

# 双馈风力发电机空载并网控制策略研究

兰华<sup>1</sup>, 刘座铭<sup>1</sup>, 童建东<sup>1</sup>, 王野藤<sup>2</sup>, 刘涛<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 齐齐哈尔电业局, 黑龙江 齐齐哈尔 161000)

**摘要:** 采用传统的 PI 控制、模糊控制以及积分型变结构控制 (IVSC) 分别与矢量控制相结合, 对双馈风力发电机空载并网控制, 即并网前的空载运行、并网时的过渡过程做了仿真实验。在 IVSC 与矢量控制相结合的控制策略中, 将饱和函数加入到切换控制, 使系统在边界层内产生准滑模运动, 有效地抑制了转子电流的抖振。通过比较, 积分型变结构控制 (IVSC) 分别与矢量控制相结合的控制策略能使系统在全局范围动态性能最佳。

**关键词:** 模糊控制; 变结构控制; 矢量控制; 双馈风力发电机

## Cutting-in control strategy of double-fed wind generator

LAN Hua<sup>1</sup>, LIU Zuo-ming<sup>1</sup>, TONG Jian-dong<sup>1</sup>, WANG Ye-teng<sup>2</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>

(1.School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Qiqihar Power Supply Company, Qiqihar 161000, China)

**Abstract:** There are three control strategies(traditional PI control ,fuzzy control ,integral variable structure control (IVSC) and the field-oriented vector control technique)are presented for double-fed wind generator's no-load cutting-in. In IVSC and the field-oriented vector control technique, the saturation function is employed in switch control, which can make the system to produce quasi slide mode movement in boundary layer, the chattering of rotor current is decreased effectively. Compared with the traditional PI control,fuzzy control is given. IVSC is verified optimal by corresponding simulations with PSCAD for no-load operation before the cutting- in, the transient process at the cutting-in moment.

**Key words:** fuzzy control; integral variable structure control; field-oriented vector control; double-fed wind generator

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)10-0011-04

## 0 引言

随着全球经济的快速增长, 电力紧缺和能源危机日趋严重, 能源、环境问题已经成为当今人类生存和发展迫切需要解决的问题, 开发新能源, 积极利用再生能源是解决能源危机的办法之一。风能作为一种清洁的可再生能源, 越来越受到世界各国的重视。在风力发电技术中, 变速恒频双馈风力发电机在提高风能利用率方面有其突出的优越性<sup>[1-3]</sup>。安全稳定, 准时的实现并网, 是风力发电的首要研究课题。

目前已有不少文献应用矢量控制技术研究了双馈风力发电机的控制策略<sup>[4,5]</sup>。文献[6,7]研究了双馈风力发电机并网和并网后的最大风能捕获控制。文献[8]进行了发电机在不同转速下(亚同步、同步、超同步)的并网研究, 文献中所采用的都是传统的 PI 控制, 但这种控制对系统的参数摄动以及外部扰

动有很强的灵敏性, 而且系统的动态特性也会随着参数的变化而变化。双馈发电机是一种绕线式异步电机, 具有高阶强耦合的特点, 运行中由于磁路饱和及温度变化, 电机参数会发生变化, 这就给依赖电机参数的控制带来困难。文献[9]研究了变速恒频风力发电机组的模糊控制, 该控制策略不需要精确的数学模型即可由微处理器执行控制功能, 但其模糊控制查询表的生成具有一定的主观性。而积分型变结构控制与矢量控制技术结合, 在切换面中引入积分项后, 对参数的摄动具有很好的自适应能力。用 PSCAD 仿真软件对这三种控制策略分别进行了仿真, 结果表明 IVSC 与矢量控制相结合的控制策略具有更快的响应速度。

