

GIS 设备运行中 SF6 气体泄漏检测与维护管理实践

曹志光

国网西藏电力有限公司超高压分公司 西藏 拉萨 850000

【摘要】：气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）凭借占地面积小、绝缘性能优、运行可靠性高的优势，在高压及超高压输变电工程中广泛应用。SF6 气体作为 GIS 设备核心的绝缘与灭弧介质，其密封性直接决定设备运行安全与电网稳定。本文结合现场运维实践，分析 GIS 设备 SF6 气体泄漏的主要成因与危害，梳理各类泄漏检测方法的适用场景与操作要点，构建全流程维护管理体系，提出针对性的泄漏防控与整改措施，为电力运维人员开展 GIS 设备日常巡检、故障处置提供实操参考，助力提升设备长周期稳定运行水平。

【关键词】：GIS 设备；SF6 气体；泄漏检测；维护管理；运维实践

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.032

1 引言

随着我国电网建设持续推进，GIS 设备在城市变电站、枢纽变电站的应用占比不断提升，成为高压输配电系统的核心装备。SF6 气体具备优异的绝缘性能和灭弧性能，在 GIS 设备内部以一定压力充注，实现各电气元件的绝缘隔离与故障灭弧，是保障设备正常运行的关键。但在长期运行过程中，受设备制造工艺、安装质量、环境因素及运维操作等影响，SF6 气体泄漏问题频发，不仅会降低设备内部气体压力，削弱绝缘与灭弧能力，还可能引发设备闭锁、绝缘击穿等故障，甚至威胁现场运维人员人身安全，同时对环境造成潜在影响。当前，GIS 设备气室结构复杂，泄漏点多隐匿于法兰接口、密封面、阀门接头等隐蔽部位，常规巡检难以快速精准定位。部分运维单位存在检测手段单一、维护流程不规范、隐患防控不到位等问题，导致微泄漏逐步发展为严重泄漏，引发电网停运事故。因此，建立科学高效的 SF6 气体泄漏检测体系，完善全周期维护管理机制，是保障 GIS 设备安全稳定运行的核心工作。本文结合多年现场运维经验，系统梳理泄漏检测技术与维护管理要点，形成可落地的实践方案。

2 GIS 设备 SF6 气体泄漏成因及危害分析

2.1 主要泄漏成因

结合现场故障处置与设备检修数据，GIS 设备 SF6 气体泄漏主要集中在设备制造、安装调试、运行运维三个阶段，具体成因可分为以下四类。

2.2.1 制造工艺缺陷

设备壳体铸造过程中存在砂眼、气孔，焊缝焊接不密实、存在裂纹，盆式绝缘子浇筑工艺不达标，出现内部缝隙或开裂，均会形成先天泄漏通道。部分厂家密封件选材不合格，密封圈弹性不足、耐老化性能差，出厂前气密性试验检测疏漏，导致带缺陷设备投运。

2.2.2 现场安装时，法兰密封面清理不到位

残留灰尘、金属碎屑或杂质，导致密封面贴合不紧密；密

封圈安装错位、未完全嵌入密封槽，出现切圈、挤压变形问题；法兰螺栓紧固力矩不均、未按对角顺序紧固，造成密封面受力失衡，形成间隙泄漏。此外，设备吊装、运输过程中产生的磕碰损伤，会加剧密封部位破损，引发泄漏。

2.2.3 运行环境与老化影响

GIS 设备多运行于室内或室外露天环境，长期受温度变化、湿度、振动及腐蚀介质影响，密封圈逐步老化、弹性失效，密封面出现锈蚀、变形；设备运行过程中的电磁振动与机械操作振动，会导致螺栓松动、密封部位位移，进一步扩大泄漏间隙。

2.2.4 运维操作不当

日常补气、检修过程中，阀门操作不规范，接头密封部位受损；密度继电器、压力表等仪表更换时，气路接口密封处理不到位；局部放电、电弧故障会损伤内部绝缘部件与密封结构，间接引发气体泄漏。

