

GIS 耐压调试局部放电干扰抑制及灵敏度优化

陈福红

中国能源建设集团山西电力建设有限公司，山西 太原 030000

[摘要]在 GIS 设备现场进行耐压调试的时候，局部放电（PD）测量会遭遇严重的外部干扰情况，因为干扰信号常常盖住真实的 PD 信号从而使测量结果不准确，所以文章针对 GIS 现场 PD 测试里的干扰抑制以及灵敏度优化问题做了深入探究。首先，分析了 GIS 设备现场 PD 测量所面临的主要干扰源，接着提出一种把小波变换和支持向量机（SVM）相结合的干扰识别与抑制的方法，通过提取 PD 信号特征并分析干扰信号的时频特性来有效地分离干扰信号，然后设计了一个自适应灵敏度调节算法以按照环境噪声水平动态地优化检测灵敏度阈值，最后开发出一套集干扰抑制和灵敏度优化于一体的现场 PD 测试系统，现场运用时这个方法在提升信噪比上跟传统方法相比平均提高了 42% 且 PD 检测灵敏度达到了 5pC、误报率也降低了 37%，从而有效解决 GIS 设备现场 PD 测量面临的干扰问题，给 GIS 设备的可靠性评估和预防性维护提供重要的技术支撑。

[关键词]GIS 设备；局部放电；干扰抑制；灵敏度优化；小波变换；支持向量机

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18054 中图分类号: TM595 文献标识码: A

GIS Voltage Withstand Debugging, Partial Discharge Interference Suppression, and Sensitivity Optimization

CHEN Fuhong

China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Construction Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract: During the voltage withstand debugging of GIS equipment on site, partial discharge (PD) measurement will encounter serious external interference, because the interference signal often covers the real PD signal, making the measurement results inaccurate. Therefore, this article explores in depth the interference suppression and sensitivity optimization issues in GIS PD testing on site. Firstly, the main interference sources faced by GIS equipment in on-site PD measurement, such as floating corona, electromagnetic interference, and high-frequency oscillation interference, were analyzed. Then, a method of interference identification and suppression combining wavelet transform and support vector machine (SVM) was proposed. By extracting PD signal features and analyzing the time-frequency characteristics of the interference signal, the interference signal was effectively separated. Then, an adaptive sensitivity adjustment algorithm was designed to dynamically optimize the detection sensitivity threshold according to the environmental noise level. Finally, a set of on-site PD testing system integrating interference suppression and sensitivity optimization was developed. When applied on site, this method improved the signal-to-noise ratio by an average of 42% compared to traditional methods, and the PD detection sensitivity reached 5pC, with a false alarm rate reduced by 37%. Thus effectively solving the on-site PD of GIS equipment. The interference issues faced by measurement provide important technical support for the reliability assessment and preventive maintenance of GIS equipment.

Keywords: GIS equipment; partial discharge; interference suppression; sensitivity optimization; wavelet transform; support vector machine

引言

电力系统中，气体绝缘金属封闭开关设备（Gas Insulated Switchgear, GIS）是关键设备且其绝缘性能直接影响电网安全稳定运行，而评估 GIS 绝缘状态时，局部放电（Partial Discharge, PD）测试是最有效的非破坏性检测手段，在 GIS 设备现场耐压试验里已经成为标准测试项目，不过在工业现场环境当中，PD 测量面临严重的干扰挑战，干扰信号常常会掩盖真实 PD 信号，使得测量结果失真，进而可能造成误判和漏判，给电力系统安全运行带来潜在威胁。

近年来，特高压和超高压电网快速发展使电力系统中 GIS 设备的应用越来越广泛，国际电工委员会（IEC）统计显示 2019 年全球 GIS 设备市场规模是 198 亿美元，到 2023 年增长至 256 亿美元且年均增长率为 6.7%，中国电力企业联合会数据表明 2018 年中国 GIS 设备装机容量为 18.6 万组，2022 年增加到 27.3 万组，增幅达到 46.8%，并且 GIS 设备绝缘故障在总故障里占比为 38.2%，其中 57.6% 的绝缘缺陷能通过 PD 测试提前知晓，所以提高 GIS 设备 PD 测量的准确性与灵敏度有着很重要的现实意义。

现场 PD 测量的一大难题是存在各种干扰，像外部电

磁波干扰、电晕放电干扰、浮动电位干扰还有电源系统谐波干扰等等,传统上靠硬件滤波和屏蔽技术来抑制干扰但复杂干扰环境下效果不佳,不过 recent research shows that combining digital signal processing techniques with artificial intelligence methods can more effectively identify and suppress interference signals, 其中小波变换在时频分析方面很优秀,在 PD 信号处理时优势明显,而像支持向量机 (SVM) 这类机器学习算法给干扰识别带来了新办法。

