

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211566

基于磁场检测与多判据融合的架空线路接地故障定位方法

郭亮¹, 杜欢², 王晓卫², 梁振锋², 黄灿英³, 徐在德¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330000; 2. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 江西建设职业技术学院, 江西 南昌 330000)

摘要: 针对当前配电网故障区段定位难的问题, 提出了一种基于故障点前后磁场差异的故障定位新方法。首先, 分析了杆塔处 x 轴与 y 轴磁场的分布及其与相电流的关系, 同时考虑了三相导线排列差异与数据窗长短对磁场的影响。其次, 通过故障点上下游 x 轴与 y 轴的磁场差异作为定位依据, 分别从不同角度对双轴磁场进行相似度分析, 由此构建 5 种定位新判据。最后, 将 5 种定位判据通过 D-S 证据理论进行融合, 将概率最大的区段判定为故障区段。所提方法综合了各判据的优势, 克服了单一判据的适应性问题。通过对高阻故障、噪声干扰等多种工况进行仿真测试, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 故障定位; 磁场测量; 配电网; D-S 证据理论; 多判据融合

Single phase to ground fault location method of an overhead line based on magnetic field detection and multi-criteria fusion

GUO Liang¹, DU Huan², WANG Xiaowei², LIANG Zhenfeng², HUANG Canying³, XU Zaide¹

(1. Institute of Electric Power Research of Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330000, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China;
3. Jiangxi College of Construction, Nanchang 330000, China)

Abstract: It can be difficult to locate the fault section of a distribution network. To help tackle this, a new fault location method based on the magnetic field difference between behind and ahead of fault point is proposed. First, the distribution of the x -axis and y -axis magnetic field at the tower and its relationship with phase current are analyzed. At the same time, the influence of the arrangement difference of three-phase conductors and the length of data window on the magnetic field is considered. Secondly, based on the magnetic field difference between the x -axis and y -axis upstream and downstream of the fault point, the similarity analysis of the biaxial magnetic field is carried out from different angles, and five new positioning criteria are constructed. Finally, the five location criteria are fused by D-S evidence theory, and the section with the greatest probability is determined as the fault section. Because of the advantages of each criterion, this method overcomes the adaptability problem of a single criterion. The effectiveness of this method is verified by a simulation test of a high impedance fault, noise interference and other working conditions.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177114 and No. 61403127).

Key words: fault location; magnetic field measurement; distribution network; D-S evidence theory; multi criteria fusion

0 引言

随着我国经济社会的快速发展, 用户对供电可靠性的要求越来越高, 故障后需要准确快速检测故障位置进而恢复配网稳定运行, 非有效接地系统故

障电流微弱, 给定位造成困难。统计表明, 单相接地故障是导致跳闸和停电最常见的故障类型, 占到了总故障的 80% 以上^[1-3]。配电网作为与用户直接连接的环节, 对其快速准确的故障定位对用户用电至关重要。

基于电气量的监测装置存在成本较高、安装检修需要停电等问题, 并且其采集到的信息(包括变电站的测量设备和配电自动化安装的传感设备)不能

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177114, 61403127); 国网江西省电力有限公司科技项目资助(521820210005)

满足当前配电网现场测量状态评估的要求。磁阻材料技术的快速发展加速了基于磁场检测的配电网架空线路故障定位的研究, 有望解决传统配电网故障定位精度不高的问题。文献[4]通过沿线传感器获得的磁场数据进行故障检测, 考虑了平衡和不平衡负载条件下的数学模型, 分析了导线高度引起的测量误差; 文献[5]通过引入一种新的几何变换, 基于对新的 $\alpha\text{-}\beta$ 平面中旋转磁场的稳态对称分量分析进行故障检测, 消除了测量磁场中高次谐波的影响; 文献[6]提出了一种基于多分辨形态学梯度从磁场强度信号中提取特征并采用 SVM 作为分类器的新方法, 来构造高阻故障指示器的功能模型; 文献[7]通过不同轴上磁场幅值之间的比值识别故障类型, 通过比较故障点两侧的磁场幅值与方向确定故障区段, 考虑了弧垂对测量磁场的影响; 文献[8]通过分析高压架空线路下垂、舞动及不平衡电流的影响, 提出了一种基于磁阻传感器测量的磁场重构输电线路位置参数和相电流的源重构方法, 高精度地监测输电线路的电气和空间参数; 文献[9]提出了一种扩展卡尔曼滤波处理磁场信息与行波原理结合的故障定位方法, 方法不受故障类型、接地电阻与故障初始角的影响, 但精度受采样率的限制, 对设备要求高; 文献[10]对磁场传感器阵列的布置进行优化来估算架空输电线路的电流和弧垂; 文献[11]提出将磁场的幅值和相位同时作为判据, 综合分析故障位置, 但算法受接地电阻影响较大; 文献[12]通过椭圆拟合标定来降低双轴磁传感器测量误差; 文献[13]用小波包分解滤除工频分量的暂态零序电流来计算各区段零序电流频谱能量分布特性的相对熵, 以熵值最大作为区段定位的依据; 文献[14]利用皮尔逊相关系数分析正向、反向差电流的相似性来进行故障测距。对零序电流预处理后, 可以将故障定位问题转化为电流波形的相似度问题^[15-18]。证据理论可以利用多传感器的多种故障信息, 提高故障诊断的可靠性。通过 SVM 分类的准确率来对证据进行自适应权重分配, SVM 与证据理论的结合能够解决各证据间冲突的问题^[19-20]。文献[21]将多个神经网络的初步诊断结果通过证据理论融合, 发挥各自优势。单一故障选线判据难以实现对所有工况的正确诊断, 具有一定的局限性, 对多个选线判据的融合能够大大提高选线的准确率^[22-25]。

传统定位方法大概分为两大类: 基于稳态电气量特征的阻抗法^[26-27]和基于暂态电气量特征的行波法^[28], 阻抗法的定位精度严重依赖线路参数的准确性, 行波法在拓扑复杂的配电网中折反射现象复杂, 且要求装置具有很高的采样率, 工程上难以实现。

人工智能算法高度依赖训练数据, 且提取故障特征和对特征进行分析处理的算法复杂, 难以快速识别故障区段。而磁场定位的优势明显, 成本低, 能定位到两杆塔之间, 精度高且不受线路复杂拓扑影响, 监测设备的运行不会对原电路造成干扰, 同时直接利用磁场来反映故障物理特性, 分析过程简单。最后引入多判据的融合算法提高了定位的准确率。

