

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200326

基于波速补偿故障距离逐步逼近的直流线路行波测距方法

段宽¹, 樊艳芳¹, 王永进², 罗瑞³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 国网河北邯郸武安供电公司, 河北 邯郸 056300)

摘要: 为解决小波变换奇异点检测技术应用于直流线路行波测距时对行波波头标定存在的适应性问题以及行波波头到达时刻与行波波速难以有机统一的问题, 提出改进方案。对于行波波头的标定, 采用对不同故障信号具有完全自适应分解能力的改进的希尔伯特-黄变换, 利用高频突变的峰值频点标定行波波头。对于行波波头到达时刻与行波波速难以有机统一的问题, 提出利用牛顿插值算法对波速逐次进行补偿。将每次补偿后的波速代入考虑波速变化的测距公式, 当测距结果的收敛精度满足设定收敛条件后算法循环终止, 得到逐步逼近真实故障距离的测距结果。在 PSCAD 中进行故障仿真, 在 Matlab 中进行数据计算。结果表明, 该测距方法精度高, 鲁棒性强, 具有一定的抗过渡电阻能力, 适用于各类常见故障类型。

关键词: 特高压直流; 行波测距; 改进的希尔伯特-黄; 波速补偿; 故障距离逼真

A traveling wave ranging method for a DC line based on wave velocity compensation and fault distance approaching its real value gradually

DUAN Kuan¹, FAN Yanfang¹, WANG Yongjin², LUO Rui³

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. State Grid Urumqi Power Supply Company, Urumqi 830011, China; 3. State Grid Wu'an Power Supply Company, Handan 056300, China)

Abstract: This paper looks at the problem of adaptability to the calibration of a traveling wave head, when wavelet transform singular point detection technology is applied to traveling wave ranging of DC lines. It also considers the difficulty of unifying organically the arrival time of the traveling wave head its velocity. An improved scheme is proposed. For the calibration of the traveling wave head, an improved Hilbert-Huang transform with full adaptive decomposition capability for different fault signals is used, and the traveling wave head is calibrated using the peak frequency point of high-frequency abrupt change. To unify organically the arrival time of a traveling wave head and its velocity, we propose the use of a Newton interpolation algorithm to compensate for the wave velocity one by one, and substitute the wave velocity after each compensation into the ranging formula considering the change of wave velocity. When the convergence accuracy of the ranging result meets the set convergence condition, the algorithm loop is terminated, and the ranging result gradually approximates the true fault distance. We perform fault simulation in PSCAD and the calculation of fault data in Matlab. The results show that the ranging method has high accuracy, strong robustness, and a certain resistance to transition resistance, and is suitable for various common fault types.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51767023) and the 2017 Natural Science Foundation of the Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2017D01C028).

Key words: UHVDC; traveling wave ranging; improved Hilbert-Huang; wave speed compensation; realistic fault distance approaching

0 引言

目前, 对直流输电线路故障测距的理论研究从时间、频率、空间三个角度出发, 可分为行波法、

固有频率法和故障分析法。工程实践的应用证明, 在故障测距领域逐渐形成了以行波法为主, 固有频率和故障分析法协助提高测距精度为辅的发展趋势^[1-6]。

行波法按其原理不同, 可分为单端法、双端法和三端法。文献[7]利用故障初始行波、故障点反射波和对端母线反射波三个行波的到达时刻与故障距

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51767023); 2017年度新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2017D01C028)

离间的约束关系, 从公式推导入手消除了对固定经验波速的主观选择。但在高阻接地故障时, 可能导致反射波波头幅值过小而无法捕捉, 从而导致测距失败。文献[8]首次提出对于合适分辨率的测距装置, 行波波速为故障距离的一元函数, 是后续改进行波测距的理论基础。基于此结论, 文中提出了一种考虑波速变化特性的行波测距新算法。文献[9]首先提取行波到达时刻所对应的瞬时频率, 进而利用波速与频率函数关系求取该频率下波速, 最后利用此波速进行故障测距。该方法需实时检测行波波头的到达时刻所对应的瞬时频率, 因此对测距装置的采样频率要求较高。文献[10]提出全线安装以 Rogowski 线圈为核心的行波检测单元, 故障发生后, 利用与故障点最邻近的 3 个检测点处的信息进行故障测距, 以此来消除行波在线路传播时的色散效应对波速的影响。该方法需要全线安装行波检测单元, 工程实现较为困难。文献[11-12]从测距算法角度入手, 利用神经网络智能算法实现故障测距。该方法测距精度依赖于训练集中包含的故障特征信息是否全面丰富, 训练集构建工作量较大。文献[13]通过在线路中点增加一个检测点, 故障发生后利用三端处的故障信息进行故障测距。在消除波速的同时, 增加了工程投资成本。文献[14]详细介绍了小波变换在输电线路行波故障测距中的应用, 但在小波分解时, 受小波基与分解尺度的限制, 对不同故障信号的分解存在难以自适应的问题。文献[15]提出利用数学形态学理论进行行波信号突变点的检测, 而不同结构元素对信号处理结果的影响较大。文献[16]提出利用数学形态学进行行波波头的标定, 比小波变换具有运算快、对信号幅值衰减小等优点, 但数学形态学依然不能摆脱其自身的固有缺点。

