

252 kV 环保型 GIS 开关在干燥空气介质下的热特性分析

曹蓉¹, 纽春萍¹, 何海龙¹, 吴翊¹, 彭哲², 荣命哲¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 广东明阳电气股份有限公司, 528400, 广东中山)

摘要: 针对传统 GIS 开关普遍采用 SF₆ 气体作为绝缘介质不仅存在极高的全球变暖潜能值, 同时由于其结构紧凑、散热面积小易引发过热影响其热稳定性的问题, 提出以干燥空气替代 SF₆ 气体作为绝缘介质, 以 252kV GIS 三工位开关为研究对象开展热特性研究。通过电-热-流体多物理场耦合实现 GIS 三工位开关的稳态热分析, 获得三工位开关的温度场分布, 并通过仿真与温升测试结果的对比, 验证了仿真模型的准确性。基于建立的该模型, 进一步分析了充气压力和接触电阻对三工位开关温度场分布的影响规律, 其在气压提升至 0.7 MPa 时温升降低得最为明显。并通过分析不同气压下干燥空气和 SF₆ 介质中 GIS 三工位开关温升的对比得到: 当干燥空气的压力约为 SF₆ 气体压力的 3 倍时, 开关的温升基本相同。该研究可为环保型 GIS 三工位开关的分析和设计提供参考。

关键词: GIS 开关; SF₆ 气体; 三工位开关; 稳态热分析; 多物理场耦合

中图分类号: TM564 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2026)02-0000-00

Thermal Characteristic Analysis of 252 kV Eco-Friendly GIS Switch in Dry Air Medium

CAO Rong¹, NIU Chunping¹, HE Hailong¹, WU Yi¹, PENG Zhe², RONG Mingzhe¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Guangdong Mingyang Electric Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong 528400, China)

Abstract: To address the issues of high global warming potential associated with the prevalent use of SF₆ gas as the insulating medium in conventional gas-insulated switchgear (GIS), as well as the overheating problems and thermal stability concerns caused by compact structure and limited heat dissipation area, dry air is proposed as an alternative insulating medium to replace SF₆. A thermal characteristic study was conducted on a 252 kV three-position GIS switch. Steady-state thermal analysis of the three-position switch was achieved through electro-thermal-fluid multiphysics coupling, and the temperature field distribution of the switch was obtained. The accuracy of the simulation model was verified by comparing the simulation results with temperature rise test data. Based on the established model, the influence of gas pressure and contact resistance on the temperature field distribution of the three-position switch was further analyzed. The temperature rise decreases most significantly when the gas pressure is increased to 0.7 MPa. By comparing the temperature rise of the GIS three-position switch in dry air and SF₆ under different gas pressures, it was found that when the dry air pressure is about three times that of SF₆, the temperature rise of the switch is essentially the same. This study provides a reference for the analysis and design of eco-friendly three-position GIS switches

Keywords: GIS switch; SF₆ gas; three-position switch; steady state thermal analysis; multi-physical field coupling

气体绝缘金属封闭开关 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 三工位开关因其结构紧凑、安全可靠而备受关注。该开关通过两个静触头和一个动触头的协同作用, 完成分闸、合闸及接地操作, 实现了隔离开关与接地开关功能的有机整合, 该装置所在的功能性气室是 GIS 中至关重要的组成部分^[1-5]。它

的提出有效避免了传统 GIS 中使用电气联锁的隔离开关和接地开关误操作的可能性。由于 GIS 三工位开关在通流工作时会产生温升, 如果温度过高可能导致绝缘材料老化、设备故障, 降低其工作可靠性和安全性^[6]。与传统 GIS 采用 SF₆ 气体作为绝缘介质不同, 环保型 GIS 以干燥空气替代 SF₆ 气体, 有助于缓

解温室效应。然而，干燥空气在相同压强下的绝缘性能和散热性能相对较低^[7]。因此，为确保电力设备的载流能力和散热效果，研究以干燥空气为绝缘介质的环保型 GIS 三工位开关的热特性具有重要意义。

电力设备的热特性分析涉及电流场、气流场和温度场的耦合效应，学者对此领域展开了广泛研究。武奇等人针对 252 kV SF₆/N₂ 混合气体 GIS 的三工位隔离开关，构建了三维有限元模型，并对电场强度和应力强度进行了分析，旨在通过仿真优化设计流程^[8]。常治国等研究了以 SF₆/N₂ 混合气体替代纯 SF₆ 气体的 145kV 三工位隔离接地开关，提出混合气体下导体的温升值与绝缘气体的综合传热系数成反比的计算方法^[9]。郭宇轩等人提出一种结构化网格优化划分方法对各分区方式的综合质量进行优化进而对交流牵引电机进行热分析^[10]。为了快速获得各种工况下油浸式电力变压器绕组的温度分布与热点，张志宇等人提出了一种基于本征正交分解（POD）与克里金代理模型（KSM）相结合的方法对油浸式变压器绕组温度场进行快速计算^[11]。气体的密度、热导率、比热容及黏度等物理特性直接决定了 GIS 设备内部热量的传递和分布，因此，气体成分的变化对 GIS 三工位开关的温升特性产生显著影响，进而影响设备的热稳定性和长期运行可靠性。气体性质的变化，尤其是在环保型 GIS 中使用干燥空气替代传统 SF₆ 气体作为绝缘介质，可能对热特性产生根本性影响，这也对其热特性的仿真分析提出了新的挑战。相比传统以 SF₆ 为绝缘介质的电力开关，采用干燥空气作为绝缘介质的环保型电力开关不仅具备更高的环境友好性，而且在温升特性和热稳定性方面可能存在不同的表现，亟待进行深入研究。目前，关于环保型 GIS 三工位开关热特性的研究相对薄弱，研究深度和系统性不足，限制了其优化设计与实际工程推广的进一步深入。因此，针对环保型 GIS 三工位开关的热分析问题开展研究，具有重要的理论意义和实际应用价值。

