

模糊前馈与模糊 PID 结合的 风力发电机组变桨距控制

郭鹏

(华北电力大学自动化系, 北京市 昌平区 102206)

Variable Pitch Control of Wind Turbine Generator Combined With Fuzzy Feed Forward and Fuzzy PID Controller

Guo Peng

(Department of Automation, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Large-scale variable pitch wind turbine generator usually uses the PID controller to maintain the output power unchanged above the rated wind speed. One set of PID parameters can hardly achieve satisfactory control performance because the range between rated wind speed and cut out wind speed is very large. This paper firstly analyzed the shortcomings of PID controller, then a new pitch control method combined with fuzzy feed forward and fuzzy PID controller was proposed. The fuzzy PID controller can produce a better control result than PID controller. With the analysis of the aerodynamic characteristics of the blade, the fuzzy feed forward controller can give different feed forward pitch angles according to wind speed at different wind speed range. The feed forward controller has achieved the dynamic feed forward compensation and improved the rapidness of control system. With the simulation of a 300 kW wind turbine generator at different wind speed, the new pitch control strategy can effectively reduce system's overshoot and regulation time, and has a satisfactory control performance.

KEY WORDS: variable pitch control system; fuzzy PID controller; fuzzy feed forward controller; aerodynamic characteristic

摘要: 大型变桨距风电机组在额定风速以上通常采用 PID 控制器调节机组桨距角以达到功率恒定的目的,但由于从额定风速到切出风速之间的风速变化范围很大,一组固定的 PID 参数难以在不同风速下均有好的控制效果。该文在分析 PID 变桨距控制器缺点的基础上,提出模糊前馈与模糊 PID 结合的新型变桨距控制方法。模糊 PID 控制器能够保证在

不同风速下均有较好的控制结果,而模糊前馈控制器则能够根据风电机组的桨叶气动特性,在额定风速以上的不同风速段,根据风速给出不同的适当的前馈桨距角,实现动态前馈补偿,提高控制系统的响应速度。对一个 300 kW 的变桨距风电机组的仿真表明,该方法在额定风速以上的不同风速段都能够有效地减小系统的超调量,缩短调节时间,具有较为满意的控制效果。

关键词: 变桨距控制系统; 模糊 PID 控制器; 模糊前馈控制器; 气动特性

0 引言

大型变桨距风电机组在额定风速以上通常采用变桨距控制方式,通过调整桨叶桨距角,改变气流对叶片的攻角,从而改变风电机组获得的空气动力转矩,使机组输出功率保持稳定^[1-7]。在此工况下风速成为外部扰动。由于风电机组具有强非线性和较大的转动惯量,导致变桨距系统控制困难。目前国内风电机组大多采用 PID 控制器完成变桨距控制。但由于风速变化的随机性和风电机组的强非线性, PID 控制算法并不能取得令人满意的效果。文献[8]提出模糊 PID 控制方法,将模糊控制与 PID 控制器相结合。不管是单纯 PID 控制还是模糊 PID 控制^[9-11],它们都是反馈控制方法,只有当机组实际功率与功率设定值出现偏差时,控制器才会开始调节。变桨系统的惯性和延迟,造成控制过程动态调节时间长,超调量大。在风电场中,风速可以通过风速计进行测量。本文在模糊 PID 控制的基础上,提出基于风速的模糊前馈方法。当在额定风速以上发生风速变化时,利用模糊推理,给出合适的桨距

角前馈值,与模糊PID控制器的输出相加作为桨距角变化的设定值。仿真表明,新方法能够有效缩短调节时间,减小系统超调量,具有较好的控制效果。

1 变桨距风电机组建模

1.1 风轮模型

当自然风以风速 v (m/s)轴向流过风轮时,风轮从风能中捕获的功率和气动转矩为:

$$P_r = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

$$T_r = \frac{1}{2} C_T(\beta, \lambda) \rho \pi R^3 v^2 \quad (2)$$

式中: P_r 为风轮吸收功率; T_r 为风轮的气动转矩; ρ 为空气密度; C_p 为风能利用系数, C_T 为气动转矩系数, $C_p(\beta, \lambda) = \lambda C_T(\beta, \lambda)$; β 为桨距角; R 为风轮半径; λ 为叶尖速比。风能利用系数 C_p 代表了风轮从风能中吸收功率的能力,是叶尖速比 λ 和桨距角 β 的高阶非线性函数,本文采用以下公式计算:

$$\begin{cases} C_p(\beta, \lambda) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(-\frac{12.5}{\lambda_1}\right) \\ \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 传动系统模型

