

SF₆/N₂混合气体 GIS 三相共箱母线接头发热时 温度分布及诊断方法的仿真研究

张丕沛¹, 赵晓楠², 丛龙琦², 郭晨瑞¹

1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003;
2. 国网山东省电力公司威海供电公司, 山东 威海 264200)

摘要:以 SF₆/N₂ 混合气体作为绝缘介质的气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)可有效降低环境污染,目前已逐渐在 220 kV 及以下 GIS 母线中推广应用。由于母线接头接触不良引起发热是 GIS 较为常见的缺陷,因此针对 SF₆/N₂ 混合气体 GIS 母线接头接触不良时的温度分布开展研究。首先,建立了 220 kV SF₆/N₂ 混合气体三相共箱母线多物理场耦合的三维等比例仿真模型,通过在母线接头处设置电阻膜实现接触不良状态的模拟,从而对不同相别的母线接头接触不良时的温度分布规律开展计算分析;然后,研究了利用壳体表面温差诊断内部严重发热缺陷的方法。研究结果显示:任意一相母线接头接触不良时,壳体表面对应位置都会出现温度最高点;当顶部两相母线接头发热且壳体表面温差达到 2.5 K,或底部母线接头发热且壳体表面温差达到 2.0 K 时,可诊断为严重缺陷。

关键词:混合气体; 接触不良; 温度分布; 多物理场耦合; 缺陷诊断

中图分类号:TM 216 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2024)05-0027-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240505

Simulation Study on Temperature Distribution and Diagnostic Method of Three-phase Enclosed Bus Joint Heating of GIS with SF₆/N₂ Gas Mixture

ZHANG Pipei¹, ZHAO Xiaonan², CONG Longqi², GUO Chenrui¹

1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, Shandong, China;
2. State Grid Weihai Electric Power Supply Company, Weihai 264200, Shandong, China)

Abstract: Gas insulated switchgear (GIS) taking SF₆/N₂ gas mixture as insulating medium can effectively reduce environmental pollution, and it has gradually been applied in GIS at 220 kV and below. Considering that poor contact of bus joint is a common defect, it is necessary to study the temperature distribution of bus joint of GIS with SF₆/N₂ gas mixture during poor contact. Firstly, a 3D simulation model of multi-physics coupling for 220 kV three-phase enclosed bus with SF₆/N₂ gas mixture is established. By setting a resistance film at the bus joint to simulate the poor contact state, the temperature distribution law of bus joint of different phases with poor contact is calculated and analyzed. And then, the method for diagnosing severe internal heating defects using the surface temperature differences of shell is studied. The results show that when the contact of any phase bus joint is poor, the highest temperature point will appear on the corresponding position of shell surface, and when the top two bus joints are heating and the temperature differences on shell surface reach 2.5 K, or when the bottom bus joints are heating and the temperature differences on shell surface reach 2.0 K, it could be diagnosed as a serious defect.

Key words: gas mixture; poor contact; temperature distribution; multi-physics coupling; defect diagnosis

0 引言

使用 SF₆ 作为绝缘介质的气体绝缘金属封闭开关设备 (gas insulated switchgear, GIS) 凭借其绝缘性能好、免维护性强的优点, 广泛应用于电力系统中。然而 SF₆ 气体是国际上公认的温室气体之一, 其分子的温室效应是 CO₂ 的 23 900 倍, 若 SF₆ 充气及回收过程未按标准工艺开展, 则可能导致 SF₆ 气体排放至空气中, 对生态环境造成危害^[1-5]。近年来, 国内外学者一直致力于环保型替代气体的研究, 其中 SF₆/N₂ 混合气体由于性能稳定且价格便宜, 开始在 220 kV 及以下变电站中逐渐应用和推广, 且相关理论试验研究及试点运行经验表明, 当混合气体中 SF₆ 与 N₂ 的比例为 3:7 并适当提升气体压力时, 可以在环保性能和绝缘性能之间获得良好的平衡^[6-10]。

