

引用格式:张成,陈宇,李灿,等.计及双馈风机无功出力的配电网无功优化[J].南方能源建设,2025,12(1):168-176. ZHANG Cheng, CHEN Yu, LI Can, et al. Reactive power optimization of distribution network considering the reactive power output of doubly fed induction generator [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 168-176. DOI: [10.16516/j.ceeec.2024-293](https://doi.org/10.16516/j.ceeec.2024-293).

# 计及双馈风机无功出力的配电网无功优化

张成, 陈宇<sup>✉</sup>, 李灿, 陆良帅, 夏正龙  
(江苏师范大学电气工程及自动化学院, 江苏徐州 221116)

**摘要:** [目的] 目前风力发电得到了广泛的应用, 但是风能具有波动性和不稳定性, 风电场并网后会造成本网电压波动和网络损耗增加。针对这些问题提出了计及双馈风机无功出力的配电网多目标无功优化模型。[方法] 基于分段思想, 将风电不确定的动态问题转化为确定的静态问题, 采用改进的鲸鱼算法求解数学模型。针对传统鲸鱼算法求解精度低、收敛速度慢、易陷入局部最优等问题, 采用混合策略改进鲸鱼算法, 引入 Tent 映射初始化、自适应权重、自适应概率阈值等改进方法。[结果] 以改进的 IEEE33 节点系统作为算例, 对比粒子群、灰狼等算法, 改进的鲸鱼算法能够提高全局搜索能力和收敛速度。[结论] 经所提策略优化后的风电场最优无功出力可以降低更多的系统损耗, 提高配电网电压的稳定性。

**关键词:** 配电网; 双馈异步风力发电机; 分时段策略; 无功补偿节点; 改进鲸鱼算法

DOI: [10.16516/j.ceeec.2024-293](https://doi.org/10.16516/j.ceeec.2024-293)

文章编号: 2095-8676(2025)01-0168-09

CSTR: [32391.14.j.ceeec.2024-293](https://doi.org/10.16516/j.ceeec.2024-293)

中图分类号: TK89; TM714.3



论文二维码

## Reactive Power Optimization of Distribution Network Considering the Reactive Power Output of Doubly Fed Induction Generator

ZHANG Cheng, CHEN Yu<sup>✉</sup>, LI Can, LU Liangshuai, XIA Zhenglong

(School of Electrical Engineering and Automation, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

**Abstract:** [Objective] At present, wind power generation has been widely used, but wind power is volatile and unstable, and the grid voltage fluctuation and network loss increase will be caused after wind farms are connected to the grid. To solve these problems, a multi-objective reactive power optimization model of distribution network considering the reactive power output of doubly fed induction generator is proposed. [Method] Based on the segmentation idea, the uncertain dynamic problem of wind power was transformed into a definite static problem, and the improved whale optimization algorithm was used to solve the mathematical model. In order to solve the problems of low precision, slow convergence speed and easy to fall into local optimality of the traditional whale optimization algorithm, a hybrid strategy was adopted to improve whale optimization algorithm, and some improved methods such as tent mapping initialization, adaptive weight and adaptive probability threshold were introduced. [Result] Taking the improved IEEE33 node distribution network as an example, the improved whale optimization algorithm can improve the global search ability and convergence speed comparing the particle swarm optimization and gray wolf optimizer. [Conclusion] The optimal reactive power output of wind farm optimized by the proposed strategy can reduce more system losses and improve the voltage stability of distribution network.

**Key words:** distribution network; doubly fed induction generator; time-sharing strategy; reactive power compensation node; improved whale optimization algorithm

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2024-09-04 修回日期: 2024-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“通信数据率约束下受扰切换系统的镇定方法研究”(62103173)

## 0 引言

风力发电是可再生能源领域的重要组成部分, 2022年国内风电总装机与发电量占比已达14%和9%。由于风电场输出功率的波动性和随机性<sup>[1]</sup>, 风电并网容易引起电网电压波动和线路损耗增加, 给电网运行带来不利影响<sup>[2-4]</sup>。风电场接入电网后会改变配电网潮流分布, 影响系统的稳定运行<sup>[5]</sup>, 因此对配电网进行无功优化, 保证其安全稳定运行, 成为了当前的研究热点<sup>[6-7]</sup>。

随着人工智能技术的快速发展, 诸多智能算法得到广泛关注与应用。文献[8]提出一种改进灰狼算法, 对齿轮修形量进行优化, 使齿轮的啮合性能更好。文献[9]针对传统优化中未考虑到配电网电压静态稳定问题, 采用粒子群算法求解基于PG&E69节点系统改进的无功优化模型。文献[10]基于鲸鱼算法通过引入自适应权重系数和改进越界处理机制, 解决了配电网的重构与无功优化问题。