对于非直驱式风电机组,靠近风轮的低速轴的动力方程为

$$J_r \frac{d\omega}{dt} = T_r - T_D - \gamma T_m \quad (4)$$

式中: J_r 为风轮转动惯量; ω 为风轮转速; T_D 为系统阻力矩,假定集中于低速轴一侧, $T_D = c_1 + c_2/\omega + c_3\omega$, c_1 , c_2 , c_3 为常数; T_m 为高速轴传递给齿轮箱的转矩; γ 为齿轮箱增速比, $\gamma = \omega_g/\omega$, ω_g 为发电机转速。

在靠近发电机的高速轴侧,忽略发电机自身的机械阻力矩:

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_m - T_c \quad (5)$$

式中: J_g 为异步发电机的转动惯量; T_c 为发电机电磁转矩。

将式(5)代入式(4),可得风电机组的传动系统方程为

$$(J_r + \gamma^2 J_g) \frac{d\omega}{dt} = T_r - T_D - \gamma T_c \quad (6)$$

1.3 异步发电机系统模型

假定所讨论的发电机为理想电机,忽略铁磁饱

和、磁滞、定子和转子齿槽及涡流等影响。定子三相绕组对称,每相均在气隙中产生正弦形分布的磁通势及磁密。转子为对称的多相绕组,每相均在气隙中产生正弦形分布的磁通势及磁密,则发电机的模型可简化为

$$\begin{cases} T_c = \frac{g m_1 U_1^2 r_2'}{(g m_g - \omega_1) [(r_1 - \frac{C_1 r_2' \omega_1}{g \omega_g - \omega_1})^2 + (x_1 + C_1 x_2')^2]} \\ P = T_c \omega_g \end{cases} \quad (7)$$

式中: g 为发电机极对数; m_1 为相数; U_1 为电网电压; C_1 为修正系数; ω_1 为发电机同步转速; r_1 , x_1 分别为定子绕组的电阻和电抗; r_2' , x_2' 分别为归算后转子绕组的电阻和电抗。

1.4 变桨系统模型

目前,大型风电机组的变桨系统大多采用液压驱动系统。考虑到液压系统的时滞特性,变桨系统可以用带有迟延的一阶惯性环节来模拟,传递函数可表示为

$$\frac{\beta(s)}{\beta_r(s)} = \frac{1}{T_\beta s + 1} \exp(-\tau s) \quad (8)$$

式中: T_β 为时间常数; β_r 为桨距角设定值; τ 为迟延时间。

2 控制系统设计

2.1 传统 PID 变桨距控制器分析

风电机组并网运行后,如果风速高于额定风速,变桨距系统会增大桨距角,使桨叶吸收的风能减小,维持额定功率;反之,减小桨距角,使风轮吸收能量增加。通过变桨距控制,维持风电机组在额定功率下运行。目前,额定风速以上桨距角的控制通常采用 PID 控制器。虽然 PID 控制器在较大的风速变化范围内能够完成控制任务,但效果并不十分理想,原因如下。

1) 风电机组在额定风速以上运行时,其特性呈现很强的非线性。由式(1)可知风电机组吸收的风能与风速的三次方成正比,将式(3)代入式(1),得

$$\begin{cases} P_r = \frac{1}{2} \times 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(-\frac{12.5}{\lambda_1}\right) \rho \pi R^2 v^3 \\ \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可以看出,对于变桨距控制系统,控制器输出桨距角设定值 β 与风轮吸收功率 P_r 之间呈现很强的非线性。桨距角的单位变化对功率的影响在不同