与此同时, 现有的基于磁场定位的方法也存在各种各样的问题, 比如基于磁场与行波结合的方法, 其准确性受到行波传感器采样率制约, 对设备技术条件和成本要求较高, 难以满足现场应用要求; 采用基于信号处理分析磁场的方法^[29], 由于引入了复杂的特征提取过程, 使得分析过程更为复杂, 比如小波分析的基函数选取与分解层数严重依赖人为经验, 而经验模态分解又容易出现模态混叠等问题; 传统基于磁场幅值与相位的定位方法仅简单考虑幅值与相位的变化情况, 对于磁场的深层次信息挖掘与利用不够, 导致其适应性差, 无法实现高阻故障、电压过零点故障等极端工况下的定位问题。相比现有的磁场定位方法, 本文方法对磁场传感器采样率没有特殊要求, 可使用低成本的常规磁阻传感器即可实现磁场信号的准确获取, 且只需对原始磁场波形进行简单预处理, 并以此构建 5 种判据分别对磁场波形特征进行测度, 最终构建基于 D-S 证据理论的融合方法, 实现基于架空线下方磁场特征的配电网故障区段定位方法, 验证表明, 本文方法对于高阻故障等极端工况具有较强的适应性。

1 架空线下磁场分析

如图 1 所示, 根据毕奥-萨伐尔定律, 载流导线在空间内 P 点处产生的磁感应强度为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \theta}{r^2} \quad (1)$$

$$B = \int dB = \int_{MN} \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \sin \theta}{r^2} \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, 其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$; r 为测量点 P 与电流元之间的距离; I 为导体中的电流; θ 为 P 点的矢量 \vec{r} 与电流元 $I d\vec{l}$ 之间的夹角, $dl = r_0 d\theta / \sin^2 \theta$, 则

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (3)$$

当 l 为无限长载流直导线, 即 $\theta_1 \rightarrow 0, \theta_2 \rightarrow \pi$ 时, 存在如式(4)的关系。

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0} \quad (4)$$

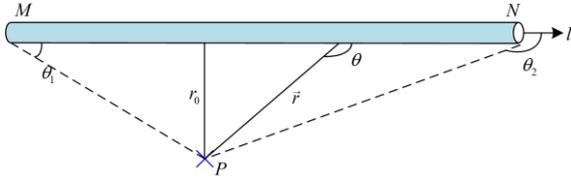


图 1 载流导体与附近 P 点几何关系

Fig. 1 Geometric relationship between current carrying conductor and nearby P point

式中, r_0 为 P 点与导体的距离。

三相导线不同排列时^[30], 传感器在杆塔上的安装位置如图 2 所示。

线路的工频电磁场作为准静态电磁场, 配电线路可以看作无限长直导线, 建立以传感器为中心的坐标轴, 传感器在导线的不同位置时, 磁感应强度均可拆分为 x 轴与 y 轴两部分, 如图 3 所示。

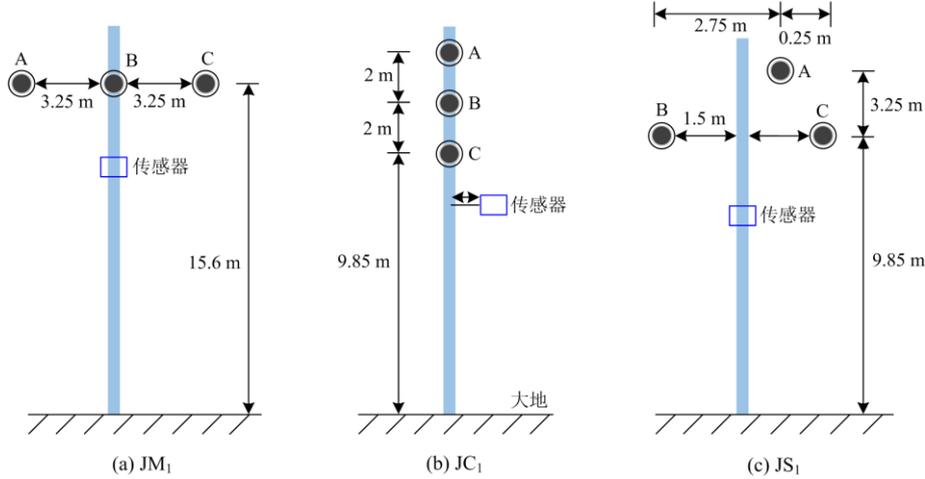


图 2 架空导线排列和传感器安装位置关系

Fig. 2 Line arrangement and sensor installation location diagram

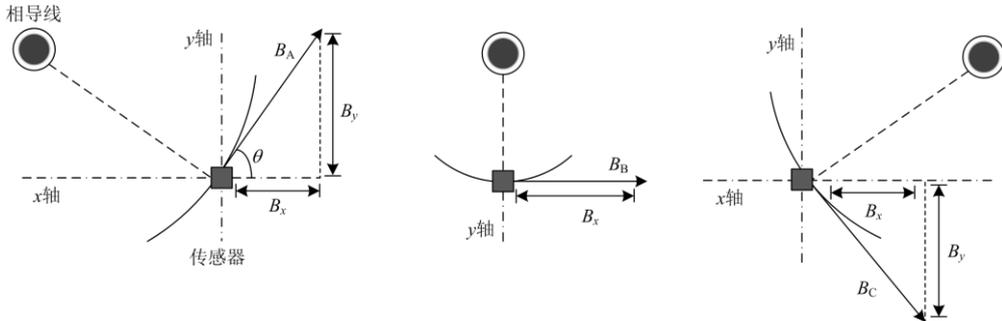


图 3 传感器处磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution at the sensor

当三相电流单独作用时产生的磁感应强度分别为

$$B_A = \frac{\mu_0 I_A}{2\pi r_A} \quad B_B = \frac{\mu_0 I_B}{2\pi r_B} \quad B_C = \frac{\mu_0 I_C}{2\pi r_C} \quad (5)$$

传感器处的磁场矢量和为

$$\begin{aligned} \vec{B} &= B_x \vec{i}_x + B_y \vec{i}_y + B_z \vec{i}_z = \\ &[(B_B + B_A \cos \theta + B_C \cos \theta) \vec{i}_x + (B_A \sin \theta - B_C \sin \theta) \vec{i}_y + 0] \end{aligned} \quad (6)$$

