

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250173

基于时域差分运算的配电网多分支线路故障定位方法

吉兴全¹, 黄心月¹, 张玉敏¹, 叶平峰², 裴佑楠³, 翟鹤峰⁴

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 衢州学院电气与信息工程学院, 浙江 衢州 324000;
3. 济南大学自动化与电气工程学院, 山东 济南 250022; 4. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘要: 针对配电网多分支线路故障定位中存在定位终端配置成本高和波头标定复杂的问题, 提出一种基于时域差分运算的配电网多分支线路故障定位方法。首先, 将故障电压行波线模分量表示为时窗内叠加在正弦波上的指数衰减分量, 通过对其进行时域差分运算, 消除正弦分量, 将故障行波表示为脉冲信号。其次, 当不同线路发生故障时, 建立故障反射波时序约束关系, 甄别故障反射波波头到达时间。最后, 在 MATLAB/Simulink 中进行不同故障工况仿真验证。结果表明, 所提方法可仅在主干线路配备行波采集装置的条件下实现故障精准定位, 受故障类型、初相角及过渡电阻的影响小, 具有良好的可靠性和经济性。

关键词: 配电网; 多分支线路; 波头标定; 时域差分运算; 故障定位

Fault location method for multi-branch distribution network lines based on time-domain differential operation

Ji Xingquan¹, HUANG Xinyue¹, ZHANG Yumin¹, YE Pingfeng², PEI Younan³, ZHAI Hefeng⁴

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Quzhou 324000, China;
3. School of Electrical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China; 4. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: To address the high cost of installing fault location terminals and the complexity of wavefront identification in multi-branch distribution network lines, a fault location method based on time-domain differential operation is proposed. First, the line-mode component of the fault-induced voltage traveling waves is expressed as an exponentially decaying component superimposed on a sinusoidal waveform within a specific time window. By applying a time-domain differential operation, the sinusoidal component is eliminated, thereby transforming the fault traveling wave into pulse signals. Furthermore, temporal sequence constraints for the fault reflection waves are established to accurately identify the arrival times of the wavefronts when faults occur on different branches. Finally, various fault scenarios are simulated and validated in MATLAB/Simulink. The results indicate that the proposed method can achieve accurate fault localization with traveling-wave acquisition devices installed only on the main line. The method exhibits minimal sensitivity to variations in fault type, initial inception angle, and fault resistance, demonstrating excellent reliability and cost-effectiveness.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107111).

Key words: distribution network; multi-branch lines; wavefront identification; time-domain differential operation; fault location

0 引言

配电网具有点多面广、分支线路多的特点, 发

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52107111); 中国博士后面上项目资助(2023M734092); 山东省自然科学基金项目资助(ZR2022ME219, ZR2023QE181, ZR2024ME029)

生故障后故障传播规律较为复杂, 导致定位困难^[1-4]。传统的多分支线路故障定位方法往往需在各分支线路末端配置测量装置^[5], 经济成本较高, 不利于大规模推广应用。为此, 如何在减少测量装置的前提下, 提高配电网多分支线路故障定位的精度具有实际意义。

行波定位法因其几乎不受系统参数、运行状态

和故障类型等因素的影响^[6-9], 广泛应用在工程实践中, 但准确且迅速地确定故障行波波头到达检测端的时间, 是保证定位结果准确的关键。现有的波头标定方法大多存在一定的局限性, 例如, 小波分析法的分析效果受限于小波基函数的选择, 适应性较差^[10-11]; 而希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)的计算复杂度较高, 其分解过程存在过包络和欠包络的问题, 易出现模态混叠和端点效应, 影响波头标定的准确性^[12-13]。文献[14]采用的静态小波变换虽改善了时移问题, 但仍未解决基函数依赖性的问题。相较于 HHT, 变分模态分解技术有效克服了模态混叠和端点效应等问题^[15-18], 然而其较高的计算复杂度限制了实际应用效果。针对上述问题, 学者们提出了多种改进方案。其中, 文献[19]利用互补集合经验模态分解减少模态混叠, 并利用改进型 Teager 能量算子(Teager energy operator, TEO)增强行波信号的突变特征。文献[20]通过极点对称模态分解滤除低频干扰, 并利用 TEO 凸显行波波头的突变特征。这些方法虽提升了定位精度, 但仍存在参数敏感和计算效率低的问题。文献[21]提出了一种基于差分计算的波头标定新方法, 通过将故障行波转化为脉冲信号实现波头到达时间的精确标定, 该方法计算简便且参数鲁棒性强, 在行波测距领域具有参考价值。然而, 该方法在配电网多分支线路模型中的应用研究较少, 值得深入探索。

配电网多分支线路进行故障定位时, 传统定位方案要在各分支末端安装行波检测设备, 因此实施工程成本较高^[22]。文献[23-25]通过建立故障行波传播路径矩阵, 基于多个端点行波传输时差来实现故障定位。但计算复杂度高, 装置配备成本高。文献[26]的距离矩阵改进方案通过优化装置配置降低成本, 但零模分量的局限性影响了其可靠性。

近年来, 随着人工智能和大数据技术的迅速发展, 数据驱动方法在配电网多分支线路故障定位领域逐渐受到关注。文献[27]采用图半监督与多任务学习相结合的方法, 提高了在低标记率和低可观测度条件下的定位精度, 但计算复杂度较高。文献[28]提出基于一维卷积和图神经网络融合注意力机制的方法, 有效提升了拓扑变动和数据不完备情况下的泛化能力, 但对数据完整性要求较高。文献[29]通过模糊熵双重判据和自适应噪声完备集合经验模态分解算法, 实现了噪声干扰条件下的稳定定位, 但实时计算性能仍待优化。上述方法均停留在故障区段定位层面, 未能实现分支线路上的精确定位。针对故障点精确定位, 现有研究呈现出多源数据融合

与多任务学习的发展趋势。文献[30]构建基于长短期记忆网络(long short term memory, LSTM)和多任务学习的实时异常识别与定位框架, 实现了故障类型判断与故障定位, 但其系统集成复杂度较高, 且对数据同步与标注质量要求严苛。针对监测信息有限的场景, 文献[31]提出的智能故障定位方法通过逻辑推理与机器学习相结合, 采用并行自编码器与注意力机制的 LSTM 进行故障距离回归估计, 但存在模型迁移策略复杂、参数敏感性等问题。文献[32]提出了基于卷积神经网络(convolutional neural network-LSTM, CNN-LSTM)的故障波形特征全景提取单端定位方法, 突破了传统多端检测的限制。尽管数据驱动方法在提高定位准确性、增强模型泛化能力等方面取得了显著进展, 但其性能受限于训练样本的质量和规模, 其工程实用性仍需进一步验证。

针对上述问题, 本文提出一种基于时域差分运算的配电网多分支线路故障定位方法。根据故障行波特性, 在合理时窗内将故障电压行波的线模分量视作由正弦波叠加指数衰减分量构成, 通过时域差分运算消除其中的正弦波成分, 使故障行波以脉冲形式呈现, 从而实现波头标定, 该方法无需考虑设置计算参数, 自适应能力强, 计算简单。通过剖析故障行波在多分支线路拓扑结构的传输机理, 建立故障反射波波头时序约束关系, 确定故障反射波波头的到达时间, 即可实现对配电网多分支线路的故障精确定位。

1 基于时域差分运算的行波波头标定方法

1.1 故障行波特性分析

行波检测算法通过提取行波信号的关键特征来迅速定位故障点, 因此, 对故障行波信号传输路径及其特性分析至关重要。

根据行波理论^[33], 当配电线路发生故障时, 故障点会激发暂态行波, 该行波以特定传播速度沿线路向两侧传输, 在传播过程中会发生畸变和幅值衰减, 经波阻抗不连续点时会产生反射和折射现象。这一物理过程将持续进行, 直至行波能量完全耗散, 如图 1 所示。

