

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.06.009

基于模糊PID控制的风电机组变桨距控制技术研究

赵正黎, 于惠钧, 张发明, 龚事引, 谷雅琼

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对传统的PID控制器在变桨距控制中存在的适应力不强、控制精度不高等缺陷, 提出将模糊控制与PID控制相结合的变桨距控制方法, 使变桨距控制系统兼具模糊控制和PID控制的优点。通过对风电机组变桨原理及控制要求进行分析, 建立风电机组的数学模型和仿真模型, 在随机风作用下对风电机组进行仿真分析。仿真结果表明, 本方法能提高变桨距控制的精度和响应时间, 具有良好的静态、动态特性。

关键词: 风力发电; 变桨距控制; 模糊PID; 直驱永磁同步风机

中图分类号: TM315

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)06-0043-06

Research on Variable Pitch Control of Wind Turbine Generator Based on Fuzzy PID

Zhao Zhengli, Yu Huijun, Zhang Faming, Gong Shiyin, Gu Yaqiong

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Aiming at the defects of not strong adaptability and not high precision of the traditional PID controller in the control of variable pitch control, puts forward the variable pitch control method based on fuzzy control and PID control combination. Through the analysis of the principle and control requirements of the wind turbine blade, establishes the mathematical model and simulation model of wind turbine generator. Simulates and analyzes the wind turbine generator under the random wind. The results show that the proposed method improves the precision and response time of the variable pitch control and has a good static and dynamic performance.

Keywords: wind power; variable pitch control; fuzzy PID; directly driven permanent magnet synchronous wind turbine

0 引言

随着风电机组的大型化发展, 对变桨距控制的性能提出了更高的要求。变桨距控制作为风电机组控制的重要部分, 对风电机组能否高效、安全、可靠的运行起到至关重要的作用。因此, 研究变桨距先进控制策略成为热点。国内外学者提出将智能控

制技术(模糊控制^[1]、神经网络、学习控制、专家系统等)运用到变桨距控制中, 用于改善变桨距控制效果, 并取得了可喜的成果。宋新甫等^[2]提出将模糊控制器取代PID控制器, 并借助仿真软件验证了模糊控制所具有的优势。针对模糊控制精度不高、模糊规则难以精确制定的问题, 学者们提出多种改进的模糊控制方法。朱必刚^[3]设计了一种基于自抗扰

收稿日期: 2015-09-13

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ9017)

作者简介: 赵正黎(1989-), 男, 广西河池人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为复杂机电系统的信息集成和协调控制,
E-mail: 824775723@qq.com

通信作者: 于惠钧, 男(1975-), 河南驻马店人, 湖南工业大学教授, 主要从事控制科学与工程方面的研究与教学,
E-mail: arejunyu@foxmail.com

控制算法的控制器，该控制器的参数调整可不依赖于实际经验，并能获得更好的控制效果，仿真结果验证了该控制方法的有效性。H. Camblong 等^[4]将数字鲁棒控制应用于变桨变速风力发电机组，但要用于实际商业化机组，还需要进行改进以及大量的试验研究。A. S. Yilmaz 等^[5]将多感知神经网络用于高于额定风速时的风力机组变桨控制系统。

综上所述，本文提出将模糊PID控制方法运用到兆瓦级永磁直驱风电机组的变桨距控制系统中。通过 Matlab/Simulink 软件对该控制系统模型进行仿真分析。仿真结果表明：基于模糊PID控制的变桨距控制，能够提高变桨距控制的精度和响应时间，具有良好的静、动态特性，在风速高于额定风速时，能够实现对风电机组输出功率更平稳的控制。因此，该控制方法具有一定的工程应用价值。

1 风电机组变桨控制原理

兆瓦级风电机组变桨距是通过变桨执行机构（电机或者液压装置）来驱动桨叶旋转，改变叶片的迎风角度，从而调整轮毂的转速，实现对风机输出功率的调节。通过对风力机的运行特性进行分析，可以更好地掌握风电机组变桨距控制过程。变桨距风力机的运行特性通常由一簇风能利用系数的无因次特性曲线表示。风能利用系数即 $C_p=f(\lambda, \beta)$ ，是关于叶尖速比 λ 及桨距角 β 的高阶非线性函数。专家学者提出 C_p 可用式（1）来近似表示，

$$C_p=(0.44-0.0167\beta)\sin\left[\frac{\pi(\lambda-3)}{15-3\beta}\right]-0.00184(\lambda-3)\beta \tag{1}$$

