

基于改进人工鱼群优化算法的配网故障定位研究

武 剑, 薛玉石, 山春风, 檀青松

(国网石家庄供电公司, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 配网作为直接面向用户的最前端, 其稳定安全运行直接关系到用户的用电安全性与可靠性。然而 10 kV 配网通常分支较多, 线路环境复杂, 线路发生故障时难以确定具体位置, 影响供电可靠性。针对这一问题, 利用粒子群 (PSO) 算法改进人工鱼群算法 (AFSA), 形成改进人工鱼群优化算法 (AFSA-PSO), 通过算例验证 AFSA-PSO 算法的可行性, 最后应用于标准配网模型, 验证其实用性与优越性。结果表明: AFSA-PSO 算法能够准确反应配网中的单点故障和多重故障, 且相较于 AFSA 和 PSO 算法, 该算法寻优的平均迭代次数更短, 具有更快的收敛速度。

关 键 词: 配网; 人工鱼群算法; 优化算法; 故障定位

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.005 中图分类号: TM76 文章编号: 1673-9140(2023)02-0040-08

A location approach for distribution network faults based on the enhanced artificial fish swarm optimization

WU Jian, XUE Yushi, SHAN Chunfeng, TAN Qingsong

(State Grid Shijiazhuang Electric Power Supply Company, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: As the front end for users, the stable and safe operation of distribution networks are directly related to the reliable power supplies. However, the large amount of branches in 10 kV distribution networks makes the transmission conditions more complicated. When a fault occurs, it is difficult to determine its specific location, which will affect the power supply. In order to solve this, this paper uses particle swarm optimization (PSO) to improve artificial fish swarm optimization (AFSA). The feasibility of AFSA-PSO algorithm is tested by a case study, where it is applied in a standard distribution network model to verify its practicality and superiority. The results show that the AFSA-PSO algorithm can accurately reflect the single and multiple point failures in distribution networks, and this algorithm is better in both iteration times and convergence speed.

Key words: distribution network; artificial fish swarm algorithm; optimization algorithm; fault location

配网是电力系统电力输送网络的终端, 直接与各类负荷相连接。配网现场环境复杂^[1], 且全国用电量也紧跟社会高速发展, 用电高峰屡创新高, 对配网的压力急剧增加, 对电能质量的要求也越发严格^[2]。然而配网线路复杂、设备老化等问题日趋严

重, 极易发生线路故障。为了能够及时处理线路故障问题, 保障配网高效、安全、平稳运行, 亟需解决配网故障定位问题^[3]。

配网中性点接线方式通常为中性点非直接接地^[4], 如有单相接地故障, 故障线路的电气量特征难

收稿日期: 2021-12-02; 修回日期: 2022-09-20

基金项目: 国网河北省电力有限公司科技项目 (KJ2018-059 II)

通信作者: 武 剑 (1979—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事继电保护自动化、新能源并网研究; E-mail: 3516993157@qq.com

以检测,针对这种现状,学者们通常利用线路故障前后的稳态和暂态分量的差异来进行故障定位,或者采用专用设备,即馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)确定故障线路^[5]。研究人员通过采取FTU设备上报信号,利用矩阵算法或智能算法确定故障区间。其中矩阵算法利用矩阵描述线路拓扑结构以及故障信息,继而通过矩阵运算确定故障线路:文献[6]和文献[7]分别利用无向图和有向图表述线路拓扑和故障信号,但需要FTU设备能判断故障电流方向,对设备要求较高,经济性较低;文献[8]通过测量各节点负荷大小,利用过热弧算法求出故障区域;文献[9]针对信号畸变问题,利用节点负荷变化更正畸变信号,解决故障定位时的信号不准难题;智能算法是将线路故障时的选线难题转化数学问题,引入各种智能算法为数学问题求解最优值,实现故障选线的要求。文献[10]引入遗传算法,通过求解矩阵方程进行定位,除此之外,还有各种智能算法如蚁群算法^[11]、人工免疫算法^[12]、神经网络^[13]、模拟退火算法^[14]、粒子群算法^[15]、模拟植物生长算法^[16]等均有应用于配网故障定位中,但上述算法均有一定的局限性,如遗传算法较为繁琐,求解时间长、模拟退火算法难以达到合适的收敛性、矩阵算法容错性交叉等。

