

基于 FDR 和时频脉冲转换的 长电缆缺陷极性识别研究

周凯¹, 黄靖涛¹, 孟鹏飞^{1*}, 饶显杰², 金宇³, 周涛³, 杨进³

(1. 四川大学电气工程学院, 四川省 成都市 610065; 2. 国网成都供电公司, 四川省 成都市 610000;
3. 云南电网有限公司昆明供电局, 云南省 昆明市 650000)

Research on Defect Polarity Identification of Long Cable Based on FDR and Time-frequency Pulse Conversion

ZHOU Kai¹, HUANG Jingtao¹, MENG Pengfei^{1*}, RAO Xianjie², JIN Yu³, ZHOU Tao³, YANG Jin³

(1. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chendu, 610065, Sichuan Province, China;

2. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chendu, 610000, Sichuan Province, China;

3. Kunming Power Supply Bureau Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, Yunnan Province, China)

ABSTRACT: It is difficult to identify the polarity of long cable defects by using frequency domain reflection(FDR) technology due to the results that are easily affected by the proportion of missing data in low frequency band. To solve this problem, this paper presents a time-frequency pulse conversion algorithm of cable impedance mismatch points based on FDR to realize defect location and polarity discrimination. First, different types of the impedance mismatch points of the cable are located by using the second-order Nuttall self-convolution window and fast Fourier calculation. Next, the time-frequency pulse conversion algorithm of cable impedance mismatch is proposed. The parameter design and polarity identification method of the time-frequency pulse are described in detail by using the good frequency modulation ability and time-frequency characteristics of the Gaussian narrowband envelope signal. Then, the effectiveness of the time-frequency pulses conversion algorithm is verified by the simulation of different types of impedance mismatch points. Finally, the effectiveness of the proposed algorithm is verified by the experiment of the 10kV XLPE cable with a joint in the laboratory, and the cable length is 1500m. The simulation and experimental results show that the time-frequency pulse conversion algorithm can effectively locate the impedance mismatch points of long cables and

realize the polarity identification of different types of impedance mismatch points. At the same time, the time-frequency pulse conversion results of different length cable impedance mismatch points are not affected by the proportion of missing data in low frequency band, and the polarity recognition rates of long cable impedance mismatch points are effectively improved.

KEY WORDS: long cable; impedance mismatch point; frequency domain reflection; polarity discrimination; time frequency pulse conversion

摘要:为解决采用频域反射技术进行长电缆缺陷检测时,其结果易受低频段数据缺失占比的影响,而难以判断电缆缺陷极性的问题,该文提出一种基于频域反射技术的电缆阻抗失配点时频脉冲转换算法以实现缺陷的定位和极性判别。首先,采用2阶Nuttall自卷积窗的快速傅里叶计算方法对不同类型的电缆阻抗失配点进行定位。其次,提出电缆阻抗失配点时频脉冲转换算法,利用高斯窄带包络信号良好的频段调节能力和时频特性,详细阐述了时频脉冲的参数设计和极性判断方法。之后,运用仿真,对不同类型的阻抗失配点进行时频脉冲转换,验证了该算法的有效性。最后,采用该算法对实验室含接头长1500m的10kV XLPE电缆进行实验验证。仿真和实验结果表明:时频脉冲转换算法可以有效地定位长电缆阻抗失配点并且实现不同类型阻抗失配点的极性识别;同时,不同长度电缆阻抗失配点的时频脉冲转换结果不受低频段数据缺失占比的影响,有效提高了长电缆阻抗失配点的极性识别率。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877142, 52107158); 四川省科技厅应用基础研究计划项目(2021YJ0538)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51877142, 52107158); Basic Applied Study of Sichuan Province (2021YJ0538).

关键词: 长电缆; 阻抗失配点; 频域反射; 极性判别; 时频脉冲转换

0 引言

XLPE 电缆由于优良的电气及机械性能使其具有较高的运行可靠性,并广泛应用于城市地下电网、跨海输电、风电接入连接等长距离电能输送领域^[1-2]。由于电缆线路通常具有复杂的运行环境和安装作业工况,随着服役时间增长,可能会导致电缆线路局部位出现性能劣化而引发缺陷,严重情况下可能导致电缆系统的故障^[3-4],由此带来巨大的经济损失和负面的社会效益。随着我国城市电缆线路“老龄化”的加速,快速准确地对长距离电缆故障或缺陷进行定位和极性识别,对电缆故障/缺陷检修策略的制定,从而迅速恢复电力系统的运行具有重要意义。

电缆中的局部缺陷如局部破损、接头受潮等会导致其物理参数变化,进而引起局部特性阻抗发生变化,造成阻抗失配,形成一些阻抗失配点,导致行波传输时在阻抗失配点处发生携带缺陷特征信息的反射波。可通过反射波的传播距离定位电缆的阻抗失配点;借助反射波的极性判断阻抗失配点的类型^[5],例如局部破损会引起阻抗增大,形成正极性的反射波,而接头受潮会引起阻抗减小,形成负极性的反射波。

时域反射(time domain reflectometry, TDR)法是定位电缆故障的一种经典方法^[6],通过检测分析从电缆首端注入的单极性低压脉冲信号在阻抗失配点产生的反射信号特征以实现电缆故障定位和类型识别^[7-9]。但由于 TDR 中注入脉冲信号高频成分较少,且易受色散效应和噪声信号影响^[10],难以对较长电缆阻抗失配点进行定位和缺陷类型的极性识别^[11]。为了能对尚未发展成故障前的一些早期缺陷进行探测,避免故障的发生,已开展频域反射(frequency domain reflectometry, FDR)技术的研究^[12]。通过分析电缆首端注入的线性扫频信号在阻抗不连续点产生的反射信号特征来实现电缆阻抗失配点的定位^[13-15]。以 FDR 为基础,通过不同的数学变换算法,将首端阻抗谱(broadband impedance spectroscopy, BIS)^[13-15]或反射系数谱(reflection coefficient spectrum, RCS)^[16-17]从频域变换到时域,进而求出距离坐标,提高了电缆缺陷或故障定位的灵敏度,但是这种基于频域扫描的方式只能得到缺陷的反射强度,不能对电缆局部缺陷或故障点的极性进行识别。

