

含电磁功率扰动的分数阶电力系统 混沌分析与同步控制

彭光娅, 闵富红, 黄雯迪, 叶彪明, 窦一平

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 混沌振荡是电力系统的固有现象, 当系统运行情况变得复杂时, 整数阶互联系统模型已无法满足研究要求. 本文提出了一个简单的含电磁功率扰动的分数阶互联电力系统模型, 利用分岔图、李雅普诺夫指数谱、庞加莱截面等分析系统产生混沌振荡的最低阶次. 通过改变电磁功率扰动幅值和频率因子, 观察到系统由倍周期分岔通往混沌直至功角失稳, 并导致系统崩溃. 同时, 采用双参数分析法对系统的周期运动、混沌和功角失稳详细划分与分析, 由于功角稳定性被破坏前并没有明显的迹象, 但会出现分岔和混沌行为, 若能对混沌运动进行控制, 就可以避免功角失稳对系统造成的巨大危害. 最后, 设计一种符合该系统稳定性要求的非线性控制器, 实现分数阶互联电力系统的同步控制, 仿真结果证明了控制方法的有效性, 为电力系统的安全稳定运行提供了依据.

[关键词] 混沌振荡, 分数阶互联电力系统, 功角失稳, 同步控制

[中图分类号] TP391.9 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2017)01-0018-08

Chaotic Analysis and Synchronization Control of Fractional Order Power System with the Disturbance of Electromagnetic Power

Peng Guangya, Min Fuhong, Huang Wendi, Ye Biaoming, Dou Yiping

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

Abstract: Chaotic oscillation is an inherent phenomenon of nonlinear power system. However, when the operation conditions in power system become complicated, the integer-order system models have not fully met the demands of research needs. In this paper, the basic dynamic properties of the fractional-order power system are investigated with the disturbance of electromagnetic power through the bifurcation diagram, Lyapunov exponent spectrum and Poincaré section. In the case of fractional-order power system, the lowest order at which chaos exists is observed. With the disturbance amplitude of electromagnetic power and the frequency factor varying, this power system shows rich dynamic behaviors characterized as period-doubling bifurcation transferring to chaos and angle instability. Based on the double parameters mapping, the regions are divided into the domains of periodic motion, chaos and angle instability. Due to the route to chaos appearing before the angle instability, the control method which can eliminate the chaos should be designed to avoid the harm of angle instability in power system. Therefore, a nonlinear controller which meets the stability requirement is designed to realize the synchronization of the fractional-order chaotic power system. Simulation results verify the effectiveness of the proposed methods, and provide theoretical references for the secure and stable operation of power system.

Key words: chaotic oscillation, fractional order power system, angle instability, synchronization control

混沌是存在于确定的非线性动力系统中的一类随机现象, 自 1963 年 Lorenz 首次提出“蝴蝶效应”以来, 人们开始对混沌学进行深入地研究, 使该理论逐渐在工程领域得到广泛地应用. 现代电力系统具有强非线性、高耦合性和不可避免性的特点, 时常伴随许多复杂的分岔和混沌, 这些行为直接威胁电力系统的稳定运行^[1-3]. 一旦大型电力系统运行的可靠性遭到破坏, 会导致一个或多个大区域停电, 给国民经济造成巨大的损失, 美国、巴西以及我国均有过类似的惨痛教训^[4-5]. 因此, 研究电力系统的动力学行为, 保证其安全运行显得尤为重要.

收稿日期: 2016-11-14.

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, 博士, 副教授, 研究方向: 非线性电路与系统. E-mail: minfuhong@njjnu.edu.cn

目前,针对电力系统混沌振荡的研究建立在简单电力系统模型的基础上,大多是通过改变外加扰动的幅值,得到产生混沌振荡的参数条件,并提出相应的控制方法. 由于电力系统在周期性负荷扰动的作用下会产生混沌振荡,倪骏康等^[6]提出了等效快速终端模糊滑模控制法,抑制了电力系统混沌振荡,使其恢复到同步运行状态;覃英华等^[7]通过研究发现,除了受到周期负荷扰动的影响,当电力系统中存在有界噪声或随机相位时,也会产生混沌振荡;董世勇等^[8]借助简单双机系统,同时考虑周期性负荷扰动和电磁功率扰动,并结合 Melnikov 函数的计算方法,计算出该系统中混沌振荡出现的临界条件和参数区域,但对于控制器的设计方案并没有提及;闵富红等^[9-10]深入研究了电力系统对电磁功率扰动幅值的敏感性,并设计了含有继电特性函数的非线性控制器,使系统快速、平滑地达到控制目标. 王晓东等^[11]研究了单机无穷大电力系统在外部周期性负荷扰动作用下的非线性动力学特性.

以上研究均是关于典型的整数阶电力系统中的混沌振荡,随着分数阶理论在物理、材料、信息科学、控制工程等领域的广泛应用,一些学者认识到,利用分数阶模型刻画物理现象比整数阶模型更能接近其本质^[12-14],且分数阶控制器拥有更高的控制性能. 谭文等^[14]将分数阶理论引入电力系统中,建立了分数阶互联电力系统模型,通过改变分数阶阶次和周期扰动幅值,证实了系统中存在混沌振荡,并分别运用非线性反馈控制和主动反馈控制有效地抑制了振荡的产生. 但是,其中的分数阶电力系统模型仅考虑了周期性负荷扰动的影响,实际上,外加扰动绝不仅仅只有这一种,这些干扰在一定条件下均会产生混沌振荡,造成电力系统的非同步运行,严重时还会引起电网解列. 故全面分析电力系统可能遭受的扰动类型,找出产生混沌振荡的参数条件,并利用控制器抑制混沌振荡,保证系统同步运行成为了研究分数阶电力系统的重点问题.

