

改进灰狼算法在配电网故障定位中的应用

甄永琦 蒋伟*

(上海电力大学电子与信息工程学院 上海 200090)

摘要 为了解决分布式电源广泛接入配电网后传统故障定位方法不再适用的问题,提出一种基于层级模型和改进灰狼优化算法的故障定位方法。构造能够适应多分布式电源接入的开关函数;根据故障电流信息的特点,建立配电网的层级模型,有效降低了问题的运算维度;结合故障定位模型,在灰狼优化算法的位置更新公式中引入交叉和变异操作,提高了算法的收敛速度和寻优精度;将建立的层级模型和改进后的灰狼优化算法应用于故障区段定位。MATLAB 仿真结果表明,层级模型和改进的灰狼算法能够快速、准确地实现配电网故障区段定位。

关键词 分布式电源 配电网 故障定位 层级模型 灰狼优化算法

中图分类号 TP29

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.11.033

APPLICATION OF IMPROVED GREY WOLF ALGORITHM IN FAULT LOCATION OF DISTRIBUTION NETWORK

Zhen Yongqi Jiang Wei*

(College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract In order to solve the problem that traditional fault location method is no longer applicable after distributed power is widely connected to distribution network, a fault location method based on hierarchical model and improved grey wolf optimizer is proposed. The switch function which can adapt to multi-distributed power access was constructed. Then, based on the characteristics of fault current information, the hierarchical model of distribution network was established, which effectively reduced the operational dimension of the problem. Combined with the fault location model, crossover and mutation operations were introduced into the position updating formula of grey wolf optimizer, which improved the convergence speed and optimization accuracy of the algorithm. Finally, the hierarchical model and the improved grey wolf algorithm were applied to fault segment location. The MATLAB simulation results show that the proposed hierarchical model and the improved grey wolf optimizer can quickly and accurately complete fault location in the distribution network.

Keywords Distributed power Distribution network Fault location Hierarchical model Grey wolf optimizer

0 引言

配电网的供电可靠性随着智能电网的发展得到了不断提高,应用于传统配电网的故障定位研究也已经比较成熟^[1]。近年来随着太阳能、风能等新型分布式电源(Distributed Generation, DG)大量接入配电网,传统单电源辐射网变成复杂的多电源网络,传统的故障

区段定位方法已不再适用^[2]。为了保证配电网的可靠性,尽可能减小线路故障对用户生产生活的影响,必须迅速准确地找出故障区段并采取措施及时排除故障。

随着馈线终端单元(Feeder Terminal Unit, FTU)在配电网中得到应用,利用其上传的故障信息进行故障区段定位得到了广泛的研究^[3-9]。文献[3]提出了一种基于非逻辑建模的方法,运用线性规划求解,避免了智能算法易陷入局部最优的问题,但只能运用于单点

故障的定位。文献[4]提出了一种改进的矩阵算法,虽然其原理简单、运算速度快且准确性较高,但容错性较差。文献[5]将矩阵算法和智能算法相结合,通过因果关联矩阵建立优化模型,并运用人工智能算法进行求解,取得了良好的效果,但仅适用于传统的单电源配电网。文献[6-7]介绍了基于改进遗传算法的故障定位方法,在复杂的配电网中取得了较好的效果,但在求解时问题的维数较高,易陷入局部最优且收敛速度较慢。文献[8-9]对粒子群算法进行改进,但采用的开关函数模型不能适应多个分布式电源的动态投切。文献[10]提出了一种基于蚁群和粒子群的混合算法,提高了算法的寻优精度,但在求解故障区段时平均运行时间较长。此外,还有一些人工智能算法在故障区段定位中得到应用,但在应用于复杂配电网故障时,都不可避免地存在搜索维度较大,运算时间长,效率较低的问题。

