

# 含功率扰动的 3 节点电力系统 7 阶模型混沌振荡分析

王耀达, 闵富红, 周琪, 胡振鑫

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 混沌振荡时电力系统的固有现象对整个互联电网具有极大危害. 基于 3 节点电力系统推导其 7 阶数学模型, 利用分岔图、相图分析了 3 节点电力系统的动力学特性, 研究了系统参数变化对系统运行状态的影响. 随后, 引入电磁功率和负载功率扰动项, 使得系统模型更接近实际情况, 研究系统在扰动幅值和扰动频率影响下的动力学行为变化过程, 并分别给出了对应的分岔图和特定参数下的系统相图. 实验表明, 当扰动项的幅值与频率处于特定范围内时, 系统能够从混沌运动状态切换至周期运动状态.

[关键词] 3 节点电力系统, 7 阶电力系统, 分岔, 功率扰动

[中图分类号] TP271 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2018)01-0001-10

## Analysis on Chaotic Oscillation in the Seven-order Model of Three-node Power System with Power Disturbance

Wang Yaoda, Min Fuhong, Zhou Qi, Hu Zhenxin

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** Chaotic oscillation is an inherent phenomenon of nonlinear power system, which is very harmful for the large-scale interconnected power grid. Based on the three-node power system, a seven-order mathematical model of this system is deduced in this paper. The dynamic characteristics of the three-node power system are analyzed through bifurcation diagrams and phase portraits, and the influence of system parameters varying on the operation states are studied as well. Then the electromagnetic power disturbance and the load power disturbance are introduced into the system model, which makes the model closer to the actual situation. The changing process in dynamic behaviors of the system under the impact of the disturbance amplitude and frequency are illustrated with bifurcation diagrams and phase portraits for specific parameters are given respectively. Moreover, it is found that the operating state of the system can reach periodic motions from the chaotic motions when the amplitude and frequency of perturbation terms are within certain ranges.

**Key words:** three-node power system, seven-order power system, bifurcation, power disturbance

电力系统是由发电机、变压器、电力线路和电力用户等所组成的具有强耦合、高度非线性、多参数等特点的大型动力系统, 其动态行为包含许多复杂的非线性机电振荡现象<sup>[1]</sup>. 为满足国民经济发展而日益增长的电能消耗, 风、光等各种新能源并网运行以及各类新型电力设备的逐步大规模装配等对电网性能的需求, 多数国家的电网都朝着大范围网络化、智能化和复杂化的方向发展, 现代电网已越来越接近其控制和运行极限, 电力系统的复杂度和高非线性也愈发加剧. 各类突发事件和不确定因素的爆发易使电力系统运行参数发生类似无规则非周期的振荡即混沌振荡, 甚至导致电力系统失稳、崩溃解列, 造成大面积停电. 1966 年, 美国西部电网在互联后不久发生了 1 min 之内 6 次混沌振荡现象, 即使紧急加装阻尼 PSS 装置也未能取得明显的抑制效果, 最终导致两个电力系统解列. 在中国以及北欧、加拿大等国家, 也都发生

收稿日期: 2017-09-14.

基金项目: 国家自然科学基金(51475246)、江苏省自然科学基金(BK20131402).

通讯联系人: 闵富红, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 非线性系统的混沌控制与同步. E-mail: minfuhong@njnu.edu.cn

过类似的混沌振荡现象.

相对于电力系统中的低频振荡和次同步振荡,混沌振荡具有产生机理复杂、常规电气维稳策略及设备抑制效果不明显等特点. 1982 年,美国科学家 Kopell 等人<sup>[2]</sup>利用 Melnikov 方法对两自由度的二机电力系统混沌与分岔现象做出理论分析,开创电力系统混沌研究的先河. 上世纪 90 年代初,理论数学家 Chiang 等人<sup>[3-4]</sup>选取二母线简单互联系统,并采用数值分析的方法,对分岔及混沌动力学行为做相关研究. 印度学者 Rajesh 等人<sup>[5-6]</sup>较为系统地研究 7 阶电力系统中的混沌运动状态,分析并总结了系统随系统控制参数变化所表现出的不同动力学行为,如鞍结分岔、霍普夫分岔、倍周期分岔等. 王庆红等人<sup>[7]</sup>分析了带励磁限制的电力系统模型,发现并解释了电力系统中多吸引子的存在及其相关解的本质特征. 王晓东等人<sup>[8]</sup>详细分析了存在周期性负载扰动的单机无穷大电力系统二阶模型的非线性动力学特性,并基于 Melnikov 方法计算了系统发生混沌运动时的参数阈值且与数值仿真相互印证. 李国庆等人<sup>[9]</sup>基于分岔理论与数值仿真,探讨了励磁饱和环节及励磁电压顶值对 3 节点电力系统稳定和系统分岔的影响. 郝建红等人<sup>[10]</sup>研究了带周期性负载扰动和电磁扰动的互联电力系统二阶模型,并设计了一种自适应反演滑模控制器,在系统内部参数不确定的情况下仍具备较好的控制性能与鲁棒性. 倪骏康等人<sup>[11]</sup>推导研究了带静态同步补偿器的三母线电力系统的 4 阶数学模型,并设计了一种定时限动态面滑模控制器来抑制系统中的混沌振荡.

从现有研究成果来看,国内外学者针对电力系统 2 阶、4 阶等低阶模型已做了大量的工作,但其数学模型做了较多简化和理想化处理,研究成果应用到实际工程中时存在较大的难度. 高阶系统模型更接近工程实际情况,但目前对其的研究工作较少,而现今的电力行业发展状况对高阶的、更接近实际状况的系统数学模型提出了越来越多的研究需求. 本文以 3 节点电力系统模型为研究对象,推导构建 7 阶电力系统模型,通过改变机械输入功率、阻尼系数等系统参数研究其动力学特性,获得其参数分岔图和相图,并在原有数学模型的基础上,增加功率扰动项,运用相同的方法探讨扰动项对系统运动状态的影响.