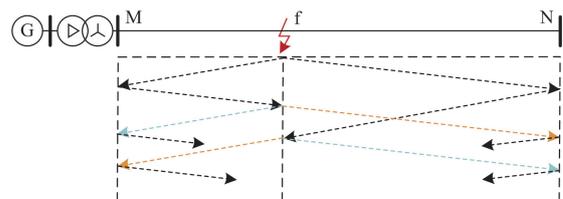


图 1 故障行波网格图

Fig. 1 Fault traveling-wave lattice diagram

通过在线路上安装行波采集装置, 可以提取三相电压行波信号, 并利用凯伦贝尔变换进行解耦, 获得故障行波线模分量。故障行波线模分量可分为两部分: 一部分是工频基波电压, 表示为正弦分量; 另一部分是由故障暂态量在线路上的传播特性决定的, 时域上可表示为指数衰减分量。如图 2 所示, 当滑动窗口足够短时, 正弦分量可近似为线性趋势分量。

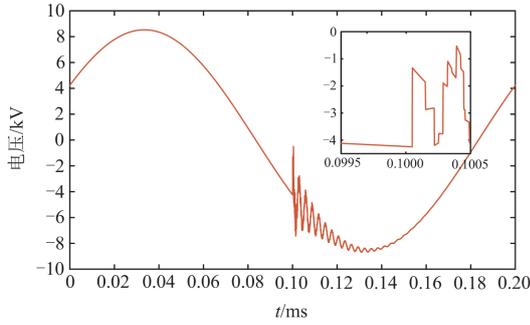


图 2 故障电压行波线模分量

Fig. 2 Line-mode component of fault voltage traveling wave

故障行波线模分量的时域模型可以表示为

$$Q(t) = Ae^{-(t-t_a)/\tau}u(t-t_a) + Bt + C \quad (1)$$

式中: $Q(t)$ 表示故障信号总响应; A 表示指数暂态分量初始幅值; τ 表示故障暂态量在线路衰减中的时间常数; t_a 为时间窗口内行波的起始时间; $u(t-t_a)$ 为单位阶跃函数; B 和 C 分别为在窗口内正弦分量线性近似的斜率及截距; $Ae^{-(t-t_a)/\tau}u(t-t_a)$ 为故障点激发的高频暂态分量, 在传播过程中会逐渐衰减; $Bt + C$ 为工频基波电压。

对信号进行离散化处理, 可得故障行波线模分量离散信号 $Q[k]$ 为

$$Q[k] = Ae^{-\alpha k}u[k] + Bk + C \quad (2)$$

式中: α 用于刻画高频分量的衰减程度, $\alpha = 1/\tau$; k 为离散采样点索引; $u[k]$ 为单位阶跃函数, 表示故障行波暂态分量。

1.2 基于时域差分运算的行波波头标定

基于时域差分运算的行波波头标定方法, 通过对故障行波的线模分量进行差分计算, 消除线性趋势成分, 增强信号的瞬态特征, 以精确标定行波波头到达时间。

首先, 对 $Q[k]$ 进行差分运算, 可得

$$Z[k] = Q[k] - Q[k-1] = Ae^{-\alpha k}\delta[k] - A_e e^{-\alpha k}u[k-1] + B \quad (3)$$

式中: $\delta[k]$ 表示脉冲函数, $\delta[k] = u[k] - u[k-1]$; A_e 为滑动窗口内的误差幅值, $A_e = A(1 - e^{-\alpha})$ 。可见, 式(3)有效消除了滑动窗口内正弦分量的截距 C 。

利用 δ 函数的性质 $u[k] \times \delta[k] = u[0] \times \delta[k]$, 式(3)可以简化为

$$Z[k] = A\delta[k] + A_e e^{-\alpha k}u[k-1] + B \quad (4)$$

对 $Z[k]$ 进行差分运算, 可得差分信号 $W[k]$ 为

$$W[k] = Z[k] - Z[k-1] = A\delta[k] + A_{w1}\delta[k-1] + A_{w2}e^{-\alpha k}u[k-2] \quad (5)$$

式中: $A_{w1} = A(e^{-\alpha} - 2)$; $A_{w2} = A(1 - e^{-\alpha})^2$ 。此时, 式(5)进一步消除了滑动窗口内正弦分量的近似斜率 B 。

通过上述计算可将工频正弦分量、趋势分量等消去, 保留包含故障行波突变的差分信号 $W[k]$, 但 $W[k]$ 中依然会含有噪声或其他干扰成分, 为进一步突出故障行波的到达时间并抑制杂散波动, 通过构建差分方程 $P[k] = W[k] - \lambda W[k-1]$, 并选择适当的参数 λ , 故障行波可以表示为序列脉冲函数, 如式(6)所示。

$$P[k] = \xi_1\delta[k] + \xi_2\delta[k-1] + \xi_3\delta[k-2] \quad (6)$$

式中: ξ_1 、 ξ_2 和 ξ_3 为脉冲函数的常系数。

式(6)以脉冲函数表示故障行波, 通过差分序列进一步消噪和突出脉冲, 且 $P[k]$ 呈现较稀疏的脉冲分布, 可表征故障行波波头的时域位置, 从而准确标定行波波头到达时间。

$W[k]$ 和 $W[k-1]$ 为两个连续时刻的差分结果, 根据最小二乘拟合思想寻找最优参数 λ , 保证在平滑区段, $W[k]$ 和 $\lambda W[k-1]$ 足够贴合, 尽量相互抵消, 同时在突变处由波前造成的差异在 $P[k]$ 中更加凸显。因此, 通过最小化式(7)的范数确定参数 λ 。

$$\min_{\lambda} \left(\sum_i (x_i - \lambda y_i)^2 \right) \quad (7)$$

式中: i 为滑动窗口内的离散采样点编号; x_i 和 y_i 分别为 $W[k]$ 和 $W[k-1]$ 的离散采样值。

解得参数 λ 的表达式为

$$\lambda = \left(\sum_i x_i y_i \right) / \sum_i y_i^2 \quad (8)$$

该方法通过脉冲函数直接提取行波到达时间。输出归一化后, 若行波到达时间位于滑动窗口内, 输出小于 1 的非零值。该方法使得故障行波的波头标定过程更加简洁, 解决了传统波头标定方法需进行复杂参数选择的问题。

2 基于故障点反射波辨识的主干线路双端行波定位

2.1 主干线路故障点反射波辨识

当主干线路某处发生故障时, 故障行波在故障点和线路两端发生多次折反射。图 1 展示了故障点

f 的故障行波传输路径, 线路两端接收到初始故障行波的时刻记为 t_{M1} 和 t_{N1} , 故障点反射波首次到达两端的时间记为 t_{M2} 和 t_{N2} 。故障点反射波到达线路两端的时序关系与故障点位置密切相关, 由于行波在传输过程中的折反射会产生多种波形, 单纯依靠检测行波信号的到达时间顺序通常难以准确判断信号的来源。因此, 需要建立故障点反射波的时序约束关系, 从而筛选 t_{M2} 和 t_{N2} 。

定义 L 为线路全长, v 为故障行波的传输速度。本节通过分析 t_{M1} 、 t_{N1} 、 L 和 v 之间的固有关系, 提出故障点反射波时序约束关系, 确定故障点反射波波头的到达时间。

具体而言, 图 1 中故障点 f 到线路左端 M 的故障距离 d 可通过结合传统双端行波法的定位公式表示, 如式(9)所示。

$$d = [L + (t_{M1} - t_{N1})v]/2 \quad (9)$$

进一步地, 利用反射波头的传输路径关系, 故障点反射波到达 M 端的时间 t_{M2} 为

$$t_{M2} = t_{M1} + 2d/v \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)整理得到

$$t_{M2} = t_{M1} + L/v - (t_{N1} - t_{M1}) \quad (11)$$

考虑到两端采集装置间可能存在时钟同步误差, 为进一步提高定位精度, 本文引入标定误差 ε_1 , 故障点反射波时序约束关系的判据为

$$|t_{M2} - t_{M1} - L/v + (t_{N1} - t_{M1})| \leq \varepsilon_1 \quad (12)$$

当 M 端采集的行波到达时间满足式(12)的约束关系时, 可确定该时刻为故障点反射波首次到达 M 端的时刻。

同理, 当 N 端采集的行波到达时间满足式(13)的约束关系时, 则可确定该时刻为故障点反射波首次到达 N 端的时刻。

$$|t_{N2} - t_{N1} - L/v + (t_{M1} - t_{N1})| \leq \varepsilon_1 \quad (13)$$

2.2 基于故障点反射波辨识的双端行波法

为解决传统的双端行波法可能受到时钟同步误差影响, 导致定位结果准确性不高的问题, 本文提出基于故障点反射波辨识的双端行波法。该方法通过分析主干线路两端的行波信号, 根据时序约束关系, 辨识故障点反射波的到达时间, 进一步结合单端行波定位公式的等量关系, 推导基于故障点反射波的双端故障定位公式, 从而得到故障点距离。