灰狼优化算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)是由 Mirjalili 等^[11]在 2014 年提出的一种新型群体智能优化算法,具有原理简单、参数设置少、全局搜索能力强等特点。本文将灰狼优化算法拓展应用到复杂配电网故障区段定位中,针对分布式电源接入对故障电流方向的影响,明确统一的方向确定规则,构造适应多电源投切的开关函数。根据各区域上开关函数的特点,对配电网进行层级划分,建立配电网的简化等效模型,有效降低了运算模型的维数。结合实际故障模型,在灰狼优化算法的基础上改进了位置更新公式,引入了交叉和变异操作,进一步提高了算法的收敛速度和寻优精度。最后通过建立的层级模型和改进的灰狼算法先进行故障区域的定位,再通过穷举法在故障区域中确定故障区段,并引入校验机制,提高了定位流程的准确性和容错性。

1 故障定位层级模型

1.1 编码规则

对于含有分布式电源的配电网,线路某处发生故障时,电网中会出现多个方向的故障过电流,传统的编码方式不再适用。规定以电网电源指向用户的方向为正方向^[12],若 FTU 检测到开关 j 的故障电流方向与规定正方向一致,则开关状态为 $I_j = 1$;若与正方向相反,则 $I_j = -1$ 。当 FTU 未检测到故障电流时,则 $I_j = 0$ 。以开关 j 为分界点,将配电网分为两部分,其中包含电网电源的部分称为开关 j 的上半区,另一部分称为开关 j 的下半区。

1.2 开关函数

根据前面的编码规则,确定每个开关的故障电流信息后,再建立一个函数表达式,反映线与开关之间的关联关系,实现开关故障电流超限信息与线路故障状态之间的转换。本文考虑了分布式电源接入后网络拓扑结构的变化,采用以下适应多个电源投切的开关函数:

$$I_{ju}^*(S) = \left(\prod_{j,d} x_{jd} \right) \cdot \left\{ \prod_u [K_u (1 - \prod_{j,S_u} x_{j,S_u})] \right\} \quad (1)$$

$$I_{jd}^*(S) = \left(\prod_{j,d} x_{ju} \right) \cdot \left\{ \prod_d [K_d (1 - \prod_{j,S_d} x_{j,S_d})] \right\} \quad (2)$$

$$I_j^*(S) = I_{ju}^*(S) - I_{jd}^*(S) \quad (3)$$

式中: \prod 表示逻辑或运算; K_u 、 K_d 分别为开关 j 上、下半区电源投切系数,若电源投入运行则取 1,反之为 0; N_1 、 N_2 分别上、下半区馈线区段总数; M_1 、 M_2 分别开关 j 为上、下半区电源总数; x_{ju} 、 x_{jd} 分别为开关 j 到上、下半区所有馈线区段状态值,当该区段发生故障时取值为 1,反之为 0; x_{j,S_u} 、 x_{j,S_d} 分别为从第 j 号开关到上半区电源、下半区电源路径上所经过的馈线区段状态值; I_{ju} 、 I_{jd} (S) 为第 j 个开关上、下半区线路的开关函数; I_j (S) 为第 j 个开关的开关函数。

1.3 层级模型

为了说明开关函数构造的合理性以及层级模型划分依据,以图 1 所示的 T 型结构的含 DG 配电网为例进行分析。

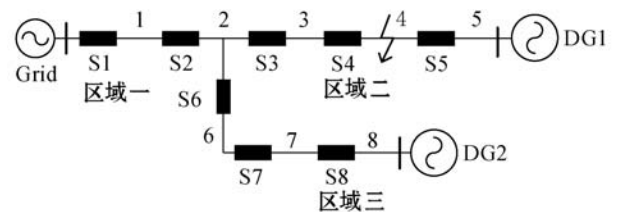


图 1 含 DG 的配电网简图

当区域二上的区段 4 发生故障时,由式(1) - 式(3),得到区域三上节点 6 的开关函数如下:

$$I_{6u}^*(S) = (x_6 | x_7 | x_8) [(1 - x_1 | x_2) | (1 - x_3 | x_4 | x_5)] = 0 \quad (4)$$

$$I_{6d}^*(S) = (x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5) [(1 - x_6 | x_7 | x_8)] = 1 \quad (5)$$

$$I_6^*(S) = I_{6u}^*(S) - I_{6d}^*(S) = -1 \quad (6)$$

同理,可以得到区域三上其余节点和区域一上节点的开关函数为:

$$I_7^*(S) = -1 \quad I_8^*(S) = -1 \quad (7)$$

$$I_1^*(S) = 1 \quad I_2^*(S) = 1 \quad (8)$$

由此可以发现区域三上的开关函数 $I_6^* = I_7^* = I_8^* = -1$,区域一的开关函数 $I_1^* = I_2^* = 1$ 。设置区域二不同区段故障,分别计算区域一和区域三的开关函

