

DOI: 10.7652/xjtuxb202001003

采用电磁时间反转的不同电压等级 同杆双回输电线路故障测距

商立群, 黄若轩, 呼延海, 杨晨光

(西安科技大学电气与控制工程学院, 710054, 西安)

摘要: 针对不同电压等级同杆双回输电线路测距复杂的问题,提出了一种基于电磁时间反转理论的故障测距方法。建立了线路的故障附加网络,推导了经时间反转后的故障电流有效值,并分析了电磁时间反转理论应用于输电线路故障测距的适用性。记录线路两侧故障电流变化的情况并用新六序分量法解耦线路,对经解耦后得到的两侧同向正序电流分量进行小波分解,提取两侧电流突变量,对两侧电流突变量进行时间反转并叠加。假设在输电线路多处发生故障,计算出各个故障点处的电流有效值,最大电流有效值对应的距离即为故障距离。利用 ATP-EMTP 软件搭建了不同电压等级同杆双回输电线路仿真模型,采用 Matlab 进行编程验证。仿真结果表明:所提方法不受过渡电阻和故障相角的影响;当采样频率为 1 MHz 时,在不同故障类型情况下测距结果的相对误差低于 0.57%,所提方法测距精度高;测距结果的相对误差会随着采样频率的上升而降低。

关键词: 不同电压等级同杆双回输电线路;故障测距;电磁时间反转;新六序分量法;小波分解

中图分类号: TM721.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)01-0019-07

Fault Location of Double-Circuit Transmission Lines on Same Pole under Different Voltage Levels by Electromagnetic Time Reversal

SHANG Liqun, HUANG Ruoxuan, HUYAN Hai, YANG Chenguang

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

Abstract: Aiming at the problem of complex ranging of double-circuit transmission lines on the same pole under different voltage levels, a fault location algorithm following electromagnetic time reversal theory is proposed. An additional network of line fault is established, the effective value of fault current after time reversal is deduced, and the applicability of electromagnetic time reversal theory to fault location of transmission line is analyzed. The fault current changes on both sides of the line are recorded and the line is decoupled by the new six-sequence component method to obtain the same-direction positive sequence current components on both sides. Wavelet decomposition is used to decouple the positive-sequence current in the same direction on both sides, and the fault current features on both sides is obtained. Then, the current mutations on both sides are time-reversed and superimposed. Assuming that there are multiple faults in the transmission line, the current effective value of each fault is evaluated, and the distance corresponding to the maximum current effective value is the fault distance. A power transmission model under different voltage levels of the same double-circuit line was built in ATP-EMTP

收稿日期: 2019-05-30。 作者简介: 商立群(1968—),男,教授。 基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JM-544)。

网络出版时间: 2019-09-19 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190919.1139.011.html>

software. The simulation results show that the algorithm is not affected by transition resistance and fault phase angle, and when the sampling frequency is 1 MHz, the relative error of ranging results is less than 0.57% under different fault types. The relative error of ranging results reduces with the increasing sampling frequency.

Keywords: double circuit transmission lines on the same pole with different voltage levels; fault location; electromagnetic time reversal; new six-sequence component method; wavelet decomposition

城市的发展、人口的增长以及土地资源的严重不足,导致架设输电线路的成本不断上升。使用同杆双回线路能够很好地满足现代电力系统对供电可靠性和大容量输电等的要求,在中国及世界各地的电力系统中,同杆架设的平行双回高压输电线路的数目越来越多^[1]。当输电线路发生故障时,准确的故障测距对快速寻找到故障点和及时清除故障具有重要意义。

同杆双回线路存在线间互感和相间互感,其故障类型包括单回线故障、跨线故障等 120 余种,类型多且复杂。但是,当前大多数的测距方法都只针对单回线,对双回线测距方法的研究相对较少,有必要进一步对双回线测距进行研究。现有测距方法根据原理的不同可分为行波法、故障分析法和智能化方法 3 大类。行波法通过记录测量点到故障点的行波传播时间进行定位,该方法原理直观,但存在行波波头识别不准确的问题^[2]。故障分析法分为单端法^[3]和双端法^[4];单端法在测距过程中仅用线路一端所测数据信息,测距精度受运行方式、过渡电阻等因素影响严重^[5];双端法需要传送双端数据的通信通道,数据严格同步实现比较困难,硬件成本较高,并且双端数据不完全同步的采样会对测距结果造成新的误差^[6]。基于人工智能的故障测距方法主要有基于人工神经网络的方法、基于遗传算法的方法、基于专家系统的方法和基于模糊理论的方法等,但是上述方法大部分尚未成熟,测距稳定性差,仍需进一步探索研究。

