

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200845

基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距

陶彩霞, 杜雪, 高锋阳, 万应利, 杨乔礼

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对架空线-电缆混合输电线路波阻抗不连续而引起的频谱混叠现象严重的问题, 提出了一种基于经验小波变换(EWT)的混合输电线路单相接地故障测距方法。首先利用 EWT 对故障产生的暂态零序电流行波分解得到低频分量。然后根据低频分量选线判据对混合输电线路进行故障选线, 通过分析奇异性检测结果准确标定故障线路行波波头。最后配电网混合输电线路的故障测距通过单端行波测距原理得以实现。PSCAD/Matlab 仿真结果表明, 该方法具有较高的准确性, 满足工程实践定位精度在 200 m 以内的要求。

关键词: 线-缆混合输电线路; 暂态信息; 行波; 经验小波变换; 奇异性检测; 故障定位

Single-phase to ground fault location of hybrid transmission lines based on empirical wavelet transform

TAO Caixia, DU Xue, GAO Fengyang, WAN Yingli, YANG Qiaoli

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To solve the serious problem of spectrum aliasing caused by discontinuous wave impedance routing of an overhead-cable hybrid transmission line, a single-phase ground fault location method based on Empirical Wavelet Transform (EWT) is proposed. First, the EWT is used to decompose the transient zero sequence current traveling wave generated by the fault to get the low-frequency component. Then, fault line selection of the hybrid transmission line is carried out with a low-frequency component line selection criterion. By analyzing the singularity detection results, the traveling wave head of the fault line is accurately calibrated. Finally, the fault location of hybrid transmission lines in distribution networks is realized by the principle of single-terminal traveling wave location. PSCAD/Matlab simulation results show that the method has high accuracy, and the fault location accuracy is within 200 m, which meets the requirements of engineering practice.

This work is supported by the Key Research and Development Program of Gansu Province (No. 18YF1FA058) and Lanzhou Talents Plan (No. 2017-RC-95).

Key words: overhead-cable hybrid transmission lines; transient information; traveling wave; empirical wavelet transform; singularity detection; fault location

0 引言

随着城市现代化建设不断推进,线-缆混合的线路结构应用越来越广泛。在市外,为了节约成本,常选用架空线路进行输电;在市内,为了美化市容、节约土地资源,常采用敷设电缆的方式进行输电^[1]。中国 10~35 kV 中压配电网普遍采用中性点经消弧线圈接地方式,在运行过程中常常会受到各种扰动,

其中,单相接地短路故障发生的概率更是达到 80%^[2]。系统发生单相接地故障后仍可运行 1~2 h^[3],在短时间内若能对故障线路实现准确的选线及定位并切除故障,对提高供电系统的稳定性和经济性具有重要意义。

现有输电线路故障选线方法主要分为人工注入法的主动式选线和基于故障产生的稳态信息、暂态信息的被动式选线^[4]。文献[5]提出了一种基于主动检测的直流电网导频保护来识别故障区段,但其成本高且易受电网系统外部设备的影响,投入较大、操作复杂^[6]。而相较于主动式选线,被动式选线不

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目资助(18YF1FA058); 兰州市人才计划项目资助(2017-RC-95)

需要向系统中投入一次设备，也不需要系统中已有一次设备的额外配合，不会给电力系统的安全稳定运行带来隐患^[7]。当系统发生故障时，暂态信息法故障特征明显，且消弧线圈及电弧对其影响甚小^[8-9]。与此同时，该方法具有较高的检测灵敏度，故而该方法在近年来研究热度较高^[10-12]。

故障行波定位技术具有不受过渡电阻、电流互感器饱和、系统振荡和长线分布电容影响等优点，具有较为明显的技术优势。针对架空线-电缆混合输电线路，文献[13]提出将混合输电线路进行归一化处理的故障定位方法，但将架空线波速换算成电缆波速或将电缆波速换算成架空线波速，算法本身存在较大的误差；有学者基于多端初始行波时差辨识故障区段提出了定位故障点位置的方法，该方法对于分接头及其周边故障和线路末端故障的定位误差较大且增大了设备成本^[14]；文献[15-19]分别提出了用希尔伯特-黄变换(HHT)、经验模态分解(EMD)、集合经验模态分解(EEMD)、变分模态分解(VMD)等方法对故障初始行波波头进行标定，但以上四种方法存在理论基础不完备、模态混叠严重及不能自适应分割信号频谱等问题，计算量大且耗时长。

