

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200725

基于自适应非奇异终端滑模控制的电力系统混沌抑制

王家斌¹, 于永进¹, 阎振坤², 王云飞³

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 国网山东省电力公司青岛供电公司, 山东 青岛 266590; 3. 国网技术学院, 山东 济南 250002)

摘要: 在一定条件下, 电力系统会产生混沌振荡现象, 影响电网的安全稳定运行。对电力系统四阶模型进行混沌振荡的动力学行为分析, 并且设计了一种基于自适应非奇异终端滑模控制的控制器。在保证系统实现有限时间内收敛以及不产生奇异性问题, 快速消除了四阶电力系统中的混沌振荡现象。针对四阶电力系统模型中阻尼系数和机械功率通常具有不确定性这一问题, 采用自适应控制对其估计, 增强了控制器的实用性。仿真结果证明了控制器的有效性。

关键词: 电力系统; 混沌振荡; 非奇异; 终端滑模

Chaotic suppression of a power system based on adaptive non-singular terminal sliding mode control

WANG Jiabin¹, YU Yongjin¹, YAN Zhenkun², WANG Yunfei³

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Qingdao Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Qingdao 266590, China; 3. State Grid Technical College, Jinan 250002, China)

Abstract: Under certain conditions, chaotic oscillations will appear in a power system, affecting the safe and stable operation of the power grid. The dynamic behavior of chaotic oscillation in the fourth-order model of power system is analyzed and a controller based on adaptive non-singular terminal sliding mode control is designed. To ensure that the system converges within a limited time and does not produce singularity problems, the chaotic oscillation phenomenon in the fourth-order power system is quickly eliminated. To solve the problem that the damping coefficient and mechanical power usually have uncertainty in the fourth-order power system model, adaptive control is used to estimate it. This enhances the practicability of the controller. Simulation results demonstrate the effectiveness of the controller.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61803233).

Key words: power system; chaotic oscillation; non-singular; terminal sliding mode

0 引言

混沌是存在于非线性系统中的一种随机现象, 而电力系统作为典型的非线性系统, 其中存在着复杂的混沌行为^[1-5]。当电力系统的运行参数发生改变, 或受到外界干扰时, 极易产生混沌振荡现象, 电力系统中的混沌振荡现象会导致电压失稳甚至崩溃, 严重影响电力系统安全的稳定运行^[6-10]。因此, 对电力系统的混沌振荡现象进行研究, 寻找合适的混沌振荡控制方法, 具有重要的实际意义。

目前, 人们对如何抑制电力系统的混沌振荡进

行了大量研究, 提出了许多抑制电力系统混沌振荡的方法, 滑模控制方法具有响应迅速、实现简单、无需在线识别以及鲁棒性好等优点^[11-14], 因此被广泛应用在混沌振荡的控制中。文献[15]把滑模变结构控制与反演控制结合, 设计了反演滑模变控制器, 抑制了电力系统的混沌振荡; 文献[16]将RBF神经网络控制方法与滑模控制方法相结合, 使电力系统从混沌振荡状态恢复到稳定状态, 并有效地降低了抖振; 文献[17]提出了一种基于终端滑模控制的方法, 实现了对电力系统混沌振荡的抑制, 但是该文献并没有考虑终端滑模控制可能会出现奇异性的问题; 文献[18]设计了基于模型参考滑模控制的控制器, 成功地抑制了电力系统的混沌振荡, 但该文献

没有考虑系统外部扰动不确定这一问题, 且系统恢复稳定的时间较长。

上述控制方法都是针对简单的二阶电力系统模型的, 为了更加贴近实际, 人们开始研究高阶电力系统的混沌振荡控制方法。文献[19]提出了一种协同控制方法, 实现了四阶电力系统混沌振荡的抑制; 文献[20]设计了一种新型反演滑模控制器, 抑制了一个含有扰动的四阶电力系统中的混沌振荡现象; 文献[21]采用有限时间稳定控制方法, 消除了四阶电力系统中的混沌振荡。

文章分析了四阶电力系统模型发生混沌振荡时的动力学行为, 将自适应控制与非奇异终端滑模控制相结合, 设计了一种自适应非奇异终端滑模控制器, 对电力系统的混沌振荡现象进行抑制。设计的控制器在保证系统实现有限时间内收敛以及不产生奇异性问题的基础上, 能够快速消除系统中的混沌振荡现象。同时, 设计的控制器采用自适应控制对系统中不确定的阻尼系数以及机械功率进行估计, 使得设计的控制器更加符合实际情况。

