

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.05.007

时滞相关稳定性分析在电力系统中的应用

袁楠, 曾红兵, 刘晓桂

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 在日趋复杂的电力系统中, 时滞现象的存在是电力系统不稳定的原因之一。为探讨时滞对电力系统稳定性的影响, 针对电力系统中的经典模型单机无穷大系统, 通过建模求得影响时滞的系统方程, 并应用基于自由权矩阵积分不等式的时滞相关稳定条件获得了保证励磁控制系统稳定的时滞裕度。最后, 通过实际模型证明了所提方法能有效地提高电力系统稳定性分析的时滞裕度。

关键词: 时滞; 稳定性; 电力系统; 励磁控制器

中图分类号: TP13

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)05-0039-05

Application of Delay-Dependent Stability Analysis in the Power System

YUAN Nan, ZENG Hongbing, LIU Xiaogui

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

Abstract: Time-delay is one of the reasons accounting for the instability of the power system in the increasingly complex power system. A tentative discussion has been made of the effect of time delay on the stability of power system. In view of the classical model of single machine infinite bus system in power system, the system equation affecting the time delay can be obtained through modeling, followed by the acquisition of the delay margin stability of the excitation control system by using the delay dependent stability condition based on the free weight matrix integral inequality. Finally, the actual model verifies the efficiency of the proposed method in the improvement of the delay margin of power system stability analysis.

Keywords: time-delay; stability; power system; excitation controller

0 引言

在当前的电力系统中, 存在着日趋明显的状态时滞现象^[1], 即系统当前状态的变化趋势依赖于前一时刻状态的现象^[2]。由于运行条件的非理想化, 电力系统存在着不可避免的小扰动, 该小扰动不会影响系统结构, 但会引起系统做出相应调整, 例如架空线路风偏扰动引起的短路、负荷波动引起的发电机机组调速

等。因此, 为了抑制各种扰动, 电力系统需要引入相应的控制系统, 安装不同的控制器^[3-6]。

已有研究表明, 用于反馈控制器的信号传输时滞随着电网的规模和复杂度的增加而愈加明显^[7-9]。若未将时滞现象考虑进电力系统设计, 则电力系统无法达到预期的运行效果, 甚至出现系统失稳的事故。对于时滞现象的稳定性控制在电力系统中的应用, 现阶段的研究主要是针对计算系统的时滞稳定裕度^[10],

收稿日期: 2017-10-19

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

作者简介: 袁楠(1993-), 男, 湖北孝感人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为鲁棒控制, 时滞系统和电力系统, E-mail: yuannan1993@hotmail.com

通信作者: 曾红兵(1979-), 男, 湖南郴州人, 湖南工业大学教授, 主要从事鲁棒控制, 时滞系统及电力系统等方面的教学与研究, E-mail: 9804zhh@163.com

即在励磁控制器的作用下保证电力系统能够运行稳定的最大允许时滞。

本文主要探讨了时滞对电力系统稳定性的影响。首先,针对电力系统中的单机无穷大系统通过建模求得影响时滞的系统方程。然后,应用一种基于自由权矩阵积分不等式的分析方法获取保证系统稳定的时滞裕度。最后,对比文献[11]中的方法,证明了所应用的方法有效地提高了保证电力系统稳定运行的时滞裕度。

1 电力系统仿真参数分析

在电力系统的分析与理论应用中,首先需要基于简单构造的系统模型来理解具有共通点的基本理论,从而更好地分析和处理大型复杂的网络化电力系统^[12]。单机无穷大系统在电力系统中是用来简化测试的系统之一,其结构如图1所示,图中 ω 为角速度、 P_m 和 P_e 分别为原动机输出机械功率和发电机输出电磁功率, E_{fd} 为励磁电势, V_s 和 V_t 分别为无穷大母线端电压和发电机机端电压, x_T 和 x_L 分别为变压器电抗和无穷大母线电抗, e^{-st} 表示测量信号经过拉普拉斯变换为控制器参数。