## 1 电网磁场定向下的双馈电机空载 $m-t$ 数学模型

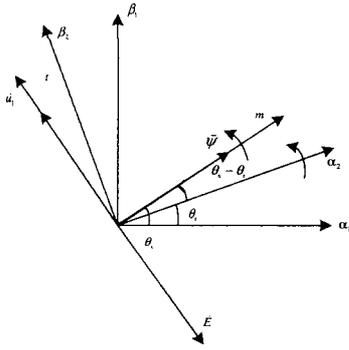


图 1 各坐标系间的关系

Fig.1 Relation of coordinates

坐标系下的空间位置关系如图1所示, 其中  $\alpha_1 - \beta_1$  为两相静止坐标系,  $\alpha_1$  轴取为定子 A 相绕组轴线正方向;  $\alpha_2 - \beta_2$  为以转子速  $\omega_r$  旋转的两相坐标系,  $\alpha_2$  取为转子 a 相绕组轴线正方向。  $\alpha_2$  轴与  $\alpha_1$  轴的夹角为  $\theta_r$ ,  $m$  轴和  $t$  轴为以同步速旋转的磁场和转矩参考轴,  $m$  轴与  $\alpha_1$  轴夹角为  $\theta_s$ 。定转子量正方向均按照电动机惯例。由于在空载下定子的  $m$ - $t$  分量电流为零, 则发电机空载的电压、磁链方程为<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} u_{m1} = P\psi_{m1} - \omega_1\psi_{t1} \\ u_{t1} = P\psi_{t1} + \omega_1\psi_{m1} \\ u_{m2} = R_2 i_{m2} + P\psi_{m2} - \omega_s\psi_{t2} \\ u_{t2} = R_2 i_{t2} + P\psi_{t2} + \omega_s\psi_{m2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{m1} = L_m i_{m2} \\ \psi_{t1} = L_m i_{t2} \\ \psi_{m2} = L_2 i_{m2} \\ \psi_{t2} = L_2 i_{t2} \end{cases} \quad (2)$$

以上各式中,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为定、转子绕组等效电阻;  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_m$  分别为  $m$ 、 $t$  轴定、转子绕组自感及互感;  $i_{m1}$ 、 $i_{t1}$ 、 $i_{m2}$ 、 $i_{t2}$  分别为  $m$ - $t$  轴定、转子电流;  $u_{m1}$ 、 $u_{t1}$ 、 $u_{m2}$ 、 $u_{t2}$  分别为  $m$ - $t$  轴定、转子电压;  $\psi_{m1}$ 、 $\psi_{t1}$ 、 $\psi_{m2}$ 、 $\psi_{t2}$  分别为  $m$ - $t$  轴定、转子磁链;  $\omega_1$ 、 $\omega_s$  分别为同步角速度和滑差角速度;  $P$  为微分算子。

为了达到定子电压的相位、幅值、频率和电网电压一致, 必须根据电网电压的信息来对转子电流进行控制。应用磁场定向矢量控制技术, 通过调节

定子磁链和电网一致来满足并网要求。将  $m$  轴与定子磁链矢量  $\vec{\psi}$  重合 (见图1), 由于大容量发电机在工频下电感远大于电阻, 所以忽略电阻以后, 定子端电压矢量  $\vec{u}$  超前磁链  $\vec{\psi}$  矢量  $90^\circ$ , 此时:

$$\begin{cases} \psi_{m1} = \psi \\ \psi_{t1} = 0 \\ u_{t1} = u \\ u_{m1} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

(3) 代入式 (2) 化简为:

$$\begin{cases} \psi = L_m i_{m2} \\ i_{t2} = 0 \\ \psi_{m2} = L_2 i_{m2} \\ \psi_{t2} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

将 (3)、(4) 代入式 (1) 化简得:

$$\begin{cases} P\psi = 0 \\ u = \omega_1\psi \\ u_{m2} = (R_2 + L_2P)i_{m2} \\ u_{t2} = \omega_s L_2 i_{m2} \end{cases} \quad (5)$$

上式是在理想磁场定向情况下导出的公式。考虑到实际并网调节动态中磁场定向的误差,  $i_{t2}$  可能不为零, 此时转子电压应修正为:

$$\begin{cases} u_{m2} = u_{m2}' + \Delta u_{m2} \\ u_{t2} = u_{t2}' + \Delta u_{t2} \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} u_{m2}' = (R_2 + L_2P)i_{m2}, \Delta u_{m2} = -\omega_s L_2 i_{t2} \\ u_{t2}' = (R_2 + L_2P)i_{t2}, \Delta u_{t2} = \omega_s L_2 i_{m2} \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $u_{m2}'$ 、 $u_{t2}'$  为分别与  $i_{m2}$ 、 $i_{t2}$  具有一阶微分关系的电压分量;  $\Delta u_{m2}$ 、 $\Delta u_{t2}$  为消除转子电压、电流交叉耦合的补偿项。通过前馈补偿可以实现转子电流  $i_{m2}$ 、 $i_{t2}$  的解耦控制。由式(3)~(7)可知变速恒频双馈风力发电机空载并网控制策略, 并网控制依据检测的电网电压, 计算出转子电流参考值后对其进行闭环控制。电机参数变化引起的电压偏差, 由电压偏差控制进行调整。系统的控制框图如图 2 所示: 图中 FC 模块完成的功能与虚线所示功能相同即模糊控制模块; 如将模糊控制模块换成传统 PI 控制及变结构控制模

