

基于 CEEMDAN 和 NTEO 的配电网 行波故障定位方法

马晓锋¹, 安 军¹, 高志强¹, 任秉珍¹, 龙 强¹, 雷 霞², 王 涛²

(1. 国网甘肃省电力公司陇南供电公司, 甘肃 陇南 746099; 2. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

摘 要: 针对传统配电网行波故障定位方法中行波信号复杂, 波头难以准确识别的问题, 提出一种基于自适应噪声完备集合经验模态分解方法 (CEEMDAN) 和改进 Teager 能量算子 (NTEO) 的配电网行波故障定位方法。该方法采用 CEEMDAN 对初始行波信号进行降噪和分解, 并通过 NTEO 增强高频分量的故障特征从而得到瞬时能量图谱, 根据瞬时能量峰值精确标定初始行波波头达到时间, 实现快速准确的故障定位。Pscad/Matlab 仿真结果表明, 所提方法能够适应不同故障类型和过渡电阻, 准确进行故障测距, 测距误差均在 2% 以内, 相较于传统 EMD 方法具有更高的定位精度和更快的计算速度。

关 键 词: 配电网; 故障定位; CEEMDAN; NTEO 行波法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.009 中图分类号: TM743 文章编号: 1673-9140(2023)06-0087-09

A traveling-wave fault location method based on CEEMDAN and NTEO for distribution networks

MA Xiaofeng¹, AN Jun¹, GAO Zhiqiang¹, REN Bingzhen¹, LONG Qiang¹, LEI Xia², WANG Tao²

(1. Longnan Power Supply Company, State Grid Gansu Electric Power Company, Longnan 746099, China; 2. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The wave head is difficult to identify because of the complexity of traveling wave signals in distribution networks. Therefore, this paper proposes a fault location method for distribution networks based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) and novel Teager energy operator (NTEO). Firstly, the CEEMDAN is used to denoise and decompose initial traveling wave signals, and fault characteristics of high-frequency components are enhanced by NTEO. Then, the initial traveling wave head reach time is accurately calibrated according to the instantaneous energy peak, thus the rapid and accurate fault location can be realized. Finally, Pscad/Matlab simulation results show that the proposed method can accurately locate faults with good adaptability to different fault types and transition resistances, and the ranging error can be controlled within 1%. Besides, compared with the traditional EMD method, it has higher location accuracy and faster calculation speed.

Key words: distribution network; fault location; CEEMDAN; NTEO traveling wave method

收稿日期: 2022-09-20; 修回日期: 2022-12-08

基金项目: 国网甘肃省电力公司科技项目 (5227122000J6); 国家自然科学基金 (51877181)

通信作者: 马晓锋 (1978—), 男, 工程师, 主要从事输电运维检修; E-mail: mx_f_gansu@163.com

随着国民经济和社会科技水平的高速发展,稳定可靠的电力供应成为助推大国崛起最重要的基础要素之一^[1]。现代配电网呈现多源化,高密度的发展模式使得网络体量巨大、结构愈发复杂^[2],据统计,电网中80%的故障都发生在配电网^[3]。因此,高效准确地定位配电网的故障是快速恢复供电、保障电力稳定供应的重要环节。

目前,应用较为广泛的故障定位方法主要有暂态法^[4]、信号注入法^[5]、阻抗法^[6]和行波法^[7]等。其中行波法是通过获取故障后的电流电压行波在非连续节点间折射和反射的传播时间,并根据行波在线路中的传播速度计算故障距离,进而实现故障定位的方法。行波法定位精度较高,因此在电网中的应用较为广泛。

精确获取故障行波波头是决定行波法精度的关键。目前主流的行波波头获取方法有小波分析^[8]和希尔伯特黄变换(Hilbert Huang transform, HHT)^[9]。小波分析对突变信号具有较好的检测能力,但需要人为选择合适的基函数和分解尺度^[10]。HHT首先应用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法对信号进行分解,得到一系列固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),然后通过HHT变换获取行波波头,可以在不需要选择基函数的条件下对非平稳信号进行有效分解,具有较强的自适应能力。

文献[11]在采用小波变换方法的基础上,引入Teager能量算子(Teager energy operator, TEO)增强故障特征,以便获取更为准确的行波信息,该方法解决了行波故障特征不明显的问题,但是测距精度仍然受到小波基函数选择的影响;文献[12]采用HHT变换方法,通过EMD分解后能够保持信号良好的时域和频域特性的同时,得到信号时频和能量的分布关系,从而精确地标定行波波头,但没有考虑EMD分解存在的模态混叠现象;文献[13]提出了改进的互补集合经验模态分解(complementary ensemble EMD, CEEMD)方法,经CEEMD分解后通过TEO对分解结果进行计算并标定行波波头,该方法虽然改善了噪声残余的现象,但不能完全抵消噪声;文献[14]采用自适应噪声完备经验模态分解(complete ensemble EMD with adaptive noise,

