

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.06.015

基于多物理场耦合的 GIS 温升异常 状态评估研究*

戴伟伟¹, 高 凯², 马 利¹, 金立军^{1*}

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 上海电力科学研究所, 上海 200063)

摘要:针对气体绝缘封闭组合电器(GIS)温升异常变化影响内绝缘性能和设备安全的问题,对 GIS 壳体温升变化与内部缺陷的关系进行了研究,提出了一种根据 GIS 壳体温升估算其内部设备温升分布的方法,实现了 GIS 设备运行状态评估及内部故障诊断;建立了 252 kV GIS 隔离开关简化的三维模型,结合 COMSOL 有限元分析软件进行了电磁-热-流等多物理场耦合仿真计算,得到了 GIS 隔离开关的稳态温度场分布;利用 GIS 模拟实验平台,进行了不同工况下的测温试验,验证了仿真计算的准确性;构建了导体温度与壳体最高温度的映射关系,建立了依据 GIS 壳体温升估算设备内部是否存在过热缺陷的方法。研究表明:多物理场耦合仿真计算能有效模拟 GIS 设备的热量传递过程,通过测量壳体温升能准确估算 GIS 内部的运行状态,为 GIS 设备的状态维护提供支持。

关键词:GIS 设备;多物理场耦合;温升分布;状态评估

中图分类号:TM507

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)06-0623-04

Condition assessment of abnormal temperature rise of GIS based on multi-physics coupling

DAI Wei-wei¹, GAO Kai², MA Li¹, JIN Li-jun¹

(1. School of electronics and information engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai Electric Apparatus Science Research Institute(Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: Aiming at the influence of abnormal rise of gas insulated switchgear (GIS) on internal insulation performance and equipment safety, the relationship between temperature rise of shell and internal defects was researched. A method for estimating the internal equipment temperature distribution based on the temperature rise of the GIS shell was proposed, and the operation condition was assessed to realize the internal fault diagnosis of GIS. The simplified three-dimensional model of 252 kV GIS disconnector was established, and the steady-state temperature field distribution was obtained by the electromagnetic-heat-fluid-solid coupling simulation combined with the COMSOL software. By the GIS simulation platform, the temperature test under different working conditions was carried out to verify the correctness of the simulation calculation. The relationship between the conductor temperature and the maximum temperature of the shell was constructed, and the method of estimating the existence of internal overheating defects according to the temperature rise of GIS shell was established. The results indicate that the internal heat transfer process can be simulated effectively by the method of multi-physics coupling calculation and the running status of GIS can be estimated accurately by measuring the temperature rise of the shell, which supports the state maintenance of GIS equipment.

Key words: GIS equipment; multi-physics coupling; steady temperature profile; condition assessment

0 引 言

因其小型化、可靠性高、通流能力强等突出优点,

气体绝缘金属封闭组合电器(gas insulated switch-gear, GIS)在电力系统中的应用日益广泛^[1]。然而其密封性严、结构紧凑等特点导致负荷电流下导体发热严重,

收稿日期:2017-11-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577135,51177109);上海市科学技术委员会基金资助项目(20120088)

作者简介:戴伟伟(1990-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事电气设备状态检测与故障诊断的研究工作。E-mail: wwdai0917@foxmail.com

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

加速绝缘材料老化,造成绝缘性能降低,引发短路等重大电网事故^[2]。因此,对 GIS 内部导体温度进行评估,提前发现并消除设备内部缺陷和隐患,对 GIS 设备的安全稳定运行具有重要意义。

目前,国内外用来测量 GIS 内部温度的方法主要有热电偶测量内部温度,红外传感测温技术以及光纤光栅测温 3 种方法^[3-5],这些方法只能在 GIS 设备发生严重故障时才可以检测出来,不满足 GIS 设备的安全监测要求。另外,国内外学者定性研究了 GIS 内部整体温升的仿真方法,没有深入研究壳体温升与导体温升分布的定量关系,罗建华^[6]于 2010 年分析了三相 GIS 母线的温升问题;武安波^[7]在 2012 年对母线槽进行过多物理场的耦合分析;这些研究也仅限于二维分析。

本文将以 252 kV GIS 隔离开关为研究对象,基于有限元分析软件 COMSOL 建立电磁场-流场-温度场等多物理场耦合数学模型,仿真计算得到隔离开关自内向外的三维稳态温度场分布,并通过测温试验以验证仿真计算的正确性,评估设备的运行状态。