本文以某 252kV 环保型 GIS 三工位开关作为研究对象，通过分析其发热与散热过程，结合电-热-流体多物理场的耦合作用，构建了数值热分析模型，对 GIS 三工位开关在额定通流条件下的温度场分布进行仿真研究，并进一步探究了充气压力和接触电阻等参数变化对温度场分布的影响规律。本文的工作可为环保型 GIS 三工位开关的分析设计提供参考。

1 GIS 三工位开关热计算模型

1.1 几何模型

本文的研究对象为 252kV 环保型 GIS 三工位开关，绝缘介质为干燥空气，其相关参数如表 1 所示。三工位开关所谓三位是指 3 个工作位置，①隔离开关主断口接通的合闸位置；②主断口分开的隔离位置；③接地侧的接地位置。其通过 2 个静触头和 1 个

动触头完成分闸、合闸和接地操作，整合了隔离开关和接地开关两者的功能，从而提升了系统的可靠性和安全性。GIS 三工位开关结构复杂，在建模分析之前，对复杂的部件在不影响发热和散热过程的基础上进行简化^[12]。图 1 为简化模型的整体图。模型中外壳与法兰部分选用镁铝合金 5052-H112，中间导体与静触头采用铝合金 6101-T6，动触头则使用 T2 紫铜，相关材料的电导率与热导率参考国家标准。同时设定环境温度为 26.8℃，假设环境为无强气流、无阳光直射的室内环境。

表 1 252kV 环保型 GIS 三工位开关参数表
Table 1 252kV environment-friendly GIS three-station switch parameter table

参数	数值及介质表
额定电压/kV	252
额定电流/A	4000
额定频率/Hz	50/60
额定工频耐受电压(对地)/kV	460
额定雷电冲击耐受电压(对地)/kV	1050
额定短时耐受电流/kA	50
额定短时耐受电流的时间/s	4
额定峰值耐受电流/kA	125
绝缘介质	干燥空气
额定气压 MPa	0.6~0.9

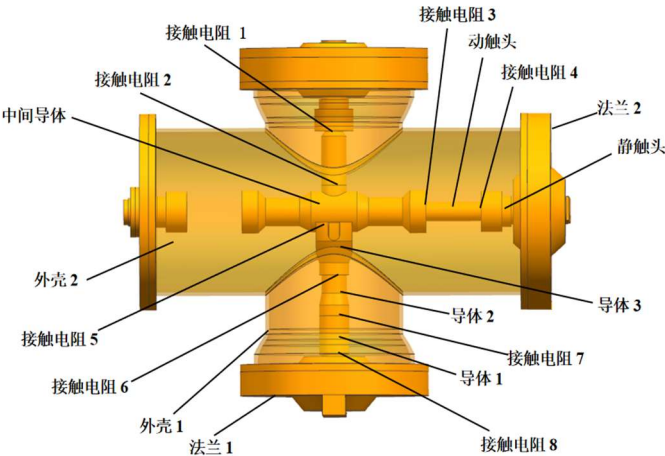


图 1 简化模型整体图
Fig. 1 Simplified model overall diagram

1.2 发热与散热分析

在额定电流条件下，GIS 三工位开关将会达到稳态温升，这一过程反映了设备内部产生的热量与其散发的热量之间的平衡状态。为准确预测稳态温升，深入分析 GIS 三工位开关的发热和散热机制至关重要。

1.2.1 发热

在 GIS 三工位开关中，电流流经导体产生的热量是导致导电回路温度升高的主要原因，此外接触电阻对导电回路温升的影响也不容忽视^[13]，同时导

体通流时由于电磁感应作用, 外壳中会感应出电流, 进而在外壳上产生热损耗^[14]。导体中的电流和外壳感应电流主要是由于电磁作用产生^[15], 因此必须通过求解电磁场方程获得感应电流分布, 进而求解出功率损耗作为热分析的热源^[16]。在交流电流情况下, 电阻损耗因为趋肤效应的存在将比直流情况下发热损耗大。本文在求解时采用 Ansys Maxwell, 根据 GIS 三工位开关材料参数和环境参数, 计算导体回路及外壳表面的电流密度分布, 最终求得功率损耗。

1.2.2 散热

GIS 三工位开关的发热一部分传递给其他部件, 导致温度升高, 另一部分经由外表面散失到周围环境中。其散热过程主要包括 3 种方式: 热传导、热对流和热辐射^[17]。其中, 热传导通过固体间的热量传递实现, 内部热传导发生在部件内部和接触面上, 而外部热传导主要体现在外壳以及通过动静触头向外接线传热的主回路中^[18]。GIS 三工位开关内外发生的热对流均属于自然对流。内部自然对流发生于气体介质与相邻部件的流固耦合面上, 外部则发生在大气环境与 GIS 三工位开关表面之间^[19]。GIS 三工位开关的热辐射效率与表面发射率密切相关。由于该开关表面发射率相对较低, 因此其辐射散热在总热量传递中占比较小, 通常在散热计算中忽略热辐射的影响^[20]。

