

基于物理化学检测技术的开关柜 潜伏性故障检测方法

何明, 余乐欣, 严铿博, 袁帅, 李思尧, 汪明科

(深圳供电局有限公司 罗湖供电局, 广东 深圳 518000)

摘要: 针对一些历史开关柜潜伏性故障诊断方法检测精度较低的问题, 该研究设计了一种新型开关柜故障诊断系统, 采用一种物理化学检测技术, 通过分析六氟化硫 (SF_6) 分解产物来检测开关柜故障原因, 利用离子迁移法分析环境中的 SF_6 离子, 进而掌握变电站开关柜中气体情况, 通过差分能量检测算法对检测数据进行分析, 计算出气体泄漏对变电站开关柜的影响, 制定出最优 SF_6 填充范围, 为开关柜安全运行提供帮助; 试验结果表明, 该研究检测数据平均精度高, 最高精度为 92%, 体现出该研究基于 SF_6 气体分解物理化学检测方法的优越性。

关键词: 物理化学检测技术; 开关柜; 故障诊断; 六氟化硫; 差分能量检测算法

Detection Method for Latent Faults of Switchgear Based on Physical and Chemical Detection Technology

HE Ming, SHE Lexin, YAN Kengbo, YUAN Shuai, LI Siyao, WANG Mingke

(Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd. Luohu Power Supply Bureau, Shenzhen 518000, Province)

Abstract: In view of the low detection accuracy of some historical switchgear latent fault diagnosis methods, a new switchgear fault diagnosis system is designed in this paper. A physicochemical detection technology is adopted to detect the cause of switchgear fault by analyzing the decomposition products of sulfur hexafluoride (SF_6), and the ion migration method is used to analyze the SF_6 ions in the environment, so as to master the gas in the switchgear of the substation closing cabinet. The detection data are analyzed through the differential energy detection algorithm, the influence of gas leakage on the substation closing cabinet is calculated, and the optimal SF_6 filling range is formulated to provide help to the safe operation of the switchgear. The experimental results show that the average accuracy of the detection data is high, and the maximum accuracy is up to 92%, which reflects the superiority of the physical and chemical detection method based on the SF_6 gas decomposition.

Keywords: physicochemical detection technology; switch cabinet; fault diagnosis; sulfur hexafluoride; differential energy detection algorithm

0 引言

状态检测对于提高气体绝缘开关柜设备的可靠性和节省维护成本非常重要, 历史研究结果表明, 绝缘故障是 60% 以上开关柜设备潜伏性损坏的根本原因。其中, 出现故障问题的局部放电 (PD, partial discharge) 和局部过热 (POT, local over-thermal) 现象是绝缘失效的关键指标^[1]。因此, 检测 PD 和 POT 以防止严重的开关柜故障非常重要。常规技术检测大多采用电压传感器、电流检测电路等方式, 这种方法虽然在一定程度上提高了开关柜故障检测水平, 但是仍旧存在一定的局限性。比如检测能力差、检测滞后等, 随着人工智能技术的飞速发展和气体检测技术的逐步应用, 为开关柜的故障检测提供了新思路^[2-3]。

文献 [4] 利用分布式半导体激光器全面扫描变电站开

关柜整体结构, 对变电站开关柜故障诊断具有较高的针对性, 更为全面的掌握变电站开关柜气体泄漏情况。但这种方法采用的激光器成本较高, 对人体危害较大, 因此不具有普遍适用性。文献 [5] 设计出快速傅立叶变换 (FFT, fast fourier transform) 开关柜故障检测方法, 利用特征分解法和紫外光谱提取环境元素, 进而分析出变电站开关柜中气体分解情况。但在运行过程中容易引起高低频噪声, 对变电站开关柜造成影响, 不利于电力系统的稳定运行。文献 [6] 通过六氟化硫 (SF_6) 气体作为绝缘介质, 将其用在高压电器中具有绝缘和灭弧能力, 该技术在变电站中能够大量使用, 但对于该气体如何使用或者具体怎么使用, 这个合适的时间点没有明确说明。导致工业应用过程中现场定位泄漏点和检测距离都存在明显的技术漏洞。文献 [7] 应用了 FLUENT 软件, 通过该技术结合 SF_6 气体

收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-04-11。

作者简介: 何明 (1988-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事中压设备管理方向的研究。

引用格式: 何明, 余乐欣, 严铿博, 等. 基于物理化学检测技术的开关柜潜伏性故障检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 54-59.

