

基于鲸鱼优化算法的风力发电机组变桨模糊控制策略

赵南南, 杨旭*, 邹琳, 马毓敏

(西安建筑科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710055)

Pitch Fuzzy Control Strategy for Wind Turbine Based on Whale Optimisation Algorithm

ZHAO Nannan, YANG Xu*, ZOU Lin, MA Yumin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Due to factors such as wind variability and randomness, the power output of wind turbines remains unstable. When the wind speed exceeds the rated wind speed, the stability of the wind power generator's output power is guaranteed by precisely regulating the pitch angle of the blades. In relation to this issue, a wind turbine pitch control model is built by Matlab/Simulink, and a whale algorithm-optimized fuzzy PID controller is introduced. However, there are many parameters of fuzzy controller, and it is difficult to set up by expert experience alone. Therefore, using the whale algorithm, and achieving optimal tuning of fuzzy parameters, effectively addressing the wind turbine's significant hysteresis and nonlinearity. Comparing the performance metrics of the PID controller and the fuzzy PID controller, and the simulations results show that the latter ensures rapid power convergence to rated values, enhances system dynamic response, and offers precise pitch angle adjustments. Moreover, the fuzzy PID controller precision minimizes pitch mechanism fatigue, and extends the wind turbine's lifespan.

Key words: wind turbine; pitch control; whale optimization algorithm; fuzzy PID controller

摘要: 由于风的变化性、随机性等因素,风电机组的输出功率处于不稳定的状态。当风速超过额定风速时,通过精确地调节桨距角,保证风电机组输出功率的稳定性。

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-443)

Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2019JM-443)

针对该问题,基于 Matlab/Simulink 仿真软件,搭建出风电机组变桨控制模型,设计了基于鲸鱼算法优化的模糊 PID 控制器。然而,模糊控制参数繁多,仅靠专家经验进行整定比较困难。因此,通过鲸鱼算法对模糊参数进行在线最优整定,很好地解决了风电机组的大滞后和非线性问题。通过对比分析 PID 控制器和模糊 PID 控制器的性能,仿真结果表明后者可以使功率快速趋于额定值,提高了系统的动态响应,并且可以精确调整桨距角。此外,模糊 PID 控制器最大限度减轻了变桨机构的疲劳,增加了风机的寿命。

关键词: 风电机组; 变桨控制; 鲸鱼算法; 模糊 PID 控制器

0 引言

风能是一种可再生清洁能源,对于可持续发展和应对气候变化具有重要意义。变桨控制是风力发电系统中至关重要的技术,变桨控制可以使风力发电机在不同风速条件下最大程度地捕获风能,提高发电效率,同时确保风力发电系统的安全运行。尽管传统的比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制器在有精确模型的线性控制系统中表现优异,但在应对复杂的非线性风电系统时,其效果往往无法满足人们的期望^[1]。因此,国内外学者对变桨控制进行了深入研究,将一些模糊控制器^[2]、鲁棒控制器^[3]、自抗扰控制器^[3-4]以及滑模控制器^[5]应用到风电变桨控制中,并取得较好的控制效果。

模糊控制是一种非线性控制方法,其不需要被

控对象精确的数学模型,通过对输入和输出之间的关系进行模糊化处理,实现对系统的控制,具有较强的抗干扰性,响应速度快。鉴于模糊控制具有较好的控制效果,其已经被应用到风电机组变桨距控制中。但模糊控制器参数多,人工调节周期长且控制效果不理想。因此,相关学者提出将粒子群算法^[6]、灰狼算法^[4]等智能优化算法应用到模糊控制中,实现对参数的自寻优整定。鲸鱼优化算法是一种基于座头鲸行为的启发式优化算法,其模拟了座头鲸在寻找食物时的集群行为和迁移策略,具有全局收敛性和较快的收敛速度,适用于解决多目标优化工程问题,被广泛应用于函数优化、机器学习、故障诊断和工程设计等领域^[7-10]。

模糊 PID 控制器的性能除了与模糊规则库有关以外,还与两类因子存在着紧密的联系,参数整定问题已成为目前模糊控制研究的焦点之一。为实现模糊控制器参数的自寻优整定,本文采用鲸鱼优化算法对量化因子、比例因子和模糊 PID 的三个初值进行最优整定,以消除人工基于经验调节的主观性以及不确定性。仿真结果表明:该方法具有较好的参数自寻优能力,同时改善了机组输出功率的波动性、提高了系统的动态响应和并网的安全性。

1 风电机组建模

风力发电系统是一个融合空气动力学特性、机械特性和电气特性的综合非线性系统。该模型主要由风力机模型、传动系统模型、永磁同步发电机模型以及变桨执行机构模型这四部分组成。

1.1 风力机模型

桨叶旋转时,其捕获的功率 P_w 为

$$P_w = \frac{\rho}{2} A C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

风力机转矩 T_m 为

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

风能利用系数 C_p 可表示为

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right] - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (3)$$

