

基于反射系数谱相关系数的电缆故障检测方法

刘鹏程¹, 田立斌², 高磊¹, 孟春旅¹, 孙源¹, 冯井普¹, 陈运锐¹, 林文¹

(1. 海南电网有限责任公司乐东供电局, 海南 乐东 572500; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510641)

摘要: 频域反射法可以有效探测电缆中故障, 但是传统的数据处理方法只能定位电缆中故障, 而不能检测故障的阻抗状态。因此, 本文提出了一种基于反射系数谱相关系数的电缆故障检测方法。首先设计对比函数, 然后通过对比函数与反射系数谱构建相关系数的函数曲线, 并利用该曲线中极值的位置与类型分别检测故障的位置与阻抗状态。最后对含故障的 10 kV 电力电缆开展仿真研究, 并对含故障的 60 m 10 kV 电力电缆开展实验研究。仿真与实验结果表明: 基于反射系数谱相关系数的电缆故障检测方法对电缆故障的定位精度较高, 并且可以准确检测故障的阻抗状态。

关键词: 电缆故障; 反射系数谱; 相关系数; 故障定位; 阻抗状态

中图分类号: TM246 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.05.015

Detection method of cable fault based on correlation coefficient of reflection coefficient spectrum

LIU Pengcheng¹, TIAN Libin², GAO Lei¹, MENG Chunlü¹,
SUN Yuan¹, FENG Jingpu¹, CHEN Yunrui¹, LIN Wen¹

(1. Hainan Power Grid Co., Ltd. LeDong Power Supply Bureau, Ledong 572500, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The frequency domain reflection method can effectively detect the fault in cable, but the traditional methods can only locate the fault in cable and can not detect the impedance state of the fault. Therefore, we proposed a cable fault detection method based on the correlation coefficient of reflection coefficient spectrum in this paper. Firstly, the comparison function was designed, then the function curve of correlation coefficient was constructed by comparing the function and reflection coefficient spectrum, and the position and type of the extreme value in the function curve were used to detect the position and impedance state of fault, respectively. At last, a 10 kV power cable with fault was conducted simulation research and a 60 m of 10 kV power cable with fault was conducted experimental research. The simulation and experiment results show that the cable fault detection method based on correlation coefficient of reflection coefficient spectrum has high location accuracy on the cable faults, and it can accurately detect the impedance state of fault.

Key words: cable fault; reflection coefficient spectrum; correlation coefficient; fault location; impedance state

0 引言

电力电缆被广泛应用于输配电网的各个环节中, 主要负责电能的传输与分配^[1-2]。实际运行的电缆不仅受到设计、制作工艺与施工操作的影响, 而且受到电应力、热应力、温度、湿度等多种因素的影响, 导致其绝缘材料发生老化, 引起电缆故障^[3-5]。而由于电力电缆通常埋设于地下, 难以排查电缆的故障, 一旦电缆出现故障只能通过大面积施工对电缆进行更换, 不仅经济成本与人力成本较高, 而且会导致输配电网长期瘫痪, 从而造成重大的经济损失。如果能快速对电缆故障的位置与类型进行

准确检测, 就可以节省大量的电网运维成本。因此, 研究电力电缆的故障检测方法对于维护输配电网的稳定运行具有重大意义。

目前, 国内外大部分研究学者利用反射测量法检测电缆的故障, 该方法是利用电缆首端发射的脉冲信号或扫频信号对电缆故障进行检测。其中, 时域反射法^[6-7]是在电缆首端发射脉冲信号, 该脉冲信号会在故障形成的阻抗不匹配点产生折反射现象, 反射信号会沿着相反的方向传输到电缆的首端, 通过记录并分析反射信号的传输时间来定位电缆的故障, 但是该方法的脉冲信号中频率分量较单一, 难以准确探测电缆中的故障。频域反射法^[8-9]则是在电缆首端发射一组扫频信号, 再检测宽频下的首端阻抗谱或反射系数谱, 该频谱数据内存在电缆的

基金项目: 海南电网有限责任公司科技项目 (071600KK5220 0001)

故障信息,可以用于电缆故障的检测分析。因为频域反射方法中扫频信号的频率范围更广,高频成分更多,所以该方法可以对故障开展快速检测并精准定位,近年来逐渐成为研究热点。

文献[10]提出基于快速傅里叶反变换算法的频域反射技术,并实现了电缆中热老化故障的定位。文献[11]则提出了基于加窗离散傅里叶变换算法的频域反射技术,改进了原有算法中窗函数固定与测试点数要求高的问题,实现了65 m电力电缆中物理结构性故障的定位。文献[12]研究了频域反射法对配电电缆中间接头中故障情况的定位检测效果。文献[13]讨论了测试因素与故障特征对频域反射法故障定位结果的影响。文献[14]证明了频域反射法可以精确定位电缆中的水树缺陷。传统的频域反射技术虽然可以定位故障形成的阻抗不匹配点,但是不能判断故障的阻抗状态,因此无法检测电缆中故障的特征。

针对传统技术无法检测故障阻抗状态的问题,本研究提出一种基于反射系数谱相关系数的电缆故障检测方法。先设计合理的对比函数,然后将对比函数与反射系数谱数据构造相关系数的函数曲线,并利用该曲线的极值特征对电力电缆中故障开展检测。最后设计具有故障的仿真电缆样本与真实电缆样本对其开展测试分析,论证所提方法的有效性。

