

考虑故障暂态信号衰减特性的分布式行波测距

戴 锋, 刘贞瑶, 陈 轩

(国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 高压电网在电压过零点附近或过渡电阻较大的情形下发生故障时, 产生的故障暂态信号微弱, 衰减明显, 波头检测困难, 传统故障测距方法易失效。针对该问题提出一种考虑故障暂态信号衰减特性的分布式行波测距方法。首先, 根据电流行波随传输距离的指数衰减规律, 确定电流行波测量单元的最大布置间距; 其次, 基于电流行波首波头各频率分量幅值衰减特征, 利用故障区间和非故障区间两端频率分量幅值比差异实现故障区间辨识; 最后, 基于故障区间两侧 3 个测点的电流行波到达时刻进行故障精确定位。在 PSCAD/EMTDC 中建立 IEEE 30 节点系统的仿真模型, 仿真结果表明: 所提方法受故障类型、电阻、初相角影响小, 且定位精度高、可靠性好。

关 键 词: 输电线路; 行波衰减; 分布式行波; 幅值比; 故障测距

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.06.009 中图分类号: TM726 文章编号: 1673-9140(2021)06-0077-07

A distributed traveling wave-based fault location method considering characteristics of fault transient signal attenuation

DAI Feng, LIU Zhenyao, CHEN Xuan

(Maintenance Branch Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: When a high-voltage fault occurs near the voltage zero-crossing point or with a large transition resistance, the attenuation of generated weak fault transient signal is obvious. Thus, the traditional fault ranging method might fail due to the difficulties to detect the wave head. Under the background, a distributed traveling wave-based fault location method which considers the fault transient signal attenuation is proposed in this paper. Firstly, according to the exponential decay law of the current traveling wave transmission distance, the maximum arrangement distance of the current traveling wave measurement unit is determined under the weak fault signals. Secondly, based on the attenuation characteristics of the frequency components in the first wave head of the current traveling wave, the fault interval identification is realized by recognizing the difference of amplitude ratio of frequency components between fault intervals and healthy intervals. Finally, the faults are accurately located by utilizing the arrival time of the current traveling waves through the three measuring points on both sides of the fault interval. The simulation model of IEEE 30-bus system is set up in PSCAD/EMTDC, and the simulative results show that the proposed method can cover the different fault types, fault resistances, and fault initial phase angles. The high positioning accuracy and ideal reliability are verified.

Key words: transmission lines; traveling wave attenuation; distributed traveling wave; amplitude ratio; fault location

收稿日期: 2020-09-10; 修回日期: 2021-09-19

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019117); 国家重点研发计划(2017YFC0804400)

通信作者: 陈 轩(1989-), 男, 硕士, 主要从事输电线路故障测距研究; E-mail: 1332020484@qq.com

输电线路跨越地域范围广,容易受到外界环境因素的影响而发生故障,快速、可靠的故障定位对于保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义^[1-3]。相比于阻抗法^[4-5],行波法^[6-8]从原理上不受系统运行方式、过渡电阻、线路结构不对称等因素影响,定位精度高,实际应用广泛。

在输电线路故障类型多样,其中单相接地故障是最常见的故障类型^[9-10]。然而,对于行波法来说,单相接地故障下的初始行波信号也是最难以识别的,当故障发生在电压过零附近或故障电阻很大时,暂态信号较为微弱,不易被检测。同时,由于行波信号在传输过程中的衰减与畸变,基于单一采样点数据的传统行波定位方法极有可能发生波头识别不准确,导致行波法测距失败。采用分布式行波^[11-13]测距能有效缩短故障区段,一定程度上克服行波衰减与畸变的影响。文献[14]根据网络拓扑结构和装置布点情况,将环路划分为多个区段,在有效界定故障区段的基础上,根据初始行波传输路径,融合处理全网波形数据得到故障精确位置;文献[15]在分析输电线路故障电流特性的基础上,利用不同检测点故障电流零序分量之间的偏离度和故障电流行波的首波头能量进行区段定位,根据相应的测距方程,实现了精确定位;文献[16]通过所提中间故障区域选择原则选出用于故障定位的线路段,根据双端行波定位原理计算出故障距离。

