

## GIS 设备 SF<sub>6</sub> 气体分解物在线监测

李崇仕<sup>1,2</sup>, 胡边<sup>1,2</sup>, 王卫玉<sup>1,2</sup>, 蔡元鹏<sup>3</sup>, 姜立<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国家电投水电产业创新中心 湖南长沙

<sup>2</sup> 湖南五凌电力科技有限公司 湖南长沙

<sup>3</sup> 厦门加华电力科技有限公司 福建厦门

**【摘要】**介绍一种基于阻容法微水测量、电化学传感器、压力传感器、恒温控制技术和气体循环回充等技术应用的 GIS 设备 SF<sub>6</sub> 气体分解物在线监测系统, 分析放电能量、压力、水分、温度、氧气和内部含量等影响因素的作用机制, 应用 GIS 设备 SF<sub>6</sub> 气体分解物在线监测综合监测技术判断 GIS 设备的潜伏性故障诊断理论。

**【关键词】**在线监测; 恒压恒流; 恒温控制; 气体分解产物; 故障诊断

**【收稿日期】**2023 年 2 月 14 日 **【出刊日期】**2023 年 4 月 23 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20230010

### Online monitoring of SF<sub>6</sub> gas decomposition products of GIS equipment

Chongshi Li<sup>1</sup>, Bian Hu<sup>1</sup>, Weiyu Wang<sup>2</sup>, Yuanpeng Cai<sup>3</sup>, Li Jiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Power Investment and Hydropower Industry Innovation Center, Changsha, Hunan

<sup>2</sup>Hunan Wuling Electric Power Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan

<sup>3</sup>Xiamen Jiahua Power Technology Co., Ltd., Xiamen, Fujian

**【Abstract】**This paper introduces an online monitoring system for SF<sub>6</sub> gas decomposition products of GIS equipment based on resistance capacitance micro water measurement, electrochemical sensor, pressure sensor, constant temperature control technology, gas cycle recharge and other technology applications, and analyzes the mechanism of influencing factors such as discharge energy, pressure, moisture, temperature, oxygen and internal content, The online monitoring and comprehensive monitoring technology of SF<sub>6</sub> gas decomposition products of GIS equipment is applied to judge the latent fault diagnosis theory of GIS equipment.

**【Keywords】**Online monitoring; Constant voltage and current; Constant temperature control; Gas decomposition products; Fault diagnosis

### 引言

气体绝缘组合电器 (GIS) 是高压线路中的重要设备, 它以 SF<sub>6</sub> 气体作为绝缘和灭弧介质。设备长期运行过程中的多种缺陷会使 SF<sub>6</sub> 气体变质, 导致设备无法正常运行, 因此, 及时发现设备放电故障并提出预警具有十分重要的意义。

目前离线检测主要是通过分析 SF<sub>6</sub> 气体组分来判断故障状态, 即通过采集样本后送至实验室进行精密分析, 如红外光谱、色谱、质谱-质谱联用等方法。这些设备由于体积庞大, 无法应用于设备现场, 且采样间隔较长, 不利于及时发现设备的故障缺陷。而目前在线监测主要是采集设备内部的温度、压力、

湿度和泄漏等信号, 但无法判断组分的变化, 只能在一定程度上表征设备的部分状态信息。

为满足未安装 SF<sub>6</sub> 气体微水在线监测装置的 GIS 设备安全运行, 电站投运后执行了 SF<sub>6</sub> 气体状态是运行设备状态评价的关键参量, 为确保设备和电网的安全运行, 应按期、及时、有效地开展运行设备的 SF<sub>6</sub> 气体状态带电检测。由于 GIS 设备普遍较高且布置复杂、现场取气检测繁琐、SF<sub>6</sub> 气体压力表计不宜观察等原因, 在进行定期工作时不仅耗时、耗力, 而且准确度和及时性也不高, 给 GIS 的安全可靠运行带来诸多不便。

