

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.019

基于温升控制的 GIS 气室微水加热氮洗干燥研究*

左 稳¹, 依马木买买提·瓦阿甫¹, 单德帅¹,
石海珍¹, 戴伟伟², 金立军^{2*}

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

摘要: 针对超高压气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS) 气室微水超标, 严重影响 GIS 设备内部的绝缘性能和电力系统的正常运行的问题, 对科学有效的微水超标处理方法进行了研究。基于 750 kV GIS 气室内各部件材料表面微水析出特性, 提出了一种 GIS 设备微水超标加热氮洗干燥处理工艺, 利用局部加热的方法提升了 GIS 气室内气体和设备的整体温度, 加速 GIS 气室内附着于各类固体材料微水的析出。建立了 GIS 设备微水加热处理的热流固耦合数学模型, 基于气密分布在 Fluent 中进行模型的解耦和计算, 得到了设备气室温升和微水析出量的提升, 验证了加热氮洗干燥处理工艺的高效性; 根据计算结果对加热模块的加热功率进行温升控制优化设计, 寻求了加热模块的最优效率。研究表明: 该微水超标加热氮洗干燥处理工艺能有效提高 GIS 气室内部温度, 有利于微水的析出和设备的干燥, 能够减少循环氮洗干燥次数, 提升 GIS 设备现场检修效率。

关键词: 超高压 GIS; 微水超标处理; 加热氮洗干燥法; 温升控制优化

中图分类号: TM643

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1186-06

Research on the drying-treatment of heating and nitrogen washing for GIS micro water in the air chamber based on the temperature rise control

ZUO Wen¹, YIMAMUMAIMAITI Waa-fu¹, SHAN De-shuai¹,
SHI Hai-zhen¹, DAI Wei-wei², JIN Li-jun²

(1. National grid Xinjiang power company maintenance company, Urumqi 830000, China;
2. School of electronics and information engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aiming at the problem of the micro water in the extra high voltage GIS gas chamber exceeding the standard, which seriously affecting the internal insulation of the equipment and the normal operation of the power system, the scientific and effective treatment for the GIS micro water exceeding problem in the gas chamber was studied. A new drying-treatment of heating and nitrogen washing for 750 kV GIS equipment was researched based on the characteristics of the micro water precipitation of the GIS indoor equipment materials. The drying-treatment was to raise the temperature of gas in the GIS chamber and the precipitation of the micro water. Establishing the heat-fluid-solid coupling model of the drying treatment and calculating the temperature rise of the chamber, which will help the precipitation of the micro water, the feasibility of the drying-treatment is verified based on the Fluent decoupling results. The optimal heating power is designed based on the calculation to control the temperature rise under the allowable value. The results indicate that the drying-treatment of heating and nitrogen washing for GIS micro water exceeding can effectively improve the internal temperature of GIS gas chamber and the precipitation of the micro water. The reoperation times of nitrogen washing is reduced, enhancing the GIS site maintenance efficiency.

Key words: extra high voltage GIS; treatment for micro water exceeding; drying-treatment of heating and nitrogen washing; optimal temperature rise control