针对上述配网故障定位难题,提出一种粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法引入人工鱼群算法(artificial fish swarm algorithm, AFSA)的改进人工鱼群优化(AFSA-PSO)算法,将人工鱼相关行为参数引进粒子群算法中,保证在局部寻优时的收敛效果;并利用两个算例验证改进算法的可行性;最后将改进算法应用于IEEE标准33节点配网模型,并比较ASFA、PSO算法以及AFSA-PSO算法寻找最优值所需的平均迭代次数,验证改进人工鱼群算法在配网故障定位中的的优越性和实用性。

1 算法基本原理

1.1 AFSA算法参数

AFSA^[11]属于智能仿真算法,是学者们研究自

然环境中的集体鱼群在进行集体捕食、群聚等行为时,总结归纳得到的一种优化方法。水域中的食物浓度影响鱼群的行为轨迹,鱼群中个体的捕食与相互间的追尾、群聚等活动,驱使鱼群向着食物浓度最高的位置靠近。

AFSA的控制变量为不同人工鱼所处的状态,可用向量 $S=(S_1, S_2, \dots, S_n)$ 表达,2条人工鱼*i*和*j*之间的距离计算如下:

$$S_{ij} = \|S_i - S_j\| \quad (1)$$

1.2 人工鱼行为

AFSA中,利用人工鱼作为寻优个体,模仿真实鱼的觅食过程中的不同行为做出不同的最优行为轨迹,以此得到寻优策略,人工鱼的基本行为如下。

1) 觅食行为。水域中不同位置的食物浓度不同,其浓度高低影响人工鱼的游动趋势,人工鱼趋向于食物浓度高的区域。假设某一人工鱼当前所处的状态为 S_i ,在其可视范围 S_v 内任选另一点为 S_j ,若 S_i 的目标函数(即食物浓度) Y_i 低于 Y_j ,则人工鱼由 S_i 游向 S_j 位置,即目标值更优,下一位置为

$$S_i^{k+1} = S_i^k + \frac{S_j - S_i^k}{\|S_j - S_i^k\|} \cdot S_s \cdot C \quad (2)$$

式中, C 在0和1间随机取值, S_s 是人工鱼单次运动最大距离。若 S_i 的目标函数 Y_i 高于 Y_j ,则在可视范围内另选新状态,重复此过程 n 次后仍未前进,则人工鱼随机游动,即随机行为,下一位置为

$$S_i^{k+1} = S_i^k + S_s \cdot C \quad (3)$$

2) 聚群行为。水域中人工鱼密度的大小影响人工鱼的移动方向,人工鱼趋向于人工鱼密度大的区域。若某水域中人工鱼总数量为 M ,某条人工鱼当前所处的状态为 S_i ,在它的视野范围中共有 m 条人工鱼,且位于视野中心处的人工鱼状态为 S_c , δ 表示水域中人工鱼的密度大小的拥挤度因子。如果 $m/M < \delta$,意味着视野中心处食物浓度高,且拥挤度小,人工鱼会朝着视野中心处移动,下一位置为

$$S_i^{k+1} = S_i^k + \frac{S_c - S_i^k}{\|S_c - S_i^k\|} \cdot S_s \cdot C \quad (4)$$

