

高压电缆在线行波故障测距算法的设计

杨建, 唐忠

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 研究了模量电流信号在高压交叉互联电缆中的传播特性, 提出了以电流模量4作为高压电缆的行波测距信号。并设计了不受电缆波速变化影响的在线行波测距算法, 有效解决了交叉互联电缆波阻抗不连续造成的行波折射反射复杂问题, 以及内外模量行波的交叉透射问题。算法通过提取故障暂态行波中能量百分比比较高的频带进行暂态行波的重构, 有效降低了暂态行波的频带宽度, 减小了行波色散对测距结果的影响。EMTP仿真及Matlab计算表明该算法适应性好, 测距精度高。

关键词: 电缆; 交叉互联; 故障测距; 行波色散; EMTP

Design of online travelling wave based fault location algorithm for HV power cable

YANG Jian, TANG Zhong

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electrical Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: This paper analyzes the propagation characteristic of modal current in cross bounding power cable, and designs an online fault location algorithm for HV power cable by using current mode 4 as fault location signal. The algorithm is independent of the propagation velocity, which can solve the problem of complicated reflection and refraction of traveling wave on cross-bounded power cable and the problem of inner mode and outer mode wave crossing into each other. By extracting the frequency band of high energy in the transient traveling wave to reconstruct the transient wave, the bandwidths is significantly reduced, thus the influence of wave dispersion is decreased. EMTP simulation and Matlab calculation results show that the fault location algorithm is not only feasible but also has higher accuracy.

Key words: power cable; cross-bonded; fault location; traveling wave dispersion; EMTP

0 引言

高压电缆充电电流比较大且故障多为高阻或闪络型故障, 实际中很难产生足够高的电压将故障点击穿^[1], 并且高压电缆一般采用金属护层交叉互联的接地方式, 波阻抗不连续, 行波在交叉互联电缆上传播会产生复杂的折射反射, 造成故障点反射波难以识别^[2]。离线测距不适用于高压电缆的故障测距, 只适用于电压等级在35 kV以下的中低压电缆的故障测距。随着高压输电电缆的广泛应用, 研究适用于高压电缆的在线故障测距算法是非常有必要的。传统的高压电缆在线测距算法一般都假设行波在电缆中的传播速度为常数, 没有考虑电缆运行参数变化及行波色散对行波波速的影响^[3-4], 测距精度不高。

本文研究了行波信号在交叉互联电缆中的传播特性, 提出了以电流模量4作为行波测距信号的在线故障测距算法。算法不受电缆波速变化的影响。有效解决了交叉互联电缆波阻抗不连续造成的行波折射反射复杂问题以及内外模量行波的交叉透射问题。算法通过提取暂态行波中能量百分比比较高的频带进行暂态行波的重构, 有效降低了暂态行波的频带宽度, 减小了行波色散对测距结果的影响。最后通过EMTP仿真及Matlab计算验证了该算法的可行性及适应性。

1 行波的折射反射

输电线路都有电感和电容, 线路发生故障会产生电压、电流突变, 这一变化并不能立即出现在线路其他部分, 而是以电磁波的形式按照一定的速度从电压或电流突变点向线路其他部位传播。这个沿输电线路传播的电压波和电流波称为行波。行波在

波阻抗不连续点会产生反射和折射。设两段波阻抗不同的线路相连, 行波从波阻抗为 Z_1 的线路传播到波阻抗为 Z_2 的线路, 在线路接点处会产生如图 1 所示的折、反射现象。

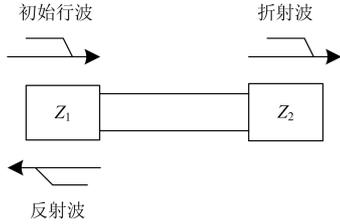


图 1 行波折反射规律

Fig. 1 Reflection and refraction of wave

根据电缆电压、电流的连续性有

$$\begin{cases} u_0 + u_r = u_q \\ i_0 + i_r = i_q \end{cases}$$

式中: u_0 、 u_r 、 u_q 分别为入射、反射和折射电压行波; i_0 、 i_r 、 i_q 分别为入射、反射和折射电流行波。

电压、电流行波之间的关系满足:

$$\begin{cases} i_0 = Z_1^{-1} u_0 \\ i_r = -Z_1^{-1} u_r \\ i_q = Z_2^{-1} u_q \end{cases}$$

