

变压器局放检测中超声波和超高频法的现状分析

雷海智

国网陕西省电力有限公司延安供电公司

摘要: 变压器局部放电对电力系统的稳定运行具有重大影响,因此,对局部放电的检测和定位至关重要。目前,无论是国内还是国外,对于变压器局部放电的检测手段主要可以归纳为非电测法与电测法这两大种类。超声波法和超低频法是目前应用最为广泛的两种局放检测法。本研究详细比较了两种检测方法:超声波法和超高频法,并对这两种方法中存在的问题进行了深入分析,基于这些分析,我们对未来的发展进行了预测。

关键词: 局部放电; 超声波; 超高频; 问题; 比较

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-627X.2023.07.226

引言

局部放电不仅是电力变压器绝缘状况的一个高度敏感的指标,也是绝缘老化过程中不可避免的一种现象,更是导致绝缘性能下降的主导因素。因此,研究和分析局部放电特性,对于判断电力变压器的绝缘性能具有重要意义。在电力系统的整体运作中,变压器在确保其安全和稳定运行方面发挥着至关重要的角色。然而,在长时间的运行过程中,由于温度、雷电和内部过电压的影响,变压器的绝缘逐步老化,从而导致变压器内部绝缘出现局部放电现象。一旦发生了局部放电,就会造成设备绝缘性能下降甚至击穿破坏,使电气设备不能正常工作,严重时可能引发火灾等恶性事件。据相关资料显示,80%的电力变压器故障是由局部放电引发的绝缘损伤所导致的。因此,及时准确地检测出变压器绝缘缺陷并进行有效处理显得尤为重要。通过在线监测变压器的局部放电情况,我们能够及时发现早期的绝缘问题,从而避免意外事故,这对电力系统的稳定和安全运行具有至关重要的作用。

一、采用超声波的检测方法

当变压器内部发生局部放电时,产生的超声波信号会以球形向周围传播^[1]。通过安装在变压器外壳上的传感器,超声波信号会被转换为电信号,然后多个传感器接收到信号的时延,经过定位算法的计算,从而对局放源进行定位。

当变压器内部发生局部放电时,放电源产生的超声波可以通过两种方式到达外壳上的传感器:一种是超声波通过变压器油并穿过钢板直接到达传感器,这种现象被称为纵向波;第二种是经过变压器套管与铁芯之间缝隙而反射回来,再由变压器内其他元件传给传感器,称之为横向波。还有一种方法是首先传递到变压器油箱的内侧,接着通过钢板传递给传感器,这种技术被称为复

合波^[1-2]。目前,对于横向波来说,主要采用时差法和自相关法对其进行检测和分析,但这两种方法都存在一定缺陷,采用超声定位则能很好地弥补这些不足。由于超声波在钢板中的传播速度远超过在变压器油中的传播速度,并且在钢板中的衰减也相当显著,因此,到达传感器的纵向波的幅度远大于复合波。

在测量各传感器接收超声波的实验时,以直达波到达的时间作为基准。目前常用的检测技术主要有测时差、测频差以及超声波定位等方法。超声波定位技术可以进一步细分为两大类^[3]:(1)电与声的定位方法。利用声波在介质内发生反射、折射或透射等现象引起能量传递来确定测点位置。该技术采用局部放电产生的电脉冲作为参考信号,并同时记录电脉冲信号与多通道超声波信号。通过将超声波信号与电脉冲信号进行对比,我们确定了两个信号之间的时延,这被用作局部放电量到达各传感器的传播时间。然后,我们使用等效声速与这些时延的乘积来计算放电源与各传感器之间的距离,并最终通过方程来确定放电点的坐标。(2)声音与声音的精确定位。此方法采用一个传感器接收的超声波信号作为参考标准,对比其他传感器接收的超声波信号与基准传感器接收信号的时延,接着将这些时延数据输入方程进行求解,从而确定局部放源的具体位置。

超声波检测定位技术因其对电磁干扰的低敏感性和在线检测定位的能力,在国内外都得到了深入的研究和广泛的应用。随着计算机技术的飞速发展,利用计算机进行超声检测定位已成为可能。尽管如此,在实际操作中,这一方法依然遭遇了若干严重的问题和挑战。首先要明确的是,超声波在电力变压器内的传播复杂性是一个不能被轻视的议题。由于变压器绕组与铁心之间存在着复杂的空间关系,使得超声波在柱坐标下无法直接测量其表面反射波形,而只能采用傅里叶变换法得到相应