若不满足条件,或视野中无人工鱼,则采取其

他行为。

3) 追尾行为。人工鱼发现其他人工鱼附近食物浓度较高时,会跟寻最优人工鱼的移动方向。若某一人工鱼的状态为 S_i ,在它视野范围内最优人工鱼的状态为 S_z ,若 $Y_i < Y_z$,且最优人工鱼视野范围内的人工鱼数 m 与总数 M 满足 $m/M < \delta$,则该人工鱼游向最优人工鱼,下一位置为

$$S_i^{k+1} = S_i^k + \frac{S_j - S_i^k}{\|S_j - S_i^k\|} \cdot S_s \cdot C \quad (5)$$

否则执行觅食行为。

4) 随机行为。人工鱼不采用上述行为模式,在水域中随机游动,直至遇到满足上述行为模式的条件。

1.3 AFSA 算法步骤

AFSA 优化过程中需要设置公告牌、行为选择、迭代终止条件,以达到最佳的优化条件^[17]。公告牌用于保存最优人工鱼的目标函数并实时更新;行为选择表示人工鱼的移动趋向,通常可以依次执行4种行为,择优选择;迭代终止条件是算法结束的条件,若满足条件则停止优化,当前公告牌记录的目标函数即为寻找的最优值,若不满足则继续迭代。

AFSA 算法步骤如下:首先设置初始参数,如鱼群总数 M 、拥挤度因子 δ 、最大视野范围 S_v 、最大运动距离 S_s 、最大游动次数 n 等,根据文献^[18],AFSA 对参数取值包容性较大,没有规定限定值;设定相关参数后,即可根据当前人工鱼所处状态计算出相对应的目标函数,即食物密度,并在公告牌上记录;人工鱼根据周围环境确定一种行为,运动至下一个状态;根据运动后的状态计算对应的目标函数,并更新公告牌;检查是否满足迭代终止条件,如果满足就输出当前最优值,如果不满足就继续进行迭代。其流程如图1所示:

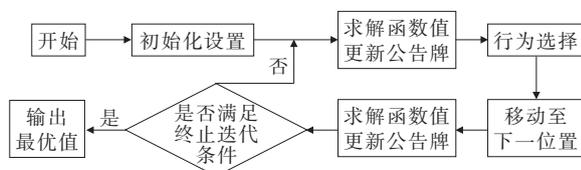


图1 人工鱼群算法流程

Figure 1 The flow chart of AFSA

2 改进 AFSA 算法

2.1 改进的 AFSA 算法

AFSA 的优势是显而易见的,其全局收敛性强、参数选择简易,但也存在较大局限性。AFSA 迭代过程中收敛速度较慢,特别是目标函数值相差较小时,人工鱼的觅食行为极易丢失更优解,从而影响优化效果。为此,文章引入 PSO 算法,PSO 算法具有步骤简单、收敛速度快等优势,且粒子间的相关性强,极易在局部收敛找到极值,将 PSO 算法与 AFSA 结合,以改进 AFAS。

PSO 算法与 AFSA 类似。PSO 算法中粒子的位置由向量 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示,速度由向量 $V_i = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 表示,其取值范围通常为 $[-3, 3]$,全局历史最优粒子记为 X_p ,各个粒子的历史最优位置记为 X_g ,迭代一次后的粒子速度如下:

$$\begin{cases} v_{i,m}^{k+1} = \omega v_{i,m}^k + a + b \\ a = v_1 c_1 (x_{g,m}^k - x_{i,m}^k) \\ b = v_2 c_2 (x_{p,m}^k - x_{i,m}^k) \end{cases} \quad (6)$$

粒子的下一步取值如下:

$$x_{i,m}^{k+1} = \begin{cases} 1, & \text{Sig}(v_{i,m}^{k+1}) \geq c_{i,m}^{k+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $x_{i,m}^k$ 为迭代 k 次后向量 x_i 中第 m 个元素的值; ω 为惯性权重系数; v_1 和 v_2 为加速因子, c_1 和 c_2 在0与1间随机取值;Sig为模糊函数,其计算式为

$$\text{Sig}(x) = \begin{cases} 0.05, & x < -3 \\ \frac{1}{1 + e^{-x}}, & -3 < x < 3 \\ 0.95, & x \geq 3 \end{cases} \quad (8)$$

