

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.12.022

基于流固双向耦合的GIS气室微水处理仿真研究

李洪渊¹, 黄经纬¹, 石海珍¹, 朱金康¹, 石 辉¹, 王泽泽², 金立军²

(1. 国家电网新疆电力公司检修公司, 乌鲁木齐 830000; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: GIS气室微水超标严重影响其内绝缘性能,探索一种工艺简单、效率高和可靠性强的微水超标处理方法,有利于保证电力系统的安全运行。文中提出了一种新的高压GIS气室微水超标加热处理方法;针对GIS断路器和电流互感器等电气设备气室,探讨了加热装置、导热媒介、气室内设备之间的相互作用关系,构建了该处理方法中流固双向耦合的热力学数学模型,分析了流体和固体的双向耦合性质;基于Ansys仿真软件进行了GIS气室微水超标加热处理方法的热流固双向耦合仿真,计算出气室壳体及气室气体的对应温升,根据GIS气室微水含量与温度的关系分析了气室内温度变化对微水含量的影响,并对加热装置的功率进行了优化计算。仿真研究表明,文中提出的微水超标加热处理方法能明显提高GIS气室内部气体的温度分布,有利于促进附着于GIS气室内固体壁的液态水析出及微水的排出,减少了现场检修环节的工作量,提高了GIS微水超标处理的效率。

关键词: GIS气室; 微水超标; 处理工艺; 热流固耦合仿真

Computational Investigation of Micro Water Treatment in GIS Gas Chamber Based on Fluid and Solid Mutual Coupling

LI Hongyuan¹, HUANG Jingwei¹, SHI Haizhen¹, ZHU Jinkang¹,
SHI Hui¹, WANG Zeze², JIN Lijun²

(1. National Grid Xinjiang Power Company Maintenance Company, Urumqi, 830000, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The excessive presence of micro water in a GIS seriously affects its internal insulation. To ensure the safe operation of the power grid, it is necessary to study and develop a simple, efficient and reliable method to process the excessive micro water. In the present work, a new method to deal with the excessive micro water in high pressure GIS chamber has been proposed. According to the structural features of the GIS breaker and CT tank, the relationships between heating device, heat transfer medium and the internal objects in the gas chamber are discussed. A mathematical model for the thermodynamics of the liquid-solid coupling process is developed based on consideration of the coupling characteristics. Modelling based on Fluent has been carried out for the coupling process of liquid and solid in the micro water treatment process with heating and the temperature of the container wall and gas inside is calculated. Based on the relationship between temperature and water content, the influence of temperature on the water content inside the chamber is discussed and the heating power is optimized. Results show that the proposed method has remarkably increased the internal gas temperature, promoting the liquid water attached to the internal solid surface to precipitate. This will reduce the amount of field work while increase the treatment efficiency of micro water.

Key words: GIS gas chamber; excessive micro water; processing technology; heat liquid-solid coupling

0 引言

收稿日期:2016-07-11; 修回日期:2016-08-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51577135)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51577135).

由于高压 GIS 设备^[1]安装时充入的 SF₆ 气体中

有一定的微水含量,随着 GIS 设备运行时温度的变化,以及区域环境温度的影响,气室内部器件如断路器、电流互感器、隔离开关等表面材料在安装前携带的水分将逐渐析出^[2],当吸附剂水分^[3]的饱和后,GIS 气室内 SF_6 微水含量逐渐超标,严重危及 GIS 的内绝缘强度^[4],常造成局部放电增大甚至发生闪络,严重影响 GIS 的可靠性^[5]。