本文提出改进的分数阶互联电力系统模型,即加入电磁功率扰动和改变控制系统阶次,得到非同量分数阶互联电力系统模型,并以阶次为变量绘制分岔图和李雅普诺夫指数谱,获得该系统产生混沌振荡的最低阶次;其次,通过改变电磁扰动幅值和扰动频率比值,完整地归纳出可能发生混沌振荡的参数条件,并采用双参数分析法勾勒出系统的周期区域、混沌区域及功角失稳区域. 由于系统从功角稳定到失稳状态往往会经过复杂的分岔与混沌行为,只有找出抑制此类行为发生的控制方法,才可以保证互联电力系统中网络的同步运行. 这里将基于分数阶系统稳定性理论,设计主动反馈控制器,实现混沌运动的两个分数阶电力系统的同步,从而为电力系统的正常同步运行提供理论保证.

1 分数阶互联电力系统模型

本文建立一个含有周期性负荷扰动和电磁功率扰动的简单分数阶互联电力系统,数学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{d^{q_1}\delta(t)}{dt^{q_1}} = \omega(t), \\ \frac{d^{q_2}\omega(t)}{dt^{q_2}} = -\frac{1}{H} [P_s \sin(\delta(t)) + D\omega(t) - P_m + P_k \cos(\alpha t) \sin(\delta(t)) - P_e \cos(\beta t)]. \end{cases} \quad (1)$$

式中, q_1, q_2 为分数阶阶次, $\delta(t)$ 为发电机转子相对运行角度(rad). $\omega(t)$ 为相对角速度(rad/s). P_s 为系统发电机电磁功率最大值(W), P_m 为发电机的机械功率(W),不妨视为常量. P_k, P_e 分别为电磁扰动功率及负荷扰动功率的幅值(W). α, β 分别表示电磁功率扰动频率和负荷扰动频率(Hz). H 为等值转动惯量($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), D 为等值阻尼系数($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$), H, D 均为正实数.

在互联电力系统的大功率送电条件下, D, P_m 和 P_e 相对于系统输送的电磁功率 P_s 来说要小得多. 因此,对式(1)进行时间尺度变换,即令 $t = \frac{1}{\sqrt{P_s}}\tau$, $x_1(\tau) = \delta(t)$, $x_2(\tau) = \omega(t)\sqrt{H/P_s}$. 则系统模型(1)可简化为:

$$\begin{cases} \frac{d^{q_1}x_1(\tau)}{d\tau^{q_1}} = x_2(\tau), \\ \frac{d^{q_2}x_2(\tau)}{d\tau^{q_2}} = -\sin(x_1(\tau)) - \lambda x_2(\tau) + \rho - \sigma \cos(\eta\tau) \sin(x_1(\tau)) + \mu \cos(\gamma\tau). \end{cases} \quad (2)$$

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

2 分数阶互联电力系统的动力学行为

分数阶混沌系统与整数阶混沌系统的非线性动力学研究相比,同样具有参数扰动敏感性,但更能反映系统的固有性质. 考虑分数阶系统的阶次具有多变性,计算系统产生混沌振荡的最低阶次也成了本文的研究重点. 下面详细分析系统随阶次变化的动力学特性,以及研究电磁功率扰动幅值和扰动频率因子对系统运动行为的影响.

2.1 系统随阶次变化的动力学特性

根据实际运行情况,仅考虑系统的外在因素,选取合适的系统参数 $H=100 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $D=40 \text{ (N}\cdot\text{m}\cdot\text{s)/rad}$, $P_s=100 \text{ W}$, $P_m=20 \text{ W}$, $P_e=2 \text{ W}$, $P_k=130 \text{ W}$, $\alpha=\beta=0.8$,得到简化后的数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{d^{q_1}x_1(\tau)}{d\tau^{q_1}}=x_2(\tau), \\ \frac{d^{q_2}x_2(\tau)}{d\tau^{q_2}}=-\sin(x_1(\tau))-0.4x_2(\tau)-1.3\cos(0.8\tau)\sin(x_1(\tau))+0.02\cos(0.8\tau)+0.2. \end{cases} \quad (3)$$

当 $q_1=q_2=1$ 时,式(3)为典型的整数阶电力系统模型;当 $q_1 \neq q_2 \in (0,1)$ 时,式(3)为非同量分数阶系统. 由于非线性环节主要在式(3)的第二项,故设分数阶次 $q_2=1$, $q_1 \in (0,1)$,研究其动力学行为特性. 绘制图 1 所示的随 q_1 变化的分岔图和最大李雅普诺夫指数谱,两者有很好的对应关系. 当阶次 q_1 的变化范围为 $0 < q_1 < 0.941$,系统运行在周期 1 状态. 随着阶次 q_1 不断地增大,系统经倍周期分岔从周期 1 过渡到周期 2,分岔图中的临界点对应的最大李雅普诺夫指数皆为零;当 q_1 为 0.973 时,最大李雅普诺夫指数为 9.3007×10^{-5} ,近似为零,系统为准周期态,之后彻底进入混沌状态. 对比图 1(a)和(b),当系统产生混沌振荡时,最大李雅普诺夫指数均为正值. 根据图(1)的分析结论,绘制了不同阶次系统的运行相位图(图 2),从而证实了分岔图与李雅普诺夫指数的正确性. 可见,非同量分数阶电力系统式(3)存在混沌振荡的最低阶次为 0.973.

