

基于反射系数谱的 XLPE 电缆水树缺陷定位方法

周 淦, 王鑫源, 欧阳希, 姜 茜

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆大学, 重庆 400044)

摘要: 地下电缆中的水树能够在不改变电缆性能的情况下持续生长数年, 并最终导致无法预料的绝缘故障。为解决现有技术对电缆水树缺陷定位诊断时存在的不足, 提出基于反射系数谱的水树定位方法。首先利用传输线理论构建了含水树缺陷的电缆反射系数谱的解析模型。然后以分布电容为对象分析了水树缺陷对反射系数谱的影响, 并基于广义正交法构建了诊断函数 $D(x)$ 对水树缺陷定位及评估。接着通过仿真实验研究了多因素对诊断结果的影响, 优选出了最佳测试频段, 分析了诊断灵敏度。最后在实验室对一根 50 m 且含有 2 处人工水树缺陷的电缆进行诊断试验。仿真及试验结果验证了方法的有效性和准确性, 该方法能够精确定位电缆中多处水树缺陷, 定位误差小于 0.4%, 同时 $D(x)$ 峰值能够作为水树老化状态评估的新特征量。

关键词: 水树定位; 反射系数谱; XLPE 电缆; 分布参数

DOI: 10.12067/ATEEE2103012

文章编号: 1003-3076(2021)07-0028-12

中图分类号: TM726

1 引言

交联聚乙烯 (Cross-linked Polyethylene, XLPE) 绝缘材料凭借其优秀的机械电气性能, 已经在输配电线路中得到了广泛应用^[1]。然而, 当电缆受潮后, 绝缘介质会在水分和电场的共同作用下形成含水通道, 发生水树老化^[2]。水树会随着电缆运行而缓慢增长, 当水树长度达到电缆绝缘层厚度的 60% 以上时电缆绝缘的击穿场强将会显著降低, 甚至造成停电事故^[3]。因此, 在电缆水树缺陷尚未发展成为绝缘故障前, 对其进行绝缘诊断, 及时维修或替换电缆缺陷部分, 能够有效预防击穿事故的发生, 从而为电网的安全稳定运行提供保障。

为实现对水树缺陷的有效诊断, 国内外学者提出了一些新型诊断方法如超低频介损法^[4]、空间电荷法^[5]、残余电荷法^[6]、极化去极化电流法^[7]等。虽然上述方法能够有效地诊断出水树老化程度, 但仍然缺乏能够对诊断出的水树缺陷进行精确定位的有效方法。

在电缆缺陷定位方面, 局部放电法^[8,9]可以定位缺陷位置, 然而在正常情况下水树缺陷并不会产

生局部放电^[10]。时域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR)^[11]通过向待测电缆注入一个脉冲信号, 利用反射信号到达监测端的时间差进行定位, 然而由于反射信号的传播衰减以及对到达时间测定存在主观性等原因, 时域反射法的定位结果可能产生较大误差^[12]。频域反射法 (Frequency Domain Reflectometry, FDR) 利用电缆频率相关量进行缺陷定位^[13]。日本 Yoshimichi Ohki 院士课题组利用傅里叶反变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) 分析电缆宽频阻抗谱成功定位电缆辐射老化缺陷^[14], 并通过试验证明了在定位效果上 FDR 优于 TDR^[15], 然而 IFFT 方法需要测试频率尽可能高 (1.5 GHz), 对设备和成本提出了较高的要求。国内学者提出基于反射系数谱的电缆机械损伤缺陷定位方法^[16], 通过离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 和加窗操作, 实现机械损伤缺陷的定位。

事实上, 由于水树与热老化、机械损伤缺陷在形成机理、发展周期、外在特征及电气特性等方面均有较大差别, 使得 FDR 对于不同类型缺陷的诊断效果以及诊断灵敏度存在差异。加上目前缺乏对于电缆

收稿日期: 2021-03-03

基金项目: “111”引智极地国际合作项目 (B08036)

作者简介: 周 淦 (1973-), 男, 四川籍, 教授, 博士, 研究方向为电气设备监测与故障诊断、绝缘材料老化等;
王鑫源 (1994-), 男, 湖北籍, 硕士研究生, 研究方向为电气设备监测与故障诊断。

水树缺陷情况与分布参数之间的影响关系的研究,共同导致国内外尚未开展基于 FDR 的水树诊断相关研究。此外,目前能用于评估局部水树老化状态的特征量较少,而 FDR 的宽频特性能够提供表征水树老化情况的新特征量,因此开展基于 FDR 的水树诊断研究能够有效填补相关研究空缺。

为解决上述问题,本文基于传输线理论构建出水树缺陷下电缆首端反射系数模型,运用有限元仿真方法明确了不同类型水树缺陷对模型中分布参数的关联关系,引入基于广义正交法的缺陷定位模型,提出一种基于电缆首段反射系数谱的水树定位及诊断新方法,并优选出模拟诊断的频带参数。最后通过多组仿真实验及实际电缆实验的分析,验证了本方法的有效性,为工程实际中电缆的故障预先感知、科学化运维管理提供更有价值的技术支持。

2 电缆首端反射系数谱

2.1 电缆分布参数模型

由传输线基本原理可知,当电缆线路长度 l 与入射信号波长 λ 满足 $l > 0.1\lambda$ 时,线路需要看作分布参数网络进行处理^[17]。此时电缆等效电路如图 1 所示,其中单位长度电缆的电阻、电感、电导和电容分别用 R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 表示。由于趋肤效应和临近效应,单位电阻和电感直接受频率影响,随着频率的增加,单位长度电阻 R 逐渐增大,电感逐渐减小,则考虑频变效应的单位电阻和电感可以分别由式(1)、式(2)近似^[18]:

$$R_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\frac{1}{\sigma_c}} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\frac{1}{\sigma_s}} \right) \quad (1)$$

$$L_0 \approx \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2\mu_0}{\omega}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\frac{1}{\sigma_s}} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\frac{1}{\sigma_c}} \right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{r_s}{r_c} \right) \quad (2)$$

式中, ω 为信号角频率; μ_0 为真空磁导率; r_c 为缆芯导体半径; r_s 为金属屏蔽层内半径; σ_c 和 σ_s 分别为缆芯导体和金属屏蔽层的电导率。

单位电容 C 和电导 G 频率不直接受频率影响,而与电缆本身特征有关,可以由式(3)计算^[18]:

$$\begin{cases} C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_s/r_c)} \\ G_0 = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_s/r_c)} \end{cases} \quad (3)$$

式中, ϵ 为介质的介电常数; σ 为介质电导率。

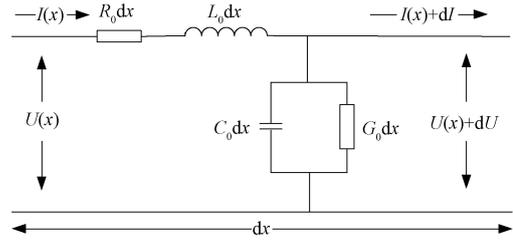


图 1 单位长度传输线等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of transmission line per unit length

2.2 含水树缺陷的电缆首端反射系数模型

应用传输线方程对图 1 电缆分布参数等效电路求解,若电缆总长度为 l ,可得电缆中距首端 x 处的电压和电流向量分别为^[18]:

$$\begin{cases} U(x) = U_i e^{\gamma(l-x)} + U_r e^{-\gamma(l-x)} \\ I(x) = \frac{U_i}{Z_0} e^{\gamma(l-x)} - \frac{U_r}{Z_0} e^{-\gamma(l-x)} \end{cases} \quad (4)$$

