

电缆故障测距的模型仿真与系统设计

金增杰¹, 卫永琴¹, 张琦², 王潇龙¹

(1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 国家电网山东省电力公司检修公司, 山东 济南 272000)

摘要: 针对电缆发生故障后难以准确定位的问题, 提出了一种多频相位法的故障测距方法。构建了电缆故障行波分离的等效模型, 在此基础上对短路和断路两种故障情况推导出不同的测距公式。在软件 Matlab 中建立电缆故障模型, 通过选择不同的故障距离和频率分别对短路和断路故障进行仿真分析, 仿真结果证实了此测距方法的准确性。最后在理论研究和仿真分析的基础上, 设计了一套电缆故障测距系统, 实验结果进一步验证了此方法的可行性和优越性。

关键词: 多频; 相位法; 电缆故障; 测距

中图分类号: TM755 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd21547

Design and Simulation of Cable Fault Location System

JIN Zengjie¹, WEI Yongqin¹, ZHANG Qi², WANG Xiaolong¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao 266590, Shandong, China; 2. Maintenance Company of State Grid Shandong

Electric Power Company, Jinan 272000, Shandong, China)

Abstract: Aiming at the problem of cable fault location, a multi-frequency phase method was proposed. An equivalent model for traveling wave separation of cable faults was constructed and different ranging formulas were derived for the short-circuit and open-circuit fault conditions. A cable fault model was established in the software Matlab. Short-circuit and open-circuit faults were simulated by selecting different fault distances and frequencies. The simulation results confirmed the accuracy of this method. Finally, based on theoretical research and simulation verification, a cable fault location system was designed. The experimental results further verify the feasibility and superiority of this method.

Key words: multi-frequency; phase method; cable fault; ranging

目前, 全球用电量增长迅速, 我国作为能源大国对电能的利用远超其他国家^[1], 这就要求我国的输配电系统具有较高的运行可靠性及持续稳定性^[2-3]。而输电线路上的电线电缆有如下优点^[4]: 1) 具有外护层, 使得电缆芯线使用寿命长; 2) 电缆一般埋于地下, 不占地上面积, 自然也不会有影响环境美观的问题。但同时也带来了一些实际问题, 最明显的是其在地下, 走线复杂曲折, 一旦发生故障, 很难定位故障点, 并且长时间的停电检修, 浪费人力物力, 对社会生产和经济都会造成较大的损失^[5-6]。那么如何迅速准确地

找到故障点位置已经成为了研究的热点问题。

故障测距主要是为了快速发现故障点, 这样工作人员就可以及时排除故障和修复线路, 所以我们研究的首要问题是如何在最短时间内把故障范围缩小到最小。现有的电缆故障测距方法主要分为离线和在线测距两种^[7]。离线测距是我国目前主要的电缆故障测距方法^[8-9]。而行波法是研究最多的一种离线测距法, 已有的故障测距的计算公式均与故障点相位有关, 不易实现。本文推导出了易操作的测距计算公式, 采用多频测相法在 Matlab 平台上仿真并验证。最后设计了

基金项目: 国家自然科学基金(61471224)

作者简介: 金增杰(1996—), 男, 硕士, 在读研究生, Email: 694087545@qq.com

通讯作者: 卫永琴(1975—), 女, 博士, 副教授, Email: skd995023@sdust.edu.cn

电缆故障测距硬件系统,完成调试并通过实验对系统可行性进行了验证。

1 电缆故障行波等效模型

下面研究行波在电缆故障中传播的等效模型,在工程计算中,假设行波传播速度的经验值等于行波的真实传播速度^[10]。

图1为行波在故障电缆中传播的示意图,电缆两端点分别用*h*和*i*表示,*f*为电缆中出现的故障点。信号*V_h*从*h*端进入电缆,当其到达*f*点时,便会产生折射和反射。*V_{rh}*为反射信号,从*f*点往回传播到端点*h*; *V_{ri}*为折射信号,向前传播至端点*i*。