泄漏的两相流三维非定常态湍流流动特征, 搭建了三维传递现象模型, 实现了真型尺寸 GIS 站室泄漏 SF₆ 气体分布规律仿真, 该技术虽然具有一定的技术进步性, 但是分析过程中, 没有气体泄漏方面进行研究。因此综合上述技术, 该研究进行了以下技术设计。

1 总体方案设计

对于上述情况, 本研究通过物理化学检测技术对变电站开关柜进行故障检测分析, 通过 SF₆ 气体分解产物来检测 PD 和 POT 这两种故障, 之后通过离子迁移法处理空气中含有的 SF₆ 气体离子浓度, 利用差分能量检测算法制定变电站开关柜 SF₆ 使用策略, 使变电站开关柜运行更为安全。此外, 本文将以上内容结合并构建了开关柜故障诊断系统, 如图 1 所示。

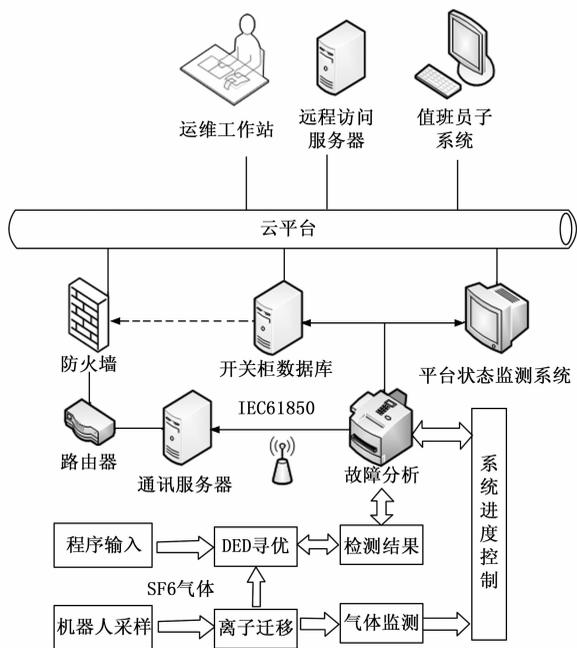


图 1 开关柜故障诊断系统

图 1 中对于开关柜故障诊断系统结构以智能巡视机器人环境分析芯片为核心, 分析的设备主要为开关柜, 该设备的检测参数包括额定电压、回路电流, SF₆ 泄漏前后变电站无功和有功功率等。通过提取这些数据信息能够有效地获取开关柜运行过程中不同状态。在具体应用过程中, 为了提高安全能力, 通过机器人携带采集装置实现开关柜数据信息。随着工业技术的发展, 机器人在工业生产过程中具有极好的感知、决策、执行等基本特征, 实现了开关柜这种危险、繁重、复杂的工作, 提高工作效率与质量。提取到的数据信息通过离子迁移将封闭设备中气体数据迁移到采集器中, 算法寻优通过 DED 程序划定 SF₆ 最佳填充范围, 寻优数据结果通过 SPI 总线将数据传递给站内主控机, 算法寻优的方式很多, 比如改进量子遗传算法 (QGA, quantum genetic algorithm) 将经典量子计算与传统遗传算法的操作方式相互融合产生的新的优化算法。该算法在应

用过程中能够在自定义的寻优数据信息范围内查找优化精度较高的信息。在一种具体应用过程中, 还可以将量子交叉与模拟退火操作融入到该方法, 通过这种交融互助的方式能够避免量子遗传算法陷入局部最优解。以提高算法寻优的精确度。由于该算法不是该研究主要提及部分, 出于篇幅的限制, 该研究不做详细说明。待完成信息分析处理后, 将结果交由智能终端执行^[6-7]。

辅助控制硬件上主要包括现场和通信设备及后台监控, 根据机器人扫描数据由 TMS+XD 联合芯片进行控制, 将变电站开关柜环境数据导入检测机中, 同时扫描窗口并将数据储存在数据库中。TMS 芯片比如 TMS320LF2407APG 芯片或者 TMS320F2806PZA 芯片。该芯片作为一组应用程序接口 (APD), 能够用于配置和控制片上外设, 大大提高了开关柜故障诊断系统控制能力。XD 系列芯片比如采用 XD308H, 该芯片是一款 18~600 V 超宽范围输入的高压降压型 AC-DC 转换器电源芯片, 能够适应 12~380 VAC 超宽电压输入 (外部加整流滤波), 在该研究中具有较好的控制能力。在检测机中设有离子迁移功能, 通过分析 SF₆ 泄漏情况给出最终检测结果, 并对产生气体泄漏设备进行故障报修, 完成离子迁移检测进度。整个 SF₆ 气体泄漏检测系统的设计能够保证智能巡视机器人对 SF₆ 的快速反映^[8-9], 对变电站开关柜气体泄漏情况更加具有针对性, 设计多个扫描窗口能够避免气体泄漏过多造成检测机构运行错乱, 加强了检测系统运行的稳定性。

