

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220372

基于分层定位模型的含 DG 配电网故障定位方法研究

李卫彬¹, 童欣¹, 黄超¹, 彭扬帆¹, 季东辉¹, 王佳裕²

(1. 国网上海崇明供电公司, 上海 202150; 2. 国网上海浦东供电公司, 上海 200120)

摘要: 针对现有配电网故障定位算法在含 DG 的故障定位中存在耗时长、准确率低等问题, 提出了一种将分层模型与改进免疫算法相结合用于含 DG 的配电网故障定位方法。简化配电网模型, 使用改进的免疫算法定位故障区域, 并使用改进的免疫算法对故障区域进行二次定位。通过试验对单点故障和多点故障进行分析, 验证了所提方法的优越性。试验结果表明, 相比于传统的故障定位方法, 所提方法引入了分层理论, 有效降低了故障节点的搜索维数, 在保证速度的情况下, 具有较高的故障定位精度。

关键词: 配电网; 分布式电源; 故障定位; 分层模型; 免疫算法

A fault location method for a distribution network with DG based on a hierarchical location model

LI Weibin¹, TONG Xin¹, HUANG Chao¹, PENG Yangfan¹, JI Donghui¹, WANG Jiayu²

(1. State Grid Shanghai Chongming Electric Power Company, Shanghai 202150, China;

2. State Grid Shanghai Pudong Electric Power Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: Aiming at the problems of long time consuming and low accuracy of existing fault location algorithms in distribution network with DG, a hierarchical model combined with an improved immune algorithm is proposed for distribution network fault location with DG. This paper simplifies the distribution network model, uses the improved immune algorithm to locate the fault area, and uses it again to locate the fault area again. The advantages of the proposed method are verified by analyzing single point fault and multi-point fault through experiment. The experimental results show that compared with the traditional fault location methods, the proposed method introduces the hierarchical theory, which effectively reduces the search dimension of fault nodes and has high fault location accuracy while ensuring the speed.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5215F02000DA).

Key words: distribution network; distributed power supply; fault location; layered model; immune algorithm

0 引言

配电网作为保证电力供应的关键环节, 在配电网发生故障时, 准确和快速的定位故障是配电网安全性和稳定性的基础^[1-2]。分布式电源(distributed power, DG)具有清洁、无污染、低碳和可再生等优点, 近年来得到广泛应用。由于大量 DG 接入配电网, 使得配电网故障定位更加困难, 且现有故障定位方法存在耗时长、准确率低等问题^[3]。因此, 研究适用于含 DG 的配电网故障定位方法具有一定的现实意义^[4-7]。

传统配电网故障定位方法有相位法^[8]、行波法^[9]、阻抗法^[10]和智能算法^[11]等。近年来, 国内外众多学

者对含 DG 的配电网故障定位方法进行了大量研究, 并取得了一些较为优秀的成果。文献[12]提出了一种改进的二进制萤火虫算法用于含 DG 的配电网故障定位。结果表明, 该算法在单个故障、多个故障和信息畸变的情况下能够准确定位, 具有一定的实用价值。文献[13]提出了一种将长须搜索算法与改进的遗传算法相结合用于含 DG 的配电网故障定位。结果表明, 在单个故障、多个故障和信息畸变的情况下, 可以准确地定位故障。文献[14]提出了一种将改进遗传算法和粒子群优化算法相结合用于含 DG 的配电网故障定位。结果表明, 该方法定位精度高、收敛速度快、抗干扰能力强。文献[15]提出了一种将免疫算法和量子计算相结合用于故障定位。结果表明, 该方法在单故障、多故障和信息畸变的情况下具有较高的故障定位精度。但是, 上

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5215F02000DA)

述方法存在定位效率低、准确率低等问题。在故障定位中的效果并不理想, 适应性有待进一步提高。

在此基础上, 将分层模型和改进的免疫算法相结合用于故障定位。简化配电网模型, 使用改进的免疫算法(immune algorithm, IA)定位故障区域, 再使用改进的 IA 算法对指定区域进行二次定位。通过试验验证了该方法的优越性。

