\gamma\mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{A}_d^T\mathbf{Y} & 0 & 0 & -(1-\bar{m})\mathbf{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_3 & 0 & 0 \\ \mathbf{W}_4 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & \mathbf{Y} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{x}}(t) &= \begin{bmatrix} x(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{B}_2\mathbf{D}_c\mathbf{C}_2 & \mathbf{B}_2\mathbf{C}_c \\ \mathbf{B}_c\mathbf{C}_2 & \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \\ \bar{\mathbf{A}}_d &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2\mathbf{D}_c\mathbf{D}_{21} \\ \mathbf{B}_c\mathbf{D}_{21} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= [\mathbf{C}_1 + \mathbf{D}_{12}\mathbf{D}_c\mathbf{C}_2 \quad \mathbf{D}_{12}\mathbf{C}_c] \\ \mathbf{D} &= \mathbf{D}_{11} + \mathbf{D}_{12}\mathbf{D}_c\mathbf{D}_{21} \end{aligned}$$

其中:  $\mathbf{A} \sim \mathbf{D}_{21}$  见式(1),  $\mathbf{A}_c \sim \mathbf{D}_c$  见式(3)。

我们关心的是对给定的正常数  $\gamma$ , 设计一个输出反馈  $H_\infty$  控制器(3), 使得闭环系统(5)具有以下性质:

① 系统是渐近稳定的, 即闭环系统状态空间的所有特征值均在左半开复平面中;

② 从扰动输入  $w(t)$  到被控输出  $z(t)$  的闭环传递函数的  $H_\infty$  范数不超过给定的常数  $\gamma$ 。

具有这样性质的控制器称为系统(1)的一个  $\gamma$ -次优输出反馈  $H_\infty$  控制器。  $\gamma$  反映了系统对外部扰动的抑制能力, 也称为系统对外部扰动的抑制度。  $\gamma$  越小, 表明系统的性能越好。

### 1.2 输出反馈 $H_\infty$ 控制器的可行性及其求解

以下两条定理分别给出了系统(1)存在  $H_\infty$  控制器的可行性条件及其求解方法<sup>[4-6]</sup>。

定理 1 考虑系统(1)和给定的正常数  $\gamma$ , 设

$[\mathbf{W}_1^T \quad \mathbf{W}_2^T]^T$  和  $[\mathbf{W}_3^T \quad \mathbf{W}_4^T]^T$  分别为  $[\mathbf{B}_2^T \quad \mathbf{D}_{12}^T]^T$  和  $[\mathbf{C}_2 \quad \mathbf{D}_{21}]^T$  的正交补矩阵。如果对给定的对称正定矩阵  $\mathbf{Q}$ , 存在对称正定矩阵  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$ , 满足如下三个线性矩阵不等式(6)~(8), 则系统(1)存在一个  $\gamma$ -次优输出反馈  $H_\infty$  控制器。

定理 2 系统 (1) 的  $r$ -次优输出反馈 H $\infty$  控制器 K 可由求解下列矩阵不等式得出:

$$\Omega + BKC + C^T K^T B^T < 0 \quad (9)$$

式中

$$B = [\hat{B}_2^T P \quad 0 \quad \hat{D}_{12}^T \quad 0]^T$$

$$C = [\hat{C}_2 \quad \hat{D}_{21}^T \quad 0 \quad 0]$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & P\hat{B}_1 & \hat{C}_1^T & P\hat{A}_d \\ \hat{B}_1^T P & -\gamma I & D_{11}^T & 0 \\ \hat{C}_1 & D_{11} & -\gamma I & 0 \\ \hat{A}_d^T P & 0 & 0 & -(1-\bar{m})Q \end{bmatrix}$$

其中  $\Omega_{11} = \hat{A}^T P + P\hat{A} + E^T Q E$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{A}_d = \begin{bmatrix} A_d \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E = [I \quad 0]$$

$$\hat{B}_1 = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{B}_2 = \begin{bmatrix} B_2 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix},$$

$$\hat{C}_1 = [C_1 \quad 0], \quad \hat{C}_2 = \begin{bmatrix} C_2 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix},$$

$$\hat{D}_{12} = [D_{12} \quad 0], \quad \hat{D}_{21} = \begin{bmatrix} D_{21} \\ 0 \end{bmatrix}$$

