

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.05.027

基于时频域反射法的核电站仪控电缆缺陷检测

王志武¹, 涂画¹, 李力行², 邓红雷²

(1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004;

2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:为确保核电站中仪控电缆的安全运行,时频域反射法(time-frequency domain reflectometry, TFDR)被广泛用于识别和定位仪控电缆中的缺陷。文中对比魏格纳-维利分布(Wigner-Ville distribution, WVD)、伪魏格纳-维利分布(pseudo Wigner-Ville distribution, PWVD)、平滑伪魏格纳-维利分布(smooth pseudo Wigner-Ville distribution, SPWVD)算法的优势,并提出时频域互相关曲线(time-frequency cross-correlation, TFCC)的能量区间放缩法。分别对50 m和148 m的多芯交联聚烯烃仪控电缆进行短路、断路、绝缘屏蔽层破损和局部热老化的缺陷模拟,并基于TFDR,采用3种时频分布算法进行实验处理。随后,基于局部热老化的检测,采用能量区间放缩法,对TFCC定位峰主瓣较宽的问题进行改善。实验结果表明:经过SPWVD处理后,TFCC的主瓣较宽;在正常电缆检测时,PWVD对交叉项有更好的抑制作用;但在单缺陷检测中,SPWVD具有更好的缺陷识别能力;通过采用能量区间放缩法,可分离相近的定位峰,加强对微弱反射信号的判别。

关键词:仪控电缆;缺陷检测;故障定位;时频域反射法(TFDR);时频分析;时频互相关曲线(TFCC)

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)05-0240-10

0 引言

随着核电厂数量及运行时间的增加,核电厂设备的老化受到越来越多的关注^[1-3]。作为传输站内运行信息及对站内设备进行控制的仪控电缆,其承担着传输仪器设备信号和控制线路的功能,甚至是反应堆和核电站电气仪控系统及设备的关键连接电缆。仪控电缆在安全壳内,受到不同场景下的热应力、机械应力、化学应力和辐射应力作用,例如交替变化的环境温度、高压强、核辐射(主要是 γ 射线)对有机高分子的破坏。在此工况下长期服役运行的仪控电缆极大可能会出现不同程度的缺陷。电缆由于缺陷发生故障后,可能会影响核反应堆的稳定性和安全性。

某核电站某设备的阀门安装朝向有误,使电缆与设计电缆桥架距离不同,导致阀门控制电缆触碰裸露高温阀体,烫伤控制电缆外皮,露出电缆屏蔽层,这有可能导致阀门误动或拒动。某电厂^[4-5]核仪表系统中间量程通道电缆电流触发短时预警,排查后发现是因为接头处芯屏绝缘低于3 G Ω 。绝缘变小会导致系统与外界存在信号交换,影响仪表电缆的监视与信号采集功能。为提高核电站运行过程中的安全可靠,亟须确定核电站内仪控电缆的状态,以极大减少由于仪控电缆存在缺陷导致信号传输失真或故障事故的发生几率^[6-8]。

收稿日期:2023-02-15;修回日期:2023-05-06

时频域反射法(time-frequency domain reflectometry, TFDR)的入射信号为高斯包络的线性调频信号,其瞬时频率、持续时间等参数可调,该信号在时域及频域都有一定的紧致性。通过时频分布结果计算时频域的相关性,确定缺陷处局部阻抗不连续点的位置和大小,从而进行检测和定位。在双域内计算可对微弱缺陷响应进行放大处理,提高检测结果的精确度。

传统的时频分布为魏格纳-维利分布(Wigner-Ville distribution, WVD),在分布处理时会产生交叉项^[9-10],检测结果呈现不确定性。目前主要采用改进的伪魏格纳-维利分布(pseudo Wigner-Ville distribution, PWVD)和平滑伪魏格纳-维利分布(smooth pseudo Wigner-Ville distribution, SPWVD)抑制交叉项的产生,两者在处理结果上各有优劣。文献[11]提出基于PWVD的TFDR,对超导电缆的绝缘缺失、对地绝缘电阻减小、短路故障进行缺陷判别。文献[12]对同轴电缆并联和串联不同阻值的电阻,以模拟老化、绝缘下降的软故障,并采用TFDR进行检测,在时频分布处理中使用SPWVD抑制交叉项,并提出采用卷积计算快速判断故障类型。文献[13]提出基于SPWVD的TFDR,对具有一个或多个受潮缺陷的10 kV长电缆进行仿真建模和检测验证,实现了长电缆的局部缺陷定位,但未考虑实际测量时高频信号在线芯传输中频率幅值不断衰减的问题,以及周围环境噪声的影响。文献[14]针对传统

TFDR 中时频分布存在交叉干扰项的问题,提出使用仿射变换的方式进行处理,在不影响自项分辨率的同时可消除交叉项干扰。文献[15]提出一种基于 TFDR 的神经网络和层次聚类的多芯电缆故障检测方法,通过比较故障位置和反射信号的不平衡水平,可以检测和区分故障和电缆接头。目前,许多学者都采用 TFDR 对各类电缆进行状态评估,但对实际运维中一簇电缆可能同时存在多个缺陷的情况缺乏考虑,对不同的时频分布算法缺乏比较,且在相距较近的缺陷判别中,定位峰重叠现象尚未有明确的解决方案。

为此,文中对 50 m 和 148 m 的多芯仪控电缆分别进行短路、断路、绝缘屏蔽层破损和局部热老化的缺陷模拟,并进行同时存在不同数量缺陷的模拟;采用不同的时频分布算法并基于 TFDR 的检测手段进行验证,探究时频分布算法在不同缺陷数量下对交叉干扰项的抑制效果;提出能量区间放缩法,对相距较近且互相重叠的定位峰进行分离与判别,证明了 TFDR 在各类情形下的可靠性和适用性。

1 理论基础

1.1 传输线模型及分布参数

仪控电缆是一段传输线,遵循传输线理论,由于 TFDR 采用的入射信号为高频信号,故当电缆长度远大于传输信号波长时,微观下单位长度电缆可视作如图 1 所示的电气网络。整段电缆可看作由无数个单位电阻(R_0)与单位电感(L_0)串联、单位电导(G_0)与单位电容(C_0)并联而成,4 个元件数值统称为分布参数,故该网络亦被称为分布参数模型。图 1 中, x 为信号沿正方向传输的距离; Δx 为单位长度; $U(x)$ 为某处对地的电压。

