

变压器局部放电检测声阻抗匹配研究

涂彦明¹, 张劲¹, 何宇航¹, 薛志航¹, 姚晓¹, 丁登伟²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213)

摘要:局部放电检测技术是变压器绝缘诊断的重要手段之一,而外置式超声法是目前使用较多的超声检测法。针对当前外置式超声检测法灵敏度较低的问题,文中研究了声阻抗匹配提高变压器局部放电超声信号透射强度的可行性。经理论分析发现,通过在变压器油和外壳之间加入匹配层,且满足匹配层声阻抗介于变压器油和外壳的声阻抗之间,能增大超声波信号的透射系数,获得了透射系数随频率变化的规律及中心频率和匹配层厚度的关系。模拟试验表明,在变压器油与变压器外壳之间加入声阻抗匹配层后,测得的超声波信号幅值约为未设置声阻抗匹配层侧的2倍,超声波信号的透射系数得到了显著增强,试验结果验证了声阻抗匹配提高实测超声波信号强度的可行性。

关键词:变压器;局部放电;超声波;声阻抗匹配;透射系数

中图分类号:TM 41 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)01-0050-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230109

Research on Acoustic Impedance Matching of Partial Discharge Detection for Transformer

TU Yanming¹, ZHANG Jing¹, HE Yuhang¹, XUE Zhihang¹, YAO Xiao¹, DING Dengwei²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Sichuan Energy Internet Research Institute of Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan, China)

Abstract: Partial discharge detection is one of the most important methods for transformer insulation diagnosis, and the sensor-externally-installed method is the most used ultrasonic detection method at present. In view of the low sensitivity of current external ultrasonic detection method, the feasibility of improving transmission intensity of ultrasonic signal of transformer partial discharge by acoustic impedance matching is studied. By theoretical analysis, it is found that the transmission coefficient of ultrasonic signal can be increased by adding matching layer between transformer oil and shell when the acoustic impedance of matching layer is between those of the transformer oil and shell. The variation rule of transmission coefficients with frequency and the relationship between center frequency and thickness of matching layer are obtained. The simulation test results show that when the acoustic impedance matching layer is added between transformer oil and shell, the amplitude of the measured ultrasonic signal is about double that of the ultrasonic signal measured in opposite side without the acoustic impedance matching layer, and the transmission coefficients of ultrasonic signal is significantly enhanced, which verifies the feasibility of improving the intensity of the measured ultrasonic signal by the acoustic impedance matching.

Key words: transformer; partial discharge; ultrasound; acoustic impedance matching; transmission coefficient

0 引言

变压器是电力系统中的关键设备,其健康、可靠运行对于系统安全有着重要的意义。变压器绝缘问题是导致其故障的主要因素,对设备绝缘状态进行检测并及时预警绝缘缺陷,是减少故障的主要手

段^[1-3]。局部放电检测技术是目前实现绝缘诊断的主要技术手段之一^[4],而主流检测方法是超声波法和特高频法。

超声波法主要分为内置式和外置式两类^[5-8]。其中,内置式传感器定位精度更高,但大多数已投运变压器无法将传感器内置安装,因此其使用场合受到极大限制;外置式超声法是目前使用较多的超声

检测法,主要通过将压电陶瓷式超声传感器贴于变压器外壳的方式以检测超声信号。该方法的优点是操作简单,且传感器位置可以自由布置,具有较高的灵活性,是目前主流的超声检测方法^[9-12]。然而,超声信号从油中传播至变压器外壳时,由于油和钢板的声阻抗相差较大,超声信号会在油和钢板处发生严重的反射,只有极少部分超声能量可以通过钢板传递出来,故而外置式超声传感器测得的信号通常较弱,信号信噪比较小^[13-14]。当放电强度不高时,实测到的超声信号常常会被背景噪声淹没^[15-17],无法直接用于分析,使其现场应用价值大打折扣。

为了解决变压器局部放电超声信号检测灵敏度较低的问题,可对超声波信号进行降噪处理,提高信噪比,从而提高实测超声信号的利用效率。目前已有大量相关研究成果,涉及小波变换软阈值处理、快速独立分量分析算法、匹配追踪算法等多种方法,取得了一定成效^[15,18-20]。尽管采用信号降噪算法可以有效提升微弱超声信号的检出能力,但该方法的前提是超声传感器能检测到信号。因而,要提高超声法的检测灵敏度,除了降噪外,还需要从测量层面提升信号的检测能力。例如,从减小信号传输过程中的衰减的角度入手,提高实测信号的强度,改善超声法灵敏度,但目前在该方面的研究较少。

下面将声阻抗匹配引入到变压器局部放电超声测量中,通过在油和钢板间设置匹配层,减小超声信号在界面处的反射,提高超声信号的透射系数,从而提高实测得到的超声信号强度,提升超声法检测局部放电的灵敏度。

