

基于双频扰动的互联电力系统混沌分析

胡振鑫, 闵富红, 周 琪

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 建立带电磁功率扰动和负荷扰动的互联电力系统模型, 在双重扰动频率呈现不同数值关系的情况下, 通过绘制分岔图、Lyapunov 指数图、相平面图和功率谱, 深入分析在扰动幅值变化时系统的动力学特性, 研究系统对扰动幅值的敏感性. 对比系统在不同扰动干扰下动力学行为的复杂程度, 针对系统功角失稳问题, 准确划分在失稳场景下扰动参数的数值范围, 为电力系统稳定运行提供可靠理论依据.

[关键词] 双频扰动, 功角失稳, 动力学行为, 数值仿真

[中图分类号] TP271 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2018)02-0009-10

Chaotic Analysis of Interconnected Power System Based on Dual Frequency Disturbance

Hu Zhenxin, Min Fuhong, Zhou Qi

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

Abstract: An interconnected power system model with electromagnetic power disturbance and load disturbance is established. Considering double disturbance with different frequency, the paper analyzes the dynamic characteristics of the system in depth when the disturbance amplitude is changed. Through the bifurcation diagram, the Lyapunov exponent spectra, the phase-plane diagram and the power spectrum, sensitivity of the system to the amplitude of disturbance is discussed. When pointing at the problem of power angle instability in the system, the numerical range of the disturbance parameters is accurately divided in the unstable scene, and numerical simulations for the dynamic behavior of the system are performed under different disturbances. At last, a reliable theoretical basis for the stable operation of the power system is provided.

Key words: double frequency disturbance, power angle instability, dynamic behavior, numerical simulation

21 世纪以来, 世界电网技术飞速发展. 但电力系统中过负荷现象频频出现, 常规电力系统已无法满足日益增长的用电负荷, 因此电力系统互联成为电网发展的必然趋势. 而提高电网发电部分出力是急需完成的任务. 随着分布式能源并网的兴起和电网互联特性的日趋明显, 导致系统失稳的外部扰动频繁出现, 电力系统时常因遭受干扰而发生非同步运行、频率崩溃和电压崩溃^[1-3]. 一旦电力系统运行可靠性出现故障甚至遭到破坏, 将会给国民经济和社会安定带来巨大损失^[4-5]. 因此, 对电力系统的稳定运行提出了更高的要求.

目前, 针对电力系统稳定性问题, 国内外专家学者进行了大量研究, 王晓东^[6]基于单机无穷大系统分析了在外部扰动影响下系统的运行情况. 罗晓曙等^[7-8]对加入光伏环节的电力系统进行建模和动力学行为研究. 闵富红等^[9-10]深入分析了分数阶电力系统的非线性特性并创新性地提出了基于继电特性函数和符号函数的控制器. 徐晋等^[11]利用功率谱密度法研究分析了随机扰动下电力系统的强迫振荡情况. 顾卓远等^[12]针对电力系统的功角失稳问题, 利用实际电网算例对理论研究的正确性进行了验证, 并提出一套紧急控制方案提高功角稳定性. 梁姗姗等^[13]基于曲面拟合分析了影响电力系统节点动态频率的因素, 提出了 3 种插值拟合方法处理实验数据, 并对拟合精确度进行了校验. 曹生顺等^[14]分析了影响电网大扰动动态稳定的因素, 提出了电网自身阻尼特性决定了电网大扰动动态特性的结论, 并利用实际电网的仿真验

证了结论的准确性.

本文在常规互联电力系统模型中加入电磁功率扰动和负荷扰动从而得到一个新的模型,针对模型中双扰动频率的不同数值关系,分别探讨频率一致、整数倍关系、分数倍关系和无理数倍关系时系统的动力学行为. 利用分岔图、Lyapunov 数谱、相轨迹图和功率谱图,分析系统对扰动幅值的敏感性,归纳出系统在扰动幅值变化时的周期范围、混沌范围以及失稳范围,对比分析电磁功率扰动和负荷扰动对系统动力学行为复杂性的影响,从而为互联电力系统的稳定运行提供理论保证.

1 互联电力系统模型

目前,电力系统时常会受到外界的干扰,从而影响系统的稳定运行. 为了突出考虑电力系统在遭受外在扰动时的运行情况,本文以简单互联电力系统为例,如图 1 所示,重点研究电磁功率扰动和周期性负荷扰动对系统的影响,系统模型如式(1)所示:



图 1 互联电力系统模型

Fig. 1 Interconnected power system model

$$\begin{cases} \frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t), \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{1}{H} [P_s \sin(\delta(t)) + D\omega(t) - P_m + P_k \cos(\alpha t) \sin(\delta(t)) - P_e \cos(\beta t)]. \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\delta(t) = \delta_1(t) - \delta_2(t)$ 为系统中两个等值发电机 S_1 与 S_2 在 q 轴电势之间的相角差(rad). $\omega(t)$ 为发电机相对角速度(rad/s). P_s, P_m, P_k, P_e 分别为电磁功率、机械功率、电磁功率扰动和负荷扰动的幅值(W). α, β 分别为电磁功率扰动和负荷扰动的频率(Hz). H 表示等值转动惯量($\text{kg}\cdot\text{m}^2$). D 为等值阻尼系数($(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})/\text{rad}$).

通过对模型进行时间尺度变换简化模型,针对外加扰动频率的不同关系分析其动力学特性,令 $x_1(T) = \delta(t), x_2(T) = \omega(t) \sqrt{H/P_s}$, 则模型可简化为如式(2)所示:

$$\begin{cases} \frac{dx_1(T)}{dT} = x_2(T), \\ \frac{dx_2(T)}{dT} = -\sin(x_1(T)) - \lambda x_2(T) + \rho - \nu \cos(\eta T) \sin(x_1(T)) + \mu \cos(\gamma T). \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\lambda = D/\sqrt{HP_s}, \rho = P_m/P_s, \nu = P_k/P_s, \mu = P_e/P_s, \eta = \alpha\sqrt{H/P_s}, \gamma = \beta\sqrt{H/P_s}, T = t\sqrt{H/P_s}$.

本文以包含两组发电机的互联电力系统为研究对象,模型(1)中参数取值情况如表 1 所示,对应该简化后的模型(2)中参数分别为 $\lambda = 0.4, \rho = 0.2$.

