

DOI: 10.7667/PSPC171211

基于 VMD-Hilbert 变换的故障行波定位研究

谢李为¹, 曾祥君¹, 柳祎璇²

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学经济与管理学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对现有行波检测方法中小波变换和希尔伯特黄变换的不足, 提出一种基于 VMD-Hilbert 变换的故障行波检测方法。通过对行波传感器采集到的故障行波信号进行 VMD 分解, 利用 Hilbert 变换提取模态分量的特征量来标定初始波头的到达时间。针对行波定位精度受波速不确定性影响的问题, 基于故障初始行波零模分量和线模分量波头的到达时刻, 提出一种与波速无关的双端定位算法。ATP/EMTP 仿真结果表明, VMD-Hilbert 行波检测方法能有效标定行波波头时间, 定位算法无需知道故障发生时刻和故障反射行波波头的到达时刻, 进一步提高了故障定位的精度。

关键词: 行波检测; 变分模态分解; 行波波速; 模分量; 故障定位

Research on fault traveling wave location based on VMD-Hilbert transform

XIE Liwei¹, ZENG Xiangjun¹, LIU Yixuan²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Economics & Management, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To solve the shortcomings of wavelet transform and Hilbert Huang Transform (HHT) in fault traveling wave detection methods, a novel fault traveling wave detection based on Variational Mode Decomposition and Hilbert (VMD-Hilbert) transform is proposed. The fault signal collected by travelling sensor is decomposed by VMD and the initial traveling wave arriving time is determined by eigenvalues of modal component extracted by Hilbert transform. To eliminate the uncertainty of fault traveling wave velocity affects the location accuracy, a novel fault location method is proposed based on arriving time of fault initial traveling wave zero mode component and line mode component, which is not affected by traveling wave velocity. Results of ATP/EMTP simulation show that the detection method proposed can effectively determine the traveling wave time and the fault location method dispenses with the time of fault occurrence and arriving time of fault reflecting wave, which improves the location accuracy further.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51425701 and No. 61233008), National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900605 and No. 2017YFB0902903), and Hunan Provincial Key Research and Development Program (No. 2016GK2013).

Key words: traveling wave detection; variational mode decomposition; traveling wave velocity; model components; fault location

0 引言

随着电力系统规模的不断扩大, 输电线路的负荷量逐年增加, 电力客户对电网安全运行的要求越来越高^[1]。如何快速查找输电线路故障点位置, 实现故障的快速切除已经成为电力系统运行稳定性的

重要保障^[2]。

行波定位法作为故障定位最有效的方法之一被普遍使用。根据行波定位原理的不同, 行波定位法分为单端行波法和双端行波法^[3-6]。单端行波法利用故障初始行波到达线路一端的时间和故障点反射行波到该端的到达时间, 结合故障行波的传输速度计算故障点位置。双端行波法利用故障初始行波到达线路两端的时间, 结合故障行波的传输速度计算故障点位置。由行波定位法的原理可知, 行波定位结果的精度受故障行波波头的达到时刻和行波的传输

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51425701, 61233008); 国家重点研发计划 (2016YFB0900605, 2017YFB0902903); 湖南省重点研发计划 (2016GK2013)

速度影响。

针对故障行波波头的检测难题,文献[7]用小波分析在一定的噪声情况下对非奇异信号的检测具有良好的效果,但不同的分解尺度和小波基函数会导致不同的结果。文献[8]利用希尔伯特黄变换(Hilbert Huang Transform, HHT)检测故障行波信号,但其中的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)算法存在模态混叠现象和端点效应,造成测距误差较大。文献[9-10]采用 EEMD 和 ELMD 方法对模态混叠现象进行抑制,但仍无法消除模态混叠和端点效应的影响。

针对行波传输速度的不确定性,文献[11-12]利用故障行波反射波的传输路程,消除行波传播速度对定位结果的影响,使故障定位精度在一定程度上得到提高。文献[13]提出的定位算法没有考虑绝对时间,需要知道故障时刻才能进行定位,实际运用比较困难。

