

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230083

基于全网故障可观测的配电网行波定位装置优化配置方法

蒋素霞¹, 邓丰¹, 祖亚瑞², 李鑫瑜¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 国家电网石家庄供电公司, 河北 石家庄 050052)

摘要: 配电网结构复杂、分支线路众多, 利用较少的行波定位装置实现全网故障定位具有显著经济效益。基于此, 提出了一种基于全网故障可观测的行波定位装置优化配置方法。首先, 引入树形结构图, 定义配电网线路各节点间的层级关系。并根据行波传输特性, 提出了装置配置基本条件: 在目标配电网树形结构图中, 邻接节点与其父节点至少有一个节点配置装置。将该基本条件作为约束, 建立以装置数量最少化为目标函数的数学模型。模型中引入权重系数, 量化线路长度、历史故障率对装置配置需求程度的影响。最后, 使用改进灰狼算法求解模型最优解, 形成最优配置方案。仿真算例结果表明, 基于所提优化配置方法, 在满足定位精度的前提下可显著减少行波定位装置数量、降低投资成本, 故障定位误差小于 100 m。且在线路 $N-1$ 情况下具有一定的适应性, 满足实际工程需求。**关键词:** 配电网; 行波定位; 优化配置; 全网故障可观测; 改进灰狼算法

Optimal configuration method of traveling wave fault location equipment in a distribution network based on fault observability of the whole network

JIANG Suxia¹, DENG Feng¹, ZU Yarui², LI Xinyu¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. State Grid Shijiazhuang Power Supply Company, Shijiazhuang 050052, China)

Abstract: A distribution network has complex structure and numerous branch lines, and using less traveling wave fault location equipment to achieve fault location throughout the network has significant economic benefits. Based on this, a method for optimizing the configuration of traveling wave fault location equipment based on observable faults across the entire network is proposed. First, a tree structure diagram is introduced to define the hierarchical relationship between nodes in the distribution network. Then, based on the characteristics of traveling wave transmission, the basic conditions for device configuration are proposed: in the target distribution network tree structure diagram, at least one adjacent node and its parent node are configured with devices. A mathematical model is established with the objective function of minimizing the number of devices using this basic condition as a constraint. The model introduces weight coefficients to quantify the impact of line length and historical fault rate on the degree of device configuration demand. Finally, the improved grey wolf algorithm is used to find the optimal solution of the model and form the optimal configuration scheme. The simulation results show that based on the proposed optimized configuration method, the amount of traveling wave fault location equipment can be significantly reduced while meeting the positioning accuracy requirement, reducing investment costs. The fault positioning error is less than 100 m. It also has a certain adaptability in the $N-1$ case of the line, meeting practical engineering needs.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077008).

Key words: distribution network; traveling wave positioning; optimal configuration; observed fault of the whole network; improved grey wolf algorithm

0 引言

配电网是电能生产与消费的重要枢纽, 研究其

故障定位方法, 提高供电可靠性, 对于社会发展与人民生活具有重要的保障作用。行波定位方法数据窗短、响应速度快、不受故障过渡电阻与系统振荡等因素影响, 在输电网中取得了较好的应用效果^[1-4]。鉴于行波法在输电网中的表现, 相关文献对其在配电网中的应用也进行了探索^[5-7]。

随着高精度时钟同步与电力系统通信技术的推

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077008); 湖南省湖湘青年科技创新人才项目资助(2021RC3097); 湖南省自然科学基金杰出青年项目资助(2022JJ10048)

进，基于整个电网的行波定位方法得以发展并成为研究热点^[8-10]，解决了现有行波定位数据来源单一、可靠性低等难题，为行波定位提供了新思路。但其所需配置行波定位装置数量较多、投资成本高、建设周期长，成为行波定位在电网中进一步发展与应用难题。针对该问题，学者们对行波定位装置优化配置方法展开了研究。

现有方法主要针对输电网环网结构，以行波初始波头传输路径唯一性为理论依据，建立数学模型并求解^[11-14]，无需人为判断各变电站的装置配置情况^[15]。故障行波初始波头到达各行波定位装置的时间由故障点向各装置安装节点传输的最短路径决定，对于确定的故障点，该最短路径唯一。双端行波测距需要检测故障线路两端初始行波波头到达时刻，若线路任意位置故障其两端初始波头均可被检测，则该故障位置可被准确计算。因此，将网络中各线路依次设置为故障线路，对其两端节点取最小公共集，可实现行波定位装置优化配置^[11]，该思想为行波定位装置优化配置研究奠定了理论基础。基于该理论，相关文献进一步研究了解决多环网结构下测距盲区问题^[12]、保证线路 $N-1$ 运行时全网故障可观测^[13]以及考虑单、双端测距组合应用^[14]的优化配置方法。

通过建立数学模型并求解，可避免人为因素影响，然而以下因素导致输电网中的数学模型不能完全适用于配电网：1) 我国配电网多呈辐射状^[16]，分支线路众多，与输电网环网结构存在差异；2) 输电网中行波定位装置安装于各变电站内，而配电网中该装置均安装于各线路末端^[17]，对各线路两端节点取最小公共集将导致所有线路末端节点均需配置装置。行波定位装置优化配置与网络结构和行波初始波头传输路径相关，该拓扑结构与装置安装位置差异制约了以上方法在配电网中的应用。

现有针对配电网的行波定位装置优化配置方法^[18-20]，需根据所研究的配置原则，对各节点是否配置装置进行人为判断，对于复杂的配网结构，工作量庞大，不适合推广运用。在配电网中故障指示器^[21]、电能质量监测^[22]、同步相量测量^[23]等装置，均以费用或装置数量最少为目标函数，以所测量电气量可观测为约束条件，建立数学模型进行优化配置，无需人为判断，为本文提供了参考。行波由故障点向全网传播，各装置间行波波头时差蕴含故障位置信息，综合故障信息可实现全网定位^[7,20]。在全网线路末端配置装置，可靠性高，但不具备经济性。本文重点考虑如何高效利用多测点故障信息，降低装置配置冗余，消除观测盲区，研究以最少的

装置数量，实现全网定位的优化配置方案。

针对配电网辐射型拓扑结构，本文基于双端行波定位原理，提出了行波定位装置优化配置的数学模型与求解算法。该模型以装置配置数量最少化为目标函数，以全网故障可观测为约束条件，使用改进灰狼算法进行求解。通过分析不同故障位置类型，总结了装置配置基本条件，避免了对全网故障可观测约束条件的复杂建模。引入权重系数，量化了各节点对定位装置的实际需求，使配置方案更贴合实际。仿真算例验证了本文所提方法可以安装最少装置，保证全网任意线路故障可观测，故障定位误差小于 100 m，且在线路 $N-1$ 运行情况下具有一定适用性。