式中, U_i 和 U_r 分别为入射电压波和反射电压波; γ 和 Z_0 分别为传播常数和特征阻抗,可以由式(5)、式(6)计算^[18]:

$$\begin{cases} \gamma(\omega) = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta \\ \alpha = \frac{1}{2} \left(R_0 \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + G_0 \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \right) \\ \beta = \omega \sqrt{L_0 C_0} \end{cases} \quad (5)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (6)$$

式中, α 和 β 分别为衰减系数和相位常数。

距离首端 x 处的反射系数为该处反射电压波与入射电压波之比:

$$\Gamma(x) = \frac{U_r}{U_i} e^{-2\gamma(l-x)} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-2\gamma(l-x)} \quad (7)$$

式中, Z_L 为负载阻抗。

通常电缆末端负载阻抗可以接触并通过阻抗分析获取。如果电缆负载不可接触,则可以通过基于小波变换的时域反射法^[19]测量。当负载端开路时,即 $Z_L = \infty$,则 x 处的反射系数可以表示为:

$$\Gamma(x) = e^{-2\gamma(l-x)} = e^{-2\alpha(l-x)} e^{-2j\beta(l-x)} \quad (8)$$

在电缆首端($x=0$)处,电缆首端反射系数谱为:

$$\Gamma(0) = e^{-2(\alpha+j\beta)l} = e^{-2\alpha l} [\cos(2\beta l) + j\sin(2\beta l)] \quad (9)$$

基于式(5)~式(9)建立含有水树缺陷的反射系数谱模型。如图 2 所示,一根总长为 l 的电缆, l_a

至 l_b 为水树缺陷段。将该电缆分为三部分计算, $(0, l_a)$ 、 (l_a, l_b) 、 (l_b, l) 。其中每一部分以式(7)为基础, 计算其首端反射系数为:

$$\Gamma(l_b) = \frac{Z_L - Z_{0h}}{Z_L + Z_{0h}} e^{-2\gamma_h(l-l_b)} \quad (10)$$

$$\Gamma(l_a) = \frac{Z_{lb} - Z_{0d}}{Z_{lb} + Z_{0d}} e^{-2\gamma_d(l_b-l_a)} \quad (11)$$

$$\Gamma(0) = \frac{Z_{la} - Z_{0h}}{Z_{la} + Z_{0h}} e^{-2\gamma_h l_a} \quad (12)$$

$$Z_{lb} = Z_{0h} \frac{1 + \Gamma(l_b)}{1 - \Gamma(l_b)} \quad (13)$$

$$Z_{la} = Z_{0d} \frac{1 + \Gamma(l_a)}{1 - \Gamma(l_a)} \quad (14)$$

式中, γ_h 和 γ_d 分别为电缆正常段的传播常数和在水树段的传播常数。

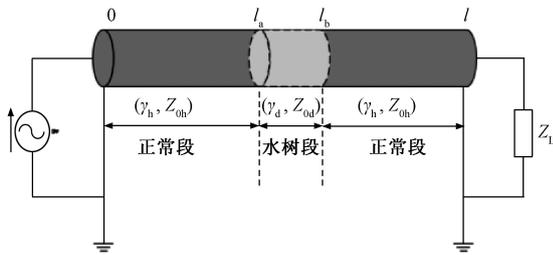


图2 含水树缺陷电缆示意图

Fig.2 Water tree defect cable diagram

由式(3)可知, 当电缆中存在水树缺陷时, 缺陷处绝缘介质的复介电常数将发生变化, 导致水树缺陷段单位长度电容 C 发生相应的变化, 分布参数 C 的变化通过影响传播常数和特征阻抗, 从而影响电缆首端反射系数谱。

由式(9)可知首端反射系数谱的实部与虚部具有相似性, 且均能独立反映反射系数谱的特性。图3分别为三根测试电缆的首端反射系数谱实部幅频图, 三根电缆均为长度50 m的同一型号电缆。其中第一根未处理, 第二根对距首端15 m部分加速水树老化240 h, 第三根整段浸泡水中1 h后擦干表面模拟整段受潮。从图3中可以看出首端反射系数谱具有周期性和衰减性, 而水树缺陷会影响它的周期性和衰减性, 使得谐振频率下的电缆反射系数在发生缺陷前后出现剧烈变化。可见反射系数谱对水树缺陷十分灵敏, 利用反射系数谱的这一特点可以实现对水树缺陷的定位和评估。

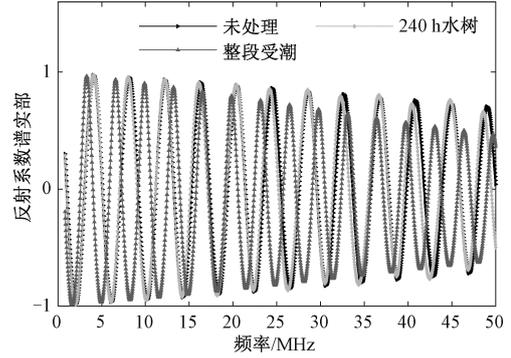


图3 不同缺陷程度电缆首端反射系数谱对比

Fig.3 Reflection coefficient spectrum of several cables with different water tree defects

3 电缆水树缺陷定位

3.1 基于广义正交法的水树缺陷定位原理

在数学中, 当两个函数存在广义正交关系时, 其乘积的积分结果在不同情况下具有明显差别, 利用这一性质可以从首端反射系数谱中获取水树位置 l_d 。由式(10)~式(14)可知, 电缆首端反射系数谱 $\Gamma(0)$ 是含有缺陷特征和缺陷位置的函数, 其性质主要由 $\exp(-2\gamma_h l_a)$ 和 $\exp(-2\gamma_d l_b)$ 和两个特征算子决定, 因此建立如式(15)的转换函数 $F(x)$:

$$\left\{ \begin{aligned} F(x) &= \int_{f_{low}}^{f_{up}} \Gamma(0) K(x) df = \begin{cases} a_1 \approx 0 & x \neq l_d \\ a_2 \gg 0 & x = l_d \end{cases} \\ &0 \leq x \leq l \\ K(x) &= \cos(2\beta_h x) e^{2\alpha_h x} \\ \gamma_h &= \alpha_h + j\beta_h \end{aligned} \right. \quad (15)$$

式中, $\Gamma(0)$ 为电缆首端反射系数谱; $K(x)$ 为构建的转换核函数; f_{up} 和 f_{low} 分别为积分频率上、下限; a_1 和 a_2 分别为正常区域 ($x \neq l_d$) 和水树区域 ($x = l_d$) 的转换结果; α_h 和 β_h 分别为正常段衰减常数和相位常数。

工程应用中, α_h 和 β_h 可以利用网络分析仪测量原始电缆线路或与待测电缆同一型号的电缆在末端短路和开路情况下的首端输入阻抗谱 Z_{sc} 和 Z_{oc} 后, 通过式(16)计算获取^[20]:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{Z_{sc}}{Z_{oc}}} \quad (16)$$

本文所构建的核函数 $K(x)$ 中因子 $\cos(2\beta_h x)$ 与反射系数谱 $\Gamma(0)$ 两者存在广义正交关系。当在缺陷处 $x = l_d$ 时, 由于缺陷处的相位常数 β_d 与正常段

