

含功率扰动电力系统混沌振荡的动态滑模控制

闵富红, 马汉媛, 王耀达

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 随着电力行业的飞速发展, 电力系统中出现极具危害的混沌振荡可能性增大, 维持电力系统稳定的重要性日益突出。通过建立含功率扰动项的四阶电力系统模型, 对 Lyapunov 指数、分岔图和谱熵等进行分析, 讨论了功率扰动项的加入对电力系统运动状态的影响。同时, 基于具有继电特性的切换函数设计了一种动态面滑模控制器, 仿真结果表明该控制器在快速平滑抑制系统混沌振荡的同时, 能够有效避免抖动问题, 并且具有较强的顽健性。

关键词: 功率扰动; 分岔图; 混沌振荡; 动态面滑模控制

中图分类号: TM712

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019005

Surface sliding mode controller for chaotic oscillation in power system with power disturbance

MIN Fuhong, MA Hanyuan, WANG Yaoda

School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: With the rapid development of the power industry, the possibility of chaotic oscillation increases in the power system, and the importance of maintaining the stability of the power system is prominent. Through a fourth-order power system model with power perturbation term built, the Lyapunov exponent spectrum, bifurcation diagram and spectral entropy were analyzed, respectively. The influence of power disturbance terms on power system motion was discussed in detail. Moreover, a dynamic surface sliding mode controller was designed based on the switching function with relay characteristics. Simulation results show that the controller can suppress the chaotic oscillation quickly and smoothly, and effectively avoid chattering and own strong robustness.

Key words: power disturbance, bifurcation diagram, chaotic oscillation, dynamic surface sliding mode control

1 引言

电力系统是由发电机、变电所、输配电线路、电力负荷等组成的复杂非线性系统, 是一种耦合性强且变量多的动态系统。随着电力系统的发展和用电需求的增加, 电网结构和电气设备特性高度复杂化, 由参数变化、时间延迟和外部干扰等因素引起的混沌振荡会给电网的安全可靠运行带来威胁。混沌振荡是一种包含不稳定轨道的、敏感依赖性的运行, 是一种极其复杂的运行形式, 其不稳定性和敏感依赖性对电网安全运行构成了威胁^[1], 因此促使学者们针对此现象做了诸多研究工作, 分析了各种电力系统的动态特性和

混沌机理^[2-3]。Ji^[4]讨论了激励硬限幅环节对四阶电力系统的影响, 发现该系统经历了全局分岔进而导致持续的混沌行为。Min 和 Ma^[5-6]分析了互联电力系统的动力学行为, 研究了电磁干扰的灵敏度和延迟时间, 并阐述了其在电力系统中的共存现象。

电力系统中出现的混沌振荡具有复杂的机理, 其存在可能会导致整个系统的稳定性丧失, 引起电压崩溃甚至灾难性停电, 但是基于线性控制理论的传统稳定性策略不能有效地对其进行抑制, 因此学者们也提出了许多非线性方法用于混沌控制, 如反馈控制^[7-8]、自适应控制^[9-12]、线性耦合^[13]、滑模控制^[14-16]、模糊控制^[17]、激活反馈控制^[18]等, 其中许

收稿日期: 2018-05-14; 修回日期: 2018-09-11

通信作者: 闵富红, minfuhong@njnu.edu.cn

多方法适用于高度非线性的大系统如电力系统。
Ni^[19-20]分别设计了模糊快速终端滑模控制器和快速
固定时间非奇异终端滑模控制方法,来抑制电力系统
中的混沌振荡。Si^[21]设计延迟反馈控制器用于抑制风
力涡轮机的分数阶永磁同步发电机模型中的混沌振
荡。可见,滑模控制器的“结构”并不固定,其主要
机理是根据系统所期望的动态特性来设计切换面,通
过控制律迫使系统状态在该平面上运动。控制器的
设计与系统参数和扰动无关,具有响应快速、对参
数变化和扰动不灵敏以及物理实现简单的优点,能
够更好地适应电力系统非线性强、变化剧烈、扰动
因素多、参数不稳定等特征,提高系统的可靠性且
滑模抖振小。

本文基于含有功率扰动项的四阶电力系统模
型,通过分岔图、Lyapunov 指数谱和谱熵研究此
模型中不同扰动参数改变时系统的非线性特性,发
现功率扰动项可以使系统运动接近具有特定参数
的周期轨道。此外,利用滑模控制进行混沌振荡的
抑制,使得系统在控制过程中随时间变化,并且沿
规定轨迹作小幅度的高频切换,以继电特性函数为
切换面,使系统能够快速平滑地到达控制目标。数
值仿真结果表明,该非线性控制器性能良好,使系
统能够快速平稳地达到预期目标。

2 系统建模

同步发电机是电力系统最重要的能量来源,也
是整个电网的核心。以同步电动机作为重要设备
的互联电力系统的研究,是电力系统动态特性研究
的关键。图 1 显示了带励磁环节的系统模型,这里
的励磁环节是指发电机励磁系统控制回路,基本功
能是为发电机励磁绕组提供直流电流(励磁电流),
以形成发电机气隙磁场,实现转子机械能到定子
电能的能量转换。

图 1 中励磁控制器的输出电压 E_{fd} 受控制
器约束,依据输入电压 E_{ldr} 的大小在有限区间
 $[E_{fd\min}, E_{fd\max}]$ 内变动,系统方程可以描述为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = 2\pi f_0 \omega \\ \dot{\omega} = \frac{-d\omega + P_m - \frac{E'V_0}{x'_d + x} \sin \delta}{2H} \\ \dot{E}' = \frac{-\frac{x_d + x}{x'_d + x} E' + \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x} \cos \delta + E_{fd}}{T'_{d0}} \\ \dot{E}_{ldr} = \frac{-K_A(V - V_{ref}) - (E_{ldr} - E_{ld0})}{T_A} \end{cases} \quad (1)$$

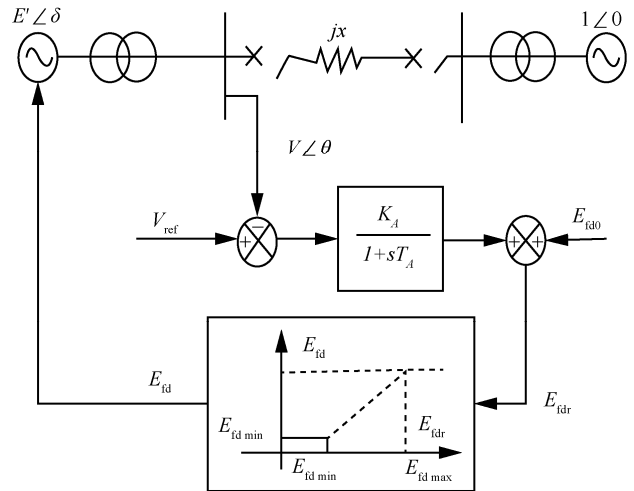


图 1 含励磁环节的电力系统模型

其中, δ 是发电机的功角, ω 是发电机角频率, f_0
是同步电机基频, M 是发电机转子的惯性, d 是
阻尼因子, P_m 是输入功率的发电机, P_G 由发电
机的电磁功率传递, x 是输电线路的电抗, x_d 是
发电机的电抗, x'_d 是发电机暂态电抗, T'_{d0} 是
发电机定子绕组的时间常数, E_{fd} 是激励电压,
 V_0 是无穷大的电压, K_A 是放大增益, V_{ref} 是
母线电压参考值, E_{ld0} 是励磁限制电压的参考
值, V 是发电机的终端电压, 可表示为

