

基于多源信息融合的配电输电线路故障自动定位方法

刘 斌 李剑飞

(中国人民解放军 78170 部队)

摘要：为实现配电输电线路故障自动定位，提高定位结果的准确性与可靠性，基于多源信息融合，提出了配电输电线路故障自动定位方法研究。首先，采集配电输电线路电气参数，为后续的多源信息融合和故障自动定位提供坚实的基础。其次，利用多源信息融合技术，提取故障特征量。在此基础上，构建矩阵 P ，定位故障区段，使用声磁同步定点仪，在故障区段内进一步定位故障点。实验结果表明，该方法应用后，在各种类型的故障中均表现出较低的定位误差，最高不超过 20m，符合故障定位误差要求，实现了对配电输电线路故障的精确定位。

关键词：多源信息融合；配电输电线路；故障；自动；定位；准确性

0 引言

在电力系统中，配电输电线路占据着不可或缺的地位，其安全稳固与可靠运行，对于确保电力供应的连贯性与平稳性具有不可估量的重要性。然而，在实际运行中，由于自然因素、设备老化、人为操作失误等多种原因，配电输电线路时常会发生故障，这些故障如果不能得到及时准确的定位和处理，不仅会影响电力系统的正常运行，还可能导致更严重的后果，如设备损坏、供电中断甚至引发安全事故。目前，国内外学者和科研机构在配电输电线路故障定位方面已经开展了大量的研究工作，并取得一定的成果。然而，由于配电输电线路具有结构复杂、环境多变等特点，传统的定位方法在实际应用中仍然存在缺陷。其中，文献 [1] 提出方法虽然在一般情境下能有效识别

故障范围，但在面对错综复杂的地质环境及多变的气候条件时，其故障点定位精度较低，甚至存在误判的风险。文献 [2] 提出方法通常需要较长的时间来定位故障，特别是在故障点不明显或需要排查多个可疑点时，响应速度更慢。

多源信息融合技术作为一种新兴的信息处理技术，在故障定位领域具有广阔的应用前景。通过融合来自不同来源的信息，充分利用这些信息的互补优势，进而优化故障定位的精度和可靠性，实现更为精准和可靠的故障识别与定位。因此，本文利用多源信息融合，开展配电输电线路故障自动定位方法研究。

1 配电输电线路故障自动定位方法设计

1.1 配电输电线路电气参数采集

在线路的始端和末端部署测量模块，捕获并记录线路两端的电流和电压的同步相量数据。使用数据集中器将测量单元采集的数据传送至主站系统。每个测量模块都独立工作，它们实时地捕捉线路两端的电流和电压的同步相量数据^[3]。为了确保数据的精确性，采用先进的AD采样控制芯片，该芯片能够确保在每周波内至少进行4000次采样，从而实现了数据的高精度捕获^[4]。为了保持数据的同步性，引入校时模块，负责解码来自变电站GPS服务器的时钟信号，并精确捕捉整秒时刻的秒脉冲上升沿，为整个数据采集工作提供了精确的时间基准。通过数据集中器的作用，测量模块捕获的包括相角、幅值、频率等在内的数据被准确地传送至主站系统^[5]。主站系统接收到这些数据后，会进行严格的校验和存储，确保所有带有准确时标的数据都被妥善保管。

通过以上流程，可以确保采集到全面、准确、可靠的数据，为后续的多源信息融合和故障自动定位提供坚实的基础。

1.2 基于多源信息融合提取故障特征量

配电输电线路电气参数采集完毕后，利用多源信息融合技术，提取故障特征量。根据先验知识和经验，选择对故障分类和定位有重要影响的特征，涵盖了时域和频域两大维度^[6]。在时域特征提取环节，重点关注峰值、均值、方差以及峭度等关键统计量，这些特征能够依据特定的需求和分析目标进行灵活选择与提取，以确保故障识别的精准性和可靠性。

