

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230637

基于电磁时间反演 P 范数判据的配电网故障定位

刘青, 黄玉河, 王宇, 付瑶, 王乐之

(西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 目前电磁时间反演(electromagnetic time reversal, EMTR)多应用在单一线路故障定位, 且现有判据在高阻抗接地情况下效果不理想。针对上述问题, 基于 EMTR 故障定位原理和均匀传输线理论推导了传播过程中线路故障信号与测量信号的传递函数, 根据传递函数的相关性提出了 P 范数判据。利用 ATP-EMTP 搭建 10 kV 配电网线路, 对比了 2 范数与 P 范数判据在复杂配电网中的定位性能, 并验证了所提判据在混合配电网线路的适用性。最后, 分析了配电网发生低阻抗及高阻抗接地故障下 P 范数判据的鲁棒性。仿真结果表明, 该方法在过渡电阻高达 3 k Ω 的情况下能准确定位, 且定位精度高, 受噪声、故障类型和采样频率的影响小。

关键词: 电磁时间反演; 传递函数; P 范数; 配电网; 故障定位; 高阻抗接地

Distribution network fault location based on an electromagnetic time reversal P-parametric criterion

LIU Qing, HUANG Yuhe, WANG Yu, FU Yao, WANG Lezhi

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Electromagnetic time reversal (EMTR) is mostly applied to single line fault localization, and the existing criterion is not satisfactory in the case of high impedance grounding. To address the above problem, this paper derives the transfer function of the line fault and measurement signals in the propagation process based on the EMTR fault localization principle and uniform transmission line theory. It proposes a P-parametric criterion based on the correlation of the transfer function. The ATP-EMTP is used to build 10 kV distribution lines to compare the localization performance of the 2-parametric and P-parametric criterion in complex distribution networks, and to verify the applicability of the proposed criterion in hybrid distribution lines. Finally, the robustness of the P-parametric criterion is analyzed in the cases of occurrence of low and high impedance ground faults in distribution networks. Simulation results show that the method can locate accurately with transition resistances as high as 3 k Ω with high accuracy, and is less affected by noise, fault type and sampling frequency.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077167).

Key words: EMTR; transfer function; P-parametric; distribution network; fault location; high impedance grounding

0 引言

随着新型电力系统的发展, 配电网的供电安全和稳定运行将得到更多的重视。配电网作为连接输电系统和用户终端的桥梁, 其安全可靠运行直接关系到人们生产生活的质量。在发生故障后, 快速准确地定位故障位置, 有利于快速恢复供电, 减少停电损失, 提高电网运行的可靠性, 具有重要的社会意

义和经济效益^[1]。

配电网拓扑结构复杂、分支节点较多, 给故障定位带来很大困难。配电网常用的故障定位算法主要有: 分析故障前后电压或电流相量的阻抗法^[2-4]、测量和分析故障产生暂态行波信号的行波法^[5-6]、以及人工智能算法^[7-10]。阻抗法定位方法测量简单, 但其故障定位准确性会受到过渡电阻、线路参数、负载不平衡以及是否存在分布式电源等因素的影响。人工智能算法的定位容错性较高, 但需要大量的历史数据来训练模型, 制约了该方法在实际配电网中的应用。行波法作为目前主流的定位方法, 具有不受线路类型和过渡电阻影响的优点。但其定位的精

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077167); 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室开放基金项目资助(2021KJX03)

度会受到多种因素的影响, 如需要复杂的信号处理技术来提取故障行波波头, 在多个观测点之间存在时间同步^[11], 高阻抗故障时行波波头难以辨别以及在架空线-电缆混合线路中, 行波波速的不同造成的定位偏差^[12]。

近年来, 电磁时间反演法(electromagnetic time reversal, EMTR)由于具有独特的时空聚焦性和超分辨性而被应用到故障定位的领域中。国内外针对 EMTR 技术应用于传输线和输电线的故障定位研究已取得了一定的进展。文献[13]通过频域分析第一次将 EMTR 应用于传输线的故障定位中, 文献[14]将该方法从频域推广到时域中。文献[15]考虑了 EMTR 故障定位时电报方程由于传输线损耗不满足时逆不变性, 提出了 3 种不同的反演模型, 并进行了对比分析。文献[16]将时间反演技术应用在电缆局放源的定位中。文献[17-19]在同轴电缆缩小系统和实际电网上进行了故障定位试验, 取得不错的定位效果, 并在文献[20]将 EMTR 技术应用到多分支复杂传输线网络中的故障定位中。文献[21]基于 EMTR 理论提出了 3 种故障测距算法, 并仿真验证了不同的测距算法在交流和多端柔性直流输电线路中故障定位的准确性^[22-23]。文献[24]中提出一种将自适应滤波和 EMTR 相结合的故障定位算法, 并将其应用到简单配电路。

目前国内外学者的研究验证了 EMTR 技术在传输线网络以及交直流输电线路中的应用, 取得了诸多研究成果, 但对 EMTR 方法在复杂配电网、混合线路及高阻抗接地情况下的定位效果并未进行深入研究。因此本文提出一种考虑线路故障阻抗的配电网故障定位方法, 利用反演聚焦时刻故障电流的峰值进行定位, 通过理论分析和仿真验证了该方法的正确性。

1 基于电磁时间反演的故障定位理论分析

1.1 暂态信号正向传播阶段的等效模型

线路发生故障时, 在观测点对暂态信号进行记录, 电磁时间反演算法的核心是对所记录的暂态信号进行时间反演, 即改变测量信号在时间轴上的方向 $t \rightarrow -t$ 。在实际的故障定位中, 记录的仅为一段时间的暂态信号, 设所测信号的时间窗口为 T , 经过时间反演后为 $t \rightarrow T - t$ 。虽然电磁时间反演法是在时域中进行变换, 但同样适用于频域, 电磁时间反演在频域上为对记录信号取共轭。为了更好地对线路进行分析, 在频域中对 EMTR 进行公式推导。

