

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250651

## 基于模糊熵的 10 kV 配电网接地故障定位研究

王子轶<sup>1</sup>, 陈新岗<sup>1,2</sup>, 马志鹏<sup>1,2</sup>, 敖怡<sup>1</sup>, 况露<sup>1</sup>, 马林涛<sup>1</sup>

(1. 重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054; 2. 重庆市能源互联网工程技术研究中心, 重庆 400054)

**摘要:** 为提高 10 kV 配电网接地故障定位装置的稳定性、响应速度, 需研究更优的定位方法并设计配套硬件装置。首先分析了不同中性点接地方式(不接地和经消弧线圈接地)下单相和两相接地故障的暂态零序电流特征。然后通过理论推导和 Simulink 仿真验证了模糊熵在识别零序电流变化上的优越性能(连续模糊隶属函数抗噪能力强、参数敏感性低、非线性动力学特征解析能力强)。接着根据计算的相邻检测点熵值比, 结合模糊熵故障区间定位原理和区内非故障阈值(0.75~1.2), 实现故障区间的高效、稳定识别。最后开发以 STM32F103C8T6 开发板为核心装置, 并在 10 kV 配电网模拟平台上设置中性点不接地和经消弧线圈接地两种工况。实验结果表明, 该装置能准确识别出首段、尾段和检测点间的单相和两相接地故障, 其具有良好的速动性与稳定性, 抗噪能力强, 定位准确率受通信传输误差影响小。

**关键词:** 配电网接地故障; 零序电流; 模糊熵; 故障定位

### Research on ground fault location in 10 kV distribution networks based on fuzzy entropy

WANG Ziyi<sup>1</sup>, CHEN Xingang<sup>1,2</sup>, MA Zhipeng<sup>1,2</sup>, AO Yi<sup>1</sup>, KUANG Lu<sup>1</sup>, MA Lintao<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Chongqing Engineering Research Center of Energy Internet, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** To improve the stability and response speed of ground fault location devices in 10 kV distribution networks, it is necessary to investigate more effective fault location methods and design corresponding hardware devices. First, the transient zero-sequence current characteristics of single-phase and two-phase ground faults are analyzed for different neutral point grounding modes (i.e., ungrounded and grounded through an arc suppression coil). Subsequently, the superior performance of fuzzy entropy in identifying changes in zero-sequence current is verified through theoretical derivation and Simulink simulations, demonstrating its strong noise immunity due to a continuous fuzzy membership function, low parameter sensitivity, and strong capability in analyzing nonlinear dynamic characteristics. Then, based on the calculated entropy ratio between adjacent detection points, combined with the principle of fuzzy entropy fault section location and an internal non-fault threshold (0.75~1.2), efficient and stable identification of the fault section is achieved. Finally, a device centered on the STM32F103C8T6 development board is developed, and two operating conditions (ungrounded neutral point and neutral point grounded through an arc suppression coil) are set up on a 10 kV distribution network simulation platform. Experimental results show that the device can accurately identify single-phase and two-phase ground faults in the first section, the last section, and between detection points. The device exhibits fast operation, high stability, strong noise immunity, and high location accuracy with minimal influence from communication transmission errors.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Chongqing (No. CSTB2023NSCQ-MSX0337).

**Key words:** distribution network ground fault; zero sequence current; fuzzy entropy; fault location

## 0 引言

随着全球能源结构的转型以及我国“双碳”目

**基金项目:** 重庆市自然科学基金项目资助 (CSTB2023NSCQ-MSX0337); 重庆市教育委员会科学技术研究项目资助 (KJZD-K202101103); 重庆理工大学研究生教育高质量发展项目资助 (gzlcy20253136)

标的提出, 配电网作为电力系统中直接连接用户的关键环节, 在能源的高效利用和绿色低碳转型中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。配电网的安全稳定运行直接关系到社会生产、生活的正常进行, 配电网故障的类型及其占比与电网结构、运行模式和接地方式密切相关<sup>[2]</sup>。配电网中单相接地故障最常见, 占比超过 70%, 通常可在短时间内带故障运行, 其主要危害是可能引发过电压及绝缘老化<sup>[3]</sup>; 两相接地故障占

10%~20%，伴随显著的短路电流激增，可能烧毁设备或引发线路熔断<sup>[4]</sup>，不平衡电流可能使电动机等设备产生异常振动、发热，甚至烧毁绕组，同时破坏三相系统对称性，影响供电稳定性<sup>[5]</sup>。因此，展开配电网接地故障定位研究，高效、准确地排除故障对电网安全运行至关重要。

为提高配电网接地故障定位的准确度和效率，学者们进行了多项研究。文献[6]提出了一种基于阻抗法的故障定位方法，通过分析故障时的电压和电流变化来计算故障点阻抗，并通过改进计算方法提高定位精度，适用于复杂结构的配电网。文献[7]针对传统阻抗法的误差问题，结合电流和电压波形进行定位，在分布式电源接入电网的过程中，应充分利用多源数据，以提升故障定位的准确性。文献[8]研究了行波法在配电网中的应用，提出结合行波时延分析的改进算法，有效提升多分支节点的故障定位精度，实验表明该方法在复杂电网环境中性能稳定。文献[9]针对行波传播全过程幅值衰减和频谱畸变现象，提出了详细数学解析方法并实现了频谱预测校正，研发出了适用的故障分段和故障测距算法。文献[10]通过融合配电网原始信息与图神经网络等深度学习算法，利用基于注意力的时空图卷积网络和图注意力网络提取遥测通信数据故障特征，经一维卷积神经网络调整特征维度，实现节点到故障支路映射后，通过全连接网络输出故障区段定位结果。文献[11]提出基于图半监督与多任务学习的故障辨识方法，通过融合拓扑参数的图网络架构、多任务注意力机制及无标签数据特征，提升辨识精度与鲁棒性。

当前，国内外配电网接地故障定位研究存在以下问题。传统阻抗法精度取决于系统参数，而参数受温度、负载影响易变动。在高阻抗故障下，因电流微弱精度降低，多分支复杂网络中还存在多解难题，长距离输电时受电容效应与电流衰减干扰。行波法虽定位精度高，但高频行波传输易衰减，受噪声干扰大，且依赖高精度时钟同步设备，多分支网络中的反射和散射增加定位难度。基于智能算法的方法自适应性好，但是计算复杂，需大量历史数据训练，易过拟合，模型解释性差，不利于排查故障原因。

本文研究了 10 kV 配电网在不同中性点接地方式下单相和两相接地故障的零序电流特征，提出了基于零序电流模糊熵的故障定位方法，并通过应用 STM32F103C8T6 最小系统开发板、AD7606 数模转换模块等核心硬件，进一步设计和制作了一套相应的故障定位装置，通过 10 kV 配电网模拟实验平台对该装置进行检验。在不同中性点接地方式、故障

类型、接地电阻和故障初相角下进行实验，进一步推导出区内非故障阈值，用以判断 10 kV 配电网发生单相和两相接地故障的位置。

## 1 配电网接地故障定位方法

### 1.1 暂态零序电流特征分析

通过 MATLAB/Simulink 搭建 10 kV 配电网系统，系统原理图如图 1 所示，图中各检测点之间长度分别为  $L_1 = 2 \text{ km}$ ， $L_2 = 3 \text{ km}$ ， $L_3 = 2 \text{ km}$ ；线路正序阻抗  $Z_1 = (0.75 + j0.39) \Omega/\text{km}$ ；正序对地导纳  $b_1 = j3.043 \text{ S}/\text{km}$ ；单位长度零序阻抗  $Z_0 = (0.24 + 1.62j) \Omega/\text{km}$ ；单位长度零序对地导纳  $b_0 = j1.784 \text{ S}/\text{km}$ ；故障点处接地电阻为  $5 \Omega$ ，故障初相角为  $0^\circ$ ，故障开始时间为  $0.01 \text{ s}$ <sup>[12]</sup>。分别在中性点经消弧线圈接地或不接地系统中，设置单相或两相接地故障，通过 M、N、P、Q 4 个检测点计算线路中的零序电流，分析不同情况下的暂态零序电流特征。

