

DOI: 10.7652/xjtub202001004

4 阶混沌电力系统的协同控制方法

王江彬, 刘崇新

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对目前众多电力系统混沌控制方法只针对简单 2 阶电力系统模型的现状以及为了应对电力系统混沌控制时广泛应用的滑模控制中出现的抖振问题及奇异问题, 为 4 阶电力系统提出了一种用于抑制其混沌振荡的协同控制方法: 利用分岔图及李雅普诺夫指数谱图找到能使 4 阶电力系统发生混沌振荡的参数范围; 引入储能装置及静止无功补偿装置的动态模型, 从而构成受控的 6 阶电力系统; 为受控电力系统定义对应的宏变量, 设计具有连续控制律的协同控制输入, 并给出用于 4 阶混沌电力系统协同控制的控制框图。数值仿真表明: 设计的协同控制器能够使受控电力系统由混沌振荡状态恢复到平衡态, 从而有效控制了 4 阶电力系统的混沌振荡。

关键词: 4 阶电力系统; 混沌振荡; 混沌控制; 协同控制

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)01-0026-06

Synergetic Control Method for Four-Dimensional Chaotic Power System

WANG Jiangbin, LIU Chongxin

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

Abstract: Many chaos control methods in power systems only focus on a simple two-dimensional power system model. To solve chattering and singularity in sliding mode control widely used in chaos control of power system, a synergetic control method for a four-dimensional power system is presented to suppress its chaotic oscillation. Employing bifurcation diagram and Lyapunov exponential spectrum, the parameter range of chaotic oscillation in the four-dimensional power system is sought out. The dynamic models of energy storage devices and static var compensators are introduced to construct a controlled six-dimensional power system. The corresponding macro variables are defined for the controlled power system, the synergetic control inputs with continuous control law are designed, and a control block diagram for the four-dimensional chaotic power system is obtained. Numerical simulation shows that the designed synergetic controller can restore the controlled power system from chaotic oscillation state to equilibrium state to effectively control chaotic oscillation of the four-dimensional power system.

Keywords: four-dimensional power system; chaotic oscillation; chaos control; synergetic control

电力系统有可能在特定参数条件下出现由其非线性所致的混沌振荡现象。电力系统的混沌运动会对电力系统稳定性构成挑战。因此, 如何有效控制

电力系统中的混沌成为一个颇具研究价值的课题。然而, 目前而言, 人们研究电力系统混沌振荡时主要关注简单双机互联 2 阶电力系统模型^[1-4], 由于模型

收稿日期: 2019-07-26。 作者简介: 王江彬(1990—), 男, 博士生; 刘崇新(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877162); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(51521065)。

网络出版时间: 2019-09-19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190919.1139.011.html>

本身只包含两个状态变量,远不能反映实际电力系统的运行情况,因此有必要在此基础上研究更为复杂的电力系统模型的混沌振荡,并对其进行控制。1988年,文献[5]建立了经典的3母线电力系统模型,该模型是一个典型的4阶电力系统模型,随后众多学者对该模型进行了分析与控制^[6-14]。就控制而言,由于滑模控制具有强鲁棒性仍然被广泛应用于控制器的设计中,然而抖振问题与奇异问题仍然伴随着整个控制器设计过程^[10]。文献[11-12]给出了一些其他控制方法,但是这些方法只从非线性控制的角度出发,在控制4阶电力系统混沌振荡时没有考虑电力系统的实际运行状况,因此所设计的控制输入偏多。

作为变结构控制的两种重要方法,滑模控制与协同控制具有诸多相似的性质^[15-16]。与滑模控制已经广泛应用于电力系统混沌控制不同,目前仍然很少有文献将协同控制方法应用于电力系统混沌控制。与滑模控制相比,协同控制的重要优势在于其可以为受控系统提供连续的控制律,因此将协同控制用于电力系统混沌控制具有潜在的应用价值。

本文利用分岔图及李雅普诺夫指数谱图找到了能使系统发生混沌振荡的参数范围,并证实了系统在特定参数条件下确实存在混沌振荡行为。为了控制混沌振荡,引入储能装置及静止无功补偿装置的动态模型,并为二者设计具有连续控制律的协同控制输入。通过Matlab仿真证实了所设计控制器的有效性。

