

大电流环保气体开关设备温升控制技术研究

林复明

(宁波天智电气科技有限公司, 浙江 宁波 330200)

摘要 本文探讨了大电流环保气体开关设备温升控制技术, 分析了环保气体的热学特性及其对大电流温升的影响规律, 通过建立多物理场耦合模型, 研究了不同工况下的温度分布特征。实验结果表明: 环保气体导热系数低于 SF6 气体 23%, 但通过优化触头结构、改进散热方式和采用新型复合材料, 可使开关温升降低 30%。本文提出的温升控制方法旨在为大电流环保气体开关的研发应用提供技术支持。

关键词 大电流开关; 环保气体; 温升机理; 散热优化; 复合材料

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.10.003

0 引言

大电流开关设备作为电网关键设备, 其安全可靠运行直接关系到供电质量。环保气体开关替代 SF6 开关已成为行业发展趋势, 但环保气体的导热性能较差, 加之在大电流条件下焦耳热显著增加, 使温升控制面临严峻挑战。国家标准规定开关设备温升不得超过标准限值, 这要求在充分认识温升机理基础上, 还需开展针对性的控制技术研究。

1 大电流环保气体开关温升特性

大电流环保气体开关温升特性源于复杂的热-电-流耦合作用过程。大电流通过触头系统时, 由于触头接触电阻和体电阻产生的焦耳热导致局部温度升高^[1]。触头表面微观接触点的集中效应使电流密度显著增大, 形成温升热点。环保气体 C4-FN、C5-FK 等介质的导热系数 (0.0105 W/m·K) 低于 SF6 (0.0136 W/m·K), 导致热量积累加剧。触头系统温升分布呈现明显的梯度特征。接触区域温升最高, 可达 85~95 °C, 随着距离增加温度逐步降低。触头结构、压力、材料性能直接影响温升水平。触头压力每增加 10 N, 接触电阻减小 0.8~1.2 μΩ, 温升下降 2~3 °C。环保气体的流动特性与温升密切相关。气体流速、压力和温度共同影响对流换热效果。在 4 bar 压力下, 气体流速增加至 15 m/s 可使温升降低 18%。触头结构产生的涡流会改变局部流场分布, 影响散热效果。建立准确的多物理场耦合模型对预测和控制温升具有重要意义。

2 温升控制原理与方法

2.1 控制目标与策略

大电流环保气体开关的温升控制必须严格遵循 IEC 62271-1 和 GB 1984-2014 标准要求: 触头温升不超过

75 K, 母线连接处温升不超过 65 K, 外壳表面温升不超过 30 K。控制策略基于热力学第一定律和傅里叶导热定律展开, 通过调节热量产生、传导和散发三个环节实现温升控制。在稳态条件下, 设备温升 ΔT 与电流 I 、接触电阻 R 、热导率 λ 、对流换热系数 h 之间满足:

$$\Delta T = I^2 R / (\lambda S + hA)$$

式中: S 为导热截面积, A 为散热面积。温升控制策略需综合考虑材料导热性能、结构散热效率和气体流动特性, 建立多层次温升控制体系^[2]。环保气体开关的温升控制策略包含静态设计和动态调节两个层面。静态设计侧重于触头结构和散热系统的优化, 通过计算触头结构参数、材料特性和散热条件, 确定最佳设计方案。动态调节则关注运行过程中的温升变化, 采用智能控制算法实现温升的实时调节。控制系统采用模糊 PID 控制器, 建立了基于温升模型的预测控制策略。

2.2 关键影响因素分析

温升控制中的关键影响因素涉及电、热、力、流等多个物理场。接触电阻受触头压力、表面粗糙度和氧化程度影响, 实验表明触头表面镀银层厚度每增加 10 μm, 接触电阻降低 12%。如图 1 所示, 触头压力对温升的影响显著, 在不同气体压力条件下均呈现非线性变化特征。当压力从 500 N 增加至 2 500 N 时, 6 bar 压力下的温升降幅达到 32.5%, 比 4 bar 工况下的降幅高出 5.8%。

环保气体的热物性参数对温升影响显著, C4-FN 气体在 2.5 MPa 压力下的导热系数比 SF6 低 23%, 对流换热能力降低 18%。触头结构的几何参数影响电流分布和热量传递, 通过有限元分析发现, 触头重叠长度与温升呈负相关, 延长重叠区可降低局部电流密度, 减少发热量。

