

基于VMD-HT算法的输电线路故障行波测距研究

于仲安,陈苗,丁雯苏,林上荣

(江西理工大学 电气工程与自动化学院,江西 赣州 341000)

摘要:传统的双回线行波测距主要在参数对称的模型上进行研究,为解决工程实际中参数不对称同塔双回线的行波测距问题,提出了一种基于VMD-HT算法的故障测距方法。因参数不对称同塔双回线各线间、相间存在耦合,先将六相电流解耦得到6个独立电流模分量,对比分析后得到特征模量,再将特征模量进行VMD-HT变换,提取出故障行波波头初始到达线路两端的时刻,根据双回线测距公式算出故障位置。PSCAD和Matlab实验对比仿真表明,所提算法比三次B样条小波包变换和希尔伯特黄变换(HHT)算法具有更好的测距效果,模型由双回线推广至四回线,误差仍在允许范围内,验证了所提算法的正确性和普适性。

关键词:故障行波测距;变分模态分解;同塔双回线;三次B样条小波包变换;希尔伯特黄变换

中图分类号:TM77 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23303

Research on Traveling Wave Fault Location of Transmission Line Based on VMD-HT Algorithm

YU Zhongan, CHEN Miao, DING Wensu, LIN Shangrong

(School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology,
Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: The traveling wave fault location of traditional double-circuit transmission lines are mainly studied on the model with symmetric parameters. In order to solve the problem of traveling wave fault location of double-circuit lines on the same tower with asymmetric parameters in engineering practice, a fault location method based on VMD-HT algorithm was proposed. Due to the coupling between lines and phases of the double-circuit transmission lines on the same tower, the six phases' currents were first decoupled to get six independent current mode components, and the characteristic mode components were obtained after comparative analysis. Then, the characteristic mode components were transformed by VMD-HT to extract the initial arrival time of the traveling wave head arriving at both ends of the lines, and the fault location was calculated according to the double-circuit lines location formula. Comparison and simulation of PSCAD and Matlab experiments show that the proposed algorithm has better accuracy of fault location than cubic B-spline wavelet packet transform and Hilbert Huang transform (HHT) algorithm. The model is extended from double-circuit transmission lines to four-circuit transmission lines, and the error is still within the allowable range, which verifies the correctness and universality of the proposed algorithm.

Key words: traveling wave fault location; variational mode decomposition (VMD); double-circuit transmission lines on the same tower; cubic B-spline wavelet packet transform; Hilbert Huang transform (HHT)

随着经济快速发展,电能需求不断增长,如何高效安全地运输电能成为亟待解决的问题。同塔双回输电线路因节约土地、输送电能效率较高而成本相对较低在我国应用十分广泛^[1],在发生故障以后快速进行故障定位对提高系统运行稳定性、

降低中断供电带来的经济损失具有至关重要的作用。故障定位常用的方法有阻抗法和行波分析法,后者分为单端法和双端法^[2-4]。行波法关键问题之一是故障行波波头初始到达时刻的检测,小波分析法的提出解决了这个问题^[5-6],但是小波基

基金项目:电力传输与功率变换控制教育部重点实验室开放课题(2015AB03)

作者简介:于仲安(1973—),男,硕士,教授,Email:yza119@126.com

通讯作者:陈苗(1998—),女,硕士研究生,Email:1581173963@qq.com

函数和分解尺度需要人为选取,选择不同会导致最后得到的结果不同。希尔伯特黄变换(HHT)在傅里叶变换的基础上建立^[7-8],由经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和希尔伯特变换(Hilbert transform, HT)组成,解决了小波变换需要选择小波基的困难,但是会出现模态混叠和端点效应等现象,使得测距结果不够精确。针对模态混叠的问题,文献[9]提出了EEMD分解,解决方式是在原始信号中加入正态分布的白噪声再进行EMD分解,此方法可以抑制模态混叠,但是不能消除其影响。变分模态分解(VMD)算法是一种新的自适应信号处理方法^[10-11],适合处理非线性非平稳的信号,针对EMD中存在的模态混叠和端点效应问题,具有很好的解决效果。文中提出VMD算法和HT变换结合应用在不对称参数同塔双回线故障测距中,PSCAD仿真表明所提算法测距误差小,适用性强。

