

引用格式:魏力强,苏金刚,韩涛,等.基于宽频阻抗谱的电缆绝缘水树定位机理及算法研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):125-133.

Citation: WEI Liqiang, SU Jingang, HAN Tao, et al. Mechanism and location algorithm of water tree in cable insulation based on broadband impedance spectrum [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 125-133.

# 基于宽频阻抗谱的电缆绝缘水树定位机理 及算法研究

魏力强<sup>1</sup>, 苏金刚<sup>1</sup>, 韩涛<sup>2</sup>, 姚羽霏<sup>2</sup>, 庞先海<sup>1</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** XLPE 配网电缆水树故障频发, 对电网的安全运行造成威胁。为研究基于宽频阻抗谱的配网电缆水树定位机理, 开展加速水树老化实验并测量水树生长不同阶段的电缆微元参数变化, 建立电缆水树截面的有限元模型, 仿真验证实验测量结果; 确定定位算法中的最佳窗函数及入射波形, 优化定位算法并依据实验结果验证算法的有效性。结果表明, 水树的生长将造成该区域电导和电容的增加, 基于宽频阻抗谱的定位方法对于水树引发的局部电容微小变化较敏感, 对电导变化不敏感, 电容变化定位图谱为典型的双峰特征, 且反射峰值大小与局部电容变化量成正比。

**关键词:** 电缆; 宽频阻抗谱; 水树; 分布参数; 定位

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.014 **中图分类号:** TM855 **文章编号:** 1673-9140(2024)03-0125-09

## Mechanism and location algorithm of water tree in cable insulation based on broadband impedance spectrum

WEI Liqiang<sup>1</sup>, SU Jingang<sup>1</sup>, HAN Tao<sup>2</sup>, YAO Yufei<sup>2</sup>, PANG Xianhai<sup>1</sup>

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

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The water tree in XLPE distribution network cables is a threat to the power grid. In order to study the location mechanism of water tree based on broadband impedance spectrum, an experiment is carried out to accelerate the water tree, and the changes of cable micro-element parameters in different stages of water tree are measured. Then a finite element model of cable water tree section is established and the experimental measurement results are verified. The optimal window function and incident waveform in the location algorithm are determined to get an optimized location algorithm. After that, the effectiveness of algorithm is verified according to the experimental results. The results show that the growth of water tree will cause the increase of conductance and capacitance. The location method based on broadband impedance spectroscopy is more sensitive to small changes in local capacitance caused by water trees, but not sensitive to changes in conductance. The localization map of capacitance changes is a in typical double peak structure, and the reflection amplitude is proportional to the local capacitance change.

**Key words:** cable; broadband impedance spectrum; water tree; distribution parameters; location

交联聚乙烯 (crosslinked polyethylene, XLPE) 因其优良的电气性能和机械性能, 在电力电缆绝缘中得到广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。自 20 世纪开始, XLPE 电缆

在中国城市地下输电网络中被广泛普及, 但随着电缆服役时间的逐渐增加, 其绝缘长时间受到周围环境中温度、湿度和自身疲劳及振动等多重因素的耦

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-09-20

基金项目: 河北省自然科学基金 (E2021521003); 国家电网公司科技项目 (kj2021-049)

通信作者: 韩涛 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力设备状态监测与评估技术等方面的研究; E-mail: hant@tju.edu.cn

合作用,逐渐出现劣化,从而导致电缆运行可靠性的下降<sup>[4-5]</sup>。大量事故及研究表明,水树是配网电缆绝缘劣化的重要形式<sup>[6]</sup>。由于水树生长周期较长,分散性大,且在其生长初期电缆依然可以正常运行,因此水树缺陷极易在检修中被忽视,从而对电网安全运行造成极大威胁。

目前成熟的电缆绝缘水树劣化诊断方法主要有积分电流法、超低频介损法和极化去极化电流法等。文献[7]通过测试含水树电缆在直流场下的积分电荷,对整条电缆绝缘状态进行了评估,有效实现了对电缆内不同水树发展阶段的准确区分。文献[8-10]利用0.1 Hz超低频介损法实现了对水树枝发展阶段的分类,并且基于测量结果提出了介损角、介损角变化量和 sirt 因子三维评估标准。文献[11-14]通过极化去极化电流法,对长电缆进行了三支路 Debye 模型参数辨识,通过第三支路极化和去极化时间常数的不对称系数对长电缆的局部水树劣化参数进行了诊断。目前上述方法均已实现了对电缆绝缘内水树的有效诊断,但其测量过程较为复杂且部分方法中需施加直流电压,可能引入空间电荷积聚进而在重新施加交流电压后导致绝缘劣化;并且上述方法并未对水树劣化进行定位,不利于电缆精细化运维工作的开展。

为了有效定位电缆内的局部缺陷,文献[15-17]在时域反射法(time domain reflectometry, TDR)的基础上提出了宽频阻抗谱法(broadband impedance spectrum, BIS),通过扫频信号测量得到电缆阻抗频谱信号,再通过快速傅里叶逆变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)转换至时域信号进行分析,通过波峰位置定位故障点,并在较低电压级别的电缆上实现了应用。相较于 TDR,该方法的测试信号不易受传输介质影响,抗干扰能力强,且测试线路简单,因此受到国内外学者的广泛关注。目前已有国内外学者利用 BIS 对受潮的长电缆缺陷点进行了定位,分析了 BIS 定位的可行性<sup>[18-20]</sup>。但目前尚缺乏对其定位机理的深入分析,未定量测量并揭示水树对电缆绝缘分布参数的作用及其对 BIS 的影响机理,且对于电缆绝缘水树区域定位算法的理论研究尚不完善。