1 电力系统模型及混沌振荡分析

文章采用含有励磁限制的四阶电力系统模型^[22], 其数学模型可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = 2\pi f_0 \omega \\ M \dot{\omega} = -D\omega + P_T - \frac{E'}{x'_d + x} \sin \delta \\ T'_{d0} \dot{E}' = -\frac{x_d + x}{x'_d + x} E' + \frac{x_d - x'_d}{x'_d + x} \cos \delta + E_{fd} \\ T_A \dot{E}_{fd} = -K_A (V - V_{ref}) - (E_{fd} - E_{fd0}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ 为发电机转子相对角度; ω 为发电机转子相对角速度; E' 为发电机定子侧暂态电势; E_{fd} 为励磁限制器的输入; M 为发电机转动惯量; f_0 为系统电压频率; D 为发电机的阻尼系数; P_T 为发电机的机械输入功率; x'_d 为发电机 d 轴瞬态电抗; x 为输电线路电抗; x_d 为发电机 d 轴同步电抗; T_A 为励磁控制器时间常数; K_A 为励磁控制器增益; E_{fd0} 为励磁控制器输入参考电压; E_{fd} 为励磁限制器的输出, 表达式为

$$E_{fd} = \begin{cases} E_{fdmax}, & E_{fd} > E_{fdmax} \\ E_{fd}, & E_{fdmin} \leq E_{fd} \leq E_{fdmax} \\ E_{fdmin}, & E_{fd} < E_{fdmin} \end{cases} \quad (2)$$

V 为发电机端电压, 表达式为

$$V = \frac{1}{x + x'_d} \sqrt{(x'_d + xE' \cos \delta)^2 + (xE' \sin \delta)^2} \quad (3)$$

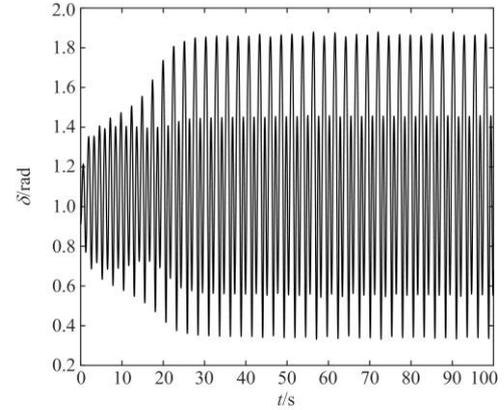
当上述四阶电力系统模型各参数取值如表 1 所示, 系统的初值取(0.9119, 0, 1.3559, 1.9229)时, 系统发生混沌振荡现象。

表 1 电力系统混沌振荡参数

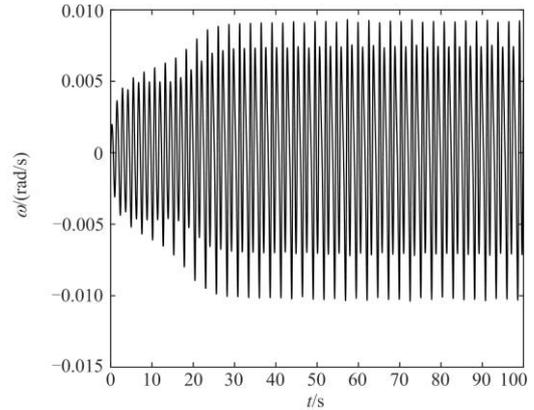
Table 1 Parameters of chaotic in power system

参数	取值
转动惯量 M	10 kg · m ²
电压频率 f_0	60 Hz
阻尼系数 D	2 N · m · s/rad
机械输入功率 P_T	1.3 W
d 轴瞬态电抗 x'_d	0.4
线路电抗 x	0.5
d 轴同步电抗 x_d	1
励磁时间常数 T_A	1
励磁控制增益 K_A	190
励磁参考电压 E_{fd0}	2 V
励磁控制上限 E_{fdmax}	5
励磁控制下限 E_{fdmin}	0

