

基于同步挤压小波变换的故障行波测距方法

付华¹, 刘公权¹, 邢亮²

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 国网葫芦岛供电公司, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 针对输电线路故障行波波头识别困难、易产生频谱混叠的问题, 提出一种基于同步挤压小波变换(SWT)的故障测距方法。利用 SWT 提取故障行波小波脊线, 生成一组内蕴模态类函数分量(IMTs)。然后对 IMTs 进行 Hilbert 变换提取故障点特征量, 进而标定首波头的到达时刻。最后根据双端测距原理计算出故障距离。与传统的希尔伯特_黄变换和小波变换相比, 该方法实现了故障行波波头较高精度的识别和对频谱混叠的有效抑制, 具有较高的测距精度, 对噪声的鲁棒性更强。PSCAD 仿真验证了该方法的有效性, 且测距结果受故障距离和过渡电阻的影响较小。

关键词: 同步挤压小波变换; 故障测距; 希尔伯特_黄变换; 小波变换; PSCAD

Fault traveling wave ranging method based on synchrosqueezing wavelet transform

FU Hua¹, LIU Gongquan¹, XING Liang²

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
2. State Grid Huludao Power Supply Company, Huludao 125000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the fault traveling wave head of transmission line is difficult to identify and easy to generate spectrum aliasing in fault location, a fault location method based on Synchrosqueezing Wavelet Transform (SWT) is proposed. The SWT is used to extract the wavelet ridges of fault traveling wave to generate a set of Intrinsic Mode Type functions (IMTs). Then, the Hilbert transform is performed on the IMTs to extract the feature points of the fault point to achieve the purpose of calibrating the arrival time of the first wave head, and finally calculate the fault distance according to the double-ended ranging principle. Based on the accurate modal decomposition capability of SWT, the recognition of the high accuracy of the faulty traveling wave head and the effective suppression of spectral aliasing are realized. Compared with the traditional Hilbert Huang transform and wavelet transform, this method achieves high accuracy recognition of faulty traveling wave head and effective suppression of spectral aliasing. It has high ranging accuracy and is more robust to noise. The PSCAD simulation verifies the effectiveness of the proposed method, and the ranging result is less affected by the fault distance and transition resistance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71771111) and Guiding Program of Liaoning Natural Science Foundation (No. 201805500438).

Key words: synchrosqueezing wavelet transform; fault location; HHT; wavelet transform; PSCAD

0 引言

输电线路是电力系统中故障概率最高的元件, 由于线路较长、工作环境恶劣^[1]、人工巡线异常困难, 影响故障排除和恢复时间。因此研究快速、准确的输电线路故障测距技术具有重要的现实意义^[2-3]。

行波法由于稳定可靠、精度高成为研究热点, 分

为单端法和双端法^[4-5]。单端法原理简单、成本低, 需要利用反射波携带的信息, 但反射波中存在频率衰减和波形畸变, 严重影响测距精度。双端法只需捕捉首波头^[6], 波频率和波幅损耗较小, 不受反射波标定困难和信息丢失的影响, 可以有效地提高故障测距的精度。

目前行波检测方法主要有小波变换和希尔伯特_黄变换^[7](Hilbert-Huang Transform, HHT)。文献[8]分析了小波变换对于故障行波突发性检测的独到之处, 但需要人为选择小波基的种类和分解层数, 不

具有自适应性。文献[9]利用 HHT 分析故障行波, 虽然具有自适应性, 但是经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)三次样条插值的过程中存在模态混叠现象。文献[10-11]利用聚类经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)优化 EMD 的同时也带入了虚假分量, 容易造成故障距离的错误判断。因此, 亟待寻找一种可以提高时频分辨率和噪声鲁棒性的分析方法, 近年 Daubechies^[12] 等人提出的同步挤压小波变换(Synchrosqueezing Wavelet Transform, SWT)通过在频率方向压缩小波变换后的时频图, 使各时频曲线间不存在交叉项, 可以较好地解决频率混叠问题。同时在挤压的过程中根据设定阈值滤掉一些幅值较小的小波系数^[13], 对噪声具有很强的鲁棒性。SWT 已被应用于气候分析^[14]、机械故障诊断^[15-16]、信号消噪^[17]、土木工程结构^[18]、谐波和间谐波检测^[19-20]、地震信号提取和面波去除^[21], 并取得了良好的效果^[22]。

