

基于短时互相关的低压脉冲法电缆故障定位

周涛, 万子逸, 段永生, 吴辰阳, 钱琪

(云南电网有限责任公司昆明供电局, 云南昆明 650200)

摘要:为了提升传统低压脉冲法的电缆故障定位能力,文中提出基于短时互相关的低压脉冲法电缆故障定位方法。首先,对电缆开展低压脉冲测试得到相应的测试波形;然后,根据输入波形设置短时参考信号,将短时参考信号进行时移后与测试波形计算互相关系数;最后,根据绝对互相关系数序列曲线的峰值位置来定位电缆故障。仿真和实测结果表明,所提方法可以有效提升低压脉冲法中反射信息的识别能力,提高低压脉冲法对电缆故障的定位能力。

关键词:电缆;故障定位;短时互相关;低压脉冲法

中图分类号:TM 935 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)01-0054-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230110

Cable Fault Location Using Low Voltage Impulse Method Based on Short-time Cross-correlation

ZHOU Tao, WAN Ziyi, DUAN Yongsheng, WU Chenyang, QIAN Qi

(Kunming Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650200, Yunnan, China)

Abstract:In order to improve the cable fault location ability of the traditional low voltage impulse method, the low voltage impulse method based on short-time cross-correlation is proposed to locate the cable fault. Firstly, the low voltage impulse test is carried out on the cable to get the corresponding test waveform. Then, the short-time reference signal is obtained according to the input signal waveform, and the cross-correlation coefficients of time-shifted short-time reference signal between the test waveform are calculated. Finally, the cable fault is located according to the peak position of sequence curve of the absolute cross-correlation coefficients. The simulation and measurement results show that the proposed method can effectively improve the recognition ability of the reflected information and the location ability of cable fault.

Key words:cable; fault location; short-time cross-correlation; low voltage impulse method

0 引言

由于城市发展的需要,越来越多的电力电缆开始替代架空线成为城市电网的主要输电载体^[1]。由于电力电缆的服役环境较差,同时容易受到施工破坏,所以在运电力电缆容易出现故障,进而造成供电区域的突发性停电事故,威胁人民的生命财产安全。由于电力电缆一般被埋于地下,盲目开挖找寻电缆故障点的时间和经济成本较大,所以研究电力电缆的故障定位技术具有重大意义^[2]。

低压脉冲法凭借着原理简单、操作方便的特点被广泛用于电力电缆的故障定位。该方法的基本原

理是向电缆首端发射一个低电压的脉冲波,由于该脉冲波会在电缆故障位置处发生行波反射现象,因此可以在电缆首端处读取反射波的时延实现电缆的故障定位^[3]。文献[4]研究了低压脉冲法对不同类型电缆故障的定位效果,并证实了低压脉冲法在电缆故障定位方面使用的可行性。文献[5]研究了低压脉冲法对电力电缆中间接头的定位效果,并说明了低压脉冲法可对中间接头的绝缘状态进行诊断。文献[6]研究了低压脉冲法对电力电缆外力破坏点的定位效果,证明了使用低压脉冲法可对电缆的较弱故障开展定位。文献[7]将电缆末端设置为开路,凭借低压脉冲法对开路故障的定位能力实现电缆长度测量。在实际使用低压脉冲法开展电缆故障定

位时,反射波的波形能量受故障的严重程度和电缆的衰减效应影响较大,因此使用低压脉冲法测试波形中较弱故障处的反射信息不明显,而现有技术并未对反射信息的识别技术开展研究,导致难以精确定位电缆故障。

综上所述,下面提出一种基于短时互相关^[8]的低压脉冲法电缆故障定位技术。首先,需要对电力电缆开展低压脉冲测试,得到低压脉冲测试波形;然后,根据输入波形选择合适的时窗,得到短时参考信号;接着,将短时参考信号进行时移后与低压脉冲测试波形求取互相关系数;最后,根据绝对互相关系数序列曲线对电缆故障进行定位。所提方法可有效地提升对低压脉冲法中反射波的辨别能力,从而提高低压脉冲法对电缆故障的定位能力。

1 技术原理

1.1 低压脉冲法

低压脉冲法是建立在传输线理论的基础上。根据传输线理论,当电缆中传输高频电磁波时,电力电缆可以视为多个单位长度元 Δd 的分布参数模型级联而成^[9]。该模型使用单位长度的电阻 R_0 、电感 L_0 、电容 C_0 和电导 G_0 来描述,如图1所示。

