

电气设备局部放电检测试验技术分析

张滢蕊 周航

国网中卫供电公司 宁夏回族自治区中卫市沙坡头区 755000

DOI : 10. 12238/j pm. v6i 3. 7808

[摘要] 本文针对电气设备局部放电现象对绝缘性能的影响,提出了一种高精度的局部放电检测方法,并结合实验验证和实际案例分析,评估其可行性与优势。研究基于信号采集与预处理技术,通过归一化和滤波算法有效提高了信号质量,并以电荷极限值为判断标准,结合起始电压、消光电压和工作电压的关系构建了检测逻辑。实验结果表明,本文技术在多种电气设备上的检测精度和可靠性显著优于文献[1]和文献[2]技术,为电气设备的运行维护和寿命延长提供了科学依据。

[关键词] 电气设备;局部放电;信号处理;检测精度

Technical analysis of local discharge detection test of electrical equipment

Zhang Yingrui Zhou Hang

State Grid Zhongwei Power Supply Company Ningxia Hui Autonomous
Region Zhongwei City Shapotou District 755000

[Abstract] According to the influence of local discharge phenomenon of electrical equipment on insulation performance, this paper proposes a high-precision local discharge detection method, and evaluates its feasibility and advantages combined with experimental verification and actual case analysis. Based on the signal acquisition and pretreatment technology, the signal quality is effectively improved by the normalization and filtering algorithm, and the charge limit value is determined by combining the starting voltage, the extinction voltage and the working voltage. The experimental results show that the detection accuracy and reliability of the technology in various electrical equipment are significantly better than the [1] and [2] technology, which provides a scientific basis for the operation and maintenance and life extension of electrical equipment.

[Key words] electrical equipment; partial discharge; signal processing; and detection accuracy

1 引言

局部放电作为电气设备内部绝缘系统的一种局部击穿现象,虽不会立即引发故障,但长期存在会加速绝缘老化,导致设备损坏甚至失效。因此,对局部放电进行准确检测与诊断是保障电气设备运行可靠性的重要环节。近年来,国内外学者提出了多种检测方法,包括电脉冲、超声波及电磁辐射信号的提取和分析。然而,这些方法在适用性和精度方面存在一定局限性,例如噪声干扰较大、检测范围较窄等问题。为解决上述难题,本文基于信号采集与预处理技术,提出了一种高精度局部放电检测技术,通过实验验证和实际案例分析,全面评估其可行性与技术优势。

2 电气设备局部放电试验技术原理

局部放电试验的核心在于通过电路模型的搭建与信号测量,精准反映设备内部的放电特性。通常,试验采用等效电路模型,其中包含被测设备、测量阻抗、耦合电容以及外部试验

电源等组件。试验电源提供高电压信号,通过耦合电容将信号注入到被测设备内,形成局部放电的电压源。当局部放电发生时,在设备内部会产生瞬态脉冲电流,流经测量阻抗后转换为脉冲电压信号,再由信号测量装置记录。该模型模拟了局部放电从产生到信号传递的全过程。在实际试验中,为保证测量精度和抗干扰能力,常使用屏蔽舱隔绝外界电磁干扰,并通过滤波器消除背景噪声。除此之外,试验参数的选择如电压幅值、试验持续时间和采样频率等,直接影响测量结果的准确性和可信性。通过试验电路模型与工作原理的分析,能够有效捕捉局部放电特征信号,为后续检测和诊断提供可靠依据。

3 局部放电信号采集与预处理

3.1 信号采集系统的组成

局部放电信号采集系统是检测设备局部放电现象的核心工具,其组成决定了信号捕获的质量和处理的精度。典型的信号采集系统由信号传感器、测量电路、数据采集设备和信号存

储与传输模块组成。信号传感器是采集系统的前端装置，其作用是捕获局部放电现象产生的脉冲信号，并将其转化为电信号。常见的传感器类型包括电容传感器、超声传感器和高频电流传感器，不同传感器的选择取决于信号频带特性和放电环境。测量电路负责将传感器捕获的信号进行初步处理，消除干扰噪声，并放大有效信号。数据采集设备采用高精度模数转换技术，将模拟信号转化为数字信号并进行实时记录。最后，信号存储与传输模块将数据保存至存储设备，或通过无线通信模块传输至远程监控终端。信号采集系统还需具备良好的抗干扰能力和动态响应性能，以确保信号的完整性和稳定性，为后续数据处理和分析提供高质量的基础数据。