表 1 互联电力系统参数取值

Table 1 Parameter value of interconnected power system

参数	取值
等值转动惯量 $H/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	100
等值阻尼系数 $D/((\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})/\text{rad})$	40
电磁功率幅值 P_s/W	100
机械功率 P_m/W	20

2 互联电力系统动力学特性

频率在电力系统稳定运行中扮演着至关重要的角色,随着当今电网日益明显的互联特性,一旦出现频率失稳的情况,电力系统将会遭受多种不稳定振荡,严重时还将造成大面积停电事故. 因此本文在常规互联电力系统模型的基础上加入电磁功率扰动和负荷扰动,针对两个扰动频率的不同关系分析系统中扰动幅值对系统模型的影响.

2.1 扰动频率一致

在电磁功率扰动频率和负荷扰动频率一致的情况下,选取系统扰动频率 $\eta = \gamma = 0.8$, 分别以扰动幅值 ν 和 μ 为分岔参数,固定负荷扰动幅值,考虑电磁功率扰动幅值 ν 在(1.1, 1.3)之间变化,系统功角 x_1 随 ν 变化的分岔图和 Lyapunov 指数谱如图 2 所示.

通过观察分岔图中系统的运动状态情况,当 $\nu \in (1.1, 1.16259)$ 时,系统呈现周期 1 运动,随着 ν 逐渐增大至 1.16259, 系统经过倍周期分岔开始周期 2 运动,该状态一直保持到 $\nu = 1.20323$, 随着系统再次经历倍周期分岔,系统开始呈现周期 4 运动状态,在 $\nu = 1.21392$ 时,系统出现了一段瞬时的拟周期运动状

态,当 ν 增大到 1.216 07 时,系统开始进入混沌状态. 当 ν 取 1.1 和 1.3 时,系统在相平面上的投影呈现出不同的运动状态,如图 3 所示.

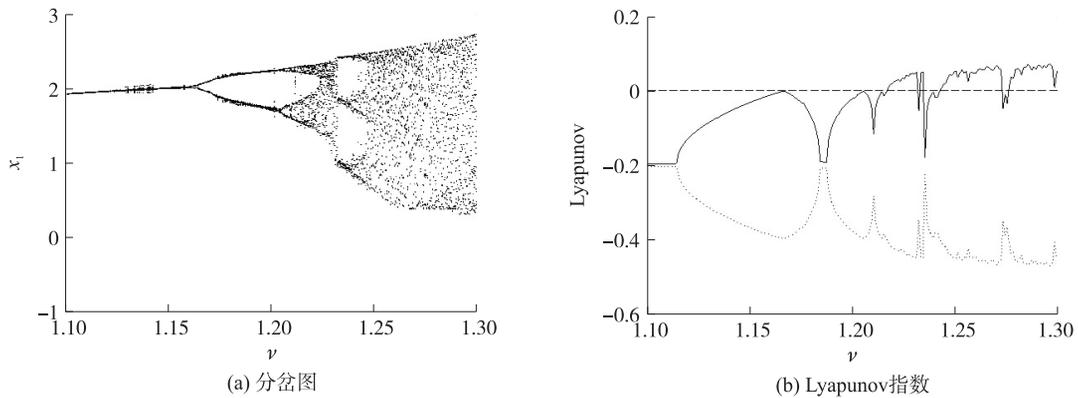


图 2 电磁功率扰动 $\nu \in (1.1, 1.3)$ 时系统分岔图和 Lyapunov 指数

Fig. 2 Bifurcation diagram and Lyapunov exponent spectrum with $\nu \in (1.1, 1.3)$

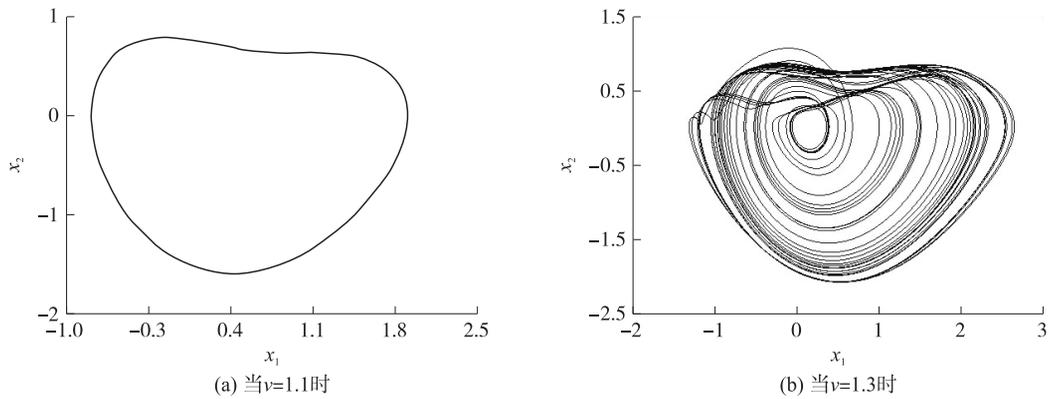


图 3 参数 ν 变化时的相平面图

Fig. 3 Phase diagram of the system for ν with different values

当电磁功率扰动幅值为定值时,改变负荷扰动幅值 μ 使其在 $(0.4, 0.9)$ 之间变化,系统功角 x_1 随 μ 变化的分岔图和 Lyapunov 指数谱如图 4 所示. 通过分岔图可知,系统运动状态在负荷扰动幅值影响下经历了周期—混沌—周期—混沌—失稳的过程,当 $\mu = 0.703$ 时,系统第一次混沌运动结束,再次开始周期运动,其周期局部分岔图及 Lyapunov 指数谱如图 5 所示,在 μ 增大到 0.825 系统第二次混沌运动结束,当 μ 继续增大时,系统功角出现失稳状态. 当 μ 取 0.5 和 0.7 时,系统在相平面上的投影呈现出不同的运动状态,如图 6 中(a)和(b)所示,在 μ 取 0.83 时,系统功角失稳的相平面投影及时序图如图 6 中(c)和(d)所示,分析系统失稳的相位图和时序图发现,功角 x_1 在时间 200 s 时急剧上升造成失稳现象,时间越长,振荡幅度越大,这对于电力系统的稳定性危害极大,严重时甚至造成整个互联电力系统的网络崩溃.

