

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003288

基于 HHT 一化迭代的输电线路故障测距研究*

张安安¹ 周志通^{1,2} 曲广龙¹ 杨超¹ 庄景泰¹

(1. 西南石油大学 电气信息学院 成都 610500; 2. 大唐水电科学技术研究院有限公司 成都 610074)

摘要:针对目前行波测距法中波速测定精度差的不足和波头检测算法存在的缺陷,通过分析行波波速随频率的变化规律,推导出波速稳定时的频率区间范围,从而消除波速对测距结果的影响;在研究高压直流输电线路故障行波到达时刻与行波特定瞬时振幅关系的基础上,分析瞬时振幅影响行波测距的机理,提出一种基于瞬时振幅的输电线路故障测距方法,利用希尔伯特黄变换(HHT)一化迭代的方法形成高频电流故障信号的一化时幅图,依据一化时幅图确定波头时刻与该时刻特定的瞬时振幅,形成高压直流输电线路故障测距算法。MATLAB/Simulink 仿真结果表明,该方法的相对误差在 0.3% 以内,且该方法与 HHT 变换的定位方法相比,具有更高定位精度,基本不受故障距离、过渡电阻的影响。

关键词: 故障测距; 瞬时振幅; HHT 一化迭代; 输电线路; 高频电流故障信号

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Study on fault location of transmission line based on HHT iteration

Zhang Anan¹ Zhou Zhitong^{1,2} Qu Guanglong¹ Yang Chao¹ Zhuang Jingtai¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd, Chengdu 610074, China)

Abstract: Aiming at the deficiency of the measurement accuracy of the wave velocity in the current traveling wave ranging method and the defect of the detection algorithm of the wave head, by analyzing the changing law of traveling wave speed with frequency, the frequency range when the wave speed is stable is derived, so as to eliminate the influence of the wave velocity on the ranging result. On the basis of studying the relationship between the arrival time of the traveling wave of the high-voltage direct current (HVDC) transmission line fault and the specific instantaneous amplitude of the traveling wave, the mechanism of the instantaneous amplitude affecting the traveling wave location is analyzed, and a fault location method of the transmission line based on the instantaneous amplitude is proposed. The iterative method forms a time-amplitude diagram of the high-frequency current fault signal. According to the time-amplitude diagram, the wave head time and the specific instantaneous amplitude at that time are determined to form a HVDC transmission line fault location algorithm. MATLAB/Simulink simulation results show that the relative error of this method is within 0.3%, and compared with the positioning method of Hilbert Huang transform, this method has higher positioning accuracy and is basically not affected by fault distance and transition resistance.

Keywords: fault location; instantaneous amplitude; HHT one iteration; transmission line; high frequency current fault signal

0 引言

高压直流输电线路在长距离大容量输电方面具有较大优势,然而线路故障的出现将对输电系统的运行造成

巨大威胁,因此快速发现故障所处位置,迅速解除故障,对于维持输电系统的稳定具有重要意义^[1-4]。目前国内国外相关研究人员提出了多种输电线路的故障测距方法。而行波法凭借其原理简单、受外界因素干扰小的优点^[5-8],广泛应用在高压直流输电线路的故障测距中^[9-11]。

近年来,人们在分析单端、双端行波法^[12]原理的基础上,持续研究了输电线路的故障测距方法。相关专家提出一种将波速和波头时间统一的方法应用于高压直流输电线路的故障测距,并取得较好的定位效果^[13]。但总体来讲,行波测距法仍然存在行波波头难以识别、行波波速很难确定的问题^[14]。尤其是色散效应所引起的波速特性致使波速的确定一直未能得到很好解决。如果单纯的选择某一经验波速,而忽略频率特性对波速的影响会造成较大的测距误差^[15]。

现阶段,确定行波波头的方法主要有小波变换、数学形态学以及希尔伯特黄变换(Hilbert Huang transform, HHT)等奇异点检测技术^[16]。小波变换不具有自适应性^[17],且存在分解尺度难以选择与行波波头位移的问题,故很难对行波波头进行精确标定;数学形态学^[18]由于其结构的形状和大小难以作出选择,同时存在假频与虚假信号的问题,也难以得到较为理想结果;HHT能直接反应出信号的时频本质,适合分析非线性、非平稳的信号^[19],但HHT存在过包络、以及频率过高易产生波头误判点等问题,导致出现较大的测距误差。