当实际线路发生故障时, 称为电磁时间反演的

正向传播阶段。在图 1(a)建立长度为 L 的单相线路发生短路故障时的正向传播阶段等效示意图。图中: U_f 和 R_f 分别表示短路点处的故障电压信号和故障阻抗; x_f 表示实际故障位置; Z_0 和 Z_L 分别为线路两侧变压器的等效输入阻抗; U_0^{DT} 为正向传播阶段线路首端测量电压; Z_C 为线路的特性阻抗; γ 为线路的传播常数。

采用戴维南等效电路对于 $x \geq x_f$ 处的线路进行等效, 如图 1(b)所示。其中故障点右侧线路可以等效为输入阻抗 Z_{in} 。 U_f^{eq} 和 R_1^{eq} 分别为等效电源和等效电阻。

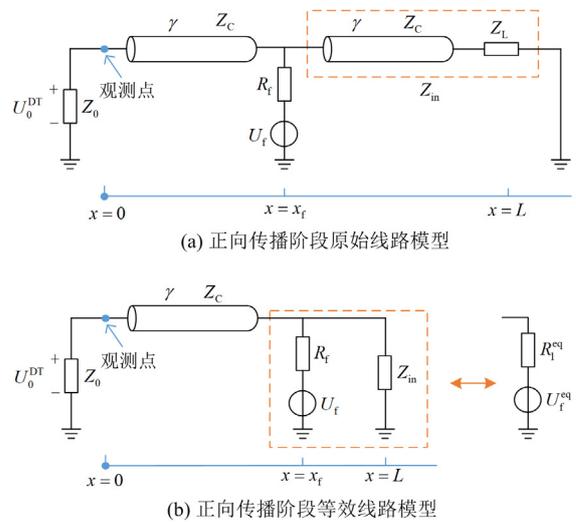


图 1 正向传播阶段线路模型

Fig. 1 Forward propagation stage circuit model

根据均匀传输线理论可知:

$$Z_{in}(s) = \frac{1 + \rho_L(s)e^{-2\gamma(L-x_f)}}{1 - \rho_L(s)e^{-2\gamma(L-x_f)}} \cdot Z_C(s) \quad (1)$$

$$R_1^{eq}(s) = \frac{R_f \cdot Z_{in}(s)}{R_f + Z_{in}(s)} \quad (2)$$

$$U_f^{eq}(s) = \frac{Z_{in}(s)}{R_f + Z_{in}(s)} \cdot U_f(s) \quad (3)$$

其中, 线路的首端反射系数 ρ_0 和末端反射系数 ρ_L 为

$$\rho_i = \frac{Z_i - Z_C}{Z_i + Z_C}, \quad i = 0, L \quad (4)$$

1.2 EMTR 线路传递函数数学模型推导

根据 1.1 节的分析, 在 $x = 0$ 观测点处观察到的电压表达式如式(5)所示, 上标 DT 表示电磁时间反演的正向传播阶段。

$$U_0^{\text{DT}}(s) = \frac{[1 + \rho_0(s)] \cdot [1 - \rho_{x_f}(s)] \cdot e^{-\gamma x_f}}{2[1 - \rho_0(s)\rho_{x_f}(s)e^{-2\gamma x_f}]} \cdot U_f^{\text{eq}}(s) \quad (5)$$

其中故障点的反射系数 $\rho_{x_f}(s)$ 为

$$\rho_{x_f}(s) = \frac{R_f^{\text{eq}}(s) - Z_C(s)}{R_f^{\text{eq}}(s) + Z_C(s)} \quad (6)$$

定义观测点和故障点的电压比值 H^{DT} 为正向阶段发生短路故障时的传递函数, 根据等效电路可得式(7)。

$$H^{\text{DT}}(s) = \frac{U_0^{\text{DT}}(s)}{U_f(s)} = \frac{(1 + \rho_0) \cdot (1 - \rho_{x_f}) \cdot e^{-\gamma x_f}}{2(1 - \rho_0 \rho_{x_f} e^{-2\gamma x_f})} \cdot \frac{Z_{\text{in}}(s)}{R_f + Z_{\text{in}}(s)} \quad (7)$$

将观测点的信号进行反演后从观测点注入电网, 该信号传播的过程称为反向传播阶段。 $I_0^{\text{DT}*}$ 为反向注入电流信号, 其中 * 为复共轭算子, 其表达式为

$$I_0^{\text{DT}*} = \frac{U_0^{\text{DT}*}}{Z_0} \quad (8)$$

由于实际故障位置未知, 设置 x_g 为任一猜测故障位置, R_f^{RT} 为猜测故障位置的阻抗, 考虑故障电阻的反向传播阶段线路模型如图 2 所示。

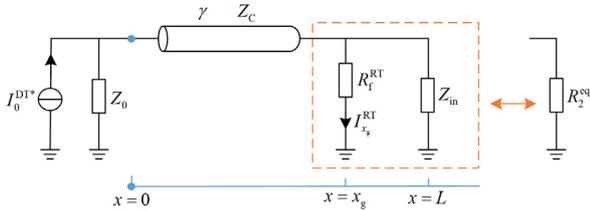


图 2 反向传播阶段线路模型

Fig. 2 Backpropagation stage circuit model

定义故障电流信号与反演电流信号的比值 H^{RT} 为反向阶段发生故障时的传递函数, 其中上标 RT 表示电磁时间反演的反向传播阶段, 可推导出其表达式为

$$H^{\text{RT}}(x_g, s) = \frac{I_{x_g}^{\text{RT}}(s)}{I_0^{\text{DT}*}(s)} = \frac{Z_{\text{in}}(s)(1 + \rho_0) \cdot (1 - \rho_{x_g}) \cdot e^{-\gamma x_g}}{2(Z_{\text{in}}(s) + R_f^{\text{eq}})(1 - \rho_{x_g} \rho_0 e^{-2\gamma x_g})} \quad (9)$$

