



研究与开发

基于 Dijkstra 算法的电力光通信网络智能运维设备脱网故障区段定位方法

张海龙, 李博, 贾娜娟

(国网甘肃省电力公司平凉供电公司, 甘肃 平凉 744000)

摘要: 智能运维设备发生脱网故障后, 往往难以定位, 为实现脱网故障区段与故障电流分布间映射关系的确定、寻找脱网故障区段与故障电流分布间映射关系的最短路径, 设计一种基于 Dijkstra 算法的电力光通信网络智能运维设备脱网故障区段定位方法。选择数据驱动方法中的 LightGBM 算法, 通过大量样本确定离网故障区段与故障电流分布之间的映射关系。基于 Dijkstra 算法寻找映射关系的最短路径, 实施脱网故障区段搜索。设计电力光通信网络智能运维设备脱网故障区段定位平台, 实现脱网故障点即智能运维设备信号丢失的定位与告警。对比实验显示, 在 SDH 环网电路区域中的光缆中断导致的脱网故障区段定位、多路由段的光缆故障下的脱网故障区段定位, 以及在环状电力区域中的多路由段的光缆故障下的脱网故障区段定位场景中, 该方法的定位结果与实际位置最贴近, 定位最准确。

关键词: Dijkstra 算法; 电力光通信网络; 数据驱动方法; 智能运维设备; IBFA 算法; 脱网故障区段定位

中图分类号: TM77

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023012

A method for locating fault sections of power optical communication network intelligent operation and maintenance equipment off-grid based on Dijkstra algorithm

ZHANG Hailong, LI Bo, JIA Najuan

State Grid Gansu Electric Power Company Pingliang Power Supply Company, Pingliang 744000, China

Abstract: In order to determine the mapping relationship between the off grid fault section and the fault current distribution, and find the shortest path between the off grid fault section and the fault current distribution, an off grid fault section location method based on Dijkstra algorithm was designed for the intelligent O&M equipment of the electro-optical communication network. The LightGBM algorithm in the data-driven method was selected to determine the mapping relationship between the off grid fault section and the fault current distribution through a large number of samples. Based on Dijkstra algorithm, the shortest path of mapping relationship was found, and the off network fault section was searched. The location platform for off grid fault section of intelligent operation and maintenance equipment of power optical communication network was designed to realize the location and alarm of off

收稿日期: 2022-09-16; 修回日期: 2023-01-06

通信作者: 张海龙, yeqinfuc2@163.com

grid fault point, namely, signal loss of intelligent operation and maintenance equipment. The comparison experiment shows that the location result of this method was the closest to the actual location and the most accurate in the off network fault section location caused by the interruption of optical cable in the SDH ring network circuit area, the off network fault section location caused by the fault of optical cable in the multi way bus section, and the off network fault section location scenario caused by the fault of optical cable in the multi way bus section in the ring power area. It effectively improved the accuracy of fault location and has good applicability.

Key words: Dijkstra algorithm, power optical communication network, data-driven method, intelligent operation and maintenance equipment, IBFA algorithm, off-grid fault section location

0 引言

电力光通信网络的运维管理对于智能电网的安全、经济、高效、正常运行有重要意义。目前, 电力光通信网络的规模正在不断扩大, 目前的管理、维护、运行技术早已无法满足实际生产需求^[1]。具体来说, 在目前的电力光通信网络中, 存在数据模型不统一、组网技术庞杂等问题, 电力光通信网络的信息数据无法实时获取, 同时网络资源也无法动态更新, 使运维情况无法被集中、全面地监控, 无法对电力光通信设备进行有效管理与统计。这就造成运维效率的下降, 同时也会造成电力通信资源的浪费与闲置。在该背景下, 电力光通信网络智能运维设备应运而生, 能够实现网络的智能化自动运维, 获得了广泛使用。但在电力光通信网络智能运维设备的使用中经常发生脱网故障, 使设备无法进行正常运维, 也无法监测到该区域的故障, 给电力光通信网络的日常运维带来很大压力。因此, 本文对电力光通信网络智能运维设备脱网故障区段定位方法进行研究, 以弥补智能运维设备的不足。