将 SWT 算法引入到输电线路故障测距中, 通过对噪声环境下的故障行波进行 SWT 分解, 获得一组内蕴模态类函数分量(Intrinsic Mode Type Functions, IMTs), 然后利用 Hilbert 变换对分离出来的模态进行参数提取和分析, 得到故障行波到达时间, 再根据双端测距公式实现故障测距。PSCAD 仿真验证, 当故障信号中混有一定程度的噪声时, 该方法仍然可以有效检测出故障行波波头的到达时刻并具有较高的测距精度。

1 同步挤压小波变换

SWT 是一种特殊的时频重分配算法, 通过对小波系数挤压锐化来提高时频曲线的提取精度, 从而准确提取出模态分量。一般情况下, 实际的时变信号可以表示成多个分量求和的形式。

$$f(t) = \sum_{k=1}^n f_k(t) = \sum_{k=1}^n A_k(t) \cos(2\pi w_k t + \phi_k) \quad (1)$$

式中: $A_k(t)$ 、 w_k 、 ϕ_k 为第 k 个分量的瞬时幅值、瞬时频率和相位; n 为可分解分量的个数。

对 $f(t)$ 进行连续小波变换, 得到时域小波系数为

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) a^{-\frac{1}{2}} \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

式中: a 为尺度参数; b 为平移参数; $\overline{\psi}$ 为母小波 ψ 的共轭函数, 由 Plancherel 定理将小波系数等价变换到频域为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{2\pi} \int \hat{f}(w) a^{\frac{1}{2}} \overline{\hat{\psi}(aw)} e^{ibw} dw \quad (3)$$

式中, $\hat{f}(w)$ 、 $\hat{\psi}(w)$ 分别表示 $f(t)$ 、 $\psi(t)$ 的傅里叶变换。对于单一谐波函数 $f(t) = A \cos(w_m t)$, 傅里叶变换 $\hat{f}(w)$ 为

$$\hat{f}(w) = \pi A [\delta(w - w_m) + \delta(w + w_m)] \quad (4)$$

将 $\hat{f}(w)$ 代入式(3)化简整理得

$$W_f(a, b) = \frac{A\sqrt{a}}{4\pi} \int [\delta(w - w_m) + \delta(w + w_m)] \overline{\hat{\psi}(aw)} e^{ibw} dw = \frac{A\sqrt{a}}{4\pi} \overline{\hat{\psi}(aw_m)} e^{ibw_m} \quad (5)$$

若 $\hat{\psi}(w_m)$ 在负频率域趋向于 0, 且在 $w = w_0$ 的一定范围内沿尺度分布, 则小波系数将集中分布在 $a = \frac{w_0}{w_m}$ 附近。瞬时频率可通过对小波系数 $W_f(a, b)$ 求偏导得到, 即

$$\omega_f(a, b) = \begin{cases} \frac{-i\partial W_f(a, b)}{W_f(a, b)\partial_b}, & |W_f(a, b)| > 0 \\ \infty, & W_f(a, b) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6), 小波变换系数由尺度平面 $[a, b]$ 转化到频率平面 $[\omega_f(a, b), b]$, 并根据能量大小重新排列。在中心频率 w_l 附近 $\left[w_l - \frac{\Delta w}{2}, w_l + \frac{\Delta w}{2}\right]$ 区间内求小波系数同步挤压变换量值。

$$T_f(\omega_l, b) = \Delta w^{-1} \sum_{a_i: |W_f(a, b) - w_l| \leq \frac{\Delta w}{2}} W_f(a, b) a_i^{-\frac{3}{2}} (\Delta a)_i \quad (7)$$

式中, $\Delta w = w_l - w_{l-1}$, $(\Delta a)_i = a_i - a_{i-1}$, a_i 为离散尺度。同步挤压变换过程中不存在交叉项, 故可利用小波系数或同步挤压变换量值对 $f(t)$ 进行近似完全无损重构。

$$\begin{aligned} f(t) &= \text{Re}\left[\frac{1}{C_\varphi} \left(\int_0^{+\infty} W_f(a, b) a^{-\frac{3}{2}} da\right)\right] \approx \\ &\text{Re}\left[\frac{1}{C_\varphi} \sum_i W_f(a, b) a_i^{-\frac{3}{2}} (\Delta a)_i\right] \approx \\ &\text{Re}\left[\frac{1}{C_\varphi} \sum_i T_f(w_l, b) (\Delta w)\right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\frac{1}{C_\varphi} = \int_0^{+\infty} \overline{\hat{\psi}(w)} \frac{dw}{w}$; i 为尺度个数。