峰值特征即配电输电线路波形中的最大值，特征提取公式如下：

$$P = \max(x_i) \quad (1)$$

式中， x_i 为数据序列中的每一个值。该特征反映了信号的最大强度。

均值即数据序列中所有值的平均数，公式如下：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

式中， n 为数据序列的长度，该特征反映了信号的平均强度。

方差作为衡量数据序列离散程度，其公式如下：

$$X_{\text{var}} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \right) \quad (3)$$

方差特征有效地反映了数据序列的波动情况。

峭度能够有效地描述数据分布形态，反映数据分布的尖锐程度，公式如下：

$$K = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^4}{(n-1) \cdot \sigma^4} - 3 \quad (4)$$

K 大于3表示数据分布比正态分布更尖锐， K 小于3表示数据分布比正态分布更平坦。

使用上述公式，对整理好的数据进行计算，得到各个时域特征的值。其次，对电气量数据进行傅里叶变换处理，提取频率成分、频谱分布等频域特征，反映信号在频域上的特性和变化^[7]。从开关量数据中提取保护动作信号、断路器状态等特征。对融合后的特征进行降维处理，公式如下：

$$TK = TK_0 + TK_1 + \dots + TK_n \quad (5)$$

式中， TK_i 为第 i 种故障类型特征向量； n 为特征向量的数量。利用多源信息融合技术，将提取的多个特征进行组合，根据PCA降维后的特征向量，构建故障特征向量，可以表示为：

$$\delta y = h(\delta x) \quad (6)$$

式中， δy 为故障特征向量； h 为映射函数； δx 为原始特征向量。

1.3 配电输电线路故障定位

在上述基于多源信息融合的配电输电线路故障特征量提取完毕后，在此基础上，对输电线路实行故障自动定位。

为了实时追踪电路的运行状态，首先在变电站的出线端、用户设备周边以及分线路和电缆的毗邻区

域安装监测设备。一旦获取到故障时的电压和电流数据, 将这些信息整合成一个矩阵 P 。通过分析矩阵 P 中列元素的零值情况, 可以精确判断故障的具体区段: 如果 P 中没有任何一列全为 0, 说明各支路均处于正常状态; 若仅有一列全为 0, 则指示故障出现在配网的末端线路; 而若存在多列全为 0, 则意味着故障发生在配网的中间支路^[8]。此外, 借助多个线路终端 (FTU) 的数据来进一步精确故障区段的定位。当 FTU 检测到过流现象并向控制主站报告时, 主站会立即启动故障信息分析程序, 准确锁定故障区段。

在此基础上, 基于故障区段定位的结果, 进一步缩小故障范围, 确保能够准确找到故障点。根据故障区段内的设备类型、历史故障记录等信息, 初步判断故障类型 (如低阻故障、高阻故障等)。使用声磁同步定点仪, 在故障区段内同时监听地震波和电磁波信号, 找到两种信号同步性最好的点即为故障点。根据定位方法找到的可能故障点, 进行现场验证, 确认是否为真正的故障点。

2 实验分析

2.1 实验准备

本次实验选取一段实际的配电输电线路作为样本对象。该线路全长约 10km, 包含多个分支和节点, 共有 20 个故障指示器 (FI) 安装在沿线关键位置, 用于监测线路的运行状态。此外, 线路还配备了馈线终端单元 (FTU) 和配变终端单元 (TTU), 分别安装在变电站和配电变压器处, 用于收集和处理遥测、通信信息。采用一套基于物联网技术的数据采集系统, 用于实时收集 FI、FTU 和 TTU 上传的故障信息和运行数据。其次, 将数据处理中心部署在一台高性能服务器上, 负责接收、存储和处理来自数据采集系统的数据。

2.2 定位结果分析

为了全面评估本文所提出故障定位方法的可行性与应用效果, 选取了文献 [1] 和文献 [2] 中提及的故障定位方法作为对比基准。在测试过程中, 设定 0.5MHz 的采样频率, 以确保数据捕获的精确性和实时性。模拟多种具体的故障情况, 并将这些模拟情况详细记录在表 1 中。

