

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241410

基于虚拟故障波形匹配的行波网络定位方法

李泽文¹, 吴国瑞², 夏翊翔¹, 邓丰¹, 刘国胜¹, 王远川¹

(1. 电网安全监控技术教育部工程研究中心(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114;

2. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523120)

摘要: 针对长距离输电行波波头精确标定困难、行波波速难以准确选取等问题, 提出了一种基于虚拟故障波形匹配的行波网络定位方法。首先分析行波在输电网络中的传播特性, 对传播过程各环节建立等效模型。利用改进的深度优先搜索(depth first search, DFS)算法, 实现任意故障位置到测量点行波传播路径搜索。进而根据路径信息构建行波传播模型。结合动态虚拟故障思路, 利用行波传播模型模拟各测量点虚拟故障行波波形。最后提出虚拟故障与真实故障行波波形自适应匹配方法, 构造行波波头匹配率来衡量虚拟故障与真实故障位置的差异性。通过PSCAD仿真平台验证, 该方法无需标定初始波头到达时间, 降低了波速误差, 实现了故障精确定位。

关键词: 虚拟故障波形; 路径搜索; 波形匹配; 故障定位; 行波

Traveling-wave network fault location method based on virtual fault waveform matching

LI Zewen¹, WU Guorui², XIA Yixiang¹, DENG Feng¹, LIU Guosheng¹, WANG Yuanchuan¹

(1. Engineering Research Center of Ministry of Education for Power Grid Safety Monitoring Technology

(Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China; 2. Dongguan Power

Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan 523120, China)

Abstract: To address the challenges of accurately identifying the wavefront of travelling waves over long transmission distances and precisely determining the wave propagation velocity, a traveling-wave network fault location method based on virtual fault waveform matching is proposed. First, the propagation characteristics of traveling waves in transmission networks are analyzed, and equivalent models are established for each stage of the propagation process. An improved depth first search (DFS) algorithm is utilized to identify the traveling wave propagation path from any fault location to the measurement points. Based on the obtained path information, a traveling-wave propagation model is constructed. Using the concept of dynamic virtual faults, the model simulates the virtual fault traveling-wave waveforms at each measurement point. Finally, an adaptive matching method between virtual and actual fault traveling waveforms is proposed, constructing a matching index to quantify the differences between the virtual and actual fault locations. PSCAD simulation results verify that the proposed method eliminates the need to calibrate the initial wavefront arrival time, reduces wave velocity errors, and achieves accurate fault location.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377073).

Key words: virtual fault waveforms; path search; waveform matching; fault location; traveling wave

0 引言

随着我国加快构建以新能源为主体的新型电力系统, 高压输电线路作为远距离电能传输的动脉, 线路长度与传输容量不断增大。快速准确定位故障

位置、及时恢复电能供应对维持电网稳定运行具有重要的现实意义^[1-4]。行波法由于具有响应速度快、定位精度高、受系统运行方式和电源类型影响小等特点, 受到越来越多的学者关注^[5-9]。

行波法主要分为单端法^[10-12]、双端法^[13-15]和网络定位法^[16-18]。单端法定位方法简单, 但难以识别故障点反射波; 双端法仅需获取初始波头到达时间信息, 但受到同步时钟误差影响较大。为此, 发展

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377073); 湖南省科技创新人才计划科技创新团队项目资助(2021RC4061)

出了网络行波定位方法^[16]。

文献[17]利用多个变电站初始行波到达时间确定故障区域, 通过综合多个双端定位结果实现网络定位。文献[18]利用 Dijkstra 算法计算最短路径, 根据各测量点初始波头到达信息建立故障距离矩阵, 对不同线路赋予不同权重, 综合所有有效故障距离得到精确的故障点位置。上述方法通过多测量点信息融合, 在一定程度上消除了时钟同步误差, 提高了定位精度, 但定位结果仍然通过定位公式计算, 受波头标定误差和波速误差影响较大。

学者们从频域和时域两方面对行波的突变点进行精确检测。文献[19]采用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)对线模分量进行分解, 利用 Teager 算子对分解出的第一层模态分量进行信号瞬时能量增强, 准确提取行波信号突变点。文献[20]使用 VMD 和 S 变换精确提取初始行波到达时间, 利用故障前后线路距离差值构建故障分支判定矩阵实现精确定位。文献[21]对带噪声的行波信号进行累加处理, 构造时窗尺度差分算子对累加曲线进行突变点标定, 该方法在强噪声情况下能准确标定突变点。上述方法默认波头到达时刻突变最明显。然而, 行波经过长距离传输后, 波头上升缓慢, 波头到达时刻突变特征不明显。因此, 上述方法标定结果仍然存在误差。

此外, 行波波速选取的准确性也决定了定位精度^[22]。现有定位方法普遍采用经验波速, 但经验波速与真实波速之间的偏差会导致定位结果失准。针对这一问题, 学者们提出了多种波速计算方法^[23-24]。文献[23]通过时频分解算法提取特定频率分量信号, 准确计算其对应的行波波速。当输电线路中存在强烈的噪声干扰时, 频率分量的选取容易受到干扰, 进而影响波速的准确计算。文献[24]在线路中点增加测量装置, 依据初始行波和母线反射波时间差在线计算波速, 但该方法仅适用于单条线路或简单网络的波速获取。

课题组前期研究发现, 各测量点测量行波信号与故障位置之间存在一一对应关系^[25-26]。基于波形唯一性理论, 本文提出了一种虚拟故障波形匹配的行波网络定位方法。根据行波的传播特性, 模拟虚拟故障的行波波形, 通过比较所有测量点虚拟故障与真实故障波形的差异度来衡量故障点位置, 实现故障精确定位。该方法充分利用一段时间窗的行波波形信息, 不依赖初始波头的准确标定; 通过优化算法自适应求解行波波速, 提高了定位精度。

