

基于 FEEMD-NTEO 的风电场送出线路故障定位

饶鸿江, 何永泰*, 彭洁, 彭文权

(楚雄师范学院 物理与电子科学学院, 云南 楚雄 675000)

Fault Location of Wind Farm Transmission Line Based on FEEMD-NTEO

RAO Hongjiang, HE Yongtai*, PENG Jie, PENG Wenquan

(Department of Physics and Electron Information Science, Chuxiong Normal University,
Chuxiong 675000, China)

Abstract: Aiming at the problems of low traveling wave detection accuracy, mode mixing, weak anti-noise ability, and poor real-time fault location in the use of collective empirical mode decomposition (EEMD) for traveling wave faults localization in doubly-fed wind farm transmission lines, a traveling wave fault localization method based on the combination of fast ensemble empirical modal decomposition (FEEMD) and the improved Teager energy operator (NTEO) is proposed. This method uses FEEMD to decompose the fault current traveling wave signal into stationary intrinsic mode components and residual components, eliminating the noise components and preserving the signal integrity. Then the NTEO algorithm is used to denoise the decomposed high-frequency signal again to enhance the faulty traveling wave mutation characteristics and accurately calibrate the traveling wave head. Simulation results show that the proposed method can accurately and quickly calibrate the fault traveling wave head precisely with good denoising effect, which improves the accuracy and speed of fault location compared with FEEMD-TEO and EEMD-NTEO traveling wave detection methods.

Key words: wind farm; transmission line; fault location; fast ensemble empirical mode decomposition and novel Teager energy operator (FEEMD-NTEO)

摘要: 针对集合经验模态分解(EEMD)用于双馈风电

基金项目: 国家自然科学基金项目(61271159); 云南省地方高校联合基金重点项目(202101BA070001039); 云南省教育厅科学研究基金项目资助(2023J1057); 校级大学生科研项目(XSKY2314)

National Natural Science Foundation of China (61271159); The key projects of joint fund of local universities in Yunnan Province (202101BA070001039); The Scientific Research Fund of the Yunnan Provincial Department of Education (2023J1057); University student research project (XSKY2314)

场送出线路行波故障定位中行波检测精度不高, 存在模态混叠、抗噪能力弱及故障定位实时性不好等问题, 提出了一种基于快速集合经验模态分解(FEEMD)与改进 Teager 能量算子(NTEO)结合的行波故障定位方法。该方法利用 FEEMD 对故障电流行波信号进行分解, 分解为平稳的固有模态分量和残差分量, 消除噪声成分, 保留信号的完整性, 然后采用 NTEO 算法对分解的高频信号再次去噪, 增强故障行波突变特征, 精确标定行波波头。仿真结果表明, 所提方法能够快速将故障行波波头精确标定, 且去噪效果好, 与 FEEMD-TEO、EEMD-NTEO 行波检测方法相比, 提高了故障定位的精度和速度。

关键词: 风电场; 送出线路; 故障定位; 快速集合经验模态分解与改进 Teager 能量算子(FEEMD-NTEO)

0 引言

传统行波检测方法精度低、抗噪能力弱, 导致无法精确标定行波波头, 行波故障定位方法存在的问题已无法满足电力系统快速切除故障的要求。双馈风电场由电力电子器件直接或间接接入电网, 其短路电流具有频率偏移、幅值受限以及正负序阻抗不一致等特点^[1], 使得以工频相量法为基础的测距技术受到极大挑战^[2]。此外, 风电资源丰富的区域通常距离负荷中心较远, 大规模风电向外输送已成为一种趋势^[3]。因此, 精确定位故障位置, 加快电力系统故障恢复运行, 提高风电利用率至关重要。

故障定位方法根据原理主要分为两种^[4]: 故障解析法和行波法。故障解析法中的单端法采用单端数据进行分析计算, 其定位精度受运行方式、过渡电阻等因素的影响^[5]; 双端法利用线路两端的数据进行故障定位计算, 但其十分依赖于站间

通信设备^[6],设备所测出数据是否精确和所上传数据是否能够实时同步将会影响故障定位的结果。为解决双端数据不同步的问题,文献[7]采用计算复杂的精确线搜索比相算法,非同步误差角计算过程中,动态计算分布系数以补偿暂态电流。行波法的故障定位结果是否精准取决于故障行波波头到达检测设备两端的时间是否精准。行波法中被运用较多的方法有小波变换^[8-9]和希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)^[10-11]。小波变换法由于计算量大、步骤繁多,因此在实际行波故障定位中不具备很高的运用价值。HHT是通过经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)算法把故障电流行波信号进行分解得到固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量,从而将不稳定信号和离散信号分解,但该方法计算速度缓慢、定位结果不够精准、模态混叠且抗噪能力,不利于现实中的故障定位。文献[12]提出一种基于EMD与Teager能量算子(Teager Energy Operator, TEO)相组合的故障行波测距算法,相较于HHT,此方法能够快速准确地计算故障距离,但仍未完全克服EMD方法存在的模态混叠和噪声抑制能力差的问题。文献[13]提出一种将集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)与TEO进行结合的故障行波定位方法,在EMD的基础上,对EEMD方法进行改进,去除模态混叠现象,但存在计算时间较长、抗噪能力差的问题。文献[14]在EEMD的基础上提出快速集合经验模态分解(Fast Ensemble Empirical Mode Decomposition, FEEMD),此方法有效解决了EEMD的抗噪能力弱的问题,并且计算速度更加迅速。文献[15]针对EMD分解信号出现模态混叠现象导致信号失真的问题,采用FEEMD减小特征量计算来抑制噪声的影响,使电磁信号的识别率得到较大提升。

综上,本文在EEMD的基础上,通过设置判定标准加快分解速度,并设置阈值去除无用内涵模态分量(Intrinsic Mode Functions, IMF)。引入分辨率参数改进的新型Teager能量算子(New Teager Energy Operator, NTEO),使得FEEMD-NTEO可以达到去除噪声的效果并保留行波信号的完整性,计算耗时也更短。提出一种基于

