

GIS开关设备SF₆气体微水超标在线干燥净化处理

田景霞 李 磊

湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司江垭水电站 湖南 张家界 427221

摘要: GIS开关设备SF₆气体微水超标会降低绝缘性能, 引发局部放电, 腐蚀金属部件, 缩短设备寿命。在线干燥净化处理技术采用吸附法、膜分离法或冷凝法, 通过旁路循环模块、干燥净化模块及监测控制模块, 实时监测并自动调节运行状态, 实现水分深度去除。该技术无需停机, 保障连续运行, 自动化程度高, 吸附剂可循环使用, 显著降低运维成本, 提升设备运行可靠性。

关键词: GIS开关设备; SF₆气体微水超标; 在线干燥净化处理

引言: GIS开关设备作为电力系统中的关键组件, 其内部SF₆气体的绝缘性能对设备安全运行至关重要。然而, SF₆气体中微水含量超标会显著降低其绝缘强度, 引发局部放电, 甚至导致设备故障。传统处理方式往往需设备停机, 影响供电可靠性。因此, 研究并开发GIS开关设备SF₆气体微水超标在线干燥净化处理技术, 实现不停机处理、实时监测与自动净化, 对保障电网安全稳定运行具有重要意义。

1 GIS 开关设备 SF₆ 气体微水超标机理与影响分析

1.1 微水来源与迁移机制

(1) 设备密封失效会导致外界潮湿空气渗入, 如密封圈老化、法兰连接不紧密; 吸附剂失效后无法吸附设备内部水分, 失去干燥作用; 充气过程若未对气瓶、管路充分干燥, 会将水分带入设备内部, 这些均为微水主要来源。(2) 根据亨利定律, 温度变化会影响微水在SF₆气体中的溶解度。温度升高时, SF₆气体对水分的溶解度增大, 水分以溶解态存在; 温度降低时, 溶解度下降, 溶解态水分会析出, 形成液态水或固态冰, 加剧微水迁移与积累。

1.2 微水超标的危害

(1) 微水超标会使SF₆气体绝缘性能下降, 在设备内部电场不均匀处易引发局部放电, 长期局部放电会进一步破坏绝缘结构, 增加闪络风险, 威胁设备安全运行。(2) SF₆气体在电弧或局部放电作用下会产生分解产物, 这些产物与水反应生成HF、H₂SO₃等酸性物质, 会腐蚀设备内的金属部件, 影响部件性能与设备密封性。(3) 微水会加速SF₆气体劣化, 促使其生成更多有害杂质, 不仅降低气体绝缘和灭弧性能, 还会缩短设备使用寿命, 增加运维成本。

1.3 微水含量标准与检测方法

(1) 国际标准IEC60480和国家标准GB/T8905对GIS

开关设备SF₆气体微水含量有明确要求, 通常运行中设备微水含量需 $\leq 500\mu\text{L/L}$, 新投运设备或检修后设备要求更严格, 需控制在更低水平(如 $\leq 300\mu\text{L/L}$), 以保障设备稳定运行。(2) 常用检测技术各有特点: 露点仪检测精度高、响应速度快, 适用于现场实时检测; 传感器阵列可实现多参数同时监测, 便于长期在线监控; 光谱分析具有非接触式检测优势, 能避免对设备内部气体的干扰, 但设备成本相对较高, 适用于高精度实验室检测或特定场景下的检测需求^[1]。