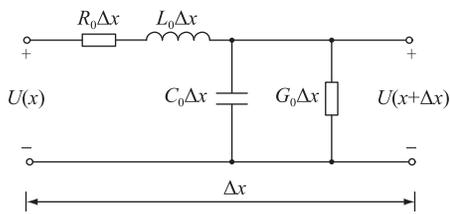


图 1 分布参数电路

Fig.1 Circuit of distribution parameters

在高频环境下,流过电缆导体的电流将不会在导体内部均匀地分布,而是集中在导体表面附近,这种物理现象被称为趋肤效应。考虑到该效应对电气性质的影响,单位长度电缆的各分布参数可近似由式(1)一式(4)求得。

$$R_0 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (1)$$

$$L_0 = L_i + L_e \approx \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} \left(\frac{\delta_c}{r_c} + \frac{\delta_s}{r_s} \right) + \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln \left(\frac{r_s}{r_c} \right) \quad (2)$$

$$G_0 \approx 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \omega / \ln(r_s/r_c) \quad (3)$$

$$C_0 \approx 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r' / \ln(r_s/r_c) \quad (4)$$

式中: r_c 为电缆缆芯半径; r_s 为电缆屏蔽层半径; ω 为角频率; ε_0 为真空介电常数; ε_r' 、 ε_r'' 分别为介质相对介电常数的实部与虚部; μ_0 、 μ_r 分别为真空磁导率和介质相对磁导率; ρ_c 、 ρ_s 分别为缆芯电阻率和屏蔽层电阻率; L_i 、 L_e 分别为单位长度电缆的内电感和外电感; δ_c 、 δ_s 分别为导体和屏蔽层的趋肤深度,其值可由式(5)求得。

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (5)$$

式中: δ 为趋肤深度; ρ 、 μ 分别为介质的电阻率和磁导率。

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial l} = -R_0 I - L_0 \frac{\partial I}{\partial t} \\ \frac{\partial I}{\partial l} = -G_0 U - C_0 \frac{\partial U}{\partial t} \end{cases} \quad (6)$$

式中: U 、 I 分别为传输线的电压和电流; l 为传输线长度。根据式(6),可得正常状态下电缆的特征阻抗 Z_0 ,如式(7)所示。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (7)$$

又由于 TFDR 采用的入射信号为高频信号,有 $\omega L_0 \gg R_0$ 且 $\omega C_0 \gg G_0$,故特征阻抗值可仅由单位长度电感和电容得到:

$$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0} \quad (8)$$

1.2 信号的折反射与反射系数

由传输线理论可知,电缆某处的结构受到破坏而发生变化时,此处的分布参数会相应改变,表现在特征阻抗的变化上,该处亦被称为阻抗不匹配点。当在电缆内部传播的电磁信号波到达阻抗不匹配点时,根据行波理论,信号波会发生折反射。信号折反射示意图 2,当电缆某处存在缺陷时,传输线模型表现为一阻抗不匹配段,传输信号在不匹配处产生一折射信号和一反射信号。电缆末端若不连接负载,可视作断路缺陷,其特征阻抗便认为无穷大,故折射信号到达电缆末端便会发生全反射。图 2 中, x_1 、 x_2 分别为电缆缺陷段的起点和终点; γ_0 、 γ_1 分别为电缆正常段和缺陷段的传播常数。

若电缆缺陷段的特征阻抗为 Z_1 ,正常处为 Z_0 ,末端的负载阻抗为 Z_L ,则在末端的反射系数 Γ_1 为:

$$\Gamma_1 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (9)$$

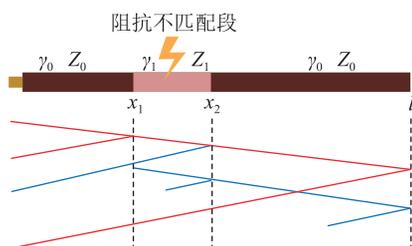


图2 信号折反射示意

Fig.2 Schematic diagram of signal refraction and reflection

由于此处电缆末端开路,故 Z_L 为无穷大。同时可得在 x_2 处的输入阻抗 Z_{x_2} 和反射系数 Γ_2 分别为:

$$\begin{cases} Z_{x_2} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_1 e^{-2\gamma_0(l-x_2)}}{1 - \Gamma_1 e^{-2\gamma_0(l-x_2)}} \\ \Gamma_2 = \frac{Z_{x_2} - Z_1}{Z_{x_2} + Z_1} \end{cases} \quad (10)$$

在 x_1 处的输入阻抗 Z_{x_1} 和反射系数 Γ_3 分别为:

$$\begin{cases} Z_{x_1} = Z_1 \frac{1 + \Gamma_2 e^{-2\gamma_1(x_2-x_1)}}{1 - \Gamma_2 e^{-2\gamma_1(x_2-x_1)}} \\ \Gamma_3 = \frac{Z_{x_1} - Z_0}{Z_{x_1} + Z_0} \end{cases} \quad (11)$$

反射系数亦表示此处反射信号与入射信号幅值之比,衡量了局部电气参数的变化大小。故可通过分析某处反射系数的大小,判断该处缺陷的严重程度。

1.3 TFDR

1.3.1 入射信号

考虑到信号在时域与频域确定范围内均有意义,TFDR 采用的入射信号为在时域与频域均有紧致性的高斯包络线性调频信号。其中高斯包络将调频信号的持续时间与信号幅值限定在局部。入射信号的函数表达式如下:

$$s(t) = (\alpha/\pi)^{1/4} e^{-\alpha(t-t_0)^2/2 + j\beta(t-t_0)^2/2 + j\omega_0(t-t_0)} \quad (12)$$

$$\begin{cases} T_s = 1/(2\alpha) \\ B_s = (\alpha^2 + \beta^2)/(2\alpha) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $e^{-\alpha(t-t_0)^2/2}$ 为高斯包络部分; $e^{j\beta(t-t_0)^2/2 + j\omega_0(t-t_0)}$ 为线性调频部分; $(\alpha/\pi)^{1/4}$ 为信号的峰值大小; α 、 β 分别为函数实部与虚部的二次系数,共同决定了信号持续时间 T_s 和扫频频带宽度 B_s ; t_0 、 ω_0 分别为信号的时间中心和频率中心。信号参数的选取详见文献 [16]。