风速下有很大差别。一组整定好的PID参数在额定风速附近的风速下控制效果可能很好，但当风速增加到切出风速附近时，控制效果会变得很差。

2) PID 控制器属于反馈控制器，只有当偏差出现时，控制才会起作用。对于变桨距系统，其特性存在一定的惯性和迟延，因此不可避免地造成较大的超调和较长的调节时间，使机组输出功率波动过大，给电网造成较大的冲击。

本文针对传统 PID 变桨距控制的上述缺点，提出模糊前馈与模糊 PID 结合的新型变桨距控制方法，控制系统结构如图 1 所示。

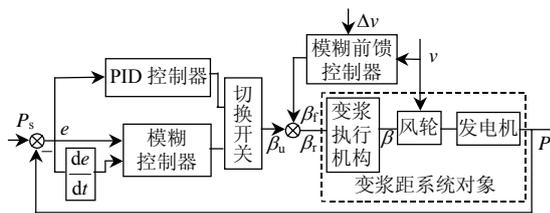


图 1 新型变桨距控制系统框图

Fig. 1 Structure of the new pitch control strategy

2.2 模糊 PID 控制器设计

模糊控制鲁棒性好，抗干扰能力强，对复杂对象或难以建立精确数学模型的对象具有很好的控制效果^[12-15]。但模糊控制器自身消除系统稳态误差的性能较差，难以达到较高的控制精度，在控制点附近会出现盲区和死区。模糊PID控制器是模糊控制与PID控制器的结合，在较大偏差范围内利用模糊推理的方法给出控制量，达到快速稳定的调节；而在小偏差范围内切换为PID控制，从而实现稳态误差的消除。两者的转换根据事先给定的偏差阈值自动实现^[16]。模糊PID控制器可以较好地克服上文指出的PID控制器的缺点 1)。当模糊控制器规则建立后，只需一组PID参数即可达到较好的控制效果。仿真表明，由于模糊PID控制器中的PID控制器主要作用是消除稳态误差，其参数整定应适当小。

模糊控制器的输入有 2 个，即功率误差和误差的变化率。输出为增量型桨距角设定值 β_u 。本文所讨论的风电机组的额定功率为 300 kW。由于实际控制或仿真的周期都较短，取功率误差和误差变化率的基本论域为 $[-2 \times 10^5 \text{ W}, 2 \times 10^5 \text{ W}]$ ，取输出量的基本论域为 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 。在为输入输出变量确定了合理的量化因子和比例因子后，控制器的输入和输出的模糊论域均为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ，模糊子集为： $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ 。为保证额定风速以上功率控制的平稳性，隶属函数采用平

滑的高斯型隶属函数。根据功率调节的要求，确定功率模糊控制规则如表 1。

表 1 模糊控制器规则表
Tab. 1 Rules of fuzzy controller

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	ZO
NM	PM	PM	PM	PS	PS	ZO	ZO
NS	PM	PS	PS	PS	ZO	ZO	ZO
ZO	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NS
PS	ZO	ZO	ZO	NS	NS	NS	NM
PM	ZO	ZO	NS	NS	NM	NM	NM
PB	ZO	ZO	NS	NM	NB	NB	NB

2.3 模糊前馈控制器设计

在风电场中，风速可以通过机舱顶部的风速计测量得到。尽管所测风速与实际风速有差别，但一般相差不大。测量风速对风电机组的启停和运行都有着重要作用。变桨距控制系统的目的就是在风速变化的情况下随时保证输出功率的恒定。风电机组运行在额定风速以上时，风速是一个可测的外部扰动。如图 1 所示，模糊前馈控制器的作用就是根据风速给出合适的桨距角前馈值 β_f ，与模糊PID控制器的输出 β_u 相加，作为变桨距系统的桨距角设定值 β_r 。当风速增大时，模糊前馈控制器输出为正，及时增大桨距角设定值，使桨距角增大，减小风轮吸收的风能；反之，模糊前馈控制器输出为负，使风轮吸收的能量增大，从而维持额定风速以上的功率恒定。前馈控制器的快速补偿作用^[17-19]，可以有效克服上文中指出的PID控制器调节滞后的缺点 2)。