GIS 设备断路器气室未安装 SF<sub>6</sub> 气体分解物组

分监测传感器, 无法提供连续分解物含量数据。按照运行规程规定, 在设备运行中必须对 SF<sub>6</sub> 气体的分解物、密度和含水量进行定期检测, 检测 SF<sub>6</sub> 气体分解物、微水含量时须排放大量的 SF<sub>6</sub> 气体, 测量后还需要补气, 补气后气室中的微水含量是否合格也无法判断。SO<sub>2</sub> 是 SF<sub>6</sub> 电气设备故障时分解的主要特征组分。SF<sub>6</sub> 气体在电弧下会分解氟硫离子, 在水分含量较高下会产生 H<sub>2</sub>S。当设备内电弧 (或过热) 灼伤固体绝缘部件时, 会产生 CO。考虑到 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CO 是放电产生的一种稳定的特征气体, 以此来表征设备的运行状态是可行的。分解产物组分采用电化学方法进行检测, 电化学检测方案相对较成熟。

## 1 GIS 设备 SF<sub>6</sub> 气体分解物在线监测系统的工作原理及技术特点

### 1.1 在线监测系统原理及组成

该 SF<sub>6</sub> 在线实时监测 SF<sub>6</sub> 设备内部气体组分变化, 以实现设备内部是否出现放电故障的快速预判, 方便运行人员及时发现问题、检修设备, 或使用更为精密的检测仪器进一步确定故障程度<sup>[1]</sup>。基于大量电气设备故障实例统计, SF<sub>6</sub> 电气设备发生故障时, 设备内 SF<sub>6</sub> 气体中会产生含量显著的多种氟氧化物、硫化物。检测这些故障特征分解物, 可以快速诊断设备内部缺陷, 准确判断设备潜伏性故障, 避免事故扩大。在放电和热分解过程中及水分作用下, SF<sub>6</sub> 气体分解产物主要为 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、HF, 当故障涉及固体绝缘材料电解或热解时, 还会产生 CF<sub>4</sub>、CO 和 CO<sub>2</sub>。由于大多数故障都会导致 SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 显著增长, 所以气室诊断关注的主要检测对象是 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S, 以及 CO、HF。电化学传感器法根据被测气体在高温催化剂作用的化学反应, 改变电化学传感器输出的电信号, 从而确定被测气体中的组分及其含量。电化学法的优点: 检测周期短、灵敏度高, 适用于现场便捷检测<sup>[2]</sup>。

SF<sub>6</sub> 分解物在线监测系统中的应用, 主要包括若干个电化学分解物传感器、数据采集气体回充模块、气路循环切换模块、网络系统、监控主机、服务器 (与物联网或局域网连接)。图 1 为 SF<sub>6</sub> 分解物在线监测系统框架图。微水密度采样变送器与数据采集模块之间的通信以有线通信连接, 以若干个微水密度采样变送器检测到的数据通过有线传输到数据

采集模块, 数据采集模块通过协议经过网络系统与监控主机实现有线通信连接, 并上传到服务器, 实现远程实时监控。应用上减少了施工布线的难度, 提高施工效率, 紧跟物联网时代步伐, 提高产品在电力行业市场的竞争力。