## 1 系统模型推导

电力系统非线性动力学行为研究所采用的数学模型一般可由一组微分-代数方程组来描述

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, \lambda), \\ 0 = g(x, y, \lambda). \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x \in \mathbf{R}^n$  和  $y \in \mathbf{R}^m$  分别为系统模型的微分变量和代数变量,  $\lambda \in \mathbf{R}$  为电力系统的相关控制参数,微分方程组  $f$  描述了电力系统各组成部分的动态行为,代数方程组  $g$  则基于电力系统潮流方程和功率平衡方程等描述了微分变量与代数变量间的关系.

本文采用单机 3 节点电力系统模型,如图 1 所示. 通过选取适当的线路阻抗,该系统可被认为是向本地负载供电的发电机之一,本地负载又连接到可被视为无穷大母线的远方无穷大系统,与此同时,发电机也通过弱连线连接到远方无穷大系统,该弱连线可自由选择联接或断开.

### 1.1 发电机模型

#### 1.1.1 转子侧方程

发电机的转子运动方程可由如下的摇摆方程表示,

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega_B s_m, \\ \frac{ds_m}{dt} = \frac{-ds_m + P_m - P_g}{2H}. \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\delta$  为发电机功角,  $\omega_B$  为系统基准角频率,  $s_m$  为发电机转差率,  $d$  为发电机等效阻尼参数,  $P_m$  为发电机机械输入功率,  $P_g$  为发电机供出的电磁功率,  $H$  为机械转动惯量.

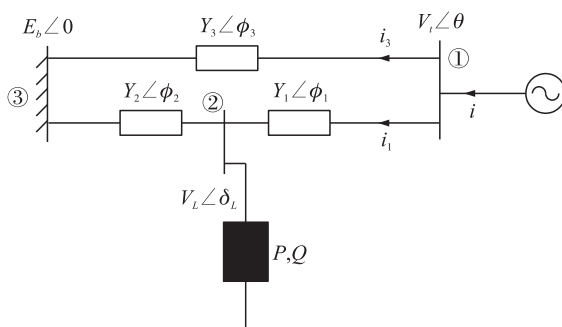


图 1 系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of system

考虑转子  $d$  轴励磁绕组和  $q$  轴阻尼绕组,可得到相应的暂态过程方程,

$$\begin{cases} \frac{dE'_q}{dt} = \frac{-E'_q + (x_d - x'_d)i_d + E_{fd}}{T'_{d0}}, \\ \frac{dE'_d}{dt} = \frac{-E'_d - (x_q - x'_q)i_q}{T'_{q0}}. \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $E'_q$  和  $E'_d$  分别为  $q$  轴和  $d$  轴暂态电势,  $E_{fd}$  为励磁电势.  $i_d$ 、 $i_q$  分别为定子电流  $d$  轴、 $q$  轴分量,  $x_d$ 、 $x_q$  分别为  $d$  轴、 $q$  轴的同步电抗,  $x'_d$ 、 $x'_q$  分别为  $d$  轴、 $q$  轴的瞬变电抗.

发电机输送的电磁功率  $P_g$  可表示为

$$P_g = E'_q i_q + E'_d i_d + (x'_d - x'_q) i_d i_q. \quad (4)$$

### 1.1.2 定子侧方程

忽略定子暂态和定子电阻,我们可得到如下代数方程,

$$\begin{cases} v_q = E'_q + x'_d i_d, \\ v_d = E'_d - x'_q i_q. \end{cases} \quad (5)$$

## 1.2 励磁系统

发电机的励磁系统可由一个单时间常数高增益自动稳压器来表示(如图2所示).该励磁系统的描述方程为

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{-E_{fd} + K_A (V_{ref} - V_t)}{T_A}. \quad (6)$$

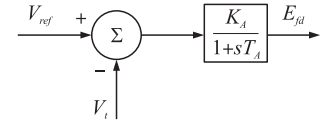


图2 励磁系统

Fig. 2 Excitation system

## 1.3 负荷模型

负荷节点采用并联有恒定功率负载的 Walve 综合负荷模型描述,表达式为

$$\begin{cases} P = P_{ld} + P_0 + p_1 \frac{d\delta_L}{dt} + p_2 \frac{dV_L}{dt} + p_3 V_L, \\ Q = Q_{ld} + Q_0 + q_1 \frac{d\delta_L}{dt} + q_2 V_L + p_3 V_L^2. \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $P_{ld}$ 、 $Q_{ld}$  代表并联的恒定有功负载和恒定无功负载,  $V_L$ 、 $\delta_L$  分别为负荷节点的电压与相角,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  为动态符合模中的动态负载系数.

## 1.4 网络模型

采用图1中的电气量标识,可推导出统一  $dq$  坐标系下的网络方程

$$\begin{cases} \hat{E}_b + \frac{\hat{i}_3}{\hat{Y}_3} = \hat{V}_t, \\ \hat{V}_t + \frac{\hat{i}_1}{\hat{Y}_1} = \hat{V}_t. \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \hat{V}_t = (v_q + jv_d) e^{j\delta}, \\ \hat{i} = (i_q + ji_d) e^{j\delta} = \hat{i}_1 + \hat{i}_3, \\ \hat{Y} = Y \angle \phi = \hat{Y}_1 + \hat{Y}_3. \end{cases} \quad (9)$$

由上述方程组联立可解得:

$$(v_q + jv_d) = \frac{E_b Y_3 e^{-j(\delta + \phi - \phi_3)} + Y_1 V_L e^{j(\delta_L - \delta - \phi + \phi_1)} + (i_q + ji_d) e^{-j\phi}}{Y}. \quad (10)$$

