基于双端卷积镜像能量判据的 EMTR 故障定位方法

胡成博，李　群，朱雪琼，路永玲，杨景刚，邵　剑，刘子全

（国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，南京 211103）

摘要：针对传统电磁时间反演定位需信号反演且在高阻接地条件下精度下降的问题，文中提出了基于双端卷积的电磁时间反演配网故障定位方法，采用镜像卷积信号能量最小值判据来实现故障定位。通过频域理论推导与PSCAD时域模型仿真，研究反向阶段注入策略、未知故障阻抗与不同噪声对定位性能的影响，最后推广至三相配电线路中未知单相发生任意接地阻抗场景。结果表明：①所提定位方法在反向阶段中选择在线路左右两端分别注入幅值相同、极性相反的高频激励源具有更好的定位效果；②针对单相配电线路，通过在反向阶段设置高阻接地故障可实现对实际发生未知故障阻抗下的定位，同时也可应用于三相配电线路中未知单相发生任意接地阻抗故障下的定位。

关键词：电磁时间反演；配电线路；双端卷积；镜像卷积信号能量最小值；故障定位

EMTR Fault Location Method Based on Double-ended Convolutional Mirror Energy Criterion

Hu Chengbo，Li Qun，Zhu Xueqiong，Lu Yongling，Yang Jinggang，Shao Jian，Liu Ziquan

（State Grid Jiangsu Electric Power Company Ltd. Research Institute，Nanjing 211103，China）

Abstract：In view of the problem that traditional electromagnetic time reversal positioning requires signal inversion and has reduced accuracy under high-resistance grounding conditions，this paper proposes an electromagnetic time reversal distribution network fault location method based on double-ended convolution，and uses the minimum energy criterion of the mirror convolution signal to achieve fault location. Through frequency domain theoretical derivation and PSCAD time domain model simulation，the impact of the reverse phase injection strategy，unknown fault impedance and different noises on the positioning performance is studied，and finally extended to the unknown single-phase arbitrary grounding impedance scenario in the three-phase distribution line. The results show that：①The proposed positioning method has better positioning effect by injecting high-frequency excitation sources with the same amplitude and opposite polarity at the left and right ends of the line in the reverse phase；②For single-phase distribution lines，by setting a high-resistance grounding fault in the reverse phase，the positioning under the actual unknown fault impedance can be achieved，and it can also be applied to the positioning of the unknown single-phase arbitrary grounding impedance fault in the three-phase distribution line.

Key words：electromagnetic time reversal；distribution line；asynchronous convolution；minimum energy of the mirror convolution signal；fault location

0　引言

随着社会经济的持续发展，对电力的需求日益增加，配电网拓扑结构也越发复杂，同时故障率随之提升[1-3]。因此对配电网的故障进行快速准确的诊断和定位，可以极大地减少故障处置和供电恢复时间，提升供电可靠性和用户幸福指数。目前根据原理的不同可将配电网故障定位方法主要分为阻抗法[4-5]，行波法[6-8]和人工智能法[9-11]。阻抗法是分析故障点到线路保护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。行波法是基于行波原理对线路进行故障测距，只适用于拓扑结构简单的输电线路。人工智能法通过神经网络[9]、蚁群算法[10]、粒子群算法[11]等来实现故障定位，但人工智能法依赖于大量数据与广泛的训练，极大限制了其在实际系统中的应用。

时间反演理论技术最早被Bogert应用于图像传输系统中纠正延时失真的实验研究中[12]，随后被Fink等人应用提高脉冲信号在非均匀介质中的自聚焦能力[13]。近年来，电磁时间反演(electromagnetic time reversal，EMTR)技术成为了国内外学者讨论的热点，并在医学成像[14]、雷击定位[15]、电缆局部放电定位[16-17]和电力线路故障定位[18-20]等领域中得到广泛应用。

基金项目：国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023133)。
Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co.，Ltd.(J2023133).

Manesh等人[21]首次提出了基于EMTR的电力系统故障定位新方法，采用故障电流能量最大值判据实现了在单相无损传输线上的故障定位。Razzaghi等人基于EMTR利用单个观测点来定位多相串联补偿传输线[22]、同轴电缆试验模型[23]、多端HVDC(high voltage direct current)网络[24]等中的故障。Zhuang等人[25]提出了一种单端直接卷积的电磁时间反演方法，并验证了该方法的有效性。和少寅等人[26]提出了一种基于传递函数相关性的EMTR定位方法，利用单一观测点来覆盖传输线网络并实现故障定位。

另外相关学者将EMTR技术也应用于电力线路高阻抗接地故障定位中并取得了一系列成果。An等人[27]提出了基于镜像故障电压能量最小值判据的双端EMTR定位方法，考虑在没有故障分支的情况下，将两端的故障产生信号进行时间反转并同步注入线路，结果表明该方法能实现对传输线高阻抗接地故障的定位。Sun[28]等人提出了一种基于镜像故障电流能量最小值判据的双端EMTR定位方法，结果表明该方法能够实现对不同接地故障阻抗下配电线路的故障定位。

