

# 汽轮发电机自适应 Terminal 滑模综合控制

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:** 提出了汽轮发电机励磁与汽门协调 Terminal 滑模控制。针对发电机综合控制存在的两个输入变量, 通过构造两个非奇异的 Terminal 滑模面, 实现解耦控制。Terminal 滑模面中含有非线性函数, 使得误差能够快速收敛, 从而取得良好的控制效果。利用自适应律实时估计扰动上界, 从而使控制器具有很强的鲁棒性。通过李亚普洛夫理论证明了控制系统的稳定性。仿真结果表明, 所设计的汽轮发电机自适应 Terminal 滑模综合控制器能够快速阻尼功率振荡, 提高电力系统的稳定性, 维持机端电压。

**关键词:** 发电机; 综合控制; Terminal 滑模控制; 自适应; 电力系统

## Integrated adaptive Terminal sliding mode controller for turbo-generator

ZOU De-hu, WANG Bao-hua

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

**Abstract:** A coordinated Terminal sliding mode control of turbo-generator excitation and valve is proposed. Two non-singular Terminal sliding surface are constructed to realize decoupling control of two input variables existing in integrated control of generators. Terminal sliding surface contains a non-linear function, allowing the error a fast convergence to achieve good control effect. Using adaptive law to estimate disturbance upper bound, it makes the controller have strong robustness. According to Lyapunov theory, the stability of this control system is proved. The simulation results show that the turbo-generator integrated adaptive Terminal sliding mode controller can quickly damp power oscillations, improve power system stability, and maintain the terminal voltage.

**Key words:** generator; integrated control; Terminal sliding mode control; adaptive; electric power systems

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0033-04

## 0 引言

汽轮发电机励磁控制和汽门开度控制均可以提高电力系统稳定性, 实现两者的协调会取得更好的效果, 因此汽轮发电机的综合控制问题得到了广泛的研究, 各种先进的控制理论应用于这一领域。

文献[1-2]采用逆系统理论设计了汽轮发电机的综合控制器。文献[3]通过构造 Hamilton 能量函数设计了具有简洁形式的发电机综合控制器。文献[4]将可量测变量引入发电机综合控制器的设计中, 实现解耦协调控制。文献[5]采用基于微分几何理论的精确反馈线性化方法设计了发电机综合控制器, 但方法较为抽象复杂。文献[6]在文献[5]基础上, 将全部控制目标反馈到线性系统。文献[7-8]采用逆推法逐步构造李亚普洛夫函数的方式设计了综合控制器。文献[9-10]讨论了多机系统综合控制器的设计方法。上述文献[1-10]在设计汽轮机综合控制器的过程中,

未考虑外扰动的影 响。事实上, 在实际场合, 扰动是难以忽略的。

滑模变结构控制作为一种不连续的控制手段, 在受到外干扰和参数摄动情况下具有很强的鲁棒性<sup>[11]</sup>, 非常适合在电力系统中应用。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。因此本文采用 Terminal 滑模控制设计汽轮发电机综合控制器, 以便使控制器具有鲁棒性, 同时能够使受扰的电力系统快速稳定。针对发电机综合控制存在两个输入变量, 通过构造两个非奇异的 Terminal 滑模面, 实现解耦控制。针对控制系统不可避免的扰动, 设计了自适应律实时估计不确定扰动上界。设计过程简洁, 便于工程技术人员理解和使用。仿真结果表明了所设计的汽轮发电机综合控制器可以迅速使系统稳定到平衡点, 维持机端电压。

### 1 数学模型

研究对象是图 1 所示的单机无穷大系统。

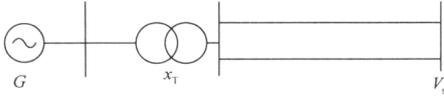


图 1 单机无穷大系统结构图

Fig. 1 Single machine infinite-bus system

只考虑高压主汽门的调节作用，则汽轮发电机综合控制的数学模型可以表示为如下的形式<sup>[3]</sup>：

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} P_H + \frac{\omega_0}{H} C_{ML} P_{m0} - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} P_e \\ \dot{E}'_q = -\frac{x_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma} T_{d0}} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} u_1 \\ \dot{P}_H = (-P_H + C_H P_{m0} + C_H u_2) / T_{H\Sigma} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\delta$  是发电机转子角； $\omega$  是发电机转子角速度； $\omega_0$  是额定角速度，取  $\omega_0 = 2\pi f$ ； $H$  是惯性时间常数； $V_s$  是无穷大母线电压； $D$  是阻尼系数； $E'_q$  是暂态电势； $x'_d$  是发电机暂态电抗； $x_d$  是发电机 d 轴同步电抗； $T_{d0}$  是励磁绕组时间常数； $u_1$  是励磁电压； $u_2$  是主汽门控制输入。

