

基于FDR法的变电站低压电缆局部缺陷定位方法

王中杰¹, 杨爱晟², 冯 霆², 陶文彪³, 杜 娟²

(1. 国网山西省电力公司, 山西 太原 030001; 2. 国网山西省电力公司晋中供电公司, 山西 晋中 030600; 3. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

摘要:为了研究低压电缆局部缺陷定位方法,本文采用频域反射法(FDR)对含缺陷低压电缆进行检测,并对定位结果进行分析。在长度为14.1 m的低压电缆A相、B相及C相依次制作D1、D2、D3三个局部缺陷,其中D1缺陷是在距电缆首端8.7 m处的A相剥掉尺寸为20 mm×2 mm的矩形绝缘(露出缆芯)并联不同阻值电阻模拟高阻及低阻故障,D2缺陷为在距电缆首端4.3 m处的B相制作的长度为5 mm的纵向刀痕缺陷,D3缺陷为在距电缆首端11 m处的C相上制作的V形刀痕缺陷。利用FDR仪对未制作缺陷的A相样本及含缺陷的A、B、C三相样本进行测试。之后将C相样本D3缺陷处浸泡在饱和食盐水中并在电缆首端三相上施加1 kV的电压进行加速老化,老化时间为4周,老化后对样本A、B、C三相进行FDR检测。利用FDR检测结果,分析不同缺陷的频域及时域波形特征。结果表明:无缺陷样本频域波形波峰幅值呈递减趋势,而含缺陷样本缺陷处的波峰幅值增大而且大于两侧波形幅值,且低阻故障时波峰幅值增大更为显著。此外,时域波形上高阻故障表现为一正波,但波峰不显著,而低阻故障表现为一显著的负波。利用FDR频域及时域波形可有效定位低压电缆故障,且对低阻故障定位灵敏度更高。

关键词:变电站;低压电缆;局部缺陷;定位;FDR;高/低阻故障

中图分类号:TM247 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)08-0097-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.08.016

Partial Defects Positioning Method of Low Voltage Cables in Transformer Substation Based on FDR Method

WANG Zhongjie¹, YANG Aisheng², FENG Ting², TAO Wenbiao³, DU Juan²

(1. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China;

2. State Grid Jinzhong Power Supply Company, Jinzhong 030600, China;

3. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: To investigate the partial defects positioning method of low voltage cable, frequency domain reflectometry (FDR) was used to test the low voltage cable with defects, and the positioning results were analyzed in this paper. Three partial defects of D1, D2, and D3 were made successively in phases A, B, and C of 14.1 m long low voltage cable. The D1 defect was a 20 mm × 2 mm of rectangular insulation (expose cable core) in phase A made at 8.7 m away from the head-end of cable and was paralleled resistors with different resistance to simulate high and low resistance faults. The D2 defect was a longitudinal knife mark defect with 5 mm of length in phase B made at 4.3 m away from the front end of cable, while D3 defect was a V-shaped knife mark defect in phase C made at 11 m away from the head-end of cable. The A phase samples without defects and A, B, and C three phase samples with defects were tested by FDR instrument. Then, the D3 defect was immersed in saturated salt water and the three phases end of cable was applied 1 kV voltage for accelerated ageing. The ageing time was four weeks. After ageing, the three phases A, B, and C were detected by FDR. The waveform characteristics in frequency

收稿日期:2021-09-13 修回日期:2021-11-28

基金项目:国网山西省电力公司科技项目资助(5205K0200JX)

作者简介:王中杰(1983-),男(汉族),河北邢台人,高级工程师,主要从事变电运检技术的研究。

domain and time domain of different defects were analyzed according to FDR detection results. The results show that the peak amplitude in frequency domain of the sample without defect decreases, but the peak amplitude at the defect of the sample with defects increases and is larger than the waveform amplitude on both sides, and the peak amplitude increases more significantly when there is a low resistance fault. In addition, the time domain waveform of high resistance fault shows a positive wave, but the peak is not significant. The low resistance fault presents a significant negative wave. FDR waveforms in frequency domain and time domain can be used to locate low voltage cable faults effectively, and have higher sensitivity to locate low resistance fault.

