



中华人民共和国国家标准

GB/T 42287—2022/IEC TS 62478:2016

高电压试验技术 电磁和声学法测量 局部放电

High-voltage test techniques—Measurement of partial discharges by
electromagnetic and acoustic methods

(IEC TS 62478:2016, IDT)

2022-12-30 发布

2023-07-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 局部放电的电磁测量	3
4.1 物理背景	3
4.2 传输	3
4.3 测量系统	3
5 局部放电的声学测量	7
5.1 物理背景	7
5.2 传输	7
5.3 测量系统	7
6 局部放电源定位	9
6.1 概述	9
6.2 电磁法	9
6.3 声学法	9
6.4 声学-电磁联合法	9
附录 A (资料性) 电磁测量的优点和缺点	11
A.1 优点	11
A.2 缺点	11
附录 B (资料性) 声学测量的优点和缺点	12
B.1 优点	12
B.2 缺点	12
附录 C (资料性) 具体应用	13
C.1 气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)	13
C.2 UHF 和 VHF 检测法	13
C.3 声学法	14
C.4 GIS 电磁和声学测量的灵敏度核查	14
C.5 旋转电机	17
C.6 变压器	18
C.7 电缆/附件	19
参考文献	22
图 1 仪器信号处理的分类	5

图 2 局部放电的电磁测量概述	6
图 3 不同设备的性能和灵敏度核查概述	6
图 C.1 通过传播时间测量的缺陷定位	16
图 C.2 油/纸绝缘变压器中局部放电电磁和声学检测示例	18
图 C.3 基于声-电信号联合的变压器/电抗器的经典传播时间局部放电定位	19



前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件等同采用 IEC TS 62478:2016《高电压试验技术 电磁和声学法测量局部放电》，文件类型由 IEC 的技术规范调整为我国的国家标准。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会(SAC/TC 163)归口。

本文件起草单位：华东电力试验研究院有限公司、西安高压电器研究院股份有限公司、西安交通大学、中国电力科学研究院有限公司、国网陕西省电力有限公司电力科学研究院、国网河北省电力有限公司电力科学研究院、国网河南省电力公司电力科学研究院、国网四川省电力公司电力科学研究院、宁波职业技术学院、国网宁夏电力有限公司电力科学研究院、中国计量科学研究院、国网经济技术研究院有限公司、南方电网科学研究院有限责任公司、国网西藏电力有限公司电力科学研究院、国网湖北省电力有限公司营销服务中心(计量中心)、国网四川省电力公司阿坝供电公司、新疆特变电工自控设备有限公司、思源电气股份有限公司、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院、上海交通大学、南方电网电力科技股份有限公司、国网智能电网研究院有限公司、武汉大学、西安西电避雷器有限责任公司、中科(深圳)能源物联网有限公司、西安西电开关电气有限公司、内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司、北京交通大学、平高集团有限公司、广西电网有限责任公司电力科学研究院、石家庄科林电气设备有限公司、甘肃电器科学研究院、中国长江电力股份有限公司、山东大学、西安茂荣电力设备有限公司、华北电力大学、广东电网有限责任公司电力科学研究院、国网重庆市电力公司电力科学研究院、国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院、杭州柯林电气股份有限公司、山东泰开成套电器有限公司、厦门斯玛特思智能电气有限公司、国网安徽省电力有限公司电力科学研究院、云南电网有限责任公司电力科学研究院、国网上海市电力公司金山供电公司、江苏省如高高压电器有限公司。

本文件主要起草人：司文荣、张小勇、李军浩、傅晨钊、雷民、李彦明、王春杰、周玮、李强、赵学风、高树国、王亭、王天、苏春强、刘宏亮、张晨萌、沈建位、王建生、吴旭涛、刘娜、杜商安、蒲路、胡良蓉、高超、王大飞、郭玥、汪司珂、王大兴、危鹏、许铁军、常家森、赵琳、王辉、卢启付、鞠登峰、关伟民、韩帅、何计谋、王伟、王建文、王玲、张伟、车传强、孙继星、林麟、饶夏锦、段洪民、燕琦、吴治国、李清泉、王国利、袁鹏、李腾、马国明、李兴旺、王嘉易、谢成、李勇、金鑫、谢炜、郑维霞、申巍、桑仲庆、朱太云、彭晶、杨洋、张榆、孙京京、谢东、范兴财。

引 言

局部放电会产生电磁和声波信号,辐射光及造成绝缘材料的化学分解;这些物理的和化学的效应可以通过各类诊断性方法及相应的传感元件(传感器)进行检测。除了 IEC 60270 描述所谓的常规电气检测方法,还可以采用非常规方法测量局部放电(见附录 A、附录 B 和附录 C)。

本文件对于电磁和声学这两类非常规检测方法应用存在的特殊需求给出了推荐,是这一方向测量局部放电的基础。



高电压试验技术 电磁和声学法测量 局部放电

1 范围

本文件描述了电气设备绝缘中局部放电的电磁(高频/甚高频/特高频)及声学测量方法。

本文件适用于不同应用场景、不同频率范围和不同灵敏度的局部放电传感器,以及相应的定位、测量系统校准或灵敏度核查。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 20833.1 旋转电机 绕组绝缘 第1部分:离线局部放电测量(GB/T 20833.1—2021, IEC 60034-27-1:2017, IDT)

IEC 60270 高电压试验技术局部放电测量(High-voltage test techniques—Partial discharge measurements)

注:GB/T 7354—2018 高电压试验技术局部放电测量(IEC 60270:2000, MOD)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

IEC 和 ISO 的术语数据库可以通过下述网址访问:

——IEC: <http://www.electropedia.org/>

——ISO: <http://www.iso.org/obp>

3.1

局部放电 partial discharge; PD

导体间绝缘仅被部分桥接的电气放电。这种放电可以在导体附近发生也可以不在导体附近发生。

3.1.1

局部放电电流脉冲 partial discharge current pulses; PD current pulses

局部放电产生的极快电流脉冲,其上升时间和脉冲宽度取决于放电类型、缺陷类型、几何形状和气体压力。

3.1.2

局部放电的电磁效应 electromagnetic effects of PD

局部放电电流脉冲导致高频瞬态电磁波的现象。

注:局部放电产生的电磁波通过包围着局放源的介质材料进行传播,这些信号能被各种天线或变换器(传感器)检测到。

3.1.3

局部放电的声学效应 acoustic effects of PD

局部放电电流脉冲导致过热气体通道(类似于雷电)所产生瞬态声波的现象。

3.1.4

局部放电效应的检测和测量 **detection and measurement of effects of PD**

可采用如下方法进行检测和测量：

- 电气方法：常规（依据 IEC 60270）或电磁的高频（high frequency, HF）、甚高频（very high frequency, VHF）及特高频（ultra high frequency, UHF）方法；
- 声学方法；
- 光学方法；
- 化学方法。

注 1：局部放电测量是评估电气设备绝缘系统介质状态的重要标准。

注 2：本文件仅讨论电磁和声学方法。

3.2

非常规局部放电测量系统 **unconventional PD measuring system**

用于局部放电非常规检测的测量系统，包括传感元件、传输路径和测量仪器。

3.2.1

传感元件 **sensing element**

传感器或天线和连接到测量仪器的连接线（例如电缆或光纤光缆）。

3.2.2

传输路径 **transmission path**

由以下参数表征的路径：

- 局部放电源到传感器的距离；
- 局部放电信号传输类型（传导或场耦合）；
- 介质材料的传播特性，例如色散、衰减、共振、反射、衍射。

3.2.3

局部放电测量仪器 **PD measuring instruments**

利用数字和模拟技术的各种组合来显示并辅助解释和评估局部放电的仪器。

注：电磁或声学信号在不同类型介质（气体、液体或固体）中的传播特性不同，将对测量到的局部放电信号产生影响，导致在时域和频域中进行数据评估具有不同的可能性，具体取决于传感元件和测量仪器的不同频带宽度。

3.3

局部放电测量系统核查 **PD measurement system checks**

通过性能核查的方法确定复杂设备组合的适当和正确操作。

3.3.1

性能核查 **performance check**

对从传感元件到局部放电测量仪器整个测量系统是否正常工作的核查，通常采用注入人工信号的方式进行。

注 1：选择用于性能核查的人工注入信号的时域和频域特性，以适当模拟被测量的局部放电现象及相应的局部放电测量系统参数，例如频带宽度、传感器类型等。

注 2：在进行性能核查时，不一定需要向测试对象发射电磁波或声波，即可以进行单端口核查。

3.3.2

灵敏度核查 **sensitivity check**

用于建立局部放电视在放电量[单位为皮库(pC)]与电磁或声学局部放电测量系统测量值(显示值)之间定量关系的核查，通常采用注入人工信号的方式进行。

注 1：用于灵敏度核查的人工注入信号的时域、频域及幅值特征通常来自实验室测量，即通过同时比较电磁或声学局部放电测量系统的输出与 IEC 60270 试验装置中实际局部放电源的测量来进行确定。