3.2 信号归一化处理

局部放电信号的归一化处理是信号预处理中不可或缺的一步，旨在消除原始信号因量纲不同或幅值差异所导致的偏差。归一化处理通过将原始信号的幅值规范化至同一范围（通常为0到1），便于信号特征的提取与比较。归一化处理的优点在于提高信号处理的鲁棒性，尤其是在局部放电信号多样化、测量条件复杂的情况下。此外，归一化处理还能提高信号的特征提取精度，例如脉冲幅值、频率和相位特征的计算。通过归一化，局部放电信号的差异被显著缩小，数据分析更加直观，同时也为采用统一阈值进行放电判别提供了条件。

3.3 信号滤波技术及其实现

局部放电信号中通常包含大量的背景噪声，这些噪声可能源自电网干扰、电磁环境噪声或其他非局部放电现象。因此，信号滤波技术是局部放电信号处理的关键步骤，其目标是提取真实的放电信号并抑制无关的噪声。滤波技术主要包括均值滤波、带通滤波和自适应滤波等。均值滤波通过计算信号在一定窗口内的平均值，平滑高频噪声；带通滤波则根据局部放电信号的特定频率范围，阻断其他频带的干扰信号；自适应滤波能够根据输入信号的变化动态调整滤波参数，适合复杂信号环境。在实际应用中，滤波器的设计需要根据局部放电信号的频谱特性进行优化。例如，采用带通滤波器时，可设置其中心频率覆盖局部放电信号的主要频段（通常为数百千赫兹至数兆赫兹）。滤波器参数的选择直接影响到信号处理的效果，过窄的频带可能导致信号损失，而过宽的频带则难以有效抑制噪声。因此，合理配置滤波器并结合实际试验数据调整其参数，是实现高质量信号处理的关键。通过有效的滤波技术，可以显著提高局部放电信号的信噪比，为后续信号分析和诊断提供可靠支持。

4. 局部放电检测与判断逻辑

4.1 检测指标设定及电荷极限值

局部放电的检测过程需要明确合理的检测指标，以确保其精度和一致性。电荷极限值是检测中的核心参数，反映了电气设备绝缘性能的可接受范围。设定电荷极限值的目的是在检测中区分正常工作状态和局部放电故障状态。根据实际设备的运行条件，电荷极限值的确定需要综合考虑设备的绝缘结构、电压等级和工作环境等因素。通常，通过大量实验数据的统计分析，结合设备运行的可靠性要求，制定一个能够反映局部放电安全阈值的范围。

在局部放电测试中，若设备测得的局部放电电荷量超过极限值，则可能表明设备绝缘系统存在缺陷或潜在隐患。极限值

的设定过程需参考国际标准，如 GB/T7354—2018 等，同时结合设备制造商提供的技术参数和运行经验。此外，为适应不同类型设备的需求，电荷极限值通常具有一定的弹性调整范围，以确保检测结果能够在不同工况下保持一致性。电荷极限值还需与起始电压、消光电压等指标协调匹配，从而形成完整的评估体系。通过合理设定电荷极限值，能够有效避免因检测误差导致的误判，同时提高设备运行安全性和可靠性。

4.2 起始电压、消光电压与工作电压的关系分析

起始电压、消光电压与工作电压三者之间的关系是评估局部放电检测结果的重要依据。起始电压是指电气设备在局部放电首次出现时所需的最小电压值，反映了绝缘系统对局部放电的起始耐受能力。消光电压则是局部放电现象停止时的电压值，表示设备在绝缘恢复过程中消除放电的能力。工作电压是设备实际运行时承受的电压，它是设计与运行中的关键参数。

