

引用格式:李松峰,谢书凝,张彬,等.基于切比雪夫窗的配电网电缆缺陷诊断优化研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):116-124.

Citation: LI Songfeng, XIE Shuning, ZHANG Bin, et al. Research on optimization of distribution cable defect diagnosis based on Chebyshev window [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 116-124.

基于切比雪夫窗的配电网电缆缺陷诊断优化研究

李松峰¹, 谢书凝², 张彬¹, 张周胜¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网福建省电力有限公司莆田供电公司, 福建 莆田 351100)

摘要: 电缆输入阻抗谱加窗傅里叶变换后主瓣宽度过大, 导致电缆末端附近缺陷定位“死区”过大。为解决该问题, 提出一种基于切比雪夫窗的配电网电缆缺陷定位改进方法。首先, 建立电缆分布参数模型, 结合电缆输入阻抗谱阐述局部缺陷定位原理; 然后, 通过海明窗、布莱克曼窗和切比雪夫窗对电缆输入阻抗谱加窗进行仿真研究, 对比分析各窗函数性能; 最后, 由电缆阻抗相位谱构造诊断函数并结合切比雪夫窗实现缺陷定位与缺陷类型识别。对长度为 100 m 的 10 kV XLPE 电缆进行仿真研究, 所得结果表明: 与直接对电缆阻抗谱加切比雪夫窗处理相比, 所提方法不仅能将距电缆首端 2 m 处缺陷定位相对误差由 0.467% 减小至 0.029%, 而且定位“死区”从距电缆末端 6 m 减小至 3 m, 同时能够根据缺陷处波形特征识别不同缺陷类型。

关键词: XLPE 电缆; 输入阻抗谱; 缺陷定位; 缺陷识别; 定位死区

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.013 **中图分类号:** TM755 **文章编号:** 1673-9140(2024)03-0116-09

Research on optimization of distribution cable defect diagnosis based on Chebyshev window

LI Songfeng¹, XIE Shuning², ZHANG Bin¹, ZHANG Zhousheng¹

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China; 2. Putian Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Putian 351100, China)

Abstract: Due to the excessive width of the main lobe after windowed Fourier transform of the cable input impedance spectrum, there is an excessive ‘dead zone’ in defect positioning near the cable end. To address this issue, an improved method for distribution cable defect positioning based on Chebyshev window is proposed in this paper. Firstly, a distributed parameter model of the cable is established, and the principle of local defect positioning is elaborated based on the cable input impedance spectrum. Subsequently, simulation studies are conducted on the cable input impedance spectrum using Hamming window, Blackman window, and Chebyshev window, comparing and analyzing the effectiveness of each window function. Finally, a diagnostic function is constructed from the cable impedance phase spectrum and combined with the Chebyshev window to achieve defect positioning and defect type identification. Simulation study on a 10 kV XLPE cable, 100 m in length, demonstrates that compared with the direct treatment of cable impedance spectrum with Chebyshev window, the proposed method not only significantly improves defect positioning accuracy: reducing the relative error of defect positioning from 0.467% to 0.029% at 2 m from the cable’s first end, but also shrinking the positioning ‘dead zone’ from 6 m to 3 m away from the cable’s end. Moreover, the proposed method can identify different types of defects according to the waveform characteristics.

Key words: XLPE cable; input impedance spectrum; defect positioning; defect identification; positioning dead zone

随着中国城镇化建设的推进, 电缆因其可靠性高、占地面积小、维护工作量少等优点被广泛用于城市电网中。然而, 在生产、运输和铺设过程中有

可能对电缆造成物理损坏, 并且电缆运行过程中, 由于受地下环境的影响, 电缆绝缘老化, 使得电缆产生局部缺陷^[1-7]。缺陷有可能出现在电缆的任何

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-05-10

基金项目: 上海市科学技术委员会项目(20020500800, 21DZ2205000)

通信作者: 张周胜(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力设备电气绝缘在线监测与故障诊断等研究; E-mail: shengzz@shiep.edu.cn

位置,若不能及时发现并处理,将可能导致电缆绝缘被击穿并发展成永久性故障,危害电网运行。因此,实现电力电缆全长度范围内缺陷位置可靠定位,对保障电网的安全运行具有重大意义。

时域反射法(time domain reflectometry, TDR)作为传统的电缆缺陷定位方法,在早期的电缆绝缘内部缺陷检测中被普遍使用^[8-9]。该方法操作简单并具有一定的抗干扰能力,但由于注入的脉冲信号在电缆中传输时的高衰减性,使得该方法的缺陷识别灵敏性较低。近年来,学者们基于频域反射法(frequency domain reflectometry, FDR)诊断电缆健康状态水平^[10-11],宽频阻抗谱和反射系数谱法都是基于FDR延伸出的电缆局部缺陷定位方法。宽频阻抗谱法通过在电缆一端注入正弦扫频信号,测量电缆首端输入阻抗谱^[12],并经过离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)后,可实现对电缆老化区域的检测。文献[13-14]通过仿真和实验研究表明,FDR比TDR缺陷识别更灵敏且定位精度更高,但由于该方法在DFT过程中,需要对信号加窗截断处理,会造成频率泄漏,从而导致缺陷识别灵敏度有所降低^[15]。通过加窗傅里叶变换对阻抗谱数据进行处理,可在一定程度上抑制频率泄漏,能够减小旁瓣幅值。该方法有效减小了电缆末端高旁瓣的干扰问题,提高了缺陷识别灵敏度,但同时加窗处理后,主瓣宽度也随之增大,更大的主瓣宽度导致电缆末端存在较大的缺陷定位“死区”^[16]。目前,诸多学者致力于探讨如何增大电缆缺陷识别灵敏度和定位精度^[17-23],但对如何减小加窗后电缆末端主瓣宽度变大对其附近缺陷处频率成分的影响以及实现缺陷类型识别还未做过多研究。