1 全网故障可观测

1.1 全网故障可观测定义

双端定位通过故障行波传输至线路两端行波定位装置的时差实现测距，仅需采集故障行波初始波头信息，基于多端行波信息的定位方法均以此为理论基础。若网络中任意线路故障，均可由双端定位原理确定故障点位置或确定故障所在线路，则称该网络全网故障可观测。根据行波定位装置配置情况，全网故障可观测下的线路可分为两种情形，本文分别将其定义为故障直接可观测与故障间接可观测。

1) 故障直接可观测：线路发生故障，故障点两侧均配置有行波定位装置，由双端定位原理可直接确定故障点位置。如图 1 中线路 T_1M_2 、 T_1T_2 、 T_2M_4 均为故障直接可观测。以图 1 中 f_1 处故障为例，故障行波如虚线所示路径向线路两端传播，到达检测点 M_2 、 M_4 ，安装于 M_2 、 M_4 节点的行波定位装置记录初始行波到达时间，依据双端定位原理可直接定位到故障点 f_1 。

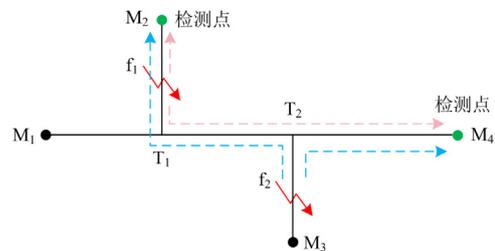


图 1 故障可观测分析

Fig. 1 Fault observable analysis

2) 故障间接可观测：线路发生故障，行波定位装置仅位于故障点同一侧，但该线路与两测点间最短路径直接连接，且再无其他分支，基于双端定位原理可确定故障线路。如图 1 中线路 T_1M_1 、 T_2M_3 。

以图中 f_2 处故障为例, 根据 M_2 、 M_4 测点信息与双端定位原理, 仅能判断为线路 T_2M_3 或节点 T_2 故障。若需确定故障点位置, 还需结合其他故障信息。

1.2 配电网树形结构图

树形结构是计算机领域中一种应用非常广泛的非线性数据结构, 是以分支关系定义的层次结构, 也是一些节点的集合, 如同一棵根朝上、叶朝下倒挂的树, 其结构如图 2 所示。

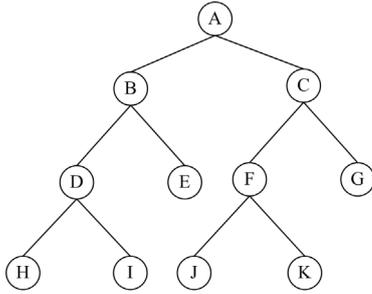


图 2 典型树形结构图

Fig. 2 Typical tree structure

在树形结构中, 其中的数据元素都称之为节点, 最上面的节点称之为根, 一棵树只有一个根且由根发展而来。节点的上层节点称之为父节点, 具有相同父亲的节点为兄弟节点, B 是 D 与 E 的父节点, D 与 E 互为兄弟节点。节点所拥有的子节点的个数称之为节点的度, 如 D 的度为 2。度为 0 的节点为树叶, 也叫终端节点或叶节点, 如节点 E; 度不为 0 的节点为分支节点, 如节点 F。辐射型配电网为典型的树枝状分支结构, 图 3 为典型辐射型配电网拓扑结构图, 可将其转化为树形结构图。

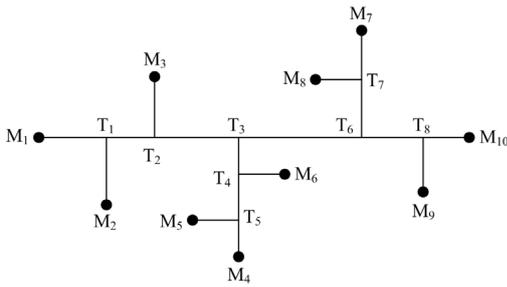


图 3 配电网拓扑图

Fig. 3 Distribution network topology

图 3 中以 M_1M_{10} 为主干线路, 线路两端点用 M_1 、 M_{10} 表示。主干线路上的分支线路 T_1M_2 、 T_2M_3 、 T_3M_4 、 T_6M_7 、 T_8M_9 分别经分支节点 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_6 、 T_8 引出, 支路 T_3M_4 分别经子分支节点 T_4 、 T_5 引出两条子分支线路 T_4M_6 、 T_5M_5 , 同样支路 T_6M_7 含有一条子分支线路 T_7M_8 , 经子分支节点 T_7 引出。

定义由主干线路引出且再无其他子分支的线路为单分支线路, 含有其他子分支则为多分支线路。如 T_1M_2 为单分支线路, T_3M_4 及其子分支统称为多分支线路。根据图 3 所示的配电网拓扑结构建立树形结构图, 如图 4 所示。

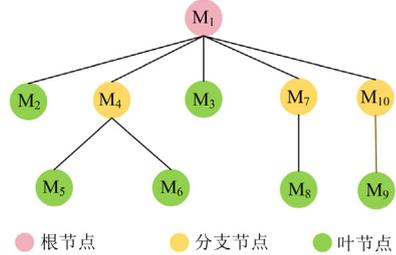


图 4 与图 3 拓扑相对应的树形结构图

Fig. 4 Tree structure corresponding to Fig.3 topology

建立规则如下: 以主干线路首端节点为根节点, 由主干线路直接引出的分支线路末端节点作为根结点的子节点, 该分支引出的子分支线路末端节点作为下一层子节点, 以此规律遍历所有线路末端节点。特殊地, 以主干线路最右侧第一个多分支线路节点为临界点, 将该临界点右侧整体视为一个分支。如图 3 中节点 T_6 右侧视为由 T_6M_{10} 引出的多分支线路。

据此原则建立的树形结构图将整个配电网转化为一棵以主干线路首端节点为根的树, 充分体现辐射型配电网各线路末端节点间的层级关系, 其表示形式可为配电网故障可观测提供分析工具。

1.3 基于树形结构图的全网故障可观测分析

根据线路故障直接与间接可观测定义, 分别分析主干线路、单分支线路、多分支线路故障可观测的装置配置情况, 结合树形结构图可总结全网故障可观测的装置配置条件。单分支线路与多分支线路定义已在 1.2 节中给出。

1) 主干线路故障。由故障直接可观测定义, 故障点两端均存在定位装置, 因此分别设置主干线路各段为故障线路, 将其两端装置可安装节点分为两个数组, 如表 1 所示。对该数组取最小公共集^[12], 即可得到实现主干线路故障直接可观测的装置配置条件。

由表 1 可知, 左右两侧节点数组最小公共集分别为 $\{M_1\}$ 、 $\{M_{10}\}$, 因此, 在集合 $\{M_1, M_{10}\}$ 中两节点安装行波定位装置, 可实现主干线路故障直接可观测, 且所需装置数量最优。

另一方面, 根据故障间接可观测定义, 将集合 $\{M_1, M_{10}\}$ 中元素分别与其他线路末端节点组合, 可分析主干线路故障间接可观测情况及装置数量。与 M_1 、 M_{10} 两节点间最短路径直连的线路为 T_1M_2 、 T_2M_3 、 T_3M_4 、 T_6M_7 、 T_8M_9 , 分别将节点 M_1 的装

