

# 基于滑模变结构控制的余热发电机机组励磁控制研究

赵辉<sup>1,2</sup>, 王亚菲<sup>1</sup>, 王红君<sup>1</sup>, 岳有军<sup>1</sup>

(1. 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室(天津理工大学), 天津 300384; 2. 天津农学院, 天津 300384)

**摘要:** 水泥生产过程中会产生大量中低温余热, 利用余热发电是水泥生产企业节能的重要手段。为维持余热发电系统的电能稳定, 以单机无穷大电力系统为例, 建立余热发电机励磁系统数学模型, 设计基于指数型终端滑模变结构控制理论的同步发电机励磁控制器。针对电力系统中三相短路和三相断路故障利用 Matlab 进行时域仿真, 与采用快速终端滑模变结构控制的仿真结果进行对比分析, 仿真结果表明该指数型终端滑模变结构励磁控制系统具有更好的适应性及稳定性。

**关键词:** 余热发电; 励磁控制系统; 汽轮发电机; 指数型终端滑模变结构控制; 时域仿真

## Study of waste heat power generation units excitation control based on sliding mode variable structure control

ZHAO Hui<sup>1,2</sup>, WANG Yafei<sup>1</sup>, WANG Hongjun<sup>1</sup>, YUE Youjun<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Much medium and low temperature waste heat is produced in the cement production process, and using waste heat power generation is an important means of energy saving of cement production enterprises. In order to keep the power stability of the waste heat power generation system, taking a single machine infinite bus power system as an example, a mathematical model of waste heat generator excitation system is established, and the excitation controller of synchronous generator is designed based on the exponential terminal sliding mode variable structure control theory. For the three-phase short circuit and three-phase circuit breaker fault of the power system, time domain simulation is performed by MATLAB, showing that exponential terminal sliding mode variable structure control system has better adaptability and stability compared with the fast terminal sliding mode variable structure control simulation result.

**Key words:** waste heat generating; excitation control system; steam turbine generator; exponential terminal sliding mode variable structure control; time-domain simulation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0008-06

## 0 引言

随着水泥厂余热发电并网的实施, 保证余热发电系统电能稳定的重要性日益凸显, 电能波动会影响水泥厂用电设备的正常运行, 而发电机励磁控制是提高电力系统稳定性的有效措施之一。

励磁控制器是随着控制理论和技术的发展而诞生的, 从单变量 PID 控制<sup>[1-2]</sup>到电力系统稳定器 PSS; 从线性最优控制<sup>[3]</sup>再到自适应控制<sup>[4-6]</sup>等。而 PSS 只能在某一种振荡频率下具有很好的控制效果; 最优控制只适用于系统处于原平衡点时的情况; 自适应控制是

基于局部线性化的设计方法, 不能精确控制, 因此上述控制方法都没有达到很好的控制效果。随着非线性控制理论的发展, 各种智能控制器<sup>[7-12]</sup>和非线性控制器<sup>[13-17]</sup>相继被提出。由于智能控制在稳定性和参数整定方面都有待完善, 使得各种非线性控制具有更大的发展空间, 而一般的非线性励磁控制没有很好的抗扰动的能力, 不能满足余热发电的工作环境。

余热发电励磁控制系统是一类具有外部扰动和参数摄动的不确定非线性系统的控制问题, 滑模变结构控制由于具有对参数摄动和扰动不敏感性的控制特点, 被认为是解决上述问题的一种有效的控制方法。例如有的学者提出了一种快速终端滑模变结构励磁控制器<sup>[18]</sup>, 使系统能在有限的时间内镇定系统的暂态过

基金项目: 天津市科技支撑计划资助 (13ZCZDGX03800)

程,但在抗抖振与快速收敛方面仍存在的问题。

为了使控制性能达到最优,本文在快速终端滑模变结构控制的基础上进行改进,提出一种指数型终端滑模变结构的励磁系统控制器,使系统能以更快的速度收敛到平衡点,并在到达滑动模态时减弱抖动,能较好地实现对给定信号的跟踪,使整个控制系统具有全程鲁棒性。