对于对流散热, 通常基于相似理论, 采用合适的实验关联式计算表面散热系数, 进而获得传热量和温度。然而, 对于 GIS 三工位开关的内部, 干燥空气的自然对流发生在封闭空间中, 内部结构既不是典型的大空间自然对流情况, 也不属于夹层缝隙较小的有限空间自然对流情况, 缺乏合适的实验关联式与之匹配, 导致表面散热系数难以直接求解。因此, 本文利用 Ansys Fluent 对气流场进行数值模拟, 对罐体内部干燥空气的自然对流问题展开分析。

1.3 热分析的计算

为获得 GIS 三工位开关的温度场的分布, 首先建立温度场仿真的几何模型, 然后利用 Maxwell 模块计算导体中的电流密度分布和热源功率, 最后, 将热源导入 Fluent 模块, 计算考虑气流场作用下 GIS 三工位开关温度场分布。计算流程如图 2 所示。

在电磁场建模中, 用基于磁矢势 A 形式的频域麦克斯韦方程组进行电流密度计算, 控制方程为

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times A) + j\omega \sigma A = J_s \quad (1)$$

式中: μ 为材料磁导率; σ 为电导率; ω 为工频角频率; J_s 为外加激励电流密度。由仿真得到的电流密度可进一步用于计算单位体积热源项 (焦耳热)

$$Q = \frac{|J|^2}{\sigma} \quad (2)$$

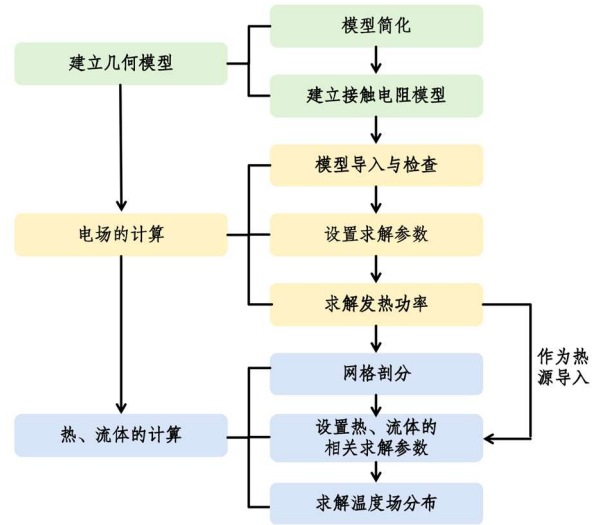


图2 GIS 三工位开关热分析仿真计算流程图

Fig. 2 GIS three-position switch temperature field simulation calculation flow chart

热场分析中采用稳态热传导控制方程:

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) + Q = 0 \quad (3)$$

式中, k 为材料热导率; T 为温度分布; Q 为内部热源功率密度。由电磁场计算得到并通过耦合导入, 气流场方面, 为模拟干燥空气自然对流行为, 在 Fluent 中引入不可压缩 Navier-Stokes 方程和连续性方程

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \\ \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ρ 为流体密度; μ 为动力黏度; $\mathbf{v}$ 为速度; p 为压力; $\mathbf{g}$ 为重力加速度。

在边界条件设置方面, 模型外壳表面采用自然对流边界条件; 内部空气物性参数随气压变化取值, 环境温度设为 26.8℃, 仿真过程中忽略辐射传热。

2 GIS 三工位开关温度场的计算与分析

2.1 GIS 三工位开关接触电阻的计算

接触电阻是指两个接触体之间由于接触面积小而造成的电流通过的电阻。接触电阻的增大会导致导体的温升增高^[21], 接触电阻由接触表面的收缩电阻及接触面的膜电阻两部分组成。常见的接触电阻的仿真方法有导电桥法、耦合面积法、接触薄层法和定义电阻率法等^[22], 本文使用方便简化的接触薄层法^[23]对接触电阻进行仿真, 仿真中接触电阻的电阻率的计算公式如下所示:

$$R = \rho' \frac{l}{s} \quad (5)$$

$$\rho'=R\frac{s}{l}\tag{6}$$

式中： ρ' 为接触薄层的电阻率 $\Omega\cdot\text{m}$ ； l 为接触薄层的长度 m ； s 为接触薄层的截面积 m^2 。在接触薄层法中，薄层的横截面积需与接触面的尺寸一致，同时在设置薄层厚度时，应避免对原有模型的整体结构产生较大影响。根据式(5)(6)计算接触电阻的电阻率。增加接触薄层后，在不影响发热和散热情况下简化模型。简化后的接触电阻模型如图 1 所示，依次命名为接触电阻 1~8，GIS 三工位开关中的接触电阻分别位于导体与导体之间、导体和动触头之间和动静触头之间。

接触电阻的值采用回路电阻测试仪进行测量，回路电阻测试仪是一种专门用于测量开关控制设备的接触电阻和回路电阻的仪器。其工作原理主要基于欧姆定律，通过施加一定的电流于被测电阻的两个端钮之间，采集电流流过被测电阻所产生的压降模拟信号，然后经过一系列处理，最终将电阻值以数字形式显示出来。其中，通过威德曼-弗朗兹定律即可得到热导率的值，计算公式如下

$$\frac{\lambda}{\sigma}=LT\tag{7}$$

式中：常数 L 即洛伦兹数，值为 $2.44\times10^{-8}\text{W}\cdot\Omega\cdot\text{K}$ ； λ 为热导率； σ 为电导率； T 为温度。通过电导率的值即可计算出热导率的值。

