

# 电树枝对10 kV电缆阻抗谱影响机理及其定位方法研究

魏力强, 贾伯岩, 苏金刚, 张鹏

(国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

**摘要:**电树枝是电力电缆中常见的绝缘劣化类型,电树枝的生长会引发绝缘材料性能的改变,从而威胁电缆的安全运行。而传统的检测方法往往无法实现对电缆内微小电树枝劣化区域的有效检测。本研究选用10 kV单芯交联聚乙烯(XLPE)电缆,在其绝缘中引入电树枝缺陷并测量了不同树枝生长阶段的绝缘电导率、内外半导体层间等效电容数值,采用宽频阻抗谱测量及傅里叶逆变换方法对设定的电树枝劣化区域进行测量及定位。结果表明:电树枝的生长使电缆绝缘电导电流明显提高,电树枝累积损伤的增加使内外半导体层间电容值增大,由于电导及电容数值的变化,使电树枝劣化段的波阻抗畸变。应用宽频阻抗谱及傅里叶逆变换方法实现了对于电树枝劣化区域的准确定位,同时电树枝的不同生长阶段会影响阻抗谱及傅里叶逆变换谱图中畸变点的幅值。

**关键词:**电树枝;电导;电容;阻抗谱;定位

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)07-0071-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.07.011

## Influence Mechanism of Electrical Tree on Impedance Spectrum of 10 kV Cables and Their Location Method

WEI Liqiang, JIA Boyan, SU Jingang, ZHANG Peng

(State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** Electrical tree is a common type of insulation deterioration in power cables. The growth of electrical trees will change the performance of insulating materials, thereby threatening the safe operation of cables. However, traditional detection methods are often unable to realize effective detection of the tiny electrical trees deteriorated area in cable. A 10 kV single-core cross-linked polyethylene (XLPE) was selected, and electrical tree defects were introduced into its insulation. The insulation conductivity and equivalent capacitance between the inner and outer semiconducting layers at different growth stages of electrical trees were measured, and the electrical trees deteriorated area was tested and located by broadband impedance spectroscopy and inverse Fourier transform method. The results show that the growth of electrical trees increases the conduction current of the cable insulation significantly. The increase of electrical tree cumulative damage makes the capacitance value between the inner and outer semiconducting layers increase. Due to the change of conductivity and capacitance, the wave impedance of the electrical tree deteriorated area distorts. Using the broadband impedance spectroscopy and inverse Fourier transform methods can realize the accurate location of the electrical tree deteriorated area. At the same time, the different growth stages of electrical tree will significantly affect the amplitude of distortion points in the impedance spectroscopy and inverse Fourier transform spectrum.

**Key words:** electrical tree; conductivity; capacitance; impedance spectrum; locating

收稿日期:2021-07-06 修回日期:2021-08-12

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目(kj2021-049);河北省自然科学基金资助项目(E2021521003)

作者简介:魏力强(1985-),男(汉族),河北邢台人,高级工程师,主要从事电力电缆寿命评估和诊断技术的相关研究。

## 0 引言

电力电缆是传输电能的主要方式之一,随着城市电缆化的发展,在大城市中架空线路逐渐被电力电缆所取代,因此电力电缆运行的安全问题不容忽视。电缆在长时间运行下可能出现受潮、杂质渗入、水树枝等局部缺陷,进而导致电缆绝缘内部局部电场强度集中,引发绝缘破坏。目前电力电缆绝缘的主要材料是以交联聚乙烯(XLPE)为主的聚合物<sup>[1]</sup>,其在极不均匀电场下,容易产生电树枝劣化。随着时间的推移,电树枝将从起树点不断向相对电极生长,最终导致整个绝缘材料击穿。因此,检测电缆中电树枝劣化的情况,是保障电缆安全运行的关键。