## 1 终端(Terminal)滑模变结构控制理论

滑模变结构控制的核心内容是设计合理的切换函数(滑模面)和控制律。通过滑模面 $s(x)$ 和趋近律使系统快速到达切换面并具有良好的动态性能。

### 1.1 Terminal 滑模面设计

Terminal 滑模控制可以使状态跟踪误差在有限时间内收敛至零。为了使系统状态无论在距离平衡点较远处还是较近处都能获得快速的收敛速度,将线性滑动模态和 Terminal 滑动模态相结合得到快速终端滑动模态,具体形式为

$$S = \dot{x}_1 + \alpha x_1 + \beta x_1 \frac{(p-q)}{q} = 0 \quad (1)$$

式中:  $x_1 \in R$  为状态变量,  $\alpha, \beta > 0$ ,  $p, q (p > q)$  为正奇数。

由公式可知,和传统终端滑模变结构相比,快速终端滑模变结构向平衡点处收敛时的速度有了很大的提高<sup>[1]</sup>,但是收敛时间未必是最优的。为了进一步提高收敛速度,使控制性能达到最优,在快速终端滑模的基础上加以改进,采用指数形式的终端滑模,滑动模态设计为

$$s = \dot{x} + \frac{\alpha}{k} (e^{k|x|} - 1) \operatorname{sgn} x + \frac{\beta}{k} (1 - e^{-k|x|})^{q/p} e^{k|x|} \operatorname{sgn} x = \dot{x} + (\alpha A + \beta B) \operatorname{sgn} x \quad (2)$$

式中:  $\alpha, \beta > 0$ ;  $p, q (p > q)$  为正奇数;  $0 < k < 1$ 。

### 1.2 趋近律设计

变结构控制系统的设计由趋近阶段和滑动模态阶段组成,而过渡过程的品质是由这两个阶段的运动品质共同决定的。滑模面在两侧来回穿越时会造成颤动,这是出现抖振的主要原因;另外,由于系统的惯性、切换开关的时间滞后、状态测量误差等因素的影响,也会使系统引起抖振。

为抑制抖振现象,本文利用趋近律的方法设计控制函数,通过设计合适的趋近律还可以提高趋近阶段的运动品质。为了使跟踪性能达到最优,本文结合指数趋近律和幂次趋近律的优点<sup>[13]</sup>,在幂次趋近律的基础上对其改进设计了一种新的趋近律。具体形式为

$$\dot{s} = -eq|s|^{\alpha} \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (3)$$

式中,  $eq > 0$ ,  $k > 0$ ,  $0 < \alpha < 1$ ,  $|s|^{\alpha}$  起平滑作用,保证快速趋近。

由滑模面及趋近律进行推导<sup>[13]</sup>,可以得到系统的控制量 $u$

$$u = -\varphi(x, t) \left[ \frac{d}{dt} \left( \frac{\alpha}{k} (e^{k|x|} - 1) \operatorname{sgn} x + \frac{\beta}{k} (1 - e^{-k|x|})^{q/p} e^{k|x|} \operatorname{sgn} x \right) + f(x, t) + eq|s|^{\alpha} \operatorname{sgn}(s) + ks \right] \quad (4)$$

## 2 励磁控制器设计

### 2.1 励磁系统数学模型

本文采用单机无穷大电力系统模型<sup>[6]</sup>来研究发电机励磁控制问题,其三阶数学模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} P_m - \frac{\omega_0}{H} \frac{U_s E'_q}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) \\ \dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_{d0}} \left( E'_q - \frac{(x_d - x'_d) U_s}{x'_{d\Sigma}} \cos \delta - u \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中:所有变量均采用标么值;  $u$  为发电机励磁电压;  $P_m$  为发电机机组的机械输入功率;  $P_e$  为同步发电机输出功率;  $H$  为同步发电机组的惯量时间常数;  $D$  为系统本身的阻尼系数;  $\omega_0$  是转子的额定机械角速度;  $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_T + \frac{1}{2} x_L$  为暂态综合电抗;  $R_f$  是励磁绕组电阻;  $U_f$  为励磁绕组电压;  $T'_{d0}$  为同步发电机的励磁绕组暂态时间常数;  $E'_q$  为空载暂态电动势。

对励磁系统的数学模型进行变换,首先令

$$\begin{cases} x_1 = \delta - \delta_0 \\ x_2 = \omega - \omega_0 \\ x_3 = E'_q \end{cases} \quad \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix}$$