文献[17]通过输入阻抗谱谐振点的偏移特性对电缆本体老化缺陷和局部破损缺陷进行了识别,但是该方法需要被测电缆的原始参数作为基线数据进行对比辨识,不利于实际现场服役电缆使用。随着研究的深入,研究者将目光转向了对缺陷点的反射特征如极性等进行识别,以了解缺陷的更多信息,从而进行准确的诊断。结合 FDR 高灵敏度的定位能力和 TDR 故障类型识别的优势,文献[18]提出了基于 FDR 的特征时域波形恢复技术,该方法虽能够较好地识别较短电缆(长度小于 1km)阻抗变化特征如极性、脉冲形状等,但由于实际测试中受到测试硬件输出频率带宽、功率和电缆长度的影响,使得有效测试频段有限和信号在较长电缆(长度大于 1km)中衰减大,从而造成特征时域恢复波形发生畸变,难以判断其极性。因此,需要考虑一种新的极性判断算法适用于长电缆线路的诊断定位。

高斯窄带包络信号具有优良的调频特性^[19],可通过其参数调节实现任意有效测试频段的信号分量,改善较长电缆低频段数据量缺失造成被测电缆反射系数不精确而引起基线振荡问题。基于此,本文在特征时域恢复技术原理的基础上,以高斯窄带包络信号为入射信号,提出一种基于 FDR 的电缆阻抗失配点时频脉冲转化识别算法,可实现长电缆局部缺陷的极性识别,并通过仿真和实验验证了该算法的有效性。

1 基于 FDR 的阻抗失配点定位和特征识别

1.1 基于 FDR 的电缆阻抗失配点定位原理

根据传输线理论^[20],在高频信号下,电缆模型需要用分布参数模型进行等效,如图 1 所示为含阻抗失配点的电缆分布参数模型。其中 $R_0(\Omega/m)$ 、 $L_0(H/m)$ 、 $G_0(S/m)$ 、 $C_0(F/m)$ 为电缆每单位长度下分布参数模型中的电阻、电感、电导和电容^[21]; Z_x 为距离电缆首端阻抗失配点位置 x 的阻抗; Z_{in} 为输入阻抗; Z_L 为负载阻抗。

根据传输线理论,长度为 l 的完好电缆首端反射系数 $\Gamma_{0l}(\omega)$ ^[18]可以表示为

$$\Gamma_{0l}(\omega) = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-2r(\omega)l} \quad (1)$$

式中: Z_0 为电缆本体特性阻抗; $r(\omega)$ 为信号在电缆中的传播系数,可以由衰减常数 $\alpha(\omega)$ 和相位常数 $\beta(\omega)$ 进行表示,如下:

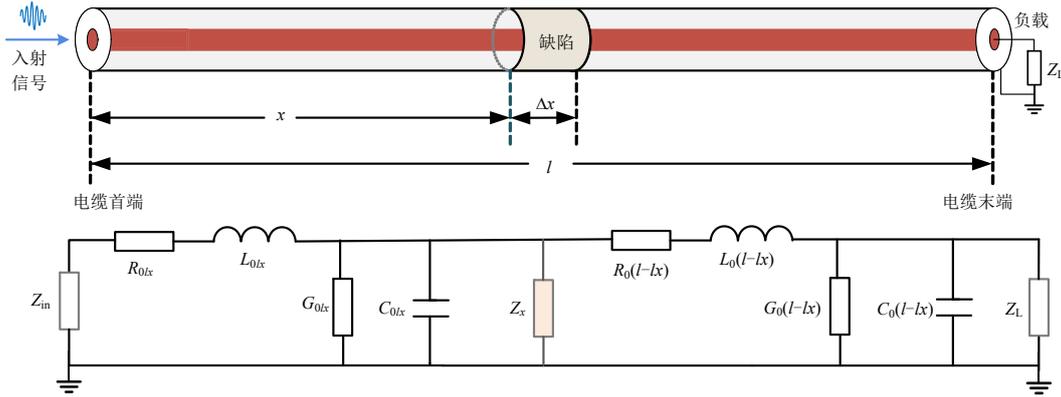


图 1 电缆的分布参数模型

Fig. 1 Distributed parameter model of power cable

$$r(\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \quad (2)$$

式中 $\beta(\omega)$ 可进一步表示为角频率 $\omega(\omega=2\pi f, f$ 为电磁波的频率) 与电磁波在电缆中的传播速度 v (高频下其近似为一定值) 的比值:

$$\beta(\omega) = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi f}{v} \quad (3)$$

当电缆末端开路 ($Z_L=\infty$) 时, 首端反射系数

$$\Gamma_{0l}(\omega) = e^{-2r(\omega)l} \quad (4)$$

采用欧拉公式将式(4)展开得到

$$\Gamma_{0l}(\omega) = e^{-2\alpha l} [\cos(2\beta l) + j \sin(2\beta l)] \quad (5)$$

由于反射系数的虚部包含了相位信息, 取反射系数 $\Gamma_{0l}(\omega)$ 的虚部进行讨论:

$$\text{imag}[\Gamma_{0l}(\omega)] = e^{-2\alpha l} \sin(2\beta l) = e^{-2\alpha l} \sin(2 \frac{2\pi f}{v} l) \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 当以频率 f 为自变量时, 长度为 l 的完好电缆, 其首端反射系数虚部 $\text{imag}[\Gamma_{0l}(\omega)]$ 会出现等效频率 $2l/v$ 的分量, 因此通过找寻反射系数虚部频谱最大畸变峰所对应的等效频率即可对电缆末端进行定位。同理, 假设电缆在距首端 x 处存在阻抗发生失配点时, 通过找寻等效频率为 $2x/v$ 的分量所对应的反射系数虚部频谱的畸变峰值即可对电缆的阻抗失配点进行定位。

引起电缆阻抗变化而造成电缆阻抗失配的类型有常见的经过渡电阻接地 ($Z_x=300\Omega$)、开路故障、短路故障^[18]以及阻抗增大和阻抗减小^[17]。因此本文建立 3000m 长 10kV YJLV 型 XLPE 电缆在 2500m 处存在上述 5 种情况的仿真模型, 电缆参数如表 1 所示^[16], 阻抗失配位置参数如表 2 所示^[17-18], 其中 C_h 为完好的电缆本体单位电容。仿真过程中, 选取 2 阶 Nuttall 自卷积窗^[22-23]对反射系数谱进行加窗傅里叶变换(windowed Fourier transform, WFT)