此时系统的时域图跟吸引子相图如图 1、图 2 所示。



(a) 相对角度时域图



(b) 相对角速度时域图

图 1 系统时域图

Fig. 1 Time domain diagram of the system

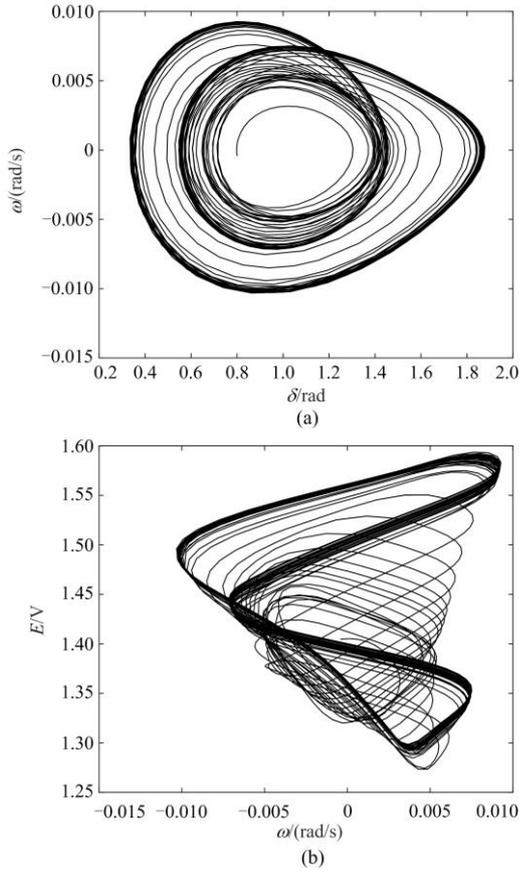


图 2 吸引子相图

Fig. 2 Attractor phase diagram

图 1(a)、图 1 (b)分别为发电机相对角度和相对角速度时域图，图 2 为系统的吸引子相图。从图中可以看出，系统的发电机相对角度和相对角速度都产生了不规则的混沌振荡，严重影响了电力系统的稳定性。

2 自适应非奇异终端滑模控制器的设计

将控制器加入四阶电力系统模型的第 2 项中，得到受控的电力系统模型为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = 2\pi f_0 \omega \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{M} \omega + \frac{P_T}{M} - \frac{E'}{M(x'_d + x)} \sin \delta + \mu \\ T'_{d0} \dot{E}' = -\frac{x'_d + x}{x'_d + x} E' + \frac{x'_d - x'_d}{x'_d + x} \cos \delta + E_{fd} \\ T_A \dot{E}'_{fd} = -K_A (V - V_{ref}) - (E'_{fd} - E_{fd0}) \end{cases} \quad (4)$$

设系统的控制目标为 δ_d ，系统的跟踪误差为

$$e = \delta - \delta_d \quad (5)$$

对跟踪误差进行求导，可得

$$\dot{e} = \dot{\delta} - \dot{\delta}_d = 2\pi f_0 \omega - \dot{\delta}_d \quad (6)$$

传统的非奇异终端滑模控制的滑模函数可以设计为

$$s = e + \frac{1}{\beta} \dot{e}^{\frac{p}{q}} \quad (7)$$

该滑模函数虽然可以实现系统状态在有限时间内的收敛，并且不会产生奇异性的问题，但当系统的运行状态远离平衡状态时，系统的收敛速度明显降低，为了提高系统的收敛速度，将滑模函数改进为

$$s = e + \alpha e^z + \frac{1}{\beta} \dot{e}^{\frac{p}{q}} \quad (8)$$

式中： $\alpha > 0$ ， α 越大，系统的收敛速度越快，但控制精度会降低； $\beta > 0$ ， β 越小，系统的收敛速度越快，但控制精度会降低，甚至会导致系统发散；

p, q 为正奇数且 $1 < \frac{p}{q} < 2$ ， $z > \frac{p}{q}$ 。当系统的运行

状态位于平衡状态附近时，滑模面中的 αe^z 可以忽略不计；当系统的运行状态远离平衡状态时，滑模函数中的 αe^z 项起主要作用，有效地加快了系统的收敛速度。因此，当采用改进的滑模函数时，无论系统的运行状态位于平衡状态附近还是远离平衡状态，都可以保证系统实现快速的收敛。

构造李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (9)$$

对李雅普诺夫函数求导，得

$$\dot{V} = s\dot{s} = s((1 + \alpha z e^{z-1})\dot{e} + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p}{q}-1} \ddot{e}) =$$

$$s((1 + \alpha z e^{z-1})\dot{e} + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p}{q}-1} (2\pi f_0 (-\frac{D}{M} \omega +$$
 (10)

$$\frac{P_T}{M} - \frac{E'}{M(x'_d + x)} \sin \delta + \mu) - \ddot{\delta}_d))$$

