

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.04.006

不确定时滞电力系统鲁棒稳定性分析

刘晓桂, 王 炜, 曾红兵, 袁 楠, 刘小文

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 基于 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法讨论含有不确定性时滞环节的电力系统鲁棒稳定性问题。通过构造合适的 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 并应用自由矩阵积分不等式方法处理泛函导数中的积分项, 建立了不确定时滞系统的鲁棒稳定判据。将数值实例的仿真结果与其它文献的结果进行对比, 进一步验证了所用方法的有效性与优越性。

关键词: 电力系统; Lyapunov-Krasovskii 泛函; 鲁棒稳定判据

中图分类号: TP13

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)04-0040-05

Robust Stability Analysis of the Uncertain Time-Delay Power System

LIU Xiaogui, WANG Wei, ZENG Hongbing, YUAN Nan, LIU Xiaowen

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Based on Lyapunov-Krasovskii functional approach, an analysis has been made of the robust stability of the power system with uncertain time-delay. By constructing an appropriate Lyapunov-Krasovskii functional and adopting the approach of free matrix integral inequality to deal with the integral terms yielded in functional derivatives, a new robust stability criterion has thus been established for uncertain time-delay systems. A comparison between the simulation results of numerical examples and those of other recorded statistics verify the effectiveness and advantages of the proposed method.

Keywords: power system; Lyapunov-Krasovskii functional; robust stability criterion

1 研究背景

时滞现象普遍存在于生活中的各个领域, 而它的存在会对系统的稳定性产生一定的影响^[1-2]。如冶金工业、智能电网、钻井过程、交通系统等方面都存在信息传输、信息处理与网络阻塞等现象。这些现象的存在会对系统的正常性能产生不良影响, 甚至使整个系统瘫痪。在电力系统的各个环节中也存在着时滞, 它是导致系统恶化、失稳与设备失效的一种诱因。因

此, 对时滞电力系统稳定性判据的研究具有十分重要的现实意义。

目前, 许多国内外知名学者都在进行时滞相关稳定性的研究工作, 同时也得出了大量的时滞相关稳定判据。文献 [3] 指出, 在保证系统稳定的前提下获得更大时滞稳定裕度是研究的关键性问题, 只有系统最大延时小于系统时滞稳定裕度时, 系统才能正常工作。获得最大时滞稳定裕度主要有两种方法: 选取

收稿日期: 2017-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61741308, 61374064, 61672225, 61703153)

作者简介: 刘晓桂 (1987-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力系统, 时滞系统, 神经网络等, E-mail: 405319366@qq.com

通信作者: 王 炜 (1979-), 女, 天津人, 湖南工业大学副教授, 主要从事电力系统, 网络控制系统方面的教学与研究, E-mail: wangwei9804@163.com

一个合适的 Lyapunov-Krasovskii 泛函和应用具有更小保守性的方法来处理泛函导数中的积分项。文献[4]总结出:目前处理积分项主要有模型变换法、自由权矩阵法与积分不等式法。这些方法的提出,为对时滞系统的研究提供了新的平台与认识。文献[5]的思想是:引入必要的松散项能降低稳定判据的保守性,同时能在一定程度上提高计算效率。文献[6]探讨了电力系统中时滞现象是如何产生的,并寻求有效方法以减少系统中的时滞现象所带来的负面影响。文献[7]研究了时滞现象对电力系统中的雅可比矩阵特征值的影响。文献[8]提出了应用时滞反馈控制来消除电力系统中的混沌现象与周期振荡。文献[9]以励磁系统信号输入作为时滞环节,引入负荷扰动项并建立相应的时滞系统数学模型,对不同扰动、不同时滞下的随机时滞电力系统稳定性进行了深入研究。

