

GIS设备SF₆气体微水超标问题的现场处理与预防措施

王 珩 罗 乘

中国电建集团湖北工程有限公司 湖北 武汉 430000

摘 要：气体绝缘金属封闭开关设备（GasInsulatedSwitchgear, GIS）因其占地面积小、可靠性高、环境适应性强等优点，在现代电力系统中得到了广泛应用。六氟化硫（SulfurHexafluoride, SF₆）作为GIS的核心绝缘和灭弧介质，其纯度及含水量（微水含量）直接关系到设备的安全稳定运行。一旦SF₆气体中的微水含量超标，将严重威胁GIS的绝缘性能，加速设备内部劣化，甚至引发灾难性的绝缘击穿事故。本文旨在系统性地探讨GIS设备SF₆气体微水超标问题的成因、危害，并重点阐述一套科学、规范、高效的现场处理流程与策略。同时，从设计、制造、安装、运维等多个维度，提出全面且具有前瞻性的预防措施，以期为电力系统的安全、可靠、经济运行提供理论支撑和实践指导。

关键词：GIS；SF₆气体；微水超标；现场处理；预防措施；绝缘性能

引言：我国城市化加速、电网规模扩大，对变电站用地、安全性与可靠性要求提高。GIS因结构紧凑、不受外界环境影响、运维量小、电磁干扰低等优势，成为高压到特高压输变电工程首选设备。其中，SF₆气体凭借优异电气绝缘和灭弧能力，承担隔离导体、熄灭电弧的关键任务。但SF₆气体性能易受杂质尤其是水分影响，IEC及我国相关标准对不同电压等级、部件的SF₆气体微水含量设严格上限，超限即“微水超标”。这一问题危害极大，会降低气体绝缘强度，与SF₆分解产物反应生成强腐蚀性酸性物质，侵蚀设备部件，形成恶性循环，最终引发设备故障、大面积停电，造成重大损失。因此，研究其机理并建立应急处理与预防体系，对保障电网安全意义重大。

1 GIS 设备 SF₆ 气体微水超标的成因与危害分析

GIS设备SF₆气体微水超标成因多样：设备本体残留水分是主要初始来源，制造中若干燥不彻底或吸附剂受潮失效，投运后水分会释放到气体中；现场安装时，环境湿度控制不当、清洁不到位或新气微水超标，会让水分侵入；密封不良会使空气中的水蒸气缓慢渗透；内部材料长期运行会缓慢释水；设备内部故障产生的高温也可能使SF₆分解并与杂质反应生成水分子。微水超标危害深远：会严重降低绝缘强度，增加绝缘闪络风险；促进有害分解产物生成，与水分反应生成剧毒强腐蚀性物质；腐蚀设备内部元件，改变电场分布；堵塞气路与操

作机构，影响设备操作；还会形成恶性循环，加速设备劣化，最终可能导致突发性绝缘故障。

2 SF₆ 气体微水超标的现场处理流程与策略

2.1 初步诊断与风险评估

2.1.1 数据复核与趋势分析

首先，需确认测试数据的准确性。检查微水测试仪是否经过校验，采样方法是否规范（如是否充分冲洗管路、取样点是否具有代表性）。同时，调阅该气室的历史微水数据，分析其变化趋势。是缓慢上升、急剧飙升还是波动较大？这有助于判断水分来源（缓慢渗透vs.密封失效vs.安装遗留问题）^[1]。

2.1.2 关联信息排查

检查该气室的SF₆气体压力历史曲线，是否存在同步缓慢下降的情况，以辅助判断是否存在泄漏。询问近期是否有过相关的检修、操作或附近有无施工活动。对设备进行外观检查，查看法兰连接处、密度继电器、充气接头等部位是否有油污、锈迹等疑似泄漏迹象。

2.1.3 风险等级判定

根据超标程度（轻微超标、严重超标）、设备重要性（主变间隔、母联间隔等）、运行工况（是否处于重载、是否临近检修窗口期）等因素，综合评估风险等级，决定是立即停电处理、安排计划停电处理，还是加强监视、择机处理。

表1 GIS设备SF₆气体微水含量标准限值与风险等级判定参考表

设备类型/气室部位	交接验收时允许值 ($\mu\text{L/L}$, 20 $^{\circ}\text{C}$)	运行中允许上限值 ($\mu\text{L/L}$, 20 $^{\circ}\text{C}$)	微水含量区间 ($\mu\text{L/L}$)	风险等级
断路器气室（含灭弧室）	≤ 150	≤ 300	≤ 300	正常
			301-450	警戒
			451-600	高风险
			> 600	紧急

续表:

设备类型/气室部位	交接验收时允许值 ($\mu\text{L/L}$,20℃)	运行中允许上限值 ($\mu\text{L/L}$,20℃)	微水含量区间 ($\mu\text{L/L}$)	风险等级
隔离开关、接地开关、母线气室	≤ 250	≤ 500	≤ 500	正常
			501-700	警戒
			701-1000	高风险
			> 1000	紧急
电流互感器 (CT) 气室	≤ 250	≤ 500	同上	同上
电压互感器 (PT) 气室	≤ 250	≤ 500	同上	同上