式中, $I_{x_g}^{\text{RT}}$ 为反向传播阶段故障电流信号。

其中猜测故障位置的等效阻抗 R_2^{eq} 和反射系数 ρ_{x_g} 分别为

$$R_2^{\text{eq}}(s) = \frac{R_f^{\text{RT}} \cdot Z_{\text{in}}(s)}{R_f^{\text{RT}} + Z_{\text{in}}(s)} \quad (10)$$

$$\rho_{x_g}(s) = \frac{R_2^{\text{eq}}(s) - Z_C(s)}{R_2^{\text{eq}}(s) + Z_C(s)} \quad (11)$$

1.3 基于传递函数的 P 范数判据

根据正向传播阶段和反向传播阶段传递函数的定义, 反向传播阶段故障电流信号的频域表达式如式(12)所示。

$$I_{x_g}^{\text{RT}}(s) = U_f^*(s) H^{\text{DT}*}(s) H^{\text{RT}}(x_g, s) / Z_0 \quad (12)$$

时域表达式 $i_{x_g}^{\text{RT}}(t)$ 为

$$i_{x_g}^{\text{RT}}(t) = \int (U_f^*(s) H^{\text{DT}*}(s) H^{\text{RT}}(x_g, s) e^{j\omega t} / Z_0) d\omega \quad (13)$$

由电磁时间反演能量聚焦性可知, 当正向和反向传播阶段传递函数相等时, 假设的故障点为实际的故障点, 即当且仅当 $x_g = x_f$ 、 $R_f = R_f^{\text{RT}}$ 时, 式(7)和式(9)相等, 此时反向传播阶段故障电流信号的峰值达到极大值。由式(13)可推导出反演电流时域信号的极大值, 如式(14)所示, $i_{x_g}^{\text{RT}}(0)$ 为 $t=0$ 时刻猜测故障位置的故障电流。

$$|i_{x_g}^{\text{RT}}(t)| \leq \left| \int (U_f^*(s) |H^{\text{RT}}(s)|^2 e^{j\omega t} / Z_0) d\omega \right| = |i_{x_g}^{\text{RT}}(0)| \quad (14)$$

在实际故障定位中, 若采样时间窗口为 T , 在反演计算中则对应为 $t=T$ 时刻。

由于配电网发生故障时, 故障脉冲信号在网络中发生多次的折反射, 采用离散采样将不可避免地产生采样误差, 因此需要对故障信号进行预处理, 处理后的信号为

$$i(x_g, t) = i_{x_g}^{\text{RT}}(k \cdot \Delta t) - 2i_{x_g}^{\text{RT}}((k-1) \cdot \Delta t) + i_{x_g}^{\text{RT}}((k-2) \cdot \Delta t) \quad (15)$$

式中: Δt 为采样间隔; k 为样本数量, $k=3, 4, \dots, (T/\Delta t)$ 。

在反演传播阶段上根据定位精度定义 N 个猜测故障位置, 使用 $P(x_{g,m})$ 表示每个猜测故障位置反演聚焦时刻的故障电流峰值, 可以定义为 P 范数, 由式(14)和式(15)可得到 P 范数为

$$P(x_{g,m}) = |i(x_{g,m}, t)|^{t=T} \quad (16)$$

式中, $m=1, 2, \dots, N$ 。

计算每个猜测故障位置的 P 范数并进行归一化处理, 如式(17)所示, $P_{\text{nor}}(x_{g,m})$ 为猜测故障位置的归一化 P 范数。

$$P_{\text{nor}}(x_{g,m}) = \frac{P(x_{g,m})}{\max(P(x_{g,1}), \dots, P(x_{g,N}))} \quad (17)$$