数,得到的结果如表 1 所示。

表 1 不同故障时对应的开关函数值

故障区段	区域一开关函数	区域三开关函数
3	$I_1^* = I_2^* = 1$	$I_6^* = I_7^* = I_8^* = -1$
5	$I_1^* = I_2^* = 1$	$I_6^* = I_7^* = I_8^* = -1$
3,5	$I_1^* = I_2^* = 1$	$I_6^* = I_7^* = I_8^* = -1$
4,5	$I_1^* = I_2^* = 1$	$I_6^* = I_7^* = I_8^* = -1$

可以看出,当一个区域发生单点或双重故障时,对其他区域的开关函数值影响不变。据此,可以将每个区域对外等效成一个二端口,如图 2 所示。

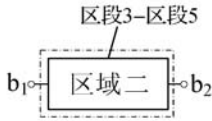


图 2 区域二的等效二端口

根据建立的等效端口,将图 1 等效为一个简化的层级模型,如图 3 所示。划分区域后只需要从 FTU 上传的故障信息中提取出各区域端口故障电流信息,有效降低了故障信息处理的维度。

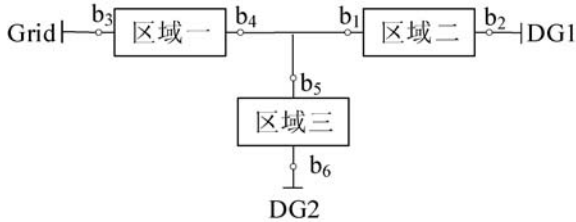


图 3 含 DG 配电网层级模型

1.4 评价函数

在确定开关函数之后,还需建立合适的评价函数实现故障区段定位。利用灰狼优化算法完成故障区段定位的过程就是实现故障电流信号与开关函数的最佳逼近过程。本文采用的评价函数为:

$$Fit(x) = \sum_{h=1}^H |I_h - I_h^*(S)| + \mu \sum_{h=1}^H |x(h)| \quad (9)$$

式中: I_h 为第 h 个区域的故障电流信息; I_h^* 为第 h 个区域的开关函数; H 为配电网中的区域总数; $x(h)$ 为第 h 个区域的区域故障状态,发生故障时取 1,反之取 0; μ 为权重系数,根据故障诊断理论中“最小集”概念设置,本文取值为 0.5。

2 故障定位层级模型

2.1 灰狼优化算法

灰狼优化算法模拟了灰狼在自然中的捕食行为和种群等级制度,用 α 代表种群中的头狼, β 代表副首领

狼, δ 代表普通狼, ω 代表底层狼。求解优化问题时,设灰狼种群中的灰狼数目为 G ,第 i 只灰狼在 d 维搜索空间中的位置可表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 。将种群中历史最优个体记为 α ,次优个体记为 β ,第三优个体记为 δ ,其余个体记为 ω 。

灰狼群体按照下式进行捕猎:

$$D = |C \cdot X_p(n) - X(n)| \quad (10)$$

$$X(n+1) = X_p(n) - A \cdot D \quad (11)$$

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (12)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (13)$$

式中: $X_p(t)$ 表示第 t 次迭代时猎物的位置; $X(t)$ 表示第 t 次迭代时灰狼个体的位置;常数 C 为摆动因子; r_1, r_2 为之间的随机数; A 为收敛因子; a 随着迭代次数增加从 2 线性递减到 0。

在狼群中,第 i 只灰狼通常利用 α, β, δ 三者的位置来判断猎物所在方位,并进行位置更新。其数学描述如下:

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha \\ X_2 &= X_\beta - A_2 \cdot D_\beta \end{aligned} \quad (15)$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta$$

$$\begin{aligned} D_\alpha &= |C_1 \cdot X_\alpha(t) - X(t)| \\ D_\beta &= |C_2 \cdot X_\beta(t) - X(t)| \end{aligned} \quad (16)$$

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

2.2 改进二进制灰狼优化算法

在解决故障区域定位问题中,故障区域状态值仅存在两种状态 0 或者 1,因此需要将实际灰狼位置更新映射为二进制值表示。根据文献[13],在二进制灰狼优化算法中,通过式(17)和式(18)进行位置更新。

$$\text{sigmoid}[X(t+1)] = \frac{1}{1 + e^{-10 \left[\left(\frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \right) - 0.5 \right]}} \quad (17)$$

$$x_d(t+1) = \begin{cases} 1 & \text{sigmoid}[X(t+1)] > \text{rand} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中:sigmoid 为转换函数;rand 为内均匀分布的随机数; $x_d(t+1)$ 为灰狼在 d 维中经过 t 次迭代后更新的位置。

2.2.1 交叉操作

为了增加迭代过后种群个体的多样性,对它们进行二项式交叉操作。第 i 只灰狼的第 d 维的交叉操作为:

$$X_d^i = \begin{cases} X_d^l & \text{rand}_d^i < C_l \\ X_d^i & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $l = 1, 2, \dots, G$,但 $l \neq i$ 。交叉概率 C_l 是动态变化

的,定义为:

$$C_l = 0.3 \times F_{i,best} \quad (20)$$

$$F_{i,best} = \frac{F_i - F_{best}}{F_{worst} - F_{best}} \quad (21)$$

式中: F_i 为第 i 只灰狼的适应度值; F_{worst} 和 F_{best} 为当前迭代的最差适应度和最优适应度值。通过式(20) - 式(21),保证了当前的最优个体不会发生改变,交叉概率与相对适应度值成正比。

2.2.2 变异操作

为了进一步提高种群的多样性,防止算法陷入局部最优,在交叉后对灰狼个体进行变异操作,定义为:

$$x_d^i = \begin{cases} x_{g_{best},d} + r_3(x_d^{q_1} - x_d^{q_2}) & rand^i_d < \eta \\ x_d^i & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

$$\eta = 0.06 \times F_{i,best} \quad (23)$$

式中: $q_1, q_2 = 1, 2, \dots, G$, 但 $q_1 \neq q_2 \neq i$; $x_{g_{best},d}$ 为到当前为止的整个迭代过程中 d 维的最优个体; η 为变异概率。若当前个体比当前全局最优个体适应度值更小,则将其取代当前全局最优个体。根据式(22) - 式(23),当前全局最优个体的变异概率为 0,最差个体的变异概率为 0.06。

3 故障定位的实现

3.1 故障区域定位

在对配电网进行区域划分后,可以通过 FTU 上传的故障信息,运用改进的灰狼算法,首先确定故障区域。具体步骤如下:

- 1) 根据配电网馈线区段的数量,设置种群规模 N ,最大迭代次数,在搜索空间中随机生成参数 A, C 。
- 2) 在搜索空间中产生初始化种群,即随机生成 N 个 d 维个体 X_1, X_2, \dots, X_N , 每个个体均由 0 或 1 组成。
- 3) 按式(9)计算群体中每个灰狼个体的适应度值,将所有适应度值进行排序,选择并更新个体最优值 F_{best} , 适应度值排列前 3 位的灰狼个体位置分别记为 α, β, δ 。
- 4) 按式(14) - 式(18)更新灰狼个体位置,再根据式(19) - 式(23)进行交叉和变异操作。
- 5) 判断算法是否达到最大迭代次数。若未达到,返回步骤 3);若已达迭代最大值,则输出最优解,算法结束。