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

电力系统中一般采用终端限幅方式的励磁环
节对系统进行设备保护,励磁控制器的输出电压
 E_{fd} 表示为

$$E_{fd} = \begin{cases} E_{fd\max}, & E_{ldr} > E_{fd\max} \\ E_{ldr}, & E_{fd\min} \leq E_{ldr} \leq E_{fd\max} \\ E_{fd\min}, & E_{ldr} < E_{fd\min} \end{cases} \quad (3)$$

当输入电压 E_{ldr} 在区间 $[E_{fd\min}, E_{fd\max}]$ 内时,
输出电压 $E_{fd} = E_{ldr}$; 当 E_{ldr} 超出输出上限(或下
限)时,输出电压 E_{fd} 保持在上限 $E_{fd\max}$ (或下
限 $E_{fd\min}$) 而不再随 E_{ldr} 变动,直到 E_{ldr} 重新
回到区间 $[E_{fd\min}, E_{fd\max}]$ 范围内。

结合电力系统实际操作参数和便于混沌研究,
各系统参数取值如表 1 所示。

依据表 1 所给系统参数,可计算式(1)的耗
散特性如式(4)所示。

表 1 系统参数取值

参数名称	数值
同步电机基频 (f_0)	60
传输线路电抗 (x)	0.5
发电机态电抗 (x_d)	1
励磁限制器电压参考值 (E_{fd0})	2
等值转动惯量 (H)	5
发电机暂态电抗 (x'_d)	0.4
母线电压参考量 (V_{ref})	1.05
励磁限制器电压最小值 (E_{fdmin})	0
无穷大母线电压 (V_0)	1
发电机定子时间常数 (T'_{d0})	10
励磁时间常数 (T_A)	1
励磁限制器电压最大值 (E_{fdmax})	5

注：表中各参数均取标么值。

$$\begin{aligned} \nabla V &= \frac{\partial \delta}{\partial \delta} + \frac{\partial \omega}{\partial \omega} + \frac{\partial E'}{\partial E'} + \frac{\partial E_{fdr}}{\partial E_{fdr}} \\ &= -\frac{d}{2H} - \frac{x_d + x}{T'_{d0}} - \frac{1}{T_A} = -\frac{d}{10} - \frac{7}{6} \end{aligned} \quad (4)$$

当系统阻尼系数为正时， ∇V 取值必为负，因此，只要保证电力系统等效阻尼一直为正阻尼，则式(1)表示的系统一定为耗散系统，对应 t 时刻的相空间体积 $V(t)$ 在运动过程中总是不断收缩，如式(5)所示。当 $t \rightarrow \infty$ 时，相空间体积为 0，系统运动轨迹收缩到有限范围内并最终固定在一个吸引域上，从而表明系统混沌吸引子存在的可能性。

$$V(t) = V(0)e^{-\left(\frac{d}{10} + \frac{7}{6}\right)t} \quad (5)$$

为求取系统的平衡点，令式(1)左侧等于 0，同时代入表 1 中的系统参数取值，可获得如式(6)所示代数方程。

$$\begin{cases} 0 = 120\pi\omega \\ 0 = \frac{-d\omega + P_m - \frac{E'}{0.4+0.5} \sin \delta}{10} \\ 0 = \frac{-\frac{1+0.5}{0.4+0.5} E' + \frac{1-0.4}{0.4+0.5} \cos \delta + E_{fdr}}{10} \\ 0 = -K_A(V - 1.05) - (E_{fdr} - 2) \end{cases} \quad (6)$$

其中，励磁控制器输出电压 E_{fd} 表示为

$$E_{fd} = \begin{cases} 5, & E_{fdr} > 5 \\ E_{fdr}, & 0 \leq E_{fdr} \leq 5 \\ 0, & E_{fdr} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

发电机端电压 V 表示为 $V = \frac{1}{0.5 + 0.4 \sqrt{(0.4 + 0.5E' \cos \delta)^2 + (0.5E' \sin \delta)^2}}$ 。

设定一组系统参数 $d = 0.5, P_m = 1.3, K_A = 150$ ，代入式(6)中进行迭代计算，可求得一组平衡点： $(\delta, \omega, E', E_{fdr}) = (1.0409, 0, 1.3559, 1.9229)$ 。

为了更接近实际情况，在电力系统中考虑了不同的功率扰动，式(1)可以被描述为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = 2\pi f_0 \omega \\ \dot{\omega} = \frac{1}{2H} \left(-d\omega + P_m - \frac{E'V_0}{x'_d + x} \sin \delta - P_e \cos(2\pi f_1 t) \sin \delta + P_k \cos(2\pi f_2 t) \right) \\ \dot{E}' = \frac{-\frac{x_d + x}{x'_d + x} E' + \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x} \cos \delta + E_{fd}}{T'_{d0}} \\ \dot{E}_{fdr} = \frac{-K_A(V - V_{ref}) - (E_{fdr} - E_{fd0})}{T_A} \end{cases} \quad (8)$$

其中， $-P_e \cos(2\pi f_1 t) \sin \delta$ 表示电磁功率扰动项， P_e 和 f_1 分别表示电磁扰动的幅值和频率， $P_k \cos(2\pi f_2 t)$ 表示负载功率扰动项， P_k 和 f_2 分别为负载扰动的幅值和频率。

3 功率扰动项对系统的影响

以电磁扰动的幅值 P_e 和频率 f_1 、负载扰动的幅值 P_k 和频率 f_2 ，这 4 个电力系统参数为研究对象，采取单变量法，固定系统参数 $d = 2, P_m = 1.2, K_A = 190$ ，将 $(\delta, \omega, E', E_{fdr}) = (1.0409, 0, 1.3559, 1.9229)$ 作为系统初始值代入式(8)进行迭代运算。利用分岔图、Lyapunov 指数谱和相图分别展示这 4 个参数对系统状态吸引子演变过程的影响。

3.1 电磁扰动幅值 P_e

电磁扰动项的存在可能会使系统出现超高压，影响系统的稳定运行，因此有必要对电磁扰动项进行研究。电力系统的振荡频率一般在 0~2 Hz 之间，选取 $P_k = 0, f_2 = 0$ Hz 和 $f_1 = 0.2$ Hz，得到 $P_e \in (0, 0.2255)$ 时系统的 P_e 分岔图和 Lyapunov 指数谱，如图 2 所示。