### 1.3 输出反馈 H $\infty$ 控制器的设计步骤

输出反馈 H $\infty$  控制器的设计远比状态反馈 H $\infty$  控制器复杂, 其设计步骤如下:

(1) 准备好时滞系统的模型和参数。

(2) 根据定理 1, 研究时滞系统存在输出反馈 H $\infty$  控制器的可行性和求解矩阵 X、Y。

将式 (6) 展开得:

$$\begin{bmatrix} xlm_{11} & xlm_{12} & W_1^T A_d & W_1^T X \\ xlm_{12}^T & -\gamma & 0 & 0 \\ A_d^T W_1 & 0 & xlm_{33} & 0 \\ XW_1 & 0 & 0 & -Q^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (10)$$

其中:  $xlmi_{11} = W_1^T (XA^T + AX)W_1 +$

$$W_2^T C_1 XW_1 + W_1^T X C_1^T W_2 - W_2^T \gamma W_2$$

$$xlmi_{12} = W_1^T B_1 + W_2^T D_{11}$$

$$xlmi_{33} = -(1-\bar{m})Q$$

式 (11) 为对称矩阵, 只要求出对角元素和上三角元素就可。

将式 (7) 展开得:

$$\begin{bmatrix} ylm_{11} & ylm_{21}^T & W_3^T Y A_d \\ ylm_{21} & -\gamma & 0 \\ A_d^T Y W_3 & 0 & -(1-\bar{m})Q \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

其中:  $ylmi_{11} = W_3^T (A^T Y + Y A + Q) W_3 +$

$$W_4^T B_1^T Y W_3 + W_3^T Y B_1 W_4 - W_4^T \gamma W_4$$

$$ylmi_{21} = C_1 W_3 + D_{11} W_4$$

进行 H $\infty$  控制的可行性研究时, 简捷有效的方法是应用 Matlab/LMI 工具箱。通过正交分解 (QR) 计算  $W_1 \sim W_4$ 。将线性矩阵不等式 (10)、(11) 和 (8) 采用内部描述方法<sup>[4, 7]</sup> 输入到 Matlab 命令窗口, 用 LMI 求解器 feasp 来检验时滞系统存在 H $\infty$  控制器的可行性, 用求解器 gevp 求得对称正定矩阵 X、Y ( $X, Y \in R^{n \times n}$ )。

(3) 通过  $I - XY$  的奇异值分解 (SVD), 得到满足

$$MN^T = I - XY \quad (12)$$

的满列秩矩阵 M 和 N ( $M$  和  $N \in R^{n \times k}$ )。

(4) 从线性方程

$$\begin{bmatrix} Y & I \\ N^T & 0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} I & X \\ 0 & M^T \end{bmatrix} \quad (13)$$

计算对称正定矩阵  $P$  ( $P \in R^{2n \times 2n}$ )。

(5) 对上一步求得的矩阵 P, 应用定理 2 用 LMI 求解器 basiclmi 来求解 (9), 得出 H $\infty$  控制器 K。

(6) 根据需要 will 控制器 K 进行降阶。

## 2 存在时滞影响的电力系统稳定器 H $\infty$ 控制 (H $\infty$ PSS) 的设计实例

### 2.1 电力系统的参数和线性化模型

以联接到远方系统的发电机为例<sup>[8]</sup>, 进行 H $\infty$  PSS 的设计。设研究的为一台 600 MW 的汽轮发电机组 G 经升压变压器 T、双回路输电线路 L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub> 与远方系统连接, 其参数为:  $x_d = 2.543$ ,  $x_d' = 0.32$ ,  $T_{d0} = 10$  s,  $D = 5.0$ ,  $H = 8$  s,  $\omega_0 = 314$  rad/s,  $x_T = 0.1$ ,  $x_{L1} = x_{L2} = 1.46$ , 输出功率为发电机额定功率的 50%。发电机组常规的励磁调节器采用按发电机端电压偏差  $\Delta V_t$  的比例-积分-微分 (PID) 反馈调节方式, 传递函数如式 (14)。

$$\frac{k_{DS} + k_p}{k_{IS} + 1} = \frac{105s + 150}{5s + 1} \quad (14)$$

H $\infty$  PSS 是在保留 PID 励磁调节器外, 增加一个按远方系统转速增量  $\Delta \omega$  进行辅助调节的反馈控制器。将发电机-输电系统模型线性化, 并与励磁调节器合并构成 H $\infty$  PSS 的控制对象, 其状态空间描述如