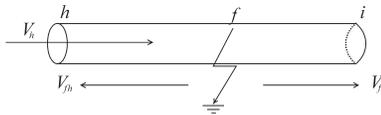


图1 故障电缆行波传播示意图

Fig.1 Traveling wave propagation schematic of fault cables

下面建立电缆故障行波传播的数学模型,假设*X₁*为原始信号,其表达式为

$$X_1(t) = H\sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

式中:*H*为信号幅值; ω 为角频率;*t*为传播时间; θ 为初始相位。

测试信号在电缆中传播时,到达故障点产生的反射信号*X_{rh}*与电缆首端的输入信号*X_{ri}*叠加,用*X₂*表示如下:

$$X_2(t) = H_0\sin(\omega t + \theta) + H_1\sin(\omega t + \theta + \varphi) \quad (2)$$

式中:*H₀*为注入信号幅值;*H₁*为故障点反射信号的幅值; φ 为反射信号*V_{rh}*和折射信号*V_{ri}*的相角差。

2 推导测距公式及相位差计算

相位法测距是基于行波测距原理提出的一种间接测距方法,测距基本公式为

$$S = \frac{\lambda}{2} (N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}) \quad (3)$$

式中: λ 为正弦信号的波长;*N*为信号在入射点和故障点之间完整传播的次数; $\Delta\varphi$ 为不足1个周期的相位差; 2π 为1个完整的传播周期。

多频测相法是一种依据电缆总长来逐步增加信号频率的测距方法,这种方法可以使测距更精确。根据已有文献的研究可知,电压的折射和反射系数都会受到频率大小的影响^[11]。下面针对断路和短路两种情况,推导出不同的测距公式。因断路时故障信号具有正的反射系数^[12], φ 的取值范围为 $0 \sim 2\pi$,则测距公式可以表示为

$$S = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (4)$$

短路故障时,信号的反射系数为负^[12], φ 的取值范围为 $-\pi \sim \pi$,测距公式为

$$S = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{(\Delta\varphi + \pi)}{2\pi} \quad (5)$$

定义入射信号为*X₁*,经故障反射后的叠加信号为*X₂*,对比信号为*X₃*。令*X₁*与*X₃*频率相同,均为 ω 。令*X₁*的初相位为0,则

$$\begin{cases} X_1(t) = H_0 \sin(\omega t) \\ X_2(t) = H_0 \sin(\omega t) + H_1 \sin(\omega t + \varphi) \\ X_3(t) = H \sin(\omega t + \theta) \end{cases} \quad (6)$$

X₂,*X₃*两信号经过乘法器运算之后,再通过低通滤波器将高频信号过滤掉,得到输出信号:

$$X(t) = \frac{HH_0}{2} \cos\theta + \frac{HH_1}{2} \cos(\theta - \varphi) \quad (7)$$

为了计算简便,设定信号*X₃*的初始相位 θ 分别为0和 $\pi/2$,得到 φ 的表达式为

$$\tan\varphi = \frac{X(t)_{\pi/2}}{X(t)_0 - \frac{HH_0}{2}} \quad (8)$$

式中:*X_{π/2}*为 $\theta=\pi/2$ 时*X(t)*的值;*X₀*为 $\theta=0$ 时*X(t)*的值。

通过 $\tan\varphi$ 的值即可求出所需相位差。

3 Matlab建模仿真分析

通过Matlab/Simulink搭建电缆故障模型,首先依据实际情况对电缆参数进行设定,然后通过多频测相原理和相位法对电缆故障进行仿真分析,模型如图2所示(只进行了*A, B*相电缆检测)。

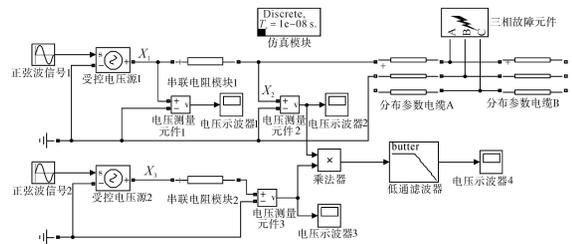


图2 电缆故障模型

Fig.2 Cable fault model

图2中,受控电压源接收正弦波信号,分别作为检测的入射信号*X₁*和对比信号*X₃*,*X₁*通过电阻模块注入电缆,电缆分布参数设置如表1所示。

表1 电缆分布参数

Tab.1 The parameters of the cable distribution

| 各序分量 | 电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$) | 电感/($\text{H} \cdot \text{km}^{-1}$) | 电容/($\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$) |
|------|--------------------------------------|--|--|
| 正序 | 0.026 72 | 9.036×10^{-4} | 2.773×10^{-8} |
| 零序 | 0.316 30 | 3.530×10^{-3} | 7.952×10^{-9} |