一般情况下，起始电压和消光电压都应高于设备的工作电压，通常要求其数值比工作电压至少高出 20%。这一设计要求的目的是在设备工作环境中，即使出现短时电压波动或外界干扰，也能有效避免局部放电的发生。此外，起始电压和消光电压的差值反映了设备的绝缘恢复能力，差值越大，说明设备对局部放电的控制能力越强。对于绝缘性能较弱的设备，起始电压和消光电压可能接近或低于工作电压，这将显著增加设备的运行风险。

通过对三者关系的分析，可以识别出潜在的绝缘问题并采取针对性的措施。例如，如果设备起始电压较低但消光电压较高，说明绝缘材料可能存在局部劣化但整体恢复能力较强；而若消光电压显著低于工作电压，则需重点关注设备在运行中的放电累积效应。综合分析三者之间的关系是确保设备安全运行的关键环节。

4.3 局部放电检测判断逻辑及公式推导

局部放电检测的判断逻辑是检测过程的核心，直接决定了检测结果的准确性和有效性。通过分析局部放电的起始电压、消光电压及电荷极限值之间的关系，可以构建系统的判断逻辑。在实际检测中，若设备的起始电压和消光电压均高于工作电压，并且测得的局部放电电荷量低于极限值，则设备可被认为符合要求，测试通过；反之，则需进一步分析其绝缘性能是否存在隐患。

数学模型是实现这一逻辑的重要工具。判断逻辑可用以下公式描述：

$$E = \begin{cases} 1, & V_0 > V_{\text{work}} + \Delta V \text{ 且 } V^* > V_{\text{work}} + \Delta V \text{ 且 } Q < Q_{\text{max}} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

其中，E 为检测结果，1 表示通过，0 表示未通过； V_0 为起始电压， V^* 为消光电压， V 为工作电压， ΔV 为安全裕量， Q 为测得的局部放电电荷量， Q_{max} 为电荷极限值。

对于不满足上述条件的情况，需要进一步判断起始电压、消光电压及电荷量的变化趋势。如果设备的起始电压与消光电压接近工作电压，但测得的电荷量能够迅速衰减至 Q_{max} 以下，则说明设备在特定工况下仍具备局部放电风险管理能力，可通过检测。否则，则判定为绝缘性能不足。通过这种逻辑判断，可以准确评估设备的绝缘状态，确保检测

结果的科学性和可靠性。

5. 实验验证与对比分析

5.1 实验设计与参数设置

为了验证本文提出的电气设备局部放电检测试验技术的可行性与可靠性，设计了对比实验，实验选取某电网系统内的多种电气设备，包括10台变压器和15段电缆，通过对比分析不同技术在实际应用中的表现，评估本文技术的优势。

实验环境配置如下：滤波器、电容器、加热器和测量仪器等仪器设备，以及标准化实验流程，确保实验过程科学、规范。实验参数设置如下：

(1) 输入电压 AC220V，输出电压 AC380V；

- (2) 电源频率 250Hz，波形为正弦波，畸变率 0.01%；
- (3) 极限电压值为 350V，极限电流值为 2000A；
- (4) 实验持续时间为 60 秒。

为保证数据的可靠性，实验采用信号归一化和均值滤波法对局部放电信号进行预处理，并设定局部放电电荷的极限值。在对比过程中，采用文献[1]的 GIS 内部电脉冲检测技术和文献[2]的高磁导率电缆局部放电检测装置，结合其描述的具体检测方法，进行多维度性能评估。

5.2 实验结果及精度分析

实验的核心目标是比较不同技术下局部放电检测值与实际值之间的偏差。具体结果如表 1 所示：

表 1 实验结果

电气设备序号	实际值 (pC)	本文技术检测值 (pC)	文献[1]检测值 (pC)	文献[2]检测值 (pC)
1	10.26	10.21	11.03	12.68
2	10.41	10.43	10.95	12.58
3	11.62	11.61	10.45	13.62
4	10.56	10.54	10.68	13.85

