

风力发电场中风机变桨模糊 自适应跟踪控制方法

张淼[†], 张毅, 雷亚宁, 兰兵, 马文海, 段博, 陈若飞

(中广核数字科技有限公司, 上海 200241)

摘 要:为了提高风机变桨的控制精度和跟踪效率,设计了风机变桨距控制系统,根据风机变桨原理以可编程控制器(Programmable Logic Controller, PLC)为主控制器,永磁同步电机为伺服电机,监测风机变桨并网过程,通过构建模糊自适应PID控制器模型,实现了对桨距角的调节和功率的跟踪。实验结果表明,本系统能提高桨距角的控制精度,提高风能利用效率,模糊自适应PID控制器使输出功率提高了2.3%,具有较高的应用价值。

关键词:变桨距控制系统;可编程控制器;模糊自适应PID控制器;桨距角;输出功率

中图分类号:TP37

文献标识码:A

Fuzzy Adaptive Tracking Control Method for Wind Turbin Pitch in Wind Farms

ZHANG Miao[†], ZHANG Yi, LEI Yaning, LAN Bing, MA Wenhai, DUAN Bo, CHEN Ruofei

(CGN Digital Technology Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: In order to improve the control accuracy and tracking efficiency of fan variable pitch, a fan variable pitch control system is designed. According to the principle of fan variable pitch, programmable logic controller (PLC) is the main controller and permanent magnet synchronous motor is the servo motor to monitor the grid-connection process of fan variable pitch. By building a fuzzy adaptive PID controller model, the pitch angle adjustment and power tracking are realized. The experimental results show that this system can improve the precision of pitch angle control and the efficiency of wind energy utilization, and the fuzzy adaptive PID controller can increase the output power by 2.3%, which has high application value.

Key words: variable pitch control system; programmable controller; fuzzy adaptive PID controller; pitch angle; output power

风电是可再生清洁能源,具有随机性、时变性、灵活性强的特点,因此风电机组是非线性系统。近年来大型风机随着直径的增大叶轮出现了载荷不平衡、输出功率不稳定问题^[1]。为了保证机组安全运行,在风力发电场中风机变桨跟踪控制方法成了当前研究的热点。

由于风电机组容易受到外界环境和风速的干

扰,需要更有效的控制方法。文献[2]提出了基于蚁群算法的变桨控制方法,通过建立风电机组系统模型,靠最优-最劣蚂蚁系统优化变桨控制器参数,该方案能抑制叶轮风速的波动,却未考虑其他自由度运动对载荷的影响;文献[3]将深度学习与模糊算法相结合,以风机模型和变桨角度为训练环境和输出,通过搭建 Actor-Critic 单元训练变桨策略,

收稿日期:2024-02-04

作者简介:张淼(1984—),男,河北三河人,本科,工程师,研究方向:风力发电机组控制系统,风电变流器控制技术和风电变桨控制技术。

[†]通信联系人, E-mail: shai7213@126.com

该方案不依赖准确风机参数,但算法的泛化能力不足。

文献[4]提出了非线性模型预测风机变桨载荷方法,根据实时信息进行反馈校正调整桨距角,该方案运用PID技术降低塔架震动的影响,但在实际系统中有很强不确定性;文献[5]设计了主从与交叉耦合相结合的双电机变桨控制系统,以TMS320F28335为控制芯片,通过差速负反馈算法实现了双电机的协同控制,该系统具有较高的稳定性,但成本比较高。

针对以上问题,设计了风机变桨模糊自适应跟踪控制系统,在分析风机变桨的原理后,以PLC为主控制器,永磁同步电机为驱动电机,通过建立模糊自适应模型改变桨距角,提高了风机变桨的响应速度和精度及风能利用效率,加强了风机运行的抗干扰性和稳定性。

1 风机变桨跟踪控制方法总体设计

桨距角由风速、输出功率、风机转速来决定,当风速在额定风速以上时,风机通过调节桨距角令气流对叶片的功角和风能利用系数发生改变,从而使机组功率稳定。变桨距控制是风机的重要部分,传统的PID控制器调整方便,但适应性差,无法取得理想的控制效果;而模糊控制具有控制过程平滑和适应性好的优点,不需要精确的数学模型,因此被引入风机变桨控制中,但规则不好确定,精度不高^[6]。基于以上分析,本文提出了模糊自适应PID整定跟踪控制方法,该方法控制精度高、鲁棒性强、抗干扰性良好,能够使风机在满发情况下适应不同的工况,推导出最优桨距角,提高风机变桨的控制效果,拥有实际的工程意义。