FEEMD-NTEO的风电场送出线路行波故障定位方法,并与FEEMD-TEO、EEMD-NTEO方法进行仿真比较。结果表明,三种方法都具有较高的定位精度,但FEEMD-NTEO方法抗噪能力更强、定位实时性更好并且可快速准确地计算出故障距离。

1 FEEMD-NTEO 原理

1.1 FEEMD 原理

文献[16-18]提出一种以EMD为基础的新分解方法,即EEMD。EEMD算法存在计算量大、计算时间较长、实时性差^[19]以及迭代过程多次在原始信号中混入白噪声,分解完后存在噪声残余^[20]的缺点。因此,为提高算法效率,文献[19]提出了基于EEMD的改进算法FEEMD。FEEMD通过优化停止条件减少筛选次数来提高算法的执行效率,且能较好地对信号进行去噪。实际上大多数信号是复杂的、非平稳的,FEEMD将信号分解为有限个IMF分量和剩余分量R,分解后既可以保留信号完整性又能达到去除噪声的目的,也能降低计算时间,主要计算步骤如下:

(1) 先分别求出时序数据 $X_i(t)$ 的极大值和极小值,再以3次样条插值方法得到上下包络线 $U_i(t)$ 和 $L_i(t)$,并求出 $U_i(t)$ 和 $L_i(t)$ 的均值 $m_i(t)$ 。

$$m_i(t) = \frac{U_i(t) + L_i(t)}{2} \quad (1)$$

(2) 求出 $m_i(t)$ 与 $X_i(t)$ 之间的差值。

$$h_i(t) = X_i(t) - m_i(t) \quad (2)$$

需判断 $h_i(t)$ 是否满足以下条件:①一个序列的零点数目和极值数目须相等,或两个序列的零点数目和极值数目不超过一个;②在任意时刻点,上包络线与下包络线的平均值均为0。

(3) 计算剩余数据。

$$r_i(t) = X_i(t) - h_i(t) \quad (3)$$

重复以上步骤,获取 N 个IMF分量。

分解过程中停止分解的判断标准如式(4)所示:

$$\sum_{i=1}^n \frac{|h_{i_{m-1}}(t) - h_{i_m}(t)|^2}{h_{i_{m-1}}(t)^2} \leq 0.2 \quad (4)$$

式中: m 为筛选次数; n 为样本数。

综上可得 $X_i(t)$ 的表达式如式(5)所示:

$$X_i(t) = \sum_{j=1}^N \text{IMF}_j(t) + R_N(t) \quad (5)$$

式中: N 为 IMF 分量总个数; $R_N(t)$ 为余项。

设定门限阈值并处理尺度上无用的 IMF1 分量, 软限幅函数如式(6)所示:

$$\eta_1(t) = \begin{cases} 0, & |\text{IMF1}(t)| \leq l \\ |\text{IMF1}(t)| \text{sgn}(|\text{IMF1}(t)| - l), & |\text{IMF1}(t)| > l \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\eta_1(t)$ 为经阈值处理后的 IMF1 分量, 已去除某些尺度上的噪声; l 为时序数据阈值, 其表达式为

$$l = \sigma \sqrt{2 \lg M} \quad (7)$$

式中: σ 为噪声的方差; M 为加噪信号长度。

1.2 NTEO 原理

Kaiser 提出计算信号瞬时能量的非线性算子: Teager 能量算子 (TEO)。其常被用于信号处理, 对于连续时间信号, TEO 定义如式(8)所示^[21]:

$$\psi_c[s(t)]^2 = [s'(t)]^2 - s(t)s''(t) \quad (8)$$

式中: $\psi_c[s(t)]$ 为能量算子; $s(t)$ 为时间信号。

在实际应用中, 采样信号为离散信号, 可进行差分运算, 定义能量算子为

$$\psi[s(n)] = s^2(n) - s(n+1)s(n-1) \quad (9)$$

TEO 对噪声的抗干扰能力较弱, 所以在噪声环境下 TEO 算法得到的定位结果可能不够精确。本文采用 NTEO 能量算子作为信号处理方法。该算法可以有效增强信号在频域中的特性, 提高 TEO 的抗噪声能力, 通过加入分辨率参数 i , 并利用前后相差 i 点的 3 个点进行能量值计算, 计算表达式为

$$\psi[s(n)] = s^2(n) - s(n+i)s(n-i) \quad (10)$$

由式(9)、(10)可知, TEO 和 NTEO 都采用 3 个点进行能量值计算, 但是后者在算法中引入分辨率参数 i , 增强了 TEO 能量算子对信号的敏感度, 从而提升了 NTEO 算法对噪声的抗干扰能力。

2 FEEMD-NTEO 行波故障定位法

FEEMD-NTEO 行波故障定位法的具体步骤如下:

(1) 采集系统侧和风电场侧三相电流行波数

据 I_A, I_B, I_C ;

(2) 通过卡伦鲍尔变换, 提取行波电流线模分量;

$$\begin{cases} I_0 = (I_A + I_B + I_C)/3 \\ I_\alpha = (I_A - I_B)/3 \\ I_\beta = (I_A - I_C)/3 \end{cases} \quad (11)$$

式中: I_α, I_β 分别为线模、 β 模分量; I_0 为零模分量。

(3) 对电流行波线模分量进行 FEEMD 分解, 获取 IMF1 分量;

(4) 计算 IMF1 分量的 NTEO 能量值;

(5) 根据 NTEO 能量谱, NTEO 能量值最高点对应时刻即为行波波头到达时刻;

(6) 标定行波波头到达时刻, 根据式(12)计算故障点到系统侧的距离。

$$l_{MF} = \frac{l + (t_{M1} - t_{N1})v}{2} \quad (12)$$

式中: t_{M1} 为行波波头到达系统侧即 M 端的时间; t_{N1} 为行波波头到达风电场侧即 N 端的时间; l 为系统侧和风电场侧之间的距离; v 为行波波速; l_{MF} 为系统侧与故障点 F 之间的距离。