1 同塔双回输电线路相模变换及分析

1.1 相模变换

相对于单回线,同塔双回线不仅节约输电走廊还提高了输电效率,但是其相间和线间存在耦合,使得传统的应用在单回线上的保护不能直接用在双回线上,因此需要对双回线参数进行解耦。参数不对称同塔双回线的系统结构图如图1所示,系统由两端电源P、Q供电,M、N为同塔双回线两端。不对称同塔双回线阻抗图如图2所示,符号含义如表1所示。

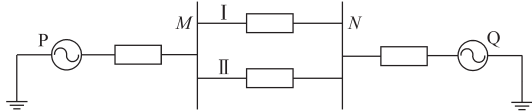


图1 参数不对称同塔双回线系统结构图

Fig.1 System structure diagram of double-circuit transmission lines on the same tower with asymmetric parameters

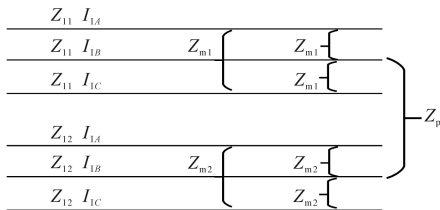


图2 参数不对称同塔双回线阻抗图

Fig.2 Impedance of double-circuit transmission lines on the same tower with asymmetric parameters

表1 各阻抗符号含义

序号	自阻抗	相间互阻抗	线间互阻抗
I	Z_{11}	Z_{m1}	Z_p
II	Z_{12}	Z_{m2}	Z_p

双回线电压、电流与阻抗的关系如下:

$$\begin{bmatrix} U_{IA} \\ U_{IB} \\ U_{IC} \\ U_{IIA} \\ U_{IIB} \\ U_{IIC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{m1} & Z_{m1} & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_{m1} & Z_{11} & Z_{m1} & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_{m1} & Z_{m1} & Z_{11} & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_{12} & Z_{m2} & Z_{m2} \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_{m2} & Z_{12} & Z_{m2} \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_{m2} & Z_{m2} & Z_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{IA} \\ I_{IB} \\ I_{IC} \\ I_{IIA} \\ I_{IIB} \\ I_{IIC} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $U_{ij}, I_{ij}(i=I, II; j=A, B, C)$ 分别为 I, II两回线路A, B, C三相电压和电流。

文献[12]提出六序分量法解决了参数对称的同塔双回线的相间线间耦合问题,但是电网在建设时由于使用材料、建设时间不同等原因,双回线参数往往是不对称的。文献[13]发现只有零序分量之间存在耦合,于是在六序分量法基础上进行改进,将零序分量分解成同向量和反向量,解决不对称参数的耦合问题,但是此方法存在复数因子,使得变换比较复杂。文献[14]提出的相模变换矩阵 S 为实数矩阵,针对单回线进行解耦,将此进行推广,可以把双回线看作两个单回线并联,先用 S 矩阵进行相间解耦,然后引入不对称参数 K_1, K_2 完成线间解耦,解耦矩阵 M 为

$$M = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 5K_1 & 5 & 5 & 5K_2 \\ 5K_1 & -1 & -4 & 5K_2 \\ 5K_1 & -4 & -1 & 5K_2 \\ 5 & & 5 & 5 \\ 5 & & 5 & -1 & -4 \\ 5 & & 5 & -4 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $K_1 = (\lambda_1 - a_1)/(3Z_p)$ $K_2 = (\lambda_2 - a_1)/(3Z_p)$

$$\lambda_1 = (a_2 + 2a_3 - \sqrt{a_4^2 + 4a_4a_5 + 4a_5^2 + 36Z_p^2})/2$$

$$\lambda_2 = (a_2 + 2a_3 + \sqrt{a_4^2 + 4a_4a_5 + 4a_5^2 + 36Z_p^2})/2$$

$$a_1 = Z_{12} + 2Z_{m2} \quad a_2 = Z_{11} + Z_{12} \quad a_3 = Z_{m1} + Z_{m2}$$

$$a_4 = Z_{11} - Z_{12} \quad a_5 = Z_{m1} - Z_{m2}$$

则 I, II 回线路各相电流解耦后得到的 6 个电流模量如下式:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} I_{IA} \\ I_{IB} \\ I_{IC} \\ I_{IIA} \\ I_{IIB} \\ I_{IIC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_{IA} + I_{IB} + I_{IC} - K_2(I_{IIA} + I_{IIB} + I_{IIC})}{K_1 - K_2} \\ I_{IA} + 2I_{IB} - 3I_{IC} \\ I_{IA} - 3I_{IB} + 2I_{IC} \\ \frac{-(I_{IA} + I_{IB} + I_{IC}) + K_1(I_{IIA} + I_{IIB} + I_{IIC})}{K_1 - K_2} \\ I_{IIA} + 2I_{IIB} - 3I_{IIC} \\ I_{IIA} - 3I_{IIB} + 2I_{IIC} \end{bmatrix} \quad (3)$$

