

基于多模量行波分量相位关系的输电线路单相接地故障定位

程孟晗¹, 褚宁^{1,2}, 梁睿^{1,2}, 彭楠^{1,2}

(1. 中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏省煤矿电气与自动化工程实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:为了充分利用模量行波首波头相位信息,克服传统模量行波首波头辨识方法的误差,基于模量行波在输电线路上传播时的畸变特性和色散效应,提出利用双端测量点零模和线模电压行波首波头中同一高频分量相位关系进行单相接地故障定位。所提方法无需双端精确同步,也不依赖于模量行波到达时刻和波速信息。利用PSCAD搭建输电线路模型并进行故障仿真,仿真结果表明了所提方法的有效性与可靠性。

关键词:模量行波;畸变;相位关系;输电线路;故障定位

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.027

0 引言

输电线路输送距离长、输电环境复杂,易发生故障。快速、准确地找出故障点,对于减轻故障巡线负担、减小停电检修时间、保障电网安全稳定运行具有重要的意义^[1]。目前,输电线路故障定位方法主要基于阻抗法^[2-3]和行波法^[4-5]。其中行波法基本不受线路结构不对称、过渡电阻、线路参数沿走廊分布不均匀等因素的影响,已经在交、直流输电线路中获得了广泛应用^[6-7]。近年来,随着信号处理技术、广域测量技术、信息融合技术的发展,行波法又得到了进一步的发展^[8-9]。

文献[10]提出利用人工神经网络得到各频率下测得的小波模极大值比和频率分量幅值比的对应关系,然后利用训练好的网络 and 实际测得的双端行波波头频率分量幅值比确定故障位置。文献[11]考虑故障点透射模量对初始反极性波头辨识的影响,提出了利用前2个波头到达时差与故障点距离在透射模量可测和衰减至不可测情况下的特定函数关系,实现初始反极性行波属性辨识的方法。文献[12]提出一种不受行波波速影响的单端行波故障测距算法。文献[13]基于机电波振荡理论,提出利用故障后低频机电波达到电网各测点的时刻构建的时间差阵列进行故障定位。文献[14]分析了发生单相接地故障后模量行波的传播规律,得出了零模检测波速度和波头李氏指数的对应关系,提出了利用小波变换和BP神经网络拟合的单端行波测距方法。

目前,输电线路故障定位方法大多依赖于测量点同步测得的行波到达时刻和行波波速。本文在分析故障模量电压初始行波首波头信号畸变和色散特性的基础上,提出利用双端模量电压行波首波头信号高频分量的相位关系进行故障定位的方法。本文方法无需输电线路两端测量点精确同步,也不依赖行波到达时刻和波速信息,具有较好的经济性和工程实践价值。

1 模量行波畸变与色散

对于同型输电线路,故障发生后距离故障点 x 处的模量电压行波首波头信号 $u_q(x)$ 可由式(1)表示^[10]。

$$u_q(x) = \sum_i e^{-\gamma_i^{(q)} x} u_i^{(q)} = \sum_i e^{-(\alpha_i^{(q)} + j\beta_i^{(q)})x} \frac{A^{(q)}}{\omega_i} \quad (1)$$

其中, $q=0$ 或 $q=1$ 分别表示零模和线模行波分量; $\gamma_i^{(q)} = \alpha_i^{(q)} + j\beta_i^{(q)}$,为频率 ω_i 下的模量行波传播常数,其实部 $\alpha_i^{(q)}$ 和虚部 $\beta_i^{(q)}$ 分别反映了模量行波的幅值衰减和相位滞后特征; $A^{(q)}$ 为模量电压行波初始幅值。

在PSCAD上搭建一条总长为100 km的输电线路,并在距离其首端80 km处模拟A相接地故障,设置故障电阻为50 Ω 。在故障点处及距离故障点20 km、30 km、40 km、50 km、60 km处测量电压行波。利用S变换提取各处模量电压行波首波头不同频率分量的幅值和相位。如果以故障点处各频率分量的幅值和相位为参考,则可利用其他各处对应频率分量的幅值与参考幅值的比值或相位与参考相位的差值表征行波的畸变程度,幅值比越小,相位差越大,畸变程度越显著。

