

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.013

基于线路参数灵敏度的EMTR配网故障定位性能影响分析

王科¹, 胡逸^{1,2}, 徐肖伟¹, 杨庆²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650220; 2. 重庆大学输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 文中提出了一种基于故障电流能量镜像最小值的电磁时间反演故障定位方法,但目前该方法要求反向阶段建立的仿真模型与正向阶段故障时的实际线路模型参数保持一致,从而限制了其在实际中的应用。因此基于该方法在正向阶段和反向阶段模型参数的差异,文中利用PSCAD仿真软件搭建了10 kV配电网线路模型并对其进行频域理论推导,通过仿真分析了不同线路参数灵敏度下该方法的定位性能,并搭建了同轴电缆试验模型进行验证。结果表明:①相比于正向阶段的线路电感参数,当反向阶段的线路电感参数设置在0.95~1.1倍范围内,该方法都能够实现高阻接地故障定位;②该方法可实现实际发生未知接地故障电阻的精确定位,且为提高其整体的定位性能,建议在反向阶段线路横向分支中设置高阻假想接地故障;③通过搭建的同轴电缆试验模型分析了故障阻抗未知情况下对方法故障定位性能的影响,综合故障定位误差最大为5 m。
关键词: 故障电流能量镜像最小值; 电磁时间反演; 线路参数灵敏度; 故障定位; 定位性能

Performance Impact Analysis of EMTR-based Fault Location in Distribution Networks Considering Line Parameter Sensitivity

WANG Ke¹, HU Yi^{1,2}, XU Xiaowei¹, YANG Qing²

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650220, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In this paper, an electromagnetic time reversal fault location method based on the minimum mirror value of fault current energy is proposed. However, this method currently requires that the simulation model set up during the reverse stage to be consistent with the actual line model parameters at the time of the fault during the forward stage, which limits its practical application. Therefore, based on the discrepancy in model parameters between the forward and reverse stages of this method, the PSCAD simulation software is used in this paper to set up a 10 kV distribution network line model and its frequency-domain theoretical derivation is conducted. Through simulation, the localization performance of this method under different line parameter sensitivities is analyzed, and a coaxial cable experimental model is constructed for validation. The results show that: ① When the line inductance parameters in the reversed stage are adjusted in the range of 0.95 times to 1.1 times compared to the line inductance parameters in the direct stage, the method is able to accomplish ground fault location with high resistance. ② The method can achieve accurate location of the real occurrence of an unknown ground fault resistance, and it is suggested that a high-resistance fictitious ground fault can be set in the line's lateral branch in the reversed stage so to increase its overall location performance. ③ Using the constructed coaxial cable test model, the impact of unknown fault impedance on the fault location performance of the method is analyzed, with a maximum comprehensive fault localization error of 5 m.

Key words: minimum mirror value of fault current energy; electromagnetic time reversal; line parameter sensitivity; fault location; localization performance

收稿日期:2025-11-08; 修回日期:2026-01-20

0 引言

配电网是电力系统输送电能到用户的最后一步,是发电、输电、变电的立足点,其安全稳定的运行与国民生活质量密不可分。随着负荷接入数量的增加^[1],配电网网络结构变得越来越复杂,这也对供电的安全性、可靠性和经济性和故障的定位、抢修等方面提出了更高的要求^[2]。因此需要快速准确地解决配电网故障,从而提高供电的可靠性和用户的幸福度。

目前常见的配网故障定位方法根据原理主要分为阻抗法^[3-5]、行波法^[6-8]和机器学习法^[9-11]三类方法。阻抗法是根据故障点到线路保护之间的距离与短路阻抗之间的线性关系,从而推断出故障点的位置,但存在伪故障点的缺点。行波法是通过故障的暂态高频信号分量进行分析来识别行波波头,再根据测距公式来计算故障距离。根据不同的测量端口数可分为单端法^[12]和多端法^[13]。单端法在识别初始行波波头和反射行波波头时会出现混叠的情况,甚至导致定位方法失效。多端法虽相对单端法能提高故障定位的精度,但所需的工程成本较高,测量参考时间的同步也存在困难。机器学习法基于配电网状态的可用信息,通过优化算法来实现故障测距,但需要大量样本来训练模型。

时间反演法自从被引入电磁学后,成为了国内外学者讨论的热点,并在无线通信^[14]、闪电定位^[15-16]、故障定位^[17]等领域得到了应用。国内外学者针对故障定位方法主要的研究重点在行波法,但该方法需对故障行波波头进行精确识别,而电磁时间反演法由于不受噪声、行波波速等因素影响,而且无需对故障行波波头精确识别从而被广泛应用于电力系统故障定位中。Manesh等人^[18]率先提出了电磁时间反演(electromagnetic time reversal, EMTR)输电线故障定位方法,在正向阶段实际线路模型中将采集到的由接地故障产生的线路终端暂态电压信号进行时间反转,并在反向阶段中使用诺顿等效电路将反演信号重新注入与正向阶段相同拓扑结构的网络中。在反向阶段沿线设置不同的短路支路,短路支路故障电流能量最大值的位置对应于实际故障位置。Razzaghi等人^[19]验证了EMTR方法在同轴电缆试验模型、IEEE 34节点模型以及三相架空线—电缆混合模型中定位的有效性。随着相关学者研究的深入,该理论也应用在高压电缆短路^[20]、径向网状交直流网络^[21]、串补传输线系统^[22]故障定位中并取