在无损线中传输的信号,其相速度 v_p 可通过式 (14) 求取,其中 L 、 C 分别为无损线中的单位分布电感和电容。

$$v_p \approx 1/\sqrt{LC} \quad (14)$$

1.3.2 时频分布

传统 TFDR 采用 WVD 展开信号的时域和频域,参考信号在 WVD 处理后展开如图 3 所示。TFDR 信号可看作由时域反射法 (time domain reflectometry, TDR) 信号与频域反射法 (frequency domain reflectometry, FDR) 信号结合而成 [17]。TDR 采用确定持续时间的阶跃波,由于理想阶跃波是具有全频段的,故 TDR 无法分辨频域中的内容;而 FDR 采用确定频带宽度的线性调频正弦波,其具有无限持续时间的特点,故 FDR 很难分辨时域中的内容。TFDR 信号在 2 个方向上均有一定的宽度,时域上表示为持续时间,频域上表示为频带宽度,故其在时频域上均有一定的分辨率。

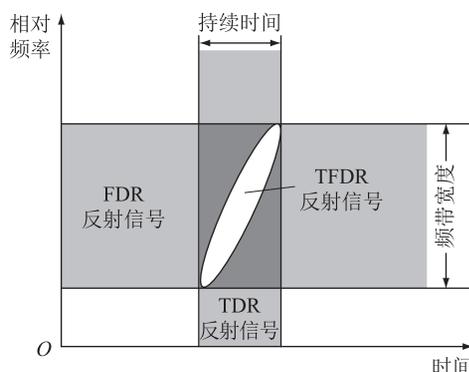


图3 TFDR 信号时间与频率关系

Fig.3 The relationship between time and frequency of TFDR signal

WVD 时频分布的表达式为:

$$D_{WVD}(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} s^* \left(t - \frac{1}{2}\tau \right) s \left(t + \frac{1}{2}\tau \right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (15)$$

式中: $s^*(\cdot)$ 为信号的共轭函数; τ 为积分变量。由于在对多个信号分量进行 WVD 处理时,会产生交叉项的干扰,严重影响原信号的分析处理。故现有研究引入了 PWVD 和 SPWVD 代替传统的 WVD。其中, PWVD 通过加入窗函数以减小交叉项对结果带来的负面影响 [17], SPWVD 在此窗函数基础上加入平滑滤波以抑制交叉项,但会牺牲一定的分辨率,且导致检测结果中定位峰主瓣较宽 [18]。PWVD 与 SPWVD 的函数表达式分别为:

$$D_{PWVD}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s \left(t + \frac{1}{2}\tau \right) s^* \left(t - \frac{1}{2}\tau \right) h(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (16)$$

$$D_{SPWVD}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \left(\int_{-\infty}^{+\infty} g(s - \tau) s^* \left(t - \frac{1}{2}\tau \right) \times s \left(t + \frac{1}{2}\tau \right) ds \right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (17)$$

式中: $h(\cdot)$ 、 $g(\cdot)$ 分别为时域和频域方向的平滑窗函数。

1.3.3 时频互相关曲线分析

根据上述计算得到入射、反射信号的时频分布,可通过式(18)计算两者的时频互相关曲线(time-frequency cross-correlation, TFCC)归一化函数^[19]。该函数在入射、反射信号之间的连续范围内积分,其本质在于:对两者时频分布内的元素进行比对,若某时刻二者匹配度高,则互相关函数值大,反之亦然。由于反射信号的出现并非阶跃或突变,故 TFCC 归一化函数为一含有有限极大值(峰值)的连续曲线。

$$C_{\text{sr}}(\tau) = \frac{2\pi}{E_s E_r} \int_{\tau-T_s}^{\tau+T_s} \int_{-\infty}^{+\infty} D_r(t, \omega) D_s(t - \tau, \omega) d\omega dt \quad (18)$$

式中: E_s 、 E_r 分别为入射、反射信号的时频域总能量,可通过对时频分布进行二重积分得到,如式(19)所示; $D_r(t, \omega)$ 、 $D_s(t, \omega)$ 分别为入射、反射信号的时频分布函数。 E_s 、 E_r 在分母位置上保证了 TFCC 的函数值在 $[0, 1]$ 范围内连续变化,归一化的定义表现于此。

$$\begin{cases} E_r = \int_{\tau-T_s}^{\tau+T_s} \int_{-\infty}^{+\infty} D_r(t, \omega) d\omega dt \\ E_s = \int_{-T_s}^{T_s} \int_{-\infty}^{+\infty} D_s(t, \omega) d\omega dt \end{cases} \quad (19)$$

TFCC 内的有限极大值点可表示为电缆中的有限缺陷点,通过确定局部峰值的时间位置,便可得到该点反射信号相对于入射信号的时间延迟 Δt 。利用信号在电缆内的传输速度,根据式(20)可得该缺陷点到电缆首端的距离,实现定位,其中 v 为信号在导体传输的波速; x_0 为定位距离。

$$x_0 = v\Delta t/2 \quad (20)$$

电缆某处的 TFCC 函数值越高,此处缺陷越严重。故 TFCC 上的局部峰值点,在横轴上的意义为缺陷的位置,在纵轴上的幅值衡量了该处缺陷的严重程度^[20]。

1.3.4 时间延迟修正

上述对于电缆缺陷点的定位是在无损传输线的理想状态下讨论的,高频信号在实际电缆的传输中,通常会存在一定程度的衰减和色散^[21],即幅值的衰弱以及相位的偏差。故实际信号的时间中心 t_0 与频率中心 ω_0 均将发生偏移,且其偏移量与高频信号的频率有关^[22]。为便于计算,在约定频率范围内,令其信号幅值衰减和相位偏移均与频率呈线性相关,即:

$$\begin{cases} a \approx A\omega \\ k \approx K\omega \end{cases} \quad (21)$$

式中: a 为衰减因子; k 为色散因子; A 、 K 分别为两线性函数的比例系数。

故修正后的时间延迟为:

$$\Delta t' = \Delta t + \delta t = \Delta t + \delta\omega/\beta \quad (22)$$

式中: $\delta\omega$ 为实际信号频率中心与理想信号的频率偏移量; β 为式(12)中参考信号设计时确定的参数,两者比值可用 δt 表示,其对反射信号的时间延迟进行补偿修正。

2 基于 TFDR 的实验验证

2.1 实验准备

2.1.1 仪控电缆结构

文中以 IE 级 K1/K3 类多芯交联聚烯烃仪控电缆为研究对象,其横剖面结构如图 4 所示。该类电缆由阻燃外护套、金属屏蔽、外绝缘、铜丝编织、填充层、内绝缘包裹的多芯导体构成^[23],其额定电压一般分为 1~5 V、48 V 和 125 V。