虽然，EMTR故障定位方法在实际应用中已取得一定进展，但仍存在两个重要问题：其一，单端EMTR法在高阻抗接地故障下的定位精度较差。原因在于高阻接地故障时，故障行波信号不止在传输线左终端和故障横向分支之间发生反射，还会折射进入横向分支右侧，导致终端处的暂态电压包含不同频带的信号，从而引起定位误差；其二，双端EMTR故障定位方法需要将正向阶段的信号进行反演处理并注入，但目前注入机制不清，线路参数、故障阻抗及噪声的影响不确定。

因此文中针对以上两个问题，提出了一种基于双端卷积的EMTR配网故障定位方法。首先，从理论方面对该方法进行频域下的推导并进行了初步仿真验证，再在单导体配电线路下研究了不同注入策略、未知故障阻抗以及不同噪声影响下对该方法定位性能的影响，最后推广至三相配电线路未知单相发生任意阻抗的接地故障定位中。

1　基于双端卷积的 EMTR 故障定位方法

1.1　频域下理论推导

为了直观体现基于双端卷积的EMTR故障定位方法，该节基于理论角度对考虑反向阶段横向分支下的整个过程进行了频域下的推导。反向、正向阶段电路模型图见图1、2。图中选择单导体无损传输线作为研究对象，线路长度为L，Z_c为传输线特征阻抗。Z_f^{RT}和Z_f^{DT}分别为反向阶段的假想故障阻抗和正向阶段的实际故障阻抗。阻抗Z_0和Z_1为电力变压器的输入阻抗。该方法主要包括以下3个阶段：

1)反向阶段。在线路两端分别注入极性相反的任意类型激励源，等间隔设置不同猜测故障点$x_f^{'}$并记录对应的横向分支故障电流I_{f1}、I_{f2}。

该阶段在故障发生前即可进行，无需像传统双端EMTR方法在反向阶段对正向阶段采集的信号进行反演处理。

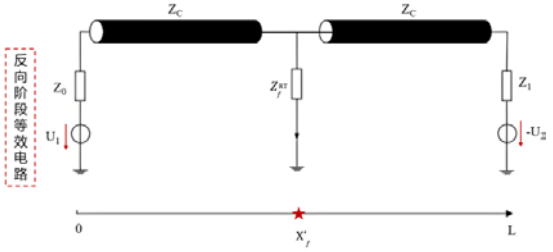


图 1　反向阶段电路模型

Fig. 1 Reverse stage circuit modeling

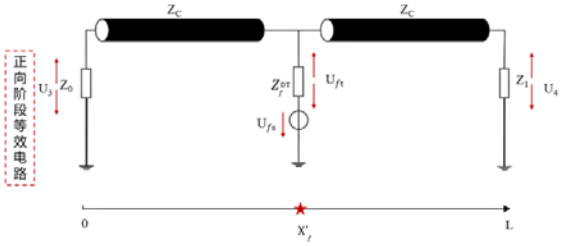
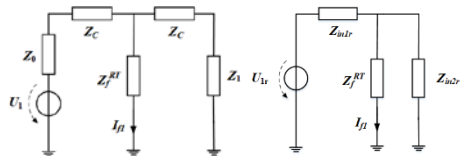


图 2　正向阶段电路模型

Fig. 2 Forward stage circuit model

以线路左端注入激励源U_1为例，计算横向分支故障电流I_{f1}。如图3所示，基于戴维南等效定理，将阻抗Z_1和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}，见式(1)

$$Z_{in2r}=Z_c\times\frac{1+\rho_1 e^{-2\gamma(L-x_f')}}{1-\rho_1 e^{-2\gamma(L-x_f')}} \tag{1}$$



(a) 反向阶段等效电路　　(b) 简化等效电路

图 3　反向阶段等效变换后的电路图

Fig. 3 Equivalently transformed circuit diagram

同理对横向故障分支左侧进行等效，得到等效阻抗Z_{inr1}和等效电压源U_{1r}，见式(2)、(3)：

$$Z_{in1r}=Z_c\times\frac{1+\rho_0e^{-2\gamma x'_f}}{1-\rho_0e^{-2\gamma x'_f}} \tag{2}$$

$$U_{1r}(x'_f,w)=\frac{(1-\rho_0)U_1(0,w)e^{-\gamma x'_f}}{1-\rho_0e^{-2\gamma x'_f}} \tag{3}$$

式(2)、(3)中：x'_f是不同猜测故障位置；γ是无损传输线的传输系数；ρ_i为电压反射系数。

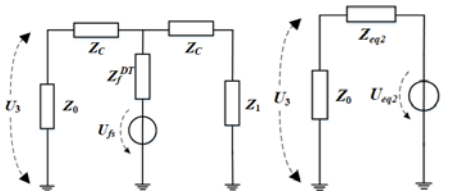
$$\rho_i=\frac{Z_i-Z_c}{Z_i+Z_c},i=0,1 \tag{4}$$

最终可推导得到不同猜测故障位置处的故障电流I_{f1}，见式(5)

$$\begin{aligned}I_{f1}(x'_f,w)&=\frac{U_{1r}(x'_f,w)\times Z_{in2r}}{Z_{in1r}Z_{in2r}+Z_{in1r}Z_f^{RT}+Z_{in2r}Z_f^{RT}}\\&=\frac{U_1(0,w)(1-\rho_0)Z_{in2r}e^{-\gamma x'_f}}{(1-\rho_0e^{-2\gamma x'_f})(Z_{in1r}Z_{in2r}+Z_{in1r}Z_f^{RT}+Z_{in2r}Z_f^{RT})}\end{aligned} \tag{5}$$