本文从消除选择固定经验波速影响的角度出发,

$$\alpha(\omega) = \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(R_0(\omega)G_0(\omega) + \omega^2 L_0(\omega)C_0(\omega))^2 + \omega^2 (L_0(\omega)G_0(\omega) - R_0(\omega)C_0(\omega))} + (R_0(\omega)G_0(\omega) + \omega^2 L_0(\omega)C_0(\omega))}{(R_0(\omega)G_0(\omega) + \omega^2 L_0(\omega)C_0(\omega))} \right] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$$\beta(\omega) = \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{(R_0(\omega)G_0(\omega) + \omega^2 L_0(\omega)C_0(\omega))^2 + \omega^2 (L_0(\omega)G_0(\omega) - R_0(\omega)C_0(\omega))} - (R_0(\omega)G_0(\omega) + \omega^2 L_0(\omega)C_0(\omega))}{(R_0(\omega)G_0(\omega) + \omega^2 L_0(\omega)C_0(\omega))} \right] \right\}^{1/2}$$

由于输电线路和大地在某一频率分量的电磁场作用下具有集肤效应, $R_0(\omega)$ 和 $L_0(\omega)$ 将随频率变化而变化, 而 $G_0(\omega)$ 和 $C_0(\omega)$ 几乎不受频率的影响。

电压行波等相位面运动方程为

$$\omega t \pm \beta(\omega)x = C \quad (3)$$

式中: C 为常数; ω 代表该频率分量的角频率, 与物理频率 f 的关系为 $\omega = 2\pi f$ 。将式(3)两端对时间

提出考虑波速变化的双端行波测距公式; 从消除变波速对行波测距精度的影响角度出发, 提出利用牛顿插值算法对波速进行补偿; 从行波波头标定方法的适应性角度出发, 提出利用改进的希尔伯特-黄算法进行波头的标定。利用 PSCAD 仿真平台搭建特高压直流输电系统进行故障仿真, 提取故障信息, 在 Matlab 中进行数据计算, 验证了所提方法的有效性。

1 行波波速变化特性分析

直流输电线路的长度一般在 1 500 km 左右, 故障行波在线路上的传播时间可达数毫秒, 需将直流线路作为传输线考虑。此外, 直流线路参数可近似为沿线均匀分布, 因此可将直流输电线路等效为均匀传输线^[17-18]。图 1 给出无限长均匀传输的分布参数模型。图中 dx 代表传输线微元, R_0 、 L_0 、 G_0 和 C_0 分别代表线路的单位长度电阻、电感、电导和电容。

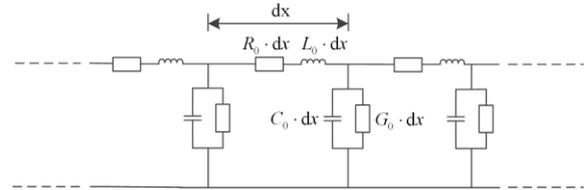


图 1 长距离输电线路分布参数微元等效图

Fig. 1 Microelement equivalent diagram of distributed parameters of long distance transmission lines

由文献[19-20]可知, 在某单一频率激励源作用下, 电压沿线分布的时域表达式为

$$u(x, t) = F_1(\omega)e^{-\alpha(\omega)x} \cos[\omega t - \beta(\omega)x] + F_2(\omega)e^{\alpha(\omega)x} \cos[\omega t + \beta(\omega)x] \quad (1)$$

式中: $F_1(\omega)$ 、 $F_2(\omega)$ 是由边界条件决定的系数; $\alpha(\omega)$ 、 $\beta(\omega)$ 分别代表行波衰减系数和行波相位畸变系数, 表达式如式(2)所示。

求导, 可得电压行波波速表达式。

$$v(\omega) = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\beta(\omega)} \quad (4)$$

由式(2)、式(4)可知, 不同频率分量的行波波速不同, 且频率越高波速越快。当直流线路发生故障后, 故障点会产生故障阶跃波, 阶跃信号包含从 0 到无穷的频率分量, 频率越高的分量其幅值越小。

故障行波在沿线路传播过程中受到线路对行波色散效应的影响,使得各频率分量之间发生相位偏移,各频率分量幅值发生衰减,其结果表现为波头形状的畸变,波头前沿由高频分量构成,波尾部分同时含有高低频分量。若不考虑实际工程中行波检测装置的幅值分辨率限制,则波头前沿的最高频分量的波速决定了该故障行波的波速,此时行波波速等于光速。然而,实际工程中行波检测装置的幅值分辨率总是有限的,不可能检测到无限小的信号。当在线路远端及高阻接地故障时,行波受到的幅值衰减作用增强,此时可能导致波头前沿的最高频分量行波的幅值小于行波检测装置的幅值分辨率,从而故障行波的波速由次高频分量行波的波速决定。实际波速示意图如图 2 所示。