1 行波传播模型

测量点故障行波波形成受故障点位置、故障点附加电源、输电线路传播距离、各波阻抗不连续点折反射影响。因此本节对行波传播过程中每个环节进行分析, 分别建立等效模型。根据路径搜索算法求出指定故障位置到测量点的行波传播路径, 并据此构建行波传播模型。

1.1 故障行波传播环节分析

1.1.1 故障点电源分析

不同故障类型故障点线模初始幅值大小不同, 本文以 A 相单相接地故障为例进行分析^[27]。

$$U_f = -\frac{Z_{cl}}{2Z_{cl} + Z_{c0} + 6R_f} U_{af} \quad (1)$$

式中: U_f 是故障点处行波幅值; U_{af} 为正常工作时 A 相电压幅值; R_f 为过渡电阻; Z_{cl} 、 Z_{c0} 分别为线模、零模波阻抗。根据叠加定理, 故障点处故障电源 U_n 可表示为^[28]

$$\begin{cases} U_n = 0 & t < t_f \\ U_n = U_f \sin(\omega_0 t + \varphi_0) & t \geq t_f \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_f 为故障时刻; $\omega_0 = 100\pi$; φ_0 为故障时刻线模相角。则故障点故障电源拉普拉斯变换为

$$U_n(s) = \mathcal{L}[U_n(t)] = \frac{U_f(\omega_0 \cos \varphi_0 + s \sin \varphi_0)}{s^2 + \omega_0^2} \quad (3)$$

1.1.2 输电线路传输特性分析

通过求解传输线波动方程可得线路传输函数。

$$A(\omega) = e^{-\gamma(\omega)x} \quad (4)$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} \quad (5)$$

式中: $A(\omega)$ 为线路传输函数; $\gamma(\omega)$ 为传播常数; R_1 、 L_1 、 G_1 、 C_1 分别为单位长度线模电阻、电感、电导、电容; ω 为信号的角频率; x 为行波传播距离。输电线路传递函数复杂, 难以直接在时域内写出具体表达式。图 1 展示了行波在不同传输距离后的波形变化。由图 1 可知, 行波在输电线路上传输后近似

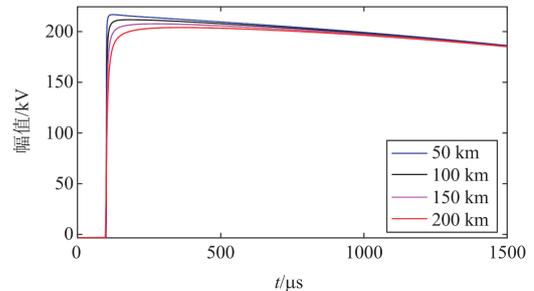


图 1 不同传输距离对行波波形的影响

Fig. 1 Effect of different distances on traveling waveforms

于指数波。因此本文采用指数函数简化反映行波在线路上传播的特性^[29]。

$$G(s, x) = \frac{1 - k_1 x}{1 + s\tau_1 x} \quad (6)$$

式中： k_1 、 τ_1 分别为单位长度的线模衰减系数和畸变系数。本文中采用麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)对不同传播距离的故障行波拟合求解，得到 k_1 、 τ_1 参数的最优结果，实现对线路传输过程的精确建模。

1.1.3 折反射过程分析

行波在经过波阻抗不连续点会发生折反射现象，不同线路节点折反射情况不同，对波形形状影响也不同。波阻抗不连续点折、反射系数公式为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2Z_{co}}{Z_{cr} + Z_{co}} \\ \beta = \frac{Z_{co} - Z_{cr}}{Z_{cr} + Z_{co}} \end{cases} \quad (7)$$

式中： α 、 β 分别为折射系数和反射系数； Z_{cr} 、 Z_{co} 分别为波阻抗不连续点进线侧波阻抗和出线侧等效波阻抗。进一步计算得到线模行波经过母线处折、反射系数为

$$\begin{cases} \alpha_b = \frac{2}{1+h} \\ \beta_b = \frac{1-h}{1+h} \end{cases} \quad (8)$$

式中： α_b 、 β_b 分别为母线 b 处的折射系数和反射系数。

不同故障类型故障点处线模折反射系数不同，下面以单相接地故障时为例。

$$\begin{cases} \alpha_f = \frac{Z_{c0} + 6R_f}{Z_{c0} + 2Z_{cl} + 6R_f} \\ \beta_f = \frac{-2Z_{cl}}{Z_{c0} + 2Z_{cl} + 6R_f} \end{cases} \quad (9)$$

式中： α_f 、 β_f 分别为故障点 f 处的折射系数和反射系数。

当行波传播到达变电站终端，受到变压器电感参数的影响，折反射系数不能简单等效为常数，此时线路终端折、反射系数为

$$\begin{cases} \alpha_s = \frac{2(Z_s + Z_T)}{Z_s + Z_T + Z_{cl}} \\ \beta_s = \frac{Z_s + Z_T - Z_{cl}}{Z_s + Z_T + Z_{cl}} \end{cases} \quad (10)$$