1 GIS 设备多物理场耦合模型

本文以隔离开关为研究对象。为便于建模计算,忽略了螺栓等小部件对温度分布的影响,按照实际 252 kV GIS 的尺寸参数,建立了简化的物理模型,其轴向剖面如图 1 所示。

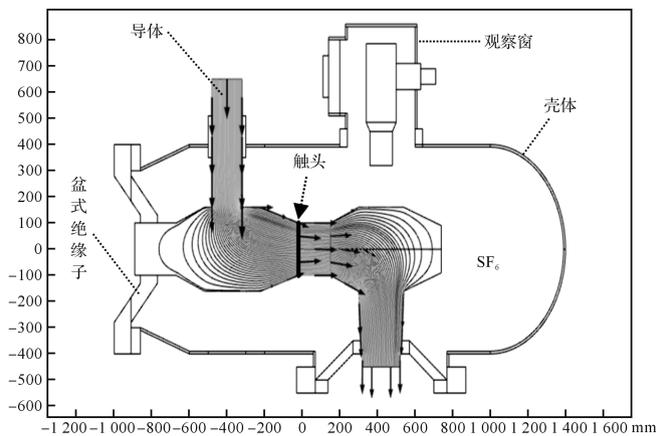


图 1 GIS 隔离开关物理模型图

图 1 箭头为载流导体中电流路径,线条为两导体触头的接触面,给其设定某接触电阻值^[8],电流在此产生焦耳热多于导体其余部分的热,可模拟隔离开关内部的过热缺陷。GIS 损耗的求取及热量的传递过程涉及电磁场^[9]、流场及温度场等多物理场耦合理论。

在整个 GIS 求解区域内进行电磁涡流场频域分析,控制方程如下^[10]：

铝合金外壳内：

$$j\omega\sigma_e A + \nabla \times (\mu_e^{-1} \nabla \times A) -$$

$$\nabla \cdot (\mu_e^{-1} \nabla \cdot A) + \sigma_e \nabla \phi = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (-J_e \omega \sigma_e A - \sigma_e \nabla \phi) = 0 \quad (2)$$

铝导体内：

$$\nabla \times (\mu_e^{-1} \nabla \times A) -$$

$$\nabla \cdot (\mu_e^{-1} \nabla \cdot A) = J_e \quad (3)$$

总电流密度：

$$J_z = -j\omega\sigma_e A + J_e \quad (4)$$

式中： A —磁矢势； ϕ —标量电位； J_e —源电流密度； J_z —总电流密度； μ_e —材料磁导率； σ_e —材料电导率； ω —角频率。

导体域引入输入总电流有效值电流 I 作为电流边界,输入电流 I 与导体内总电流密度关系为：

$$I = \int_S J_z dS \quad (5)$$

涡流场导体和外壳电能损耗为：

$$Q_h = \frac{1}{2} \int_S \frac{|J_z|^2}{\sigma_e} dS \quad (6)$$

GIS 温度分布计算涉及多热源、多区域、多气体组分的热量传递过程,热源主要是导体电流和外壳涡流产生的焦耳热,热量散失主要包括导体和外壳固体传热、腔体内部 SF₆ 气体在自然对流下气体传热和外部空气自然对流下气体的散热。因为本文研究的 GIS 设备是在室内无太阳光照、无强对流稳定环境下,可不考虑太阳辐射及空气强迫对流的影响。该模型中空气和 SF₆ 均采用层流模型,控制方程和边界条件如下^[11]。

质量守恒方程：

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

动量守恒方程：

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \mathbf{u})\mathbf{I}] + g\Delta\rho \quad (8)$$

能量守恒方程：

$$\rho C_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (9)$$

固体传热控制方程：

$$\rho C_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_h \quad (10)$$

式中： ρ , C_p , k —气体或固体材料的密度、比热容和导热系数； \mathbf{u} —速度矢量； p —气压； μ —气体动力粘度； g —重力加速度,指向 z 轴负向； $\Delta\rho$ —气体热膨胀引起的密度差； \mathbf{I} —单位矩阵； Q —体积热量。

气体和固体交界面采用无滑移边界,壳体外部只考虑空气的自然对流,采用恒温边界条件(T_0 为环境温度)：

$$T = T_0 \quad (11)$$

2 多物理场耦合计算结果与分析

基于隔离开关的耦合模型,施加边界条件:GIS 外壳外表对流换热 4.5 W/m²,SF₆ 气体充气压强 0.3 MPa,对流换热系数为 12 W/(m²·K),环境温度 T_0 为 293 K。