收稿日期: 2017-02-22

作者简介: 左 稳 (1987-), 男, 陕西西安人, 助理工程师, 主要从事变电设备检修工作方面的研究。E-mail: 294146983@qq.com

通信联系人: 金立军, 男, 博士, 博士生导师。E-mail: jinlj@tongji.edu.cn

0 引言

750 kV 超高压 GIS 设备气室六氟化硫 (SF_6) 气体微水含量在安装和运行过程中要求严格^[1-2], 标准明确^[3]。GIS 设备气室微水含量的变化与 GIS 设备的气密性^[4-5]、检修维护操作过程的规范性^[6]、 SF_6 气体和分子筛的合格性^[7]、气室内部设备材料表面的含水量等因素息息相关^[8], 尤其是气室内部设备如断路器、电流互感器、隔离开关等材料表面吸附的水分影响最大^[9], 水分在设备生产、运输、安装过程中吸附至设备材料表面, 在长期的运行过程中, 逐渐析出^[10], 释放到绝缘气体中, 造成 GIS 设备微水含量超标^[11]。现有 GIS 气室微水超标氮洗干燥处理工艺复杂, 具有对材料表面吸附的水分难以处理, 氮洗干燥循环操作次数多、耗时长、处理效果差等缺点。文献[12]针对兰州石化合成橡胶厂 110 kV 变电站 GIS 气室微水超标的问题, 提出了抽真空不断循环氮洗干燥的方法, 但只能将少量的水分从气室中带出来, 线圈或者 GIS 本体中仍然有水分, 一段时间以后水分又会从中逸出使气室的水分增大, 所以用此法处理微水是不彻底的。文献[13]对 500 kV SF_6 电流互感器运行中出现的含水量超标缺陷进行了循环氮洗处理, 由于电流互感器内部固体材料吸附水分难以在现场彻底根除, 受客观条件限制只能采取了临时过渡方案。另外, 目前国内外对 GIS 设备材料表面水分析出特性的研究较少^[14], 微水含量与温度压力的关系不明确^[15], 因此, 研究 GIS 设备气室材料微水析出特性并提出高效的现场处理工艺对 GIS 设备的维护检修、缩短停电时间、及时投入运营具有重大意义^[16]。

本文在研究 GIS 气室内不同材料表面微水析出特性的基础上, 提出 GIS 气室微水超标加热氮洗干燥处理工艺, 工艺拟通过外壳贴合式加热方式提高设备气室内部气体和固体的温度, 提升固体材料表面水分的析出量, 从而提高一次氮洗干燥过程去除的微水量, 减少循环氮洗的操作次数; 建立 GIS 设备加热氮洗工况下的热流固耦合模型, 基于气密分布在 Fluent 中进行模型解耦, 仿真计算得到 GIS 设备的温升和气密分布, 以验证加热氮洗干燥处理工艺的可行性; 针对加热模块的温升控制进行功率优化设计, 得到不同设备气室加热模块的最优加热功率, 为微水超标现场检修提供处理工艺指导。

1 微水析出特性及加热处理工艺

当气体或水蒸汽在固体材料表面析出时, 固体称为吸附剂^[17], 析出的气体称为析出物。GIS 气室内设备材

料均为吸附剂, 主要有: 金属构件、分子筛、绝缘材料等。析出物为微水^[18]。当材料置于气体中时, 材料表面和内部吸附的水分就会因扩散解溶、解吸脱附而析出, 至达到析出平衡。对于一般的固体吸附剂与气体析出物的体系, 达到析出平衡时, 气体析出量 q 是吸附剂温度 T 和环境压力 P 的函数:

$$q = f(T, P) \quad (1)$$

若固定 P =常数, 则 $q = f(T)$, 得析出等压线。

GIS 气室气体在正常运行和检修过程中压力保持恒定, 研究材料在不同温度下的微水析出特性, 即等压线, 等压线是在吸附等温线^[19]的基础上, 根据吸附与析出的平衡关系, 及气体体积恒定下温度与压力的关系得到, 有如下 5 种类型, 如图 1 所示 (T/T_S 称为比温, T_S 是吸附质在一定气压时的饱和温度)。

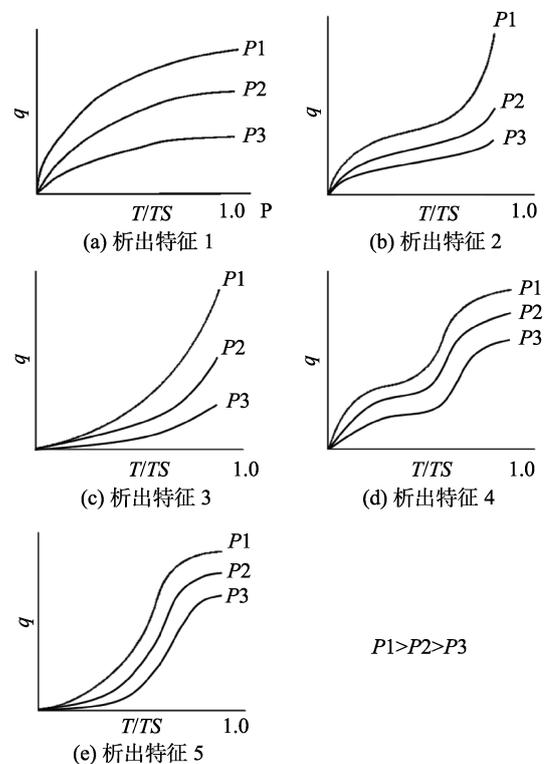


图 1 微水析出等压线

(1) 当吸附剂和吸附质相互作用很弱时出现这种等压线, 如水蒸气在钢、铝合金等金属材料上的析出, 这类包括 GIS 壳体、断路器电流互感器外壳、铜排绕组、母线等。