风电机组并网的相关研究得到了广大学者的普遍关注, 部分学者从发电机侧入手, 提高风机出力准确性, 从而降低风机出力波动性和随机性对配电网无功优化的影响<sup>[11]</sup>。进行场景分析时, 文献[12]基于改进的BP神经网络进行数据预测, 能够有效减小风机出力不确定性对配电网无功优化的影响。而采用分时段优化法也可以减少由于风速变化而导致的功率波动, 提高风电场的稳定性和可靠性<sup>[13-14]</sup>。文献[15]考虑了双馈风机的无功出力, 但是只考虑满额输出无功这一种情况。文献[16]提出将含永磁直驱风电机组的风电场作为连续无功源参与到配电网的无功优化, 但是没有提出具体无功出力的策略。文章给出了双馈风机的无功出力控制策略, 与粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)<sup>[17]</sup>、灰狼优化算法(Gray Wolf Optimizer, GWO)<sup>[18]</sup>等智能优化算法相比, 文章提出的改进鲸鱼优化算法(Improved Whale Optimization Algorithm, IWOA)算法在无功优化方面收敛速度更快、全局搜索能力和适应性更强。

在考虑双馈风电场的波动性与无功调节能力基础上, 首先分析双馈风机的基本数学模型, 其次给出双馈风机无功出力控制策略, 最后以系统有功网损最低和电压偏差最小为目标函数, 建立多目标优化

模型。文章对标准IEEE33节点接入风机后的模型作为算例进行分析, 仿真分析结果验证了文章所提无功优化模型和改进算法的有效性。

## 1 双馈风力发电机无功特性分析

### 1.1 双馈风机数学模型

双馈风电机组<sup>[19]</sup>通常由涡轮机、双馈异步风力发电机和齿轮变速箱组成, 其定子端直接并入电网, 转子侧通过背靠背变流器接入电网, 双馈异步风力发电机折算到定子侧的等效电路如图1所示。

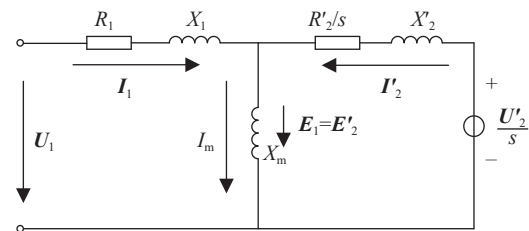


图1 双馈风力发电机的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of doubly fed induction generator

由图1可得以下公式:

$$\begin{cases} U_1 = E_1 + I_1 (R_1 + jX_1) \\ \frac{U_2}{s} = E_2 - I_2 (\frac{R_2'}{s} + jX_2') \\ E_1 = E_2 = (I_1 + I_2) jX_m \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$U_1$  —— 定子侧电压(V);

$E_1$  —— 定子侧感应电动势(V);

$I_1$  —— 定子侧电流(A);

$R_1$  —— 定子侧的定子等效电阻( $\Omega$ );

$X_1$  —— 定子侧的定子等效漏电抗( $\Omega$ );

$U_2$  —— 转子励磁电压经绕组折算后的值(V);

$s$  —— 转差率;

$E_2$  —— 转子侧感应电势经绕组和频率折算到定子侧的值(V);

$I_2$  —— 转子电流经绕组和频率折算到定子侧的值(A);

$R_2'$  —— 转子折算到定子侧的转子等效电阻( $\Omega$ );

$X_2'$  —— 转子折算到定子侧的转子漏电抗( $\Omega$ );

$X_m$  —— 励磁电抗( $\Omega$ )。

### 1.2 双馈风机无功极限

双馈风机功率流向集中在定子侧, 其功率输出公式在两相旋转坐标系下表达式为:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2}U_s i_{sd} \\ Q_s = \frac{3}{2}U_s i_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$P_s$  ——电机定子侧发出有功(W);

$Q_s$  ——电机定子侧发出无功(Var);

$U_s$  ——定子电压(V);

$i_{sd}$  ——定子电流的  $d$  轴分量(A);

$i_{sq}$  ——定子电流的  $q$  轴分量(A)。

当两相旋转坐标系的  $d$  轴定向于定子电压  $U_s$  时,有

$$\begin{cases} \psi_{sd} \approx 0 \\ \psi_{sq} \approx -\frac{U_s}{\omega_1} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$\psi_{sd}$  ——定子磁链的  $d$  轴分量(Wb);

$\psi_{sq}$  ——定子磁链的  $q$  轴分量(Wb);

$\omega_1$  ——双馈电机同步转速(r/min)。

双馈风机的磁链方程可以表示为:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$i_{rd}$  ——电机转子的  $d$  轴分量(A);

$i_{rq}$  ——电机转子的  $q$  轴分量(A);

$L_s$  ——定子电感(H);

$L_m$  ——双馈风机定转子间互感(H)。

由式(2)~式(4)可得:

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{2P_s L_s}{3U_s L_m} \\ i_{rq} = -\frac{2Q_s L_s}{3U_s L_m} - \frac{U_s}{\omega_1 L_m} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可得:

$$\left(\frac{2L_s}{3L_m U_s} P_s\right)^2 + \left(\frac{2L_s}{3L_m U_s} Q_s + \frac{U_s}{\omega_1 L_m}\right)^2 = i_r^2 \quad (6)$$

