

基于频域反射信号衰减强度评估的电缆缺陷长度和类型判别方法

唐作鑫, 周凯, 徐叶飞, 黄靖涛

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:为解决频域反射法(FDR)只能判别缺陷极性而不能识别缺陷长度和类型的问题,本文提出了一种基于信号衰减强度评估的缺陷类型判别方法,通过利用各缺陷处总的折反射强度与首次反射强度作差,再利用差值的大小即可对缺陷的长度和类型做出判断,并结合极性判断方法将缺陷细分为4种类型。结果表明:本文所提方法可成功识别电缆中常见的接地故障、过度弯折、本体受潮及长电缆中间接头4种缺陷的长度和类型,且与仿真建模的结果一致。本文缺陷类型判别方法可对电缆常见的点缺陷和段缺陷进行识别。

关键词:频域反射法;缺陷识别;长度类型;信号衰减强度评估

A method for discriminating defect length and type of cable based on attenuation intensity evaluation of frequency domain reflected signal

TANG Zuoxin, ZHOU Kai, XU Yefei, HUANG Jingtao

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To solve the problem that frequency domain reflectometry (FDR) can only distinguish defect polarity and cannot identify the defect length and type, a defect type discrimination method was proposed on the basis of signal attenuation intensity evaluation in this paper. The difference between the total refracted reflection intensity at each defect and the initial reflection intensity was calculated, and then the defect length and type can be discriminated by comparing the magnitude of difference. Combined with the polarity judgment method, the defect can be subdivided into four types. The results show that the method proposed in this paper can successfully identify the length and type of four common defects in cables, including grounding faults, excessive bending, cable body moisture, and long intermediate joints of cables, and the recognition results are consistent with the simulation modeling results. The defect type discrimination method in this paper can identify the common point defects and segment defects in cables.

Key words: Frequency domain reflection method; defect identification; length type; signal attenuation evaluation

0 引言

随着城市化进程的加快,电缆被广泛应用于城市输配电系统中。而电缆在制造和安装过程中可能会产生各种缺陷,且由于温度、湿度、化学腐蚀、机械物理等因素的长期作用^[1-2],也会导致电力电缆出现局部老化、腐蚀、铜屏蔽破损和受潮等现象^[3]。这些问题会进一步导致电缆产生缺陷,对电力输送带来负面影响,因此对电缆绝缘缺陷和故障定位技术的研究具有重要意义。

常见的电缆缺陷检测方法中,局部放电法(partial discharge, PD)难以检测受潮、腐蚀等绝缘劣化

缺陷,且其检测效果极易受到现场复杂的电磁环境影响^[4-5];极化/去极化电流(polarization and depolarization current, PDC)法只能反映电缆整体的绝缘老化状态,无法对局部受潮缺陷进行定位以及确定受潮区域范围^[6];时域反射法(time domain reflectometry, TDR)因其从电缆首端注入脉冲信号所含高频成分不多、信号传输过程中会出现衰减与色散、抗干扰性能较差等不足,使其在检测与定位电缆不同程度受潮缺陷时的检测灵敏度较低^[7-8]。

采用扫频信号的频域反射法(FDR)因其入射波所含高频成分较多,已成为电缆缺陷定位方面的主要技术^[9]。该技术原理为入射信号(一段频率步长恒定的正弦线性扫频信号)在阻抗不连续点处发生

反射,其首端的反射系数谱就会发生改变,通过在首端对反射系数谱进行分析,再根据电缆的传播速度就可计算得到电缆阻抗不连续点的位置。该方法可测量的缺陷长度范围从几厘米到几米,具体定位精度可达到0.4%内,相较于传统的TDR方法有很大的提升^[10]。采用频域反射法进行现场测试时,首先对同型号已知长度的电缆进行测试,确定该电缆的电缆信号传播速度后即可对同型号所有电缆进行测试。现有的FDR方法虽然能够定位缺陷的位置,但是目前还不能对缺陷的长度、类型进行准确的识别。文献[11]早期提出了一种电缆缺陷识别方法,但是该方法只能对可能出现的缺陷进行预测,不能对电缆已有的缺陷进行判别。文献[10]提出了一种基于输入阻抗谱的电力电缆本体局部缺陷类型识别及定位方法,但该方法只能判别出电缆本体的电感性 and 电容性两种缺陷的区别,且在实际测试中实用性不强;文献[12]提出了一种反射系数极性判断法,但该方法只能对缺陷处阻抗的增大或减小做出判断,不能对缺陷的长度、类型进行判别。

基于目前研究对于缺陷类型判别及分类的不足,本文首先根据行波理论^[13]建立电缆典型缺陷模型,然后在原有的反射系数极性判断方法^[12]基础上提出了一种基于信号衰减强度评估来判断具体缺陷长度的方法,根据缺陷的长度将其分为点缺陷和段缺陷2类,再结合极性判断方法将缺陷种类细分为4类,最后通过建模仿真和实验来进行验证。