电磁时间反转(EMTR)理论最初应用于超声波源的定位中^[7],其是将电场强度和磁场强度的时间变量进行反转,通过麦克斯韦方程组的可逆性进行理论证明,同时利用大量的实验数据验证理论的正确性^[8]。文献[9]将 EMTR 理论用于交流配电网的故障定位。文献[10]将 EMTR 理论运用于柔性直流输电系统的故障测距。现有研究表明,将 EMTR 理论应用于电力线路故障测距具有广阔的前景。

本文提出一种基于 EMTR 理论的不同电压等

级同杆双回线故障测距方法,采用线路两端故障电流进行测距,不受过渡电阻、故障类型和故障相角的影响,具有较高的精度。

1 不同电压等级同杆双回输电线路的解耦

不同电压等级同杆双回线路具有线间耦合和相间耦合,耦合线路结构如图 1 所示。 i_{IA} 、 i_{IB} 、 i_{IC} 分别为 I 回线的相电流, i_{IIA} 、 i_{IIB} 、 i_{IIC} 分别为 II 回线的相电流。I 回线的自阻抗为 Z_1 、相间互阻抗为 Z_{m1} , II 回线的自阻抗为 Z_2 、相间互阻抗为 Z_{m2} ,双回线间的互感为 Z_p 。

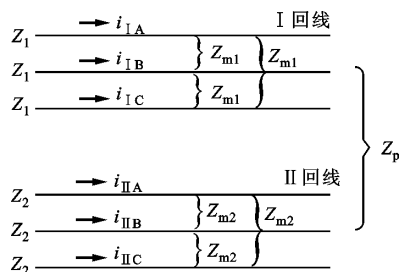


图 1 不同电压等级耦合线路

传统的六序分量法^[11]不能用于不同电压等级同杆双回线路的解耦。本文针对参数不对称同杆双回线提出新六序分量法进行解耦^[12],首先进行相间解耦,通过对称分量法将双回线分解为正序、负序和零序分量,相间解耦后,零序分量之间仍有互感,再针对零序互感进行线间解耦,从而将线路阻抗完全解耦。经两次解耦,得到解耦矩阵 $\mathbf{M}$,表达式为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & a^2 & a & 1 & 0 & 0 \\ 1 & a & a^2 & 1 & 0 & 0 \\ k_1 & 0 & 0 & k_2 & 1 & 1 \\ k_1 & 0 & 0 & k_2 & a^2 & a \\ k_1 & 0 & 0 & k_2 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $a=e^{j120^\circ}$; k_1 、 k_2 为修正系数,计算式为

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{Z_{\parallel 0} - Z_{\perp 0} + \sqrt{(Z_{\parallel 0} - Z_{\perp 0})^2 + 36Z_p^2}}{6Z_p} \\ k_2 &= \frac{Z_{\parallel 0} - Z_{\perp 0} - \sqrt{(Z_{\parallel 0} - Z_{\perp 0})^2 + 36Z_p^2}}{6Z_p} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 $Z_{\perp 0}$ 、 $Z_{\parallel 0}$ 为 I、II 回线的零序阻抗, 计算式为

$$\left. \begin{aligned} Z_{\perp 0} &= Z_1 + 2Z_{m1} \\ Z_{\parallel 0} &= Z_2 + 2Z_{m2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

新的解耦方法对电流总的变换为

$$\mathbf{i}_{ABC} = \mathbf{M} [i_{T0} \quad i_{F0} \quad i_{T1} \quad i_{F1} \quad i_{T2} \quad i_{F2}]^T \quad (4)$$