对于故障区段定位方法的研究, 目前的研究成果已经十分丰富。其中, 王钢等^[2]针对现有配电网故障区段定位方法存在对不同接地故障的适应性不强、灵敏度低等问题, 分析谐振接地配电网在发生不同过渡电阻接地故障时, 故障点上、下游的零序电流和零序电压暂态分量的特征, 提出一种能够适用于谐振接地配电网接地故障区段

定位的方法, 在高阻接地故障、低阻接地故障和非线性弧光接地故障下都具有较好的可行性。王毅等^[3]针对以往定位方法存在的问题, 提出了一种基于孪生神经网络的故障区段定位方法, 主要使用孪生神经网络进行故障点上下游信号的相似性匹配, 从而实现故障区段的准确定位。叶雨晴等^[4]着眼于柔性开关设备的发展趋势, 提出一种基于柔性开关设备的新的定位方法, 通过消弧线圈对于低频外加信号的一种过补偿作用实现了故障区段定位, 并通过仿真证明了该方法的可行性与正确性。

以上方法在光缆中断与经过多路由段的光缆故障导致的脱网故障中实际定位效果不好, 本文设计了一种基于 Dijkstra 算法的电力光通信网络智能运维设备脱网故障区段定位方法。

1 设备脱网故障区段定位

1.1 确定映射关系

选择数据驱动方法中的 LightGBM 算法, 通过大量样本确认脱网故障区段与故障电流分布间映射关系。具体步骤如下。

步骤 1 特征选择在应用数据驱动方法前, 需要确定标签集 A 与特征集 B 的组成。根据获取的实际量测信息, 选择联络开关开断情况 C 与脱网故障前后有效稳态电流值变化量 D 作为样本特征。并将脱网故障线路编号作为标签, 构建标签与样本特征间的映射关系^[5]。

假设电力光通信网络中的联络开关共有 a 组,



线路共有 b 条, 则网络特征 y 可以表示为:

$$y = [(D_{1A}, D_{1B}, D_{1C}), \dots, (D_{kA}, D_{kB}, D_{kC}), C_1, C_2, \dots, C_q] \quad (1)$$

其中, (D_{kA}, D_{kB}, D_{kC}) 表示第 k 组脱网故障前后三相有效稳态电流值变化量, C_q 表示第 q 组联络开关开断情况数据。

网络特征 y 中的特征数量可以表示为:

$$f = 3k + q \quad (2)$$

步骤2 选择分类模型

选择多分类框架对脱网故障判断模型进行设计, 具体标签为:

$$w = \begin{cases} 0, & \text{无故障} \\ w, & w \in [1, 2, \dots, b], \text{线路 } w \text{ 发生故障} \end{cases} \quad (3)$$

其中, w 表示线路。

步骤3 构建选择标签与特征的弱学习器

通过 LightGBM 算法构建选择标签与特征的弱学习器即多棵决策树。通过多个样本对弱学习器进行训练, 对树群的输出结果进行综合决策以决定最终的脱网故障区段与故障电流分布间的映射关系模型^[6]。

脱网故障区段与故障电流分布间的映射关系模型的构建过程具体如下。

首先, 以迭代方式实现决策树的生长与增加。

其次, 当决策树增加所带来的准确度提升比某阈值小时, 直接停止迭代, 获得 E 棵决策树构成的 LightGBM 模型, 具体如式 (4)。

$$\alpha(y_j) = \sum_{p=1}^E G_p(y_j) \quad (4)$$

其中, y_j 表示第 j 个电力光通信网络特征, $\alpha(y_j)$ 表示 y_j 的 LightGBM 模型, $G_p(y_j)$ 表示第 p 个决策树。

步骤4 生成样本

利用 MATLAB/Simulink 搭建电力光通信网络模型, 对脱网故障进行仿真, 获得训练样本。为确保资源数据准确性, 在生成样本的过程中, 需要充分考虑负荷波动、噪声干扰、运行方式切

