

# 多机电力系统自适应鲁棒 Terminal 滑模励磁控制

邹德虎, 王宝华

(南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 设计了多机电力系统发电机励磁的自适应鲁棒 Terminal 滑模控制器, 将  $L_2$  增益干扰抑制、自适应逆推法、Terminal 滑模控制相结合, 可以自适应估计发电机的不确定阻尼系数, 对扰动具有鲁棒性。给出了控制器的设计过程。针对 2 区域 4 机系统的仿真结果表明, 所设计的自适应鲁棒 Terminal 滑模励磁控制器能够快速抑制功率振荡, 有效提高电力系统的暂态稳定性, 并保持机端电压的恒定。

**关键词:** Terminal 滑模控制; 自适应; 鲁棒; 电力系统; 稳定性

**中图分类号:** TM 761

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2010)12-0079-04

## 0 引言

随着发电机快速励磁技术的发展, 采用先进的非线性励磁控制方式有助于提高电力系统的稳定性<sup>[1]</sup>。近年来各种控制理论应用于励磁控制中, 取得了一系列成果。目前得到较多研究的是构造 Hamilton 能量函数方法<sup>[2-4]</sup>、 $L_2$  增益干扰抑制<sup>[5-7]</sup>、 $H_\infty$  理论<sup>[8-9]</sup>、自适应逆推法<sup>[10-11]</sup>等。

随着广域测量技术的发展, 将全局性的信息引入多机电力系统控制中已成为可能。文献[12]首先探讨了基于惯量中心坐标 COI(Center Of Inertia)的励磁控制方式, 认为基于 COI 信号的励磁控制规律可以进一步提高系统的暂态稳定性。文献[13]实现了跟踪 COI 信号的多机系统鲁棒励磁控制器。文献[14]在文献[13]的基础上简化了推导过程和控制器的复杂度。依据上述文献的成果, 本文所设计的励磁控制器控制目标也是跟踪系统的 COI 信号。

在设计电力系统励磁问题中, 所建立的数学模型必然包含不确定部分, 主要包括外界干扰和不确定参数。 $L_2$  增益干扰抑制控制能够有效处理不确定项, 实现严格的鲁棒控制。而逆推法是一种逐步构造李亚普诺夫函数的方法, 设计过程易于理解, 同时可以很方便地构造不确定参数的自适应律。采用逆推法可以简化  $L_2$  增益干扰抑制控制的设计过程, 避免求解 HJI(Hamilton-Jacobi-Issacs)不等式所带来的困难。

滑模变结构控制是一种不连续的控制, 在受到外干扰和参数摄动情况下具有很强的鲁棒性, 且响应速度快<sup>[15]</sup>, 而电力系统是强非线性系统, 如果在励磁控制器中应用滑模控制<sup>[16]</sup>, 有助于提高控制器的鲁棒性。

Terminal 滑模控制通过在滑模面的设计中引入非线性函数, 使得误差能够快速收敛, 是对普通滑模控制的改进。将 Terminal 滑模控制与其他方法, 例如

$L_2$  增益干扰抑制、逆推方法相结合, 既可以加快误差收敛速度, 同时保持逆推法设计灵活以及  $L_2$  增益干扰抑制鲁棒性强的特点。文献[17-18]提出了 Terminal 滑模控制与逆推法结合的算法, 但是文献[17]假定外扰动必须满足匹配条件, 文献[18]采用模糊系统逼近干扰, 实现较为困难, 都不适合在电力系统大规模推广应用。

本文将  $L_2$  增益干扰抑制控制、自适应逆推法、Terminal 滑模控制相结合, 以求获得更佳的控制效果。新的控制方法可以镇定既有外扰动又含有不确定参数的非线性系统。将这种控制方法应用到多机系统的励磁控制器中, 并且实现跟踪 COI 信号。2 区域 4 机系统的仿真结果证明了所设计的控制器可以提高电力系统的暂态稳定性, 维持机端电压, 且稳定控制的效果优于逆推励磁控制。

