

基于改进VMD的输电线路行波故障定位研究

宋晓星, 高艳丰, 丁光彬, 李铁源

(河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056002)

摘要: 为了避免变分模态分解(Variational Mode decomposition, VMD)过程中人为设定分量个数 k 值对故障行波信号分解不足或过剩造成的故障定位不精确, 提出一种参数交替优化VMD的行波故障定位方法。首先, 采用参数交替优化VMD的方法, 得出更加合理的 k 值和 α 值。其次, 根据Teager能量算子(Teager Energy Operator, TEO)对单分量信号解调速度快、准确度高的优点, 将改进VMD与TEO相结合应用到高压输电线路故障行波检测, 仿真验证该检测方法在输电线路行波故障定位中的优势。最后, 推导出一种不受波速和线路弧垂影响的输电线路双端故障行波测距的新算法并进行故障定位。EMTDC仿真表明, 该定位方法正确, 计算简单, 定位准确度较高。

关键词: 变分模态分解; 行波检测; 参数优化; Teager能量算子; 故障定位

Study on transmission line traveling wave fault location based on improved VMD participation

SONG Xiaoxing, GAO Yanfeng, DING Guangbin, LI Tiejuan

(School of Water Conservancy and Hydropower Hebei University of Engineering, Handan 0560002, China)

Abstract: In order to avoid the inaccurate fault location caused by the insufficient or excessive decomposition of the fault traveling wave signal during the Variational Mode Decomposition (VMD) process, an alternate parameter optimization VMD is proposed. Traveling wave fault location method. Firstly, the method of alternately optimizing the VMD by parameters is used to obtain a more reasonable k value and α value. Secondly, according to the Teager Energy Operator (TEO), the single component signal has the advantages of fast demodulation speed and high precision. The improved VMD and TEO are applied to the fault traveling wave detection of high-voltage transmission lines, and the advantages of the detection method in traveling wave fault location of transmission lines are verified by simulation. Finally, a new algorithm for traveling-line ranging of double-ended faults on transmission lines unaffected by wave velocity and line sag is deduced and fault location is performed. The EMTDC simulation shows that the positioning method is correct, the calculation is simple, and the positioning accuracy is high.

Key words: variational mode decomposition; traveling wave detection; parameter optimization; Teager energy operator; fault location

0 引言

我国输电线路穿越地形复杂, 气候条件多变, 故障事件发生频繁^[1-3], 高压输电线路故障对

电力系统的安全稳定运行构成了较大威胁。雷电直接或间接作用所造成的故障约占总故障次数的40%~70%^[4]。研究输电线路故障后快速、准确定位, 可以及时查找故障位置和快速恢复供电, 对电力系统的安全稳定运行具有重要的意义。

邯郸市科学技术研究与发展计划项目(1721203048-1); 河北工程大学创新基金项目(17129033052)

近年来,国内外许多学者提出大量有关输电线路故障查找和定位的方法,并且研制了故障定位装置^[5]。目前,行波定位装置已开始在现场使用,但是实际定位结果受行波波速、输电线的弧垂、线路参数的变化及定位装置本身等因素的影响仍有较大误差,所以测距准确度有待进一步提高。行波测距的两个关键问题即行波波头的检测和行波波速的设定。小波变换(Wavelet Transform, WT)^[6-8]需要根据实际问题选择合适的基函数和分解尺度,而希尔伯特-黄变换^[9-10](Hilbert-Huang Transform, HHT)是一种自适应的信号分解算法,定位准确度比WT方法更高^[11]。HHT方法首先通过经验模态分解(EMD)算法将非平稳信号分解为一组平稳分量,然后再利用Hilbert变换计算出各分量的瞬时频谱。瞬时频率谱的首个突变点对应时刻即为故障初始行波的到达时刻。由于Hilbert变换只适用于单分量的信号,而EMD算法存在模态混叠现象,分解出的IMF分量可能不是单分量信号^[11],这就会对检测结果造成不准确或失败。文献[12-14]提出的方法在一定程度上减轻了模态混叠现象,但也无法完全消除。

