

基于电化学传感器的SF₆分解产物检测系统研究

介绍了电气设备SF₆气体放电分解产物的影响因素，重点分析了SF₆气体分解物常用检测方法的优缺点，提出适应于现场检测的电化学传感器数据新型处理分析方法，研究SF₆分解产物综合检测系统，通过微积分分析技术、动态载气误差修正、抗交叉干扰设计、空气洁净单元及动态温度校正补偿技术的联合运用，提高了系统的响应时间、测量准确度以及数据的准确性，在实际现场检测中产生了良好的应用效果。

王永奇 陈宏刚 刘 媛 樊新鸿 张有丹/国网甘肃省电力公司电力科学研究院

0 引言

电力系统中高压电气设备内部故障以绝缘性故障较多，而电气设备绝缘故障往往表现为设备内部局部放电，局部放电等潜伏性故障可通过带电检测技术及时检测发现。目前常用的带电检测方法主要有成像类带电检测技术、局部放电类检测技术和SF₆气体成分分析等。

目前常用带电检测方法中，红外热成像带电检测法的红外辐射在固体中穿透能力极其微弱，不能测量对于距离设备表面较远的某些设备内部故障部位；紫外成像带电检测法的检测距离、环境湿度、大气气压、温度和海拔等主要因素对紫外光子计数值的影响较大。超声波带电检测法对发现出的故障缺陷作定性、定量十分困难，并对检测人员的实际经验和技术水平要求较高。以上带电检测方法均具有检测局限性。而SF₆气体成分分析法是通过分析分解产物主要成分的含量以及水分含量多少判断内部故障，检测方法受外界环境影响较小，是

目前检测SF₆电气设备内部是否存在局部性放电及过热性缺陷等潜伏性故障的最有效方法。

近几年来，国内外学者提出利用SF₆气体分解产物分析的方法来检测与诊断设备内部故障^[1-3]。SF₆气体具有优异的电气性能和稳定的化学性质，是电气设备理想的绝缘灭弧介质。SF₆气体在电弧作用下很容易产生分解物，分解出硫化物、氟化物等酸性物质，这些酸性物质与绝缘材料、水分等进一步反应生成剧毒、强腐蚀性的物质，会使设备内部金属部件出现腐蚀及绝缘材料的性能劣化，降低了SF₆电气设备绝缘性能，给设备安全运行和现场人员人身安全带来极大的隐患。随着SF₆气体分解产物检测技术发展，通过检测SF₆气体分解物含量来预测电气设备产生的可能故障及故障部位。

1 SF₆气体放电分解产物的影响因素

研究表明，SF₆气体分解产物的成分及含量多少与设备内部放电类型、放电能量、绝缘材料、含水量及氧气含量等因素有直接关系^[4-5]。一般而言，SF₆最初的分解产物为SF₄、SF₅等低氟化物和F原子，低氟化物可与气态水分和氧气发生进一步反应，生成SF₄、SOF₂、SO₂F₂、S₂F₁₀、SOF₄、SO₂和HF等分解物；活泼的F原子可和金属发生反应，生成金属氟化物。在固体绝缘物过热时也可能有CO、CO₂等气体生成。



王永奇/工程师

关键词/Keywords

电气设备 ·
SF₆分解产物 ·
电化学传感器 ·
现场检测 ·

SF₆气体电气设备在放电情况下分解出SO₂、H₂S、HF、SOF₂、CO和CO₂等产物。当设备发生局部放电时，分解物含有SO₂、H₂S和HF；当设备发生热故障时，分解物含有SO₂、HF、H₂S和SO₂F₂等物质；当涉及固体绝缘性故障时，SF₆气体分解物中有CF₄、H₂S、CO和CO₂等物质。在现阶段SF₆气体分解产物检测中，主要检测分解物中的SO₂和H₂S气体，其次检测CO、HF等组分，这样可以快速地预测可能产生的SF₆气体电气设备故障及其故障定位。

2 SF₆气体分解物检测方法

目前，分析SF₆气体中分解物的检测方法很多，如化学分析法、检气管法、红外光谱法、气相色谱法和电化学传感器法等^[6-9]，以下对常用的检测方法及其原理、特点进行分析。