若记

$$\begin{cases} a = E_b Y_3 \cos(\delta + \phi - \phi_3) + Y_1 V_L \cos(\delta_L - \delta - \phi + \phi_1), \\ b = -E_b Y_3 \sin(\delta + \phi - \phi_3) + Y_1 V_L \sin(\delta_L - \delta - \phi + \phi_1). \end{cases} \quad (11)$$

则电流方程可表示为

$$i_q \cos \phi + i_d \sin \phi = Y v_q - a i_d \cos \phi - i_q \sin \phi = Y v_d - b. \quad (12)$$

### 1.5 系统模型推导

将定子侧代数方程式(5)代入式(12),可得

$$\begin{bmatrix} (YE'_q - a) \\ (YE'_d - b) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & (\sin \phi - Yx'_d) \\ -(\sin \phi - Yx'_q) & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix}. \quad (13)$$

由上式可解出  $i_d, i_q$ , 代入定子侧方程可解得  $v_d, v_q$ . 随后, 由式(8)可得

$$|\hat{\mathbf{V}}_t| = \sqrt{(v_q^2 + v_d^2)}, \quad (14)$$

$$\theta = \delta + \arctan(v_d/v_q). \quad (15)$$

再定义

$$r_1 = \delta_L - \theta - \phi_1, \quad (16)$$

$$r_2 = \delta_L - \phi_2. \quad (17)$$

则母线 2 处的功率平衡方程为

$$\begin{cases} P = V_t V_L Y_1 \cos r_1 - V_L^2 Y_1 \cos \phi_1 + E_b V_L Y_2 \cos r_2 - V_L^2 Y_2 \cos \phi_2, \\ Q = V_t V_L Y_1 \sin r_1 + V_L^2 Y_1 \sin \phi_1 + E_b V_L Y_2 \sin r_2 + V_L^2 Y_2 \cos \phi_2. \end{cases} \quad (18)$$

再联合式(2)~(7), 可联立 7 阶互联电力系统数学模型,

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega_B s_m, \\ \frac{ds_m}{dt} = \frac{-ds_m + P_m - P_g}{2H}, \\ \frac{dE'_q}{dt} = \frac{-E'_q + (x_d - x'_d)i_d + E_{fd}}{T'_{d0}}, \\ \frac{dE'_d}{dt} = \frac{-E'_d - (x_q - x'_q)i_q}{T'_{q0}}, \\ \frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{-E_{fd} + K_A(V_{ref} - V_t)}{T_A}, \\ \frac{d\delta_L}{dt} = \frac{1}{q_1} [Q - Q_{ld} - Q_0 - q_2 V_L - q_3 V_L^2], \\ \frac{dV_L}{dt} = \frac{1}{p_2} [P - P_{ld} - P_0 - q_3 V_L - \frac{p_1}{q_1} (Q - Q_{ld} - Q_0 - q_2 V_L - q_3 V_L^2)]. \end{cases} \quad (19)$$

该系统模型可简写为  $\frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}, \lambda)$  的形式, 式中  $\mathbf{x} = [\delta, s_m, E'_q, E'_d, E_{fd}, \delta_L, V_L]^T$ ,  $\lambda$  则为分岔参数, 可以是

发电机的机械输入功率  $P_m$ , 等效阻尼系数  $d$ , 有功无功负荷  $P_{ld}, Q_{ld}$ , 励磁系统参考输入电压  $V_{ref}$ .

## 2 系统分析

本节将结合系统分岔图与三维相图对电力系统数学模型进行动力学分析, 并对系统模型引入扰动项, 探究扰动的存在对系统运行状态的影响. 给出部分系统参数的具体数值:

网络参数:

$$Y_1 = 4.9752, Y_2 = 1.6584, Y_3 = 1.1056, \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = -1.4711, E_b = 1.0.$$

发电机参数:

$$x_d = 1.79, x_q = 1.71, T'_{d0} = 4.3, T'_{q0} = 0.85, x'_d = 0.169, x'_q = 0.23, H = 3, \omega_B = 377.$$

负荷参数:

$$P_0 = 0.4, Q_0 = 0.8, p_1 = 0.24, q_1 = -0.02, p_2 = 1.7, q_2 = -1.866, p_3 = 0.2, q_3 = 1.4.$$

励磁参数:

$$K_A = 200, T_A = 0.05.$$

## 2.1 系统对机械输入功率 $P_m$ 的敏感性

取  $d=0.5, P_{ld}=0, Q_{ld}=0$ , 改变参数  $P_m$  观察系统的变化情况. 从图3可看出, 随着  $P_m$  的增大, 可明显发现当  $P_m$  分别为 1.858, 1.876 以及 1.879 时系统发生了典型的倍周期分岔. 当  $P_m > 1.880$  时, 系统已进入混沌运行状态, 但在  $P_m = 1.882$  和  $P_m = 1.888$  附近能够观察到较明显的周期窗口. 当  $P_m$  达到 1.893 时, 系统无法保持稳定运行, 发生电压与功角崩溃. 取不同的  $P_m$  值并用 Runge-Kutta 法积分方程组, 获得系统状态量的时间序列, 以  $\delta, s_m, E'_q$  三个状态量作为坐标, 取用时间序列末端的 50 000 个数据点绘制系统三维相图(如图4所示). 从相图可看出随选取的  $P_m$  值增大, 系统运动状态的变化过程.

