

基于 CEEMD 和 NTEO 的故障行波定位方法

白浩¹, 钟振鑫², 李巍¹, 曾祥君³, 潘姝慧¹, 袁智勇¹

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510663; 2. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516003;
3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对传统行波检测方法中定位不准确、计算量大等问题, 提出了一种基于补充总体平均模态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)和改进型 Teager 能量算子(novel Teager energy operator, NTEO)的行波定位方法。该方法采用 CEEMD 算法来分解故障行波信号, 滤除故障信号中的低频分量。然后采用 NTEO 能量算子对分解后的信号进行差分运算, 增强行波波头的突变特征, 实现故障行波波头的精确标定。仿真结果表明, 所提方法能够精准地标定故障行波波头, 并且有良好的去噪能力。与传统方法相比具有更好的检测效果和更小的定位误差, 可以有效地提高配电网行波定位的精确性。

关键词: 配电线路; 双端行波定位; CEEMD; 电压行波检测; NTEO

A fault traveling wave location method based on CEEMD and NTEO

BAI Hao¹, ZHONG Zhenxin², LI Wei¹, ZENG Xiangjun³, PAN Shuhui¹, YUAN Zhiyong¹

(1. Electric Power Research Institute, China Southern Grid, Guangzhou 510663, China; 2. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516003, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To solve the problems of mode aliasing and large amount of calculation required in the traditional traveling wave detection method, a traveling wave ranging method based on complementary ensemble empirical mode decomposition (CEEMD) and novel Teager energy operator (NTEO) is proposed. In this method, a CEEMD algorithm is used to decompose the fault traveling wave signal and filter out the low-frequency component. Then the NTEO energy operator is used to perform differential operation on the decomposed signal to enhance the mutation characteristics of traveling wave head and realize the accurate calibration of the fault traveling wave head. Simulation results show that the proposed method can accurately calibrate the fault traveling wave head and has good denoising ability. Compared with existing methods, it offers better detection and smaller positioning error, and effectively improves the accuracy of traveling wave location in a distribution network.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20198410).

Key words: distribution line; double-terminal traveling wave location; CEEMD; voltage traveling wave detection; NTEO

0 引言

现有的配网故障监测装置普遍存在判定故障不可靠、无法精确定位等问题。为了加快智能电网的配电自动化建设, 应在故障后快速地对故障进行定位, 修复故障使系统恢复稳定状态。传统的定位

故障方式已经无法满足当前电力系统发展的要求。因此, 提出精准、快速的故障定位方法对配电系统的稳定运行有着非常重要的意义。

近年来, 国内外的学者们提出了很多电网故障定位的原理和算法, 并研制了应用于现场的故障定位装置^[1-4]。行波法应用较广泛, 能否对行波波头进行精确标定将直接影响行波故障定位的精度^[5-8]。目前应用较多的方法主要有小波变换^[9-11]和希尔伯特黄变换(hilbert-huang transform, HHT)^[12-14]。小波变

换算法在不同情况下需分别选择合适的小波基函数和分解的尺度, 自适应能力较差, 所以实际应用价值不高^[15-16]。HHT 采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法将检测到的行波信号分解成几个具有固定频率的分量固有模态函数(intrinsic mode function, IMF), 实现离散信号和非平稳信号的有效分解。该方法具有自适应性的优点, 但 EMD 分解算法分解的模态分量会出现模态混叠的情况, 造成行波波头标定困难, 且 Hilbert 变换的计算量较大, 不利于迅速、精确地进行故障定位^[17-18]。

Teager 能量算子(teager energy operator, TEO)是一种非线性的差分算子, 具有较好的自适应能力, 时长分辨率高并且算法效率高^[19]。对比于 Hilbert 变换, TEO 算法更为先进, 计算量较小, 更适用于对行波信号的在线检测处理。文献[20]提出了采用 EMD 与 TEO 相结合的行波定位方法。相较于 HHT 方法, 它可以更快更准确地标定行波波头, 但没有解决 EMD 算法本身的模态混叠问题。文献[21]提出了将集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)与 TEO 相结合的定位方法, EEMD 方法在 EMD 的基础上做了改进, 对模态混叠现象的抑制能力较好, 但是会出现噪声残余的问题。文献[22-24]采用了变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)的方法, 可以有效抑制模态混叠、边界效应等问题。但 VMD 的信号分解层数和惩罚因子需要人为选取, 很难找到最优的参数组合。文献[25]提出了采用补充总体平均模态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)分解法解决 EEMD 分解分量噪声残余过大而淹没故障信息的问题。文献[26]提出了一种结合 CEEMD 和 TEO 的方法对电缆进行双端电流行波测距, 具有较高的测距精度。但是该方法没有考虑到在噪声较多的环境下 TEO 算法的去噪能力较差的问题, 将会影响测距的精度和可靠性。文献[27]提出了一种改进型能量算子(NTEO)算法, 在 TEO 的算法中加入了分辨率参数, 通过提高对信号频率的敏感度来增强去噪能力。该算法具有 TEO 能够快速、精确定位的优点, 同时解决了 TEO 算法去噪能力差的问题。文献[28-29]将 NTEO 算法应用在轴承故障诊断中, 通过轴承故障诊断对比, 验证了 NTEO 与传统的 TEO 算法相比具有更好的去噪能力, 有助于使得故障信号特征更突出。

针对当前配电网行波定位方法普遍去噪能力较差的问题, 本文在文献[21]的基础上采用 NTEO 算法替代 TEO 算法来增强去噪能力, 确保在噪声环

境下行波定位的精度和可靠性。

本文提出了一种基于 CEEMD 和 NTEO 的行波故障定位方法, 采用双端行波定位算法来对配电网接地故障的故障点进行定位。将所提方法与文献[22]提出的 CEEMD 和 TEO 相结合的方法进行对比, 通过仿真验证了本文所提方法具有更好的去噪能力。此外, 将本文所提算法与传统的 HHT 算法、小波分析法进行对比, 仿真结果表明, 应用该方法进行行波故障定位与传统的行波定位方法相比具有更高的定位准确度, 可以更加快速、精准地计算出故障位置。