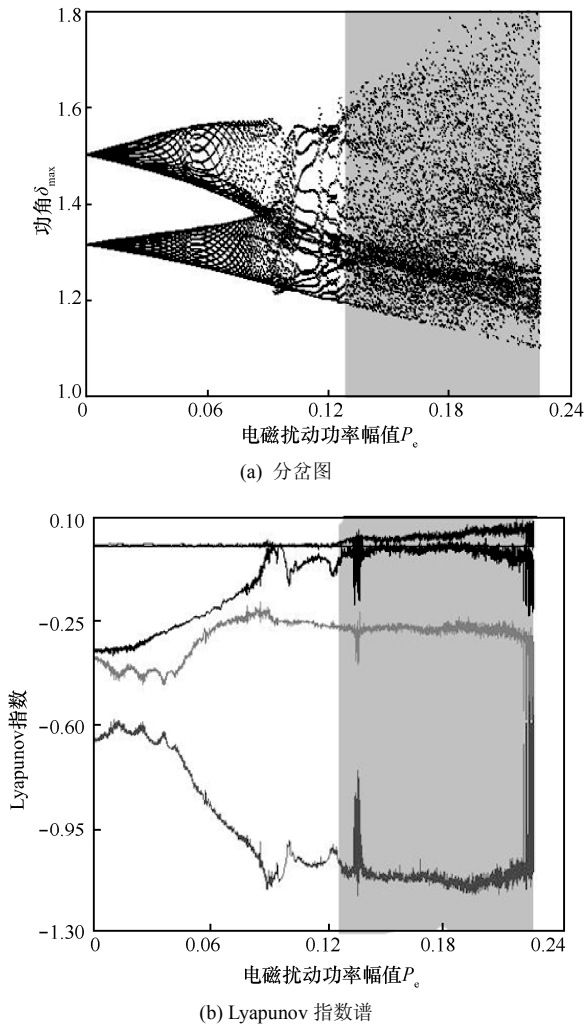


图 2 系统关于 P_e 的分岔图和 Lyapunov 指数谱

当 $P_e \in (0, 0.1256)$ 时, 系统在参数范围内最大的 2 个 Lyapunov 指数 (LE, Lyapunov exponent) 同时保持趋近于 0, 即系统在该范围内 LE 值的分布情况为 $(0, 0, -, -, -)$, 通过 LE 值并结合分岔图可判定系统运动在此范围内为拟周期态。而系统在拟周期态与混沌态的分界点 $P_e = 0.1256$ 处的 LE 具体值为 $(0, 0, -0.0944, -0.2502, -1.1088)$ 。当 P_e 持续增大超过 0.1256 后, 系统的最大 LE 也会迅速增大并大于 0, 系统运动实现由拟周期向混沌转变的过渡过程。在 $P_e \in (0.1256, 0.2255)$ 的范围内, 对应图 2(a)和图 2 (b)的阴影部分, 系统最大 LE 大于 0, 结合分岔图可知此时系统运行在混沌运动状态。当 $P_e > 0.2255$ 时, 由于式(8)中的电力系统不能长期处于稳定态, 导致过度扰动作用下的电压崩溃。表 2 给出了部分 P_e 值时系统的 LE 和运行状态。

P_e	LE	系统运行状态
0.1237	$(0, 0, -0.0646, -0.2723, -1.0364)$	拟周期
0.2250	$(0.07620, -0.0217, -0.2882, -0.570)$	混沌

3.2 电磁扰动频率 f_1

频率作为功率扰动的另一个重要参数, 其取值也会直接影响到电力系统运动状态。在不考虑负荷扰动情况下, 选取 $P_k = 0$, $f_2 = 0$ 和 $P_e = 0.02$, 得到 $f_1 \in (0, 2)$ 时系统关于 f_1 的分岔图和 Lyapunov 指数谱, 如图 3 所示。

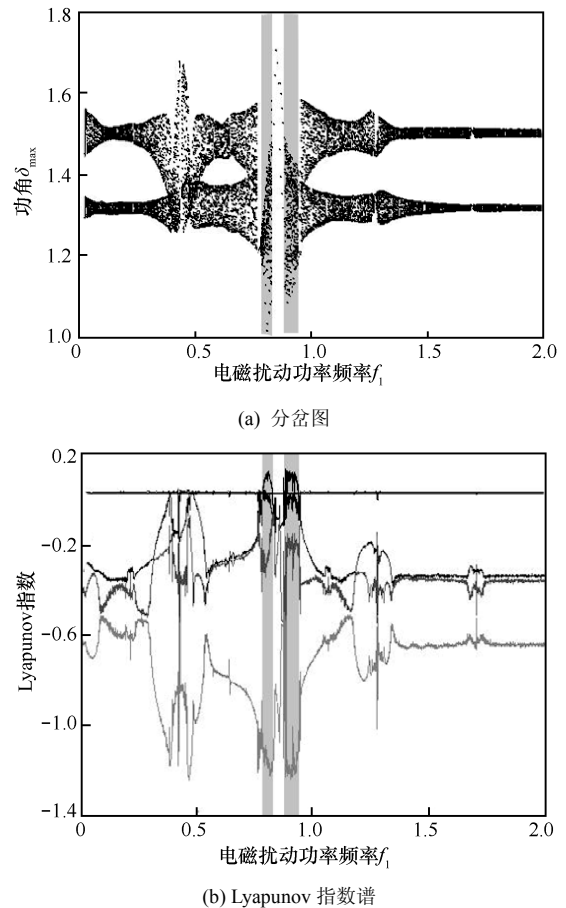


图 3 系统关于 f_1 的分岔图和 Lyapunov 指数谱

在 $f_1 \in (0.7780, 0.8205) \cup (0.8740, 0.9315)$ 的范围内, 即图 3(a)与图 3(b)中的 2 块阴影区域, 最大 LE 大于 0, 表明系统运动于混沌状态。当 $f_1 \in (0.8205, 0.9315)$ 时, 对应图 3(a)与图 3(b)中 2 块阴影区域的中间部分, 该段范围内最大 LE 等于 0 且次大 LE 小于 0, 即该参数范围内系统处于周期运动状态。而在 $f_1 \in (0, 0.7780) \cup (0.9315, 2)$ 时, 系统的最大与次大 LE 均趋于 0, 从分岔图可

看出此时系统处于拟周期运动状态。此外， $f_1 = 0.4200$ 和 $f_1 = 1.2680$ 的较小邻域内，最大的 LE 仍然为 0，次大 LE 为负，在图 4(a) 中出现周期窗口。

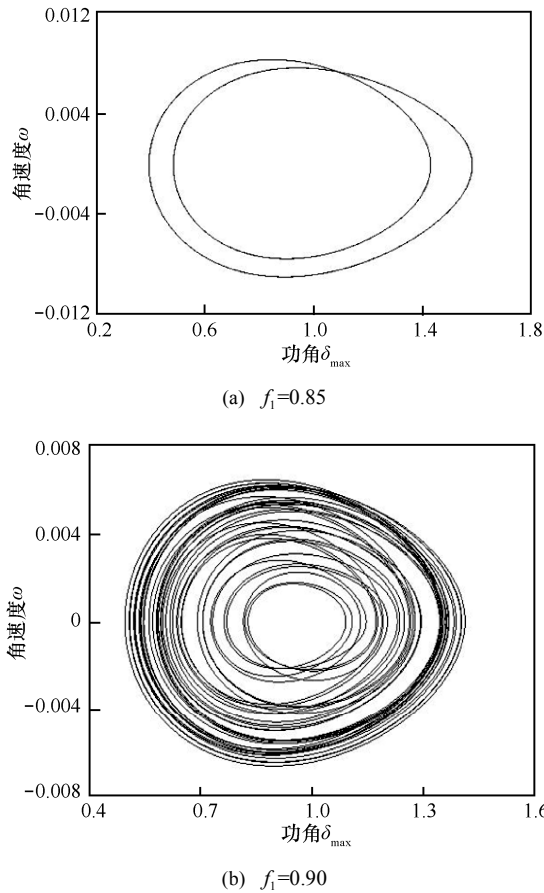


图 4 系统关于 f_1 特定值的相图

图 4 为 $f_1 = 0.85$ 和 $f_1 = 0.90$ 时系统的相图，可以明显看出系统运动状态从周期到混沌的变化，与上述分析相对应。部分 f_1 值对应的系统 LE 和运行状态如表 3 所示。

3.3 负荷扰动幅值 P_k

负荷扰动的存在可能会引起谐波和电压波动

等损害电能质量的问题，威胁到电力系统的稳定，因此有必要对负荷扰动项进行研究。在不考虑电磁扰动情况下，选取 $P_c = 0$ ， $f_1 = 0$ ， $f_2 = 0.2$ ，得到 $P_k \in (0, 0.2555)$ 时系统关于 P_k 的分岔图和 Lyapunov 指数谱，如图 5 所示。