设计非奇异终端控制器为

$$\mu = \frac{D}{M} \omega - \frac{P_T}{M} + \frac{E'}{M(x'_d + x)} \sin \delta + \frac{1}{2\pi f_0} (\ddot{\delta}_d -$$
 (11)

$$\beta \frac{q}{p} \dot{e}^{2-\frac{p}{q}} (1 + \alpha z e^{z-1}) - ks - \eta \operatorname{sgn}(s))$$

从式(11)可以看出，控制器中的指数项为

$\beta \frac{q}{p} \dot{e}^{2-\frac{p}{q}} (1 + \alpha z e^{z-1})$ ，根据各参数的取值条件可知，

控制器中不会产生负指数项，因此可以避免产生奇异性的问题。

将设计的控制器代入式(10)中，可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s((1 + \alpha ze^{z-1})\dot{e} + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p-1}{q}} (-\beta \frac{q}{p} \dot{e}^{\frac{2-p}{q}} (1 + \alpha ze^{z-1}) - \\ & ks - \eta \operatorname{sgn}(s))) = s(\frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p-1}{q}} (-ks - \eta \operatorname{sgn}(s))) = \\ & \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p-1}{q}} (-ks^2 - \eta|s|) \leq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

根据上述分析可知, 设计的控制器能够实现电力系统混沌振荡的抑制。然而, 由于阻尼系数 D 和机械功率 P_T 在实际的电力系统中具有不确定性, 上述控制器的实用性不强。自适应控制可以很好地降低不确定参数对控制过程的影响^[23], 因此采用自适应控制对不确定的阻尼系数和机械功率进行估计, 设计的自适应率为

$$\dot{\hat{D}} = \frac{-2\pi f_0 \gamma s \omega}{M} \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p-1}{q}} \quad (13)$$

式中: \hat{D} 为 D 的估计值; γ 为自适应系数, 当 γ 的取值越大, 系统的控制精度越高, 但会延长系统的控制时间。

$$\dot{\hat{P}}_T = \frac{2\pi f_0 \lambda s}{M} \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p-1}{q}} \quad (14)$$

式中: \hat{P}_T 为 P_T 的估计值; λ 为自适应系数, 同 γ 一样, λ 越大, 控制精度越高, 控制速度越慢。

得到设计的自适应非奇异终端滑模控制器为

$$\begin{aligned} \mu = & \frac{\hat{D}}{M} \omega - \frac{\hat{P}_T}{M} + \frac{E'}{M(x'_d + x)} \sin \delta + \frac{1}{2\pi f_0} (\ddot{\delta}_d - \\ & \beta \frac{q}{p} \dot{e}^{\frac{2-p}{q}} (1 + \alpha ze^{z-1}) - ks - \eta \operatorname{sgn}(s)) \end{aligned} \quad (15)$$

由于在设计的控制器中采用了不连续的符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$, 控制过程中会产生比较严重的抖振现象, 使得控制效果难以令人满意。为了抑制抖振, 用连续的继电特性函数代替控制器中不连续的符号函数, 最终设计得到的自适应非奇异终端滑模控制器为

$$\begin{aligned} \mu = & \frac{\hat{D}}{M} \omega - \frac{\hat{P}_T}{M} + \frac{E'}{M(x'_d + x)} \sin \delta + \frac{1}{2\pi f_0} (\ddot{\delta}_d - \\ & \beta \frac{q}{p} \dot{e}^{\frac{2-p}{q}} (1 + \alpha ze^{z-1}) - ks - \eta \frac{s}{|s| + \psi}) \end{aligned} \quad (16)$$

重新构造李雅普诺夫函数, 如式(17)所示。

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{D}^2 + \frac{1}{2\lambda} \tilde{P}_T^2 \quad (17)$$

式中: $\tilde{D} = \hat{D} - D$; $\tilde{P}_T = \hat{P}_T - P_T$ 。

对其求导

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s\dot{s} + \frac{1}{\gamma} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} + \frac{1}{\lambda} \tilde{P}_T \dot{\tilde{P}}_T = \\ & s((1 + \alpha ze^{z-1})\dot{e} + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p-1}{q}} \ddot{e}) + \frac{1}{\gamma} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} + \frac{1}{\lambda} \tilde{P}_T \dot{\tilde{P}}_T = \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & s((1 + \alpha ze^{z-1})\dot{e} + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p-1}{q}} (2\pi f_0 (-\frac{D}{M} \omega + \frac{P_T}{M} - \\ & \frac{E'}{M(x'_d + x)} \sin \delta + \mu) - \ddot{\delta}_d)) + \frac{1}{\gamma} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} + \frac{1}{\lambda} \tilde{P}_T \dot{\tilde{P}}_T \end{aligned}$$

