

风电机组非线性前馈与模糊 PID 结合变桨距控制研究

郭 鹏

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘 要: 针对风电机组的强非线性和时滞特性, 提出将非线性前馈与模糊 PID 结合的新型变桨距控制方法, 以克服传统 PID 变桨距调节系统在额定风速以上难以达到满意效果的缺点. 根据桨叶的气动特性, 采用数值计算和多项式曲线拟合的方法得到桨距角与风速的非线性模型, 并以该模型为基础设计了非线性前馈控制器. 对某 300 kW 变桨距风电机组的仿真表明: 新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, 具有较满意的控制效果.

关键词: 风电机组; 变桨距控制系统; 模糊 PID; 非线性前馈控制器; 气动特性; 桨距角

New Variable Pitch Control Strategy Combining Nonlinear Feed Forward and Fuzzy PID Control for Wind Turbine-generator Sets

GUO Peng

(Department of Automation and Computer Engineering, North China
Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Aiming at the strong non-linear and time-delay characteristics of wind turbine-generator set, a new variable pitch control strategy combining nonlinear feed forward and fuzzy PID control is being proposed, so as to overcome the deficiency of conventional PID controller that can't achieve satisfactory performance above rated speed. According to aerodynamic characteristics of its blade, the nonlinear relationship between pitch angle and wind speed was obtained by way of numerical calculation and least square polynomial fitting method, based on which a nonlinear feed forward controller was designed. Simulation results on a 300 kW variable pitch wind turbine-generator set show that with the new pitch control strategy, the system's overshoot can be effectively reduced at different wind speed ranges above the rated speed, while the regulation time shortened and satisfactory control effect achieved.

Key words: wind turbine-generator set; variable pitch control system; fuzzy PID; nonlinear feed forward controller; aerodynamic characteristic; pitch angle

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矩, 使机组输出功率保持稳定. 在此工况下风速成为

收稿日期: 2010-01-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(09MG18)

作者简介: 郭 鹏(1975-), 男, 河南洛阳人, 副教授, 博士, 研究方向为: 大型风电机组控制技术和状态监测. 电话(Tel.): 13811262903;

E-mail: huadiangp@163.com.

外部扰动. 风电机组各部分如叶轮、变桨系统、发电机等存在严重的非线性以及惯性和延迟, 导致变桨距系统控制困难. 目前国内采用较多的 PID 变桨距控制方法难以达到令人满意的效果. 姚兴佳等人^[1]提出模糊 PID 控制方法, 将模糊控制与 PID 控制器相结合. 单纯 PID 控制和模糊 PID 控制都是反馈控制方法, 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. 由于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. 风电机组的气动特性是较为稳定的, 在此前提下, 在额定风速以上为保证机组输出功率恒定, 叶轮桨距角与风速存在确定的关系. 笔者通过数值计算和多项式拟合的方法获得了两者间的解析非线性模型, 并将其作为前馈控制器; 将测量风速作为前馈控制器输入, 其输出为前馈参考桨距角增量, 从而达到快速补偿的作用; 反馈控制器采用模糊 PID 控制器. 仿真表明, 新方法能够有效地缩短调节时间, 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 轴向流过风轮时, 风轮从风能中捕获的功率和气动转矩为:

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

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

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:

$$C_p = C_p(\beta, \lambda) = 0.22 \left[\frac{116}{\lambda} - 0.4\beta - 5 \right] e^{-\frac{12.5}{\lambda}} \tag{3}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{4}$$

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:

$$J_r \frac{d\omega}{dt} = T_r - T_D - \gamma T_m \tag{5}$$

$$T_D = c_1 + \frac{c_2}{\omega} + c_3 \omega \tag{6}$$

式中: J_r 为风轮转动惯量; T_D 为系统阻力矩, 假定

集中于低速轴一侧; T_m 为高速轴传递给齿轮箱的转矩; $\gamma = \omega / \omega$ 为齿轮箱增速比; ω 为风轮转速; ω 为发电机转速; c_1, c_2, c_3 为常数.