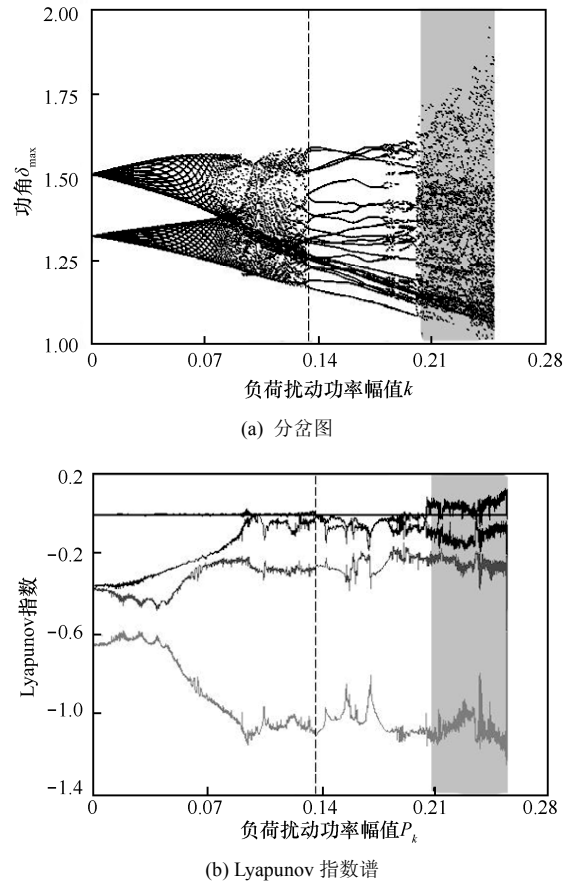


图 5 系统关于 P_k 的分岔图和 Lyapunov 指数谱

在 $P_k \in (0, 0.1370)$ 的范围内，系统最大 LE 以及次大 LE 均趋近于 0，系统此时处于拟周期运动状态。当 $P_k \in (0.1370, 0.2055)$ 时，系统最大 LE 保持 0，次大 $LE \leq 0$ ，系统运行在周期状态，且从图 5(a) 可看出周期数较大，而在上文中改变 P_c 时

表 3 不同 f_1 值时的 LE 与系统状态

f_1	LE	系统运行状态
0.4200	(0, -0.0469, -0.0491, -0.2336, -1.0371)	周期
0.8000	(0.0838, 0, -0.0329, -0.2612, -1.1564)	混沌
0.8500	(0, -0.0517, -0.1310, -0.1389, -1.0451)	周期
0.9000	(0.0773, 0, -0.0196, -0.2138, -1.2107)	混沌
1.2680	(0, -0.0266, -0.1972, -0.2050, -0.9380)	周期

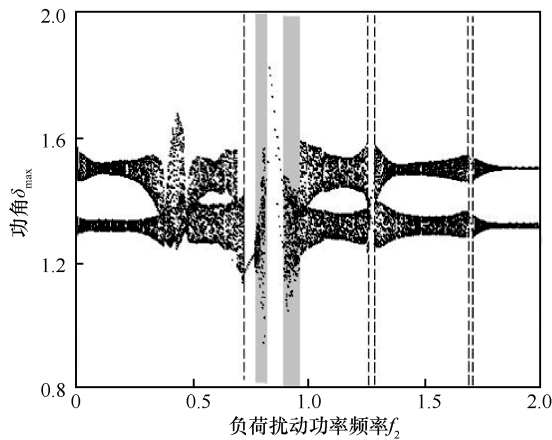
表 4 不同 P_k 值时的 LE 与系统状态

P_k	LE	运行状态
0.090 3	(0, 0, -0.100 3, -0.218 2, -1.073 9)	拟周期
0.170 3	(0, -0.062 8, -0.128 7, -0.222 7, -0.966 0)	周期
0.218 0	(0.216 7, 0, -0.124 2, -0.246 1, -1.050 5)	混沌

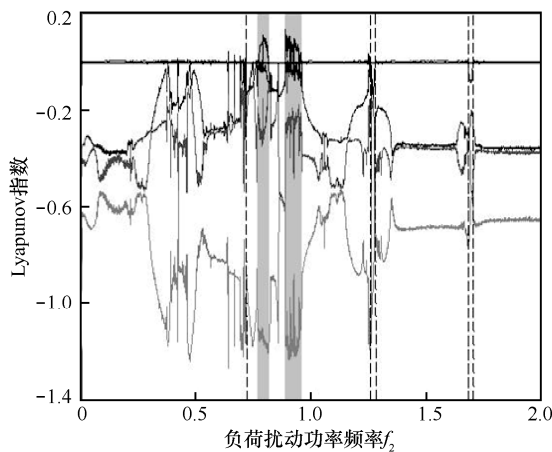
却并未找到周期运动的痕迹。当 $P_k \in (0.2055, 0.2555)$ 时, 对应图 5(a)与图 5(b)中的阴影区域, 该段参数范围内系统最大 LE 具有明显的正性, 此时系统运动状态为典型的混沌态。而在 P_k 值超过 0.255 5 时, 系统将会因过大的扰动作用产生功角发散现象从而崩溃。表 4 展示了部分 P_k 值时系统的 LE 和运行状态。

3.4 负荷扰动频率 f_2

与上文分析方法类似, 在不考虑电磁扰动情况下, 选取 $P_k = 0.02$, $P_c = 0$, $f_1 = 0$, 得到 $f_2 \in (0, 2)$ 时系统关于 f_2 的分岔图和 Lyapunov 指数谱, 如图 6 所示。



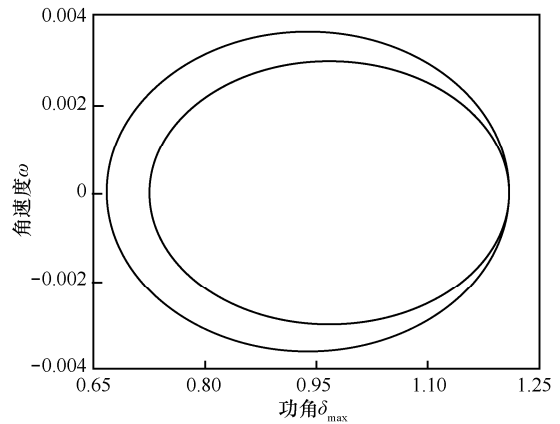
(a) 分岔图



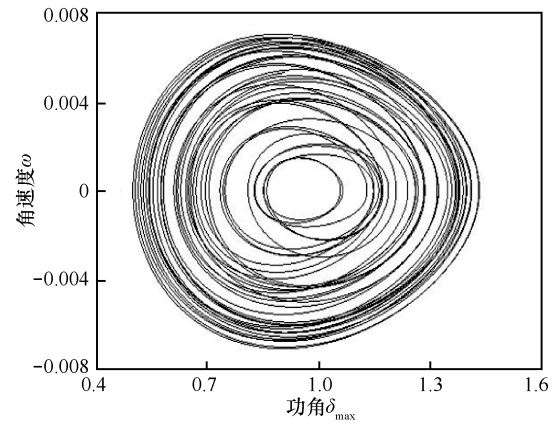
(b) Lyapunov 指数谱

图 6 系统关于 f_2 的分岔图和 Lyapunov 指数谱

相较于改变 f_1 时的情况, 改变 f_2 对系统带来的变化大体上相似, 只存在几处较小的差别。当 f_2 在 $(0.7615, 0.8130) \cup (0.8855, 0.9575)$ 的范围内时, 对应于图 6 中 2 个阴影区域, 此时系统的最大 LE 大于 0, 说明系统运动状态为混沌态。当 $f_2 \in (0.7135, 0.7615) \cup (0.8130, 0.8855) \cup (1.2565, 1.2775) \cup (1.6820, 1.7040)$ 时, 系统最大 LE 为 0, 其余的 LE 均明显小于 0, 从图 8(a)对应区域也能观察到明显的周期窗口。当 $f_2 \in (0, 0.7135) \cup (0.9575, 1.2565) \cup (1.2775, 1.6820) \cup (1.7040, 2)$ 时, 系统中最大的 2 个 LE 值同时趋近于 0, 意味着系统在该参数范围内运行于拟周期状态。图 7 为 $f_2 = 0.75$ 和 $f_2 = 0.90$ 时系统的相图, 可以明显看出系统运动状态从周期到混沌