为此,本文在已有研究的基础上,制作了含水树的电缆样品进行相关微元分布参数测试,结合仿真验证,确定了水树劣化对电缆分布参数的影响规律;基于传输线理论建立了含水树段的长电缆模型,并通过改进算法得到了水树缺陷定位图谱,定

量分析了水树引发的分布参数变化对定位图谱的影响规律。

## 1 电缆 BIS 数学模型的建立

### 1.1 传输线模型

BIS 测试中一般选用频带位于 kHz~MHz 范围内的人射扫频信号,该频段信号频率高、波长短,信号在长电缆中的传输需要经过多个周期振荡,因此集总参数模型已不适用,需建立基于微元参数的传输线模型来分析信号的传输过程<sup>[21-22]</sup>,如图 1 所示。其中, $R_0$ 、 $L_0$ 、 $G_0$ 、 $C_0$ 为电缆的分布参数,分别表示电缆单位长度的电阻、电感、电导、电容。

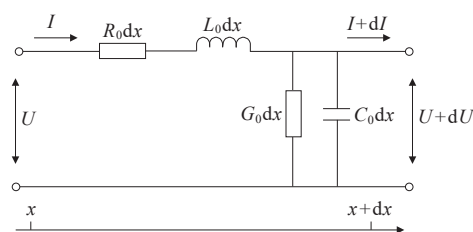


图 1 传输线模型示意

Figure 1 Schematic diagram of transmission line model

通过传输线模型求解微分方程,可得到距电缆首端任意位置  $x$  的 BIS:

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

式中, $\gamma$ 为电缆的传播系数; $Z_0$ 为电缆的特征阻抗; $\Gamma_L$ 定义为反射系数,表示电缆反射波与入射波的比值,在本文中,入射波和反射波均指信号传输过程中的电压波。 $l$ 为电缆的总长度,其表达式分别为

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

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

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (4)$$

式中, $Z_L$ 为电缆末端的负载值。当负载开路时,即  $Z_L = \infty$ ,则 BIS 只与  $Z_0$  和  $\gamma$  有关,可反映电缆自身的电气参数,因此可以将 BIS 作为电缆绝缘状态分析的相关判据。而  $Z_0$  和  $\gamma$  参数是电缆分布参数的函数,为分析水树对 BIS 的影响机理,需要对水树产生后的分布参数变化规律进行分析。

### 1.2 电缆分布参数

在高频段,由于导体的集肤效应的存在, $R_0$ 、 $L_0$  可表示为频率的函数,主要用以表征电缆导体部分(包括线芯和屏蔽层)的性质,通过同轴结构计算得

到近似表达式<sup>[19,21-22]</sup>:

$$R_0(\omega) = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{8\pi^2}} \left( \frac{1}{r_c \sqrt{\gamma_c}} + \frac{1}{r_s \sqrt{\gamma_s}} \right) \quad (5)$$

$$L_0(\omega) = \sqrt{\frac{\mu_0}{8\pi^2 \omega}} \left( \frac{1}{r_c \sqrt{\gamma_c}} + \frac{1}{r_s \sqrt{\gamma_s}} \right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} \quad (6)$$

式(5)、(6)中, $\omega$ 为测试信号角频率; $r_c$ 、 $r_s$ 分别为线芯和金属屏蔽层的半径; $\mu_0$ 为真空磁导率; $\gamma_c$ 、 $\gamma_s$ 分别为线芯和金属屏蔽层的电导率。

电缆的  $G_0$ 、 $C_0$ <sup>[19-20]</sup>分别为

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

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(r_s/r_c)} \quad (8)$$

式(7)、(8)中, $\epsilon_0$ 为真空介电常数; $\epsilon_r$ 为XLPE的相对介电常数; $\gamma_r$ 为XLPE的电导率。对于电缆绝缘的水树缺陷,其主要对绝缘部分造成影响。因此为分析水树对BIS的影响机理,本文从实验及仿真角度对水树生长前后  $G_0$ 、 $C_0$ 的变化进行了研究。

## 2 实验结果分析

### 2.1 试样制备

本文为实现对电缆含水树段绝缘电导、电容变化的测量,采用YJLV-1×35-8.7/15 kV单芯XLPE电缆制作试样。该型号电缆尺寸参数如下:XLPE厚度为4.5 mm,电缆外半导体层外径约为17.5 mm,线芯半径为4 mm。实验前去除护套和金属屏蔽层部分。试样的结构如图2所示。

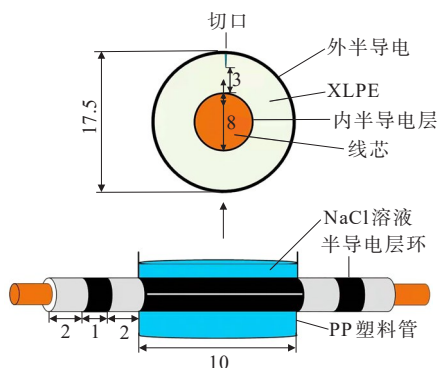


图2 试样结构示意图(单位:mm)

Figure 2 Schematic diagram of sample structure(Unit:mm)

图2中间10 mm区域为水树测试部分,该部分保留外半导体层。水树中利用刀片(刀片宽度为0.25 mm)引入长度为10 mm的切口(水刀电极),切口内侧与线芯之间的距离为3 mm。为便于电导参

数的测量,将试样两端预留两段宽1 mm的半导体层圆环,该圆环和水树测试部分的距离为2 mm。两端预留线芯便于实验加压,半导体层圆环距两端线芯的距离为2 mm。

### 2.2 水树实验平台搭建

完整实验系统如图3所示,本文采取加速水树老化实验,步骤如下:

1) 将试样套入一端开口的PP塑料管中,使用防水胶封堵PP管和试样的连接处,将1.8 mol/L的NaCl溶液注入PP管内;