1 电缆典型缺陷建模

电缆存在局部缺陷时,其特性阻抗会发生改变,根据行波理论,此时电缆首端反射系数谱也会发生改变,对反射系数的变化进行处理即可实现对缺陷的定位^[13]。根据行波的折反射^[14]建立电缆模型后,可利用电缆模型对信号传输过程进行分析。

1.1 完好电缆的反射系数模型

设电缆总长为 l ,末端开路,在电缆首端注入信号,模型示意图如图1所示。当电缆完好时,电缆末端的反射系数 $P_l=1$,此时首端的反射系数 Γ_l 如式(1)所示。

$$\Gamma_l = e^{-2\gamma l} \quad (1)$$

式(1)中, γ 表示为电缆的传播系数,可由式(2)计算得到^[15]。

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2)$$

式(2)中: α 为衰减常数,表征电缆单位长度的信号

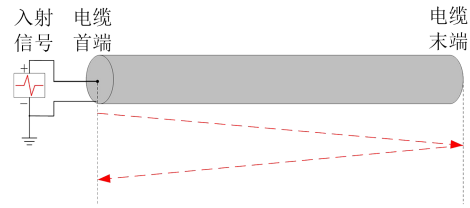


图1 完好电缆反射系数模型

Fig.1 Reflection coefficient model of intact cable

幅值衰减特性; β 为相位常数,表征电缆单位长度的信号相位滞后特性。将式(1)代入式(2)可得式(3)。

$$\Gamma_l = e^{-2\alpha l - 2j\beta l} = e^{-2\alpha l} e^{-j2\frac{2\pi f}{v}l} \quad (3)$$

式(3)中: f 为测试频率; v 为电磁波在电缆中的传播速度。由欧拉公式可将(3)展开得到式(4)。

$$\Gamma_l = e^{-2\alpha l} \left(\cos\left(2\frac{2\pi f}{v}l\right) - j \sin\left(2\frac{2\pi f}{v}l\right) \right) \quad (4)$$

其中式(4)的实部如式(5)所示。

$$\text{Real}(\Gamma_l) = e^{-2\alpha l} \cos\left(2\frac{2\pi l}{v}f\right) \quad (5)$$

式(5)中, $\text{Real}(\Gamma_l)$ 为首端反射系数 Γ_l 的实部。由式(5)可知, $\text{Real}(\Gamma_l)$ 呈指数衰减振荡形式,且频率分量 $f=2l/v$,可等效为输入信号从电缆首端到末端的往返传播时间,因此可由 f_l 可求出电缆的总长度。

1.2 点缺陷的反射系数模型

当电缆只存在单个接地故障点缺陷时,其反射系数模型如图2所示。图2中 x 为接地故障离首端的距离, R 为接地故障的过渡电阻, ρ_x 为接地处的反射系数,则首端反射系数实部 $\text{Real}(\Gamma_l)$ 可表示为式(6)所示(为简化分析过程,忽略首端反射的影响)。

$$\begin{aligned} \text{Real}(\Gamma_l) = & \rho_x e^{-2\alpha x} \cos\left(2\pi\frac{2x}{v}f\right) - \\ & \rho_x^2 e^{-4\alpha x} \cos\left(2\pi\frac{4x}{v}f\right) \\ & + \dots + (1 + \rho_x)^2 e^{-2\alpha l} \cos\left(2\pi\frac{2l}{v}f\right) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中,接地故障处第一次反射信号强度为第一项,第二次反射信号强度为第二项,末端反射信号强度为最后一项。第一次反射信号强度计算公式与式(5)一致($\rho_x=1$),第 n 项反射信号强度为第 n 项反射系数的 n 次方,依次类推。但因为末端反射系数由于信号反射回首端时经过接地故障处有折射,且折射了两次,所以其反射系数为 $(1+\rho_x)^2$,此处 ρ_x 为前一项的反射系数。缺陷处的频率分量为 $f=2nx/v$,对于电缆缺陷的定位问题,可根据式(7)转换为对频率 $f_n(n=1,2,3)$ 的估计问题。

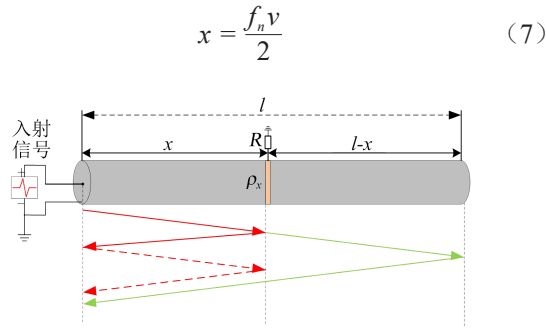


图2 含单个点故障电缆的反射系数模型
Fig.2 Reflectance coefficient model of cable with single point fault

1.3 段缺陷的反射系数模型

对于本体受潮等段缺陷时,其电容相对于电缆本体会发生变化,因此电缆的局部电容变化通常作为缺陷的一种表征形式^[13],建立段缺陷反射模型如图3所示。图3中 x 为段缺陷离首端的距离, Δx 为接头段或受潮段的距离,则首端反射系数实部 $\text{Real}(\Gamma_l)$ 可表示为式(8)所示(为简化分析过程,忽略首端反射的影响)。

