

基于联合时频域反射法的电力电缆故障定位方法

张卓然^{1*}, 骆力州²

¹内蒙古电力(集团)有限责任公司呼和浩特供电分公司, 内蒙古呼和浩特, 中国

²国网北京市电力公司, 北京, 中国

*通讯作者

【摘要】电力电缆运行的可靠性对于保障电网的安全稳定运行至关重要。为了全面评估电缆的健康状态, 亟需一种能够精准识别、定位缺陷并预测潜在故障的技术。本文首先对传统的电缆诊断方法—时域反射法(Time domain reflectometry, TDR)和频域反射法(Frequency domain reflectometry, FDR)进行了深入分析, 探讨了其基本原理及固有局限性。在时域反射法和频域反射法的基础上, 提出采用联合时频域反射法(joint time-frequency domain reflectometry, JTFDR)作为本文的电缆故障诊断方法。实验结果表明, JTFDR能够成功实现对目标交联聚乙烯绝缘电缆的检测与精确定位, 验证了该方法的有效性。

【关键词】电力电缆; 故障; 定位; 联合时频域反射法

1. 引言

在电力系统基础设施中, 电缆在电网系统重的作用如同人体的血管一般不可或缺。然而, 电缆在运行过程中会受到多种应力的影响, 例如电气应力、机械应力、化学应力, 特别是热应力的作用。热应力通常源于带电内导体通过绝缘层向周围土壤散发热量的过程。在此过程中, 电缆的化学特性和物理结构可能发生改变, 从而加速水分树现象的发展。水分树是一种渐进式的退化过程, 通常起始于含有水分的缺陷或杂质区域, 在常规运行条件下, 上述任何一种应力都可能对电缆造成潜在损害[1-3]。

电缆线路中的故障通常会引发严重的经济损失。为了减少停电风险并降低维修成本, 需要一种诊断技术, 能够在故障造成实际损害之前, 精确识别并定位硬性故障(例如开路或短路)以及早期缺陷(如细微异常或潜在隐患)[4-7]。

电缆诊断方法丰富多样, 涉及机械、化学以及电气技术等多个领域。然而, 这些方法或具有破坏性, 或需要在实验室环境中实施, 或无法有效预测电缆未来的性能。相比之下, 电气技术因其适用于现场高效诊断而成为一种更为理想的解决方案。当前, 市场上提供了多种电缆测试仪器, 这些仪器基于绝缘电阻测量、介质损耗评估、耐压测试、局部放电检测、甚低频测试, 以及包括时域反射(TDR)和频域反射(FDR)在内的反

射测量技术[8-12]。其中, 局部放电测试作为一种广泛应用的诊断工具, 在评估电力电缆绝缘状况方面表现突出。然而, 局部放电测试也存在一定的局限性。例如, 该方法需要在施加较高电压的同时测量微小电流脉冲, 而这种高电压可能会进一步加剧绝缘缺陷的发展。此外, 来自电缆接头、分支点、污秽以及接头材料类型的局部放电信号强度通常远高于绝缘电缆本身的局部放电信号强度, 这使得数据解读变得更加复杂且具有挑战性[13]。

因此, 对于非侵入式的电缆电气诊断而言, 若反射测量法能够得到有效应用, 则其将成为最优的技术方案。然而, 当前最先进的反射测量技术虽然在严重缺陷的检测与定位上表现出色, 但在早期缺陷的检测与定位方面仍存在局限性, 而这一能力正是实现预测性诊断的关键所在。基于反射测量的诊断方法主要包括: 时域反射(TDR)以及频域反射(FDR)[14]。但是上述方法均存无法得到信号的时频分布, 最终影响电缆的定位准确度。

基于以上分析, 本文提出采用基于JTFDR的电缆故障定位方法。采用调制高斯线性调频脉冲作为激励信号, 从而同时实现时间定位与频率定位。该激励信号的中心频率、带宽及持续时间可根据被测电缆的具体特性进行定制化调整, 以获取最优的布线诊断与预测解决方案。

