

## 基于改进灰狼算法的配电网故障定位

于婷垚, 李红月

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

**摘要:**目的 针对优化算法在处理配电网故障定位问题时存在后期收敛速度慢、定位准确度低的缺点,提出了一种改进的灰狼算法(IGWO)。方法 首先构建能用于分布式电源(DG)接入的开关函数和适应度函数,在此基础上建立一个 IEEE33 节点配电网模型,再结合含 DG 配电网的情况对灰狼算法做离散化处理;其次参考蝠鲞优化算法翻筋斗觅食的思想,同时加入小波函数最优解扰动,从而增强跳出局部最优的能力,并加速收敛;另外,对收敛因子作非线性处理,提高算法的局部搜索能力、快速性和准确性。结果 通过将配电网连接到不同位置和不同数量的分布式电源,进行单点故障、多点故障和信息畸变的仿真测试,将 IGWO 算法与二进制灰狼算法、原始灰狼算法以及粒子群算法在定位准确率、平均收敛代数 and 迭代时间方面进行对比,其整体性能更为优越。结论 IGWO 算法在故障定位中对比另 3 种优化算法在收敛速度和定位效率方面都是最好的。

**关键词:**改进灰狼算法;分布式电源;故障定位;配电网;容错性

**中图分类号:**TP183 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2026.0001.013

### Distribution Network Fault Location Based on an Improved Gray Wolf Optimizer

YU Tingyao, LI Hongyue

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China

**Abstract: Objective** To address the limitations of existing optimization algorithms in distribution network fault location, specifically slow convergence speed during later iterations and low positioning accuracy, an improved gray wolf optimizer (IGWO) is proposed. **Methods** First, a switching function and a fitness function suitable for distributed generation (DG) integration were constructed. An IEEE 33-node distribution network model was then established based on these functions. Subsequently, the gray wolf optimizer was discretized to accommodate distribution networks with DG. Second, inspired by the somersault-foraging mechanism in the manta ray foraging optimizer, a wavelet-function-based perturbation strategy was incorporated into the optimal solution to enhance the ability to escape local optima and accelerate convergence. Additionally, a nonlinear processing scheme was applied to the convergence factor to improve local search capability, computational speed, and solution accuracy. **Results** Simulation tests for single-point faults, multi-point faults, and information distortion were conducted by connecting DGs at varying locations and quantities. Comparative analyses against the binary gray wolf optimizer, original gray wolf optimizer, and particle swarm optimizer demonstrated that the IGWO achieved superior performance in positioning accuracy, average convergence generation, and iteration time. **Conclusion** The IGWO outperforms the other three optimization algorithms in terms of convergence speed and positioning efficiency in fault location.

**Keywords:** improved gray wolf optimizer; distributed generation; fault location; distribution network; fault tolerance

收稿日期:2024-03-05 修回日期:2024-07-12 文章编号:1672-058X(2026)01-0106-09

作者简介:于婷垚(1998—),女,山东威海人,硕士研究生,从事配电网故障定位研究。

通信作者:李红月(1978—),女,安徽萧县人,副教授,从事电力电子与电力传动研究。Email:2082382659@qq.com.

引用格式:于婷垚,李红月.基于改进灰狼算法的配电网故障定位[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2026,43(1):106-114.

YU Tingyao, LI Hongyue. Distribution network fault location based on an improved gray wolf optimizer[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43(1): 106-114.

随着国家经济和科技的快速发展,人们对供电可靠性的要求也在不断增加。在电力系统故障中占比较高的是配电网故障,如果发生故障造成停电,会给人们的生活和工作带来很多麻烦,因此,在配电网发生故障后,最重要的就是迅速准确地定位到故障区段,这可以为故障隔离、分析和事后恢复供电提供条件,对于缩短停电时间、提高供电可靠性具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。

