

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.016

# 电力系统混沌振荡的双曲函数滑模控制

朱大锐<sup>1</sup>, 张文超<sup>2</sup>, 段建东<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:**混沌是指确定性动力学系统因对初值敏感而表现出的不可预测的、类似随机性的运动。电力系统是一个典型的非线性系统,在各参数相互作用下将会发生混沌振荡,甚至因此失去稳定性。为了对电力系统中出现的混沌现象进行抑制,基于具有混沌振荡特性的简单互联电力系统,本文提出了双曲正切函数的滑模控制方法,设计了双曲正切函数滑模控制器,并从理论上分析和证明了该控制器的收敛精度,仿真结果表明,所设计的滑模控制器能够有效抑制电力系统的混沌振荡。

**关键词:**电力系统;混沌振荡;双曲正切函数;滑模控制

**中图分类号:**TM712;TP713

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-4710(2017)02-0220-06

## Hyperbolic function sliding mode control for chaos oscillation in power system

ZHU Darui<sup>1</sup>, ZHANG Wenchao<sup>2</sup>, DUAN Jiandong<sup>1</sup>

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Chaos is a kind of motion that is not predictable or similar to the initial value of the system because of its sensitivity to initial value. The power system is a typical nonlinear system, in which chaotic oscillations will occur in the interaction of the parameters, and even will lose its stability. In order to suppress the chaos in power system, this paper proposes a sliding mode control method of hyperbolic tangent function based on a simply interconnected power system of chaotic oscillation, with the convergence accuracy of the controller proved theoretically. The simulation results show that the designed sliding mode controller can effectively restrain the chaotic oscillation of power system.

**Key words:** electric power system; chaotic oscillation; sliding mode control; hyperbolic tangent function

混沌振荡是非线性系统中由于各参数相互作用而导致的一种复杂现象,近年来,学者们不仅观察到了许多混沌现象,而且认识到混沌产生的条件及其特征<sup>[1,2]</sup>。在电力系统运行过程中,当系统的运行参数发生改变时,系统将出现持续无规则的振荡现象<sup>[3]</sup>,这种振荡可能会导致系统失稳,严重情况下将危害系统的安全运行。

混沌振荡的控制方法分为引导混沌振荡向预期的轨道发展和抑制系统混沌的发生两个方面<sup>[4-6]</sup>,目前常用的控制方法有参数微扰法<sup>[7]</sup>(OGY)、反馈控制法<sup>[8]</sup>、自适应控制法<sup>[9]</sup>、模糊控制法<sup>[10]</sup>等。近年来,各种智能控制算法在电力系统混沌振荡控制方

面的研究也取得了较快的发展,潘永湘<sup>[11]</sup>等通过系统映射图中不稳定点的近似值,有效控制了混沌吸引子不稳定周期轨道;袁雷<sup>[12]</sup>用微分跟随器实时提取电力系统混沌振荡状态和它的微分信号,通过对非线性周期性负荷扰动的影响进行自适应补偿,设计了一种线性自适应反馈控制器,消除了由周期性负荷扰动而导致的电力系统的混沌振荡。

滑模控制能够克服系统的不确定性,对干扰和未建模动态具有很强的鲁棒性,该控制的缺点是其控制过程中出现的抖振问题。传统滑模控制中会加入切换控制,使系统状态在有限时间到达切换面<sup>[13]</sup>。目前,滑模控制已被研究者应用于电力系统

收稿日期:2016-10-10

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划资助项目(15JK1552)

作者简介:朱大锐,男,讲师,博士,研究方向为电力系统非线性控制。E-mail:zhudarui@xaut.edu.cn

混沌振荡的控制中<sup>[14,15]</sup>。王少夫等<sup>[16]</sup>以 Lyapunov 法和递推法为理论基础,推导设计出参数自适应控制器,实现了对参数未知、外部扰动的不确定性电力系统鲁棒性的自适应跟踪控制,但由于其自适应参数和滤波器的引入,会对控制器输出的时效性产生影响。

本文采用双曲正切函数代替不连续的切换函数,从理论上分析了双曲正切函数滑模控制器能够有效地降低滑模控制中的抖振现象,仿真结果表明,该控制器对互联双机电力系统中产生的混沌振荡现象进行了快速、有效的抑制。