1 电缆的反射系数谱

1.1 电缆的传输线模型

如果传输信号的频率较高或电缆的长度较长,那么必须将电缆当做传输线,并利用传输线理论分析电缆中电压与电流的变化规律。在传输线理论^[15-16]中,电缆需要采用图1所示的分布参数模型开展分析,其中参数 R 、 L 、 G 、 C 分别表示电缆的电阻、电感、电导与电容,可以分别表示为式(1)~(4)。

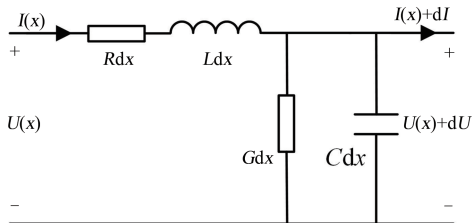


图1 电缆的分布参数模型

Fig.1 Distributed parameter model of cable

$$R \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2}} \left(\frac{1}{r_c \sqrt{\sigma_c}} + \frac{1}{r_s \sqrt{\sigma_s}} \right) \quad (1)$$

$$L \approx \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2\mu_0}{\omega}} \left(\frac{1}{r_c \sqrt{\sigma_c}} + \frac{1}{r_s \sqrt{\sigma_s}} \right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} \quad (2)$$

$$G = \frac{2\pi\sigma_D}{\ln(r_s/r_c)} \quad (3)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_D}{\ln(r_s/r_c)} \quad (4)$$

式(1)~(4)中: ω 是信号的角频率, $\omega=2\pi f$, f 是信号的频率; r_c 和 r_s 分别是缆芯半径与屏蔽层半径; σ_c 和 σ_s 分别是缆芯材料与屏蔽层材料的电导率; μ_0 是真空磁导率; σ_D 与 ϵ_D 分别为电介质的电导率与介电常数。

假设电缆的长度是 l ,其 x 处位置的电压 $U(x)$ 与电流 $I(x)$ 可以分别表示为式(5)、式(6)。

$$U(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} = U^+ + U^- \quad (5)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) = I^+ + I^- \quad (6)$$

式(5)~(6)中: A_1 与 A_2 均是待定系数,可由电缆首端功率与末端负载的边界条件得到; U^+ 与 U^- 分别是 x 处的入射电压与反射电压; I^+ 与 I^- 分别是 x 处的入射电流与反射电流; γ 是电缆的传播常数; Z_0 是电缆的特性阻抗。其中 γ 与 Z_0 可以分别表示为式(7)、式(8)。

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (7)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (8)$$

式(7)~(8)中: α 与 β 分别是电缆的衰减常数与相位常数,其中 $\beta = 2\pi f/v$, v 是电缆的电磁波速度。

1.2 首端反射系数谱

因为故障会引起电缆的局部参数发生变化,形成阻抗不匹配点^[17],所以在高频信号沿着电缆进行传播的过程中,高频信号会在故障处产生折反射现象,其中反射信号的特征会表现在反射系数上。则针对总长度是 l 的电缆,与首端相距 x 处的电缆反射系数 $\Gamma(x)$ 与输入阻抗 $Z(x)$ 可分别为式(9)、式(10)。

$$\Gamma(x) = \frac{U^-}{U^+} = \frac{Z(l) - Z_0}{Z(l) + Z_0} e^{-2\gamma(l-x)} \quad (9)$$

$$Z(x) = \frac{U(x)}{I(x)} = Z_0 \left(\frac{1 + \Gamma(l) e^{-2\gamma(l-x)}}{1 - \Gamma(l) e^{-2\gamma(l-x)}} \right) \quad (10)$$

进一步可得到首端反射系数谱 $\Gamma(0)$ 为式(11)。

$$\Gamma(0) = \frac{Z(l) - Z_0}{Z(l) + Z_0} e^{-2\gamma l} = \Gamma(l) e^{-2\gamma l} \quad (11)$$

分析含有故障形成阻抗不匹配点的电缆,如图2所示。与首端相距 l_1 处,电缆存在阻抗不匹配点,可以得到电缆的首端反射系数谱为式(12)。

$$\Gamma(0) = \frac{Z(l_1) - Z_0}{Z(l_1) + Z_0} e^{-2\gamma l_1} = \Gamma(l_1) e^{-2\gamma l_1} \quad (12)$$

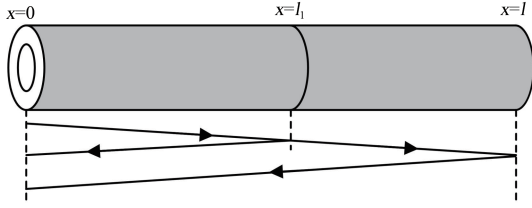


图2 含有故障的电缆示意图
Fig.2 Schematic diagram of cable with fault

为了分析反射系数谱与电缆故障的关系,整合式(7)~(8)和式(11)可得到式(13)。

$$\Gamma(0) = \Gamma(l)e^{-2\alpha l} = \Gamma(l)e^{-2\alpha l}e^{-j2\frac{2\pi f}{v}l} \quad (13)$$

