

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.02.020

六阶电力系统动力学分析及其参数自适应滑模控制

鲁升敏¹, 王江彬², 刘崇新²

(1. 陕西省地方电力有限公司, 陕西 西安 710061; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了对六阶电力系统中的复杂动力学行为进行分析与控制,对系统动力学模型进行详细分析并为其设计参数自适应滑模控制器。首先,利用分岔图、相图以及频谱图分析电力系统的动力学行为,分析结果表明系统会在不同的参数条件下呈现周期运动、拟周期运动以及混沌运动,并出现了多涡卷吸引子。然后,在考虑系统参数不确定条件下为其设计参数自适应滑模控制器,并利用 Lyapunov 稳定性理论证明受控电力系统可以实现控制目标。最后,对所设计控制器的控制效果进行数值仿真,从而证实控制器可以实现复杂六阶电力系统动力学模型的控制。研究结果对于电力系统中高维复杂动力学模型的分析及控制具有借鉴作用。

关键词: 六阶电力系统; 混沌振荡; 混沌控制; 自适应滑模控制

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)02-0295-06

Dynamic analysis and parameter adaptive sliding mode control of a six-dimensional power system

LU Shengmin¹, WANG Jiangbin², LIU Chongxin²

(1. Shaanxi Local Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710061, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The complex dynamic behavior of a six-dimensional power system model is analyzed in detail, with a parameter adaptive sliding mode controller designed for it. Firstly, the bifurcation diagram, phase portrait and spectrum diagram are used to analyze the dynamic behavior of the power system, showing that the system will exhibit periodic motion, quasi periodic motion and chaotic motion with different parameters, and that there are multi-scroll attractors in the system. Then, a parameter adaptive sliding mode controller is designed under the condition of considering parameter uncertainties, with the Lyapunov stability theory used to prove that the controlled power system can achieve control goal. Finally, the numerical simulation results show that the controller can control the complex six-dimensional power system dynamics model. The results of the paper can be used for reference to the analysis and control of the high-dimensional complex dynamic model in a power system.

Key words: six-dimensional power system; chaotic oscillation; chaos control; adaptive sliding mode control

电力系统作为典型的动力学工程实际系统,其往往呈现多种复杂的动力学行为。研究表明,电力系统也会和其它众多非线性系统一样在特定参数及初始值条件下呈现混沌状态^[1-2]。人们已经提出了众多控制方法抑制电力系统混沌,然而目前大量研究工作仍然集中在二阶电力系统模型^[3-7]。

近年来,人们开始研究典型三母线电力系统混沌振荡行为并为其设计控制器。三母线电力系统的

主要动力学模型包括四阶模型、六阶模型以及更为复杂的七阶模型^[8-10]。为了控制四阶电力系统的混沌振荡,文献[11]基于有限时间稳定理论提出了有限时间反馈控制,文献[12]提出了性能更为优越的固定时间积分滑模控制,文献[13]则基于 LaSalle 不变集理论提出了形式简单的自适应反馈控制,该控制方法的突出特点在于所需电力系统模型的信息量很少。另外,文献[14]在考虑系统干扰的条件下

收稿日期: 2020-07-09; 网络出版日期: 2020-12-14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201214.1507.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877162)

第一作者: 鲁升敏,男,高级工程师,研究方向为城市电网规划设计及电机控制。E-mail: lusm@spg.com.cn

通信作者: 王江彬,男,博士生,研究方向为电力系统混沌控制。E-mail: 1550151867@qq.com

为该系统提出时标分离滑模控制。四阶模型可以通过对六阶模型化简得到,针对更为复杂的六阶模型提出的混沌控制方法必然更加具有普适性。

六阶电力系统动力学模型由于模型本身的复杂性所致,因此无法按照文献[15-16]分析及控制简单系统的方法通过解析运算求取系统平衡点与 Jacobi 矩阵,也难于采用诸如文献[17]对简单二阶电力系统混沌振荡条件进行解析分析的方法对六阶电力系统模型进行类似的分析。这给系统的分析与控制问题带来困难,也将六阶电力系统的分析及控制问题与简单系统明显相区别。目前来说,研究这类复杂系统模型的主要方法仍然是计算机数值仿真方法^[8-10]。文献[18]为六阶混沌电力系统提出了自适应协同控制,为该动力学系统的混沌控制问题提供了思路。然而,一方面尚需要对该系统模型中的动力学行为进行分析,另一方面仍然有必要针对该复杂电力系统模型进行混沌控制研究。