随着绿色发展理念的提出以及清洁能源的发展,太阳能等分布式电源被大量应用于配电网,这导致配电网变成更加复杂的多电源结构,使传统的故障定位方法不再可行<sup>[4]</sup>。因此,对含 DG 的配电网故障定位的研究是一个热点问题。随着配电网的不断进步,馈线终端单元(FTU)有广阔的应用前景,把在 FTU 上采集到的故障信息导入至数据采集与监视控制系统(SCADA),再通过各种算法对数据进行计算得到故障区域。文献[5]利用矩阵算法对可疑区段进行筛选,提高容错性和矩阵运算效率,但只能用于不含 DG 的配电网中。文献[6]使用基于阈值反馈的蝠鲞觅食优化算法,使定位效率和收敛速度都显著提高,但在配电网发生多重故障和信息畸变时会陷入局部最优。文献[7]通过引入分组算子和模因组改进二进制粒子群算法,对含 DG 的配电网进行故障定位仿真,与原 BPSO 算法相比具有更好的准确性、快速性和容错性。文献[8]将蚁群算法应用于配电网故障定位中,提高了定位精度与容错性,能更好解决含 DG 配电网局部故障定位的问题,但寻优效果不太稳定。文献[9]使用鲸鱼优化算法,其抗干扰和收敛性更强,但在节点信息遗失或改变时,易发生局部最优。

上述研究在解决故障定位问题上均有所改进,但在算法的迭代时间和跳出局部最优方面还有待改善,算法整体性能还可以进一步加强。本文使用了一种通过改进灰狼算法来定位含 DG 配电网故障的具体方式,在对传统灰狼算法做二进制处理的基础上,参考蝠鲞优化算法翻筋斗觅食的思想,并加入小波函数最优解扰动,从而跳出局部最优,并增加种群多样性;其次,对收敛因子作非线性处理,以加强算法整体性能。最后,将改进的灰狼算法应用于含 DG 的配电网模型中进行故障定位,并对其进行仿真对比,确定了该算法的高效率与准确性。

## 1 灰狼优化算法及改进

### 1.1 灰狼优化算法

灰狼优化算法(GWO)是由 Mirjalili 等<sup>[10]</sup>在 2014 年提出的一种群智能算法。 $\omega$  狼总要服从所有占统治地位的狼,负责种群的内部平衡<sup>[11]</sup>。狼群狩猎过程的

公式为

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (1)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D \quad (2)$$

$$A = 2 \cdot a \cdot r_1 - a \quad (3)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (4)$$

$$a_1 = 2 - \frac{2 \cdot t}{T} \quad (5)$$

式(1)中, $t$ 为当前迭代次数; $X(t)$ 表示灰狼个体的位置; $X_p(t)$ 表示猎物位置; $A$ 和 $C$ 为系数;式(3)一式(4)中: $r_1$ 、 $r_2$ 为 $[0,1]$ 之间的随机数; $a$ 为收敛因子。

灰狼个体位置更新的公式为

$$D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha(t) - X(t)| \quad (6)$$

$$D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta(t) - X(t)| \quad (7)$$

$$D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta(t) - X(t)| \quad (8)$$

$$X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha \quad (9)$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 \cdot D_\beta \quad (10)$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta \quad (11)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (12)$$

式(6)一式(8)表示灰狼个体到 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 狼之间的距离;公式(9)一式(11)表示 $\omega$ 狼随 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 狼的位置更新,得到 $\omega$ 狼前进的步长和捕猎方向;再根据式(12)得到每只灰狼的最终位置。

### 1.2 改进二进制灰狼优化算法

处理配电网故障定位问题时,需要对连续的灰狼位置做二进制处理,使用 sigmoid 函数<sup>[12]</sup>将灰狼的位置压缩至 $[0,1]$ 区间内,转换函数为

$$\text{sigmoid}[X(t+1)] = \frac{1}{1 + e^{-10 \left[ \left( \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \right) - 0.5 \right]}} \quad (13)$$

$$x_d(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{sigmoid}[X(t+1)] > \text{rand}() \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: $\text{rand}()$ 是 $[0,1]$ 内均匀分布的随机数; $x_d(t+1)$ 是在 $d$ 维中灰狼迭代后更新的位置。

#### 1.2.1 改进非线性收敛因子

$A$ 对局部搜索和全局搜索有着平衡的作用。通过式(3)可知, $A$ 的值根据 $a$ 而改变,且 $a$ 是由2向0线性递减的。本文使用一种非线性变化的收敛因子<sup>[13]</sup>,公式如下

$$a = \sin\left(\frac{t\pi}{T} + \frac{\pi}{2}\right) + 1 \quad (15)$$

式(15)中, $T$ 表示最大迭代次数。

初始阶段 $a$ 的斜率较缓,能够更好地防止处于局部最优。到了中后期, $a$ 的曲线斜率快速变陡,这意味着在局部搜索方面的能力更强,有利于寻找最优解。

### 1.2.2 翻筋斗觅食策略

本文使用翻筋斗觅食策略<sup>[14]</sup>让 GWO 算法能更容易跳出局部最优。数学模型如下:

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + S \cdot (r_1 x_{best}^d - r_2 x_i^d(t)) \quad i=1,2,\dots,N \quad (16)$$

式(16)中,  $S$  表示翻转范围的空翻因子, 本文取  $S=2$ ;  $d$  表示维度;  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  之间的随机数。

每次迭代,  $x_i^d(t)$  总和翻筋斗后的灰狼实施适应度比较, 若处于局部最优,  $x_i^d(t)$  或许会被调换, 迭代后期, 被替代的可能性会更大。在更新位置时是绕着最优解进行的, 使算法有了更好的收敛性。

### 1.2.3 小波函数最优解扰动策略

为了增加迭代之后的种群多样性, 本文使用小波函数对最优解  $\alpha$  进行调整。Morlet 小波具有良好的时频和动态特性<sup>[15]</sup>, 公式如下:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{m}} e^{-\frac{(\frac{\varphi}{m})^2}{2}} \cos\left(5\left(\frac{\varphi}{m}\right)\right) \quad (17)$$

$$m = e^{-\ln g \times (1 - \frac{1}{g})^\xi + \ln g} \quad (18)$$

其中,  $\varphi$  的值在  $[-2.5a, 2.5a]$  之间;  $g$  是  $m$  的上限;  $\xi$  是形状参数, 本文取  $g=10\ 000, \xi=5$ 。

$$X_\alpha^* = \sigma X_\alpha + r(l+u + \sigma X_\alpha) \quad (19)$$

式(19)中,  $X_\alpha$  是最优解;  $X_\alpha^*$  是调整后的解;  $u, l$  分别是  $X_\alpha$  的上下限;  $r$  是  $[0, 1]$  之间的随机数。

## 2 配电网故障定位方法

### 2.1 编码方式

配电网发生故障时, 将从 FTU 上收集到的故障信息上传至 SCADA 系统, 系统再通过 IGWO 算法对数据进行计算得到故障区段。为了能将算法与配电网结合起来, 需要对故障电流信息进行编码。用  $x_k$  表示馈线段  $k$  处的状态, 其编码方式为

$$x_k = \begin{cases} 1, & \text{区段 } k \text{ 存在故障} \\ 0, & \text{区段 } k \text{ 无故障} \end{cases} \quad (20)$$

对于含 DG 的配电网, 其拓扑结构会比传统配电网更加复杂, 故障电流方向也会发生改变, 电流从单向流动变换为双向, 因此, 需要改变电流编码方式。将电流从系统电源向负载流动的方向设为正方向<sup>[16]</sup>, 否则视为反方向。当故障电流的流向与设定的正方向一致时, 将其记作 1; 没有故障电流时, 记作 0; 当故障电流方向为反方向时, 记作 -1。用  $I_j$  表示开关  $j$  处的状态, 编码方式为

$$I_j = \begin{cases} 1, & \text{故障电流方向与正方向相同} \\ -1, & \text{故障电流方向与正方向相反} \\ 0, & \text{无故障电流} \end{cases} \quad (21)$$

### 2.2 构建开关函数

按照上述编码方式, 得到开关  $j$  处的故障电流信息  $I_j$ , 然后构建开关函数, 将馈线段的状态与  $I_j$  联系起来进行故障定位。文献[17]提出了一种应用于含 DG 配电网故障定位的开关函数, 公式如下:

$$I_j^*(x) = \prod_{i=1}^{n_2} X_i - \prod_{i=1}^{n_{DG}} K_i \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^{n_2} X_i\right) \cdot \prod_{i=1}^{n_1} X_i \quad (22)$$

式(22)中, 将系统电源到开关  $j$  之间的区段称为上游馈线段, 开关到负载的区段称为下游馈线段;  $I_j^*(x)$  表示开关  $j$  处的期望故障电流信息;  $n_1, n_2$  分别是开关  $j$  上游和下游的馈线段数;  $n_{DG}$  是下游的电源数量;  $K_i$  是下游的第  $i$  个 DG 开关;  $X_i$  是上下游中第  $i$  个区段的状态信息。