在靠近发电机的高速轴侧, 忽略发电机自身的机械阻力矩:

$$J_g \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \tag{7}$$

式中: J_g 为异步发电机的转动惯量; T_e 为发电机电磁转矩.

将式(7)代入式(5), 可得风电机组的传动系统方程为:

$$(J_r + \gamma J_g) \frac{d\omega}{dt} = T_r - T_D - \gamma T_e \tag{8}$$

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:

$$T_e = \frac{gm_1 U_1^2 r_2'}{(gm_g - \omega) \left[\left(r_1 - \frac{C_1 r_2' \omega}{g \omega - \omega} \right)^2 + (x_1 + C_1 x_2')^2 \right]} \tag{9}$$

$$P = T_e \omega \tag{10}$$

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 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:

$$\frac{\beta(s)}{\beta_r(s)} = \frac{1}{T_{\beta s} + 1} e^{-\tau s} \tag{11}$$

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

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, 使风轮吸收的能量增加. 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:

$$P_r = \frac{1}{2} \times 0.22 \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right] e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} (\pi R^2 V^3) \quad (12)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (13)$$

由式(12)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 PID 参数整定好的控制器在额定风速附近控制效果可能很好,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.变桨距系统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,提出非线性前馈控制器与模糊 PID 结合的新型变桨距控制方法,控制系统结构见图 1.

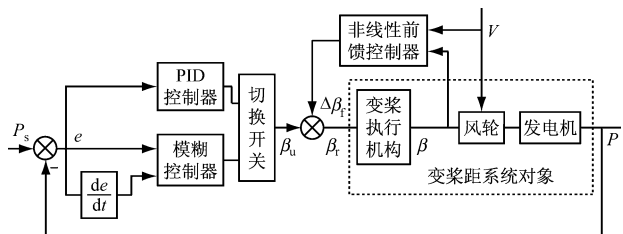


图 1 新型变桨距控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of the new pitch control strategy

2.1 模糊 PID 控制器的设计

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.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 and 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,达到快速稳定地调节;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^[2-3].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两个,即功率误差 e 和误差的变化率 e_c ,输出为增量型桨距角设定值 β_i .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 $[-200 \text{ kW}, 200 \text{ kW}]$,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见表 1.去模糊化方法采用重心法.

表 1 模糊控制器规则表

Tab. 1 Rules of the fuzzy controller

| e_c | 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 |

2.2 非线性前馈控制器

2.2.1 桨距角与风速非线性关系建模

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有着重要作用.在额定风速以上,为达到输出功率恒定,桨距角和风速间存在确定的非线性关系.根据运行经验,在高速时风轮的气动转矩对桨距角的灵敏度远比低速时高^[4-5].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.

桨叶生产定型后,其风能利用系数曲线是确定的,一般以数据表或经验公式的方式给出.本文暂以式(3)作为功率利用系数来讨论.

风轮捕获的风能即式(12)可以简写为:

$$P_r = f(V, \beta) \quad (14)$$

机组的损耗一般是固定的, 包括铜损、变速箱等, 设其为 $a\%$. 则为使发电机的功率为额定功率 P_e , 叶轮捕获的风能也应恒定为:

$$P_{rs} = (1 + a\%)P_e \tag{15}$$

将式(15)代入式(14)得:

$$(1 + a\%)P_e = \frac{1}{2} \times 0.22 \left[\frac{116}{\lambda} - 0.4\beta - 5 \right] e^{-\frac{12.5}{\lambda}} (9\pi R^2 V^3) \tag{16}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{17}$$

在式(16)中, 将实际风速 V 作为输入变量, 将桨距角 β 作为输出变量, 则可得到:

$$\beta = g[(1 + a\%)P_e, V] \tag{18}$$

由于式(16)存在严重的非线性, 直接从式(16)中整理出式(18)的解析形式十分困难. 本文采用数值计算的方法来进行简化.

设待研究的风电机组的额定风速为 V_e (一般在 12 m/s 左右), 切出风速为 V_c (一般在 25 m/s 左右). 根据现场运行经验, 在切出风速附近, 机组对应的最大桨距角不会超过 40° . 同时在额定风速以上, 机组处在定速运行状态, 即机组转速等于额定转速 $\omega = \omega_r$. 按以下方法 (计算流程见图 2), 由计算机计算得到以 1 m/s 为间隔的从额定风速到切出风速范围内多个风速对应的桨距角值. ϵ 为预先设定的正整数.