从而可以变换为滑模变结构的标准形式:

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = Z_2 \\ \dot{Z}_2 = Z_3 \\ \dot{Z}_3 = \ddot{\omega} = f(x_1, x_2, x_3) + \varphi(x_1, x_2, x_3) u \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} f(x_1, x_2, x_3) = \frac{\omega_0 U_s}{H x'_{d\Sigma}} \sin \delta \left( \frac{E'_q}{T'_{d0}} - \frac{(x_d - x'_d)}{x'_{d\Sigma}} \cos \delta \right) - \frac{\omega_0 E'_q U_s}{H x'_{d\Sigma}} \dot{\delta} \cos \delta - \frac{D}{H} \dot{\omega} \\ \varphi(x_1, x_2, x_3) = -\frac{\omega_0 U_s}{H x'_{d\Sigma} T'_{d0}} \sin \delta \end{cases}$$

针对系统采用的指数型终端滑动模态变结构进行控制, 根据滑动模态可设

$$\begin{cases} s_0 = Z_1 \\ s_1 = \dot{s}_0 + \alpha_0 A_0 + \beta_0 B_0 \\ s_2 = \dot{s}_1 + \alpha_1 A_1 + \beta_1 B_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$A_i = \frac{(e^{k_i |s_i|} - 1)}{k_i} \quad (i = 0, 1)$$

$$B_i = \frac{(1 - e^{-k_i |s_i|})^{q_i/p_i}}{k_i} \quad (i = 0, 1)$$

根据式(4)的结论可得出控制律  $u$  为

$$u = -\frac{1}{\varphi(x_1, x_2, x_3)} \left[ f(x_1, x_2, x_3) + \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{\alpha_0}{k_0} (e^{k_0 |x_0|} - 1) + \frac{\beta_0}{k_0} (1 - e^{-k_0 |x_0|})^{q_0/p_0} e^{k_0 |x_0|} \right) \right. \\ \left. \frac{d}{dt} \left( \frac{\alpha_1}{k_1} (e^{k_1 |x_1|} - 1) + \frac{\beta_1}{k_1} (1 - e^{-k_1 |x_1|})^{q_1/p_1} e^{k_1 |x_1|} \right) + eq |s_2|^\alpha \operatorname{sgn}(s_2) + k_2 s_2 \right]$$

式中:  $p_0 = p_1 = 3$ ,  $q_0 = q_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = 0.05$ ,  $\beta_0 = 0.5$ ,  $k_0 = 0.6$ ,  $\alpha_1 = 0.05$ ,  $\beta_1 = 0.05$ ,  $k_1 = 0.5$ ,  $\alpha_2 = 0.05$ ,  $k_2 = 100$ ,  $eq = 5$ ,  $e = \Delta\delta$ 。

本文采用指数型终端滑模变结构控制, 将  $\delta$ 、 $\omega$ 、 $E'_q$  作为状态变量,  $u$  作为控制量, 对励磁电压进行控制, 并添加了 AVR 电压调节器来调节励磁电流实现电压调整, 强行励磁、强行灭磁等控制功能。由式(1)可知,  $e$  为跟踪误差, 当系统远离滑模面时,  $A$ 、 $B$  值较大, 距离越远值越大, 那么会加快趋近过程; 当接近滑模面时,  $A$ 、 $B$  的值趋近于零, 减慢趋近速度, 从而减弱抖振。由式(2)可以看出  $|s|^\alpha$  项起平滑作用,  $-ks$  项保证快速趋近, 当初始状态距离滑模面较远时,  $\alpha$  越小, 第一项起的作用越小,  $k$  值越大趋向于滑模面的速度越快; 当接近滑模面时, 第二项作用变小, 第一项控制系统接近滑模面的速度,  $\alpha$  越小, 系统的收敛速度越大; 到达滑模面时, 速度会小到接近于零, 实现滑模面的光滑过度, 削弱抖振。

## 2.2 到达时间和稳定性分析

由于变结构控制器需要满足可达性、稳定性和存在性三个条件。首先对系统的到达时间进行分析, 系统的状态变量是在有限时间内依次到达滑模面  $s_2 = 0$ 、 $s_1 = 0$ , 直至到达平衡点, 即总的到达时间为:  $T = t + t_1 + t_2$ , 其中,  $t$  为系统从初始状态到达