Gills 基于小波变换和窄带信号分析理论，给出了 EWT 的运算过程^[20]。EWT 理论依据完备且计算量远小于 EEMD 和 EMD，其本质是通过对信号频谱进行自适应分割，构造合适的小波滤波器组，从而提取信号的不同调频-调幅成分。该方法已成功应用于信号处理和图像降噪分析中^[21-25]。研究表明，EWT 极大地削弱了端点效应和模态混叠现象，进一步提高了信噪比，加快了计算速度^[26]。

基于以上分析，文中提出了一种基于经验小波变换的混合输电线路单端行波故障定位方法。首先，提取故障后的暂态零序电流行波，利用 EWT 分解出低频分量 IMF1，计算线路间两两相关系数，利用低频分量选线判据进行故障选线；然后对故障线路 IMF1 进行奇异性检测从而准确标定故障电流行波波头；最后利用单端行波测距原理，得到准确的故障位置。通过 Pscad/Matlab 仿真对测距技术进行了验证。

1 经验小波变换原理

经验小波变换的理论基础是小波分析理论，该方法对频域极大值点进行提取，为使信号的不同模态分离，对傅里叶频谱进行自适应分割；为了得到具有紧密支撑的傅里叶频谱的 AM-FM 成分，该理论在频域范围内构造自适应的带通滤波器组从而对正交小波函数进行构建。其主要步骤如下：

1) 划分原始信号的傅里叶频谱：频率取值范围假设为 $\omega(\omega \in [0, \pi])$ ，频带分区的划分依据原始信号的极大值点确定其个数为 M ，相对应的频带边界中心角频率为 ω_0 ，频带记为 $(\omega_n(\omega_0 = 0, \omega_N = \pi))$ ， $\Lambda_n = [\omega_{n-1}, \omega_n]$ ， $\bigcup_{n=0}^N \Lambda_n = [0, \pi]$ ，定义每个频带的边界宽为 τ_n ，则称以 ω_n 为中心角频率，频宽 $2\tau_n$ 的区域为过渡段，如图 1 所示，经验小波即为定义在每个频带 Λ_n 上的窄带滤波器^[20]。

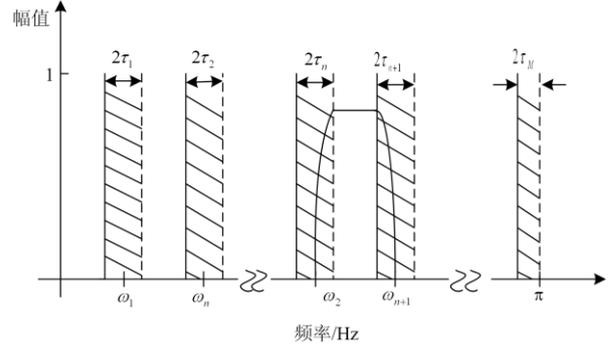


图 1 傅里叶分割

Fig. 1 Fourier segmentation

2) 构造经验小波：通过借鉴 Meyer 型正交小波基的理论^[27]来构造小波基函数，得到的经验尺度函数 $\hat{\phi}_n(\omega)$ 和经验小波函数 $\hat{\psi}_n(\omega)$ 分别如式(1)、式(2)所示。

$$\hat{\phi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq (1-\gamma)\omega_m \\ \cos\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_n}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_m)\right)\right], & (1-\gamma)\omega_m \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_m \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$\hat{\psi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & (1+\gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1-\gamma)\omega_{n+1} \\ \cos\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_{n+1}}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_{n+1})\right)\right], & (1-\gamma)\omega_{n-1} \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_{n+1} \\ \sin\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_n}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_n)\right)\right], & (1-\gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中：

$$\tau_n = \gamma\omega_n (0 < \gamma < 1, \gamma = \min \frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_{n+1} + \omega_n}),$$

$$\beta(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3) \quad x \in [0,1]$$

3) 重构信号: 定义经验小波变换的方法与传统小波变换类似, 得到经验小波变换的细节系数 $W_x^e(n, t)$ 和近似系数 $W_x^e(0, t)$ 如下:

$$W_x^e(0, t) = \langle x(t), \varphi_1(t) \rangle = F^{-1} \left[x(\omega) \hat{\varphi}_1(\omega) \right] \quad (3)$$

$$W_x^e(n, t) = \langle x(t), \psi_n(t) \rangle = F^{-1} \left[x(\omega) \hat{\psi}_n(\omega) \right] \quad (4)$$

则重构之后的信号为

$$x_c(t) = W_x^e(0, t) * \varphi_1(t) + \sum_{n=1}^{N-1} W_x^e(n, t) * \psi_n(t) \quad (5)$$