参数对称的同塔双回线,用文献[15]中的 $\mathbf{S}$ 矩阵进行解耦得到下式:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \mathbf{S}^{-1} \begin{bmatrix} I_{IA} \\ I_{IB} \\ I_{IC} \\ I_{IIA} \\ I_{IIB} \\ I_{IIC} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_{IA} + I_{IB} + I_{IC} + I_{IIA} + I_{IIB} + I_{IIC} \\ I_{IA} + I_{IB} + I_{IC} - I_{IIA} - I_{IIB} - I_{IIC} \\ I_{IA} + 2I_{IB} - 3I_{IC} \\ I_{IA} - 3I_{IB} + 2I_{IC} \\ I_{IIA} + 2I_{IIB} - 3I_{IIC} \\ I_{IIA} - 3I_{IIB} + 2I_{IIC} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,3,4,5,6模量分别对应式(3)的2,3,5,6模量;1,2模量对应式(3)的1,4模量。参数对称与不对称的双回线只在解耦矩阵上存在差异,并不影响后续故障行波初始到达时刻的检测,所以文中所提算法同样适用于参数对称的同塔双回线。

1.2 特性分析

由式(3)可以得到,双回线中任意一条线发生故障都存在1模和4模分量,若只有I回线故障,5模和6模分量则为零,反之若只有II回线故障,2模和3模分量就为零。2,3,5,6模量是特征模量,在2模和3模分量中选择一个,在5模和6模分量中选择一个,二者结合就可以判断是单线故障还是跨线故障,若是单线故障只有其中一个有数值,若是跨线故障,二者均有数值。

考虑实际运行时不平衡电流的影响,令 I_I 为 $|I_2|, |I_3|$ 中较大的电流,则 $I_I = \max\{|I_2|, |I_3|\}$, I_{II} 为 $|I_5|, |I_6|$ 中较大的电流,则 $I_{II} = \max\{|I_5|, |I_6|\}$,设置动态阈值 $I_c = 20\% \times \max\{I_I, I_{II}\}^{[6]}$ 。

以I回线的A相为基准,表2为发生各种类型故障时2模和3模分量,其中A,B,C代表发生三相故障,G表示发生接地故障。

表2 典型故障类型下的电流行波
Tab.2 Electrical currents under typical fault types

故障类型	2模	3模
I AG	I_{IA}	I_{IA}
I AB	I_{IB}	$4I_{IA}$
I ABG	$I_{IA} + 2I_{IB}$	$I_{IA} - 3I_{IB}$
I ABC	$I_{IA} + 2I_{IB} - 3I_{IC}$	$I_{IA} - 3I_{IB} + 2I_{IC}$
I A II A	I_{IA}	I_{IA}
I A II AG	I_{IA}	I_{IA}
I A II AB	I_{IA}	I_{IA}
I A II ABC	I_{IA}	I_{IA}
I AB II A	$I_{IA} + 2I_{IB}$	$I_{IA} - 3I_{IB}$
I AB II AB	$I_{IA} + 2I_{IB}$	$I_{IA} - 3I_{IB}$
I AB II ABC	$I_{IA} + 2I_{IB}$	$I_{IA} - 3I_{IB}$

2 故障行波信号检测方法

2.1 VMD原理与算法

VMD是一种自适应、完全非递归的模式变分

和信号处理方法。其模式分解个数不需要提前设置,会根据实际情况确定,在求解过程中最佳中心频率和有限带宽会自动匹配。VMD能有效分离固有模式分量,对信号的频域进行划分,得出初始信号的有效分解成分,最后得到最优解。其分解过程包括多种变换方式,让信号的局部特征更加明显,信号抗干扰能力增强。假设信号被分解成 K 个模式分量,每个分量的带宽需进行估计,其约束公式为