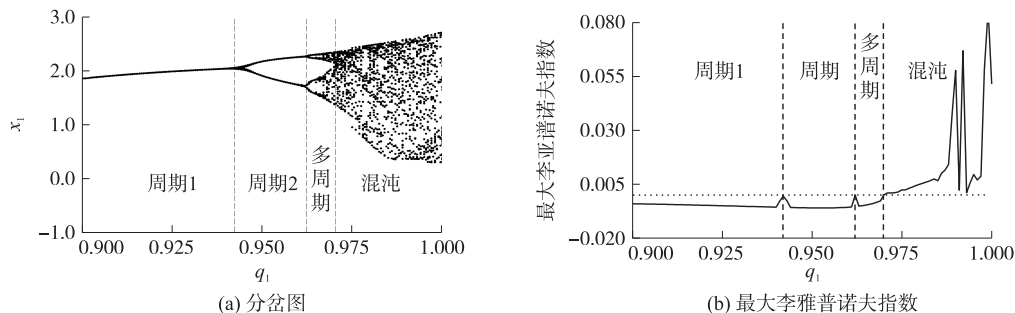


图 1 系统随分数阶阶次 q_1 变化的动力学特性

Fig. 1 Dynamic characteristics of system with the variation of fractional order q_1

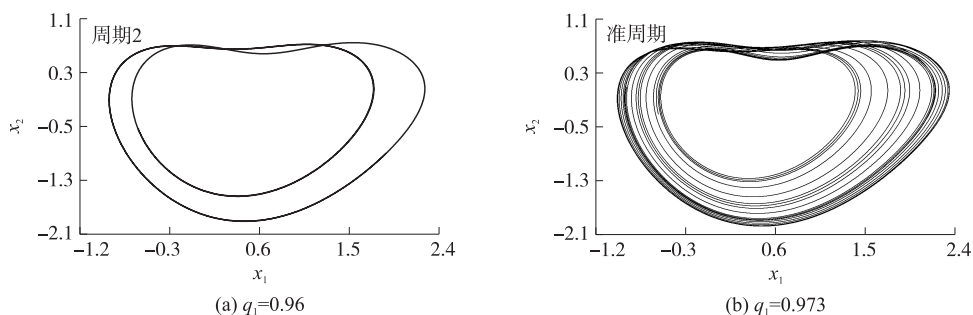


图 2 阶次 q_1 取不同值时系统吸引子相图

Fig. 2 Chaotic attractors with the different values of q_1

2.2 系统随参数变化的动力学特性

2.2.1 电磁功率扰动幅值的敏感性分析

电磁功率扰动决定着发电机的运行速度,有必要分析其对系统的影响. 这里设分数阶电力系统式(3)

的阶次 $q_1=0.98, q_2=1$, 分析系统参数变化的动力学行为, 系统模型为:

$$\begin{cases} \frac{d^{0.98} x_1(\tau)}{d\tau^{0.98}} = x_2(\tau), \\ \frac{dx_2(\tau)}{d\tau} = -\sin(x_1(\tau)) - 0.4x_2(\tau) - \sigma \cos(0.8\tau) \sin(x_1(\tau)) + 0.02\cos(0.8\tau) + 0.2. \end{cases} \quad (4)$$

当外加电磁功率扰动幅值 σ 变化时, 绘制出系统吸引子的演化过程, 如图 3 所示. 通过对比分岔图和李氏指数谱, 可知李氏指数大于零的部分与分岔图中的密集点集中区域对应一致. 当参数 $\sigma \in [1.10, 1.219\ 07]$ 时, 系统处于周期 1 状态; 当 $\sigma \in [1.219\ 07, 1.260\ 68]$ 时, 系统经倍周期分岔进入周期 2 状态, 此后逐步过渡到混沌态; 然而, 当 $\sigma > 1.398\ 02$ 后, 分岔图中出现空白区域, 同时 x_1 “跳跃”到较大值, 即系统功角值突然增大, 发生功角失稳, 导致了系统崩溃. 选取 $\sigma = 1.30$, 绘出了图 4 中的相平面图和庞加莱截面图, 当 σ 运动到混沌区域时, 庞加莱截面为一段不封闭的连续曲线, 从而证实了图 3 的分析结论. 此外, 关于功角稳定性的研究, 本文着眼于系统中发电机的转子角度, 在给定的系统状态下追踪发电机功角的动态变化过程, 采用相图和时序图呈现出混沌吸引子的发散过程, 选取参数 $\sigma = 1.40$ 绘制图 5 所示的运动, 可见系统先经历一段时间的暂态混沌, 然后功角分量逐渐增大而频率分量 x_2 变化不大, 当运动到下一个吸引域再形成暂态混沌, 因为系统 (4) 属于一种摆动方程, 然后运动会再次振荡发散. 由图 5(b) 可见, 功角分量 x_1 在时间为 85 s 左右后增加, 出现功角失稳, 导致了电力系统的崩溃.