1 含 DG 的配电网故障定位模型

1.1 编码方式

当配电网中某一线路发生短路故障时, 馈线终端单元(FTU)将检测信息上传至控制中心。通过集合智能算法的优化最终找到故障的过程。

s_i 为某一分配电网的状态, 具体表达方法如式(1)所示^[16]。

$$s_i = \begin{cases} 1, & \text{故障} \\ 0, & \text{正常} \end{cases} \quad (1)$$

DG 未并网, 故障定位中只有故障和正常两种线路状态, 相应开关的 FTU 采集数据只有正常和过流。因此, FTU 采集信息可以编码, 如式(2)所示^[17]。

$$I_j = \begin{cases} 1, & \text{故障} \\ 0, & \text{正常} \end{cases} \quad (2)$$

DG 并网后, DG 响应不同的故障情况, 故障电流方向不同^[18]。此时, 仅使用 0 和 1 并不能很好地表示流过节点的故障电流状况。因此, 引入了新的编码规则如式(3)所示^[19]。

$$I_j = \begin{cases} 1, & \text{故障流正向} \\ 0, & \text{正常} \\ -1, & \text{故障流反向} \end{cases} \quad (3)$$

开关故障电流状态使用代码为“-1”, 考虑到接入 DG 配电网支路上开关流过的故障电流可能与 DG 接入前方向相反。

1.2 构建开关模型

DG 未连接前, 开关函数如式(4)所示^[20]。

$$I_j(s) = \prod_i s_i \quad (4)$$

式中: $I_j(s)$ 为第 j 个开关的开关函数; s_i 为下游区段 i 的状态; \prod 为逻辑“或”。

DG 并网后, 配电网的潮流随着 DG 的切换而变化, 各节点的电流方向也随之变化。此外, 在故障情况下, 每个节点监控的电流方向不是唯一的, 而是由每个电源的电流信息决定的。

参考文献[21], 开关函数如式(5)所示。

$$\begin{cases} I_{ju}^*(s) = \prod_u^{M_1} [K_u (1 - \prod_{j,s_u} s_{j,s_u})] \times \prod_{j,d}^N s_{j,d} \\ I_{jd}^*(s) = \prod_d^{N_1} [K_d (1 - \prod_{j,s_d} s_{j,s_d})] \times \prod_{j,u}^M s_{j,u} \\ I_j^*(s) = I_{ju}^*(s) - I_{jd}^*(s) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $I_j^*(s)$ 由两部分组成, 开关 j 划分上游和下游开关; $I_{ju}^*(s)$ 和 $I_{jd}^*(s)$ 分别为上、下游开关函数; M 和 N 分别是上、下游区段的总数; M_1 和 N_1 分别为上、下游电源总数; K_u 和 K_d 分别为上、下游的电源接入情况(1 表示接入, 0 表示未连接)^[22]; s_{j,s_u} 和 s_{j,s_d} 分别为开关 j 到上、下游线路电源区段的节点状态; $s_{j,u}$ 和 $s_{j,d}$ 分别为开关 j 上游段和下游段的节点状态。

1.3 评价函数

根据文献[23]描述, 原单电源辐射状配电网故障定位评价函数也可以应用于含 DG 的配电网故障定位, 如式(6)所示。

$$F_u(i) = T - \left(\sum_{j=1}^N |I_j - I_j^*(S_i)| + \omega \sum_{j=1}^N |S_i(j, i)| \right) \quad (6)$$

式中: T 为常数, 取开关数的两倍; ω 为权重因子, 通常是[0, 1]之间的实数, 本文取 0.5。

2 分层定位模型

2.1 改进的免疫算法

免疫算法是一种新型智能搜索算法^[24]。抗原是要解决的优化问题, 抗体是相应问题的解结构, 然后评估抗体群的质量。评价标准是个体亲和力和个体浓度。对评价得到的优质抗体进行免疫操作, 对劣质抗体进行更新^[25]。

随着配电网模型中节点数量的增加和整体结构的复杂化, 传统智能算法的精度明显降低。对于多分支、多节点和长分支的情况, 该算法很容易陷入局部最优^[26]。本文提出了一种改进的免疫算法, 将改进的二进制粒子群优化算法与免疫算法相结合, 提高免疫算法的搜索能力。并引入记忆细胞的信息分化机制, 利用二进制粒子群优化算法优良的优化能力和良好的收敛效率, 对免疫算法的内存数据库进行更新。