1 系统模型及动力学分析

研究的电力系统是一个典型的3母线电力系统,该系统是一个用于电压稳定性分析的经典系统,系统的接线图如图1所示,3个母线分别是发电机

母线1、负载母线2以及松弛母线3。

系统的动力学方程由4个微分方程组成,表达式^[5]为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta}_m &= \omega \\ \dot{\omega} &= (1/M)[-d_m\omega + P_m + E_m Y_m V_L \sin(\delta_L - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin\theta_m] \\ \dot{\delta}_L &= (1/K_{qw})[-K_{qw}V_L^2 - K_{qv}V_L + (Q - Q_0 - Q_1)] \\ \dot{V}_L &= (1/TK_{qw}K_{pv})[K_{pw}K_{qv}V_L^2 + (K_{pw}K_{qv} - K_{qw}K_{pv})V_L + K_{qw}(P - P_0 - P_1) - K_{pw}(Q - Q_0 - Q_1)] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: ω 表示发电机频率偏差; P_m 表示发电机机械输入功率,将该参数作为重要的分岔参数, P_m 为标么值;常值参数 $E_m=1.05$, $Y_m=5.0$, $\theta_m=0$, $E'_0=20$, $Y'_0=0.1665$, $\theta'_0=0$, $d_m=0.05$, $M=0.01464$, $K_{pw}=0.4$, $K_{qv2}=2.1$, $K_{qw}=-0.03$, $K_{qv}=-2.8$, $K_{pv}=0.3$, $T=8.5$, $P_0=0.6$, $Q_0=1.3$, $P_1=0$, $Q_1=2.9$,这些常值参数中, θ_m 与 θ'_0 的单位为rad,其他参数均取标么值,物理意义详见文献[5,10]。状态变量中, δ_m 与 δ_L 的单位为rad, ω 与 V_L 取标么值。 P 和 Q 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} P &= -E'_0 Y'_0 V_L \sin(\delta_L + \theta'_0) - E_m Y_m V_L \sin(\delta_L - \delta_m + \theta_m) + (Y'_0 \sin\theta'_0 + Y_m \sin\theta_m) V_L^2 \\ Q &= E'_0 Y'_0 V_L \cos(\delta_L + \theta'_0) + E_m Y_m V_L \cos(\delta_L - \delta_m + \theta_m) - (Y'_0 \cos\theta'_0 + Y_m \cos\theta_m) V_L^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

选取式(1)系统的初值为 $\delta_m(0)=0.29$ rad, $\omega(0)=0.2$, $\delta_L(0)=0.23$ rad, $V_L(0)=0.8$ 。为了找到系统发生混沌振荡的 P_m ,研究系统状态随参数 P_m 的变化情况,取 $P_m \in [1.090, 1.102]$,利用极大值法绘制系统的分岔图,如图2所示。系统在 $P_m \in [1.090, 1.102]$ 时的李雅普诺夫指数谱如图3所示,图中给出了4个李雅普诺夫指数 L_1 、 L_2 、 L_3 及 L_4 随参数 P_m 的变化情况。

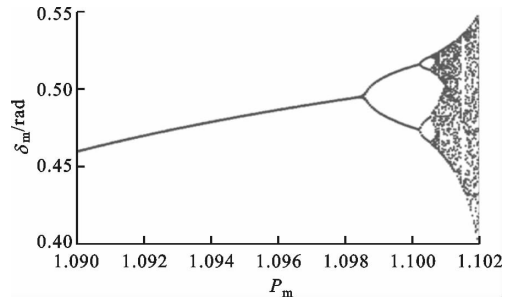
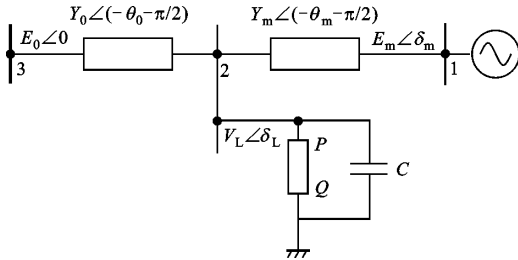