根据风轮的叶片特性，高风速时风轮的气动转矩对桨距角的灵敏度远高于低风速时^[20]。因此，当风速在额定风速附近时，较小的风速变化也需要桨距角改变一个较大的角度才能使输出功率恒定。而在超出额定风速较多的高风速段或切出风速附近，较大的风速变化只需要一个较小的桨距角改变就可以使输出功率稳定。即发生相同的风速变化 Δv ，在额定风速附近和在高风速段，需要的桨距角改变是不同的。前者要求很大，一般需要 10° 左右，而后者只需要 1° 左右。

根据变桨距系统的上述特性，模糊前馈控制器有 2 个输入量，一个输出量。

输入 1：上一控制时刻的风速 $v(k-1)$ ，作为前馈桨距角 β_f 变化速率的依据。当发生相同的风速变化 Δv 时，如果 $v(k-1)$ 在额定风速附近，模糊前馈控制器会输出较大的 β_f ；反之，如果 $v(k-1)$ 在切

出风速附近，输出的 β_f 很小。

输入 2: 当前时刻风速与上一时刻风速的差值，即风速增量 $\Delta v = v(k) - v(k-1)$ ，决定前馈桨距角 β_f 变化的大小。

输出: 前馈参考桨距角增量 β_f 。

本文研究的风电机组对象的额定风速为 12 m/s，切出风速是 25 m/s。模糊前馈控制器的输入 1，即风速 $v(k-1)$ 的基本论域为 [12 m/s, 25 m/s]，模糊论域为 {1,2,3,4,5}。对应的模糊子集有 5 个: 稍高(little high)、较高(relatively high)、高(high)、很高(very high)、非常高(extremely high)，对应简写为 {LH,RH,H,VH,EH}。

由于风电场中风速的采样时间很短，一般为 10 s，因此 2 次采样间的风速变化一般不会超过 ± 3 m/s。所以模糊前馈控制器的输入 2，即风速增量 Δv 的基本论域为 [-3 m/s, 3 m/s]，其对应的模糊论域为 {-3,-2,-1,0,1,2,3}，模糊子集为 {NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB}。

对本文研究的风电机组，在风速变化最大为 ± 3 m/s 时，桨距角的最大增量变化范围为 [-13°, 13°]。为达到较精确的前馈效果，模糊前馈控制器输出量的模糊论域和模糊子集分别为: {-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6} 和 {NB2,NB1,NM2,NM1,NS2,NS1,ZO,PS1,PS2,PM1,PM2,PB1,PB2}。模糊前馈控制器的输入输出隶属度函数都采用简单的三角隶属函数，去模糊化方法采用重心法。

根据前面描述的不同风速下的风速增量所对应的前馈桨距角输出的关系，给出模糊前馈控制器的控制规则如表 2 所示。

表 2 模糊前馈控制器规则表
Tab. 2 Rules of fuzzy feed forward controller

Δv	v				
	LH	RH	H	VH	EH
NB	NB2	NB1	NM2	NM1	NS2
NM	NB1	NM2	NM1	NS2	NS1
NS	NM1	NS2	NS1	NS1	NS1
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	PM1	PS2	PS1	PS1	PS1
PM	PB1	PM1	PS2	PS2	PS1
PB	PB2	PM2	PM1	PS2	PS2

表 2 的模糊规则充分反映了桨叶在不同风速下的气动特性，即在不同风速下对于相同的风速增量，模糊前馈控制器给出的前馈桨距角 β_f 差别很大。现从表 2 中选取以下 2 条规则加以说明。

规则 1: IF v is LH and Δv is PB, THEN β_f is

PB2;

规则 2: IF v is EH and Δv is PB, THEN β_f is PS2;

