

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201270

基于全局滑模时滞的电力系统混沌振荡控制

杨洋¹, 于永进¹, 王云飞²

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 国网技术学院, 山东 济南 250002)

摘要: 电力系统易受扰动影响, 在一定扰动条件下会进入混沌状态。通过分岔图和李雅普诺夫指数谱分析了扰动 P_e 与 P_k 单独作用与共同作用时对电力系统的影响, 当 P_e 与 P_k 单独作用时, 系统状态均随着扰动的增加由周期态过渡到混沌态, 当 P_e 与 P_k 共同作用时, 系统状态均随着扰动的增加由混沌态过渡到周期态再过渡到混沌态。设计了一种全局滑模时滞控制策略, 时滞控制采用延时反馈环节, 即误差信号中采用上个采样周期的采样值与此时的采样值来对不确定系统项与扰动项进行估计, 但由于延时环节存在时滞误差, 导致系统收敛速度较慢且扰动抑制能力较差。为此, 将时滞控制与全局滑模控制相结合, 并设计具有快速收敛特性的时滞补偿项, 提高系统收敛速度与抗扰动能力, 并且可以抑制上界未知的外部扰动。仿真结果表明, 相较于时滞控制, 所设计的全局滑模时滞控制收敛速度更快, 超调量更小, 在系统遭受周期扰动与阶跃扰动时仍能保证收敛。

关键词: 电力系统; 混沌振荡; 时滞控制; 全局滑模控制; 抗扰动能力

Power system chaotic oscillation control based on global sliding mode time delay

YANG Yang¹, YU Yongjin¹, WANG Yunfei²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Grid Technical College, Jinan 250002, China)

Abstract: It is easy for a power system to be affected by disturbance and it will enter a chaotic state under certain disturbance conditions. A bifurcation diagram and the Lyapunov exponential spectrum are used to analyze the influence of perturbation P_e and P_k on the power system when they act alone or together. When P_e and P_k act alone, the system states transition from the periodic state to a chaotic state with the increase of perturbation. When P_e and P_k act together, with the increase of the disturbance, the system states transition from the chaotic state to a periodic state and then back to a chaotic state. This paper designs a kind of global sliding mode control with time-delay strategy. The time delay control uses a delay feedback loop, namely the error signal using the sampling value of the sampling period and the sampling value of uncertain systems are estimated with the disturbance. However, because of the delay link lag error, this results in slow convergence speed and lower ability to reject disturbance. For this reason, the time delay control is combined with global sliding mode control, and a time delay compensation term with fast convergence is designed to improve the convergence speed and anti-disturbance ability of the system. This also suppresses the external disturbance whose upper bound is unknown. The simulation results show that compared with the time-delay control, the proposed global sliding mode time-delay control has faster convergence speed and less overshooting, and can still guarantee convergence when the system is subjected to periodic and step disturbance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61803233).

Key words: power system; chaotic oscillation; time delay control; global sliding mode control; anti disturbance ability

0 引言

电力系统是一种易受各种复杂扰动影响的复杂非线性系统, 在一定的系统参数与扰动条件下,

非线性系统会出现系统状态无规则振荡的混沌现象^[1-6]。为此, 国内外诸多学者对电力系统混沌振荡特性进行了研究, 文献[7-8]分析了二阶互联电力系统非线性动力学行为特性, 文献[9-10]研究了四阶电力系统的混沌特性, 发现特定值下的系统参数与一定范围内的扰动变化会导致系统进入混沌状态。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61803233)

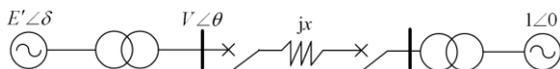
为了保护电力系统安全稳定运行, 研究人员提出了一系列可用于电力系统的控制策略。文献[11-14]将滑模控制应用在电力系统中。滑模控制具有响应快速、抗扰能力强的特点, 但无法有效抑制上界未知的外部扰动, 在工程实际中有一定局限性。文献[15-16]将状态负反馈方法应用在电力系统中。状态负反馈控制有较为完备的设计方法, 但由于只在平衡点处进行线性化处理, 导致系统抗扰能力较差。文献[17]采用模糊控制方法来抑制系统的混沌状态。模糊控制主要针对不确定系统, 其适用范围较广且有较强的鲁棒性, 但模糊规则没有完备的选取方法, 加大了控制器的设计难度。文献[18-19]采用 RBF 网络来对系统参数进行辨识。RBF 网络拥有较强的拟合能力, 能对不确定参数进行辨识, 但当样本数据不足时, 辨识结果准确性就会下降。文献[20]将协同控制应用在电力系统中, 所设计控制率为连续控制率, 不含抖振项, 但较依赖系统模型。

时滞控制作为一种非线性控制方法, 利用延时反馈来估计系统的不确定性问题, 不需要事先知道系统不确定因素的上界。但由于时滞控制具有较大的时滞误差, 导致追踪精度不高, 抗扰能力较差[21]。针对此类问题, 文献[22]提出了参数自适应时滞控制, 利用系统参数导数大小来决定补偿大小, 此方法跟踪误差较小, 抗扰能力较强, 但系统到达目标轨道时间较长。文献[23]提出了一种基于新型切换函数的时滞控制, 由于切换函数响应特性并不平滑, 此方法具有较大抖振。

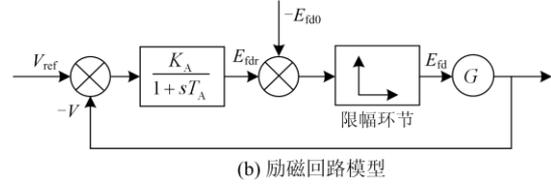
为解决上述问题, 提出一种全局滑模时滞控制策略。所提出的控制策略综合了时滞控制与滑模控制策略的优势, 可以有效抑制上界未知的外部扰动, 并加入时滞补偿项, 弥补时滞误差。选用具有平滑特性的继电函数替代切换函数, 有效削弱了抖振。仿真验证表明, 所设计控制器对混沌状态具有较好的抑制作用。