由以上两式可得电流行波的折、反射系数 α_i 、 β_i 分别为

$$\begin{cases} \alpha_i = 2Z_1(Z_1 + Z_2)^{-1} \\ \beta_i = (Z_1 - Z_2)(Z_1 + Z_2)^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

2 行波测距信号的选取

2.1 电缆的模量信号

三相单芯电力电缆是由导电芯线和金属护套组成的六导体系统, 六导体系统之间存在着耦合, 为了在电缆系统中采用行波方法测距, 必须将电缆的电压、电流信号通过相模变换矩阵转换成互相独立的模量信号进行分析, 本文采用扩展 Clark 矩阵对电缆系统进行相模变换^[5]。

扩展 Clark 矩阵形式的电流相模变换矩阵为

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & -q \\ q & q \end{bmatrix}$$

式中, q 为 Clark 矩阵。

由于外模量以金属护层和大地为回路, 传播特性不稳定, 衰减系数大, 本文主要研究电缆内模量电流的传输特性^[6]。相模变换后模电流与相电流之间的关系为

$$\begin{cases} \text{外模量} \begin{cases} i_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c + i_A + i_B + i_C) \\ i_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c + i_A - 2i_B + i_C) \\ i_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c + i_A - i_C) \end{cases} \\ \text{内模量} \begin{cases} i_4 = -\frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c) \\ i_5 = -\frac{1}{\sqrt{6}}(i_a - 2i_b + i_c) \\ i_6 = -\frac{1}{\sqrt{2}}(i_a - i_c) \end{cases} \end{cases}$$

式中: i_a 、 i_b 、 i_c 分别为三相芯线电流; i_A 、 i_B 、 i_C 分别为三相护套电流; $i_1 \sim i_6$ 分别是电流模量 1~模量 6 在扩展 Clark 矩阵变换下的表达式。

2.2 行波在交叉互联电缆中的波速干扰

对于金属护层采用交叉互联方式接地的电缆, 行波传播到交叉互联点和直接接地点, 会因波阻抗不连续而发生折反射。如图 2 所示, 在直接接地点, 外模量会被接地点拦截而流入大地, 内模量则完好无损地通过^[7], 即在直接接地点, 外模量行波不会给内模量行波带来干扰。在交叉互联点, 内外模量会因行波的折反射而发生相互转换, 由于内、外模量波速不同, 行波整体波速表现为内外模量的混合波速。

对于直埋电缆, 内模量波速大于外模量波速, 内模量行波先到达测量点, 外模量不会干扰内模量行波。对于架空敷设或隧道敷设的电缆, 外模量行波波速大于内模量波速, 外模量行波先到达测量点, 会给内模量行波波头的识别带来干扰, 造成内模量行波波头难以识别。

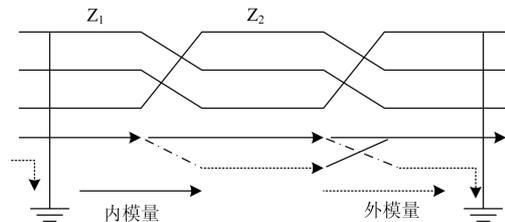


图 2 交叉互联电缆内外模量的转换

Fig. 2 Transition between inner and outer module for cross-bounded power cable

2.3 内外模量波速干扰的解决方法

对于交叉互联电缆, 由于金属护层的交叉换位连接, 在互联点前后, 波阻抗不连续。对互联点前的波阻抗矩阵 Z_1 的行、列进行相应的换位即可得到

互联点后的波阻抗矩阵 Z_2 , 即 $Z_2=PZ_1P^T$ 。对于图 2 所示的换位情况, 变换位矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

其中阻抗矩阵的排列顺序为: a 相线芯, b 相线芯, c 相线芯, a 相护套, b 相护套, c 相护套。

通过计算可得某 220 kV 隧道敷设的电缆, 采用图 2 所示的交叉互联方式, 在频率为 1 kHz 时的波阻抗矩阵为

$$Z_1 = \begin{bmatrix} 39.84 & 8.12 & 6.71 & 22.8 & 8.13 & 6.71 \\ 8.12 & 39.38 & 8.12 & 8.13 & 22.33 & 8.13 \\ 6.71 & 8.12 & 39.84 & 6.71 & 8.13 & 22.8 \\ 22.8 & 8.13 & 6.71 & 22.77 & 8.14 & 6.72 \\ 8.13 & 22.33 & 8.13 & 8.14 & 22.3 & 8.14 \\ 6.71 & 8.13 & 22.8 & 6.72 & 8.14 & 22.7 \end{bmatrix}$$