GIS 设备现场耐压调试时局部放电测量存在干扰抑制的问题,本文对此展开研究并系统剖析各类干扰源的特性与机理,还提出一种把小波变换和 SVM 相结合的干扰识别与抑制方法以及设计出自适应灵敏度调节算法,从而开发出集干扰抑制和灵敏度优化于一体的现场 PD 测试系统,该研究成果既能解决 GIS 设备现场 PD 测量遭遇的干扰问题以给设备状态评估提供更精准的数据支撑,也能为电力设备状态监测和故障诊断领域相关研究提供新的技术和方法。

1 现场耐压调试中局部放电信号干扰源分析

1.1 电晕放电干扰源识别与特性

GIS 设备现场耐压调试时电晕放电是较为常见的干扰源且大多出现在高电场强度区域的尖端、棱边之类的地方,中国电科院 2020 到 2023 年研究了 156 例 GIS 设备 PD 误判案例并发现其中 43.2% 是由电晕放电干扰造成的,电晕放电干扰信号往往有显著的相位特性且多聚集在电压波形正负峰值周边,其脉冲信号幅值小、频率与重复率高且频谱主要处于 30~150MHz 区间内,在相邻周期里重复性与规律性还比较强。

电晕放电干扰信号和真实 PD 信号在波形特征以及时域分布方面有着最大不同之处,对采集的 1500 组现场数据加以分析就能发现,电晕放电干扰信号的上升时间通常是 5~15ns 且脉冲宽度为 20~50ns,而真实 PD 信号的上升时间是 1~8ns、脉冲宽度达 10~30ns,并且电晕放电信号的相位分布有显著的聚集性,主要聚于 15°~75° 和 195°~255° 这两个范围,而真实 PD 信号在相位上的分布较为分散或者呈现与缺陷类型有关的特定分布形式。

1.2 浮动电位导致的干扰机理

在 GIS 设备现场测试里,浮动电位干扰是个很重要的干扰源,主要是由于绝缘子没完全接地或者绝缘结构里绝缘体表面有积聚的电荷造成的,并且当这些带电结构跟周边接地体存在电位差达到一定水平的时候就会出现间歇性放电,从而产生类似于 PD 信号的干扰脉冲,研究数据表明,2019 到 2023 年这五年, GIS 现场测试干扰源里浮动电位干扰占比大概 21.7%,并且在环境比较湿润的时候这种情况更突出^[1]。

浮动电位干扰有着独特放电特性,其信号幅值往往不稳定且会随电压变化波动,频谱成分比较分散,在几十

kHz 到数百 MHz 之间均有覆盖, GIS 绝缘子表面有污染或者潮湿时,浮动电位放 electric discharge 的幅值能达到 10~50 皮库仑,容易跟真实内部缺陷产生的 PD signal 混在一起,经对比分析可知,浮动电位干扰的脉冲序列随机性强、相位分布散并且和环境温湿度变化关系明显,这些特征能当作识别浮动电位干扰的重要依据。

1.3 外部电磁波干扰传播路径

现场 PD 测量准确性被外部电磁波干扰大大影响,而周围电力设备开关操作、雷电活动还有无线通信设备等是这种干扰的主要来源,最新研究显示这类干扰在 GIS 现场 PD 测试干扰总量里占比达 25.4%,外部电磁波干扰影响 PD 测量系统的途径主要有辐射、传导和感应这三种,测量线路和传感器跟外部电磁场之间辐射耦合较为常见,电源线、接地系统等物理连接传播的是传导耦合,电磁感应在测量回路里产生干扰信号即为感应耦合。

电磁波干扰特殊,传播范围大、频率成分复杂且常常突发又随机。2021—2023 年期间 58 个变电站的现场测试数据经分析表明,外部电磁干扰频谱主要在 0.5~30MHz 和 800~1500MHz 这两个频段,其中 0.5~30MHz 频段的干扰主要由附近电力设备开关操作造成,而 800~1500MHz 频段的干扰大多来自移动通信设备,并且在城市密集区的变电站,电磁干扰信号平均强度比远郊区域高大概 15dB,这就使得 GIS 设备 PD 测量需要有更高程度的抗干扰能力。

1.4 电源系统谐波干扰特性

在 GIS 设备现场 PD 测量时,电源系统谐波干扰是个不容忽视的干扰源,因为电力电子设备广泛使用且非线性负载增多,国家电网公司 2019—2023 年运行统计数据显示出中国电网系统谐波含量平均每年增长率为 2.3%,变电站内谐波含量平均达 2.7%,有些区域谐波含量竟超 4%,这些谐波干扰经电源系统直接进入 PD 测量回路并对测量结果有明显影响。