式中: ρ 为空气的密度; v 为风速; A 为风轮面积; λ 为叶尖速比; β 为桨叶的桨距角; R 为风力机转子半径; ω 为风轮旋转角速度。

1.2 传动系统模型

直驱式风力发电机组中,它不使用传统的齿轮箱,风轮直接与发电机的转子相连,通过转子的旋转来产生电能。传动系统数学模型可以描述为

$$T_m - T_e - B_m \omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

为了简化分析,忽略阻尼项,令其值为 0,故:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} \quad (5)$$

式中: T_m 为风轮转矩; T_e 为电磁转矩; J 为风电机组的转动惯量; B_m 为阻尼系数。

1.3 永磁同步发电机模型

在 d - q 旋转坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L_d} i_d + \omega_e i_q + \frac{1}{L_d} u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L_q} i_q - \omega_e \left(\frac{L_d}{L_q} i_d + \frac{1}{L_q} \psi_f \right) + \frac{1}{L_q} u_q \end{cases} \quad (6)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴的电流; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴的电感; u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴的电压; R_a 为定子电阻; ψ_f 为磁链; ω_e 为转子电角频率。

则发电机的电磁转矩为

$$T_e = 1.5 N_p [(L_d - L_q) i_d i_q + i_q \psi_f] \quad (7)$$

若 $L_d = L_q$, 则:

$$T_e = 1.5 N_p i_q \psi_f \quad (8)$$

式中: N_p 为发电机极对数。

1.4 变桨执行机构模型

考虑到风电机组的电气和机械极限,实际运行中,执行机构的变桨幅度在 $-2^\circ \sim 30^\circ$ 之间,变桨速率则不会超过 $\pm 10^\circ/\text{s}$ 。将其简化为一阶惯性环节:

$$\tau_\beta \frac{d\beta}{dt} = \beta_{\text{ref}} - \beta \quad (9)$$

式中: τ_β 为时间常数; β 为目前桨距角值; β_{ref} 为给定桨距角值。

对上式进行拉氏变换:

$$\frac{\beta}{\beta_{\text{ref}}} = \frac{1}{\tau_\beta s + 1} \quad (10)$$

2 模糊 PID 控制原理

模糊 PID 控制是一种结合模糊逻辑和 PID 控制的方法,具有两种控制策略的优点^[11-15]。模糊 PID 控制器克服了传统 PID 控制在处理非线性、时变和复杂系统时的局限性。此外,模糊 PID 控制具有更高的灵活性,可以应对不同的系统和

控制要求^[16]。模糊控制器将风电机组的额定功率 P_{eref} 与输出功率 P_e 的误差值 e 和误差变化率 ec 作为输入变量,经过模糊化、模糊推理、去模糊化三个部分,最后输出 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 三个参数变量,从而实现 PID 参数的实时调节^[17],模糊 PID 控制原理框图如图 1 所示。

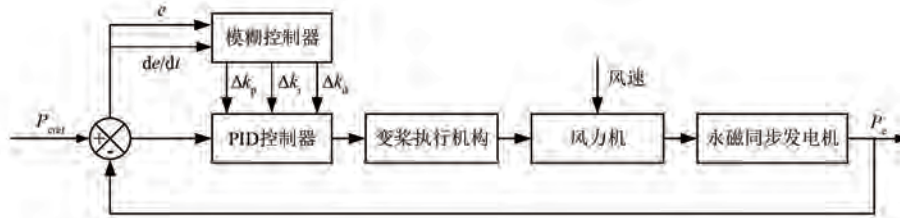


图 1 模糊 PID 控制原理框图

Fig. 1 Fuzzy PID control block diagram

调整后的控制器参数为

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases} \quad (11)$$

式中: k_p 、 k_i 、 k_d 为调整后的参数; k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} 为 PID 的三个初值; Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 为模糊控制器的输出参数变量。

3 模糊 PID 控制器设计

3.1 定义输入、输出变量及隶属函数

规定风电机组的功率偏差应小于额定功率的 10%, 即 ± 200 kW。针对本文研究的 2 MW 风机, 可以设定输入功率偏差 e 的论域为 $[-200$ kW, 200 kW]。输入与输出均采用七个语言值变量, 其中 NB (负大, $e \leq -200$ kW); NM (负中, -200 kW $\leq e \leq -100$ kW); NS (负小, -100 kW $\leq e \leq -20$ kW); Z (零, -20 kW $\leq e \leq 20$ kW); PS (正

小, 20 kW $\leq e \leq 100$ kW); PM (正中, 100 kW $\leq e \leq 200$ kW); PB (正大, $e \geq 200$ kW)。同理, 设定输入功率偏差 ec 的论域为 $[-400$ kW/s, 400 kW/s]。最后, 将其映射到模糊论域 $[-6, 6]$ 中。

将模糊控制器输出变量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 分别作为 PID 控制器参数的修正值, 结合传统 PID 参数调整原则, 设置其模糊论域分别为 $[-0.3, 0.3]$ 、 $[-0.06, 0.06]$ 、 $[-3, 3]$ 。为保证输出功率的平稳性, 输入的隶属函数均采用平滑的高斯型, 而当输出的模糊集为零 (Z) 时采用高斯型, 其余隶属函数均采用简单的三角形。