将设计的控制器以及自适应率代入式(18), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s((1 + \alpha ze^{z-1})\dot{e} + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p-1}{q}} (2\pi f_0 (\frac{\tilde{D}}{M} \omega - \\ & \frac{\tilde{P}_T}{M} + \frac{1}{2\pi f_0} (\ddot{\delta}_d - \beta \frac{q}{p} \dot{e}^{\frac{2-p}{q}} (1 + \alpha ze^{z-1}) - ks - \\ & \eta \frac{s}{|s| + \psi})) - \ddot{\delta}_d)) + \frac{1}{\gamma} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} + \frac{1}{\lambda} \tilde{P}_T \dot{\tilde{P}}_T = \\ & s((1 + \alpha ze^{z-1})\dot{e} + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p-1}{q}} (2\pi f_0 \frac{\tilde{D}}{M} \omega - 2\pi f_0 \frac{\tilde{P}_T}{M} - \\ & \beta \frac{q}{p} \dot{e}^{\frac{2-p}{q}} (1 + \alpha ze^{z-1}) - ks - \eta \frac{s}{|s| + \psi})) + \\ & \frac{1}{\gamma} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} + \frac{1}{\lambda} \tilde{P}_T \dot{\tilde{P}}_T = s(\frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p-1}{q}} (2\pi f_0 \frac{\tilde{D}}{M} \omega - \\ & 2\pi f_0 \frac{\tilde{P}_T}{M} - ks - \eta \frac{s}{|s| + \psi})) + \frac{1}{\gamma} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} + \frac{1}{\lambda} \tilde{P}_T \dot{\tilde{P}}_T = \\ & \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} \dot{e}^{\frac{p-1}{q}} (-ks^2 - \eta \frac{s^2}{|s| + \psi}) \leq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

由上述分析可以证明, 设计的控制器能够抑制系统中的混沌振荡, 使系统恢复稳定。

3 数值仿真

为了验证设计的控制器的有效性, 采用 Matlab/Simulink 进行仿真。控制器中各个参数的取值为: $\alpha = 15$, $\beta = 1$, $z = 2$, $p = 3$, $q = 5$, $\psi = 0.01$, $\gamma = 2$, $\lambda = 2$, $k = 5$, $\eta = 25$ 。

将控制目标选为 $\delta_d = \sin(t)$ 和 $\dot{\delta}_d = 0$, 仿真时间设置为 100 s, 在第 50 s 时将设计的控制器加入到受控系统中, 仿真得到的发电机相对角度时域图如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，在混沌振荡的系统中加入设计的控制器后，系统的运动轨迹被迅速控制到目标轨迹上，系统由不稳定的混沌振荡状态转变为稳定状态，因此可以证明设计的控制器能够消除系统中的混沌振荡。为了详细观察系统由混沌振荡状态恢复到稳定状态的时间，将控制器在 0 s 时加入到受控系统中进行仿真，得到的发电机相对角度时域图如图 4 所示。

