

改进蝠鲞觅食优化算法的配电网故障定位

张荣升^{1,2}, 刘丽桑^{1,2}, 徐辉^{1,2}, 柯程扬^{1,2}

(1. 福建工程学院电子电气与物理学院, 福建 福州 350118;

2. 工业自动化福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350118)

摘要: 复杂的配电网系统中, 蝠鲞觅食优化算法存在后期搜索能力不足导致故障定位准确率下降的缺点。针对该问题, 提出了一种基于阈值反馈蝠鲞觅食优化算法的多电源配电网故障定位方法。在确立适用于复杂多电源网络的故障定位数学模型的基础上, 采用 Limit 阈值控制算法求得极值时的迭代次数; 在算法位置更新阶段引入交流反馈机制, 加快算法收敛速率; 利用 Sigmoid 函数对算法进行二进制离散化, 输出故障向量完成故障定位。在 Matlab 中建立故障定位仿真模型, 对多种算法开展对比实验。结果表明, 不同故障情况下, 改进的配电网故障定位算法的定位速度与准确度均优于其他算法。

关键词: 配电网; 故障定位; 蝠鲞觅食优化算法; Limit 阈值; 交流反馈机制

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)03-0267-08

Distribution network fault location based on improved manta ray foraging optimization algorithm

ZHANG Rongsheng^{1,2}, LIU Lisang^{1,2}, XU Hui^{1,2}, KE Chengyang^{1,2}

(1. School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Engineering Research Center for Industrial Automation in Colleges and Universities

of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In response to the shortcomings of manta ray foraging optimization (MRFO) algorithm in complex distribution network systems, which leads to the decrease of fault location accuracy due to insufficient search capability in the later stage, a multi-source distribution network fault location method based on threshold feedback manta ray foraging optimization (TFMRFO) algorithm was proposed. First, a fault location mathematical model applicable to multi-source complex networks was established. Second, the number of iterations was obtained by using the Limit threshold control algorithm. Meanwhile, the feedback mechanism of information exchange was introduced at the late stage of algorithm location update to accelerate the convergence rate of the algorithm. Finally, the Sigmoid function was used to improve the binary discretization of the algorithm and output the fault vector to complete the fault location. A simulation model of fault location was established using Matlab and compared with various algorithms. Results show that the improved distribution network fault location method has better speed and accuracy in locating faults under different fault situations.

Keywords: distribution network; fault location; manta ray foraging optimization algorithm; Limit threshold; communication feedback mechanism

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 福建省科技厅面上项目(2019J01773)

第一作者简介: 张荣升(1996—), 男, 山东东营人, 硕士研究生, 研究方向: 配电网故障定位。

通信作者: 刘丽桑(1984—), 女, 福建莆田人, 副教授, 博士, 研究方向: 智能控制、人工智能。

当前,清洁能源与新能源快速发展,集低能耗、清洁环保、灵活供电等优点于一体的分布式电源(distributed generation, DG)被大力推广。当大量清洁能源被接入配电网后,电力系统的容量和规模被扩大,配电网的内部构造以及系统工作方式发生改变,电网结构愈加复杂,电流的传输方向不再单一。在含 DG 的配电网中, DG 的运行与退出以及过流信息发生改变或信息不完整等问题,都使得故障定位更加复杂。

理论上,智能优化算法容错性较好,具有全局寻优收敛性,适用于配电网故障区段定位^[1]。但在实际应用中,因算法计算过程的随机性不能完全避免,以致智能优化算法在收敛过程陷入部分最佳状态。文献[2]联合量子计算与免疫算法,缩小了种群规模,在系统多区段同时故障以及节点信息不完整的情况下,提高了故障定位的准确率。文献[3][4]分别将鲸鱼算法与蝠鲼觅食算法应用到配电网故障定位中,搜索机制独特,定位效果均优于传统的粒子群算法、遗传算法,但在节点信息发生遗失或改变时,容错能力会降低,导致定位结果出错。文献[5]将优化改良后的蚁群算法应用到故障区段检测中,改正了蚁群算法计算慢、求解能力不足的缺点,但算法鲁棒性差,寻优结果不稳定。文献[6]利用多种算法混合计算的策略对粒子群算法进行优化,故障区段的定位速度显著提高,但算法在求解过程中更新局部极值能力的不足、故障定位的准确率不稳定。

基于上述研究成果,本研究提出了改进基于阈值反馈蝠鲼觅食优化(threshold feedback MRFO, TFMRF0)的多电源配电网系统检测故障的方法减少算法寻优过程中学习入局部最优的迭代次数,以提高配电网故障定立的准确率与速率。