1 基于 CEEMD 和 NTEO 的行波定位方法

1.1 CEEMD 方法原理

CEEMD 算法通过对原始信号加入成对的特定噪声, 在 EEMD 算法的基础上较好地解决了模态混叠和 EEMD 分解过后有噪声残留的问题, 使得最后的分解结果更能体现出故障的特征信息, 其分解的步骤如下。

在原始信号中加入特定噪声, 采用 EMD 进行 I 次分解, 算出第一阶段的平均值 F_{IM1} , 表达式为

$$F_{IM1} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_1(x + \varepsilon_0 \omega^i) \quad (1)$$

式中: E_1 为第一个模态给定的算子; x 表示原始信号; ω^i 为权重因子, $i=1,2,3,L,I$ 。计算一阶残差的公式为

$$r_1 = x - F_{IM1} \quad (2)$$

再次分解 $r_1 + \varepsilon_1 \omega^i$, 其中 ε_1 表示第一阶段的信噪比, 算出第二阶段的总体平均值 F_{IM2} , 表达式为

$$F_{IM2} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_1(r_1 + \varepsilon_1 E_1(\omega^i)) \quad (3)$$

对 $k=2,L,K$, 计算 k 阶残差: $r_k = r_{k-1} - F_{IMk}$, 然后提取 $r_k + \varepsilon_k E_k(\omega^i)$ 的 F_{IM1} 分量, 其中 ε_k 为第 k 阶段的信噪比, E_k 为第 k 个模态给定的算子, 计算他们的平均值, 得到原始信号的分量 F_{IMk+1} 为

$$F_{IMk+1} = \frac{1}{I} E_1(r_k + \varepsilon_k E_k(\omega^i)) \quad (4)$$

一直进行该过程的筛选, 直到残差无法分解为止(残差最后只会有 0 个或 1 个极值点), 最后的残差结果为

$$R = x - \sum_{k=1}^K F_{IMk} \quad (5)$$

式中, K 是 F_{IM} 的总数。因此原始信号 x 经分解后可表达为

$$x = R + \sum_{k=1}^K F_{\text{Im}k} \quad (6)$$

1.2 改进型 Teager 能量算子

Teager 能量算子可以高效率地计算出信号瞬时能量。对于一个连续的时间信号, TEO 的定义为

$$\psi_c[s(t)]^2 = [s'(t)]^2 - s(t)s''(t) \quad (7)$$

式中: $\psi_c[s(t)]$ 表示能量算子; $s(t)$ 表示该时间信号。在实际应用中, 一般采集到的是离散信号。因此采用的是差分运算, 对于这种信号, 能量算子定义为

$$\psi[s(n)] = s^2(n) - s(n+1)s(n-1) \quad (8)$$

由于在噪声环境下, TEO 算法的去噪能力较差, 可能会导致定位的结果不精确。因此, 本文采用改进型的 Teager 能量算子, 即 NTEO 算法来进行行波故障定位。该算法通过增强信号的频域特性来提升 TEO 的去噪能力, 在 TEO 的算法中加入了分辨率参数 i , 采用前后相隔 i 个点的 3 个点来计算能量值, 如式(9)所示。

$$\psi[s(n)] = s^2(n) - s(n+i)s(n-i) \quad (9)$$

由式(9)可知, NTEO 与 TEO 一样都是选取 3 个点来计算能量值。不同的是, NTEO 引入了分辨率参数 i , 可以提高对信号频率的敏感度, 从而提高算法的抗噪性能^[27-29]。

1.3 CEEMD 与 NTEO 结合的行波故障定位方法

基于 CEEMD 与 NTEO 结合的行波故障定位算法流程如下:

- 1) 采集故障后 M 、 N 两端的三相暂态电压行波信号;
- 2) 采用 Karenbauer 相模变换, 获得电压行波的线模分量;
- 3) 采用 CEEMD 算法分解电压行波线模分量, 得到 IMF 分量;
- 4) 选取 CEEMD 分解后的 IMF1 分量, 采用 NTEO 算法来计算 Teager 能量值;
- 5) 通过 Teager 能量谱, 可对故障行波波头进行准确标定, 能量最高点即为第一个行波波头。

由标定的两端行波波头到达的时间可计算出故障点到线路 M 、 N 两端的距离, 如图 1 所示。

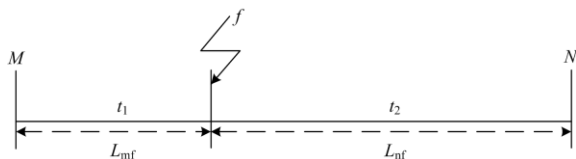


图 1 双端行波故障定位原理图

Fig. 1 Schematic diagram of double terminal traveling wave fault location

双端行波定位法表达式为

$$L_{mf} = \frac{l + (t_1 - t_2)v}{2} \quad (10)$$

式中: t_1 为 M 端检测到行波波头的时刻; t_2 为 N 端检测到行波波头的时刻; l 为 M 、 N 两端之间的线路长度; v 为行波波速; L_{mf} 为 M 端与故障点 f 之间的距离。

2 配电网双端行波定位仿真研究

2.1 仿真模型建立

双端行波定位法需要在线路两端都装设行波检测设备, 虽然投入成本较大, 但具有较高的精度和可靠性且应用较广。所以本文采用双端法进行仿真模拟。由于双端测距装置需要将线路两侧的行波浪涌到达时刻作为计算故障位置的依据, 因此线路两侧需要精确对时, 在实际应用中应采用基于 GPS/北斗的高精度时钟来进行对时, 确保定位精度。

