

变桨风力发电机组控制器优化设计

赵微微¹, 张磊¹, 井延伟²

(1. 河北工业大学 控制科学与工程学院, 天津市 红桥区 300131;

2. 国电联合动力技术有限公司, 河北省 保定市 071051)

Optimization Design of Controller for Pitch Wind Turbine

ZHAO Weiwei¹, ZHANG Lei¹, JING Yanwei²

(1. School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Hongqiao District, Tianjin 300131, China;

2. Guodian United Power Technology Co., Ltd., Baoding 071051, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Due to the randomness of wind speed and the nonlinearity of control system for wind power generating units it is hard to achieve accurate mathematical model of wind power generating units. Since the simple proportional integral differential (PID) controller or proportional integral (PI) controller are generally applied in actual wind power generation projects to achieve the control objective to output constant power and it does not come down to complex intelligent control algorithm, in the occasion that the wind speed is higher than rated wind speed an additive decomposition based method is proposed to normalize the design parameter of variable pitch controller for wind power generating units, that is, the variable pitch control problem of wind power generating unit is decomposed into two simple subproblems, namely the tracing of linear time-invariant main system and the stabilization of auxiliary system. Based on the proposed principle, a simple PI controller is designed, and the optimization design of the controller is carried out, and then the stability of this controller is proved by theoretical derivation. Finally, the fact that using the optimized controller the stationary of the output power can be greatly enhanced is validated by simulation results.

KEY WORDS: variable pitch wind turbine; controller optimization; additive decomposition; proof of stability

摘要: 风速的随机性和风电机组控制系统的非线性导致难以获取风电机组精确的数学模型。鉴于实际的风电工程通常采用简单的比例-积分-微分(proportional integral differential, PID)控制器或比例-积分(proportional integral, PI)控制器达到输出恒定功率的控制目标,不涉及复杂的智能控制算法,在风速高于额定风速时,提出了一种基于加性分解原理的方法来规范风力发电机组变桨控制器的设计参数,将风力发电机组变桨控制问题分解为2个简单的子问题,即线性时不变主系统的追踪问题和辅系统的镇定问题。基于该原理,设计出了简单的PI控制器,并在此基础上进行了控制器优化设计,而且通过理论推导给出了该控制器的稳定性证明,最后

通过仿真验证优化后的控制器能够大大增加输出功率的平稳性。这将为今后设计风力发电机组变桨控制器设计提供一定的准则。

关键词: 变桨风力机; 控制器优化; 加性分解; 稳定性证明

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.12.026

0 引言

随着风电机组容量的增加,变速变桨风电机组的使用越来越广泛。按照风速点划分,变速变桨风力发电机组一般分为3个运行区域^[1]:区域1是风速达到切入风速之前,发电机不工作,风轮做机械转动,属于风机启动阶段;区域2是风速达到切入风速后,通过控制发电机转矩达到输出功率最大化^[2-3];区域3是风速达到额定风速,通过控制桨距角将风机输出功率稳定在额定功率。目前,大型风电机组都采用变桨控制技术,国内外众多学者针对该问题进行了大量研究^[4-6]。韦徵等人依据输出功率的变化提出模糊控制策略,可以减轻变桨距执行机构的疲劳度^[7]。秦斌等人提出了一种基于径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络的变桨距滑模控制方法,把滑模误差引用到变桨距滑模自适应律中,改善系统性能^[8]。Nam等人针对线性控制技术提出选择风力机特定的稳定工作点,然后在这个工作点建立线性模型^[9]。尽管这些控制方法效果良好,但前提是基于精确的数学模型,而风力发电系统作为一个复杂的非线性系统,数学模型不能精确建立,难以将这些方法运用到实际的工程中。

从70多年前开始到今天,比例-积分-微分(proportional integral differential, PID)控制器以其结构简单,理论成熟,控制效果理想,逐渐成为工业控制的重要手段。近年来,PID控制策略随着智能控制方法的发展也得到深入研究。宋新甫等人提出将模糊