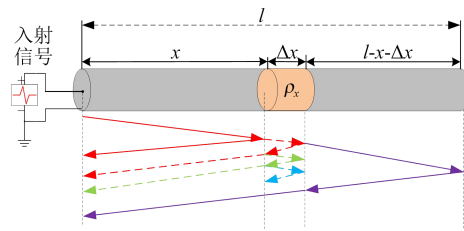


图3 接头受潮或本体受潮的电缆反射系数模型
Fig.3 Cable reflection coefficient model with joint or body affected with moisture

$$\begin{aligned} \text{Real}(\Gamma_l) &= \rho_x e^{-2\alpha x} \cos\left(2\pi \frac{2x}{v} f\right) \\ &- \rho_x (1 - \rho_x^2) e^{-2\alpha x} e^{-2\alpha_x \Delta x} \cos\left(2\pi \left(\frac{2x}{v} + \frac{2\Delta x}{v_x}\right) f\right) \\ &- \rho_x^3 (1 - \rho_x^2) e^{-2\alpha x} e^{-4\alpha_x \Delta x} \cos\left(2\pi \left(\frac{2x}{v} + \frac{4\Delta x}{v_x}\right) f\right) \\ &+ \dots + (1 - \rho_x^2)^2 \cos\left(2\pi \left(\frac{2(l - \Delta x)}{v} + \frac{2\Delta x}{v_x}\right) f\right) \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中, α_x 为段缺陷的衰减系数。段缺陷第一次反射信号为第一项,第二次反射信号为第二项,末端反射信号为最后一项。根据缺陷处的频率分量 $f = 2x/v + 2n\Delta x/v_x$ (v_x 为信号在缺陷段的传播速度)即可根据式(7)对电缆进行缺陷定位。

2 信号衰减强度评估及缺陷类型分类方法

目前针对缺陷类型的识别方法中,早期主要是根据缺陷阻抗大小和缺陷呈电感性或电容性将缺

陷笼统地分为电感性缺陷、电容性缺陷^[10-11],这可划归为对缺陷的极性进行判断^[12]。目前仍缺少其他类型的缺陷判别方法,因此本文提出一种基于信号衰减强度评估来判断具体缺陷类型的方法,根据该方法判别出缺陷的长度、类型,并由极性和长度特性将缺陷分为4类。随后设置本体受潮、接地故障、过度弯折及中间接头4种缺陷对该缺陷类型判别方法进行了验证。

2.1 基于信号折反射衰减强度缺陷类型识别方法的具体步骤

通常地,不同阻抗失配类型不仅是反射信号极性不一样,其幅值也不相等,因此可由幅值来判断反射信号的类型。对式(6)~(8)的反射系数模型进行进一步的分析,发现对于点缺陷,首次反射时的幅值最大;由于信号衰减以及折反射的影响,后续反射系数幅值呈指数衰减的趋势,首次反射信号的幅值与后续多次反射信号的幅值差异较明显,其定位谱中的峰值主要受首次反射的影响。对于段缺陷而言,由于其内部会产生多次的折反射,首次反射与内部多次反射信号的幅值差异不明显,它们的定位谱中峰值由首次反射峰与多次反射峰叠加得到。

基于此,可利用缺陷各频率分量及其极性构建余弦函数,建立其首项反射信号强度的函数,并对实测首端反射系数谱实部进行求差处理,若求差之后幅值与求差之前的幅值差异较大,则认定该缺陷为点缺陷,若差异较小则认定该缺陷为段缺陷。信号折反射衰减强度识别方法具体步骤如下:

(1)由极性判别方法^[12]得到缺陷的极性 p ,若极性为正,则 $p=1$;为负则 $p=-1$ 。

(2)利用各缺陷点的频率分量 f_x 和其反射信号强度 A_x 构建首次反射信号强度余弦函数,如式(9)所示。

$$y_x = p|A_x| \cos(2\pi f_x f) \quad (9)$$

(3)将式(9)中得到的 y_x 与原首端反射系数的实部进行作差处理得到新的反射系数谱,将新的反射系数谱转换为定位图谱,记录等效频率分量 f_x 的新反射强度 A'_x 。

(4)根据 A'_x 的值进行判断,若 $|A'_x|/|A_x| \leq d$ 时则缺陷为点缺陷,否则为段缺陷,其中 d 为判定阈值。

2.2 判定阈值 d 的选取

2.2.1 点缺陷

当缺陷为点缺陷时,根据式(6)可得缺陷点处

的反射强度 $A_x = \rho_x e^{-2\alpha x}$, 由此得到余弦函数 $y_x = p|\rho_x e^{-2\alpha x}| \cos(2\pi f_x f)$, 因为此时接地处的阻抗相较于本体阻抗是减小的^[16], 所以由极性判断方法得到 $p = -1$, 而接地处反射系数 $-1 < \rho_x < 0$ 。使用式(6)与 y_x 作差, 得到新的反射系数谱实部 $\text{Real}(\Gamma_{\text{New}})$ 为式(10)。

$$\text{Real}(\Gamma_{\text{New}}) = -\rho_x^2 e^{-4\alpha x} \cos\left(2\pi \frac{4x}{v} f\right) + \dots + (1 + \rho_x)^2 e^{-2\alpha l} \cos\left(2\pi \frac{2l}{v} f\right) \quad (10)$$