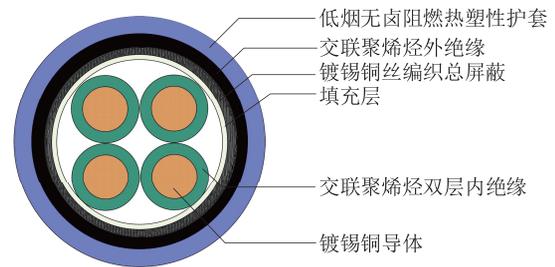


图 4 多芯交联聚烯烃仪控电缆横剖面示意

Fig.4 Cross-sectional view of multi-core cross-linked polyolefin instrumentation and control cable

2.1.2 检测平台

为对实际核电站仪控电缆进行缺陷检测有效性验证,以任意函数发生器、数字示波器、高性能计算机组建缺陷检测平台。利用 MATLAB 完成入射信号产生、时频分布、归一化时频互相关处理分析以及缺陷距离计算的工作。

将实验仪器设备按图 5 所示的结构进行连接。将计算机生成的高斯包络线性调频信号载入到任意函数发生器中,并通过 T 型接头分别入射到仪控电缆样品与数字示波器。信号线探头连接电缆的缆芯导体,信号线屏蔽连接电缆的屏蔽层。当高频信号在电缆中遇到阻抗不匹配段时,便发生信号的折反射现象,由数字示波器采集入射、反射信号,并转换为数字数据。计算机通过预定公式进行数据处理,得到可视化的检测结果。

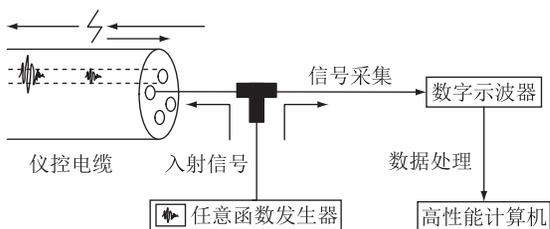


图5 TFDR 检测系统示意

Fig.5 Schematic diagram of TFDR detection system

2.2 正常电缆检测

文中实验对象为 50 m 的 K1 类多芯交联聚烯烃仪控电缆样品,实验中入射参数的持续时间 T_s 为 178 ns, 带宽 B_s 为 100 MHz, 频率中心 ω_0 为 450 MHz。

由于仪控电缆试样的首末端已为自然开路状态^[24],故选择便于连接探头的一端作为首端,使用上述系统对电缆试样进行缺陷检测。利用 WVD 对电缆试样的信号数据进行时频分析处理,得到的时域波形和 TFCC 结果如图 6 所示。

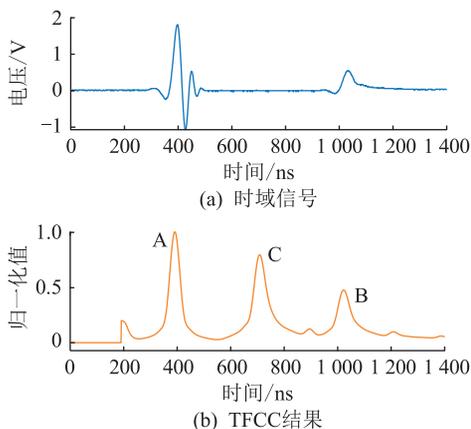


图6 时域信号与 WVD 处理后的 TFCC 检测结果

Fig.6 Time domain signals and TFCC detection results after WVD processing

图 6(a) 为时域波形,即数字示波器采集到的信号。时间轴 400 ns 附近的信号段为入射信号,1 000 ns 附近的信号段为由电缆末端断路引起的全反射信号,由于信号在传输中持续衰减,故反射信号经过 2 倍电缆长度的传输,幅值和频率已发生一定的衰弱。在采集到正常电缆的时域信号后,根据示波器的水平刻度可得入射、反射信号时间差。由于实验电缆的长度已知,根据式 (20) 可得此入射信号在该类电缆中行进波速约为 151 200 km/s,该值在后续实验中用于计算 TFCC 的缺陷定位距离。

图 6(b) 为使用 WVD 进行时频分布处理的 TFCC 结果,其有 3 个波峰,分别为 A、B、C。其中,波峰 A 是由入射信号的自相关引起,波峰 B 是由电

缆末端断路产生反射信号引起的互相关峰值,波峰 C 时间轴对应的时域波形并没有发现明显反射信号。

为进一步探究图 6(b) 中波峰 C 是否为交叉项,对仅入射信号、仅末端反射信号、整信号段分别进行 WVD 处理,得到的结果如图 7 所示。在单信号的 WVD 处理结果中,仅存在单个能量块,如图 7(a)、(b) 所示。但在图 7(c) 中,对 2 个信号同时进行时频分析时,2 个能量块之间存在一个单信号 WVD 处理结果中均未出现的交叉干扰项。该交叉项为有断层的能量块,且其能量强度介于入射、反射信号的能量强度之间^[25-26]。由此可以判断,波峰 C 是 WVD 处理时产生的交叉项,其对 TFCC 的解读产生了干扰。

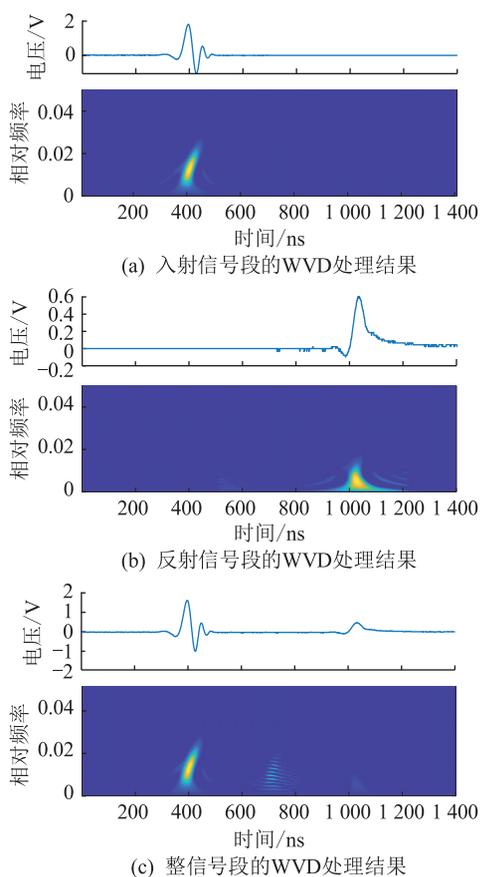


图7 不同信号段的 WVD 处理结果

Fig.7 WVD results of different signal segments

为分析不同的时频分布方法对检测结果的影响,分别采用 PWVD 与 SPWVD 对原信号进行时频分析处理,得到的 TFCC 结果如图 8 所示。可以发现,2 个 TFCC 中间的交叉干扰峰均被显著削弱。PWVD 基于 WVD 并加入窗函数进行处理,能降低交叉项能量块的强度,且其很大程度地保留了分布结果的细节;而 SPWVD 基于 WVD 加入窗处理,并与平滑函数进行卷积,牺牲更多的时频分辨率以对