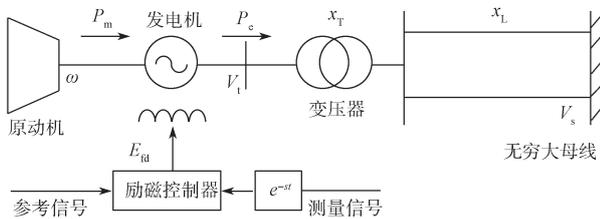


图1 单机无穷大系统

Fig. 1 Single machine infinite bus system

首先,对采用自动调压励磁控制器的单机无穷大系统^[11]运行状态进行简化处理,得到其动态系统方程,可由以下微分方程表示:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_B(\omega - 1), \\ \dot{\omega} = \frac{1}{M}(P_m - P_e - D\omega), \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0}}(E_{fd} - E'_q - (x_d - x'_d)I_d), \\ \dot{E}_{fd} = -\frac{K_A}{T_A}(V_t(t-h) - V_{ref}) - \frac{1}{T_A}(E_{fd} - E_{fd0}). \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ 为发电机功角;

ω_B 为额定角速度;

M 为机组启动时间;

D 为发电机阻尼系数;

E'_q 为发电机 q 轴的暂态电势;

T_{d0} 为发电机定子开路时间常数;

x_d 、 x'_d 分别为发电机稳态及暂态电抗;

K_A 和 T_A 分别为发电机励磁器控制增益及其时间常数;

E_{fd0} 为励磁电势参考值;

h 为机组电压测量和处理过程中存在的时滞;

V_{ref} 为发电机机端电压参考值;

I_d 和 I_q 分别为 d 轴和 q 轴的电流,且有

$$I_d = \frac{E'_q - V_s \cos \delta}{x_e + x'_d}; \quad (2)$$

$$I_q = \frac{V_s \sin \delta}{x_e + x'_d}. \quad (3)$$

$$V_t = \sqrt{(x_q I_q)^2 + (E'_q - x'_d I_d)^2}; \quad (4)$$

$$P_e = \frac{E'_q V_s \sin \delta}{x_e + x'_d}. \quad (5)$$

其中 x_e 和 x_q 分别为线路电抗和 q 轴电抗。

本研究设定的单机无穷大系统相关参数及其取值均为标么值(p.u.),如表1所示^[13-14],其中 T_{d0}' 为时间常数。

表1 单机无穷大系统的相关参数及取值

Table 1 Parameters of the single-machine infinite bus system

参数	V_s	T_{d0}'	x_d	x'_d	x_e	x_q	ω_B	P_m	D	M
取值	1.0	10	1.0	0.4	0.5	0.4	377	1.0	10	5

令该单机无穷大系统的运行稳定平衡点为

$\mathbf{x}(t) = [\delta_0, \omega_0, E'_{q0}, E_{fd0}]^T$,将上述微分方程在平衡点线性化,可得到如下线性系统:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_d\mathbf{x}(t-h). \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}(t)$ 和 $\mathbf{x}(t-h)$ 均为状态向量,其中 $\mathbf{x}(t)$ 为系统的当前状态, $\mathbf{x}(t-h)$ 为系统的滞后状态,且 $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{x}(t-h) \in \mathbf{R}^n$;

\mathbf{A} 、 \mathbf{A}_d 均为系统矩阵, $\mathbf{A}, \mathbf{A}_d \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 且

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_B & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ -\frac{K_3}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{K_4}{T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_5 K_A}{T_A} & 0 & -\frac{K_6 K_A}{T_A} & 0 \end{bmatrix}.$$

其中,

$$\begin{aligned}
K_1 &= \frac{E'_{q0} V_s \cos \delta_0}{x_e + x'_d}, \\
K_2 &= \frac{V_s \sin \delta_0}{x_e + x'_d}, \\
K_3 &= \frac{(x_d - x'_d) V_s \sin \delta_0}{x_e + x'_d}, \\
K_4 &= \frac{x_e + x_d}{x_e + x'_d}, \\
K_5 &= \frac{-x_e x'_d E'_{q0} \sin \delta_0}{(x_e + x'_d) \sqrt{(x_q V_s \sin \delta_0)^2 + (x_e E'_{q0} + x'_d V_s \cos \delta_0)^2}}, \\
K_6 &= \frac{x_e x'_d \cos \delta_0 + x_e^2 E'_{q0}}{(x_e + x'_d) \sqrt{(x_q V_s \sin \delta_0)^2 + (x_e E'_{q0} + x'_d V_s \cos \delta_0)^2}}.
\end{aligned}$$