2.2 泄漏带来的核心危害

SF6 气体泄漏对 GIS 设备运行、电网安全及人员健康均存在显著威胁。其一，气体压力下降会直接降低绝缘强度与灭弧能力，当压力低于报警值时，设备会触发闭锁保护，无法正常分合闸，影响供电可靠性；压力持续降低至临界值，会引发绝缘击穿、短路故障，造成大面积停电。其二，SF6 气体在电弧高温作用下会分解产生有毒有害气体，泄漏后积聚在室内低洼区域，运维人员近距离接触易引发呼吸道不适，危害身体健康。其三，SF6 属于温室效应潜能值较高的气体，大量泄漏会加剧温室效应，不符合绿色电网建设要求。

3 GIS 设备 SF6 气体泄漏检测方法与实践应用

针对 GIS 设备泄漏点隐蔽、微泄漏难发现的特点，需结合设备运行状态，采用分级检测策略，先通过在线监测与日常巡检排查异常，再用精准检测工具定位泄漏点，各类检测方法的适用场景、操作要点及优缺点对比详见下表。

表1 各类检测方法的适用场景、操作要点及优缺点对比

检测方法	适用场景	操作核心要点	优势	局限性
压力监测法	日常巡检、在线监测	定期记录各气室 SF6 气体压力, 对比额定压力与历史数据, 结合温度修正压力值, 判断是否存在泄漏	操作简单、可实时监测、无需设备停电	仅能判断整体泄漏, 无法定位具体泄漏点
皂液检漏法	疑似泄漏点初步排查、停电检修	将配制好的皂液均匀涂抹在法兰、阀门、接头等部位, 观察是否产生持续气泡	成本低、直观易操作、适合显性泄漏点排查	检测灵敏度低, 微泄漏无法检出, 受环境风速影响大
高精度检漏仪检测法	微泄漏精准定位、日常精细化巡检	采用灵敏度不低于 $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的 SF6 专用检漏仪, 探头沿密封部位缓慢移动, 根据报警信号锁定泄漏点	灵敏度高、可精准定位微泄漏点、无需大范围停电	检测时需避开干扰气体, 探头需保持清洁
红外成像检漏法	大面积快速排查、室内 GIS 设备	通过红外成像仪捕捉 SF6 气体吸收特定红外波段的图像, 直观显示气体扩散路径与泄漏点	检测范围广、速度快、可视化程度高	设备成本较高, 受环境温度、气流影响较大
局部包扎定量检测法	泄漏量精准测算、验收检测	用密封薄膜包扎疑似泄漏部位, 静置规定时间后, 检测包扎区域内气体浓度, 计算年漏气率	可定量判断泄漏程度, 结果精准, 符合行业标准	操作繁琐、耗时较长, 需局部包扎处理

3.1 分级检测实操流程

现场运维中, 遵循“先整体后局部、先定性后定量”的原则开展泄漏检测。第一步, 日常巡检通过密度继电器、在线监测系统, 实时监控各气室气体压力, 每周记录压力数据并做温度修正, 若压力月下降值超过 0.01MPa, 判定存在异常泄漏, 立即启动专项检测。第二步, 采用红外成像仪对设备整体进行全覆盖扫描, 快速锁定泄漏区域, 排除大面积泄漏隐患。第三步, 针对疑似区域, 用高精度检漏仪逐点排查, 精准定位泄漏点, 同步用皂液法复核显性泄漏点。第四步, 对确定的泄漏点, 采用局部包扎法测算年漏气率, 行业标准规定 GIS 设备年漏气率不得大于 1%, 超标部位需立即安排检修处理。

3.2 检测注意事项

开展泄漏检测时, 需保障操作安全与检测准确性。室内 GIS 设备检测前, 先启动通风系统, 保持空气流通, 避免有毒气体聚集; 检测人员需佩戴防护用品, 严禁在泄漏区域长时间停留。室外检测需避开大风、雨雪天气, 防止气流干扰检测结果。检测仪器使用前需校准, 探头避免接触油污、水分, 确保检测灵敏度。