三相不同排列方式下沿 x 轴方向的磁感应强度具有相同的计算式, 如式(7)所示。

$$\begin{aligned} B_x &= B_A \cos \theta_A + B_B \cos \theta_B + B_C \cos \theta_C = \\ &\frac{\mu_0 I_A r_{Ay}}{2\pi r_A^2} + \frac{\mu_0 I_B r_{By}}{2\pi r_B^2} + \frac{\mu_0 I_C r_{Cy}}{2\pi r_C^2} \end{aligned} \quad (7)$$

不同排列方式下沿 y 轴方向的磁感应强度不同。三相导线水平排列时, 如图 2(a)所示, 沿 y 轴方向磁感应强度为

$$\begin{aligned} B_y &= B_A \sin \theta_A - B_C \sin \theta_C = \\ &\frac{\mu_0 I_A r_{Ax}}{2\pi r_A^2} - \frac{\mu_0 I_C r_{Cx}}{2\pi r_C^2} \end{aligned} \quad (8)$$

三相导线竖直排列时, 如图 2(b)所示, 沿 y 轴方向磁感应强度为

$$B_y = B_A \sin \theta_A + B_B \sin \theta_B + B_C \sin \theta_C = \frac{\mu_0 I_A r_{Ax}}{2\pi r_A^2} + \frac{\mu_0 I_B r_{Bx}}{2\pi r_B^2} + \frac{\mu_0 I_C r_{Cx}}{2\pi r_C^2} \quad (9)$$

三相导线三角排列时, 如图 2(c)所示, 沿 y 轴方向磁感应强度为

$$B_y = B_B \sin \theta_B - B_A \sin \theta_A - B_C \sin \theta_C = \frac{\mu_0 I_B r_{Bx}}{2\pi r_B^2} - \frac{\mu_0 I_A r_{Ax}}{2\pi r_A^2} - \frac{\mu_0 I_C r_{Cx}}{2\pi r_C^2} \quad (10)$$

式(6)一式(10)中: r_A, r_B, r_C 分别为三相导线与传感器间的距离; i_x, i_y, i_z 分别为磁场 x, y, z 轴的单位矢量; r_{Ax}, r_{Bx}, r_{Cx} 分别为三相导线在 x 轴上与传感器之间的距离; r_{Ay}, r_{By}, r_{Cy} 分别为三相导线在 y 轴上与传感器之间的距离。

以一典型配电网为例, 分别采用图 2(a)中水平排列的 JM_1 杆型结构、图 2(b)中竖直排列的 JC_1 杆型结构、图 2(c)中三角排列的 JS_1 杆型结构, 3 种杆塔类型下, 线路流经同样的电流时架空线下方磁场波形如图 4 所示。

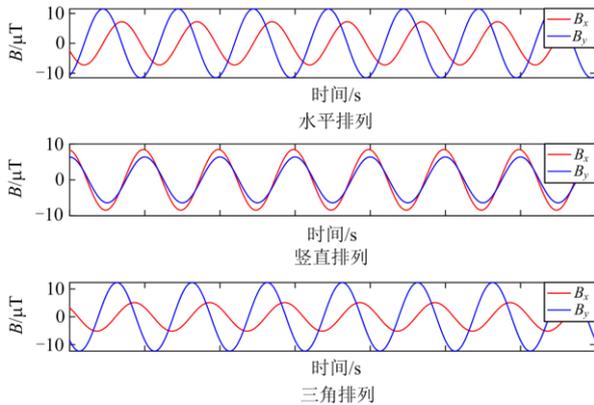


图 4 导线不同排列下架空线下磁场波形

Fig. 4 Waveform of magnetic field under overhead line with different conductor arrangement

由图 4 及式(5)一式(10)可知, 与电流信号相同, 磁场信号依旧具有正弦特征且频率同样为 50 Hz。传感器处 x 轴与 y 轴磁场的大小及相位受三相导线不同排列方式的影响。三相导线在同一排列方式下, B_x 与 B_y 之间也存在大小及相位上的差异。

当线路为同杆并架双回时^[31], 由于传感器一般安装在杆塔上, 因此, 传感器两侧的三相导线对称相等, 导致 y 轴上的磁场相互抵消后为 0(双回线各相电流对应相等时), x 轴上的磁场强度大小和三相

导线三角排列近似相等且依然满足故障特征, 其线路结构和正常时磁场波形对比如图 5 所示。

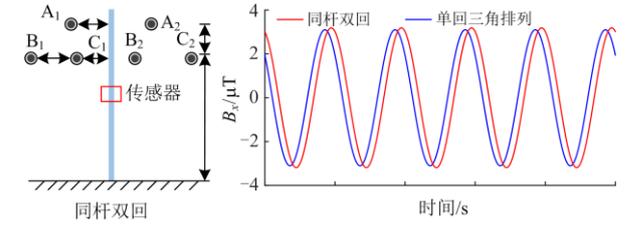


图 5 杆塔结构及磁场波形对比

Fig. 5 Tower structure and waveform of magnetic field comparison

2 故障定位算法

2.1 故障区段定位

某典型 10 kV 配电网发生单相接地故障时, 供电拓扑如图 6 所示。

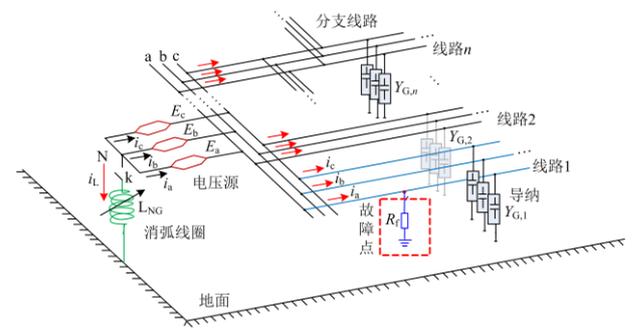


图 6 配网单相接地故障模型

Fig. 6 Grounding fault model of distribution network

发生单相接地故障时, 电源侧线路从故障点接入大地构成回路, 流过接地点的电流为系统所有非故障相对地电容电流之和, 当接地电阻较小时, 故障点前故障相电流会显著增大, 故障点后故障相电流会降低, 前后出现显著差异。非故障相电压升高, 相电流微弱变化, 且两个非故障相的相电流变化量近似相等^[32]。而由于配电网线路较短, 故障点前与故障点后两部分各自的电流不会出现较大变化, 所以故障点前和故障点后两部分各自的所有传感器所测磁场基本相同。三相电流的变化导致架空线下的磁场大小发生改变, 由此可根据故障点前后磁场差异来确定故障区段。为更好阐述这一特性, 分别给出故障点前后故障相电流, 三相合成的 x 轴磁场、 y 轴磁场波形, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 故障时刻相电流发生变化时, 故障点前后的磁感应强度也同时都敏感变化。故障点前的磁场会随着相电流的增大而增大。图 7 说明电流的变化会影响磁场, 即磁场的变化能够反映电流