电磁功率的表达式有： $P_e = \frac{E'_q V_s}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta + \varepsilon$ ， $\varepsilon$  为

系统所受到的功率扰动以及建模不精确引起的不确定部分。

发电机机端电压可以由下式表示：

$$V_1 = \sqrt{\left(\frac{V_s x_q \sin \delta}{x_{q\Sigma}}\right)^2 + \left(\frac{E'_q (x'_{d\Sigma} - x'_d) + V_s x'_d \cos \delta}{x'_{d\Sigma}}\right)^2} \quad (2)$$

为了便于控制器的设计，令  $x_1 = \delta - \delta_0$ ； $x_2 = \omega - \omega_0$ ； $x_3 = -(P_e - P_{e0})$ ； $x_4 = P_H - P_{H0}$ ，下标 0 表示各状态量的初始值。则系统 (1) 可表示为：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{\omega_0}{H} x_3 + \frac{\omega_0}{H} x_4 - \frac{D}{H} x_2 \\ \dot{x}_3 = f(x) + g(x)u_1 + \varepsilon_1 \\ \dot{x}_4 = (-x_4 + C_H u_2) / T_{H\Sigma} + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中：

$$f(x) = -\frac{E'_q}{x'_{d\Sigma}} V_s x_2 \cos(x_1 + \delta_0) + \frac{x_{d\Sigma} V_s E'_q}{(x'_{d\Sigma})^2 T_{d0}} \sin(x_1 + \delta_0) - \frac{V_s^2 (x_d - x'_d)}{(x'_{d\Sigma})^2 T_{d0}} \sin(x_1 + \delta_0) \cos(x_1 + \delta_0)$$

$$g(x) = -\frac{V_s}{T_{d0} x'_{d\Sigma}} \sin(x_1 + \delta_0); \quad \varepsilon_1 = -\dot{\varepsilon}$$

其中： $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别为励磁回路和主汽门控制系统的扰动。有  $|\varepsilon_1| < \rho_1$ ， $|\varepsilon_2| < \rho_2$ ， $\rho_1$  和  $\rho_2$  未知。

### 2 控制器设计

首先令  $x_5 = \int_0^t x_1 d\tau$ ； $x_6 = \int_0^t x_3 d\tau$ ； $x_7 = \int_0^t x_4 d\tau$ ；

$$s_1 = x_6 + c_1 x_5 + c_2 x_1; \quad s_2 = x_3 + c_1 x_1 + c_2 x_2;$$

$$s_3 = x_7 + c_3 x_5 + c_4 x_1; \quad s_4 = x_4 + c_3 x_1 + c_4 x_2;$$

式中， $c_i > 0$ 。

显然有  $\dot{s}_1 = s_2$ ； $\dot{s}_3 = s_4$

选择两个非奇异的 Terminal 滑模面<sup>[12]</sup>：

$$\text{令: } s_A = s_1 + \frac{1}{\beta} s_2^{p/q} \quad (4)$$

$$s_B = s_3 + \frac{1}{\beta} s_4^{p/q} \quad (5)$$

式中， $\beta > 0$ ， $p$  和  $q$  是正奇数，且保证  $1 < p/q < 2$ 。

系统的控制规律如下：

$$u_1 = -\frac{1}{g(x)} [f(x) + c_1 x_2 + c_2 \dot{x}_2 + \beta \frac{q}{p} s_2^{2-p/q} + \hat{\rho}_1 \text{sgn}(s_A)] \quad (6)$$

$$u_2 = -\frac{T_{H\Sigma}}{C_H} [-\frac{x_4}{T_{H\Sigma}} + c_3 x_2 + c_4 \dot{x}_2 + \beta \frac{q}{p} s_2^{2-p/q} + \hat{\rho}_2 \text{sgn}(s_B)] \quad (7)$$