为此,本文提出一种基于变模态分解算法(Variational Mode decomposition, VMD)和 Hilbert 变换相结合的故障行波波头检测方法。VMD 算法是一种完全非递归的模态变分方法,具有较好的模态分解能力和噪声鲁棒性,能够解决 EMD 方法中存在的模态混叠现象和端点效应^[14]。利用 Hilbert 变换提取模态分量信号的瞬时频率,根据第一个瞬时频率的奇异点位置确定故障行波的到达时刻。基于双端定位方法的原理,利用故障行波零线模分量和线模分量的到达时刻,消除波速对故障定位结果的影响。通过 ATP/EMPT 仿真,验证了所提检测方法能更好地检测故障行波波头的到达时间,新的双端定位算法简单可行,定位误差小,能够进一步提高定位精度。

1 基于 VMD 与 Hilbert 变换的行波检测方法

1.1 VMD 原理与算法^[15-17]

变模态分解(VMD)是一种完全非递归的模态变分方法,目标是将实值输入信号 f 分解为多个具有特定稀疏属性的离散模态信号 u_k ,利用多个维纳滤波组实现滤波。其中各模态信号带宽的计算公式如式(1)所示。

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \quad \sum_k u_k = f \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\{u_k\}$ 和 $\{\omega_k\}$ 分别为 k 个模态分量和各模态分量的中心频率。

为解决式(1)的约束问题,采用二次惩罚项 α 和拉格朗日乘数 λ 相结合的办法,得到如式(2)的增广表达式。

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) := \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \quad (2)$$

其中式(1)的最小化问题可以转化成增广表达式(2)中的鞍点问题,通过交替方向算法(ADMM)的迭代次优化序列,得到其模态分量和中心频率的表达式分别为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (3)$$

$$\omega_k^{n+1}(\omega) = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (4)$$

式中: $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 为模态分量的维纳滤波,通过傅里叶逆变换可得实部 $u_k(t)$; $\omega_k^{n+1}(\omega)$ 为对应模态函数的中心频率。

VMD 算法实现流程如下:

(1) 设定初始值,将 $\{\hat{u}_k^1\}$ 、 $\{\hat{\omega}_k^1\}$ 、 $\hat{\lambda}^1$ 和 n 的初始值设为 0, K 设置为需要分解的正整数, $n=n+1$ 。

(2) 利用式(1)和式(2)分别更新 u_k 和 ω_k , 循环直至 K 次结束。

(3) 利用 $\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left[\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right]$

更新 $\hat{\lambda}$, 其中 τ 为更新参数,当分解结果对保真度要求低时,可以设为 0。

(4) 重复步骤(2)和步骤(3),当 $\sum_k \|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2 /$

$\|\hat{u}_k^n\|_2^2 < \varepsilon$ 时,停止迭代,输出结果。

1.2 故障行波信号的采集和检测

输电线路发生故障时,故障点将产生故障行波信号沿线路向两端传播,在阻抗不连续点处发生折射和反射。由于三相线路间存在耦合现象,线路故障电磁暂态过程中各行波相量相互干扰,通常采用凯伦布尔变换矩阵对互相耦合的系统进行相模变换,分解成 0、1 和 2 三个相互独立的模分量,其中 1、2 为线模分量,0 为零模分量。

本文课题组提出从 CVT 接电线采用行波传感器提取行波信号^[18]。在河南濮阳某 110 kV 线路两端变电站的 CVT 接地线安装行波传感器,传感器是一

个罗柯夫斯基线圈, 采用开口式的两个半月形, 通过 CVT 接地线采集行波信号。

利用行波传感器采集输电线路的行波信号, 通过凯伦布尔变换对故障行波信号进行解耦变换, 将解耦得到的分量信号进行 VMD 分解, 利用 Hilbert 变换提取模态分量的瞬时频率, 标定第一个瞬时频率的奇异点位置。

2 与波速无关的双端定位算法

双端行波故障定位法通过利用故障行波波头到达检测两端的时间和故障行波在线路上的传播速度进行故障定位。故障行波的传输速度计算公式为 $V = 1/\sqrt{LC}$, 其中 L 和 C 分别是线路单位长度的电感值和电容值。因此不同线路上的故障行波传输速度不一致, 并且由于运行环境的影响和线路参数的变动, 波速在同一线路的不同时刻和不同位置也并不相同。

