

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181318

基于果蝇优化算法的配电网故障定位

王巍璋¹, 王淳¹, 敖鑫²

(1. 南昌大学电气与自动化系, 江西 南昌 330031; 2. 国网新余供电公司, 江西 新余 338000)

摘要: 为解决配电网故障定位问题, 提出了一种基于果蝇优化算法的故障定位方法。将原先果蝇优化算法中连续的位置坐标和搜索步长离散化, 使其与馈线区段的状态信息相联系。对于单电源辐射状配电网和多电源复杂配电网建立了相应的目标函数, 分别针对单一故障、含信息畸变的单一故障、多重故障、含信息畸变的多重故障等四种场景进行了测试, 测试结果验证了所提出方法的准确性和有效性。与蝙蝠算法、粒子群算法、遗传算法相比, 果蝇优化算法在多重故障定位问题中表现出了良好的寻优能力和更快的收敛速度。

关键词: 配电网; 故障定位; 多电源; 信息畸变; 果蝇优化算法

Fault location of power distribution network based on fruit fly optimization algorithm

WANG Weizhang¹, WANG Chun¹, AO Xin²

(1. Department of Electrical and Automatic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. State Grid Xinyu Power Supply Company, Xinyu 338000, China)

Abstract: To solve the problem of fault location of power distribution network, a fault location method based on fruit fly optimization algorithm is put forward. The continuous location coordinates and search steps of the original fruit fly optimization algorithm are discretized to link with the status information of feeder sections. Objective functions are established for radial distribution network with single power supply and complex distribution network with multiple power supplies. Four fault scenarios including single fault, single fault with information distortion, multiple faults and multiple faults with information distortion are tested respectively, and the test results validate the accuracy and effectiveness of the proposed method. Compared with bat algorithm, particle swarm optimization and genetic algorithm, fruit fly optimization algorithm turns out to be good at finding an optimal solution to multiple faults location problems with a faster convergence speed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467012).

Key words: power distribution network; fault location; multiple power supplies; information distortion; fruit fly optimization algorithm

0 引言

配电网的安全稳定运行是人们日常生活和社会经济发展的重要保障^[1]。随着社会经济的快速发展和人民生活水平的不断提高, 电网终端用户对电力供应的要求也越来越高^[2]。配电网发生故障后, 对故障进行及时有效的处理, 可以减少用户停电时间, 缩小停电面积, 提高供电可靠性^[3]。

随着智能电网不断发展, 馈线终端单元 (Feeder Terminal Unit, FTU)和数据采集与监视控制

系统 (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)得到了广泛应用。分段开关将配电网分成了不同的区段, 同时, 分段开关处也加装了 FTU。当 FTU 检测到超过电流整定值的故障电流时, 就会将故障信息上传给 SCADA 系统, 然后通过有效的算法对故障信息进行分析处理, 从而进行故障定位。

目前, 配电网故障定位方法大致可以分为两类, 一类是以配电网拓扑结构为基础的矩阵算法^[4-8], 另一类是智能算法, 如遗传算法^[9-12]、蚁群算法^[13-15]、粒子群算法^[16-17]、和声算法^[18]、仿电磁学算法^[19]、免疫算法^[20-21]、蝙蝠算法^[22]、人工蜂群算法^[23]等。以这些智能算法为基础的配电网故障定位容错性较

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51467012)

好, 并且能够实现配电网多重故障定位; 但处理优化问题时对算法的要求较高, 需要调整的参数往往很多, 参数之间的相互影响和复杂关系很难把握清楚, 一旦参数取值不当, 会严重影响算法的性能, 从而导致分析出现偏差, 难以找到最优解。

果蝇优化算法^[24-26]是台湾学者潘文超提出的一种基于果蝇觅食行为的群体智能优化算法。该算法与其他群体智能算法相比, 原理比较简单, 设置参数很少, 程序代码易于实现, 寻优精度较高, 具有良好的收敛性能, 适合应用于解决非负的参数寻优问题^[27]。本文将果蝇优化算法应用于配电网故障定位, 为配电网故障定位提供了一种新的解决方法。

1 果蝇优化算法

果蝇优化算法是一种基于果蝇觅食行为推演出的全局寻优算法。在感官知觉方面, 尤其是在嗅觉和视觉上, 果蝇优于很多物种; 其嗅觉器官能够充分搜集空气中的各种气味, 甚至可以嗅到 40 km 之外的食物源^[24]。在觅食过程中, 果蝇会通过其灵敏的嗅觉搜集空气中的食物气味, 同时也会通过其敏锐的视觉观察同伴聚集的位置并往该方向飞去, 逐渐靠近直至发现食物^[24]。