具体而言, 当故障点位于线路 MN 上时, 首先根据式(12)和式(13)筛选出故障点反射波到达时间。进一步, 通过分析主干线路两端检测到的故障行波信号, 利用单端定位算法分别计算两端所测的故障点位置, 如式(14)和式(15)所示。

$$d_{MF} = (t_{M2} - t_{M1})v/2 \quad (14)$$

$$d_{NF} = (t_{N2} - t_{N1})v/2 \quad (15)$$

式中: d_{MF} 、 d_{NF} 分别为故障点 f 距离主干线路 M 端和 N 端的距离。

进一步, 结合式(14)和式(15)两端所测故障点位置的等量关系, 推导出故障点到主干线路 M 端和 N 端的距离为

$$d_{MF} = \frac{t_{M2} - t_{M1}}{(t_{M2} - t_{M1}) + (t_{N2} - t_{N1})} L \quad (16)$$

$$d_{NF} = \frac{t_{N2} - t_{N1}}{(t_{N2} - t_{N1}) + (t_{M2} - t_{M1})} L \quad (17)$$

2.3 基于故障点反射波辨识的双端行波定位

基于故障点反射波辨识的改进型双端行波定位法的具体步骤如下。

1) 初始行波波头标定。利用本文提出的时域差分运算法, 对故障初始行波波头到达 M 端和 N 端的时间 t_{M1} 和 t_{N1} 进行标定。

2) 故障点反射波辨识。依据 t_{M1} 、 t_{N1} 、 L 和 v 之间的固有关系, 构建故障点反射波时序约束关系判据, 筛选 t_{M2} 和 t_{N2} 。

3) 基于故障点反射波辨识的双端行波法。通过主干线路两端行波测量装置记录的故障行波信号, 根据步骤 2) 中确定的 t_{M2} 和 t_{N2} , 利用式(16)和式(17)的定位公式, 完成故障定位。

3 基于反射行波时序约束和极性判别的分支线路故障定位

3.1 分支线路故障行波传播路径

当分支线路发生故障时, 通过对初始行波和后续反射行波之间的时域约束关系和极性进行分析, 区分故障线路与健全线路的行波特征, 从众多折反射行波中甄选出故障区段的故障点反射波和对端母线反射波, 用于分支线路故障定位。如图 3 所示, 以主干线路 M 端为观测点, 区段 P_1Q_1 中的不同故障行波到达时间和极性特征可以表征故障信息。

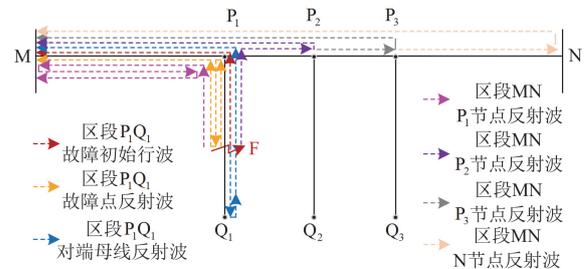


图 3 故障行波传播路径图

Fig. 3 Propagation path diagram of fault traveling wave

3.2 分支线路故障区段的行波特性分析

以分支线路 P_1Q_1 上发生短路故障为例, 分析测量端 M 处的初始行波和故障区段的反射行波, 传输路径如图 4 所示。

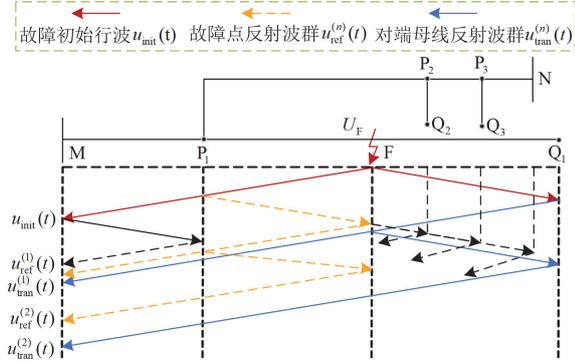


图 4 多分支线路故障行波网格图

Fig. 4 Fault traveling-wave lattice diagram for multi-lateral branches

首先到达主干线路 M 端的是故障初始行波^[34-35] $u_{init}(t)$, 表示为

$$u_{init}(t) = U_F \cdot \varepsilon(t - t_F) \cdot (1 + \beta_M) \alpha_{P_1} e^{-\gamma \cdot l_{MF}} \quad (18)$$

式中: U_F 为故障点施加的阶跃电压; $\varepsilon(t - t_F)$ 表示描述行波的触发时间与传播特性的阶跃函数, $t_F = l_{MF}/v$, l_{MF} 为故障点 F 到主干线路 M 端的距离; β_M 为 M 端的行波反射系数; α_{P_1} 为分支节点 P_1 处的行波折射系数; γ 为线路传播系数。

线路 P_1Q_1 上发生故障时, 经过折反射后到达 M 端的后续行波中, 蕴含故障距离信息的故障反射行波波群有两种。

1) 第一种是故障点反射波群, 在 F 点处经过折反射后经分支节点透射的行波群 $u_{ref}^{(n)}(t)$ 表示为

$$u_{ref}^{(n)}(t) = U_F \cdot \varepsilon(t - t_F - 2n \cdot l_{P_1F}/v) \cdot (1 + \beta_M) \alpha_{P_1} \beta_{P_1}^n \beta_F^n e^{-\gamma(l_{MF} + 2n \cdot l_{P_1F})} \quad (19)$$

式中: n 为故障行波在故障点的反射次数; l_{P_1F} 为 F 点到分支节点 P_1 的距离; β_{P_1} 和 β_F 分别表示行波在分支节点 P_1 处和 F 点处的反射系数。

2) 第二种是对端母线反射波群, 在对端母线 Q_1 点处反射经 F 点和分支节点 P_1 透射的行波群 $u_{tran}^{(n)}(t)$ 表示为

$$u_{tran}^{(n)}(t) = U_F \cdot \varepsilon(t - t_F - 2n \cdot l_{Q_1F}/v) \cdot (1 + \beta_M) \beta_F^{n-1} \beta_{Q_1}^n \alpha_F \alpha_{P_1} e^{-\gamma(l_{MF} + 2n \cdot l_{Q_1F})} \quad (20)$$

式中: l_{Q_1F} 为 F 点到分支末端节点 Q_1 的距离; β_{Q_1} 为行波在分支末端节点 Q_1 的反射系数; α_F 为行波在 F

点的折射系数。

3.3 分支线路故障反射行波时序及极性分析

以图 4 中分支线路 P_1Q_1 上发生短路故障为例, 假设在 M 端检测到故障初始行波 $u_{init}(t)$ 到达的时间为 t_{M1} , 初次到达 M 端的故障点反射波 $u_{ref}^{(1)}(t)$ 的时刻记为 t_{M2} , 初次到达 M 端的对端母线反射波 $u_{tran}^{(1)}(t)$ 的时刻记为 t_{M3} , 根据单端行波法有

$$\begin{cases} t_{M2} - t_{M1} = 2l_{P_1F}/v \\ t_{M3} - t_{M1} = 2(l_{P_1Q_1} - l_{P_1F})/v \end{cases} \quad (21)$$