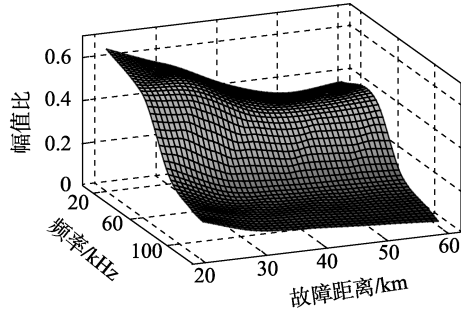
不同测量点处的零模和线模电压行波首波头信号不同频率分量与参考分量的幅值比和相位差分别如图1(a)、(b)和图2(a)、(b)所示。可以看出:对于同一模量电压行波而言,行波传播距离越远,频率越高的分量幅值衰减和相位滞后越明显;对于不同

收稿日期:2017-07-31;修回日期:2018-07-13

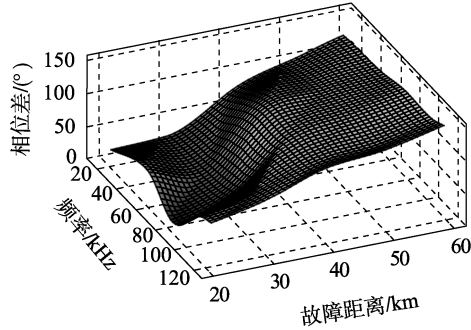
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51504253);江苏省自然科学基金资助项目(BK20161185);国家级大学生科研训练计划(201710290047)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51504253), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20161185) and the National Undergraduate Training Program of China for Innovation and Entrepreneurship(201710290047)

模量电压行波的同一频率分量而言,零模电压行波比线模电压行波的幅值衰减和相位滞后更显著。



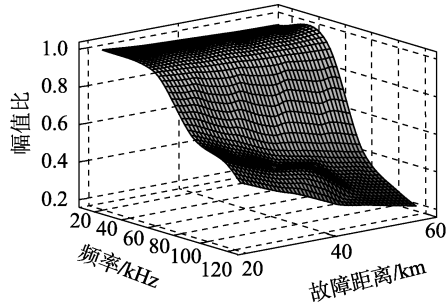
(a) 幅值比



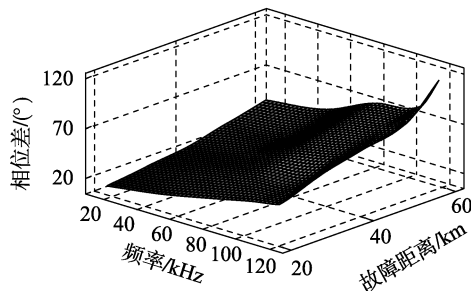
(b) 相位差

图 1 不同故障距离下零模行波频率分量与参考频率分量的幅值比与相位差

Fig.1 Amplitude ratios and phase differences between zero-mode traveling wave frequency components and reference components under different fault distances



(a) 幅值比



(b) 相位差

图 2 不同故障距离下线模行波频率分量与参考频率分量的幅值比与相位差

Fig.2 Amplitude ratios and phase differences between aerial-mode traveling wave frequency components and reference components under different fault distances

2 模量行波高频分量相位与故障距离的关系

两端输电线路的模型如图 3 所示。图中, M 、 N 为输电线路两端的测量点; F 为故障点; x 为故障点与点 M 之间的距离; L 为线路总长; u_b 和 u_f 分别为初始反向和正向模量电压行波; 虚线箭头表示初始行波传播方向。

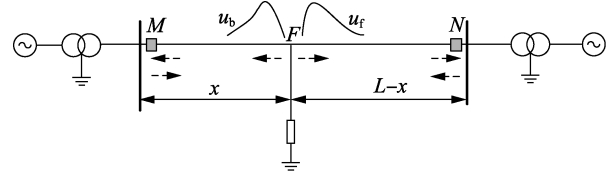


图 3 双端输电线路模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of dual-terminal transmission line model