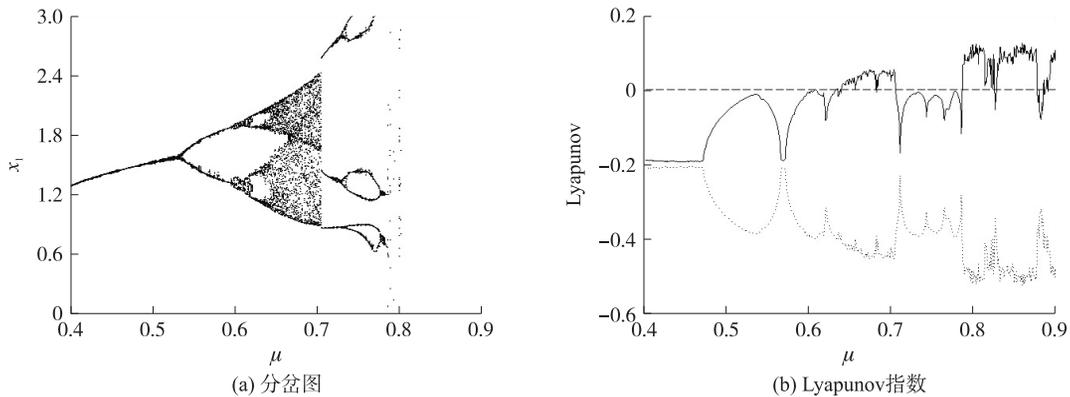


图 4 负荷扰动 $\mu \in (0.4, 0.9)$ 时系统分岔图和 Lyapunov 指数

Fig. 4 Bifurcation diagram and Lyapunov exponent spectrum with $\mu \in (0.4, 0.9)$

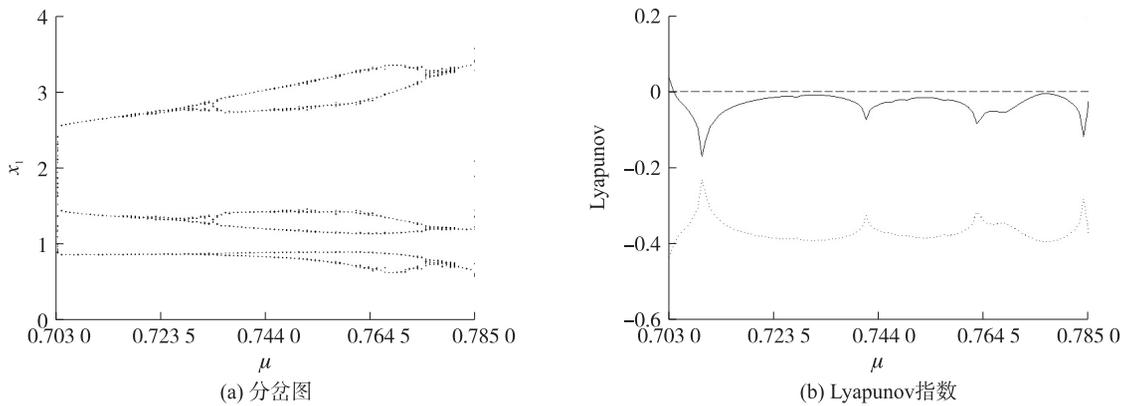


图 5 负荷扰动 $\mu \in (0.703, 0.785)$ 时系统分岔图和 Lyapunov 指数
 Fig. 5 Bifurcation diagram and Lyapunov exponent spectrum with $\mu \in (0.703, 0.785)$

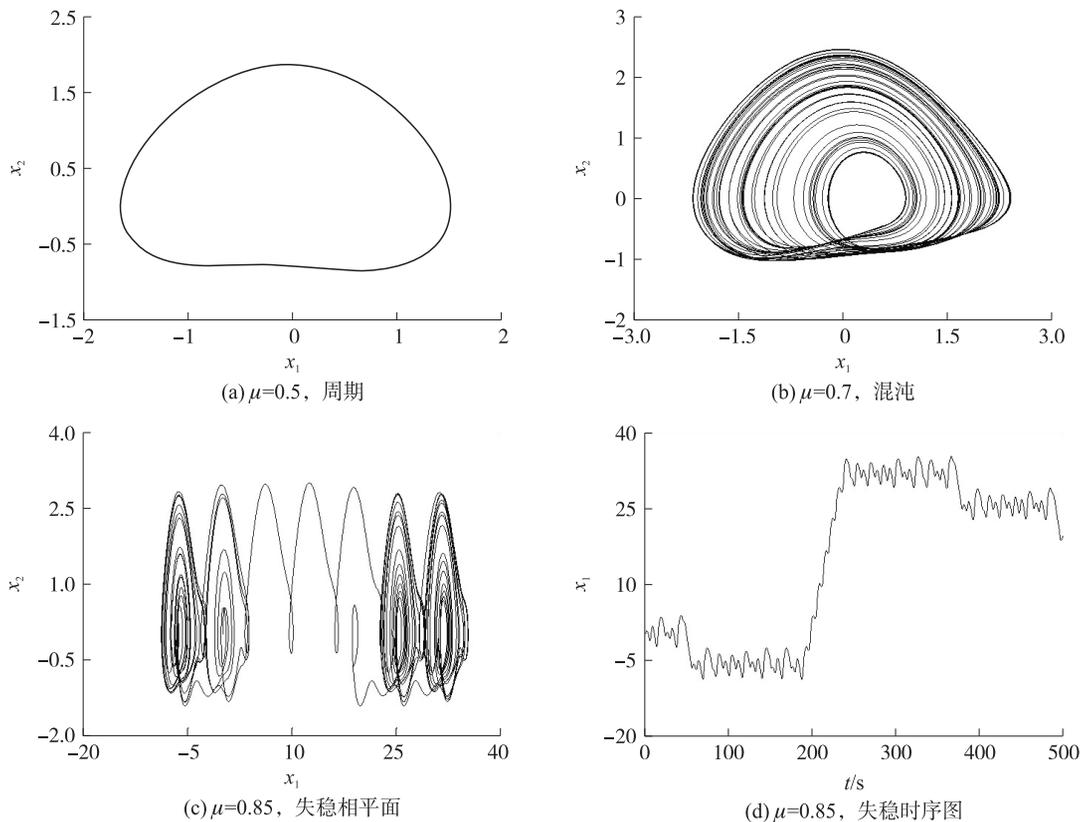


图 6 参数 μ 变化时的相平面图及时序图
 Fig. 6 Phase diagram and time sequence diagram of the system for μ with different values