Key words: transformer station; low voltage cable; partial defects; positioning; FDR; high/low resistance fault

0 引言

低压电缆是变电站供电网的重要组成部分,其主要包括交流电缆及直流电缆(用于站用直流电源系统供电网),低压电缆在运行过程中由于挤压、受热、潮湿、腐蚀等老化因素的影响^[1],出现局部破损,水分等由此进入绝缘层,导致绝缘层不断老化、绝缘性能下降,可能在绝缘破损处和钢铠或大地之间产生某种程度的导电途径,造成低压系统故障及事故^[2-3]。随着变电站运行年限增加,因电缆老化而导致的绝缘故障及系统事故不断增多^[3-6]。此外,低压直流电源支路较多,在该系统中电缆老化、短路容易引发系统事故,因此低压直流电缆故障的定位值得重点关注。

在实际工作中,运维人员常采用接地故障查找仪对故障电缆进行逐段检测,该方法不仅耗费大量人力物力,而且对于运维人员无法到达的电缆线路难以进行准确定位。因此,如何对低压电缆局部缺陷进行快速有效定位是目前亟待解决的问题^[7-9]。

电缆局部缺陷或故障会导致电缆在该位置的特性阻抗发生改变,行波法对特性阻抗具有较好的探测效果。国内外学者通常采用时域反射法(time domain reflectometry, TDR)^[10-11]、频域反射法(frequency domain reflectometry, FDR)^[12-15]或时频域反射法^[16-18]进行电缆局部缺陷定位。其中FDR法因其采用扫频信号,高频成分含量较多,因此开始逐渐替代TDR法^[19-20]。已有研究表明,FDR法能够对中高压电缆及同轴电缆中的局部缺陷进行较为准确的定位,但目前尚无针对低压电缆局部缺陷的定位方法^[12-15]。低压电缆结构和中高压电缆类似,因而理论上FDR法同样适用于低压电缆局部缺陷定位。然而,低压电缆绝缘材料及绝缘厚度均有别于中高压电缆,如低压电缆绝缘材料通常为聚氯乙烯(PVC),而中高压电缆通常为交联聚乙烯(XLPE),且低压电缆绝缘厚度远小于中高压电缆,这些均导

致低压电缆采用FDR法检测出现与中高压电缆检测不同的特征。FDR法是否能有效应用于低压电缆局部缺陷定位,如何提出有效方法及参数定位低压电缆局部缺陷,值得进一步研究。

本文在低压电缆中制作局部缺陷,并利用FDR法对电缆局部缺陷进行检测,研究低压电缆的频域及时域波形特征,分析FDR法检测低压电缆局部缺陷的有效性,并提出基于FDR法频域及时域波形特征的低压电缆局部缺陷定位方法。

1 样本制作及FDR检测

1.1 电缆样本局部缺陷制作

低压电缆型号为ZR-KVVP2-22 4×4型(220/380 V,交流电缆),电缆横截面如图1所示,其中电缆绝缘为聚氯乙烯(PVC),绝缘厚度为0.75 mm。截取长度为14.1 m的电缆样本,在距离样本首端8.7 m处依次剥除长度为10 cm的外护套层、钢铠、内护套层、铜屏蔽层并依次对样本A相进行FDR检测。之后在露出绝缘部分的A相上剥除尺寸为20 mm×2 mm的矩形绝缘层并露出缆芯形成D1缺陷。

A相检测结束后,在距离样本首端4.3 m处依次剥除长度为10 cm的外护套层、钢铠、内护套层、铜屏蔽层,之后在露出绝缘层的B相上制作长度为5 mm、深度为0.4 mm的纵向刀痕缺陷作为D2缺陷。

B相检测结束后,用同样的方法在距离样本首端11 m处的C相上制作沿电缆径向的V形刀痕缺陷作为D3缺陷,缺陷深度约为0.4 mm。含缺陷电缆样本如图1所示。

A、B、C三相含缺陷电缆FDR检测完成后,对样本进行加速老化。将样本D3缺陷处浸泡在饱和食盐水中,之后在样本A、B、C三相上施加1 kV的工频交流电压进行加速老化,老化时间为4周,如图2所示。