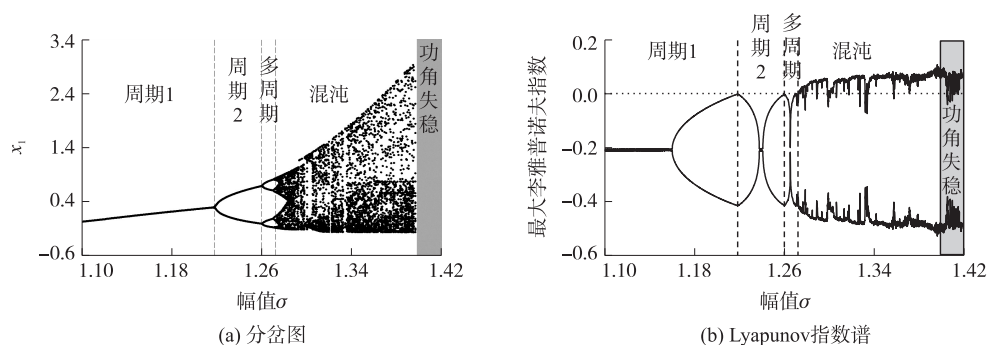


图 3 系统随电磁功率扰动幅值 σ 变化的分岔图和 Lyapunov 指数谱

Fig. 3 Bifurcation diagram and Lyapunov exponent spectrum with the disturbance σ of electromagnetic power varying

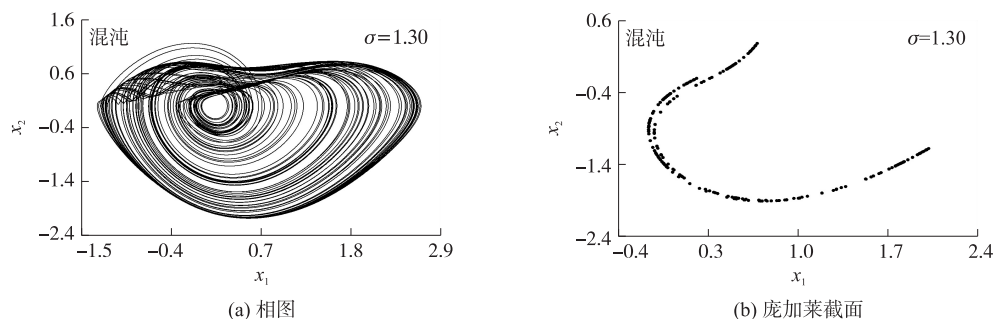


图 4 系统取不同电磁功率扰动幅值 σ 时的相图和庞加莱截面

Fig. 4 Phase diagram and the Poincaré section with the different disturbance σ of electromagnetic power

2.2.2 扰动频率的敏感性分析

分数阶系统式 (2) 是一个双频率的电力系统, 参数 η 表征了电力系统中电磁功率扰动的频率, 参数 γ 表征了系统的周期性负荷扰动. 为了分析两个扰动频率对系统敏感性的影响, 这里引入一个频率因子 $k = \eta/\gamma$, 并设参数 $\gamma = 0.8$ 和扰动幅值 $\sigma = 1.30$, 通过改变频率因子 k , 观察系统的动力学行为. 改变频率因子 k , 绘制系统在 $k \in [0, 4.0]$ 范围内的李雅普诺夫指数谱和分岔图, 如图 6 所示. 图中的周期、混沌及功角失稳区域均对应一致, 当 k 从 4.0 开始不断减小时, 系统从周期运动经过倍周期分岔进入混沌并产生功角失稳, 这样的过程重复出现, 其不同于电磁功率扰动幅值变化的情形. 当 $k \in [0.780\ 3, 0.977\ 1]$ 和 $[1.820\ 7, 2.294\ 7]$ 时, 系统呈现功角失稳, 此时最大李雅普诺夫指数大于零. 图 7 中利用相图和时序图描绘了 $k = 2$ 时系统发生功角失稳时的变化趋势, 因为是改变频率因子 k , 故功角以周期振荡形式逐渐发散而失稳, 在不同的吸引域都出现了暂态

混沌. 功角失稳前一定是混沌引起的,由于出现混沌危机,继而发生暂态混沌失稳. 图 8(a)表示了 $k=2.3$ 时系统处于混沌运动的相位图. 此外,当频率因子 $k<0.5674$ 时,电磁功率扰动的频率就很低,系统处于多周期的低频振荡而且振荡幅值很大,如图 8(b)所示,这种低频振荡对电力系统的危害极大,会造成整个互联电力系统网络崩溃.