为了更进一步对六阶混沌电力系统进行分析与控制,首先利用混沌理论的分岔图、相图以及频谱图对六阶电力系统的动力学行为进行分析,并在系统中捕获到了多涡卷吸引子等动力学现象。然后在考虑参数不确定条件下为其设计参数自适应滑模控制器,利用 Lyapunov 稳定性方法证明了在控制器的作用下受控系统能够实现控制目标,从而消除了系统中的混沌振荡等复杂动力学行为,使整个受控电力系统能够恢复至稳定运行状态。

1 系统模型及其动力学分析

六阶电力系统模型可以由七阶电力系统模型简化而来^[10],在原有六阶电力系统模型的第二个方程、第五个方程以及第六个方程施加控制器之后构成的受控电力系统动力学模型表述为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_m = \omega_B s_m \\ \dot{s}_m = \frac{-d_m s_m + P_m - P_g}{2H} + u_1 \\ \dot{E}'_q = \frac{-E'_q + (x_d - x'_d)I_d + E_{fd}}{T'_{do}} \\ \dot{E}_{fd} = \frac{-E_{fd} + K_A(V_{ref} - V_t)}{T_A} \\ \dot{\delta}_L = \frac{Q - Q_{ld} - Q_0 - q_2 V_L - (q_3 - B_c)V_L^2}{q_1} + u_2 \\ \dot{V}_L = \frac{\{P - P_{ld} - P_0 - p_1[Q - Q_{ld} - Q_0 - q_2 \cdot V_L - (q_3 - B_c)V_L^2]/q_1 - p_3 V_L\}/p_2 + u_3}{1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ_m 与 s_m 分别表示发电机功角与频率偏差;

E'_q 表示 q 轴暂态电势; E_{fd} 表示励磁电势; δ_L 与 V_L 分别表示负载母线电压相角及幅值; u_1 、 u_2 、 u_3 表示三个待设计的控制输入。

系统(1)中, P_g 、 I_d 、 V_t 、 Q 、 P 这五个变量均是状态变量 δ_m 、 E'_q 、 δ_L 、 V_L 的函数,系统其它变量均为系统的常值参数。常值参数中除了 P_m 作为可变的分岔参数之外,系统其它参数的赋值、系统状态变量的初始值以及系统变量之间的具体耦合关系详见文献[18]。

令控制输入 $u_1 = 0$ 、 $u_2 = 0$ 、 $u_3 = 0$, 则系统(1)为原有六阶电力系统动力学模型。系统(1)的参数中, P_m 表示发电机机械输入功率,以该参数作为分岔参数对系统呈现的复杂动力学行为进行数值仿真分析。取参数区间 $P_m \in [0.65, 1.129]$, 利用最大值法绘制系统状态 δ_m 随参数 P_m 变化的分岔图见图 1。

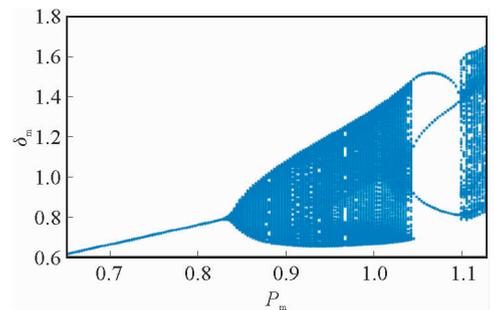


图1 系统状态 δ_m 随参数 P_m 变化的分岔图
Fig. 1 Bifurcation diagram for system state δ_m varying with parameter P_m