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \|\partial_t [(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t)] e^{-j\omega_k t}\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^K u_k = f \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\{u_k\}, \{\omega_k\}$ 分别为第 k 个模式分量以及对应的中心频率, $k=1,2,\dots,K$; $\delta(t)$ 为狄拉克函数;*为卷积运算符; f 为输入信号。

引入拉格朗日乘法算子 λ ,约束变分问题转化为非约束变分问题, α 是二次乘法因子,可以减少高斯噪声的干扰,通过一系列的算法处理和变换,将一个信号分解成多个固有模式分量(intrinsic mode function, IMF),得到最优的个数和对应的中心频率,并搜寻增广拉格朗日函数的鞍点。增广拉格朗日函数公式如下:

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \|\partial_t [(\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t)] e^{-j\omega_k t}\|_2^2 + \|f(t) - \sum_k u_k(t)\|_2^2 + \langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \rangle \quad (6)$$

交替寻优迭代后的 $\{u_k\}, \{\omega_k\}$ 和 λ 的表达式如下:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) \leftarrow \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \hat{\lambda}(\omega)/2}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (7)$$

$$\omega_k^{n+1} \leftarrow \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega} \quad (8)$$

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \gamma [\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega)] \quad (9)$$

式中: γ 为噪声容忍度; $\hat{u}_k^{n+1}(\omega), \hat{f}(\omega), \hat{\lambda}(\omega)$ 为时域中 $u_k^{n+1}(t), f(t), \lambda(t)$ 的频域表达式^[7]。

VMD算法步骤如下:初始化 $\hat{u}_k^1, \omega_k^1, \lambda^1$ 和 $N(N$ 为最大迭代次数),令 $n=0,1,2,\dots,N$;利用式(7)~式(9)更新 $\hat{u}_k, \omega_k$ 和 $\hat{\lambda}$;当 $\sum_k \|\hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n\|_2^2 / \|\hat{u}_k^n\|_2^2 < \varepsilon$ (ε 为精度收敛判据,大于0)或迭代次数达到最大值时,迭代结束,输出 $\hat{u}_k$ 和 ω_k ,否则继续更新。

2.2 检测流程

故障测距流程图如图3所示,故障距离的计算公式^[18]为

$$\begin{cases} d_M = \frac{L + v(t_M - t_N)}{2} \\ d_N = \frac{L + v(t_N - t_M)}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: L 为线路全长; v 为波速,取光速; t_M, t_N 分别为故障行波波头初始到达 M, N 端的时刻; d_M, d_N 分别为故障处距离 M, N 端的距离。