2014年,Dragomiretskiy等提出了一种新的多分量信号自适应分解方法——变分模态分解(VMD)^[15]。该方法与EMD的不同是在获取IMF分量时是将信号分解过程转移到变分框架内,通过迭代搜索变分模型最优解来确定每个分量的频率中心及带宽,并且利用多个维纳滤波组实现滤波,具有很好的噪声鲁棒性^[16-17]。

由VMD算法原理可知,模态分量的个数 k 和惩罚因子 α 在采用VMD算法处理信号之前就需要预先设定, k 和 α 的设置值直接影响到最终的分解结果, k 值过小会造成信号分解不充分; k 值过大会产生一些虚假分量,干扰对原信号有用成分的分析。所以, k 值的确定在VMD算法中起着至关重要的作用^[18]。 α 过大会使模态的带宽较小;相反 α 较小会使模态具有较大的带宽。文献[19]研究表明,随着模态分量个数 k 的增加,模态重叠会先出现在中低频段,因此, k 和 α 对分解效果的影响可以分开考虑,为了解决上述问题,本文提出参数交替

优化的VMD算法,通过引入参数交替优化,将多目标优化问题转化为单一目标问题的优化。然后采用改进的VMD算法与TEO结合进行行波波头的检测,并与HHT方法进行了比较。最后,推导出不受波速影响的双端行波测距新算法进行故障定位。大量EMTDC仿真结果,表明该方法能够更准确地检测到行波的波头突变,定位准确度更高。

1 基于改进VMD与TEO的行波检测方法

1.1 VMD 原理

VMD分解算法实际上是一个变分问题的求解过程,它将原信号分解为 k 个模态函数 $U_k(t)$,使得每个模态函数的估计带宽之和最小,则相应的约束变分模型可表达为

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

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

引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘法算子 λ ,将约束性变分问题转变为非约束性变分问题,则增广拉格朗日的表达式为

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

式中, α 为惩罚参数; λ 为拉格朗日乘子在求解过程中需要更新 u_k^{n+1} 、 ω_k^{n+1} 和 λ^{n+1} 。

u_k^{n+1} 的取值问题可表述为

$$U_k^{n+1} = \arg \min_{U_k \in X} \left\{ \alpha \|\partial_t [(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) u_k(t)] e^{-j\omega_k t}\|_2^2 + \|f(t) - \sum_k u_k(t) + \frac{\lambda(t)}{2}\|_2^2 \right\} \quad (3)$$

为了计算简单,式(3)中 $\omega = \omega_k^{n+1}$, $\sum_i u_i(t) = \sum_{i \neq k} u_i(t)^{n+1}$ 。利用Parseval傅里叶等距变换,式(3)可变为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4)$$

根据上述同样的方法，中心频域的更新结果为

$$\omega_k^{n+1}(\omega) = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (5)$$

式中， $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 为当前的剩余量 $\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega)$ 的维纳滤波结果； $\omega_k^{n+1}(\omega)$ 为模态函数功率谱的重心。

1.2 参数交替优化VMD

文献[19]研究得出结论，模态个数与惩罚因子对分解效果的影响可分开考虑，本文以此为基础提出参数交替优化VMD，经过交替优化参数使多目标交替优化问题转化为单目标交替优化。

1) k 值的更新取决于各模态中心频率的间隔占比 k_p 和阈值 k_e ，间隔占比定义为

$$k_p(i) = p(i) / [p(i) + p(i+1)] \quad i = 1, 2, \dots, k-1 \quad (6)$$

式中， $p(i)$ 为当前模态间隔， $p(i+1)$ 是相邻模态间隔。一般阈值 k_e 设置为30%~40%的目的是为了避免模态个数过大造成模态重叠，本文取 $k_e = 35\%$ 。