根据式(1)可知,点 M 、 N 处测得的零模和线模电压行波首波头中频率为 ω_i 的高频分量 $u_M^{(q)}(x)$ 和 $u_N^{(q)}(x)$ 为:

$$\begin{cases} u_M^{(q)}(x) = |u_M^{(q)}| e^{j\theta_M^{(q)}} = 2 \frac{A^{(q)}}{\omega_i} e^{-\alpha_i^{(q)}x} e^{-j\beta_i^{(q)}x} \\ u_N^{(q)}(L-x) = |u_N^{(q)}| e^{j\theta_N^{(q)}} = 2 \frac{A^{(q)}}{\omega_i} e^{-\alpha_i^{(q)}(L-x)} e^{-j\beta_i^{(q)}(L-x)} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $|u_M^{(q)}|$ 和 $|u_N^{(q)}|$ 分别为点 M 和点 N 处测得的模量电压行波首波头信号中高频分量的幅值; $\theta_M^{(q)}$ 和 $\theta_N^{(q)}$ 分别为点 M 和点 N 处测得的模量电压行波首波头信号中高频分量的相位。

根据式(2),若假设故障初相角为 θ_f ,则点 M 和 N 处测得的零模、线模电压行波首波头信号中频率为 ω_i 的高频分量信号的实际相位为:

$$\begin{cases} \theta_M^{(0)} = -\beta_i^{(0)}x + \theta_f \\ \theta_M^{(1)} = -\beta_i^{(1)}x + \theta_f \\ \theta_N^{(0)} = -\beta_i^{(0)}(L-x) + \theta_f \\ \theta_N^{(1)} = -\beta_i^{(1)}(L-x) + \theta_f \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)可求得点 M 和 N 的模量电压行波首波头高频分量的相位差为:

$$\theta_M^{(0)} - \theta_M^{(1)} = (\beta_i^{(1)} - \beta_i^{(0)})x \quad (4)$$

$$\theta_N^{(0)} - \theta_N^{(1)} = (\beta_i^{(1)} - \beta_i^{(0)})(L-x) \quad (5)$$

式(4)与式(5)的比值为:

$$\frac{\theta_M^{(0)} - \theta_M^{(1)}}{\theta_N^{(0)} - \theta_N^{(1)}} = \frac{x}{L-x} \quad (6)$$

求解式(6),则故障距离百分比 d 为:

$$d = \frac{x}{L} \times 100\% = \frac{\theta_M^{(0)} - \theta_M^{(1)}}{\theta_N^{(0)} - \theta_N^{(1)} + \theta_M^{(0)} - \theta_M^{(1)}} \times 100\% \quad (7)$$

3 故障定位具体实现方法

本文方法的具体实现流程如图 4 所示,具体实施的核心包括高频分量的相位提取、模量电压行波首波头信号数据窗确定及提取信号分量频率确定。

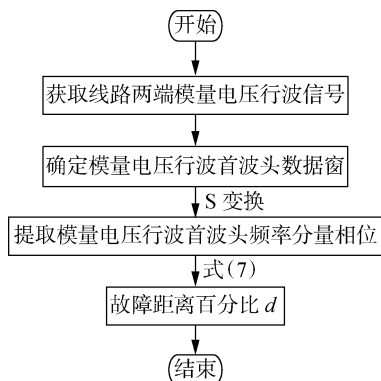


图 4 本文方法具体实施流程图

Fig.4 Flowchart of implementation of proposed method

3.1 高频分量相位提取算法

目前,提取信号某一频率分量相位的数学方法主要有复小波变换和 S 变换,但是复小波变换的分解结果较 S 变换误差更大,因此本文采用 S 变换提取模量电压行波高频分量相位^[15]。

