

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210003

基于多端行波时差的配电网故障定位方法

李练兵¹, 孙腾达¹, 曾四鸣², 王磊², 梁纪峰², 郝育红³

(1. 河北工业大学人工智能与数据科学学院, 天津 300401; 2. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 3. 冀中能源峰峰集团有限公司, 河北 邯郸 056107)

摘要: 针对现有配电网故障定位方法存在实现复杂、可靠性不高的问题, 提出一种基于多端行波时差的配电网故障定位方法。首先, 分析故障行波传输特性, 提出一种配电网故障状态表达式。根据多端行波时差和双端行波原理计算故障距离理论值。将理论值代入故障状态表达式, 搭建故障搜索矩阵和辅助矩阵, 通过分析矩阵元素变化特征和数值状态定位故障线路。然后, 根据三端行波法计算实际故障距离, 消除行波波速不确定性造成的测距误差。最后, 在 Matlab/Simulink 中建立配电网故障模型, 验证在不同的故障类型和过渡电阻下定位方法的有效性。仿真结果表明定位方法可靠性好、准确度高。

关键词: 配电网; 故障搜索矩阵; 辅助矩阵; 故障定位; 行波测距

Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference

LI Lianbing¹, SUN Tengda¹, ZENG Siming², WANG Lei², LIANG Jifeng², HAO Yuhong³

(1. School of Artificial Intelligence and Data Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;
3. Jizhong Energy Fengfeng Group Co., Ltd., Handan 056107, China)

Abstract: There are problems of complex implementation and low reliability in the existing fault location methods of a distribution network. Thus a fault location method based on multi-terminal traveling wave time difference is proposed. First, by analyzing the transmission characteristics of a fault traveling wave, a fault state expression of the distribution network is proposed. The theoretical value of the fault distance is calculated. The fault search and auxiliary matrices are built, and the change characteristics and numerical status of the matrix elements are analyzed to locate the fault line. Then the actual fault distance is calculated according to the three-terminal traveling wave method, and the influence of traveling wave velocity is eliminated. Finally, the distribution network fault model is established in Matlab/Simulink to verify the effectiveness of the location method under different fault types and transition resistances. The simulation results show that the location method has good reliability and high accuracy.

This work is supported by Hebei Provincial-level Science and Technology Program (No. 20314301D).

Key words: distribution network; fault search matrix; auxiliary matrix; fault location; traveling wave ranging

0 引言

配电网直接向广大用户提供电能, 其安全可靠运行是人们生产生活的重要保障。故障发生后, 故障位置的快速精准定位, 能够实现故障线路的快速切除, 极大提高故障处理效率和电网运行可靠性,

具有重要的社会意义和经济效益。

随着大规模分布式电源接入配电网, 电力系统出现了潮流双向流动、配电网拓扑结构改变等一系列问题, 传统的故障定位方法可能失效^[1-5]。

行波法^[6-12]凭借高精度、高可靠性的定位效果, 在配电网故障定位领域具有较好的应用前景, 但是仍面临着定位可靠性不高、行波波头难以识别以及行波速度受线路参数影响等问题。文献[13]提出一种基于模量行波传输时差的单端测距方法, 通过神经网络获取行波零模分量波速度的近似值, 利用模

基金项目: 河北省省级科技计划项目资助(20314301D); 国网河北能源技术服务有限公司科技项目资助(SGHEJS00JYJS2000295)

量时差进行故障定位, 不需要同步时钟和识别故障点反射波, 不过定位精度受神经网络拟合效果的影响较大。文献[14]提出一种基于行波时频分析的单端测距方法, 通过小波法提取故障行波特征频率, 能够准确识别故障反射波, 定位故障点, 但是面临特征频率混叠的问题。文献[15]采用 VMD 和 S 变换相结合的方法提取故障行波零、线模分量的特征频率, 有效避免了频率混叠和行波波速对故障定位的干扰, 实现了多端输电线路故障的准确定位。

配电网结构复杂、分支众多, 应用单端行波法需要准确识别初始行波的反射波, 技术难度较大, 定位可靠性不高。在配电网拓扑结构已知的情况下, 根据广域行波法^[16-18]建立基于整个配电网的行波定位系统, 可实现配电网故障的准确定位。文献[19]通过构建行波时差矩阵实现故障馈线的判定, 定位效果较好, 但是所提的故障判定原理难以适应配电网的多分支结构。文献[20]利用多端行波时差和双端行波原理搭建故障支路搜索矩阵, 通过矩阵元素变化特征判定故障支路, 定位方法原理简单、可靠性高, 但是定位过程繁琐, 计算量较大。文献[21]提出一种基于距离矩阵和分支系数的配电网故障定位方法, 通过提取故障行波的零、线模分量优化行波采集装置配置, 减小了计算量和工程成本, 但零模分量在线路中衰减较快且只存在于接地故障中, 定位可靠性有待考察。