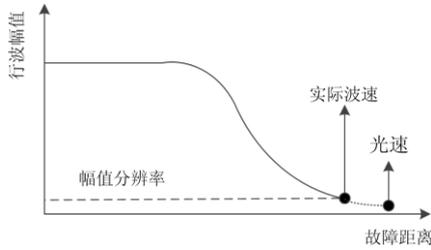


图 2 实际波速示意图

Fig. 2 Schematic diagram of actual wave speed

图 3 所示为在距整流侧 100 km、300 km、600 km、800 km、1 200 km、1 400 km 处分别经 0 Ω、100 Ω、300 Ω 过渡电阻接地的单极接地故障情况下波速变化的曲线示意图。由图 3 可知,在线路全长范围内任意一故障点处,当过渡电阻由 0 Ω 变为 100 Ω、300 Ω 时,由过渡电阻引起的行波波速变化范围均较小,此变化程度与同一过渡电阻不同故障距离下引起的波速变化范围相比可近似忽略,即可将实际行波速度近似视为故障距离的一元函数,即 $v = v(l)$ 。(基于此结论,本文提出对波速进行补偿的双端行波测距方法,见 3.2 与 3.3 节介绍)。

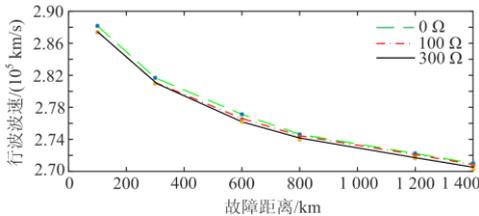


图 3 波速随故障距离及过渡电阻变化曲线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wave speed as a function of fault distance and transition resistance

2 变波速对传统双端测距的影响机理分析

图 4 所示为传统双端行波测距原理图。

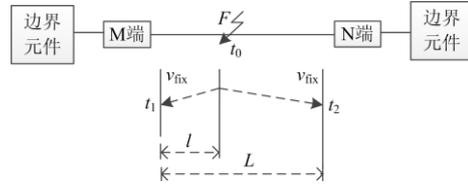


图 4 传统双端行波测距原理图

Fig. 4 Traditional double-ended traveling wave ranging principle diagram

图中, t_0 代表故障发生时刻, t_1 、 t_2 分别为行波到达整流站和逆变站的时刻, l 为真实故障距离, L 为输电线路全长, v_{fix} 为固定经验波速,根据工程运行经验,一般取 94% 左右的光速。

由图 4 可得传统双端行波测距公式为

$$\begin{cases} l = v_{\text{fix}}(t_1 - t_0) \\ L - l = v_{\text{fix}}(t_2 - t_0) \end{cases} \quad (5)$$

求解得到:

$$l = \frac{L - v_{\text{fix}}(t_2 - t_1)}{2} \quad (6)$$

图 5 所示为考虑波速变化特性的双端行波测距原理图。

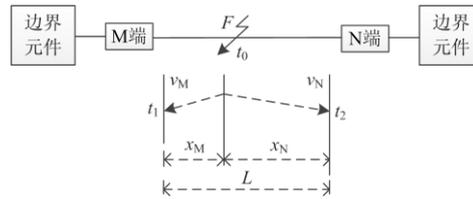


图 5 考虑波速变化特性的双端行波测距原理图

Fig. 5 Schematic of double-ended traveling wave ranging considering wave velocity variation

图中, v_M 、 v_N 分别代表故障行波到达整流侧和逆变侧两端的波速, x_M 、 x_N 分别代表故障点距整流站和逆变站两端的距离。

由图 5 可得考虑波速变化的双端行波测距公式为

$$\begin{cases} x_M = v_M(t_1 - t_0) \\ x_N = v_N(t_2 - t_0) \\ L = x_M + x_N \end{cases} \quad (7)$$

求解得:

$$x_M = \frac{Lv_M + v_M v_N(t_1 - t_2)}{v_M + v_N} \quad (8)$$

若以整流侧为线路测距本端,则故障距离 $l = x_M$ 。

将式(5)和式(7)进行对比分析可知,固定经验波速与故障行波到达两端测距装置时的真实波速的误差为

$$\begin{cases} \Delta v_M = v_M - v_{\text{fix}} \\ \Delta v_N = v_N - v_{\text{fix}} \end{cases} \quad (9)$$

可见, Δv_M 的大小与 v_M 和 v_{fix} 有关, 由第 1 章分析可知, v_M 是故障距离 l 的一元函数, 因此, Δv_M 受故障距离 l 和固定经验波速 v_{fix} 共同作用的影响, 即 $\Delta v_M = f(l, v_{\text{fix}})$ 。 Δv_N 的分析与 Δv_M 相同。

图 6 为取定固定经验波速为 $0.94c$ 时(c 为光速), Δv_M 受故障距离变化的影响情况; 表 1 所示为不同固定经验波速情况下传统双端行波测距的测距结果。表 1 中, l 代表真实故障距离, c 为光速。

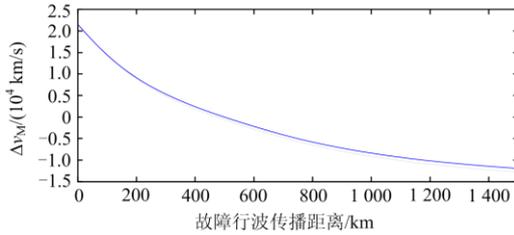


图 6 固定经验波速下 Δv_M 受故障距离变化的影响曲线

Fig. 6 Influence curve of Δv_M as a result of different fault distance under fixed empirical wave speed