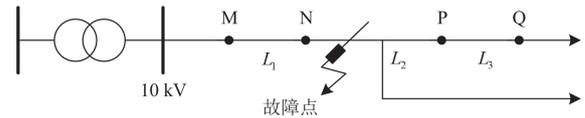


图 1 10 kV 配电网接地故障系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of 10 kV distribution network earth fault system

中性点不接地系统单相和两相接地故障零序电流如图 2 所示，中性点经消弧线圈接地系统单相和两相接地故障零序电流如图 3 所示。M 和 N 点、P 和 Q 点的零序电流波形具有相似的振荡和衰减特性；N 点和 P 点的零序电流波形在幅值和衰减速率方面差异显著，这种差异是由于故障点位置不同，

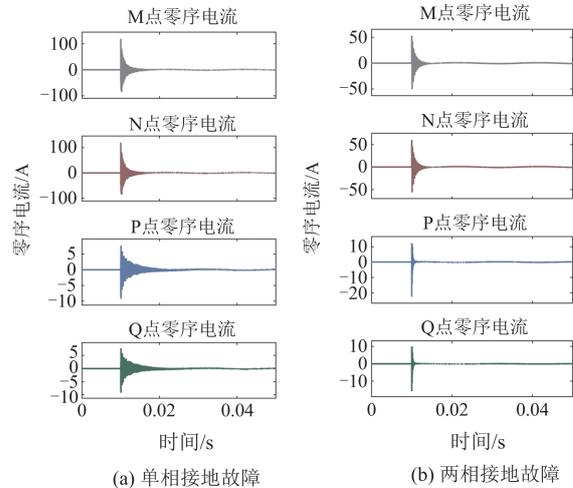


图 2 中性点不接地系统零序电流

Fig. 2 Zero sequence current of neutral ungrounded system

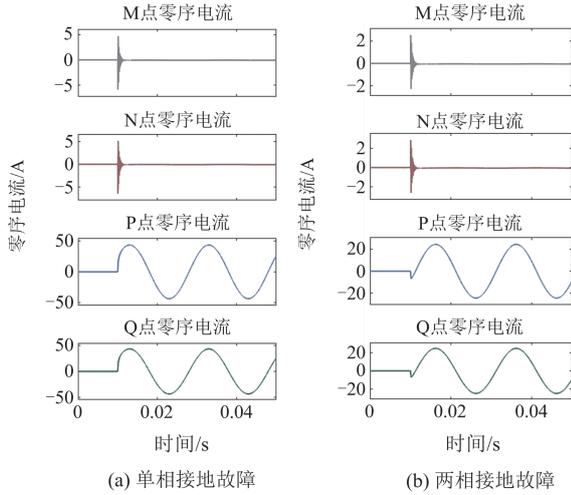


图3 中性点经消弧线圈接地系统零序电流

Fig. 3 Zero sequence current in neutral point via arc suppression coil grounding system

导致零序电流呈现非均匀的空间分布。同时，中性点不接地系统零序电流振荡频率高、衰减慢，表现为明显的高频衰减振荡；消弧线圈接地能够降低振荡频率、加快衰减，使波形更平稳<sup>[13]</sup>。模糊熵算法能对信号复杂度的变化进行量化，基于以上特性，通过对各检测点零序电流的模糊熵值进行计算并比较，可以有效识别故障点的位置。

## 1.2 模糊熵故障区间原理

模糊熵是一种评估时间序列复杂性与不确定性的统计量，由样本熵改进而来，旨在解决样本熵在处理边界问题时的敏感性，并在分析含噪时间序列时提供更加平滑和鲁棒的复杂性度量。模糊熵通过模糊隶属度函数来测量时间序列中模式的相似性，从而估计序列的复杂性。

模糊熵计算过程如下。

$m$  为嵌入维度，表示被比较的序列片段的长度，本文取值为 3； $r$  为容忍度或相似性判定阈值，表示时间序列标准差的 0.25 倍比例，取 0.25 倍标准差； $N$  为时间序列的长度； $n$  为模糊隶属度函数的分布参数，取值为 2。

从时间序列中提取长度为  $m$  的向量。对于时间序列  $[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]$ ，构建如式(1)所示的向量。

$$\mathbf{X}_i^m = [x_i \ x_{i+1} \ \dots \ x_{i+m-1}] \quad (1)$$

式中： $i = 1, 2, \dots, N - m + 1$ 。

对每个向量  $\mathbf{X}_i^m$ ，计算其与所有其他向量  $\mathbf{X}_j^m$  之间的距离，其中  $j = 1, 2, \dots, N - m + 1$ 。

距离定义为各元素间的最大差值，表示为

$$d(\mathbf{X}_i^m, \mathbf{X}_j^m) = \max_{k=1,2,\dots,m} |x_{i+k-1} - x_{j+k-1}| \quad (2)$$

引入模糊隶属度函数  $D_{ij}^m$  来衡量两个向量之间的相似性，模糊隶属度函数为指数型函数，表示为

$$D_{ij}^m = \exp\{-[d(\mathbf{X}_i^m, \mathbf{X}_j^m)/r]^n\} \quad (3)$$

式中： $\exp$  表示以自然常数  $e \approx 2.71828$  为底的指数函数。计算与其相似向量的模糊隶属度的平均值  $\Phi^m(r)$ ，表示为

$$\Phi^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \frac{1}{N - m} \sum_{j=1}^{N-m+1} D_{ij}^m \quad (4)$$

增加嵌入维度  $m$  至  $m+1$ ，重复上述步骤，计算新的平均模糊隶属度  $\Phi^{m+1}(r)$ 。

模糊熵定义为

$$\text{FuzzyEn}(m, r, n, N) = \lim_{N \rightarrow \infty} -\ln \left( \frac{\Phi^{m+1}(r)}{\Phi^m(r)} \right) \quad (5)$$

这一熵值衡量了时间序列在不同嵌入维度下的复杂性变化<sup>[14]</sup>。

### 1) 相似性度量的连续性改进

传统熵算法(近似熵与样本熵)基于 Heaviside 函数定义序列相似性  $C_i^m(r)$ ，可描述为

$$C_i^m(r) = \frac{1}{N - m} \sum_{j=1}^{N-m} \Theta(r - d_{ij}^m) \quad (6)$$

$$\Theta(r - d_{ij}^m) = \begin{cases} 1, & r - d_{ij}^m \geq 0 \\ 0, & r - d_{ij}^m < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中： $d_{ij}^m$  为子序列之间的切比雪夫距离； $\Theta(r - d_{ij}^m)$  为 Heaviside 阶跃函数。该函数在阈值  $r$  处存在阶跃不连续性，导致熵值易受噪声扰动与参数选择的影响。模糊熵对此进行改进，采用指数型模糊隶属函数  $D_{ij}^m(r, n)$ ，表示为

$$D_{ij}^m(r, n) = \exp\left(-\frac{(d_{ij}^m)^n}{r}\right) \quad (8)$$

函数  $D_{ij}^m$  在  $d_{ij}^m$  域内连续可微，其一阶导数满足：

$$\frac{\partial D_{ij}^m}{\partial d_{ij}^m} = -\frac{n(d_{ij}^m)^{n-1}}{r} \cdot D_{ij}^m \quad (9)$$

该特性表明，当  $d_{ij}^m$  接近  $r$  时，相似度变化率受  $n$  调控，避免了二值化判据的突变效应，显著提升了算法对含噪信号的鲁棒性<sup>[15]</sup>。