2.2 扰动频率整数倍关系

分析电磁功率扰动和负荷扰动频率在不一致情况下呈现整数倍关系时系统的运动状态,选取两个扰动频率参数分别为 $\eta=0.8, \gamma=0.2$,在负荷扰动幅值为一定值时,改变电磁功率扰动幅值使其在 $\nu \in (1.1, 1.3)$ 之间变化,画出系统功角随 ν 变化的分岔图和 Lyapunov 指数谱如图 7 所示,系统从周期 4 开始运动,当电磁功率扰动幅值增大至 1.168 时,系统进入混沌运动状态。

考虑电磁功率扰动幅值固定不变,现改变负荷扰动幅值的参数范围 $\mu \in (0, 0.18)$,如图 8 所示为系统的分岔图和 Lyapunov 指数。通过观察,在 $\mu=0.069$ 时,系统经历倍周期分岔从周期 4 过度到周期 8,同时在该点处的 Lyapunov 指数为 0,也证明了该点为系统的分岔点,在 $\mu=0.084$ 时系统再次经历一段短暂的倍周期分岔后进入混沌运动,直至 $\mu=0.116$,系统的第一段混沌运动结束,再次进入周期状态,并在 $\mu=0.125$ 处经历倍周期分岔,当 μ 增大至 0.130 时,系统开始第二次混沌运动。分析系统在相平面的投影和 Poincare 截面,如图 9 所示, μ 取值分别为 0.05 和 0.11,对应系统的运动状态分别为周期 4 和混沌。

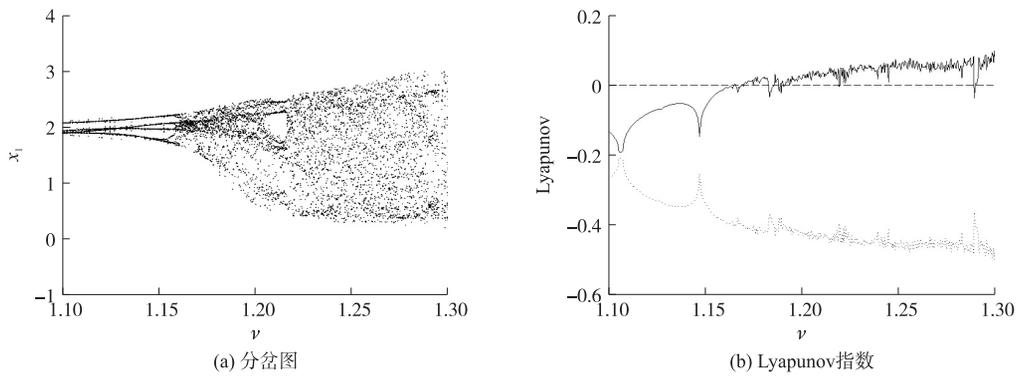


图 7 参数 $\nu \in (1.1, 1.3)$ 时系统分岔图和 Lyapunov 指数

Fig. 7 Bifurcation diagram and Lyapunov exponent spectrum with $\nu \in (1.1, 1.3)$

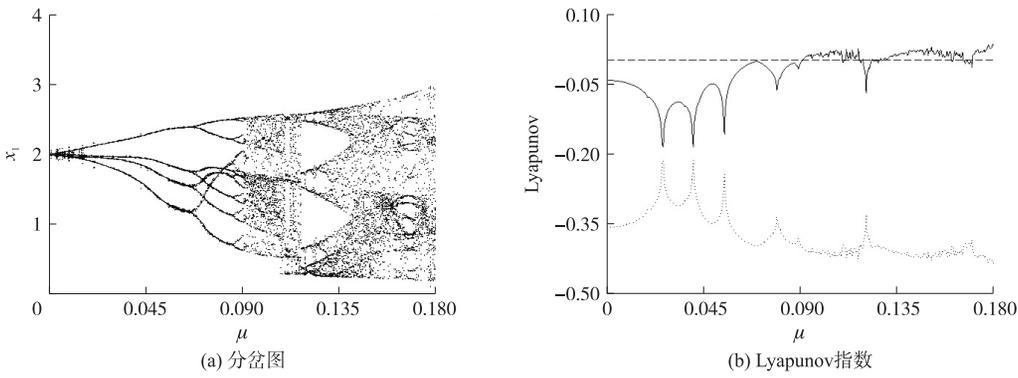


图 8 参数 μ 变化时的动力学特性

Fig. 8 Dynamic behavior with the change of μ

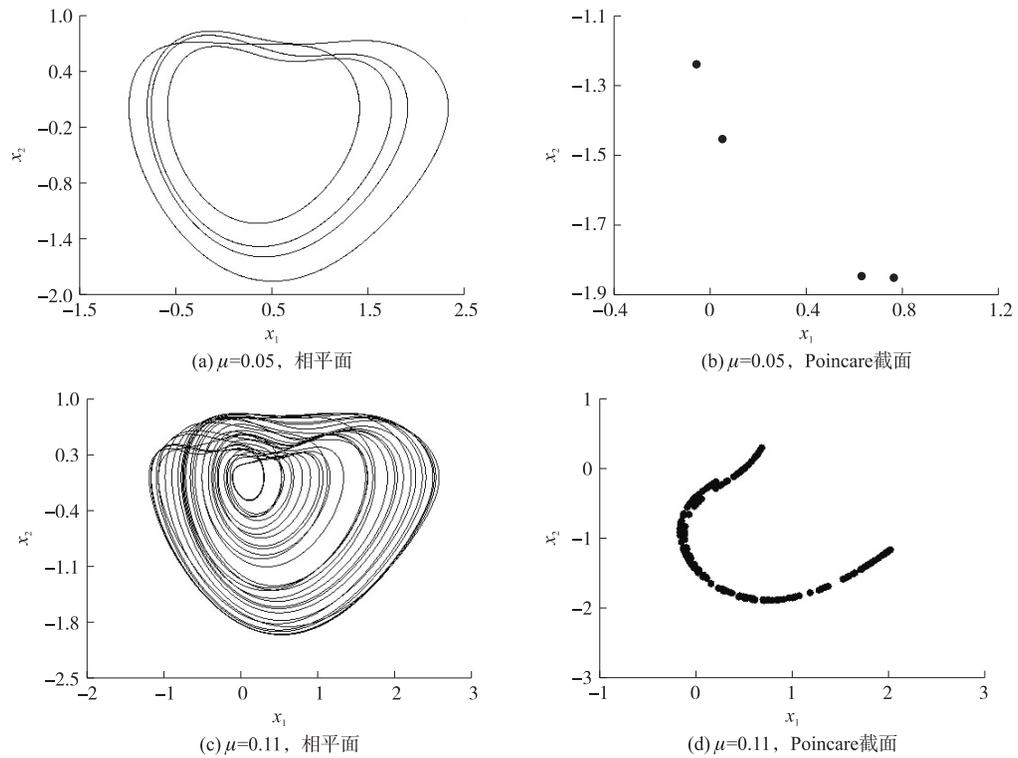


图 9 参数 μ 变化时的相平面图和 Poincare 截面

Fig. 9 Phase diagram and Poincare for μ with different values

2.3 扰动频率分数倍关系

针对系统中电磁功率扰动和负荷扰动频率的数值关系为分数倍关系,选取的扰动频率参数为 $\eta=0.8$, $\gamma=0.6$,在固定负荷扰动幅值为定值的情况下,分析系统在电磁功率扰动幅值影响下的动力学特性,确定

