



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117329070 A

(43) 申请公布日 2024. 01. 02

(21) 申请号 202311405538.6

(22) 申请日 2023.10.26

(71) 申请人 贵州理工学院

地址 550003 贵州省贵阳市云岩区贵工路1号

(72) 发明人 雷邦军 卢槐 吕兴玉

(74) 专利代理机构 贵州派腾知识产权代理有限公司 52114

专利代理师 张祥军

(51) Int. Cl.

F03D 7/02 (2006.01)

F03D 7/04 (2006.01)

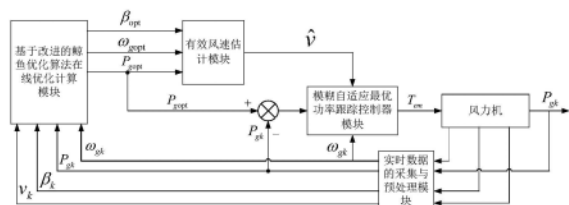
权利要求书3页 说明书7页 附图1页

(54) 发明名称

一种风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法

(57) 摘要

本发明提供一种风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法,包括风力机实时数据的采集与预处理模块、基于改进的鲸鱼优化算法(Improved Whale Optimization Algorithm, IWOA)的在线优化计算模块、基于IWOA和核极限学习机(Kernel Based Extreme Learning Machine, KELM)算法的有效风速估计模块、发电机的模糊自适应最优功率跟踪控制器模块。本发明设计了风力发电机的自适应模糊输出功率跟踪控制方法,以实现风力发电机输出功率平滑且达到最优的目标,从提高风力发电机的发电量。



1. 一种风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法,包括风力机实时数据采集与预处理模块、基于IWOA算法的在线优化计算模块、基于IWOA算法和KELM的有效风速估计模块、发电机的模糊自适应最优功率跟踪控制器模块;

所述风力机实时数据采集与预处理模块通过实时采集发电机输出功率、桨距角和发电机转速的实时数据,剔除异常数据,为在线优化计算模块提供输入变量;

在线优化计算模块对多目标优化模型求解,得到风力机发电机输出功率、桨距角和发电机转速的最优预测值,为有效风速估计模块提供输入变量;

有效风速估计模块的输出有效风速的估计值,为发电机的模糊自适应最优功率跟踪控制器提供输入变量;

发电机的模糊自适应最优功率跟踪控制器对风力机进行最优功率跟踪控制。

2. 如权利要求1所述的一种风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法,其特征在于:所述在线优化计算模块通过预处理模块将风力机实时数据采集与预处理模块提供的输入变量进行在线优化计算,获得发电机输出功率、发电机转速、桨距角的最优预测值。

3. 如权利要求2所述的一种风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法,其特征在于:所述在线优化计算模块还包括改进的IWOA算法的和多目标优化模型;

a. 在全风速下建立以风力机输出功率、发电机转速、桨距角为优化目标的多目标优化基础模型:

$$\begin{aligned} \min & f(x) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} h(x) = 0 \\ g(x) \leq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

式中 $f(x)$ 是多目标函数, $h(x)$ 是一个等式向量约束函数, $g(x)$ 是一个不等式向量约束函数;

其中多目标函数为:

$$f(x) = \varpi T_p + (1 - \varpi) T_g, \varpi \in (0, 1),$$

$$T_p = \sum_{k=1}^n \left(w_p (P_{gk} - \min\{P_N, P_m\})^2 + (1 - w_p) (P_{gk+1}^* - \min\{P_N, P_m\})^2 \right), w_p \in (0, 1),$$

$$T_g = \sum_{k=1}^n \left(w_g \left(\frac{\omega_{gk+1}^* - \omega_{gk}}{\omega_{\max}} \right)^2 + (1 - w_g) \left(\frac{\beta_{k+1}^* - \beta_k}{\beta_{\max}} \right)^2 \right), w_g \in (0, 1),$$

$$x = [P_2^*, \dots, P_{n+1}^*, \omega_{g2}^*, \dots, \omega_{gn+1}^*, \beta_2^*, \dots, \beta_{n+1}^*, \varpi, w_p, w_g]^T.$$

