

基于局部放电监测的高压试验方法优化研究

郭兴帅，马晓玮

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

DOI:10.61369/ETQM.2025110018

摘要：高压试验是电力设备绝缘性能评估的重要手段，但传统方法多依赖宏观指标，难以及时揭示潜在缺陷。局部放电作为绝缘劣化的敏感表征，可在微观层面反映绝缘状态。本文系统阐述局部放电的机理与监测方法，剖析耐压试验、泄漏电流、介质损耗和绝缘电阻等传统试验的局限性，并提出基于局部放电监测的优化路径。通过协同监测、脉冲特征融合、频谱扩展及多维参数耦合等措施，实现高压试验由宏观诊断向精细化、智能化演进，为电力设备绝缘状态评价与智能电网运行提供新思路。

关键词：局部放电；高压试验；绝缘诊断；信号处理；优化路径

Optimization Study of High-Voltage Test Methods Based on Local Discharge Monitoring

Guo Xingshuai, Ma Xiaowei

Xuejiawan Power Supply Branch, Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300

Abstract : High-voltage testing serves as a crucial method for evaluating the insulation performance of electrical equipment, yet traditional approaches predominantly rely on macro-level indicators, making it difficult to promptly identify potential defects. Partial discharge, as a sensitive indicator of insulation degradation, can reflect insulation conditions at a microscopic level. This paper systematically elaborates on the mechanisms and monitoring methods of partial discharge, analyzes the limitations of conventional tests such as withstand voltage testing, leakage current, dielectric loss, and insulation resistance, and proposes optimized approaches based on partial discharge monitoring. Through coordinated monitoring, pulse characteristic fusion, spectrum expansion, and multi-dimensional parameter coupling, this study facilitates the evolution of high-voltage testing from macro-level diagnosis to refined and intelligent evaluation, offering new insights for assessing electrical equipment insulation status and supporting smart grid operations.

Keywords : partial discharge; high-voltage test; insulation diagnosis; signal processing; optimization path

引言

随着电力系统电压等级不断攀升，设备绝缘性能成为运行安全的关键环节。长期以来，高压试验作为常规检测手段在保障设备可靠性方面发挥了重要作用，但其侧重宏观参数，往往无法揭示绝缘内部潜在缺陷。近年来，国际上对绝缘状态评估的关注不断深化，传统耐压、泄漏电流、介质损耗及绝缘电阻等方法在工程实践中逐渐显现局限，难以满足智能电网对早期隐患识别和精细化诊断的需求。如何在现有试验体系中引入更敏感、可量化的指标，成为高压试验方法亟需解决的核心问题。

一、局部放电监测在高压试验中的理论基础

（一）局部放电机理与特征

局部放电是绝缘系统在承受电场作用时局部区域发生的非完全击穿现象，通常出现在气隙、固体界面或绝缘材料劣化部位^[1]。其产生过程与局部电场畸变密切相关，放电形式包括气隙

击穿、沿面闪络及树枝状发展等。局部放电虽不会立即导致设备击穿，但在长期作用下会逐步恶化绝缘性能，最终演化为绝缘失效。其特征主要表现为放电量大小、脉冲波形、能谱分布和相位分布规律，这些参数能反映绝缘缺陷的性质与发展趋势，因此被视为评价绝缘早期劣化的敏感信号，具有重要理论与工程应用价值。

作者简介：

郭兴帅（1987.08.12—），男，河北邯郸人，汉族，大学本科，副高，工程师，专业和研究方向：电力高压试验。

马晓玮（1995.01.12—），女，内蒙古乌兰察布人，汉族，大学本科，工程师，专业和研究方向：电力高压试验。

(二) 局部放电监测方法分类

局部放电的监测方法依据信号类型和检测原理可分为多种路径。电气法通过电流脉冲和电容耦合采集放电脉冲，灵敏度高但受噪声干扰明显；电磁法以超高频天线或传感器捕捉放电电磁辐射，适合用于GIS和电缆场景；声学法依靠超声波换能器识别放电产生的机械波动，便于空间定位；光学法则利用放电伴随的光辐射特征，适合检测透明或局部可视的绝缘体^[2]。不同方法各有优势和适用范围，随着传感技术与数据处理算法的发展，综合多源监测并融合分析结果逐渐成为趋势，为后续高压试验方法的优化和创新奠定了更加坚实和广阔的技术基础。