借助欧拉公式将式(13)展开,得到式(14)。

$$\Gamma(0) = \Gamma(l)e^{-2\alpha l} [\cos(2\pi\frac{2l}{v}f) - j\sin(2\pi\frac{2l}{v}f)] \quad (14)$$

仅对式(14)中实部的三角函数开展分析,得到式(15)。

$$\Gamma(0) = \Gamma(l)e^{-2\alpha l} \cos(2\pi\frac{2l}{v}f) \quad (15)$$

2 电缆的故障检测方法

2.1 现有基于反射系数谱的电缆故障检测方法

由式(15)可知,对于完整的电缆而言,反射系数谱是随频率 f 变化的周期函数,并且该周期函数的频率为 $2l/v$,正好是测试信号从首端传输到末端经末端处反射回来的时间。类似地,当电缆与首端相距 l_1 处产生故障时,反射系数谱中会出现新的周期函数,并且该周期函数的频率是 $2l_1/v$,正好是测试信号从首端传输到故障处然后经故障处反射回来的时间。

对于总长度为 l 的被测电缆而言,其反射系数谱中信号的最高频率为 $2l/v$,根据奈奎斯特采样准则,其反射系数谱的采样频率必须大于最高频率 $2l/v$ 的2倍,才能保证采集的反射系数谱是准确的,即可得到式(16)。

$$N/(f_{\max} - f_{\min}) \geq 4l/v \quad (16)$$

式(16)中: N 是反射系数谱的测点个数; f_{\max} 为反射系数谱的频率上限; f_{\min} 为反射系数谱的频率下限。

根据式(16)可以得到式(17)。

$$N \geq 4l(f_{\max} - f_{\min})/v \quad (17)$$

只要测点个数 N 满足式(17),则采集的反射系数谱就是准确的,可以用于电缆故障检测。

目前大部分的传统方法都是选用傅里叶变换算法处理反射系数谱,研究其中周期性分量的频率,从而实现故障的定位,但是此类方法无法检测故障的阻抗状态。并且,由于实际测量反射系数谱的数据量有限,传统方法通常会利用补零与加窗的

数学算法对反射系数谱进行预处理^[13],但是在实际分析的过程中,补零的个数与窗函数的类型都难以选择,加大了传统方法的实际运用难度。

2.2 反射系数谱的相关系数

令 $\rho(l)=|\Gamma(l)e^{-2\alpha l}|$,当电缆的末端阻抗 $Z(l)>Z_0$ 时,即电缆末端存在阻抗增大的情况时,有 $\Gamma(l)>0, e^{-2\alpha l}>0$,则式(15)可以表示为式(18)。

$$\Gamma(0) = \rho(l) \cos(2\pi\frac{2l}{v}f) \quad (18)$$

同理,当电缆的末端阻抗 $Z(l)<Z_0$ 时,即电缆末端存在阻抗减小的情况时,有 $\Gamma(l)<0, e^{-2\alpha l}>0$,则式(15)可以表示为式(19)。

$$\Gamma(0) = -\rho(l) \cos(2\pi\frac{2l}{v}f) \quad (19)$$

建立对比函数 $y(x, f)$ 为式(20)。

$$y(x, f) = \cos(2\pi\frac{2x}{v}f) \quad (20)$$

式(20)中, x 是距离待定参数。

结合式(18)、(19)和式(20)可以看出,如果将 f 视为变量,那么 $y(x, f)$ 与 $\Gamma(0)$ 具有相同的函数结构,当 $x=l$ 时,两者的波形特征变得一致,仅幅值不一样,两者呈现高度相关的状态。如果电缆末端的阻抗呈现为减小的状态,那么两者呈现高度的负相关;如果电缆末端的阻抗呈现为增大的状态,那么两者呈现高度的正相关。因此,可以利用 $y(x, f)$ 与 $\Gamma(0)$ 的相关性来对电缆末端的阻抗状态开展检测。同理,当电缆中存在故障时,同样可以利用 $y(x, f)$ 与 $\Gamma(0)$ 的相关性对电缆故障的阻抗状态开展检测。

为了将 $y(x, f)$ 与 $\Gamma(0)$ 的相关性进行量化,本研究进一步引入皮尔逊相关系数 $P(x)$ ^[18-19],该系数通常可以用于量化两组变量的线性相关度,其数值范围是-1~1,具体的定义为式(21)。

$$P(x) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} (\Gamma(0) - \bar{\Gamma}(0))(y(x, f) - \bar{y}(x, f))df}{\sqrt{\int_{f_1}^{f_2} (\Gamma(0) - \bar{\Gamma}(0))^2 df} \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} (y(x, f) - \bar{y}(x, f))^2 df}} \quad (21)$$

式(21)中: $\bar{\Gamma}(0)$ 是 $\Gamma(0)$ 的平均值; $\bar{y}(x, f)$ 是 $y(x, f)$ 的平均值; f_1 是最低测量频率; f_2 是最高测量频率。

式(21)中 $P(x)$ 绝对值的取值范围是0~1, $P(x)$ 的绝对值越大,那么变量 $y(x, f)$ 与 $\Gamma(0)$ 的相关度越高; $P(x)$ 的绝对值越小,那么变量 $y(x, f)$ 与 $\Gamma(0)$ 的相关度越低。而且, $P(x)$ 数值的正负表示了变量 $y(x, f)$ 与 $\Gamma(0)$ 相关度的正负特征。