为此,阐述电缆缺陷识别与定位原理,对比分析各窗函数性能,明确切比雪夫窗用于电缆缺陷诊断的优势,基于电缆输入阻抗相位谱,构造诊断函数 $D(x)$ 并结合切比雪夫窗函数,提出一种电缆局部缺陷识别与定位的新方法。该方法可大大提高缺陷定位精度并有效解决电缆末端附近缺陷定位“死区”过大的问题,同时能够进行缺陷类型识别。通过在电缆各处设置局部缺陷的定位仿真研究,验证该方法的有效性。

1 电缆输入阻抗谱

当电缆长度较长或电缆中传输信号频率较高时,电缆不能再等效成集总电路,随频率变化而呈

现电感性或电容性,电缆被视为传输线。

在传输线理论中,电缆的分布参数等效电路如图1所示^[24],图中 Δx 为电缆的微小单元, R 、 L 分别为分布电阻和分布电感, C 、 G 分别称为分布电容和分布电导,其具体数值可由电缆实际组分材料、尺寸、结构等参数计算得到^[25]。

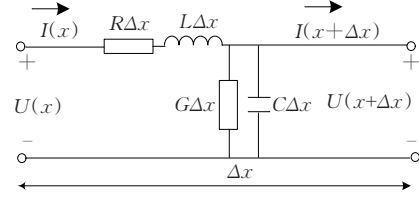


图1 电缆分布参数等效电路图

Figure 1 Equivalent circuit diagram of cable distribution parameters

对于总长度为 l 的电缆,距离电缆首端任意位置 x 处电压 $U(x)$ 和电流 $I(x)$ 表示为

$$U(x) = U^+ e^{\gamma(l-x)} + U^- e^{-\gamma(l-x)} \quad (1)$$

$$I(x) = 1/Z_0 (U^+ e^{\gamma(l-x)} - U^- e^{-\gamma(l-x)}) \quad (2)$$

式(1)、(2)中, U^+ 、 U^- 分别为入射电压波和反射电压波; γ 为传播常数; Z_0 为特征阻抗,其定义如下:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (3)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (4)$$

式(3)、(4)中, α 为衰减常数; β 为相位系数, β 可由信号频率 f 和信号在电缆中的传播速度 v 进一步表示如下:

$$\beta = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi f}{v} \quad (5)$$

结合式(1)、(2)可知,距电缆首端 x 处的输入阻抗可表示为

$$Z_x = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L e^{-2\gamma(l-x)}}{1 - \Gamma_L e^{-2\gamma(l-x)}} \quad (6)$$

式中, Γ_L 为电缆末端反射系数,当电缆负载阻抗为 Z_L 时, Γ_L 可表示为

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (7)$$

2 电缆缺陷定位原理

当电缆存在局部缺陷时,缺陷位置处分布参数会发生改变,结合式(3)、(4)可知,该处传播常数和特征阻抗发生相应变化,从而导致电缆的输入阻抗谱也会随之改变^[26]。图2为 $l_a \sim l_b$ 段存在局部缺陷的电缆模型。 γ_0 和 Z_0 分别为电缆正常状态的传播常数和特征阻抗; γ_d 和 Z_d 为电缆缺陷处的传播常数和

特征阻抗。

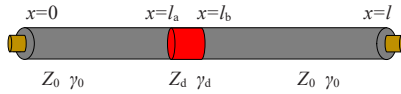


图2 含局部缺陷电缆示意图

Figure 2 Schematic diagram of cables with localized defects

电缆输入阻抗谱中包含了电缆缺陷的位置信息,因此,可考虑在获取到含缺陷电缆输入阻抗谱后,提取其缺陷位置信息来实现对电缆缺陷定位。

对于式(6),当 $x=0$ 时,电缆输入阻抗为首端阻抗。当电缆末端开路时,负载趋于无穷,反射系数 Γ_1 等于1。取 $r=e^{-2\alpha l}$, $\theta=-2\beta l$,结合式(3)和式(5)并将其用欧拉公式展开,求得电缆输入阻抗幅值为

$$|Z_i| = |Z_0| \sqrt{\frac{1 + r^2 + 2r \cos\left(2\pi \frac{2l}{v} f\right)}{1 + r^2 - 2r \cos\left(2\pi \frac{2l}{v} f\right)}} \quad (8)$$

由式(8)可知,电缆输入阻抗谱 $|Z_i|$ 是一个以 f 为自变量的周期性函数,其频率 f' 恰好为 $2l/v$,可以通过DFT处理输入阻抗谱来获取 f' (即空间位置谱)并确定电缆末端。当电缆中存在局部缺陷时,由于缺陷位置处与电缆本体阻抗不匹配,电缆阻抗谱幅值中会含有缺陷处的等效频率成分 $2l_i/v$ (假设缺陷位置为 l_i 处)。因此,通过DFT对输入阻抗处理,分别得到电缆末端和缺陷位置处的等效频率后,在电缆长度已知的前提下,缺陷处等效频率成分 $2l_i/v$ 和电缆末端等效频率成分 $2l/v$ 之比与电缆长度 l 相乘,所得结果即为缺陷位置。