2 故障线路选线

2.1 故障信号 EWT 分解

经验小波变换对非平稳信号的分解效果显著, 有效处理了经验模态分解的虚假模态问题及小波变换的小波基选取等问题^[28]。因此, 为了克服传统信号分析方法的不足, 文中对暂态零序电流故障行波采取经验小波变换进行模态分解, 达到实现精准选线的目的。基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距算法框图如图 2 所示。

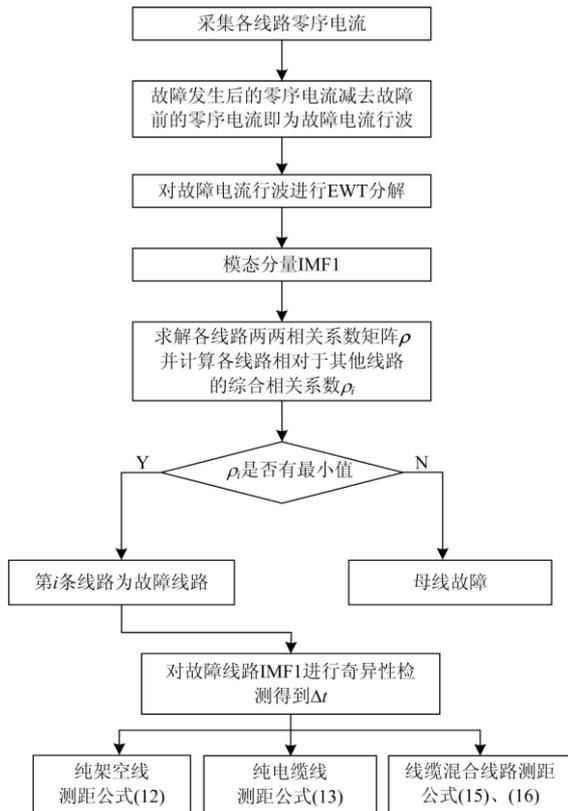


图 2 算法框图

Fig. 2 Diagram of algorithm

基于 EWT 的小电流接地系统单相接地故障选线, 以经验小波变换理论为依据, 分解重构暂态零序电流故障行波信号, 将信号 $f(t)$ 分解为 $k+1$ 个函数 $f_k(t)$:

$$\begin{cases} f_0(t) = W_x^e(0, t) * \phi_n(t) \\ f_1(t) = W_x^e(1, t) * \psi_1(t) \\ \vdots \\ f_k(t) = W_x^e(k, t) * \psi_n(t) \end{cases} \quad (6)$$

则暂态零序电流故障行波信号被 EWT 分解为 $N+1$ 个固有模态之和:

$$f(t) = \sum_{k=0}^N f_k(t) \quad (7)$$

将分解得到的函数 $f_k(t)$ 定义为调幅-调频信号 (AM-FM):

$$f_k(t) = F_k(t) \cos(f_k(t)) \quad (8)$$

在 PSCAD 中搭建仿真模型, 模拟得到不同种类接地故障模型的暂态零序电流故障行波, 在 Matlab 中利用 EWT 工具包对其进行模态分解。通过对比分析仿真实验结果, 故障行波信号的低频分量在故障线路与非故障线路的模态函数 (IMF) 中特征差异尤为明显, 但是因为故障类型的不同, 中频、高频分量的特征差异会存在不稳定情况, 所以文中利用相关性原理对提取的所有出线的低频分量波形进行分析, 将计算出的综合相关系数作为低频分量选线判据。

2.2 低频选线判据

假定系统的出线为 k 条, 所有出线的零序电流故障行波利用经验小波变换进行分解, 从而得到每条线路的低频分量, 计算各线路间低频分量的两两相关系数 ρ ^[5]如式(9)。

$$\rho = \frac{\sum_{n=1}^N x(n)y(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N x^2(n) \sum_{n=1}^N y^2(n)}} \quad (9)$$

式中: $x(n)$ 、 $y(n)$ 分别为两条线路暂态零序电流的低频采样信号; n 表示采样序列, 故障发生时刻即为采样起始点 $n=1$; N 为主频信号的数据长度。

则低频选线判据如下:

1) 在同一数据窗下, 相关系数矩阵 ρ 通过采样系统的所有出线的低频分量数据利用式(9)做两两相关性分析, 可得:

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1k} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \dots & \rho_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{k1} & \rho_{k2} & \dots & \rho_{kk} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, ρ_{ij} 表示在同一数据窗下, 各条出线之间暂态零序电流故障行波低频分量之间的相关系数。由此可知, 该矩阵为对角阵, 对角线均为 1。