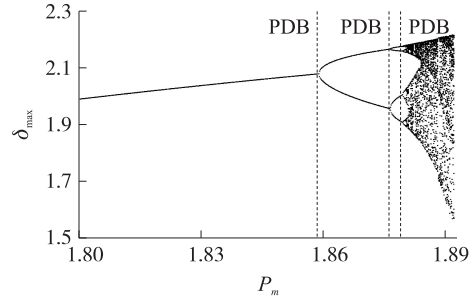


图3 系统随  $P_m$  变化的分岔图

Fig. 3 Bifurcation diagram with  $P_m$  varying

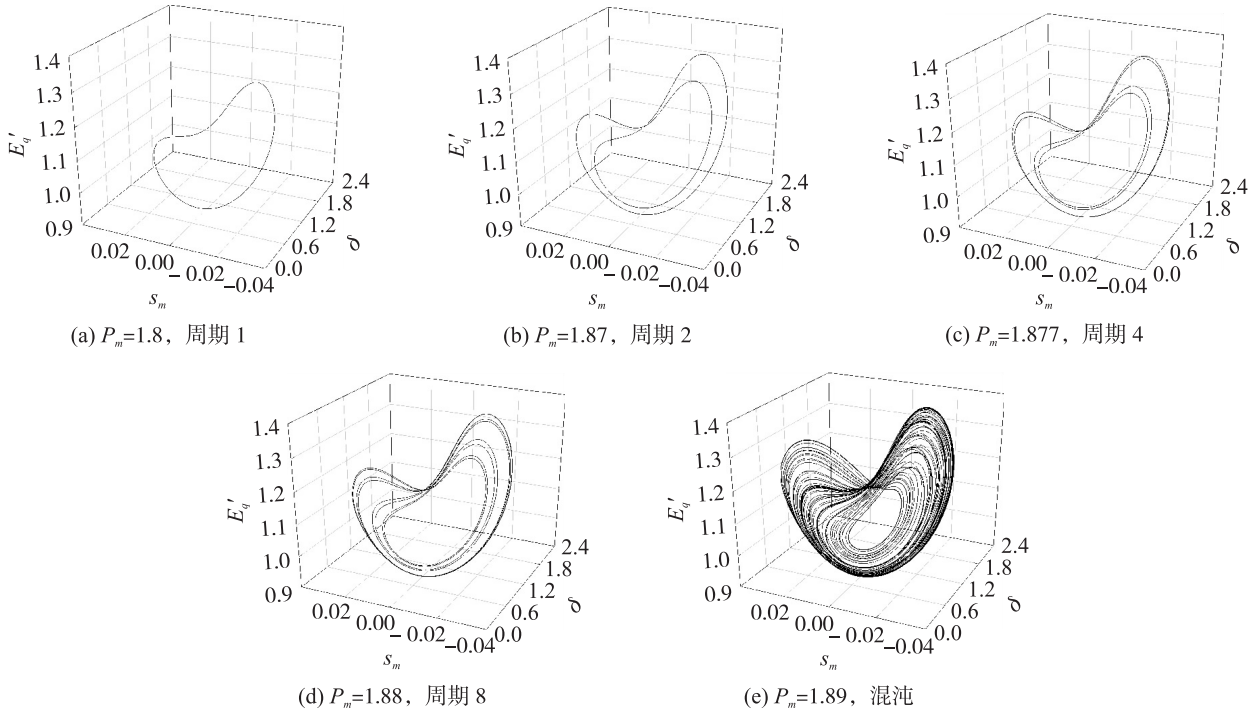


图4 不同  $P_m$  值对应的系统三维相图

Fig. 4 Phase portraits with different  $P_m$

## 2.2 系统对等效阻尼参数 $d$ 的敏感性

取  $P_m = 1.89$ , 固定其他系统参数, 改变  $d$  观察系统运动状态的变化情况. 图5为改变  $d$  值在  $[0.384, 2]$  内变化时的系统分岔图. 在  $d = 0.900, d = 1.018$  以及  $d = 1.689$  处可观察到典型的反向倍周期分岔. 在  $d = 0.417, d = 0.563, d = 0.653$  和  $d = 0.792$  这4个值的附近范围出现较明显的周期窗口. 当  $d < 0.384$  时, 系统模型因等效阻尼过小失去稳定. 依旧以  $\delta, s_m, E'_q$  为3个状态量作为坐标, 取用时间序列末端的 50 000 个数据点绘制不同  $d$  值对应的系统三维相图, 从相图观察系统运动状态随  $d$  值改变的变化情况(如图6所示).

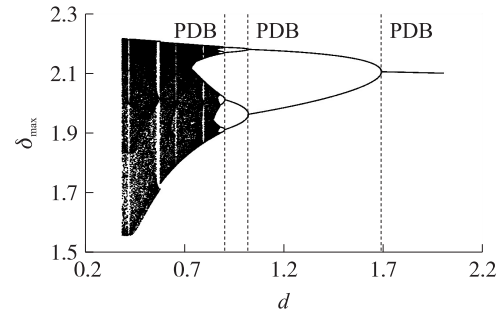


图5 系统随  $d$  变化的分岔图

Fig. 5 Bifurcation diagram with  $d$  varying

## 2.3 系统对电磁扰动功率幅值 $P_e$ 的敏感性

此处对系统模型引入电磁功率扰动项, 将系统方程中的  $P_g$  修改为  $P_g(1 + P_e \cos(2\pi f_1 \cdot t))$ , 即  $P_g$