如图 2 所示, 本文采用 5 条架空出线的 10 kV 配电网馈线系统进行双端行波定位仿真, 由于行波特征不受中性点接地方式的影响, 接地方式为谐振接地。设置 0.5 ms 时在第 4 条线路上发生单相接地故障, 接地电阻为 5Ω , 故障点到 M 端的距离为 7 km。线路波速为 2.98285×10^5 km/s, 采样率为 10 MHz。

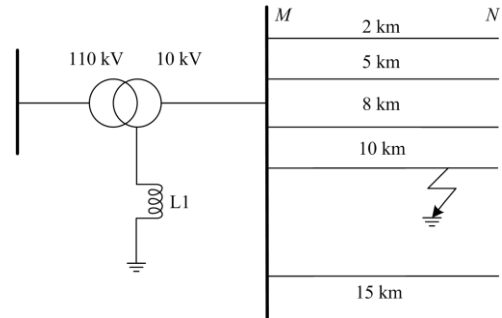


图 2 5 条出线的 10 kV 配电网馈线系统

Fig. 2 Feeder system of 10 kV distribution network with 5 outgoing lines

由于三行的行波之间有耦合关系, 故采用 Karenbauer 变换来消除耦合关系, 暂态行波经过 Karenbauer 变换后为零模分量和线模分量。该变换的表达式为

$$\begin{cases} U_0 = (U_A + U_B + U_C)/3 \\ U_\alpha = (U_A - U_B)/3 \\ U_\beta = (U_A - U_C)/3 \end{cases} \quad (11)$$

式中: U_α 、 U_β 为线模分量; U_0 为零模分量。

本文选用电压行波的 α 线模分量, 在线路 M 端和 N 端检测电压行波, 采用 Karenbauer 变换分解出电压行波的 α 线模分量。 M 端和 N 端的电压行波 α 线模分量如图 3 所示。

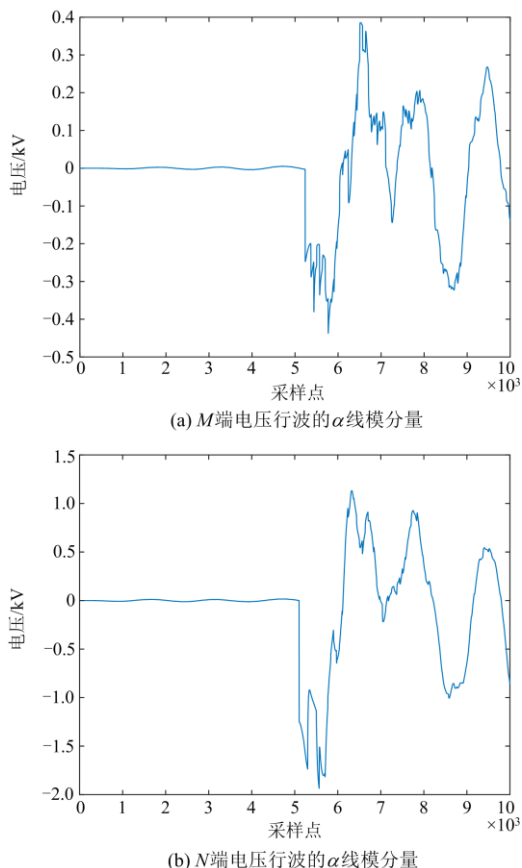


图 3 M 、 N 端电压行波的 α 线模分量

Fig. 3 α line mode components of voltage traveling waves at terminals M and N

2.2 CEEMD 分解

设定参数如下: 噪声与待分解信号标准差之比 $N_{\text{std}} = 8$; 对信号的平均次数 $N_E = 8$ 。采用 CEEMD 算法对两端的电压行波进行分解后, 可以很大程度上滤除噪声, 体现出行波信号的特征信息, 使能量算子的波头标定更精确。对 M 、 N 两端电压行波采用 CEEMD 分解如图 4 和图 5 所示。

2.3 故障特征提取

1) 噪声环境较小时

本文采用 CEEMD 对电压行波信号进行分解后, 用能量算子对 IMF1 分量进行计算得到瞬时能量谱, 在瞬时能量谱上能量最高点对应的的时间就是行波波头到达的时间。

对双端电压行波经 CEEMD 分解过后的 IMF1 分量分别采用 TEO 和 NTEO 算法得到瞬时能量谱。NETO 算子中分辨率参数 i 的选取必须满足条件

$i < f_s / 8f_0$, 其取值会影响去噪的效果, 应根据实际情况来选取最合适的值。本文根据仿真结果, 选取参数 $i = 5$, 在实际情况下, 若采样频率 f_s 改变, 则应重新选取最合适的参数。 M 和 N 端的 Teager 瞬时能量谱分别如图 6 和图 7 所示。