针对目前行波法中波速测定精度差的不足和波头检测算法存在的缺陷,本文通过分析行波波速随频率的变化规律,推导出波速稳定时的频率区间范围,从而消除波速对测距结果的影响;在探究输电线路行波到达时刻与行波特定瞬时振幅关系的基础上,提出一种基于瞬时振幅的高压直流输电线路故障测距方法,并利用HHT一化迭代的方法形成测距算法。通过MATLAB/Simulink的多次测试,验证了该方法的有效性与准确性。

1 高压直流输电线路行波测距原理

高压直流输电系统如图1所示。点F发生故障时,产生不同频率的故障行波分量向两端进行传送,到达整流侧M,测量点P,以及逆变侧N。记故障发生时刻为 T_F ,设故障行波到达3个测量端的时刻分别为 T_M 、 T_P 、 T_N 。 D_{MF} 、 D_{FN} 分别为整流侧M到故障点F的距离与故障点F到逆变侧N的距离。 d 为整流侧M与测量点P之间的距离(d 可任意设置), L 为线路总长, v 为波速。

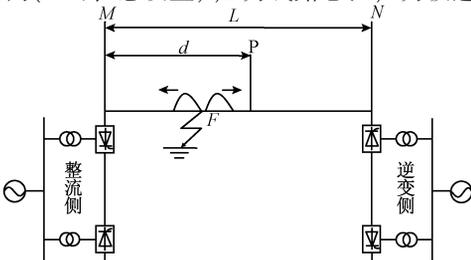


图1 高压直流输电系统

Fig.1 HVDC transmission system

当故障发生在MP之间时,由故障行波在PN段的传输时间 $\Delta t_{PN} = T_N - T_P$,则故障行波波速 $v = (L - d) / \Delta t_{PN}$ 。

同时建立等式如下:

$$\begin{cases} D_{MF} - D_{FN} = v \times (T_M - T_N) \\ D_{MF} + D_{FN} = L \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)推出故障行波测距计算式为:

$$D_{MF} = \frac{(L - d) \times (T_M - T_N)}{2 \times (T_N - T_P)} + \frac{L}{2} \quad (2)$$

当故障发生在PN之间,同理可求得故障行波测距计算式为:

$$D_{MF} = \frac{d \times (T_M - T_N)}{2 \times (T_M - T_P)} + \frac{L}{2} \quad (3)$$

1.1 行波波速特征分析

上述故障测距的过程实际上需满足波速为匀速时才能实现。然而实际应用中,行波波速并不是固定不变。在考虑线路参数的频率相关性^[20-21]时,波速计算公式如下:

$$v = \frac{w}{\sqrt{\frac{1}{2} [w^2 LC - RG + \sqrt{(R^2 + w^2 L^2)(G^2 + w^2 C^2)}]}} \quad (4)$$

式中: C 、 R 、 L 、 G 分别表示单位长度线路的电容、电阻、电感、电导; w 为角频率。

由式(4)可知计算波速,需确定线路的参数,以及角频率。由于不同的条件下频率差异较大,同时受运行条件以及气候等的影响,导致波速随频率的变化而发生改变。如果单纯地选取某一频率下的波速用于故障测距计算,而不考虑频率对波速的影响,则会导致较大的测距误差。

在考虑频率相关性时,由于集肤效应与邻近效应的影响, R 、 L 会随着频率的变化而改变,将 R 、 L 近似表示如下^[22-23]:

$$R \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{u_0 w}{2}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (5)$$

$$L \approx \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2u_0}{w}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) + \frac{u_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} \quad (6)$$

式中: $w = 2\pi f$ 为角频率, f 为频率; ρ_c 、 ρ_s 为输电线的线芯电导率与屏蔽层电导率; r_c 、 r_s 为输电线的线芯半径与屏蔽层内半径; u_0 为真空中的磁导率。

令:

$$R = k_1 \sqrt{w}, k_1 = \frac{\sqrt{2u_0}}{4\pi} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (7)$$

$$L = \frac{k_1}{\sqrt{w}} + k_2, k_2 = \frac{u_0}{2\pi} \ln \left(\frac{r_s}{r_c} \right)$$