虽然现有分布式行波测距方法对于大多数故障具有较好的定位精度,但没有对实际行波测量装置布置间距进行详尽讨论。此外,对于过渡电阻较大和故障初始角较小的单相接地故障,现有行波测距方法可能因波头难以检测而失效。

鉴于此,该文在原有分布式行波定位方法研究的基础上,首先通过小波变换提取电流行波小波模极大值,拟合其与暂态行波传输距离的函数关系,给出实际线路中分布式行波测量单元的布置间距;其次通过S变换提取故障区间和非故障区间两端行波首波头多频率分量幅值比差值信息,快速、可靠地辨识故障区间;最后利用故障区间两侧3个测点的行波到达时刻确定行波传播速度,实现故障精确定位。

1 电流行波幅值衰减

对于一条同型输电线路,由于传输通路的不同,零模信号比线模信号衰减更严重,故分析线模电流行波与故障点相距 x 的线模电流行波首波头信号 $I(x)$ 可以表示为

$$I(x) = \sum_i \frac{A_1}{\omega_i} e^{-(\alpha_i + j\beta_i)x} \quad (1)$$

式中 x 为故障距离; A_1 为线模电流行波初始幅值,取决于故障电阻、故障类型等因素; α_i 、 β_i 为频率 ω_i 下线模电流行波传播常数。

由式(1)可知,频率为 ω_i 时线模电流行波首波头含有的分量 $I_i(x)$ 的幅值可以表示为

$$I_i(x) = A_{1-i} e^{-\alpha_i x} = \frac{A_1}{\omega_i} e^{-\alpha_i x} \quad (2)$$

其中,首波头中频率为 ω_i 的信号分量的初始幅值为 A_{1-i} 。从式(2)可以看出,不同频率的信号分量幅值随着传播距离 x 的增加而衰减,其衰减的程度取决于行波传播常数实部 α_i 的大小。

综上,对于长距离输电线路,暂态行波信号传播过程中的衰减尤为明显,导致行波波头检测困难,影响行波法测距精度,通过布置多测点的方式实现分布式行波测距能有效缩短故障点与测量单元的距离,减小行波信号的衰减与畸变造成的误差。

2 分布式行波测量装置部署原则

设输电线路全长为 L (km),以 X_G (km)为间隔,从线路首端依次配置电流行波测量单元,直至线路末端,则共需装设的测量单元总数为

$$J = L/X_G + 1 \quad (3)$$

考虑测量单元布置成本,需要保证在全线路暂态行波信号可观性的前提下取得 X_G 的最大值。

小波系数模极大值可以用于表征行波信号的幅值^[17]。根据这一结论,该文采用db6小波来处理行波测量单元获取的电流行波信号,并将 d_1 层小波细节系数的模极大值所对应的时刻标定为行波波头到达时刻。在PSCAD/EMTDC中搭建一条300 km

的输电线路,设置其电压等级为 220 kV,在故障电阻 400 Ω 且故障初相角较小的条件下模拟故障,故障点设置距离首端 80 km。间隔 4 km 采集一次电流行波信号,同时记录在无噪声和信噪比为 40 dB 的条件下行波波头的到达时刻。在 Matlab 中使用指数函数通过拟合的方式获取小波系数模极大值随行波传播距离变化的关系,得到图 1 所示的拟合结果,曲线方程为

$$y = 2.2577e^{-0.1224x} \quad (4)$$

式中 y 为小波系数模极大值; x 为行波传播距离。

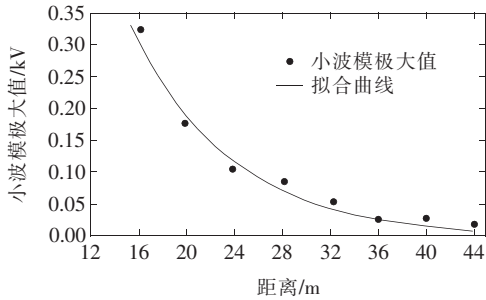


图 1 小波模极大值与行波传播距离拟合曲线

Figure 1 The fitting curve of maximum wavelet modulus and fault distance

无噪声和信噪比为 40 dB 的条件下不同故障距离的行波波头到达时刻比较结果如表 1 所示,其中 $\phi=0$ 表示 2 种情况下波头到达时刻相同, $\phi=1$ 表示 2 种情况下波头到达时刻不同。