式中: l_{P_1F} 为故障距离; $l_{P_1Q_1}$ 为分支线路长度。

引入波头标定误差 ε_2 , 构建两种反射行波波头初次到达时间 t_{M2} 、 t_{M3} 和初始行波波头到达的时间 t_{M1} 之间的时域约束判据, 如式(22)所示。

$$|t_{M2} + t_{M3} - 2t_{M1} - 2l_{P_1Q_1}/v| \leq \varepsilon_2 \quad (22)$$

故障初始行波波头标定可靠性高, 因此可在确定故障初始行波波头到达时间后, 利用式(22)的时域约束判据筛选故障点反射波和对端母线反射波, 有效排除后续路径折返所产生的多重反射波影响。

筛选出故障点反射波和对端母线反射波后, 进一步探究其极性。两种故障反射行波的极性仅与折反射系数的正负相关, α_{P_1} 、 α_F 为正数, β_{P_1} 和 β_F 为负数, β_{Q_1} 为正数。 $u_{ref}^{(n)}(t)$ 的极性为 $K_{ref,n} = \beta_{P_1}^n \beta_F^n$, 其中, 当 $n=1$ 时, $K_{ref,1} > 0$; $u_{tran}^{(n)}(t)$ 的极性为 $K_{tran,n} = \beta_F^{n-1} \beta_{Q_1}^n \alpha_F$, 同样地, 当 $n=1$ 时, $K_{tran,1} > 0$ 。在第一次反射中, 两种反射波的波头极性与 $u_{init}(t)$ 的极性保持一致。当 $n=2$ 时, $K_{ref,2} > 0$ 且 $K_{tran,2} < 0$, 此时, 两类行波的系数相反, 表明 $u_{ref}^{(2)}(t)$ 与 $u_{init}(t)$ 的极性仍然相同, 而 $u_{tran}^{(2)}(t)$ 与 $u_{init}(t)$ 的极性相反。

基于上述分析, 可以通过二次波头极性差异, 明确区分 $u_{ref}^{(1)}(t)$ 和 $u_{tran}^{(1)}(t)$ 到达 M 点的先后顺序, 实现配电网分支线路故障测距。

3.4 基于反射行波的分支线路故障定位方法

当故障点位于分支线路上时, 根据式(22)筛选两种反射波, 结合极性特征进行区分, 利用 M 端测量信息进行单端定位, 分别利用两种反射波的时差计算故障距离。

$$\begin{cases} l_{MF}' = l_{MP_1} + (t_{M2} - t_{M1})v/2 \\ l_{MF}'' = l_{MP_1} + l_{P_1Q_1} - (t_{M3} - t_{M1})v/2 \end{cases} \quad (23)$$

式中: l_{MF}' 为由 $u_{init}(t)$ 与 $u_{ref}^{(1)}(t)$ 的波头时差得出的故障距离; l_{MF}'' 为 $u_{init}(t)$ 与 $u_{tran}^{(1)}(t)$ 的波头时差得出的故障距离; l_{MP_1} 为主干线路 M 端到分支节点 P_1 的距离。

两组故障测距结果可以相互校验,当 I'_{MF} 和 I''_{MF} 均在误差范围内时,计算二者的平均值 $I_{MF,avg}$,可进一步提高故障测距的容错性。

$$I_{MF,avg} = (I'_{MF} + I''_{MF})/2 \quad (24)$$

同理,利用N端测量装置信息实现单端定位,可得

$$I_{NF,avg} = (I'_{NF} + I''_{NF})/2 \quad (25)$$

式中: I'_{NF} 为到达N端故障初始行波与故障点反射波的波头时差得出的故障距离; I''_{NF} 为到达N端故障初始行波与对端母线反射波的波头时差得出的故障距离; $I_{NF,avg}$ 为二者的平均值。

当某一分支线路发生故障时,采集距分支节点P最近的测量装置记录的故障行波信号,通过上述行波定位方法,实现故障点的精确定位。

3.5 基于反射行波的分支线路故障定位方法

所提方法的具体步骤如下。

1) 提取故障信息。提取并整理故障线路的相关信息,包括故障线路的基本参数、故障区段以及从线路两端采集到的故障行波数据。

2) 去噪预处理。基于改进型卡尔曼滤波技术^[36-38]对故障行波信号实施噪声抑制预处理,减小噪声对后续算法的影响。

3) 初始行波波头标定。基于本文提出的时域差分运算法,可准确测定故障初始行波抵达测量端点M和N的具体时间,分别记为 t_{M1} 和 t_{N1} 。

4) 确定采样时窗。结合故障分支线路长度 l 定义时间常数 $\tau_1 = l/v$,以故障初始行波波头到达时间为参考点,构建一个采样时窗范围,该范围覆盖了初始行波到达前的10个采样点以及到达后 $4\tau_1$ 范围内的所有采样点。

5) 反射行波时序约束和极性判别。在采样时窗内,根据时域约束判据筛选故障点反射波一次波头和对端母线反射波一次波头,结合极性特征进行区分。

6) 故障定位。利用两端测量信息,基于故障点反射波和对端母线反射波的到达时间,按式(23)—式(25)计算故障距离。

4 仿真分析

4.1 故障行波波头标定

为评估本文所提故障行波波头标定方法的性能,本文基于MATLAB/Simulink仿真平台构建如图1所示的仿真模型,线路采用分布参数模型,线路长度设为5 km。在线路M端和N端分别配置故

障行波采集装置,采样率为10 MHz。在距离M端1.5 km处模拟A相接地故障场景。两端装置的波头标定结果分别如图5、图6所示。

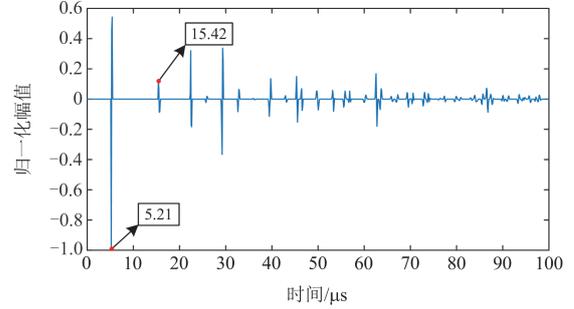


图5 M端装置波头标定结果

Fig. 5 Wavefront identification results at terminal M

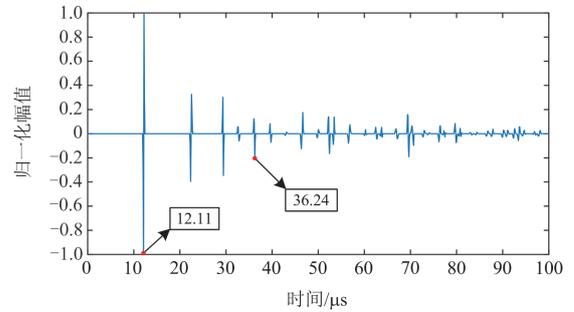


图6 N端装置波头标定结果

Fig. 6 Wavefront identification results at terminal N

根据图5和图6的标定结果,故障初始行波波头抵达M端和N端的时间分别为 $5.21 \mu\text{s}$ 和 $12.21 \mu\text{s}$,利用式(12)和式(13)的故障点反射波时序约束关系筛选M端和N端后续行波,得到M端和N端故障点反射波首次到达测量装置的时间分别为 $15.42 \mu\text{s}$ 和 $36.24 \mu\text{s}$ 。将上述测得的波头时间代入式(16),得到故障点到主干线路M端的距离为 1491.23 m ,代入式(17)得到故障点到主干线路N端的距离为 3508.77 m ,误差仅为 8.77 m 。

由此表明,本文所提波头标定方法,仅通过时域差分运算,可有效标定故障行波波头到达时刻,根据故障点反射波时序约束关系判据,可精确筛选包含有效故障信息的反射行波,本文提出的基于故障点反射波辨识的主干线路双端行波定位方法可精确定位故障位置。