## 1 数学模型

假设发电机机械功率不变, 采用快速励磁, 即不考虑励磁机本身的动态, 则可以得到有  $N$  台机的多机电力系统的状态方程<sup>[1]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{\omega_0}{\tau_i} P_{mi} - \frac{\xi_i}{\tau_i} (\omega_i - \omega_0) - \frac{\omega_0}{\tau_i} P_{ei} + d_{i1}(t) \\ \dot{E}_{qi}' = \frac{E_{fi} - E_{qi}}{T_{d0i}} + d_{i2}(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $P_{ei} = E_{qi}' I_{qi}$ ,  $E_{qi}' = E_{qi} - I_{di}(x_{di} - x_{di}')$ ,  $d_{i1}(t)$  和  $d_{i2}(t)$  分别为有界不确定项, 包括外扰动和建模不精确部分;  $\xi_i$  是阻尼系数, 是不确定参数;  $\delta_i$  是发电机功角;  $\omega_i$  是发电机转子角速度;  $\omega_0$  是额定角速度, 取  $\omega_0 = 2\pi f$ ;  $\tau_i$  是惯性时间常数;  $P_{mi}$  是机械功率, 假定不变;  $E_{fi}$  是励磁电压, 即所设计的控制量。

COI 信号的定义如下:

$$\delta_{COI} = \sum_{i=1}^N \tau_i \delta_i / \sum_{i=1}^N \tau_i, \quad \omega_{COI} = \sum_{i=1}^N \tau_i \omega_i / \sum_{i=1}^N \tau_i$$

## 2 控制器设计

### 2.1 自适应鲁棒 Terminal 滑模控制设计方法

#### 2.1.1 问题描述

考虑含不确定参数和外扰动的三阶不确定系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + \varphi(x)\theta + \varepsilon_1 \\ \dot{x}_3 = v + \varepsilon_2 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $v$  和  $y$  分别为控制输入和输出,  $\varepsilon_i$  为不确定有界扰动,  $\theta$  为不确定参数,  $\varphi(x)$  为已知函数。

$L_2$  增益干扰抑制的控制目标是找到一个  $v$ , 在给定某个正常数  $\gamma$  的情况下, 使得:

$$\int_0^T |y|^2 dt \leq \gamma^2 \int_0^T \|\varepsilon\|^2 dt + V(x_0)$$

其中,  $V(x_0)$  是所构造存储函数的初值。存储函数通过逆推法逐步构造<sup>[7]</sup>。构造到最后一阶时, 加入 Terminal 滑模面, 从而实现不同控制方法的结合。

#### 2.1.2 递推设计过程

取坐标变换:

$$\begin{cases} z_1 = x_1 \\ z_2 = kx_1 + x_2 \end{cases}$$

构造李亚普诺夫函数:

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}z_2^2 + \frac{1}{2l}(\hat{\theta} - \theta)^2$$

其中,  $l$  为自适应增益系数。

定义  $H_1 = \dot{V}_1 + \frac{1}{2}(|y|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon_1\|^2)$ , 令

$$\dot{\hat{\theta}} = lz_2\varphi(x) \quad (3)$$

可得:

$$\begin{aligned} H_1 = & z_1 z_2 - k z_1^2 + z_2 [k x_2 + x_3 + \varphi(x)\hat{\theta}] + \\ & \frac{1}{2}x_1^2 + z_2 \varepsilon_1 - \frac{1}{2}\gamma^2 \varepsilon_1^2 = -k z_1^2 + \frac{1}{2}z_1^2 + \\ & z_2 \left[ z_1 + k x_2 + x_3 + \varphi(x)\hat{\theta} + \frac{1}{\gamma_2} z_2 \right] - \\ & \left( \frac{1}{\gamma} z_2 - \frac{1}{2}\gamma \varepsilon_1 \right)^2 - \frac{1}{4}\gamma^2 \varepsilon_1^2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $-k + \frac{1}{2} < 0$ 。

令

$$z_3 = z_1 + k x_2 + x_3 + \varphi(x)\hat{\theta} + \frac{1}{\gamma^2} z_2 + m z_2 \quad (5)$$