式中， $\hat{\rho}_1$  和  $\hat{\rho}_2$  分别是对  $\rho_1$  和  $\rho_2$  的估计。

估计扰动的自适应律如下：

$$\dot{\hat{\rho}}_1 = r \frac{p}{q\beta} s_2^{p/q-1} |s_A| \quad (8)$$

$$\dot{\hat{\rho}}_2 = r \frac{p}{q\beta} s_4^{p/q-1} |s_B| \quad (9)$$

式中， $r$  为自适应增益系数。

式 (6) 和式 (7) 中的  $\dot{x}_2$  即  $\dot{\omega}$ ，是可以直接测量的量，因此没有必要把  $\dot{\omega}$  的表达式代入式 (6)、(7)。

式 (6) ~ (9) 中所涉及的物理量，除了  $E'_q$ ，其他均可以直接测量得到。由电路理论，有  $E'_q \approx V_1 + \frac{Qx'_d}{V_1}$ ，因此  $E'_q$  可以通过测量机端电压和无功功率间接得到。因此控制器是可以实用化的。

### 3 稳定性证明

对式 (4) 和式 (5) 求导，并分别代入式 (6) 和式 (7)，可得：

$$\dot{s}_A = \frac{p}{q} \frac{1}{\beta} s_2^{p/q-1} [\varepsilon_1 - \hat{\rho}_1 \operatorname{sgn}(s_A)] \quad (10)$$

$$\dot{s}_B = \frac{p}{q} \frac{1}{\beta} s_4^{p/q-1} [\varepsilon_2 - \hat{\rho}_2 \operatorname{sgn}(s_B)] \quad (11)$$

构造李亚普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} s_A^2 + \frac{1}{2} s_B^2 + \frac{1}{2r} (\hat{\rho}_1 - \rho_1)^2 + \frac{1}{2r} (\hat{\rho}_2 - \rho_2)^2 \quad (12)$$

求得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s_A \dot{s}_A + s_B \dot{s}_B + \frac{1}{r} \dot{\hat{\rho}}_1 (\hat{\rho}_1 - \rho_1) + \frac{1}{r} \dot{\hat{\rho}}_2 (\hat{\rho}_2 - \rho_2) = \\ & \frac{p}{q} \frac{1}{\beta} s_2^{p/q-1} (s_A \varepsilon_1 - \hat{\rho}_1 |s_A|) + \frac{p}{q} \frac{1}{\beta} s_4^{p/q-1} (s_B \varepsilon_2 - \hat{\rho}_2 |s_B|) + \\ & \frac{p}{q} \frac{1}{\beta} s_2^{p/q-1} |s_A| (\hat{\rho}_1 - \rho_1) + \frac{p}{q} \frac{1}{\beta} s_4^{p/q-1} |s_B| (\hat{\rho}_2 - \rho_2) = \\ & \frac{p}{q} \frac{1}{\beta} s_2^{p/q-1} (s_A \varepsilon_1 - |s_A| \rho_1) + \frac{p}{q} \frac{1}{\beta} s_4^{p/q-1} (s_B \varepsilon_2 - |s_B| \rho_2) \end{aligned} \quad (13)$$

显然有  $s_A \varepsilon_1 - |s_A| \rho_1 < 0$ ,  $s_B \varepsilon_2 - |s_B| \rho_2 < 0$

因为  $0 < \frac{p}{q} - 1 < 1$ , 又由于  $\beta > 0$ ,  $p$  和  $q$  是正

奇数, 因此当  $s_2 \neq 0$  时,  $\frac{p}{q} \frac{1}{\beta} s_2^{p/q-1} \eta_A > 0$ ;  $s_4 \neq 0$  时,

$\frac{p}{q} \frac{1}{\beta} s_4^{p/q-1} \eta_B > 0$ , 显然当  $s_2$  和  $s_4$  只要不全为 0, 就

有  $\dot{V} < 0$ , 满足李亚普诺夫稳定条件。

假定  $s_2$  和  $s_4$  均等于 0, 即  $x_3 = -c_1 x_1 - c_2 x_2$ ;