式中: T_p 是全风速下发电机实际输出功率跟踪期望预测值的目标函数, T_g 是发电机转速和桨距角的控制变化量最小化目标函数, x 是决策变量; P_{gk} 、 ω_{gk} 和 β_k 分别是 k 时刻实际输出功率、发电机转速和桨距角; P_{gk+1}^* 、 ω_{gk+1}^* 和 β_{k+1}^* 分别是发电机输出功率、发电机转子角速度和桨距角在 $k+1$ 时刻的期望预测值; ϖ 、 w_p 和 w_g 是权重系数; n 是优化进程, P_N 、 P_m 分别是风力发电机的额定输出功率和理论设计输出功率;

a. 1. 设置多目标优化模型的约束条件:

a. 1. 1. 气动功率平衡约束

$$\frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_p(\omega_{gk}, \beta_k) v_k^3 - P_m = 0,$$

$$\frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_p(\omega_{gk+1}^*, \beta_{k+1}^*) v_{k+1}^3 - P_{k+1}^* = 0.$$

式中： ρ 指的是空气密度 (kg/m^3)； v 指的是风速，单位为 m/s ； R 代表风轮的半径，单位为 m ， P_m 分别是风力发电机的理论设计输出功率， β_k 是风力发电机在 k 时刻的桨距角，单位为度， $C_p(\omega_{gk}, \beta_k)$ 是风力发电机风能利用系数，上述参数的关系表达式如下：

$$\begin{cases} P_m = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 v_k^3 C_p(\omega_{gk}, \beta_k), \\ C_p(\omega_{gk}, \beta_k) = 0.22 \left(\frac{116}{\Lambda} - 0.4\beta_k - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\Gamma}}, \\ \lambda = \frac{\omega_{gk} R}{n_g v_k}, \\ \frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta_k} - \frac{0.035}{\beta_k^3 + 1}. \end{cases}$$

式中， λ 是风机叶尖速比， n_g 是齿轮箱变速比；

a.1.2. 权重系数约束

$$0 < \varpi < 1,$$

$$0 < w_p < 1,$$

$$0 < w_g < 1.$$

a.1.3. 输出功率约束

$$0 \leq P_{gk+1}^* \leq \min\{P_N, P_m\}$$

a.1.4. 桨距角和发电机转速约束

$$\beta_L \leq \beta_{gk+1}^* \leq \beta_H,$$

$$\omega_L \leq \omega_{gk+1}^* \leq \omega_H.$$

式中， β_H 和 β_L 是桨距角的上下限， ω_H 和 ω_L 为发电机转速的上下限；

b. 改进的IWOA算法的为：

b.1. 改进的非线性收敛因子

$$a(t) = 4 \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^\mu \right) \right] \frac{e^{-\left(\frac{t}{\kappa t_{\max}} \right)^\mu}}{1 + e^{-\frac{\tau t}{t_{\max}}}}$$

其中 κ 、 τ 和 μ 是调节参数， t 和 t_{\max} 是分别为当前迭代次数和最大迭代次数；

b.2. 非线性惯性重量 ω ：

$$\omega(k) = 1 - \left(1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{t}{t_{\max}} \right) \right)^\gamma$$

式中， γ 为调节参数， t 和 t_{\max} 是分别为当前迭代次数和最大迭代次数；

b.3.改进的位置更新方程:

$$X(t+1) = \omega X_{\text{rand}} - A \cdot D, |A| > 1 \text{ 且 } p < 0.5$$

$$X(t+1) = \omega X_{\text{best}}(t) - A \cdot D, |A| \leq 1 \text{ 且 } p < 0.5$$

$$X(t+1) = (1 - \omega) X_{\text{best}}(t) + D_p e^{bl} \cos(2\pi l), p \geq 0.5$$

式中, $X(t+1)$ 为第 $t+1$ 代的位置向量, $X(t)$ 为第 t 代的位置向量, X_{rand} 为从当前种群中随机选择的位置向量, $X_{\text{best}}(t)$ 为迄今为止最优的位置向量, p 为随机选择概率, l 是区间 $[-1, 1]$ 上的一个随机数, b 表示用于描述螺旋形状的系数, A 、 D 和 D_p 是系数向量, 其表达式如下:

$$A = a(2r_1 - 1)$$

$$C = 2r_2$$

$$D = |C \cdot X_{\text{rand}} - X(t)|$$

$$D_p = |X_{\text{best}}(t) - X(t)|$$

式中, r_1 、 r_2 是区间 $[0, 1]$ 上的随机数。

4. 如权利要求3所述的一种风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法, 其特征在于: 所述有效风速估计模块的输入变量为最优预测功率 P_{gopt} 、最优预测转速 ω_{gopt} 和最优预测桨距角 β_{opt} , 其输出变量为有效风速的估计值 \hat{v} 。