换、过渡电阻设置、故障位置分布等因素^[7]。

- 在负荷波动因素模拟中, 设定模型在 1 s 内负荷保持不变。并且在各组样本仿真前, 将各负荷设定为在 0.8~1.2 倍范围中随机选取, 对不同负荷的波动进行模拟。
- 在噪声干扰的模拟中, 针对实际数据与仿真数据之间存在一定随机误差的问题, 在仿真数据中对白噪声进行添加。将添加噪声后的信噪比控制在 50 dB 以上, 以模仿电力光通信网络实际运行情况, 并保留一定裕度。
- 在运行方式切换的模拟中, 设置每间隔一定数量的样本, 即重新对系统阻抗进行取值, 取值的范围为 $(3+4j) \sim (7+8j) \Omega$ ^[8]。在各样本的仿真开始之前, 重新设定联络开关状态, 保证以全部线路不失电为前提, 对一种运行方式进行随机选取。
- 在过渡电阻设置中, 采用随机方式进行取值, 取值范围为 0~1 400 Ω 。
- 在故障位置分布的模拟中, 为确保各样本故障位置的分布相对均匀, 首先将故障设置为均匀分布在所有相, 在线路中的任一位置随机发生。接着测试训练效果与训练样本数量之间的关系, 选择一个既能确保故障位置分布能够覆盖全部线路, 又可以获得良好训练效果的数量, 将其当作实际样本训练数量。

1.2 脱网故障区段搜索

基于 Dijkstra 算法寻找脱网故障区段与故障电流分布间映射关系的最短路径, 实施脱网故障区段搜索。对 Dijkstra 算法进行改进, 设计一种基于二叉排序树的 Dijkstra 算法实施搜索^[9]。引入二叉排序树前, 先实施中间节点的排序, 能够解决 Dijkstra 算法计算量较大的问题。

二叉排序树的构造流程如下。

步骤 1 对一个待排序元素 g 进行选择, 将其作为起点。

步骤 2 当下一个元素 h 比 g 大时, 将其放在右边子树上; 当 h 比 g 小时, 将其放在左边子树上。如果该元素左边或者右边已经有子节点, 则将其与子节点进行对比。

步骤 3 重复步骤 2, 直到元素 h 找到能够存放的子节点。

步骤 4 重复步骤 (2) ~ 步骤 (3), 直到全部元素都被插入二叉树中。

基于二叉排序树的 Dijkstra 算法的运行流程具体如下。

步骤 1 构建一个 Open 顶点的集合与 Close 顶点的集合, 二者互补。并对 Close 顶点的集合实施初始化处理, 使 Close 顶点的集合中仅包含起点 s , 将其出口记为 r 。

步骤 2 求取起点 s 的邻接节点。

步骤 3 将邻接节点的权值直接导入构造的二叉排序树, 实施权值的排序操作。

步骤 4 取出二叉排序树中最左侧元素 l , 将其作为下一步计算中的中间节点, 在 Close 顶点的集合中加入 l , 并在 Open 顶点的集合中将 l 点删除。

步骤 5 对 l 的邻接节点进行更新。

步骤 6 对二叉排序树内的各元素进行更新, 更新后的元素集合如式 (5)。

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\} \quad (5)$$

其中, t_n 指的是第 n 个更新的二叉排序树内的元素。

步骤 7 对 T 中的元素进行排序。

步骤 8 如果从起点 s 到出口 r 的实际距离比之前远, 则对出口 r 的距离值进行修改, 并对中间节点 l 的父节点进行修改。

步骤 9 再次对二叉排序树进行更新。

步骤 10 重复步骤 4~步骤 9, 直到 Open 顶点的集合变成空集。

步骤 11 以记录下的父节点为依据, 依次向上追溯, 获得映射关系的最短路径^[10]。

1.3 脱网故障区段定位

本文设计了一种电力光通信网络智能运维

设备脱网故障区段定位平台, 实现脱网故障点即智能运维设备信号丢失的定位与告警^[11]。平台为 5 层架构, 分别为物理层、采集层、数据层、能力层和应用层。

通过采集层的网管采集适配模块, 将数据层的下层网管的告警、配置数据和业务数据, 存储在数据库中。通过信号采集卡采集智能运维设备信号丢失数据, 梳理设备端口告警光路信息, 获取光路的光缆段信息, 采用自顶向下的方法建立网络端口到光路的关联模型。