注 2：在进行灵敏度核查时，应向测试对象发射电磁波或声波以模拟实际的局部放电信号。

3.4

参量和单位

3.4.1

传感器输出电压 **sensor output voltage**

电磁或声学传感器的响应[单位为伏特(V)或分贝毫伏(dBmV)]。

3.4.2

传感器有效口径 **sensor effective aperture**

传感器最大输出功率[单位为毫瓦(mW)]与输入电场功率密度[单位为毫瓦每平方米(mW/mm^2)]之比。

注 1: 传感器有效口径以平方毫米(mm^2)表征。

注 2: 在这种情况下,被测量是由局部放电信号引发的瞬态电场所产生的脉冲能量。

3.4.3

传感器有效高度 **sensor effective height**传感器有效长度 **sensor effective length**

传感器输出电压幅值[单位为伏(V)]与输入电场强度[单位为伏每毫米(V/mm)]之比。

注 1: 传感器有效高度以毫米(mm)表征。

注 2: 通常情况下输出包含一个暂态电压脉冲。

3.4.4

天线因子 **antenna factor**

有效高度(或长度)的倒数,定义为输入电场强度[单位为伏每毫米(V/mm)]与传感器输出电压幅值[单位为伏(V)]之比。

注: 天线因子以毫米倒数(mm^{-1})表征。

4 局部放电的电磁测量

4.1 物理背景

短上升沿时间($<1 \text{ ns}$)的局部放电脉冲电流会激发出从 HF 到 UHF 范围(3 MHz~3 GHz)的电磁波,并在多种绝缘材料中传播。所产生的 UHF 电磁波的传播速度取决于材料的相对介电常数 ϵ_r ,例如在油中约为 $2/3 \times c_0$ 或 $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ (c_0 表示真空中的光速),频率范围取决于具体设备。

4.2 传输

设备外壳的金属部件可充当波导或谐振腔,产生诸如色散、衰减、腔谐振、驻波、反射和衍射等效应;所有这些效应将分别影响局部放电脉冲信号的传播和脉冲特性。

传输路径特性通常依赖如下因素:

- 材料特性及尺寸;
- 周围介质的电磁阻抗及介电性能;
- 局部放电源和传感器之间的距离。

4.3 测量系统

4.3.1 电/电磁场

基于射频(RF)技术的非常规局部放电测量系统有两种不同的处理模式:一种采用 HF/VHF 的频率范围,另一种采用 UHF 的频率范围。在 HF 和 VHF 范围内,通常可以测量电、磁和电磁场(例如 TEM_{00})。在 UHF 范围内,主要测量各种模式的电磁波(例如 TEM_{xx})。

4.3.2 频率范围

HF 标称频率范围覆盖 3 MHz~30 MHz, VHF 标称频率范围覆盖 30 MHz~300 MHz。通常,在 HF 和 VHF 范围内的窄带测量,测量带宽为 3 MHz;在 VHF 范围内的宽带测量,测量带宽为 50 MHz 和更宽。

UHF 的标称频率范围在 300 MHz~3 GHz 之间。应用于 UHF 范围内的测量模式通常是一个或多个单独频率的零带宽模式,分辨带宽通常在 3 MHz~6 MHz 之间,或全带宽模式。

4.3.3 传感器

4.3.3.1 总则

在 HF 和 VHF 频率范围内通常使用基于电容、电感和电磁检测原理的传感器。

在 UHF 频率范围内,所使用的传感器通常是近场天线,例如具有场均压电极的盘形或锥形传感器。

传感器通常输出高频振荡脉冲信号。输出信号在时域中表现为振荡脉冲,例如具有测量输出量的最大包络;在频域中通常表现为由瞬态脉冲产生的频谱,测量输出量是相关特征频谱频率的最大幅值。

传感器的特征采用包括电容、电感和电阻元件组合的高频阻抗描述。高频阻抗和相应的测量频率范围决定了传感器的测量模式和传输阻抗函数及局部放电引起的相关瞬态场分量幅值。

被测量可以是瞬态电压或脉冲电流值。

4.3.3.2 类型和特性

主要应用于 HF 至 VHF 频率范围的传感器示例如下:

- 电容器,
- 电流互感器,
- 罗哥夫斯基(Rogowski)线圈,
- 定向电磁耦合器,
- 薄膜电极,
- 轴向场耦合器,
- 暂态地电压(TEV)探头,
- 电阻耦合器。

主要应用于 UHF 频率范围的传感器示例如下:

- 圆盘和锥形传感器,
- 外置窗口耦合器,
- 舱口耦合器,
- 屏障传感器,
- 场均压电极,
- 波导传感器,
- 特高频天线,
- 定向电磁耦合器。

传感器特性可以分为如下几类:

- 频率特性即传递函数,
- 极性保持,
- 方向性,

- 与场强相关，
- 灵敏度，
- 取决于几何形状和位置的安装，
- 与模式相关，
- 传递特性，
- 监测区域应位于传感器接收区域的范围内。

4.3.3.3 安装位置

传感器能安装在高压组件内部或外部介质孔上，例如检查窗或阀门。传感器宜尽可能安装在靠近特定的局部放电检测区域及高压组件的金属外壳或屏蔽内。

在大型高压设备或系统中安装多个传感器以提高测量灵敏度，有助于局部放电源的检测和定位。此外多个传感器也能用于灵敏度核查。

传感器不宜对高压组件的绝缘设计和功能产生任何负面影响。

4.3.4 仪器相关影响

4.3.4.1 频域和时域信号处理

传感器的输出信号可以在时域或频域进行处理(见图 1)。

宽带时域信号处理能更好地表征局部放电相关脉冲的完整波形，并且能够详细分析单个脉冲的波形特征(例如局部放电信号反射，局部放电脉冲波形分析等)。

窄带频域信号处理具有更好的噪声抑制能力，在存在噪声和外部干扰的环境中具有更高的灵敏度。由于带宽限制，在处理过程中会导致脉冲波形失真，使得单个脉冲波形分析不是完全可行的；但进行统计分析是可以应用的，例如局部放电相位分布模式。

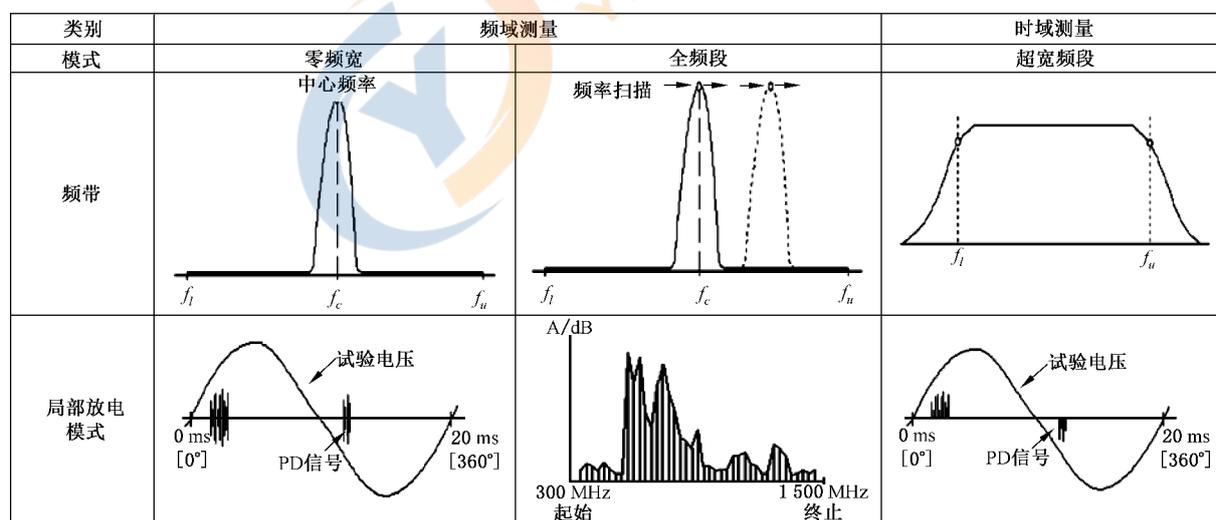


图 1 仪器信号处理的分类

4.3.4.2 处理带宽

时域处理可使用宽频或超宽频率范围进行信号处理。在信号处理之前可采用滤波器抑制单个或多个干扰。然后处理宽带峰值检测器检测到的信号，并通常在时域中与外加高压相位进行同步显示。