SF₆/N₂ 混合气体 GIS 装用量已逐渐增大, 其运行状态的评估方法也亟需研究, 尤其是将传统的纯 SF₆ 气体替换为混合气体后, 气体对流能力的变化势必会对气室内部的温度分布产生不同的影响。文献[11-13]分别对纯 SF₆ 气体、SF₆/N₂ 混合气体、C₄F₇N/CO₂ 混合气体及 C₅F₁₀O/空气混合气体 GIS 的温度特性开展计算研究, 结果表明, 相同运行条件下各类混合气体 GIS 的母线导体温度均高于纯 SF₆ 气体 GIS, 说明混合气体的对流换热能力低于纯 SF₆ 气体。文献[14-16]分别对 110~500 kV SF₆/N₂ 混合气体 GIS 母线的温度特性开展了试验及仿真分析, 研究了不同运行电流、不同气体压力对导体及壳体温度的影响规律, 但上述研究仅针对正常运行条件, 缺少对母线接头因接触不良而发热时温度分布的计算分析。

下面根据山东省内广泛应用的 ZF16-252 型 220 kV SF₆/N₂ 混合气体 GIS 三相共箱母线气室的实际结构尺寸, 利用有限元仿真软件建立了多物理场耦合的三维温度场计算模型, 并在母线接头处设置电阻膜来模拟接触不良的状态。在此基础上对导体及壳体的温度分布特点开展了计算分析, 并研究得出利用壳体表面温差进行接触不良引起的严重发热缺陷诊断的判断方法。

1 混合气体母线温度分布计算原理

SF₆/N₂ 混合气体 GIS 母线温度分布计算包含多个物理场之间的耦合过程, 主要包括电磁场-温度场耦合和流体场-温度场耦合。

1.1 电磁场-温度场耦合

混合气体母线气室内部的热源, 主要为电流流过母线导体产生的焦耳发热及在壳体内部感应产生的环流发热。

导体和外壳等金属材料在不同温度下的电导率也不相同, 因此在电磁场-温度场耦合计算时, 需要根据温度计算结果, 不断修正导体和壳体的电导率, 直至温度计算结果收敛。金属材料电导率与温度的关系可表示为

$$\sigma_m(T) = \frac{\sigma_{m20}}{1 + \alpha(T - 20)} \quad (1)$$

式中: σ_{m20} 为金属材料在 20 °C 时的电导率, 铝合金材质的导体和壳体可取 7.14×10^5 S; $\sigma_m(T)$ 为温度 T 时的电导率; α 为电导率温度系数, 铝合金材料约为 $3.9 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 。

对于 GIS 母线, 其导体和壳体内部的电磁场控制方程均满足:

$$\nabla \times (\mu_m^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \cdot \mu_m^{-1} \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e \quad (2)$$

式中: ∇ 为矢量微分算子; μ_m 为磁导率, 铝合金材质的导体和壳体均取 $1.4 \times 10^{-6} \text{ H/m}$; \mathbf{A} 为矢量磁位; \mathbf{J}_e 为导体内的运行电流密度, 由运行电流及导体截面尺寸计算得到。

在导体和壳体中还存在着感应电流, 感应电流与导体和壳体所交链的磁场有关。因此, 导体和壳体中的总电流密度分别为:

$$\mathbf{J}_d = -j\omega\sigma_m(T)\mathbf{A} \Big|_{\text{导体交链}} + \mathbf{J}_e \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_k = -j\omega\sigma_m(T)\mathbf{A} \Big|_{\text{壳体交链}} \quad (4)$$

式中: \mathbf{J}_d 和 \mathbf{J}_k 分别为导体和壳体内部的电流密度; ω 为角频率, 这里 $\omega = 100\pi \text{ rad/s}$ 。可以看出, 由于壳体内部没有电流源, 因此式(4)右边仅有感应电流一项, 即壳体环流。

因此, 导体单位体积内的焦耳发热功率和壳体单位体积内的环流发热功率分别为:

$$P_d = \frac{\mathbf{J}_d \mathbf{J}_d^*}{\sigma_m(T)} \quad (5)$$

$$P_k = \frac{J_k J_k^*}{\sigma_m(T)} \quad (6)$$

式中, J_d^* 和 J_k^* 分别为 J_d 和 J_k 的共轭复数。

从而,导体和壳体内部的温度场计算满足的控制方程^[19]为:

$$\rho_m C_m \nabla T = \nabla(q_c + q_r) + q_m \quad (7)$$

$$q_c = \lambda_m \nabla T \quad (8)$$

$$q_r = \frac{\sigma \pi d \left(\left(\frac{T_d}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_D}{100} \right)^4 \right)}{\frac{1}{\varepsilon_d} + \frac{d_2}{D_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_D} - 1 \right)} \quad (9)$$

$$q_m = \begin{cases} P_d, & \text{导体内部} \\ P_k, & \text{壳体内部} \end{cases} \quad (10)$$