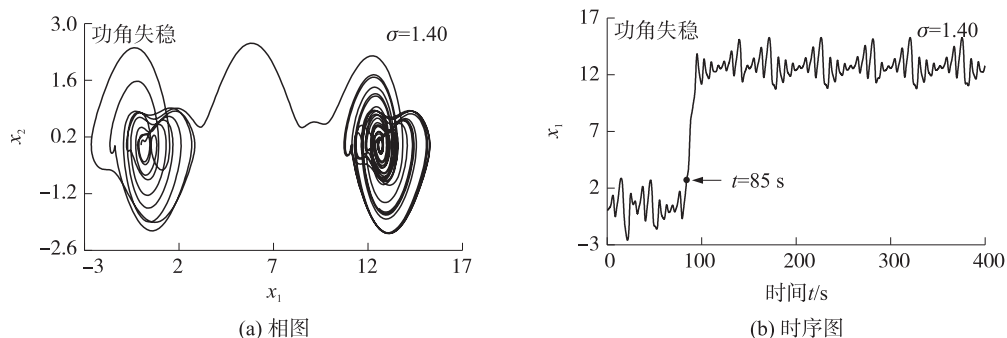


图 5 功角失稳时系统的相图和时序图

Fig. 5 Phase diagram and timing diagram of system in angle instability

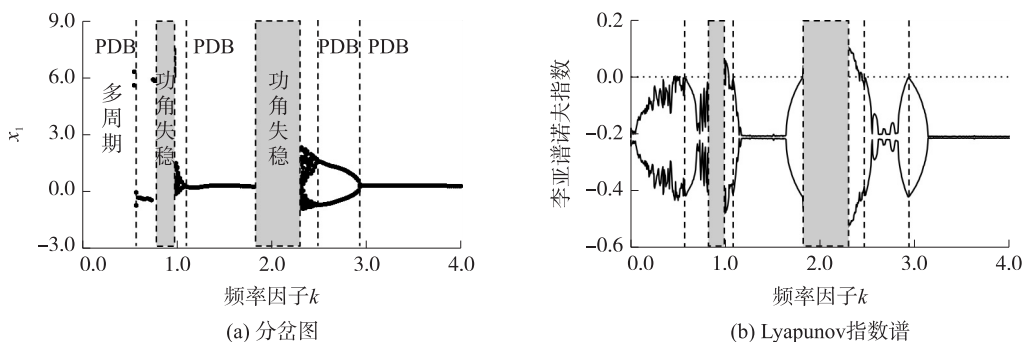


图 6 系统随扰动频率因子 k 变化的分岔图和 Lyapunov 指数谱

Fig. 6 Bifurcation diagram and Lyapunov exponent spectrum with the frequency factor k varying

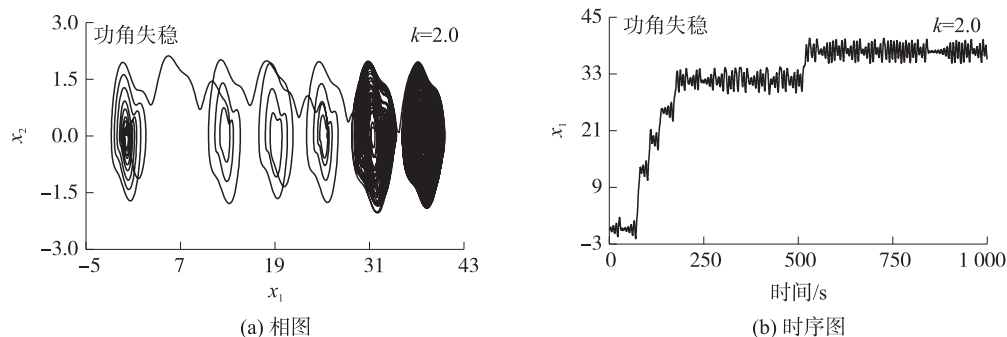


图 7 频率因子 $k=2$ 时系功角失稳时系统的相图和时序图

Fig. 7 Phase diagram and timing diagram in angle instability when $k=2$

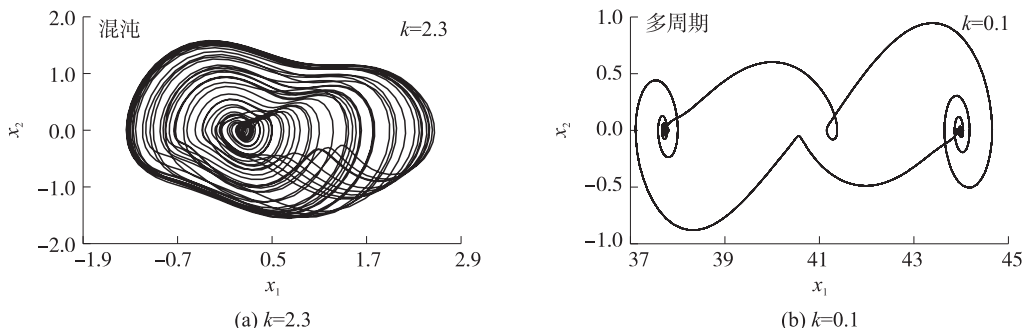


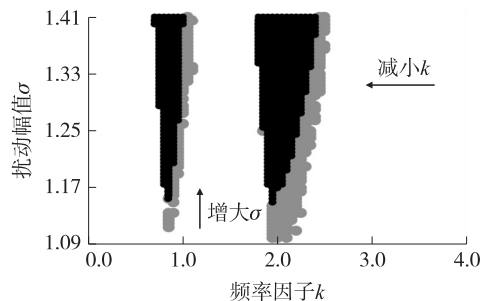
图 8 系统取不同扰动频率因子 k 时的相图

Fig. 8 Phase diagram with the different frequency factor k

2.2.3 双参数分析

为了观察系统随电磁功率扰动幅值和频率因子同时变化时的运行情况,这里基于双参数分析法,直观地勾勒出系统运行的周期、混沌和功角失稳区域,如图9所示.其中,黑色区域为功角失稳,灰色部分为混沌振荡,其他白色的部分为周期运动与平衡态的稳定运行区域.