式中： α_s 、 β_s 分别为终端节点 s 处的折射系数和反射系数； Z_T 为变电站等效阻抗； Z_s 为电源等效阻抗。

1.2 故障行波时域波形模拟

深度优先搜索(depth first search, DFS)算法是一种遍历图的算法，其核心思想是从起始节点出发，尽可能深入图中未访问的节点，直到无法继续为止，然后回溯到上一个节点，继续探索其他分支，直到所有节点被访问^[30]。基于 DFS 算法，加入行波的折反射传播规则，允许节点反复访问^[31]。因此，改进后的深度优先搜索算法可求出行波从故障点传播到测量点的所有路径。

$$\mathbf{L}_M = [\mathbf{L}_M^1, \mathbf{L}_M^2, \dots, \mathbf{L}_M^k] \quad (11)$$

$$\mathbf{L}_M^k = [j_1, c_{j_1 j_2}, j_2, \dots, c_{j_{u^k-1} j_{u^k}}, j_{u^k}] \quad (12)$$

$$\mathbf{U}^k = [j_1, j_2, \dots, j_{u^k-1}, j_{u^k}] \quad (13)$$

$$L_{sum}^k = \sum_{i=2}^{u^k} c_{j_{i-1} j_i} \quad (14)$$

式中： \mathbf{L}_M 为传播到测量点 M 所有行波的路径矩阵； \mathbf{L}_M^k 为第 k 个传播到测量点 M 的行波路径信息矩阵； \mathbf{U}^k 为第 k 个传播到测量点 M 的行波路径节点序列矩阵； L_{sum}^k 为 k 个传播到测量点 M 的行波传播长度； j_1 、 j_{u^k} 分别表示故障点和测量点； u^k 表示第 k 条路径经过总的节点数； $c_{j_{i-1} j_i}$ 为故障行波传播经过两节点间的距离。

测量点采集的故障行波信号是由故障点电源信号经过不同路径发生线路衰减以及折反射，按照对应延时在测量点叠加而成。根据式(11)~式(14)，可以得到任意测量点 M 处的故障行波复频域表达式，如式(15)所示。

$$\begin{aligned} U_M(s) &= U_{L_M^1}(s) + U_{L_M^2}(s) + \dots + U_{L_M^k}(s) = \\ &U_{\Pi}(s) \prod_{i=2}^{u^1} \lambda_{j_{i-1} j_i} \prod_{i=2}^{u^1} G(s, c_{j_{i-1} j_i}) + \\ &U_{\Pi}(s) \times \prod_{i=2}^{u^2} \lambda_{j_{i-1} j_i} \prod_{i=2}^{u^2} G(s, c_{j_{i-1} j_i}) + \dots + \\ &U_{\Pi}(s) \prod_{i=2}^{u^k} \lambda_{j_{i-1} j_i} \prod_{i=2}^{u^k} G(s, c_{j_{i-1} j_i}) = \\ &U_{\Pi}(s) \left(\prod_{i=2}^{u^1} \lambda_{j_{i-1} j_i} \prod_{i=2}^{u^1} G(s, c_{j_{i-1} j_i}) + \prod_{i=2}^{u^2} \lambda_{j_{i-1} j_i} \times \right. \\ &\left. \prod_{i=2}^{u^k} G(s, c_{j_{i-1} j_i}) + \dots + \prod_{i=2}^{u^k} \lambda_{j_{i-1} j_i} \prod_{i=2}^{u^k} G(s, c_{j_{i-1} j_i}) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

式中： $U_{L_M^k}(s)$ 是第 k 个从故障点传播到测量点 M 的行波； λ 是节点处的折反射系数，其中下标表示行波传播方向。用计算机实现拉普拉斯反变换求出每个行波的时域波形，根据每个行波波头的传播路径长度求出对应延时，最后根据叠加定理把每条路径

的行波波形按照一定时序组合, 得到测量点的最终行波波形。

$$t^k = \frac{L_{\text{sum}}^k}{v} \quad (16)$$

$$U_M(t) = U_{L_M}^1(t-t^1) + U_{L_M}^2(t-t^2) + \dots + U_{L_M}^k(t-t^k) \quad (17)$$

式中: t^k 为第 k 个行波到达测量点 M 的时间; v 为行波波速。根据式(17)可以模拟出在拓扑网络中任意位置发生故障时各个测量点的故障行波波形。

2 虚拟故障波形自适应匹配机制

动态虚拟故障是指在网络拓扑中人为假定一故障位置, 虚拟故障行波按照行波传播规律传遍全网^[32]。当各测量点虚拟故障波形与真实故障波形一致时, 认为虚拟故障位置就是真实故障位置。用 SSA 算法不断地迭代故障点位置, 实现虚拟故障点的动态移动, 最终找到最优故障位置。

2.1 虚拟故障和真实故障波形矩阵

选取一定时间窗长度各测量点真实故障行波波形, 并基于课题组前期提出的波形反演方法, 利用采集的二次侧波形精确还原出一次侧波形^[33]。将还原后的各测量点波形合并, 最终构成真实故障波形矩阵, 如式(18)所示。

$$\mathbf{R} = \{\mathbf{R}^1, \mathbf{R}^2, \dots, \mathbf{R}^M\} = \begin{bmatrix} r_1^1 & r_1^2 & \dots & r_1^M \\ r_2^1 & r_2^2 & \dots & r_2^M \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_u^1 & r_u^2 & \dots & r_u^M \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: \mathbf{R}^M 为测量点 M 真实故障波形信息; r_i^M 为测量点 M 第 i 个采样点真实故障波形幅值; u 表示真实故障波形时间序列总长度。根据式(17)得到虚拟故障行波波形矩阵为

$$\mathbf{A} = \{\mathbf{A}^1, \mathbf{A}^2, \dots, \mathbf{A}^M\} = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_1^2 & \dots & a_1^M \\ a_2^1 & a_2^2 & \dots & a_2^M \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_w^1 & a_w^2 & \dots & a_w^M \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: \mathbf{A}^M 为测量点 M 虚拟故障波形信息; a_i^M 为测量点 M 第 i 个采样点虚拟故障波形幅值; w 表示虚拟故障波形时间序列总长度。矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{A} 按照式(20)归一化处理得到 $\hat{\mathbf{R}}$ 和 $\hat{\mathbf{A}}$ 。

$$\hat{H}^M = \frac{H_i^M}{H_{\text{max}}^M} \quad (20)$$

式中: \hat{H}^M 为矩阵归一化结果; H_i^M 为矩阵中第 i 个元素; H_{max}^M 为矩阵中最大元素。

2.2 自适应波形匹配机制

将生成的虚拟故障波形映射至真实故障波形坐标系下, 不断平移虚拟故障波形, 计算每次平移后虚拟故障和真实故障波形重合部分的匹配程度。重合部分真实故障和虚拟故障波形信息分别为

$$\hat{\mathbf{R}}_g^M = [r_1^M, r_2^M, \dots, r_g^M] \quad (21)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_{w-g+1}^M = [a_{w-g+1}^M, a_{w-g+2}^M, \dots, a_w^M] \quad (22)$$