2 GIS 开关设备 SF₆ 气体微水超标在线干燥净化处理技术原理与方案

2.1 技术原理

(1) 吸附法: 核心是利用高效吸附剂的选择性吸附特性, 常用吸附剂包括分子筛与活性氧化铝。分子筛具有均匀微孔结构, 孔径与水分子直径匹配, 能精准捕获SF₆气体中的水分子, 且对SF₆气体无吸附作用; 活性氧化铝则凭借高比表面积和强吸附能力, 辅助吸附残留水分, 二者协同可将气体微水含量降至标准以下。该方法需定期对吸附剂再生, 以恢复吸附能力。(2) 膜分离法: 基于渗透膜的选择透过性实现干燥。选用对水蒸气具有高透过性、对SF₆气体阻隔性强的高分子膜材料, 当含湿SF₆气体在膜两侧压力差作用下流经膜组件时, 水蒸气会优先透过膜进入低压侧被排出, 而SF₆气体则被截留并返回设备, 实现水分与气体的高效分离, 该过程无相变, 能耗较低^[2]。(3) 冷凝法: 通过主动降温使水蒸气冷凝分离。系统利用制冷单元将含湿SF₆气体温度降至露点以下, 气体中的水蒸气遇冷冷凝成液态水, 再通过气液分离装置收集并排出, 干燥后的SF₆气体经升温后返回GIS设备。此方法适用于高湿度场景, 但需精准控制温度, 避免SF₆气体液化。

2.2 系统方案设计

(1) 整体架构：系统采用模块化设计，核心包含三大模块，架构如图1所示。①旁路循环模块：通过管道与GIS设备形成闭环回路，借助循环风机驱动SF₆气体持续流经干燥系统，不影响设备主回路运行；②干燥净化模块：集成吸附柱、膜组件或冷凝单元，根据微水超标程度选择单一或组合干燥技术，实现水分深度去除；③监测控制模块：搭载微水传感器、压力传感器及PLC控制系统，实时监测气体微水含量、压力等参数，自动调节运行状态。(2) 关键部件：①吸附剂选型与再生设计：优先选用13X分子筛（高吸水容量）与活性氧化铝（高吸附速率）组合，再生采用“热再生+真空再生”双模式—热再生通过加热氮气吹扫吸附剂，脱附水分；真空再生利用负压降低水分子分压，加速水分释放，再生后吸附剂可重复使用。②循环风机与过滤器：选用耐SF₆腐蚀的离心式风机，保证气体循环流量稳定；在风机入口处设置高精度金属网过滤器（过滤精度 ≤ 1μm），防止GIS设备内的金属颗粒、绝缘杂质进入干燥系统，避免堵塞吸附剂或损坏膜组件。③智能控制单元：以PLC为核心，连接微水传感器、温度传感器、压力传感器，实时采集数据并反馈至控制系统；当微水含量超标时，自动启动干燥模块；再生过程中，自动调节加热温度与真空度，实现全流程自动化控制，减少人工干预^[1]。

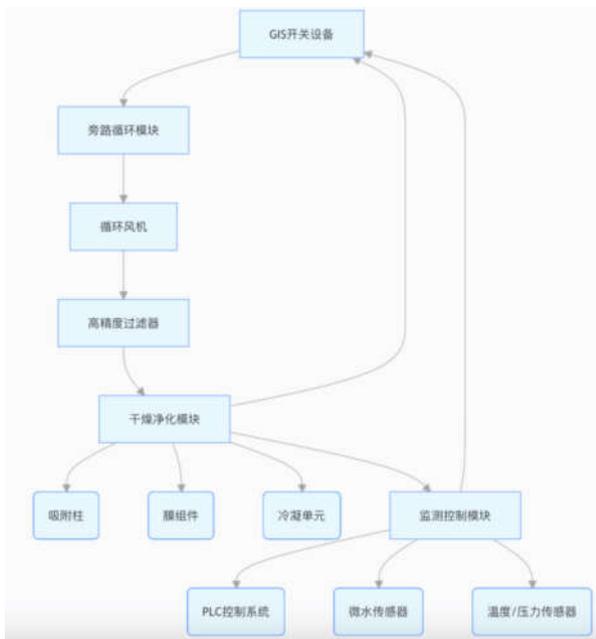


图1 GIS开关设备SF₆气体在线干燥净化系统整体架构图

2.3 技术优势

(1) 无需停机，保障连续运行：系统通过旁路循环方式接入GIS设备，干燥过程中不中断设备主回路供电，避免因停机检修导致的供电可靠性下降，尤其适用于变

电站关键GIS设备。(2) 自动化程度高，降低运维成本：依托PLC与传感器组成的智能控制单元，实现微水监测、干燥启动、吸附剂再生的全流程自动化，无需人工值守，减少运维人员工作量。(3) 吸附剂可循环，经济性优：通过热再生或真空再生技术，吸附剂使用寿命可延长至3-5年，无需频繁更换，相比一次性干燥材料，显著降低长期运行成本；同时，膜组件与冷凝单元无耗材消耗，进一步提升系统经济性。