二、传统高压试验方法的局限性

(一) 耐压试验的局限性

耐压试验通过施加高电压考察绝缘承受能力，但该方法只关注击穿阈值，忽视了电压作用下可能发生的局部放电现象^[3]。局部缺陷往往在额定电压以下就已产生放电活动，而传统耐压试验并未监测这些信号，导致潜在隐患被掩盖。另外，单纯依赖电压升高可能加速绝缘老化，甚至诱发新的微裂纹，反而降低设备的长期可靠性。从局部放电监测的角度看，耐压试验缺少对放电相位分布和脉冲特征的捕捉，无法实现早期诊断。更重要的是，该方法给出的结果通常是“合格或不合格”的单一判据，缺乏细化的健康等级评估功能，也不利于长期状态趋势的跟踪。

(二) 泄漏电流测量的局限性

泄漏电流测量常用来评估整体绝缘导电性，但该方法主要反映均值变化，对局部缺陷导致的瞬态放电信号并不敏感。在绝缘材料内部产生的放电脉冲，其电流贡献往往极小，很容易淹没在背景电流中^[4]。传统测量方式忽略这些短时高频信号，因此即便存在局部放电，测试结果仍可能显示绝缘良好。在局部放电监测的视角下，泄漏电流测量缺乏对脉冲波形和能谱信息的获取能力，导致其诊断分辨率不足。另外，测试结果还易受外部电磁干扰和环境变化的影响，进一步降低了其在复杂现场条件下的可靠性，也限制了其在早期缺陷预警中的实用性。

(三) 介质损耗因数测量的局限性

介质损耗因数是反映绝缘在交流电压下介质损耗水平的重要指标，但该参数主要呈现整体趋势，对局部放电引起的微观能量释放反映不足^[5]。实际中，放电活动会在高频区产生能谱特征，而传统损耗测量聚焦于工频条件，无法有效捕捉高频分量。另外，该方法受湿度、温度等外部因素影响明显，掩盖了局部放电信号的贡献。从局部放电监测的角度看，介质损耗测试缺少与放电脉冲能量耦合的能力，限制了其在精细化诊断中的作用。尤其在特高压设备中，这种不足会导致早期缺陷被延迟发现，降低了测试对运维决策的指导价值，也使设备健康评价的灵敏度明显不足。

(四) 绝缘电阻测量的局限性

绝缘电阻测试通常用于宏观评估绝缘状况，但在特高压设备中，这种方法无法揭示局部放电引发的早期劣化^[6]。放电活动在直流电压下同样可能发生，但其表现为瞬时脉冲，难以通过平均

电阻值反映出来。由于该方法侧重整体电阻数值，缺乏对瞬态局部放电信号的敏感捕捉，结果往往显示正常而实际存在隐患。同时，环境湿度与温度的波动对电阻数值影响较大，进一步降低了对局部放电活动的指示能力。其局限性还体现在测试周期较长、判据粗糙，使其在现代电力设备状态评估中的独立价值逐渐减弱，也难以满足精细化诊断和全寿命周期管理的需求。

三、基于局部放电监测的高压试验方法优化路径

(一) 耐压试验的协同监测优化

在高压设备的检测实践中，耐压试验长期作为“通行证”，然而仅凭电压能否承受往往无法揭示绝缘材料内部的隐性问题^[7]。引入局部放电监测后，试验的意义被重新定义：升压不仅是电场强度的考验，更是对放电活动的实时跟踪。其优化路径首先体现在判据的转变。过去结果只有“是否击穿”，而现在可以通过“电压阈值+放电活动”双标准进行综合判断。例如，在逐级升压过程中，如果在额定电压的八成水平就检测到持续放电量超过10 pC，且脉冲分布具有稳定相位集中性，即可认定设备绝缘存在缺陷风险，而不必继续冒险升压。