式中: ρ_m 、 C_m 、 λ_m 分别为导体和壳体的密度、比热容、导热系数,铝合金材料分别取 2750 kg/m³、985 J/(kg·K)、1500 W/(m·K); q_c 为固体材料内部的热传导换热量; q_r 为固体及壳体间的热辐射换热量; q_m 为自身发热产生的能量; σ 为斯蒂芬玻尔兹曼常数,为 5.67×10⁻⁸ W/(m²·K⁴); T_d 和 T_D 分别为导体外表面温度和壳体内表面温度,需在迭代计算过程中读取; ε_d 和 ε_D 分别为导体外表面和壳体内表面的辐射率,铝合金材料可近似取 0.88; d_2 、 D_1 分别为导体外径、壳体内径。

式(7)的物理意义即为能量守恒定律,等号左边为导体和壳体单位体积的内能变化量,等号右边的两项分别为外界输入的能量(即 q_c 和 q_r)和自身发热产生的能量(q_m)。

1.2 流体场-温度场耦合

SF₆/N₂混合气体 GIS 母线导体与壳体间的热量传递主要以混合气体中对流传热的形式进行,气体内部的对流传热过程满足能量守恒方程、质量守恒方程和动量守恒方程,表达式^[18]分别为:

$$\rho_g C_g \mathbf{u} \nabla T = \nabla(\lambda_g \nabla T) \quad (11)$$

$$\nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (12)$$

$$\rho(\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} =$$

$$\nabla \left\{ -p \mathbf{I} + \mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} + g \Delta \rho \quad (13)$$

式中: ρ_g 、 C_g 、 λ_g 分别为气体的密度、比定压热容、导热系数; p 、 μ 、 $\Delta \rho$ 分别为气体压强、气体动力粘度、气体热膨胀引起的密度差; g 为重力加速度,取 10 m/s²; \mathbf{u} 和 \mathbf{I} 分别为速度矢量和单位矩阵。式(11)与

式(7)一样都反映了能量守恒定律,不同的是混合气体内部无热源,因此式(11)等号右边仅有一项。

式(7)一式(11)的求解还需要明确导体、壳体、混合气体各个边界上的边界条件。对于壳体外表面与外界空气的交界面 S1,当外界环境温度已知且恒定时,壳体与外界空气间的对流换热过程可以用对流换热边界条件来表征,即

$$\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n_1} \Big|_{S1} = h(T - T_a) \quad (14)$$

式中: T_a 为空气温度,取 25 °C; h 为壳体与空气间的对流传热系数,主要与壳体尺寸及材质有关,取 5 W/(m²·K); n_1 为交界面 S1 的法向。

对于导体外表面、壳体内表面与混合气体的交界面 S2,由于混合气体的温度为待求量,因此无法用对流换热边界条件来表征,仅满足接触面边界条件,即:

$$\begin{aligned} T_m \Big|_{S2} &= T_g \Big|_{S2} \\ \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial n_2} \Big|_{S2} &= \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial n_2} \Big|_{S2} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: T_m 、 T_g 分别为导体、壳体与混合气体在交界面处的温度; n_2 为交界面 S2 的法向。

2 混合气体母线仿真模型

2.1 母线接头接触不良仿真模型

220 kV GIS 母线大多数为三相共箱结构,三相导体呈倒立的正三角形布置。根据典型型号的 220 kV SF₆/N₂混合气体 GIS 三相共箱母线的实际结构尺寸,利用 Comsol 多物理场有限元仿真软件建立母线接头处的 1:1 三维模型,如图 1 所示。模型包含两段母线气室,中间由盆式绝缘子隔开,由于实际中每段母线气室长度在 8 m 及以上,尺寸太大不利于计算,因此仿真模型中将每段母线气室长度设置为 2 m,并在两端施加无限远边界条件来模拟实际尺寸。母线壳体内外径分别为 460 mm、440 mm,导体内外径分别为 48 mm、60 mm。