目前,关于电缆电树枝老化监测的主要手段包括超低频介质损耗测试<sup>[2-3]</sup>、局部放电测试<sup>[4]</sup>和行波法测试<sup>[5-7]</sup>等。超低频介损测试主要依据的原理是:电树生长后绝缘内部出现导电性通道,导致介质损耗因数随着电导型电流增加,从而可以用于评估电缆的老化情况;局部放电测试则利用高频电流传感器(HFCT)采集电树枝缺陷产生的局部放电信号,从而实现在线绝缘监测。但上述两种监测方法均存在灵敏度不高、易受外部信号干扰的问题。在行波法测试中,测试设备向电缆发射入射信号,并收集通过电缆反射回设备的信号,对入射、反射信号进行比较发现电缆绝缘内部的缺陷。该方法操作简单、抗干扰能力较强、对电缆的损伤较小,但测试过程中发射的信号在电缆内部传输时存在较大的衰减和色散,可能会影响测试结果。单端宽频阻抗谱法(BIS)是利用行波法的思想,将扫频信号发射至电缆中,保证信号不会在电缆中传输时因为某个频段的衰减造成测试的失效,同时其兼具行波法的优点。因此研究BIS法测试判断电缆的电树枝劣化,并探究其中的原理具有重要的意义。

目前国内外有很多学者研究了BIS法在绝缘状态监测中的应用。BIS可以测试同轴电缆的绝缘层过热<sup>[8]</sup>、过度弯曲<sup>[9]</sup>、局部受潮<sup>[10]</sup>、 $\gamma$ 射线辐照<sup>[11]</sup>等绝缘劣化,并通过快速傅里叶逆变换(IFFT)将频域信号换算至时域实现对故障定位。在BIS定位算法中,可以利用加窗、对频谱信号插值<sup>[12]</sup>等计算方法提高定位的精度。有学者利用计算软件对于BIS进行了仿真,并对电缆中接头接地、开路、电缆局部受潮等故障展开实验研究,分析了BIS定位的可行性<sup>[13-15]</sup>。但是目前缺少对于BIS测试电树枝劣化的

研究,尤其缺少电树枝故障如何改变BIS的机理性分析。

本研究通过测试电树枝劣化前后电缆切片的电气参数,分析电树枝对于BIS的影响机理,并结合实际电缆的测试结果,研究该方法对于含电树枝电缆检测的实用效果。

## 1 单端宽频阻抗谱理论

在BIS测试中,扫频信号的频率能够达到100 MHz以上,该信号波长很短,当入射信号的波长远小于传输线的长度时,信号在传输线上能够完成多个周期的振荡,可用微元分布参数来描述传输线的性质,如图1所示。

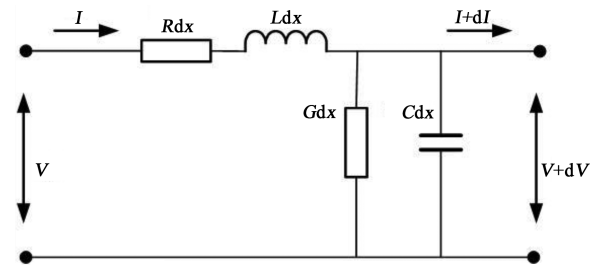


图1 传输线微元分布模型

Fig.1 Transmission line element distribution model

求解传输线的微分方程得到不同位置电压  $V$  和电流  $I$  的解,通过  $V$  和  $I$  的比值得到不同位置的阻抗谱,如式(1)所示。

$$Z_x = Z_0 \left( \frac{1 + \Gamma_L e^{-2\gamma x}}{1 - \Gamma_L e^{-2\gamma x}} \right)$$

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

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

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

式(1)中: $Z_0$ 为电缆的特征阻抗; $\gamma$ 为电缆的传播系数; $\Gamma_L$ 为电缆的反射系数,其与电缆末端(定义信号入射的一端为首端)的负载值( $Z_L$ )和特征阻抗有关,当电缆末端开路时,电缆末端的负载可以看作无穷大,此时电缆的阻抗谱只与 $Z_0$ 和 $\gamma$ 有关,即反映电缆自身的电气参数,因此阻抗谱可以作为电缆绝缘缺陷的判断依据。而在电缆微元电气参数中, $R$ 和 $L$ 为电缆的等效电阻、电感,由导体的性质决定, $G$ 和 $C$ 为电缆的等效电导、电容,由绝缘的性质决定,因此分析电树枝如何影响阻抗谱参数,需要先分析电树枝的生长对于电导参数 $G$ 和电容参数 $C$ 的影响。