规则 1 解释为: 当风速在额定风速附近(LH)且风速增量接近 3 m/s(PB)时，模糊前馈控制器给出的前馈桨距角增量 β_f 为最大(PB2)，接近 13°;

规则 2 解释为: 在切出风速附近(EH)，风速发生同样变化 3 m/s(PB)，模糊前馈控制器给出的前馈桨距角 β_f 只有大约 3°(PS2)。

3 仿真

本文研究的风电机组的参数为: 风轮半径 $R = 15$ m，额定风速 $v_e = 12$ m/s，切出风速 $v_{out} = 25$ m/s，空气密度 $\rho = 1.25$ kg/m³；变桨系统的时间常数 $T_\beta = 0.2$ ，迟延时间 $\tau = 0.3$ s。风轮和发电机的转动惯量分别为: $J_r = 3.5 \times 10^5$ kg·m²， $J_g = 32$ kg·m²，齿轮箱的传动比 $\gamma = 28.78$ ；发电机额定功率 $P_e = 300$ kW，额定转速 $n_e = 1554$ r/min，极对数 $g = 2$ ，电网电压 $U_1 = 220$ V， $r_1 = 0.0208$ Ω ， $x_1 = 0.0132$ Ω ， $r_2' = 0.01525$ Ω ， $x_2' = 0.0425$ Ω 。

1) 在额定风速附近风速变化的工况。假定在 10 s 时，风速由 12 m/s 变化为 15 m/s，在 17.5 s 时，风速由 15 m/s 变化为 17 m/s。仿真结果如图 2 所示。实线为传统 PID 控制器的仿真结果，虚线为模糊前馈与模糊 PID 控制器结合的新型控制器的控制结果。10 s 时，模糊前馈控制器的前馈桨距角输出为 12.3°；17.5 s 时，前馈桨距角输出为 6°。在新型控制器调节下，风电机组输出功率的超调量大大减

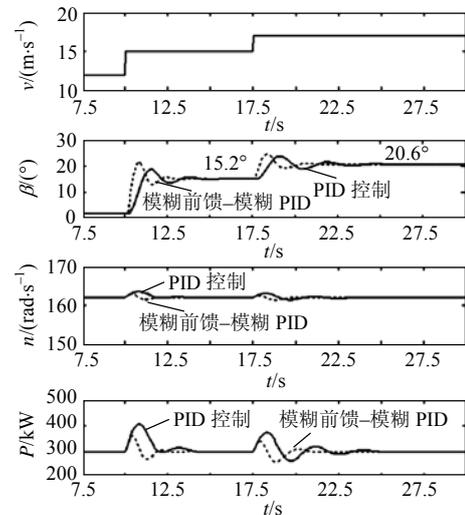


图 2 额定风速附近仿真结果
Fig. 2 Simulation near the rated wind speed

小, 调节时间也有明显缩短, 减小了对电网的冲击作用。

2) 接近切出风速的工况。假定在 10s 时, 风速由 20 m/s 变为 23 m/s; 在 17.5 s 时, 风速由 23 m/s 变为 25 m/s。仿真结果如图 3 所示。图中实线为传统 PID 控制器的仿真结果, 虚线为本文方法的仿真结果。由图 3 可见, 在接近切出风速的高风速阶段, 新型控制器同样具有较好的控制效果。在 10 s 时, 前馈控制器输出为 4° ; 在 17.5 s 时, 前馈控制器输出为 1.5° 。