S 变换实质上可看作是窗口可变的短时傅里叶变换,具有良好的时频特性^[15]。S 变换的结果是一个复数矩阵,矩阵的行对应频率,列对应采样点。理想情况下,矩阵的行向量中每个元素的相角均可以看作是该频率分量的相位,但是由于各种因素的影响,有些元素的相角与实际偏差较大,因此需要进行筛选,留下最接近实际情况的相位。类比小波变换可知,模值最大元素的相角最能代表该频率分量的相位。高频分量相位确定的具体步骤为:

a. 根据所提取的频率(S 变换分解尺度)确定复数矩阵中对应的行向量;

b. 求取行向量中每一个复数元素的模值,并计算模值最大的元素相角,该相角为所提取频率分量的相位。

3.2 模量电压行波首波头信号数据窗的选择

模量电压行波首波头信号数据窗的选择会影响 S 变换对高频分量相位的提取,进而影响故障定位精度。因此,需要确定数据窗长度以保证模量电压行波首波头信号中尽量少掺杂其他无用信号,具体步骤如下。

a. 确定行波信号突变点:设故障发生后,测得的零模电压行波信号序列为 $U_0 = [u_1, u_2, \dots, u_{k-1}, u_k, u_{k+1}, \dots, u_n]$, 根据式(8)所示判据确定行波信号突变点。

$$\frac{u_{k+1}}{u_k} \geq \varepsilon \text{ 且 } \frac{u_k}{u_{k-1}} < \varepsilon \quad (8)$$

其中, u_{k-1} 、 u_k 、 u_{k+1} 均不为 0; ε 为设定阈值,取 10^4 。对于同一频率的高频分量,近似认为该点亦为线模高频信号突变点。当存在噪声时,可采用小波变换确定突变点。

b. 确定模量电压行波首波头信号数据窗长度:选取突变点 k 前 5 个采样点及其后 P 个采样点为数据窗, $P=67$ 。

3.3 高频分量提取频率的确定

高频分量的频率应选择在行波系数频率特性曲线中较为陡峭的中间部分^[10]。为了选出最合适的频率,在 PSCAD 中搭建的 230 kV 双端输电线路不同位置处模拟 A 相接地故障,利用 S 变换提取双端测量点模量电压行波首波头中 4 个不同频率分量信号的相位,并代入式(7)进行计算,求取故障定位误差,结果如图 5 所示。由图可见,当提取频率为 82 kHz 时,定位结果满足工程应用要求(故障定位误差小于 2%)。因此,本文的提取频率为 82 kHz。

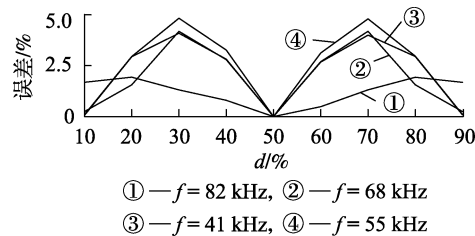


图 5 不同故障距离下利用各频率分量定位的误差曲线

Fig.5 Fault location errors of different frequency components under different fault distances

4 仿真验证与讨论

在 PSCAD 中搭建一条总长为 100 km 的 220 kV 输电线路,采用依频特性模型,在线路首端 M 和末端 N 处采集电压行波信号,如图 3 所示。仿真采样频率为 1 MHz。为了验证本文方法的有效性和可靠性,分别讨论了不同故障距离、故障初相角、故障电阻、同步测量误差、噪声及互感器测量误差对故障定位的影响。

4.1 故障距离、故障电阻、故障初相角的影响

模拟不同的故障距离、故障电阻、故障初相角的情况下,输电线路发生 A 相接地故障,故障定位结果如表 1 所示。表中, e 为故障定位相对误差^[3]; R_F 为故障电阻; δ_F 为故障初相角; δ_m 为小故障初相角(约为 5°)。从表中可看出:虽然个别情况下故障定位相对误差可达 1.5%,但大部分情况下定位相对误差小于 1%,可满足工程应用要求。

4.2 同步测量误差的影响

为了验证同步测量误差对本文方法的影响,保持点 M 处测得的信号不变,依次将点 N 测得的行波信号向后推迟 10、30、50 个点(即点 N 测量存在的同步误差时间分别为 10 μs 、30 μs 、50 μs),设置故障