## 2 实验

### 2.1 试样制备

为实现对于含电树枝电缆绝缘样品不同性能的测量及表征,采用如下方法制备不同的测量用试样。本研究所用的 XLPE 绝缘均取自 10 kV 单芯电缆,型号为 YJLV-35, XLPE 绝缘厚度约为 4.5 mm。电缆在剥除外护套和铜屏蔽层后外径约为 17 mm,线芯外径约为 8 mm。

#### 2.1.1 体电导电流测量试样

为实现对于不同电树枝生长阶段绝缘电导特性的测量,设计了采用外半导体层作为保护电极的电导特性测量系统,试样结构如图 2 所示。测量电极的宽度为 2 mm,保护电极由电缆外半导体层构成,两侧保护电极的宽度为 1 mm,保护电极与测量电极之间的距离为 1 mm,此设计在保证保护电极与被测 XLPE 绝缘紧密贴合的同时防止了表面泄漏电流对体电导特性测量准确性的干扰。

为实现电树枝缺陷的引入,在测试电极等间距插入 8 根针电极,针尖曲率半径为  $3\ \mu\text{m}\pm 0.5\ \mu\text{m}$ 。针电极与内半导体层间距为 2 mm。

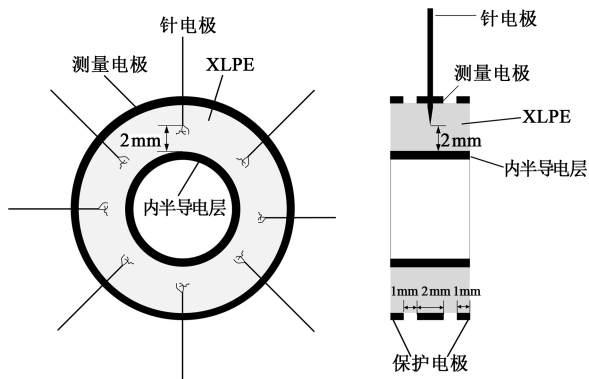


图2 体电导测量试样

Fig.2 Bulk conductivity measurement sample

#### 2.1.2 内外半导体层间电容测量试样

为实现对于不同老化阶段电缆内外半导体层之间电容变化特性的测量,将电缆绝缘切片(3 mm 厚度)分割为 8 片扇形区域,每个扇形区域内插入针电极用以实现电树枝的引发,针尖与内半导体层间距设置为 2 mm。

#### 2.1.3 电树枝劣化定位试样

为实现长距离电缆内的单端宽频阻抗谱测量,截取 10 m 长电缆,将其两端剥出 10 cm 主绝缘。为设置电树枝劣化区域,在距离测量端 6.5 m 处扎入

电树枝引发用针电极,针尖距离内半导体层距离设置为 2 mm,针电极数量为 50。

### 2.2 电容测试平台搭建

考虑高频信号在长距离电缆中的衰减特性,本文单端宽频阻抗谱测量中选用的频段为 100 kHz~150 MHz。为掌握此频段内微元长度电缆电容参数变化规律,采用网络分析仪(NA7632A,德力)中的电容测量组件对含有不同生长阶段电树枝试样的电容值进行测量。测量过程中内外半导体层经鳄鱼夹及 N 接头连接网络分析仪的 1 端口。测量连接电路如图 3 所示。电容测量前先对试样施加工频电压(10 kV)以诱导电树枝,电树枝引发实验中针电极连接高压,内半导体层接地,实验中分别测量了 5 组试样不同电树枝生长时间(0、10、20、30、45、60 min)的电容参数。

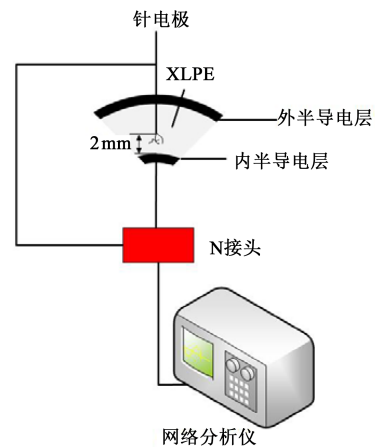


图3 电容参数测试平台

Fig.3 Capacitance parameter test platform

### 2.3 电导电流测试平台搭建

采用如图 4 所示的电导测试系统,测试过程中高压直流电源连接试样的内半导体层,测试电极经保护电阻连接皮安表(B2981A,Keysight),为实现表面电流的隔离,使用导线将两保护电极短接并且接地。由于测试过程中被测试样内部含有电树枝,为防止测试过程中引发局部放电影响电流测试结果,经多次局部放电监测确定电导特性测试电压为 +3 kV。电导电流测试前,先将针电极及内半导体层分别连接工频高压电源(9 kV)及地电极,在试样内引发电树枝。之后分别测试电树枝生长时间为 0、10、20、30、40、50 min 时的体电导电流。采用 3 000 s 时的 100 组测试结果作为各时间试样电导特性的表征数据,并以其平均值作为试样的特征电导