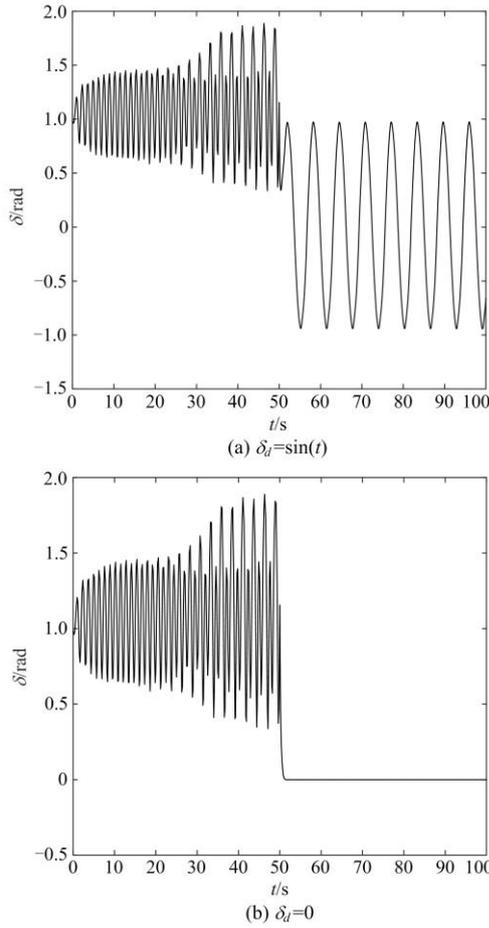
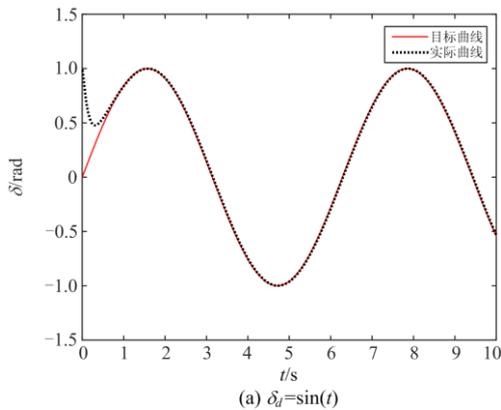
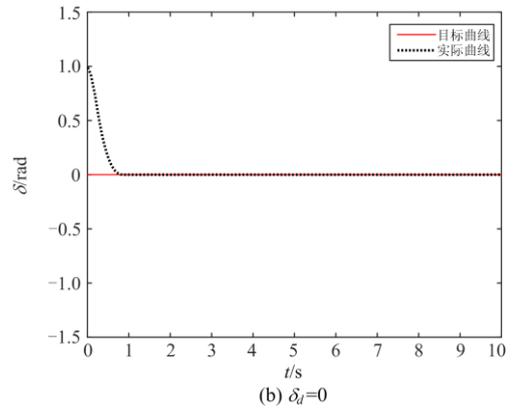


图 3 相对角度时域图

Fig. 3 Time domain diagram of relative angle



(a) $\delta_d = \sin(t)$

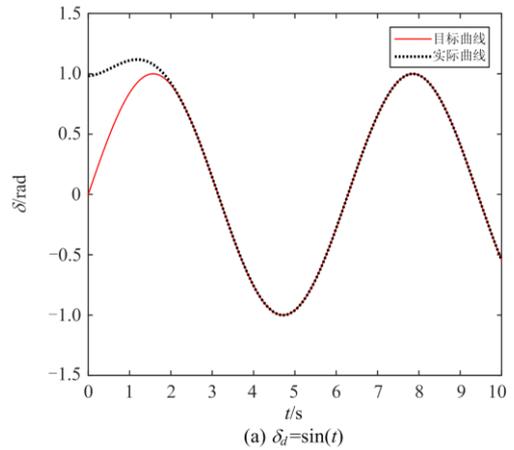


(b) $\delta_d = 0$

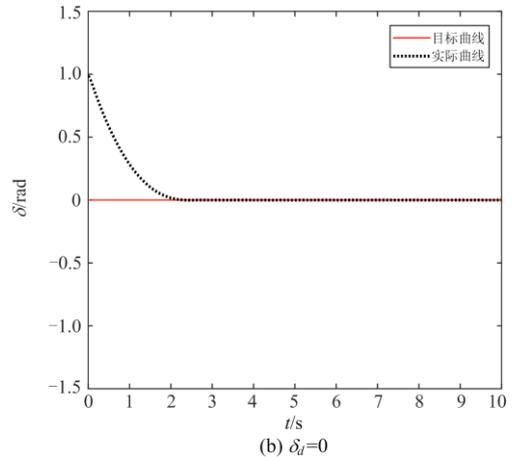
图 4 相对角度时域图

Fig. 4 Time domain diagram of relative angle

从图 4 中可以看出，采用本文设计的控制器，大约需要 0.8 s 的时间，系统就能从混沌振荡状态恢复稳定。为了进一步体现设计的控制器具有控制速度快的优点，对传统自适应非奇异终端滑模控制器的控制效果进行仿真，得到发电机相对角度时域图如图 5 所示。



(a) $\delta_d = \sin(t)$



(b) $\delta_d = 0$

图 5 相对角度时域图

Fig. 5 Time domain diagram of relative angle

从图 5 中可以看出, 当采用传统自适应非奇异终端滑模控制器时, 系统大约需要 2 s 的时间才能恢复稳定。因此, 本文设计的自适应非奇异终端滑模控制器具有更快的控制速度, 控制效果更好。