有

$$H_1 \leq \left( -k + \frac{1}{2} \right) z_1^2 - m z_2^2 + z_2 z_3 - \frac{1}{4}\gamma^2 \varepsilon_1^2 \quad (6)$$

令

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_3^2 \quad (7)$$

定义

$$H_2 = \dot{V}_2 + \frac{1}{2}(|y|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon\|^2) \quad (8)$$

可得:

$$\begin{aligned} H_2 = & H_1 + z_3 \dot{z}_3 - \frac{1}{2}\gamma^2 \varepsilon_2^2 = \\ & H_1 + z_3 \left[ v + x_2 + k x_3 + \varphi(x)\hat{\theta} + \dot{\varphi}(x)\hat{\theta} + \right. \\ & \left. \left( \frac{1}{\gamma^2} + m \right) \dot{z}_2 \right] + z_3 \varepsilon_2 - \frac{1}{2}\gamma^2 \varepsilon_2^2 \end{aligned} \quad (9)$$

#### 2.1.3 与 Terminal 滑模面的结合

加入 Terminal 滑模面, 令

$$\begin{aligned} v = & -x_2 - k x_3 - \varphi(x)\hat{\theta} - \dot{\varphi}(x)\hat{\theta} - \\ & \left( \frac{1}{\gamma^2} + m \right) \dot{z}_2 - \alpha z_3 - \beta z_3^{q/p} \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $\alpha \geq \frac{1}{\gamma^2}$ ;  $\beta > 0$ ;  $q, p$  为正奇数, 且  $q < p$ 。

有

$$\dot{z}_3 = -\alpha z_3 - \beta z_3^{q/p} + \varepsilon_2 \quad (11)$$

假定扰动是有界的, 因此  $|\varepsilon_2| \leq \rho$ ,  $\rho$  为已知正数。

式(11)可变换为

$$\dot{z}_3 = -\alpha z_3 - \beta' z_3^{q/p} \quad (12)$$

其中,  $\beta' = \beta - \varepsilon_2 / z_3^{q/p}$ 。

令  $\beta = \rho / |z_3^{q/p}| + \eta$ , 显然  $\beta' \geq \eta$ 。

式(12)是典型的快速 Terminal 滑模面<sup>[19-20]</sup>。

文献[20]已证明无论  $z_3$  初始值为多少, 式(12)总可以使  $z_3$  在有限时间收敛到  $z_3 = 0$  的一个邻域内, 其收敛时间满足:

$$t_0 \leq \frac{p}{\alpha(p-q)} \ln \frac{\alpha z_3(0)^{(p-q)/p} + \eta}{\eta} \quad (13)$$

$z_3 = 0$  的邻域为  $z_3 < (\rho / \beta)^{p/q}$ 。选取足够大的  $\beta$  和  $p/q$  可以使该邻域足够小。当  $t > t_0$  时, 通过合适的

参数选取, 可使  $|z_2 z_3| \leq \frac{1}{4}\gamma^2 \varepsilon_2^2$ 。

当  $t > t_0$  时, 有

$$\begin{aligned} H_2 = & H_1 - \left( \alpha - \frac{1}{\gamma^2} \right) z_2^2 - \beta z_3^{(p+q)/p} - \left( \frac{1}{\gamma} z_3 - \frac{1}{2}\gamma \varepsilon_2 \right)^2 - \\ & \frac{1}{4}\gamma^2 \varepsilon_2^2 \leq \left( -k + \frac{1}{2} \right) z_1^2 - m z_2^2 - \frac{1}{4}\gamma^2 \varepsilon_1^2 - \\ & \left( \alpha - \frac{1}{\gamma^2} \right) z_2^2 - \beta z_3^{(p+q)/p} - \left( \frac{1}{\gamma} z_3 - \frac{1}{2}\gamma \varepsilon_2 \right)^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

最终可得:

$$\dot{V}_2 + \frac{1}{2}(|y|^2 - \gamma^2 \|\varepsilon\|^2) \leq 0 \quad (15)$$

求积分后可得:

$$\int_{t_0}^{t'} |y|^2 dt \leq \gamma^2 \int_{t_0}^{t'} \|\varepsilon\|^2 dt + 2V_2(x(t_0)) \quad (16)$$

