基于电缆故障的配电网单相接地故障区段定位方法研究

钱宝玉

（广州泰捷建设有限公司，广东 广州 510700）

摘 要 配电网电缆馈线的单相接地故障定位受线路分布电容、过渡高阻及信号衰减等多重因素影响，传统定位方法在高阻故障与低信噪比场景下普遍存在精度不足的问题。针对这一痛点，本文提出融合小波变换与奇异值分解的两阶段特征提取方法，结合相似度单峰化约束的改进二分区段定位算法，构建一套三层协同的故障定位系统。经RTDS平台200组工况验证表明，该方法的区段定位精度88% ~ 95%，在信噪比10 dB ~ 12 dB下保持稳定，整体响应时间在12 ms ~ 25 ms区间，较阻抗法与行波法定位精度提升3% ~ 10%。测试结果表明，该方法可显著降低高阻故障与线路分支处的定位误差，工程适用性良好。

关键词 单相接地故障；区段定位；小波变换；奇异值分解；改进二分法

中图分类号：TM726.3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.004

0 引言

单相接地是配电网最常见的故障形态，电缆主导的城市馈线因分布电容大与衰减强，故障暂态呈现行波多次反射与高频能量快速衰落，稳态零序量又受接地方式与过渡电阻强烈影响。随着环网与多分支结构增多，以及分布式电源渗透率提升，零序相位稳定性与行波可观测性进一步下降，传统阻抗法易受模型不确定性与阈值漂移影响，行波法对带宽与同步精度高度敏感，二者在高阻与低信噪场景均存在区段可分性不足。因此，本文从故障机理入手，结合零序幅相约束与行波首达信息，设计融合小波与奇异值分解的协同特征，并以相似度单峰化校正改进二分搜索，配套多点同步采样、动态阈值与拓扑在线约束，构建可落地的端到端定位系统，并在实时仿真平台进行系统性评估。

1 配电网单相接地故障区段定位分析

1.1 配电网单相接地故障特性

单相接地故障的暂态表现为行波陡沿、零序电流跃变及高频能量集中，稳态由网络容抗与感抗主导，零序电流相对零序电压呈容性或感性相移，谐波谱以3次、5次为主。电缆馈线因分布电容大、衰减强，反射更密集，零序电流多对电压超前，小波域高频能量峰值更短[1]。架空线容量小、散射弱，高频含量受限，相位偏移受接地方式影响显著。在MATLAB建立含电缆与架空混联系统，改变故障阻值可观测零序幅值及相位的连续变化，为区段定位阈值设定提供依据。零序电压幅值受故障阻值约束的等效表达式如下：

$$U_0 = \left| \frac{E_0 Z_0}{Z_0 + 3R_f} \right| \tag{1}$$

式（1）中，U_0为零序电压幅值，单位V；E_0为等效零序电源幅值，单位V；Z_0为系统零序等效阻抗，单位Ω；R_f为故障阻值，单位Ω。

1.2 现配电网单相接地故障的影响因素

配电网单相接地故障的区段定位精度受多因素耦合制约，关键因素包含线路拓扑复杂度、故障过渡电阻、分布式电源接入形态及控制策略、环境噪声与采样同步质量，这些因素直接影响零序量相位稳定性、行波反射可观测性、特征信噪比与可分性[2]。

2 基于电缆故障的配电网单相接地故障区段定位方法设计

2.1 电缆故障特征提取模型构建

面向电缆单相接地故障的高频行波反射与低频零序响应并存特性，构建融合小波变换与奇异值分解的两阶段特征提取模型：数据采集侧以同步采样获得零序电流、零序电压原始序列，经抗混叠带通、幅值归一化及滑动窗切片后输入离散小波变换，选择db8母小波进行5层尺度分解，在细节系数中增强首达波陡

作者简介：钱宝玉（1992-），女，本科，助理工程师，研究方向：电力工程电气。

变与末端反射位置敏感性，同时保留近似系数以刻画工频稳态偏移[3]。

在小波域完成软阈去噪后，按时间窗构造零序电流细节系数的一维 Hankel 矩阵并引入多测点联合观测，执行 SVD 得到奇异值谱以量化跨时滞的相关秩及能量集中度，首阶奇异值反映行波一致性而高阶分量表征反射与分叉引起的模式扰动，并以低秩截断抑制噪声；模型设置母小波阶数、自适应阈值与窗长的在线整定规则，依据噪声方差估计与到达时差粗测动态修正参数，最终将各尺度能量、能量熵以及归一化奇异值向量拼接为区段判别的特征向量[4]。

为量化多尺度能量分布不均衡程度，定义小波能量熵如下：

$$H_w=-\sum_{j=1}^{J} p_j \log p_j \tag{2}$$

式（2）中，H_w 为小波能量熵，p_j 表示第 j 层细节能量占比，等于该层能量对各层能量总和之比，J 为分解层数，E_j 为第 j 层细节系数能量，$d_j(k)$ 为第 j 层细节系数序列，特征向量中同时包含 $\{E_j\}$ 的归一化取值以增强区段可分性。