1.2 FDR检测

D1缺陷制作前,首先对A相进行FDR检测,检

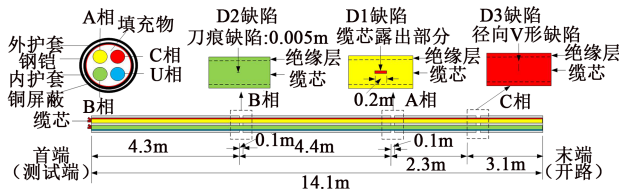


图1 含缺陷电缆样本示意图

Fig.1 Schematic diagram of defective cable sample

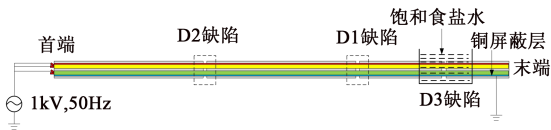


图2 电缆样本加速老化示意图

Fig.2 Schematic diagram of accelerated ageing for cable samples

测原理如图3所示。本文FDR检测均针对电缆单相,检测时将测试电压加在待检测相缆芯及剩余铜屏蔽上。从图3可以看出,检测时样本首端露出缆芯部分接检测线,铜屏蔽层接地,样本末端开路。FDR检测过程中利用计算机控制调频信号源的输出频率为0.15~200 MHz,测量频率点数为3 000(均匀分布),后续检测参数同上。

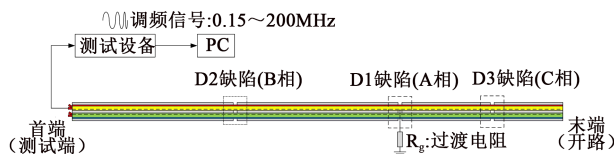


图3 含局部缺陷电缆样本FDR检测示意图

Fig.3 Schematic diagram of FDR test for cable samples containing partial defects

上述检测完成后,在A相制作D1缺陷并在D1缺陷处分别接阻值为20 Ω、30 Ω、20 kΩ、50 kΩ的过渡电阻,其中20 Ω和30 Ω模拟电缆低阻故障,20 kΩ和50 kΩ模拟电缆高阻故障(本文所用电缆特征阻抗约为50 Ω),并对不同过渡电阻下的A相样本进行检测^[19],如图3所示。A相检测完成后依次在B相、C相上制作D2、D3缺陷,并对B相、C相依次进行FDR检测。之后对样本进行为期4周的加速老化,老化结束后对A、B、C三相进行FDR检测。最后利用FDR自带程序分析检测结果,包括频域波形及时域波形转换后的时域波形,并根据频域及时域波形特征对样本局部缺陷进行分析^[19]。

2 FDR检测结果

2.1 剥除内外护套、钢铠及铜屏蔽层

依次剥除D1缺陷处长度为10 cm的外护套、钢

铠、内护套及铜屏蔽层测得的FDR结果(A相)如图4所示。图4中横轴为距首端距离,纵轴为反射波幅值。因在检测时调频信号首先经过长度为0.9 m的信号线,之后进入电缆,故电缆首端波形位于0.9 m处,末端波形位于15 m处。从图4可以看出,在首端及末端存在两个明显高于其余位置的波峰。原因是一方面调频信号在传播过程中逐渐衰减,因而在电缆首端形成一个波峰;另一方面在FDR检测中电缆末端开路,其等效阻抗高于电缆本体,因而在末端反射波增强形成波峰。本文主要分析首端及末端之间波形的变化,其反映了电缆本体的故障信息。

由图4可见,未剥外护套、剥除外护套、剥除钢铠、剥除内护套及铜屏蔽层测得的频域波形变化趋势均类似,幅值都是从电缆首端至末端递减。

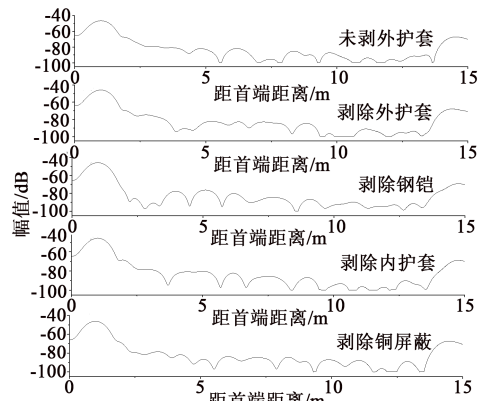


图4 A相的频域波形

Fig.4 Frequency domain waveforms of phase A

2.2 A、B、C三相缺陷的FDR检测

D1缺陷处接电阻前及接不同阻值电阻时的频域及时域波形分别如图5和图6所示。本文的时域反射波形是将频域波形用时域反射波形恢复技术处理后得到的。基本原理是利用频域上扫频测得的反射系数结合1个虚拟的时域入射波形 $s(t)$ 计算得到虚拟的时域反射波形 $y(t)$,并结合 $y(t)$ 的波形特征判断阻抗不连续点处的阻抗变化情况^[19]。