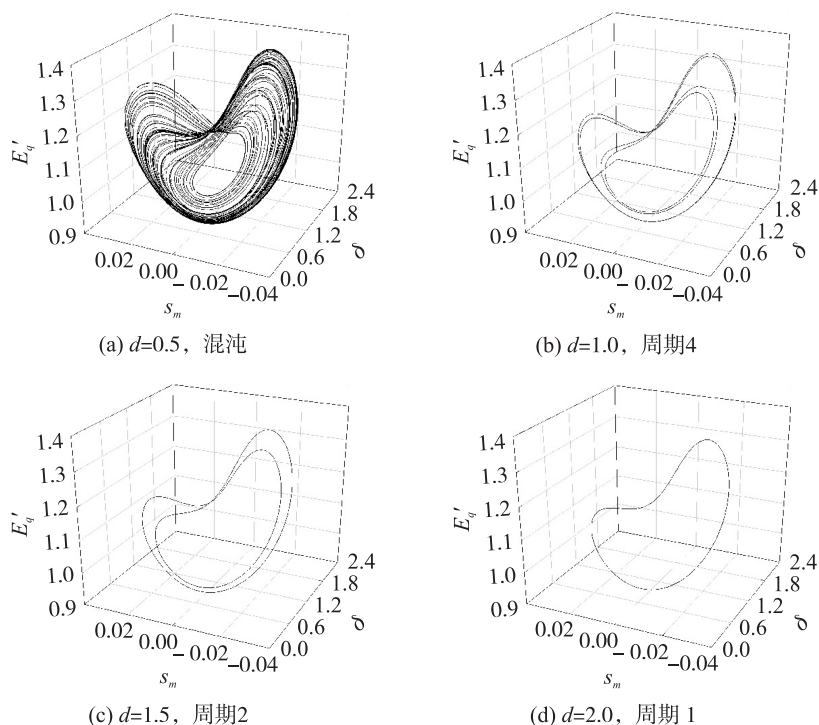


图 6 不同  $d$  值对应的系统三维相图

Fig. 6 Phase portraits with different  $d$

在原先的基础上增加一幅值为  $P_e$ , 频率为  $f_1$  的三角余弦函数型周期扰动, 因此系统方程中  $\frac{ds_m}{dt}$  的表达式也相应地改变为

$$\frac{ds_m}{dt} = \frac{-ds_m + P_m - P_g(1 + P_e \cos(2\pi f_1 \cdot t))}{2H}. \quad (20)$$

本处研究电磁扰动功率幅值  $P_e$  对系统的影响, 暂不考虑该扰动的频率  $f_1$  的作用, 故给其一固定值  $f_1 = 0.2$ , 其他参数则为  $P_m = 1.8$ ,  $d = 0.5$ ,  $P_{ld} = 0$ ,  $Q_{ld} = 0$ . 图 7 为随  $P_e$  增大时的系统分岔图. 由图 7 可见, 随  $P_e$  从 0 至 0.050 6 逐步增大, 分岔图呈现出如绞线散开般的态势直至系统失去稳定, 与常见的倍周期分岔、鞍结分岔等分岔形式呈现出的不同周期之间、周期与混沌之间的明显切换并不相同. 图 8 展示了系统取不同  $P_e$  值时的系统三维相图. 从相图观察, 随着  $P_e$  取值的增大, 系统吸引子表现出逐步向周边弥散的发展态势, 从最初的  $P_e = 0$  的周期 1 历经类似拟周期或多周期的过程发展为混沌状态.

## 2.4 系统对电磁扰动功率频率 $f_1$ 的敏感性

前一小节研究了电磁扰动功率的幅值  $P_e$  对系统的影响, 本处则从电磁扰动功率的频率  $f_1$  入手, 固定取  $P_e = 0.03$ ,  $f_1$  在  $(0, 2)$  内变化, 其余系统参数与前文探讨  $P_e$  时一致, 绘制系统分岔图如图 9 所示. 由分岔图可知, 在  $f_1$  处于  $(0, 1.566) \cup (1.675, 2)$  内时, 系统处于明显的混沌运动状态, 而当  $f_1 \in (1.566, 1.675)$  时, 系统处于周期运行状态, 混沌与周期之间的切换明显, 没有出现的明显的不同周期状态之间变化的过渡过程. 此外, 在  $P_e = 0.816$ ,  $P_e = 1.090$ ,  $P_e = 1.226$  以及  $P_e = 1.306$  附近的较小范围内存在周期窗口, 在图 10 中相应相图有所体现.