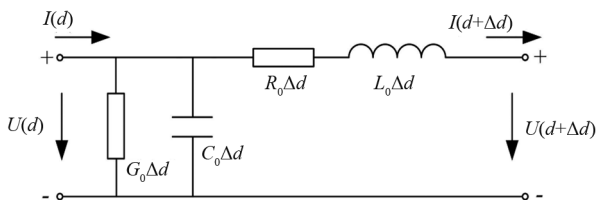


图1 电缆的单位长度模型

此时对于电缆而言,当距首端 d 处的电压和电流分别为 $U(d)$ 和 $I(d)$ 时,则距首端 $d+\Delta d$ 处的电压和电流应分别为 $U(d+\Delta d)$ 和 $I(d+\Delta d)$,根据基尔霍夫定律,得到^[9]

$$\begin{cases} -\frac{\partial U(d)}{\partial d} = R_0 I(d) + L_0 \frac{\partial I(d)}{\partial t} \\ -\frac{\partial I(d)}{\partial d} = G_0 U(d) + C_0 \frac{\partial U(d)}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

反射系数 ρ 是电缆中任意一点反射波电压和入射波电压的比值,因此根据边界条件求解式(1)^[9]可得

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2)$$

式中: Z_L 为电缆中距首端 d 处的等效阻抗; Z_0 为电缆的特征阻抗, Z_0 被定义为

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (3)$$

式中, ω 为电磁波的角频率。

从式(2)中可以看出,当电缆距首端 d 处出现故障时,该位置的 Z_L 会发生变化,导致该位置的 ρ 不为0,进而产生低压脉冲波的反射现象。为了进一步说明 ρ 和 Z_L 的关系,给出 Z_0 为 50Ω 时 ρ 和 Z_L 的函数关系,如图2所示。从图2中可以看出:当故障程度较严重时,即 Z_L 趋于0(完全短路)或 ∞ (完全开路), ρ 的绝对值较大,此时产生的反射波能量较大,低压脉冲法测试波形中反射信息明显;当故障程度较弱时,即 Z_L 趋于 Z_0 , ρ 的绝对值较小,此时产生的反射波能量较小,低压脉冲法测试波形中反射信息不明显。

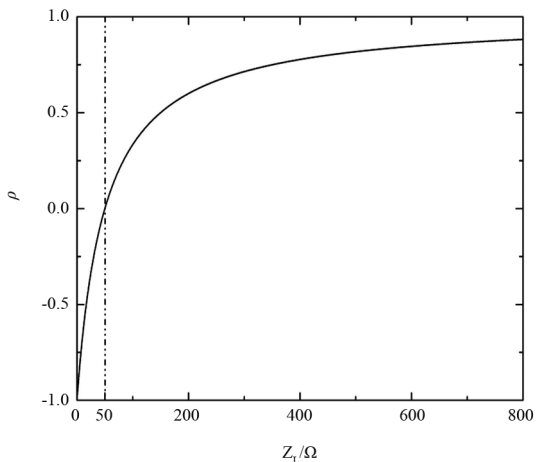


图2 ρ 和 Z_L 的关系

1.2 短时互相关算法

为了提升低压脉冲法测试波形中反射信息的读取能力,将短时互相关算法引入低压脉冲法中。该方法根据输入波形构建短时参考信号,然后将时移后的短时参考信号和低压脉冲测试波形求取互相关系数,最后根据绝对互相关系数序列曲线定位电缆故障。因为测试信号的波形是人为设定的,所以测试信号的波形是已知的,通过以尽可能短的时窗截取完整的测试信号波形便得到短时参考信号。计算的时窗长度会随着测试信号不同而不同,以能截取完整的测试信号波形的最短时窗长度为宜。具体方法如图3所示,图中: $s(i)$ 为离散的短时参考信号; $y(i)$ 为窗口截取之后的离散低压脉冲法测试波形; w 为时窗长度。

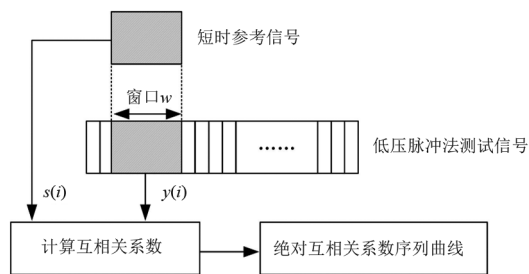


图3 短时互相关算法

图3中互相关系数 r 的计算公式^[10]定义为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^w [s(i) - \bar{s}] [y(i) - \bar{y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^w [s(i) - \bar{s}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^w [y(i) - \bar{y}]^2}} \quad (4)$$