由式（1）风能利用系数 C_p 可以得到变桨距风力机的特性曲线图，如图 1 所示。

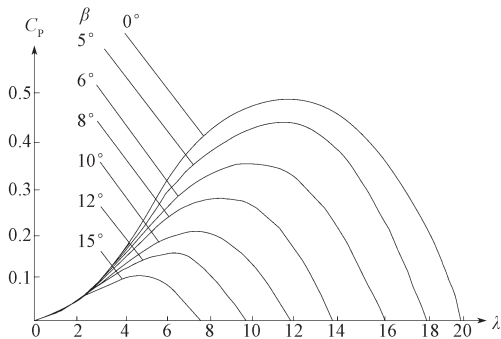


图1 变桨距风力机的 $C_p=f(\lambda, \beta)$ 特性曲线图

Fig. 1 The characteristic curve $C_p=f(\lambda, \beta)$ of variable pitch wind turbine

从图 1 中可以得出，风能利用系数 C_p 随着桨距角 β 和尖速比 λ 的改变有如下变化规律：

1) 给定一个桨距角 β ，都会有一个风能利用系

数最大值 $C_{p,max}$ 及其对应的最佳叶尖速比 λ_{opt} 。

2) 当桨距角 β 变大时，风能利用系数 C_p 明显减少。桨距角为 0° 时，风能利用系数 C_p 相对大些。

以上 C_p 的变化规律，为变速恒频变桨距的控制提供了理论依据。当风速低于额定风速时，调整桨距角 $\beta=0^\circ$ ，调整发电机转子的转速，使风能利用系数保持在最大值 $C_{p,max}$ ，尽可能捕获更多风能；当风速比额定风速高时，改变桨距角来降低发电机输出功率，保证输出功率稳定在额定功率附近^[6]。

2 风电机组建模

风力发电机组主要由发电机、机舱、轮毂、叶片、塔筒等部分组成。针对本文研究的侧重点，对风电机组的某些部件作简化处理或暂不对其进行分析。直驱永磁同步风力发电机组模型包括空气动力学部分模型（风力机模型和传动系统模型）、变桨驱动模型、电气系统转换系统模型（发电机模型）等，如图 2 所示。

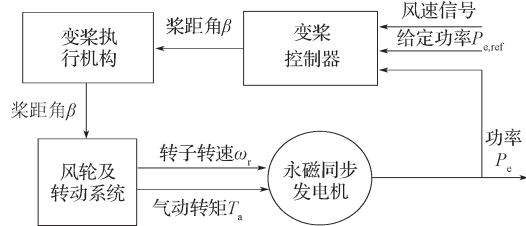


图2 永磁同步风力发电机组系统的简化模型框图

Fig. 2 The simplified model block diagram of permanent magnet synchronous wind turbine system

2.1 风力机模型

由于损耗功率较小，可近似地认为 0，则有机械功率等于气动功率。风轮的机械功率 P_a 为

$$P_a = T_a \omega_r \tag{2}$$

式中 T_a 为风力机气动转矩，即

$$T_a = \frac{P_a}{\omega_r} = \frac{0.5\rho C_p \pi R^2 v^3}{\omega_r} = 0.5\rho \pi R^3 v^2 C_T \tag{3}$$

其中 ρ 为空气密度， ω_r 为风力机转子转速， R 为风轮半径， v 为风速， C_T 为转矩系数， $C_T=C_p/\lambda$ ， $\lambda=R\omega_r/v$ 。