式中:

$i_r^2 = i_{rd}^2 + i_{rq}^2$  且  $i_r^2 \leq I_{rmax}^2$ ,  $I_{rmax}$  ——转子侧电流上限(A)。

综上,在定子侧有功功率  $P_s$  固定时,双馈风机无功功率输出的范围为:

$$Q_{smin} \leq Q_s \leq Q_{smax} \quad (7)$$

式中:

$Q_{smin}$  ——风机无功输出的最小值(Var);

$Q_{smax}$  ——风机无功输出的最大值(Var)。

$$\begin{cases} Q_{smin} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_s} U_s I_{rmax}\right)^2 - P_s^2} \\ Q_{smax} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_s} U_s I_{rmax}\right)^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$X_s$  ——定子电抗( $\Omega$ )。

## 2 配电网无功优化数学模型

### 2.1 分时段策略

由于风电场功率输出受风速波动影响,配电网优化问题变得复杂,为了简化数学模型且更贴合实际,文章采用分段积分的思想,将一天中波动的风速分为5个风速段,对每个风速段单独优化,其中每个时段代表风机在不同风速区域的运行特征,公式如下:

$$\bar{v}_s = \int_{t_{s0}}^{t_{s1}} \frac{v}{t_{s1} - t_{s0}} dt \quad (9)$$

式中:

$t_{s0}$  ——某时段的起始时刻;

$t_{s1}$  ——某时段的终止时刻。

根据上式可计算出每个风速段的定值,再由风机的风功率特性曲线可得风机有功功率输出,最后由式(8)得到风机的无功出力最大值与最小值。表1为风电场含4台双馈风机的有功和无功功率输出极限。

表 1 风电场功率输出极限  
Tab. 1 Wind farm power output limit

风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	风电场有功功率	风电场无功功率	风电场无功功率
	最大值/MW	最小值/MVar	最大值/MVar
7	1.0674	-3.0854	4.1411
10	2.0262	-2.8962	3.9254
11	4.9234	-2.7534	3.3525
13	6.0000	-1.4248	0.9785
16	6.0851	-1.4258	0.9798

### 2.2 目标函数

1) 最小网络损耗函数  $f_1$

$$\min f_1 = \sum_{j \in i}^{i \in n} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (10)$$

式中:

- $n$  —— 配电网系统节点数;
- $G_{ij}$  —— 节点  $i$ 、 $j$  之间的电导(S);
- $U_i$ 、 $U_j$  —— 节点  $i$ 、 $j$  的电压幅值(V);
- $\theta_{ij}$  —— 节点  $i$ 、 $j$  间的电压相角差值(°)。

2) 最小电压偏差函数  $f_2$

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^n \left( \frac{\Delta U_i}{U_{i\max} - U_{i\min}} \right)^2 \quad (11)$$

式中:

- $U_{i\max}$  —— 节点  $i$  的电压上限值(V);
- $U_{i\min}$  —— 节点  $i$  的电压下限值(V)。

$\Delta U_i$  可以表示为:

$$\Delta U_i = \begin{cases} U_{i\min} - U_i, & U_i < U_{i\min} \\ 0, & U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \\ U_i - U_{i\max}, & U_i > U_{i\max} \end{cases} \quad (12)$$

3) 目标函数归一化

将目标函数归一化可以简化多目标优化问题的处理和求解过程, 提高寻优效率, 同时能够兼顾各目标函数的重要性, 避免某个目标函数对最终结果的影响过大。

$$f_{\min} = k_1 \frac{f_1}{F_1} + k_2 \frac{f_2}{F_2}, \quad (13)$$

式中:

$k_1$ 、 $k_2$  —— 目标函数的权重, 文章以最小网损为主要优化目标, 分别取值 0.7 和 0.3;

$F_1$  —— 目标函数每次迭代网损的最小值;

$F_2$  —— 目标函数每次迭代电压偏差的最小值。

### 2.3 约束条件

在配电网无功优化中为了保证系统的稳定性与经济性, 变量需满足一定的约束条件, 主要分为等式约束与不等式约束。

#### 2.3.1 等式约束条件

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (14)$$

式中:

- $P_i$  —— 节点  $i$  注入的有功功率(W);
- $Q_i$  —— 节点  $i$  注入的有功功率(Var);
- $B_{ij}$  —— 节点  $i$ 、 $j$  之间的电纳(S)。

#### 2.3.2 不等式约束条件

$$\begin{cases} U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \\ Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max} \\ P_{Gi\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max} \\ Q_{Ci\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中:

$U_{i\min}$  —— 节点  $i$  电压的下限(V);

$U_{i\max}$  —— 节点  $i$  电压的上限(V);

$Q_{Gi\min}$  —— 风机无功出力最小值(Var);

$Q_{Gi\max}$  —— 风机无功出力最大值(Var);

$P_{Gi\min}$  —— 风机有功出力最小值(W);