## 1 互联双机电力系统混沌振荡分析

本文以二阶互联双机电力系统模型为研究对象<sup>[17]</sup>,系统接线如图 1 所示。图中  $G_1$  为系统  $S_1$  的等值发电机; $G_2$  为系统  $S_2$  的等值发电机; $T_1$  为系统  $S_1$  的等值变压器; $T_2$  为系统  $S_2$  的等值变压器; $P_L$  为负荷;QF<sub>1</sub> 和 QF<sub>2</sub> 为断路器;L 为电力系统联络线。

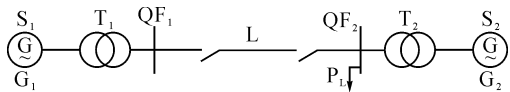


图 1 二阶电力系统接线图

Fig. 1 Two power system wiring diagram

其数学模型为:

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

式中, $\delta(t)=\delta_1(t)-\delta_2(t)$ 为等值发电机  $G_1$  和  $G_2$  的  $q$  轴电势的相对电角度(rad); $\omega$  为对应的相对转角速度(rad/s); $H$  为系统的等值转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ); $P_s$  为系统发电机的电磁功率(W); $P_m$  为发电机的机械功率(W); $D$  为阻尼系数( $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})/\text{rad}$ ); $P_e$  为二阶电力系统中存在的扰动功率(W); $\beta$  为扰动功率的频率(Hz); $t$  为时间(s)。

令  $a = \frac{1}{H}P_s$ ,  $b = \frac{D}{H}$ ,  $c_1 = \frac{P_m}{H}$ ,  $F = \frac{P_e}{H}$ ,  $x_1(t) = \delta(t)$ ,  $x_2(t) = \omega(t)$ , 则式(1)二阶电力系统模型可等效简化为式(2)所示的一般形式下的二阶电力系统模型:

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = -a \sin x_1(t) - b x_2(t) + c_1 + F \cos \beta t \end{cases} \quad (2)$$

取系统初值为  $(\delta_0, \omega_0) = (0.43, 0.003)$ , 当  $a = 1$ ,  $b = 0.02$ ,  $c_1 = 0.2$ ,  $F = 0.2593$ ,  $\beta = 1$  时, 式(2)所示二阶电力系统模型的时序图和混沌吸引子相图如图 2、图 3 和图 4 所示。由时序图和混沌吸引子相图可知, 该二阶电力系统将出现混沌振荡。