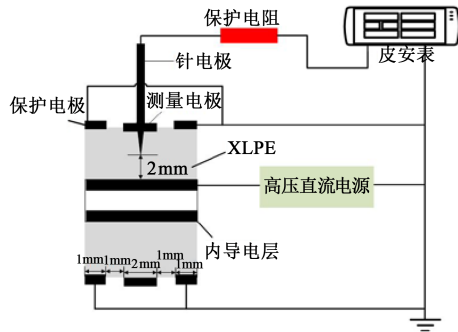


图4 电导参数测试平台

Fig.4 Conductance parameter test platform

电流。

#### 2.4 单端阻抗谱测试平台搭建

为实现对于10 m长电缆样品内电树枝缺陷的定位以及测量,采用图5所示电路进行测试。为减小网络分析仪测量端口与电缆端头之间的连接线对于测量信号的干扰,本实验采用N接头延长线实现电缆端头与网络分析仪的连接,且设定延长线与连接鳄鱼夹的长度为10 cm。测量频段设定为100 kHz~150 MHz,采样点为10 000个。

电树枝缺陷诱发实验中,需拆除N接头及鳄鱼夹,将针电极及电缆导体分别连接至10 kV工频电压及地电极,实现电缆绝缘内电树枝缺陷的引入。分别在电树枝生长时间为0、20、40、60 min的测定电缆单端阻抗谱。

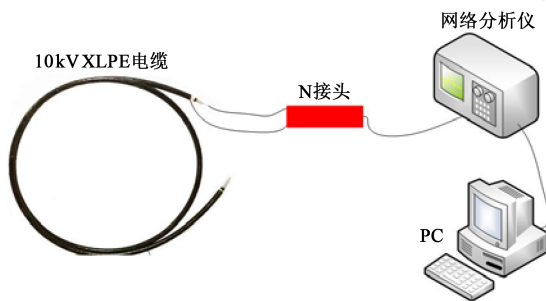


图5 单端宽频阻抗谱测试平台

Fig.5 BIS test platform

### 3 结果与讨论

#### 3.1 不同电树枝长度对电容C的影响规律

实验结果表明,在10 kV工频交流电压下,获得的电树枝形态大部分为树枝状,典型电树枝随加压时间变化的形态如图6所示,可以看出其形状呈现明显的树枝状结构,其树枝长度及通道宽度随时间增加均呈现逐渐增长的趋势。

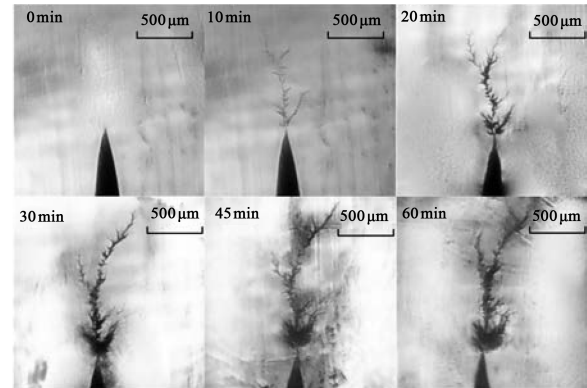


图6 典型电树枝形态

Fig.6 Typical electrical tree morphology

当电树枝生长时,聚合物被击穿会产生空心的放电通道。已有学者指出,不同形态及颜色的树枝通道可能具有导电或半导电特性<sup>[6]</sup>,因而伴随着其生长区域及破坏面积的变化,内外半导体层间的电容值必然会受影响。而较深颜色的电树枝更多的展现为导电性,颜色较浅且形状细长的电树枝更可能展现为非导电性<sup>[7]</sup>。电树枝生长过程中树枝通道区域可等效为独立的电容,实现与XLPE原有电容的串并联等效。而电树枝区域等效电容的数值与树枝区域面积直接相关。因此,为体现电树枝对绝缘的破坏面积,可采用累积损伤面积实现对于树枝破坏区域的表征。累计损伤的求解方法为通过颜色识别实现对于深色电树枝区域的像素数量统计,以像素数量体现不同生长时刻电树枝的破坏面积。