(2) 吸附剂孔径大小不一, 发生多分子层析出, 称为 S 型等压线。当比温接近 0 时, 易发生毛细管和孔凝现象。

(3) 在 2.5 nm 以下微孔吸附剂上的析出等压线属于这种类型, 初始析出量不明显, 当比温逐渐增大时, 析出量越来越大。

(4) 多种材料组合的多分子层结构时，析出会有这种不规律等压线。水分在油漆层、油纸上的析出就属于这种类型。

(5) 发生多分子层吸附，例如水分在环氧树脂上的析出属于这种类型，这类有机材料包括设备绝缘材

料等。

基于上述 GIS 设备材料微水析出特性与 GIS 气室气体温度的关系,本研究在现有 GIS 气室微水超标循环氮洗干燥处理工艺的基础上,研究设计了新的 GIS 微水超标处理工艺,如图 2 所示。

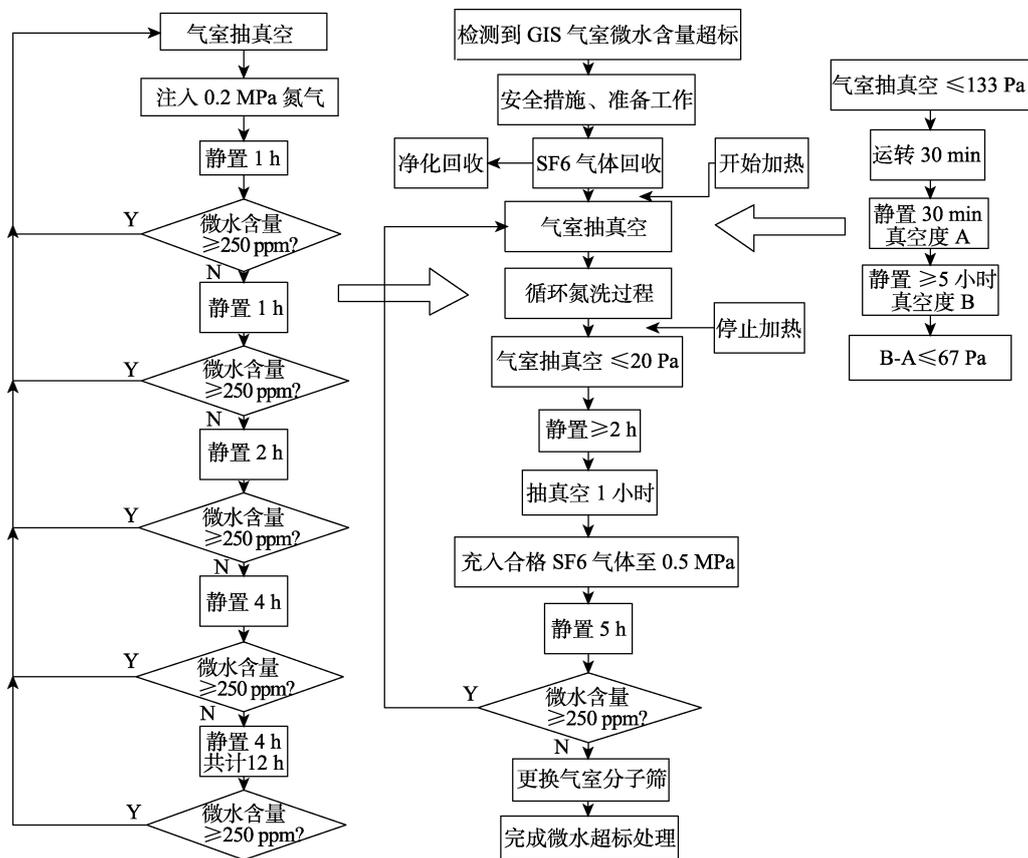


图 2 GIS 微水超标加热处理工艺

本研究通过在 GIS 壳体外安装加热装置对 GIS 设备气室进行加热，氮洗和加热同步进行。加热过程从 SF₆ 回收完成开始，到循环氮洗干燥处理结束为止。加热装置贴合于 GIS 壳体外表面，不影响 GIS 设备的正常检修工作。