注：表中数值综合DL/T596-2021、GB/T8905-2012整理，具体执行以设备制造商技术文件及最新版国家/行业标准为准。“风险等级”划分考虑超标幅度、设备功能重要性、故障后果严重性。微水含量单位“ $\mu\text{L/L}$ ”等同“ppm(v)”，工程常混用，严格指体积比。未超限但持续上升（如年增长率 $> 50\mu\text{L/L}$ ）应视为潜在风险，启动预警。

2.2 处理方案的制定

处理方案的选择取决于超标原因、超标程度、设备结构以及现场条件。常见的处理方法主要有以下几种：

2.2.1 吸附剂更换法

这是最常用、最经济的方法，适用于微水含量超标不严重，且判断主要原因为吸附剂饱和或失效的情况。GIS设备内部通常装有分子筛等吸附剂，用于吸附运行中产生的水分和分解产物^[2]。随着时间推移，吸附剂会达到饱和。通过更换新的、活化处理过的吸附剂，可以有效吸收气室内的游离水分。

2.2.2 SF₆气体置换法

当微水含量严重超标，或怀疑气体已被严重污染（如伴随有大量分解产物）时，单纯更换吸附剂效果有限。此时需要将气室内原有的SF₆气体全部回收，然后用高纯度、微水含量合格的新SF₆气体进行置换。此方法效果彻底，但成本较高，且涉及SF₆气体的回收与处理，需遵守环保规定。

2.2.3 内循环干燥法

这是一种无需大量排放SF₆气体的绿色处理方法。利用专用的SF₆气体处理装置（集成了过滤、吸附、干燥、净化功能），将气室内的SF₆气体抽出，经过装置内部的高效干燥系统（如深度冷冻、分子筛吸附）去除水分和杂质后，再将洁净干燥的气体打回气室。此过程可循环多次，直至微水含量达标。该方法既经济又环保，但处理周期相对较长，且对处理装置的性能要求较高。

2.2.4 局部解体检查法

对于反复出现微水超标，或通过上述方法处理后很快再次超标的情况，必须怀疑存在密封缺陷或内部有难以清除的污染源。此时，需要在严格的安全措施和防尘防潮条件下，对相关气室进行局部解体，仔细检查密封圈、法兰面、绝缘子、导体等部件的状态，查找并修复泄漏点或清除污染物。

2.3 现场处理的具体操作步骤（以吸附剂更换+气体置换为例）

2.3.1 安全准备与隔离

办理工作票，严格执行停电、验电、接地等安全措施。将待处理气室与其他运行气室可靠隔离（通过关闭气路阀门）。设置围栏和警示标志。

2.3.2 SF₆气体回收

使用经校验合格的SF₆回收装置，将气室内的SF₆气体全部回收至储气罐中。回收过程中应密切监视气室压力，防止出现负压吸入空气。回收后的气体应妥善保管，以备后续净化或交由专业机构处理。

2.3.3 抽真空处理

气体回收完毕后，立即对气室进行抽真空。这是处理过程中最关键的一步。高真空度可以有效抽出设备内部材料（尤其是绝缘件）吸附的深层水分。根据厂家要求和相关规程，通常需要将真空度抽至133Pa（1Torr）以下，并在此真空度下保持数小时（如4-8小时），以确保充分干燥。抽真空过程中应使用麦氏真空计或经校准的电子真空计进行精确测量^[3]。

2.3.4 更换吸附剂

在维持高真空或充入少量高纯氮气作为保护气的条件下，打开吸附剂仓盖。迅速取出已失效的旧吸附剂，并立即装入足量的、经过300℃以上高温活化处理并在干燥环境中冷却的新吸附剂。整个操作过程必须迅速，尽量减少吸附剂暴露在空气中的时间，防止其二次吸潮。装填完毕后，密封好仓盖。

2.3.5 充入合格SF₆气体

再次对气室抽至规定真空度并保持一段时间后，开始充入微水含量和纯度均符合标准（通常微水 $\leq 8\mu\text{g/g}$ ）的新SF₆气体。充气过程应缓慢进行，并实时监测气室压力，直至达到额定压力。

2.3.6 静置与检漏

充气完成后,让设备静置24小时以上,使气体充分扩散均匀,并让新吸附剂发挥最大效能。随后,对所有密封部位进行严格的检漏(通常采用灵敏度高的SF₆检漏仪),确保无泄漏。

2.4 处理后的验证与跟踪

处理工作完成后,绝不能立即投入运行。必须进行严格的验证:(1)微水复测:在静置24-48小时后,再次取样测量SF₆气体微水含量,确认其已稳定在合格范围内。(2)纯度与分解产物检测:必要时,还需检测SF₆气体纯度及SO₂、H₂S、CO等特征分解产物的含量,以全面评估设备内部状态。(3)建立跟踪档案:将本次处理的全过程、数据、原因分析及结论详细记录归档。在接下来的3个月、6个月、1年内,对该气室进行加密微水监测,以验证处理效果的持久性,确保问题得到根治。

