

# 电力系统有限时间稳定控制策略

赵 辉<sup>1,2†</sup>, 袁大壮<sup>1</sup>, 王红君<sup>1</sup>, 岳有军<sup>1</sup>

(1. 天津理工大学 天津市复杂控制理论与应用重点实验室, 天津 300384;  
2. 天津农学院 工程技术学院, 天津 300384)

**摘 要:** 电力系统是典型的非线性系统, 当电力系统遭受周期性负荷扰动时, 只要周期性负荷的幅值满足一定条件, 就可能诱发混沌振荡. 电力系统中的混沌振荡可能导致电压崩溃, 严重危害系统的稳定与运行安全. 鉴于此, 针对四阶电力系统, 基于有限时间稳定原理, 设计一种反馈控制器, 对系统发生的混沌进行控制. 数值仿真分析表明, 所设计的控制器能够有效地对电力系统发生的混沌进行控制, 并且对外在干扰和系统参数具有很强的鲁棒性, 当减小所设计的控制律中的指数参数, 或者增大其余任意控制律参数时, 系统恢复到目标平衡态所需的时间都将减少.

**关键词:** 电力系统; 混沌; 有限时间稳定; 反馈控制; 鲁棒性

**中图分类号:** TP27      **文献标志码:** A

## Finite time stability control strategy for power system

ZHAO Hui<sup>1,2†</sup>, YUAN Da-zhuang<sup>1</sup>, WANG Hong-jun<sup>1</sup>, YUE You-jun<sup>1</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated System, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** A power system is a typical nonlinear system. When the power system is subjected to periodic load disturbance, it is possible to induce chaotic oscillation as long as the amplitude of periodic load satisfies certain conditions. Chaotic oscillation in the power system may lead to voltage collapse, which seriously affects the stability and operation safety of the power system. In this paper, a feedback controller is designed for the fourth-order power system based on the theory of finite time stability. The numerical simulation results show that the controller proposed can effectively suppress the chaos in the power system and has strong robustness to external disturbances and system parameters. When the exponential parameter of the designed control law is reduced, or any other control law parameters are increased, the time required for the system to recover to the target equilibrium state will be reduced.

**Keywords:** power system; chaos; finite-time stability; feedback control; robustness

## 0 引 言

电力系统作为一个典型的非线性系统, 其动态行为包含了低频振荡、次同步振荡和系统的分岔与混沌等典型的复杂非线性特征. 电力系统遭受周期性负荷扰动时, 若周期性负荷的幅值满足一定条件, 则可能诱发混沌振荡<sup>[1]</sup>, 导致电力系统解列、失稳, 严重危害电力系统的运行安全. 1966 年美国电网发生的混沌振荡, 导致美国西北西南两个系统解列, 造成了巨大的经济损失, 这是电力系统混沌振荡的典型病例之一<sup>[2]</sup>.

对于电力系统混沌振荡的控制, 人们设计了多种控制器, 如: 逆系统控制<sup>[3]</sup>、变量反馈控制<sup>[4]</sup>、自适应控制<sup>[5-6]</sup>、滑模控制<sup>[7-9]</sup>. 以上研究对象多为二阶电力系统, 近年来, 人们针对四阶电力系统混沌振荡的控制, 基于三对角矩阵稳定性原理<sup>[10]</sup>、Lasalle 不变集原理<sup>[11]</sup>、有限时间稳定原理<sup>[12]</sup>分别设计了多种控制器, 但从研究内容上看, 控制器的设计过于繁琐, 且对系统模型的要求较高.

目前, 应用有限时间稳定原理对系统进行控制的研究越来越多. Sun 等<sup>[13]</sup>针对高阶不确定非线性系

收稿日期: 2017-06-21; 修回日期: 2017-11-24.

基金项目: 天津市自然科学基金项目(08JCZDJC18600).

责任编委: 解学军.

作者简介: 赵辉(1963—), 男, 教授, 博士, 从事智能控制等研究; 袁大壮(1993—), 男, 硕士生, 从事电力系统混沌振荡的研究.

†通讯作者. E-mail: 929217140@qq.com

统,设计了有限时间自适应稳定控制策略,但控制器的设计过程过于复杂.文献[14]提出了一种鲁棒自适应无颤振有限时间控制方法,对Liu系统进行控制,但缺乏对控制系统在外界干扰情况下的鲁棒性的研究.文献[15]针对气动伺服电机,基于有限时间稳定原理设计了一种非光滑输出反馈控制器,相比于传统的Backstepping输出反馈控制器,具有更快的跟踪速度和更高的跟踪精度.