式(15)

$$\begin{cases} \dot{X} = a_g X + b_g U \\ Y = c_g X + d_g U \end{cases} \quad (15)$$

式中

$$\begin{aligned} b_g &= [1 \quad 1.701 \quad 0 \quad 1.071]^T \\ c_{g1} &= [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \\ d_g &= 0 \end{aligned}$$

$$a_g = \begin{bmatrix} -0.215 & 0.691 & -1.826 & 2.089 \\ -39.3 & -0.625 & 0 & 0 \\ -0.134 & -0.0015 & -1.149 & 1.316 \\ 0 & 0 & -1 & -0.2 \end{bmatrix}$$

所以得出  $H_\infty$ PSS 的控制对象的状态空间模型如下式(为了简便起见,以下的步骤直接应用 Matlab 工具箱函数来表述<sup>[9]</sup>):

$$G_1 = ss(a_g, b_g, c_{g1}, d_g) \quad (16)$$

按照加权混合灵敏度设计方法<sup>[3]</sup>, 取加权函数为

$$\begin{cases} W_s = 0.004 \times tf([1, 50], [1, 4]) \\ W_R = 1 \\ W_T = tf([1, 10], [1, 380]) \end{cases} \quad (17)$$

利用 `augtf.m` 函数构成加权被控对象的增广模型

$$tss = augtf(G_1, W_s, W_R, W_T) \quad (18)$$

利用 `branch.m` 函数得出增广模型的系数矩阵(6 阶)

$$[A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}] = \text{branch}(tss) \quad (19)$$

2.2 应用定理1对存在 $H_\infty$ PSS的可行性进行研究

为了求得  $[B_2^T \quad D_{12}^T]^T$  和  $[C_2 \quad D_{21}]^T$  的正交补矩  $[W_1^T \quad W_2^T]^T$  和  $[W_3^T \quad W_4^T]^T$ , 采用下列正交分解公式得出  $W_1 \sim W_4$  (简便地应用 Matlab 工具箱函数来表述)

$$\begin{cases} a = [B_2^T, D_{12}^T]^T; [Q_1, R_1] = qr(a, 0); \\ W_1 = Q_1(1:6, :); W_2 = Q_1(7:9, :) \\ b = [C_2, D_{21}]^T; [Q_2, R_2] = qr(b, 0); \\ W_3 = Q_2(1:6, :); W_4 = Q_2(7, :); \end{cases} \quad (20)$$

取  $A_d = 0.05 \times A$ ;  $\gamma = 0.8$ ;  $m = 0.5$ ;  $Q = \text{eye}(6)$ .

将式(19)、(20)所得的各系数矩阵以及式(10)、(11)和(8)的内部描述(命名为 `lmisys`)输入 Matlab 命令窗口, 检验 `lmisys` 存在  $H_\infty$ PSS 的可行性, 并求出矩阵  $X$ 、 $Y$ :

$$[tmin, xfeas] = \text{feasp}(\text{lmisys})$$

$$\begin{aligned} [\alpha, \text{popt}] &= \text{gevp}(\text{lmisys}, 1, \\ & [0, 0, 27, 0, 1], [], [], -10); \\ X &= \text{dec2mat}(\text{lmisys}, \text{popt}, 1), \\ Y &= \text{dec2mat}(\text{lmisys}, \text{popt}, 2) \end{aligned}$$

得到  $t_{\min} = -0.0596 < 0$ , 表示存在  $H_\infty$ PSS 的可行性, 求得的  $X$ 、 $Y$  为 6 阶对称正定矩阵。

