

# Terminal 滑模变结构励磁控制设计及仿真研究

曾正<sup>1,2</sup>, 刘涤尘<sup>2</sup>, 廖清芬<sup>2</sup>, 向农<sup>2</sup>, 袁荣湘<sup>2</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 基于 Terminal 滑模变结构控制, 提出了一种新的励磁控制器设计策略。给出了其设计过程, 计算了其到达时间, 证明了其稳定性。该励磁控制策略以微分几何精确反馈线性化为理论基础, 可以推广到多机系统的分散励磁控制中。以线性最优励磁控制器为参照, 利用一典型单机无穷大系统, 进行了多种扰动下的仿真校验。仿真结果验证了所提励磁控制策略的稳定性和鲁棒性, 此外, 还发现该控制策略能明显提高系统的电压、功角、频率稳定性。

**关键词:** Terminal 滑模变结构控制; 励磁控制; 微分几何; 精确反馈线性化; 线性最优控制

## Design and simulation study on Terminal sliding mode variable structure excitation control

ZENG Zheng<sup>1,2</sup>, LIU Di-chen<sup>2</sup>, LIAO Qing-fen<sup>2</sup>, XIANG Nong<sup>2</sup>, YUAN Rong-xiang<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** A novel design strategy for excitation controller is proposed based on Terminal sliding mode variable structure control. The design process is presented, the arrival time is calculated, in addition, the stability of the controller is proved. Because its theoretical foundation is differential geometry, it can be extended to separate excitation control of multi-machine system easily according to exact feedback linearization method in differential geometry. Compared with linear optimal excitation control, the simulation with a variety of disturbance is done based on a typical single machine to infinite-bus system. The simulation results verify the stability and robustness of the control strategy proposed. The results also show that it can improve the stability of system in voltage, power angle, and frequency aspects.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50677046).

**Key words:** Terminal sliding mode variable structure control; excitation control; differential geometry theory; exact feedback linearization method; linear optimal control

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0001-05

## 0 引言

励磁控制器的发展是随着控制理论和控制技术的发展而发展的。基于古典控制理论的励磁调节器的高增益放大倍数, 导致了系统的不稳定隐患<sup>[1]</sup>。为了克服这一缺陷, 出现了电力系统稳定器 PSS。然而, PSS 是针对某一振荡频率而设计的, 可能会对其他频率的振荡产生不良后果。在此基础上线性最优励磁控制器 (Linear Optimal Excitation Control, LOEC) 被提了出来。但是, 该方法在大扰动后仍使用在原平衡点设计的控制器来施加控制, 显然是

不合理的。相应地出现了各种自适应控制策略<sup>[2]</sup>。然而, 这些励磁控制器都没有跳出局部线性化设计方法的框架。于 80 年代末 90 年代初完善的非线性控制理论和微机控制技术为各种复杂控制策略的工程应用提供了可能。随后, 各种非线性控制和智能控制相继被提出来<sup>[3-5]</sup>。由于智能控制在稳定性和参数整定方面都有待完善, 各种非线性控制取得了更大的发展空间<sup>[6-9]</sup>。一般的非线性励磁控制中并没有引入机端电压作为反馈信号, 使得对机端电压的调节不能满足要求<sup>[9]</sup>。然而, 各种控制器的设计理论是相辅相成的, 多种策略的综合应用可能会取得更好的控制效果<sup>[10]</sup>。文献[3]在非线形控制中引入了比例控制器, 以满足机端电压调节的要求。

电力系统暂态调节时间对系统的稳定性有密切

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (50677046); 国家电网公司特高压适应性科技项目 (2008-416)

联系, 系统暂态持续时间越短, 对系统的稳定性越有利。传统的励磁控制器的设计过程中, 并没有考虑这个问题。本文提出了一种非线性 Terminal 滑模变结构励磁控制器 (Terminal sliding mode Variable Structure Control, TVSC), 能够在有限的时间内镇定系统的暂态过程。利用一单机系统对所提控制策略进行了校验, 仿真结果表明: 所提出的控制策略能够在有限的时间内镇定系统暂态, 明显提高系统的稳定性。