3.2 模糊规则库的建立

模糊规则库是由一系列模糊规则组成的知识库, 由专家和工作人员长期积累经验所建立^[18], 用于将输入模糊集映射到输出模糊集, 以 “If e and ec then Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d ” 的样式进行建立。模糊 PID 控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊 PID 控制规则表

Tab. 1 Fuzzy PID control rule sheet

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	Z/Z/NM	Z/Z/PS
NM	PB/ NB/PS	PB/ NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/Z/Z
NS	PM/NB/Z	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NS/PS/Z
Z	PM/NM/Z	PM/NM/NS	PS/NS/NS	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/Z
PS	PS/NM/Z	PS/NS/Z	Z/Z/Z	NS/PS/Z	NS/PS/Z	NMPB/Z	NM/PB/Z
PM	PS/Z/PB	Z/Z/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	Z/Z/PB	Z/Z/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

3.3 量化因子和比例因子的选择

量化因子和比例因子是用于调整模糊控制器输出的重要参数,起到调节输出离散级别、精度和增益的作用,以实现对系统的精确控制、确保系统的稳定性。起初,两类因子是通过近似计算和经验积累得出,不仅耗时而且十分困难。

3.4 模糊推理与去模糊化

模糊推理是模糊控制系统中的一个关键步骤,用于将模糊输入转换为模糊输出。在模糊推理过程中,首先根据系统的输入和定义的模糊规则,将输入值映射到模糊集合中合适的隶属度值。然后,通过应用模糊规则的逻辑关系,计算出相应的模糊输出值。

去模糊化是将模糊输出映射到实际输出空间的过程,以便进行实际的控制或决策。常用的去模糊化的方法主要有:最大隶属度法、中位数法以及重心法。在选择方法时,需要考虑系统的性能要求、实时性、复杂度和计算效率等因素。重心法计算直观简单,具有可解析性且物理含义清晰。因此,本文采用重心法进行去模糊化处理^[19]。重心法由下式描述:

$$u^* = \frac{\int_a^b u^* \mu(u) du}{\int_a^b \mu(u) du} \quad (12)$$

式中: u^* 为清晰量; u 为输出的控制量; μ 为隶属度函数; b 为清晰化值的上限; a 为清晰化值的下限。

4 鲸鱼算法寻优

4.1 鲸鱼算法

与灰狼算法、水循环算法以及粒子群算法等智能优化算法类似,鲸鱼算法也是一种自然启发式优化算法,最初是由 Seyedali Mirjalili 于 2016 年提出。其基本思想是模拟鲸鱼群体的行为,寻优过程主要包括 3 个环节:围捕猎物、局部搜索和随机搜索^[20]。其本质思想是基于统计优化,与其他算法相比具有参数设置少、操作简单、易于实现以及寻优能力强等优点。

4.2 寻优过程

4.2.1 围捕猎物

类比于真实的鲸鱼行为,鲸鱼在觅食时会围绕着猎物,采取相应的捕食策略。假设某一鲸鱼

个体所处的位置是目标函数的最优解,那么其他鲸鱼便会更新自己的位置,以增加找到更优解的机会,位置更新计算式为

$$D = |C \cdot X^*(t) - X(t)| \quad (13)$$

$$X(t+1) = X^*(t) - A \cdot D \quad (14)$$

式中: A 、 C 为系数向量; t 为迭代次数; $X^*(t)$ 为当前最优适应度鲸鱼的位置向量; $X(t)$ 为当前鲸鱼所处的位置向量。

其中 A 、 C 的计算式如下:

$$A = 2a \cdot r - a \quad (15)$$

$$C = 2r \quad (16)$$

式中: a 在整个迭代过程中由 2 线性递减到 0; r 为 $[0,1]$ 中的随机向量。

4.2.2 局部搜索

鲸鱼的捕食行为主要包含两种方式:

a) 气泡网捕食

采用气泡网捕食时,座头鲸会在猎物周围产生气泡网,以限制猎物的逃逸路径,从而更容易捕获猎物,位置更新计算式为

$$X(t+1) = D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X^*(t) \quad (17)$$

$$D' = |X^*(t) - X(t)| \quad (18)$$

式中: D' 为个体和最优鲸鱼的距离; b 为一个常数,表示螺旋形状,取为 1; l 为区间 $[-1,1]$ 均匀分布的随机数。

b) 包围捕食

捕猎时鲸鱼的群体位置需采用式 (14) 进行更新。

鲸鱼在围捕猎物时会采用上述两种捕食方式,通常设置鲸鱼采用两种捕食方式的可能性各为 0.5,表达式为

$$X(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - A \cdot D, & P \leq 0.5 \\ D' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + X^*(t), & P > 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