图2 状态变量 δ_m 随参数 P_m 变化的分岔图



E_0 —无穷大系统母线电压幅值; Y_0 —节点2、3之间的传输线等效导纳; θ_0 —节点2、3之间的传输线等效阻抗角; Y_m —节点1、2之间的传输线等效导纳; θ_m —节点1、2之间的传输线等效阻抗角; V_L —负载电压幅值; δ_L —负载电压相角; P —提供给负载母线的有功功率; Q —提供给负载母线的无功功率; C —负载侧固定电容; E_m —发电机母线电压幅值; δ_m —发电机功角。

图1 电力系统接线图

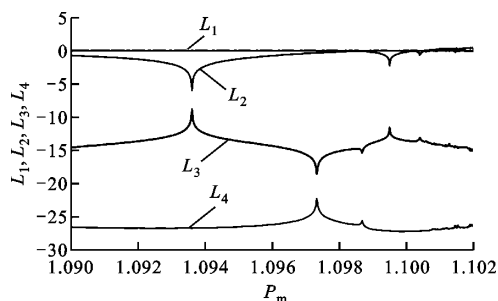


图3 参数 P_m 变化时系统的李雅普诺夫指数谱

由图2可以看出,系统经过倍周期分岔,在 $P_m \geq 1.101$ 时进入混沌状态。当 $P_m \geq 1.101$ 时,在图3中的李雅普诺夫指数 L_1 出现正值,这也说明该参数条件下系统呈现混沌状态。图2的分岔图与图3的李雅普诺夫指数谱图显示的结论是一致的。

取参数 $P_m = 1.102$,可以得到系统的三维相图,如图4所示,系统状态在相空间中表现为奇怪吸引子。计算系统在该参数条件下的4个李雅普诺夫指数,得 $L_1(P_m = 1.102) = 0.4666$, $L_2(P_m = 1.102) = -0.0136$, $L_3(P_m = 1.102) = -14.8097$, $L_4(P_m = 1.102) = -26.4023$ 。正的最大李雅普诺夫指数说明整个系统处于混沌振荡状态,此时系统各个状态变量的时域波形必然为非周期波形,这种非周期振荡是电力系统稳定运行所不允许出现的。为了抑制混沌振荡,必须设计相应的混沌控制器进行控制。

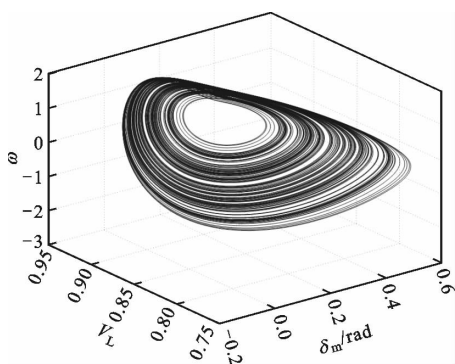


图4 4阶电力系统三维相图

2 控制器设计

为了对式(1)所示系统的混沌振荡进行控制,必须使整个系统恢复到再同步,并使系统电压恢复到额定值。考虑到所设计控制器的可实现性,引入储能装置及静止无功补偿器的动态模型^[10,17-18],具体为

$$\left. \begin{aligned} \dot{P}_{es} &= -\frac{1}{T_{es}} P_{es} + \frac{K_{es}}{T_{es}} u_{es} \\ \dot{B}_{eq} &= -\frac{1}{T_{svc}} B_{eq} + \frac{K_{svc}}{T_{svc}} u_{svc} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: P_{es} 表示储能装置吸收的有功功率; T_{es} 表示储能装置时间常数; K_{es} 表示储能装置控制输入增益; u_{es} 表示储能装置控制输入; B_{eq} 表示静止无功补偿器的等效电纳; T_{svc} 表示静止无功补偿器的时间常数; K_{svc} 表示静止无功补偿器控制输入增益; u_{svc} 表示静止无功补偿器控制输入。