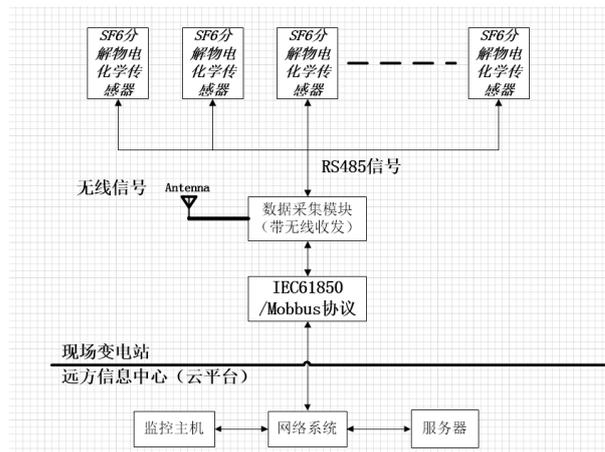


图 1 SF<sub>6</sub> 分解物在线监测系统框架图

### 1.2 微氧系统检测 SF<sub>6</sub> 气体特征组分检测技术

电化学法容易实现自动化检测, 同时对待测气体无污染和损耗, 若检测传感器处于缺氧状态, 会导致传感器零位漂移, 检测精度下降<sup>[3]</sup>。整个结构件的设计充分利用电化学传感器自身的特性, 即对电极和工作电极通过电解质进行了隔离, 结构件主要由顶盖和底座两部分组成。由于整个结构件暴露于空气中, 通过结构件顶盖设置的微孔和空气接触可为传感器对电极反应提供少量的氧气, 并利用传感器内部电解质的阻隔作用, 采取密封措施可有效防止空气等杂质气体透过传感器进入测量气室内。传感器放置在传感器的底座上, 通过底座两侧的管道通入被测气体, 与工作电极充分发生反应。顶盖通过和底座上设定的螺纹紧密契合在一起, 这样的结构设计, 便于电化学传感器更换。提高电化学传感器 O<sub>2</sub> 补充, 确保传感器检测精度, 可及时有效捕捉放电瞬间, 有利于更加准确地判断故障类型并进行故障定位。使通过在线监测气体分解产物来发现高压电气设备潜伏性故障具有有效性和实用性。

### 1.3 恒压恒流检测系统

检测过程中, 压力及流量与检测稳定性相关性较大。采用常规针阀限流的方式对压力及流量进行限制。该方法受进气压力影响较大, 导致压力及流

量不稳定, 从而影响检测稳定性及对传感器造成伤害。设计恒压恒流控制系统, 以 PWM 做为控制源, 采用可控比例阀。采用模糊 PID 软件控制方式, 达到恒压恒流控制目的, 使检测流量均匀流入传感器气室。确保测试稳定性。通过恒压恒流技术采集被测气体, 通过缓冲实现样气加压回送, 实现设备气室内 SF<sub>6</sub> 气体样品的采集、检测和循环回充<sup>[4]</sup>。

#### 1.4 循环切换监测及气路自洁净技术研究

本系统可支持循环检测多个气室, 在检测过程中需确保各个气室的气体不互相干扰, 同时管路上不能有残留, 避免对检测结果造成影响。采用全密封电磁阀, 在取气口及管路末端仅安装全密封高压电磁阀, 通过硬件自保护控制电路及软件冗余设计控制系统, 在检测过程中, 各个检测通道独立控制, 防止检测交叉干扰, 提高检测准确性。通过负压释放技术, 实现气路自洁净功能, 避免上一个气室气体对下一个气室检测的影响。

#### 1.5 气密性保护

为保证检测管路不漏气, 各个接头处均采用不锈钢卡套, 管路也采用不锈钢管。以保证整个管路的气密性及安全性。同时通过压力传感器实时监测整个管路及气室压力变化, 监测到气路发生压力改变时, 及时关闭相应电磁阀, 保证本体安全。同时为防止断电时, 整个管路发生异常, 所有电磁阀均采用常闭电磁阀<sup>[5]</sup>。同时电路上设计自锁装置, 在断电时, 保证电磁阀处于关闭状态。

#### 1.6 IOT 数据传输及监测模块

该模块由物联网传输模块进、电力专网和远程云服务构成, 传输数据包括分解物特征组分、纯度、密度、气体湿度、设备类型和环境参数等, 实时监测, 异常时可实时上报。远程云平台根据收到的数据综合判断电气设备状态变化趋势, 在达到预警限值时, 定位潜伏性故障, 及时进行整改报警、短信、微信或邮件提醒, 告知运行人员尽快采取相应的处理措施。

#### 1.7 故障预警模块

系统平台中建立 SF<sub>6</sub> 电气设备健康状态各个监测的三级阈值, 从而通过比较各种监测参数和其对应的报警值, 自动生成提示、预警、报警三级电网运行提示, a) 蓝色、黄色预警: 此级预警对整个电网的正常运行不构成威胁, 但存在比较小的隐患

(需要引起运维人员重视)。b) 橙色预警: 此级预警对整个电网的正常运行构成一定程度的威胁, 需要监测人员到现场进行查看核实。c) 红色预警: 此级预警对整个电网的正常运行已经构成相当高的威胁, 对电网的运行情况构成非常大的威胁(必须立即排除)。