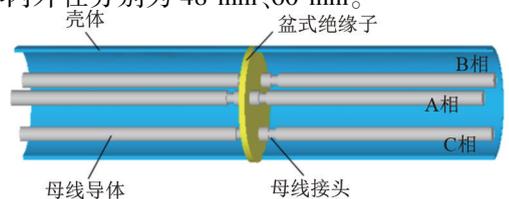


图 1 混合气体 GIS 母线仿真模型

母线接头处主要由导体触头和内嵌在盆式绝缘子上的触头座组成。当导体触头插入触头座后,触头座上的弹簧触指对导体触头形成夹紧力,从而使两者保持良好接触。若长期运行后出现触指夹紧力不足或接触面氧化等现象,则会导致导体触头与触指间接触电阻增大。为模拟母线接头接触不良,仿真模型中在导体触头与触指接触面处设置厚度为 1 mm 的电阻膜,通过改变电阻膜的电阻值来模拟触头触指间接触电阻的变化。母线接头及电阻膜示意如图 2 所示。

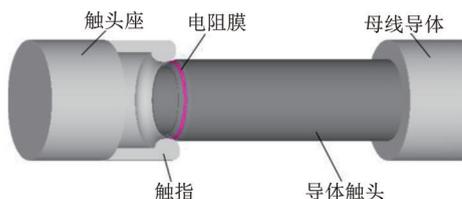


图 2 母线接头及电阻膜

2.2 混合气体参数赋值

由式(11)一式(13)可以看出,混合气体的密度、比定压热容、导热系数、动力粘度等参数都会影响导体和壳体间的对流传热过程,且这些参数都会随气体温度和气压的变化而变化。表 1 给出了 SF₆、N₂ 及 30% SF₆/70% N₂ 混合气体在 25 °C、0.6 MPa (混合气体 GIS 额定气压) 下的热特性参数值^[20],其中混合气体的相关参数由文献^[21]中提出的多组分气体参数计算公式求得。

表 1 气体热特性参数

气体	密度/ (kg·m ⁻³)	动力粘度/ (10 ⁻⁵ Pa·s)	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	比定压热容/ [J·(kg·K) ⁻¹]
SF ₆	5.967	1.501	0.013 58	649.6
N ₂	1.144	1.743	0.025 61	1 039.0
30%SF ₆ /70%N ₂	4.218	1.863	0.015 84	839.5

鉴于 Comsol 软件中已内置 SF₆、N₂ 气体热特性参数随温度的变化函数,因此计算过程中只需根据当前步长的温度计算结果对气体参数进行更新(先根据温度计算 SF₆、N₂ 气体的参数,再使用多组分气体参数计算公式计算当前温度下混合气体参数),迭代计算至结果收敛即可。混合气体隔离开关温度分布的完整迭代计算流程如图 3 所示,图中 n 为迭代计算次数。

3 混合气体母线温度计算结果

前期的理论试验研究及试点运行经验表明,

30%SF₆/70%N₂ 混合气体压力为 0.6 MPa 的母线气室具有较好的绝缘性能,因此在该条件下并设定外界空气温度为 25 °C 时开展母线导体与壳体温度分布研究。