事实上,除了将电缆阻抗幅值频谱作为指标来实现电缆缺陷定位,输入阻抗相位、实部和虚部等指标,都包含电缆缺陷处位置信息,同样也可用于电缆缺陷识别与定位。仿真设置长度为100 m的XLPE电缆,在距电缆首端5.0~5.5 m处设置电容与电缆本体偏差3.9%的容性缺陷,各个指标分别经DFT处理后得到的缺陷定位图谱如图3所示。可以看到,在电缆缺陷定位图谱中,相位和虚部相较于幅值和实部,其电缆首端附近处的数值更小,且在缺陷处有较为明显的突变峰值。这意味着使用阻抗谱相位或虚部来定位电缆首端附近缺陷,有更大的缺陷识别灵敏度,更有利于提高电缆首端附近缺陷的识别能力。为增强对电缆缺陷的识别能力,文中选取电缆阻抗相位谱来实现缺陷诊断。

缺陷出现早期往往较为微弱,这使得定位图谱中缺陷处等效频率成分幅值较小且由于DFT对信

号非整周期截断会造成频率泄漏,导致电缆末端高旁瓣幅值干扰甚至淹没缺陷处等效频率成分的识别。鉴于此,为抑制频率泄漏,需要对输入阻抗加窗处理。

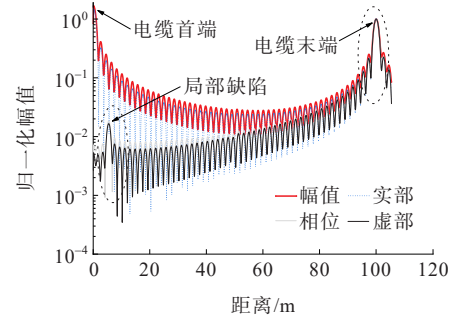


图3 输入阻抗DFT定位图谱

Figure 3 DFT positioning spectrum of input impedance

3 含缺陷电缆阻抗谱加窗定位

3.1 切比雪夫窗

切比雪夫窗为局部优化的时窗函数,其旁瓣具有等波动性,且主瓣宽度和旁瓣衰减可通过形状参数灵活调节,窗函数性能较好。契比雪夫窗是通过切比雪夫多项式在单位圆上 N 点等间隔抽样,然后进行DFT处理后得到的。通过对输入阻抗谱加切比雪夫窗处理可减小频率泄漏,对应的切比雪夫窗函数阻抗谱和空间位置谱^[27]分别表示为

$$w_c(n) = \frac{\sum_{m=-M}^M W_c(m) \cos\left(\frac{2\pi}{N} mn\right)}{\sum_{m=-M}^M W_c(m)} \quad (9)$$

$$W_c(m) = R_p \cos\left(M \cdot \arccos\left(\frac{2\cos\left(\frac{2\pi m}{N}\right) - \cos(2\pi\Delta F) + 1}{\cos(2\pi\Delta F) + 1}\right)\right) \quad (10)$$

式(9)、(10)中, $w_c(n)$ 为窗函数阻抗谱; $W_c(m)$ 为 $w_c(n)$ 经过DFT后得到的窗函数空间位置谱; N 为窗长度且满足 $|n| \leq M$, $N=2M+1$; R_p 为窗函数形状调节参数; ΔF 为中间变量且与 R_p 具有以下关系:

$$\Delta F = \frac{1}{\pi} \arccos\left(1 / \cosh\left(\frac{\cosh\left(\frac{1+R_p}{R_p}\right)}{N-1}\right)\right) \quad (11)$$

图4给出了固定窗口长度($N=128$)下,切比雪夫窗形状调节参数不同取值时的空间位置谱。形状调节参数取值为 $R_p=0.4572$ 和 $R_p=0.3512$,此时二者的旁瓣峰值分别为 -100 dB和 -200 dB。

由图 4 可知,切比雪夫窗函数的旁瓣具有等波动性,因此相同旁瓣衰减下,其主瓣宽度最小,相同主瓣宽度下,其旁瓣衰减最大。大的旁瓣衰减有利于提高电缆缺陷识别灵敏度,而小的主瓣宽度能提高频率分辨率,减小电缆末端频率成分干扰所带来的缺陷定位“死区”。同时通过改变形状调节参数 R_p 的大小可以调整窗函数主瓣宽度和旁瓣衰减,使得该窗函数更具灵活性。

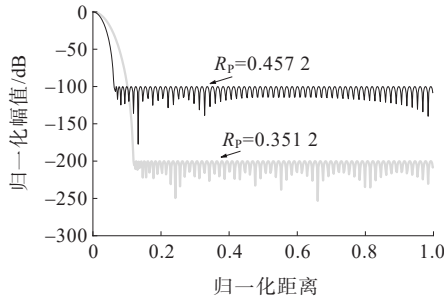


图 4 不同形状调节参数下切比雪夫窗的空间位置谱
Figure 4 Spatial position spectrum of Chebyshev window with different shape adjustment parameters