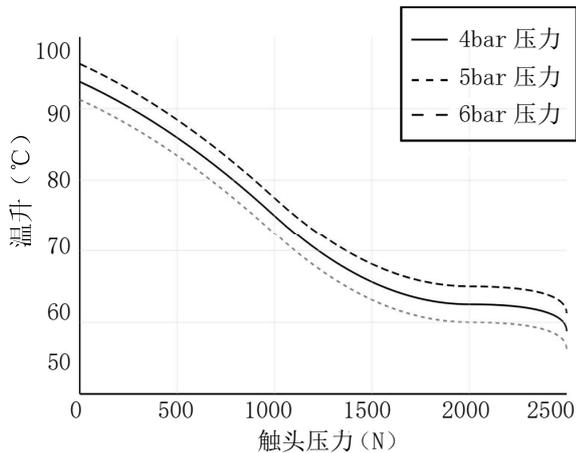


图1 触头压力与温升关系曲线

材料的导热性能和表面特性也是影响温升的重要因素^[3]。采用导热系数为 $380 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 的铜基复合材料可使温升降低20%。触头表面镀层材料的选择对温升有显著影响,银镀层能有效降低接触电阻,但易发生氧化;镍镀层耐氧化性好但导电性较差。因此,需要在导电性和耐氧化性之间寻找平衡点。

2.3 控制技术体系构建

大电流环保气体开关的温升控制技术体系采用分层架构设计。底层实现温度实时监测,采用光纤测温 and 红外成像相结合的方式,实现 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 的测量精度。中层执行控制策略,基于模糊PID算法建立触头压力与温升的映射关系,实现闭环控制。上层完成智能决策,通过深度学习算法预测温升趋势,优化控制参数。控制系统的核心是基于多物理场耦合的温升模型。该模型考虑了焦耳热产生、热传导、对流换热等多个物理过程,能准确描述设备的温升特性^[4]。控制算法采用模型预测控制(MPC)方法,根据温升模型预测未来温度变化,提前调整控制参数。系统响应时间小于 100 ms ,控制精度达到 $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。实验验证表明,该控制体系能有效应对负载波动、环境温度变化等外部干扰。通过优化气体流场分布,调节触头压力,改善散热条件,可使开关设备在额定电流条件下的温升始终控制在标准限值以内。系统具有自适应能力,能根据运行工况自动调整控制策略,保持温升的稳定性。

3 温升控制措施

3.1 环保气体流场优化

环保气体流场优化是提升开关设备散热效果的关键途径。通过改进气体流道结构,提高气体流速和湍流强度,增强对流换热效果。风道结构优化采用CFD

数值模拟方法,建立了包含触头系统、灭弧室和绝缘外壳的三维模型^[5]。计算结果表明,在 4 bar 压力下,采用螺旋型气体导流结构可使触头区域气体流速提高25%,温升降低 $13.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。气流组织优化从气体入口布置、导流板设计和出口结构三个方面展开。入口采用切向进气方式,形成旋转气流场,增强扰动效果。经过多次迭代优化,确定最佳导流角度为 35° ,翼型曲率半径为 80 mm 。出口采用变截面设计,气流截面积比为1.5,避免气体滞留。优化后的流场结构使气体在触头区域形成强迫对流,换热系数提高了42%。热成像测试结果显示,改进后触头最高温升从 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $71.5 \text{ }^\circ\text{C}$,温度分布更加均匀,局部热点温差减小58%。气体流场优化方案的有效性通过长期运行试验得到验证,设备在额定电流条件下温升始终满足标准要求。

3.2 触头系统改进

触头系统改进围绕结构设计、压力控制和表面处理三个方面开展。触头结构采用“工”字型设计,增大接触面积,降低接触电阻。触头重叠长度由原来的 40 mm 增加到 65 mm ,接触压力提高到 2.8 kN 。触头系统主要参数见表1。压力弹簧采用双弹簧结构,内弹簧刚度为 35 N/mm ,外弹簧刚度为 50 N/mm ,确保长期运行中保持稳定的接触压力。表面处理采用复合镀层工艺,底层为 $3 \text{ }\mu\text{m}$ 镍,中间为 $15 \text{ }\mu\text{m}$ 银,表面为 $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ 金。该结构既能保证良好的导电性,又具有优异的耐氧化性能。经过 5000 次机械操作试验,触头表面未出现明显氧化现象,接触电阻增加不超过5%。温升测试结果表明,改进后的触头系统在额定电流 4000 A 条件下,最高温升为 $69.8 \text{ }^\circ\text{C}$,比原结构降低 $15.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表1 触头系统主要参数

参数项目	改进前	改进后	单位
重叠长度	40	65	mm
接触压力	2.2	2.8	kN
接触面积	480	750	mm^2
触头厚度	12	15	mm
镀层总厚度	12	18.5	μm