双端行波故障定位原理图如图 1 所示。

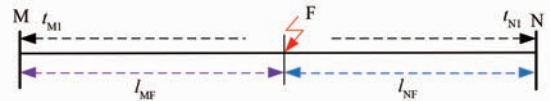


图 1 双端行波故障定位原理图

Fig. 1 Principle diagram of double-ended traveling wave fault location

3 仿真分析

3.1 仿真模型

双端行波故障定位法精度和可靠性较高, 但需要在线路两端安装行波检测装置, 因此造价较高。为保证较高的故障定位精度, 应精确标定行波波头到达线路两端的时间, 所以在实践中需要利用高精度的北斗系统实现采样数据精确同步。为验证本文所提方法的可靠性和精确性, 采用如图 2 所示的双馈风电场送出线路进行故障定位仿真验证。

仿真模型中双馈风机单机额定容量为 1.5 MW, 总台数 200 台, 风电场总容量为 300 MW; 机端额定电压为 0.6 kV, 额定频率为 50 Hz; 定子电阻为 0.015 7 p.u., 定子电感为 0.325 p.u., 转子

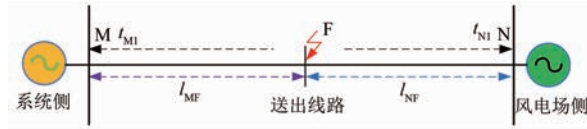


图 2 风电场送出系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of wind farm outgoing system

电阻 0.016 p.u., 转子电感 0.16 p.u., 撬棒电阻为 0.004 5 p.u.; 风电场箱变额定容量为 2.5 MVA, 电压等级为 35 kV/0.69 kV, DYN 接线; 主变额定容量为 350 MVA, 电压等级为 220 kV/35 kV, YN 接线; 送出线路长度为 100 km, 单位长度正负序阻抗为 $0.082 + j0.342 \Omega/\text{km}$ 、零序阻抗 $0.221 + j0.787 \Omega/\text{km}$, 采样率为 1 MHz。

故障定位仿真计算时间取决于电脑硬件配置, 为更好进行仿真验证, 计算机配置为: CPU 为 i5-12450 H, 主频为 2.0 GHz, 内存为 16 G。

采用电流行波线模分量, 在系统侧和风电场侧进行电流行波检测, 利用卡伦鲍尔变换对电流行波进行解耦, 提取系统侧和风电场侧的电流行波线模分量, 如图 3 所示。

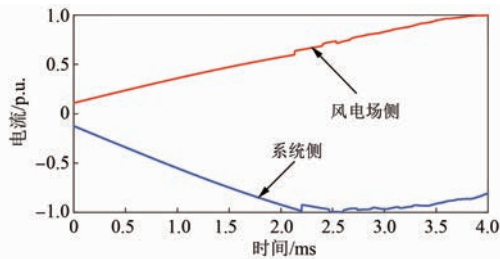


图 3 系统侧和风电场侧电流行波线模分量

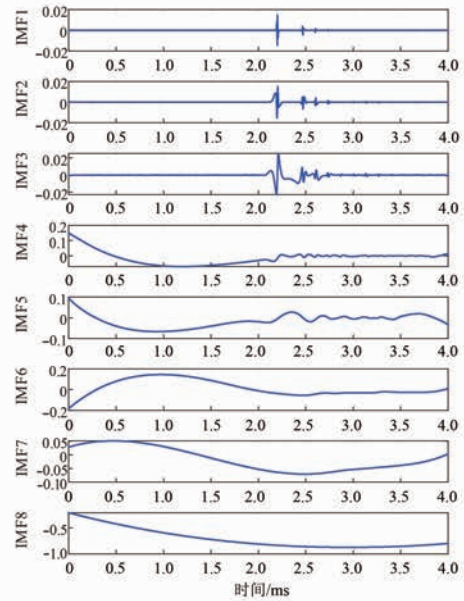
Fig. 3 System side and wind farm side current traveling wave line mode component

3.2 电流行波 FEEMD 分解

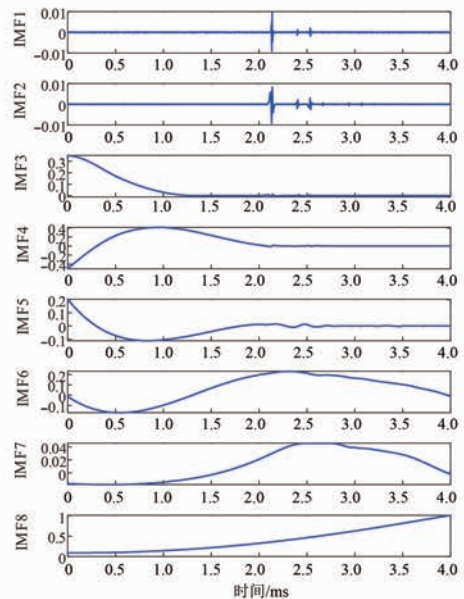
设定参数: 噪声与待分解信号标准差之比 $N_{std} = 0.01$, 对信号的平均次数 $N_E = 8$ 。采用 FEEMD 算法对系统侧和风电场侧的电流行波进行分解后, 尺度上无用的 IMF1 分量可以通过设定阈值来筛选, 既保留行波特征信息的完整性又能去除噪声; 再采用 NTEO 能量算子对 IMF1 分量去噪, 使行波波头的标定更精确。设置距离系统侧 60 km 处发生 A 相金属性接地故障, 电流行波 FEEMD 分解如图 4 所示。