### 2) 参数敏感性优化

定义参数敏感性系数  $S_r = \left| \frac{\partial \text{En}}{\partial r} \right|$  量化熵值  $\text{En}$  对阈值  $r$  的依赖程度。

对于  $\text{SampEn}$ ，其敏感性可表示为

$$S_r^{\text{SampEn}} = \left| \frac{1}{B^m(r)} \frac{\partial B^m(r)}{\partial r} - \frac{1}{A^m(r)} \frac{\partial A^m(r)}{\partial r} \right| \quad (10)$$

式中:  $A^m(r)$  与  $B^m(r)$  分别为  $m+1$  维与  $m$  维相似序列的计数统计量。由于  $\Theta(z)$  的导数为狄拉克函数  $\delta(z)$ , 统计量导数  $\partial A^m / \partial r$  与  $\partial B^m / \partial r$  表现为脉冲形式, 导致  $S_r^{\text{SampEn}}$  在  $d_{ij}^m = r$  附近显著增大。

相比之下, 模糊熵的敏感性系数为

$$S_r^{\text{FuzzyEn}} = \left| \frac{1}{\Phi^m(r)} \sum_{i,j} \frac{(d_{ij}^m)^n}{r^2} D_{ij}^m - \frac{1}{\Phi^{m+1}(r)} \sum_{i,j} \frac{(d_{ij}^{m+1})^n}{r^2} D_{ij}^{m+1} \right| \quad (11)$$

由于  $D_{ij}^m$  随  $d_{ij}^m$  呈指数衰减, 使得  $S_r^{\text{FuzzyEn}}$  在全局范围内呈现平滑衰减特性<sup>[16]</sup>。

### 3) 非线性动力学特征的解析能力提升

设零序电流信号为非线性系统输出  $x(t) = f(\xi(t))$ , 其中  $\xi(t)$  为系统内在状态变量,  $f$  表示输入  $\xi(t)$  和输出  $x(t)$  之间的函数映射关系。

样本熵与近似熵通过二值化相似性统计系统熵值, 其分辨率受限于  $\Theta(z)$  的信息损失。模糊熵则通过式(8)保留子序列的形态细节, 其熵值计算可视为对系统相空间概率密度  $p(d_{ij}^m)$  的连续积分, 表示为

$$\text{FuzzyEn}(m, r, n, p) = \ln \frac{\int_0^\infty D_{ij}^m(r, n) p(d_{ij}^m) dd_{ij}^m}{\int_0^\infty D_{ij}^{m+1}(r, n) p(d_{ij}^{m+1}) dd_{ij}^{m+1}} \quad (12)$$

此积分形式有效抑制了二值化统计引起的量化误差, 尤其当信号包含高频暂态分量时, 模糊熵通过调节  $n$  增强对相空间局部奇点的捕捉能力。理论分析表明, 当  $n \rightarrow \infty$  时,  $D_{ij}^m$  退化为阶跃函数, 模糊熵等价于样本熵; 而当  $n=1$  时, 其分辨率达到最优平衡点, 可解析零序电流中幅值低至 0.5% 额定值的故障特征分量<sup>[17]</sup>。

模糊熵算法通过引入连续模糊隶属函数, 优化参数及增强非线性特征解析能力, 该算法在 10 kV 配电网零序电流分析中展现出理论优越性。其数学本质体现为对传统熵算法的泛化改进, 为小信号、非平稳电力时间序列的特征提取提供了抗干扰能力更强的量化工具。

在图 1 的 10 kV 配电网系统原理图中, 设置中性点不接地, N 和 P 检测点之间设置单相接地故障, 接地电阻为 15  $\Omega$ , M 和 N、P 和 Q 之间无故障, 开始时间为 0.01 s。近似熵算法处理零序电流结果如图 4 所示, 样本熵算法处理零序电流结果如图 5 所示, 模糊熵算法处理零序电流结果如图 6 所示。

图 4 中, M 和 N、P 和 Q 点的近似熵值变化的差异小于 N 和 P 检测点, 但熵值比 M/N、P/Q 在故障发生时出现急剧升高, 随后在 0~2.5 内波动, 而 N/P 在故障发生后 0.01 s 才开始急剧上升。结果表明, 近似熵很难在故障发生的 0.005 s 内判断出故障区间。

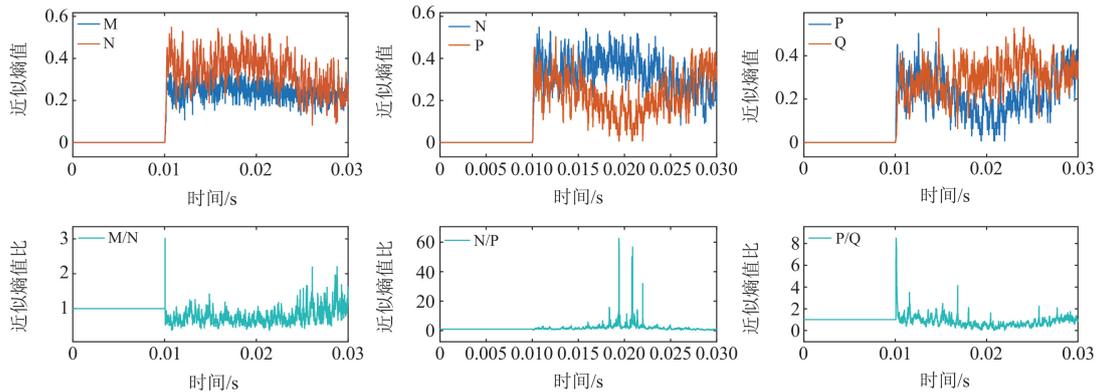
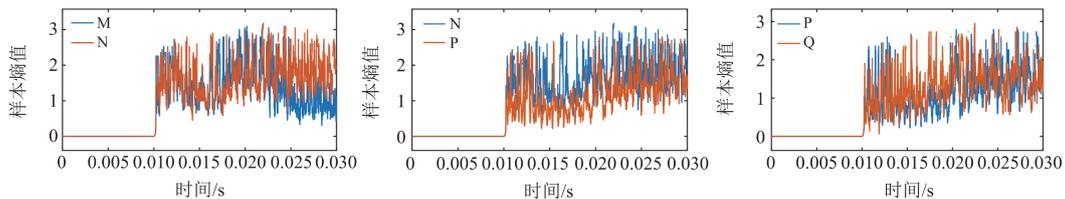