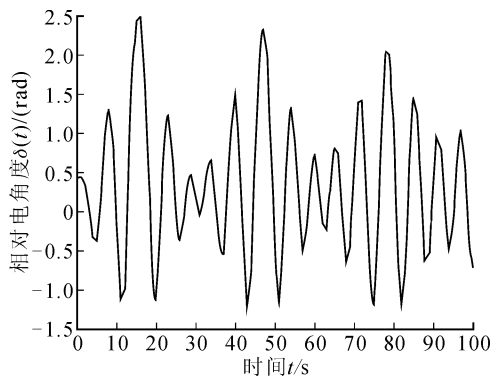


图 2 相对电角度  $\delta(t)$  时序图

Fig. 2 Relative electrical angle sequence diagram of  $\delta(t)$

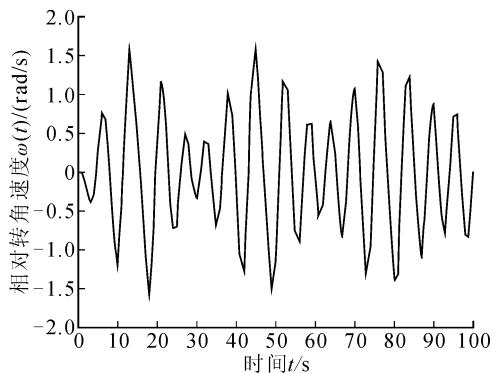


图 3 相对转角速度  $\omega(t)$  时序图

Fig. 3 Relative angular velocity sequence diagram of  $\omega(t)$

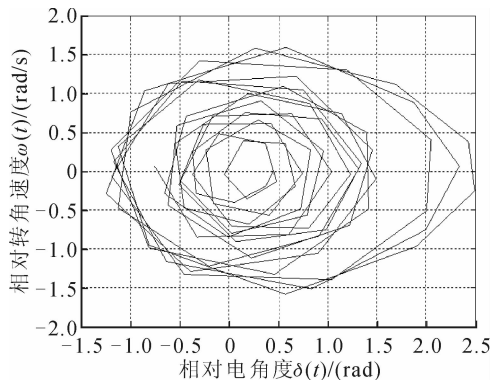


图 4 系统混沌吸引子相图

Fig. 4 Chaotic attractor phase diagram of system

由上述仿真结果可以看出, 系统在该参数条件下, 发电机转子相对电角度和相对转角速度发生了无规则的振荡, 此时该互联系统处于混沌振荡状态,

这种振荡将使二阶互联电力系统失去稳定性。

当系统参数发生改变时,系统将从稳定状态进入临界状态甚至出现混沌振荡。根据 Lyapunov 稳定性理论可知, Lyapunov 指数代表了在空间中两条靠近的轨线随时间按指数分离或聚合的平均变化率,当 Lyapunov 指数为正值时,表明系统轨道在相空间的不同方向上不断进行扩张;当 Lyapunov 指数为负值时,表明系统轨道在相空间进行收缩;当 Lyapunov 指数为零时,表明系统轨道在扩张和收缩的临界区域中进行变化。因此,通过观察图中 Lyapunov 指数的正负,就可判断出系统是否出现振荡。图 5 为系统参数机械功率变化时的 Lyapunov 指数图。从图中可看出,机械功率  $P_m$  位于区间(17.38, 55.1)、(56.25, 57.15)、(69.9, 76)、(80.34, 80.68)、(81.32, 100)上时,系统处于混沌状态。

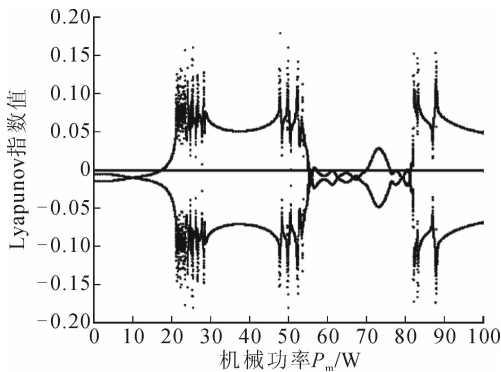


图 5 机械功率变化的 Lyapunov 指数图

Fig. 5 Lyapunov index with mechanical power change

对式(2)所示二阶电力系统简化模型进行时间尺度变换,令  $\tau_1 = t \sqrt{P_s/H}$ ,  $x(t) = \delta(t)$ ,  $y(t) = \sqrt{H/P_s} \omega(t)$ ,可得:

$$\begin{cases} \frac{dx(\tau_1)}{d\tau_1} = y(\tau_1) \\ \frac{dy(\tau_1)}{d\tau_1} = -\sin x(\tau_1) \end{cases} \quad (3)$$

设式(3)为一个受到扰动的 Hamilton 系统,由 Melnikov 分析法可知,该 Hamilton 系统的 Melnikov 函数具有简单零点时,系统将会出现混沌振荡现象<sup>[18]</sup>,对 Melnikov 函数进行计算,经过分析可得式(2)所示二阶电力系统简化模型的混沌振荡条件为:

$$\frac{|4\sqrt{P_s/H}D - \pi P_m|}{P_e} < \pi \operatorname{sech}\left(\beta \sqrt{H/P_s} \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

由式(4)可以看出,当二阶电力系统仅有阻尼而无周期性负荷扰动,即  $P_e = 0$  时,该系统不会出现混沌振荡;而当二阶电力系统中的扰动功率  $P_e$  达

到式(4)中的临界条件或当阻尼系数  $D$  的取值满足  $D_-^* < D < D_+^*$  时,系统会出现混沌振荡,其中:

$$D_-^* = \frac{\pi P_m - \pi \operatorname{sech}\left(\beta \sqrt{H/P_s} \frac{\pi}{2}\right) P_e}{4\sqrt{P_s/H}}$$

$$D_+^* = \frac{\pi P_m + \pi \operatorname{sech}\left(\beta \sqrt{H/P_s} \frac{\pi}{2}\right) P_e}{4\sqrt{P_s/H}}$$

式中:  $D_-^*$  为可使二阶电力系统出现混沌振荡的阻尼系数的下界,  $D_+^*$  为阻尼系数的上界。系统持续的、无规则的振荡行为会对电网安全运行的稳定性造成影响,在振荡严重的情况下会导致互联系统的解列,故需设计控制器来抑制和消除此振荡现象。