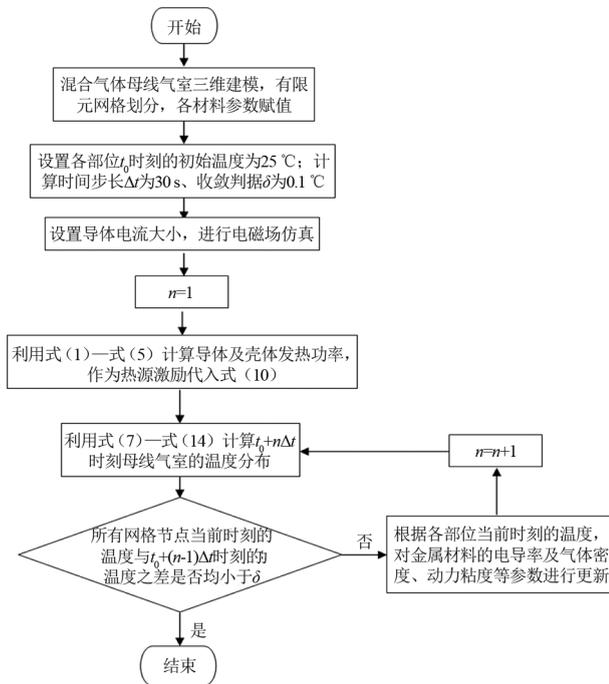


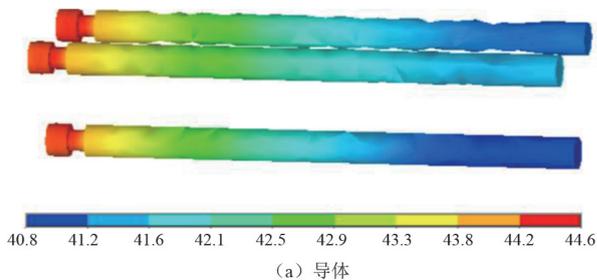
图 3 温度分布计算流程

3.1 母线接头接触不良时的温度分布

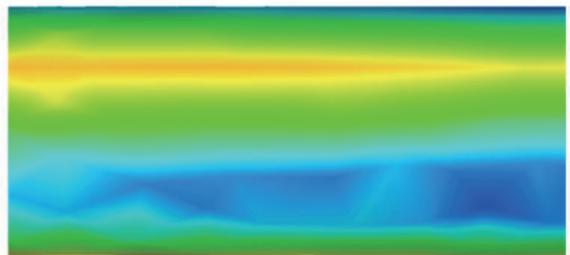
以图 1 所示仿真模型中的右侧气室为研究对象,当三相母线接头的接触电阻均设置为 50 μΩ (正常接触)时,对导体施加额定电流 4000 A,导体和壳体的温度分布如图 4 所示。可以看出,三相导体的温度分布基本一致,最高温度为 44.6 °C,位于母线接头处,与导体其余位置相比温差约为 3.8 K,这是由于母线接头处的通流面积相对较小造成的,属于正常温升。壳体表面与三相导体对应位置的温度较高,为 33.4 °C,但与壳体表面其余部位的温差较小(小于 1 K),此时壳体表面温度主要受外界空气对流的影响,温度分布较为均匀。

分别将 A 相、C 相母线接头的接触电阻设置为 200 μΩ,导体和壳体的温度分布分别如图 5、图 6 所示。可见当 A 相、C 相母线接头接触不良时,母线接头处的最高温度均达到 76 °C 左右,同时,发热相对应的壳体位置也出现了较为明显的温度最高点。因此,可以根据壳体表面温度最高点出现的位置,判断内部是否存在母线接头接触不良导致的发热缺陷。

此外,A 相母线接头接触不良时的壳体表面最高温度为 34.5 °C,与壳体表面其余部位最大温差为

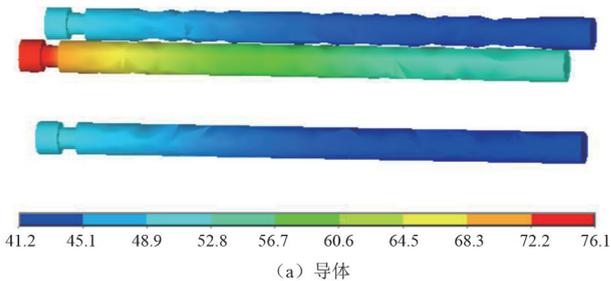


(a) 导体

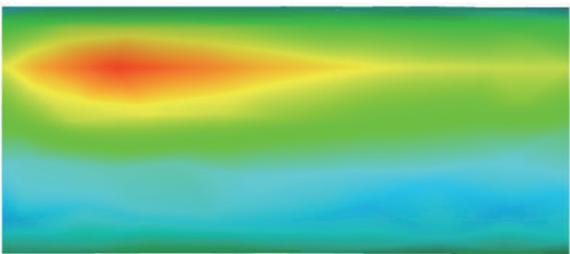


(b) 壳体

图 4 正常接触时的温度分布(单位:℃)



