[继电器]

混合气体密度继电器校验系统的设计

文/河南平高电气股份有限公司　张鹏飞　张建飞　刘朋亮　刘朝阳　谢东晨

根据SF_6/N_2混合气体密度继电器校验仪的校验原理，设计了密度继电器校验仪的系统结构，内置混合气体温度压力曲线，实现了对密度继电器的自动校验，最后设计试验验证了校验系统功能。解决了混合气体密度继电器校验的自动化设备需求，为开展混合绝缘气体电气设备的推广应用提供技术支持。

SF_6气体具有优良的绝缘和灭弧性能，但同时也存在强温室效应和液化温度较高等弊端。为减少温室气体排放，降低环境温度对电气设备运行的影响，国内外电力行业研究采用混合绝缘气体（SF_6/N_2）替代纯SF_6气体。

SF_6/N_2混合气体密度继电器作为混合气体高压电气设备的关键元件之一，能够对开关设备气室压力进行实时监控，实现对气体泄漏事故的及时报警与闭锁反馈。为了使混合气体密度继电器工作有效性及高压电气设备安全性得到保障，国家电网公司规定须定期对混合气体密度继电器进行校验。

混合气体密度继电器校验原理

在密闭容器中，一定温度下的绝缘气体压力可代表该气体密度。为了能够统一，习惯上常把20℃时绝缘气体的压力作为其对应密度的代表值。所以，密度继电器均以20℃时气体的压力作为标准值。在现场校验时，不同的环境温度下，测量到的压力值都要换算到其对应20℃时的标准压力值，从而判断该密度继电器的性能。对于SF_6/N_2混合气体压力值的计算，可根据道尔顿分压定律，分别计算SF_6、N_2的压强，混合气体的压强等于两者的和。

1）SF_6气体状态方程，使用Beattie-Bridgman（贝蒂一布里奇曼）方程为

$$P=(RTB-A)d^2+RTd$$

$$\text{其中，}\begin{cases}A=73.882\times10^{-5}-5.132\,105\times10^{-7}d\\B=2.506\,95\times10^{-3}-2.122\,83\times10^{-6}d\\R=56.950\,2\times10^{-5}\end{cases}\qquad(1)$$

式中，P是压强，×0.1MPa；d是密度，kg/m^3；T是温度，K。

根据已知初始状态下SF_6/N_2混合气体的体积比、压强和温度，计算出SF_6的分压强，连同温度带入方程，求得SF_6密度d的值，再将d的值带入方程，得到在该密度下SF_6的气体状态方程，进而得到$p(SF_6)$。

2）N_2气体状态方程，使用理想气体状态方程为

$$pV=nRT\qquad(2)$$

式中，p是压强，Pa；V是气体体积，m^3；n是物质的量，mol；R是普适气体常量，8.314 472 J/(mol·K)；T是温度，K。

已知初始状态下SF_6/N_2混合气体的体积比、压强和温度，计算出N_2的分压强，连同温度带入方程，求得n/V的值，再将n/V的值带入方程，得到该条件下N_2的气体状态方程，进而得到$p(N_2)$。

3）根据上述公式，可求得SF_6/N_2混合气体压力为

$$p(SF_6/N_2)=p(SF_6)+p(N_2) \quad (3)$$

校验仪系统设计

1．系统结构

随着国内自动化发展水平和传感器检测准确度的不断提升，电力行业对密度继电器的校验也由原来的半自动校验逐步发展为全自动校验。本文中混合气体密度继电器校验仪系统主要由信号采集单元、压力控制单元、数据处理单元、触摸屏、微型压缩机、气路单元、压力及温度传感器等模块组成，能够实现自动压力控制并将任意温度下SF_6/N_2混合气体密度值自动换算为20℃时的标准密度值，实现对混合气体密度继电器的全自动、全量程校验，系统结构设计如图1所示。