### 2.3 构建适应度函数

适应度函数<sup>[18]</sup>是实际的故障电流信息和期望的开关函数值之间的差, IGWO 算法通过这个差值来搜索最优, 差值最小时才能得到最优解, 进而实现配电网故障定位。适应度函数如下:

$$\text{Fit}(x) = 100 - \left[ \sum_{j=1}^N |I_j - I_j^*(x)| + \delta \cdot \sum_{j=1}^n |x_j| \right] \quad (23)$$

式(23)中,  $N, n$  分别表示配电网的开关数量和馈线段数量;  $I_j, I_j^*(x)$  分别表示开关  $j$  的实际故障电流信息和期望状态, 当存在故障电流时, 该变量的值为 1, 而当没有故障电流时, 该变量的值为 0;  $\delta$  是权重系数, 在本文中将其取为 0.5。

### 2.4 层级模型

为了说明层级模型的可行性, 以图 1 所示的简单配电网为例做分析。

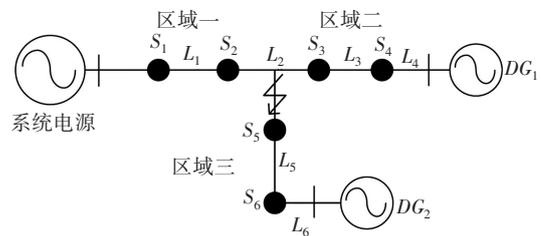


图 1 简单配电网

Fig. 1 Simple distribution network

当区域三上的  $L_5$  故障时, 根据式(22)可得区域二中节点  $S_4$  的开关函数为

$$I_4^*(x) = X_4 - [(X_1 | X_2 | X_3) | (X_3 | X_5 | X_6)] \cdot (1 - X_4) = -1 \quad (24)$$

同理, 其他节点的开关函数为

$$I_1^*(x) = 1 \quad I_2^*(x) = 1 \quad I_3^*(x) = -1 \quad (25)$$



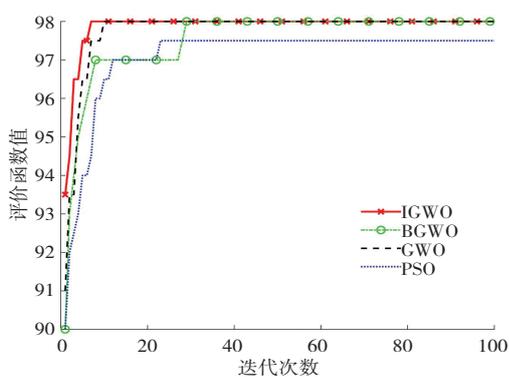


出的结果为 $[0,0,0,1,1,0,1]$ ,再在区域四、五、七中进行定位,解分别为 $[0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0]$ 、 $[0,1,0,0,0]$ 、 $[0,0,1,0]$ ,表示故障发生在 $L_8, L_{19}, L_{32}$ ,说明发生多点故障时定位也准确,算法对比曲线如图 6(c)所

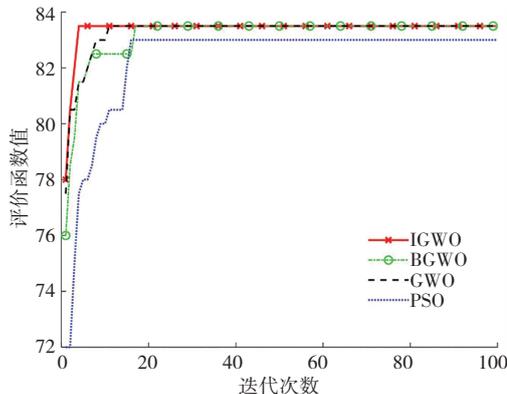
示;另 $[K_1, K_2, K_3] = [0,0,0]$ 、 $[K_1, K_2, K_3] = [0,1,0]$ 、 $[K_1, K_2, K_3] = [1,1,1]$ ,即有 0、1、3 个 DG 接入时的对比曲线分别对应图 6(a)、6(b)、6(d)。在多点故障仿真测试中,经过多次仿真对数据取平均值,记录见表 6。