由于 AFSA 在寻优方面的局限性,文章对 AFSA 中人工鱼行为进行优化,将其融入 PSO 算法中的速度向量参数中;同时当人工鱼在进行行为选择时,如若选择结果为觅食行为,且未寻得最优解,此时人工鱼不采用随机行为,而是遵循式(7)确定其下一步游动位置;所有人工鱼行为选择移动后,按照式(6)确定下一次移动的速度值,改进后的 AFSA-PSO 算法优化算法流程如图2所示。

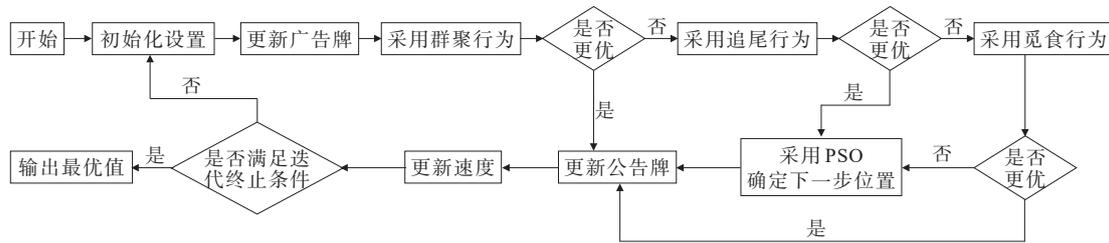


图 2 改进人工鱼群算法流程
Figure 2 The flow chart of AFSA-PSO

2.2 算例分析

为验证 AFSA-PSO 算法的可行性与优越性,本文分别使用 AFSA、PSO 以及 AFSA-PSO 算法对如下算例进行计算。

算例 1:

$$\min F_1(X) = \sum_{i=1}^{K_1} (x_{2i-1} - 2x_{2i} + 2) \quad (9)$$

算例 2:

$$\min F_2(X) = \sum_{i=0}^{K_2} \begin{pmatrix} 60x_{6i+1}^2 - 54x_{6i+1} + 60x_{6i+2}^2 - 55x_{6i+2} + \\ 60x_{6i+3}^2 - 56x_{6i+3} + 60x_{6i+4}^2 - 57x_{6i+4} + \\ 60x_{6i+5}^2 - 57x_{6i+5} + 60x_{6i+6}^2 - 60x_{6i+6} - \\ 30x_{6k+1}x_{6k+4}x_{6k+5} - 60x_{6k+2}x_{6k+3}x_{6k+4} + 52 \end{pmatrix} \quad (10)$$

s. t.

$$\begin{aligned} 30x_1 + 16x_2 + 14x_3 + 11x_4 + 10x_5 + 4x_6 &\leq 50 \\ 30x_7 + 16x_8 + 14x_9 + 11x_{10} + 10x_{11} + 4x_{12} &\leq 50 \\ &\vdots \\ 30x_{6k+1} + 16x_{6k+2} + 14x_{6k+3} + 11x_{6k+4} + 10x_{6k+5} + \\ 4x_{6k+6} &\leq 50 \end{aligned} \quad (11)$$

本文设定变量的取值在 0 和 1 这 2 个数字中选择,其个数为 N , $\lfloor \cdot \rfloor$ 符号表示为向下取整函数,其中,

$$K_1 = \left\lfloor \frac{N+1}{2} \right\rfloor, K_2 = \left\lfloor \frac{N}{6} \right\rfloor.$$

算例参数设置参照文献[19],其中 PSO 算法和 AFSA-PSO 算法的惯性权重系数 ω 取值为 1,加速因子 v_1 和 v_2 取值为 2,AFSA 的最大游动次数 n 取值为 20,人工鱼群的最大视野范围 S_v 、最大运动距离 S_s 等参数均在区间 $[-3, 3]$ 上均匀分布取值,粒子数和人工鱼数量均为 30,为方便比较,迭代次数取值