1 电力系统模型

励磁回路是电力系统中不可缺少的一部分, 为增加系统模型与实际系统的契合度, 将简化后的励磁回路数学模型与传统二阶互联电力系统模型相结合, 得到如图 1 所示系统模型。二阶互联电力系统模型如图 1(a)所示, 励磁回路模型如图 1(b)所示。



(a) 互联电力系统模型



(b) 励磁回路模型

图 1 带励磁回路的互联电力系统模型

Fig. 1 Interconnected power system model with excitation

在以上基础考虑两种功率扰动后, 其表达式为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = 2\pi f \omega \\ \dot{\omega} = \frac{1}{2H} (-d\omega + P_m - \frac{E'V_0}{x'_d + x} \sin \delta) - \\ P_e \cos(2\pi\alpha t) \sin \delta + P_k \cos(2\pi\beta t) \\ \dot{E}' = \frac{-\frac{x_d + x}{x'_d + x} E' + \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x} \cos \delta + E_{fd}}{T'_{d0}} \\ \dot{E}_{fdr} = \frac{-K_A(V - V_{ref}) - (E_{fdr} - E_{fd0})}{T_A} \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ 为互联系统功角差; ω 为互联发电机角频率之差; E' 为暂态电势; E_{fdr} 为限幅环节输入; K_A 为励磁增益; P_e 为电磁扰动的幅值; P_k 为负载扰动的幅值; α 和 β 分别对应上述两种扰动的频率大小。

V 为线路出口处的母线电压大小, 其表达式为

$$V = \frac{1}{x_d + x'_d} \sqrt{(x'_d + xE' \cos \delta)^2 + (xE' \sin \delta)^2} \quad (2)$$

为防止过励磁对设备产生损坏, 一般采用限幅环节对励磁回路进行保护, 限幅环节输出 E_{fd} 表达式为

$$E_{fd} = \begin{cases} E_{fdmax}, E_{fdr} > E_{fdmax} \\ E_{fdr}, E_{fdmin} \leq E_{fdr} \leq E_{fdmax} \\ E_{fdmin}, E_{fdr} < E_{fdmin} \end{cases} \quad (3)$$

模型中其余参数如表 1 所示。

表 1 系统参数取值

Table 1 Values of system parameters

常值参数名称	符号	取值/p.u
基频频率	f	50
等效转动惯量	H	5
阻尼常数	d	1.4
原动机机械功率	P_m	1.2
无穷大母线电压	V_0	1
传输线电抗	x	0.5
母线电压参考值	V_{ref}	1.05
同步电机电抗	x_d	1
励磁时间常数	T_A	1
暂态电抗	x'_d	0.4
电枢绕组开环时间常数	T'_{d0}	10
限幅环节电压最大值	E_{fdmax}	5
限幅环节电压最小值	E_{fdmin}	0
限幅环节电压参考值	E_{fd0}	2

2 混沌特性分析

2.1 混沌吸引子存在性

初始值的选取是能否产生混沌现象的关键, 通过多组迭代, 取系统初始值为[0.978 0 1.325 1.955]。取 $K_A=150$, $P_k=0.2$, $P_e=0.1$, 由于电力系统电磁扰动与负荷扰动频率基本不会超过1 Hz, 因此取 $\alpha=0.1$, $\beta=0.1$, 系统(1)的相图如图2所示。

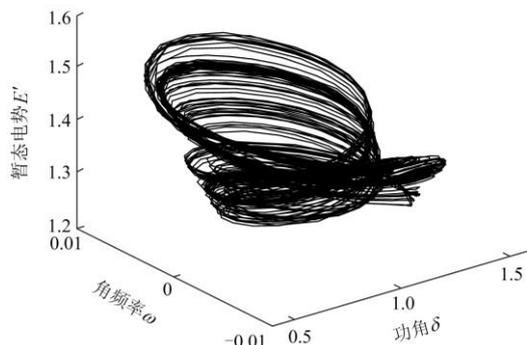


图2 混沌吸引子

Fig. 2 Chaotic phase diagram of power system

为验证混沌吸引子的存在性, 式(1)的Jacobi矩阵行列式的迹如式(4)所示。

$$\nabla V = \frac{\partial \dot{\delta}}{\partial \delta} + \frac{\partial \dot{\omega}}{\partial \omega} + \frac{\partial \dot{E}'}{\partial E'} + \frac{\partial \dot{E}_{\text{ldr}}}{\partial E_{\text{ldr}}} = -\left(\frac{d}{2H} + \frac{x_d + x}{x'_d + x} \frac{1}{T'_{d0}} + \frac{1}{T_A}\right) \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 若系统参数均取大于0的常数, 则式(1)表示的电力系统始终是耗散的, 并以式(5)指数形式收敛。

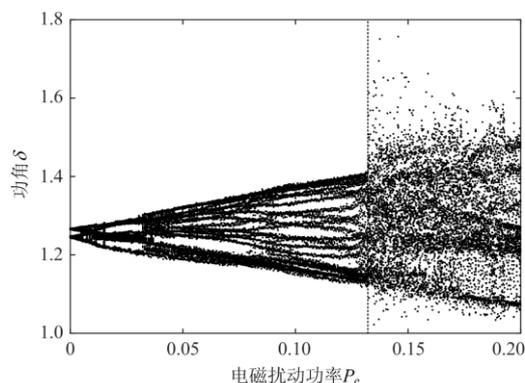
$$\frac{dV}{dt} = V_0 e^{-\left(\frac{d}{2H} + \frac{x_d + x}{x'_d + x} \frac{1}{T'_{d0}} + \frac{1}{T_A}\right)t} \quad (5)$$