2) 每条线路相对于其他线路的综合相关系数 ρ_i 可由式(10)求取如下:

$$\rho_i = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1, j \neq i}^k \rho_{ij} \quad (11)$$

3) 可得低频分量选线判据如下:

① 在 k 条出线中, 若 $\exists \rho_k < 0$ 且有最小值 ρ_i , 判定第 i 条线路为故障线路; ② 若 $\forall \rho_i > 0$, 则判定为母线故障。

3 单端行波故障测距原理

单端行波测距法有着成本低、实时性高等诸多优势^[29-31], 所以本文采取单端行波测距法。图 3 所示为输电线路发生故障后的行波传播示意图, 图中, PN 为架空线路, MP 为电缆线路, P 为电缆线与架空线的连接点; F_1 为电缆线内部故障点, F_2 为架空线内部故障点, F 为线-缆连接点故障点; L_c 为电缆线线长, L_o 为架空线线长; 假设线路故障发生在 t_0 时刻。

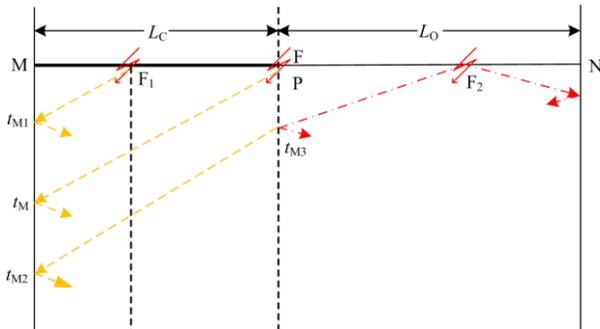


图 3 输电线路故障行波传播示意图

Fig. 3 Propagation diagram of transmission line fault traveling wave

1) 全架空线输电线路

假设输电线路为全架空线输电线路, 即 PN 段, 故障点为 F_2 , 则此时故障距离为

$$x_1 = \frac{1}{2} v_o (t_{M3} - t_0) \quad (12)$$

式中: t_{M3} 为架空线输电线路发生故障时, 暂态零序电流故障行波首次反射到母线 P 端的时间; v_o 为故障行波在架空线路中的传播速度。

2) 全电缆线输电线路

同理, 假设输电线路为全电缆线输电线路, 即 MP 段, 故障点为 F_1 , 则此时故障距离为

$$x_2 = \frac{1}{2} v_c (t_{M1} - t_0) \quad (13)$$

式中: t_{M1} 为电缆线输电线路发生故障时, 暂态零序电流故障行波首次反射到母线 M 端的时间; v_c 为故障行波在电缆线中的传播速度。

3) 电缆-架空线混合输电线路

假设图 3 所示为线-缆混合输电线路, 当故障行波到达线-缆连接点时, 会引起波速的变化, 传播过程如图 3。

当在线-缆混合线路连接点发生故障时, 故障行波的传播时间为

$$\Delta T = t_M - t_0 = \frac{L_c}{v_c} \quad (14)$$

式中, t_M 为故障发生在线-缆连接点时, 线路暂态零序电流故障行波首次反射到 M 端母线的时刻。

若电缆线内部发生故障时, 测得线路暂态零序电流故障传播到 M 端的时间为 t_{M1} , 令 $\Delta t = t_{M1} - t_0$, 则应有 $\Delta t < \Delta T$, 且故障位置距离 M 端为

$$x_3 = \frac{1}{2} v_c \Delta t \quad (15)$$

若架空线内部发生故障时, 测得线路暂态零序电流故障传播到 M 端的时刻为 t_{M2} , 令 $\Delta t = t_{M2} - t_0$, 则应有 $\Delta t > \Delta T$, 且故障位置距离 M 端为

$$x_4 = L_c + \frac{1}{2} v_o (\Delta t - \Delta T) \quad (16)$$

若 $\Delta t = \Delta T$, 说明故障发生在线-缆混合输电线路的连接点处, 计算公式同式(15)。

4 算例仿真

文中通过在 Pscad 中搭建具有 3 条出线, 电压为 10 kV 的小电流接地系统仿真模型(如图 4)进行仿真实验, 以验证所提出的基于 EWT 的小电流接地系统单相接地故障选线及测距的优越性。其中, 架空线采用贝杰龙模型; 电缆线采用同轴电缆模型; 3 条线路分别为: L1 纯架空线长度为 15 km; L2 纯电缆长度为 11 km; L3 为线缆混合输电线路, 其中电缆线长 8 km, 架空线线长 6 km; 采样频率为 1 MHz, 系统仿真时间为 0.3 s, 故障发生在 0.2 s。