为解决故障行波定位精度受波速不确定性的影响, 结合双端行波法的定位原理, 利用线路故障行波的模分量和传输路径进行双端定位算法的分析。由图 1 可知, 当线路 F 点发生故障后, 故障行波由故障点向线路两端传输。

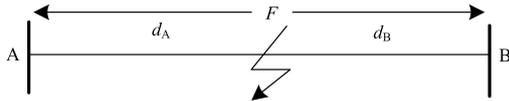


图 1 故障行波传输图

Fig. 1 Transmission diagram of fault traveling wave

根据双端定位公式可得故障点距线路 A 端和 B 端的距离。

$$\begin{cases} d_A = \frac{l_{AB} + v(t_A - t_B)}{2} \\ d_B = \frac{l_{AB} + v(t_B - t_A)}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: l_{AB} 为线路 AB 的距离; v 为故障行波波速; t_A 、 t_B 分别为故障行波波头到达 A、B 两端的时刻。

线路发生故障时, 通过凯伦布尔变换可以将行波信号解耦成零模分量和线模分量, 其中线模分量波速设为 v_1 , 零模分量波速为 v_0 。可得故障点到 A 端的距离为

$$\begin{cases} d_A = \frac{l_{AB} + v_1(t_{A1} - t_{B1})}{2} \\ d_A = \frac{l_{AB} + v_0(t_{A0} - t_{B0})}{2} \end{cases} \quad (6)$$

根据故障行波零模分量和线模分量在线路上的

传输过程, 可得

$$\begin{cases} l_{AB} = v_1(t_{A1} - t_0 + t_{B1} - t_0) \\ l_{AB} = v_0(t_{A0} - t_0 + t_{B0} - t_0) \\ v_0(t_{A0} - t_0) = v_1(t_{A1} - t_0) \end{cases} \quad (7)$$

消去 v_1 、 v_0 、 t_0 得

$$d_A = \frac{t_{A0} - t_{A1}}{t_{A0} - t_{A1} + t_{B0} - t_{B1}} l_{AB} \quad (8)$$

式中: t_{A1} 和 t_{B1} 分别为线模行波到达 A、B 两端的时间; t_{A0} 和 t_{B0} 分别为零模行波到达 A、B 两端的时间; v_1 、 v_0 分别为线模行波波速和零模行波波速; l_{AB} 为线路 AB 的长度。

由式(8)可知, 行波定位结果与行波传输速度的变化无关。与当前不受行波波速影响的定位方法相比, 该算法避免了故障反射波的测量, 无需得知故障发生时刻, 减少了波头检测时间和难度, 降低了算法的复杂程度, 提高了故障定位精度。如文献[11]中算法, 需要检测故障发生后前三个故障行波到达线路各端的时间, 利用第一个波头到达时刻确定离故障点近的母线端, 然后根据前三个波头到达近端母线的的时间确定故障点类型, 消除行波波速对定位结果的影响, 确定故障点位置, 由于反射波的检测与辨识困难、定位算法复杂, 故障定位精度与鲁棒性不足。

3 仿真分析

在 ATP/EMTP 中搭建一条如图 2 所示的 220 kV 输电线路, 验证提出方法的可靠性和精度。线路 AB 长度为 110 km, 线路参数如表 1 所示。

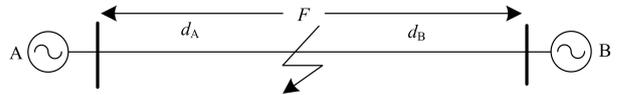


图 2 某 220 kV 输电线路仿真模型

Fig. 2 Simulation model of a 220 kV transmission line

表 1 输电线路参数

Table 1 Parameters of transmission lines

参数类型	电阻/ (Ω/km)	电感/ (mH/km)	电导/ (S/km)	电容/ ($\mu\text{F}/\text{km}$)
正序	0.035	1.34	1×10^{-8}	0.008 5
零序	0.3	3.65	1×10^{-8}	0.008 5

$t=2 \mu\text{s}$ 时, 在距离线路 A 端 70 km 处设置 AB 两相接地故障, 故障行波信号的采样频率为 10 MHz。通过凯伦布尔变换矩阵对采样信号进行解耦, 将解