2 基于 SF₆ 的物理化学检测技术

2.1 SF₆ 分解机理

开关柜潜伏性故障局部放电 (PD, partial discharge) 和局部过热 (POT, local over-thermal) 产生的能量将导致 SF₆ 分解, 其成分信息可以用来诊断^[10]。为此, 该研究采用一种物理化学检测技术, 通过分析 SF₆ 分解产物来检测 PD 和 POT 这两种故障, 难以受到噪音和电磁干扰的影响。根据 SF₆ 的分解机制, 该研究提出概念图了“区域模式”, 将反应区分为 3 个区域, 即发光区、离子漂移区和主气量, 如图 2 所示。

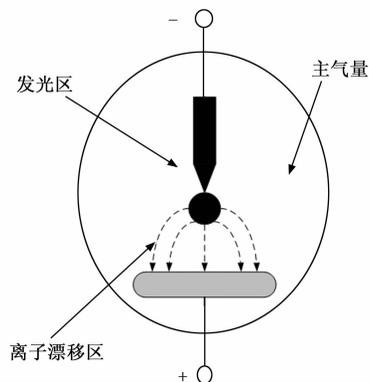


图 2 SF₆ 的分解机制概念图

如图 2 所示,在发光区,电场强度很高,能量更集中。由于电子碰撞, SF_6 、 H_2O 和 O_2 将发生电离。 SF_6 将在该地区分解并产生大量氟化物。该区域能够将不同的微分子发生化学反应,通过裂分成不同的化学微量元素实现气体裂变, SF_6 、 H_2O 和 O_2 发生电离之后,将出现氟化物,该物体出现后,能够从侧面反映出开关柜潜伏性故障局部放电、或者局部过热等多种数据问题,从视觉角度可以将宏观的故障潜在问题转换为微观数据分析。因此该部分可以通过光等视觉形式提醒用户。

离子漂移区是指辉光与平面阳极之间的区域,负离子在该区域的电场作用下漂移。在主气量中,PD 产生的一次分解产物会逐渐扩散到主气量中,然后发生气相反应或表面反应,生成各种二次分解产物^[11-12]。当放电区域中有有机绝缘材料和金属电极时,会产生碳化物。离子在电场中做加速运动时,很容易产生各种形式的碰撞,再结物理化学,通过动能定理进而求出离子在漂移区的速度,通过这种方式能够控制二次分解产物。这是由于速度不同,撞击力度不同导致的产物不同的原因。

主气体体积是根据上述方法的碰撞产生不同的结果,在具体应用过程中,需要设置主气体体积的阈值,当超过一定的阈值,则提醒用户气体分解过多,需要进行把控,当低于阈值时,可以适当放松警惕,说明开关柜潜伏性故障局部放电或者过热现象不是很明显。

从以上分析可以看出,PD 下 SF_6 的分解反应过程非常复杂,分解组分的形成特征也会受到各种环境因素的影响,如放电能量、缺陷类型、 $\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ 分子、电极材料、放电电压等。相对而言,POT 下 SF_6 的分解过程较为复杂,相关研究较少。然而,从之前的研究结果可以确定, SF_6 在 PD 和 POT 下常见的主要稳定分解产物,包括 SOF_2 、 H_2S 、 CO_2 和 SO_2 ^[13],下面将分别阐述其分解原理。

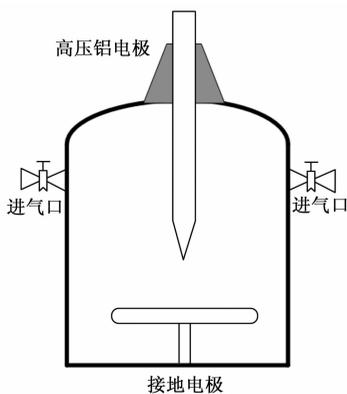


图 3 PD 下 SF_6 分解室

图 3 显示了在 PD 下用于 SF_6 分解的气体室,该气体室为密封容器。腔室的平均壁厚为 15 mm,因此其压力公差为 0.5 MPa。气室由不锈钢制成,能够抵抗 SF_6 分解产物的腐蚀。人工缺陷与瓷套管内的高压导线相连。设计了两