2 时滞稳定裕度求解

本研究基于一种积分不等式稳定性条件来讨论单机无穷大系统的时滞稳定裕度。为简化矩阵和向量的表达, 给出如下定义:

$$\begin{aligned}
\mathbf{v}_1(t) &= \int_{t-h}^t \mathbf{x}(s) ds, \\
\mathbf{v}_2(t) &= \int_{t-h}^t \int_{t-h}^s \mathbf{x}(u) du ds, \\
\mathbf{v}_3(t) &= \int_{t-h}^t \int_{t-h}^s \int_{t-h}^u \mathbf{x}(v) dv du ds, \\
\mathbf{v}_4(t) &= \int_{t-h}^t \int_{t-h}^s \int_{t-h}^u \int_{t-h}^v \mathbf{x}(z) dz dv du ds, \\
\boldsymbol{\eta}_1(t) &= [\mathbf{x}^T(t) \quad \mathbf{v}_1^T \quad \mathbf{v}_2^T \quad \mathbf{v}_3^T \quad \mathbf{v}_4^T], \\
\boldsymbol{\eta}_2(t) &= \left[\frac{1}{h} \mathbf{v}_1^T(t) \quad \frac{2}{h^2} \mathbf{v}_2^T(t) \quad \frac{6}{h^3} \mathbf{v}_3^T(t) \quad \frac{24}{h^4} \mathbf{v}_4^T(t) \right], \\
\boldsymbol{\zeta}(t) &= [\mathbf{x}^T(t) \quad \mathbf{x}^T(t-h) \quad \boldsymbol{\eta}_2^T(t)], \\
\boldsymbol{\Gamma} &= [A \quad A_d \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}], \\
\mathbf{e}_i &= [\mathbf{0}_{n \times (i-1)n} \quad \mathbf{I}_n \quad \mathbf{0}_{n \times (6-i)n}], \quad i=1, 2, \dots, 6.
\end{aligned}$$

首先, 给出以下积分不等式。

定理 1 令 \mathbf{x} 为区间 $[\alpha, \beta]$ 内映射到 \mathbf{R}^n 的可微函数, 对于任意对称矩阵 $\mathbf{R} (\mathbf{R} \in \mathbf{R}^{n \times n}) > 0$, $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 \in \mathbf{R}^{6n \times n}$ 有以下两个不等式成立:

$$-\int_{\alpha}^{\beta} \dot{\mathbf{x}}^T(s) \mathbf{R} \dot{\mathbf{x}}(s) ds \leq \mathbf{v}^T \boldsymbol{\Omega} \mathbf{v}, \quad (7)$$

$$-\int_{\alpha}^{\beta} \dot{\mathbf{x}}^T(s) \mathbf{R} \dot{\mathbf{x}}(s) ds \leq -\mathbf{v}^T \sum_{i=1}^5 \left\{ \frac{2i-1}{\beta-\alpha} \boldsymbol{\Pi}_i \mathbf{R} \boldsymbol{\Pi}_i^T \right\} \mathbf{v}. \quad (8)$$

式 (7) ~ (8) 中:

$$\boldsymbol{\Omega} = \sum_{i=1}^5 \left\{ \frac{\tau}{2i-1} N_i \mathbf{R}^{-1} N_i^T + N_i \boldsymbol{\Pi}_i + (N_i \boldsymbol{\Pi}_i)^T \right\},$$