置安装至此线路末端节点，则以该线路分支节点为临界点，主干线路右侧满足故障直接可观测，左侧满足故障间接可观测。

表 1 主干线路各段线路两侧节点数组

Table 1 Node array on both sides of each section of trunk line

故障线路	左侧节点数组	右侧节点数组
M_1T_1	$\{M_1\}$	$\{M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9, M_{10}\}$
T_1T_2	$\{M_1, M_2\}$	$\{M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9, M_{10}\}$
T_2T_3	$\{M_1, M_2, M_3\}$	$\{M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9, M_{10}\}$
T_3T_6	$\{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6\}$	$\{M_7, M_8, M_9, M_{10}\}$
T_6T_8	$\{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8\}$	$\{M_9, M_{10}\}$
T_8T_{10}	$\{M_1, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7, M_8, M_9\}$	$\{M_{10}\}$

举例说明，若定位装置仅配置在 M_3 、 M_{10} 两节点处，则理论上分支节点 T_2 左侧主干线路 T_2M_1 区段满足故障间接可观测，但实际拓扑图中该区段存在 T_1M_2 分支，仅靠 M_3 、 M_{10} 两处装置无法判断故障点位于线路 T_1M_2 还是线路 T_1M_1 ，导致临界点左侧成为观测盲区，如图 5 所示。此时，为保证 T_1M_1 故障仍可观测，需在 M_1 或 M_2 节点增配行波定位装置。同理，将节点 M_{10} 装置安装至与主干线路直连的各分支线路末端，使之与 M_1 组合，则临界点右侧线路满足故障间接可观测，但若该侧线路上包含其他分支，则成为观测盲区。本文致力于消除观测盲区，使所有线路均处于故障直接或间接可观测状态，保证全网故障可观测。

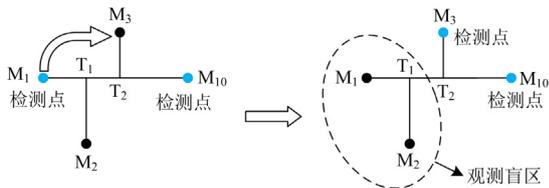


图 5 主干线路故障可观测情况

Fig. 5 Observable condition of trunk line fault

为避免观测盲区，须根据实际情况增配定位装置。各节点组合保证无观测盲区所需装置数量如表 2 所示。

由表 2 可知， $\{M_1, M_9\}$ 、 $\{M_2, M_{10}\}$ 组合无需增配装置即可保证主干线路故障可观测。若行波定位装置安装于 $\{M_2, M_9\}$ 节点，主干线路间接可观测区段上无其他分支，亦可实现其全长故障可观测。

表 2 主干线路故障可观装置数量

Table 2 Number of observable devices for main line fault

节点组合	装置数量/台	节点组合	装置数量/台
M_1, M_2	3	M_2, M_{10}	2
M_1, M_3	3	M_3, M_{10}	3
M_1, M_4	3	M_4, M_{10}	3
M_1, M_7	3	M_7, M_{10}	3
M_1, M_9	2	M_9, M_{10}	3

综上所述，主干线路故障可观测的配置集合可为 $\{M_1, M_{10}\}$ 、 $\{M_1, M_9\}$ 、 $\{M_2, M_{10}\}$ 、 $\{M_2, M_9\}$ ，即集合 $\{M_1, M_2\}$ 与 $\{M_9, M_{10}\}$ 中任意节点两两组合均可实现主干线路故障可观测。

2) 单分支线路故障。单分支线路与主干线路直连，且再无其他分支，依靠实现主干线路故障可观测的定位装置可确保其故障间接可观测，因此该类分支线路末端无须增配装置。

3) 多分支线路故障。假设主干线路故障可观测的装置配置集合为 $\{M_1, M_{10}\}$ ，将多分支线路各末端节点依次与 M_1 、 M_{10} 组合，与主干线路故障可观测同理，分析无观测盲区时的装置配置情况。

为保证由 T_3M_4 引出的多分支线路故障可观测所需装置数量，其中 $\{M_1, M_4\}$ 、 $\{M_1, M_5\}$ 、 $\{M_4, M_{10}\}$ 、 $\{M_5, M_{10}\}$ 所需配置装置数量最优，因此集合 $\{M_4, M_5\}$ 与 $\{M_1, M_{10}\}$ 中任意节点两两组合可实现由 T_3M_4 引出的多分支线路故障可观测，如表 3 所示。同理分析可得，由 T_6M_7 引出的多分支线路故障可观测的装置配置条件为：集合 $\{M_7, M_8\}$ 、 $\{M_1, M_{10}\}$ 中节点两两组合。主干线路故障可观测装置配置集合为其他组合时所得结果相同，限于篇幅不再赘述。

表 3 多分支线路故障可观装置数量

Table 3 Number of observable devices for multi branch line faults

节点组合	装置数量/台	节点组合	装置数量/台
M_1, M_4	2	M_4, M_{10}	2
M_1, M_5	2	M_5, M_{10}	2
M_1, M_6	3	M_6, M_{10}	3

综合以上分析，图 3 所示辐射型配电网全网故障可观测的基本条件为集合 $\{M_1, M_2\}$ 、 $\{M_9, M_{10}\}$ 、 $\{M_4, M_5\}$ 、 $\{M_7, M_8\}$ 中均至少选一节点配置行波定位装置。结合上述分析过程，探究以上 4 个集合中的元素在树形结构图中的特点，可总结配置规律，使全网故障可观测分析更简明。

在图 4 所示的树形结构图中，全网故障可观测配置集合中的 M_1 、 M_4 、 M_7 、 M_{10} 分别为 M_2 、 M_5 、

M_8 、 M_9 的父节点, 即集中的两元素均为父子关系。且 M_2 、 M_5 、 M_8 、 M_9 均为叶节点, 即子节点均为叶节点。除根节点外, 集中中各父节点的所有子节点均为叶节点。配置集中的叶节点在拓扑结构图中均与其父节点相邻, 其余叶节点均无此特征。定义在拓扑结构图中与其父节点相邻的叶节点为邻接节点。

因此, 全网故障可观测的配置集合为树形结构图中叶节点与其父节点的组合, 其中叶节点与其父节点均具有以下特征: 1) 除根节点外, 父节点的子节点均为叶节点; 2) 与父节点组合的叶节点均为邻接节点。