式(10)中因为 $e^{-2\alpha x}$ 是呈指数衰减的, 所以取最大值第一项作为新的反射强度, 则 $|A'_x| = \rho_x^2 e^{-4\alpha x}$, 将其除以 $|A_x|$ 得到式(11)。

$$d = |\rho_x| e^{-2\alpha x} \quad (11)$$

因为 α 与 x 都为大于 0 的数, 所以 $e^{-2\alpha x}$ 的最大值为 1, 则接地处的反射系数如式(12)所示。

$$\rho_x = \frac{Z_0 \| R - Z_0}{Z_0 \| R + Z_0} = \frac{Z_0 \| r Z_0 - Z_0}{Z_0 \| r Z_0 + Z_0} = -\frac{1}{2r + 1} \quad (12)$$

式(12)中, r 为过渡电阻 R 与本体电缆阻抗 Z_0 的比值。

在 d 的表达式中, 衰减常数 α 与接地故障与首端的距离 x 都是可以变化的, α 值会随着 x 增大而增大, 由此可见 d 的大小由 ρ_x 与 x 共同决定。图 4 为 r 值从 0.8~1.2 变化时缺陷处峰值及末端峰值的变化曲线。从图 4 可以发现随着 r 增大, 缺陷处幅值减小, 而末端幅值增大。当 r 值小于 1 时, 即过渡阻值小于本体阻抗时, 缺陷处幅值会大于末端幅值, 因此本文仅考虑 $r \geq 1$ 的情况, 此时 ρ_x 的最大值为 1/3。

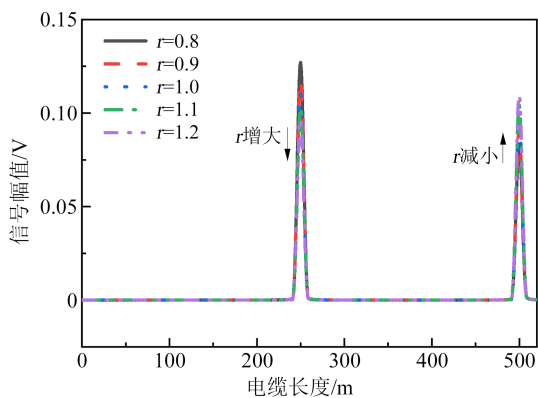


图 4 不同 r 值下缺陷处幅值及末端处幅值的变化曲线
Fig.4 Variation curves of defect amplitude and amplitude of end under different r values

设置一个接地故障, 其过渡电阻从 Z_0 变化至 $5Z_0$, 则可根据式(11)得到 d 的大小与缺陷距离 x 、比值 r 的关系如图 5 所示。从图 5 可以发现, 开始时反

射系数 ρ_x 为影响 d 值的主要因素; 当缺陷距离电缆首端越大时衰减项 $e^{-2\alpha x}$ 成为影响 d 值的主要因素; d 均随着 r 、 x 的增大而减小, 因此 d 的最大值为 1/3。

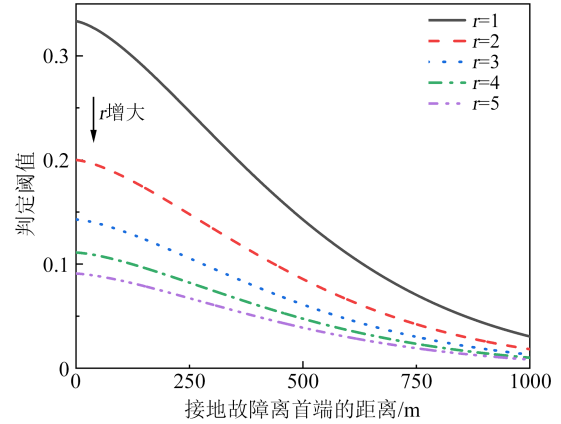


图 5 判定阈值 d 与缺陷距离 x 及比值 r 的关系曲线
Fig.5 The relationship curves between d and defect distance x , ratio r