滑模面所用的时间,  $t = \frac{1}{k(1-\alpha)} \ln \left[ 1 + \frac{k|s(0)|^{1-\alpha}}{eq} \right]$ 。

另外, 从滑模面  $s_2$  到达滑模面  $s_1 = 0$ , 和滑模面  $s_1$  到达滑模面  $s_0 = 0$  所用的时间分别是  $t_1$  和  $t_2$ :

$$t_1 = \frac{p_1}{\alpha_{1(p_1-q_1)}} \ln \frac{\alpha_1 |e^{-k_1 |s_1(0)|} - 1|^{(p_1-q_1)/p_1} + \beta_1}{\beta_1}$$

$$t_2 = \frac{p_0}{\alpha_{0(p_0-q_0)}} \ln \frac{\alpha_0 |e^{-k_0 |s_0(0)|} - 1|^{(p_0-q_0)/p_0} + \beta_0}{\beta_0}$$

式中,  $s_0(0) = \Delta\delta(0)$ , 由得到的到达时间可知系统是满足可达性的。

其次, 证明指数型终端滑模变结构励磁控制器的稳定性。选取李雅普诺夫稳定性函数  $v = \frac{1}{2}s^2$ , 若系统满足  $\dot{v} = ss' < 0$ , 则满足李雅普诺夫稳定性的条件。

$$\text{因为: } \dot{s} = -eq |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - ks$$

$$\text{则有: } ss' = -eqs |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - ks^2 =$$

$$-eq |s|^{\alpha+1} \operatorname{sgn}(s) - ks^2 < 0$$

由此可以说明系统满足稳定性和存在性条件。

## 3 仿真研究

针对发电机单机无穷大系统的动态模型, 采用本文所提出的指数型终端滑动模态变结构控制策略, 在 Matlab 上得到控制模型图, 如图 1 和图 2 所示。

由图 2 可以看出, 本次设计采用的是指数型终端滑模变结构和 AVR 电压调节器对励磁系统进行综合控制的, 即将指数型终端滑模变结构控制的输出作为 AVR 电压调节器的输入。AVR 以发电机的机端电压作为反馈控制信号, 通过调节励磁电流维持机端电压跟踪给定值, 实现并联运行机组间的无功功率自动分配和提高发电机组运行的稳定性等。图 2 中的三相短路器可以设置发生短路的时刻、持续时间以及发生几相短路故障。三相断路器可以进行同样的设置。三相短路是电力系统最严重的故障, 对其进行校验, 对励磁控制器在最坏情况下进行分析。图 3 是指数型终端滑模变结构控制的设计框图, 具体是通过编写两个 s 函数来实现(具体的程序将不再列出), 其中 www1 为控制算法, www2 是被控对

象, 然后将输出进行反馈, 即实现了端电压的反馈系统。然后对励磁控制器进行仿真实验, 通过改变控制系统参数得到最佳的控制效果, 其中仿真系统模型的有关参数为:  $\omega_0 = 100\pi$  rad/s, 即标么值为

1 p.u.,  $D = 0.1$  p.u.,  $H = 0.3407$  p.u.,  $T'_{d0} = 1.3201$  p.u.,  $P_{m0} = 0.75$  p.u.,  $x_d = 1.8$  p.u.,  $x'_d = 0.3$  p.u.,  $x_q = 1.76$  p.u.,  $x_T = 0.15$  p.u.,  $x_{L1} = 0.5$  p.u.,  $x_{L2} = 0.93$  p.u.,  $U_s = 0.995$  p.u.