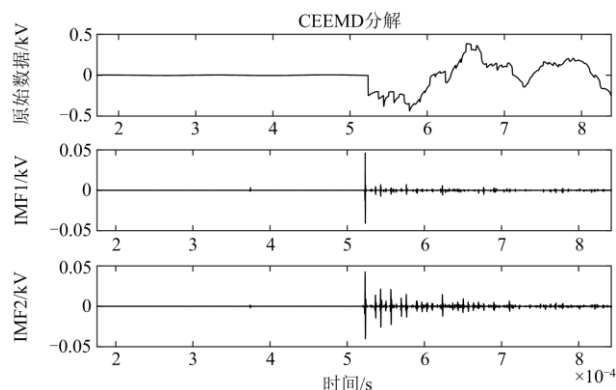


图 4 采用 CEEMD 分解 M 端电压行波的结果

Fig. 4 Results of decomposing M -terminal voltage traveling wave by CEEMD

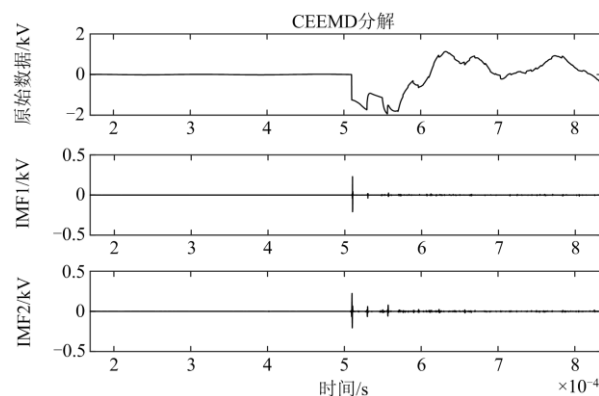
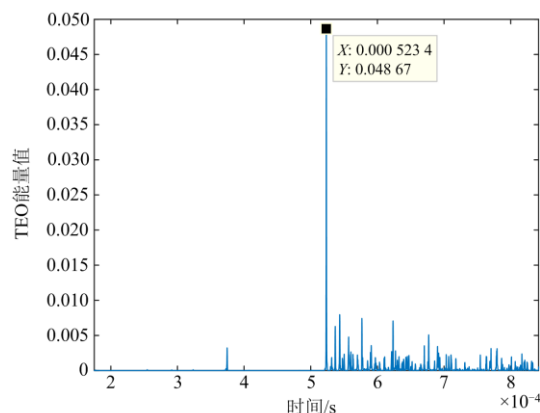


图 5 采用 CEEMD 分解 N 端电压行波的结果

Fig. 5 Results of decomposing N -terminal voltage traveling wave by CEEMD



(a) M 端行波 IMF1 分量的 Teager 瞬时能量谱

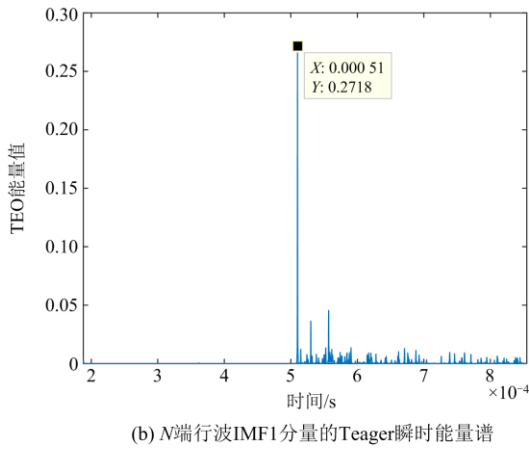
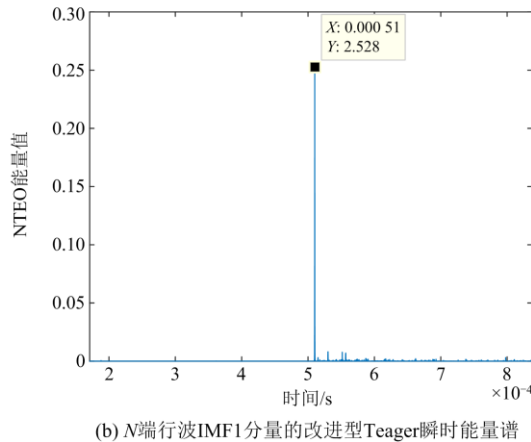
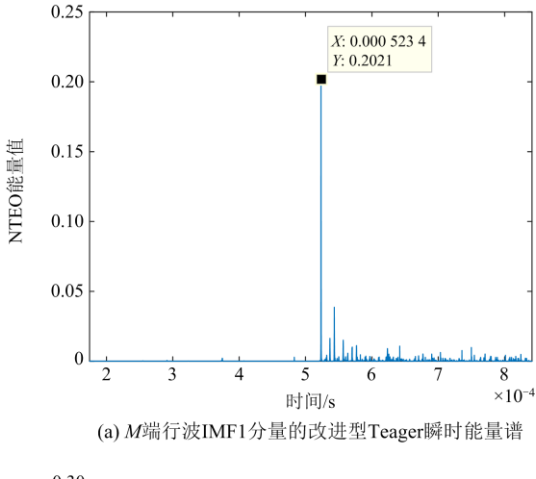


图6 M、N端行波 IMF1 分量的 Teager 瞬时能量谱

Fig. 6 Teager instantaneous energy spectrum of traveling wave IMF1 component at M-terminal and N-terminal

图7 M、N端行波 IMF1 分量的改进型 Teager 瞬时能量谱
Fig. 7 Improved Teager instantaneous energy spectrum of traveling wave IMF1 components at M-terminal and N-terminal

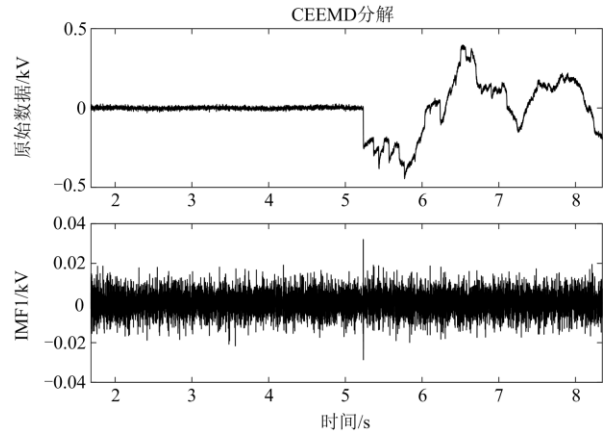
如图6和图7所示, CEEMD 结合 TEO 能量算子的定位结果为 $t_1 = 23.4 \mu\text{s}$, $t_2 = 10.0 \mu\text{s}$ 。CEEMD

结合 NTEO 能量算子的定位结果同样为 $t_1 = 23.4 \mu\text{s}$, $t_2 = 10.0 \mu\text{s}$ 。由式(10)可算出故障点到 M 端的距离为 6.998 km, 误差为 2 m。在噪声较少的情况下, 上述两种算法都有很高的定位精度, 因此本文通过对电压行波信号加入噪声, 来对比上述两种算法的去噪能力。