为便于表示, 本文以状态变量 x_i 表示节点 i 的装置配置情况, 其中 x_i 为 1 表示节点 i 需安装行波定位装置, x_i 为 0 表示该节点无需安装行波定位装置。在集中中至少选一元素作为行波定位装置安装节点, 各元素之和将大于等于 1, 则全网故障可观测基本条件的数学描述可统一为

$$x_{\text{邻接节点}} + x_{\text{该邻接节点的父节点}} \geq 1 \quad (1)$$

式(1)表示基于树形结构图总结的全网故障可观测约束条件。辐射型配电网均由主干线路、单分支线路与多分支线路构成, 因此以上结论可适用并简化该约束条件分析过程。

2 行波定位装置优化配置数学模型

2.1 数学模型构建

行波定位装置最优配置为以最少的装置安装数量实现全网故障可观测。对于一个具有 N 个顶点、 M 条边的网络, 其行波定位装置优化配置问题可抽象为 0-1 数学规划模型。

$$f(x) = \min \sum_{i=1}^N x_i, i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$x_{\text{叶节点}} + x_{\text{该叶节点的父节点}} \geq 1 \quad (3)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$L_j = 1, j=1, 2, \dots, M \quad (5)$$

式(2)表示以全网行波定位装置安装总数最少化为目标的目标函数。式(3)为基于目标配电网树形结构图的全网故障可观测约束条件。式(4)表示目标函数与约束条件中 x_i 的取值, $x_i = 1$ 表示节点 i 需安装行波定位装置, $x_i = 0$ 表示节点 i 无需安装行波定位装置。式(5)中 $L_j = 1$ 表示线路 j 故障可观测。

2.2 考虑各节点实际安装需求程度

2.2.1 已配置装置节点约束

在实际工程中不会拆除已安装的行波定位装置, 若在进行全网行波定位装置优化配置前已有节

点安装该装置, 则优化结果需保持优化前已装设节点安装状态, 因此须在 2.1 节数学模型中附加如式(6)所示的等式约束。

$$x_p = 1, x_p \in S_{\text{placed}} \quad (6)$$

式中, S_{placed} 为优化配置前已安装行波定位装置的节点集合。

2.2.2 线路长度权重

考虑各线路末端节点所连接线路长度不同, 导致故障行波衰减程度存在差异, 本文针对网络线路长度进行权重计算, 量化线路长度对各节点装置配置需求程度的影响, 如式(7)所示。

$$L_i = \frac{l_i^2}{l'^2} \quad (7)$$

式中: L_i 为线路长度权重; l_i 为节点 i 到主干线路中点的最短路径长度; l' 为各线路末端节点到主干线路中点的平均距离。

2.2.3 线路历史故障频率权重

为保证供电可靠性, 对于历史故障率较高的线路应及时确定故障点位置, 在最短时间内消除故障恢复供电, 因此该类线路对安装行波定位装置有着更高的需求。在实际优化配置中, 可通过整理目标配电网各线路历史故障率, 得到网络中各条线路历史故障频率权重 f_i 。本文使用 Matlab 生成线路模拟历史故障频率数组, 利用该数组计算各线路末端节点对应线路的历史故障率。

2.2.4 目标函数权重

各节点对应线路历史故障频率、长度不同致使其对于行波定位装置的实际装设需求程度具有差异, 该差异可通过在目标函数中引入权重系数进行体现, 综合线路长度权重与历史故障频率权重得到节点权重系数 w_i , 如式(8)所示。

$$w_i = C \left(\frac{1}{f_i} + L_i \right) \quad (8)$$

式中, C 为权重系数调整因子, 使 w_i 在 [0,1] 内取值。

$$f(x) = \min \sum_{i=1}^N w_i x_i, i=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

式(9)为引入权重系数后的目标函数, w_i 表示各节点行波定位装置安装需求程度, 其取值越小, 需求程度越高, 则在模型求解过程中更倾向于在该节点配置行波定位装置。

3 灰狼算法及其改进

3.1 灰狼算法原理

澳大利亚学者 Seyedali Mirjalili 于 2014 年提出灰狼优化算法(grey wolf optimization, GWO), 该算

法模拟自然界中灰狼等级制度与狩猎行为, 具有总体结构简单、收敛速度快、易于编程、搜索效率高等优点, 在配电网优化配置中已取得了良好的应用效果^[24]。

灰狼群服从金字塔形等级制度, 下级灰狼服从并执行上级灰狼决策, 狼群中适应度值排名前3的个体依次记为 α 、 β 和 δ 狼, 引导搜索目标, 其余个体均记为 ω 狼, 跟随其向猎物位置(最优解)逼近。优化过程包括包围、追捕、攻击3个阶段, 灰狼在猎守过程中, 利用以下位置更新公式包围猎物。

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}_p(t) - \mathbf{AD} \quad (10)$$

$$D = |\mathbf{CX}_p(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (11)$$

$$\mathbf{C} = 2r_1 \quad (12)$$

$$\mathbf{A} = 2ar_2 - a \quad (13)$$

$$a = 2\left(1 - \frac{t}{T_{\max}}\right) \quad (14)$$

式中: \mathbf{X} 表示灰狼个体位置; \mathbf{X}_p 表示猎物位置; D 为灰狼个体与猎物之间的距离; \mathbf{C} 和 \mathbf{A} 为协同系数; r_1 、 r_2 为[0,1]之间的随机数; a 为收敛因子, 随着迭代次数增加从2至0线性衰减; t 为当前迭代次数; T_{\max} 为最大迭代次数。

当灰狼确定猎物位置时, α 、 β 、 δ 狼是与目标猎物距离最近的三头狼, 利用其位置更新所有灰狼位置对猎物实施追捕。

$$D_\alpha = |C_1 X_\alpha(t) - X(t)| \quad (15)$$

$$D_\beta = |C_2 X_\beta(t) - X(t)| \quad (16)$$

$$D_\delta = |C_3 X_\delta(t) - X(t)| \quad (17)$$

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_\alpha - \mathbf{A}_1 D_\alpha \quad (18)$$

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_\beta - \mathbf{A}_2 D_\beta \quad (19)$$

$$\mathbf{X}_3 = \mathbf{X}_\delta - \mathbf{A}_3 D_\delta \quad (20)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = (\mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \mathbf{X}_3)/3 \quad (21)$$

式(15)一式(20)表示狼群中 ω 狼与 α 、 β 、 δ 狼之间的距离, 式(21)表示更新后 ω 狼的具体位置。其中中: D_α 、 D_β 、 D_δ 分别为 α 、 β 、 δ 狼与该 ω 狼之间的距离; \mathbf{X}_α 、 \mathbf{X}_β 、 \mathbf{X}_δ 分别代表 α 、 β 、 δ 狼当前位置; \mathbf{X} 为该 ω 狼个体位置; \mathbf{A}_1 、 \mathbf{A}_2 、 \mathbf{A}_3 、 \mathbf{C}_1 、 \mathbf{C}_2 、 \mathbf{C}_3 为随机向量; \mathbf{X}_1 、 \mathbf{X}_2 、 \mathbf{X}_3 为 ω 狼向 α 、 β 、 δ 狼前进的步长。