表 1 不同固定经验波速下的测距结果

Table 1 Ranging results at different fixed empirical wave speeds

l/km	不同固定经验波速下的测距结果		
	$0.9c$	$0.94c$	c
100	108	95.963	91.950
500	504	500.935	497.85
800	810	810.75	811.5
1 100	1 092	1 096.275	1 100.55
1 400	1 392	1 404.025	1408

对图 6 和表 1 进行分析, 可得如下结论:

(1) v_M 与 v_{fix} 的误差随着故障距离的不同而不同, 接近线路中部故障时, 波速误差较小, 在线路两端故障时, 波速误差较大, 因此在线路全长范围内用固定经验波速代替真实波速存在原理性误差。

(2) 除线路中点发生故障外, 行波达到两端测距装置时的衰减程度不同, 若不考虑行波到达线路两端时波速的差异性, 则会进一步增大测距误差。

(3) 从表 1 各列可以看出, 无论经验波速取何值, 均无法保证不同故障距离下的测距精度。对比表 1 中的各行数据可知, 除极少数的故障距离下测距精度较高外, 大多数情形下测距误差较大, 因此, 并不存在某一最佳固定经验波速, 满足线路全长范围的测距精度。

因此, 亟需考虑波速变化特性的双端行波测距公式进行故障距离计算。

3 对波速逐步补偿的双端行波测距新方法

3.1 基于改进希尔伯特-黄算法的行波波头标定

小波变换(Wavelet Transformation, WT)和数学形态学曾是应用于故障信号中突变点检测的主流方法。小波变换对信号的时频局部化分析结果受制于小波基及分解尺度的影响, 小波基与分解尺度一旦选定后, 必须用它来分析各类故障信号。不同故障类型, 不同故障程度, 故障信息的特征有所差异, 此时利用固定的小波基函数和固定的分解尺度对不同故障情况下的信号进行小波变换, 会存在小波分解时的自适应性问题。数学形态学对信号的分解结果因结构元素的不同而不同, 结构元素的尺寸、形状对信号处理结果有很大的影响, 应用于故障行波波头检测时, 不同的结构元素对应的波头标定时刻存在差异。

希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transformation, HHT)是一种对各类故障信号具自适应分析能力的时频局部处理方法, 它没有固定的先验基底, 对信号的局部化处理完全是自适应的。针对 HHT 变换中经验模态分解时产生的模态混叠和虚假分量现象, Flandrin 教授和 Huang 教授提出了在原始信号中添加高斯白噪声, 然后再进行经验模态分解的改进的希尔伯特-黄变换(Improved Hilbert-Huang Transformation, IHHT), 其步骤如下:

在原始信号 $s(t)$ 中加入一组高斯白噪声 $w(t)$ 后得到一个新的信号 $S(t)$ 。

$$S(t) = s(t) + w(t) \quad (10)$$

对新信号 $S(t)$ 进行 EMD 分解, 得到频率从高到低依次排列的 n 个固有模态函数(imf _{n})分量。

$$S(t) = \sum_{k=1}^n \text{imf}_k(t) + r_n(t) \quad (11)$$

再在原始信号中加入不同的高斯白噪声 $w_j(t)$ ($j=1 \sim m$), 共进行 m 次。

$$\begin{cases} S_j(t) = s(t) + w_j(t) \\ S_j(t) = \sum_{k=1}^n \text{imf}_{jk}(t) + r_{jn}(t) \end{cases} \quad (12)$$

为消除高斯白噪声带来的影响, 对 m 个 imf _{jk} 分量求平均:

$$\text{imf}_k(t) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \text{imf}_{jk}(t) \quad (13)$$

对最高频的 imf₁ 分量进行 Hilbert 变换后得到其对应的瞬时幅值 $A(t)$ 、瞬时相位 $\varphi(t)$ 、瞬时频率 $f(t)$, 其中,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (14)$$

最终根据 $f(t)$ 绘制 imf_1 分量时频图。

由第 1 节分析可知, 波头中可以检测到的最高频分量的到达时刻, 定义为此故障行波的到达时刻, 在该时刻处故障暂态电压波形呈现尖锐的突变, 在 imf_1 分量的时间-频率图像中表现为明显的高频突变, 具体表现如图 7、图 8 所示。

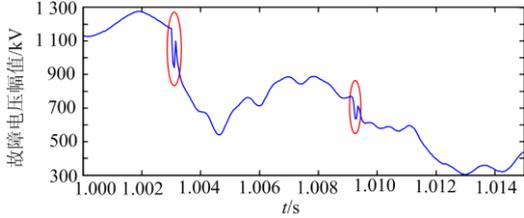


图 7 故障电压波形图

Fig. 7 Waveform of fault voltage

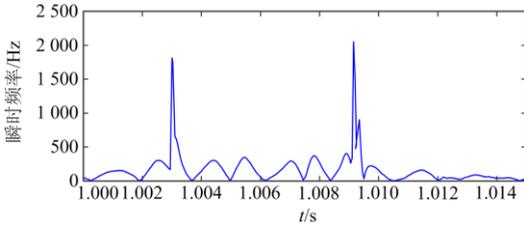


图 8 imf_1 分量时频图

Fig. 8 Time-frequency diagram of imf_1

3.2 用于波速补偿的牛顿插值算法

根据本文中第 1 节的结论 $v = v(l)$ 可知, 行波波速与故障距离之间存在某种内在的函数关系。考虑到行波波速与故障距离的函数关系受到实际工程中众多因素的影响, 难以代数化, 故可以考虑利用函数拟合的方法予以解决。根据插值法思想, 若可以构造出一个多项式函数 $P(l)$, 并且使其可以满足 $P(l_k) = v(l_k) (k = 0, 1, \dots, n)$, 则可将 $P(l)$ 作为已知的插值函数拟合 $v(l)$, 用于求解其他未知故障距离下的波速值。