频域处理通常以各种频宽或零频宽模式执行，基本上是以具有特定分辨带宽的固定中心频率为中心进行调谐接收。零频宽模式的输出通常在时域中进行显示，例如类似于典型的示波器显示或作为局

部放电模式相位谱图显示。

宽带频谱模式则处理扫频接收机(例如超外差)或“实时频谱分析仪”的输出信号,并以功率谱和频率的关系进行显示。这也能显示为测量信号(局部放电和其他信号)的频谱。

4.3.5 仪器的量

在 HF 和 VHF 范围内,考虑到电感和电容耦合器的应用,仪器的量通常为安培(A)或伏特(V)。UHF 传感器的输出通常也是电压信号。这些仪器测量值与被测电磁场模式及传感器的传递特性线性相关。

导出的量值宜与局部放电的参数相关。当使用 UHF 传感器直接输出电压时,可能是线性关系,也可以是二次的关系,例如处理传感器信号的功率量(W)或与定义的测量电阻相关的信号能量(J)。

注: UHF 传感器的天线特性根据其有效高度(mm)、有效口径(mm²)、天线因子(mm⁻¹)或天线增益(dBi)来描述。

4.3.6 性能和灵敏度核查

对于局部放电电磁波的检测和测量,该方法描述见图 2。

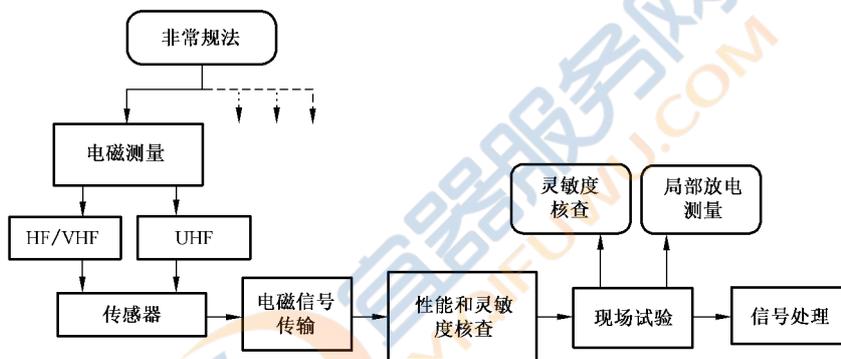


图 2 局部放电的电磁测量概述

宜注意的是,当采用电磁测量(射频)时,局部放电的视在电荷量不能通过校准的方法直接得到。

然而,可以进行检测灵敏度的核查,该方法已经在实践中证明是有用的。例如,用于气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)、旋转电机定子绕组等。图 3 给出了对 GIS、电力变压器、定子绕组和电力电缆进行性能和灵敏度核查的一般步骤。虽然不同高压设备的具体步骤略有不同,但一般方法见图 2。

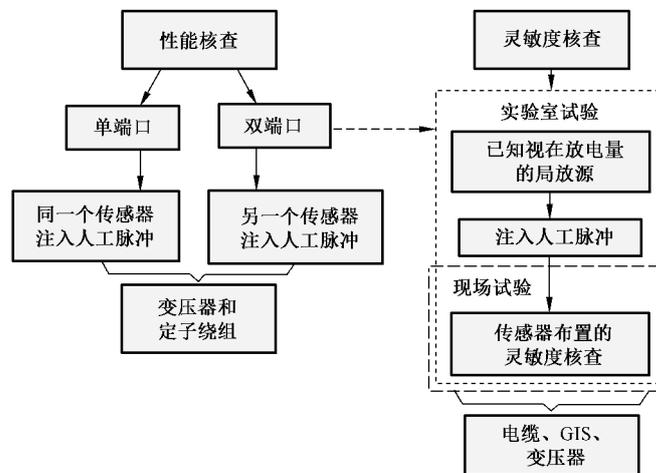


图 3 不同设备的性能和灵敏度核查概述

为了评估电磁波检测方法(如 UHF)的灵敏度,宜进行其灵敏度核查。在最不利的配置下,检测灵敏度通过直接与利用 IEC 60270 方法同时检测到的实际局部放电源的视在放电量(pC)比较证明。

性能核查是对整个局部放电测量系统的功能检查,一般而言与视在放电量测量无关。

注:性能核查也能用于寻找合适的窄带测量频率。

HF 至 UHF 范围内的局部放电检测主要应用于电力电缆附件和旋转机械,通过电感和电容传感器以及特殊设计的场强探头获得电磁暂态信号。对于电力变压器、气体绝缘开关设备和定子绕组,主要使用 VHF 和 UHF 范围。

5 局部放电的声学测量

5.1 物理背景

局部放电声学测量的基础是局部放电源可视作产生声波的点声源。这些声波通过高压设备的内部结构传播并到达设备外表面。不同类型的波具有不同的传播速度,并且边界处的反射和折射将导致衰减、吸收和散射。通常借助于压电传感器、结构声学共振传感器、加速度传感器、电容式传声器或声光传感器来检测声波并将其转换成电信号。局部放电声学相关信号也可由气体绝缘设备(例如 GIS)中的自由移动颗粒产生。

对于局部放电检测,通常采用超声波频率范围(大约 20 kHz~250 kHz),以及可听声波范围(大约 100 Hz~20 kHz)。根据被测绝缘系统的形态(固态、液态和气态)选择用于声学检测的频率范围。

5.2 传输

在液体和气体绝缘部件中,辐射声场作为理想球面波(纵向)传播。当到达固体绝缘部件或设备外壳时,通常会观测到更复杂的模式和所谓的结构传播路径。声波在不同介质中具有不同的传播速度,因此几何上的最短传播路径并不一定是放电源和传感器之间的最快传播路径。

声传输路径通常包括以下几个重要特征:

- 声波的传播模式以及沿局部放电源到传感元件路径传播时所导致的变化;
- 传播速度的变化取决于不同的材料和条件(例如对于绝缘油,随温度变化较为剧烈,而随湿度的变化则很小);
- 色散:传播速度依赖于频率变化;
- 各种绝缘材料或混合物和结构中声脉冲的频率相关衰减;
- 材料边界处的声阻抗的匹配,例如在传感元件和高压设备外壳之间的边界;
- 传感元件和局部放电源之间的距离。

5.3 测量系统

5.3.1 一般原则

测量系统能分为接触式和非接触式。为了灵敏地检测高压设备内的局部放电,大多采用将测量系统的传感器与设备结构如外壳进行直接接触。

此外,测量系统还能区分为采用时域或是频域处理。

5.3.2 传感器

5.3.2.1 总则

可选用的传感器分为压电传感器、麦克风或使用声光效应的传感器。

两类外置式压电效应传感器如下所示:

- 加速度传感器(输出信号与加速度成正比),具有平坦的频率特性;
- 声发射传感器(输出信号与速度成正比),通常具有谐振型的频率特性。

5.3.2.2 类型和特性

传感器分为无源或有源(内置信号放大器)两种类型。通常,传感模块前端的显著信号放大是最有益的,这也取决于传感元件的特性。

传感器的一般特性包括:

- 灵敏度,
- 工作频带的频率特性(谐振型或平坦频率响应),
- 工作温度范围内的温度特性。

考虑到声信号的衰减,通常优选在特定频率范围内具有更高灵敏度特性的谐振型传感器。

5.3.2.3 局部放电检测用声学传感器的布置

通常,外部声学压电传感器宜安装在最有可能检测到由局部放电产生声信号的位置,即结构最佳传递振动的部位。因此,传感器安装在靠近可能在先前测试中显现出问题的区域。

注:对于GIS,声学信号由放置在GIS外壳表面上的传感器获取。通常传感器通过弹性绑扎带或磁性固定器固定到外壳上。由于来自缺陷的声信号沿着GIS轴向传播时会衰减,尤其在局部放电源和测量探头之间存在绝缘子时,因此传感器通常布置在GIS的不同位置(通常在每个气室中至少一个测量点)。

对于变压器,参考变压器的设计可以获得传感器安装的有用信息。通过避免某些区域进行传感器的布置是有利的,例如避免传感器靠近或直接布置在变压器壳体加强筋的顶部,而是将其布置在变压器壳体的机械加强元件之间的区域。将传感器布置在变压器油箱顶部时注意安全距离。而且传感器可以四处移动来进行内部局部放电源的定位。

5.3.3 仪器的量

量化机械压力的主要单位是帕(Pa)。由于压电传感器主要用于将输入的声波转换成与机械压力输入相关的电压输出信号,在大多数仪器中测量的量可用伏特(V)或分贝(dB)来表征。

此外,其他导出值可用于进一步对声学数据进行说明,例如脉冲率或脉冲计数、直方图、与施加高压相位同步的脉冲模式、单个或多个声学局部放电脉冲的频域信息、与工频的不同相关系数和其他等。