CEEMDAN)方法,提高了行波信号的噪声自适应性;文献[15]将改进后的TEO(novel TEO, NTEO)应用于轴承故障诊断,相比于TEO进一步增强了故障特征,提高了故障诊断的精度。

可见,现有行波故障定位方法虽然应用广泛,但是仍然存在信号分解效率低和波头识别精度差等问题。因此,本文提出一种采用CEEMDAN和NTEO相结合的配电网行波故障定位方法。在待分解信号中,CEEMDAN通过加入成对正负高斯白噪声并进行多次迭代取平均,可有效避免模态混叠的现象,相比于EMD具有更简单的计算流程,可以极大地提高计算效率。

1 CEEMDAN与NETO理论

1.1 CEEMDAN的基本原理

集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法是把添加白噪声后的 M 个信号直接进行分解,然后将相对应的IMF分量求均值。而CEEMDAN方法则是在每次求完一阶IMF分量后,均在残值中加入白噪声或白噪声的IMF分量,并求出此时的IMF分量均值,然后逐次迭代^[16]。因此,CEEMDAN可以解决EMD的模态混叠问题,提高处理效率的同时可以降低出现噪声残余的可能性。CEEMDAN算法流程如图1所示。

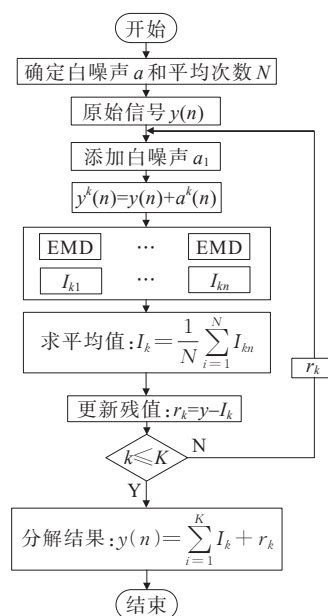


图1 CEEMDAN算法流程

Figure 1 CEEMDAN algorithm workflow

1) 在原始信号 $y(n)$ 中加入服从标准正态分布的高斯白噪声 $a^k(n)$, 经 k 次迭代后得到构造后的信号:

$$y^k(n) = y(n) + a^k(n) \quad (1)$$

2) 采用EMD算法进行 n 次分解并经 k 次迭代, 得到第 k 次 IMF 平均模态分量 I_k 和第 k 次残差 r_k :

$$\begin{cases} I_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{kn} \\ r_k = y(n) - I_k \end{cases} \quad (2)$$

3) 重复步骤2), 直到获得的残差信号为单调函数, 不能继续分解, 算法结束。最终原始信号 $y(n)$ 被分解为

$$y(n) = \sum_{i=1}^K I_k + r_k \quad (3)$$

1.2 NTEO的基本原理

TEO是一种非线性算子,能够快速准确地反映出信号幅值和频率的变化程度,其能量值对应信号幅值和频率的变化速度。相较于HHT变换,TEO减少了复数计算,降低了运算量,提高了计算效率。TEO在进行配电网故障行波信号检测时,其能量图谱中的首个频率突变点对应的的时间即为行波波头到达检测点的时间,再采用行波定位方法,利用波头到达时间和波速之间的关系即可实现故障的精确定位。

对于离散时间信号 $s(n)$, TEO的定义如下:

$$\varphi(s(n)) = s^2(n) - s(n+1)s(n-1) \quad (4)$$

其中, $\varphi(s(n))$ 表示能量算子。TEO通常采用前、后间隔的3个采样点进行计算,以提高对信号故障特征的敏感程度。

由于行波信号检测设备的工况环境较为复杂,采集到的行波信号可能会受到一定程度的噪声干扰,而TEO算法对噪声较为敏感,其计算结果容易受到影响,因此,本文所提方法采用一种新型TEO。NTEO是一种多分辨率非线性算子,在TEO的基础上,其通过引入分辨率参数 i ,能够快速准确地跟踪信号的变化,并且具有更加优异的抗噪性能^[15]。对于离散时间信号 $s(n)$, NTEO的定义如下:

$$\varphi(s(n)) = s^2(n) - s(n+i)s(n-i) \quad (5)$$

设 f_c, f_s 分别为基频、采样频率,根据NTEO算法可知,分辨率参数的约束条件为

$$f_c/f_s < 1/8i \quad (6)$$

根据分辨率参数的约束条件可知,基频 $f_c = 50$ Hz, 采样频率 $f_s = 10$ MHz, 因此, i 的上限为 $i < f_s/8f_c$ 。为了提高抗噪能力,本文设置分辨率参数 $i=3$, 即采用前、后间隔的3个采样点进行计算,以提高NTEO对信号频率的敏感度,进而提升抗噪性能。