图 1 结合系统相图表明,系统状态在参数区间 $P_m \in [0.65, 0.83]$ 内表现为周期 1 运动,在该区间内取参数值 $P_m = 0.7$, 绘制的系统相图见图 2(a)。在参数区间 $P_m \in [0.84, 1.04]$ 内表现为拟周期运动,在该参数区间内取值 $P_m = 0.9$, 得到的系统相图见图 2(b)。在参数区间 $P_m \in [1.05, 1.09]$ 内表现为周期 3 运动,在该参数区间内取值 $P_m = 1.07$, 得到的系统相图见图 2(c)。而当 $P_m \in [1.1, 1.129]$ 时,系统状态进入混沌态,同样在参数区间内取值 $P_m = 1.129$, 得到系统相图见图 2(d)和图 2(e),明显系统状态在这两个相图上表现为奇怪吸引子。而当 $P_m > 1.129$ 时,会在多个参数区间出现系统状态发散的情况,因此选取的参数区间上界为 $P_m = 1.129$ 。然而,在 $P_m > 1.129$ 时系统状态的相图会在某些参数区间表现为多涡卷吸引子,而且随着系统仿真时间的增加涡卷的数目会持续增多。取参数 $P_m = 1.1465$, 仿真时间为 $t = 100$ s, 得到的系统相图见图 2(f)。这里绘制相图时选取的是具有典型特征的相平面。

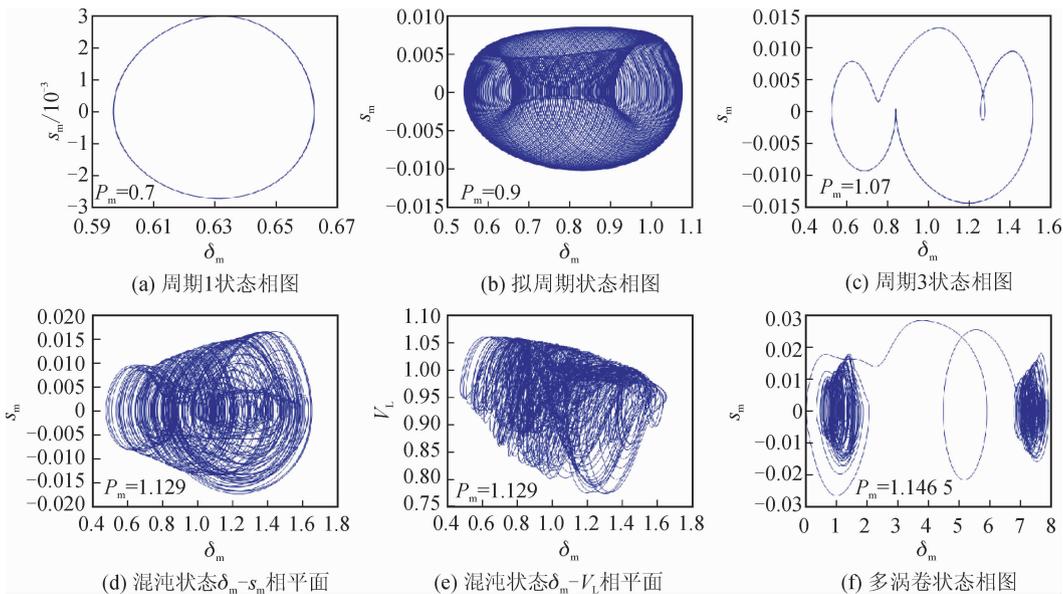


图2 六阶电力系统在不同分岔参数条件下的相图

Fig. 2 Phase diagram for six-dimensional power system with different bifurcation parameters

为了更进一步证实系统(1)在参数 $P_m = 1.129$ 与 $P_m = 1.1465$ 条件下的振荡形式是混沌振荡,取仿真时间 $t = 600s$,得到参数 $P_m = 1.129$ 时状态变量 δ_m 与 V_L 的频谱图见图 3(a)和图 3(b)。同样,参数 $P_m = 1.1465$ 时状态变量 s_m 与 V_L 的频谱图见图 3(c)和图 3(d)。对应每个状态变量均可以绘制对应的频谱图,这里选取的也是具有典型特征的频谱图。由图 3 可知,六阶电力系统在这些参数条件下的频谱图是具有混沌振荡典型特征的连续谱。包括混沌振荡在内的电力系统复杂动力学行为有可能对电力系统稳定性造成危害,因此有必要对其进行控制。