计算, 仿真结果如图 2 所示。由图 2 可知, FDR 能够准确定位阻抗失配点, 但是不能识别电缆阻抗失配点极性。

表 1 10kV XLPE 电缆仿真参数

Table 1 Simulation parameters of 10kV XLPE power cable

参数	数值
缆芯半径 r_c/mm	4.0
屏蔽层半径 r_s/mm	9.5
缆芯电阻率 $\rho_c/(\mu\Omega\cdot\text{mm})$	28.3
屏蔽层电阻率 $\rho_s/(\mu\Omega\cdot\text{mm})$	17.5
XLPE 电导率 $\sigma/(\text{S}/\text{m})$	1×10^{-16}
XLPE 介电常数 $\epsilon/(\text{F}/\text{m})$	2.04×10^{-11}

表 2 阻抗失配点参数设置

Table 2 Parameter setting of impedance mismatch point

电缆样本编号	阻抗失配类型	距首端距离 x/m	参数设置
1	经过渡电阻接地	2500	$Z_x=300\Omega$
2	开路	2500	∞
3	短路	2500	0
4	阻抗增大	2500	$0.95C_h$
5	阻抗减小	2500	$1.08C_h$

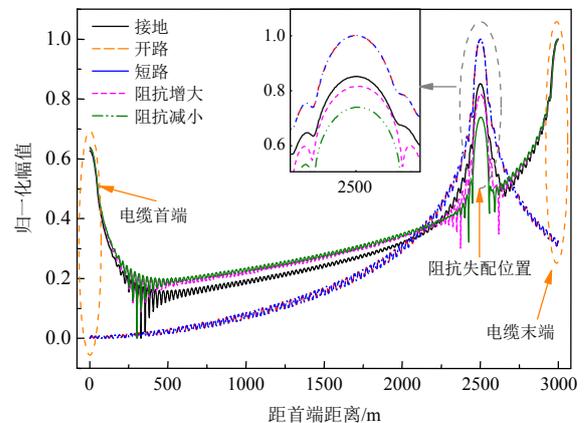


图 2 阻抗失配点定位谱图

Fig. 2 Location spectrum of Impedance mismatch point
1.2 FDR 阻抗失配点时域恢复

为了能够判断阻抗失配点的阻抗变化特征, 文

献[18]提出了阻抗失配点的特征时域恢复技术。其基本原理为：首先利用 FDR 测试得到被测电缆的传递函数，即反射系数 Γ ；然后在被测电缆首端输入一个时域激励信号 $g(t)$ ，将 $g(t)$ 与 Γ 的时域冲激响应进行卷积就可得到阻抗失配点的时域脉冲响应 $y(t)$ ，即特征时域恢复波形，如下所示：

$$y(t) = \text{IFT}[\text{FT}(g(t))\Gamma] \quad (7)$$

式中： $\text{FT}(\cdot)$ 表示傅里叶变换； $\text{IFT}(\cdot)$ 表示反傅里叶变换。

该方法可有效识别短电缆阻抗失配点阻抗变化情况。随着电缆长度增加导致高频信号衰减严重，实际测试时不得将上限测试频率 f_{\max} 设置较低，否则将导致低频段($0 \sim f_{\min}$)缺失数据量在测试频段内占比越多，使得时域恢复波形基线波动较严重，难以判断阻抗失配点阻抗变化特征。以图2中阻抗增大为例，改变上限测试频率，对频域定位曲线进行特征时域恢复，如图3所示。

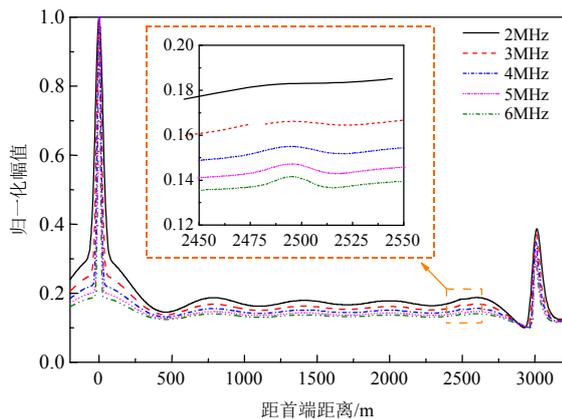


图3 阻抗失配点特征时域恢复波形

Fig. 3 Impedance mismatch point characteristic time domain recovery waveform

由图3可知，随着上限频率降低，低频段缺失的数据量相对有效测试频段数据量占比较多，中间缺陷处的特征时域恢复波形基线波动越严重，难以准确判断阻抗变化情况。为了提高在上限频率较低时对电缆阻抗失配点阻抗变化情况判断的准确率，下文将提出基于 FDR 的电缆阻抗失配点时频脉冲转换识别算法。

2 基于 FDR 的时频脉冲极性识别算法

2.1 输入信号的选取

为了保证所选入射信号的时频脉冲能量尽可能在传递函数的幅频特性以内，选择具有良好时频特性^[24]的高斯窄带包络信号 $g(t)$ 作为时域入射信号。其表示式为

$$g(t) = g_a e^{-\frac{(t-g_b)^2}{2g_c^2}} \{\cos[(2\pi f_m + g_d(t-g_b))(t-g_b)]\} \quad (8)$$

式中： g_a 为幅值因数； g_b 为时间因数，保证 $g(t)$ 在时间中心点有最高主峰； g_c 为脉宽因数，同时决定了时域中反射波的距离分辨率； g_d 为调频因数，可根据测试系统需求通过其大小调节任意信号频段，不存在低频段缺失的现象； f_m 为中心频率。

2.2 高斯窄带包络信号的优化设计方法

为提高电缆阻抗失配点阻抗变化情况判断能力，对 $g(t)$ 参数进行优化设计。将幅值因数 g_a 设置为1，并进行归一化。由于是在电缆阻抗失配点定位的基础上进行反射波形转换，所以将时间横轴转换为距电缆首端的距离轴，故时间因数 g_b 的参数设置不会影响最终运算结果。调频因数 g_d 对 $g(t)$ 的频率带宽进行调制，从而影响整个系统的运算结果。为此，设置 $f_m=10\text{MHz}$ ， $g_c=0.1\mu\text{s}$ ，取 g_d 分别为0、45、90 $\text{rad}/\mu\text{s}^2$ 时，分析 g_d 对 $g(t)$ 时频特性的影响。图4(a)为 $g(t)$ 的时域波形。利用希尔伯特变换^[25-26]求取 $g(t)$ 的时域上包络线^[27-28]，如图4(b)所示；再通过傅里叶变换求取 $g(t)$ 的幅频特性曲线，如图4(c)所示。