当 t 趋于无穷时, 式(1)所示系统初始体积元 V_0 将会以速率 $\left(\frac{d}{2H} + \frac{x_d + x}{x'_d + x} \frac{1}{T'_{d0}} + \frac{1}{T_A}\right)$ 收缩到0, 从而证明混沌吸引子的存在性。

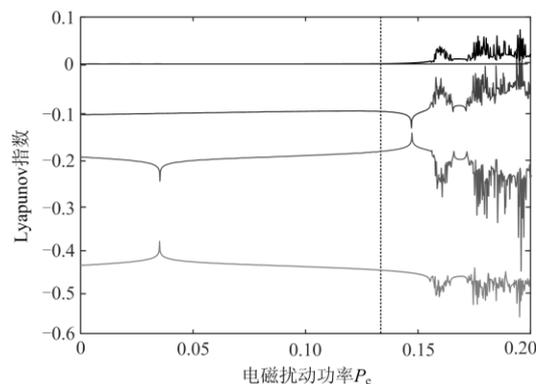
2.2 扰动参数对混沌特性的影响

设系统的5个Lyapunov指数(LE)从大到小依次分别为LE1、LE2、LE3、LE4、LE5。当 P_e 或 P_k 单独作用于式(1)所示系统时, 固定 $\alpha=0.1$, $\beta=0$, $P_k=0$, 取 $P_e \in \{0, 0.2\}$, 分岔图和Lyapunov指数谱如图3所示。

由图3(b)可知, 当 $P_e \in \{0, 0.1253\}$, 此阶段系统LE1和LE2均为0, 其余LE均小于0, 当 $P_e \in \{0.1253, 0.2\}$, 此阶段系统LE1大于0, LE2始终等于0, 结合图3(a)可以看出系统在此两个区间内分别为拟周期和混沌态。



(a) 分岔图



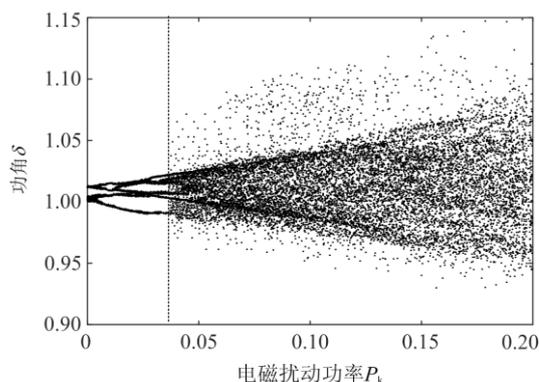
(b) Lyapunov指数谱

图3 分岔图与Lyapunov指数谱

Fig. 3 Bifurcation diagram and Lyapunov index spectrum

固定 $\alpha=0$, $\beta=0.1$, $P_e=0$, 取 $P_k \in \{0, 0.2\}$, 其分岔图和Lyapunov指数谱如图4所示。由图4(b)可知, 当 $P_k \in \{0, 0.0375\}$, 此阶段系统的LE1等于0, LE2小于0, 当 $P_k \in \{0.0375, 0.2\}$, 此阶段系统LE1大于0, LE2等于0, LE3小于0, 结合图4(a)可知系统在此两个区间内分别为周期和混沌态。

当 P_e 或 P_k 同时作用于式(1)所示系统时。固定 $\alpha=0.1$, $\beta=0.1$, $P_k=0.1$, 取 $P_e \in \{0, 0.19\}$, 其分岔图和Lyapunov指数谱如图5所示。



(a) 分岔图

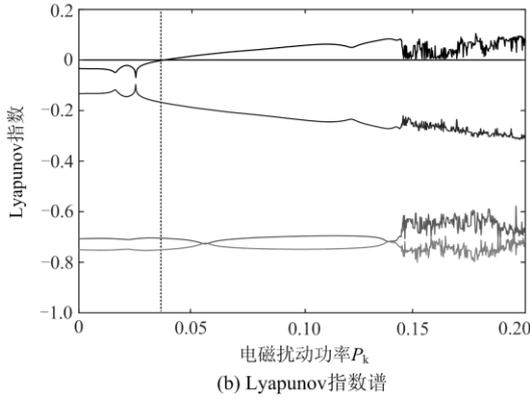


图 4 分岔图与 Lyapunov 指数谱

Fig. 4 Bifurcation diagram and Lyapunov index spectrum

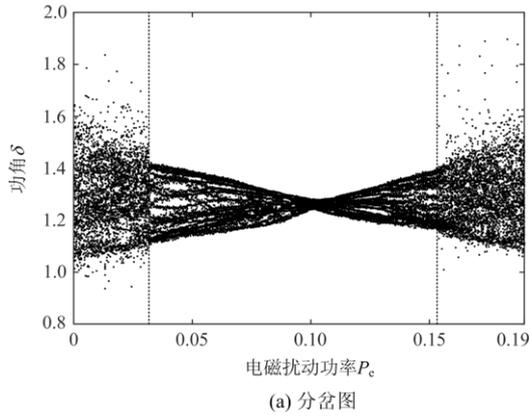


图 5 分岔图与 Lyapunov 指数谱

Fig. 5 Bifurcation diagram and Lyapunov index spectrum

由图 5(b)可知, 当 $P_e \in \{0, 0.03124\}$, 此阶段系统 LE_1 大于 0, LE_2 等于 0, 当 $P_e \in \{0.03124, 0.1521\}$, 此阶段系统 LE_1 和 LE_2 均为 0, 其余 LE 小于 0, 当 $P_e \in \{0.1521, 0.19\}$, 此阶段系统 LE_1 大于 0, LE_2 等于 0, 结合图 5(a)可以看出系统在此三个区间内分别为混沌、拟周期、混沌态。