由图5可知,D1缺陷处未接电阻前,电缆本体频域相邻波峰幅值从首端至末端呈递减趋势。D1缺陷处接不同阻值电阻时,每个电阻对应的频域波形波峰幅值在D1处增大,导致缺陷处波峰幅值高于两侧波峰,且接低阻电阻时缺陷处波峰幅值与两侧相邻波峰幅值之间的差值更大。例如,接20 kΩ电阻时D1处波峰幅值为-82 dB,其左侧相邻波峰幅值为-84 dB,二者差值为2 dB;而接20 Ω电阻时D1

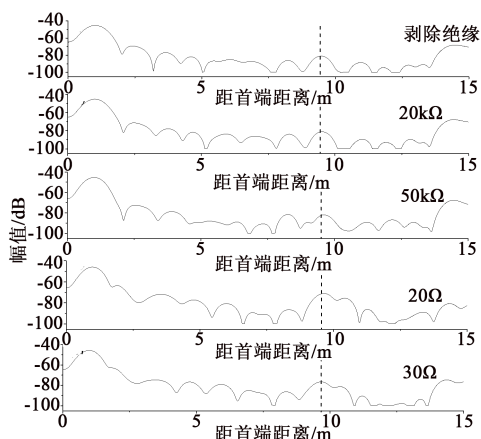


图5 D1缺陷的频域波形

Fig.5 Frequency domain waveforms of D1 defect

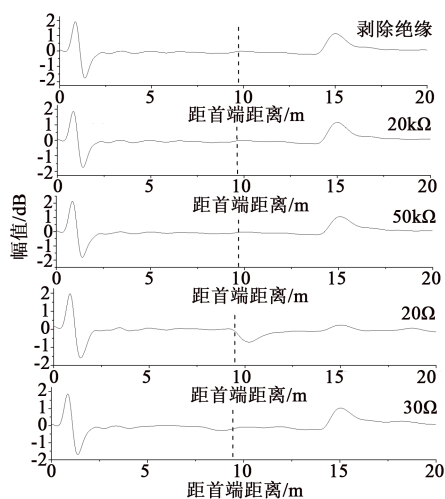


图6 D1缺陷时域波形

Fig.6 Time domain waveforms of D1 defect

处波峰幅值为 -72 dB,其左侧相邻波峰幅值为 -86 dB,二者差值为 14 dB。

值得注意的是,结合图4测试结果,在绝缘中未制作缺陷时样本频域波形从电缆首端至末端均递减,而制作缺陷时频域波形在缺陷处的波峰幅值增大且大于两侧波峰幅值,由此可见有缺陷时的波形变化是由绝缘缺陷所引起,即FDR频域波形主要反映的是某相绝缘部分的阻抗变化及缺陷状况。事实上,本文的FDR检测的是电缆单相波形,测试电压接在某相电缆缆芯和屏蔽层之间,因此FDR频域波形主要反映的是电缆绝缘的阻抗变化,外护套、钢铠、铜屏蔽层对测试结果的影响很小。

由图6可知,D1缺陷处未接电阻前,电缆时域波形在 0 dB上下波动,接高阻值电阻时D1缺陷处波形和未接电阻时较为接近,波峰幅值无明显变

化。而接低阻值电阻时D1缺陷处出现负波。如接 $20\ \Omega$ 电阻时波谷处幅值约为 -0.75 dB。

B相、C相样本制作D2、D3刀痕缺陷前后样本FDR频域及时域波形分别如图7及图8所示。

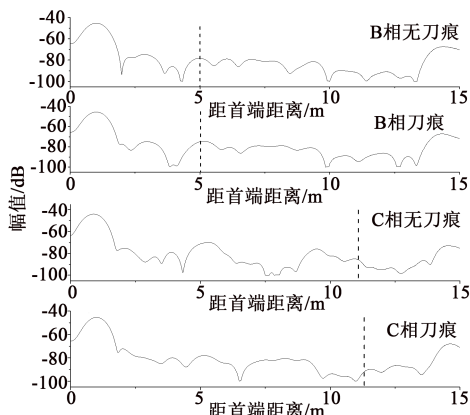


图7 B相和C相制作刀痕缺陷前后频域波形

Fig.7 Frequency domain waveforms before and after making cutting defects at phase B and phase C