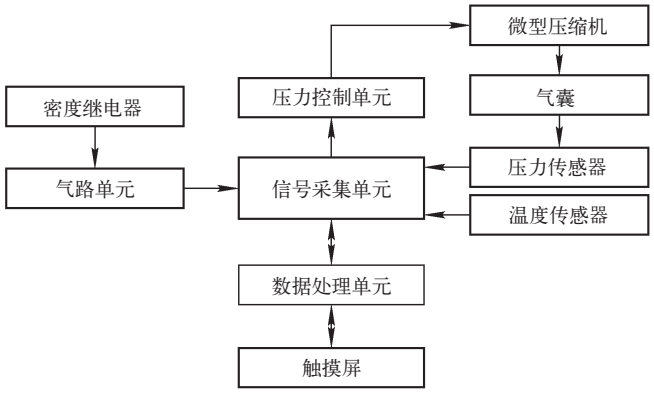

图1　混合气体密度继电器校验仪系统结构图

2．校验流程

进行密度继电器校验时，首先连接待校验密度继电器的气路部分与信号传输部分，连接铂电阻温度传感器并将其置于密度继电器工作环境温度下，通过触摸屏内置程序选择校验模式并设置动作校验压力；压缩气囊内充置SF_6/N_2气体或SF_6气体，通过压力控制单元控制微型压缩机对气囊压缩升压，压力控制单元设计双速升/降压模式。向目标校验压力升/降压时，首先选择快速升/降压方式，提高校验效率，当接近信号设定值时，选择稳速升/降压方式，控制升/降压速度每秒不大于量程的5‰，精准采集密度继电器报警及闭锁时模拟量信号；数据处理单元根据内置混合气体温度特性曲线，将已采集压力和温度模拟量自动转换为20℃时标准压力值，即实现温度和压力的动态补偿，通过程序对比设定点标准压力值，完成对额定压力值、接点动作值以及其对应的返回值、切换差的校验。

3．主要元器件功能介绍

混合气体密度继电器校验仪的主要元器件包括：微型压缩机、压力传感器、温度传感器、压力控制单元和数据处理单元等。

（1）微型压缩机

根据密度继电器校验量程，选择额定压力为11 bar的微型压缩机，同时具有干式、无油、低噪声微功耗和体积小等优点，无须添加真空泵油或润滑油，对工作介质零污染，对设备气体分析不产生干扰，可满足混合气体密度继电器校验需求。当系统校验处于升压状态时，动态调节密闭气缸进气量，控制微型压缩机持续工作压缩内置气囊，使校验系统自动升压至目标压力值，相较传统半自动校验模式，显著提升了校验效率与准确度。

（2）压力传感器

密度继电器校验仪设计准确度级别通常为0.1级以上，因此需要选择准确度级别为0.01的压力传感器。压力传感器安装于气路中，当系统校验时，SF_6/N_2气体压力作用于压力传感器中弹性敏感元件表面，使弹性敏感元件随动态压力而产生形变，带动电阻应变片产生形变，测量电路最终将该应变转换为可采集处理的4～20 mA模拟量信号。

（3）温度传感器

铂电阻温度传感器是最精准和最稳定的温度传感器，相较热偶和热敏电阻具有更优良的线性度，可满足密度继电器校验对温度测量的高精度要求。当系统校验测量温度时，将铂电阻温度传感器与待校验密度继电器置于相同环境温度下，传感器电阻值随金属铂的温度变化而改变，变化电阻值可转换为电信号传送至数据处理单元，系统根据内置温度特性曲线，将压力传感器所测模拟量信号转换为20℃时标准压力值。

（4）压力控制单元

根据混合气体密度继电器校验规程，对密度

继电器接点动作值以及切换差校验时，应控制升/降压速度每秒不大于继电器量程的5‰，避免测量压力信号出现过冲，同时系统设计应考虑非接点动作区升/降压速度，保障密度继电器校验效率。压力控制单元采用双速升/降压模式，向目标校验压力升/降压时，自动选择快速升/降压方式，可显著提高校验效率，当压力接近信号设定值时，选择稳速升/降压方式，控制压力波动范围小于压力最大允许误差绝对值的50%，精准采集密度继电器报警及闭锁时模拟量信号。