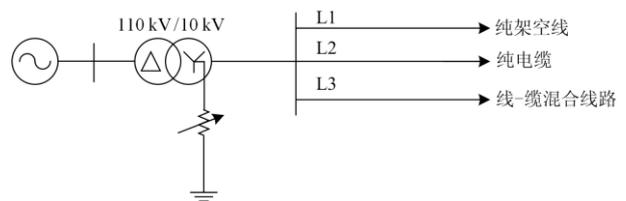


图 4 系统仿真模型

Fig. 4 System simulation model

行波在架空线中的传播速度 $v_0 = 2.9418 \times 10^8$ m/s, 在电缆中的传播速度 $v_c = 1.48 \times 10^8$ m/s。行波测距原理选用单端行波测距法, 测量端为母线端。

文中仅展示当故障发生在 L_3 电缆线 2 km 时的仿真情况。当故障发生电缆线 2 km 处时, 线路暂态零序电流如图 5 所示, 可以看出, 当故障发生后, 三条线路零序电流混叠严重, 需在短时间内准确选线。

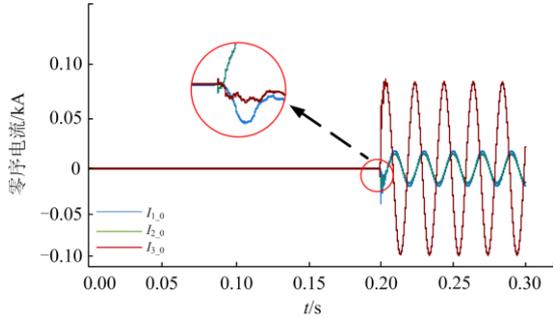


图 5 故障前后系统零序电流

Fig. 5 System zero sequence current before and after fault

因采样频率高, 数据量大, 故截取故障前后 0.1 个周期的零序电流作差即得到故障电流行波如图 6 所示。

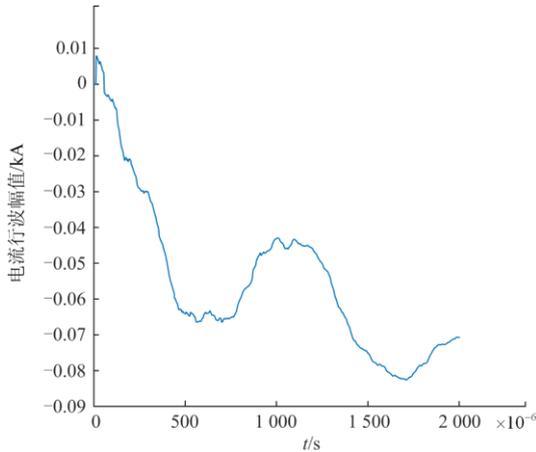


图 6 故障电流行波

Fig. 6 Fault current traveling wave

首先对系统进行故障选线仿真。由式(10)可得各线路低频分量两两相关系数矩阵:

$$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0.9393 & -0.9360 \\ 0.9393 & 1 & -0.9564 \\ -0.9360 & -0.9564 & 1 \end{bmatrix}$$

则由式(11)可得, 每条线路相对于其他线路的综合相关系数为

$$\rho_1 = \frac{1}{2}(\rho_{12} + \rho_{13}) = 0.0016$$

$$\rho_2 = \frac{1}{2}(\rho_{21} + \rho_{23}) = -0.0086$$

$$\rho_3 = \frac{1}{2}(\rho_{31} + \rho_{32}) = -0.9462$$

可以看出, $\rho_3 < \rho_2 < \rho_1$, 即线路 L_3 为故障线路。

对故障线路 L_3 进行测距定位: 图 7 所示为利用 EWT 分解得到的 IMF1, 图 8 所示为利用 EMD 分解得到的 IMF1*, 对比图 7 图 8 可以看到 EWT 分解的 IMF1 频谱特征明显, 而 EMD 分解的 IMF1* 混叠严重, 不利于对故障线路进行准确的测距; 图 9 所示为对故障线路的 IMF1 进行奇异性检测的结果。