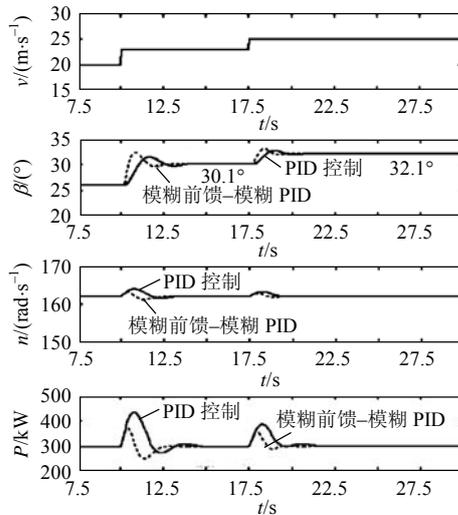


图 3 切出风速附近仿真结果

Fig. 3 Simulation near the cutout wind speed

4 结论

由于风电机组的强非线性和时滞特性, 传统的 PID 变桨距调节系统在额定风速以上难以达到满意的控制结果。本文将模糊控制引入变桨距控制系统中, 分别设计了模糊 PID 控制器和模糊前馈控制器。模糊 PID 控制器能够解决传统 PID 控制器参数整定困难的问题。而模糊前馈控制器则能够根据风电机组的气动特性, 在额定风速附近和高风速附近分别给出不同的适当的前馈桨距角增量, 实现快速补偿的目的。对 300 kW 风电机组的仿真表明, 2 个模糊控制器配合使用, 取得了比较满意的控制效果。

参考文献

[1] Horiuchi N, Kawahito T. Torque and power limitations of variable speed wind turbines using pitch control and generator power control[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, 2001.

[2] Bianchi F D, Mantz R J, Christiansen C F. Gain scheduling control of variable speed wind energy conversion systems using quasi-LPV models[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(2): 247-255.

[3] 夏长亮, 宋战锋. 变速恒频风力发电系统变桨距自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 91-95.
Xia Changliang, Song Zhanfeng. Pitch control of variable speed constant frequency wind turbines based on active disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 91-95(in Chinese).

[4] 林勇刚, 李伟, 崔宝玲. 基于 SVR 风力机变桨距双模型切换预测控制[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 101-106.
Lin Yonggang, Li Wei, Cui Baoling. Two model switched predictive pitch control for wind turbine based on support vector regression [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(8): 101-106(in Chinese).

[5] 郭庆鼎, 赵麟, 郭洪澈. IMW 变速变距风力发电机的滑模变结构鲁棒控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27(2): 171-174.
Guo Qingding, Zhao Lin, Guo Hongche. Sliding mode variable structure control for a 1MW variable-speed adjustable-pitch wind energy conversion system[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2005, 27(2): 171-174(in Chinese).

[6] 耿华, 杨耕. 变速变桨距风电系统的功率水平控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 130-137.
Geng Hua, Yang Geng. Output power level control of variable-speed variable-pitch wind generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 130-137(in Chinese).

[7] 张雷, 李海东, 李建林, 等. 基于 LQR 方法的风电机组变桨距控制的动态建模与仿真分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(7): 781-785.
Zhang Lei, Li Haidong, Li Jianlin, et al. Dynamic modeling and simulation of pitch control strategy for wind turbines based on LQR method[J]. Acta Energlae Solaris Sinica, 2008, 29(7): 781-785(in Chinese).

[8] 姚兴佳, 温和熙, 邓英. 变速恒频风力发电系统变桨距智能控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(2): 159-162.
Yao Xingjia, Wen Hexu, Deng Ying. Adjustable pitch intelligent control of variable speed constant frequency wind generation system [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, 30(2): 159-162(in Chinese).

[9] 王江. 带增益调度的风力发电变桨距控制研究[J]. 电器时代, 2009, 15(2): 52-53.
Wang Jiang. New control method of variable pitch system with variable gain PID controller[J]. Electric Area, 2009, 15(2): 52-53(in Chinese).

[10] Senjyu T, Sakamoto R, Urasaki N, et al. Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 467-475.

[11] Chen W L, Hsu Y Y. Controller design for an induction generator driven by a variable-speed wind turbine[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(3): 625-635.

[12] 高文远, 祝振敏, 井明波, 等. 风电机组变桨距系统神经网络模糊自适应控制[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(4): 533-536.
Gao Wenyan, Zhu Zhenmin, Jing Mingbo, et al. Adaptive fuzzy control based on the neural network for the wind turbines variable pitch system[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(4): 533-536(in Chinese).