为 1 000,如果达到迭代次数则停止迭代。

算例 1 目标函数的最优值为 0,算例 2 目标函数的最优值为 1。表 1、2 中 P 代表计算得到最优值需要的平均迭代次数、 Q 代表运行过程计算得到最优解的次数、 $R\%$ 代表算得最优解的次数与总运行次数之比。图 3 为平均函数值与迭代次数的关系曲线。

表 1 算例 1 中不同算法计算结果

Table 1 Results of example 1

算法	N	P	Q	$R/\%$
PSO	50	34.58	200	100
	100	83.52	200	100
AFSA	50	25.45	200	100
	100	74.86	200	100
AFSA-PSO	50	20.56	200	100
	100	66.96	200	100

表 2 算例 2 中不同算法计算结果

Table 2 Results of example 2

算法	N	P	Q	$R/\%$
PSO	30	485.35	118	59
	50	824.12	48	24
AFSA	30	86.23	200	100
	50	560.50	140	70
AFSA-PSO	30	44.42	200	100
	50	251.12	194	97

由表 1、2 中数据可知,AFSA-PSO 算法能够得到算例的最优值,具有较好的可行性,且相比于 PSO 算法以及 AFSA,AFSA-PSO 算法能在更短的时间内收敛,能在较短的迭代次数中寻得最优值,具有一定的优越性。

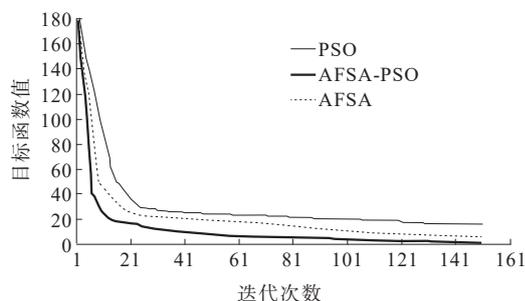


图3 算法迭代速度对比

Figure 3 Comparison of convergence speed

3 AFSA-PSO 算法应用于配网故障定位

通常配网中的各个节点以及联络开关等处均安装有FTU,可用于测量电流、进行通信等功能,当线路发生故障时,FTU能够测量到流过线路上的故障电流的大小,且将相关电气量上报,通过编码“0”和“1”,分别表示未出现故障电流和出现故障电流,但若用于故障定位还需要判别故障电流的方向。对于单端网络,线路故障时的故障电流方向为固定方向;但对于多端供电网络或者分布式电源(DG)时,则需要能够判别故障电流方向的FTU设备。

3.1 开关函数

当线路上流过故障电流时,线路上对应的开关也会流过,针对开关上有无故障电流流过,建立开关函数并表示为

$$I_p^*(s) = \prod_{n=1}^Q s_{pq} \quad (12)$$

其中, s_{pq} 表示开关 p 下游线路的故障状态, Q 表示 p 开关下游所有线路的总和。如果线路 n 上有故障,则 s_{pq} 取值为1,反之则取值为0。

以图4为例,开关数和线路数各有5个,其中 L_3 为T型支路, L_4 、 L_5 支路为出线,则图示配网的开关函数可以表示如下:

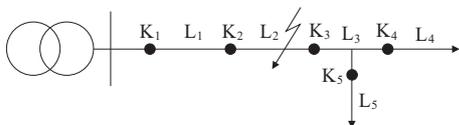


图4 简单配网

Figure 4 A simple network diagram

$$\begin{cases} I_1^*(s) = \prod_{n=1}^{Q_1} (L_1, L_2, L_3, L_4, L_5) \\ I_2^*(s) = \prod_{n=1}^{Q_2} (L_2, L_3, L_4, L_5) \\ I_3^*(s) = \prod_{n=1}^{Q_3} (L_3, L_4, L_5) \\ I_4^*(s) = \prod_{n=1}^{Q_4} L_4 \\ I_5^*(s) = \prod_{n=1}^{Q_5} L_5 \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13),其开关函数矩阵 K 可写为