2) α 的更新运用了包络熵的区间消去法，以各模态包络熵均值最小为目标，利用二分法选择新的 α 区间，更新后的 α 取区间中点。

3) 当满足交替优化次数大于最大设定次数或者出现中心频率间隔 k_p 小于阈值 k_e 且 α 更新幅度小于一定值（本文取10%）时，更新就会停止。

参数优化流程图如图1所示。

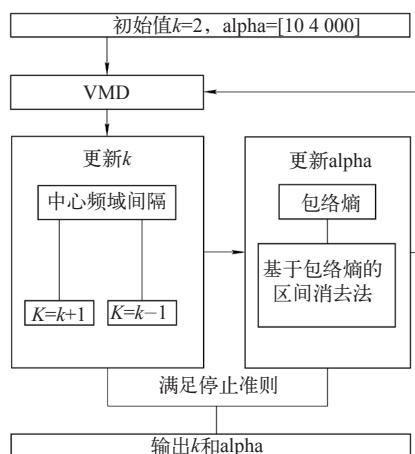


图1 参数交替优化VMD算法流程

Fig. 1 Algorithm process of VMD about alternation optimization

1.3 信号去噪处理

输电线路故障会产生一些噪声，这不利于后期故障电流行波波头提取。故障行波波头一般从故障电流信号的中、高频段进行提取，另外VMD在提取低频段信号时 also 具有良好的准确性和稳定性。由以上分析，信号经过参数交替优化VMD分解后，把除低频噪声模态信号以外的各模态进行重构。另外，VMD自身维纳特性也抑制了噪声干扰对中、高频段的影响。

1.4 基于改进VMD与TEO的行波检测实例

输电线路发生故障时，故障点将产生故障行波信号，故障行波检测主要是检测故障行波波头最初到达检测点的时间。而行波波头到达检测点时，高频行波分量频率和幅值的较大波动，会使相应的Teager瞬时能量值发生突变。Teager能量算子是一种非线性算子，能反映能量的瞬时变化。且其具有很小的计算量，能够快速准确地跟踪信号的变化，适于信号的实时检测处理。因此，通过高频行波分量瞬时能量谱中的突变点就可以确定出波头的到达时刻。

拟搭建一个220 kV的输电系统模型，线路长度为110 km，故障点设在距线路某检测端27 km处，A相短路故障时，选取故障后2.5 ms内的故障行波信号进行分析，采样频率为1 MHz。高压输电线路故障时会产生大量含有噪声的电流行波信号^[20]，为能更好地仿真现实中的故障电流信号，在故障行波信号中加入一些白噪声进行干扰。由于三相线路相间电磁耦合的作用，首先利用一种新的相模变换进行解耦^[21]，解决了现有的相模变换得到的单一模量均不能反映所有故障类型的问题，然后用改进的VMD对解耦后的电流线模分量进行分解。VMD参数最终的优化结果为： $\alpha = 1356$ ， $k = 4$ 。VMD分解结果如图2所示。

由图2可知，信号的变化趋势会随模态数量 k 的增加而改变，只有模态1基本保持不变，模态1能反映原始信号的变换趋势，因此计算模态1的瞬时Teager能量值，得到模态1的瞬时能量谱如图3所示。