$\nu \in (1.1, 1.3)$, 在此范围内系统功角 x_1 随 ν 变化的分岔图和 Lyapunov 指数谱如图 10 所示, 系统从周期 4 开始运动, 在 $\nu=1.15$ 处进入混沌状态, 当 ν 增大至 1.20 时系统再次进入一个短暂的多周期状态, 紧接着继续混沌运动. 为了更清楚地呈现系统的运动状态, 特别选取了 ν 分别取 1.1、1.2、1.26 时系统在相平面上的投影和功率谱图, 如图 11 所示.

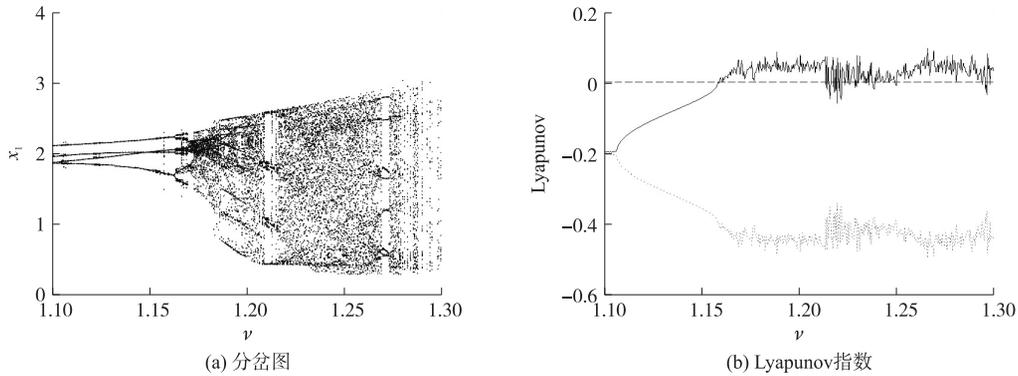


图 10 参数 $\nu \in (1.1, 1.3)$ 时, 系统分岔图和 Lyapunov 指数

Fig. 10 Bifurcation diagram and Lyapunov exponent spectrum with $\nu \in (1.1, 1.3)$