3.2 故障区段定位

在确定故障区域之后,由于区域内包含的区段数量较少,使用智能算法求解的效率较低,因此在故障区段的定位中采用穷举法。穷举法通过取符合区域内区段数量限制的每一种由 0 或 1 构成的组合,计算评价

函数值,比较得出最优解。在组合数较少的情况下,穷举法相较于智能算法运算量小,计算速度快,更适合用于故障区段定位。

3.3 故障定位流程

根据划分的层级模型和 FTU 上传的故障电流信息,先运用改进灰狼算法定位出故障区域,再运用穷举法在故障区域内找出故障区段。为了提高定位的准确性,将输出定位区段与区域定位结果进行比较,若一致则输出定位结果。否则返回区域定位,重新完成故障定位。整个定位过程如图 4 所示。

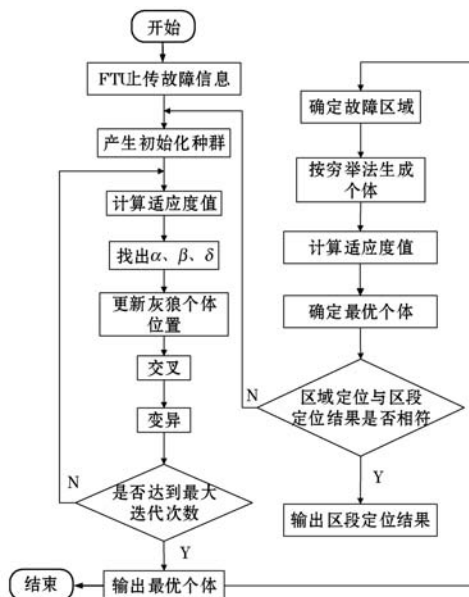


图 4 故障定位流程图

4 算例分析

本文采用如图 5 所示的含分布式电源的配电网进行仿真实验。在节点 13、22 和 30 处分别接入分布式电源 DG1、DG2 和 DG3。图中:Grid 为系统电源,S1 - S30 为分段开关;编号 1 - 30 为馈线区段;K1、K2、K3 为 DG 接入配电网的开关。

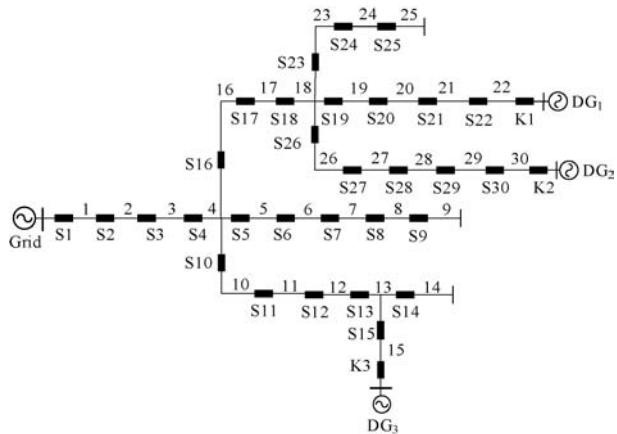


图 5 含分布式电源的配电网

本文对 30 节点的复杂配电网进行区域划分,建立层级模型。等效过后的配电网如图 6 所示,每个区域包含的区段编号如表 2 所示。

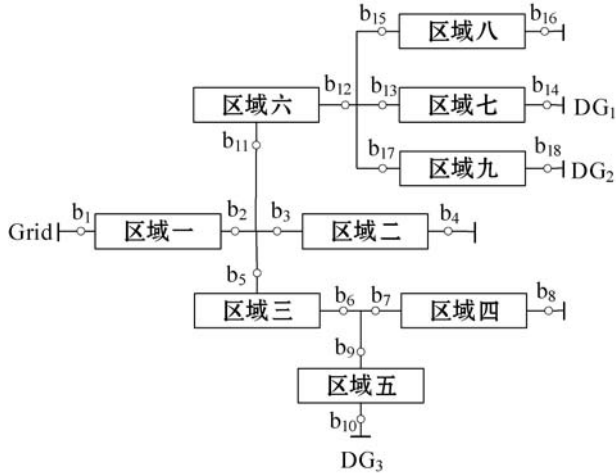


图 6 配电网区域划分图

表 2 各区域包含的区段编号

区域	区段编号	区域	区段编号
一	1,2,3,4	六	16,17,18
二	5,6,7,8,9	七	19,20,21,22
三	10,11,12,13	八	23,24,25
四	14	九	26,27,28,29,30
五	15		