2 基于同步挤压小波变换的故障行波测距

2.1 利用 SWT 和 Hilbert 的模式和参数提取

(1) 对故障行波信号进行连续小波变换: 选取 morlet 小波作为母小波 $\psi(t)$, 由式(2)、式(6)计算 $f(t)$ 的小波变换系数 $W_f(a, b)$ 及瞬时频率 $w_f(a, b)$ 。

(2) 划分频率区间, 挤压中心频率附近小波系数。设 $f(t)$ 的长度 $n = 2^{L+1}$, 采样间隔为 Δt , 取 $n_v = 32$, 令 $n_a = Ln_v$, $\Delta w = \frac{1}{n_a - 1} \log_2(\frac{n}{2})$, $w_0 = \frac{1}{n\Delta t}$ 。按照规定 $w_l = 2^{l\Delta w} w_0$, $l = 0, 1, \dots, n_a - 1$, 由 Nyquist 采样定理, 将故障行波划分为不同的频率区间 $\left[w_l - \frac{\Delta w}{2}, w_l + \frac{\Delta w}{2} \right]$ 。

(3) 计算中心频率附近同步挤压小波变换量值 $\tilde{T}_f(w_l, b)$, 提取故障行波的各个模式分量, 利用式(10)重构第 k 个分量, 其中 $t_m = m\Delta t$, $L_k(t_m)$ 为 f_k 曲线在 w_l 附近的下标集合。

$$\tilde{T}_f(w_l, b) = \sum_{0 \leq j \leq n_a - 1} W_f(a_j, t_m) \frac{\log 2}{n_v} a_j^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$f_k(t_m) \approx \frac{2}{R_\psi} \operatorname{Re} \left[\sum_{l \in L_k(t_m)} \tilde{T}_f(w_l, t_m) \right] \quad (10)$$

(4) 对 $f_k(t)$ 进行 Hilbert 变换, 引入解析信号 $Z(t) = A_k(t)e^{j\theta(t)} = f_k(t) + jy(t)$, 则有

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f_k(\tau)}{t - \tau} d\tau = \operatorname{Im}[A_k(t)e^{j\theta(t)}] \quad (11)$$

反变换可由式(11)中 $y(t)$ 和 $f_k(t)$ 位置对调得到

$$f_k(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{y(\tau)}{t - \tau} d\tau = \operatorname{Re}[A_k(t)e^{j\theta(t)}] \quad (12)$$

故重构分量 $f_k(t)$ 的瞬时幅值和瞬时频率为

$$A_k(t) = \sqrt{f_k^2(t) + y^2(t)} \quad (13)$$

$$w_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\arctan \frac{y(t)}{f_k(t)})}{dt} \quad (14)$$

2.2 同步挤压小波变换故障行波测距步骤

利用同步挤压小波变换进行故障行波测距分析, 主要分为以下三步。

(1) 相模转换。对故障点产生的暂态行波进行凯伦贝尔变换解耦, 消除相间电容和电感耦合的影响,

保证原始故障信号的准确性。

(2) 同步挤压小波分析。对原始信号小波变换得到的小波脊线进行同步挤压细化, 去噪后重构模式提取 IMTs 分量, 选择包含故障信息较多的模式分量用于下一步分析处理。

(3) 确定故障距离。对所选分量进行 Hilbert 变换标定出时频曲线突变点位置, 即故障行波到达两端的时刻, 代入双端测距公式计算出故障距离。

3 算例和仿真分析

3.1 算例分析

为验证 SWT 算法的模式提取能力和特征信息标定准确性, 参考文献[21]选取时变信号, 表达式为

$$\begin{cases} \sin(100\pi t) & 0 < t \leq 0.12, 0.5 < t \leq 1 \\ \sin(100\pi t) + 0.8\sin(150\pi t) & 0.12 < t \leq 0.2 \\ \sin(100\pi t) + 0.5\sin(220\pi t) & 0.2 < t \leq 0.4 \\ \sin(100\pi t) + 0.7\sin(220\pi t) & 0.4 < t \leq 0.5 \end{cases}$$