如果检测到 GIS 设备气室微水含量超标,目前的处理方式^[6]主要包括更换合格的 SF_6 新气、更换新的吸附剂、对气室抽真空循环氮洗^[7]处理工艺等措施,但更换 SF_6 新气和吸附剂无法解决微水的来源^[8],更换后微水含量仍会迅速回升^[9];抽真空循环氮洗处理工艺复杂耗时^[10],人力物力资源浪费,且常常不能达到微水含量有效的抑制,为此进行 GIS 气室微水含量影响因素的研究,探索简易高效的超标微水处理方法,具有较大的理论意义和实际工程应用价值。GIS 气室微水处理是一个流体与固体耦合的过程^[11],需建立 GIS 气室微水超标处理的流双向固耦合仿真分析数学模型^[12],模拟温升变化与微水析出的内在关系,减少实验探索研究的周期与成本。

文中根据相关 IEC 和电力行业标准^[13],在原有处理工艺的基础上,提出了一种新的高压 GIS 气室微水超标加热处理工艺,即在循环氮洗过程中对 GIS 壳体进行加热处理,并通过流固双向耦合数学模型的求解论证了加热处理的可行性和对提高微水处理效率的促进作用,加热处理有利于 GIS 内壁凝露气化,提高氮洗处理的效率,为优化 GIS 气室微水超标处理工艺提供理论依据。

1 GIS 气室微水超标加热过程分析

GIS 微水超标加热处理在现有处理工艺的基础上,通过对 GIS 设备壳体进行加热,以提高氮洗时内部氮气的温度,气化 GIS 内壁的凝露,释放元器件表面的水分。加热过程具体步骤见图 1。

加热过程从更换完吸附剂并封盖开始,至 12 h 静止结束,通过加热模块对 GIS 断路器、电流互感器壳体外表面加热完成,加热模块采用上下两片加热板贴合,两组加热模块共同作用,模型见图 2。

2 GIS 气室流固双向耦合数学模型

GIS 气室微水超标加热处理的过程中,壳体与加热模块、壳体与内部氮气之间存在热传导关系。内部氮气在受热的情况下产生流体流动,从而会影响内部氮气的整体温度场分布;氮气与气室壳体内壁存在边界耦合问题,流动的氮气反向影响壳体的温度

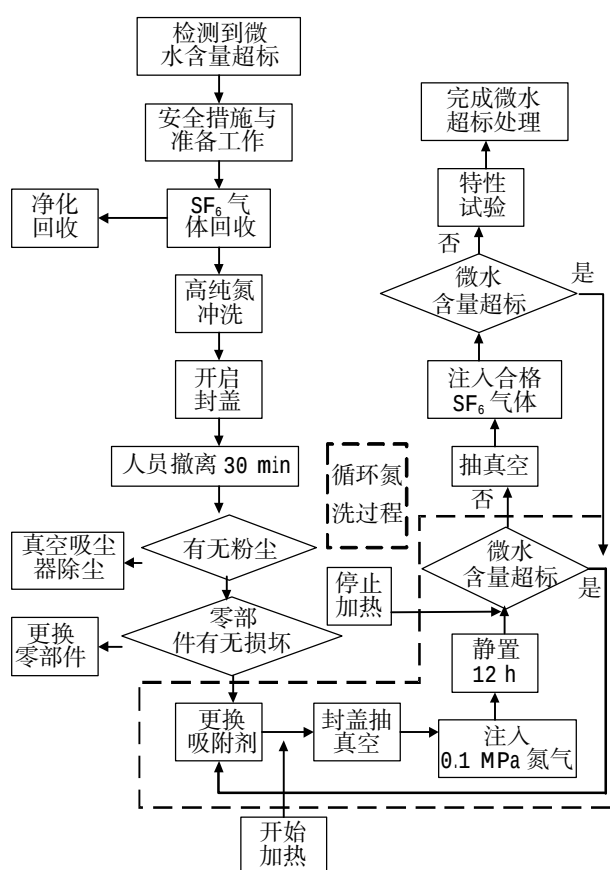
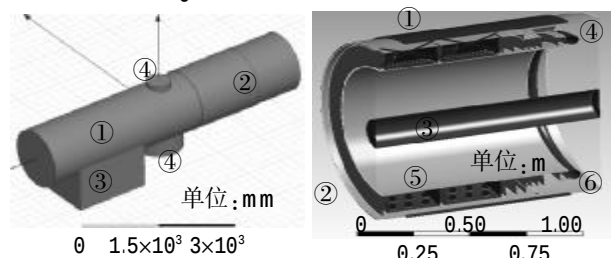