3 GIS 开关设备 SF₆ 气体微水超标在线干燥净化系统设计及实现

3.1 硬件系统设计

(1) 循环管路布局：采用“U型+直段”组合式管路设计，全程避免90°以上急弯及封闭死角，减少气体流动阻力与水分滞留风险。管路直径根据GIS设备容积与气体循环流量匹配，主管道选用Φ25-32mm的316L不锈钢管，壁厚 ≥ 3mm，满足耐压需求；分支管路采用渐变径设计，确保气体流速稳定（控制在0.8-1.2m/s），降低系统压降（全程压降 ≤ 0.02MPa），保障干燥效率。同时，在管路最低处设置排污阀，便于定期排出可能残留的液态水。(2) 吸附装置结构优化：吸附柱采用圆柱形立式结构，内径与高度比为1:5，确保气体与吸附剂充分接触；内部设置多层多孔分布板，将吸附剂均匀分层填充（每层高度 ≤ 15cm），避免吸附剂堆积导致流场不均；通过CFD流场模拟分析，优化进气口与出气口位置（进气口位于吸附柱底部，出气口位于顶部），使气体流速偏差控制在±5%以内，提升吸附剂利用率^[4]。

(3) 密封与耐压设计：系统整体耐压等级与GIS设备匹配，≥ 1.2MPa（表压）；所有管路连接采用双卡套密封或焊接密封，密封圈选用耐SF₆腐蚀的氟橡胶（硬度70±5ShoreA），确保密封寿命 ≥ 5年；吸附柱、膜组件等压力容器均采用无缝不锈钢材质，出厂前经水压试验（试验压力1.8MPa，保压30min无泄漏）与气密性试验（氦质谱检漏，漏率 ≤ 1×10⁻⁹Pa·m³/s），满足严苛的密封与耐压要求。

3.2 软件控制系统开发

(1) 数据采集与处理：采用“多传感器+边缘计算”架构，实时采集露点（精度±0.2℃Td）、温度（精度±0.1℃）、压力（精度±0.2%FS）等参数，采样频率设为1次/秒；数据经RS485/Modbus协议传输至边缘计算单元，通过卡尔曼滤波算法去除干扰噪声，再结合历史数据建立微水含量预测模型（误差 ≤ 3%），提前预判微水变化趋势；采集数据实时存储至本地SD卡（存储容量 ≥ 16GB），并通过4G/5G模块上传至云端平台，支持数据

追溯与远程查看。(2)智能控制策略:基于PLC开发核心控制程序,设置三级控制逻辑:①阈值报警:当微水含量 $>400\mu\text{L/L}$ 时触发黄色预警, $>500\mu\text{L/L}$ 时触发红色报警并自动启动干燥模块;②自动启停:干燥过程中,若微水含量持续 $24\text{h}\leq 300\mu\text{L/L}$,系统自动停机;若微水含量反弹至 $350\mu\text{L/L}$,自动重启;③再生周期优化:根据吸附剂吸附量(通过压力差与露点变化计算)自适应调整再生周期,常规工况下再生周期设为30-60天,高湿度工况下缩短至15-20天,避免过度再生或再生不及时。