2.2 GIS 三工位开关发热功率的计算

GIS 三工位开关发热仿真的主要目的是研究包括接触电阻在内的各导电部件的发热情况，从而为传热仿真分析提供基础。在建立几何模型时，首先需要对整个结构进行分析，并在模型中考虑接触电阻的影响。接触电阻通常存在于导电部件的接触面上，它会导致局部电流密度增大，从而在接触部位产生额外的热量。因此，建立含接触电阻的导电回路发热模型至关重要。该模型的建立考虑了电流通过接触电阻时产生的功率损耗，通过仿真计算，可以得到各个导电部件在工作状态下的发热功率，从而进一步推导出整体设备的温升特性。

在 GIS 三工位开关几何模型的基础上，还需在外部建立空气区域，为磁场求解提供空间。通常取空气区域尺寸为内部通流导体尺寸的 3-5 倍即可。GIS 三工位开关除了导电回路结构之外还存在许多其他的绝缘或支撑部件，它们的相对磁导率近似为 1，因此对模型中的相关结构进行了简化。

对 252kV 环保型 GIS 三工位开关通额定电流的 1.1 倍 4400A 的交流电，图 3 为导体连接处的功率密度图，通过 Maxwell 中的 Calculator 计算器可直接计算得到各关键部件的欧姆损耗如表 2 所示。其中单位体积损耗通过电磁场仿真计算得到，而整体损耗值则是对多个部件进行积分后的结果。GIS 三工位开

关总损耗为 1080.08W，通过计算得到 GIS 三工位开关各个部件的发热功率，其中接触处的功率密度要大于其他处的发热功率密度，为避免 GIS 局部温度过高，应从减小 GIS 连接处接触电阻着手。

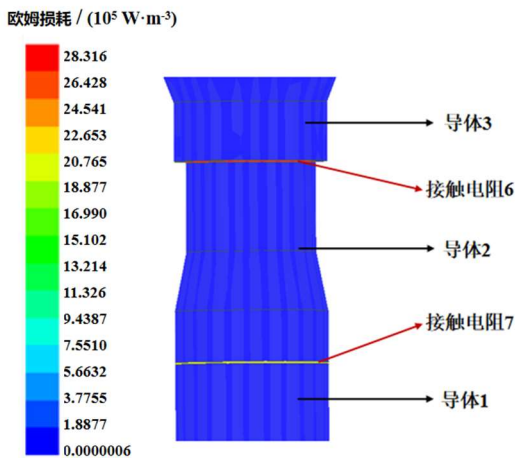


图 3 导体连接处的功率密度
Fig. 3 Power density at the conductor joint

表 2 部分关键部件的欧姆损耗值

位置	欧姆损耗 /W	位置	欧姆损耗/W
导体 1	7.37	外壳 1	18.07
导体 2	9.33	外壳 2	35.70
导体 3	15.35	接触电阻 3	38.32
中间导体	30.93	接触电阻 4	25.87
动触头	30.91	接触电阻 5	68.17
静触头	10.03	接触电阻 6	39.18
法兰 1	10.76	接触电阻 7	39.17
法兰 2	18.69	接触电阻 8	39.18

在实际电流流通路径中，接触电阻 1 和接触电阻 2 所在位置几乎没有电流通过，其欧姆损耗值分别为 $2.03\times10^{-18}\text{W}$ 和 $1.5\times10^{-4}\text{W}$ ，基本可以忽略不计。由表 2 可知，其中在接触电阻中，接触电阻 5 处的欧姆损耗最大，因为接触电阻 5 处为四部分接触，相比于其他部分接触状况更差一些。

2.3 GIS 三工位开关的温度场仿真

在进行温度场分析前，先进行网格划分，因为在 Fluent 中对网格划分的要求比较高，所以尽可能在计算允许范围内细化网格，以便得到更准确的结果。采用非结构化四面体单元进行整体网格划分，并对关键热梯度变化剧烈的区域进行了局部加密处理。最终模型共生成 12794757 个单元,用 ANSYS Meshing 自带的质量评估工具对网格进行质量分析，结果显示：所有网格单元的网格偏斜度均小于 0.35，其中 90%以上低于 0.25，正交质量大多在 0.78 以上，长宽比平均小于 3，满足仿真对网格质量的要求。网格剖分结果如图 4 所示。

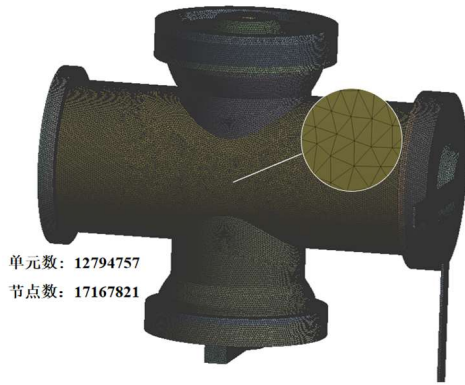


图 4 模型的网格剖分
Fig. 4 Model meshing map

将剖分后的模型导入 ANSYS Fluent 中, 设置求解参数进行计算, 将 Maxwell 模块中计算导体的热源功率导入 Fluent 模块计算热源作用下 GIS 三工位开关的温度场分布, 最终得到温度仿真结果如下图 5 所示。