2 EMTR 用于配电网故障定位步骤

通过上述分析, 基于电磁时间反演 P 范数判据

的配电网故障定位流程如图 3 所示。

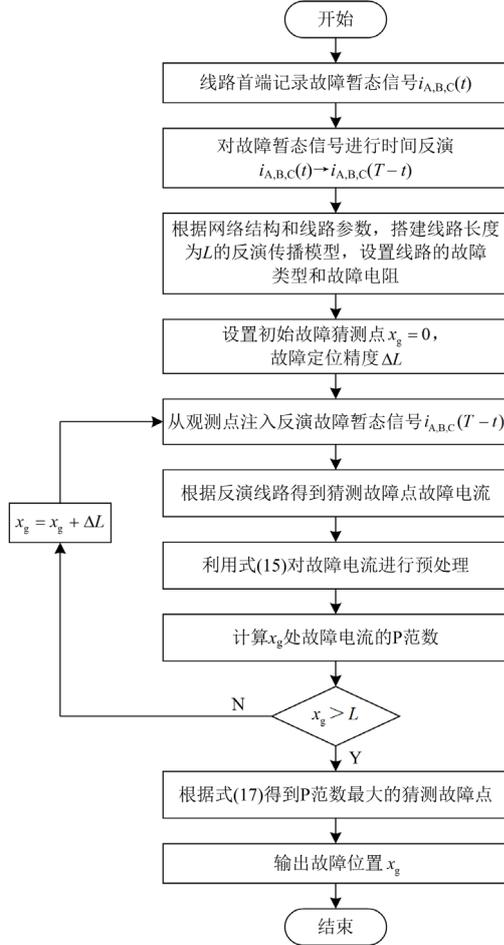


图 3 故障定位流程图

Fig. 3 Fault location flowchart

从图 3 可以看出, 故障定位主要分为 5 个步骤: 1) 线路故障发生时, 在线路首端记录故障暂态信号 $i_{A,B,C}(t)$, 并对暂态信号进行时间反演。2) 获取正向传播线路的网络结构和参数, 根据得到的线路参数, 搭建反向传播线路, 设置故障类型和故障电阻。3) 设定故障定位精度 ΔL 和初始猜测故障点 x_g , 将时间反演后的暂态信号从原观测点重新注入反向传播线路中, 仿真得到猜测故障位置处的故障电流信号。4) 利用式(15)对故障电流信号进行预处理, 计算猜测故障位置的 P 范数。5) 判断猜测故障位置是否达到线路长度, 如果没有达到, 将猜测故障位置加上故障定位精度并重新仿真获得故障电流; 如果达到, 利用式(17)计算各猜测故障位置的归一化范数, 范数最大的猜测故障位置即为真实故障位置。

3 典型配电网系统仿真分析

为了更好地对配电网系统进行描述, 本文分别

设置两种不同的工况。工况 1: 架空线配电网; 工况 2: 架空线-电缆混合配电网。利用电磁仿真软件 ATP-EMTP 对配电线路搭建仿真模型, 并将仿真计算结果导入 Matlab 软件中进行处理和分析。

3.1 架空线配电网

在 ATP-EMTP 中搭建电压等级为 10 kV 的典型配电网线路。为了尽可能地接近实际配电网线路的行波过程, 架空线路的仿真模型采用 LCC 线路中的频率相关线路模型, 这种线路模型能精确反演线路参数随频率变化的特性, 架空线的线路结构如图 4 所示。其中: ρ_e 为土壤电阻率; R_{DC} 为架空线的直流电阻。架空线的单位阻抗矩阵 Z_{ohl} 、导纳矩阵 Y_{ohl} 分别如式(18)和式(19)所示。

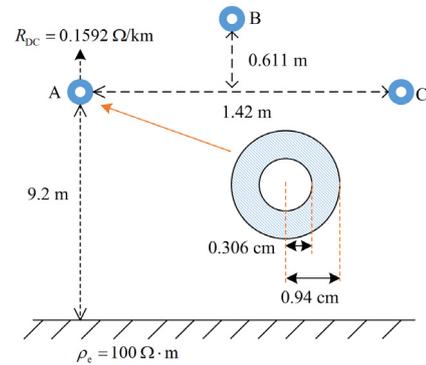


图 4 架空线线路结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of overhead line structure

$$Z_{ohl} = \begin{bmatrix} 0.21 + j0.74 & 0.05 + j0.43 & 0.05 + j0.41 \\ 0.05 + j0.43 & 0.21 + j0.74 & 0.05 + j0.43 \\ 0.05 + j0.41 & 0.05 + j0.43 & 0.21 + j0.74 \end{bmatrix} (\Omega/\text{km}) \quad (18)$$

$$Y_{ohl} = \begin{bmatrix} j2.87 & -j0.89 & -j0.62 \\ -j0.89 & j2.98 & -j0.89 \\ -j0.62 & -j0.89 & j2.87 \end{bmatrix} \times 10^{-6} (\text{S}/\text{km}) \quad (19)$$

架空线配电网拓扑结构以及长度如图 5 所示, 其中 0 节点代表信号测量点。在线路中每隔 1 km 设置一个猜测故障点, 设置仿真时间为 0.1 s, 在 0.05 s 时发生线路故障, 采样频率为 10 MHz, 故障类型为 A 相接地故障, 过渡电阻为 10 Ω 。线路发生故障后, 在信号测量点记录 0.05~0.055 s 时间段内暂态电流波形, 故障位置分别设置在 3 km 和 24 km。

目前的电磁时间反演技术在进行故障定位时大多采用计算反演故障电流的能量来进行判断, 这种判据被称为 2 范数判据, 其表达式如式(20)所示, $x_{f,real}$ 为 2 范数判据得到的真实故障位置。

$$x_{f,real} = \arg \left\{ \max_{x_g} \left\{ \left[\int_0^{2T} i_{x_g}^{RT}(x_g, t) dt \right]^{1/2} \right\} \right\} \quad (20)$$

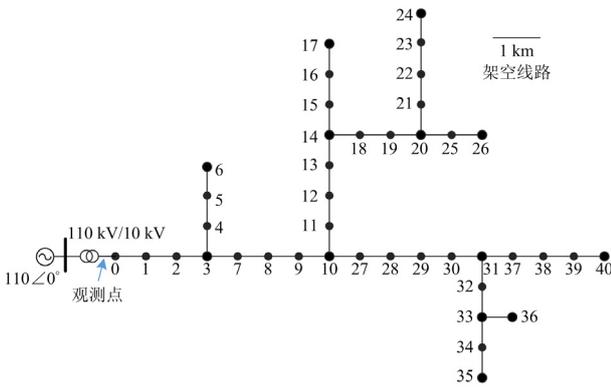


图 5 典型架空线配电网拓扑结构

Fig. 5 Typical overhead line distribution network topology

根据第 2 节中的故障定位步骤进行仿真，并计算故障电流信号的 2 范数和 P 范数。仿真结果如图 6 和图 7 所示。从图中可以看出，P 范数相比于 2 范数在猜测故障点的归一化范数值更小，并且在 24 km 处发生故障时，只有 P 范数可以判断出故障