$P_{Gi\max}$  —— 风机有功出力最大值(W);

$Q_{Ci\min}$  —— 节点  $i$  的无功补偿装置补偿容量下限

(Var);

$Q_{Ci\max}$  —— 节点  $i$  的无功补偿装置补偿容量上限

(Var)。

## 3 改进鲸鱼算法

### 3.1 基本鲸鱼算法

鲸鱼算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)<sup>[20]</sup>的位置更新分为 3 个阶段。第一阶段为包围式捕食, 在包围式捕食中, 鲸鱼可以识别猎物位置, 根据当前鲸鱼的位置和速度, 以及全局最优解, 其它鲸鱼会向着最优位置移动, 其位置更新公式为:

$$X_{(t+1)} = X_{(t)}^* - A \cdot D \quad (16)$$

$$D = |CX_{(t)}^* - X_{(t)}| \quad (17)$$

式中:

$t$  —— 迭代次数;

$X_{(t)}$  —— 当前空间解的位置;

$X_{(t)}^*$  —— 当前空间解的最优位置;

$A$ 、 $C$  —— 系数向量。

$A$  和  $C$  的计算公式为:

$$\begin{cases} A = 2a \cdot r - a \\ C = 2 \cdot r \end{cases} \quad (18)$$

式中:

$a$  —— 线性递减向量, 从 2 减少到 0;

$r$  —— [0, 1] 之间的随机向量。

第二阶段为泡泡网捕食, 座头鲸以其独有的攻击方式来捕食猎物, 在捕食的过程中包围和螺旋更

新的概率均为 50%, 其更新公式为:

$$X_{(t+1)} = \begin{cases} X_{(t)}^* - A \cdot D, & p < 0.5 \\ D_2 \times e^{bl} \times \cos(2\pi l) + X_{(t)}^*, & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

式中:

$D_2$  —— 鲸鱼个体和猎物之间的距离;

$b$  —— 决定鲸鱼个体螺旋线性运动的参数;

$l$  ——  $[-1, 1]$  间的随机数。

第三阶段为搜索捕食, 这种位置更新方式增强鲸鱼的搜索能力, 即  $A \geq 1$  时, 使鲸鱼个体远离猎物, 搜索其他更合适的猎物, 算法进行全局搜索。其更新公式为:

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

$$D = |C \cdot X_{\text{rand}} - X_{(t)}| \quad (21)$$

式中:

$X_{\text{rand}}$  —— 随机选取的鲸鱼个体位置。

### 3.2 鲸鱼算法的改进

传统鲸鱼算法在解决配电网无功优化问题时, 会出现求解精度低、收敛速度慢、易陷入局部最优等问题, 为了解决上述问题, 文章从 4 个方面对鲸鱼算法进行改进优化。

#### 3.2.1 Tent 映射初始化

Tent 映射是一种基于二进制运算的混沌系统, 能够生成高度随机、不可预测的序列。文献 [21] 将目前优化领域众多混沌映射应用到算法优化中, 实验结果证明基于 Tent 映射的 WOA 算法在所有混沌映射测试中结果最佳。其公式如下:

$$x_{k+1} = \begin{cases} x_k / \alpha, & 0 < x_k \leq \alpha, \\ (1 - x_k) / (1 - \alpha), & \alpha < x_k \leq 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中:

$\alpha$  —— 混沌控制参数,  $\alpha \in (0, 1]$ , 取值为 0.5 时混沌映射效果最好。

#### 3.2.2 自适应概率阈值

传统鲸鱼算法为了同步包围与螺旋更新, 将算法的概率阈值设置为 0.5, 通过随机生成  $p$  值与概率阈值比较, 来选择包围更新还是螺旋更新。这种固定概率阈值容易使算法陷入局部最优, 导致搜索效率下降<sup>[22]</sup>。文章提出一种自适应概率阈值  $p'$ , 它能够根据算法的迭代过程, 动态地调整概率阈值, 从而更好地平衡探索和包围之间的关系, 能够更好地适应搜索环境, 提高算法的效率。

$$p' = 1 / \left( 1 + e^{\frac{2t-T}{2\alpha}} \right) \quad (23)$$

式中:

$\alpha$  —— 自适应控制参数, 随着最大迭代次数变化更改, 使其优化效果保持不变。

#### 3.2.3 自适应权重

WOA 在后期进行局部搜索时, 因控制参数较为简单, 位置更新公式不能调整, 可能会导致鲸鱼算法陷入局部最优。通过引入惯性权重, 可以增加鲸鱼个体在更新位置时的运动惯性, 从而使得鲸鱼具有更好的探索能力, 在复杂的搜索空间中能够更快地找到全局最优解。其自适应权重公式为:

$$\omega = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \left( \frac{T-t}{T} \right)^k + \omega_{\min}, \quad (24)$$

式中:

$t$  —— 当前迭代次数;

$T$  —— 最大迭代次数;