耦后的线模分量进行三次 B 样条小波变换、HHT 变换和 VMD-Hilbert 变换。限于篇幅，只列出原始信号中加入信噪比 30 db 白噪声时的检测图。其中 VMD 参数设置： $K=4$ ， $\alpha=8\ 000$ ， $\tau=2$ 。

如图 3 所示，三次 B 样条小波变换能够较好地检测到故障初始行波到达时刻，但检测结果随着分解尺度的不同而发生变化，存在尺度选取不同造成定位误差较大的问题。

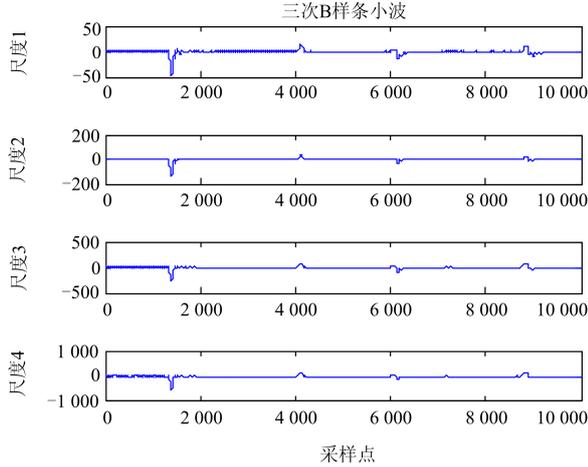


图 3 三次 B 样条小波分量结果图

Fig. 3 Component results of cubic B-spline wavelet

图 4 中 EMD 分解的模态分量信号存在端点效应和模态混叠现象，难以得到真实的特征信号。加上噪声信号的影响，图 5 显示 HHT 变换的结果中存在大量干扰信号，无法准确检测故障行波信号的第一个频率突变点。

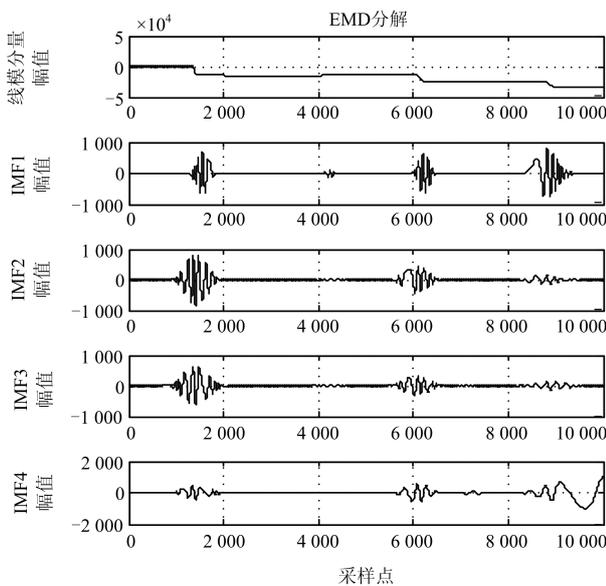


图 4 线模信号和 EMD 分解结果

Fig. 4 Line model signal and EMD decomposition results

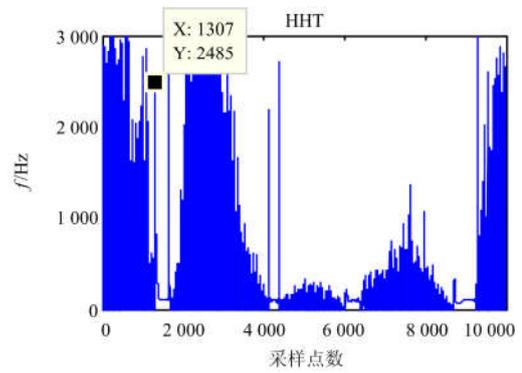


图 5 HHT 变换检测结果

Fig. 5 Detection results of HHT transform

图 6 中 VMD 分解的模态分量信号无模态混叠现象和端点效应，其中模态 1 分量信号相比于其他模态信号，其变化趋势和原始线模分量信号的变化趋势最一致，因此将模态 1 分量信号进行 Hilbert 变换，提取故障行波信号的瞬时频率，如图 7 所示，根据第一个瞬时频率的突变点确定故障初始行波的到达时间。