个加油口。一个用于实现 SF_6 。另一个用于从燃烧室中吸收分解产物^[14]。高压电极由铝制成,接地电极由钢制成,以便更好地模拟实际变电站开关柜设备检测过程。关于 SF_6 热分解室由一个真实的隔离开关室模拟如图 4 所示。

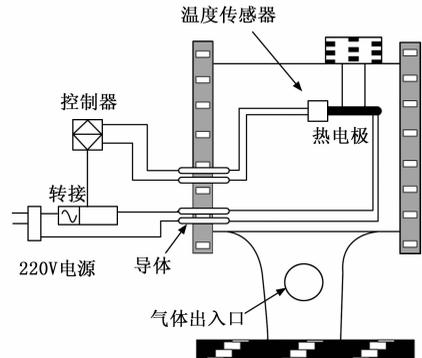


图 4 POT 下 SF_6 分解室模型图

图 4 中热分解室的体积约为 350 L,加热棒固定在燃烧室中,与燃烧室不接触。加热棒由不锈钢制成,其长度和直径分别为 200 mm 和 10 mm。采用 PID 控制器对温度进行调节。PID 控制器(比例-积分-微分控制器),在控制架构上,通常包括比例单元(P)、积分单元(I)和微分单元(D)等。在工业控制技术领域中,该控制技术是比较常见的反馈回路部件。通过该技术能够将 POT 下 SF_6 分解室内的气体集中起来,并通过设置的参考值进行对比、分析,将实际值与设置的阈值进行对比分析。当与设置的参考值之间存在的误差不大时,则可以将该数据室内的数据信息保持在参考值附近,下次依据该数据进行参考。通过这种方式的控制,能够使系统更加准确、稳定,提高数据判定能力。然后通过隔离开关室的接口采用 SF_6 分解气体^[14]。之后,对 PD 与 POT 中化学气体 SF_6 分解进行成分检测,在此之前,为了排除温度和湿度的影响,所有试验都保持在相同的环境中。试验前用氮气清洗试验箱,然后在 0.3 MPa 的压力下填充 SF_6 。对缺陷模型施加高压,并缓慢增加,直到示波器能够检测到局部放电,此时的电压称为起始电压^[15]。为了获得稳定的局部放电,将测试电压设置为高于起始电压,完成对 SF_6 分解产物进行采样的准备工作。

2.2 离子迁移法检测 SF_6 泄漏技术

根据变电站开关柜环境数据,该研究采用离子迁移法检测 SF_6 泄漏技术,通过将 SF_6 离子浓度迁移到气体分析仪中,从而判断气体泄漏浓度对变电站开关柜运行的影响,并记录事件发生时间,为后续人工维护和检修提供帮助,离子迁移技术原理如图 5 所示。

将待检测设备中气体离子通过发射源送入离子迁移装置中,载气离子和 SF_6 离子在分离源的作用下发生电离反应,形成分化性的多种离子。经过电场的作用,气体离子通过隔离门进入漂移区,隔离门周期性开启,泄漏的气体离子在通过隔离门时被检测。带电离子在漂移区中不断碰

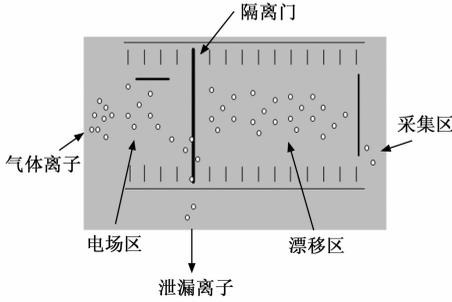


图 5 离子迁移原理图

撞, 由于气体离子的迁移速率存在差异, 因此在漂移区中完成分离, 在采集区由收集板检测^[16-17]。变电站开关柜利用离子迁移法对泄漏的 SF₆ 气体离子进行检测, 检测框图如图 6 所示。

