

气体绝缘开关设备及泄漏检测技术的研究进展

许鹏飞¹, 陈韶伟¹, 周鑫阳¹, 李东¹, 杨军^{2,3*}, 齐伟^{2,3*}

¹ 国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司 江苏无锡

² 湖北翼之航技术有限公司 湖北武汉

³ 华中科技大学 湖北武汉

【摘要】本文着重综述了基于六氟化硫的气体绝缘开关设备的国内外应用与发展历程, 运维中气体泄漏以及相应的检测技术与方法。初步展望了“双碳”目标新形势下基于洁净空气的气体绝缘开关设备研究与应用现状, 并总结了其应用过程的运维技术与难点, 以及潜在解决方法。该综述对“双碳”理念下新型变电站的安全运行与关键技术研发具有重要意义。

【关键词】GIS; 泄漏; 特性气体; 检测

【基金项目】国网江苏省电力公司科技项目 (J2023044)

【收稿日期】2025 年 5 月 17 日

【出刊日期】2025 年 6 月 8 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250301

A review of applications and research on gas insulated switchgear

Pengfei Xu¹, Shaowei Chen¹, Xinyang Zhou¹, Dong Li¹, Jun Yang^{2,3*}, Wei Qi^{2,3*}

¹State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi, Jiangsu

²Hubei Yizhihang Technology Co. Ltd., Wuhan, Hubei

³Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei

【Abstract】 This article provides an overview of the application and development history of gas insulated switchgear (GIS) based on sulfur hexafluoride, with a focus on its domestic and international usage. It also discusses gas leakage during operation and the corresponding detection techniques and methods. The article preliminarily summarizes the research and application status of gas insulated switchgear based on clean air in the context of the “dual carbon” target, and outlooks the maintenance techniques and challenges during its application process, as well as potential solutions. This review is of significant importance for the safe operation and key technology development of new substations under the “dual carbon” concept.

【Keywords】 GIS; Leakage; Characteristic gas; Detection

引言

气体绝缘开关设备 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 自 20 世纪 60 年代实用化以来, 因其结构紧凑、灵敏度高、可靠性高、安装方便、安全性强、易于维护、操控性强等优点, 被广泛应用于高压电力设施中, 在维护电力安全运行和保障国民经济快速发展上发挥着重要作用^[1]。六氟化硫 (SF₆) 因其优异的绝缘性能与灭弧性能常被用来作为 GIS 设备的绝缘与灭弧介质^[2]。然而, GIS 设备本身存在诸多的法兰与接口, 导致潜在的气体泄漏, 进而危害设备运行安全与环境安全。因此, 人们对 GIS

设备气体泄漏检测技术开展了大量研究与应用。此外, 随着全球资源危机与环境问题日益加剧, 基于洁净空气的低碳环保型 GIS 设备越来越受到人们重视, 将会逐步取代传统的 SF₆ 作为绝缘与灭弧介质的 GIS 设备^[3]。然而, 由于洁净空气与大气组分几乎完全一致, 这为该类型 GIS 设备气体泄漏检测与维稳带来了新的挑战。因此, 本论文针对以上 GIS 设备的发展与应用现状进行了总结, 且针对基于洁净空气的 GIS 设备泄漏检测技术研发思路进行了展望。通过本综述, 可为零碳环保型 GIS 设备关键技术研发与安全应用提供重要参考。

第一作者简介: 许鹏飞 (1990-) 男, 副高级工程师, 主要从事电力工程与设计研究;

*通讯作者: 杨军 (1981-) 男, 副教授, 主要从事高压电源设计与研究; 齐伟 (1987-) 男, 副教授, 主要从事高能电子加速器应用与功能材料改性研究。

