

基于线性调频 Z 变换的电缆故障高精度定位

吴美胜¹ 袁超² 胡力文¹ 宾峰¹

(1. 长沙理工大学物理与电子科学学院, 长沙 410114;
2. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘要 为了解决传统的电缆故障定位谱数据冗余度高且定位精度低的问题, 本文提出一种基于线性调频 Z 变换 (CZT) 的电缆故障高精度定位方法。首先根据传输线理论, 分析故障电缆的分布参数和反射系数特征, 然后对反射系数实部进行 CZT, 最后采用迭代式滤波进行去噪, 得到电缆故障定位谱。结果表明, 本文所提方法的故障点识别误差为 0.025%~0.275%。相较于快速傅里叶变换 (FFT), 本文所提方法具有定位谱细化、分辨率高、冗余度低、故障定位精度高的优点。

关键词: 频域反射法; 电缆故障定位; 反射系数; 线性调频 Z 变换 (CZT)

High precision location of cable faults based on chirp-Z transform

WU Meisheng¹ YUAN Chao² HU Liwen¹ BIN Feng¹

(1. School of Physics and Electronic Science, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114;
2. School of Electrical and Information Engineering, Hu'nan University, Changsha 410082)

Abstract In order to solve the problem of high redundancy and low positioning accuracy of traditional cable fault location spectrum data, this paper proposes a high precision cable fault location method based on chirp-Z transform (CZT). Firstly, according to the transmission line theory, the distribution parameters and reflection coefficient characteristics of the fault cable are analyzed. Then, CZT is performed on the real part of the reflection coefficient. Finally, iterative filtering is used to denoise and obtain the cable fault location spectrum. The results show that the fault point recognition error of the proposed method is 0.025%~0.275%. Compared with fast Fourier transform (FFT), the proposed method has the advantages of refined location spectrum, high resolution, low redundancy and high fault location accuracy.

Keywords: frequency domain reflection method; cable fault location; reflection coefficient; chirp-Z transform (CZT)

0 引言

电缆在电网输配电建设中扮演着至关重要的角色, 电缆故障可能引发严重后果。随着电缆规模不断扩大、应用范围日益增广, 电缆故障的检修难度逐渐上升, 若故障未被及时发现, 则可能导致生产和生活供电中断、工厂及企业停产、产品报废等严重后果^[1]。此外, 电缆故障时可能引发火灾, 造成经济损失及人员伤亡。据统计, 全国各类火灾中有 1/3 是电气火灾, 而由电线电缆故障造成的火灾又占其中的 1/2 以上^[2], 因此研究电缆故障定位对于电网

的稳定运行具有重大意义^[3]。

目前, 常见的电缆故障检测方法有时域反射法和频域反射法。其中, 时域反射法^[4-5]是在电缆首端注入脉冲信号, 当信号遇到阻抗不匹配点时会进行折反射, 反射信号沿相反路径回到电缆首端, 通过测量反射信号传输时间差来实现电缆故障定位, 但是此方法频域分量单一、高频成分少, 导致其故障定位效果不理想。频域反射法^[6-7]则是在电缆首端注入扫频信号, 由于该方法频率范围广、高频成分多、精准度高, 近年来逐渐成为电缆故障定位研究的热点。

基于频域反射法衍生出的宽频阻抗谱法和反射系数谱法得到广泛应用。日本 OHKI Y. 院士研究组提出利用快速傅里叶反变换对阻抗谱进行处理, 实现了热老化故障电缆定位^[8]。四川大学谢敏等提出利用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 对反射系数谱进行处理, 并引入 Kaiser 窗, 实现了电缆物理结构性故障定位^[9]。李蓉等利用离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 对宽频阻抗谱进行处理, 实现了 10kV 配电电缆中间接头受潮故障定位^[10]。周志强通过积分变换分析法, 对阻抗谱数据进行处理, 实现了电缆缺陷定位^[11]。传统的频域反射法虽然可以实现电缆故障定位, 但故障定位函数分辨率较低且数据冗余度较高, 因此容易造成故障点的误判、漏判。

针对当前电缆故障定位存在的问题, 本文依据频域反射法, 运用首端反射系数, 提出基于线性调频 Z 变换 (chirp-Z transform, CZT) 的电缆故障定位方法, 利用实验来验证该方法在不同故障 (开路故障、短路故障、过渡电阻接地故障) 下进行电缆故障定位的准确性和优越性。