在实际工程中,可以通过选择合适的形状调节参数,以满足不同的现场情况。因此,选择将切比雪夫窗应用于电缆缺陷识别更有优势。

3.2 电缆缺陷定位图谱加窗前后对比分析

为验证切比雪夫窗对电缆阻抗相位谱加窗处理后的定位效果,分别采用海明窗、布莱克曼窗和切比雪夫窗对电缆阻抗谱信号加窗处理。仿真设置频率为 100 kHz~50 MHz,电缆长度为 100 m,在距电缆首端 50.00~50.05 m 和 85.00~85.05 m 处设置 2 处局部缺陷,缺陷位置处的电容设置为电缆本体的 1.02 倍。将阻抗相位谱经各窗函数加窗处理后,在全频率范围的所有数据点进行离散傅里叶变换,得到切比雪夫窗旁瓣衰减为 -120 dB 时,各窗函数加窗处理后的缺陷定位结果如图 5 所示。

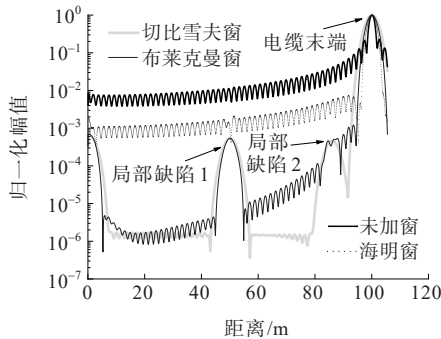


图 5 加窗处理后缺陷定位结果
Figure 5 Defect positioning results after window treatment

从图 5 中的加窗缺陷定位结果可以看出,海明窗由于高旁瓣的影响,无法识别出 2 处微弱缺陷信息,因此不适合用于电缆阻抗谱加窗处理。布莱克曼窗具有距离主瓣越远其旁瓣衰减越大的特性,能够有效识别出 50 m 处局部缺陷,缺陷识别能力远远强于海明窗,但由于其距离电缆末端附近的旁瓣幅度很大,会严重干扰电缆末端附近缺陷处的频率成分,从而导致 85 m 处缺陷识别效果并不理想。相比之下,加切比雪夫窗处理后得到的缺陷定位曲线,能有效识别 2 处缺陷,即使对于电缆末端附近缺陷,仍保持很高的识别灵敏度,非常有利于电缆缺陷的定位。

根据以上电缆阻抗相位谱加窗后的缺陷定位对比分析,相比其他窗函数,切比雪夫窗用于电缆缺陷定位效果更好。同时从图 5 中观察到,由于 85 m 处缺陷距电缆末端较近,其主瓣受到了电缆末端频率成分的影响,并且缺陷位置距电缆末端越近,缺陷处频率成分受末端主瓣影响越大,如果电缆中的缺陷位置距末端过近,则无法识别出缺陷信息。

4 构造诊断函数优化缺陷诊断效果

4.1 加窗缺陷诊断函数 $D_{\text{chebwin}}(x)$

考虑增大缺陷识别灵敏度,即增大窗函数旁瓣衰减,会使其主瓣宽度变大。当主瓣宽度达到一定程度后,导致电缆缺陷定位图谱无法识别出电缆末端附近缺陷,此时将出现缺陷识别“死区”。为增大对缺陷的识别能力和减小定位死区,定义缺陷定位诊断函数如下:

$$D(x) = A_{\text{angle}}(zd) - A_{\text{angle}}(zl) \quad (12)$$

式中, $A_{\text{angle}}(zd)$ 、 $A_{\text{angle}}(zl)$ 分别为含缺陷电缆和相同长度健康电缆的首端输入阻抗相位。

图 6 为缺陷电缆阻抗相位图谱和诊断函数曲线,后者依然具有周期性且与缺陷电缆阻抗谱周期保持一致。

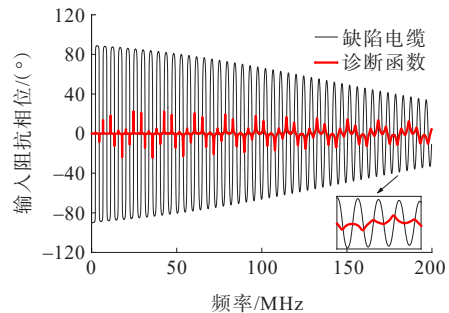


图 6 电缆输入阻抗相位谱图
Figure 6 Phase spectrum of cable input impedance

为探究诊断函数对电缆末端附近缺陷识别效果,在距电缆首端 50.0~50.1 m 和 94.00~94.05 m 处分别设置 2 处缺陷,缺陷位置电容为电缆本体的 1.039 倍,测试频率为 100 kHz~50 MHz,得到电缆输入阻抗并直接经 DFT 处理后,得到诊断函数未加窗缺陷定位图谱如图 7 所示。

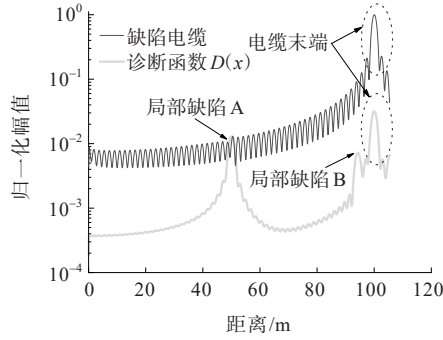


图 7 $D(x)$ 未加窗缺陷定位结果

Figure 7 $D(x)$ defect positioning results without windows

根据图 7 中 2 条曲线对比分析表明,通过构造诊断函数,其定位效果得到显著改善。一方面,与未加窗缺陷电缆定位曲线因旁瓣幅值过大无法识别出缺陷处频率成分相比,诊断函数曲线在缺陷位置处有较明显的峰值;另一方面,诊断函数缺陷定位曲线末端和缺陷处幅值差有所减小,可结合切比雪夫窗进一步优化缺陷定位效果。