互联点后的波阻抗矩阵 $Z_2=PZ_1P^T$, 将 Z_1 、 Z_2 代入式(1)可得电流行波的折射系数矩阵 α_i 和反射系数矩阵 β_i 。

电流行波在模量域的折反射关系满足:

$$\begin{cases} i_q = QI_{qm} \\ i_0 = QI_{0m} \\ i_q = \alpha_i i_0 \end{cases}$$

式中: I_{0m} 和 I_{qm} 分别为由 6 个模量电流组成的入射模量电流矩阵和折射模量电流矩阵; Q 为电流相模变换矩阵。

由上式可得: $i_{qm} = Q^{-1}\alpha_i Q \cdot i_{0m}$ 。

所以电流行波在模量域的折射系数矩阵为:

$\alpha_m = Q^{-1}\alpha_i Q$, 通过 Matlab 计算可得

$$\alpha_m = \begin{bmatrix} 1.0001 & -0.0560 & -0.0302 & 0.0001 & -0.0564 & -0.0457 \\ -0.0092 & 1.8107 & 0.7298 & -0.0117 & 0.4234 & 1.1992 \\ -0.0059 & -0.7132 & 1.8949 & -0.0055 & -1.1612 & 0.4894 \\ -0.0000 & 0.0270 & 0.0156 & 0.9999 & 0.0271 & 0.0232 \\ 0.0012 & -0.8385 & -0.4833 & 0.0020 & 0.1614 & -0.7183 \\ 0.0040 & 0.5015 & -0.8670 & 0.0045 & 0.7262 & 0.1332 \end{bmatrix}$$

模量电流经交叉互联点折射到下一段线路的电流为: $i_{qm} = [i_{qm1} i_{qm2} i_{qm3} i_{qm4} i_{qm5} i_{qm6}] = \alpha_m i_{0m}$, 除对角线元素外 α_m 第 4 列的元素很小, 且明显小于其他各列的元素, 说明在交叉互联点, 其他模量电流透射到电流模量 4 中的分量最小。由 $\alpha_{m44}=0.9999$, 可知电流模量 4 在交叉互联点基本全部发生折射, 不发

生反射。因此, 采用电流模量 4 作为交叉互联电缆行波测距信号, 可以有效解决行波折反射复杂造成的故障点反射波难以识别的问题。

α_m 第 4 行的前三个元素明显小于其他各行相应的元素, 说明外模量行波(模量 1~3)在交叉互联点透射到电流模量 4 的分量很小, 基本不会干扰电流模量 4 行波的波头。因此, 对于交叉互联电缆, 选用电流模量 4 作为行波测距信号, 可以最大限度地消除内外模量交叉透射给行波测距带来的干扰问题。

3 行波的色散

3.1 行波色散对故障测距的影响

高压电缆的线芯和金属护层在通有交流电时有趋肤效应, 线路的电阻和电感会随电流频率的变化而变化。线路对于不同频率分量的行波会呈现出不同的传输特性, 电缆系统在频域的传播系数为^[8]

$$\gamma(\omega) = \sqrt{ZY} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega)$$

式中: Z 、 Y 分别为电缆的阻抗矩阵和导纳矩阵; $\alpha(\omega)$ 为幅值衰减系数, 使得不同频率信号的幅值衰减不同; $\beta(\omega)$ 为相位系数, 使得不同频率信号的波速衰减不同, 电流行波和电压行波具有相同的传播系数。

电缆故障时产生的暂态行波具有从低频到高频的连续频谱, 由于不同频率分量的行波传播速度不同, 衰减也不同, 行波沿电缆线路传播过程中会发生色散, 使得行波波头趋于平缓, 整体波速趋于下降, 给行波测距中波头的识别和波速的确定带来很大困难。由行波色散产生的误差对于架空线路的故障测距而言尚可接受^[9], 而对于频变特性更强、测距精度要求更高的电缆线路而言却是不可接受的。