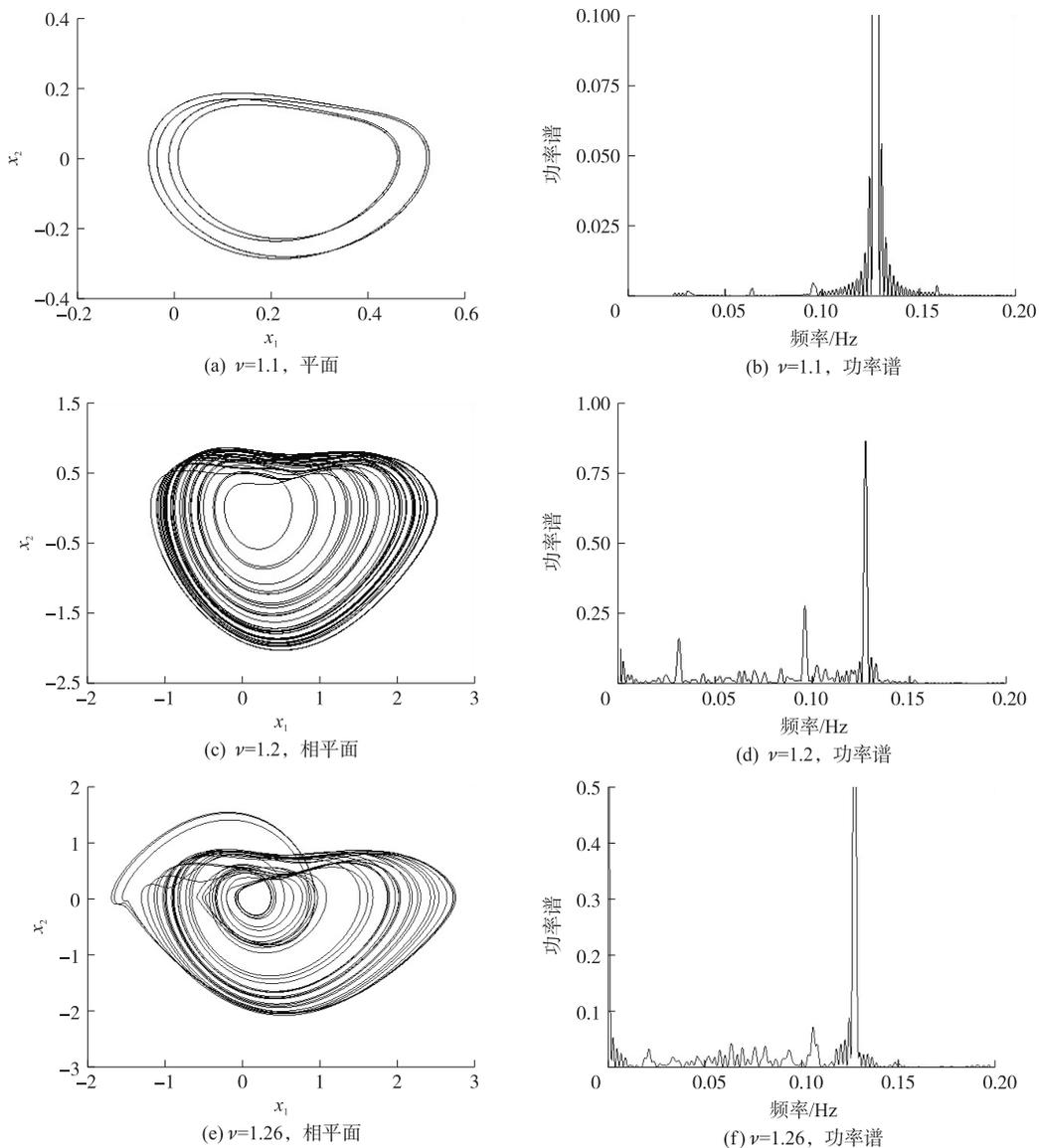


图 11 参数 ν 变化时的相平面图和功率谱图

Fig. 11 Phase diagram and power spectrum for ν with different values

固定电磁功率扰动幅值不变,改变负荷扰动幅值 μ 使其在 $(0, 0.12)$ 之间变化,系统功角 x_1 随 μ 变化的分岔图和 Lyapunov 指数谱如图 12 所示,系统在短暂的周期 2 运动之后经历倍周期分岔进入周期 4 运动,在 $\mu=0.055$ 处系统开始第一次混沌运动,持续时间很短,在 $\mu=0.058$ 时系统再次进入周期状态,当 $\mu=0.065$ 系统结束第二次周期状态,继而进入第二次混沌状态,这次状态持续时间较长,直至 $\mu=0.089$ 时结束混沌状态进入第三次周期运动,之后系统经历一段瞬时混沌运动后出现功角失稳现象,当 μ 继续增大时,系统回到混沌状态并在 $\mu=0.115$ 时出现不可逆功角失稳现象. 为了更清晰观察系统的运动状态,画出了 μ 分别取 0.001 和 0.08 时在相平面上的投影,如图 13(a)和(b)所示, $\mu=0.12$ 时系统功角失稳的相平面图和时序图如图 13(c)和(d)所示,功角分别在时间 58 s 和 180 s 经历两次急剧变化,功角的失稳严重影响了互联电力系统的稳定运行,尤其像这种功角多次变化的情况,甚至会导致系统的全面崩溃.

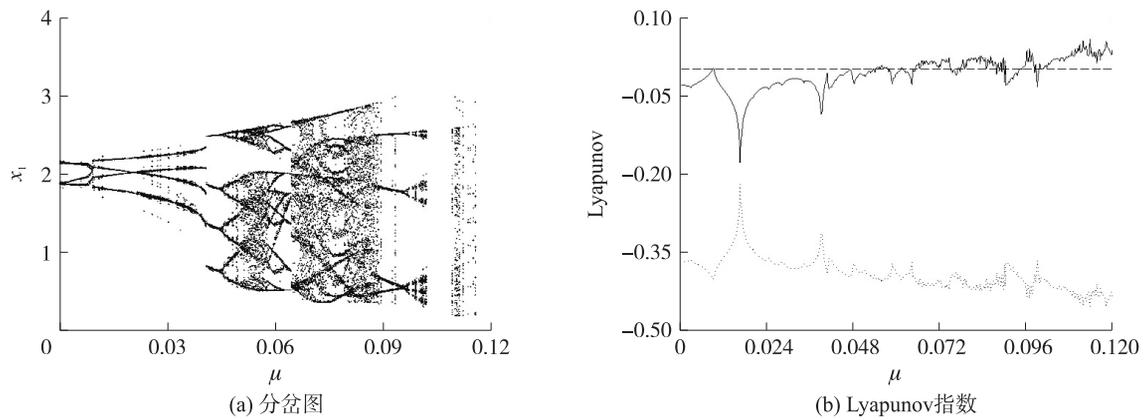


图 12 参数 $\mu \in (0, 0.12)$ 时的系统分岔图和 Lyapunov 指数

Fig. 12 Bifurcation diagram and Lyapunov exponent spectrum with $\mu \in (0, 0.12)$

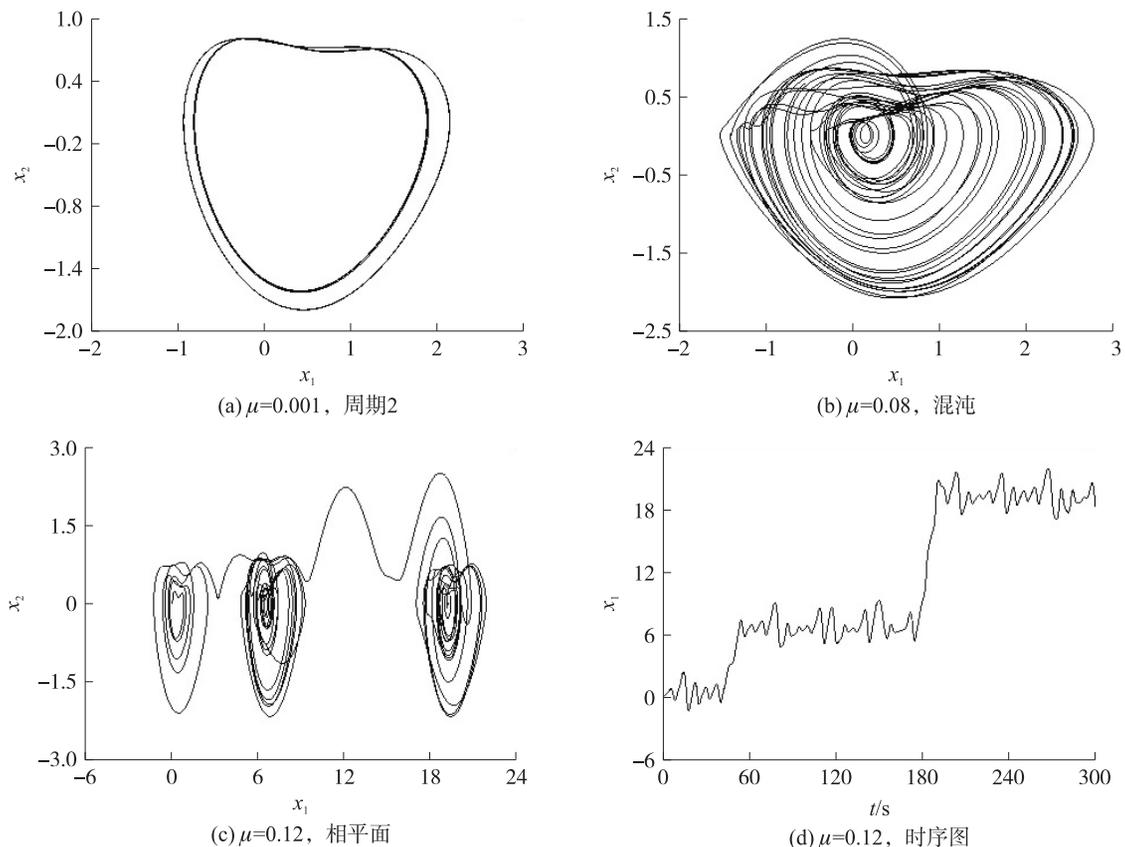


图 13 参数 μ 变化时的相平面图及时序图

Fig. 13 Phase diagram and time sequence diagram of the system for μ with different values