(a) $f_2 = 0.75$



(b) $f_2 = 0.90$

图 7 系统关于 f_2 特定值的相图

的改变，与上述分析相对应。部分 f_2 值对应的系统 LE 和运行状态如表 5 所示。

4 系统的复杂度分析

混沌系统复杂度是指采用相关算法衡量混沌序列接近随机序列的程度，复杂度值越大，序列越接近随机序列，相应的运动越无规律^[22]。对于电力系统而言，若其具有明显的振荡规律，则得到的 SE 测度值较小，即复杂度较小，若系统无振荡规律则复杂度较大。

为了进一步验证此模型的运动状态，这里引入谱熵复杂度(SE, spectral entropy)分析，图 8 为系统

关于 P_e 、 P_k 、 f_1 、 f_2 的 SE 复杂度分析图。

由图 8(a)与图 8(b)可以明显看出系统随着 P_e 和 P_k 的增大，其复杂度呈现上升趋势，与系统从拟周期到混沌的运动轨迹相对应，在同一参数配置下，混沌运动的复杂度比拟周期和周期态大。图 8(c)与图 8(d)为系统关于 f_1 和 f_2 的 SE 复杂度分析图。图 8(c)中虚线之间的区域对应于图 3(a)与图 3(b)中 2 块阴影区域的中间部分，图 8(d)中虚线之间的区域对应于图 6(a)与图 6(b) $f_2 \in (0.8130, 0.8855) \cup (1.2565, 1.2775)$ 的范围内，这些部分均为系统出现小周期的区间，其 SE 值较小，在混沌区间内，其 SE 值相对较大。不同于

表 5 不同 f_2 值时的 LE 与系统状态

f_2	LE	运行状态
0.500 0	(0, 0, -0.068 6, -0.453 4, -0.847 2)	拟周期
0.750 0	(0, -0.062 0, -0.072 4, -0.106 6, -1.125 7)	周期
0.800 0	(0.063 7, 0, -0.027 4, -0.250 5, -1.152 5)	混沌
0.850 0	(0, -0.112 2, -0.114 4, -0.168 6, -0.971 6)	周期
0.900 0	(0.100 4, 0, -0.028 1, -0.250 3, -1.188 7)	混沌
1.270 0	(0, -0.130 5, -0.163 6, -0.167 9, -0.904 7)	周期

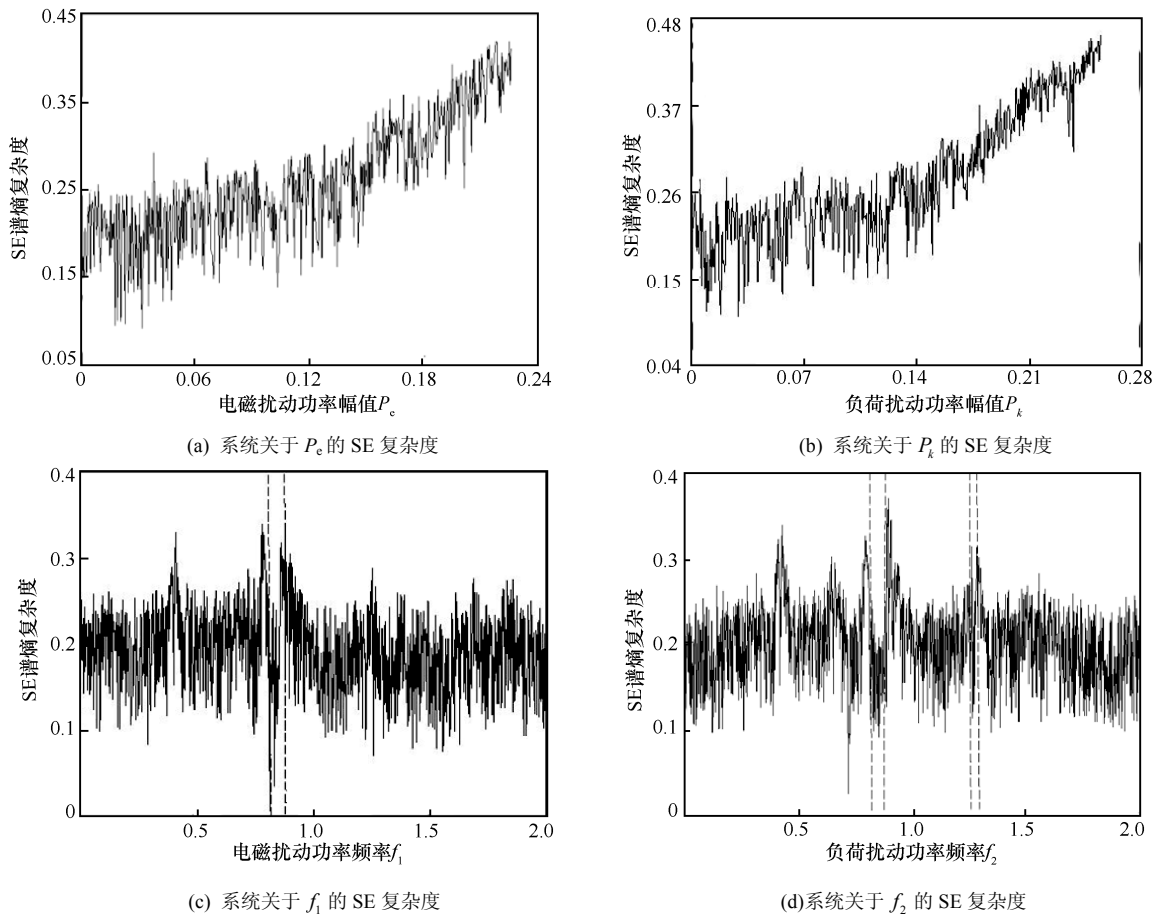


图 8 系统关于 P_e 、 P_k 、 f_1 、 f_2 的复杂度

图 8(a)与图 8(b)中 SE 值呈现单调递增趋势, 图 8(c)与图 8(d)中的 SE 值变化起伏较多, 即相比扰动幅值, 在扰动频率影响下系统会展现出更加丰富的动力学行为。

通过改变式(8)中的功率扰动参数, 观察到了周期运动、拟周期运动以及混沌现象。与以往的工作相比, 当功率扰动存在时, 电力系统更有可能出现混沌振荡。因此, 有必要设计一种有效的控制器来抑制电力系统的混沌现象。

5 混沌振荡的抑制

滑模控制器设计与系统参数无关, 具有抗干扰能力强等特点。这里设计了一种基于低通滤波器的动态表面滑模控制方法, 以抑制混沌振荡。该方法可以消除微分项的爆炸, 具有简单的结构和参数设计, 并将继电器特性函数作为控制器的开关函数, 有效地抑制了系统的抖振。