## 1 Terminal 滑模变结构励磁控制器设计

### 1.1 Terminal 滑模

对于经典的滑模变结构控制, 需要先选择一个线性滑模平面, 控制的目标是使系统的状态变量到达该滑模面。在该滑模面上, 系统的跟踪误差为零。若系统是渐近稳定的, 那么收敛的速度可以通过调节滑模面的参数来改变。然而, 状态误差始终都不会在有限的时间内收敛到零, 在此基础上文献[11]提出了 Terminal 滑模控制策略。所谓的 Terminal 滑模控制, 即利用非线性的切换函数取代线性切换函数来构成新的 Terminal 滑模面, 使得系统的跟踪误差能在有限的时间内收敛到零。该控制策略能够显著提高系统的暂态性能<sup>[12-15]</sup>。

传统的 Terminal 滑模为

$$s = \dot{x} + \beta x^{q/p} = 0 \quad (1)$$

其中:  $x \in R$  为状态变量; 常数  $\beta > 0$ ;  $p, q$  ( $q < p$ ) 为正奇数。可知系统在该滑模面上的动态方程为

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = -\beta x^{q/p} \quad (2)$$

也即

$$dt = -\frac{1}{\beta} x^{-q/p} dx \quad (3)$$

进一步有

$$\int_0^t dt = \int_0^t -\frac{1}{\beta} x^{-q/p} dx \quad (4)$$

这样, 可以得到从任意非平衡点处的初始状态沿滑模面到达平衡点的时间  $t_s$ , 也即到达时间

$$t_s = \frac{p}{\beta(p-q)} |x(0)|^{(p-q)/p} \quad (5)$$

当状态到达平衡点后, 是否能维持系统稳定,

可以利用 Lyapunov 函数  $V = \frac{1}{2} x^2$  来加以分析, 其对时间的导数为

$$\dot{V} = x\dot{x} = -\beta x x^{q/p} = -\beta x^{(p+q)/p} \quad (6)$$

因为  $p+q$  为偶数,  $\dot{V}$  负定, 所以系统是 Terminal 稳定的。由于滑模面中引入了非线性项  $\beta x^{q/p}$ , 因而改善了到达平衡点的收敛性。越接近平衡点, 收敛速度越快, 这就保证了系统暂态在有限时间内收敛到平衡点, 下面将给出这一机制的数学解释。考虑平衡点附近的 Jacobian 矩阵

$$J = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} = -\frac{\beta q}{p x^{(p-q)/p}} \quad (7)$$

对于标量  $x$  来说,  $J$  就是其一阶近似矩阵的特征值, 这就意味着  $\lim_{x \rightarrow 0} J \rightarrow -\infty$ 。也即在平衡点的一个小邻域内, 特征值趋近于负无穷大。此时, 系统的轨迹在该负无穷大的特征值的作用下, 将以无穷大的速度收敛于平衡点。这就是有限时间收敛机制的数学解释。

虽然引入非线性项  $\beta x^{q/p}$  能提高向平衡点收敛的速度, 但是 Terminal 滑模控制在收敛时间上却未必是最优的。因为, 在系统状态接近平衡点时, 非线性滑动模态的收敛速度要比线性滑动模态 ( $p=q$ ) 的收敛速度慢。为了进一步改善系统状态在平衡点附近的控制效果, 文献[11]给出了一种全新的全局快速 Terminal 滑模

$$s = x + \alpha x + \beta x^{1-q/p} = 0 \quad (8)$$

### 1.2 Terminal 滑模励磁控制律设计

为了设计 Terminal 滑模控制励磁器, 首先, 考虑单输入单输出的仿射非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1}, & i=1, 2, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = f(x) + g(x)u \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $f(x), g(x)$  是已知光滑的非线性函数,  $g(x) \neq 0, u \in R$ 。

一种具有递归结构的 Terminal 滑模可表示为

$$s_1 = s'_0 + \alpha_0 s_0 + \beta_0 s_0^{q_0/p_0} \quad (10)$$

⋮

$$s_{n-1} = s'_{n-2} + \alpha_{n-2} s_{n-2} + \beta_{n-2} s_{n-2}^{q_{n-2}/p_{n-2}} \quad (11)$$