3.3 新型材料应用

新型材料的应用主要包括触头材料和散热复合材料。触头基体采用铜铬合金材料,铬含量为0.8%,导

电率达到 80% IACS，抗电蚀性提高 45%。触头表面采用纳米复合镀层，在传统银镀层中添加 0.5% 的氧化石墨烯，显著提升导电性和散热性。材料性能参数见表 2。散热系统采用高导热铝基复合材料，导热系数达到 205 W/m·K。通过粉末冶金工艺在铝基体中添加 20% 的碳纳米管和 5% 的氮化铝，形成三维导热网络。散热鳍片采用压铸成型工艺，表面处理采用阳极氧化技术，提高辐射散热效果。综合测试结果显示，新材料的应用使开关设备的温升降低了 22.3%，热稳定性显著提升。

表 2 材料性能参数对比

材料类型	导电率 (%IACS)	导热系数 (W/m·K)	硬度 (HV)
传统铜触头	75	380	85
铜铬合金	80	355	125
传统散热器	-	180	-
新型复合材料	-	205	-

4 实验验证与效果评估

4.1 试验系统设计

试验系统采用闭环温升测试平台，包含大电流发生装置、环保气体充气系统、温度测量系统和数据采集系统。大电流发生装置采用三相变压器方案，输出电流可调范围 2 000 ~ 5 000 A，稳定度 ±1%。环保气体充气系统配备气体混合装置，可实现不同比例气体混合，压力控制精度达 0.05 MPa。温度测量采用光纤测温与红外热像相结合的方式，在触头系统关键位置布置 8 个光纤温度传感器，测温精度 ±0.5 °C。红外热像仪分辨率为 640×480 像素，测温范围 -20 ~ 150 °C，热灵敏度 0.03 °C。数据采集系统采用 32 位高速采集卡，采样频率 10 kHz，实现温度、电流、压力等参数同步采集。测试方案按照 IEC 62271-1 标准设计，包括温升试验、热稳定性试验和长期运行试验。温升试验在额定电流条件下进行，每间隔 30 分钟记录一次温度数据，直至温升变化率小于 1 °C/h。热稳定性试验模拟负载波动工况，电流在 2 000 ~ 4 000 A 范围内随机变化，考察温升控制效果。

4.2 控制效果对比

通过对比试验评估温升控制效果，试验在相同工况下进行，包括额定电流 4 000 A、环保气体压力 4 bar、环境温度 25 °C 等条件。试验对象包括原型样机和改进

后样机，每组试验重复 3 次，取平均值。测试结果显示，改进后样机的温升控制效果显著优于原型样机，关键部位温升数据见表 3。触头系统最高温升由 85.2 °C 降至 69.8 °C，降幅达 18.1%。温度分布更加均匀，触头系统内部最大温差由 15.3 °C 降至 6.8 °C。在负载波动工况下，改进后样机表现出更好的温升稳定性，温升波动幅度不超过 5 °C。长期运行试验结果表明，经过 5 000 次操作后，改进样机的温升变化不超过 3%，触头系统性能保持稳定。经济性分析表明，采用新型温升控制方案，开关设备的制造成本增加约 8%，但通过降低运行损耗，可在 3 年内收回投资。改进后的开关设备在可靠性、稳定性和经济性方面均达到预期目标。

表 3 温升控制效果对比

测试部位	原型样机(°C)	改进样机(°C)	降幅(%)
触头最高点	85.2	69.8	18.1
母线连接处	72.5	61.3	15.4
灭弧室壁面	58.4	48.7	16.6
外壳表面	42.3	35.6	15.8
触头温差	15.3	6.8	55.6

5 结束语

通过系统研究大电流环保气体开关的温升机理，建立了基于多物理场耦合的温升分析模型。针对环保气体导热性能差、大电流发热量大的特点，从气体流场优化、触头系统改进和新型材料应用三个方面提出了温升控制方案。实验验证表明，采用该方案后开关设备在额定电流下温升满足标准要求，且具有良好的工程实用性，为环保气体开关的推广应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 赵莉华, 郭志云, 闫志强, 等. 基于新型环保气体的断路器温升特性 [J]. 工程科学与技术, 2024, 56(05): 86-97.
- [2] 王双成, 郭宏, 王晓智, 等. 大容量环保气体开关设备温升问题分析 [J]. 电器工业, 2023(05): 61-65.
- [3] 陆彪, 汤凯, 陈德敏, 等. 基于响应曲面法的大电流开关柜结构优化 [J]. 南方电网技术, 2021, 15(08): 112-119.
- [4] 朱佩龙, 欧张力, 林复明. 大电流气体绝缘金属封闭开关设备的三工位隔离开关设计 [J]. 高压电器, 2020, 56(12): 297-301.
- [5] 徐慧强, 李猛, 杨镇宁. 环保气体绝缘开关设备温升控制方法研究 [J]. 机电工程技术, 2020, 49(08): 66-69.