

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181275

基于零序电流波形相似度的接地故障定位方法

尤向阳^{1,2}, 葛笑寒², 吴萍²

(1. 河南科技大学应用工程学院, 河南 三门峡 472000; 2. 三门峡职业技术学院, 河南 三门峡 472000)

摘要: 为了准确定位小电流接地系统中单相接地故障点, 在中心站故障定位系统架构下, 基于暂态录波故障指示器, 将故障定位转化为比较零序电流相似度的问题。在对线路拓扑结构采用六位数编码进行描述的基础上, 设计了基于离散均方根距离的故障定位算法。通过仿真模拟实际运行中可能出现的各种接地故障, 并进行定位试验。测试结果表明, 将对零序电流波形相似度应用到配电自动化在线监测领域中进行接地故障定位是可行的。

关键词: 零序电流波形; 相似度; 离散均方根距离; 故障定位

Grounding fault location method based on waveform similarity of zero-sequence current

YOU Xiangyang^{1,2}, GE Xiaohan², WU Ping²

(1. School of Applied Engineering, Henan University of Science and Technology, Sanmenxia 472000, China;

2. Sanmenxia Polytechnic, Sanmenxia 472000, China)

Abstract: In order to accurately locate the single phase ground fault point in the small-current grounding system, the fault location is transformed into comparing zero sequence current similarity based on transient recording fault indicator. The coding rules of each branch of power line are determined. A fault location algorithm is designed based on discrete mean distance. The experiment is carried out by simulating various ground faults that may occur in practice. The test results show that it is feasible to apply the method of comparing the similarity of zero-sequence current waveforms to the on-line monitoring field of distribution automation for ground fault location.

This work is supported by Henan Provincial Science and Technology Project (No. 1821021479) and Key Research Projects of Henan Higher Education Institutions (No. 17A413010).

Key words: zero-sequence current waveform; similarity; discrete mean distance; fault location

0 引言

电力系统线路故障定位是保障电网可靠运行的重要环节。我国在电压等级 3~60 kV 的电网中普遍采用的是小电流接地方式。其传统的定位方法有注入法和稳态信号定位法, 传统定位法缺点是注入设备复杂、定位用时长^[1-4]。为快速确定故障位置, 减少因线路故障而造成的各项损失, 电力部门对配电网故障定位自动化程度的要求越来越高, 利用故障暂态信号进行定位的智能化定位方法成为当前电力系统配电自动化的新兴技术之一^[5]。文献[6]提出了一种基于暂态线电压与暂态零模电流的故障定位方法, 利用暂态线电压的希尔伯特变换与暂态零模电

流的乘积计算故障方向参数, 根据故障点前后方向参数极性相反的特征确定故障点, 该法存在线路电压获取困难以及回传数据量大的不足。文献[7]提出基于磁场的非接触式故障定位方法, 根据磁场的幅值和相位确定故障点位置, 因为要使用磁阻传感器测量杆塔下方磁场, 一旦传感器周围的磁场受到干扰而产生坏数据, 会大大降低算法的可靠性。文献[8-9]利用小波能量相对熵来进行接地故障定位。小波变换虽然能够很好地分析信号的频率特征, 但是由于小波分析的算法复杂, 工程实际中的应用前景还有待检验。文献[10]主要通过链表法实现故障定位, 提高了容错能力, 但是如果故障发生在末节点有可能发生漏报误报的情况。文献[11]对矩阵算法进行改进, 简化矩阵生成方法, 增强矩阵稀疏性, 可以对分布复杂的配电网实现快速定位, 但是容错能力较差, 有待改进。文献[12]是通过相模变换将故障

基金项目: 河南省科技攻关项目资助(182102210479); 河南省高等学校重点科研项目资助(17A413010)

定位问题转化为整数规划问题，这种算法最终实现时成本低、可靠性高，但是计算复杂，定位时间较长。文献[13]选择改进矩阵算法，并首次选择网络关系矩阵，这种方法具有准确度高、容错能力强等特点，但是随着故障指示器的发展，这种算法不适用于具有同步录波功能的故障指示器。