1) 改进二进制粒子群优化

粒子群优化算法是一种全局进化算法, 适应性决定了粒子的优势, 每个粒子的适应性由目标函数决定。二进制粒子群优化算法的位置更新如式(7)和式(8)所示^[27]。

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (X_{pbest} - X_{id}^k) + c_2 r_2 (X_{gbest} - X_{id}^k) \quad (7)$$

$$\text{Sigmoid}(V_{id}^{k+1}) = \frac{1}{1 + e^{-V_{id}^{k+1}}} \quad (8)$$

$$\begin{cases} X_{id}^{k+1} = 1, & \text{Sigmoid}(V_{id}^{k+1}) > r \\ X_{id}^{k+1} = 0, & \text{Sigmoid}(V_{id}^{k+1}) < r \end{cases} \quad (9)$$

式中： P_{best} 和 G_{best} 分别为个体和全局最优； k 为迭代次数； r_1 和 r_2 为学习系数； c_1 和 c_2 为[0,1]内的随机数； V_{id}^{k+1} 和 X_{id}^{k+1} 分别为 $k+1$ 次迭代的速度和位置； $\text{Sigmoid}()$ 为二进制函数。

V_{id}^{k+1} 值越大 $\text{Sigmoid}(V_{id}^{k+1})$ 越接近 1，所以 v 不要太大。本文在[-4, 4]内，函数如式(10)所示^[28]。

$$\text{Sigmoid}(V_{id}^{k+1}) = \begin{cases} 0.982, & V_{id}^{k+1} > 4 \\ \frac{1}{1 + e^{-V_{id}^{k+1}}}, & -4 \leq V_{id}^{k+1} \leq 4 \\ 0.018, & V_{id}^{k+1} < -4 \end{cases} \quad (10)$$

ω 值越高，全局搜索能力越强。 ω 值越小，局部搜索能力越好。因此，对惯性权重进行调节，如式(11)所示^[29]。

$$\omega = \lambda \cdot \frac{|P_{best,i} - G_{best,i}|}{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (P_{best,i} - G_{best,i})} \quad (11)$$

式中： λ 为权重因子，本文取 0.01； N 为粒子数； $P_{best,i}$ 和 $G_{best,i}$ 分别为当前个体最优和全局最优。

2) 记忆细胞的信息分化机制

针对陷入局部优化的情况，设计了一种记忆信息分化机制。

如果算法陷入局部优化时，则将记忆细胞中的每一个可疑故障点提取出来，转化为单故障点抗体和复合故障抗体参与免疫。如局部最优状态为(1,0,0,1,1,0,...)，分化为

(1,0,0,0,0,0,...),(0,0,0,1,0,0,...),(0,0,0,0,1,0,...)

(0,0,0,1,1,0,...),(1,0,0,0,1,0,...),(1,0,0,1,0,0,...)