$x_4 = -c_3 x_1 - c_4 x_2$ 。

构造李亚普诺夫函数:

$$V_2 = \frac{1}{2} x_2^2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{H} (c_1 + c_3) x_1^2$$

求得:

$\dot{V}_2 = -[\frac{\omega_0}{H} (c_4 + c_2) + \frac{D}{H}] x_2^2 \leq 0$ 。也就是说  $x_1 \sim x_4$  均可以收敛至 0。至此稳定性得证。

#### 4 数值仿真

系统参数为:  $H = 10$  s;  $T_{d0} = 10$  s;  $V_s = 1$ ;  $x_q = 1.8$ ;  $x'_d = 0.3$ ;  $x'_{d\Sigma} = 0.7$ ;  $x_d = 1.8$ ;  $x_{d\Sigma} = 2.2$ ;  $P_{m0} = 1$ ;  $C_H = 0.3$ ;  $C_{ML} = 0.7$ ;  $T_{H\Sigma} = 0.5$  s。

仿真时假定  $t = 1$  s 时, 某条线路发生三相接地短路, 0.05 s 后故障消失。

仿真时假定扰动是周期性的, 设  $\varepsilon_1 = 0.01 \sin t$ ;  $\varepsilon_2 = 0.02 \sin 3t$ 。考虑控制器限幅, 有  $|u_i| \leq 0.3$ ; 由于只考虑主汽门调节, 因此有  $C_{ML} P_{m0} \leq P_m \leq P_{m0}$ 。

仿真结果见图 2~6, 较粗实线是本文方法所得到的波形, 细线是采用逆推法<sup>[7]</sup>设计的控制器所得到的波形。由波形可以看出, 自适应 Terminal 滑模稳定综合控制器可以迅速使系统稳定, 抑制功率振荡, 提高单机无穷大电力系统的稳定性, 并有效维持机端电压。同逆推控制相比, 本文所设计的控制器可以更快使受到扰动的电力系统稳定到平衡点。同时 Terminal 滑模综合控制器的控制量较小, 尤其是对汽门的控制较平滑, 避免了频繁切换对机械阀门的损耗。