2.理论基础

2.1 TDR 和 FDR

基于与雷达相同的原理：一个低电压能量脉冲沿着导线传输，任何阻抗的不连续性都会产生反射，从而可以检测并定位缺陷，反射波形的幅度可用于表征缺陷的阻抗特性，而反射波形的时间延迟则可用于确定缺陷的位置[15-17]。导线上的缺陷可通过其阻抗进行描述，而缺陷引发的反射现象则由反射系数及缺陷的具体位置共同决定。

$$\Gamma_d = \frac{Z_d - Z_0}{Z_d + Z_0} \quad (1)$$

其中， Z_0 为特性阻抗， Z_d 为故障阻抗，对于硬缺陷而言，反射系数为 21（短路）或 1（开路）， $[21, 1]$ 也是 Γ_d 的上限和下限。因此，它们相对容易检测和定位。根据反射测量理论，电缆上的阻抗变化会引发反射现象。然而，在实际应用中，初期缺陷所产生的微弱反射信号往往难以被有效检测和精确定位。缺陷的阻抗特性主要由绝缘性能以及导体的几何形状决定。因此，即便能够成功解析反射波形，所获得的数据通常仍具有一定的模糊性，难以明确区分反射是由导线变形还是绝缘材料问题所引起。因此，故障阻抗与特征阻抗之间的微小差异会导致反射信号微弱且幅度较小，这种反射可能被测量噪声掩盖而难以检测。值得注意的是，导线的轻微磨损或机械损伤同样可能引发类似的微小阻抗变化。然而，在电缆老化的典型场景中，电缆绝缘层通常会长期暴露于水分侵入、化学腐蚀、温度波动、辐射以及机械振动等恶劣运行环境之中。此外，与局部性的磨损或机械损伤不同，电缆老化的影响往往广泛分布于整个电缆长度上，这可能导致绝缘层的介电常数发生显著变化。然而，即便这种显著的反射现象，目前 TDR 和 FDR 技术难以有效观测。

2.2 JTFDR

JTFDR 技术融合了 TDR 和 FDR 的优势，同时克服了两者的部分局限性。它采用一种可根据具体应用场景定制的询问信号，并对反射信号进行处理。该询问信号能够在时域和频域中同时实现局部化特性。这种询问信号由高斯包络调制的线性调频信号构成，具体形式如下所示。

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

其中， α 决定了入射信号的时间持续长度； α 和 β 共同决定了入射信号的带宽， ω_0 表示中心频率。该入射信号的一个显著优势在于其高度可配置性。能够根据被测电缆的频率特性，合理选择入射信号的关键参数，包括中心频率、频率带宽以及时间持续长度。在获取被测电缆缺陷反射信号后，JTFDR 利用预先选定的核函数计算出射信号和反射信号的时间-频率分布。时间信号 $s(t)$ 的维格纳分布可通过以下变换求得。

$$W(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} s^*(t - \frac{1}{2}\tau) s(t + \frac{1}{2}\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

JTFDR 通过以下方程计算入射信号与反射信号之间的时间-频率互相关性。

$$C_{sr}(t) = \frac{1}{E_s E_r(t)} \int_{i=-T_s}^{i=t+T_s} \int_{-\infty}^{\infty} W_r(t', \omega) \quad (4)$$

$$W_s(t' - t, \omega) d\omega dt' \quad (5)$$

$$E_r(t) = \int_{i=-T_s}^{i=t+T_s} \int_{-\infty}^{\infty} W_r(t', \omega) d\omega dt' \quad (5)$$

$$E_s = \iint W_s(t, \omega) dt d\omega \quad (6)$$

其中， $W_r(t, \omega)$ 为反射信号的 Wigner 分布， $W_s(t, \omega)$ 为入射信号的 Wigner 分布。在反射信号的时频分布 $W_r(t, \omega)$ 与参考信号的时频分布 $W_s(t, \omega)$ “匹配”的情况下，时频交叉相关函数取得最大值 $E_r(t)$ 。局部最大值由 E_s 和 $E_r(t)$ 的乘积限定，因此时频交叉相关函数的取值范围在 0 到 1 之间。时频互相关函数的峰值可用于检测缺陷并确定其具体位置。JTFDR 所采用的时频互相关函数的独特特性，使其能够灵敏地监测所有细微缺陷。