频率处的回波信号。由于变压器的内部构造和所用材料对超声波的传播产生了影响，这导致波信号在传播时会受到显著的减弱，从而明显降低了检测的准确性。

为了进一步提升检测的准确性，我们必须对变压器进行精确的模型分析，这需要依赖大量的实验数据作为支撑。此外，由于变压器本身具有复杂的内部结构以及外部磁场干扰等原因，使得建立精确可靠的数学模型变得更加困难。虽然已有研究者对超声波的传播途径进行了深入的系统性分析，但目前建立的变压器模型还不能准确地模拟实际变压器的复杂性。

再者，当传感器在接收信号时，判断其是否为纵向波动变得尤其重要。如果不能准确地确定出被检物体与目标之间的距离，就无法实现对其进行有效探测。然而，在实际应用过程中，这主要取决于技术专家的经验性判断。目前，关于纵向波的研究还相对较少，这无疑为超声波检测和定位技术带来了不小的挑战。

虽然超声波传感器在最近几年有了显著的进步，但关于如何提升其准确性和分辨率的传感器技术，我们还需要进行更深入的研究。随着科学技术水平不断提升，未来超声波传感器将具有更广阔的应用前景。在超声波传感器技术的演进中，如何突破当前技术的限制并优化传感器性能，成了一个我们迫切需要解决的难题。

二、超高频（UHF）的检测方法

超高频检测方法是利用天线传感器来捕获局部放电所发出的超高频电磁波，从而达到检测的目的。由于它具有灵敏度高，抗干扰能力强等优点而被广泛用于电力设备局部放电的现场在线监测。在1982年，Boggs和Stone首次采用超高频技术成功地在GIS设备中检测到了初始的局部放电脉冲。此后，随着微波、毫米波以及其他波段的无线电波在电力设备上的广泛应用，使得采用超高频法测的局部放电信号成为可能。在1996年，Rutgers是第一个将UHF检测方法用于电力变压器局部放电测量的人。近年来，随着计算机技术、微电子技术等领域的迅猛发展，基于微带线结构的微波局放源逐渐成了一种新的局放信号提取手段。这项技术具有极高的检测频段，能够有效地规避局部放电测量过程中可能出现的电气干扰，从而实现了极高的灵敏度，并显著提升了信号与噪声的比值。目前已被广泛应用于油浸式套管、高压电缆等电力设备内部故障定位及早期故障诊断。正因为这种方法具有传统检测手段无法匹敌的优势，它在近年来在国内外都受到了广泛的研究关注^[4]。

来自英国Strathclyde大学的Judd及其团队和荷兰KEMA实验室的Rutgers及其团队的研究发现，油中的放电上升边缘非常陡峭，脉冲的宽度大多为纳秒级别，这可以激发超过1GHz的超高频电磁信号。这些结果说明超高频法是一种非常有效地检测电力设备绝缘状态的工具体。Raja和他的团队在实际的变压器模型上进行了实验，结果显示超高频方法的灵敏度远超过超声波方法，并且几乎不会受到纸板或其他绝缘材料的干扰。他们还发现了一种新的基于超高频技术测量绝缘介质介电常数的方法，该方法可以同时获得介质的介电常数、电导率及表面电阻率信息，从而为实现对绝缘结构内部状态的无损检测提供可能。此外，来自法国ALSTOM输配电研究中心的K. Raja及其团队对多种典型的局部放电模型的UHF特性进行了深入研究，并成功构建了一种模式识别技术。

近年来，我国在变压器局部放电的UHF检测方面也取得了显著的进展。西安交通大学的李彦明及其团队利用混频技术构建了一个频带可调的窄带检测系统，并通过神经网络技术成功实现了局部放电类型的自动识别。华北电力大学的李成裕和他的团队利用检波技术对超高频信号进行了调整，并成功开发了一种基于检波技术的电力变压器在线检测设备。目前，这些研究都已经应用于实际工程中，且具有良好的效果和可靠性。重庆大学和清华大学在变压器局部放电的超高频检测领域也获得了众多的研究成果。

作为新兴的局部放电定位技术，基于超高频信号的局部放电定位方法具有很高的定位准确性。目前在电力系统中得到了广泛地应用，取得了较好的效果。然而，对这一主题的研究尚未达到深度，仍需进一步的科学探究和实验验证。

(1) 现有的方法模拟出的局部放电源与变压器的实际放电模式存在差异，这使得准确确定局部放电源的位置变得困难。(2) 由于变压器的内部构造相当复杂，这也使得UHF信号的传递模式变得异常复杂，从而对定位的准确性产生了不利影响。(3) 鉴于现场电磁干扰极为严重，因此需要进一步研究和制造具有高抗干扰能力和高灵敏度的传感器。(4) 目前，超高频法的定位技术仍处于初级阶段，有待于深入探讨和研究。