1 声阻抗匹配的基本原理

对于两层介质 1 与介质 3,其声阻抗分别为 z_1 和 z_3 ,假设 $z_1 < z_3$,则超声波信号直射时的声强透射系数为 T_1 为^[21]

$$T_1 = \frac{4 \times z_1 \times z_3}{(z_1 + z_3)^2} \quad (1)$$

当 $z_1 \neq z_3$ 时, $T_1 < 1$,表明当两层介质声阻抗不相同,超声波信号不能完全透射,两层介质声阻抗的差异越大,超声波信号的透射系数则越低。

若在介质 1 和介质 3 中间加入一层厚度为 d 、声阻抗为 z_2 的介质 2,可以推导出式(2)所示的超声波信号的声强透射系数 T_2 ^[21]。

$$T_2 = \frac{4 \times z_1 \times z_3}{(z_1 + z_3)^2 \cos^2 \frac{2\pi d}{c_2} f + \left(z_2 + \frac{z_1 \times z_3}{z_2} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{c_2} f} \quad (2)$$

式中: c_2 为超声波信号在介质 z_2 中的传输速度; f 为超声波信号频率。

由此可见,当有三层介质时,透射系数是厚度 d 的函数。当 $z_1 < z_2 < z_3$ 时,即加入的介质声阻抗介于原来两种介质声阻抗之间时,式(2)在 $d = c_2 / (4f) = \lambda / 4$ 时取得极大值。同时,可以推导出,当 $z_1 < z_2 < z_3$ 时,有 $T_1 \leq T_2 \leq T_{2\max}$ 。这表明,当加入介质的声阻抗介于原来两种介质的声阻抗之间时,超声波信号的透射系数会增大,这便是声阻抗匹配的基本原理。特别地,当 $z_2 = \sqrt{z_1 \times z_3}$ 时, $T_{2\max} = 1$,此时为最佳匹配,即超声波信号的透射系数最大。

2 变压器局部放电检测声阻抗匹配分析

局部放电激发产生的超声信号在向外传播的过程中,其部分能量会在介质(油、钢板等)中被吸收而产生损耗,同时,在油和变压器外壳界面处会发生反射使得部分超声能量无法透过钢板。因此,实际传播至变压器外侧超声传感器处的超声信号能量较小,从而导致外置式超声法的检测灵敏度低。

在导致实测超声信号衰减的因素中,油和钢板界面处的反射是主要因素。通常,变压器油和钢的声阻抗分别为 1.3 和 46,由式(1)可计算得到超声波信号在变压器油 and 外壳交界处的透射系数约为 0.11。由此可见,大部分的超声波能量并不能传入钢制外壳,因此超声波传感器测得的信号强度也较低。基于声阻抗匹配原理,若能在变压器油和外壳间加入一种声阻抗介于变压器油和钢的声阻抗之间的材料,则可提高超声波信号的透射系数,进而提高实测超声波信号的强度。

分别选取环氧树脂和玻璃纤维作为声阻抗匹配层材料进行分析,其声学参数如表 1 所示,通过式(2)可以得到如图 1 所示的透射系数随频率变化的规律。

表 1 不同声阻抗匹配层声学参数

序号	材料	声速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	声阻抗/ ($\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)	厚度/cm
1	环氧树脂	2400	2.70	1.0
2	环氧树脂	2400	2.70	0.5
3	玻璃纤维	3150	6.04	1.0

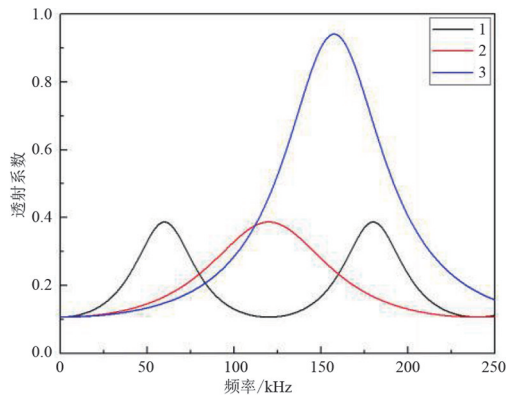


图 1 不同声阻抗匹配层透射系数随频率变化关系

由图 1 可知,经过声阻抗匹配,超声波信号在变压器油和外壳之间的透射系数均比未匹配时有所增大。同时,当声阻抗匹配层厚度确定后,匹配后的透射系数是随信号频率周期变化的,透射系数在一个周期内呈单峰状。