$k$  —— 控制参数, 调节曲线平滑度。

改进后 WOA 公式如下:

$$X_{(t+1)} = \omega X_{(t)}^* - AD \quad A < 1, \quad p < p' \quad (25)$$

$$X_{(t+1)} = \omega X_{\text{rand}} - AD \quad A \geq 1, \quad p < p' \quad (26)$$

$$X_{(t+1)} = D_2 \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \omega X_{(t)}^* \quad p \geq p' \quad (27)$$

#### 3.2.4 自适应混合变异

在算法迭代后期, 所有鲸鱼个体均按照式(27)更新位置, 易陷入局部最优。文章提出了一种混合自适应变异机制, 利用差分变异前期的全局快速搜索能力和柯西变异易跳出局部最优能力。先选出当前种群适应度值最好的前  $S$  个个体, 接着对  $S$  个最优个体进行混合自适应变异, 最后从变异前后的个体中选择最优个体进入下一次迭代。其中柯西变异遵循柯西密度函数:

$$f(x) = -\frac{1}{\tan(\pi x)}, \quad -\infty < x < +\infty \quad (28)$$

其变异公式为:

$$X(t+1) = X(t) + X(t) \cdot f(x) \quad (29)$$

式中:

$X(t+1)$  —— 柯西变异后的位置;

$X(t)$  —— 当前空间最优位置。

差分变异公式为:

$$V = V_1 + F \cdot (V_2 - V_3) \quad (30)$$

式中:

$V$  ——新的差分向量;

$V_1、V_2、V_3$  ——3 个不同位置向量。

即自适应混合变异为:

$$u(t+1) = u^*(t) \cdot (1 + \lambda_1 \cdot V + \lambda_2 X(t+1)) \quad (31)$$

式中:

$u(t+1)$  ——变异后的位置;

$u^*(t)$  ——差分变异全局控制参数;

$\lambda_1、\lambda_2$  ——控制参数,  $\lambda_1 = 1 - t^5/t_{\max}^5$ 、 $\lambda_2 = t^5/t_{\max}^5$ 。

### 3.3 改进 WOA 流程图

改进后鲸鱼算法优化流程图如图 2 所示。

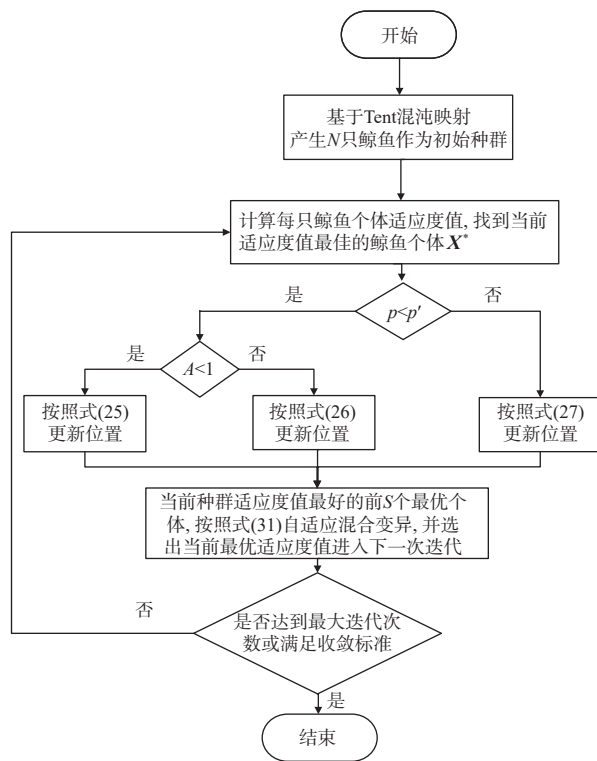


图 2 改进鲸鱼算法流程图

Fig. 2 Flow chart of improved whale algorithm

## 4 算例分析

### 4.1 基本参数

为了验证改进鲸鱼算法和优化模型的有效性, 文章以 IEEE33 节点为基础算例模型, 分别在节点 30 处加入风电场和节点 3、节点 6、节点 18 处加入无功补偿装置, 改进后的系统图如下。

如图 3 所示, 风电场的装机总容量为 6 MW, 其中风机的额定电压为 690 V, 其它相关电气参数和优

化变量约束如表 2 和表 3 所示。WOA、IWOA、GWO 和 PSO 初始种群均设定为 50, 迭代次数为 50, 维度为 4; 其中 PSO 算法惯性因子的上限为 0.6, 学习因子  $c_1, c_2$  均为 2.01。

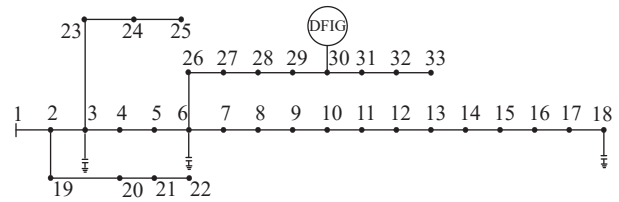


图 3 改进的 IEEE33 节点配电网

Fig. 3 Improved IEEE33 node distribution network

表 2 风力发电机参数

Tab. 2 Table title in English

参数	$r_1/\Omega$	$x_1/\Omega$	$r_2/\Omega$	$x_2/\Omega$	$x_m/\Omega$
数值	0.0076	0.1248	0.0073	0.0884	1.8365