5.1 控制器设计与稳定性分析

对于含功率扰动项的电力系统四阶模型式(8), 以发电机功角 δ 作为控制目标, 在方程组的第 2 项式加入控制律 u , 得到如下受控系统

$$\begin{cases} \dot{\delta} = 2\pi f_0 \omega \\ \dot{\omega} = f + \Delta + u \\ \dot{E}' = \frac{-\frac{x_d + x}{x_d' + x} E' + \frac{x_d - x_d'}{x_d' + x} \cos \delta + E_{fd}}{T_{d0}} \\ \dot{E}_{idr} = \frac{-K_A(V - V_{ref}) - (E_{idr} - E_{fd0})}{T_A} \end{cases} \quad (9)$$

其中, 系统项 $f = \frac{-d\omega + P_m - \frac{E'V_0}{x_d' + x} \sin \delta}{2H}$, 扰动项 $\Delta = \frac{-P_e \cos(2\pi f_1 t) \sin \delta + P_k \cos(2\pi f_2 t)}{2H}$ 。

设受控系统式(9)的预期控制目标为 r , 定义位置误差为

$$e_1 = \delta - r \quad (10)$$

则 $\dot{e}_1 = 2\pi f_0 \omega - \dot{r}$ 。

取第一个 Lyapunov 函数为 $V_1 = \frac{1}{2} e_1^2$, 则有

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 (2\pi f_0 \omega - \dot{r}) \quad (11)$$

定义 $e_2 = 2\pi f_0 \omega - \alpha$, 则有

$$\dot{V}_1 = e_1 (e_2 + \alpha - \dot{r}) \quad (12)$$

在反演设计中, 取虚拟控制 $\alpha = -c_1 e_1 + \dot{r}$ (c_1 为正常数), 导致求 $\dot{\alpha}$ 时出现微分爆炸, 通过采用低通滤波器可克服这一缺点。

取 α 为 $\bar{\alpha}$ 的低通滤波器 $\frac{1}{\tau s + 1}$ 的输出, 定义 $\bar{\alpha} = -c_1 e_1 + \dot{r}$, c_1 为正常数, 并满足式(13)。

$$\begin{cases} \tau \dot{\alpha} + \alpha = \bar{\alpha} \\ \alpha(0) = \bar{\alpha}(0) \end{cases} \quad (13)$$

由式 (13)得 $\dot{\alpha} = \frac{\bar{\alpha} - \alpha}{\tau}$, 所产生的滤波误差为 $y = \alpha - \bar{\alpha}$ 。

考虑到位置跟踪、虚拟控制和滤波误差, 定义第二个 Lyapunov 函数为

$$V_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} y^2 \quad (14)$$

由于 $\dot{e} = 2\pi f_0 \dot{\omega} - \dot{\alpha} = 2\pi f_0 (f + \Delta + u) - \dot{\alpha}$, $\dot{y} = \frac{\bar{\alpha} - \alpha}{\tau} - \dot{\alpha} = \frac{-y}{\tau} + c_1 \dot{e}_1 - \ddot{r}$, 则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= e_1 (e_2 + y + \bar{\alpha} - \dot{r}) + \\ &e_2 [2\pi f_0 (f + \Delta + u) - \dot{\alpha}] + y \left(\frac{-y}{\tau} + c_1 \dot{e}_1 - \ddot{r} \right) \\ &= e_1 (e_2 + y + \bar{\alpha} - \dot{r}) + \\ &e_2 [2\pi f_0 (f + \Delta + u) - \dot{\alpha}] + y \left(\frac{-y}{\tau} + B \right) \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $B = c_1 \dot{e}_1 - \ddot{r}$ 。由于

$$\begin{aligned} B &= c_1 (\dot{\delta} - \dot{r}) - \ddot{r} = c_1 (2\pi f_0 \omega - \dot{r}) - \ddot{r} \\ &= c_1 (e_2 + \alpha - \dot{r}) - \ddot{r} = c_1 (e_2 + y + \bar{\alpha} - \dot{r}) - \ddot{r} \\ &= c_1 (e_2 + y - c_1 e_1) - \ddot{r} \end{aligned} \quad (16)$$

因此 B 为关于 e_1 、 e_2 、 y 、 \ddot{r} 的函数。

定义滑动面为 $s = e_2$, 则动态面滑模控制器设计为

$$u = -\frac{\eta}{2H} \theta(e_2) - f + \frac{\dot{\alpha} - c_2 e_2}{2\pi f_0} \quad (17)$$

其中, 切换函数 $\theta(s)$ 采用继电器特性函数而非常规的符号函数, 即 $\theta(s) = \frac{s}{s + |\varepsilon|}$, ε 为很小的正常数; η 为扰动控制增益参数, 是一个满足 $\frac{\eta}{2H} \geq |\Delta|$ 的正常数; c_2 为大于 0 的常数。

定理 取 $V_2(0) \leq p$, $p > 0$, 则系统所有信号有界, 收敛。

证明 当 $V_2 = p$ 时, $V_2 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}y^2 = p$,

$$\dot{V}_2 \leq -2\frac{1}{4p}p + \frac{1}{2} = 0 \quad (20)$$

B 有界, 记为 M , 则 $\frac{B^2}{M^2} - 1 \leq 0$ 。

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= e_1(e_2 + y + \bar{\alpha} - \dot{r}) + \\ &e_2[2\pi f_0(f + \Delta + u) - \dot{\alpha}] + y\left(\frac{-y}{\tau} + B\right) = \\ &e_1(e_2 + y - c_1e_1) + \\ &e_2\left[2\pi f_0\left(\Delta - \frac{\eta}{2H}\theta(e_2) + \frac{\dot{\alpha} - c_2e_2}{2\pi f_0}\right) - \dot{\alpha}\right] + y\left(\frac{-y}{\tau} + B\right) = \\ &e_1(e_2 + y) - c_1e_1^2 + 2\pi f_0e_2\left(\Delta - \frac{\eta}{2H}\theta(e_2)\right) - \\ &c_2e_2^2 + y\left(\frac{-y}{\tau} + B\right) \leq |e_1||e_2| + |e_1||y| - c_1e_1^2 - c_2e_2^2 - \frac{y^2}{\tau} + \\ &|y||B| + \left(2\pi f_0e_2\Delta - 2\pi f_0|e_2|\frac{\eta}{2H}\right) \leq \\ &\frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2) + \frac{1}{2}(e_1^2 + y^2) - c_1e_1^2 - c_2e_2^2 - \frac{y^2}{\tau} + \frac{1}{2}y^2B^2 + \frac{1}{2} = \\ &(1 - c_1)e_1^2 + \left(\frac{1}{2} - c_2\right)e_2^2 + \left(\frac{1}{2}B^2 + \frac{1}{2} - \frac{1}{\tau}\right)y^2 + \frac{1}{2} \quad (18) \end{aligned}$$

令 $\chi > 0, C_1 \geq 1 + \chi, C_2 \geq \frac{1}{2} + \chi, \frac{1}{\tau} \geq \frac{1}{2}M^2 + \frac{1}{2} + \chi$, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -\chi e_1^2 - \chi e_2^2 + \left(\frac{1}{2}B^2 - \frac{1}{2}M^2 - \chi\right)y^2 = \\ &-2\chi V_2 + \left(\frac{B^2}{M^2} - 1\right)\frac{M^2y^2}{2} + \frac{1}{2} \quad (19) \end{aligned}$$

若有 $\chi \geq \frac{1}{4p}$, 则

式(20)说明, 如果 $V_2(0) \leq p$, 则 $V_2(t) \leq p$ 。且 V_2 正定, \dot{V}_2 负定, 满足 Lyapunov 稳定性定理。