表 5 多点故障定位仿真测试  
Table 5 Simulation test of multi-point fault location

$[K_1, K_2, K_3]$	故障区段	FTU 设备上报信息	定位输出结果	定位结果
$[0,0,0]$	$L_{12}, L_{20}, L_{27}$	$[1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,1]$	$[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]$	$L_{12}, L_{20}, L_{27}$
$[0,1,0]$	$L_{13}, L_{19}, L_{31}$	$[1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,-1,-1,-1,-1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0]$	$[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]$	$L_{13}, L_{19}, L_{31}$
$[1,0,1]$	$L_8, L_{19}, L_{32}$	$[1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,1,1,0]$	$[0,0,0,0,0,0,0,1,0]$	$L_8, L_{19}, L_{32}$
$[1,1,1]$	$L_9, L_{26}, L_{31}$	$[1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,0,0,0,0,0,0,0,0]$	$[0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0]$	$L_9, L_{26}, L_{31}$



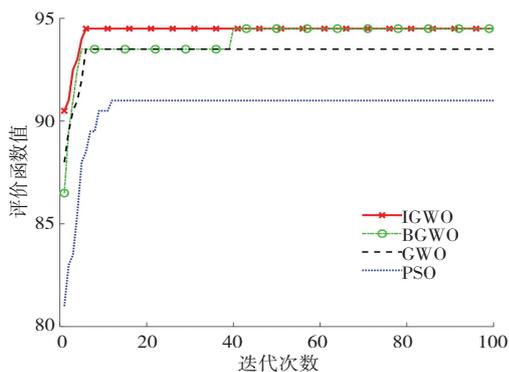
(a)  $[K_1, K_2, K_3] = [0,0,0]$



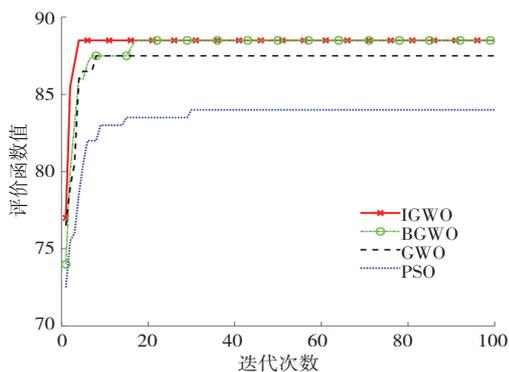
(d)  $[K_1, K_2, K_3] = [1,1,1]$

图 6 多点故障定位的算法对比图

Fig. 6 Comparison of algorithms for multi-point fault location



(b)  $[K_1, K_2, K_3] = [0,1,0]$



(c)  $[K_1, K_2, K_3] = [1,0,1]$

表 6 多点故障定位算法迭代结果对比

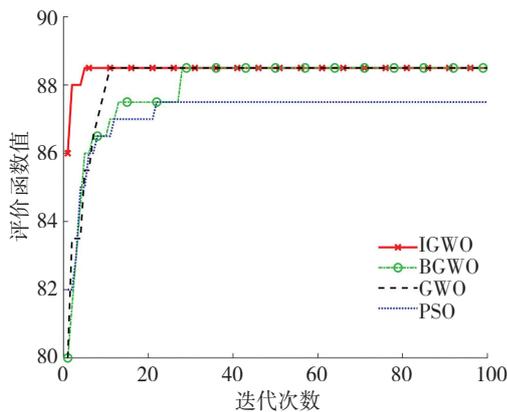
Table 6 Comparison of iterative results of multi-point fault location algorithms

对比算法	定位准确率/%	平均收敛代数	迭代时间/s
IGWO	95.0	9.20	0.612
BGWO	90.0	11.10	0.741
GWO	67.5	10.08	0.955
PSO	57.5	22.51	0.749

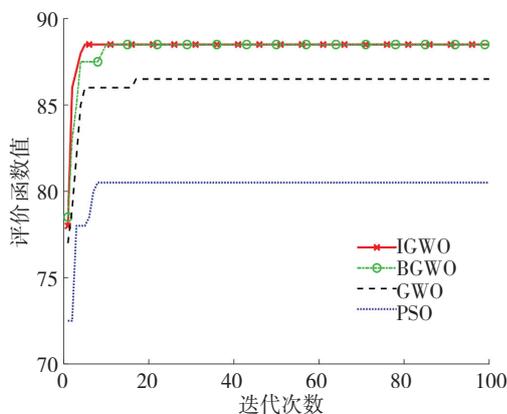
### 3.3 信息畸变故障仿真测试

将信息畸变分为 6 类进行仿真测试,结果见表 7。当 $[K_1, K_2, K_3] = [0,0,0]$ ,即无分布式电源接入时, $L_{14}$ 是故障区段,FTU 设备上报信息为 $[1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0]$ , $S_{10}$ 是畸变位置,定位输出结果是 $[0,0]$ ,表示故障发生在 $L_{14}$ ,说明有一处发生信息