其中,  $t'$  为大于  $t_0$  的任意一个正数。由此实现了  $L_2$  增益干扰抑制控制。

式(3)和式(10)构成了自适应控制器。本文提出的自适应鲁棒 Terminal 滑模控制设计方法易推广到更高阶的非线性系统。

## 2.2 多机电力系统励磁控制表达式

针对式(1),取下面的坐标变换:

$$\begin{cases} x_{i1} = (\delta_i - \delta_0) - (\delta_{COI} - \delta_{COI0}) \\ x_{i2} = \omega_i - \omega_{COI} \\ x_{i3} = \frac{\omega_0}{T_i} (P_{mi} - P_{ei}) - \dot{\omega}_{COI} \end{cases} \quad (17)$$

则式(1)可以变换为

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1} = x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} = x_{i3} - \frac{\xi_i}{T_i} (\omega_i - \omega_0) + d_{i1}(t) \\ \dot{x}_{i3} = v_i + d_i(t) \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $\xi_i$  是不确定参数,  $d(t)$  是有界不确定项。

式(18)与式(2)的形式相同,可以得到  $v_i$  的表达式:

$$v_i = \frac{\omega_0}{T_i} \left( -\frac{I_{qi}(E_{fi} - E_{qi})}{T'_{d0i}} - E'_{qi} \dot{I}_{qi} \right) - \dot{\omega}_{COI} \quad (19)$$

进一步可求出励磁控制规律:

$$E_{fi} = E_{qi} - \frac{T'_{d0i} E'_{qi}}{I_{qi}} \dot{I}_{qi} - \frac{T_i T'_{d0i}}{\omega_0 I_{qi}} (v_i + \dot{\omega}_{COI}) \quad (20)$$

## 3 数值仿真

本文仿真采用 2 区域 4 机系统<sup>[21]</sup>,如图 1 所示。发电机采用六阶模型,负荷为恒定功率模型,各种设备的参数参见文献[21]。仿真时考虑了控制器的限幅,有  $0 \text{ p.u.} \leq E_f \leq 6 \text{ p.u.}$ 。

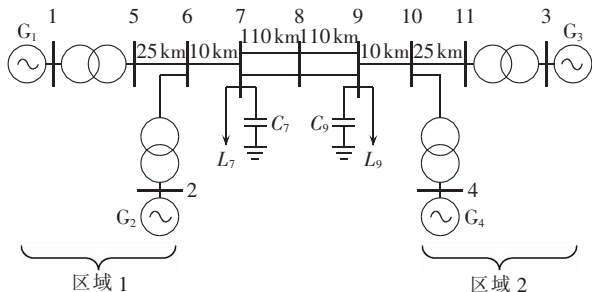
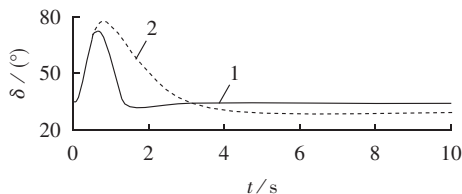


图 1 2 区域 4 机系统示意图

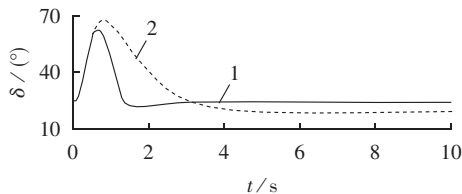
Fig.1 Schematic diagram of 2-area 4-machine power system

仿真时假定  $t=0.1 \text{ s}$  时,节点 7 和 8 之间某条线路靠近节点 7 侧发生三相接地短路,  $0.2 \text{ s}$  时切除故障所在线路。仿真结果见图 2(曲线 1 是本文方法所得到的波形,曲线 2 是采用文献[14]所设计的基于 COI 的逆推励磁控制器所得的波形)。由图中发电机功角波形可以看出,相比文献[14],本文设计的控制策略可以使功角更快稳定下来,超调量更小;在电压控制方面,逆推励磁控制下的机端电压(标么值)很长时间都在额定值以下,而本文设计的控制器可以使机端电压迅速恢复至额定值。