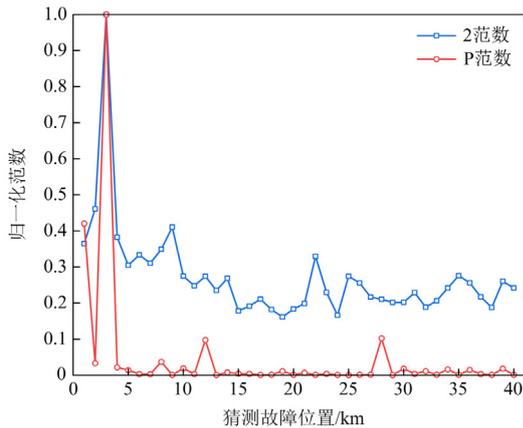


图 6 故障位置为 3 km 时故障定位结果

Fig. 6 Fault location results when the fault location is 3 km

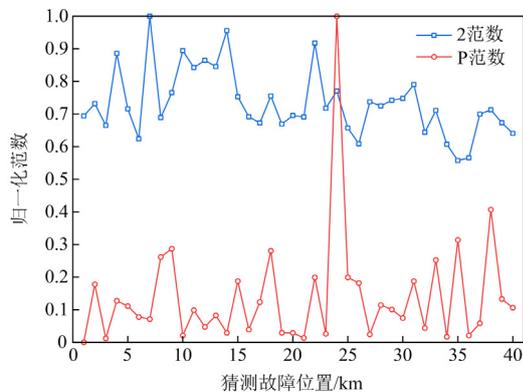
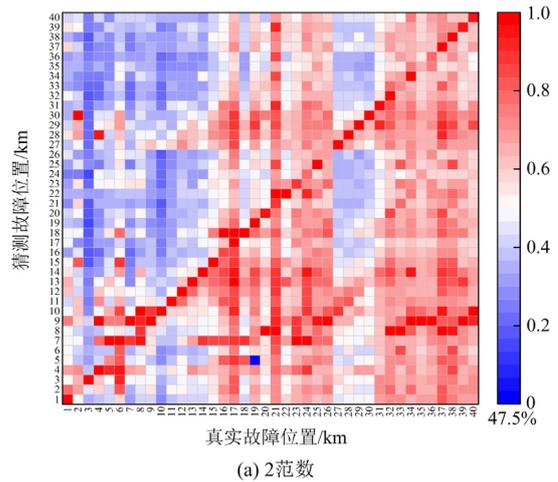


图 7 故障位置为 24 km 时故障定位结果

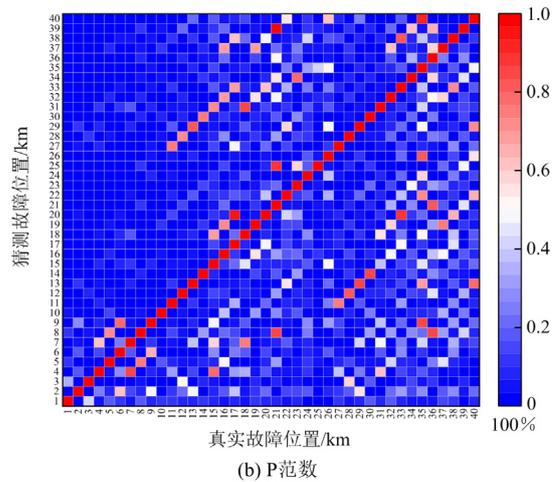
Fig. 7 Fault location results when the fault location is 24 km

位置。这是由于 2 范数虽然避免了对故障信号细节的提取，但对于信号中包含的噪声信号也进行了计算，并且随着配电网距离的增加，故障暂态信号在传播过程中能量受到衰减，因此，在采用故障电流信号的 2 范数进行配电网故障定位时存在判断不出来故障位置的问题。

为了对所提方法定位的准确性进行验证，将配电网线路中所有节点分别设置为真实故障点，按照电磁时间反演步骤进行定位，定位结果如图 8 所示。为了更好地对故障定位的效果进行比较，定义定位正确率=正确故障定位数/故障点位置总数。从仿真结果可以看出，采用 2 范数进行故障定位的准确率较低，只有 47.5%，并且在其他猜测故障点的归一化范数也较大，在进行故障定位时容易造成误判。而 P 范数在线路不同区段发生故障时，均能准确定位出故障位置。



(a) 2范数



(b) P范数

图 8 架空线配电网故障定位结果

Fig. 8 Fault location results of overhead line distribution network

3.2 架空线-电缆混合配电网

由于架空线与电缆线路参数的不同, 导致行波波速在这两种线路中也明显不同, 因此在 ATP-EMTP 中搭建架空线-电缆混合配电网线路模型进行仿真分析。线路简化模型如图 9 所示。电缆线路模型采用 LCC 线路中的 Bergeron 模型, 三芯电缆的物理结构见图 10。电缆线路单位阻抗矩阵 Z_{cable} 、导纳矩阵 Y_{cable} 分别如式(21)和式(22)所示。

$$Z_{\text{cable}} = \begin{bmatrix} 2.4 + j12.2 & 2.1 + j10.8 & 2.1 + j10.8 & 1.5 + j10.1 \\ 2.1 + j10.8 & 2.4 + j12.2 & 2.1 + j10.8 & 1.5 + j10.1 \\ 2.1 + j10.8 & 2.1 + j10.8 & 2.4 + j12.2 & 1.5 + j10.1 \\ 1.5 + j10.1 & 1.5 + j10.1 & 1.5 + j10.1 & 1.5 + j10.1 \end{bmatrix} \times 10^{-2} (\Omega/\text{m}) \quad (21)$$

$$Y_{\text{cable}} = \begin{bmatrix} j6.6 & -j1.8 & -j1.8 & -j3.1 \\ -j1.8 & j6.6 & -j1.8 & -j3.1 \\ -j1.8 & -j1.8 & j6.6 & -j3.1 \\ -j3.1 & -j3.1 & -j3.1 & j109.9 \end{bmatrix} \times 10^{-6} (\text{S}/\text{m}) \quad (22)$$