得了较好的定位效果。An等人^[23]提出了基于故障电压能量镜像最小值判据的EMTR方法,能够较好的解决不含分支情况下高阻接地故障定位问题。Zhuang等人^[24]提出了一种直接卷积的EMTR方法,并验证该方法的可行性。杨欢红等人^[25]利用离散二进小波对时间反转故障暂态信号进行重构,并验证了该方法在主馈线及T接线路中故障的定位的有效性。

目前相关学者将该方法运用在配电网线路接地故障定位时,需将发生故障时正向阶段实际线路模型与反向阶段所建立的仿真模型保持一致,但在实际应用中,一方面配电网的故障相关信息随时间可能会发生改变(趋肤效应导致线路电感参数发生改变),另一方面由于正向阶段模型中实际接地故障阻抗值未知,因此反向阶段所建立的仿真模型中横向分支故障阻抗值也不确定,所以文中研究不同线路电感参数改变值及不同故障阻抗下该方法的定位性能对以后实际应用具有参考价值。第1节中介绍了时域反演的基本理论,并对基于故障电流信号能量镜像最小值(mirrored minimum fault current signal energy, MMFCSE)判据的双端EMTR进行频域下的推导。在第2节中讨论了在不同线路参数灵敏度(线路电感参数以及故障阻抗)下对该方法定位性能的影响。第3节中搭建基于RG-58同轴电缆的低压试验模型,分析了故障阻抗未知情况下对方法故障定位性能的影响。第4节中介绍了主要结论。

1 双端EMTR故障定位方法的建模

1.1 时域反演方法原理分析

EMTR理论的核心是对所测量的信号基于时间方向的逆转,见式(1)

$$t \mapsto -t \quad (1)$$

如果一个方程在时间反转算子计算后是不变的,那么它被定义为“时间反转不变量”。多导体无损传输线的电压波动方程为

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} U(x, -t) - L'C' \frac{\partial^2}{\partial t^2} U(x, t) = 0 \quad (2)$$

式(2)中: $U(x, t)$ 为在 t 时刻传输线上 x 处的相电压; L' 和 C' 分别为单位长度的电感值和电容值。经过时间反转后方程为

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} U(x, -t) - L'C' \frac{\partial^2}{\partial t^2} U(x, -t) = 0 \quad (3)$$

因此,如果 $U(x, t)$ 是传输线电压波动方程的解,那么 $U(x, -t)$ 也是解,即波动方程在时间反转变换下是不变的。

在实际应用过程中,需要记录瞬时电压信号在

时间0到T的变化,再对该信号进行时间反转。为了使得反转变量的参数在所测时间范围内为正值,还要将额外的延迟时间T考虑在内

$$u(x,t) \mapsto u(x,T-t) \quad (4)$$

式(4)中:T为延迟时间;u为信号;x为信号所处位置;t为时间。

1.2 频域下双端EMTR分析

基于双端EMTR的故障定位方法主要包括以下3个步骤:①正向阶段,在线路两端对由故障产生的电压暂态信号进行测量。②反向阶段,将测量的暂态信号进行反演处理(时域内时间反向,频域内进行共轭处理),其中一个信号乘以-1,从相同的测量点将经过反演处理的信号注入到与实际一致的配电网仿真模型。③故障定位阶段,采用基于MMFCSE的判据量化反演时间阶段不同猜测故障位置的聚焦能量,并通过该量化指标实现对实际故障位置的预测。

为了更直观地描述EMTR的原理,首先是正向阶段,见图1,选择单导体无损传输线,线路长度L, Z_c 为传输线特征阻抗。假设两条线路的末端都接电力变压器,用阻抗 Z_0 和 Z_1 来表示, x_f 为故障位置。由

于该线路是无损的,因此信号的衰减是由故障阻抗和 Z_0 、 Z_1 所引起的。

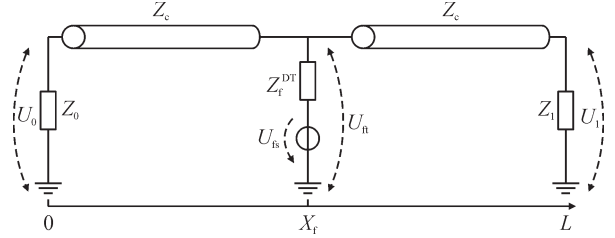


图1 正向时间阶段电路模型

Fig. 1 Direct time stage circuit model

针对图1电路拓扑结构,基于戴维南等效定理进行化简,以推导线路左侧暂态电压信号频域表达式为例进行说明见图2。如图2(a),将故障点右侧包含传输线特征阻抗和末端阻抗部分用等效输入阻抗 Z_{in2d} 代替,见式(5),对于无损传输线 $\gamma = j\beta$ 。

$$Z_{in2d} = \frac{Z_c \times [1 + \rho_1 e^{-2\gamma(L-x_f)}]}{1 - \rho_1 e^{-2\gamma(L-x_f)}} \quad (5)$$