1 基于 SF₆ 的 GIS 设备的研究与应用

自 1900 年法国化学家首次合成 SF₆ 后, 人们随后发现其具有优异的绝缘性能和灭弧性能, 因而被研究用于高压电气设备的绝缘介质 (见表 1) [4]。与西方发达国家相比, 我国对 GIS 设备的需求起步晚, 因而发展比较缓慢。然而, 伴随着国民经济的快速发展, 我国发电量与用电需求也稳步提升, 其中最具代表性的世纪工程——长江三峡水力发电站。但是, 电力设施起步晚与发展滞后仍然限制着电力工业发展的需求, 且许多高压输变电工程主要依赖进口 GIS 设备[5,6]。因此, 我国出台了一系列政策用于提升 GIS 设备制造水平, 保障电力运行与国计民生。主要方法是引进国际先进的设计技术、生产技术及管理方法, 再结合研究, 吸收, 消化与创新。在这个理念下, 经过几代人的努力, 逐步完善了相应的工业体系与产业布局, 为 GIS 设备的自主化提供坚强的基础[5,6]。

表 1 SF₆ 作为绝缘介质在高压电器设备中的发展时间

国家	时间/年	发展应用
法国	1937	SF ₆ 作为高压电气设备的绝缘介质
美国	1953	生产双压式 (1.5 MPa) SF ₆ 断路器
德国	1964	西门子推出 220 kV、15 kA 的 SF ₆ 断路器
中国	1973	生产出首台 110 kV GIS 并试运行

GIS 设备作为一个系统性的工程装置, 在填充高压绝缘介质气体后, 由于设备材质纯度、焊缝、法兰接口、软硬管连接缝隙等均会影响其气密性, 进而导致绝

缘气体的泄漏[7-9]。GIS 设备中的气体一旦发生泄漏将会造成非常严重的危害。首先是设备危害。气体泄漏会导致 GIS 设备系统内气体压力下降。气体压力下降会降低气室的绝缘性与灭弧能力, 甚至造成气体密度继电器报警及闭锁开关动作, 在出现故障时会造成大范围停电, 进而带来严重的社会危害与经济损失。其次是环境危害。SF₆ 是当下 GIS 设备系统主流的绝缘气体, 因此一旦泄漏会导致严重的环境问题与经济损失[11,12]。因此, 开展 GIS 设备的泄漏检测技术研究具有重要意义。根据理论基础不同, 可将针对基于 SF₆ 的 GIS 设备的泄漏检测方法分为以下几大类: 压力法, 气体收集法, SF₆ 电离法, 光谱法等[13-15] (见表 2)。

压力法通常包括抽真空法、压力降法和肥皂泡法等[15,16]。抽真空法主要在充入 SF₆ 之前对设备系统抽真空并静置一段时间, 通过仪器检测真空度下降的程度与速度, 进而检测气室的气密性来反映泄漏情况。该方法用于 GIS 设备安装与检修过程, 因此具有一定局限性。压力降法是通过检测设备或隔室在一定时间间隔内测定的气压降, 来计算设备漏气率的方法, 适用于漏气量较大的设备检漏。肥皂跑法又称为液体表面张力法, 主要用于确定设备存在泄漏情况, 然后对设备停电后, 通过对疑似泄漏点涂抹肥皂水, 观察气泡现象进而确定漏点, 检测方式比较直观。但是肥皂泡法对涂抹质量要求非常高, 不易控制, GIS 中的某些特定位置不适合涂抹而无法测定。而且具有不能对微量泄漏检测, 工作量大, 不易操作等缺点。