交叉项进行处理,故其弱化了时频分析的边缘特征,提高了TFCC的峰值聚集性能。对比图8(b)与图6(b)的波峰,可以发现,经SPWVD处理的TFCC更加圆滑,其定位峰的主瓣更宽,时频空间分辨率更低,这会导致其定位的精度比WVD与PWVD要低。综合比较图8(a)与图8(b)可知,PWVD的检测效果要比SPWVD更好。

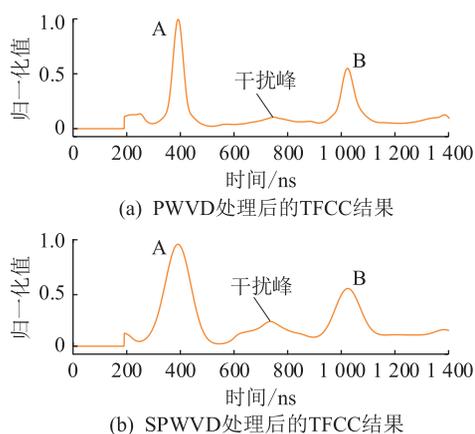


图8 PWVD与SPWVD处理后的TFCC检测结果

Fig.8 TFCC detection results after PWVD and SPWVD processing

2.3 单缺陷检测

对电缆进行绝缘屏蔽层破损的缺陷模拟,设置其位置为距离首端21 m处。具体做法为:将电缆试样的外绝缘、金属屏蔽、铜丝编织按一定宽度环割掉,宽度大约为3~5 cm;刮开铜丝编织与附近填充层,并将确定缆芯的内绝缘层剖开长度为1~2 cm、宽度为0.5 cm的切口,如图9所示。使用基于TFDR的系统进行检测,得到的时域信号如图10(a)所示。为探究PWVD与SPWVD对交叉项处理效果的区别,对图10(a)中3个独立信号段的时频分布分别采用PWVD与SPWVD进行处理,得到的TFCC结果如图10(b)、图10(c)所示。



图9 电缆绝缘屏蔽层破损示意

Fig.9 Schematic diagram of metal shield damage

图10(b)中,A、B两波峰与上述电缆末端断路的情况一致,不再赘述。波峰C为电缆中间段绝缘屏蔽层破损的定位峰,对比时域信号的时间位置,也可以得到验证。而在AC波峰与BC波峰间,均产

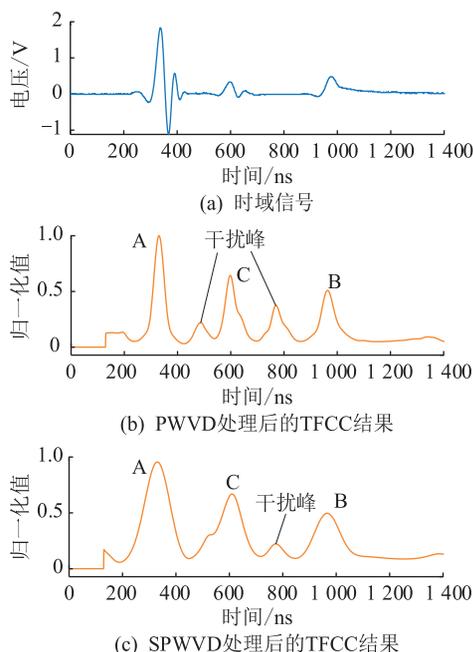


图10 绝缘屏蔽层破损的时域信号与TFCC检测结果

Fig.10 Time domain signals and TFCC detection results of metal shield damage

生了一个幅值较小的干扰峰,由上述讨论可知,其为PWVD处理时产生的交叉项。图10(c)中,采用SPWVD进行分布处理后,AC波峰间的干扰峰已经被定位峰C的主瓣覆盖,而BC波峰间的干扰峰也被抑制,导致其值更小。在对3个独立信号段的分布处理中,SPWVD对交叉项的抑制效果比PWVD更好。

在TFCC检测结果中,可以计算缺陷定位峰与入射信号自相关峰的时间差,根据式(20)可进一步得到定位距离。电缆试样中,绝缘屏蔽层破损的定位距离与误差如表1所示。2种分布处理后的定位距离均接近真实故障点位置,且误差均小于5%。若忽视干扰峰带来的影响,PWVD时频分布后处理的定位效果更好。

表1 绝缘屏蔽层破损的定位结果

Table 1 Location results of metal shield damage

时频分布算法	定位距离/m	误差/%
PWVD	21.200	0.952
SPWVD	21.899	4.281

将绝缘屏蔽层缺陷处改造成短路缺陷,具体做法为:利用小导体将裸露的电缆线芯与金属屏蔽短接,并使用电工胶带环绕固定;使用铜带环绕包裹缺陷处,使用电工胶带进行二次环绕。基于TFDR进行检测,其中时频分布算法采用SPWVD,得到的检测结果如图11所示。图11(a)为时域信号波形,时间轴600 ns附近出现的信号波为短路缺陷产生

的反射信号,可以发现其与参考信号的正负性相反。这是由于短路缺陷段的输入阻抗近似为 0,根据式(11),将 0 代入 Z_{x1} ,可得反射系数 $\Gamma_3 < 0$ 。根据图 11(b)可计算得到定位距离为 22.473 m,误差为 7.014%。