针对上述问题, 文章提出一种基于多端行波时差的配电网故障定位方法。根据多端行波时差和双端行波原理构建故障搜索矩阵和辅助矩阵进行故障线路判定, 配合配电网节点矩阵, 在不影响定位准确性的情况下有效降低了矩阵维度, 通过分析矩阵元素变化特征和数值状态, 提出可适应配电网多分支结构的故障判定原理。确定故障支路后, 根据三端行波测距法计算实际故障距离, 可消除行波波速不确定性造成的测距误差, 文章所提故障定位方法原理简单、计算量小, 有效提高了配电网故障行波定位方法的可靠性和准确性。

1 行波传输特性分析

1.1 配电网归一化

配电网中含有大量电缆—架空线混合线路, 由式(1)可知, 受线路参数和行波频率的影响, 行波在电缆和架空线中的传播速度明显不同^[22-23]。

$$v = \omega / \sqrt{[\omega^2 LC - RG + \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}] / 2} \quad (1)$$

式中: R 、 L 、 G 、 C 分别为单位长度线路电阻、

电感、电导和电容; ω 为行波频率。

电缆和架空线中行波线模波速度如图 1 所示。

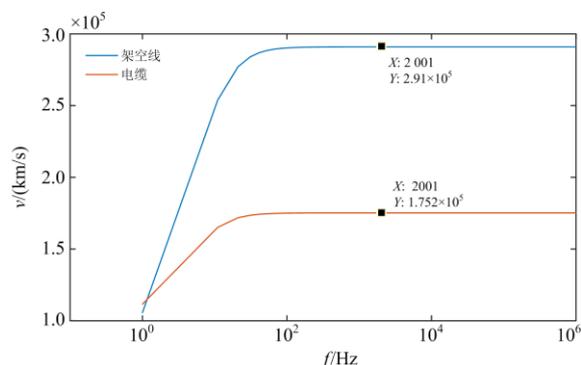


图 1 不同线路参数行波线模波速度

Fig. 1 Traveling wave velocity curves for different parameters

由图 1 可以看出: 当行波频率在 1 kHz 以上时, 架空线和电缆中的行波线模波速度基本趋近于一个稳定值, 本文采用 2 kHz 以上的故障行波信号线模分量标定行波到达时刻, 其在架空线和电缆中的波速度分别为 2.91×10^5 km/s 和 1.752×10^5 km/s。

令 v_1 、 v_2 分别为故障行波在架空线和电缆中的线模波速度, L_{cable} 为配电网单位电缆长度, 根据式(2)可得单位长度电缆等效为架空线的长度。

$$L_{\text{eq}} = \frac{L_{\text{cable}}}{v_2} v_1 \quad (2)$$

式中, L_{eq} 为归一化后单位长度电缆等效长度。

通过式(2)可将配电网中的电缆线路全部等效为架空线路, 实现配电网线路的归一化。

1.2 故障行波传输路径分析

图 2 为简单配电网, $K_1 K_4$ 为主馈线, $K_2 T_1$ 、 $K_3 T_2$ 为单分支支路, 各线路长度已知。主馈线首端变电站和各支路末端的配电变压器装有行波采集装置。以变电站首端的行波采集点 K_1 为参考端, K_2 、 K_3 、 K_4 为非参考端。参考端与各个非参考端唯一确定一条最短线路, 当故障发生在线路内部时, 根据双端行波法计算故障点与参考端的距离, 不会发生误判。当故障发生在线路外部时, 根据双端行波法计算故障距离, 故障点被定位在支路与主馈线相交的节点处。在故障位置未知的情况下, 根据双端行波原理计算所得故障距离为理论值。

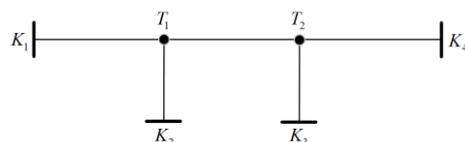


图 2 简单配电网

Fig. 2 Simple distribution network

为了有效反映故障在配电网中的相对位置, 定义配电网故障状态表达式为

$$S(i, p, q) = \frac{l_{K_i F} - l_{K_i T_p} + \delta}{l_{T_p T_q} + \delta} \quad (3)$$

式中: K_i 为参考端; F 为故障点位置; T_p 为与参考端相邻的节点, 记为参考端节点; T_q 为与非参考端相邻的节点, 记为非参考端节点; $l_{K_i F}$ 表示故障点到参考端的距离; $l_{K_i T_p}$ 表示参考端到参考端节点的距离; $l_{T_p T_q}$ 表示参考端节点到非参考端节点的距离; δ 为校正因子, 取极小正值, 避免分母出现等于零的情况。

以 K_1 为参考端, K_3 、 K_4 为非参考端, 当故障分别发生在参考端支路 $K_1 T_1$ 、参考端节点 T_1 、节点线路 $T_1 T_2$ 、非参考端节点 T_2 以及非参考端支路 $K_3 T_2$ 或 $K_4 T_2$ 时, 根据双端行波原理计算故障距离理论值, 代入式(3), 对应上述不同故障位置, 式(3)表现出小于 0、等于 0、大于 0 小于 1、等于 1、大于 1, 共 5 种状态。