块就相应的转化成了不同的控制策略。

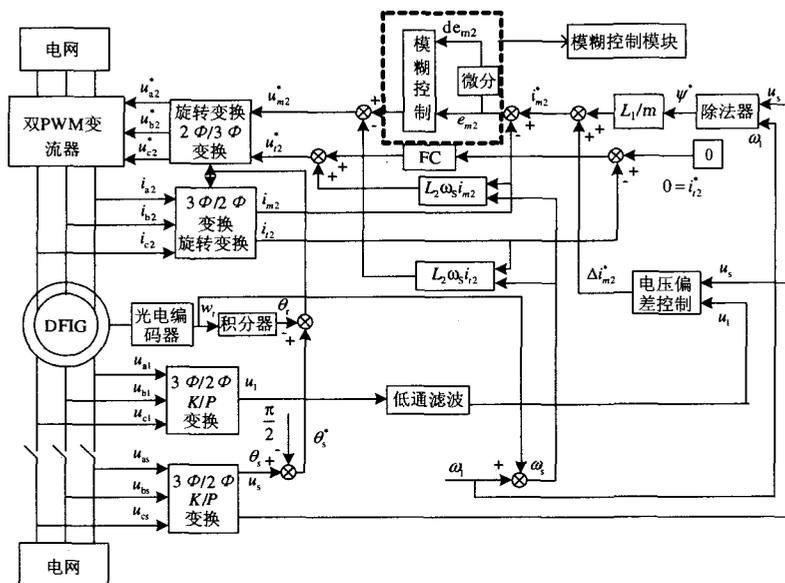


图2 系统的控制框图

Fig.2 System control strategy

如表 1。

## 2 变结构控制及模糊控制设计

风力发电系统本质上是一种非线性控制系统,其非线性即系统随时可以发生变化。而变结构控制及模糊控制都具有较强的鲁棒性,变结构控制设计详见文献[12],模糊控制其具体理论详见文献[13],模糊控制器的设计具体如下,首先根据式(7)中转子  $m$ - $t$  轴电流的微分方程建立其偏差的微分方程,引入偏差变量:  $e_m = i_{m2}^* - i_{m2}$ ,  $e_t = i_{t2}^* - i_{t2}$ , 其中  $i_{m2}^*$ ,  $i_{t2}^*$  为给定的控制目标, 则:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_m \\ e_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_2}{L_2} & 0 \\ 0 & \frac{R_2}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{m2}^* - e_m \\ i_{t2}^* - e_t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{m2} \\ u_{t2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{m2}^* \\ i_{t2}^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

采用电流误差  $E$  以及电流误差变化率  $E_C$  为模糊控制器的被控量,以  $i_{m2}^*$ ,  $i_{t2}^*$  的变化量为控制量的控制方案。把误差  $E$  的论域量化 13 档, 即  $\{-6, -5, -4, -3, -2, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ;

误差变量的模糊子集选取如下:

$\{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}$ ;

将误差变化  $E_C$  的论域量化以及模糊子集的选择与  $E$  的相同。限于篇幅, 本文只列出模糊控制查询表,

表 1 模糊控制查询表

Tab.1 Fuzzy control polling list

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
	u												
-6	7	6	5	4	4	3	3	1	4	3	0	0	0
-5	6	4	3	3	2	2	3	1	4	1	0	0	0
-4	5	6	4	3	3	2	3	1	2	3	0	0	0
-3	7	4	4	3	2	1	1	1	2	4	-1	0	0
-2	4	4	3	3	2	1	1	1	0	0	-2	-3	-3
-1	4	4	4	3	3	1	0	0	-1	-1	-2	-2	-3
0	3	3	3	2	2	2	1	1	0	0	-1	-1	-1
1	2	2	2	2	2	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-3
2	2	2	2	1	1	0	0	0	-1	-2	-2	-3	-3
3	2	2	2	0	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-3	-4
4	1	1	0	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-4
5	0	0	0	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-5
6	0	0	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-6	-7

## 3 系统仿真分析

用电力系统仿真软件 PSCAD 对该控制策略进行了仿真, 所用双馈电机参数 (折算到定子侧) 如下: 额定功率为 3 kW, 额定电压 380 V, 定子电阻  $R_1 = 1.92 \Omega$ , 转子电阻  $R_2 = 2.57 \Omega$ , 互感  $L_m = 0.234$  H, 定子漏感  $L_\sigma = 0.011$  H, 转子漏感  $L_\sigma = 0.011$  H。