在数据层中, 基于第 1.1 节实现的脱网故障区段与故障电流分布间映射关系, 对各种数据进行配置, 形成统一的网络资源数据, 结合第 1.2 节脱网故障区段搜索建立传输-数据跨专业关联分析模型, 实施脱网故障数据的关联规则分析, 挖掘脱网故障溯源数据。

在能力层中, 资源管理及稽核模块能够实现相应的资源数据管理及稽核校准功能, 并进行脱网设备告警。

在物理层中, 通过路由分析可发现网络潜在隐患, 设置任务进行及时处理^[12]。

在应用层中, 通过改进细菌觅食算法 (improved bacterial foraging algorithm, IBFA) 实现脱网故障点定位^[13]。同时拓扑管理以静态图形方式呈现所有网元与网元间的连接关系, 通过相关的告警及业务数据对网络运行状态进行渲染呈现, 使网络运维人员能够直观地监控网络、网元、业务的运行状态以及脱网设备定位结果。其中脱网故障设备定位的具体步骤如下。

步骤 1 对相关参数进行设定, 具体如下: 最大吸引度为 ε_0 , 步长因子为 ϕ_0 , 光强吸收系数为 ϕ_0 , 总运算次数为 δ , 将需要搜索的解空间维数为 χ , 萤火虫种群规模为 γ 。

步骤 2 对各开关节点的开关函数进行编写。

步骤 3 以开关函数为基础对相关的评价函数进行确定。



步骤4 萤火虫种群 Z 具体如式 (6)。

$$Z = (z_1, z_2, \dots, z_m) \quad (6)$$

其中, z_m 表示第 m 只萤火虫。

对萤火虫种群实际空间位置进行初始化处理, 也就是将每只萤火虫的位置直接随机初始化为 1 或者 0。

步骤5 通过评价函数获取初始状态下各萤火虫的个体极值, 将该极值作为萤火虫个体的对应初始亮度 O_0 , 全部萤火虫的吸引度为:

$$v = v_0 \cdot e^{-\eta_0 \cdot \zeta^2} \cdot \varepsilon_0 \quad (7)$$

其中, v_0 指最大吸引度, ζ 指距离。

步骤6 根据式 (8) 对萤火虫的飞行速度进行更新。

$$u_\alpha^\beta(\zeta+1) = \psi \cdot u_\alpha^\beta(\zeta) + v \cdot \delta \cdot [l_\alpha^\beta(\zeta) - l_\alpha^\beta(\zeta)] \cdot \chi + \text{rand} \cdot \phi_0 \cdot \gamma \quad (8)$$

其中, $l_\alpha^\beta(\zeta)$ 指第 ζ 次迭代中萤火虫个体 α 的第 β 维变量, $l_\alpha^\beta(\zeta)$ 指第 ζ 次迭代中萤火虫个体 α 的第 β 维变量, rand 指随机函数, $u_\alpha^\beta(\zeta)$ 指第 ζ 次迭代中萤火虫个体 α 第 β 维变量的对应修正速率, $u_\alpha^\beta(\zeta+1)$ 指第 $\zeta+1$ 次迭代中萤火虫个体 α 第 β 维变量的对应修正速率, ψ 指惯性权重。

步骤7 对萤火虫的空间位置向量进行更新。

步骤8 对吸引度与评价函数值进行计算。

步骤9 对记忆池中的个体进行更新。

步骤10 对个体之间的亲和度进行计算。

步骤11 通过记忆池中的个体对每代萤火虫中的较差个体进行替换。

步骤12 对每代萤火虫中最亮个体实施变异操作, 具体如式 (9) 所示。

$$l_\alpha^\beta = \begin{cases} 1 - l_\alpha^\beta, & \text{rand} \leq Q_r \\ l_\alpha^\beta, & \text{rand} > Q_r \end{cases} \quad (9)$$