2 基于CEEMDAN与NTEO的行波定位方法

NTEO对信号的分辨率较为敏感,能够精确地表示出单分量信号的突变点。但是在配电网中,故障所产生的行波信号为多分量幅频信号,所以NTEO不能直接对故障行波信号进行行波波头的分解。因此,本文提出一种基于CEEMDAN与NTEO结合的行波故障定位方法。首先通过CEEMDAN算法将原始行波信号进行分解,得到其一阶高频IMF分量;然后通过NTEO对高频IMF分量进行解调,进而通过能量图谱的突变点位来精确标定行波波头,获取精确故障位置。

2.1 行波模量的获取

当配电网线路中发生故障时,在故障发生的位置会产生高频率、非平稳的故障暂态电压电流行波信号,等效于一个附加电源。这些信号从故障点沿线路向两侧传播,获取行波波头信号首次到达检测点的时刻,并根据双端行波故障测距算法即可进行精确故障定位。

双端行波故障测距算法是通过在线路两端布置行波检测装置,故障发生后记录故障行波波头到达线路两端的时间差,并根据波速进行计算来确定故障发生的具体位置。以一种简单的10 kV单馈线配电网拓扑模型为例,说明双端行波故障定位方法的基本原理,如图2所示。

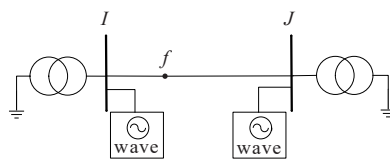


图2 10 kV单馈线配电网拓扑模型

Figure 2 Topological diagram of a 10 kV single feeder distribution network

在配置有双端电源的供电系统模型中,线路 IJ 两端配置有行波检测装置。若 0 时刻故障发生在 F 点,初始行波波头到达 I, J 的时间分别为 T_I, T_J ,线路长为 L_{IJ} ,则根据行波沿线路传播的速度和到达的时间可得:

$$\begin{cases} D_{FI} + D_{FJ} = L_{IJ} \\ D_{FI} - D_{FJ} = v(T_I - T_J) \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可得:

$$\begin{cases} D_{FI} = (L_{IJ} + v(T_I - T_J))/2 \\ D_{FJ} = (L_{IJ} - v(T_I - T_J))/2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, v 为行波波速, $v = \sqrt{1/LC}$; L, C 分别为线路的单位长度电感和电容。

三相配电系统中行波存在复杂的耦合现象,对测距精度会产生影响。因此,采用相模变换的方法分解得到独立的零模和线模分量,再利用独立分量进行故障测距。常用的相模解耦变换方法有克拉克变换^[17]、对称分量法^[18]以及凯伦贝尔变换^[19]等。

本文采用凯伦贝尔变换对三相行波电压信号进行相模变换。所采用的凯伦贝尔变换和反变换矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A(t) \\ U_B(t) \\ U_C(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} U_A(t) \\ U_B(t) \\ U_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(9)、(10)中, U_0 为零模分量; U_α, U_β 分别为 α, β 线模分量; $U_A(t), U_B(t), U_C(t)$ 分别为A、B、C相电压行波信号。

由于线模分量在线路中传播的衰减远小于零模分量,因此,本文选取 α 线模分量进行故障定位计算,其表达式为

$$U_\alpha = (U_A(t) - U_B(t))/3 \quad (11)$$

2.2 输入量的选择

本文提出一种基于CEEMDAN与NTEO结合的行波故障定位方法,流程如图3所示,具体步骤如下:

1) 获取故障后双端电压信号,进行三相凯伦贝尔变换得到电压行波线模分量;

2) 通过CEEMDAN算法对原始行波线模分量信号进行分解,得到一阶高频IMF分量;

3) 计算一阶高频IMF分量的NTEO瞬时能量值,得到瞬时能量图谱;

4) 提取瞬时能量图上的首个突变点位,标定双端波头的精确位置,并通过双端行波定位方法进行故障测距,从而实现精确故障定位。

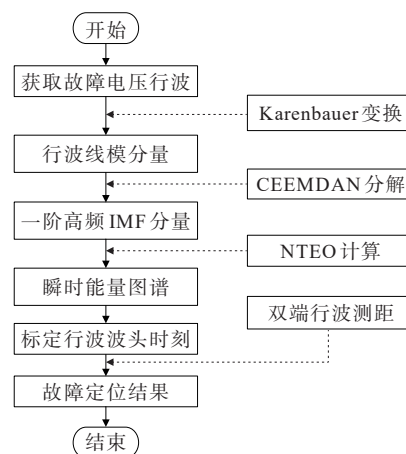


图3 所提故障定位方法的流程

Figure 3 Flow chart of the proposed fault location method

3 算例分析

为验证所提行波故障定位方法的有效性和精确性,本文在Pscad环境中搭建10 kV电源配电系统,进行故障仿真、行波数据的获取和故障距离的计算,并在不同实验条件下,采用不同的行波波头获取方法进行仿真对比验证。