为了分析控制器的鲁棒性, 在受控系统中加入扰动功率 $0.2\cos(2\pi f_0 t)$, 将设计的控制器加入到含有扰动功率的系统中, 得到的发电机相对角度时域图如图 6 所示。

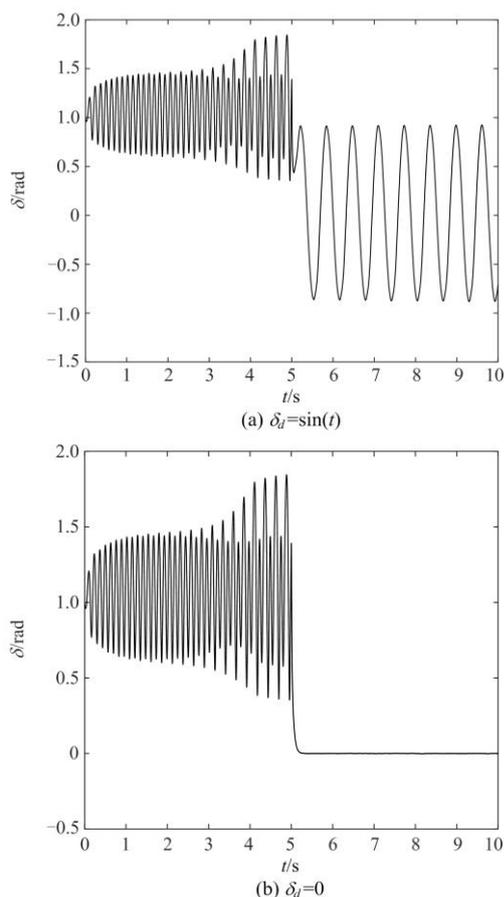


图 6 相对角度时域图

Fig. 6 Time domain diagram of relative angle

从图 6 中可以看出, 当在系统中加入扰动功率后, 设计的控制器依然能够将系统迅速恢复稳定, 因此可以证明, 设计的控制器具有良好的鲁棒性。

4 结论

文章设计了一种基于自适应非奇异终端滑模控制的控制器来对四阶电力系统的混沌振荡进行抑制。设计的控制器在保证系统实现有限时间收敛以及不产生奇异性的基础上, 快速消除了系统中的混沌振荡现象。同时, 针对系统的阻尼系数与机械功率在实际电力系统中通常具有不确定性这一问

题, 文章设计的控制器采用了自适应控制, 对电力系统中具有不确定性的阻尼系数与机械功率进行估计, 增强了控制器的实用性。文章设计的控制器具有良好的适应性, 同样可以应用在多机电力系统的混沌振荡控制中。

参考文献

- [1] 罗晓曙, 韦笃取. 复杂电机与电力系统非线性动力学行为与控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 30-32.
- [2] 刘馨芳. 风电系统中混沌动力学行为分析[D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
LIU Xinfang. Research of chaotic dynamics behavior in wind power system[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2013.
- [3] 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): 1-8.
- [4] 唐梦雪, 王奔, 朱龙. 电力系统混沌振荡的模糊趋近律滑模控制[J]. 电气自动化, 2019, 41(1): 53-55.
TANG Mengxue, WANG Ben, ZHU Long. Fuzzy reaching law sliding mode control of chaotic oscillation in power system[J]. Electrical Automation, 2019, 41(1): 53-55.
- [5] NI J K, LIU L, LIU C X, et al. Fractional order fixed-time singular terminal sliding mode control for chaotic oscillation in power system[C] // Proceedings of the 36th Chinese Control Conference, 2017: 494-499.
- [6] 王宝华, 杨成梧, 张强. 电力系统分岔与混沌评述[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.
- [7] 马鹏飞, 李华. 基于模糊自适应延时反馈的电力系统混沌抑制[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(13): 3603-3608.
MA Pengfei, LI Hua. Control of chaos in power system based on fuzzy adaptive time-delayed feedback control[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(13): 3603-3608.
- [8] 史昭娣, 张靠社, 黄越辉, 等. 基于 Hopf 分岔的风电集群系统电压稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 9-16.
SHI Zhaodi, ZHANG Kaoshe, HUANG Yuehui, et al. Analysis of voltage stability in wind power cluster system based on Hopf bifurcation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 9-16.
- [9] 朱大锐, 张文超, 段建东. 电力系统混沌振荡的双曲函数滑模控制[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(2): 220-232.