1 多电源配电网故障定位模型

在基于智能算法的配电网故障定位中,馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)是将线路电流信息输送到系统终端的载体,可以随时掌控配电网线路的运行状态。系统以节点开关上每个 FTU 上报的故障信息组合而成的向量为依据,联合多电源配电网的拓扑结构建成适应度函数,利用各种寻优算法求解适应度函数的最佳结果,顺利检测出配电网故障位置^[7]。为了对含多电源的配电网进行仿真实验,在传统的配电网模型中

加入了分布式电源。以图 1 多电源配电网简易模型为例,建立了改进的故障信息编码方法、开关函数以及适应度函数。

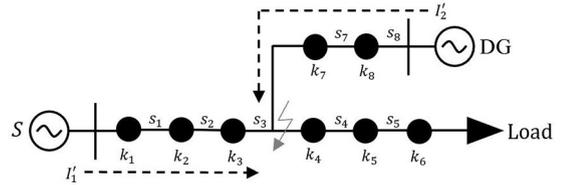


图 1 多源配电网简易模型

Fig.1 Simple multi-power distribution network model

1.1 故障信息编码

将配电网模型中装有 FTU 设备的开关节点定义为分段开关,在构造的配电网模型中分别用 $k_1 \sim k_8$ 表示。这些开关节点将整个配电网划分为若干个区段 $s_1 \sim s_8$,将开关节点与线路区段联系起来^[8]。线路区段发生故障时,故障电流只源于靠近电源的上游节点, I_1' 、 I_2' 为故障电流方向,由于在多源配电网中,潮流方向不在唯一,0-1 编码不再适用于目前的电网结构,故将系统电源流向故障点的方向定义为参考方向。

开关节点 i 的实际线路测量值用 I_i 表示,新的编码方式为: $I_i = 1$ 表示 FTU 监测到电流方向与该节点编码的参考方向一致;反之, $I_i = -1$;线路中没有检测到流过信息时, $I_i = 0$;对于有故障的区段,令 $s_i = 1$;对无故障的区段,令 $s_i = 0$ 。

1.2 开关函数构造与验证

开关函数是联系开关节点的故障信息与线路区段状态的关键桥梁。开关节点的故障信息经编码后由 FTU 上传到数据采集监控系统。因此,基于智能算法分析开关节点故障信息的故障区段定位,需建立一个开关函数将每条线路的运行情况与其开关工作状态一一对应。由于传统的开关函数不适用于多电源配电网,本研究采用了新的开关函数构造方式,在原始模型中加入 DG 运行状况的表达式。开关函数设为 $I_i(s)$,开关节点 i 状态的期望值设为 I_i^* ,如式(1)所示。

$$I_i(s) = I_i^* = \prod_i s_{jd} - \left(\prod_i s_{iu} \right) \times \left(\prod_i k_{DGm} \right) \quad (1)$$

式中, Π 表示逻辑“或”的叠加运算;开关节点 i 的上、下游线路的运行状态用 s_{iu} 、 s_{id} 表示,线路

发生故障时, s_{iu} 或 s_{id} 的值为“1”, 无故障时值为“0”; n 为系统中含有分布式电源个数; 节点 i 上、下游全部区段的个数分别用 u 、 d 表示; 分布式电源 m 运行状况用 k_{DGm} 表示, 电源投入配电网运行时, $k_{DGm} = 1$, 切除时, $k_{DGm} = 0$ 。分布式电源数学模型的构造决定了新的开关函数在含有 DG 的配电网中能否对线路运行状态进行准确表达。

1.3 适应度函数构造与验证

适应度函数的求解精度是配电网故障区段完成精准定位的保障, 表示配电网发生故障时, FTU 上传至系统终端的实际测量值与通过构造的开关函数计算出来的期望值之间的差异^[9]。基于智能算法的配电网故障定位过程即为适应度函数求解全局最小值的过程。为了避免函数求解出现多解, 根据“最小集”原理^[10], 在原始的适应度函数中加入系统中发生故障区段数量模块, 使求得的解最小, 保证了解的唯一性, 减少定位结果发生误判。本研究所采用的适应度函数如式(2)所示。

$$f_{fit} = \sum_{i=1}^E |I_i - I_i^*| + \omega \sum_{i=1}^F |s_i| \quad (2)$$

式中, 配电网中全部开关节点的数目用 E 表示; 系统中所有线路的区段个数总和用 F 表示; ω 为发生故障区段总和的加权系数, 通常取 0.5; $\omega \sum_{i=1}^F |s_i|$ 表示配电网中发生故障区段的个数。