表 2 基于 SF₆ 的 GIS 设备泄漏检测方法与优缺点

类型	具体方式	优点	缺点
压力法	抽真空	可针对任何绝缘气体, 直观检测泄漏速度, 推断年泄漏量	只能适用于新安装设备或检修的设备
	压力降	可计算设备年漏气率	只适用于漏气量较大的设备
	肥皂泡	直观泄漏点位	操作复杂, 涂抹质量要求高, 工作量大, 且需要停电处理
气体收集法	扣罩法	可计算设备年漏气率	适用于制造厂对设备进行整体检漏
	挂瓶法	可计算设备年漏气率	需要事先确定泄漏点位
	局部包扎法	可计算设备年漏气率, 可靠性高	操作复杂, 工作量大
光谱法	高压脉冲法	测量准确和可定位漏点	操作时需对设备停电处理, 受环境影响大
	红外光谱法	测量精准, 灵敏度高, 远程操作, 直观判定漏气点位与范围	需要对检测对象加热处理, 受环境影响大等
	激光成像法	远距离测量, 泄漏点可以图像化	背景对图像影响较大, 会影响观测效果, 传感器的灵敏度受局限性较强
	超声波法	测量精度高, 操作简易	价格较为昂贵, 且只适用于 SF ₆ 泄漏量较大的情况

气体收集法是通过将局部漏点进行处理后, 收集一定时间内的气体泄漏量后, 通过检测其气体浓度, 进而计算设备年漏气率的方法, 主要包括扣罩法、挂瓶法和局部包扎法^[15,16]。扣罩法顾名思义, 将漏点置于密封的塑料罩内, 从而收集泄漏气体, 主要是制造厂商对设备进行整体检漏时使用。挂瓶法, 具体而言是用软胶管将检漏孔与挂瓶连接来收集泄漏气体, 可计算设备年漏气率, 但是需要事先确定泄漏位点。局部包扎法是将检漏孔用塑料薄膜包扎, 通过检测包扎腔内气体浓度而确定年泄漏率, 方法可靠性高, 但是实际操作的工作量比较大。因此, 气体收集法需要与其他检测技术共同使用, 且在设备停电后进行相关操作。

目前常用的六氟化硫气体检漏仪即是基于电离法原理设计而成^[17]。SF₆ 气体具有强电负性, 在脉冲高压作用下可连续放电, 导致电晕电场的改变, 进而可用来判断气体是否泄漏, 测量准确, 可有效定位泄漏点。在检测时, 通过对泄漏点附近气体采样后, 仪器内部传感器可以检测出 SF₆ 含量, 因而该检测技术受环境影响明显, 且需要将 GIS 设备停电。

光谱法主要是根据 SF₆ 在不同波段的特征吸收实现其泄漏检测, 主要有红外检漏法、激光检漏法等^[18,19], 具有便携性、检测速度快、图像可视化、远距离、场景适用性强等优点。红外检漏仪探测大气中的红外辐射被 SF₆ 吸收的情况, 通过这种吸收作用造成的温度差别而形成红外影像, 进而可视化判定漏点位置与范围。红外检漏仪具有成像速度快 (0.02 秒/次), 检测时间短, 灵敏度高 (泄漏率 0.001ml/s) 等优点, 更重要的是可在设备运行状态下进行检测, 避免因停电导致的社会与经济危害。但是, 这种方法检漏时需加热, 而且背景板受环境的影响较大等缺陷。激光检漏仪原理是当特定波长的激光照射在设备的可疑泄漏点时, 被泄漏的 SF₆ 气体的吸收特性成像, 可进行远距离测量, 且可使泄漏点图像化。但是, 如果背景选择不当会影响对 SF₆ 气体的成像, 影响观测效果。此外, 根据超声波在不同介质之间传播的速度不同对 SF₆ 进行检测, 具有精度高、操作简易等优点。但是, 存在影响因素太多, 价格较为昂贵, 且只适用于 SF₆ 泄漏量较大的情况。

因此, SF₆ 本身具有比较鲜明的特征性, 借助该特性通过电离或光谱技术可实现其可移动检测装置的设计与制造, 目前市面上有比较成熟的商用设备。然而, 随着信息技术的快速发展与应用, 后续在针对 GIS 设备安全运行上必将逐步实现主动在线智能检测与预警。因而, 基于光谱技术的检测方法将会倍受青睐。此外,

