

高性能 UHF GIS 局放传感器：设计改进与性能评估

黄 正，高存玉

上海欧秒电力监测设备有限公司 上海

【摘要】 UHF（特高频）局放传感器通过捕捉 GIS 内部局部放电的超高频电磁波信号实现监测，但由于传统的 GIS 内置 UHF 传感器灵敏度性能不够高，导致实际应用中存在有效性不足的问题。本文提出一种新的设计方案，采用双层阻抗匹配环和梯度渐变天线振子，实现双谐振点特性，展宽频带并增强接收能力。仿真与实验表明，该设计显著提升 GIS 内置局放传感器频响特性，平均有效高度提升了 58%；最低有效高度提升了 100%，传感器检测灵敏度可达到 3pC，有效解决了应用中检测有效性问题。

【关键词】 UHF 局放传感器；灵敏度；GIS 设备；天线设计

【收稿日期】 2024 年 12 月 23 日

【出刊日期】 2025 年 1 月 10 日

【DOI】 10.12208/j.jeea.20250003

High-performance UHF GIS partial discharge sensor: design improvements and performance evaluation

Zheng Huang, Cunyu Gao

Shanghai Oumiao Electric Power Monitoring Equipment Co., Ltd., Shanghai

【Abstract】 Ultra-High Frequency (UHF) partial discharge sensors monitor Gas Insulated Switchgear (GIS) by capturing internal ultra-high frequency electromagnetic wave signals generated by partial discharges. However, traditional built-in UHF sensors in GIS suffer from insufficient sensitivity, leading to limited effectiveness in practical applications. This paper proposes a novel design incorporating dual-layer impedance matching rings and gradient-tapered antenna dipoles to achieve dual-resonance characteristics, thereby broadening the frequency bandwidth and enhancing signal reception capability. Simulation and experimental results demonstrate that this design significantly improves the frequency response characteristics of GIS sensors, with an average effective height increased by 58% and the minimum effective height elevated by 100%. The sensor achieves a detection sensitivity of 3 pC, effectively resolving application challenges related to detection reliability.

【Keywords】 UHF partial discharge sensor; Sensitivity; Gas-insulated switchgear (GIS); Antenna design

引言

局部放电是高压电力设备绝缘缺陷或劣化过程中产生的电离现象，其本质是绝缘体内部或表面因电场集中导致局部耐受场强被击穿而形成的短暂放电。这类信号的检测与分析对评估电力设备绝缘状态、预防突发性故障具有关键意义，已成为电力设备生产调试、运行维护及状态检修的核心试验项目^[1-4]。UHF（特高频）局放传感器通过捕捉局部放电产生的超高频电磁波信号实现监测。目前，基于特高频（UHF）电磁波原理的 GIS 局放检测技术因其较高灵敏度、抗电磁干扰性强及实时在线监测能力，被广泛应用于高压设备的状态监测领域^[5-8]。国家电

网公司发布的设备变电〔2020〕67 号文件明确要求 500kV 及以上 GIS 设备需配置一体化内置局放传感器^[9]，进一步验证了 UHF 局放在线监测技术的可行性与工程价值。然而，针对超高压、特高压的局放检测应用，因其 GIS 设备局部放电呈现“小脉冲”特征，即放电信号幅值低、持续时间短且能量微弱；现有 UHF 传感器的灵敏度难以有效捕捉此类微弱信号，导致检测系统的有效性不足，尤其在绝缘劣化初期或高压试验场景下易漏检^[9-10]。

本文针对这一问题，提出一种基于 UHF 原理的 GIS 内置局放传感器改进设计方案，并通过仿真与实验验证其性能提升效果。

作者简介：黄正（1979-）男，主要从事电力设备在线监测技术研究与应用。

1 GIS 内置 UHF 局放传感器天线灵敏度不足问题分析

基于 UHF 原理的 GIS 内置局放传感器, 主要包括传感器的安装反射盘(即 GIS 盖板)和用于接收局放信号的天线两大部分, 其天线性能直接决定了信号接收能力, 影响传感器的检测灵敏度。常用的天线是各类阿基米德螺旋或对数螺旋天线, 如日本 Toshiba 公司研发出品的螺旋式超高频局放传感器, 就是采用标准的双臂阿基米德螺旋天线; 这种双臂阿基米德螺旋天线属于超宽带频率无关天线双臂辐射, 相位相差 180 度时具有较为良好的辐射性能, 但这种天线工作在 UHF 频段时其本身物理尺寸也比较大, 不适合小型化按装使用的要求^[11-12]。