2.3 应用定理 2 对  $H_\infty$ PSS 进行求解

(1) 通过奇异值分解, 得到满足式(12)的满列秩矩阵  $M$  和  $N$  ( $M$  和  $N \in R^{6 \times 6}$ )

$$I = \text{eye}(6); [U, S, V] = \text{svd}(I - X^*Y);$$

$$M = U; N = V^*S^*;$$

(2) 从线性方程(13)计算对称正定矩阵  $P$  ( $P \in R^{12 \times 12}$ )

$$O = \text{zeros}(6);$$

$$P = [Y, I; N, O]^* \text{inv}([I, X; O, M]);$$

(3) 通过求解器 `basiclmi` 来求解(9), 得出控制器  $K$  ( $K \in R^{7 \times 7}$ )

$$\text{option} = ['0', '0', '100', '0', '0'];$$

$$K = \text{basiclmi}(\Omega, B', C, \text{option})$$

$$Ac = K(2:7, 2:7); Bc = K(2:7, 1);$$

$$Cc = K(1, 2:7); Dc = K(1, 1);$$

由  $A \sim D_{21}$ 、 $Ac \sim Dc$  得出闭环系统(5)的系数矩阵

$\bar{A} \sim \bar{D}$ , 检验得出: ①闭环系统状态空间的所有特征值(eig)均在左半开复平面中, 所以闭环系统是渐近稳定的; ② $H_\infty$ 范数(`normhinf`)为 0.795 2, 不超过给定的常数  $\gamma$  ( $\gamma = 0.8$ )。所以控制器  $K$  是系统(1)的一个  $\gamma$ -次优输出反馈  $H_\infty$ 控制器。

(4) 将控制器  $K$  的阶数降为 3 阶

$$Kc = ss(Ac, Bc, Cc, Dc);$$

$$K3 = \text{balmr}(Kc, 1, 3); Kzpk = \text{zpk}(K3)$$

得出  $H_\infty$ PSS 的传递函数表达式为

$$K(s) = K_{zpk} = \frac{0.23(s + 2.38e^5)(s + 33.5)(s + 7.84)}{(s + 4390)(s + 1970)(s + 28.9)} \quad (21)$$

### 3 仿真示例及结果分析

用以上所得的  $H_\infty$ PSS 进行 Matlab/Simulink 仿真<sup>[10]</sup>, 应用 Pade 逼近法<sup>[11]</sup>近似时间延迟, 作发电机组与远方系统区间功角振荡曲线如图 1 所示。扰动为  $t = 0$  s 时发电机的功率突然增大(额定功率的)10%。从图中可以看出, 所得到的  $H_\infty$ PSS 对于时滞  $d$  达到 300 ms (远大于时滞上界)的电力系统, 仍能有效地保持系统稳定。

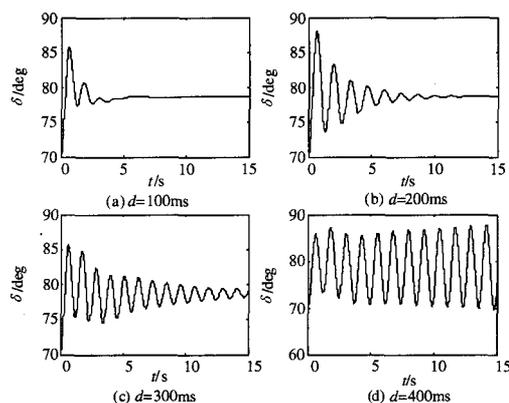


图1 不同滞的区间功角振荡曲线

Fig 1 Power angle oscillation of different time-delay

设存在时滞  $d=100$  ms, 联络线路送端于  $t=0.2$  s 发生三相短路故障,  $t=0.35$  s 故障消除, 进行 Matlab/Simulink 仿真, 得出区间功角和角频率振荡仿真曲线分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示。图中实线为具有考虑时滞设计的  $H_\infty$  PSS (式 (21)), 系统振荡很快地消除, 保持了稳定; 图中虚线系相同的系统发生相同的故障, 但采用未考虑时滞影响而设计的  $H_\infty$  PSS<sup>[8]</sup>, 系统失去稳定。

