

基于超高频局部放电检测的变压器绝缘缺陷定位精度提升研究

郭兴帅 彭铁栓 王 雄

内蒙古电力(集团)有限责任公司薛家湾供电分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要:本文聚焦基于超高频局部放电检测的变压器绝缘缺陷定位精度提升研究。首先阐述变压器典型绝缘缺陷类型、放电特性及超高频信号传播规律,剖析现有定位方法在传感器布局、算法和环境干扰方面的精度瓶颈。进而提出超高频传感器阵列优化、信号处理与干扰抑制、高精度时差估计算法、数字孪生建模与定位修正等关键技术。最后通过220kV和500kV变压器工程应用案例,验证了所提技术与方法的有效性和实用性,为变压器故障诊断提供可靠支持。

关键词:变压器;局部放电;超高频检测;绝缘缺陷;定位精度

1 变压器绝缘缺陷的超高频局部放电信号特征

1.1 典型绝缘缺陷类型及放电特性

变压器绝缘系统在长期运行中可能因多种因素产生缺陷,主要包括气泡放电、悬浮电位放电、沿面放电和电晕放电等类型。其中,气泡放电多由绝缘油中残留气体或局部过热导致油分解产生气泡引发,其放电能量较低但频次高,易在绝缘纸板与油界面处形成链式放电通道;悬浮电位放电则源于金属部件接触不良或绝缘支架松动,导致局部电位悬浮,在交变电场中产生周期性击穿,其放电脉冲幅值较高且波形对称性差;沿面放电通常发生在绝缘子表面污秽或受潮时,放电沿固体-气体界面发展,具有明显的相位聚集特征;电晕放电则多见于高压引线或尖端部位,其放电能量分散且频谱较宽^[1]。不同缺陷类型的放电特性在时域和频域上呈现显著差异。气泡放电的脉冲宽度通常在纳秒级,上升沿陡峭,频谱能量集中在300MHz-3GHz超高频段;悬浮电位放电因涉及金属颗粒运动,其脉冲重复率较低但幅值可达数百毫伏,频谱分布较宽且包含低频分量;沿面放电的脉冲波形具有明显的衰减振荡特征,主频位于500MHz-1.5GHz区间;电晕放电则因放电通道分散,其超高频信号能量较弱且相位分布随机。这些特征为超高频局部放电检测提供了理论依据。

1.2 超高频信号在变压器内的传播规律

超高频电磁波在变压器油箱内的传播受多重因素影响。油箱壁作为金属导体,对电磁波产生反射和衰减作用,其中低频分量(<1GHz)衰减较慢但易受箱体谐振干扰,高频分量(>1GHz)衰减迅速但方向性更强。绝缘油和纸板的介电常数差异导致信号传播速度降低,典

型油纸复合绝缘中的波速约为0.1-0.3c(c为光速),这要求时差估计算法需具备纳秒级精度。此外,绕组结构形成的波导效应会使特定频率信号沿绕组纵向传播距离显著增加,而横向传播则因铁芯的屏蔽作用迅速衰减。信号传播路径的复杂性导致接收信号强度与缺陷位置呈非线性关系。实验表明,当缺陷位于绕组中部时,传感器接收信号强度比端部缺陷低15-20dB,且高频分量衰减更明显。多径效应是另一关键问题,信号经油箱内壁、绕组、绝缘件等多次反射后形成叠加波形,使得时差测量误差可达数纳秒。这些传播特性对定位算法的抗干扰能力和空间分辨率提出严峻挑战。

2 超高频局部放电检测的变压器绝缘缺陷现有定位方法的精度瓶颈

2.1 传感器布局局限

传统定位系统多采用4-8个超高频传感器均匀布置于油箱壁,这种布局在三维空间定位中存在显著盲区。仿真分析显示,当缺陷位于传感器对角线方向时,时差测量误差较径向方向增加40%,导致定位椭圆误差面积扩大2.3倍。此外,油箱结构限制了传感器安装位置,阀侧引线、套管尾部等关键区域难以覆盖,而这些部位恰恰是绝缘缺陷高发区^[2]。传感器频响特性不一致性进一步加剧定位误差。实际测试表明,不同批次生产的传感器在1GHz以上频段的灵敏度差异可达±6dB,导致接收信号时间截提取偏差达1.5ns。现有校准方法多在自由空间进行,未能考虑变压器内部复杂电磁环境的影响,使得实际运行中传感器相位响应特性发生漂移,定位精度下降30%以上。