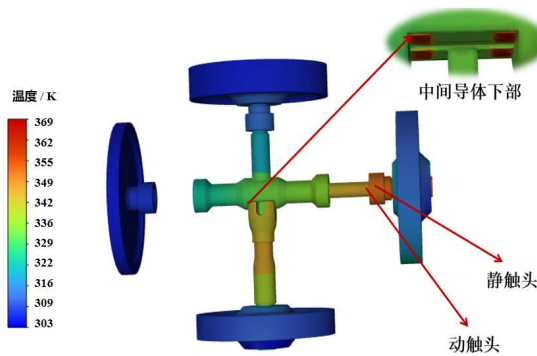


图 5 GIS 三工位温度仿真结果图
Fig. 5 GIS three-position temperature simulation results

由计算可知, 最高温升出现在中间导体下部, 为 55.72K, 中间导体和导体 3 是通过四个接触电阻模拟中间导体与下侧导体之间的螺栓连接, 静触头和动触头的温升次之, 分别为 51.68K 和 48.14K。导体与导体连接处附近的温度比导体其他部位温度高, 符合 GIS 三工位开关实际的发热情况。

2.4 GIS 三工位开关的温升测试与仿真结果对比

为验证仿真结果的准确性, 针对 GIS 三工位开关进行了温升测试, 温升测试装置如图 6 所示。通额定电流的 1.1 倍 4400A 电流, 环境温度设为 26.8℃, 在无强气流、无阳光直射的室内环境中进行, 使用 5000A 温升测试系统测温仪通过热电偶测量关键部位的温度, 选取 6 个温度测点如下图 7 所示进行温升测试与仿真结果的对比。所选测温点分别为中间导体上部、动触头、中间导体下部、中间壳体、外侧壳体 and 静触头部分。



图 6 GIS 三工位开关温升测试装置
Fig. 6 GIS three-position switch temperature rise test device

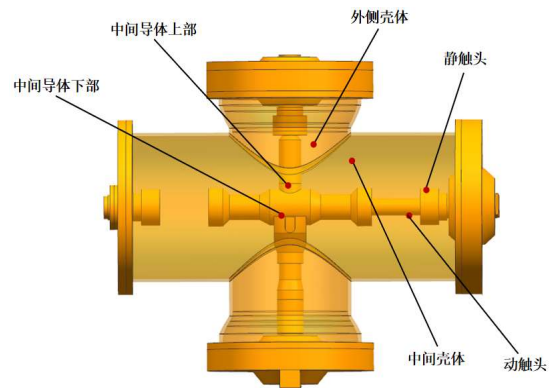


图 7 GIS 三工位开关温升实验测温点
Fig. 7 Temperature rise test measurement points for GIS three-position switch

图 8 为温升测试与仿真结果的 6 个测温点的对比图。由图 8 可知, 6 个温度测点温升测试和仿真结果的绝对误差均在 4K 以内, 进一步验证了仿真模型的准确性。

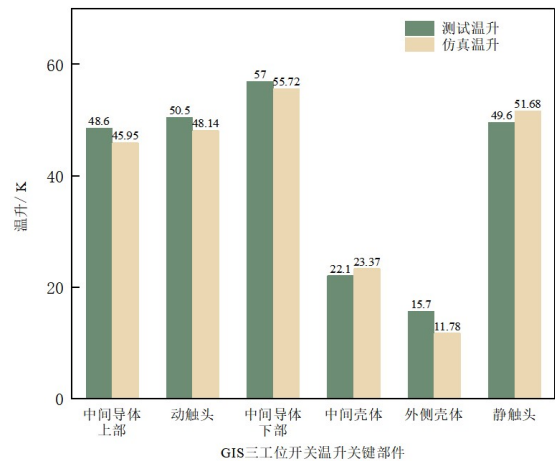


图 8 温升测试和仿真结果对比图
Fig. 8 CoMParison of temperature rise test and simulation results

3 GIS 三工位开关热特性影响因素分析

3.1 充气压对热特性的影响

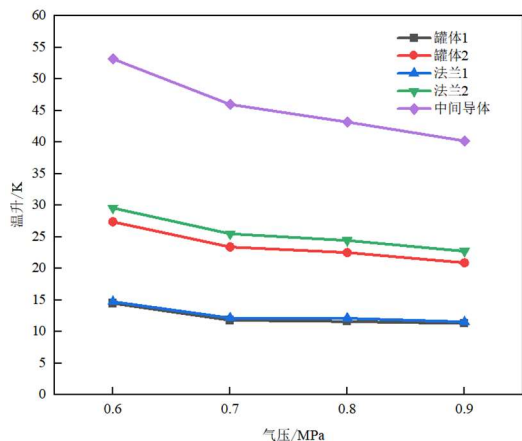
为了分析 252kV 环保型 GIS 三工位开关中干燥空气的充气压力对热特性的影响, 利用建立的热分析模型, 计算气压在 0.6~0.9 MPa 条件下, 三工位开关的温度场分布。随着气压的变化, 干燥空气的物性参数也随之变化, 如表 3 所示。物性参数包括热力学参数(密度、比热容)、输运系数(黏度和热导率)等。热力学参数可通过标准热力学函数的定义并结合理想气体状态方程得到^[24]; 输运系数则基于 Chapman-Enskog 碰撞理论并通过气体分子两两之间的碰撞积分计算得到^[25]。其中, 密度随压力变化逐渐增大, 比热主要随温度变化而变化, 而与压力变化关系不大, 热导率和黏度变化也不大。