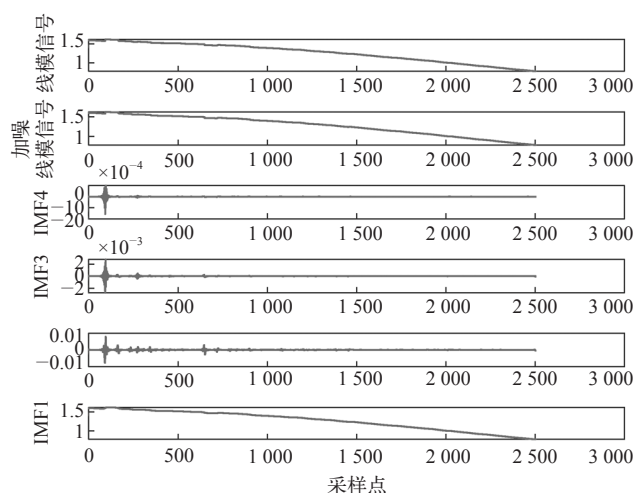


图2 分析信号及其VMD分解结果

Fig. 2 Analytical signal and its VMD decomposition results

由图3可知,故障初始行波到达检测点的时间 $t=92 \mu\text{s}$ 。故障行波信号突变点明显,能准确地检测到行波波头的突变,使定位结果更加准确。

同理将故障行波信号进行EMD分解,如图4所示。

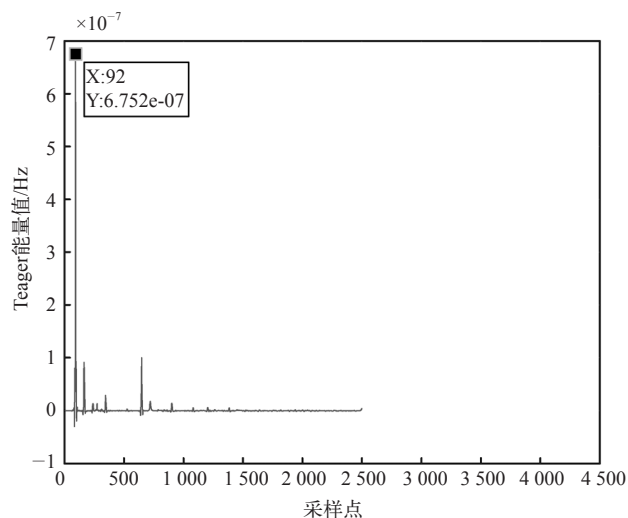


图3 模态1的瞬时能量谱

Fig. 3 Instantaneous energy spectrum of modal 1

图4表明,EMD分解信号时存在的模态混叠现象比较严重,IMF1分量淹没在噪声背景中,无法得到信号特征分量。图5为上述分析信号的HHT方法的检测结果,表明Hilbert变换得到的瞬时频率谱无法检测到故障行波到达检测点的时刻,导致测距失败。由上述仿真图比较可知,在人为加入强噪声的背景下,所提出的方法能清晰、准确地检测到故障的初始行波,检测效果更加优越。

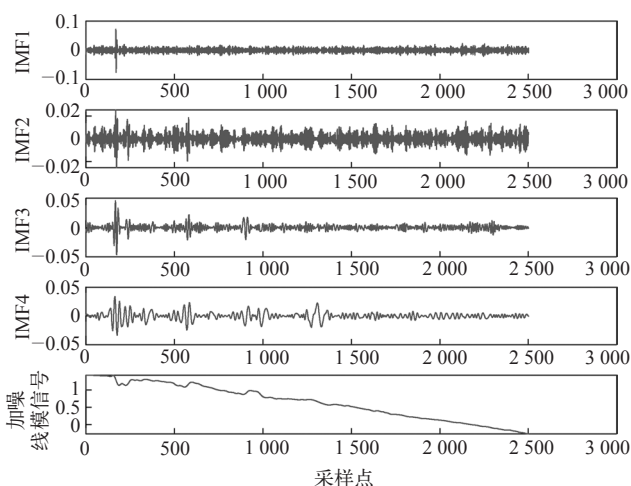


图4 分析信号及其EMD分解结果

Fig. 4 Analytical signal and its EMD decomposition results

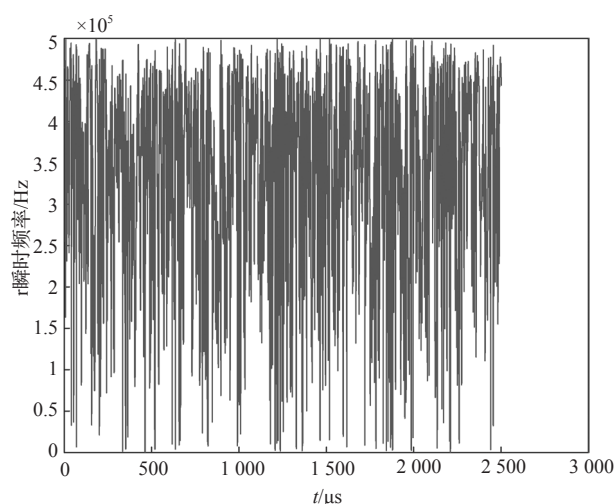


图5 HHT方法检测结果

Fig. 5 The test results of HHT method

2 与波速无关的双端定位算法

双端行波故障定位法利用波速和故障点产生的行波到达两端的时间差来确定故障的位置,其测距原理如图6所示。

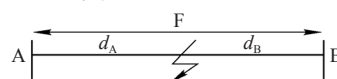


图6 故障行波传输图

Fig. 6 Transmission diagram of fault traveling wave

测距公式为

$$\begin{cases} d_A = \frac{L_{AB} + v(t_A - t_B)}{2} \\ d_B = \frac{L_{AB} + v(t_B - t_A)}{2} \end{cases} \quad (7)$$