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\Pi}_1 &= \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2, \\
\boldsymbol{\Pi}_2 &= \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 - 2\mathbf{e}_3, \\
\boldsymbol{\Pi}_3 &= \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2 - 6\mathbf{e}_3 + 6\mathbf{e}_4, \\
\boldsymbol{\Pi}_4 &= \mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 - 12\mathbf{e}_3 + 30\mathbf{e}_4 - 20\mathbf{e}_5, \\
\boldsymbol{\Pi}_5 &= \mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2 - 20\mathbf{e}_3 + 90\mathbf{e}_4 - 140\mathbf{e}_5 + 70\mathbf{e}_6; \\
\mathbf{v} &= [\mathbf{x}^T(\beta) \quad \mathbf{x}^T(\alpha) \quad \bar{\mathbf{v}}_1^T \quad \bar{\mathbf{v}}_2^T \quad \bar{\mathbf{v}}_3^T \quad \bar{\mathbf{v}}_4^T], \\
\bar{\mathbf{v}}_1 &= \frac{1}{\tau} \int_{\alpha}^{\beta} \mathbf{x}(s) ds, \\
\bar{\mathbf{v}}_2 &= \frac{1}{\tau^2} \int_{\alpha}^{\beta} \int_{\alpha}^s \mathbf{x}(u) du ds, \\
\bar{\mathbf{v}}_3 &= \frac{6}{\tau^3} \int_{\alpha}^{\beta} \int_{\alpha}^s \int_{\alpha}^u \mathbf{x}(v) dv du ds, \\
\bar{\mathbf{v}}_4 &= \frac{24}{\tau^4} \int_{\alpha}^{\beta} \int_{\alpha}^s \int_{\alpha}^u \int_{\alpha}^v \mathbf{x}(z) dz dv du ds, \quad \tau = \beta - \alpha.
\end{aligned}$$

证明 定义

$$\begin{aligned}
f_1(s) &= \frac{2s - \beta - \alpha}{\beta - \alpha}, \\
f_2(s) &= \frac{6s^2 - 6(\beta + \alpha)s + \beta^2 + 4\beta\alpha + \alpha}{(\beta - \alpha)^2}, \\
f_3(s) &= \frac{20s^3 - 30(\beta + \alpha)s^2 + c_{11}s + c_{10}}{(\beta - \alpha)^3}, \\
f_4(s) &= \frac{70s^4 - 140(\beta + \alpha)s^3 + c_{22}s^2 + c_{21}s + c_{20}}{(\beta - \alpha)^4},
\end{aligned}$$

$$\mathbf{N} = [\mathbf{N}_1^T \quad \mathbf{N}_2^T \quad \mathbf{N}_3^T \quad \mathbf{N}_4^T \quad \mathbf{N}_5^T]^T,$$

$$\boldsymbol{\zeta}(S) = [\mathbf{v}^T \quad f_1(s) \mathbf{v}^T \quad f_2(s) \mathbf{v}^T \quad f_3(s) \mathbf{v}^T \quad f_4(s) \mathbf{v}^T]^T,$$

其中,

$$\begin{aligned}
c_{11} &= 12\beta^2 + 36\alpha\beta + 12\alpha^2, \\
c_{10} &= -(\alpha^3 + 9\alpha^2\beta + 9\alpha\beta^2 + \beta^3), \\
c_{22} &= 90\alpha^2 + 240\alpha\beta + 90, \\
c_{21} &= -20(\alpha^3 + 6\alpha^2\beta + 6\alpha\beta^2 + \beta^3), \\
c_{20} &= \alpha^4 + 16\alpha^3\beta + 36\alpha^2\beta^2 + 16\alpha\beta^3 + \beta^4.
\end{aligned}$$

由基本不等式可知,

$$-2\boldsymbol{\zeta}^T(s) \mathbf{N} \dot{\mathbf{x}}(s) \leq \boldsymbol{\zeta}^T(s) \mathbf{N} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{N}^T \boldsymbol{\zeta}(s) + \dot{\mathbf{x}}^T(s) \mathbf{R} \dot{\mathbf{x}}(s). \quad (9)$$