对 $D(x)$ 加契比雪夫窗处理,得到加窗缺陷定位诊断函数 $D_{\text{chebwin}}(x)$:

$$D_{\text{chebwin}}(x) = D(x) \cdot C_{\text{chebwin}}(N, \beta) \quad (13)$$

式中, $D(x)$ 为诊断函数; N 为窗口长度; $C_{\text{chebwin}}(N, \beta)$ 为窗口长度为 N , 旁瓣衰减为 β 的切比雪夫窗函数。

图 8 为未加窗电缆输入阻抗谱、直接加切比雪夫窗和构造诊断函数加切比雪夫窗处理后,经 DFT 变换得到的缺陷定位图谱。此时,仅对输入阻抗谱加切比雪夫窗处理,94 m 处缺陷已经不能被识别出来,而反观诊断函数结合契比雪夫窗处理后,在该处存在明显的峰值点,这表明该方法对电缆末端附近缺陷依旧保持有效识别。

为比较直接加切比雪夫窗和构造诊断函数后加切比雪夫窗分别对电缆局部缺陷定位精度和定位范围的影响,在电缆首末两端附近分别设置多处缺陷,缺陷设置情况、定位结果和相对误差如表 1 所示。定位相对误差 ϵ_r 计算如下:

$$\epsilon_r = \left| \frac{100 \cdot (P_{\text{cal}} - P_{\text{act}})}{L} \right| \times 100\% \quad (14)$$

式中, P_{act} 为缺陷实际位置; P_{cal} 为定位位置。

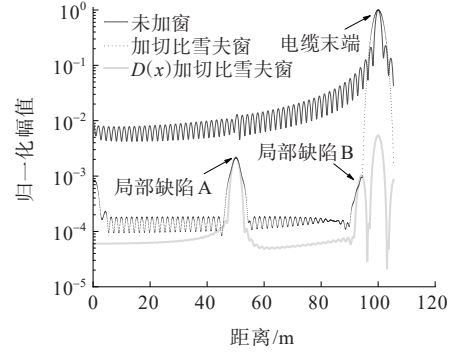


图 8 $D(x)$ 加窗缺陷定位结果

Figure 8 $D(x)$ defect positioning results with windows

表 1 各位置缺陷定位结果

Table 1 Defect positioning results at each position

情形	加切比雪夫窗位置/m	定位相对误差/%	$D(x)$ 加切比雪夫窗位置/m	定位相对误差/%
1	实际位置	1.000	1.000	0.097
	定位结果	1.316	1.097	0.097
2	实际位置	2.000	2.000	0.029
	定位结果	2.467	2.029	0.029
3	实际位置	93.000	93.000	0.127
	定位结果	92.434	92.873	0.127
4	实际位置	94.000	94.000	0.024
	定位结果	—	94.024	0.024
5	实际位置	96.000	96.000	0.057
	定位结果	—	95.943	0.057
6	实际位置	97.000	97.000	—
	定位结果	—	—	—

可以看到,通过构造诊断函数定位缺陷,不仅提高了缺陷定位精度,而且增大了缺陷识别范围。表 1 中前 3 处缺陷定位相对误差分别由 0.316%、0.467% 和 0.536% 减小至 0.097%、0.029% 和 0.127%。从距电缆首端 94 m (距末端 6 m) 处起,只加契比雪夫窗处理已经无法识别出缺陷,而构建诊断函数后与契比雪夫窗联合的缺陷诊断方法,直到从距首端 97 m (距末端 3 m) 时才出现定位“死区”,定位范围扩大了 3 m。

为进一步研究该方法对长电缆缺陷诊断的适用性,对长度为 1 000 m 的 XLPE 电缆,分别在距其首端 500 m 和 970 m 处设置 2 处缺陷,测试频率为 100 kHz~10 MHz,得到的缺陷定位结果如图 9 所示。显然,构造诊断函数并加切比雪夫窗的处理方法对 2 处缺陷定位效果都很好,这表明文中提出的电缆缺陷定位优化方法也适用于更长的电缆。

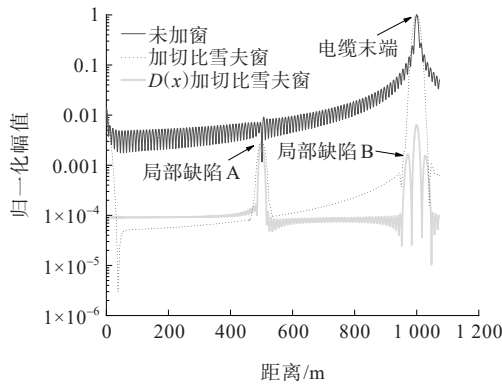


图 9 1 000 m XLPE 电缆缺陷定位结果

Figure 9 Defect positioning results of a 1 000 m XLPE cable

4.2 缺陷类型识别

根据缺陷出现后电缆分布参数的变化,电缆局部缺陷可分为容性缺陷和感性缺陷,分别指缺陷处电容与电缆本体相比变大、变小而造成阻抗不匹配的缺陷类型,文献[28]能对电缆中整体缺陷类型进