随着环境危机的加重, 新型低碳 GIS 设备绝缘介质也在快速发展, 将会逐步取代价格昂贵、温室效益极强的 SF₆, 因而各种新型 GIS 设备泄漏检测技术将被开发出来, 进而精确判定泄漏位置与漏率等参数, 为 GIS 设备维修与正常运营提供基础。

2 基于洁净空气的 GIS 设备研究与应用

随着全球资源短缺与环境污染问题的日益加剧, 开发环保型绝缘气体 GIS 设备越来越受到人们关注^[12,20,21]。截至目前, 环保型绝缘气体 GIS 设备中所涉及气体主要有三类: 一是洁净空气及 N₂; 二是使用含少量 SF₆ 的混合气体, 如 10% SF₆ 和 90% N₂ 混合气体, 20% SF₆ 和 80% N₂ 混合气体等, 进而降低温室效应; 三是 SF₆ 的替代气体: 如 PFC 气体 (包括 C₃F₈、C₂F₆、CF₃I 气体, 但由于这两类气体液化温度高, 目前仍未工业化^[22]。其中, 大量研究表明基于洁净空气的 GIS 设备因其性能好与可靠性较高, 已经被应用于变电站、化工产业园等。零碳环保型 GIS 设备中的洁净空气如果发生气体泄漏, 同样会造成设备绝缘能力降低、灭弧能力减弱, 危及电网安全。因此, 开发研究零碳环保型 GIS 设备的洁净空气泄漏检测技术对保障电网安全运行是十分必要的。

由于洁净空气组分与大气环境相同, 因此传统上基于特性气体的检测技术并不适用于基于洁净空气的零碳环保型 GIS 设备绝缘气体泄漏的检测, 比如前面所述的 SF₆ 电离法、扣罩法、挂瓶法、局部包扎法、红外检漏法、激光检漏法、超声波检漏法等。抽真空法、肥皂泡法和压力降法均具有不可避免的缺陷, 尤其是需要 GIS 设备停电处理, 且检测过程繁琐, 工作量大。基于洁净空气的零碳环保型 GIS 设备正式推出时间为 2019 年, 正式应用为 2020 年下半年。由于推出应用时间短, 国内外针对其泄漏检测仅有少量研究。西门子公司 B.LUTZ 等人提出利用示踪检测法进行检漏的概念^[23], 设想特性气体为氦气、臭氧、二氧化碳等 (见表 3)。首先, 洁净空气不含 CO₂ 气体, 而大气的 CO₂ 气体体积分数约为 400 μL/L。因此, 结合前述包扎法, 通过测量洁净空气 GIS 泄漏点包扎腔内的 CO₂ 气体体积分数, 可有效确定泄漏范围与年泄漏率。但是, 该方法受包扎质量与包扎材料影响较大, 而且不能精准确定具体泄漏点位。利用臭氧作为示踪气体具有高灵敏度等特点。但是, 臭氧分子不稳地, 在数十分钟内即可分解为氧气, 需要及时补充气体, 而且频繁的臭氧使用对 GIS 设备上的金属具有潜在损伤。氦气容易被高压电离而发热, 且会降低 GIS 设备内的绝缘性能; 而

二氧化碳不符合环保性。

根据零碳环保型 GIS 内部气体组分 (O_2 ($20.5\% \pm 0.5\%$)、 N_2 ($79.5 \pm 0.5\%$)) 性质, 利用与其理化性质相似的氮或氧的同位素作为示踪剂可有效克服上述问题。氮共有 17 个已知同位素, 仅 ^{14}N 、 ^{15}N 为稳定同位素, 其余的同位素类型均为放射性同位素。在自然界中, ^{14}N 的含量为 99.635%, ^{15}N 的含量为 0.365%。 ^{15}N 用作氮元素化合物的示踪原子, 被广泛应用于生命科学、化学、农业等领域。氧共有 18 个已知同位素, 只有 ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O 是稳定同位素, 其他都是有放射性同位素。 ^{18}O 在自然界中的丰度远高于 ^{17}O , 而且制作相对更容易, 成本更低, 被广泛用于医疗、环保、电气等领域。