2.2.2 段缺陷

而当缺陷为受潮段缺陷时, 根据式(8)可得缺陷的反射强度 $A_x = \rho_x e^{-2\alpha x}$, 由此构造出的余弦函数为 $y_x = p|\rho_x e^{-2\alpha x}| \cos(2\pi f_x f)$, 与式(8)作差后得到式(13)。

$$\text{Real}(\Gamma_{\text{New}}) = -\rho_x (1 - \rho_x^2) e^{-2\alpha x} e^{-2\alpha_{\Delta x} \Delta x} \cos\left(2\pi \left(\frac{2x}{v} + \frac{2\Delta x}{v_x}\right) f\right) - \rho_x^3 (1 - \rho_x^2) e^{-2\alpha x} e^{-4\alpha_{\Delta x} \Delta x} \cos\left(2\pi \left(\frac{2x}{v} + \frac{4\Delta x}{v_x}\right) f\right) + \dots + (1 - \rho_x^2)^2 e^{-2\alpha l} \cos\left(2\pi \left(\frac{2(l - \Delta x)}{v} + \frac{2\Delta x}{v_x}\right) f\right) \quad (13)$$

由于段缺陷峰值由首次反射峰与多次反射峰叠加得到, 而 Δx 为段缺陷的长度, Δx 对比于 v_x 非常小, 因此 $e^{-2n\alpha_{\Delta x} \Delta x}$ ($n=1, 2, 3, \dots$) 的值可以视为 1, 所以新反射强度可近似为式(14)。

$$\begin{aligned} |A'_x| &= |[-\rho_x (1 - \rho_x^2) - \rho_x^3 (1 - \rho_x^2) - \dots - \rho_x^{2n-1} (1 - \rho_x^2)]| e^{-2\alpha x} \\ &= |-\rho_x + \rho_x^{2n+1}| e^{-2\alpha x} \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)中, n 趋于无穷, 将 A'_x 除以 $|A_x|$ 得到 $|1 - \rho_x^{2n}|$, 而 $-1 < \rho_x < 1$, 所以 A'_x 与 $|A_x|$ 的比值近似为 1。

综上所述, 为了区分点缺陷与段缺陷, d 的值可取为 1/3。当 A_x 与 $|A'_x|$ 的比值小于 d 时判断为点缺陷, 反之判断为段缺陷。

2.3 缺陷类型判别分类及方法流程图

由本文提出的电缆缺陷识别方法再结合已有的极性判断技术, 可以将缺陷类型进行进一步的细

分,总共可以分为4类,具体类型为正极性段缺陷、负极性段缺陷、正极性点缺陷、负极性点缺陷。图6为本文电缆缺陷识别方法流程图。

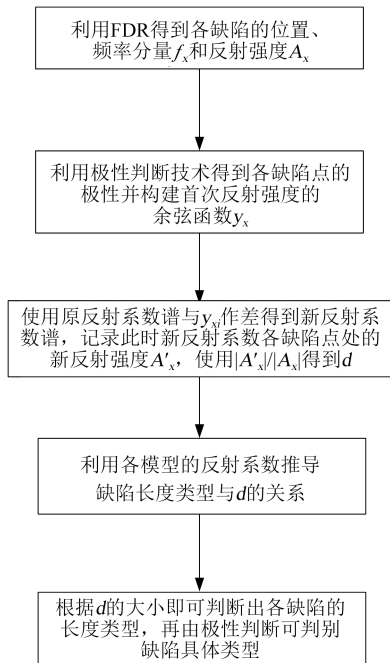


图6 电缆缺陷识别方法流程图
Fig.6 Flow chart of cable defect identification method

3 仿真结果及实验结果

3.1 仿真实验

针对本文所提缺陷识别方法,对接地故障和中间接头进行建模仿真。设置电缆总长为200 m,在距离首端50 m处有一中间接头,接头长度设置为0.8 m,电容变化倍数为0.848^[18]。在距离首端150 m处设置一接地故障,其过渡电阻为1.5Z₀。其FDR定位曲线及新反射强度谱与旧反射强度谱对比如图7所示。从图7可以看出,中间接头处的缺陷,按第2节的方法求差后反射强度稍小于原始数据;对于接地故障,求差后的反射强度远小于原始数据;接头处和接地处原反射强度分别为0.014 9和0.0547;求差后为0.013 3和0.010 4。

使用第2节中信号衰减强度评估判断方法和进行极性判断后的结果如表1所示。由表1可以发现,两种缺陷的判别结果与仿真设置的缺陷一致,证明了本文缺陷识别方法对点缺陷与段缺陷识别的可行性。

3.2 同轴电缆测试结果

根据仿真结果对实际的电缆缺陷进行测试,选择被测电缆一端为首端,注入信号后使用宽频阻抗

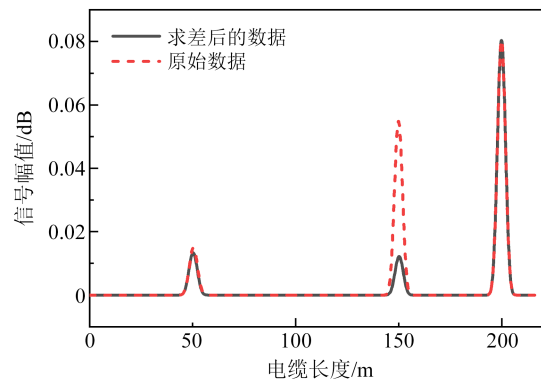


图7 两种识别方法的缺陷定位结果及其反射强度谱的对比

Fig.7 Comparison of defect localization results and their reflection intensity spectra between two identification methods