由式(4)~(7)将波速化简如下:

$$v = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{Ck_1}{\sqrt{w}} + Ck_2 - \frac{k_1 G}{w^{\frac{3}{2}}} + \sqrt{\left(\frac{2k_1^2}{w^3} + \frac{2k_1 k_2}{w^{\frac{5}{2}}} + \frac{k_2^2}{w^2}\right) \left(\frac{G^2}{w^4} + \frac{C^2}{w^2}\right)}}}$$

(8)

当 w 趋近于无穷,即 f 较大时, v 表示为:

$$v = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{Ck_2}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{Cu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_s}{r_c}\right)}}$$

(9)

由式(9)可知,当 f 较大时,波速 v 逐渐趋近于稳定,并且最终稳定后的波速只与影响输电线路自身特性的单位长度线路电容 C 、屏蔽层内半径 r_s 、线芯半径 r_c ,以及真空的磁导率 u_0 相关,而与其他因素无关。

波速 v 随频率的变化情况如图 2 所示。在低频阶段,波速随频率的增加而增大,当频率增大至某一临界值 f_m 时,随着频率增加,波速几乎不再发生变化。文献[24]提出当频率范围为 10 kHz~1 MHz 时,可认为行波波速固定,结合图 2 可知,必有 $f_m \leq 10$ kHz,从而进一步推出行波波速稳定时的频率区间范围为 $[10$ kHz, $+\infty]$,在此较高频率的范围内,行波波速变化较小,可视为波速不变,此时利用本文提出的故障测距方法即可消除波速对测距结果的影响。

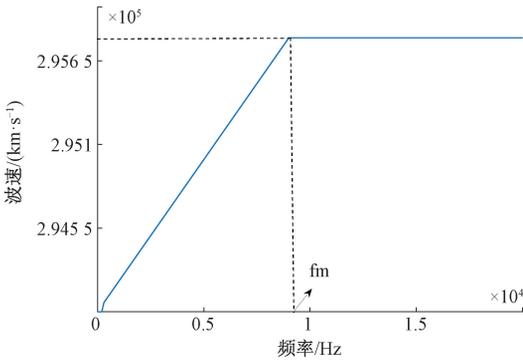


图 2 波速随频率的变化

Fig. 2 The variation of wave velocity with frequency

2 HHT 一化迭代的波头标定方法

HHT 由经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 和希尔伯特变换 (Hilbert transform, HT) 两部分组成。EMD 将信号分解成多个由高频至低频排列的固有模态函数 (intrinsic mode function, IMF)。HT 是对信号进行解析分析,获取信号的瞬时频率、幅值等相关信息。然而对于频率较高的高频故障信号,利用 HHT 对故障信号处理得到的瞬时振幅图 (简称“时幅图”)中,易出现较多成份的波头误判点,从而导致行波波头的标定

失败,最终出现较大的测距误差。本文提出一种基于 HHT 一化迭代的波头标定方法,将高频故障信号分别进行 HHT 变换与一化迭代后,可实现波头的精确标定。

2.1 一化迭代

一化迭代是先对信号归一化处理,得到幅值范围在 $(0, 1]$ 之间的首个一化分量,记为 $y(x)$,再对得到的 $y(x)$ 做多次重复的 k 阶迭代,从而得到第 k 个一化分量,记为 $Z(k)$,如下:

$$Z(k) = y^k(x) \begin{cases} y(x) = 1, k = 1, 2, 3, 4, \dots \\ 0 < y(x) < 1, k = 1, 2, 3, 4, \dots \end{cases}$$

(10)

式中: $y(x)$ 为首个一化分量, k 为迭代阶数, $Z(k)$ 为 $y(x)$ 经 k 阶迭代后的一化分量。

当 k 增大到某一临界值 k_m 时,在所得到的 $Z(k)$ 中,幅值处于 $(0, 1)$ 的分量经多次迭代后趋近于 0,而幅值为 1 的分量经多次迭代后,仍保持原有幅值不变为 1。 $Z(k)$ 最终表达式如下:

$$Z(k) = \begin{cases} 1, y(x) = 1 \text{ 且 } k = k_m \\ 0, 0 < y(x) < 1 \text{ 且 } k = k_m \end{cases}$$