## 2 控制器设计

### 2.1 双曲函数滑模控制器设计

将发电机功角作为控制目标,对式(2)所示二阶电力系统模型进一步简化并加入控制律  $u(t)$ ,加入控制律后的系统模型为:

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = f(x(t)) + d(t) + u(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $f(x(t)) = -a \sin x_1(t) - b x_2(t) + c_1$ ; 设不确定扰动项有界,即  $|d(t)| \leq F_1$ , 其中  $F_1$  为正常数。

滑模函数设计为  $s(t) = ce(t) + \dot{e}(t)$ , 其中常数  $c$  必须满足 Hurwitz 条件,即  $c > 0$ 。将  $x_d(t)$  作为系统跟踪目标,其跟踪误差及其导数分别为  $e(t) = x_1(t) - x_d(t)$ ,  $\dot{e}(t) = \dot{x}_1(t) - \dot{x}_d(t)$ 。

定义 Lyapunov 函数为  $V(t) = \frac{1}{2} s^2(t)$ , 则有:

$$\dot{s}(t) = c\dot{e}(t) + \ddot{e}(t) = c\dot{e}(t) + \dot{x}_1(t) - \ddot{x}_d(t) \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)中得到:

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= c\dot{e}(t) + f(x(t)) + d(t) + u(t) - \ddot{x}_d(t) \quad (7) \\ s(t)\dot{s}(t) &= s(t)(c\dot{e}(t) + f(x(t)) + d(t) + \\ &\quad u(t) - \ddot{x}_d(t)) \quad (8) \end{aligned}$$

为了保证  $s(t)\dot{s}(t) < 0$ , 设计基于双曲正切函数的控制率:

$$u(t) = J(\dot{x}_d(t) - c\dot{e}(t) - f(x(t)) - \eta\dot{e}(t)) - K \tanh\left(\frac{s(t)}{\epsilon}\right) \quad (9)$$

式中:  $J$  为转动惯量,  $\eta$  为收敛速度,  $K$  为扰动项的上界,即  $|d(t)| \leq K$ , 由常数  $\epsilon$  值的大小决定双曲正切光滑函数拐点的变化快慢。

### 2.2 稳定性分析

引理 1<sup>[19]</sup>: 取  $\epsilon > 0$ , 对于任意  $\chi \in R$ , 存在常数  $\epsilon > 0$ ,

有如下不等式成立:

$$0 \leq |\chi| - \chi \tanh\left(\frac{\chi}{\epsilon}\right) \leq \mu\epsilon, \mu = 0.2785 \quad (10)$$

根据引理 1, 可得:

$$|s(t)| - s(t) \tanh\left(\frac{s(t)}{\epsilon}\right) \leq \mu\epsilon \quad (11)$$

则  $K|s(t)| - Ks(t) \tanh\left(\frac{s(t)}{\epsilon}\right) \leq K\mu\epsilon$ , 即

$$-Ks(t) \tanh\left(\frac{s(t)}{\epsilon}\right) \leq -K|s(t)| + D\mu\epsilon \quad (12)$$

通过进一步分析:

$$s(t)s'(t) =$$

$$\begin{aligned} s(t)(c\dot{\epsilon}(t) + f(x(t)) + u(t) + d(t) - \ddot{x}_d(t)) = \\ s(t)\left(-\eta s(t) - K \tanh\left(\frac{s(t)}{\epsilon}\right) + d(t)\right) = \\ -\eta s^2(t) + \left(-Ks(t) \tanh\left(\frac{s(t)}{\epsilon}\right) + s(t)d(t)\right) \leq \\ -\eta s^2(t) + (-K|s(t)| + K\mu\epsilon + s(t)d(t)) \leq \\ -\eta s^2(t) + K\mu\epsilon = -2\eta V(t) + B \quad (13) \end{aligned}$$

式中:  $B = K\mu\epsilon$ 。

**引理 2**<sup>[20]</sup>: 针对 Lyapunov 函数  $V(t): [0, \infty) \in R$ , 不等式方程  $\dot{V}(t) \leq -\alpha V(t) + f(t)$ , 对任意时刻  $t \geq t_0 \geq 0$  的解为:

$$V(t) \leq e^{-\alpha(t-t_0)} V(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-\alpha(t-\tau)} f(\tau) d\tau \quad (14)$$