3.3 安全与环保措施

(1) SF_6 气体泄漏监测与应急处理:在系统管路接头、阀门等关键部位布置 SF_6 泄漏传感器(检测下限 $\leq 10\mu\text{L/L}$),当检测到泄漏时,立即关闭系统进出口阀门,启动内置的 SF_6 回收泵(回收速率 $\geq 5\text{m}^3/\text{h}$),将泄漏气体回收至专用钢瓶;同时触发声光报警,通过短信/APP通知运维人员,应急处理流程响应时间 $\leq 10\text{s}$,最大限度减少 SF_6 气体排放。(2)废吸附剂的无害化回收流程:废吸附剂(使用3-5年后)需进行无害化处理,流程如下:①再生预处理:先通过热再生($250\text{-}300^\circ\text{C}$)脱附水分与残留 SF_6 气体,脱附气体经吸附净化后达标排放;②分类回收:分子筛与活性氧化铝分别装入密封容器,标注“有害废物”标识;③专业处置:委托具备危废处置资质的单位,采用高温焚烧(温度 $\geq 800^\circ\text{C}$)或固化处理,确保最终排放物符合《危险废物焚烧污染控制标准》(GB18484-2020)要求,避免环境污染。

4 GIS 开关设备 SF_6 气体微水超标处理技术的挑战与改进方向

4.1 当前技术瓶颈

(1)极端湿度条件下处理效率不足:当GIS设备内 SF_6 气体相对湿度超80%时,现有吸附法易因吸附剂快速饱和导致干燥效率骤降,膜分离法则因水蒸气浓度过高出现膜渗透速率衰减,冷凝法也需更长降温时间才能将微水含量降至标准值,难以满足极端潮湿环境下的快速处理需求。(2)吸附剂再生过程能量损耗大:当前热再生需将吸附剂加热至 $250\text{-}300^\circ\text{C}$,单次再生能耗约5-8kWh;真空再生虽无需高温,但真空泵持续运行也会

消耗3-5kWh电能,且两种再生方式均需中断干燥作业,不仅增加能源成本,还降低系统整体运行效率。

4.2 优化建议

(1)研发复合吸附材料:将分子筛与石墨烯、金属有机框架(MOFs)复合,利用MOFs高比表面积特性提升吸附容量(目标比传统分子筛提高30%以上),通过石墨烯改性增强对水分子的选择性吸附,减少 SF_6 气体吸附损耗,同时提升材料耐高温性,延长使用寿命。(2)集成能源回收技术:在吸附剂再生系统中加装余热回收装置,收集GIS设备运行时的散热(温度约 $40\text{-}60^\circ\text{C}$),通过热泵系统升温后为热再生提供热源,预计可降低再生能耗40%;或利用光伏供电为真空再生真空泵供电,实现清洁能源替代,减少传统电能消耗。(3)开发物联网+AI远程监控平台:整合多设备传感器数据,通过AI算法预测吸附剂饱和时间(误差控制在 $\pm 2\text{h}$),自动调度再生作业;远程实时监控微水含量、能耗等参数,实现故障预警与远程运维,减少人工巡检成本,提升系统智能化水平。

结束语

GIS开关设备 SF_6 气体微水超标在线干燥净化处理技术,通过高效吸附、膜分离或冷凝等手段,有效解决了微水超标问题,提升了设备运行的稳定性与安全性。该技术实现了不停机处理,大幅降低了运维成本,且自动化程度高,易于远程监控与管理。未来,随着技术的不断优化与创新,该处理技术将更加成熟,为电力系统提供更加可靠、经济的解决方案,推动电网智能化、绿色化发展。

参考文献

- [1]张伟,赵何鹏.GIS设备 SF_6 微水超标原因及处理方法[J].农村电工,2024,32(05):44-45.
- [2]黄雅玲.GIS设备中 SF_6 气体水分超标问题的原因分析[J].电气时代,2022,(04):40-42.
- [3]曾晓珊,熊贞,黄维.GIS组合电器中六氟化硫水分含量偏高的处理方法研究[J].通讯世界,2020,27(06):167-168.
- [4]梅帅鹏,党培森.220kV GIS设备 SF_6 气体微水超标原因分析及应对措施[J].电力系统及自动化,2021,(12):79-80.