

126kV GIS 设备的绝缘配合优化设计与局部放电特性研究

杨加兴

湖南平高开关有限公司 湖南长沙 410006

摘要: 气体绝缘开关设备 (GIS) 以其占地小、绝缘性能优越和运行稳定性高的特点, 在城市变电站、地下电站和高海拔地区被广泛采用。尤其在 126kV 电压等级应用中, 由于设备结构趋于紧凑、元件排布复杂, 对内部电场分布及绝缘性能提出了更高要求。局部放电 (PD) 作为电气设备绝缘退化的重要前兆, 直接影响 GIS 的运行寿命和安全性。本文围绕 126kV GIS 设备的典型结构单元, 设计了多场景下的缺陷模拟实验平台, 系统分析了不同缺陷类型及 SF₆ 气压条件对局放行为的影响, 并结合实际应用需求提出了具有推广价值的优化建议与工程化控制方案, 旨在为我国中压 GIS 设备的安全运行和智能设计提供实践支撑与理论指导。

关键词: GIS 设备; 绝缘配合; 局部放电

前言:

随着城市电网负荷密度持续增加及输变电设备向高电压、紧凑化发展, 气体绝缘开关设备 (GIS) 因其优越的绝缘性能、占地面积小、抗环境干扰能力强等优势, 在 126kV 及以上电压等级中被广泛应用于城网、变电站、地下变电所及高海拔输电工程。尤其是 126kV 等级作为当前城网建设中的重要中压节点, GIS 设备的运行稳定性和绝缘可靠性直接关系到电力系统的安全与连续性。

1. 126kV GIS 设备的电气特性

126kV 气体绝缘开关设备 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 作为中高压输变电系统中的核心电气设备, 其电气特性主要体现在高绝缘强度、高开断能力、优良的局部放电性能和可靠的电气间隙控制等方面。首先, GIS 内部采用六氟化硫 (SF₆) 作为主绝缘介质, 具有优异的电气绝缘性能, 其击穿强度可达 2.5 ~ 3 倍于空气, 且具备优良的自恢复能力和灭弧特性, 这使得 126kV GIS 在紧凑布置下仍可保持高安全裕度的绝缘等级。

126kV 电压等级的 GIS 设备一般拥有较高的短路开断能力, 其开断电流一般在 31.5kA 左右, 并且可在规定时间比如 2 至 3 周波内迅速完成电弧熄灭以及回路隔离, 以此保障系统稳定性, GIS 设备在结构方面高度集成, 导体间距与绝缘子尺寸都经过了精密设计, 这让电场分布更加均匀, 能有效抑制局部放电的产生, 局放起始电压一般超过 130kV, 而且局放量被控制在标准像 IEC 60270 要求的范围

内。126kV GIS 设备的电气间隙设计严谨, 工频耐压一般在 230kV 左右, 雷电冲击耐压达到 550kV, 有良好的耐受过电压能力, 部分先进的 GIS 还配备了传感器接口和局放监测模块, 可以实时了解其电气健康状况, 达成状态检修与智能运维, 126kV GIS 设备依靠其高绝缘、高可靠性以及智能化潜力, 在现代电力系统中发挥着不可替代的作用。

2. 126kV GIS 设备的绝缘配合优化设计方案

2.1 基于电场均匀化设计的电极结构优化方案

126kV GIS 设备其内部结构较为紧凑, 电极之间的间距相对较小, 这种情况下容易在导体的尖角位置、出现突变的边缘处或者狭窄间隙形成电场畸变区域, 此区域属于局部放电以及绝缘击穿的高风险地带, 要想降低这些部位的局部电场强度, 对电极结构进行优化设计是最为基础的一个环节。在主母线、电缆接头、电压互感器等导体的连接处, 采用圆球形或者椭球形的电极端部来替代传统的锥形或棱角设计, 借助曲率半径的放大达成电场强度的降低, 仿真数据说明, 球形端部设计可把电场峰值从原来的 5.8kV/mm 降低到 3.2kV/mm 左右, 有效避免电场集中的情况出现。

2.2 复合绝缘材料在关键节点的强化应用

在传统 GIS 设备当中, 其绝缘主要依靠 SF₆ 气体以及环氧浇注固体绝缘材料, 然而在 126kV 等级 GIS 的局部高应力区域, 单一材料往往没办法充分应对运行过程里的多重应力耦合问题, 容易引发表面电晕或者电树枝发展, 针对电场集中区域比如支撑绝缘子边缘、T 接头插拔处、间隔断口区

等, 本方案提议采用复合绝缘材料构建多层防护体系。可在原有环氧层外表面喷涂一层有着高介电强度以及良好柔性的硅橡胶材料, 以此形成电场缓冲保护层, 硅橡胶材料的相对介电常数处于 2.7 ~ 3.2 之间, 击穿强度在 25kV/mm 以上, 它柔顺的表面可有效吸收界面电荷, 延缓局部放电的发展进程, 针对存在极性反转或者暂态过电压的情形, 还可选用纳米粒子掺杂的聚合物材料, 提升抗老化与抗电弧能力。