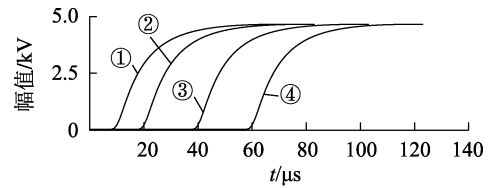
表 1 不同故障位置、故障电阻、故障初相角下的故障定位结果

$d/\%$	R_F/Ω	$\delta_F/(\circ)$	$\theta_M^{(0)}/\text{rad}$	$\theta_M^{(1)}/\text{rad}$	$\theta_N^{(0)}/\text{rad}$	$\theta_N^{(1)}/\text{rad}$	$e/\%$
10	δ_m	0	1.007 0	1.508 9	-1.721 3	1.347 2	1.056 0
		45	1.020 0	1.515 0	-1.730 7	1.354 9	0.824 4
		90	1.021 2	1.515 6	-1.731 7	1.355 7	0.803 0
		135	1.022 7	1.516 3	-1.732 8	1.356 5	0.777 3
13	δ_m	0	1.003 1	1.505 4	-1.718 9	1.343 8	1.090 3
		45	1.016 3	1.511 7	-1.728 1	1.351 6	0.856 4
		90	1.017 5	1.512 2	-1.729 0	1.352 3	0.834 8
		135	1.018 9	1.512 9	-1.730 1	1.353 2	0.808 9
200	δ_m	0	0.658 5	1.582 3	-1.796 8	1.254 7	0.760 4
		45	0.682 1	1.588 0	-1.843 0	1.263 1	1.421 2
		90	0.684 3	1.588 5	-1.844 2	1.263 9	1.463 9
		135	0.686 9	1.589 2	-1.845 5	1.264 8	1.515 3
24	δ_m	0	0.652 9	1.578 9	-1.794 5	1.251 2	0.686 1
		45	0.676 9	1.584 6	-1.840 5	1.259 6	1.352 3
		90	0.679 1	1.585 1	-1.841 7	1.260 4	1.395 5
		135	0.687 1	1.585 7	-1.843 0	1.261 4	1.447 3
34	δ_m	0	-0.189 4	1.430 1	-1.732 0	1.424 2	0.089 3
		45	-0.148 8	1.436 9	-1.736 5	1.431 1	0.640 1
		90	-0.145 0	1.437 5	-1.736 9	1.431 8	0.692 3
		135	-0.140 4	1.438 3	-1.737 5	1.432 5	0.755 4
48	δ_m	0	-0.199 1	1.426 7	-1.732 6	1.420 8	0.017 7
		45	-0.158 3	1.433 5	-1.737 1	1.427 8	0.534 6
		90	-0.154 5	1.434 2	-1.737 5	1.428 4	0.587 0
		135	-0.149 8	1.434 9	-1.738 0	1.429 2	0.650 3
55	δ_m	0	-1.038 0	1.491 5	-1.387 5	1.362 0	0.083 8
		45	-1.006 6	1.497 8	-1.372 1	1.369 4	0.260 2
		90	-1.003 5	1.498 4	-1.370 6	1.370 1	0.277 4
		135	-0.999 8	1.499 1	-1.397 6	1.371 0	0.552 3
65	δ_m	0	-1.017 4	1.488 1	-1.393 2	1.358 6	0.343 0
		45	-1.016 0	1.494 4	-1.378 1	1.366 1	0.224 9
		90	-1.012 9	1.495 0	-1.376 6	1.366 8	0.242 0
		135	-1.009 2	1.495 7	-1.374 8	1.367 6	0.262 7

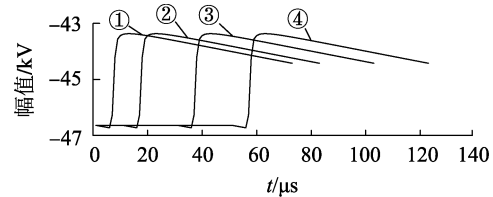
电阻为 200Ω 、故障初相角为 δ_m ，在线路不同位置处模拟 A 相接地故障。当线路中点发生故障时，点 N 处测得的原始电压行波首波头信号及推迟后的模量电压行波首波头信号如图 6 所示。各模量电压行波频率分量的相位和故障定位结果如表 2 所示，其中 E_{sm} 为同步测量误差（篇幅所限，仅展示后半段线路的故障测距结果）。由表 2 可见，同步测量误差对定位结果无影响。