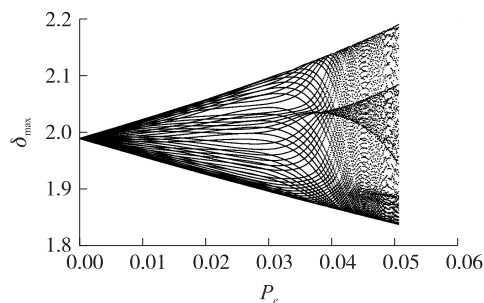


图 7 系统随  $P_e$  变化的分岔图

Fig. 7 Bifurcation diagram with  $P_e$  varying

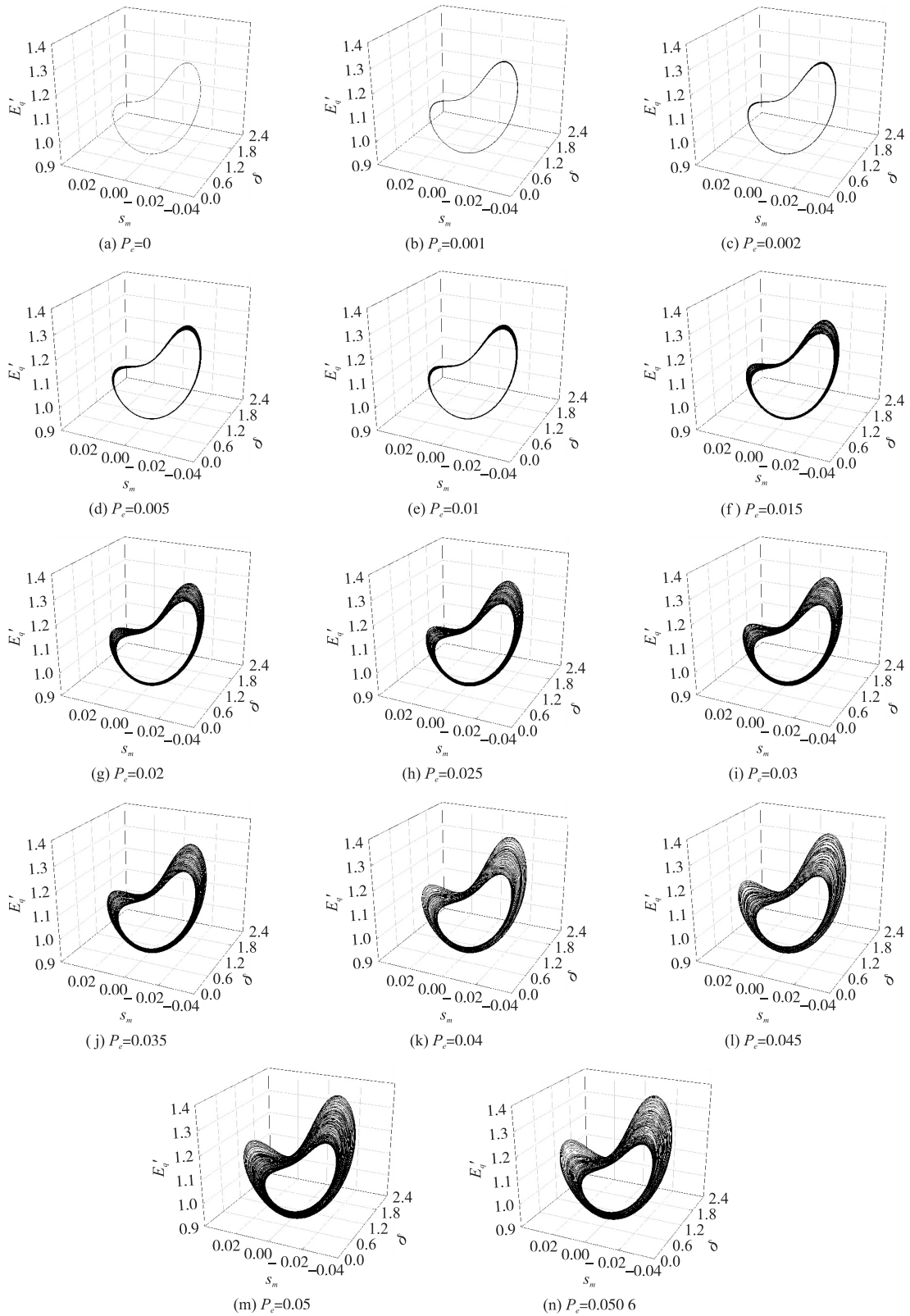

 图8 系统取不同  $P_e$  值时的吸引子相图

 Fig. 8 Phase portraits with different  $P_e$ 

## 2.5 系统对负载扰动功率幅值 $P_k$ 的敏感性

本处对系统模型引入形如  $P_k \cos(2\pi f_2 \cdot t)$  的负载扰动功率项,扰动功率的幅值为  $P_k$ ,频率为  $f_2$ ,扰动类型设为三角余弦型,系统方程中  $\frac{ds_m}{dt}$  的表达式也相应地改为

$$\frac{ds_m}{dt} = \frac{-ds_m + P_m + P_k \cos(2\pi f_2 \cdot t)}{2H} \quad (21)$$

固定系统参数  $P_m = 1.8, d = 0.5, P_{ld} = 0, Q_{ld} = 0$ , 扰动频率  $f_2 = 1.5, P_k$  在  $(0, 0.078)$  范围内变动, 求解系统随  $P_k$  增大时的分岔图(如图 11 所示). 由图可知, 当  $P_k \in (0, 0.0606)$  时, 分岔图与上文改变  $P_e$  时的情况类似, 系统运行状态介于拟周期和混沌之间. 当  $P_k = 0.0606$  时, 系统发生鞍结分岔, 从混沌转变为周期态. 当  $P_k$  增大至  $0.0703$  时, 系统发生较明显的倍周期分岔. 使  $P_k$  继续增大, 则系统逐渐从周期状态经由倍周期分岔重新回到混沌态, 并最终失去稳定. 图 12 展示了数个特定  $P_k$  值时的系统吸引子相图.