1) 化学分析法。该方法为常规检测SF₆气体中的酸度和测定气体可水解氟化物的含量。特点：耗气量大，试验较烦琐，易受取样和操作因素影响。

2) 检气管法。目前常用的是SO₂、HF和H₂S检测管，主要用于测定SO₂、HF、H₂S、SOF₂和CO气体。优点：操作简单、简便易行且耗时短；缺点：检测管的检测分组有限，检测准确度较差，检测管只能一次性使用并有一定检测周期。

3) 红外光谱法。主要用于测定SO₂、SOF₂、SOF₄、SO₂F₂和CF₄。红外吸收光谱法的不足之处在于其准确度、灵敏度较低，同时其光谱复杂，谱带很多，测量谱峰容易受到其他峰的干扰，导致吸收定律存在偏差。

4) 气相色谱法。利用热导检测器和火焰光度检测器测定SF₆分解物，大多在实验室进行检测。优点：气体分离效率高，准确度可靠，样品用量较少，检测灵敏度较高；缺点：检测能力受标准样品和色谱分离能力的限制，检测时间较长，易受取样水平影响。

5) 电化学传感器法。该方法是利用待检测气体的成分、浓度与按一定规律转换成相应电信号

之间存在的关系来确定被测物的含量。在电气设备SF₆气体分解物现场检测中应用比较普遍。主要用于检测SF₆气体中的SO₂、H₂S、HF和CO等。优点：操作简单，消耗气体较小，简便易行，重复性好且耗时短，不被其他气体污染，检测准确，适用于现场检测；缺点：寿命短，需定期校验，与其他气体的交叉灵敏度大等。

通过对现有SF₆气体分解产物检测方法优缺点分析，本系统选用电化学传感器法进行电气设备SF₆气体分解产物的检测，并针对电化学传感器在实际应用中存在问题进行优化设计，采用电化学传感器对SF₆气体分解物中的SO₂、H₂S和CO浓度等指标进行测量，具有响应快、准确度高的优点，故有很大的发展潜力。

3 SF₆分解产物综合检测系统

3.1 新型数据处理方法

目前现场检测SF₆气体的仪器主要是采用电化学传感器原理进行检测。电化学传感器接触到足量的特征气体后，电极之间产生的电流随着时间缓慢变大，到3 min左右时，电流基本达到稳定，传统的仪器都是用稳定电流的大小来反映特征气体浓度。因而，传统的采用电化学传感器的仪器都至少需要通入气体3 min，按气体流量200 mL/min计算，至少需要消耗600 mL气体。对于高压互感器这类内储SF₆气体较小的电力设备，检测过程中气体消耗量比较大。

针对电化学传感器的气体检测仪测量时间长、气体消耗量大等问题^[5-6]，本文提出了一种基于电化学传感器的信号数据新型数据处理分析方法，利用数字技术改进数据处理方式，缩短测量时间，尽量减少每次的现场测试耗气量。

不同浓度的气体以固定的流量通入电化学传感器时会有不同的反应，低浓度气体通入时，传感器产生的电流上升斜率小，最终稳定下来；高浓度气体通入时，传感器产生的电流上升斜率大，最终稳定下来。而传统的检测仪器是通过检测最终稳定下来的电流值来测量气体浓度的。而

新型数据处理方法只需少量气体通入测量单元，对传感器响应信号进行微积分计算得出对应额定流量的稳定值。当给传感器通入气体后，在传感器电流值上升阶段，计算在一个固定的时间段电流曲线的面积，因为不同浓度的气体会有不同的斜率，因而就会有不同的曲线面积，通过曲线面积换算出对应的气体浓度。不同浓度气体的曲线面积计算如图1所示。检测系统采样新型数据处理技术后，测量时间可以缩短到75 s，消耗气体大于200 mL，从而达到了节省测试气体的目的。

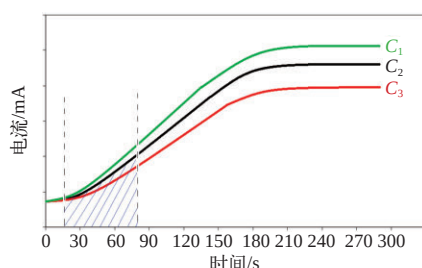


图1 不同浓度的气体的曲线面积计算

3.2 动态载气误差修正

仪器标定使用与被测设备绝缘气体不同的载气会带来测量误差，仪器在测量过程中样气与空气混合也会带来测量误差，特别是为避免后者情况，现场必须配有较高纯度的SF₆气体来冲洗采样管路，这样测试效率低，而且浪费气源。仪器设计应能动态修正因上述两种原因带来的误差。