的变化。因此，同电流一样，磁场也能够表征线路的运行情况。

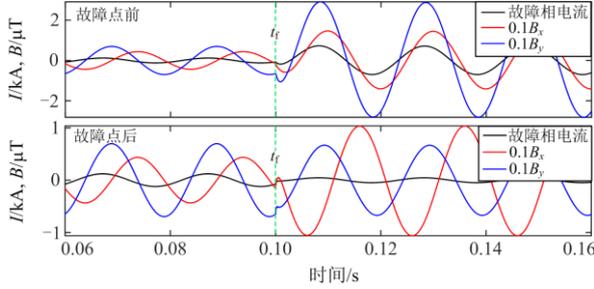


图7 故障相电流及磁场变化

Fig. 7 Fault phase current and magnetic field change

2.2 相似度分析判据原理

本文采用相对熵、Frobenius 范数、最大平均差异、余弦相似度、皮尔逊相关系数 5 种相似度分析方法对各区段两端传感器获取的磁场波形进行分析，具体如下。

2.2.1 相对熵

定义：相对熵可以度量两个不同向量之间的差异，计算式为两个向量信息熵之差。对于概率分布分别为 P 和 Q 的两个离散随机变量 $P(i)$ 和 $Q(i)$ ，其相对熵可表示为

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_i P(i) \log \frac{P(i)}{Q(i)} \quad (11)$$

相对熵可以度量相邻两测点磁场的近似程度，熵值越小，说明两测点磁场越相似，熵值越大，说明两测点磁场差异越大，即此区段故障的可能性越大。定位算法中，各测点间磁场的相对熵定义为

$$D_{KL}(B_i || B_{i+1}) = \left| B_{xi} \log \frac{B_{xi}}{B_{xi+1}} \right| + \left| B_{yi} \log \frac{B_{yi}}{B_{yi+1}} \right| \quad (12)$$

式中： B_i 与 B_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 这两个相邻测点的磁场；下标 x, y 表示 x, y 坐标轴。

2.2.2 Frobenius 范数

Frobenius 范数简称 F-范数，其大小可以表征两个矩阵之间的距离，即两个矩阵的相似度。对于 $m \times n$ 的矩阵 A ，其 F-范数可定义为

$$\|A\|_F = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |a_{ij}|^2 \right)^{1/2} \quad (13)$$

式中， a_{ij} 为矩阵 A 中的元素。

为更好说明 F-范数原理，假设所采集的磁场波形的采样点数为 λ 个，则各监测点沿 x 轴的磁场与沿 y 轴磁场所测数据可构成 $\lambda \times 2$ 的矩阵 $[B_x, B_y]$ ，相邻测点磁场所构成的两个矩阵的差矩阵的 F-范数可表征相邻两测点磁场的相似度，进一步，F-范

数值的大小与磁场间的相似度成反比。

2.2.3 最大平均差异 (Maximum Mean Discrepancy, MMD)

MMD 通过度量源域与目标域数据在再生 Hilbert 空间中的距离来作为两个样本分布相似程度的判断依据。假设 X, Y 为两种分布的数据集，其大小分别为 n, m ，映射函数集用 F 表示，则 MMD 的经验估计为

$$\text{MMD}[F, X, Y] := \sup_{f \in F} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i) - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f(y_j) \right] \quad (14)$$

式中， x_i, y_j 分别为 X, Y 中的样本。将式(14)展开可得

$$\text{MMD}[F, X, Y] = \left\| \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{i'=1}^n k(x_i, x_{i'}) - \frac{2}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k(x_i, y_j) + \frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^m \sum_{j'=1}^m k(y_j, y_{j'}) \right\|^{1/2} \quad (15)$$

在式(15)中，由于映射函数不容易定义，因此跳过选取映射函数的过程，一般以高斯核函数作为核函数，直接求取 $k(x_i, x_{i'})$ 等。

2.2.4 余弦相似度

余弦相似度通过测量两个向量夹角的余弦值来度量它们之间的相似性，其值介于 -1 和 1 之间。其定义为

$$\cos \theta = \frac{x \cdot y}{\|x\| \|y\|} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \times y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (16)$$

基于式(16)，相邻磁场间相似度定义为

$$\cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} B_{xi} \times B_{xi+1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} B_{xi}^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} B_{xi+1}^2}} + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} B_{yi} \times B_{yi+1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} B_{yi}^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} B_{yi+1}^2}} \quad (17)$$

由式(17)可知，余弦相似度的数值越接近于 2，表明相邻两测点的磁场越相似。

2.2.5 皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数等同于对数据先进行去中心化操作，对处理后的数据进一步求解余弦相似度值，其计算公式为两个变量之间的协方差 $\text{cov}(X, Y)$ 和标准差 σ 的商，如式(18)所示。

$$\rho_{XY} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (18)$$

基于式(18)，相邻磁场间相似度定义为

$$\rho_{i,i+1} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (B_{xi} - \bar{B}_{xi})(B_{xi+1} - \bar{B}_{xi+1})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (B_{xi} - \bar{B}_{xi})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (B_{xi+1} - \bar{B}_{xi+1})^2}} + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (B_{yi} - \bar{B}_{yi})(B_{yi+1} - \bar{B}_{yi+1})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (B_{yi} - \bar{B}_{yi})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (B_{yi+1} - \bar{B}_{yi+1})^2}} \quad (19)$$

与余弦相似度相同, 相关系数越接近于 2, 表明相邻两测点的磁场越相似。

2.3 D-S 证据融合的实现

D-S 证据理论是不确定推理中数值推理的一种, 可以看作对主观 Bayes 方法的推广。D-S 证据理论可以将多证据体的输出结果相融合, 在专家系统、情报系统、多属性决策分析等领域具有广泛应用。

2.3.1 基本概率分配

D-S 证据理论的识别框架 U 包含各证据体所判定的有限种互斥的结果。在配电网区段定位中, 这些结果即各个区段发生故障的情况。

在识别框架 U 上的基本概率分配是一个 $2^U \rightarrow [0,1]$ 的函数 m , 称为 mass 函数, 满足式(20)。

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \subseteq U} m(A) = 1 \end{cases} \quad (20)$$