1 电缆分布参数模型及反射系数

1.1 分布参数模型

根据传输线理论, 高频下的电缆等效分布参数电路如图 1 所示。图 1 中, R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 分别为电缆单位长度下的电阻、电感、电导、电容, Δl 为电缆单位长度^[10]。

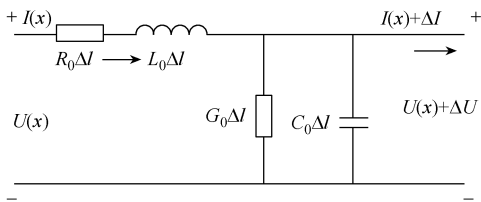


图 1 高频下的电缆等效分布参数电路
单位长度电缆的分布电阻、分布电感^[10]近似为

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

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

式中: ω 为输入角频率; μ_0 为真空磁导率; r_c 为缆芯半径; ρ_c 为缆芯电阻率; r_s 为屏蔽层半径; ρ_s 为屏蔽层电阻率。

单位长度电缆的分布电容和分布电导^[10]分别为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{r_s}{r_c}} \quad (3)$$

$$G_0 = \frac{2\pi\sigma}{\ln \frac{r_s}{r_c}} \quad (4)$$

式中: ϵ 为绝缘层介电常数; σ 为绝缘层电导率。

假设电缆长度为 l , 电缆首端为原点, 负载端为终点, 电缆任意位置距原点 x 处的电压 $U(x)$ 和电流 $I(x)$ 表示为^[11]

$$U(x) = U_i e^{\gamma(l-x)} + U_r e^{-\gamma(l-x)} \quad (5)$$

$$I(x) = \frac{U_i}{Z_0} e^{\gamma(l-x)} - \frac{U_r}{Z_0} e^{-\gamma(l-x)} \quad (6)$$

式中: U_i 、 U_r 分别为负载端的入射、反射电压; γ 为传播系数; Z_0 为特性阻抗。 γ 、 Z_0 是电缆在高频条件下的固有特性, 其表达式可由 (7) ~ 式 (9) 得到^[10]。

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta \quad (7)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{v} \quad (9)$$

式中: α 为衰减常数; β 为相位常数; v 为电缆中电磁波波速; λ 为电缆中电磁波波长; f 为输入频率。

在高频下, $\omega L_0 \gg R_0$ 、 $\omega C_0 \gg G_0$, 特性阻抗可近似为

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (10)$$

1.2 电缆首端反射系数

反射系数通常表征电磁波在电缆内部传播过程中的衰减情况。反射系数越小, 代表电磁波在电缆内部传播时的衰减越小, 信号传输效果越好。反射系数可以通过计算电缆反射信号与入射信号幅值之比得到。

根据式 (5), 电缆任意位置距原点 x 处的反射系数 $\Gamma(x)$ 为

的回波信号叠加,导致故障定位误判或无法识别。因此,CZT对阻抗失配程度大的故障定位效果好,但对阻抗失配程度微弱的故障的定位效果有待提高。为解决上述问题,本文采用峰值检测和Savitzky-Golay迭代式滤波对变换结果进行去噪。具体流程为:首先,针对CZT后的信号,采用阈值法进行峰值检测,以提取信号中的波峰特征;随后,对非波峰点的部分进行适当滤除,保留关键波峰特征以提高信号处理的准确性;接着,采用Savitzky-Golay平滑信号,设置滤波器的阶数、窗口大小和多项式拟合次数,确保平滑处理的有效性;最后,对滤波后的信号进行包络处理。

3 实验及讨论

3.1 实验平台

为了验证本文方法的实际效果,运用如图3所示的实验平台对电缆进行测试,其中 R_f 为故障点等效电阻。矢量网络分析仪为SIGLENT公司生产,型号为SVA1015X,设置频率范围为100MHz~1.5GHz,采样点数为5000。