式中: P 为值域为 $[0,1]$ 的随机数。

4.2.3 随机搜索

随机搜索通常被用作初始阶段的探索机制,以便尽快地在搜索空间中找到一些潜在的解。此外,鲸鱼在捕食过程还会进行大范围的随机搜索猎物。在该算法中,是通过 $|A|$ 的大小判断鲸鱼是否进入随机搜索这一过程。当 $|A| < 1$ 时,鲸鱼会游向最优鲸鱼所处的位置;当 $|A| \geq 1$ 时,鲸鱼则会选择随机个体为目标进行位置更新,迫使鲸鱼偏离猎物,借

此找到一个更合适的猎物,表达式为

$$X(t+1) = X_{\text{rand}}(t) - A \cdot |C \cdot X_{\text{rand}}(t) - X(t)| \quad (20)$$

式中: $X_{\text{rand}}(t)$ 为随机鲸鱼的位置向量。

鲸鱼算法优化流程可用图 2 来表示。

4.3 鲸鱼算法优化模糊控制器参数

模糊控制所涉及的参数繁多且相互影响,因

此需要对参数进行协调组合以得到系统最优性能。本文采用鲸鱼算法,通过调用搭建的风力发电机组变桨控制模型,对模糊 PID 控制的参数进行最优整定,使控制效果达到最佳。鲸鱼的位置对应待优化的参数(Whale Optimisation Algorithm-Fuzzy Proportional Integral Derivative, WOA-FPID)控制结构图如图 3 所示。

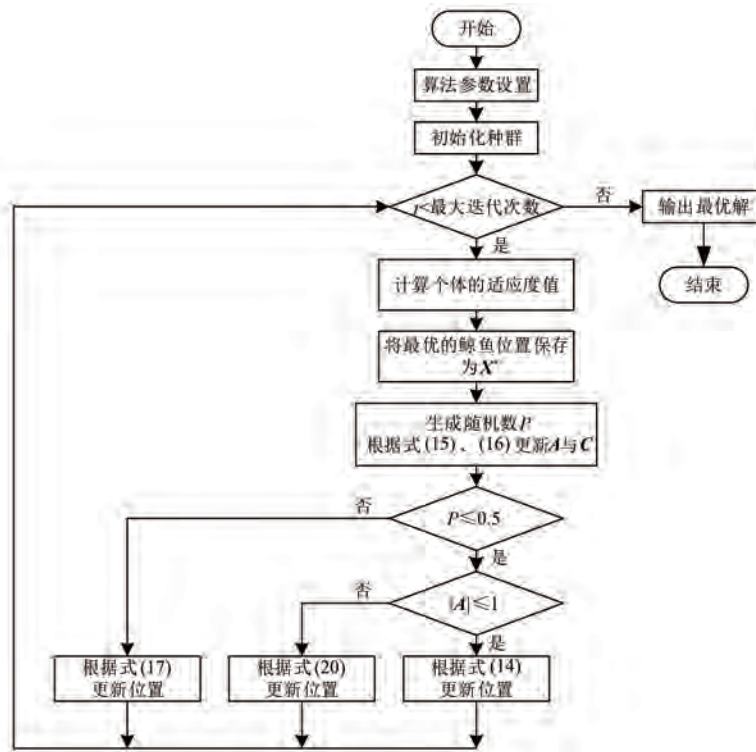


图 2 鲸鱼算法优化流程图

Fig. 2 Whale algorithm optimisation flowchart

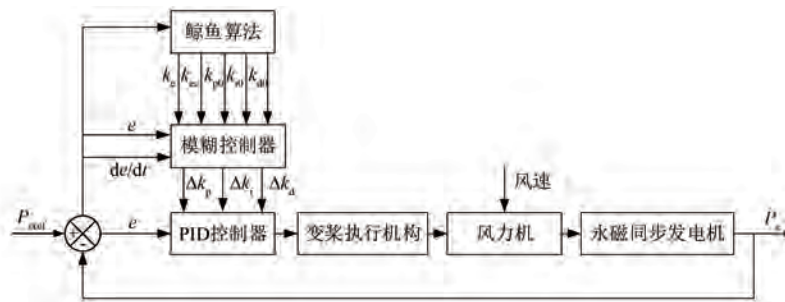


图 3 WOA-FPID 控制结构图

Fig. 3 WOA-FPID control structure diagram

具体步骤如下:

- (1) 设置初始种群数量和最大迭代次数;
- (2) 设置参数的上下界;
- (3) 确定适应度函数,本文采用衡量控制系

统的性能评估指标 ITAE 作为适应度函数^[21],指标越小,表示控制系统的性能越好,表达式如下:

$$J = \int_0^t |e(t)| dt \quad (21)$$

- (4) 运行鲸鱼优化算法,输出优化后 5 个参

数(分别为 k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} 、 k_e 、 k_{ec})的数值;

(5) 通过 *sim* 函数调用风力发电机组系统仿真模型,通过适应度函数对优化后的参数进行评价;