2.2 区段定位算法的设计与优化

在馈线有序区段集上递归收缩搜索区间，以相似度地形的单峰性替代传统电测量阈值判据，结合动态阈值抑制噪声与分布式电源引起的局部畸变，最终在有限轮次内确定故障落点所在区段[5]。

相似度由幅值分量与时序分量协同度量，其中幅值分量刻画小波能量熵与奇异谱强度的匹配关系，时序分量通过首达行波时延差对极性与衰减进行惩罚，为此定义区段相似度函数如下：

$$s_i=\alpha\frac{\mathrm{f}\cdot \mathrm{t}_i}{\|\mathrm{f}\|_2\|\mathrm{t}_i\|_2}+(1-\alpha)\exp(-\beta\Delta\tau_i) \tag{3}$$

式（3）中，s_i 表示第 i 区段的相似度，单位为 1；f 为故障特征向量；t_i 为第 i 区段模板特征向量；$\Delta\tau_i$ 为测得首达时延与该区段理论时延之差，单位为 s；$\alpha\in[0,1]$ 为权重系数；$\beta>0$ 为时延惩罚系数；· 表示内积运算；$\|\cdot\|_2$ 表示二范数[6]。

2.3 定位系统的架构设计

本文构建由数据采集层、通信层、定位分析层组成的三层架构，面向配电电缆单相接地场景实现从原始波形到区段判据的端到端闭环，见图 1。数据采集层部署 FTU、故障指示器、合并单元和站端网关，采集零序电压电流、行波启动量与录波片段，统一采用毫秒级时间戳并通过 IEEE 1588 授时，边缘侧完成去噪、异常点剔除、事件对齐及关键特征计算，生成轻量特征向量和事件元数据以降低链路负载。

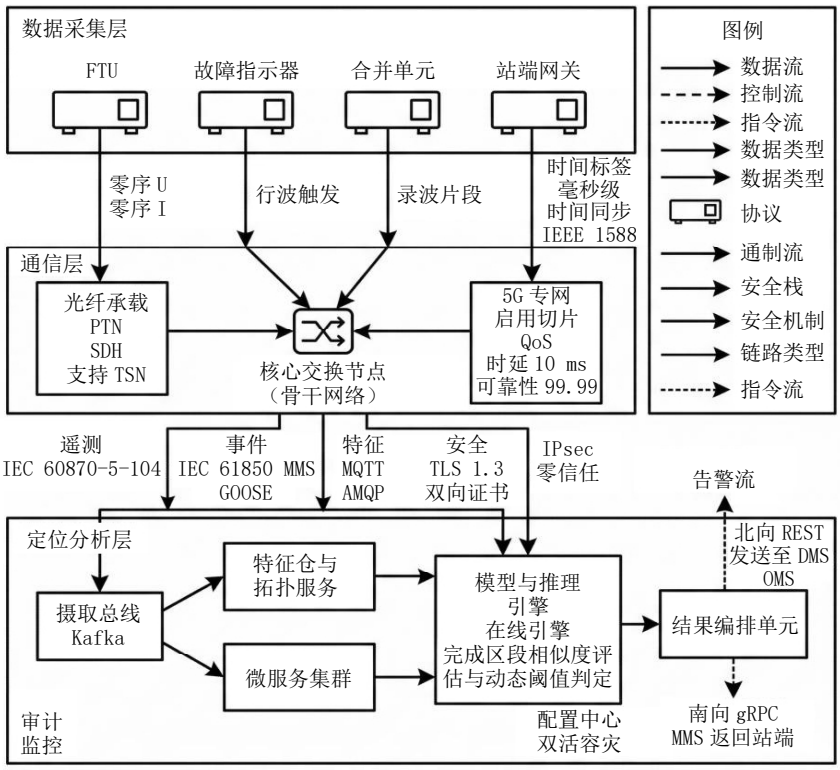


图 1 定位系统架构图

定位分析层部署于云端服务器与容器平台，采集网关接入Kafka实现流式摄取，特征仓、拓扑服务和模型服务以微服务解耦运行，在线引擎对到达的特征向量执行区段相似度评估与动态阈值判定并结合拓扑库与开关状态生成故障区段结果。

3 定位方法的实验验证与效果评估

3.1 实验平台搭建与数据采集

为验证所提出区段定位方法的工程可实现性，搭建基于RTDS的配电网实时仿真平台，构建10 kV含电缆主干及3条电缆分支的放射型馈线模型，支路长度0.5 km～3.0 km，电缆采用交联聚乙烯等效参数并考虑接头电容与护套接地效应，末端配置混合负荷，母线侧引入PQ型与VSG型分布式电源，设置经消弧线圈接地与经电阻接地两种工况。