3.2 行波信号的小波包分解与重构

小波包分析可以将信号分解为低频近似部分与高频细节部分, 低频(高频)部分又可以分解成第二层低频部分与高频部分^[10]。经过 n 层分解, 信号就被分解在 2^n 个不同的频带。小波包分解树如图 3 所示。

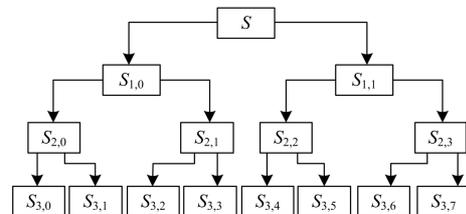


图 3 小波包分解树

Fig. 3 Wavelet packet decomposition tree

其中, $S_{n,j}$ 表示第 n 层, 第 j 个节点的小波包分解系数。

小波包分解系数具有能量的量纲^[10-11], 可以利

用小波包分解系数来计算各个频带能量的大小, 根据重构小波包系数可得各个频带的能量:

$$E_{n,j} = \sum_{k=1}^N |d_{j,k}|^2$$

式中: n 为小波包分解的层数; N 为行波信号的采样点数。 $d_{j,k}$ ($j=0,1,2,\dots,2^n-1, k=1,2,\dots,N$) 表示第 n 层第 j 个节点的小波包重构系数。

对第 n 层每个频带的能量进行归一化处理, 可得各个频带能量所占的百分比 η_j 。

$$\eta_j = \frac{E_{n,j}}{\sum_{j=0}^{2^n-1} E_{n,j}} \times 100\%$$

然后提取暂态行波中能量百分比中比较高的频带进行小波包重构。通过对暂态行波的分解与重构, 有效降低了暂态行波的频带宽度, 减小了行波色散对测距结果的影响。

4 在线行波测距算法的设计

4.1 故障发生在电缆前半段

设 t_1 、 T_1 分别为故障初始行波浪涌到达线路两端的时间, 若 $t_1 < T_1$, 说明故障发生在电缆的前半段, 此时故障点的行波在电缆线路上的折反射情况如图 4 所示。

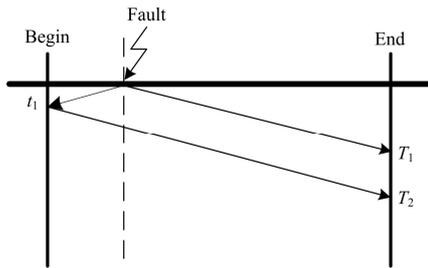


图 4 电缆前半段故障时行波折反射

Fig. 4 Reflection and refraction of wave when fault occurred in first half of cable

其中: t_1 为初始行波到达电缆始端测量点的时间; T_1 、 T_2 分别为电缆末端初始行波及第二个行波到达测量点的时间。

考虑到现实中电缆一般采用蛇形敷设, 电缆的实际长度并不易求得^[12]。设电缆的实际长度 l 和地理长度 L 之间的关系近似为: $l = \lambda L$, λ 为蛇形敷设电缆实际长度与地理长度之间的比例系数。

行波在电缆中的波速:

$$\begin{cases} v = \frac{l}{T_2 - t_1} \\ l = \lambda L \end{cases}$$

故障点距电缆始端的距离:

$$\begin{cases} l_f = \frac{1}{2}v(T_2 - T_1) \\ l_f = \lambda L_f \end{cases}$$

联立以上两式可得故障点距电缆始端的地理距离为

$$L_f = \frac{L(T_2 - T_1)}{2(T_2 - t_1)} \quad (2)$$

4.2 故障发生在电缆后半段

若 $t_1 > T_2$, 说明故障发生在电缆的后半段, 此时故障点的行波在电缆线路上的折反射情况如图 5 所示。

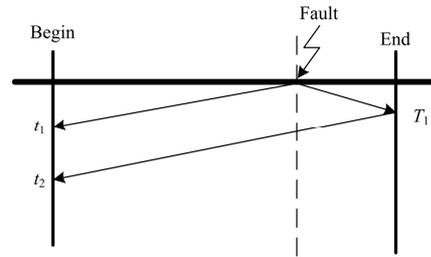


图 5 电缆后半段发生故障时行波折反射

Fig. 5 Reflection and refraction of wave when fault occurred in second half of cable