其中:  $s_0 = x_1$ ;  $\alpha_i, \beta_i > 0$ ;  $p_i$  和  $q_i$  为正奇数, 且满足  $(2q_i + 1 \leq p_i, i=1, 2, \dots, n-2)$ 。

可设计 Terminal 滑模控制律为

$$u(t) = -\frac{1}{g(x)} \left[ f(x) + \sum_{k=0}^{n-2} \alpha_k s_k^{(n-k-1)} + \sum_{k=0}^{n-2} \beta_k \frac{d^{n-k-1}}{dt^{n-k-1}} s_k^{q_k/p_k} + k s_{n-1} + \gamma s_{n-1}^{q/p} \right] \quad (12)$$

其稳定性分析见文献[12]。

对于单机无穷大系统的三阶模型

$$\begin{cases} \dot{\delta} = w_r w_0 \\ \dot{w}_r = \frac{1}{H}(P_m - P_e - Dw_r) \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}}(-E'_q + E_{fd} + u) \end{cases} \quad (13)$$

其中,

$$P_e = \frac{E_q V_s}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta \quad (14)$$

$$E_q = E'_q + (x_d - x'_d) \frac{E'_q - V_s \cos \delta}{x'_{d\Sigma}} \quad (15)$$

根据非线性控制理论, 若  $\delta_0$  为平衡点处的功角, 选择观测函数  $z_1 = h(x) = \delta - \delta_0$ , 得到一组微分同胚:

$$\begin{cases} z_1 = h(x) = \delta - \delta_0 = \Delta\delta \\ z_2 = L_r h(x) = w_r w_0 = \Delta w \\ z_3 = \Delta \dot{w} \end{cases} \quad (16)$$

在该微分同胚的映射下, 可得到系统的精确反馈线性化模型, 即布鲁夫斯基标准型

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = L_r^2 h(x) + L_g L_r^2 h(x) u = \alpha(x) + \beta(x) u \end{cases} \quad (17)$$

其中,

$$\alpha(x) = L_r^3 h(x) = \frac{w_0 E_q V_s \sin \delta}{H x'_{d\Sigma} T'_{d0}} - \quad (18)$$

$$\frac{D}{H} \dot{w} - \frac{w_0 E_q V_s}{H x'_{d\Sigma}} \cos \delta \Delta w$$

$$\beta(x) = L_r L_g^2 h(x) = -\frac{w_0 V_s \sin \delta}{H T'_{d0} x'_{d\Sigma}} \quad (19)$$

取滑动模态

$$\begin{cases} s_0 = \Delta\delta \\ s_1 = s'_0 + \alpha_0 s_0 + \beta_0 (s_0^{q_0/p_0}) \\ s_2 = s'_1 + \alpha_1 s_1 + \beta_1 (s_1^{q_1/p_1}) \end{cases} \quad (20)$$

根据式 (12) 的结论, 设计 Terminal 励磁控制律为

$$u = -\frac{1}{\beta(x)} \left[ \alpha(x) + \alpha_0 s_0'' + \beta_0 (s_0^{q_0/p_0})'' + \right. \quad (21)$$

$$\left. \alpha_1 s_1' + \beta_1 (s_1^{q_1/p_1})' + k s_2 + \gamma s_2^{q/p} \right]$$

选择参数  $q=q_0=q_1=1$ ;  $p=p_0=p_1=3$ ;  $\alpha_0=\alpha_1=0.5$ ;

$\beta_0=\beta_1=1$ ;  $k=10$ ;  $\gamma=10$ 。从式 (21) 可以看出, 单独的 Terminal 励磁控制器没有考虑对机端电压偏差的调节, 所以失去了维持机端电压的能力。在所设计的控制律式 (21) 基础上附加一个比例控制器 (P 环节) [3], 比例系数  $K_p$  取为  $K_p=10$ 。这样就结合了 Terminal 滑模控制在有限时间镇定暂态和比例励磁控制维持机端电压的能力。显然, 这是一种基于微分几何控制的分散励磁控制器, 依据文献[3]的推导, 该控制策略能实现广域系统的分散线性化, 每台发电机具有相同的控制律, 且所需反馈量只来自其机端。

