

油浸式电力变压器局部放电特征提取与故障诊断方法的研究

陈加云

云南华电金沙江中游水电开发有限公司梨园发电分公司 云南 丽江 674100

【摘要】：油浸式电力变压器在电力系统中承担电能变换与传输任务，绝缘状态直接关系设备运行稳定性。局部放电作为绝缘劣化的重要早期表现，信号中包含放电类型、缺陷位置及故障演化等信息。围绕局部放电特征提取与故障诊断之间的内在联系，可从放电脉冲、相位分布、频谱变化和统计参数等角度提取有效特征，削弱噪声干扰对识别结果的影响。通过构建特征参数与典型绝缘缺陷之间的映射关系，可实现对悬浮放电、气隙放电、沿面放电等故障类型的区分，为油浸式电力变压器状态评估、隐患识别和检修决策提供依据。

【关键词】：油浸式电力变压器；局部放电；特征提取；故障诊断；绝缘缺陷

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.021

引言

电力系统运行规模持续扩大，油浸式电力变压器长期承受电、热、机械及环境因素共同影响，内部绝缘缺陷容易在隐蔽状态下逐渐发展。局部放电通常出现在绝缘劣化早期，放电信号微弱且易受现场电磁噪声干扰，单纯依靠常规检测难以准确判断故障类型。如何从复杂信号中提取具有代表性的特征，并将特征信息转化为可靠诊断依据，成为提升变压器状态感知能力的关键。围绕局部放电信号特征与绝缘缺陷类型之间的对应关系展开分析，可使故障识别更加精准，也为后续正文中检测信号处理、特征参数选择及诊断判据构建奠定逻辑基础。

1 油浸式变压器局部放电信号特性分析

1.1 信号形成机制与类型分类

油浸式变压器在运行过程中，局部放电常在绝缘缺陷或局部电场集中区域产生，表现为绝缘油、纸及固体绝缘介质中微小放电脉冲的释放。局部放电类型主要包括气隙放电、沿面放电、悬浮放电和内部空洞放电等。不同类型的放电在电压相位、脉冲幅值及重复频率上表现出明显差异，信号波形反映绝缘缺陷的空间分布和电场强度分布特征。通过对这些信号的深入分析，可以揭示放电形成的物理机理和演变规律，为进一步提取有效特征提供理论依据^[1]。局部放电信号在短时间内频繁变化，其特性不仅受到绝缘材料和结构的影响，还与温度、湿度及运行负荷密切相关。系统掌握这些信号形成机制，有助于建立局部放电与绝缘缺陷之间的映射关系，从而为故障诊断奠定基础。

1.2 放电信号关键参数识别

局部放电信号中包含大量信息，关键参数的提取决定了后续分析的准确性。脉冲幅值、重复频率、相位位置以及脉冲持续时间等是反映放电强度和绝缘劣化程度的重要指标。这些参数能够揭示局部放电在不同绝缘结构中的活动规律，并对缺陷类型进行初步区分。通过信号统计分析，可以获得脉冲数量分布、平均幅值及最大幅值等特征，进一步量化放电强度。信号

的相位分布特征与运行电压周期密切相关，能够反映放电在电压波形中的偏移规律。精确识别这些关键参数，有助于建立稳定可靠的诊断模型，使局部放电信号从复杂的原始数据中转化为可直接用于绝缘缺陷分析的定量信息。

1.3 噪声干扰与信号复杂性问题

局部放电信号在现场测量过程中极易受到外部电磁干扰、开关操作以及其他设备运行噪声的影响，使得信号特征掩盖或失真。噪声的存在增加了信号解析难度，同时可能导致特征提取的误判。复杂的信号不仅体现在幅值和频率的变化，还包括脉冲叠加和相位错乱现象，这对精确区分放电类型提出挑战。通过滤波、时频分析等方法，可以从原始信号中分离出有效成分，降低环境干扰对诊断的影响。多通道数据对比和信号同步分析有助于验证脉冲来源，增强特征提取的可靠性。理解噪声干扰与信号复杂性的本质，有助于在后续特征提取和故障判别过程中提高判断的稳定性和准确性。

2 局部放电检测与数据采集方法

2.1 检测装置选择及布置策略

油浸式变压器局部放电的检测装置需针对不同放电类型的信号特性进行选择。电容耦合、超声波和电磁感应等多种检测方式各自具备敏感度和频率响应上的差异，合理组合能够覆盖绝缘内部和表面多种放电源^[2]。装置的布置位置应考虑变压器内部结构、电场分布以及可能的放电集中区域，以便捕捉到最具代表性的信号。安装过程中对传感器间距和接地方式进行优化，有助于减少干扰并增强信号采集的完整性。通过合理的布置策略，可以确保各类放电信号均能够被检测到，为后续特征分析提供高质量数据。

2.2 数据采集过程与信号预处理

局部放电信号采集涉及高频微弱脉冲的实时捕捉和记录，需要在不同负荷和运行状态下进行长时间观测。采集过程中，对信号进行放大、滤波和去噪处理，能够提升有效脉冲的可辨识度。针对时域和频域特性，可通过分段采样和窗口分析对信