(6) 若达到最大的迭代次数,则输出全局最优解,并将优化后的参数带入模型中,进行仿真。

5 仿真结果及分析

在鲸鱼优化算法中,种群规模过小易陷入局部最优,太大则会导致计算量增加和收敛性变坏;迭代次数过少会导致搜索不充分,过多则会导致计算时间增加,收敛速度变慢。因此,设定种群规模为 10,最大迭代次数为 20,种群维数为 5。参数的寻优范围分别设置为 $K_e \in [0.02, 0.04]$ 、 $K_{ec} \in [0.01, 0.02]$ 、 $K_p \in [0.5e-6, 4e-6]$ 、 $K_i \in [1e-5, 8e-5]$ 、 $K_d \in [3e-7, 1e-5]$,在 Matlab/Simulink 中进行仿真,得到 WOA 的迭代曲线,如图 4 所示。图中适应度值越小,表示当前鲸鱼的位置最优。从迭曲线可知,WOA 在迭代 6 次后,适应度值收敛并且达到最优。

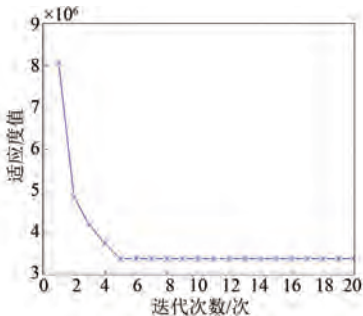


图 4 WOA 迭代曲线

Fig. 4 Iterative curve of WOA

为验证本文所设计的控制策略在风电机组中的效果,选取图 5 所示的高于额定风速的自然风速作为输入,将 PID、FPID 及 WOA-FPID 分别应用到模型中进行对比分析。机组参数如表 2 所示,风力发电机组整体仿真模型如图 6 所示,变桨控制器仿真如图 7 所示,不同控制策略的输出功率性能指标对比见表 3,仿真结果如图 8、9 所示。

图 8 所示为桨距角变化曲线对比,3 种控制下的曲线基本一致。第 44.9 s 时,风速突然下降,PID 在第 44.916 s、FPID 在 44.912 s、WOA-FPID 在第 44.901 s 作出减小桨距角的响应。在第 35.7 s 时,风速突然上升,PID 在第 35.73 s、FPID

表 2 永磁直驱风电机组
(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) 参数

Tab. 2 System parameters of PMSG	
参数名称	参数值
额定功率/MW	2
发电机额定转速/(r·min ⁻¹)	22.5
发电机最大转速/(r·min ⁻¹)	29
极对数	30
电机转动惯量/(kg·m ²)	28 059
定子电阻/Ω	6.7×10 ⁻³
定子额定电压/V	660
d、q 轴电感/mH	2.7
桨叶数	3
风轮半径/m	45
额定风速/(m·s ⁻¹)	11
切入风速/(m·s ⁻¹)	3
切出风速/(m·s ⁻¹)	25
风轮转动惯量/(kg·m ²)	41 185
额定轴转矩/(kN·m)	940
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.225

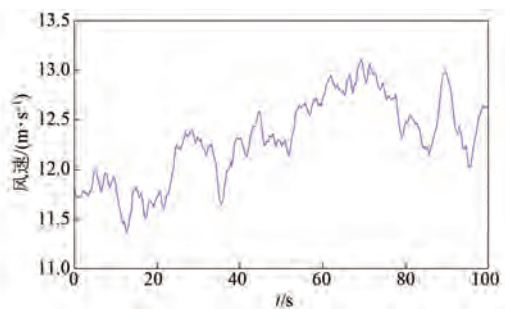


图 5 高于额定风速的风速曲线

Fig. 5 Wind speed profile above rated wind speed

表 3 不同控制策略下的输出功率性能指标对比

Tab. 3 Comparison of performance indexes of different control strategies

控制策略	上升时 间/s	超调 量/%	调节时 间/s	峰值时 间/s
PID	1.175	24.15	–	4.899
FPID	0.169	21.35	6.72	0.802
WOA-FPID	0.165	16.2	1.28	0.598

在第 35.711 s、WOA-FPID 在第 35.709 s 做出增大桨距角的响应。因此,WOA-FPID 控制的灵敏度优于其余两种控制方式。当第 10 s、风速为 11.84 m/s 时,PID 的桨距角为 4.14°,未经鲸鱼算法优化的 FPID 的桨距角为 4.38°,而经过鲸鱼算法优化的 FPID 的桨距角为 4.48°。当风速大于额定风速时,桨距角的细微变动对功率有明显影响,因此,WOA-FPID 控制的桨距角准确性最好,从而可以减少风机部件间的磨损,延长其使用寿命。