$x \neq l_d$ 相位常数 β_h 不同,使得在缺陷处的积分变换结果 a_2 与正常段的积分变换结果 a_1 出现了明显差异。因子 $\exp(2\alpha_h x)$ 用于消除由反射系数谱带来的衰减特性,使得转换结果 $F(x)$ 只与缺陷状态相关,而与电缆长度和缺陷距首端距离无关。通过将电缆中正常电缆的相位常数 β_h 与任意位置 x 处的相位常数 β_x 逐一对比,便可以获取缺陷处的位置信息,从而实现缺陷定位。图 4 为一根 50 m 电缆(25 m 存在水树缺陷)的转换结果,可见完好电缆除了在电缆末端以外没有明显峰值,而缺陷电缆在 25 m 处多出一个峰值,反射系数谱经过式(15)转换后,其转换函数 $F(x)$ 将在缺陷处出现一个峰值。

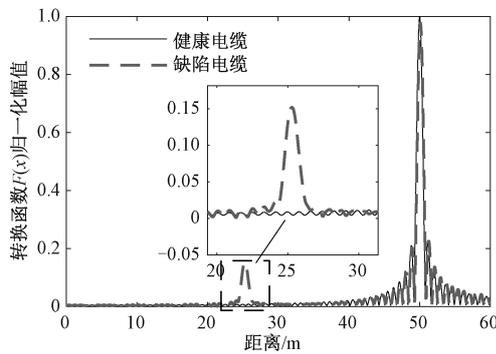


图 4 一根 50 m 电缆 $F(x)$ 转换结果(25 m 处为缺陷位置)
Fig.4 $F(x)$ transformation results of 50 m long cable with deflection at 25 m

为了更加清晰直观地定位电缆水树缺陷,并表征水树老化缺陷程度,定义诊断函数 $D(x)$ 为:

$$D(x) = |F_h(x) - F_d(x)| \quad (17)$$

式中, x 为与电缆首端距离; $F_h(x)$ 为正常电缆的转换谱图; $F_d(x)$ 为含有水树缺陷电缆的转换谱图。

在实际应用中, $F_h(x)$ 可以通过测量同型号正常电缆或者利用式(15)仿真获取, $F_d(x)$ 则可以通过测量待测电缆直接获取。因为诊断函数 $D(x)$ 定义为电缆健康状态与水树缺陷状态下积分变换的差

值,因此当诊断函数 $D(x)$ 接近 0 时,说明电缆该位置没有水树缺陷。

3.2 水树缺陷与分布电容的关联特性

为研究水树的类型和尺寸对电缆分布电容的影响,本文在 COMSOL Multiphysics 5.5 中建立 YJV 8.7/15-150 电缆模型,利用 AC/DC 模块下电流场(ec)接口仿真并计算不同情况下水树的电容值。仿真中利用椭球体结构分别建立发散型和领结型水树的等效模型^[21]。以图 5 中外导型水树(从外半导体层开始生长的发散型水树)为例说明仿真模型。如图 5 所示,水树椭球中心 O 位于绝缘层与内半导体交界处,长轴 b 与电场方向平行,纵横比为 5,文献[22]指出该值具有良好仿真效果。在水树椭球内设置了诸多充水微孔,充水微孔为一系列长轴为 $5 \mu\text{m}$ 、短轴为 $3 \mu\text{m}$ 的椭球体。相邻充水微孔通过长 $10 \mu\text{m}$ 、宽 $3 \mu\text{m}$ 的水树通道连接成为“珍珠串”模型,该模型模拟了实际观测到水树所具有的树枝状形态。同时为模拟水树的非均匀性,本文水树部分材料设置采用线性参数,即水树参数从起始点(椭球中心 O)到水树与 XLPE 绝缘交界处呈线性降低(交界处参数与 XLPE 相同),仿真中各部分相关材料参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Tab.1 Simulation parameters setting

名称	相对介电常数	电导率 / (S/m)	厚度 / mm
缆芯/金属屏蔽层	10^4	5.96×10^7	7/0.3
半导体层	100	2×10^{-3}	1
XLPE 绝缘层	2.3	10^{-17}	4.5
水树通道与主体	6.9 ~ 2.3	$10^{-7} \sim 10^{-17}$	—
充水微孔	81	5.86×10^{-6}	—

仿真中以 10% 绝缘层厚度为步长逐渐增加水树尺寸,分别对三种类型的水树进行研究,共得到

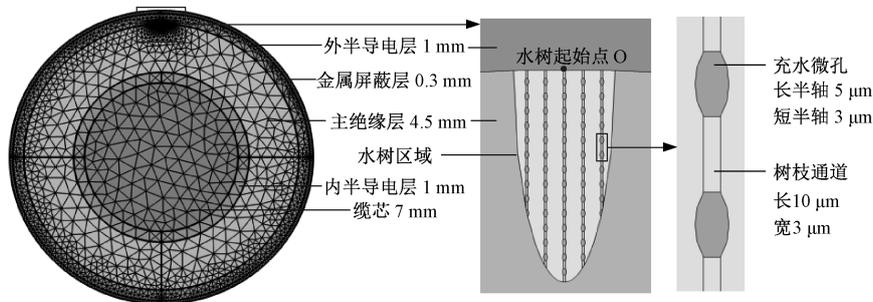


图 5 水树有限元仿真模型

Fig.5 Water tree finite element simulation model

31组电场和电容结果。图6显示了水树尺寸分别为20%绝缘厚度(长度0.9 mm、短轴0.18 mm)和60%绝缘厚度(长度2.7 mm、短轴0.54 mm)时,三种水树类型的电势和电场分布。如图6所示,水树会使绝缘层电势分布情况发生改变,使水树区域的电场发生畸变,且局部场强较正常区域变大,因此造成水树持续生长直至绝缘击穿。正常电缆中的电势

和电场均匀分布,绝缘性能良好;当水树生长至20%绝缘厚度时,水树对电场的影响不是很明显,不足以造成击穿,水树缓慢生长;当水树尺寸达到60%绝缘厚度后,水树已经对电场的分布造成了显著影响,水树快速生长,绝缘击穿场强降低,这与文献[3]的试验结论相符。