号进行预处理,减少环境噪声干扰对特征参数提取的影响。采集设备与控制系统的同步保证了数据完整性,使每个脉冲的幅值、相位和时间信息都能够准确记录,为后续特征分析和故障识别提供基础数据支持。

2.3 多源信号同步与完整性保障

局部放电检测常采用多通道、多类型传感器同时采集数据,不同信号源间的时间同步是保证分析准确性的关键。通过同步时钟或触发机制,能够确保各通道信号在同一时间基准下对应,避免信号错位导致特征判断失真。多源信号之间的对比与校正可以识别异常数据,剔除误检测脉冲,提升整体数据可靠性。完整性保障不仅依赖硬件同步,也需结合软件处理实现数据校验和缺失补偿,使信号特征在多通道环境下保持一致,为后续的特征提取与故障类型判断提供坚实基础。

3 特征提取技术与参数优化

3.1 时域、频域与相位域特征分析

局部放电信号具有脉冲持续时间短、频率成分复杂、相位分布不均匀等特点,单一角度分析难以完整反映放电状态。时域特征能够直接体现放电脉冲的幅值、持续时间、上升沿变化和重复次数,适合判断放电强弱及活动频繁程度。频域特征则从信号能量分布、主频范围和频谱变化中揭示放电源的频率响应差异,有助于区分不同绝缘缺陷产生的信号形态^[3]。相位域特征与工频电压周期密切相关,能够显示放电在正负半周中的集中位置和分布规律。将时域、频域与相位域信息结合分析,可以避免单一特征造成的判断偏差,使局部放电信号呈现出更加完整的特征结构,为后续故障类型识别提供更可靠的数据依据。

3.2 统计特征与脉冲特征结合

局部放电信号并非孤立出现,而是在一定时间范围内呈现连续变化和随机波动,因此特征提取需要兼顾单个脉冲信息与整体统计规律。脉冲特征主要反映单次放电的幅值、极性、持续时间及能量大小,能够揭示放电瞬间的强度变化。统计特征则通过放电次数、平均幅值、最大幅值、方差、偏度和峰度等参数,描述放电活动在时间序列中的分布状态。两类特征相互补充,可以更全面地刻画绝缘缺陷的发展程度。对于气隙放电、沿面放电和悬浮放电等不同类型,脉冲形态与统计分布往往存在明显差异。将统计特征与脉冲特征结合,有助于增强特征表达能力,减少偶然信号对判断结果的影响,提高故障诊断过程中的稳定性和准确性。

3.3 特征降维与信息提炼方法

局部放电信号经过多角度特征提取后,容易形成维度较高、信息交叉较多的特征集合,其中部分参数可能存在重复、冗余或相关性过强的问题。过多特征不仅会增加计算负担,还可能削弱诊断模型对关键故障信息的识别能力。特征降维的核

心在于保留能够反映放电类型和绝缘缺陷状态的主要信息,同时去除干扰性较强或贡献较低的参数。可通过相关性分析、主成分分析、特征选择等方法,对原始特征进行筛选和压缩,使高维数据转化为更具代表性的低维特征空间。经过信息提炼后的参数集合,能够突出不同放电类型之间的差异,提升诊断模型的分类效率。合理的参数优化过程可以使特征提取结果更加集中、清晰,为故障判别提供更准确的输入条件。

4 绝缘缺陷与故障类型识别

4.1 特征参数与典型缺陷映射

油浸式变压器内部绝缘缺陷类型不同,局部放电信号在幅值、相位、频率和脉冲分布上会呈现差异化特征。气隙放电通常表现为脉冲幅值波动较大、相位分布相对集中;沿面放电多与绝缘材料表面电场畸变相关,放电次数和持续性较为明显;悬浮放电受金属部件电位变化影响,脉冲出现具有一定间歇性^[4]。通过提取时域、频域、相位域及统计参数,可将不同特征与典型缺陷建立对应关系,使原本复杂的放电信号转化为可识别的故障信息。特征参数与绝缘缺陷之间的映射越清晰,故障类型判断越具有针对性,也能减少单一参数带来的误判。

4.2 故障类型判别模型建立

故障类型判别需要以局部放电特征参数为输入,将不同绝缘缺陷对应的信号规律转化为可计算、可分类的诊断依据。模型建立过程中,可选取放电幅值、重复率、相位分布、频谱能量和统计指标等参数,形成完整的特征样本。针对气隙放电、沿面放电、悬浮放电及内部空洞放电等类型,可通过分类算法构建判别边界,使不同故障在特征空间中形成相对清晰的区分。模型训练需要保证样本类型完整、数据分布合理,避免因样本偏差造成识别结果不稳定。将特征提取结果与判别模型相结合,可以提高局部放电故障识别的自动化程度,使诊断过程更加客观、连续和高效。