对照图3和图6中描述的系统功角从稳态到失稳的过程为固定频率增大电磁功率扰动幅值 σ ,以及固定幅值 σ 减小频率因子 k ,系统运动的演化过程都是从稳定状态经由倍周期分岔进入混沌并最终出现失稳.由于系统一旦进入功角失稳区域,功角值将会连续地、不可逆转地持续振荡增大,引起电力系统发电机的非同步运行,严重破坏系统的稳定性,所以必须在功角失稳之前将其控制到稳定运行状态.考虑到功角失稳之前往往会产生混沌振荡,需要设计合适的控制器,及时地消除混沌振荡.



(白色区域为周期与平衡态的稳定域,灰色区域为混沌,黑色区域为功角失稳)

图9 双参数控制的系统运行分区图

Fig. 9 System partition map controlled by double parameters

3 分数阶互联电力系统同步控制

大型互联电力系统网络能够正常运行的条件是很多单个小型电力系统的电机同步运行,因而有必要研究电力系统的同步控制.对于整数阶混沌系统的同步研究已经存在许多性能良好的控制方法,然而这些方法不能完全照搬到分数阶混沌系统中.一些学者试图通过时频域转换法把分数阶混沌系统转化为整数阶系统以实现混沌控制,但该方法误差较大,应用性不强.还有一些方法是基于拉普拉氏变换的最终定理来设计控制器,从而达到分数阶同步控制,但该方法的使用前提是分数阶方程必须满足拉普拉氏变换条件,因此并不适用于本文的系统模型.这里采用的控制方法是主动反馈控制法,通过设计控制器使驱动系统与响应系统的误差系数矩阵为定常的负定矩阵,保证同步误差在一定时间内逐渐趋近于零,最终实现两个分数阶系统的同步.

3.1 分数阶系统稳定性理论

分数阶系统稳定性的研究已经取得一定的成果,可知分数阶线性系统稳定的必要条件如下^[15-16]:

引理1 考虑一个自治的分数阶微分系统

$$D^q X = f(X), X(0) = X_0. \quad (5)$$

式中, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbf{R}^n$, $X_0 \in \mathbf{R}^n$ 是系统式(5)的平衡点. $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$, $q_i \in (0, 1]$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 且 $D^q = [D^{q_1}, D^{q_2}, \dots, D^{q_n}]^T$, $f \in \mathbf{R}^n$. 假设 $q_i = v_i/u_i$, v_i, u_i 为互质数, M 是所有 u_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的最小公倍数, 那么, 对于 $q_1 = q_2 = \dots = q_n = \tilde{q}$ 的同量分数阶系统, 若 Jacobian 矩阵 $J = \partial f / \partial X|_{X_0}$ 的特征根 λ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 满足任意的 λ_i 都有 $|\arg(\lambda_i)| > \tilde{q}\pi/2$, 则系统式(5)是渐近稳定的. 同理, 对于 q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 不完全相等的非同量分数阶系统, $\det(\text{diag}[\lambda^{Mq_1}, \lambda^{Mq_2}, \dots, \lambda^{Mq_n}]) - J = 0$ 的根 λ_i ($i = 1, 2, \dots, M(q_1 + q_2 + \dots + q_n)$) 满足任意的 λ_i 都有 $|\arg(\lambda_i)| > \pi/2M$, 则系统(5)是渐近稳定的.

3.2 主动反馈控制器

利用主动反馈控制法设计合适的控制器,取电磁扰动频率幅值 $\sigma = 1.30$,保证系统中存在混沌振荡,式(4)设为驱动系统,则受控响应系统为:

$$\begin{cases} \frac{d^{0.98} y_1(\tau)}{d\tau^{0.98}} = y_2(\tau) + u_1(\tau), \\ \frac{dy_2(\tau)}{d\tau} = -\sin(y_1(\tau)) - 0.4y_2(\tau) - 1.3\cos(0.8\tau)\sin(y_1(\tau)) + 0.02\cos(0.8\tau) + 0.2 + u_2(\tau). \end{cases} \quad (6)$$

设误差信号为 $e_1 = y_1 - x_1$, $e_2 = y_2 - x_2$, 得到同步误差方程如下:

$$\begin{cases} \frac{d^{0.98} e_1}{d\tau^{0.98}} = e_2 + u_1(\tau), \\ \frac{de_2}{d\tau} = -(\sin y_1 - \sin x_1) - 0.4e_2 - 1.3\cos(0.8\tau)(\sin y_1 - \sin x_1) + u_2(\tau). \end{cases} \quad (7)$$

选择合适的控制函数 $U = (u_1, u_2)^T$ 为:

$$\begin{cases} u_1 = V_1(\tau), \\ u_2 = (\sin y_1 - \sin x_1) + 1.3 \cos(0.8\tau) (\sin y_1 - \sin x_1) + V_2(\tau). \end{cases} \quad (8)$$

将控制器(8)代入式(7)后,得到简化后的线性误差方程为:

$$\begin{cases} \frac{d^{0.98} e_1}{d\tau^{0.98}} = e_2 + V_1(\tau), \\ \frac{de_2}{d\tau} = -0.4e_2 + V_2(\tau). \end{cases} \quad (9)$$