式中: $\mathbf{i}_{ABC}$ 为双回线的电流列向量; i_{T0} 、 i_{F0} 、 i_{T1} 、 i_{F1} 、 i_{T2} 、 i_{F2} 分别为同向零序电流、反向零序电流、同向正序电流、反向正序电流、同向负序电流、反向负序电流。通过式(4)可实现六相电流与六序分量之间的转化。

由于对于任何类型的双回线故障, 同向正序电流总是存在, 因此为了适用于各种故障类型, 本文采用同向正序电流进行测距^[13]。

2 电磁时间反转理论在传输线上的应用

2.1 电磁时间反转理论基础

EMTR 理论的核心是时间反转算子对应于时间符号的变化, 即 $t \rightarrow -t$ ^[14]。在实际应用中, 所测信号仅为一段时间。设所测信号的时间段为 T ^[15], 对该信号进行时间反转, 即得到 $t \rightarrow T-t$ 。

多导体无损传输线的电压波动方程为

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} U(x, t) - L'C' \frac{\partial^2}{\partial t^2} U(x, t) = 0 \quad (5)$$

式中: $U(x, t)$ 为相电压; L' 和 C' 分别为传输线的电感和电容。

时间反转方程为

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} U(x, -t) - L'C' \frac{\partial^2}{\partial t^2} U(x, -t) = 0 \quad (6)$$

如果 $U(x, t)$ 是波动方程的一个解, 那么 $U(x, -t)$ 也是一个解, 这表明波动方程在时间反转变换下是不变的^[16]。

2.2 电磁时间反转理论的证明

为了验证 EMTR 理论在有损线路故障测距中的适用性, 给出有损传输线故障后的故障附加网络, 如图 2 所示。线路长为 l , R 、 G 、 L 、 C 分别为线路分

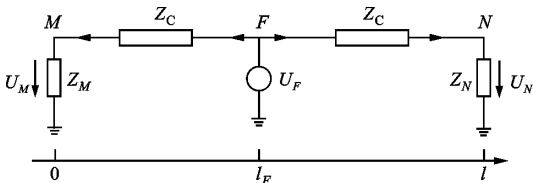


图 2 线路故障附加网络

布参数的电阻、电导、电感、电容, 波阻抗为 Z_C , 线路两端的阻抗分别为 Z_M 和 Z_N 。M 和 N 分别为传输线的左端和右端, 以 M 端为原点建立坐标。

假设故障点在 F 处, 故障点处电压 U_F 已知, 计算出线路两端电压 U_M 和 U_N 为

$$\left. \begin{aligned} U_M &= \frac{(1 + \rho_1) e^{-\gamma_1 l_F}}{1 + \rho_1 e^{-2\gamma_1 l_F}} U_F \\ U_N &= \frac{(1 + \rho_2) e^{-\gamma_1 (l - l_F)}}{1 + \rho_2 e^{-2\gamma_1 (l - l_F)}} U_F \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: ρ_1 和 ρ_2 为线路反射系数; γ_1 为传播常数。 ρ_1 、 ρ_2 、 γ_1 的计算式为

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= (Z_1 - Z_C) / (Z_1 + Z_C) \\ \rho_2 &= (Z_2 - Z_C) / (Z_2 + Z_C) \\ \gamma_1 &= \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

图 3 是有损镜像线路, 线路分布参数的电阻、电导、电感、电容分别设为 R 、 G 、 $-L$ 、 $-C$, 线路波阻抗为 Z_C^* , 线路的传播系数为 γ_2 。

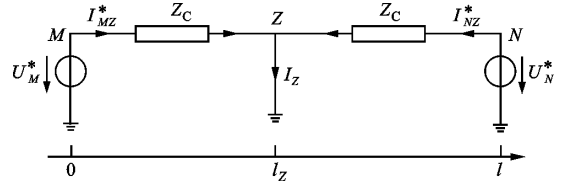


图 3 有损镜像线路

在镜像线路的 M 端和 N 端分别引入两个电压源 U_M^* 和 U_N^* , 计算式为

$$\left. \begin{aligned} U_M^* &= \frac{(1 + \rho_1) e^{-\gamma_2 l_F}}{1 + \rho_1 e^{-2\gamma_2 l_F}} U_F^* \\ U_N^* &= \frac{(1 + \rho_2) e^{-\gamma_2 (l - l_F)}}{1 + \rho_2 e^{-2\gamma_2 (l - l_F)}} U_F^* \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 $\gamma_2 = \sqrt{(R - j\omega L)(G - j\omega C)}$ 。