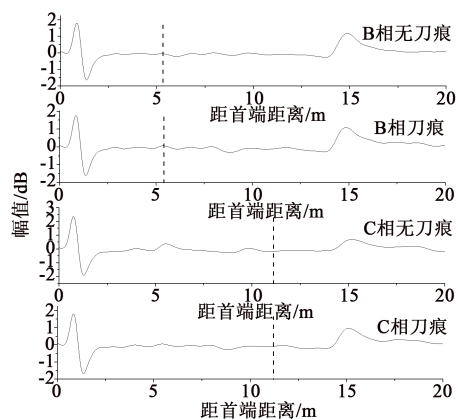


图8 B相和C相制作刀痕缺陷前后时域波形

Fig.8 Time domain waveforms before and after making cutting defects at phase B and phase C

由图7可知,B相和C相样本制作刀痕缺陷前,电缆本体频域相邻波峰幅值从首端至末端呈递减趋势。而制作刀痕缺陷后,缺陷处波峰幅值等于(D2缺陷)或高于(D3缺陷)两侧波峰幅值。由图8可知,B相和C相样本制作刀痕缺陷前,电缆本体时域波峰幅值在 0 dB上下波动。而制作刀痕缺陷后,缺陷处出现一正波且波峰幅值相比于无刀痕缺陷时略有增大。因刀痕缺陷未切至缆芯时,其实际上为高阻缺陷。由此可知,当电缆中存在高阻故障时,其在频域上将表现为波峰幅值增大而接近或高于两侧波峰;时域上则出现一正波,且波峰幅值无

明显变化或略有增大。而当电缆中存在低阻故障时,其在频域上同样表现为波幅值增大而接近或高于两侧波峰,时域上则出现一负波。

2.3 A、B、C三相局部加速老化

加速老化后样本的 FDR 检测结果如图 9 和图 10 所示。

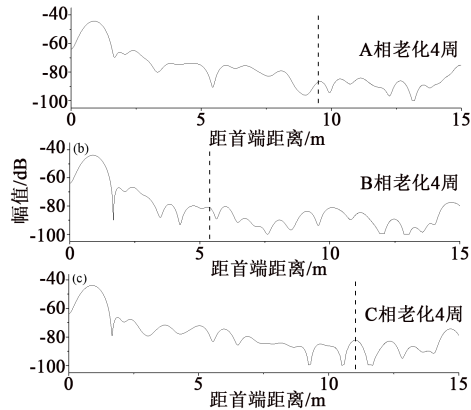


图9 加速老化后三相频域波形

Fig.9 Frequency domain waveforms of the three phases after accelerated ageing

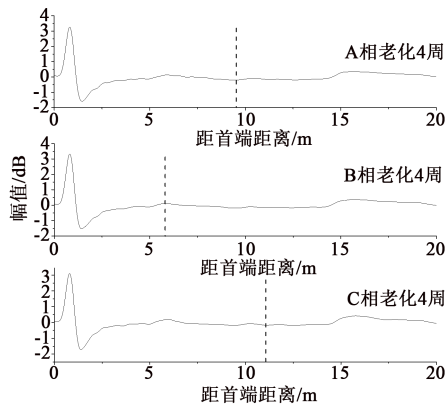


图10 加速老化后三相时域波形

Fig.10 Time domain waveforms of the three phases after accelerated ageing

由图9可见,A、B两相缺陷处波峰略有增大,波峰幅值小于(A相)或等于(B相)两侧波峰,而C相缺陷处波峰大于两侧波峰。也即C相缺陷(D3缺陷)处波峰幅值增幅高于A、B两相缺陷(D1和D2缺陷)处波峰增幅。这是因为A、B两相D1和D2缺陷处未进行加速老化,仅有C相加速老化部分制作了刀痕缺陷D3(距离C相电缆首端11 m),在老化过程中该处阻抗变化较大,所以该处波峰幅值增幅更大。由图10可见,三相缺陷处出现一正的波峰而波峰幅值变化不大。