2) 噪声环境较大时

由于电网在不同工况下的线路阻抗、信道衰落等均会产生各种噪声干扰。如果不同类型的噪声分别进行建模研究, 则过于繁琐且精度不高, 一般采用噪声统计模型来模拟电力线中的噪声。因此本文采用叠加零均值白噪声的方法来模拟实际电网中的噪声。

在 M 端检测到的电压行波中加入 20 dB 白噪声, 用以检测上述两种算法在有大量噪声情况下的定位效果。加噪声之后的波形经 CEEMD 分解后的波形如图8所示。

图8 加入大量噪声后采用 CEEMD 分解电压行波的结果
Fig. 8 Results of decomposition of voltage traveling wave by CEEMD after adding a large amount of noise

可见 CEEMD 分解可以滤除部分噪声, 体现行波信号的特征信息, 但分解后仍有大量噪声未被滤除。对 CEEMD 分解后的 IMF1 分量分别采用 TEO 算法和 NTEO 算法计算得到瞬时能量谱, 如图9和10所示。

如图9和图10所示, 加入大量噪声后, CEEMD 与 TEO 相结合的算法去噪效果不够理想, 难以选定正确的波头。而 CEEMD 与 NTEO 相结合的算法在有大量噪声的情况下仍能较为清楚地选定波头位置, 与无噪声情况下检测到波头的时间相同。

综上所述, 两种算法具有相同的定位精度, 其中 NTEO 的去噪能力明显强于 TEO, 考虑到实际情况不排除有大量噪声的情况存在, 采用 CEEMD

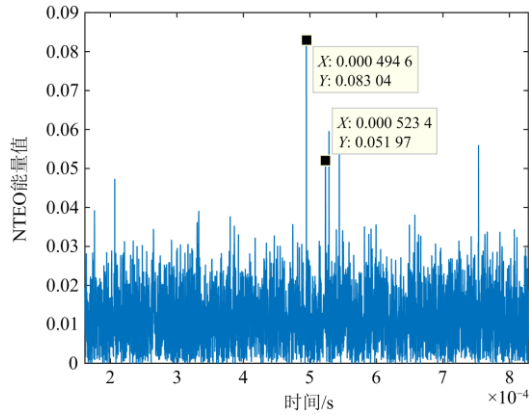


图 9 M 端加噪行波 IMF1 分量的 Teager 瞬时能量谱
Fig. 9 Teager instantaneous energy spectrum of IMF1 component of M-terminal noisy traveling wave

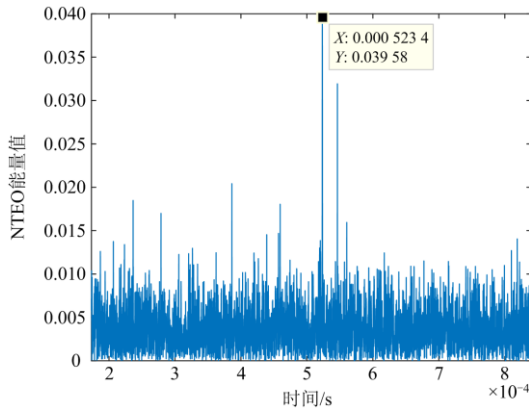


图 10 M 端加噪行波 IMF1 分量的改进型 Teager 瞬时能量谱
Fig. 10 Novel Teager instantaneous energy spectrum of IMF1 component of M-terminal noisy traveling wave

与 NTEO 相结合的算法更适用于实际情况下的行波故障定位。

3 不同故障情况下的仿真验证

3.1 过渡电阻的影响

考虑到过渡电阻越大, 行波幅值的衰减速度越快, 行波到达时的波头幅值将会因此降低, 可能会影响到定位的结果。由于配电网易发生千欧以上的高阻接地故障^[30], 本文分别对接地电阻为 $5\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 、 $5000\ \Omega$ 的情况进行仿真验证。定位结果如表 1 所示。

通过上述分析可知, 过渡电阻的大小变化对定位的精度几乎没有影响, 该方法在高阻接地的情况下仍能精确标定波头。

3.2 不同故障距离的影响

考虑到不同的故障距离会对定位结果造成影响, 本文选取故障距离为 2 km、4 km、7 km、9 km、

表 1 不同过渡电阻条件下的定位结果

Table 1 Positioning results under different transition resistance conditions

过渡电阻/ Ω	M 端行波时刻/ μs	N 端行波时刻/ μs	定位结果/km	定位误差/m
5	523.4	510.0	6.998	2
50	523.4	510.0	6.998	2
500	523.3	510.0	6.984	16
5000	523.3	510.0	6.984	16

13 km 的情况进行仿真验证。过渡电阻采用 $5\ \Omega$, 其中故障距离为 13 km 的情况下, 故障点设置在第 5 条线路上, 其余情况故障点均设置在第 4 条线路上。定位结果及误差如表 2 所示。

表 2 不同故障距离条件下的定位结果

Table 2 Location results under different fault distance conditions

故障距离/km	M 端行波时刻/ μs	N 端行波时刻/ μs	定位结果/km	定位误差/m
2	506.8	526.8	2.017	17
4	513.3	520.1	3.986	14
7	523.4	510.0	7.998	2
9	530.0	503.3	8.982	18
13	543.3	506.6	12.973	27

通过上述分析, 验证了该方法的定位精度几乎不受故障距离的影响, 在不同故障距离的情况下可以保证很高的定位精度。

3.3 传统 HHT 算法和小波分析法的定位结果

传统 HHT 故障定位算法采用 EMD 分解信号, 得到 IMF 分量, 对 IMF1 分量进行希尔伯特黄变换, 通过得到的瞬时频率谱来标定波头位置。图 11 为故障距离为 2 km、过渡电阻为 $5\ \Omega$ 时的 M 端电压行波经 EMD 分解后得到的 IMF1 分量, 图 12 为 M 端