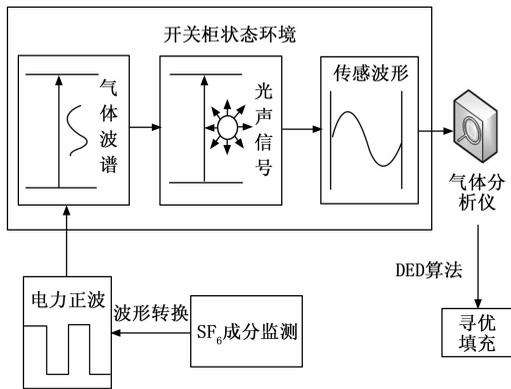


图 6 离子迁移检测框图

离子迁移检测技术能够将变电站开关柜中 SF₆ 气体迁移到分析仪中, 通过电力设备允许泄漏 SF₆ 气体浓度调整变电站开关柜阀门通道, 更为有利于设备的安全操作。离子迁移技术在运行过程中通过分析变电站开关柜中 SF₆ 泄漏数据, 对采集的数据信息进行波形转换, 由此形成电力正波, 本文采集的气体泄漏以方波形式为例, 之后对电力正波进行变电站开关柜环境分析, 根据分析的气体波谱和光声信号建立图形样式, 进而建立传感波形, 电力正波转换的波形一般为正弦或者余弦波形, 波形数据主要来源为 SF₆ 泄漏离子, 通过波形传输到气体分析仪中, 最终通过差分能量检测 (DED, differential energy detection) 算法完成寻优填充操作^[18-19]。

离子迁移法充分运用了现代波形控制系统和光声感应技术, 通过多个技术功能实现 SF₆ 泄漏气体的离子分析和波形转换, 最终以离子的形式编入算法程序中, 实现变电站开关柜气体泄漏的检测, 为输配电系统的稳定奠定基础。根据离子迁移输出波形分析 SF₆ 气体函数, 则气体检测数学模型表示为^[20]:

$$\begin{cases} H_0 : y(t) = n(t) \\ H_1 : y(t) = h \cdot x(t) + n(t) \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中, t 表示检测气体, H_0 表示预设 SF₆ 气体浓度值, H_1 表示机器人检测变电站开关柜内部 SF₆ 浓度, $y(t)$ 表示气体表达函数模型, $n(t)$ 表示内部气体存余量, h 表示泄漏气体变化系数, $x(t)$ 表示 SF₆ 泄漏变量函数。DED 算法中对变电站开关柜能量的差分计算公式为:

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i(t)]^2 \quad (2)$$

式 (2) 中, Y 表示 DED 算法中能量检测函数, N 表示所需检测设备数量, $y_i(t)$ 表示单体设备检测能量函数。将差分函数与变电站开关柜 SF₆ 气体检测模型函数集合处理, 对检测变电站开关柜中 SF₆ 气体模型函数简化如下:

$$\begin{cases} H_0 - \lambda Y \leq \lambda \\ H_1 - \lambda Y > \lambda \end{cases}; t = 1, 2 \quad (3)$$

式 (3) 中, λ 表示气体标准差分能量值。根据变电站开关柜运行中可能出现的 SF₆ 气体泄漏故障, 通过 DED 算法估算气体运行时间, 根据填充气体量估算实际效率, 其表达式为^[21]:

$$Y \sim \begin{cases} \chi_{2m}^2 \cdot H_0 \\ \chi_{2m}^2 (2\gamma), H_1 \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 中, Y 表示 DED 算法中能量估算函数, χ_{2m}^2 表示变电站开关柜运行中气体泄漏预算, H_0 表示预设 SF₆ 气体浓度值, H_1 表示机器人检测变电站开关柜内部 SF₆ 浓度, γ 表示气体标准差分能量值。

根据式 (4) 中 SF₆ 气体泄漏对变电站开关柜运行效率估计值, 利用概率学公式判断存在差分能量情况下气体泄漏概率:

$$P_d = \Pr\{Y > \lambda \mid H_1\} = \frac{\Gamma(m, \lambda/2)}{\Gamma(m)} \quad (5)$$

式 (5) 中, P_d 表示变电站开关柜 SF₆ 气体泄漏概率, \Pr 表示气体差分能量集, Γ 表示非完全可控变量, m 表示变电站开关柜气体显示量。

经过概率和估算了解变电站开关柜可能出现气体泄漏情况, 实际运行中 SF₆ 气体泄漏和填充规律如下:

$$P_f = \Pr\{Y\lambda \mid H_0\} = Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (6)$$

式 (6) 中, P_f 表示实际运行中变电站开关柜 SF₆ 气体量值, \Pr 表示变电站开关柜运行过程中 SF₆ 计量方式, Y 表示总气体填充量, Q_m 表示 SF₆ 对变电站开关柜运行影响效率。

