电力电缆 XLPE 绝缘上的声波衰减实验研究

叶逢春¹, 倪辉¹, 吴旭涛¹, 余海博², 程养春², 邢琳³

- (1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院,宁夏银川 750011;
- 2. 华北电力大学,北京 102206;
- 3. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院,河北石家庄 050011)

摘 要: 为了探究声波在交联聚乙烯(XLPE)电缆绝缘上的衰减特性,制备了 220 kV 电力电 缆横向 XLPE 绝缘环状切片,搭建了声波衰减研究实验系统,进行了正弦声波衰减实验和声脉 冲信号衰减实验,研究了正弦声波信号和声脉冲信号在 XLPE 绝缘中的衰减与频率的关系。在 进行频率分析时,还提出了抵消错钛酸铅后电陶瓷传感器(PZT)多点测量时 PZT 和绝缘切片之 间难以计算的耦合误差的数学方法。研究结果表明,当声源是正弦信号时,频率在 155~350 kHz 之间的声波幅值衰减速度依次大于频率在 355~500 kHz 之间和 1~150 kHz 之间的声波幅 值衰减速度,而 1~150 kHz 之间的声波幅值几乎不衰减。频率在 155~350 kHz 之间和 355~ 500 kHz 之间的声波幅值在检测位置为 45°~90°之间衰减速度最快,90°~315°之间趋于平缓。当 声源是声脉冲信号时,声波幅值的衰减也呈现出了高频快速衰减的规律,同时随着传播距离的增 加,频谱的主频主要分布在 1~50 kHz。

关键词: 电力电缆;XLPE 绝缘;声波衰减

中图分类号: TM247.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-3643(2019)04-0007-08 有效访问地址: http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2019.04.002

Research on attenuation of acoustic waves on XLPE insulation of power cable

YE Fengchun¹, NI Hui¹, WU Xutao¹, YU Haibo², CHENG Yangchun², XING Lin³

- (1. Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co. , Ltd. , Yinchuan Ningxia 750011, China;
- 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
- Economic & Technical Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050011, China)

Abstract: The attenuation characteristic of ultrasonic wave in power cable is very important for exploring the ultrasonic testing technology of partial discharge. In order to explore the attenuation characteristics of acoustic waves on XLPE cable insulation, the transverse XLPE cable insulation annular slices of 220 kV power cables were prepared. and the experimental system of acoustic attenuation was built.

收稿日期:2019-05-24

作者简介:叶逢春(1967),男,工程硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定分析管理工作。

The sinusoidal attenuation experiments and acoustic pulse signal attenuation experiments were carried out respectively, and the relationship between the attenuation and frequency of sinusoidal acoustic signals and acoustic pulse signals in XLPE insulation was studied. In the frequency analysis, a mathematical method was also proposed to counteract the coupling error between PZT and insulation chips, which is difficult to calculate when PZT multi – point measurement is carried out. The results show that the attenuation rate of acoustic wave amplitude in XLPE insulation is related to the frequency and propagation distance of acoustic wave under experimental conditions. When the sound source is a sinusoidal signal, the attenuation velocity of the amplitude of the sound wave with the frequency of 155 ~ 350 kHz is successively higher than that of the frequency of 355 ~ 500 kHz and 1 ~ 150 kHz, and the amplitude of the sound wave with 1 ~ 150 kHz is almost unattenuated. The amplitude of acoustic waves with frequencies of 155 ~ 350 kHz and 355 ~ 500 kHz is the fastest between 45° and 90°, and tends to be flat between 90° and 315°. When the sound source is an acoustic pulse signal, the attenuation of acoustic amplitude also shows the law of high frequency and fast attenuation. At the same time, with the increase of propagation distance, the main frequency of the spectrum is mainly distributed in 1 ~ 50 kHz.