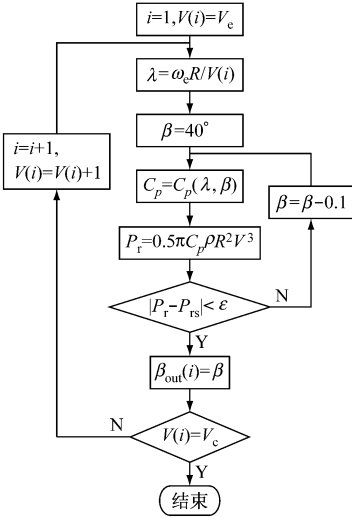


图 2 桨距角数值计算流程

Fig. 2 Flow chart of the numerical calculation process for pitch angle

按图 2 流程计算后得到为保证额定风速以上功率恒定的对应不同风速的一组桨距角值. 即 $[\beta_{out}(i), V(i)], i = 1, 2, \dots, V_e - V_e$.

将外部扰动 $V(i)$ 作为自变量, 将桨距角 $\beta_{out}(i)$ 作为因变量, 通过最小二乘多项式拟合的方法对桨

距角-风速数据对进行拟合^[9], 建立桨距角-风速非线性模型:

$$\beta_r = \beta(V) = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + \dots + a_n V^n \tag{19}$$

式(19)即为保证机组输出功率维持在额定功率所需的桨距角与对应风速的非线性关系.

2. 2. 2 非线性前馈控制器设计

式(19)系数采用最小二乘多项式拟合方法确定后, 按以下方式设计非线性前馈控制器.

设当前时刻的测量风速为 V_k . 将 V_k 代入式(19)得:

$$\beta_r(k) = \beta(V_k) \tag{20}$$

设上一控制时刻的实际桨距角为 $\beta(k-1)$, 则前馈控制器的输出为增量型参考前馈桨距角:

$$\Delta\beta = \beta_r(k) - \beta(k-1) \tag{21}$$

前馈控制器可以起到快速补偿作用^[7], 有效地克服 PID 控制器调节滞后的缺点(2). 同时增量型前馈桨距角也能保证控制的稳定性.

3 仿 真

本文研究的风电机组的参数为^[8]: 风轮半径 $R = 15$ m, 额定风速 $V_e = 12$ m/s, 切出风速 $V_c = 25$ 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 和 $J_g = 32$ 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 $n_e = 1\,554$ r/min, 极对数 $g = 2$. 电网电压 $U_1 = 220$ V, $r_1 = 0.020\,8\,\Omega$, $x_1 = 0.013\,2\,\Omega$, $r_2' = 0.015\,25\,\Omega$, $x_2' = 0.042\,5\,\Omega$.

建立桨距角与风速的非线性模型. 按照图 2 流程计算出 12~25 m/s 的 14 对数据 $[\beta_{out}(i), V(i)], i = 1, 2, \dots, 14$. 机组损耗为 10%, $\epsilon = 1\,000$ W.

表 2 为不同风速下的桨距角.

表 2 不同风速下的桨距角

Tab. 2 Pitch angle under different wind speeds

| 风速/(m · s ⁻¹) | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 桨距角/(°) | 2 | 7.1 | 11.6 | 15.1 | 18.1 | 20.6 | 22.7 |
| 风速/(m · s ⁻¹) | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 桨距角/(°) | 24.5 | 26.2 | 27.6 | 28.9 | 30.1 | 31.1 | 32.0 |