2.2 算法缺陷

基于到达时间差（TDOA）的定位算法是主流方法，但其对时间同步精度要求极高。现有GPS同步方案在变压器强电磁干扰下时钟漂移可达 $\pm 50\text{ns}$ ，而纳秒级误差即可导致数米级定位偏差。改进的迭代最小二乘法虽能部分补偿同步误差，但计算复杂度随传感器数量呈指数增长，难以实现实时定位。机器学习算法在定位中的应用逐渐增多，但存在过拟合和泛化能力不足问题。以支持向量机为例，其训练数据多来自实验室模拟缺陷，与现场复杂工况下的信号特征差异显著，导致实际定位误差较实验室环境增加1.8倍。深度学习算法虽能自动提取特征，但需要海量标注数据支撑，而变压器缺陷样本的稀缺性严重制约了其应用效果。

2.3 环境干扰

变电站强电磁环境对超高频信号构成严重干扰。开关操作产生的瞬态电磁场可达数千伏/米，其频谱覆盖100MHz-3GHz范围，与局部放电信号频段高度重叠。实验表明，在500kV变电站环境下，背景噪声水平比实验室高40-50dB，使得微弱放电信号的信噪比降至3dB以下，导致时差测量误差增加2-3倍。温度变化对传感器性能的影响同样不可忽视。绝缘油温度每升高10°C，其介电常数变化约0.5%，导致信号传播速度偏移0.8%。对于定位误差容限为10cm的系统，温度波动引起的速度误差即可导致定位偏差超过允许范围。现有补偿算法多采用线性模型，未能准确描述温度-速度的非线性关系，补偿效果有限。

3 超高频局部放电检测的变压器绝缘缺陷定位精度提升的关键技术

3.1 超高频传感器阵列优化设计

针对传统传感器布局存在的监测盲区问题，创新性地提出分层分布式传感器阵列设计方法。在变压器油箱纵向方向上，科学合理地设置3-4层传感器，每层均匀分布6-8个传感器单元，如此构建起三维立体监测网络，实现对变压器内部全方位、无死角的监测。运用遗传算法对传感器位置进行优化，该算法模拟生物进化过程中的自然选择和遗传机制，通过不断迭代寻找最优解，使定位误差椭圆面积大幅缩小至传统布局的15%，显著提高了定位精度。同时，采用宽频带螺旋天线传感器，其工作频段广泛覆盖300MHz-3GHz，在1.5GHz处增益高达5dBi，相比传统蝶形天线提升了3dB。这一特性使其能够有效捕捉微弱的局部放电信号，大大增强了微弱信号的检测能力，为准确诊断变压器绝缘缺陷提供了有力支持。为解决传感器一致性这一关键难题，专门开发了基于同轴腔体的标准化校准装置。该装置通过精确调节腔

体长度，实现不同频率点的谐振，再结合网络分析仪，能够完成传感器幅频和相频特性的精确测量。现场应用效果显著，经校准后的传感器群时延波动从 $\pm 2\text{ns}$ 大幅降至 $\pm 0.3\text{ns}$ ，时间截提取精度提高至50ps，为后续的高精度定位奠定了坚实基础，确保了定位结果的准确性和可靠性。

3.2 超高频信号处理与干扰抑制

提出基于经验模态分解（EMD）的噪声抑制方法，该方法先将复杂的信号分解为多个本征模态函数（IMF），每个IMF包含信号不同频率段的成分。然后通过计算各IMF的峭度值，峭度值能够反映信号的冲击特性，从而自动筛选出放电分量。实验表明，即使在信噪比低至0dB的恶劣环境下，该方法仍能有效提取放电脉冲，与传统小波阈值法相比，信噪比提升了8dB，显著提高了信号的质量。针对变电站中常见的周期性干扰，设计出自适应陷波滤波器^[3]。该滤波器的中心频率和带宽可根据干扰的实时变化进行动态调整，在50Hz及其谐波干扰下，能将信号失真度从15%大幅降至3%以下，有效抑制了周期性干扰对信号的影响。对于多径效应这一难题，采用时反镜技术，通过发射逆时延信号并记录反射路径，构建变压器内部信道模型。结合压缩感知理论，利用信号在稀疏域的独特表示特性，实现多径分量的精确分离。仿真结果显示，该方法可使时差测量误差从5ns降至0.8ns，定位精度提高至10cm以内，大大提升了定位的准确性。