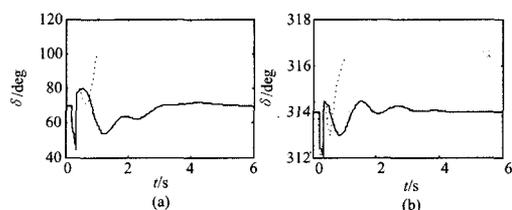


图2 短路故障后功角和角频率振荡曲线

Fig2 Power angle and angular frequency oscillation

#### 4 结束语

本文用实例说明了应用  $H_\infty$ /LMI 理论和 Matlab/LMI 工具箱设计存在时滞影响的电力系统稳定器  $H_\infty$  控制 ( $H_\infty$  PSS) 的方法, 所设计的控制器具有较好的时滞不敏感性, 对外部扰动能保持电力系统动态稳定。文章对设计步骤作了详细的介绍, 可以推广应用用于其他设备的时滞输出反馈  $H_\infty$  控制。

#### 参考文献

- [1] 江全元, 张鹏翔, 曹一家, 等. 计及反馈信号时滞影响的广域 FACTS 阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 82-88.  
JIANG Quan-yuan, ZHANG Peng-xiang, CAO Yi-jia, et al. Wide-area FACTS Damping Control in Consideration of Feedback Signals Time Delays[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 82-88.
- [2] 王成山, 石颀. 考虑时间延迟影响的电力系统稳定器

设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 16.

WANG Cheng-shan, SHI Jie. PSS Designing with Consideration of Time Delay Impact[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 1-6.

- [3] 申铁龙.  $H_\infty$  控制理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

SHEN Tie-long.  $H_\infty$  Control Theory and Its Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.

- [4] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

YU Li. Robust Control—Linear Matrix Inequality Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

- [5] 王德进.  $H_2$  和  $H_\infty$  优化控制理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.

WANG De-jin.  $H_2$  and  $H_\infty$  Optimal Control Theory[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001.

- [6] Jeung E T, Kim J H, Park H. B.  $H_\infty$  Output Feedback Controller Design for Linear Systems with Time-varying Delayed State[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(7): 971-974.

- [7] 蔡超豪, 刘峰. 计及时滞影响的静止无功补偿器的  $H_\infty$  控制[J]. 电力科学与工程, 2008, (1).

CAI Chao-hao, LIU Feng.  $H_\infty$  Control of TCSC in Consideration of Time-delay[J]. Electric Power Science and Engineering, 2008, (1): 10-14.

- [8] 蔡超豪. 可抑制低频振荡的鲁棒电力系统稳定器设计[J]. 电力科学与工程, 2006, (1): 22-26.

CAI Chao-hao. Design of Power System Stabilizer for Damped Low-frequency Oscillation[J]. Electric Power Science and Engineering, 2006, (1): 22-26.

- [9] Gahinet P, Nemirovski A, Laub A J. LMI Control Toolbox—for Use with Matlab[M]. The MathWorks Inc., 1995.

- [10] 蔡超豪.  $H_\infty$  电力系统稳定器控制性能的 Matlab 仿真[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2006, (2)3: 223-228.

CAI Chao-hao. Simulation of the  $H_\infty$  Power System Stabilizer with Matlab. Journal of Shenyang Institute of Engineering(Natural Science), 2006, (2)3: 223-228.

- [11] 石颀, 王成山. 时间延迟对电力系统稳定器性能的影响[J]. 继电器, 2006, 34(13): 21-24.

SHI Jie, WANG Cheng-shan. Time Delay Impact on the Performance of the Power System Stabilizer[J]. Relay, 2006, 34(13): 21-24.

收稿日期: 2008-03-19; 修回日期: 2008-04-05

作者简介:

蔡超豪(1965-), 男, 教授, 从事电力系统供用电及其控制的教学与研究工作; E-mail: lorermr@yahoo.com.cn

赵敏(1966-), 男, 副教授, 主要从事电力系统自动化教学与研究工作;

郝福忠(1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力生产技术管理工作。