5.3.4 性能和灵敏度核查

与UHF方法类似,可在时域或频域中进行声学信号的测量。灵敏度核查旨在验证具体的测量设备,并且可分两步执行。

- 步骤1——实验室试验

与UHF方法的情况一样,首先进行实验室测试以确定来自真实局部放电缺陷的频谱和信号幅值水平。记录利用待核查传感器及检测仪器获得的声学信号幅值水平。此声学信号与来自真实局部放电源,且与已知的视在放电量(pC)相关。此外,还应测量被检测信号的频谱分布。

接下来,声学测量装置记录来自人工声学发生器的信号。该信号能由声学传感器(压电晶体)的反向法产生(例如,施加阶跃电压脉冲)。如果建立人工信号源的频谱和信号幅值水平与真实局部放电缺陷的相似,其能作为灵敏度核查的参考信号。对于压电晶体,可通过使用选择公认的传感器施加阶跃电压脉冲来实现,阶跃电压的幅度和上升时间调整至适合此测试的值。

如果来自人工信号源的信号频率特性与真实缺陷的频率特性不同,则应在接收传感器、信号调节和记录单元之间加入滤波器,以将检测到的频率限制在与真实缺陷紧密相关的范围内。

注:当进行声学测量时,灵敏度通常会因移动和重新固定传感器而发生3 dB的变化。而且,声波是高度分散的。因此这种测量仅适用于核查而不适用于校准。

作为压电晶体的替代物,在外壳上方固定距离降落毫米级直径的钢球可用作声信号发射器。与使用脉冲压电晶体的方法相比,该方法将激发频带更宽的信号。在结构表面上通过折断铅笔芯来产生声信号也已经证明是可行的方法。

- 步骤 2——现场试验

为了在现场验证测量设备的灵敏度和完整性,外壳应采用与实验室相同的激励方式。整个测量系统应与实验室测试中使用的相同。

6 局部放电源定位

6.1 概述

当对高压设备进行局部放电测量时,通常采用两种不同的方法来定位局部放电源。首先,信号幅度的变化或信号波形的畸变可指示出局部放电源位置。其次,测量局部放电脉冲的传播时间能用于计算局放源位置。这些方法也称为基于到达时间的定位或传播时间测量。方法应用可基于电磁、声学或两种技术联合。

当使用基于到达时间的定位方法时,通常应用数学描述或建模来确定局部放电源的空间位置。观测方程的范围从直接和反射局部放电脉冲的线性差分方程到球面的非线性方程组(三角定位法)。

任何基于到达时间的定位过程的重要基础是准确确定脉冲的到达时间,等同于确定瞬态局部放电脉冲(或当传播通过测试对象时未受影响的特征信号部分)的真实起始时间。人工时间确定(由经验丰富的人员执行)和采用信号处理技术的自动时间确定两者都能使用。根据所研究设备的不同,当使用声学法时信号去噪作为第二种技术被特殊使用,其可包括信号滤波、信号均值滤波(平均)或基于小波的去噪方法。

6.2 电磁法

与局部放电的声脉冲相比,局部放电的电磁脉冲传播速度要快得多。因此,对于使用电磁信号到达时间的方法,测量系统所需的分辨率和到达时间差的准确测量要求会更高。测量系统(包括传感元件)的总带宽会影响可达到的总体最大空间定位分辨率,并且根据应用,通常需要 VHF 或 UHF 范围内的宽频信号部分。

根据所测试设备中的信号传播特性,特别需要注意的是要确保所使用数学模型的正确性,例如,假设直线传播的 UHF 信号,由于散射或衍射的影响,如果不修正测量到的到达时间,则可能给出错误的定位结果。

6.3 声学法

所有的局部放电声学定位都能采用基于信号和/或基于信号到达时间的方法进行。根据高压设备的不同,测量还进一步分为单通道或多通道测量。

基于到达时间的局部放电定位方法的关键是获得同时记录的足够数量的声信号,以便求解相应的观测方程,从而估计局部放电源的位置。

由于全声学局部放电测量可能受到微弱的或深度隐藏的局部放电缺陷导致的检测灵敏度降低的影响,因此采用被触发声学信号的均值来增强声学检测灵敏度。实现该方法的基本要求是在测量系统的至少一个通道上测量到重复的局部放电声学信号。

6.4 声学-电磁联合法

相比于局部放电电磁信号,声学信号从源传播到传感元件时会受到相对更强的衰减,通过联合声学和电磁检测局部放电,能增强声学测量的灵敏度。

将电磁与声学测量相结合的另一个重要优点是局部放电联合测试结果具有更高的可信度。声学噪声一般不产生内部电磁信号,电磁干扰也不会产生声学信号。通常,稳定的相位关系用于判断信号是否是局部放电。



附 录 A
(资料性)
电磁测量的优点和缺点

A.1 优点

相比 IEC 60270 所描述的局部放电常规检测法, VHF 和 UHF 的主要优点如下。

- 对干扰和噪声具有更强的免疫能力,使得局部放电的灵敏测量能在含有噪声的交流电源环境或者当测试对象连接到电源系统时进行。这能大大降低局部放电试验的成本并提升取得可靠结果的概率。
- VHF 和 UHF 方法经常被用于局部放电源定位,其空间分辨率有助于找到实际的缺陷位置。
- 宽带 VHF/UHF 检测可保留脉冲波形和相关频率的信息,因此有时可以使用 VHF/UHF 方法确定局部放电源的本质特征。
- 噪声抑制:
 - 在 VHF/UHF 范围内测量局部放电时具有更高的信噪比,因为电力系统中电磁噪声大部分能量的频率往往低于几 MHz;
 - 利用两个或更多传感器,并区分两个或更多传感器处脉冲的相对到达时间,可以将噪声与局部放电脉冲进行分离。
- VHF/UHF 的宽频检测方法具有更好的频域和时域特性,因此能帮助区分设备内局部放电的不同类型和/或发生位置。

A.2 缺点

如 4.3.6 所述, VHF/UHF 方法的主要缺点是不能根据其视在电荷量(例如 pC)唯一地校准出局部放电的幅值。

其他的缺点:

- 由于 VHF/UHF 检测设备需要工作在更高的频率下,其所需的部件会更昂贵,因此整个测试设备通常比常规方法的局部放电检测系统更昂贵;
- 为了有效地实现在线和现场局部放电测试噪声分离和/或抑制,传感器及其物理布置倾向于仅适用于一种类型的高压设备。也就是说用于 GIS 局部放电检测的传感器通常不能用于测量变压器或定子绕组中的局部放电。因此 VHF/UHF 系统在实际应用中具有更强的针对性。

附录 B

(资料性)

声学测量的优点和缺点

B.1 优点

高压设备的声学测量主要用于检测、识别及定位局部放电源,优点如下:

- 设备成本低(声学传感器加局部放电信号采集单元);
- 易于操作;
- 非侵入式方法:传感器布置在正常运行设备的外壳表面;
- 对变电站中的电磁干扰免疫:通常使用的是在超声频段工作的声发射传感器;
- 通过声学—电磁(常规法和/或 UHF 法)联合法检测能提高灵敏度;
- 现场声学系统的性能核查易于实施。

B.2 缺点

缺点如下:

- 依赖局部放电源和传感器之间的路径,相对较高的衰减系数会增加现场测量所需的时间;
- 现场电力变压器局部放电源定位具有较低的灵敏度;
- 无法依据 IEC 60270 校准声信号。

附 录 C

(资料性)

具体应用

C.1 气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)

对于 GIS,可能发生并影响设备绝缘性能的缺陷分为如下几大类:

- a) 装配错误;
- b) 引入导电污染物,例如金属颗粒;
- c) 导电部件如场电极和屏蔽之间的电气和机械接触不良或松动,导致元器件出现悬浮电位;
- d) 固定缺陷,例如高压导体上的金属尖端和附着在固体绝缘(绝缘子)表面上的微粒;
- e) 绝缘子缺陷,包括制造缺陷;
- f) 表面痕迹,例如由高压试验中闪络导致的;
- g) 影响到 SF₆ 气体质量的污染物(副产物、微水、充气错误等)。

GIS 中局部放电由绝缘系统的缺陷引起。已有的研究表明 SF₆ 气体中局部放电源的放电电流上升时间小于 100 ps。自由金属颗粒(最常见的缺陷类型)或固定缺陷,会产生频率分量高于 2 GHz 的暂态电磁波。所产生的电磁波信号在 GIS 同轴母线内传播时不仅存在基本模式(TEM₀₀),而且含有许多高阶模式(TE_{xx}, TM_{xx})。GIS 内部结构中存在许多固有的不连续处,会导致电磁波发生反射,在不同频率下形成多个驻波和共振。此外,模式之间存在耦合效应,这也影响场强的空间变化。由于金属导体的有限导电性,以及绝缘体边界和表面(例如绝缘体、隔板)及不连续性(例如 T 形接头等)的损耗,信号的传播会受到影响,例如阻尼和色散。信号的衰减与频率相关并主要发生在不连续处。上述导致检测结果是每个气室内电磁波共振的复杂混合。