表 3 变量约束范围

Tab. 3 Variable constraint scope

变量	变化范围
$Q_{ci}(i=1,2,3)/\text{MVar}$	[0, 1]
$Q_{Gi}/\text{MVar}$	[-2.12, 1.42]
$U_i(i=1,2,\dots,33)/\text{p.u.}$	[0.95, 1.05]

### 4.2 静态优化分析

为了验证算法的改进效果, 将风机视为额定风速下运行, 多次运行后取平均值得到图 4, 最终寻优结果如表 4 所示。从中可以看出 IWOA 初始种群的适应度值最优, 证明了 Tent 混沌映射初始化的优越性。在收敛速度方面, WOA 算法在第 15 次收敛到

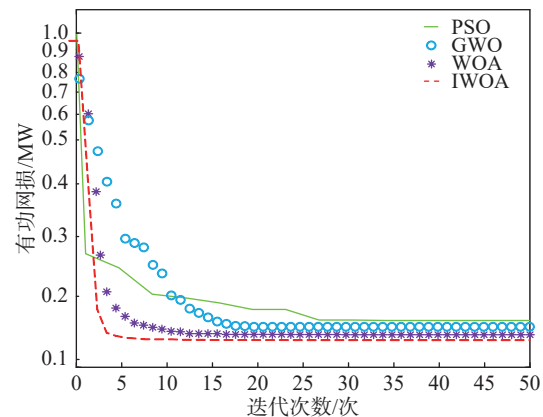


图 4 4 种算法的收敛曲线

Fig. 4 Convergence curves for the four algorithms

最优,而 IWOA 通过引入自适应权重与自适应阈值,加快了算法在前期的全局搜索能力,在第 6 次迭代收敛到最优。4 种算法在 50 次迭代后,都收敛至各自最优解。其中 IWOA 收敛效果最好,降损效益最高为 23.85%,网损最小且无功补偿容量最小,减少了无功补偿的成本。

表 4 IEEE33 节点 4 种算法优化结果  
Tab. 4 Optimization results of four IEEE33 nodes

优化算法	补偿节点	补偿容量/MVar	有功网损/MW	降损效益/%
初始潮流	—	—	0.1841	0
PSO	3	0.1651	—	—
	6	0.1524	0.1651	10.32
	18	0.2842	—	—
GWO	3	0.1971	—	—
	6	0.0625	0.1447	21.40
	18	0	—	—
WOA	3	0.2127	—	—
	6	0.1437	0.1492	18.96
	18	0.0202	—	—
IWOA	3	0	—	—
	6	0.1643	0.1402	23.85
	18	0.0501	—	—

表 5 为 IWOA 下 3 种场景优化结果,场景 1 为风电场只发出有功功率,无功出力为 0,此时为额定功率运行;场景 2 为风电场在额定运行下无功出力最大值;场景 3 为风电场无功出力作为控制变量参与算法计算得到最优无功出力。

表 5 3 种场景优化结果  
Tab. 5 Optimization results of three scenarios

场景	风机无功出力/MVar	补偿节点	补偿容量/MVar	有功网损/MW	降损效益/%
1	0	3	0	0.1402	23.85
		6	0.1643		
		18	0.0501		
2	1.3441	3	0.0723	0.1231	31.13
		6	0.1207		
		18	0.0201		
3	0.8805	3	0.0937	0.0964	47.64
		6	0.0456		
		18	0.0194		

从表 5 中可以得到场景 1 降损效益最低,场景 2 降损效益提高但是总电容投切容量增加,场景 3 降

损效益最高且总电容投切容量最小,减少了电容投切的成本。证明了文章计及双馈风机无功出力优化方案的可行性。

图 5 为 3 种场景下优化后各节点电压图。根据各场景优化后的电压进行对比,可以看出风电场无功出力优化配置后的节点电压明显上升,电压波动范围显著减小。且场景 3 比场景 2 优化后的电压波动更小,电压提升更大。

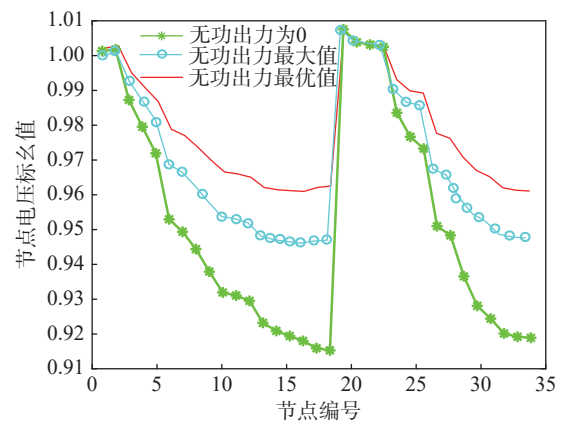


图 5 优化前后的各节点电压曲线图

Fig. 5 Voltage curves of each node before and after optimization

### 4.3 动态无功优化分析

由于风电场功率输出受风速波动的影响,文章采用分段积分方法,将一天中波动的风速分为 5 个风速段,5 个时段分别对应表 1 的 5 种风速,对每个时段单独优化,结果如图 6 所示。结果表明:风电场的接入随着风速的增加,系统损耗也在增加,经过 WOA 算法优化后系统的损耗整体下降,且 IWOA