(e)  $[K_1, K_2, K_3] = [0, 1, 1]$



(f)  $[K_1, K_2, K_3] = [1, 0, 1]$

图 7 信息畸变时故障定位的算法对比图

Fig. 7 Comparison of fault location algorithms under information distortion

表 8 信息畸变时故障定位的算法迭代结果对比

Table 8 Comparison of iterative results of fault location algorithms under information distortion

对比算法	定位准确率/%	平均收敛代数	迭代时间/s
IGWO	93.3	8.16	0.642
BGWO	90.8	8.99	0.748
GWO	73.3	9.08	0.737
PSO	55.8	24.66	0.602

### 3.4 结果分析

由表 4、表 6、表 8 分析可知,含 DG 的配电网在发生单点故障、多点故障和信息畸变时,IGWO 算法基本都能在 6 代左右收敛到最优,在翻筋斗觅食和小波函数最优解扰动的策略下,其迭代时间仅 0.6 s;BGWO 在 10 代左右迭代完成,故障定位效率和准确率较好;GWO 中灰狼群体位置根据  $\alpha, \beta, \delta$  来更新,若其追击猎物的方向出现误差,则很难进行全局搜索,会导致过早收敛;PSO 的定位准确率极低,收敛代数也很大。

综上所述,IGWO 算法能迅速准确地定位到单点、

多点及信息畸变故障,并比其他 3 种算法的准确性更好,平均迭代次数更少,迭代时间也更短。因此,本文的 IGWO 算法在配电网故障定位中的寻优能力更好。

## 4 结束语

本文通过改变非线性收敛因子,引入翻筋斗觅食策略和小波函数最优解扰动策略改进了 BGWO 算法,并根据 FTU 设备上报的故障电流信息构建开关函数和适应度函数,在含 DG 的 IEEE33 节点配电网中进行了故障定位仿真测试。通过多种算法的仿真对比,表明在配电网接入不同位置、不同数量的分布式电源以及发生信息畸变时,IGWO 算法能更快速、准确地定位到单点或多点故障区段,从而缩短检查和恢复供电的时间。但改进的 IGWO 算法在发生多点故障和信息畸变时,其定位不是完全准确的,需要再做改进使容错性加强。

### 参考文献(References):

[1] 唐金锐,尹项根,张哲,等. 配电网故障自动定位技术研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 7-13.  
TANG Jin-rui, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Research review on automatic fault location technology of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 7-13.

[2] 王守相,宋丽可,舒欣. 分布式电源与多元负荷高渗透接入的主动配电网自适应过流保护方案[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1783-1794.  
WANG Shou-xiang, SONG Li-ke, SHU Xin. Adaptive overcurrent protection scheme for active distribution network with high penetration access of distributed power supply and multiload[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(6): 1783-1794.

[3] 赵凤贤,孟镇,李永勤,等. 基于故障分量的主动配电网纵联保护原理[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3092-3100.  
ZHAO Feng-xian, MENG Zhen, LI Yong-qin, et al. Principle of longitudinal protection for active distribution network based on fault component[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(10): 3092-3100.

[4] 王增平,杨国生,王志洁,等. 继电保护相关的国内外分布式电源并网标准[J]. 中国电力, 2019, 52(8): 112-119.  
WANG Zeng-ping, YANG Guo-sheng, WANG Zhi-jie, et al. Relay protection-related domestic and foreign standards for interconnecting distributed resources with electric power systems[J]. Electric Power of China, 2019, 52(8): 112-119.