除了依据 IEC 60270 的常规检测方法外,VHF、UHF 和声学检测法也可应用于 GIS 局部放电检测。

C.2 UHF 和 VHF 检测法

UHF 信号通常通过内置式耦合器进行检测,内置式耦合器通常具有与电容耦合器类似的设计。当这些都不可用时,可以在介质窗或在未屏蔽的绝缘子外边缘使用外置式耦合器进行检测。由于 UHF 信号的衰减,在长 GIS 上应安装多个耦合器。根据典型经验,信号强度的平均衰减大约是 2 dB/m。这使得在一些直的母线部分或支线部分,每隔大约 20 m 的间隔就需要安装耦合器。在 GIS 内部存在的各种组件,如断路器、隔离和接地开关、电流和电压互感器等,与母线的直线部分相比,通常会导致更高的信号衰减。可通过使用合适的耦合器、放大器和滤波器来改善信噪比,提高 UHF 测量灵敏度。UHF 法的灵敏度已被证实至少与 IEC 60270 常规法的灵敏度相当,这主要是得益于外部噪声水平低。实验室和现场的测试表明,UHF 法可以检测到较小的严重缺陷,甚至是并不严重的缺陷。然而,采集的 UHF 信号幅值和利用 IEC 60270 常规法局部放电测量记录的视在放电量之间的相关性较差。通过例如使用宽带数字存储示波器测量到达相邻耦合器的信号到达时间的差异,可以对局部放电进行精确的定位。当耦合器之间的距离已知时,能通过简单的计算来定位缺陷位置。

VHF 法与 UHF 法不同,但存在一些相似之处。VHF 法应用于约 30 MHz~300 MHz 范围内的宽带测量。在这些频率下,GIS 中的 TEM₀₀ 传播模式占主导地位,因为任何高阶模式的截止频率均高于 30 MHz。对于给定位置的局部放电源和局部放电传感器,使用 VHF 法测得的局部放电幅值和视在放电量成一定比例。VHF 信号可由内部传感器获取,例如将金属板用作电场传感器,而且与 UHF 法相比需要更少的传感器。VHF 范围内的局部放电测量比 IEC 60270 常规法具有更高的信噪比,但仍然

经常受外部干扰信号的影响。对于局部放电源定位，VHF 法有与 UHF 法的优点类似，通过测量不同耦合器上的时域信号，计算传播时间和距离。

C.3 声学法

GIS 中缺陷产生的声学信号(机械波)主要有两种机制：

- 运动的颗粒在外壳中激发机械波；
- 固定缺陷的局部放电在气体中产生压力波并传播至外壳。

所产生的声学信号取决于局部放电源和其传播路径。GIS 外壳中可能存在几种声学传播模式。然而，对于通常使用的频率范围(例如 <150 kHz)，以及正常的外壳材料和厚度，主要考虑的传播模式为 0 阶反对称(弯曲)波。由于外壳通常由铝或钢制成，信号衰减非常小。然而当信号穿过不同 GIS 气室之间时则会损失能量，例如在绝缘子法兰中的衰减，以及部分信号被反射。

通过外部安装的传感器能检测声信号。通常使用加速度传感器或声发射(AE)传感器进行检测。加速度传感器的输出信号与检测面的加速度(在垂直于传感器底部的方向上)成正比。其频率曲线平坦至上限频率。

AE 传感器的输出信号与其检测面的速度(在垂直于传感器的底部的方向上)成正比，以谐振方式工作。已有可用于校准声学传感器的国外标准(例如：对于 AE 传感器的 ASTM E976、ASTM E1106)。AE 传感器的校准一直是十分重要的主题。虽然这些国外标准可以对来自供应商的传感器起到较好的规范和控制作用，但是并不能评估在 GIS 上使用此类传感器的可行性。使用 AE 的方法可以进行缺陷的识别和定位。

弹跳颗粒产生的声信号频带较宽(>1 MHz)，并且比固定缺陷例如尖端突起物的预放电所产生的声信号具有更高的幅值。常规仪器的时间分辨率，足够将每个颗粒和外壳之间的碰撞作为独立事件进行区分。信号在法兰处的反射信号称为“回波”。当颗粒产生的声信号离开其生成处时，将在空间中衰减。信号幅度的衰减与从点源到传感器距离的平方根成反比，直到传播至外壳，此时衰减可以忽略不计。对弹跳颗粒进行声学检测的灵敏度通常远高于任何其他诊断方法的灵敏度，只要传感器安装在包含颗粒的同一气室上(例如在法兰之间)。该方法在检测位于盆式绝缘子表面的颗粒放电时也存在一些问题。由于环氧树脂浇注件中声波的高衰减，该方法对于检测环氧树脂的内部缺陷(例如气隙)也不是非常敏感。

来自尖端突起物预放电产生的声信号是由于在预放电处的局部气体被快速加热产生的压力波。接近声源的信号频带将非常宽，但由于气体具有低通滤波器的效应，当信号从声源向外壳传播时，高频分量会大幅衰减。通常来说，检测预放电所产生的声信号一般在低于 100 kHz 的频率范围，但位于外壳上的声源将具有更宽的频带。从气体中的压力波到外壳的声耦合，信号的大小主要取决于气体压力和入射角。声学检测仪器的时间分辨率较低，不足以检测到每一次气体放电；声学传感器的响应速度较慢，无法区分单个放电。当前使用声学传感器的时间常数与外壳的机械响声一起导致检测中的脉冲重叠。对于预放电型的信号，其形状是复杂的。检测到的信号是外壳上的后向和前向行波的混合，从而产生具有 50/60 Hz 或 100/120 Hz 包络的连续信号。最终的峰值信号水平取决于外壳的长度以及传感器位置处在后行和前行波之间的重合和干涉的机率。信号水平在同一部分/气室内相当恒定，但一旦穿过法兰(绝缘子)，其通常会下降约 8 dB。

信噪比取决于传感器的类型和使用的信号调理方法。声学法可以忽略变电站中的电磁噪声影响。弹跳颗粒产生非常强的信号，当使用适当的传感器时，可以检测到毫米范围内的颗粒所产生的视在放电 5pC 范围内的明显放电，并且具有高信噪比。由于声信号在 GIS 中传播时会被吸收和衰减，导致灵敏度随着距离的增加而减小。

C.4 GIS 电磁和声学测量的灵敏度核查

C.4.1 概述

对于实际电荷，无法进行局部放电测量的校准。然而，可对电磁(UHF)和声学法的检测灵敏度进

行核查。对于 UHF 和声学法这两种方法,可使用相同的技术原理来核查其灵敏度。

C.4.2 UHF 测量的灵敏度核查

UHF 系统的灵敏度核查可确保 UHF 系统能够检测到 5 pC 及以上幅值视在放电量(根据 IEC 60270 测量)的 GIS 危险缺陷。该灵敏度核查流程应分两步进行。

- 第一步,在制造商工厂中母线的直线部分上进行测试,该母线包含两个临近的耦合器并连接到耦合电容器,利用 IEC 60270 常规法校准。一个具有危险尺寸的缺陷(自由金属颗粒或高压导体上的尖端突起物)应设置在第一个耦合器的对应位置,母线应通电;应调整电压幅值和缺陷,使该缺陷在施加电压下所测量的视在放电量为 5 pC。然后测量对应于该 5 pC 视在放电量的 UHF 信号。在第一个耦合器上注入一个脉冲,其上升时间足够短,产生信号与实际 5 pC 局部放电源的输出频谱相同,并调整其幅度,使得该脉冲信号与实际局部放电信号尽可能紧密匹配。应记录该人工脉冲的幅值,以便稍后在灵敏度核查的第二步中使用。
- 第二步,在 GIS 现场组装后,应核查耦合器的位置和局部放电测量系统的功能,以便于确定 UHF 系统可以检测到 GIS 中任何位置视在放电量为 5 pC 的缺陷。从前一段所述的工厂试验中获得的人工脉冲应逐一注入所有耦合器,并在相邻耦合器处测量 UHF 信号,从而验证 UHF 系统具有足够的灵敏度来检测整个 GIS 内部 5 pC 的放电。

C.4.3 声学测量的灵敏度核查

与 C.4.2 中描述的 UHF 法类似,声学测量的灵敏度核查旨在确认测量设备的正确功能,且也是通过两个步骤执行:

- 第一步,首先进行实验室测试以确定来自真实缺陷的信号频谱和幅值。使用相应的传感器和仪器记录根据 IEC 60270 校准的对应于来自实际局部放电源的 5 pC 视在放电水平的声学信号。此外,应测量检测信号的频谱。接下来,声学测量装置记录来自人工声信号发射器的信号。该信号可以由一个声学传感器(压电晶体)的反向使用方法(例如施加阶跃电压脉冲)下产生。使以这样的方式建立人工源的声信号频谱及其幅值应与来自真实局部放电缺陷的信号尽可能相似,然后该人工信号能用作灵敏度核查的参考信号。对于压电晶体,可以通过使用选择公认的传感器施加阶跃电压脉冲来实现,阶跃电压的幅度和上升时间调整至适合的值。
- 第二步,对于现场,测量设备的完整性和灵敏度核查可以使用从 C.4.2 中描述的实验室方法获得的人工声学信号源。应以与实验室相同的方式激励外壳,测量系统也应与实验室测试中使用的相同。

注:对于声学测量,通常会因移除和重新固定传感器而发生 3 dB 的灵敏度变化。另外,声波也是高度分散的。因此,这种测量方法仅适用于核查,而不适用于校准。

C.4.4 GIS 内部局部放电源的定位

现场开展 GIS 内部局部放电源定位,已被证实的情况如下:

- 绝缘介质的失效很大程度上取决于缺陷的类型及其在 GIS 内部的位置。
- 基于实践和物理原理能选择使用不同的方法。常用于 UHF 法的电气时差测量也适用于声学测量,是本领域最常用的方法。
- 基于不同传播模式和定向电磁耦合器之间的时间延迟方法已经被证明是不实用的。
- 一般分为时域法或频域法。

C.4.5 使用 UHF 法进行传播时间测量

局部放电源发出的暂态电脉冲沿 GIS 管道向各个方向传播(见图 C.1)。它到达位于局部放电源两

侧的内部耦合器。通过传播时间测量技术,基于到达两个耦合器波前时间的的时间差可以用来计算局部放电源的位置。两个耦合器观察到的时间差通常在数十纳秒(ns)的范围内,因此测量应使用具有足够高的采样率和输入带宽的数字示波器。利用这种技术,放电源可以定位在数十厘米的范围内。

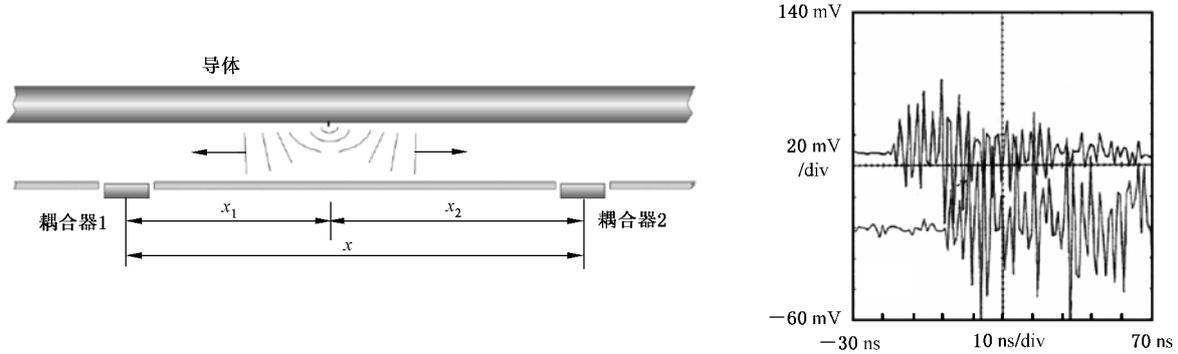


图 C.1 通过传播时间测量的缺陷定位

耦合器 1 和局部放电源之间的距离可以使用公式(C.1)进行计算:

$$x_1 = \frac{x - (x_2 - x_1)}{2} = \frac{x - v_c \Delta t}{2} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

v_c ——信号的传播速度:30 cm/ns;

Δt ——信号到达耦合器 2 和耦合器 1 的时间差值。

考虑传播路径参数的变化:例如电磁波穿过介电常数为 ϵ_r 的绝缘子,信号的传播速度将会减小,减小程度与 $(\epsilon_r)^{0.5}$ 成比例并由绝缘子厚度决定。

C.4.6 信号衰减分析

由于衰减、色散和共振现象,电磁波在 GIS 内传播时会衰减。如果准确地知道不同 GIS 组部件对信号衰减的影响,则能将其应用于局部放电定位。UHF 信号衰减的典型值:在直行母线管中为 2 dB/m,每个间隔气室则为 1 dB~5 dB。由于这些典型的数值不是很准确,因此该方法只能用于特定场合。

C.4.7 声学定位法

关于传播时间测量、寻找最高幅值等应用的说明如下:

- 传播时间测量:使用两个传感器,在示波器上观察来自传感器信号的到达时间。如果信号源位于传感器对之外,则信号来自它首先到达的一侧。如果信号源位于传感器对之间,则到达时间的差值小于传感器对之间的传播时间。

注:外壳中的声速与频率相关。

- 寻找最高幅值:只使用一个传感器,可以简单地寻找信号幅值的变化;当传感器靠近局部放电源时,信号通常会更强。当移动至下一个气室时(例如越过绝缘子或法兰),信号将显著下降。宜注意,当传感器远离信号源形成间距时,声信号的幅值衰减将反比于该间距的平方根。移动颗粒产生信号的幅度随时间变化,因此建议重复测量以获得最大幅值。观察信号上升时间:外壳中的声信号传播是高度色散的。弯曲波是最重要的波分量,其传播速度在 10 kHz~100 kHz 的频率范围内从低于约 1 000 m/s~3 000 m/s 变化。此外,在气体中声信号的吸收随频率增加,结果导致信号在信号源附近呈现非常陡的上升沿,随着传播远离信号源上升沿逐渐变缓。因此,信号上升沿越陡,距离信号源越近。

- 如果声学系统由使用诸如 UHF 耦合器检测的电信号触发,则能进行更精确的测量:
 - 对大多数常见的 GIS 局部放电缺陷敏感;检测自由移动颗粒的灵敏度远高于任何其他诊断方法的灵敏度,只要传感器安装在含有颗粒的同一气室(例如在法兰/绝缘子之间)。
 - GIS 中存在自由金属颗粒时,能估计颗粒缺陷的严重性(其跳跃高度、质量和长度)。
 - 利用该方法对运行中的 GIS 和实验室中电力变压器内部的局部放电源定位更有效。

C.5 旋转电机

额定电压 3.3 kV 及以上的定子绕组中由于多种原因会出现局部放电。当前大多数定子绕组中的绝缘材料是由用环氧树脂或聚酯树脂粘合在一起的云母纸带层制成。由于以下原因,局部放电可能发生在对地主绝缘的孔隙内:

- 制造过程中浸渍不良;
- 热老化导致树脂降解(产生气体);
- 电机负载的周期性变化,导致绝缘内存在剪切应力。

另外,局部放电可以发生在定子线棒和线圈表面上的原因有:

- 定子铁芯中线棒和线圈的松动;
- 改善电场的涂层制造不良;
- 定子铁芯外部的线棒或线圈过于靠近。

与大多数其他类型的设备不同,额定电压 3.3 kV 及以上的定子绕组在运行期间总是表现出连续的、低水平的局部放电,这是由于存在“微气隙”(制造过程的正常副产品)。由于使用云母,绕组绝缘被设计为能够耐受这种低水平的局部放电,且不会造成长期使用寿命风险。然而经验表明,如果局部放电水平较“高”或者在几年内持续增长,需要进行修理或更换绕组的谨慎处置。

通常定子中由于存在大量的局部放电源,定子绕组中每秒产生的局部放电脉冲可达数千个。这些局部放电脉冲具有数纳秒的上升时间。如 GB/T 20833.1 中所述,这些电流脉冲通过定子槽中定义明确的瞬态阻抗以及定子端绕组中复杂的电感-电容网络。因此局部放电脉冲会激发许多谐振模式,使得局部放电电流从局部放电源到经常测量局部放电的电机端子的传输非常复杂。局部放电电流脉冲在绕组中传播时的衰减和色散取决于许多因素,如端部绕组长度、端部绕组之间的电容、槽导电涂层的电阻率、绕组连接等。

定子绕组中的大多数离线局部放电测试是根据 GB/T 20833.1 在低频范围内完成,以最大限度地减少局部放电脉冲通过定子绕组后的衰减。定子绕组的大多数在线局部放电测试是在 VHF 范围或更高频率范围内进行的,以降低由于电气干扰引起错误指示的风险(见 IEC TS 60034-27-2)。在旋转电机中,有时使用 40 kHz 定向麦克风的声学法来定位定子绕组内的表面局部放电位置。

