

## 新型绝缘气体密度继电器智能校验的研究与应用

叶正帆<sup>1</sup>, 李佳文<sup>1</sup>, 张嵩<sup>1</sup>, 游骏标<sup>2</sup>, 郑立登<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 国网上海市区供电公司 上海

<sup>2</sup> 厦门加华电力科技有限公司 福建厦门

**【摘要】** SF<sub>6</sub> 气体是一种化学性质稳定的气体, 具有优良的绝缘性能和灭弧特性, 目前在高压电气设备 GIS 和 GIL 气室中具有广泛地应用, 对提高电力系统输电容量和电力设备的小型化具有重要作用。但是 SF<sub>6</sub> 气体本身有局限性, 是受管制的温室气体之一, 能够有效替代 SF<sub>6</sub> 的新型环保绝缘气体在高压电气设备制造业中受到越来越多关注。新型绝缘气体密度继电器在新型绝缘气体高压电气设备中应用越来越广泛, 为了保证密度继电器可靠运行, 对新型绝缘气体密度继电器智能校验的研究与应用具有重要的意义。

**【关键词】** 气体密度继电器; 气体检测; 气体泄漏检测

**【收稿日期】** 2023 年 10 月 14 日 **【出刊日期】** 2023 年 12 月 13 日 **【DOI】** 10.12208/j.jeea.20230026

### Research and application of intelligent calibration for new insulating gas density relays

Zhengfan Ye<sup>1</sup>, Jiawen Li<sup>1</sup>, Song Zhang<sup>1</sup>, Junbiao You<sup>2</sup>, Lideng Zheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai

<sup>2</sup>Xiamen Jiahua Electric Power Technology Company, Xiamen, Fujian

**【Abstract】** SF<sub>6</sub> gas is a chemically stable substance known for its excellent arc-extinguishing performance and insulating properties. It is currently widely used in high-voltage electrical equipment such as Gas-Insulated Switchgear (GIS) and Gas-Insulated Lines (GIL) chambers, playing a crucial role in enhancing power transmission capacity and the miniaturization of electronic devices. However, SF<sub>6</sub> gas has its limitations and is classified as a controlled greenhouse gas. Consequently, there is a growing focus within the high-voltage electrical equipment manufacturing industry on new environmentally friendly insulating gases that can effectively replace SF<sub>6</sub>. The adoption of these new insulating gases, particularly in high-voltage electrical equipment, is on the rise. To ensure the reliable operation of density relays, research and the application of intelligent calibration for density relay devices using novel insulating gases are of significant importance.

**【Keywords】** Gas density relay; Gas detection; Gas leak detection

### 引言

目前, 随着我国电力行业高速发展, 国家电网公司和南网公司在新建的气体绝缘金属封闭开关设备, 变压器、互感器等电力装备中, SF<sub>6</sub> 气体绝缘全封闭组合电器 (gas-insulated switchgear, GIS) 和气体绝缘金属封闭输电线路 (gas-insulated transmission lines, GIL) 作为高压电力电网建设的关键设备, 所占比例逐年增加, SF<sub>6</sub> 产能和储量也在持续增长。然而 SF<sub>6</sub> 是一种强温室气体, 其温室效应潜值 (GWP) 是二氧化碳的约 23900 倍, 扩散到大气中难以降解, 可以保持存在 3200 年。SF<sub>6</sub> 的大规模使用必然会加

剧全球环境温室效应和气候恶化, 这显然违背国家提倡“碳达峰”和“碳中和”的目标。为积极响应国家“2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和”号召, 落实国家电网公司“碳达峰、碳中和”重点工作安排, 推进能源技术革命, 全面推动电网设备节能减排, 国家电网设备 (2022) 290 号《国家电网有限公司关于开展混合气体 GIS 设备推广应用工作的通知》要求全面开展 SF<sub>6</sub> 混合气体及新型绝缘气体 GIS 设备推广应用工作。按照“积极稳妥、有序推进”原则, 完善设备技术标准、通用制度与管理规定, 健全混气、分离、检测等专用装备配置, 细化装备维护管