表 1 有、无噪声情况下到达时刻比较结果

Table 1 Comparison between the arrival times with and without noise

距离/km	ϕ	距离/km	ϕ	距离/km	ϕ
4	0	20	0	36	1
8	0	24	0	40	1
12	0	28	0		
16	0	32	0		

由表 1 可知,距离故障点 32~36 km 时有、无噪声波头到达时间出现不同,32 km 时仍能保持 2 种情况结果一致,此时无噪声条件下的小波系数模极大值为 $W'_{\min}=0.0275$ 。故行波测量单元在实际环境中能检测到行波波头的条件为

$$W_{\min} = \beta_{re} \cdot W'_{\min} \quad (5)$$

式中 W_{\min} 为能够检测到行波波头的小波系数模极大值的最小值; β_{re} 为可靠系数,取值为 1.5。

联立式(4)、(5),解得测点间距最大允许值为 32.69 km,即线路上 2 个测点的间距最大不能超过 32.69 km。同理,采用上述方法可获得不同长度输电线路下的测点布置间距,此外,测量单元实际布置应考虑现场环境和杆塔位置,在最大允许间距范围内对实际间距进行微调。

3 故障定位方法

3.1 故障区间辨识

假设 Y_1, Y_2, \dots, Y_n 为线路 MN 上布置的 n 个电流行波测量单元, $L_{12}, L_{23}, \dots, L_{(n-1)n}$ 为相邻 2 个测量单元的距离。设故障发生在测量单元 Y_{k-1} 和 Y_k ($k=2, 3, \dots, n$) 之间且在距离 Y_{k-1} 处 x (km),由式(2)可知,故障点左侧各测量单元所测得的行波首波头中频率为 ω_i 的分量幅值 $f_{i_{Y_p}}$ ($p=1, 2, \dots, k-1$) 为

$$\begin{cases} Y_{k-1} : f_{i_{Y_{k-1}}} = A_{1_i} e^{-a_i x} = \frac{A_1}{\omega_i} e^{-a_i x} \\ Y_{k-2} : f_{i_{Y_{k-2}}} = A_{1_i} e^{-a_i (L_{(k-2)(k-1)} + x)} = \\ \quad \frac{A_1}{\omega_i} e^{-a_i (L_{(k-2)(k-1)} + x)} \\ \vdots \\ Y_1 : f_{i_{Y_1}} = A_{1_i} e^{-a_i (L_{12} + \dots + L_{(k-2)(k-1)} + x)} = \\ \quad \frac{A_1}{\omega_i} e^{-a_i (L_{12} + \dots + L_{(k-2)(k-1)} + x)} \end{cases} \quad (6)$$

故障点右侧各测量单元所测得的行波首波头中频率为 ω_i 的分量幅值 $f_{i_{Y_q}}$ ($q=k, k+1, \dots, n-1, n$) 分别为

$$\begin{cases} Y_k : f_{i_{Y_k}} = A_{1_i} e^{-a_i (L_{(k-1)k} - x)} = \frac{A_1}{\omega_i} e^{-a_i (L_{(k-1)k} - x)} \\ Y_{k+1} : f_{i_{Y_{k+1}}} = A_{1_i} e^{-a_i (L_{(k-1)k} + L_{k(k+1)} - x)} = \\ \quad \frac{A_1}{\omega_i} e^{-a_i (L_{(k-1)k} + L_{k(k+1)} - x)} \\ \vdots \\ Y_n : f_{i_{Y_n}} = A_{1_i} e^{-a_i (L_{(k-1)k} + \dots + L_{(n-1)n} - x)} = \\ \quad \frac{A_1}{\omega_i} e^{-a_i (L_{(k-1)k} + \dots + L_{(n-1)n} - x)} \end{cases} \quad (7)$$