被测试样在不同电树枝生长时间的电容值如图7所示。由图7可知,随着测量频率的升高,同一试样电容值在50 MHz频率以下表现出迅速衰减的趋势,50~150 MHz频率段则呈现出趋近饱和的趋势。且随着电树枝生长时间的增加,同一频率下的电容值呈现明显的上升趋势。图8为100 MHz频率下的电容值与电树枝累积损伤面积关联曲线。由

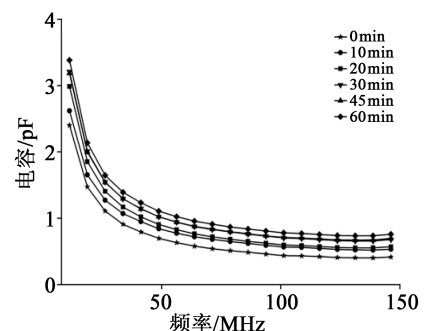


图7 不同电树枝生长时刻的电容值

Fig.7 Capacitance value at different treeing time

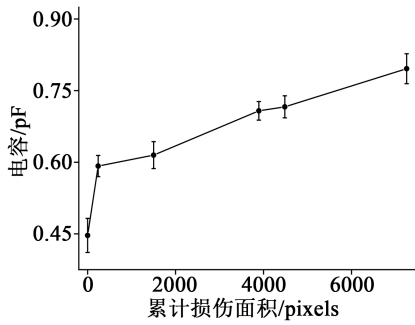


图8 100 MHz 下的电容值与累计损伤面积  
Fig.8 Capacitance value versus cumulative damage area at 100 MHz

图8可知,随着电树枝生长时间的增加,累计损伤面积呈现明显增加,其对应的电容值则由最初的0.45 pF增长至60 min时的0.8 pF。上述结果表明,累计损伤面积的增加会明显提高电缆内外屏蔽层间的等效电容。即电树枝的生长会对微元长度(约3 mm)范围内的电容值产生明显影响,使得传输线公式中的微元参数C发生变化,进而导致该处阻抗谱的相应改变。

### 3.2 不同电树枝长度对电导G的影响规律

在电树枝影响电导率的实验中,同时设置了8组针-板电极结构。实验过程中发现,8组针-板电极结构引发的电树枝在1 h内的生长趋势较为一致,其最大电树枝长度约为500 μm。为获得电树枝对绝缘电导特性的影响规律,测试了不同时刻的电树枝平均长度并获得了不同平均长度下的体电导电流,结果如图9所示。

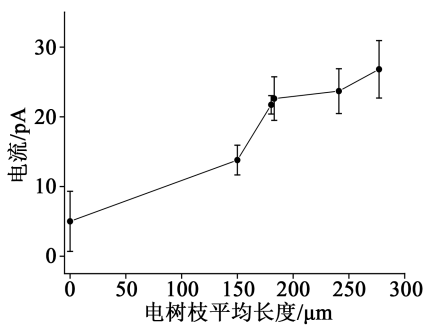


图9 不同电树枝长度时的电导电流值  
Fig.9 Conductance current value under different electrical tree length

由图9可知,当试样内无电树枝缺陷时,其电导电流约为5 pA,随着电树枝长度的增加,其电导电流迅速升高。然而,电导电流并非随着电树枝平均长度呈线性增长,这是由于随着树枝长度的增加,

其树枝宽度也会发生变化,且在电树枝区域内形成更多的电树枝通道,这些通道通过其内壁与针电极连接,进而实现与半导体测量电极的连接。因此,若树枝通道中存在导电性通道,这些通道会使测量电极向高压电极等效延伸,且使其与XLPE绝缘的接触面积增加,因此测得的电导电流将会明显上升。因此,树枝长度为150~200 μm时电导电流增加较快,可能是该时间内产生了大量的导电性通道所致。