表 3 0.6~0.9 MPa 时干燥空气的物性参数

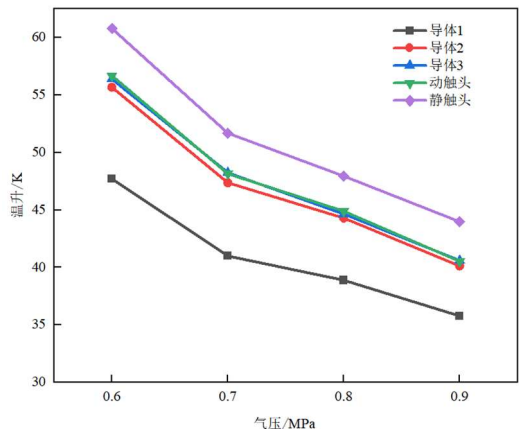
气压/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	比热/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	黏度/ (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
0.6	6.97	1005	0.0257	1.85×10 ⁻⁵
0.7	8.13	1005	0.0262	1.88×10 ⁻⁵
0.8	9.29	1005	0.0268	1.91×10 ⁻⁵
0.9	10.45	1005	0.0274	1.94×10 ⁻⁵

不同气压下 252kV 环保型 GIS 三工位开关各部分的温升仿真结果如图 9 所示。其中, 图 9(a)为 0.6~0.9 MPa 下罐体、法兰和中间导体随气压增大的温升情况, 图 9(b)为 0.6~0.9 MPa 下导体和动静触头随气压增大的温升情况。

从图 9 可以看出随着气压的增大, GIS 三工位开关罐体内部干燥空气的密度逐渐增大, GIS 三工位开关各部件的最高温升均减小。其中从 0.6 MPa 增加到 0.7 MPa 时, 温升降低得最明显, 当气压继续增大时, 温升降低变缓。因此本文所研究的 252kV 环保型 GIS 三工位开关的额定气压应该充 0.7 MPa 较为合适。



(a) 0.6~0.9MPa 下罐体、法兰和中间导体随气压增大的温升情况



(b) 0.6~0.9 MPa 下导体和动静触头随气压增大的温升情况

图 9 0.6~0.9 MPa 下各部件温升仿真结果
Fig. 9 Simulation results of temperature rise of each component under 0.6~0.9 MPa

3.2 接触电阻对热特性的影响

本文所研究 252kV 环保型 GIS 三工位开关中的接触电阻通过回路电阻测试仪进行测量, 接触电阻是影响温升的重要因素, 接触电阻主要受材料、压力、表面状态、使用电压电流等因素影响。根据接触状态的不同, 接触电阻的值可能发生改变。环保型 GIS 三工位开关中最高温升出现在中间导体下部。在干燥空气的气压为 0.7 MPa、通流大小为 4400A 时, 改变接触电阻 5 的值, 其余接触电阻保持实测值不变模拟接触电阻改变时温升变化的情况。图 10 为中间导体上下部分随着接触电阻 5 的值不断增大的温升变化情况。

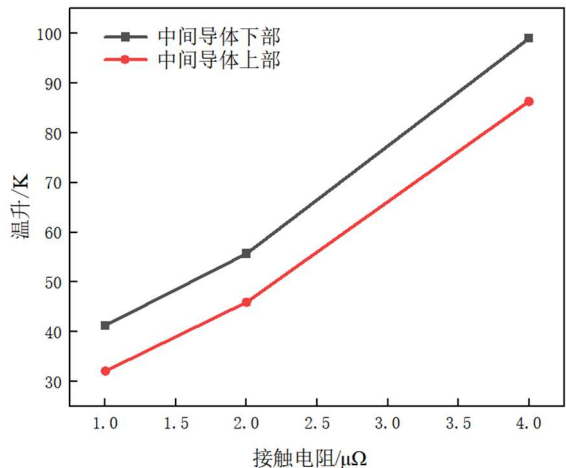


图 10 中间导体上下部分随接触电阻 5 的温升变化情况
Fig. 10 Temperature rise of the upper and lower part of the intermediate conductor with contact resistance 5

由图 10 可知, 接触电阻 5 的值从 1μΩ 增加到 2μΩ 再到 4μΩ 时, 靠近接触电阻处的中间导体下部和中间导体上部的温升迅速增大, 特别是从 2μΩ 到 4μΩ 时, 中间导体下部与中间导体上部温升分别增

加 43.3K 与 40.43K。且由于中间导体下部的接触为四部分接触, 接触点更聚集, 更易造成聚集处温升过高。因此在 GIS 的设计中尽量减少此种情况以降低温升。

3.3 气体介质对热特性的影响

传统 GIS 三工位开关通常使用 SF_6 气体作为绝缘介质。 SF_6 气体具有分子结构稳定、难以分解、高温下保持稳定等特点, 从而提供优异的热稳定性和绝缘效果^[26]。然而, SF_6 气体不仅成本高昂, 而且其全球变暖潜能值约为空气的 22,800 倍, 给环境带来显著的温室效应。因此, 寻找替代介质成为当前研究的重点。

干燥空气作为一种环保型气体, 具有无温室效应、来源广泛、成本低廉、系统设计简洁、易于维护等多重优势。尽管干燥空气在高压电力设备中的应用仍处于研究起步阶段, 但其潜在的工程应用前景和理论研究价值不容忽视。与 SF_6 相比, 干燥空气的热特性表现存在显著差异, 这为其在 GIS 中的应用提供了新的研究方向。通过优化设计和适当增加气压, 干燥空气在 GIS 设备中的应用可有效降低温升, 并达到与 SF_6 类似的效果。随着气压的提高, 干燥空气的密度增加, 进而提升其绝缘能力, 从而在相同的工作条件下实现类似 SF_6 气体的温升控制。图 11 为不同气压气体介质下关键部件的最高温升。