（5）数据处理单元

数据处理单元接收来自压力传感器及温度传感器的实时模拟量信号，并做运放处理，根据运算放大器输出信号进行A/D转换，系统根据可处理的数字量信号完成标准密度值的自动转换，同时根据数据处理结果向压力控制单元、驱动电路和触摸屏等相关模块发送指令，进而完成对额定压力值、接点动作值以及其对应的返回值、切换差的校验。

试验验证

1．20±2℃时压力测量不确定度的检测

使用于压力标准器比对的方法进行校准。校准点不少于5个点（表压：0.0 MP、0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa和0.9 MPa，绝压：0.1 MP、0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa）和检测时进行一个上、下行程的循环。将所选择的压力标准器与被检校验装置连接好，确认连接管路无泄漏，手动或自动升压至压力校准点，待压力稳定后分别读取压力标准器和被检校验装置的压力值，至各个校准点直到测量上限，然后，再逐点降压进行反行程校准，并记录，按照式（1）计算各目标压力值的压力测量不确定度，即

$$\Delta p = \left|(p_i - p)/p_{FS} \times 100\%\right| \qquad (4)$$

式中，Δp是压力测量不确定度，%FS；P是各目标值对应的压力标准器的压力示值，MPa；p_i是各目标值对应的装置的测量压力示值，MPa；p_{FS}是装置的量程，即1.0 MPa。

2．重复性检测

在试验中，取压力目标值为0.6 MPa的密度继电器校验装置记录的10次压力测量值，按式（2）计算装置的重复性q_v为

$$q_v = \frac{\sqrt{\frac{\sum(p_i - \bar{p})^2}{n-1}}}{p_{FS}} \times 100\% \qquad (5)$$

式中，$\bar{p}$是10次测量值的平均值；p_i是第i次的测量值；n是测量次数，10次；p_{FS}是装置的量程，即1.0 MPa。

3．环境温度－10～40℃时，密度的不确定度试验

将密度继电器校验仪放置在特定温度（－10℃或40℃）的高低温试验箱中静置2 h。在气路上连接密度继电器校验装置和放置在环境温度中的压力标准器；启动密度继电器校验装置的升压功能，目标试验压力值分别为相应混合比例的混合气体20℃压力值$p_{20标i}$(0.4～0.9 MPa abs.)抽取5个压力点，目测精密数字压力表数值到达目标试验压力值$p_{-10目标i}$或$p_{40目标i}$时，同时校验装置的温度探头温度彻底平衡后，记录此时的密度继电器校验装置的换算压力值p_{20i}；检测时进行一个上、下行程的循环，按照式（3）计算压力及温度测量换算后的密度的不确定度

$$\Delta p_{20} = \left|\frac{p_{20i} - p_{20标i}}{p_{FS}} \times 100\%\right| \qquad (6)$$

式中，Δp_{20}对应温度（－10℃或40℃）的压力及温度测量换算后的密度的不确定度，%FS；p_{20i}是在相应混合比例的混合气体所对应的相应目标压力（$p_{-10目标i}$、$p_{40目标i}$）和温度下，校验装置根据所检测到的压力和温度值进行换算后的密度（即对应20℃压力值）p_{20}，MPa；$p_{20标i}$是相应混合比例混合气体的20℃压力值，MPa；p_{FS}是装置的量程，即1 MPa。

结束语

SF_6/N_2混合气体密度继电器校验系统的设计，解决了混合气体密度继电器校验的自动化设备需求，能够实现校验不受环境因素影响，为开展混合绝缘气体电气设备的推广应用提供技术支持，对建设绿色电网及开展混合绝缘气体电气设备的运行管理意义重大；为开展高压开关设备状态评价工作奠定基础，能够保证密度继电器工作的有效性，为电气设备运行状态的安全评估提供技术支持；为电网科学制定检修策略、合理安排运行方式提供可靠参考，以确保电网的安全稳定运行，具有重要的推广应用价值。EA

（收稿日期：2020.05.08）