果蝇优化算法首先会随机生成一个空间位置坐标, 作为果蝇群体的初始位置坐标。然后, 所有果蝇从初始位置出发, 每只果蝇会随机飞到一个新的位置。通过计算可得到每只果蝇所处位置的食物气味浓度值, 比较得到的食物气味浓度值和对应果蝇的位置坐标, 最佳气味浓度值即为当代最优解。将该最佳气味浓度对应的位置坐标赋予全体果蝇, 得到新的果蝇群体位置坐标, 重复上述迭代过程, 直到找到最优解为止。具体步骤如下。

1) 给定果蝇种群规模 P , 最大迭代次数 M , 随机生成果蝇群体的初始空间位置坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 。

2) 赋予每只果蝇搜寻食物的随机飞行方向和搜索步长 $Rand$:

$$\begin{cases} X_i = X_0 + Rand \\ Y_i = Y_0 + Rand \\ Z_i = Z_0 + Rand \end{cases} \quad (1)$$

3) 计算第 i 只果蝇与坐标原点之间的距离 D_i 为

$$D_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2} \quad (2)$$

4) 对 D_i 取倒数, 得到第 i 只果蝇所处位置坐标的食物气味相对浓度值 S_i 为

$$S_i = 1/D_i \quad (3)$$

5) 将 S_i 代入适应度函数(即根据实际问题建立的目标函数)中, 得到第 i 只果蝇所处位置坐标的食

物气味浓度值 $Smell_i$ 为

$$Smell_i = function(S_i) \quad (4)$$

6) 找出果蝇群体中所处位置坐标的食物气味浓度值最高的果蝇个体。

$$[bestsmell \ bestcoordinate] = \max(Smell) \quad (5)$$

式中: $bestsmell$ 为最高的食物气味浓度值; $bestcoordinate$ 为所处位置的食物气味浓度值最高的果蝇个体对应的空间位置坐标信息; $Smell$ 为全体果蝇各自所处位置的食物气味浓度值的集合。

7) 记录并保留最佳食物气味浓度值 $bestsmell$ 与对应的空间位置坐标, 此时果蝇群体利用视觉飞往该位置, 并更新位置坐标。

$$\begin{cases} Smell_{best} = bestsmell \\ X_i = X(bestcoordinate) \\ Y_i = Y(bestcoordinate) \\ Z_i = Z(bestcoordinate) \end{cases} \quad (6)$$

8) 进行迭代寻优, 重复执行步骤 2) 至步骤 7), 并判断当前最佳食物气味浓度值是否优于上一次迭代的结果, 直到达到设置的最大迭代次数 M , 输出最优解。

2 果蝇优化算法故障定位中的应用

2.1 单电源配电网目标函数的构造

当配电网中发生故障时, FTU 会监测所处位置的电流变化情况, 并且与系统预先设置的电流整定值进行比较, 从而得到一系列由 0 和 1 组成的离散数据, 即节点电流信息序列 $\mathbf{I} = (I_1, I_2, I_3, \dots, I_i, \dots, I_n)$ 。类似地, 各开关的状态信息序列 $\mathbf{K} = (K_1, K_2, K_3, \dots, K_i, \dots, K_n)$, 各馈线区段的状态信息序列 $\mathbf{L} = (L_1, L_2, L_3, \dots, L_i, \dots, L_n)$ 。它们分别表示的情况如下:

$$I_i, K_i = \begin{cases} 0, & \text{无故障电流} \\ 1, & \text{有故障电流} \end{cases} \quad (7)$$

$$L_i = \begin{cases} 0, & \text{非故障区段} \\ 1, & \text{故障区段} \end{cases} \quad (8)$$

以图 1 中的单电源配电网为例, CB 为进线断路器, S_1 — S_5 为分段开关, L_1 — L_6 为馈线区段。每个开关均配置了 FTU。

设 CB_1 、 S_1 — S_5 分别依次对应的节点电流信息序列为 $\mathbf{I} = (I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6)$, 开关状态信息序列 $\mathbf{K} = (K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6)$ 。对于各开关的状态信息序列 \mathbf{K} 和各馈线区段的状态信息序列 \mathbf{L} 的关系, 使用“逻辑或”运算来进行刻画。