Keywords: power cable; XLPE insulation; acoustic attenuation **DOI**: 10.3969/j.issn.1672 – 3643.2019.04.002

电力电缆在制造和安装过程中难免会产生缺 陷,这些缺陷会增强运行中电缆的局部场强,易引 发局部放电,进而导致电缆绝缘老化和故障失效。 电力设备局部放电检测的常规方法分为电信号检 测法和非电信号检测法,电信号检测法有电感法、 电容法和脉冲电流法:非电信号检测法有超声波 检测法、光检测法、热检测法和分解产物检测法。 和电信号检测法相比,非电信号检测法的优势在 于它能有效避免电力设备运行环境中复杂的电磁 环境干扰,所以非电信号检测法的发展前景广 阔^[1-2],其中局部放电超声信号检测可以利用光 纤光栅传感技术、压电传感技术等[3]。光纤光栅 传感技术与压电传感等技术相比,具有容易实现 波分、空分复用的优点^[8-9],但是光纤光栅传感技 术在实际检测电力电缆局部放电的超声信号时效 果并不理想^[3],造成这种结果的原因一方面和光 纤光栅传感器设计有关;另一方面和声波在电缆 中的衰减有关。本文从声波在电缆中的衰减着 手,分别利用信号发生器激励压电陶瓷传感器产 生的正弦声波信号,以及断铅信号作为声源,在 220 kV 电缆切片上进行试验,研究了声波在

XLPE 绝缘上的衰减和频率的关系,希望能给实现 光纤光栅局部放电超声检测在电力电缆上的应用 提供理论参考。

1 实 验

1.1 试品制备

本实验的 XLPE 绝缘试品是 220 kV 电缆绝 缘切片,呈圆环形状,并将圆环从一端断开,如图 1 所示。电缆的型号为 YJLW03 - Z - 127/220 kV -1 × 2 500 mm²,绝缘切片的内半径为 32 mm,外半径 为 57 mm,厚度为 6.9 mm,断口宽度为 2 mm。



1.2 实验系统

搭建的整个实验系统的实物及原理如图 2 所示,其中声源利用 Agilent33250 A 信号发生器手动扫描产生不同频率正弦信号,激励压电陶瓷传感器产生相应同频率正弦声波信号,其输出信号峰值均设置为 10 V。模拟声脉冲信号的常用方法有折断毛细玻璃管和折断铅笔芯^[4-7]。实验中采用断铅(0.5 mm,HB)的方法来产生声脉冲信号,断铅模拟的是一个具有冲击特性的信号,根据信号处理相关原理,此类信号是一个在时域作用时间很短、幅值很大,在频域具有全频分布特性的信号。

实验采用型号为 SR150N3055 的 PZT 检测声 波信号,通过前置放大器对信号进行 40 dB 的放 大。实验中,源 PZT 和检测 PZT 均通过超声耦合 剂与试品接触。示波器为 Tektronix TPS 2024B, 用来放置试品的铝板尺寸为 350 mm × 350 mm × 3 mm。





⁽b)原理图2 实验系统

1.3 声波衰减试验

1.3.1 正弦声波衰减试验

为了研究不同频率的声信号在绝缘试片中的 衰减规律,实验利用信号发生器手动扫频逐个产 生不同频率正弦电信号,以此激励 PZT 产生相应 频率的正弦声波信号作为声源。实验中手动扫描 信号的频率范围设置在1~500 kHz,在1~10 kHz 之间频率的增量为1 kHz,在10~500 kHz 之间频 率的增量为5 kHz。如图1 所示,XLPE 绝缘环形 切片被切断,以此增加声波在绝缘试品上的传播 长度,并在环形试品上等角度、等距离取8个点, 圆点S为声源位置,星点为检测点,这样每相邻两 个点和圆心连线夹角呈45°,从声源点S开始逆时 针计,7个检测点的位置依次是45°、90°、135°、 180°、225°、270°、315°,检测点距声源的距离随角 度的增大而增大,文中用检测点的角度代表距离 及位置关系。

实验原理如图 2(b) 所示,将绝缘试品放置在 铝板上,源 PZT、检测 PZT 和绝缘试品之间通过超 声耦合剂进行耦合,源 PZT 将信号发生器产生的 电信号转换成声信号,声信号沿着绝缘环从声源 点传播到检测点,被检测 PZT 转换成电信号,电信 号通过前置放大器进行放大,最后用示波器对电 信号进行显示和存储。示波器显示正弦声波波形 如图 3 所示。