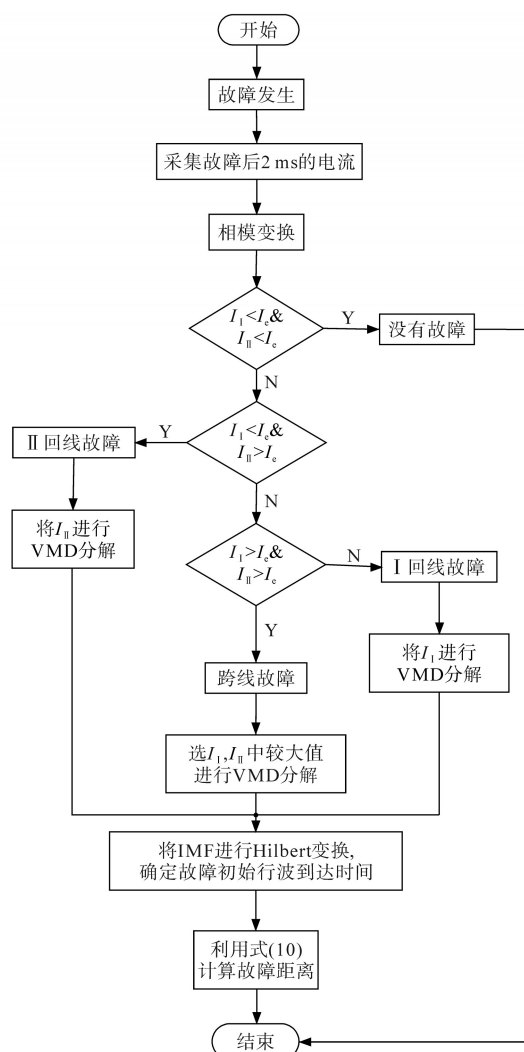


图3 故障测距流程图

Fig.3 Flow chart of fault location

3 仿真分析

在PSCAD中搭建图1所示的参数不对称同塔双回线模型,线路全长100 km,电压等级500 kV,两侧都有电源供电,具体线路参数如表

3所示。

表3 线路参数

Tab.3 Circuit parameters

参数类型	I 回线	II 回线
自阻抗/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.119 981+j0.664 752	0.126 983+j0.661 216
相间阻抗/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.085 648+j0.245 939	0.092 287+j0.242 481
自导纳/($\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$)	j0.256 835 E-05	j0.259 199 E-05
相间导纳/($\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$)	-j0.175 743 E-06	-j0.160 684 E-06
线间阻抗/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.088 948+j0.260 051	
线间导纳/($\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$)	-j0.290 442 E-06	

在PSCAD仿真过程中,采样频率10 MHz,设置在1 ms处发生故障,故障持续2个周波,提取故障后2 ms的数据,在Matlab中进行信号分解,找出故障初始行波到达时刻,计算故障位置。为了验证提出的VMD-HT算法的正确性,用HHT和三次B样条小波变换做对比。VMD分解参数设置为 $K=4, \alpha=2\ 000$ ^[18]。因篇幅限制,只展示I回线35 km处A相接地故障时HHT和VMD-HT算法的图形仿真结果,如图4和图5所示。

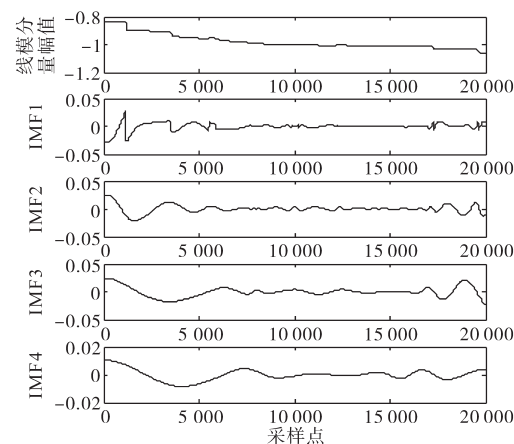


图4 EMD信号分解1

Fig.4 EMD signal decomposition 1

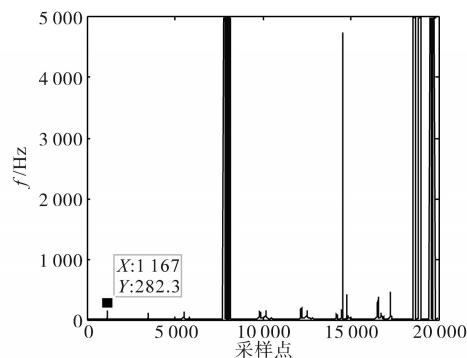


图5 HHT变换1

Fig.5 HHT transform 1

用同样的方法可以得到故障初始行波到达 N 端的采样点为2 169,采样点1 167和2 169对应的时间分别为1 116.7 μs 和1 216.9 μs ,根据式(10)

可以得出故障距离为34.97 km,误差为0.03 km。

图6和图7为VMD-HT变换的结果,同理得N端故障初始行波到达时刻的采样点为2 170,根据式(10)计算得到故障距离为34.985 km,误差为0.015 km。图8为三种算法的误差对比图。