基于以上研究,本文基于有限时间稳定原理提出一种反馈控制方法,数值分析表明,所设计的控制器能够有效地对电力系统发生的混沌进行控制,并且对外在干扰和系统参数具有很强的鲁棒性,当减小所设计的控制律中的指数参数,或者增大其余任意控制律参数时,系统恢复到目标平衡态所需的时间都将减少.

### 1 有限时间稳定原理与引理

**定义1**(有限时间稳定)<sup>[16-17]</sup> 考虑如下非线性系统:

$$\dot{x} = f(x). \quad (1)$$

其中:  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n, f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) : R^n \rightarrow R^n; f(x)$  为非线性的向量函数.  $f : D \rightarrow R^n$  是一个定义在区域  $D \in R^n$  中的随时间变化的向量,假设非线性系统至少存在一个平衡点,如果存在一个时间常数  $T > 0$  ( $T > 0$  可能依赖于系统的初始状态  $x(0)$ ),则可得

$$\lim_{t \rightarrow T} \|x(t)\| = 0; \quad (2)$$

如果  $t \geq T$ ,则有

$$\|x(t)\| \equiv 0; \quad (3)$$

称动态系统(1)是有限时间稳定的.

**引理1**<sup>[16-17]</sup> 假设存在正定函数  $V(t)$ ,且满足如下不等式:

$$\dot{V}(t) \leq -cV^\eta(t), \forall t \geq t_0, V(t) \geq 0, \quad (4)$$

其中  $c > 0, 0 < \eta < 1$  均为常数.对于给定的  $t_0$ ,如下不等式成立:

$$V^{1-\eta}(t) \leq V^{1-\eta}(t_0) - c(1-\eta)(t-t_0), \quad (5)$$

$$t_0 \leq t \leq t_1;$$

$$V(t) \equiv 0, \forall t \geq t_1. \quad (6)$$

其中

$$t_1 = t_0 + \frac{V^{1-\eta}(t_0)}{c(1-\eta)}. \quad (7)$$

**证明** 根据微分方程

$$\dot{X}(t) = -cX^\eta(t), \quad (8)$$

$$X(t_0) = X(t_0).$$

尽管不满足全局Lipschitz条件,但可以得到如下结论:

$$X^{1-\eta}(t) = X^{1-\eta}(t_0) - c(1-\eta)(t-t_0). \quad (9)$$

因此可以得到

$$X^{1-\eta}(t) \leq X^{1-\eta}(t_0) - c(1-\eta)(t-t_0), \quad (10)$$

$$t_0 \leq t \leq t_1;$$

$$X(t) = 0, \forall t \geq t_1. \quad (11)$$

其中  $t_1$  为式(7). □

**引理2**<sup>[16-17]</sup> 如果  $a, b$  和  $c < 1$  都是正实数,则有如下不等式成立:

$$(a+b)^c \leq a^c + b^c. \quad (12)$$

### 2 四阶电力系统有限时间反馈控制器设计

本文采用由Chiang等<sup>[13]</sup>提出的电力系统模型,研究对象为三母线互联的电力系统,如图1所示.

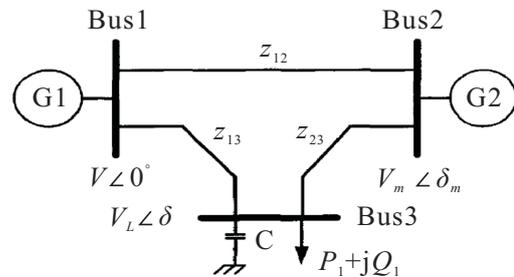


图1 三母线电力系统

由图1可知,系统由两个发电机馈送一个负载组成,负荷可以用一个异步发电机、一个电容器以及负载并联表示.根据图1,得到四阶电力系统混沌模型<sup>[18]</sup>