4.3 诊断结果准确性与可靠性分析

局部放电故障诊断结果是否可靠,取决于特征参数质量、样本数据完整程度以及判别模型适应能力。现场检测环境复杂,噪声干扰、传感器灵敏度差异和运行工况变化都可能影响特征提取结果,进而造成故障类型判断偏差。为提高诊断准确性,需要对采集数据进行去噪、校正和异常值剔除,并通过多维特征交叉验证判断结果的一致性。诊断模型还应结合不同放电类型的典型特征,对识别结果进行可信度评估,避免单次检测数据导致片面判断。准确性分析能够反映模型分类能力,可靠性分析则强调结果在不同工况下的稳定表现,两者共同决定故障识别结论的实用价值。

5 局部放电特征应用与运行策略

5.1 故障演化趋势监测

局部放电信号记录的长期变化能够反映绝缘缺陷的发展趋势，幅值波动、脉冲数量以及相位分布的演变直接揭示放电活动的活跃程度和缺陷扩展速度。通过对连续采集数据进行时序分析和趋势曲线绘制，可以识别出绝缘性能逐步下降的早期迹象。气隙放电若出现幅值上升且重复率增加，往往提示局部放电源逐渐扩大，沿面放电在脉冲频率持续高位时可能预示绝缘表面老化加剧^[5]。趋势监测不仅能够对异常放电进行动态跟踪，还可以通过历史数据建立参考基线，使异常变化在初期被识别，提高隐患发现的敏感性。结合多维特征信息，对放电演化趋势进行分析能够揭示缺陷的扩展路径和潜在风险，为判断变压器整体绝缘状况提供连续性数据支持。

5.2 关键部位隐患识别

变压器内部结构复杂，某些电场集中区域如油隙、绕组端部和绝缘纸板边缘更容易产生局部放电。通过对局部放电特征参数的空间分布进行分析，可以准确定位高风险部位。幅值较高、频率集中、相位异常的信号通常指向绝缘薄弱区域，而统计特征如脉冲密度分布和能量集中度能够揭示潜在的隐蔽故障源。结合不同类型放电的特征映射，可区分气隙、沿面和悬浮放电的来源部位，实现对关键部位隐患的识别和分类。针对发现的高风险点进行重点监控和数据记录，可以为后续运行安全评估提供精细化依据，使内部缺陷在尚未演化为明显故障前得到关注。

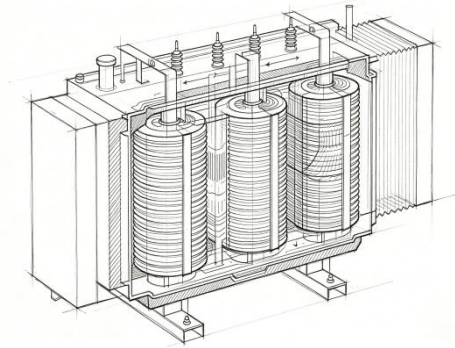


图1 变压器隐患部位剖面图

5.3 运行维护决策支撑

局部放电特征信息能够为运行维护提供量化依据，减少依赖经验判断。通过对特征参数、趋势变化和高风险部位识别结果的综合分析，可以对变压器运行状态进行等级划分和优先级排序。脉冲幅值和频率异常显著的设备应安排重点巡检，而低幅值、稳定分布的放电信号可维持常规监控。数据驱动的决策过程使维护策略更加科学，优化检修周期和资源配置，同时提升运行安全保障。多维特征分析与历史数据比对还可以为故障预防提供参考，使管理者能够基于定量信息制定针对性运行策略，确保设备长期稳定运行，降低突发故障风险。

6 结语

油浸式电力变压器局部放电特征提取与故障诊断，核心在于从复杂微弱信号中筛选有效信息，并将信号特征与绝缘缺陷状态建立对应关系。围绕放电信号特性、检测采集、参数提取、缺陷识别和运行策略等方面展开分析，可以形成较为完整的诊断思路。时域、频域、相位域及统计参数的综合利用，能够增强局部放电类型识别能力，降低噪声干扰带来的判断偏差。故障演化趋势和关键部位隐患的识别，也为变压器运行维护提供了更具针对性的依据。局部放电诊断并非单一检测环节，而是贯穿信号获取、特征分析和故障判别的连续过程，对提升设备绝缘状态判断水平具有重要价值。

参考文献:

- [1] 何畅.油浸式变压器用防腐涂料的研究与应用[J].广州化工,2025,53(21):22-24+29.
- [2] 郭建涛.油浸式电力变压器胶囊式储油柜运维方法研究[J].今日制造与升级,2025,(9):182-184.
- [3] 王兴佳.适用于油浸式电力变压器的智能温度变送器设计[J].电气技术与经济,2025,(9):169-171.
- [4] 汪可,李金忠,罗亮,等.油浸式变压器电弧故障下油箱结构失效及改进加强研究综述[J].高电压技术,2025,51(7):3379-3392.
- [5] 李京萌.油浸式电力变压器多场耦合热分析及绕组等效建模研究[D].沈阳工业大学,2025.