同理也可以推导得到线路右端注入的反向激励源所产生的故障电流I_{f2}。

2)正向阶段。故障发生时，通过安装在线路两端的故障录波装置对由故障产生的电压暂态信号U_3、U_4进行测量，并采用切比雪夫I型滤波器对测量的信号进行截止频率为1 kHz的滤波处理。正向阶段等效变换后的电路图见图4。



(a) 正向阶段等效电路　　(b) 简化等效电路

图 4 正向阶段等效变换后的电路图

Fig. 4 Equivalently transformed circuit diagram

与反向阶段一样，经过戴维南等效简化，得到最后左端暂态电压U_3见式(6)，右端暂态电压推导同理。

$$U_3=\frac{Z_0e^{-\gamma x_f}(1-\rho_f)Z_{in2d}U_{fs}}{(Z_0+Z_{eq2})(1-\rho_fe^{-2\gamma x_f})(Z_{in2d}+Z_f^{DT})} \tag{6}$$

式(6)中：Z_{eq}为最终的等效输入阻抗；Z_{in2d}为横向故障分支右侧等效输入阻抗；ρ_f为传输线终端电压反射系数；x_f为实际故障位置。

3)定位阶段。将对应线路端的故障电流和电压暂态信号进行直接卷积计算并相加，从而计算卷积信号的能量，最后根据镜像卷积信号能量最小值判据实现故障定位。

将前两个阶段推导得到的故障电流$I_{f1}(x'_f,w)$与左端暂态电压U_3、故障电流$I_{f2}(x'_f,w)$与右端暂态电压U_4分别进行卷积计算，见式(7)

$$\begin{aligned}E(x'_f,w)&=I_{f1}(x'_f,w)U_3(0,w)+I_{f2}(x'_f,w)U_4(L,w)\\&=\frac{U_1(0,w)U_3(0,w)(1-\rho_0)Z_{in2r}e^{-\gamma x'_f}}{(1-\rho_0e^{-2\gamma x'_f})(Z_{in1r}Z_{in2r}+Z_{in1r}Z_f^{RT}+Z_{in2r}Z_f^{RT})}\\&+\frac{-U_2(L,w)U_4(L,w)(1-\rho_1)Z_{in1r}e^{-\gamma(L-x'_f)}}{(1-\rho_1e^{-2\gamma(L-x'_f)})(Z_{in1r}Z_{in2r}+Z_{in1r}Z_f^{RT}+Z_{in2r}Z_f^{RT})}\end{aligned} \tag{7}$$

基于帕塞瓦尔定理，不同猜测故障位置处卷积信号能量$P(x'_{f,j})$可通过式(8)计算

$$P(x'_{f,j})=\sum_{k=1}^{N}E^2(x'_f,\omega_k) \tag{8}$$

卷积信号能量最小值位置x'_{fmin}通过式(9)进行计算：

$$x'_{f\min}=\min_{x'_{f,j}}\left\{P(x'_{f,j})\right\} \tag{9}$$

$$x_f=L-x'_{f\min}=L-\min_{x'_{f,j}}\left\{P(x'_{f,j})\right\} \tag{10}$$

从式(9)、(10)可知，实际故障位置x_f在卷积信号能量最小值位置相对于线路中点的镜像位置，满足镜像能量最小性质。

1.2 定位机理分析

高阻接地故障条件下，单端EMTR定位方法采集到的暂态电压信号往往包含多频带的信号分量。以图5左端暂态电压为例，故障电压行波在线路中进行多次反射与折射。对于故障定位而言，只需要故障分支与线路终端之间的反射信号(U_{31}^1、U_{32}^1)，而折射电压信号U_{32}^2是无用信号。如果在反向阶段直接对未消除的折射分量实施时间反演注入，当实际故障位置与猜测故障位置一致时，正向阶段所产生的信号波与反向阶段产生的信号波不会发生相干谐振，即不表现出能量最大值现象，从而影响定位精度。

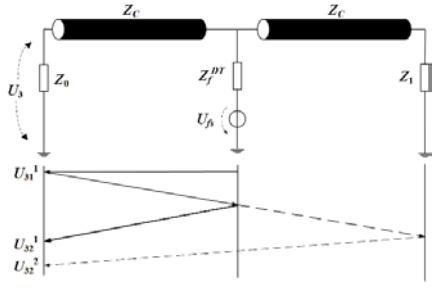


图 5 正向阶段发生高阻接地故障时传输线波过程

Fig. 5 Transmission line wave process during the occurrence of a high resistance ground fault in the forward phase

在正向阶段与反向阶段所获取的信号都存在与单端EMTR方法在高阻接地故障下的折射干扰问题。因此为了有效抑制无用信号的影响，文中采取以下措施：①正向阶段无用信号的消除：在反向阶段引入极性相反的任意类型激励源U_1和-U_2，并将其响应与原始信号进行卷积计算。该方法可消除故障点以外的折射信号，从而实现近似低阻抗短路故障的定位精度；②反向阶段无用信号的消除：在反向注入过程中，于横向分支处设置高阻假想接地故障，让反向阶段两端注入的信号在横向故障分支处发生折射，从而使得两端反向注入的信号能够分布在整条传输线上。该结构设计不仅实现对无用信号的抵消，同时也保留了尽可能多的有用故障信号。