式中: g 为真实故障波形和虚拟故障波形重合部分长度。

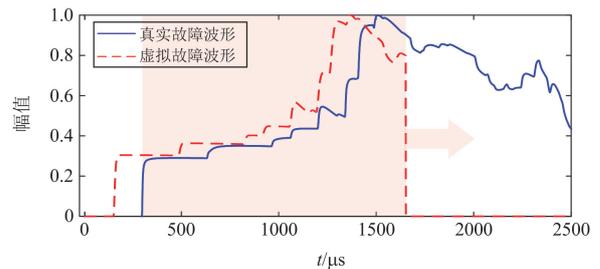
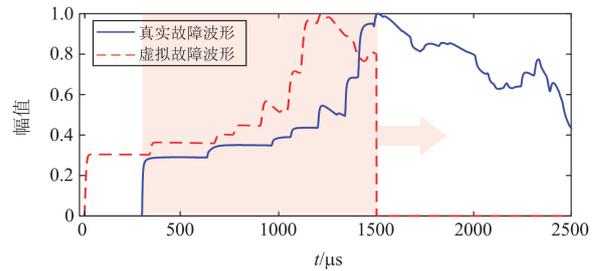
用皮尔逊相关系数来描述各测量点虚拟故障和真实故障重合部分波形的相关性, 如式(23)所示。

$$\rho^M = \frac{\sum_{i=1}^g (a_{w-g+i}^M - \overline{a^M})(r_i^M - \overline{r^M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^g (a_{w-g+i}^M - \overline{a^M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^g (r_i^M - \overline{r^M})^2}} \quad (23)$$

式中: ρ^M 为测量点 M 处虚拟故障和真实故障重合部分波形的相似度; r_i^M 、 a_{w-g+i}^M 分别表示在测量点 M 、重合波形长度为 g 的时间窗内第 i 个采样点的真实故障和虚拟故障波形的值; $\overline{r^M}$ 、 $\overline{a^M}$ 分别表示测量点 M 在时间窗范围内真实故障和虚拟故障重合波形的平均值。当虚拟故障波形移动到波形相关性最大位置时, 认为该位置为虚拟故障波形和真实故障波形的最佳匹配位置, 波形匹配过程如图 2 所示。图中红色箭头表示虚拟故障波形移动方向, 红色区域表示波形重合部分。

用式(24)计算多测量点虚拟故障矩阵和真实故障矩阵的波形匹配率 G 。

$$G = \sum_{M=1}^N \rho(\hat{\mathbf{R}}_g^M, \hat{\mathbf{A}}_{w-g+1}^M) \quad (24)$$



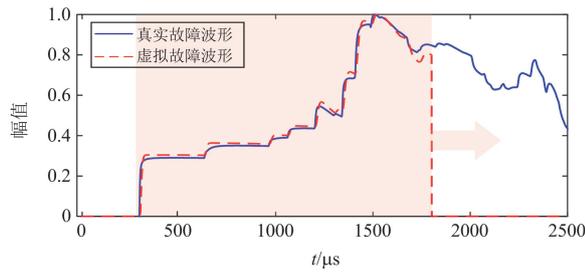


图 2 波形匹配过程

Fig. 2 Waveform matching process

式中： N 为测量节点数。选择波形匹配率 G 最大的映射方式，即完成所有测量点虚拟故障波形的自适应匹配过程。

3 基于虚拟故障波形匹配的定位模型

根据虚拟故障波形匹配机制，给定任意虚拟故障点位置即能构造出虚拟故障波形并求得虚拟故障波形匹配率。当虚拟故障与真实故障位置重合时，各测量点虚拟故障波形与真实故障波形一致，此时虚拟故障的波形匹配率最大。以此为基础，本文进一步提出故障定位优化模型，将定位问题转化为优化求解问题。

根据式(15)一(17)，虚拟故障波形的合成需获取行波波速和故障点参数。其中，行波波速会影响各个波头叠加的时刻，故障点参数会影响附加故障电源和故障点折反射情况。故障点的未知参数有故

障时刻相角、故障类型和过渡电阻。根据式(2)，故障点处故障电源信号由故障初相角、故障类型和故障过渡电阻决定；根据式(9)，故障点折反射系数由故障类型和过渡电阻决定。为减少优化求解参数数量，对虚拟故障和真实故障波形幅值进行归一化处理，消除幅值因素带来的影响；考虑在任一故障情况下，故障类型和故障电阻恒定，故障点折反射系数也为确定值，因此无需提前辨识故障类型和求解故障电阻，直接求解故障点折反射系数即可。

通过上述分析，本文将虚拟故障点位置、行波波速、故障发生时刻相角、故障点折反射系数共同作为待优化变量，以虚拟故障波形匹配率最大为目标，建立故障定位优化模型。

SSA是一种模拟麻雀群体觅食特征的启发式优化算法，通过不断地调整个体和种群位置来寻找最优解。该算法在收敛速度、稳定性和求解精度上有较好的效果，本文通过SSA实现定位模型的优化求解。在SSA中，第 j 只麻雀第 t 次迭代位置对应问题的解 X'_j 为

$$X'_j = \{n_1, n_2, d, v, \alpha_f, \varphi_0\} \quad (25)$$

式中： n_1 、 n_2 、 d 共同表示虚拟故障点的位置，即虚拟故障点位于线路 n_1n_2 距离 n_1 节点 d km处； α_f 表示故障点 f 处的折射系数。本文以式(26)虚拟故障波形匹配率 $G(X)$ 的倒数作为适应度函数。本文故障定位总体流程如图3所示。