根据引理 1, 当 $q_1 = v_1/u_1 = 0.98, q_2 = v_2/u_2 = 1.00$ 时, $u_1 = 50, u_2 = 1$, 求得 M 为 u_1 和 u_2 的最小公倍数, 即 $M = 50$. 因此, 若系统(9)在平衡点 $e_i = 0 (i = 1, 2)$ 的 Jacobian 矩阵可以满足任意的特征值 $\lambda_i (i = 1, 2)$ 都有 $|\arg(\lambda_i)| > \pi/2M = \pi/100$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时误差 $e_i (i = 1, 2)$ 将逐渐收敛到零. 为了实现两个分数阶互联电力系统混沌同步的目的, 选择合适的 $(V_1(\tau), V_2(\tau))^T$ 如下所示:

$$\begin{bmatrix} V_1(\tau) \\ V_2(\tau) \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

令 $J = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 0 & -0.6 \end{bmatrix}$, 此时, $|\arg(\lambda_i(J))| = \pi > \frac{\pi}{100}$ 满足引理 1. 将 $V(V_1(\tau), V_2(\tau))^T$ 代入式(8), 得到控制器为

$$\begin{cases} u_1 = -e_1 - e_2, \\ u_2 = (\sin y_1 - \sin x_1) + 1.3 \cos(0.8\tau) (\sin y_1 - \sin x_1) - 0.6e_2. \end{cases} \quad (11)$$

3.3 仿真实验

为了验证主动反馈同步控制器的可靠性, 本文基于 MATLAB 仿真软件, 采用预估校正法进行数值计算, 设置仿真时长为 80 s, 采样周期为 0.05 s, 令驱动系统的初值为: $x_1(0) = 0.1, x_2(0) = -0.2$, 响应系统的初值为: $y_1(0) = 0.2, y_2(0) = 0.5$, 得到仿真结果如图 10. 由图 10 可知, 在控制器(11)的作用下当 t 经过 0.7 s 后, 驱动系统的 x_1 与响应系统的 y_1 逐渐达到一致同步, 而当 t 经过 3.7 s 后, 驱动系统的 x_2 与响应系统的 y_2 逐渐达到同步. 由于是非等量的分数阶电力系统同步控制, 故对应状态向量达到同步的时间也有区别. 当然, 从误差曲线也可以观察到, 仿真开始后不久, 误差量迅速地稳定在零点附近, 说明该控制器对分数阶电力系统中的混沌振荡进行了快速、有效地抑制, 控制性能指标良好.

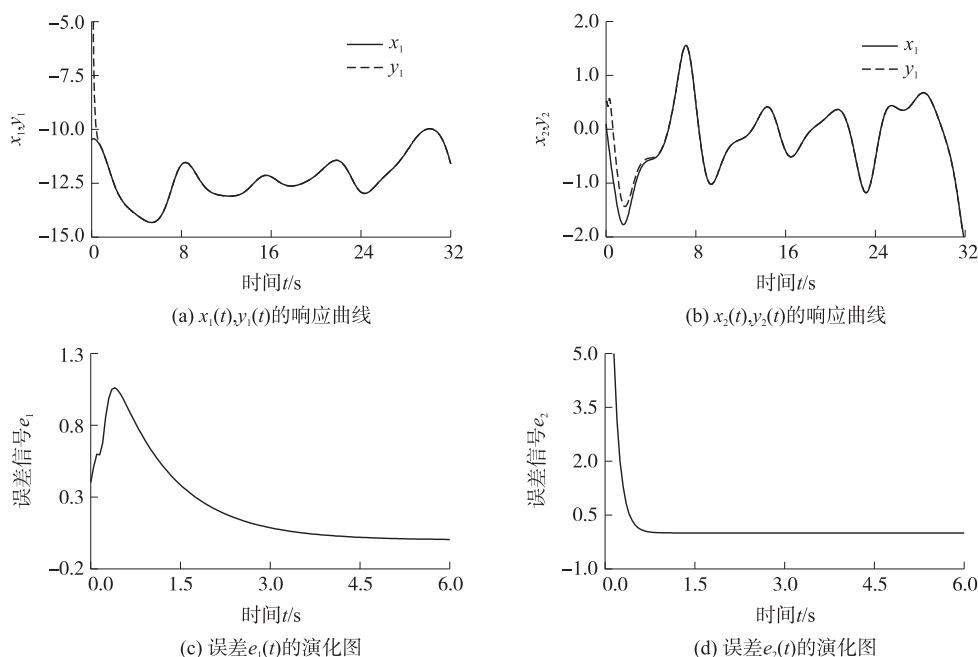


图 10 主动反馈同步控制仿真结果

Fig. 10 Simulation results of active feedback synchronous control

4 结语

本文结合分数阶微积分理论,构造了含有电磁功率扰动的分数阶电力系统模型.采用预估矫正法对系统进行了数值分析,计算出非同量分数阶电力系统存在混沌振荡的最低阶次.基于分岔图和李雅普诺夫指数谱等证实了系统随电磁功率扰动幅值和频率因子变化时会呈现丰富的动力学特性,并使用双参数分析法归纳系统分别处于周期运动、混沌状态和功角失稳状态时的参数条件,分析了系统经过倍周期分岔到达混沌并发生功角失稳的过程.最后,设计主动反馈控制器,实现了分数阶互联电力系统的同步,仿真结果证明了控制器的有效性.