固定 $\alpha = 0.1$, $\beta = 0.1$, $P_e = 0.1$, $P_k \in \{0, 0.19\}$, 其分岔图和 Lyapunov 指数谱如图 6 所示。

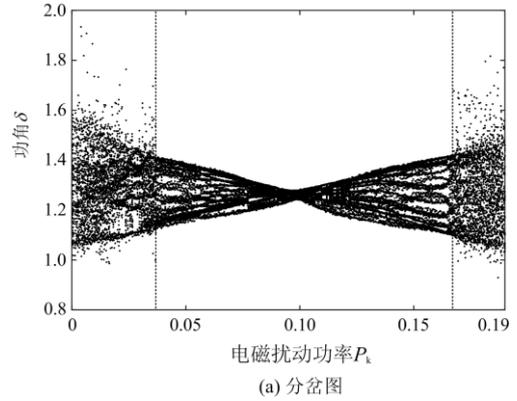


图 6 分岔图与 Lyapunov 指数谱

Fig. 6 Bifurcation diagram and Lyapunov index spectrum

由图 6(b)可知, 当 $P_k \in \{0, 0.0379\}$, 此阶段系统 LE_1 大于 0, LE_2 等于 0, 当 $P_k \in \{0.0379, 0.1688\}$, 此阶段系统 LE_1 等于 0, 其余 LE 均小于 0, 当 $P_k \in \{0.1688, 0.19\}$, 此阶段系统 LE_1 大于 0, LE_2 等于 0, 结合图 6(a)可知在此三个区间内系统分别处于混沌、拟周期、混沌态。

3 控制器设计

3.1 时滞控制器设计

时滞控制通过对系统状态进行延时采样来估计系统不确定因素的值, 与模糊控制相比, 时滞控制设计原理简单, 与滑模控制相比, 时滞控制免去对系统未知参数的估计, 并且可以有效抑制上界未知的扰动, 放宽了控制器设计的限制条件, 降低了工程实现的难度。

以功角 δ 为控制目标, 对系统(1)进行如下变换。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = 2\pi f \omega \\ \dot{\omega} = g_t + \Delta_t + u_t \\ \dot{E}' = \frac{-\frac{x_d + x}{x'_d + x} \dot{E}' + \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x} \cos \delta + E_{fd}}{T'_{d0}} \\ \dot{E}_{tdr} = \frac{-K_A(V - V_{ref}) - (E_{tdr} - E_{fd0})}{T_A} \end{cases} \quad (6)$$

式中: g_i 为系统项; Δ_i 为扰动项。其表达式分别如式(7)和式(8)。

$$g_i = \frac{1}{2H}(-d\omega + P_m - \frac{E'V_0}{x'_d + x} \sin \delta) + \Delta_c \quad (7)$$

$$\Delta_i = P_c \cos(2\pi\alpha t) \sin \delta + P_k \cos(2\pi\beta t) \quad (8)$$

由于发电机受非线性摩擦力等因素的影响, 并且存在数学模型不够精确的情况, 在原式(1)中加入不确定项, 设 Δ_c 为发电机中的不确定项之和。

令系统中总的不确定因素之和为

$$f_i = g_i + \Delta_i \quad (9)$$

为了对系统目标轨迹进行更好的跟踪, 通过延时一个采样周期来对系统不确定值进行估计。令 τ 为延时时间, 如果时滞误差 $|f_i - f_{i-\tau}|$ 足够小, 即可认定延时前后系统的状态近似相同, 即

$$f_i \cong f_{i-\tau} = \dot{\omega}_{i-\tau} - u_{i-\tau} \quad (10)$$

令目标函数为 r_i , 则控制误差 e_i 为

$$e_i = \delta - r_i \quad (11)$$

结合式(5)一式(10)得到如式(12)形式时滞控制器。

$$u = -(\dot{\omega}_{i-\tau} - u_{i-\tau}) - (\ddot{r} - c_1 \dot{e}_i - c_2 e_i) / 2\pi f \quad (12)$$

式中, c_1 、 $c_2 > 0$, 其大小影响控制器收敛速度与抗扰动能力, 取值越大, 控制器收敛速度越快, 但过大的取值会导致控制器产生较大抖振, 并且在遭遇外部扰动时可能产生较大超调现象^[24]。

3.2 全局滑模时滞控制器设计

由于时滞控制采用延时采样方法, 增加了系统到达预定目标轨道的时间, 且电力系统同时存在电磁扰动和负荷扰动, 在时滞误差的作用下系统误差可能会不断累积, 最终出现系统振荡。

全局滑模控制响应速度较快, 且具有很好的抗扰动能力。将时滞控制与全局快速滑模控制结合, 并加入时滞补偿项以补偿时滞误差, 加快系统收敛到目标轨道的速度, 减小跟踪误差。

取滑模面为

$$S = \dot{e}_i + K_b e_i + K_c e_i^{q/p} \quad (13)$$

式中, K_b 、 $K_c > 0$, p 和 q 为正奇数, 且 $p > q$ 。 K_b 、 K_c 取值对系统的影响与 c_1 、 c_2 相同, p 和 q 的取值应满足 $q < p < 2q$ ^[24]。

全局滑模时滞控制器表达式为

$$u = -(\dot{\omega}_{i-\tau} - u_{i-\tau}) - f(S) - (K_b \dot{e}_i + K_c e_i^{(q-p)/p} \dot{e}_i q/p + \gamma S^{q/p} - \ddot{r}) / 2\pi f \quad (14)$$