2 气室密度分布耦合模型

本研究通过在 GIS 壳体外安装加热装置对 GIS 设备气室进行加热，氮洗和加热同步进行。加热过程从 SF₆ 回收完成开始，到循环氮洗干燥处理结束为止。加热装置贴合于 GIS 壳体外表面，不影响 GIS 设备的正常检修工作。

750 kV GIS 气室微水超标处理按照各个不合格气室分开进行，不同设备之间通过母线连接实现电气导通，通过盆式绝缘子隔开实现气室分离，从而减小设备

故障范围和检修工作量。

针对断路器和电流互感器两种易出现微水超标问题的设备,本研究建立了基于气密分布模型的断路器气室加热模型和电流互感器气室加热模型。分别如图 3、图 4 所示。

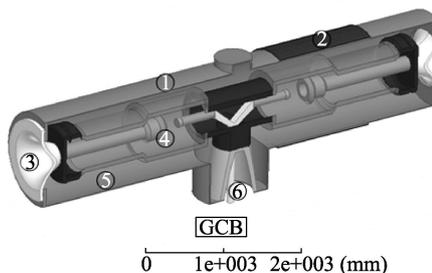


图 3 断路器气室加热模型 (半剖)

①GIS 断路器壳体; ②加热模块; ③盆式绝缘子; ④断路器灭弧室; ⑤气室部分; ⑥传动机构

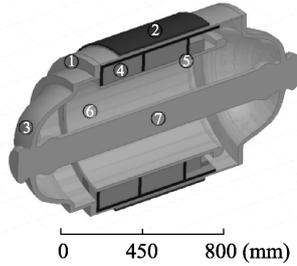


图 4 电流互感器气室加热模型 (半剖)

①GIS 电流互感器壳体; ②加热模块; ③盆式绝缘子; ④二次绕组; ⑤绝缘层及均压环; ⑥气室部分; ⑦母线

本研究通过建立加热情况下的热流固耦合模型, 设置加热模块内部发热功率的热源, 壳体外部与空气的热对流, 加热模块与壳体、壳体与氮气、氮气与内部设备之间的热传导和环境温度等相关条件, 基于 ANSYS Fluent 流体热力学仿真软件, 进行 GIS 设备微水加热处理的解耦计算, 其数学计算模型包括质量守恒、动量守恒、能量守恒^[20-21]和状态方程 4 个方程。

(1) 质量守恒: 根据质量守恒定律, 在流动过程中, 气室内的氮气气体总质量保持不变, 即氮气气体质量在气室中体积积分的导数为零:

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

式中: ρ —氮气密度, t —时间, V —气室体积。

(2) 动量守恒: 气室流场中任意氮气单元的总动量变化率应等于作用于该氮气气体单元上所有外力的总和:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} = \rho F_i + \text{grad}P + \text{div}(2\mu \vec{S}) - \frac{2\mu}{3} \text{grad}(\mu \text{div} \vec{v}) \quad (i = x, y, z) \quad (3)$$

式中: \vec{v} —气体单元速度矢量; 等式右边第 1 项—单位体积氮气的质量力, 第 2 项—作用于单位氮气体积的压力梯度; 第 3 项—氮气粘性变形应力, 它只与氮气的粘度系数和应变率张量有关; 第 4 项—氮气粘性体膨胀应力。

(3) 能量守恒: 根据能量守恒定律, 在气体流动过程中, 氮气气体单元总能量的增量等于外力对气体单元做的功与外界交换的能量之和:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial(u_i \bar{T})}{\partial x_j} = \text{div} \left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} \bar{T} \right) + S_T \quad (4)$$

式中: T —温度; c_p —氮气比热容; λ —氮气传热系数; S_T —流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分, 称为粘性耗散项。

(4) 状态方程: 粘性流体的运动变量是速度、压

力、温度和密度, 因此以上 3 个基本方程不足以建立封闭方程组, 需补充气体状态方程来建立压力、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 P 、体积 V 和温度 T , 这 3 个变量之间的关系式称为状态方程^[22], 即:

$$P = \rho V = \frac{m}{M} R_0 T \quad (5)$$

式中: R_0 —气体普适常数; m —气体质量; M —气体摩尔质量。

3 Fluent 热流固模型解耦

4 个方程中 4 个未知数: v 、 p 、 T 、 F , 采用分区计算、边界耦合的方法, 即分别对固体和流体区域建立控制方程, 然后列出每个区域的边界条件, 在耦合边界上满足下列 3 个边界条件, 包括:

(1) 耦合边界上的温度连续性:

$$T_{W1} = T_{W2} \quad (6)$$

(2) 耦合边界上的热流密度连续性:

$$q_{W1} = q_{W2} \quad (7)$$

(3) 耦合边界上的对流换热第三类边界条件。当固体与流体进行热对流交换时, 固体温度变化所释放的热量引起固体与气体温度的差异性, 称之为牛顿冷却定律^[23]:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T_{W1}}{\partial n} \right)_{W1} = q_{W1} = \alpha (T_{W1} - T_{W2}) \quad (8)$$

式(6~8)中: T_{W1} 、 T_{W2} —耦合边界两侧的温度; q_{W1} 、 q_{W2} —耦合边界两侧的热流密度; n —方向矢量。

假定耦合边界上的温度分布, 对其中一个区域求解, 得出耦合边界上的局部热流密度和温度梯度, 然后根据式(6~8)求解另一区域, 得出耦合边界上新的温度分布, 再以此作为前一区域的输入, 重复上述计算直到收敛。

考虑 GIS 工作环境状况, 计算得到断路器气室在 9 600 W 加热功率下的温升分布图如图 5 所示。

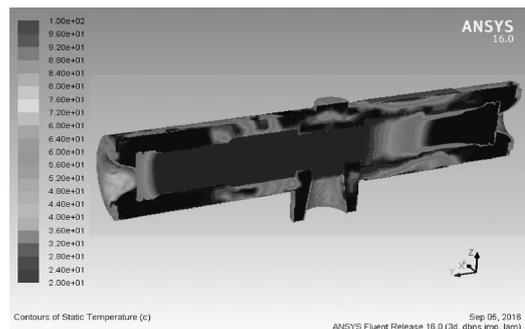


图 5 断路器气室温升分布图

在额定压力 0.5 MPa 下，断路器本体由于散热条件的局限性，温升最高，可达到 102.9 °C，极大提高了断路器表面材料微水的析出。

电流互感器在 2 400 W 加热功率下的温升分布图计算结果如图 6 所示。

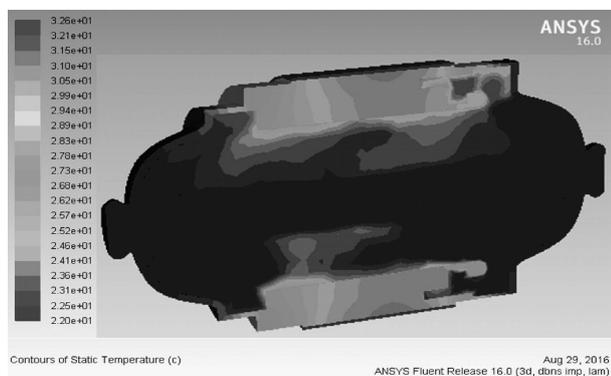


图 6 电流互感器气室温升分布图

气室绝缘侧和二次绕组部分可达到最高温度 32.6 °C，温度最低为母线部分，基本无温升。

通过实测得到断路器和电流互感器模拟设备中各材料微水析出总量与气室温度的变化特性如图 7 所示。

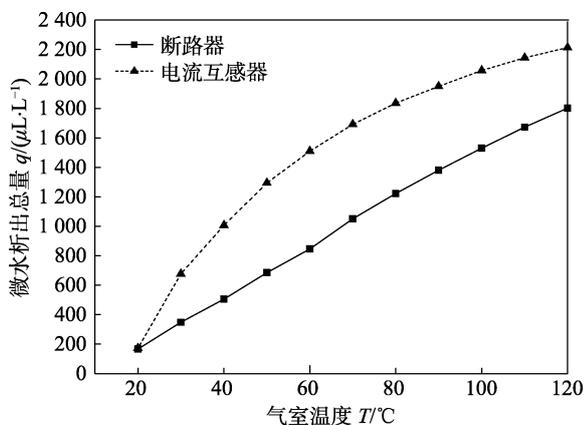


图 7 微水析出总量与温度关系图

根据以上特性和温升计算结果，得到断路器气室和电流互感器气室对应的加热过程中微水含量变化如图 8 所示。断路器气室空间体积较大，设备数量多，吸附的水分也较多，因此微水含量的变化范围较大，22 °C 温度时测量微水含量为 200 μL/L 的气室加热稳定后微水含量上升至 1 577 μL/L，氮气中微水含量提升明显；电流互感器气室体积较小，但绕组及绝缘层微水含量大，22 °C 温度时测量微水含量为 200 μL/L 的气室加热稳定后微水含量上升至 847 μL/L，加热措施对微水的析出和气体微水含量的提高作用明显。