5. 如权利要求4所述的一种风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法, 其特征在于: 所述风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制器的控制方法为:

$$\begin{cases} \dot{T}_{em} = \frac{1}{\omega_{\text{gopt}}} \left[ke + \frac{K_t}{J_t} T_{em} \omega_{\text{gopt}} + \frac{n_g^2}{J_t} T_{em}^2 \right. \\ \quad \left. - \frac{n_g}{J_t} T_{em} \hat{\Phi}^T \phi(x) + \hat{k}_1 T_{em} \delta_1 + \hat{\theta} \delta_2 \right] \\ \dot{\hat{\Phi}} = -k_2 \hat{\Phi} - \frac{n_g}{J_t} T_{em} e \phi(x) \\ \dot{\hat{k}}_1 = -k_3 \hat{k}_1 + T_{em} e \delta_1 \\ \dot{\hat{\theta}} = -k_4 \hat{\theta} + e \delta_2 \end{cases}$$

式中, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^n$ 为模糊变量, T_{em} 是发电机转矩, e 是发电机输出功率跟踪误差, $e = P_{\text{gopt}} - P_{\text{gk}}$, K_t 、 J_t 分别是发电机阻尼系数和等效惯性常数, $|\dot{P}_{\text{gopt}}| \leq P_1$, P_1 为一个未知常数, ε_1 和 ε_2 分别是充分小的正常数, $\delta_1 = \tanh\left(\frac{e}{\varepsilon_1}\right)$ 、 $\delta_2 = \tanh\left(\frac{e}{\varepsilon_2}\right)$ 、 $\hat{\theta}$ 是参数 $\theta = P_1$ 的估计, k_1 、 k_2 、 k_3 和 k_4 是严格正常数, \hat{k}_1 是未知常数 k_1 的估计, $\hat{\Phi}$ 是向量参数 Φ 的估计, $\phi(x) = [\phi_1(x), \phi_2(x), \dots, \phi_m(x)]^T$ 是函数向量, $\phi_i(x)$ 为是模糊基函数, 其表达式为:

$$\phi_i(x) = \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j)}{\sum_{i=1}^m \left(\prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j) \right)}$$

式中, $\mu_{F_j^i}(x_j)$ 表示 x_j 隶属于模糊集 F_j^i 的隶属度函数, m 为模糊规则数, 在本发明中 $m=2$ 。

一种风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及风力发电系的风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法邻域,具体涉及一种基于改进鲸鱼优化算法的功率在线优化计算方法和一种模糊自适应最优功率跟踪控制方法。

背景技术

[0002] 风力机由于受到受湍流、塔架、风剪差及地表粗糙度等因素的影响而使得风速在整个风力机旋转平面上的分布是不同的,导致风力机的最优实际输出功率曲线(称为动态功率曲线)与理论功率的设计曲线(称为静态功率曲线)偏差较大,这给风力发电运行控制带来了极大的挑战。

[0003] 决定风力机年度发电量的是动态功率曲线,而不是静态功率曲线。现有的风力机功率跟踪控制方法都是以静态功率曲线为功率跟踪控制的跟踪目标,没有考虑风湍流强度、风剪差及地表粗糙度、复杂地形等的影响致使动态功率曲线与静态功率曲线偏差较大的情况,从而导致控制效果不理想。因此,本发明构造一个基于改进的IWOA算法和一个多目标优化模型的在线计算优化模块,用以获取风力机输出功率的动态功率曲线,为风力机最优功率跟踪控制提供跟踪目标。

[0004] 风力发电系统是一个强非线性系统,要建立风力发电系统的精确数学模型是非常困难的,甚至可以说无法实现。本发明利用模糊逻辑系统强大的非线性逼近能力,用模糊基函数逼近风力发电系统未知的非线性时变函数,解决了风力发电系统建模难的问题。

发明内容

[0005] 针对风力发电系统数学建模难的问题和在线获取最优动态功率曲线难的问题,本发明提供一种风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法,提出了一种基于改进的鲸鱼优化算法(IWOA)的在线优化计算方法和一种模糊自适应最优功率跟踪控制设计方法,解决了上述两个关键问题。