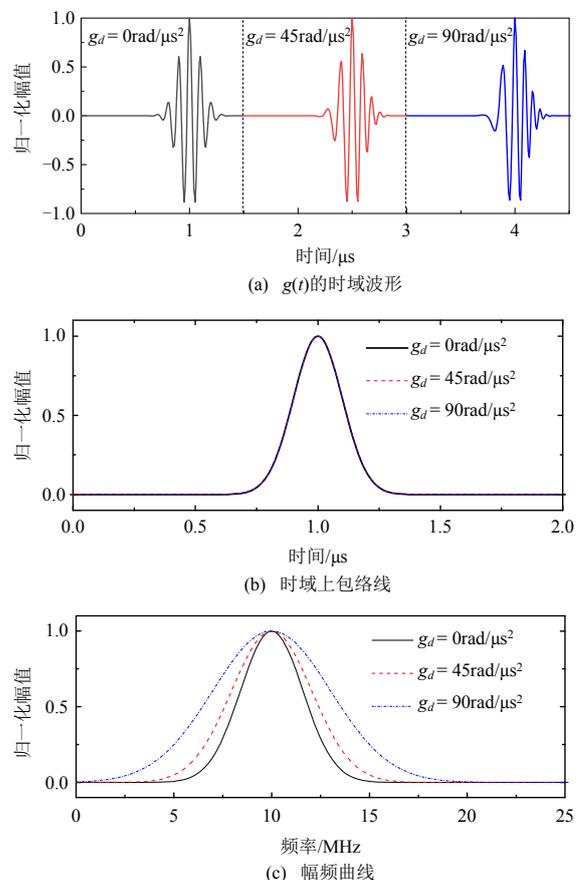


图4 不同 g_d 时 $g(t)$ 的时频特性

Fig. 4 $g(t)$ time frequency characteristics at different g_d

从图 4(a)可以看出，高斯包络窄带信号 $g(t)$ 是一种双极性脉冲，随着 g_d 的增大， $g(t)$ 的频率变化率越大，频率变化现象越明显，说明 $g(t)$ 的时域波形呈现了其调频特性，因此将其定义为时频脉冲。同时，不论参数如何变化，其幅值最大的峰只有一个，因此，将其定义为主峰。从图 4(b)和 4(c)中可以看出，随着 g_d 的增大， $g(t)$ 的时间带宽不变，频率带宽增加。说明 g_d 越大，取得相同的时间带宽(反射波距离分辨率)，需要更多的频域数据，即在频域中需要更宽的测试频带或更高的测试上限频率。而测试设备频带越宽，设备成本和技术要求越高；同时上限频率越高，信号的高频成分衰减越大；此外，在进行系统测试时还会引入较大噪声而降低测试效果。综上所述，将 g_d 设置为 $0\text{rad}/\mu\text{s}^2$ ，此时式(8)可改写为

$$g(t) = g_a e^{-\frac{(t-g_b)^2}{2g_c^2}} \cos(2\pi f_m(t-g_b)) \quad (9)$$

对式(9)进行傅里叶变换得到式(10)所示的幅频曲线 $abs(g(f))$ ：

$$abs[g(f)] = g_a \sqrt{2g_c^2 \pi e}^{-[(f-f_m)^2]/[2(\frac{1}{2\pi g_c})^2]} \quad (10)$$

将输入信号 $g(t)$ 的离散信号记为 $g_n(t)$ 。结合奈奎斯特采样定理，设置离散采样频率 $f_n > 2f_{max}$ 。对式(10)进行离散化处理，得到信号 $g_n(t)$ 的幅频曲线如式(11)所示。

$$abs[g_n(f)] = f_n g_a \sqrt{2g_c^2 \pi e}^{-[(f-f_m)^2]/[2(\frac{1}{2\pi g_c})^2]} \quad (11)$$

从式(11)中可以看出， $g_n(t)$ 的频率分量是一个高斯脉冲函数， g_c 决定信号频率带宽，信号的分布特性与 g_a 无关。由于 $abs(g_n(f))$ 为对称高斯函数，为了保证 $g_n(t)$ 合理分布在频域反射测试频带内，将中心频率 f_m 设置为测试频带的中心，如下：

$$f_m = (f_{max} - f_{min})/2 + f_{min} \quad (12)$$

参考文献[18]，高斯函数的幅频特性与其脉冲宽度值 g_c 相对应，当 g_c 越小时， $g(t)$ 的时间带宽会越小，时域中反射波在距离轴上的分辨率会增加，其相应的频率带宽会增加。因此对于频域反射测试得到的有限频段数据而言，应使 g_c 尽量小，在提升时域中反射波距离分辨率的同时，取得较大的频率带宽以便合理地利用测试频段内的反射系数。综上所述，设定一个比例系数阈值 k_{th} ，保证 $abs(g_n(f))$ 在 f_{max} 时为该函数峰值的 k_{th} 倍，本文将其设置为 0.5%，得到参数 g_c 的值，如下所示：

$$g_c = \frac{\sqrt{2 \ln k_{th}}}{2\pi(f_{max} - f_m)} \quad (13)$$

2.3 时频脉冲反射波形极性识别方法

为了对阻抗失配点的阻抗变化情况进行判断，需要对其时域波形极性进行判断。从图 4(a)中可以看出，时频脉冲是一种频率可调的双极性振荡信号，不能直接判断其极性。同时，考虑到高频信号在电缆中传播时，受衰减和色散效应的影响，使信号本身发生畸变，而影响反射信号极性判断。因此，首要分析高斯包络窄带信号的传播特性。

为了分析衰减和色散效应对 $g(t)$ 传播特性的影响，利用电缆的传递函数模拟 $g(t)$ 在电缆中传播。信号 $g(t)$ 的参数设置为： $f_m=1.5\text{MHz}$ ， $g_a=1\text{V}$ ， $g_b=20\mu\text{s}$ 和 $g_c=0.4\mu\text{s}$ 。利用傅里叶频谱计算方法得到仅存在衰减效应和同时存在衰减、色散效应时 $g(t)$ 的传播波形、时域上包络线和幅频特性曲线如图 5 所示。