针对以上利用故障暂态信号定位方法中存在的问题，本文结合配电网自动化的发展现状，以暂态录波型故障指示器为基础，选择在中心站使用离散均方根距离算法进行故障定位，将故障定位转化为比较曲线相似度的问题。并利用 Matlab 工具进行仿真试验，通过改变线圈的位置和方向模拟实际运行中可能出现的各种接地故障，验证了离散均方根距离算法在电网中心站故障定位系统中的有效性。

1 暂态录波故障指示器

故障指示器通常安装在配电线路和开关柜进出线上，一旦线路发生故障，线路中会产生一个能够持续 5~20 ms 的暂态过程^[14]。在这期间，零序电流呈现为一个幅值较大、频率较高的暂态信号。故障指示器捕获到非正常的高频暂态电流信号时会进行报警显示。巡线人员可借助指示器的报警显示，迅速确定故障点，排除故障。故障指示器的广泛应用改变了传统分段合闸送电查找故障的盲目巡线方法。

暂态录波型故障指示器^[15]不仅可以采集到零序电流的暂态持续过程，而且能把高速、高精度、三相同步采样得到的零序电流暂态波形通过小电流自取电技术和无线通信技术实时合成为零序电流曲线。通过计算曲线相似度，并与相似度阈值进行对比，可以快速判断线路是否发生故障，并可以根据指示器的位置准确确定障点位置。

2 中心站故障定位系统架构

故障定位系统架构如图 1 所示。在故障定位时，每个监测点作为基础的网络节点，每个节点由三个故障指示器分别安装在配电线路的三条线路上的同

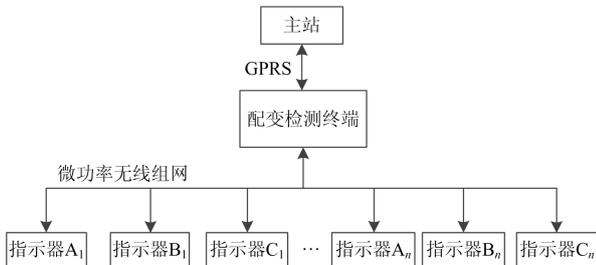


图 1 系统架构图

Fig. 1 System architecture diagram

一位置，故障指示器之间可以以广播的形式完成通信，触发录波，节点之间则采用微功率无线通信组网的技术转发数据，直至数据汇集到配电监测终端。配电监测终端将汇集的电压电流等参数信息以 GPRS 的方式发给主站。

3 主站故障定位算法

3.1 离散均方根距离

设 $I_a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ，是两条 $I_b = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ 零序电流波形上采用相同采样方法得到的两组离散电流的数据，则这两条零序电流波形之间的离散均方根距离可以用式(1)表示。

$$dist(I_a, I_b) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \tag{1}$$

式中： a_i 、 b_i 表示的是两条零序电流曲线上同一采样时间点的电流值； n 为零序电流持续期间采样的次数。

由于故障指示器采集的零序电流波形是一系列时间序列上的电流值，所以本文采用均方根值来描述零序电流波形之间的距离，这种距离的定义大大简化了离散均方根距离^[15-19]对路径相似性的数学描述，减少了运算的次数。适当增加采样次数 n 的值越大，可以提高结果的可靠性。

3.2 阈值确定

故障判定时需要波形相似度与给定的阈值进行比较，阈值一般由统计的方法确定^[20-21]。根据离散均方根距离公式计算零序电流的距离，并用式(2)定义两电流曲线的相似度。

$$SIM(I_a, I_b) = \frac{1}{1 + dist(I_a, I_b)} \tag{2}$$

随机测量 1 000 组正常线路的监测点曲线的相似度。在 1 000 个样本组中，得到的正常线路的波形相似度大部分在 0.85~1 之间，只有 9 组得到的相似度稍小于 0.85，所以确定相似度阈值为 0.85。由线路的零序电流曲线得到部分相似度数据如表 1 所示。