- ZHU Darui, ZHANG Wenchao, DUAN Jiandong. Hyperbolic function sliding mode control of chaotic oscillation in power system[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(2): 220-232.
- [10] 江世明, 曾喆昭, 陈开义. 互联电力系统混沌控制的新滑模控制方法[J]. 控制工程, 2017, 24(5): 978-983. JIANG Shiming, ZENG Zhezao, CHEN Kaiyi. A new sliding mode control method for chaos control in interconnected power systems[J]. Control Engineering, 2017, 24(5): 978-983.
- [11] AHMAD S A, SAEED B. Chaotic control of the power system via sliding mode based on fuzzy supervisor[J]. International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 2017, 10(1): 154-164.
- [12] 孙立明, 杨博. 基于扰动观测器的电力系统鲁棒滑模控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 124-132. SUN Liming, YANG Bo. Design of perturbation observer-based sliding-mode controller for power systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 124-132.
- [13] DASH P K, PATNAIK R K, MISHRA S P. Adaptive fractional integral terminal sliding mode power control of UPFC in DFIG wind farm penetrated multimachine power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 79-92. DOI: 10.1186/s41601-018-0079-z.
- [14] 张维奇, 李富盛, 余涛. 双馈感应电机最大功率跟踪鲁棒滑模控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 47-56. ZHANG Weiqi, LI Fusheng, YU Tao. Robust sliding mode control design for maximum power tracking of doubly-fed induction motor[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 47-56.
- [15] 杨晓辉, 王毅, 刘小平, 等. 基于反演滑模变的电力系统混沌振荡控制[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(18): 221-225. YANG Xiaohui, WANG Yi, LIU Xiaoping, et al. Chaos control in power system based on backstepping sliding mode[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18): 221-225.
- [16] 王年, 陈辉, 丁大为, 等. 基于RBF神经网络滑模控制的互联电力系统混沌控制研究[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2018, 54(5): 911-920. WANG Nian, CHEN Hui, DING Dawei, et al. RBF neural network based sliding mode controller and its application to chaos control in interconnected power system[J]. Journal of Nanjing University: Natural Science, 2018, 54(5): 911-920.
- [17] 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.
- [18] 许燕青, 毛家松, 刘建峰, 等. 基于同步思想的电力系统混沌滑模变结构控制[J]. 电测与仪表, 2012, 49(8): 27-31. XU Yanqing, MAO Jiasong, LIU Jianfeng, et al. Sliding mode variable structure control of power system chaos based on synchronization thought[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(8): 27-31.
- [19] 王江彬, 刘崇新. 4阶混沌电力系统的协同控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(1): 26-31. WANG Jiangbin, LIU Chongxin. Synergetic control method for four-dimensional chaotic power system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(1): 26-31.
- [20] 方洁, 许丹莹, 方娜, 等. 四阶电力系统混沌分析与新型滑模控制[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2020, 54(3): 391-397, 404. FANG Jie, XU Danying, FANG Na, et al. Chaotic analysis and new sliding mode control for fourth-order power system[J]. Journal of Central China Normal University: Natural Science, 2020, 54(3): 391-397, 404.
- [21] 赵辉, 袁大壮, 王红君, 等. 电力系统有限时间稳定控制策略[J]. 控制与决策, 2018, 33(12): 2283-2288. ZHAO Hui, YUAN Dazhuang, WANG Hongjun, et al. Finite time stability control strategy for power system[J]. Control and Decision, 2018, 33(12): 2283-2288.
- [22] 马美玲. 电力系统的混沌特性分析与控制[D]. 南京: 南京师范大学, 2015. MA Meiling. Analysis and control of chaotic characteristics in power system[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015.
- [23] 杨蕾, 李胜男, 黄伟, 等. 永磁同步发电机自适应分数阶PID控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 49-58. YANG Lei, LI Shengnan, HUANG Wei, et al. Design of adaptive fractional PID control for permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 49-58.

收稿日期: 2020-06-25; 修回日期: 2020-10-24

作者简介:

王家斌(1994—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 939588506@qq.com

于永进(1980—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yaydito@163.com

阎振坤(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: qdyan1979@163.com

(编辑 葛艳娜)