采样频率为 4 096 Hz, 采样点数为 4 096。频率为 50 Hz 的分量在 1 s 内频率和幅值均未发生变化。频率为 75 Hz 的分量产生和截止时间分别对应 491.52 点、819.2 点。频率为 110 Hz 的分量幅值变化对应 819.2 点、1 638.4 点和 2 048 点, 频率突变对应 819.2 点、2 048 点。混入 30 dB 噪声后, SWT 分解如图 1, EMD 分解共 8 项, 取前 6 项如图 2 所示, 图 3 为采用 db4 小波 5 层分解所得。

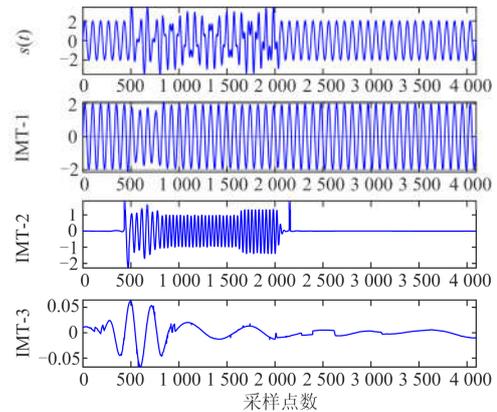


图 1 含噪时变信号的 SWT 分解

Fig. 1 SWT decomposition of noisy time-varying signal

由图 2 可知, EMD 分解中不同频率的分量混杂在一起, 不能准确判断某个分量突变的发生和终止时刻。这是因为噪声影响筛分过程中极值点的选取, 包络线拟合度降低, 导致 EMD 分解产生模式混叠。图 3 中频率为 110 Hz 的分量处于 d3、d4 两个模式, d5 中同时含有频率为 50 Hz、75 Hz 两种分量, 这主要是小波变换不能对信号频带进行严格分割导

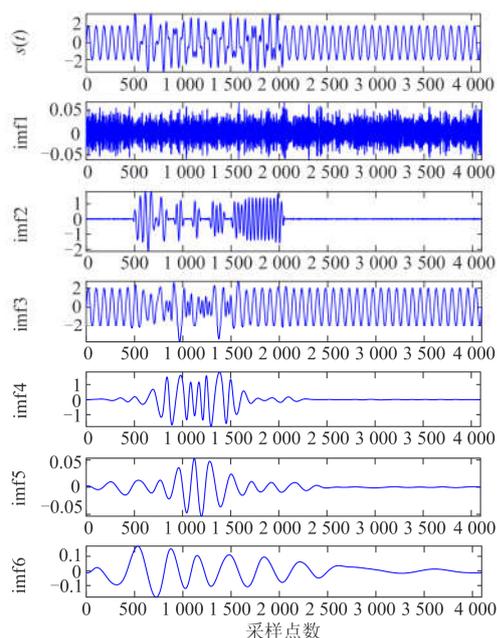


图 2 含噪时变信号的 EMD 分解

Fig. 2 EMD decomposition of noisy time-varying signal

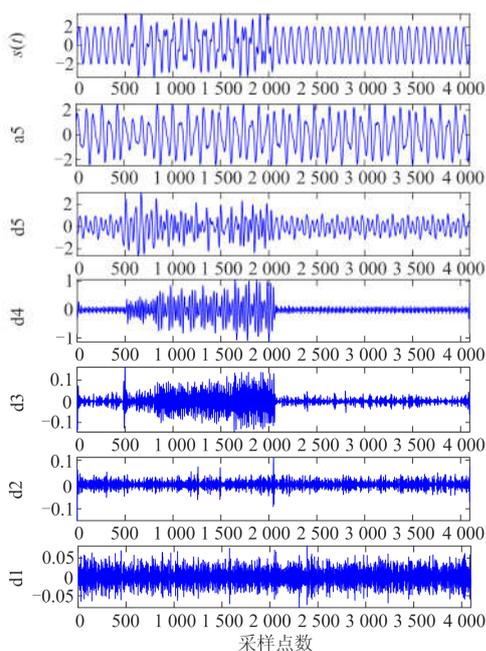


图 3 含噪时变信号的小波分解

Fig. 3 Wavelet decomposition of time-varying signal

致频带混叠, 从而无法准确提取模态。由图 1 可以看出, SWT 既能够准确提取出模态分量, 又可以标定频率和幅值突变时刻, 表现出良好的噪声鲁棒性。这是由于在 SWT 分解过程中, 过滤掉一部分幅值小于设定阈值的小波系数, 实现对信号的去噪。由于 IMT2 蕴含较多故障特征信息, 故对 IMT2 进行 Hilbert 变换得到瞬时频率和瞬时幅值如图 4。