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两端的初始时刻。

由式(10)可知, 行波波速、线路的实际长度和行波波头的到达时间是影响故障定位的重要因素。而在实际自然环境中线路往往要面临大风、覆冰等工况, 导线承受荷载较设计值增大, 致使导线产生弧垂, 弧垂的存在使电力线每档的实际长度与杆塔间的水平距离不相等, 一般认为输电线路实际长度变化的范围是杆塔间水平距离的 $0.9L \sim 1.1L$ ^[22], 到同一线路的导线在相同的外环境下伸缩性是均匀的。假设输电线路的水平距离为 L_{AB} , t_0 时刻在输电线路AB上发生故障。 t_A 、 t_B 分别为故障初始行波到达A、B两端检测点的时刻; v 为实际线路行波传播速度; v_1 为水平线路行波传播速度。

故障点到A端的实际距离为

$$d'_A = v(t_A - t_0) \quad (8)$$

故障点到A端实际所需的时间为

$$T'_A = \frac{d'_A}{v} = \frac{v(t_A - t_0)}{v} = t_A - t_0 \quad (9)$$

线路AB的实际长度表示为

$$L_{AB} = v(t_A - t_0 + t_B - t_0) \quad (10)$$

行波传播线波AB实际所需要的时间为

$$T_{AB} = \frac{v(t_A - t_0 + t_B - t_0)}{v} = t_A - t_0 + t_B - t_0 \quad (11)$$

不考虑弧垂影响故障点到A端所需的时间为

$$T_A = \frac{d_A}{v_1} \quad (12)$$

行波传播水平线路AB所需的时间为

$$T_{AB} = \frac{L_{AB}}{v_1} \quad (13)$$

由式(9)~式(13)得

$$\frac{T_A}{T_{AB}} = \frac{T'_A}{T'_{AB}} \quad (14)$$

$$T_A = \frac{T'_A}{T'_{AB}} T_{AB} \quad (15)$$

故障点到A端的水平距离为

$$d_A = \frac{t_A - t_0}{t_A - t_0 + t_B - t_0} L_{AB} \quad (16)$$

令 $t_A - t_0 = t'_A$, $t_B - t_0 = t'_B$, 则

$$d_A = \frac{t'_A}{t'_A + t'_B} L_{AB} \quad (17)$$

由式(17)可知, 故障定位结果与行波波速和弧垂导致线路长度变化无关, 只与故障初始行波到达两端检测点的时刻和给定线路长度有关, 此方法避免了故障反射波的测量, 使得故障定位结果更加准确。

3 仿真验证

为了验证所提方法的可靠性, 利用PSCAD软件搭建220 kV输电线路, 如图7所示。

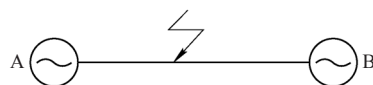


图7 输电线路仿真模型

Fig. 7 Simulation model of transmission line

输电线路AB的总长度为110 km, 故障点设在距线路A检测端64 km处, 并且发生A相短路故障。首先利用相模变换进行解耦, 经过VMD得到的模态1和TEO瞬时能量谱, 并得到故障行波到达A、B两端的初始时刻。

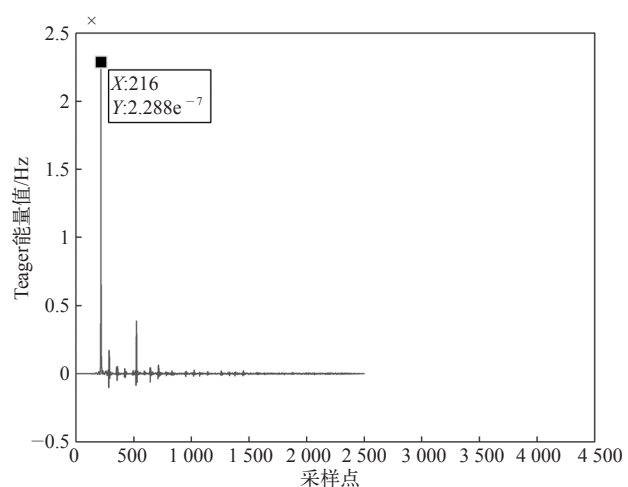
由图8可知, 故障初始行波到达A、B两端的初始时刻为216 μ s、156 μ s。把所测得数据带入式(17)中得

$$d_A = \frac{t'_A}{t'_A + t'_B} L_{AB} = \frac{216}{216 + 156} \times 110 = 63.87 \text{ km} \quad (18)$$