然后将故障阻抗、故障电压源与右侧等效输入阻抗 Z_{in2d} 应用戴维南等效定理,得到新的等效电阻 Z_1 和等效电压源 U_{fs} ：

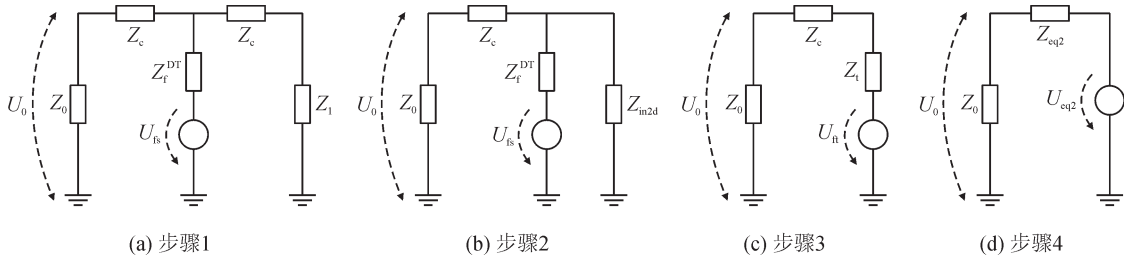


图2 基于戴维南等效定理推导输电线路左端暂态电压表达式

Fig. 2 Derivation of transient voltage expression at the left end of the line based on Thevenin equivalent

$$Z_{t1} = \frac{Z_f^{DT} \times Z_{in2d}}{Z_f^{DT} + Z_{in2d}} \quad (6)$$

$$U_{ft} = \frac{Z_{in2d}}{Z_{in2d} + Z_f^{DT}} U_{fs} \quad (7)$$

接下来将除去首端阻抗 Z_0 的其余部分,包括左侧传输线特征阻抗 Z_c 、等效阻抗 Z_{t1} 和等效电压源 U_{ft} 应用戴维南等效定理,得到最终的等效输入阻抗 Z_{eq2} 和等效电压源 U_{eq2} ,见式(8)、(9),式(10)为传输线终端电压反射系数:

$$Z_{eq2} = \frac{Z_c \times (1 + \rho_f e^{-2\gamma x_f})}{1 - \rho_f e^{-2\gamma x_f}} \quad (8)$$

$$U_{eq2} = \frac{e^{-\gamma x_f} (1 - \rho_f)}{1 - \rho_f e^{-2\gamma x_f}} U_{ft} \quad (9)$$

$$\rho_f = \frac{Z_t - Z_c}{Z_t + Z_c} \quad (10)$$

最后推导得到传输线左侧暂态电压频域表达式 U_0 ,见式(11)。同理,可以推导传输线右端暂态电压表达式 U_1 。

$$U_0 = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_{eq2}} U_{eq2} \quad (11)$$

反向阶段考虑所有阻抗不连续点对于横向分支故障电流影响,推导流过横向分支任意故障阻抗的电流频域解析式,此时采用双端反向注入方式,其中一个信号乘以-1,见图3。

首先,仅考虑传输线左侧注入暂态信号时,对横向分支故障电流的影响。基于戴维南等效定理,将反向阶段横向故障分支右侧的电力变压器等效输入阻抗 Z_1 和传输线特征阻抗 Z_c 进行等效,得到横向故障分支右侧等效阻抗表达式 Z_{in2r} 。

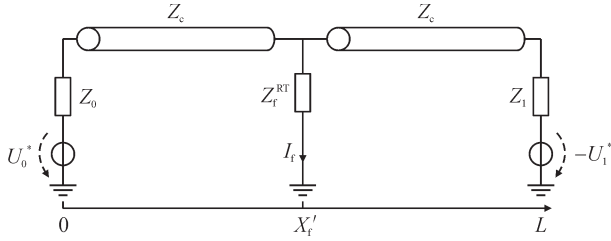


图3 反向时间阶段电路模型

Fig. 3 Reversed time stage circuit model

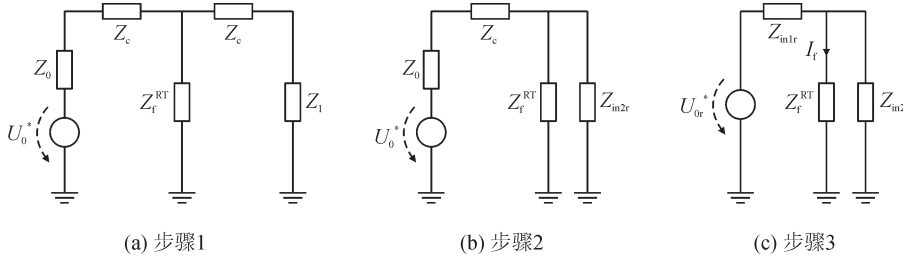


图4 基于戴维南等效定理的故障电流表达式推导

Fig. 4 Derivation of fault current expression based on Thevenin equivalent

$$U_{0r}^*(x'_f, \omega) = \frac{(1 - \rho_0)U_0^*(0, \omega)e^{-\gamma x'_f}}{1 - \rho_0 e^{-2\gamma x'_f}} \quad (14)$$

