

# 基于频域反射法的高压电缆外破故障定位研究

马 骁,刘云龙,余华兴,顾 博,张午阳,黄会贤  
(重庆电网有限责任公司江北供电局,重庆 401147)

**摘要:** 高压电缆在安装施工阶段,有可能遭受机械振动、外力挤压和冲击作用,从而造成绝缘层破损、异物刺入等外破缺陷。为了对这些外破缺陷位置进行精准定位并加以维修,提出一种基于频域反射法的新型高压电缆外破故障定位方法。首先结合电缆分布参数模型,基于现有的频域反射法理论基础,展开对电缆宽频阻抗谱 FFT 变换实现定位方法详细说明。最后在实验室一段 30 m 长的 110 kV 电缆上制作铁钉扎入的缺陷,并对该缺陷进行定位,发现该方法具有较高的识别灵敏度和识别精度。

**关键词:** 外破; 高压电缆; 定位; 缺陷

中图分类号: TM246 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)01-0022-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.01.005

## Research on Fault Location of External Broken in High-voltage Cable Based on Frequency Domain Reflection Method

Ma Xiao<sup>1</sup>, Liu Yunlong<sup>1</sup>, Yu Huaxing<sup>1</sup>, Gu Bo<sup>1</sup>, Zhang Wuyang<sup>1</sup>, Huang Huixian<sup>1</sup>  
(Jiangbei Power Supply Bureau, Chongqing Power Grid Co., Ltd., Chongqing 401147, China)

**Abstract:** In the stage of installation and construction, high-voltage cable may suffer from mechanical vibration, external pressure and impact, resulting in damage to the insulation layer, foreign matter penetration and other external damage defects. In order to accurately locate and maintain these faults, a new method based on frequency domain reflection method is proposed. Firstly, based on the cable distribution parameter model and the existing frequency domain reflection method, the location method for FFT transform of cable broadband impedance spectrum is described in detail. Finally, the defect of iron nails in a section of 30 m-long 110 kV cable in the laboratory is made, and the location for the defect is carried out. It is found that the proposed method has high identification sensitivity and accuracy.

**Key words:** external broken; high-voltage cable; location; defect

## 0 引言

随着中国城市化的不断推进和工业的不断发展,人们对电力的需求也在与日俱增,为了满足人们对电力的需求,交联聚乙烯电缆因其良好的电气性能和机械性能而被大量地使用。

虽然交联聚乙烯电缆因其良好的机械性能,使电缆系统发生故障的概率远低于架空输电线路<sup>[1]</sup>,但由于电缆敷设多位于城市的核心地带,出现故障后,难以定位且修复难度大,造成的损失远远大于架空线路。近年来国内因高压电缆故障导致的爆炸火灾等重大事故,给电网运行带来了极大的威胁<sup>[2-3]</sup>,高压电缆的运行维护成为电网安全运营的重要保障

之一。

为了保证电力系统的正常运行,需要定期对输电电缆进行巡视,并对缺陷故障部分进行维修。目前电缆故障定位测距的方法主要包括阻抗法和行波法等。其中,阻抗法中的经典电桥法和分布参数计算高阻故障法都具有一定的局限性,测量的精度差,适用范围小。行波法主要包括低压脉冲反射法、脉冲电压法、脉冲电流法和二次脉冲法。现在实际现场中使用最多的电缆局部缺陷定位技术是行波法中的低压脉冲反射法,也就是时域反射法(time domain reflectometry, TDR)定位技术,该方法的基本思想是通过估计入射脉冲信号和反射脉冲信号的时间差实现定位<sup>[4]</sup>。但该种方法注入的脉冲高频成分较少,当故障处于始发阶段,电气参数变化不明显时,该方

法不能很好地识别定位缺陷位置。为了提高缺陷故障的识别度,尝试通过频域反射法,对含故障的高压电缆注入一系列步长的扫频信号,并对回损信号进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)转换为频域信息,此时根据传输线中波的相对传播速度就可以计算出信号反射点的实际距离,即可对故障位置实现精准定位。该方法和时域反射法等行波法相比,包含的高频成分更多,所以反射信号中包含的电缆缺陷信息也更加精细,故具有更好的识别灵敏度和识别精度。