3.3 线路节点描述与故障点计算

图 2 表示某个变电站出线线路的拓扑结构。其每个监测点对应一个六位数编码作为其组号。按照子节点组号的前三位与其父节点组号的后三位相同的原则进行编码。这样在遍历时比较方便，只需依次向后进行比较，直到找到故障点为止。

以图 2 为例，假定 000 001 为故障点。从源节点 000 001 开始，将其零序电流波形与 001 002、001 005 和 001 008 节点处的零序电流波形作比较，001 005 的零序电流波形与 000 001 相似，说明监测点 001 005

表 1 部分零序电流曲线相似度

Table 1 similarity of zero sequence current curve

组	相似度	组	相似度	组	相似度	组	相似度
1	0.923 7	11	0.926 3	21	0.941 3	31	0.951 1
2	0.924 1	12	0.856 4	22	0.978 3	32	0.967 8
3	0.935 0	13	0.976 5	23	0.958 2	33	0.906 2
4	0.942 2	14	0.926 9	24	0.999 3	34	0.967 9
5	0.952 5	15	0.896 6	25	0.978 8	35	0.989 9
6	0.914 2	16	0.897 8	26	0.922 0	36	0.922 3
7	0.946 7	17	0.906 5	27	0.930 6	37	0.947 7
8	0.960 2	18	0.906 6	28	0.975 7	38	0.936 6
9	0.942 1	19	0.914 3	29	0.889 2	39	0.901 3
10	0.958 8	20	0.943 0	30	0.905 4	40	0.987 2

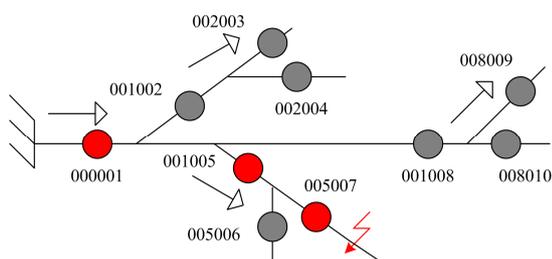


图 2 线路拓扑描述

Fig. 2 Topology description of line

也有故障电流流过; 然后将监测点 001 005 作为父节点, 将该处的零序电流波形与其子节点即 005 006 和 005 007 处的零序电流波形比较, 结果 005 007 与 001 005 的波形相似, 说明故障在 005 007 后方。若故障点在叶子节点上, 则需要比较各个叶子节点处零序电流的距离是否超过阈值, 若 005 007 处与其他叶子节点的波形距离都超过阈值, 则说明故障点在 005 007 末端。至此, 实现故障点的有效定位。

基于离散均方根距离的故障点计算流程如图 3 所示。算法流程的具体实现可采用 Visual C++ 软件进行编程实现。所用的循环语句越多, 算法用时越长。若两条曲线都是由 n 个点组成, 则此算法需要比较 $n \times n$ 次, 所以此算法的时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

4 结果准确性测试

单相接地故障作为配电网中主要出现的故障包括金属接地和弧光接地等。不同于金属接地, 弧光接地的故障点与地之间不是直接接触, 而是通过电弧接触, 接地不稳定, 而且这种接地故障往往可以通过重合闸恢复。所以本文使用 Matlab 工具对图 4 所示的简单拓扑线路进行金属接地模拟试验。该线路包括由变压器引出的 L_a 、 L_b 、 L_c 三条线路。通过改变线圈的位置和方向模拟故障点位置, 最终通过零序电流的曲线相似度进行故障定位。