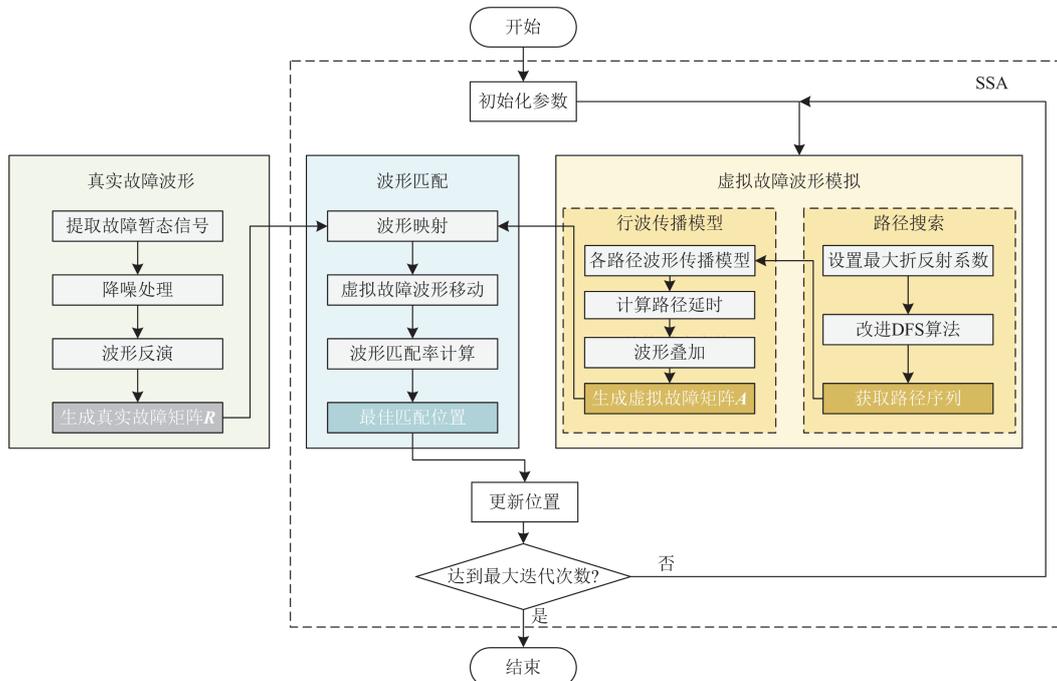


图 3 故障定位流程

Fig. 3 Fault location flow

$$f(X) = \frac{1}{G(X)} \quad (26)$$

4 仿真分析

4.1 仿真模型

在 PSCAD 中搭建如图 4 所示 500 kV 输电网模型, 图中红色圆点为设置的测量点, 线路采用频率相关相域模型。线路信息如表 1 所示, 仿真采样频率为 1 MHz。

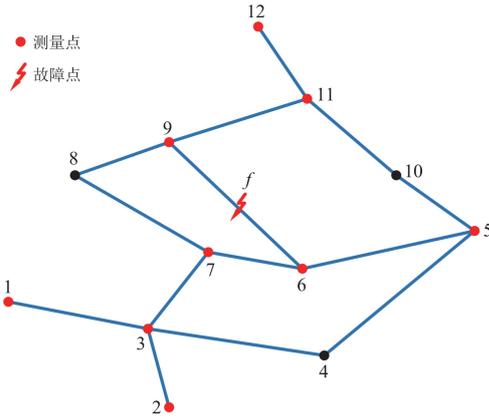


图 4 某 500 kV 高压输电线路

Fig. 4 A 500 kV high voltage transmission line

表 1 线路长度

Table 1 Length of lines

序号	线路	长度/km	序号	线路	长度/km
1	1-3	178.000	8	7-8	171.767
2	2-3	135.000	9	8-9	133.000
3	3-4	182.000	10	6-9	206.582
4	4-5	186.000	11	5-10	106.105
5	5-6	177.471	12	9-11	154.750
6	3-7	114.080	13	10-11	145.578
7	6-7	99.535	14	11-12	165.192

4.2 单测量点虚拟故障波形模拟结果

为清楚展示虚拟故障波形的模拟过程, 在线路 10 距 6 节点 56.582 km 处设置 AG 故障, 初相角为 -90° , 过渡电阻设置为 100Ω 。以 3 节点为例进行分析, 在相同位置设置虚拟故障点, 利用改进的 DFS 算法搜索从故障点到测量点 3 的所有路径(只列出前 10 个到达行波)如表 2 所示。表中 f 表示故障点, 其他数字表示网络中对应节点, \rightarrow 表示行波传播方向。

根据表 2 求出的所有路径, 通过行波传播模型模拟出各时刻到达行波形状, 结果如图 5 所示。根据表 2 中波头依次到达时刻, 将各个波头叠加合成虚拟故障波形, 默认初始波头到达时刻为 $0 \mu\text{s}$, 时间窗取 1.5 ms , 得到最终归一化处理后真实故障波

形和虚拟故障波形如图 6 所示。

表 2 故障点到测量点 3 行波路径

Table 2 Traveling wave path from fault point to measurement point 3

序号	路径	总长度/km	到达时间/ μs
1	f \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3	270.197	908
2	f \rightarrow 6 \rightarrow f \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3	383.361	1288
3	f \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3	469.267	1577
4	f \rightarrow 6 \rightarrow f \rightarrow 6 \rightarrow f \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3	496.525	1668
5	f \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3 \rightarrow 7 \rightarrow 3	498.357	1675
6	f \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 3	540.197	1815
7	f \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 3	568.847	1912
8	f \rightarrow 9 \rightarrow f \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3	570.197	1916
9	f \rightarrow 6 \rightarrow f \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3	582.431	1957
10	f \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow f \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 3	582.431	1957