线路两端的电流为

$$\left. \begin{aligned} I_M^* &= U_M^* / Z_C^* \\ I_N^* &= U_N^* / Z_C^* \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

假设在距离 M 端 l_Z 处发生接地故障, 故障点两侧的故障电流为

$$\left. \begin{aligned} I_{MZ}^* &= \frac{(1 + \rho_1) e^{-\gamma_2 l_Z}}{1 + \rho_1 e^{-2\gamma_2 l_Z}} I_M^* \\ I_{NZ}^* &= \frac{(1 + \rho_2) e^{-\gamma_2 (l - l_Z)}}{1 + \rho_2 e^{-2\gamma_2 (l - l_Z)}} I_N^* \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将式(9)(10)代入式(11)中, 可得

$$\left. \begin{aligned} I_{MZ}^* &= \frac{(1 + \rho_1)^2 e^{-\gamma_2 (l_Z - l_F)}}{Z_C^* (1 + \rho_1 e^{-2\gamma_2 l_Z}) (1 + \rho_1 e^{-2\gamma_2 l_F})} U_F^* \\ I_{NZ}^* &= \frac{(1 + \rho_2)^2 e^{-\gamma_2 (l_Z - l_F)}}{Z_C^* (1 + \rho_2 e^{-2\gamma_2 (l - l_Z)}) (1 + \rho_2 e^{-2\gamma_2 (l - l_F)})} U_F^* \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

因此,可通过假设的故障位置 l_z 推导出总电流的表达式为

$$I_z^* = I_{Mz}^* + I_{Nz}^* \quad (13)$$

为了便于计算,令 $A = |I_{Mz}^* - I_{Nz}^*|$, 将求 I_z^* 最大值的问题转化求 A 最小值的问题,由此可得。

$$|A| = |I_{Mz}^* - I_{Nz}^*| = \left| \frac{U_F^*}{Z_C} \right| \cdot \left| \frac{(1+\rho_1)^2 e^{-\gamma_2(l_z-l_F)}}{(1+\rho_1 e^{-2\gamma_2 l_z})(1+\rho_1 e^{-2\gamma_2 l_F})} - \frac{(1+\rho_2)^2 e^{-\gamma_2(l_z-l_F)}}{(1+\rho_2 e^{-2\gamma_2(l-l_z)})(1+\rho_2 e^{-2\gamma_2(l-l_F)})} \right| \quad (14)$$

由式(14)可知,当且仅当 $l_z = l_F$ 时, $|A|$ 可取到唯一的最小值,同样说明 $|I_z^*|$ 此时取得唯一的最大值。

3 基于电磁时间反转理论的故障测距方法

线路故障体现为线路各处电压、电流的变化。EMTR 方法从电磁场的角度出发,通过对故障电流产生的电场进行时间反转,进而在所构造的传输线模型中求得故障距离。

输电线路发生故障后,首先需要对所测故障电流进行合适的滤波并提取有用的信号。小波函数可以表征不同尺度的信号特征,并且不用直接处理大量的小波系数,故选择小波函数对故障信号进行滤波。图4给出了结合小波分解和 EMTR 理论的故障测距方法流程。

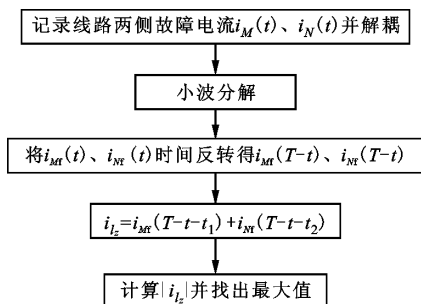


图4 基于 EMTR 故障测距方法的流程

结合小波分解和 EMTR 理论的故障测距方法步骤如下。

第1步,当线路发生故障后,记录线路两侧电流,左侧电流为 $i_M(t)$,右侧电流为 $i_N(t)$ 。使用新六序分量法进行解耦。

第2步,选取二阶 db2 小波函数分解故障电流,得到电流突变量, M 侧的电流突变量设为 $i_{Mf}(t)$, N 侧的电流突变量设为 $i_{Nf}(t)$ 。