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_m &= \omega, \\ \dot{\omega} &= -0.1667\omega + 16.6667 \sin(\delta - \delta_m + \\ &\quad 0.0873)V_L + 1.8807, \\ \dot{\delta} &= 496.8718V_L^2 - 166.6667 \cos(\delta - \delta_m - \\ &\quad 0.0873)V_L - 666.6667 \cos(\delta - 0.2094)V_L - \\ &\quad 93.3333V_L + 33.3333Q_1 + 43.333, \\ \dot{V}_L &= -78.7638V_L^2 + 26.2172 \cos(\delta - \delta_m - \\ &\quad 0.0124)V_L + 104.8669 \cos(\delta - 0.1346)V_L + \\ &\quad 14.5229V_L - 5.2288Q_1 - 7.0327. \end{aligned} \quad (13)$$

其中:  $\delta_m$  为发电机电压相角,  $\omega$  为发电机的角速度,  $\delta$  为负载电压相角,  $V_L$  为负载电压,  $Q_1$  为分岔参数.

当  $Q_1 = 11.3776$  时,系统发生混沌振荡,其典型混沌吸引子如图2所示.系统中的  $V_L$  仿真相图如图3所示.

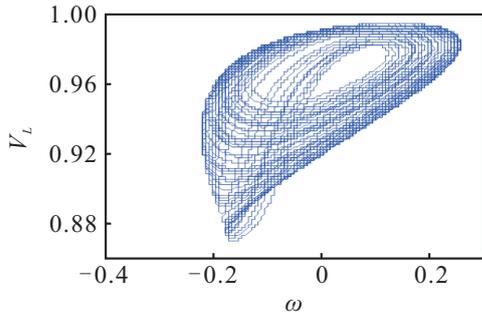


图2 典型混沌吸引子

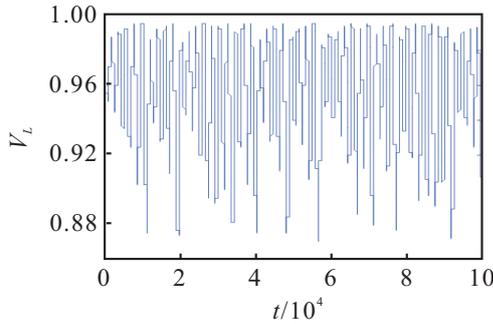


图3 典型混沌吸引子

由图3可知,  $V_L$  的取值范围在1以下, 即  $V_L < 1$ . 多次改变  $Q_1$  的值, 发现  $V_L$  的取值范围为  $0.5 \sim 1$ .

将  $Q_1 = 11.3776$  代入式(13), 假设目标平衡态为  $(\delta_m^*, \omega^*, \delta^*, V_L^*)$  (在实际应用中,  $V_L^*$  的取值范围大于0, 小于1.2), 进行坐标变化后得到

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_m &= \omega - \omega^*, \\ \dot{\omega} &= -0.1667(\omega - \omega^*) + 1.8807 + \\ & 16.6667 \sin((\delta - \delta^*) - (\delta_m - \delta_m^*) + \\ & 0.0873)(V_L - V_L^*), \\ \dot{\delta} &= 496.8718(V_L - V_L^*)^2 - \\ & 166.6667 \cos((\delta - \delta^*) - (\delta_m - \delta_m^*) - \\ & 0.0873)(V_L - V_L^*) - \\ & 666.6667 \cos((\delta - \delta^*) - 0.2094)(V_L - V_L^*) - \\ & 93.3333(V_L - V_L^*) + 422.58595408, \\ \dot{V}_L &= -78.7638(V_L - V_L^*)^2 + \\ & 26.2172 \cos((\delta - \delta^*) - (\delta_m - \delta_m^*) - \\ & 0.0124)(V_L - V_L^*) + 104.8669 \cos((\delta - \\ & \delta^*) - 0.1346)(V_L - V_L^*) + \\ & 14.5229(V_L - V_L^*) - 66.52389488. \end{aligned} \quad (14)$$

考虑到数学模型中各个变量间的关系, 若能保证  $V_L \equiv V_L^*$ , 则剩余的方程组将变得更加简单, 所以先对  $V_L$  进行控制.