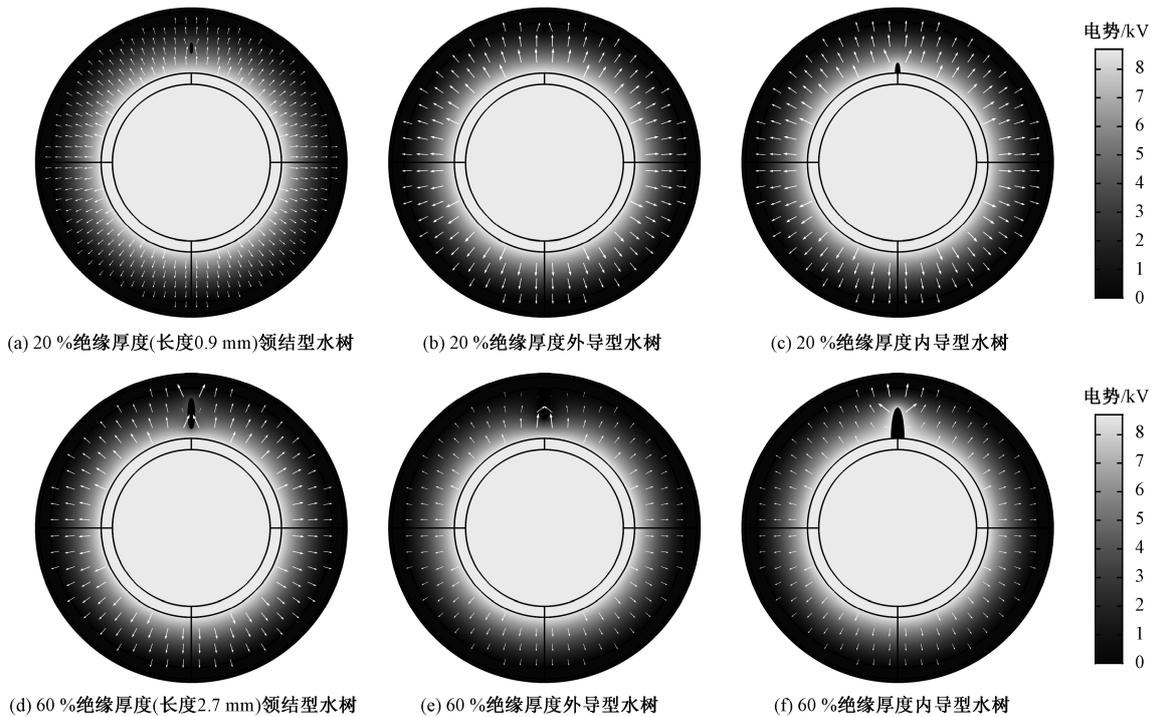


图6 不同类型和尺寸(长度0.9 mm和2.7 mm)水树缺陷下的电势和电场分布

Fig.6 Distribution of voltage and electric field under different types and sizes (length 0.9 mm and 2.7 mm) of water tree defects

通过改变水树尺寸刻画水树缺陷程度,获得电容随水树尺寸变化曲线如图7所示。随着水树尺寸的增长,三种类型水树的分布电容呈非线性增长,且增速逐渐加快。同一尺寸下,从内导型水树对分布电容的影响最大,领结型水树对分布电容的影响最小,表明内导型水树的危害性最大。正常电缆的分布电容 C_0 为286.71 pF,当水树发展到绝缘厚度20%时,领结型、外导型、内导型三种类型水树的分布电容分别增长为 $1.003C_0$ (287.47 pF)、 $1.004C_0$ (287.80 pF)、 $1.008C_0$ (288.96 pF);当水树发展到绝缘厚度60%时,三种类型水树的分布电容分别增长为 $1.029C_0$ (295.1 pF)、 $1.047C_0$ (300.3 pF)、 $1.074C_0$ (308 pF);可见水树尺寸与分布电容呈正相关,因此可以利用分布电容表征水树老化程度。

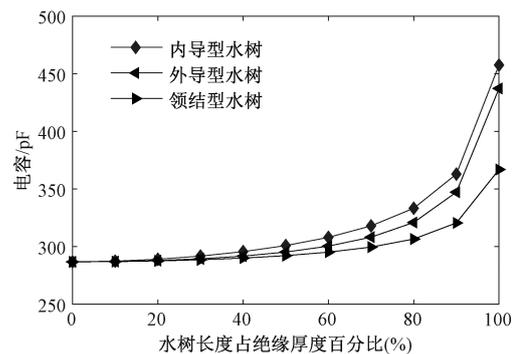


图7 水树缺陷对分布电容的影响

Fig.7 Impact of water tree on distributed capacitance

4 水树定位及诊断仿真研究

4.1 仿真设置与诊断结果

本文以10 kV XLPE 电力电缆为例进行水树诊断仿真实验,验证本文方法的有效性,仿真电缆结构

和尺寸如图 8 所示。单位电阻和电感分别通过式 (1) 和式 (2) 计算。电缆介质的复介电常数通过 Cole-Cole 模型描述,其表达式如式 (18) 所示^[23]。

$$\varepsilon^*(\omega) = \frac{A_1}{1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}} + \frac{A_2}{1 + (j\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} + \frac{\sigma_{dc}}{j\omega\varepsilon_0} + \varepsilon_\infty \quad (18)$$

式中, τ_1 和 τ_2 为弛豫时间; σ_{dc} 为直流电导率; A_1 和 A_2 为幅值系数; ε_∞ 为相对介电常数的高频分量; α_1 和 α_2 为弛豫峰的宽度。

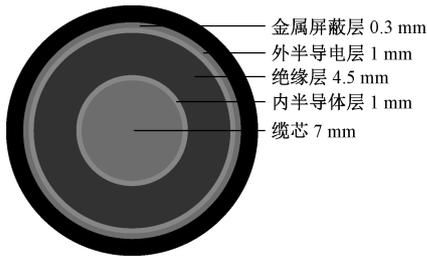


图 8 10 kV 电缆同轴结构

Fig.8 Coaxial structure of 10 kV voltage cable

文献[23]利用该模型对测量结果进行拟合,得到电缆各层介质复介电常数表达式,拟合结果如该文献中表 2 所示。将结果代入式(3)中即可得到电缆单位长度导纳。仿真中正常电缆的传播常数和特征阻抗分别通过式(5)、式(6)计算获得。

仿真中共设置了 7 个含有水树的电缆样本,仿真频带范围为 200 kHz ~ 80 MHz,具体参数设置如表 2 所示。其中,基于 3.2 节的研究结果,缺陷程度分别根据 20%绝缘厚度尺寸和 60%绝缘厚度尺寸下内导型水树的分布电容选取。诊断函数 $D(x)$ 通过式(17)计算。

表 2 电缆仿真样本设置

Tab.2 Simulation specimen of deficient cable

编号	电缆长度/m	缺陷位置/m	水树段长度/m	缺陷程度
1	100	40 ~ 40.05	0.05	1.008C _h
2	100	40~40.05	0.05	1.074C _h
3	100	70~70.05	0.05	1.008C _h
4	100	40~40.10	0.10	1.008C _h
5	50	20~20.05	0.05	1.008C _h
6	100	整体受潮	整体受潮	1.039C _h ^[24]
7	100	40 ~ 40.05 70 ~ 70.05	0.05	1.008C _h

7 个样本的仿真结果整理在图 9 中,首先所有样本中的水树都被准确定位,最大定位误差小于 0.1%,定位结果统计见表 3。其次因为样本 2 的水树老化程度较样本 1 更严重,所以在 40 m 处样本 2

的诊断峰值大于样本 1,说明诊断函数峰值与水树老化程度呈正相关。样本 3 与样本 1 相比仅改变了水树位置,然而两个样本在对应缺陷处的峰值几乎相等,说明诊断函数峰值几乎不受水树位置影响,也就是说除了电缆末端诊断盲区,电缆其余位置的水树都能被有效检测。样本 4 与样本 1 相比仅有水树区域长度不同,而在 40 m 处样本 4 的诊断函数峰值明显高于样本 1,说明诊断函数峰值受水树区域长度影响。样本 5 与样本 1 为两根长度不同的电缆,而两个样本在对应缺陷处的诊断函数峰值几乎相等,说明诊断函数峰值独立于待测电缆长度,即只改变待测电缆长度不会影响诊断结果,因此本文方法可以应用于长电缆的水树定位。样本 6 设置为整段电缆因长期受潮而导致水分侵入整段电缆,此时诊断函数峰值仅在电缆末端出现,但其余位置的值却会远大于 0,因此本文方法不仅可以诊断局部水树也可以诊断整体受潮。样本 7 为电缆中同时出现多处水树的例子,各处水树均被准确定位,此外样本 7 中两处水树与样本 1 和样本 3 中对应位置的诊断结果有略微差别,这是由 70 m 和 40 m 两处水树之间的相互折反射现象导致的,但比较两个样本的诊断结果可知,这种多次折反射现象对诊断结果的影响十分微弱,因此应用本文方法时可以忽略多处水树之间的折反射对诊断结果的相互影响。