接入储能装置及静止无功补偿器的受控混沌电力系统电路接线图如图5所示。

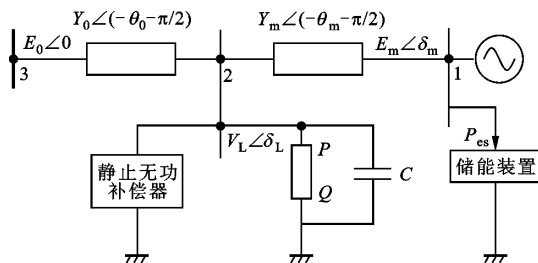


图5 受控4阶混沌电力系统电路接线图

受控混沌电力系统的动力学模型可由式(1)与式(3)联立表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta}_m &= \omega = f_1 \\ \dot{\omega} &= (1/M)[-d_m\omega + P_m + E_m Y_m V_L \sin(\delta_L - \delta_m - \theta_m) + E_m^2 Y_m \sin\theta_m - P_{es}] = f_2 \\ \dot{P}_{es} &= -\frac{1}{T_{es}} P_{es} + \frac{K_{es}}{T_{es}} u_{es} \\ \dot{\delta}_L &= (1/K_{qw})[-K_{qw} V_L^2 - K_{qv} V_L + (Q - Q_0 - Q_1 - Q_{svc})] = f_3 \\ \dot{V}_L &= (1/TK_{qw} K_{pv})[K_{pw} K_{qv2} V_L^2 + (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) V_L + K_{qw} (P - P_0 - P_1) - K_{pw} (Q - Q_0 - Q_1 - Q_{svc})] = f_4 \\ \dot{B}_{eq} &= -\frac{1}{T_{svc}} B_{eq} + \frac{K_{svc}}{T_{svc}} u_{svc} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 Q_{svc} 表示静止无功补偿器提供给负载母线的无功功率, $Q_{svc} = B_{eq} V_L^2$ 。

为了抑制电力系统混沌振荡,需要使电力系统恢复到再同步,并将电压幅值调节到额定值,系统输出确定为 $y_1 = \delta_m$, $y_2 = V_L$,控制目标为 $(\delta_{md}, V_{Ld}) = [0, 1]$ 。

为了利用协同控制方法实现控制目标,为式(4)所示受控系统定义两个宏变量,即

$$\begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{d}{dt} + k_1\right)^2 & 0 \\ 0 & \frac{d}{dt} + k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_m \\ V_L - 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $k_1 > 0$; $k_2 > 0$ 。

对于协同控制,宏变量的定义原则表述为:当系统状态到达不变流形后,系统状态能够沿着该不变流形渐近收敛至控制目标。为了证明所定义的宏变量(式(5))满足这一重要原则,给出一个定理并加以证明。

定理:如果受控混沌电力系统(式(4))的两个宏变量定义为式(5),当两个宏变量分别到达不变流形 $\Psi_1=0$ 、 $\Psi_2=0$ 后,即可实现控制目标 $(\delta_{md}, V_{LD}) = [0, 1]$ 。

证明:当宏变量 Ψ_1 与 Ψ_2 分别到达不变流形后,其满足 $\Psi_1=0$ 、 $\Psi_2=0$,即有

$$\left. \begin{aligned} \Psi_1 &= \left(\frac{d}{dt} + k_1 \right)^2 \delta_m = \ddot{\delta}_m + 2k_1 \dot{\delta}_m + k_1^2 \delta_m = 0 \\ \Psi_2 &= \left(\frac{d}{dt} + k_2 \right) (V_L - 1) = \dot{V}_L + k_2 (V_L - 1) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

令 $e = V_L - 1$,则式(6)可以表达为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\delta}_m + 2k_1 \dot{\delta}_m + k_1^2 \delta_m &= 0 \\ \dot{e} + k_2 e &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由于 $k_1 > 0, k_2 > 0$,所以式(7)的变量 δ_m 与 e 能够渐近收敛到 0,因此可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \delta_m = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$,即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \delta_m = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} V_L = 1$ 。证明完毕。

值得强调的一点是,式(5)中的参数 k_1 与 k_2 是决定控制性能的两个重要参数。由于式(7)中微分方程 $\ddot{\delta}_m + 2k_1 \dot{\delta}_m + k_1^2 \delta_m = 0$ 的特征方程为 $(r + k_1)^2 = 0$,因此 k_1 应该尽可能大,以使得微分方程的解尽可能远离复平面的虚轴,那么变量 δ_m 的收敛速度也会越快。另外, k_2 越大,变量 e 的收敛速度也会越快。在具体参数值选取时,这两个参数应该在尽可能保证快速收敛的基础上不至于影响其他控制性能。由式(7)还可以得, δ_m 不仅可以收敛到 0, $\dot{\delta}_m$ 也可以收敛到 0,即受控电力系统状态变量 ω 也可以收敛到 0,从而使式(4)受控电力系统完全恢复到同步运行状态。