2.3 基于反射系数谱相关系数的电缆故障检测方法

利用函数 $P(x)$ 对故障的位置与阻抗状态开展检

测,具体步骤如下:

(1)利用电缆首端反射系数谱测量平台对电缆开展测试,获取电缆的反射系数谱,并提取出反射系数谱的实部 $\Gamma(0)$ 。

(2)根据被测电缆的总长度 l ,设置距离待参参数 x 的范围是 $[0.05l, 1.1l]$, x 的间隔 Δx 可以根据实际情况设置。

(3)根据设定的 x 值,构建多组不同的对比函数 $y(x, f)$ 。

(4)计算 $\Gamma(0)$ 与对比函数 $y(x, f)$ 的皮尔逊相关系数,得到皮尔逊相关系数的函数序列 $P(x)$ 。

(5)观察 $P(x)$ 的极值特征,极值的位置指示了故障的位置,极值的类型(极大值或极小值)说明了故障的阻抗状态。

值得说明的是, x 的个数不是测点的个数,对于 x 的选择问题,为了屏蔽电缆首端测试夹具处阻抗不匹配现象引起的强烈干扰,同时准确检测电缆在全长范围内的故障,本文将 x 的范围设置为 $[0.05l, 1.1l]$ 。 x 的范围设置过大,不仅无法提高故障的检测效果,而且会增加设备的计算量。 x 的点数取决于 x 的间隔 Δx , Δx 越小, x 的点数越多, $y(x, f)$ 的函数分辨率越高,因此 $P(x)$ 的函数分辨率也会越高,使故障检测曲线的分辨率提高,但是设备的计算量会增加。为了均衡设备的计算量与故障检测曲线的分辨率,本研究将 Δx 设置为0.01 m,即最终故障检测曲线的距离分辨率为0.01 m。

3 仿真研究

3.1 含故障的电缆模型

当电缆产生故障时,电缆故障位置的特性阻抗会发生变化,为了对含故障的电缆开展仿真研究,建立如图3所示的电缆故障研究模型,以模拟电缆因自身或外部因素造成的微弱或严重故障。图3(a)是开路故障的示意图,其中电缆内部导体存在电阻 R_k ,当 R_k 趋于无穷大时,电缆类似于断开,形成开路故障。图3(b)是经过渡电阻接地故障的示意图,其中电缆线芯通过一个过渡电阻 R_g 接地,当出现该类型的故障时,说明电缆已经处于特别恶劣的绝缘状态,如果该故障进一步发展,当 $R_g=0$ 时,该故障将演变为短路故障,导致电缆的线芯接地。图3(c)是短路故障的示意图,其中电缆已经存在接地点,该电缆的缆芯与屏蔽层短接,产生短路故障。

本模型中电缆的长度为500 m,故障均设置在300 m位置,仿真采用的电缆型号为文献[11]中的10 kV交联聚乙烯电缆模型,具体电缆模型的故障

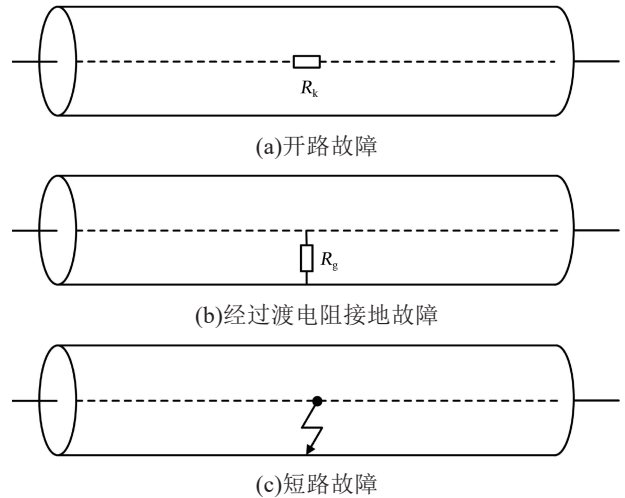


图3 含有故障的电缆模型

Fig.3 Cable models with fault

情况如表1所示。为了模拟实际的电缆故障情况,参考文献[20]中的仿真模型,随机将过渡电阻设置为 $R_g=30\ \Omega$ 、 $R_g=100\ \Omega$ 两组值,以仿真测试本研究所提方法对于不同程度下经过渡电阻接地故障的检测效果,值得说明的是,仿真3#电缆模型、4#电缆模型的末端都设置为开路状态,因此两者在500 m处末端存在开路故障。测量环节中,首端反射系数谱的测量频率范围设置为0.1~200 MHz,测量点数为3 999。

表1 电缆模型的故障情况

Tab.1 Fault situation of cable model

电缆模型编号	故障类型
1#	开路故障
2#	短路故障
3#	经过渡电阻接地故障, $R_g=30\ \Omega$
4#	经过渡电阻接地故障, $R_g=100\ \Omega$