为模拟 GIS 的过热缺陷,按图 1 所示,笔者对整个铝导体施加大小 3 kA,频率 50 Hz 的工频电流 I ,触头设置不同阻值的接触电阻,阻值愈大,电流在此产生的焦耳热也愈大,从而可模拟不同程度的过热缺陷。

接触电阻为 0,即设备无过热缺陷时的温度分布图如图 2 所示。

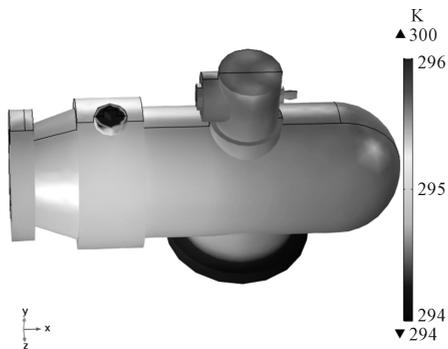


图 2 接触电阻 0 $\mu\Omega$ 时的温度分布图

从图 2 中可以看出:设备内无过热缺陷时,GIS 整体温升并不明显,内部触头温度 300 K,外壳最高温度 296 K,最低 294 K,差异不大。

接触电阻 100 $\mu\Omega$ 时整体温度分布图如图 3 所示。

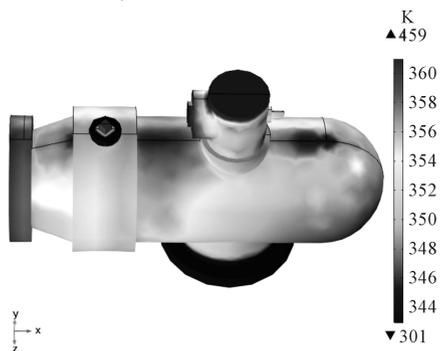


图 3 接触电阻 100 $\mu\Omega$ 时的温度分布图

图 3 中,当接触电阻为 100 $\mu\Omega$ 时 GIS 壳体温度差异显著,最高温 360.8 K,出现在触头正上方偏左位置,是触头左侧附近的高温气体与触头上方的高温气体共同对壳体传热叠加所致。

接触电阻 100 $\mu\Omega$ 时整体温度剖面图如图 4 所示。

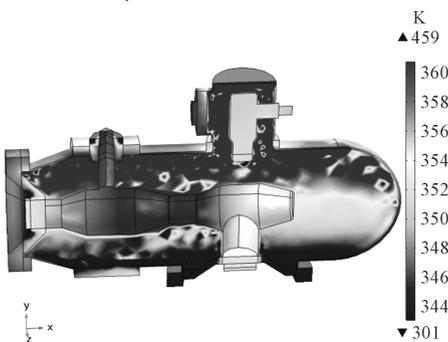


图 4 温度场分布剖面图

图 4 中,内部温度分布呈现明显的分层现象,总趋

势为上高下低,左右对称,触头处气体热浮力作用下产生对流,热气流温度高密度小而上浮,冷气流温度低密度大而下沉,上浮的热气流将热量传给壳体,使触头正上方壳体区域温升达到最高。稳定时触头温度高达 459 K,发热严重。

3 测温试验论证和内部缺陷估算

为验证仿真计算的正确性,笔者利用 252 kV GIS 实验平台对 GIS 隔离开关开展了在线测温试验。试验采用大电流发生器加载 3 kA 的工频交流电,隔离开关触头接触电阻为可变电阻。利用光纤光栅温度传感器对触头及其正上方的壳体外表面分别进行温度测量,测量采用的稳态温度判据为:10 min 内各传感器测得温度变化均小于 0.2 $^{\circ}\text{C}$ 。