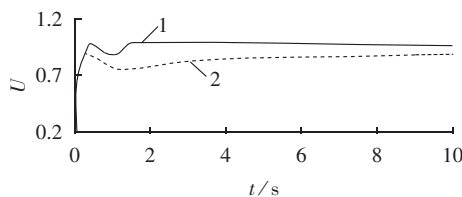
COI 信号需要通过广域测量系统获得,一般而言,信号时滞约为几百毫秒。图 3 所示为 COI 信号时滞对  $G_1$  与  $G_4$  的功角差的影响(曲线 1、2、3 分别为时滞 200 ms、300 ms、500 ms 时的情况)。由图 3 可以看



(a) 发电机  $G_1$  与  $G_4$  功角差



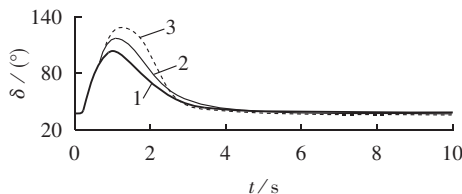
(b) 发电机  $G_2$  与  $G_4$  功角差



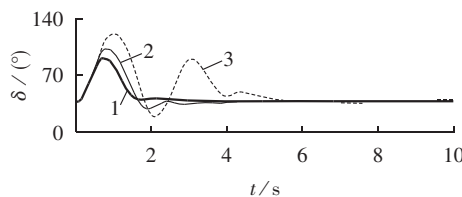
(c) 发电机  $G_1$  机端电压

图 2 三相短路时的响应曲线

Fig.2 Dynamic response to three-phase short-circuit



(a) 逆推法



(b) 本文方法

图 3 COI 时滞对  $G_1$  与  $G_4$  的功角差的影响

Fig.3 Influence of COI-delay on power angle between  $G_1$  and  $G_4$

出,时滞小于 300 ms 时,对稳定控制的影响不大,且本文控制效果仍然优于文献[14];但时滞超过 500 ms 时,功角将可能趋于振荡或发散。可接受的最大时滞大约在 300~500 ms,和文献[13]的结论是一致的。

## 4 结论

本文将  $L_2$  增益干扰抑制、自适应逆推法及 Terminal 滑模控制相结合,提出自适应鲁棒 Terminal 滑模控制的设计方法,并且应用到多机励磁控制器的设计中。控制目标是使系统状态跟踪 COI 信号。设计时既考虑了干扰的影响,又考虑了阻尼的参数不确定性。仿真结果表明所设计的自适应鲁棒 Terminal 滑模励磁器可以有效提高多机电力系统的稳定性,维