故障处的反射系数理论值 ρ_G 可以表示为式(22)。

$$\rho_G = \frac{Z_G - Z_0}{Z_G + Z_0} \quad (22)$$

式(22)中, Z_G 是故障位置的特性阻抗。

当电缆中无故障时, $Z_G=Z_0$,确定 $\rho_G=0$,此时不会产生反射信号;当电缆中故障导致特性阻抗增大时, $Z_G>Z_0$,确定 $\rho_G>0$,此时反射信号会呈现正的极性特征;当电缆中故障导致特性阻抗减小时, $Z_G<Z_0$,确定 $\rho_G<0$,此时反射信号会呈现负的极性特征。在图3的电缆故障模型中,开路故障会导致电缆的特性阻抗增大,而经过渡电阻接地故障与短路故障会导致电缆的特性阻抗减小^[17],因此,不同类型的故障会呈现出不同极性特征的反射信号,可以利用该特点

对故障特征进行检测。

3.2 仿真结果分析

根据本文提出的基于反射系数谱相关系数的电缆故障检测方法,可通过计算反射系数谱与对比函数的相关系数,得到相关系数的函数序列曲线 $P(x)$ 。通过分析 $P(x)$ 极值的位置可以定位电缆中的故障,同时通过判断该极值的类型可以检测故障的阻抗状态,当极值类型是极大值时,说明该故障处特性阻抗处于增大状态;当极值类型是极小值时,说明该故障处特性阻抗处于减小状态。

图4为采用本研究方法对图3中故障电缆测量反射系数谱的处理结果,通过检测 $P(x)$ 的极值,得到故障电缆模型的检测结果如表2所示。

在图4的处理结果中,通过 $P(x)$ 中极值的位置,有效定位了4组电缆模型中故障的位置,且由表2可知,本文方法的故障定位结果和电缆模型中预设故障的位置(300 m)高度吻合,定位精度较高。

然后通过 $P(x)$ 中极值的类型,有效分析了4组电缆模型中故障的阻抗状态。对于1[#]电缆模型而言,故障处的函数 $P(x)$ 出现了极大值,和开路故障导致电缆特性阻抗增大的情况一致。对于2[#]~4[#]电缆模型而言,故障处的函数 $P(x)$ 出现了极小值,和经过渡电阻接地故障或短路故障导致电缆特性阻抗减小的情况一致。

综上所述,电缆故障导致的阻抗状态变化会引发函数 $P(x)$ 的极值,因此可以通过分析函数 $P(x)$ 曲线的极值来检测电缆中的故障。

对于3[#]、4[#]电缆模型而言,电缆总长度为500 m,电缆在300 m、500 m处分别存在经过渡电阻接地故障与开路故障,应存在两个不同程度的阻抗不匹配点。从图4(c)、(d)可以看出,3[#]、4[#]电缆模型的故障检测结果中300 m、500 m附近均出现明显的极值,并且300 m附近极值为极小值,500 m附近极值为极大值,说明300 m附近故障的特性阻抗处于减小状态,500 m附近故障的特性阻抗处于增大状态,两处故障的检测结果和电缆模型中预设故障的情况高度吻合,说明本研究方法可以检测长电缆中多处程度不一的阻抗不匹配点。

为了说明本研究方法的优越性,利用传统方法对4组电缆模型的测量数据进行处理,得到传统方法的故障诊断函数如图5所示。由图5可以看出,在传统方法处理结果中,故障位置处诊断函数几乎一致,即在故障处的阻抗不匹配点产生冲击响应,并不会因各故障的阻抗状态不一致,而在诊断函数上产生差异。综上所述,传统方法仅简单利用傅里

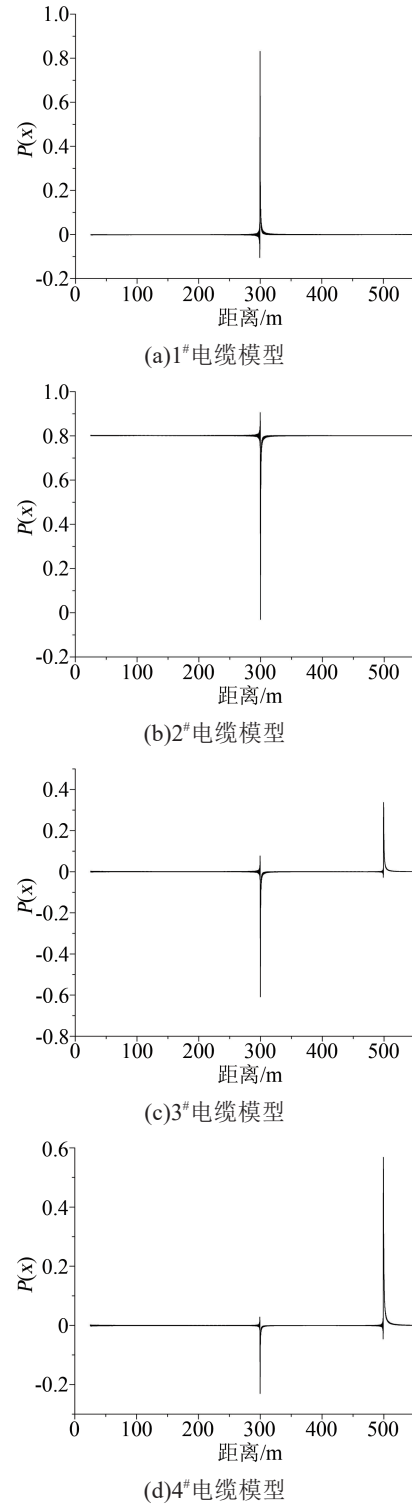


图4 本文方法对故障电缆模型的处理结果

Fig.4 Processing results of fault cable model by the proposed method

叶算法将频域测量数据转化成时域测量数据,因此相应诊断函数的故障处仅能出现简单的冲击响应,该冲击响应与故障处电缆特性阻抗的状态无关,仅与故障的位置相关联,导致传统方法仅能定位电缆的故障,而不能检测故障的阻抗状态。