图 4 各检测点近似熵值及熵值比

Fig. 4 Approximate entropy value and entropy ratio for each detection point



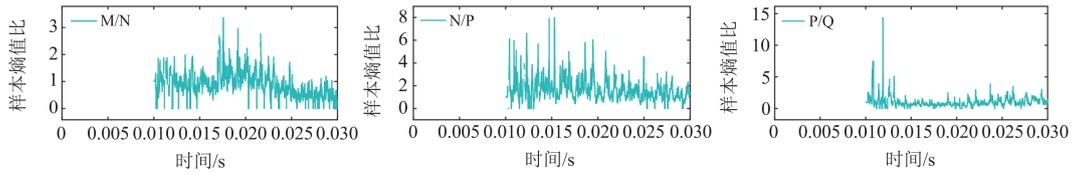


图 5 各检测点样本熵值及熵值比

Fig. 5 Entropy value and entropy ratio of samples at each testing point

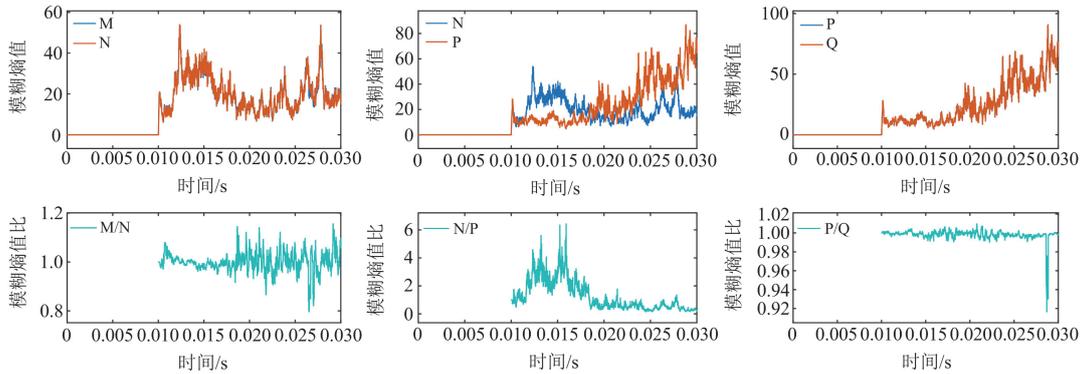


图 6 各检测点模糊熵值及熵值比

Fig. 6 Fuzzy entropy value and entropy ratio of each detection point

图 5 中, M 和 N、P 和 Q 样本熵值的变化差异小, N 和 P 近似熵值的变化差异大, 但熵值比 M/N、P/Q 在故障发生时出现急剧波动, 且熵值比 N/P 在故障发生后的波动幅度与熵值比 P/Q 接近。该结果表明, 样本熵算法在该问题上优于近似熵, 但可能发生误判。

图 6 中, M 和 N、P 和 Q 模糊熵值的变化差异极小, N 和 P 近似熵值的变化差异较大, 熵值比 M/N、P/Q 在故障发生时波动不明显, 始终在 1 附近, 熵值比 N/P 在故障发生后迅速波动且幅度极大。该结果表明, 模糊熵算法在处理该问题上优于近似熵和样本熵, 响应速度快且不容易误判<sup>[18]</sup>。

基于零序电流模糊熵的故障区间定位流程如图 7 所示。首先, 在配电网发生故障后, 通过采集三相电流并计算暂态零序电流; 接着, 利用模糊熵算法计算各测点零序电流的模糊熵值, 并通过相邻测点的熵值比来确定故障区间, 若熵值比超出区内故障阈值, 表明故障可能位于这两个检测点之间的线路段; 否则, 进一步分析线路首尾检测点的熵值大小, 以确定故障在线路首段还是末段。

## 2 硬件电路及实验平台

系统整体架构如图 8 所示, 电流互感器采集配电网输电线路电流信号, 故障定位装置对电流信号进行数据处理和故障定位, 并将故障信息上传到电力调度中心, 帮助电网公司快速排除故障, 提高电网故障响应效率。

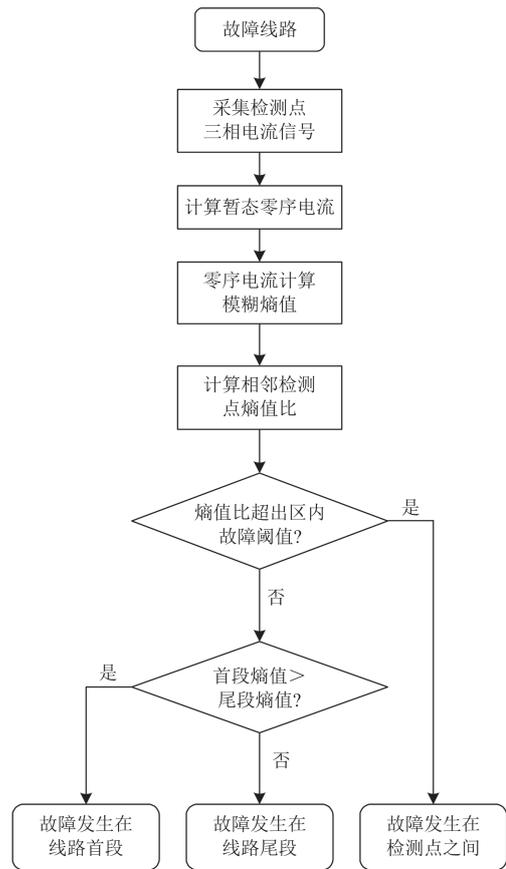


图 7 基于零序电流熵值的故障区间定位流程图

Fig. 7 Flowchart of fault section location based on zero sequence current entropy value

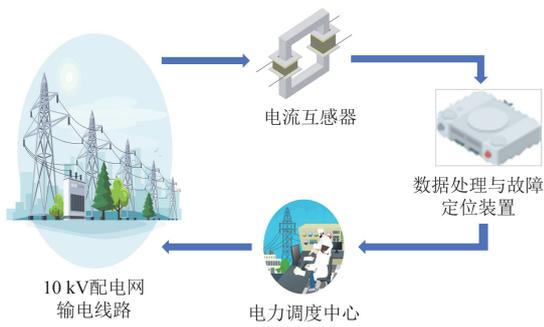


图 8 系统整体架构

Fig. 8 Architecture of overall system

为模拟 10 kV 配电网的实验环境并验证装置的有效性, 现利用 10 kV 配电网对该装置进行测试, 如图 9 所示。实验平台主要由 800 V 发电机及双绕

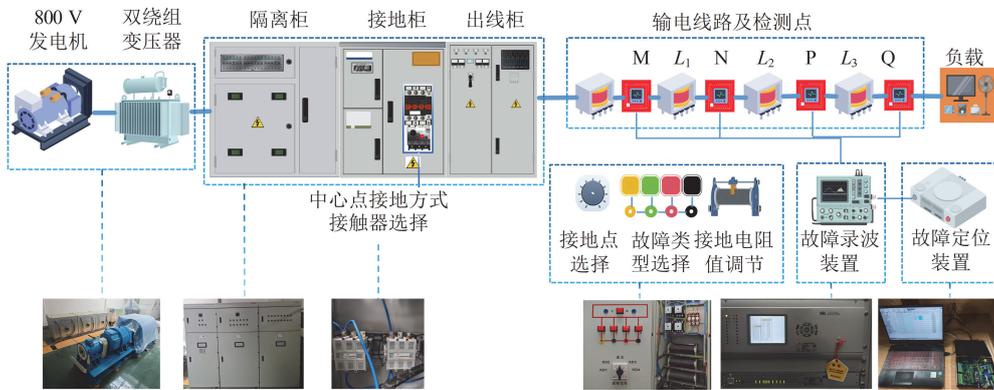


图 9 10 kV 模拟配电网实验平台

Fig. 9 Experiment platform of 10 kV simulated distribution network

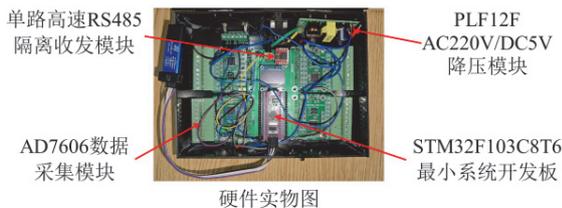


图 10 区间定位装置硬件电路

Fig. 10 Hardware circuit of zone positioning device

### 3 实验结果分析

#### 3.1 实验平台检验

在对称负载且无故障的情况下, 线电流和相电压主要取决于负载特性, 与中性点接地与否无关。将 10 kV 模拟配电网实验平台设置为中性点不接地, 检测点 P 的相电压和线电流如图 11 所示。10 kV 配电网实验平台在正常运行状态下无异常。A、B、C 三相电压幅值均约为 10 kV, 三相对称且相位差

组变压器、隔离柜、接地柜、出线柜、10 kV 高压架及模拟输电线路、故障类型及接地电阻值调节装置和故障录波装置组成。该平台能够模拟 10 kV 配电网的运行状态和故障场景, 故障录波装置对 M、N、P、Q 4 个检测点的三相电流电压信号进行记录, 将数据导入到配电网接地故障定位装置中进行模糊熵值比计算和故障区间判断。