2) 将试样反复抽真空3次,去除气隙的影响,保证溶液完全渗入刀口;

3) 水树在高频电压下的生长速率增快<sup>[23-24]</sup>,为了在试样中快速引入水树缺陷,本文选用高频等离子电源作为水树实验电压。通过浸泡在NaCl溶液中的铜电极向水刀电极切口施加3 kV RMS、5 kHz的交流电压,电压值使用阻容分压器测定。实验过程中电缆线芯接地,最长加压持续时间设定为7 d。

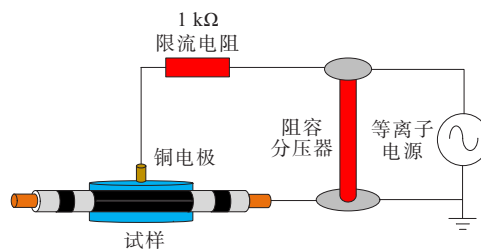


图3 加速水树实验示意

Figure 3 Schematic diagram of accelerated water tree experiment

### 2.3 电导、电容测试平台搭建

本文的电导测试平台如图4所示。将水树老化后的试样从PP管中取出,将水树段半导体层作为测试电极经过1 kΩ保护电阻连接皮安表。为实现表面电流的隔离,将试样两端的保护电极短接并接地,测试电压设置为直流9 kV。分别测量水树生长时间0、1、3、7 d时的体电导电流。采用30 min时的100组测量结果平均值作为不同组别电导特性的表征数据。

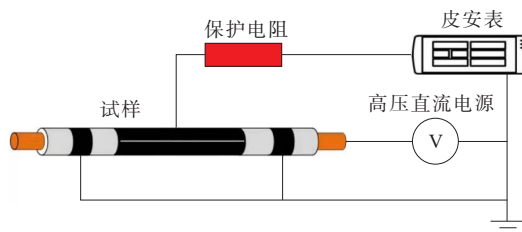


图4 电导率测试平台

Figure 4 Test platform for conductivity

本文采用网络分析仪(NA7632A,德力)的电容测量组件分析高频电容特性。测试中将试样通过线芯和外屏蔽层通过测量组件与网络分析仪的1端口相连,读取10~100 MHz的电容作为高频电容特性的参考值。

## 2.4 不同阶段水树形态

本文通过切片染色的方式观测了水树3、5、7 d的生长形态。步骤如下:

1) 将试样从PP管中取出,截取水刀电极部分并将缆芯抽出;

2) 沿刀口垂直切成厚度约300  $\mu\text{m}$ 的薄片;

3) 将薄片完全浸入90  $^{\circ}\text{C}$ 的亚甲基蓝溶液(浓度5 g/L)中,水浴加热保持温度恒定,浸渍24 h后取出通过光学显微镜观察,得到的水树形态如图5所示。

对比3 d和7 d的水树样本,水树的长度和宽度均随时间增长。需要注意的是,3 d染色后的样本呈扇形分布,且颜色沿半径逐步变浅,水树周围有未染色的浅色区域;而5 d和7 d的样本中扇形面积增加,颜色加深,其面积覆盖了3 d样本中水树生长的所有区域,并且在水树末端出现了新的浅色区域。根据电—机械应力理论<sup>[6,23-24]</sup>,XLPE的无定形区主要由交联网状结构中的连接分子链和片晶组成,在高频电场下,水分子反复挤压无定形区,易造成连接分子链断裂,形成材料的裂缝,此时水分子渗入材料,将形成充水微孔的结构。在水树初期,充水微孔的数量较少,水树密度较低,染色后颜色较浅;在水树后期,随着材料裂缝的扩大,大量充水微孔被引入,不同的水树分支连通,水树密度增大,因此染色后颜色较深。而在水树的末端,大量充水微孔的存在降低了末端电场强度,减缓了水分子承受的应力,因此新的水树通道引发率降低,观测到的颜色较浅。

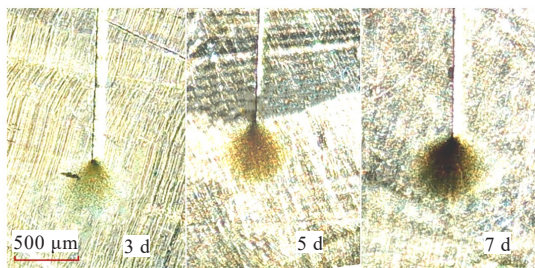


图5 不同生长时间的水树形态

Figure 5 Morphology of water tree at different growing times

## 2.5 电导和电容测试结果

试样的电导特性如图6所示,箱线图中箱体部

分表示测量数据分布在25%~75%范围内的测试结果。当试样内无水树缺陷时,其电导率约为 $2.00 \times 10^{-17} \text{ S/m}$ 。当水树生长时间为1 d时,切片的等效电导率增加至 $2.89 \times 10^{-17} \text{ S/m}$ ,之后当水树继续生长时,电导率基本不变。对于水树初期电导的增加,可以认为径向充水微孔的存在,使得绝缘内产生大量导电性较强的通道。而水树后期电导特性的相对稳定是由于充水微孔降低了尖端电场强度,使得末端充水微孔生长缓慢,因此通道导电性并没有显著增加。

试样的电容特性如图7所示。计算4组样本电容值的测量频段下的平均值可知,对于0 d试样,电容均值为7.65 pF,而随着加压时间增加,电容分别增加至8.62、9.36、10.06 pF。对于水树对试样电容特性的影响,可以认为水树区域内充水微孔中存在的大量极性水分子导致了电容值的增加。随着加压时间的增加,水分子渗入材料微孔中的数量持续增长,电容值呈增长趋势。