在风力发电场中,风机通过变桨执行机构驱动桨叶转动,通过齿轮箱使风能转化为机械能,转变叶片的迎风角度调整输出功率,通过传动链驱动发电机将机械能转变为电能送入电网^[7]。由于功率调节方法的不同,风机包含变桨距风机和定桨距风机,变桨距控制系统如图1所示。

由图1可知,模糊PID控制利用模糊数学把规则的条件和操作用模糊集来表示,将初始PID参数等信息存入计算机知识库中,靠模糊推理算出 K_p 、 K_i 、 K_d 后,在线整定误差 e 和误差变化率,自适应调整并输出最优PID参数,从而满足不同的控制要求。

变桨距是让叶片绕着安装轴转动,让叶片形成

不同的桨距角,改变风机的运行特性。在本研究中变距机构以电机驱动齿轮旋转,带动桨叶和回转支承的内环转动,通过调节桨距角控制叶轮转速和功率,降低了叶轮的机械应力和输出功率波动,应在风电机组中得到广泛应用。

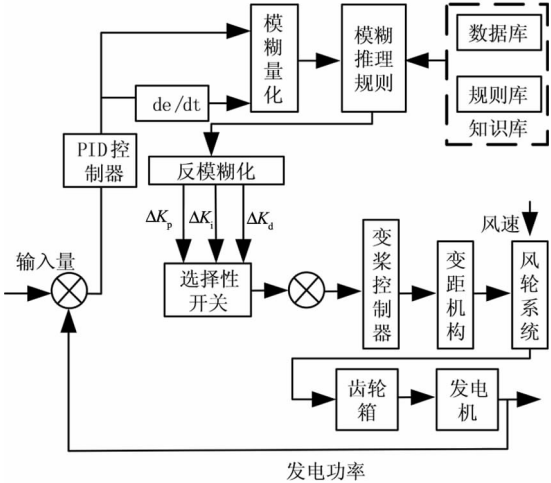


图1 模糊自适应PID风机变桨距控制系统

2 风机变桨跟踪控制体系设计

2.1 风机变桨距控制原理

根据贝兹空气动力学理论可得,风机吸收风能捕获的输出功率 P_r 如式(1)所示。

$$P_r = \frac{1}{2} C_P(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 V_w^3 = T_m \times \omega_r \tag{1}$$

在式(1)中, C_P 为风能利用系数; β 为桨距角; λ 为叶尖速比; ρ 为空气密度; R 为叶片半径; V_w 为风速; T_m 为风机的扭矩; ω_r 为风机的角速度。

风能利用系数 $C_P = f(\lambda, \beta)$ 能反映风能的利用效率,与桨距角 β 和叶尖速比 λ 存在函数关系如式(2)所示。

$$\begin{cases} C_P(\beta, \lambda) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-12.5/\lambda_i} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \\ \lambda = \frac{\omega_r R}{V_w} \end{cases} \tag{2}$$

由式(1)、式(2)可得,风机变桨距通过改变桨距角 β 使 C_P 随 V_w 的变化而变化,目的是让 P_r 保持在额定风速以下,以免风速过高给风机带来严重的损害^[8]。风机的功率特性可由一簇风能利用系数曲线表示,如图2所示。