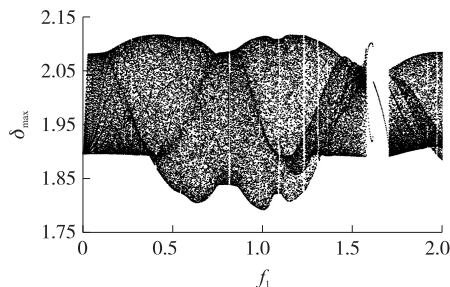


图 9 系统随  $f_1$  变化的分岔图

Fig. 9 Bifurcation diagram with  $f_1$  varying

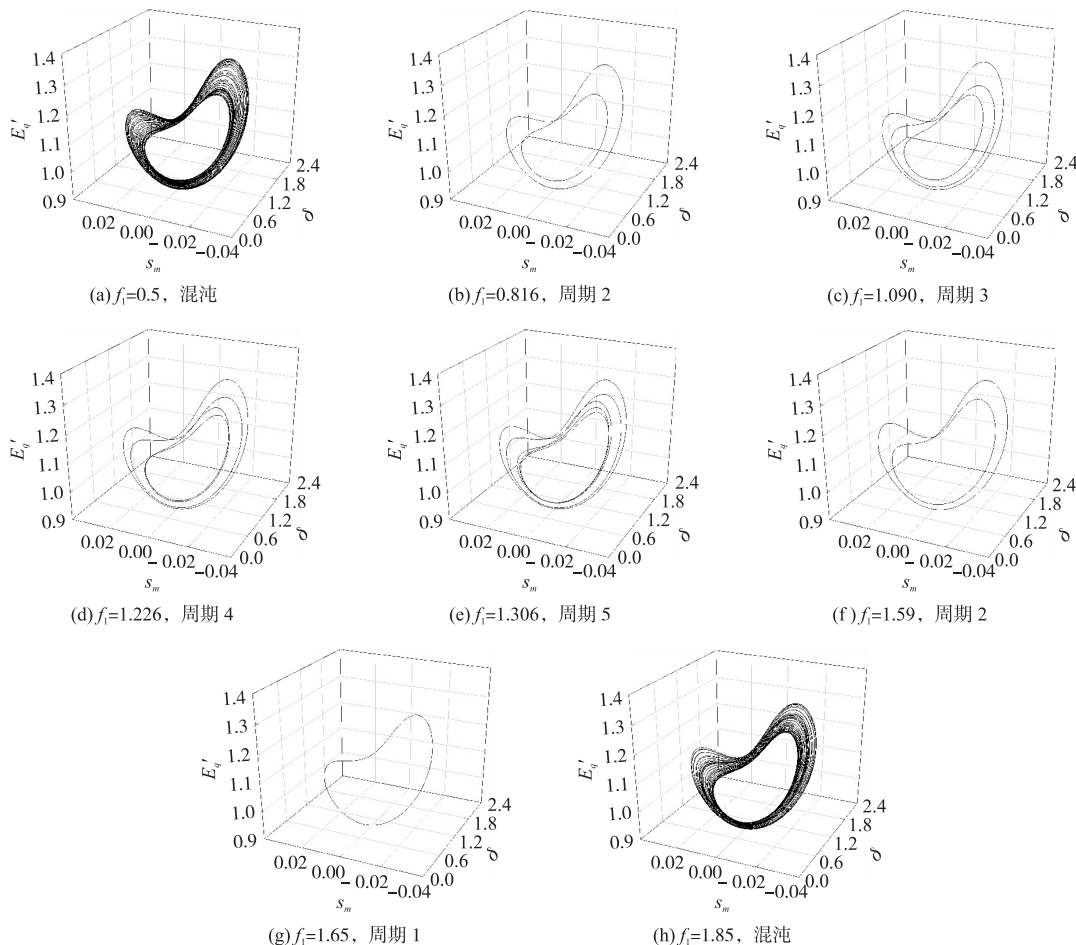


图 10 系统取不同  $f_1$  值时的吸引子相图

Fig. 10 Phase portraits with different  $f_1$

## 2.6 系统对负载扰动功率频率 $f_2$ 的敏感性

本处固定负载扰动功率幅值  $P_k = 0.07, f_2$  在  $(0, 2)$  内变动, 其余参数设置与上文讨论  $f_1$  时一致. 对比图 13 和图 9, 系统随  $f_2$  变动时的分岔情况与改变  $f_1$  时基本相同, 但能够观察到更多的窄周期窗口. 此外, 相对于时  $f_1 \in (1.566, 1.675)$  的周期窗口,  $f_2$  在  $(1.560, 1.712)$  的范围内历了周期运行状态由倍周期分岔演变为混沌态, 再由反向倍周期分岔重新回到周期运行状态的变化过程. 图 14 给出了数个吸引子相图.