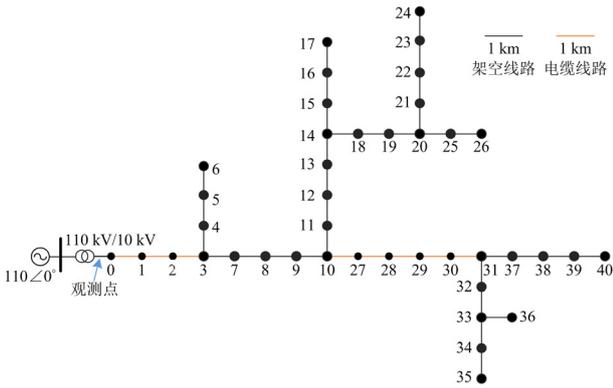


图 9 架空-电缆混合配电网线路模型

Fig. 9 Line model of overhead-cable hybrid distribution network

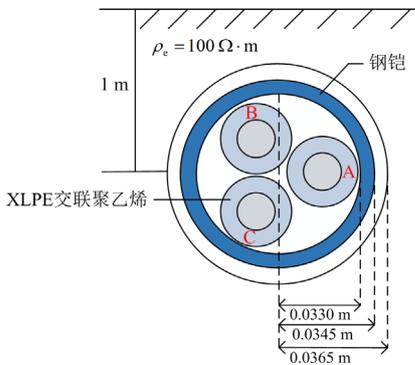


图 10 三芯电缆物理结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the physical structure of a three-core cable

为了对混合配电网不同故障位置下所提方法故障定位的准确度进行分析, 对混合配电网线路进行仿真, 结果如图 11 所示。可以看出, 归一化 P 范数最大值出现在图形对角线位置, 说明在混合配电网线路不同位置发生故障时所提方法均能准确定位, 并且其他猜测故障点的归一化范数较小, 不存在定位盲区。

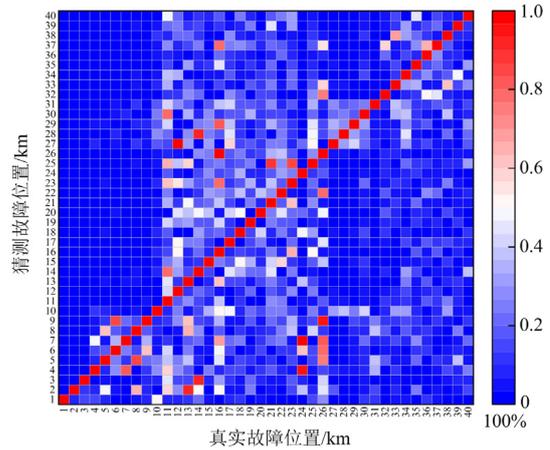


图 11 混合配电网故障定位结果

Fig. 11 Fault location results of hybrid distribution network

4 鲁棒性分析

4.1 不同过渡电阻

为了研究不同过渡电阻值对反演结果的影响, 在图 5 所示架空线配电网线路中进行仿真分析, 设置在 10 km 处发生 A 相短路接地故障, 在正向传播阶段分别设置不同的故障电阻为 10 Ω、100 Ω 和 300 Ω, 故障定位结果如图 12 所示。可以看出, 在低过渡阻抗下所提方法能够准确定位出故障位置。

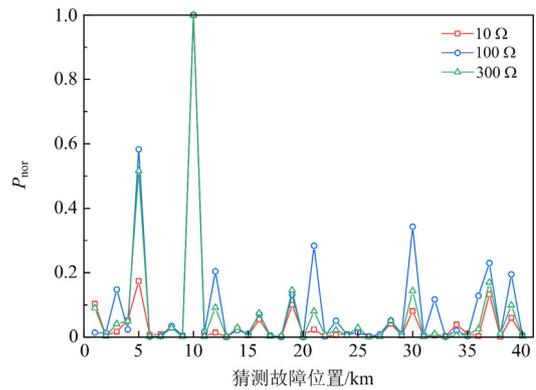


图 12 低过渡电阻对故障定位结果的影响

Fig. 12 Effect of low transition resistance on fault location results

实际配电网当通过树枝、草地、沥青、沙子等非金属导体介质接地时, 过渡电阻呈现明显的高阻

态, 其阻值通常超过 500 Ω。由于过渡电阻较大, 导致故障暂态信号较弱, 难以进行故障定位, 因此进一步讨论配电网发生高阻故障定位效果。在上述故障位置分别设置过渡电阻为 10 Ω 和 1 k Ω, 采用传统 2 范数判据进行故障定位, 定位结果如图 13 所示。从图 13 中可以看出, 在使用 2 范数进行故障定位时, 在低阻抗下传统 EMTR 方法还能够判断出故障位置, 但在高阻抗时则会失效。