其中,  $\alpha$  为任意常数,  $\tau$  为任意时刻。

结合引理 2 和式(13)的解, 可以推得如下关系:

$$\begin{aligned} V(t) &\leq e^{-2\eta(t-t_0)} V(t_0) + Be^{-2\eta t} \int_{t_0}^t e^{2\eta\tau} d\tau = \\ &e^{-2\eta(t-t_0)} V(t_0) + \frac{Be^{-2\eta t}}{2\eta} (e^{2\eta t} - e^{2\eta t_0}) = \\ &e^{-2\eta(t-t_0)} V(t_0) + \frac{B}{2\eta} (1 - e^{-2\eta(t-t_0)}) = \\ &e^{-2\eta(t-t_0)} V(t_0) + \frac{D\mu\epsilon}{2\eta} (1 - e^{-2\eta(t-t_0)}) \quad (15) \end{aligned}$$

可得:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) \leq \frac{K\mu\epsilon}{2\eta} \quad (16)$$

由上述分析可知, Lyapunov 函数  $V(t)$  渐进收敛, 收敛精度取决于  $K$ 、 $\eta$  和  $\epsilon$ , 即  $K$  越小,  $\eta$  越大、 $\epsilon$  越小, 收敛精度越小, 控制器稳定性得到证明。

### 3 数值仿真

应用 Matlab 中的 Simulink 仿真工具对所设计控制器在二阶互联混沌电力系统中的控制效果进行了仿真验证, 如图 6 所示。

图 6 中“双曲滑模控制器”是为控制互联双机系统混沌振荡而加入的控制模块, 其控制流程图如图

7 所示。

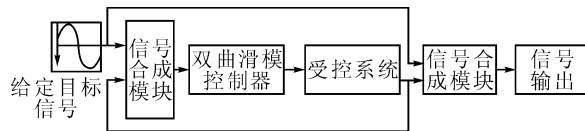


图 6 电力系统混沌控制系统仿真框图

Fig. 6 Simulation diagram of chaos control power system

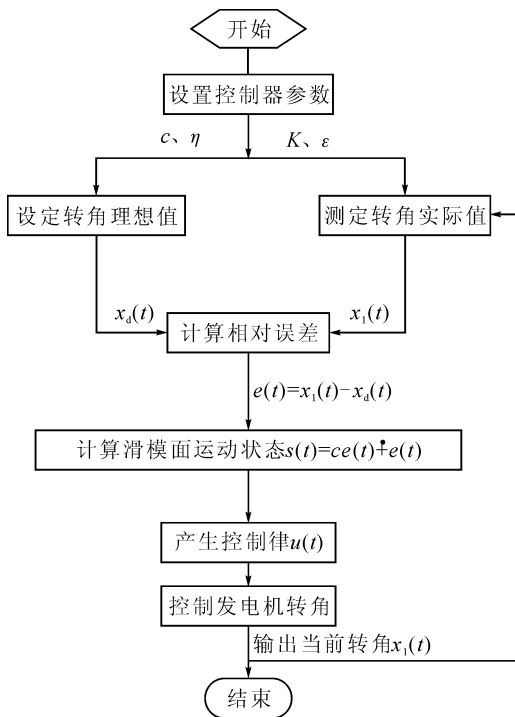


图 7 “双曲滑模控制器”控制流程图

Fig. 7 Flow chart of hyperbolic sliding mode controller

图 6 中“受控系统”模块即为双机互联混沌控制系统, 其对应的数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = -a \sin x_1(t) - b x_2(t) + c_1 + F \cos \beta t + u(t) \end{cases} \quad (17)$$

控制器输出由双机相对转子角度目标信号及模型参数和控制器参数共同作用产生, 其中控制律  $u(t)$  为:

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t < 5 \\ \ddot{x}_d(t) - c\dot{\epsilon}(t) - f(x(t)) - \eta s(t) - K \tanh\left(\frac{s(t)}{\epsilon}\right) & t > 5 \end{cases} \quad (18)$$

取系统参数为  $a = 1$ 、 $b = 0.02$ 、 $c_1 = 0.2$ 、 $F = 0.2593$ 、跟踪目标为  $x_d(t) = \sin t$ 。

双曲滑模控制器相关参数设计为  $c = 25$ 、 $K = 2$ 、

$\eta=20, \epsilon=0.02$ 。

设置仿真总时长为 15s, 在 5s 时给式(2)所示混沌系统加入所设计的双曲正切滑模控制器, 可得加入控制器后系统相对转角和转子角速度的时序波形图仿真结果, 如图 8 及图 9 所示。