4.1.1 噪声对行波波头标定的影响

为验证噪声对行波波头标定的影响,在两端检测到的行波中加入 30 dB 的高斯白噪声,经过改进卡尔曼滤波去噪后标定结果如图7、图8所示。

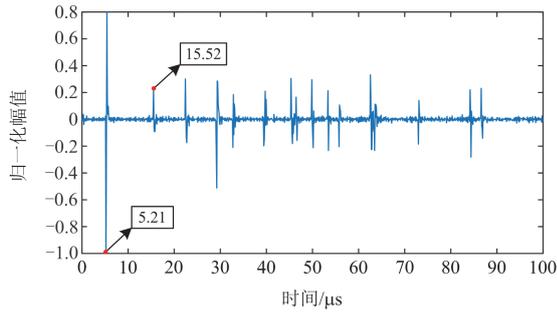


图 7 30 dB 噪声下 M 端装置波头标定结果

Fig. 7 Wavefront identification results at terminal M under 30 dB noise

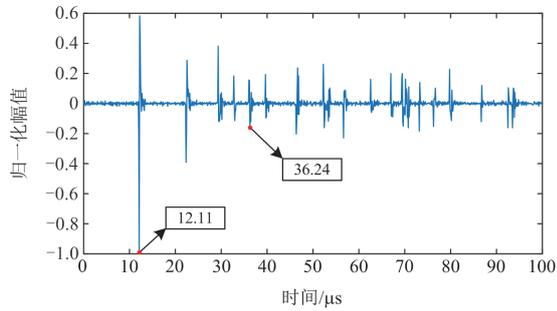


图 8 30 dB 噪声下 N 端装置波头标定结果

Fig. 8 Wavefront identification results at terminal N under 30 dB noise

由图 7 和图 8 可知, 在 30 dB 强噪声条件下, 仅 N 端初始波头的标定时间较无噪声工况偏差 $0.1 \mu\text{s}$, 代入式(16)和式(17), 得到 M 端与 N 端的故障距离分别为 1486.88 m 和 3513.12 m, 相对于无噪声结果仅偏差 4.35 m。结果表明, 改进卡尔曼滤波能够有效抑制噪声对行波特性的影响, 使波头标定在强噪声条件下仍保持高度一致性。

此外, 为进一步验证本文所提方法的抗噪性能, 在附录 A 图 A1—图 A4 中增加小波变换和 HHT 方法在 30 dB 噪声条件下的波头标定结果。结果表明, 在 30 dB 噪声条件下小波变换和 HHT 方法只能识别初始行波波头到达时间, 后续波头湮没在噪声中, 无法识别。

4.1.2 故障条件对行波波头标定的影响

为进一步验证本文方法的适用性和准确性, 将其与小波变换和 HHT 方法进行对比分析。在信噪比为 50 dB 的高斯白噪声环境下, 模拟线路不同位置的多种故障类型, 并评估不同故障条件对波头标定的影响, 3 种方法的故障定位结果如表 1 所示。

由表 1 的对比结果可知, 在所有测试条件下, db6 小波变换和 HHT 的平均误差分别为 20.79 m 和

12.33 m, 而本文方法的平均误差最小, 为 5.92 m。这是因为本文方法通过时域差分运算将故障行波波头表示为脉冲信号的形式进行标定, 与 db6 小波变换方法相比, 其不受计算参数的影响, 与 HHT 方法相比不存在模态混叠现象和端点效应。

表 1 不同情况下 3 种方法的故障定位结果

Table 1 Fault location results of three methods under various scenarios

检测方法	故障距 M 端距离/m	故障类型	故障角/(°)	过渡电阻/ Ω	定位结果/m	绝对误差/m
db6 小波变换	700	Ag	10	300	718.08	18.08
	1400	AB	50	100	1419.16	19.16
	2100	ABC	90	200	2120.25	20.25
	2800	ABg	60	500	2821.33	21.33
	3500	Cg	20	1000	3522.41	22.41
	4200	BCg	90	200	4223.49	23.49
HHT 方法	700	Ag	10	300	659.66	40.34
	1400	AB	50	100	1404.56	4.56
	2100	ABC	90	200	2105.64	5.64
	2800	ABg	60	500	2806.72	6.72
	3500	Cg	20	1000	3507.81	7.81
	4200	BCg	90	200	4208.89	8.89
本文方法	700	Ag	10	300	702.58	2.58
	1400	AB	50	100	1402.58	2.58
	2100	ABC	90	200	2105.44	5.44
	2800	ABg	60	500	2806.88	6.88
	3500	Cg	20	1000	3508.31	8.31
	4200	BCg	90	200	4209.74	9.74

此外, 本文方法与小波变换、HHT 方法在不同故障类型和工况下更详细的定位结果对比如附录 B 表 B1—表 B4 所示。

4.1.3 算法定位速度比较

为研究不同波头标定方法的定位速度, 使用配备 AMD Ryzen 7 7840H 处理器和 16 GB RAM 的计算机, 对相同故障条件下 3 种方法的平均计算时间进行了对比, 结果如表 2 所示。

表 2 相同条件下 3 种方法的计算时间

Table 2 Computational times of three algorithms under identical conditions

波头标定方法	算法计算时间/ms
小波变换	61.79
HHT	176.22
本文方法	30.42

由表 2 可得, 本文方法摒弃频域变换和模态分解, 构建从波头标定到故障定位的纯时域处理链条, 避免了小波基选择、模态混叠等问题, 算法简单便于实现, 相比小波变换和 HHT, 计算耗时分别减少

了 50.8%和 82.7%，有效提升了定位速度。

4.2 多分支线路故障定位结果

为评估本文所提方法的准确性，本研究基于 MATLAB/Simulink 仿真平台，构建如图 9 所示的模型。在主干线路两端安装故障行波采集装置，采样频率为 10 MHz。

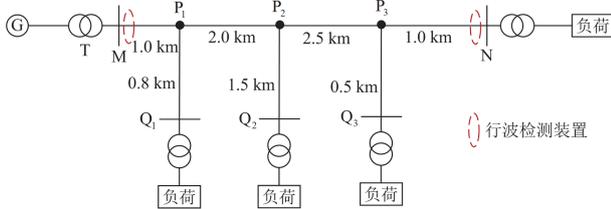


图 9 多分支配电网

Fig. 9 Multi-lateral branches distribution network

4.2.1 故障定位方法分析

为验证本文所提分支线路故障定位方法的可行性，在分支线路 P_2Q_2 距离 P_2 分支节点 300 m 处设置 A 相接地故障，过渡电阻为 100 Ω ，测得故障初始行波波头后，结合故障分支线路 P_2Q_2 长度确定常数 τ_1 ，以故障初始行波波头到达时间为参考点，前向截取 10 个采样点，后向截取 $4\tau_1$ 时长的采样序列，构建采样时窗，用于分析 M 端装置的后续波头标定结果，如图 10 所示。

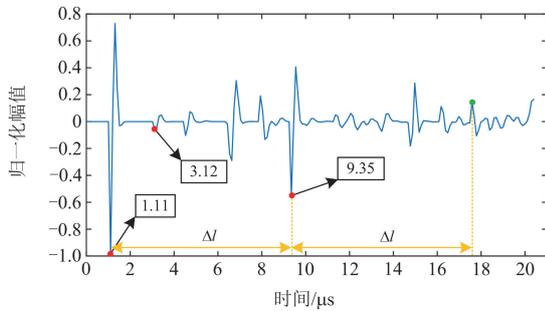


图 10 M 端装置波头标定结果

Fig. 10 Wavefront identification results at terminal M

分析 M 端装置波头标定结果，利用式(22)的时域约束判据筛选得到一组波头时间为 1.11 μs 、3.12 μs 和 9.35 μs ，其中 1.11 μs 对应初始行波波头到达时间，需进一步分析极性判别反射波头，因 9.35 μs 对应的行波幅值较大，利用其与初始行波波头的间隔距离，可确定其到达 M 端二次波头的时间为 17.59 μs ，由图 10 可知，其与初始行波极性相反，故判 9.35 μs 时对应的行波波头为对端母线反射波。进一步，利用式(23)计算得到故障点距分支节点 P_2 的距离为 293.56 m 和 296.42 m，由式(24)得到故障

点距分支节点 P_2 的距离为 294.99 m，误差为 5.01 m。

综上所述，本文所提出的分支线路故障定位方法通过融合故障行波的时域约束关系与极性特征，构建判据体系，精确筛选含有故障信息的后续行波波头。仿真结果表明，该方法在无需增设分支线路末端监测装置的情况下，实现了复杂多支配电网故障的精准定位，同时显著降低了测量终端配置成本。