本文从电力系统中单机无穷大系统入手,推导出含不确定性参数的时变时滞系统模型的数学表达式,结合系统的相关约束条件,构建出合适的 Lyapunov-Krasovskii 泛函,并应用文献[3]中提出的自由矩阵积分不等式方法,得到了系统的鲁棒稳定性条件。基于所得到的稳定性条件,获得了励磁放大系数中的扰动项与系统时滞稳定裕度之间的关系。数值实例结果表明,本文所用的方法具有更小的保守性。

本文标号: $\mathbf{R}^{n \times m}$ 与 \mathbf{R}^n 分别表示实数域的 $n \times m$ 阶矩阵空间与 n 维向量空间;上标“-1”和“T”分别表示矩阵的“逆”与“转置”;“*”表示对称矩阵的对称项;“ \mathbf{I} ”和“ $\mathbf{0}$ ”分别表示合适维度的单位矩阵和零矩阵; $\text{Sym}\{\mathbf{X}\}=\mathbf{X}+\mathbf{X}^T$; $\mathbf{P}>\mathbf{0}$ 表示矩阵 \mathbf{P} 是对称与正定的。

2 系统描述

在电力系统分析中,一般通过分析简单低阶系统来掌握大型复杂高阶系统。本文研究的单机无穷大系统主要由发电机组、变压器、并联输电线路与远端构成,其系统模型如图1所示。

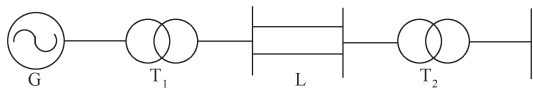


图1 单机无穷大系统

Fig. 1 One machine and infinite bus system

通过对单机无穷大系统发电机进行简化处理,得到基于三阶模型的单机无穷大系统,其模型如下:

$$\dot{\delta} = \omega_B \omega; \quad (1)$$

$$M \dot{\omega} = -D\omega + P_T - P_G, \quad \omega_B = 2\pi f_0; \quad (2)$$

$$T_{d0}' \dot{E}_q' = E_{fd} - E_q' - (x_d - x_d') I_d; \quad (3)$$

$$I_d = \frac{E_q' - V_s \cos \delta}{x_c + x_d'}. \quad (4)$$

式(1)~(4)中: δ 为功角;

ω 为角速度;

ω_B 为额定角速度;

P_T 为输出机械功率;

P_G 为输出电磁功率;

M 为惯性时间常数;

D 为阻尼系数;

f_0 为基准频率;

T_{d0}' 是发电机定子开路时间常数;

E_q' 为 q 轴电抗后暂态电势;

E_{fd} 为励磁系统的输出电势;

x_d 为发电机稳态电抗;

x_d' 为发电机暂态电抗;

x_c 为线路阻抗;

I_d 为 d 轴电流;

V_s 为无穷大母线端电压。

将式(4)代入式(3)得

$$T_{d0}' \dot{E}_q' = -\frac{x_d + x_c}{x_d' + x_c} E_q' + \frac{x_d - x_d'}{x_d' + x_c} V_s \cos \delta + E_{fd}. \quad (5)$$

发电机机端电压可表示为

$$V = \frac{\sqrt{(x_d' + x_c E_q' \cos \delta)^2 + (x_c E_q' \sin \delta)^2}}{x_c + x_d'}. \quad (6)$$

设系统稳定平衡点为 $(\delta_0, \omega_0, E_{q0}', E_{fd0})$, 对上述公式所描述的非线性模型在系统平衡点进行线性化处理, 可得如下线性系统:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}_q' \end{bmatrix} = \mathbf{H}_1 \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_q' \end{bmatrix} + \mathbf{H}_2 \Delta E_{fd}, \quad (7)$$

$$\text{式中: } \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \omega_B & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} \\ -\frac{K_3}{T_{d0}'} & 0 & -\frac{K_4}{T_{d0}'} \end{bmatrix}, \text{ 其中 } K_1 = \frac{E_{q0}' V_s \cos \delta_0}{x_c + x_d'},$$

$$K_2 = \frac{V_s \sin \delta_0}{x_c + x_d'}, \quad K_3 = \frac{x_d - x_d'}{x_c + x_d'} V_s \sin \delta_0, \quad K_4 = \frac{x_c + x_d}{x_c + x_d'};$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/T_{d0}' \end{bmatrix}^T.$$