此外 GIS 局放传感器还要满足内嵌式、限制空间、小型化等安装要求。基于这些要求, 上述提到的各种传统天线性能参数难以满足, 体现在驻波比高、增益不均衡、接收频带窄等问题, 导致信号衰减严重, 甚至存在频响盲区, 从而导致其检测能力有效性不足; 针对类似特高压 GIS “小脉冲” 特性的局放检测, 传统类型的天线性能很难到要求。

2 GIS 内置 UHF 局放传感器天线设计优化方法

为了解决传统天线灵敏度性能欠佳问题, 需要解决频带宽度、辐射特性、匹配性和增益等关键问题, 本文采用一种全新的金属结构来设计一种新型的 GIS 内置局放传感器, 如图 2 所示。

这种新型 GIS 内置 UHF 局放传感器的特点包括以下几点:

1) 采用双层阻抗匹配环结构, 实现传统 GIS 局放传感器天线不具备的双谐振点特性, 可展宽天线工作频带, 并确保天线增益在整个工作频带范围内保持平坦, 有效降低特定频率点的信号衰减。

2) 采用梯度渐变的天线振子结构, 沿高度方向逐步增加天线振子的直径, 优化电磁场分布, 延长辐射电流路径, 使得信号接收能力显著增强, 同时降低了电场集中效应带来的信号畸变。

3) 采用了大曲率表面结构, 使天线表面电场均匀分布, 约束高压电场环境中的电荷, 避免局部电场过高带来的自放电风险, 提高传感器在 GIS 设备高电场环境中的适应性和稳定性。

4) 采用轴向对称结构, 使得天线做到全向接收, 解决安装过程中的便捷性。

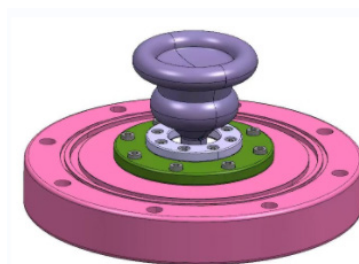


图2 新型 GIS 内置 UHF 局放传感器

通过天线结构设计的创新, 引入了双谐振点, 从而使得天线具有超宽带、良好的增益平坦度、表面电荷束缚能力强和全向接收等优点, 可大幅提升传感器的接收灵敏度性能, 从而突破了传统天线性能的不足。