图3 正弦声波信号

1.3.2 声脉冲信号衰减实验

用铅笔芯断裂产生的声波信号模拟局部放电 产生的声波信号,如图2所示,在环形绝缘声源点S 处折断铅笔芯,控制铅笔芯伸出约2.5 mm,与绝缘 表面呈约30°时折断。断铅信号沿绝缘环向前传 播,检测PZT将声信号转换成电信号,经前置放大 40 dB 后在示波器上显示和存储,示波器采样率设 置为1 MS/s,示波器断铅信号采集如图4所示。



图 4 示波器显示断铅信号

电力电缆 XLPE 绝缘上的声波衰减实验研究

2 实验结果与分析

2.1 正弦声波衰减实验

正弦声波衰减实验手动扫描得到的不同位置 信号频谱如图5所示。从频谱图的幅值变化规律 来看,总体上随传播距离的增加,信号的幅值呈递 减的趋势,说明了正弦声波信号在环形绝缘结构 中发生了衰减,这符合声波在媒质传播中存在衰 减的普遍现象。但可以明显地发现图5(d)中的 幅值和其他图相比较并不符合递减的规律,在实 际实验时,耦合剂涂抹不均匀不一致是造成幅值 测量误差的主要因素。





声波幅值在绝缘环中的减小不仅和传播距离 有关系,还同时和声波信号的频率有关系,本实验

• 10 •

主要目的就是研究 XLPE 绝缘中声波幅值衰减和 传播距离以及声波频率之间的关系。对比图 5 中 绝缘环 7 个检测点得到的频谱,可以发现在 45°至 90°,200~300 kHz 的声波幅值减小了约 3/5 至 19/20 不等,和其他角度之间的本频带幅值减小 速度相比,此角度之间减小速度最快;和其他频带 的幅值减小速度相比,本频带幅值较小速度最快。 对于 45°到 315°,1~150 kHz 的声波幅值稳定在 0.1 V 左右。随着检测点到声源点距离的增加, 1~150 kHz、155~350 kHz 以及 335~500 kHz 声 波幅值大小之间的比例关系发生变化,即不同频 率的声波幅值随距离减小的速度不一致,并且同 频带随角度增加幅值的减小速度也发生变化。为 了探究这 3 个频段的声波幅值变化规律,对声波 幅值进行分频段分析。

图 6 是正弦声波衰减试验系统传递函数方框 图。其中 f 指频率; θ 代表角度;K(f) 代表源 PZT 由电信号激励产生声波的激励系数,与频率 f 有 关; $C_1(\theta)$ 、 $C_2(\theta)$ 分别代表源 PZT 以及检测 PZT 和绝缘表面之间的耦合系数,其仅与此点的耦合 剂涂抹和 PZT 放置有关,形式上表示成 θ 的函数; T(f) 代表信号幅值传输系数,即从声源点到检测 点信号幅值的传输比例;g(f) 代表检测传感器的 传感系数; V_{s1} 、 V_s 、 V_{o1} 、 V_o 指声波幅值。实验系统 响应如式 1。

 $V_o(\theta, f) = U_s \cdot K(f) \cdot C_1(\theta) \cdot T(\theta, f) \cdot C_2(\theta) \cdot g(f)$ (1)

电力电缆 XLPE 绝缘上的声波衰减实验研究

同一位置 θ_i ,不同频率 f_1, f_2 时的响应之比 M_1, M_2 如式(2)、(3),进而可得 H 如式(4)。 $M_1(\theta_1, f_1, f_2) = \frac{V_o(\theta_1, f_2)}{V_o(\theta_1, f_1)} = \frac{K(f_2) \cdot T(\theta_1, f_2) \cdot g(f_2)}{K(f_1) \cdot T(\theta_1, f_1) \cdot g(f_1)}$ (2) $M_2(\theta_2, f_1, f_2) = \frac{V_o(\theta_2, f_2)}{V_o(\theta_2, f_2)} = \frac{K(f_2) \cdot T(\theta_2, f_2) \cdot g(f_2)}{V(\theta_2, f_2) \cdot g(f_2)}$