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

当发生单一故障时,如线路 p 发生单相接地短路,FTU记录的线路电流的流通信息即为 K 的第 p 列。

例如当线路 L_5 发生故障,则体现在矩阵 K 的第5列上,其值为 $[1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1]^T$,代表开关 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_5 有故障电流流过。据此来描述图3中 L_2 线路单一故障,可表示为

$$S = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (15)$$

当发生多重故障时,可根据矩阵 K 与矩阵 S 相乘后的矩阵 Z 来判断,矩阵 Z 中的非零元素即为各个开关的状态。如当线路发生多种故障时,向量 V 表示为

$$V = KS = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中,等号右边第1、2、3、5行元素非零,即开关 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_5 有故障电流流过。

本文选用文献[20]中提及的评价函数作为文章中AFSA-PSO的目标函数。

3.2 AFSA-PSO 算法应用

本文将改进人工鱼群算法应用于标准配网模型中,模型选用IEEE标准33节点配网模型,如图5所示。

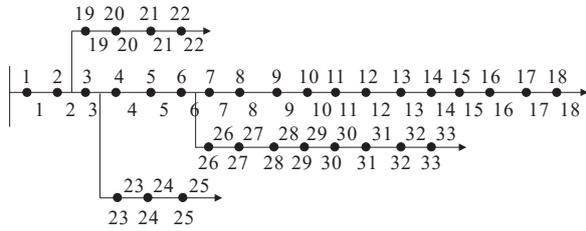


图 5 33 节点配电网

Figure 5 Distribution network with 33 nodes

开关数和线路数均为 33,人工鱼群的初始状态随机赋值 0 或者 1(线路初始状态),算法中人工鱼的数量和粒子的数量均取值 20,维度等于配网节点

数 33,算法的最大迭代次数为 500,惯性权重系数 ω 取值为 1,加速因子 v_1 和 v_2 取值为 2,最大游动次数 n 取值为 20。

3.2.1 单点故障

配网中发生单点故障的概率较大,并考虑到 FTU 设备上报信号畸变情况,设置 4 种情况:情况 1 为线路 12 发生短路故障;情况 2 为线路 12 发生短路故障,开关 8 上报信息发生改变;情况 3 为线路 28 发生故障;情况 4 为线路 28 发生故障,开关 16 和 26 上报信息发生改变。上述情况均测试 20 次,测试所得数据如表 3 所示。

表 3 单点故障测试结果

Table 3 Test result of single fault

故障情况	畸变数目	开关信号上报状态	线路故障状态	故障线路定位结果	平均迭代次数
1	0	11111-11111-11000-00000 00000-00000-000	00000-00000-01000-00000 00000-00000-000	12	24.2
2	1	11111-11011-11000-00000 00000-00000-000	00000-00000-01000-00000 00000-00000-000	12	28.3
3	0	11111-10000-00000-00000 00000-11100-000	00000-00000-00000-00000 00000-00100-000	28	20.1
4	2	11111-10000-00000-10000 00000-01100-000	00000-00000-00000-00000 00000-00100-000	28	26.5

由表 3 中开关信号和线路故障按照 1~33 的顺序排列。从情况 1、3 可以得出,AFSA-PSO 算法可正确判断出故障线路;从情况 2、4 可以得出,即使少数 FTU 上报信号畸变,AFSA-PSO 算法仍能准确进行故障定位。

3.2.2 多重故障

配网中时常会发生多重故障,同时考虑到

FTU 设备上报信号畸变情况,同样设置 4 种情况:情况 5 为线路 15、27 发生短路故障;情况 6 为线路 15、27 发生短路故障,且开关 11、20 上报信息发生改变;情况 7 为线路 17、23 和 28 发生故障;情况 8 为线路 17、23 和 28 发生故障,开关 9、14、2 和 31 上报信息发生改变。上述情况均测试 20 次,测试所得数据如表 4 所示。