2 TFMRFO 算法原理

蝠鲞觅食优化(manta ray foraging optimization, MRFO)算法是由 ZHAO Weiguo 等^[11]在 2020 年提出的智能优化算法, 具有优化速度快、局部搜索能力强、参数少等优点但也存在定位速度慢、对故障区段定位能力不足等问题。本研究基于 MRFO 算法提出了基于阈值反馈蝠鲞觅食优化算法 TFMRFO, 引用 Limit 阈值控制算法迭代次数, 降低算法在定位过程中因陷入局部最优而导致故障区段发生误判的可能性, 融合信息反馈机制, 在蝠鲞个体位置更新后期, 通过种群中最差点向最优点的移动, 加快种群最差位置向最优位置靠拢, 从而改善算法全局寻优性能, 加快了故障定位速率; 后期利用 Sigmoid 函数将连续求解问题转化为 0-1 非线性整数优化问题, 输出 33 个只包含 {0, 1} 元素的结果向量, 找出系统中发生故障的位置。

2.1 MRFO 算法原理

MRFO 算法由蝠鲞链式捕食、旋风式捕食、筋

斗式捕食 3 种捕食策略引申而来。在链式觅食阶段, 蝠鲞群体紧密排成一队, 呈一条首尾相连的长链。领头个体在队伍最前方觅食, 其他个体跟随其后, 觅食前面个体遗漏的食物。除此之外, 群体会朝着食物最多的地方游行, 所有个体都会被当前最优位置和其前边位置取代, 该种位置更新方式数学模型如式(3)(4)所示。

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} x_i^d(t) + r(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)) + \\ \alpha(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)), i = 1; \\ x_i^d(t) + r(x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)) + \\ \alpha(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)), i = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha = 2r\sqrt{|\log(r)|} \quad (4)$$

式中, 第 i 个、第 t 代蝠鲞个体在第 d 维上的位置用 $x_i^d(t)$ 表示; 第 t 代最优个体在第 d 维空间的位置用 x_{best}^d 表示; 权重因子用 α 表示; r 为 (0, 1) 随机数。

当蝠鲞群发现食物时, 它们会将队伍形成一条漩涡状的捕食链游向食物, 将食物牢牢围住。此时算法进入旋风式觅食阶段。当 $t/T > \text{rand}$, 所有个体将以食物作为参考点, 进行下一步的搜寻, 其更新模式如式(5)(6)所示。

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} x_{best}^d(t) + r(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)) + \\ \beta(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)), i = 1; \\ x_{best}^d(t) + r(x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)) + \\ \beta(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)), i = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta = 2\exp\left(r_1 \frac{T-t+1}{T}\right) \times \sin(2\pi r_1) \quad (6)$$

式中, β 为权重因子; T 为总迭代次数; r_1 为 (0, 1) 随机数。当 $t/T \leq \text{rand}$, 优化参考点发生改变, 为了进一步加强全局计算, 在整个寻优空间随机位置作为参考点, 此时每个个体的寻优能力为整个优化过程的主要阶段, 使 MRFO 能够在整个搜索空间内进行全方位地搜寻, 描述这一过程的数学方程如式(7)(8)所示。

$$x_i^d(t+1) = \begin{cases} x_{rand}^d(t) + r(x_{rand}^d(t) - x_i^d(t)) + \\ \beta(x_{rand}^d(t) - x_i^d(t)), i = 1; \\ x_{rand}^d(t) + r(x_{i-1}^d(t) - x_i^d(t)) + \\ \beta(x_{rand}^d(t) - x_i^d(t)), i = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

$$x_{\text{rand}}^d(t) = Lb^d + r(Ub^d - Lb^d) \quad (8)$$

式中,搜索空间中第 d 维、第 t 代的随机位置用 x_{rand}^d 表示;第 d 维空间的上限和下限分别用 Ub^d 和 Lb^d 表示。

蝠鲮在捕食过程中,个体在筋斗范围内可以移动到任何一个新位置。一般群体会选择当前最优位置作为参考点,将其当前位置另一侧作为目标点成镜像关系进行捕食。这一阶段也是 MRFO 算法的关键阶段,因为在捕食过程中群体总是围绕着最优点来进行位置更新。其数学模型表达如式(9)所示。