4.3 噪声干扰的影响

为了验证噪声干扰对本文方法的影响，模拟不同故障位置处的 A 相接地故障，故障电阻设置为 200Ω ，故障初相角设为 δ_m （对应故障时刻为 0.05 s ）。将不同信噪比 SNR（Signal-to-Noise Ratio）的高斯白噪声加入点 M 和 N 处测得的模量电压行波信号中。采用小波变换确定信号突变点，利用本文方法进行故障测距。当故障点距离点 M 35 km （ $d = 35\%$ ）时，点 M 处测得的零模和线模电压行波信号和加入 SNR = 35 dB 的高斯白噪声后的信号如图 7 所示。图中，SNR = ∞ 表示未添加噪声。图 8 为原始



(a) 零模电压行波首波头信号



(b) 线模行波首波头信号

①—原始信号，②— $10 \mu\text{s}$ 同步误差信号
③— $30 \mu\text{s}$ 同步误差信号，④— $50 \mu\text{s}$ 同步误差信号

图 6 不同同步测量误差下点 N 处测得的模量电压行波首波头信号

Fig.6 Modulus wave front signals at terminal N with different synchronization errors

表 2 不同同步误差的定位结果

Table 2 Fault location results with different synchronous measuring errors

$d/\%$	$E_{sm}/\mu\text{s}$	$\theta_M^{(0)}/\text{rad}$	$\theta_M^{(1)}/\text{rad}$	$\theta_N^{(0)}/\text{rad}$	$\theta_N^{(1)}/\text{rad}$	$e/\%$
55	10	-1.532 9	1.347 1	-0.843 9	1.498 9	0.143 5
	30	-1.532 9	1.347 1	-0.843 9	1.498 9	0.143 5
	50	-1.532 9	1.347 1	-0.843 9	1.498 9	0.143 5
65	10	-1.812 0	1.174 8	-0.453 4	1.290 6	1.865 1
	30	-1.812 0	1.174 8	-0.453 4	1.290 6	1.865 1
	50	-1.812 0	1.174 8	-0.453 4	1.290 6	1.865 1
75	10	-1.788 1	1.387 2	0.425 4	1.460 3	0.581 2
	30	-1.788 1	1.387 2	0.425 4	1.460 3	0.581 2
	50	-1.788 1	1.387 2	0.425 4	1.460 3	0.581 2
85	10	-1.743 4	1.217 2	1.063 8	1.613 1	0.650 9
	30	-1.743 4	1.217 2	1.063 8	1.613 1	0.650 9
	50	-1.743 4	1.217 2	1.063 8	1.613 1	0.650 9

信号加入不同 SNR 高斯白噪声后的故障测距误差。从图 8 中可以看出，随着 SNR 的减小（高斯白噪声水平升高），故障测距误差有所增加。这主要是由于高斯白噪声水平增加时，S 变换提取信号相位信息的误差有所增加，导致故障测距误差增加。

4.4 互感器测量误差的影响

行波高频分量衰减较低频分量更显著，经过一定的传播距离后，其幅值会有衰减。在一定的输电距离内，线模行波高频分量衰减较零模行波小得多。虽然本文方法采用了零模行波，但行波衰减对本文方法影响并不大，这是因为本文提取的模量电压行波信号分量的频率并不高，且本文方法利用相位信息进行故障测距，并非幅值信息，行波幅值衰减几乎没有影响。