1.3　仿真验证

文中在PSCAD仿真软件中模拟基于双端卷积的EMTR方法在配电网故障定位中的应用。仿真针对电压等级为10 kV的单相配电网线路，注入幅值为10 kV、相位角为0°的正弦电压源，线路参数如表1所示。电力变压器等效阻抗Z_0=Z_1=100 kΩ。设定线路4 km处发生接地故障，以0.5 km等间隔设置猜测位置。假想故障接地阻抗Z_f^{RT}和实际故障接地阻抗Z_f^{DT}设置为1 000 Ω。

反向阶段线路左右两端注入的任意激励源仅极性不同，以左端注入为例，激励源选择幅值为10 kV、波形参数为2.6/50 μs的雷电压，见式(11)

$$U(t)=10(e^{-15000t}-e^{-1860000t})\text{kV} \tag{11}$$

配电线路参数见表 1。

表 **1**　配电线路参数

Table 1 Power distribution line parameters

线路参数	数值
总长度/km	10
单位长度电阻/(Ω·m^{-1})	0
单位长度电感/(μH·m^{-1})	1.56
单位长度电容/(pF·m^{-1})	7.1

不同猜测故障位置下卷积信号能量的归一化分布见图6，从图6中可看出卷积信号能量最小值在猜测故障位置6 km处，该位置为实际故障位置(4 km)相对线路中点(5 km)的镜像位置，满足镜像卷积信号能量最小值判据，初步验证了基于异步卷积的双端EMTR方法能够实现在配网线路高阻接地故障下的定位。

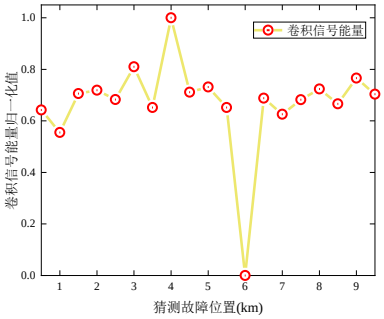


图 6　卷积信号能量归一化分布

Fig. 6 Convolutional signal energy normalised distribution

2　仿真分析

采用上节的配电线路参数，首先分析反向阶段采用不同类型及不同幅值的注入激励源对定位方法性能的影响，从而选取最优注入策略。再采用最优注入策略分析未知故障阻抗和不同噪声下对定位精度的影响。

2.1　不同注入策略下定位性能分析

2.1.1 不同注入激励源的类型

选取幅值为10 kV的50 HZ正弦波电压和上述参数的雷电压来进行分析，假想故障接地阻抗Z_f^{RT}和实际故障接地阻抗Z_f^{DT}设置为1 000 Ω，考虑到线路两端都为电力变压器，因此注入方式可分为三类：①左右两端都注入雷电压；②左右两端都注入正弦波电压；③左端注入雷电压，右端注入正弦波电压。Z_f^{RT}=Z_f^{DT}=1 000 Ω时不同激励源类型下卷积信号能量归一化分布见图7。

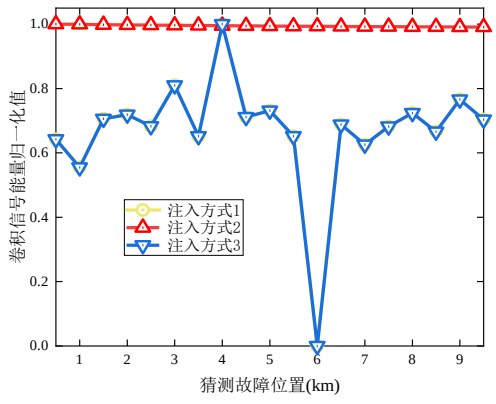


图 7 Z_f^{RT}=Z_f^{DT}=1 000 Ω时不同激励源类型下卷积信号能量归一化分布

Fig. 7 Normalised distribution of convolved signal energy for different excitation source types with Z_f^{RT}=Z_f^{DT}=1 000 Ω

从图7中可以看出，采用注入方式2下每个猜测故障位置处的卷积信号能量归一化值基本相等，分布图整体呈现为一条直线，能量归一化值在猜测故

障位置9.5 km处最小，不满足实际故障位置相对于线路中点的镜像最小值，因此该方式不能实现故障定位。采用注入方式1和注入方式3下卷积信号能量归一化分布图一致，在猜测故障位置6 km处能量最小，能够实现故障定位。因此线路左右两端初步选择注入极性相反的激励源中至少含有一个高频注入源。

为进一步研究注入方式1和注入方式3在其他故障阻抗下的定位性能，设置假想故障接地阻抗Z_f^{RT}和实际故障接地阻抗Z_f^{DT}为100 Ω，能量归一化分布见图8。从图8中可以看出，注入方式1相比于注入方式3在不同故障阻抗下定位效果更好。