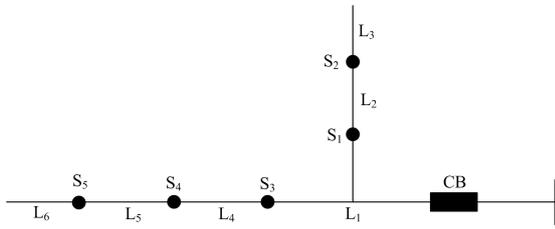


图1 单电源配电网

Fig. 1 Distribution network with single power supply

$$\begin{cases} K_1 = L_1 \parallel L_2 \parallel L_3 \parallel L_4 \parallel L_5 \parallel L_6 \\ K_2 = L_2 \parallel L_3 \\ K_3 = L_3 \\ K_4 = L_4 \parallel L_5 \parallel L_6 \\ K_5 = L_5 \parallel L_6 \\ K_6 = L_6 \end{cases} \quad (9)$$

分析FTU上传的故障电流信息是为了找出一种故障场景，该场景对应的故障电流信息能够与真实的故障电流信息吻合。现有文献构造目标函数的思路主要有两类：第一类是对 I_i 与 K_i 取差值的绝对值再累计求和的形式 $\sum_{i=1}^n |I_i - K_i|$ ，详见文献[9-10]；第二类是对 I_i 与 K_i 进行异或逻辑运算再累计求和的形式 $\sum_{i=1}^n [I_i \text{ xor } K_i]$ ，详见文献[18]。它们的目的是将期望故障场景与真实故障场景的偏差量化，偏差越小则说明期望故障场景与真实故障场景越接近。以上两类目标函数都是要寻找最小值。

本文按照第一类思路构造目标函数，为体现果蝇优化算法中的距离 D_i ，采取对 I_i 与 K_i 取差值的平方并累计求和再开方的形式 $\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i - K_i)^2}$ 。其中， n 为配电网中安装了FTU的监测点总数。同时，考虑到故障信息在上传过程中可能发生畸变，所以在目标函数中补充了对配电网中故障终端和故障区段数量的统计项 $\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i - K_i)^2} + a \sum_{i=1}^n J_i$ 。统计的方式即

对所有FTU上传的信息进行一个预处理，分析它们之间是否符合上下游的逻辑关系。以图1为例，若 S_4 的相邻上下游 S_3 与 S_5 处的FTU都上报经过了故障电流，而 S_4 处的FTU却上报未经过故障电流，则不符合逻辑，便认为 S_4 处的FTU为故障终端上传了畸变信息。 $\sum_{i=1}^n J_i$ 实际上就是统计配电网中的故障终端和故障区段总数。 a 为权重系数， $a \in (0, 1]$ ，本文 a

取0.5。因为果蝇优化算法是寻找最大值，故需要做一些调整，将包含了对故障终端和故障区段数量统计项的目标函数取倒数 $\frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i - K_i)^2} + a \sum_{i=1}^n J_i}$ ；同时，为了避免出现分母为零的情况，需要再补充一个任意正数 ε ，本文 ε 取1。综上，本文构造目标函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i - K_i)^2} + a \sum_{i=1}^n J_i + \varepsilon} \quad (10)$$

2.2 多电源配电网目标函数的构造

以文献[22]中的三电源配电网为例，如图2所示。 CB_1 — CB_3 为进线断路器， S_1 — S_{13} 为分段开关， S_{14} 为联络开关， L_1 — L_{15} 为馈线区段。以联络开关 S_{14} 为分界线将此网络分为区域1和区域2。区域1内的模式为双电源闭环运行，区域2内的模式为单电源供电。

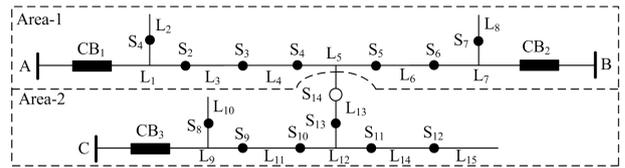


图2 三电源配电网

Fig. 2 Distribution network with three power supplies

对于区域2内发生的故障，可以直接采取2.1节中对单电源配电网的处理方法构造目标函数。而对于区域1内发生的故障，则需要对目标函数做一些调整。

文献[6]指出，解决环网闭环运行模式的故障定位问题的思路是将多电源配电网故障定位转化为单一电源的故障定位问题，转化的关键在于考虑故障电流的方向。因此，可以人为假定该闭环网络只由其中某一个电源供电，这个被选定的电源向整个网络供电的功率流出方向即为馈线正方向。只需要对闭环中每一个电源都假定一次正方向即可锁定故障所在的馈线区段。