2 参数自适应滑模控制器设计

复杂电力系统模型的控制目标要能够兼容简单系统模型的控制目标。二阶电力系统模型的控制目标多为使系统恢复到同步运行状态^[3-7],而控制四阶电力系统模型需要使电力系统恢复同步并将其负载母线电压幅值控制到额定值^[19]。为此,系统(1)的控制目标设为使电力系统恢复到同步运行状态并将负载母线电压的相角及幅值控制到额定值,即具体控制目标设为: $\delta_{md} = 0, \delta_{ld} = 0, V_{ld} = 1$ 。为了利用滑模控制方法为系统(1)设计混沌控制器,定义滑模函数:

$$\begin{cases} S_1 = \omega_B s_m + \lambda_1 \delta_m \\ S_2 = \delta_L, \quad S_3 = V_L - 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\lambda_1 > 0$ 。

定义式(2)的滑模函数之后,就可以将系统(1)的控制目标表述为:设计控制器 $u_1、u_2、u_3$,使系统(1)的状态分别到达滑模面: $\{S_1 | S_1 = 0\}, \{S_2 | S_2 = 0\}, \{S_3 | S_3 = 0\}$ 。

系统(1)的常值参数中, d_m 与 P_m 分别表示发电机阻尼系数与机械输入功率; Q_{ld} 与 P_{ld} 分别表示负载无功功率值与有功功率值。这四个参数中, d_m 是难以测量的参数,而 $P_m、Q_{ld}、P_{ld}$ 则容易波动,因此将这四个参数作为不确定参数,并为其设计参数自适应律。设 $\hat{d}_m、\hat{P}_m、\hat{Q}_{ld}、\hat{P}_{ld}$ 分别表示 $d_m、P_m、Q_{ld}、P_{ld}$ 的参数估计值,则参数估计误差表示为:

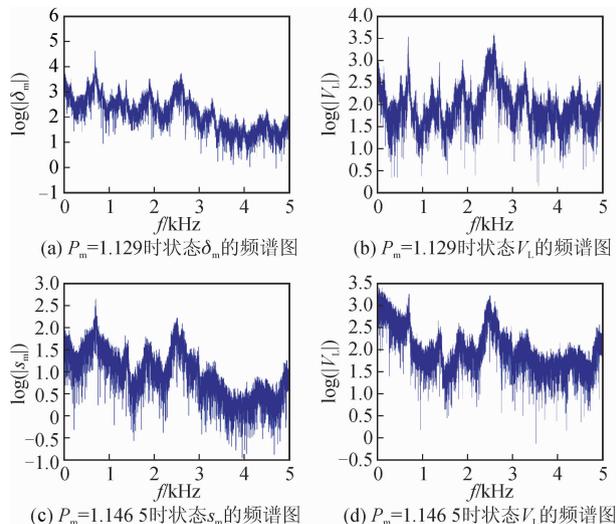


图3 六阶电力系统在不同分岔参数条件下的频谱图
Fig. 3 Spectrum of six dimensional power systems with different bifurcation parameters

$$\begin{cases} e_{d_m} = \hat{d}_m - d_m, e_{P_m} = \hat{P}_m - P_m \\ e_{Q_{1d}} = \hat{Q}_{1d} - Q_{1d}, e_{P_{1d}} = \hat{P}_{1d} - P_{1d} \end{cases} \quad (3)$$

定理 如果针对系统(1)的控制输入 u_1 、 u_2 、 u_3 及参数自适应律 $\dot{\hat{d}}_m$ 、 $\dot{\hat{P}}_m$ 、 $\dot{\hat{Q}}_{1d}$ 、 $\dot{\hat{P}}_{1d}$ 的表达形式设为式(4),则系统(1)的状态能够到达滑模面: $\{S_1 | S_1 = 0\}$, $\{S_2 | S_2 = 0\}$, $\{S_3 | S_3 = 0\}$, 即系统(1)能够实现其控制目标。