表1 缺陷信号衰减强度评估分析

Table 1 Evaluation and analysis of defect signal attenuation

预设缺陷	A'_x/A_x	信号衰减强度评估结果	类型判断	极性	缺陷类型
中间接头	0.88	>1/3	段缺陷	正	正极性段缺陷
接地故障	0.19	<1/3	点缺陷	负	负极性点缺陷

谱仪采集电缆的首端输入阻抗谱,再利用计算机将采集到的数据进行分析,测试平台如图8所示。

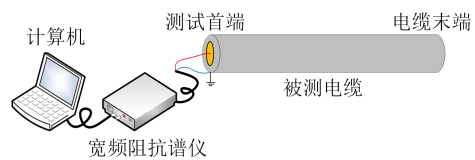


图8 电缆测试平台

Fig.8 Cable test platform

本文在同轴电缆和电力电缆上开展实验。首先在一根总长度为27 m的同轴电缆展开测试实验,试样由两根不同长度(8 m、19 m)的SYV50-5-1型同轴电缆串联组成,试样8 m处的T型转接头用50 Ω的电阻来模拟接地故障^[17],18 m处将电缆弯折90°模拟过度弯折缺陷,如图9所示。

对该同轴电缆进行FDR测试,测试频段为150

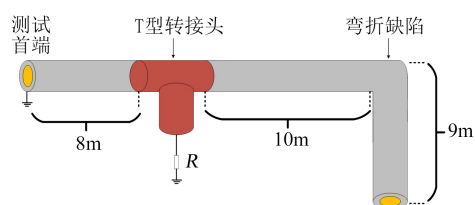


图9 27 m同轴电缆试样

Fig.9 27 m coaxial cable sample

kHz~80 MHz, 采样点数为3 001个。测试结果及新反射强度谱与旧反射强度谱对比如图10所示。由于原始数据的缺陷定位峰值不明显, 已对结果进行求对数处理。

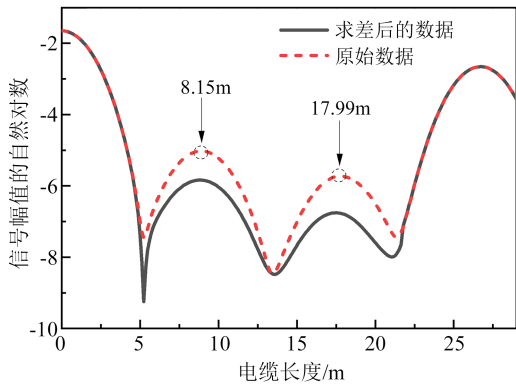


图10 同轴电缆试样的新反射强度谱与原反射强度谱对比图

Fig.10 Comparison between the new reflection intensity spectrum and the original reflection intensity spectrum of coaxial cable sample

从图10可以看出, 接地故障和过度弯折求差后的反射强度对比原始数据明显减小, 接地处原反射强度与求差后在缺陷处的数值分别为0.006 6和0.002 1, 弯折处原反射强度与求差后的数值分别为0.003 3和0.000 8, 这与仿真结果类似。使用第2节缺陷类型判别方法识别后的结果如表2所示。

表2 同轴电缆试样的缺陷类型判别结果

Table 2 Defect type judgment results of coaxial cable sample

预设缺陷	A'_x/A_x	信号衰减强度评估结果	类型判断	极性	缺陷类型
接地故障	0.31	<1/3	点缺陷	负	负极性点缺陷
过度弯折	0.25	<1/3	点缺陷	正	正极性点缺陷

从表2可以发现, 本文缺陷类型判别方法成功识别了27 m同轴电缆试样的接地故障缺陷类型, 同时也证明了该方法对于过度弯折的识别也是有效的。实验中T型转接头的长度和弯折处长度都小于5 cm, 因此可得出结论对于5 cm及以下长度的缺陷都可判定为点缺陷。

3.3 20m电力电缆测试结果

对本体受潮缺陷进行识别: 在一根总长度为20 m的YJLV22 8.7/15-1×95型10 kV XLPE电力电缆上制作缺陷, 离首端10 m处设置本体受潮缺陷, 受潮段长度为0.3 m。使用热缩管将缺陷段包裹, 封住

两端后进行注水浸泡处理。测试频段为150 kHz~80 MHz, 采样点数为3 001个。其FDR缺陷定位和新老反射强度谱对比如图11所示, 已对结果进行求对数处理。从图11可以看出, 求差后的反射强度对比原始数据在缺陷处减小, 原反射强度在缺陷处的数值为0.029 5, 求差后的数值为0.022 9。使用第2节缺陷类型判别方法识别后的结果如表3所示。从表3结果可以发现, 本文所提的缺陷类型判别方法成功识别了该电力电缆试样的缺陷类型。