图 1 GIS 气室微水超标加热处理流程

Fig. 1 Heating treatment process of GIS gas chamber micro water



①—GIS 断路器;②—加热模块;③—操动机构;④—上下端盖。
①—加热模块;②—电流互感器;③—母线导体;④—均压环;⑤—线圈绕组;⑥—GIS 壳体。

图 2 GIS 断路器、电流互感器加热模型

Fig. 2 Heating model of the GCB and CT

场分布。所以 GIS 气室微水超标加热处理过程中存在流体与固体的双向耦合关系,对这样的问题,可以认为是无内热源、常物性、不可压缩粘性流体的流动与传热问题^[14]。

为判定内部氮气流体的流动情况,引进流体状态的无量纲参数——雷诺数 Re ^[15],考虑 GIS 气室壳体的实际结构,可以视为在圆管中流动的流体,其雷诺数表现形式为

$$Re = \frac{\nu D}{\eta} \quad (1)$$

式(1)中: $\bar{v}$ 为管内流体平均流速, m/s; D 为圆管直径, m; ϑ 为氮气运动粘度, m^2/s 。流体开始由层流形态向紊流转变时,称为下临界雷诺数^[16], $Re=2\ 100\sim 2\ 320$; 当 $Re>10\ 000\sim 13\ 800$ 时流体的流动形态为稳定的紊流,称上临界雷诺数;当 $Re=(2\ 100\sim 2\ 320)\sim (10\ 000\sim 13\ 800)$, 流动形态为过渡状态,可以是紊流或层流。GIS 断路器罐体直径 1.3 m, 氮气 20 °C 下运动粘度 15.753 mm^2/s , 氮气完全封闭流速较低, 平均流速取 0.1 m/s, 其雷诺数为 8 252.4, 氮气流动为层流和紊流的过渡状态^[17], 基本无湍流。

该流体状态可运用层流模型^[18]进行计算, 其计算数学模型包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、状态方程等 4 个方程构成的封闭方程组。

1) 质量守恒方程。根据质量守恒定律, 在流动过程中, 系统内的氮气总质量保持不变, 即氮气质量在壳体内体积分的导数等于零, 写为

$$\frac{d}{dt} \int \rho dV = 0. \quad (2)$$

式(2)中: ρ 为密度; V 为体积; t 为时间。

2) 动量守恒方程。氮气中任意单位的总动量变化率应等于作用于该单位上所有外力的合力为

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} = \rho F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i})] + \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda \nabla \cdot \mathbf{u}) \quad i=1,2,3. \quad (3)$$

式(3)中: p 为压力; λ 为流体传热系数; F_i 为单位质量在某方向上的质量力; μ_i ($i,j=1,2,3$) 分别为速度矢量在 x_1, x_2, x_3 方向的分量; $\partial/\partial x_i (\rho u_i h)$ 表示固体由于平移或旋转而引起的对流传热, $\partial/\partial x_i (k \partial T/\partial x_i)$ 是由于传导引起的热流。

3) 能量守恒方程。根据能量守恒定律, 在流动过程中, 氮气总能量的增量等于外力对氮气单位作的功与外界传进的热量之和, 可表达为

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{T})}{\partial x_i} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \bar{u}_j \bar{T}'). \quad (4)$$