第3步,设置录波时间延时为 T ,将电流突变量

在该时间段内进行时间反转,反转后的 M 侧电流为 $i_{Mf}(T-t)$, N 侧电流为 $i_{Nf}(T-t)$ 。

第4步,对线路左侧反转后的电流突变量进行 $t_1 = l/v$ 的时移,对线路右侧反转后的电流突变量进行 $t_2 = (l-l_z)/v$ 的时移,对两段时移后的电流突变量进行叠加,得到故障点处的电流 i_{l_z} 为

$$i_{l_z} = i_{Mf}(T-t-t_1) + i_{Nf}(T-t-t_2) \quad (15)$$

第5步,利用式(16)计算假设故障点处的电流有效值,最大的有效值处对应的距离即为故障距离。故障点处的电流有效值为

$$|i_{l_z}| = \sqrt{\left[\sum_{n=1}^{T/f_s} i_{l_z}(nf_s) \right] / (T/f_s)} \quad (16)$$

式中 f_s 为录波装置的采样率。

4 仿真实验

4.1 仿真模型及参数

用 ATP-EMTP 软件搭建不同电压等级同杆双回输电线路系统,采用 Matlab 进行编程验证。图5为不同电压等级双回路系统简图,图6为架空线路示意图。

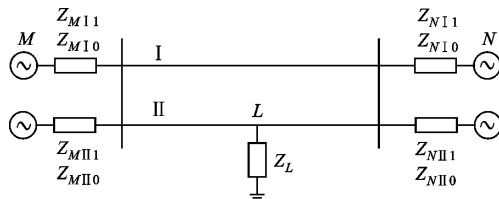


图5 不同电压等级同杆双回输电线路

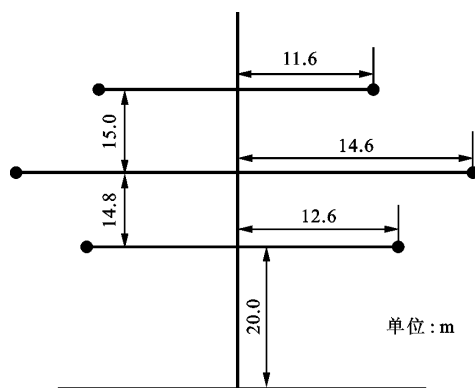


图6 架空线路示意图

本文模型的 I 回线和 II 回线的电压等级分别为 220 kV 和 500 kV。I 回线 M 侧正序阻抗为 $Z_{M11} = j43 \Omega$, 零序阻抗为 $Z_{M10} = j49.668 \Omega$, N 侧正序阻抗为 $Z_{N11} = j50 \Omega$, 零序阻抗为 $Z_{N10} = j53.668 \Omega$ 。II 回线 M 侧正序阻抗为 $Z_{M11} = j63 \Omega$, 零序阻抗为 $Z_{M10} = j69.999 \Omega$, N 侧正序阻抗为 $Z_{N11} = j40 \Omega$,

零序阻抗为 $Z_{N\text{II}0} = \text{j}59.998 \, \Omega$ 。架空线路采用 Bergeron 模型,具体参数如表 1 所示,线路全长为 300 km,采样频率为 1 MHz。

表 1 架空线路参数

参数	数值
土壤电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	100
单位长度直流电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.072 32
导线内半径/cm	0.406 14
导线外半径/cm	2.763
分裂导线分裂间距/cm	40
分裂导线分裂数	4

4.2 仿真过程

故障开始时刻设为 0.1 s,仿真总时长设为 0.2 s,假设距离线路 M 侧 200 km 处发生单回线接地故障,过渡电阻 Z_L 为 15 Ω 。记录 99.0~102.0 ms 时间段内的电流数据。将记录的电流数据进行解耦,可得到 M 侧和 N 侧的同向正序电流分量,如图 7 所示。