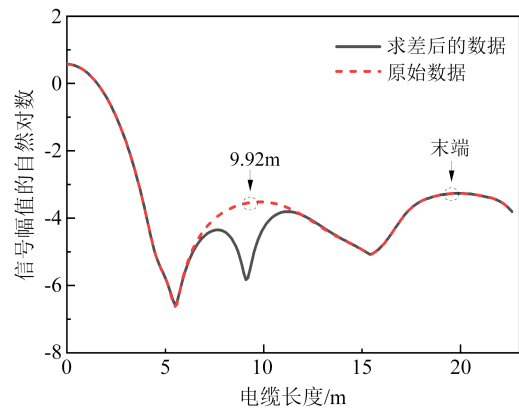


图11 20 m电力电缆试样的新反射强度谱与原反射强度谱对比图

Fig.11 Comparison between the new reflection intensity spectrum and the original reflection intensity spectrum of 20 m power cable sample

表3 电力电缆试样的缺陷类型判别结果

Table 3 Defect type judgment results of power cable sample

预设缺陷	A'_x/A_x	信号衰减强度评估结果	类型判断	极性	缺陷类型
本体受潮	0.78	>1/3	段缺陷	负	负极性段缺陷

3.4 500m电力电缆测试结果

为了验证本文所提方法在长距离电缆上的有效性, 在一根总长度为度500 m的YJLV22 8.7/15-YJLV22 8.7/15-1×95型10 kV XLPE电力电缆250 m处制作中间接头, 接头长度为0.5 m。测试频段为150 kHz~10 MHz, 采样点数为3001个。其FDR缺陷定位和新老反射强度谱对比如图12所示, 已对结果进行求对数处理。从图12可以看出, 求差后的反射强度对比原始数据在缺陷处减小, 原反射强度在缺陷处的数值为0.002 3, 求差后的数值为0.001 7。使用第2节缺陷类型判别方法识别后的结果如表4所示。从表4可以看出, 本文所提的缺陷类型判别方法成功识别了该500 m电力电缆的缺陷类型, 证

明该方法对于长距离电缆的缺陷识别是有效的。

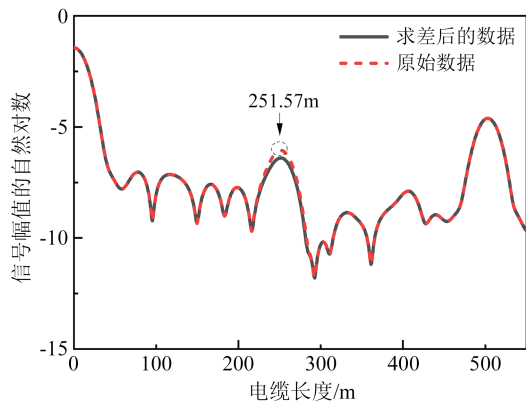


图12 500 m电力电缆试样的新反射强度谱与原反射强度谱对比图

Fig.12 Comparison between the new reflection intensity spectrum and the original reflection intensity spectrum of 500 m power cable sample

表4 500 m电力电缆试样的缺陷类型判别结果

Table 4 Defect type judgment results of 500 m power cable sample

预设缺陷	A'_x/A_x	信号衰减强度评估结果	类型判断	极性	缺陷类型
中间接头	0.71	>1/3	段缺陷	正	正极性段缺陷

综上,对4种缺陷进行实验后发现其识别结果与仿真结果一致,证明了本文所述缺陷判别方法可以对缺陷的长度和类型进行准确的判别。

4 结论

(1)本文所述缺陷判别方法可基于信号衰减强度评估得到缺陷的长度信息,当缺陷为段缺陷时,其定位峰值由信号在段内多次折反射叠加得到,与本文构建的余弦函数作差相除后仍大于所选取的阈值;当缺陷为点缺陷时,其定位峰值主要受信号在第一次反射的影响,与余弦函数作差相除后小于所选取的阈值。结合原有的极性判断技术后可将缺陷的种类细分为4种,分别为正极性段缺陷、负极性段缺陷、正极性点缺陷、负极性点缺陷,提高了现有的缺陷识别类型的种类。

(2)当被测电缆长度一定时,阈值 d 为随缺陷距离和反射系数的变化值,且在开始时主要受反射系数的影响,当超过某一长度时主要受衰减项的影响。本文中为了区分点缺陷与段缺陷取阈值 d 为最大值1/3。

(3)本文所述缺陷判别方法可对本体受潮、接

地故障、过度弯折和中间接头4种缺陷进行长度和类型的判别。

参考文献 References

[1] 汪先进,周凯,赵世林,等.基于冲击介电响应法的电力电缆绝缘状态评估[J].绝缘材料,2020,53(4):59-63.
WANG X J, ZHOU K, ZHAO S L, et al. Insulation state assessment of power cables based on impulse dielectric response method[J]. Insulating Materials,2020,53(4):59-63.

[2] 郑建康,苏小婷,李庚,等.高压电缆阻水缓冲层电化学腐蚀特性及失效研究[J].绝缘材料,2022,55(2):91-96.
ZHENG J K, SU X T, LI G, et al. Electrochemical corrosion characteristics and failure study of high voltage cable water blocking buffer layer[J]. Insulating Materials,2022,55(2):91-96.