如图 10 所示, 区间定位装置的硬件电路包括 AD7606 数据采集模块、STM32F103C8T6 主控板、RS485 隔离收发模块和 PLF12F 降压模块, 用于采集配电网的三相电流信号并进行降噪和数模转换。输入信号通过 STM32F103C8T6 执行故障区段定位算法, 并利用 RS485 通信将结果上传至调度中心, 实现配电网的快速故障定位和信息显示。

恒为  $120^\circ$ , 三相电流幅值均约为 80 A, 同样保持对称性和相位差一致, 波形无畸变或不平衡现象, 表明系统运行稳定。实验平台由 800 V 发电机、双绕组变压器、隔离柜、接地柜、出线柜、10 kV 高压架及模拟输电线路组成, 能够精确模拟配电网运行状态, 故障录波装置记录的三相电压、电流波形表明, 系统功能可靠。

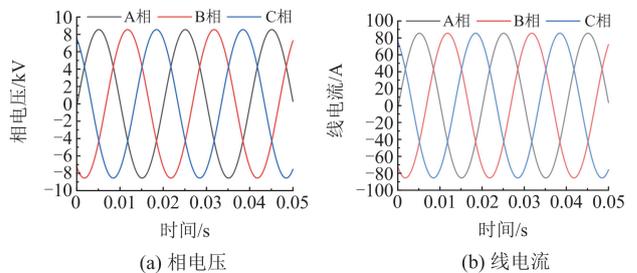


图 11 10 kV 模拟输电线路电压电流波形

Fig. 11 Voltage and current waveforms of 10 kV analogue transmission line

### 3.2 故障定位分析

在对 10 kV 模拟配电网实验平台进行可靠性及稳定性测试后, 在不同中性点接地方式、不同故障类型、不同接地电阻、不同故障初相角及不同故障区间下进行实验, 检验装置性能。

#### 3.2.1 区内故障

以 10 kV 模拟配电网实验平台为对象, 设置不同中性点接地方式, 且 N-P 段发生不同类型的故障。在接地电阻 15 Ω 下, 分别设置故障初相角为 15°、30°、60°和 90°; 设置故障初相角为 90°时, 在故障点分别接入 5 Ω、10 Ω、15 Ω、20 Ω 的接地电阻<sup>[19]</sup>。实验结果分别如表 1、表 2 所示。

由表 1 和表 2 可知, 当系统发生区内故障时, 对于两种不同的中性点接地方式和故障类型。1) 熵值比 M/N 普遍略小于 1, 说明故障未发生在 M 和 N 点之间, 且 N 点的零序电流信号序列复杂度略高于 M 点, 则故障点相比于 M 点更接近 N 点; 熵值比 N/P 远小于 1, 普遍低于 0.6, 说明故障发生在 N 和 P 点之间, 且故障点后 P 点的零序电流因接地故障的发生, 其有序性所受扰动强于故障点前的 N 点。熵值比 P/Q 普遍略大于 1, 说明故障未发生在 P 和 Q 点之间, 且 P 点的零序电流信号序列复杂度略高于 Q 点, 则故障点相比于 Q 点更接近 P 点。2) 当接地电阻不变时, 随着故障初相角从 15°增加至 90°, 相

表 1 中性点不接地系统区内故障实验结果

Table 1 Experimental results of faults in the neutral ungrounded system area

接地条件	熵值比			故障区间	
	M/N	N/P	P/Q		
A 相 接地	15 Ω	15°	0.95	0.54	1.03
		30°	0.92	0.51	1.02
		60°	0.89	0.49	1.06
		90°	0.88	0.46	1.11
	90°	5 Ω	0.96	0.49	1.01
		10 Ω	0.94	0.42	1.07
		15 Ω	0.91	0.40	1.09
		20 Ω	0.93	0.43	1.06
A、B 两相接地	15 Ω	15°	0.98	0.46	1.03
		30°	0.95	0.45	1.06
		60°	0.92	0.44	1.07
		90°	0.88	0.42	1.10
	90°	5 Ω	0.97	0.52	1.05
		10 Ω	0.95	0.48	1.07
		15 Ω	0.92	0.45	1.11
		20 Ω	0.94	0.47	1.09

表 2 中性点经消弧线圈接地系统区内故障实验结果

Table 2 Inter area fault experimental results of neutral point via arc suppression coil grounding system

接地条件	熵值比			故障区间	
	M/N	N/P	P/Q		
A 相 接地	15 Ω	15°	0.98	0.59	1.06
		30°	0.69	0.55	1.08
		60°	0.92	0.51	1.09
		90°	0.85	0.49	1.13
	90°	5 Ω	0.85	0.63	1.10
		10 Ω	0.79	0.59	1.12
		15 Ω	0.78	0.58	1.15
		20 Ω	0.82	0.55	1.11
A、B 两相接地	15 Ω	15°	0.97	0.56	1.03
		30°	0.91	0.54	1.05
		60°	0.88	0.52	1.09
		90°	0.81	0.48	1.12
	90°	5 Ω	0.91	0.55	1.06
		10 Ω	0.89	0.57	1.08
		15 Ω	0.92	0.55	1.12
		20 Ω	0.93	0.58	1.08

邻检测点的熵值比出现逐渐远离 1 的趋势, 相邻检测点模糊熵值的差值逐渐增大, 说明故障初相角越接近 90°, 故障暂态零序电流的幅值变化越快。3) 当故障初相角不变, 接地电阻在 15 Ω 附近时, 相邻检测点的模糊熵值的差值最大, 在该实验平台下, 接地电阻越接近 15 Ω, 线路故障暂态零序电流的幅值变化越快。4) 不同故障类型对零序电流的影响主要体现在, 两相接地故障的熵值比 N/P 均值为 0.49, 低于单相接地故障的 0.51, 说明故障路径的复杂性、相间耦合效应以及频谱复杂性的增加, 共同导致了零序电流时间序列复杂性的增大<sup>[20]</sup>。5) 不同的中性点接地方式对零序电流的影响主要体现在, 中性点经消弧线圈接地系统的熵值比 N/P 均值为 0.54, 高于中性点不接地系统的 0.46, 说明消弧线圈通过减少故障电流和抑制电弧重燃, 使得零序电流的时间序列更加稳定, 减少了不规则的电流跳变<sup>[21]</sup>。

#### 3.2.2 首段故障

在 10 kV 模拟配电网实验平台上, 设置不同的中性点接地方式, 并模拟其首段发生不同类型的故障。在接地电阻 15 Ω 下, 分别设置故障初相角为 15°、30°、60°和 90°; 在故障初相角为 90°下, 故障点处分别接入 5 Ω、10 Ω、15 Ω、20 Ω 的接地电阻。实验结果如表 3、表 4 所示。当系统首段发生故障时, 对于两种不同的中性点接地方式和两种故障类型。1) 熵值比 M/N、N/P、P/Q 均未超过 1.17, 但

大于 1, 说明故障未发生在 M 和 Q 点之间, 线路首段近似熵值大于尾段, 故障发生在首段。2) 熵值比  $M/N \geq N/P \geq P/Q$ , 说明离故障点越远, 线路零序电流复杂性减小得越快。3) 故障初相角、接地电阻、故障类型和中性点接地方式对线路零序电流信号复杂性的影响与区内故障相同。

表 3 中性点不接地系统首段故障实验结果

Table 3 Neutral ungrounded system first fault experimental results

接地条件	熵值比			故障 区间		
	M/N	N/P	P/Q			
A 相 接地	15 Ω	15°	1.07	1.05	1.04	
		30°	1.08	1.07	1.05	
		60°	1.10	1.08	1.02	
		90°	1.12	1.09	1.04	
	90°	5 Ω	1.06	1.03	1.02	
		10 Ω	1.10	1.07	1.01	
		15 Ω	1.13	1.11	1.05	
		20 Ω	1.09	1.06	1.03	
	A、B 两相接地	15 Ω	15°	1.08	1.04	1.00
			30°	1.10	1.06	1.04
			60°	1.11	1.04	1.02
			90°	1.14	1.05	1.03
90°		5 Ω	1.11	1.06	1.02	
		10 Ω	1.15	1.07	1.01	
		15 Ω	1.17	1.05	1.04	
		20 Ω	1.16	1.05	1.03	