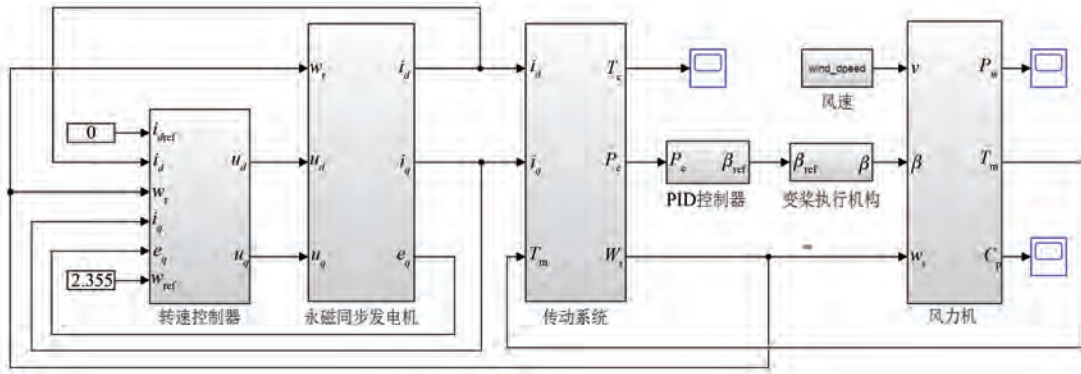


图 6 永磁直驱风电机组仿真模型

Fig. 6 Simulation of PMSG

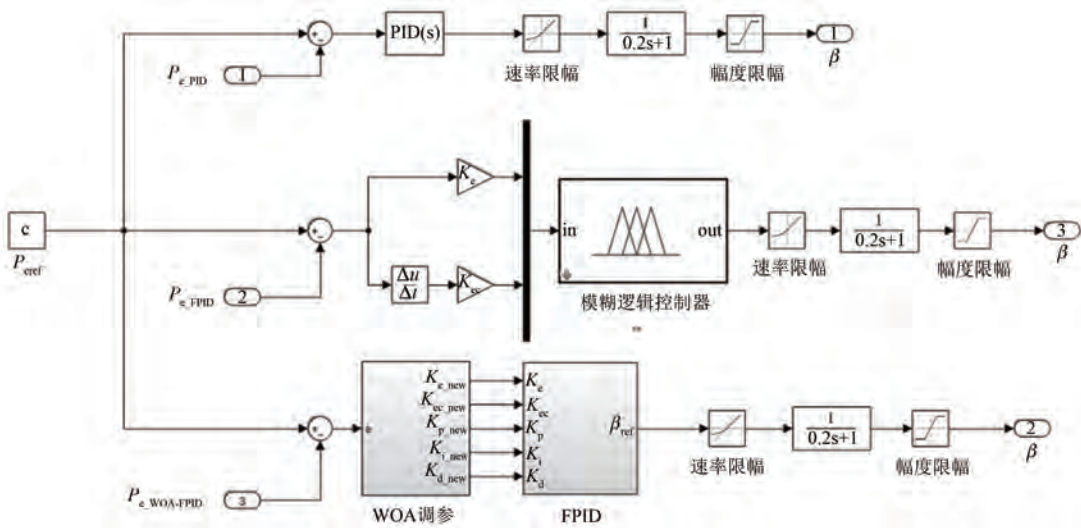


图 7 不同变桨控制器仿真模型

Fig. 7 Simulation model of different pitch controllers

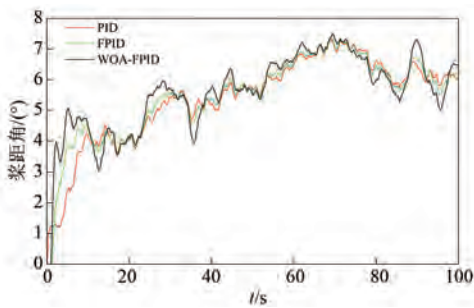


图 8 桨距角曲线对比

Fig. 8 Pitch angle curve comparison

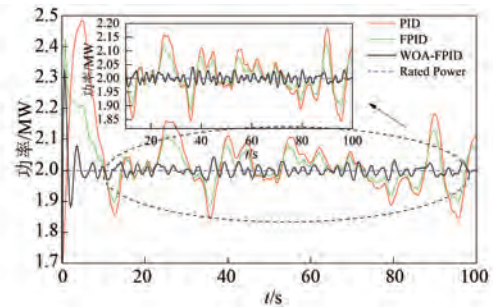


图 9 风电机组的输出功率

Fig. 9 Output power diagram for wind turbines

图 9 所示为风电机组的输出功率对比,传统 PID 的效果并不理想,FPID 与 WOA-FPID 都可以将输出功率稳定在额定值附近,但后者波动范围更小且稳定速度快。在第 12.8、35.8、95.6 s 等风速突变时刻, PID 的功率跌落幅值分别为

144 kW、156 kW、155 kW; FPID 的功率跌落幅值分别为 98 kW、120 kW、99 kW; WOA-FPID 的功率跌落幅值分别为 6 kW、5 kW、8 kW。当风机并网后,功率的波动容易对电网造成冲击,导致机组端电压以及并网电压的波动,也会影响到电网的暂