根据协同控制方法,为了使两个宏变量 Ψ_1 与 Ψ_2 到达不变流形 $\Psi_1=0$ 、 $\Psi_2=0$,令

$$\begin{bmatrix} \dot{\Psi}_1 \\ \dot{\Psi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_1 & 0 \\ 0 & -1/T_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $T_1 > 0; T_2 > 0$ 。由于 T_1 和 T_2 是决定宏变量向不变流形收敛速率的重要参数,因此取值应该尽可能小,以使宏变量尽可能快地到达不变流形。

结合式(5)与式(8)可以得到

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\delta}_m + 2k_1 \dot{\delta}_m + k_1^2 \delta_m &= -(1/T_1) k \Psi_1 \\ \dot{V}_L + k_2 \dot{V}_L &= -(1/T_2) \Psi_2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

再结合式(4)与式(9),可以得到两个控制输入的表达式为

$$\left. \begin{aligned} u_{es} &= -(T_{es}/K_{es}) [d_m f_2 - E_m Y_m f_4 \sin(\delta_L - \delta_m - \theta_m) - E_m Y_m V_L (f_3 - f_1) \cos(\delta_L - \delta_m - \theta_m) - (1/T_{es}) P_{es} + M(-2k_1 f_2 - k_1^2 f_1 - (1/T_1) \Psi_1)] \\ u_{svc} &= (T_{svc}/K_{svc} K_{pw} V_L^2) [TK_{qw} K_{pv} (-k_2 f_4 - (1/T_2) \Psi_2) - K_{pw} K_{qv} 2V_L f_4 - (K_{pw} K_{qv} - K_{qw} K_{pv}) f_4 - K_{qw} \dot{P} + K_{pw} \dot{Q} - K_{pw} B_{eq} 2V_L f_4 + (B_{eq} K_{pw} V_L^2 / T_{svc})] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \dot{P} &= -E'_0 Y'_0 [f_4 \sin(\delta_L + \theta'_0) + V_L f_3 \cos(\delta_L + \theta'_0)] - E_m Y_m [f_4 \sin(\delta_L - \delta_m + \theta_m) + V_L (f_3 - f_1) \cos(\delta_L - \delta_m + \theta_m)] + (Y'_0 \sin \theta'_0 + Y_m \sin \theta_m) 2V_L f_4 \\ \dot{Q} &= E'_0 Y'_0 [f_4 \cos(\delta_L + \theta'_0) - V_L f_3 \sin(\delta_L + \theta'_0)] + E_m Y_m [f_4 \cos(\delta_L - \delta_m + \theta_m) - V_L (f_3 - f_1) \sin(\delta_L - \delta_m + \theta_m)] - (Y'_0 \cos \theta'_0 + Y_m \cos \theta_m) 2V_L f_4 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

在式(10)的两个控制输入的作用下,两个宏变量 Ψ_1 与 Ψ_2 必然能够到达不变流形 $\Psi_1=0$ 、 $\Psi_2=0$,从而完成 4 阶电力系统的混沌控制。

根据本节控制器设计思路,可以得到控制框图,如图 6 所示。

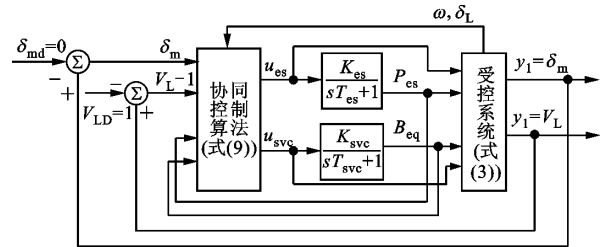


图 6 4 阶混沌电力系统控制框图

3 控制效果数值仿真

为了验证控制方法的有效性,利用 Matlab 对控制器的控制效果进行仿真验证。控制参数取为: $k_1=5, k_2=5, T_1=0.2, T_2=0.2, T_{es}=1, K_{es}=1, T_{svc}=0.01, K_{svc}=1$,均为标么值。