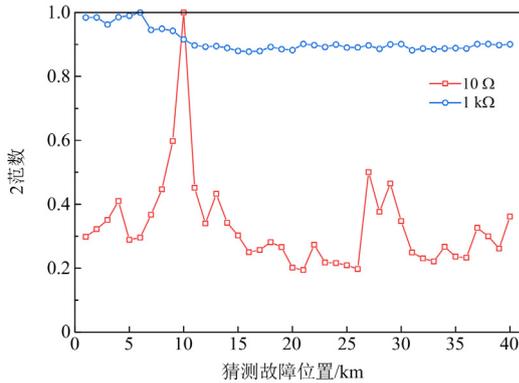


图 13 不同故障电阻时传统 EMTR 方法定位结果
Fig. 13 Location results of traditional EMTR method under different fault resistance

为了说明所提方法在高阻抗故障下定位的有效性, 在上述配电网线路中分别将过渡电阻设置为 1 k Ω、2 k Ω 和 3 k Ω, 利用 P 范数进行故障定位, 定位结果如图 14 所示, 可以看出在配电网发生不同高阻故障时所提方法依然能够准确定位故障位置。

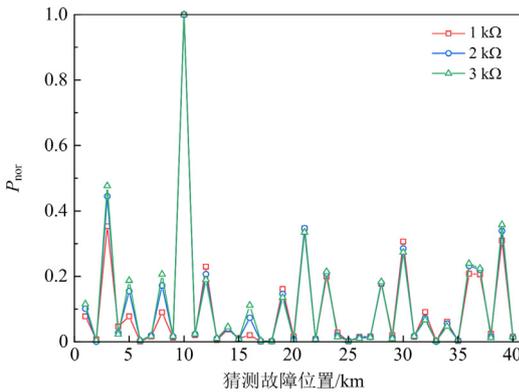


图 14 高过渡电阻对故障定位结果的影响
Fig. 14 Effect of high transition resistance on fault location results

4.2 不同信噪比的噪声

考虑配电网实际运行情况下噪声对测量的暂态信号的影响, 评估不同信噪比(signal to noise ratio, SNR)下所提方法的准确性。分别将 SNR 为 10、20

和 30 dB 的噪声信号添加到测量的暂态信号中, 图 15 为故障阻抗为 10 Ω 时不同 SNR 的噪声影响下的定位结果。从图 15 可以看出, 与其他两种情况相比, 由于 SNR 为 10 dB 的暂态信号中噪声信号比例的增加, 导致归一化 P 范数分布向上移动, 但在高噪声的情况下, 归一化 P 范数的最大值仍出现在实际故障位置处。

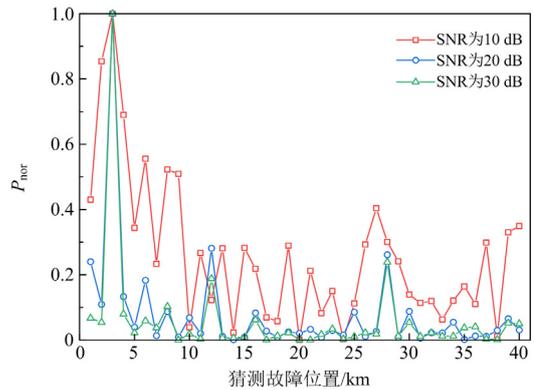


图 15 不同 SNR 噪声对定位结果的影响

Fig. 15 Effects of different SNR noises on positioning results

4.3 不同采样频率

理论上, 采样频率越高, 故障暂态信号中包含行波的折、反射特性以及故障信息越多, 对故障信息的获取就越完整, 对数据处理以及相关设备的要求越高。考虑到故障定位的精确度和经济性, 在仿真中设置不同的采样频率, 设置仿真位置为 30 km, 过渡电阻为 10 Ω。故障定位相对误差 δ 的计算公式为

$$\delta = \left| \frac{x_g - x_f}{L} \right| \times 100\% \quad (23)$$

故障定位结果如表 1 所示, 故障定位结果的相对误差会随着采样频率的提高而降低。

表 1 不同采样频率下的故障定位结果

Table 1 Fault location results at different sampling frequencies

f_s /MHz	x_f /km	x_g /km	δ /%
0.3	30	29.7	0.75
0.5	30	29.9	0.25
1	30	29.9	0.25
5	30	30	0
10	30	30	0

4.4 不同的故障类型

对配电网不同区段发生的不同类型故障进行故障定位, 其中 AG 代表 A 相接地故障, AB 代表 A、B 相短路故障, ABG 代表 A、B 相接地故障, ABC 代表 A、B、C 三相短路故障, 定义 δ_{max} 为故障类型

中最大的相对误差。不同故障类型下的故障定位结果如表 2 所示, 线路在不同位置发生不同类型的故障时, 均不会对定位结果造成显著的影响, 定位最大的相对误差均不超过 0.5%, 能够准确定位到故障位置。

表 2 不同故障类型下的故障定位结果

Table 2 Fault location results under different fault types

x_f/km	故障类型				$\delta_{\max}/\%$
	AG	AB	ABG	ABC	
5	5.01	5.01	5.01	4.98	0.050
9	8.94	8.97	9.01	8.88	0.300
18	18.03	18.06	17.99	18.07	0.175
25	24.97	24.95	25.01	24.97	0.125
30	30.02	30.06	29.98	30.10	0.250
38	37.94	38.08	37.98	37.91	0.225