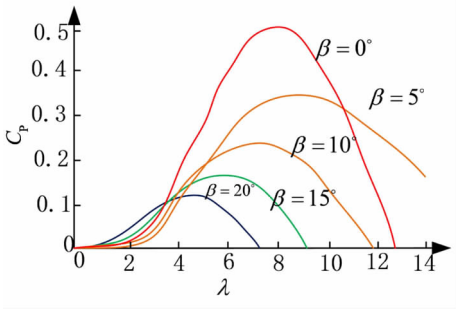


图 2 不同桨距角下 C_p 与 λ 的关系

2.2 风机变桨跟踪控制系统设计

风机变桨跟踪控制系统能够实现对三个桨叶的单独控制,由风速风向仪、变桨控制器、不间断电源(UPS)、伺服驱动器、永磁同步电机、齿轮箱等部件组成,如图 3 所示。

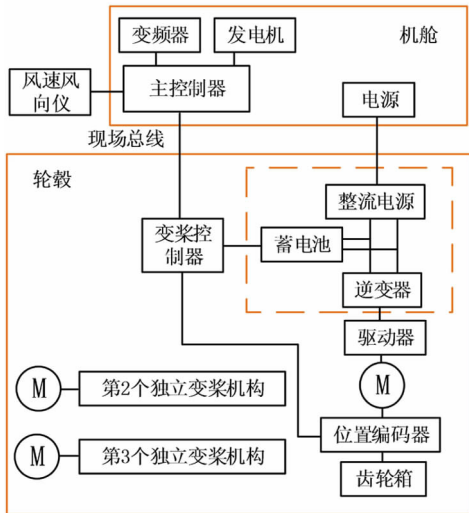


图 3 变桨距控制系统硬件框图

在图 3 中,虚线为 UPS 电源,可以将 AC380 V 转化为 DC24 V,为其他装置供电;主控制器通过现场总线与伺服系统相连;电源通过整流逆变电路与驱动器相连,改变控制电压让电机转动。位置编码器安装在变桨电机转轴上,能获得位置信息。每个桨叶所处的位置和承受的风力不同,变桨控制器在对比较距角位置和参考信号后,通过模糊自适应算法输出速度值驱动桨叶转动,让桨叶转到最佳迎风角度获取风能^[9]。

在风机变桨系统中,本研究选择倍福 BECK-HOFF BX3100 PLC 为变桨主控制器、ABB-ACS51 型号变频器、GM400 绝对式旋转编码器、三相永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor,PMSM)作为伺服电机,旨在提高风能

利用率。PLC 能够监测电机工作状态,收集风速、转速和叶片角度等信息;ABB-ACS51 变频器的功率为 5.5 kW,输入电压频率 50 Hz,输出电压频率可调 0—500 Hz;GM400 为二进制码输出,分辨率较高,能够提升桨叶的位置检测精度;PMSM 具有动态响应好、惯性参量小、重量小、调速平滑的特点,转矩为 13 N·m,功率为 4 K。在 $d-q$ 坐标下,PMSM 的数学模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L_d}i_d + \omega_e \frac{L_q}{L_d}i_q + \frac{1}{L_d}u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L_d}i_q - \omega_e \left(\frac{L_q}{L_d}i_d + \frac{1}{L_d}\lambda_0 \right) + \frac{1}{L_d}u_q \end{cases} \quad (3)$$

式中, i_d 、 L_d 、 u_d 分别为发电机在 d 轴的电流、电感和电源电压分量, i_q 、 L_q 、 u_q 分别为发电机在 q 轴的电流、电感和电源电压分量, R_a 为定子电阻, λ_0 为磁链。

若忽略磁场储能,PMSM 的输出扭矩如式(4)所示。

$$T_e = 1.5n_p[(L_d - L_q)i_d i_q + i_q \lambda_0] \quad (4)$$

式中, p 为微分算子。基于永磁同步电机的控制系统选择电流环、位置环、速度闭环控制,速度环和电流环用于快速跟踪,位置环用于精确定位,如图 4 所示。

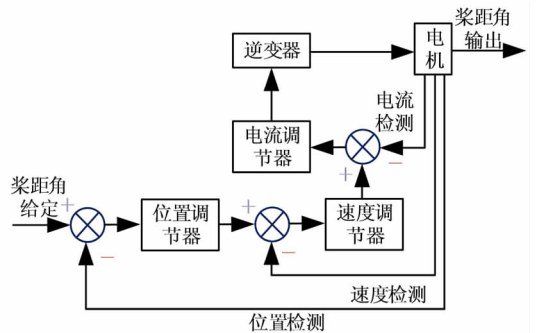


图 4 变桨距控制系统桨距角调节

在风机变桨时,变桨控制器给定桨距角,经过调节器输出控制电压,使电机得到圆形磁链,完成位置、速度、电流的控制^[10]。本研究选择比例位置控制器保证了系统的动态性能。

2.3 风机变桨跟踪控制系统并网流程

在不同的风速情况下,风机变桨系统分为开桨阶段、最大风能跟踪阶段及恒功率阶段。风机到了切入风速,风机开桨启动到并网过程。由于风速变化比较快,需监测是否满足开桨要求,如图 5 所示。