设备除在校准时采用以SF₆为平衡气的标准气体外，还专为现场使用设计了独特的CGC工作模式，如图2所示，以消除被测气室SF₆与外界空气形成的混合载气带来的测量误差，特别适用于现场使用无SF₆纯气吹扫采样管路的情况。



图2 CGC工作模式

3.3 动态温度校正补偿技术

电化学传感器受环境温度的影响较大，在-20~50℃之间，其输出数据最大可相差20%，尤其传感器灵敏度的变化会给仪器带来最大16%的测量误差。环境温度对测量准确度如此大的影响，要求测量仪器必须对温度参数进行校正，这样才能保证在工作温度范围内检测仪器的测量准确度^[9]。

样气温度和环境温度变化会影响电化学传感器的特性（基线与量程），从而影响测量准确度。仪器计算机系统应内置传感器温度特性曲线，并通过独立的测温电路实时获取样气与环境温度，根据传感器温度特性曲线对测量结果进行零点与灵敏度双重动态校正，确保测量结果的可靠性和准确性。以H₂S传感器为例，给出了H₂S传感器温度特性曲线如图3所示。

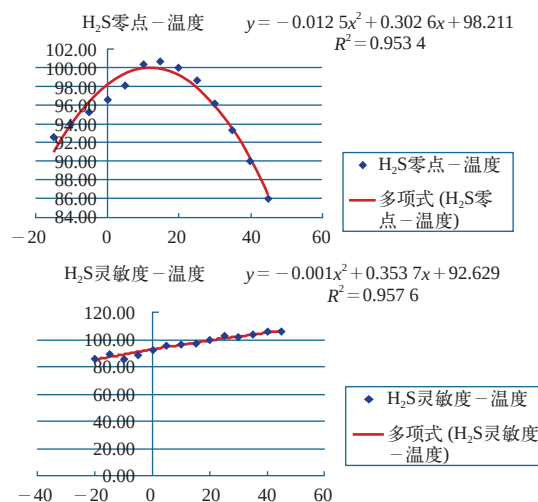


图3 H₂S传感器温度特性曲线

3.4 泵压式气室样气清除技术

电化学气体传感器的气体交换室都采用扩散式结构设计，这会导致气体滞留在气室里，在相邻的两次测量中，第一次检测的残留气体会干扰第二次测量的准确性，尤其是使用多个电化学传感器同时测量有多种混合气体的情况下更为严重^[8]。同时，在装有电化学传感器的气室中，气室残留气体会减少传感器的使用寿命。

针对上述问题，检测系统采用泵压式气室样

气清除技术，气体检测单元每次测量完毕均应采用泵压的方式将外界空气吸入设备内部，吸入的空气经过滤干燥后导入气室，形成气室内外压力差，排出气室内气体，保证气室无样气残留，最大限度保证测量准确性，同时延长了电化学传感器的使用寿命。

3.5 双量程、抗干扰设计

异常气室的 SO_2 浓度往往高达几百甚至上千百万分比深度，并且会扩散至相邻气室，导致相邻气室均有较高的 SO_2 含量，在此情况下，交叉干扰亦将导致其他组分传感器处于过载状态，低量程传感器长时间过载直至烧毁，并无法比较各气室 SO_2 浓度高低，难以最快时间进行故障定位^[9]。

该检测仪器设计了双量程 SO_2 传感器组件，测量时先打开大量程 SO_2 通道进行预测量，此时其他组分传感器通道处于关闭状态。当大量程 SO_2 通道未检测大浓度 SO_2 时，会自动切换至低量程检测通道完成多组分高准确度检测。此设计为现场故障快速定位提供了方便，同时保护了各组分传感器，也满足了低浓度、高准确度测量的要求。

采用多个电化学传感器检测 SF_6 电气设备中混合气体，当某一个电化学传感器对某种特定气体显示有交叉干扰时，会影响到检测的准确性^[10-11]。仪器气体检测单元应内置寿命长于传感器的特定的化学过滤器或选择内置过滤器的传感器，解决相互交叉干扰问题，在干扰气体接触到电化学传感器的感应电极之前就将干扰气体过滤掉，消除干扰气体对测量准确度造成的影响，提高仪器检测的准确性。抗交叉干扰界面图如图4所示。