3.1 仿真模型和环境搭建

Pscad环境中搭建10 kV单馈线配电网仿真模型(图2);系统模型参数如表1所示。故障仿真开始时间为0.035 s,持续时间为0.04 s,系统仿真采样频率设置为10 MHz,采样时间窗为40 μ s;基于Matlab进行行波数据运算和故障定位算法的实现。

表1 系统模型参数设置

Table 1 System model parameters					
$R_1/$	$L_1/$	$R_0/$	$L_0/$	$C_1/$	$C_0/$
(Ω/km)	(mH/km)	(Ω/km)	(mH/km)	($\mu\text{F}/\text{km}$)	($\mu\text{F}/\text{km}$)
0.023 3	0.898 4	0.173 6	0.346 2	0.129 4	0.052 3

仿真线路 $L_{IJ}=10$ km, 假设距离 I 节点 3.5 km 处发生故障。以单相接地故障为例, 开始故障仿真后获取节点 I 、 J 的故障前后同步电压信号, 并通过凯伦贝尔变换分解得到故障后 I 、 J 端的电压行波 α 线模分量, 具体如图 4 所示。

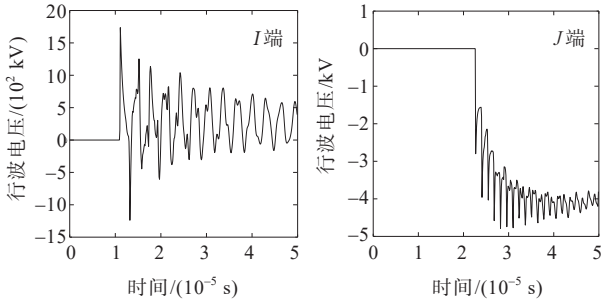


图 4 双端电压行波 α 线模分量

Figure 4 Double-end voltage traveling wave line mode component α

3.2 模态分解对比

本文进行 CEEMDAN 和 EEMD 这 2 种方法的模态分解对比实验。对双端电压进行凯伦贝尔变换后得到故障后的行波 α 线模分量, 分别采用 CEEMDAN 和 EEMD 算法进行模态分解, 并分别计算各算法 IMF_1 的 NTEO 瞬时能量图谱。以 I 端电压行波的线模分量分解结果为例, 如图 5、6 所示, 可以看出, CEEMDAN 分解得到的分辨率更高。在高频分量的分解结果中, 基于 EEMD 方法计算得到的 NTEO 瞬时能图谱存在一定的噪声, 并且行波到达时刻的特征峰值不明显, 而基于 CEEMDAN 方法计算得到的瞬时能量图谱能够清晰精确地体现出故障特征, 更加有利于行波波头的标定计算。

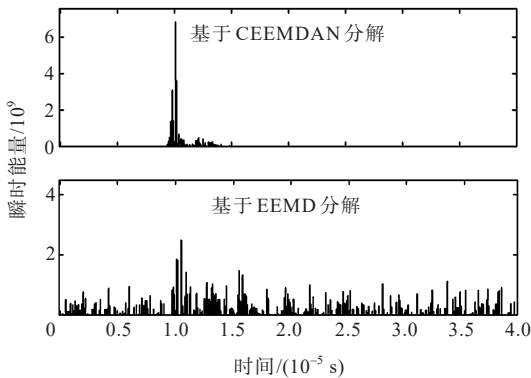
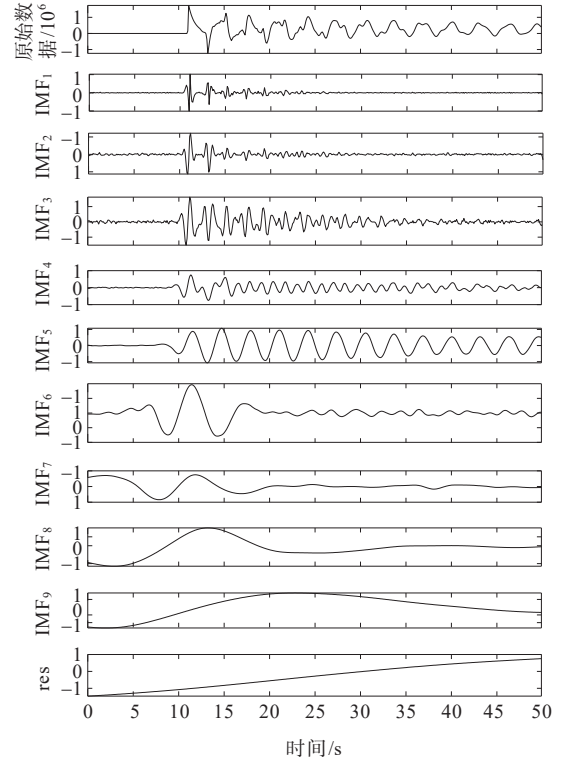
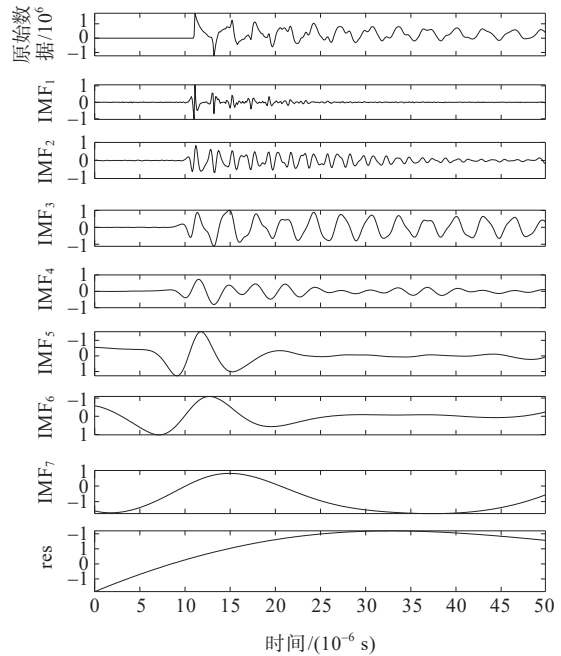