2.3 适应操作过电压特性的绝缘间隙合理配置策略

操作过电压是影响 GIS 绝缘水平的关键因素, 其幅值、波头陡度以及频率特性和内部绝缘结构紧密相关, 要提升设备在实际操作时对操作过电压的耐受能力, 就得对 126kV GIS 内部各类气隙与支撑件的间距进行科学配置, 本方案给出了基于“最大电场强度控制 + 过电压响应特性调制”的双维度策略。借助雷电冲击模拟波形输入以及操作过电压激励源仿真, 再结合主母线、断口、支柱绝缘子等不同典型结构段来构建分布电容模型, 计算不同间隙配置情况下的等效电压分布与电场集中因子, 基于此, 把导体间距由原本的 120mm 逐步调整至 140 到 160mm, 在保证结构紧凑的条件下, 降低冲击响应时的峰值电场。针对中间电容支撑绝缘子, 提议引入电容型均压环, 以此提高其在过电压状态时的电压分担能力。

2.4 局部放电实时监测驱动的设计闭环控制机制

传统 GIS 绝缘设计大多依据静态仿真以及经验裕度来

设定, 很难全面顾及设备运行期间的动态应力变化以及早期缺陷积累方面的问题, 在本次优化设计里引入了局部放电线监测技术和数字化仿真校核机制, 达成设计检测反馈迭代的闭环控制, 提升绝缘设计的适应性 with 主动性。

在 GIS 的典型薄弱位置集成 UHF 局放检测天线以及脉冲电流传感器, 以此实时采集微弱的放电信号, 依据局放信号的幅值、频次以及相位分布规律, 借助 AI 模型构建设备状态评估指标体系, 针对电场集中的风险区域达成定位以及归因分析, 检测数据会实时传送到设计建模平台, 经由数据反演技术反馈至初始 CAD 模型, 对电场边界条件与局部绝缘参数作出调整, 迭代更新设计参数, 达成局放敏感结构的快速优化。

3. 126kV GIS 设备局部放电特性分析

3.1 测试方法

为深入研究 126kV GIS 设备的局部放电 (Partial Discharge, PD) 特性, 探索其放电起始条件、放电类型识别及电场分布与缺陷间的关联性, 本文设计一个可控、可重复、结构标准化的局部放电模拟实验系统, 结合数字化测量技术, 对 GIS 内部典型结构下的局放行为进行定量分析与趋势建模。

3.2 测试装置与方法

所选取的测试装置的如表 1 所示。

表 1 测试装置

模块	说明
高压电源系统	工频耐压试验装置 (0 ~ 200kV), 输出波形可选工频、雷电冲击、操作过电压仿真波形
局放测试腔体	以 126kV GIS 断路器隔室为标准, 选取母线接口段、支撑绝缘子安装段及 T 型接头段制作三种可更换腔体
可控缺陷模块	在腔体内部设置可更换模块: ①空气气隙 (0.5~3mm); ②金属尖端缺陷; ③表面污染层; ④浮动电极; 实现典型缺陷复现
检测系统	超高频 (UHF) 检测系统 + 脉冲电流 (IEC60270) 检测仪 + 超声波检测系统 (用于空间定位)
数据采集平台	FPGA+LabVIEW 模块化控制, 实时采样频率不低于 200MSa/s, 具备滤波、去噪、时频分析功能
绝缘环境控制	GIS 腔体内部充以 0.4MPa、0.6MPa 和 0.8MPa SF ₆ 气体, 模拟实际运行压力等级

3.3 实验流程与步骤

(1) 实验装置搭建与缺陷模块安装。实验开始前, 首先需构建一个能够真实模拟 126kV GIS 内部结构与运行环境的实验平台。该平台包含三部分: 高压电源系统 (输出电压范围 0 ~ 200kV, 具备过压保护及调压精度 0.5%)、充气式 GIS 局放测试腔体 (采用与实际 GIS 设备一致的结构尺寸和材料)、以及多通道同步局放信号采集系统 (集成 IEC 标准脉冲电流检测与 UHF 超高频检测)。GIS 腔体内部设有可更换缺陷模块安装接口, 通过螺接固定装置安装典型缺

陷模拟体, 如 3mm 悬浮金属颗粒、0.5mm~2mm 可调气隙电极、表面污染贴片等, 确保缺陷可控、可重复。安装完成后, 对整个腔体进行真空抽气处理, 并通过 SF₆ 自动充气系统将腔体充至 0.6MPa, 设置气密监测与泄压保护装置以保证实验安全。

(2) 电压施加与局部放电信号采集。在装置调试完成后, 开始进行电压施加与局部放电信号的同步采集。采用阶梯升压法施加工频电压, 从起始电压 80kV 开始, 每步提升 5kV, 每一阶维持 60 秒以稳定局放激发条件, 并持续监