通过 DED 算法对变电站开关柜 SF₆ 气体泄漏浓度估算概率和实际运行中气体泄漏影响, 使检测系统更为精确了解变电站开关柜实际运行状况, 对 SF₆ 气体室外和室内浓度比较给予参考价值, 提高本研究检测系统对 SF₆ 气体运行的可行性。

3 试验结果与分析

开关柜设备潜伏性损坏 60% 是因为绝缘故障, 其局部放电和局部过热产生的能量是绝缘失效的根本原因。为了验证本研究采用的基于 SF₆ 气体的开关柜故障检测方法

的适用性与可靠性，本研究针对变电站开关柜中 SF₆ 气体分解产物泄漏进行检测实验。实验室配置采用 i8 系列双核计算机，采用 64+256 GB 储存配置^[22]，利用仿真软件显示 3 种气体检测系统对变电站开关柜运行中 SF₆ 泄漏浓度检测的变化曲线，利用 Multisim 软件^[23]模拟 SF₆ 泄漏模型，在 20 kV 变电站中进行试验，输入频率为 30 kHz，锯齿波和正弦波正负为 1，光强为 14.0 cd，气体浓度为 50 mol/mL，气压为 1 kPa，SF₆ 分解产物成分检测仿真模型如图 7 所示。

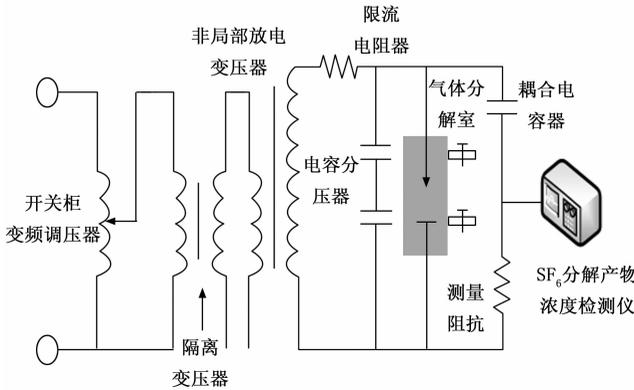


图 7 SF₆ 分解产物成分检测仿真模型图

实际试验场合示意图如图 8 所示。

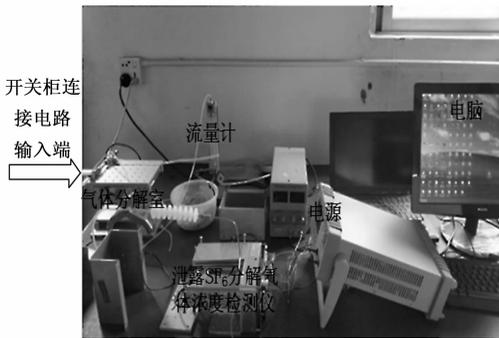


图 8 物理化学检测技术实验架构

为了得出 SF₆ 分解产物中具体哪些气体浓度最高，浓度变化较大且特征明显，该研究在局部放电情况下通过气体分析仪中的光谱检测^[24]得到 300~800 nm 波段 SF₆ 分解产物的强度，如图 9 所示。

从图 9 中可以看出，整个 SF₆ 光谱较为突出的 4 个峰端对变电站开关柜泄漏浓度影响具有明显作用，分别是 SO₂ (349.73 nm 波长)、CO (359.10 nm 波长)、SO₂ (383.91 nm 波长) 和 H₂S (409.97 nm 波长)。其中，SO₂ 气体波峰强度最高，这说明其在 SF₆ 分解产物中化学运动最为活跃，该成分浓度最高。

根据 2.1 中所描述的内容，此次实验将以 SF₆ 分解产物成分 SO₂ 的浓度作为评判指标，其浓度越高，说明变电站开关柜潜伏性故障局部放电和局部过热产生的能量越大，其损坏的可能性也越高^[25]。关于气体浓度分析仪浓度显示