保持参考端不变, 以 K_2 为非参考端时, 由于 $K_1 K_2$ 之间不包含节点线路, 当故障分别发生于参考端支路 $K_1 T_1$ 、参考端节点 T_1 和非参考端支路 $K_2 T_1$ 时, 将相关数据代入式(3), 式(3)表现出小于 0、等于 1 和大于 1, 共 3 种状态。线路中不包含节点线路不影响参考端支路与非参考端支路的故障特征表达, 而等于 0 或 1 都表示节点故障, 可将节点 T_1 视为非参考端节点, 故式(3)的数值状态实现了配电网不同故障位置的特征表达。

2 故障线路判定与故障测距

2.1 故障搜索矩阵和节点矩阵

仅含单分支支路的配电网拓扑结构如图 3 所示。根据式(3)构建故障搜索矩阵, 通过分析故障搜索矩阵的矩阵元素变化特征和数值状态, 可以判定故障线路。

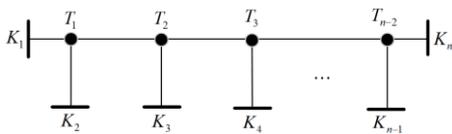


图 3 含单分支支路的配电网拓扑结构

Fig. 3 Distribution network topology with single branch

图 3 中包含 n 个行波采样点, $n-2$ 条单分支支路, 以 K_1 为参考端, 建立故障搜索矩阵, 如式(4)所示。

$$D = \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & \cdots & K_n \\ \frac{l_{K_1 F} - l_{K_1 T_1} + \delta}{\delta} & \frac{l_{K_1 F} - l_{K_1 T_2} + \delta}{l_{T_1 T_2} + \delta} & \cdots & \frac{l_{K_1 F} - l_{K_1 T_{n-2}} + \delta}{l_{T_1 T_{n-2}} + \delta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

当故障发生在参考端支路 $K_1 T_1$ 时, 故障搜索矩阵具有如下特征:

$$D(i, j) < 0 \quad i=1, j=1, 2, \dots, n-1 \quad (5)$$

即故障搜索矩阵的矩阵元素都为负数时, 故障发生于参考端支路。

当故障发生在参考端节点 T_1 时, 此时故障搜索矩阵具有如下特征:

$$\begin{cases} D(i, j) = 1 & i=1, j=1 \\ D(i, j) = 0 & i=1, j=2, 3, \dots, n-1 \end{cases} \quad (6)$$

需要说明的是, 若与 T_1 直接相连的支路为多分支支路时, 故障搜索矩阵具有如下特征:

$$D(i, j) = 0 \quad i=1, j=1, 2, \dots, n-1 \quad (7)$$

即故障搜索矩阵中的矩阵元素仅包含一个等于 1 的元素其余元素均为 0 或者矩阵元素全部等于 0 时, 故障发生在参考端节点。

当故障发生在非参考端支路 $K_2 T_1, \dots, K_n T_{n-2}$ 时, 故障搜索矩阵具有如下特征:

$$D(i, j) > 1 \quad i=1, j \in [1, n-1] \quad (8)$$

即当故障搜索矩阵中出现大于 1 的矩阵元素时, 大于 1 矩阵元素对应的非参考端支路即为故障支路。

故障发生在节点 T_2, T_3, \dots, T_{n-2} 时, 可将节点故障视为与节点直接相连的下游节点线路故障, 定位节点线路故障时, 需要结合配电网的节点矩阵来判定故障线路。定义节点矩阵如式(9)所示。

$$T = \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & \cdots & K_n \\ T_1 & T_1, T_2 & \cdots & T_1, T_2, \dots, T_{n-2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

节点矩阵 T 中的各个元素是以 K_1 为参考端, 参考端与各个非参考端之间经过的节点的集合。

通过对故障行波传输路径的分析可知: 当故障发生在参考端与非参考端确定的线路外部时, 对应的矩阵元素等于 1; 当故障发生在线路内部时, 对应的矩阵元素大于 0 小于 1。故当发生节点线路故障时, 故障判定原理为: 计算故障搜索矩阵, 记录数值等于 1 矩阵元素对应的非参考端, 确定节点矩阵中对应的非参考端, 提取其中的矩阵元素, 对各个矩阵元素中的节点集合取交集, 记为 A ; 记录故障搜索矩阵中数值为大于 0 小于 1 矩阵元素对应的非参考端, 确定节点矩阵中对应的非参考端, 提取

其中的矩阵元素, 对各个矩阵元素中的节点集合取交集, 记为 U ; A 为 U 的子集, 取 A 在 U 中的补集, 记为 B ; 若 B 中仅包含一个节点, 则故障线路为与此节点直接相连的上游节点线路, 若 B 中包含两个节点, 则故障线路为两个节点确定的节点线路。