现有的电压互感器（除电子式电压互感器外）二次侧无法精确反映一次侧信号的暂态特性。根据相关研究，常用的电容式电压互感器二次侧信号相

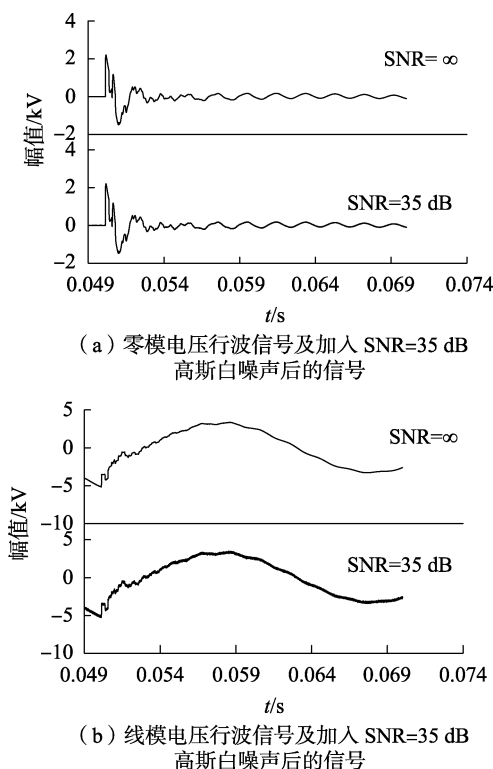


图7 点M处模量电压行波信号及加入SNR=35 dB高斯白噪声后的信号

Fig.7 Modulus voltage traveling waves at terminal M and corresponding signals with white Gaussian noise(SNR=35 dB)

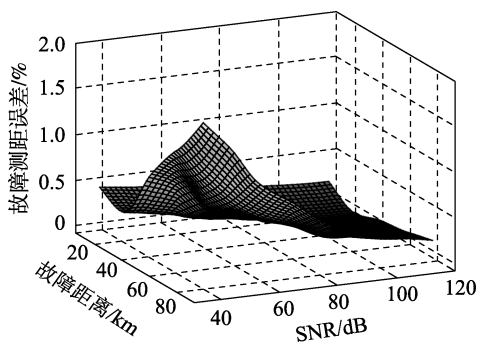


图8 不同SNR下的故障测距误差

Fig.8 Fault location errors with different values of SNR

比于一次侧信号,除了幅值会有衰减外,信号会发生一定程度的滞后,即信号频率分量的相位会滞后。假设线路上安装的电压互感器二次侧信号滞后一次侧信号的采样点个数为 ΔS ,则在1 MHz采样频率下,二次侧信号滞后的相位 $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta S}{0.02 \times 10^6} \times 2\pi \quad (9)$$

进一步地,线路首端点M和末端点N处行波频率分量的相位可表示为:

$$\begin{cases} \tilde{\theta}_M^{(q)} = -\beta_i^{(q)} x + \theta_i + \Delta\theta \\ \tilde{\theta}_N^{(q)} = -\beta_i^{(q)} (L-x) + \theta_i + \Delta\theta \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知:虽然电压互感器二次侧频率分

量存在相位滞后,但是线路首、末端相应频率分量信号的相位差并没有改变,仍然与式(4)、(5)保持一致,故障测距方程也没有发生变化。综上所述,电压互感器的测量误差和行波衰减对于本文方法无显著影响。

5 结论

本文基于模量电压行波首波头信号高频分量在输电线路上传播时发生畸变的特性,提出利用线路双端测量点测得的线模与零模电压行波首波头高频分量的相位与故障距离之间的线性关系来进行单相接地故障定位。本文方法利用了模量行波首波头特定高频分量的传播特性,克服了传统模量行波故障定位忽略其首波头畸变特性的缺点。经过仿真验证,本文方法的定位结果基本不受故障距离、故障初相角、故障电阻等各种因素的影响,对同步测量亦无要求,具有较高的理论和工程实践意义。本文方法仅适用于同型输电线路,未来将致力研究混合线路的测距方法。

参考文献:

- [1] 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 Weifu. Traveling wave fault location based on multiple current measurements for transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 39-45.
- [2] JIAO Xiangqing, LIAO Yuan. Accurate fault location for untransposed/transposed transmission lines using sparse wide-area measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1797-1805.
- [3] 夏经德,张向聪,黄新波,等. 基于纵向阻抗的双端量故障测距新算法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 133-139.
XIA Jingde, ZHANG Xiangcong, HUANG Xinbo, et al. Fault locating based on longitudinal impedance according to dual-terminal variables[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 133-139.
- [4] 牛睿,梁军,负志皓,等. 基于故障距离区间的混联线路单端行波测距[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 156-163.
NIU Rui, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. A fault distance interval based single terminal traveling wave fault location method for hybrid transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 156-163.
- [5] 刘可真,束洪春,于继来,等. ± 800 kV特高压直流输电线路故障定位小波能量谱神经网络识别法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 141-147, 154.
LIU Kezhen, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Fault location based on wavelet energy spectrum and neural network for ± 800 kV UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 141-147, 154.
- [6] REDDY M J B, RAJESH D V, GOPAKUMAR P, et al. Smart fault location for smart grid operation using RTUs and computational intelligence techniques[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(4): 1260-1271.
- [7] XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Self-adapted single-