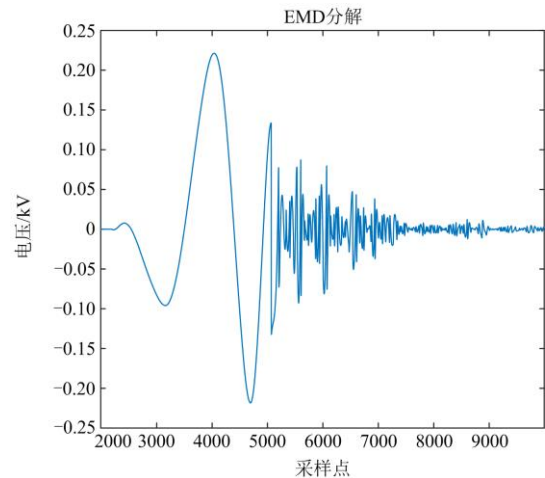


图 11 M 端电压行波 IMF1 分量

Fig. 11 M-terminal voltage traveling wave IMF1 component

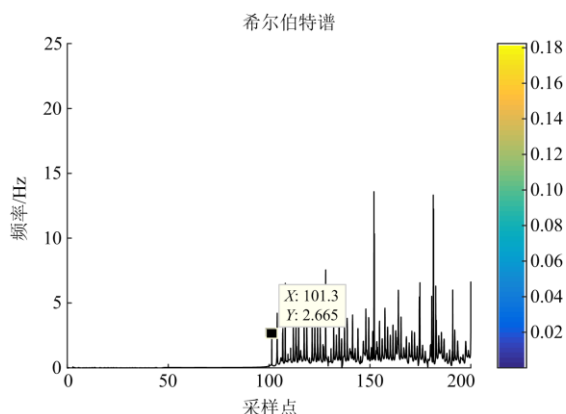


图 12 M 端电压行波瞬时频率谱

Fig. 12 Instantaneous frequency spectrum of M-terminal voltage traveling wave

瞬时频率谱。如图 12 所示, HHT 方法存在模态混叠的现象, 容易导致定位失败或定位误差较大。表 3 为不同故障距离条件下的 HHT 算法定位结果, 过渡电阻均为 5Ω 。

本文中, 传统小波分析法选取常用的 db6 小波作为小波基函数^[31]。图 13 为故障距离 2 km, 过渡电阻 5Ω 时的 M 端电压行波经 db6 小波处理后的结果, 表 4 为不同故障距离条件下的小波分析法定位结果。

表 3 采用传统 HHT 算法的定位结果

Table 3 Positioning results using traditional HHT algorithm

故障 距离/km	M 端行波 时刻/ μ s	N 端行波 时刻/ μ s	定位 结果/km	定位 误差/m
2	506.5	526.5	2.017	17
4	513.0	520.0	3.956	43
7	523.5	510.0	7.013	13
9	530.0	503.5	8.952	48
13	543.5	507.0	12.943	57

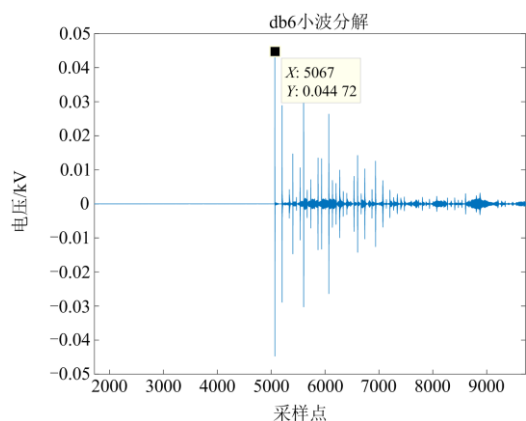


图 13 M 端电压行波小波变换结果

Fig. 13 Wavelet transform results of M-terminal voltage traveling wave

表 4 采用小波分析法的定位结果

Table 4 Positioning results using wavelet analysis method

故障 距离/km	M 端行波 时刻/ μ s	N 端行波 时刻/ μ s	定位 结果/km	定位 误差/m
2	506.7	526.7	2.017	17
4	513.4	520.3	3.970	30
7	523.9	510.1	7.058	58
9	530.2	503.8	8.937	67
13	543.7	507.4	12.913	87

通过上述分析, 传统 HHT 算法存在模态混叠的情况容易导致定位失败, 小波分析法需要寻找合适的基函数, 而本文提出的方法没有上述缺点, 并且在定位精度上明显优于传统 HHT 算法和传统的小波分析法。因此, 该方法对于行波检测有着极大的优势。

3.4 多分支线路的故障行波定位

由于配电网有大量的分支线路, 本文将所提方法与多分支线路判定故障分支的方法相结合, 进行配电网多分支线路的行波定位仿真验证。

在多分支行波定位中, 本文对故障行波线模分量采用 S 变换计算出对应的时频矩阵, 与样本库中各个分支故障时的行波信号时频矩阵对比得到相似度 α , 相似度越高说明故障点距离该样本点越近, 根据相似度最高的两个样本点即可判定故障所在分支。

在 PSCAD 中搭建如图 14 所示的 10 kV 配电网多分支线路模型, 测定线路波速为 2.98285×10^5 km/s, 采样率为 10 MHz, 0.1 ms 时发生故障, 在 M 端及各分支点、线路末端检测故障电压行波波形。