控制应用于传统的PID控制方法中^[10],有效减小系统超调量,缩短调节时间。任海军等人采用基于单神经元自适应PID的异步变桨控制策略或多变量控制策略设计控制器,减少风轮转矩的波动和桨叶的不平衡载荷^[11-13]。这些方法的共同点是基于智能算法的基础上进行PID控制器参数设置,算法复杂。本文选择从工程应用角度出发,采用一种加性分解原理方法进行风力机控制器设计及优化,简单可靠,最后通过仿真证明在风速高于额定风速时,该控制器能达到将输出功率稳定在额定功率的控制目标。

1 模型描述

由空气动力学可知,风力机捕获的气动功率^[14]为

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

式中: P_a 为风轮捕获的气动功率; ρ 为空气密度; R 为风轮半径; C_p 为风能利用系数,表示风能转换为机械能的转换效率,是一个关于叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数; v 为风速。叶尖速比定义如下:

$$\lambda = \frac{\omega_r}{v} \quad (2)$$

式中 ω_r 为风轮转速。功率系数定义如下:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-12.5/\lambda_i} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

风速的任何变化都会引起叶尖速比的改变,发电机产生的功率随着变化。用气动转矩表示功率:

$$P_a = \omega_r T_a \quad (5)$$

式中 T_a 为气动转矩。

当风轮转速达到一定值后,风力机在气动转矩 T_a 的作用下以一定角速度运行,风机系统模型如图1所示。

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - T_{ls} - K_r \omega_r \quad (6)$$

式中: J_r 为风轮惯量; T_{ls} 为低速轴转矩; K_r 为转子阻尼。

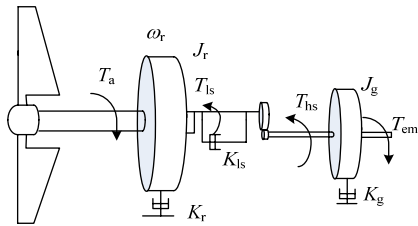


图1 风力机两质量块模型

Fig. 1 Two-mass model of a wind turbine

采用高速轴转矩和电磁转矩驱动发电机电磁转矩,如式(7)所示。

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - K_g \omega_g \quad (7)$$

式中: J_g 为发电机惯量; ω_g 为发电机转速; T_{hs} 为高速轴转矩; T_{em} 为发电机电磁转矩; K_g 为发电机转子侧转矩。

通过式(7)可以得到:

$$n_g^2 J_g \dot{\omega}_{ls} = T_{ls} - (n_g^2 K_g) \omega_{ls} - n_g T_{em} \quad (8)$$

式中齿轮箱齿速 $n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}}$ 。

假设低速轴是完全刚性的,风力机单质量块模型描述如(9)所示:

$$J_t \dot{\omega}_r = T_a - T_g - K_t \omega_r \quad (9)$$

式中: J_t 为风力机总惯量; T_g 为转子侧发电机转矩; K_t 为风力机总阻尼。

为了转矩控制简单,用式(10)表示:

$$\dot{T}_g = \frac{1}{\omega_r} \left[c_0 \varepsilon_p - \frac{T_g}{J_t} (T_a - K_t \omega_r - T_g) \right] \quad (10)$$

式中: c_0 为控制器参数; ε_p 为期望功率与实际输出功率误差。

综上所述,风力机的非线性模型可以描述为:

$$\begin{cases} J_t \dot{\omega}_r = T_a - T_g - K_t \omega_r \\ \dot{T}_g = \frac{1}{\omega_r} \left[c_0 \varepsilon_p - \frac{T_g}{J_t} (T_a - K_t \omega_r - T_g) \right] \end{cases} \quad (11)$$