式中, mass 值大于 0 的假设 A 称为焦元。

相对熵, F-范数, MMD 分别作为故障区段定位的一项证据体, 3 种方法所得结果均为正值, 且结果越大, 表示相邻磁场差异越大, 即越可能为故障区段。

相对熵、F-范数和 MMD 3 种判据的基本概率分配函数均为

$$m_j = D_j / \sum_{j=1}^{n-1} D_j \quad (21)$$

式中: D_j 表示在某一判据下 j 区段的计算结果, $j=1,2,3,L,n-1$; m_j 表示此判据下 j 区段的故障概率。

余弦相似度和皮尔逊相关系数分别作为故障区段定位的一项证据体, 在本文定位算法中, 两种方法所得结果在 -2 和 +2 之间, 其计算结果越小, 所对应的区段越可能为故障区段。引入 $1/e^x$ 函数, 如图 8, 其因变量恒大于 0 且在整个定义域中为减函数。以余弦相似度为例, $y=1/(e \cos^x)$ 满足 $\cos x$

的值越小, 其 y 值越大, 即越可能为故障区段。同时, 其计算结果恒为正, 保证了基本概率分配的实现。

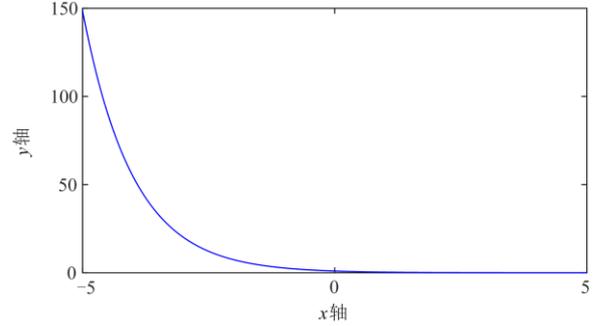


图 8 $y = 1/e^x$ 函数图像

Fig. 8 $y = 1/e^x$ function image

定义余弦相似度和相关系数两种判据的 mass 函数为

$$m'_j = \frac{1/e^{D_j}}{\sum_{j=1}^{n-1} 1/e^{D_j}} \quad (22)$$

2.3.2 Dempster 合成规则

对于 $\forall A \subseteq U$, U 上 n 个 mass 函数的 D-S 合成规则为

$$(m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n)(A) = \frac{1}{K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) \quad (23)$$

式中, K 称为归一化系数, 反映了各证据间的冲突程度, K 值越趋近于 0, 表明各证据体的判断越不一致。

2.4 故障定位流程

基于相似度分析、D-S 证据理论的多证据融合诊断故障区段流程如图 9 所示。首先通过双轴磁传感器获取 x 轴和 y 轴的磁场原始波形, 并对原始波形进行适度放大和滤波去噪, 然后使用相对熵、F-范数、MMD、余弦相似度、相关系数 5 种方法分别对各相邻监测点的磁场波形进行相似度分析, 基于相似度计算结果进行基本概率分配, 最后利用 D-S 证据理论实现多判据的分析融合。

3 数据窗影响分析

考虑不同数据窗的选取对波形相似度的影响, 图 10 为不同采样周波下故障点前后 x 、 y 轴磁场的极坐标轨迹图。其中图 10(a)为故障时刻之后半周波磁场减去故障时刻前半周波磁场, 图 10(b)为故障时刻之后半周波的磁场数据, 图 10(c)为故障时刻后一周波的磁场, 图 10(d)为故障时刻后 2 周波的磁场数据。

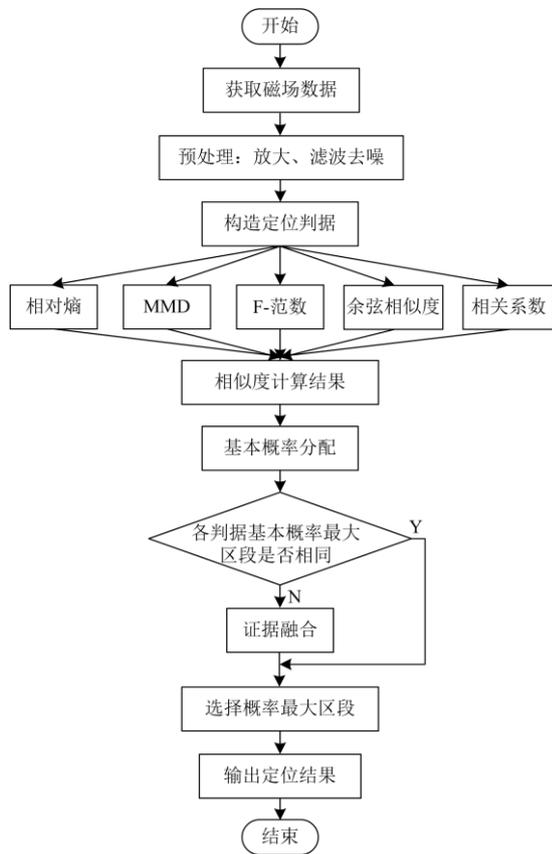


图 9 故障定位流程

Fig. 9 Fault location flow

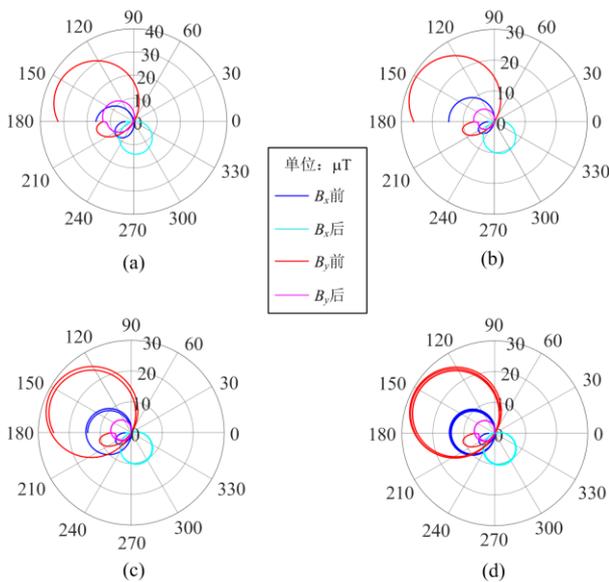


图 10 不同采样数据窗时各轴的磁场轨迹

Fig.10 Magnetic field locus in different sampling data windows

对比图 10(a)、图 10(b)可知, 故障时, 两种数据窗下同轴上故障点前后磁感应强度大小的差值基

本相同, 但所获取的未经处理的原始磁场波形明显具有更大的差异, 即相似度更低, 更适合本文定位算法。由图 10(c)、图 10(d)可知, 故障发生一周波时磁场已趋于稳定, 故障点前后的磁场差异基本保持恒定。