2.4 扰动频率无理数倍关系

无理数在数值关系中属于比较复杂的一类, π 是最常见的无理数之一, 针对电磁功率扰动频率和负荷扰动频率呈现无理数倍关系, 将 $\eta=0.8$ 和 $\gamma=0.8\pi$ 作为扰动频率参数, 分析电磁功率扰动幅值和负荷扰动幅值的不同取值对互联电力系统动力学行为的影响. 在负荷扰动幅值为一常数时, 系统功角 x_1 随电磁功率扰动幅值 ν 变化的分岔图和 Lyapunov 指数谱如图 14 所示, 在 $\nu \in (1.1, 1.16)$ 时, 系统处于周期状态, 通过观察 Lyapunov 指数谱中最大 Lyapunov 指数多次在零点处, 因此系统经历了多次拟周期状态, 在 $\nu=1.22$ 时, 系统由混沌状态进入了短暂的周期运动状态, 紧接着继续处于混沌的运动状态.

将电磁功率扰动幅值固定为一个常数, 改变负荷扰动幅值 μ 使其在 $\mu \in (0, 3)$ 之间变化, 如图 15 所示为系统功角 x_1 随 μ 变化的分岔图和 Lyapunov 指数谱, 在扰动频率呈现无理数倍关系的情况下, 相比电磁功率扰动幅值, 负荷扰动幅值的影响使得系统表现出了非常复杂的运动行为, 系统一开始处于短暂的周期 1 状态, 随后系统进入多周期状态, 在 $\mu=0.75$ 时系统最大 Lyapunov 指数为 0, 系统处于拟周期状态, 当 μ 增大至 1.11 时, 系统经过一段暂态混沌进入功角失稳状态, 并且持续时间很长, 直至 $\mu=1.80$, 观察图 15 (b) 中最大 Lyapunov 指数多次经过 0 点, 系统的运动状态在拟周期和混沌之间不断转换, 当 μ 继续增大至 2.40 时, 系统再次开始周期运动, 在 $\mu=2.86$ 处系统进入持续混沌状态. 对比之前扰动频率的关系, 在无理数倍的情况下, 观察系统在相平面上的投影发现, 负荷扰动幅值参数 μ 取 2.2 时, 在混沌状态时系统的吸引子产生了明显变化, 如图 16(a) 所示, 对应功率谱如图 16(b) 所示.

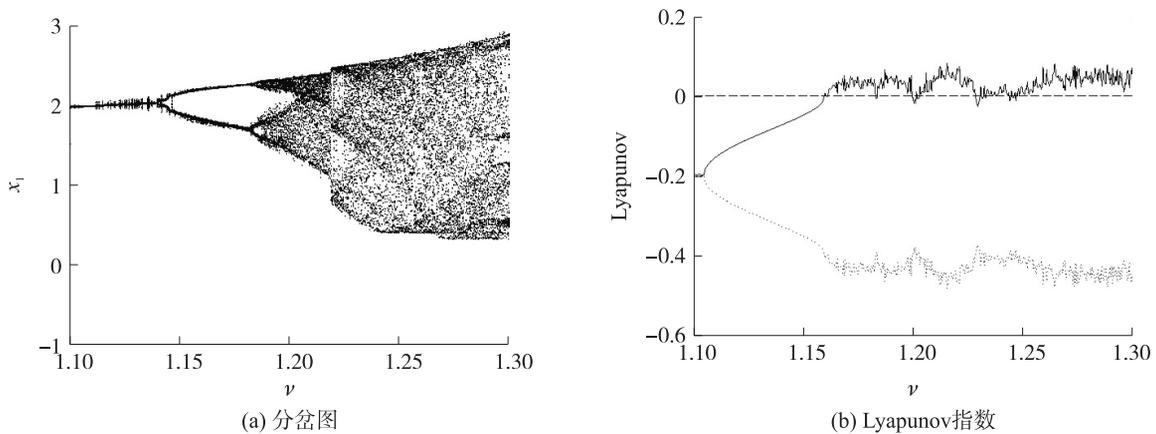


图 14 参数 $\nu \in (1.1, 1.3)$ 时系统分岔图和 Lyapunov 指数

Fig. 14 Bifurcation diagram and Lyapunov exponent spectrum with $\nu \in (1.1, 1.3)$

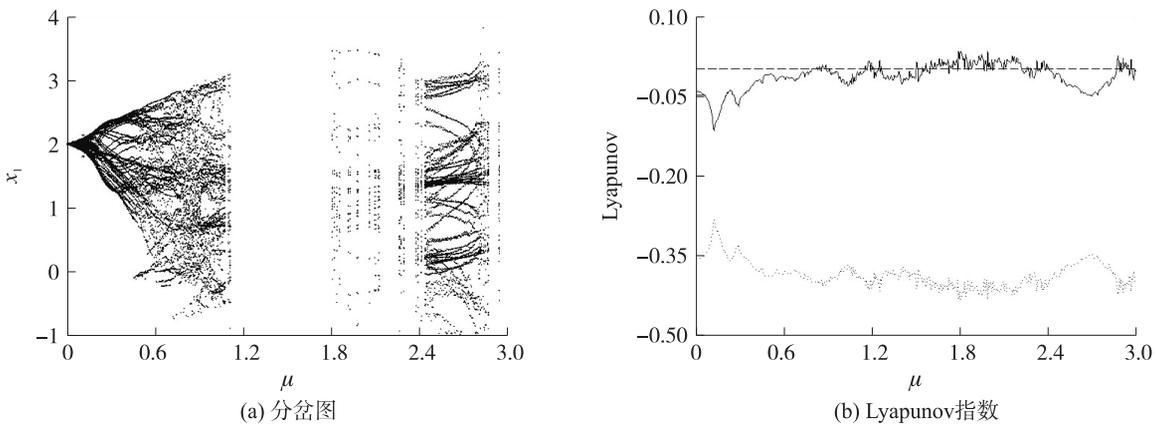
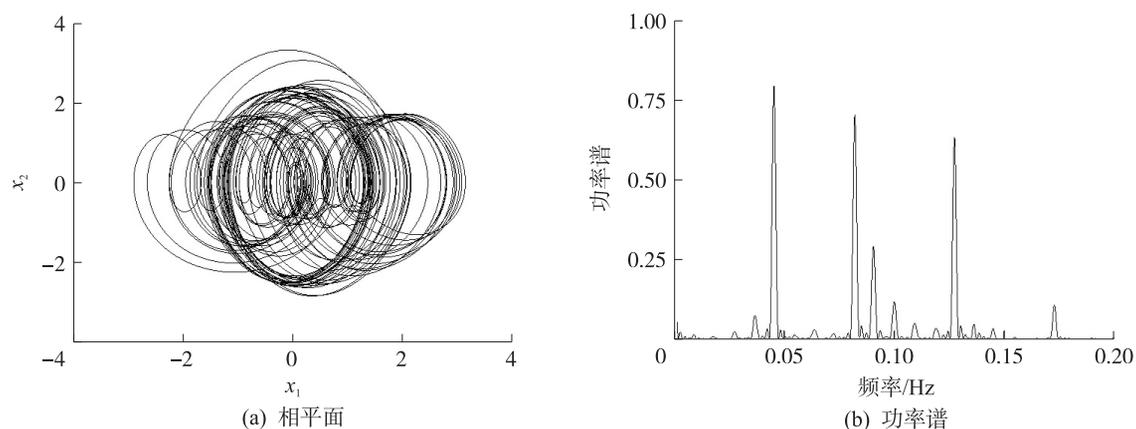