## 1 电缆特性及阻抗不连续点的波反射

### 1.1 电缆分布参数模型

由传输线理论<sup>[5]</sup>可知,当电磁波的波长远小于网络的物理尺寸时,在网络的整个长度内各点的电压和电流都将是不同的,就不能将线路各点的电路参数合并成集中参数来处理,此时需要用分布参数进行表示。因此,对于电力电缆而言,当注入高频信号时电缆应被当作一个分布参数网络,其等效电路图可由图1表示,其中 $R$ 、 $L$ 、 $G$ 、 $C$ 分为电缆单位长度的电阻(单位为 $\Omega/m$ )、电感(单位为 $H/m$ )、电导(单位为 $S/m$ )和电容(单位为 $F/m$ )。

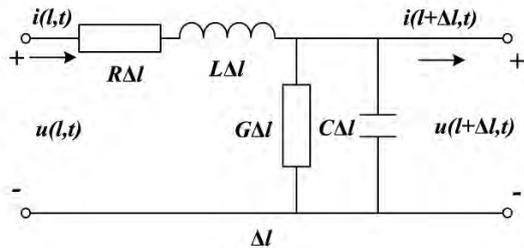


图1 电缆分布参数等效电路

由于集肤效应和邻近效应<sup>[6-7]</sup>的影响,电流主要集中在导体表面,此时频率对电缆的单位电阻 $R$ 与单位电感 $L$ 有较明显的影响,因此在高频下就必须将集肤效应和邻近效应考虑进去。电缆单位长度电阻 $R$ 与电感 $L$ 会随着频率 $f$ 而变化,变化规律由式(1)<sup>[8]</sup>近似表示:

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

式中: $\omega = 2\pi f$ ,为角频率; $r_c$ 和 $r_s$ 分别为电缆缆芯半

径和屏蔽层内半径; $\rho_c$ 和 $\rho_s$ 分别为电缆缆芯电导率和屏蔽层电导率; $\mu_0$ 为真空的磁导率; $\omega$ 为角频率。

电缆为同轴结构时, $G$ 、 $C$ 可表示为

$$\begin{cases} G = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_s/r_c)} \\ C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_s/r_c)} \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2 阻抗不连续点的波反射

通过行波理论可知<sup>[9]</sup>,行波在经过线路中不均匀节点时会发生一系列的折反射。由于电缆中存在许多结构不连续点,当往电缆中注入一系列高频信号的时候,信号在到达这些结构不连续点时就会发生反射现象。如果利用波反射原理对电缆中缺陷进行检测就能实现对缺陷的精确定位。

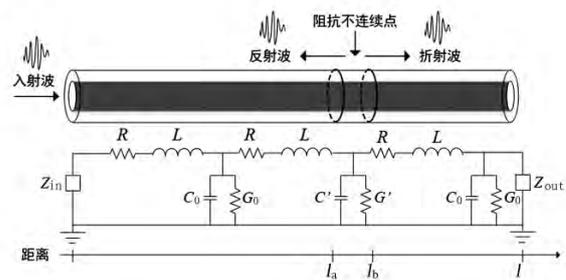


图2 存在缺陷的线缆传输线模型

如图2所示,由于电缆结构的改变和缺陷的存在,导致局部线路的集中参数发生变化。反射系数与入射电压波形 $V_i$ 和反射电压波形 $V_r$ 有关,也与负载阻抗 $Z_L$ 和线路的特征阻抗 $Z_0$ 有关。线路末端的反射系数 $\Gamma_L$ 可表示为

$$\Gamma_L = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3)$$

若电缆线路末端开路则末端的反射系数为1,若负载短路则反射系数为-1。

## 2 故障缺陷定位原理

### 2.1 电缆首端的阻抗频谱特性

根据图1的电缆分布参数等效电路图,在正弦稳态条件下可以求出电缆任意位置的电压、电流相量,可表示为

$$\begin{cases} V(z) = V_{i2} e^{\gamma(l-z)} + V_{r2} e^{-\gamma(l-z)} \\ I(z) = \frac{1}{Z_0} (V_{i2} e^{\gamma(l-z)} - V_{r2} e^{-\gamma(l-z)}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $V_{i2}$ 为负载侧的入射电压波; $V_{r2}$ 为负载侧的反