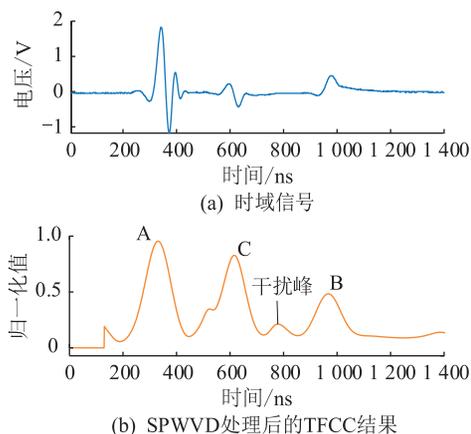


图 11 短路缺陷的时域信号与 TFCC 检测结果
Fig.11 Time domain signals and TFCC detection results of short circuit defect

2.4 双缺陷检测

为探究离线电缆中同时存在两处缺陷(不包括末端断路)能否被准确检测出来,保留电缆试样中间段绝缘屏蔽层缺陷,在电缆距离首端 44 m 的位置再制造一处短路缺陷。具体方法与前述相同,但不环剖,仅将绝缘屏蔽层切开一 4 cm×4 cm 的缺口,并将线芯内绝缘刮开,方便线芯与屏蔽层短接即可。

经过检测,得到如图 12 所示的时域信号与 TFCC 结果。其中,在时域信号中能观察到第二处缺陷的反射信号,但是经过 SPWVD 处理后,第二处缺陷的定位峰与电缆末端断路的定位峰相互重叠,导致该区间仅显示一处定位峰 D,如图 12(b)所示。这是因为第二处缺陷位置与末端过近,而经过 SPWVD 处理后的定位峰主瓣较宽,使得电缆近末端处存在一定距离的检测盲区。可计算得到定位距离为 45.651 m,误差为 3.752%。

2.5 局部热老化检测

为能使核电站内的仪控电缆控制机组设备,通常将其敷设在温度较高、核辐射较大、环境较恶劣的管道处。仪控电缆的某些位置通常会受到长时间的高温辐射,这会使得该处绝缘层的微观结构发生变化,即出现局部热老化现象。具体表现在:在老化前期和中期,绝缘的分子链加速断裂,产生低分子产物,容易出现二次结晶的现象,从而加剧界面极化,最终导致绝缘层介电常数 ϵ_r' 上升;在老化后期,热运动的加剧将进一步阻碍偶极子沿电场方向

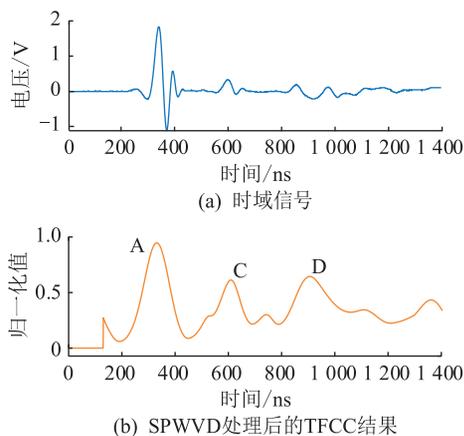


图 12 两处缺陷的时域信号与 TFCC 检测结果
Fig.12 Time domain signals and TFCC detection results of two defects

的有序排列,从而削弱极性效应,绝缘层介电常数 ϵ_r' 下降。根据式(4)、式(8)可知,无论是老化的前、中、后期,相应的局部热老化缺陷均会导致该处出现阻抗不匹配的现象。

采用 148 m 的 K3 类多芯交联聚烯烃仪控电缆试样进行局部加速热老化模拟。具体做法为:将电缆的局部放入恒温箱中,并使用锡纸覆盖入口,如图 13 所示。在距首端 27 m 处进行局部热老化处理,施加温度为 130 °C,持续时间为 14 d。在距首端 58 m 处设置第二个局部热老化缺陷,施加温度为 150 °C,持续时间为 21 d。



图 13 电缆的局部加速热老化实验示意
Fig.13 Schematic diagram of local accelerated thermal aging experiment for cables

加速热老化处理后的试样使用 TFDR 进行检测,得到的检测结果如图 14 所示。时域信号中缺陷处反射信号的幅值较低,与入射信号及末端反射信号相比不明显。但在 TFCC 中,其定位峰峰值较高,能较好反映缺陷的存在。经过 SPWVD 处理后,定位峰的主瓣较宽,两处老化缺陷定位峰的部分相互叠加,导致缺陷区间上仅存在一个定位峰。

为改善此问题,文中提出归一化时频域互相关中的能量区间放缩法,改变归一化时分母能量的区间,即改变函数中 E_r 的积分区间,这对调整 TFCC 定

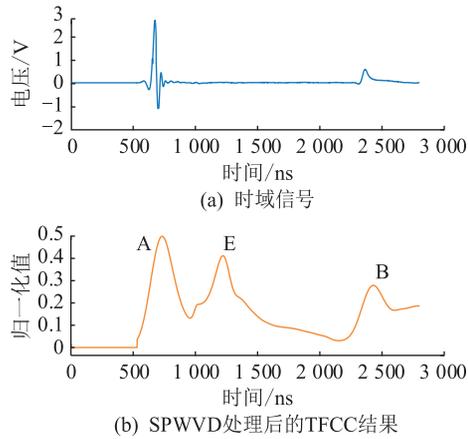


图 14 局部热老化的时域信号与 TFCC 检测结果
Fig.14 Time domain signals and TFCC detection results of local thermal aging

位峰的瓣宽和峰值有一定帮助。式(19)中对时间积分的上下限分别为 $\tau+T_s$ 和 $\tau-T_s$, 其中 T_s 为入射信号的持续时间的一半, 现今修改后的积分上下限分别为 $\tau+T_y$ 与 $\tau-T_y$, T_y 为一设定的时间长度, 其值与 T_s 的量级相同, 修改后 E_r 如式(23)所示。

$$E_r = \int_{\tau-T_y}^{\tau+T_y} \int_{-\infty}^{+\infty} D_r(t, \omega) d\omega dt \quad (23)$$

为探究该参数的不同取值能否对定位结果有更好的改善, 文中以 0.2 为步长, 取 T_y/T_s 在 [0.6, 1.4] 内变化。对不同取值的积分上下限进行重新计算, 并代入到 TFCC 计算中, 得到的结果如图 15 所示。结果表明, 通过改变积分上下限区间, 即改变 T_y 的值, 能使定位峰的幅值发生变化。减少 T_y 的值可使定位峰的瓣宽变窄, 峰值变高, 使不同缺陷的定位峰区分开来, 而不易混叠在一起。且由图 15 可知, 当 T_y/T_s 在 [0.6, 1.0] 之间时, 缺陷的区分效果更好。