技术实现上，这一优化并不依赖大规模改造，而是通过加装局部放传感器实现嵌入式改进。常见做法是在高压回路中安装高频电流互感器，同时布设超音频传感器，用于捕捉不同形态的放电信号。数据采集采用高速示波器与专用监测软件，在升压过程中生成“电压—放电量”曲线，并同步存储用于后期比对。通过这一方式，耐压试验不仅能区分设备的绝缘等级，还能实现健康度分级：当放电量长期低于5 pC，可判定绝缘状态良好；若在电压尚未达到额定水平时放电量已超过20 pC，则表明局部缺陷处于活跃状态，必须进行检修。进一步地，还可以将不同设备的历史试验结果建立数据库，通过横向对比识别典型缺陷模式。优化后的流程让试验结论不再是单一的合格或不合格，而是面向维护决策的精细化参考，使耐压试验真正转向动态预警和风险控制。

(二) 泄漏电流测量的脉冲特征融合

在常规高压试验中，泄漏电流被视作评价绝缘导电性的直接指标，但这种宏观量值往往掩盖了缺陷发展的细节^[8]。通过引入局部放电监测，可以让这一方法焕发新价值。其核心思路是把泄漏电流分解为两部分：一是低频背景分量，反映绝缘整体的稳定性；二是高频脉冲分量，直接对应局部放电活动。优化后的测试流程要求在电流采集回路中增加宽带传感器，以捕捉脉冲信号，同时保持整体电流监测。随后，利用滤波与时频分析将两类信号分离，再进行耦合对比。如果整体电流变化在0.5 μA以内，而脉冲活动频度却在电压上升过程中不断增加，则表明绝缘内部已经存在活跃缺陷，应引起重视。

这一融合方法的优势在于，它能够将原本稳定的电流曲线转化为“整体值+脉冲特征”的双维度结果。试验人员不再仅仅依赖数值的绝对大小，而是观察脉冲出现的频度、幅值以及与电压的相关性。例如，一根电缆在升压至额定值前，整体电流仍维持在允许范围，但脉冲活动在数百千赫兹到数兆赫兹的频段持续

出现，这一迹象往往预示着气隙或界面缺陷的存在。通过这种方式，泄漏电流测量不再停留在宏观诊断，而是成为揭示微观劣化的精密工具。同时，结合多次测量、平均化统计和噪声抑制手段，可以有效降低外界干扰的影响，提高数据的可信度。更进一步，试验结果还可与局放相位分布图谱联动，形成多源信息融合，使诊断结论更加稳健。最终，该优化路径使泄漏电流测试实现了由粗粒度到精细化的转型，为设备状态评估提供了更敏感、更前瞻的依据。

（三）介质损耗测量的频谱扩展应用

介质损耗因数常用于反映绝缘在交流电场下的整体能量损耗，但其不足之处在于，只在工频条件下取值，局部放电的高频能量释放往往被忽略^[9]。优化思路是将局部放电监测方法引入介质损耗测试，使其从单一工频量值扩展为多频段诊断。具体路径包括两个层面。第一，采集放电脉冲信号并进行频谱分析，提取局放活动在数百千赫兹到数兆赫兹范围内的能量特征；第二，将这些高频特征与工频损耗因数进行关联，构建“多频损耗曲线”。在实践中，如果某设备的工频损耗值仍处于合格范围，但在高频区出现能量峰值集中，且与放电脉冲对应关系明确，就可以认定绝缘存在早期劣化迹象。

实施过程中，需要在测试平台上增加频谱分析单元，能够对局部放电引起的脉冲群进行能量分布计算。数据处理方面，常用小波包分解方法对不同频段的能量占比进行量化，再与损耗因数的基准曲线进行比对。这样一来，介质损耗测试不仅能反映整体趋势，还能揭示放电源的活跃程度和位置特征。例如，若在1 MHz附近能量显著增强，往往指向沿面放电；若在数百千赫兹频段能量占比增加，则多与气隙缺陷相关。通过频谱扩展，介质损耗测试实现了由单参数向多维度指标的转变，使结果不仅仅是一个数值，而是包含频率分布、能量结构和缺陷特征的综合判据。这一方法能够让传统测试焕发新的诊断能力，更适应特高压设备复杂的绝缘系统。同时，这种扩展方式还能为不同设备建立“指纹特征库”，通过历史比对实现长期趋势监控，为状态评估提供更加全面的技术支撑。