目前较为成熟、程序化的插值算法有拉格朗日插值、牛顿插值、埃尔米特插值等。利用拉格朗日插值时, 当插值节点增加时, 拉格朗日插值基函数全部需要重新计算, 应用于故障测距问题时, 每新增一组故障数据, 需要重新编程, 算法延续性差。埃尔米特插值不仅可以满足插值节点上函数值相等, 而且可以满足插值节点上一阶导函数值也相等, 相应的算法编程复杂。牛顿插值算法与上述两者相比, 在能满足问题需要的同时, 算法编程简单, 且插值余项收敛速度快。

利用牛顿插值算法拟合 $v(l)$ 的步骤为:

当 $n=1$ 时, (n 代表插值多项式阶数, 此时有两个插值节点 l_0, l_1), 记一阶插值多项式为 $P_1(l)$, 它满足 $P_1(l_0) = v(l_0)$, $P_1(l_1) = v(l_1)$, 可构造 $P_1(l)$ 为

$$P_1(l) = v(l_0) + \frac{v(l_1) - v(l_0)}{l_1 - l_0}(l - l_0) \quad (15)$$

$P_1(l)$ 可看作是由零阶插值 $P_0(l) = v(l_0)$ 修正得来, 即

$$P_1(l) = P_0(l) + a_1(l - l_0) \quad (16)$$

式中, a_1 为函数 $v(l)$ 的一阶差商系数, 记为 $v[l_0, l_1]$, 则有

$$a_1 = v[l_0, l_1] = \frac{v(l_1) - v(l_0)}{l_1 - l_0} \quad (17)$$

当 $n=2$ 时, (有三个插值节点 l_0, l_1, l_2), 记二阶插值多项式为 $P_2(l)$, 它满足 $P_2(l_0) = v(l_0)$, $P_2(l_1) = v(l_1)$, $P_2(l_2) = v(l_2)$, 可构造 $P_2(l)$ 为

$$P_2(l) = v(l_0) + \frac{v(l_1) - v(l_0)}{l_1 - l_0}(l - l_0) + \frac{\frac{v(l_2) - v(l_0)}{l_2 - l_0} - \frac{v(l_1) - v(l_0)}{l_1 - l_0}}{l_2 - l_1}(l - l_0)(l - l_1) \quad (18)$$

同理, $P_2(l)$ 可看作是由一阶插值 $P_1(l) = P_0(l) + a_1(l - l_0)$ 修正得来, 即

$$P_2(l) = P_1(l) + a_2(l - l_0)(l - l_1) \quad (19)$$

式中, a_2 为函数 $v(l)$ 的二阶差商系数, 记为 $v[l_0, l_1, l_2]$, 则有

$$a_2 = v[l_0, l_1, l_2] = \frac{v[l_0, l_2] - v[l_0, l_1]}{l_2 - l_1} \quad (20)$$

当 $n=3$ 时,

.....

根据递推法, 可得 n 阶牛顿插值多项式的表达式为

$$P_n(l) = P_0(l) + a_1(l - l_0) + a_2(l - l_0)(l - l_1) + \dots + a_n(l - l_0)(l - l_1) \dots (l - l_{n-1}) \quad (21)$$

$P_n(l)$ 即为替代未知函数 $v(l)$ 用于波速补偿的插值多项式函数。式中, a_n 为函数 $v(l)$ 的 n 阶差商系数, 记为 $v[l_0, l_1, \dots, l_n]$, 则有

$$a_n = v[l_0, l_1, \dots, l_n] = \frac{v[l_0, \dots, l_{n-2}, l_n] - v[l_0, l_1, \dots, l_{n-1}]}{l_n - l_{n-1}} \quad (22)$$

针对本文仿真系统, 线路全长为 1 500 km, 从线路 50 km 处开始, 以步长为 100 km 设置单极金属性接地故障, 得到故障距离的插值节点向量 l_{15} , 在 Matlab 中进行数据计算得到波速向量 v_{15} , 由 l_{15} 、 v_{15} 构造 $P_{14}(l)$ 用于对波速的补偿。

根据牛顿插值多项式的构造思想可以看出, 对于高阶插值多项式可以看做是由低阶插值多项式逐次修正后得到, 算法具有良好可延续性。同时, 对差商系数 a_n 的求取也具有明显规律的递推性。随着插值节点个数的增加, 插值多项式阶数逐渐提高, 插值函数与原函数的拟合度将逐步提高。

3.3 波速补偿和故障距离的逐步逼真

故障发生后首先利用 IHHT 算法标定出电压行波到达两端测距装置的时刻 t_M 、 t_N , 将其代入传统双端行波测距公式(6), 可以得到未考虑波速变化的故障距离的近似值 l_0 , 再用线路全长 L 减去 l_0 得到故障点距逆变侧的故障距离 $L-l_0$ 。其次, 以 l_0 、 $L-l_0$ 作为牛顿插值多项式的输入量进行求解, 得到行波达到两端测距装置时的波速 v_{M0} 、 v_{N0} 。最后, 将 v_{M0} 、 v_{N0} 代入考虑波速变化的双端行波测距公式(8), 得到比近似值 l_0 更为接近真实故障距离的 l_1 。