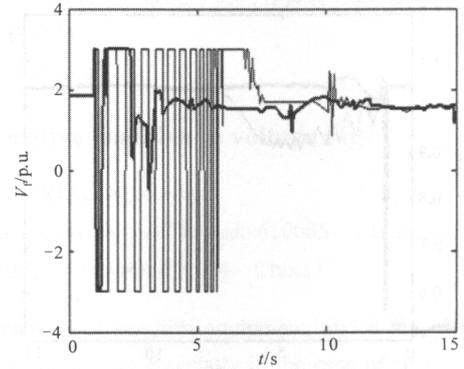


图 2 励磁电压响应曲线

Fig.2 Response of excitation voltage

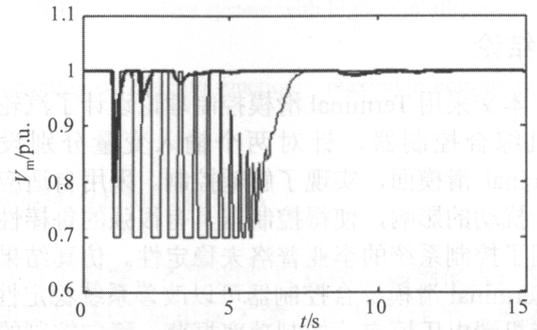


图 3 机械功率输入曲线

Fig.3 Response of mechanical power

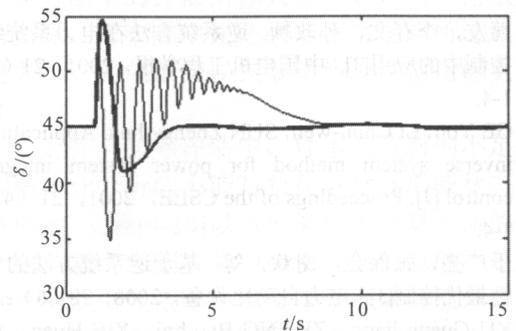


图 4 发电机功角响应

Fig.4 Response of power angle

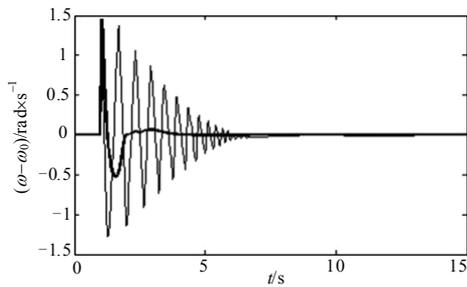


图5 发电机转子相对角速度

Fig.5 Response of angular velocity of generator rotor

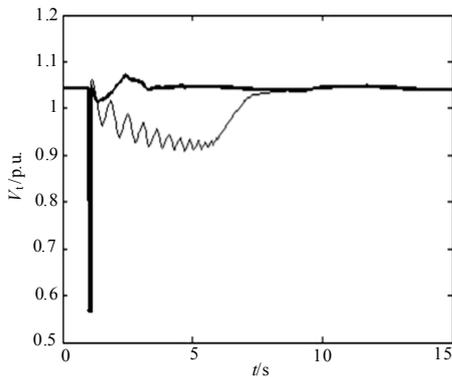


图6 发电机机端电压响应曲线

Fig.6 Response of terminal voltage

### 5 结论

本文采用 Terminal 滑模控制理论设计了汽轮发电机综合控制器，针对两个输入变量分别设置 Terminal 滑模面，实现了解耦控制。采用自适应律估计扰动的影响，使得控制器具有很强的鲁棒性。证明了控制系统的李亚普洛夫稳定性。仿真结果表明 Terminal 滑模综合控制器可以改善系统稳定性，保持机端电压恒定，抑制功率振荡。稳定控制的效果优于基于逆推法设计的汽轮发电机综合控制器。

### 参考文献

[1] 葛友, 李春文, 孙政顺. 逆系统方法在电力系统综合控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (4) : 1-4.  
 GE You, LI Chun-wen, SUN Zheng-shun. Application of inverse system method for power system integrated control [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (4) : 1-4.

[2] 于广亮, 张保会, 谢欢, 等. 基于逆系统方法的非线性最优控制[J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (6) : 1-5.  
 YU Guang-liang, ZHANG Bao-hui, XIE Huan, et al. Nonlinear optimal control based on inverse system method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28 (6) : 1-5.

[3] 马进, 席在荣, 梅生伟, 等. 基于Hamilton能量理论的发电机汽门与励磁非线性稳定控制器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (5) : 88-93.  
 MA Jin, XI Zai-rong, MEI Sheng-wei, et al. Nonlinear stabilizing controller design for the steam-valving and excitation system based on Hamilton energy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (5) : 88-93.

[4] 常乃超, 郭志忠. 基于控制系统四元组形式的发电机非线性分散鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (7) : 151-157.  
 CHANG Nai-chao, GUO Zhi-zhong. Nonlinear decentralized robust control of turbo-generator based on four-atom formulation of control systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (7) : 151-157.

[5] 李啸骢, 程时杰, 韦化, 等. 具有多性能指标的汽轮发电机非线性综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (4) : 96-101.  
 LI Xiao-cong, CHENG Shi-jie, WEI Hua, et al. Multi-index nonlinear integrated control for turbing generator unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (4) : 96-101.

[6] 刘辉, 李啸骢, 韦化. 基于目标全息反馈的发电机非线性综合控制设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (4) : 21-25.  
 LIU Hui, LI Xiao-cong, WEI Hua. Nonlinear integrated control design for generator unit based on NCOHF[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (4) : 21-25.

[7] 王宝华, 杨成梧, 张强. 发电机的非线性自适应逆推综合控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23 (1) : 60-64.  
 WANG Bao-hua, YANG Cheng-wu, ZHANG Qiang. Integrated nonlinear adaptive backstepping controller for synchronous generator[J]. Control Theory and Applications, 2006, 23 (1) : 60-64.

[8] Chen H, Ji H B, Wang B, et al. Coordinated passivation techniques for the dual-excited and steam-valving control of synchronous generators[J]. IEE Proceedings-Control Theory Appl, 2006, 153 (1) : 69-73.

[9] 吴俊勇. 多机电力系统发电机励磁与调速器的最优变目标非线性控制的研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21 (6) : 106-110.  
 WU Jun-yong. Coordinated optimal variable-aim nonlinear control strategy of generator excitation and governor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21 (6) : 106-110.