由式（3）可建立风轮的仿真模型。图 3 为叶尖速比 λ 模型，图 4 为风轮气动转矩模型。

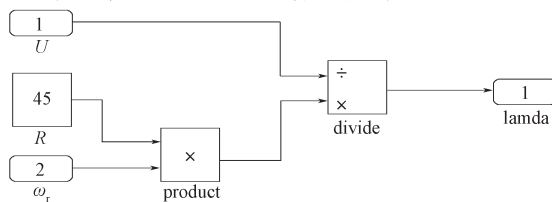


图3 尖速比 λ 模型

Fig. 3 Tip speed ratio model of λ

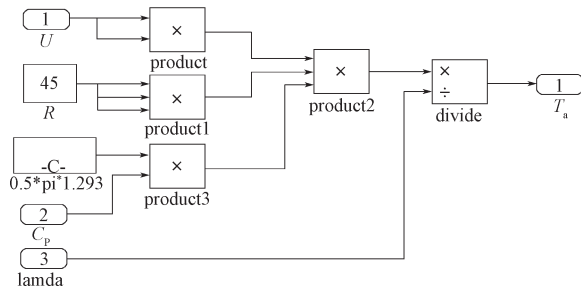


图4 风轮气动转矩模型

Fig. 4 Rotor aerodynamic torque model

2.2 传动系统模型

风力发电机的风轮转子会随着气动转矩 T_a 和电机磁转矩 T_e 的变化而变速运行。假定直驱型风力发电机的转子与电机之间是刚性连接, 则传动系统模型如图5所示, 可表示为

$$J_{eq} \frac{d\omega_e}{dt} = T_a - T_L - T_e, \quad (4)$$

式中: ω_e 为电角频率, $\omega_e = n_p \omega_r$, 其中 n_p 为发电机转子的极对数; T_L 为传动损失; J_{eq} 为机组等效转动惯量, 直驱型永磁同步风力发电机组的等效转动惯量等于风轮转动惯量 J_r 与发电机的转动惯量 J_g 之和, 即

$$J_{eq} = J_r + J_g. \quad (5)$$

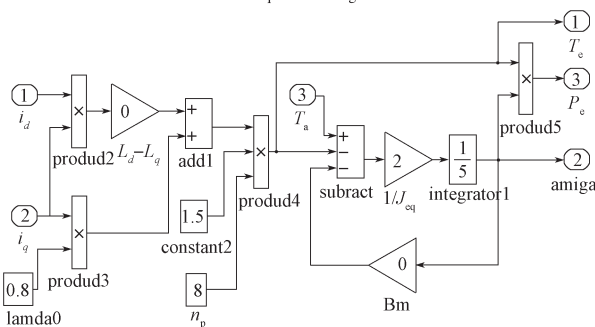


图5 传动系统模型图

Fig. 5 Transmission system model diagram

2.3 变桨距系统模型

在闭环控制系统中, 变桨执行机构模型可以用具有幅值及输出信号微分饱和特性的一阶动力学系统来表示 (见图6)。

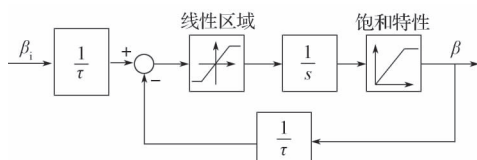


图6 变桨距系统模型图

Fig. 6 Variable pitch system model diagram

在变桨距执行的局部线性化区域内, 其动力学方程为

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau} \beta + \frac{1}{\tau} \beta_1, \quad (6)$$

式中: β 和 β_1 分别为实际的和理想的桨距角; τ 为执行变桨机构的时间常数。

风力发电机系统运行时, 桨距角 β 通常以最大 $\pm 10^\circ/s$ 的速度在 $-2 \sim 30^\circ$ 范围内变化。为了保证功率控制以及考虑到载荷疲劳的影响, 变桨机构的动作不宜超出上述调节幅度和调节速度。

2.4 永磁同步发电机模型

在建立永磁同步发电机的模型时, 通常采用 $d-q$ 坐标系下的数学模型来进行分析。在 $d-q$ 同步旋转坐标系下, 永磁同步发电机组数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L_d} i_d + \omega_e \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{1}{L_d} u_d, \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L_d} i_q - \omega_e \left(\frac{L_q}{L_d} i_d + \frac{1}{L_d} \lambda_0 \right) + \frac{1}{L_d} u_q. \end{cases} \quad (7)$$