风力机变桨控制方案如图2所示。

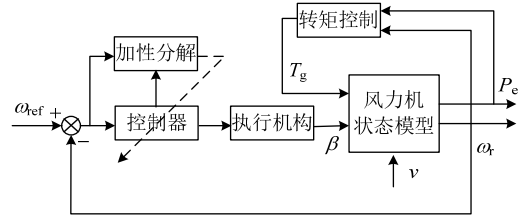


图2 风力机变桨控制方案

Fig. 2 Wind turbine pitch control program

2 控制器设计

2.1 问题描述

风力机模型改写为数学模型,其形式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{a_1} \left[\frac{1}{2} a_2 f_1(x_1, u, v) - a_3 x_1 - x_2 \right] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{x_1} \left[c_0 (b_1 v^2 + b_2 v + b_3 - x_1 x_2) - \frac{x_2}{a_1} \left(\frac{1}{2} a_2 f_1(x_1, u, v) - a_3 x_1 - x_2 \right) \right] \\ y = x_1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: x_1 和 x_2 为状态量; $u(t)$ 为控制量; y 为输出量; $x_1 = \omega_r$; $x_2 = T_g$; $u = \beta$; $a_1 = J_t$; $a_2 = \rho \pi R^3$; $a_3 = K_t$; b_1 、 b_2 、 b_3 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 分别为常数; $f_1(x_1, u, v) = \frac{v^3}{x_1 R} C_p$ 。

通过引用文献[15], $\dot{x}_1 = \frac{1}{a_1} [\frac{1}{2} a_2 f_1(x_1, u, v) - a_3 x_1 - x_2]$ 用如下形式表示:

$$\dot{x}_1 = ax_1 + b[h(t, u) + \sigma(t)] \quad (13)$$

式中: $a = -\frac{a_3}{a_1}$; $b = 1$; $h(t, u) = \frac{a_2}{2a_1} f_1(x_1, u, v)$;

$$\sigma(t) = -\frac{1}{a_1} x_2。$$

式(13)进一步改写为

$$\dot{x}_1 = (a + bk)x_1 + b[h(t, u) + \sigma(t) - kx_1] \quad (14)$$

假设 $(a + bk, b)$ 是可控的, 其中控制参数 k 必须满足 $a + bk$ 稳定。本文控制目标是设计一个稳定的控制器使得 $t \rightarrow \infty$ 系统状态有界。

2.2 加性分解

加性分解原理是指将一个非线性系统分解为 2 个子系统: 一个是线性时不变的主系统, 包含所有的期望和扰动信号; 剩下作为辅系统不包含期望和扰动信号。针对线性系统, 本文采用现有的成熟的控制方法解决它的跟踪问题。针对辅系统, 本文从理论上证明镇定性。这样, 复杂的原始系统便分解为两个简单的问题。

通过加性分解, 考虑将式(14)作为原始系统, 那么主系统如下所示:

$$\dot{x}_{1,p} = (a + bk)x_{1,p} + bu \quad (15)$$

式中 $x_{1,p}(0) = 0$ 。

辅系统由原始系统与主系统作差得到

$$\dot{x}_{1,s} = (a + bk)x_{1,s} + b[-u + h(t, u) + \sigma(t) - kx_1] \quad (16)$$

式中 $x_{1,s}(0) = x_1(0)$ 。

由加性分解原理可知

$$y = x_1 = x_{1,p} + x_{1,s} \quad (17)$$

定义传递函数 $G(s) = [s - (a + bk)]^{-1}b = \frac{b}{s + \frac{a_3}{a_1} - bk}$, 由式(15)–(17)得出

$$\begin{cases} \dot{x}_{1,p} = (a + bk)x_{1,p} + bu, & x_{1,p}(0) = 0 \\ y = x_{1,p} + d_1 \end{cases} \quad (18)$$