[10] 于广亮, 张保会, 谢欢, 等. 基于广域信息的非线性全局综合控制器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4) : 26-31.  
 YU Guang-liang, ZHANG Bao-hui, XIE Huan, et al. A nonlinear global integrated controller based on wide-area measurement information[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (4) : 26-31.

(下转第 42 页 continued on page 42)

[5] Wagner V E, Andreshak A A, Staniak J P. Power quality and factory automation[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1990, 26 (4): 620-626.

[6] Gupta C P, Milanovic J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21 (2): 711-718.

[7] 肖先勇, 马超, 李勇. 线路故障引起电压凹陷的频次最大熵评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (1): 87-93.  
XIAO Xian-yong, MA Chao, LI Yong. Voltage sag occurrence frequency assessment caused by line faults using the maximum entropy method[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (1): 87-93.

[8] 陈卫东, 肖先勇, 李皖, 等. 敏感负荷电压凹陷敏感度的最佳平方逼近评估法[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 55-59.  
CHEN Wei-dong, XIAO Xian-yong, LI Wan, et al. Voltage sag sensitivity assessment of sensitive equipments by optimal square approximation[J]. Power System Technology, 2009, 33 (8): 55-59.

[9] 陈武, 苟剑, 肖先勇. 敏感设备电压凹陷敏感度的随机-模糊评估[J]. 电网技术, 2009, 33 (6): 39-44.  
CHEN Wu, GOU Jian, XIAO Xian-yong. A stochastic-fuzzy assessment method for voltage sag sensitivity of sensitive equipment[J]. Power System Technology, 2009, 33 (6): 39-44.

[10] Lamoree J, Mueller D, Vinett P, et al. Voltage sag analysis case studies industry applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 30 (4): 1083-1089.

[11] 吕恩琳, 钟佑明. 模糊密度随机变量的数学描述[J]. 应用数学和力学, 2000, 21 (8): 861-869.  
Lü En-lin, ZHONG You-ming. Mathematic description about random variable with fuzzy density function[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2000, 21 (8): 861-869.

[12] 钟佑明, 吕恩琳, 王应芳. 区间概率随机变量及其数字特征[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2001, 24(1): 24-27.  
ZHONG You-ming, Lü En-lin, WANG Ying-fang. Interval probability random variable and its numerical characters[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2001, 24 (1): 24-27.

[13] 刘晓石, 陈鸿建, 何腊梅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
LIU Xiao-shi, CHEN Hong-jian, HE La-mei. Probability theory and mathematical statistics[M]. Beijing: Science Press, 2005.

[14] 任震, 万官泉, 黄雯莹. 参数不确定的配电系统可靠性区间评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (12): 68-73.  
REN Zhen, WAN Guan-quan, HUANG Wen-ying. An interval approach to evaluate distribution system reliability with parameters uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (12): 68-73.

[15] 董玉革. 机械模糊可靠性设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
DONG Yu-ge. Design of mechanism fuzzy reliability[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.

[16] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
XU Guo-zheng, ZHANG Jie-rong, QIAN Jia-li, et al. Theories and applications of high-voltage circuit breakers[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.

[17] Myo Thu Aung, Milanovic J V. Stochastic prediction of voltage sags by considering the probability of the failure of the protection system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21 (1): 322-329.

[18] University of Washington. IEEE-30 bus test system [EB/OL]. 1993-08-20. [http://www.Ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](http://www.Ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm).

收稿日期: 2009-09-25; 修回日期: 2009-11-03  
作者简介:

李政光 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量及其控制技术; E-mail: leezhengguang@163.com

桂贤明 (1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力自动化运行管理和研究工作;

肖先勇 (1968-), 男, 副教授, 硕士生导师, 长期从事电能质量及其控制技术的教学与研究工作。

(上接第 36 页 continued from page 36)

[11] 刘金琨. 滑模变结构MATLAB仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[12] YONG Feng, YU Xing-huo, MAN Zhi-hong. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatica, 2002, 38 (2): 2159-2167.

收稿日期: 2009-09-26; 修回日期: 2009-10-19  
作者简介:

邹德虎 (1986-), 男, 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, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统分析与非线性控制。