3.3 电流行波能量谱

采用 FEEMD 分解后, 提取行波信号中的



(a) 系统侧电流行波 FEEMD 分解



(b) 风电场侧电流行波 FEEMD 分解

图 4 电流行波 FEEMD 分解

Fig. 4 Current traveling wave FEEMD decomposition

IMF1 分量, 利用 NTEO 能量算子计算 IMF1 分量, 即可得到 IMF1 分量的能量谱。能量谱中, 能值最大值点对应时刻为行波波头到达系统侧和风电场侧的时间。NTEO 能量算子中分辨率参数 i 应满足 $i < f_s/8f_0$ 的条件, 分辨率参数 i 的选取会影响去噪效果。为保证行波检测结果的准确性, 针对不同的 i 值对故障定位精度进行测试, 其结果如表 1 所示。

表 1 不同分辨率参数 i 下的定位精度Tab.1 Positioning accuracy under different resolution parameter i

故障 距离/km	误差 $\delta/\%$								
	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$
40	0.13	0.13	0.50	-0.25	-2.88	369.50	369.50	369.50	369.50
60	-1.57	-0.58	-0.58	-0.58	-1.08	-1.08	-0.58	-0.58	-0.58
80	209.38	-241.31	-0.19	0	-0.19	-0.19	-0.38	209.60	-0.19
90	192.61	-208.72	0.44	0.11	1.44	0.11	192.78	192.28	0.61

由表 1 可知,根据多次仿真结果,选取分辨率参数 $i=5$ 较合适。实际上,当采样频率 f_s 发生改变时,分辨率参数 i 应重新选取最优参数值。

假设在距离系统侧 60 km 处发生 A 相金属性接地故障,系统侧和风电场侧采用 FEEMD 和 EEMD 分解的 IMF1 分量 NTEO 能量谱分别如图 5 和图 6 所示。

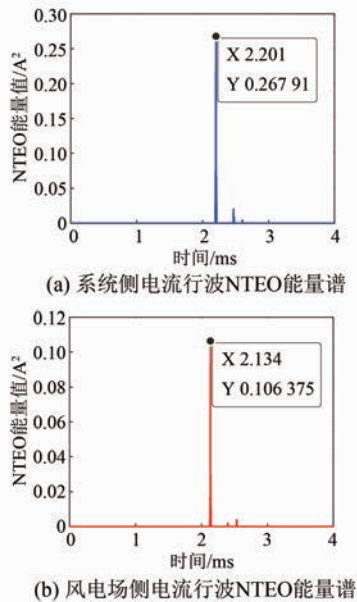


图 5 FEEMD 分解电流行波 NTEO 能量谱

Fig.5 FEEMD decomposes the current traveling wave NTEO energy spectrum

由图 5 和图 6 可知,FEEMD-NTEO 算法检测到故障行波波头到达两侧的时间分别为 $t_{M1} = 2.201$ ms、 $t_{N1} = 2.134$ ms。EEMD-NTEO 算法检测到故障行波波头到达两侧的时间 FEEMD-NTEO 算法相同。由式(12)计算可得故障点距离系统侧 60.05 km,误差为 50 m,上述两种方法都有较高的定位精度。

为验证本文所提故障定位方法具有良好的实用性,而且为更贴近工程实际情况,在系统侧和风电场侧

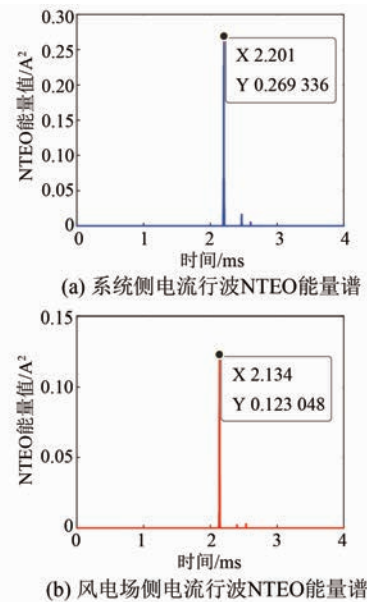


图 6 EEMD 分解电流行波 NTEO 能量谱

Fig.6 EEMD decomposes the current traveling wave NTEO energy spectrum

电场侧电流中加入 30 dB 的高斯白噪声,将 FEEMD-NTEO、FEEMD-NTEO 以及 EEMD-NTEO 三种算法进行对比。假设在距离系统侧 96 km 处发生 A 相金属性接地故障,加入噪声后的系统侧和风电场侧电流行波如图 7 所示。

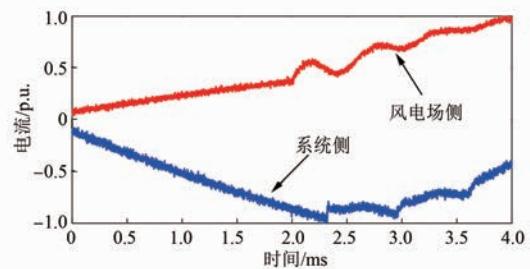


图 7 两侧电流行波(含噪声)

Fig.7 Current traveling waves on both sides contain noise

采用 FEEMD 分解的两侧电流行波含噪 IMF1 分量 NTEO 能量谱如图 8 所示。

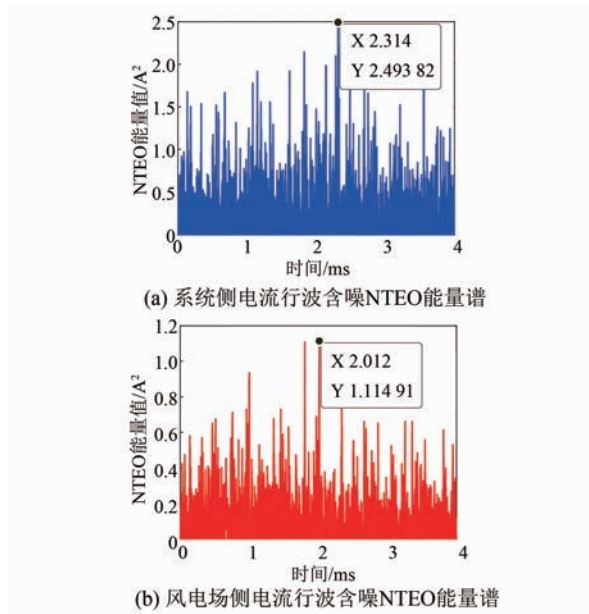


图 8 FEEMD 分解电流行波含噪 NTEO 能量谱
 Fig. 8 FEEMD decomposes the noisy NTEO energy spectrum of current traveling wave