行评估,但无法判断电缆中具体某处缺陷类型。按缺陷范围进行划分,文献[29]将电缆缺陷分为集中性缺陷和区间性绝缘老化缺陷。

基于输入阻抗谱,提取加窗缺陷诊断函数的幅值信息可以确定电缆中阻抗不连续点的位置,但无法识别缺陷类型,幅值这一参量只能反映电缆的部分状态信息,没有考虑正负极性问题。因此,为获得更全面的信息,考虑对诊断函数加窗处理并进行傅里叶变换后,将所得复数结果的虚部作为指标来实现缺陷类型的识别。图 10 为在距电缆末端 50、80 m 处分别设置不同类型的局部缺陷得到的缺陷类型识别图谱。

从图 10 可知,在缺陷类型识别图谱中,不同的缺陷类型表现出的波形特征也不相同,一共包括 4 种缺陷类型组合,即容性集中和区间缺陷,感性集中和区间缺陷,根据缺陷处波形特征建立如表 2 所示缺陷类型识别判据。

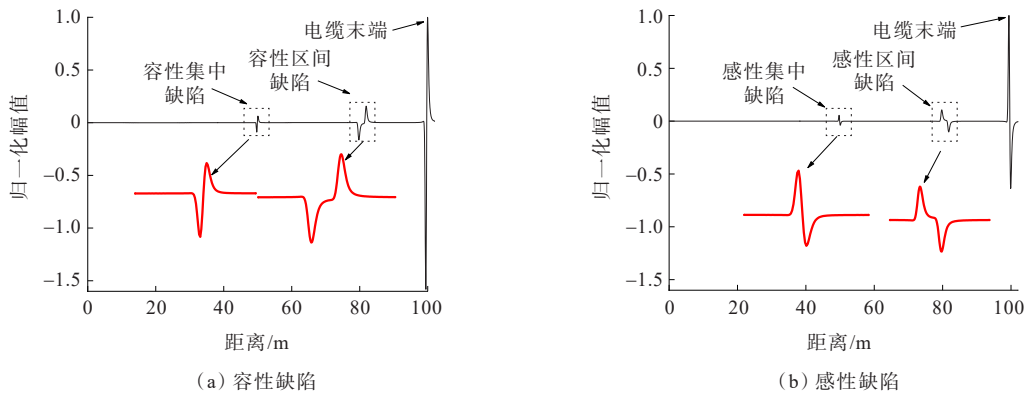


图 10 不同缺陷类型识别图谱

Figure 10 Identification spectrums of different defect types

表 2 电缆缺陷类型识别判据

Table 2 Identification criteria of cable defect types

缺陷性质	缺陷类型	缺陷波形	波形特征描述
容性	集中缺陷		先负向峰值,后正向峰值,且两峰值点直线相连
	区间缺陷		先负向峰值,后正向峰值,且两峰值点曲线相连
感性	集中缺陷		先正向峰值,后负向峰值,且两峰值点直线相连
	区间缺陷		先正向峰值,后负向峰值,且两峰值点曲线相连

4.3 讨论与分析

文中诊断函数末端频率成分幅值不仅和电缆缺陷严重程度有关还与缺陷类型有关。健康电缆

诊断函数末端频率成分幅值趋于零,当电缆存在多处缺陷时,极性相同的缺陷在电缆末端产生的频率幅值会正向叠加,即表现为末端幅值增大,极性相反的缺陷在末端产生的幅值互相“中和”,使得电缆末端的幅值变小。特别地,当电缆中存在的容性和感性缺陷程度相同时,末端幅值处于最小值且数值为零。

表 3 给出了电缆中含不同缺陷程度和缺陷类型对 $D_{\text{chebwin}}(x)$ 末端幅值的影响结果,图 11 为表 3 中情形 1~3 的缺陷诊断曲线, C_d 、 C_n 分别为完好和局部缺陷段电缆的单位电容,当距电缆首端 50、80 m 处存在严重程度相同但极性相反的 2 处缺陷,将幅值按归一化处理,末端幅值为 0.000 4,此时可认为没有末端频率成分干扰,电缆定位“死区”达到最小。遗憾的是,正是因为末端幅值和缺陷严重程度与缺陷类型都有关,因此无法根据末端幅值来评估

电缆健康状态。

表3 缺陷程度和类型对 $D_{\text{chebwin}}(x)$ 末端幅值影响

Table 3 Effects of defect severity and type on $D_{\text{chebwin}}(x)$ end amplitude

情形	局部缺陷1		局部缺陷2		末端幅值
	C_d/C_n	缺陷幅值	C_d/C_n	缺陷幅值	
1	0.975 0	0.307 3	—	—	0.496 7
2	0.975 0	0.305 2	0.975 0	0.278 4	1.000 0
3	0.975 0	0.313 9	1.025 0	0.004 2	0.000 4

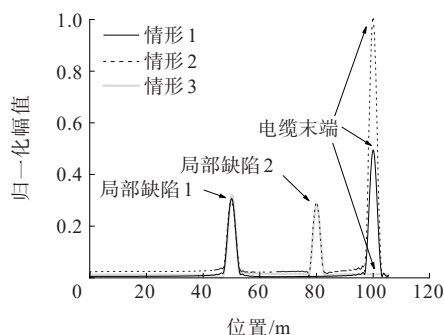


图11 局部缺陷诊断曲线

Figure 11 Localized defect diagnosis curve

值得指出的是,由于末端幅值受缺陷的影响,若电缆中缺陷程度在末端正向叠加形成的幅值很大,其旁瓣同样会“淹没”末端附近缺陷频率成分,此时不利于电缆末端附近缺陷的定位。因此,该方法虽对电缆中间段缺陷有很好的识别效果,但将其用于电缆末端附近缺陷的识别时,当存在多处缺陷且所有缺陷在末端叠加的幅值很大时,同样会对末端附近缺陷产生很大干扰。