图 5 不同方法下 NTEO 计算结果

Figure 5 Comparison of NTEO calculation results under different methods



(a) CEEMDAN 分解



(b) EEMD 分解

图 6 I 端电压行波 CEEMDAN、EEMD 分解结果

Figure 6 CEEMDAN and EEMD decomposition results in the I -end

此外, CEEMDAN 具有更好的信号完备性, 即分解后各阶分量相加后获得的信号非常接近原信号, 而对于 EEMD 方法来说, 较小的平均次数会导

致较大重构误差。因此,在相同平均次数下,CEEMDAN的信号完备性比EEMD更高。由于CEEMDAN在获得相同的解时所用的平均次数更少,因此,可以有效提高CEEMDAN的运算速度和处理效率。

3.3 故障测距验证

首先对双端电压进行凯伦贝尔变换,然后采用CEEMDAN对得到的故障后行波 α 线模分量进行分解。设定参数:附加噪声标准差与Y标准差之比 $N_{std}=0.2$,信号的平均分解次数 $N_E=100$,最大迭代次数 $N_{max,iter}=1000$ 。经分解得到一阶模态分量 IMF_1 如图7所示,可以看出,原始电压行波经过CEEMDAN分解之后,得到的一阶 IMF 能够在一定程度上消除信号中的噪声,并体现出故障的特征信息。

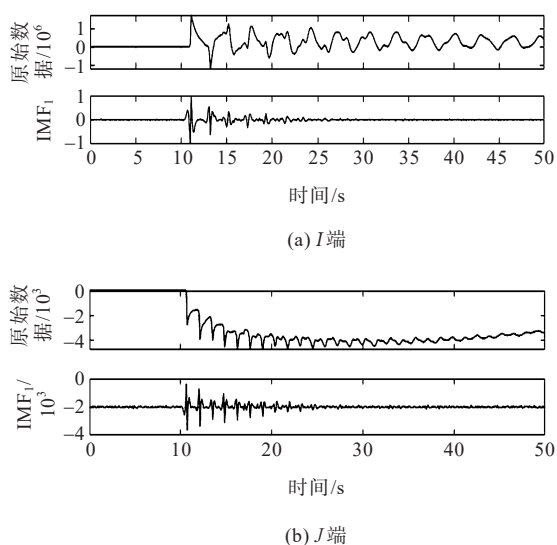


图7 电压行波CEEMDAN分解结果

Figure 7 CEEMDAN decomposition results of the voltage traveling wave

接着采用NTEO能量算子对分解得到的双端 IMF 高频分量进行计算,并根据瞬时能量图谱的结果对故障电压行波波头的初次到达时间进行标定,如图8所示,可以看出,图中存在明显的能量值尖峰,能够很清晰地标定出故障行波初次到达 I 、 J 两端的时间,即 $T_I=1.0521 \times 10^{-5}$ 、 $T_J=2.2194 \times 10^{-5}$ s。根据式(8)可以精确计算出故障位置,即 $D_{FI}=3.4469$ 、 $D_{FJ}=6.5531$ km;行波波速 $v=1/\sqrt{L_1 C_1}=2.9527 \times 10^5$ km/s,测距误差为 $\eta=|(D_{FI}-D)/D|=1.77\%$, D 为实际故障到 I 端距离。