式中, $f(S)$ 为时滞补偿项, 为减小时滞控制误差, 设计 $f(S)$ 为

$$f(S) = \frac{K_d + \eta |S|^{\lambda}}{M(S)} \theta(S) \quad (15)$$

$$M(S) = \varphi + (1 + 1/|e_i|^2 - \varphi) e_i^{-\sigma |S|} \quad (16)$$

采用具有平滑特性的继电函数而非符号函数, 其表达式可以描述为

$$\theta(S) = \frac{S}{|S| + \varepsilon} \quad (17)$$

在式(15)中, $K_d > 0$ 、 $\eta > 0$ 、 $\sigma > 0$ 、 $1 > \varphi > 0$, ε 为足够小的常数。通过引入误差函数 $|e_i|$ 和滑模函数 $|S|$, 使控制器在线地调整状态并迅速逼近滑模面。当 $|S|$ 增大时, $M(S)$ 将逐渐逼近 φ , 时滞补偿项化为 $(K_d + \eta |S|^{\lambda})/\varphi$, 由于 $1 > \varphi > 0$, 时滞补偿项比常规幂指数项更大, 增加时滞误差的补偿量, 收敛速度更快。当系统误差较小时, $|S|$ 趋近于 0, $M(S)$ 趋近于 $1 + 1/|e_i|^2$, $\eta |S|^{\lambda}$ 趋近于 0, 则时滞补偿项化为 $K_d |e_i|^2 / (1 + |e_i|^2)$, 补偿项主要由 $|e_i|$ 决定, 此阶段补偿项较小, 可有效避免超调现象。

由上述分析可知 σ 、 η 、 λ 与 K_d/φ 主要影响系统抗扰动能力, 取值越大, 系统抗扰动能力越强。考虑到系统稳态收敛精度, 其取值不宜过大^[25-26]。

由于时滞误差的影响, 控制器输出可能过大, 故应对控制器增加限幅措施。

$$u = \begin{cases} u_i, & |u| \leq u_{\max} \\ 5, & |u| > u_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

取 Lyapunov 函数为

$$V_2 = \frac{1}{2} S^2 \quad (19)$$

对 V_2 求导可得

$$\dot{V}_2 = S(2\pi f(f_i + u_i) - \ddot{r} + K_b \dot{e}_i + K_c e_i^{(q-p)/p} \dot{e}_i q/p) \quad (20)$$

将式(14)代入上式可得

$$\dot{V}_2 = S(2\pi f(f_i - f_{i-\tau} - f(S)) - \gamma S^{q/p}) \quad (21)$$

假设 $|f_i - f_{i-\tau}| < H$, 即时滞误差有界, 则式(21)可化为

$$\dot{V}_2 \leq S(2\pi f(H - f(S)) - \gamma S^{q/p}) \quad (22)$$

将式(15)代入式(22)中得到

$$\dot{V}_2 \leq 2\pi f(HS - \frac{K_d |S|}{M(S)} - \frac{\eta |S|^{\lambda+1}}{M(S)}) - \gamma S^{(q+p)/p} \quad (23)$$

由于 $M(S)$ 存在下界 φ , $1 > \varphi > 0$, 式(23)化为

$$\dot{V}_2 \leq (2\pi f(HS - \frac{1}{\varphi} K_d |S| - \frac{\eta |S|^{\lambda+1}}{M(S)}) - \gamma S^{(q+p)/p}) \quad (24)$$

若取 $K_d/\varphi > H$ ，由于 $2\pi f\eta|S|^{\lambda+1}/M(S) \geq 0$ 且 $(p+q)$ 为偶数，所以 $\dot{V}_2 \leq 0$ ，系统稳定。

全局滑模时滞控制框图如图 7 所示。

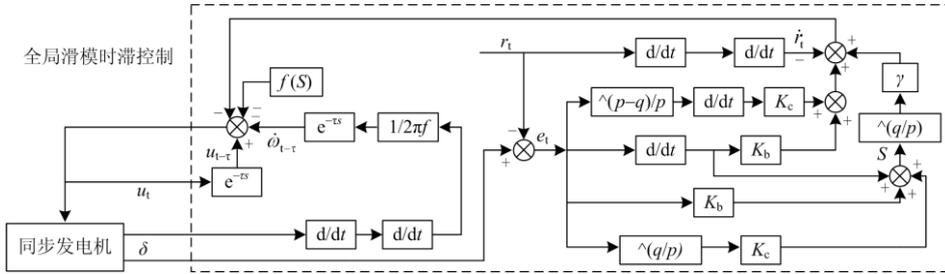


图 7 全局滑模时滞控制系统框图

Fig. 7 Block diagram of global sliding mode time delay control system

4 仿真验证

为对比时滞控制与全局滑模时滞控制对混沌状态的抑制能力，采用 Matlab/Simulink 进行仿真验证。由上节可知，取 $P_e = 0.2$ ， $\alpha = 0.1$ ， $P_k = 0.1$ ， $\beta = 0.1$ 时，系统(1)处于混沌状态。从图 8 可以看出，系统功角 δ 处于无规则振荡状态。

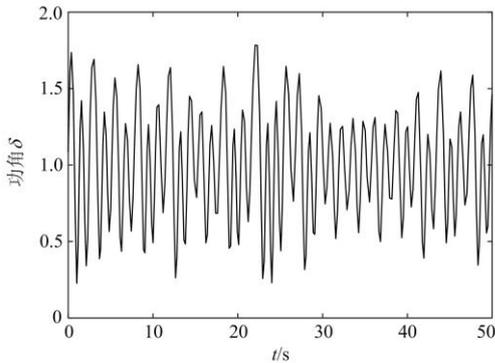
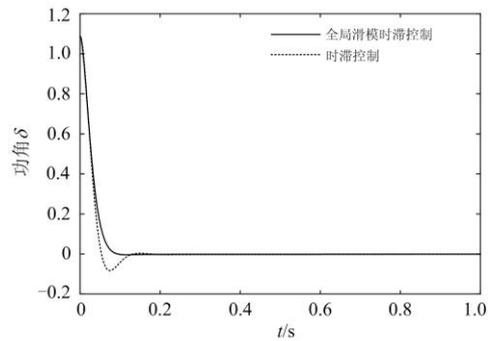