4 仿真验证

4.1 仿真模型

以 PSCAD 仿真软件为平台搭建如图 11 所示的 10 kV 典型配电网系统。系统共 3 条架空线路, 主线路均为 10 km, 杆塔采用 JM₁ 杆型结构, 三相导线水平排列, 其中杆塔高度为 15.6 m, 相间距为 3.25 m, 传感器位于杆塔上, 距中间相 3 m, 消弧线圈过补偿 5%, 变压器额定容量为 31.5 MVA, 采样频率为 20 kHz。f 处为单相接地故障点。线路参数如表 1 所示。

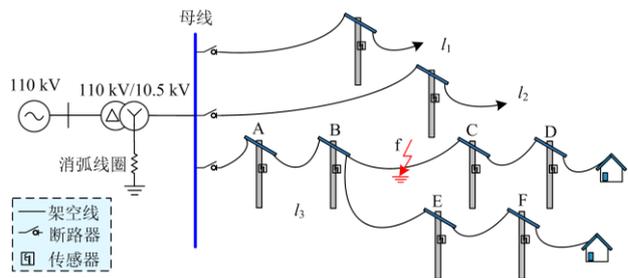


图 11 10 kV 配电网模型

Fig. 11 10 kV distribution network model

表 1 配电网模型线路参数

Table 1 Distribution network model line parameters

线路类型	相序	$R/(\Omega/\text{km})$	$L/(\text{mH}/\text{km})$	$C/(\text{nF}/\text{km})$
架空线路	正序	0.1700	1.2100	9.7000
	零序	0.2300	5.4800	6.0000

4.2 区段定位算法验证

线路 l_3 上 BC 区段 f 点在 0.1 s 时发生 A 相单相接地故障, 采集各测点故障发生后第 2 个 1/4 周波与故障前的第 3 个 1/4 周波, 对各波形差分别根据式(12)一式(14)、式(17)和式(19)计算各判据下的相似度, 为了方便 MMD 中高斯核函数 sigma 的取值, 在计算 MMD 时将磁场波形数据均放大 10^6 倍。下列各表中, 行为 5 种相似度判据, 列为待诊断区段。

4.2.1 普通工况测试

设定接地电阻 R_f 为 5Ω , 由图 12 可知, 故障点前后 x 轴和 y 轴上的磁场具有明显差异, 相似度很低。根据磁阻传感器所测数据, 计算配网模型中各区段在各判据下的相似度结果, 如表 2 所示。

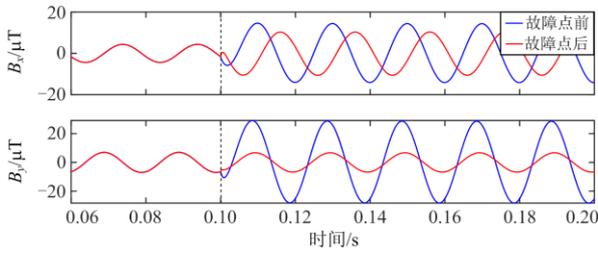
图 12 R_f 为 5Ω 时的磁场波形Fig. 12 Magnetic field waveform when R_f is 5Ω

表 2 普通工况下各判据相似度计算值

Table 2 Similarity calculation value of each criterion

under normal condition

相似度计算值	AB	BC	CD	BE	EF
相对熵($\times 10^{-7}$)	0.0138	1334.0879	0.0051	0.0081	0.0040
F-范数($\times 10^{-6}$)	0.0431	872.9902	0.0143	0.0240	0.0119
MMD($\times 10^{-4}$)	1.5463	12 932.5598	0.3555	0.4236	0.1903
余弦相似度	2.0000	-1.8207	2.0000	2.0000	2.0000
相关系数	2.0000	0.6702	2.0000	2.0000	2.0000

由表 2 数据可知, 在各判据下, BC 区段两端的磁场相似度都远低于其他区段。由表 2 的相似度计算结果, 根据式(21)、式(22)计算各区段在各判据下基本概率, 列于表 3。

表 3 普通工况下各判据基本概率分布

Table 3 Basic probability assignment of each criterion

under normal condition

基本概率分布	AB	BC	CD	BE	EF
相对熵	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
F-范数	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
MMD	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
余弦相似度	0.0201	0.9196	0.0201	0.0201	0.0201
相关系数	0.1285	0.4860	0.1285	0.1285	0.1285

对于本文应用 D-S 证据理论实现故障定位的方法, 基本概率和融合概率值越大, 区段故障的可能性越大。表 3 中各判据下 BC 区段的基本概率均远大于其他区段, 判定 BC 区段发生故障, 结果正确, 说明在接地电阻低且无其他外界因素干扰的理想情况下, 本文定位算法具有很高的可靠性。

4.2.2 含噪声测试

为模拟实际配电网故障发生时的复杂情况, 考虑噪声对定位算法的影响, 对原始磁场波形叠加信噪比为 120 dB 的高斯白噪声, 同时接地电阻 R_f 设置 20Ω , 故障点前后 B_x 和 B_y 如图 13 所示。

由图 13 可知, 此工况下故障点前后 x 轴和 y 轴上的磁场依然具有显著差异, 相似度低。根据传感器所测数据, 计算各区段在各判据下的相似度结

果, 如表 4 所示。

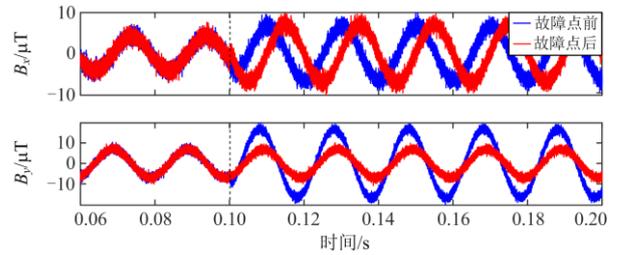
图 13 R_f 为 20Ω 时的磁场波形Fig. 13 Magnetic field waveform when R_f is 20Ω

表 4 含噪声工况下各判据相似度计算值

Table 4 Similarity value of each criterion under noise condition

相似度计算值	AB	BC	CD	BE	EF
相对熵($\times 10^{-5}$)	0.3498	4.9967	0.4510	0.4656	0.4783
F-范数($\times 10^{-5}$)	9.0980	41.6177	9.1981	8.7512	8.7742
MMD	0.0106	1.2482	0.0234	0.0122	0.0152
余弦相似度	1.8464	-1.0441	0.8026	0.6971	0.6313
相关系数	0.5063	-0.0161	0.0947	0.0780	0.0727