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + S[r_2x_{\text{best}}^d - r_3x_i^d(t)] \quad (9)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, N$; 决定翻滚范围的筋斗因子用 S 表示,取 $S = 2$; r_2, r_3 为 $(0, 1)$ 随机数。

2.2 TFMRF0 算法改进原理

2.2.1 Limit 阈值原理

Limit 阈值机制是通过观察可行解的停滞次数是否达到预先设定的极限值来进行循环迭代,若在 Limit 迭代中某个个体的位置没有发生改变,则抛弃当前解,继续下一代的进化重新生成新解^[12]。在算法寻优过程中,蝠鲮个体将慢慢向猎物位置靠近,种群多样性降低,算法进入局部循环迭代状态的可能性增大,若不能及时迭代更新将直接导致求解出错。因此,引入 Limit 阈值的方法有效地控制 MRFO 算法陷入局部极值时的迭代次数,使得算法尽快更新局部所得解,MRFO 算法在整个求解空间内的寻优能力得到加强。算法改进后的优化能力取决于阈值 Limit 的取值,一般将局部迭代累加次数控制在总迭代次数的 5%,若取值过大则算法改进效果不明显;过小则算法局域内迭代频繁,导致局域范围内的搜索性能变差,全局收敛速度下降。

2.2.2 信息反馈原理

在 MRFO 算法中,蝠鲮的运动轨迹因猎物的位置变化而改变,运动方式单一。但在实际的觅食过程中,蝠鲮种群之间会进行位置信息交流,通过信息反馈,距离猎物较远的蝠鲮个体能快速跟随距离猎物近的个体游动,算法的计算速度得到进一步改善,因此融合交流反馈策略来提高算法的寻优速度与精度^[13]。信息反馈阶段的数学表达式如式(10)所示。

$$x_{\text{worst}}^{t+1} = x_{\text{worst}}^t - \text{rand}(x_{\text{best}}^t - x_{\text{worst}}^t) \quad (10)$$

式中, x_{worst}^t 为第 t 代中最差蝠鲮个体位置; rand

为 $[0, 1]$ 中的随机数。

2.2.3 Sigmoid 函数离散化变换

MRFO 算法主要用于函数在连续空间内的求解问题,若要解决工程中配电网故障定位问题需要对原始算法进行离散化处理^[14]。由第 1.1 线路状态的编码方式可知,用 $\{1, 0\}$ 表示线路中有无故障。故需要将 MRFO 算法离散为二进制空间的优化算法,结合概率映射的方法优化蝠鲮个体的位置更新算式,下一代蝠鲮个体的位置变化由 Sigmoid 函数将个体位置转化到 $\{1, 0\}$ 集合的概率决定。其更新公式如式(11)(12)所示。

$$S(x_i) = \frac{1}{1 + \exp(-x_i)} \quad (11)$$

$$y_i = \begin{cases} 1, \text{rand} < S(x_i) \\ 0, \text{rand} \geq S(x_i) \end{cases} \quad (12)$$

式中, x_i 表示第 i 个蝠鲮个体的位置; rand 为 $[0, 1]$ 的随机数; y_i 表示二进制转换后的向量元素。

3 基于 TFMRF0 算法的故障定位

3.1 TFMRF0 算法改进流程

阈值反馈蝠鲮觅食算法的具体改进步骤如下:

- (1) 种群规模设为 N , 全局最大迭代次数设为 T , 当前的迭代次数设为 t , 求解维度设为 d , 局部停滞次数设为 t_r , 迭代阈值设为 Limit;
- (2) 随机产生个体位置, 并计算当前适应度值, 得到当前最优位置 x_{best} 及求得当前最优适应度值为 f_{best} , 完成种群初始化;
- (3) 根据式(3)-(9)进入算法主循环;
- (4) 判断当前个体是否为当前最优, 满足则进行 Step6, 否则记录当前解的局部停滞次数;
- (5) 根据式(9)更新个体位置;
- (6) 选择最差个体位置 x_{worst} , 根据式(10)更新当前个体位置;
- (7) 计算每个个体的适应度值, 根据新的适应度得到个体最优解 x'_{best} 及全局最优解 f'_{best} ;
- (8) 判断是否达到 Limit 阈值, 满足则执行(2), 否则执行第(9)步;
- (9) 判断是否满足 $t \geq T$, 是则执行步骤(10), 否则执行步骤(2);
- (10) 使用 Sigmoid 函数对实数向量进行离散化处理。将 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 转化为二进制向量 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ 。