式中, $\bar{\cdot}$ 表示对数组求平均值。

以此得到时移 n 个离散点的互相关系数序列为 $r(n)$,然后对 $r(n)$ 取绝对值得到绝对互相关系数序列曲线并用于电缆故障定位,此时电缆故障的反射信息被放大,易于开展电缆故障定位工作。

2 仿真测试

为了验证所提方法的可行性和有效性,下面开展了仿真测试分析,仿真模型采用10 kV交联聚乙烯电力电缆,其单位长度的各参数值^[11]如下:

$$R_0 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (5)$$

$$L_0 \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} + \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2\mu_0}{\omega}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (6)$$

$$G_0 = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_s/r_c)} \quad (7)$$

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_s/r_c)} \quad (8)$$

式中: r_c 为缆芯半径,取4 mm; r_s 为屏蔽层内半径,取9.5 mm; ρ_c 为缆芯电阻率,取 $17.5 \mu\Omega \cdot \text{mm}$; ρ_s 为屏蔽层电阻率,取 $17.5 \mu\Omega \cdot \text{mm}$; μ_0 为真空磁导率,取 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; σ 为电介质的电导率,取 10^{-16} S/m ; ϵ 为电介质的介电常数,取 $2.04 \times 10^{-11} \text{ F/m}$ 。

本仿真中电缆模型长度设置为300 m,故障位置设置在距首端200 m,故障类型设置为经过渡电阻接地故障^[4],过渡电阻值设置为300 Ω 。

所提低压脉冲法测试信号选用高斯脉冲波。高

斯脉冲波的时宽可以任意调节。当作为测试信号的高斯脉冲波设置为窄时宽时,测试信号和各反射信号的时宽都会较窄,因此测试信号和各反射信号不易形成混叠,测试盲区更小;但是此时测试信号中高频能量较大,在电缆对高频信号的强衰减效应影响下,测试信号的能量会衰减很快,导致反射信号的能量较弱,难以检测。当作为测试信号的高斯脉冲波设置为宽时宽时,虽然测试信号和各反射信号容易形成混叠,会造成较大的测试盲区,但是此时测试信号的低频能量更大,抗衰减能力更强。综上所述,应该根据被测电缆的长度选取对应的测试信号时宽。当电缆长度较短时,电缆整体的衰减效应较弱,此时应选取窄时宽的测试信号,以降低测试盲区的长度;电缆长度较长时,电缆整体的衰减效应较强,此时应选取宽时宽的测试信号,以增加测试盲区的代价提升反射信号的抗衰减能力,便于反射信号的检测。

以此得到仿真电缆模型的低压脉冲法测试波形如图4所示。为了便于分析,已经将低压脉冲法测试波形的时间横轴乘以电磁波速度得到距离横轴。从图4中可以看出,由于在经过渡电阻接地故障点和电缆末端位置处存在电缆的阻抗失配现象,所以在相应位置出现了行波反射现象,导致低压脉冲法测试波形在相应位置出现了反射波,通过分析反射波的时延信息可实现电缆故障定位。同时还可以看出,由于经过渡电阻接地故障点位置的阻抗失配程度较弱,因此该位置的反射波幅值较低,难以直接从低压脉冲法的测试波形中检测到该反射波;当故障的严重程度更弱时,该位置的反射波幅值更低,更加难以检测。

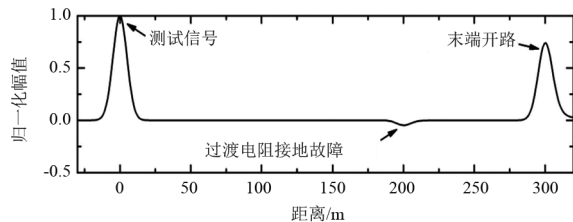


图4 仿真电缆模型的低压脉冲法测试波形

利用短时互相关对图4中低压脉冲法测试波形进行处理得到绝对互相关系数序列曲线如图5所示。对比图4和图5可以看出,相比于低压脉冲法测试波形曲线,绝对互相关系数序列曲线中经过渡电阻接地故障点和电缆开路末端两处位置均出现了明显的异常峰值,并且两处峰的幅值和陡度较大,反