图4 抗交叉干扰界面

设备在 SO_2 、CO传感器的前端放置化学过滤器，消除干扰气体，通过软件算法准确扣除交叉干扰，以确保仪器测量的准确性。

4 检测系统实际应用

为验证基于电化学传感器的 SF_6 分解产物检测系统的使用性能，在实验室与传统检测仪器进行了比对测试：传统检测仪器测试气体流量为590 mL/min，基于电化学传感器的 SF_6 分解产物检测系统测试气体流量为300 mL/min。测量时间也缩短到75 s就完成检测。系统检测操作流程如图5所示。

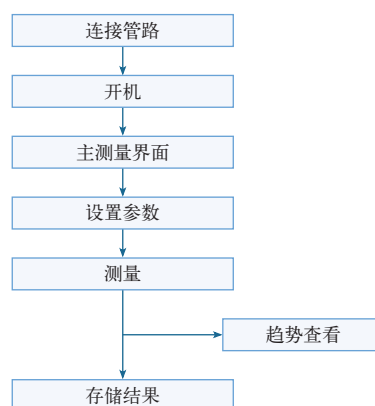


图5 系统检测操作流程

该检测系统已成功应用于某省330 kV及以上电压等级变电站内 SF_6 电气设备气体检测中，通过检测发现多台设备 SF_6 气体分解产物超标问题，及时的对问题设备进行处理，避免了设备故障事故的发生，保证了电网的安全稳定运行，产生了巨大的经济效益。

5 结束语

1) 系统采用气体电化学传感器技术和微积分分析技术相结合，只需少量气体通入测量单元，对传感器响应信号进行微积分计算得出对应额定流量的稳定值，即可同时监测 SF_6 气体分解产物中 SO_2 、 H_2S 和CO杂质组分。在最大限度节省气体用量的条件下，快速完成测量过程。

2) 系统通过内置传感器温度特性曲线，并通过独立的测温电路实时获取气体与环境温度，根

据传感器温度特性曲线对测量结果进行零点与灵敏度双重动态校正,确保可靠的测量结果。

3) 通过设计双量程SO₂传感器组件,测量时能快速定位现场故障部位,同时保护了各组分传感器,也满足了低浓度、高准确度测量的要求。

4) 使用多个电化学传感器同时测量混合气体,会产生交叉干扰,影响到检测的准确性。系统通过抗干扰设计,内置了特定的化学过滤器,检测时过滤干扰气体,从而减少特定气体的干扰,确保测量值的真实准确性。

5) 该检测系统已应用到某检修公司的SF₆带电检测工作中,通过检测发现多台电气设备SF₆气体分解产物超标问题,及时地对问题设备进行处理,避免了SF₆电气设备故障的发生,确保电网设备的安全运行。

参考文献

- [1] 张国光. 电气设备带电检测技术及故障分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 颜湘莲, 王承玉, 季严松, 等. 气体绝缘设备中SF₆气体分解产物与设备故障关系的建模 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (22): 231-238.
- [3] 唐炬, 杨东, 等. 基于分解组分分析的SF₆设备绝缘故障诊断方法与技术的现状 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (20): 41-54.
- [4] 夏恒桓, 李仕林, 等. 六氟化硫分解产物检测及设备故障判断浅析 [C]. 中国电机工程学会年会, 2010.
- [5] 林涛, 韩冬, 钟海峰, 等. 工频交流电晕放电下SF₆气体分解物形成的影响因素 [J]. 电工技术学报, 2014 (2): 219-225.
- [6] 张晓星, 姚尧, 唐炬, 等. SF₆放电分解气体组分分析的现状和发展 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (4): 664-669.
- [7] 毛建坤, 汤会增, 洪西凯, 等. SF₆气体分解物组分检测法在GIS局部放电故障诊断中的应用 [J]. 电气技术, 2016 (8): 99-102.
- [8] 赵小勇. SF₆放电分解气体组分分析 [J]. 电气技术, 2013, 14 (1): 75-76.
- [9] 毛光辉, 朱建军, 等. 电化学传感器检测SF₆分解产物的影响因素及现场应用 [J]. 电力科技与环保, 2016, 32 (4): 60-62.
- [10] 周艺环, 叶日新, 等. 基于电化学传感器的SF₆分解气体检测技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (9): 2133-2139.
- [11] 王晶晶, 周海. 电化学方法在六氟化硫气体分解产物检测的偏差性研究 [J]. 贵州电力技术, 2015, 18 (10): 25-30.

(收稿日期: 2017-02-14) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告