(11)

高频故障信号经 HHT 后得到瞬时振幅,对瞬时振幅进行一化迭代处理得到相应的 $Z(k)$,从而绘制出一化时幅图。

2.2 初始行波波头的标定

故障行波中常常包含多个频段的分量,通常将行波波头中某一高频分量抵达测量点的时间视为行波波头的到达时间。故障信号经 HHT 一化迭代处理后,得到相应的“一化时幅图”,在一化时幅图中,行波波头将表现出唯一突变,突变点即标志着故障行波首次到达测量端的时间。

图 3、4 所示分别为高频故障信号的线模电流与线模电流经 HHT 和一化迭代处理后的时幅图。

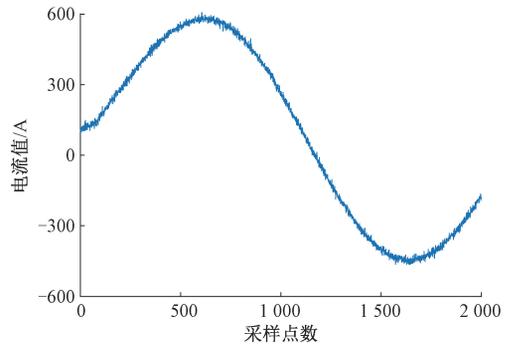


图 3 高频线模电流

Fig. 3 High frequency line mode current

如图 4 所示, $k=1$ 时的一化时幅图中存在一定成份的波头误判点,从而给波头的确定带来困难。而随着迭代阶数 k 的增加,误判点逐渐消失,波头也更加明显,当

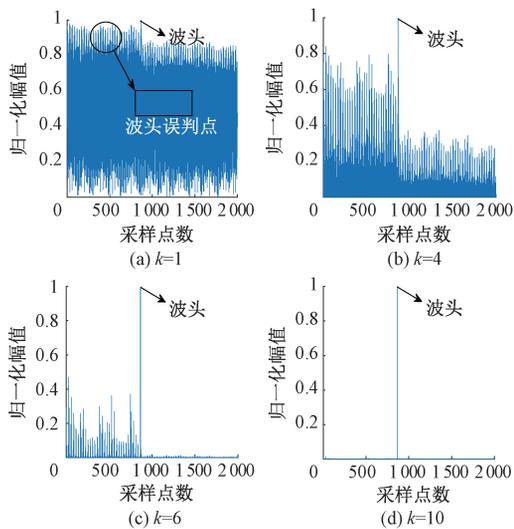


图 4 HHT 一化迭代后的时幅图

Fig. 4 The time frame after HHT iteration

迭代阶数 k 增加至 10 时,只剩下唯一的行波波头,此时波头对应的时间即为故障信号首次抵达测量端的时间。由于迭代后的波头不会发生位移,因此通过此方法可对行波波头进行准确标定。

3 HHT 一化迭代的故障测距算法

将 HHT 一化迭代的方法应用于高压直流输电线路的故障测距式(2)、(3),形成如下测距算法。

1) 线路发生故障过后,整流侧 M ,逆变侧 N ,测量点 P 的测距装置将检测线路上的高频故障电压信号与电流信号(本文以高频电流信号为例)。

2) 输电系统各极之间存在电磁互感,可能出现混叠现象,故需要对采集的信号进行解耦,本文采用克拉克变换(Clarke)对采集到的高频电流信号进行解耦得到线模、零模分量。由于线模分量更加稳定,故采用高频电流线模分量进行分析。