综上，对于多电源配电网，本文建立包含区域1和2的统一目标函数，如式(10)所示。

$$F(x) = \max \left\{ \sum f_{\text{Area-1}}(x) + f_{\text{Area-2}}(x) \right\} \quad (11)$$

对图2而言，将式(10)具体展开可得

$$F(x) = \max \{ f_A(x) + f_B(x) + f_C(x) \} \quad (12)$$

式中： $f_A(x)$ 表示在区域1中以电源A作为供电电源时的目标函数； $f_B(x)$ 表示在区域1中以电源B

作为供电电源时的目标函数; $f_c(x)$ 表示区域 2 中以电源 C 作为供电电源时的目标函数。

2.3 信息畸变的情况

处理信息畸变, 必须注意到: 有一些信息畸变可直接通过电流的连续性和逻辑关系来进行识别, 以图 1 为例, 若 L_6 发生故障, 则节点电流信息序列 $I = (1, 0, 0, 1, 1, 1)$ 。假设 I_5 发生畸变, 则 $I = (1, 0, 0, 1, 0, 1)$ 。因为 I_5 的相邻上、下游 I_4 和 I_6 均有故障电流经过, 所以根据电流的连续性可以判断 I_5 发生畸变。而有的信息畸变则比较特殊, 畸变后的节点电流信息序列可能是某种故障发生后的节点电流信息序列, 导致无法识别。仍以图 1 为例, 同样是 L_6 发生故障, 假设 I_6 发生畸变, 则 $I = (1, 0, 0, 1, 1, 0)$, 此时无法进行判断, 因为畸变后的节点电流信息序列与 L_5 发生故障后的节点电流信息序列相同。

基于此, 本文将信息畸变分为两类。

1) 可识别畸变: 畸变后的节点电流信息序列 I 存在明显矛盾, 不满足电流连续性和上下游逻辑关系。

2) 不可识别畸变: 畸变后的节点电流信息序列 I 与某种故障发生后的节点电流信息序列相同。

本文处理的畸变类型为可识别畸变。

2.4 应用流程

通过构造目标函数的过程可知, 基于 FTU 故障信息的故障定位的实质就是寻找与真实故障场景偏离程度最小的故障场景。考虑到各馈线区段的状态信息序列 $(L_1, L_2, L_3, \dots, L_i, \dots, L_n)$ 是一系列由 0 和 1 组成的离散数据, 如果使用果蝇优化算法进行寻优求解, 就必须把三维连续空间内的优化问题转化为对 n 维离散空间内的果蝇群体进行优化求解。可以用果蝇的位置坐标表示馈线状态信息序列, 每次迭代后都通过目标函数评价各果蝇所处位置食物气味浓度的优劣, 再更新果蝇的位置坐标, 直到满足收敛条件为止, 此时得到的果蝇位置坐标, 即相应的馈线区段状态信息序列是最接近真实故障场景的。具体的应用流程如下所示。

1) 初始化。给定果蝇种群规模 P , 最大迭代次数 M , 随机生成果蝇群体的 n 维离散空间位置坐标 $(L_1, L_2, L_3, \dots, L_i, \dots, L_n)$, $L_i \in \{0, 1\}$ 。根据配电网拓扑结构, 明确序列 K 和 L 各元素之间的对应关系。

2) 以序列 I 作为参照点, 计算第 i 只果蝇与参照点之间的距离 D_i , 此处距离指 n 维欧氏距离。对 D_i 取倒数, 得到第 i 只果蝇所处位置坐标的食物气味相对浓度值 S_i 。

3) 将本文构造的具备容错性的目标函数 $F(x)$ 作为适应度函数 $function(S_i)$, 并进行迭代。 $F(x)$ 中含有对配电网中故障终端和故障区段数量的统计项

$a \sum_{i=1}^n J_i$, 即对可识别的畸变进行统计, 以提高故障定位的容错性。

4) 迭代过程中赋予每只果蝇搜寻食物的随机飞行方向和一个随机数 $Rand$, 作为下一代果蝇更新位置的执行依据, $Rand \in [0, 1]$ 。执行依据如下:

$$L_i = \begin{cases} 0, & Rand \leq 0.5 \\ 1, & Rand > 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