如果局部优化仅一个故障点，故障点进行偏移。

例如，当得到的解为(0,0,0,1,0,0,...)时，得到(0,0,1,0,0,0,...)和(0,0,0,0,1,0,...)进行免疫寻优。

3) 改进算法实现

应用改进的算法对故障进行定位的步骤如下所述。

步骤 1：参数初始化，种群数、记忆细胞数、评价函数参数、交叉和变异概率、惯性权重范围等。

步骤 2：首先生成 $N_0 + N_m$ 个个体。个体在两个群体中被复制。一组参与二进制粒子群优化算法，另一组与 N_m 个个体进行免疫操作。

步骤 3：同时进行免疫操作和二进制粒子群优化算法，迭代更新。

步骤 4：个体多次未更新，则进行信息分化，参与下一次免疫操作。如果达不到分化条件，则执行下一步。

步骤 5：当达到最大迭代次数时，则结束，如果尚未达到最大迭代次数，转到步骤 3。

图 1 所示为改进算法的故障定位流程。

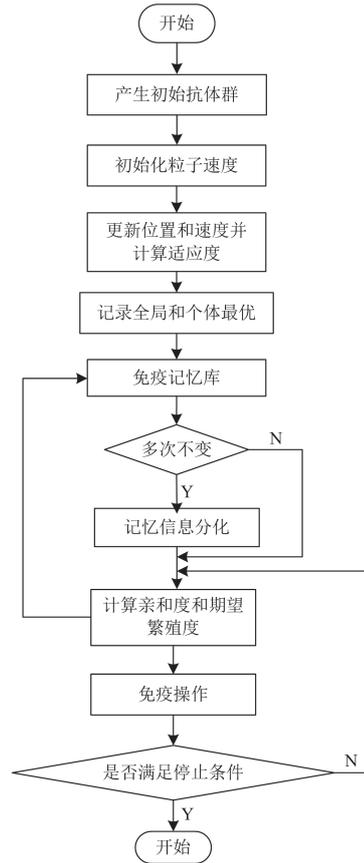


图 1 改进算法的故障定位流程

Fig. 1 Fault location process of improved algorithm

2.2 分层模型

改进的免疫算法采用混合算法的并行方式，可以提高故障定位的准确性，但计算量很大。基于这种情况，本文设计了一种层次化的网络结构。第一层简化了配电网模型，使用改进的免疫算法定位故障区域。第二层采用改进免疫算法对特定区段进行二次定位。

配电网各分支是否有 DG 可以分为有源和无源，电源产生的故障电流会影响有源支路而不影响无源支路，如果无源支路没有发生故障，定位时进行剔除，从而减少了维数^[30]。图 2 为配电网的拓扑模型。

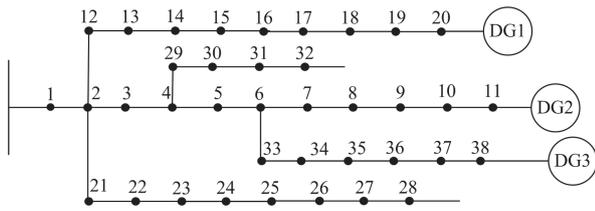


图 2 配电网拓扑结构

Fig. 2 Distribution network topology

通过对每个支路段的分析,不难看出:当一个支路段发生故障时,对其他区段的影响是固定的,对区内节点的影响不固定。对图 2 所示的拓扑结构进行简化后的 8 节点网络如图 3 所示。

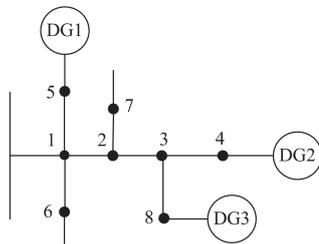


图 3 简化结构

Fig. 3 Simplified structure

分层模型的具体实现流程如下所述。

步骤 1: 将配电网划分为有源支路和无源支路,根据发现的实际节点状态过滤无源支路。如果确定无源支路没有故障电流,则认为无源支路没有故障点,将无源支路从网络模型中移除。

步骤 2: 去除无源支路后,通过简化网络等效节点,再通过改进免疫算法得到故障点所在的区域。

步骤 3: 使用改进免疫算法对步骤 2 定位区域进行故障定位。

图 4 为分层模型的故障定位流程。

3 试验结果与分析

3.1 试验参数

为了验证所提方法的优越性,使用 Matlab 2018a 作为仿真软件,操作系统为 Windows 10,计算机为 i5-7200u 处理器,2.7 GHz 频率,8 GB 内存。在图 2 所示的 38 节点配电网拓扑进行试验,图 2 中 DG1、DG2 和 DG3 是分布式电源,通过并网开关进行控制。L1—L38 为馈线编号,S1—S38 为各节点开关,采用 FTU 对故障电流进行检测。为了保证结果的准确性,取 20 次的平均值,表 1 为算法的参数。本文从单点故障、多点故障和信息畸变方面对算法的性能进行了分析。

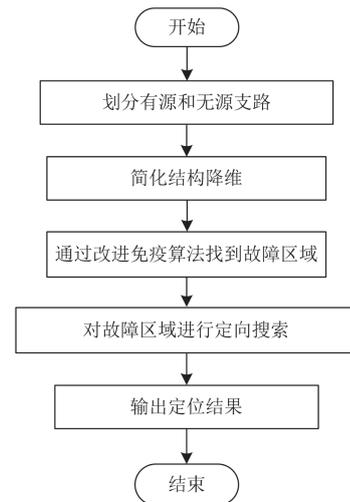


图 4 分层模型故障定位流程

Fig. 4 Fault location process of hierarchical model

表 1 算法参数

Table 1 Algorithm parameters

参数	数值
抗体数量	20
记忆细胞数量	4
最大迭代次数	400
相似度阈值	0.9
交叉/变异概率	0.8/0.08

3.2 试验分析

1) 单点故障

DG 接入由 [1,1,1]、[1,0,1]、[0,1,0]、[0,0,0] 4 种情况组成。其中 1 为 DG 并网,0 为 DG 未接入。为了验证本文方法的准确性,对 38 节点含 DG 的配电网模型进行了单次故障试验。当配电线路单点故障时,配电网 DG 数量不同,FTU 信息存在不同畸变,故障定位结果如表 2 所示。