3.2 二进制离散化

在行波定位装置优化配置数学模型中, 行波定位装置安装状态变量仅存在0或1两种取值, 因此需将连续的灰狼位置进行二进制离散化。本文采用

sigmoid函数对灰狼位置进行更新, 使其取值仅在0、1之间变化。

$$s(\mathbf{X}) = \frac{1}{1 + e^{-10\left(\frac{X_1+X_2+X_3}{3} - 0.5\right)}} \quad (22)$$

$$x = \begin{cases} 1 & s(\mathbf{X}) > \text{rand} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $s(\mathbf{X})$ 为转换函数; rand 为[0,1]之间的随机数; x 为灰狼个体各元素的取值。

3.3 收敛因子调整

在基础灰狼算法中, 收敛因子 a 随着迭代次数增加从2至0线性衰减, 不能有效均衡算法的全局和局部搜索能力, 本文根据文献[25]使用如式(24)所示指数函数调整 a 在迭代过程中的衰减过程。

$$\alpha = 2\left(1 - \frac{t^2}{T_{\max}^2}\right) \quad (24)$$

收敛因子改进前后对比如图6所示。

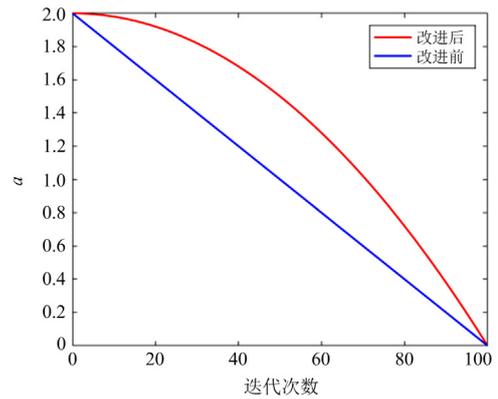


图6 收敛因子变化图

Fig. 6 Convergence factor change diagram

改进后的收敛因子在迭代前期变化速率较慢, 可扩大搜索范围, 避免过早陷入局部最优, 增强算法的全局寻优能力, 后期变化速率较快, 可加快算法的收敛速度, 该非线性收敛策略有利于平衡算法的局部与全局搜索能力。

4 行波定位装置优化配置方案

对于所构建优化配置数学模型中的约束条件, 本文利用非固定多段映射罚函数^[26]对其进行处理, 将模型中的约束优化问题转化为一个无约束的广义目标函数 $F(x)$, 其形式如式(25)所示。

$$F(x) = f(x) + \delta(t)H(x) \quad (25)$$

式中: $f(x)$ 为模型中的目标函数; $\delta(t)H(x)$ 为惩罚项; $\delta(t)$ 随迭代次数不断变化。该罚函数可根据约束违法程度自适应选取不同惩罚力度, 避免采用精

确罚函数时出现惩罚因子难以选取的难题。然后, 使用改进灰狼算法对该广义目标函数进行智能寻优, 从而得到问题的最优解。基于全网故障可观测的行波定位装置优化配置流程如图 7 所示。

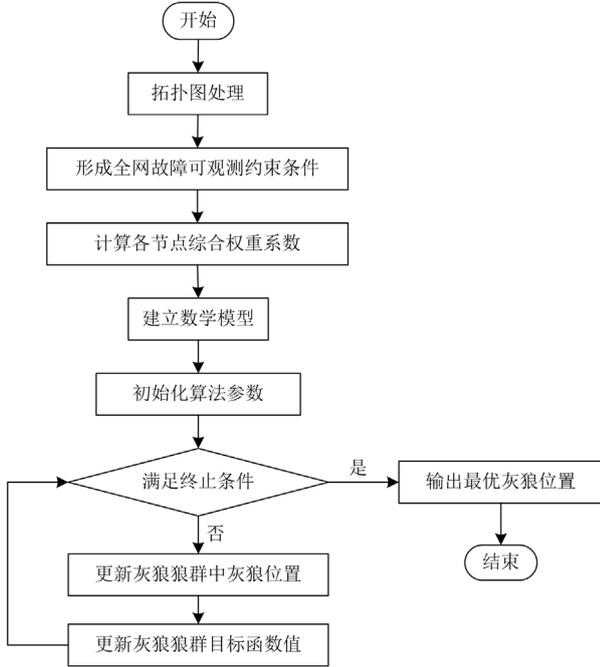


图 7 优化配置流程图

Fig. 7 Flow chart of optimized configuration

具体实施步骤如下:

- 1) 将电力网络抽象为图, 对各节点进行编号;
- 2) 根据树形结构图建立规则, 将拓扑网络转化为树形结构图, 基于式(1)建立全网故障可观测约束条件;
- 3) 根据各线路长度与式(7)计算线路长度权重, 使用随机数组模拟各线路历史故障概率, 由式(8)计算各节点综合权重系数;
- 4) 以行波定位装置配置数量最少为目标函数, 结合约束条件构建优化配置数学模型;
- 5) 使用非固定多段映射罚函数将模型中带约束的目标函数转化为无约束广义目标函数;
- 6) 初始化算法参数, 生成初始种群, 读入广义目标函数进行寻优求解;
- 7) 当达到算法终止条件时, 输出最终配置结果。

5 仿真算例

5.1 行波定位装置优化配置

本文以某地区实际 10 kV 复杂配电网为例, 对其进行行波定位装置优化配置。

- 1) 简化目标配电网, 建立拓扑结构图, 对各节

点进行编号, 如图 8 所示, 图中数字为线路长度, 单位为 km。

2) 根据树形结构图建立规则, 构造图 8 拓扑结构对应树形结构图, 确定各叶节点、邻接节点及其父节点, 如图 9 所示。

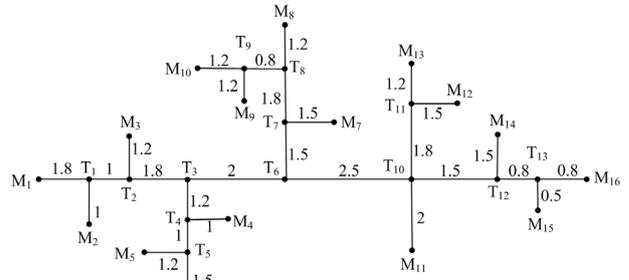


图 8 10 kV 配电网拓扑图

Fig. 8 10 kV distribution network topology

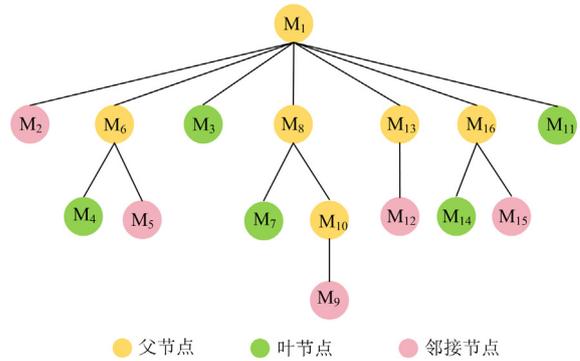


图 9 复杂配电网树形结构图

Fig. 9 Tree structure of complex distribution network

基于该树形结构图, 根据式(1)得到实现全网故障可观测的约束条件, 如式(26)所示。

$$\begin{cases} x_1 + x_2 \geq 1 \\ x_5 + x_6 \geq 1 \\ x_9 + x_{10} \geq 1 \\ x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ x_{15} + x_{16} \geq 1 \end{cases} \quad (26)$$