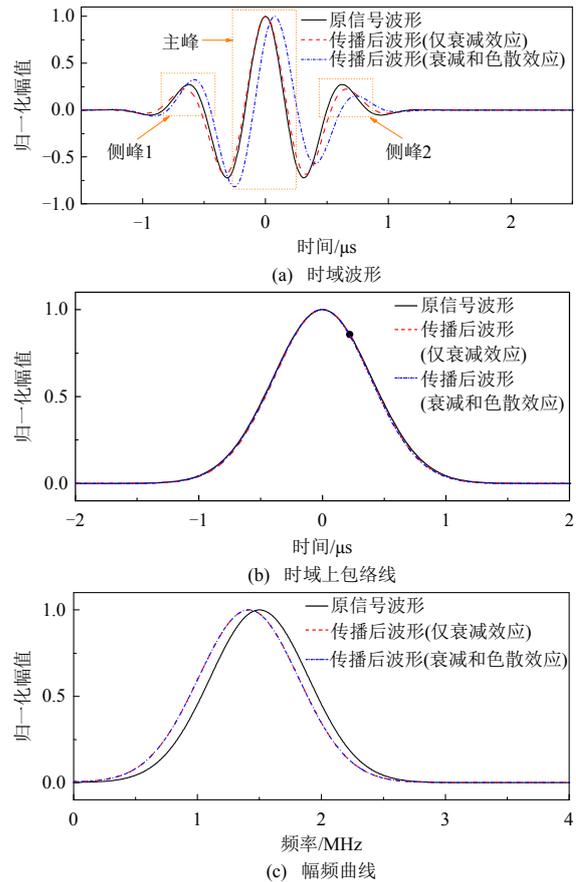


图 5 $g(t)$ 信号时频特性

Fig. 5 Time-frequency characteristics of $g(t)$ signal

由图 5(a)可知，相较于原信号波形，仅存在衰减效应时传播后的信号波形主峰位于时间带宽的中间位置；当衰减效应和色散效应共同作用时，其主峰发生了向右偏移现象，且侧峰 1 的幅值开始增加，侧峰 2 的幅值开始减小，说明这主要是由色散

效应造成的。由图 5(b)可知,相较于原信号波形,传播后的信号波形时域上包络线几乎不变。说明衰减和色散效应不会影响 $g(t)$ 的时域上包络线,据此,可用于反射脉冲时宽中心的确定。由图 5(c)可知,相较于原信号波形,仅考虑衰减效应和同时考虑衰减色散效应,传播后的信号波形中心频率会向左偏移,导致波形的振荡周期变大,说明这是由衰减效应造成的。

接着,结合 $g(t)$ 反射信号的时频特性对反射信号时域脉冲极性进行判断。

1) 根据被测电缆数据,将入射的时域脉冲信号 $g(t)$ 通过频域传递函数转化为响应信号 $y(t)$, 并由此计算反射信号的时域包络线;

2) 取包络线峰值位置确定为反射脉冲的时域中心;

3) 受色散效应影响,其时域脉冲会向右偏移,而其幅频曲线会向左偏移,因此将距离时域中心最近,且幅值最大的波峰确定为主峰。

4) 根据主峰峰向判断反射波峰极性。当主峰向上时其值为正,向下时其值为负,因此,定义主峰向上时为正极性;主峰向下时为负极性。

综上所述,可通过时域脉冲的主峰峰向定性判断电缆局部缺陷处的极性,但是,由于局部缺陷处反射波的特征受注入信号^[6, 18]、缺陷类型和程度^[29-30]、传播效应^[31]等因素的影响,不同情况电缆局部缺陷的主峰特征各异,其识别精度也不相同。因此,针对某一确定电缆,在当前测试条件下,定义采用该方法进行缺陷极性识别的精度 γ_x 为

$$\gamma_x = \gamma / \gamma_{xm} \quad (14)$$

式中: γ 为缺陷处主峰的幅值; γ_{xm} 为距离首端 x 处的时域包络线幅值。

3 仿真实证

3.1 仿真模型

为验证本文所提方法的有效性,首先进行仿真测试分析。仿真测试系统模型如图 6 所示,由宽频阻抗谱测试仪、控制 PC 和被测电缆组成。采用控制 PC 控制扫频信号源, f_{\min} 设置为宽频阻抗谱仪允许的最低下限频率 150kHz, f_{\max} 设置为 2、3、4、5 和 6MHz。选取电缆的一端为测试端,即电缆首端;然后将测试夹具分别夹至电缆缆芯和铜屏蔽层(接地),电缆末端设置为开路。同时,将图 3 转换为对应的时域脉冲,如图 7 所示。

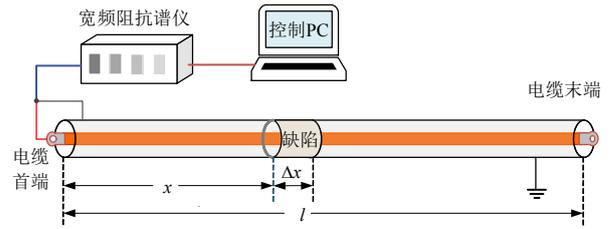


图 6 频域反射测试模型

Fig. 6 Frequency domain reflection test model

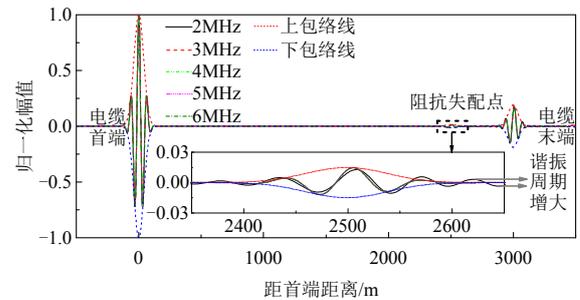


图 7 阻抗失配点时频脉冲波形

Fig. 7 Impedance mismatch point time frequency pulse waveform

由图 7 可知,时域反射波形的包络线不会随着频率的增大而发生变化。同时与特征时域恢复波形(见图 3)进行对比,发现在同样的上限测试频率时,本文所提方法不存在波形振荡,且其时域波形不受色散效应影响,时域特征更加清晰,能够更有效地提取测试上限频率相对较低时电缆阻抗失配点特征信息,判断其阻抗变化情况。

3.2 阻抗失配点极性判断

本文以常见的经过电阻接地、开路故障、短路故障、阻抗增大、阻抗减小讨论阻抗失配点的极性判断。设置电缆长度 l 为 3000m,阻抗失配点距离首端的距离 x 为 2500m,测试下限频率依据仪器设备允许的最大下限频率($f_{\min}=150\text{kHz}$)进行设置,根据 3.1 节,测试上限频率 f_{\max} 设置为 4MHz,阻抗失配点的具体参数如表 2 所示。