对系统施加控制  $u_i (i = 1, 2, 3, 4)$ , 系统变为

$$\dot{\delta}_m = (\omega - \omega^*) + u_2,$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= -0.1667(\omega - \omega^*) + 1.8807 + \\ & 16.6667 \sin((\delta - \delta^*) - (\delta_m - \delta_m^*) + \\ & 0.0873)(V_L - V_L^*) + u_3, \\ \dot{\delta} &= 496.8718(V_L - V_L^*)^2 - \\ & 166.6667 \cos((\delta - \delta^*) - (\delta_m - \delta_m^*) - \\ & 0.0873)(V_L - V_L^*) - \\ & 666.6667 \cos((\delta - \delta^*) - 0.2094)(V_L - V_L^*) - \\ & 93.3333(V_L - V_L^*) + 422.58595408 + u_4, \\ \dot{V}_L &= -78.7638(V_L - V_L^*)^2 + 14.5229(V_L - V_L^*) + \\ & 26.2172 \cos((\delta - \delta^*) - (\delta_m - \delta_m^*) - \\ & 0.0124)(V_L - V_L^*) + 104.8669 \cos((\delta - \delta^*) - \\ & 0.1346)(V_L - V_L^*) - 66.52389488 + u_1. \end{aligned} \quad (15)$$

Step 1: 设计控制律

$$u_1 = -L_1(V_L - V_L^*) - \alpha(V_L - V_L^*)^\beta + 66.52389488. \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} L_1 &\geq 14.5229 + 26.2172 + 104.8669 + \\ & 78.7638 = 224.3708, \\ \alpha &> 0, \quad 0 < \beta < 1. \end{aligned}$$

将  $u_1$  代入式(15)中的第4个式子, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= \\ & -78.7638(V_L - V_L^*)^2 - (L_1 - 14.5229)(V_L - \\ & V_L^*) + 26.2172 \cos((\delta - \delta^*) - (\delta_m - \delta_m^*) - \\ & 0.0124)(V_L - V_L^*) + 104.8669 \cos(\delta - \\ & 0.1346)(V_L - V_L^*) - \alpha(V_L - V_L^*)^\beta. \end{aligned} \quad (17)$$

选取Lyapunov函数

$$V_1 = \frac{1}{2}(V_L - V_L^*)^2,$$

显然  $V_1 \geq 0$ . 对  $V_1$  求导, 注意到  $0.5 < V_L < 1$ ,  $0 < V_L^* < 1.2$ , 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= (V_L - V_L^*)\dot{V}_L = \\ & -78.7638(V_L - V_L^*)^3 - (L_1 - 14.5229)(V_L - \\ & V_L^*)^2 + 26.2172 \cos((\delta - \delta^*) - (\delta_m - \delta_m^*) - \\ & 0.0124)(V_L - V_L^*)^2 + 104.8669 \cos((\delta - \delta^*) - \\ & 0.1346)(V_L - V_L^*)^2 - \alpha(V_L - V_L^*)^{1+\beta} \leq \\ & 78.7638(V_L - V_L^*)^2 - (L_1 - 14.5229)(V_L - V_L^*)^2 + \\ & 26.2172(V_L - V_L^*)^2 + 104.8669(V_L - V_L^*)^2 - \\ & \alpha(V_L - V_L^*)^{1+\beta} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - (L_1 - 78.7638 - 14.5229 - 26.2172 - \\
& 104.8669)(V_L - V_L^*)^2 - \alpha(V_L - V_L^*)^{1+\beta} \leq \\
& - \alpha(V_L - V_L^*)^{1+\beta} = -\alpha 2^{\frac{1+\beta}{2}} V_1^{\frac{1+\beta}{2}}. \quad (18)
\end{aligned}$$

根据引理1,可以得到式(17)是有限时间稳定的,即存在时间常数 $T_1 > 0$ ,使得 $V_L - V_L^* \equiv 0$ (即 $V_L \equiv V_L^*$ )成立,且有 $t \geq T_1$ .

Step 2: 当 $t \geq T_1$ 且 $V_L \equiv V_L^*$ 时,式(15)的前3式可简化为

$$\begin{aligned}
\dot{\delta}_m &= (\omega - \omega^*) + u_2, \\
\dot{\omega} &= -0.1667(\omega - \omega^*) + 1.8807 + u_3, \\
\dot{\delta} &= 422.58595408 + u_4. \quad (19)
\end{aligned}$$

设计控制律

$$\begin{aligned}
u_2 &= -L_2|\omega - \omega^*|\text{sign}(\delta_m - \delta_m^*) - \alpha(\delta_m - \delta_m^*)^\beta, \\
u_3 &= -L_3(\omega - \omega^*) - 1.8807 - \alpha(\omega - \omega^*)^\beta, \\
u_4 &= -422.58595408 - \alpha(\delta - \delta_m^*)^\beta. \quad (20)
\end{aligned}$$