$$\begin{cases} u_1 = -f_1/\omega_B - K_1 S_1 + [s_m/(2H)]\hat{d}_m - [1/(2H)]\hat{P}_m \\ u_2 = -f_2 - K_2 S_2 + (1/q_1)\hat{Q}_{1d} \\ u_3 = -f_3 - K_3 S_3 - [p_1/(q_1 p_2)]\hat{Q}_{1d} + \hat{P}_{1d}/p_2 \\ \dot{\hat{d}}_m = -[(\omega_B s_m)/(2H)]S_1 \\ \dot{\hat{P}}_m = [\omega_B/(2H)]S_1 \\ \dot{\hat{Q}}_{1d} = -S_2/q_1 + [p_1/(q_1 p_2)]S_3 \\ \dot{\hat{P}}_{1d} = -S_3/p_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $K_1 > 0, K_2 > 0, K_3 > 0$; f_1 、 f_2 、 f_3 表示系统函数,具体的表达式为:

$$\begin{cases} f_1 = -[\omega_B P_g/(2H)] + \lambda_1 \omega_B s_m \\ f_2 = [Q - Q_0 - q_2 V_L - (q_3 - B_c)V_L^2]/q_1 \\ f_3 = \{P - P_0 - p_1[Q - Q_0 - q_2 V_L - (q_3 - B_c)V_L^2]/q_1 - p_3 V_L\}/p_2 \end{cases} \quad (5)$$

证明:构造正定的 Lyapunov 函数:

$$V = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)/2 + (e_{d_m}^2 + e_{P_m}^2 + e_{Q_{1d}}^2 + e_{P_{1d}}^2)/2 \quad (6)$$

则该函数关于时间的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & S_1(\omega_B \dot{s}_m + \lambda_1 \omega_B s_m) + S_2 \dot{\delta}_L + S_3 \dot{V}_L + (\hat{d}_m - d_m) \dot{\hat{d}}_m + \\ & (\hat{P}_m - P_m) \dot{\hat{P}}_m + (\hat{Q}_{1d} - Q_{1d}) \dot{\hat{Q}}_{1d} + (\hat{P}_{1d} - P_{1d}) \dot{\hat{P}}_{1d} = \\ & S_1 \{f_1 - [(\omega_B s_m)/(2H)]d_m + [\omega_B/(2H)]P_m + \\ & \omega_B u_1\} + S_2 \{f_2 - (Q_{1d}/q_1) + u_2\} + \\ & S_3 \{f_3 - (P_{1d}/p_2) + [p_1/(q_1 p_2)]Q_{1d} + u_3\} + \\ & (\hat{d}_m - d_m) \dot{\hat{d}}_m + (\hat{P}_m - P_m) \dot{\hat{P}}_m + (\hat{Q}_{1d} - Q_{1d}) \dot{\hat{Q}}_{1d} + \\ & (\hat{P}_{1d} - P_{1d}) \dot{\hat{P}}_{1d} \end{aligned} \quad (7)$$

将式(4)的控制输入 u_1 、 u_2 、 u_3 及参数自适应律 $\dot{\hat{d}}_m$ 、 $\dot{\hat{P}}_m$ 、 $\dot{\hat{Q}}_{1d}$ 、 $\dot{\hat{P}}_{1d}$ 的表达式代入式(7),可以得到:

$$\dot{V} = S_1 \{-[(\omega_B s_m)/(2H)]d_m + [\omega_B/(2H)] \cdot$$

$$\begin{aligned} & P_m - K_1 \omega_B S_1 + [(\omega_B s_m)/(2H)]\hat{d}_m - \\ & [(\omega_B/(2H)]\hat{P}_m\} + S_2 \{- (Q_{1d}/q_1) - K_2 S_2 + \\ & (\hat{Q}_{1d}/q_1)\} + S_3 \{- (P_{1d}/p_2) + [p_1/(q_1 p_2)] \cdot \\ & Q_{1d} - K_3 S_3 - [p_1/(q_1 p_2)]\hat{Q}_{1d} + (\hat{P}_{1d}/p_2)\} + \\ & (\hat{d}_m - d_m) \{- [(\omega_B s_m)/(2H)]S_1\} + \\ & (\hat{P}_m - P_m) \{[\omega_B/(2H)]S_1\} + (\hat{Q}_{1d} - Q_{1d}) \cdot \\ & \{- (S_2/q_1) + [p_1/(q_1 p_2)]S_3\} + (\hat{P}_{1d} - P_{1d}) \cdot \\ & (-S_3/p_2) = -K_1 \omega_B S_1^2 - K_2 S_2^2 - K_3 S_3^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中, $\dot{V} \leq 0$ 意味着系统状态能够到达滑模面 $\{S_1 | S_1 = 0\}$, $\{S_2 | S_2 = 0\}$, $\{S_3 | S_3 = 0\}$, 并且自适应参数 \hat{d}_m 、 \hat{P}_m 、 \hat{Q}_{1d} 、 \hat{P}_{1d} 分别能够逼近未知参数 d_m 、 P_m 、 Q_{1d} 、 P_{1d} , 从而能够实现系统(1)的控制目标。经过控制器设计过程,受控的六阶电力系统最终形成了由电力系统(1)及式(4)的四个参数自适应律方程构成的十阶电力系统动力学模型。