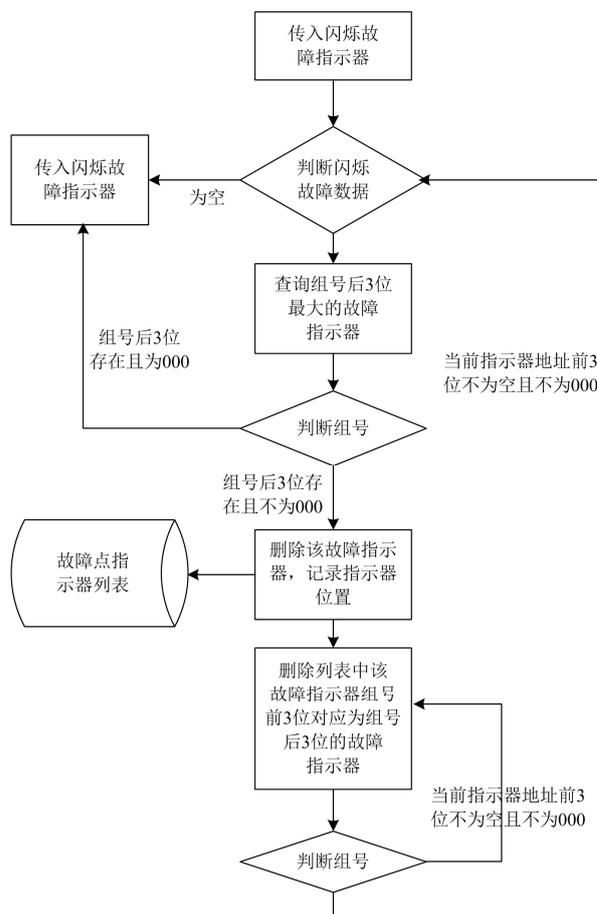


图 3 计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart

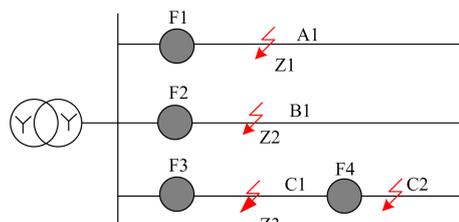


图 4 测试线路拓扑

Fig. 4 Power network structure for testing

4.1 金属接地情况 1

测试方法: F1、F4 采集单元挂载于同一组线圈上, 且方向相同。F3 挂载于另一组线圈上, 方向与 F1、F4 相反。F2 未挂载线圈上, 只加电场变化。预期结果: 故障位置在 F3 和 F4 之间。得到各节点的相似度见表 2。

节点 F2 未悬挂线圈, 所以只比较电场的变化, F1 和 F4 方向相同且挂载于同一线圈, 两监测点的零序电流曲线相似, 监测点 F3 和 F4 的零序电流曲

线的计算值为 0.623, 则判断故障点为 C1。符合预期结果, 定位正确。其中节点 F3 与节点 F4 的零序电流波形如图 5 所示。

表 2 各节点间的相似度

Table 2 Similarity between nodes

节点	F1	F2	F3	F4
F1	1	-	0.623	1
F2	-	-	-	-
F3	0.623	-	0	0.623
F4	0	-	0.623	0

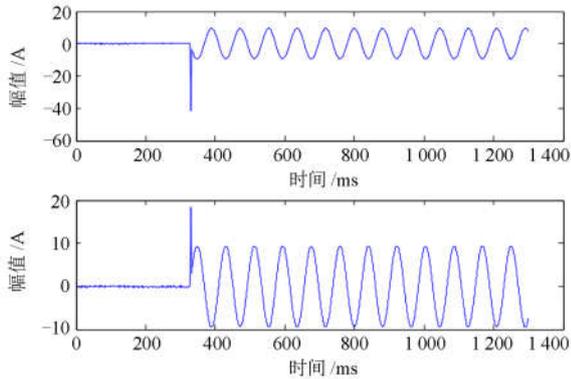


图 5 F3 与 F4 的零序电流波形

Fig. 5 Zero sequence current waveform of F3 and F4

4.2 金属接地情况 2

测试方法: F1 挂载于一组线圈上, F3 挂载于另一组线圈上, F1 与 F3 方向相反。F2、F4 未挂载线圈上, 只加电场变化。

预期结果: 故障位置在 F3 和 F4 之间。

计算每两个节点的相似度, 监测点 F2 与 F4 未加线圈, 所以只比较电场的变化情况, 监测点 F3 与监测点 F1 的曲线相似度为 0.528, 则判断故障点在 C1 处, 符合预期结果, 判断正确。