### 1.3 到达时间和稳定性分析

首先分析 Terminal 吸引子的到达时间, 由式 (20) 可知

$$s'_2 = s''_1 + \alpha_1 s'_1 + \beta_1 (s_1^{q_1/p_1})' \quad (22)$$

$$s''_1 = s'''_0 + \alpha_0 s''_0 + \beta_0 (s_0^{q_0/p_0})'' \quad (23)$$

所以, 有

$$s'_2 = s'''_0 + \alpha_0 s''_0 + \beta_0 (s_0^{q_0/p_0})'' + \quad (24)$$

$$\alpha_1 s'_1 + \beta_1 (s_1^{q_1/p_1})'$$

将励磁控制律式 (21) 代入式 (24), 注意到

$$s'''_0 = x'''_1 = z'_3 = \alpha(x) + \beta(x) u \quad (25)$$

则有

$$s'_2 = -k s_2 - \gamma s_2^{q/p} \quad (26)$$

解此微分方程, 可得全局快速 Terminal 滑模的到达时间为

$$t_{s_2} = \frac{p}{k(p-q)} \ln \frac{k [z_1(0)]^{(p-q)/p} + \gamma}{\gamma} \quad (27)$$

其中,  $z_1(0) = \Delta\delta(0)$ 。可见, 系统从暂态到稳态的暂态调节时间  $t_{s_2}$  是参数  $p$ 、 $q$ 、 $k$ 、 $\gamma$  的函数。这样, 通过调节参数即可改变系统的收敛速度。

其次, 证明 Terminal 滑模变结构励磁控制器的稳定性。选择 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} s_2^2 \geq 0 \quad (28)$$

那么, 有

$$\dot{V} = s_2 \dot{s}_2 = -k s_2^2 - \gamma s_2^{(p+q)/p} \leq 0 \quad (29)$$

因为  $p+q$  为偶数, 所以易知系统是稳定的。

## 2 仿真模型与线性最优励磁控制器设计

考虑典型的单机无穷大系统<sup>[16-17]</sup>, 发电机经过

变压器和两回输电线路向无穷大系统供电。附加励磁控制器后系统原理图如图 1 所示。系统的参数为： $\omega_0=100 \pi \text{ rad/s}$ ,  $D=0.1 \text{ p.u.}$ ,  $H=7 \text{ s}$ ,  $T'_{d0}=8 \text{ s}$ ,  $V_s=0.995 \text{ p.u.}$ ,  $P_{m0}=0.9 \text{ p.u.}$ ,  $x_d=1.8 \text{ p.u.}$ ,  $x'_d=0.3 \text{ p.u.}$ ,  $x_q=1.76 \text{ p.u.}$ ,  $x_T=0.15 \text{ p.u.}$ ,  $x_{L1}=0.5 \text{ p.u.}$ ,  $x_{L2}=0.93 \text{ p.u.}$ 。系统的平衡点为

$$(\delta_0, \omega_{r0}, E_{fd0}, E'_{q0}) = (1.1851, 0, 2.2145, 1.0013) \quad (30)$$