[0006] 本发明通过以下技术方案得以实现。

[0007] 本发明提供一种风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法,包括风力机实时数据的采集与预处理模块、基于改进的鲸鱼优化算法(IWOA)的在线优化计算模块、基于IWOA和核极限学习机(KELM)算法的有效风速估计模块、发电机的模糊自适应最优功率跟踪控制器模块;以及,

[0008] 所述风力机实时数据的采集与预处理模块采集风力发电机输出功率、发电机转速、桨距角和风速的实时数据;

[0009] 所述基于改进的鲸鱼优化算法(IWOA)的在线优化计算模块,即第一微处理器,如图1所示,包括一个多目标优化模型和改进的灰狼优化IGWO算法,具体构成如下:

[0010] a.在全风速下建立以风力机输出功率、发电机转速、桨距角为优化目标的多目标优化模型:

$$[0011] \quad \min f(x)$$

$$[0012] \quad s.t. \begin{cases} h(x) = 0 \\ g(x) \leq 0 \end{cases}$$

[0013] 式中 $f(x)$ 是多目标函数, $h(x)$ 是一个等式向量约束函数, $g(x)$ 是一个不等式向量约束函数;

[0014] 其中多目标函数为:

$$[0015] \quad f(x) = \varpi T_p + (1 - \varpi) T_g, \varpi \in (0, 1),$$

$$[0016] \quad T_p = \sum_{k=1}^n \left(w_p \left(P_{gk} - \min \{P_N, P_m\} \right)^2 + (1 - w_p) \left(P_{gk+1}^* - \min \{P_N, P_m\} \right)^2 \right), w_p \in (0, 1),$$

$$[0017] \quad T_g = \sum_{k=1}^n \left(w_g \left(\frac{\omega_{gk+1}^* - \omega_{gk}}{\omega_{\max}} \right)^2 + (1 - w_g) \left(\frac{\beta_{k+1}^* - \beta_k}{\beta_{\max}} \right)^2 \right), w_g \in (0, 1),$$

$$[0018] \quad x = \left[P_2^*, \dots, P_{n+1}^*, \omega_{g2}^*, \dots, \omega_{gn+1}^*, \beta_2^*, \dots, \beta_{n+1}^*, \varpi, w_p, w_g \right]^T.$$

[0019] 式中 T_p 是全风速下发电机实际输出功率跟踪期望预测值的目标函数, T_g 是发电机转速和桨距角的控制变化量最小化目标函数, x 决策变量; P_{gk} 、 ω_{gk} 和 β_k 分别是 k 时刻实际输出功率、发电机转速和桨距角; P_{gk+1}^* 、 ω_{gk+1}^* 和 β_{k+1}^* 分别是发电机输出功率、发电机转子角速度和桨距角在 $k+1$ 时刻的期望预测值; ϖ 、 w_p 和 w_g 是权重系数; n 是优化进程, P_N 、 P_m 分别是风力发电机的额定输出功率和理论设计输出功率;

[0020] a.1.设置多目标优化模型的约束条件:

[0021] a.1.1.气动功率平衡约束

$$[0022] \quad \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\omega_{gk}, \beta_k) v_k^3 - P_m = 0,$$

$$[0023] \quad \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\omega_{gk+1}^*, \beta_{k+1}^*) v_{k+1}^3 - P_{k+1}^* = 0.$$

[0024] 式中: ρ 指的是空气密度(kg/m^3); v 指的是风速,单位为 m/s ; R 代表风轮的半径,单位为 m , P_m 分别是风力发电机的理论设计输出功率, β_k 是风力发电机在 k 时刻的桨距角,单位为度, $C_p(\omega_{gk}, \beta_k)$ 是风力发电机风能利用系数,上述参数的关系表达式如下:

$$[0025] \quad \begin{cases} P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_k^3 C_p(\omega_{gk}, \beta_k), \\ C_p(\omega_{gk}, \beta_k) = 0.22 \left(\frac{116}{\Lambda} - 0.4 \beta_k - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\Gamma}}, \\ \lambda = \frac{\omega_{gk} R}{n_g v_k}, \\ \frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta_k} - \frac{0.035}{\beta_k^3 + 1}. \end{cases}$$