- ended travelling wave fault location algorithm considering transfer characteristics of the secondary circuit[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(14):1913-1921.
- [8] 张广斌,束洪春,于继来,等. 基于回路电流故障主导波头到达时差的输电线路故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28):137-145.
- ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Traveling wave fault location for transmission lines based on arrival time difference of dominant fault induced current waves in closed loop circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28):137-145.
- [9] HAMIDI R J, LIVANI H. Traveling-wave-based fault-location algorithm for hybrid multiterminal circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1):135-144.
- [10] 徐铭铭,肖立业,林良真. 基于零模行波衰减特性的配电线路单相接地故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14):397-404.
- XU Mingming, XIAO Liye, LIN Liangzhen. A fault location method for the single-phase-to-earth fault in distribution system based on the attenuation characteristic of zero-mode traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14):397-404.
- [11] 张峰,梁军,李建超,等. 基于初始反极性行波检测的单端故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4):108-113.
- ZHANG Feng, LIANG Jun, LI Jianchao, et al. Single ended fault location algorithm based on detection of initial reverse polarity traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4):108-113.
- [12] 高洪雨,陈青,徐丙垠,等. 输电线路单端行波故障测距新算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 37(5):121-127.
- GAO Hongyu, CHEN Qing, XU Bingyin, et al. Fault location algorithm of single-ended traveling wave for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 37(5):121-127.
- [13] ESMAEILIAN A, KEZUNOVIC M. Fault location using sparse synchrophasor measurement of electromechanical-wave oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4):1787-1796.
- [14] 张帆,潘贞存,马琳琳,等. 基于模量行波传输时间差的线路接地故障测距与保护[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10):78-83.
- ZHANG Fan, PAN Zhencun, MA Linlin, et al. Transmission line fault location and protection based on the gap between zero mode and aerial mode traveling wave propagation time[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10):78-83.
- [15] 张文海,肖先勇,汪颖. 基于故障暂态信号及其衰减特征的配网单相接地故障测距[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3):46-52.
- ZHANG Wenhai, XIAO Xianyong, WANG Ying. Single-phase-to-ground fault location based on transient fault signal and its attenuation character for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):46-52.

作者简介:



程孟晗

程孟晗(1997—),女,江苏徐州人,主要研究方向为输电线路行波测距(E-mail: cehngmenghan@163.com);

褚宁(1994—),男,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向为输电线路故障定位(E-mail: cumtnick@163.com);

梁睿(1981—),男,江苏灌云人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统及其自动化、供配电安全及保护(E-mail: cumtlr@126.com)。

Single-phase grounding fault location based on phase relation between multi-modulus traveling waves for transmission line

CHENG Menghan¹, CHU Ning^{1,2}, LIANG Rui^{1,2}, PENG Nan^{1,2}

(1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Jiangsu Province Laboratory of Electrical and Automation Engineering for Coal Mining, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to make full use of the phase information of initial modulus traveling wave and overcome the error of traditional initial modulus traveling wave front identification method, a single-phase grounding fault location method is proposed based on the distortion characteristics and dispersion effect of the modulus traveling wave propagating on the transmission line, which locates single-phase grounding fault by using the phase relation between the same high-frequency components of initial zero-mode and aerial-mode voltage traveling waves at two-terminal measuring points. The proposed method does not require accurate synchronization at both terminals, nor does it depend on the arrival time of the modulus traveling waves and wave velocity information. The transmission line model is built on PSCAD and the simulation is carried out. The simulative results show the effectiveness and reliability of the proposed method.

Key words: modulus traveling waves; distortion; phase relation; transmission line; electric fault location