式中 $d_1 = G[-u + h(t, u) + \sigma(t) - kx_1] + e^{(a+bk)t}x_0$ 为集总扰动, 且有 $d_1 = x_{1,s}$ 。而且, 式(18)可表示为

$$y = G(s)u + d_1 \quad (19)$$

集总扰动包含不确定因素, 扰动和输入。因为 $x_{1,p} = Gu$, 输出 y 是已知的, d_1 的估计值为

$$\hat{d}_1 = y - Gu \quad (20)$$

显而易见 $\hat{d}_1 = d_1$ 。

针对不确定系统被改写为带集中扰动的式(19), 由于传递函数 G 已知, 动态逆镇定控制器设

计如下:

$$u = \frac{1}{\alpha s} G^{-1}(s)(r - y) \quad (21)$$

为了达到控制目标, 可定义

$$u = \frac{1}{\alpha s + 1} G^{-1}(s)(r - \hat{d}_1) \quad (22)$$

式中控制器参数 $\alpha > 0$ 。

将式(20)代入式(22)中, 可得到

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{\alpha s + 1} G^{-1}(s)(r - y + Gu) = \\ &= \frac{1}{\alpha s + 1} G^{-1}(s)(r - y) + \frac{1}{\alpha s + 1} u \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{\alpha s} G^{-1}(s)(r - y) = \\ &= \frac{1}{\alpha s} \frac{s + \frac{a_3}{a_1} - bk}{b} (r - y) = \\ &= \frac{1}{\alpha b} (r - y) + \frac{\frac{a_3}{a_1} - bk}{\alpha b} \frac{1}{s} (r - y) = \\ &= \frac{1}{\alpha b} e + \frac{\frac{a_3}{a_1} - bk}{\alpha b} \int e dt \end{aligned} \quad (24)$$

式中 $e = r - y$ 。最终得到比例-积分(proportional integral, PI)控制器, 可得知其比例系数为 $K_p = \frac{1}{\alpha b}$,

其积分系数为 $K_i = \frac{\frac{a_3}{a_1} - bk}{\alpha b}$ 。

工程上通常采用二阶系统最佳工程参数作为设计系统的依据^[16]。为了实现控制器克服各种扰动和精确跟踪设定值变化的功能, 在上述控制器设计的基础上进行优化, 控制器控制风力机变桨前, 先通过 2 阶带阻滤波器进行滤波, 增加系统衰减, 避免风机转速的快速变化。优化控制器形式如下:

$$u = G_F(s)G^{-1}(s)(r - \hat{d}_1) \quad (25)$$

式中: 二阶滤波器传递函数 $G_F(s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \xi\omega_c s + \omega_c^2}$; ω_c 为滤波器的固有频率; ξ 为衰减系数。

将滤波器传递函数表达式代入式(25)中, 可得

$$u = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \xi\omega_c s + \omega_c^2} G^{-1}(s)(r - y + Gu)$$

由此得出

$$\begin{aligned} u &= \frac{s^2 + \omega_c^2}{\xi\omega_c s} G^{-1}(s)(r - y) = \\ &= \frac{s^2}{\xi\omega_c b} e + \frac{\omega_c}{\xi b} e + \frac{(\frac{a_3}{a_1} - bk)\omega_c}{\xi b} \int e dt + \frac{(\frac{a_3}{a_1} - bk)}{\xi\omega_c b} \frac{de}{dt} \end{aligned} \quad (26)$$

最终得到带有滤波器的 PID 控制器。其中 ξ 反映滤波器的宽度和强度, 应增大到对目标频率产生明显滤波效果, ω_c 应与驱动频率相接近。

2.3 追踪性证明

由上式, 本文有 $u = \frac{s^2 + \omega_c^2}{\xi \omega_c s} G^{-1}(s)(r - y)$, 表示为

$$u = \frac{s^2 + \omega_c^2}{\xi \omega_c s} G^{-1}(s)(r - Gu - d_1) \quad (27)$$