3) 对高频电流线模分量分别进行 HHT 变换和一化迭代,确定迭代阶数 k ,求得一化时幅图。

4) 由一化时幅图中的突变点,确定故障行波到达整流侧 M ,逆变侧 N ,以及测量点 P 的时间。

5) 将确定的 3 个测量端的时间代入推导的测距式(2)、(3),计算出故障距离。

算法流程如图 5 所示。

4 仿真分析

4.1 仿真模型

本文利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建图 1 所

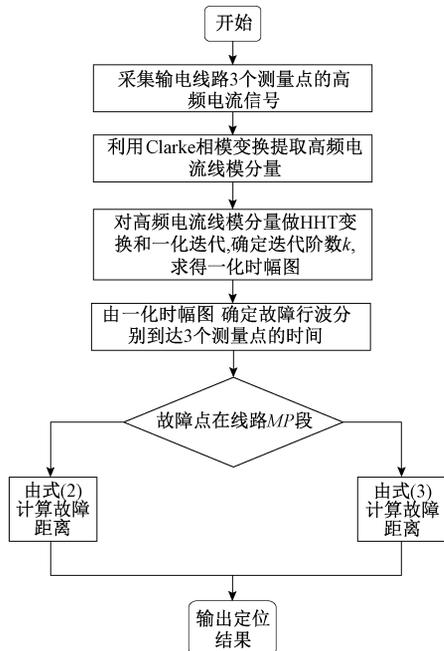


图 5 算法流程

Fig. 5 Algorithm flowchart

示的双极十二脉高压直流输电模型,利用该模型模拟高频条件下的多种故障情况。并在频率范围为 $[10 \text{ kHz}, +\infty]$ 的区间内对本文提出的测距算法进行验证。

仿真参数如下:电源电压等级为 230 kV,仿真时间为 0~0.2 s, MP 之间的定长为 $d = 400 \text{ km}$,线路全长 1 200 km。故障点设置在距离整流侧 100、300、500、700、1 000 km 处且过渡电阻分别为 5、260 Ω 两种情形。并在 0.08 s 时刻发生故障。(采样周期 10^{-5} s)。

4.2 仿真测试及其结果分析

实际工程中,由于单极接地故障发生的概率较高。则本文以距离整流侧 M 端 300 km,过渡电阻为 260 Ω 、频率为 20 kHz、故障类型为单极接地故障为例进行分析。其中用于 HHT 一化迭代分解的高频电流线模分量是通过选取故障发生后各测量点 1/10 周波的高频电流信号经 Clarke 变换得到。图 6 所示为整流侧 M ,测量点 P ,以及逆变侧 N 的波头突变点所在的位置,分别位于第 261 个采样点,第 87 个采样点,以及第 785 个采样点,对应的迭代阶数 k 分别为 $k_1 = 10, k_2 = 11, k_3 = 12$ 。

由故障测距公式(式(2))计算故障距离:

$$D_{MF} = \frac{(L - d) \times (T_M - T_N)}{2 \times (T_N - T_P)} + \frac{L}{2} = 600 + 400 \times \frac{T_M - T_N}{T_N - T_P} = 600 + 400 \times \frac{(261 - 785) \times 10^{-5}}{(785 - 87) \times 10^{-5}} = 299.713 \text{ km}$$

相对误差 0.10%,绝对误差 0.287 km。

为探究算法稳定性与准确性,本文在频率为 21 kHz,极间短路故障的条件下进行不同故障距离、过渡电阻实

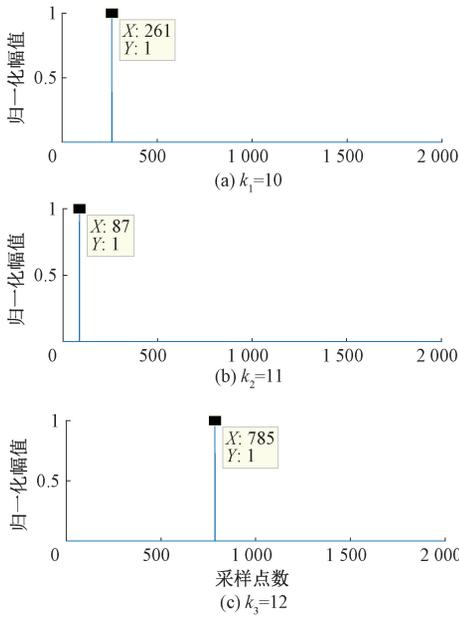


图 6 三个测量端的一化时幅图

Fig. 6 One-time frame of three measuring terminals

验,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,测量值相对误差最大值为 0.29%,最小值为 0.04%;绝对误差最小值为 -0.287 km,最大值为 0.287 km。在不同的故障距离、过渡电阻条件下,本文提出的算法具有较高的测量精度,相对误差在 0.3% 以内,绝对误差在 0.3 km 的范围内。并且测量精度受故障距离、过渡电阻的影响较小。