式中: i_d 和 i_q 分别为发电机的 d 轴和 q 轴电流; L_d 和 L_q 分别为发电机的 d 轴和 q 轴电感; R_a 为定子电阻; λ_0 为永磁体的磁链; u_d 和 u_q 分别为电压源电压 d 轴和 q 轴的分量。

定义 q 轴的反电势 $e_q = \omega_e \lambda_0$, d 轴的反电势 $e_d = 0$, 假定发电机 d 轴和 q 轴的电感相等, 即 $L_d = L_q = L$, 则式(7)为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L} i_d + \omega_e i_q + \frac{1}{L} u_d, \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L} i_q - \omega_e \left(i_d + \frac{1}{L} \lambda_0 \right) + \frac{1}{L} u_q. \end{cases} \quad (8)$$

永磁同步发电机的电磁转矩表达式为

$$T_e = 1.5 n_p \left[(L_d - L_q) i_d i_q + i_q \lambda_0 \right]. \quad (9)$$

将式(9)简化为

$$T_e = 1.5 n_p i_q \lambda_0. \quad (10)$$

搭建的发电机模型如图7所示。

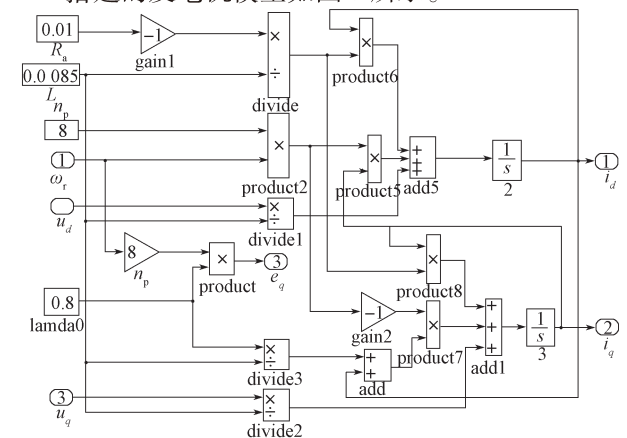


图7 发电机模型图

Fig. 7 The generator model diagram

2.5 桨距角控制

桨距角 β 的变化对风能利用系数 C_p 有着较大的

影响，它的作用相当于是发电机组的调速器。桨距角控制器以功率信号作为参考输入信号。风力机模型如图8所示。图中参数说明如下： $P_{e,ref}$ 为功率给定值； P_e 为风机实际功率值，开关switch为由风速 v 控制的开关，当 v 低于额定风速 v_r 时，将开关置

“0”，使桨距角保持在初始值 0° 附近，当 v 高于额定风速 v_r 时，将开关置“1”，桨距角控制器发挥作用； $\omega_{e,ref}$ 为电角频率参考值，其表达式为