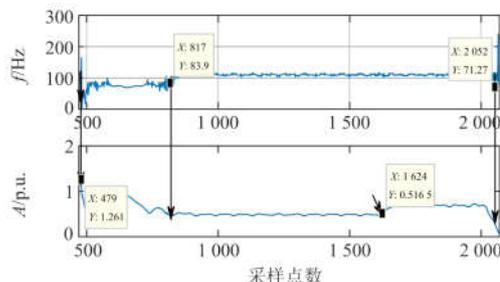


图 4 IMT2 分量的瞬时频率和瞬时幅值

Fig. 4 Instantaneous frequency and amplitude of IMT2

可以看出 Hilbert 变换对 IMT2 分量的瞬时幅值、频率的解析较为准确, 在突变产生和恢复时刻的标定上精度较高, 这得益于 SWT 准确的模态提取能力。

3.2 仿真实验

在 PSCAD 中搭建一个额定电压为 500 kV, 全长 500 km 的输电系统仿真模型, 采样频率为 1 MHz, 运行时长 0.7 s, 在 0.4 s 时发生故障, 设定距离整流侧 200 km 处发生单相接地故障, 取故障前后 10 ms(97~107 ms)的数据进行分析。在检测故障行波后, 加入 20 dB 噪声淹没原信号, 利用凯伦贝尔变换消除信号相间耦合的影响, 解耦后分别采用 SWT、EMD 和 db4 小波变换提取模态分量, 其中 EMD 分解共 10 项, 取前 7 项。限于篇幅, 本文只列出整流侧故障行波分解结果。

图 5 中 EMD 分解得到的 imf1—imf6 分量故障信息完全淹没在高频噪声中, 呈现出较大程度的模态混叠, 故障信号特征难以提取。理论上分解层数越多, 越容易辨认出故障点, 但是分解层数过多, 分量中容易出现虚假分量, 给故障检测带来困难。由图 6 可以看出, 低频系数 a6 与原始不含噪故障信号基本相同, 可见小波变换实现了去噪, 但同时舍弃了大量高频故障信息, 使得故障时刻标定不准确。实验过程中发现采用不同的小波基, 分解不同的层数, 分解结果也存在差异, 这也混淆了对故障位置的准确判定。图 7 中 SWT 分解得到的模态分量曲线十分清晰, 基本不含高频噪声, 表现出良好的抗噪性。其分解效果好于 EMD 和小波变换是因为 SWT 将小波变换后的时频图在频率方向挤压锐化, 各频率域间不存在交叉项, 从而有效地抑制了频谱混叠。对 IMT2 分量进行 Hilbert 变换, 提取故障行波的瞬时频率和瞬时幅值如图 8。

同整流侧故障行波处理过程, 将逆变侧故障行波进行 SWT 分解, 并对分解得到的模态分量进行 Hilbert 得到故障行波到达整流侧的时间为 0.101 572 s, 到达逆变侧的时间为 0.102 01 s。利用