3.2 故障定位流程

首先,根据上述故障定位数学模型建立仿真新系统,并对不同故障类型做出故障假设;然后,针对原始 MRFO 算法的缺陷,通过多策略融合的方式进行改进,并利用 Sigmoid 函数将其输出结果进行二进制转换;与此同时,利用 FTU 将节点故障信息转化为向量参数,将每个节点状态输入到 TFMRF0 算法中进行故障区段搜索。最终,输出定位结果向量,定位出具体的故障区段。基于 TFMRF0 算法的配电网故障区段检测方法的详细运行流程如图 2 所示。

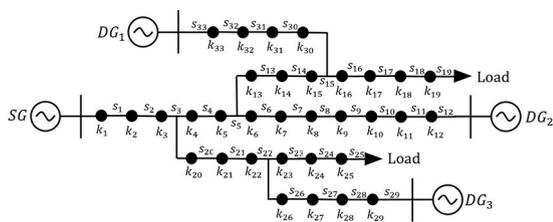


图 3 33 节点配电网仿真模型

Fig.3 33-node distribution network simulation model

其中,系统主电源用 SG 表示,分布式电源用 $DG_1 \sim DG_3$ 表示,系统负荷用 Load 表示,开关节点与线路区段分别用 $k_1 \sim k_{33}$ 、 $s_1 \sim s_{33}$ 表示。

4.1 单重故障分析

随机选取 6 个区段做单重故障假设,系统电源与 3 个分布式电源均投入配电网系统运行。分别对每种算法在故障信息是否发生畸变的情况下循环运行 50 次,取正确定位次数所占总运行次数的比值来描述算法的准确性。系统只发生单重故障时的区段检测的结果如表 1 所示,其中区段 s_8 、 s_{21} 、 s_{31} 发生单重故障时,节点信息均未发生畸变;区段 s_{16} 、 s_5 、 s_{27} 发生单重故障时,节点 I_3 、 I_{22} 、 I_{14} 发生信息畸变。

表 1 单重故障定位结果

Tab.1 Single fault location result

算法	故障区段定位准确率/%					
	s_8	s_{21}	s_{31}	s_{16}	s_5	s_{27}
矩阵算法	100	100	100	0	0	0
WOA	100	96	98	94	92	90
CFAWOA	96	94	92	92	94	90
BPSO	96	94	90	80	86	74
GA	90	84	80	76	82	80
MRFO	100	98	96	92	96	90
TFMRF0	100	100	100	100	100	100

由表 1 可知,在配电网系统中只存在单个区段发生事故且无论故障信息是否完整的情况下,TFMRF0 算法定位结果最理想,达到了 100% 的故障定位正确率。WOA 算法、CFAWOA 算法、MRFO 算法有 5% 左右的可能性发生误判。BPSO 算法的平均定位准确率为 90% 左右。GA 算法的平均定位准确率为 85% 左右。在节点信息正常的情况下,矩阵算法才能正确定位出故障区段,否则,会直接发生错误定位。TFMRF0 算法相比于

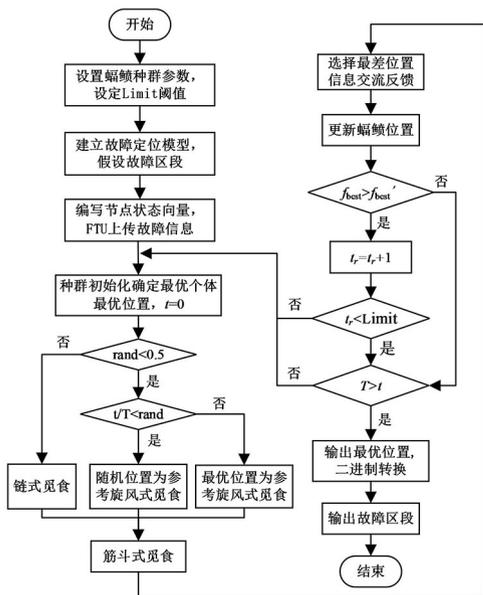


图 2 TFMRF0 算法故障定位流程

Fig.2 Fault location flow of TFMRF0 algorithm

4 算例分析

实验在 Matlab R2020b 上搭建仿真平台,构建配电网故障定位模型,并对基于 TFMRF0 算法的求解方法进行建模仿真。种群规模 $N = 50$,解空间内最大迭代次数 $T = 60$, 阈值 $Limit = 3$ 。为了验证 TFMRF0 算法能否在配电网故障区段检测中合理运用,本研究选取经典矩阵算法、遗传算法 (genetic algorithm, GA)、MRFO 算法、混沌反馈鲸鱼算法 (CFAWOA)、鲸鱼算法 (WOA)、二进制粒子群算法 (binary particle swarm optimization algorithm, BPSO) 以及 TFMRF0 算法分别在有无故障信息缺失或畸变时进行单重故障与多重故障配电网故障定位的仿真实验。本实验所构建的 33 节点配电网故障定位仿真拓扑模型如图 3 所示。