故障发生后,各测量单元检测到的行波首波头中频率 ω_i 的分量幅值及衰减规律如图 2 所示。

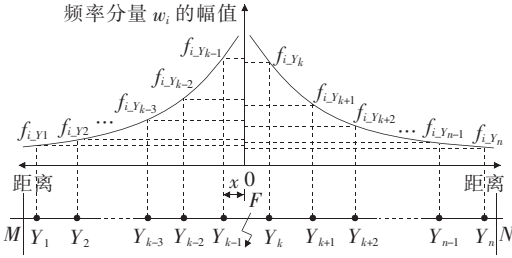


图2 频率分量 ω_i 衰减情况

Figure 2 The attenuation of the frequency component ω_i

定义任意区间 $Y_j Y_{j+1}$ ($j=1, 2, \dots, n$) 的两端测量单元检测的频率为 ω_i 的信号分量的幅值比为

$$R_{Y_j Y_{j+1}} = \frac{f_{i,Y_j}}{f_{i,Y_{j+1}}} \quad (8)$$

对于故障点左右两侧的非故障区间,其两端测量单元检测的频率为 ω_i 的信号分量幅值比为

$$\begin{cases} R_{Y_p Y_{p+1}} = e^{-\alpha_i L_{p(p+1)}} \\ R_{Y_q Y_{q+1}} = e^{\alpha_i L_{q(q+1)}} \end{cases} \quad (9)$$

任意区间 $Y_{k-1} Y_k$ 、 $R_{Y_{k-1} Y_k}$ 需满足条件:

$$e^{-\alpha_i L_{(k-1)k}} < R_{Y_{k-1} Y_k} = \frac{f_{i,Y_{k-1}}}{f_{i,Y_k}} = e^{\alpha_i L_{(k-1)k} - 2\alpha_i x}, \quad 0 < x < L_{(k-1)k} \quad (10)$$

综上,对于故障行波首波头中频率分量为 ω_i 的信号分量,非故障区间两端测量单元的幅值比只与两测量单元的间距有关,与故障位置无关;而故障区间两端测量单元的幅值比与故障距离的关系满足式(10)。

为了进一步提高故障区间识别的可靠性与准确性,考虑实际中可能存在计算、测量等误差,通过不同的S变换尺度提取线模行波首波头中多个不同频率分量的幅值,在210~300 kHz范围内等间距确定10个合适的频率,在计算中采用累加的方式处理多频率分量幅值。此外,设定比较阈值 ϵ ,取值为0.2。故障区间辨识判据可表示为

$$\begin{cases} R_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}} = \sum_{s=1}^{10} e^{\alpha_s (L_{(k-1)k} - 2x)}, \quad 0 < x < L_{(k-1)k} \\ M_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}} = \sum_{s=1}^{10} e^{-\alpha_s L_{(k-1)k}} \\ N_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}} = \sum_{s=1}^{10} e^{\alpha_s L_{(k-1)k}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} |R_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}} - M_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}}| > \epsilon \\ |R_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}} - N_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}}| > \epsilon \end{cases}$$

式中 $R_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}}$ 为区间 $Y_{k-1} Y_k$ 两端测量单元检测到的10个不同频率分量下幅值比的累加和值; $M_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}}$ 、 $N_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}}$ 分别为离线情况下根据线路参数计算的区间 $Y_{k-1} Y_k$ 对应的10个不同频率分量下的衰减因子及其倒数的累加和值。

3.2 故障精确定位

在识别出故障所在区间后,利用故障相邻正常区间两端所测波头到达时刻求解波速,故障区间两侧3个测量单元检测的行波波头到达时刻实现故障测距,其原理如图3所示。

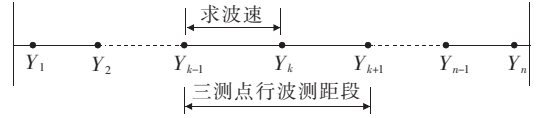


图3 基于三端电流量的故障测距方法

Figure 3 Location method based on three-terminal current

设行波波头到达测点 Y_1, Y_2, \dots, Y_n 时刻分别为 t_1, t_2, \dots, t_n , 首先,利用相邻区间 $Y_{k-1} Y_k$ 测点检测到的行波波头到达时刻 t_{k-1} 和 t_k 确定行波实时波速 v ,进而利用区间 $Y_{k-1} Y_{k+1}$ 测点检测的 t_{k-1} 、 t_{k+1} 求解故障位置:

$$L_{Y_{k-1} F} = \frac{L_{(k-1)(k+1)}}{2} + \frac{v(t_{k-1} - t_{k+1})}{2} = \frac{L_{(k-1)(k+1)}}{2} + \frac{L_{(k-1)k}(t_{k-1} - t_{k+1})}{2(t_{k-1} - t_k)} \quad (12)$$