表 2 单点故障定位结果

Table 2 Fault location results

DG 接入情况	故障类型	结果	时间/s
[1,1,1]	故障 L9	L9	1.67
[1,0,1]	故障 L23, 畸变信息 S30	L23	1.96
[0,1,0]	故障 L34	L34	1.64
[0,0,0]	故障 L16, 畸变信息 S8 和 S24	L16	2.03

由表 2 可知,在单点故障情况下,本文方法的所有判断结果都是准确的。当存在信息畸变时,仍能准确定位,具有良好的容错性。不同故障定位时间不同,这是因为不同故障分层降维的效果不同。

2) 多点故障

配电线路发生多点故障时，并入配电网的 DG 数量会有所不同，FTU 上报的故障信息也会出现不同程度的畸变。为了避免结果的偶然性，进行 20 次试验取均值。多点故障定位结果如表 3 所示。

表 3 多点故障定位结果

Table 3 Multipoint fault location results

DG 接入情况	故障类型	结果	时间/s
[1,1,1]	故障 L18、L34	L18、L34	1.72
[1,0,1]	故障 L18、L27，畸变 信息 S22 和 S36	L18、L27	2.22
[0,1,0]	故障 L25、L31、L36， 畸变信息 S3 和 S11 和 S17	L25、L31、L36	3.47
[0,0,0]	故障 L10、L16、L31	L10、L16、L31	2.14

由表 3 可知，在多点故障的情况下，采用不同位置、不同数量的 DG，FTU 信息存在不同畸变的情况下，本文方法的所有判断结果都是准确的。从故障类型分析来看，故障点越多，故障定位时间越长，畸变信息也会延长定位时间。

3) 算法对比

为了验证所提方法的优越性，将本文方法与改进的 IA 算法(未进行分层定位)和文献[31]方法进行故障定位比较。对于表 2 和表 3 中的 8 种故障情况，根据 DG 接入的 4 种情况，每种情况试验 20 次，共 640 次试验。表 4 为不同算法的试验结果对比。

表 4 不同算法试验结果

Table 4 Experimental results of different algorithms

算法	识别准确数	准确率/%	平均运行时间/s
文献[31]	622	97.19	6.82
改进 IA	640	100	8.55
本文方法	640	100	2.24

从表 4 中可以看出，本文方法在准确性和速度方面都是最优的。文献[31]的定位精度最低，执行时间位于中间。改进的 IA 算法在故障定位中准确率为 100%，但该算法主要基于 IA 算法，还通过改进粒子群对记忆库进行更新，因此算法的整体执行速度较慢。总体而言，定位速度不低于传统算法，但无法满足实际应用的需要。定位速度慢则后期的恢复和重构都会延误，造成较大的损失。而本文方法在配电网的故障定位中得到了很好的应用，平均执行时间远快于改进 IA 算法和文献[31]方法，在保证高精度的同时满足故障定位的速度要求。