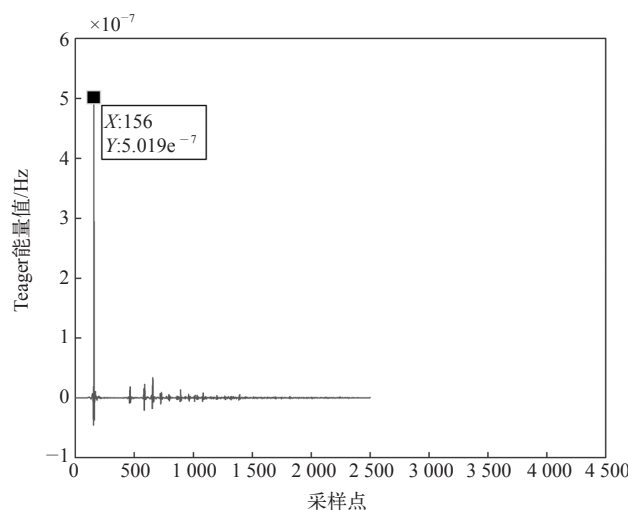
故障点到达A端的距离为63.871 km, 定位的误差为-0.129 km。

同理, 在不同故障类型下, 不同的故障位置时, 测距结果如下表所示。

表中, 分别设在距离A端27 km、47 km、64 km和73 km, 4个位置发生故障时, 测距误差分别为+0.204 km、+0.016 km、-0.129 km和-0.258 km。由数据分析可知, 故障点越靠近输电线路的中间位置, 测距误差越小; 故障点越靠近线路两端的位置时, 测距误差越大, 但是整体误差在实际要求的范围之内。所以, 所提出的定位方法能满足现实的实际需求, 定位结果比较理想。



(a) A端故障初始行波到达时刻



(b) B端故障初始行波到达时刻

图8 故障行波模分量达到时刻

Fig. 8 The arriving time of fault traveling wave mode components

表 不同条件下的故障测距结果

Tab. Fault location results under different conditions

(单位: km)

故障位置	故障条件	$t_A/\mu s$	$t_B/\mu s$	测距结果	误差
27	Ag	92	280	27.204	+0.204
	AB	92	280	27.204	+0.204
	ABg	92	280	27.204	+0.204
	ABC	92	280	27.204	+0.204
47	Ag	159	213	47.016	+0.016
	AB	159	213	47.016	+0.016
	ABg	159	213	47.016	+0.016
	ABC	159	213	47.016	+0.016
64	Ag	216	156	63.871	-0.129
	AB	216	156	63.871	-0.129
	ABg	216	156	63.871	-0.129
	ABC	216	156	63.871	-0.129
73	Ag	246	126	72.742	-0.258
	AB	246	126	72.742	-0.259
	ABg	246	126	72.742	-0.258
	ABC	246	126	72.742	-0.258

4 结束语

1) 针对VMD算法中人为经验设定 k 值和 α 值, 对行波信号分解结果的影响, 提出了一种参数交替优化的VMD方法, 使 k 值和 α 值的设定更加合理。

2) 在加入强噪声的干扰下采用改进的VMD和TEO相结合的方法能准确地检测到行波信号。与HHT检测方法相比较, 该方法具有更好的检测效果。

3) 考虑到故障定位受行波波速和线路弧垂的影响, 推导出一种不计行波波速和线路实际长度影响的输电线路故障定位新算法, 该算法不用考虑行波反射波的影响, 定位结果更加准确。