$$\omega_{e,ref} = v \lambda n_p / R \quad (11)$$

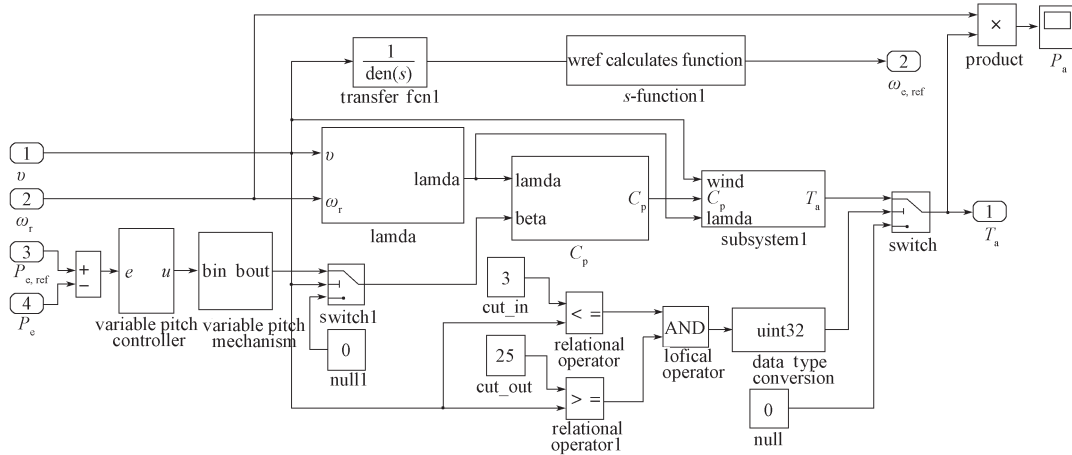


图8 风力机模型图

Fig. 8 Wind turbine model diagram

2.6 直驱永磁同步风力发电机组模型

由上所述的各个风机子模块，按照直驱永磁同步风力发电机组的构成，可以搭建完整的系统仿真模型，如图9所示。图中，speed control是转速控制器，PMSG是发电机模型，drive train是传动系统模型，wind turbine是风力机模型。

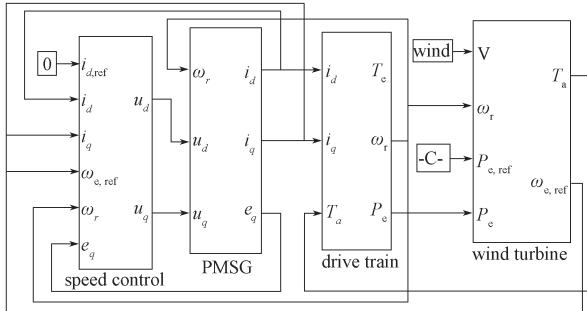


图9 永磁同步风力发电机系统仿真模型

Fig. 9 The simulation model of permanent magnet synchronous wind turbine system

3 模糊PID控制器设计

与传统PID控制不同，模糊控制不需要被控对象的精确数学模型，它是一种基于经验规则的控制，对时变、非线性的被控对象有着较强的控制能力。虽然模糊控制有着上述优点，但同时也存在控制精确度不高，静态误差不能有效消除，模糊规则难以合理制定等不足。针对模糊控制与PID控制的优缺点，本文将两者结合起来，设计了模糊PID控制器^[7]，并应用到风电变桨距控制中。该控制器能

根据控制参数的变化，及时改变控制策略，使PID参数可以在线调整，从而使风电机组对变化风速有较强的适应能力，且存在大扰动情况下，也能使控制系统保持较好的性能。

3.1 模糊控制器

模糊控制是一种基于规则的控制，主要是根据技术人员的控制经验或专家的知识来制定控制规则。模糊控制在一定程度上实现了将计算机推理代替人的思维和经验，能够满足一些复杂多变、无法用精确数学描述的控制系统的要求，是一种非线性的智能控制^[8]。

模糊控制器主要由模糊化、知识库、模糊推理以及反模糊化4个部分组成，如图10所示。

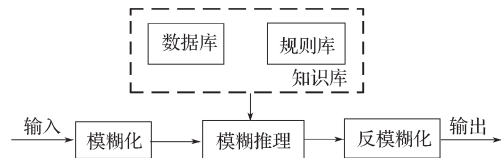


图10 模糊控制器的组成框图

Fig. 10 The block diagram of fuzzy controller

模糊控制器具有如下特点：容易控制和掌握，适应能力强，鲁棒性强。因此，其特别适合于非线性、时变及纯滞后系统的控制。

3.2 模糊PID控制器

模糊PID控制器的结构如图11所示。该控制器为二维模糊控制器，将风机给定功率 $P_{e,ref}$ 与实际的输出功率 P_e 的偏差 e 以及偏差的变化率 ec 作为输入变量，经模糊化后的 e 和 ec 通过模糊控制规则来进行推理，