图 8 功角时域图

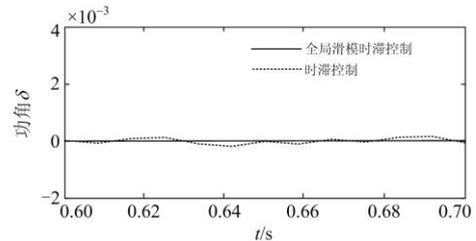
Fig. 8 Power angle time domain diagram

以功角 δ 为控制目标，设置控制目标轨道为 $r = 0$ ，取仿真步长和延时时间 τ 为 1 ms。经过多次实验，取时滞控制的控制参数为 $c_1 = 800$ ， $c_2 = 314$ ，取全局滑模时滞控制的控制参数为 $\varepsilon = 0.001$ ， $K_c = 186$ ， $q = 3$ ， $p = 5$ ， $K_d = 2$ ， $\eta = 15$ ， $\lambda = 0.1$ ， $\varphi = 0.1$ ， $\sigma = 30$ ， $\gamma = 154$ ， $\varepsilon = 0.01$ ， $u_{\max} = 5$ 。 $t = 0$ s 时在系统中分别加入两控制器进行位置跟踪，仿真结果如图 9 所示。

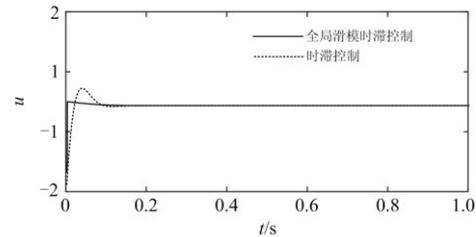
通过图 9(a)可以看出，加入控制信号后，在时滞控制的作用下，系统在接近目标轨道中有一小段振荡，最大超调量为 0.092，稳定在目标轨道的时间为 0.188 s，而全局滑模控制则快速接近目标轨道，且不存在振荡过程，稳定在目标轨道的时间为 0.112 s。从图 9(b)可以看出，系统在全局滑模时滞



(a) 功角时域图



(b) 功角误差时域图



(c) 控制器输出时域图

图 9 控制效果对比图

Fig. 9 Control effect comparison chart

控制的作用下稳定收敛于目标轨道，而在时滞控制作用下系统状态仍有小幅误差。由此可见，相比于时滞控制，全局滑模时滞控制收敛速度更快，跟踪误差更小。

除扰动 P_e 和 P_k 外，给系统加入扰动高频正弦信号 $\sin(50t)$ 。 $t = 0$ s 时在系统中分别加入时滞控制与

全局滑模时滞控制进行位置跟踪, 仿真结果如图 10 所示。

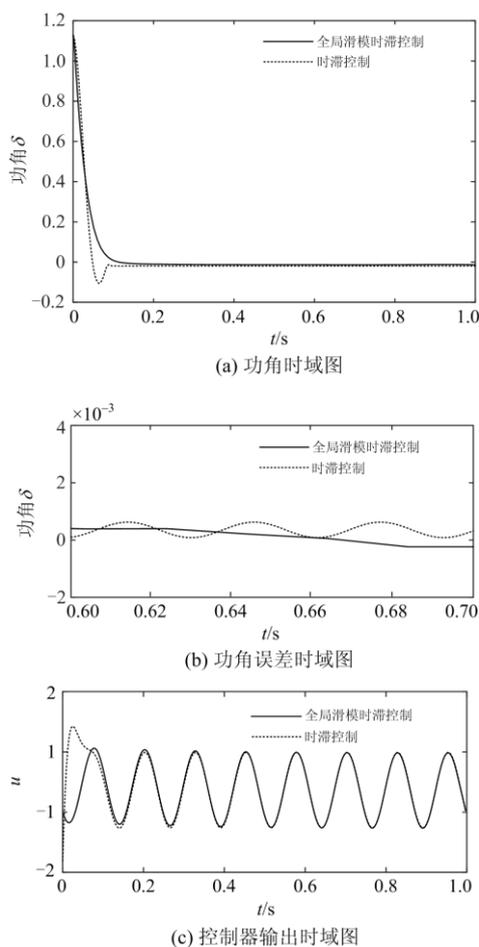


图 10 控制效果对比图

Fig. 10 Control effect comparison chart

通过图 10(a)可以看出, 加入控制信号后, 在时滞控制作用下, 系统接近目标轨道过程中仍有小幅振荡, 在 0.906 s 后基本稳定在预定轨道上, 其最大超调量为 0.010 1, 而在全局滑模时滞控制作用下, 系统在接近目标轨道过程中不存在振荡过程, 在 0.12 s 后基本稳定在目标轨道上。通过图 10(b)可以看出, 在全局快速滑模时滞控制的作用下, 系统稳定在目标轨道上且系统状态有着缓慢平滑的波动, 功角跟踪误差最大值为 0.22×10^{-3} , 而在时滞控制作用下系统状态仍有小幅误差, 其功角跟踪误差最大值为 0.854×10^{-3} 。由此可见, 在高频扰动下, 相较于时滞控制, 全局快速滑模时滞控制控制抗扰动能力更强, 跟踪误差更小。

除扰动 P_e 和 P_k 外, 在 $t = 0.5$ s 时刻额外加入幅值为 1 的阶跃扰动信号, $t = 0$ s 时在系统中分别加入时滞控制与全局滑模时滞控制进行位置跟踪, 仿