4.3 不同算法定位效果对比

为对不同算法的检测效果进行对比,本文分别采用 HHT 一化迭代和 HHT 的两种算法对过渡电阻 5 Ω、频率 21 kHz 的单极接地故障情况进行实验。结果如表 2 所示。

在确定故障波头首次抵达测量点的时刻时,HHT 采用 IMF1 的时幅图中的首个突变点进行确定,本文提出的将 HHT 一化迭代的算法则利用一化时幅图的唯一突变点进行判断。结合表 1、2 可知,两种故障测距算法的差别主要来自它们对各自波头突变点的反应速度不同,从而导致行波波头响应时间的不同。而本文提出的故障测

表 1 不同故障距离、过渡电阻的测距结果

Table 1 The ranging results of different fault distances and transition resistances

故障距离/km	过渡电阻/Ω	整流侧波头	测量点 P	逆变侧波头	计算距离/km	相对误差/%	绝对误差/km
		采样点	波头采样点	采样点			
100	5	88	262	959	100.143	0.14	0.143
	260	87	261	959	100.287	0.29	0.287
300	5	263	88	786	300.287	0.10	0.287
	260	261	87	785	299.713	0.10	-0.287
500	5	437	88	612	499.713	0.06	-0.287
	260	436	87	611	499.713	0.06	-0.287
700	5	609	260	435	699.713	0.04	-0.287
	260	608	259	433	700.287	0.04	0.287

表 2 两种方法的测距结果对比

Table 2 The results of the two methods are compared

故障距离/km	HHT 一化迭代	相对误差/%	HHT 定位	相对误差/%
	定位结果/km		结果/km	
100	100.143	0.14	101.001	1.00
300	300.287	0.10	299.246	0.25
500	499.713	0.06	502.681	0.54
700	699.713	0.04	689.453	1.51
1 000	1 000.235	0.02	989.631	1.04

距算法相比 HHT 测距算法而言,波头反应更灵敏,定位精度更高。

4.4 最佳迭代阶数的选择

迭代阶数 k 直接影响着波头标定的准确度与测距的精度。k 值过小,易出现误判点,波头突变也极不明显;k 值过大,Z(k) 收敛速度缓慢,不利于波头的确定。

为迅速找到 k 的最佳迭代阶数,定义如下所示的变

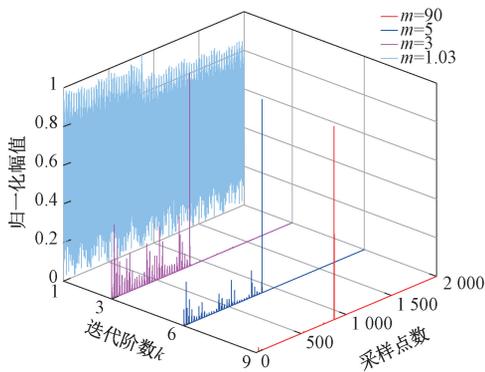
量 m。

$$m = \frac{A_{\max 1}}{A_{\max 2}} \tag{12}$$

式中: $A_{\max 1}$ 为一化时幅图中的最大幅值; $A_{\max 2}$ 为一化时幅图中的次最大幅值。

大量实验表明,当迭代阶数 k 增加至某一定值 k_m 并满足 $m \approx 90$ 时,如图 7 所示,由于该条件下的波头突变明显,Z(k) 收敛速度相对较快,故可将此时的 k_m 视为该频率下的最佳迭代阶数。

为探索不同频率下 k_m 的变化情况,本文在故障距离为 100 km,频率范围为 [10 kHz, 30 kHz],过渡电阻为 5 Ω 的单极接地故障条件下进行实验。图 8 所示为 3 个测量端对应的最佳阶数曲线图。频率初期,由于误判点的波动幅度较小,各测量端的最佳迭代阶数相对较低且基本都保持不变;频率在 13 kHz 后,随着误判点波动幅度的增大,整流侧与逆变侧的最佳迭代阶数同步递增,测