因为集总扰动包含输入, 所以闭环系统是不稳定的, 因此需要给出一些满足稳定的条件。将 \hat{d}_1 代入式(27), 得到

$$\begin{aligned} \frac{\xi \omega_c}{s^2 + \omega_c^2} \dot{u} &= -h(t, u) - \sigma(t) + kx_1 + G^{-1}r - \\ &G^{-1}e^{(a+bk)t}x(0) \end{aligned} \quad (28)$$

实际中 α 较小, $h(t, u)$ 恒大于 0 且 $u \geq 0$ (这样 $\frac{\xi \omega_c}{s^2 + \omega_c^2} \dot{u} = -h(t, u)$ 稳定), 那么 $0 \approx -h(t, u) - \sigma(t) + kx_1 + G^{-1}r - G^{-1}e^{(a+bk)t}x(0)$ 。

因 $\dot{x}_1 = ax_1 + b[h(t, u) + \sigma(t)]$, 那么

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= ax_1 + b[kx_1 + G^{-1}r - G^{-1}e^{(a+bk)t}x(0)] = \\ &(a + bk)x_1 + bG^{-1}r - bG^{-1}e^{(a+bk)t}x(0) \end{aligned} \quad (29)$$

由于 $bG^{-1}e^{(a+bk)t}x(0) \rightarrow 0$, 因此 $x_1 \rightarrow r$, 闭环系统稳定。

2.4 稳定性证明

假设 $z = \frac{1}{a_1}[\frac{1}{2}a_2f_1(x_1, u, v) - a_3x_1 - x_2]$, 则模型改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = z \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{x_1}[c_0(b_1v^2 - b_2v + b_3 - x_1x_2) - x_2z] \\ y = x_1 \end{cases} \quad (30)$$

通过式(29), 有 $x_1(t) = r(t)$ 以及 $v(t) = \dot{r}(t)$, 进而得到

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{x_1}[c_0(b_1v^2 - b_2v + b_3 - x_1x_2) - x_2z]$$

$$\dot{x}_2 = -[c_0 + \frac{\dot{r}(t)}{r(t)}]x_2 + \frac{1}{r(t)}c_0(b_1v^2 - b_2v + b_3)$$

从以上推论本文可以得到 x_1 和 x_2 有界稳定的条件, 即给定 $\alpha > 0$, $k < 0$, 满足条件 1)

$-\frac{a_3}{a_1} + bk < 0$, 2) $c_0 + \frac{\dot{r}(t)}{r(t)} > 0$, 则设计的控制器可以保证输出和跟踪信号满足 $y \rightarrow r$, 系统稳定且所有状态有界。

3 系统仿真

本文采用 MATLAB 对系统进行仿真, 对未优化的比例-积分(proportional integral, PI)控制器和优化后的带滤波器的 PID 控制器仿真结果进行对比, 并选择在额定风速以上工况对采用的控制方法进行验证。已知风轮半径为 38.5 m, 额定转速为 2 rad/s, 额定风速为 12 m/s, 额定功率为 1.5 MW, 切入风速为 3 m/s, 切出风速为 25 m/s。本文采用基于实际测量值的风速进行模拟, 图 3 为平均输出风速 20 m/s 的风速。

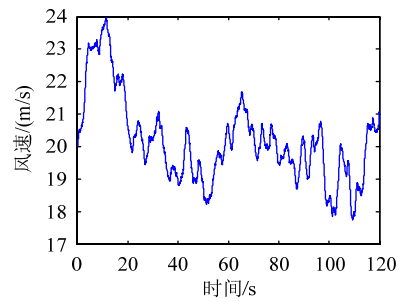
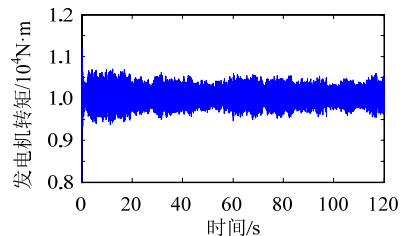