再将 l_1 、 $L-l_1$ 作为牛顿插值多项式的输入量, 重复上述“其次、最后”中步骤, 随着迭代次数的增加, 得到逐步逼近真实故障距离的测距结果 $[l_0 \ l_1 \ l_2 \ \dots \ l_{k-1} \ l_k]$, 定义波动系数 $\lambda = |l_k - l_{k-1}|$, λ 会逐渐趋近于零。理论上可以将 λ 设置为无穷小, 但出于工程实际和算法的收敛速度考虑, 取 λ 为 0.003 已具有足够的测距精度。最终的测距结果为

$$l = \frac{l_k + l_{k-1}}{2} \quad (23)$$

算法原理流程如图 9 所示。

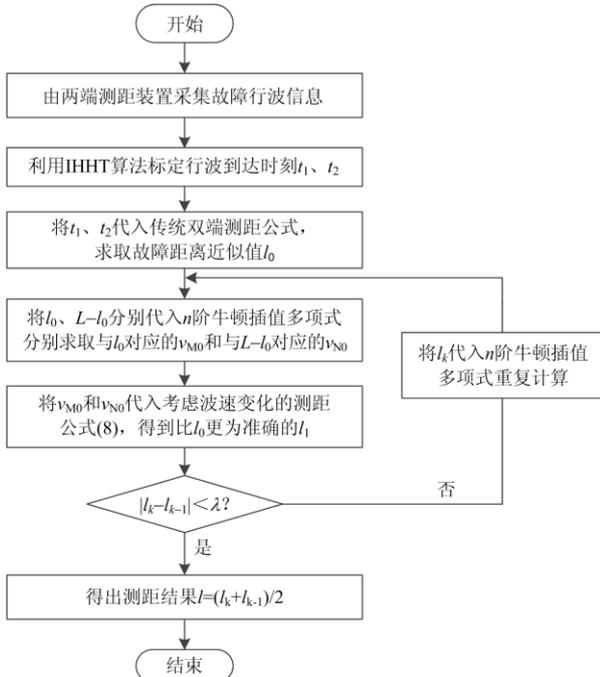


图 9 算法原理流程图

Fig. 9 Algorithm flowchart

4 仿真验证

本文借助 PSCAD 仿真平台, 搭建如图 10 所示 ± 800 kV 双极特高压直流输电工程仿真模型^[21-23]。输电线路采用 Frequency Dependent (Phase) Model Options 模型, 全长为 1 500 km, $t=1$ s 时设置故障, 故障持续 0.05 s, 综合考虑工程可实现性与测距精度, 采样频率取 20 kHz。将 PSCAD 中的仿真数据导入 Matlab 中进行数据分析计算。

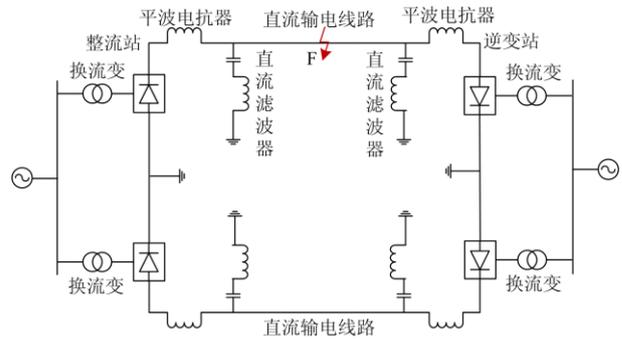


图 10 仿真系统模型示意图

Fig. 10 Schematic diagram of simulation system model

4.1 算法鲁棒性验证

由文中 3.3 节分析可知, 所提算法的收敛情况会受到给定波速初值(传统测距公式中的固定经验波速)和牛顿插值多项式阶数的影响。

为分析不同给定波速初值对所提算法收敛情况的影响, 将波速初值分别设为 c 、 $0.94c$ 、 \bar{v}_{15} (波速向量 v_{15} 的平均值), 再分别计算 $l=100$ km、 300 km、 600 km、 800 km、 $1\ 200$ km、 $1\ 400$ km 处发生单极金属性接地故障时的收敛情况。此时取牛顿插值多项式为 $P_{14}(l)$ 进行波速补偿。测距结果如表 2 所示。表中: l 代表真实故障距离; 9/99.99991 中的 9 代表迭代次数, 99.99991 代表测距结果。

表 2 采用不同波速初值下的收敛情况

Table 2 Convergence at different initial values of wave velocity

l/km	给定不同波速初值情况下收敛情况		
	c	$0.94c$	\bar{v}_{15}
100	9/99.99991	7/99.99201	8/99.99796
300	6/300.00012	5/300.00027	5/300.00014
600	4/599.99946	4/599.99725	4/599.99928
800	4/800.00019	4/800.009611	4/800.00022
1 200	7/1199.99988	5/1199.99667	6/1199.99703
1 400	9/1400.00026	8/1400.00073	9/1400.00036