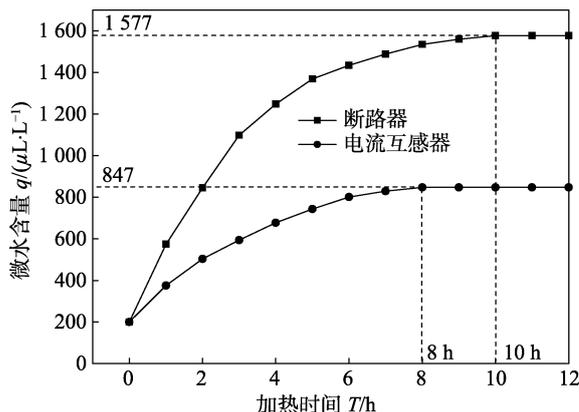


图 8 气室微水变化

4 温升控制优化设计

根据 GIS 设备气室微水析出特性知，温度越高，微水析出速率越大，析出量越多。但是根据气体绝缘金属封闭开关设备运行及维护规程的规定，GIS 设备不需接触的外壳，其温升不应超过 40 °C，对加热氮干燥过程中的温升作出了限制，加热模块的功率优化设计统一了这两者之间的矛盾。

加热模块的输入受控制单元控制并功率可调，受实际材料和加工的限制，每组模块的加热功率可设为 0~9 600 W。不同加热功率下断路器 GIS 设备的不同部件稳态最高温度如图 9 所示。

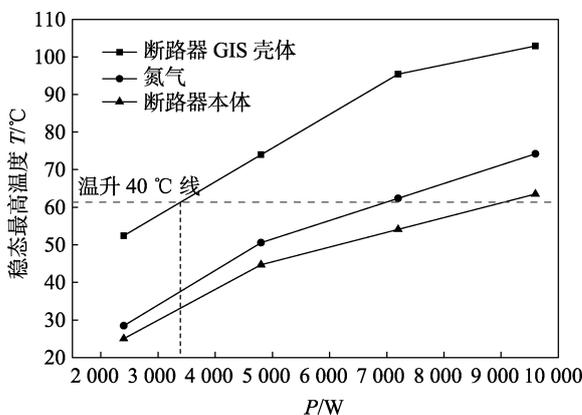


图 9 断路器加热功率优化结果

为保证温升不超过 40 °C，断路器气室加热装置每组最优加热功率可设置为 3 400 W。

电流互感器采用与断路器相同的加热模块，受可加热面积的限制只采用一组模块加热，不同加热功率下的电流互感器部件稳态最高温度分布如图 10 所示。

2 400 W 加热功率下电流互感器壳体稳态最高温度 60.92 °C，绝缘层 42.91 °C，铜排绕组 39.31 °C，氮气 35.71 °C，母线 32.6 °C，满足运行要求且绕组和绝缘层部分温升最高，有利于微水的析出。

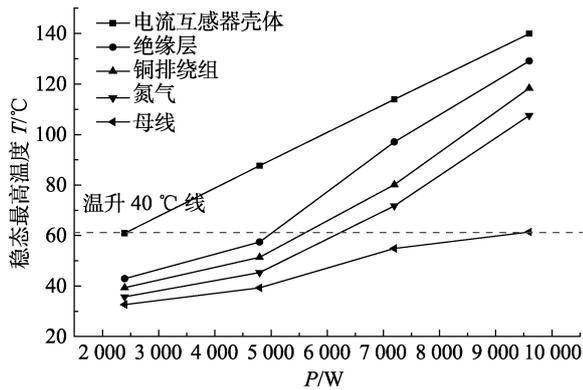


图 10 电流互感器加热功率优化结果

5 结束语

本文针对 750 kV 超高压 GIS 设备气室微水超标问题, 研究设计了局部加热的循环氮洗干燥处理工艺, 根据 GIS 设备材料微水析出特性, 基于气密分布的热流固耦合加热氮洗干燥处理仿真计算, 得到了以下结论:

(1) 局部加热氮洗干燥微水超标处理工艺能有效提高 GIS 设备内部气体和固体材料的温度, 有利于固体材料表面微水的析出, 增大了氮洗过程中氮气排出的水分, 提高了 GIS 设备现场检修工艺的效率;

(2) 针对加热模块的功率进行了温升控制优化设计, 断路器气室加热模块每组最优加热功率 3 400 W, 电流互感器加热模块每组最优加热功率 2 400 W, 设备在环境温度 22 °C 的条件下温升不超过 40 °C, 且 GIS 微水超标加热氮洗干燥处理效果最优。

参考文献(References):

- [1] 刘欢, 邓科, 付汉江, 等. SF₆ 气体分解物与 GIS 设备运行状态关系的探讨[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 127-132.
- [2] PAUL T A, M. PORUS M, GALLETTI B, et al. SF₆ concentration sensor for gas-insulated electrical switchgear[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2014, 206(1): 51-56
- [3] GB7674-2008. 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [4] 肖湘莹, 吴雪峰. 极限温度下 GIS 开关设备的 SF₆ 气密性能研究[J]. 电气制造, 2012(12): 66-68, 73.
- [5] 李秀广, 卢军, 吴旭涛, 等. SF₆ 电气设备中气体内部微水和密度的在线监测装置的研制[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 72-77.
- [6] DLT603-2006. 气体绝缘金属封闭开关设备运行及维护规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [7] 汲胜昌, 钟理鹏, 刘凯, 等. SF₆ 放电分解组分分析及其应用的研究现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2318-2332.
- [8] 郭锦龙, 钟理鹏, 冀国龙, 等. GIS 内常用吸附剂的性能对比研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(7): 18-22.
- [9] 杨振宇, 何正兴, 俞澄一. 晋陵变 220 kV GIS 的漏气检修及其相关问题[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 93-97, 102.
- [10] 刘阳. GIS 内装式电流互感器的微水控制[J]. 电气时代, 2010(7): 94-96.
- [11] 唐炬, 梁鑫, 姚强, 等. 微水微氧对 PD 下 SF₆ 分解特征组分比值的影响规律[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 78-84, 221.
- [12] 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.
- [13] 张巍, 刘玮, 陈红. 500 kV SF₆ 电流互感器微水超标临时处理[J]. 变压器, 2009, 46(7): 64-65.
- [14] 陈小刚. GIS 设备中 SF₆ 的微水含量检测系统的研究[D]. 南京航空航天大学机电学院, 2010.
- [15] 张健, 黄晨光. 三维瞬态方形管流的热流固耦合数值模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 232-239.
- [16] 袁峰, 徐洪, 李振波, 等. 采用露点法的 SF₆ 微水含量变送器[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 93-95.
- [17] 袁镜江. 110 kV 八达站 GIS 设备 SF₆ 气体微水超标原因分析及其临时处理方法[J]. 电气开关, 2014, 52(1): 89-91.
- [18] 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, 31(3): 113-120.
- [19] 何余生, 李忠, 奚红霞, 等. 气固吸附等温线的研究进展[J]. 离子交换与吸附, 2004, 20(4): 376-384.
- [20] 徐聪聪. 柴油机气缸盖热-流-固多场耦合仿真研究[D]. 太原: 中北大学机电工程学院, 2011.
- [21] 陈驭航, 何志霞, 纪长浩. 水力空化耦合撞击流空化器的数值模拟[J]. 液压气动与密封, 2015, 35(12): 33-35.
- [22] 王鑫, 申杨, 赵杰, 等. 论范氏气体方程和理想气体状态方程的关系[J]. 大学物理, 2010, 29(4): 8-10.
- [23] 潘海俊, 刘明群. 热电制冷器在第三类边界条件下的非均匀内热源工程求解[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(2): 63-66.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

左 稳, 依马木买买提·瓦阿甫, 单德帅, 等. 基于温升控制的 GIS 气室微水加热氮洗干燥研究[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1186-1191.
 ZUO Wen, YIMAMUMAIMAITI Waa-fu, SHAN De-shuai, et al. Research on the drying-treatment of heating and nitrogen washing for GIS micro water in the air chamber based on the temperature rise control[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(10): 1186-1191.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>