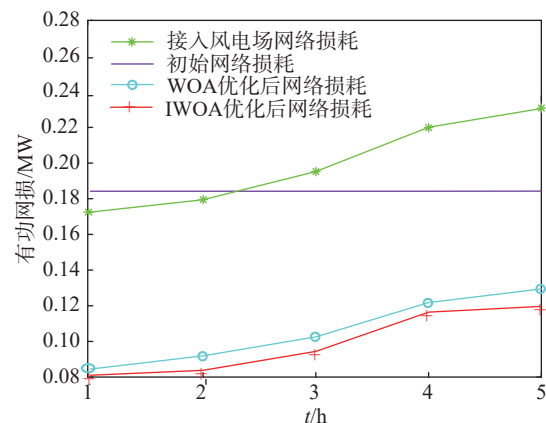


图 6 优化前后系统各时段的网损

Fig. 6 Optimize the network loss of the system before and after each period

算法优化后的网络损耗更小,验证了算法改进的有效性。

## 5 结论

基于双馈风机的无功调节能力,以网损和电压偏差最小为目标函数,将双馈风机无功出力作为控制变量,对含风电场的配电网进行无功优化,并利用改进鲸鱼算法求解。仿真结果表明:

1)通过分时段策略将一天中波动的风速分为5个风速段,可以将风力机组出力的随机问题转化成确定性问题,在一定程度反映其出力随机性的基础上,简化了求解过程。

2)优化风电场无功出力可以有效提升电网电压降低网络损耗,且文章所提出的优化方案降损效益高。

3)改进后的鲸鱼算法有效地解决了收敛精度低的问题,提升了算法的全局寻优能力与收敛速度。

### 参考文献:

- [1] 白建华,辛頌旭,刘俊,等.中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J].*中国电机工程学报*,2015,35(14):3699-3705. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.14.026.  
BAI J H, XIN S X, LIU J, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3699-3705. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.14.026.
- [2] 刘岩,李雨森,张夕佳,等.基于粒子群优化算法的可再生能源功率预测模型设计[J].*电子设计工程*,2023,31(9):146-150. DOI: 10.14022/j.issn1674-6236.2023.09.030.  
LIU Y, LI Y S, ZHANG X J, et al. Design of renewable energy power prediction model based on particle swarm optimization algorithm [J]. *Electronic design engineering*, 2023, 31(9): 146-150. DOI: 10.14022/j.issn1674-6236.2023.09.030.
- [3] 王诗超,刘嘉畅,刘展志.基于高斯混合聚类的海上风电出力特征曲线提取方法及其在电量平衡计算中的应用[J].*南方能源建设*,2023,10(1):39-47. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.005.  
WANG S C, LIU J C, LIU Z Z. Extraction method of offshore wind power output characteristic curve based on Gaussian mixture model and its application in electric quantity balance [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 39-47. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.005.
- [4] LIU Y C, ĆETENović D, LI H Y, et al. An optimized multi-objective reactive power dispatch strategy based on improved genetic algorithm for wind power integrated systems [J]. *International journal of electrical power & energy systems*, 2022, 136: 107764. DOI: 10.1016/J.IJEPES.2021.107764.
- [5] 鲁改凤,欧钰雷,杜帅,等.基于改进HPSO算法的风电场内部无功优化研究[J].*电测与仪表*,2020,57(10):36-42. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.10.006.  
LU G F, OU Y L, DU S, et al. Research on internal reactive power optimization of wind farm based on the improved HPSO algorithm [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2020, 57(10): 36-42. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.10.006.
- [6] BABU R, RAJ S, DEY B, et al. Optimal reactive power planning using oppositional grey wolf optimization by considering bus vulnerability analysis [J]. *Energy conversion and economics*, 2022, 3(1): 38-49. DOI: 10.1049/ENC2.12048.
- [7] QU Z Y, DONG Y C, MUGEMANYI S, et al. Dynamic exploitation Gaussian bare-bones bat algorithm for optimal reactive power dispatch to improve the safety and stability of power system [J]. *IET renewable power generation*, 2022, 16(7): 1401-1424. DOI: 10.1049/RPG2.12428.
- [8] 张波,连婷,沈娴.改进灰狼优化算法的减速器齿轮修形方法[J].*煤炭技术*,2023,42(11):217-220. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2023.11.047.  
ZHANG B, LIAN T, SHEN X. Gear reshaping method for reducer based on improved GWO algorithm [J]. *Coal technology*, 2023, 42(11): 217-220. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2023.11.047.
- [9] 夏鹏,许宁,周永刚.计及静态电压稳定的配电网多目标无功优化研究[J].*信息技术*,2023,47(3):64-69. DOI: 10.13274/j.cnki.hdzt.2023.03.012.  
XIA P, XU N, ZHOU Y G. Research on multi-objective reactive power optimization of distribution network with static voltage stability [J]. *Information technology*, 2023, 47(3): 64-69. DOI: 10.13274/j.cnki.hdzt.2023.03.012.
- [10] 孙琪,于永进,王玉彬,等.采用改进鲸鱼算法的配电网综合优化[J].*电力系统及其自动化学报*,2021,33(5):22-29. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.000553.  
SUN Q, YU Y J, WANG Y B, et al. Comprehensive optimization of distribution network using improved whale optimization algorithm [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(5): 22-29. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.000553.
- [11] 孙浩锋,章健,熊壮壮,等.含风光储联合发电系统的主动配电网无功优化[J].*电测与仪表*,2023,60(2):104-110,125. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2023.02.015.  
SUN H F, ZHANG J, XIONG Z Z, et al. Reactive power optimization of active distribution network with wind-photovoltaic-energy storage hybrid generation system [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2023, 60(2): 104-110, 125. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2023.02.015.
- [12] 李竹星,卢家麟,高琪,等.计及双馈风机接入的配电网无功优化[J].*电器与能效管理技术*,2021(6):86-91. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2021.06.015.  
LI Z X, LU J L, GAO Q, et al. Reactive power optimization of distribution network considering doubly-fed fan access [J].