表 3 基于洁净空气的 GIS 设备泄漏检测示踪气体研究

示踪气体	优点	缺点
CO_2	高灵敏度, 能够判定泄漏范围, 且可计算年泄漏率	需结合包扎法进行, 操作复杂, 工作量大, 不能判定具体泄漏点位
O_3	灵敏度高, 检测方便	臭氧分子分解快, 氧化性强, 对设备潜在危害
He	示踪性好, 灵敏度高, 专用检测设备	成本高, 高电压下影响气体绝缘性质
SF_6	示踪性好, 检测灵活, 灵敏度高	增加成本, 引入温室气体

3 总结

自 SF_6 作为绝缘气体的 GIS 设备应用以来, 经过几十年的发展其在工作模式与功能多样性、泄漏检测适用性等方面取得了快速发展, 并趋于成熟, 为电力设备稳定运行与社会经济发展做出了重要贡献。然而, SF_6 本身价格昂贵、极强的温室效应以及大气代谢寿命长等缺陷。而且, 随着全球资源短缺与环境问题的日益严重, 零碳环保型洁净空气 GIS 设备的发展与应用越来越受到人们重视, 我国于 2020 年正是运营了首台基于洁净空气的 GIS 设备, 有力助推了国家“双碳”目标的早日实现。然而, 由于洁净空气与大气环境组分与性质一样, 开发针对零碳环保型洁净空气 GIS 设备泄漏检测技术势在必行。虽然, 已有少量针对洁净空气 GIS 设备泄漏检测技术的研究报道, 但是并未实现相关产品应用。因此, 根据前述研究现状, 结合未来行业智慧化发展趋势, 针对洁净空气 GIS 设备泄漏检测的研究可围绕如下几个方向开展:

- (1) 研究高丰度 ^{15}N 和 ^{18}O 同位素标记的洁净空气的高电压电气特性、分解产物的产生与演变规律及其对电气特性与设备的影响等, 全面评价同位素示踪洁净空气的应用可靠性;
- (2) 开发兼具高绝缘性、环保性、经济性与稳定性的新型绝缘气体介质, 为实现零碳环保目标提供新

近期, 周鑫阳等人针对高丰度 ^{15}N 和 ^{18}O 标记的洁净空气开展了系统的绝缘性质研究^[24]。结果表明在均匀电场中, 与单纯洁净空气相比, ^{15}N 和 ^{18}O 同位素丰度的提升对其击穿电压无影响, 且同位素示踪性洁净空气的工频击穿电压随着其气体填充压强增加而增加。说明适当提高洁净空气中 ^{15}N 与 ^{18}O 同位素丰度作为示踪性气体实现洁净空气的泄漏检测具有高度可行性和电力可靠性, 为真正实现零碳环保型 GIS 设备系统的建设与应用提供物质基础。在此基础上, 该团队结合同位素质谱仪设计和构建了一套基于同位素示踪法的洁净空气 GIS 泄漏检测装置^[25,26], 为推动零碳环保型 GIS 设备的推广应用奠定了基础。

的物质基础;

- (3) 根据 GIS 设备的体积、尺寸与工况性质, 利用机器学习技术, 开发可移动巡检系统, 实现 GIS 设备泄漏检测的在线性与实时性。

参考文献

[1] 黄政宇. 气体绝缘开关设备局部放电故障定位技术分析[J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(10): 30-32.

[2] 孔凡珺, 马径坦, 谌珉灏等. SF_6 压力对 GIS 典型缺陷局部放电检测灵敏度的影响[J]. 电力工程技术, 2023, 42(03): 233-241.

[3] 顾寅, 缪金, 肖焱艳等. 基于 FLUENT 的示踪氦气在 GIS 绝缘空气中扩散规律及泄漏检测研究[J]. 电气技术, 2023, 24(06): 42-46+56.