2.2 辅助矩阵

含有多分支支路的配电网如图 4 所示, 当发生节点线路故障时, 仅依靠故障搜索矩阵不能准确判定故障线路, 需要结合辅助矩阵定位故障线路。

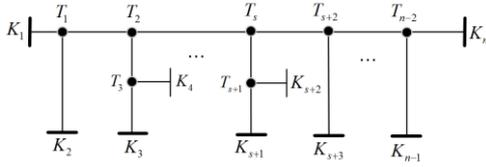


图 4 含多分支支路的配电网拓扑结构

Fig. 4 Distribution network topology with multiple branches

图 4 中包含 $s/2$ 条多分支支路, $n-s-2$ 条单分支支路, 其中 $n > 4, s > 1$ 。当故障分别发生在与节点 $T_2, T_4, T_6, \dots, T_s$ 直接相连的线路时, 故障搜索矩阵的矩阵元素相同, 故障线路不能判定。定义此类节点为无效节点, 判断条件为: 仅与未安装行波采集装置的节点线路相连的节点为无效节点。

当配电网中存在无效节点时, 需要建立关于无效节点的辅助矩阵配合故障搜索矩阵定位故障线路, 辅助矩阵的构建方法为: 保持参考端与故障搜索矩阵一致, 将无效节点作为参考端节点, 非参考端与参考端确定的线路需要包含无效节点, 将随之改变的参考端支路、节点线路距离代入式(3), 得到辅助矩阵。每个无效节点都有与之对应的辅助矩阵和节点矩阵。

图 4 的辅助矩阵和节点矩阵如式(10)和式(11)所示。

$$\begin{cases} J_1 = \begin{bmatrix} K_3 & K_4 & \dots & K_n \\ \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_2} + \delta}{l_{T_2T_3} + \delta} & \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_2} + \delta}{l_{T_2T_3} + \delta} & \dots & \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_2} + \delta}{l_{T_2T_{n-2}} + \delta} \end{bmatrix} \\ J_2 = \begin{bmatrix} K_5 & K_6 & \dots & K_n \\ \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_4} + \delta}{l_{T_4T_5} + \delta} & \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_4} + \delta}{l_{T_4T_5} + \delta} & \dots & \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_4} + \delta}{l_{T_4T_{n-2}} + \delta} \\ \vdots \\ K_{s+1} & K_{s+2} & \dots & K_n \\ \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_s} + \delta}{l_{T_sT_{s+1}} + \delta} & \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_s} + \delta}{l_{T_sT_{s+1}} + \delta} & \dots & \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_s} + \delta}{l_{T_sT_{n-2}} + \delta} \end{bmatrix} \\ J_{s/2} = \begin{bmatrix} K_{s+1} & K_{s+2} & \dots & K_n \\ \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_s} + \delta}{l_{T_sT_{s+1}} + \delta} & \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_s} + \delta}{l_{T_sT_{s+1}} + \delta} & \dots & \frac{l_{K_1F} - l_{K_1T_s} + \delta}{l_{T_sT_{n-2}} + \delta} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} T_1 = [T_2, T_3 \quad T_2, T_3 \quad \dots \quad T_2, T_4, \dots, T_{n-2}] \\ T_2 = [T_4, T_5 \quad T_4, T_5 \quad \dots \quad T_4, T_6, \dots, T_{n-2}] \\ \vdots \\ T_{s/2} = [T_s, T_{s+1} \quad T_s, T_{s+1} \quad \dots \quad T_s, T_{s+2}, \dots, T_{n-2}] \end{cases} \quad (11)$$

对于含有无效节点的配电网, 当发生节点线路故障时, 建立关于无效节点的辅助矩阵和节点矩阵, 故障判定原理为: 观察各个辅助矩阵中是否含有大于 0 小于 1 的元素, 若没有则按照不含多分支支路的情况, 直接根据故障搜索矩阵判定节点线路故障, 若含有大于 0 小于 1 的矩阵元素则保留此辅助矩阵, 其余辅助矩阵不作为定位依据; 计算保留下来的辅助矩阵的矩阵元素个数, 选择矩阵元素个数最小的辅助矩阵, 记录其中数值等于 1 矩阵元素对应的非参考端, 确定节点矩阵中对应的非参考端, 提取其中的矩阵元素, 对矩阵元素中的节点集合取交集, 记为 A^* ; 记录辅助矩阵中数值大于 0 小于 1 矩阵元素对应的非参考端, 确定节点矩阵中对应的非参考端, 提取其中的矩阵元素, 对矩阵元素中的节点集合取交集, 记为 U^* ; A^* 为 U^* 的子集, 取 A^* 在 U^* 中的补集, 记为 B^* ; 若 B^* 中仅包含一个节点, 则故障位置为与此节点直接相连的上游节点线路, 若 B^* 中包含两个节点, 则故障线路为两个节点确定的节点线路。