当发出提示后, 系统向在线人员发出报警信息, 描述报警发生的位置、类型、设备历史运行情况等信息, 并能够使用户在查看报警信息时, 快速定位到报警发生的地点和设备。系统在图形上以专题图形式显示存在不同预警级别的区域, 可以通过图形上显示的颜色判定该处属于哪种级别的预警, 可通过鼠标点击区域显示预警信息, 便于用户在第一时间对报警信息进行处理。同时, 系统还能够以邮件和短信息的方式, 向指定运行负责人员、管理人员发送报警情况简报。

## 2 GIS 设备 SF<sub>6</sub> 气体分解物在线监测系统技术路线

### 2.1 电化学传感器在 SF<sub>6</sub> 绝缘电气设备在线监测中的应用

SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CO 电化学传感器在检测过程中是需要少量氧气参与氧化还原反应, 即对电极表面的反应需要接触氧气完成还原反应, 工作电极和被测气体中的 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CO 反应进行氧化反应, 设计微量氧补充技术, 确保电化学传感器保持有氧状态, 确保检测稳定性<sup>[6]</sup>。

SO<sub>2</sub> 气体具有较强的吸附性, 为降低吸附性需确保气体在恒定流速的方式进行测量, 在测量气室中增加微型泵, 使气室中的气体处于流动状态, 从而达到降低 SO<sub>2</sub> 被消耗速度和被测量气室吸附的目的, 提高测量的准确度与稳定度。

### 2.2 SF<sub>6</sub> 气体湿度在线监测技术应用

采用高分子薄膜聚合物湿度检测技术, 内置气路快速干燥技术, 采用局部加热及气室微扰动循环技术, 提高气室微水检测精度, 缩短检测时间<sup>[7]</sup>。

针对温度、压力等影响因素, 综合实验数据使用自校正技术, 提升检测精度。内置温度传感器, 检测气体温度, 进行温度折算; 试验研究气体湿度与压力的对应关系, 并得到压力校正曲线, 通过微型压力传感器检测气体压力, 依据校正曲线进行压力校正。

### 2.3 传感器低温应用技术

采用模糊 PID 控制技术, 使用帕尔贴半导体制冷及制热系统, 均匀温控循环系统, 均匀制冷或制热; 智能调节温度, 实现 SF<sub>6</sub> 分解物组分传感器恒温控制, 确保传感器处于稳定状态, 可大幅提高检测灵敏度及检测稳定性<sup>[8]</sup>。

### 2.4 恒压恒流控制技术应用

电化学传感器检测时受压力及流量变化影响导致检测值波动, 如果压力及流量突变会导致电化学传感器损坏, 从而导致漏液, 液体可能流到 GIS 设备本体, 导致 GIS 设备故障, 采用 PWM 控制技术, 运用压力调节阀, 当系统压力达到设定值, 确保输出压力及流量稳定, 起到恒压恒流控制, 从而提高系统检测稳定性。

### 2.5 循环回充气路和零排放系统应用技术

结合 SF<sub>6</sub> 电气设备的结构特点, 多路循环检测要求, 设计合理的气路系统, 通过模糊 PID 控制技术对检测气体进行恒压恒流控制, 采用无油压缩机, 实现样气恒压回充, 实现设备气室 SF<sub>6</sub> 气体样品的采集、检测和循环回充零排放<sup>[9]</sup>。

2.6 基于物联网 4G 传输技术的监测终端, 远程监控应用技术

应用数据通讯加密技术, 采用 4G 通讯技术, 运用硬件加密技术, 将监测数据实时上传至远程监控系统。研究传感器检测数据的采集、数据的安全传输、数据的储存和管理; 研究后台数据的处理与计算, 实现将传感器在线监测的数据实时传输给后台, 实现 GIS 气室监测的实时性, 定时性和周期性, 实现各报警阈值的灵活设置和至少两种报警方式(短信、邮件)的研究基于智能传感器技术, 湿度采用薄膜聚合物技术, 分解物组分采用电化学传感器技术。基于信号智能采集及滤波技术, 对数据进行预处理及故障诊断预分析。采用 4G 无线技术, 实现检测数据上次至检测终端监控系统接收检测上报的数据, 将接收的数据自动绘制成变化趋势图, 供观察气体的湿度或分解物含量变化, 将测量监测的 SF<sub>6</sub> 典型分解产物趋势规律数据结合起来, 建立相互关联的数据系统, 为潜伏性故障诊断提供数据支撑<sup>[10]</sup>。远程监控系统集中监控数据变化, 通过该系统可在计算机上实现数据采集, 可设置。