（四）绝缘电阻测量的多维参数耦合

绝缘电阻测量向来以宏观数值为判据，其优点在于简便，但

缺点是难以发现局部放电引起的瞬态变化^[10]。优化路径是将电阻测量与局放监测耦合，使测试结果从单一电阻值拓展为“电阻趋势+局放活动”双指标体系。具体方法为：在直流耐压过程中同步采集局放脉冲信号，当电阻值显示稳定但脉冲数量逐步增加时，可判断绝缘内部已存在微小缺陷。进一步地，还可以在试验结束后进行“吸收比”与“局放活动量”的交叉比对，以揭示绝缘材料的极化过程是否与局部放电关联。例如，如果吸收比仍符合标准，但局放量在几十 pC以上，说明宏观性能尚未恶化，但微观缺陷已经萌芽。

该方法的实施强调结果的多维解读。单独的电阻数值只能给出整体状态，而与局部放电信号耦合后，就能区分“表面稳定、内部活跃”的情况。为了提升可靠性，可通过多点测试采集不同时间段的电阻和局放数据，建立趋势曲线，判断劣化的动态发展。结果呈现方式也不再是一个固定的兆欧级数值，而是包含电阻基线、脉冲活动频率和趋势指标的综合图表。这样一来，绝缘电阻试验不再是入门级的“初步判断”，而是升级为兼具宏观和微观视角的诊断手段。通过这种多维参数耦合，检测人员能够更准确地把握绝缘劣化的早期阶段，从而为预防性维护和寿命评估提供科学依据。另外，这一方法还能与在线监测系统对接，形成“实验室检测+运行监控”的双重机制，从而实现长期稳定的数据积累，为智能电网的绝缘全寿命管理提供可行路径。

四、总结

本文围绕高压试验方法的优化，系统引入局部放电监测思想，突破了传统耐压、泄漏电流、介质损耗和绝缘电阻试验宏观判据单一、灵敏度不足的局限。研究结果表明，通过协同监测、脉冲融合、频谱扩展及多维耦合等路径，可实现从“是否击穿”到“早期预警”、从“宏观指标”到“微观细节”的转型。该优化体系不仅提升了检测的准确性和前瞻性，也为绝缘状态分级评估和智能化诊断提供了实践依据。未来有望与大数据、人工智能结合，构建面向全寿命周期的智能监测平台。

参考文献

- [1] 李军浩, 韩旭涛, 王昊天, 等. 电气设备局部放电检测技术述评: 2015—2025[J]. 高电压技术, 2025, 51(07): 3132–3158.
- [2] 张羽翔. 高压电气试验的局部放电检测方法及故障诊断研究 [J]. 防爆电机, 2025, 60(04): 124–127.
- [3] 郑楠. 基于物联网的电力电缆局部放电故障状态自动监测方法 [J]. 自动化应用, 2025, 66(12): 252–254+258.
- [4] 张红彬, 黄明辉, 乔亚飞. 高压电气设备局部放电在线监测技术与应用 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15(17): 182–185.
- [5] 吴江锋. 电力电缆局部放电检测技术及应用分析 [J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(05): 82–83+86.
- [6] 王德玉. 基于局部放电检测技术的高压开关设备状态评估研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, (04): 69–72.
- [7] 杨应仓, 张斌山, 陈俊德, 等. 局部放电理论及其检测方法研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (04): 18–20.
- [8] 王理强, 李玉华. 局部放电测试技术在电力电缆的应用分析 [J]. 中国设备工程, 2025, (S1): 276–278.
- [9] 徐明磊. 电力变压器电气高压试验技术要点探讨 [J]. 中国设备工程, 2024, (24): 212–214.
- [10] 胡晖, 周广成, 李安茂. 高压试验中变压器试验问题及故障处理方法 [J]. 科技资讯, 2022, 20(15): 63–65.