式(13)、(14)中: x'_f 为猜测故障距离; $U_0^*(0, \omega)$ 为经过反演算子处理的传输线首端暂态电压信号; ρ_0 为电压反射系数。最后得到反向阶段不同猜测故障位置流过横向分支任意故障电阻的电流表达式 $I_{f1}(x'_f, \omega)$

$$I_{f1}(x'_f, \omega) = \frac{U_{0r}^*(x'_f, \omega)Z_{in2r}}{Z_{in1r}Z_{in2r} + Z_{in1r}Z_f^{RT} + Z_{in2r}Z_f^{RT}} = \frac{U_0^*(0, \omega)(1 - \rho_0)Z_{in2r}e^{-\gamma x'_f}}{(1 - \rho_0 e^{-2\gamma x'_f})(Z_{in1r}Z_{in2r} + Z_{in1r}Z_f^{RT} + Z_{in2r}Z_f^{RT})} \quad (15)$$

同理可以推导传输线右侧单独注入信号时, 流过横向分支任意故障电阻的电流解析式。

1.3 基于MMFCSE判据的故障定位

采用双端反向注入方式, 任意GFL处故障电流表达式为

$$I_f(x'_f, \omega) = I_{f1}(x'_f, \omega) + I_{f2}(x'_f, \omega) \quad (16)$$

基于帕塞瓦尔定理, 频域下不同GFL处故障电流能量 $P(x'_{fj})$ 可通过式(17)计算

$$P(x'_{fj}) = \sum_{k=1}^N I_{fj}^2(x'_f, \omega_k) \quad (17)$$

故障电流能量最小值位置 x'_{fmin} 通过式(18)进行计算。

$$x'_{fmin} = \min_{x'_{fj}} \{P(x'_{fj})\} \quad (18)$$

$$x_f = L - x'_{fmin} = L - \min_{x'_{fj}} \{P(x'_{fj})\} \quad (19)$$

从式(18)、(19)可知, 实际故障位置 x_f 在故障电

$$Z_{in2r} = Z_c \times \frac{1 + \rho_1 e^{-2\gamma(L-x'_f)}}{1 - \rho_1 e^{-2\gamma(L-x'_f)}} \quad (12)$$

接下来对横向故障分支左侧部分应用戴维南等效定理, 见图4, 推导得到左侧等效阻抗 Z_{in1r} , 左侧等效电源 U_{0r}^* , 其表达式为:

$$Z_{in1r} = Z_c \times \frac{1 + \rho_0 e^{-2\gamma x'_f}}{1 - \rho_0 e^{-2\gamma x'_f}} \quad (13)$$

流能量最小值位置相对于线路中点的镜像位置, 满足能量镜像最小性质。

2 仿真分析

为研究基于MMFCSE判据的双端EMTR方法在不同线路参数灵敏度(线路电感参数以及故障阻抗)下故障定位性能分析, 采用PSCAD/EMTDC软件搭建仿真模型。配电单导体线路电压等级10 kV, 总长度10 km, 线路无损耗, 单位长度电感和电容分别为 1.56×10^{-6} H/m 和 7.1×10^{-12} F/m。变电站等效阻抗 $Z_1 = Z_2 = 100$ k Ω 。设定线路8 km处发生接地故障, 设置9个猜测位置 x'_f , 每个猜测位置间隔1 km。

2.1 不同线路电感参数下定位性能分析

设置正向和反向阶段故障阻抗都为1 000 Ω , 考虑到在实际发生故障时, 无损线路中可能存在趋肤效应从而导致电感发生改变。因此通过改变反向阶段中电感 L 的值来分别进行仿真, 进而来分析该方法的定位性能和寻找使得方法有效的参数大致范围, 故障电流能量分布热点图见图5。

由图5可以看出, 当线路参数中的电感倍数在0.95到1.1范围之间时, 相对应的每行数据在猜测故障位置为2 km时取最小值, 该能量值是实际故障关于线路中点的镜像位置。换句话说, 反向阶段故障电流能量最小值位置(2 km)与实际故障位置(8 km)之和为线路总长度(10 km)。而其他电感倍数下, 该方法均在猜测故障位置1 km处取最小值, 从而定位失效。

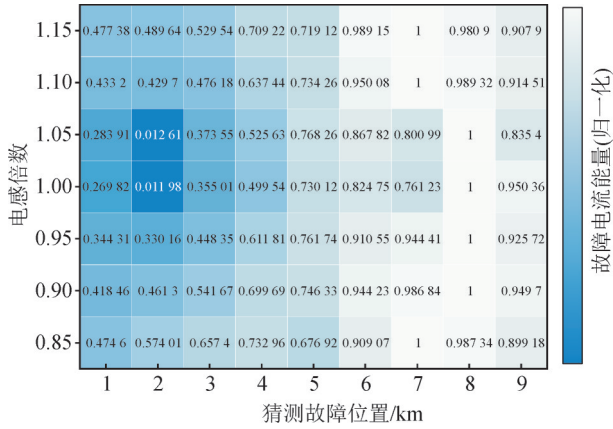


图5 故障电流能量分布热点图

Fig. 5 Map of the hot spots for fault current energy distribution

2.2 未知故障阻抗下定位性能分析

本节在正向阶段与反向阶段线路电感参数保持一致的情况下,对正向阶段实际故障电阻 Z_f^{DT} 分别选择1、10、100、1 000 Ω 4个值,反向阶段传输线上任意位置发生不同假想电阻 ($Z_f^{RT}=1 \sim 1\ 000\ \Omega$) 接地故障下双端EMTR的定位性能进行了分析,计算得到的故障电流能量热点分布见图6。