对上述数据采用最小二乘多项式拟合. 式(19)中多项式的阶数 $n = 3$. 拟合出的多项式为:

$$\beta_r = 0.011\,4V^3 - 0.789\,9V^2 + 19.331V - 135.81 \tag{22}$$

拟合效果见图 3. 从图 3 可以看出, 桨距角与风速间的关系呈现严重的非线性, 在风速低时, 拟合曲

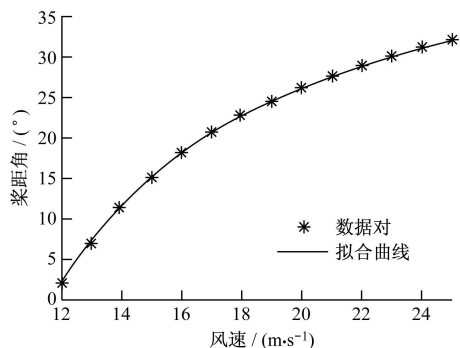


图 3 最小二乘多项式拟合结果

Fig. 3 Result of least square polynomial fitting

线梯度很大;而在切出风速附近,拟合曲线梯度很小.在不同风速下,相同的风速变化 ΔV (如 1 m/s) 要求的桨距角改变是不同的,额定风速附近一般需要 5° 左右,而高风速段只需要 1° 左右.

得到式(22)后,按照 2.2 节方法设计前馈控制器.首先研究额定风速附近的工况,假定在 10 s 时,风速由 12 m/s 变为 14.8 m/s ,在 17.5 s 时,风速由 14.8 m/s 变为 17.2 m/s .仿真结果见图 4.

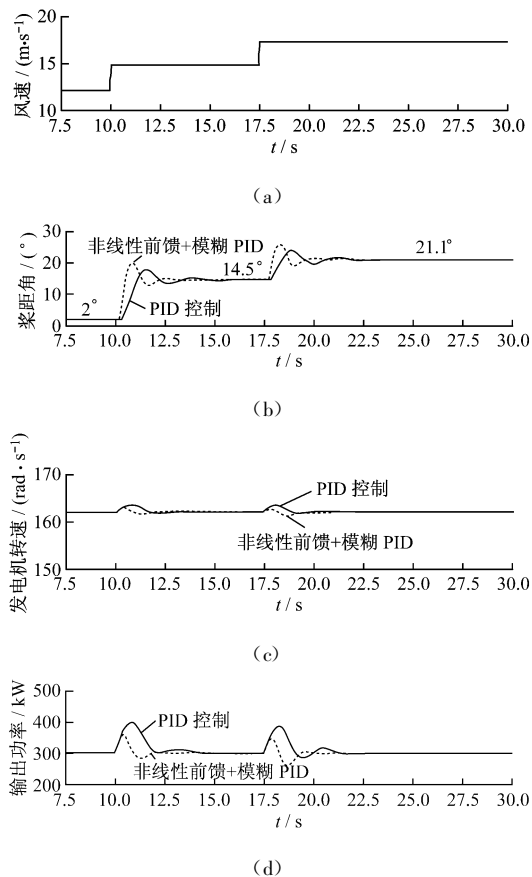


图 4 额定风速附近仿真

Fig. 4 Simulation around the rated wind speed

由图 4 看到,在 10 s 时,前馈控制器输出的桨距角增量为 12.1° ;在 17.5 s 时,输出的桨距角增量为 6.8° .在新型控制器调节下,风电机组输出功率

的超调量大大减小,调节时间也明显缩短,减小了对电网的冲击作用.

再研究接近切出风速的工况,假定在 10 s 时风速由 20 m/s 变为 23.2 m/s ,在 17.5 s 时风速由 23.2 m/s 变为 25 m/s .仿真结果见图 5.