表 4 中性点经消弧线圈接地系统首段故障实验结果

Table 4 First fault experimental results of neutral point via arc suppression coil grounding system

接地条件	熵值比			故障 区间		
	M/N	N/P	P/Q			
A 相 接地	15 Ω	15°	1.02	1.02	1.00	
		30°	1.03	1.03	1.03	
		60°	1.03	1.02	1.02	
		90°	1.05	1.04	1.01	
	90°	5 Ω	1.04	1.04	1.01	
		10 Ω	1.09	1.07	1.04	
		15 Ω	1.10	1.10	1.02	
		20 Ω	1.10	1.08	1.03	
	A、B 两相接地	15 Ω	15°	1.02	1.01	1.00
			30°	1.04	1.03	1.01
			60°	1.07	1.05	1.04
			90°	1.09	1.07	1.06
90°		5 Ω	1.04	1.04	1.01	
		10 Ω	1.09	1.07	1.07	
		15 Ω	1.11	1.10	1.09	
		20 Ω	1.10	1.08	1.07	

### 3.2.3 尾段故障

将 10 kV 模拟配电网实验平台上设置不同中性点接地方式, 并模拟其尾段发生不同类型的故障。在接地电阻 15 Ω 下, 分别设置故障初相角为 15°、30°、60°和 90°; 在故障初相角为 90°下, 故障点处分别接入 5 Ω、10 Ω、15 Ω、20 Ω 的接地电阻。

表 5、表 6 可知, 当系统尾段发生故障时, 对于两种不同的中性点接地方式和两种故障类型。

1) M/N、N/P、P/Q 三段熵值比均大于 0.83, 且小于 1, 说明线路各段之间熵值差异较小, 故障可能发生在线路首尾段。2) 熵值比  $M/N \leq N/P \leq P/Q$ , 说明故障发生在尾段, 随着位置逐渐远离故障点, 线路的零序电流信号复杂性降低越快, 即检测点越靠近故障点, 其零序电流信号的复杂性越高, 这种复杂性变化趋势揭示了零序电流在空间传播过程中受故障点影响的规律性。3) 故障初相角、接地电阻、故障类型和中性点接地方式对线路零序电流信号复杂性的影响与区内故障相同。

### 3.3 区内非故障阈值

相邻检测点模糊熵值比为

$$R(X, Y) = \frac{\text{FuzzyEn}(X)}{\text{FuzzyEn}(Y)} \quad (13)$$

式中:  $X, Y \subseteq [M N P Q]$ 。

定义非故障状态下熵值比集合为

$$\Omega_{\text{non-fault}} = [R(X, Y) | \text{无故障区间段}] \quad (14)$$

表 5 中性点不接地系统尾段故障实验结果

Table 5 Experimental results of tail section fault in neutral ungrounded system

接地条件	熵值比			故障 区间		
	M/N	N/P	P/Q			
A 相 接地	15 Ω	15°	0.97	0.96	0.93	
		30°	0.96	0.95	0.92	
		60°	0.93	0.92	0.91	
		90°	0.91	0.90	0.89	
	90°	5 Ω	0.96	0.95	0.90	
		10 Ω	0.94	0.92	0.89	
		15 Ω	0.89	0.87	0.87	
		20 Ω	0.91	0.91	0.89	
	A、B 两相接地	15 Ω	15°	0.95	0.94	0.89
			30°	0.93	0.91	0.64
			60°	0.91	0.90	0.87
			90°	0.88	0.88	0.88
90°		5 Ω	0.90	0.89	0.86	
		10 Ω	0.88	0.87	0.85	
		15 Ω	0.85	0.84	0.83	
		20 Ω	0.87	0.86	0.86	

表 6 中性点经消弧线圈接地系统尾段故障实验结果

Table 6 Experimental results of neutral point via arc suppression coil grounding system tail section faults

接地条件		熵值比			故障 区间
		M/N	N/P	P/Q	
A 相 接地	15 Ω	15°	0.98	0.97	0.94
		30°	0.96	0.96	0.94
		60°	0.95	0.94	0.92
	90°	90°	0.93	0.93	0.91
		5 Ω	0.91	0.90	0.87
		10 Ω	0.92	0.91	0.87
A、B 两相接地	15 Ω	15°	0.94	0.94	0.91
		30°	0.93	0.92	0.89
		60°	0.93	0.92	0.88
	90°	90°	0.92	0.91	0.85
		5 Ω	0.91	0.90	0.87
		10 Ω	0.89	0.88	0.87
尾段	20 Ω	15°	0.92	0.91	0.87
		30°	0.92	0.91	0.85
		60°	0.92	0.91	0.86

统计特征参数均值为

$$\mu = \frac{1}{U} \sum_{g \in \Omega_{\text{non-fault}}} g = 1.01 \quad (15)$$

式中：U 为样本量，U = 96。

标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{U-1} \sum_{g \in \Omega_{\text{non-fault}}} (g - \mu)^2} = 0.14 \quad (16)$$

取95%置信水平时，标准正态分布下对应的双侧分位数 q 取1.96。

$$[\mu - q\sigma, \mu + q\sigma] = [0.73, 1.29] \quad (17)$$

基于实际阈值修正，取非故障样本极值  $T_{\text{low}}$ 、 $T_{\text{high}}$  分别为

$$T_{\text{low}} = \min(\Omega_{\text{non-fault}}) = 0.75 \quad (18)$$

$$T_{\text{high}} = \max(\Omega_{\text{non-fault}}) = 1.20 \quad (19)$$

将表 1—表 6 中的实验数据进行编号，序号 1—32 为区内故障实验数据，序号 33—64 为首段故障实验数据，序号 65—96 为尾段故障实验数据，将熵值比 M/N、N/P 和 P/Q 以正方形、圆形和三角形进行区分，绘制模糊熵值比散点图如图 12 所示，将区内非故障阈值设置为 0.75~1.2，作为判断相邻检测点是否发生接地故障的阈值范围。

### 3.4 通信传输误差

10 kV 配电网接地故障定位装置基于相邻检测点的熵值比进行故障定位，其准确度受通信质量即传输延迟与丢包率的影响。10 kV 配电网要求通信传输延迟均值为 30 ms，丢包率要求在 10% 以下，因此

在传输延迟为 20~50 ms、丢包率为 1%~20% 的测试条件下<sup>[22]</sup>，测试装置准确率结果如图 13 所示。

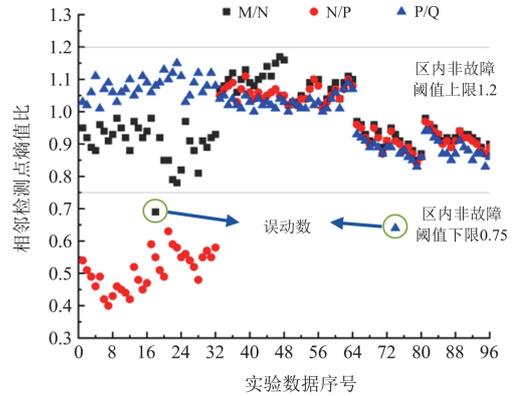


图 12 模糊熵值比散点图

Fig. 12 Scatter plot of fuzzy entropy ratio

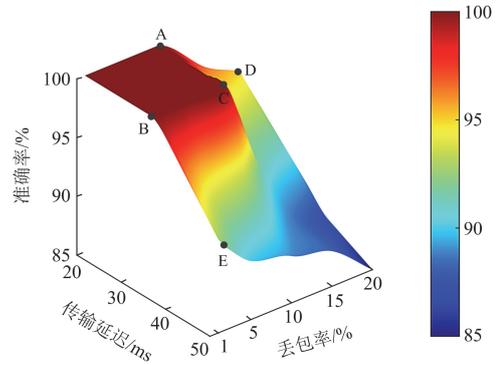


图 13 准确率随通信质量变化图

Fig. 13 Diagram of accuracy rate vs. communication quality

A 点传输延迟为 20 ms、丢包率为 10%，装置准确率为 100%；B 点传输延迟为 35 ms、丢包率为 1%，准确率为 100%；C 点传输延迟为 35 ms、丢包率为 10%，准确率为 97.92%；D 点传输延迟为 20 ms、丢包率为 20%，准确率为 95%；E 点传输延迟为 50 ms、丢包率为 1%，准确率为 93%；F 点传输延迟为 50 ms、丢包率为 20%，准确率为 86%。综上所述，该装置准确率在正常工况下受通信质量影响小，在通信质量差的情况下准确率有所下降。