说明：

1. 本文技术的检测偏差控制在 0.1pC 以内，表现出最高的检测精度；

2. 文献[1]技术依赖于 GIS 内部的电脉冲、电磁辐射及超声波信号检测，尽管在 GIS 设备中效果较好，但在电缆等其他设备上的偏差较大，误差范围为 0.5 至 1.2pC；

3. 文献[2]技术通过宽频带和高磁导率的检测装置检测电缆放电信号，但在信号干扰较强的环境下表现不够理想，偏差范围为 1 至 2.5pC。

5.3 技术对比与优势说明

通过对比实验，可以总结出本文技术的主要优势：首先，在高精度检测能力方面，本文技术能够精准捕捉局部放电信号，偏差显著低于文献[1]和文献[2]中的技术，适合对精度要求较高的电气设备检测需求。其次，本文技术具有广泛的适用性。文献[1]技术虽然在 GIS 设备的检测中表现突出，但适用范围较窄；文献[2]技术主要针对电缆检测，而本文技术适用于变压器、电缆等多种电气设备，显示了更强的通用性。此外，本文技术在有效噪声抑制方面也表现优异。通过滤波器和归一化处理，本文技术能够在电磁干扰复杂的环境中保持高信噪比，确保信号数据的可靠性。

6. 应用实例与技术效果

6.1 实际案例分析

在某电网公司对多台变压器进行局部放电检测时，采用了本文技术以及文献[1]和文献[2]中的技术进行比较。结果显示，本文技术成功检测出一台变压器的局部放电起始电压接近工作电压下限，并及时建议进行绝缘处理，避免了后续可能发生的绝缘击穿事故。而文献[1]和文献[2]技术对该变压器的放电信号检测不够敏感，未能及时发现潜在问题。

在另一案例中，针对多段电缆的局部放电检测，文献[2]技术在特定条件下能够快速检测出电缆局部放电信号，但对环境电磁干扰的适应性较差，检测结果误差较大；而本文技术在

整个检测过程中保持了较高的精度和稳定性，进一步验证了其在实际应用中的价值。

6.2 技术应用的可靠性与可行性评价

本文技术在实际应用中表现出以下可靠性：首先，它具有适用多场景的特点，无论是在实验室环境还是实际电网运行环境中，均能保持高精度检测。其次，通过设定局部放电电荷的极限值以及信号特征提取算法，本文技术能够实现精准诊断，准确判断设备的运行状态。此外，本文技术操作便捷，采用模块化的设备连接方式和自动化的信号分析流程，大幅提升了检测效率。

7. 结论与展望

本文通过对电气设备局部放电检测技术的研究，提出了一种高精度检测方法，并在实验与实际应用中验证了其可靠性与可行性。相比文献[1]和文献[2]的技术，本文技术在信号处理、噪声抑制和适用性方面具有显著优势，能够满足多种电气设备的检测需求。未来，随着检测技术的不断发展，可以进一步优化算法模型，拓展应用场景，推动局部放电检测在智能电网中的应用，为电气设备的可靠运行提供更有力的技术支撑。

[参考文献]

- [1] 李晓磊, 张甲辉, 李林, 等. 一起 110kV GIS 绝缘子局部放电检测案例分析[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2024, 27(2): 1-4.
- [2] 杨巧为, 陈蓉, 多俊龙. 一种宽频带、高磁导率电缆局部放电检测装置的研制与应用[J]. 东北电力技术, 2024, 45(2): 22-25.
- [3] 潘彪, 周永涛, 董秦龙, 等. 基于 FDTD 建模的高压电缆局部放电检测方法[J]. 浙江电力, 2023, 42(12): 12-19.
- [4] 陈臻, 陈林, 康宁, 等. 基于天线近场测量的电力电缆局部放电在线检测方法[J]. 广东电力, 2023, 36(9): 89-99.