需要说明的是实际工程中计算结果可能受到各种因素的干扰, 为了减少干扰引起的定位误差, 同时避免校正因子 δ 带来的理论误差, 设置修正裕度对矩阵元素进行修正。设定误差裕度为 μ 和 γ , 根据式(12)修正故障搜索矩阵和辅助矩阵。

$$\begin{cases} -\mu \leq l_{K_iF} - l_{K_iT_p} \leq \mu \text{ 时} & l_{K_iF} - l_{K_iT_p} = 0 \\ l_{T_pT_q} - \mu \leq l_{K_iF} - l_{K_iT_p} \leq l_{T_pT_q} + \mu \text{ 时} & l_{K_iF} - l_{K_iT_p} = l_{T_pT_q} \\ -\gamma \leq \frac{l_{K_iF} - l_{K_iT_p} + \delta}{l_{T_pT_q} + \delta} \leq \gamma \text{ 时} & \frac{l_{K_iF} - l_{K_iT_p} + \delta}{l_{T_pT_q} + \delta} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

一般误差裕度 μ 取 50 m, γ 取 0.05。

2.3 故障点精确定位

确定故障支路后, 根据双端行波原理即可求得故障距离, 但是为了进一步提高测距精度, 根据故障支路末端和主馈线两端的行波达到时间, 建立关于行波波速和行波到达时间的方程组, 消除行波波速对测距结果的影响。当故障发生在图 4 的单分支支路 K_2T_1 时, 提取局部故障域如图 5 所示。



图5 局部故障域

Fig. 5 Local fault domain

本文通过变分模态分解分解故障电压行波线模分量，采用对称差分解能量算子解析高频分量信号^[24]，可以准确标定行波波头到达时间。根据三端行波时间信息联立方程组如式(13)所示。

$$\begin{cases} l_{K_1T_1} + l_{T_1F} = v(t_1 - t_0) \\ l_{K_nT_1} + l_{T_1F} = v(t_n - t_0) \\ l_{K_2T_1} - l_{T_1F} = v(t_2 - t_0) \end{cases} \quad (13)$$

式中： t_0 为故障发生时刻； t_1 、 t_2 和 t_n 分别为故障行波到达 K_1 、 K_2 和 K_n 采样点的时间； v 为故障行波在线路中的传播速度。解方程组，故障距离表达式如式(14)所示。

$$l_{T_1F} = \frac{l_{K_2T_1}(t_1 - t_n) + l_{K_1T_1}(t_n - t_2) + l_{K_nT_1}(t_2 - t_1)}{2(t_1 - t_n)} \quad (14)$$

代入三端行波时间信息，即可得到故障点与支路节点的距离。实际工程应用中，配电网线路参数可能不是均匀分布的，行波波速受线路参数变化的影响会略有波动，但考虑到配电网所处地理位置相近，自然条件相似，可认为相同线路参数一致。

通过三端行波测距法得到的故障距离是配电网线路归一化后的计算结果，需要根据式(15)将最终测距结果转化为实际故障距离。

$$l_{T_1F}^* = (l_{T_1F} - l) \cdot \frac{v_2 + l}{v_1} \quad (15)$$

式中： $l_{T_1F}^*$ 为实际故障距离； l 表示线路 T_1F 内包含的实际架空线长度。

3 仿真分析

3.1 仿真模型建立

在Matlab/Simulink中建立10 kV配电网仿真模型如图6所示，系统电源采用理想电源，电压等级为110 kV/10 kV的变压器向负荷供电，中性点采用经过消弧线圈的方式接地。线路 K_2T_1 为电缆线路，其余线路均为架空线，线路参数如表1所示。 K_1K_9 为主馈线， K_2 、 K_3 、 \dots 、 K_9 为各支路末端， T_2 和 T_4 为无效节点，主馈线首端变电站和各支路末端配电变压器均装有行波采集装置，采样频率为1 MHz。

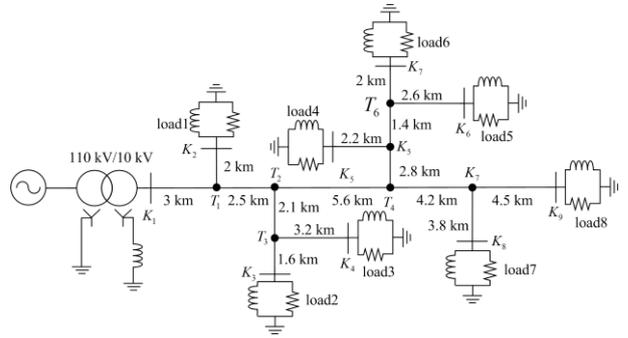


图6 10 kV 配电系统模型

Fig. 6 10 kV distribution network model

表1 10 kV 配电网线路参数

Table 1 10 kV distribution network line parameters

参数类型	$R/(\Omega/km)$	$L/(H/km)$	$R/(\Omega/km)$
架空线参数	0.132	0.92×10^{-3}	12.84×10^{-9}
电缆参数	0.091	0.087	0.37×10^{-9}