再根据传统的自动电压调节器励磁系统, 当考虑机组电压测量与时滞时, 可得到其状态方程为

$$T_A \dot{E}_{fd} = -K_A (V(t-h(t)) - V_{ref}) + E_{fd0} - E_{fd}, \quad (8)$$

式中: T_A 为自动调节器的时间常数;

K_A 为自动电压调节器的控制增益;

V_{ref} 为机端电压参考值 (1.05 pu);

$h(t)$ 为满足 $0 < h(t) < h$ 时变时滞函数;

E_{fd0} 为励磁控制输出参考值, 即系统平衡点的一个分量。

结合系统方程 (7) 与控制器方程 (8), 并在平衡点处进行线性化处理, 可以得到含有时变时滞线性系统模型的一般形式:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_d x(t-h(t)), & t > 0; \\ x(t) = \phi(t), & t \in [-h, 0]. \end{cases} \quad (9)$$

式中 $x(t) = [\delta_0, \omega_0, E_{q0}', E_{fd0}]^T$ 是状态向量;

A_0 、 A_d 为系统矩阵;

$\phi(t)$ 为初始状态, 是一个向量值函数。

由于电力系统一般在连续扰动与不断改变操作方式的状态下工作, 含不确定性的系统模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A_0 + \Delta A_0)x(t) + (A_d + \Delta A_d)x(t-h(t)), & t > 0; \\ x(t) = \phi(t), & t \in [-h, 0]. \end{cases} \quad (10)$$

式中 ΔA_0 、 ΔA_d 为未知常数系统参数不确定性。

不确定性满足 $[\Delta A_0 \quad \Delta A_d] = W_1 F_0 [E_a \quad E_b]$, 其中 W_1 、 E_a 、 E_b 是已知的合适维数的常实数矩阵, F_0 为未知实矩阵且满足 $F_0^T F_0 \leq I$ 。

为建立本文的主要结论, 需要用到以下引理。

引理 1^[3] 定义 x 在区间 $[\alpha, \beta] \rightarrow \mathbf{R}^n$ 上是可导函数, 对于对称矩阵 $\tilde{N} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 和 $Z_1'、Z_3' \in \mathbf{R}^{3n \times 3n}$, 以及任意矩阵 $Z_2' \in \mathbf{R}^{3n \times 3n}$ 和 $N_1'、N_2' \in \mathbf{R}^{3n \times n}$, 满足

$$\Phi = \begin{bmatrix} Z_1' & Z_2' & N_1' \\ * & Z_3' & N_2' \\ * & * & \tilde{N} \end{bmatrix} \geq 0,$$

则不等式

$$-\int_{\alpha}^{\beta} \dot{x}^T(t) \tilde{N} \dot{x}(t) ds \leq \omega^T \Omega \omega \quad (11)$$

成立。其中:

$$\Omega = (\beta - \alpha) \left(Z_1' + \frac{1}{3} Z_3' \right) + \text{Sym} \left\{ N_1' \bar{\Pi}_1 + N_2' \bar{\Pi}_2 \right\},$$

$$\bar{\Pi}_1 = \bar{e}_1 - \bar{e}_2, \quad \bar{\Pi}_2 = 2\bar{e}_3 - \bar{e}_1 - \bar{e}_2, \quad \bar{e}_1 = [I \quad 0 \quad 0],$$

$$\bar{e}_2 = [0 \quad I \quad 0], \quad \bar{e}_3 = [0 \quad 0 \quad I];$$

$$\omega^T = \left[x^T(\beta) \quad x^T(\alpha) \quad \frac{1}{\beta - \alpha} \int_{\alpha}^{\beta} x^T(s) ds \right].$$