图 7 不同 m 下的一化时幅图Fig. 7 The normalized time picture under different m

量点 P 的最佳迭代阶数递增变化相对迟缓;之后 3 个测量端的最佳迭代阶数变化趋势基本一致,都随着频率的增加而增大并最终趋于稳定,但测量点 P 最先达到稳定,整流侧其次,逆变侧最后。

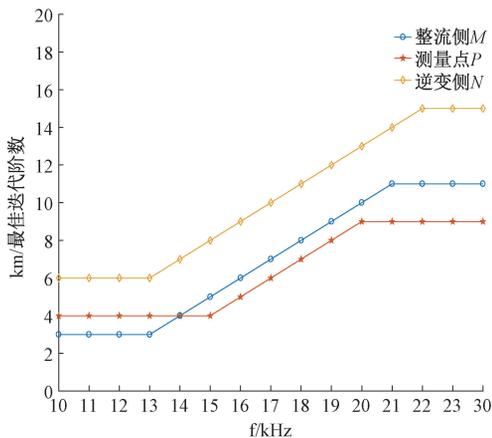


图 8 三个测量端的最佳阶数曲线

Fig. 8 The optimal order curve of three measuring terminals

5 结论

本文提出一种基于瞬时振幅的高压直流输电线路故障测距新方法,解决传统行波法中,波速难以计算,波头确定不准等问题。针对行波波速易受频率影响导致测距结果不准的问题。本文通过分析行波波速随频率的变化规律,推导出波速稳定时的计算式,结果表明,波速稳定时只与影响输电线路自身特性的单位长度线路电容 C 、屏蔽层内半径 r_s 、线芯半径 r_c 以及真空的磁导率 μ_0 相关,而与其它因素无关;同时本文推广了波速保持稳定时的频率区间范围为 $[10 \text{ kHz}, +\infty]$,在该频率范围内进行故障测距,可消除波速对测距结果的影响。针对波头检测常用的小波变换法的分解尺度难以选择和波头位移,以及希尔伯特黄变换法存在过

包络、频率过高易产生波头误判点等问题。本文提出一种基于 HHT 一化迭代的波头标定方法,能够实现波头的精确标定,并利用最佳迭代阶数消除误判点对波头标定的影响,提高了定位算法的效率。MATLAB/Simulink 仿真结果表明,本文所提出的方法相对误差在 0.3% 以内,绝对误差在 0.3 km 的范围内,几乎不受故障距离、过渡电阻的影响。

参考文献

- [1] 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 X H, ZHAO X J, LIANG H N. A power cable fault location method based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3):20-25.
- [2] 黄元亮, 郝真真, 姜甜甜. 一种新的输电线路双端行波故障定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 20-29.
HUANG Y L, HAO ZH ZH, JIANG T T, et al. Novel two-terminal travelling wave fault location algorithm for transmission line[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(1): 20-29.
- [3] 郝勇奇, 王倩, 周士琼, 等. 基于 LMD 与 Teager 能量算子的 VSC-HVDC 输电线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 81-88.
HAO Y Q, WANG Q, ZHOU SH Q, et al. Fault location for VSC-HVDC transmission lines based on LMD and Teager energy operator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 81-88.
- [4] 刘顺桂, 李勋, 张宏钊, 等. 一种采用时间判别法的混合线路故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 41-46.
LIU SH G, LI X, ZHANG H ZH, et al. A traveling wave fault location method of hybrid line using time discrimination[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 41-46.
- [5] ZOU G B, HUANG Q, SONG SH L, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168.
- [6] LI Y L, ZHANG S, LI H B, et al. A fault location method based on genetic algorithm for HVDC transmission line [J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(6): 866-878.
- [7] 王奎鑫, 祝成, 孙佳佳, 等. 输电线路组合行波测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 82-88.
WANG K X, ZHU CH, SUN J J, et al. Research of