比较分析三种故障行波波头检测方法的结果，VMD-Hilbert 变换相比于三次 B 样条小波变换不受分解尺度的影响，和 HHT 变换相比具有更好的噪声鲁棒性，端点效应和模态混叠现象不明显，更容易分辨故障行波信号的第一个频率突变点。

同理可得，VMD-Hilbert 变换检测故障行波到达另一端的时间为 235.2 μs ，根据线路的参数和波速

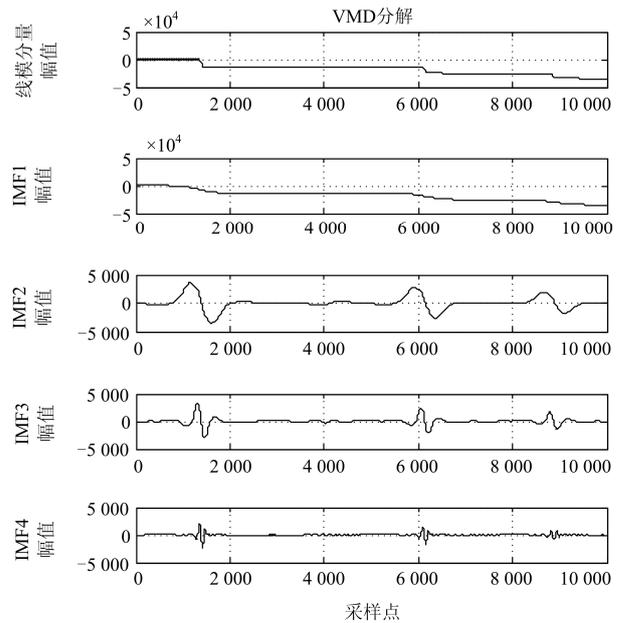


图 6 线模信号和 VMD 分解结果

Fig. 6 Line model signal and VMD decomposition results

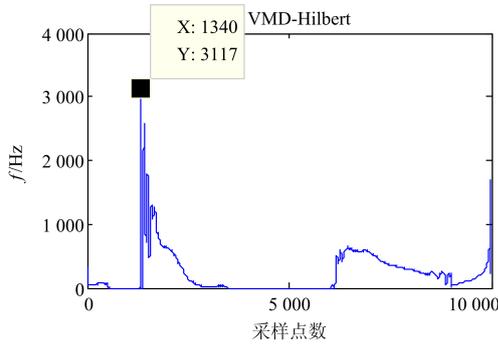


图 7 VMD-Hilbert 变换检测结果

Fig. 7 Detection results of VMD-Hilbert transform

公式计算得到故障行波的传输速度为 2.98062924×10^8 m/s, 因此故障点与 A 端的距离为

$$d_A = \frac{110 + (134 - 235.2) \times 0.298062924}{2} = 39.918 \text{ km},$$

与故障点实际距离 A 端 40 km 相比, 定位误差为 82 m, 满足故障点精确定位的要求。

取三次 B 样条小波变换中尺度 3 的第一个突变点数据为故障初始行波的到达时间, 考虑故障点 F 处发生的不同类型故障, 不考虑噪声干扰, 对三种提取方法的定位结果进行比较, 如表 2 所示。

表 2 不同故障类型的检测定位结果

Table 2 Detection and location results with different faults

	故障类型	A 端采样点	B 端采样点	计算距离/km	误差/m
三次 B 样条	ABC	1 393	2 393	40.097	97
	ABg	1 393	2 392	40.112	112
	Ag	1 393	2 392	40.112	112
HHT	ABC	1 331	2 345	39.888	-112
	ABg	1 332	2 347	39.873	-127
	Ag	1 331	2 345	39.888	-112
VMD-Hilbert	ABC	1 340	2 351	39.933	-67
	ABg	1 340	2 352	39.918	-82
	Ag	1 340	2 352	39.918	-82