[5] 徐彪,尹项根,张哲,等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 152-158.  
XU Biao, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Distribution

- network fault location based on combination of matrix algorithm and optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 152-158.
- [6] 张荣升, 刘丽桑, 徐辉, 等. 改进蝠鲞觅食优化算法的配电网故障定位[J]. 福建工程学院学报, 2022, 20(3): 267-274.  
ZHANG Rong-sheng, LIU Li-sang, XU Hui, et al. Distribution network fault location with improved manta ray foraging optimization algorithm[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2022, 20(3): 267-274.
- [7] 张莲, 禹红良, 张逸玮, 等. 含分布式电源的配网改进 BPSO 算法故障定位[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(3): 183-192.  
ZHANG Lian, YU Hong-liang, ZHANG Yi-wei, et al. Fault location of distribution network with distributed power supply based on improved BPSO algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(3): 183-192.
- [8] 张亚东, 茅东华, 余洋. 基于蚁群算法的分布式配电网局部故障定位方法[J]. 能源与环保, 2021, 43(11): 182-187.  
ZHANG Ya-dong, MAO Dong-hua, YU Yang. Local fault localization method for distributed distribution networks based on ant colony algorithm[J]. Energy and Environmental Protection, 2021, 43(11): 182-187.
- [9] 张荣升, 刘丽桑, 宋天文, 等. 基于鲸鱼优化算法的配电网故障区段定位[J]. 福建工程学院学报, 2021, 19(4): 378-384.  
ZHANG Rong-sheng, LIU Li-sang, SONG Tian-wen, et al. Distribution network fault location based on whale optimization algorithm[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2021, 19(4): 378-384.
- [10] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in engineering software, 2014, 69(3): 46-61.
- [11] 李竹根, 刘波峰, 张晓飞, 等. 基于改进灰狼算法与隐枚举法的配电网分区故障定位研究[J/OL]. 电测与仪表, 2023(5): 1-10[2023-08-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220527.1835.010.html>.  
LI Zhu-gen, LIU Bo-feng, ZHANG Xiao-fei, et al. Research on regional fault location of distribution network based on improved grey wolf algorithm and hidden enumeration method [J/OL]. Electrical measurement and instrumentation, 2023(5): 1-10[2023-08-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220527.1835.010.html>.
- [12] EMARY E, ZAWBAA H M, HASSANIEN A E. Binary grey wolf optimization approaches for feature selection[J]. Neurocomputing, 2016, 172(1): 371-381.
- [13] 王芬, 杨媛. 一种改进的灰狼算法[J]. 长春师范大学学报, 2023, 42(4): 47-53, 76.  
WANG Fen, YANG Yuan. An improved grey wolf algorithm [J]. Journal of Changchun Normal University, 2023, 42(4): 47-53, 76.
- [14] 王正通, 程凤芹, 尤文, 等. 基于翻筋斗觅食策略的灰狼优化算法[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(5): 1434-1437.  
WANG Zheng-tong, CHENG Feng-qin, YOU Wen, et al. Grey wolf optimization algorithm based on somersault foraging strategy [J]. Application Research of Computers, 2021, 38(5): 1434-1437.
- [15] 许秋艳, 马良, 刘勇. 基于小波精英解学习和多角度搜索的新型阴阳平衡优化算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 1962-1970.  
XU Qiu-yan, MA Liang, LIU Yong. A novel Yin-Yang balance optimization algorithm based on wavelet elite solution learning and multi-angle search [J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 1962-1970.
- [16] 甄永琦, 蒋伟. 改进灰狼算法在配电网故障定位中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(11): 200-205.  
ZHEN Yong-qi, JIANG Wei. Application of improved grey wolf algorithm to fault location of distribution network[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(11): 200-205.
- [17] 郑聪, 周海峰, 郑东强, 等. 基于改进多元宇宙算法的主动配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 169-179.  
ZHENG Cong, ZHOU Hai-feng, ZHENG Dong-qiang, et al. Research on fault location method of active distribution network based on improved multiverse algorithm [J]. Power Systems Protection and Control, 2019, 51(2): 169-179.
- [18] 陈辉. 基于改进和声算法的含 DG 配电网故障定位与供电恢复研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.  
CHEN Hui. Research on fault location and power supply restoration of distribution network with DG based on improved harmonic algorithm [D]. ChangSha: Changsha University of Science and Technology, 2017.
- [19] 任志玲, 刘卫东, 杨柳, 等. 基于改进鸽群算法的含分布式电源配电网故障定位[J]. 电源学报, 2022, 20(4): 171-178.  
REN Zhi-ling, LIU Wei-dong, YANG Liu, et al. Fault location of distribution network with distributed power based on improved pigeon swarm algorithm [J]. Journal of Power Sources, 2022, 20(4): 171-178.

责任编辑: 陈芳