射信息更加明显,说明了所提方法可以有效放大低压脉冲法测试波形中故障的反射信息,易于电缆故障定位。

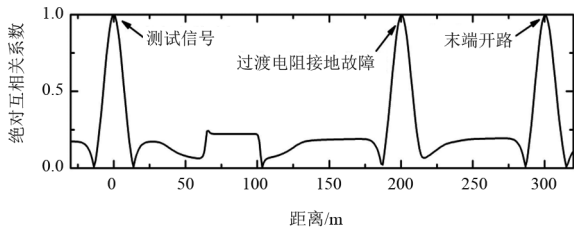


图 5 仿真电缆模型的绝对互相关系数序列曲线

3 实例分析

为了进一步验证所提方法的有效性,参考文献[12],采用和电力电缆结构类似的通信同轴电缆开展实际测试。具体的测试系统如图6所示:同轴电缆总长为40m,在距首端20m处A点设置过渡电阻接地故障,过渡电阻的阻值为81Ω;距首端40m的B点为电缆末端,设置为开路状态,可以视为开路故障。因此该同轴电缆可视为在A点存在经过渡电阻接地的软故障和B点存在完全开路的硬故障两处故障。

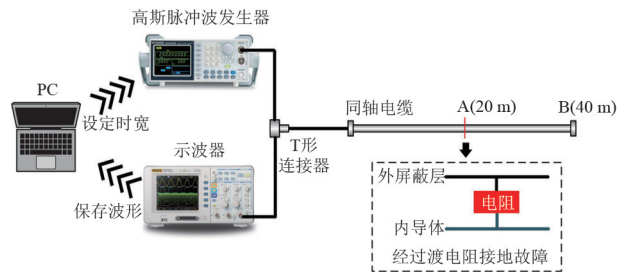


图 6 低压脉冲法的测试系统

在图6中,开始测试时,PC会根据测试电缆的长度设定适宜的高斯脉冲时宽;然后,由高斯脉冲发生器接受时宽设定值后输出作为测试信号的高斯脉冲波,测试信号经过T形连接器后进入电缆,在电缆的故障处产生反射波,反射波信号和测试信号都途经T形连接器后被示波器采集并保存;最后,示波器将保存的测试信号和反射波信号传输给PC进行分析。

由于所做实验中测试电缆长度较短,仅有40m,因此高斯脉冲波时宽设置为16ns。通过测试得到实测的低压脉冲波测试波形如图7所示,同样为了方便分析,已将低压脉冲波测试波形的时间横轴乘

以电磁波波速得到距离横轴。从图7中可以看出,由于A、B位置处均存在电缆故障,因此低压脉冲波测试波形曲线中A、B位置处均出现了反射信号,但是该反射信号的幅值受到故障严重程度和电缆中衰减效应的影响,因此反射信号的幅值较低,峰值位置不突出,难以准确定位电缆故障,当故障的严重程度减轻时,该现象会进一步加剧。

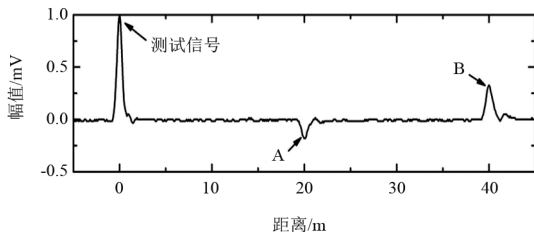


图 7 实际电缆的低压脉冲法测试波形

利用所提短时互相关算法对图7中低压脉冲法测试波形进行处理,得到绝对互相关系数序列曲线如图8所示。从图8中可以看出,由于电缆中A、B位置存在故障,因此绝对互相关系数序列曲线中A、B对应位置处出现了明显的异常峰值,相对于低压脉冲波测试波形曲线而言,两处峰的幅值和陡度明显增加,峰值位置更加突出,故障的反射信息被放大,使故障定位更加容易。综上所述,实测结果也说明了所提方法可以有效地放大低压脉冲法测试波形中故障的反射信息,便于电缆故障定位。

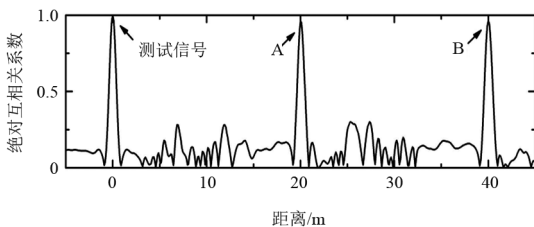


图 8 实际电缆的绝对互相关系数序列曲线

4 结论

1)上面提出了将短时互相关算法应用于低压脉冲法的电缆故障定位技术中。该方法首先截取短时参考信号,然后将短时参考信号进行时移后与低压脉冲测试波形求取绝对互相关系数序列曲线,最后读取绝对互相关系数序列曲线的峰值位置来定位电缆故障。