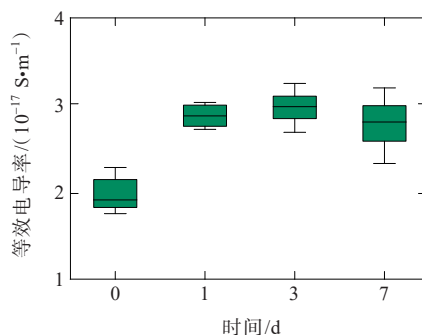


图6 电导率测试结果

Figure 6 Test results of conductivity

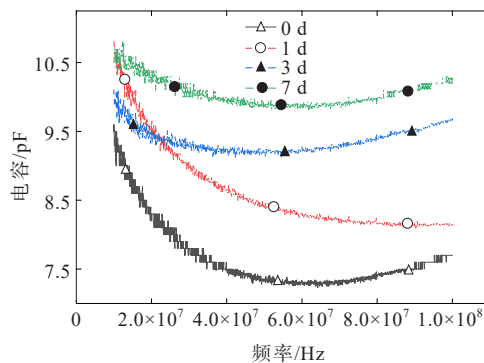


图7 电容值测试结果

Figure 7 Test results of capacitance

## 3 电缆绝缘水树有限元仿真

为进一步研究电缆分布参数和水树尺寸的关系,验证文2.5的实验结果,搭建了电缆绝缘水树模

型,电缆参数设置参照 YJLV-1×35-8.7/15 kV 单芯 XLPE 电缆,参数如表 1 所示。由于实验采取水刀电极的形式,在电缆轴向水树生长情况相同,可以将三维模型转换为二维模型。将水树模拟为扇形分散式的充水微孔。根据文献[24-26],充水微孔设置为椭圆形,微孔间用矩形的通道连接。充水微孔之间的参数依照 XLPE 无定形区进行设定,无定形区的电导率、相对介电常数和该点与水刀尖距离相关:距刀尖距离越远,微孔通道间的连通面积越小,因此无定形区电导率和相对介电常数呈下降趋势,水树参数设置如表 2 所示。

表 1 仿真电缆相关参数

Table 1 Simulation cable parameters setting

电缆部分	电导率/ (S·m <sup>-1</sup> )	相对介电 常数	外径/ mm	厚度/ mm
线芯	5.71×10 <sup>7</sup>	1×10 <sup>4</sup>	8.0	—
内半导体层	2×10 <sup>-3</sup>	100	8.2	0.10
绝缘	1×10 <sup>-17</sup>	2.3	17.2	4.50
外半导体层	2×10 <sup>4</sup>	100	17.5	0.15
铜屏蔽层	5.71×10 <sup>7</sup>	1×10 <sup>4</sup>	17.5	—

表 2 水树部分相关参数

Table 2 Water tree parameters setting

水树部分	电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	相对介 电常数	几何尺寸/μm
充水微孔	5.5×10 <sup>-6</sup>	80	椭圆:长半轴 5, 短半轴 3
微孔间通道	1×10 <sup>-7</sup>	10	矩形:高 10,宽 3
无定形区	1×10 <sup>-17</sup> ~1×10 <sup>-7</sup>	2.3~10	—

模拟水刀施加 10 kV、50 Hz 工频电压时水树的电场分布,结果如图 8 所示。可知,电场集中于水刀电极处和水树的末端区域。进一步研究水树尺寸对电缆分布参数的影响,为分析水树对分布电导参数的影响规律,将线芯电压设置为 9 kV 直流,采用电场进行仿真;为分析水树对分布电容参数的影响规律,将线芯电压设置为 5 V、50 MHz 交流电压,采用静电场进行仿真。分别计算水树长度 0~2 000 μm 的电容值和电导率,结果如图 9 所示。计未生长水树时分布电导参数为 G<sub>0</sub>,分布电容参数为 C<sub>0</sub>。由图 9 可知,水树长度 400 μm 时,分布电导增长至 1.12 G<sub>0</sub>;在水树长度 2 000 μm 时,分布电导增长至 2.13 G<sub>0</sub>;在水树长度 400 μm 时,分布电容增长至 1.014 C<sub>0</sub>;在水树长度 2 000 μm 时,分布电容增长

至 1.181 C<sub>0</sub>。仿真结果显示,水树生长过程中分布电导及电容参数均呈持续增大趋势,表明了与实验结果较高的一致性。

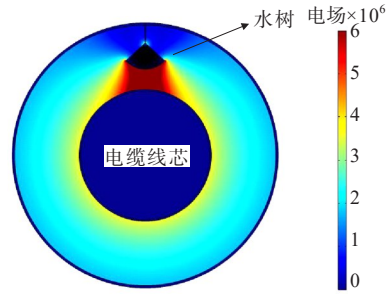


图 8 水树截面电场分布

Figure 8 Electric field distribution of water tree section

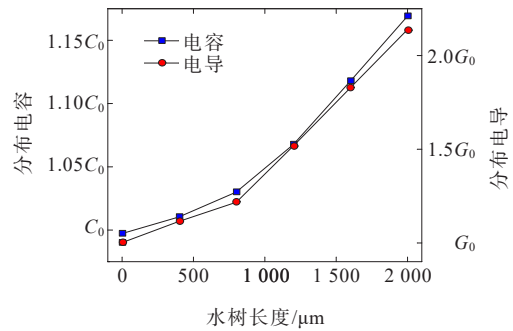


图 9 仿真计算电导率、电容值结果

Figure 9 Simulation results of conductivity and capacitance

## 4 电缆绝缘水树定位算法优化分析

### 4.1 含缺陷段的 BIS 计算方法

对于 YJLV-1×35-8.7/15 kV 单芯 XLPE 电缆水树缺陷定位的仿真参数设置与表 1 相同,仿真电缆长度设置为 1 km。仿真频谱范围为 100 kHz~100 MHz,频谱采样步长为 100 kHz。