其中: $L_2 \geq 1$ ,  $L_3 \geq -0.1667$ ,  $\text{sign}$ 代表符号函数.代入式(19),可得

$$\begin{aligned}
\dot{\delta}_m &= (\omega - \omega^*) - L_2|\omega - \omega^*|\text{sign}(\delta_m - \delta_m^*) - \alpha(\delta_m - \delta_m^*)^\beta, \\
\dot{\omega} &= -0.1667(\omega - \omega^*) - L_3(\omega - \omega^*) - \alpha(\omega - \omega^*)^\beta, \\
\dot{\delta} &= -\alpha(\delta - \delta^*)^\beta. \quad (21)
\end{aligned}$$

选取Lyapunov函数

$$V_2 = \frac{1}{2}(\delta_m - \delta_m^*)^2 + \frac{1}{2}(\omega - \omega^*)^2 + \frac{1}{2}(\delta - \delta^*)^2,$$

显然 $V_2 \geq 0$ .对 $V_2$ 求导,得到

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= (\delta_m - \delta_m^*)\dot{\delta}_m + (\omega - \omega^*)\dot{\omega} + (\delta - \delta^*)\dot{\delta} = \\
& (\delta_m - \delta_m^*)((\omega - \omega^*) - L_2|\omega - \omega^*|\text{sign}(\delta_m - \delta_m^*) - \\
& \alpha(\delta_m - \delta_m^*)^\beta) + (\omega - \omega^*)(-0.1667(\omega - \omega^*) - \\
& L_3(\omega - \omega^*) - \alpha(\omega - \omega^*)^\beta) + \\
& (\delta - \delta^*)(-\alpha(\delta - \delta^*)^\beta) \leq \\
& - (L_2 - 1)|(\omega - \omega^*)(\delta_m - \delta_m^*)| - \\
& \alpha(\delta_m - \delta_m^*)^{1+\beta} - (L_3 + 0.1667)(\omega - \omega^*)^2 - \\
& \alpha(\omega - \omega^*)^{1+\beta} - \alpha(\delta - \delta^*)^{1+\beta} \leq \\
& -\alpha(\delta_m - \delta_m^*)^{1+\beta} - \alpha(\omega - \omega^*)^{1+\beta} - \alpha(\delta - \delta^*)^{1+\beta} \leq \\
& -\alpha 2^{\frac{1+\beta}{2}} V_2^{\frac{1+\beta}{2}}. \quad (22)
\end{aligned}$$

根据引理1,可以得到式(21)是有限时间稳定的,即存在时间 $T_2 > 0$ ,使得 $\delta_m \equiv \delta_m^*$ ,  $\omega \equiv \omega^*$ ,  $\delta \equiv \delta^*$ 成立,且有 $t \geq T_2$ .

### 3 数值仿真

本文采用Matlab软件对四阶电力系统及所设计的控制器进行仿真,采用四阶龙格-库塔法进行计算,仿真步长为0.001 s.根据上述理论证明,选取控制器各个参数为 $L_1 = 224.3708$ ,  $L_2 = 1$ ,  $L_3 = -0.1667$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0.9$ .系统的初始状态为 $(\delta_m, \omega, \delta, V_L) = (0.3, 0, 0.2, 0.97)$ ,设定系统稳定的目标平衡点为 $(\delta_m^*, \omega^*, \delta^*, V_L^*) = (0.3366, 0, 0.1330, 0.9727)$ .

在 $t = 100$  s时施加控制,仿真如图4所示.

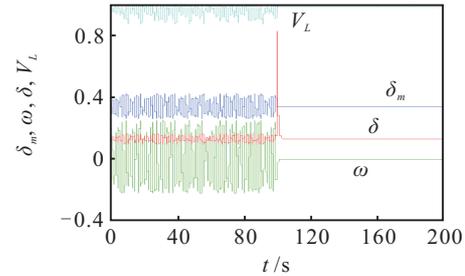


图4 系统仿真

由图4可见,施加控制后, $\delta_m$ 和 $V_L$ 迅速达到平衡状态, $\omega$ 会在几秒钟之内达到平衡状态,而 $\delta$ 在经历一个大的冲击后迅速回到平衡状态.

只改变 $L_1$ 的值,其余参数全部不改变,调整参数使 $L_1 = 300$ ,得到系统仿真如图5所示.由图5可见,在进行控制时,增加 $L_1$ 的值可以抑制 $\delta$ 的冲击波形,并且可以小幅度减少系统回复到平衡状态所需的时间.