$$M_{2}(\theta_{2}, f_{1}, f_{2}) = \frac{V_{o}(\theta_{2}, f_{1})}{V_{o}(\theta_{2}, f_{1})} = \frac{V(f_{1}) \cdot V(\theta_{2}, f_{2}) \cdot S(f_{1})}{K(f_{1}) \cdot T(\theta_{2}, f_{1}) \cdot g(f_{1})}$$
(3)

$$H(\theta_1, \theta_2, f_1, f_2) = \frac{M_2(\theta_2, f_1, f_2)}{M_2(\theta_1, f_1, f_2)} = \frac{\frac{T(\theta_2, f_2)}{T(\theta_2, f_1)}}{\frac{T(\theta_1, f_2)}{T(\theta_1, f_1)}}$$

(4)

式(4)中, $H(\theta_1, \theta_2, f_1, f_2)$ 能够反映随着传播 距离的变化,不同频率声波幅值的比例的变化情况。由于式(4)不包含源 PZT 激励系数 K(f)、源 PZT 耦合系数 $C1(\theta)$ 、检测 PZT 耦合系数 $C2(\theta)$ 以及检测 PZT 传感系数 g(f),减小了实验分析的 误差。

为了探究 1~150 kHz、155~350 kHz 以及 335~500 kHz 3 个频段的声波信号幅值的相对变 化规律,分别求得每 1 个检测点信号频谱中 3 个 频带内各自的幅值均方根 U_{RMS} ,用来代替频带中 信号幅值,这 3 个频带依次按频率由小到大用符 号 f_1 , f_2 , f_3 表示。

求得均方根 U_{RMS}数值如表 1 所示, 根据式 (2) - (4)求得 *M* 和 *H* 如表 2 所示。



图6 买验系统传递函	数
------------	---

表1 均方根 U_{RMS}

频率 -	幅值均方根								
	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°		
f_1	2.409 67	0.033 66	0.022 92	0.032 95	0.019 81	0.021 69	0.023 72		
f_2	25.375 25	1.89744	0.410 24	0.563 66	0.104 66	0.061 17	0.015 75		
f_3	1.543 09	0.167 95	0.019 71	0.032 13	0.009 73	0.007 54	0.007 02		

《宁夏电力》2019年第4期

西日	频带信号均方根比值										
坝日	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°				
$M(\theta, f_1, f_2)$	10.53058	56.363 56	17.900 19	17.108 12	5.283 76	2.820 17	0.663 92				
$M(\theta, f_2, f_3)$	0.060 81	0.088 51	0.048 04	0.057 00	0.092 98	0.123 20	0.445 56				
$M(\theta, f_1, f_3)$	0.64037	4.988 85	0.860 00	0.975 17	0.491 30	0.347 45	0.295 81				
$H(\theta,\theta+45^\circ,f_1,f_2)$	5.352 37	0.317 58	0.95575	0.308 85	0.53374	0.235 42	—				
$H(\theta,\theta+45^\circ,f_2,f_3)$	1.455 53	0.54 28	1.186 42	1.631 25	1.325 01	3.616 47	—				
$H(\theta,\theta+45^\circ,\!f_1,\!f_3)$	7.790 56	0.172 38	1.133 92	0.503 8	0.707 22	0.851 38	—				

表2 M、H值

表 2 中, $H(\theta, \theta + 45^\circ, f_1, f_2)$ 表示位置 $\theta + 45^\circ$ 和位置 θ 相比, f_2 频带的信号均方根值和 f_1 频带的信号均方根值之比的变化情况, 其他 H 参数 以此类推。绘制 $H - \theta$ 曲线如图 7 所示, 其中图 (a) 和图(c) 总体呈递减趋势, 说明 f_2 频带和 f_3 频带信号均方根值相对 f_1 频带衰减快一些, 图(b) 总体呈增加趋势, 说明 f_2 频带信号均方根值相对 f_3 频带衰减快一些。同时, 图(a) 和图(c) 中可以 明显看到 45°~90°之间曲线的陡度最大,已知 f_1 频带的幅值几乎不变化, 说明在 45°~90°之间, f_2 和 f_3 频带声波幅值减小最快, 随着角度的增加, 这两个频带幅值的减小速度变小并且趋于平缓。