4.2.2 主干线路故障定位结果分析

在主干线路 MN 上模拟多种故障条件下的情况，得到的故障定位结果如表 3 所示。

表 3 主干线路定位结果

Table 3 Fault location results on main lines

故障区段	故障距 M 端距离/m	故障类型	故障角/(°)	过渡电阻/ Ω	定位结果/m	定位误差/m
MP ₁	300	ABg	90	100	283.52	16.48
MP ₁	600	Ag	50	300	605.01	5.01
MP ₁	900	AB	80	500	882.66	17.34
P ₁ P ₂	1400	ABC	10	100	1423.35	23.35
P ₁ P ₂	1800	Cg	90	200	1803.29	3.29
P ₁ P ₂	2200	Ag	50	1000	2183.24	16.79
P ₁ P ₂	2600	Ag	80	1000	2607.02	7.02
P ₂ P ₃	3400	ABg	20	300	3425.36	25.36
P ₂ P ₃	3800	ABg	10	500	3819.91	19.91
P ₂ P ₃	4200	AB	90	100	4199.86	0.14
P ₂ P ₃	4600	Ag	50	500	4623.64	23.64
P ₂ P ₃	5000	Ag	30	800	5018.20	18.20
P ₂ P ₃	5400	Bg	40	500	5427.37	27.37
P ₃ N	5700	ABC	10	100	5719.63	19.63
P ₃ N	6000	Ag	50	1000	6026.51	26.51
P ₃ N	6300	ABg	90	100	6304.16	4.16

由表 3 结果可知，当故障距 M 端距离为 300 m 和 6300 m 时，误差分别为 16.48 m 和 4.16 m，可见，随着故障距离的变化，定位误差总体保持在较小范围内。当故障距离为 900 m、故障类型为 AB、过渡电阻为 500 Ω 、故障角为 80°时，定位误差为 17.34 m；而当故障距离为 5000 m、故障类型为 Ag、过渡电阻为 800 Ω 、故障角为 30°时，误差为 18.20 m，可见，不同的故障条件下，定位结果均比较稳定，故障条件对定位精度的影响较小。

在不同故障条件下，所提方法均表现出较高的精确度和稳定性，误差范围保持在 30 m 以内，这是由于本文提出的故障点反射波时序约束关系的判据能够剔除复杂折反射波干扰，准确识别故障点反射波，并采用基于故障点反射波辨识的双端行波法进行故障定位，消除时钟同步误差的影响，进而验证

了本文方法在配电网主干线路故障定位中的适用性。

4.2.3 分支线路故障定位

为验证本文所提方法在分支线路故障定位的准确度, 在不同分支线路上模拟不同故障条件下的故障情况。当分支线路 P_1Q_1 和 P_2Q_2 发生故障时, 利用 M 端测量装置采集到的故障电压行波信息, 通过式(24)计算故障点距离分支节点的距离; 当分支线路 P_3Q_3 发生故障时, 利用 N 端测量装置采集到的故障电压行波信息, 通过式(25)计算故障点距离分支节点的距离。同时, 在每条分支线路末端配备测量装置, 通过式(9)计算故障点距离分支节点的距离, 与本文所提分支线路故障定位方法进行对比, 定位结果对比见表 4。

表 4 分支线路定位结果

Table 4 Fault location results on branch lines

故障支路	故障距分支节点距离/m	故障类型	故障角/(°)	过渡电阻/ Ω	定位结果/m	对比定位结果/m
P_1Q_1	100	ABC	10	100	97.81	89.97
P_1Q_1	200	Ag	30	100	193.62	177.65
P_1Q_1	300	AB	50	500	296.81	294.56
P_1Q_1	500	ABg	80	1000	503.19	499.14
P_1Q_1	600	ABC	90	200	599.01	616.05
P_1Q_1	700	Bg	10	300	709.56	703.73
P_2Q_2	200	Cg	90	200	199.58	170.63
P_2Q_2	400	Ag	50	1000	397.73	389.83
P_2Q_2	600	Ag	80	500	603.22	609.03
P_2Q_2	800	ABg	20	300	801.37	784.39
P_2Q_2	1000	AB	10	500	1006.86	988.97
P_2Q_2	1200	ABC	70	100	1219.69	1193.55
P_3Q_3	100	AB	50	100	94.31	101.15
P_3Q_3	200	Ag	30	800	212.93	218.05
P_3Q_3	300	ABC	40	1000	294.48	305.73
P_3Q_3	400	Ag	90	200	390.86	422.64

由表 4 结果可知, 所提定位方法在不同故障支路和故障条件下均表现出较高的精度。其中, 当 P_1Q_1 、 P_2Q_2 和 P_3Q_3 支路分别发生故障时, 定位平均误差分别为 4.09 m、5.64 m 和 8.32 m, 可见, 在不同长度的分支线路发生故障的情况下, 该定位方法均可实现精确的故障距离测定。当故障位于分支线路 P_2Q_2 上, 故障距离节点 Q_2 为 200 m、400 m、600 m、800 m、1000 m 和 1200 m 时, 定位误差分别为 0.42 m、2.27 m、3.22 m、1.37 m、6.86 m 和 19.69 m, 结果表明, 定位误差随故障点与节点 Q_2 距离的增加波动不大, 可见, 该方法几乎不受故障距离影响。不同故障类型、过渡电阻及故障角下, 定位误差均保持在较低水平, 表明本文方法在复杂工况下具有稳定性。同时, 表 4 中在不同工况类型下,

本文所提方法的定位结果平均误差为 5.22 m, 而在每条分支线路末端配备测量装置的定位结果平均误差为 11.36 m, 可见本文所提方法在减少测量装置的同时提升了定位精度。

综上, 本文方法通过融合反射波的时序约束与极性判别, 有效克服了传统多端检测方法的局限性, 具有一定的工程应用价值。

5 结论

针对配电网多分支线路行波故障定位方法存在波头标定困难和故障定位成本高的问题, 本文提出了一种基于时域差分运算的配电网多分支线路故障定位方法。通过仿真验证了该方法的有效性。主要结论如下。

1) 本文提出的波头标定方法基于时域差分运算, 可在无需频域变换与参数选取的前提下, 实现故障行波波头的精确标定。该方法具有运算速度快、抗噪声能力强等优点, 显著优于传统小波变换及 HHT 方法。

2) 构建了基于反射行波时序约束与极性判别的多分支故障定位方法, 结合主干线路两端采集的数据即可实现多分支模型下的故障定位。该方法减少了检测装置的部署数量, 具有良好的经济性与工程可行性。仿真结果表明, 在不同故障类型、过渡电阻和故障初相角条件下, 所提方法的定位误差均能保持在 30 m 以内, 定位精度和稳定性良好。

本文方法依赖的行波传播机理不受系统运行模式的影响, 未来可通过仿真和实际数据验证其在含高比例分布式电源的配电网中的适应性。同时, 为进一步满足快速高精度故障定位的需求, 未来研究可结合深度学习技术增强对复杂故障波形的特征提取能力。

附录 A

小波变换和 HHT 方法在 30 dB 噪声条件下的波头标定结果, 如图 A1—图 A4 所示。

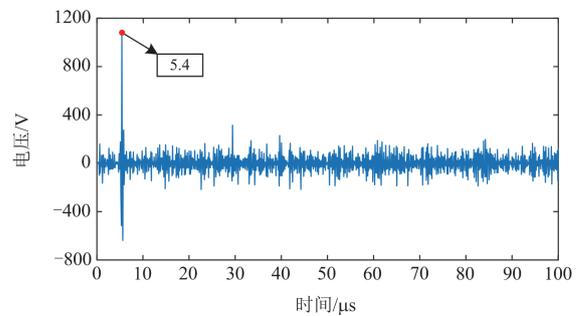


图 A1 30 dB 噪声下 M 端 HHT 方法标定结果

Fig. A1 Wavefront identification results at terminal M using HHT method under 30 dB noise