4 GIS 设备 SF6 气体泄漏维护管理体系构建

为从源头防控泄漏隐患, 需建立“事前预防、事中管控、事后整改”的全周期维护管理体系, 覆盖设备安装、日常运维、

检修整改全流程, 实现泄漏隐患闭环管理。

4.1 安装阶段质量管控

安装阶段是防控先天泄漏的关键环节, 需严格把控施工工艺。安装前, 全面检查设备壳体、密封面、密封圈有无损伤, 核对密封件型号与材质, 杜绝不合格部件入场。安装过程中, 彻底清理法兰密封面, 确保无杂质、无划痕; 密封圈安装时居中嵌入密封槽, 无扭曲、无错位; 法兰螺栓按设计力矩对角均匀紧固, 做好紧固记录。设备安装完成后, 按规范开展气密性试验与真空度检测, 充气 24 小时后进行定性检漏, 合格后方可投运。

4.2 日常运维常态化管理

制定标准化日常巡检制度, 明确巡检频次、内容与记录要求。室内 GIS 设备每日巡检一次, 室外设备每周巡检两次, 重点检查密度继电器压力值、仪表有无异常、密封部位有无锈蚀。建立各气室压力、温度台账, 绘制压力变化曲线, 及时发现微泄漏趋势。定期对密封部位进行防腐处理, 对螺栓进行复紧, 避免因松动引发泄漏。同时, 加强运维人员专业培训, 熟练掌握各类检漏仪器操作与泄漏应急处置流程。

4.3 泄漏故障应急处置与整改

发现 SF6 气体泄漏后, 立即启动应急处置流程。对于微泄漏、压力未降至报警值的情况, 做好安全防护, 精准定位泄漏点, 结合停电计划安排检修; 对于压力快速下降、严重泄漏情况, 立即申请设备停电, 隔离故障气室, 启动通风装置, 疏散现场人员, 待气体浓度达标后开展检修。针对不同泄漏点, 采取差异化整改措施: 法兰接口密封不良, 需重新清理密封面, 更换老化密封圈, 按工艺复紧螺栓; 阀门、仪表接头泄漏, 更换密封垫或接头部件, 重新密封; 壳体砂眼、焊缝裂纹, 需先回收 SF6 气体, 抽真空后进行补焊处理, 补焊后再次开展气密性试验; 盆式绝缘子开裂, 直接更换绝缘子, 杜绝隐患遗留。检修完成后, 重新充气、静置, 开展泄漏复检, 确保年漏气率达标后方可恢复运行。

4.4 设备全生命周期管理

建立 GIS 设备全生命周期档案, 记录设备型号、投运时间、气室参数、巡检数据、泄漏故障及整改情况。根据设备运行年限, 制定密封圈更换计划, 一般运行 8-10 年需全面更换密封件, 提前预防老化泄漏。结合状态检修要求, 定期开展 SF6 气体微水、分解产物检测, 同步排查泄漏隐患, 实现设备状态可控、在控。

5 实践案例与成效分析

5.1 案例背景与故障概况

本次选取某 220kV 城区枢纽变电站作为实践对象, 该站全站采用 GIS 设备布置, 共包含 10 个间隔、16 个独立气室, 设

备于2017年完成安装投运,主要承担周边城区工业及居民供电任务,运行负荷常年处于中高位水平。投运前设备各项交接试验均合格,SF₆气体密封性检测达标,前期运行状态稳定。投运第6年,运维人员开展月度常规巡检时,通过气室密度继电器在线监测数据发现,#2主变进线间隔母线气室SF₆气体压力出现持续性缓慢下降,连续三个月监测数据显示,压力月均下降值达到0.015MPa,远高于正常允许的压力波动范围,初步判定该气室存在隐蔽性微泄漏隐患,需开展专项排查与处置。