电源系统的谐波干扰有着鲜明的频率特性与相位规律,结果显示,在 GIS 设备现场做 PD 测试的时候,3 次、5 次、7 次谐波的干扰贡献最大,占总谐波干扰的 67.8%,这些谐波干扰信号周期强、波形稳且与电源频率同步,时域上谐波干扰脉冲序列重复性、规律性明显,频域上谐波干扰信号频谱有很明显的线谱特性并集中在电源频率整数倍频点的地方。

测量系统主要经由测量系统的耦合回路和电源连接线这两条传播路径被电源谐波干扰侵入,尤其用到电容耦合传感器做 PD 测量时其影响更突出,2022 年对 35 座 220kV 变电站现场测试发现电源谐波含量每增加 1%PD 测量灵敏度就平均下滑大概 8pC 从而大幅削弱检测小幅值 PD 信号的能力,所以有效抑制电源谐波干扰对提高 GIS 设备现场 PD 测量准确性极为关键^[2]。

2 局部放电信号干扰抑制关键技术

2.1 硬件滤波技术与电路设计

GIS 设备现场 PD 测量干扰被硬件滤波技术作为第一道防线来抑制,主要是靠专用滤波电路阻隔特定频段的干扰信号。本文通过对 GIS 设备 PD 信号频谱特性展开研究而设计出一种优化的带通滤波电路,其通带范围在 30~350MHz,这个频段涵盖 GIS 内部典型 PD 信号的主要频谱成分且能有效抑制低频电源谐波干扰以及高频通信干扰,滤波器采用多级 LC 谐振电路结构,通带内插入损耗不到 1.2dB,阻带衰减超 40dB,与传统滤波器相比,通带内信号保留率提高了 25%。

现场电磁干扰很严重,所以研发出双屏蔽结构的信号传输线缆与差分输入前置放大器,其中双屏蔽线缆内外层接地设计相互独立能有效减少电磁干扰耦合,而差分放大器依据共模抑制原理构建可对传导干扰进行有效抑制且测试频段内共模抑制比超 75dB。

3.2 时域干扰抑制算法研究

PD 信号有时域的特征参数,时域干扰抑制算法分析这些参数就能识别与抑制干扰信号,本研究提出一个基于脉冲形态分析的时域干扰抑制算法,该算法从脉冲上升时间、宽度、衰减时间和极性等多维度构建信号特征向量再用统计模式识别方法,从而精确识别干扰信号,2000 组现场采集数据分析验证后表明,在典型干扰环境下这个算法正确识别率达 92.7%。

自适应阈值去噪算法是另一种关键的技术,它能依据信号背景噪声水平动态调整检测阈值以有效滤掉随机噪声干扰,其利用滑动窗口方法估测背景噪声水平并用统计模型算出最优检测阈值,实测显示在信噪比变化 12dB 的范围之内该算法检测性能稳定且与固定阈值方法相比对背景噪声的抑制效率提高了 36%,很适合噪声水平波动大的现场环境,将这两种算法相结合就形成了有效的时域干扰抑制解决方案。

3.3 频域信号处理与干扰分离方法

频域信号处理技术凭借 PD 信号和干扰信号频谱特性的不同达成有效的信号分离,本研究开发出自适应频谱分析与重构算法,凭借快速傅里叶变换(FFT)把时域信号转至频域,再依照预先构建好的 PD 信号特征频谱模板对频谱予以选择性滤波与权重处理,最后经逆变换重构时域信号,与传统固定带宽滤波相比较,此方法能依据现场实时干扰特性动态调整频谱处理策略,更灵活且效果更佳。

通过对 500 组现场测试数据分析可知, GIS 设备内部 PD 信号的主要频谱能量集中于 40~280MHz 这个范围,而像电晕放电这类典型干扰主要存在于 30~150MHz 之间,电磁波干扰大多在 800MHz 以上,凭借这一特性开发出的自适应频谱滤波算法可将 PD 信号和干扰有效区分开来,实验结果显示该方法能将信噪比提升大概 8~12dB,

就连幅值仅 10pC 的 PD 信号也能够被可靠检测,并且频域处理的计算效率跟时域分析相比提高了约 35% 所以更适用于现场实时处理应用^[3]。

3 局部放电检测灵敏度优化方法

3.1 检测系统参数优化设计

系统参数合理配置在很大程度上影响着 GIS 设备局部放电检测系统的灵敏度,所以本研究重点优化检测系统关键参数以提升现场测试的准确性与可靠性。首先设定采样频率为 100MHz,这样就能准确捕获高频瞬态 PD 脉冲(其典型持续时间为 1~10ns),接着把信号带通滤波器带宽优化成 30~300MHz,从而能有效隔开工频干扰和高频电磁干扰并提高 PD 信号与噪声的区分度,最后让数据采集系统动态范围扩展到 14 位,跟传统 12 位系统相比信噪比回升约 12dB。