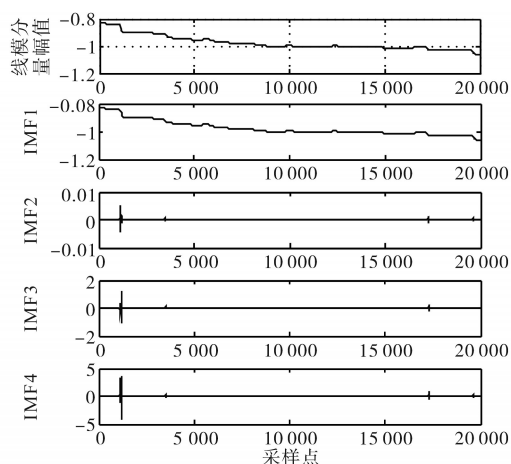


图6 VMD信号分解

Fig.6 VMD signal decomposition

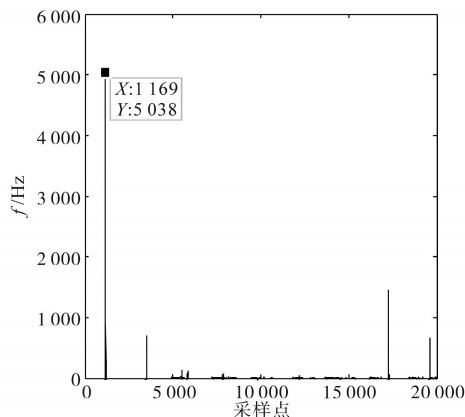


图7 VMD-HT变换

Fig.7 VMD-HT transform

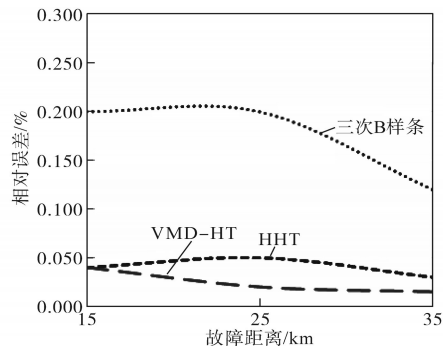


图8 三种算法误差对比图

Fig.8 Error comparison diagram of three algorithms

表4为不同故障类型和故障距离时三种算法的测距结果和误差,相对误差的公式为

$$e = \frac{|\text{故障距离} - \text{测距结果}|}{100} \times 100\% \quad (11)$$

表4 三种算法的测距结果

Tab.4 Ranging results of three algorithms

算法名称	故障距离/km	故障类型	M端采样点	N端采样点	测距结果/km	误差/km	相对误差e/%
三次B样条	15	I ABG	35	180	15.2	0.2	0.200
		I A II BG	35	180	15.2	0.2	0.200
	25	I ABG	55	160	24.8	-0.2	0.200
		I A II BG	55	160	24.8	-0.2	0.200
	35	I ABG	119	182	34.88	-0.12	0.120
		I A II BG	119	182	34.88	-0.12	0.120
HHT	15	I ABG	500	2 836	14.96	-0.04	0.040
		I A II BG	500	2 836	14.96	-0.04	0.040
	25	I ABG	834	2 504	24.95	-0.05	0.050
		I A II BG	834	2 504	24.95	-0.05	0.050
	35	I ABG	1 167	2 169	34.97	-0.03	0.030
		I A II BG	1 167	2 169	34.97	-0.03	0.030
VMD-HT	15	I ABG	501	2 837	14.96	-0.04	0.040
		I A II BG	501	2 837	14.96	-0.04	0.040
	25	I ABG	835	2 503	24.98	-0.02	0.020
		I A II BG	835	2 503	24.98	-0.02	0.020
	35	I ABG	1 169	2 170	34.985	-0.015	0.015
		I A II BG	1 169	2 170	34.985	-0.015	0.015

从表4可以看出,故障类型对行波测距没有影响,三次B样条小波包变换误差达到0.2 km,远远大于VMD-HT的测距误差。HHT算法测距误差达到0.05 km,虽在15 km处HHT和VMD-HT所测误差相等,但是据图8可以看出总体上HHT比VMD-HT误差大。从图5可以看出HHT变换存在干扰信号,而且在EMD分解过程中,若行波的极值点小于3个,就无法进行EMD分解,它本身是唯一的IMF分量,如图9所示,在进行HHT变换时,会出现图10所示的情况,无法检测出初始行波到达的时刻,这个问题可以通过增加采样点来解决,但是这样就增加了计算时间,而且寻找合适的采样点也是一个问题,增加了算法的复杂度。

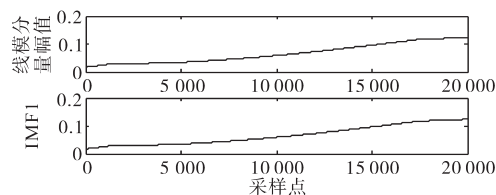


图9 EMD信号分解2

Fig.9 EMD signal decomposition 2

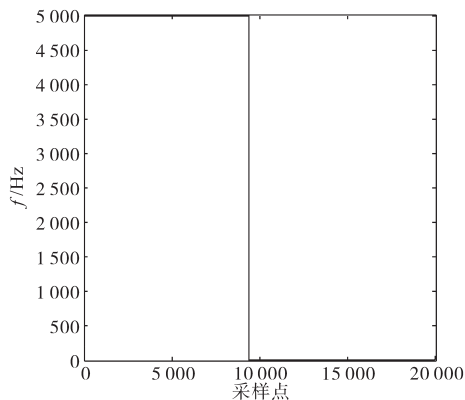


图10 HHT变换2

Fig.10 HHT transform 2

表5列出了I回线不同位置、不同过渡电阻情况下发生A相接地故障时,VMD-HT算法的测距结果和误差。表6列出了不同故障位置和故障类型算法的测距结果。根据两个表的数据可以发现,误差在允许的范围内,测距的结果不受过渡电阻的影响,与故障类型无关。