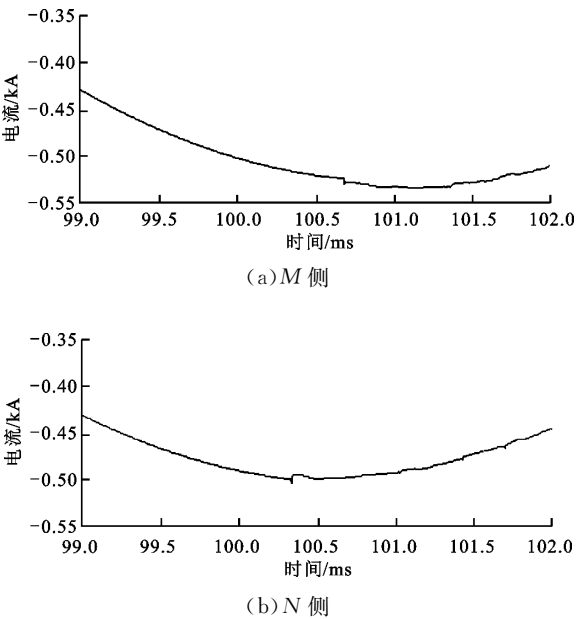


图 7 同向正序电流分量

在电磁时间反转前后,分别利用 db2 小波函数对解耦后的 M 侧和 N 侧同向正序电流进行小波分解,得到反转前后 M 侧和 N 侧的同向正序电流小波分解值,如图 8~9 所示。

假设在线路上每间隔 0.1 km 就有一次故障,利用式(16)计算故障电流有效值,结果如图 10 所示。可以发现,在横坐标 198.8 km 处的电流有效值最大,此处即为故障距离。