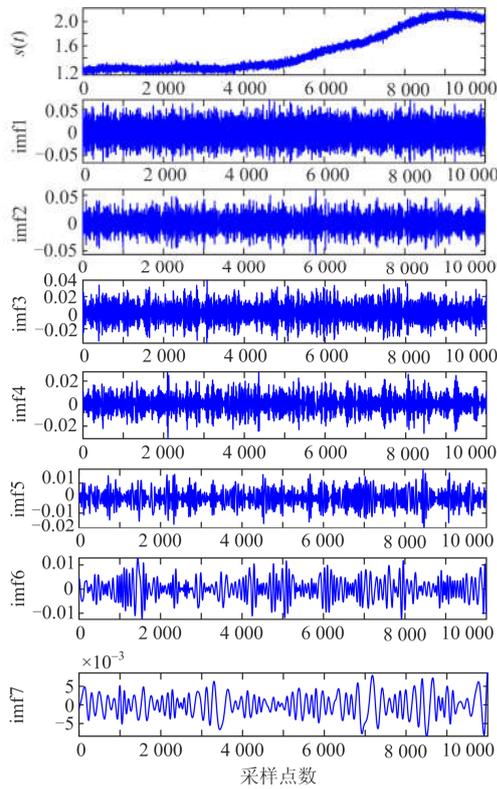


图 5 故障行波 EMD 分解

Fig. 5 EMD decomposition of fault traveling wave

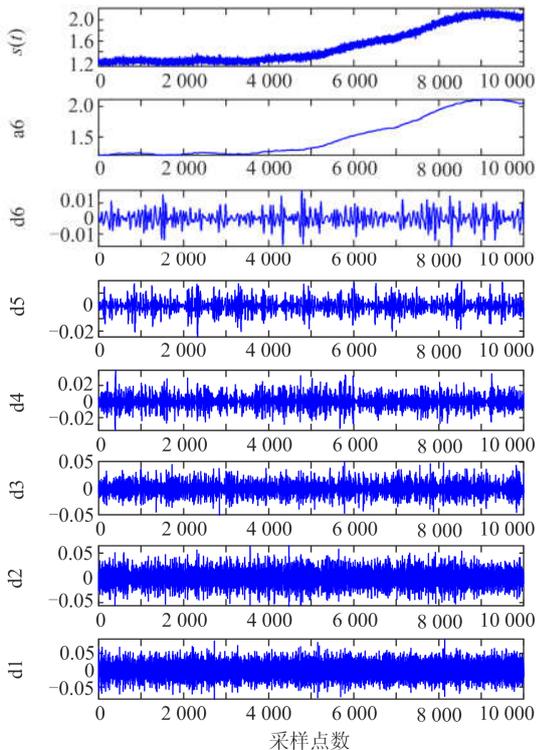


图 6 故障行波小波分解

Fig. 6 Wavelet decomposition of fault traveling wave

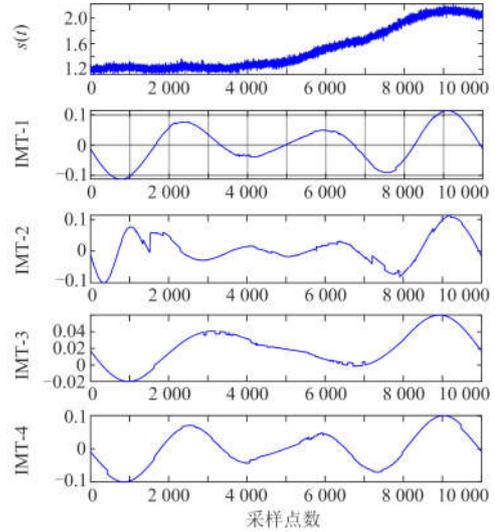


图 7 故障行波 SWT 分解

Fig. 7 SWT decomposition of fault traveling wave

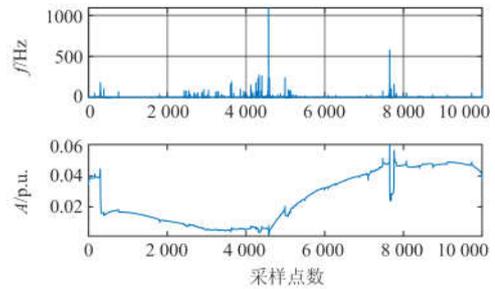


图 8 整流侧 IMT2 分量瞬时频率和瞬时幅值

Fig. 8 Instantaneous frequency and amplitude of the IMT2 component on the rectification side

线路参数计算波速度为 2.35×10^5 km/s，由双端测距公式计算故障点与整流侧的距离为

$$L_{MF} = \frac{[L + v(t_M - t_N)]}{2} = \frac{500 + 2.35 \times 10^5 \times (0.101572 - 0.10201)}{2} = 198.535 \text{ km}$$

从测距结果看，该算法的误差为 1.47 km，测距精度达到 0.29%，满足实际工作精度要求。

3.3 结果分析

为验证 SWT 算法的有效性，在同等条件下采用 SWT、EMD 和小波变换分别对含噪信号进行处理，对比分析测距结果，并从故障距离和过渡电阻两个方面讨论本算法的适应性。