态稳定性。由以上分析可知,WOA-FPID 具有更小的功率波动,有更好的输出性能,提高了系统的稳定性、安全性与抗干扰性。

6 结语

本文首先介绍了风电机组各部分的数学模型以及模糊控制的基本原理,其次阐述了鲸鱼算法的原理与优化流程,很好地解决了风电机组变桨模糊控制的参数难以整定到最优的问题。通过 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了风电机组仿真模型,将 3 种不同变桨控制策略应用其中并进行对比分析,结果显示,WOA-FPID 性能明显优于其他两种控制器,减少了超调量,大幅度缩短了调节时间,并提高了抗扰动性能。同时,WOA-FPID 可以更好地将输出功率快速稳定到额定值附近,使得功率跌落幅值更小,并对桨距角进行精确调整,提高了系统的稳定性与安全性。

参考文献

- [1] 袁鹏, 张磊. 风电机组非线性 PI 变桨控制器设计[J]. 中国测试, 2018, 44(3): 114-119.
YUAN P, ZHANG L. Design of nonlinear PI pitch controller for wind turbine [J]. China Measurement & Testing Technology, 2018, 44(3): 114-119.
- [2] 杨伟, 邓程城, 徐乐. 基于模糊 Smith 预估的直驱风电机组变桨距控制器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 65-70.
YANG W, DENG C C, XU L. Pitch control of direct drive wind turbine based on the fuzzy Smith predictor [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 65-70.
- [3] 宋文静, 谢源, 黄文君, 等. 一种基于改进自抗扰控制器的风电机组变桨距控制策略[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(7): 2719-2726.
SONG W J, XIE Y, HUANG W J, et al. A variable pitch control strategy for wind turbines based on improved active disturbance rejection controller [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(7): 2719-2726.
- [4] 宋文静, 谢源, 黄文君, 等. 改进灰狼优化算法在变桨距自抗扰控制中的应用[J]. 可再生能源, 2020, 38(7): 905-910.
SONG W J, XIE Y, HUANG W J, et al. Application of improved grey wolf optimization algorithm in variable pitch auto disturbance rejection control [J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(7): 905-910.
- [5] 钟林恩. 永磁同步风力发电机变速变桨距鲁棒控制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
ZHONG L E. Research on variable speed variable pitch robust control of permanent magnet synchronous wind turbine generator [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [6] 周杨, 赵毅君, 赵耀, 等. 一种基于滑模自抗扰控制器的风电机组变桨距控制策略[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2022, 32(1): 36-41.
ZHOU Y, ZHAO Y J, ZHAO Y, et al. A variable pitch control strategy for wind turbine based on sliding mode and active disturbance rejection controller (SMC-ADRC) [J]. Journal of Hu'nan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 32(1): 36-41.
- [7] 杨得成, 宁亚楠, 李岩. 基于鲸鱼优化和模糊聚类的林火图像分割[J]. 黑河学院学报, 2023, 14(7): 177-182.
YANG D C, NING Y N, LI Y. Forest fire image segmentation based on whale optimization and fuzzy clustering [J]. Journal of Heihe University, 2023, 14(7): 177-182.
- [8] 李康乐, 张云逸, 韩劲松, 等. 基于 WOA 优化概率分布参考点的锂电池故障诊断[J/OL]. 计算机应用研究, 2023-07-28. <https://link.cnki.net/doi/10.19734/j.issn.1001-3695.2023.04.0154>.
LI K L, ZHANG Y Y, HAN J S, et al. Lithium batteries fault diagnosis based on WOA optimized probability distribution reference points [J/OL]. Application Research of Computers, 2023-07-28. <https://link.cnki.net/doi/10.19734/j.issn.1001-3695.2023.04.0154>.
- [9] 陈霖, 李岩, 景银华. 基于 WOA-Elman 快速推测火炮射击高空风参数研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(6): 108-113.
CHEN L, LI Y, JING Y H. Study on rapid speculation of high-altitude wind parameters of artillery firing based on WOA-Elman [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(6): 108-113.
- [10] 张萍, 吴显腾, 卢盛欣, 等. 基于鲸鱼算法的风机接地网优化设计[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 128-136+153.