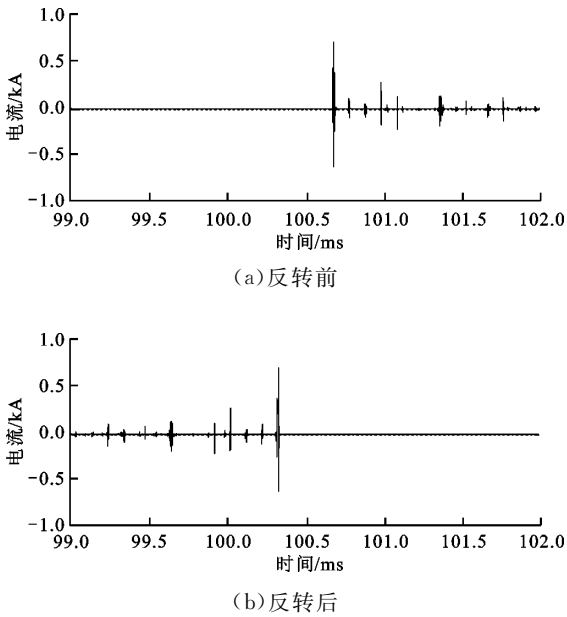


图 8 反转前后 M 侧同向正序电流的小波分解值

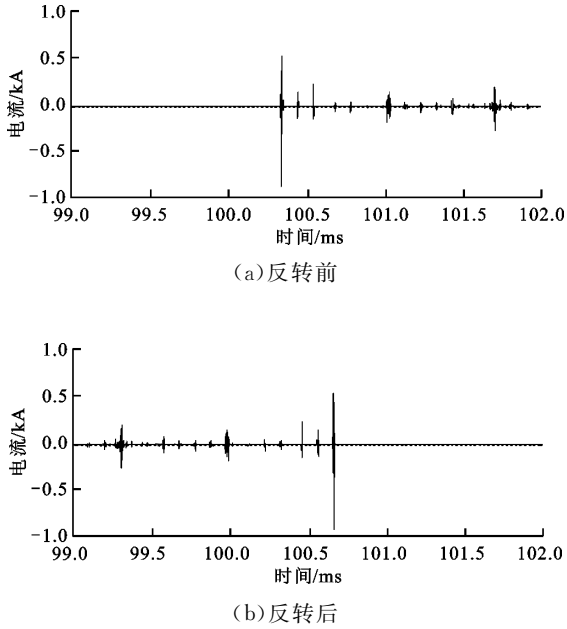


图 9 反转前后 N 侧同向正序电流的小波分解值

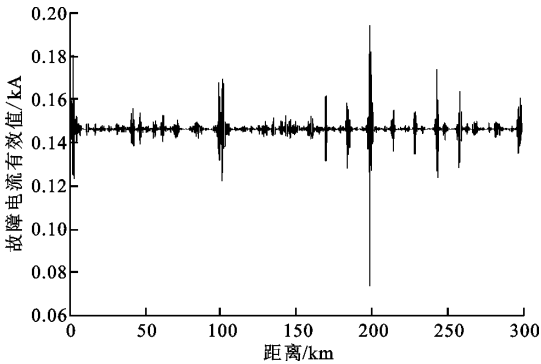


图 10 输电线路上的故障电流有效值

4.3 单回线故障类型的影响

为了验证本文测距方法的实际效果,首先对不
同单回线故障类型进行了仿真验证,结果如表 2 所
示。测距相对误差 δ 的计算式为

$$\delta = \left| \frac{l_{ca} - l_{re}}{l} \right| \times 100\% \tag{17}$$

式中: l_{ca} 为计算故障距离; l_{re} 为实际故障距离。

表 2 不同单回线故障类型的测距结果

故障 类型	l_{re}/km	l_{ca}/km		
		接地电阻 为 15 Ω	接地电阻 为 50 Ω	接地电阻 为 100 Ω
单相 接地	50	51.4	51.4	51.4
	150	149.7	149.7	149.7
	250	248.3	248.3	248.3
相间 短路	50	51.7	51.7	51.7
	150	150.3	150.3	150.3
	250	248.6	248.6	248.6
相间 短路 接地	50	51.7	51.7	51.7
	150	149.4	149.4	149.4
	250	248.6	248.6	248.6
3 相 短路	50	51.4	51.4	51.4
	150	150.3	150.3	150.3
	250	248.6	248.6	248.6

从表 2 可以看出:测距结果不受单回线故障类
型、故障点位置以及过渡电阻的影响,测距结果的相
对误差小于 0.57%。

4.4 跨线故障的影响

跨线故障在双回线故障种类中占 80%左右,虽
然其发生概率较低,但是仍有必要对跨线故障的准
确定位进行研究。表 3 给出了不同跨线故障类型的
测距结果。可以看出,不同跨线故障类型对测距结
果并无影响,测距结果的相对误差为 0.47%。

4.5 故障相角的影响

表 4 给出了两侧电源在不同初相角下的测距结
果。仿真设置的过渡电阻为 15 Ω 。从表 4 可以看
出,在两侧电源超前或滞后,即初相角不同的情况
下,测距结果均不受影响,测距结果的相对误差为
0.133%。

从表 2~4 的测距结果可以看出:本文测距方法
不受故障类型、故障距离、故障相角以及过渡电阻的
影响,测距结果的相对误差低于 0.47%。

4.6 采样频率的影响

由于采样频率对测距精度也存在一定的影响,
因此针对不同采样频率进行了仿真验证。故障类型

设置为单回线 A 相接地,假设故障距离为 100 km,
仿真结果如表 5 所示。可以看出,测距结果的相对
误差会随着采样频率的上升而降低,当采样频率为
250 kHz 时,测距结果的相对误差为 0.43%。

表 3 不同跨线故障类型的测距结果

故障 类型	l_{re}/km	l_{ca}/km		
		接地电阻 为 15 Ω	接地电阻 为 50 Ω	接地电阻 为 100 Ω
2 相 跨线	50	51.4	51.4	51.4
	150	149.4	149.4	149.4
	250	248.3	248.3	248.3
3 相 跨线	50	51.4	51.4	51.4
	150	150.3	150.3	150.3
	250	248.6	248.6	248.6
4 相 跨线	50	51.4	51.4	51.4
	150	149.7	149.7	149.7
	250	248.6	248.6	248.6
5 相 跨线	50	51.4	51.4	51.4
	150	149.7	149.7	149.7
	250	248.6	248.6	248.6
6 相 跨线	50	51.4	51.4	51.4
	150	150.3	150.3	150.3
	250	248.6	248.6	248.6

表 4 两侧电源不同初相角下的单相接地
故障测距结果

左侧电源 初相角/ $^{\circ}$	右侧电源 初相角/ $^{\circ}$	l_{re}/km	l_{ca}/km	$\delta/\%$
0	0	100	100.4	0.133
45	45	100	100.4	0.133
90	90	100	100.4	0.133
0	30	100	100.4	0.133
30	0	100	100.4	0.133
45	75	100	100.4	0.133
75	45	100	100.4	0.133
90	120	100	100.4	0.133
120	90	100	100.4	0.133