其中, l_α^β 是萤火虫个体 α 的第 β 维变量, Q_r 是该点位对应的随机变异概率。

步骤12 判断是否运行至最大迭代次数。如是, 直接跳出循环, 找到的萤火虫最优位置向量即各

脱网智能运维设备的定位结果; 如否, 则将迭代次数加一, 转至步骤 6。

2 实例实验与结果分析

2.1 实验区段

对于设计的基于 Dijkstra 算法的电力光通信网络智能运维设备脱网故障区段定位方法, 在某地的电力光通信网络中开展其性能测试。在该电力光通信网络某段发生光缆中断与经过多路由段的光缆故障时, 对设计方法进行测试。

实验电力光通信网络由两种区域构成: 一种是 SDH 环网电路区域, 共有 32 个光通信网络节点, 节点序号为 3-4~3-36, 也就是有 31 个区段; 另一种是环状电力区域, 共有 28 个光通信网络节点, 节点序号为 18-2~18-30, 也就是有 27 个区段。

在 SDH 环网电路区域中, 共包含 50 台智能运维设备, 在外层环状电力区域中, 共包含 30 台智能运维设备, 分别对 SDH 环网电路区域、外层环状电力区域进行脱网故障区段定位。

2.2 实验方法设计

首先实施光缆中断导致的脱网故障区段定位, 接着实施经过多路由段的光缆故障下的脱网故障区段定位, 分别测试设计方法的定位结果与定位性能。

在测试中, 将文献[2]与文献[3]中提出的定位方法作为测试中的对比方法, 分别进行测试。

在所提方法的脱网故障区段定位中, 首先利用 MATLAB/Simulink 搭建实验电力光通信网络模型, 获得训练样本。通过大量样本实现脱网故障区段与故障电流分布间映射关系的确定。接着基于 Dijkstra 算法寻找脱网故障区段与故障电流分布间映射关系的最短路径, 实施脱网故障区段搜索, 确认脱网故障区段后, 利用设计平台进行故障点定位与告警。定位中的 IBFA 算法参数设置见表 1。

表1 IBFA 算法参数设置

参数名称	取值
最大吸引度 ε_0	0.1
步长因子 ϕ_0	0.01
光强吸收系数 φ_0	0.3
总运算次数 δ	200
需要搜索的解空间维数 χ	3
萤火虫种群规模 γ	50

2.3 测试结果

2.3.1 光缆中断导致的脱网故障区段定位

在 SDH 环网电路区域中, 光缆中断导致的脱网故障区段定位结果如图 1 (a) 所示。在外层环状电力区域, 光缆中断导致的脱网故障区段定位结果如图 1 (b) 所示。