采用 FEEMD 分解两侧电流行波含噪 IMF1 分量 TEO 能量谱如图 9 所示。

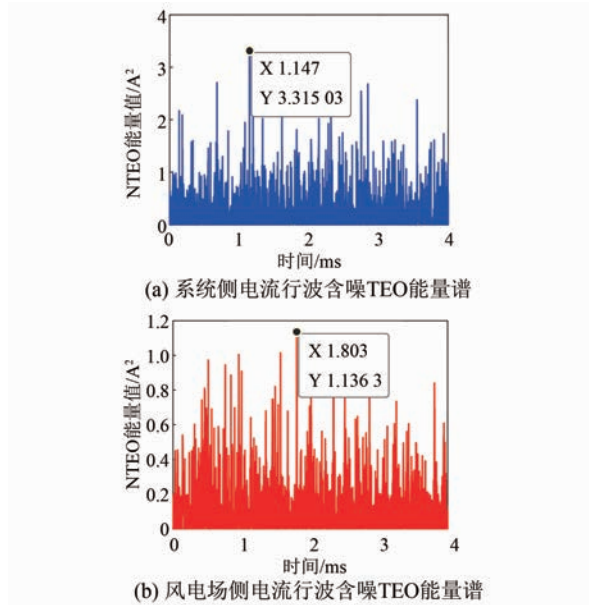


图 9 FEEMD 分解电流行波含噪 TEO 能量谱
 Fig. 9 FEEMD decomposes the noisy TEO energy spectrum of current traveling wave

采用 EEMD 分解两侧电流行波含噪 IMF1 分量 NTEO 能量谱如图 10 所示。

由图 8 ~ 10 可知, 故障信号含有强噪声, FEEMD-TEO 算法采用的是 TEO 能量算子,

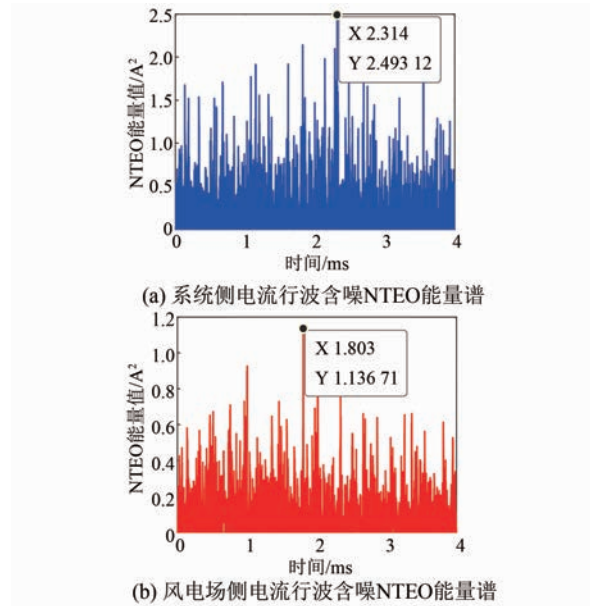


图 10 EEMD 分解电流行波含噪 NTEO 能量谱
 Fig. 10 EEMD decomposes the noisy NTEO energy spectrum of current traveling wave

FEEMD 分解虽不彻底, 但保留了信号的完整性, 存在少部分噪声干扰的情况下波头难以精准标定, 定位结果为 48.4 km, 结果失效。EEMD-NTEO 算法虽然在一定程度上能够抑制模态混叠, 但并没有完全消除, 残余噪声的存在使定位失败, 定位结果为 126.65 km。FEEMD-NTEO 算法中的 NTEO 相比于 TEO 去噪能力强, FEEMD 分解在保留信号完整性的前提下, 行波突变点明显, 所以该算法能够精确标定波头, 故障定位结果为 95.3 km, 误差为 700 m。FEEMD-NTEO 算法计算耗时 0.589 4 s, EEMD-NTEO 法计算总耗时 1.190 3 s, 可见相较于 EEMD-NTEO 算法, FEEMD-NTEO 算法行波检测实时性更好。

以距离系统侧 60 km 处发生 A 相金属性接地故障为例, 线路两侧采样电流行波中含有 40 dB 高斯白噪声的故障定位结果如图 11 和 12 所示。图 11 采用 FEEMD-NTEO 算法, 定位结果 60.35 km, 图 12 采用 FEEMD-TEO 算法, 定位结果 81.35 km。NTEO、TEO 能量算子虽然都采用三个点计算, 但 NTEO 算法引入的参数 i 增强了行波信号的依频特性, 抑制噪声的能力比 TEO 算法强。因此 FEEMD-NTEO 行波检测结果更为准确。

综上所述, 噪声能量不可忽略时, NTEO 算法

的去噪效果比 TEO 算法好。信号不含噪声时 FEEMD-NTEO 算法与 EEMD-NTEO 算法定位结果都比较精确,但在抗噪能力上 FEEMD-NTEO 算法比 EEMD-NTEO 算法强。考虑到实际现场会有大量噪声干扰,所以本文所提的基于 FEEMD-NTEO 算法的故障定位方法更适用于实际现场。

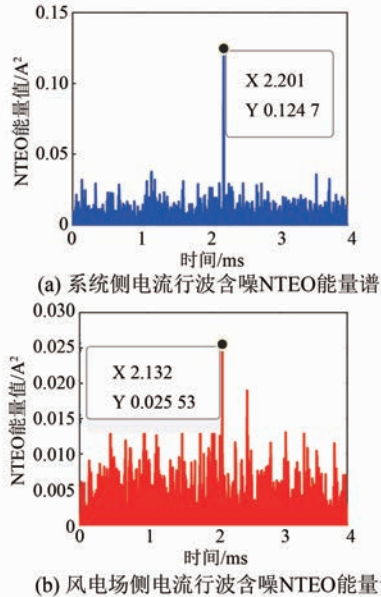


图 11 FEEMD 分解电流行波含噪 NTEO 能量谱
Fig. 11 FEEMD decomposes the noisy NTEO energy spectrum of current traveling wave