3.3 故障定位流程

分布式行波测距方法流程如图4所示。以某线路MN为例,该文的故障区间辨识和故障精确定位方法实现步骤如下。

1) 计算所选10个不同频率分量的衰减系数 α_s ,代入式(11),计算得到各区间的 $M_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}}$ 及 $N_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}}$;

2) 故障发生后通过卡伦鲍尔变换解耦获取沿线 n 个测量单元检测的线模行波信号,令 $k=1$;

3) 获取沿线测量单元检测的故障线模行波波头中10个不同频率分量的幅值,并计算 $R_{\text{sum}_{Y_{k-1} Y_k}}$;

4) 将区间 $Y_{k-1} Y_k$ 对应的两端测量单元检测的信号幅值比累加和值代入式(11),校验该区间是否满足故障区间辨识判据,若满足则区间 $Y_{k-1} Y_k$ 为故障区间;若不满足,继续校验剩余区间,直至确定故障区间;

5)利用小波变换获取故障初始行波到达测点 Y_{k-1}, Y_k, Y_{k+1} 时刻,利用故障相邻区间 $Y_{k-1}Y_k$ 在线求取行波波速,利用区间 $Y_{k-1}Y_{k+1}$ 求得故障位置。

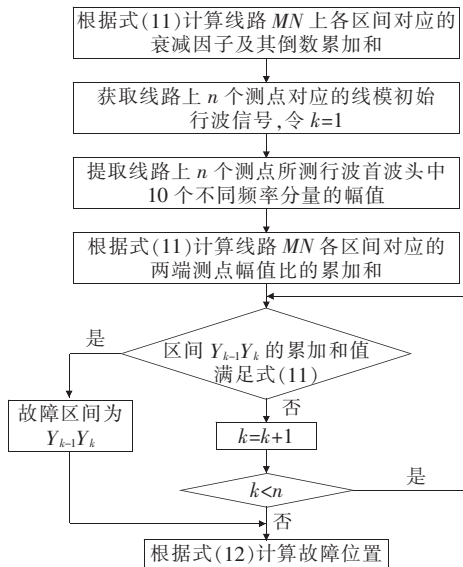


图 4 分布式行波测距方法流程

Figure 4 The flowchart of distributed traveling wave fault location method

4 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中搭建 IEEE 30 节点系统模型,选择其中线路 L_{10-22} 进行仿真研究,验证所提故障区间辨识和故障测距方法的有效性,系统电压等级为 220 kV,线路全长为 204 km,采样频率为 2 MHz,输电线路单位长度电抗 x 、电阻 r 、电纳 b 、电导 g 数值如表 2 所示。由文 2 中所述测量单元间距设定方法,计算得到线路 L_{10-22} 上共需要布置 8 个电流行波测量单元,理论布置间距为 29.1 km。模拟实际运行情况,将实际间距进行微调,区间 Y_1Y_2, Y_3Y_4, Y_6Y_7 分别设为 29.8、28.8、29.4 km,其余区间设为 29 km,如图 5 所示。

表 2 线路仿真参数

Table 2 Line simulation parameter

类型	$x/(\Omega/\text{km})$	$r/(\Omega/\text{km})$	$b/(10^{-6} \text{ S}/\text{km})$	$g/(10^{-7} \text{ S}/\text{km})$
正序	0.421	0.035	2.661	1
零序	1.143	0.300	1.936	1