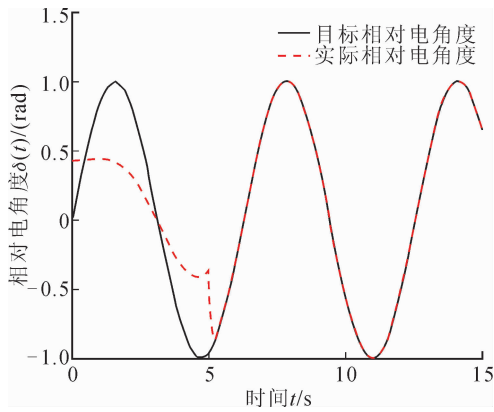


图 8 5s 时加入控制器下相对电角度时序图  
Fig. 8 Sequence diagram of relative electric angle of controller added to 5s

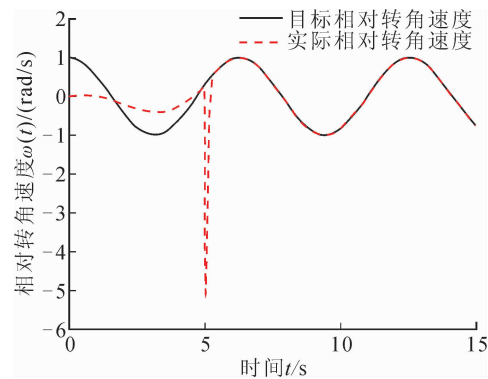


图 9 5s 时加入控制器下相对转角速度时序图  
Fig. 9 Sequence diagram of relative angular velocity of controller added to 5s

为便于比较传统切换函数和双曲函数的控制效果, 基于本文互联双机混沌振荡系统, 保持控制器主要参数一致, 设计传统切换函数的滑模控制, 其控制律为:

$$u_2(t) = \ddot{x}_d(t) - \dot{c}(t) - f(x(t)) - \eta s(t) - K \operatorname{sgn}(s(t)) \quad (19)$$

在两种控制器作用下, 系统时序图的局部放大图分别如图 10 和图 11 所示。

图 12、图 13 分别为基于传统切换函数和基于双曲函数的控制器输出曲线图。

仿真结果分析:

1) 由图 8、图 9 可看出, 发生混沌的互联双机电力系统在双曲滑模控制器作用下经过一段时间后稳定到系统的平衡点, 系统相对电角度及相对转角速

度恢复正常, 说明该控制器有效实现了双机电力系统的混沌振荡控制。

2) 滑模控制系统的抖振主要由滑模控制律的非线性部分引起。

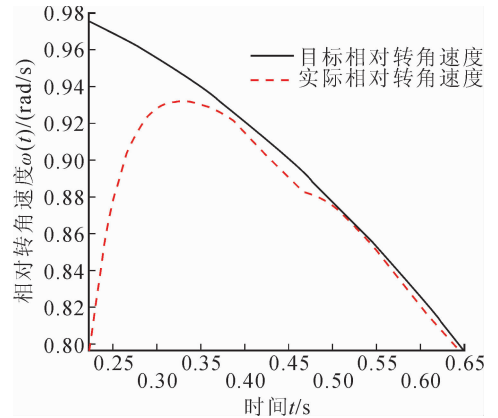


图 10 传统切换函数下系统时序图局部放大图  
Fig. 10 System time sequence partial enlargement with traditional switching function

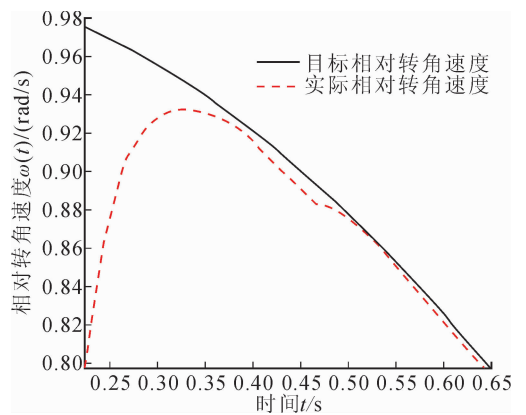


图 11 双曲函数下系统时序图局部放大图  
Fig. 11 System time sequence diagram of partial enlargement with hyperbolic function