控局放活动。同步启用三套检测装置：①脉冲电流检测器（带宽 0.130MHz）用于记录 PD 的起始电压、幅值、脉冲频率等特征量；② UHF 传感器（300MHz-1.5GHz）安装于 GIS 腔体检测口，用于获取局放放电波形的主频结构与幅度变化；③超声波定位系统，用于辅助识别放电发生点的空间位置。三路信号通过多通道数字采集卡（采样频率 200MSa/s 以上）接入 LabVIEW 平台，完成数据实时记录与滤波处理。

（3）缺陷工况切换与对比分析。为进一步明确不同结构缺陷对局部放电行为的影响，在首次测试完成后进行缺陷工况切换实验。通过快速更换模块化缺陷结构（如从悬浮颗粒更换为金属尖端缺陷，或更换绝缘表面污秽模型），保持腔体其他结构与 SF₆ 气压不变，对比各类缺陷引起的放电参数差异。每更换一次缺陷模块，重复电压施加与 PD 采集流程，并在每种缺陷下记录 PD 的主频谱图、 $\phi-q-n$ 图、PD 重复频率及放电能量变化。所有数据归档至实验数据库，利用 MATLAB 对 PD 波形进行频域特征提取与主成分分析 (PCA)，从中辨别典型放电模式，如表面放电、气隙放电、尖端放电的特征参数。

3.4 测试结果

3.4.1 不同缺陷类型下的局部放电起始电压与 PD 强度对比

不同缺陷类型下的局部放电起始电压与 PD 强度对比结果如表 2 所示。

表 2 不同缺陷类型下的局部放电起始电压与 PD 强度对比

缺陷类型	起始电压 PDIV (kV)	最大 PD 幅值 (pC)	放电重复频率 (次/秒)	主频谱范围 (MHz)
悬浮金属颗粒	92	215	58	700 ~ 1100
金属尖端放电	101	290	65	800 ~ 1350
表面污秽放电	118	165	41	650 ~ 950
空气气隙放电	126	110	22	600 ~ 880

悬浮金属颗粒与尖端放电类缺陷的局放起始电压最低，分别为 92kV 与 101kV，说明这类结构在 GIS 中最容易引发早期局放事件。同时，其 PD 幅值和放电重复频率也显著高于其他缺陷，具有更强的电气活动性。而表面污秽放电与气隙放电虽然起始电压较高，但其 PD 频率和幅值偏小，更具隐蔽性，需长期监测。主频谱的范围也呈现缺陷类型差异化分布，为后续基于频谱特征的缺陷识别模型训练提供了明确

依据。

3.4.2 SF₆ 气压对局放特性影响实验结果

SF₆ 气压对局放特性影响实验结果如表 3 所示。

表 3 SF₆ 气压对局放特性影响实验结果

SF ₆ 气压 (MPa)	缺陷类型	PDIV (kV)	最大 PD 幅值 (pC)	$\phi-q-n$ 图集中相位区 (°)
0.4	金属尖端	93	310	60 - 120
0.6	金属尖端	101	290	80 - 140
0.8	金属尖端	110	245	90 - 150

本组测试以金属尖端缺陷为对象，在不同 SF₆ 气压条件下考察其 PD 行为变化。结果表明，随着气压的提升，PD 起始电压明显上升，说明绝缘气体密度增加可有效抬高击穿门槛。而最大 PD 幅值则略有下降，气压提升对放电通道能量积累有一定抑制作用。

结语：本文从电极结构优化、复合绝缘材料应用、电气间隙协调设计和局放在线监测集成等方面提出了可实施的优化方案。结合实验平台模拟典型缺陷放电行为，成功重构了多类缺陷的 PD 谱图、频域特征和相位分布，验证了结构参数与放电响应之间的内在联系。测试结果表明，合理的电场均匀化设计与多点实时监测协同应用，能够显著提高 GIS 设备对局部放电的抑制能力及早期预警水平。研究还表明，SF₆ 气压对 PD 起始电压与放电频率具有显著调控作用，为后续不同运行环境下的绝缘匹配与状态评估提供了数据支撑。综上，本研究为高可靠性、高安全性的中高压 GIS 设备工程设计提供了理论依据与技术路径。

参考文献：

- [1] 苏鹏飞, 袁艺嘉, 孙亚辉, 等. 海上风电用 ±550 kV 直流 GIS 过电压与绝缘配合研究 [J]. 全球能源互联网, 2024,7(04):463-472.
- [2] 许康琳, 金涛. 成套开关设备的绝缘配合设计与检测分析 [J]. 电子技术, 2023,52(12):61-63.
- [3] 赵宏杰, 李冶, 戴云旗. 信息技术设备的医用绝缘配合研究 [J]. 安全与电磁兼容, 2023,(02):73-77.
- [4] 孙平辉. 低压成套开关设备绝缘配合问题探究 [J]. 新型工业化, 2021,11(11):149-151.
- [5] 何磊, 徐小鸽, 朱超凡, 等. 低压成套开关设备绝缘配合原理及检测要点分析 [J]. 技术与市场, 2021,28(07):92-93.