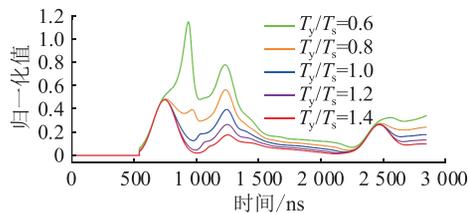


图 15 0.2 为步长放缩 T_y/T_s 的 TFCC 结果
Fig.15 TFCC results of scaling T_y/T_s in steps of 0.2

为探究在该实验中 T_y/T_s 的最佳取值, 取 0.05 为步长, 令 T_y/T_s 在 [0.65, 0.95] 内变化, 得到的结果如图 16 所示。对所有曲线中的定位距离及其误差进行计算, 得到的定位结果如表 2 所示。

结合表 2 及图 16 数据可知, 第二处缺陷定位峰的定位距离基本不随 T_y/T_s 的变化而改变; 第一处缺陷的定位距离, 随着 T_y/T_s 的改变, 逐渐往实际缺

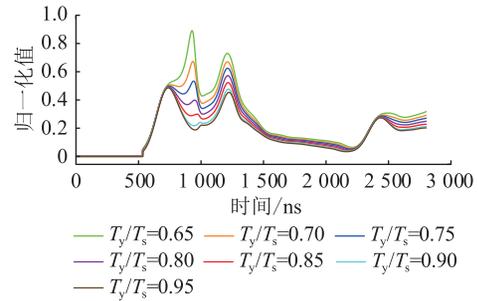


图 16 0.05 为步长放缩 T_y/T_s 的 TFCC 结果
Fig.16 TFCC results of scaling T_y/T_s in steps of 0.05

表 2 局部热老化缺陷定位结果

Table 2 Localization results of local thermal aging defect

T_y/T_s	第一处		第二处	
	定位距离/m	误差/%	定位距离/m	误差/%
0.65	16.832	37.659	41.513	28.426
0.70	17.443	35.396	41.513	28.426
0.75	17.966	33.459	41.600	28.276
0.80	18.751	30.552	41.775	27.974
0.85	20.408	24.415	41.949	27.674
0.90	22.414	16.985	42.211	27.222
0.95	24.071	10.848	42.385	26.922

陷位置靠近。这是由于第二处的局部老化程度较高, 其定位峰能量在两者中的占比较大。但由于加速热老化的施温时间较短, 两处特征阻抗值改变的量不大, 故两者的定位误差较大, 均在 20%~30%。

当 T_y/T_s 取 0.80 与 0.85 时定位效果最佳, 能明显看出定位峰, 且误差在所有曲线中相对较小。故适当减少归一化的能量区间, 即 E_r 的积分上下限区间, 可增加定位峰的峰值, 减少主瓣宽度, 更易区分相近的缺陷定位峰, 并减少定位误差。上述实验亦表明, 对于时域中较小的反射信号, 通过时频分析及互相关处理后, 也能识别出缺陷的存在。

3 结论

文中对国产 50 m 与 148 m 的多芯仪控电缆进行了短路、断路、绝缘屏蔽层破损及局部热老化的缺陷模拟实验。基于传统 TFDR 的 WVD 时频分布方法, 通过比较 PWVD 与 SPWVD 算法, 分析了各时频分布算法在缺陷识别上的可靠性。并采用 TFCC 的能量区间放缩法, 对局部老化的微弱缺陷进行判别。得到如下结论:

(1) 时域信号经过 WVD 处理后, 产生的交叉项会对 TFCC 的定位结果产生干扰。PWVD 与 SPWVD 能减弱交叉项的能量强度, TFCC 结果能得到一定的改善。在正常电缆的检测中, PWVD 对交叉项的抑制效果更好。

(2) 对于电缆中存在的单缺陷,SPWVD 对交叉项的抑制效果比 PWVD 更好。经过 SPWVD 处理后,定位峰的主瓣较宽,会降低缺陷定位的精度,但若忽略交叉项对结果判断的干扰,PWVD 处理后的检测精度更高,定位误差仅有 0.952%。

(3) 在对电缆局部热老化的检测中,通过采用能量区间放缩法,可使 TFCC 定位峰的主瓣变窄,峰值变高,有利于区分相近的相互重叠的定位峰,加强对微弱反射信号的判别。

实际工程操作中可结合 SPWVD 的强抑制交叉项和 PWVD 的精准定位 2 个优点,对整体仪控电缆单个或多个缺陷进行可靠识别和定位。对于精密仪器的仪控电缆,可进一步采用能量区间放缩法先对仪控电缆中微弱缺陷进行精确识别。文中所提方法对核电站中仪控电缆的可靠运维具有重要意义。

参考文献:

- [1] ABRO S H, SHAH S A A, ALABOODI A S, et al. Ageing analysis of power cable used in nuclear power plant[J]. Mehran University Research Journal of Engineering and Technology, 2020, 39(1):195-204.
- [2] 范遂. 核电站安全级仪控设备寿命内的质量鉴定[J]. 产业与科技论坛, 2019, 18(10):62-63.
FAN Sui. Quality appraisal of safety-level instrument and control equipment in nuclear power plant during its service life[J]. Industrial & Science Tribune, 2019, 18(10):62-63.
- [3] 吴斌, 陈焯强. AVC 在大型核电厂中的应用与存在问题探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(3):44-49.
WU Bin, CHEN Yeqiang. Discussion on application and problems of automatic voltage control in large nuclear power plant[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3):44-49.
- [4] 文朗, 白会贤, 郝庆福. 核电站仪控全数字化改造项目规划和对策分析[J]. 产业与科技论坛, 2019, 18(11):212-213.
WEN Lang, BAI Huixian, HAO Qingfu. Planning and countermeasure analysis of all-digital transformation project of instrument and control innuclear power plant[J]. Industrial & Science Tribune, 2019, 18(11):212-213.
- [5] MCCARTER D, SHUMAKER B, MCCONKEY B, et al. Nuclear power plant instrumentation and control cable prognostics using indenter modulus measurements[J]. International Journal of Prognostics and Health Management, 2020, 6(3).
- [6] 李睿, 阎春雨. 高压 XLPE 电缆护层缺陷及检测技术[J]. 河北电力技术, 2004, 23(4):10-12, 20.
LI Rui, YAN Chunyu. Defects in armour layer of high voltage XLPE cable and their detecting technology[J]. Hebei Electric Power, 2004, 23(4):10-12, 20.
- [7] 唐明琪. 电缆故障检测的技术应用[J]. 电气时代, 2015(2):93-96.
TANG Mingqi. Technical application of cable fault detection[J]. Electric Age, 2015(2):93-96.
- [8] 王兴, 张琪, 陈亮, 等. 时域反射法在核级电缆状态监测的应用[J]. 电子技术应用, 2021, 47(S1):28-31.
WANG Xing, ZHANG Qi, CHEN Liang, et al. The use of time-domain reflectometry (TDR) in early detection of the nuclear cable defects[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(S1):28-31.
- [9] WANG Y, WU X, LI W Z, et al. Analysis of micro-Doppler signatures of vibration targets using EMD and SPWVD[J]. Neurocomputing, 2016, 171:48-56.
- [10] 曾哲, 邓丰, 张振, 等. 基于 VMD-WVD 的故障行波全波形时-频分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7):49-57.
ZENG Zhe, DENG Feng, ZHANG Zhen, et al. Time-frequency analysis of a traveling wave based on VMD and WVD[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7):49-57.
- [11] 王瑶瑶, 姚周飞, 谢伟, 等. 基于时频域反射法的高温超导电缆故障定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5):1540-1547.
WANG Yaoyao, YAO Zhoufei, XIE Wei, et al. Research on fault location of high temperature superconducting cable based on time-frequency domain reflectometry[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5):1540-1547.
- [12] 尹振东, 王莉, 陈洪圳, 等. 增广时频域反射法在电缆复合故障检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23):7760-7773.
YIN Zhendong, WANG Li, CHEN Hongzhen, et al. Application of augmented time frequency domain reflectometry in detection of complex cable faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23):7760-7773.
- [13] FENG B, ZHANG L, HOU S, et al. Research on cable defect location method based on joint time-frequency analysis[C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Chongqing, China. IEEE, 2021:1-4.
- [14] 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):2584-2594.
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):2584-2594.
- [15] LEE C K, CHANG S J. Fault detection in multi-core C&I cable via machine learning based time-frequency domain reflectometry[J]. Applied Sciences, 2019, 10(1):158.
- [16] SHIN Y J, POWERS E J, CHOE T S, et al. Application of time-frequency domain reflectometry for detection and localization of a fault on a coaxial cable[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(6):2493-2500.
- [17] 李蓉, 周凯, 万航, 等. 基于频域反射法的 10 kV 配电网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 10 kV cable joints in medium voltage distribution grid based on frequency domain reflection [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(2): 825-832.
- [18] 刘韬, 马回明, 韩飞, 等. 核电厂低压电缆的老化状态监测技术[J]. *电线电缆*, 2009(4): 34-36.
- LIU Tao, MA Huiming, HAN Fei, et al. The monitoring technique for ageing of low voltage cables for nuclear power plant [J]. *Electric Wire & Cable*, 2009(4): 34-36.
- [19] CHUN-KWON, JIN S O. Diagnostics of control and instrumentation cables in nuclear power plant via time-frequency domain reflectometry with optimal reference signal [C]//9th International Conference on Insulated Power Cables, 2015.
- [20] SHI X D, ZHANG L, JING T, et al. Research on aircraft cable defects locating method based on time-frequency domain reflection [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 17: 446-454.
- [21] 刘凯. 基于时频域联合分析的电力电缆故障定位方法研究 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.
- LIU Kai. Research on fault location of power cable based on time-frequency domain joint analysis method [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [22] PIRC M, AVSEC J, ČELAN KOROŠIN N, et al. Cable aging monitoring with differential scanning calorimetry (DSC) in nuclear power plants [J]. *Transactions of FAMENA*, 2018, 42 (Si1): 87-98.
- [23] FABIANI D, SURACI S V, BULZAGA S. Aging investigation of low-voltage cable insulation used in nuclear power plants [C]//2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). San Antonio, TX, USA. IEEE, 2018: 516-519.
- [24] 王春逢. 交联聚乙烯电缆缺陷老化特性与寿命评估研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- WANG Chunfeng. Research on fault aging characteristics and life evaluation of XLPE cable [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [25] 高向南. 基于频域反射的电缆局部老化诊断仿真研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- GAO Xiangnan. Simulation research on cable local aging diagnosis based on frequency domain reflection [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [26] 王昊月, 李成榕, 王伟, 等. 高压频域介电谱诊断 XLPE 电缆局部绝缘老化缺陷的研究 [J]. *电工技术学报*, 2022, 37(6): 1542-1553.
- WANG Haoyue, LI Chengrong, WANG Wei, et al. Local aging diagnosis of XLPE cables using high voltage frequency domain dielectric spectroscopy [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(6): 1542-1553.

作者简介:



王志武

王志武(1975),男,硕士,高级工程师,从事仪控设备可靠性技术相关工作(E-mail: wangzhiwu@cgnpc.com.cn);

涂画(1984),男,学士,高级工程师,从事仪控设备可靠性技术相关工作;

李力行(1999),男,硕士在读,研究方向为电力设备状态监测和信号处理。

Defect detection of I&C cable in NPP based on TFDR

WANG Zhiwu¹, TU Hua¹, LI Lixing², DENG Honglei²

(1. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To ensure safe operation of instrumentation and control (I&C) cables in nuclear power plants (NPP), time-frequency domain reflectometry (TFDR) is widely applied to identify and locate typical defects in I&C cables. The advantages of Wigner-Ville distribution (WVD), pseudo Wigner-Ville distribution (PWVD), and smooth pseudo Wigner-Ville distribution (SPWVD) are compared. In addition, the energy range scaling method is proposed in the time-frequency cross-correlation (TFCC) processing. During the experiment, a 50-meter and a 148-meter multi-core cross-linked polyolefin I&C cable are prepared to simulate several failure cases, including short circuit, open circuit, metal shield damage, and local thermal aging defect. Based on the TFDR method, three time-frequency distribution algorithms are adopted. Then, the energy range scaling method is applied to improve the problem of wide main lobe of TFCC localization peak. The experimental results show that the main lobe of TFCC is wider after SPWVD processing. PWVD has a better inhibitory effect on cross terms in normal cable detection. In terms of detecting a defect, SPWVD has better detection ability. By using the energy range scaling method, similar localization peaks can be separated to enhance the discrimination of weak reflection signals.

Keywords: instrumentation and control (I&C) cable; defect detection; fault location; time-frequency domain reflectometry (TFDR); time-frequency analysis; time-frequency cross-correlation (TFCC)

(编辑 陆海霞)