### 3.5 降噪测试

在 10 kV 配电网的电流采集系统中，由于其高压、强电磁环境、复杂负载及长距离传输等特点，将面临 3 类典型噪声，包括工频及谐波干扰噪声、高频电磁干扰噪声和共模噪声<sup>[23]</sup>。

针对该情况，在 10 kV 配电网模型中设置中性点经消弧线圈接地，N-P 之间设置 0.01 s 发生 A 相接地故障，在 P 点采集的电流波形如图 14(a)所示；叠加 10% 的 3 类典型噪声后的波形如图 14(b)所示；

该噪声波形经屏蔽接地、差分隔离、滤波电路及采集模块综合抑制后的结果如图 14(c)所示; 原始无噪声波形与降噪后波形在故障发生前后的对比分别如图 14(d)和图 14(e)所示。对比图 14(a)—图 14(c)可知,

未叠加噪声时电流波形规律明显, 利于捕捉故障特征; 叠加 10% 的 3 类典型噪声后, 图 14(b)的波形混乱, 故障识别困难; 经综合降噪处理后, 图 14(c)的波形规律恢复清晰, 降噪效果显著。

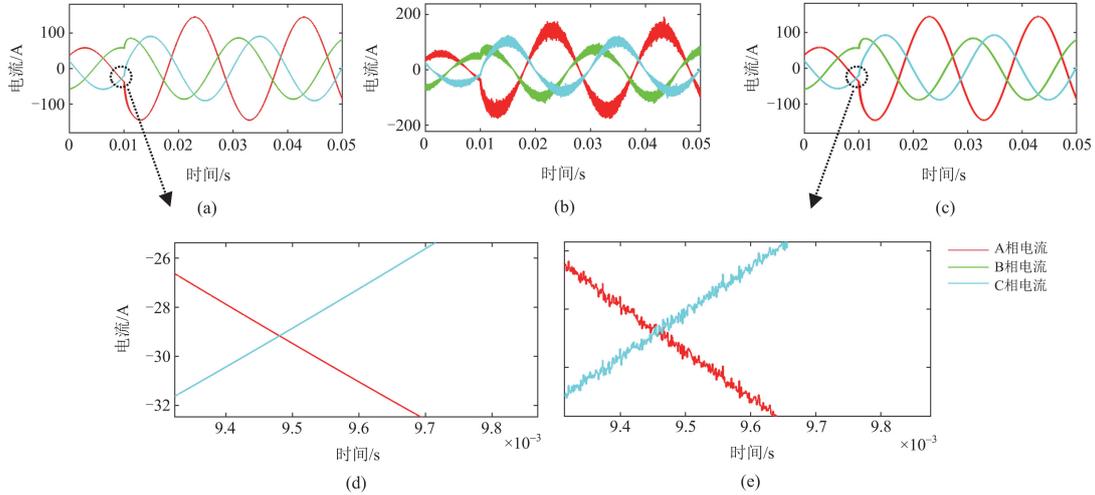


图 14 降噪对比图

Fig. 14 Comparison chart of noise reduction

### 3.6 误动率与响应时间

根据表 7 的对比数据, 基于模糊熵的故障定位装置误动率为 2.08%, 与其他定位装置相比, 处于相对较低且稳定的水平, 具有良好的稳定性<sup>[24-27]</sup>。

表 7 不同类型故障定位装置误动率对比

Table 7 Comparison of error rates of fault location devices with different types

定位装置分类	误动率/%
机械式 FPI	2~8
电子式 FPI	1~5
基于零序电流检测的故障定位装置	2~6
基于暂态信号的故障定位装置	2~5
基于 FTU 的故障定位系统	2~6
基于模糊熵的故障定位装置	2.08

10 kV 中性点不接地或经消弧线圈接地系统单相接地故障, 允许带故障运行 1~2 h<sup>[28]</sup>, 两相接地故障一般要求在 100 ms 内切除<sup>[29]</sup>。表 8 的实验数

表 8 不同类型故障定位装置响应时间对比

Table 8 Comparison of response times of fault location devices with different types

定位装置分类	响应时间/ms
机械式 FPI	50~200
电子式 FPI	20~100
基于零序电流检测的故障定位装置	30~100
基于暂态信号的故障定位装置	2~20
基于 FTU 的故障定位系统	100~180
基于模糊熵的故障定位装置	30~50

据表明, 基于模糊熵的故障定位装置响应时间为 30~50 ms, 满足 100 ms 内切除两相接地故障的要求, 与其他定位装置相比, 响应速度更快, 具有良好的速动性。

## 4 结论

本文提出了一种基于零序电流模糊熵的 10 kV 配电网接地故障定位方法, 并设计相应的硬件装置, 通过对各检测点零序电流信号的模糊熵值进行计算和比较, 实现对故障区段的快速精确定位。主要结论如下。

1) 基于零序电流模糊熵的接地故障定位方法对零序电流变化的识别能力优于传统熵值法, 计算量远小于人工智能算法。通过分析 10 kV 配电网在不同中性点接地方式及故障类型下零序电流的暂态特性, 故障点前后的检测点零序电流模糊熵值变化差异较大, 为故障定位提供了可靠的判据。理论推导和 Simulink 仿真证明了模糊隶属函数抗噪能力强、参数敏感性低、非线性动力学特征解析能力强、计算量小。

2) 该故障定位装置具有良好的稳定性和速动性, 相比传统接地故障定位装置性能优异, 比基于人工智能算法的定位装置造价低。通过 10 kV 配电网模拟实验平台, 对各检测点的模糊熵值进行分析, 并引入熵值比作为故障区段划分的判据。根据实验数据推导区内非故障阈值, 从而有效确定故障区间,

装置误动率为 2.08%、响应时间为 30~50 ms。

3) 实验结果验证了本文所设计装置具备较强的抗噪能力, 同时表明其定位准确率不易受通信传输误差的影响。在工频及谐波干扰、高频电磁干扰、共模噪声各为 10%, 且通信传输误差为 30 ms、丢包率为 20% 的工况下仍能保持较高的准确率。