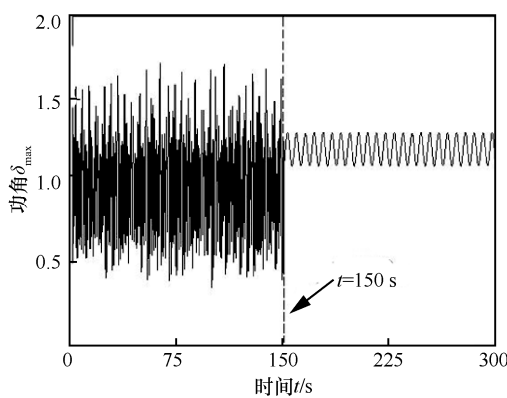
另外, $V_2 \leq \frac{1}{4\chi} + \left(V_2(0) - \frac{1}{4\chi}\right)e^{-2\chi t}$, 解得 $\dot{V}_2 \leq -2\chi V_2 + \frac{1}{2}$, 当 $t \rightarrow \infty, V_2 \rightarrow \frac{1}{4\chi}$ 。如果取 $\chi \rightarrow +\infty, V_2 = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}y^2 \rightarrow 0$, 即所有误差信号收敛于 0。同时, 由于 $\frac{1}{\tau} \geq \frac{1}{2}M^2 + \frac{1}{2} + \chi$, 若取滤波器时间常数 $\tau \rightarrow 0$, 则可取数 $\chi \rightarrow +\infty$ 。

5.2 数值仿真

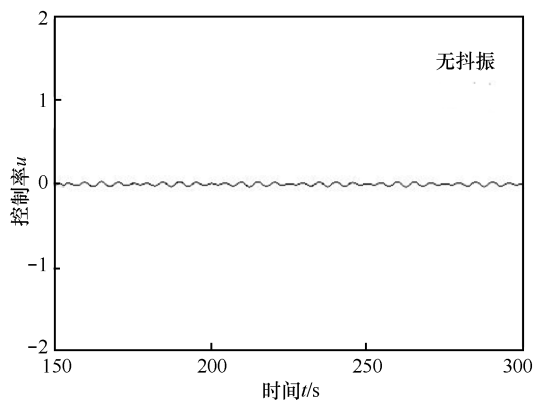
选取系统参数 $d = 2, P_m = 1.2, K_A = 190$, 扰动项参数 $P_e = 0.2, f_1 = 0.2, P_k = 0, f_2 = 0$, 此时系统表现为无规则混沌振荡状态。为抑制混沌振荡现象, 在系统运行 150 s 后添加设计的控制器即式(17)观察控制效果。

依据上文受控系统稳定性证明过程可知, χ 越大控制效果越好, 这也要求控制参数 $c_1、c_2$ 尽可能取较大的正常数。此处选取控制器参数 $c_1 = c_2 = 60, \tau = 0.01, \eta = 0.3, \varepsilon = 0.001$ 。选择 2 组不同的控制目标 $r = 1.2 + 0.1\sin(t)$ 和 $r = 1.2$, 观察系统在控制器接入系统后的控制效果, 结果如图 9 和图 10 所示。可以明显看出在控制器接入之前系统中功角 δ 非常不稳定, 波动幅度大且没有规律性, 在 150 s 加入控制器后功角 δ 趋于稳定, 波动范围小且有规律, 系统近乎没有抖振。

为体现本文控制方法的优越性, 在相同参数条



(a) 功角 δ 的时序曲线



(b) 控制率 u 的时序曲线

图 9 目标轨迹为 $r = 1.2 + 0.1\sin(t)$ 的滑模控制

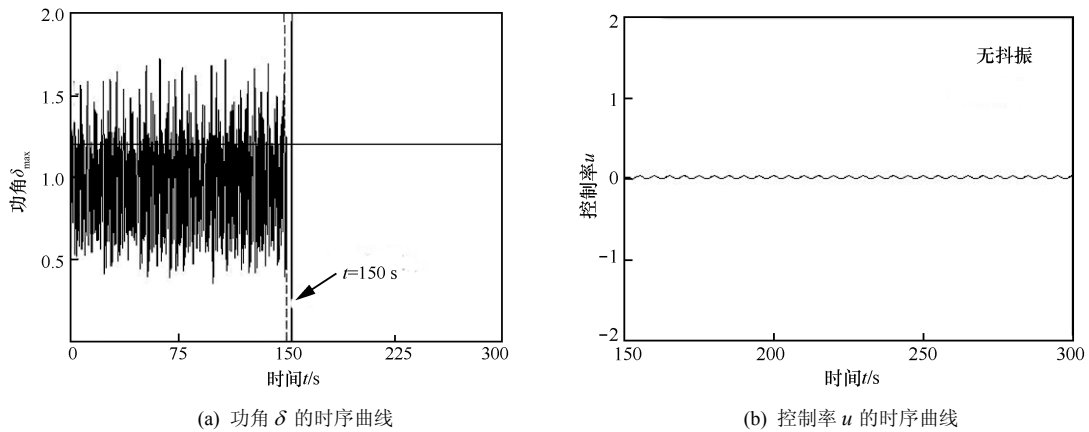


图 10 目标轨迹为 $r=1.2$ 的滑模控制

件下，采用符号函数即 $\theta(s) = \text{sgn}(s)$ 作为控制器的切换函数，并对相同的控制目标 $r = 1.2 + 0.1\sin(t)$ 和 $r = 1.2$ 进行追踪控制数值仿真，仿真结果如图 11 和图 12 所示。显然，采用继电特性函数 $\theta(s) = \frac{s}{s + |\varepsilon|}$ 作为切换函数的控制器控制效果更好，系统平滑稳定无抖振。而采用常规的符号函数作为切换函数，