首先利用 FDR 测试技术对 1 号、2 号、3 号、4 号和 5 号电缆进行频域反射测试,接着采用本文所提方法对频域反射测试数据进行转换计算,得到不同类型阻抗失配点的时域脉冲如图 8 所示;并根据极性识别方法的精度计算公式,计算其精度如表 3 所示。

由图 8(a)可知,1 号电缆样本在距首端 2500 和 3000m 处均出现了时域振荡脉冲波形,说明频域反射法能够对电缆阻抗失配点准确定位。接着采用本文所提方法对阻抗失配点阻抗变化情况进行判断。从图中可看出,在 2500m 处,时域振荡脉冲波形的

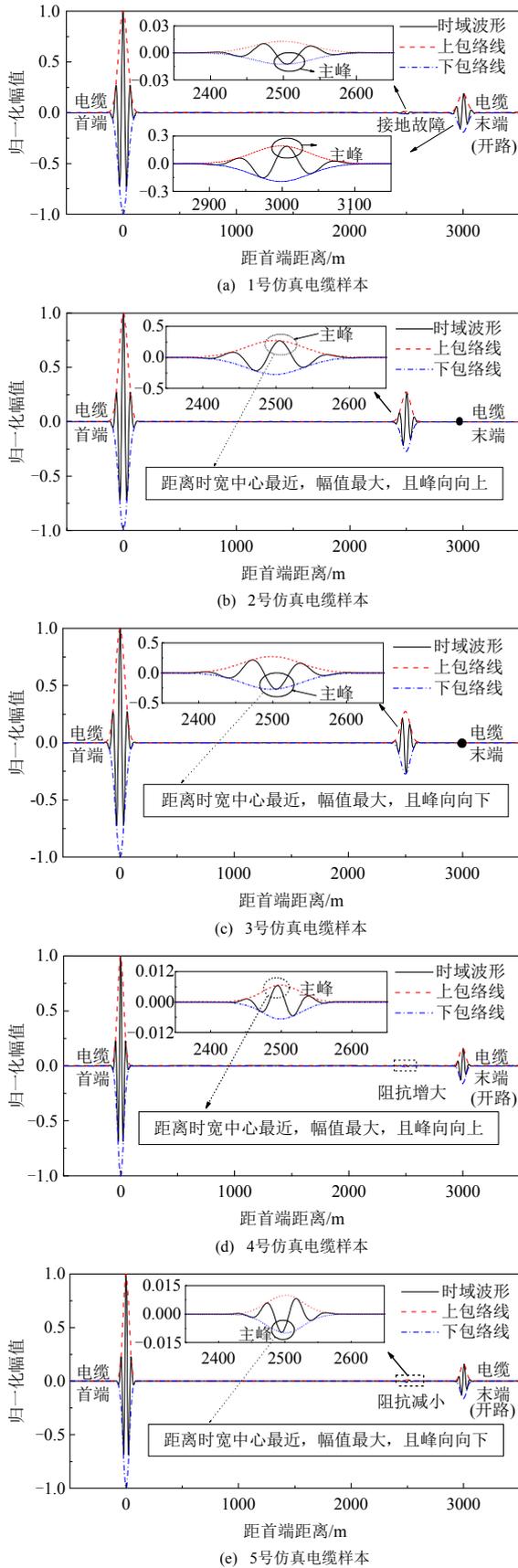


图 8 时频脉冲波形

Fig. 8 Time frequency pulse waveform

主峰幅值为负，因此判断此处反射波为负极性，这与经过渡电阻接地使阻抗失配处阻抗减小的真实

表 3 阻抗失配点极性识别精度
Table 3 Polarity identification accuracy of impedance mismatch point

电缆样本编号	阻抗失配类型	时域包络线幅值	主峰幅值	主峰识别率/%
1	经过渡电阻接地	0.01278	0.01261	98.67
2	开路	0.27407	0.27029	98.62
3	短路	0.27408	0.27029	98.62
4	阻抗增大	0.00668	0.00656	98.20
5	阻抗减小	0.00989	0.00962	97.27

情况一致；在电缆末端，主峰幅值为正，由此判断电缆末端反射波为正极性，这和末端设置开路时阻抗增加的真实情况一致。

由图 8(b)、(c)可知，2 号和 3 号电缆样本在 2500m 处均出现了时域振荡脉冲波形。采用本文所提方法对图 8(b)、(c)进行极性判断。可知 2 号电缆样本阻抗失配点阻抗为正极性，与开路故障导致阻抗增加的真实情况一致。3 号电缆样本阻抗失配点阻抗为负极性，和短路故障导致阻抗减小的真实情况一致。

由图 8(d)、(e)可知，4 号和 5 号电缆样本在 2500m 处均出现了时域振荡脉冲波形。采用本文所提方法对图 8(d)、(e)进行极性判断。可知 4 号电缆样本阻抗失配点反射波为正极性，与局部缺陷导致阻抗增加的真实情况一致。5 号电缆样本阻抗失配点反射波为负极性，和局部缺陷导致阻抗减小的真实情况一致。

由表 3 可知，在当前测试条件下，本文所提方法对阻抗失配点极性识别精度超过 97%，说明本文方法能够有效对局部缺陷的极性进行识别。

4 实验验证

为进一步验证本文方法的有效性，通过实验对长 1500m XJLV-8.7/15kV 电缆在实验室进行测试，该电缆在 200m 处设置中间接头(阻抗增加)，保持末端开路。由于局部缺陷会引起局部特征参数单位电容的变化，导致缺陷处阻抗发生变化而形成阻抗失配。电缆本体的单位电容值往往大于中间接头，使得中间接头的阻抗大于电缆本体阻抗，从而在接头处形成阻抗失配^[32]；同时由于中间接头为不同材料贴合形成的复合界面，是电缆运行的薄弱环节，因此，可以将电缆接头模拟为缺陷^[17]。

采用 FDR 对其进行测试，测试系统如图 9 所示。控制 PC 输出设定频段的扫频信号，由端口 1

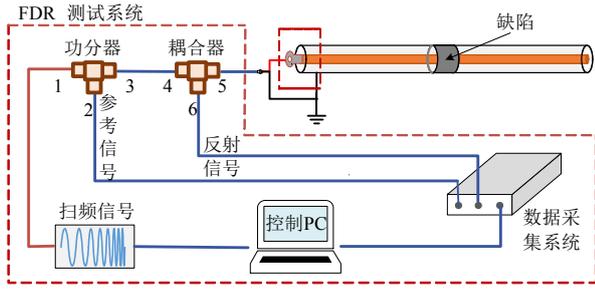
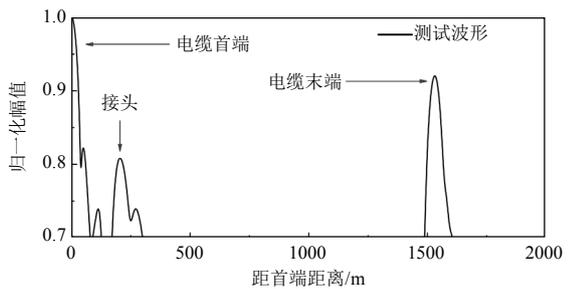