参考文献

- [1] 易辉, 崔江流. 我国输电线路运行现状及防雷保护[J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 44-50.
YI Hui, CUI Jiangliu. The present state and lightning protection of transmission line in China[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(6): 44-50.
- [2] 陈家宏, 张勤, 冯万兴, 等. 中国电网雷电定位系统与雷电监测网[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 425-431.
CHEN Jiahong, ZHANG Qin, FENG Wanxing, et al. Lightning location system and lightning detection network of China power grid [J]. High voltage Engineering, 2008, 34(3): 425-431.
- [3] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲. 行波保护中雷电干扰问题的对策[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 74-78.
DONG Xingli, GE Yaozhong, DONG Xinzhou. Effect of lightning on protection based on traveling waves [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 74-78.
- [4] 梅贞, 陈水明, 顾勤伟, 等. 1998~2004年全国雷电灾害事故统计[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 173-176.
MEI Zhen, CHEN Shuiming, GU Qinwei, et al. Statistic of lightning accidents during 1998~2004

- in China[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 173-176.
- [5] 葛耀中. 继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [6] MAGNAGO F H, ABUR A. Fault location using wavelets[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1475-1480.
- [7] 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 methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 55-59.
- [8] 梁劲, 周静. 多小波理论在输电线故障定位中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 26-32.
- LIANG Jin, ZHOU Jing. Application of multi-waves theory for the fault location in transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 26-32.
- [9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [10] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999(31): 417-457.
- [11] 韩建平, 李达文. 基于Hilbert-Huang变换和自然激励技术的模态参数识别[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 54-59.
- HAN Jianping, LI Dawen. Modal parameter identification based on Hilbert-Huang transform and natural excitation technique[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 54-59.
- [12] 张玲玲, 廖红云, 曹亚娟, 等. 基于EEMD和模糊C均值聚类算法诊断发动机曲轴轴承故障[J]. 内燃机学报, 2011, 29(4): 332-336.
- ZHANG Lingling, LIAO Hongyun, CAO Yajuan, et al. Diagnosis on crankshaft bearing fault based on EEMD and fuzzy C mean clustering arithmetic[J]. Transaction on CSICE, 2011, 29(4): 332-336.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] DRAGOMIRETSKIY Konstantin, ZOSSO Dominique. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [16] 唐贵基, 王晓龙. 参数优化变分模态分解方法在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5): 73-81.
- TANG Guiji, WANG Xiaolong. Parameter optimized variational mode decomposition method with application to incipient fault diagnosis of rolling bearing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(5): 73-81.
- [17] 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.

- [18] 朱永利, 贾亚飞, 王刘旺, 等. 基于改进变分模态分解和Hilbert变换的变压器局部放电信号特征提取及分类[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 222-235.
ZHU Yongli, JIA Yafei, WANG Liuwang, et al. Feature extraction and classification on partial discharge signals of power transformers based on improved variational mode decomposition and Hilbert transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 222-235.
- [19] 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.
- [20] 康忠健, 王升花, 樊建川. 基于形态小波的输电线路故障电流行波消噪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(19): 36-39.
KANG Zhongjian, WANG Shenghua, FAN Jianchuan. Study on the noise reduction of power line fault current traveling wave based on morphological wavelet[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(19): 36-39.
- [21] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 57-60.
SONG Guobing, LI Sen, KANG Xiaoning, et al. A novel phase-mode transformation matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 57-60.
- [22] 梁军, 麻常辉, 负志皓. 基于线路参数估计的高压架空输电线路故障测距新算法[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 60-63, 68.
LIANG Jun, MA Changhui, YUN Zhihao. A fault location algorithm for high voltage overhead power transmission line based on line parameter estimation[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 60-63, 68.

作者简介

宋晓星

宋晓星(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

(收稿日期: 2018-11-30) **EA**

(上接第25页)

- 218.
- [16] 孙奇珍, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 500 kV电网短路电流超标机理及限制措施适应性[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 92-96.
SUN Qizhen, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. The mechanism of short-circuit current exceeding standard and restrictive measures adaptability in 500 kV power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 92-96.

作者简介

张 锋

张锋(1972-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行与控制。

王衡(1983-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行与控制。

(收稿日期: 2018-12-16) **EA**