理, 加强备品备件储备, 制定故障抢修预案, 结合新建站建设和在运站改造两个方面, 有序推进混合气体 GIS 设备扩大应用。在选择 SF<sub>6</sub> 替代绝缘气体主要有 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> 混合气体以及新型绝缘气体 C<sub>4</sub>H<sub>7</sub>N、C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 等。由于不同的绝缘气体在不同温度下的体积压缩因子不一样, 相应的密度继电器在 20℃ 下的等效压力也不一样, 因此就需要各种绝缘气体的密度继电器监测高压开关电气设备的气室压力, 保障电网安全可靠运行<sup>[1]</sup>。

### 1 新型绝缘气体密度继电器校验在电网运行中的作用

新型绝缘气体密度继电器是监控新型绝缘气体 GIS 设备的关键元器件之一, 实时监测新型绝缘气体 GIS 设备本体中气体密度的变化, 上传报警信息或闭锁高压断路器开断的功能, 它的性能好坏直接影响到电网安全运行和新型绝缘气体电气设备的安全可靠运行。现场运行中的新型绝缘气体密度继电器由于长时间不动作, 长期运行后可能经常出现触点动作不灵活的粘连现象或接触不可靠的现象, 还可能还会出现高低温度补偿偏差的问题, 或者当遇到极端环境温度变化时可能出现新型绝缘气体密度继电器拒动或误动的现象。

为了保障电力系统安全运行, 国家电网公司要求定期进行新型绝缘气体密度继电器现场校验。从电力系统长期运行实践经验表明, 定期进行新型绝缘气体 GIS 设备的密度继电器校验是为电网安全运行防患于未然的重要措施, 保障电网设备安全运行具有重要的意义。新型绝缘气体密度继电器校验的研究与应用就是为了精确可靠校验新型绝缘气体密度继电器。

新型绝缘气体密度继电器校验装置现场校验的工作原理是通过三通阀断开密度继电器与高压电气设备 GIS 气路连接, 使新型绝缘气体密度继电器校验装置与密度继电器进行气路连接, 密度继电器校验装置自动调节密度继电器的压力感应元件的气体压力缓慢上升和缓慢下降, 使密度继电器的电接点发生动作, 并自动按顺序捕获报警和闭锁电接点动作时的压力值、温度值并转化为气体密度值, 自动统计分析新型绝缘气体密度继电器电接点动作的误差值和合格性能判断, 完成新型绝缘气体密度继电器现场校验工作<sup>[2]</sup>。

### 2 新型绝缘气体密度继电器校验的等效压力的计算

新型绝缘气体密度继电器校验的等效压力的计算是校验新型绝缘气体密度继电器准确性的关键技术<sup>[3]</sup>, 下面分别介绍纯 SF<sub>6</sub> 压力密度等效原理及计算方法和新型绝缘气体压力密度等效原理及计算方法。

#### 2.1 纯 SF<sub>6</sub> 压力密度等效原理及计算方法

目前国内外对研究 SF<sub>6</sub> 气体的绝缘性能和灭弧特性很多。如: SF<sub>6</sub> 气体的化学特性: 常温常压下为无色\无味、无毒、无腐蚀性, 物理化学性能稳定的气体, 相对分子质量是 146.06, 标准状态下密度约为空气的 5 倍。六氟化硫由于具有优良的化学稳定性和热稳定性, 具有卓越的绝缘性能和灭弧特性, 使 SF<sub>6</sub> 作为绝缘气体在高压电气设备中广泛应用。