构造诊断函数并结合切比雪夫窗的缺陷定位方法可提高缺陷识别范围和定位精度,能有效减小电缆末端附近缺陷定位“死区”。同样需要说明的是,该方法需要使用健康电缆的原始数据进行数据处理^[30],可在电缆投入使用之前测量其阻抗谱数据并建立相应数据库,对于三芯及多芯电缆,在实际工况中,可尝试用健康相阻抗谱作为被测相原始数据。

5 结语

针对现有方法对电缆末端附近缺陷诊断的低灵敏性问题,基于电缆输入阻抗谱,提出了一种由诊断函数 $D(x)$ 和切比雪夫窗相结合的电缆缺陷识别与定位方法。通过对10 kV XLPE电缆进行缺陷诊断仿真研究,得出以下结论。

1) 该方法能实现电缆中微弱缺陷的有效识别

和高精度定位,定位相对误差小于0.127%,并且适用于同时出现多处缺陷的情况。

2) 文中所提方法提高了缺陷识别能力,能增大电缆末端附近缺陷定位范围,与直接对阻抗谱加契比雪夫窗的定位方法相比,其电缆末端定位“死区”由距末端6 m减小至3 m。

3) 针对不同的局部缺陷类型,提出了缺陷类型识别判据,能根据缺陷处的波形特征识别容性和感性以及集中性和区间性缺陷。

4) 文中诊断函数的末端幅值不仅与缺陷严重程度有关,而且也和缺陷类型有关。特别地,当电缆中容性和感性缺陷程度相同时,其末端幅值处于最小值且数值为零,但无法根据末端幅值来评估电缆健康状态。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张丹丹,苏小婷,景晓东,等.基于阻抗谱的同轴电缆故障及中间接头定位实验研究[J].高压电器,2021,57(7):92-97+104.
ZHANG Dandan, SU Xiaoting, JING Xiaodong, et al. Experimental study on coaxial cable faults and intermediate joints location based on impedance spectrum[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 92-97+104.
- [2] 贾科,施志明,张旸,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.
- [3] 王雪芹,张大海,李猛,等.基于小波能量谱和SSA-GRU的混合直流输电系统故障测距方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(12):14-24.
WANG Xueqin, ZHANG Dahai, LI Meng, et al. Fault location method for a hybrid DC transmission system based on wavelet energy spectrum and SSA-GRU[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 14-24.
- [4] 朱家宁,张诗钊,葛维春,等.海上风电外送及电能输送技术综述[J].发电技术,2022,43(2):236-248.

- ZHU Jianing, ZHANG Shitan, GE Weichun, et al. Overview of offshore wind power transmission and power transportation technology[J]. *Power Generation Technology*,2022,43(2):236-248.
- [5] 冯寅,贾宏涛,杨震强,等.基于CNN-LSTM的输电线路故障诊断方法研究[J]. *电网与清洁能源*,2023,39(11):59-65.
- FENG Yin, JIA Hongtao, YANG Zhenqiang, et al. A study on the transmission line fault diagnosis method based on CNN-LSTM[J]. *Power System and Clean Energy*,2023,39(11):59-65.
- [6] 赵书静,詹博博,龚梁涛,王伟,李成榕,孟晓凯.基于调频连续波相位敏感特性的电缆局部缺陷检测方法[J]. *电工技术学报*,2023,38(11):3009-3021.
- ZHAO Shujing, ZHAN Bobo, GONG Liangtao, et al. Research on cable local defect detection method based on phase-sensitive characteristics of frequency modulated continuous wave[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2023,38(11):3009-3021.
- [7] 纪晓妍,方春华,游海鑫.基于多元非线性回归模型的220 kV电缆油终端缺陷场强预测[J]. *智慧电力*,2023,51(8):96-103.
- JI Xiaoyan, FANG Chunhua, YOU Haixin. Field strength prediction of 220 kV cable oil terminal defects based on multivariate nonlinear regression model[J]. *Smart Power*, 2023,51(8):96-103.
- [8] 苑吉河,杨阳,张曦,等.基于材料和电场分布的不同电缆缺陷的震荡波表征效果研究[J]. *电力科学与技术学报*,2020,35(4):42-48.
- YUAN Jihe, YANG Yang, ZHANG Xi, et al. Detective effect of oscillation on different defects of cable from the perspective of materials and electric field[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(4): 42-48.
- [9] 张俊民,周小猛,魏娟,等.基于小波变换的导线绝缘故障定位方法[J]. *电工技术学报*,2012,27(5):99-104.
- ZHANG Junmin, ZHOU Xiaomeng, WEI Juan, et al. Method of wire insulation fault location based on wavelet transform[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2012,27(5):99-104.
- [10] ZHOU Z Q, ZHANG D D, HE J J, et al. Local degradation diagnosis for cable insulation based on broadband impedance spectroscopy[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(4): 2097-2107.
- [11] 饶显杰,徐忠林,陈勃,等.基于频域反射的电缆缺陷定位优化方法[J]. *电网技术*,2022,46(9):3681-3689.
- RAO Xianjie, XU Zhonglin, CHEN Bo, et al. Cable defect location optimization based on frequency domain reflection[J]. *Power System Technology*,2022,46(9):3681-3689.
- [12] 张丹丹,苏小婷,景晓东,等.基于阻抗谱的同轴电缆故障及中间接头定位实验研究[J]. *高压电器*,2021,57(7):92-97+104.
- ZHANG Dandan, SU Xiaoting, JING Xiaodong, et al. Experimental study on coaxial cable faults and intermediate joints location based on impedance spectrum[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(7): 92-97+104.
- [13] 李蓉,周凯,万航,等.基于频域反射法的10 kV配电网中接头受潮定位[J]. *电网技术*,2021,45(2):825-832.
- LI Rong, ZHOU Kai, WAN Hang, et al. Moisture location of 10 kV cable joints in medium voltage distribution grid based on frequency domain reflection[J]. *Power System Technology*,2021,45(2):825-832.
- [14] 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.
- XIE Min, ZHOU Kai, ZHAO Shilin, et al. A new location method of local defects in power cables based on reflection coefficient spectrum[J]. *Power System Technology*,2017,41(9):3083-3089.
- [15] 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.
- [16] 李蓉,周凯,饶显杰,等.配电网电缆本体受潮缺陷定位及受潮特性分析[J]. *中国电机工程学报*,2022,42(9):3470-3480.
- LI Rong, ZHOU Kai, RAO Xianjie, et al. Localization of damp defects and analysis of moisture characteristics for cable body in the distribution grid[J]. *Proceedings of the CSEE*,2022,42(9):3470-3480.
- [17] PAN W X, LI X R, ZHU Z D, et al. Detection sensitivity of input impedance to local defects in long cables[J]. *IEEE Access*,2020,8:55702-55710.
- [18] 罗杨茜玥.基于阻抗频域信息的电缆接头内部缺陷评估方法[D].重庆:重庆大学,2018.
- LUOYANG Xiyue. Evaluation of cable joint internal faults based on impedance information in the frequency domain[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [19] 徐兴全,桂媛,姚玉海,等.基于Nuttall自卷积窗的10 kV配电网中接头定位改进方法[J]. *中国电力*,2021,54(4):26-32.
- XU Xingquan, GUI Yuan, YAO Yuhai, et al. An improved location method of 10 kV cable joints based on Nuttall self-convolution window[J]. *Electric Power*, 2021, 54(4): 26-32.
- [20] 杨喜行,黄纯,申亚涛,等.基于损失功率匹配的配电网线路故障定位方法[J]. *中国电力*,2022,55(8):113-120.