3.3.1 不同故障距离

将故障距离依次设为距离整流侧 25 km、50 km、100 km、180 km、270 km、420 km，其他线路参数不变，分别采用 SWT、EMD 和小波变换处理故障信号，测距结果如图 9。

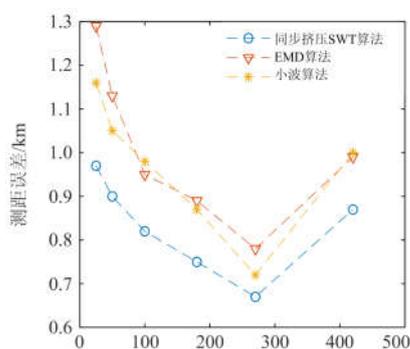


图 9 不同故障距离下算法测距误差比较

Fig. 9 Comparison of algorithm ranging error under different fault distances

由图 9 可以看出, 故障距离靠近中点时, 测距精度较高, 靠近两端误差随之增大, 这与两端测距规律相符。虽然定位精度随着故障点位置发生变化, 但一直优于 EMD 和小波变换, 误差距离控制在 1 km 以内, 测距精度受故障距离影响较小。

3.3.2 不同过渡电阻

为验证该算法的耐过渡电阻能力, 设距离整流侧 250 km 处发生单相接地故障, 设置不同等级过渡电阻, 表 1 为三种方法的测距结果。

表 1 不同过渡电阻下算法测距误差比较

Table 1 Comparison of algorithm ranging error under different transition resistances

过渡电阻/ Ω	SWT 算法		EMD 算法		小波变换	
	计算距离	绝对误差	计算距离	绝对误差	计算距离	绝对误差
0.5	250.354	0.14%	249.428	0.23%	250.625	0.25%
1	249.625	0.15%	250.65	0.26%	250.679	0.27%
10	250.427	0.17%	249.247	0.30%	249.273	0.29%
50	250.451	0.18%	249.153	0.34%	250.904	0.36%
100	250.572	0.23%	250.912	0.36%	248.869	0.44%
300	249.028	0.39%	248.825	0.47%	251.311	0.52%

表 1 数据表明, 过渡电阻在 0.5~100 Ω 时, SWT 算法测距精度变化较小, 这与行波法不易受过渡电阻影响的结果相符。当电阻达到 300 Ω 时, 测距误差变大, 但仍然可以保证实际需要。对比其他两种测距方案, 该算法测距的误差小、精度高, 一定程度上减小了人工巡线工作量。

4 结论

SWT 方法应用于 HVDC 系统实现输电线路故障行波测距, 经过算例和仿真表明。

(1) SWT 算法通过同步挤压变换可以有效地改善频谱混叠, 具有更强的噪声鲁棒性, 比传统的 HHT 和小波变换具有更好的模式提取能力。

(2) SWT 算法结合 Hilbert 变换可以在噪声环境下较为准确地标定故障行波的到达时刻, 提高故障测距的精度, 且受故障距离和过渡电阻的影响较小, 满足实际测距需要。

(3) 后续可以在信号的重构方面深入研究, 进一步提高幅值、频率检测的精度, 为实际的工程应用提供有力的理论支持。

参考文献

- [1] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 257-264.
CHEN Shilong, XIE Jiawei, BI Guihong, et al. A novel two terminal fault location method used ANN for UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 257-264.
- [2] 张广斌, 束洪春, 于继来, 等. 不依赖双侧时钟同步的输电线路双端行波测距[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 199-209.
ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Double-ended travelling wave fault location independent of two side time synchronization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 199-209.
- [3] 费春国, 李春信. 基于电压振幅和支持向量回归机的高压电力输电线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 27-32.
FEI Chunguo, LI Chunxin. Fault location in high voltage power transmission based on voltage amplitude and support vector regression[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 27-32.
- [4] ROOSTAEE S, THOMAS M S, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 169-177. DOI: 10.1186/s41601-017-0048-y.
- [5] 焦在滨, 吴润东, 王钊, 等. 利用数据融合技术提升输电线路故障定位精度的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2571-2578.
JIAO Zaibin, WU Rundong, WANG Zhao, et al. A novel method to improve the fault location accuracy in transmission line based on data fusion technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2571-2578.
- [6] 束洪春, 田鑫萃, 白冰, 等. 基于多测点的特高压长距离直流输电线路行波故障测距[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2105-2113.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, BAI Bing, et al. Fault location for traveling wave based on multi measuring points for UHVDC long distance transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2105-2113.
- [7] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 基于 VMD 和 TEO 的高