虽然也能获得良好的控制效果，但系统抖振明显且抖振频率较高，同时也因剧烈的抖振现象导致数值仿真耗时长、数据量大。

6 结束语

本文建立了含有功率扰动项的四阶电力系统模型，基于耗散性分析了系统混沌吸引子存在的可

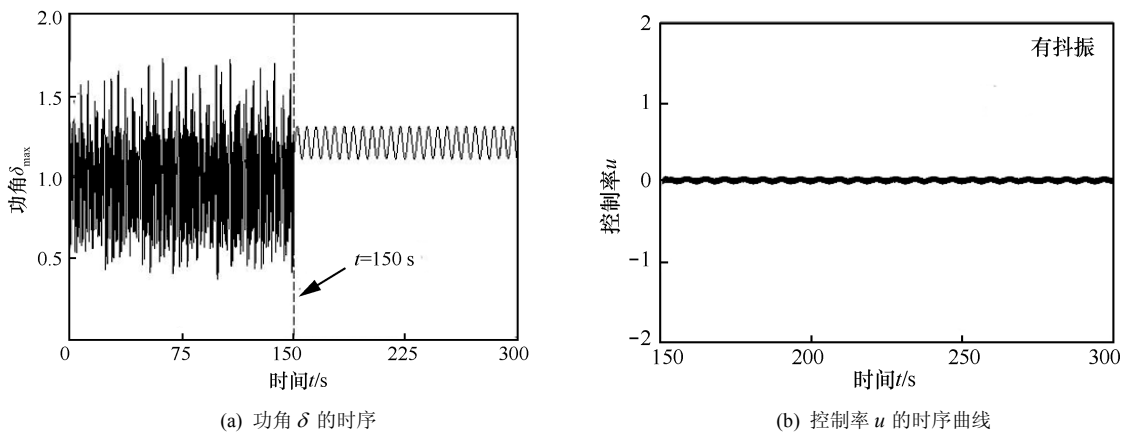


图 11 采用符号函数对目标轨迹为 $r = 1.2 + 0.1\sin(t)$ 的滑模控制

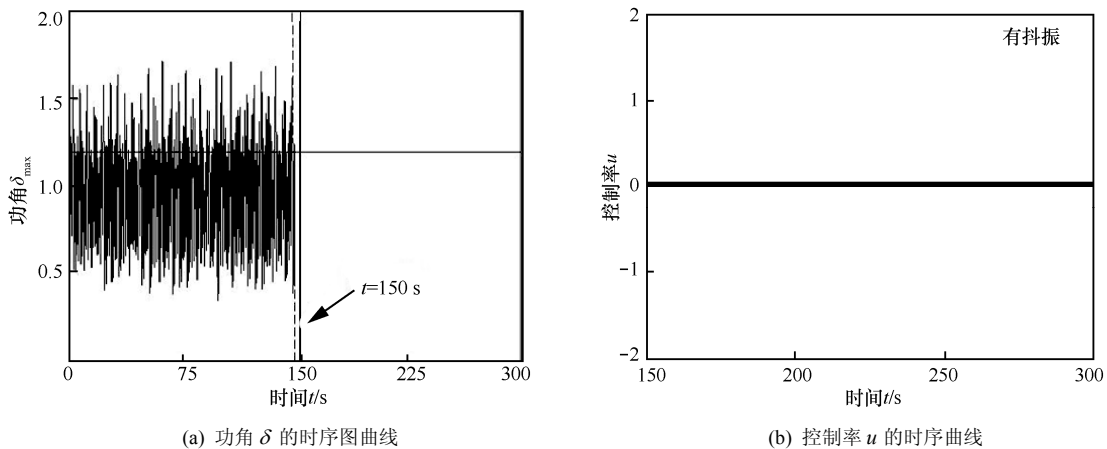


图 12 采用符号函数对目标轨迹为 $r = 1.2$ 的滑模控制

能性, 利用 Lyapunov 指数谱、分岔图、相图、谱熵等研究了功率扰动项对系统运动状态的影响, 可知在扰动频率影响下系统会展现出更加丰富的动力学行为。功率扰动项参数对系统功角影响更为敏感, 随着扰动幅值到达某一值时, 功角会急剧增大最终使系统失稳。本文根据系统特点设计了一种基于低通滤波器动态面滑模控制, 选取继电特性函数作为切换函数, 对电力系统中的混沌振荡进行抑制, 理论和数值仿真结果都表明了该控制器具备良好的控制效果, 能有效地去除抖振。

参考文献:

- [1] 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 W D, ZHANG W N. Parametric analysis of chaotic oscillations in power systems[J]. Power Grid Technology, 2000, 24 (12): 17-20.
- [2] 宋墩文, 姜苏娜, 郝建红, 等. 电力系统低频振荡分岔和混沌机理述评[J]. 华东电力, 2014, 42(6):1115-1123.
SONG D W, JIANG S N, HAO J H, et al. Review on the bifurcation and chaos mechanism of low frequency oscillation in power systems[J]. East China Power, 2014, 42 (6): 1115-1123.
- [3] ABADI A S A, BALOCHIAN S. Chaos control of the power system via sliding mode based on fuzzy supervisor[J]. International Journal of Intelligent Computing & Cybernetics, 2017, 10(1):68-79.
- [4] JI W, VENKATASUBRAMANIAN V. Hard-limit induced chaos in a fundamental power system model[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1996, 18(5):279-295.
- [5] 闵富红, 马美玲, 翟炜, 等. 基于继电特性函数的互联电力系统混沌控制[J]. 物理学报, 2014, 63(05):70-77.
MIN F H, MA M L, ZHAI W, et al. Chaos control of interconnected power system based on relay characteristic function[J]. Journal of Physics, 2014, 63 (5): 70-77.
- [6] MA M L, MIN F H. Bifurcation behavior and coexisting motions in a time-delayed power system[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(3):78-86.
- [7] 杨晓辉, 王毅, 刘小平, 等. 基于状态负反馈的电力系统混沌控制[J]. 电测与仪表, 2017, 54(14):76-80.
YANG X H, WANG Y, LIU X P, et al. Chaos control of power system based on state negative feedback[J]. Electrical Measurement and Instrument, 2017, 54(14): 76-80.
- [8] LI K, YU W, DING Y. Successive lag synchronization on nonlinear dynamical networks via linear feedback control[J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 80(1-2):421-430.
- [9] WANG Y, ZHANG C. Synchronization of the fractional order finance systems with activation feedback control[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2009, 14(8):3351-3357.
- [10] ROY S B, BHASIN S, KAR I N. Robust gradient-based adaptive control of nonlinearly parametrized plants[J]. IEEE Control Systems Letters, 2017, 1(2):352-357.
- [11] CHEN M, TAO G. Adaptive fault-tolerant control of uncertain nonlinear large-scale systems with unknown dead zone[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(8):1851-1862.
- [12] LIN D, WANG X. Self-organizing adaptive fuzzy neural control for the synchronization of uncertain chaotic systems with random-varying parameters[J]. Neurocomputing, 2011, 74(12-13):2241-2249.
- [13] WANG X Y, WANG M J. Dynamic analysis of the fractional-order Liu system and its synchronization[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2007, 17(3):304-311.
- [14] ZRIBI M, ALRIFAI M T, SMAOUI N. Control of chaos in a single machine infinite bus power system using the discrete sliding mode control technique[J]. Discrete Dynamics in Nature & Society, 2018(11):1-14.
- [15] LI C L, WU L. Sliding mode control for synchronization of fractional permanent magnet synchronous motors with finite time[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(6): 3329-3332.
- [16] PRASAD S, PURWAR S, KISHOR N. Non-linear sliding mode load frequency control in multi-area power system[J]. Control Engineering Practice, 2017, 61:81-92.
- [17] PRECUP R E, TOMESCU M L. Stable fuzzy logic control of a general class of chaotic systems[J]. Neural Computing & Applications, 2014, 26(3):1-10.
- [18] WANG X Y, SONG J M. Synchronization of the fractional order hyperchaos Lorenz systems with activation feedback control[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2009, 14(8):3351-3357.
- [19] 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 J K, LIU C X, PANG X. Equivalent fast terminal fuzzy sliding mode control for chaotic oscillation in power systems[J]. ACTA Physica, 2013, 62 (19): 107-113.
- [20] NI J K, LIU L, LIU C, et al. Fast fixed-time nonsingular terminal sliding mode control and its application to chaos suppression in power system[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs, 2017, 64(2):151-155.
- [21] SI G, ZHU J, DIAO L, et al. Modeling, nonlinear dynamic analysis and control of fractional PMSG of wind turbine[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 88(2):1-16.
- [22] 孙克辉, 贺少波, 何毅, 等. 混沌伪随机序列的谱熵复杂性分析[J]. 物理学报, 2013, 62(1): 27-34.
SUN K H, HE S B, HE Y, et al. Spectral entropy complexity analysis of chaotic pseudorandom sequences[J]. Journal of Physics, 2013, 62 (1): 27-34.

作者简介



闵富红 (1970-), 女, 江苏海安人, 博士, 南京师范大学教授, 主要研究方向为非线性电路系统、电力系统稳定性分析。



马汉媛 (1994-), 女, 陕西安康人, 南京师范大学硕士生, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制。

王耀达 (1993-), 男, 江苏宜兴人, 南京师范大学硕士生, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制。