- combined traveling wave's fault location method on transmission lines [J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(15): 82-88.
- [8] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(8):172-178.
- JI T. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(8): 172-178.
- [9] 宋国兵,李德坤,靳东晖,等. 利用行波电压分布特征的柔性直流输电线路单端故障定位[J]. *电力系统自动化*,2013,37(15):83-88.
- SONG G B, LI D K, JIN D H, et al. One-terminal fault location for HVDC flexible transmission lines based on wave voltage distribution features [J]. *Automation of Electric Power Systems*,2013,37(15):83-88.
- [10] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. *电力系统保护与控制*,2012, 40(5):133-137.
- SONG G B, CAI X L, GAO SH P, et al. Survey of fault location research for HVDC transmission lines[J]. *Power System Protection and Control*,2012,40(5):133-137.
- [11] SUONAN J, GAO S P, SONG G B, et al. A novel fault-location method for HVDC transmission lines [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25 (2): 1203-1209.
- [12] 许小雪,刘建锋,江玉蓉. 基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(22): 32-39.
- XU X X, LIU J F, JIANG Y R. HVDC transmission line protection based on single-ended transient current using multiband energy [J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(22): 32-39.
- [13] 段建东,刘静,陆海龙,等. 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 J D, LIU J, LU H L, et al. Fault location method based on traveling-wave instantaneous frequency for HVDC transmission lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(7): 1842-1848.
- [14] 何军娜,陈剑云,艾颖梅,等. 电力系统行波测距方法及其发展[J]. *电力系统保护与控制*, 2014(24): 148-154.
- HE J N, CHEN J Y, AI Y M, et al. Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development [J]. *Power System Protection and Control*, 2014(24):148-154.
- [15] 张怿宁,徐敏,刘永浩,等. 考虑波速变化特性的直流输电线路行波故障测距新算法[J]. *南方电网技术*, 2011,35(7):227-232.
- ZHANG Y N, XU M, LIU Y H, et al. A novel travelling wave fault location algorithm for HVDC transmission lines considering variation characteristics of wave speed [J]. *Power System Technology*, 2011, 35(7): 227-232.
- [16] 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 T, SHI X X, LIU X, et al. Simulation study of fault location algorithm for HVDC transmission based on hilbert-huang transform [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18 (4): 279-285.
- [17] MALICKI P, PAPPENHEIM S, KIZILCAY M. Shielding failure analysis of a hybrid transmission line with AC and DC systems on the same tower [J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 159:2-8.
- [18] 徐俊明,汪芳宗,尹星,等. 基于 Hilbert-Huang 变换的行波法高压输电线路故障定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(2):88-92.
- XU J M, WANG F Z, YIN X, et al. A traveling wave fault location method for high voltage power transmission lines based on Hilbert-Huang transform [J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(2): 88-92.
- [19] 侯国强,李思兰. 基于 HHT 的小电流接地故障定位原理[J]. *自动化技术与应用*, 2016(2):91-95.
- HOU G Q, LI S L. Small current grounding fault location principle based on HHT [J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2016(2): 91-95.
- [20] AUTH J, HENNIGER U, KEIPER R. Artificial neural network-based fault distance locator for double-circuit transmission lines [J]. *Advances in Artificial Intelligence*, 2013(66):219-220.
- [21] 成乐祥. 输电线路行波测距的新方法研究[D]. 南京:东南大学,2010.
- CHENG L X. Study on a new method of transmission line traveling wave ranging [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [22] 谢敏,周凯,赵世林,等. 新型基于反射系数谱的电力电缆局部缺陷定位方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(9): 3083-3089.
- XIE M, ZHOU K, ZHAO SH L, et al. A new location method of local defects in power cables based on reflection coefficient spectrum [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(9): 3083-3089.
- [23] 周志强. 基于宽频阻抗谱的电缆局部缺陷诊断方法研

究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.

ZHOU ZH Q. Study on local defect diagnosis of cable based on broadband impedance spectrum[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.

[24] 李泽文, 曾祥君, 徐晓菁, 等. 输电线路双端行波故障定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 40-43.

LI Z W, ZENG X J, XU X J, et al. New fault location algorithm based on double terminal traveling waves for transmission lines [J]. Automation of Electric Power

Systems, 2006, 30(15): 40-43.

作者简介



张安安,2010年于四川大学获得博士学位,现为西南石油大学教授,主要研究方向为综合能源系统研究。

E-mail:2564764@qq.com

Zhang Anan received Ph. D. from Sichuan University in 2010. He is currently a professor in Southwest Petroleum University. The main research direction is integrated energy system research.