含缺陷的长电缆传输线模型如图 10 所示,其中, A<sub>n</sub> 为第 n 个阻抗不匹配点,第 n 段电缆为 A<sub>n+1</sub> 与测量端之间的部分,其中 n 为自然数,正方向从测量端指向负载端。用递推的方式计算 BIS<sup>[19]</sup>:

$$\begin{cases} \Gamma^{(n)} = \frac{Z^{(n-1)} - Z_0^{(n)}}{Z^{(n-1)} + Z_0^{(n)}} \\ Z^{(n)} = Z_0^{(n)} \left( \frac{1 + \Gamma^{(n)} \exp[-2\gamma^{(n)}(l^{(n)} - l^{(n-1)})]}{1 - \Gamma^{(n)} \exp[-2\gamma^{(n)}(l^{(n)} - l^{(n-1)})]} \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中, n 为自然数; Z<sup>(n-1)</sup>、Z<sup>(n)</sup> 分别为第 n-1 段和第 n 段的 BIS; Γ<sup>(n)</sup> 为第 n 段的反射系数; γ<sup>(n)</sup> 为第 n 段的传播系数; Z<sub>0</sub><sup>(n)</sup> 为第 n 段的特征阻抗; l<sup>(n-1)</sup>、l<sup>(n)</sup> 分别为第 n-1 段和第 n 段电缆的长度。

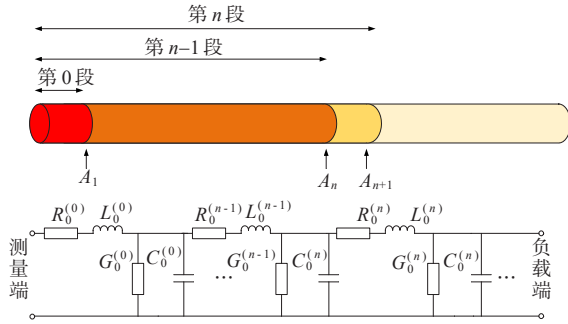


图10 含水树缺陷段长电缆传输线模型

Figure 10 Transmission line model of long cable with water tree

式(9)中的 $Z^{(n)}$ 中的阻抗谱参数需要经过阻抗变换计算电缆的传递函数,通过传递函数进一步得到电缆的定位图谱,阻抗变换公式如下:

$$S^{(n)} = \frac{Z^{(n)} - Z_{\text{ref}}^{(n)}}{Z^{(n)} + Z_{\text{ref}}^{(n)}} \quad (10)$$

式中, $S^{(n)}$ 为第 $n$ 段电缆的自反射系数; $Z^{(n)}$ 为第 $n$ 段电缆的BIS; $Z_{\text{ref}}^{(n)}$ 为第 $n$ 段电缆的参考阻抗。在文献[15-17]中,普遍采用了由网络分析仪测得的自反射系数推算定位图谱的方法,忽略了仪器中参考阻抗的影响。而只有当参考阻抗与电缆的波阻抗匹配时,行波在首端才不会出现反射,此时 $S^{(n)}$ 为第 $n$ 段电缆反射波和入射波在频域中的比值,即可看作第 $n$ 段电缆的传递函数。波阻抗的计算公式如下:

$$Z_{\text{ref}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \frac{\ln(r_s/r_c)}{2\pi} \quad (11)$$

实际情况下BIS的测试端一般为在运电缆,波阻抗为定值。通过表1的参数,可以计算得到仿真电缆的波阻抗为 $30.95 \Omega$ 。图11所示为通过式(9)计算参考阻抗分别设为 $30.95 \Omega$ (阻抗匹配)和 $50 \Omega$ (阻抗不匹配)的定位图谱,入射信号设置为高斯函数,当阻抗不匹配时,定位图谱在信号发射端将有

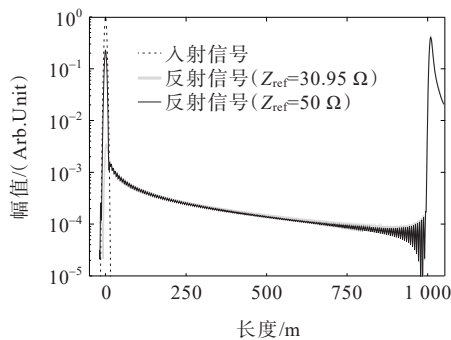


图11 不同参考阻抗对应定位图谱的比较

Figure 11 Comparison of location spectra under different reference impedances

明显反射现象,降低测试的灵敏度。因此,在后续分析中,本文将参考阻抗设置为 $30.95 \Omega$ 。

#### 4.2 窗函数和入射信号的选择

在传统的TDR方法中,由于无法任意设定入射波类型,因此不能保证入射信号在传输过程中的较小衰减,使得许多情况下测量准确度较低。而基于BIS的方法可以通过选定合适的入射信号,实现信号在电缆中传输时较小衰减。当选定入射信号后,可通过IFFT得到TDR信号,计算公式为

$$\begin{cases} S_i(\omega) = \text{FFT}(s_i(t)) \\ s_r(t) = \text{abs}[\text{IFFT}(S_i(\omega)W(N)S^{(n)*})] \end{cases} \quad (12)$$