式(4)中, c_p 为比热容。

4) 状态方程。粘性流体运动的基本变量是速度, 压力、温度和密度, 因此 3 个基本方程(连续方程、动量方程和能量方程)不足以建立封闭方程组、需补充状态方程来建立氮气压力、密度和温度之间的关系。通常描述平衡状态流体的物理量是压力体积 V 和温度 T , 联系这 3 个变量之间的关系式称为状态方程, 可表示为

$$p = \rho R T. \quad (5)$$

式(5)中, R_0 为气体普适常数。4 个未知数是 ν 、 ρ 、 T 和 F , 3 个基本方程加上状态方程正好封闭, 可以求解。

采用分区计算、边界耦合的方法, 即分别对 GIS 壳体固体和氮气流体区域建立控制方程, 然后列出每个区域的边界条件, 在耦合边界上的条件取下列 3 种表达式中的两个:

1) 耦合边界上的温度连续性

$$T_{w1} I_1 = T_{w2} I_2. \quad (6)$$

2) 耦合边界上的热流密度连续

$$q_{w1} I_1 = q_{w2} I_2. \quad (7)$$

3) 耦合边界上的第 3 类边界条件

$$-k (\frac{\partial T}{\partial X})_{w1} I_1 = \alpha (T_{w2} - T_f) I_2. \quad (8)$$

假定流固耦合边界上的温度分布, 对其中一个区域进行求解, 得到耦合边界上的局部热流密度和温度梯度, 然后利用上面的式子求解另一个区域, 得出耦合边界上的新的温度分布, 再以此分布作为前一区域的初始值, 重复上述计算直到收敛。

3 流固双向耦合模型求解

基于第 2 节中所述模型, 在 Ansys-workbench 中进行 GIS 气室微水超循环氮洗过程中加热处理的热流固双向耦合求解, Ansys 提供了流体仿真计算 Fluent 模块和固体稳态、暂态热力学仿真计算模块^[19], 并通过系统设置可以实现两个模块之间的数据共享、传递及耦合计算。

仿真通过氮气流体与气室壳体的接触面进行温度和热流量数据传递, 通过不断耦合计算直到数据收敛为止, 即为计算的最终结果, 仿真系统结构图见图 3。



图 3 流固双向耦合仿真结构

Fig. 3 Fluid solid two-way coupling simulation experimental structure

仿真模型在实际 GIS 气室模型的基础上进行简化, 去除影响较小的结构部分, 对盆式绝缘子作平面化处理, 并将模型按对称轴对称剖分, 以减少流固耦合面的复杂程度, 降低耦合系统传递的数据量, 提升仿真的效率; GIS 气室模型、外表面加热模型和内部

氮气模型尺寸比例为 1:1。为确定系统耦合时间,对 GIS 固体壳体进行单独的瞬态热力学计算,以得到 GIS 固体壳体在加热模块的作用下达达到稳态温升所需要的时间,加热模块采用每组加热片 2 400 W 的加热功率,分两组。

仿真结果见图 4。稳态温升最高为 10.63 °C(环境温度 20 °C),达到稳态温升时间为 46 654 s,所以系统的耦合时间必须超过该值,设为 48 000 s,仿真步长 240 s,仿真步数 200。