由表 2 可得, 在线路全长范围内, 无论给定波速初值取何值, 该方法均具有较高的测距精度。在靠近线路两端故障时, 其收敛速度会随着不同给定

波速初值有略微差异；在线路中部故障时，其收敛速度几乎不受给定波速初值的影响。

为验证所提算法的收敛情况受不同牛顿插值多项式阶数的影响，从线路 50 km 处开始，分别以步长为 50 km 和 100 km 设置单极金属性接地故障，得到各自的牛顿插值多项式 $P_{28}(l)$ 、 $P_{14}(l)$ ，再依次计算 $l=100$ km、300 km、600 km、800 km、1 200 km、1 400 km 处的收敛情况。此时波速初值分别取各自波速向量的平均值 \bar{v}_{29} 、 \bar{v}_{15} 。测距结果如表 3 所示。

表 3 不同插值节点个数情况下的收敛情况

l/km	不同插值节点个数下的收敛情况	
	n=28	n=14
100	15/100.00185	8/99.99796
300	7/300.00011	5/300.00014
600	4/599.99939	4/599.99928
800	4/800.00018	4/800.00022
1200	8/1200.00228	6/1199.99703
1400	16/1399.99880	9/1400.00036

由表 3 可得，在线路全长范围内，所提算法的收敛精度随插值节点个数的增多而提高，同时可以看出在 $n=14$ 时该方法已具有较高的测距精度。在线路两端故障时，插值节点越多，收敛速度越慢；在靠近线路中部故障时，收敛速度受插值节点个数的影响较小。

4.2 算法适用性验证

为验证所提算法在整个线路全长范围内的适用性，需验证算法在除已知插值节点外，其他故障距离处的测距表现。表 4 给出 $l=130$ km、370 km、690 km、960 km、1 180 km、1 420 km 处发生单极接地故障后的测距结果。此时波速初值分别取各自波速向量的平均值 \bar{v}_{29} 、 \bar{v}_{15} 。测距结果如表 4 所示。

表 4 未知插值节点处的收敛情况

l/km	给定不同插值节点个数下的测距结果	
	n=28	n=14
130	129.777 12/-0.223	129.743 64/-0.256
370	369.825 00/-0.175	369.812 48/-0.188
690	689.900 00/-0.100	689.875 00/-0.125
960	960.106 25/0.106	960.125 02/0.125
1 180	1179.837 54/-0.162	1179.812 50/-0.187
1 420	1420.255 14/0.255	1420.276 08/0.276

由表 4 可得，所提算法在任意故障距离处均具有较高的测距精度，在线路全长范围内具有普遍适用性。

由表 2、表 3、表 4 与表 1 进行对比，验证了所提方法的有效性。

4.3 算法抗过渡电阻能力验证

为验证所提算法的抗过渡电阻能力，表 5 给出在线路 960 km 处发生不同过渡电阻故障时的测距结果。此时插值多项式取 $P_{14}(l)$ ，波速初值取 \bar{v}_{15} 。

表 5 不同过渡电阻情况下的测距结果

R/ Ω	l/km	d/km	ϵ /km
0	960	960.125 02	0.125
100	960	960.137 50	0.138
200	960	960.140 00	0.140
300	960	960.142 98	0.143

表 5 中： R 代表过渡电阻； d 代表测距结果； ϵ 代表绝对误差。

由表 5 可得，在不同过渡电阻故障情况下，该测距方法的精度较为稳定，且在高阻接地故障时也具有较高的测距精度，抗过渡电阻能力强。

4.4 极间短路故障验证

为验证所提算法在不同故障类型下的测距结果，表 6 给出发生极间短路故障时多个故障点处的测距结果。此时插值多项式取 $P_{14}(l)$ ，波速初值取 \bar{v}_{15} 。

表 6 极间短路故障测距结果

l/km	d/km	ϵ /km
130	129.777 12	-0.223
370	369.825 00	-0.175
690	689.900 00	-0.100
960	960.106 25	0.106
1 180	1 179.837 54	-0.162
1 420	1 420.255 14	0.255

由表 4 和表 6 可得，所提方法几乎不受故障类型的影响，这是因为针对某一特定的工程实例，在插值节点给定的情况下，波速随故障距离变化曲线一定，则牛顿插值多项式一定，在波头到达时刻不出现错标的情况下，则测距结果一定。

5 结论

本文在详细分析行波波速变化特性以及变波速对传统双端行波测距精度影响机理的基础上，利用牛顿插值算法对波速进行补偿，最后利用考虑波速变化特性的双端测距公式进行计算，得出故障距离。同时兼顾小波变换奇异点检测技术应用于行波波头标定的适用性问题，提出一种利用 IHHT 算

法进行波头的标定。理论分析和仿真验证得出该测距方法具有以下特点:

1) 采用 IHHT 算法进行波头标定, 解决了小波变换的自适应性难题; 采用改进的双端行波测距公式, 考虑了行波波速的变化特性以及行波到达线路两端时波速的差异性; 采用牛顿插值多项式对波速进行补偿, 消除了变波速对行波法测距精度的影响。

2) 该方法收敛速度快, 测距精度高, 稳定可靠, 在可提高传统双端行波测距精度的同时, 对采样频率及其他硬件设施无额外要求, 可为目前工程实际中的双端行波测距方法提供参考。