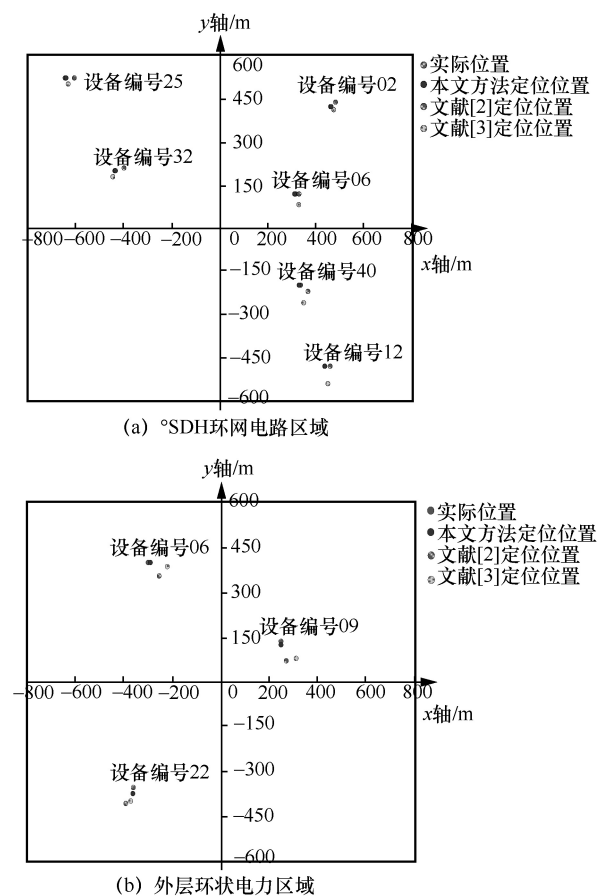


图1 光缆中断导致的脱网故障区段定位结果

由图 1 (a) 可知, 在 SDH 环网电路区域内光缆中断导致的脱网故障区段定位中, 本文方法的

定位结果与实际位置最贴近, 定位最准确, 其次是文献[2]中提出的方法、文献[3]中提出的方法。

由图 1 (b) 可知, 在外层环状电力区域内光缆中断导致的脱网故障区段定位中, 本文方法的定位结果与实际位置最贴近, 但定位精度比 SDH 环网电路区域内的低。文献[2]、文献[3]中提出的方法的定位精度相似, 低于本文方法。

2.3.2 多路由段的光缆故障下的脱网故障区段定位

在 SDH 环网电路区域中, 多路由段的光缆故障下的脱网故障区段定位结果如图 2 (a) 所示。在环状电力区域, 多路由段的光缆故障下的脱网故障区段定位结果如图 2 (b) 所示。

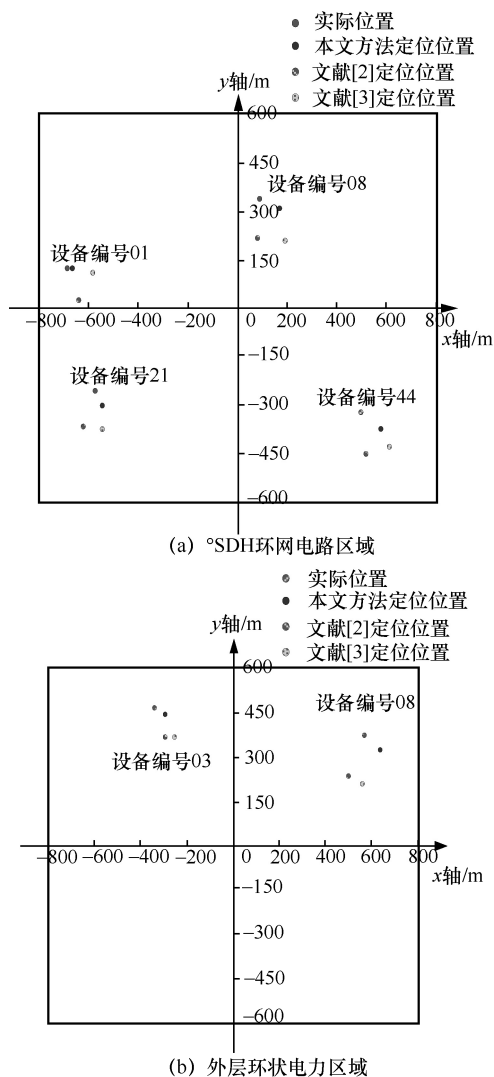


图2 多路由段的光缆故障下的脱网故障区段定位结果



由图 2 (a) 可知, 在 SDH 环网电路区域中, 多路由段的光缆故障下的脱网故障区段定位精度整体低于光缆中断导致的脱网故障区段定位精度, 其中本文方法的定位精度最高。

由图 2 (b) 可知, 在外层环状电力区域中, 多路由段的光缆故障下的脱网故障区段定位精度整体同样低于光缆中断导致的脱网故障区段定位精度, 但本文方法的定位精度仍高于其他两种方法。

3 结束语

在智能运维设备脱网故障的研究中, 本文设计了一种基于 Dijkstra 算法的电力光通信网络智能运维设备脱网故障区段定位方法, 通过与文献[2]、文献[3]的对比实验可知, 在 SDH 环网电路区域中的光缆中断导致的脱网故障区段定位、多路由段的光缆故障下的脱网故障区段定位, 以及在环状电力区域中的多路由段的光缆故障下的脱网故障区段定位, 该方法的定位结果与实际位置最贴近, 定位最准确。本文方法实现了精准的脱网故障设备定位, 对于电力光通信网络的发展有很大意义。

参考文献:

- [1] 杨耿杰, 许晔, 高伟, 等. 基于能量谱相似度自适应聚类的配电网接地故障区段定位方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 25-32.
YANG G J, XU Y, GAO W, et al. Grounding fault section location method of distribution network based on adaptive clustering of similarities between energy spectra[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41 (3): 25-32.
- [2] 王钢, 曾德辉, 李松奕, 等. 一种基于零序特征量的配电网接地故障区段定位方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 34-40, 68.
WANG G, ZENG D H, LI S Y, et al. Fault section location method for grounding fault of distribution network based on zero-sequence characteristic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41 (1): 34-40, 68.
- [3] 王毅, 李曙, 李松浓, 等. 基于自校验孪生神经网络的故障区段定位方法[J]. 电子技术应用, 2022, 48(7): 60-66, 73.
WANG Y, LI S, LI S N, et al. Fault segment location method based on self-checking siamese convolutional neural network[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48 (7): 60-66, 73.

- [4] 叶雨晴, 马啸, 林湘宁, 等. 基于 SOP 的主动式谐振接地配电网单相接地故障区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1453-1464.
YE Y Q, MA X, LIN X N, et al. Active fault locating method based on SOP for single phase grounding faults in the resonant grounding distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (5): 1453-1464.
- [5] 朱占春, 潘宗俊, 唐金锐, 等. 基于单端暂态能量谱相似性的配电网故障区段定位新方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 180-191.
ZHU Z C, PAN Z J, TANG J R, et al. A novel fault location method for power distribution systems using energy spectrum similarity analysis of single-terminal transient waveform[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36 (2): 180-191.
- [6] 李振兴, 王朋飞, 王新, 等. 基于幅值特征和 Hausdorff 距离的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 169-177.
LI Z X, WANG P F, WANG X, et al. Fault location method of distribution network based on amplitude feature and hausdorff distance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (7): 169-177.
- [7] 王玲, 邓志, 马明, 等. 基于状态估计残差比较的配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 132-139.
WANG L, DENG Z, MA M, et al. A method for locating fault sections in distribution networks based on the comparison of state estimation residual errors[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (14): 132-139.
- [8] 陶维青, 肖松庆, 李林, 等. 基于双精英蚁群算法的配电网故障区段定位[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2020, 43(12): 1626-1632.
TAO W Q, XIAO S Q, LI L, et al. Fault location of distribution network based on double elite ACO[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2020, 43 (12): 1626-1632.
- [9] 侯思祖, 郭威, 王子奇, 等. 基于小波 AlexNet 网络的配电网故障区段定位方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 46-57.
HOU S Z, GUO W, WANG Z Q, et al. Fault segment location method for distribution network based on wavelet AlexNet network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59 (3): 46-57.
- [10] 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区段定位方法[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 133-143.
XU Y C, ZHAO C C, SUN S H, et al. Fault location for active distribution network based on improved LMD and energy relative entropy[J]. Electric Power, 2021, 54 (11): 133-143.
- [11] 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 W Z, WANG C, YIN F G. 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.

- [12] 郭壮志, 陈涛, 徐其兴, 等. 配电网故障区段定位的互补松弛约束新模型与算法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 129-136.

GUO Z Z, CHEN T, XU Q X, et al. Novel fault section location model for distribution network with complementary relaxation constraints and its algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40 (5): 129-136.

- [13] 朱昊宇, 贾振堂, 李强. 基于 CNN 的配电网故障区段定位[J]. 水电能源科学, 2021, 39(7): 188-191.

ZHU H Y, JIA Z T, LI Q. CNN-based fault location of distribution network[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(7): 188-191.

[作者简介]



张海龙 (1992-), 男, 国网甘肃省电力公司平凉供电公司工程师, 主要研究方向为多域光网络、自动化系统、有源器件光芯片等。

李博 (1998-), 男, 国网甘肃省电力公司平凉供电公司助理工程师, 主要研究方向为通信系统、通信设备等。

贾娜娟 (1991-), 女, 国网甘肃省电力公司平凉供电公司工程师, 主要研究方向为无线光通信网络、机器学习和物联网等。