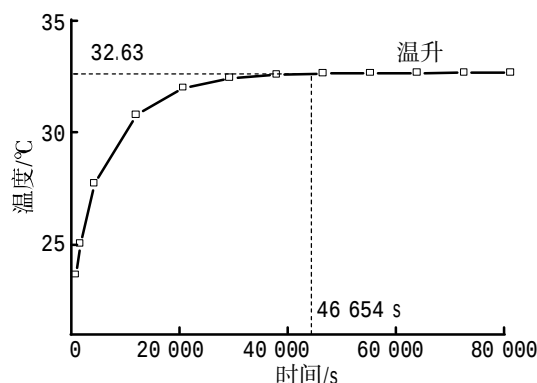


图 4 稳态温升变化曲线

Fig. 4 Steady-state temperature rise change curve

4 GIS 气室微水超标处理方法论证

仿真经过 GIS 壳体固体和内部氮气流体流动的双向耦合计算,计算过程中传输数据的残差曲线,见图 5。

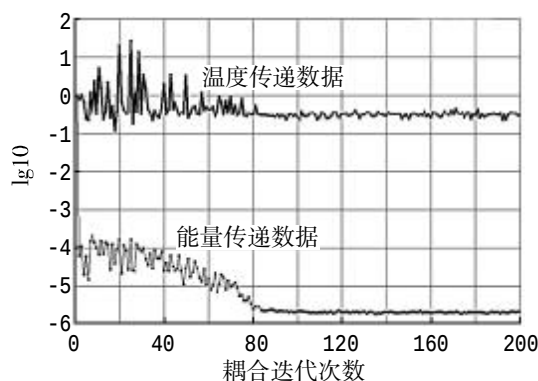


图 5 传递数据相对值残差曲线

Fig. 5 Transfer data relative value residual curve

由图 5 可以看出,双向耦合计算初始,GIS 壳体内表面与氮气外表面温差较大,热流量小,随着加热模块的持续加热,耦合界面温差逐步缩小,热流量保持稳定,GIS 整体温度分布趋于稳态。在固体计算域可得到 GIS 断路器的温度场分布见图 6。断路器壳体由于体积尺寸较大,温度分布差异明显,靠近加热模块附近最高稳态温升可达 13.125 °C。

氮气温度场分布见图 7。氮气部分在靠近加热模块附近温升较高,最高 11.009 °C,远离加热模块

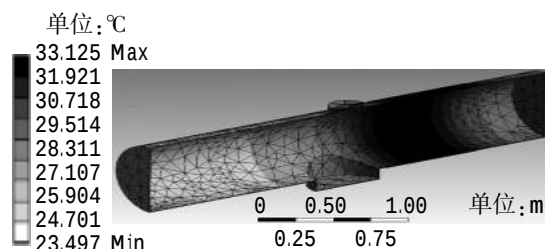


图 6 GIS 断路器固体壳体温度场分布

Fig. 6 Temperature distribution of the shell of GCB

的两端温升不够明显;在流体计算域可得到断路器内氮气流动速度分布,见图 8。

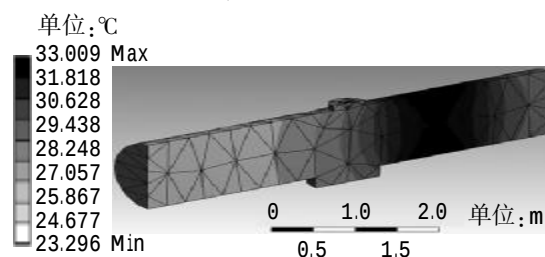


图 7 GIS 断路器内部氮气温度场分布

Fig. 7 Temperature distribution of nitrogen in GCB

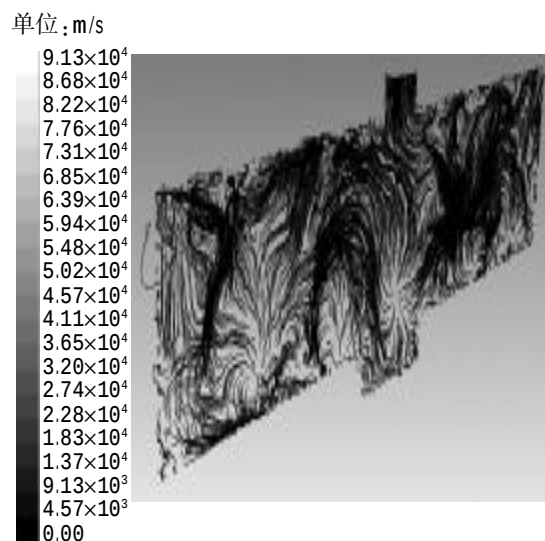


图 8 GIS 断路器内部氮气流速分布

Fig. 8 Nitrogen flow distribution in the GCB

氮气流体因完全封闭,在 GIS 壳体内产生层流,受断路器罐体结构影响,层流主要分布在耦合界面,氮气体积大,整体的流动性较差,氮气流速分布见图 8,造成氮气整体温度分布不均匀,断路器局部最高温度 33.009 °C,电流互感器局部最高温度 35.81 °C,见图 9。