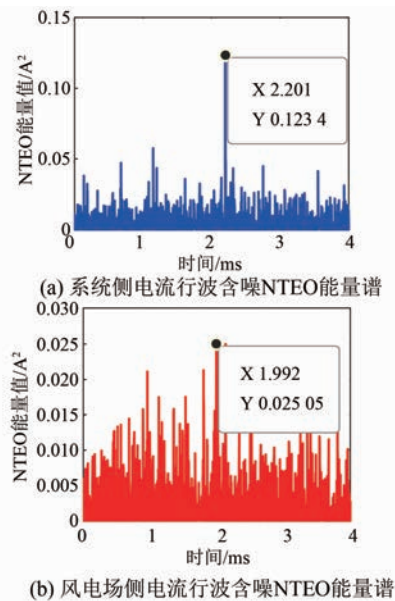


图 12 FEEMD 分解电流行波含噪 TEO 能量谱
Fig. 12 FEEMD decomposes the noisy TEO energy spectrum of current traveling wave

3.4 不同故障情况下的仿真实验

3.4.1 不同故障距离的影响

考虑到不同的故障距离可能会对结果产生影响,所以选择分别在距系统侧 3、10、20、30、40、50、60、80、90 km 处设置 A 相接地故障,过渡电阻为 50Ω ,进行验证,其结果如表 2 所示。由表 2 可知,采用 FEEMD-NTEO 算法和 EEMD-NTEO 算法都有较高的定位精度,受故障距离的影响较小,但 FEEMD-NTEO 算法耗时短,实时性更好。

表 2 不同故障距离下的定位结果

Tab. 2 Positioning results under different fault distances

故障距离/km	FEEMD-NTEO			EEMD-NTEO		
	定位结果/km	误差 $\delta/\%$	耗时/s	定位结果/km	误差 $\delta/\%$	耗时/s
3	3.05	-1.67	0.50	2.75	8.33	1.25
10	9.65	3.50	0.54	9.95	0.50	1.27
20	19.85	0.75	0.42	20.15	-0.75	1.26
30	29.75	0.83	0.42	30.05	-0.17	1.09
40	39.95	0.13	0.42	39.95	0.13	1.16
50	49.85	0.30	0.43	49.85	0.30	1.03
60	60.05	-0.83	0.42	60.05	-0.83	1.01
80	80.15	-0.18	0.42	80.30	-0.38	1.07
90	90.05	-0.06	0.40	90.05	-0.06	1.03

3.4.2 不同过渡电阻的影响

过渡电阻越大,行波幅值衰减速度越快,行波到达系统侧和风电场侧的波头幅值会有所降低,可能会对测距结果造成影响。因此将分别在 5 和 96 km 处设置单相接地故障,对过渡电阻分别为 10、40、80、100、200、300 Ω 的情况进行仿真验证,故障定位结果如表 3 所示。由表 3 可知,两种方法的定位结果基本一致,不受过渡电阻的影响,过

表 3 不同过渡电阻下的定位结果

Tab. 3 Positioning results under different transition resistances

故障距离/km	过渡电阻/ Ω	FEEMD-NTEO			EEMD-NTEO		
		定位结果/km	误差 $\delta/\%$	耗时/s	定位结果/km	误差 $\delta/\%$	耗时/s
5	10	5.15	-3.0	0.44	5.15	-3.0	1.13
	40	5.15	-3.0	0.43	5.15	-3.0	1.06
	80	5.15	-3.0	0.47	5.15	-3.0	1.12
	100	5.15	-3.0	0.46	5.15	-3.0	1.23
	200	5.15	-3.0	0.44	5.15	-3.0	1.09
	300	5.15	-3.0	0.44	5.15	-3.0	1.11
96	10	96.5	-0.5	0.43	96.5	-0.52	1.00
	40	96.2	-0.2	0.44	96.2	-0.21	1.04
	80	96.2	-0.2	0.41	96.2	-0.21	1.00
	100	96.2	-0.21	0.44	96.2	-0.21	0.99
	200	96.200	-0.21	0.45	96.05	-0.05	1.17
	300	96.350	-0.36	0.45	96.05	-0.05	1.03

渡电阻发生变化时,故障定位相对误差基本不变,但在故障定位计算时长上本文所提算法比 EEMD-NTEO 算法耗时更短,故障定位速度更快。

3.4.3 不同故障类型的影响

为验证不同故障类型的影响,本文在距离系统侧 15、65 km 处,分别设置 ABC 三相短路、A 相接地短路、BC 相间短路、BC 两相接地短路。不同故障类型下测距结果如表 4 所示。由表 4 可知,两种方法的定位结果基本不受不同故障类型的影响,但 EEMD-NTEO 算法在 65 km 处的 BC 两相接地短路的故障情况下定位失效。其它故障类型下上述两种方法仍然可以保证很高的测距精度,且本文所提算法比 EEMD-NTEO 算法耗时更短。

表 4 不同故障类型下的定位结果

Tab. 4 Positioning results under different fault types

故障距离/km	故障类型	FEEMD-NTEO			EEMD-NTEO		
		定位结果/km	误差/ $\delta/\%$	耗时/s	定位结果/km	误差/ $\delta/\%$	耗时/s
15	AG	14.75	1.67	0.48	14.90	0.67	1.10
	BC	14.90	0.67	0.52	14.90	0.67	1.18
	BCG	14.9	0.67	0.43	14.90	0.67	1.07
	ABC	14.90	0.67	0.65	14.90	0.67	1.56
65	AG	65.15	-0.23	0.46	65.15	-0.23	1.29
	BC	65.00	0	0.41	65.00	0	1.02
	BCG	65.00	0	0.41	331.70-410.31		1.050
	ABC	65.00	0	0.41	65.00	0	1.02