但对 SF<sub>6</sub> 气体在高低温下等压力变化特性及等效压力的计算研究甚少, 查阅相关文献可知: 临界压力是气体液化的最小压力, SF<sub>6</sub> 的临界压力是 3.9MPa; 临界温度是液化的最高温度, SF<sub>6</sub> 临界温度是 45.6℃。一般地, 当 SF<sub>6</sub> 气体的压力小于 0.3MPa 时, 可视为理想气体, 根据理想气体的状态方程的关系, 即:  $pV=mRT/M=nRT$ :

式中:  $m$ ——气体质量  $g$ ,

$P$ ——气体压强  $MPa$ ,

$T$ ——温度  $K$ ,

$V$ ——气体体积  $L$ ,

$M$ ——气体摩尔质量,  $g/mol$

$R$ ——摩尔气体常数( $=0.0082MPa \cdot L/(K \cdot mol)$ )

根据数学方程原理, 当只含有 1 个未知量的方程中时, 可以通过解方程的办法计算出这个方程解。上式方程中  $pV=mRT/M=nRT$ , 已知压强、体积、温度和物质的量中, 已经知道其中的 3 个量就可计算出未知量。根据需要计算的未知量, 可以相应的转换为以下等效的公式:

求  $p=nRT/v$

求  $v=nRT/p$

求物质的量= $pv/RT$

求温度  $T=pv/nR$

根据 SF<sub>6</sub> 气体状态方程可以进一步推测气体的状态。

当 SF<sub>6</sub> 气体压力高于 0.3MPa~0.5MPa 时, 由于 SF<sub>6</sub> 分子在 20℃ 下气体吸引力随密度增大即分子间

距离的减小而愈益显著, 如果 SF<sub>6</sub> 压力变化按理想气体变化定律推导出来的参数来计算会产生较大误差。在实际应用中, 为了较准确地计算六氟化硫的压力、体积等参数采用 beattie-bridgman (贝蒂-布里奇曼) 公式是比较准确和实用的。

$$P=56.2 \cdot 10^{-6} \cdot \gamma \cdot T \cdot (1+B) - \gamma^2 \cdot A$$

$$A=74.9 \cdot 10^{-6} \cdot (1-0.727 \cdot 10^{-3} \cdot \gamma)$$

$$B=2.51 \cdot 10^{-3} \cdot \gamma \cdot (1-0.846 \cdot 10^{-3} \cdot \gamma)$$

其中, P 为 SF<sub>6</sub> 气体的压力 MPa

$\gamma$  为气体的密度 kg/m<sup>3</sup>

T 为气体的温度 K

$$T=t+273.15。$$

应用状态计算方程可以较准确地计算六氟化硫的状态参数, 使用牛顿叠代程软件计算当前温度下的压转化为 20℃ 下的 P<sub>20</sub> 压力。

## 2.2 新型绝缘气体压力密度等效原理及计算方法

目前可以选用的能和 SF<sub>6</sub> 混合的气体或新型绝缘气体主要有: N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>、CF<sub>3</sub>I、CF<sub>4</sub>、C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 等。比如: SF<sub>6</sub> 气体与 CF<sub>4</sub> 气体混合后, 其物性参数相比纯 SF<sub>6</sub> 已经发生变化, 为对 SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> 混合气体进行深入研究, 需要取得 SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> 混合气体的物性参数。物性参数的获取主要有实验测量与理论计算两种方法。

通常情况下, 理论计算可以获得较准确的参数, 花费成本较低, 可以在较短的时间内得到所需的结果, 便于科技工作者与工程人员使用。因混合气体断路器在低温高压下工作, 利用理想气体状态方程计算混合气体物性参数会带来很大的偏差。本论文的研究利用真实气体模型, 通过 SRK 状态方程计算出混合气体压缩因子在不同压力、温度与不同混合比条件下的变化特性<sup>[4]</sup>; 为进一步计算混合气体热力学参数及混合气体流动特性提供了数据支撑。