其中: t_1 和 T_1 为初始故障行波浪涌到达电缆两端测量点的时间; t_2 为末端反射波到达测量点的时间。

行波信号在电缆中的传播速度:

$$\begin{cases} v = \frac{l}{t_2 - T_1} \\ l = \lambda L \end{cases}$$

故障点距电缆始端的距离:

$$\begin{cases} l_f = l - \frac{1}{2}v(t_2 - t_1) \\ l_f = \lambda L_f \end{cases}$$

联立以上两式可得故障点距电缆始端的地理距离为

$$L_f = L - \frac{L(t_2 - t_1)}{2(t_2 - T_1)} \quad (3)$$

本测距算法需要的已知条件仅为电缆的地理长度, 且算法不受电缆波速变化的影响。

5 ATP-EMTP 仿真分析

利用电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 建立 220 kV 电缆系统仿真模型, 电缆地理长度为 4 500 m, 仿真步长为 1E-7 s, 仿真时间为 0.01 s, 电缆的原始

参数如表 1 所示。

表 1 220 kV 单芯电缆原始参数

Table 1 Parameter of 220 kV single core cable

结构	参数	参数值
导体	材料	铜
	电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)	1.7E-8
	外径/mm	45.0
	相对磁导率	1
主绝缘	内径/mm	49
	外径/mm	103
	相对介电常数	2.3
金属护套	材料	波纹铝
	电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)	2.8E-8
	内径/mm	111
	外径/mm	116.8
护层绝缘	外径	148
	相对介电常数	3.5

5.1 在线故障测距仿真实例

故障点设在距电缆始端 3 000 m 处，电缆带负荷正常运行，在 $t=0$ 时刻发生 a 相线芯对金属护套短路故障。选取合适的时间窗，提取故障发生时刻附近的波形，电缆首端和末端信号采集装置记录到故障波形如图 6 所示，横坐标为时间 t/ms ，纵坐标为电流模量信号幅值 I/kA 。

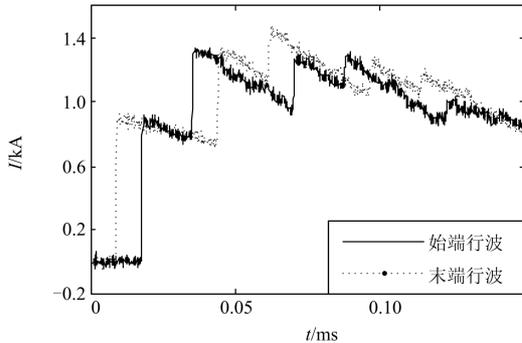


图 6 电缆故障暂态行波

Fig. 6 Transient wave generated by cable fault

对电缆始端和末端波形进行 3 层小波包分解，将故障暂态行波分解成具有相同频宽的 8 个不同的频带，然后根据每个频带的小波包分解系数计算各个频带的能量百分比，从而得到电缆始末端行波的能量频谱图如图 7、图 8 所示。

由始末端故障行波的能量谱可知，行波的能量主要集中在频带 1 和频带 2，分别提取电缆始末端行波频带 1 和频带 2 的小波包分解系数，重构故障暂态行波如图 9 所示。