[0026] 式中, λ 是风机叶尖速比, n_g 是齿轮箱变速比。

[0027] a.1.2.权重系数约束

[0028] $0 < \varpi < 1,$

[0029] $0 < w_p < 1,$

[0030] $0 < w_g < 1.$

[0031] a.1.3.输出功率约束

[0032] $0 \leq P_{gk+1}^* \leq \min \{P_N, P_m\}$

[0033] a.1.4.桨距角和发电机转速约束

[0034] $\beta_L \leq \beta_{gk+1}^* \leq \beta_H,$

[0035] $\omega_L \leq \omega_{gk+1}^* \leq \omega_H.$

[0036] 式中, β_H 和 β_L 是桨距角的上下限, ω_H 和 ω_L 为发电机转速的上下限。

[0037] b.改进的鲸鱼优化IWOA算法:

[0038] b.1.改进的非线性收敛因子

[0039]
$$a(t) = 4 \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^\mu \right) \right] \frac{e^{-\left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^\mu}}{1 + e^{-\frac{\tau t}{t_{\max}}}}$$

[0040] 其中 κ 、 τ 和 μ 是调节参数, t 和 t_{\max} 是分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

[0041] b.2.非线性惯性重量 ω :

[0042]
$$\omega(k) = 1 - \left(1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{t}{t_{\max}} \right) \right)^\gamma$$

[0043] 式中, γ 为调节参数, t 和 t_{\max} 是分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

[0044] b.3.改进的位置更新方程:

[0045] $X(t+1) = \omega X_{\text{rand}} - A \cdot D, |A| > 1$ 且 $p < 0.5$

[0046] $X(t+1) = \omega X_{\text{best}}(t) - A \cdot D, |A| \leq 1$ 且 $p < 0.5$

[0047] $X(t+1) = (1 - \omega) X_{\text{best}}(t) + D_p e^{b1} \cos(2\pi l), p \geq 0.5$

[0048] 式中, $X(t+1)$ 为第 $t+1$ 代的位置向量, $X(t)$ 为第 t 代的位置向量, X_{rand} 为从当前种群中随机选择的位置向量, $X_{\text{best}}(t)$ 为迄今为止最优的位置向量, p 为随机选择概率, l 是区间 $[-1, 1]$ 上的一个随机数, b 表示用于描述螺旋形状的系数, A 、 D 和 D_p 是系数向量, 其表达式如下:

[0049] $A = a(2r_1 - 1)$

[0050] $C = 2r_2$

[0051] $D = |C \cdot X_{\text{rand}} - X(t)|$

[0052] $D_p = |X_{\text{best}}(t) - X(t)|$

[0053] 式中, r_1 、 r_2 是区间 $[0, 1]$ 上的随机数。

[0054] 所述第二微处理器, 如图1所示, 用于估计风速的有效值, 为风力机模糊自适应最优功率跟踪控制器 (即第三微处理器) 提供输入变量;

[0055] 所述第三微处理器, 如图1所示, 其内部构成如下:

$$[0056] \quad \begin{cases} \dot{T}_{em} = \frac{1}{\omega_{\text{gopt}}} \left[ke + \frac{K_t}{J_t} T_{em} \omega_{\text{gopt}} + \frac{n_g^2}{J_t} T_{em}^2 \right. \\ \quad \left. - \frac{n_g}{J_t} T_{em} \hat{\Phi}^T \phi(x) + \hat{k}_1 T_{em} \delta_1 + \hat{\theta} \delta_2 \right] \\ \dot{\hat{\Phi}} = -k_2 \hat{\Phi} - \frac{n_g}{J_t} T_{em} e \phi(x) \\ \dot{\hat{k}}_1 = -k_3 \hat{k}_1 + T_{em} e \delta_1 \\ \dot{\hat{\theta}} = -k_4 \hat{\theta} + e \delta_2 \end{cases}$$

[0057] 式中, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$ 为模糊变量, T_{em} 是发电机转矩, e 是发电机输出功率跟踪误差, $e = P_{\text{gopt}} - P_{\text{gk}}$, K_t 、 J_t 分别是发电机阻尼系数和等效惯性常数, $|\dot{P}_{\text{gopt}}| \leq P_1$, P_1 为一个