### 3.3 电导G和电容C对单端阻抗谱的影响规律

对于含电树枝的10 m电缆试样,可以等效为两段完好段电缆和一段故障段电缆的串联,串联等效模型如图10所示。

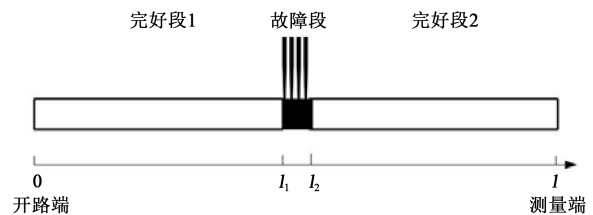


图10 故障电缆分析模型  
Fig.10 Faulty cable analysis model

计算该模型下的单端阻抗谱,需要从开路端逐段计算。其中,完好段的传输系数 $\gamma_h$ 和特征阻抗 $Z_h$ 利用未劣化的电缆微元电气参数计算,而故障段的传输系数 $\gamma_d$ 和特征阻抗 $Z_d$ 则利用劣化后的微元电气参数计算,根据上文的讨论结果,电导和电容在电树枝劣化处数值会大幅增加。计算图10的阻抗谱时先计算完好段1的阻抗谱,其中 $l_1$ 是故障段的首端位置, $\Gamma_1$ 是该电缆段的反射系数,由于电缆末端开路,负载 $Z_L$ 约等于正无穷,因此反射系数约等于1。完好段1的阻抗谱如式(2)所示。

$$Z_1 = Z_h \left( \frac{1 + \Gamma_1 e^{-2\gamma_h l_1}}{1 - \Gamma_1 e^{-2\gamma_h l_1}} \right) \quad (2)$$

$$\Gamma_1 = \frac{Z_L - Z_h}{Z_L + Z_h} \approx 1$$

将 $Z_1$ 作为中间故障段电缆的负载,代入反射系数 $\Gamma_2$ 中,得到0至 $l_2$ 段电缆的阻抗谱,其中 $l_2$ 是故障段电缆末端的位置,如式(3)所示。

$$Z_2 = Z_d \left( \frac{1 + \Gamma_2 e^{-2\gamma_d(l_2 - l_1)}}{1 - \Gamma_2 e^{-2\gamma_d(l_2 - l_1)}} \right) \quad (3)$$

$$\Gamma_2 = \frac{Z_1 - Z_d}{Z_1 + Z_d}$$

同理将 $Z_2$ 作为完好段2的负载,得到全缆的单

端阻抗谱,其中 $l$ 是电缆的总长, $\Gamma_3$ 是该段电缆的反射系数,如式(4)所示。

$$Z = Z_h \left( \frac{1 + \Gamma_3 e^{-2\gamma_h(l-l_2)}}{1 - \Gamma_3 e^{-2\gamma_h(l-l_2)}} \right) \quad (4)$$

$$\Gamma_3 = \frac{Z_2 - Z_h}{Z_2 + Z_h}$$

通过上述分析,存在电树枝缺陷的阻抗表达式是故障段传输系数 $\gamma$ 、特征阻抗 $Z_0$ 、电缆长度、电缆故障点首末端位置 $l_1$ 、 $l_2$ 的函数。通过分析阻抗谱函数的信息,不仅可以得到故障位置,还可以得到故障的严重程度。当电导 $G$ 和电容 $C$ 增加时,传输系数 $\gamma$ 增大,特征阻抗 $Z_0$ 减小,阻抗谱的幅值和相位也会发生相应的变化,通过软件对电缆中心段发生电树枝故障的情况进行了仿真,根据前文的实验,将电导增大系数设置为10,电容增大系数设置为2,仿真参数设置如表1所示,仿真结果如图11所示。

表1 不同电阻电容下阻抗谱仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of impedance spectrum under different resistance and capacitance

参数	数值
线芯内径/m	0.01
线芯外径/m	0.02
铜的电导率/(S/m)	$5.96 \times 10^7$
测试电缆长度/m	100
故障点位置/m	45~55
XLPE电导率/(S/m)	$1 \times 10^{-17}$
XLPE介电常数	2.3
故障点电导增大系数	10
故障点电容增大系数	2