在恒转矩下分别采用模糊控制、PI 控制及变结构与矢量控制相结合的控制策略进行仿真。定子电

压动态过程波形见图 3 所示。带两个修正因子的模糊控制的响应速度很快,几乎无超调。在一个半周波就能满足并网条件。与之相比,一般的模糊控制动态响应性能相对弱些。而 PI 控制响应速度与前者相比相对缓慢。需要 3 个周波才能满足并网条件。要提高响应速度,就会产生很大的超调,而且会影响到系统的稳定性。但 IVSC 与前两者相比,响应速度更快,而且能够有效的降低了定子电压的谐波畸变率。

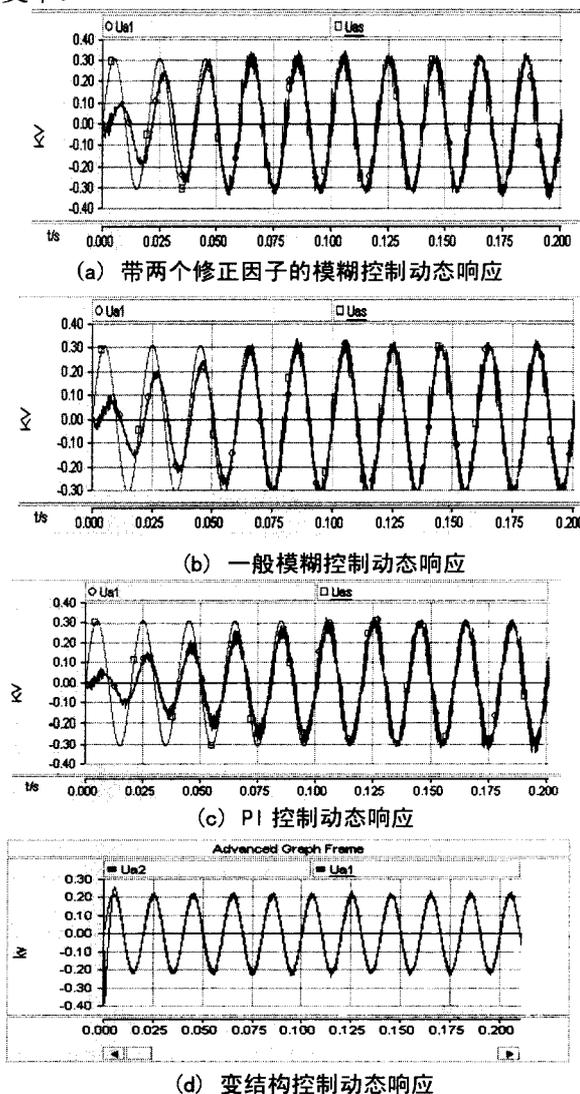


图 3 模糊控制、PI 控制以及变结构控制动态响应的比较

Fig.3 Comparison between fuzzy control, PI control and IVSC dynamic response curve

#### 4 结论

在变速恒频双馈风力发电机的并网调节中,根据交流电机矢量控制和磁场定向原理,分别采用传

统 PI、模糊控制以及变结构控制对双馈风力发电机空载并网控制,通过仿真验证了积分型变结构控制(IVSC)分别与矢量控制相结合的控制策略具有更优良的动态性能。

#### 参考文献

- [1] 叶杭冶. 风力发电系统控制技术[M]. 北京: 机工业出版社, 1998.  
YE Hang-zhi. The Control of Wind Power Generating System[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] Tang Y, Xu L. A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System[J]. IEEE Trans on Power Electron, 1995,(10):472-478.
- [3] 伍小杰, 柴建云, 王祥珩. 变速恒频双馈风力发电系统交流励磁综述[J]. 电力系统自动化, 2004,28(23):92-96.  
WU Xiao-jie, CHAI Jian-yun, WANG Xiang-heng. Overview of AC Excitation for Variable Speed Constant Frequency Double-fed Wind Power Generator Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(23):92-96.
- [4] 贺益康, 郑康, 潘再平, 等. 交流励磁变速恒频风电系统运行研究[J]. 电力系统自动化, 2004,28(13):55-59.  
HE Yi-kang, ZHENG Kang, PAN Zai-ping, et al. Investigation on an AC Excited Variable-Speed Constant-frequency Wind-power Generation System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13):55-59.
- [5] 胡家兵, 孙丹, 贺益康. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8):21-26.  
HU Jia-bing, SUN Dan, HE Yi-kang. Modeling and Control of DFIG Wind Generation System Under Grid Voltage Dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(8):21-26.
- [6] 刘其辉, 贺康益, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11.  
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, BIAN Song-jiang. Study on the No-load Cutting-in Control of the Variable-speed Constant-frequency(VSCF) Wind-power Generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11.
- [7] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统自动化, 2003,27(20):62-67.