由图6可以看出,当正向阶段实际故障电阻 Z_f^{DT} 选择不同的值,反向阶段传输线上任意位置不管是发生金属性接地、低阻接地还是高阻假想接地故障,均能满足故障电流能量最小特性,可实现实际发生未知接地故障电阻的精确定位,但在低阻实际接地故障下整体定位效果较差。

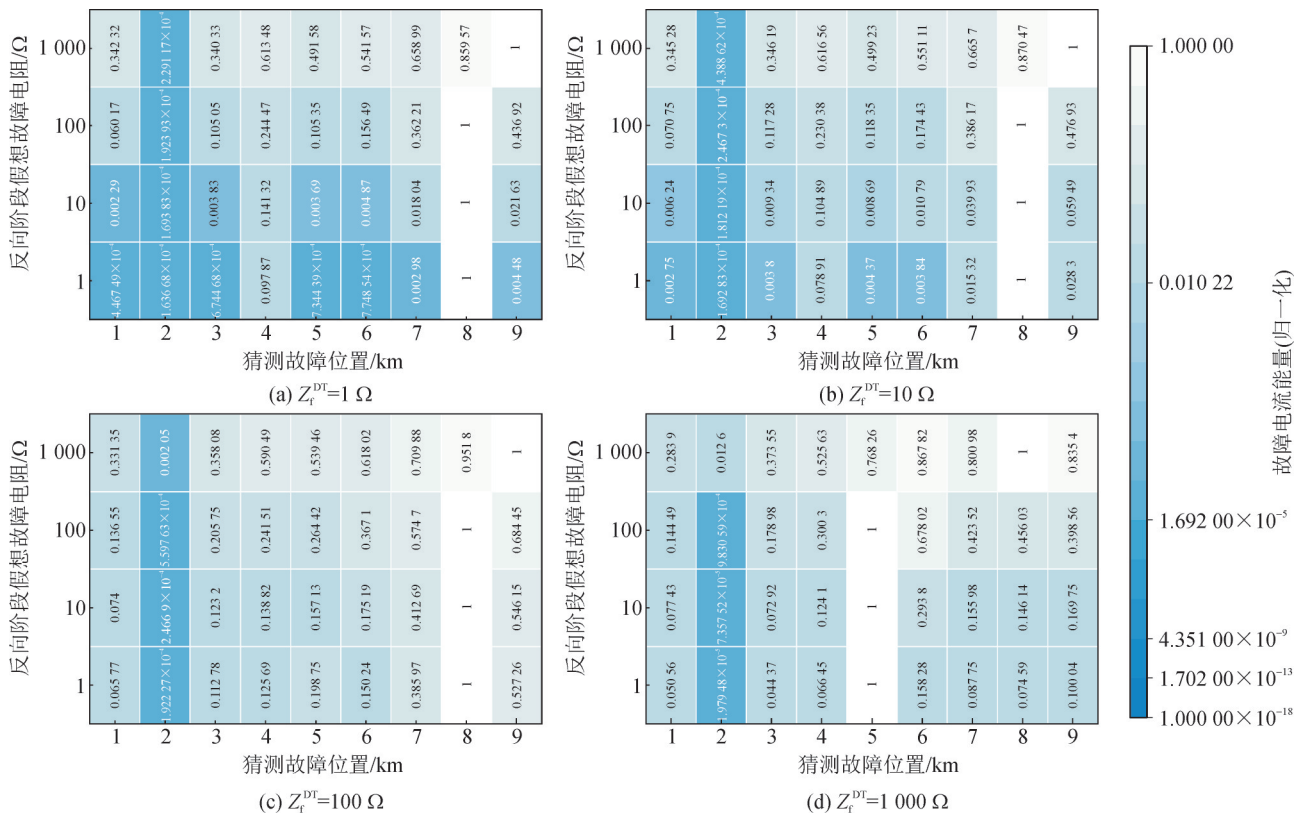


图6 未知故障阻抗下故障电流能量分布热点图

Fig. 6 Map of the hot spots for fault current energy distribution under unknown fault impedance

当正向阶段实际故障电阻从1~1 000 Ω 逐渐增加,反向阶段无论设置哪种故障,其他猜测故障位置处故障电流能量与故障电流能量最小值比值越大。换句话说,实际故障电阻越高,对于正向阶段某一个具体故障位置,反向阶段故障电流能量最小值相比于其他猜测故障位置的电流能量更小,能够更好区分故障位置。

有趣的是,当反向阶段假想故障电阻设置为1 000 Ω 时,随着正向阶段的实际故障电阻从1~

1 000 Ω 逐渐增加,该方法的定位性能越好。因此为提高在实际未知故障阻抗下双端EMTR的定位性能,建议在反向阶段线路横向分支中设置高阻假想接地故障。

3 试验分析

本节基于搭建同轴电缆试验模型,研究基于MMFCSE判据的双端EMTR在不同故障电阻下对该方法定位性能分析的影响,试验模型见图7。故障可以在试验网络的任意位置发生,为了更好的模拟