3) 根据式(7)与线路长度参数计算图 8 中各线路长度权重。

4) 使用 Matlab 中的 rand 函数产生一个与网络中线路数量相匹配的随机数组, 模拟该系统线路历史故障频率, 如表 4 所示。

5) 综合线路故障概率权重系数与线路长度权重系数, 通过式(11)得到各线路末端节点权重系数, 如表 5 所示。

- 6) 考虑在进行优化配置前, M_1 、 M_{16} 已安装行

波定位装置，基于以上步骤建立的数学模型如式(27)所示。

表 4 各线路历史故障率

Table 4 Historical failure rate of each line

线路	故障率	线路	故障率	线路	故障率
M ₁ T ₁	0.79	T ₁ T ₂	0.65	M ₂ T ₁	0.60
M ₃ T ₂	0.18	T ₂ T ₃	0.40	T ₃ T ₄	0.04
M ₄ T ₄	0.26	T ₄ T ₅	0.40	M ₅ T ₅	0.69
M ₆ T ₅	0.48	T ₃ T ₆	0.35	T ₆ T ₇	0.54
M ₇ T ₇	0.59	T ₇ T ₈	0.67	M ₈ T ₈	0.49
T ₈ T ₉	0.11	M ₉ T ₉	0.42	M ₁₀ T ₉	0.62
T ₆ T ₁₀	0.14	M ₁₁ T ₁₀	0.33	T ₁₀ T ₁₁	0.46
M ₁₂ T ₁₁	0.21	M ₁₃ T ₁₁	0.26	T ₁₀ T ₁₂	0.30
M ₁₄ T ₁₂	0.20	T ₁₂ T ₁₃	0.51	M ₁₅ T ₁₃	0.45
M ₁₆ T ₁₃	0.64	—	—	—	—

表 5 各线路末端节点权重 w_i

Table 5 Weights of terminal nodes of each line w_i

节点	权重	节点	权重	节点	权重
M ₁	0.23	M ₇	0.20	M ₁₃	0.48
M ₂	0.24	M ₈	0.27	M ₁₄	0.59
M ₃	0.61	M ₉	0.33	M ₁₅	0.31
M ₄	0.42	M ₁₀	0.25	M ₁₆	0.26
M ₅	0.20	M ₁₁	0.37	—	—
M ₆	0.28	M ₁₂	0.58	—	—

$$\begin{cases} \min \sum w_i x_i, & i = 1, 2, \dots, 16 \\ x_i \in \{0, 1\}, & i = 1, 2, \dots, 16 \\ x_1 = 1, & x_{16} = 1 \\ L_j = 1, & j = 1, 2, \dots, 28 \end{cases} \quad (27)$$

7) 设置算法参数，生成初始灰狼种群，进行迭代求解。

8) 输出优化配置结果：1000100001001001，该结果中取值为 1 的 5 个节点即为行波定位装置配置节点，即需要配置的节点为 M₁、M₅、M₁₀、M₁₃、M₁₆。由于 M₁、M₁₆ 节点已配置行波定位装置，因此需要新增配置节点为 M₅、M₁₀、M₁₃。

由优化配置结果可知，实现全网故障可观测所需安装行波定位装置数量为 5 台，无须配置定位装置的终端节点数量减少了 69%，大大缩减了投资成本。基于该方案的线路故障可观测情况如表 6 所示，

表 6 线路故障可观测情况

Table 6 Observable situation of line faults

故障直接可观测线路	故障间接可观测线路
T ₁ M ₁ 、T ₁ T ₂ 、T ₂ T ₃ 、T ₃ T ₄ 、T ₄ T ₅ 、 T ₅ M ₅ 、T ₃ T ₆ 、T ₆ T ₇ 、T ₇ T ₈ 、T ₈ T ₉ 、 T ₉ M ₁₀ 、T ₆ T ₁₀ 、T ₁₀ T ₁₁ 、T ₁₁ M ₁₃ 、 T ₁₀ T ₁₂ 、T ₁₂ T ₁₃ 、T ₁₃ M ₁₆	T ₁ M ₂ 、T ₂ M ₃ 、T ₄ M ₄ 、T ₅ M ₆ 、 T ₇ M ₇ 、T ₈ M ₈ 、T ₉ M ₉ 、 T ₁₀ M ₁₁ 、T ₁₁ M ₁₂ 、T ₁₂ M ₁₄ 、 T ₁₃ M ₁₅

其中故障直接可观测线路占全网线路总长的 62%，故障间接可观测线路占比为 38%，由此可见该方案可对全网 62% 的线路故障直接定位。

5.2 定位计算

利用 PSCAD/EMTDC 软件搭建以图 8 所示配电网为基础的仿真模型。根据优化配置方案，在 M₁、M₅、M₁₀、M₁₃、M₁₆ 共 5 个节点配置行波定位装置。假设故障间接可观测线路 T₈M₈ 距 M₈ 节点 600 m 处发生单相接地故障，5 个行波定位装置检测到故障行波信号，故障行波线模分量到达各装置时间如表 7 所示。

表 7 线模分量到达时间

Table 7 Arrival time of linear mode component

检测端	时间/μs	检测端	时间/μs
M ₁	35.5	M ₅	31.5
M ₁₀	9	M ₁₃	31.75
M ₁₆	32.25	—	—

使用文献[20]所述方法对优化配置结果进行故障定位计算，验证优化配置结果的可靠性。根据文献[20]中公式与各线路长度得到故障前的固有距离矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} M_1 & M_5 & M_{10} & M_{13} & M_{16} \\ 0 & -5.6 & -7.9 & -6.1 & -10.6 \\ -4.4 & 0 & -6.7 & -4.9 & -9.4 \\ -8.3 & -8.3 & 0 & -4.8 & -9.3 \\ -8.5 & -8.5 & -6.8 & 0 & -4.5 \\ -8.6 & -8.6 & -6.9 & -0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

由双端定位公式与故障行波线模分量到达各装置时间，计算得到故障距离矩阵 d 为

$$d = \begin{bmatrix} 0 & -1.192 & -7.900 & -1.118 & -0.968 \\ 1.192 & 0 & -6.708 & 0.074 & 0.224 \\ 7.900 & 6.708 & 0 & 6.782 & 6.930 \\ 1.118 & -0.074 & -6.782 & 0 & 0.150 \\ 0.968 & -0.224 & -6.930 & -0.150 & 0 \end{bmatrix}$$