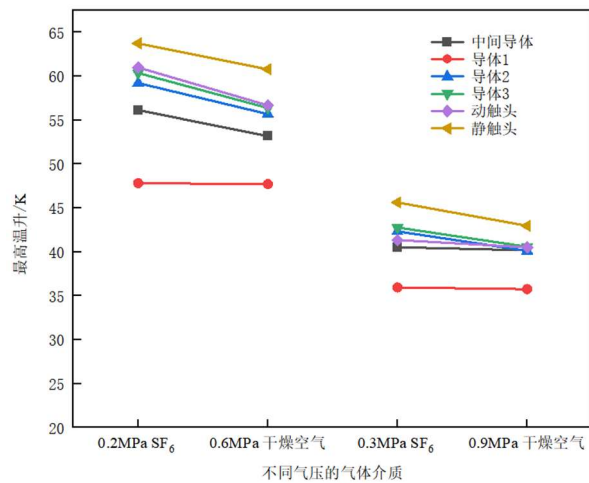


图 11 不同气压的气体介质下关键部件的最高温升(K)

Fig. 11 The highest temperature rise of key components of different insulating media under different air pressure(K)

通过图 11 可以看出: 气体介质为 0.2 MPa 的 SF_6 气体的关键部件的最高温升和气体介质为 0.6 MPa 的干燥空气的关键部件的最高温升基本一致, 气体介质为 0.3 MPa 的 SF_6 气体的关键部件的最高温升和气体介质为 0.9 MPa 的干燥空气的关键部件的最高温升基本一致。因此, 当干燥空气的压力为 SF_6 气体压力的 3 倍时, 开关的温升基本相同。

4 结论

本文建立了 252 kV 环保型 GIS 三工位开关的电-热-流体多物理场耦合模型, 针对其热特性进行了仿真与试验分析, 主要结论如下:

(1) 仿真结果与温升测试数据对比显示, 6 个温度测点的仿真值与实测值之间的绝对误差均小于 4 K, 验证了所构建电-热-流体多物理场耦合模型的准确性与可靠性。

(2) 随着气压的升高, 开关内部最高温升显著降低, 尤其在气压提升至 0.7 MPa 时降温效果最为明显, 继续升压对温升改善作用有限。此外, 当干燥空气压力达到 SF_6 气体压力的 3 倍时, 可实现相近的温升水平, 表明干燥空气在热性能方面具备良好的替代潜力, 具有重要的工程应用价值。

(3) 接触电阻的增大显著影响局部温升, 易导致温升集中和分布不均。在高温环境下, 接触电阻可能呈现非线性变化趋势, 在后续研究中将进一步考虑其随温度动态变化的特性, 以提高热仿真的精度并优化产品热设计。

参考文献:

- [1] [1] 孙龙勇, 李付永, 姚灿江, 等. 复合式组合电器三工位组合开关的设计与开发[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 296-304.
SUN Longyong, LI Fuyong, YAO Canjiang, et al. Design and development of three-position combination switch of compound combined electrical apparatus[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 296-304.
- [2] 杨春月, 吕敏, 方启, 等. 基于电机驱动技术的三工位隔离/接地开关操作机构设计[J]. 电工电气, 2024(6): 59-64.
YANG Chunyue, LV Min, FANG Qi, et al. Design of the operating mechanism of the three-station disconnecting/earthing switch based on motor drive technology[J]. Electrotechnics Electric, 2024(6): 59-64.
- [3] FENG Zhengmao, PAN Hui, LI Peizhong, et al. Research and design of 40.5 kV intelligent and environment-friendly cubicle gas-insulated switchgears[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2025, 19(2): 763-772.
- [4] 吴小虎, 吕东明, 高美华, 等. 高压 GIS 用三工位隔离接地开关的结构类型[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 197-204.
WU Xiaohu, LV Dongming, GAO Meihua, et al. Structure types of three-position disconnector and earthing switches for high voltage GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 197-204.
- [5] 成俊奇, 李哲远, 周寅, 等. 环保气体环网柜中接地开关短路关合性能分析[J]. 电器与能效管理技术, 2023(12): 77-82.