表 3 水树诊断结果

Tab.3 Diagnose results of water trees

编号	电缆长度/m	缺陷位置/m	定位位置/m	缺陷程度	$D(x)$ 峰值	相对误差(%)
1	100	40~40.05	40.01	1.008C _h	1.231e4	0.025
2	100	40~40.05	40.01	1.074C _h	1.138e5	0.025
3	100	70~70.05	70	1.008C _h	1.238e4	0
4	100	40~40.10	40.01	1.008C _h	1.902e4	0.025
5	50	20~20.05	20.02	1.008C _h	1.245e4	0.1
6	100	整体受潮	—	1.039C _h	—	—
7	100	40~40.05 70~70.05	40.02 70.05	1.008C _h	1.232e4 1.270e4	0.05 0.071

4.2 负载类型的影响

在电缆末端开路的情况下,所提方法可取得较好的诊断效果,而针对实际应用时负载可能无法切断的情况,需要明确电缆负载类型对所提方法诊断结果的影响。对一根长度为 500 m 的电缆(水树设置在 200 m 处)进行仿真研究,其末端分别接入感性负载($Z_L = 10 + j5\omega$)和容性负载($Z_L = 5000 - j10/\omega$)时的诊断结果如图 10 所示。两种负载类型下水树

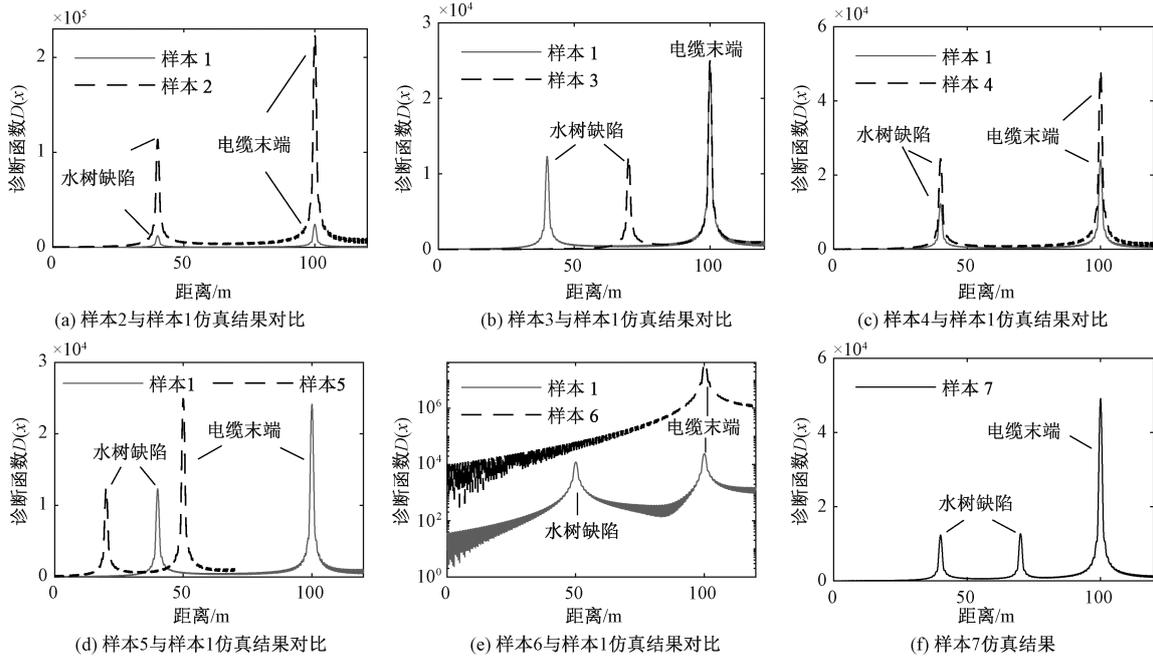


图9 水树诊断仿真结果

Fig.9 Simulation results of water tree diagnosis

缺陷均被准确定位,在感性负载下的诊断峰值为 3 192,在容性负载下的诊断峰值为 3 261,两次诊断效果几乎一致。因此,负载类型对所提方法的诊断结果影响可以忽略。

4.3 最佳测试频率范围

由式(15)可知,频率范围会影响诊断结果,接下来探究频率范围对诊断结果的影响机理,随后确定最佳测试频率范围选取方法。本文方法基于传输线理论,要求线路满足要求 $l > 0.1\lambda$,其中 l 为电缆长度, λ 为入射信号波长,其定义为:

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{19}$$

故测试频率的下限取值需满足:

$$f_{low} \geq \frac{v}{10l} \tag{20}$$

式中, v 为电缆波速,一般在 $1.5 \times 10^8 \sim 2.2 \times 10^8$ m/s 范围内,本文模型中 v 的计算值为 1.627×10^8 。

为探究频率上限对诊断结果的影响规律,对一根长度为 500 m 的电缆(水树设置在 200 m 处),改变测试频率的上限值 f_{up} ,获得诊断结果与测试频率上限 f_{up} 的关系如图 11 所示,每个测试频率范围内水树均被准确定位。定义峰值因数 $K^{[25]}$:

$$K = \frac{V_{Peak}}{V_{RMS}} \tag{21}$$

式中, V_{Peak} 为诊断函数 $D(x)$ 突峰值; V_{RMS} 为 $D(x)$ 有

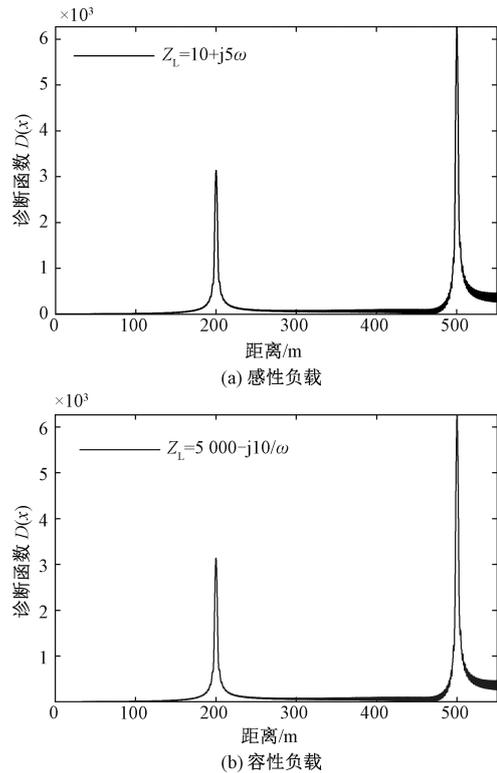


图10 不同负载类型下的诊断结果

Fig.10 Diagnosis results under different load types

效值。

峰值因数 K 刻画了诊断突峰的凸显程度,即 K 值越大,诊断突峰越容易被识别,诊断灵敏度越高,

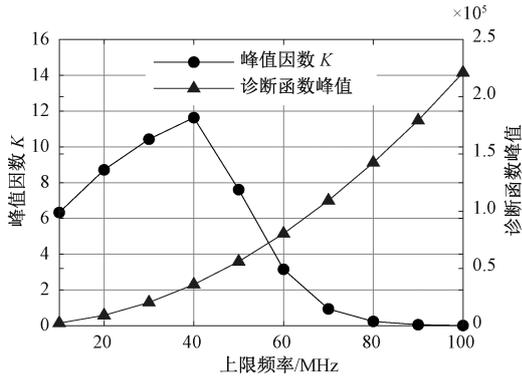


图 11 频率上限对诊断结果的影响

Fig.11 Influence of upper frequency on diagnosis results

诊断结果越直观。一般情况下由于电缆末端阻抗不匹配程度最高,诊断函数会在电缆末端处出现一个较大的突峰,并伴随着产生众多纹波。当 K 值趋近于 0 时,此时水树处的突变峰将被临近末端处的纹波淹没,电缆大部分区域成为诊断盲区。工程应用中,一方面希望诊断函数峰值尽可能大,这有利于减小背景干扰和提高水树突变峰的识别成功率。另一方面希望峰值因数 K 尽可能大,这有利于缩小诊断盲区和提升诊断直观性。然而从图 11 可以看出,随着频率上限的增加,虽然水树处诊断函数的峰值增加,但 K 值却在超过 40 MHz 后逐渐降低,甚至在 100 MHz 时趋近于 0,因此需要选取合适的测试频率才能获得最佳诊断效果。