将式 (8) 从 α 到 β 积分, 可得到

$$\begin{aligned}
& -2\mathbf{v}^T N_1 (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2) \mathbf{v} - 2\mathbf{v}^T N_2 (\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 - 2\mathbf{e}_3) \mathbf{v} - \\
& 2\mathbf{v}^T N_3 (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2 - 6\mathbf{e}_3 + 6\mathbf{e}_4) \mathbf{v} - \\
& 2\mathbf{v}^T N_4 (\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2 - 12\mathbf{e}_3 + 30\mathbf{e}_4 - 20\mathbf{e}_5) \mathbf{v} - \\
& 2\mathbf{v}^T N_5 (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2 - 20\mathbf{e}_3 + 90\mathbf{e}_4 - 140\mathbf{e}_5 + 70\mathbf{e}_6) \mathbf{v} \leq \\
& \tau \mathbf{v}^T N_1 \mathbf{R}^{-1} N_1^T \mathbf{v} + \frac{\tau}{3} \mathbf{v}^T N_2 \mathbf{R}^{-1} N_2^T \mathbf{v} + \\
& \frac{\tau}{5} \mathbf{v}^T N_3 \mathbf{R}^{-1} N_3^T \mathbf{v} + \frac{\tau}{7} \mathbf{v}^T N_4 \mathbf{R}^{-1} N_4^T \mathbf{v} + \\
& \frac{\tau}{9} \mathbf{v}^T N_5 \mathbf{R}^{-1} N_5^T \mathbf{v} + \int_{\alpha}^{\beta} \dot{\mathbf{x}}^T(s) \mathbf{R} \dot{\mathbf{x}}(s) ds. \quad (10)
\end{aligned}$$

经整理后可得不等式(7)。

若进一步设 Ω 中

$$N_1 = \frac{1}{\tau}[-R \ R \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$N_2 = \frac{3}{\tau}[-R \ -R \ 2R \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$N_3 = \frac{5}{\tau}[-R \ R \ 6R \ -6R \ 0 \ 0]^T,$$

$$N_4 = \frac{7}{\tau}[-R \ R \ 12R \ -30R \ 20R \ 0]^T,$$

$$N_5 = \frac{9}{\tau}[-R \ R \ 20R \ -90R \ 140R \ -70R]^T,$$

则可得到不等式(8), 证明完毕。

接下来, 基于定理1给出的积分不等式, 建立系统(6)的时滞相关稳定性条件。

定理2 给定 $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$, 如果存在 $P(P \in \mathbf{R}^{5n \times 5n}) > 0, Q(Q \in \mathbf{R}^{n \times n}) \geq 0, R(R \in \mathbf{R}^{n \times n}) > 0$, 使得式(11)所示线性矩阵不等式成立

$$\Phi_1 + \Phi_2 < 0, \tag{11}$$

则系统(6)是稳定的, 其中,

$$\Phi_1 = \text{Sym}\{\Pi_6^T P \Pi_7\} + e_1^T Q e_1 - e_2^T Q e_2 + h \Gamma^T R \Gamma,$$

$$\Phi_2 = -\sum_{i=1}^5 \frac{2i-1}{h} \Pi_i R \Pi_i^T,$$

$$\Pi_6 = \begin{bmatrix} e_1^T & h e_3^T & \frac{h^2}{2} e_4^T & \frac{h^3}{6} e_5^T & \frac{h^4}{24} e_6^T \end{bmatrix},$$

$$\Pi_7 = \begin{bmatrix} \Gamma^T & \Pi_1^T & \Pi_8^T \end{bmatrix},$$

$$\Pi_8 = \begin{bmatrix} h(e_3 - e_2)^T & \frac{h^2}{2}(e_4^T - e_2^T) & \frac{h^3}{6}(e_5 - e_2)^T \end{bmatrix}.$$

证明 选取 Lyapunov-Krasovskii 函数为

$$V(x_t) = \eta_1^T(t) P \eta_1(t) + \int_{t-h}^t x^T(s) Q x(s) ds + \int_{-h}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds d\theta. \tag{12}$$

对 $V(x_t)$ 求导, 可得

$$\dot{V}(x_t) = \zeta^T(t) \Phi \zeta(t) - \int_{t-h}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds. \tag{13}$$

由不等式(8)可得出 $\dot{V}(x_t) \leq \zeta^T(t) (\Phi_1 + \Phi_2) \zeta(t)$ 。

若 $\Phi_1 + \Phi_2 < 0$, 则 $\dot{V}(x_t) < 0$, 系统(6)是渐进稳定的。

最后, 应用定理1给出的稳定性条件计算单机无穷大系统的稳定时滞裕度。一方面, 针对给定机械功率 ($P_m=1.0$) 的条件下, 研究控制器增益变化对时滞裕度的影响, 所得结果列于表2中; 另一方面, 给定控制器增益 ($K_A=100$) 的情况下, 研究机械功率大小对时滞裕度的影响, 相应的结果列于表3中。同时,