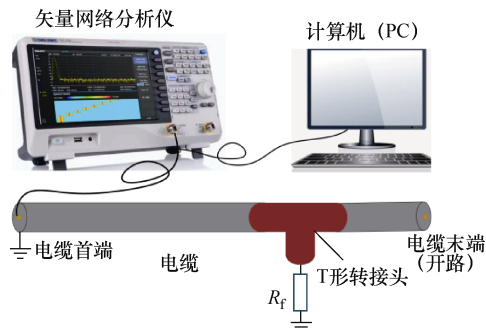


图3 实验平台

实验电缆设置见表1,本文选用两根不同长度的同轴电缆(型号为SYV50—5—3)为测试对象,电缆总长度为40m,并对电缆设置3类故障,采用SIGLENT公司生产的F503ME校准件进行故障模拟,如图4所示。

表1 实验电缆设置

编号	故障类型	R_f/Ω	故障点位置/m	电缆总长度/m
1号	开路故障	∞	10	40
2号	开路故障	∞	30	40
3号	短路故障	0	10	40
4号	短路故障	0 </tr		



图4 F503ME校准件实物

为了验证本文所提方法对电力电缆故障定位同样有效,选取总长度为200m,型号为YJLV22—3×25的交联聚乙烯电缆作为测试对象,参考文献[12]的故障模拟方法,在距离电缆首端100m的位置分别制造开路故障、短路故障、经50Ω过渡电阻接地故障。依托实验平台,开展电力电缆故障检测。

实验步骤为:首先,利用矢量网络分析仪测量不同故障下的 S_{11} 参数史密斯圆图;然后,提取实部数据进行CZT或FFT,并结合待测电缆中电磁波波速 v ,得到初步定位谱;最后,将初步定位谱进行峰值检测和Savitzky-Golay迭代式滤波,得到电缆故障定位谱。

3.2 同轴电缆实验结果分析

基于FFT的同轴电缆开路故障定位结果如图5所示,横轴表示距电缆首端的距离,纵轴代表FFT的归一化幅值。在定位谱中,分别在10.16m、39.99m、291.93m和321.75m处识别到波峰。其中,10.16m的位置为识别到的电缆故障点,其相对实际位置的误差为1.6%,这表明该算法基本能够准确识别开路故障点的位置。同时,39.99m处的峰值最大,表示的是电缆末端位置。从图5可见,定位谱呈现对称分布,而291.93m和321.75m处的波峰代表冗余干扰峰。这是由FFT在处理时间和频域样本时的一致性所导致。因此,基于FFT的电缆故障定位谱显示出分辨率较低和数据冗余度较高的问题。在研究电缆故障时,冗余干扰峰也可能导致故障点的误判。

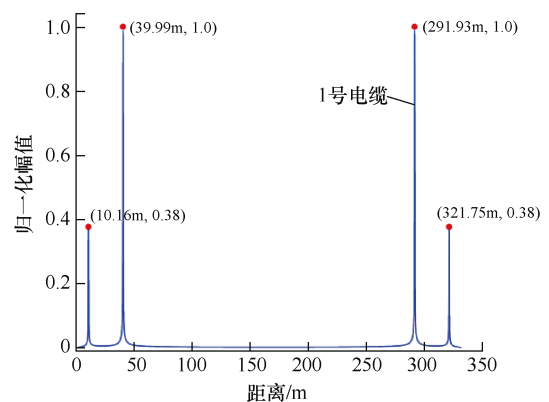


图5 基于FFT的同轴电缆开路故障定位结果

基于 CZT 的同轴电缆故障定位结果如图 6 所示,横轴为距电缆首端的距离,纵轴为 CZT 的归一化幅值。由图 6 可知,3 种类型的故障点和电缆末端均被准确识别,故障点识别误差为 0.025%~0.275%。对比图 6 (a)~图 6 (c) 可以发现,当电缆故障点的 R_f 越小时,故障点处的归一化幅值越大,