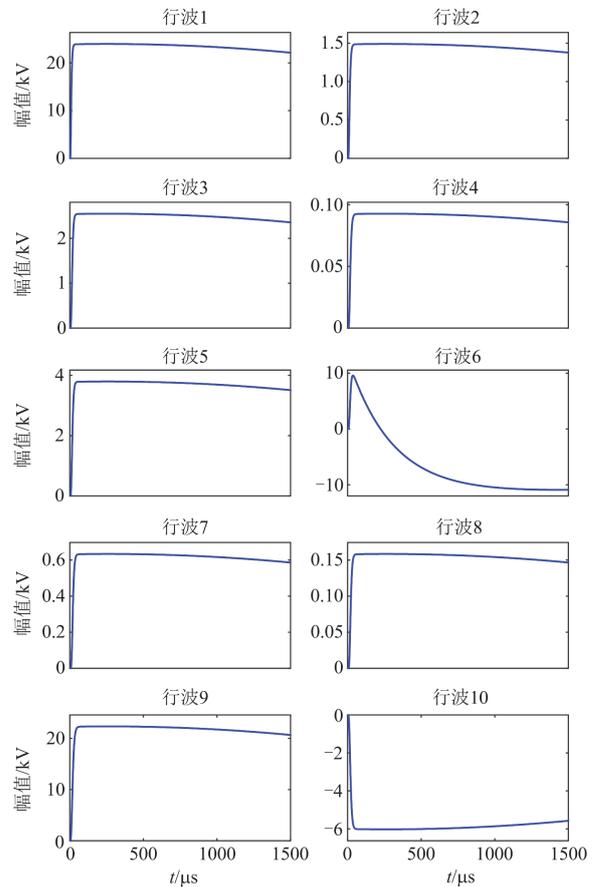


图 5 不同路径模拟波形

Fig. 5 Simulated waveforms for different paths

由图 6 可以看出, 当虚拟故障点与真实故障点重合时, 两者波形相似度极高, 不仅各波头到达时刻顺序一一对应, 而且波头幅值形状大小也一一对应, 此时 $\rho = 0.9966$, 验证了第 1 节行波传播各环节等效模型和行波传播路径搜索算法的精确性。

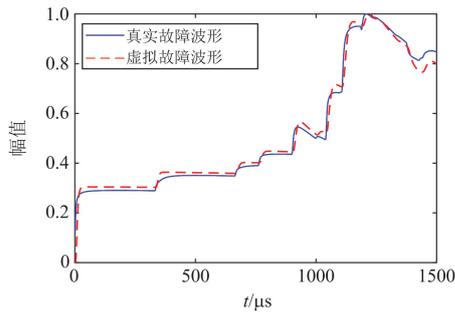


图 6 测量点 3 虚拟故障波形

Fig. 6 Virtual fault waveform of measurement point 3

当虚拟故障位置 1、2 分别设置在线路 10 距 6 节点 54.582 km 处和线路 7 距 6 节点 10 km 处, 此时虚拟故障波形如图 7 所示。两个虚拟故障波形与真实故障波形匹配率分别为 0.9932 和 0.8350。当虚拟故障位于故障点周围, 总体相似度较高, 当虚拟故障点与真实故障点重合时, 虚拟故障波形和真实故障波形匹配率最高。当虚拟故障远离真实故障点或在其他线路, 波形匹配率较低。

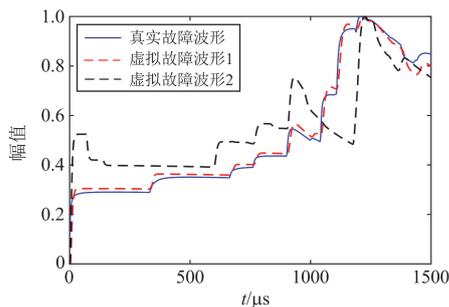


图 7 故障位置 1 和 2 时测量点 3 的虚拟故障波形

Fig. 7 Virtual fault waveforms of measurement point 3 at fault locations 1 and 2

4.3 多测量点故障定位结果

在网络拓扑中设置不同故障位置、不同故障类型、不同故障初相角、不同过渡电阻的故障, 故障工况如表 3 所示。参数优化结果和故障定位结果分别如表 4 和表 5 所示。

表 3 故障工况

Table 3 Fault condition

故障序号	故障线路	故障位置/km	故障类型	过渡电阻/ Ω	初相角/ $^\circ$
1	1	30	AG	10	5
2	4	10	BG	100	10
3	6	25	BC	200	15
4	7	70	ACG	300	30
5	8	80	AB	100	45
6	10	50	AG	200	60
7	14	20	AC	300	90

表 4 参数优化结果

Table 4 Parameter optimization results

故障序号	$w/(m/\mu s)$	故障相角/ $^\circ$	故障点折射系数
1	297.03	5.043	0.4531
2	297.05	10.942	0.6009
3	297.11	14.136	0.4365
4	296.98	30.034	0.7843
5	297.25	45.432	0.2109
6	297.21	60.744	0.6023
7	297.10	89.913	0.5398

表 5 故障定位结果

Table 5 Fault location results

故障序号	故障线路	故障位置/km	故障类型	绝对误差/m	匹配率
1	1	30	AG	80	8.6958
2	4	10	BG	41	8.7998
3	6	25	BC	39	8.8373
4	7	70	ACG	36	8.7462
5	8	80	AB	69	8.7165
6	10	50	AG	57	8.7421
7	14	20	AC	65	8.7709