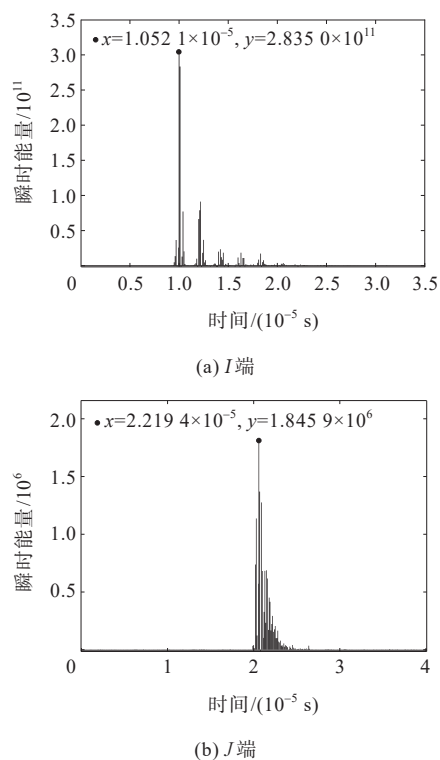


图8 双端NTEO瞬时能量图谱

Figure 8 Tow-ended NTEO transient energy map

3.4 不同实验条件下的故障验证

为了验证本文所提方法在不同实验条件下的适应性和准确性,在上述仿真环境下,设置不同的故障位置、故障类型和过渡电阻的验证试验。同时,与文献[18]中基于EMD的故障测距方法的计算结果进行对比。由于篇幅原因,实验结果仅展示A相接地、AB相间短路和AB相间短路接地3种故障类型,并进行结论分析。

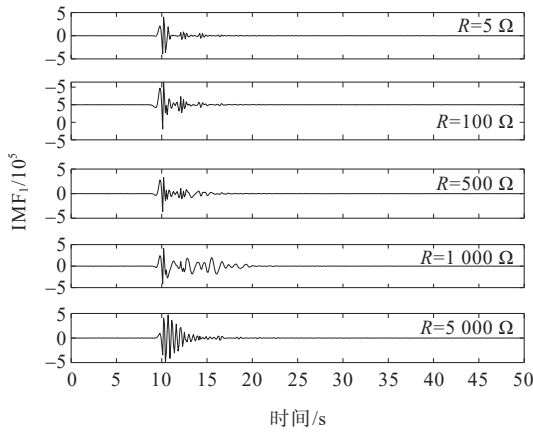
首先在全长10 km的线路上,分别在距离首端2、5、8 km的位置处设置故障,故障类型为单相接地、相间短路和相间短路接地,设置过渡电阻为5 Ω ;然后进行故障仿真并计算故障距离,如表2所示,可知在不同故障距离和不同故障类型下,本文所提方法均能够准确地计算出故障位置。在该实验条件下,故障测距的误差均控制在1%以内。而在相同故障类型条件下,距离行波检测装置较近时故障测距误差相对较大,例如距离线路首端2 km的实验测距误差接近1%,高于同等条件下5、8 km时的测距误差。

实际故障中高阻接地的比例较高,因此,为验证本文所提方法对不同过渡电阻的适应性,在距离

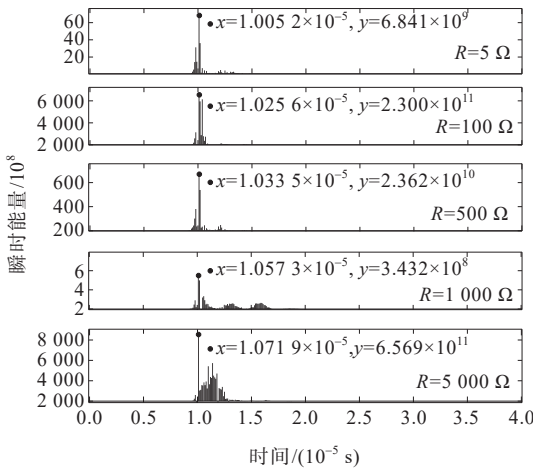
首端 3.5 km 处设置 A 相接地故障 (Ag), 并改变过渡电阻的大小, 分别设置为 5、100、500 和 5 000 Ω。不同条件下的实验结果如图 9 所示。

表 2 不同实验条件下的故障测距结果
Table 2 Fault ranging results under different experimental conditions

故障距离/ km	故障 类型	测距结果/ km	误差/ km	误差率/ %
2		1.982 3	0.017 7	0.885
5	A 相接地	4.966 8	0.033 2	0.664
8		7.934 2	0.065 8	0.823
2	AB 相间	2.019 5	0.019 5	0.975
5	短路	5.013 1	0.013 1	0.262
8		7.936 7	0.063 3	0.791
2	AB 相间	2.017 8	0.017 8	0.890
5	短路接地	5.021 9	0.021 9	0.438
8		8.062 5	0.062 5	0.781



(a) IMF₁ 分解结果



(b) NTEO 计算结果

图 9 不同过渡电阻下 I 端计算结果

Figure 9 The I-end calculation results under different transition resistances

由图 9 可以看出, 随着过渡电阻的增大, IMF₁ 分解的结果出现了一些波动, 故障特征逐渐模糊, 但是通过 NTEO 的计算, 本文方法仍然能够准确地标定故障行波的到达时间。