故障,故障位置选择电缆接头,通过将电缆内部导体与屏蔽层相连模拟短路故障,这样模拟可以激发屏蔽层到内部导体的传播模式。电压源为幅值10 V的直流电压,通过 $Z_0=1.5\text{ k}\Omega$ 的集中电阻注入试验系统,线路末端连接 $Z_1=1.5\text{ k}\Omega$ 用来等效变压器输入阻抗。采用8段不同长度的同轴电缆搭建试验模型,同轴电缆选用RG-58型号,特征阻抗为 $50\ \Omega$,其余基本参数见表1,线路总长65 m,试验模型示意图见图8。

表1 同轴电缆结构参数

Table 1 Parameters of the coaxial cable

电缆结构	材料	直径/mm
内导体	单根裸铜线	0.90
绝缘层	实芯聚乙烯	3.00
外导体	铝箔	3.05
编织层	铜包铝丝	3.50
护套层	聚氯乙烯	5.00

在正向阶段,在线路首末端测量故障导致的暂态电压信号,测量设备是:采样频率可达2 GHz的12位示波器,型号为Tektronix TDS 2024C。在RT阶段,将经过时间反演处理的信号从相应测量点注入试验系统,在不同的猜测故障电缆接头测量故障电流,测量设备是:Pearson线圈110 A,其变比是0.1 V/A。时间反演处理后的故障电压暂态波形通过任意函数波形发生器注入系统,为了实现信号的双端注入,选用采样频率可达1 GHz的16位任意波形发生器,型号为Tektronix AFG 3102C,采样频率设置为250 MHz。

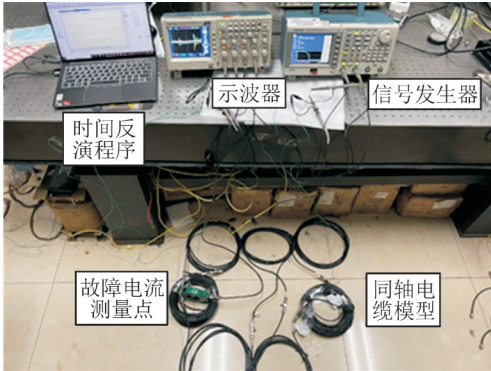


图7 基于RG-58同轴电缆的试验模型

Fig. 7 The test model based on RG-58 coaxial cable

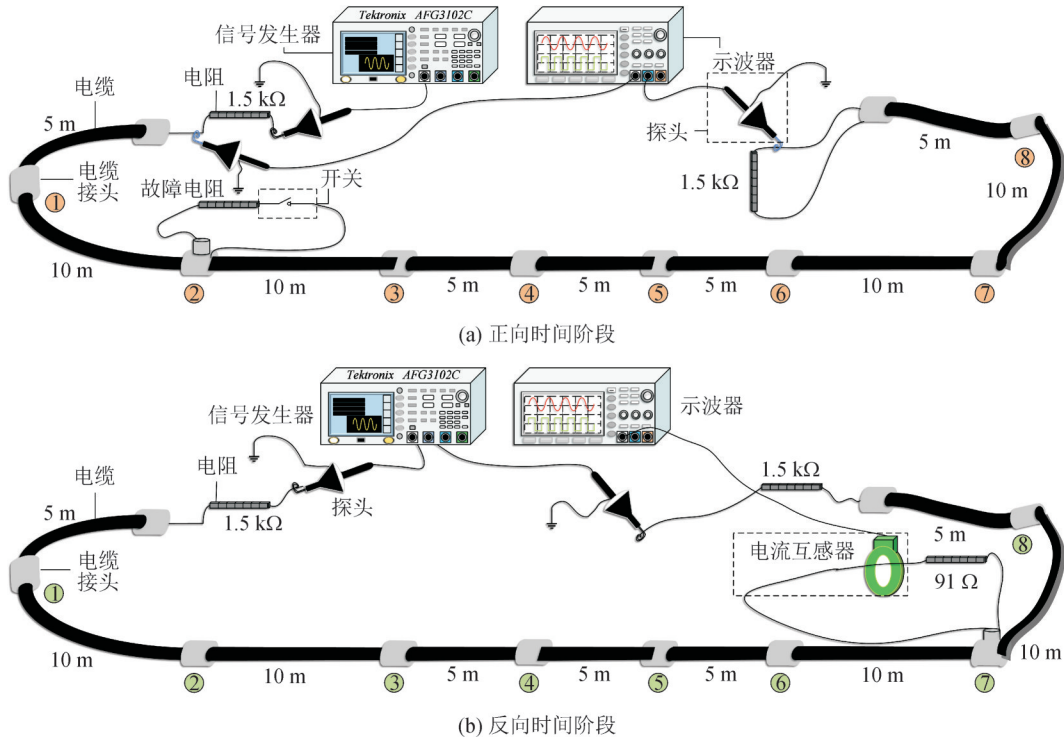


图8 基于RG-58同轴电缆的试验模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the test model based on RG-58 coaxial cable