GIS 气室内的器件表面、绝缘层和吸附剂等部件上均含有一定的水分,伴随长时间的运行,或者温度上升时,分子热运动加快,这些部件上的水分就会不断扩散析出,进入 GIS 气室中,造成微水含量上升。GIS 气室微水含量与环境温度呈非线性关系^[20],可以按照式(9)进行近似计算为

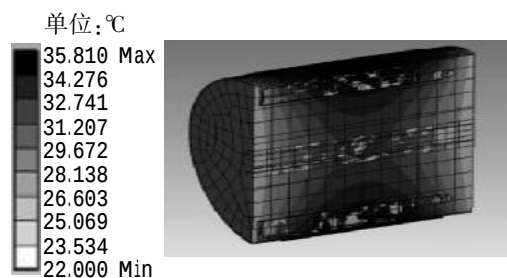


图 9 电流互感器温度场分布

Fig. 9 Temperature field distribution of the CT

$$X_2 = X_1 \frac{P_{H2}}{P_{H1}} \frac{P_1}{P_2} \quad (9)$$

式(9)中: X_1 、 X_2 为温度 T_1 、 T_2 时微水含量; P_{H1} 、 P_{H2} 为温度 T_1 、 T_2 时的饱和水蒸气压; P_1 、 P_2 为温度 T_1 、 T_2 时的气体压强。其对应关系曲线见图 10。

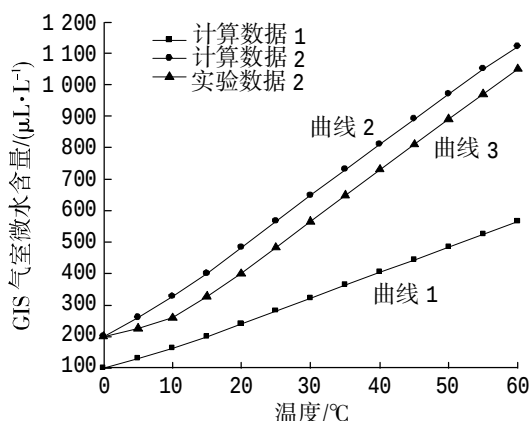


图 10 GIS 气室微水含量与温度关系

Fig. 10 Relationship between GIS gas chamber micro water and temperature

图 10 中曲线 1、2 分别为微水含量 100、200 $\mu\text{L/L}$ (测量温度 0 $^{\circ}\text{C}$) 的计算数据曲线, 曲线 3 为 200 $\mu\text{L/L}$ 的实验测量数据。由图 10 可知, 在微水含量为 200 $\mu\text{L/L}$ (环境温度 20 $^{\circ}\text{C}$), 断路器气室微水含量可提升至 395 $\mu\text{L/L}$, 电流互感器气室微水含量提升至 437 $\mu\text{L/L}$ 。

根据相关电力行业标准^[4]的规定, GIS 正常安全运行的最高温度为 60 $^{\circ}\text{C}$, 为提高加热模块的加热效果, 并保证 GIS 的安全稳定运行, 对加热模块单片发热功率进行了实验分析, 根据加热模块加工设计的要求和规定, 单片加热模块的加热功率设为 2 400、4 800、7 200、9 600 W, 针对 4 种不同加热功率等级的加热模块进行仿真, 得到其 GIS 断路器和电流互感器壳体稳态最高温度, 见表 1。

由对比实验结果可知, 在保证 GIS 正常安全运行的条件下, 断路器加热模块每片发热功率可提升至 7 200 W, 电流互感器加热模块每片发热功率可提升至 4 800 W, 内部气室温度明显提高, 有利于提升氮洗的干燥效果。