[13] Petru T, Thiringer T. Modeling of wind turbines for power system studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4):

- 1132-1139.
- [14] 张纯明, 姚兴佳, 张忠丛, 等. 模型参考自适应电动变桨距控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 148-150.
Zhang Cunming, Yao Xingjia, Zhang Zhongcong, et al. A model reference adaptive blade-pitch control for a wind generator system[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(1): 148-150(in Chinese).
- [15] 张新房, 徐大平, 吕跃刚, 等. 大型变速风力发电机组的自适应模糊控制[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(3): 573-577.
Zhang Xinfang, Xu Daping, Lü Yuegang, et al. Adaptive fuzzy control for large-scale variable speed wind turbines[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(3): 573-577(in Chinese).
- [16] 牛志刚, 张建民. 应用于直线电机的平滑切换模糊 PID 控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 132-136.
Niu Zhigang, Zhang Jianmin. Method of smooth-switch fuzzy PID for linear motor control[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 132-136(in Chinese).
- [17] 湛腾西, 张国云, 胡文静. 基于前馈补偿和模糊 PID 的提馏段温度串级控制系统[J]. 炼油技术与工程, 2008, 38(11): 47-50.
Zhan Tengxi, Zhang Guoyun, Hu Wenjing. Cascade temperature control system for stripping section based on fuzzy-PID and feed-forward compensation[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2008, 38(11): 47-50(in Chinese).
- [18] 段黎明, 周艳君, 石红武. 注汽锅炉蒸汽干度的模糊前馈-反馈控制[J]. 仪器与仪表学报, 2006, 27(7): 720-724.
Duan Liming, Zhou Yanjun, Shi Hongwu. Fuzzy feed forward feedback control of steam injection boiler dryness fraction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(7): 720-724(in Chinese).
- [19] 王玉惠, 吴庆宪, 姜长生. 基于模糊前馈的空天飞行器再入姿态的模糊鲁棒跟踪控制[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 150-155.
Wang Yuhui, Wu Qingxian, Jiang Changsheng. Fuzzy robust tracking control for aerospace vehicle's reentry attitude based on fuzzy feed forward[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 150-155(in Chinese).
- [20] 叶杭冶, 潘东浩. 风电机组变速与变桨距控制过程中的动力学问题研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(12): 1321-1328.
Ye Hangye, Pan Donghao. Dynamic analysis of variable speed and pitch controlled wind turbines[J]. Acta Energlae Solaris Sinica, 2007, 28(12): 1321-1328(in Chinese).



郭鹏

收稿日期: 2009-08-17。

作者简介:

郭鹏(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为大型风电机组控制技术, huadiangp@163.com。

(责任编辑 车德竞)

关于中国电机工程学会第十一届青年学术会议的征文通知

中国电机工程学会第十一届青年学术会议将于 2010 年 8 月下旬在清华大学召开, 会议由中国电机工程学会主办, 清华大学承办。

中国电机工程学会第十一届青年学术会议以“低碳时代的电力技术”为主题, 广泛邀请电力工程各个专业领域的青年科技人员参加, 交流青年科技人员的最新研究成果, 发现和培养优秀青年科技人才。

会议征稿范围: 1) 电厂动力工程; 2) 电网规划、运行、保护、控制技术; 3) 输配电及其装备技术; 4) 电力信息及自动化技术; 5) 新能源发电技术; 6) 节电节能技术; 7) 电力企业经营管理与电力市场; 8) 环境友好的电力技术。应征论文第一作者的年龄原则上应在 40 周岁以下。

投稿论文经过评审后, 由会议组委会正式通知作者。会议将出版论文光盘, 评选优秀论文并推荐到国内核心期刊发表。

会议期间代表交通食宿自理。

征文截止日期: 2010 年 6 月 15 日

论文必须通过网上在线提交,

网址: <http://www.csee-conference.org/qnxshy11/> 或 <http://www.eea.tsinghua.edu.cn/>

联系人:

清华大学:

董嘉佳

电话: 010-62782138

传真: 010-62783057

中国电机工程学会:

王春莉

电话: 010-63416712

传真: 010-63414319