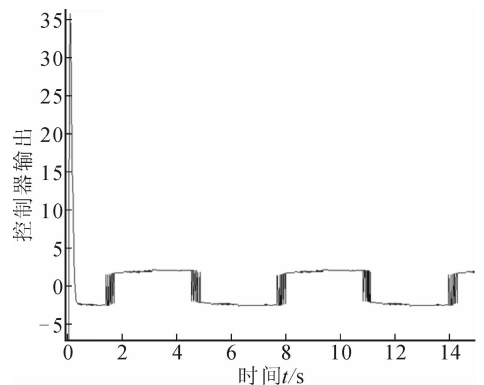


图 12 传统切换函数下控制器的输出  
Fig. 12 Controller output with traditional switching function

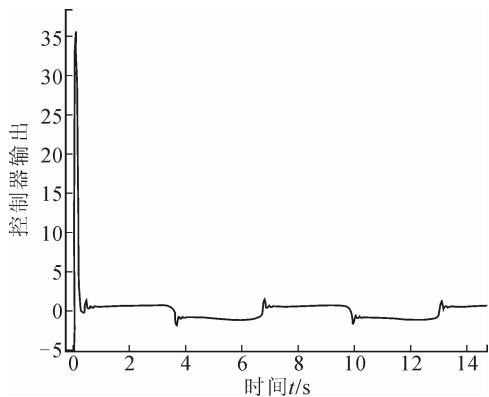


图 13 双曲函数下控制器的输出

Fig. 13 Controller output with hyperbolic function

由图 10 至图 13 可以看出,由于传统切换函数的不连续性,当系统状态运动到切换面附近时,控制结构的连续切换会造成系统状态频繁进出切换面,从而引起抖振现象,和传统切换控制中不连续的切换函数相比,连续光滑的双曲正切函数柔化了控制器的输出,并有效地降低了滑模控制中的抖振现象。

#### 4 结 语

本文针对二阶混沌电力系统的非线性模型,对简单双机互联电力系统混沌振荡的产生条件进行了定量的分析,并针对发生混沌振荡的互联双机系统采用连续切换的滑模控制方法进行了抑制分析,利用双曲正切函数代替传统滑模控制中的切换函数,使系统状态保持在切换面上从而达到稳定,通过对该混沌控制系统进行 Lyapunov 指数稳定性分析和在 Matlab 中进行仿真验证,说明双曲正切函数连续光滑的特性可有效降低滑模控制中的抖振现象。

#### 参考文献:

[1] 王宝华, 杨成梧, 张强. 电力系统分岔与混沌研究综述 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(7): 1-10.  
WANG Baohua, YANG Chengwu, ZHANG Qiang. Summary of bifurcation and chaos research in electric power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(7): 1-10.

[2] 张卫东, 张伟年. 电力系统混沌振荡的参数分析 [J]. 电网技术, 2000, 24(12): 17-20.  
ZHANG Weidong, ZHANG Weinian. Analysis of parameters for chaotic power system [J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 17-20.

[3] 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. Calculations and simulations of the chaotic oscillation threshold in dual-u-

nit systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 58-63.

[4] 李冠林, 李春阳, 陈希有, 等. 基于共振参数微扰法的 SEPIC 变换器的混沌控制 [J]. 物理学报, 2013, 62(21): 210505-210505.  
LI Guanlin, LI Chunyang, CHEN Xiyu, et al. Chaos control of SEPIC converter based on resonant parametric perturbation method [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(21): 210505-210505.

[5] 王丽, 都洪基. 基于延迟反馈控制法铁磁谐振过电压混沌抑制 [J]. 工业控制计算, 2012, 25(8): 65-67.  
WANG Li, DU Hongji. Controlling chaos in ferroresonance overvoltage based on delayed feedback control [J]. Industrial Control Computer, 2012, 25(8): 65-67.

[6] NI J, LIU C, LIU K, et al. Variable speed synergetic control for chaotic oscillation in power system [J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 78(1): 681-690.

[7] CHEN X, ZHANG W, ZHANG W. Chaotic and subharmonic oscillations of a nonlinear power system [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs, 2006, 52(12): 811-815.