未知常数, ε_1 和 ε_2 分别是充分小的正常数, $\delta_1 = \tanh\left(\frac{e}{\varepsilon_1}\right)$ 、 $\delta_2 = \tanh\left(\frac{e}{\varepsilon_2}\right)$ 、 $\hat{\theta}$ 是参数 $\theta = P_1$ 的

估计、 k_1 、 k_2 、 k_3 和 k_4 是严格正常数, \hat{k}_1 是未知常数 k_1 的估计, $\hat{\Phi}$ 是向量参数 Φ 的估计, $\phi(x) = [\phi_1(x), \phi_2(x), \dots, \phi_m(x)]^T$ 是函数向量, $\phi_i(x)$ 为是模糊基函数, 其表达式为:

$$[0058] \quad \phi_i(x) = \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j)}{\sum_{i=1}^m \left(\prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j) \right)}$$

[0059] 式中, $\mu_{F_j^i}(x_j)$ 表示 x_j 隶属于模糊集 F_j^i 的隶属度函数, m 为模糊规则数, 在本发明中 $m = 2$ 。

[0060] 本发明的独创性在于: 以发电机输出功率平滑且达到最优为目标, 构建了一个以发电机输出功率、发电机转速和桨距角为优化目标的在线优化模型; 对标准的鲸鱼优化算法的线性收敛因子、惯性权重、自适应位置更新方程进行了改进, 用该改进的鲸鱼优化算法对在线优化模型求解, 得到电机输出功率、发电机转速和桨距角的最优预测值; 设计了风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制器, 该控制器用模糊逻辑系统的模糊基函数去逼近风力发电系统的未知非线性时变函数, 解决了难以建立风力发电系统精确数学模型的难题, 提高了控制器的控制效果, 具有较强的鲁棒性和有效性, 成本低, 易于实现。

附图说明

[0061] 图1是本发明的风力机模糊自适应最优功率跟踪控制策略结构图。

具体实施方式

[0062] 下面进一步阐述本发明的技术方案, 但要求保护的并不局限于所述。

[0063] 如图1所示, 本发明提供一种风力机的模糊自适应最优功率跟踪控制方法, 包括风力机实时数据的采集与预处理模块、基于改进的鲸鱼优化算法 (IWOA) 的在线优化计算模块、基于IWOA和核极限学习机 (KELM) 算法的有效风速估计模块、发电机的模糊自适应最优

功率跟踪控制器模块;以及,

[0064] 所述风力机实时数据的采集与预处理模块采集风力发电机输出功率、发电机转速、桨距角和风速的实时数据;

[0065] 所述第一微处理器包括一个多目标优化模型和改进的灰狼优化IGWO算法,具体构成如下:

[0066] a.在全风速下建立以风力机输出功率、发电机转速、桨距角为优化目标的多目标优化模型:

[0067] $\min f(x)$

[0068] $s.t. \begin{cases} h(x) = 0 \\ g(x) \leq 0 \end{cases}$

[0069] 式中 $f(x)$ 是多目标函数, $h(x)$ 是一个等式向量约束函数, $g(x)$ 是一个不等式向量约束函数;

[0070] 其中多目标函数为:

[0071] $f(x) = \varpi T_p + (1 - \varpi) T_g, \varpi \in (0, 1),$

[0072] $T_p = \sum_{k=1}^n \left(w_p (P_{gk} - \min \{P_N, P_m\})^2 + (1 - w_p) (P_{gk+1}^* - \min \{P_N, P_m\})^2 \right), w_p \in (0, 1),$

[0073] $T_g = \sum_{k=1}^n \left(w_g \left(\frac{\omega_{gk+1}^* - \omega_{gk}}{\omega_{\max}} \right)^2 + (1 - w_g) \left(\frac{\beta_{k+1}^* - \beta_k}{\beta_{\max}} \right)^2 \right), w_g \in (0, 1),$

[0074] $x = [P_2^*, \dots, P_{n+1}^*, \omega_{g2}^*, \dots, \omega_{gn+1}^*, \beta_2^*, \dots, \beta_{n+1}^*, \varpi, w_p, w_g]^T.$