正弦声波衰减实验表明:在本实验 XLPE 绝 缘环试品中,声波幅值的衰减快慢和频率有关,其 衰减速度大小关系为 $v_{f2} > v_{f3} > v_{f1} \cdot f_1$ 频带信号 幅值基本保持稳定;同时,随着传播距离的增加, $f_2 \, nf_3$ 频带声波幅值的衰减速度是变化的,其中 45°~90°时, $f_2 \, nf_3$ 频带幅值衰减最快,然后趋于 平缓。

2.2 声脉冲信号衰减实验

实验中采用折断铅笔芯的方式产生声脉冲信 号,模拟局部放电时产生的声波脉冲,断铅信号的 频率谱组成相比信号发生器手动扫描信号更接近 真实局放信号的情况。在绝缘环的7个检测点检 测到的断铅信号及其频谱如图8所示,从频谱图 可以看到,最近的测量点 θ =45°处,355~500 kHz 的频谱幅值已经几乎为零,155~350 kHz 的频谱 幅值和1~150 kHz 的频谱幅值相比已经很小,比 例关系约1/6,说明从声源点*S* 到检测点 θ =45° 处高频已经很快衰减;从测量点 θ =90°至 θ = 315°,155~350 kHz 的频谱幅值也已经几乎衰减 为零。断铅信号中的高频部分衰减明显比低频部 分快,从 $\theta = 90^{\circ}$ 开始其频谱主要集中在 $1 \sim 50$ kHz,且其幅值衰减较慢。





· 13 ·



(g)测量点 θ = 315°的断铅信号及其频谱

图 8 断铅信号及其频谱

3 结 论

(1)在正弦声波衰减实验中,声波幅值的衰 减速度和声波的频率有关,当频率在155~350 kHz 时的幅值衰减速度大于335~500 kHz;频率 在1~150 kHz 的声波幅值衰减速度最小,其幅值 几乎保持稳定而不衰减。同时,声波幅值衰减速 度还和传播距离有关,155~350 kHz 和335~500 kHz 声波幅值在45°~90°衰减速度最快,之后趋 于平缓。

(2)在声脉冲信号衰减实验中,声波幅值衰 减速度同样和频率有关,表现高频衰减速度快的 特点,同时,随着检测点距离的增加,频谱的主频 主要分布在1~50 kHz。

参考文献

- [1] 李科林.局放超声波在电缆附件介质中传播特性研 究[D].哈尔滨理工大学,2017.
- [2] 何聪,袁川,曾伟,等. XLPE 高压电力电缆局部放电 检测方法[J]. 电网与清洁能源,2016,32(5):27

-33.

- [3] TIAN Y , LEWIN P L, DAVIES A E, et al. Acoustic emission detection of partial discharges in polymeric insulation [C]//1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, London, UK, 1999(1): 82-85.
- [4] 郭艳平,解武波,郑小平. 声发射技术及其在变压器局部放电检测中的应用[J]. 现代电子技术,2007 (17):137-140.
- [5] 中国特种设备检测研究院.无损检测声发射检测总则:GB/T 26644-2011[S].2011.
- [6] 施克仁.无损检测技术[M].北京:清华大学出版 社,2007.
- [7] 袁振明. 声发射技术及其应用[M]. 北京:机械工业 出版社,1985:91-92.
- [8] 余有龙,谭华耀,王骐.基于光纤激光器的波分复用 光纤光栅传感系统[J].光学学报,2002(5):592
 -595.
- [9] 李维民,黄海清,王元一.光纤光栅及其在光波分复 用技术中的应用[J].空军工程大学学报(自然科学 版),2000(3):80-82.

• 14 •