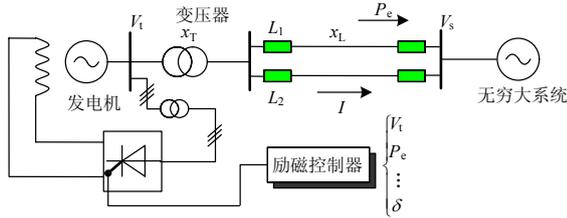


图 1 含励磁控制器的单机无穷大系统原理图

Fig.1 Single machine to infinite bus system including excitation control system

建立如图 2 所示的仿真模型。其中有一路仿真时间控制信号，在该控制信号的作用下，对系统进行三相短路故障设置。改变参数后，还可以分析系统短路后单回运行或双回运行以及断线故障。三相短路是电力系统最严重的故障，对其进行校验，是对励磁控制器的最坏情况分析。由于其他故障产生的干扰相对较弱，所以采用三相短路故障的分析是对励磁系统性能的一种保守估计。除大扰动外，还可以分析在机端电压或机械功率阶跃扰动下的小扰动分析，以校验励磁控制对低频振荡的抑制效果。此外，在实际的仿真过程中，为了加强对比，可以把励磁控制部分设置为多路开关。这样，就可以根据需要选择励磁控制方式。特别地，该模型还能分析发电机失磁和控制系统存在延迟等情况。系统的初始平衡点是通过非线性无约束极值来求得的。该仿真模型结构简单，理论完善，物理概念清晰，稍加改变可以适用于待研究的其他系统。

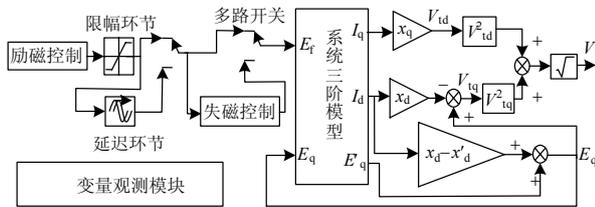


图 2 仿真模型系统结构图

Fig.2 The structure of simulation model

根据文献[18]的原理设计了线性最优励磁控制器 (LOEC)，选择  $Q=\text{diag}(1,100, 5000)$ 、 $R=1$ ，

得到最优反馈增益： $k_p=22.8316$ 、 $k_w=-1.0384$ 、 $k_v=70.4308$ ，得到线性最优励磁控制律为

$$u = -k_v \Delta V_t - k_w \Delta \omega - k_p \Delta P_e \quad (31)$$

### 3 仿真与结果分析

为了校验所提 Terminal 滑模变结构励磁控制器 (TVSC) 的效果。在第 2 部分内容的基础上，以线性最优励磁控制器 (LOEC) 为参照，在 Matlab 环境下进行了仿真分析。扰动设置：2 s 时变压器出口一回线路发生三相短路故障，持续 0.1 s 后故障切除；7 s 时发电机机械功率发生 0.05 p.u. 的阶跃扰动；12 s 机端电压发生 0.05 p.u. 的阶跃扰动。仿真结果如图 3~5 所示。

图 3 给出了发电机机端电压的响应过程，从中可以看出，两种控制方法都具有在扰动后维持电压稳定的能力。在大扰动过程中，TVSC 的效果明显好于 LOEC。

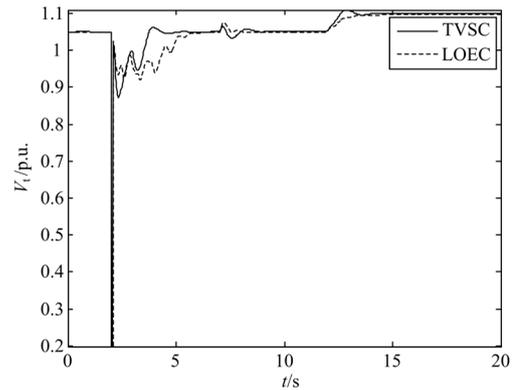


图 3 机端电压的动态响应

Fig.3 Dynamic response of the terminal voltage

图 4 给出的是发电机输出有功功率的动态响应结果。对比 LOEC 控制，不难看出 TVSC 控制能够在足够短的时间内镇定暂态，从而能向系统提供更多的阻尼，增加系统的稳定性。这主要得益于：TVSC 控制以功角为输出观测量施加控制，在机端电压基本不变的情况下，功角的快速镇定，自然能很好地抑制功率振荡。

图 5 给出了发电机角速度的响应情况，不难看出 TVSC 的效果明显好于 LOEC。由于角速度偏差量是功角的微分，类似地，当功角能很好地镇定时，系统的角速度能快速恢复到稳态，也就是说系统的频率能快速恢复到额定值。