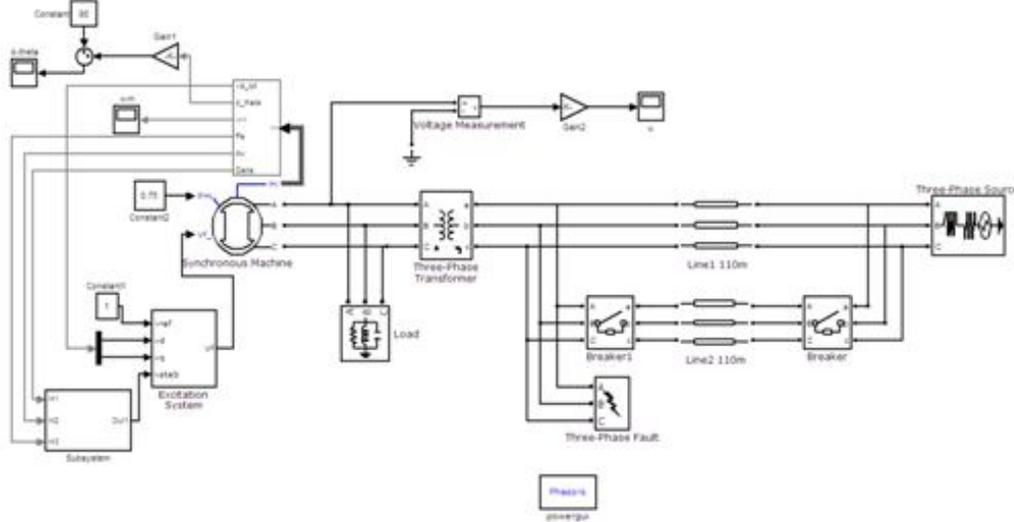


图 1 含励磁控制器的单机无穷大电力系统模型图

Fig. 1 Single machine to infinite power system model including excitation control system

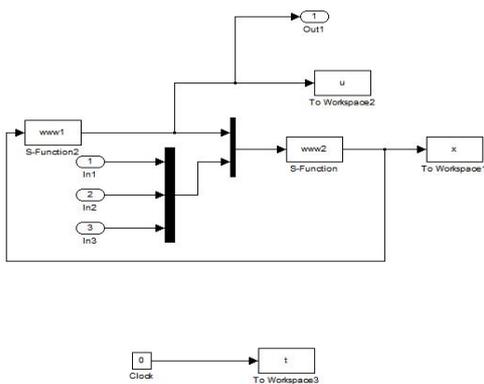


图 2 励磁控制系统模型图  
Fig. 2 Excitation control system model

平衡点参数为:  $(\delta_0, \omega_{r0}, E'_{q0}) = (1.185, 0, 1.0031)$

为了校验指数型终端滑模变结构的控制效果, 建立快速终端滑模变结构的仿真作为对照, 在 Matlab 环境下进行仿真分析, 仿真程序选用 4 阶龙格-库塔法, 采样和控制时间为 20 ms。系统是由初始状态开始运行, 达到稳定后设置扰动, 扰动设置为: 8 s 时变压器出口回路发生三相短路故障, 持续 0.1 s 后故障切除, 15 s 时发生三相断路故障, 0.1 s 后切除故障。指数型仿真结果如图 3~图 5 所示, 快速型仿真结果如图 6~图 8 所示。

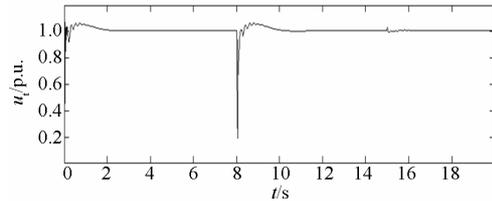


图 3 指数型终端滑模变结构控制机端电压的动态响应  
Fig. 3 Exponential terminal sliding mode variable structure control dynamic response of the terminal voltage

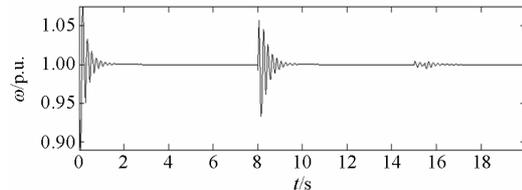


图 4 指数型终端滑模变结构控制发电机角速度响应  
Fig. 4 Exponential terminal sliding mode variable structure control generator angular velocity response

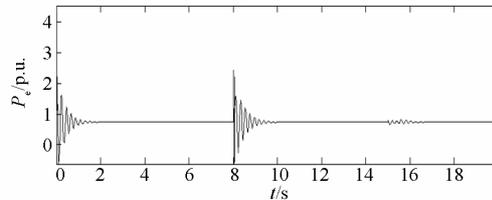


图 5 指数型终端滑模变结构控制发电机输出有功功率动态响应  
Fig. 5 Exponential terminal sliding mode variable structure control generator active power dynamic response