3) 所提算法对插值节点个数要求不高, 对于已有十数组现场数据的某实例工程, 可直接利用实测数据得到一套针对本工程专用的测距算法, 且该算法具有良好的可延续性, 将后续每次新增故障数据作为新增已知插值节点, 可得到高一阶牛顿插值多项式, 随着故障数据的累加, 测距算法精度将进一步提升。

参考文献

- [1] 王永进, 樊艳芳, 唐勇, 等. 考虑强非线性和波速变化特性的特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 17-25.
WANG Yongjin, FAN Yanfang, TANG Yong, et al. Fault location method for UHV DC transmission lines considering strong nonlinearity and wave velocity variation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 17-25.
- [2] 王增超, 郑俊超, 曾耿晖, 等. 基于高压直流换流站站域信息的交流线路距离保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 101-107.
WANG Zengchao, ZHENG Junchao, ZENG Genghui, et al. AC line distance protection method based on station area information of HVDC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 101-107.
- [3] 张怿宁, 郝洪民, 李京, 等. 脉冲注入法和单端故障行波法相结合的直流输电系统接地极线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 117-122.
ZHANG Yining, HAO Hongmin, LI Jing, et al. Ground fault line fault location of DC transmission system based on pulse injection method and single-ended fault traveling wave method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 117-122.
- [4] 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, 147.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Summary of research on fault location of HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 133-137, 147.
- [5] 杨林, 王宾, 董新洲. 高压直流输电线路故障测距研究综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 185-191.
YANG Lin, WANG Bin, DONG Xinzhou. A review of the fault location of HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 185-191.
- [6] 廖凯, 何正友, 李小鹏. 基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 104-109.
LIAO Kai, HE Zhengyou, LI Xiaopeng. Fault location of HVDC transmission lines based on traveling wave natural frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 104-109.
- [7] 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-ended fault location method for UHV DC transmission lines not affected by wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 142-148.
- [8] 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]. 电网技术, 2011, 35(7): 227-232.
ZHANG Yining, XU Min, LIU Yonghao, et al. A novel traveling wave fault location algorithm for DC transmission lines considering wave speed variation[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 227-232.
- [9] 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 Jiandong, LIU Jing, LU Hailong, et al. Fault location method for HVDC transmission lines based on traveling wave instantaneous frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1842-1848.
- [10] 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. Traveling wave fault location of long-distance UHVDC transmission line based on multiple measuring points[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2105-2113.
- [11] 陈仕龙, 李建平, 谢佳伟, 等. 利用模量传输时间差的特高压直流线路故障测距[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8): 20-24.
CHEN Shilong, LI Jianping, XIE Jiawei, et al. Fault

- location of UHVDC transmission lines based on modulus transmission time difference[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(8): 20-24.
- [12] 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. New method for fault location of UHVDC transmission line neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 257-264.
- [13] 段宽, 樊艳芳, 王永进. 考虑波速及弧垂效应的特高压直流线路测距方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 21-27.
- DUAN Kuan, FAN Yanfang, WANG Yongjin, et al. Ranging method for UHV DC line considering wave velocity and sag effect[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(6): 21-27.
- [14] 汪敏. 小波变换在输电线路行波故障测距中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- WANG Min. Application of wavelet transform in traveling wave fault location of transmission lines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [15] 张怿宁, 王彩芝, 李京, 等. 基于数学形态学的直接地极线路单端行波故障测距[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1): 74-78.
- ZHANG Yining, WANG Caizhi, LI Jing, et al. Single-ended traveling wave fault location for DC grounded electrode lines based on mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(1): 74-78.
- [16] 束洪春, 王超, 张杰, 等. 基于形态学的HVDC线路故障识别与定位方法研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 6-9, 18.
- SHU Hongchun, WANG Chao, ZHANG Jie, et al. Research on HVDC line fault identification and location based on morphology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(4): 6-9, 18.
- [17] 李慧奇, 任红昕, 郭鑫, 等. ± 1100 kV 长距离直流输电线路接地线感应电流分布及拆除方案[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 92-98.
- LI Huiqi, REN Hongxin, GUO Xin, et al. ± 1100 kV long-distance DC transmission line ground wire induced current distribution and removal plan[J]. Electric Power, 2019, 52(7): 92-98.
- [18] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, 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. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [19] 王永进, 樊艳芳, 李自乾. 基于改进方向电流法的特高压直流输电线路故障识别[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 76-81.
- WANG Yongjin, FAN Yanfang, LI Ziqian. UHVDC transmission line fault identification based on improved directional current method[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 76-81.
- [20] 中国电力科学研究院. 特高压直流输电技术直流输电分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [21] 崔青汝, 朱子凡. 智能发电运行控制技术[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 28-33.
- CUI Qingru, ZHU Zifan. Intelligent power generation operation control technology[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 28-33.
- [22] 杨新民, 曾卫东, 肖勇. 火电站智能化现状及展望[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 1-8.
- YANG Xinmin, ZENG Weidong, XIAO Yong. Current status and prospects of intelligent thermal power station[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 1-8.

收稿日期: 2020-03-29; 修回日期: 2020-05-26

作者简介:

段宽(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 1142047219@qq.com

樊艳芳(1971—), 女, 硕士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源并网技术及电力系统保护与控制。E-mail: 410849062@qq.com

(编辑 张爱琴)