在仿真模型中设置6例故障：

故障一：在线路 K_1T_1 距离节点 T_1 1 km处设置A相接地故障，过渡电阻设为 2Ω ；

故障二：在线路 K_2T_1 距离 T_1 节点 1 km处设置A相接地故障，过渡电阻设为 20Ω ；

故障三：在线路 T_4T_5 距离 T_4 节点 1.8 km处设置A相接地故障，过渡电阻设为 200Ω ；

故障四：在线路 K_8T_7 距离 T_7 节点 1.2 km处设置AB两相短路故障，过渡电阻设为 200Ω ；

故障五：在节点 T_1 处设置AB两相接地短路故障，过渡电阻设为 200Ω ；

故障六：在节点 T_7 处设置ABC三相短路故障，过渡电阻设为 200Ω 。

故障发生在0.035 s，持续到0.1 s。故障发生前，对配电网线路进行归一化处理。故障发生后，根据多端行波时差定位故障点，计算故障搜索矩阵和辅助矩阵时均以 K_1 为参考端，校正因子 δ 取0.01。

3.2 算例分析

3.2.1 算例1

以故障一为例，对参考端支路故障的定位过程进行详细说明。以故障发生时刻为起始时间，初始行波到达各个采样点的时间如表2所示。

表2 故障一初始行波到达时间

Table 2 Arrival time of initial traveling wave of fault I

采样点	时间/ μs	采样点	时间/ μs	采样点	时间/ μs
K_1	7	K_4	30	K_7	52
K_2	15	K_5	48	K_8	59
K_3	25	K_6	55	K_9	61

根据双端行波定位原理计算故障点与参考端之间的距离, 将相关参数代入式(3)、式(12), 构建故障搜索矩阵:

$$D = \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & K_4 & K_5 & K_6 & K_7 & K_8 & K_9 \\ -10^5 & -0.22 & -0.21 & -0.08 & -0.08 & -0.07 & -0.08 & -0.08 \end{bmatrix}$$

观察故障搜索矩阵元素可知, 矩阵元素都为负数, 根据故障线路判定原理可知故障发生在参考端支路 K_1T_1 。确定故障支路后, 将 K_1 、 K_2 、 K_9 的行波到达时间代入式(16), 根据三端行波法计算故障距离。

$$l_{T_1F} = \frac{l_{K_1T_1}(t_2 - t_9) + l_{K_2T_1}(t_9 - t_1) + l_{K_9T_1}(t_1 - t_2)}{2(t_2 - t_9)} \quad (16)$$

故障距离 l_{T_1F} 为 1 011 m, 误差为 11 m。

3.2.2 算例 2

以故障二为例, 对非参考端支路故障的定位过程进行详细说明, 初始行波到达时间如表 3 所示。

表 3 故障二初始行波到达时间

Table 3 Arrival time of initial traveling wave of fault II

采样点	时间/ μs	采样点	时间/ μs	采样点	时间/ μs
K_1	16	K_4	33	K_7	55
K_2	6	K_5	51	K_8	61
K_3	27	K_6	57	K_9	63

同理, 根据式(3)、式(12)构建故障搜索矩阵, 如式(17)所示。

$$D = \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & K_4 & K_5 & K_6 & K_7 & K_8 & K_9 \\ 1.6 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

观察故障搜索矩阵的矩阵元素可知, 出现大于 1 的矩阵元素, 其对应的非参考端为 K_2 , 根据故障线路判定原理可知故障发生在非参考端支路 K_2T_1 。确定故障支路后, 将 K_1 、 K_2 、 K_9 的行波到达时间代入式(18), 根据三端行波法计算故障距离。

$$l_{T_1F} = \frac{l_{K_2T_1}(t_1 - t_9) + l_{K_1T_1}(t_9 - t_2) + l_{K_9T_1}(t_2 - t_1)}{2(t_1 - t_9)} \quad (18)$$

故障距离 l_{T_1F} 为 1 629 m, 此时的故障距离为配电网路归一化之后的测距结果, 需要根据式(19)将其换算为实际故障距离。

$$l_{T_1F}^* = (l_{T_1F} - l) \cdot \frac{v_2}{v_1} + l \quad (19)$$

代入相关参数可得实际故障距离 $l_{T_1F}^*$ 为 981 m, 误差为 19 m。

3.2.3 算例 3

以故障三为例, 对节点线路故障定位过程进行详细说明, 初始行波到达时间如表 4 所示。

表 4 故障三初始行波到达时间

Table 4 Arrival time of initial traveling wave of fault III

采样点	时间/ μs	采样点	时间/ μs	采样点	时间/ μs
K_1	44	K_4	44	K_7	15
K_2	45	K_5	11	K_8	34
K_3	38	K_6	17	K_9	36

同理, 根据式(3)、式(12)构建故障搜索矩阵, 如式(20)所示。

$$D = \begin{bmatrix} K_2 & K_3 & K_4 & K_5 & K_6 & K_7 & K_8 & K_9 \\ 1 & 0.54 & 0.52 & 0.9 & 0.8 & 0.8 & 0.65 & 0.66 \end{bmatrix} \quad (20)$$

观察故障搜索矩阵的矩阵元素, 根据故障线路判定原理可知, 故障未发生在参考端支路、参考端节点和非参考端支路, 可以判断故障发生在节点线路。节点线路故障需要构建辅助矩阵, 配合与之对应的节点矩阵实现故障线路定位。