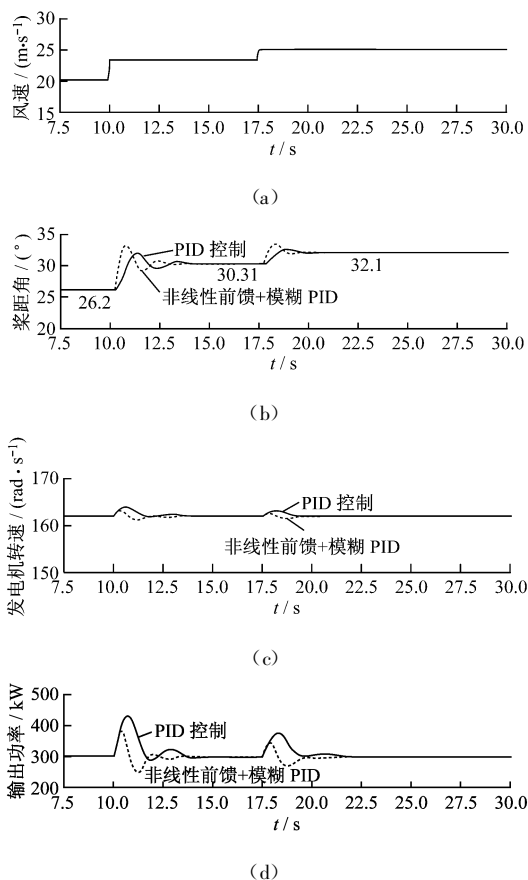


图 5 切出风速附近仿真

Fig. 5 Simulation around the cutting out wind speed

由图 5 可知,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,前馈控制器输出的桨距角增量为 3.8° ;在 17.5 s 时,输出的桨距角增量为 2° .

4 结 论

由于风电机组的强非线性和迟延特性,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效果.本文提出非线性前馈控制与模糊 PID 控制结合的新型变桨策略.根据桨叶的气动特性,采用数值计算和最小二乘多项式拟合的方法,得到了桨叶与风速的非线性模型,并以该模型为基础设计了非线性前馈控制器,达到快速补偿风速扰动的目的.而模糊 PID 控制器则能解决传统 PID 控制器参数整定困难的问题.对 300 kW 风电机组的仿真表明,新型变桨控制方法在不同风速段都能达到比较满意的控制效果.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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 Wenyuan, 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.
- [3] 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.
- [4] 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 Energiae Solaris Sinica**, 2007, 28(12): 1321-1328.
- [5] 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.
- [6] 张善文, 雷英杰, 冯有前. MATLAB 在时间序列分析中的应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [7] 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.
- [8] 高峰, 徐大平, 吕跃刚. 大型风力发电机组的前馈模糊 PI 变桨距控制[J]. 动力工程, 2008, 28(4): 537-542.
GAO Feng, XU Daping, LÜ Yuegang. Feed forward fuzzy PI pitch control for large scale wind turbines [J]. **Journal of Power Engineering**, 2008, 28(4): 537-542.
- (上接第 819 页)
- YANG Xiangliang, AN Liansuo, SUN Xinqiang, *et al.* Real-time monitoring system for ash deposit in utility boiler based on artificial neural network [J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2010, 30(3): 206-209.
- [5] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 高等教育出版社, 1998: 239-251.
- [6] 阎维平, 米翠丽. 基于宽带关联 k 模型的气体辐射特性分析与计算[J]. 动力工程, 2009, 29(12): 1115-1122.
YAN Weiping, MI Cuili. Analysis and calculation of gas radiation characteristics based on wide band correlated- k distribution model[J]. **Journal of Power Engineering**, 2009, 29(12): 1115-1122.
- [7] 高燕. 传感器原理及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009: 163-169.
- [8] MAURO Bramanti. An acoustic pyrometer system for tomographic thermal imaging in power plant boilers[J]. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 1996, 45(1): 159-167.
- [9] 王彦飞. 反演问题的计算方法及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 201-223.
- [10] TIKHONOV A N, ARSENIN V Y. Solution of ill-posed problems [J]. **Washington, V. H. Winston & Sons**, 1977, 23(2): 315-318.
- [11] 韩曙东, 周怀春, 盛锋, 等. 基于具有明显测量误差的辐射图像的二维炉膛温度分布重建和快速特征识别研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 67-71.
HAN Shudong, ZHOU Huaichun, SHENG Feng, *et al.* Study on reconstruction and fast characteristic recognition of temperature distributions in a 2-D furnace via radiant energy images with sensitive measurement errors [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2000, 20(9): 67-71.
- [12] XIE C G, HUANG S M. Experimental evaluation of capacitance tomographic flow imaging systems using physical models [J]. **IEEE Proc-Circuits Devices & Systems**, 1994, 141(5): 357-368.