3 控制效果数值仿真

为验证控制方法的有效性,可以为系统(1)的分岔参数 P_m 取不同的值,以使得系统状态呈现如图 2 所示的不同状态。取参数值 $P_m = 1.129$ 以使得系统呈现图 2(d)与图 2(e)所示的混沌状态,并在该参数条件下对控制器的有效性进行验证。控制器参数取 $\lambda_1 = 2, K_1 = 10, K_2 = 10, K_3 = 10$, 由式(2)及式(4)可知只要这四个参数取正值即可,具体取值时还可以人为调整。控制器投入运行后,受控六阶电力系统及参数自适应律的时域波形见图 4,该图说明六阶电力系统由混沌状态恢复到平衡态,自适应参数也恢复稳定,从而使整个电力系统恢复至稳定运行状态。

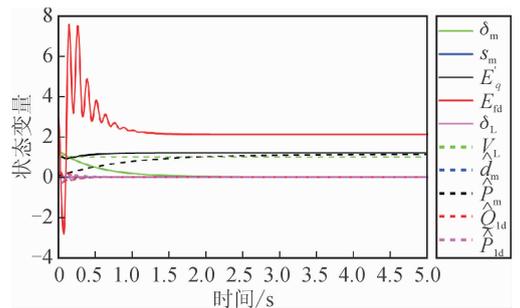


图 4 混沌状态条件下受控六阶电力系统的时域波形
Fig. 4 Time responses of controlled six-dimensional power system under chaotic state condition

图 5 给出了六阶电力系统状态的演化过程图,正如该图显示,未受控的电力系统状态在相图中表现为

奇怪吸引子,而控制器投入运行后系统状态在 δ_m-s_m 相平面中由奇怪吸引子经状态演化轨迹 L_1 最终到达目标点 $O_1(0,0)$,在 δ_m-V_L 相平面中也由奇怪吸引子经状态演化轨迹 L_2 最终到达目标点 $O_2(0,1)$,从而在考虑参数不确定条件下实现了该复杂动力学系统的控制。

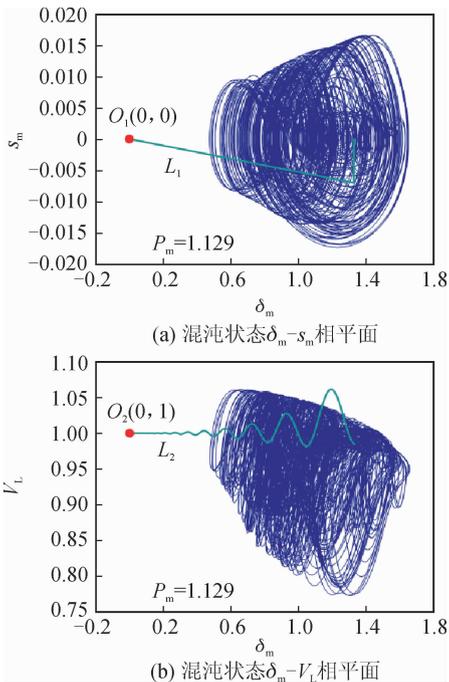


图5 混沌状态条件下六阶电力系统的状态演化过程图

Fig. 5 State evolution process of six-dimensional power system under chaotic state condition