4.1 多种故障分析

根据灰狼优化算法原理,设置算法参数如下:种群总数 $N = 20$;种群个体维数 $d = 9$;最大迭代次数 50。

若 DG1、DG2 和 DG3 均投入运行,当图 5 中的馈线区段 10 发生故障时,FTU 上传的故障电流信息为 $[1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ -1\ -1\ -1\ 0\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 0\ 0\ 0\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1]$,提取出每个区域的故障电流信息为 $[1\ 0\ 1\ 0\ -1\ -1\ -1\ 0\ -1]$,运用二进制 GWO 对其进行求解,得到的定位结果为 $[0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$,由此判定区域三发生故障;再由穷举法进行区段定位,得到的区域三内的区段状态值为 $[1\ 0\ 0\ 0]$,与假定故障位置相符。当区段 23、28 发生故障时,FTU 上传的故障信息为 $[1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ -1\ -1\ -1\ -1\ 0\ -1\ 1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ -1\ -1]$,提取区域端口状态值为 $[1\ 0\ -1\ 0\ -1\ 1\ -1\ 1\ 1]$,运用 GWO 求解得到的区域定位结果为 $[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1]$;再利用穷举法分别在区域八和区域九内得到的区段状态值为 $[1\ 0\ 0]$ 和 $[0\ 0\ 1\ 0\ 0]$,也与假定故障位

置相符。

当故障电流过小,FTU 设备未能检测到故障电流信息,或者因为其他原因导致 FTU 上传的故障信息发生畸变等情况,验证算法的容错性。例如当区段 18 发生故障时,FTU 上传的故障信息为 $[1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ -1\ -1\ -1\ -1\ 0\ -1\ 1\ 1\ 1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 0\ 0\ 0\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1]$,分段开关 S7 的开关状态值由 0 畸变为 1,运用 GWO 求解得到的区域定位结果为 $[0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0]$,得到区域二和区域六发生故障,再分别进行区段定位得到的区段状态值为 $[0\ 0\ 0\ 0\ 0]$ 和 $[0\ 0\ 1]$,在区域二内没有定位出故障区段,与区域定位结果不符。因此将重新进行区域定位与区段定位,若两次结果一致,则输出故障区段结果,这避免了故障信息畸变对故障区段定位的影响,说明本文方法具有一定的容错性。

为了更好地说明改进 GWO 的准确性及容错性,对不同 DG 的动态投切及 FTU 畸变情况进行仿真验证,结果如表 3 所示,其中系数矩阵表示分布式电源的投切状态。仿真结果表明,本文选用的故障区段定位模型在面对不同 DG 投切以及 FTU 信息畸变情况下,对单重或多重故障定位均能输出正确的定位结果。

表 3 不同故障信息下的仿真结果

故障区段	DG 投切状态 K	信息畸变位置	区域定位结果	区段定位结果
4	$[1\ 1\ 1]$	无	$[0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$	4
14	$[0\ 1\ 1]$	无	$[0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$	14
21	$[1\ 1\ 0]$	12	$[0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0]$	21
26	$[1\ 0\ 1]$	21	$[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1]$	26
5,12	$[1\ 0\ 0]$	9	$[0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$	5, 12
11,15	$[1\ 1\ 1]$	1, 18	$[0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]$	11, 15
17, 20	$[0\ 1\ 1]$	6, 24	$[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0]$	17, 20
7, 14, 20	$[1\ 1\ 0]$	12, 13	$[0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0]$	7, 14, 20
11, 16, 25	$[0\ 0\ 0]$	7, 13	$[0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0]$	11, 16, 25

4.2 结果比较

以图 5 的配电网为例,用遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO)在单层模型中的表现与文中采用的层级模型和改进 GWO 进行比较。假设配电网中仅有分布式