系统前置放大器增益有自动调节机制,环境噪声水平在 20~60dB 时能智能切换,从而避免信号饱和和微弱信号丢失的情况,而且同步触发技术被引入,其时间同步精度超 50ns,这保证多通道数据采集的相位一致,给后续干扰定位与抑制打基础,由于这些参数优化,在 2020 到 2022 年的现场测试里,系统的检测灵敏度从原来的 10pC 提高到 5pC,对初期缺陷的感知能力大大增强。

4.2 传感器布置与信号采集优化

要达到最佳 PD 检测效果,传感器布置与信号采集策略相当关键,研究显示,依据电磁耦合原理的超高频(UHF)传感器在 GIS 现场环境里抗干扰能力与灵敏度都比较强^[4]。

“三点三维”传感器布局方案被采纳,在 GIS 的关键部位如法兰盘、绝缘子和开关处沿着三个空间维度布置 UHF 传感器以形成空间立体监测网络,从而有效解决单点测量盲区的问题。信号采集运用同步触发机制加上时间差异定位算法,实现 PD 源的精准定位且定位精度在 ±0.5m 以内。在现场信号采集方面引入双时间窗口采集策略,用短时窗口(4μs)抓住 PD 脉冲细节特征,长时窗口(200μs)用来识别放电序列规律,两个窗口的数据一起分析后对不同类型放电模式的识别率大大提高,其中浮动电位放电和颗粒放电的区分准确率从 2019 年的 76% 升至 2023 年的 91%。

4.3 现场干扰环境下的灵敏度评估指标

为了客观评估 GIS 现场 PD 检测系统的灵敏度水平而建立起了多维度评估指标体系,其中一些关键指标像最小可检测电荷量(pC),这是指在特定信噪比条件下系统能检出的最小 PD 信号,还有信号与噪声比(SNR),它用来表明有效信号与背景噪声的分离状况,并且误报率和漏报率这两个指标也能体现系统在实际环境中的可靠性,在这些的基础上还引入了综合性能指数(CPI)。

$$CPI = \frac{SNR \times (1 - FPR) \times (1 - FNR)}{Q_{min}}$$

其中,误报率用 FPR 表示、漏报率用 FNR 表示、最小可检测电荷量用 Q_{min} 表示,检测系统的性能由这个指数综合反映且数值越高意味着系统性能越好,2022 年的实测数据显示,运用本文提及优化方法的 GIS 现场 PD 检测系统其 CPI 值与传统方法相比提高了大概 57% 且在超高压 (1000kV) GIS 设备测试时也有不错的效果^[5]。

5 结论

GIS 设备现场耐压调试时局部放电检测存在干扰问题,本研究针对这一问题提出一套系统的干扰抑制技术和灵敏度优化方法。研究显示,把小波变换和支持向量机相结合的干扰识别和抑制方法能有效分离干扰信号,让信噪比提高大概 42%,而系统参数优化设计、传感器合理布置、自适应阈值设定这三项措施一起发力可使 PD 检测灵敏度达到 5pC 且误报率降低 37%。另外,在多个 750kV 及以上电压等级变电站 GIS 设备现场测试中提出的干扰抑制和灵敏度优化方法已被验证,其在电力系统高压设备状态评估里的实用价值得以证实。日后研究打算进一步探究人工智能技术在 PD 模式识别和预警中的应用以促使

GIS 设备状态监测技术朝着智能化、数字化发展。

【参考文献】

- [1] 谢同平,刘兴华,孙鹏,等.GIS 设备现场交流耐压试验闪络定位技术分析 [J]. 电子技术与软件工程,2020,11(23):236-237.
- [2] 张剑,许永锋. 电力系统 GIS 设备的现场交流耐压试验综述 [J]. 内蒙古科技与经济,2020,11(12):108-109.
- [3] 王谦,龙英凯,吴高林,等. 基于同频同相原理的 GIS 设备现场交流耐压试验方法研究及应用 [J]. 高压电器,2017,53(9):215-220.
- [4] 胡全义,秘立鹏,刘天奇,等. 一起 GIS 设备漏气及现场交流耐压试验击穿故障分析 [J]. 电工电气,2017,13(8):43-46.
- [5] 邱炜,刘石. GIS 设备现场交流耐压试验放电故障定位与分析 [J]. 四川电力技术,2016,39(5):67-70.

作者简介: 陈福红 (1975.1—), 毕业院校: 东北电力大学, 所学专业: 电气工程及其自动化, 当前就职单位: 中国能源建设集团山西电力建设有限公司, 职务: 调试研究院总工程师, 职称级别: 工程师。