当然, P_m 的值完全可以取 $P_m = 0.9$ 或者 $P_m = 1.1465$, 以使得系统状态呈现图 2(b)或图 2(f)所示的拟周期状态或者多涡卷吸引子状态,即验证控制器的有效性时完全可以使系统状态呈现拟周期状态或者多涡卷吸引子状态。控制参数不变,将系统分岔参数取值为: $P_m = 0.9$, 这时系统状态在相图上表现为如图 2(b)所示的拟周期吸引子。在该运动状态条件下投入所设计的控制器,可得到电力系统状态演化图如图 6 所示,该图说明控制器能够实现与图 5 类似的控制效果,受控系统的状态在相图上也经由一定的演化轨迹逐渐运动到控制目标点。图 7 则给出了当分岔参数 $P_m = 1.1465$, 系统状态呈现如图 2(f)所示的多涡卷吸引子状态条件下的系统状态演化图,所得到的控制效果类似于图 5 和图 6 的仿真结果。拟周期状态与多涡卷状态条件下受控电力系统的时域响应波形也和图 4 呈现的结果相似。控制器在系统运行的三种状态条件下均能够控制复杂六阶电力系统中的动力学行为,这都证实了所设计控制器的有效性,也意味着控制器对重要参数 P_m 的变动具备一定的鲁棒性。

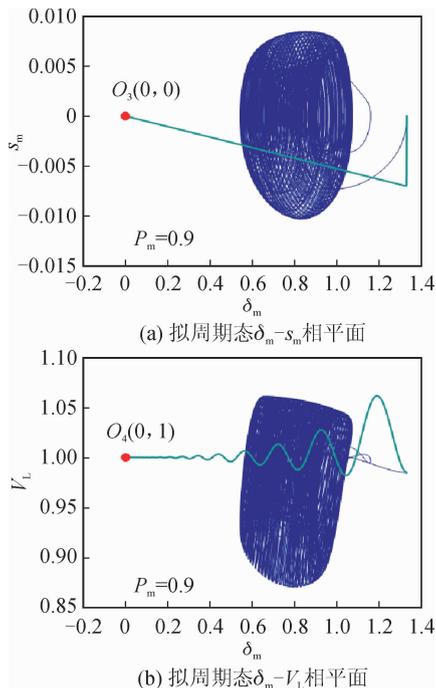


图6 拟周期状态条件下六阶电力系统的状态演化过程图

Fig. 6 State evolution process of six-dimensional power system under quasi periodic state condition

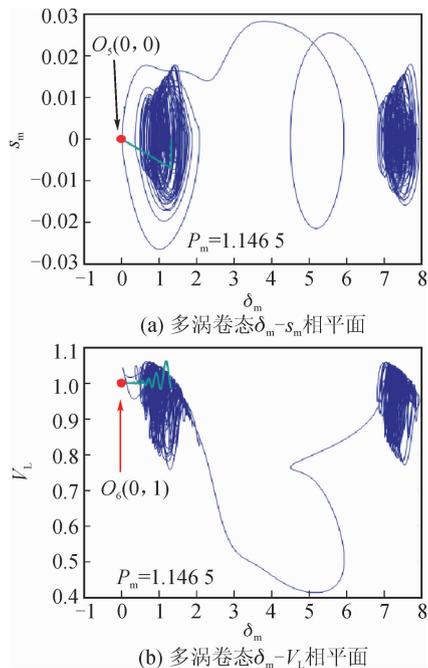


图7 多涡卷状态条件下六阶电力系统的状态演化过程图

Fig. 7 State evolution process of six-dimensional power system under multi-scroll chaotic state condition

4 结论

1) 通过混沌理论中的分岔图、相图以及频谱图分析得出,六阶电力系统存在复杂的动力学行为,包

括周期运动、拟周期运动、混沌运动,并出现了多涡卷吸引子现象。

2) 考虑参数不确定条件下,所设计的参数自适应滑模控制器可以控制六阶电力系统中的复杂动力学行为,并使系统能够恢复到稳定运行状态。控制效果仿真证实,控制器在系统呈现混沌状态、拟周期状态以及多涡卷吸引子状态三种条件下均能够实现控制目标。