(下转第 18 页 continued on page 18)

- Application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (2): 11-16.
- [3] 马幼婕, 王新志, 刘昂, 等. 混杂动态系统及其在电力系统中的应用[J]. 天津师范大学学报, 2006, 26 (4): 69-73.
- MA You-jie, WANG Xin-zhi, LIU Ang, et al. Hybrid Dynamic System and Its Application in Power Systems[J]. Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition), 2006, 26(4):69-73.
- [4] 颜钢锋, 全庆胎, 赵光宙. 含有微分代数子系统的混杂系统稳定性研究[J]. 浙江大学学报, 2004, 38(10): 1293-1297, 1379.
- YAN Gang-feng, TONG Qing-yi, ZHAO Guang-zhou. Study on Stability of Hybrid Systems Composed of Differential-algebraic Subsystems[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(10): 1293-1297, 1379.
- [5] Ye H, Michel A N, Hou L. Stability Theory of Hybrid Dynamical Systems[J]. IEEE Trans on Automat Contr, 1998, 43(40):461-474.
- [6] ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, SONG Wei, et al. Multiple Lyapunov Functions Analysis of Hybrid Power Systems with Discrete Event Actions. PowerCon2002[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2002. 2026-2029.
- [7] CHEN Luo-nan, Aihara K. Bifurcation Analysis of Hybrid Dynamical Systems[A]. In: IEEE Proc Int Conference on Systems[C]. Geneva(Switzerland):2000. 228-231.
- [8] 张聚. 混杂系统理论及其在非线形系统中的应用研究(博士学位论文)[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- ZHANG Ju. Hybrid Systems and Its Application in Nonlinear Control Systems, Doctoral Dissertation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [9] Bemporad A, Morari M. Control of Systems Integrating Logic, Dynamics and Constraints[J]. Automatic, 1999, 35(3): 407-427.
- [10] 陆启韶. 分叉与奇异性[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1995.
- [11] 彭志炜, 胡国根, 韩帧祥. 基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [12] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.
- 
- 收稿日期: 2007-09-14; 修回日期: 2007-12-11
- 作者简介:
- 刘凯(1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与稳定; E-mail: gz\_liukai@yahoo.com.cn
- 彭志炜(1958-), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统运行与稳定, 电力系统电压稳定;
- 黄忠(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场。
- 
- (上接第 14 页 continued from page 14)
- LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHAO Ren-de. The Maximal Wind-energy Tracing Control of a Variable-speed Constant-frequency Wind-Power Generation System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20):62-67.
- [8] 刘其辉, 贺康益, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机并网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 50-55.
- LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHANG Jian-hua. Grid Connection Control Strategy of AC-excited Variable-speed Constant-frequency Wind Power Generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3):50-55.
- [9] 程静, 王维庆, 岳雷. 变速恒频风力发电机组的模糊控制[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2004, 21(1): 56-59.
- CHENG Jing, WANG Wei-qing, YUE Lei. Fuzzy Control of the Variable Speed Pitch Regulated Generator [J]. Xinjiang University Solaris Sinica, 2004, 21(1):56-59.
- [10] 赵栋利, 许洪华, 赵斌, 等. 变速恒频风力双馈发电机并网电压控制研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 587-591.
- ZHAO Dong-li, XU Hong-hua, ZHAO Bin, et al. Study on the Cut-in Voltage Control of a Variable-speed Constant-frequency Doubly-fed Induction Generator[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 25(5): 587-591.
- [11] Chung Se-Kyo, Lee Jung-Hoon, et al. Current Control of voltage-fed PWM invert for AC Machine Drives Using Integral Variable Structure Control[J]. IEEE, 1995.
- [12] 于文波, 童建东, 刘成斌, 等. 变速恒频双馈风力发电机空载并网滑模控制[J]. 沈阳工程学院学报, 2007, 3(1): 10-12.
- [13] 康小亲. 模糊控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- KANG Xiao-qin. Fuzzy Control Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- 
- 收稿日期: 2007-09-11; 修回日期: 2008-01-10
- 作者简介:
- 兰华(1956-), 女, 教授, 主要从事信号处理及理论电工的研究工作;
- 刘座铭(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统控制与风力发电技术. E-mail: lzmhero\_@126.com