表5 不同过渡电阻时VMD-HT的测距结果

Tab.5 VMD-HT ranging results with different transition resistances

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	M端采样点	N端采样点	测距结果/km	误差/km
20	50	669	2 671	19.97	-0.03
	100	669	2 671	19.97	-0.03
	200	669	2 671	19.97	-0.03
40	50	1 335	2 002	39.995	-0.005
	100	1 335	2 002	39.995	-0.005
	200	1 335	2 002	39.995	-0.005
70	50	2 337	1 002	70.025	0.025
	100	2 337	1 002	70.025	0.025
	200	2 337	1 002	70.025	0.025

表6 不同故障类型时VMD-HT的测距结果

Tab.6 VMD-HT ranging results for different fault types

故障位置/km	故障类型	M端采样点	N端采样点	测距结果/km	误差/km
20	I AB	669	2 671	19.97	-0.03
	I ABCG	669	2 671	19.97	-0.03
	I A II BC	669	2 671	19.97	-0.03
	I AB II C	669	2 671	19.97	-0.03
40	I AB	1 335	2 002	39.995	-0.005
	I ABCG	1 335	2 002	39.995	-0.005
	I A II BC	1 335	2 002	39.995	-0.005
	I AB II C	1 335	2 002	39.995	-0.005
70	I AB	2 337	1 002	70.025	0.025
	I ABCG	2 337	1 002	70.025	0.025
	I A II BC	2 337	1 002	70.025	0.025
	I AB II C	2 337	1 002	70.025	0.025

将模型推广至参数不对称同塔四回线,采用文献[19]中的 M_3 矩阵对线路进行解耦。因篇幅限制,不再列出解耦过程。表7为参数不对称同塔四回线在不同故障距离、故障类型下的VMD-HT算法的测距结果,可以看出最大误差为0.05 km,测距效果较好。

表7 参数不对称同塔四回线测距结果

Tab.7 Ranging results of four-circuit transmission lines on the same tower with asymmetric parameters

故障位置/km	故障类型	M端采样点	N端采样点	测距结果/km	误差/km
10	I AG	339	3 009	9.95	-0.05
	I A II BCG	339	3 009	9.95	-0.05
	I AB II AB III AB IV ABG	339	3 009	9.95	-0.05
40	I AG	1 339	2 007	39.98	-0.02
	I A II BCG	1 339	2 007	39.98	-0.02
	I AB II AB III AB IV ABG	1 339	2 007	39.98	-0.02
70	I AG	2 337	1 007	69.95	-0.05
	I A II BCG	2 337	1 007	69.95	-0.05
	I AB II AB III AB IV ABG	2 337	1 007	69.95	-0.05

4 结论

传统双回线解耦大多针对参数对称的模型,且解耦得到的6个模分量传播特性差异较大。文中所采用的解耦方法,基于工程实际中参数不对称的模型,而且解耦后很容易选取特征模量,进行信号分解、行波波头检测,最后算出故障距离。

针对不对称参数同塔双回线行波测距的问题,文中所提的VMD-HT算法,模态分解能力强,噪声鲁棒性较好,消除了HHT中端点效应和模态混叠的影响,也不需要考虑小波变换基函数和分解尺度选择的问题,具有良好的自适应性。仿真表明,VMD-HT算法不受过渡电阻、故障类型、故障开始时刻等因素的影响,普适性强,不仅适用于同塔双回线行波测距,对于参数不对称的同塔四回线也有较好的测距效果。

参考文献

- [1] 孙子昌,邓迎君,陈昊,等. 同塔双回线路同名相跨线短路故障分析[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(4):154-159.
Sun Zichang, Deng Yingjun, Chen Hao, et al. Analysis of homogeneous phase cross-country faults of double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 154-159.
- [2] 朱柏寒,陈羽,马金杰. 基于波前陡度的输电线路单端行波故障测距[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):130-135.
Zhu Baihan, Chen Yu, Ma Jinjie. Wavefront steepness based single-end traveling wave fault location of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 130-135.