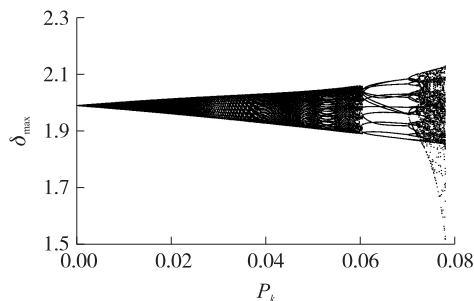


图 11 系统随  $P_k$  变化的分岔图

Fig. 11 Bifurcation diagram with  $P_k$  varying



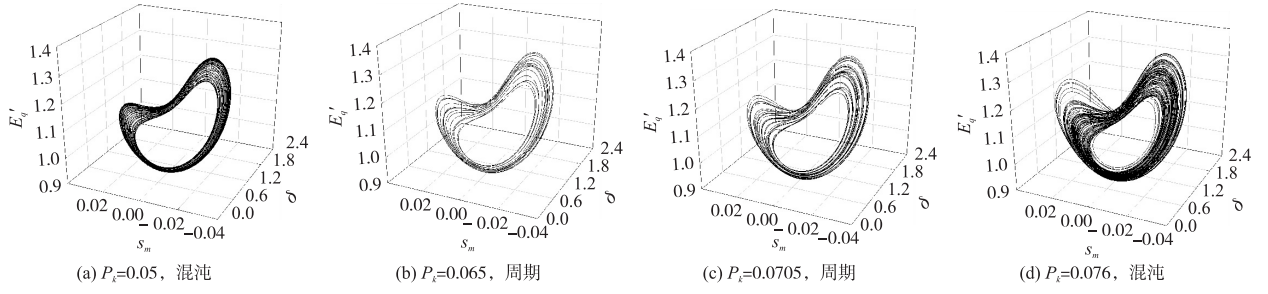


图 12 系统取特定  $P_k$  值时的吸引子相图

Fig. 12 Phase portraits with different  $P_k$

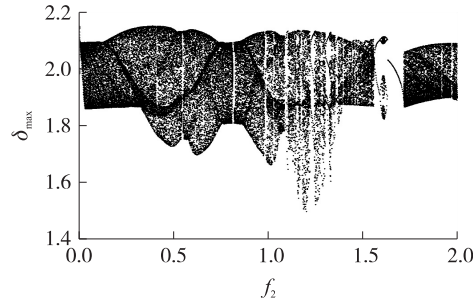


图 13 系统随  $f_2$  变化的分岔图

Fig. 13 Bifurcation diagram with  $f_2$  varying

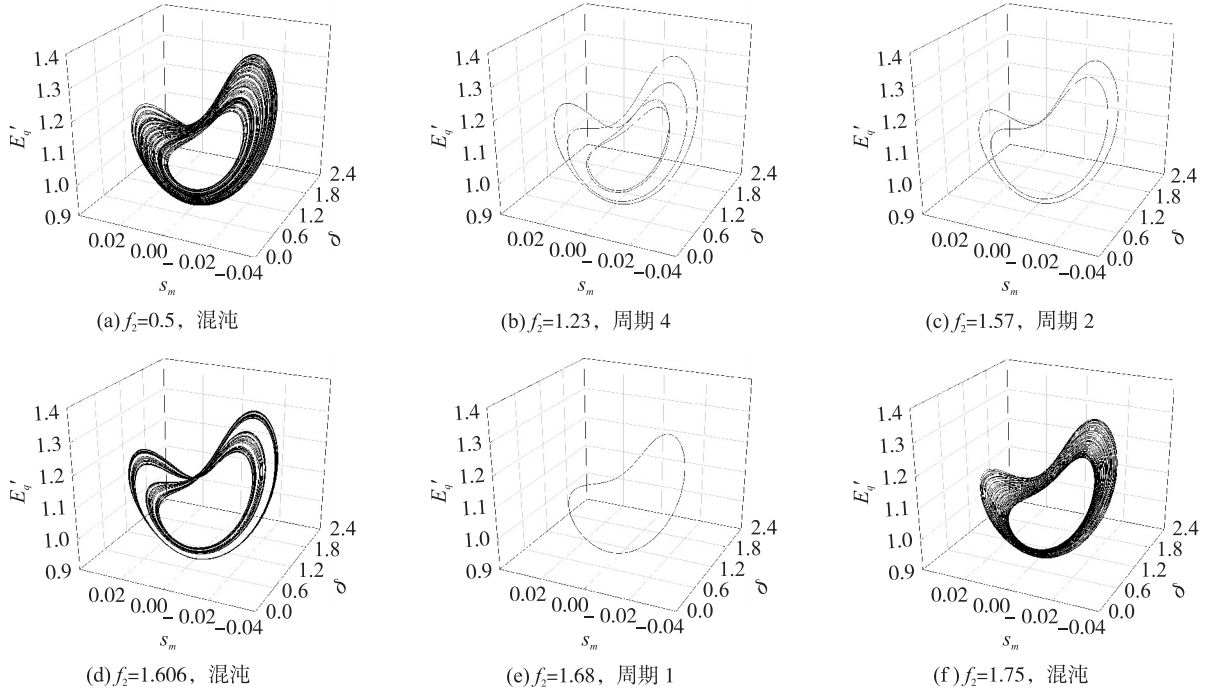


图 14 不同  $f_2$  值对应的系统吸引子相图

Fig. 14 Phase portraits with different  $f_2$

### 3 结语

本文以3节点电力系统模型为研究对象,推导了系统的7阶数学模型,研究了系统参数变化对系统运行状态的影响.根据系统分岔图,分析了电力系统运行状态对系统参数变化的敏感性,结合相图获得系统随参数变化的周期和混沌运动状态,并给出了数组特定参数值下的系统三维相图.随后,对系统模型引入电磁功率和负载功率扰动项,从扰动功率幅值和扰动功率频率两个角度研究扰动项对系统运行的影

响. 同样基于分岔图并结合相图分析系统运行状态随扰动参数变化的情况,发现了不同于常见的倍周期分岔、鞍结分岔等的系统结构变化过程. 此外,当系统扰动项的幅值和频率取在特定范围内时,系统运行状态可达到混沌中的周期窗口,该现象内在机理值得深究,且为电力系统混沌抑制提供了新思路.

### [参考文献] (References)

- [1] 卢强,梅生伟,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京:清华大学出版社,2008.  
LU Q,MEI S W,SUN Y Z. Nonlinear Control of Power System[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2008.(in Chinese)
- [2] KOPELL N,WASHBURN R J. Chaotic motions in the two-degree-of-freedom swing equations[J]. IEEE transactions on circuits and system,1982,29(11):738-746.
- [3] CHIANG H D,DOBSON I,THOMAS R J,et al. On voltage collapse in electric power systems[J]. IEEE transactions on power system,1990,5(2):342-349.
- [4] CHIANG H D,LIU C W,VARAIYA P P,et al. Chaos in a simple power system[J]. IEEE transactions on power system,1993,8(4):1 407-1 417.
- [5] 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.
- [6] RAJESH K G,PADIYAR K R. Analysis of bifurcations in a power system model with excitation limits[J]. International journal of bifurcation and chaos,2001,11(9):2 509-2 516.
- [7] 王庆红,周双喜. 考虑励磁限制的典型三节点电力系统分岔分析[J]. 华北电力大学学报,2004,31(1):5-14.  
WANG Q H,ZHOU S X. Bifurcation analysis with excitation limits in classic three-node power system[J]. Journal of North China electric power university,2004,31(1):5-14.(in Chinese)
- [8] WANG X D,CHEN Y S,HAN G,et al. Nonlinear dynamic analysis of a single-machine infinite-bus power system[J]. Applied mathematical modelling,2014,39(10/11):2 951-2 961.
- [9] 李国庆,张浩,李江,等. 基于分岔理论研究励磁饱和环节对系统电压稳定的影响[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):1-5.  
LI G Q,ZHANG H,LI J,et al. Influence of excitation saturation element on power system voltage stability based on bifurcation theory[J]. Electric power automation equipment,2015,35(3):1-5.(in Chinese)
- [10] 郝建红,汪筱巍. 互联混沌电力系统的自适应 backstepping 滑模鲁棒控制[J]. 河北师范大学学报(自然科学版),2016,40(3):220-227.  
HAO J H,WANG X W. Adaptive backstepping sliding mode robust control of interconnected chaotic power system[J]. Journal of Hebei normal university(natural science edition),2016,40(3):220-227.(in Chinese)
- [11] NI J K,LIU L,LIU C X,et al. Fixed-time dynamic surface high-order sliding mode control for chaotic oscillation in power system[J]. Nonlinear dynamics,2016,86(1):401-420.

[责任编辑:陈 庆]