表 5 不同采样频率下的故障测距结果

f_s/kHz	l_{re}/km	l_{ca}/km	$\delta/\%$
50	100	102.1	0.70
100	100	98.0	0.67
250	100	101.3	0.43
500	100	99.3	0.23
1 000	100	100.4	0.13

5 结 论

本文提出了一种基于 EMTR 理论的不同电压等级同杆双回输电线路的故障测距方法,建立了考虑反射的有损线路模型,并将其时间反转得到镜像线路,推导出镜像线路中故障点处的反转电流,验证了将 EMTR 理论应用于输电线路故障测距的适用性。根据线路的结构特点,在传统的六序分量法的基础上引入修正参数得到新的六序分量法,再利用新的六序分量法消除线路互感,通过小波变换滤波得到正序电流突变量,将线路两侧的电流突变量进行时间反转并叠加进行测距。

在 ATP-EMTP 软件中建立了仿真模型并用 Matlab 进行了编程,仿真和计算结果表明:本文测距方法不受故障相角和过渡电阻的影响;在不同故障类型的情况下,当采样频率为 1 MHz 时,测距结果的相对误差低于 0.57%;在不同采样频率的情况下,测距结果的相对误差会随着采样频率的上升而降低。本文方法对于不同电压等级同杆双回输电线路的故障测距是适用的。

参考文献:

- [1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996: 256-335.
- [2] 高效海, 苏晓龙. 一种新的单端行波测距方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 87-91.
GAO Xiaohai, SU Xiaolong. A new method for single-ended traveling wave fault location [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 87-91.
- [3] 宋国兵, 索南加乐, 许庆强, 等. 基于单端电流量的同杆双回线故障定位方法 [J]. 继电器, 2004, 32(7): 1-6.
SONG Guobing, SUONAN Jiale, XU Qingqiang, et al. Fault location for parallel transmission lines on the same tower based on one-terminal current [J]. Relay, 2004, 32(7): 1-6.
- [4] 商立群, 施围. 基于分布参数模型的同杆双回输电线路故障测距 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(12): 1380-1383.
SHANG Liqun, SHI Wei. Fault location algorithm for double-circuit transmission lines based on distributed parameter model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(12): 1380-1383.
- [5] 李振兴, 田斌, 李振华, 等. 适用于单/双回线的双端非同步故障测距方法 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 105-110.

- LI Zhenxing, TIAN Bin, LI Zhenhua, et al. Two-terminal nonsynchronized fault location algorithms for single/double transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 105-110.
- [6] 梁振锋, 康小宁, 索南加乐. 基于故障类型的同杆双回线故障分量提取算法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 50-54.
LIANG Zhenfeng, KANG Xiaoning, SUONAN Jiale. Novel fault components extraction approach for double-circuit transmission lines on one pole [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 50-54.
- [7] FINK M. Time reversal of ultrasonic fields: part I Basic principles [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1992, 39(5): 555-566.
- [8] CASSEREAU D, FINK M. Time-reversal of ultrasonic fields: part III Theory of the closed time-reversal cavity [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1992, 39(5): 579-592.
- [9] CODINO A, WANG Z Y, RAZZAGHI R, et al. An alternative method for locating faults in transmission line networks based on time reversal [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(5): 1601-1612.
- [10] 张希鹏, 郇能灵, 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.
- [11] 索南加乐, 葛耀中, 陶惠良. 用六序分量补偿过渡电阻的双回线准确故障定位方法 [J]. 西安交通大学学报, 1992, 26(6): 107-112, 120.
SUONAN Jiale, GE Yaozhong, TAO Huiliang. A new accurate fault locator of the double circuit line using six-sequence components at one terminal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1992, 26(6): 107-112, 120.
- [12] 许侃, 范春菊, 许锦喜. 经过渡电阻短路接地故障的计算方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 44-51.
XU Kan, FAN Chunju, XU Jinxi. Study on calculation methods of ground fault through transition resistance [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 44-51.

(下转第 41 页)