射电压波;  $\gamma$  称为电缆的传递常数;  $Z_0$  为电缆的特征阻抗。

$Z_0$  可由式(5)表示为

$$\begin{cases} \gamma(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \\ Z_0(\omega) = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \end{cases} \quad (5)$$

传播常数  $\gamma$  可由式(6)表示为

$$\begin{cases} \gamma = \alpha + j\beta \\ \beta = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi f}{v} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $v$  为电缆中电磁波的波速;  $\alpha$  称为衰减系数;  $\beta$  称为相位系数。

此时对电缆任意一点的电流和电压, 带入式(4)中就可以得到电缆任意位置处的电压与电流和电缆末端反射系数  $\Gamma_L$  的关系, 并可以得到当  $z=0$  时, 也就是电缆首端的输入阻抗为

$$Z(0) = Z_0 \left( \frac{1 + \Gamma_L e^{-2\gamma l}}{1 - \Gamma_L e^{-2\gamma l}} \right) \quad (7)$$

### 2.2 故障缺陷定位

当电缆存在阻抗不连续点的时候, 其缺陷的信息会通过电缆首端的输入阻抗反应出来。因此, 可以通过对电缆首端不同频率下的输入阻抗谱的研究来对高压电缆故障缺陷位置进行定位。

对式(7)进行欧拉公式展开并简化为

$$Z(0) = Z_{0h} \left( 1 + \frac{2}{e^{2\alpha l} (\cos(2\beta l) + j\sin(2\beta l))} \right) \quad (8)$$

对于式(8), 若只考虑电缆宽频阻抗谱的虚部三角函数部分, 带入相移常数  $\beta$  后可得到:

$$Z'(0) = \sin\left(\frac{4\pi l f}{v}\right) \quad (9)$$

当电磁波频率很高时(此时  $\omega L \gg R$ ,  $\omega C \gg G$ ), 电缆中电磁波的波速  $v$  趋近常数。对于式(9)中的  $Z'(0)$ , 可以认为是以  $f$  为时间变量, 角频率为  $4\pi l/v$  的正弦信号。考虑其频率为

$$f' = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{2l}{v} \quad (10)$$

可以发现  $Z'(0)$  的基频可以表征为一时间变量, 其频率恰好为 2 倍电缆长度除以波速, 即行波从电缆首端再通过末端反射所经历的时间长度, 因此利用快速傅里叶变换(FFT)通过寻找  $f$  的基频  $f'$  的位置确定为电缆的末端。当频率较高时电缆的波速

趋近常数, 且电缆长度  $l$  也为定值, 则  $f'$  在高频下也趋近常数, 所以无需对波速进行评估, 故可以认为  $f'$  的位置为电缆末端的位置。当电缆线路出现缺陷故障, 也就相当于在电缆路径中出现阻抗不连续点时, 阻抗频谱信息的 FFT 功率谱中会存在两个峰值。其中较为明显的是末端引起的  $f'$ , 另外一个则为缺陷处产生的  $f'$ 。如果在已知电缆长度的情况下, 就可以根据电缆末端的位置推算出电缆中存在缺陷的位置。若电缆中存在多个缺陷, 则电缆宽频阻抗谱虚部的 FFT 功率谱图中也会存在多个峰。根据峰值与末端峰值进行对比, 就可以准确对高压电缆的故障位置进行定位。

### 3 实验样本制作及测试结果

为了验证该定位方法对高压电缆外破故障位置的定位识别能力, 在实验室选取一段长 30 m 的 110 kV 高压电缆, 并在 15 m 的位置扎入一枚铁钉模拟电缆外破故障, 缺陷设置如图 3 所示。



图3 高压电缆外破缺陷

针对做好的高压电缆外破样本, 利用如图 4 所示的测试系统对电缆进行故障定位分析。首先利用实验装置通过扫频的方式向需要测试的外破电缆注入一系列不同频率的正弦信号, 然后把测试到的反射信号通过所介绍的定位方法进行数据分析处理。