5) 判断是否满足最大迭代次数 M 及 $F(x)$, 若是, 则停止迭代, 否则继续进行迭代更新。

6) 输出 $F(x)$ 对应的果蝇位置坐标, 即最接近真实故障场景的各馈线区段状态信息序列。

3 算例分析

以图 2 中的三电源配电网作为测试算例进行验证与分析。

对于区域 1, 设置果蝇群体的离散空间位置坐标为 8 维向量 $(L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8)$; CB_1 、 S_1 — S_7 和 CB_2 分别依次对应的节点电流信息序列 $I = (I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9)$, 依次对应的开关状态信息序列 $K = (K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8, K_9)$ 。

对于区域 2, 设置果蝇群体的离散空间位置坐标为 7 维向量 $(L_9, L_{10}, L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{14}, L_{15})$; CB_3 和 S_8 — S_{13} 分别依次对应的节点电流信息序列 $I = (I_{10}, I_{11}, I_{12}, I_{13}, I_{14}, I_{15}, I_{16})$, 依次对应的开关状态信息序列 $K = (K_{10}, K_{11}, K_{12}, K_{13}, K_{14}, K_{15}, K_{16})$ 。

算例验证使用的软件为 Matlab R2016a, 设置果蝇优化算法初始种群大小为 400, 最大迭代次数为 800。分别对单一故障、含信息畸变的单一故障、多重故障、含信息畸变的多重故障 4 种场景进行仿真测试, 每种场景测试 30 次。

3.1 单一故障场景

分别假设区域 1 中的馈线区段 L_4 和区域 2 中的馈线区段 L_{12} 发生了故障。故障定位结果如表 1 所示。通过果蝇优化算法找出区域 1 内最优 L 序列为 00010000, 对应故障区段为 L_4 ; 区域 2 内最优 L 序列为 0001000, 对应故障区段为 L_{12} , 判断结果准确。如表 1 所示。

表 1 单一故障定位结果

区域	电源	序列 I	最优 L	故障区段	判断结果
区域 1	A	101100000	00010000	L_4	准确
	B	000011101	00010000		
区域 2	C	1011000	0001000	L_{12}	准确

3.2 含信息畸变的单一故障场景

分别假设区域1中的馈线区段L₄和区域2中的馈线区段L₁₂发生了故障。同时,区域1中断路器CB₂处的FTU上传的信息发生了畸变,即序列I的I₉发生了畸变;区域2中分段开关S₁₂处的FTU上传的信息发生了畸变,即序列I的I₁₅发生了畸变。故障定位结果如表2所示。通过果蝇优化算法找出区域1内最优L序列为00010000,对应故障区段为L₄;区域2内最优L序列为0001000,对应故障区段为L₁₂,在发生信息畸变的情况下仍然能够准确定位。

表2 含信息畸变的单一故障定位结果

Table 2 Fault location result of single fault with information distortion

区域	电源	序列 I	最优 L	故障区段	判断结果
区域1	A	101100001	00010000	L ₄	准确
	B	000011100	00010000		
区域2	C	1011010	0001000	L ₁₂	准确

3.3 多重故障场景

假设区域1中的馈线区段L₄、L₆和区域2中的馈线区段L₁₀、L₁₁均发生了故障。故障定位结果如表3所示。通过果蝇优化算法找出区域1内最优L序列为00010000、00000100,故障区段为L₄、L₆;区域2内最优L序列为0110000,故障区段为L₁₀、L₁₁,判断结果准确。

3.4 含信息畸变的多重故障场景

假设区域1中的馈线区段L₂、L₆和区域2中的馈线区段L₁₁均发生了故障。同时,区域1中分段开关S₃处的FTU上传的信息发生了畸变,即序列I的I₄发生了畸变;区域2中分段开关S₁₂处的FTU上传的信息发生了畸变,即序列I的I₁₅发生了畸变。故障定位结果如表4所示。通过果蝇优化算法找出区域1内最优L序列为01000000、00000100,故障区段为L₂、L₆;区域2内最优L序列为0010000,

表3 多重故障定位结果

Table 3 Fault location result of multiple faults

区域	电源	序列 I	最优 L	故障区段	判断结果
区域1	A	101100000	00010000	L ₄ 、L ₆	准确
	B	000000101	00000100		
区域2	C	1110000	0110000	L ₁₀ 、L ₁₁	准确