2)传统的低压脉冲法测试波形中反射信号幅值较低,峰值位置不突出,难以准确定位电缆故障,

绝对互相关系数序列曲线可以有效提升故障处异常峰的幅值和陡度,便于电缆故障定位。

3) 仿真和实测结果表明,所提方法可以有效提升对低压脉冲法中反射信息的识别能力,提高对电缆故障的定位能力。

参考文献

- [1] 饶显杰,周凯,汪先进,等. 基于改进 SVD 算法的局部放电窄带干扰抑制方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 705-713.
- [2] 高树国,刘贺晨,范辉,等. 考虑波速特性的小波变换模极大值法的电力电缆局部放电定位研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2244-2250.
- [3] 王丹阳,唐健钧,陈讴,等. 基于时域反射法的航空电缆故障定位技术研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(S2): 84-88.
- [4] 李露. 船用电力电缆故障诊断的仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [5] 杨帆,曾莼,阮羚,等. 中压交联电缆接头复合界面受潮缺陷的诊断方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 1-5.
- [6] 余坤,赫志伟,王善民,等. 基于低压脉冲法的电力
- (上接第 5 页)
- [6] 宋玉才,冯智慧. 架空电力线路导线断股原因分析及预防措施[J]. 电工技术, 2015(12): 11-12.
- [7] SI Jiajun, ZHU Kuanjun. Aerodynamic analysis of bundle with six cables for UHVDC by numerical simulation based on LES[C]. Power Engineering and Automation Conference (PEAM), IEEE, 2012: 1-5.
- [8] 万建成,周立宪,刘臻,等. 1000 mm² 大截面导线用防振锤设计[J]. 电力建设, 2011, 32(1): 94-98.
- [9] LIU S, SUN N, YIN Q, et al. Study of new vibration suppression devices for application to EHV transmission line groundwires[J]. Energy Procedia, 2011(12): 313-319.
- [10] 赵颖越. 我国南北气候分界线对全球变化的响应[D]. 成都: 四川师范大学, 2019.
- [11] 全国架空线路标准化技术委员会. 防振锤技术条件和试验方法: DL/T 1099—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [12] 程敏杰,王建文. 利用机器视觉的直齿轮在线测量方法研究[J]. 机械设计, 2020, 37(3): 19-22.
- [13] 王刚,彭商贤,黄时聪,等. 一种非接触式机器人位姿精度测量系统[J]. 机械设计, 1992, 9(6): 37-38.
- [14] 谢源,康双扬. 基于四目光视觉的蜗杆压力角检测研究[J]. 机械设计, 2021, 38(6): 70-74.

电缆外力破坏检测技术研究[J]. 四川电力技术, 2017, 40(4): 48-52.

- [7] 陈伟,王谦,吴高林,等. 基于时域脉冲反射的高压电力电缆测长技术研究[J]. 中国仪器仪表, 2020(8): 83-87.
- [8] 李启飞,温玮,韩蕾蕾,等. 基于短时互相关算法对航空磁异常信号的检测[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(6): 178-183.
- [9] 孟佳彬,李智华,吴春华,等. 基于 SSTDR 的光伏系统对地故障检测方法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 109-118.
- [10] 白春乐,马娇. 一种基于互相关系数的白噪声不相关性检验方法[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(10): 67-69.
- [11] 谢敏,周凯,赵世林,等. 新型基于反射系数谱的电力电缆局部缺陷定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3083-3089.
- [12] 尹振东,王莉,陈洪圳,等. 增广时频域反射法在电缆复合故障检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7760-7773.

作者简介:

周涛(1984),男,工程师,主要从事电气设备试验和故障诊断方面的工作。(收稿日期:2022-07-15)

- [15] 陈嘉麟,李金奎. 光纤复合架空地线的防振[J]. 电力系统通信, 2006, 27(9): 6-9.
- [16] 王藏柱,杨晓红. 输电线路导线的振动和防振[J]. 电力情报, 2002(1): 69-70.
- [17] 刘胜春,王景朝,吴建生,等. 500 kV 大跨越四分分裂导线及地线防振试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2007(4): 332-336.

作者简介:

刘敬华(1977),男,教授级高级工程师,研究方向为电网设备运维管理;

赵彬(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为电网风振防治;

邹赫(1985),女,博士,经济师,研究方向为对外直接投资、电力设备技术经济性评价;

李鹏(1984),男,博士,高级工程师,研究方向为电网风振防治;

李孟轩(1991),男,博士,高级工程师,研究方向为电网智能感知与传感;

汉京善(1992),男,硕士,工程师,研究方向为人工智能技术;

杨知(1992),男,博士,高级工程师,研究为输电线路防灾减灾。

(收稿日期:2022-07-20)