由图 9 可得:

$$\Delta t = (41 - 12) \times 10^{-6} \text{ s} = 2.9 \times 10^{-5} \text{ s}$$

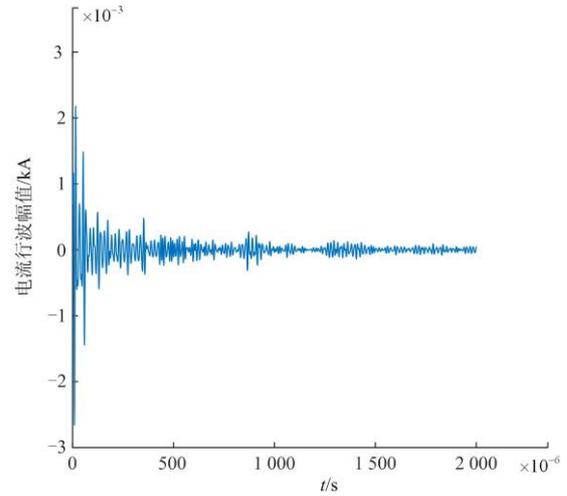


图 7 EWT 分解得到的 IMF1

Fig. 7 IMF1 obtained by EWT decomposition

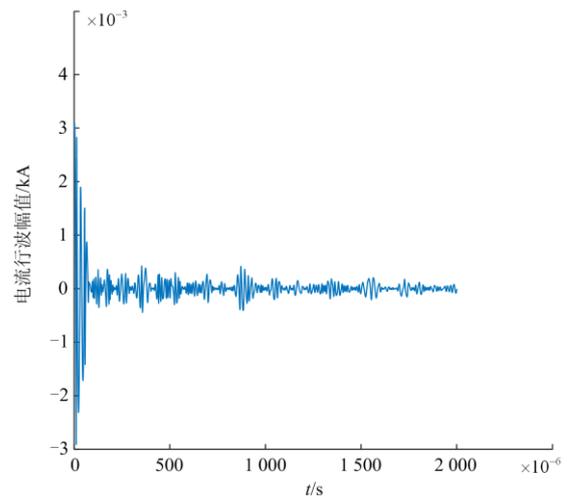


图 8 EMD 分解得到的 IMF1*

Fig. 8 IMF1* obtained by EMD decomposition

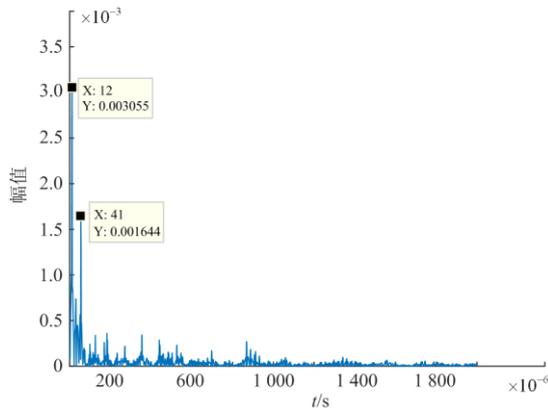


图 9 IMF1 奇异性检测结果

Fig. 9 Singularity detection results of IMF1

$$\Delta T = \frac{L_c}{v_c} = \frac{8 \times 10^3}{1.48 \times 10^8} = 5.4054 \times 10^{-5} \text{ s}$$

$\Delta t < \Delta T$ ，即故障发生在 L3 线路电缆线上。故此时由式(15)可得测距结果为

$$x_3 = \frac{1}{2} v_c \Delta t = \frac{1}{2} \times 1.48 \times 10^8 \times 2.9 \times 10^{-5} = 2.146 \text{ (km)}$$

可以看出，选线结果与仿真预设一致，测距结果与仿真预设相差 146 m，精度满足工程实践的需求。同理，当其他线路其他位置发生故障时可得选线及测距结果如表 1。此外，仿真采用 EMD 分解相同的暂态零序电流故障行波，并采用 EMD 进行故障定位，与 EWT 对比测距结果(见表 1)。

表 1 单相接地故障选线测距仿真结果

Table 1 Simulation results of single phase to ground fault line selection and location

故障线路	L1		L2		L3			
故障位置	5 km	10 km	3 km	8 km	电缆线 2 km	架空线 4 km	线-缆连接点	
低频分量	-0.940 6	-0.915 1	0.004 6	0.007 9	0.001 6	0.002 6	0.003 9	
两两相关系数	0.027 2	0.040 6	-0.941 2	-0.938 8	-0.008 6	-0.005 0	-0.003 6	
选线结果	L1 (正确)		L2 (正确)		L3 (正确)			
测距结果/km	EMD	5.221 7	10.516 9	2.584 4	8.384 1	2.385 7	9.775 3	6.766 8
	EWT	4.892	9.855	3.142 4	7.850 6	2.146 0	9.865 4	6.198 9
相对测距	EMD	0.221 7	0.516 9	0.415 6	0.384 1	0.385 7	0.224 7	0.766 8
误差/km	EWT	0.108	0.145	0.142 4	0.149 4	0.136 0	0.134 6	0.198 9