3.4.4 不同故障相角的影响

考虑到不同的故障相角可能会对测距结果造成影响,所以选择在距离系统侧 6、96 km 处分别设置 30° 、 60° 、 90° 的故障相角,测距结果如表 5 所示。由表 5 可知,两种方法都不受故障相角的影响,都具有较高的定位精度,但 FEEMD-NTEO 算法比 EEMD-NTEO 算法定位耗时更短。因此

表 5 不同故障相角下的定位结果

Tab. 5 Positioning results under different fault phase angles

故障距离/km	$\varphi/^\circ$	FEEMD-NTEO			EEMD-NTEO		
		定位结果/km	误差/ $\delta/\%$	耗时/s	定位结果/km	误差/ $\delta/\%$	耗时/s
6	30	5.90	1.67	0.45	5.90	1.67	0.87
	60	5.90	1.67	0.44	5.90	1.67	0.90
	90	5.90	1.67	0.43	5.75	4.17	0.93
96	30	96.05	-0.05	0.42	96.05	-0.05	0.85
	60	96.05	-0.05	0.41	96.05	-0.05	0.83
	90	96.05	-0.05	0.42	96.05	-0.05	0.88

FEEMD-NTEO 算法更适用于送出线路的故障定位,能够加快恢复故障运行。

4 结语

针对 EEMD 用于双馈风电场送出线路行波故障定位中行波检测精度不高,出现模态混叠、抗噪能力弱以及故障定位实时性差等问题,本文提出一种基于 FEEMD-NTEO 的双馈风电场送出线路行波故障定位方法。通过仿真验证,得出如下结论:

(1) 所提 FEEMD-NTEO 算法与 EEMD-NTEO 算法都有较高的定位精度,但在故障信号含大量噪声的情况下,采用 FEEMD-NTEO 算法可以消除部分噪声,保留行波突变特征,定位精度能满足实际工程需求。

(2) 针对不同故障距离、故障相角、过渡电阻以及故障类型等故障情况进行仿真对比。结果表明,所提算法受故障距离、过渡电阻、故障类型及故障相角的影响较小,定位结果具有可靠性高、精度高且实时性好等优点,可应用于风电场送出线路故障定位中。强噪声环境下相较于 FEEMD-NTEO、EEMD-NTEO 算法,本文所提的 FEEMD-NTEO 算法定位结果更可靠,实用性更强。

参考文献

- [1] 余越,王聪博,樊沛林,等. 基于差动电流能量比的新能源场站送出线路纵联保护[J/OL]. 电网技术, 2023-06-08. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20230606.1657.008.html>.
- [2] YU Y, WANG C B, FAN P L, et al. Pilot protection based on energy ratio of differential current for outgoing line from renewable power plants [J/OL]. Power System Technology, 2023-06-08. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20230606.1657.008.html>.
- [3] 束洪春,邓亚琪,曹璞璘,等. 风电场双回送出线路时域故障测距新方法[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1450-1460.
- [4] SHU H C, DENG Y Q, CAO P L, et al. Novel method of time-domain fault location for wind farm double-circuit transmission lines [J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1450-1460.
- [5] 贾科,杨哲,赵其娟,等. 适用于新能源场站送出线路的高频突变量距离保护[J]. 电网技术,

- 2019, 43(9): 3271-3280.
- JIA K, YANG Z, ZHAO Q J, et al. High-frequency fault component based distance protection for transmission lines connected to renewable energy power plants [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3271-3280.
- [4] 艾轩源, 刘辉, 谭畅. 基于 EEMD 和 TEO 的输电线路故障定位研究 [J]. *湖北工业大学学报*, 2020, 35(1): 43-46+51.
- AI X Y, LIU H, TAN C. Research on fault location of transmission line based on EEMD and TEO [J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2020, 35(1): 43-46+51.
- [5] 张科, 马长啸, 曹雁庆, 等. 基于参数估计的风电场混合输电线路故障定位方法 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(8): 323-329.
- ZHANG K, MA C X, CAO Y Q, et al. Fault location based on parameter estimation in hybrid transmission lines of wind farm [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(8): 323-329.
- [6] 李聪聪, 李玉敦, 杨超, 等. 基于序分量电压加权的两端故障定位算法研究 [J]. *山东电力技术*, 2021, 48(7): 53-57+69.
- LI C C, LI Y D, YANG C, et al. Research on two-terminal fault location algorithm based on weighted voltage sequence component [J]. *Shandong Electric Power*, 2021, 48(7): 53-57+69.
- [7] 任红向, 梁睿, 丁然, 等. 双端非同步数据精确线搜索比相的故障定位 [J]. *电网技术*, 2015, 39(10): 2972-2978.
- REN H X, LIANG R, DING R, et al. Fault location research adopted two-terminal asynchronous data and based on accurate line-searching and phase-comparing [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(10): 2972-2978.
- [8] 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 N, SUN X J, WANG P F, et al. Transmission line fault location method based on wavelet transform and TEO [J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(10): 142-144+149.
- [9] 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 Y G, CHEN C, YANG R J, 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.
- [10] 张安安, 周志通. 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 A A, ZHOU Z T. Study on fault location of transmission line based on HHT iteration [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(3): 165-172.
- [11] 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 J, SHI J W. Sinusoidal representation of a transient signal based on the Hilbert transform [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(1): 1-7.
- [12] 范新桥, 朱永利. 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 X Q, ZHU Y L, et al. Traveling wave based fault location for transmission lines based on EMD-TEO [J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(9): 8-12+17.
- [13] 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 Y H. Fault location of transmission line through traveling wave based on EEMD and Teager energy operator [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.
- [14] 陈仕龙, 陈俊濬, 蔡潇, 等. 基于 FEEMD 与 TEO 的贯通式 AT 同相牵引供电系统牵引网单端功率方向保护 [J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(8): 73-78+86.
- CHEN S L, CHEN J H, CAI X, et al. Single-ended power direction protection for traction network of through-type AT in-phase traction power supply system based on FEEMD and TEO [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(8): 73-78+86.
- [15] 郭钰荣, 姚金杰, 白建胜, 等. 基于 FEEMD 算法对小样本电磁信号的识别与分类 [J]. *国外电子测量技术*, 2023, 42(4): 166-172.
- GUO Y R, YAO J J, BAI J S, et al. Recognition and classification of small sample electromagnetic signals