3.1 短路故障

首先,设置电缆总长度 S 为 23 km, A 段长度即故障距离为 17.65 km,故障设为接地电阻为 10Ω 的单相接地故障。采样频率 $f_s=100 \text{ MHz}$, 采样时间 $t=0.005 \text{ s}$ 。信号 1 和信号 2 的幅值均为 5 V, X_1 的初相位为 0, 由此可得入射信号 X_1 , 叠加信号 X_2 以及对比信号 X_3 。

然后, 1) 根据电缆长度选择 4 个测距信号的频率 $f_1 \sim f_4$, 要求满足 $\lambda > 2S$ 且留有一定裕度, 取波长 $\lambda_1=50 \text{ km}$, 假设选择的第一频率 $f_1=3.9938 \text{ kHz}$, 确定故障距离的十位数字; 2) 确定故障距离的个位数字, 此时 $\lambda_2/2=10 \text{ km}$, $f_2=9.967 \text{ kHz}$; 3) 确定故障距离小数点后第 1 位数字, 此时 $\lambda_3/2=1 \text{ km}$, $f_3=99.67 \text{ kHz}$; 4) 确定故障距离小数点后第 2 位数字, 此时 $\lambda_4/2=0.1 \text{ km}$, $f_4=996.7 \text{ kHz}$ 。

$f_1=3.9938 \text{ kHz}$ 时, 可以得到 $\theta=0$ 和 $\theta=\pi/2$ 两种情况下示波器 V_4 的波形, 如图 3 所示。

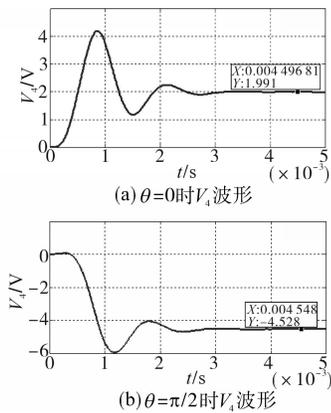


图3 短路故障 $f_1=3.9938 \text{ kHz}$ 时 V_4 波形

Fig.3 V_4 waveforms at $f_1=3.9938 \text{ kHz}$ when short circuit fault

图 3 中高频分量被滤掉, 只剩直流分量, $X_0=1.991 \text{ V}$, $X_{\pi/2}=-4.528 \text{ V}$, 可得 $\tan\varphi=7.114$, 相位差 φ 为 -0.544π 或 0.456π , 由于故障反射信号 V_r 总滞后于由电压测量元件 1 测得的发射信号 V_{M1} , 因此 φ 的值为正, 取 $\varphi=0.456\pi$, 故障类型为短路故障。根据式(5)可得故障距离 $S_1=18.2 \text{ km}$, 因此故障距离十位数字为 1。此时误差为 0.55 km, 相对误差为 2.391%。运用同样的方法可分别计算出其他 3 个频率测距时故障距离的个位、小数点后第 1 位和小数点后第 2 位数字, 最终得到故障距离 S_4 为 17.6132 km, 误差为 -0.0368 km , 相对误差从第 1 个频率测距时的 2.391% 精确到了 0.16%。