正向阶段试验模型2号电缆接头处发生故障电阻值分别为1、22、47、91 Ω 接地故障时的首端电压波形见图9。从图9可以看出,随着故障电阻增大,首端测量的电压信号振荡情况减弱,当故障电阻大于22 Ω 时,首端暂态电压信号基本上没有振荡,也

就是说故障电阻为47 Ω 或者91 Ω 时,其故障暂态特征很小。考虑到同轴电缆特征阻抗为50 Ω ,因此,当故障电阻为47 Ω 或者91 Ω 时,可以等效为发生了高阻接地故障。

基于图9的分析,正向阶段分别设置接地故障

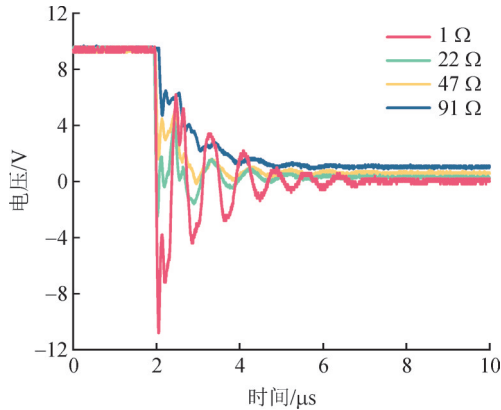


图9 不同故障电阻下首端电压波形

Fig. 9 Voltage waveform of the head end under different fault impedance

电阻为1、22、47、91 Ω,反向阶段假想接地故障电阻设置为91 Ω,分别设置电缆接头位置1号到8号发生接地故障,计算得到的故障电流能量热点分布见图10。

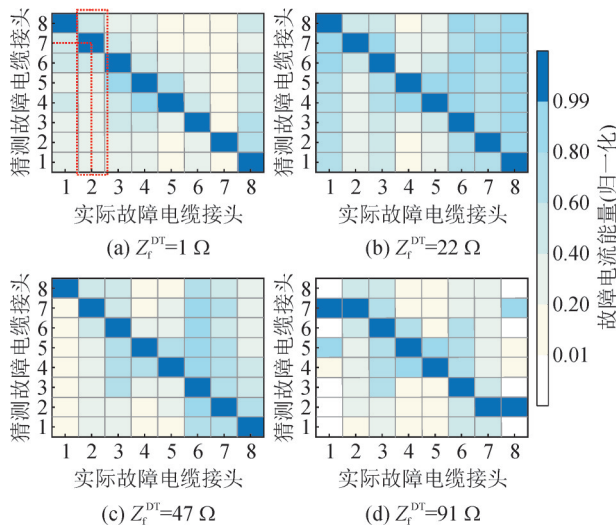


图10 故障电流能量热点分布图

Fig. 10 Map of the hot spots for fault current energy distribution

以图10(a)为例进行说明。假设故障发生在试验模型2号电缆接头,接地故障电阻为1 Ω,只需分析红色框中的数据。从红色框中数据可以看出,7号电缆接头为所有猜测故障电缆接头故障电流能量的最小值位置,即故障电流能量最小值电缆接头位置(7号)为实际故障电缆接头位置(2号)的关于试验模型中点的镜像位置,满足能量镜像最小值性质,验证了该方法能有效故障定位。从图10可以看出,除了高阻接地故障,在线路首末端出现了一定的定位误差外,定位误差在5 m以内,而对于金属性接地故障或者低阻接地故障具有较高的定位精确性。

4 结论

文中对基于MMFCSE判据的双端EMTR方法进行频域下的理论推导,通过仿真分析了在不同线路参数灵敏度(线路电感参数以及故障阻抗)下对方法故障定位性能的影响,并搭建了同轴电缆试验模型进行验证。主要结论如下:

1)相比于正向阶段的线路参数,当反演阶段的线路电感参数设置在0.95~1.1倍范围内,该方法都能够实现高阻接地故障定位。

2)正向阶段实际接地故障电阻 Z_r^{DT} 选择不同的值,反向阶段传输线上任意位置无论发生什么假想接地故障,均可实现实际发生未知接地故障电阻的精确定位。

3)为提高在实际未知故障阻抗下双端EMTR整体的定位性能,建议在反演阶段线路横向分支中设置高阻假想接地故障。

4)搭建基于RG-58同轴电缆的低压试验模型,分析了故障阻抗未知情况下对方法故障定位性能的影响,综合故障定位误差最大为5 m。

参考文献:

- [1] 陶劲宇,秦川,金宇清,等. 面向新型电力系统的负荷模型研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(5):168-187.
TAO Jinyu, QIN Chuan, JIN Yuqing, et al. A review of load models for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2025,53(5):168-187.
- [2] 艾轩源. 基于EMTR和WT的配电网故障定位的研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2020.
AI Xuanyuan. Research on fault location of distribution network based on EMTR and WT[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020.
- [3] 王小君,任欣玉,和敬涵,等. 基于μPMU相量信息的配电网故障测距方法[J]. 电网技术,2019,43(3):810-817.
WANG Xiaojun, REN Xinyu, HE Jinghan, et al. Distribution network fault location based on μPMU information[J]. Power System Technology, 2019, 43(3):810-817.
- [4] 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.
- [5] 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 Chaohui, 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.
- [6] 吉兴全,黄心月,张玉敏,等. 基于时域差分运算的配电网多分支线路故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(24):