4.3 金属接地情况 3

测试方法: F1 挂载于一组线圈上, F2、F3 和 F4 挂载于另外同一组线圈上。F1 与 F3、F4 方向相同, F2 与 F3、F4 方向相反。

预期结果: 故障位置在 F4 之后。

计算得到各节点相似度如表 3 所示。

表 3 各节点间的相似度

Table 3 Similarity between nodes

节点	F1	F2	F3	F4
F1	1	0.693	-	0.703
F2	0.693	1	-	0.765
F3	-	-	1	1
F4	0.703	0.765	1	1

由表 3 可知, 监测点 F3 与监测点 F4 挂载于同一线圈且方向相同, 其波形相似度为 1, 说明线路中间正常运行, 故障在叶子结点部分。监测点 F1 和 F2 的线圈方向相反, 监测点 F1 与 F4 之间的曲线相似度为 0.703 0, 监测点 F2 与 F4 之间的曲线相似度为 0.765 7, 判断故障点为 C2。符合预期结果, 定位正确。图 6 为节点 F1、F2 与 F4 零序电流波形对比。

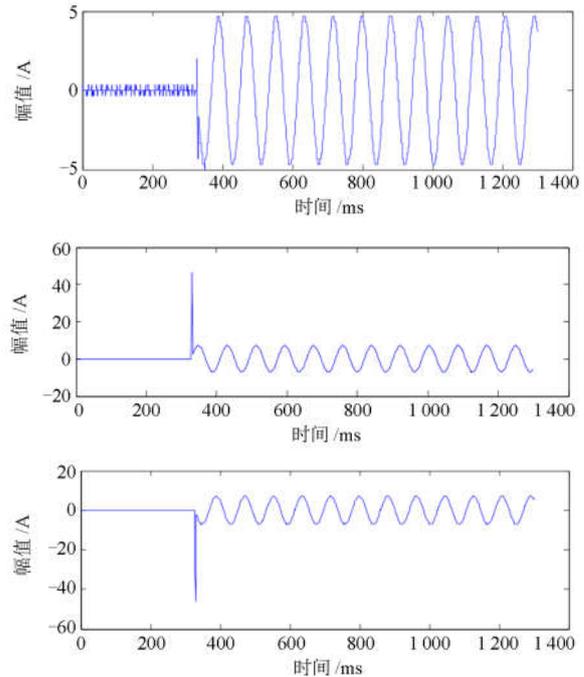


图 6 F1、F2 与 F4 零序电流波形

Fig. 6 Zero sequence current waveform of F1, F2 and F4

4.4 金属接地情况 4

测试方法: F1 挂载于一组线圈上, F3 和 F4 挂载于另外同一组线圈上且方向相同, F1 与 F3、F4 方向相反。F2 未挂载线圈上, 只加电场变化。

预期结果: 故障位置在 F4 之后。

监测点 F2 处未加线圈, 只加电场变化, 不参与比较零序电流波形。F3 和 F4 挂载在同一线圈且方向相同, 所以线路中间运行正常, 应该计算叶子节点波形相似度。监测点 F1 与 F4 的曲线相似度为 0.703, 判断故障点为 C2。符合预期结果, 定位正确。

4.5 金属接地情况 5

测试方法: F1 挂载于一组线圈上, F2 和 F3 和 F4 挂载于另外同一组线圈上, F1 与 F3、F4 方向相反。F2 也与 F3、F4 方向相反。

预期结果: 故障位置在 F4 之后。计算得到的各节点相似度如表 4。

表 4 过各节点间的相似度
Table 4 Similarity between nodes

节点	F1	F2	F3	F4
F1	1	0.997	-	0.778
F2	0.997	1	-	0.765
F3	-	-	1	1
F4	0.778	0.765	1	1