[8] 方洁, 崔光照, 李俊. 自适应方法实现混沌系统控制与同步 [J]. 微计算机信息, 2007, 23(4): 51-53.  
FANG Jie, CUI Guangzhao, LI Jun. An adaptive approach to the control and synchronization of chaotic system [J]. Control & Automation, 2007, 23(4): 51-53.

[9] 修春波, 刘向东, 张宇河. 混沌优化与模糊控制在混沌控制中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(1): 63-66.  
XIU Chunbo, LIU Xiangdong, ZHANG Yuhe. Applications of chaos optimization and fuzzy control in chaos control [J]. Control Theory & Applications, 2005, 22(1): 63-66.

[10] WEI D Q, LUO X S. Passivity-based adaptive control of chaotic oscillations in power system [J]. Chaos Solitons & Fractals, 2007, 31(3): 665-671.

[11] 潘永湘, 刘兴伟. 一种控制混沌吸引子不稳定周期轨道的新方法 [J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(1): 14-18.  
PAN Yongxiang, LIU Xingwei. A new method for controlling over unstable periodic orbits embedded in chaotic attractor [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, 16(1): 14-18.

[12] 袁雷, 吴汉松, 涂建军. 同步发电机混沌振荡的积分滑模模糊控制 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 82-85.  
YUAN Lei, WU Hansong, TU Jianjun. Integral sliding mode control for chaos oscillation of synchronous generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 82-85.

- 92-95.  
HUI Wenbo, ZHANG Lixin, WANG Sunxin, et al. The sensitivity analysis of influence parameters of flexible polishing force for abrasive wheel [J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(9): 92-95.
- [20] 淮文博. 工艺参数对砂布轮柔性抛光力影响规律的分析[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(4): 24-27.  
HUI Wenbo. Process parameters influence law analysis on flexible polishing force for abrasive wheel[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2016, 52(4): 24-27.
- [21] 李小彪, 史耀耀, 赵鹏兵, 等. 航空发动机叶片砂带抛光力控制技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(6): 1209-1214.
- LI Xiaobiao, SHI Yaoyao, ZHAO Pengbing, et al. Polishing force control technology of aero-engine blade in belt polishing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(6): 1209-1214.
- [22] 蔺小军, 杨艳, 吴广, 等. 面向叶片型面的五轴联动柔性数控砂带抛光技术研究[J]. 航空学报, 2015, 36(6): 2074-2082.  
LIN Xiaojun, YANG Yan, WU Guang, et al. The research of flexible polishing technology of five-axis NC abrasive belt for blade surface[J]. Acta Aeronaut Astronaut Sin, 2015, 36(6): 2074-2082.
- (责任编辑 王卫勋)

(上接第 225 页)

- [13] 吴佳妮, 邱立存. 混沌电力系统的模糊滑模控制 [J]. 中国科技信息, 2013(10): 156-157.  
WU Jiani, QIU Licun. Fuzzy sliding mode control of chaotic power system [J]. China Science and Technology Information, 2013(10): 156-157.
- [14] 王鹤, 李耀峰, 张守龙, 等. 基于自适应 Terminal 滑模的混沌振荡控制 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3): 152-157.  
WANG He, LI Yaofeng, ZHANG Shoulong, et al. Chaotic oscillation control based on adaptive terminal sliding mode [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(3): 152-157.
- [15] 刘美菊, 朴在林, 吴秀华. 同步发电机混沌振荡的模糊滑模变结构控制 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 85-88.  
LIU Meiju, PIAO Zailin, WU Xiuhua. Fuzzy sliding mode variable structure control for chaos oscillation of synchronous generator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 85-88.
- [16] 王少夫. 电力系统混沌振荡分析及其自适应控制 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012.  
WANG Shaofu. Analysis and adaptive control of chaotic oscillation in power system [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [17] 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.
- [18] 朱志宇, 蔡立勇, 刘维亭. 基于 Melnikov 方法的电力系统混沌振荡参数计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(3): 41-45.  
ZHU Zhiyu, CAI Liyong, LIU Weiting. Computation of chaotic oscillation parameter in electrical power system based on Melnikov method [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(3): 41-45.
- [19] POLYCARPOU M M, IOANNOU P A. A robust adaptive nonlinear control design [C]// American Control Conference, the Westin St. Francis Hotel, San Francisco, California, 1993: 1365-1369.
- [20] IOANNOU P A, SUN J. Robust adaptive control [M]. New Jersey: Prentice-Hall PTR, 1996.
- (责任编辑 周 蓓)