- 13-25.
- JI Xingquan, HUANG Xinyue, ZHANG Yumin, et al. Fault location method for multi-branch distribution network lines based on time-domain differential operation[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(24):13-25.
- [7] 舒佳蕾,陈依林,曹虹,等.基于图注意力网络的配电网故障行波定位方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2025, 40(1):85-91.
- SHU Jialei, CHEN Yilin, CAO Hong, et al. A fault traveling wave localization method for distribution networks based on graph attention networks[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(1):85-91.
- [8] 张帝,宋兴荣,唐海国,等.基于自适应VMD和WVD的配电网故障行波检测方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(2):80-90.
- ZHANG Di, SONG Xingrong, TANG Haiguo, et al. Fault traveling wave detection method of distribution network based on adaptive VMD and WVD[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(2):80-90.
- [9] 麦家怡,侯祖锋,梁苑,等.基于高性能神经网络的配电网自主故障定位算法研究[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(12):81-90.
- MAI Jiayi, HOU Zufeng, LIANG Yuan, et al. Research on autonomous fault location algorithm for distribution network based on high performance neural network[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(12):81-90.
- [10] WU Yang, ZHANG Pinjia, LU Guanghui. Detection and location of aged cable segment in underground power distribution system using deep learning approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(11):7379-7389.
- [11] 王宇杉,王晨,王淑侠,等.基于IWOA的配电网故障定位方法[J]. *智慧电力*, 2024, 52(11):98-105.
- WANG Yushan, WANG Chen, WANG Shuxia, et al. Fault location method for distribution network based on improved IWOA[J]. *Smart Power*, 2024, 52(11):98-105.
- [12] 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.
- [13] 李航,曾海燕,喻锐,等.基于多端行波频率矩阵的复杂配电网故障定位方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(3):19-30.
- LI Hang, ZENG Haiyan, YU Kun, et al. Fault location method for complex distribution networks based on multiterminal traveling wave frequency matrix[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(3):19-30.
- [14] ZHAI Huiqing, SHA Shaoshu, SHENOY V K, et al. An electronic circuit system for time-reversal of ultra-wideband short impulses based on frequency-domain approach[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(1):74-86.
- [15] LUGRIN G, MORA N M, RACHIDI F, et al. On the location of lightning discharges using time reversal of electromagnetic fields[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, 56(1):149-158.
- [16] KARAMI H, AZADIFAR M, MOSTAJABI A, et al. Numerical and experimental validation of electromagnetic time reversal for geolocation of lightning strikes[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, 62(5):2156-2163.
- [17] 刘青,黄玉河,王宇,等.基于电磁时间反演P范数判据的配电网故障定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(3):74-82.
- LIU Qing, HUANG Yuhe, WANG Yu, et al. Distribution network fault location based on an electromagnetic time reversal P-parametric criterion[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(3):74-82.
- [18] MANESH H M, LUGRIN G, RAZZAGHI R, et al. A new method to locate faults in power networks based on electromagnetic time reversal[C]//2012 IEEE 13th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Turkey:IEEE, 2012:469-474.
- [19] 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.
- [20] 柴鹏,周灏,张煜,等.基于护层电流时域反演信号的高压电缆短路故障定位方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(6):189-195.
- CHAI Peng, ZHOU Hao, ZHANG Yu, et al. Fault location method for high-voltage cable short-circuit based on electromagnetic time reversal[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(6):189-195.
- [21] RAZZAGHI R, PAOLONE M, RACHIDI F, et al. Fault location in multi-terminal HVDC networks based on electromagnetic time reversal with limited time reversal window[C]//2014 Power Systems Computation Conference. Poland:IEEE, 2014:1-7.
- [22] RAZZAGHI R, LUGRIN G, PAOLONE M, et al. On the use of electromagnetic time reversal to locate faults in series-compensated transmission lines[C]//2013 IEEE Grenoble Conference. France:IEEE, 2013:1-5.
- [23] AN Jianwei, ZHUANG Chijie, RACHIDI F, et al. An effective EM-TR-based high-impedance fault location method for transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(1):268-276.
- [24] WANG Guanbo, ZHUANG Chijie. A fault location method using direct convolution: Electromagnetic time reversal or not reversal[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(4):1112-1116.
- [25] 杨欢红,朱子叶,黄文焘,等.基于直接时间反转法的直流配电网故障测距[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(16):66-75.
- YANG Huanhong, ZHU Ziye, HUANG Wendao, et al. Fault location of a DC distribution network based on a direct time reversal method[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(16):66-75.
- 王科(1982—),男,硕士,高级工程师,研究方向为配电一次设备的监测、带电和在线检测技术应用研究(E-mail:41872645@qq.com)。
- 胡逸(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网故障定位(E-mail:202111021013@cqu.edu.cn)。
- 徐肖伟(1983—),男,高级工程师,研究方向为高电压试验技术、变压器状态评估(E-mail:40858480@qq.com)。
- 杨庆(1981—),男,博士,教授,研究方向为电力系统过电压及其绝缘配合、复杂环境下输电线路外绝缘特性及放电机理研究(通信作者)(E-mail:yangqing@cqu.edu.cn)。