引理 2^[10] 给定合适维数的实矩阵 H 、 E 和

$F(t)$, 且 $F(t)$ 满足 $F(t)^T F(t) \leq I$, 对于任意标量 $\varepsilon > 0$, 有 $HF(t)E + (HF(t)E)^T \leq \varepsilon^{-1} H H^T + \varepsilon E^T E$ 。

3 主要结论

为方便起见, 本章先给出有关向量和矩阵定义, 然后应用自由权矩阵积分不等式方法, 导出含不确定时滞环节的单机无穷大系统 (10) 的稳定性判据。

$$\text{定义: } \eta_1(t) = \left[x^T(t) \quad \int_{t-h}^t x^T(s) ds \right]^T;$$

$$\eta_2(t) = \left[x^T(t) \quad x^T(t-h(t)) \quad x^T(t-h) \quad \dot{x}^T(t) \right]^T;$$

$$\eta_3(t) = \left[\frac{1}{h(t)} \int_{t-h(t)}^t x^T(s) ds \quad \frac{1}{h-h(t)} \int_{t-h}^{t-h(t)} x^T(s) ds \right]^T;$$

$$\xi(t) = \left[\eta_2^T(t) \quad \eta_3^T(t) \right]^T;$$

$$e_i = \left[0_{n \times (i-1)n} \quad I_n \quad 0_{n \times (6-i)n} \right], \quad i=1, 2, \dots, 6.$$

下面给出系统的稳定性判据:

定理 1 对给定标量 h 、 $\varepsilon > 0$, 如果存在矩阵 $P(\in \mathbf{R}^{2n \times 2n}) > 0$, $Q(\in \mathbf{R}^{n \times n}) > 0$, $R_n(\in \mathbf{R}^{n \times n}) > 0$, 对称矩阵 X_1 、 X_3 、 Y_1 、 $Y_3 \in \mathbf{R}^{3n \times 3n}$ 和任意矩阵 U_1 、 $U_2 \in \mathbf{R}^{n \times n}$, X_2 、 $Y_2 \in \mathbf{R}^{3n \times 3n}$, N_1 、 N_2 、 M_1 、 $M_2 \in \mathbf{R}^{3n \times n}$, 对于条件 $0 < h(t) < h$, 不等式

$$\begin{bmatrix} \Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3 + \varepsilon \theta_2^T \theta_2 & \theta_1^T \\ \theta_1 & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0, \quad (12)$$

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & N_1 \\ * & X_3 & N_2 \\ * & * & R_n \end{bmatrix} \geq 0, \quad (13)$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 & M_1 \\ * & Y_3 & M_2 \\ * & * & R_n \end{bmatrix} \geq 0, \quad (14)$$

成立, 则系统 (10) 是渐近稳定的。

式 (12) ~ (14) 中:

$$\Xi_1 = \text{Sym} \left\{ \Pi_1^T P \Pi_2 \right\} + e_1^T Q e_1 - e_3^T Q e_3 + h e_4^T R_n e_4;$$

$$\Xi_2 = h(t) \Pi_3^T \left(X_1 + \frac{1}{3} X_3 \right) \Pi_3 +$$

$$(h-h(t)) \Pi_6^T \left(Y_1 + \frac{1}{3} Y_3 \right) \Pi_6 + \text{Sym} \left\{ \Pi_3^T N_1 \Pi_4 + \right.$$