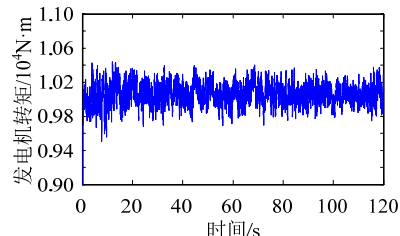
图3 平均风速 20 m/s 曲线

Fig. 3 Curve of the average wind speed (20 m/s)

图 4 为平均风速 20 m/s 时, 风力机控制器优化前后发电机转矩输出曲线对比图。本文可以看到控制器经过优化后, 发电机转矩波动误差大大小于优化前波动误差。



(a) 优化前



(b) 优化后

图4 优化前后发电机转矩输出曲线

Fig. 4 Curve and optimized curve of generator torque

图 5 为该工况下的发电机输出功率曲线对比图, 采用原控制器稳定后的输出功率波动最大误差为额定功率的 6.7%, 采用优化控制器控制稳定后的输出功率波动最大误差为额定功率的 3.3%, 波动率减小了几乎 50%。

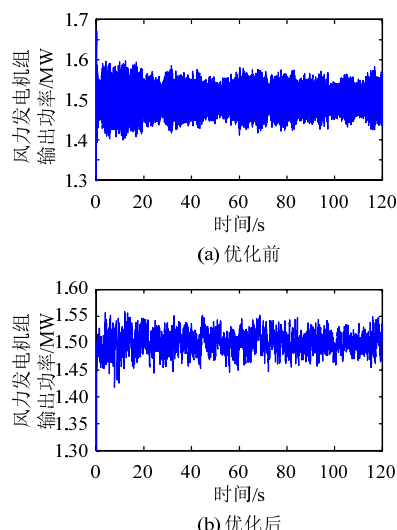


图5 优化前后风力发电机组功率输出曲线

Fig. 5 Curve and optimized curve of wind turbine power

4 结论

本文提出将加性分解原理用于风力机变桨控制系统中, 不仅给出了简单规范的控制器的设计方法, 在控制器优化的基础上给出了稳定性描述, 具有鲜明的工程意义。最后通过理论和仿真说明在高于额定风速时基于该原理设计出的控制器不仅稳定性良好还易于控制, 使风电机组输出功率基本维持在额定功率, 满足风场对高风速的要求。这将为今后设计风电机组控制器设计提供一定的准则。

致 谢

本文得到了河北省高等学校科学技术研究优秀青年基金项目(Y2011105)的资助, 谨此致谢!