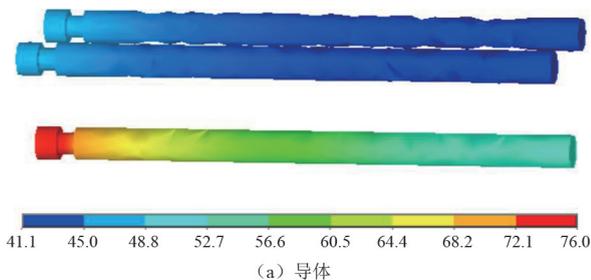
(a) 导体



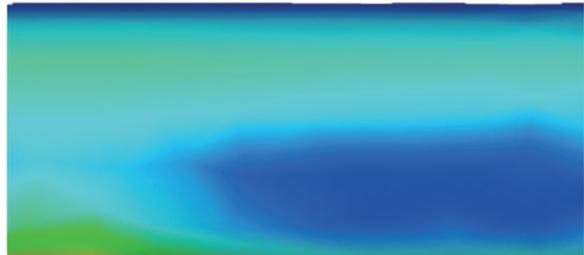
(b) 壳体

图 5 A 相母线接头接触不良时的温度分布(单位:℃)

1.8 K; C 相母线接头接触不良时的壳体表面最高温度为 34.1℃,最大温差为 1.3 K。C 相发热时的壳体表面最高温度和温差相对较小,这是因为 C 相位于底部,受对流换热的影响,C 相母线接头产生的热量被较多地传递至气室上方,从而略微增大了壳体其余位置的温度。鉴于三相导体为倒立的正三角形布置,B 相母线接头接触不良时的温度分布规律与 A 相类似,这里不再单独进行分析。



(a) 导体



(b) 壳体

图 6 C 相母线接头接触不良时的温度分布(单位:℃)

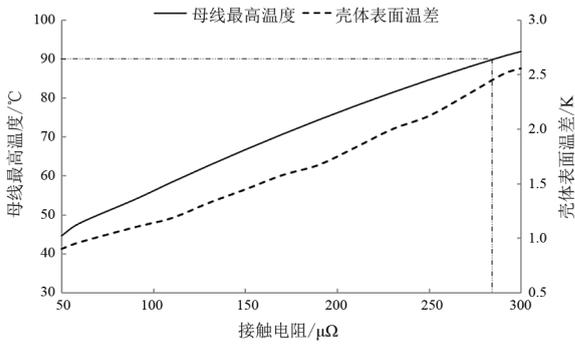
3.2 母线接头接触不良的诊断方法

由第 3.1 节的仿真结果可知,当母线接头接触电阻增大至 200 μΩ 时,接头处最高温度为 76℃,尚未达到 DL/T 664—2016《带电设备红外诊断应用规范》中明确的严重发热缺陷的判定标准(90℃)。因此,继续对 A 相、C 相不同接触电阻时的导体和壳体温度分布开展计算,得到母线接头处最高温度和壳体表面温差随接触电阻的变化曲线如图 7 所示。

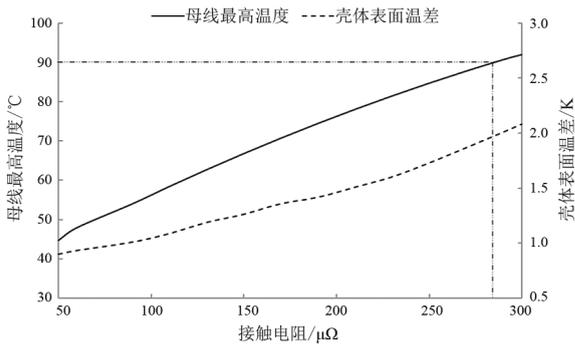
可以看出,当母线接头接触电阻增大至 280 μΩ 时,A 相、C 相导体最高温度均达到 90℃。此时,A 相壳体表面温差为 2.5 K,C 相壳体表面温差为 2.0 K。

同时,考虑到不同运行电流对温度分布的影响,分别对运行电流为 3000 A、2000 A、1000 A 时,A 相、C 相母线接头接触不良的温度分布仿真计算,得到当母线接头温度达到 90℃时的壳体表面温差,如表 2 所示。可以看出,对于不同运行电流,母线接头温度达到 90℃时的壳体表面温差相同。这是由于内部导体发热严重时,壳体表面最高温度主要受内部导体温度的影响,而壳体表面最低温度主要与外界空气温度有关。