[参考文献] (References)

- [1] PRAPROST K L, LOPARO K A. A stability theory for constrained dynamic systems with applications to electric power systems[J]. American control conference, 1996, 2(11): 1 605-1 617.
- [2] 赵晓伟, 吕思昕, 谢欢, 等. 电力系统低频振荡综述[J]. 华北电力技术, 2015(3): 34-37.
ZHAO X W, LYU S X, XIE H, et al. A survey of power system low frequency oscillation[J]. North China electric power, 2015(3): 34-37. (in Chinese)
- [3] 杨珺, 王雅光, 孙秋野, 等. 智能电网的失稳与混沌[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 6-10.
YANG J, WANG Y G, SUN Q Y, et al. Instability and chaos of smart grid[J]. Journal of Northeastern university (natural science), 2016, 37(1): 6-10. (in Chinese)
- [4] 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 in 2003[J]. Automation of electric power systems, 2003, 27(18): 1-5. (in Chinese)
- [5] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 1-5.
LIN W F, SUN H D, TANG Y, et al. Analysis and lessons of blackout in Brazil power grid on November 10, 2009[J]. Automation of electric power systems, 2010, 34(7): 1-5. (in Chinese)
- [6] 倪骏康, 刘崇新, 庞霞, 等. 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 J K, LIU C X, PANG X, et al. 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. (in Chinese)
- [7] QIN Y H, LUO X S. Random-phase-induced chaos in power systems[J]. Chinese physics B, 2010, 19(5): 050511.
- [8] 董世勇, 鲍海, 魏哲, 等. 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 S Y, BAO H, WEI Z, et al. Calculations and simulations of the chaotic oscillation threshold in dual-unit systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 58-63. (in Chinese)
- [9] MIN F H, WANG Y D, PENG G Y, et al. Bifurcations, chaos and adaptive backstepping sliding mode control of a power system with excitation limitation[J]. Aip advances, 2016, 6(8): p681-295.
- [10] 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.
- [11] 王晓东, 陈予恕. 一类电力系统的分岔和奇异性分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(4): 1-6
WANG X D, CHEN Y S. Bifurcation and singular analysis for a class of power systems[J]. Journal of vibration and shock, 2014, 33(4): 1-6. (in Chinese)
- [12] LIU X J, HONG L. Chaos and adaptive synchronizations in fractional-order systems[J]. International journal of bifurcation and chaos, 2013, 23(11): 43-56.
- [13] 高远, 范健文, 罗文广, 等. 分数阶永磁同步电机的混沌运动及其控制研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(7): 134-140.
GAO Y, FAN J W, LUO W G, et al. Chaos in the fractional order permanent magnet synchronous motor and its control[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2012, 34(7): 134-140. (in Chinese)

(下转第 36 页)

- university(natural sciences),2010,38(1):115-122.(in Chinese)
- [2] 彭思敏,曹云峰,蔡旭. 大型蓄电池储能系统接入微电网方式及控制策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):38-43.
PENG S M,CAO Y F,CAI X. Control of large scale battery energy storage system interface to microgrid[J]. Automation of electric power systems,2011,35(16):38-43.(in Chinese)
- [3] 丁明,徐宁舟,毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价[J]. 电力系统自动化,2011,35(2):66-72.
DING M,XU N Z,BI R. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuations[J]. Automation of electric power systems,2011,35(2):66-72.(in Chinese)
- [4] TELEKE S,BARAN M E,BHATTACHARYA S,et al. Optimal control of battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE transactions on energy conversion,2010,25(3):787-794.
- [5] LI W,JOOS G,ABBEY C. Wind power impact on system frequency deviation and an ESS based power filtering algorithm solution[C]//Power Systems Conference and Exposition,Atlanta:IEEE,2006:2 077-2 084.
- [6] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学,2004,6(8):28-34.
LI D Y,LIU C Y. Study on universality of the normal cloud model[J]. Engineering science,2004,6(8):28-34.(in Chinese)
- [7] KHALID M,SAVKIN A V. A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage[J]. Renewable energy,2010,35(7):1 520-1 526.
- [8] 宋志惠,韩晓娟,孟芳园,等. 基于云模型的风电功率平滑控制策略研究[J]. 电气应用,2012(24):101-104.
SONG Z H,HAN X J,MENG F Y,et al. Research of smoothing strategy for wind power based on cloud model[J]. Electro technical application,2012(24):101-104.(in Chinese)
- [9] 丁明,吴建锋,朱承治,等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):22-29.
DING M,WU J F,ZHU C Z,et al. A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(1):22-29.(in Chinese)
- [10] 王成全. 基于二维云模型规则提取算法研究[J]. 计算机工程与应用,2010,46(26):46-49.
WANG C Q. Study of rules extraction method based on two-dimension cloud model [J]. Computer engineering and applications,2010,46(26):46-49.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]

(上接第25页)

- [14] 谭文,张敏,李志攀,等. 分数阶互联电力系统混沌振荡及其同步控制[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2011,26(2):74-78.
TAN W,ZHANG M,LI Z P. Chaotic oscillation of interconnected power system and its synchronization[J]. Journal of Hunan university of science and technology(natural science edition),2011,26(2):74-78.(in Chinese)
- [15] MATIGNON D. Stability results for fractional differential equations with applications to control processing[J]. Computational engineering in systems applications,1997(2):963-968.
- [16] 黄雯迪,闵富红. 单一驱动多响应分数阶混沌系统的完全同步[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2015,15(2):1-8.
HUANG W D,MIN F H. Complete synchronization of single-drive and multiple-response fractional-order chaotic system[J]. Journal of Nanjing normal university(engineering and technology edition),2015,15(2):1-8.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]