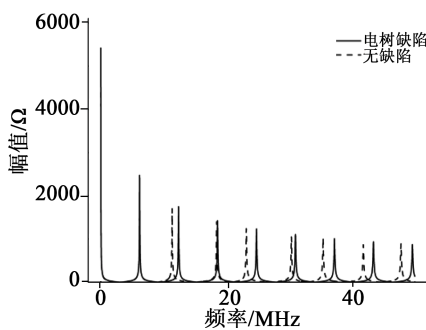


图11 仿真电缆阻抗幅值谱

Fig.11 The amplitude spectra of BIS for simulated cable

从图11仿真结果得到,阻抗谱每两个周期发生一次突变,突变的结果主要体现在相位左移和幅值

减小两个方面。为确定上述分析的准确性,需要进一步实验测量电树枝劣化前后整缆单端阻抗谱并对其进行分析。

### 3.4 电树枝对整缆单端阻抗谱的影响及其定位

从网络分析仪得到的电缆阻抗谱数据为复数,通过复数可以提取幅值谱和相角谱。而电树枝生长过程对阻抗谱的幅值和相角都会产生影响,由于幅值谱相对相角谱较为敏感,本研究主要分析在电缆6.5 m处插入50根针电极后,加压0、20、40、60 min的幅值谱变化,结果如图12所示。从图12可以看出,电树枝生长过程中,阻抗幅值谱表现为不断衰减。其中,低频段的衰减比高频段明显,在7.864 MHz频率处,幅值从0 min时的2 032 Ω衰减至60 min时的1 847 Ω,这与前一节的计算结果一致,说明通过阻抗幅值谱可以辨别电缆内部的电树枝劣化现象,电树枝劣化越明显,阻抗幅值谱的衰减中高度越大。但是该方法得到的阻抗幅值谱仍然无法定位电树枝生长的空间位置,需要对阻抗谱的数据进行进一步处理。

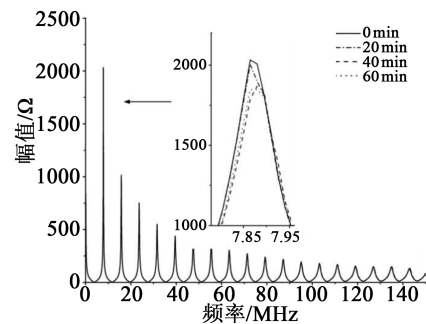


图12 电树枝不同生长阶段宽频阻抗幅值谱

Fig.12 The amplitude spectrum of BIS at different growth stages of electrical tree

定位需要得到测试函数与故障点位置之间的关系,因此需要将测得的频谱函数转换到空间域函数中。得到定位谱图的步骤如下:

(1)将测试得到的阻抗谱复数数据进行共轭计算,并延拓到负频域中,得到信号的频域函数;

(2)将延拓后的数据进行IFFT计算,得到信号与时间的函数,即信号的时域函数;

(3)将该函数与电磁波在XLPE中的传播速度(有学者指出电磁波在XLPE中的传播速度约等于0.58倍光速<sup>[18]</sup>)相乘,得到信号的空间域函数;

(4)将电树枝生长前的信号空间域函数作为参考信号,测量电树枝不同生长阶段的信号空间域函数,并将其与参考信号相除求得比值,得到不同生长阶段的定位谱图。

图13是加压20、40、60 min后的定位谱图。从图13可以发现,在6.5 m处定位谱图出现一个明显的阻抗不匹配点,与事先设定的插入针电极位置符合。完好段定位谱值都在1上下浮动,即电缆阻抗信号的空间域函数未发生较明显的改变,而故障点处的定位谱值达到1 000以上,说明此时电缆阻抗信号的空间域函数已经发生了严重的畸变,阻抗出现不匹配的情况,并随着电树枝的生长,阻抗的不匹配程度逐渐增加。在加压20 min时,电树枝长度及累计损伤较小,树枝的劣化程度不足以严重影响电缆的电导、电容,此时故障点的定位谱值为780.86;而在加压40 min时,该点的定位谱值为2 353.39,此时电树枝快速生长,阻抗谱可以明显识别到电树枝生长的位置;在加压60 min时,该点的定位谱值为8 520.01,说明电缆已经严重劣化。