MRFO 算法而言,在系统发生节点信息不完整的状况下,定位准确率明显提升。

当 s_8 发生单重故障时,在节点信息传输完整时,通过算法寻优运算可求得最小适应度值为 0.5,输出结果向量为 [00000001000000000000000000000000],从而准确定位出 s_8 发生单重故障,6 种智能算法均完成了正确定位。其中,TFMRFO 算法由于引入交流反馈机制,寻优前期适应度最接近全局最优值,从而最先完成故障定位。MRFO 算法在两次迭代后达到全局最优,在单重故障状况下,通过算法收敛曲线尚未能明显地体现 TFMRFO 算法故障定位的优越性。算法收敛曲线如图 4 所示, F 为算法求解所得适应度值, I 为迭代次数。

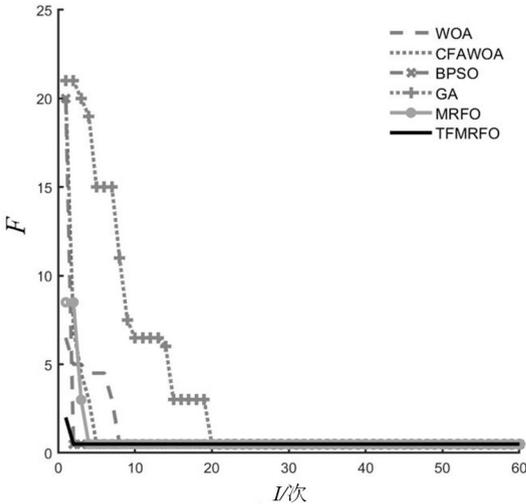


图 4 无信息畸变单重故障定位收敛曲线图

Fig.4 Convergence curve of single fault location without information distortion

当 s_{16} 发生单重故障时,节点 I_3 状态由“1”畸变为“0”,通过算法寻优运算可求得最小适应度值为 1.5,算法收敛曲线如图 5 所示。输出结果向量为 [0000000000000000010000000000000000],从而准确定位出 s_{16} 发生单重故障。其中,TFMRFO 算法最先完成故障定位,WOA 算法次之,其他智能算法均出现了陷入局部极值状态。CFAWOA 算法局部迭代时间过长,MRFO 算法定位时间与 TFMRFO 算法时间相近,收敛速度快于 BPSO 算法,但前期出现了局部迭代、鲁棒性差、寻优性能不稳定等问题。大多数算法在伴随故障信息畸变的单重故障状况下均能准确实现故障定位,容错能力良好。只有 GA 算法在最大迭代次数内未能

跳出局部最优状态,只求得局部极值,最终导致对故障区段做出误判。

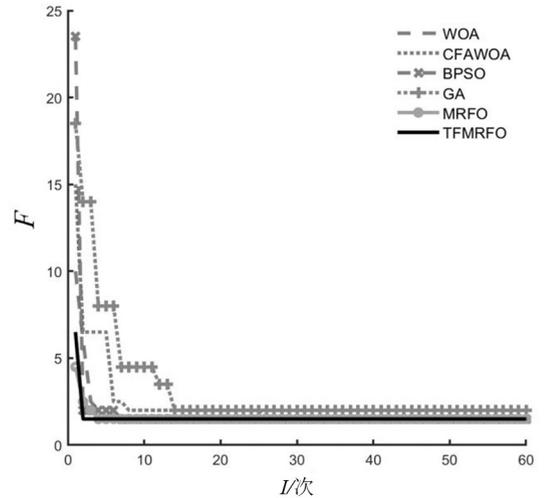


图 5 信息畸变单重故障定位收敛曲线图

Fig.5 Convergence curve of single fault location with information distortion

4.2 多重故障分析

随机选取多个区段做多重故障假设,其中包含多个开关节点信息发生畸变或缺失,系统中所有电源均正常运行。每种算法循环运行 50 次,记录每次实验结果,并对算法的故障定位准确性、容错性进行测试分析。发生多重故障时定位结果如表 2 所示,区段 s_6 、 s_{15} 、 s_{23} 、 s_{26} 发生多重故障时,节点信息均未发生畸变;区段 s_{10} 、 s_{22} 、 s_{11} 、 s_{28} 、 s_{32} 发生多重故障时,节点 I_5 、 I_7 、 I_{18} 、 I_{24} 发生信息畸变。