$$\left. \Pi_3^T N_2 \Pi_5 + \Pi_6^T M_1 \Pi_7 + \Pi_6^T M_2 \Pi_8 \right\};$$

$$\Xi_3 = \Pi_9^T \Pi_{10} + \left(\Pi_9^T \Pi_{10} \right)^T;$$

$$\theta_1 = \left[e_1^T U_1 W_1 + e_4^T U_2 W_1 \right]^T;$$

$$\theta_2 = \left[e_1^T E_a^T + e_2^T E_b^T \right]^T.$$

其中: $\Pi_1 = \left[e_1^T \quad h(t) e_5^T + (h-h(t)) e_6^T \right]^T$,

$$\begin{aligned} \Pi_2 &= [e_4^T \ e_1^T - e_3^T]^T, \quad \Pi_3 = [e_1^T \ e_2^T \ e_5^T]^T, \quad \Pi_4 = e_1 - e_2, \\ \Pi_5 &= 2e_5 - e_1 - e_2, \quad \Pi_6 = [e_2^T \ e_3^T \ e_6^T]^T, \quad \Pi_7 = e_2 - e_3, \\ \Pi_8 &= 2e_6 - e_2 - e_3, \quad \Pi_9 = [e_1^T U_1 + e_4^T U_2]^T, \\ \Pi_{10} &= [e_1^T A_0^T + e_2^T A_d^T - e_4^T]^T. \end{aligned}$$

证明 选取 Lyapunov-Krasovskii 泛函

$$\begin{aligned} V(x_t) &= \eta_1^T(t) P \eta_1(t) + \int_{t-h}^t x^T(s) Q x(s) ds + \\ &\int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s) R_n \dot{x}(s) ds d\theta, \end{aligned} \quad (15)$$

当 $P > 0$ 、 $Q > 0$ 与 $R_n > 0$ 时, 该函数正定, 即 $V(x_t) > 0$ 。

对 $V(x_t)$ 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_t) &= \xi^T(t) [2\Pi_1^T P \Pi_2 + e_1^T Q e_1 - e_3^T Q e_3 + \\ &h e_4^T R_n e_4] \xi(t) - \int_{t-h}^t \dot{x}^T(s) R_n \dot{x}(s) ds = \\ &\xi^T(t) \Xi_1 \xi(t) - \int_{t-h}^t \dot{x}^T(s) R_n \dot{x}(s) ds. \end{aligned} \quad (16)$$

由于 $\Phi_1 \geq 0$ 和 $\Phi_2 \geq 0$, 从引理 1 可得

$$\begin{aligned} - \int_{t-h}^t \dot{x}^T(s) R_n \dot{x}(s) ds = \\ - \int_{-h(t)}^t \dot{x}^T(s) R_n \dot{x}(s) ds - \\ \int_{t-h}^{-h(t)} \dot{x}^T(s) R_n \dot{x}(s) ds \leq \\ \xi^T(t) \{ \Sigma_1 + \Sigma_2 \} \xi(t) = \xi^T(t) \Xi_2 \xi(t), \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\Sigma_1 = h(t) \Pi_3^T \left(X_1 + \frac{1}{3} X_3 \right) \Pi_3 +$

$$(h-h(t)) \Pi_6^T \left(Y_1 + \frac{1}{3} Y_3 \right) \Pi_6;$$

$$\begin{aligned} \Sigma_2 = \text{Sym} \{ \Pi_3^T N_1 \Pi_4 + \Pi_3^T N_2 \Pi_5 + \\ \Pi_6^T M_1 \Pi_7 + \Pi_6^T M_2 \Pi_8 \}. \end{aligned}$$

另一方面, 对任意合适维数矩阵 U_1 、 U_2 , 等式

$$\begin{aligned} 2[x^T(t) U_1 + \dot{x}^T(t) U_2] [-\dot{x}(t) + \\ (A_0 + \Delta A_0) x(t) + (A_d + \Delta A_d) x(t-h(t))] = \\ 2\xi^T(t) [e_1^T U_1 + e_4^T U_2] \Sigma_3 \xi(t) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

成立, 式中

$$\Sigma_3 = [e_1^T A_0^T + e_2^T A_d^T - e_4^T]^T + [e_1^T \Delta A_0^T + e_2^T \Delta A_d^T]^T。$$