式中, $s_i(t)$ 、 $S_i(\omega)$ 分别为入射信号的时域谱和频域谱,频域信号包含正负频谱; $W(N)$ 为窗函数,其长度 $N$ 等于 $S_i(\omega)$ 的采样点数; $S^{(n)*}$ 为 $S^{(n)}$ 的共轭延拓信号,其负频域的值等于对应正频域值的共轭; $s_r(t)$ 为反射信号的时域谱,其反映了反射信号在时域中的传输过程。将时域谱乘上信号在电缆中传播的速度即可得到电缆的定位曲线,行波信号在媒介中的传播速度可以用下式近似计算:

$$\begin{cases} v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \\ s_r(l) = 2vs_r(t) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $v$ 为电力电缆中电磁波的传播速度,约为 $1.978 \times 10^8 \text{ m/s}$ ; $s_r(l)$ 为反射信号的空间域谱,本文将该信号作为定位图谱。

根据文献[22]可知,对非周期函数的频谱进行截断会造成频谱泄漏,经过对多种窗函数的对比可知,布莱克曼窗能起到较好的抑制效果。图12对比了无缺陷时加窗前后的定位图谱,窗函数的引入显著降低了电缆尾端信号震荡,提高了位置识别灵敏度。因此,本文在信号处理中选取布莱克曼窗函数。

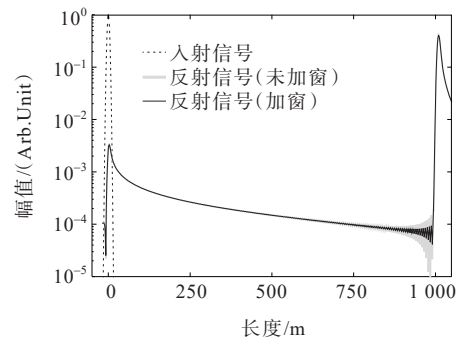


图12 加窗前后定位图谱的比较

Figure 12 Comparison of location spectra before and after windowing

目前,大部分基于 BIS 的定位算法中主要采用直接将 BIS 或反射系数相关特征参数进行 IFFT。这样的算法实际上是将入射信号设置为功率谱恒为常数的扫频信号,该算法在计算时由于高频信号分量较大,用任意窗函数截断都将造成信号的时域混叠,在时域中产生大量纹波,即如图 13 所示的吉布斯效应。为解决该问题,本文在计算过程中选取了高斯信号模拟入射信号。由于高斯脉冲在频域上的功率分布较为集中,高频部分截断后对于原始波形的畸变较小,从而削弱了反射信号在传导过程中的振荡,形成了图 13 所示的平滑曲线。

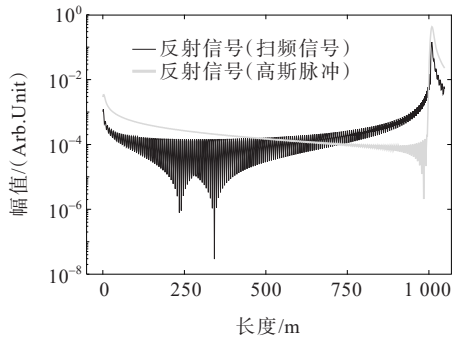


图 13 不同入射信号对应时域定位图谱的比较

Figure 13 Comparison of localization spectra under different incident signals

### 4.3 水树定位算法验证

为进一步分析水树引发电导和电容参数变化对定位图谱的影响机理,验证含水树区域长电缆的特征定位算法,建立了不同水树参数(对应不同的  $G_0$  和  $C_0$ )、不同位置的仿真模型,不同组别的电缆参数如表 3 所示,其中  $G_0$ 、 $C_0$  为电缆无缺陷时的电导、电容分布参数,由式(7)、(8)算得到,电缆的长度设置为 1 km。依据文 4.2 所述,入射信号采用高斯脉冲函数、窗函数采用布莱克曼窗函数。

表 3 仿真电缆组别设置

Table 3 Simulation cable group setting

组号	电导分布参数	电容分布参数	位置/m
1#	$2G_0$	$C_0$	595~605
2#	$1 \times 10^8 G_0$	$C_0$	595~605
3#	$G_0$	$1.014 C_0$	595~605
4#	$G_0$	$1.181 C_0$	595~605
5#	$2G_0$	$1.181 C_0$	595~605
6#	$G_0 \sim 2G_0$	$C_0 \sim 1.181 C_0$	575~625

比较 1# 和 2# 电缆的定位图谱,其中 1# 电缆模拟水树缺陷时的电导变化,2# 电缆模拟电缆低阻故障时的电导变化,结果如图 14 所示,1# 电缆的微弱

电导变化定位图谱中并无明显畸变点,无法识别出电导变化位置。由文 2.5 实验结果可知,即使水树生长至  $2\ 000\ \mu\text{m}$  (约 50% 绝缘厚度),电缆绝缘电导数量级仍保持不变,对高频行波很难造成透反射现象。而当低阻故障时,绝缘电阻降低至  $\text{M}\Omega$  量级,电缆的电导率约为  $10^{-9}$  数量级,此时在定位图谱 590~610 m 处显现出一个反射峰,反射峰峰值位于 600.69 m,位于设定故障中心处,存在 0.69% 的误差,因此可以基于本反射峰确定低阻故障位置。

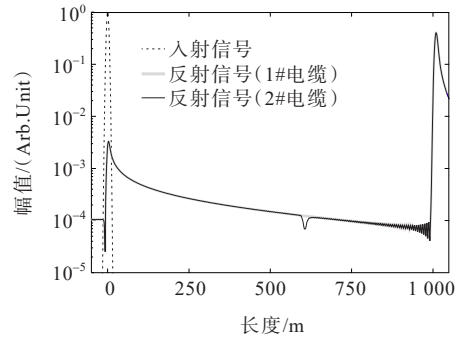


图 14 1#、2# 电缆定位图谱的比较

Figure 14 Comparison of 1# and 2# cable location spectrum

图 15 所示为 3# 和 4# 电缆的定位图谱,3# 电缆模拟水树生长初期(水树长度  $400\ \mu\text{m}$ )引发电容参数变化后的定位图谱,4# 电缆模拟水树生长后期(水树长度  $2\ 000\ \mu\text{m}$ )引发电容参数变化后的定位图谱。由图 15 可知,定位图谱对于水树所引发的电容改变更加敏感。相较于图 14,图 15 显现出 2 个反射峰,分别位于故障段的首端(594.43 m)和尾端(605.26 m),误差分别为 0.69% 和 0.26%。电容效应对定位图谱的影响体现在电容的改变量,电容的变化量越大,反射峰的峰值越大。因此局部的电容增大在定位图谱上表现出 2 个反射峰叠加的波形特征。需要注意的是,反射峰波尾在时域中会有部分泄漏,导致反射峰末端波形幅值增加,降低了缺陷末端侦测其他缺陷的灵敏度。