[0075] 式中 T_p 是全风速下发电机实际输出功率跟踪期望预测值的目标函数, T_g 是发电机转速和桨距角的控制变化量最小化目标函数, x 决策变量; P_{gk} 、 ω_{gk} 和 β_k 分别是 k 时刻实际输出功率、发电机转速和桨距角; P_{gk+1}^* 、 ω_{gk+1}^* 和 β_{k+1}^* 分别是发电机输出功率、发电机转子角速度和桨距角在 $k+1$ 时刻的期望预测值; ϖ 、 w_p 和 w_g 是权重系数; n 是优化进程, P_N 、 P_m 分别是风力发电机的额定输出功率和理论设计输出功率;

[0076] a.1.设置多目标优化模型的约束条件:

[0077] a.1.1.气动功率平衡约束

[0078] $\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p (\omega_{gk}, \beta_k) v_k^3 - P_m = 0,$

[0079] $\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p (\omega_{gk+1}^*, \beta_{k+1}^*) v_{k+1}^3 - P_{k+1}^* = 0.$

[0080] 式中: ρ 指的是空气密度(kg/m^3); v 指的是风速,单位为 m/s ; R 代表风轮的半径,单位为 m , P_m 分别是风力发电机的理论设计输出功率, β_k 是风力发电机在 k 时刻的桨距角,单位为度, $C_p(\omega_{gk}, \beta_k)$ 是风力发电机风能利用系数,上述参数的关系表达式如下:

$$[0081] \begin{cases} P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_k^3 C_p(\omega_{gk}, \beta_k), \\ C_p(\omega_{gk}, \beta_k) = 0.22 \left(\frac{116}{\Lambda} - 0.4 \beta_k - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\Gamma}}, \\ \lambda = \frac{\omega_{gk} R}{n_g v_k}, \\ \frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta_k} - \frac{0.035}{\beta_k^3 + 1}. \end{cases}$$

[0082] 式中, λ 是风机叶尖速比, n_g 是齿轮箱变速比。

[0083] a.1.2. 权重系数约束

$$[0084] \quad 0 < \omega < 1,$$

$$[0085] \quad 0 < w_p < 1,$$

$$[0086] \quad 0 < w_g < 1.$$

[0087] a.1.3. 输出功率约束

$$[0088] \quad 0 \leq P_{gk+1}^* \leq \min \{ P_N, P_m \}$$

[0089] a.1.4. 桨距角和发电机转速约束

$$[0090] \quad \beta_L \leq \beta_{gk+1}^* \leq \beta_H,$$

$$[0091] \quad \omega_L \leq \omega_{gk+1}^* \leq \omega_H.$$

[0092] 式中, β_H 和 β_L 是桨距角的上下限, ω_H 和 ω_L 为发电机转速的上下限。

[0093] b. 改进的鲸鱼优化IWOA算法:

[0094] b.1. 改进的非线性收敛因子

$$[0095] \quad a(t) = 4 \left[1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^\mu \right) \right] \frac{e^{-\left(\frac{t}{\kappa t_{\max}} \right)^\mu}}{1 + e^{-\frac{\tau t}{t_{\max}}}}$$

[0096] 其中 κ 、 τ 和 μ 是调节参数, t 和 t_{\max} 是分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

[0097] b.2. 非线性惯性重量 ω :

$$[0098] \quad \omega(k) = 1 - \left(1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{t}{t_{\max}} \right) \right)^\gamma$$

[0099] 式中, γ 为调节参数, t 和 t_{\max} 是分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

[0100] b.3. 改进的位置更新方程:

$$[0101] \quad X(t+1) = \omega X_{\text{rand}} - A \cdot D, |A| > 1 \text{ 且 } p < 0.5$$

$$[0102] \quad X(t+1) = \omega X_{\text{best}}(t) - A \cdot D, |A| \leq 1 \text{ 且 } p < 0.5$$

$$[0103] \quad X(t+1) = (1 - \omega) X_{\text{best}}(t) + D_p e^{b1} \cos(2\pi 1), p \geq 0.5$$

[0104] 式中, $X(t+1)$ 为第 $t+1$ 代的位置向量, $X(t)$ 为第 t 代的位置向量, X_{rand} 为从当前种群中随机选择的位置向量, $X_{\text{best}}(t)$ 为迄今为止最优的位置向量, p 为随机选择概率, 1 是区间 $[-1, 1]$ 上的一个随机数, b 表示用于描述螺旋形状的系数, A 、 D 和 D_p 是系数向量, 其表达式如