图9 FDR测试系统图

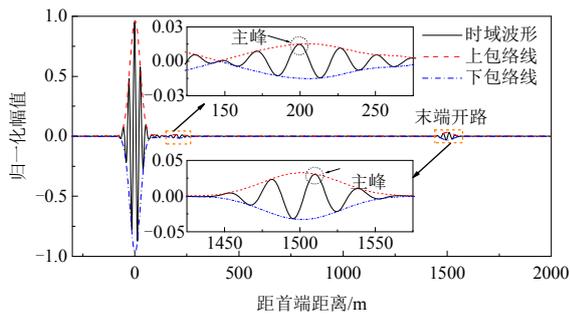
Fig. 9 FDR test system diagram

将其功率二等分，一部分作为参考信号通过端口2由数据采集系统进行采集，再输入到控制PC。另一部分作为入射信号经过端口4和5注入电缆，端口5还会采集电缆的反射信号经过端口6，由数据采集系统采集之后，输入到控制PC，完成电缆首端频域反射系数谱的测试和时频脉冲转换。

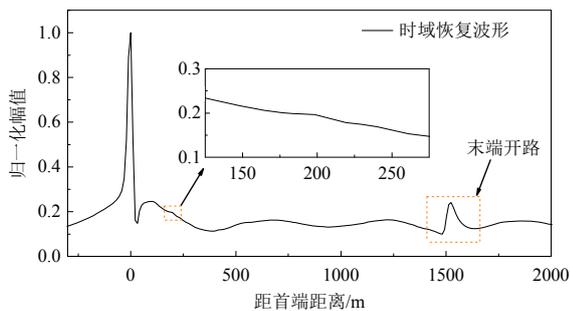
系统参数设置如下： $f_{min}=0.15\text{MHz}$ ， $f_{max}=4\text{MHz}$ ，测量点数为3001。首先对该电缆进行FDR测试，测试结果如图10(a)所示；接着利用本文所提方法得



(a) 频域反射定标测试曲线



(b) 时域振荡脉冲波形



(c) 特征时域恢复波形

图10 实验结果

Fig. 10 Experimental results

到阻抗失配点时频脉冲如图10(b)所示；为了对比说明本文所提方法有效性，对阻抗失配点特征时域恢复脉冲波形进行计算如图10(c)所示。

从图10(a)中可以看出，在1500和200m的位置各存在一个明显的畸变点，根据实际电缆情况说明FDR方法能够有效定位到实际电缆的阻抗失配点。从图10(b)中可以看出，在200m处出现时频脉冲，根据本文所提极性判断方法，说明反射波形极性为正，因此判断该处为局部阻抗增加的阻抗不连续点，与电缆存在接头的实际情况一致；根据极性识别精度计算方法，其时频脉冲包络线归一化幅值为0.01519，主峰的归一化幅值为0.01477，识别精度为97.24%。同时在1500m处出现时频脉冲，根据本文所提方法，判断该处发生了局部阻抗增加的情况，与电缆开路时的实际情况一致，证明了本文方法的有效性。从图10(c)中可以看出，当上限频率较低时，受衰减效应的影响，时域反射波形振荡较严重，且200m处的特征时域恢复波形发生畸变，特征模糊，难以准确判断该位置处的阻抗变化。

综上所述，采用FDR方法能够对电缆的局部缺陷进行定位，但是不能对电缆阻抗失配点的极性进行识别；尽管基于FDR的特征时域恢复波形方法能够根据阻抗失配点的特征时域恢复波形的形状进行极性判断，但是在应对长电缆阻抗失配点的极性判断时易受低频段数据量缺失占比的影响而失效，此时，使用本文所提方法仍然能够对电缆阻抗失配点的极性进行诊断。

5 结论

本文对高斯包络窄带信号的时频特性进行分析，提出一种基于FDR和时频脉冲转换的长电缆缺陷定位和极性识别算法，实现了电缆阻抗失配点反射波形的极性判断。通过仿真和实测分析，得到以下结论：

1) 基于仿真分析和实验测试发现，特征时域恢复技术在应对较长电缆局部缺陷的极性识别时，由于低频段数据量缺失占比较大使得时域恢复波形基线振荡严重，难以进一步识别电缆局部缺陷处的阻抗变化。

2) 通过高斯包络窄带信号的时频特性分析，对其参数进行优化设计，使时频脉冲在有效测试频带上能够在较小的时间宽度范围内具有较好的距离分辨率；同时不存在低频段数据量缺失问题，使

被测电缆的时频脉冲不存在基线振荡, 易于电缆局部缺陷处的极性判断。

3) 可利用高斯包络窄带信号的时域包络线不受衰减和色散的影响找寻时频脉冲的时宽中心, 并且确定距离时宽中心最近且幅值最大的峰为主峰, 根据主峰的峰向识别电缆阻抗失配点的极性, 进而判断电缆局部缺陷的类型。