表2 电缆模型的故障检测结果
Tab.2 Fault detection results of cable models

电缆模型	故障位置	故障的阻抗状态
1#	299.7 m	增大
2#	299.7 m	减小
3#	299.7 m	减小
4#	299.7 m	减小

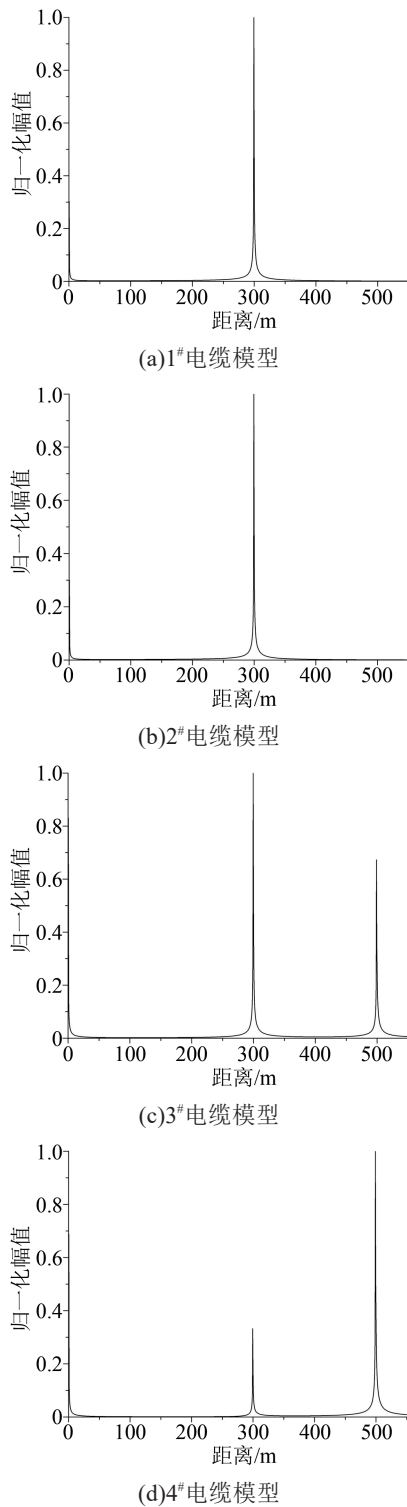


图5 电缆模型的传统故障诊断函数

Fig.5 Traditional fault diagnosis function of cable models

4 试验研究

4.1 测试平台

为研究所提基于反射系数谱相关系数的电缆故障检测方法的有效性,设计了如图6所示的反射系数谱测量平台,网络分析仪型号为NA7632A。在长度为60 m的10 kV 交联聚乙烯电力电缆上开展故障检测研究,电缆型号为YJLV22-3×25,真实电缆故障相关参数如表3所示。本研究参考文献[20]中试验设置情况,令7#真实电缆中经过渡电阻接地故障的 $R_g=20 \Omega$,以设立一组典型的经过渡电阻接地故障开展分析检测。

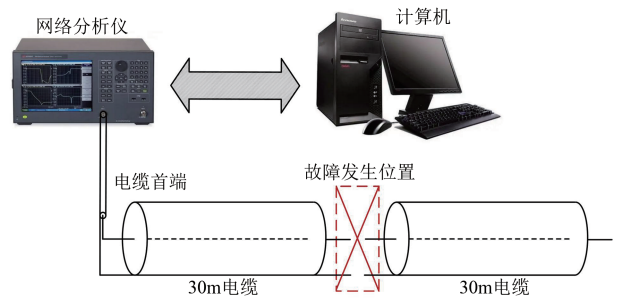


图6 反射系数谱的测量平台

Fig.6 Measurement platform of reflection coefficient spectrum

表3 真实电缆的故障情况

Tab.3 Fault situation of actual cable

真实电缆编号	故障类型
5#	开路故障
6#	短路故障
7#	经过渡电阻接地故障, $R_g=20 \Omega$

只有当电缆中传输信号的频率较高,且传输信号的波长远小于电缆的长度时,才可以将电缆视为传输线,进一步可以利用反射系数谱数据对电缆故障进行检测。本研究中仿真研究部分的电缆模型长度为500 m,试验研究部分的真实电缆长度为60 m,由于试验研究部分的真实电缆长度远小于仿真研究的电缆模型长度,为了将电缆视为传输线,提升利用反射系数谱数据检测电缆故障的效果,必须将试验研究部分的测试频率提高,因此试验研究部分的测试频率选择为0.15~500 MHz,随后利用反射系数谱测量平台在电缆首端测量其反射系数谱,电缆的末端设置为开路状态,测量点数设置为5 001。