用 $W_1 F_0 E_a$ 、 $W_1 F_0 E_b$ 分别代替式 (18) 中的 ΔA_0 、 ΔA_d 可得

$$\begin{aligned} 2\xi^T(t) [e_1^T U_1 + e_4^T U_2] \Sigma_3 \xi(t) = \\ 2\xi^T(t) \{ \Pi_9^T \Pi_{10} + [e_1^T U_1 + e_4^T U_2] \Sigma_4 \} \xi(t) = \\ 2\xi^T(t) \{ \Pi_9^T \Pi_{10} + [e_1^T U_1 W_1 + e_4^T U_2 W_1] \times \\ F_0 [e_1^T E_a^T + e_2^T E_b^T]^T \} \xi(t) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2\xi^T(t) \Pi_9^T \Pi_{10} \xi(t) + 2\xi^T(t) \theta_1^T F_0 \theta_2 \xi(t) = \\ \xi^T(t) \{ \Xi_3 + \theta_1^T F_0 \theta_2 + \theta_2^T F_0 \theta_1 \} \xi(t) = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

式中 $\Sigma_4 = [e_1^T (W_1 F_0 E_a)^T + e_2^T (W_1 F_0 E_b)^T]^T$ 。

根据式 (15) ~ (19) 可以推出

$$\dot{V}(x_t) \leq \xi^T(t) \Sigma_5 \xi(t), \quad (20)$$

式中 $\Sigma_5 = \Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3 + \theta_1^T F_0 \theta_2 + \theta_2^T F_0 \theta_1$ 。

如果 $\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3 + \theta_1^T F_0 \theta_2 + \theta_2^T F_0 \theta_1 < 0$, 由引理 2 可知, 当 $\varepsilon > 0$ 时有

$$\Xi_1 + \Xi_2 + \Xi_3 + \varepsilon^{-1} \theta_1^T \theta_1 + \varepsilon \theta_2^T \theta_2 < 0. \quad (21)$$

应用 Schur 补引理, 式 (21) 等价于式 (12), 从而 $\dot{V}(x_t) < 0$, 所以系统 (10) 是渐进稳定的。

4 数值算例

单机无穷大系统模型与相关参数见文献[11-12], 在阻尼系数 $D=7.0$, 自动电压调节器的控制增益 $K_A=180$ 和机械功率 $P_m=1.0$ 的情况下, 系统存在单一时滞时的对应矩阵如下:

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 376.9911 & 0 & 0 \\ -0.0963 & -0.7000 & -0.0801 & 0 \\ -0.0480 & 0 & -0.1667 & 0.1000 \\ 0 & 0 & 0 & -1.0000 \end{bmatrix},$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 38.0187 & 0 & -95.2560 & 0 \end{bmatrix}。$$

假设自动电压调节器的控制增益存在扰动时, 在此扰动影响下的实际系数

$$\tilde{K}_A = K_A + r, \quad (22)$$

式中 r 为一个标量, 反映对自动电压调节器的控制增益的扰动。

为了研究 r 对系统稳定性的影响, 将参数的不确定性视为:

$$W_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r \end{bmatrix}, \quad E_a = 0, \quad E_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}。$$

应用定理 1 可以得出当 r 取不同值且系统 (10) 满足约束条件 $0 < h(t) < h$ 的情况下, 系统最大允许的时滞稳定裕度 h , 并将其与其它文献的结果进行对比, 如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 当 K_A 中的扰动项

r 变化时, 系统稳定运行所能允许的时滞上界 h 也随之变化, 且随扰动项 r 的增大而逐渐减小; 本文方法得出的仿真结果明显优于文献 [13] 和文献 [14] 中的结果。这表明应用本文的稳定性判据能让系统具有更小的保守性。

表 1 不同 r 时系统的允许时滞上界 h
Table 1 Allowable time delay upper bound for systems with different r values

r	h		
	本文	文献 [13]	文献 [14]
0.5	0.063 4	0.058 7	0.057 0
1.0	0.063 0	0.057 6	0.055 2
1.5	0.062 4	0.055 7	0.053 4
2.0	0.062 0	0.054 5	0.051 6
2.5	0.061 6	0.053 3	0.049 7
4.0	0.060 4	0.047 9	0.043 9
5.0	0.059 4	0.045 7	0.039 7
6.0	0.058 6	0.044 4	0.035 3
7.0	0.057 8	0.041 7	0.030 7
8.0	0.056 8	0.039 2	0.026 3
9.0	0.056 0	0.036 3	0.022 0
10.0	0.055 0	0.034 3	0.018 0