3) 注意到控制目标为使电力系统恢复到同步运行状态并将其负载母线电压控制到额定值,这与四阶电力系统及二阶电力系统的控制目标是相兼容的。也说明电力系统混沌控制完全是一个电力系统控制问题,应从电力系统控制的角度为混沌电力系统设计控制器。本文的研究结论可以为电力系统高维复杂动力学系统模型的混沌控制提供借鉴。

参考文献:

- [1] CHIANG H D, LIU C W, VARAIYA P P. Chaos in a simple power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(4): 1407-1417.
- [2] WANG H O, ABED E H, HAMDAN A M A. Bifurcations, chaos, and crises in voltage collapse of a model power system[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 41(4): 294-302.
- [3] 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): 99-105.
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): 99-105.
- [4] 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(5): 62-69.
MIN Fuhong, MA Meiling, ZHAI Wei, et al. Chaotic control of the interconnected power system based on the relay characteristic function[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(5): 62-69.
- [5] 崔浩,章彦燕,朱英伟,等. 阻尼互联电力系统混沌振荡的滑模干扰观测器[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4083-4090.
CUI Hao, ZHANG Yanyan, ZHU Yingwei, et al. Sliding mode interference observer for damping chaotic oscillation of interconnected power system[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4083-4090.
- [6] 朱大锐,张文超,段建东. 电力系统混沌振荡的双曲函数滑模控制[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(2): 220-225, 232.
ZHU Darui, ZHANG Wenchao, DUAN Jiandong. Hyperbolic function sliding mode control for chaos oscillation in power system[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(2): 220-225, 232.
- [7] NI Junkang, LIU Chongxin, LIU Kai, et al. Variable speed synergetic control for chaotic oscillation in power system [J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 78(1): 681-690.
- [8] YU Yixin, JIA Hongjie, LI Peng, et al. Power system instability and chaos[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 65(3): 187-195.
- [9] JING Zhujun, XU Dashun, CHANG Yu, et al. Bifurcations, chaos, and system collapse in a three node power system[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25(6): 443-461.
- [10] RAJESH K G, PADIYAR K R. Bifurcation analysis of a three node power system with detailed models[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1999, 21(5): 375-393.
- [11] ZHAO Hui, MA Yajun, LIU Sijia, et al. Controlling chaos in power system based on finite-time stability theory [J]. Chinese Physics B, 2011, 20(12): 105-112.
- [12] WANG Jiangbin, LIU Chongxin, WANG Yan, et al. Fixed time integral sliding mode controller and its application to the suppression of chaotic oscillation in power system[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(7): 239-246.
- [13] WEI Duqu, LUO Xiaoshu, QIN Yinghua. Controlling bifurcation in power system based on LaSalle invariant principle [J]. Nonlinear Dynamics, 2011, 63(3): 323-329.
- [14] NI Junkang, LIU Ling, LIU Chongxin, et al. Chattering-free time scale separation sliding mode control design with application to power system chaos suppression[J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, <https://doi.org/10.1155/2016/5943934>.
- [15] 李春来,禹思敏. 永磁同步电动机的自适应混沌控制[J]. 物理学报, 2011, 60(12): 85-91.
LI Chunlai, YU Simin. Adaptive chaotic control of permanent magnet synchronous motor[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(12): 85-91.
- [16] 尹逊和,冯汝鹏. 超混沌系统的控制[J]. 原子能科学技术, 1999, 34(5): 432-438.
YIN Xunhe, FENG Rupeng. Control of hyperchaotic system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1999, 34(5): 432-438.
- [17] 董世勇,鲍海,魏哲. 双机电力系统中混沌振荡阈值的计算与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 58-63.
DONG Shiyong, BAO Hai, WEI Zhe. Calculation and simulation of the chaotic oscillation threshold in dual-unit systems[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2010, 30(19): 58-63.
- [18] WANG Jiangbin, LIU Ling, LIU Chongxin, et al. Chaos control in six-dimensional power system via adaptive synergetic approach[J]. Journal of Vibration and Control, 2020, 26(9): 790-800.
- [19] 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 four-dimensional chaotic power system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(1): 26-31.