- 压输电线路雷击故障测距研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 24-33.
- GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. Study on lightning fault locating of high-voltage transmission lines based on VMD and TEO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 24-33.
- [8] 李自乾, 樊艳芳, 胡剑生. 不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 142-148.
- LI Ziqian, FAN Yanfang, HU Jiansheng. Single terminal fault location method of UHVDC transmission line immune to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 142-148.
- [9] 隋涛, 史小雪, 刘欣, 等. 基于希尔伯特-黄变换的高压直流输电故障测距算法的仿真研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 279-285.
- SUI Tao, SHI Xiaoxue, LIU Xin, et al. Simulation investigation of fault location algorithm for high voltage direct current transmission based on Hilbert-Huang transform[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(4): 279-285.
- [10] 段建东, 刘静, 赵召. 基于行波瞬时频率的高压直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1842-1848.
- DUAN Jiandong, LIU Jing, ZHAO Zhao. Fault location method for HVDC transmission lines based on traveling wave instantaneous frequency[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 36(7): 1842-1848.
- [11] SOUALHI A, MEDJAHHER K, ZERHOUNI N. Bearing health monitoring based on Hilbert-Huang transform support vector machine and regression[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(1): 52-62.
- [12] DAUBECHIES I, LU J, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: an empirical mode decomposition-like tool[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30: 243-261.
- [13] 喻敏, 王斌, 陈绪轩, 等. 同步挤压小波变换在电力系统低频振荡模态参数提取中的应用[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 14-20.
- YU Min, WANG Bin, CHEN Xuxuan, et al. Application of synchrosqueezed wavelet transform for extraction of the oscillatory parameters of low frequency oscillation in power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 14-20.
- [14] THAKUR G, BREVDO E, FUCKAR N S, et al. Synchrosqueezing algorithm for time-varying spectral analysis: robustness properties and new paleoclimate applications[J]. Signal Process, 2013, 93(5): 1079-1094.
- [15] FENG Z P, CHEN X W, LIANG M. Iterative generalized synchrosqueezing transform for fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox under nonstationary conditions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 52-53: 360-375.
- [16] LI C, LIANG M. Time-frequency signal analysis for gearbox fault diagnosis using a generalized synchrosqueezing transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 26(4): 205-217.
- [17] MEIGNEN S, OBERLIN T, MCLAUGHLIN S. A new algorithm for multicomponent signals analysis based on synchrosqueezing: with an application to signal sampling and denoising[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(11): 5787-5798.
- [18] 刘景良, 任伟新, 王佐才, 等. 基于同步挤压小波变换的结构瞬时频率识别[J]. 振动与冲击, 2013, 32(18): 37-42.
- LIU Jingliang, REN Weixin, WANG Zuocai, et al. Instantaneous frequency identification based on synchrosqueezing wavelet transformation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(18): 37-42.
- [19] 喻敏, 王斌, 王文波, 等. 基于 SST 的间谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2944-2951.
- YU Min, WANG Bin, WANG Wenbo, et al. An interharmonic detection method based on synchro-squeezing wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2944-2951.
- [20] 汪祥莉, 王斌, 王文波, 等. 混沌干扰中基于同步挤压小波变换的谐波信号提取方法[J]. 物理学报, 2015, 64(10): 11-20.
- WANG Xiangli, WANG Bin, WANG Wenbo, et al. Harmonic signal extraction from chaotic interference based on synchrosqueezed wavelet transform[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(10): 11-20.
- [21] ROBERTO H, HAN J J, VANDERBAAN M. Applications of the synchrosqueezing transform in seismic time-frequency analysis[J]. Geophysics, 2014, 79(3): 55-64.
- [22] XU Yan, LIU Jingyan, FU Yuan. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.

收稿日期: 2019-03-25; 修回日期: 2019-06-03

作者简介:

付 华(1962—), 女, 博士(后), 教授, 研究方向为电力系统故障诊断、煤矿瓦斯检测、智能检测和数据融合技术; E-mail: fxfuhua@163.com

刘公权(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定控制, 输电线路故障诊断与辨识; E-mail: 2265977787@qq.com

邢 亮(1991—), 男, 学士, 研究方向为电力系统运行相关工作。

(编辑 许 威)