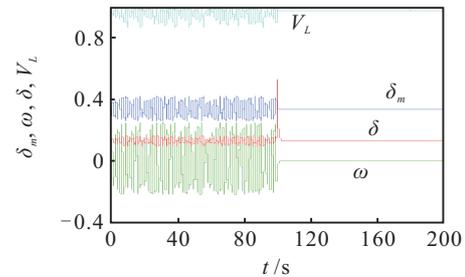


图5  $L_1 = 300$ 时的仿真

只改变 $\beta$  ( $0 < \beta < 1$ )的值,其余参数全都不改变,令 $\beta = 0.7$ ,系统仿真如图6所示.

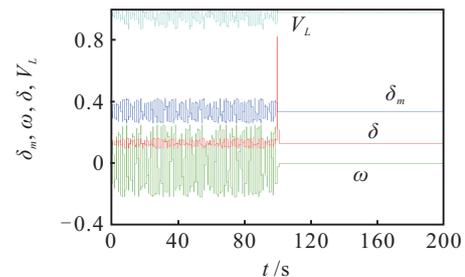


图6  $\beta = 0.7$ 时的仿真

继续减小 $\beta$ 值,经多次仿真发现,当 $\beta$ 减小到一定程度后,继续减小 $\beta$ 的值,系统所需的恢复时间变长,

再继续减小,系统将无法恢复到目标平衡点.

经过多次仿真实验可知,对于  $L_1$ 、 $\alpha$  两个参数,随着它们的增大,系统恢复到平衡态所需的时间越少,  $\delta$  的冲击波形越平稳;当  $L_2$  值增加时,  $\delta_m$  的恢复时间将减少;当  $L_3$  值增加时,  $\omega$  的恢复时间将减少;对于  $\beta$ ,在一定取值范围内,随着  $\beta$  的减小,系统所需要的恢复时间逐渐变短,若  $\beta$  的值小于此范围,系统无法恢复到目标平衡态. 随着各参数的增大,  $\beta$  的取值范围相应增加. 若无限增大控制器参数,除去  $\beta$ ,最终发现系统仍将失稳,但系统失稳时控制器参数设定值和临界参数值的差距为 10 倍以上. 所以在选取控制器参数时,为抑制冲击波形和减小恢复时间,应留取一定裕量,而非直接取临界值.

以上仿真表明所设计的控制策略有效,且无论如何改变参数,  $\delta_m$  和  $V_L$  都将在很短的时间内到达平衡

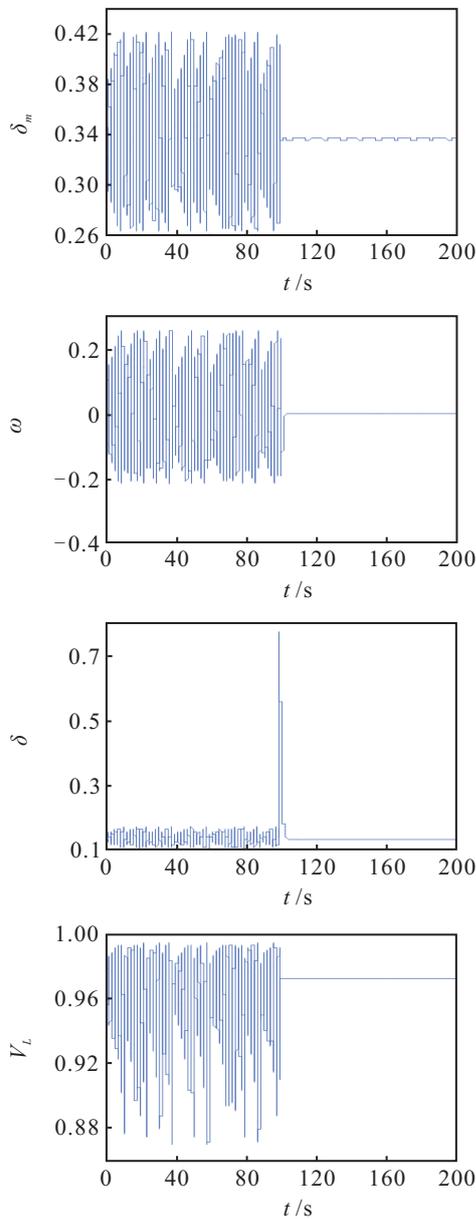


图 7 存在外部干扰时系统各变量动态曲线

状态,随后  $\omega$  和  $\delta$  也将在相对较短的时间内到达平衡状态.