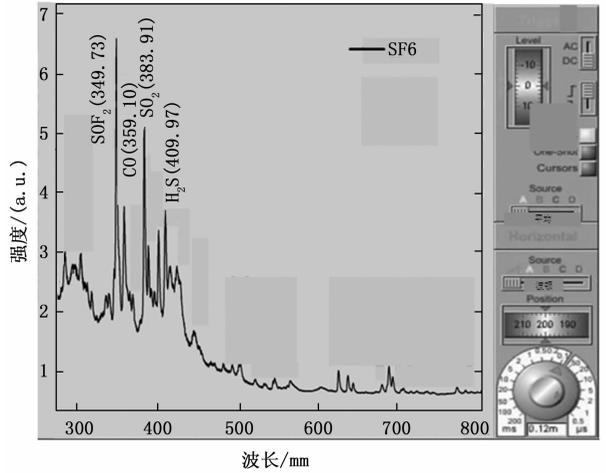


图 9 SF₆ 气体分解产物光谱图

示例图如图 10 所示。

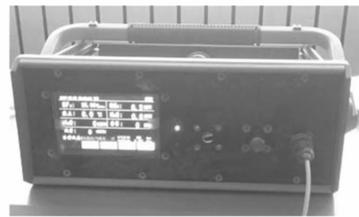


图 10 气体浓度分析仪界面

气体分析仪主要依据来源为 SF₆ 泄漏离子，通过气体波谱数据转换得到屏幕中显示出的 SF₆ 分解产物泄漏 SO₂ 的具体浓度数值，最终通过差分能量检测算法完成寻优填充操作。为了体现该研究气体浓度检测方法的适用性，以文献 [4] 与文献 [5] 检测方法最为参照对象，通过在不同开关柜工作电能环境下，统计各检测系统其检测气体 SO₂ 浓度的精度结果如表 1 所示。

表 1 SO₂ 浓度的检测精度结果

电能/KW	本文方法/%	文献[4]/%	文献[5]/%
500	92.00	89.32	83.82
1 000	91.79	89.76	85.56
1 500	91.70	89.56	85.12
2 000	91.58	88.04	83.42
2 500	90.95	88.00	82.01
3 000	89.76	87.93	81.89
3 500	89.57	86.85	80.96
4 000	90.49	86.09	84.00

参照表 1 中的数据结果并启动计算机仿真软件，得到 3 种检测系统精确度曲线对比如图 11 所示。

通过对比发现 3 种检测方法随开关柜工作电能变化精确度变化较大，本研究降低幅度较小，最高精度为 92.0%，在工作电能为 3 500 kW 达到最低，此时为 89.57%；文献 [4] 的检测方法与该研究变化规律相似，但整体精度相对

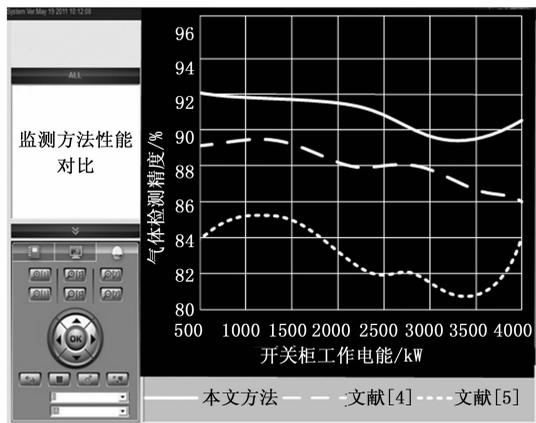


图 11 3 种检测方法精度对比曲线

较低, 最高精度为 89.76%, 在工作电能为 4 000 kW 达到最低, 此时为 86.09%; 文献 [5] 设计的检测系统呈波动性变化, 在工作电能为 1 200 kW 时达到波峰, 此时最高精度为 85.56%, 在工作电能为 3 300 kW 达到波谷, 此时精度最低为 80.46%。综上所述, 该研究对变电站开关柜通过分析 SF₆ 分解产物来检测开关柜故障原因具有明显效果, 根据实验表明该研究方法检测精确度最高, 体现出该研究检测方法的优越性。

4 结束语

SF₆ 等气体分子分解衍生物会腐蚀变电站设备, 很容易导致绝缘性能下降, 并对设备的安全稳定运行造成严重损害。为此, 本文对变电站开关柜进行故障分析, 采用离子迁移检测 SF₆ 泄漏技术, 对变电站开关柜设备环境中含有的 SF₆ 离子进行频谱和波形变换, 方便判断开关柜内部具体 SF₆ 变化规律。利用 DED 算法比较开关柜运行中内外 SF₆ 气体离子的浓度, 根据概率结果显示, 制定最佳气体填充量。通过对气体检测系统进行测试, 根据反馈结果记录分析, 表明本设计气体泄漏检测方法具有明显优势。但在实验过程中发现, 存在对开关柜气体泄漏修复程序繁琐等问题仍待解决。