表 2 多重故障定位结果

Tab.2 Multiple fault location result

算法	故障区段准确率/%			
	s_6 、 s_{15}	s_{23} 、 s_{26}	s_{10} 、 s_{22}	s_{11} 、 s_{28} 、 s_{32}
矩阵算法	100	100	0	0
WOA	94	96	88	82
CFAWOA	90	94	92	80
BPSO	90	92	86	84
GA	82	80	74	68
MRFO	94	92	86	84
TFMRFO	100	100	100	98

由表 2 可知,TFMRFO 算法在配电网发生多重故障并且伴有故障信息存在畸变的情况下发生了一次误判,但定位准确率依然接近 100%。

WOA 算法、CFAWOA 算法、BPSO 算法、MRFO 算法有 10%左右的可能性发生误判。GA 算法的平均定位准确率为 75%左右。当配电网系统中故障区段个数以及过流信息不完整的节点个数增加时,上述智能算法的故障定位准确率均随之下降。矩阵算法只有在节点信息保存完整的情况下,才能对多重故障能正确定位出故障区段,容错性能差,在 FTU 上传的节点信息发生遗漏或受损时不再适用。

当 s_6, s_{15} 发生多重故障并且节点状态未发生畸变时,通过算法寻优运算可求得最小适应度值为 1,算法收敛曲线如图 6 所示。输出结果向量为 [00000100000000100000000000000000],从而准确定位出 s_6, s_{15} 发生多重故障。其中,TFMRFO 算法最先完成故障定位,CFAWOA 算法次之,其余算法均出现局部迭代状态。GA 算法局部迭代耗时最严重,在第 41 迭代时才求得全局最优值。在发生多重故障情况下,TFMRFO 算法较原始的 MRFO 算法改进效果更佳明显,未陷入局部最优状态,定位速率更快、精确度更高。

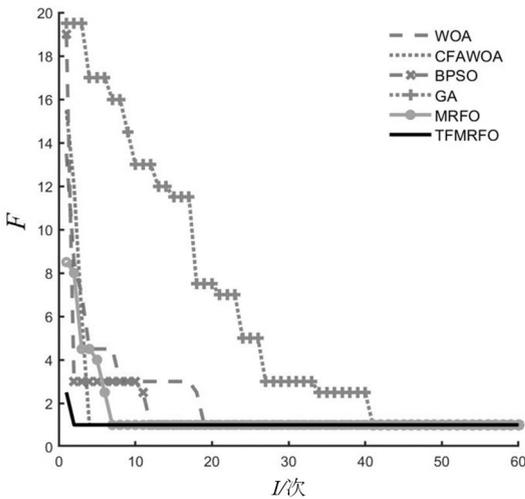


图 6 无信息畸变多重故障定位收敛曲线图

Fig.6 Convergence curve of multiple fault location without information distortion

当 s_{11}, s_{28}, s_{32} 发生多重故障时,节点 I_7 状态由“1”畸变为“0”,节点 I_{24} 状态由“0”畸变为“-1”,通过算法寻优运算可求得最小适应度值为 3,算法收敛曲线如图 7 所示。输出结果向量为 [00000000001000000000000000100010],从而准确定位出 s_{11}, s_{28}, s_{32} 发生多重故障。其中,

TFMRFO 算法在第 8 次迭代时达到全局最优值,相对其他故障情况下故障定位速率下降,但在此故障类型下,相比于其他算法依然最先完成故障定位,而且寻优性能更加明显。TFMRFO 算法在寻优过程中由于采用了 Limit 阈值的方法,陷入局部最佳状态的可能性被有效地避免了。通过群体间最优位置与最差位置的交流反馈,使得改进后的 TFMRFO 算法加强了全局搜索能力,加快了全局寻优速度。而原始的 MRFO 算法有 3 次陷入了局部极值状态,影响了解空间中全面求解的速度与精度。