### 4 鲁棒性分析

在工程控制理论中,控制器的鲁棒性是一个重要问题.

1) 对外在干扰的鲁棒性.

对受控系统微分方程施加外在噪音干扰  $n(t) = 0.001 \cos(0.2\pi t)$ ,假定控制目标平衡点仍然是

$$(\delta_m^*, \omega^*, \delta^*, V_L^*) = (0.3366, 0, 0.1330, 0.9727).$$

为了验证所设计的控制器的鲁棒性,在  $t = 100\text{s}$  时打开控制器  $u$ ,受控系统的各变量动态曲线如图 7 所示.

由图 7 可见,在有外在噪音干扰的情况下,施加控制器后,仍能将发生混沌的电力系统控制到目标平衡点  $(0.3366, 0, 0.1330, 0.9727)$ ,其中  $\delta_m$  的波动范围

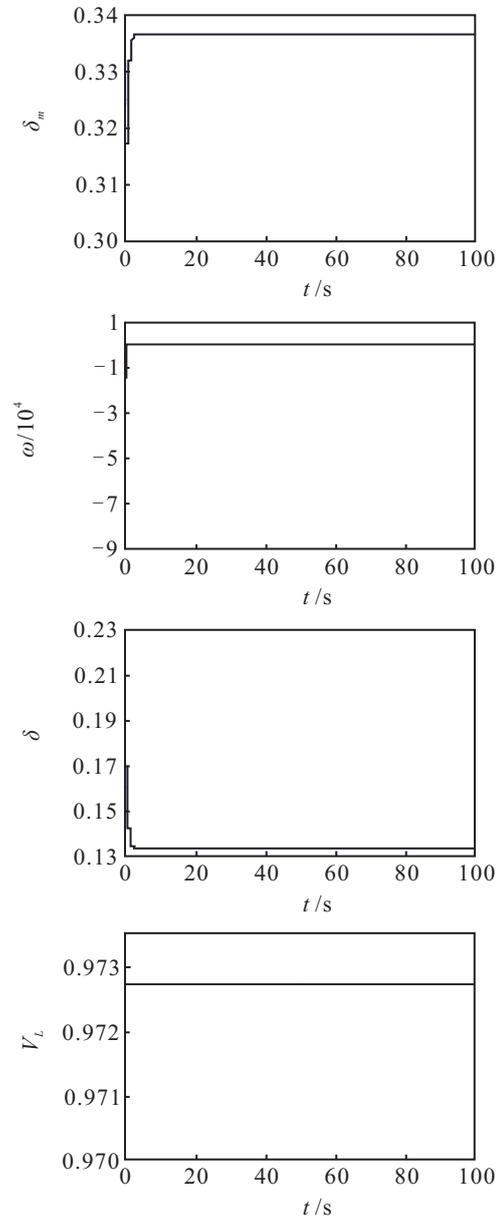


图 8 系统参数改变时系统各变量动态曲线

为 $\pm 0.0005$ 。仿真结果表明,所设计的控制器对外界干扰具有较好的鲁棒性能,与文献[12]所提出的控制方法相比效果更好。

2) 对系统参数的鲁棒性。

控制器参数设定为 $L_1 = 240, L_2 = 1, L_3 = 0, \alpha = 1, \beta = 0.9$ ,相比于上一小节,增大了 $L_3$ ,由上一节内容可知,施加控制器后,系统仍能恢复到预设稳定态。若系统因某些原因导致系统参数发生改变,则以式(13)中的第2个式子为例, $\omega$ 的系数由 $-0.1667$ 增大到 $-0.05$ ,经仿真可知,系统此时处于发散态。对系统进行控制,仿真结果如图8所示。由图8可见,施加控制器后,系统会恢复到预定平衡点。仿真表明,所设计的控制器对于参数具有一定的鲁棒性,但前提是在选取控制器参数时,要留有一定的裕量。

由以上仿真结果可知,所设计的控制器对外在干扰与系统参数具有很强的鲁棒性。由本文设计的控制器,从其结构构造上可以看到,控制器是对系统各变量进行分别控制,每个控制律中的参数影响的是单个控制律对应的系统变量,所以外在干扰与系统参数的改变对系统整体状态的影响很小。