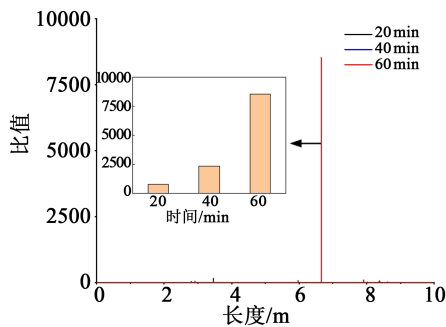


图13 电树枝不同生长阶段的定位谱图

Fig.13 Locating spectra of different growth stages of electric tree

由此可知,上述测量及定位方法可以实现10 kV 电缆内电树枝缺陷的有效测量和定位,在电缆运检工作中具有较高的应用前景。

## 4 结论

本文使用10 kV 电缆绝缘试样开展了多种电树枝老化实验,测量了电树枝生长对电缆绝缘微元参数 $G$ 及 $C$ 的影响规律,并应用单端宽频阻抗谱测量了电树枝不同生长阶段的阻抗谱,利用傅里叶逆变换实现了对于电树枝劣化区域的定位,得出以下结论:

(1)绝缘内电树枝的生长会使电缆绝缘电导电导明显升高,从而使传输线方程中的电导 $G$ 发生变化。

(2)电树枝引发的绝缘累计损伤面积的增加会使电缆内外半导体层间的等效电容变大,从而影响传输线方程中的微元参数 $C$ 。

(3)使用单端宽频阻抗谱方法,结合傅里叶逆变换算法,可以有效实现对10 m 长度电缆中电树枝

劣化区域的定位,且畸变点的幅值随电树枝生长明显增加。

## 参考文献:

- [1] 张成,李洪飞,杨延滨,等. 交联聚乙烯电缆老化、诊断及修复研究进展[J]. 绝缘材料,2020,53(7):1-11.
- [2] 任志刚,李伟,周峰,等. 基于超低频介损检测的电缆绝缘性能评估与影响因素分析[J]. 绝缘材料,2018,51(4):64-68,74.
- [3] 孙斌煌,杨赞峰,苏宁,等. 基于0.1Hz超低频介损检测的配电网电缆分析与评价[J]. 电气开关,2020,58(4):97-99.
- [4] 何若冰,陈佳,朱劲松,等. 交流XLPE 电缆典型绝缘缺陷的PD特性与类型识别[J]. 电工电气,2020(6):5-13.
- [5] 彭浩,沈兴来,陈奎. 电缆单端故障测距的阻抗-行波组合法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(23):110-114.
- [6] 李雪云,刘青,李丽英. 基于单端行波法的配电网混合线路波头组合式故障测距方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2014,41(5):55-61.
- [7] 柏亭潇,张斌,董洪智,等. 行波法在高压输电线路故障定位检测中的应用[J]. 电工技术,2020(20):46-47,49.
- [8] 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.
- [9] HIRAI N, OHKI Y. Highly sensitive detection of distorted points in a cable by frequency domain reflectometry[C]//Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Niigata, Japan:IEEE,2014:144-147.
- [10] OHKI Y, HIRAI N. Effects of the structure and insulation material of a cable on the ability of a location method by FDR[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(1):77-84.
- [11] OHKI Y, HIRAI N. Fault location in a cable for a nuclear power plant by frequency domain reflectometry[C]//2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Xi'an, China: IEEE,2016:36-39.
- [12] OHKI Y, YAMADA T, HIRAI N. Diagnosis of cable aging by broadband impedance spectroscopy[C]//2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE,2011:24-27.
- [13] 徐兴全,桂媛,姚玉海,等. 基于Nuttall自卷积窗的10kV 配电网电缆中间接头定位改进方法[J]. 中国电力,2021,54(4):26-32.
- [14] 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.
- [15] 周志强. 基于宽频阻抗谱的电缆局部缺陷诊断方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [16] CHEN X R, XU Y, CAO X L, et al. On the Conducting and non-conducting electrical trees in XLPE cable insulation specimens [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016,23(1):95-103.
- [17] CHEN X R, XU Y, CAO X L, et al. Effect of tree channel conductivity on electrical tree shape and breakdown in XLPE cable insulation samples[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(3):847-860.
- [18] 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.