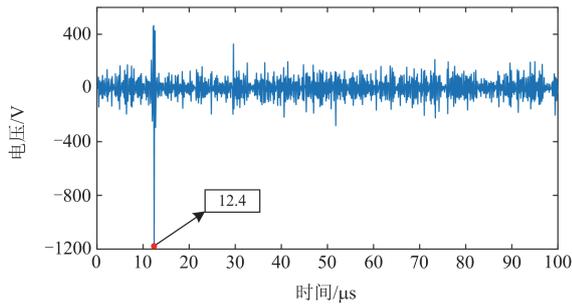


图 A2 30 dB 噪声下 N 端 HHT 方法标定结果

Fig. A2 Wavefront identification results at terminal N using HHT method under 30 dB noise

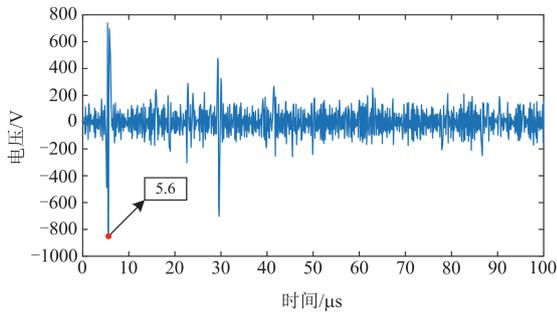


图 A3 30 dB 噪声下 M 端小波变换标定结果

Fig. A3 Wavefront identification results at terminal M using wavelet transform under 30 dB noise

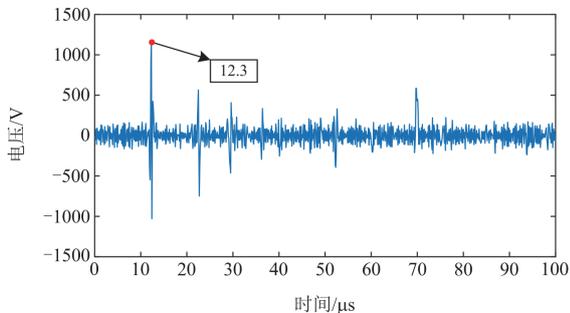


图 A4 30 dB 噪声下 N 端小波变换标定结果

Fig. A4 Wavefront identification results at terminal N using wavelet transform under 30 dB noise

在 30 dB 噪声条件下小波变换和 HHT 方法只能识别初始行波波头到达时间,其中: HHT 方法在 M 端和 N 端的标定结果分别为 5.4 μs 和 12.4 μs;小波变换在 M 端和 N 端的标定结果分别为 5.6 μs 和 12.3 μs。后续波头湮灭在噪声中,无法识别,故无法在故障定位方法中使用后续波头信息。

附录 B

本文方法与对比方法在不同故障条件下的仿真结果如表 B1—表 B4 所示。

表 B1 对比了本文方法、小波变换和 HHT 方法在故障距离变化时的定位误差(故障类型为 Ag, 过渡电阻为 100 Ω, 故障角为 60°)。

表 B1 不同故障距离下 3 种方法的定位结果

Table B1 Fault location results of three methods at different fault distances

故障距 M 端 距离	小波变换方法 定位结果	HHT 方法 定位结果	本文方法 定位结果
700	718.08	659.66	702.58
1400	1419.16	1404.56	1404.01
2100	2120.25	2105.64	2105.44
2800	2821.33	2806.72	2806.88
3500	3522.41	3507.81	3508.31
4200	4223.49	4208.89	4209.74
4900	4924.58	4909.97	4911.18

小波变换和 HHT 方法的定位结果平均误差分别为 21.57 m 和 11.74 m, 而本文方法的平均误差为 6.92 m。可见, 本文方法在故障距离变化时表现稳定。

表 B2 对比了本文方法、小波变换和 HHT 方法在过渡电阻变化时的定位误差(故障距离为 700 m, 故障类型为 Ag, 故障角为 60°)。

表 B2 不同过渡电阻下 3 种方法的定位结果

Table B2 Fault location results of three methods under different transition resistances

过渡电阻/Ω	小波变换方法 定位结果/m	HHT 方法 定位结果/m	本文方法 定位结果/m
10	718.08	659.66	702.58
50	718.08	659.66	702.58
100	718.08	659.66	702.58
200	718.08	659.66	702.58
500	718.08	659.66	702.58
750	718.08	659.66	702.58
1000	718.08	659.66	702.58

小波变换和 HHT 方法的定位误差分别为 18.08 m 和 40.34 m, 而本文方法的定位误差为 2.58 m, 本文方法在过渡电阻变化时表现稳定。

表 B3 对比了本文方法、小波变换和 HHT 方法在故障角变化时的定位误差(故障距离为 3200 m, 过渡电阻为 100 Ω, 故障类型为 Ag)。

小波变换方法和 HHT 方法的定位误差均为 1.08 m, 而本文方法的定位误差为 0.85 m。本文方法在故障角变化时表现稳定。

表 B4 对比了本文方法、小波变换和 HHT 方法在故障类型变化时的定位误差(故障距离为 4600 m, 过渡电阻大小为 100 Ω, 故障角 60°)。

小波变换和 HHT 方法的定位误差分别为 25.96 m

和 11.36 m, 而本文方法的定位误差为 6.33 m。本文方法在不同故障类型下表现稳定。

表 B3 不同故障角下 3 种方法的定位结果

Table B3 Fault location results of three methods under different fault angles

故障角/(°)	小波变换方法 定位结果/m	HHT 方法 定位结果/m	本文方法 定位结果/m
0	3201.08	3201.08	3200.85
15	3201.08	3201.08	3200.85
30	3201.08	3201.08	3200.85
45	3201.08	3201.08	3200.85
60	3201.08	3201.08	3200.85
75	3201.08	3201.08	3200.85
90	3201.08	3201.08	3200.85

表 B4 不同故障类型下 3 种方法的定位结果

Table B4 Fault location results of three methods for different fault types

故障类型	小波变换方 法定位结果	HHT 方法 定位结果	本文方法 定位结果
Ag	4574.04	4588.64	4606.33
Cg	4574.04	4588.64	4606.33
AB	4574.04	4588.64	4606.33
BC	4574.04	4588.64	4606.33
ABg	4574.04	4588.64	4606.33
ACg	4574.04	4588.64	4606.33
ABC	4574.04	4588.64	4606.33

参考文献

- [1] 董新洲. 故障行波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [2] 闫明, 郭文豪, 胡永乐, 等. 基于 5G 的配电网智能故障诊断方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 15-20.
YAN Ming, GUO Wenhao, HU Yongle, et al. Intelligent fault diagnosis method of distribution network based on 5G[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 15-20.
- [3] 吉兴全, 张朔, 张玉敏, 等. 基于 IELM 算法的配电网故障区段定位[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 157-166.
JI Xingquan, ZHANG Shuo, ZHANG Yumin, et al. Fault section location for distribution network based on improved electromagnetism-like mechanism algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 157-166.
- [4] 李成钢, 刘亚东, 杨雪凤, 等. 基于变分模态分解与空洞卷积神经网络的配电网故障选线方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(2): 110-118, 126.
LI Chenggang, LIU Yadong, YANG Xuefeng, et al. A
- method of fault line selection for distribution networks based on variational mode decomposition and dilated convolutional neural network[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(2): 110-118, 126.
- [5] 贾科, 董雄鹰, 李论, 等. 基于稀疏电压幅值量测的配电网故障测距[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 835-844.
JIA Ke, DONG Xiongying, LI Lun, et al. Fault location for distribution network based on transient sparse voltage amplitude measurement[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 835-844.
- [6] 邓丰, 曾哲, 祖亚瑞, 等. 基于行波全景特征深度挖掘的单端故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1310-1322.
DENG Feng, ZENG Zhe, ZU Yarui, et al. Single-ended fault location method based on traveling wave panoramic fault characteristics deep mining[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1310-1322.
- [7] QUISPE J C, MORALES J, ORDUNA E, et al. Time-frequency multiresolution of fault-generated transient signals in transmission lines using a morphological filter[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 1-14.
- [8] 王有鹏, 曾祥君, 刘丰, 等. 基于行波全频带特征的配电网故障行波波头标定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(1): 171-180.
WANG Youpeng, ZENG Xiangjun, LIU Feng, et al. Fault traveling wave head identification method for a distribution network based on the full band characteristics of a traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(1): 171-180.
- [9] 黄博, 李文亮, 徐学帅, 等. 35 kV 中压配电网单相接地故障行波定位方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 58-63.
HUANG Bo, LI Wenliang, XU Xueshuai, et al. A study on the traveling wave location method of single-phase grounding fault in 35 kV medium voltage distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 58-63.
- [10] 王桐, 史雯, 石浩瀚, 等. 基于平稳小波变换的光伏直流串联电弧故障检测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 82-93.
WANG Tong, SHI Wen, SHI Haoyuan, et al. Photovoltaic DC series arc fault detection based on stationary wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 82-93.
- [11] 张雅晖, 杨凯, 杨帆. 基于小波包能量分析和信号融合的异步电机转子故障诊断[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 161-168.