通过数据分析可得, 在无噪声干扰情况下, 三种方法都可以有效提取故障初始行波的到达时刻, 定位故障点。其中 VMD-Hilbert 方法相比于三次 B 样条变换和 HHT 方法, 得到的故障点位置误差更小, 定位精度更高。

为验证与所提波速无关的双端定位算法的可行性, 通过 VMD-Hilbert 变换提取得到 F 处发生 AB 两相接地故障时故障初始行波线模分量和零模分量分别到达 AB 两端的时间。A 端的零模时间 $t_{A0} = 144.2 \mu\text{s}$, 线模时间 $t_{A1} = 134 \mu\text{s}$, B 端的零模时间 $t_{B0} = 235.1 \mu\text{s}$, 线模时间 $t_{B1} = 253.2 \mu\text{s}$ 。将数据代

入式(8)可得

$$d_A = \frac{144.2 - 134}{144.2 - 134 + 253.1 - 235.2} \times 110 = 39.929 \text{ km}$$

与故障点实际距离 A 端 40 km 相比, 定位误差为 71 m。相比于传统双端定位误差 82 m, 定位精度更高。

在距离 A 端 40 km、60 km 和 90 km 处, 分别模拟 A 相接地故障、AB 两相接地故障和 ABC 三相短路故障。通过 VMD-Hilbert 变换检测故障行波零模分量和线模分量到达线路两端的时刻, 故障行波波速由计算得 2.98062924×10^8 m/s, 用本文所提与波速无关的双端定位方法和传统双端定位方法计算故障点位置, 结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 本文所提方法定位结果

Table 3 Fault location results based on new methods

故障距离/km	故障类型	计算距离/km	误差/m
40	ABC	40.035	35
	ABg	39.929	-71
	Ag	39.929	-71
60	ABC	60.042	42
	ABg	60.042	42
	Ag	60.042	42
90	ABC	89.872	-128
	ABg	89.872	-128
	Ag	89.872	-128

表 4 传统双端定位算法结果

Table 4 Fault location results based on original methods

故障距离/km	故障类型	计算距离/km	误差/m
40	ABC	39.933	-67
	ABg	39.918	-82
	Ag	39.918	-82
60	ABC	59.948	-52
	ABg	59.948	-52
	Ag	59.948	-52
90	ABC	90.186	186
	ABg	90.186	186
	Ag	90.186	186

通过表格数据分析可得, 本文所提与波速无关的双端定位算法能够在不同的故障情况下有效实现故障点的精确定位, 并随着故障点位置靠近线路中点, 定位误差越小。

该算法基于电力系统一次侧高精度采集的故障行波特性分析, 对行波测量精度要求高。而实际故障行波录波波形为电力系统一次侧波形经互感器转

换后的二次侧波形, 由于现有互感器高频传输性能难以满足准确测量的要求, 受互感器本身波过程固有频率振荡信号的影响, 所检测的二次行波不能真实反映一次行波特征, 难以满足本文所提方法的计算要求。

为此, 作者课题组正在研发故障行波信号的真实测量装置, 经信号反演消除互感器的传变误差, 并抑制互感器固有频率振荡信号, 有望实现行波信号的高精度检测, 促进行波保护的实用化, 有望满足所提方法要求, 解决暂态保护的工程应用问题。

4 结论

本文提出一种基于 VMD 和 Hilbert 变换的行波波头检测方法, 通过对信号进行 VMD 分解, 消除了 EMD 算法中的模态混叠现象和端点效应, 有效提高了行波信号的信噪比, 然后利用 Hilbert 变换提取模态信号的瞬时频率, 标定故障初始行波波头的到达时刻。仿真结果分析可知, 相比于三次 B 样条小波变换和 HHT 检测法, VMD-Hilbert 检测方法具有更好的检测效果。

利用 VMD-Hilbert 方法检测故障初始行波零模分量和线模分量分别到达各端的时间, 结合双端行波定位的原理, 提出一种与波速无关的双端定位算法。仿真结果表明, 该算法简单可靠, 无需知道故障发生时刻和反射波到达时刻, 不受故障类型影响, 进一步提高定位精度。