3 设计仿真及实验验证

3.1 设计仿真

针对本文设计的 GIS 内置 UHF 局放传感器, 通过驻波图、电场电荷沉积和方向图三个方面的仿真来说明其是否达到设计要求, 仿真结果如图 3 所示。

仿真结果表明, 该新型 GIS 内置 UHF 局放传感器具有双谐振的特点, 且电场电荷沉积较小, 没有方向性。

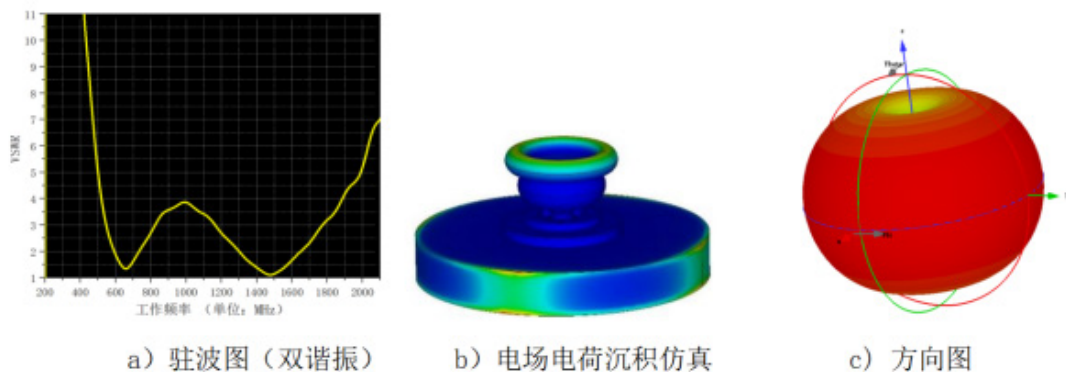


图3 新型 GIS 内置 UHF 局放传感器仿真图

3.2 驻波比测试

组装好的新型 GIS 内置 UHF 局放传感器实物如图 4 所示, 其驻波图如图 5 所示。

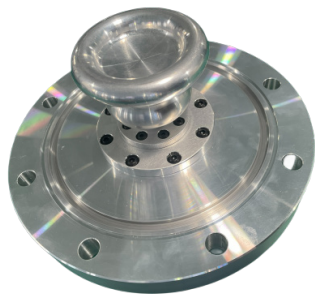


图 4 新型传感器实物

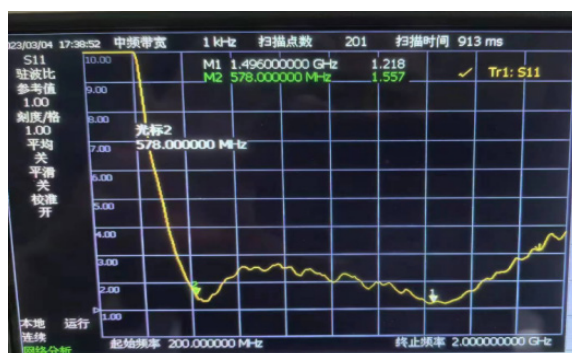
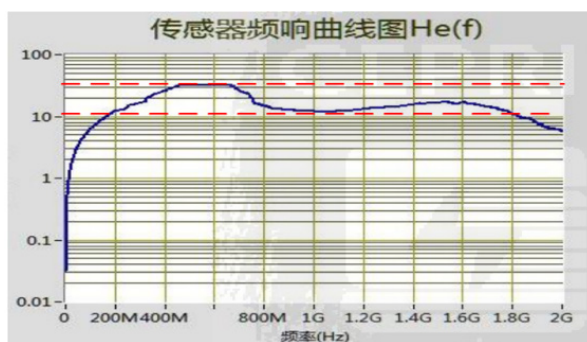
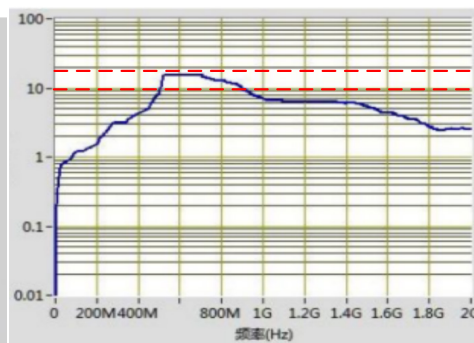


图 5 驻波图



a) 本设计传感器频响曲线



b) 其它设计类型传感器频响曲线

图 6 传感器灵敏度曲线

3.3 传感器频率响应验证

本设计传感器通过中国电科院的型式试验, 采用 GTEM 小室进行频率响应测试, 其结果用有效高度 $H_e(f)$ 来表示, 其检测结果如图 6 所示。

测试结果为: 本设计传感器的平均有效高度达到 20.9mm, 最低有效高度达到 12mm; 而作为对照的其他设计类型的传感器, 其平均有效高度为 13.2mm, 最低有效高度为 6mm。本设计方案使得传感器平均有效高度提升了 7.7mm, 提升了 58%; 最低有效高度提升了 6mm, 提升了 100%, 从而验证了本设计方案的优越性。

3.4 项目灵敏度验证

本设计传感器已在多个项目中应用, 并证明了其优越的灵敏度性能。例如在新加坡电网的 361 Plantation Crescent 项目中, 该产品用在 66kV 的 GIS 上。GIS 在出厂前进行灵敏度有效性测试, 如图 7 所示, 在 GIS 的 A 和 B 两个位置都安装了本设计传感

通过传感器实物的驻波图可看出, 其频率双谐振特性明显, 两个谐振点驻波比接近于 1, 且工作频带范围内驻波比均小于 3, 体现了其优越的性能。

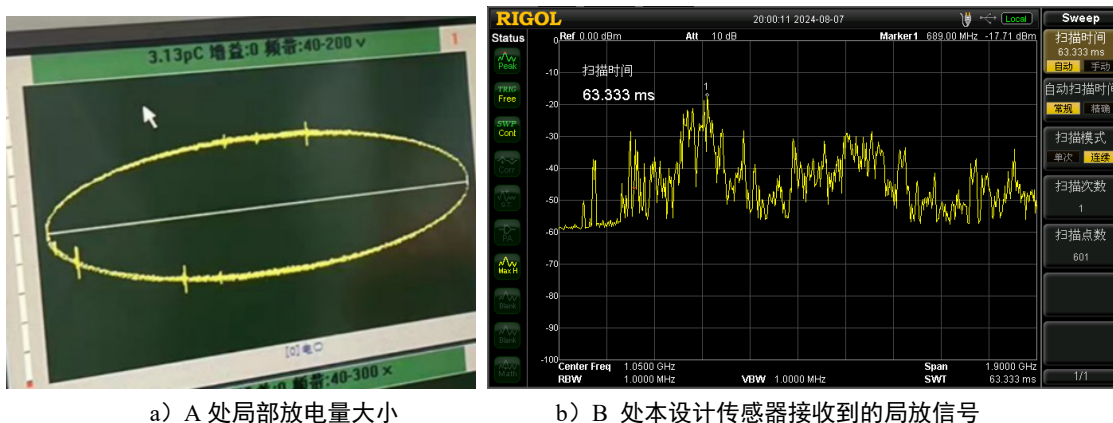
器, 其中 A 处 GIS 内装有金属颗粒缺陷, 而 B 处没有。A 和 B 之间的结构包含了 5 个气体隔离绝缘盆、3 个绝缘通盆和 3 个 L 型结构, 理论局放信号路径衰减约 45dB。