为了进一步验证该方法测距的准确性, 分别设置故障距离为 2.59 km, 9.68 km, 13.24 km,

17.32 km 和 22.05 km。仿真结果如表 2 所示, 其中, S 为测量的故障距离, e 为相对误差。

表2 短路故障仿真结果

Tab.2 Simulation calculation results when short circuit fault

| 故障距离/ km | 单相接地 | | 两相短路接地 | | 三相短路接地 | |
|-------------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | S/km | e/% | S/km | e/% | S/km | e/% |
| 2.59 | 2.6429 | 0.23 | 2.5187 | 0.31 | 2.5486 | 0.18 |
| 9.68 | 9.7766 | 0.42 | 9.6938 | 0.06 | 9.7605 | 0.35 |
| 13.24 | 13.2699 | 0.13 | 13.2768 | 0.16 | 13.3688 | 0.56 |
| 17.32 | 17.3016 | 0.08 | 17.3959 | 0.33 | 17.2671 | 0.23 |
| 22.05 | 21.9942 | 0.24 | 21.9856 | 0.28 | 22.0937 | 0.19 |

3.2 断路故障

将故障类型设置为 A 相单相断路, 采样时间 $t=0.005 \text{ s}$, 采样频率 $f_s=100 \text{ MHz}$ 。由于故障距离没有改变, 因此四组测量频率与短路故障时相同。 $f_1=3.9938 \text{ kHz}$ 时, 可以得到 $\theta=0$ 和 $\theta=\pi/2$ 两种情况下示波器 V_4 的波形如图 4 所示。

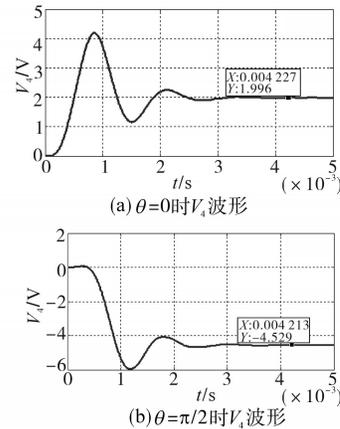


图4 断路故障 $f_1=3.9938 \text{ kHz}$ 时 V_4 波形

Fig.4 V_4 waveforms at $f_1=3.9938 \text{ kHz}$ when open circuit fault

由图 4 可知, $X_0=1.996 \text{ V}$, $X_{\pi/2}=-4.529 \text{ V}$, 同短路故障相同, 利用式(8)可以求出 $\tan\varphi=7.1718$, 所以相位差 $\varphi=0.456\pi$ 或 1.456π , 因为 $X_{\pi/2}<0$, 而 $\varphi \in (\pi \sim 2\pi)$, 可得 φ 的值为 1.456π , 利用式(4)可得故障距离 $S_1=18.2 \text{ km}$, 故障距离十位数字为 1, 计算可得误差为 0.55 km, 相对误差为 2.4%。同样的方法可得到其他 3 个频率测距时测量故障距离的个位、小数点后一位和小数点后第二位数字。最终计算出故障距离为 17.7266 km, 误差为 0.0766 km, 相对误差从第一个频率测距时的 2.4% 精确到了 0.33%。

同样, 分别设置故障距离 2.59 km, 9.68 km, 13.24 km, 17.32 km 和 22.05 km, 仿真计算结果如表 3 所示。

表3 断路故障仿真结果

Tab.3 Simulation calculation results when open circuit fault

| 故障距离/ km | 单相断路 | | 两相断路 | | 三相断路 | |
|-------------|----------|------|----------|------|----------|------|
| | S/km | e/% | S/km | e/% | S/km | e/% |
| 2.59 | 2.633 7 | 0.19 | 2.624 5 | 0.15 | 2.537 1 | 0.23 |
| 9.68 | 9.622 5 | 0.25 | 9.597 2 | 0.36 | 9.776 6 | 0.42 |
| 13.24 | 13.315 9 | 0.33 | 13.322 8 | 0.36 | 13.221 6 | 0.08 |
| 17.32 | 17.416 6 | 0.42 | 17.356 8 | 0.16 | 17.294 5 | 0.11 |
| 22.05 | 21.932 7 | 0.51 | 22.029 3 | 0.09 | 22.135 1 | 0.37 |