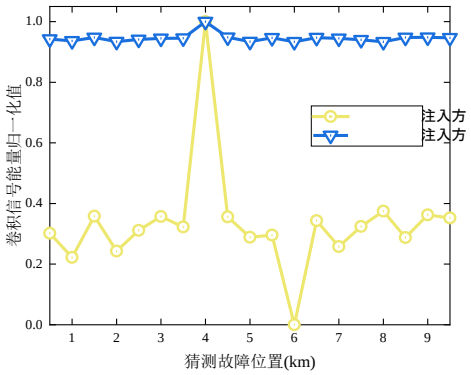


图 8 Z_f^{RT}=Z_f^{DT}=100 Ω时不同激励源类型下卷积信号能量归一化分布

Fig. 8 Normalised distribution of convolved signal energy for different excitation source types with Z_f^{RT}=Z_f^{DT}=100 Ω

2.1.2 不同幅值的注入激励源

按照上节分析，左右两端注入的激励源选取极性相反的高频雷电压，假想故障接地阻抗Z_f^{RT}和实际故障接地阻抗Z_f^{DT}设置为1 000 Ω，通过改变雷电压的幅值大小来进行分析，注入方式分为以下4类，见表2。

表 **2** 不同幅值下雷电压注入方式

Table 2 Lightning voltage injection methods under different amplitudes

注入方式	左端注入幅值/kV	右端注入幅值/kV
1	10	-10
2	10	-5
3	5	-10
4	5	-5

从图9可以看出，采用注入方式2与注入方式3后该方法不能实现故障定位。采用注入方式1和注入方式4下能量归一化值分布曲线一致，均在猜测故障位置6 km处最小，因此同时改变线路两端注入激励源的幅值大小并不影响该方法的定位精度。Z_f^{RT}=Z_f^{DT}=1 000 Ω时不同激励源类型下卷积信号能量归一化分布见图9。

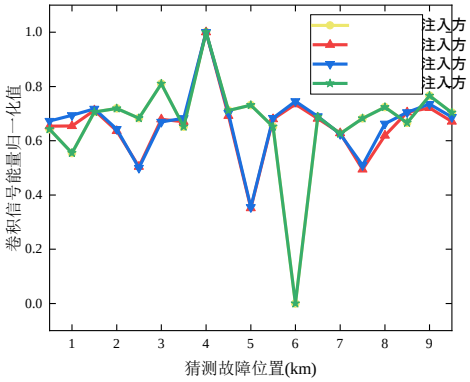


图 9 Z_f^{RT}=Z_f^{DT}=1 000 Ω时不同激励源类型下卷积信号能量归一化分布

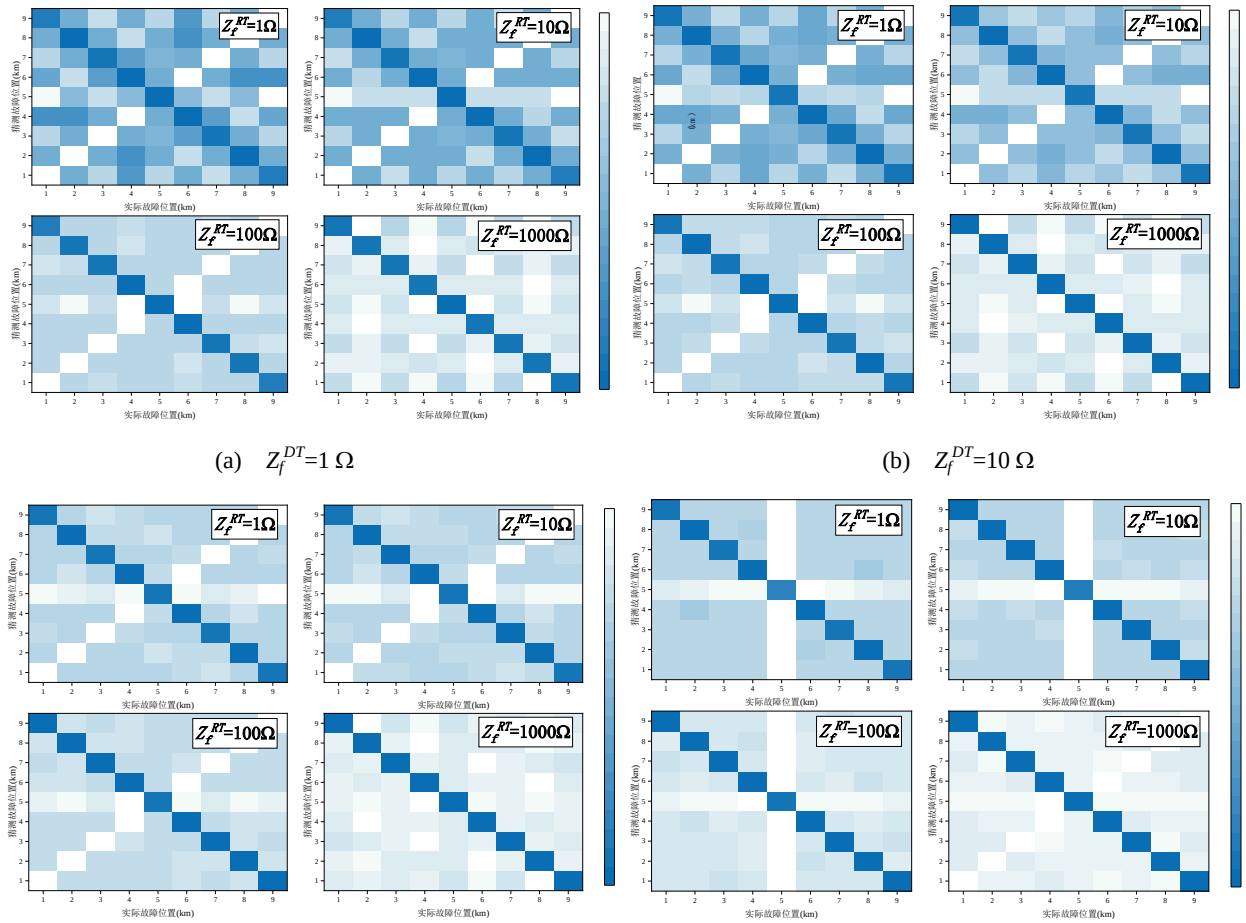
Fig. 9 Normalised distribution of convolved signal energy for different excitation source types with Z_f^{RT}=Z_f^{DT}=1 000 Ω