用于旋转电机定子绕组的电磁传感器,最常见的 VHF 传感器是电容传感器。通常它们用在 30 MHz~300 MHz 范围,并安装在电机的高压端子上。在大多数情况下,每一相使用两个电容传感器来确定脉冲的发源方向。采用这种方式能够利用脉冲到达两个传感器的相对时间将定子绕组的局部放电与噪声区分开。另外,与电机端子相距一定距离发生的或从转子绕组辐射到定子绕组的噪声,比局部放电传感器附近的局部放电具有更长的脉冲上升时间(更低的频率成分)。因此,VHF 范围内的测量允许采用基于脉冲到达时间以及脉冲波形来进行噪声辨别。

有时定向电磁耦合器作为另一种 VHF 传感器用于旋转电机,被称为定子槽耦合器。它安装于工作在高压状态线棒的定子槽中(此处最易发生局部放电)。耦合器检测到定子槽中的局部放电是持续时间 < 6 ns 的非振荡脉冲。相对应的,被检测到的噪声或来自槽外部的局部放电是宽度 > 8 ns 的振荡型脉冲。因此,这种类型的局部放电传感器具有非常强的抗干扰性,但只能可靠地检测安装有这种传感器的定子槽中的局部放电。

通常将持续时间较短(< 10 ns 宽)的脉冲注入电机端子来进行性能核查。最好使用内部阻抗小于

几欧姆的脉冲发生器,并确保所有信号线和接地引线长度 $<50\text{ cm}$ 。检测到的信号幅值宜记录在示波器上。对于定子绕组上的所有局部放电传感器,检测到的脉冲幅值应大致相同。通常灵敏度核查无法测试完整的定子绕组。这是因为绕组的电感-电容分布式阻抗特性,导致绕组内存在非常复杂的阻抗和频率响应,使得 pC 级的校准变得困难并且高度依赖于绕组特性和局部放电传感器的频率范围(见 GB/T 20833.1)。

C.6 变压器

C.6.1 电磁和声学测量变压器局部放电的物理背景

变压器油中的局部放电信号,除了可测量的电脉冲之外,还包含超声波(20 kHz~1 MHz)和 UHF 电磁波(300 MHz~3 GHz)。因此,特别是对于现场/在线局部放电测量,电磁或声学测量是可行的、有帮助且有优势的。在图 C.2 中,粗略地说明了在变压器上进行局部放电的检测过程的基本物理原理(还有其他部位检测未在图中说明)。

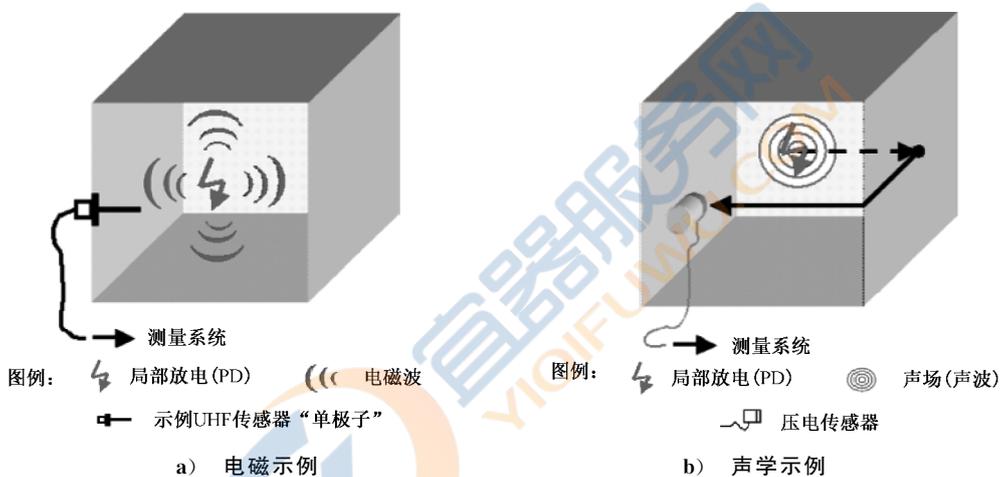


图 C.2 油/纸绝缘变压器中局部放电电磁和声学检测示例

C.6.2 变压器中局部放电的 UHF 信号

在 UHF 工况下,局部放电发射的电磁波可能会在箱体中发生几次反射,最容易通过安装在油阀上的传感器检测获取。在变压器上使用适当屏蔽设施,得到几乎完全封闭的法拉第笼(不包括套管的介质开口),因此可有效地抑制外部干扰。UHF 电磁波的传播速度取决于得到的 ϵ_r ,估计约为 $2/3 \times c_0$ 或 $2 \times 10^8\text{ m/s}$ (c_0 表示光速)。200 MHz~2 GHz 是较为合理的检测频带。

C.6.3 变压器中局部放电的声学信号

局部放电声学信号作为声场辐射,理想情况下,以球形压力(纵向)波的形式传播,直到到达变压器外壳[图 C.2 b)中虚线],到达变压器外壳后会产生更复杂的模式和传播路径[图 C.2 b)中实线],显示了可能的结构传播路径,例如对于没有直接安装在局部放电源附近的传感器会存在不同的传播路径]。

绝缘材料(例如固体绝缘部件或油)基本上具有低通特性,并且声信号的衰减增加与频率的平方 f^2 成正比。因此,局部放电声学测量实际可用的频率范围,由声波通过材料时的过度衰减决定了其上限,由干扰例如所谓的铁心噪声等决定了其下限。

安装在变压器外壳上的压电传感器的工作频率范围在 10 kHz~300 kHz 之间。变压器油工作温度在 50 °C 和 80 °C 之间时,油中声速变化范围大约为 1 240 m/s~1 300 m/s。

C.6.4 液体绝缘变压器/电抗器中局部放电源的空间定位

变压器中局部放电源的定位分为两个主要工作。首先是获取尽可能敏感同时又可区分任何潜在干扰的局部放电信号。其次,进行故障点的确定,即局部放电源的定位。

通常使用多个测量信号的传播时间来计算信号源位置。这种方法通常被称为三角定位法(见图 C.3)。

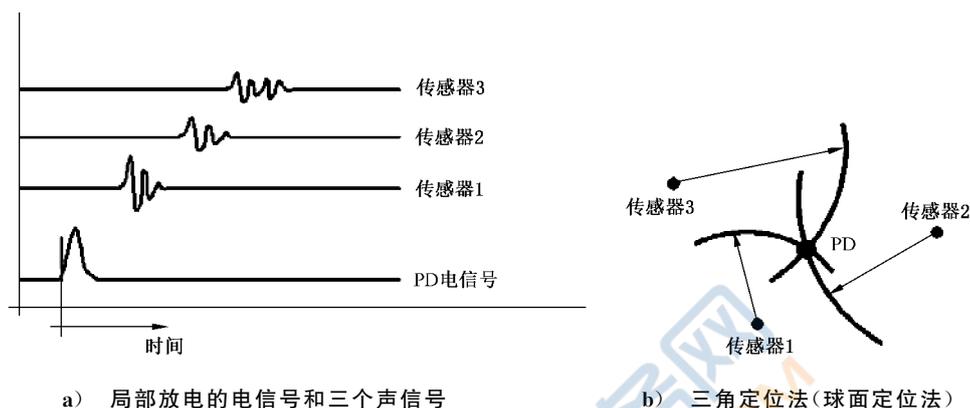


图 C.3 基于声-电信号联合的变压器/电抗器的经典传播时间局部放电定位

在变压器/电抗器内,局部放电能视为在均匀介质中辐射声波和电磁波的点源(例如使用平均声速)。使用适当的非线性观测方程是最简单的方法,其特征是声学传感器为圆心的球面方程在局部放电源点相交[图 C.3 b)]。这个方法需要一个定义局部放电发生瞬间的信号,其在数学上对应于绝对时间来测量。

基于到达时间的几何局部放电定位主要分为:

- 仅使用局部放电声学信号的全声学局部放电定位;
- 使用局部放电声学信号结合局部放电电磁或电信号的声学—电磁联合局部放电定位;
- 仅使用变压器安装的 UHF 传感器上的多个局部放电电磁信号的全电磁局部放电定位。

C.7 电缆/附件

挤包电缆的生产质量由制造商依据相关标准进行常规试验确定。现场安装附件有引入缺陷的一定风险。小型颗粒、灰尘和潮气露珠等都会在关键的附件位置上导致电气缺陷,并可能会导致电缆系统的寿命缩短甚至失效。直接在附件上安装合适的传感器,能在安装后的绝缘测试期间,以及之后设备运行期间,测量局部放电流脉冲来获得局部放电信息。