表4 含信息畸变的多重故障定位结果

Table 4 Fault location result of multiple faults with information distortion

区域	电源	序列 I	最优 L	故障区段	判断结果
区域1	A	110100000	01000000	L ₂ 、L ₆	准确
	B	000100101	00000100		
区域2	C	1010010	0010000	L ₁₁	准确

故障区段为L₁₁,在发生信息畸变的情况下仍然能够准确定位。

3.5 不同目标函数的比较

使用果蝇优化算法采取不同目标函数分别针对3.1—3.4节中的算例进行测试,每节算例重复测试25次,结果如表5所示。

表5 不同目标函数的故障定位结果

Table 5 Fault location results of different objective functions

测试故障场景	文献[9-10]		文献[18]		本文	
	结果	平均用时/s	结果	平均用时/s	结果	平均用时/s
3.1节	准确	3.685	准确	4.186	准确	3.701
3.2节	存在	3.703	存在	4.245	准确	3.713
	误判		误判			
3.3节	准确	3.757	准确	4.306	准确	3.842
3.4节	存在	3.839	存在	4.371	准确	4.148
	误判		误判			

分别将文献[9-10]与文献[18]的目标函数转化为本文能够适用的形式,即对目标函数取倒数并补充防止分母为零的正数ε。将以上两类目标函数应用于果蝇优化算法中,与本文构造的目标函数进行比较。无信息畸变的情况下,使用这三类目标函数处理单个故障和多重故障时均能准确定位。其中,使用文献[9-10]的目标函数进行故障定位的平均用时最短,本文平均用时次之,文献[18]的平均用时最长。有信息畸变的情况下,使用本文的目标函数能够准确定位,使用文献[9-10]和文献[18]的目标函数进行故障定位存在误判的情况。出现误判的原因在于其目标函数中未考虑终端设备出现故障的情况,未加入故障终端和故障区段统计项。

3.6 与其他算法的比较

以3.3节的多重故障场景为测试算例,将果蝇优化算法(FFOA)与文献[22]中蝙蝠算法(BA)、粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)的故障定位结果进行比较,各算法重复测试25次,对比结果如表6所示。

表6 对比结果

Table 6 Comparison result

算法	平均迭代用时/s	准确定位次数	准确率
BA	4.361	25	100%
PSO	4.724	25	100%
GA	5.023	25	100%
FFOA	3.837	25	100%

使用BA、PSO、GA、FFOA四种算法分别测试25次得到的故障定位结果都正确,平均迭代用时分别为4.361 s、4.724 s、5.023 s、3.837 s。相较于

BA、PSO、GA 算法, FFOA 算法的平均迭代用时更短。

4 结论

(1) 本文将果蝇优化算法应用于配电网故障定位。分别针对单一故障、含信息畸变的单一故障、多重故障、含信息畸变的多重故障等场景进行测试, 验证了使用果蝇优化算法进行配电网故障定位的有效性。

(2) 所构造的目标函数在有信息畸变的情况下具有更好的适应性。

(3) 在与蝙蝠算法、粒子群算法、遗传算法进行多重故障定位的比较中, 果蝇优化算法表现出了良好的寻优能力和更快的收敛速度。相较于以上智能算法, 果蝇优化算法的原理比较简单, 需要设置的参数很少, 程序代码易于实现, 寻优精度较高, 具有良好的收敛性能。

(4) 在处理多电源复杂配电网故障定位问题时, 本文采取矩阵算法中分区域讨论和假定正方向的思路, 建立了包含各区域的统一目标函数。随着配电网规模的不断扩大, 如何提出更简洁高效的方法有待进一步研究。