依据以上结果可知,当电缆故障发生在不同的距离时,此方法不受故障类型的影响,能检测出准确的故障距离,误差不超过0.6%。

4 系统设计及实验

4.1 系统总结构

根据以上的公式推导和仿真结果理论分析,设计了一种多频测相法电缆故障测距系统,如图5所示。

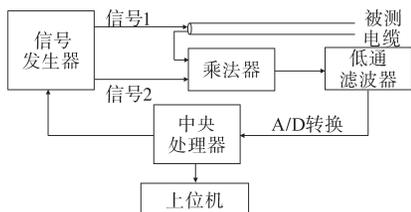


图5 多频测相法电缆故障测距系统

Fig.5 Ranging system with multi-frequency phase method when cable fault

本文提出的多频测相法电缆故障测距系统工作原理如下:首先将故障数据输入系统,中央处理器检测信号频率有无超出临界值,若低于临界值便通过信号发生器发出两个频率同步的信号,分别输入电缆首端和乘法器中,进入电缆的信号到达末端再次沿电缆返回后同样注入乘法器。之后乘法器输出信号,通过低通滤波器处理该信号变为直流,最后通过A/D转换器将信号输入中央处理器。第一频率完成运行计算之后,中央处理器自主选取下一频率,继续重复上述过程,最终由上位机显示距离数值。

4.2 系统组装及实验测试

系统包括STM32系统、信号发生器AD9959及2个运算放大器、2个功率放大器、1个乘法器和1个4阶巴特沃斯低通滤波器等,组装焊接并调试。

下面利用这套测距系统做实验,实验中的电缆绝缘材料为聚氯乙烯,选其波速为130 m/μs,

将电缆在1 km处断开,也就是断路故障。将入射信号的幅值设置为5 V,并注入电缆;将对比较信号的幅值设置为2.5 V,并注入乘法器。运行系统,根据系统提示向下位机发送电缆长度和故障类型(0表示短路故障、1表示断路故障),随后系统会根据电缆故障信息自动选择频率进行测距,如图6所示。

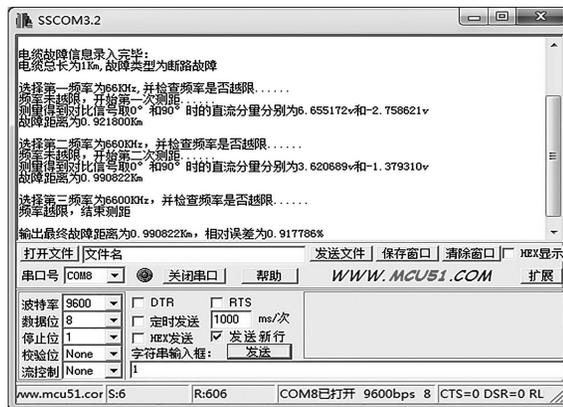


图6 测距结果

Fig.6 Ranging result

第一频率为66 kHz,分别设置对比信号的相位 θ 为0和 $\pi/2$,用示波器观测相应的滤波器输出直流信号 X_0 和 $X_{\pi/2}$,如图7所示。

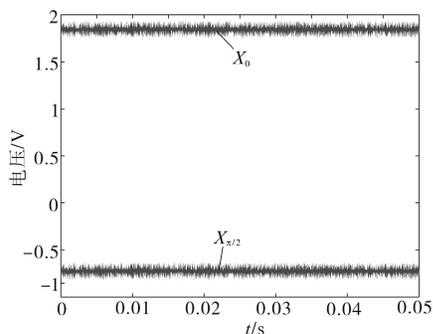


图7 第一频率为66 kHz时的直流分量

Fig.7 The DC components at the first frequency of 66 kHz

图7中直流分量 X_0 的值为1.93 V,直流分量 $X_{\pi/2}$ 的值为-0.8 V,可以计算出 X_0 的初始值为6.655 V, $X_{\pi/2}$ 的初始值为-2.759 V,相位差 φ 为 $1.843 6\pi$ 或 $0.843 6\pi$,最后算得故障距离为0.921 8 km,与系统运行结果一致。

第2次选频后的直流信号中直流分量 $X_0=1.053$ V,直流分量 $X_{\pi/2}=-0.4$ V。经计算可知故障距离为0.990 8 km。

将电缆末端设置为短路,通过本系统测距得到的故障距离为0.997 6 km。通过以上结果可知,该测距系统能够根据设计方案测量故障距离,测得的断路故障和短路故障相对误差分别为