无效节点 T_2 和 T_4 对应的辅助矩阵为

$$\begin{cases} J_1 = \begin{bmatrix} K_3 & K_4 & K_5 & K_6 & K_7 & K_8 & K_9 \\ 0 & 0 & 0.88 & 0.75 & 0.75 & 0.56 & 0.57 \end{bmatrix} \\ J_2 = \begin{bmatrix} K_5 & K_6 & K_7 & K_8 & K_9 \\ 0.63 & 0.42 & 0.42 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (21)$$

无效节点 T_2 和 T_4 对应的节点矩阵为

$$\begin{cases} T_1 = \begin{bmatrix} K_3 & K_4 & \cdots & K_9 \\ T_2, T_3 & T_2, T_3 & \cdots & T_2, T_4, T_7 \end{bmatrix} \\ T_2 = \begin{bmatrix} K_5 & K_6 & \cdots & K_9 \\ T_4, T_5 & T_4, T_5, T_6 & \cdots & T_4, T_7 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (22)$$

观察辅助矩阵的矩阵元素, J_1 和 J_2 中均包含大于 0 小于 1 的元素, 故保留 J_1 和 J_2 , 又因为 J_2 的矩阵元素个数小于 J_1 , 故选择 J_2 判定故障线路, J_2 中大于 0 小于 1 的矩阵元素对应的非参考端为 K_5 、 K_6 、 K_7 , 对节点矩阵 T_2 中 K_5 、 K_6 、 K_7 对应的矩阵元素取交集, 为 $U^* = \{T_4, T_5\}$, J_2 没有等于 1 的元素, 故集合 A^* 为空集, A^* 在 U^* 中的补集为 $B^* = \{T_4, T_5\}$, 根据故障线路判定原理可知故障发生在节点线路 T_4T_5 。确定故障线路后, 将 K_1 、 K_7 、 K_9 的行波到达时间代入式(23), 根据三端行波法计算故障距离。

$$l_{T_4F} = \frac{l_{K_7T_4}(t_1 - t_9) + l_{K_1T_4}(t_9 - t_7) + l_{K_9T_4}(t_7 - t_1)}{2(t_1 - t_9)} \quad (23)$$

故障距离 l_{T_4F} 为 1 900 m, 误差为 100 m。

限于篇幅, 其他故障的具体计算过程不再赘述, 定位结果如表 5 所示。

表 5 故障定位结果
Table 5 Fault location results

故障区间	参考点	故障类型	测距结果/m	定位误差/m
K_1T_1	T_1	Ag	1 011	11
K_2T_1	T_1	Ag	981	19
T_4T_3	T_4	Ag	1 900	100
K_5T_7	T_7	AB	1 177	23
T_1	T_1	ABg	16	16
T_7	T_7	ABC	21	21

根据仿真结果可知，文章的故障定位方法准确度较高，总体测距结果精度较高，其中算例 3 的测距误差相对较大，这是由于采样频率不高，采样间距过大产生截断误差导致的，在具体工程实践中，应尽可能提高采样装置的采样频率，减小行波到达时间对测距精度的影响。

通过定位结果可知，基于多端行波时差的故障定位算法不受故障类型、过渡电阻的影响，能够较好地适应配电网的多分支结构，且在本文提出的定位算法基础上，通过增加参考端，对故障点进行二次定位，可以进一步提高定位系统的容错性和可靠性。

4 结论

本文提出一种基于多端行波时差的配电网故障定位方法。对于结构复杂、分支众多的配电网，根据配电网自身拓扑结构特征定义节点矩阵和无效节点。通过分析故障行波的传输特性，提出一种配电网故障状态表达式，根据多端行波时差和双端行波原理计算的故障距离理论值，将理论值代入故障状态表达式，建立故障搜索矩阵和辅助矩阵，通过分析故障搜索矩阵和辅助矩阵的元素状态，提出故障线路判定原理，提取节点矩阵中的故障节点，进而有效判定故障线路。根据三端行波法计算实际故障距离，可消除行波波速不确定性造成的测距误差，实现故障点的精准定位。

仿真结果表明，本文所提定位方法原理简单、可靠性好，不受故障类型和过渡电阻的影响，与现有配电网故障行波定位方法相比，通过节点矩阵的配合，有效降低了故障搜索矩阵和辅助矩阵的维度，减少了计算量，提高了配电网行波定位方法的可靠性和实用性。

参考文献

[1] 戴志辉, 王旭. 基于改进阻抗法的有源配电网故障测距算法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2027-2034.
DAI Zhihui, WANG Xu. Impedance method based fault location algorithm for active distribution system[J]. Power