故障 6 各测量点优化结果如图 8 所示。可以看出最终定位结果虚拟故障与真实故障整体匹配率高。由定位结果可以得出, 本文定位方法能够在不同故障工况下进行准确故障定位, 最大定位误差小于 100 m, 定位精度高。对波形误差进一步分析发

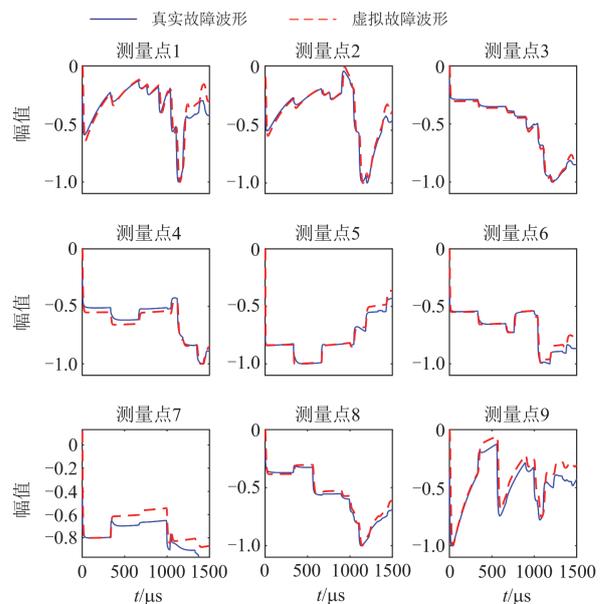


图 8 故障 6 各测量点虚拟故障和真实故障波形

Fig. 8 Virtual and real fault waveforms at each measurement point of fault 6

现, 网络结构对波形的影响较大, 网络参数存在微小误差, 对波形影响可以忽略。

4.4 定位算法的对比

为验证本文定位方法的优越性, 将本文方法与文献[18,32]所用方法在定位所需条件和定位精度两个关键指标上进行对比。仿真设置 4 例 AG 故障, 过渡电阻均设置为 100Ω 。故障 8: 线路 3 距 3 节点 10 km; 故障 9: 线路 5 距 5 节点 30 km; 故障 10: 线路 2 距 2 节点 50 km; 故障 11: 线路 9 距 9 节点 100 km。经验波速取值为 $294 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。不同方法所需定位条件和定位结果分别如表 6、表 7 所示。

表 6 所需定位条件

Table 6 Required conditions for positioning

方法	波速选取	波头标定	定位使用数据
文献[18]	经验波速	需要	初始波头到达时间
文献[32]	迭代求解	需要	初始波头到达时间
本文方法	迭代求解	自适应匹配	一段时间窗长度行波数据

表 7 不同定位方法结果对比

Table 7 Comparison of results of different locating methods

故障序号	文献[18]	文献[32]	本文方法
	定位误差/m	定位误差/m	定位误差/m
8	132	75	64
9	104	93	58
10	114	88	67
11	127	71	50

由表 6 可知: 本文所提定位方法避免了由波速选取和波头标定带来的定位误差, 但需使用一段时间窗长度的行波数据, 增加了方法的计算复杂度。由表 7 可知, 相较于其他定位方法, 本文所提方法定位精度更高。

5 结论

本文基于行波波形与故障位置一一对应关系, 提出一种基于虚拟故障波形匹配的行波网络定位方法。通过构造虚拟故障波形, 比较虚拟故障波形与真实故障波形的匹配率, 进而实现故障定位。具体结论如下:

1) 通过改进的 DFS 算法搜索虚拟故障点到测量点全部路径, 利用行波传播过程等效模型和路径信息模拟出虚拟故障波形;

2) 提出自适应波形匹配机制, 该机制无需标定波头到达时间, 降低了时间标定带来的定位误差;

3) 将定位问题转化为优化求解问题, 自适应求取准确行波波速, 降低了波速误差, 提高了定位精度。

参考文献

- [1] 王洪彬, 周念成, 王伟, 等. 基于行波模态分解的特高压直流输电线路双端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 109-120.
WANG Hongbin, ZHOU Niancheng, WANG Wei, et al. A double-terminal fault location method for UHVDC transmission lines based on traveling wave mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 109-120.
- [2] CHENG L, WANG T, WANG Y. A novel fault location method for distribution networks with distributed generations based on the time matrix of traveling-waves[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 1-12.
- [3] 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.
- [4] 刘志栋, 陈羽, 孙伶俐, 等. 基于波前陡度的直流输电线路单端行波测距方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 70-79.
LIU Zhidong, CHEN Yu, SUN Lingyan, et al. A single-ended traveling wave location method for DC transmission lines based on wavefront steepness[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 70-79.
- [5] 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.
- [6] 刘国胜, 李泽文, 夏翊翔, 等. 基于电流行波高频能量比值的全并联 AT 牵引网单端故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 99-108.
LIU Guosheng, LI Zewen, XIA Yixiang, et al. Single-end fault localization method for an all-parallel AT traction network based on high-frequency energy ratio of current traveling waves[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 99-108.
- [7] 曹璞璘, 黄美琴, 王云龙, 等. 交流线路避雷线融冰故障电磁暂态分析与间接式行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 11-21.
CAO Pulin, HUANG Meiqin, WANG Yunlong, et al. Electromagnetic transients analysis and indirect traveling wave fault location for ground wires of AC transmission line amid de-icing[J]. Power System Protection and