再经解模糊得到 k_p^* , k_i^* 和 k_d^* 参数, 在线实时调整 PID 控制的参数, 以保证发电机输出的功率维持在额定功率附近。

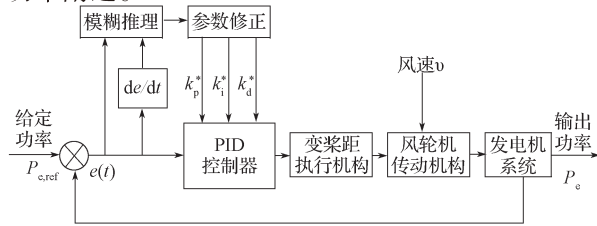


图 11 模糊控制器结构图

Fig. 11 Fuzzy controller structure diagram

3.2.1 建立隶属度函数

本文建立了 3 个模糊控制器, 都是以风力机反馈功率与目标功率的偏差 e 及误差变化率 ec 作为控制器的输入量。定义 e 和 ec 模糊子集为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 并将它们映射到论域 $[-6, 6]$ 。将模糊控制器的输出 k_p^* , k_i^* 和 k_d^* 分别作为常规 PID 控制器的比例、积分、微分参数的修正值输入量, 并定义其模糊子集为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 将它们映射到论域 $[-10, 10]$ 。

3.2.2 制定模糊规则

模糊控制规则是由自然语言变量所表达的模糊条件语句组成, 表征了控制目标和该领域专家的控制策略, 是根据被控对象的行为特性和专家的控制经验来编写。模糊规则的优劣直接影响到系统性能的好坏。模糊规则对应输入量偏差 e 以及偏差变化率 ec 的变化情况如表 1~3 所示。

根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模型, 应用模糊合成推理, 设计分数阶 PID 参数的模糊矩阵表, 算出参数, 代入式 (12) 中, 从而得到更为精准的控制参数, 使控制系统具有较优静态、动态性能。

$k_p = k_{p0} + (e, ec)p$, $k_i = k_{i0} + (e, ec)i$, $k_d = k_{d0} + (e, ec)d$ 。(12) 式中: k_{p0} , k_{i0} , k_{d0} 为 PID 参数的初始设计值, 通过传统 PID 控制器的参数整定方法得到; $(e, ec)p$, $(e, ec)i$, $(e, ec)d$ 即 k_p^* , k_i^* 和 k_d^* 为模糊控制器的 3 个输出, 可根据被控对象的状态自动调整 PID 的 3 个控制参数的取值。

表 1 k_p 控制规则表

Table 1 k_p control rules

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 k_i 控制规则表

Table 2 k_i control rules

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 k_d 控制规则表

Table 3 k_d control rules

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

3.2.3 反模糊化

为了得到确定值来驱动执行机构, 模糊控制器还需要进行反模糊化处理, 即将输出的语言变量转变成精确的数值。本文模糊 PID 控制器运用重心法对模糊子集进行反模糊化处理。

4 仿真分析

风力机组参数有: 额定输出功率 2 000 kW, 额定风速 11 m/s, 切除风速 25 m/s, 风轮半径 45 m。由于本文主要研究风电机组在额定风速以上的变桨控制过程, 因此, 选择风速在额定风速以上的随机风进行仿真分析。

通过 Matlab 仿真得到了风速、桨距角、风电机输出功率的仿真波形如图 12~14 所示。

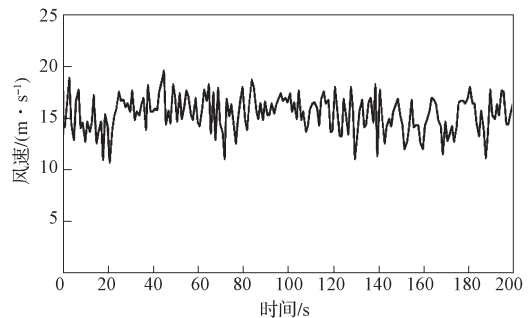


图 12 风速波形图

Fig. 12 Wind speed waveform diagram

由图 12 可知, 风速不稳定、变化较大; 由图 13 可知, 桨距角会跟随风速的变化而调整; 由图 14 可

知,通过桨距角的调整使风机基本保持在额定功率附近。仿真结果表明,当随机风大于额定风速并快速变化时,桨距角能够根据风速变化迅速响应,使输出功率稳定在额定功率附近,满足变桨距控制要求。