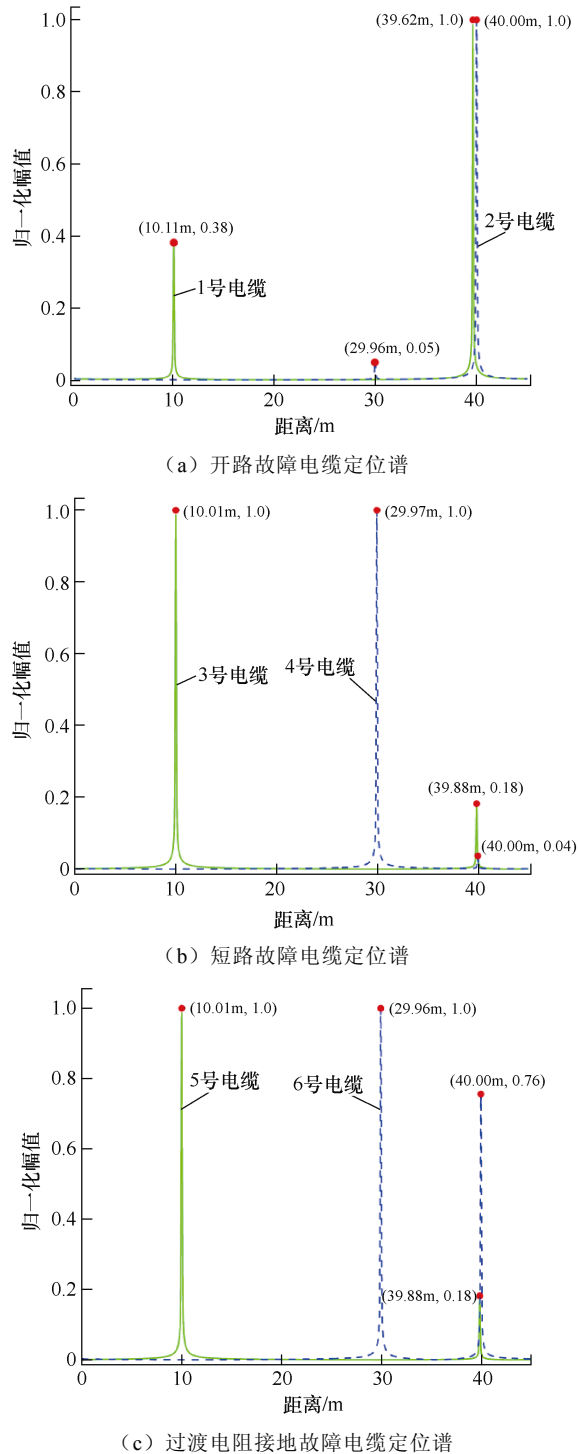


图 6 基于 CZT 的同轴电缆故障定位结果

表明电缆出现接地故障后,大部分信号直接流向大地,通过电缆故障点的信号被严重衰减,反射回来的信号也更加微弱。此外,故障点距离电缆首端越远,由于信号在传输过程不断衰减,故障识别难度越大。因此,根据实验结果分析,本文所提方法的故障(开路故障、短路故障、经 50Ω 过渡电阻接地故障)定位效果较好,数据冗余度低。

3.3 电力电缆实验结果分析

基于 CZT 的电力电缆故障定位结果如图 7 所示,开路故障点和短路故障点的位置识别结果均为 100.04m,过渡电阻接地故障点的位置识别结果为 99.95m,相对实际故障点位置存在 0.04%或 0.05%的误差。此外,电缆末端识别误差在 0.08%以内。实验结果表明,本文所提方法对于电力电缆同样有效,且测量精度高。

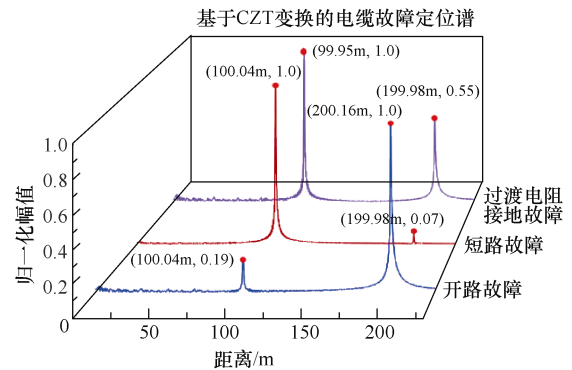


图 7 基于 CZT 的电力电缆故障定位结果

4 结论

针对传统基于频域反射定位方法的不足,本文提出了一种基于线性调频 Z 变换的电缆故障高精度定位方法。与快速傅里叶变换相比,利用线性调频 Z 变换可以实现对电缆开路故障、短路故障及经 50Ω 过渡电阻接地故障下的故障定位谱进行任意位置的细化。这种方法具有更高的分辨率,且定位谱中的干扰峰较少,数据冗余度低。此外,本文还采用峰值检测和 Savitzky-Golay 迭代滤波对变换结果进行去噪,既有效消除了反射系数谱中的噪声,也保留了原始信号的特征,从而显著提升了故障定位的效果。