3.3 高精度时差估计算法

提出基于相位差变化的时差估计新方法，该方法通过精确计算两传感器接收信号的瞬时相位差，构建相位差变化率曲线。由于该曲线的过零点对应信号到达时刻，且不受信号幅度衰减的影响，在信噪比为5dB时，时间分辨率可达10ps，相比传统互相关法提高了一个数量级，能够更精确地确定信号到达时间差。为解决非视距传播问题，引入粒子滤波算法。该算法通过构建状态空间模型来描述信号传播过程，结合先验信息对时差参数进行动态估计。在非视距传播的复杂环境下，定位误差标准差从0.5m降至0.15m，有效提高定位的准确性。针对多传感器同步难题，研发光纤同步时钟系统。利用光脉冲在光纤中稳定传播的特性，实现纳秒级同步精度。该系统采用主从式架构，主时钟通过光纤向从时钟发送同步脉冲，从时钟利用锁相环技术实现本地时钟的精确锁定。现场测试表明，在1km传输距离下，时钟同步误差小于50ps，完全满足高精度定位的需求，确保多传感器之间的同步工作。

3.4 数字孪生建模与定位修正

构建变压器三维电磁-热耦合数字孪生模型,该模型全面集成了几何结构、材料特性、电磁参数和温度场分布等多物理场信息,能够真实准确地反映变压器的实际运行状态。通过有限元方法,精确计算不同缺陷位置下的超高频信号传播路径,并建立定位误差数据库。采用深度神经网络学习误差分布规律,构建定位修正模型,实现对实测定位结果的动态补偿,提高定位的准确性。在数字孪生框架下,提出基于粒子群优化的定位结果修正方法。将初始定位结果作为粒子群的初始位置,以数字孪生模型计算的信号传播时间为目地函数,通过迭代优化不断调整粒子位置。经过多次迭代后,最终得到修正后的定位结果。工程应用表明,该方法效果显著,可使220kV变压器定位误差从1.2m降至0.3m,500kV变压器定位误差从2.5m降至0.6m,定位精度得到显著提升,为变压器的故障诊断和维护提供了更可靠的依据。

4 工程应用案例

4.1 案例一: 220kV变压器气泡放电定位

某220kV主变在带电检测中发现局部放电异常,超高频传感器检测到频率集中在800MHz-1.2GHz的放电信号。采用分层分布式传感器阵列进行定位,上层传感器接收信号强度比下层高12dB,初步判断缺陷位于绕组上部。通过数字孪生模型修正后,定位结果指向高压绕组A相第5饼绝缘纸板与油间隙处。解体检查发现,该位置绝缘纸板存在轻微褶皱,导致局部油隙增大,在运行电压下发生气泡放电。放电痕迹呈树枝状分布,与定位结果高度吻合^[4]。经处理后,局部放电水平从1500pC降至50pC以下,变压器恢复正常运行。本案例验证了超高频局部放电检测与高精度定位技术的有效性。

4.2 案例二: 500kV变压器悬浮电位放电诊断

某500kV换流变压器在线监测系统突然发出紧急报警。超高频传感器迅速捕捉到周期性脉冲信号,其重复

率约为120次/秒,幅值高达300mV,这表明设备内部可能存在严重局部放电问题。技术人员借助时差分析,初步判定缺陷位于阀侧引线区域,但传统算法定位误差较大,达到2.3m,难以精准锁定故障点。随后,引入数字孪生技术进行修正,定位精度大幅提升至0.6m,精准指向阀侧套管尾部均压环固定螺栓松动部位。解体检查发现,均压环固定螺栓因长期承受振动,导致接触电阻增大至200 $\mu\Omega$,在直流场强作用下发生悬浮电位放电。放电致使螺栓表面严重熔蚀,产生金属微粒和臭氧产物。技术人员立即紧固螺栓并对接触面进行处理,悬浮电位放电现象随即消失,设备运行稳定性显著提高。本案例充分表明,高精度定位技术对于保障特高压设备安全稳定运行具有不可替代的重要意义。

结束语

本文围绕提升基于超高频局部放电检测的变压器绝缘缺陷定位精度展开研究,针对现有方法存在的诸多问题,提出一系列关键技术与创新方法。通过理论分析、技术改进以及工程应用案例验证,有效提高了变压器绝缘缺陷定位的准确性。这些研究成果对于保障变压器的安全稳定运行具有重要意义,未来可进一步探索更优的算法和技术,以适应不断变化的电力系统需求,为电力设备的可靠运行提供更坚实的保障。

参考文献

- [1]王秀敏,张宁波,唐飘逸,潘雄.电力变压器局部放电检测技术的发展与检测方法[J].科技传播,2022,14(05):134-136.
- [2]张宇.电力变压器局部放电带电检测与定位技术[J].集成电路应用,2020,37(08):48-49.
- [3]赵刚,钱程.基于局部放电信号的变压器绝缘状态评估方法研究[J].高电压技术,2023,49(3):641-649.
- [4]孙涛,周梅.机器学习在电力设备状态监测中的应用进展[J].电力系统自动化设备,2022,42(10):1-8.