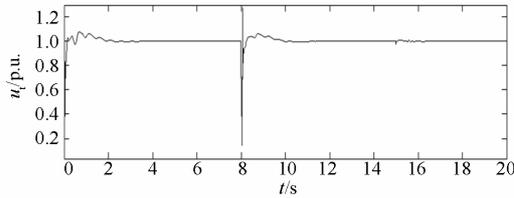


图 6 快速终端滑模变结构控制机端电压的动态响应  
Fig. 6 Fast terminal sliding mode variable structure control dynamic response of the terminal voltage

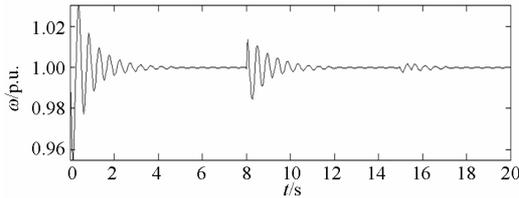


图 7 快速终端滑模变结构控制发电机角速度响应  
Fig. 7 Fast terminal sliding mode variable structure control generator angular velocity response

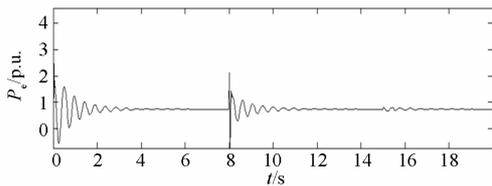


图 8 快速终端滑模变结构控制发电机输出有功功率动态响应  
Fig. 8 Fast terminal sliding mode variable structure control generator active power dynamic response

根据图 3~图 8 将数据列入表 1。

表 1 仿真数据

Table 1 Simulation data

名称	初始状态达到稳定时的时间		三相短路故障最大超调值		三相短路故障恢复所需		断路器故障恢复所需时间/s	
	指数型	快速型	指数型	快速型	指数型	快速型	指数型	快速型
机端电压	3.2	2	1.09	1.2	2	2.1	1	1.2
发电机角速度	1.8	5	1.06	1.018	1.9	4	1.5	2
发电机输出有功功率	1.9	4	2.5	2.5	1.9	3.5	1.3	2.2

由表 1 可以看出，对于机端电压动态响应，两种控制方法在扰动后都能够达到电压稳定，但是指数型终端滑模控制在振荡幅度和快速恢复方面明显要好；由发电机角速度的动态响应结果可知，指数型终端滑模变结构控制具有更好的控制效果，由于角速度的偏差是功角的微分，当功角得到镇定时，

系统的角速度就能快速达到稳态，即系统的频率能很快恢复到额定值；通过对比发电机输出有功功率的动态响应结果，可看出指数型终端滑模变结构控制能够在更短的时间内使系统稳定，抑制功率的振荡。

仿真结果表明，通过对比快速终端滑模变结构励磁控制器，所提控制方法能快速收敛达到平衡状态，而且抖动现象明显减弱，到达滑模面所用时间减少，提高了系统的电压、功角、频率稳定性。

#### 4 结语

本文从水泥厂余热发电系统发电机励磁控制的要求出发，提出了基于指数型 Terminal 滑模变结构与 AVR 自动电压调节器相结合的励磁控制策略。仿真分析结果验证了所提控制策略在提高系统稳定性、鲁棒性和削弱系统抖振方面的有效性。

#### 参考文献

- [1] 雷娇, 付周兴, 王枫. 同步电动机励磁模糊 PID 控制仿真研究[J]. 电力学报, 2013, 28(6): 459-462.  
LEI Jiao, FU Zhouxing, WANG Feng. Simulation of synchronous motor excitation fuzzy-PID controller[J]. Journal of Electric Power, 2013, 28(6): 459-462.
- [2] 揭海宝, 康积涛, 李平. 基于变论域模糊 PID 控制的同步发电机励磁研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 101-104.  
JIE Haibao, KANG Jitao, LI Ping. Fuzzy PID controller based on variable universe for excitation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 101-104.
- [3] 罗建, 任成君, 冯树辉. 基于线性最优控制和积分控制的励磁控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 134-140.  
LUO Jian, REN Chengjun, FENG Shuhui. Design of excitation controller based on linear optimal control and integral control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 134-140.
- [4] 李鑫滨, 朱庆军. 一种改进粒子群优化算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 137-143.  
LI Xinbin, ZHU Qingjun. Application of improved particle swarm optimization algorithm to multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 137-143.
- [5] 黄丽莲, 齐雪. 基于自适应滑模控制的不同维分数阶混沌[J]. 物理学报, 2013, 62(8): 1-7.  
HUANG Lilian, QI Xue. The synchronization of