参考文献

- [1] 叶茂远, 吴捷, 张先亮, 等. 变桨距风力机分区段模拟方法及其控制策略[J]. 2010, 34(1): 159-163.
Ye Yuanmao, Wu Jie, Zhang Xianliang, et al. Sectioned simulation of variable blade pitch wind turbine and its control strategy[J]. 2010, 34(1): 159-163(in Chinese).
- [2] Maria LC, Gianluca I, Giuseppe O. Fully sensorless robust control of variable-speed wind turbines for efficiency maximization[J]. Automatica, 2013(49): 3023-3031.
- [3] 王立鹏, 巫发明. 减小变速变桨型风电机组载荷的控制策略研究[J]. 西华大学学报, 2011, 30(2): 70-74.
Wang Lipeng, Wu Faming. The research on the control strategy for reducing the loads on the wind turbines with variable speed and pitch[J]. Journal of Xihua University, 2011, 30(2): 70-74(in Chinese).
- [4] 刘军, 何玉林, 李俊, 等. 变速变桨距风力发电机组控制策略改进与仿真[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 82-86.
Liu Jun, He Yulin, Li Jun, et al. Design and simulation of an improved control strategy for variable-speed pitch controlled wind turbine driven generator system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 82-86(in Chinese).
- [5] 郑黎明, 林宇, 陈严, 等. 大型风力机恒功率变桨距非线性 PID 控制方法研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(5): 727-731.
Zheng Liming, Lin Yu, Chen Yan, et al. Research on blade pitch
- conlinear PID control for a large-scale wind turbine under constant power[J]. Acta Energy Solaris Sinica, 2012, 33(5): 727-731(in Chinese).
- [6] 梁立哲, 姚兴佳, 祝贺, 等. 风力发电系统最大风能追踪的非线性控制策略[J]. 华东电力, 2013, 41(2): 353-358.
Liang Lizhe, Yao Xingjia, Zhu He, et al. Nonlinear control strategy for wind power system MPPT[J]. East China Electric Power, 2013, 41(2): 353-358(in Chinese).
- [7] 韦微, 陈冉, 陈家伟, 等. 基于功率变化和模糊控制的风力发电机组变速变桨距控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 121-126.
Wei Zheng, Chen Ran, Chen Jiawei, et al. Wind turbine-generator unit variable-speed pitch control based on judgment of power changes and fuzzy control[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 121-126(in Chinese).
- [8] 秦斌, 周浩, 杜康, 等. 基于 RBF 网络的风电机组变桨距滑模控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 37-41.
Qin Bin, Zhou Hao, Du Kang, et al. Sliding mode control of pitch angle based on RBF neural-network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 37-41(in Chinese).
- [9] Nam Y, Kim J, Moon Y H, et al. Feedforward pitch control using wind speed estimation[J]. Journal of Power Electronics, 2011, 11(2): 211-217.
- [10] 宋新甫, 梁波. 基于模糊自适应 PID 的风力发电系统变桨距控制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 50-58.
Song Xinfu, Liang Bo. Wind power system pitch control based on fuzzy self-learning emendation control theory[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 50-58(in Chinese).
- [11] 任海军, 何玉林. 2 种风力机变桨系统单神经元比例-积分-微分控制策略的比较与分析[J]. 电网技术, 2010, 49(12): 154-157.
Ren Haijun, He Yulin. Comparative analysis on two single neuron PID control methods for wind turbine pitch-control system[J]. Power System Technology, 2010, 49(12): 154-157(in Chinese).
- [12] 窦真兰, 施刚, 曹云峰, 等. 减少风力机转矩波动的异步变桨控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 236-245.
Dou Zhenlan, Shi Gang, Cao Yunfeng, et al. Individual Pitch Control for Reducing Wind Turbine Torque Fluctuation[J]. transactions of china electrotechnical society, 2014, 29(1): 236-245.
- [13] 任海军, 何玉林, 杜静, 等. 变速变桨距风力机功率控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 59-63.
Ren Haijun, He Yulin, Du Jing, et al. Power control strategies of variable speed and variable pitch wind turbines[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 59-63(in Chinese).
- [14] 林志明, 潘东浩, 王贵子, 等. 双馈式变速变桨距风力发电机组的转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(32): 118-124.
Lin Zhiming, Pan Donghao, Wang Guizi, et al. Torque congtrrol of doubly-fed variable speed variable pitch wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(32): 118-124(in Chinese).
- [15] Quan Quan, Cai Kaiyuan, Additive-state-decomposition-based tracking control for TORA benchmark[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(20): 4829-4841.
- [16] 姚兴佳, 侯世旭, 王晓东, 等. 3 MW 双馈式风电机组变桨控制策略优化研究[J]. 2013, 31(2): 30-33.
Yao Xingjia, Hou Shixu, Wang Xiaodong, et al. Optimization of 3 MW doubly-fed wind turbines pitch control strategy[J]. 2013, 31(2): 30-33(in Chinese).



赵微微

收稿日期: 2014-09-16。

作者简介:

赵微微(1988), 女, 硕士, 研究方向为风力发电机组控制技术, E-mail: zhaoweimei8817@126.com;

张磊(1977), 男, 教授, 研究方向为风力发电机组控制技术。

(责任编辑 杜宁)