参考文献

- [1] 董新洲, 王珺, 施慎行, 等. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 154-160.
DONG Xinzhou, WANG Jun, SHI Shenxing, et al. Principle and algorithm of traveling waves based single-phase-to-ground protection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 154-160.
- [2] 李泽文, 刘柏罕, 熊毅, 等. 基于 SR-ITD 的故障行波检测方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 121-125, 133.
LI Zenwen, LIU Bohan, XIONG Yi, et al. Fault traveling wave detection based on SR-ITD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 121-125, 133.
- [3] 马丹丹, 王晓茹. 基于小波模极大值的单端行波故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 55-59.
MA Dandan, WANG Xiaoru. Single terminal of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 55-59.
- [4] 郑州, 吕艳萍, 王杰, 等. 基于小波变换的双端行波测距新方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 203-207.
ZHENG Zhou, LÜ Yanping, WANG Jie, et al. A new two terminal traveling wave fault location method based on wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 203-207.
- [5] 覃剑, 葛维春, 邱金辉. 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 92-95.
QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui. Study on single terminal method and double terminal method of traveling wave fault location in transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 92-95.
- [6] 李振兴, 吴李群, 田斌, 等. 不同步双端数据修正波速的单端行波测距算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 16-22.
LI Zhenxing, WU Liqun, TIAN Bin, et al. Single-terminal traveling wave location algorithm based on amending wave velocity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 16-22.
- [7] 覃剑, 陈祥训, 郑健超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 7-11.
QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao, et al. A new double terminal method of traveling wave fault location using wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 7-11.
- [8] 张小丽, 曾祥君, 马洪江, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 64-68.
ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power grid faults location with traveling wave based on Hilbert-Huang transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 64-68.
- [9] 雷强, 刘光晔, 朱永强, 等. 基于 EEMD 和矩阵束算法的低频振荡主导模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 56-62.
LEI Qiang, LIU Guangye, ZHU Yongqiang, et al. Identification of the dominant mode based on EEMD and matrix pencil algorithm for low frequency oscillations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 56-62.
- [10] 康守强, 王玉静, 杨广学, 等. 基于经验模态分解和超球多类支持向量机的滚动轴承故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(14): 96-102.
KANG Shouqiang, WANG Yujing, YANG Guangxue, et al. Rolling bearing fault diagnosis method using empirical mode decomposition and hypersphere multiclass support vector machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(14): 96-102.

- [11] 位韶康, 陈平, 姜映辉. 一种不受波速影响的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 76-81.
WEI Shaokang, CHEN Ping, JIANG Yinghui. A single-ended traveling wave ranging method avoiding wave speed influence[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 76-81.
- [12] 尹晓光, 宋琳琳, 尤志, 等. 与波速无关的输电线路双端行波故障测距研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 35-39.
YIN Xiaoguang, SONG Linlin, YOU Zhi, et al. Study of fault locating for transmission line double terminal traveling waves unrelated to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 35-39.
- [13] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 8-13.
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.
- [14] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [15] 贾亚飞, 朱永利, 王刘旺, 等. 基于 VMD 和多尺度熵的变压器内绝缘局部放电信号特征提取及分类[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 208-217.
JIA Yafei, ZHU Yongli, WANG Liuwang, et al. Feature extraction and classification on partial discharge signals of power transformers based on VMD and multiscale entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 208-217.
- [16] 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.
- [17] 刘长良, 武英杰, 甄成刚. 基于变分模态分解和模糊 C 均值聚类的滚动轴承故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3358-3365.
LIU Changliang, WU Yingjie, ZHEN Chenggang. Rolling bearing fault diagnosis based on variational mode decomposition and fuzzy C means clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3358-3365.
- [18] 赵庆喜, 蔡夏诗, 盛从兵, 等. 基于行波理论的电力线路绝缘故障预警系统[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(3): 66-72.
ZHAO Qingxi, CAI Xiashi, SHENG Congbing, et al. Traveling wave based on insulation faults pre-warning system for transmission line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(3): 66-72.

收稿日期: 2017-08-12; 修回日期: 2017-10-16

作者简介:

谢李为(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: fengxlw@qq.com

曾祥君(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 从事电力系统保护与控制方向研究。E-mail: eexjzeng@qq.com

(编辑 张爱琴)