相比于电缆末端的常规局部放电检测,电缆系统越长,直接在附件处进行局部放电检测的优点越明显。局部放电脉冲沿着电缆传播时会严重衰减。局部放电快脉冲波形的上升沿约为几纳秒,因此具有高达 GHz 范围的频谱。随着电缆长度的增加,电缆自身作为低通滤波器其截止频率逐渐降低。积分范围下限频率越高,测得的视在放电量的衰减就越大。高频分量的大幅衰减,使得脉冲前沿更加平滑。例如,对于带宽在 50 MHz 以上的检测器,在局部放电脉冲沿着 220 kV 电缆行进 500 m 之后,检测到的能量仅约为其初始频谱能量的 10%。因此,对于长电缆(>500 m),为了获得更好的测量精度并覆盖更长的电缆长度,局部放电的检测频率宜更低。在短电缆或仅监测局部区域的情况下,可使用更高的频率得到更高的检测灵敏度并实现更好的降噪。

高频信号的衰减随着电缆长度的增加而变大,因此挤包电缆系统末端有效的局部放电测量和定位被限制在大约 2 km 长度范围内。当使用直接安装在电缆附件处的传感器进行局部放电检测时,高频信号的衰减可以达到预期的降噪效果。无论选取怎样的传感器,局部放电测量宜在所有电缆附件上同

时进行,以尽早发现所有的局部放电。通过利用光纤进行通信和同步的分布式测量系统,可以对电缆系统的所有附件进行局部放电的同步测量。

可以使用不同种类的局部放电传感器直接在附件上检测局部放电。它们是基于电容式的(例如同轴箔电极)、电感式的(例如罗哥夫斯基线圈,铁氧体 HF 变送器)或电磁场耦合式的(例如定向耦合传感器,DCS)。为了最大限度地提高信噪比,这些传感器被设计用于 HF 或 UHF 检测。

电容式局部放电传感器是一种电场传感器,可以很容易地内嵌到附件内部。一般情况下,应力锥电极等附件的构成元件能用作传感器,这个结构的高压性能不受影响,尤其是在快速瞬态过电压的情况下。电容性电流通常由电力电缆的半导电层分流,使之产生一阶高通特性。典型电容式传感器的上限截止频率约为 10 MHz,并且通常每个接头仅能连接一个电容式传感器,因此无法通过到达时间测量实现接头内部局部放电缺陷的精确定位。精确的定位不仅需要第二个传感器,还需要足够的测量频率带宽以提高精度。

为了实现附件内部局部放电缺陷的精确定位,需要双传感器进行 UHF 局部放电检测。沿着电缆传播的高频脉冲在电容传感器的工作频率范围内严重衰减,因此通过评估从局部放电源到测量点的脉冲幅度的减小程度以及观测脉冲的变形状况,可以可靠地进行局部放电源的鉴别。以这种方式,通过使用测量装置本身作为信号滤波器,能准确地区分由有缺陷的接头引起的局部放电信号和外部干扰(例如电晕)。

当使用分布式局部放电传感器开展同步局部放电检测时,准确地测量每个传感器信号的到达时间能够确定脉冲的传播方向,并且可以可靠地区分局部放电脉冲源。

如果在接头处只安装一个电容式传感器,是无法进行现场校准的。由于电容式传感器是电缆附件的集成组件,因此改装电容式传感器几乎是不可能的。

电感式局部放电传感器对磁场较为敏感。如果没有内置式局部放电传感器,使用这类传感器具有优势。在这种情况下,安装在屏蔽层或交叉互联(CB)链路上的电感式传感器为电缆附件局部放电的灵敏检测提供了方便的方式。直埋系统的交叉互联箱也是可以利用的。

DCS 是一种无源 RF 器件,它根据脉冲传播方向将能量耦合到不同的输出端口。使用特殊设计的感应电极和两个同轴输出端口,DCS 即可应用于高压电缆的局部放电检测。由于传感电极完全屏蔽,使得对外部干扰免疫。

DCS 有两个基本特性参数,其中耦合衰减对应传感器的灵敏度,方向性决定了传感器通过两个输出的幅值关系来区分不同脉冲传播方向的能力。

不同耦合配置的逻辑组合可以清楚地对信号的源进行分类,从而在附件上将外部干扰与局部放电区分开来。为了实现高灵敏度以及高方向性,通常将传感器调节到符合高压电缆的特性并直接安装在外半导电层。

虽然 DCS 具有出色的固有能力和区分外部和内部(附件)局部放电,但实际应用却很少。与其他方案相比,DCS 需要针对适应电缆而特殊设计,特别是外半导体层的 UHF 特性(需要 HF 专家)。DCS 信号处理(每个接头 4 个通道,UHF)比单通道信号处理更昂贵。此外,根据现场接头处的电容式或电感式传感器检测到的噪声水平,无需更复杂(且更昂贵)的局部放电传感器。DCS 适用于接头和 GIS 终端,但不适用于室外终端,因为第二个 DCS 无法应用。但室外终端噪声水平非常高,最需要做到区分内部和外部局部放电。当确实需要对户外终端进行检测时,DCS 无法适用,可使用非定向 UHF 传感器。

运行电压下在电缆附件外部应用 UHF 传感器也可以实现几个 pC 的局部放电检测灵敏度。

如果在电缆终端上安装 UHF 传感器,每一个传感器都嵌入基板和地之间的支柱绝缘子中。传感器完全封闭在注塑树脂的外壳中,由于支柱绝缘子可承受高达 55 °C 的温度,因此适合户外使用。在紧固结合的护套端部,传感器与接地并联。在开路端,带有内部电容的传感器可用于阻断感应电流。

通常,局部放电脉冲的衰减是频率的函数。因此,在 UHF 频段(300 MHz~3 000 MHz)内检测 PD 仅会存在少量已知的干扰,且具有距离选择性只有几米的优点。这可以完美地用于集中设备的诊断,例

如电缆终端。

由于电缆的对称配置,每个局部放电会产生两个相同的电流脉冲。每个脉冲的电荷量等于初始整个脉冲的一半。两个脉冲在远离局部放电源的两个方向上传播。局部放电测量期间,脉冲在电缆远端的开路处会发生全反射。因此,在连接局部放电耦合单元电缆的近端处,不仅能检测到直接脉冲而且还能检测到反射脉冲。这种现象被用于使用时域反射法(TDR)定位局部放电。

局部放电脉冲在接头处也会发生部分反射,这是由于接头的设计和材料导致波阻抗的轻微变化。当在长三相电缆系统采用CB方式时,局部放电脉冲能在不同相之间发生改变。

包含位于电缆附件的局部放电采集单元和所有设备位置的局部放电同步测量部分组成的局部放电测量系统的性能核查,能按照以下步骤进行。

a) 第一步——检查测量系统的功能就绪情况

应检查测量系统(所有局部放电传感器、采集单元和测量通道)的功能就绪情况。可用每个局部放电测量单元的内部测试信号发生器进行验证。

b) 第二步——检查局部放电测量系统的同步状况

对于此步,应通过电缆室外终端输入适当大小的校准脉冲。局部放电测量单元应以同步方式连接。校准信号及其下一个附件的部分反射信号应明确区别于所有连接单元的背景噪声水平。

c) 第三步——局部放电脉冲衰减、阻尼和色散的测定

应确定以下参数:

- 沿电缆线的局部放电脉冲衰减、阻尼和色散;
- 电缆线中校准信号的速度;
- 所有局部放电测量单元的最佳频率范围(具有最高的信噪比);
- 每个选定频率范围的局部放电检测路径分频系数。

d) 第四步——电晕放电下测量系统的最终功能核查“线路测试”

如果外部电压源可用(例如在安装测试后),宜执行所谓的“线路测试”。铜线应连接到高压并指向地。应施加高压以在电线上产生电晕放电。局部放电单元应检测到模拟的放电现象,并且应在选择测量频率范围时观察信号的衰减。“线路测试”演示了所有局部放电单元和测量通道的功能。电晕局部放电信号的频率相关衰减演示了局部放电测量在各个附件上的选择性。试验设置的干扰对上述测试应不起任何作用。

参 考 文 献

- [1] GB/T 22566—2017 电气绝缘材料和系统 重复电压冲击下电气耐久性评定的通用方法
- [2] IEC TS 60034-27-2 Rotating electrical machines—Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines
- [3] IEC 60060-2 High-voltage test techniques—Part 2: Measuring systems
- [4] IEC TS 61934 Electrical insulating materials and systems—Electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses
- [5] ASTM E976 Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response
- [6] ASTM E1106 Standard Test Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors
- [7] CIGRE Joint Task Force 15/33.03.05: Partial Discharge Detection System for GIS: Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method; Electra No.183, April 1999