表 4 多重故障测试结果

Table 4 Test result of multiple fault

故障情况	畸变数目	开关信号上报状态	线路故障状态	故障线路定位结果	平均迭代次数
5	0	11111-11111-11111-00000 11000-00000-000	00000-00000-00001-00000 01000-00000-000	15、27	23.5
6	1	11111-11111-01111-00001 11000-00000-000	00000-00000-00001-00000 00000-00000-000	15、27	27.3
7	0	11111-11111-11111-11000 00100-11100-000	00000-00000-00000-01000 00100-00100-000	17、23、28	25.1
8	2	11111-11101-11101-11000 10100-11100-100	00000-00000-00000-01000 00100-00100-000	17、23、28	28.2

由表4数据可知,AFSA-PSO算法对多重故障仍能准确判断故障线路,故障选线能力强,迭代次数短,收敛能力强。

3.2.3 各算法收敛速度对比

为了测试AFSA-PSO算法相较于AFSA和PSO算法的优越性,本文利用AFSA和PSO算法分析故障情况1、5,设置测量次数为20,结果如表5所示,数据代表各算法在每次运算寻找最优值时所需的平均迭代次数。

表5 各算法平均迭代次数

Table 5 Average iterations of different algorithms

故障情况	平均迭代次数		
	AFSA	PSO	AFSA-PSO
1	213.4	124.5	24.2
5	71.1	67.3	23.5

由表5可知,相较于AFSA和PSO算法,AFSA-PSO算法在收敛速度上具备明显优势。

4 结语

本文对配网故障定位问题进行研究,通过联合AFSA和PSO算法,形成一种改进人工鱼群算法。通过算例验证,改进人工鱼群算法可以正确定位配网中发生的单点故障和多重故障,且收敛速度明显快于AFSA和PSO算法,具有较强的实用性。

参考文献:

[1] 高立克,陈绍南,秦丽文,等.基于混合整数非线性方法的配网可靠性规划[J].高压电器,2022,58(9):182-189.
GAO Like, CHEN Shaonan, QIN Liwen, et al. Reliability planning of distribution network based on mixed integer nonlinear method[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 182-189+196.

[2] 姚忠胜,钱虹,吴文军,等.基于多因素综合评价和改进灰色关联的供电可靠性研究[J].电力系统保护与控制, 2021,49(11):28-34.
YAO Zhongsheng, QIAN Hong, WU Wenjun, et al. Research on power supply reliability based on multi-factor comprehensive evaluation and improved gray relation[J].

Power System Protection and Control,2021,49(11):28-34.

[3] 宋连峻,曲霏,廉洪波,等.基于阻抗分析的复杂配电网接地故障定位方法[J].电网与清洁能源,2022,38(8):69-74.
SONG Lianjun, QU Fei, LIAN Hongbo, et al. A grounding fault location method for complex distribution networks based on impedance analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(8): 69-74.

[4] 龙国华,刘衍,彭军海,等.配网小电阻接地系统过电压与人身安全性仿真研究[J].电瓷避雷器,2019(5):85-91+98.
LONG Guohua, LIU Yan, PENG Junhai, et al. Simulation study on overvoltage and personal safety of neutral low-resistance grounding system in distribution network [J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 85-91+98.

[5] 邓丰,徐帆,曾哲,等.基于多源暂态信息融合的单端故障定位方法[J].电工技术学报,2022,37(13):3201-3212.
DENG Feng, XU Fan, ZENG Zhe, et al. Single-ended fault location method based on multi-source transient information fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3201-3212.

[6] 刘耀湘,乐秀璠,顾欣欣.配电网故障区段判断和隔离的综合矩阵法[J].电力自动化设备,2006(3):38-41.
LIU Yaoliang, LE Xiupan, GU Xinxin. Synthesis matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006(3): 38-41.