综上所述，最优注入策略应选择线路左右两端分别注入幅值相同、极性相反的高频激励源，使得基于异步卷积的双端 EMTR 方法能够实现在中高阻接地故障下的定位。

2.2 未知故障阻抗下定位性能分析

由于正向阶段实际接地故障阻抗是未知的，因此该节研究正向阶段发生不同实际接地故障电阻、反向阶段设置不同的假想接地故障电阻下对该方法定位性能的影响。

未知故障阻抗下卷积信号归一化后能量热点图见图10，从图10可以看出，无论正向阶段发生低阻接地还是高阻接地故障，反向阶段设置任意假想接地故障都能在实际故障位置相对于线路中点镜像位置处出现镜像卷积信号能量最小值。另外可以发现当反向阶段设置任意假想故障接地电阻，随着正向阶段实际故障接地电阻的增加，该方法的定位效果越好，更适用于实际发生高阻接地故障的定位。



(a)　Z_f^{DT}=1 Ω　　(b)　Z_f^{DT}=10 Ω

(c)　Z_f^{DT}=100 Ω　　(d)　Z_f^{DT}=1000 Ω

图 10　未知故障阻抗下卷积信号归一化后能量热点图

Fig. 10 Energy hotspot map after normalisation of convolved signal with unknown fault impedance

对比图10(a)和图10(b)可发现，当正向阶段发生低阻接地故障、反向阶段发生中高阻接地故障时，该方法的定位效果比正向阶段和反向阶段都发生低阻接地故障的定位效果好，镜像卷积信号能量最小值现象更明显。因此为实现实际接地故障未知情况下的故障定位，建议反向阶段横向分支故障设置为高阻接地。

2.3　不同噪声影响下定位性能分析

考虑到在实际配网环境中噪声对正向阶段线路左右两端暂态电压的测量有较大影响，特别是当实际发生高阻接地故障时测量信号极其微弱，噪声易掩盖特征信号，因此研究不同噪声对该方法在高阻接地故障下的定位性能分析十分有必要。Z_f^{RT} 和 Z_f^{DT} 都设置为 1 000 Ω，通过对正向阶段两端滤波后的暂态信号叠加不同噪声信号，信噪比设置为 10、20、30、40 dB。

不同信噪比噪声影响下的卷积信号能量分布见图11，从图11中可以看出，对于正向阶段实际发生高阻接地故障时，当信噪比为10 dB和20 dB时，该方法故障定位失效。当信噪比为30 dB和40 dB时，卷积信号能量归一化值均在相对于线路中点的镜像猜测故障位置6 km处为最小值，且随着信噪比的减小，卷积信号能量分布图逐渐上移，相比于无噪声情况，该方法定位精度逐渐下降。

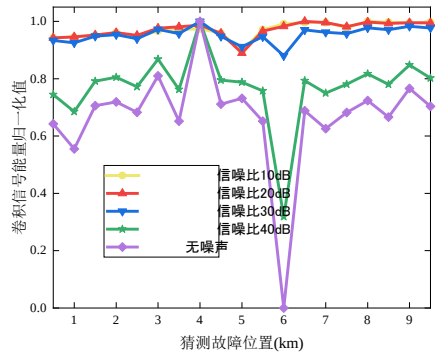
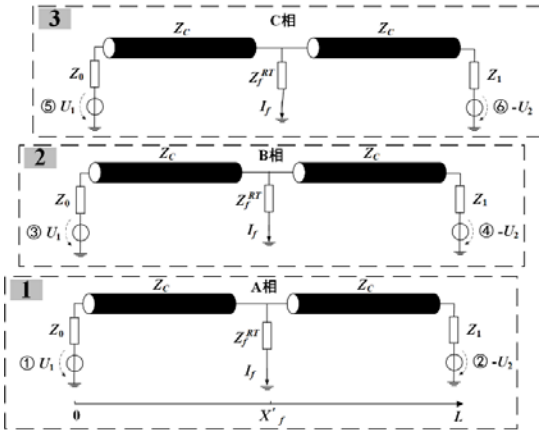