参考文献:

- [1] 刘劲松, 禹晋云, 王 飞, 等. 变电站 GIS 设备 SF₆ 泄漏检测与智能机器人应用结合 [J]. 信息技术, 2020 (1): 54-57.
- [2] 范海芳. SF₆ 气体泄漏在线检测报警系统研究 [J]. 中国新技术新产品, 2019 (5): 26-27.
- [3] 丁 伟, 权利刚, 王永利, 等. 变电站 GIS 设备组合电器智能巡检装置的研制与应用 [J]. 自动化应用, 2019 (10): 140-142.
- [4] 李 晴. 地铁变电所设置 SF₆ 气体检测装置的应用分析 [J]. 山西建筑, 2019, 45 (4): 149-150, 220.
- [5] GOERITNO A. Preliminary Evaluation for the Performance of Circuit Breaker Mediated by SF₆ Gas [J]. Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2020, 13 (1): 35-38.

- [6] 罗 洋, 董汉彬, 王嘉易, 等. 六氟化硫气体泄漏成像仪检测方法应用研究 [J]. 四川电力技术, 2020, 266 (2): 66-69.
- [7] 杨 芮, 赵建勇, 石 磊, 等. 全封闭组合电器室 SF₆ 气体泄漏分布规律与气体检测布置策略 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (9): 99-107.
- [8] 王瑞萍, 鲍 喜, 张海超, 等. 人工智能审计流程的设计及平台构建 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38 (1): 62-65.
- [9] 范海芳. GIS 设备中 SF₆ 气体泄漏检测研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2019 (2): 11-12.
- [10] APOLLONOV V V, KAZANTSEV S Y. Self-Organization of Gas-Discharge Plasma in SF₆ and Related Gas Mixtures [J]. Technical Physics Letters, 2019, 45 (5): 443-445.
- [11] 杨师童. 全封闭组合电器 (GIS) SF₆ 气体微水超标处理 [J]. 环球市场, 2019 (7): 130.
- [12] 戴美胜. 变电站 GIS 设备 SF₆ 断路器的运行维护要求及异常处理方法研究 [J]. 科学技术创新, 2020 (5): 173-174.
- [13] 刘亚东, 王恒超, 田润钰. SF₆ 断路器气体泄漏分析与预防 [J]. 农村电工, 2019, 27 (1): 44.
- [14] 陈奕群. SF₆ 气体现场回收处理技术研究 [J]. 中国设备工程, 2019, 421 (10): 182-183.
- [15] 翟向红. 浅析 SF₆ 断路器液压操作机构常见故障的原因及处理方法 [J]. 百科论坛电子杂志, 2019 (21): 346.
- [16] 余 爽, 赵 科. 一起 1 100 kV 气体绝缘金属封闭开关设备母线放电故障分析 [J]. 电气技术, 2021, 22 (4): 94-97.
- [17] 张建军, 岳啸鸣, 屈少平, 等. 一起 220 kV 气体绝缘金属封闭开关设备母线放电故障分析 [J]. 电气技术, 2020, 21 (8): 98-102, 106.
- [18] 牛建鸿, 曾庆忠, 王光明, 等. 气体绝缘金属封闭开关设备电压互感器击穿放电故障原因 [J]. 理化检验 (物理分册), 2020, 56 (7): 69-72.
- [19] 高玉峰. 气体绝缘全封闭开关设备的状态监测与故障诊断方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [20] 杨斌山. 基于骨架理论的机电特种设备启动故障检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 60-63, 108.
- [21] 郭 兴, 徐 武, 唐文权, 等. BPSO 优化算法在含 DG 配电网中的故障诊断研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 88-92.
- [22] 刘丹丹, 彭跃辉, 宋选锋, 等. SF₆ 气体状态采集及多参量评估技术研究 [J]. 自动化技术与应用, 2021, 40 (4): 120-123, 147.
- [23] 汪 波, 夏钦锋, 钱 龙, 等. 基于全相关动态核偏最小二乘法的故障诊断方法 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (3): 19-24.
- [24] 王岩妹, 彭跃辉, 陈富国, 等. 远传式高精度 SF₆ 气体状态感知终端的设计 [J]. 自动化技术与应用, 2020, 39 (9): 114-118, 138.
- [25] 隋 心, 张正维, 闵 绚, 等. 超长 GIL 综合管廊 SF₆ 气体泄露模拟研究 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57 (3): 91-98, 107.