综上，对比线性最优励磁控制器，所提控制策略是能快速使系统渐近收敛到平衡点。能提高系统的电压、功角、频率稳定性。

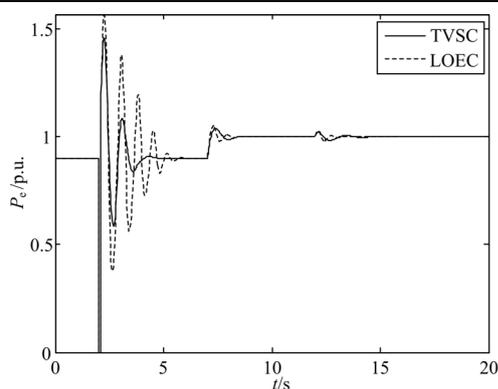


图4 发电机输出有功功率动态响应

Fig.4 Generator active power dynamic response

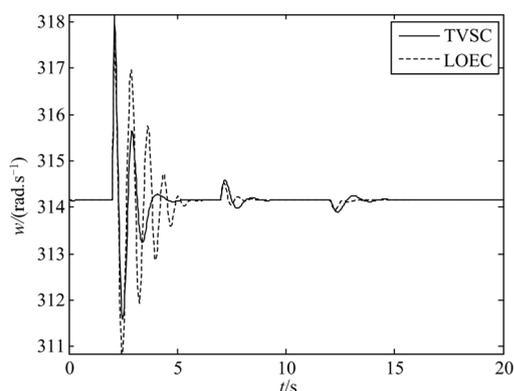


图5 发电机角速度响应

Fig.5 Generator angular velocity response

## 4 讨论

从 Terminal 励磁控制器的设计过程可以看出,其设计的理论基础是微分几何理论中的精确反馈线性化理论,通过一组合适的微分同胚实现系统的线性化。类似于传统的非线性励磁控制律,这也是一种分散的非线性励磁控制策略。可以很容易地推广到多机系统。此时,每台发电机都具有相同的控制律,且控制器的反馈信息只来自于该发电机自身,实现了大系统的分散解耦。

同时,也应注意该控制策略中存在多个微分环节,这对于系统的稳定性具有一定的不良影响。在实际现场需要考虑添加适当的滤波环节,这有待进一步的研究。

## 5 结语

本文基于 Terminal 滑模变结构控制提出了一种新的励磁控制策略,该控制策略结合了仿射非线性系统精确反馈线性化和 Terminal 滑模控制。同时,充分利用了比例控制能维持机端电压和 Terminal 滑模控制能在有限时间内镇定系统的优点。通过和

LOEC 对比仿真分析,验证了所提控制策略的稳定性、鲁棒性和改善系统暂态稳定性的能力。

## 参考文献

- [1] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 118-122.
- [2] ZHOU Lan, GAN De-qiang, NI Yi-xin. Robust adaptive control design for generator excitation[C]. //Power Engineering Society General Meeting, IEEE. 2006: 1-5.
- [3] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 二版. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] Yong Taiyou, Lasseter R H, CUI Wen-jin. Coordination of excitation and governing control based on fuzzy logic[C]. //Power Engineering Society Winter Meeting. 1999: 737-742.
- [5] 范澍, 毛承雄, 陆继明, 等. 多机电力系统神经网络最优励磁控制器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 80-84.  
FAN Shu, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al. Neural network based optimal excitation controller for multi-machine power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (7) : 80-84.
- [6] CHANG Xian-rong, WANG Ren-zhou, YANG Yi-han. The nonlinear excitation control of generators[C]. //Proceedings on Computer, Communication, Control and Power Engineering Conference. 1993: 23-26.
- [7] 梁志珊, 张化光, 王红月, 等. 同步发电机励磁非线性预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (12) : 52-56.  
LIANG Zhi-shan, ZHANG Hua-guang, WANG Hong-yue, et al. Nonlinear predictive control of synchronous machine excitation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (12) : 52-56.
- [8] 孙元章, 黎雄, 戴和平, 等. 同时改善稳定性和电压精度的非线性励磁控制器[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16 (5) : 332-336.  
SUN Yuan-zhang, LI Xiong, DAI He-ping, et al. A nonlinear excitation controller to improve both power system stability & voltage regulation accuracy[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16 (5) : 332-336.
- [9] 李啸驰, 程时杰, 韦化, 等. 一种高性能的非线性励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (12) : 37-42.  
LI Xiao-chi, CHENG Shi-jie, WEI Hua, et al. A high performance nonlinear excitation control for generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (12) : 37-42.
- [10] 韩英铎, 谢小荣, 崔文进. 同步发电机励磁控制研究的现状与走向[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41 (4/5) : 142-146.  
HAN Ying-duo, XIE Xiao-rong, CUI Wen-jin. Status quo and future trend in research on synchronous generator excitation control[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2001, 41 (4/5) : 142-146.