4 结语

本文提出了一种将分层模型和改进免疫算法相

结合用于含 DG 的配电网故障定位方法。简化配电网模型，使用改进的免疫算法进行区域定位，再使用改进的免疫算法对指定区域进行精确定位。结果表明，在故障时，并入的 DG 数不同，信息存在畸变，该方法不仅保证了速度，而且具有较高的故障定位精度。与传统的故障定位方法相比，本文方法引入了分层理论，有效降低了故障节点的搜索维数，提高了运行速度。基于分层模型的改进 IA 在含 DG 的配电网故障定位方面仍处于试验阶段，如何恢复和重构也是研究的重点。基于此，持续改进和完善将是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] 李练兵, 孙腾达, 曾四鸣, 等. 基于多端行波时差的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 140-147.
LI Lianbing, SUN Tengda, ZENG Siming, et al. Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 140-147.
- [2] 蒋原, 李擎, 冯茜, 等. 基于 BP 神经网络的直流电网故障定位与保护方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 23-28.
JIANG Yuan, LI Qing, FENG Qian, et al. Fault location and protection method for DC power grid based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 23-28.
- [3] 杨晨曦, 马杰, 杨威, 等. 基于馈线负荷骤降度的配电网故障研判方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 144-151.
YANG Chenxi, MA Jie, YANG Wei, et al. Distribution network fault location method based on the sudden drop ratio of feeder active load[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 144-151.
- [4] 于毅, 尹丽菊, 申晋, 等. 改进整数规划的含分布式电源配电网故障定位[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 104-108, 116.
YU Yi, YIN Liju, SHEN Jin, et al. Fault location in distribution network with distributed generation based on improved integer programming[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 104-108, 116.
- [5] 刘煜, 王俊江, 焦青, 等. 基于量子行为粒子群算法的含分布式电源的配电网故障定位[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 51-55.
LIU Yu, WANG Junjiang, JIAO Qing, et al. Fault location of distribution network with distributed power supply based on quantum behavior particle swarm optimization algorithm[J]. Smart Power, 2020, 48(8): 51-55.

- [6] 王巍璋, 王淳, 尹发根. 基于可达矩阵和贝叶斯定理的含分布式电源的配电网故障区段定位[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 93-99, 124.
WANG Weizhang, WANG Chun, YIN Fagen. Reachability matrix and Bayes' theorem based fault section location of power distribution network with distributed generation[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 93-99, 124.
- [7] 徐艳春, 赵彩彩, 孙思涵, 等. 基于改进 LMD 和能量相对熵的主动配电网故障定位方法[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 133-143.
XU Yanchun, ZHAO Caicai, SUN Sihan, et al. Fault location for active distribution network based on improved LMD and energy relative entropy[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 133-143.
- [8] 梁梦可, 刘远, 韩文文, 等. 基于虚拟电流注入技术的有源配电网故障定位[J]. 浙江电力, 2019, 38(6): 9-16.
LIANG Mengke, LIU Yuan, HAN Wenwen, et al. Fault location method of active distribution networks based on virtual current injection technology[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(6): 9-16.
- [9] 侯丽钢, 汤向华, 江辉, 等. 应用于含有线-缆混合线路配电网的行波故障测距新方法[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2): 111-116.
HOU Ligang, TANG Xianghua, JIANG Hui, et al. A novel traveling wave fault location method applied to distribution networks with hybrid line composed of overhead line and cable[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 111-116.
- [10] 董曼玲, 郭磊, 丁国君, 等. 基于循环电压测量法的接地网故障定位装置设计及应用[J]. 电瓷避雷器, 2019(5): 111-117.
DONG Manling, GUO Lei, DING Guojun, et al. Design and application of the fault location device of the grounding grids based on cyclic voltage measurement method[J]. Electric Porcelain Arrester, 2019(5): 111-117.
- [11] 王巍璋, 王淳, 敖鑫. 基于果蝇优化算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 108-114.
WANG Weizhang, WANG Chun, AO Xin. Fault location of power distribution network based on fruit fly optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 108-114.
- [12] 杨莉, 周年荣, 李川, 等. 含 DG 配电网故障定位的免疫二进制萤火虫算法[J]. 化工自动化及仪表, 2021, 48(3): 253-258.
YANG Li, ZHOU Nianrong, LI Chuan, et al. IBFA for fault location of DG-included power distribution network[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2021, 48(3): 253-258.
- [13] 邱彬, 罗添元, 宁博, 等. 基于 BAS-IGA 的含分布式电源配电网故障定位[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 8-14.
QIU Bin, LUO Tianyuan, NING Bo, et al. Fault location of distribution network with distribution generations based on BAS-IGA[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2): 8-14.
- [14] 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.
ZHANG Bo, TANG Liang, LIANG Xiaowei, et al. Research on fault location of distribution network based on genetic particle swarm optimization[J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(1): 33-37.
- [15] 金涛, 李鸿南, 刘对. 基于 BPSOGA 的含风电机组的配电线路故障区段定位[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 27-33.
JIN Tao, LI Hongnan, LIU Dui. Faulty section location based on BPSOGA for distribution line with wind turbine generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 27-33.
- [16] 谭辉, 戴小剑, 田家俊, 等. 改进粒子群算法在含 DG 配电系统可靠性评估中的应用[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(1): 104-108.
TAN Hui, DAI Xiaojian, TIAN Jiajun, et al. Improved particle swarm optimization algorithm for reliability assessment of DG-containing power distribution systems[J]. Journal of Hubei University for Nationalities (Natural Sciences Edition), 2019, 37(1): 104-108.
- [17] 谢飞, 夏锐. 基于动态差分和粒子群混合算法的含分布式电源配电网重构[J]. 黑龙江电力, 2018, 40(3): 221-226.
XIE Fei, XIA Rui. Power distribution network reconfiguration with distribution network based on hybrid dynamic difference algorithm and Particle Swarm Optimization algorithm[J]. Heilongjiang Electric Power, 2018, 40(3): 221-226.
- [18] 郦阳, 王宝华. 继电保护系统故障的智能定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 69-76.
LI Yang, WANG Baohua. An intelligent fault location method for a relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 69-76.
- [19] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 基于改进小生境粒子群算法的主动配电网优化重构[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 31(3): 473-478.
ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Optimal reconfiguration of the active distribution network based on improved niche multi-objective particle

- swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 31(3): 473-478.
- [20] LI Y, XIAO J, CHEN C, et al. Service restoration model with mixed-integer second-order cone programming for distribution network with distributed generations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4138-4150.
- [21] 王进强. 含分布式电源的配电网故障定位的应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
WANG Jinqiang. Application research on fault location of distribution network with distributed generation[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.
- [22] 景皓, 贾伯岩, 李小玉, 等. 考虑节点电价机制的主动配电网两阶段动态故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 29-37.
JING Hao, JIA Boyan, LI Xiaoyu, et al. A two-stage dynamic fault recovery method for an active distribution network considering the node price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 29-37.
- [23] 雷绍兰, 王士彬, 胡晓倩, 等. 配电网供电恢复的混沌免疫算法[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1492-1496.
LEI Shaolan, WANG Shibin, HU Xiaoqian, et al. Chaotic optimization integrated with artificial immune algorithm for distribution service restoration after faults[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1492-1496.
- [24] 陈军, 隋佳闽, 赵子涵, 等. 输电线路断线故障保护逻辑分析及附加判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 103-111.
CHEN Jun, SUI Jiamin, ZHAO Zihan, et al. Protection logic analysis and additional judgment method of a transmission line break fault[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 103-111.
- [25] 刘刚, 陈莎, 全进, 等. 含分布式电源接入的配电网故障恢复方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 50-56.
LIU Gang, CHEN Sha, TONG Jin, et al. Fault restoration method for power distribution networks considering distributed generations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 50-56.
- [26] 罗春辉, 瞿纲举, 汤涛, 等. 基于双种群 CSO 算法重构的含 DG 配网故障恢复[J]. 湖北电力, 2021, 41(1): 11-17.
LUO Chunhui, QU Gangju, TANG Tao, et al. Service restoration of distribution network with DG based on dual-population CSO algorithm[J]. Hubei Electric Power, 2021, 41(1): 11-17.
- [27] TESHOME D F, LIAN K L, DAWIT F. Comprehensive mixed-integer linear programming model for distribution system reconfiguration considering DGs[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(20): 4515-4523.
- [28] 缪辉, 丁晓群, 叶晨晖, 等. 基于图论和 OBDD 的含分布式电源配电网故障恢复算法[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(9): 59-66.
MIAO Hui, DING Xiaoqun, YE Chenhui, et al. Service restoration algorithm for distribution network with distributed generation based on graph theory and OBDD[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(9): 59-66.
- [29] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 119-125.
- [30] 李哲超. 协同网络重构与需求侧响应的配电网优化运行方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
LI Zhechao. Research on optimal operation method of distribution network based on collaborative network reconfiguration and demand side response[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [31] 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): 396-405.
GAO Fengyang, LI Zhaojun, YUAN Cheng, et al. Fault location for active distribution network based on quantum computing and immune optimization algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 396-405.

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-05-23

作者简介:

李卫彬(1980—), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电网生产管理;

童欣(1992—), 女, 通信作者, 学士, 工程师, 主要研究方向为配电自动化; E-mail: tongxin9273@163.com

黄超(1981—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为配电线路管理。

(编辑 魏小丽)