[3] 沈智飞,柳宝坤,王国栋,等.10 kV交联聚乙烯电缆加速电老化特性研究[J].绝缘材料,2021,54(8):60-66.
SHEN Z F, LIU B K, WANG G D, et al. Accelerated electrical ageing characteristics of 10 kV XLPE cable[J]. Insulating Materials,2021,54(8):60-66.

[4] 汪先进,周凯,谢敏,等.基于时间反演相位法的电力电缆局部放电定位[J].电网技术,2020,44(2):783-790.
WANG X J, ZHOU K, XIE M, et al. Partial discharge localization of power cables based on time reversal phase method[J]. Power System Technology,2020,44(2):783-790.

[5] 常文治,李成榕,苏鎔,等.电缆接头尖刺缺陷局部放电发展过程的研究[J].中国电机工程学报,2013,33(7):192-201.
CHANG W Z, LI C R, SU Q, et al. Research on the development process of partial discharge in sharp defects of cable joints[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(7):192-201.

[6] 赵艾萱,刘健,徐龙,等.基于PDC法的在运XLPE电缆绝缘状态评估[J].高电压技术,2019,45(5):1542-1550.
ZHAO A X, LIU J, XU L, et al. Insulation state assessment of XLPE cables in operation based on PDC method[J]. High Voltage Engineering,2019,45(5):1542-1550.

[7] 任志刚,赵雪霁,郭卫,等.基于时域反射技术的电缆渗水缺陷检测方法[J].绝缘材料,2022,55(1):80-86.
REN Z G,ZHAO X Q, GUO W, et al. Cable water leakage defect detection method based on time-domain reflection technology[J]. Insulating Material,2022,55(1):80-86.

[8] CHANG S J, LEE C K, LEE C K, et al.Condition monitoring of instrumentation cable splices using Kalman filtering[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2015, 64(12): 3490-3499.

[9] 单秉亮,李舒宁,孙茂伦,等.基于宽频阻抗谱技术的XLPE电缆老化诊断方法研究[J].绝缘材料,2022,55(2):84-90.
SHAN B L, LI S N, SUN M L, et al. Research on aging diagnosis method of XLPE cable based on broadband impedance spectroscopy technology[J]. Insulating Material,2022,55(2):84-90.

[10] 李蓉,周凯,万航,等.基于输入阻抗谱的电力电缆本体局部缺陷类型识别及定位[J].电工技术学报,2021,36(8):1743-1751.
LI R, ZHOU K, WANG H, et al. Identification and determina-

- tion of local defect types in power cable body based on input impedance spectrum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(8):1743-1751.
- [11] 李胜辉,白雪,董鹤楠,等. 基于平稳小波变换与随机森林的电缆早期故障识别方法[J]. 电工电能新技术,2020,39(3):40-48.
LI S H, BAI X, DONG H N, et al. Early fault identification method for cables based on stationary wavelet transform and random forest[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering,2020,39(3):40-48.
- [12] 饶显杰,周凯,黄永禄,等. 频域反射法中阻抗变化类型判断技术[J]. 电工技术学报,2021,36(16):3457-3466.
RAO X J, ZHOU K, HUANG Y L, et al. Impedance change type determination technique in frequency domain reflection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(16):3457-3466.
- [13] 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.
XIE M, ZHOU K, ZHAO S L, et al. A new method for locating local defects in power cables based on reflection coefficient spectrum[J]. Power System Technology,2017,41(9):3083-3089.
- [14] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
ZHAO Z D. High voltage technology[M]. Beijing: China Electric Power Press,2006.
- [15] ZHOU Z Q, ZHANG D D, HE J J, et al. Local degradation diagnosis for cable insulation based on broadband impedance spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015,22(4):2097-2107.
- [16] 梁钟颖,周凯,孟鹏飞,等. 基于频域反射系数谱的电缆故障定位与故障类型识别方法研究[J]. 电工电能新技术,2022,41(8):79-88.
LIANG Z Y, ZHOU K, MENG P F, et al. Research on cable fault localization and fault type identification method based on frequency domain reflectance coefficient spectrum[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering,2022,41(8):79-88.
- [17] 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.
LI L. Simulation study on fault diagnosis of marine power cables [D]. Dalian:Dalian University of Technology,2017.
- [18] 李蓉,周凯,万航,等. 基于频域反射法的10 kV 配电电缆中间接头受潮定位[J]. 电网技术,2021,45(2):825-832
LI R, ZHOU K, WANG H, et al. Moisture localization of intermediate joints in 10 kV distribution cables based on frequency domain reflection method[J]. Power System Technology,2021,45(2):825-832.

收稿日期:2023-07-04;修回日期:2023-09-15。

作者简介:

唐作鑫(1998-),男(汉族),四川成都人,硕士生,研究方向为电力设备状态监测;

周凯(1975-),男(汉族),四川宜宾人,教授,研究方向为电缆绝缘检测及修复等。