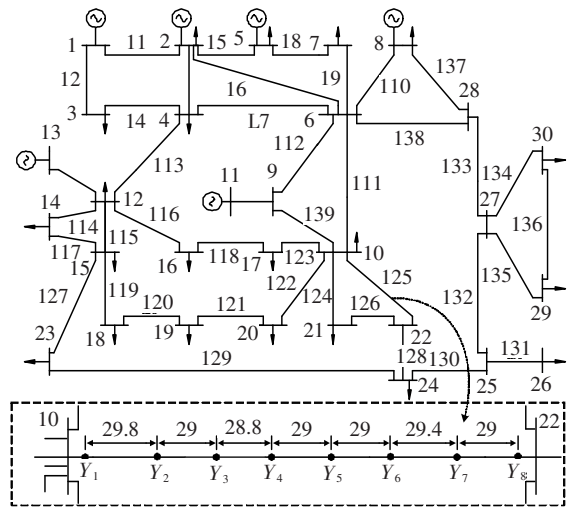


图 5 线路 L_{10-22} 上行波测量单元布置

Figure 5 The layout of measuring unit on L_{10-22}

4.1 案例分析

仿真故障设置在 Y_6Y_7 ,故障点距离 Y_6 为 9.3 km,故障类型为 A 相接地短路,故障电阻设置为 200 Ω 。故障发生后行波测量单元 Y_6, Y_7 处的线模电流行波信号如图 6 所示。根据故障区间辨识方法,计算各区间多频率分量下的衰减因子及其倒数的累加和值以及各区间两端测量单元检测的信号幅值比的累加和值,如表 3 所示。

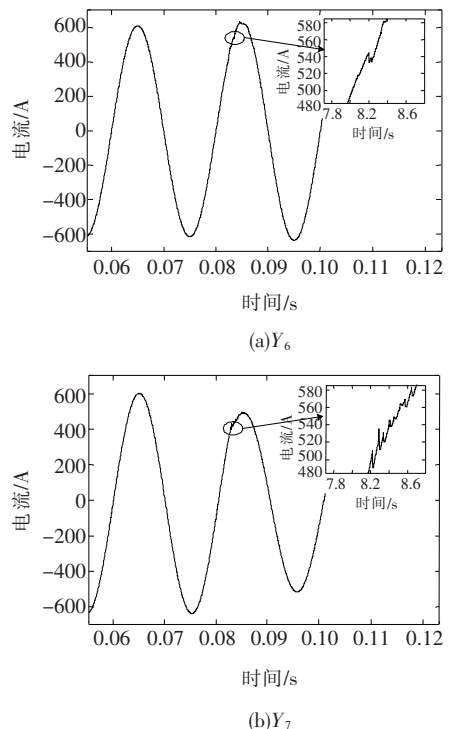


图 6 Y_6, Y_7 处的线模电流行波信号

Figure 6 The aerial-mode current wave signal at Y_6 and Y_7

根据表3结果以及故障区间辨识判据,可判断 Y_6Y_7 为故障区间。确定故障区间后,通过小波变换提取测点 Y_5 、 Y_6 、 Y_7 的故障线模电流行波首波头到

表3 线路 L_{10-22} 上各区间 $M_{\text{sum}_{Y_k Y_{k+1}}}$ 、 $N_{\text{sum}_{Y_k Y_{k+1}}}$ 、 $R_{\text{sum}_{Y_k Y_{k+1}}}$ 的值

Table 3 Values of $M_{\text{sum}_{Y_k Y_{k+1}}}$, $N_{\text{sum}_{Y_k Y_{k+1}}}$ and $R_{\text{sum}_{Y_k Y_{k+1}}}$ in each section of L_{10-22}

区间	$M_{\text{sum}_{Y_k Y_{k+1}}}$	$N_{\text{sum}_{Y_k Y_{k+1}}}$	$R_{\text{sum}_{Y_k Y_{k+1}}}$
Y_1Y_2	7.47	16.34	7.42
Y_2Y_3	7.75	15.61	15.61
Y_3Y_4	7.87	15.22	7.86
Y_4Y_5	7.75	15.61	7.75
Y_5Y_6	7.75	15.61	7.76
Y_6Y_7	7.59	15.96	12.71
Y_7Y_8	7.75	15.61	15.59

表4 不同故障状况下线路 L_{10-22} 上的故障区间辨识及故障定位结果

Table 4 The fault section determination and the fault location results on L_{10-22} under different fault conditions