4.2 试验结果分析

利用本文所提方法对真实电缆的测量结果进行处理,得到对应的函数 $P(x)$ 曲线如图7所示。结合第2节中理论对 $P(x)$ 开展分析,检测 $P(x)$ 的极值,

确定故障的检测结果如表 4 所示。

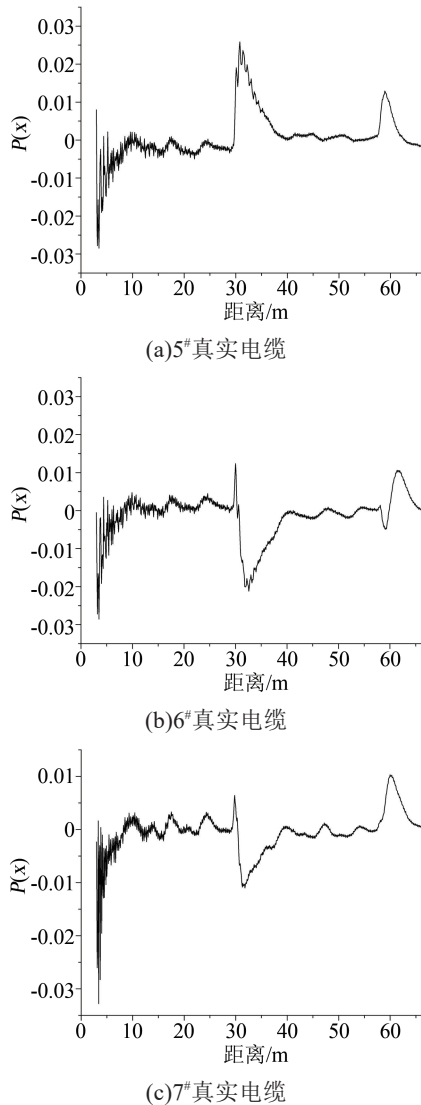


图 7 本文方法对真实电缆的处理结果
Fig.7 Processing results of actual cables by the proposed method

表 4 真实电缆的故障检测结果

Tab.4 Fault detection results of the actual cables

真实电缆编号	故障位置	故障的阻抗状态
5#	30.8 m	增大
6#	32.6 m	减小
7#	31.8 m	减小

由表 4 可知,本文方法通过检测函数 $P(x)$ 的极值位置,可以有效定位真实电缆中故障,并且定位结果的最大绝对误差为 2.6 m。接着,通过检测函数 $P(x)$ 的极值类型,准确判断了真实电缆中故障的阻抗状态。对于 5# 真实电缆而言,故障处的函数 $P(x)$ 出现了极大值,和开路故障导致电缆特性阻抗增大的情况一致;对于 6#、7# 真实电缆而言,故障处的函

数 $P(x)$ 出现了极小值,和短路故障或经过渡电阻接地故障导致电缆特性阻抗减小的情况一致。

在真实电缆测试时,通常会直接采用测试夹具连接反射系数谱测量平台与测试电缆,整个测试系统会在测量平台与电缆连接处(电缆首端位置)产生严重的阻抗不匹配的现象,以此可以解释图 7 中的两个特殊现象。

(1)5#~7# 真实电缆的函数 $P(x)$ 曲线在靠近首端位置均出现了严重的噪声,这是由于首端位置处阻抗不匹配点引起的强烈反射造成的,说明本文方法难以检测真实电缆中首端附近的故障,此时建议采用对端测量的方式开展二次检测。

(2)5# 真实电缆中 30 m 处存在开路故障,6# 真实电缆中 30 m 处存在短路故障,而 5#、6# 真实电缆中故障的反射信号均会在首端位置处再次发生反射,形成多重反射,造成了函数 $P(x)$ 曲线中 60 m 附近的虚假极值,因此虚假极值不仅会在短路故障情况下出现,在开路故障情况下也会出现。因为测试信号无法通过开路故障或短路故障继续传播到电缆末端,所以当电缆中出现开路故障或短路故障时,电缆末端位置不应该出现反射信号,例如 1#、2# 仿真电缆模型的处理结果中,电缆末端 500 m 处无反射信号。但是在实际测试过程中,由于首端位置存在严重的阻抗不匹配现象,故障处对应的反射信号会在首端与故障位置发生多次反射,造成虚假极值,例如 5#、6# 真实电缆中 30 m 处开路故障与短路故障对应的反射信号在达到首端后被采集,然后再次反射到故障处,最后由故障处反射到首端后再次被采集,造成了 60 m 附近的虚假极值。但是,值得说明的是,由图 7 可知,多重反射形成的虚假极值并不影响本研究对故障的检测,仍可以准确检测 30 m 处的故障。

同样为了说明本研究方法的优越性,利用传统方法对真实电缆的测量数据进行处理,得到传统方法的故障诊断函数如图 8 所示。由图 8 可以看出,对于不同种类的故障而言,传统故障诊断函数仅会在故障位置产生简单的冲击响应,且特征几乎保持一致,说明传统的故障诊断函数仅能定位电缆中故障,而无法检测故障的阻抗状态。