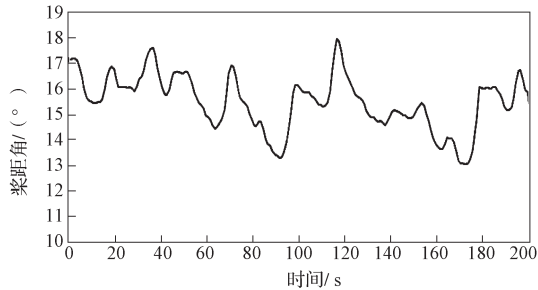


图 13 风力机组输出桨距角波形图

Fig. 13 Waveform diagram for wind turbine output pitch angle

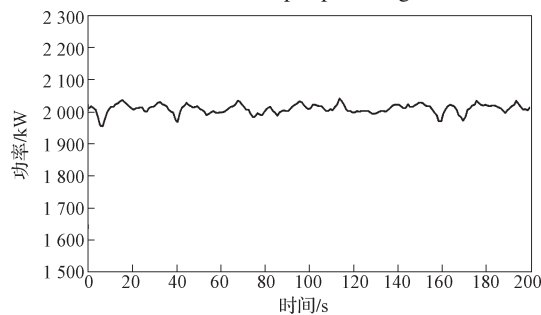


图 14 风力机组输出功率波形图

Fig. 14 Waveform diagram for wind turbine power output

5 结语

本文通过对风电机组变桨距原理及控制要求进行分析,建立了风电机组的数学模型和仿真模型,设计了兼具模糊控制和PID控制2种控制方法优点的模糊PID变桨距控制器,在随机风作用下对风电机组进行仿真分析。仿真结果表明,基于模糊PID控制的变桨距控制器,能够提高变桨距控制的精度和响应时间,具有良好的静、动态特性。

参考文献:

- [1] Adzic E, Ivanovic Z, Adzic M, et al. Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control[J]. Acta Polytechnica Hungarica, 2009, 6(1): 131-149.
- [2] 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): 50-53, 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): 50-53, 58.

- [3] 朱必刚. 基于直驱型PMSG风力发电系统的变桨自抗扰控制[J]. 现代电子技术, 2011, 34(20): 200-203.
Zhu Bigang. Active Disturbances Rejection Control of Wind Power System Based on Direct Driving PMSG[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(20): 200-203.
- [4] Camblong H. Digital Robust Control of Avariable Speed Pitch Regulated Wind Turbine for Above Rated Wind Speeds [J]. Control Engineering Praetice, 2008, 16(8): 946-958.
- [5] Yilmaz A S, özer Z. Pitch Angle Control in Wind Turbines Above the Rated Wind Speed by Multi-Layer Perception and Radial Basis Function Neural Networks[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(6): 9767-9775.
- [6] 杨莉,孙衢,李涛. 风力发电系统变桨距模糊PID控制[J]. 微计算机信息, 2008, 24(12): 12-13.
Yang Li, Sun Qu, Li Tao. Design of Variable-Pitch Fuzzy PID Controller Based on Wind Power System[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(12): 12-13.
- [7] 康严文,李智勇,王维庆. 基于MATLAB的风能自校正自调整PID模糊控制器仿真研究[J]. 水力发电, 2006, 32(1): 61-63, 92.
Kang Yanwen, Li Zhiyong, Wang Weiqing. Simulation for a Self-Correction and Self-Aligning PID Fuzzy Control System Based on MATLAB[J]. Water Power, 2006, 32(1): 61-63, 92.
- [8] 赵正黎,于惠钧,张发明,等. 基于模糊PID控制的直流电机调速系统[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(2): 38-43.
Zhao Zhengli, Yu Huijun, Zhang Faming, et al. DC Motor Speed Control System Based on Fuzzy PID Control[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(2): 38-43.
- [9] 姚兴佳,马佳,郭庆鼎. 基于模糊控制的风电机组独立变桨距控制[J]. 可再生能源, 2012, 29(6): 34-38.
Yao Xingjia, Ma Jia, Guo Qingding. Individual Pitch Control of Wind Turbine Based on Fuzzy Control[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 29(6): 34-38.

(责任编辑: 邓彬)