计算故障距离矩阵 d 与固有距离矩阵 L 的差值，得到分支判定矩阵 δ，并根据文献[20]中原则进行修正，得到修正后的分支判定矩阵为

$$\delta' = \begin{bmatrix} 0 & 4.408 & 0 & 4.982 & 9.632 \\ 5.592 & 0 & 0 & 4.974 & 9.624 \\ 16.200 & 15.008 & 0 & 11.582 & 16.23 \\ 9.618 & 8.426 & 0 & 0 & 4.560 \\ 9.568 & 8.376 & 0 & -0.050 & 0 \end{bmatrix}$$

由于修正后的分支判定矩阵中 M₁₀ 所对应列元素为 0，根据文献[20]中的原则初步判定故障发生在

M_{10} 所在支路的参考节点 T_8 。鉴于存在文献[20]中定义的非有效支路节点, 为进一步确定故障点具体位置, 需要计算端点 M_5 与 M_{10} 之间所有支路的分支系数值 W , 如表 8 所示。

表 8 各支路的分支系数值 W

检测端	分支线路	W/km
M_5, M_{10}	T_4M_4	13.008
M_5, M_{10}	T_5M_5	17.408
M_5, M_{10}	T_3M_6	15.008
M_5, M_{10}	T_7M_7	9.808
M_5, M_{10}	T_8M_8	0
M_5, M_{10}	T_9M_9	15.008
M_5, M_{10}	T_8M_{10}	3.992

由表 8 可知, T_8M_8 支路的 W 值最小且为 0, 根据判定原则判定故障发生在 T_8M_8 支路。根据式(28)可计算故障点与 M_5 节点的距离 d_{M5F} 。

$$d_{M5F} = \left| \frac{(t_{M5F1} - t_{M5F0})(t_{M5F1} - t_{MnF1})}{(t_{M5F0} - t_{MnF0}) - (t_{M5F1} - t_{MnF1})} v_{M5F1} \right| \quad (28)$$

式中: v_{M5F1} 为故障行波线模分量传输速度, 本文取 $2.9812 \times 10^5 \text{ km/s}$; t_{M5F0} 、 t_{M5F1} 分别为故障行波零模、线模分量传输至 M_5 节点的时间; t_{MnF0} 、 t_{MnF1} 分别为故障行波零模、线模分量传输至 M_n 的时间, 本算例中 M_n 为 M_{10} 。

据此计算得到故障点与节点 M_5 的距离为

$$d_{M5F} = \left| \frac{(31.5 - 38.2)(31.5 - 9)}{(38.2 - 10.9) - (31.5 - 9)} \times 2.9812 \right| = 9.363 \text{ km}$$

换算为距 M_8 节点的距离为

$$d_{M8F} = L_{M5M8} - d_{M5F} = 0.537 \text{ km}$$

故障点距离 M_8 节点 537 m, 实际故障距离为 600 m, 定位误差为 63 m, 在工程允许范围之内, 由此可见 T_8M_8 支路故障能够被准确定位。

表 3 中各故障间接可观测线路与 T_8M_8 支路具有相同特征, 均可由该定位方法中的分支系数确定故障分支, 再通过式(28)实现故障定位, 不受所在区段位置制约。因此本文优化配置方法中的故障间接可观测线路亦可被准确定位, 不存在测距盲区。

5.3 线路 $N-1$ 适应性分析

网络中某条线路可能由于故障、检修等因素退出运行, 致使网络拓扑结构改变。故障行波无法沿该退出运行线路进行传播, 此时根据原有拓扑结构得到的装置配置方案可能无法保证全网故障可观测。

对于本算例中的配置结果, 间接可观测线路末

端未安装行波定位装置, 当其退出运行时, 不改变装置数量及故障行波传输路径, 则不影响全网故障可观测状态。因此本文所提方法对间接可观测线路 $N-1$ 运行具有一定适应性。

直接可观测线路中某段线路退出运行, 将导致故障观测盲区。本文以可测区段长度与系统线路总长度之比作为故障可测度^[13], 计算各直接可观测线路退出运行时的系统可测度, 如表 9 所示。

表 9 直接可观测线路 $N-1$ 运行系统可测度

$N-1$ 线路	不可测线路长度/km	可测度/%	$N-1$ 线路	不可测线路长度/km	可测度/%
T_1M_1	3.2	91.6	T_1T_2	2.8	92.6
T_2T_3	3.8	90.0	T_3T_4	4.7	87.6
T_4T_5	2.7	92.9	T_5M_5	3.5	90.8
T_3T_6	0	100	T_6T_7	7.7	80.7
T_7T_8	4.4	88.4	T_8T_9	6.9	81.8
T_9M_{10}	6.5	82.9	T_6T_{10}	0	100
$T_{10}T_{11}$	2.7	92.9	$T_{11}M_{13}$	0	100
$T_{10}T_{12}$	3.6	90.5	$T_{12}T_{13}$	1.3	96.5
$T_{13}M_{16}$	3.6	90.5	—	—	—

表 9 结果显示, 故障直接可观测线路 $N-1$ 运行时, 系统可测度不低于 80%, 且系统可测度为 90% 以上占比较高, 甚至部分线路退出运行不影响全网故障可观测。在投资预算充裕的情况下, 可适当增加装置数量, 以确保任意线路 $N-1$ 运行时全网故障可观测, 进一步提高供电可靠性。

5.4 装置 $N-1$ 分析

行波定位装置在实际运行过程中可能发生故障, 由于本方案已为保证全网故障可观测前提下的配置数量最少, 若某台装置故障, 将会出现观测盲区, 该观测盲区将导致故障装置所连接线路及其子分支故障不可观测。此时为保证全网故障仍可观测需增配行波定位装置, 增配原则为在全网故障可观测约束条件下, 与该故障装置属于同一不等式的节点配置装置。如图 8 中, 若 M_{13} 节点装置故障, 则线路 $T_{10}T_{11}$ 、 $T_{11}T_{13}$ 、 $T_{11}M_{12}$ 将成为观测盲区, 在 M_{12} 节点处增配装置, 可保证 M_{13} 节点装置故障时, 此处线路故障仍可被观测。增配装置将增加投资成本, 可靠性与经济性的取舍与权衡需根据实际情况决定。

6 结论

针对配电网行波定位装置优化配置问题, 本文

提出了基于全网故障可观测的优化配置方法, 通过理论分析与仿真算例, 可得到以下结论:

1) 依据故障直接与间接可观测定义, 对主干线路、单分支线路、多分支线路故障进行理论分析, 基于树形结构图提出了全网故障可观测分析方法, 总结了装置配置的基本条件: 目标配电网树形结构图中邻接节点与其父节点至少有一个节点配置装置, 该结论有助于构造优化配置数学模型中的约束条件。

2) 将优化配置问题转化为数学规划问题, 建立了以系统装置数量最少化为目标函数的数学模型, 同时模型中考虑了节点既有装置配置情况、线路长度、历史故障率等因素, 体现各节点的装置配置需求差异, 使用改进灰狼算法迭代寻优, 提高配置结果的可靠性。