上述现象是由反射系数谱随频率的衰减性造成的。图 12 显示了算例中反射系数谱随频率的变化关系,可见反射系数谱随频率的增加呈指数型衰减,当频率超过 40 MHz 后,其值几乎趋近于 0。积分变换法的定位本质是从出现水树前后反射系数谱的变化量中获取水树信息,由于过高频率下反射系数谱本身幅值很小,导致出现水树前后谱图变化量也非常小,因此该部分频谱对水树的敏感程度很低,也就是说超过某一阈值后的频率部分会对诊断结果起到削弱作用。综上所述,为保证本文方法的高效性,需避免使用反射系数幅值过小的部分,本文确定幅值的阈值为 0.01,则测试频率的上限 f_{up} 取值可由式 (22) 确定:

$$|\Gamma(0)| = e^{-2\alpha f_{up} l} \geq 0.01 \quad (22)$$

由于衰减系数 α 正比于频率,所以上限频率 f_{up} 随着电缆长度 l 增加而降低,6 km 电缆对应的 f_{up} 为 2.21 MHz。总的来说,测试频率范围会影响诊断结果,利用式 (21) ~ 式 (23) 确定的最佳测试频率范围

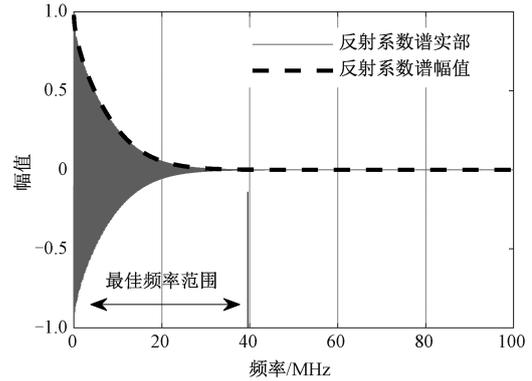


图 12 反射系数谱与频率的关系

Fig.12 Relationship between reflection coefficient spectrum and frequency

将获得最佳诊断效果,不需要较高测试频率以及对于长电缆所需测试频率进一步降低都是本文方法的优势。

4.4 待测电缆长度

尽管 4.1 节中已经说明了待测电缆长度不影响诊断结果,但由式 (21) ~ 式 (23) 可知,最佳测试频率范围与待测电缆长度有关,而测试频率范围会影响诊断结果。为探究待测电缆长度对诊断结果的间接影响,设置了一系列长度为 l 的电缆,并在电缆距首端 $l/2$ 处设置长度为 10 cm 的水树区域,且每根电缆均根据式 (21) ~ 式 (23) 采用最佳测试频率范围。测试诊断结果与待测电缆长度的关系如图 13 所示,可知诊断峰值随着待测电缆变长而降低,这是因为电缆变长后水树区域对首端反射系数谱的影响变小,使得诊断效果变差。当电缆长度达到 2.5 km 后轻度水树的峰值低于 10^3 ,考虑到环境干扰和测量误差,此时检测灵敏度较低,水树突峰无法有效识别。然而重度水树的峰值在 6 km 之前仍高于 10^3 ,可以有效识别。

综上所述,本方法最大有效检测电缆长度与水树缺陷情况有关,算例表明能够可靠定位 2.5 km 电缆中的轻度水树以及 6 km 电缆中的重度水树,两个算例对应的频率上限分别为 6.63 MHz 和 2.21 MHz。

4.5 电缆接头对诊断结果的影响

考虑到实际中电缆接头处的分布参数与本体不同,可能导致误诊的情况,需要有效区别诊断结果中的突变峰值是由接头还是水树缺陷导致的。文献 [24] 利用有限元方法获取了电缆接头处的分布参数,图 14 显示了含中间接头电缆的水树诊断仿真结果

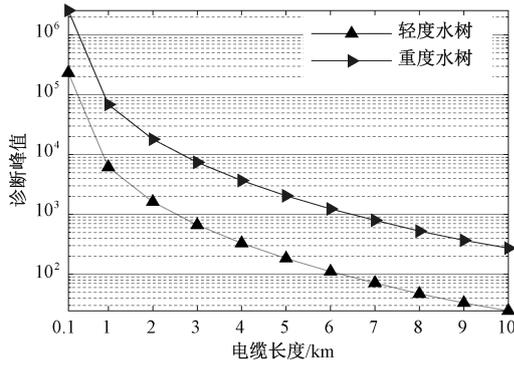


图 13 电缆长度对诊断结果的影响

Fig.13 Influence of cable length on diagnosis results

果,可见在接头位置均出现突峰,水树接头与正常接头突峰值有明显差异。由于本文方法诊断结果的突峰不随距首端距离变化而改变,所以正常电缆接头与水树缺陷相比其突峰位置和突峰幅值都具有稳定性。对于新建电缆线路,可以在投运前测量获取其原始特征数据 $F_h(x)$,后期检测结果与之对比即可。而对于在运电缆线路,则可以将测试结果与仿真结果进行对比,或者按以下步骤逐步排查:①对于初次测试的结果,观察结果中出现的多个突峰,将其中突峰值几乎相等的位置标记为电缆接头,并保留测试结果。②若存在突峰值特别高的位置可以认为存在严重水树,建议立即治理。③将当前测试结果与前一次测试结果对比,突峰新增或改变的位置则可以确诊为水树。由于水树的生长是一个缓慢的过程,且水树初期对电缆绝缘性能的影响很小,所以只要定期检测,就一定能及时发现电缆潜在危险,保证电网安全运行。

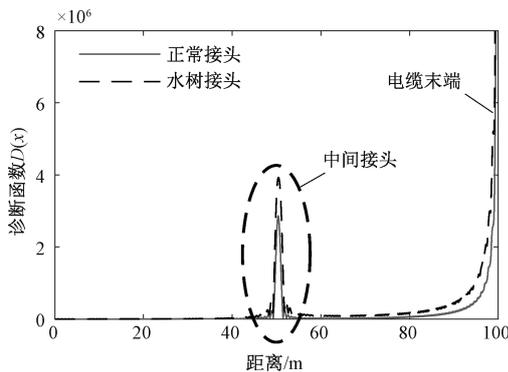


图 14 含中间接头电缆的水树诊断仿真结果

Fig.14 Water tree diagnosis simulation results of cables with middle joint

4.6 诊断灵敏度分析

本文方法对于不同情况的水树缺陷,其诊断效

果存在差异。为进一步探究该方法的诊断灵敏度,利用仿真模型,在一根 100 m 电缆距首端 40 m 处设置了一系列不同长度和老化程度的水树区域,采用最佳测试频带仿真。诊断灵敏度通过式(22)中峰值因数 K 表征量化。