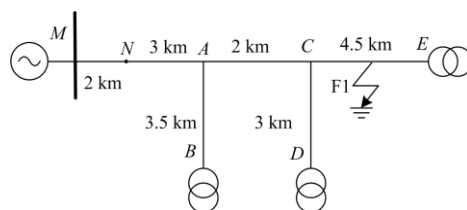


图 14 多分支线路结构示意图

Fig. 14 Schematic diagram of multi branch line structure

在图中 N、A、B、C、D、E 点分别模拟发生单相接地故障, 在 M 端通过传感器检测各点发生故障时的行波信号, 对三相故障行波信号进行凯伦贝尔变换后, 将其线模分量进行 S 变换得到对应的时频矩阵, 将时频矩阵保存至样本库(在实际应用中可以将每个采样点实际故障波形的时频矩阵保存至样本库, 每隔 500 m 至 1 km 设置一个采样点可以有效提高分支判定的准确性)。

设置故障发生在图 14 中 C 点右侧 2.5 km 处的 F1 点, 接地电阻为 $100\ \Omega$, 对 M 点检测到的故障行波线模分量进行 S 变换得到对应的时频矩阵, S 变换结果体现的时频域全景波形如图 15 所示。

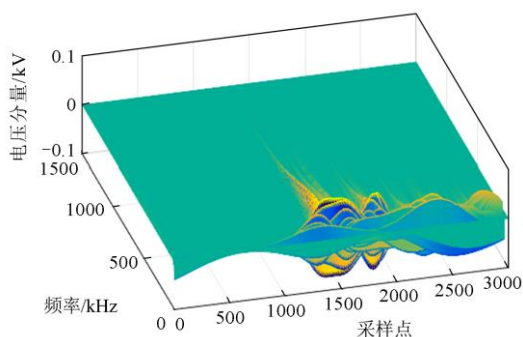


图 15 S 变换时频域全景波形图

Fig. 15 Panoramic waveform of S-transform time-frequency domain

将该时频矩阵与样本库进行相似度对比, 如表 5 所示, 故障点时频矩阵与 C 点的矩阵相似度最大, E 点次之, 则判定故障点在 CE 分支上, 且距离 C 点较近, 可采用 C、E 两点采集的电压行波信号对故障进行双端定位。若故障点时频矩阵与 N、A 两采样点的相似度最大, 则判定故障发生在 MA 分支, 采用 M、A 两处的行波信号即可完成定位。

表 5 与各样本点的矩阵相似度

Table 5 Matrix similarity with each sample point

样本点	N	A	B	C	D	E
矩阵相似度	0.8219	0.7931	0.8324	0.9244	0.8596	0.8984

采用 C、E 两端采集的故障行波信号进行 CEEMD-NTEO 双端定位, 定位结果为: 故障距离 C 点 2.489 km, 即定位误差为 11 m。

通过上述分析, 验证了该方法可以应用于配电网多分支线路的行波测距, 通过与 S 变换时频矩阵判定故障分支的算法相结合, 可以实现对配电网多分支线路故障的准确定位。

4 结论

1) 本文对于目前的行波检测方法中 EMD 存在模态混叠、小波分析中小波基难以选定以及 TEO 能量算子去噪能力差等问题, 提出了一种基于 CEEMD 和 NTEO 的行波定位方法。

2) 本文通过在 PSCAD 和 Matlab 上进行仿真模拟 10 kV 配电网单相接地故障的情况, 将本文算法与文献[26]所提“CEEMD 与 TEO 相结合的算法”

进行对比, 结果表明本文提出的算法和 CEEMD 与 TEO 相结合的算法都有很高的定位精度。但本文提出的算法在有大量噪声的情况下具有更好的去噪能力, 总体来说优于采用 CEEMD 与 TEO 相结合的算法。

3) 本文对不同过渡电阻、故障距离等故障情况进行了仿真数据研究。结果表明, 本文提出的将 CEEMD 与 NTEO 相结合的算法几乎不受过渡电阻和故障距离的影响, 定位精度高, 可靠性好, 可应用于配电网多分支行波定位中。并且通过和传统 HHT 算法与传统小波分析法的定位结果对比可知, 该方法在各方面均优于传统 HHT 算法与小波分析法, 具有很高的实用价值。此外, 除了本文采用的双端行波测距法, 本文所提算法在单端行波测距中的应用, 有待进一步研究。

参考文献

- [1] 李泽文, 曾祥君, 姚建刚, 等. 不受波速影响的输电线路双端行波故障测距算法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2006, 4(4): 68-71.
LI Zewen, ZENG Xiangjun, YAO Jiangang, et al. New fault location algorithm based on double terminal travelling waves avoiding wave speed influence[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2006, 4(4): 68-71.
- [2] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.
- [3] 雷金勇, 白浩, 黄秉开, 等. 基于频差回归-差分观测共视授时模型的高精度同步时钟[J]. 南方电网技术, 2022, 16(5): 54-60.
LEI Jinyong, BAI Hao, HUANG Bingkai, et al. High-precision synchronous clock based on frequency difference regression-difference observation common-view timing model[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(5): 54-60.
- [4] NAIDU O D, PRADHAN A K. A traveling wave-based fault location method using unsynchronized current measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 34(2): 505-513.
- [5] 刘丰, 曾祥君, 谷应科, 等. 基于行波技术的电力线路绝缘预警系统及其现场试验[J]. 南方电网技术, 2019, 13(6): 24-29.
LIU Feng, ZENG Xiangjun, GU Yingke, et al. Traveling wave based insulation faults early warning system and its field tests[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(6): 24-29.