参考文献

- [1] ORTON H. Power cable technology review[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(4): 1057-1067.
- [2] 邵森安, 马颀, 丰如男, 等. 海底电缆国内外研究综述[J]. 南方电网技术, 2020, 14(11): 81-88.
SHAO Senan, MA Xie, FENG Runan, et al. Review of researches on submarine cables at home and abroad[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(11): 81-88(in Chinese).
- [3] 林思衍, 周凯, 尹游, 等. 基于连续 PDC 测试的 XLPE 电缆水树老化判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 4(20): 6764-6772.
LIN Siyan, ZHOU Kai, YIN You, et al. Diagnosing method for water tree aging on XLPE cable based on continuous PDC test method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 4(20): 6764-6772(in Chinese).
- [4] 张桥峰, 周凯, 李康乐, 等. 不同交联温度下交联聚乙烯绝缘中的水树生长特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5758-5766.
ZHANG Qiaofeng, ZHOU Kai, LI Kangle. et al. Study the growth characteristic of water trees in XLPE insulation at different crosslinking temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5758-5766.
- [5] FURSE C M, KAFAL M, RAZZAGHI R, et al. Fault diagnosis for electrical systems and power networks: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(2): 888-906.
- [6] 李露. 船用电力电缆故障诊断的仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
LI Lu. Simulation study on fault diagnosis of marine power cable[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017(in Chinese).
- [7] 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.
WANG Liming, HOU Jingzhou, CHEN Changlong. Diagnosis of XLPE cable insulation using velocity of electromagnetic wave[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 2984-2989(in Chinese).
- [8] 王立, 杜伯学, 任志刚. 高压交联聚乙烯电缆绝缘劣化试验分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 111-116.
WANG Li, DU Boxue, REN Zhigang. Test and analysis of insulation deterioration of XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 111-116(in Chinese).
- [9] 赵晓宇, 李艳萍, 付颜龙, 等. 几种时频分析方法的研究和对比[J]. 信息通信, 2019(8): 99-100.
ZHAO Xiaoyu, LI Yanping, FU Yanlong, et al. Study and comparison of several time-frequency analysis methods [J]. Information & Communications, 2019(8): 99-100(in Chinese).
- [10] 谢敏, 周凯, 何珉, 等. 基于时间反演技术的电力电缆局部放电定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3402-3409.
XIE Min, ZHOU Kai, HE Min, et al. Partial discharge location for power cable based on the time reversal technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3402-3409(in Chinese).
- [11] OHKI Y, HIRAI N. Location attempt of a degraded portion in a long polymer-insulated cable[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2461-2466.
- [12] 张国鑫. 基于频域反射法的电缆故障定位方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
ZHANG Guoxin. Cable fault location method based on frequency domain reflectometry[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019(in Chinese).
- [13] ZHOU Zhiqiang, ZHANG Dandan, HE Junjia, 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.
- [14] 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.
- [15] OHKI Y, YAMADA T, HIRAI N. Diagnosis of cable aging by broadband impedance spectroscopy[C]// Proceedings of 2011 Annual Report IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2011: 24-27.
- [16] 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(in Chinese).
- [17] 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(in Chinese).
- [18] 饶显杰, 周凯, 谢敏, 等. 基于频域反射法的特征时域波形恢复技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1420-1427.
RAO Xianjie, ZHOU Kai, XIE Min, et al. Recovery technique of characteristic time domain waveform based

- on frequency domain reflection method[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1420-1427(in Chinese).
- [19] KWON G Y, LEE C K, LEE G S, et al. Offline fault localization technique on HVDC submarine cable via time-frequency domain reflectometry[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1626-1635.
- [20] PAUL C R. Analysis of multiconductor transmission lines[M]. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2008.
- [21] 谢敏, 周凯, 赵世林, 等. 考虑相速度频变特性的改进互相关算法局部放电定位[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1661-1667.
XIE Min, ZHOU Kai, ZHAO Shilin, et al. Research on partial discharge location using modified cross correlation method considering frequency characteristic of phase velocity[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1661-1667(in Chinese).
- [22] 徐兴全, 桂媛, 姚玉海, 等. 基于 Nuttall 自卷积窗的 10kV 配电电缆中间接头定位改进方法[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(in Chinese).
- [23] 饶显杰, 周凯, 黄永禄, 等. 频域反射法中阻抗变化类型判断技术[J]. 电工技术学报, 2021, 36(16): 3457-3466.
RAO Xianjie, ZHOU Kai, HUANG Yonglu, et al. Type Judgement technology of impedance variation in frequency domain reflection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(16): 3457-3466(in Chinese).
- [24] 王昱皓, 周凯, 汪先进, 等. 基于改进时频域反射法的电力电缆局部缺陷定位[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2584-2593.
WANG Yuhao, ZHOU Kai, WANG Xianjin, et al. Power cable defects location based on improved time-frequency domain reflectometry[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2584-2593(in Chinese).
- [25] 韦娟, 顾兴权, 宁方立. 希尔伯特时频谱特征提取方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 50-54.
WEI Juan, GU Xingquan, NING Fangli. Hilbert time-frequency spectrum feature extraction method [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2021, 49(1): 50-54(in Chinese).
- [26] 王艳松, 徐海亮, 衣京波, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的配电馈线接地故障测距[J]. 电气工程学报, 2020, 15(4): 18-26.
WANG Yansong, XU Hailiang, YI Jingbo, et al. Distribution feeder grounding fault location based on hilbert-huang transform[J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 15(4): 18-26(in Chinese).
- [27] 张民谣, 高云鹏, 吴聪, 等. 基于自适应变分模式分解的非稳态电压闪变包络参数检测[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 599-608.
ZHANG Minyao, GAO Yunpeng, WU Cong, et al. Non-stationary voltage flicker envelope parameters detection based on adaptive variational mode decomposition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 599-608(in Chinese).
- [28] 朱正斌, 黄军, 牛剑锋, 等. 基于暂态特征参数的数字式非接触负载测量研究[J/OL]. 电源学报, 2021 [2021-09-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20210831.1529.008.htm>.
ZHU Zhengbin, HUANG Jun, NIU Jianfeng, et al. The Research of digital contactless load detection based on characteristic parameters in transient process [J/OL]. Journal of Power Supply, 2021[2021-09-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20210831.1529.008.htm>(in Chinese).
- [29] MO Shi, ZHANG Dandan, LI Zhenbiao, et al. Extraction of high-frequency power cable transmission characteristics from impedance spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1503810.
- [30] ZHANG Haotian, MU Haibao, ZOU Xingyu, et al. A novel method for identifying cable defect and improving location accuracy based on frequency domain reflectometry[C]//Proceedings of the IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Wuhan: IEEE, 2021: 1-5.
- [31] 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(in Chinese).
- [32] 李蓉, 周凯, 万航, 等. 基于频域反射法的 10kV 配电电缆中间接头受潮定位[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 825-832.
LI Rong, ZHOU Kai, WAN Hang, et al. Moisture location of 10kV cable joints in medium voltage distribution grid based on frequency domain reflection[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 825-832(in Chinese).



周凯

在线出版日期: 2022-07-10.

收稿日期: 2022-01-04.

作者简介:

周凯(1975), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力设备状态监测与故障诊断等研究工作, Zhoukai_scu@163.com;

*通信作者: 孟鹏飞(1992), 男, 博士, 副研究员, 主要从事电气绝缘材料, 过电压及防雷方面的研究工作, mpf@scu.edu.cn.

(编辑 胡琳琳)