图 16 所示为 5# 和 6# 电缆的定位图谱,其中 5# 电缆模拟水树电导参数和电容参数同时变化时的定位图谱,并且设置电导参数和电容参数的变化为在缺陷点处突变。而 6# 电缆和 5# 电缆参数设置相同,区别于在 6# 电缆缺陷两端各设置 20 m 过渡区,在过渡区电导和电容线性均匀增长。由图 16 可知,5# 和 6# 电缆故障处均呈现 2 个反射峰波形,说明了电容参数变化是该处发生信号反射的主要原因。而 5# 电缆的反射峰峰值大,上升沿更窄,6# 电缆反射峰的峰值较小,波形更平滑。这证实了出现电容

型缺陷时,反射峰的峰值与电容的变化量成正比。实际运行中,电缆出现局部受潮或水树缺陷时,在某一点电容值突变的可能性较小。因此利用定位图谱评估水树缺陷程度时,不能仅根据反射峰的峰值评价水树发展的程度。需同时参考反射波的能量(反射峰对于时域的积分),可以得到更精确的评估结果。

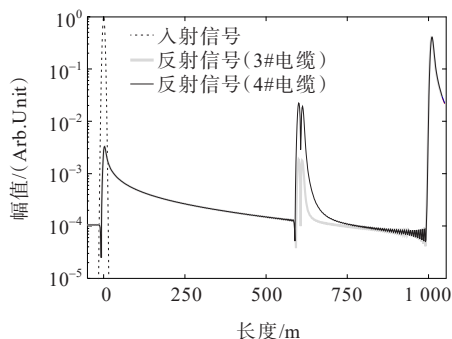


图 15 3#、4#电缆定位图谱的比较

Figure 15 Comparison of 3# and 4# cable location spectrum

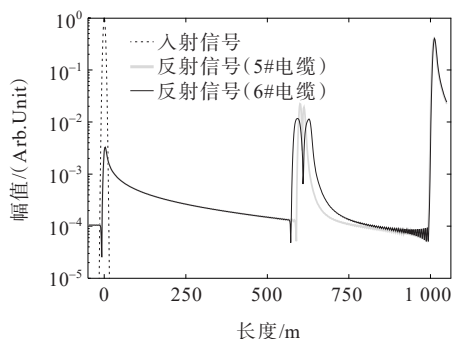


图 16 5#、6#电缆定位图谱的比较

Figure 16 Comparison of 5# and 6# cable location spectrum

## 5 结语

1) 含水树电缆试样的电导和电容分布参数随着加压时间增长趋势明显,通过有限元仿真证明了分布参数的变化与水树充水微孔的存在及其尺寸有关。

2) 选取了最佳入射波形和窗函数,实现了基于BIS数据的定位。在定位图谱中,电导性缺陷呈现单脉冲反射峰特征,峰值位于缺陷中心,电容性缺陷呈现双脉冲叠加反射峰特征,峰值位于缺陷两端。

3) 水树缺陷引发的电容变化是影响BIS定位的主要因素,电容的变化量与定位谱中反射峰值成正比。

## 参考文献:

[1] 邓伟,曲可新,任媛媛,等.芳香族电压稳定剂改善聚乙烯电缆绝缘材料耐电性能的研究进展[J].高压电器,2023,59(12):185-194.  
DENG Wei, QU Kexin, REN Yuanyuan, et al. Research

progress of aromatic voltage stabilizers to improve the electrical resistance performance of polyethylene cable insulation materials[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (12):185-194.

[2] 李登淑,王昕,吴健儿,等.基于特征检测量的XLPE电缆绝缘老化寿命预测方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):168-177.

LI Dengshu, WANG Xin, WU Jianer, et al. XLPE cable insulation aging based on feature detection life prediction method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1):168-177.

[3] 沙浩源,郭涛,赵兴华,等.基于空间矢量复合判断指标的变电站动力电缆漏电检测算法[J].电力系统保护与控制,2023,51(11):168-176.

SHA Haoyuan, GUO Tao, ZHAO Xuehua, et al. Leakage detection algorithm for long-section power cables in substations based on a composite judgment index of space vector[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11):168-176.

[4] 闫轰达,李文鹏,张翀,等.500 kV电力电缆用国产交联聚乙烯绝缘材料性能分析[J].中国电力,2023,56(2):86-92.

YAN Hongda, LI Wenpeng, ZHANG Chong, et al. Performance analysis of a domestic crosslinked polyethylene insulating material for 500 kV power cable [J]. Electric Power, 2023, 56(2):86-92.

[5] TAO W B, SONG S Y, ZHANG W, et al. Influence of temperature on the growth characteristics of water tree in XLPE cable[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019 (16):1636-1639.

[6] 赵岩,郑书生.基于损耗电流谐波特征分析的XLPE电缆局部尖刺缺陷诊断[J].电工技术学报,2023,38(21):5725-5737.

ZHAO Yan, ZHENG Shusheng. Diagnosis of XLPE cable local tip defects based on analysis of harmonic characteristics of loss current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21):5725-5737.