三、两种不同的方法

经过对当前两种检测手段的详细描述和存在的问题进行分析后，这两种方法的主要特性已在表1中进行了

总结。

表1 超声波和超高频法的比较

检测方法	超声波法	超高频法
放电量测量	通过超声幅值估算	无法测量
可达精度	<2pC	0.5~0.8pC
故障类型判别	能	能
抗干扰性	现场噪声干扰	受电磁干扰
适用情况	在线、离线	在线、离线
其他	需要有经验人员操作	造价高

四、超声波局部放电检测技术的未来发展方向

(一) 智能化与自动化：随着人工智能科技的不断进步，未来超声波局放检测设备将拥有更高的数据处理和分析能力，能够实现局放信号的自动识别、分类和定位。此外，借助机器学习的技术，该设备能够持续地调整检测参数，从而增强检测的精确度。为了达到这个目的，科研团队会持续研究新的计算方法和技巧，目的是提升设备的智能化和自动化程度。

(二) 微型化与集成化：对于超声波传感器和相关设备来说，走向小型化和轻量化将成为一个关键的发展趋势。由于超声波具有穿透性强等优点，它还可用于对电力设备局部放电进行定位。利用微型超声波传感器，变压器内部的安装变得更为简便，从而增强了检测的精确度和稳定性。目前，超声无损探伤已经成为电力设备绝缘状态监测中最主要的手段之一。此外，集成的超声波检测工具有助于减少系统的复杂度并提高检测的效率。这种发展方向也将推动超声波局放检测技术在更多领域得到广泛应用。

(三) 关于超声波信号的传播特性研究：为了进一步增强超声波局放检测的精确度，未来的研究方向将更多地集中在超声波在变压器的各种材料和构造中的传播行为上，目的是降低信号的衰减和外部干扰。这有助于增强检测技术在实际场景中的稳健性和信赖度。

(四) 超高频局放检测技术的未来发展方向

1. 高效能传感器的研发：为了增强超高频局放检测的灵敏性和精确度，未来的研究方向将主要集中在开发更高性能的传感器上。这款新型传感器将拥有更高的频率响应能力、更广泛的检测范围以及更出色的抗干扰性能。这有助于增强检测技术在实际场景中的精确度和稳定性。

2. 高效的优化：随着大数据技术的进步，超高频局放检测的数据处理和分析方法将得到更高效地优化。通过运用更为先进的信号处理技术和机器学习算法，我们

能够准确地识别和分类复杂的局部放电信号。这会提高变压器局放检测的精确度和工作效率^[5]。

3. 智能化和集成化：超高频局放检测设备正逐步向智能化和集成化的趋势发展。智能系统能够对检测数据进行实时的分析和诊断，从而提升检测的精确度和效率。集成化设备有助于减少系统的复杂度，并为现场的安装与维护提供便利。这有助于增强检测技术在实际场景中的使用便利性和稳定性。

4. 技术整合：在未来，超高频局放检测技术将与其他多种检测手段（例如超声波、光声等）进行融合，以实现全方位、多维度的局放检测，从而提升检测结果的可靠性和精确度。这有助于进一步扩大检测技术的应用领域，并为变压器的稳定和安全运行提供更为坚实的支持。

结语

在变压器局部放电检测定位方面，超声波法和超高频法具有其他传统技术无法匹敌的优势。目前应用最为广泛的是超声波法。然而，这两种研究方法在实际应用中依然面临一些挑战和问题。例如，对于不同类型变压器所建立的数学模型不一致，以及利用超声检测时间短而导致定位精度不高。面对这些挑战，变压器局放的发展可以从两个关键方面入手：深入探讨各种放电模型的工作原理，以满足实际应用的需求；（2）对变压器的模拟结构进行了扩充，并运用合适的手段对信号在变压器内部的传播模式进行了建模和分析。

参考文献

[1] 罗日成, 李卫国, 李成榕, 等. 基于改进PSO算法的变压器局部放电超声波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18): 66~69

[2] 罗勇芬, 李彦明. 用于油中局部放电定位的超声相控接收阵传感器的研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(4): 402~406

[3] 孙才新, 罗兵, 顾乐观, 等. 变压器局部放电源的电-声和声-声定位法及其评判的研究[J]. 电工技术学报, 1997, 12(5): 49~52, 60

[4] 罗勇芬, 李彦明, 刘丽春. 基于超高频和超声波相控接收原理的油中局部放电定位法仿真研究[J]. 电工技术学报, 2004(1): 35~39

[5] 刘兴元. 变压器局放检测中超声波和超高频法的现状分析[J]. 机电信息, 2013(6): 11-1113