3 GIS设备SF₆气体微水超标的预防措施

3.1 源头控制:设备制造与出厂阶段

(1)严格厂内干燥工艺:制造厂必须建立完善的零部件清洗、烘干、装配和总装车间的环境控制系统(恒温恒湿)。对所有进入总装的部件,特别是绝缘件和吸附剂,必须进行严格的干燥处理,并在干燥空气中或氮气保护下储存和转运。(2)吸附剂质量管控:选用高品质、高吸附容量的分子筛,并建立严格的吸附剂活化、包装、储存和使用管理制度。出厂前,应对吸附剂的性能进行抽检。(3)强化出厂试验:出厂前的微水含量测试和长时间的老化试验(热稳定试验)是检验设备干燥效果的重要手段。应确保出厂设备的微水含量远低于标准限值,留有足够的裕度。

3.2 关键环节:现场安装与交接阶段

(1)环境条件控制:严禁在雨、雪、雾、沙尘暴及空气相对湿度大于80%的天气下进行GIS开盖、对接等核心安装作业。现场应搭建临时防尘、防潮工棚,并配备工业除湿机,确保作业环境湿度可控。(2)精细化安装工艺:严格执行厂家提供的安装说明书。对接前,必须使用无水乙醇或丙酮彻底清洁所有密封面、导体接触面,并用洁净的白布擦干,确保无任何水渍、油污和颗粒物。密封圈的安装要规范,避免扭曲、划伤^[4]。(3)新气质量把关:所有充入的SF₆新气必须具备合格的质量证明文件,并在现场使用前进行抽检,确认其微水含量、纯度等指标合格。(4)高标准交接试验:交接试验中的微水含量测试是检验安装质量的最后一道关口。必须在设备充气静置足够时间(通常24小时以上)后进行,并确保测试结果满足甚至优于运行标准。

3.3 长效机制:运行维护与技术监督阶段

(1)建立科学的监测周期:根据设备投运年限、运行状况、历史数据,动态调整微水检测周期。新投运设备、老旧设备、曾出现问题的设备应适当缩短周期。积极推广在线微水监测技术,实现对关键气室的实时、连续监控,做到早发现、早预警。(2)规范的日常巡检:日常巡视中,除了关注SF₆压力外,还应留意密度继电器、充气接头等部位是否有凝露、结霜等异常现象,这可能是微水含量过高或存在泄漏的间接征兆。(3)加强技术档案管理:为每台GIS设备建立完整的“健康档案”,详细记录从出厂、安装、交接、历次检修到每次微水测试的所有数据。利用大数据分析技术,挖掘数据背后的规律,预测潜在风险。(4)人员培训与技能提升:定期对运维人员进行GIS设备原理、SF₆气体特性、微水危害、测试仪器使用及处理工艺的专业培训,提升其风险意识和实操能力。

3.4 技术升级:新材料与新工艺的应用

(1)高性能吸附剂:研发和应用吸附容量更大、选择性更强、寿命更长的新型吸附剂,如改性分子筛、复合吸附剂等。(2)先进的密封技术:探索应用金属C形环、激光焊接等更可靠的永久性或半永久性密封技术,从源头上杜绝因密封圈老化导致的微渗漏。(3)智能监测与诊断系统:结合物联网、人工智能技术,构建GIS设备状态的智能评估与故障预警平台,实现从“被动检修”向“主动预测”的转变。

结语:GIS设备SF₆气体微水超标成因复杂、危害大,电力工作者需摒弃短视思维,树立“预防为主、防治结合、闭环管理”理念。应对此问题,一要建立标准化应急处理流程,在微水超标时快速安全恢复设备,并做好后续跟踪确保根治;二要将防控关口前移,在设备设计选型、制造监造、安装验收、运维监督等各环节植入“控水”意识,严格执行标准工艺,筑牢防线。未来,新材料、新工艺、智能化技术持续发展应用,将为解决该问题提供更多可能,我们有信心有效控制GIS设备SF₆气体微水超标,为构建安全可靠的现代化智能电网提供坚实保障。

参考文献

- [1]张伟,赵何鹏.GIS设备SF₆微水超标原因及处理方法[J].农村电工,2024,32(05):44-45.
- [2]李永凯,曹玲燕,晋成凤,等.基于STM32L051的SF₆气体微水密度在线监测系统研究[J].河南科技,2025,52(24):17-21.
- [3]邓冰,王贺,孟庆伦.六氟化硫断路器气体微水超标分析及预控措施[J].电工电气,2022,(03):69-70.
- [4]刘天宇,赵磊,刘涛玮,等.5组220kVGIS设备微水含量超标原因分析与处理[J].电气开关,2021,59(04):87-89.