控制器作用以后宏变量的时域波形如图 7 所示,可以看出,当控制器投入运行时,所定义的两个宏变量能够快速到达不变流形。

式(4)所示受控电力系统的 6 个状态变量的时域波形如图 8 与图 9 所示,可以看出,受控电力系统

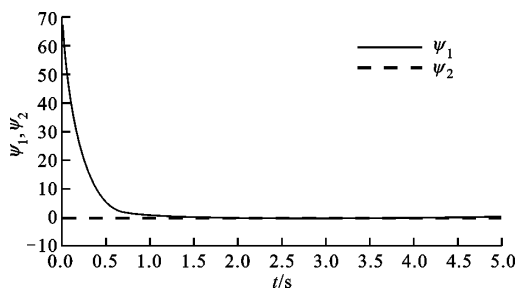


图7 宏变量时域波形

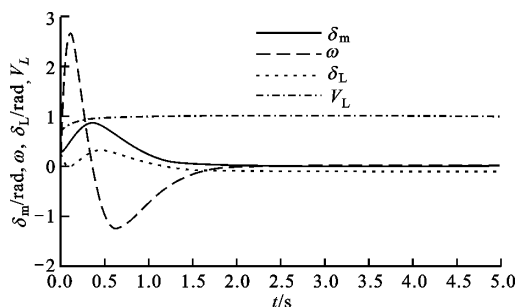


图8 受控电力系统状态变量时域波形

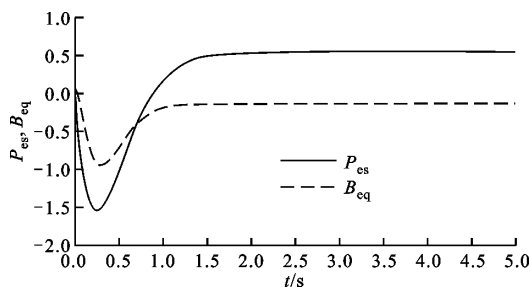


图9 储能装置吸收的有功功率及静止无功补偿器的等效电容时域波形

各个状态变量均由混沌振荡状态恢复到平衡态,从而使电力系统能够稳定运行。另外,如图9所示,储能装置吸收的有功功率稳态值为正值,说明储能装置从受控电力系统中吸收了一部分有功功率。

图10给出了系统状态在相空间中的演化过程,可以看出,投入控制器以后系统状态由原来的混沌吸引子经由轨线 L 逐渐演化为相空间中的不动点

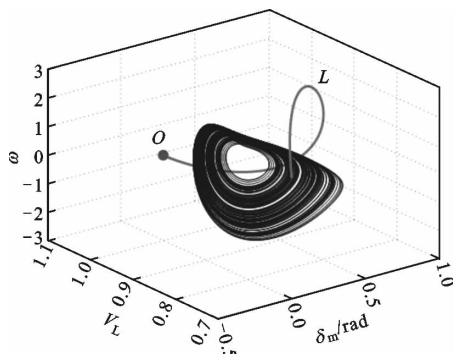


图10 系统状态在相空间中的演化过程

$$O(\delta_{md}, V_{Ld}, \omega_d) = [0, 1, 0]。$$

图11给出了两个控制输入的波形,由于设计的协同控制律是连续控制律,因此控制输入非常平滑。

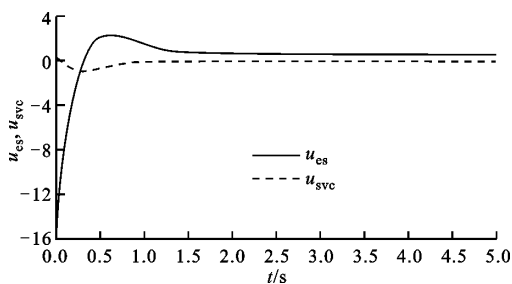


图11 控制输入波形

4 结 论

(1)利用分岔图及李雅普诺夫指数谱找到了能够使系统发生混沌振荡的参数,具体而言,当系统机械输入功率增加到一定值后,系统产生了奇怪吸引子,从而使系统发生混沌振荡。

(2)引入储能装置及静止无功补偿器,可以有效控制电力系统混沌振荡,并使系统从混沌状态恢复到稳定运行状态,这时系统状态由原来的奇怪吸引子演化为系统中的不动点。

(3)设计的控制律为连续控制律,因此不会出现诸如滑模变结构控制中的抖振问题,具有一定的优越性。

参考文献:

- [1] 张强. 电力系统非线性振荡研究 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22(5): 17-19.
ZHANG Qiang. Study on nonlinear oscillations of electric power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(5): 17-19.
- [2] 倪俊康, 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.
- [3] 闵富红, 马美玲, 翟炜, 等. 基于继电器特性函数的互联电力系统混沌控制 [J]. 物理学报, 2014, 63(5): 70-77.
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): 70-77.