综上所述,当 220 kV SF₆/N₂混合气体 GIS 母线壳体表面侧上方存在热点且温差达到 2.5 K 时,可诊断为 A 相或 B 相(即顶部两相)导体接头存在严重发热缺陷;当母线壳体表面底部存在热点且温差



(a) A相母线接头接触不良



(b) C相母线接头接触不良

图 7 温度随接触电阻变化曲线

表 2 母线接头温度 90℃ 时不同运行电流下壳体表面温差

运行电流/ A	接触电阻/ $\mu\Omega$	A 相发热时 壳体表面温差/K	C 相发热时 壳体表面温差/K
3000	570	2.5	2.0
2000	890	2.5	2.0
1000	1050	2.5	2.0

达到 2 K 时,可诊断为 C 相(即底部)导体接头存在严重发热缺陷。

4 结 论

上面通过对 ZF16-252 型 220 kV SF₆/N₂ 混合气体 GIS 三相共箱母线接头发热时温度分布的仿真研究,得出以下结论:1) 母线接头接触不良时温度上升明显,对应的壳体表面位置会出现温度最高点,但壳体表面温差较小;2) 位于底部的母线导体因接触不良发热时,受气室内混合气体对流作用影响,壳体表面温差更小。

为进一步研究利用壳体表面温差进行内部发热缺陷诊断的方法,对不同运行电流下,动静触头插接处温度达到 90℃ 时的壳体表面温差开展计算分析,结果表明:1) 顶部两相母线接头因接触不良发热时,壳体表面温差达到 2.5 K 时可诊断为严重缺陷;

2) 底部母线接头发热时,壳体表面温差达到 2.0 K 可诊断为严重缺陷。

上述结论对于结构尺寸相近的其他型号 220 kV SF₆/N₂ 混合气体 GIS 三相共箱母线可供借鉴。

参考文献

- [1] 高克利,颜湘莲,王浩,等.环保型气体绝缘输电线路(GIL)技术发展[J].高电压技术,2018,44(10):3105-3113.
- [2] 傅明利,王勇,卓然,等.SF₆替代气体在隔离开关中的开断性能仿真研究[J].高压电器,2021,57(3):41-47.
- [3] 周文俊,郑宇,高克利,等.环保型绝缘气体电气特性研究进展[J].高电压技术,2018,44(10):3114-3124.
- [4] 张晓星,田双双,肖淞,等.SF₆替代气体研究现状综述[J].电工技术学报,2018,33(12):2883-2893.
- [5] 李杰,汪鹏,孙景文,等.基于 Gabor 变换的 GIS 设备典型放电缺陷识别[J].山东电力技术,2022,49(2):54-60.
- [6] 郝学东,孙飞舟,罗四娇.SF₆/N₂混合气体在气体绝缘金属封闭开关设备母线中的应用[J].电气时代,2018(10):86-87.
- [7] 季严松,张民,王承玉,等.SF₆/N₂混合气体在电弧作用下分解产物试验研究[J].高压电器,2021,57(3):145-151.
- [8] 孙鹏程,王帮田,洪文芳,等.SF₆/N₂混合气体绝缘特性的实验研究[J].中国电力,2012,45(12):71-75.
- [9] 汪泓,邱毓昌,张乔根.六氟化硫混合气体绝缘的发展动向[J].绝缘材料,2002(5):31-34.
- [10] 周安春,高理迎,冀肖彤,等.SF₆/N₂混合气体用于 GIS 母线的应用与研究[J].电网技术,2018,42(10):3429-3435.
- [11] 史荣斌,秦炜淇,张猛,等.特高压 C₄F₇N/CO₂混合气体 GIL 温度分布[J].高电压技术,2022,48(2):698-705.
- [12] 靳国豪,秦川,靳婷蕾,等.c-C₄F₈和 C₅F₁₀O 应用于气体绝缘输电线路的温升特性分析[J].绝缘材料,2020,53(9):81-86.
- [13] 张俊民,高荟凯,冯昊.三种绝缘气体下开关设备的温度场及流场对比与分析[J].电工技术学报,2015,30(6):155-161.
- [14] 杨植,任玲玲,王凯,等.基于混合绝缘气体的 GIS 母线温升多物理场耦合分析[J].高压电器,2021,57(1):48-54.
- [15] 李冰,肖登明,赵谏,等.第二代气体绝缘输电线路的温升数值计算[J].电工技术学报,2017,32(13):271-276.