为说明本文所给条件的有效性, 将本文方法所得结果与文献[11]的结果进行对比。

表2 不同控制增益时的系统时滞稳定裕度对比

Table 2 Comparison of system time-delay stability margin under different control gain values

K_A	系统时滞稳定裕度 /ms		提高率 /%
	文献[11]	本文	
50	320.45	326.89	2.0
60	262.34	267.52	2.0
70	221.20	225.74	2.1
80	190.49	194.71	2.2
90	166.62	170.75	2.5
100	147.51	151.67	2.8

表3 不同机械功率时的系统时滞稳定裕度对比

Table 3 Comparison of system time-delay stability margin under different mechanical powers

P_m	系统时滞稳定裕度 /ms		提高率 /%
	文献[11]	本文	
0.1	215.80	218.01	1.0
0.3	210.11	212.37	1.1
0.5	198.94	201.33	1.2
0.7	182.53	185.23	1.5
0.9	160.75	164.20	2.1
1.0	147.51	151.67	2.8

分析表2和表3中的数据可以得知, 在两种情况下, 采用本文方法计算所得到的稳定时滞裕度均有所提高: 给定机械功率条件下, 控制器增益变化对时滞裕度的影响较文献[11]提高了2%以上; 给定控制器增益的情况下, 机械功率大小对时滞裕度的影响较文献[11]提高了1%以上。

从表2~3中还可以看出, 在实际电力系统运行中, 为了保证单机无穷大系统有较大的时滞裕度, 可选择较小的控制器增益及较小的机械功率。

3 结语

本文以单机无穷大系统为实际案例模型, 应用基于自由权矩阵积分不等式的方法对电力系统的稳定裕度进行了分析, 并计算出在不同励磁控制器增益及机械功率条件下的系统时滞裕度, 分析了系统各参数对系统时滞裕度的影响。实验结果表明, 本文所采用的方法相较于文献[11]给出的方法, 可以得到更大的稳定时滞裕度。

参考文献:

[1] 刘晓桂, 王 炜, 曾红兵, 等. 不确定时滞电力系统鲁棒稳定性分析[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(4): 40-44.

- LIU Xiaogui, WANG Wei, ZENG Hongbing, et al. Robust Stability Analysis of the Uncertain Time-Delay Power System[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(4): 40–44.
- [2] 何勇. 基于自由权矩阵的时滞相关鲁棒稳定与镇定[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- HE Yong. Delay-Dependent Robust Stability and Stabilization Based on Free-Weighting Matrices[D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [3] ABD-ELAZIMS M, ALI E S. Load Frequency Controller Design via BAT Algorithm for Nonlinear Interconnected Power System[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 77: 166–177.
- [4] LI J, CHEN Z, CAI D, et al. Delay-Dependent Stability Control for Power System with Multiple Time-Delays[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2316–2326.
- [5] SARGOLZAEI A, KANG K Y, ABDELGHANI M N. Preventing Time-Delay Switch Attack on Load Frequency Control in Distributed Power Systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1176–1185.
- [6] ZHANG X, LU C, XIE X, et al. Stability Analysis and Controller Design of a Wide-Area Time-Delay System Based on the Expectation Model Method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(1): 520–529.
- [7] GHOSH S, FOLLY K, PATEL A. Synchronized Versus Non-Synchronized Feedback for Speed-Based Wide-Area PSS: Effect of Time-Delay[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016(99): 1.
- [8] SINGH V P, KISHOR N, SAMUEL P. Communication Time Delay Estimation for Load Frequency Control in Two-Area Power System[J]. Ad Hoc Networks, 2016, 41: 69–85.
- [9] CHENG L, CHEN G, GAO W, et al. Adaptive Time Delay Compensator (ATDC) Design for Wide-Area Power System Stabilizer[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 5(6): 2957–2966.
- [10] 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.
- [11] 张传科. 时滞电力系统的小扰动稳定分析与负荷频率控制[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- ZHANG Chuanke. Small-Signal Stability Analysis and Load Frequency Control for Delayed Power Systems[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [12] KUNDUR P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994: 727–732.
- [13] 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.
- [14] JI W, VENKATASUBRAMANIAN V. Hard-Limit Induced Chaos in a Fundamental Power System Model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1996, 18(5): 279–295.

(责任编辑: 廖友媛)