由图中曲线 1 和曲线 2 可知,对于同一种声阻抗匹配材料,当匹配层厚度不同时,透射系数频谱的中心频率是不同的,中心频率和匹配层厚度的关系为

$$d = c_2 / (4f) = \lambda / 4 \quad (3)$$

因此,匹配层厚度越小,透射系数频谱的中心频率越高,且频带越宽。在实际应用时,需要根据超声波信号的中心频率选择合适的匹配层厚度,从而将匹配效果调整至最佳。

由图中曲线 1 和曲线 3 可知,对于不同匹配层材料,当匹配层的声阻抗越接近最佳匹配阻抗 $z_2 = \sqrt{z_1 \times z_3} = \sqrt{1.3 \times 46} = 7.7$ 时,透射系数的峰值也越大。

总体而言,在忽略声阻抗匹配层对超声波信号吸收损耗的情况下,只要匹配层的声阻抗介于变压器油和外壳的声阻抗之间,均能增大超声波信号的透射系数,而透射系数的峰值则取决于匹配层的声阻抗,因此,选择声阻抗合适的匹配材料,可以在较大程度上增大超声波信号的透射系数。匹配层的厚度取决于检测所需的中心频率和匹配层中的超声波声速,在中心频率确定的前提下,出于节省空间的考虑,匹配层应当越薄越好,照此要求应选择声速相对较小的材料。此外,在实际应用中,超声波信号在匹配层中不可避免会发生吸收损耗,因此,要选择超声波损耗相对较小的材料。

3 变压器局部放电声阻抗匹配试验

3.1 变压器声阻抗匹配试验系统

为了验证基于声阻抗匹配提升实测超声波信号

强度的可行性,搭建了试验系统,如图 2 所示。在等比例缩小的充油模拟变压器器身(尺寸 $60 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$,外壳厚度 2 cm)中部设置油中尖端放电模型,在对模拟变压器施加相应电压后,可激发出尖端放电超声波信号。在布置声阻抗匹配层时,要求匹配层和模拟变压器金属外壳紧密接触,其间不能留有气隙或油隙,因此,选用环氧树脂浇注的方式在外壳的油箱一侧布置环氧树脂匹配层,匹配层厚度为 1 cm 。将两个型号为 PAC R15 α 的超声波传感器对称布置于油中尖端放电模型两侧的壳体外表面,一侧信号传输路径上变压器油和外壳之间有声阻抗匹配层,另一侧则没有。

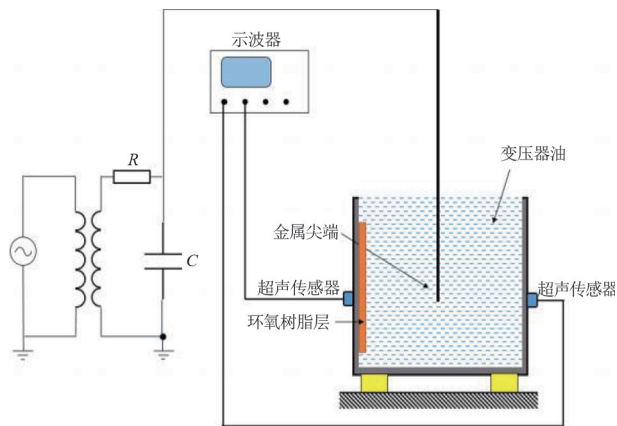


图 2 变压器声阻抗匹配试验系统

3.2 结果分析

如图 3 所示,从试验结果可知,设置了声阻抗匹配层一侧测得的超声波信号幅值约为未设置声阻抗匹配层一侧的 2 倍,表明经过声阻抗匹配,超声波信号的透射系数得到了显著增强。基于试验便捷性考虑,选择了环氧树脂材料作为声阻抗匹配层,由于其并非最佳声阻抗匹配材料,因此对超声波信号的增强幅度有限,但试验结果仍然可以表明,通过声阻抗匹配提高检测到的超声波信号强度具有可行性。在实际应用中,根据检测需求选择更为合适的声阻抗匹配材料,实现更为理想的变压器局部放电声阻抗匹配效果。

根据理论分析和试验验证,利用声阻抗匹配增大超声波传感器检测到的变压器局部放电信号强度是可行的,这为变压器局部放电超声波检测灵敏度的提升提供了一种新的方法。实际应用时,鉴于变压器本身是一个复杂系统,内部电磁环境复杂,且长期处于温度、振动、油浸工况下,在变压器油和外壳之间加入声阻抗匹配层的工程可行性研究还应进一