- [16] 吴晓文,舒乃秋,李洪涛,等. 基于流体多组分传输的气体绝缘母线温度场数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(33):141-147.
- [17] 崔兆轩,林莘,钟建英,等.C₄F₇N/CO₂混合气体特高压母线通流温升特性研究[J]. 电工技术学报,2023,38(9):2491-2499.
- [18] 梁智权,主编. 流体力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.
- [19] 张丕沛,李杰,汪鹏. 隔离开关合闸不到位引起 GIS 放电故障的原因分析[J]. 山东电力技术,2021,48(11):54-58.
- [20] 刘光启,马连湘,刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京:化学工业出版社,2002.

- [21] 陈敬友,高兵,杨帆,等. 气体绝缘输电线路温升数值计算及绝缘气体换热能力[J]. 高压技术,2020,46(11):4042-4051.

作者简介:

张丕沛(1996),男,硕士,工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作;

赵晓楠(1986),男,硕士,高级工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作;

丛龙琦(1985),男,硕士,高级工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作;

郭晨瑞(1996),男,工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作。

(收稿日期:2024-02-20)

(上接第7页)

- [13] 印云刚,刘闯,何其新,等. 基于改进狼群算法的含风电配电网无功优化[J]. 内蒙古电力技术,2023,41(3):1-7.
- [14] LI Yujun, XU Zhao, WONG Kit Po. Advanced control strategies of PMSG-based wind turbines for system inertia support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(4):3027-3037.
- [15] 王康平,张兴科,刘财华,等. 基于自适应下垂控制的风电场无功电压控制策略[J]. 综合智慧能源,2022,44(4):12-19.
- [16] 李生虎,章怡帆,于新钰,等. 采用改进下垂控制和双层无功优化的风电场无功均衡分配研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(13):1-7.
- [17] 吴昊,于景龙,杨政厚,等. 风电场无功与电压控制技术综述[J]. 热力发电,2023,52(3):26-38.
- [18] 叶林,路朋,赵永宁,等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6181-6198.
- [19] 路朋,叶林,裴铭,等. 风电集群有功功率模型预测协调控制策略[J]. 中国电机工程学报,2021,41(17):5887-5900.
- [20] LIAO W, WU Q W, CUI H S, et al. Model predictive control based coordinated voltage control for offshore radial DC-connected wind farms [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023,11(1):280-289.
- [21] KOURO S, CORTES P, VARGAS R, et al. Model predictive control-a simple and powerful method to control power converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6):1826-1838.
- [22] CHRISTAKOU K, LEBOUDEC J-Y, PAOLONE M, et al. Efficient computation of sensitivity coefficients of node

voltages and Line currents in unbalanced radial electrical distribution Networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013,4(2):741-75.

- [23] MARTINEZ J, KJÆR P C, TEODORESCU R. DFIG turbine representation for small signal voltage control studies [C]//2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, May 20-22, 2010, Brasov, Romania. IEEE, 2010:31-40.

[24] 王子伊,王玮,马伟,等. 梯级水光蓄互补发电系统实时协调控制策略[J]. 电网技术,2021,45(3):871-881.

- [25] 丁理杰,史华勃,陈刚等. 全功率变速抽水蓄能机组控制策略与调节特性[J]. 电力自动化设备,2024,44(3):166-171.

作者简介:
潘鹏宇(1993),男,博士,工程师,研究方向为全功率变速抽水蓄能机组优化控制、电力系统宽频带阻抗测量;

丁理杰(1981),男,博士,正高级工程师,研究方向为大电网安全稳定分析与控制;

王珍(2000),女,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

史华勃(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为抽水蓄能发电技术、电力系统分析计算与稳定控制等;

陈刚(1985),男,博士,正高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制;

张远志(1995),男,博士,研究方向为电机设计及其控制、电机磁场调制原理、新型电力系统用电机研究;

查晓明(1967),男,教授,博士生导师,研究方向为电力电子功率变换及系统、新能源发电及新型供配电系统技术;

孙建军(1975),男,教授,博士生导师,研究方向为电能质量分析及治理、电力电子系统及微电网的建模和分析。

(收稿日期:2023-11-15)