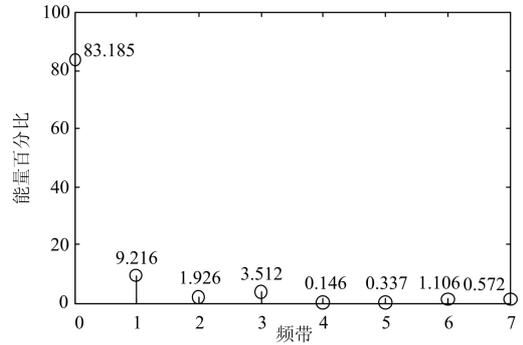


图 7 始端行波能量频谱图

Fig. 7 Band energy ratio of sending end

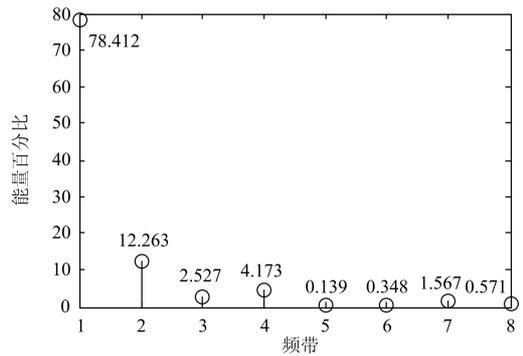


图 8 末端行波能量频谱图

Fig. 8 Band energy ratio of receiving end

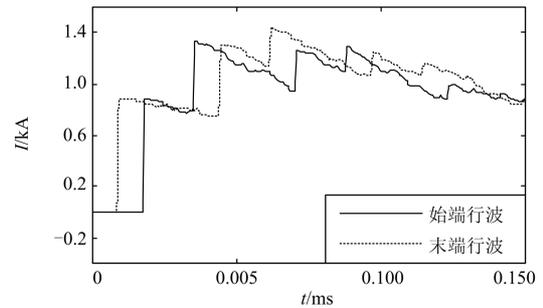


图 9 重构故障行波

Fig. 9 Refactoring fault traveling wave

对图 9 重构故障波形进行小波分析，确定初始行波到达电缆始末端的时间 t_1 、 T_1 ，根据 t_1 、 T_1 的大小判断故障发生的区域。如果故障发生在电缆前半段，再求出电缆末端第二个行波波头到达测量点的时间 T_2 ，代入式(2)求出故障距离。如果判断故障发生在电缆后半段，求出电缆始端第二个行波波头到达测量点的时间 t_2 ，代入式(3)求出故障距离。

5.2 测距算法适应性的验证

5.2.1 算法在不同故障距离下的测距精度

仿真电缆在不同故障距离下算法的测距精度、测距结果如表 2 所示。

表 2 不同故障距离下测距精度

Table 2 Algorithm accuracy at different fault location

故障距离/m	计算距离/m	相对误差/%
500	479.08	0.46
1 500	1 480.02	0.44
2 500	2 498.13	0.042
3 000	3 020.15	0.44
3 500	1 009.49	0.21

仿真表明, 在不同故障距离下, 测距算法都能达到很高的测距精度。

5.2.2 不同故障电阻下算法的测距精度

行波信号中高频分量的衰减系数比低频分量, 对电阻的变化更为敏感^[13], 接地电阻的增大会导致行波信号中高频分量的含量减少, 检测到的行波波速会偏小, 从而对行波测距带来影响。仿真电缆在距始端 3 000 m 处发生 a 相线芯对金属护层短路, 不同故障电阻下算法的测距精度、测距结果如表 3 所示。

表 3 不同故障电阻下的测距精度

Table 3 Algorithm accuracy at different fault resistance

短路电阻/ Ω	计算距离/m	相对误差/%
10	3 019.34	0.43
100	2 985.77	0.32
500	3 022.18	0.50
1 000	3 025.64	0.57

由于该算法不受波速变化的影响, 接地电阻增大对行波波速带来的影响并不能影响到算法的测距精度。由表 3 仿真结果可知, 该测距算法精度不受接地电阻变化的影响。

5.2.3 算法在不同故障类型下的测距精度

仿真电缆在距始端 3 000 m 处发生不同故障时算法的测距精度, 测距结果如表 4 所示。

表 4 不同故障类型下的测距精度

Table 4 Algorithm accuracy at different type of fault

故障类型	计算距离/m	相对误差/%
单相接地	3 017.36	0.39
两相接地	3 021.57	0.48
三相接地	失效	∞
断线	2 977.21	0.51

由仿真结果可知, 该算法在除三相短路外的其他故障类型下均有很高的测距精度, 实际中高压电缆故障多为单相接地故障, 两相接地故障、三相接地故障一般都是发生单相接地故障没有及时处理形成的。故障测距系统在电缆发生单相接地故障时就能给出故障距离, 并且高压电缆为单芯电缆, 相与

相之间都有一定的敷设间距, 三相电缆在相同距离处同时发生短路故障的概率基本为零。因此, 我们可以认为该算法对不同类型的故障具有很好的适应性。

5.2.4 电缆参数变化对测距算法精度的影响

电缆主绝缘的介电常数会随着电缆的老化而发生变化, 从而影响行波信号在电缆中的传播速度。仿真电缆在距始端 3 000 m 处发生 a 相线芯对金属护套短路, 相对介电常数变化时(正常时为 2.3), 算法的测距精度、测距结果如表 5 所示。