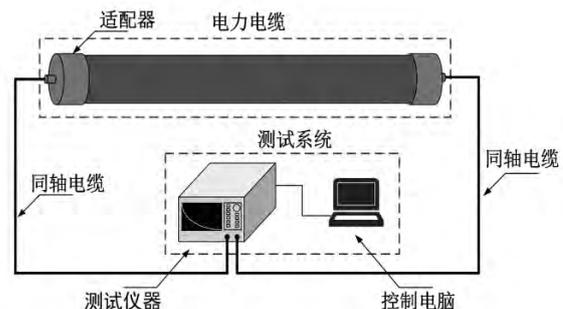


图4 定位测试原理

测试结果如图 5 所示, 可以看到在 15.2 m 的位

置有一个明显的畸变峰,因此可以说明所提出的方法可以有效探测到因外破故障引起的微弱电气参数变化,并具有极高的识别灵敏度和定位准确度,定位误差小于0.7%。图5中电缆首端和末端比较宽的遮蔽区域是因为测试端测试线和末端开路造成阻抗不匹配带来的影响,所以当故障靠近首末端时,有可能对测试结果造成影响。同时,为了与TDR的测试结果进行对比,利用TDR对该缺陷故障样本进行测试,测试结果如图6所示,因为实验样本较短,入射脉冲和反射脉冲叠加干扰严重,得不到明显的测试结果。

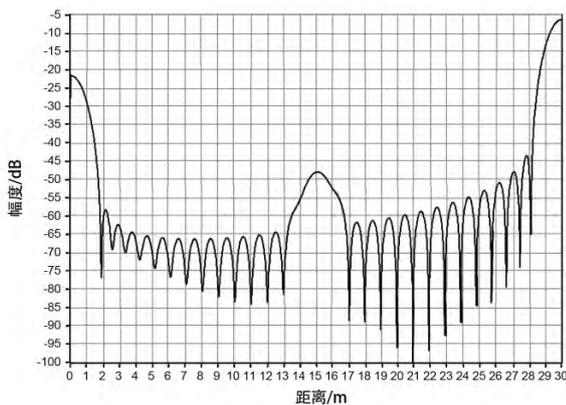


图5 频域反射测试结果定位图谱

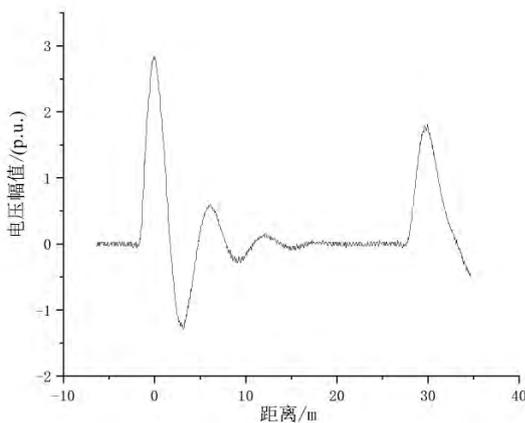


图6 时域反射测试结果定位图谱

## 4 结 论

1) 提出了一种基于频域反射法的高压电缆外破故障定位方法,对外破引起的电缆微弱电气参数变化具有很高的识别度。

2) 通过对有外破缺陷的高压电缆进行定位测试,发现该方法可以实现高精度定位,并且能够实现定位误差小于0.7%。

### 参考文献

- [1] 罗俊华,杨黎明,姜芸,等. 电力电缆运行故障及试验综述[J]. 电力设备, 2004, 5(8): 4-8.
- [2] 魏前虎,陈腾彪,罗智奕,等. 多起220 kV 电缆中间接头故障分析[J]. 电缆技术, 2015(2): 34-38.
- [3] 黄顺涛. 一起电力隧道中220 kV 电缆接头爆炸机理的研究及应对措施[J]. 企业技术开发, 2015, 34(12): 82-85.
- [4] 李保生. 基于时域脉冲反射原理的电线电缆精确测长技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [5] L. N. Dworsky. Modern Transmission Line Theory and Applications[M]. New Jersey: Wiley, 1979.
- [6] 徐政,钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 689-697.
- [7] 旷建军,阮新波,任小永. 集肤和邻近效应对平面磁性元件绕组损耗影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2006(5): 170-175.
- [8] Van der Wielen PCJM. On-line Detection and Location of Partial Discharges in Medium-voltage Power Cables[D]. Netherlands: TU Eindhoven, 2005.
- [9] 赵智大. 高电压技术(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

作者简介:

马 骁(1989), 硕士, 工程师, 从事高压电缆运维检修方面的工作。

(收稿日期: 2019-12-04)

# 欢迎订阅

# 《四川电力技术》