真结果如图 11 所示。

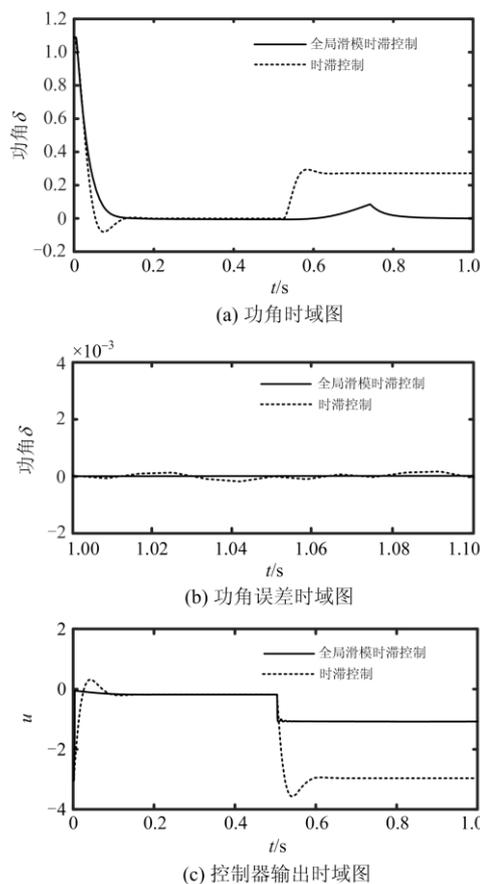


图 11 控制效果对比图

Fig. 11 Control effect comparison chart

在 $t < 0.5$ s 时, 图 11 中两条功角变化曲线与图 9 相同, 故在此不再赘述。由图 11(a)可以看出, $t = 0.5$ s 时在系统中加入阶跃扰动后, 在时滞控制作用下, 系统功角在 $t = 0.5$ s 时快速上升, 经过一小段波动后最终稳定在 $\delta = 0.276$ 上, 并未成功收敛到 0。而在全局快速滑模时滞控制作用下, 系统功角在 $t = 0.5$ s 时缓慢上升, 并在 $t = 0.5$ s 后开始逐渐收敛至目标轨道上。由此可见, 在阶跃扰动下, 相较于时滞控制, 全局滑模时滞控制抗扰动能力更强, 跟踪误差更小。

5 结论与展望

1) 本文分析了扰动 P_e 与 P_k 单独作用与共同作用时对电力系统的影响。当扰动单独作用时, 系统会随着扰动量的增大而逐渐进入混沌。两种扰动共同作用时, 随着扰动量的增大, 系统出现由混沌到拟周期态再到混沌的复杂现象。

2) 针对电力系统易受参数不确定和不确定扰

动的影响, 本文提出了一种全局滑模时滞控制来抑制电力系统的混沌状态。仿真结果表明, 全局滑模时滞控制收敛速度更快, 稳态误差更小, 在高频正弦扰动信号与阶跃扰动作用时仍可以快速收敛至目标轨道。

3) 对于多机电力系统, 由于各发电机参数可能不同, 动态特性也不同, 故应分别对目标发电机进行控制, 且应根据具体情况选择相应的采样时间。当多机电力系统发生局部扰动时, 此时扰动区域较小, 在全局滑模时滞控制的作用下, 扰动区域内发电机功角经过几个延时周期的波动后收敛至原稳定目标轨道, 其余并联机组功角也均会出现小幅波动; 当系统发生区域扰动时, 此时扰动区域较大, 在各控制器时滞误差的积累下, 系统可能出现大幅功角振荡, 从而导致系统失稳。故在易受区域扰动的多机电力系统中, 全局滑模时滞控制并不适用。

4) 未来可将时滞控制应用在模型更为精确的 7 阶电力系统中, 并针对易受区域扰动的多机电力系统改进时滞控制。

参考文献

- [1] 严波, 贺少波. Conformable 分数阶单机无穷大电力系统分岔与混沌研究[J]. 系统科学与数学, 2020, 40(6): 954-968.
YAN Bo, HE Shaobo. Bifurcation and chaos of conformable fractional order unipolar infinite power system[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2020, 40(6): 954-968.
- [2] 蔡卫江, 李雪锋, 赵士正. 基于粒子群算法的 SVC 抑制阻尼系统振荡控制器设计[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 60-65.
CAI Weijiang, LI Xuefeng, ZHAO Shizheng. Design of oscillation controller of SVC damping system based on particle swarm algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 60-65.
- [3] 贾宏杰, 余贻鑫, 王成山. 电力系统混沌现象及相关研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 27-31.
JIA Hongjie, YU Yixin, WANG Chengshan. Chaotic phenomena in power systems and its studies[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 27-31.
- [4] 和萍, 武欣欣, 陈婕, 等. 含风电和光伏发电的综合能源系统的低频振荡[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 20-27.
HE Ping, WU Xinxin, CHEN Jie, et al. Low frequency oscillation of an integrated energy system with wind and solar power generations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 20-27.
- [5] 薛禹胜, 周海强, 顾晓荣. 电力系统分岔与混沌研究述评[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(16): 9-15.
XUE Yusheng, ZHOU Haiqiang, GU Xiaorong. A review of bifurcation and chaos researches in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(16): 9-15.
- [6] 王宝华, 杨成梧, 张强. 电力系统分岔与混沌研究综述[J]. 电工技术学报, 2005, 20(7): 1-10.
WANG Baohua, YANG Chengwu, ZHANG Qiang. Summary of bifurcation and chaos research in electric power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(7): 1-10.
- [7] 张卫东, 张伟年. 电力系统混沌振荡的参数分析[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 17-20.
ZHANG Weidong, ZHANG Weinian. Analysis of parameters for chaotic power systems[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 17-20.
- [8] 胡振鑫, 闵富红, 周琪. 基于双频扰动的互联电力系统混沌分析[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2018, 18(2): 9-18.
HU Zhenxin, MIN Fuhong, ZHOU Qi. Chaotic analysis of interconnected power system based on dual frequency disturbance[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2018, 18(2): 9-18.
- [9] 方洁, 许丹莹, 方娜. 四阶电力系统混沌分析与新型滑模控制[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2020, 54(3): 391-397, 404.
FANG Jie, XU Danying, FANG Na. Chaotic analysis and new sliding mode control for fourth-order power system[J]. Journal of Central China Normal University: Natural Sciences, 2020, 54(3): 391-397, 404.
- [10] 闵富红, 马汉媛, 王耀达. 含功率扰动电力系统混沌振荡的动态滑模控制[J]. 通信学报, 2019, 40(1): 119-129.
MIN Fuhong, MA Hanyuan, WANG Yaoda. Surface sliding mode controller for chaotic oscillation in power system with power disturbance[J]. Journal on Communications, 2019, 40(1): 119-129.
- [11] 张维奇, 李富盛, 余涛. 双馈感应电机最大功率跟踪鲁棒滑模控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 47-56.
ZHANG Weiqi, LI Fusheng, YU Tao. Optimal wind power extraction of doubly-fed induction generator via perturbation observer based sliding-mode controller[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 47-56.
- [12] 于永进, 王家斌, 王艳. 基于自适应全局滑模的电力系统混沌振荡控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 43-49.
YU Yongjin, WANG Jiabin, WANG Yan. Chaotic oscillation control in power system based on adaptive total sliding mode[J]. Power System Protection and