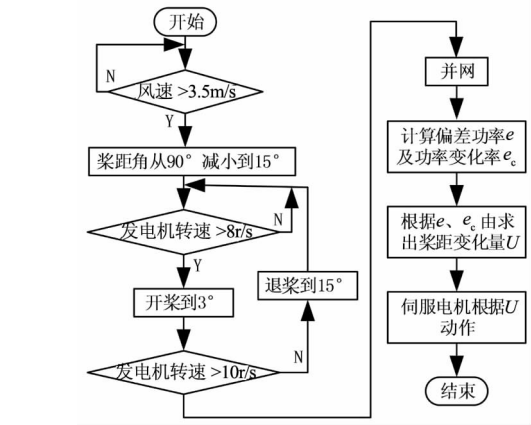


图 5 风机变桨并网流程

由图 5 可知,当传感器监测到风速大于 3.5 m/s,桨距角从 90°减小到 15°,此时继续监测发电机转速,若转速大于 8 r/s,则开桨到 3°,再检测发电机转速是否满足并网条件,否则退桨到 15°。在并网后,模糊控制器根据功率偏差 e 和偏差变化率 e_c ,调节 PID 控制器的参数,使变桨控制器的预期效果更好。

到了最大风能追踪阶段,无需变桨距执行机构动作。在恒功率阶段,桨距角在零处,为了使风机在额定功率左右正常运行,必须减小 C_p ,限制风机扭矩 T_m 的值,桨距角与 P 和 P_m 存在一定的函数关系,如式(5)所示。

$$\Delta\beta = F\{K_P(P - P_{ref}),\omega\} \tag{5}$$

式中, K_P 为比例系数, P 和 P_{ref} 分别为实际功率与额定功率。

3 基于模糊自适应 PID 算法的模型建立

传统的风机变桨一般采用 PID 算法来完成,具体函数如式(6)所示。

$$u(k) = K_P e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d e_c(k) \tag{6}$$

在式(6)中, K_i 和 K_d 分别为积分系统和微分系数, $e(k)$ 、 $e(j)$ 、 $e_c(k)$ 为系统误差。

由于风速具有随机性,传统的 PID 控制器控制精度较差,而模糊控制对非线性的对象的控制效果好。模糊控制器由模糊量化、模糊规则推理、知识库及反模糊化组成。本文将两者相结合,设计了模糊自适应 PID 控制器,该控制器在较大扰动的情况下,也能根据控制参数的变化改变控制策略,有较强的自适应能力。本文定义模糊子集 {NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB},模糊规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制器规则

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

在表 1 中,为了得到确定值,在对模糊子集进行反模糊化处理后,模糊系统能根据参考转速值获得最大风能利用系数。为了避免参数震荡,本文采用变论域自适应模糊算法,输入变量 x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 和 y 的论域分别为 $X_i = [-E, E]$ 、 $Y = [-U, U]$, X_i 和 Y 的模糊划分为 $\{A_{ij}\} (1 \leq j \leq m)$ 和 $\{B_{ij}\} (1 \leq j \leq n)$,模糊控制器的函数如式(7)所示。

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n A_{ij}(x_i) y_j \tag{7}$$

式中,论域 X_i 和 Y 会根据 x_i 和 y 的改变而改变,如式(8)、式(9)所示。

$$X(x_i) = [-\partial_i(x_i)E_i, \partial_i(x_i)E_i] \tag{8}$$

$$Y(y) = [-\beta(y)U, \beta(y)U] \tag{9}$$

在式(8)、式(9)中, $\partial_i(x_i)$ 和 $\beta(y)$ 为论域的伸缩因子,如式(10)、式(11)所示。

$$\partial(x) = 1 - \lambda \exp(-kx^2), \lambda \in (0, 1), k > 0 \tag{10}$$

$$\beta(t) = K_1 \sum_{i=1}^n p_i \int_0^t e_i(\tau) d\tau + \beta(0) \tag{11}$$

式中, K_1 为比例常数, $\beta(0) = 1$ 。模糊自适应控制器的控制规则如式(12)所示。

$$u(t) = \left[K_1 \sum_{i=1}^n p_i \int_0^t e_i(\tau) d\tau + \beta(0) \right]$$

$$U \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n A_{ij} \left\{ \frac{x_i(t)}{\partial_i[x_i(t)]} \right\} y_j \tag{12}$$

基于模糊自适应 PID 控制器的输入为额定转速、转速反馈的 e 和 e_c ,输出为桨距角参考值。该控制器能使风机保持在额定功率发电,以免机组转速波动导致电能输出不稳定影响电网的经济效益^[11]。

在阶跃风速等条件下,风机变桨距控制系统的效果从以下几个方面进行分析:

1. 桨距角控制精度:在阶跃风速变化时,系统能够快速检测到风速变化,并根据风机变桨原理,通过调节桨距角来改变叶片的角度以适应风速变化。通过模糊自适应 PID 控制器的调节,系统能够实现快速响应和精确的桨距角控制,从而保持风机在不同风速条件下的最佳效能。