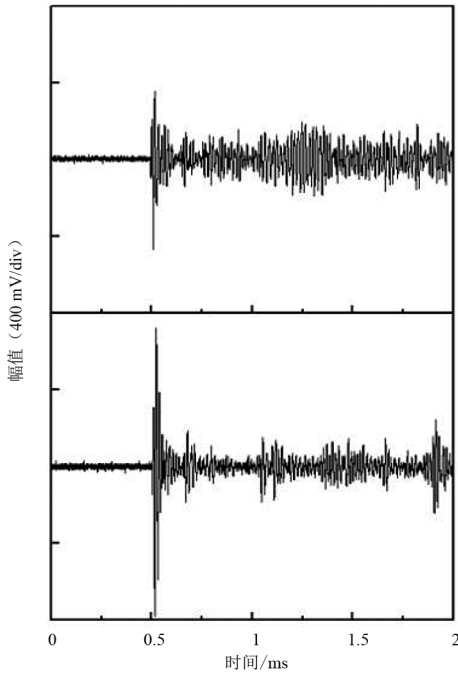


图 3 两侧超声传感器测得的油中尖端放电时域波形

步研究。声阻抗匹配材料的选择需要综合考虑多种因素,如材料的耐油性、对变压器内电场分布是否有影响等,同时,在满足最佳匹配阻抗值的情况下,应选取声速较小的材料,可以使得匹配层更薄,节省变压器内部空间,减小对变压器内电场分布的影响。

4 结 论

为了解决变压器局部放电超声信号检测灵敏度较低的问题,研究加入声阻抗匹配层后超声波在介质中的传播情况,得到了透射系数随频率的变化关系以及中心频率和匹配层厚度的关系。根据前述规律,选用环氧树脂作为声阻抗匹配层材料,通过模拟试验验证了采用声阻抗匹配提升超声波信号透射系数、提高实测超声波信号强度的可行性。

参考文献

[1] 侯恺宁,王强,陆信波,等.基于超宽频带法的油纸绝缘局部放电检测方法[J].高电压技术,2022,48(12):4770-4779.

[2] 陆宇航,杜伯学.时频匹配滤波法用于变压器局部放电模式识别的实验研究[J].中国电力,2008,41(10):16-19.

[3] 李红军,卢宁.浅析一起由于套管末屏绝缘状态不良引起的变压器放电事故[J].变压器,2020,57(12):79-82.

[4] 高树国,赵军,乔辉,等.换流变压器局部放电检测与特

性研究综述[J].绝缘材料,2022,55(7):1-9.

[5] 贾骏,陶风波,杨强,等.复杂多径传播条件下变压器局部放电定位方法研究[J].中国电机工程学报,2022,42(14):5338-5348.

[6] 蔡鋈,袁文泽,张轩瑞,等.基于特高频自感知的变压器局部放电检测方法[J].高电压技术,2021,47(6):2041-2050.

[7] 张林楠,杨俊杰,江晨.基于特高频传感器和 TDOA 数据库的电力变压器局部放电的定位[J].变压器,2021,58(5):67-72.

[8] 刘化龙.变压器局放超声检测和定位技术现状及发展[J].重庆理工大学学报(自然科学),2014,28(7):71-79.

[9] 律方成,程述一,李燕青,等.超声法在电力变压器局部放电检测中的应用与展望[J].变压器,2012,49(8):45-49.

[10] 葛为民.变压器局部放电超声定位的现场应用[J].高压电器,2005,41(5):351-353.

[11] 孙浩飞,高坤,花啸昌,等.基于路径时间差的变压器局部放电超声定位方法研究[J].智慧电力,2022,50(3):100-107.

[12] 余昌佳,郑建勇,何嘉弘,等.时差筛选和 ABC 二次寻优的变压器局放超声定位方法[J].高电压技术,2021,47(8):2820-2827.

[13] 董艳唯,张弛,满玉岩,等.基于阵列时延库的变压器局放超声阵列定位研究[J].电测与仪表,2015,52(10):109-113.

[14] 高超飞,刘旭,王伟,等.变压器局放超声传播 FEM 仿真分析[J].电网与清洁能源,2017,33(10):14-22.

[15] 程万胜,岳伦,付振贺,等.基于小波变换的变压器局放信号超声直达波提取[J].电测与仪表,2013,50(9):46-50.

[16] 周晶,罗日成,黄军,等.基于 NS-APSO 算法的变压器局部放电超声定位方法[J].电测与仪表,2022,59(8):155-160.

[17] 金广厚,王庆,李燕青,等.局部放电超声信号在变压器模型中的传播[J].高电压技术,2003,29(9):14-15.

[18] 李燕青,郑伟烁,王川,等.匹配追踪算法在局放超声阵列信号去噪中的应用[J].高电压技术,2015,41(10):3302-3312.

[19] 谢庆,程述一,律方成,等.采用改进型圆形超声阵列传感器的油中局放定位[J].高电压技术,2013,39(5):1054-1060.

[20] 李燕青,王飞龙,赵亮.变压器局放源定位时差求取方法研究[J].电测与仪表,2013,50(12):69-72.

[21] 张剑.超声换能器匹配层与背衬材料对性能影响的研究[D].长春:长春理工大学,2021.

作者简介:

涂彦明(1972),硕士,高级工程师,从事高电压技术和电力系统断电保护工作。(收稿日期:2022-10-25)