根据文献已经公布的绝缘气体状态方程的计算有 150 多种, 如果方程中所含的变量越多, 计算就越复杂, 所得到结果的精度就越高, 但是对应参数获取的代价就越大, 计算也越复杂, 实际应用越不方便。因此, 有必须寻求实际应用的要求与计算精度相一致的计算方法。SRK 状态方程是 Soave 对理论 RK 方程实际应用的改进, 是第一个将状态方程与偏心因子联系起来的状态方程, 对纯物质和多组

分物质计算具有较高的精度,

SRK 方程能适用于所有的非极性物质的计算。在相同的温度与压力下, 真实气体与理想气体的差异, 可以使用压缩因子 Z 表示,  $Z=PV/(RT)$ , 其中 V 为摩尔体积, 当 Z=1 时, 其式为理想气体状态方程。

SRK 方程的表达式为:

$$P=\frac{RT}{V-b}-\frac{a(T)}{V(V-b)}。 \quad (1)$$

方程在临界等温线的临界点处存在拐点, 有

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T=\left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_T=0。 \quad (2)$$

确定 a(T) 和 b 的表达式为:

$$a(T)=0.42748\frac{R^2T_c^2}{P_c}\alpha(T); \quad (3)$$

$$b=0.08664\frac{RT_c}{P_c}; \quad (4)$$

$$[\alpha(T)]=1+m(1-T_r^{0.5}); \quad (5)$$

$$m=0.48+1.574\omega-0.176\omega^2。 \quad (6)$$

式 (3) - (6) 中:

R 为普适气体常数; T 为温度; P 为气体绝对压力; T<sub>c</sub> 为临界温度; P<sub>c</sub> 为临界压力; T<sub>r</sub> 为对比温度;  $\omega$  为偏心因子。将式 (1) 乘以 V/(RT), 带入压缩因子的定义式可得:

$$Z=\frac{1}{1-b/V}-\frac{a(T)}{bRT}\frac{b/V}{1+b/V}。 \quad (7)$$

将  $h=b/V, B=b/(RT), A/B=a(T)/(bRT)$ , 整理式(7)得

$$Z=\frac{1}{1-h}-\frac{A}{B}\frac{h}{1-h}。 \quad (8)$$

将  $RT=PV/Z$  和  $h=b/V$  带入  $B=b/(RT)$ , 整理得 h 的表达式为

$$h=PB/Z。 \quad (9)$$

式 (8) - (9) 是 SRK 方程的迭代式, 可以应用迭代法对进行求解。

## 3 新型绝缘气体密度继电器智能校验装置研制

为了开发出适用于上述主流新型绝缘气体密度继电器的智能校验装置, 我们特别进行了新型绝缘气体密度继电器智能校验技术的研究及工程应用<sup>[5]</sup>。

### 3.1 气路原理

新研发的新型绝缘气体密度继电器校验装置的气路逻辑由 2 个比例阀, 3 个电磁阀, 两个单向阀, 一个气泵, 3 个高精度压力传感器, 测量口, 回收瓶, 储气瓶等主要部件组成, 其气路原理框图如图 1 所示。