- fractional order chaotic systems with different orders based on adaptive sliding mode control[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 1-7.
- [6] 于海涛, 王江. 基于反演自适应动态滑模的 FitzHugh-Nagumo 神经元混沌同步控制[J]. *物理学报*, 2013, 62(17): 1-7.  
YU Haitao, WANG Jiang. Chaotic synchronization control FitzHugh-Nagumo neurons via backstepping and adaptive dynamical sliding mode control[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(17): 1-7.
- [7] 胡建兵, 赵灵冬. 分数阶系统稳定性理论与控制研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(24): 1-7.  
HU Jianbing, ZHAO Lingdong. The theory of fractional order system stability and control research[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(24): 1-7.
- [8] 白敬彩, 吴君晓, 赵苏. 同步发电机的双重学习励磁控制[J]. *微电机*, 2013, 46(6): 50-53.  
BAI Jingcai, WU Junxiao, ZHAO Su. Dual learning excitation control design for synchronous generator[J]. *Micromotors*, 2013, 46(6): 50-53.
- [9] LIU Y H, LI C W, WANG Y Z. Decentralized excitation control of multi-machine multi-load power systems using[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(7): 919-925.
- [10] 陆冬良, 张秀彬. 基于 Hamilton 能量整形的多机电力[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(5): 45-50.  
LU Dongliang, ZHANG Xiubin. Excitation control of multi-machine power systems based on Hamilton energy-shaping[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(5): 45-50.
- [11] 李啸骢, 李文涛, 徐俊华. 不确定性电力系统鲁棒自适应励磁控制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2011, 23(3): 13-17.  
LI Xiaocong, LI Wentao, XU Junhua. Robust adaptive excitation control for uncertain power system[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2011, 23(3): 13-17.
- [12] 余向阳, 南海鹏, 余娟. 不自适应积分逆推滑膜励磁控制研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(10): 74-77.  
YU Xiangyang, NAN Haipeng, YU Juan. Adaptive integral back stepping sliding mode generator excitation control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(10): 74-77.
- [13] 杨培宏, 刘文颖, 魏毅立, 等. 基于自适应逆推变结构方法的非线性励磁控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(20): 125-129.  
YANG Peihong, LIU Wenyong, WEI Yili, et al. Nonlinear excitation control based on adaptive backstepping and variable structure method[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(20): 125-129.
- [14] 张丰. 滑模变结构控制理论在非线形系统中的应用[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.  
ZHANG Feng. The application of sliding-mode variable structure control theory in nonlinear system[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2013.
- [15] 戚军, 江全元, 曹一家. 一种简单实用的分散非线性励磁控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(20): 32-36.  
QI Jun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. A simple and practical decentralized nonlinear excitation control method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(20): 32-36.
- [16] 阮阳, 袁荣湘, 万黎, 等. 同步发电机的非线性鲁棒电压控制[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(9): 9-16, 33.  
RUAN Yang, YUAN Rongxiang, WAN Li, et al. Nonlinear robust voltage control for synchronous generators[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(9): 9-16, 33.
- [17] 汪旋, 刘辉, 陈武晖, 等. 水轮发电机组励磁与水门协调控制设计[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(7): 262-268.  
WANG Ni, LIU Hui, CHEN Wuhui, et al. Coordinated control for the excitation and governing of hydroturbine generator set[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(7): 262-268.
- [18] 曾正, 刘涤尘, 廖清芬, 等. Terminal 滑模变结构励磁控制设计及仿真研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(23): 1-6.  
ZENG Zheng, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Design and simulation study on Terminal sliding mode variable structure excitation control[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(23): 1-6.

收稿日期: 2014-06-08

作者简介:

赵辉(1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能控制, 电力系统; E-mail: zhaohui3379@126.com

王亚菲(1991-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 1138381861@qq.com

王红君(1963-), 女, 教授, 主要研究方向为流程工业先进控制技术, 微机控制, 智能控制。

(编辑 姜新丽)