实验过程中, 将 GIS 升压到 30kV 左右, 金属颗粒局放即被激发出来, 局放大小为 3.13pC; 从 B 处接入频谱分析仪进行局放信号测试, 即 3.13pC 的局放信号在 A 处发生, 产生了电磁波, 并经过约 45dB 的衰减后到达 B 处, 被 B 处的本设计内置局放传感器接收, 并接入频谱分析仪进行显示, 如图 8 所示。一般 GIS 出厂耐压测试要求局放量控制在 $\leq 3\text{pC}$ 即可满足要求。

图 8 说明, 当 A 处发生局放 3.13pC 信号并经过 45dB 衰减后, 本设计传感器仍可清晰的接收到局放信号, 信号大小约 -17dBm, 信噪比明显。本测试说明, 局放传感器的灵敏度可达到 3pC, 性能优越, 完全可解决实际应用中的有效性问题。



图7 GIS 内置局放传感器灵敏度有效性测试



a) A 处局部放电量大小

b) B 处本设计传感器接收到的局放信号

图8 5pC 灵敏度有效性测试

4 结语

本文针对 GIS 设备局部放电信号微弱、现有 UHF 传感器灵敏度不足的问题, 提出了一种新型的 GIS 内置 UHF 局放传感器设计方案。通过采用双层阻抗匹配环结构和梯度渐变设计的天线振子, 实现了天线的双谐振点特性, 拓宽了工作频带, 并显著增强了信号接收能力。仿真与实验验证结果表明, 该设计方案的传感器具有优越的灵敏度性能, 平均有效高度和最低有效高度均有显著提升。此外, 该传感器已在多个项目中应用, 并证明了其在实际工程中的有效性。因此, 本文提出的设计方案为解决 GIS 设备局部放电监测中的灵敏度问题提供了新的思路和方法, 具有重要的工程应用价值。

参考文献

- [1] 李军浩, 车 斌, 韩旭涛, 等. 特高压气体绝缘组合开关设备现场冲击耐压试验及局部放电测量[J]. 高电压技术, 2015
- [2] 季洪鑫, 庞志开, 李成榕, 等. 冲击电压下 GIS 典型缺陷的局部放电特征分析[J]. 高电压技术, 2013
- [3] 庞志开. 冲击力对 GIS 中自由金属颗粒行为影响及其危害性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017
- [4] 徐 洋, 刘卫东, 许 渊, 等. GIS 绝缘件局部放电脉冲电流互参考试验测量方法[J]. 高压电器, 2018
- [5] 吴旭涛, 李军浩, 张 亮, 等. 振荡型冲击电压下局部放电的检测及干扰分析[J]. 高压电器, 2016
- [6] 任明. SF₆ 气体中绝缘缺陷的冲击电压局部放电特性及其影响因素[D]. 西安: 西安交通大学, 2014
- [7] 车 斌, 张 亮, 李军浩, 等. 振荡型雷电冲击电压和标准雷电冲击电压在 220 kV GIS 中的分布特性研究[J]. 高压电器, 2017
- [8] 王红梅, 丁登伟, 贾志杰, 等. 恒压下 GIS 盆式绝缘子表面缺陷的长间歇性放电特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018
- [9] 国家电网有限公司, 国网设备部关于印发气体绝缘金属封闭开关设备特高频局放在线监测装置管理等 4 项规范规定的通知, 2020
- [10] 高飞, 特高压 GIS 局放监测技术报告[R]. 北京: 国家电网特高压研究院, 2022
- [11] 李信. GIS 局部放电特高频检测技术的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2005
- [12] 顾乐, 陈隽, 刘文浩, 等. GIS 局部放电圆板型内置传感器性能影响因素的研究[J]. 高压电器, 2012

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