### 3 SF<sub>6</sub> 气体分解物在线监测创新点

SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CO、多组分监测, 实时分析与诊断 SF<sub>6</sub> 断路器劣化状态和趋势; MODBUS 通信, 远程主站对分布各变电站断路器实时安全预警 SF<sub>6</sub> 气体微循环功能, 解决当前普遍只监测 SF<sub>6</sub> 接头局部死角的不足; 采样气体自动存储以及 SF<sub>6</sub> 断路器低压自动补齐技术, 零排放, 安全、环保; 管接头采用自封接头, 确保气瓶换瓶时不带入水分; 借助现有的开关接口即可实现, 不需改变断路器结构, 安全可靠; 用户自行设置采样周期, 定时检测和分析, 高效、经济、实用; 现场智能控制, 无需人工操作。远程数据平台, 及时、方便; 气体自动回充功能; 专家诊断系统可对故障进行智能诊断并提出处理意见; 具备自检功能, 可对主要传感器及部件进行自检, 故障提示; 传感器温度自动补偿功能。

### 4 结语

该系统实现了对 GIS 设备是否存在潜伏性故障进行实时监测, 为保证身背安全稳定运行, 实现故障预防提供了必要的信息与决策建议。该系统的建立, 为检测专业人员提供完善的现场数据分析软件, 同提供了特有的针对 SF<sub>6</sub> 气体设备专家诊断及趋势分析功能, 使专业人员能够通过分解物组生成分析全面了解设备整体健康状态。专业技术人员利用该系统可实时查看 GIS 设备是否存在故障, 不用耗费人力财力进行离线检测试验。系统的投运, 为断路器故障诊断积累了大量现场实测数据, 为后期进行生产决策系统建设故障建模分析提供了丰富的历史数据支持。该系统可推广应用到其它水电厂, 对于预防 GIS 设备局部放电、温度过热等恶性事故发生有非常重要的应用意义, 同时能实现 GIS 设备多方位状态监测, 为实现 GIS 还是被状态检修打下良好基础。

### 参考文献

- [1] 尹超勇,徐浩,许立强,等. 一起线路高阻接地故障引起的主变越级跳闸事故分析[J]. 湖南电力,2020,40(4):51-54.
- [2] 王凯. 基于磁条编码器的水电机组蠕动监测装置的应用[J]. 湖南电力, 2022, 42(4): 60-63.
- [3] 潘华,李辉,严亚兵,等.智慧变电站二次及辅控系统新技术分析[J]. 湖南电力, 2020, 40(4):68-73.
- [4] 潘臻,温定筠,彭鹏,等. SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测技术在开

- 关类设备状态诊断中的应用[J]. 高压电器, 2016,52(7): 196-201.
- [5] 季严松,王承玉,杨韧,等. SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测技术及其在 GIS 设备故障诊断 中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(2):100-103.
- [6] 游荣文,黄逸松. 基于 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 体积分数测试的 SF<sub>6</sub> 电气设备内部故障的判断[J]. 福建电力与电工,2004, 24(2):15-16.
- [7] 史会轩,钱进,熊志东,等. SF<sub>6</sub> 电气设备分解产物在线监测方法研究[J]. 高压电器,2014,50(1):56-60.
- [8] 颜湘莲,王承玉,宋杲,等. 气体绝缘开关设备中 SF<sub>6</sub> 气体分解产物检测与设备故障诊断的研究进展[J]. 高压电器,2013,49(6):1-9.
- [9] 刘锦杰,叶波,刘佳薇,等.一种基于云模型的 SF<sub>6</sub> 高压断路器状态评估方法[J] 高压电器,2019,55(4):031-038.
- [10] GB / T 8905-2012 六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则.

**版权声明:** ©2023 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/>



**OPEN ACCESS**