从表 1 可以看出，文中所提算法选线结果与仿真预设故障线路一致，选线结果准确；对比 EWT 与 EMD 测距相对误差可知，EWT 测距误差小且均在 200 m 以内，测距精度明显比 EMD 高。仿真结果表明，文中所提基于经验小波变换的混合线路故障定位算法能够有效、可靠地定位系统故障。

5 结论

文中提出了一种基于 EWT 的小电流接地系统混合输电线路单相接地故障测距方法。针对多种线型混合输电线路故障测距中的端点效应和频谱混叠现象，对暂态零序电流故障行波进行 EWT 分解，从而实现单相接地故障的准确选线及可靠测距。

通过 EWT 和 EMD 的仿真结果比较分析可得，使用 EWT 比 EMD 测距精度更高，且算法本身更优越。研究表明，文中所提算法不仅具有特征量提取准确、自适应性强的优点，而且能够准确地对故障线路进行选线，且测距结果较精确，为混合输电线路单相接地故障测距提供了新的思路。

参考文献

- [1] 刘顺桂, 李勋, 张宏钊, 等. 一种采用时间判别法的混合线路故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 41-46.
LIU Shungui, LI Xun, ZHANG Hongzhao, et al. A traveling wave fault location method of hybrid line using time discrimination[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 41-46.
- [2] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 基于配电自动化系统的单相接地定位[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 145-149.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Single phase to ground fault location based on distribution automation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 145-149.
- [3] 陈宏山, 石勇, 史泽兵, 等. 小电流接地系统接地故障选线方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5): 42-48, 57.
CHEN Hongshan, SHI Yong, SHI Zebing, et al. Fault line selection method for small current grounding system [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(5): 42-48, 57.
- [4] 刘谋海, 方涛, 姜运, 等. 基于暂态主频分量相关性分

- 析的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 74-79.
- LIU Mouhai, FANG Tao, JIANG Yun, et al. A new correlation analysis approach to fault line selection based on transient main-frequency components[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 74-79.
- [5] SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of hybrid MMC DC grid based on active detection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 82-96. DOI: 10.1186/s41601-020-0152-2.
- [6] 李福志, 郑卫宾, 张文海, 等. 基于回路直流电阻测量的输电线路单相接地故障离线故障定位[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 140-146.
- LI Fuzhi, ZHENG Weibin, ZHANG Wenhai, et al. Offline fault location of transmission line single-phase ground fault based on circuit DC resistance measurement[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 140-146.
- [7] 陈丽丹. 小电流接地系统接地选线的研究[J]. 电工技术, 2020(14): 97-98, 136.
- CHEN Lidan. Research on grounding line selection of small current grounding system[J]. Electrical Engineering Technology, 2020(14): 97-98, 136.
- [8] 孙广, 王阳, 薛枫, 等. 特高压直流输电线路改进双端行波故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 113-120.
- SUN Guang, WANG Yang, XUE Feng, et al. Research on an improved double-terminal traveling wave fault location method for UHVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 113-120.
- [9] 朱鹏, 夏向阳, 李明德, 等. 基于能量比值分析的直流输电线路故障判别[J]. 中国电力, 2020, 53(8): 85-90, 99.
- ZHU Peng, XIA Xiangyang, LI Mingde, et al. The fault determination of DC transmission line based on energy ratio analysis[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 85-90, 99.
- [10] 汤奕, 崔晗, 李峰, 等. 人工智能在电力系统暂态问题中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 2-13, 315.
- TANG Yi, CUI Han, LI Feng, et al. Review on artificial intelligence in power system transient stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 2-13, 315.
- [11] 韦莉珊, 贾文超, 焦彦军. 基于导纳不对称原理的小电流接地系统选线方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 162-167.
- WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Line selection scheme of small current grounding system based on admittance asymmetry principle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 162-167.
- [12] 孙浩飞, 吕新良, 琚泽立, 等. 基于小波变换和嵌入式零树编码的电力录波有损压缩应用[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 31-38, 44.
- SUN Haofei, LÜ Xinliang, JU Zeli, et al. Application of power disturbance data compression based on wavelet transform and EZW coding[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6): 31-38, 44.
- [13] 刘晓琴, 王大志, 江雪晨, 等. 利用行波到达时差关系的配电网故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4109-4115, 4290.
- LIU Xiaoqin, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. Fault location algorithm for distribution power network based on relationship in time difference of arrival of traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4109-4115, 4290.
- [14] HAMIDI R J, LIVANI H. Traveling-wave-based fault-location algorithm for hybrid multiterminal circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32(1): 135-144.
- [15] 张耘川, 苏宏升. 小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2): 32-38.
- ZHANG Yunchuan, SU Hongsheng. New method of fault location in small current grounding systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(2): 32-38.
- [16] 夏璐璐, 何正友, 李小鹏, 等. 基于行波固有频率和经验模态分解的混合输电线路故障测距方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 67-73.
- XIA Lulu, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. Hybrid transmission line fault location method based on traveling wave natural frequency and empirical mode decomposition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 67-73.
- [17] 杜向楠, 卢敏, 冯伟岗, 等. 小电流接地故障定位测距一体化研究与实现[J]. 电工技术, 2016(11): 18-20.
- DU Xiangnan, LU Min, FENG Weigang, et al. Integration research and implementation of small current grounding fault location and distance measurement[J]. Electrical Engineering Technology, 2016(11): 18-20.
- [18] 付华, 吴赛, 徐耀松, 等. 基于VMD与广义S变换的HVDC线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 125-133.
- FU Hua, WU Sai, XU Yaosong, et al. HVDC line fault location based on VMD and generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 125-133.
- [19] 王磊, 黄力, 黄照厅, 等. 基于VMD-后向预测prony的直流混合线路故障测距方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(10): 61-67, 72.