3 基于 FDR 法的电缆局部缺陷定位及类型判别

3.1 基于 FDR 频域波形的低压电缆局部缺陷定位方法

FDR法是将一调频波形注入电缆中,当电缆中存在短路、开路及缺陷等故障时,故障处的特征阻抗将不连续或发生变化,行波在该处也将不连续而产生反射现象,从而可利用频域反射波形特征判断电缆中是否存在故障。对于长度为 d 的电缆而言,首端测得的反射系数 Γ 可表示为式(1)^[13]。

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-2\gamma(\omega)d} \quad (1)$$

式(1)中: Z_L 为负载阻抗; $\gamma(\omega)$ 、 Z_0 分别为电缆传播常数和特性阻抗,对同一种电缆为常数,可由式(2)表示。

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2)$$

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

式(2)中: $Z(\omega)$ 为电缆相应位置的本体特性阻抗, R 、 L 、 G 、 C 分别为电缆分布参数等效电路单位长度电阻、电感、电导、电容。

$\gamma(\omega)$ 还可表示为式(3)。

$$\begin{aligned} \gamma(\omega) &= \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \\ \beta(\omega) &= \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi f}{v} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中: $\alpha(\omega)$ 为衰减常数; $\beta(\omega)$ 为相位常数; v 为电缆中电磁波波速,在高频下几乎为一定值。

在高频下 $Z(\omega)$ 可表示为式(4)。

$$Z(\omega) = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

电缆末端开路时($Z_L = \infty$), Γ 可表示为式(5)。

$$\Gamma = e^{-2\gamma(\omega)d} = e^{-2\alpha(\omega)d} e^{-j2\beta(\omega)d} \quad (5)$$

将式(5)利用欧拉公式进行展开得到式(6)。

$$\Gamma = e^{-2\gamma(\omega)d} (\cos(2\beta(\omega)d) - j \sin(2\beta(\omega)d)) \quad (6)$$

得到 Γ 的实部为式(7)。

$$Re(\Gamma) = e^{-2\alpha(\omega)d} \cos\left(2 \frac{2\pi f}{v} d\right) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,当频率 f 为自变量时,完好电缆的反射系数实部会出现 $2d/v$ 的频率等效分量,当电缆在距首端 l 处出现阻抗不连续点时,例如缺陷或故障,电缆的反射系数实部会出现 $2l/v$ 的频率等效分量,因此可以通过对反射系数的实部进行傅

里叶分析来定位电缆的阻抗不连续点^[13]。其在FDR频域波形上表示为相比于左侧(靠近测试端)波峰幅值增大。

由图5、图7、图9中电缆频域波形特征可知,当电缆中存在高低阻故障时,在故障处频域波峰幅值将增大^[13,19],利用频域波形的这一变化特点可以有效定位缺陷位置。

值得注意的是,已有研究利用FDR法判断电缆局部缺陷通常是选取一个基准值(例如频域波形上首端波峰峰值一半),高于此基准值的波峰处判断为有局部缺陷,其判断局部缺陷的随机性较大。而本文采用频率波形变化特征判断电缆中是否含有局部缺陷及进行缺陷定位,该方法相对已有方法灵敏度更高。

3.2 基于FDR时域波形的低压电缆局部缺陷类型判别

电缆的阻抗不连续点会造成行波在该位置出现反射现象,不同阻抗值(高阻或低阻)不连续点的反射时域波形不同,反射时域波形的幅值、极性、振荡等特征对于判断阻抗不连续点的阻抗变化类型和变化程度等情况有着重要作用^[21-23]。测得电缆频域波形后,利用傅里叶反变换及反射系数插值法将频域波形变换为时域波形,进而分析局部缺陷类型及变化程度^[19]。当发生过渡电阻接地故障时,此时仅有1个特性阻抗不连续面发生反射,当故障处的特性阻抗增大时(对应高阻故障),将产生1个正极性的脉冲反射时域波形,而当故障处的特性阻抗减小时(对应低阻故障),会产生1个负极性的脉冲反射时域波形^[19]。

由图6、图8、图10可知,利用电缆时域波形特征可进一步判断电缆局部缺陷类型。首先根据频域波形判断出故障位置,进而结合故障处时域波形特征,判断局部缺陷类型。当故障处时域波形为正极性时,判断该处为高阻故障,而当时域波形为负极性时,判断该处为低阻故障。

由本文分析可知,对于变电站低压供电系统实际运行的低压电缆而言,利用FDR法可有效定位局部缺陷及判断缺陷类型。尤其是对于低阻故障,FDR法的定位有效性及灵敏度更高。在电缆检测中,首先利用频域波形判断缺陷位置,进而利用时域波形判断缺陷类型。当判断为低阻故障时,需对电缆相应位置及时处理。