电源 DG2 接入,分别在线路 10 发生单点故障和线路 23、28 发生双重故障,FTU 上传信息无畸变。在相同的运行环境下,输入相同的 FTU 上传的故障信息,采用 4 种算法分别仿真 50 次,得到的结果如表 4 所示。

表 4 不同算法定位对比结果

算法	单点故障		双重故障	
	平均耗时/s	准确率/%	平均耗时/s	准确率/%
GA	1.80	87	2.60	72
PSO	1.20	88	1.50	74
改进 GWO	0.08	100	0.08	100

可以看出,与 GA、PSO 在单层模型中的表现相比,采用的层级模型和改进 GWO 耗时较短且准确率更高。在单层模型中,GA 与 PSO 需要搜寻 30 个节点对应的故障信息,运算维数较高,易陷入局部最优。层级模型大大降低了问题的维数,改进的 GWO 在快速定位出故障区域之后,采用的穷举法在很短的时间内定位出故障区段,大大提高了问题解决的速度和精度。

为了说明改进措施的有效性,对单点故障用基本 GWO 和改进 GWO 分别运行 50 次,初始化种群个体为 20,最大迭代次数为 20,得到的对比结果如表 5 所示。

表 5 改进算法的故障区域定位性能对比

算法	平均迭代次数	平均耗时/s	准确率/%
GWO	5.3	0.07	95
改进 GWO	3.2	0.08	100

可以看出,与基本 GWO 相比,改进后的算法在处理故障区段定位问题中具有更快的收敛性与全局寻优能力,证明了改进措施的有效性。

5 结 语

本文针对分布式电源接入配电网后传统故障定位方法不再适用的问题,提出了一种基于层级模型和改进灰狼算法的故障定位新方法。首先在确定的编码规则下,定义了配电网中每个节点的开关函数,能够反映区段状态与开关之间的关联关系。然后对复杂多分支配电网进行简化,建立层级模型,有效降低了问题维数。再在基本二进制灰狼算法的基础上,引入了交叉

和变异操作,提高了算法的收敛速度和寻优精度。最后将改进灰狼算法应用于层级划分后的配电网故障区域定位中,并采用穷举法进行区域内的故障区段定位,大大提高了整个故障定位流程的准确性和稳定性。仿真结果表明:采用的故障定位方法相较于单层定位方法更加准确且速度更快,对于复杂的配电网具有更好的适应性。

参 考 文 献

- [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.
- [2] Shen S F, Lin D, Wang H F, et al. An adaptive protection scheme for distribution systems with DGs based on optimized Thevenin equivalent parameters estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2017,32(1):411-419.
- [3] 何瑞江,胡志坚,李燕,等. 含分布式电源配电网故障区段定位的线性整数规划方法[J]. 电网技术,2018,11(22):3684-3692.
- [4] 王一非,贾燕冰. 含分布式电源配电网故障定位改进矩阵算法[J]. 计算机仿真,2018,35(4):58-64.
- [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.
- [6] 刘鹏程,李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(2):36-41.
- [7] 谢涛,蒯圣宇,朱晓虎,等. 基于改进遗传算法的配电网故障定位方法[J]. 沈阳工业大学学报,2019,41(2):126-131.
- [8] 钟建伟,朱润枫,黄秀超,等. 基于双态二进制粒子群优化算法的配电网故障定位[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(3):29-34.
- [9] 徐鹏飞,邢仁周. 粒子群优化算法含分布式电源配电网故障定位[J]. 电源技术,2018,42(4):591-592,600.
- [10] 郭玉雯. 分布式发电配电网故障区段定位新方法[J]. 计算机应用与软件,2017,34(9):14-18.
- [11] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software,2014,69:46-61.
- [12] 金涛,李鸿南,刘对. 基于 BPSOGA 的含风电机组的配电网故障区段定位[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):27-33.
- [13] Emary E, Zawba H M, Hassanien A E. Binary grey wolf optimization approaches for feature selection[J]. Neurocomputing,2016,172(1):371-378.