- [4] 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): 1-7.
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.
- [5] DOBSON I, CHIANG H D, THORP J S, et al. A model of voltage collapse in electric power systems [C] // Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1988: 2104-2109.
- [6] CHIANG H D, LIU C W, VARAIYA P P, et al. Chaos in a simple power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(4): 1407-1417.
- [7] 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, 1994, 41(4): 294-302.
- [8] DOBSON I, CHIANG H D. Towards a theory of voltage collapse in electric power systems [J]. Systems & Control Letters, 1989, 13(3): 253-262.
- [9] CHIANG H D, DOBSON I, THOMAS R J, et al. On voltage collapse in electric power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(2): 601-611.
- [10] NI J K, LIU L, LIU C X, et al. Fast fixed-time nonsingular terminal sliding mode control and its application to chaos suppression in power system [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: II Express Briefs, 2017, 64(2): 151-155.
- [11] ZHAO H, MA Y J, LIU S J, et al. Controlling chaos in power system based on finite-time stability theory [J]. Chinese Physics: B, 2011, 20(12): 120501.
- [12] MA C Y, LIU J H, WANG C L. Chaos of a power system model and its control [J]. Journal of Vibration and Control, 2012, 18(14): 2176-2185.
- [13] NI J K, LIU L, LIU C X, et al. Chattering-free time scale separation sliding mode control design with application to power system chaos suppression [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 1-14.
- [14] WANG J B, LIU C X, WANG Y, 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): 070503.
- [15] NUSAWARDHANA A, ZAK S H, CROSSLEY W A. Nonlinear synergetic optimal controllers [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(4): 1134-1147.
- [16] SANTI E, MONTI A, LI D, et al. Synergetic control for power electronics applications: a comparison with the sliding mode approach [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2004, 13(4): 737-760.
- [17] FANG J K, YAO W, CHEN Z, et al. Design of anti-windup compensator for energy storage-based damping controller to enhance power system stability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1175-1185.
- [18] SAAD M S, HASSOUNEH M A, ABED E H, et al. Delaying instability and voltage collapse in power systems using SVCs with washout filter-aided feedback [C] // Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 4357-4362.

[本刊相关文献链接]

- 田士君, 王秀丽, 齐世雄, 等. 计及短路电流限额的网架优化模型及启发式算法. 2019, 53(9): 102-109. [doi:10.7652/xjtuxb201909014]
- 李轩, 翟桥柱, 吴江, 等. 应用全场景可行安全约束机组组合的风电最优消纳模型及解法. 2019, 53(6): 142-150. [doi:10.7652/xjtuxb201906019]
- 郭璋, 司刚全, 黄越辉, 等. 考虑波动趋势和相关性的多风电场模拟出力数据生成方法. 2018, 52(4): 7-14. [doi:10.7652/xjtuxb201804002]
- 李石磊, 刘崇新, 胡晓宇, 等. 用于保密通信的高安全性混沌振荡器. 2017, 51(6): 35-40. [doi:10.7652/xjtuxb201706006]
- 李浩, 柏鹏, 张辉, 等. 反向烟花算法及其应用研究. 2015, 49(11): 82-88. [doi:10.7652/xjtuxb201511014]
- 庞霞, 刘凌, 刘崇新, 等. 利用异结构同步对铁磁混沌电路的非线性反馈控制. 2015, 49(4): 18-23. [doi:10.7652/xjtuxb201504004]
- 刘凌, 庞霞, 刘崇新, 等. 一类分数阶电力电容器动力学建模与数值分析. 2014, 48(8): 104-108. [doi:10.7652/xjtuxb201408018]

(编辑 陶晴)