5 结论

(1)传统基于反射系数谱的电缆故障检测方法仅能定位故障的位置,无法检测故障处的阻抗状态,难以获取故障的具体特征。

(2)以频率为自变量,建立对比函数,并研究对

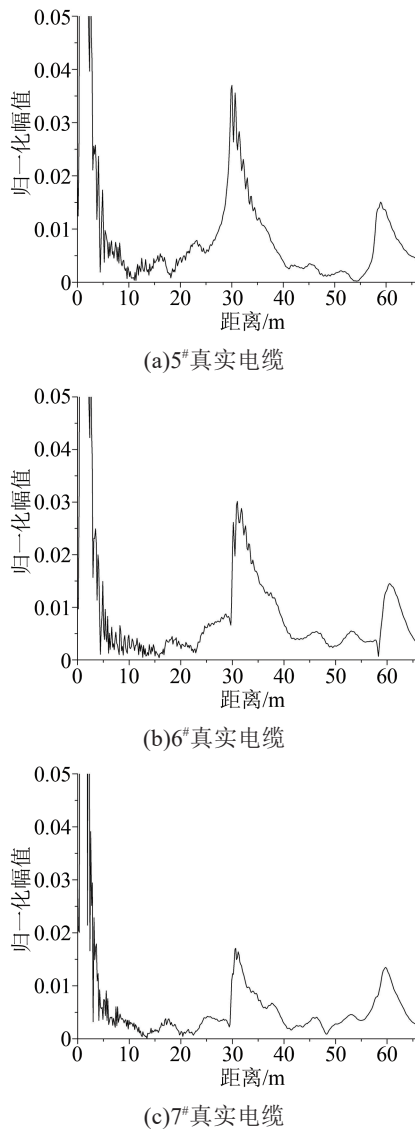


图8 真实电缆的传统故障诊断函数

Fig.8 Traditional fault diagnosis function of the actual cables

比函数与反射系数实部的相关系数,发现该相关系数曲线的极值特性由故障形成的阻抗不匹配点确定,因此可将该极值用于检测电缆故障。

(3)根据本研究提出基于反射系数谱相关系数的电缆故障检测方法,通过相关系数曲线的极值可以确定故障的位置与阻抗状态。首先通过该极值的位置可以对故障进行定位,然后通过该极值的类型可以确定故障的阻抗状态。

参考文献:

- [1] 罗阳帆,周凯,李康乐,等.基于电缆绝缘寿命扩展技术的现场退运电缆修复效果研究[J].绝缘材料,2021,54(5):54-60.
- [2] 郭瑞宙,王天正,杨罡,等.电缆绝缘缺陷与电流谐波成分特性关系分析[J].绝缘材料,2020,53(2):102-108.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 沈智飞,柳宝坤,王国栋,等.10kV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.
- [6] 梁栋,徐丙垠,谢伟,等.基于小波脉冲相关的电缆故障时域反射测距方法[J].中国电机工程学报,2020,40(24):8050-8057,8241.
- [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.
- [8] 魏力强,贾伯岩,苏金刚,等.电树枝劣化对10kV电缆传输特性影响机理及其定位方法研究[J].绝缘材料,2022,55(7):71-77.
- [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.
- [10] OHKI Y, YAMADA T, HIRAI N. Precise location of the excessive temperature points in polymer insulated cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2013,20(6): 2099-2106.
- [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] 李蓉,周凯,万航,等.基于频域反射法的10kV配电网电缆中间接头受潮定位[J].电网技术,2021,45(2):825-832.
- [13] 高向南,姚李孝,杨国清.基于反射系数傅里叶逆变换的电缆局部缺陷诊断方法研究[J].电网与清洁能源,2021,37(8):76-83.
- [14] 周淦,王鑫源,欧阳希,等.基于反射系数谱的XLPE电缆水树缺陷定位方法[J].电工电能新技术,2021,40(7):28-39.
- [15] 王昱皓,周凯,汪先进,等.基于改进时频域反射法的电力电缆局部缺陷定位[J].中国电机工程学报,2021,41(7):2584-2594.
- [16] 潘文霞,赵坤,朱正鼎.一种基于阻抗相位变化比率的长电缆局部缺陷定位新方法[J].中国电机工程学报,2020,40(12):4043-4051.
- [17] 吴春华,曹明杰,李智华,等.光伏系统直流电缆故障检测及其定位研究[J].太阳能学报,2021,42(5):267-275.
- [18] 纪德洋,金锋,冬雷,等.基于皮尔逊相关系数的光伏电站数据修复[J].中国电机工程学报,2022,42(4):1514-1523.
- [19] 张华,龙呈,胡思洋,等.基于层次聚类法与皮尔逊相关系数的配电网拓扑校验方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(21): 88-96.
- [20] 李蓉,周凯,饶显杰,等.基于输入阻抗谱的电缆故障类型识别及定位[J].高电压技术,2021,47(9):3236-3245.

收稿日期:2022-04-25 修回日期:2022-07-15

作者简介:刘鹏程(1988-),男(汉族),海南乐东人,工程师,研究方向为输电设备的故障诊断;通信作者:田立斌(1964-),男(汉族),广东广州人,副教授,研究方向为电力设备的可靠性分析。