表 5 不同介电常数下的测距精度

Table 5 Algorithm accuracy at different cable parameters

相对介电常数	波速/(m/ μ s)	计算距离/m	相对误差/%
2	183.7	2 966.36	0.75
2.3	171.1	3 017.34	0.44
2.8	154.6	2 984.92	0.34
4.6	120.3	3 020.31	0.44
8	90.7	3 008.12	0.18

由表 5 仿真结果可知, 随着电缆的老化, 行波在电缆中的传播速度变化很大, 但算法的测距精度并没发生太大变化, 即该算法的测距精度并不受电缆参数变化的影响。

6 结论

本文研究了模量电流信号在交叉互联电缆中的传播特性, 提出以电流模量 4 作为高压电缆的行波测距信号, 并设计了不受波速变化影响的测距算法, 有效解决了交叉互联电缆波阻抗不连续造成的行波折反射复杂问题以及内外模量行波的交叉透射问题。对于故障暂态行波, 算法通过提取暂态行波中能量百分比比较高的频带进行暂态行波的重构, 有效降低了暂态行波的频带宽度, 减小了行波色散对故障测距的干扰, 提高了测距精度。EMTP 仿真及 Matlab 计算表明该算法的适应性好, 测距精度高。

参考文献

- [1] 王玮, 蔡伟, 张元芳, 等. 基于阻抗法的电力电缆高阻故障定位理论及试验[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 38-41.
WANG Wei, CAI Wei, ZHANG Yuanfang, et al. Theory and experiment of a cable fault location method based on impedance and using frequency-variable source[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 38-41.
- [2] 陈玉林, 陈允平, 孙金莉. 高压电缆金属护套交叉点行波折反射的规律[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 11-14.

- CHEN Yulin, CHEN Yunping, SUN Jinli. Study of traveling wave save at the sheath-crossing point of high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 11-14.
- [3] 夏成军, 李勇, 金兵梅, 等. 基于护套电流和的 110 kV GIS 终端电缆行波故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 91-97.
- XIA Chengjun, LI Yong, JIN Bingmei, et al. Fault location of 110 kV GIS terminal cable by traveling wave based on the sum of the sheath current[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 91-97.
- [4] GUSTAFSSON S, BIRO T, CINAR G, et al. Electromagnetic dispersion modeling and measurements for HVDC power cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6): 2439-2447.
- [5] 张宏. GIS 终端高压电缆故障在线行波测距研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- ZHANG Hong. Research on on-line travelling wave fault location for high voltage cable in GIS terminal[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [6] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [7] 陈玉林, 龚庆武, 陈允平, 等. 高压电缆护层交叉互联时的行波故障测距[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 799-803.
- CHEN Yulin, GONG Qingwu, CHEN Yunping, et al. Traveling wave fault location for cross-bonded HV cables[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 799-803.
- [8] 张伟, 张龙, 黄志伟, 等. 考虑频变参数的交联聚乙烯电缆中局部放电传播特性的时域分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3461-3467.
- ZHANG Wei, ZHANG Long, HUANG Zhiwei, et al. Time domain analysis of partial discharge propagation in cross-linked polyethylene cables considering frequency dependent parameters[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3461-3467.
- [9] 林圣, 何正友, 陈鉴, 等. 基于行波时频特征的单端故障测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 258-264.
- LIN Sheng, HE Zhengyou, CHEN Jian, et al. A single terminal fault location method based on time-frequency characteristic of traveling wave[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 258-264.
- [10] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.
- YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.
- [11] 任琴, 舒勤, 刘勇. 基于对称注入法反射波特征提取的配电网故障测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 19-25.
- REN Qin, SHU Qin, LIU Yong. A fault location algorithm for distribution network based on extracting features from the reflected wave of symmetrical injection method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 19-25.
- [12] 周毓捷, 姜芸, 蒋晓娟. 远距离跨海大桥高压电缆敷设工程[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 87-90.
- ZHOU Yunjie, JIANG Yun, JIANG Xiaojuan. Cable laying project of long distance bridge cutting across sea[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 87-90.
- [13] 于洋, 孙学锋, 高鹏, 等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 148-154.
- YU Yang, SUN Xuefeng, GAO Peng, et al. Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 148-154.

收稿日期: 2015-08-11; 修回日期: 2015-09-23

作者简介:

杨建(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电缆在线监测及故障测距; E-mail: 1048828776@qq.com

唐忠(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制、电能质量分析与节能。E-mail: tangzhong64@163.com

(编辑 魏小丽)