因为 F3 与 F4 挂载于同一线圈且方向相同, 所以监测点 F3 与 F4 的零序电流曲线相似, 故障点在线路末端。比较监测点 F1 与 F2, 它们之间的相似度大于阈值, 监测点 F1 和 F2 与监测点 F4 的相似度低于阈值, 判断 C2 故障。符合预期结果, 定位正确。

4.6 金属接地 6

测试方法: F1 挂载于一组线圈上, F2、F3 和 F4 挂载于另外同一组线圈上, F1 与 F3、F4 方向相反。F2 也与 F3、F4 方向相同。

预期结果: 故障位置在 F1 之后。

计算各个节点的相似度, 因为监测点 F3 与 F4 挂载于同一线圈且方向相同, 所以故障点不在 F3 与 F4 之间。此时需要比较各个叶子节点零序电流曲线的相似度。监测点 F2 与 F3 的波形相似度超过 0.85, 监测点 F1 与 F2 和 F4 的相似度远远低于 0.85, 判断故障点为 A1。符合预期结果, 定位正确。

实际配电线路出现单相接地故障时, 电场下降以及电流突变会使故障点与正常线路的零序电流波形特征不一样。以上几种金属接地情况通过改变故障指示器挂载线圈的位置和方向模拟故障点位置。通过比较零序电流曲线进行故障点定位。如果曲线相似度达不到该算法的已定阈值, 就说明该处可能为故障点。以上通过在仿真模型中设置各种不同条件的单相接地故障验证了基于离散均方根距离进行小电流接地故障定位的有效性。需要注意的是, 当部分高阻接地时, 由于接地电阻过大(1 000 Ω 以上), 实际中获取的电流信号幅值较小, 易受干扰, 该方法可能存在误判的情况。另外, 由于暂态录播故障指示器技术指标所限, 本方法适用的线路电压范围为 3~35 kV。

5 结论

本文利用零序电流波形相似度对金属接地故障定位进行研究, 采用离散均方根距离定义了零序电流波形的相似度。在对线路拓扑结构采用六位数编码进行描述的基础上, 设计了基于离散均方根距离的故障定位算法。用 Matlab 进行了仿真试验。仿真

结果表明, 基于离散均方根距离的零序电流波形相似度故障定位方法简单有效, 准确率高。

参考文献

- [1] 刘健, 芮骏, 张志华, 等. 智能接地配电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 130-133.
LIU Jian, RUI Jun, ZHANG Zhihua, et al. Smart grounding power distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 130-133.
- [2] 张林利, 徐丙垠, 薛永端, 等. 基于线电压和零模电流的小电流接地故障暂态定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 110-115, 198.
ZHANG Linli, XU Bingyin, XUE Yongduan, et al. Transient fault locating method based on line voltage and zero-mode current in non-solidly earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 110-115, 198.
- [3] 武江斌, 张彦兵. 配电线路故障指示器检测平台的设计研究[J]. 电力学报, 2018, 33(2): 128-131.
WU Jiangbin, ZHANG Yanbing. Design research for the test platform of fault indicators for distribution lines[J]. Journal of Electric Power, 2018, 33(2): 128-131.
- [4] 郑国华, 黄朵, 张伟基, 等. 基于最大概率的故障指示器故障判定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 105-109.
ZHENG Guohua, HUANG Duo, ZHANG Weiji, et al. A method for fault diagnosis of fault indicator based on maximum probability[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 105-109.
- [5] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. 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.
- [6] 孙波, 徐丙垠, 孙同景, 等. 基于暂态零模电流近似熵的小电流接地故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 83-87.
SUN Bo, XU Bingyin, SUN Tongjing, et al. New fault locating method based on approximate entropy of transient zero-module current in non-solidly earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 83-87.
- [7] 田书, 王亚彩, 王晓卫, 等. 基于磁场测量的配电网单相接地选线及定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 61-67.
TIAN Shu, WANG Yacai, WANG Xiaowei, et al. A new magnetic field measurement based method to detect faulty line and fault location for single phase to ground fault occurred in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 61-67.