[7] 聂永杰,王威望,李盛涛,等.基于电流积分技术的XLPE绝缘动态电荷行为和高场电导特性[J].高电压技术,2021,47(8):2971-2980.

NIE Yongjie, WANG Weiwang, LI Shengtao, et al. Dynamic charges behavior and high-field conduction characteristics of XLPE insulation based on current integrated charge technique[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8):2971-2980.

[8] JUNG W, KIM S, LIM J, et al. A statistical analysis to the VLF Tan $\delta$  criteria for aging diagnosis in power cables[J]. Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, 2020, 33(1):1-5.

[9] ZHU G Y, ZHOU K, ZHAO S L, et al. A novel oscillation wave test system for partial discharge detection in XLPE cable lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4):1678-1684.



- [10] 刘维功,王昊展,时振堂,等.基于改进XGBoost算法的XLPE电缆局部放电模式识别研究[J].电测与仪表,2022,59(4):98-106.  
LIU Weigong, WANG Haozhan, SHI Zhentang, et al. Research on partial discharge pattern recognition of XLPE cable based on improved XGBoost algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 98-106.
- [11] ZHOU K, RAO X, CHEN Z, et al. Illuminations to the interface polarization characteristics of water-tree aged cables based on polarization and depolarization current method[C]//2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Knoxville, USA :IEEE, 2019.
- [12] SELVAMANY P, VARADARAJAN G S. A Consideration of non-linear dielectric response of water-treed XLPE cable insulation[C]//2021 13th IEEE PES Asia Pacific Power & Energy Engineering Conference (APPEEC). Thiruvananthapuram, India:IEEE, 2021:1-5.
- [13] 贾科,施志明,张旻,等.基于电缆早期故障区段定位的柔性直流配电系统保护方法[J].电力系统自动化,2023,47(4):163-171.  
JIA Ke, SHI Zhiming, ZHANG Yang, et al. Protection method for flexible DC distribution system based on cable incipient fault section location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 163-171.
- [14] 徐明忠,夏荣,欧阳本红,等.基于内置差分电容的电缆接头局放检测技术研究[J].智慧电力,2022,50(7):37-44.  
XU Mingzhong, XIA Rong, OUYANG Benhong, et al. Cable joint partial discharge detection based on built-in differential capacitance[J]. Smart Power, 2022, 50(7): 37-44.
- [15] HIRAI N, YAMADA T, OHKI Y. Comparison of broadband impedance spectroscopy and time domain reflectometry for locating cable degradation[C]//2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia:IEEE, 2012:229-232.
- [16] 钟启迪,蒲莹,孙建锋,等.适用于柔性直流电网的500 kV级直流电缆与架空线路并联运行控制及保护策略[J].电力建设,2022,43(7):80-86.  
ZHONG Qidi, PU Ying, SUN Jianfeng, et al. Operation control and protection strategy of domestic 500 kV DC cable in flexible DC grid[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 80-86.
- [17] YAMADA T, HIRAI N, OHKI Y. Improvement in sensitivity of broadband impedance spectroscopy for locating degradation in cable insulation by ascending the measurement frequency[C]//2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Bali, Indonesia:IEEE, 2012:677-680.
- [18] LI R, ZHOU K, WAN H, et al. Location of cable joints with moisture in medium voltage distribution grid based on frequency domain reflection method[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China:IEEE, 2020:1-4.
- [19] 冯尧,赵鹏,李文杰,等.高压XLPE电缆缓冲层烧蚀故障机理分析与结构优化[J].电力工程技术,2023,42(3):242-249.  
FENG Yao, ZHAO Peng, LI Wenjie, et al. Ablative fault mechanism analysis and structure improvement of buffer layer of high voltage XLPE cable[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 242-249.
- [20] 陈泰龙,马玫,陈少磊,等.基于多尺度优化卷积神经网络的配电网电缆局部放电图像识别[J].供用电,2023,40(11):105-111.  
CHEN Tailong, MA Mei, CHEN Shaolei, et al. Cable fault diagnosis of distribution network based on multi-scale optimized convolutional neural network[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(11): 105-111.
- [21] 张丹丹,郑建康,冯南战,等.基于阻抗谱的同轴电力电缆高频传输特性研究[J].高压电器,2021,57(6):18-23.  
ZHANG Dandan, ZHENG Jiankang, FENG Nanzhan, et al. Study on high frequency transmission characteristics of coaxial power cable based on impedance spectrum[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 18-23.
- [22] 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.  
ZHOU Zhiqiang. Local defects diagnosis for cable based on broadband impedance spectroscopy[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [23] 陶霁韬,李化,方田,等.基于片晶滑移的水树结晶破坏机理[J].电工技术学报,2021,36(12):2640-2649.  
TAO Xiantao, LI Hua, FANG Tian, et al. Crystalline destruction mechanism caused by water tree based on lamella slip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2640-2649.
- [24] 周凯,黄科荣,黄明,等.交联聚乙烯电缆绝缘中的水树生长特性[J].高电压技术,2019,45(10):3207-3213.  
ZHOU Kai, HUANG Kerong, HUANG Ming, et al. Water tree growth characteristics in XLPE power cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3207-3213.
- [25] 林涛,翟璐,孙浩飞,等.长距离330 kV交联聚乙烯电缆交接试验研究[J].电网与清洁能源,2022,38(4):28-36.  
LIN Tao, ZHAI Lu, SUN Haofei, et al. Study on commissioning test of long-distance 330 kV XLPE power cable[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 28-36.
- [26] ZHOU K, HUANG M, TAO W B, et al. A possible water tree initiation mechanism for service-aged XLPE cables: conversion of electrical tree to water tree[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1854-1861.