2.3 基于时频互相关函数的电缆定位

考虑时频域参考信号在空间中的传播与反射过程。当信号沿具有空间变量 x 的介质传播时，其波形将通过介质的传递函数 $H(\omega, x)$ 发生变化。为便于计算，不妨假设参考信号的时间中心 $t_0 = 0$ 。设 $u(x, t)$ 为在距离 x 处观测到的波形，并给定初始条件 $u(x = 0, t) = s(t)$ ，则 $u(x, t)$ 的一般解为：

$$u(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega, x) e^{-j\omega t} d\omega \quad (7)$$

$$S(\omega, x) = S(\omega, x = 0) \cdot H(\omega, x) = S(\omega, x = 0) e^{-(\alpha(\omega) - jk(\omega))x} \quad (8)$$

其中 $H(\omega, x)$ 是介质的传输函数，其特

性由频率相关的衰减 $\alpha(\omega)$ 和波数 $k(\omega)$ 决定。假设衰减和色散均为线性关系，即 $\alpha(\omega) \cong A\omega$ ， $k(\omega) \cong K\omega$ 。相速度 ω/k 和群速度 $\partial\omega/\partial k$ 都等于 $1/k$ ，因此，将其均简称为 v ，即传播速度。

根据传播距离 x 计算信号 $u(x,t)$ 的频率中心 $\omega_{u(x)}$ 。

$$\omega_{u(x)} = \int_{-\infty}^{\infty} \omega |S(x, \omega)|^2 d\omega \quad (9)$$

$$= \omega_0 - \delta\omega$$

$$\delta\omega = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{2\alpha} Ax \quad (10)$$

同样地，信号 $u(x,t)$ 在传播距离 x 处的时间中心 $t_{u(x)}$ 可以按如下方式计算。

$$t_{u(x)} = \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot |u(x,t)|^2 dt \quad (11)$$

$$= -\frac{\beta}{\alpha^2 + \beta^2} \cdot \delta\omega + Kx$$

因此，估计的时间中心 $t_{u(x)}$ 即为频率中心 $\omega_{u(x)}$ 的传播延迟。为了精确测量传播延迟，需要通过由线性调频斜率参数 β 和频率偏差 $\delta\omega$ 确定的 δt 对波形的实际延迟进行补偿，使得：

$$t_{delay} = t_{u(x)} - t_s + \frac{\delta\omega}{\beta} = \Delta t + \delta t \quad (12)$$

$$\delta t = \frac{\delta\omega}{\beta} \quad (13)$$

其中， $\Delta t = t_{u(x)} - t_s$ ，实际传播距离可基于传播速度 v 进行评估。在故障检测中，可通过分析参考信号与反射信号的时间频率分布相关性来实现。考虑到电缆的衰减特性，参考信号 $W_s(t, \omega)$ 的 Wigner 分布以及反射信号 $W_r(t, \omega)$ 的 Wigner 分布可通过以下方法获得。

$$W_s(t, \omega) = \frac{1}{\pi} e^{-\alpha(t-t_0)^2 - (\omega - \beta(t-t_0) - \omega_0)^2 / \alpha} \quad (14)$$

$$W_r(t, \omega) = \frac{1}{\pi} e^{-\alpha(t-x/v)^2 - (\omega - \beta(t-x/v) - \omega_0)^2 / \alpha} \cdot e^{-2Ax\omega} \quad (15)$$

将距离为 x 处 $C_{sr}(t)$ 的局部最大值的时间索引 t_{Mx} 分配为：

$$C_{sr}(t) = \frac{2\pi}{E_r(t)E_s} \int_{t-t_s}^{t+T_s} \int_{-\infty}^{\infty} W_r(t', \omega) W_s(t' - t, \omega) d\omega dt' \quad (16)$$

$$E_r(t) = \int_{t-t_s}^{t+T_s} \int_{-\infty}^{\infty} W_r(t', \omega) d\omega dt' \quad (17)$$