仿真结果如图 15 所示,可以发现缺陷长度和缺陷程度均影响该方法诊断灵敏度,其中缺陷长度的影响更加显著。随着缺陷长度的增长,该方法的诊断灵敏度逐渐降低;当水树区域长度小于 1 m 时,随着水树程度的增加,其诊断灵敏度缓慢提升,而当水树区域长度大于 1 m 时,随着水树程度的增加,其诊断灵敏度缓慢降低。总的来说,对于区域长度小于 2 m 的缺陷,该方法具有良好诊断灵敏度。此外,根据图 9 中样本 6 的仿真结果可知,所提方法也可以诊断出电缆整段劣化缺陷。

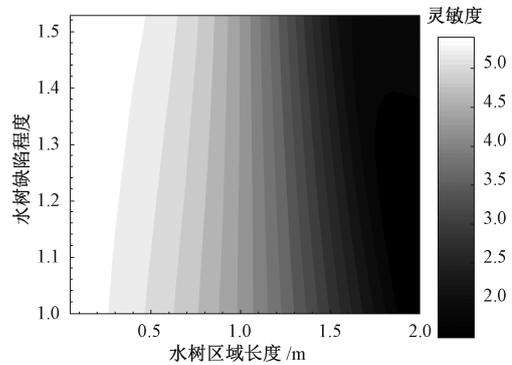


图 15 不同程度水树诊断灵敏度

Fig.15 Diagnosis sensitivity of different water tree condition

5 实验与讨论

5.1 诊断试验水树样本电缆制作及参数获取

为了验证本文所提出方法对水树诊断的有效性,在实验室利用水针电极法^[26]在一根 50 m 长的型号为 YJV 8.7/15-150 同轴电缆距一端 15 m 和 35 m 制作两处水树缺陷。首先制作 15 m 处水树并加压 240 h,随后制作 35 m 处水树再继续加压 240 h,即 35 m 处水树加压总时长为 480 h,15 m 处水树加压总时长为 240 h。所加电源电压 7.5 kV,频率 800 Hz。在进行加速水树老化试验之前利用网络分析仪(E5061B)测量了老化前电缆的首端反射系数和传播系数,获取积分变换所需的特征参量。在加速老化试验结束后用铜网覆盖其表面,测量老化后电缆首端反射系数谱,过程中以矢量网络分析仪接入端为电缆首端,同时保持测试电缆末端开路。利用式(21)~式(23)确定最佳频率范围为输入信

号源的频率范围为 0.4~120 MHz,测量频率点数为 1 000,图 16 为测量平台示意图。由于网络分析仪为 BNC 接口,需要对电缆终端进行预处理,以满足连接需求。制作一根长约 1.5 cm 的含 BNC 接头的电极,对应连接至电缆屏蔽层和电缆芯线。

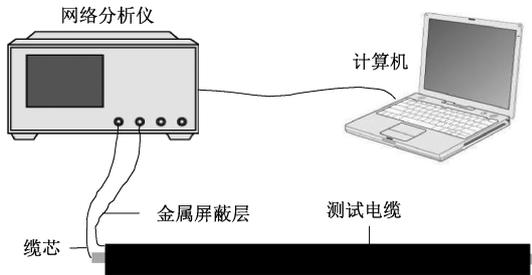


图 16 首端反射系数谱测量平台示意图

Fig.16 Schematic diagram of head end reflection coefficient measurement platform

5.2 诊断试验结果

将首端反射系数谱代入式(15)~式(17)获得诊断函数 $D(x)$ 。诊断结果如图 17 和表 4 所示,可以看到诊断函数 $D(x)$ 在 15.055 m 和 35.034 m 处出现两个明显峰值,两处缺陷均被准确定位。35.034 m 处的峰值大于 15.055 m 处,表明 35.034 m 处的老化程度高于 15.055 m 处,诊断结果与试验设定相符。

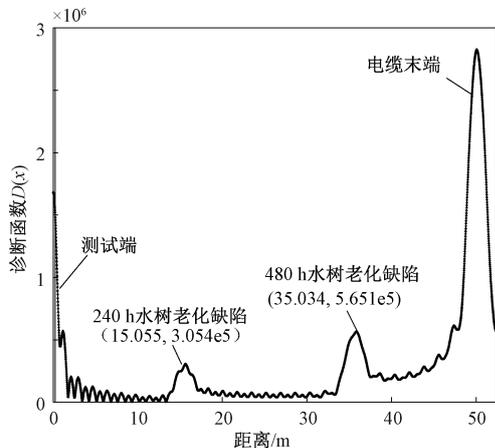


图 17 水树诊断试验结果

Fig.17 Diagnose experiment results of water trees

表 4 水树诊断试验结果

Tab.4 Diagnose experiment results of water trees

老化时间/h	缺陷位置/m	定位位置/m	$D(x)$ 峰值	相对误差(%)
240	15~15.20	15.055	3.054e5	0.37
480	35~35.20	35.034	5.651e5	0.24

由于电缆首端延长电极和末端开路造成的阻抗不匹配,在电缆首端和末端处均出现了一个“遮蔽区域”^[16],较文献中的测试结果该“遮蔽区域”有了较大改善。可见根据式(21)~式(23)采用最佳测试频带后可以大幅度削弱电缆端部的“遮蔽效应”,而工程应用中还可以通过特制测试转换端口,进一步降低首端阻抗不匹配带来的影响。

定位测试结束后将水树部分切片(0.2 mm),然后将薄片浸泡在亚甲基蓝溶液中 24 h,使水树充分染色,通过光学显微镜观察到如图 18 所示的典型水树形态。水树区域形似椭球,纵横比较低,加速老化 240 h 后长半轴 238 μm 、短半轴 149 μm ,加速老化 480 h 后发展至长半轴 675 μm 、短半轴 433 μm 。

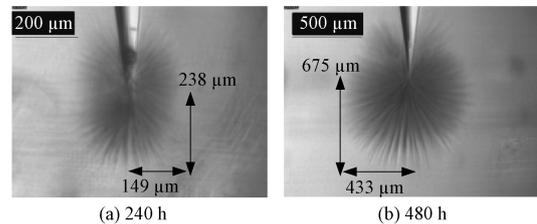


图 18 加速水树老化试验水树形态

Fig.18 Water tree shape by accelerated experiment

试验测试结果验证了本文方法的有效性,该方法不仅能够针对电缆中多处水树情况进行精确定位,定位误差小于 0.4%,而且诊断函数峰值与水树老化程度正相关,能够有效反映水树老化程度,可以作为水树缺陷程度表征量,为电缆线路的状态诊断提供有效信息。

6 结论

(1)本文提出了一种基于反射系数谱的水树定位方法,该方法以水树缺陷引起的电缆分布电容变化为特征量,利用广义正交法分析电缆首端反射系数谱,获取缺陷位置和状态信息,能够有效应用于同时存在多处水树缺陷情况的诊断。

(2)利用有限元法研究水树类型与尺寸对电缆分布电容的影响,发现水树使分布电容变大。相同尺寸下,领结型水树、外导型水树和内导型水树的分布电容依次增加,三种类型水树的分布电容均随着水树尺寸的增长呈非线性增长。

(3)通过仿真和实验验证了该方法对水树缺陷诊断的有效性和准确性,结果表明本文方法对于同时存在多处水树缺陷的电缆,不仅能够精确定位各水树位置,定位误差小于 0.4%,满足工程应用需

求,而且诊断函数 $D(x)$ 峰值与水树老化程度正相关,能够作为评估水树老化程度的新特征量。

(4)给出了应用该方法时最佳测试频率范围的选取方法,实验结果显示采用最佳频带可以有效削弱电缆终端阻抗不匹配造成的“遮蔽效应”。测试频率上限与电缆长度负相关,算例中 2.5 km 电缆所需频率上限仅为 6.63 MHz。与一般 FDR 法^[14]相比,获得良好定位效果所需的测试频率明显降低,对于长电缆的诊断具有明显优势。