表 1 不同发热功率下的温升对比

Table 1 Comparison of temperature rise under different heating power

加热功率/(W/片)	稳态最高温度/ $^{\circ}\text{C}$		微水含量/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	
	断路器	CT	(环境温度 20 $^{\circ}\text{C}$)	
2 400	33.13	35.81	395	437
4 800	43.73	49.62	556	644
7 200	52.99	77.24	695	1 059
9 600	60.54	—	808	—

5 结语

文中以提升高压 GIS 气室微水超标处理工艺的效率为目的, 提出了加热处理循环氮洗的新的处理工艺, 构建了 GIS 断路器气室氮洗过程流固耦合层流计算模型, 基于 Ansys 仿真软件进行了求解, 得到以下结论:

断路器气室加热模块采用上下两片一组, 整体分两组加热, 每片加热功率 7 200 W 为宜, 可以使 GIS 断路器壳体稳态最高温度达到 52.99 $^{\circ}\text{C}$, 氮气稳态最高温度 52.50 $^{\circ}\text{C}$; 电流互感器气室加热模块每片 4 800 W 最优, 可使电流互感器壳体稳态最高温度达到 49.62 $^{\circ}\text{C}$, 氮气稳态最高温度 49.17 $^{\circ}\text{C}$ 。加热模块可明显提高 GIS 壳体及内部气体的温度。

在微水含量为 200 $\mu\text{L/L}$ (环境温度 20 $^{\circ}\text{C}$) 的情况下, 通过加热处理工艺, 断路器微水含量可提升至 695 $\mu\text{L/L}$, 电流互感器提升至 644 $\mu\text{L/L}$, 有效地促进了 GIS 气室内器件壁凝露的气化, 再经过循环氮洗处理, 提高了干燥效果, 可准确长期控制 GIS 气室微水含量。

参考文献:

- [1] THPAUL A, PORUS M, GALLETTI B, et al. SF_6 concentration sensor for gas-insulated electrical switchgear original research article[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 206(1): 51-56.
- [2] 贺 虎, 韩书谟, 王延豪, 等. 交流特高压晋东南变电站 1 100 kV GIS 设备的现场安装管理[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 11-16.
HE Hu, HAN Shumo, WANG Yanhao, et al. The field installation and management of the GIS 1 100 kV equipment of UHV substation[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 11-16.
- [3] 乔胜亚, 周文俊, 唐 念, 等. 不同吸附剂对 GIS 局部放电特征气体变化规律的影响[J]. 电工技术学报, 2016(3): 113-120.
QIAO Shengya, ZHOU Wenjun, TANG Nian, et al. Effects of different adsorbents on the characteristics of the partial discharge characteristics of gas GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016(3): 113-120.