图 15 参数 $\mu \in (0, 3.0)$ 时系统分岔图和 Lyapunov 指数

Fig. 15 Bifurcation diagram and Lyapunov exponent spectrum with $\mu \in (0, 3.0)$

图 16 参数 $\mu=2.2$ 时相平面图和功率谱图Fig. 16 Phase diagram and power spectrum with $\mu=2.2$

3 结语

本文通过建立含电磁功率扰动和负荷扰动的互联电力系统模型,重点分析扰动频率呈现不同倍数关系时,扰动幅值对系统稳定性的影响.通过绘制分岔图、Lyapunov 指数、相轨迹图和功率谱图,分析发现系统具有丰富的动力学行为,呈现出周期态、拟周期态、混沌态以及周期和混沌不断交替的运动状态.对比电磁功率扰动和负荷扰动多系统的影响,发现系统在负荷扰动幅值影响下产生的动力学形态更为丰富,并且对于稳定与否的状态区域划分更为复杂.

[参考文献] (References)

- [1] MU C, TANG Y, HE H. Improved sliding mode design for load frequency control of power system integrated an adaptive learning strategy[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2017, 64(8): 6742-6751.
- [2] SAMUEL I A, KATENDA J, AWOSOPE C et al. Prediction of voltage collapse in electrical power system networks using a new voltage stability index[J]. International journal of applied engineering research, 2017, 12(2): 190-199.
- [3] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难—北美“8.14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 1-5. XUE Y S. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the eastern interconnection blackout[J]. Automation of electric power system, 2003, 27(18): 1-5. (in Chinese)
- [4] 李晨, 胡志坚, 仇梦林, 等. 电力系统动态环境经济调度问题的建模与求解[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(7): 53-60. LI C, HU Z J, ZHANG M L, et al. Modeling and solving of dynamic environmental/economic dispatch problem in power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2017, 29(7): 53-60. (in Chinese)
- [5] 王士柏, 韩学山, 杨明, 等. 计及间歇性特征的电力系统区间经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2966-2977. WANG S B, HAN X S, YANG M, et al. Interval economic dispatch of power systems with intermittent feature[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2966-2977. (in Chinese)
- [6] 王晓东. 电力系统中同步发电机摇摆振荡的非线性动力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 1-5. WANG X D. Study on nonlinear dynamic characteristics of synchronous generator swaying oscillation in power system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 1-5. (in Chinese)
- [7] 廖志贤, 罗晓曙, 黄国现, 等. 两级式光伏并网逆变器建模与非线性动力学行为研究[J]. 物理学报, 2015, 64(13): 20-27. LIAO Z X, LUO X S, HUANG G X, et al. Numerical modeling and research on nonlinear dynamic behaviors of two-stage photovoltaic grid-connected inverter[J]. Acta physica sinica, 2015, 64(13): 20-27. (in Chinese)
- [8] MAI X H, WEI D Q, ZHANG B, et al. Controlling chaos in complex motor networks by environment[J]. IEEE transactions on circuits and systems II: express briefs, 2017, 62(6): 603-607.
- [9] MIN F H. Circuit implementations, bifurcations and chaos of a novel fractional-order dynamical system[J]. Chinese physics letters, 2015, 32(3): 21-25.

- [10] 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): 70-77.
MIN F H, MA M L, ZHAI W, et al. Chaotic control of interconnected power system based on relay characteristic function[J]. Acta physica sinica, 2014, 63(5): 70-77. (in Chinese)
- [11] 徐晋, 汪可友, 李国杰, 等. 随机扰动下的电力系统强迫振荡分析[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(5): 563-569.
XU J, WANG K Y, LI G J, et al. Analysis of forced power oscillation under stochastic disturbance[J]. Journal of Shanghai jiao tong university, 2017, 51(5): 563-569. (in Chinese)
- [12] 顾卓远, 汤涌, 易俊, 等. 电力系统功角失稳与局部感应电动机失稳相互影响机理分析[J]. 电网技术, 2017, 61(8): 2500-2505.
GU Z Y, TANG Y, YI J, et al. Study on mechanism of interrelationship between power system angle stability and induction moter stability[J]. Power system technology, 2017, 61(8): 2500-2505. (in Chinese)
- [13] 梁姗姗, 吴军, 刘涤尘, 等. 基于曲面拟合的电力系统节点动态频率响应特性的影响因素[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(2): 228-238.
LIANG S S, WU J, LIU D C, et al. Analysis of factors influencing nodel dynamic frequency response characteristics on curved surface fitting[J]. Engineering journal of Wuhan university, 2017, 50(2): 228-238. (in Chinese)
- [14] 曹生顺, 张文朝, 范新桥, 等. 电网大扰动动态稳定影响因素分析[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 14-19.
CAO S S, ZHANG W C, FAN X Q, et al. Analysis of influencing factors of power grid dynamic stability under large disturbance[J]. Power system and clean energy, 2017, 33(8): 14-19. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]