图 11　不同信噪比噪声影响下的卷积信号能量分布

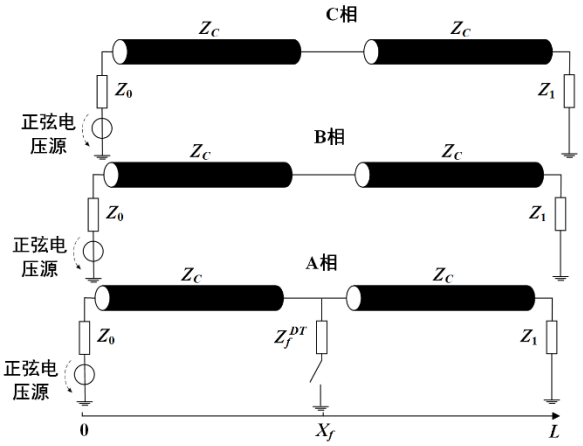
Fig. 11 Energy distribution of convolved signals under the influence of noise with different signal-to-noise ratios

3 三相配电线路中的仿真验证

搭建10 kV三相配电线路模型，正向阶段与反向阶段电路模型见图12，图12中以A相发生单相接地故障为例，线路总长度为10 km，正向实际故障位置设置为4 km处，故障发生时刻为0.01 s。反向阶段将三相线路分为三组单导体进行分别注入雷电压并设置假想故障阻抗Z_f^{RT}为1 000 Ω，该过程可在故障发生前进行。



(a) 反向阶段电路

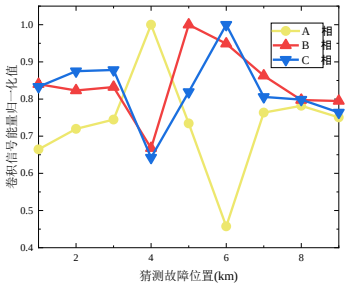


(b) 正向阶段电路

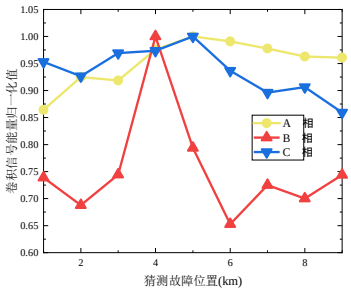
图 12 三相线路电路模型图

Fig. 12 Three-phase line circuit model diagram

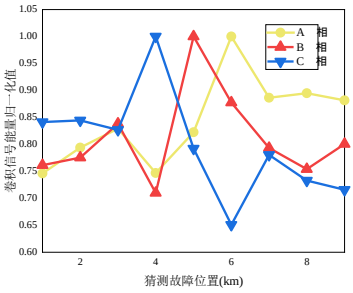
为研究该方法在三相配电线路中的定位效果，通过设置正向阶段不同相发生任意阻抗单相接地故障，仿真结果图见图13、14。从图13可以看出，正向阶段无论哪相导线发生高阻接地故障，则该相的卷积信号能量归一化值都在实际故障位置(4 km)相对于线路中心的镜像位置(6 km)处取最小值。从图14可以看出，无论正向阶段发生低阻还是高阻接地故障，也都能够实现对故障相的定位。



(a) A 相接地故障



(b) B 相接地故障



(c) C 相接地故障

图 13 Z_f^{DT}=1 000 Ω时不同故障相下卷积信号能量分布图

Fig. 13 Energy distribution of convolved signal under different fault phases at Z_f^{DT}=1 000 Ω

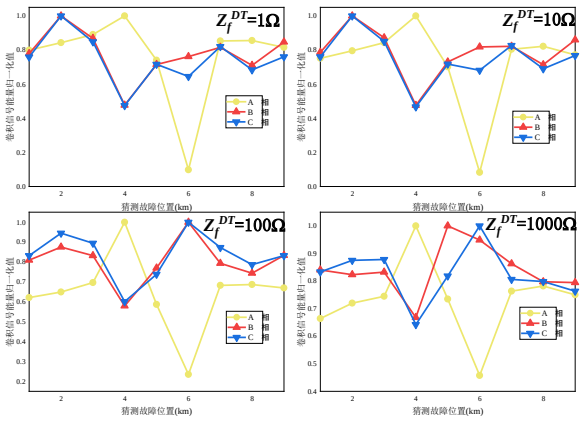


图 14 正向阶段 A 相发生不同接地故障阻抗下卷积信号能量分布图

Fig. 14 Energy distribution of the convolved signal under different ground fault impedances in phase A of the forward phase

因此只需在故障发生前，按照顺序分别计算A相、B相及C相导线上每个猜测故障位置的故障电流，故障发生时再与正向阶段对应相获取到的暂态电压信号分别进行卷积计算，最后根据各相卷积信号能量归一化后镜像位置最小值来实现未知单相发生任意阻抗接地故障的定位。

4　结论

1)文中提出了一种基于双端卷积的EMTR配网故障定位方法，该方法无需对正向阶段所获取到的暂态电压进行反演处理，并采用镜像卷积信号能量最小值判据来实现故障定位；

2)在单相配电线路中，所提定位方法在反向阶段中选择在线路左右两端注入幅值相同、极性相反的高频激励源具有更好的定位效果；

3)在单相及三相配电线路中，所提定位方法若在反向阶段设置高阻接地故障，均可实现对实际发生未知故障阻抗下的定位，另外对于三相线路也可实现未知单相发生接地故障下的定位。

参考文献：

[1] 史明明，刘瑞煌，张宸宇，等．考虑输电网与柔性互联配电网交互影响的可靠性评估方法[J]．电力工程技术，2024，43(4)：77-87.
Shi Mingming，Liu Ruihuang，Zhang Chenyu，et al. Analytical evaluation method of reliability considering interaction between transmission network and flexible interconnected distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology，2024，43(4)：77-87.