- Electrical & energy management technology, 2021(6): 86-91. DOI: 10.16628/j.cnki.2095-8188.2021.06.015.
- [13] 易锴, 井天军, 薛蕾, 等. 基于相似搜索与阈值判定改进的配电网无功优化 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(12): 91-97. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.12.014.  
YI K, JING T J, XUE L, et al. Reactive power optimization method for distribution network based on similar search and threshold judgment [J]. Electrical measurement & instrumentation, 2020, 57(12): 91-97. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.12.014.
- [14] 吴星, 刘天羽, 江秀臣, 等. 基于改进遗传算法的海上风电场无功优化 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(4): 108-113. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.04.017.  
WU X, LIU T Y, JIANG X C, et al. Reactive power optimization of offshore wind farm based on improved genetic algorithm [J]. Electrical measurement & instrumentation, 2020, 57(4): 108-113. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.04.017.
- [15] 耿焱, 潘庆, 华宇肖, 等. 考虑风功率特性的双馈风机无功补偿容量计算 [J]. 浙江电力, 2017, 36(11): 61-66. DOI: 10.19585/j.zjdl.201711011.  
GENG L, PAN Q, HUA Y X, et al. Calculation of reactive power compensation capacity of DFIG considering the wind power characteristics [J]. Zhejiang electric power, 2017, 36(11): 61-66. DOI: 10.19585/j.zjdl.201711011.
- [16] 刘奕, 朱吉然, 邓威, 等. 电力市场下含风电场的无功优化控制策略 [J]. 湖南电力, 2022, 42(4): 99-105. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0198.2022.03.020.  
LIU Y, ZHU J R, DENG W, et al. Reactive power optimization control strategy of wind farm in electricity market [J]. Hunan electric power, 2022, 42(4): 99-105. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0198.2022.03.020.
- [17] JAMES K, RUSSEL E. Particle swarm optimization [C]//IEEE. Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. Perth, WA, Australia: IEEE, 1995: 1942-1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [18] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in engineering software, 2014, 69: 46-61. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [19] ABAD G, LÓPEZ J, RODRÍGUEZ M, et al. 双馈感应电机在风力发电中的建模与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.  
ABAD G, LÓPEZ J, RODRÍGUEZ M, et al. Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [20] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm [J]. Advances in engineering software, 2016, 95: 51-67. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.
- [21] KAUR G, ARORA S. Chaotic whale optimization algorithm [J]. Journal of computational design and engineering, 2018, 5(3): 275-284. DOI: 10.1016/j.jcde.2017.12.006.
- [22] 刘亮, 何庆. 一种求解函数优化问题的改进鲸鱼优化算法 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37(4): 1004-1009. DOI: 10.19734/j.issn.1001-3695.2018.11.0726.  
LIU L, HE Q. Improved whale optimization algorithm for solving function optimization problems [J]. Application research of computers, 2020, 37(4): 1004-1009. DOI: 10.19734/j.issn.1001-3695.2018.11.0726.

---

作者简介:



张成

张成(第一作者)

1997-, 男, 硕士在读, 主要从事智能矿井和电力系统无功优化研究(e-mail)1215438663@qq.com。



陈宇

陈宇(通信作者)

2001-, 男, 硕士在读, 主要从事电力系统无功优化和智能算法研究(e-mail)1454614177@qq.com。

(编辑 叶筠英)