- [4] KHAYAM U. Electric field characteristics inside three-phase gas insulated switchgear in the presence of foreign metallic particle[C]//4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics(ICEEI).[S.L.]:IEEE, 2013: 1195-1201.
- [5] 王晋根, 黄 弘. SF₆ 电器中微水过量的危害及采标建议[J]. 高电压技术, 2002, 28(5):49-54.
WANG Jingen, HUANG Hong. SF₆ electric water excessive harm and advice on application[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(5):49-54.
- [6] ZHANG Xiaoxing, MENG Fansheng, YANG Bing. Use of hydroxyl-modified carbon nanotubes for detecting SF₆ decomposition products under partial discharge in gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2246-2253.
- [7] 张 鹏, 楼文耀, 乔 木. 110 kV GIS 微水处理的探讨[J]. 电工技术, 2007(3): 21-23.
ZHANG Peng, LOU Wenyao, QIAO Mu. The discussion of minim-water's treating in 110 kV GIS[J]. Electric Engineering, 2007(3): 21-23.
- [8] 司增彦, 冯阿龙. 3 台 110 kV SF₆ 断路器微水含量超标的原因分析与处理[J]. 高压电器, 2009, 45(2):112-113.
SI Zengyan, FENG Along. 3 sets of 110 kV SF₆ circuit breaker micro water content exceeding the reason analysis and processing[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45 (2): 112-113.
- [9] 李明芸, 江秀臣, 赵子玉, 等. 组合电器中微水含量在线监测实验研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(3):32-33.
LI Mingyun, JIANG Xiuchen, ZHAO Ziyu, et al. Study on the on-line humidity monitoring of SF₆ gas in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 32-33.
- [10] QI Bo, LI Chengrong, WU Zhangjian. Experimental study on the relationship between partial discharge and gas decomposition products in SF₆ insulated electrical equipment [C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.[S.L.]:IEEE, 2009: 392-395.
- [11] 胡丹梅, 张志超, 孙 凯, 等. 风力机叶片流固耦合计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(17): 98-104.
HU Danmei, ZHANG Zhichao, SUN Kai, et al. Computational analysis of wind turbine blades based on fluid-structure interaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (17): 98-104.
- [12] 李术才, 宋曙光, 李利平, 等. 海底隧道流固耦合模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (5):883-890.
LI Shucai, SONG Shuguang, LI Liping, et al. Development and application of the model test system for fluid structure interaction model of subsea tunnel[J]. Chinese Journal of rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5):883-890.
- [13] DL/T 603—2006 气体绝缘金属封闭开关设备运行及维护规程[S].2006.
DL/T 603—2006 Regulation of operation and maintenance for gas-insulated metal-enclosed switchgear[S].2006.
- [14] KAUFMANN B, KUDOKKE M, GROSSMANN S. Experimental verification of convective heat transfer computations for gas insulated switchgear[C]//4th International Youth Conference on Energy(IYCE).[S.L.]:IYCE, 2013:1-6.
- [15] 王新荣, 顾 明, 全 涌. 低紊流度下二维矩形截面柱体模型表面风压分布的雷诺数效应[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1):143-149.
WANG Xinrong, GU Ming, QUAN Yong. Reynolds number effects on wind pressure distributions of 2D rectangular prisms in low turbulence flow[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 143-149.
- [16] 霍 磊, 刘火星. 低雷诺数下离心压气机性能及流动影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2013, 28(4):911-920.
HUO Lei, LIU Huoxing. Numerical analysis of centrifugal compressor performance and flow at low reynolds number [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(4): 911-920.
- [17] 杨秉雄, 蔡临宁. 充型过程数值模拟中紊流模型与层流模型的比较[J]. 热加工工艺, 1997(5):11-14.
YANG Bingxiong, CAI Linning. Comparisons of laminar assumption and turbulence model in numerical simulation of mold filling[J]. Hot Working Technology, 1997(5):11-14.
- [18] 李伟力, 李 勇, 杨雪峰, 等. 大型空冷汽轮发电机定子端部温度场与流体场的计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 36(29):80-87.
LI Weili, LI Yong, YANG Xuefeng, et al. Calculation and analysis of temperature field and fluid field of stator end of large air cooled turbo generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 36(29):80-87.
- [19] FEI Dong, CAI Yixi, JIANG Shuli, et al. A research on fluid-solid-heat coupling simulation for diesel engines with considering boiling heat transfer[C]//International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE).[S.L.]:IEEE, 2011: 4723-4729.
- [20] 汤义勤. GIS 微水在线监测系统的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
TANG Yiqin. Research and application of GIS of micro water online monitoring system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [21] GB 7674—2008 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备[S].2008.
GB 7674—2008 Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above[S].2008.

李洪渊(1982—), 男, 工程师, 大学本科, 主要从事变电设备检修管理。

石海珍(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事变电设备检修和试验工作。

王泽泽(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事电机与电器的研究工作(通讯作者)。

金立军(1964—), 男, 博士, 博导, 主要从事电器测试与故障诊断研究。