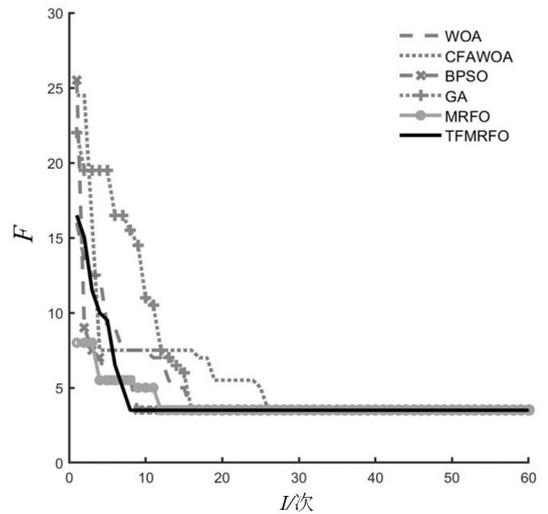


图 7 信息畸变多重故障定位收敛曲线图

Fig.7 Convergence curve of multiple fault location with information distortion

5 结论

本研究基于原始 MRFO 算法,引入了 Limit 阈值控制算法与信息交流反馈方法,提出基于 TFMRFO 的含 DG 的配电网系统检测故障的方法。该方法确立了在含 DG 的复杂配电网中节点开关的编码方式、开关函数以及适应度函数,利用 TFMRFO 搜索全局最小适应度值检测出配电网的故障区段的位置。应用 Matlab 构造出含 DG 的 33 节点配电网系统,基于 TFMRFO 算法在不同故障情况下模拟寻找配电网故障区段仿真实验。通过实验分析得出结论如下:

1) 阈值 Limit 的合理设定,有效地改善了算法寻优过程中出现局部迭代状态的不足。算法求得局部极值时的迭代次数被减少,从而提高了算法计算精度和故障区段检测的准确率。

2)通过引入交流反馈机制,算法在全局的探索能力加强,鲁棒性得到优化,提高了算法的求解速度。多次实验仿真证明了收敛曲线波动小,性能稳定。

3)优化后的 TMRFO 算法全局寻优能力与传统的智能算法相比,计算精度与收敛速度均得到改善,故障定位效率显著提高。

实验仿真过程中发现了 TMRFO 算法在配

电网发生多重故障且伴随故障信息发生畸变时,定位过程中陷入了局部最优状态。然而,实际生活中配电网同时发生多重故障的机率较小,因此基于智能算法的配电网故障定位更具有实际工程意义。在配电网规模不断扩大、结构愈加复杂的背景下,实现高效的配电网故障定位离不开对智能算法的不断优化改进。

参考文献:

- [1] 程梦竹,张新慧,徐铭铭,等.基于多目标加权灰靶决策的有源配电网故障区段定位方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(11):124-132.
- [2] 高锋阳,李昭君,袁成,等.量子计算和免疫优化算法相结合的有源配电网故障定位[J].高电压技术,2021,47(2):396-406.
- [3] 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.
- [4] 凤盛强.基于蝠鲼觅食优化算法的配电网故障区间定位[J].兰州文理学院学报(自然科学版),2021,35(1):19-23.
- [5] 李霆,方志坚,罗义旺,等.基于改进蚁群算法的配电网故障定位研究[J].微型电脑应用,2020,36(9):86-88.
- [6] 张波,唐亮,梁晓伟,等.基于遗传粒子群法的配电网故障定位研究[J].计算技术与自动化,2021,40(1):33-37.
- [7] 郑涛,马龙,李博文.基于馈线终端装置信息畸变校正的有源配电网故障区段定位[J].电网技术,2021,45(10):3926-3935.
- [8] 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,2002,22(4):127-130.
- [9] 李明阳,张沈习,程浩忠,等.含分布式电源的主动配电网分层故障定位方法[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(8):79-87.
- [10] 赵乔,王增平,董文娜,等.基于免疫二进制粒子群优化算法的配电网故障定位方法研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(20):83-89.
- [11] ZHAO W G, ZHANG Z X, WANG L Y. Manta ray foraging optimization: an effective bio-inspired optimizer for engineering applications[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 87: 103300.
- [12] 高文欣,刘升,肖子雅,等.全局优化的蝴蝶优化算法[J].计算机应用研究,2020,37(10):2966-2970.
- [13] 涂春梅,陈国彬,刘超.混沌反馈自适应鲸鱼优化算法研究[J].统计与决策,2019,35(7):17-20.
- [14] 马天祥,王春英,贾静然,等.基于二进制粒子群算法的交直流混合配电网故障恢复方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(9):112-119.

(责任编辑:方素华)