最后,本文所提的FDR法实际上针对的是电缆

单相,而不论是直流电缆还是交流电缆,其单相结构均是相似的,均由缆芯、绝缘层、屏蔽层构成,故得到的结论适用于低压交流及直流电缆。

4 结论

(1)利用FDR法可有效定位低压电缆局部缺陷及进行缺陷类型识别,尤其是对于低阻故障定位精确度更高。缺陷定位主要利用频域波形判断,缺陷类型需进一步结合时域波形判断。当判断为低阻故障时,需对电缆相应位置及时处理。

(2)高阻和低阻故障在频域波形上均表现为相对于靠近首端侧的波峰幅值增大。高阻故障在时域波形上表现为一正波,且波峰幅值增大不明显。低阻故障在时域波形上则表现为一明显的负波,缺陷处波峰幅值显著减小。

(3)本文所提的FDR法针对的是电缆单相,而不论是直流电缆还是交流电缆,其单相结构均是相似的,故得到的结论适用于低压交流及直流电缆。

参考文献:

- [1] 宋鹏先,王浩鸣,房晟辰,等. 基于综合健康指数的热缩材料寿命评估模型[J]. 绝缘材料,2020,53(11):45-49.
- [2] 江日洪. 交联聚乙烯电力电缆线路[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [3] 周凯,李康乐,龚薇,等. 中高压电缆系统老化诊断及修复[M]. 北京:科学出版社,2018.
- [4] 周凯,陈泽龙,李天华,等. 运行老化XLPE电缆导体屏蔽层侧绝缘缺陷分析[J]. 高电压技术,2020,46(1):187-194.
- [5] 黄明,周凯,黄科荣,等. 基于PDC法的绝缘老化电缆低频损耗特性分析[J]. 高电压技术,2019,45(3):959-967.
- [6] THAYOOB Y H M, VISVANATHAN Y S, AHMED S K, et al. Analysis and characterization of water tree condition in XLPE cables from dielectric spectroscopy measurement in frequency domain [C]//2015 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications. Kuala Lumpur, Malaysia:IEEE,2015.
- [7] FURSE C M, KAFAL M, RAZZAGHI R, et al. Fault diagnosis for electrical systems and power networks: A review[J]. IEEE Sensors Journal,2021,21(2):888-906.
- [8] JING L W, WANG W J, LI Z, et al. Detecting impedance and shunt conductance faults in lossy transmission lines[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2018,66(7):3678-3689.
- [9] FURESE C, CHUNG C Y, LO C. A critical comparison of reflectometry methods for location of wiring faults[J]. Smart Structures and Systems,2006,2(1):25-46.
- [10] SHIN D S, CHO H D, PARK W S, et al. Extraction of propagation constant of XLPE cable using time-domain transmission[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2014,63(12):2855-2862.

- [11] SCHUET S, TIMUCIN D, WHEELER K. A model-based probabilistic inversion framework for characterizing wire fault detection using TDR[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(5): 1654-1663.
- [12] 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.
- [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.
- [14] SHI Q H, KANOUN O. Wire fault diagnosis in the frequency domain by impedance spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(8): 2179-2187.
- [15] NOROUZI Y, BRAUN S, FROHNE C, et al. Effect of cable joints on frequency domain analysis[C]//2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2018.
- [16] SHIN Y, POWERS E J, CHOE T, et al. Application of time-frequency domain reflectometry for detection and localization of a fault on a coaxial cable[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(6): 2493-2500.
- [17] KWON G, LEE C, LEE G S, et al. Offline fault localization technique on HVDC submarine cable via time - frequency domain reflectometry[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1626-1635.
- [18] SHI Q H, TROELTZSCH U, KANOUN O. Detection and localization of cable faults by time and frequency domain measurements systems[C]//2011 7th International Multi-Conference on System, Signals and Devices. Amman, Jordan: IEEE, 2011.
- [19] 饶显杰, 周凯, 谢敏, 等. 基于频域反射法的特征时域波形恢复技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1420-1427.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 王黎明, 侯经洲, 陈昌龙. 用电磁波速诊断 XLPE 电缆绝缘[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 2984-2989.
- [23] 杨帆, 曾苑, 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.