## 5 结论

本文基于有限时稳定原理,设计了反馈控制器,理论上证明了所设计的控制器的正确性,数值仿真验证了所设计控制器的有效性以及对外部干扰和系统参数的强鲁棒性,其中分两步设计控制策略可以保证每一步系统达到稳定所需的时间无冲突。将有限时稳定原理应用到更高阶的电力系统中,在每一步设计中是否存在稳定时间的冲突,这一问题仍需继续探讨。本文所设计的控制器,构造过程简单,易于推广到更高阶系统的控制。

## 参考文献(References)

- [1] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 17-19.  
(Lu Q, Sun Y Z. Nonlinear control of electric power systems[M]. Beijing: Science Press, 1993: 17-19.)
- [2] Yu Y N. Electric power system dynamics[M]. New York: Academic Press, 1983: 5.
- [3] 王宝华, 张强, 苏荣兴. 电力系统混沌振荡的逆系统方法控制[J]. 南京工程学院学报, 2002, 2(4): 8-11.  
(Wang B H, Zhang Q, Su R X. Chaotic oscillation control of electric power system based on inverse system method[J]. J of Nanjing Institute of Technology, 2002, 2(4): 8-11.)
- [4] 张强, 王宝华. 基于变量反馈的电力系统混沌振荡控制[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(10): 6-9.  
(Zhang Q, Wang B H. Chaos control with variable feedback in power system[J]. Electric Power Automation

Equipment, 2002, 22(10): 6-9.)

- [5] 王宝华, 张强, 杨成梧, 等. 电力系统混沌振荡的自适应Backstepping控制[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(11): 9-12.  
(Wang B H, Zhang Q, Yang C W, et al. Chaotic oscillation control of electric power system based on adaptive backstepping[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(11): 9-12.)
- [6] Ni J K, Liu L, Liu C X, et al. Chaos suppression for a four-dimensional fundamental power system model using adaptive feedback control[J]. Trans of the Institute of Measurement and Control, 2017, 39(2): 194-207.
- [7] 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.
- [8] Ni J K, Liu L, Liu C X, et al. Fast fixed-time nonsingular terminal sliding mode control and its application to chaos suppression in power system[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 64(2): 151-155.
- [9] Ahmad Sarani Ali Abadi, Saeed Balochian. Chaos control of the power system via sliding mode based on fuzzy supervisor[J]. Int J of Intelligent Computing and Cybernetics, 2017, 10(1): 68-79.
- [10] Wang H J, Han Z Z, Zhao H, et al. Controlling chaos in power system based on tridiagonal structure matrix stability theory[J]. Advanced Materials Research, 2012, 588/589: 622-625.
- [11] Zhao H, Ma Y J, Liu S J, et al. Stabilization of chaotic power system based on LaSalle invariable principle[J]. Int J of Automation and Control, 2011, 5(3): 254-266.
- [12] Zhao H, Ma Y J, Liu S J, et al. Controlling chaos in power system based on the finite-time stability theory[J]. Chinese Physics B, 2011, 20(12): 120501.
- [13] Sun Z Y, Xue L R, Zhang K M. A new approach to finite-time adaptive stabilization of high-order uncertain nonlinear system[J]. Automatica, 2015, 58(8): 60-66.
- [14] Tran X T, Kang H J. Robust adaptive chatter-free finite-time control method for chaos control and (anti-) synchronization of uncertain(hyper) chaotic systems[J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 80(1/2): 637-651.
- [15] Wang X Y, Li G P, Li S H, et al. Finite-time output feedback control for a pneumatic servo system[J]. Trans of the Institute of Measurement and Control, 2016, 38(12): 1520-1534.
- [16] Wang H, Han Z Z, Xie Q Y. Finite-time chaos control of unified chaotic systems with uncertain parameters[J]. Nonlinear Dynamics, 2009, 55(4): 323-328.
- [17] Sanjay P Bhat, Dennis S Bernstein. Finite-time stability of continuous autonomous systems[J]. Control Optimization, 2000, 38(3): 751-766.
- [18] Dohson I, Chiang H D, Thorp J S, et al. A model of voltage collapse in electric power systems[C]. IEEE Conf on Control and Decision. Austin, 1988, 3: 2104-2109.

(责任编辑: 郑晓蕾)