- Control, 2023, 51(10): 11-21.
- [8] 叶远波, 章昊, 王同文, 等. 基于电压行波极性特征的新能源送出线路保护方案[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 127-135.
YE Yuanbo, ZHANG Hao, WANG Tongwen, et al. Renewable energy line protection based on voltage traveling wave polarity[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 127-135.
- [9] 赵欣洋, 邹洪森, 杨晨, 等. 基于模量反向行波的接地极线路故障类型识别与定位方法[J]. 中国电力, 2025, 58(2): 33-42.
ZHAO Xinyang, ZOU Hongsen, YANG Chen, et al. Fault type recognition and localization method for grounding electrode line based on modulus backward traveling wave[J]. Electric Power, 2025, 58(2): 33-42.
- [10] 邓丰, 祖亚瑞, 黄懿菲, 等. 基于行波全波形主频分量的单端定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2156-2168.
DENG Feng, ZU Yaru, HUANG Yifei, et al. Research on single-ended fault location method based on the dominant frequency component of traveling wave full-waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2156-2168.
- [11] 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. Fault location algorithm of single-ended traveling wave for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 121-127.
- [12] 戴志辉, 秦昊宇, 李杭泽, 等. 基于反射系数和模型匹配的柔性直流电网单端量线路保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 101-109.
DAI Zhihui, QIN Haoyu, LI Hangze, et al. Single-end line protection based on reflection coefficient and model matching in flexible DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 101-109.
- [13] 闫宁宁, 王健, 秦诚意, 等. 基于双端行波频率变化特性的中低速磁浮交通供电轨故障定位方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1526-1537.
YAN Ningning, WANG Jian, QIN Chengyi, et al. Fault location method for power supply rails in low and medium speed magnetic levitation traffic based on double-ended traveling wave frequency variation characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1526-1537.
- [14] 束洪春, 杨竞及, 张广斌. 高压直流输电线路的双端行波频差比值故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6715-6727.
SHU Hongchun, YANG Jingji, ZHANG Guangbin. A novel fault-location method for HVDC transmission lines based on the ratio of two-terminal traveling wave frequency difference[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6715-6727.
- [15] 张广斌, 陈柏宇, 束洪春, 等. 基于时域波形特征认知的输电线路近端故障辨识与定位[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 146-156.
ZHANG Guangbin, CHEN Boyu, SHU Hongchun, et al. Identification and location of near-end faults in transmission lines based on time-domain waveform characteristic recognition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 146-156.
- [16] 邓丰, 曾祥君, 马士聪, 等. 基于分布式行波检测的广域网络故障定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1300-1307.
DENG Feng, ZENG Xiangjun, MA Shicong, et al. Research on wide area traveling wave fault location method based on distributed traveling wave detection[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1300-1307.
- [17] CHEN Y, LIU D, XU B. Wide-area traveling wave fault location system based on IEC61850[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 4(2): 1207-1215.
- [18] 李泽文, 唐平, 曾祥君, 等. 基于 Dijkstra 算法的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 162-168.
LI Zewen, TANG Ping, ZENG Xiangjun, et al. Method of traveling wave fault location based on Dijkstra algorithm in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 162-168.
- [19] 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.
- [20] 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. Fault location of multi-terminal transmission lines based on VMD and S transform[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(2): 126-134.
- [21] XIA Yixiang, LI Zewen, XI Yanhui, et al. Distribution network fault location method based on wide scale time window difference operator[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(3): 3446-3455.
- [22] 宁一, 王大志, 江雪晨, 等. 基于零模行波波速特性的配电网单相接地故障测距方法[J]. 中国电机工程学报,

- 2015, 35(增刊 1): 93-98.
- NING Yi, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. A single phase-to-ground fault location scheme for distribution networks based on zero-mode traveling wave velocity property[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 93-98.
- [23] BENATO R, SESSA S D, POLI M, et al. An online travelling wave fault location method for unearthed-operated high-voltage overhead line grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 2776-2785.
- [24] 丁佳立, 王昕, 郑益慧, 等. 利用线路中点电流检测的改进单端行波故障测距方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1814-1822.
- DING Jiali, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Improved method for fault location of single-ended traveling-wave using line midpoint current measurement[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1814-1822.
- [25] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于波形唯一和时-频特征匹配的单端行波保护和故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1475-1487.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-end traveling wave based protection and fault location method based on waveform uniqueness and feature matching in the time and frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1475-1487.
- [26] 李泽文, 刘基典, 席燕辉, 等. 基于暂态波形相关性的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 72-79.
- LI Zewen, LIU Jidian, XI Yanhui, et al. Fault location method for distribution network based on transient waveform correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 72-79.
- [27] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 29-32, 53.
- SHI Shenxing, DONG Xinzhou, ZHOU Shuangxi. Analysis of single-phase-to-ground fault generated traveling waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 29-32, 53.
- [28] 张晨浩, 闫吉飞, 吕艺超, 等. 不依赖电源特性的交流线路单端量保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 33-43.
- ZHANG Chenhao, YAN Jifei, LÜ Yichao, et al. Single-ended protection for AC line independent of power source characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 33-43.
- [29] 董新洲. 故障行波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [30] KIM J S, KIM C H, OH Y S, et al. An islanding detection method for multi-RES systems using the graph search method[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2722-2731.
- [31] XIA Y, LI Z, XI Y, et al. Accurate fault location method for multiple faults in transmission networks using travelling waves[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(6): 8717-8728.
- [32] 夏翊翔, 李泽文, 雷柳, 等. 基于动态虚拟故障的行波网络定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4868-4878.
- XIA Yixiang, LI Zewen, LEI Liu, et al. A new method of traveling wave network location based on dynamic virtual fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4868-4878.
- [33] 李泽文, 杜昱东, 林依勤, 等. 结合 Tikhonov 正则化的电压行波精确检测方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1049-1055.
- LI Zewen, DU Yudong, LIN Yiqin, et al. A method of voltage wave accurate detection based on Tikhonov regularization theory[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1049-1055.

收稿日期: 2024-10-22; 修回日期: 2025-02-12

作者简介:

李泽文(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: lzw0917@163.com

吴国瑞(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: wgr@stu.csust.edu.cn

(编辑 魏小丽)