- WANG Lei, HUANG Li, HUANG Zhaoting, et al. A fault location method of the DC hybrid line based on VMD-backward prediction prony[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(10): 61-67, 72.
- [20] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(16): 3999-4010.
- [21] 向玲, 李媛媛. 经验小波变换在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 动力工程学报, 2015, 35(12): 975-981.
- XIANG Ling, LI Yuanyuan. Application of empirical wavelet transform in fault diagnosis of rotary mechanisms[J]. Journal of Chinese Society Power Engineering, 2015, 35(12): 975-981.
- [22] 张瑞, 邓艾东, 司晓东, 等. 一种新的声发射信号消噪及故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 75-81.
- ZHANG Rui, DENG Aidong, SI Xiaodong, et al. A new method for acoustic emission signal de-noised and fault diagnosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(4): 75-81.
- [23] KIRAR B S, AGRAWAL D K. Computer aided diagnosis of glaucoma using discrete and empirical wavelet transform from fundus images[J]. IET Image Processing, 2019, 13(1).
- [24] 郭宇峰. 基于经验小波变换和 Prony 算法的电力谐波检测与识别[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- GUO Yufeng. Power harmonic detection and recognition based on empirical wavelet transform and Prony algorithm[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.
- [25] GUPTA A, KUMAR D. Fuzzy clustering-based feature extraction method for mental task classification[J]. Brain Informatics, 2017(4): 135-145.
- [26] 席亚军. 基于经验小波变换和奇异值分解的旋转机械故障诊断[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- XI Yajun. Fault diagnosis of rotating machinery based on empirical wavelet transform and singular value decomposition[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [27] 胡英, 陈基明. Meyer 型正交小波基的构造与性质[J]. 应用数学与计算数学学报, 2000, 14(1): 63-69.
- HU Ying, CHEN Jiming. Construction and properties of Meyer-type orthogonal wavelet bases[J]. Communication on Applied Mathematics and Computation, 2000, 14(1): 63-69.
- [28] 郭小定, 刘伟, 肖华根, 等. 基于经验小波分析的小电流接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24): 73-79.
- GUO Xiaoding, LIU Wei, XIAO Huagen, et al. Single phase grounding fault line selection method based on EWT for small current grounding system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 73-79.
- [29] 赵海龙, 陈钦柱, 梁亚峰, 等. 一种小电流接地系统故障行波精确定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 85-93.
- ZHAO Hailong, CHEN Qin Zhu, LIANG Yafeng, et al. A fault location method of single phase earth fault in small current neutral grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 85-93.
- [30] ZHANG Ke, ZHU Yongli, LIU Xuechen. A fault locating method for multi-branch hybrid transmission lines in wind farm based on redundancy parameter estimation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 5(7): 1033-1043.
- [31] 柴鹏, 周灏, 张煜, 等. 基于双端行波法的电缆线路短路故障定位改进[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 168-174.
- CHAI Peng, ZHOU Hao, ZHANG Yu, et al. Improvement of cable line short circuit fault location based on two terminal traveling wave method [J]. Electric Power, 2020, 53(11): 168-174.

收稿日期: 2020-07-16; 修回日期: 2020-11-15

作者简介:

陶彩霞(1972—), 女, 教授, 从事电机及控制、配电网故障诊断、光伏系统健康管理研究; E-mail: 1733425004@qq.com

杜雪(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障诊断。E-mail: 1836648539@qq.com

(编辑 葛艳娜)