下:

$$[0105] \quad A = a(2r_1 - 1)$$

$$[0106] \quad C = 2r_2$$

$$[0107] \quad D = |C \cdot X_{\text{rand}} - X(t)|$$

$$[0108] \quad D_p = |X_{\text{best}}(t) - X(t)|$$

[0109] 式中, r_1, r_2 是区间 $[0, 1]$ 上的随机数。

[0110] 所述第二微处理器用于估计风速的有效值, 为风力机模糊自适应最优功率跟踪控制器 (即第三微处理器) 提供输入变量;

[0111] 所述第三微处理器, 其内部构成如下:

$$[0112] \quad \begin{cases} \dot{T}_{em} = \frac{1}{\omega_{\text{gopt}}} \left[ke + \frac{K_t}{J_t} T_{em} \omega_{\text{gopt}} + \frac{n_g^2}{J_t} T_{em}^2 \right. \\ \quad \left. - \frac{n_g}{J_t} T_{em} \hat{\Phi}^T \phi(x) + \hat{k}_1 T_{em} \delta_1 + \hat{\theta} \delta_2 \right] \\ \dot{\hat{\Phi}} = -k_2 \hat{\Phi} - \frac{n_g}{J_t} T_{em} e \phi(x) \\ \dot{\hat{k}}_1 = -k_3 \hat{k}_1 + T_{em} e \delta_1 \\ \dot{\hat{\theta}} = -k_4 \hat{\theta} + e \delta_2 \end{cases}$$

[0113] 式中, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$ 为模糊变量, T_{em} 是发电机转矩, e 是发电机输出功率跟踪误差, $e = P_{\text{gopt}} - P_{\text{gk}}$, K_t, J_t 分别是发电机阻尼系数和等效惯性常数, $|\dot{P}_{\text{gopt}}| \leq P_1$, P_1 为一个

未知常数, ε_1 和 ε_2 分别是充分小的正常数, $\delta_1 = \tanh\left(\frac{e}{\varepsilon_1}\right)$ 、 $\delta_2 = \tanh\left(\frac{e}{\varepsilon_2}\right)$ 、 $\hat{\theta}$ 是参数 $\theta = P_1$ 的

估计、 k_1, k_2, k_3 和 k_4 是严格正常数, \hat{k}_1 是未知常数 k_1 的估计, $\hat{\Phi}$ 是向量参数 Φ 的估计, $\phi(x) = [\phi_1(x), \phi_2(x), \dots, \phi_m(x)]^T$ 是函数向量, $\phi_i(x)$ 为是模糊基函数, 其表达式为:

$$[0114] \quad \phi_i(x) = \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j)}{\sum_{i=1}^m \left(\prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j) \right)}$$

[0115] 式中, $\mu_{F_j^i}(x_j)$ 表示 x_j 隶属于模糊集 F_j^i 的隶属度函数, m 为模糊规则数, 在本发明中 $m = 2$ 。

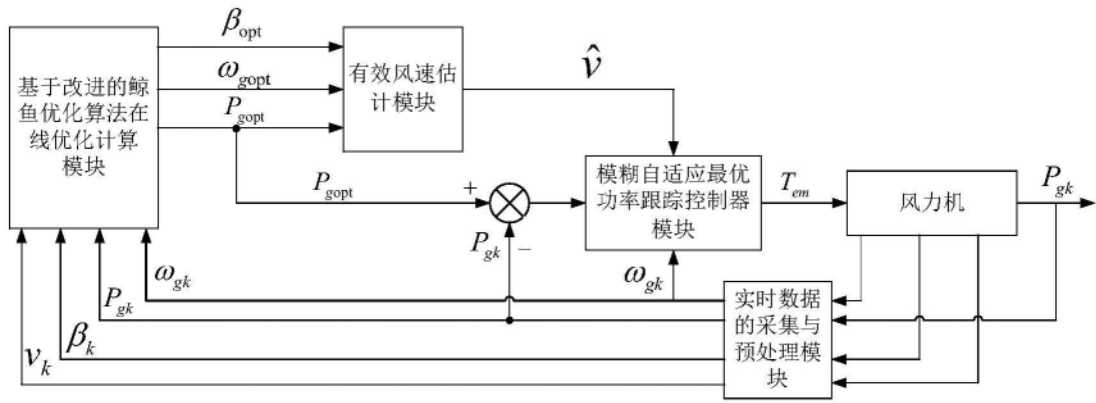


图1