[4] 张乔根, 游浩洋, 郭璨等. 雷电冲击下 SF_6 气体放电击穿电压分散性的实验研究[J]. 高电压技, 2016, 42(11): 3415-3420.

[5] 李建基. 高压气体绝缘金属封闭开关设备的发展[J]. 农村电气化, 2007, (11): 57-59.

[6] 俞慧忠, 吴国忠, 苏伟民等. 中压气体绝缘开关设备的发展简析[J]. 电气应用, 2006, (10): 138-140.

- [7] 尧阳. 电气设备中 SF6 气体泄漏的检测与监测[J]. 电工技术, 2022(23):184-187.
- [8] 李林虎. SF6 开关在变电检修中的常见问题及解决措施[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(09):288-289.
- [9] 陈图南, 马凤翔, 袁小芳等. SF6 气体绝缘电气设备故障分解物检测的多组分交叉干扰及校正算法综述[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(01):43-54.
- [10] 张潮海, 邹可园, 张晓星. 高压电气设备绝缘气体分解产物光学检测技术研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(07):2806-2815.
- [11] 李兴文, 赵虎. SF6 替代气体的研究进展综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(06):1695-1701.
- [12] 和彦淼, 黄印, 颜湘莲等. SF6 混合气体和环保替代气体设备标准化研究[J/OL]. 中国电力, 2021, 1-8.
- [13] 陈昌飞, 宋晓婧. SF6 开关气体泄漏检测技术研究与应用[J]. 橡塑技术与装备, 2015, 41(16):53-54.
- [14] 徐超, 王凯, 郭跃男等. SF6 电气设备泄漏检测技术[J]. 电测与仪表, 2016, 53(S1):28-32.
- [15] 程伟, 苏镇西, 马凤翔等. SF6 混合绝缘气体电气设备中气体泄漏检测技术研究[J]. 高压电器, 2016, 52(12):146-150.
- [16] 张新中. 气体绝缘开关柜漏气问题的分析及处理[J]. 高压电器, 2010, 46(04):93-96.
- [17] 姜宝林, 孙吉权, 许亮等. 紫外线电离型 SF6 气体检漏仪[J]. 现代仪器, 2005, (04):56-58.
- [18] 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.
- [19] 王逸君, 武海天. 基于激光成像的 SF6 设备气体检测技术研究[J]. 信息记录材料, 2018, 19(03):83-84.
- [20] 尤天鹏, 董旭柱, 周文俊等. 中压设备中 SF6 替代气体的试验研究[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(03):59-65.
- [21] 张杰, 王放放, 夏忠林等. “双碳”目标下 SF6 排放现状、减排手段分析及未来展望[J]. 化工进展, 2023, 42(S1):447-460.
- [22] 陈波, 许爱东, 韩利群等. 环保气体绝缘金属封闭开关设备研究现状及发展动向[J]. 科技创新与应用, 2017, (03):1-3.
- [23] B. Lutz, M. Kuschel, K. Pohlink, R. Kurte. Gas handling and assessment of gas quality in gas-insulated switchgear containing clean air. International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance CMDM 2019 (5th edition), September 9th -11th 2019, Radisson Blu Hotel Bucharest, Romania.
- [24] 周鑫阳, 陈韶伟, 许鹏飞等. 基于同位素示踪法的环保型 GIS 泄漏检测技术研究[J]. 环境技术, 2024, 42(07):145-153.
- [25] S. Chen, P. Xu, X. Zhou et al. Study on the Leakage Detection of Clean Air Insulated Switchgear Based on Isotope Tracer Technology, 2024 2nd International Conference on Mechatronics, IoT and Industrial Informatics (ICMIII), 2024: 13-17.
- [26] P. Xu, S. Chen, X. Zhou, et al. Research on the Design of Zero-carbon Environmental-friendly GIS Leakage Detection Technology, 2024 2nd International Conference on Mechatronics, IoT and Industrial Informatics (ICMIII), 2024:18-21.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