- ZHANG Yahui, YANG Kai, YANG Fan. Rotor fault diagnosis of induction motor based on wavelet packet energy analysis and signal fusion[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(4): 161-168.
- [12] 张小丽, 曾祥君, 马洪江, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(8): 64-68.
- ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power grid faults location with traveling wave based on Hilbert-Huang transform[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(8): 64-68.
- [13] 王凯亮, 曾远方, 李家洪, 等. 基于希尔伯特-黄变换的新型配电系统行波故障定位仿真研究[J]. *供用电*, 2023, 40(9): 43-49.
- WANG Kailiang, ZENG Yuanfang, LI Jiaqi, et al. Simulation study on traveling wave fault location of new distribution network system based on Hilbert-Huang transform[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(9): 43-49.
- [14] 张永健, 胥杰, 孙嘉. 基于静态小波变换的 T 型输电线路行波测距方法[J]. *电网技术*, 2012, 36(6): 84-88.
- ZHANG Yongjian, XU Jie, SUN Jia. Travelling wave fault location for three-terminal transmission line based on static wavelet transform[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(6): 84-88.
- [15] XIE Liwei, LUO Longfu, LI Yong, et al. A traveling wave-based fault location method employing VMD-TEO for distribution network[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 35(4): 1987-1998.
- [16] 池梓斌, 夏成军, 杨明嘉. 基于参数优化 VMD 和 TET 的柔直线路单端故障测距方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(4): 1-11.
- CHI Zhibin, XIA Chengjun, YANG Mingjia. Single-end fault location method for MMC-HVDC transmission lines based on parameter-optimized VMD and TET[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(4): 1-11.
- [17] 张海涛, 李文娟, 李雪峰, 等. 基于变分模态分解和时间注意力机制 TCN 网络的光伏发电功率预测[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(12): 156-163.
- ZHANG Haitao, LI Wenjuan, LI Xuefeng, et al. Photovoltaic power forecasting based on TPA-TCN model and variational modal decomposition[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(12): 155-163.
- [18] 李佳宇, 王光临, 罗建华, 等. 基于多元变分模态分解与峭度的配电电缆故障定位方法[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(3): 92-98.
- LI Jiayu, WANG Guanglin, LUO Jianhua, et al. A cable fault location method of distribution networks based on mvmd and kurtosis calculation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(3): 92-98.
- [19] 白浩, 钟振鑫, 李巍, 等. 基于 CEEMD 和 NTEO 的故障行波定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(20): 50-59.
- BAI Hao, ZHONG Zhenxin, LI Wei, et al. A fault traveling wave location method based on CEEMD and NTEO[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(20): 50-59.
- [20] 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.
- XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault location method for multi-branch lines based on extreme-point symmetric mode decomposition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(21): 7326-7339.
- [21] REZAEI D, GHOLIPOUR M, PARVARESH F. A novel traveling wave arrival time detection method in power system[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2022, 16(6): 1151-1165.
- [22] 王成斌, 负志皓, 张恒旭, 等. 基于微型 PMU 的配电网多分支架空线路参数无关故障定位算法[J]. *电网技术*, 2019, 43(9): 3202-3209.
- WANG Chengbin, YUN Zhihao, ZHANG Hengxu, et al. Parameter-free fault location algorithm for multi-terminal overhead transmission line of distribution network based on μ PMU[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3202-3209.
- [23] ROBSON S, HADDAD A, GRIFFITHS H. Fault location on branched networks using a multiended approach[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(4): 1955-1963.
- [24] 刘晓琴, 王大志, 江雪晨, 等. 利用行波到达时差关系的配电网故障定位算法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(14): 4109-4115.
- LIU Xiaoqin, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. Fault location algorithm for distribution power network based on relationship in time difference of arrival of traveling wave[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(14): 4109-4115.
- [25] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
- [26] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于距离矩阵与分支系数的配电网故障定位方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020,

- 40(7): 2180-2191, 2397.
- XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault location method for distribution networks based on distance matrix and branch coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2180-2191, 2397.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 姜洪华, 李晓晨, 刘晓军, 等. 基于模糊熵双重判据的多支配电线路故障区段定位方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(1): 90-97.
- JIANG Honghua, LI Xiaochen, LIU Xiaojun, et al. Fault section location method for multi-branch distribution lines based on dual fuzzy entropy criterion[J]. Smart Power, 2025, 53(1): 90-97.
- [30] GANJKHANI M, GHOLAMI A, GIRALDO J, et al. Multi-source data aggregation and real-time anomaly classification and localization in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 15(2): 2191-2202.
- [31] LUO Guomin, SHANG Boyang, WANG Xiaojun, et al. Intelligent location method with limited measurement information for multibranch distribution networks[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-15.
- [32] 邓丰, 史鸿飞, 冯思旭, 等. CNN-LSTM 全景故障特征挖掘的配电网单端定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(增刊 1): 114-126.
- DENG Feng, SHI Hongfei, FENG Sixu, et al. Single-ended traveling wave location method for distribution network based on CNN-LSTM panoramic fault feature mining[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 114-126.
- [33] 束洪春. 行波暂态量分析与故障测距: 上册[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [34] 张广斌, 王开福, 束洪春, 等. 基于波形群灵敏角特征的输电线路故障单端行波辨识与测距[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 3789-3804.
- ZHANG Guangbin, WANG Kaifu, SHU Hongchun, et al. Single-ended traveling wave surge identification and fault location for transmission lines based on the sensitive angle characteristic of waveshape with multiple wavefronts[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3789-3804.
- [35] 胡满琳, 李楠, 李一鸣, 等. 基于负序分量的含光伏电源配电网故障区段定位方法[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 188-199.
- HU Manlin, LI Nan, LI Yiming, et al. Fault location method for distribution network with photovoltaic power based on negative sequence component[J]. Electric Power, 2024, 57(5): 188-199.
- [36] 岳兴春, 彭勇, 宋威, 等. 融合 EMA 和卡尔曼滤波的 MEMS 去噪研究与应用[J]. 仪表技术与传感器, 2023(4): 83-86, 92.
- YUE Xingchun, PENG Yong, SONG Wei, et al. Research and application of MEMS denoising based on EMA and Kalman filter[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(4): 83-86, 92.
- [37] XI Yanhui, ZHANG Xiaodong, LI Zewen, et al. Double-ended travelling-wave fault location based on residual analysis using an adaptive EKF[J]. IET Signal Processing, 2018, 12(8): 1000-1008.
- [38] 庞清乐, 韩松易, 周泰, 等. 基于 ASRUKF 和 IMC 算法的电力信息物理系统虚假数据注入攻击检测[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 111-118.
- PANG Qingle, HAN Songyi, ZHOU Tai, et al. False data injection attack detection of cyber-physical power system based on ASRUKF and IMC algorithms[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 111-118.

收稿日期: 2025-02-22; 修回日期: 2025-06-14

作者简介:

吉兴全(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电系统及其自动化; E-mail: xqji@sdust.edu.cn

黄心月(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障定位; E-mail: huangxy@sdust.edu.cn

叶平峰(1988—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为电力系统电压稳定分析和优化调度。

E-mail: ypfinput@163.com

(编辑 许威)