5 结论

本文考虑到线路故障阻抗对故障信号的影响, 根据 EMTR 线路传递函数相关性和能量聚焦性, 提出了基于电磁时间反演 P 范数判据的配电网故障定位新方法。在 10 kV 三相复杂配电网线路上进行时域仿真实验, 仿真结果表明本文所提出的方法适用于多分支混合复杂配电网线路。此外, 考虑到不同的影响因素, 评估了所提方法的故障定位效果。结果表明, 即使在线路故障阻抗高达 3 k Ω 时, 所提方法也可以定位故障位置。在信噪比为 10 dB 的高噪声环境中, 该方法对配电网故障定位仍具有良好的鲁棒性, 并且所提方法受采样频率和故障类型的影响较小。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 齐郑, 黄朝晖, 陈艳波. 基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 54-62.
QI Zheng, HUANG Zhaohui, CHEN Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 54-62.
- [3] 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.
- [4] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于节点电压差值的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 106-116.
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. A novel fault location method employing node voltage difference value for a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 106-116.
- [5] 李练兵, 孙腾达, 曾四鸣, 等. 基于多端行波时差的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 140-147.
LI Lianbing, SUN Tengda, ZENG Siming, et al. Fault location method for distribution networks based on traveling wave time difference[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 140-147.
- [6] 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.
- [7] 麦章渠, 曾颖, 张禄亮, 等. 基于改进 Harris 鹰优化算法的有源配电网故障定位[J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 104-111.
MAI Zhangqu, ZENG Ying, ZHANG Luliang, et al. Fault location of active distribution network based on improved Harris Hawks optimization algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(11): 104-111.
- [8] 郑聪, 周海峰, 郑东强, 等. 基于改进多元宇宙算法的主动配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 169-179.
ZHENG Cong, ZHOU Haifeng, ZHENG Dongqiang, et al. An active distribution network fault location method based on improved multi-universe algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 169-179.
- [9] 杨国华, 冯骥, 柳萱, 等. 基于改进秃鹰搜索算法的含分布式电源配电网分区故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 1-9.
YANG Guohua, FENG Ji, LIU Xuan, et al. Fault location of a distribution network hierarchical model with a distribution generator based on IBES[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 1-9.
- [10] 张颖, 周韧, 钟凯. 改进蚁群算法在复杂配电网故障区段定位中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 224-228.
ZHANG Ying, ZHOU Ren, ZHONG Kai. Application of

- improved ant colony algorithm in fault-section location of complex distribution network[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 224-228.
- [11] 杨晓丽, 舒勤. 基于单-双端行波测距原理的配网多端故障定位[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(4): 91-96.
YANG Xiaoli, SHU Qin. Distribution network fault location based on single-and double-end traveling wave distance measurement principle[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(4): 91-96.
- [12] 刘亮, 曾祥君, 邓名高, 等. 基于线路归一和网络解耦的配网故障测距方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 243-249.
LIU Liang, ZENG Xiangjun, DENG Minggao, et al. Fault distance measurement method in distribution network based on line normalization and network decoupling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 243-249.
- [13] MANESH H M, LUGRIN G, RAZZAGHI R, et al. A new method to locate faults in power networks based on electromagnetic time reversal[C]// IEEE 13th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), June 17-20, 2012, Cesme, Turkey: 469-474.
- [14] RAZZAGHI R, LUGRIN G, MANESH H, et al. An efficient method based on the electromagnetic time reversal to locate faults in power networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1663-1673.
- [15] LUGRIN G, RAZZAGHI R, RACHIDI F, et al. Electromagnetic time reversal applied to fault detection: The issue of losses[C]// 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Aug 16-22, 2015, Dresden, Germany: 209-212.
- [16] 汪先进, 周凯, 谢敏, 等. 基于时间反演相位法的电力电缆局部放电定位[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 783-790.
WANG Xianjin, ZHOU Kai, XIE Min, et al. Research on partial discharge source location for power cables based on time reversal phase method[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 783-790.
- [17] WANG Z, HE S, RAZZAGHI R, et al. A full-scale experimental validation of electromagnetic time reversal applied to locate disturbances in overhead power distribution lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5): 1562-1570.
- [18] HE S, WANG Z, RAZZAGHI F, et al. Norm criteria in the electromagnetic time reversal technique for fault location in transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5): 1240-1248.
- [19] WANG Z, RAZZAGHI R, PAOLONE M, et al. Time reversal applied to fault location in power networks: Pilot test results and analyses[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 114: 142-615.
- [20] 和少寅, 谢彦召, 宋宇, 等. 基于电磁时间反演传递函数相关性的传输线网络故障定位方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1851-1859.
HE Shaoyin, XIE Yanzhao, SONG Yu, et al. Fault location method in transmission line network based on transfer function correlation of electromagnetic time reversal[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1851-1859.
- [21] 张希鹏, 邵能灵, 郑晓冬, 等. EMTR 理论在电力系统线路故障测距中的应用基础 I: 理论部分[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 845-854.
ZHANG Xipeng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Application basis of EMTR theory for line fault location in power system I: theoretical part[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 845-854.
- [22] 张希鹏, 邵能灵, 郑晓冬, 等. EMTR 理论在电力系统线路故障测距中的应用基础 II: 仿真部分[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 854-863.
ZHANG Xipeng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Application basis of EMTR theory for line fault location in power system II: simulation part[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 854-863.
- [23] 张希鹏, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于 WEMTR 的柔性直流输电线路故障测距[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 589-598.
ZHANG Xipeng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Fault location in VSC-HVDC transmission lines based on WEMTR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 589-598.
- [24] 张明一, 黎雄, 孙元章, 等. 一种基于自适应滤波的时域反演故障定位方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(10): 934-941.
ZHANG Mingyi, LI Xiong, SUN Yuanzhang, et al. A time reversal fault location method based on adaptive filtering[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(10): 934-941.

收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-10-31

作者简介:

刘青(1978—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统电磁暂态分析; E-mail: liuqing623nn@163.com

黄玉河(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统配电网故障定位。E-mail: 164205726@qq.com

(编辑 魏小丽)