- CHENG Junqi, LI Zheyuan, ZHOU Yin, et al. Analysis on Short-Circuit closing performance of grounding switch in environmental gas ring network cabinet[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2023(12): 77-82.
- [6] 郝建, 刘清松, 彭华东, 等. GIS 三工位开关典型机械缺陷的特征量差异分析及辨识方法[J]. *高电压技术*, 2024, 50(6): 2567-2579.
- HAO Jian, LIU Qingsong, PENG Huadong, et al. Characteristic difference analysis and identification method of typical mechanical defects for GIS three-position switches[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(6): 2567-2579.
- [7] ZHAO Lihua, WANG Zelong, ZHU Haiyi, et al. Study on temperature rise characteristics of GIS disconnecter under different operating conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(6): 3601-3610.
- [8] 武奇, 袁志兵. 252kV SF₆/N₂ 混合气体 GIS 用三位置隔离开关的设计研究[J]. *电工技术*, 2023(11): 131-134.
- WU Qi, YUAN Zhibing. Design and Research of three-position disconnecter in 252kV SF₆/N₂ gas mixture GIS[J]. *Electric Engineering*, 2023(11): 131-134.
- [9] 常治国, 郝学东, 弋江淼, 等. SF₆/N₂ 混合气体替代纯 SF₆ 气体的 145kV 三工位隔离接地开关研究[J]. *电气技术*, 2023, 24(8): 65-69.
- CHANG Zhiguo, HAO Xuedong, YI Jiangmiao, et al. Research on 145kV three-station isolation grounding switch with SF₆/N₂ mixture replacing pure SF₆ gas[J]. *Electrical Engineering*, 2023, 24(8): 65-69.
- [10] 郭宇轩, 张小平, 刘东浩, 等. 基于果蝇算法的多边形柱状热分析模型结构化网格优化划分方法[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(10): 2028-2038.
- GUO Yuxuan, ZHANG Xiaoping, LIU Donghao, et al. A structured mesh optimization method for polygonal columnar thermal analysis model based on Drosophila algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(10): 2028-2038.
- [11] 张志宇, 寇家俊, 张重远, 等. 基于本征正交分解和克里金代理模型的油浸式变压器绕组温度场快速计算方法[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(7): 2215-2225.
- ZHANG Zhiyu, KOU Jiajun, ZHANG Zhongyuan, et al. A fast calculation method for temperature field of oil immersed transformer windings based on proper orthogonal decomposition and Kriging surrogate model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(7): 2215-2225.
- [12] 纽春萍, 矫璐璐, 王小华, 等. 基于多场耦合的环保型 GIS 热特性分析[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(17): 3765-3772.
- NIU Chunping, JIAO Lulu, WANG Xiaohua, et al. Thermal characteristics analysis of environmentally friendly GIS based on multi-field coupling[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(17): 3765-3772.
- [13] 谢汶含, 蒋永清, 孙大伟, 等. 基于数字孪生及 GA-BP 神经网络的开关柜温升风险预测[J]. *中国安全生产科学技术*, 2025, 21(2): 184-190.
- XIE Wenhan, JIANG Yongqing, SUN Dawei, et al. Risk prediction on temperature rise of switchgear based on digital twin and GA-BP neural network[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2025, 21(2): 184-190.
- [14] 李永建, 闫鑫笑, 张长庚, 等. 基于磁-热-流耦合模型的变压器损耗计算和热点预测[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(21): 4483-4491.
- LI Yongjian, YAN Xinxiao, ZHANG Changgeng, et al. Numerical prediction of losses and local overheating in transformer windings based on magnetic-thermal-fluid model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(21): 4483-4491.
- [15] 程志远, 宋晓逸, 吴晓婷, 等. 无线充电系统旋转式电磁耦合器损耗计算及热点温度研究[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(7): 1932-1942.
- CHENG Zhiyuan, SONG Xiaoyi, WU Xiaoting, et al. Loss calculation and Hot Spot Temperature Research of Rotary Electromagnetic Coupler in Wireless Charging System[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(7): 1932-1942.
- [16] 纽春萍, 崔艺龄, 李忠翔, 等. 航空接触器散热特性分析及耦合迭代热分析方法[J]. *高电压技术*, 2021, 47(2): 487-494.
- NIU Chunping, CUI Yiling, LI Zhongxiang, et al. Thermal dissipation characteristics analysis and coupling iterative thermal analysis method of aviation contactor[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(2): 487-494.
- [17] 李源. GIS 开关触头的接触电阻与温升特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [18] 王雪. GIS 温升特性多物理场耦合仿真与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- [19] 袁发庭, 施文苑, 王玥, 等. 基于多物理场仿真的油浸式变压器温度特性分析及散热器优化[J]. *高电压技术*, 2024, 50(1): 221-231.
- YUAN Fating, SHI Wenwan, WANG Yue, et al. Temperature

- characteristic analysis and radiator optimization of oil-immersed transformer based on multi-physical field simulation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 221-231.
- [20] 刘彦丰, 梁秀俊, 高正阳, 等. 传热学[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [21] 王增基, 陈立学, 尤彭昊, 等. 考虑速度趋肤效应与接触电阻影响的轨轨界面电流分布特性[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 5003-5010.
- WANG Zengji, CHEN Lixue, YOU Penghao, et al. Current distribution characteristics of armature-rail interface under velocity skin effect and contact resistance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 5003-5010.
- [22] 贾文卓. 基于 ANSYS 的开关柜电场与温度场仿真计算[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [23] 朱兆芳. GIS 设备稳态热分析及环保型气体热特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2017.
- [24] RONG Mingzhe, ZHONG Linlin, CRESSAULT Y, et al. Thermophysical properties of SF₆-Cu mixtures at temperatures of 300–30 000 K and pressures of 0.01–1.0 MPa: part 1. Equilibrium compositions and thermodynamic properties considering condensed phases[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(49): 495202.
- [25] WANG Xiaohua, ZHONG Linlin, CRESSAULT Y, et al. Thermophysical properties of SF₆-Cu mixtures at temperatures of 300–30,000 K and pressures of 0.01–1.0 MPa: part 2. Collision integrals and transport coefficients[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(49): 495201.
- [26] 何雨峰, 丁登伟, 卢贵有, 等. SF₆ 气体压力对 GIS 隔离开关操作时暂态电压过程的影响分析[J]. 高压电器, 2025, 61(3): 1-8.
- HE Yufeng, DING Dengwei, LU Guiyou, et al. Analysis on influence of SF₆ gas pressure on transient voltage process during operation of GIS disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(3): 1-8.
- (编辑 刘杨 陶晴)