- ZHANG P, WU X T, LU S X, et al. Optimized design of wind turbine grounding grid based on whale algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (6): 128-136+153.
- [11] 潘公宇, 郭丛摇, 晋恩荣. 基于粒子群优化的模糊自适应等效油耗最小能量管理策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2023, 37(9): 88-99.
- PAN G Y, GUO C Y, JIN E R. A fuzzy adaptive minimum energy management strategy for equivalent fuel consumpyion based on particle swarm optimization [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 37 (9): 88-99.
- [12] JHA A K, DASGUPTA S S. Fractional order PID based optimal control for fractionally damped nonlocal nanobeam via genetic algorithm [J]. Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems, 2019, 25 (11): 4291-4302.
- [13] 刘杰, 刘明芹. 基于模糊 PID 控制的永磁同步电机矢量控制研究[J]. 工业控制计算机, 2022, 35 (1): 152-154+157.
- LIU J, LIU M Q. Vector control of permanent magnet synchronous motor based on fuzzy PID control [J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(1): 152-154 +157.
- [14] 刘玉可. 超声波电机模糊自整定 PID 控制研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019.
- LIU Y K. Research on fuzzy self-tuning PID control of ultrasonic motor [D]. Luoyang: He' nan University of Science and Technology, 2019.
- [15] 顾祖成, 耿小江, 王永娟, 等. 模糊自适应 PID 控制在无刷直流电机调速系统中的应用[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49(1): 39-41.
- GU Z C, GENG X J, WANG Y J, et al. Application of fuzzy adaptive PID control in brushless DC motor speed control system [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2020, 49(1): 39-41.
- [16] 霍建楠, 王自强. 基于神经网络的摆动电机的模糊 PID 控制[J]. 电子设计工程, 2018, 26(12): 129-133+138.
- HUO J N, WANG Z Q. Fuzzy PID control of oscillating motor based on neural network [J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(12): 129-133+138.
- [17] 金爱娟, 郑天翔, 纪晨烨, 等. 基于模糊自适应 PID 控制的速度调节器设计与仿真[J]. 电子科技, 2018, 31(1): 29-33.
- JIN A J, ZHENG T X, JI C Y, et al. Design and simulation of speed regulator based on adaptive fuzzy PID control [J]. Electronic Science and Technology, 2018, 31(1): 29-33.
- [18] ZHAO Y, LUO C. Adaptive PID control with forgetting factor for three-phase asynchronous motor [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1626(1): 012091-012098.
- [19] BOUZIDI M, HARROUZ A, MANSOURI S. Control and automation of asynchronous motor using fuzzy logic [J]. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(2): 154-171.
- [20] 蔡斌军, 李朝旗, 何雍, 等. 基于 Fuzzy-PI 的直驱永磁风力发电系统 MPPT 控制[J]. 微特电机, 2023, 51(2): 51-55.
- CAI B J, LI C Q, HE Y, et al. Fuzzy-PI based MPPT control of direct-drive permanent magnet wind power generation system [J]. Small & Special Electrical Machines, 2023, 51(2): 51-55.
- [21] 张旭东. 基于异步电机的电动汽车控制策略研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
- ZHANG X D. Research on control strategy of electric vehicle based on asynchronous motor [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.

收稿日期:2023-09-27

收到修改稿日期:2023-12-05

作者简介:

赵南南(1983-),男,博士,副教授,主要研究方向为微电网风力发电并网技术、新能源汽车电驱动系统与控制,znn5838@qq.com;

*通信作者:杨旭(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向为永磁直驱风力发电机组变桨控制,374343672@qq.com。

Pitch Fuzzy Control Strategy for Wind Turbine Based on Whale Optimisation Algorithm

ZHAO Nannan, YANG Xu^{*}, ZOU Lin, MA Yumin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Key words: wind turbine; pitch control; whale optimization algorithm; fuzzy PID controller

With the development of the economy, the energy problem is becoming more and more prominent. Wind energy becomes one of the key energy sources developed by various countries because of its abundant reserves, cleanliness, environmental protection, renewability and other advantages. Therefore, the precise adjustment of wind turbine blade pitch angle to ensure the stability of the variable pitch control system, and then get safe, high-quality electricity is a key issue in the study of wind turbines.

This paper bases on Matlab/Simulink simulation software, the wind turbine pitch control model is built and a fuzzy PID controller is designed which bases on the whale algorithm. Firstly, the wind turbine has serious nonlinear characteristics, and the conventional PID control can not better realize the wind turbine pitch performance and the control effect is not in line with the expected value, thus the fuzzy PID pitch controller is designed. Which could improve the unit output power, however, there are problems such as manually adjusting the fuzzy parameters of the fuzzy parameters of the cycle is long and the control effect is not ideal.

Finally, the online optimal adjustment of fuzzy parameters by whale algorithm improves the reliability of the obtained parameters, which solves the problem of large hysteresis and nonlinearity of the wind turbine effectively, and can make the power quickly converge to the rated value. Moreover, the

algorithm improves the dynamic response of the system, and can accurately adjust the pitch angle, which reduces the fatigue of the pitch mechanism, and increases the life of the wind turbine. The output power performance index is shown in Tab.1. The output power error curve is shown in Fig.1.

Tab. 1 Comparison of performance indexes of different control strategies

Control Strategy	Rise time/s	Over shoot/%	Setting time/s	Peak time/s
PID	1.175	24.15	–	4.899
FPID	0.169	21.35	6.72	0.802
WOA-FPID	0.165	16.2	1.28	0.598

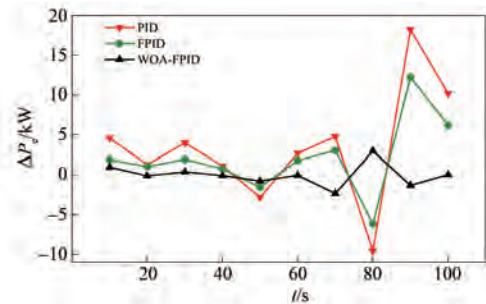


Fig. 1 Output power error curve

The simulation results show that the proposed pitch control strategy which could realize the precise adjustment of the pitch angle, stabilize the output power of the wind turbine near the rated value, improve the dynamic response characteristics of the wind turbine pitch system, and enhance the safety of grid connection.