- gle-ended traveling wave fault location for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (9): 130-135.
- [3] 郑玉平, 司鑫尧, 吴通华, 等. 特高压半波长交流输电线路的行波保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 124-131.
- Zheng Yuping, Si Xinyao, Wu Tonghua, *et al.* Travelling wave protection of UHV half-wavelength AC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (18): 124-131.
- [4] 邓雯玲, 卢继平, 石家炜, 等. 基于双端非同步数据的混合线路故障测距方法[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1574-1580.
- Deng Wenling, Lu Jiping, Shi Jiawei, *et al.* A fault location method for hybrid lines based on two-terminal asynchronous data[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1574-1580.
- [5] 冯秋实, 陈剑云, 林鹏, 等. 基于连续小波变换的输电线路故障行波测距方法的研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(2): 40-44.
- Feng Qiushi, Chen Jianyun, Lin Peng, *et al.* The research of transmission line fault location method based on the continuous wavelet transform[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(2): 40-44.
- [6] 杨斌, 张翠娟, 江聪, 等. 加窗小波包变换及其在故障测距中的应用[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 245-250.
- Yang Bin, Zhang Cuijuan, Jiang Cong, *et al.* Windowed wavelet transform method and its application to fault location[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 245-250.
- [7] 廖晓辉, 赵肖健, 梁恒娜. 一种基于Hilbert-Huang变换的电力电缆故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 20-25.
- Liao Xiaohui, Zhao Xiaojian, Liang Hengna. A power cable fault location method based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 20-25.
- [8] 艾颖梅, 陈剑云, 何军娜, 等. 基于三端法的HHT行波故障测距研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(21): 11-16.
- Ai Yingmei, Chen Jianyun, He Junna, *et al.* HHT traveling wave fault location method based on the study of the three end method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(21): 11-16.
- [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] 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.
- [11] 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.
- [12] 范春菊, 舒巧俊. 序分量法在电力系统中的应用[J]. 电气电子教学学报, 2010, 32(5): 32-36, 46.
- Fan Chunju, Shu Qiaojun. Application of sequence component method in power system[J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 2010, 32(5): 32-36, 46.
- [13] 许侃, 范春菊, 许锦喜. 经过渡电阻短路接地故障的计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 44-51.
- Xu Kan, Fan Chunju, Xu Jinxi. Study on calculation methods of ground fault through transition resistance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 44-51.
- [14] 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(14): 57-60.
- Song Guobing, Li Sen, Kang Xiaoning, *et al.* A novel phase-mode transformation matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007(14): 57-60.
- [15] 束洪春, 刘振松, 彭仕欣. 耦合双回线路电弧故障测距的新相模变换方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 480-486.
- Shu Hongchun, Liu Zhensong, Peng Shixin. Locating arc faults on coupling two parallel transmission lines using the novel phase-model transformation[J]. High Voltage Technology, 2009, 35(3): 480-486.
- [16] 于仲安, 毕俊强, 郭培育, 等. 同塔四回输电线路故障选线新方案[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 127-132.
- Yu Zhongan, Bi Junqiang, Guo Peiyu, *et al.* New fault line selection scheme for four-circuit transmission lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 127-132.
- [17] 付华, 吴赛, 徐耀松, 等. 基于VMD与广义S变换的HVDC线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 125-133.
- Fu Hua, Wu Sai, Xu Yaosong, *et al.* HVDC line fault location based on VMD and generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 125-133.
- [18] 闫红艳, 高艳丰, 王继选, 等. 同杆双回线路行波故障测距的关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 120-128.
- Yan Hongyan, Gao Yanfeng, Wang Jixuan, *et al.* Research on key problems of traveling wave location of double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 120-128.
- [19] 于仲安, 丁雯苏, 陈璐, 等. 不对称参数同塔四回线行波测距[J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 77-83, 91.
- Yu Zhongan, Ding Wensu, Chen Lu, *et al.* Traveling wave fault location for four-parallel transmission lines on the same tower with asymmetric parameters[J]. Electrical Measurement & Instrument, 2022, 59(2): 77-83, 91.

收稿日期: 2021-04-02

修改稿日期: 2021-05-18