- [6] 史宗翰. 基于广域暂态行波的复杂配电网故障定位研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
SHI Zonghan. Research on fault location of complex distribution network based on wide area transient traveling wave[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2020.
- [7] 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 Qinzhu, 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.
- [8] 廖芳群, 李海锋, 陈嘉权, 等. 小电阻接地系统高灵敏性接地故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 150-158.
LIAO Fangqun, LI Haifeng, CHEN Jiaquan, et al. High sensitive ground fault location in a low-resistance grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 150-158.
- [9] 李娜, 孙秀娟, 王鹏飞, 等. 基于小波变换和 TEO 的输电线路故障测距方法[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 142-144, 149.
LI Na, SUN Xiujuan, WANG Pengfei, et al. Transmission line fault location method based on wavelet transform and TEO[J]. Hydropower and Energy Science, 2019, 37(10): 142-144, 149.
- [10] 高淑萍, 徐振曦, 宋国兵, 等. 基于小波阈值去噪和 CEEMD 的混合三端直流输电线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 29-40.
GAO Shuping, XU Zhenxi, SONG Guobing, et al. Fault location of hybrid three-terminal HVDC transmission lines based on wavelet threshold denoising and CEEMD[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 29-40.
- [11] 刘渝根, 陈超, 杨蕊菁, 等. 基于小波相对熵的变电站直流系统接地故障定位方法[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 169-174.
LIU Yugen, CHEN Chao, YANG Ruijing, et al. Location method of ground fault in DC system of substation based on wavelet relative entropy[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 169-174.
- [12] 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 An'an, 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.
- [13] 张安安, 周志通, 庄景泰, 等. 基于行波瞬时振幅的高压直流输电线路故障测距方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 78-84.
ZHANG An'an, ZHOU Zhitong, ZHUANG Jingtai, et al. Fault location method of HVDC transmission line based on traveling wave instantaneous amplitude[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 78-84.
- [14] 罗建, 石家炜. 基于希尔伯特变换的暂态信号正弦表示分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 1-7.
LUO Jian, SHI Jiawei. Sinusoidal representation of a transient signal based on the Hilbert transform[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 1-7.
- [15] 李舟, 乔文, 谈震, 等. 基于行波特征频率的配电网混合线路故障定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5): 33-42, 51.
LI Zhou, QIAO Wen, TAN Zhen, et al. Fault location method for hybrid lines based on traveling wave characteristic frequency in distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 33-42, 51.
- [16] 郑思琦, 陈皓, 高传薪, 等. 一种基于简化能量比的直流线路故障区间定位方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 17-22.
ZHENG Siqi, CHEN Hao, GAO Chuanxin, et al. A fault location method for DC line based on simplified energy ratio[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 17-22.
- [17] 王德真, 王众毅, 王晓东. 基于 Wigner-Ville 时频分析的行波信号检测方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 128-133.
WANG Dezhen, WANG Zhongyi, WANG Xiaodong. The detection method for traveling wave based on Wigner-Ville time-frequency analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3): 128-133.
- [18] 张泽宁. 架空-电缆混合输电线路故障定位方法综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 44-51.
ZHANG Yining. A review of fault location methods for hybrid overhead and cable transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 44-51.
- [19] 彭楠, 程真何, 崔玉, 等. 半波长输电线路行波传播特性及故障测距[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 86-94.
PENG Nan, CHENG Zhenhe, CUI Yu, et al. Travelling wave propagation characteristics and fault location of half-wave length transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 86-94.
- [20] 范新桥, 朱永利, 卢伟甫. 基于 EMD-TEO 的输电线路行波故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 8-12, 17.
FAN Xinqiao, ZHU Yongli, LU Weifu. Traveling wave

- based fault location for transmission lines based on EMD-TEO[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 8-12, 17.
- [21] 李玥桦. 基于 EEMD 与 Teager 能量算子的输电线路行波故障测距研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019.
LI Yuehua. Fault location of transmission line through traveling wave based on EEMD and Teager energy operator[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.
- [22] XIE L, LUO L, LI Y, et al. A traveling wave-based fault location method employing VMD-TEO for distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 35(4): 1987-1998.
- [23] DIBAJ A, ETTEFAGH M M, HASSANNEJAD R, et al. A hybrid fine-tuned VMD and CNN scheme for untrained compound fault diagnosis of rotating machinery with unequal-severity faults[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 167.
- [24] 付华, 王婧羽. 基于 SR-VMD 的微弱故障行波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 156-162.
FU Hua, WANG Jingyu. Weak fault traveling wave detection method based on SR-VMD[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 156-162.
- [25] 邹红波, 伏春林, 高沈清. 基于互补经验模态分解法的高压直流输电线路故障测距[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 93-99.
ZOU Hongbo, FU Chunlin, GAO Shenqing. Fault location for high voltage direct current transmission lines based on complementary ensemble empirical mode decomposition[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2021, 43(2): 93-99.
- [26] 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 and Control Technology, 2018, 37(5): 113-117.
- [27] 董娜, 黄文清, 周超, 等. 基于改进型能量算子的电压暂降快速检测方法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(10): 3011-3014, 3021.
DONG Na, HUANG Wenqing, ZHOU Chao, et al. Novel method of voltage sag rapid detection based on energy operator[J]. Computer Application Research, 2013, 30(10): 3011-3014, 3021.
- [28] 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, 4(6): 170-172, 176.
ZHANG Xiaochen, LIU Deping, WANG Yaoying. Fault diagnosis of bearings based on LCD and modified Teager operator[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2020, 4(6): 170-172, 176.
- [29] 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, 4(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, 4(6): 81-83, 88.
- [30] LAAKSONEN H, HOVILA P. Method for high-impedance fault detection[J]. CIRED-Open Access Proceedings Journal, 2017(1): 1295-1299.
- [31] 叶鑫杰, 兰生, 肖思捷, 等. 基于小波包能量熵和 DBN 的 MMC-HVDC 输电线路单极接地故障定位方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(2): 82-91.
YE Xinjie, LAN Sheng, XIAO Sijie, et al. Single pole grounding fault location method of MMC-HVDC transmission line based on wavelet packet energy entropy and DBN[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(2): 82-91.

收稿日期: 2021-12-11; 修回日期: 2022-06-01
作者简介:

白浩(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电网快速故障处理、配电网高品质供电技术、分布式能源控制、数字孪生与全景仿真等; E-mail: baihao@csg.cn

钟振鑫(1983—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事电网科技管理及变电试验研究;

李巍(1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为分布式电源接入、配电网运行与控制等。

(编辑 周金梅)