故障距离/km	故障类型	Z_F/Ω	$\delta_F/(\circ)$	区间名称							区间判定	计算距离/km(绝对误差 e/m)	
				Y_1Y_2	Y_2Y_3	Y_3Y_4	Y_4Y_5	Y_5Y_6	Y_6Y_7	Y_7Y_8		该文方法	D型双端法
102.6	A、B两相接地	20	30	7.43	7.75	7.86	9.72	15.58	15.95	15.59	Y_4Y_5	102.625(25)	102.668(68)
			60	7.43	7.76	7.86	9.68	15.62	15.97	15.60	Y_4Y_5	102.622(22)	102.520(80)
	400	30	7.46	7.76	7.83	9.71	15.61	15.96	15.61	Y_4Y_5	102.628(28)	102.520(80)	
		60	7.49	7.77	7.84	9.69	15.60	15.95	15.60	Y_4Y_5	102.625(25)	102.668(67)	
170.4	A相接地	50	30	7.48	7.74	7.88	7.76	7.72	8.68	15.58	Y_6Y_7	170.367(33)	170.162(238)
			90	7.47	7.77	7.87	7.77	7.74	8.68	15.61	Y_6Y_7	170.370(30)	170.236(164)
	100	30	7.43	7.71	7.85	7.74	7.71	8.69	15.59	Y_6Y_7	170.443(43)	170.087(313)	
		90	7.46	7.72	7.88	7.75	7.77	8.68	15.62	Y_6Y_7	170.367(33)	170.162(238)	
12.4	A、B相间	100	60	10.72	15.60	15.18	15.59	15.62	15.95	15.64	Y_1Y_2	12.421(21)	12.677(277)
			90	10.68	15.60	15.22	15.60	15.63	15.96	15.62	Y_1Y_2	12.421(21)	12.677(277)
	400	30	10.71	15.62	15.23	15.57	15.62	15.93	15.64	Y_1Y_2	12.434(34)	12.752(352)	
		90	10.69	15.59	15.22	15.57	15.65	15.98	15.59	Y_1Y_2	12.434(31)	12.603(203)	

由表3、4可得,在不同故障类型情况下,该文所提方法能准确可靠地判断出故障区间,且受故障电阻、故障初相角影响小。

定义故障定位绝对误差为

$$e = |x_F^* - x_F| \quad (13)$$

式中 x_F^* 为实际故障距离; x_F 为计算所得故障距离。

将该文方法与D型双端行波故障定位方法进行比较,由表4易得,在不同的故障类型、电阻、初相角情况下,该文所提故障定位方法均有较高的定位

精度,尤其是故障发生在线路首末端附近时,该文所提算法定位绝对误差在50 m以内,而D型双端行波法定位绝对误差在200 m左右,定位精度明显提高。该文所提方法测距精度较高,主要在于分布式测点有效缩短了故障信号的传输距离,降低了暂态行波衰减造成的误差。

将该文方法与D型双端行波法定位法进行比较,根据线路参数计算线模电流行波波速 v 为 2.97×10^8 m/s,利用小波变换获取测点 Y_1 、 Y_8 的故障行波首波头到达时间分别为 $t_{Y_1} = 0.0825200$ 、 $t_{Y_8} = 0.0821655$ s,计算得到故障点距离 Y_1 为154.643 km,与 Y_6 的距离为9.043 km,定位误差为257 m。

4.2 算法鲁棒性分析

为了验证不同故障类型、电阻、位置、初相角对该文方法的影响,在线路 L_{10-22} 上进行不同条件下的故障仿真模拟,仿真结果如表4所示,其中 Z_F 为故障电阻, δ_F 为故障初相角。

4 结语

该文基于暂态信号衰减特性从行波可观性角度

出发,通过指数函数拟合电流行波随传输距离的变化关系,得到线路上允许设定的最大测点间距。通过比较故障区间电流行波首波头频率分量幅值比和所设衰减因子及其倒数累加和的大小辨识故障区间,并采用S变换提取行波首波头中多个不同频率分量的幅值以累加处理的方式提高了算法的可靠性。利用故障区间两侧3个电流测点的行波首波头到达时刻进行故障精确定位。大量仿真结果表明:该文所提算法在不同的故障类型、电阻、初相角下均能准确判定故障区间。和传统双端行波法相比,所提方法定位精度较高。

参考文献:

- [1] 何继勇,周海阔,朱仁勋. 高压输电线路在线监测设备无线供电电磁耦合机构优化[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 139-147+165.
HE Jiyong, ZHOU Haikuo, ZHU Renxun. Optimization of magnetic coupling mechanism for wireless power supply of high-voltage transmission line on-line monitoring equipment[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 139-147+165.
- [2] Od N, Pradhan A K. A traveling wave-based fault location method using unsynchronized current measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 505-513.
- [3] 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. Fault diagnosis of UHVDC transmission lines based on improved directional current method[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 76-81.
- [4] 严学文,高伟,张稳稳,等. 基于相电压电流突变量的配电网单相接地故障频段定位方法[J]. 供用电, 2019, 36(3): 50-55+75.
YAN Xuewen, GAO Wei, ZHANG Wenwen, et al. Frequency domain location method for single-phase grounding fault of distribution network based on break variable of phase voltage and current[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3): 50-55+75.
- [5] 戴锋,叶昱媛,刘贞瑶,等. 基于S变换及同步相量测量的输电线路故障定位研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 13-19+44.
DAI Feng, YE Yuyuan, LIU Zhenyao, et al. Research on fault location of transmission line based on S-transform and synchronized phasor measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(8): 13-19+44.
- [6] 张安安,周志通,庄景泰,等. 基于行波瞬时振幅的高压直流输电线路故障测距方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 78-84.
ZHANG Anan, ZHOU Zhitong, ZHUANG Jingtai, et al. Fault location method of HVDC transmission line based on traveling wave instantaneous amplitude[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 78-84.
- [7] 李泽文,范彩影,曾贇,等. 不受波速影响的电力线路故障双端行波定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(2): 79-83.
LI Zewen, FAN Caixiong, ZENG Yun, et al. Power line fault location method with double terminal traveling waves unconsidered wave transmission speed[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(2): 79-83.
- [8] 刘秀军,焦健,周会峰,等. 基于故障行波传输有向树的网络定位算法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 58-64.
LIU Xiujun, JIAO Jian, ZHOU Huifeng, et al. Network location algorithm with the directed tree of traveling wave transmission[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 58-64.
- [9] 许光,刘漫雨,王兴念,等. 基于多信息融合的自适应单相接地故障在线定位研究与应[J]. 电测与仪表, 2019, 56(12): 64-72.
XU Guang, LIU Manyu, WANG Xingnian, et al. Research and application of adaptive single phase ground fault online locating based on multi-information fusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(12): 64-72.
- [10] 陈燕擎,刘涛,韩文建,等. 考虑配电网分布式零序电流关系的单相接地故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 118-126.

- CHEN Yanqing, LIU Tao, HAN Wenjian, et al. Single-phase-to-earth fault location in distribution networks considering the distributed relations of the zero-sequence currents[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 118-126.
- [11] 张悛宁, 孟令军, 王越杨. 基于非接触式行波采集的分布式高压直流故障测距方法[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(4): 55-59+65.
- ZHANG Yining, MENG Lingjun, WANG Yueyang. A fault location method for distributed HVDC high resistance fault based on non-contact traveling wave collecting[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(4): 55-59+65.
- [12] 徐湘忆, 盛戈皞, 刘亚东, 等. 输电线路分布式行波检测的故障定位方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2012, 24(3): 134-138.
- XU Xiangyi, SHENG Gehao, LIU Yandong, et al. Fault location method for transmission line based on distributed traveling wave detection[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2012, 24(3): 134-138.
- [13] DING Jiali, LI Lixue, ZHENG Yihui, et al. Distributed travelling-wave-based fault location without time synchronisation and wave velocity error[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(8): 2085-2093.
- [14] 邓丰, 曾祥君, 马士聪, 等. 基于分布式行波检测的广域网络故障定位方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1300-1310.
- DENG Feng, ZENG Xiangjun, MA Shicong, et al. Research on wide area traveling wave fault location method based on distributed traveling wave detection[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1300-1310.
- [15] 刘亚东, 盛戈皞, 孙岳, 等. 基于故障电流信息综合分析的分布式单相接地故障测距方法[J]. *电网技术*, 2012, 36(8): 87-94.
- LIU Yandong, SHENG Gehao, SUN Yue, et al. A distributed fault location algorithm for single-phase ground fault by comprehensive analysis on fault current information[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(8): 87-94.
- [16] 范新桥, 朱永利, 卢伟甫. 基于多点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(11): 39-45.
- FAN Xinqiao, ZHU Yongli, LU Weipu. Traveling wave fault location based on multiple current measurements for transmission line[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(11): 39-45.
- [17] 王俊波, 武利会, 罗容波, 等. 基于小波变换-振动起始时刻分析的高压断路器故障诊断方法[J]. *高压电器*, 2020, 56(6): 211-217.
- WANG Junbo, WU Lihui, LUO Rongbo, et al. Fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on wavelet transform-vibration start time analysis[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(6): 211-217.