参考文献 (References):

- [1] 林添堤,张成,刘皓,等 (Lin Tiandi, Zhang Cheng, Liu Hao, et al.). 基于等温松弛电流的 110 kV 电缆绝缘状态评估 (Insulation state evaluation of 110 kV cable based on isothermal relaxation current) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (4): 43-52.
- [2] 周凯,陈泽龙,尹游,等 (Zhou Kai, Chen Zelong, Yin You, et al.). XLPE 电缆水树老化及其诊断技术的研究进展 (Research progress in water tree ageing of XLPE cables and its diagnosis technologies) [J]. 绝缘材料 (Insulating Materials), 2019, 52 (2): 13-20.
- [3] Steennis E F, Kreuger F H. Water treeing in polyethylene cables [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25 (5): 989-1028.
- [4] Hernandez-Mejia J C, Harley R, Hampton N, et al. Characterization of ageing for MV power cables using low frequency $\tan\delta$ diagnostic measurements [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16 (3): 862-870.
- [5] Suzuki K, Tanaka Y, Takada T, et al. Correlation between space charge distribution and water-tree location in aged XLPE cable [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2001, 8 (1): 78-81.
- [6] Kurihara T, Okamoto T, Kim M H, et al. Measurement of residual charge using pulse voltages for water tree degraded XLPE cables diagnosis [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21 (1): 321-330.
- [7] 李陈,雷勇,周凯,等 (Li Chen, Lei Yong, Zhou Kai, et al.). 极化去极化电流技术用于诊断 XLPE 电缆绝缘老化状态 (Diagnosis of XLPE cable insulation using polarization and depolarization current measurements) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (4): 32-35, 66.
- [8] 高树国,刘贺晨,范辉,等 (Gao Shuguo, Liu Hechen, Fan Hui, et al.). 考虑波速特性的小波变换模极大值法的电力电缆局部放电定位研究 (PD location method of power cable based on wavelet transform modulus maxima considering wave characteristics) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (7): 2244-2250.
- [9] 谢敏,周凯,赵世林,等 (Xie Min, Zhou Kai, Zhao Shilin, et al.). 考虑相速度频变特性的改进互相关算法局部放电定位 (Research on partial discharge location using modified cross-correlation method considering frequency characteristic of phase velocity) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2018, 42 (5): 1661-1667.
- [10] Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables-an overview [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2001, 17 (1): 14-22.
- [11] 李华春,周作春,徐阳,等 (Li Huachun, Zhou Zuochun, Xu Yang, et al.). 交联电缆绝缘在线检测方法综述 (Overview of on-line detecting technology for XLPE cable) [J]. 绝缘材料 (Insulation Materials), 2008, (6): 59-62.
- [12] Song E, Shin Y-J, Stone P E, et al. Detection and location of multiple wiring faults via time-frequency-domain reflectometry [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51 (1): 131-138.
- [13] 陆跃 (Lu Yue). 基于频域反射法的泄漏电缆分布系统故障定位研究 (Localization of leaky coaxial cable distributed system faults by frequency domain reflectometry) [D]. 杭州: 浙江工业大学 (Hangzhou: Zhejiang University of Technology), 2019.
- [14] Ohki Y, Yamada T, Hirai N. Diagnosis of cable aging by broadband impedance spectroscopy [A]. 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena [C]. Cancun, Mexico, 2011. 24-27.
- [15] Hirai N, Yamada T, Ohki Y. Comparison of broadband impedance spectroscopy and time domain reflectometry for locating cable degradation [A]. 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis [C]. Bali, Indonesia, 2012. 229-232.
- [16] 谢敏,周凯,赵世林,等 (Xie Min, Zhou Kai, Zhao Shilin, et al.). 新型基于反射系数谱的电力电缆局部缺陷定位方法 (A new location method of local defects in power cables based on reflection coefficient spectrum) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (9): 3084-3089.
- [17] 俞容江,马炯,李家栓,等 (Yu Rongjiang, Ma Jiong, Li Jiashuan, et al.). 考虑电缆宽频特性的光伏电站谐振机理及抑制 (Resonance mechanism and sup-

- pression of photovoltaic plants considering wide-band frequency character) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (10): 47-54.
- [18] 邱关源 (Qiu Guanyuan). 电路 (Circuit) [M]. 北京: 高等教育出版社 (Beijing: Higher Education Press), 2006.
- [19] Lee S H, Park J B, Choi Y H. Measurement of load impedance in power cables using wavelet-transform based time-frequency domain reflectometry [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24 (9): 95008.
- [20] Papazyan R, Pettersson P, Edin H, et al. Extraction of high frequency power cable characteristics from S-parameter measurements [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2004, 11 (3): 461-470.
- [21] 金天雄, 黄兴溢, 江平开, 等 (Jin Tianxiong, Huang Xingyi, Jiang Pingkai, et al.). 用有限元法分析水树尺寸对电场分布的影响 (Influences of water tree dimensions on its internal electric field distributions based on FEM) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2008, 34 (3): 489-491, 564.
- [22] Mugala G, Eriksson R, Pettersson P. High frequency characteristics of water-tree degraded XLPE insulation in power cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14 (5): 1271-1277.
- [23] Mugala G, Eriksson R, Gafvert U, et al. Measurement technique for high frequency characterization of semiconducting materials in extruded cables [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2004, 11 (3): 471-480.
- [24] 李蓉, 周凯, 万航, 等 (Li Rong, Zhou Kai, Wan Hang, et al.). 基于频域反射法的 10 kV 配电电缆中间接头受潮定位 (Study on moisture location of cable joints in medium voltage distribution grid based on frequency domain reflection method) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2021, 45 (2): 825-832.
- [25] Kim C, Jin Z, Jiang P, et al. Investigation of dielectric behavior of thermally aged XLPE cable in the high-frequency range [J]. Polymer Testing, 2006, 25 (4): 553-561.
- [26] 郑晓泉, 王金锋, 李彦雄 (Zheng Xiaoquan, Wang Jinfeng, Li Yanxiong). 交联聚乙烯中水树枝向电树枝的转化 (Transformation of electrical tree from water tree degradation in XLPE) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 36 (22): 166-174.

Location of water tree in XLPE cable based on reflection coefficient spectrum

ZHOU Quan, WANG Xin-yuan, OUYANG Xi, JIANG Qian

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Water trees in underground cables can continue to grow for years without changing cable performance and eventually lead to unexpected insulation failures. In order to solve the shortcomings of the existing technology in the localization and diagnosis of cable water tree defects, a water tree location method based on reflection coefficient spectrum is proposed. Firstly, the analytical model of reflection coefficient spectrum of cable with water tree defect is constructed by transmission line theory. Then, the influence of water tree defect on reflection coefficient spectrum is analyzed, and the diagnosis function $D(x)$ is constructed based on the generalized orthogonal method to locate and assess the water tree. Then, the influence of multiple factors on the diagnosis results are analyzed by simulation experiments, the best test frequency range is selected, and the diagnosis sensitivity is analyzed. Finally, a 50 m long cable with two artificial water tree defects was tested in the laboratory. The simulation and experiment results verify the effectiveness and accuracy of proposed method. The method can precisely locate multiple water tree defects in the cable, and the relative error is less than 0.4%. Besides, peak value of $D(x)$ can be used as new characteristic quantity for water tree assessment.

Key words: water tree location; reflection coefficient spectrum; XLPE cable; distributed parameter