- Control, 2019, 47(16): 43-49.
- [13] AYYARAO T S L V. Modified vector controlled DFIG wind energy system based on barrier function adaptive sliding mode control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 34-41. DOI: 10.1186/s41601-019-0119-3.
- [14] 江世明, 曾喆昭, 陈开义. 互联电力系统混沌控制的新型滑模控制方法[J]. 控制工程, 2017, 24(5): 978-983. JIANG Shiming, ZENG Zhezha, CHEN Kaiyi. A new sliding mode control method of chaos control for interconnected power systems[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(5): 978-983.
- [15] 刘先正, 王兴成, 温家良, 等. 含新能源直流电网的状态反馈控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 115-121. LIU Xianzheng, WANG Xingcheng, WEN Jialiang, et al. State feedback control of DC grid with renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 115-121.
- [16] 阴宏民, 王继弘, 阴冠嵩. 鲁棒状态反馈附加励磁控制器设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 116-122. YIN Hongmin, WANG Jihong, YIN Guanhao. Design of robust-state feedback supplementary excitation controller[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(12): 116-122.
- [17] 倪骏康, 刘崇新, 庞霞. 电力系统混沌振荡的等效快速终端模糊滑模控制[J]. 物理学报, 2013, 62(19): 107-113. NI Junkang, LIU Chongxin, PANG Xia. Fuzzy fast terminal sliding mode controller using an equivalent control for chaotic oscillation in power system[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(19): 107-113.
- [18] 田芳, 周孝信, 史东宇, 等. 基于卷积神经网络的电力系统暂态稳定预防控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 1-8. TIAN Fang, ZHOU Xiaoxin, SHI Dongyu, et al. A preventive control method of power system transient stability based on a convolutional neural network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 1-8.
- [19] 王年, 陈辉, 丁大为, 等. 基于RBF神经网络滑模控制的互联电力系统混沌控制研究[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2018, 54(5): 911-920. WANG Nian, CHEN Hui, DING Dawei, et al. RBF neural network based sliding mode controller and its application to chaos control in interconnected power system[J]. Journal of Nanjing University: Natural Science, 2018, 54(5): 911-920.
- [20] 王江彬, 刘崇新. 4阶混沌电力系统的协同控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(1): 26-31. WANG Jiangbin, LIU Chongxin. Synergetic control method for fourth-dimensional chaotic power system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(1): 26-31.
- [21] JIN Maolin, JIN Yi, CHANG P H. High-accuracy trajectory tracking of industrial robot manipulators using time delay estimation and terminal sliding mode[C] // 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, November 3-5, 2009, Porto, Portugal: 3095-3099.
- [22] 赵希梅, 姬相超, 王浩林. 永磁直线同步电动机的时滞自适应积分滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8): 44-50. ZHAO Ximei, JI Xiangchao, WANG Haolin. Time delay adaptive integral sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(8): 44-50.
- [23] CHO S J, JIN M, KUC T Y, et al. Control and synchronization of chaos systems using time-delay estimation and supervising switching control[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 75(3): 549-560.
- [24] 张达科, 胡跃明, 胡战虎. 低抖振非奇异终端滑模控制[J]. 广东工业大学学报, 2007, 24(3): 32-36. ZHANG Dake, HU Yueming, HU Zhanhu. Sliding mode control of low chattering non-singular terminal[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2007, 24(3): 32-36.
- [25] 穆朝絮, 余星火, 孙长银. 非奇异终端滑模控制系统相轨迹和暂态分析[J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 902-908. MU Chaoxu, YU Xinghuo, SUN Changyin. Phase trajectory and transient analysis for nonsingular terminal sliding mode control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(6): 902-908.
- [26] 李升波, 李克强, 王建强, 等. 非奇异快速的终端滑模控制方法[J]. 信息与控制, 2009, 38(1): 1-8. LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang, et al. Nonsingular and fast terminal sliding mode control method[J]. Information and Control, 2009, 38(1): 1-8.

收稿日期: 2020-10-21; 修回日期: 2020-12-30

作者简介:

杨洋(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 2534019091@qq.com

于永进(1980—), 男, 通信作者, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yaydjto@163.com

王云飞(1964—), 男, 学士, 高级政工师, 主要研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: wangyunfei@sgtc.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)