表 1 配电输电线路故障模拟

故障标号	故障类型	故障线路距离/km	过渡电阻/ Ω	故障初始相位/ $^{\circ}$
GZ-01#	单相接地故障	2.0	50	0
GZ-02#	单相接地故障 (高阻)	5.0	1000	90
GZ-03#	两相短路故障	3.5	0	180
GZ-04#	两相接地故障	7.0	200	270
GZ-05#	三相短路故障	9.0	0	30
GZ-06#	两相短路接地故障	6.5	150	60

使用表 1 的数值来设置配电输电线路故障自动定位实验的仿真环境, 以评估定位方法的性能。应用三种定位方法, 统计故障线路定位距离, 与实际模拟距离比较, 得出故障定位误差, 对比结果如图 1 所示。

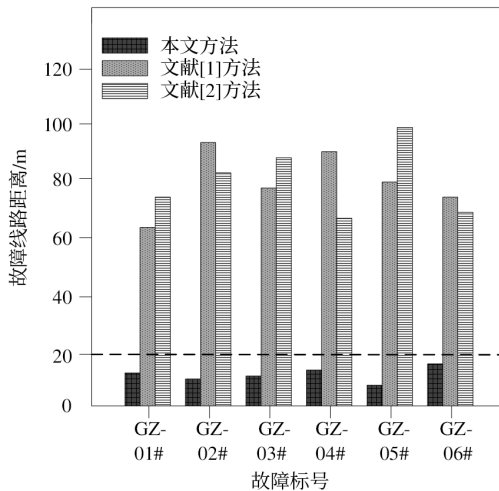


图 1 配电输电线路故障定位误差对比结果

通过图 1 的对比结果可以看出, 本文提出的融合多源信息的故障定位方法在各种复杂多变的故障场景中, 均展现出卓越的精确度, 特别是在高阻故障和复杂

故障类型中，定位精度明显优于两种传统方法，最高不超过 20m，实现了对配电输电线路故障的精确定位。

3 结束语

综上所述，本文提出的方法通过整合来自不同传感器、监测设备和数据源的信息，能够实现配电输电线路故障信息的全面感知和准确、快速定位，对于提高电力系统的可靠性具有重要意义。此外，该方法还可以为电力系统的运行调度和故障预防提供数据支持。通过对配电输电线路的实时监控与细致分析，能够迅速察觉潜在的安全风险，并立即启动相应的预防措施和应对策略。这种前瞻性的管理不仅显著减少了故障事件的发生可能性，还有效促进了整个电力系统的运作效率提升，从而保障了电网的稳定与高效运行。

参考文献

[1] 刘沐辰，安景革，程定一，等. 基于双端同步响应的高压输电线路故障定位方法 [J]. 智慧电力，2023，51（12）：15-22.

[2] 王雪芹，张大海，李猛，等. 基于小波能量谱和 SSA-GRU 的混合直流输电系统故障测距方法 [J]. 电力系统保护与控制，2023，51（12）：14-24.

[3] 李志川，兰生，魏柯. 基于 MRSVD-GRU 的混合三端特高压直流输电线路单极接地故障定位方法 [J]. 电气技术，2023，24（3）：1-8，63.

[4] 张翼，刘富州，朱永利，等. 广域行波信息与图注意力网络相结合的输电网故障定位 [J]. 仪器仪表学报，2022，43（6）：140-150.

[5] 王春明，李杰，徐正清，等. 基于暂态信息融合的输电线路单端故障定位方法 [J]. 电力科学与技术学报，2022，37（2）：62-71.

[6] 张智伟，范新桥，张利，等. 基于动态模式分解的三端多段式架空线-电缆混合输电线路故障定位新方法 [J]. 电力系统及其自动化学报，2022，34（10）：129-137.

[7] 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.

[8] 谢李为，李勇，罗隆福，等. 基于极点对称分解的多分支线路故障定位方法 [J]. 中国电机工程学报，2021，41（21）：7326-7339.

(收稿日期：2024-09-29)