参考文献

- [1] 李宽宏,林金树,江捷,等. 基于信号包络与希尔伯特边缘谱的高阻接地故障检测方法[J]. 电气技术,

(下转第 50 页)

度;起3台风机温度>停1台风机温度;起2台风机温度>停2台风机温度;起1台风机温度>停3台风机温度。起停温度定值须同时满足上述原则,否则报定值错误并退出水温自动控制联锁。

4 结论

本文根据某换流站调相机外冷水换热量、流量、进水温度需求及站址环境条件,研究分析了闭式水冷却系统和开式水冷却系统的优缺点,并结合项目的经济投入情况,最终确定两台调相机共用一套开式循环外冷水系统。通过计算循环水路的阻力,确定外冷水系统的工艺流程、循环水泵和冷却塔的选型及运行控制逻辑,以期调相机外冷水系统的设计提供参考。

参考文献

- [1] 郑玉平,潘书燕,柴济民,等.新一代调相机变压器组启机过流保护误动作原因及对策[J].电力系统自动化,2022,46(5):105-112.
 - [2] 阮羚,王庆,凌在汛,等.新型大容量调相机性能特点及工程应用[J].中国电力,2017,50(12):57-61.
 - [3] 张腾,张琳.新一代大容量调相机在电网中的应用[J].集成电路应用,2023,40(5):100-101.
 - [4] 杨鹏程,王庆,钟后鸿,等.新一代调相机参数自适应优化设计[J].电机技术,2020(3):1-3,21.
 - [5] 李志强,蒋维勇,王彦滨,等.大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J].大电机技术,2017(4):15-22.
 - [6] 苏东亮,邓化运.新型大容量调相机原理及运行控制[J].电气技术,2021,22(6):87-91.
 - [7] 徐大坤,甘露.高温缺水地区调相机外冷却系统研究[J].制冷与空调(四川),2019,33(6):609-612.
 - [8] 郝亚楠,李贵海,颜庆,等.调相机外冷水系统结垢分析及改进研究[J].山东电力技术,2024,51(2):79-84.
 - [9] 张辉亮,刘金革.冷水机组在电力电子水冷却系统中的应用研究[J].电气技术,2021,22(1):71-74.
 - [10] 刘重强,张恩龙,陈绪胜,等.高温缺水地区换流阀冷却系统的研究[J].电力工程技术,2017,36(4):54-58.
 - [11] 黄伟,冯维,王海峰,等.直流换流阀单元模块蒸发冷却系统的仿真分析与试验[J].电工技术学报,2017,32(2):264-270.
 - [12] 白羽丰,周亚素,查小欢.闭式冷却塔冬季运行性能研究[J].建筑热能通风空调,2018,37(3):26-29.
-
- 收稿日期:2024-08-29
修回日期:2024-10-06
- 作者简介
张辉亮(1985—),男,陕西咸阳人,硕士,高级工程师,从事电力电子设备冷却系统研究工作。
-
- (上接第44页)
- 2024,25(6):39-46,55.
- [2] 和敬涵,罗国敏,程梦晓,等.新一代人工智能在电力系统故障分析及定位中的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5506-5515.
 - [3] 郭自刚,徐天乐,陈玉林,等.配电网电缆故障在线监测及定位系统[J].电气技术,2022,23(11):74-79.
 - [4] 任志刚,赵雪骞,郭卫,等.基于时域反射技术的电缆渗水缺陷检测方法[J].绝缘材料,2022,55(1):80-86.
 - [5] 周志通,陈永琦,黄璜,等.一种基于频率选择的输电线路故障行波测距方法[J].电气技术,2024,25(2):31-36,44.
 - [6] 饶显杰,徐忠林,刘翔宇,等.基于反射系数与核函数构建的新型电缆缺陷诊断方法[J].电工技术学报,2024,39(7):2184-2192,2213.
 - [7] 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(8):79-88.
 - [8] 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.
 - [9] 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.
 - [10] 李蓉,周凯,万航,等.基于频域反射法的10kV配电网电缆中间接头受潮定位[J].电网技术,2021,45(2):825-832.
 - [11] 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.
 - [12] 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(5):95-102.
-
- 收稿日期:2024-08-08
修回日期:2024-08-24
- 作者简介
吴美胜(1998—),男,江西省九江市人,硕士研究生,研究方向为电力设备状态监测与故障诊断。