持机端电压,并可以接受一定范围内的 COI 信号时滞带来的影响。

## 参考文献:

- [1] 卢强,梅生伟,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2008:249-290.
- [2] SUN Y Z,LI X,ZHAO M,et al. New Lyapunov function for transient stability analysis and control of power systems with excitation control[J]. Electric Power Systems Research,2001,57(2):123-131.
- [3] MEI S,SHEN T,HU W,et al. Robust  $H_\infty$  control of a Hamiltonian system with uncertainty and its application to a multi-machine power system[J]. IEE Proc-Control Theory Appl,2005,152(2):202-210.
- [4] HAO Jin,CHEN Chen,SHI Libao,et al. Nonlinear decentralized disturbance attenuation excitation control for power systems with nonlinear loads based on the Hamiltonian theory[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2007,22(2):316-324.
- [5] SHEN Tielong,MEI Shengwei,LU Qiang,et al. Adaptive nonlinear excitation control with  $L_2$  disturbance attenuation for power systems[J]. Automatica,2003,39(1):81-89.
- [6] LIU Yanhong,CHEN Tiejun,LI Chunwen,et al. Energy-based  $L_2$  disturbance attenuation excitation control of differential algebraic power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs,2008,55(10):1081-1085.
- [7] 梅生伟,申铁龙,刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2008:295-321.
- [8] LU Q,MEI S,HU W,et al. Decentralized nonlinear  $H_\infty$  excitation control based on regulation linearization[J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,2000,147(4):245-251.
- [9] 徐丽杰,王玮. 多机电力系统  $H_\infty$  分散鲁棒励磁控制器的优化设计[J]. 电工技术学报,2004,19(10):42-46.  
XU Lijie,WANG Wei. A new optimum design of  $H_\infty$  decentralized robust excitation controllers for multi-machine power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(10):42-46.
- [10] 王宝华,杨成梧,张强. 自适应逆推励磁控制器设计[J]. 电工技术学报,2005,20(12):91-94.  
WANG Baohua,YANG Chengwu,ZHANG Qiang. Design for adaptive backstepping excitation controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(12):91-94.
- [11] 兰洲,甘德强,倪以信,等. 电力系统非线性鲁棒自适应分散励磁控制设计[J]. 中国电机工程学报,2006,26(17):1-5.  
LAN Zhou,GAN Deqiang,NI Yixin,et al. Decentralized nonlinear robust adaptive excitation control design for power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(17):1-5.
- [12] 常乃超,郭志忠. 基于广域量测的全局非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报,2004,24(2):43-48.
- CHANG Naichao,GUO Zhizhong. Global nonlinear excitation control based on wide-area measurements[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(2):43-48.
- [13] 兰洲,甘德强,倪以信. 跟踪 COI 思想应用于多机系统励磁控制[J]. 电力系统自动化,2006,30(17):14-18.  
LAN Zhou,GAN Deqiang,NI Yixin. COI-tracking concept for excitation control in multi-machine power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(17):14-18.
- [14] 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.
- [15] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2005:1-3.
- [16] COLBIA-VEGAA A,DELE'ON-MORALES J,FRIDMAN L,et al. Robust excitation control design using sliding-mode technique for multimachine power systems[J]. Electric Power Systems Research,2008,78(9):1627-1634.
- [17] 郑剑飞,冯勇,郑雪梅,等. 不确定非线性系统的自适应反演终端滑模控制[J]. 控制理论与应用,2009,26(4):410-414.  
ZHENG Jianfei,FENG Yong,ZHENG Xuemei,et al. Adaptive backstepping-based terminal-sliding-mode control for uncertain nonlinear systems[J]. Control Theory & Applications,2009,26(4):410-414.
- [18] 周丽,姜长生,都延丽. 一种基于反步法的鲁棒自适应终端滑模控制[J]. 控制理论与应用,2009,26(6):678-682.  
ZHOU Li,JIANG Changsheng,DU Yanli. A robust and adaptive terminal sliding mode control based on backstepping[J]. Control Theory & Applications,2009,26(6):678-682.
- [19] MAN Zhihong,XING Huoyu. Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-I:Fundamental Theory and Applications,2002,49(2):261-264.
- [20] YU Shuanghe,YU Xinghuo,MAN Zhihong. Robust global terminal sliding mode control of siso nonlinear uncertain systems [C]//The 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney,Australia:IEEE,2000:2198-2203.
- [21] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill,1994:813-814.

(实习编辑:李莉)

## 作者简介:

邹德虎(1986-),男,安徽肥东人,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定控制(E-mail:zoupaper@163.com);

王宝华(1968-),男,江苏海安人,副教授,博士,研究方向为电力系统分析与非线性控制。

## Adaptive and robust excitation control with terminal sliding mode for multi-machine power system

ZOU Dehu,WANG Baohua

(School of Power Engineering,Nanjing University of Science and Technology,Nanjing 210094,China)

**Abstract:** The adaptive and robust generator excitation controller with terminal sliding mode for multi-machine power system is designed.  $L_2$ -gain disturbance attenuation,adaptive backstepping method and terminal sliding mode control are combined to adaptively estimate the uncertain damping coefficient of generator and possess robustness to disturbance. Its design steps are given. Simulative results for 2-area 4-machine power system show that the designed controller restrains the power oscillation quickly,improves the system stability effectively and maintains the terminal voltage constant.

**Key words:** terminal sliding mode control; adaptive; robustness; electric power system; stability