在该平台中实施单相接地故障注入，覆盖金属性及高阻两类场景，故障位置按0.1 km～9.0 km步长0.2 km遍历，过渡电阻取10 Ω～5 000 Ω并对合闸相角0°～360°均匀扫描，同时区分间歇电弧与永久接地，叠加开关投切和背景谐波构建多噪声工况，各测点同步采集零序电压与零序电流，采样率100 kHz，前置带通20 Hz～20 kHz，PTP同步误差优于1 μs，触发采用零序电流突变与行波启动双判据并保留100 ms故障前及500 ms故障后录波。

数据侧在网关完成去噪与时间对齐后将波形与元数据入库，元数据包含拓扑段号、注入位置、Rf、接地方式、DG运行模式及噪声等级，真实区段标签依据RTDS事件标记与等效距离计算联合生成，随后形成标准化数据集和数据字典供特征提取、参数整定以及离线复现实验使用。

3.2 定位方法的准确性验证

在RTDS平台构建覆盖关键工况的数据集，按统一注入策略生成200组故障样本，涵盖位置、过渡电阻、接地方式、分布式电源模式、噪声等级五维组合，采用事件标记和等效距离生成基准标签，定义区段识别准确率为正确区段占比，误差距离为预测区段到真实落点的沿线绝对距离，并以工况分层及五折交叉验证完成统计与置信评估。离线阶段完成模板库构建及传播速度校准，在线回放提取小波与奇异谱特征后由改进二分法输出区段，再与基准标签比对，误差矩阵按注入位置与过渡电阻二维汇总并绘制定位误差热力图，用于识别系统性偏差及边界效应。典型误判集中在支路汇接处、电缆接头邻域及多源并列区[7]。因为高阻故障导致高频能量衰减、逆潮流及控制注入引起零序相位漂移、微小同步偏差触发首达时标抖动、残余环网造成多路径叠加，因此在评估中引入零序极性校正、邻段投票、首达置信筛选、动态阈值自适应，以及基于拓扑约束的速度重估和模板在线重标，以抑制误差聚簇并提升区段判定稳定性。

3.3 定位方法的性能对比分析

阻抗法依赖低频等值模型，过渡电阻升高导致零序量幅相失配，DG逆潮流和继电保护切换易引入阈值漂移，虽部署成本低且启动判据简单，但在低SNR下易误判；行波法具备高时间分辨率，首波可提供较强的几何约束，但对采样带宽和同步精度敏感，电缆衰减与多路径反射将抬高触发门限并削弱分支处的可区分性。本文方法通过小波能量与奇异谱的多模态协同刻画以及相似度地形的单峰化校正，在DG引起的相位漂移和同步误差可控的条件下保持特征稳定，同时以动态阈值与邻段投票缓解局部畸变，因而在高阻故障与中低SNR场景中展现更高的区段可分性，计算负荷适中且可在边缘节点实现毫秒级响应。

4 结束语

面向电缆占比高的配电网单相接地场景，本文提出小波与奇异值分解协同特征与相似度单峰化的改进二分区段定位方法，构建三层架构，实现从同步采集到在线判据的闭环。仿真结果显示，方法在SNR 10 dB～12 dB与过渡电阻最高至5 000 Ω条件下仍具备88%至95%的区段定位精度，响应时间12 ms～25 ms，相较常规方法在高阻与多分支区域具备更高稳健性。未来将面向环网深度耦合与多源并列工况开展模板在线重标与速度自适应研究，推进现场试点与长期运行验证。

参考文献：

[1] 毛王清,万新强,赵宇.基于信号特征提取的配电网单相接地故障选线方法[J].兵工自动化,2026,45(02):50-55.
[2] 孙辉,朱振洪,刘文建.面向新型电力系统的10 kV配电线路小电流多点多态单相接地故障区段定位方法[J/OL].电测与仪表,1-9[2026-02-14][2026-03-11].https://read.cnki.net/web/Journal/Article/DCYQ202604017.html.
[3] 林平.基于多源信息融合的配电网单相接地故障选线及综合研判[J].电力设备管理,2026(02):41-43.
[4] 孙伟,乔操.基于特征融合的GA-SVM配电网单相接地故障选线方法[J].大众用电,2026,41(01):40-41.
[5] 毛颖,畅布赫,王琦,等.基于三相参数不对称度的配电网单相接地故障定位[J].电气应用,2026,45(01):56-62.
[6] 邱桂华,郭志燊,邵玉明,等.基于TransTCN半监督模型的配电网单相接地故障检测方法研究[J].电机与控制应用,2026,53(01):87-100.
[7] 杜涛,赵隆乾,索吉鑫,等.基于健全线路倍增系数的配电网单相接地故障测试[J].微型电脑应用,2026,42(01):180-183.