### 3.2 硬件结构设计

新硬件电路方案由 MCU 控制系统、预升压控制模块、液晶触摸屏、气路控制模块、储气气室、测

量气室、回收气室、气泵、压力调节模块、触点动作值及电阻采集模块、压力传感器和温度传感器组成。硬件电路方案结构框如图 2 所示。

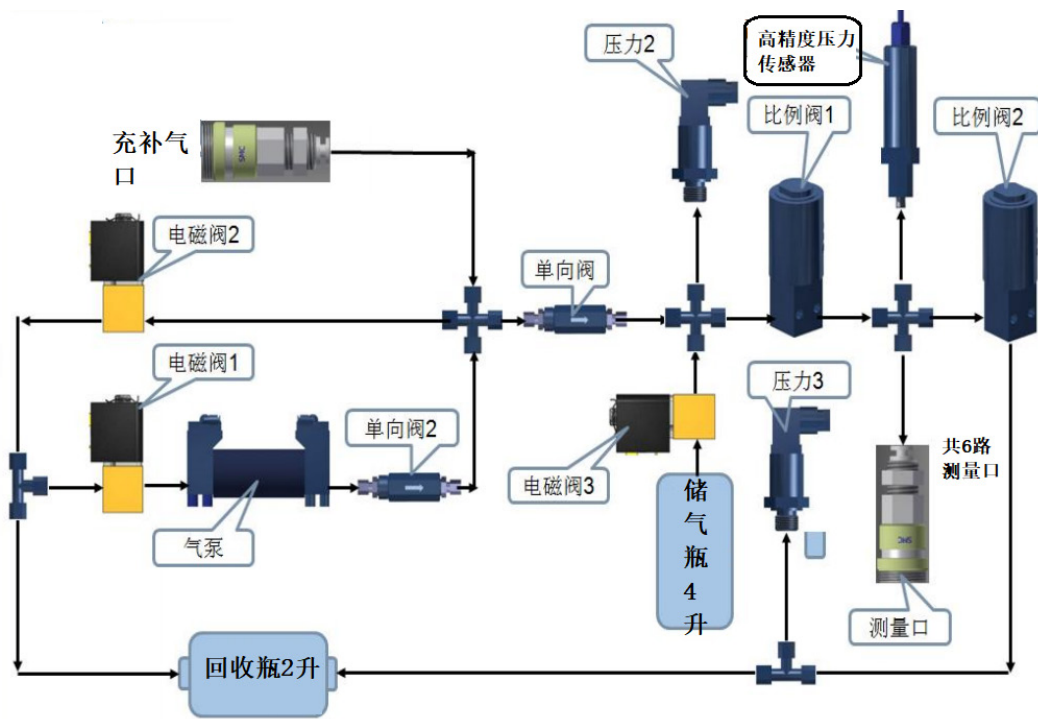


图 1 新型绝缘气体密度继电器校验气路原理框图

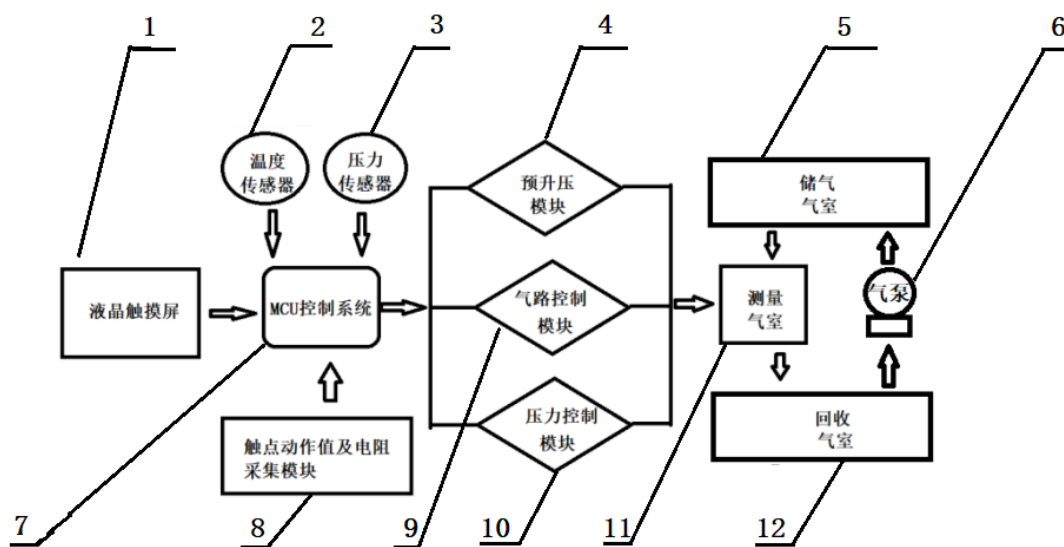


图 2 硬件电路方案结构框图

### 3.3 新型绝缘气体密度继电器智能校验装置技术指标

本项目研发的新型绝缘气体密度继电器智能校验装置经过实验室验证试验，到达了如下主要技术

指标：

- (1) 仪器精度/分辨率：0.1 级/0.0001MPa；
- (2) 环境温度精度/分辨率：0.5℃/0.1℃；
- (3) 压力校验范围：0~1.5MPa，可选择绝对