- [8] 吴乐鹏, 黄纯, 林达斌, 等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 70-75.
WU Lepeng, HUANG Chun, LIN Dabin, et al. Faulty line selection based on transient wavelet energy for non-solid-earthed network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 70-75.
- [9] 卢继平, 徐兵. 基于小波包能量相对熵的配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 33(20): 26-31, 37.
LU Jiping, XU Bing. Single-phase earth fault section location based on wavelet packet energy relative entropy in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 33(20): 26-31, 37.
- [10] 翁蓝天, 刘开培, 刘晓莉, 等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 190-196.
WENG Lantian, LIU Kaipei, LIU Xiaoli, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 190-196.
- [11] 胡福年, 孙守娟. 基于图论的矩阵算法在配电网故障定位中的应用[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 94-98.
HU Funian, SUN Shoujuan. Fault location of distribution network by applying matrix algorithm based on graph theory[J]. Electric Power, 2016, 49(3): 94-98.
- [12] 傅晓飞, 张宵蕾, 赵彬. 基于相模变换和频谱分析的电网行波故障定位算法研究[J]. 华东电力, 2014, 42(9): 1897-1901.
FU Xiaofei, ZHANG Xiaolei, ZHAO Bin. Grid traveling wave fault location algorithm based on the phase mode transformation and spectral analysis[J]. East China Electric Power, 2014, 42(9): 1897-1901.
- [13] 黄佳乐, 杨冠鲁. 配电网故障区间定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 41-45.
HUANG Jiale, YANG Guanlu. Modified matrix algorithm for fault section location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 41-45.
- [14] 岳仁超, 孙建东. 新型配电网故障指示器的设计[J]. 电子器件, 2015, 38(4): 845-848.
YUE Renchao, SUN Jiandong. Design of new fault indicator in power distribution network[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2015, 38(4): 845-848.
- [15] 丁伟. 架空配网故障指示系统设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
DING Wei. The design of overhead distribution network fault indicator system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [16] 居学尉, 贺利军, 朱光宇. 基于离散 Fréchet 距离的多目标优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(2): 253-260.
JU Xuewei, HE Lijun, ZHU Guangyu. Multi-objective optimization method based on discrete Fréchet distance[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(2): 253-260.
- [17] 朱洁, 黄樟灿, 彭晓琳. 基于离散 Fréchet 距离的判别曲线相似性的算法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2009, 55(2): 227-231.
ZHU Jie, HUANG Zhangcan, PENG Xiaolin. Curve similarity judgment based on the discrete Fréchet distance[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2009, 55(2): 227-231.
- [18] 耿俊成, 张小斐, 郭志民, 等. 基于离散 Fréchet 距离和剪辑近邻法的低压配电网拓扑结构校验方法[J]. 电测与仪表, 2017, 54(5): 50-55.
GENG Juncheng, ZHANG Xiaofei, GUO Zhimin, et al. Topology verification of low-voltage transformer areas based on discrete Fréchet distance and editing nearest-neighbors method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(5): 50-55.
- [19] 陈超, 黄国勇, 范玉刚, 等. 基于离散 Fréchet 距离和 LS-SVM 的短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 142-146.
CHEN Chao, HUANG Guoyong, FAN Yugang, et al. Short-term load forecasting based on discrete Fréchet distance and LS-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 142-146.
- [20] 肖开伟, 许晓平, 王渊, 等. 基于故障指示器的配电线路故障定位算法研究与程序设计[J]. 软件, 2017, 38(8): 125-129.
XIAO Kaiwei, XU Xiaoping, WANG Yuan, et al. Research on fault location algorithm of distribution line based on fault indicator and its program design[J]. Computer Engineering & Software, 2017, 38(8): 125-129.
- [21] 殷豪, 李德强, 孟安波, 等. 纵横交叉算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 109-113.
YIN Hao, LI Deqiang, MENG Anbo, et al. Fault location for distribution network based on crisscross optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 109-113.

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2018-11-29

作者简介:

尤向阳(1980—), 男, 副教授, 主要从事电力电子与电力传动技术研究。E-mail: youxiyag@126.com

(编辑 张爱琴)