System Technology, 2017, 41(6): 2027-2034.
[2] 赵乔, 王增平, 董文娜, 等. 基于免疫二进制粒子群优化算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 83-89.
ZHAO Qiao, WANG Zengping, DONG Wenna, et al. Research on fault location in a distribution network based on an immune binary particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 83-89.
[3] LI R, WANG W, XIA M. Cooperative planning of active distribution system with renewable energy sources and energy storage systems[J]. IEEE Access, 2018, 23(10): 5916-5926.
[4] KOUTSOUKIS R N C, SIAGKAS D O, GEORGILAKI P S, et al. Online reconfiguration of active distribution networks for maximum integration of distributed generation[J]. Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(2): 437-448.
[5] 高锋阳, 李昭君, 袁成, 等. 量子计算和免疫优化算法相结合的有源配电网故障定位[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 396-406.
GAO Fengyang, LI Zhaojun, YUAN Cheng, et al. Fault location for active distribution network based on quantum computing and Immune optimization algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 396-406.
[6] 李练兵, 张晓娜, 张家安, 等. 基于电流行波的微电网保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 94-100.
LI Lianbing, ZHANG Xiaona, ZHANG Jiaan, et al. Protection scheme of microgrid based on current traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 94-100.
[7] SHI S, ZHU B, LEI A. Fault location for radial distribution network via topology and reclosure generating traveling waves[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6404-6413.
[8] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 基于 VMD 和 TEO 的高压输电线路雷击故障测距研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 24-33.
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. Study on lightning fault locating of high-voltage transmission lines based on VMD and TEO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 24-33.
[9] 高洪雨, 陈青, 徐丙垠, 等. 输电线路单端行波故障测距新算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 121-127.
GAO Hongyu, CHEN Qing, XU Bingyin, et al. A new algorithm for single-end traveling wave fault location of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 121-127.
[10] 付华, 吴赛, 徐耀松, 等. 基于 VMD 与广义 S 变换的 HVDC 线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020,

- 48(4): 125-133.
- FU Hua, WU Sai, XU Yaosong, et al. HVDC line fault location based on VMD and generalized S transform[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(4): 125-133.
- [11] 董新洲, 王珺, 施慎行. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(10): 154-160.
- DONG Xinzhou, WANG Jun, SHI Shenxing. Principle and algorithm of traveling waves based single phase to ground protection for distribution lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(10): 154-160.
- [12] 赵海龙, 陈钦柱, 梁亚峰, 等. 一种小电流接地系统故障行波精确定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(19): 85-93.
- ZHAO Hailong, CHEN Qinzhui, LIANG Yafeng, et al. A fault location method of single phase earth fault in small current neutral grounding system[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(19): 85-93.
- [13] 张帆, 潘贞存, 马琳琳, 等. 基于模量行波传输时间差的线路接地故障测距与保护[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(10): 78-83.
- ZHANG Fan, PAN Zhencun, MA Linlin, et al. Transmission line fault location and protection based on the gap between zero mode and aerial mode traveling wave propagation time[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(10): 78-83.
- [14] 梁睿, 靳征, 王崇林, 等. 行波时频复合分析的配电网故障定位研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(28): 130-136.
- LIANG Rui, JIN Zheng, WANG Chonglin, et al. Research of fault location in distribution networks based on integration of travelling wave time and frequency analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(28): 130-136.
- [15] 谢李为, 柳祎璇, 曾祥君, 等. 基于 VMD 和 S 变换的多端输电线路故障定位[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(2): 126-134.
- XIE Liwei, LIU Yixuan, ZENG Xiangjun, et al. Multi-terminal transmission line fault location based on VMD and S transformation[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2019, 31(2): 126-134.
- [16] DENG F, ZENG X J, PAN L L. Research on multi terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 199-210.
- [17] CHEN M Y, LIU D, XU B. Wide-area traveling wave fault location system based on IEC61850[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(2): 1207-1215.
- [18] LEE L W, KIM K W, HAN J, et al. Fault area estimation using traveling wave for wide area protection[J]. *Modern Power Systems and Clean Energy*, 2016, 4(3): 478-486.
- [19] 梁睿, 崔连华, 都志立, 等. 基于广域行波初始波头时差关系矩阵的配电网故障选线及测距[J]. *高电压技术*, 2014, 40(11): 3411-3417.
- LIANG Rui, CUI Lianhua, DU Zhili, et al. Fault line selection and location in distribution power network based on traveling wave time difference of arrival relationships[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(11): 3411-3417.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] ZHANG C, SONG G, WANG T, et al. Single-ended traveling wave fault location method in DC transmission line based on wave front information[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(5): 2028-2038.
- [23] 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.
- [24] 徐元博, 蔡宗琰, 丁凯. 复杂背景下对称差分解析能量算子在轴承故障诊断中的应用[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(8): 246-254.
- XU Yuanbo, CAI Zongyan, DING Kai. Bearing fault detection based on an analytic energy operator of symmetrical differencing under complex background[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(8): 246-254.

收稿日期: 2021-01-02; 修回日期: 2021-05-06

作者简介:

李练兵(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子技术、新能源发电与微电网技术; E-mail: lilianbing@hebut.edu.cn

孙腾达(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障定位技术、电能质量治理技术。E-mail: 2380379625@qq.com

(编辑 周金梅)