2. 功率跟踪能力:在阶跃风速变化时,系统能够根据风机的特性以及实时的风速信息,通过桨距角的调节来实现功率的跟踪。模糊自适应 PID 控制器的自适应能力使得系统能够根据不同的风速条件,动态调整桨距角,从而实现风机的最大功率输出。

3. 控制效果稳定性:在阶跃风速变化时,系统能够快速响应,并通过桨距角的调节来保持系统的稳定性。模糊自适应 PID 控制器能够根据风速变化的情况,动态调整控制参数,使系统能够快速适应风速变化,并保持桨距角的控制精度。因此,在阶跃风速等条件下,该系统能够保持稳定的控制效果。

综上所述,该风机变桨距控制系统在阶跃风速等条件下能够实现精确的桨距角控制和功率的跟踪,具有较高的控制精度和稳定性,能够提高风能利用效率,具有广泛的应用前景。

4 实验分析

为了验证风机变桨模糊自适应跟踪方法的正确性和有效性,本文在风力发电变桨距试验台上进行仿真,采用 Intel core i5 CPU、RAM 计算机,实验环境如图 6 所示。



图 6 实验环境

根据变桨系统执行机构原理,本文在 MATLAB/Simulink 中搭建了风力发电的系统模型,仿真用的风电机组相关参数如表 2 所示。

表 2 风力发电机组参数表

名称	参数值	名称	参数值
额定功率	5 MW	风轮直径	126 m
额定风速	12.5 m/s	叶尖速度	80 m/s
切入与切出风速	3.5 m/s, 25 m/s	切入与额定转速	6.9 r/min, 12.1 r/min
轮毂直径	3 m	轮毂高度	90 m

由表 2 可知,本文以 5 MW 的永磁风机为仿真对象,机组一般在风速 3.5 m/s 开始启动,风速在 12.5 m/s 就达到了额定风速,风速高于 25 m/s 时机组停机。在风机正常运行时,风速波形如图 7 所示。