- YANG Xihang, HUANG Chun, SHEN Yatao, et al. Fault location method for distribution lines based on loss power matching[J]. *Electric Power*, 2022, 55(8):113-120.
- [21] 段玉兵, 姚金霞, 马国庆, 等. 基于顶棚温度分布的变电站高压电缆沟道着火点辨识[J]. *高压电器*, 2023, 59(3):171-178.
- DUAN Yubing, YAO Jinxia, MA Guoqing, et al. Identification of ignition point of high voltage cable channel in substation based on ceiling temperature distribution[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(3):171-178.
- [22] 秦剑华, 刘洋, 杨景刚, 等. 电力电缆局放及温度的多维检测研究方法研究[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(3):92-96.
- QIN Jianhua, LIU Yang, YANG Jinggang, et al. Research on multi-dimensional detection method of partial discharge and temperature of power cable[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(3):92-96.
- [23] 李浩, 解超, 周伟绩, 等. 采用分相重合方式的风电送出线路自适应重合闸策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(5):94-107.
- LI Hao, XIE Chao, ZHOU Weiji, et al. Adaptive reclosing scheme for wind power outgoing line using partial-phase reclosing[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(5):94-107.
- [24] 齐磊, 崔翔, 卢铁兵, 等. 屏蔽电缆的分布参数测量及瞬态分析[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(6):119-123.
- QI Lei, CUI Xiang, LU Tiebing, et al. Measurement of distributed parameters and transient analysis of shielded cable[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(6):119-123.
- [25] PCJM W V D. On-line detection and location of partial discharges in medium-voltage power cables[J]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2005
- [26] 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.
- [27] 田文博, 余健明, 马小津, 等. Dolph-Chebyshev窗插值FFT的谐波参数估计[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2014, 26(2):50-54.
- TIAN Wenbo, YU Jianming, MA Xiaojin, et al. Estimation of harmonics parameters base on dolph-chebyshev window interpolation FFT algorithm[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2014, 26(2):50-54.
- [28] 李蓉, 周凯, 万航, 等. 基于输入阻抗谱的电力电缆本体局部缺陷类型识别及定位[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(8):1743-1751.
- LI Rong, ZHOU Kai, WAN Hang, et al. Identification and location of local defects in power cable body based on input impedance spectroscopy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(8):1743-1751.
- [29] 单秉亮, 李舒宁, 程俊华, 等. XLPE配电电缆热老化段和集中性缺陷的辨识与定位[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(23):8231-8241.
- SHAN Bingliang, LI Shuning, CHENG Junhua, et al. Distinguishing and locating thermal aging segments and concentration defects in XLPE distribution cables [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(23):8231-8241.
- [30] 赵洪山, 孙京杰, 许向东. 基于反射系数谱积分的电缆缺陷诊断方法[J]. *电网技术*, 2022, 46(11):4548-4556.
- ZHAO Hongshan, SUN Jingjie, XU Xiangdong. Diagnosis of local defects in cables based on integral reflection coefficient spectrum[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(11):4548-4556.