5 结语

本文根据含不确定性时滞环节的单机无穷大系统的约束条件, 构建合适的 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 对系统的稳定性进行了分析, 并应用自由矩阵积分不等式方法, 得到了一种新的时滞相关稳定判据。比较本文数值实例的结果与其它文献中的结果, 可以看出本文的结果具有显著的优越性。

参考文献:

- [1] SIPAHI R, NICULESCU S I, ABDALLAH C T, et al. Stability and Stabilization of Systems with Time Delay[J]. IEEE Control Systems, 2012, 31(1): 38-65.
- [2] WU L G, SU X J, SHI P, et al. A New Approach to Stability Analysis and Stabilization of Discrete-Time T-S Fuzzy Time-Varying Delay Systems[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B, 2011, 41(1): 273.
- [3] ZENG H B, HE Y, WU M, et al. Free-Matrix-Based Integral Inequality for Stability Analysis of Systems with Time-Varying Delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(10): 2768-2772.
- [4] 陈刚, 王信. 分析时变时滞系统稳定性的新判据[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(1): 60-63.
CHEN Gang, WANG Xin. A New Criterion for the Stability Analysis of Time Varying Delay Systems[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(1): 60-63.
- [5] 贾宏杰, 安海云, 余晓丹. 电力系统改进时滞依赖型稳定判据[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 15-19.
JIA Hongjie, AN Haiyun, YU Xiaodan. An Improved Delay-Dependent Stability Criteria for Power System with Multiple Time Delays[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 15-19.
- [6] 胡志祥, 谢小荣, 童陆园. 广域阻尼控制延迟特性分析及其多项式拟合补偿[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 29-34.
HU Zhixiang, XIE Xiaorong, TONG Luyuan. Characteristic Analysis and Polynomial Fitting Based Compensation of the Time Delays in Wide-Area Damping Control System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 29-34.
- [7] 贾宏杰, 陈建华, 余晓丹. 时滞环节对电力系统小扰动稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 5-8.
JIA Hongjie, CHEN Jianhua, YU Xiaodan. Impact of Time Delay on Power System Small Signal Stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 5-8.
- [8] OKUNO H, FUJII T. Delayed Feedback Controlled Power System[C]//Proceedings of the SICE Annual Conference. Okayama: SICE, 2005: 2659-2663.
- [9] 厉文秀. 随机时滞电力系统稳定性分析[J]. 电力与能源, 2015, 36(1): 10-15.
LI Wenxiu. Stability Analysis for Stochastic Time Delay Power Systems[J]. Power and Energy, 2015, 36(1): 10-15.
- [10] PETERSEN I R, HOLLOT C V. A Riccati Equation Approach to the Stabilization of Uncertain Linear Systems[J]. Automatica, 1986, 22(4): 397-411.
- [11] 贾宏杰, 谢星星, 余晓丹. 考虑时滞影响的电力系统小扰动稳定域[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 1-5.
JIA Hongjie, XIE Xingxing, YU Xiaodan. Power System Small Signal Stability Region with Time Delay Considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 1-5.
- [12] 贾宏杰, 尚蕊, 张宝贵. 电力系统时滞稳定裕度求解方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 5-11.
JIA Hongjie, SHANG Rui, ZHANG Baogui. Computation of Delay Stability Margin of Electric Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 5-11.
- [13] SUN Y H, ZHAO X M, LI N, et al. Robust Stochastic Stability of Power System with Time-Varying Delay Under Gaussian Random Perturbations[J]. Neurocomputing, 2015, 162: 1-8.
- [14] JIA H J, AN H, YU X. A Delay-Dependent Robust Stability Criterion for Power System and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 6-11.

(责任编辑: 邓光辉)