5.2 泄漏故障分级排查过程

运维团队严格遵循前文所述分级检测流程开展排查,全程遵循安全操作规范,未影响设备正常供电。第一步开展整体压力复核,对该气室进行温度补偿修正计算,排除环境温度干扰,确认压力下降属于真实泄漏,而非温度波动导致的数值偏差,同步记录周边其他气室压力数据,排除监测仪表故障可能性。第二步采用红外成像检漏仪对母线气室整体、法兰接口、阀门接头、仪表接口等部位进行全覆盖扫描,受泄漏量微小影响,红外成像未捕捉到明显气体扩散轨迹,仅锁定法兰连接区域为疑似泄漏范围。第三步采用高精度SF₆检漏仪进行定点精细化排查,将探头沿母线筒上下法兰、密度继电器连接丝口、补气阀门等关键部位缓慢移动,最终在母线筒中段法兰连接处捕捉到稳定报警信号,精准定位泄漏点。第四步采用局部包扎法定量检测,对该法兰部位进行密封包扎,静置24小时后检测包扎腔内气体浓度,计算得出该泄漏点年漏气率为1.8%,超出DL/T 603-2019规程规定的1%标准限值,确定需停机检修整改。

参考文献:

- [1] 侯雨飞.基于神经网络的电气设备SF₆气体泄漏检测研究[J].中国新技术新产品,2025,(22):143-145.
- [2] 宋东波,黄洁,金甲杰,等.红外成像检漏技术在GIS SF₆气体泄漏检测中的应用[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2023,28(01):52-56.
- [3] 田忠,常敏,金海勇,等.GIS设备内SF₆气体泄漏检测技术创新研究[J].粘接,2023,50(01):192-196.
- [4] 田忠,常敏,金海勇,等.电力系统智能化运维中GIS设备SF₆气体泄漏检测方法研究[J].计算机测量与控制,2022,30(10):27-32.
- [5] 马凤翔,袁小芳,程登峰,等.基于红外吸收原理的SF₆气体泄漏检测技术应用研究[J].电气技术,2021,22(10):51-56.

5.3 针对性检修整改实施

结合电网运行方式安排,申请该间隔短时停电,严格按照GIS设备检修规范开展处置工作。检修前先通过专用回收装置回收气室内SF₆气体,做好气体净化处理备用,随后对故障法兰进行拆解检查,发现核心问题为密封圈长期运行老化失去弹性,且密封面残留少量安装遗留的金属碎屑与灰尘,导致密封面贴合不严形成微泄漏。检修过程中,彻底清理法兰密封面,采用专用擦拭工具去除杂质与氧化层,检查密封面无划痕、无变形后,更换同型号全新耐老化氟橡胶密封圈,确保密封圈完全嵌入密封槽、无扭曲无错位。随后按照设备厂家给定的力矩值,采用力矩扳手对角均匀紧固法兰螺栓,做好力矩记录。完成检修后,对气室进行抽真空、真空保持试验,合格后回充合格SF₆气体,静置48小时后开展密封性复检。

5.4 整改成效与管理推广价值

体系推行两年来,全站未再发生SF₆气体泄漏故障,未出现因泄漏引发的设备闭锁、停运事件,设备可用率提升至99.9%以上,大幅降低了应急检修成本与停电损失,有效保障了电网供电可靠性,同时减少SF₆气体排放,契合绿色电网建设要求,该运维模式可在同类型高压GIS设备运维工作中推广应用。

6 结论

SF₆气体泄漏是GIS设备运行中的常见隐患,直接影响设备安全与电网稳定,需通过科学的检测手段与完善的维护管理体系实现精准防控。日常运维中,采用压力监测、红外成像、高精度检漏相结合的分级检测方法,可快速定位泄漏点;构建全周期维护管理体系,强化安装质量管控、日常巡检与故障整改闭环,能从源头减少泄漏发生。