(下转第59页 continued on page 59)

- [3] Abdel-Aal R E. Improving electric load forecasts using network committees[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 74: 83-94.
- [4] 张筱慧. 标么值加权平均组合变量生成法用于中长期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 40-43.  
ZHANG Xiao-hui. Per-unit value weighted average combined variable generated method for mid-long term power load forecasting[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 40-43.
- [5] 肖先勇, 葛嘉, 何德胜. 基于支持向量机的中长期电力负荷组合预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 84-88.  
XIAO Xian-yong, GE Jia, HE De-sheng. Combination method of mid-long term load forecasting based on support vector machine[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(1): 84-88.
- [6] 杨春玲, 李天云, 王爱凤. 基于自适应加权最小二乘支持向量机的短期负荷预测方法[J]. 吉林电力, 2007, 35(3): 18-21.  
YANG Chun-ling, LI Tian-yun, WANG Ai-feng. An adaptive weighed LS-SVM approach for STLF[J]. Jilin Electric Power, 2007, 35(3): 18-21.
- [7] 耿艳, 韩学山, 韩力. 基于最小二乘支持向量机的短期负荷预测[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 72-76.  
GENG Yan, HAN Xue-shan, HAN Li. Short-term load forecasting based on least squares support vector machines[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 72-76.
- [8] Chen Bojun, Chang Mingwei, Lin Chijin. Load forecasting using support vector machines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1821-1830.
- [9] 王惠文, 吴载斌, 孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
WANG Hui-wen, WU Zai-bin, MENG Jie. Partial least-squares regression-linear and nonlinear methods [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [10] 海安统计年鉴[R]. 2008.  
Haian Statistic Annual[R]. 2008.
- [11] 李新炜, 王子琦, 方鸣, 等. 基于分区逐时气象信息的全网负荷预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 36-40.  
LI Xin-wei, WANG Zi-qi, FANG Ming, et al. Daily load forecasting based on hourly area weather data[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 36-40.

---

收稿日期: 2009-11-28; 修回日期: 2010-08-26

作者简介:

吉训生(1969-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为微机电力系统理论及应用。E-mail: shxybkpg@163.com

---

(上接第5页 continued from page 5)

- [11] Park K B, Tsuiji T. Terminal sliding mode of second-order nonlinear uncertain system[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 1999, 9(11): 769-780.
- [12] 贺昱曜, 闫茂德. 非线性控制理论及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [13] 刘金琨. 滑模变结构控制MATLAB仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [14] YU Xing-huo, MAN Zhi-hong. Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(2): 261-264.
- [15] YU Shuang-he, YU Xing-huo, MAN Zhi-hong. Robust global terminal sliding mode control of SISO nonlinear uncertain systems[C]. //Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney(Australia): 2000: 2198-2203.
- [16] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York(USA): McGraw-Hill Inc, 1994.
- [17] 孙元章, 焦小红, 申铁龙. 电力系统非线性鲁棒控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [18] 卢强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1982.

---

收稿日期: 2009-12-09; 修回日期: 2010-03-29

作者简介:

曾正(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为微电网与分布式发电、电力系统运行与控制; E-mail: zengerzheng@126.com

刘涤尘(1953-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

廖清芬(1975-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为电机及电力系统的稳定与控制。