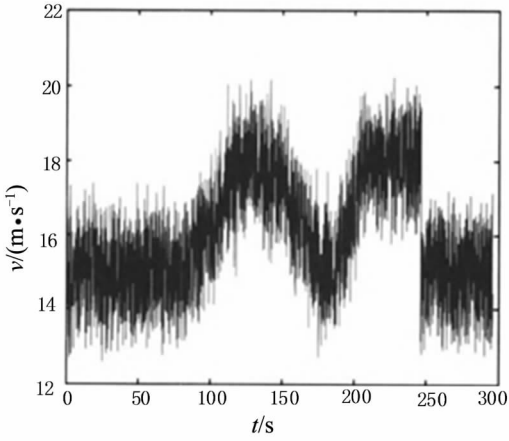


图 7 风速变化曲线

在图 7 中,风速变化较大,不稳定。在风速波动的环境下,为了分析桨距角变化情况和风机工作状态,本文通过 MATLAB 得到了桨距角的变化曲线,如图 8 所示。

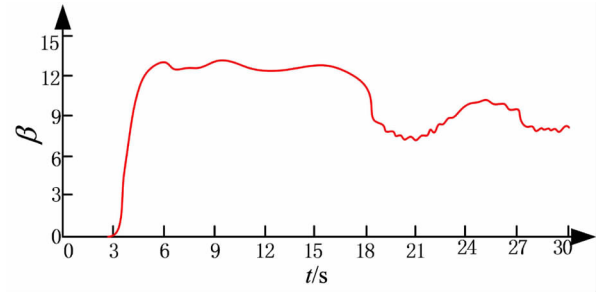


图 8 桨距角 β 变化曲线

由图 8 可知,桨距角会随着风速的变化而变化,当桨距角较大时能降低风能利用效率,当桨距角较小时风机能动态捕获风能,使输出功率稳和额定功率差别不大。

在风机变桨系统中,桨距角和叶尖速比的增加

都会使风能利用系数增加,通过数据模拟能得到不同工况下桨距角和叶尖速比的最优值, C_P 在 MATLAB 中的仿真效果如图 9 所示。

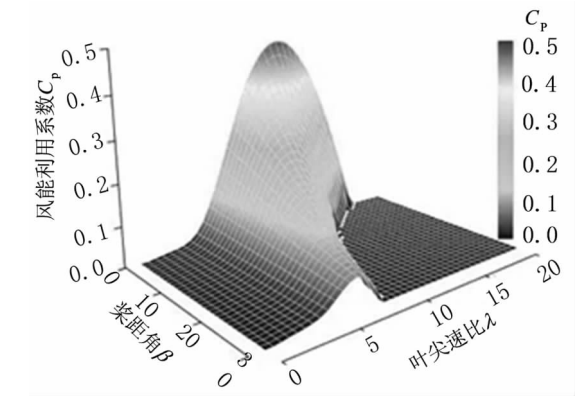


图 9 风能利用系数 3D 仿真

在图 9 中,通过调整叶轮的桨距角就能改变风能利用系数 C_P ,从而影响输入给发电机的扭矩,提高和风能利用效率,使输出功率保持稳定。本文对比了传统 PID 和模糊自适应 PID 的输出功率,如图 10 所示。

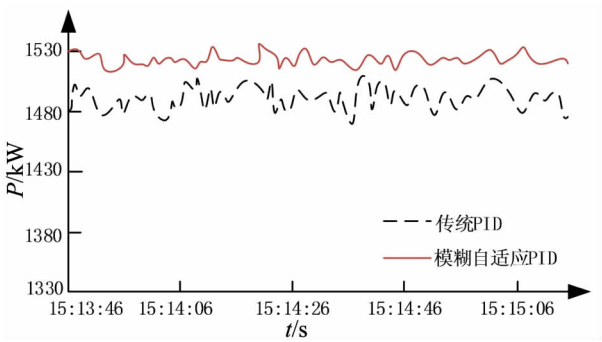


图 10 风机输出功率对比

由图 10 可知,和传统的 PID 控制器相比,模糊自适应 PID 控制器输出功率提高了 2.3%,波动明显得到了降低,对功率跟踪的效果比较好^[12]。

5 结 论

为了跟踪控制风机的桨距角,将 PID 控制和模糊控制结合到一起,设计了风机变桨控制系统,

根据模糊原理修改 PID 参数值,最终减小了机组的功率波动。与其他方法相比,模糊自适应控制器鲁棒性强,能够控制桨距角,跟踪功率,提高风机的发电量,适合复杂的大型风机的工程应用。但频繁的变桨动作会给风电出力带来不确定性和波动性,本文还需在减少桨距角调节上做出进一步的研究。

参考文献

[1] 程志江,袁嘉旺,陈星志,等. 海上漂浮式风机变桨距控制策略研究[J]. 振动与冲击,2023,42(15):260—267,297.

[2] 李飞龙,周腊吾,李玲,等. 基于蚁群算法的 Spar 型浮式风机独立变桨控制方法[J]. 可再生能源,2020,38(6):771—777.

[3] GARCIA S E J, SANTOS M. Deep learning and fuzzy logic to implement a hybrid wind turbine pitch control [J]. Neural Computing and Applications, 2021, 34 (13): 1—15.

[4] 周嘉玉,郝万君. 基于 NMPC-PID 的大型风力机独立变桨控制[J]. 机床与液压,2023,51(3):151—155.

[5] 代兴华,王海明,赵瑞杰,等. 基于双电机的变桨同步控制系统设计[J]. 微电机,2021,54(11):88—92.

[6] 司荣国,贾成真,王灵梅,等. 基于 5MW 风机模型的变初值模糊 PI 变桨控制技术研究[J]. 可再生能源,2020,38(6):778—783.

[7] 张真源,刘国荣,杨小亮,等. 基于 RBF 神经网络的参数自适应 PID 变桨控制器的设计[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(5):16—23.

[8] 孙寒冰,刘伟杰,荆丰梅. 基于规定性能方法的海上浮式风机独立变桨控制[J]. 哈尔滨工程大学学报,2023,44(5):767—773.

[9] 何胜华,黄弘,范必双,等. 带自适应模糊神经网络补偿的自耦合 PI 在风力机变桨控制中的应用[J]. 可再生能源,2023,41(5):618—624.

[10] OAKS N F, HASAN M A, DIPANKAR D. Artificial intelligence and machine learning in grid connected wind turbine control systems: a comprehensive review [J]. Energies, 2023, 16 (3): 1530—1530.

[11] 王迎博,易成宏,孙海鹏,等. 基于变论域模糊控制的风机叶片颤振抑制[J]. 科学技术与工程,2021,21(22):9365—9371.

[12] 胡业林,邓想,郑晓亮. 改进遗传算法优化的矿井局部通风机模糊 PID 控制器设计[J]. 工矿自动化,2021,47(9):38—44.