3) 仿真算例表明, 本文所提方法可保证复杂配电网全网故障可观测, 且所需装置数量最少, 能够对全网任意故障点进行定位, 定位误差小于 100 m, 可在一定程度上适应线路 $N-1$ 运行, 具有实用性, 同时提出了特殊情况下的增配方案, 有望促进行波定位方法在配电网中的进一步发展与应用。

参考文献

- [1] 梁睿, 王全金, 孔令昌, 等. 考虑行波波速衰减及波头时间误差的复杂输电网故障精准定位[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4512-4524.
LIANG Rui, WANG Quanjin, KONG Lingchang, et al. Precise location of complex power grid faults considering velocity attenuation and time error of traveling waves[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4512-4524.
- [2] 高淑萍, 徐振曦, 宋国兵, 等. 基于小波阈值去噪和 CEEMD 的混合三端直流输电线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 29-40.
GAO Shuping, XU Zhenxi, SONG Guobing, et al. Fault location of hybrid three-terminal HVDC transmission lines based on wavelet threshold denoising and CEEMD[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 29-40.
- [3] 邓丰, 祖亚瑞, 黄懿菲, 等. 基于行波全波形主频分量的单端定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2156-2168.
DENG Feng, ZU Yarui, HUANG Yifei, et al. Research on single-ended fault location method based on the dominant frequency component of traveling wave full-waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2156-2168.
- [4] 白浩, 钟振鑫, 李巍, 等. 基于 CEEMD 和 NTEO 的故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 50-59.
BAI Hao, ZHONG Zhenxin, LI Wei, et al. A fault traveling wave location method based on CEEMD and NTEO[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 50-59.
- [5] 刘晓琴, 王大志, 江雪晨, 等. 利用行波到达时差关系的配电网故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4109-4115, 4290.
LIU Xiaoqin, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. Fault location algorithm for distribution power network based on relationship in time difference of arrival of traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4109-4115, 4290.
- [6] 杨欢红, 朱子叶, 黄文焘, 等. 基于直接时间反转法的直流配电网故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 66-75.
YANG Huanhong, ZHU Ziye, HUANG Wentao, et al. Fault location of a DC distribution network based on a direct time reversal method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 66-75.
- [7] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
- [8] LEE H, MOUSA A M. GPS travelling wave fault locator systems: investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1214-1223.
- [9] 曾祥君, 陈楠, 李泽文, 等. 基于网络的故障行波定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 48-53.
ZENG Xiangjun, CHEN Nan, LI Zewen, et al. Network-based algorithm for fault location with traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 48-53.
- [10] 夏翊翔, 李泽文, 雷柳, 等. 基于动态虚拟故障的行波网络定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4868-4878.
XIA Yixiang, LI Zewen, LEI Liu, et al. A new method of traveling wave network location based on dynamic virtual fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4868-4878.
- [11] 邓丰, 陈楠, 曾祥君, 等. 基于图论的电网故障行波定位装置最优配置算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 87-92.
DENG Feng, CHEN Nan, ZENG Xiangjun, et al. An optimal configuration algorithm for traveling wave fault location equipments in power grid based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 87-92.
- [12] 梁睿, 徐成, 王飞, 等. 复杂输电网中基于全网行波信息的测距装置最优配置[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 30-38.
LIANG Rui, XU Cheng, WANG Fei, et al. Optimal deployment of fault location devices based on wide area

- travelling wave information in complex power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 30-38.
- [13] 李振兴, 程宜兴, 吴李群, 等. 基于初始波头广域传输路径的行波定位单元优化配置[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 60-66.
LI Zhenxing, CHENG Yixing, WU Liqun, et al. Optimal placement of traveling wave fault location equipment based on wide area transmission path of initial wave head[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 60-66.
- [14] 张广斌, 束洪春, 于继来. 220 kV 电网电流行波测距装置的优化布点方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6246-6253.
ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai. Optimal placement of traveling wave current fault location devices in 220 kV power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6246-6253.
- [15] 李泽文, 姚建刚, 曾祥君, 等. 电网行波故障定位装置的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 64-68.
LI Zewen, YAO Jiangang, ZENG Xiangjun, et al. Optimal placement of traveling wave fault location equipment for power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 64-68.
- [16] 王颖, 许寅, 和敬涵, 等. 基于断线解环思想的配电网辐射状拓扑约束建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2395-2404.
WANG Ying, XU Yin, HE Jinghan, et al. Radiality constraint modelling method in distribution network based on cutting-line and opening-loop idea[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2395-2404.
- [17] 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.
- [18] 王浩宇, 谭阳红, 张海霞, 等. 配电网行波定位优化配置新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 22-28.
WANG Haoyu, TAN Yanghong, ZHANG Haixia, et al. A new method for optimal configuration of traveling wave location in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 22-28.
- [19] 邓丰, 徐帆, 冯思旭, 等. 基于行波全波形能量分布特征的高阻接地故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8177-8190.
DENG Feng, XU Fan, FENG Sixu, et al. Research on high impedance fault detection method based on energy distribution characteristics of traveling wave full waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8177-8190.
- [20] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于距离矩阵与分支系数的配电网故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2180-2191, 2397.
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault location method for distribution networks based on distance matrix and branch coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2180-2191, 2397.
- [21] 蔡超, 丁建忠, 吕峰, 等. 基于整数线性规划模型的配电网故障指示器优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 172-180.
CAI Chao, DING Jianzhong, LÜ Feng, et al. Optimal placement of fault indicators based on integer linear programming model in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 172-180.
- [22] 周超, 田立军. 基于粒子群优化算法的电压暂降监测点优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 181-187.
ZHOU Chao, TIAN Lijun. An optimum allocation method of voltage sag monitoring nodes based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 181-187.
- [23] 曹鹏, 刘敏. 基于改进的整数规划法结合零注入节点的PMU优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 143-150.
CAO Peng, LIU Min. PMU placement method based on improved integer programming method combined with zero injection buses[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 143-150.
- [24] 赵超, 王斌, 孙志新, 等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1): 256-262.
ZHAO Chao, WANG Bin, SUN Zhixin, et al. Optimal configuration optimization of islanded microgrid using improved grey wolf optimizer algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(1): 256-262.
- [25] MITTAL N, SINGH U, SOHI B S. Modified grey wolf optimizer for global engineering optimization[J]. Applied Computational Intelligence and Soft Computing, 2016(4598): 1-16.
- [26] 龙文, 赵东泉, 徐松金. 求解约束优化问题的改进灰狼优化算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(9): 2590-2595.
LONG Wen, ZHAO Dongquan, XU Songjin. Improved grey wolf optimization algorithm for constrained optimization problem[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(9): 2590-2595.

收稿日期: 2023-01-20; 修回日期: 2023-06-19

作者简介:

蒋素霞(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 3040883911@qq.com

邓丰(1983—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统微机保护、故障定位。E-mail: df_csust@126.com

(编辑 魏小丽)