[7] 梅念,石东源,杨增力,等.一种实用的复杂配电网故障定位的矩阵算法[J].电力系统自动化,2007,31(10):66-70.
MEI Nian, SHI Dongyuan, YANG Zengli, et al. A practical matrix-based fault location algorithm for complex distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 66-70.

[8] 梅念,石东源,段献忠.基于过热区域搜索的多电源复杂配电网故障定位方法[J].电网技术,2008,32(12):95-99.
MEI Nian, SHI Dongyuan, DUAN Xianzhong. A fault location algorithm for complex multi-source distribution networks based on over-heated region searching[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 95-99.

[9] 谭红岩.配网故障定位的算法研究[D].成都:西南交通大学,2009.
TAN Hongyan. Research on algorithm of distribution network fault location[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

- [10] 孙志达,杨涛,吴栋冀,等.基于多源信息和遗传算法的配电网故障定位模型[J].智慧电力,2021,49(12):104-110.
SUN Zhida, YANG Tao, WU Dongqi, et al. Fault location model for distribution networks based on multi-source information and genetic algorithm[J]. Smart Power, 2021, 49(12):104-110.
- [11] 陶维青,肖松庆,李林,等.基于双精英蚁群算法的配电网故障区段定位[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(12):1626-1632.
TAO Weiqing, XIAO Songqing, LI Lin, et al. Fault location of distribution network based on double elite ACO[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2020, 43(12):1626-1632.
- [12] 傅龙天,余玉梅.基于人工免疫原理的故障检测模型[J].河南科技学院学报(自然科学版),2017,45(3):57-64.
FU Longtian, YU Yumei. Fault detection model based on artificial immune theory[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology(Natural Science Edition), 2017, 45(3):57-64.
- [13] 周智.基于神经网络的含DG中压配电网故障测距方法研究[D].济南:山东大学,2020.
ZHOU Zhi. Research on fault location method of medium voltage distribution network with DG based on neural network[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [14] 李家启.基于LLS的重庆地区雷电活动规律及其风险评估研究[D].南京:南京信息工程大学,2012.
LI Jiaqi. Study on lightning activity law and risk assessment in Chongqing area based on LLS[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.
- [15] 于艾清,丁丽青,王育飞,等.基于故障邻接状态的配电网多故障抢修与优化策略[J].中国电力,2023,56(3):64-76.
YU Aiqing, DING Liqing, WANG Yufei, et al. Multi-fault repair and optimization strategy of distribution network based on fault adjacency state[J]. Electric Power, 2023, 56(3):64-76.
- [16] 禹红良.基于馈线终端设备的配网故障定位算法研究[D].重庆:重庆理工大学,2020.
YU Hongliang. Research on fault location algorithm of distribution network based on feeder terminal equipment [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2020.
- [17] 江铭炎,袁东风.人工鱼群算法及其应用[M].北京:科学出版社,2012:45.
JIANG Mingyan, YUAN Dongfeng. Artificial fish swarm algorithm and its application[M]. Beijing: Science Press, 2012:45.
- [18] 袁远.基于改进人工鱼群算法的配电网无功优化[D].南京:南京理工大学,2008.
YUAN Yuan. Reactive power optimization of distribution network based on improved artificial fish swarm algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [19] 赵知劲,徐世宇,郑仕链,等.基于二进制粒子群算法的认知无线电决策引擎[J].物理学报,2009,58(7):5118-5125.
ZHAO Zhijin, XU Shiyu, ZHENG Shilian, et al. Cognitive radio decision engine based on binary particle swarm optimization[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(7):5118-5125.
- [20] 卫志农,何桦,郑玉平.配电网故障区间定位的高级遗传算法[J].中国电机工程学报,2002(4):128-131.
WEI Zhinong, HE Ye, ZHENG Yuping. Advanced genetic algorithm for fault location of distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2002(4):128-131.