[2] 陈一丰，黄铭浩，董树锋．计及配电侧分布式电源的输配协同高收敛性最优潮流研究[J]．电力工程技术，2024，43(4)：36-44.
Chen Yifeng，Huang Minghao，Dong Shufeng. Research on improving the convergence of optimal power flow of transmission-distribution-coupled networks[J]. Electric Power Engineering Technology，2024，43(4)：36-44.

[3] 常新建，邵文权，程　远，等．基于模型预测控制的配电网单相接地故障有源消弧[J]．电力工程技术，2023，42(2)：161-169.
Chang Xinjian，Shao Wenquan，Cheng Yuan，et al. Active arc suppression of a single-phase grounding fault in distribution network based on model predictive control[J]. Jiangsu Electrical Engineering，2023，42(2)：161-169.

[4] 王小君，任欣玉，和敬涵，等．基于 μPMU 相量信息的配电网络故障测距方法[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.

[5] 张雪松，徐　琛，马　啸，等．不依赖时间同步的多分支配网故障精确定位方案研究[J]．电力系统保护与控制，2019，47(2)：56-63.
Zhang Xuesong，Xu Chen，Ma Xiao，et al. Research on the precise fault location scheme for distribution network with multiple branches Independent of time synchronization[J]. Power System Protection and Control，2019，47(2)：56-63.

[6] 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.

[7] Wu T，Chung C Y，Kamwa I，et al. Synchrophasor measurement-based fault location technique for multi-terminal multi-section non-homogeneous transmission lines[J]. IET Generation Transmission & Distribution，2016，10(8)：1815-1824.

[8] Anderson P M，Agrawal B L，Ness J E V. Subsynchronous resonance in power systems[M]. New York，USA：IEEE，1990：288.

[9]Liang Jiefeng，Jing Tianjun，Niu Huanna，et al. Two-Terminal fault location method of distribution network based on adaptive convolution neural network[J]. IEEE Access，2020(8)：54035-54043.

[10]Xue Liu，Jun Jia，Jian Wang. Research on fault location of low voltage distribution network based on improved ant colony algorithm[C]//2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA)，2020：759-762.

[11]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.

[12]Bogert B. Demonstration of delay distortion correction by Time-Reversal techniques[J]. IRE Transactions on Communications Systems，1957，5(3)：2-7.

[13]Fink M，Prada C，Wu F，et al. Self focusing in inhomogeneous media with time reversal acoustic mirrors[C]//Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium，1989：681-686.

[14]Kosmas P，Rappaport C. Use of the FDTD method for time reversal ： application to microwave breast cancer detection[C]//Computational Imaging II. International Society for Optics and Photonics，2004：1-9.

[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]Ragusa A，Sasse H，Duffy A，et al. Electromagnetic time reversal method to locate partial discharges in power networks using 1D TLM modelling[J]. IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications，2021，3(1)：24-28.

[17]Ragusa A，Sasse H，Duffy A. Practical evaluation of electromagnetic time reversal to locate partial discharges on power networks in the presence of noise[C]//2022 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)，2022：635-640.

[18]刘亚东，盛戈皞，王 葵，等．输电线路分布式综合故障定位方法及其仿真分析[J]．高电压技术，2011，37(4)：923-929．
Liu Yadong，Sheng Gehao，Wang Kui，et al. Method and simulation analysis of comprehensively distributed fault location of transmission line[J]. High Voltage Engineering，2011，37(4)：923-929.

[19]张希鹏，郤能灵，范春菊，等．基于 VPC-EMTR 理论的直流配电网故障选线[J]．高电压技术，2020，46(5)：1730-1739．
Zhang Xipeng，Tai Nengling，Fan Chunju，et al. Fault line selection in DC distribution network based on VPC-EMTR theory[J]. High Voltage Engineering，2020，46(5)：1730-1739.

[20]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.

[21]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)，2012：469-474.

[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，2013：1-5.

[23]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.

[24]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，2014：1-7.

[25]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.

[26]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 correla-tion of electromagnetic time reversal[J]. High Voltage Engineering，2023，49(5)：1851-1859.

[27]An Jianwei，Zhuang Chijie，Rachidi F，et al. An effective EMTR-Based high-impedance fault location method for transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility，2021，63(1)：268-276.

[28]Sun Jian，Yang Qing，Cui Haonan，et al. Distribution line fault location with unknown fault impedance based on electromagnetic time reversal[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility，2021，63(6)：1921-1929.

胡成博(1984—)，男，高级工程师，研究方向为输变电设备智能运检。

朱雪琼(1990—)，男，高级工程师，研究方向为输变电设备状态智能传感。