故障测距结果如表 3 所示, 可以看出, 随着过渡电阻的增大, 故障测距的误差由 0.014 2 km 增加到了 0.066 4 km, 误差率由 0.41% 增加到了 1.90%, 但是误差都控制在 2% 以内, 仍然满足精度要求。因此, 本文方法对过渡电阻阻值的适应范围较大, 并且能够在不同的过渡电阻条件下准确标定行波波头, 实现精确故障测距。

表 3 不同过渡电阻故障测距结果

Table 3 Different transition resistance fault ranging results

过渡电阻/Ω	故障类型	测距结果/km	误差/km	误差率/%
5	Ag	3.516 0	0.016 1	0.46
100	Ag	3.485 8	0.014 2	0.41
500	Ag	3.474 9	0.025 1	0.72
1 000	Ag	3.439 5	0.060 5	1.73
5 000	Ag	3.433 6	0.066 4	1.90

实际电网运行和信号采集过程中都会产生一定的噪声干扰。为了测试本文方法对噪声的抗干扰能力, 本文采用在原始信号中叠加高斯白噪声的方式模拟不同的噪声强度。在相同实验环境下, 分别加入信噪比为 10、15 和 20 dB 的高斯白噪声, 并进行行波波头的标定实验, 如图 10 所示, 可知 CEEMDAN 与 NTEO 相结合的算法在有大量噪声的情况下, 瞬时能量值幅值出现波动, 但仍能较为清楚地标定波头位置, 与无噪声情况下检测到波头的时间相同, 具有一定的抗噪能力。

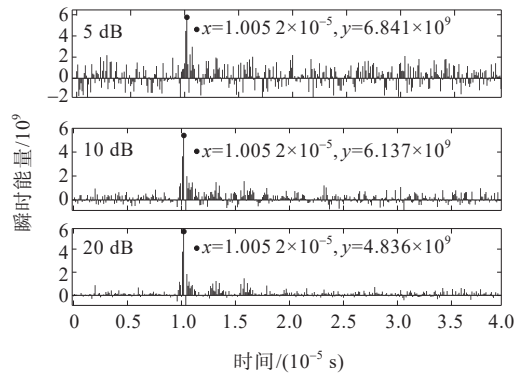


图 10 不同信噪比下 NTEO 计算结果

Figure 10 The NTEO calculation results under different signal-to-noise ratios

最后,在相同实验条件下,将本文方法与基于EMD的故障测距方法^[18]进行对比,如表4所示,2种方法均能适应不同的故障类型,并且都可以准确地测量故障距离。在相同故障类型条件下,故障距离越近,2种方法的测距误差率越大;而在相同的故障距离时,相间短路接地故障条件下的误差相对较小,单相接地误差最大,相间短路次之。在所测试的实验中,本文所提方法测距误差均在2%以内,远远高于基于EMD的故障定位算法,符合现有标准的同时,更加精确高效。

表4 不同方法故障测距结果对比

Table 4 Comparison of fault ranging results among different methods

故障距离/km	故障类型	误差率/%	
		本文所提方法	EMD方法
2	A相接地	0.885	4.979
5		0.664	2.201
8		0.823	1.400
2	AB相间短路	0.875	3.975
5		0.262	2.236
8		0.791	4.475
2	AB相间短路 接地	0.870	2.450
5		0.438	1.390
8		0.781	1.113

4 结语

1) 本文所提方法可以准确快速地对初始行波波头进行标定,并结合双端行波法计算出故障距离,实现故障定位;

2) 该方法解决了传统EMD方法的模态混叠问题,对行波故障特征的提取更加清晰和准确,特别是在高阻故障和有一定噪声的情况下,也能精准识别行波波头,适应性更强;

3) 通过Pscad/Matlab平台上进行的仿真实验可以看出,所提方法在不同的故障类型、过渡电阻和故障距离的条件下都能准确地实现故障测距,并且测距误差皆小于2%,相较于传统EMD方法,精度更高。

参考文献:

- [1] 于力,焦在滨,王晓鹏,等.基于PMU的中压配电网精确故障定位方法及关键技术[J].电力系统自动化,2020,44(18):30-38.
YU Li, JIAO Zaibin, WANG Xiaopeng, et al. Accurate fault location scheme and key technology of medium-voltage distribution network with synchrophasor measurement units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18):30-38.
- [2] 魏亚军,李开灿,董振.含逆变型分布式电源的配电网故障暂态分析[J].电力科学与技术学报,2022,37(3):102-108+125.
WEI Yajun, LI Kaican, DONG Zhen. Transient analysis of distribution networks fault with inverter interfaced distributed generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3):102-108+125.
- [3] 张健磊,高湛军,陈明,等.考虑复故障的有源配电网故障定位方法[J].电工技术学报,2021,36(11):2265-2276.
ZHANG Jianlei, GAO Zhanjun, CHEN Ming, et al. Fault location method for active distribution networks considering combination faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(11):2265-2276.
- [4] 朱占春,潘宗俊,唐金锐,等.基于单端暂态能量谱相似性的配电网故障区段定位新方法[J].电力科学与技术学报,2021,36(2):180-191.
ZHU Zhanchun, PAN Zongjun, TANG Jinrui, et al. A novel fault location method for power distribution systems using energy spectrum similarity analysis of single-terminal transient waveform[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2):180-191.
- [5] 任琴,舒勤,刘勇.基于对称注入法反射波特征提取的配电网故障测距算法[J].电力系统保护与控制,2015,43(24):19-25.
REN Qin, SHU Qin, LIU Yong. A fault location algorithm for distribution network based on extracting features from the reflected wave of symmetrical injection method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24):19-25.
- [6] 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.
- [7] 黄龙,肖湘纯,曾祥君,等.混合线路故障行波综合定位方法[J].电力科学与技术学报,2018,33(1):93-101.
HUANG Long, XIAO Xiangchun, ZENG Xiangjun, et al. Integrated fault location method for mixed lines based on

- traveling wave[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 93-101.
- [8] 储佳伟,袁晓冬,陈兵,等.结合小波分析和改进型DTW距离的配电网电压暂降源辨识方法[J].电网技术,2018,42(2):637-643.
CHU Jiawei, YUAN Xiaodong, CHEN Bing, et al. A method for distribution network voltage sag source identification combining wavelet analysis and modified DTW distance [J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 637-643.
- [9] 张安安,周志通,曲广龙,等.基于HHT一化迭代的输电线路故障测距研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(3):165-172.
ZHANG Anan, ZHOU Zhitong, QU Guanglong, et al. Study on fault location of transmission line based on HHT iteration [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3): 165-172.
- [10] 王宇,徐长宝,祝健杨,等.基于改进Petri网和Hilbert变换的多源信息融合电网故障诊断方法[J].电测与仪表,2021,58(6):125-129.
WANG Yu, XU Changbao, ZHU Jianyang, et al. Grid fault diagnosis method for multi-source information fusion based on improved Petri net and Hilbert transform [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(6): 125-129.
- [11] 邓丰,祖亚瑞,黄懿菲,等.基于行波全波形主频分量的单端定位方法研究[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2156-2168.
DENG Feng, ZU Yaru, HUANG Yifei, et al. Research on single-ended fault location method based on the dominant frequency component of traveling wave full-waveform [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2156-2168.
- [12] 廖晓辉,赵肖健,梁恒娜.一种基于Hilbert-Huang变换的电力电缆故障测距方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(3):20-25.
LIAO Xiaohui, ZHAO Xiaojian, LIANG Hengna. A power cable fault location method based on Hilbert-Huang transform [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 20-25.
- [13] 田书,周令,孙永超.基于CEEMD和TEO的电力电缆故障测距方法研究[J].测控技术,2018,37(5):113-117.
TIAN Shu, ZHOU Ling, SUN Yongchao. A power cable fault location method based on CEEMD and TEO [J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(5): 113-117.
- [14] 李英春,白艺,褚恩亮,等.基于CEEMDAN-EDO的行波波头标定算法研究[J].中国测试,2021,47(12):98-105.
LI Yingchun, BAI Yi, ZHU Enliang, et al. Research on traveling wave head detecting algorithm based on CEEMDAN-EDO [J]. China Measurement & Test, 2021, 47(12): 98-105.
- [15] 张小琛,刘德平,王耀赢.LCD联合改进Teager算子的轴承故障诊断[J].机械设计与制造,2020(6):170-172+176.
ZHANG Xiaochen, LIU Deping, WANG Yaoying. Fault diagnosis of bearings based on LCD and modified Teager operator [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(6): 170-172+176.
- [16] 田书,尚鹏辉,寿好俊.基于EEMD的电缆故障测距方法仿真研究[J].测控技术,2016,35(11):36-39+43.
TIAN Shu, SHANG Penghui, SHOU Haojun. A double terminal cable fault location method based on EEMD [J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(11): 36-39+43.
- [17] KWAK D H, LEE D H, AHN J H, et al. Fault detection of roller-bearings using signal processing and optimization algorithms [J]. Sensors, 2014, 14(1): 283-298.
- [18] 王耀赢,刘德平,郑鹏.基于EMD和改进Teager能量算子的轴承故障诊断[J].组合机床与自动化加工技术,2018(6):81-83+88.
WANG Yaoying, LIU Deping, ZHENG Peng. Fault diagnosis of rolling element bearings based on EMD and modified Teager [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(6): 81-83+88.
- [19] 林莉,王凯佩,何月,等.基于瞬态对称分量法的中性点不接地电网电压互感器暂态过电流分析[J].电力自动化设备,2016,36(11):157-164.
LIN Li, WANG Kaipei, HE Yue, et al. PT transient over-current analysis based on instantaneous symmetrical component method for ungrounded-neutral power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 157-164.