由表 4 数据可知, 各判据下的 BC 区段两侧磁场相似度都低于其他区段。由表 4 结果计算基本概率分配, 列于表 5。

表 5 含噪声工况下各判据基本概率分布

Table 5 Basic probability assignment of each criterion

under noise condition

基本概率分布	AB	BC	CD	BE	EF
相对熵	0.051 88	0.741 20	0.066 90	0.069 07	0.070 95
F-范数	0.117 48	0.537 43	0.118 78	0.113 01	0.113 30
MMD	0.008 07	0.953 14	0.017 83	0.009 34	0.011 62
余弦相似度	0.035 25	0.634 59	0.100 10	0.111 25	0.118 81
相关系数	0.137 50	0.231 84	0.207 51	0.211 02	0.212 13

表 5 数据表明: 各判据中基本概率最大的区段均为 BC 区段, 正确地判定出了故障区段。由以上仿真可以看出, 本文定位方法的准确性没有受到外界噪声的影响, 说明其具有一定的抗噪声干扰能力。

4.2.3 高阻含噪测试

将上述系统中接地电阻 R_f 调整为 2000Ω , 对原始磁场波形叠加信噪比为 130 dB 的高斯白噪声, 故障点前后 B_x 和 B_y 的磁场波形如图 14 所示。

由图 14 可知, 在高阻故障工况下故障点前后的磁场具有很高的相似度。计算各区段在各判据下的相似度结果, 如表 6 所示。

由表 6 数据可知, 在此极端工况下, 虽然最后两种判据出现了不同结果, 但前 3 种判据下 BC 区段的相似度依然低于其他区段。由表 6 计算结果计算基本概率分配, 列于表 7。

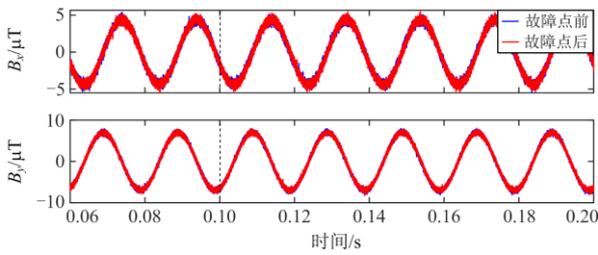


图 14 R_f 为 2000 Ω 时的磁场波形

Fig. 14 Magnetic field waveform when R_f is 2000 Ω

表 6 高阻工况下各判据相似度计算值

Table 6 Similarity calculation value of each criterion under high impedance fault

相似度计算值	AB	BC	CD	BE	EF
相对熵($\times 10^{-6}$)	1.5974	1.7376	1.5416	1.6343	1.6645
F-范数($\times 10^{-5}$)	2.8181	2.9036	2.7779	2.8461	2.8660
MMD	0.0093	0.0296	0.0088	0.0066	0.0031
余弦相似度	0.1290	-0.0505	0.0383	0.0028	-0.0697
相关系数	0.0404	-0.0393	0.0346	0.0033	-0.0726

表 7 高阻工况下各判据基本概率分布

Table 7 Basic probability assignment of each criterion under high impedance fault

基本概率分布	AB	BC	CD	BE	EF
相对熵	0.195 39	0.212 55	0.188 57	0.199 90	0.203 59
F-范数	0.198 29	0.204 31	0.195 47	0.200 26	0.201 67
MMD	0.162 65	0.516 61	0.152 86	0.114 61	0.053 27
余弦相似度	0.177 12	0.211 94	0.193 94	0.200 95	0.216 05
相关系数	0.190 62	0.206 43	0.191 72	0.197 82	0.213 41

表 7 中各判据所得最大基本概率不是同一区段, 因此通过证据理论进行融合, 5 段线路故障的概率分别为 12.61%、58.18%、12.42%、10.81%、5.98%, BC 区段概率远大于其他区段, 可判定 BC 为故障区段。仿真结果表明: 在外界干扰较小时, 高阻故障下会导致个别判据出现误判, 但融合后的综合判据依然能够准确地定位故障区段, 由此可见, 本文算法具有一定的耐高阻能力。

由以上仿真可知, 不同判据进行融合, 能够克服单一判据的局限性, 得到比单判据可信度更高的结果, 比如单判据作用时, 应用 MMD 分析故障区段概率最大只有 51.66%; 只应用相关系数分析, 会得到错误结果。算例仿真结果充分说明本文提出的基于 D-S 证据理论的多相似度判据故障定位方法的准确性与有效性。

5 结论

本文提出了一种基于磁场波形相似度分析与

D-S 证据理论结合的配电网架空线故障定位方法, 首先采用 5 种相似度方法从不同角度对磁场波形进行分析, 然后通过分析结果得出基本概率, 最后用证据理论进行融合。充分利用了各个判据的优势, 比单一判据具有更高的可靠性, 提高了判断结果的准确性。

1) 定位方法通过双轴磁阻传感器获取的磁场信息进行故障定位, 经济性好, 精度高, 能够定位到两杆塔之间且运行过程中不会对线路电流造成干扰, 并且具有不停电安装维护的优势, 可在配网大规模应用, 具有很强的现实意义。

2) 本文算法在缺少部分监测装置信息时虽然可能降低定位精度, 但依然可以应用, 且不受三相不平衡和 DG 接入的影响(不影响故障时磁场差异性特征), 抗噪声能力强, 适用于高阻接地工况, 在极端条件下依然能够得到较高的准确率。

参考文献

- [1] 曾祥君, 黄慧, 喻锴, 等. 基于柔性调控零序电压的配电网高阻接地及单相断线故障的选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 9-18.
ZENG Xiangjun, HUANG Hui, YU Kun, et al. Voltage phase selection method for high resistance grounding and a single-phase disconnection fault of a distribution network based on flexible control of zero-sequence voltage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 9-18.
- [2] 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.
- [3] 王晓伟, 张晓, 赵倩宇, 等. 基于暂态零模电流的配电网故障区段定位[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 103-110.
WANG Xiaowei, ZHANG Xiao, ZHAO Qianyu, et al. Fault section location in distribution system based on transient zero-mode current[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 103-110.
- [4] KAZIM M, KHAWAJA A H, ZABIT U, et al. Fault detection and localization for overhead 11-kV distribution lines with magnetic measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(5): 2028-2038.
- [5] LEKIC D M, MRŠIĆ P D, ERCEG B B, et al. Generalized approach for fault detection in medium voltage distribution networks based on magnetic field measurement[J]. IEEE

- Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1189-1199.
- [6] SARLAK M, SHAHRTASH S M. High-Impedance faulted branch identification using magnetic-field signature analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 67-74.
- [7] HUANG Qi, ZHEN Wei, PHILIP PONG A novel approach for fault location of overhead transmission line with noncontact magnetic-field measurement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1186-1195.
- [8] SUN Xu, HUANG Qi, HOU Yunhe, et al. Noncontact operation-state monitoring technology based on magnetic-field sensing for overhead high-voltage transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2145-2153.
- [9] OLIVEIRA N J A, SARTORI C A F, MANASSERO G J R. Fault location in overhead transmission lines based on magnetic signatures and on the extended Kalman filter[J]. IEEE Access, 2021, 9: 15259-15270.
- [10] KHAWAJA A H, HUANG Qi, LI Jian, et al. Estimation of current and sag in overhead power transmission lines with optimized magnetic field sensor array placement[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(5).
- [11] 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.
- [12] 李冰, 雷泷杰, 陈超. 基于椭圆拟合的双轴磁传感器标定方法[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(3): 20-23.
LI Bing, LEI Longjie, CHEN Chao. A calibration method of biaxial magnetic sensor based on ellipse fitting[J]. Journal of Detection & Control, 2020, 42(3): 20-23.
- [13] 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, 40(20): 26-31.
LÜ 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, 40(20): 26-31.
- [14] 李斌, 张纪航, 刘海金, 等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 27-32, 53.
LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 27-32, 53.
- [15] 尤向阳, 葛笑寒, 吴萍. 基于零序电流波形相似度的接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 124-130.
YOU Xiangyang, GE Xiaohan, WU Ping. Grounding fault location method based on waveform similarity of zero-sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 124-130.
- [16] 李卫国, 许文文, 乔振宇, 等. 基于暂态零序电流凹凸特征的配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 164-173.
LI Weiguo, XU Wenwen, QIAO Zhenyu, et al. Fault section location method for a distribution network based on concave and convex characteristics of transient zero sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 164-173.
- [17] 张太升, 韩伟, 杨霖, 等. 基于波形相关分析的双馈风电场送出线时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 82-88.
ZHANG Taisheng, HAN Wei, YANG Lin, et al. Time-domain distance protection for transmission lines of doubly-fed wind farms based on waveform correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 82-88.
- [18] 梅睿, 程孟晗, 管廷龙, 等. 基于电流波形聚类的谐振接地系统高阻接地故障定位方法[J]. 供用电, 2020, 37(5): 36-41.
MEI Rui, CHENG Menghan, GUAN Tinglong, et al. High-resistance grounding fault location method for resonance grounding system based on current waveform clustering[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(5): 36-41.
- [19] 赵书涛, 王亚潇, 孙会伟, 等. 基于自适应权重证据理论的断路器故障诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 7040-7046.
ZHAO Shutao, WANG Yaxiao, SUN Huiwei, et al. Research of circuit breaker fault recognition method based on adaptive weighted of evidence theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 7040-7046.
- [20] 向阳辉, 张干清, 庞佑霞. 结合 SVM 和改进证据理论的多信息融合故障诊断[J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 71-77.
XIANG Yanghui, ZHANG Ganqing, PANG Youxia. Multi-information fusion fault diagnosis using SVM & improved evidence theory[J]. Vibration and Shock, 2015, 34(13): 71-77.
- [21] 廖瑞金, 廖玉祥, 杨丽君, 等. 多神经网络与证据理论融合的变压器故障综合诊断方法研究[J]. 中国电机工

- 程学报, 2006, 26(3): 119-124.
- LIAO Ruijin, LIAO Yuxiang, YANG Lijun, et al. Study on synthetic diagnosis method of transformer fault using multi-neural network and evidence theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 119-124.
- [22] 牛云涛, 李华, 宋志宏, 等. 谐振接地系统多判据多周期信息融合故障选线方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 512-517.
- NIU Yuntao, LI Hua, SONG Zhihong, et al. Fault line selection for grounding power network in arc suppression coil based on information fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 512-517.
- [23] 贾清泉, 石磊磊, 王宁, 等. 基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 191-197.
- JIA Qingquan, SHI Leilei, WANG Ning, et al. A fusion method for ground fault line detection in compensated power networks based on evidence theory and information entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 191-197.
- [24] 贾清泉, 杨奇逊, 杨以涵. 基于故障测度概念与证据理论的配电网单相接地故障多判据融合[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 6-11.
- JIA Qingquan, SUN Qixun, YANG Yihan. Fusion strategy for single phase to ground fault detection implemented through fault measure and evidence theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 6-11.
- [25] 邓丰, 李鹏, 曾祥君, 等. 基于 D-PMU 的配电网故障选线和定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 160-167.
- DENG Feng, LI Peng, ZENG Xiangjun, et al. Fault line selection and location method based on synchrophasor measurement unit for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 160-167.
- [26] ROOSTAEE S, THOMAS M S, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 169-177.
- [27] 高传薪, 陈皓, 郑思琦, 等. 一种基于改进阻抗法的直流微网故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5): 151-158.
- GAO Chuanxin, CHEN Hao, ZHENG Siqi, et al. A fault location method for DC micro-grid based on the improved impedance method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 151-158.
- [28] 梁睿, 孟祥震, 周鲁天, 等. 配电网故障定位技术发展现状及展望[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 20-27.
- LIANG Rui, MENG Xiangzhen, ZHOU Lutian, et al. Status quo and prospect of distribution network fault location[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 20-27.
- [29] SARTORI C A F, SEVEGNANI F X. Fault classification and detection by wavelet-based magnetic signature recognition[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(8): 2880-2883.
- [30] 赵先德. 输电线路基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [31] 姜博, 董新洲, 施慎行, 等. 自适应时频窗行波选线方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6387-6397.
- JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. A method of adaptive time frequency window traveling wave based fault feeder selection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6387-6397.
- [32] 曾祥君, 王媛媛, 庞方亮, 等. 基于故障电阻测量的小电流接地系统保护方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 26-30.
- ZENG Xiangjun, WANG Yuanyuan, PANG Fangliang, et al. Grounding fault protection based on fault resistance measurement for ineffectively earthed distribution systems[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 26-30.

收稿日期: 2021-11-19; 修回日期: 2022-04-08

作者简介:

郭亮(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网继电保护;

杜欢(1996—), 男, 硕士, 研究方向为配电网接地故障处理; E-mail: shansi2021@126.com

王晓卫(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护、配电网接地故障处理等。E-mail: proceedings@126.com

(编辑 周金梅)