压力或相对压力;

(4) 环境温度/湿度范围:  $-30^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C} / 5 \sim 95\% \text{RH}$ ;

(5) 校验: 全自动校验;

(6) 电接点校验: 范围  $0-100 \Omega$ , 精度 5%, 分辨率  $0.01 \Omega$ ;

(7) 电接点校验电压: DC24V、DC110V 可任意切换选择;

(8) 校验介质气源: 新型绝缘气体或用户指定干净气体, 系统自动回收循环无泄漏;

(9) 自动检测大气压, 适用于高海拔地区密度继电器校验, 应用泛围广;

(10) 具有校验结果误差分析, 自动判断各种压力和接触电阻是否合格;

(11) 能同时测试一组报警信号、二组闭锁信号;

(12) 适用于 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub>、C4F7N/CO<sub>2</sub> 混合气体以及其它新型绝缘气体密度继电器智能校验。

#### 4 新型绝缘气体高低温试验结果和本智能校验装置混气状态方程计算结果的比较

SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> 混合气体在全封闭的高低温试验环境中, 实测温度与压力的数据, 本智能校验装置根据测试温度值和压力值以本文 SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> 混合气体状态方程进行计算, 得到了不同温度下对应的压力理论计算值, 并计算了理论压力值与试验实测值的相对误差, 验证 SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> 混合气体状态方程的准确性。由表 1 中的数据可知, 不同 SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> 气体混合比下的压力理论计算值与试验实测值的相对误差均不大于 0.5%, 验证了本文 SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> 混合气体状态曲线方程的实用性和可靠性。

表 1 SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> 混合气体理论压力值与实测值

SF <sub>6</sub> /CF <sub>4</sub> 体积比	温度/°C	本装置计算理论值/MPa	实测量/MPa	相对误差/%
45%: 55%	-40.02	0.3168	0.3163	0.31
	-20.01	0.3455	0.3446	0.26
	19.98	0.4008	0.4005	0.32
	39.99	0.4295	0.4283	0.27
57%: 43%	-40.02	0.3160	0.3146	0.44
	-20.01	0.3445	0.3430	0.43
	19.98	0.3995	0.4003	0.20
	39.99	0.4299	0.4285	0.32

## 5 结语

新型绝缘气体是解决减少 SF<sub>6</sub> 气体排放的最有效方法, 研究新型绝缘气体在高低温环境等效压力的计算, 设计新型新型绝缘气体密度继电器校验装置, 对新型绝缘气体的密度继电器智能校验的研究与应用提供理论支持, 为保障新型绝缘气体密度继电器智能校验的准确性具有重要的意义。

## 参考文献

- [1] 于剑昆. 温室气体六氟化硫的替代技术进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2012, 10(4): 41-8.
- [2] 汤昕, 廖四军, 杨鑫. SF<sub>6</sub> 混合/替代气体绝缘性能的研究进展[J]. 绝缘材料, 2014, 47(6): 18-22.

- [3] 六氟化硫气体密度继电器校验规程: DL/T 259—2012[S], 2012.
- [4] 李璐维, 林莘, 徐建源, 等. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 和 SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> 混合气体放电参数计算分析[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 60-65.
- [5] 赵晓民, 韩国辉, 刘文魁, 等. 高压断路器用 SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> 混合气体状态参数计算及液化分析[J]. 高压电器, 2016, 52(12): 211-215.

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