### 参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[Z]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2022. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Modern energy system plan for the “fourteenth five-year plan”[Z]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2022.
- [2] 李靖云, 周婧瑜, 陈海涛, 等. 双碳目标下新型电力系统规划与省域减排路径——以中国南方某省为例[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2024, 26(4): 68-75. LI Jingyun, ZHOU Jingyu, CHEN Haitao, et al. Research on new power system planning and provincial emission reduction path under dual carbon target—a province in southern China as an example[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Science Edition), 2024, 26(4): 68-75.
- [3] 许守东, 欧阳金鑫, 陈宇捷, 等. 基于模型识别的有源配电网单相接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 51-60. XU Shoudong, OUYANG Jinxin, CHEN Yujie, et al. A fault location method for a single-phase fault for a distribution network with DGs based on model recognition[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 51-60.
- [4] 申玮, 蒋鑫. 配电网故障选线与定位发展现状[J]. 电子测试, 2022(3): 129-131. SHEN Wei, JIANG Xin. Development status of fault routing and location in distribution networks[J]. Electronic Test, 2022(3): 129-131.
- [5] 张啸宇. 10 kV 配电线路接地故障定位与措施分析[J]. 集成电路应用, 2023, 40(10): 106-107. ZHANG Xiaoyu. Analysis of grounding fault location and measures for 10 kV distribution lines[J]. Applications of IC, 2023, 40(10): 106-107.
- [6] 齐郑, 黄朝晖, 陈艳波. 基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 54-62. QI Zheng, HUANG Zhaohui, CHEN Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 54-62.
- [7] 杨超, 郭文奇, 熊姚意, 等. 基于改进阻抗法的配电变压器低压故障越级跳闸故障定位方法[J]. 电气自动化, 2023, 45(3): 11-14. YANG Chao, GUO Wenqi, XIONG Yaoyi, et al. Fault location method for low voltage fault overstep trip of distribution transformer based on improved impedance method[J]. Electrical Automation, 2023, 45(3): 11-14.
- [8] WANG Y, XIE L, LIU F, et al. Fault location method for distribution network considering distortion of traveling wavefronts[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 159.
- [9] WANG D, YU D, GAO H, et al. Frequency modification algorithm-based traveling wave fault location approach for overhead transmission lines with structural changes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(2): 1-12.
- [10] 何小龙, 高红均, 黄媛, 等. 基于一维卷积和图神经网络的配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 27-39. HE Xiaolong, GAO Hongjun, HUANG Yuan, et al. Fault section location for a distribution network based on one-dimensional convolution and graph neural networks[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 27-39.
- [11] 梁栋, 赵月梓, 贺国润, 等. 基于图半监督与多任务学习的配电网故障区段与类型统一辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 25-32. LIANG Dong, ZHAO Yuezi, HE Guorun, et al. Unified identification of fault section and type for distribution networks based on graph semi-supervised and multi-task learning[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 25-32.
- [12] 姜雨轩, 窦震海, 陈平, 等. 基于行波时差矩阵算法的 10 kV 电缆网络故障定位[J]. 水电能源科学, 2020, 38(7): 184-188. JIANG Yuxuan, DOU Zhenhai, CHEN Ping, et al. Fault location of 10 kV cable network based on traveling wave time difference matrix algorithm[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(7): 184-188.
- [13] 刘青, 黄玉河, 王宇, 等. 基于电磁时间反演 P 范数判据的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 74-82. LIU Qing, HUANG Yuhe, WANG Yu, et al. Distribution network fault location based on an electromagnetic time reversal P-parametric criterion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 74-82.
- [14] 阮光鑫, 柳征. 基于模糊熵的连续相位调制识别算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(7): 710-715. RUAN Guangxin, LIU Zheng. Continuous phase modulation recognition algorithm based on fuzzy entropy[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information,

- 2024, 22(7): 710-715.
- [15] CHEN W T, ZHUANG J, YU W X, et al. Measuring complexity using FuzzyEn, ApEn, and SampEn[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2008, 31(1): 61-68.
- [16] ZHU K, YUE X, SUN D, et al. Rolling bearing fault feature extraction using local maximum synchro-squeezing transform and global fuzzy entropy[J]. *International Journal of Acoustics and Vibrations*, 2022, 27(1): 37-44.
- [17] ZHOU H, CHEN W, SHEN C, et al. Intelligent machine fault diagnosis with effective denoising using EEMD-ICA-FuzzyEn and CNN[J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(23): 8252-8264.
- [18] 陈新岗, 刘新宇, 马志鹏, 等. 基于近似熵的小电流接地系统故障区段定位[J]. *计算机仿真*, 2023, 40(1): 112-117.
- CHEN Xingang, LIU Xinyu, MA Zhipeng, et al. Location of fault section in small current grounded system based on approximate entropy[J]. *Computer Simulation*, 2023, 40(1): 112-117.
- [19] 严正国, 马慧, 任星, 等. 基于 MATLAB 的小电流接地系统单相接地故障仿真分析[J]. *工业控制计算机*, 2021, 34(10): 153-154.
- YAN Zhengguo, MA Hui, REN Xing, et al. Simulation analysis of single-phase grounding fault based on MATLAB small current grounding system[J]. *Industrial Control Computer*, 2021, 34(10): 153-154.
- [20] WANG J, WANG J. Cross-correlation complexity and synchronization of the financial time series on Potts dynamics[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 541: 123286.
- [21] 李广, 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电流接地系统接地故障电弧重燃暂态特征分析[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(11): 189-196.
- LI Guang, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Analysis on arc re-ignition transient characteristics for grounding fault in non-solidly grounding system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(11): 189-196.
- [22] 魏荣欣, 牟明文. 10 kV 配电线路故障处理中的数字化接地故障定位装置研究[J]. *通讯世界*, 2024, 31(9): 79-81.
- WEI Rongxin, MOU Mingwen. Research on digital ground fault location devices for 10 kV distribution line faults[J]. *Telecom World*, 2024, 31(9): 79-81.
- [23] 赵广旭, 黄小燕. 基于故障指示器 + PMU 装置信息的配电网故障定位技术研究[J]. *电工技术*, 2024(13): 53-56.
- ZHAO Guangxu, HUANG Xiaoyan. Study on distribution networks fault location technology based on fault indicator + PMU device information[J]. *Electric Engineering*, 2024(13): 53-56.
- [24] 张占凯. 基于故障指示器的配电网接地故障定位[J]. *百科论坛电子杂志*, 2020(12): 1787-1796.
- ZHANG Zhankai. Ground fault localisation in distribution networks based on fault indicators[J]. *Encyclopedic Forum*, 2020(12): 1787-1796.
- [25] 刘斯琪, 喻锴, 曾祥君, 等. 基于零序电流幅值连调的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(9): 48-56.
- LIU Siqi, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Fault location method of a non-effective earthed system based on zero sequence current amplitude continuous regulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(9): 48-56.
- [26] 黄灿英, 杨壖金, 宁珍. 基于暂态信号的配电网单相接地故障区段自动定位方法[J]. *自动化与信息工程*, 2023, 44(6): 22-28.
- HUANG Canying, YANG Yongjin, NING Zhen. Automatic positioning method of single-phase ground fault section of distribution network based on transient signal[J]. *Automation and Information Engineering*, 2023, 44(6): 22-28.
- [27] 黄涛涛, 周胡钧, 卢明, 等. 考虑 FTU 信号丢失的有源配电网故障区段定位方法[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(9): 212-216.
- HUANG Mutao, ZHOU Hujun, LU Ming, et al. Fault section location method for active distribution network considering FTU signal loss[J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(9): 212-216.
- [28] GB-国家标准编制组, 建筑电气杂志社. 学习 GB《民用建筑电气设计标准 51348—2019》[J]. *建筑电气*, 2021, 40(5): 76-79.
- GB-National Standard Preparation Group, Building Electrical Magazine. Study GB 51348 — 2019 “Civil building electrical design standard”[J]. *Building Electricity*, 2021, 40(5): 76-79.
- [29] 余军. 输配电线路中的运维与故障排除技术分析[J]. *消费电子*, 2023(12): 65-67.
- YU Jun. Analysis of operation and maintenance and troubleshooting technology in transmission and distribution lines[J]. *Consumer Electronics Magazine*, 2023(12): 65-67.

收稿日期: 2025-06-16; 修回日期: 2025-08-06

作者简介:

王子轶(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备状态监测和柔性交直流配电网; E-mail: wangziyi991201@163.com

陈新岗(1968—), 男, 通信作者, 硕士, 教授, 研究方向为电气设备状态监测、智能发电运行与控制、信号采集与信号处理。E-mail: chenxingang@cqut.edu.cn

(编辑 许威)