- based on FEEMD algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(4): 166-172.
- [16] NATH S, CHETIA B, KALITA S. Ionospheric TEC prediction using hybrid method based on ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and long short-term memory (LSTM) deep learning model over India [J]. Advances in Space Research, 2023, 71(5): 2307-2317.
- [17] LIU Z L, LI M G, ZHU Z F, et al. Health state identification method of nuclear power main circulating pump based on EEMD and OQGA-SVM [J]. Electronics, 2023, 12(2): 410-416.
- [18] 曹文治, 苏雅. 基于 EEMD-LSTM-SVR 的水质预测模型 [J]. 系统工程, 2023, 41(4): 1-12.
CAO W Z, SU Y. Water quality prediction model based on EEMD-LSTM-SVR [J]. Systems Engineering, 2023, 41(4): 1-12.
- [19] 蒲娴怡, 毕贵红. 基于 FEEMD-PACF-BP_AdaBoost 模型的风电功率超短期预测 [J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(11): 91-97.
PU X Y, BI G H. Ultra-short-term forecast of wind power based on FEEMD-PACF-BP_AdaBoost model [J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(11): 91-97.
- [20] 何润奇. 基于重构分解混合优化模型的大豆期货价格预测 [D]. 武汉: 中南财经政法大学, 2020.
HE R Q. Soybean futures price forecast based on reconstructed decomposed hybrid optimization model [D]. Wuhan: Zhongnan University of Economics and Law, 2020.
- [21] 白浩, 钟振鑫, 李巍, 等. 基于 CEEMD 和 NTEO 的故障行波定位方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 50-59.
BAI H, ZHONG Z X, LI W, et al. A fault traveling wave location method based on CEEMD and NTEO [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 50-59.

收稿日期:2023-09-05

收到修改稿日期:2023-10-10

作者简介:

饶鸿江(1992-),男,硕士,助教,研究方向为电力系统新型继电保护与故障定位,新能源发电技术,20210100019@cxtc.edu.cn;

* 通信作者:何永泰(1970-),男,博士,教授,研究方向为电力系统新型继电保护与故障定位,光电微能源及光伏/光热技术,hyt@cxtc.edu.cn。

Fault Location of Wind Farm Transmission Line Based on FEEMD-NTEO

RAO Hongjiang, HE Yongtai^{*}, PENG Jie, PENG Wenquan

(Department of Physics and Electron Information Science, Chuxiong Normal University,
Chuxiong 675000, China)

Key words: wind farm; transmission line; fault location; fast ensemble empirical mode decomposition and novel Teager energy operator (FEEMD-NTEO)

The traditional traveling wave detection method has low accuracy and weak anti-noise ability, which makes it impossible to accurately calibrate the traveling wave head. The problems existing in the traveling wave fault location method have been unable to meet the requirements of fast fault removal in power system. The doubly-fed wind farm is directly or indirectly connected to the power grid by power electronic devices. Its short-circuit current has the characteristics of frequency offset, limited amplitude, and inconsistent positive and negative sequence impedance, which makes the ranging technology based on the power frequency phasor method greatly challenged. Therefore, it is crucial to accurately locate the fault location, speed up the fault recovery operation of the power system and improve the utilization rate of wind power.

In this paper, the ensemble empirical mode decomposition is applied to the traveling wave fault location of the doubly-fed wind farm transmission line. And a traveling wave fault location method based on fast ensemble empirical mode decomposition and improved novel Teager energy operator is proposed. This method uses FEEMD to decompose the fault current traveling wave signal into stationary intrinsic mode components and residual components, eliminates noise components, and preserves the integrity of the signal. Then, the NTEO algorithm is used to denoise the decomposed high-frequency signal again, enhance the fault traveling wave mutation characteristics, and accurately calibrate the traveling wave head.

In order to ensure high fault location accuracy, the time when the traveling wave head reaches both

ends of the line should be accurately calibrated. Therefore, it is necessary to use high-precision Beidou system to achieve accurate synchronization of sampling data in engineering. In order to verify the reliability and accuracy of the proposed method, the simulation model of the doubly-fed wind farm transmission system shown in Fig. 1 is used to verify the fault location.

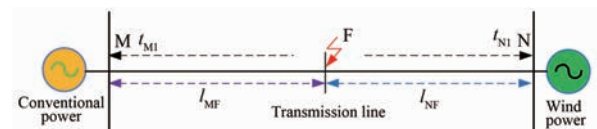


Fig. 1 Simulation model of wind farm outgoing system

The simulation analysis is carried out for different fault conditions such as different fault distance, fault phase angle and transition resistance. The simulation results show that both the proposed method and the EEMD-NTEO algorithm have high positioning accuracy. However, in the case of a large amount of noise in the fault signal, the FEEMD-NTEO algorithm can eliminate some noise and retain the mutation characteristics of the traveling wave, so the positioning accuracy can meet the actual engineering requirements. The proposed algorithm is less affected by fault distance, transition resistance, fault type and fault phase angle. The positioning results have the advantages of high reliability, high precision and good real-time performance, which can be applied to the fault location of wind farm transmission line. In the strong noise environment, compared with the FEEMD-TEO and EEMD-NTEO algorithms, the FEEMD-NTEO algorithm proposed in this paper is more reliable and practical in localization results.