参考文献

- [1] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [2] HUANG Junhui, HAN Jun. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 63-70. DOI: 10.1186/s41601-016-0020-2.
- [3] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 207-208.
- [4] 刘健, 倪建立, 杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 31-33. LIU Jian, NI Jianli, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33.
- [5] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障定位的一种新算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 48-50. WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A new algorithm for fault location in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 48-50.
- [6] 王飞, 孙莹. 配电网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 45-46. WANG Fei, SUN Ying. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 45-46.
- [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] 马腾飞, 高亮. 含多微网的主动配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 64-68. MA Tengfei, GAO Liang. Fault location algorithm for active distribution network with multi micro-grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 64-68.
- [9] 杜红卫, 孙雅明, 刘弘靖, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位和隔离[J]. 电网技术, 2000, 24(5): 52-55. DU Hongwei, SUN Yaming, LIU Hongjing, et al. Fault section diagnosis and isolation of distribution networks based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 52-55.
- [10] 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. WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [11] 郭壮志, 陈波, 刘灿萍, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 88-92. GUO Zhuangzhi, CHEN Bo, LIU Canping, et al. Fault location of distribution network based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 88-92.
- [12] 严太山, 崔杜武, 陶永芹. 基于改进遗传算法的配电网故障定位[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 255-259. YAN Taishan, CUI Duwu, TAO Yongqin. Fault location for distribution network by improved genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 255-259.
- [13] 陈歆技, 丁同奎, 张钊. 蚁群算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 74-77. CHEN Xinji, DING Tongkui, ZHANG Zhao. Ant colony algorithm for solving fault location in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 74-77.
- [14] 刘迅, 黄纯. 蚁群算法在超高压输电线路故障测距的

- 应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(5): 132-137.
- LIU Xun, HUANG Chun. Fault location for EHV transmission line based on ant colony algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(5): 132-137.
- [15] 张颖, 周韧, 钟凯. 改进蚁群算法在复杂配电网故障区段定位中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 224-228.
- ZHANG Ying, ZHOU Ren, ZHONG Kai. Application of improved ant colony algorithm in fault-section location of complex distribution network[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 224-228.
- [16] 唐贤伦, 程祥, 汪斌全. 采用多 Agent 混沌粒子群算法的配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 17-23.
- TANG Xianlun, CHENG Xiang, WANG Binquan. Distribution network reconfiguration adopting chaos particle swarm algorithm of multi-agent system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(3): 17-23.
- [17] 姜志鹏, 文习山, 蓝磊, 等. 粒子群算法应用于避雷器均压环配置优化[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 102-106.
- JIANG Zhipeng, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Application of particle swarm optimization algorithm to configuration optimization of grading rings for arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 102-106.
- [18] 刘蓓, 汪泓, 陈春, 等. 和声算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 280-286.
- LIU Bei, WANG Feng, CHEN Chun, et al. Harmony search algorithm for solving fault location in distribution networks with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 280-286.
- [19] 郭壮志, 吴杰康. 配电网故障区间定位的仿电磁学算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 34-40.
- GUO Zhuangzhi, WU Jiekang. Electromagnetism-like mechanism based fault section diagnosis for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 34-40.
- [20] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 77-83.
- ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
- [21] 陈奎, 张云, 王洪寅, 等. 基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 57-62.
- CHEN Kui, ZHANG Yun, WANG Hongyin, et al. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 57-62.
- [22] 付家才, 陆青松. 基于蝙蝠算法的配电网故障区间定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 100-105.
- FU Jiakai, LU Qingsong. Fault sections location of distribution network based on bat algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 100-105.
- [23] 曾红梅. 基于人工蜂群算法的配电网故障定位[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- ZENG Hongmei. Distribution network fault location based on artificial bee colony algorithm[J]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [24] 潘文超. 果蝇最佳化演算法[M]. 台北: 沧海书局: 2011: 10-32.
- [25] 潘文超. 应用果蝇优化算法优化广义回归神经网络进行企业经营绩效评估[J]. 太原理工大学学报(社会科学版), 2011, 29(4): 1-5.
- PAN Wenchao. Using fruit fly optimization algorithm optimized general regression neural network to construct the operating performance of enterprises model[J]. Journal of Taiyuan University of Technology (Social Science), 2011, 29(4): 1-5.
- [26] PAN W T. A new fruit fly optimization algorithm: Taking the financial distress model as an example[J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 26: 69-74.
- [27] 吴小文, 李擎. 果蝇算法和 5 种群智能算法的寻优性能研究[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(4): 17-20.
- WU Xiaowen, LI Qing. Research of optimizing performance of fruit fly optimization algorithm and five kinds of intelligent algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 24(4): 17-20.

收稿日期: 2018-10-24; 修回日期: 2019-02-20

作者简介:

王巍璋(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障定位和终端配置优化; E-mail: 120162174@qq.com

王 淳(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统规划、优化理论在电力系统中的应用。E-mail: cwang_ncu_cn@163.com

(编辑 许威)