令 $E_s = 1$ 则式 (16) 变为

$$C_{sr}(t) = e^{-Ax\delta\omega} \cdot e^{-(\alpha^2 + \beta^2 / 2\alpha)(t-Kx)^2} \quad (18)$$

反射信号 $C_{sr}(t)$ 的时频互相关函数为：

$$C_{sr}(t) = e^{-(\alpha^2 + \beta^2 / 2\alpha)(Ax)^2} \cdot e^{-(\alpha^2 + \beta^2 / 2\alpha)(t-x/v)^2} \quad (19)$$

因此，反射信号的存在性可通过一个介于 0 到 1 之间的定量数值进行检测。从式 (19) 中的时频互相关函数 $C_{sr}(t)$ 的分析可以

看出，其在 $t = \frac{x}{v}$ 时达到最大值（局部峰值时间），这与预期相符。由于反射信号传播得越远，其高频成分衰减得越多，因此反射信号与参考信号的相关性会降低，所以等式右边的第一项会减小。本文将利用时频互相关函数的局部峰值时间来精确测量反射信号的传播延迟，然后根据传播速度将其转换为故障位置。

3. 实验结果分析

实验采用交联聚乙烯电缆进行实验，电缆长度为 10 米，故障位置为距离起始段 5.8 米，电缆的输入信号的中心频率为 125MHz，带宽为 50MHz，持续时间为 30 纳秒，采用本文所提方法进行实验分析，实验所得结果如图 1 所示。图 1 (a) 中展示了时域中的入射波形与反射波形。图 1 (a) 中的波形以及图 1 (b) 中的曲线均为时间的函数。为了便于分析，通过将时间轴乘以信号在电缆中的传播速度，将其转换为距离轴。电缆中的信号传播速度可通过光速 c 与交联聚乙烯的介电常数 $\epsilon_r = 2.3$ 计算得出，具体计算方式如下。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.3}} = 1.98 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} \quad (20)$$

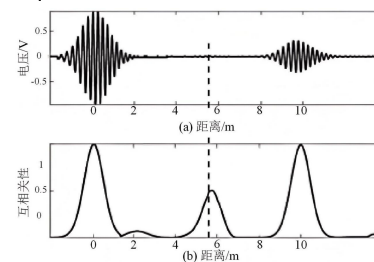


图 1. 采用 JTFDR 对交联聚乙烯电缆样本故障定位结果。(a) 时域中的入射波和反射波形；(b) 对应的时频互相关

图 1 (a) 中, 故障位置在图中无法确定, 利用式 (3) 和式 (4) 计算入射波形和反射波形对应的 Wigner 分布 (W_r 和 W_s) 以及联合时频互相关函数 $C_{sr}(t)$ 。时频互相关函数如图 1 (b) 所示。图 1 (b) 中, 在电缆起始处有一个峰值, 这对应于入射波形与其自身的互相关, 这也被称为自相关, 在电缆末端有一个明显的峰值, 这对应于开路端的反射。这两个峰值之间的较小峰值对应于缺陷处的反射。因此, 即使初始缺陷的反射在时域中非常微弱, 甚至可能被噪声掩盖, 但如果反射的时频特征与所发射信号的特征相似, 时频互相关就能体现这种相似性。

通过时频互相关函数定位缺陷后, 可从边缘分布中获得本地化参考信号和反射信号的四个时频矩: 时间中心 t_s 、时间持续 T_s 、频率中心 ω_s 和带宽 B_s 。由于频率相关的衰减, 反射信号的 T_s 、 ω_s 和 B_s 均小于参考信号。利用所得数据评估的时频矩, 缺陷的精确位置 d_f 可按如下方式计算:

$$\Delta t_r = t_r - t_s = 58.95ns \quad (21)$$

由反射信号失真所导致的时间延迟需要按如下方式补偿:

$$\delta t_r = \frac{\delta f_r}{\beta} = 0.65ns \quad (22)$$

总时延为:

$$t_{delay} = \Delta t_r + \delta t_r = 59.6ns \quad (23)$$

最终的缺陷位置为:

$$df = \frac{vt_{delay}}{2} = 5.9m \quad (24)$$

这与实际故障距离相差 0.1 米。实验结果表明, JTFDR 能够准确检测并定位这些交联聚乙烯绝缘电缆的早期缺陷。

4. 结论

本文针对 TDR 和 FDR 的在电缆故障诊断过程中故障定位精确度不稳定的问题, 提出采用 JTFDR 进行电缆故障定位, JTFDR 采用调制高斯线性调频脉冲作为激励信号, 能够在时间定位和频率定位上同时实现高精度表现。此外, 激励信号的中心频率、带宽以及持续时间可根据待测电缆的具体特性进行定制化调整, 从而为布线诊断与预测提供更为有效的解决方案。进一步地, 通过对反射信号进行后处理, 可以实现对早期缺陷的高度敏感且精准的检测与定位。采用交联聚乙

烯绝缘电缆作为实验对象进行了实验, 最后, JTFDR 成功检测并定位了一个早期缺陷, 定位误差仅为 0.1 米, 验证了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 张晓新, 董灵斌, 林峰, 等. 自取电的电缆故障类型及故障分段定位的研究[J]. 高压电器, 2024, 60 (11): 116-122.
- [2] 金琰, 胡钰骁, 石超群, 等. 基于反射系数的电缆故障定位及评估优化算法[J/OL]. 高电压技术, 1-11[2025-05-05].
- [3] 于志鹏, 刘亚东, 严英杰, 等. 积水环境下的中压电缆接头早期故障特征分析与识别逻辑[J/OL]. 高电压技术, 1-13[2025-05-05].
- [4] 夏向阳, 刘奕琰, 刘雄, 等. 基于 S 变换模能量分析的直流电缆故障测距[J]. 高压电器, 2024, 60 (07): 201-209.
- [5] 王楠, 吕培庚, 李怀政, 等. 深度残差网络下的电缆隧道低压故障检测[J]. 人工智能科学与工程, 2024, (02): 78-86.
- [6] 杨明嘉, 夏成军, 池梓斌, 等. 基于沿线电流故障分量差值的交叉互联电缆故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (19): 54-66.
- [7] 张育梁, 夏向阳, 夏君山, 等. 基于 Bagging-异质 k 近邻的输电电缆故障诊断方法[J]. 高压电器, 2023, 59 (05): 104-112+121.
- [8] 刘鹏程, 田立斌, 高磊, 等. 基于反射系数谱相关系数的电缆故障检测方法[J]. 绝缘材料, 2023, 56 (05): 95-102.
- [9] 高超, 刘泽辉, 曹栋, 等. 基于 1DCNN-BiLSTM 的电力电缆故障诊断[J]. 郑州大学学报 (工学版), 2023, 44 (05): 86-92.
- [10] 任广振, 王云鹤, 曹俊平, 等. 电力电缆初期绝缘故障检测方法综述[J]. 重庆大学学报, 2023, 46 (11): 1-12.
- [11] 赵书静, 龚梁涛, 詹博博, 等. 基于 FMCW 的 10kV 配电电缆故障定位及类型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (11): 4452-4463.
- [12] 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 (04): 163-171.

- [13]梁钟颖,周凯,孟鹏飞,等.基于频域反射系数谱的电缆故障定位与故障类型识别方法研究[J].电工电能新技术,2022,41(08):79-88.
- [14]何宁辉,周秀,马波,等.基于神经网络和温度特性曲线的电缆故障率估计[J].电力科学与技术学报,2022,37(04):169-174.
- [15]区伟潮,葛阳,朱延廷,等.基于双端原理的中压电缆潜伏性故障定位方法[J].山东大学学报(工学版),2022,52(05):84-91.
- [16]曹玉石,张慧媛,许军,等.基于行波相位特征的海上风电柔直电缆故障保护方法的研究[J].电测与仪表,2024,61(07):81-87.
- [17]王雪菲,李京,陈平,等.基于行波波形综合相似度比较的电缆故障选线[J].电力系统保护与控制,2022,50(01):51-59.