将环境温度 21 $^{\circ}\text{C}$ 时,仿真计算及测温试验得到的稳态温度绘制成曲线图,如图 5 所示。

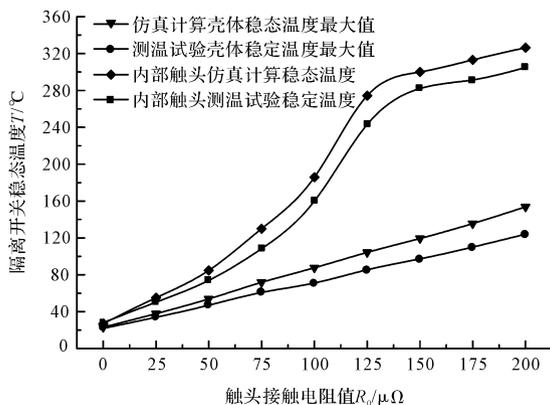


图 5 测温试验与仿真计算结果比较

图 5 曲线显示:仿真和实验存在一定误差,误差一方面来自仿真建模时的模型简化和边界条件设置,另一方面是由于实验中 GIS 内部气体并非 SF_6 而是空气。但是两者误差在可接受范围内,且整体温度趋势趋于一致,从而验证了本文 GIS 多物理场耦合仿真模型的正确性。

IEC6227-1 对环境温度不高于 40 $^{\circ}\text{C}$ 时高压开关产品各部件所能承受的温度及温升大小进行了相关规定。根据相关理论计算及工程经验,GIS 不同程度的过热缺陷对应的内部导体的温升范围如表 1 所示^[12]。

表 1 不同程度过热缺陷对应的温升范围

过热缺陷程度	对应温升/K
一般缺陷	> 306 (33 $^{\circ}\text{C}$)
严重缺陷	> 360 (87 $^{\circ}\text{C}$)
危急缺陷	> 402 (129 $^{\circ}\text{C}$)
熔焊点	> 880 (607 $^{\circ}\text{C}$)

对 GIS 仿真计算和测温试验的研究表明:内部触头过热,在壳体表面会有内部触头的温度信息,触头温度与壳体表面温度正相关,不同的触头温度对应不同

的外壳温度。基于此,本文建立了触头温度与壳体最高温度的函数关系,依据壳体温度估算 GIS 触头的温度,从而判断内部是否过热。将仿真数据拟合成 S 型曲线,如图 6 所示。

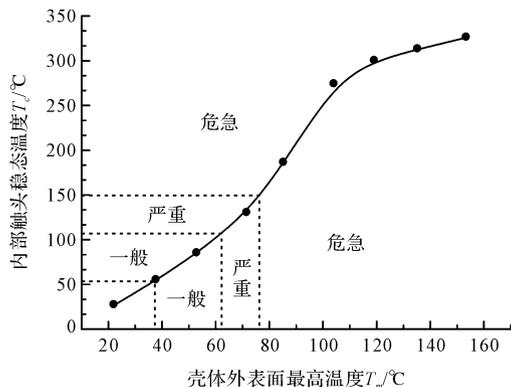


图 6 触头温度与壳体最高温度的拟合关系曲线图

图 6 中,曲线初始斜率逐渐变大,因内部 SF₆ 温度较低,热量吸收充分,壳体每升高单位温度需更多的内部发热。随着 SF₆ 受热饱和,单位触头发热量可使壳体升温更高,斜率又会逐渐变小。

图 6 中的拟合曲线对应的函数解析式为:

$$T_c = \frac{346.52}{1 + e^{3.39 - 0.04T_m}} \quad (12)$$

式中: T_c —触头的稳态温度; T_m —触头正上方壳体区域的最高温度。

以某 252 kV 室内变电站为例,对 A 相隔离接地开关拍摄的红外热像上显示壳体某区域最高温度达到 67.3 °C (环境温度 22 °C),代入式(12)中估算设备内部温度为 115.0 °C,对照表 1,判断为内部严重过热缺陷。经测量,动触头温度为 122.6 °C,与估算值接近,验证了公式的有效性。

4 结束语

本文建立了简化的 GIS 隔离开关三维仿真模型,对设备内部的热量传递过程进行了多物理场耦合仿真计算与分析,并利用 GIS 测温实验平台进行测温试验研究,拟合了发热触头温度与壳体最高温度的函数映射关系。研究得到如下结论:

(1) GIS 隔离开关稳态温度场计算结果表明内部存在过热缺陷时,GIS 壳体表面温差显著,壳体最高温升出现在过热触头正上方位置;

(2) GIS 测温试验结果与仿真计算结果的一致性

表明本文所建仿真模型的正确性,多物理场耦合仿真能有效模拟 GIS 设备的热量传递过程;

(3) 基于仿真计算及测温试验,提出依据壳体升温估算 GIS 内部触头温升的函数解析方法,实测结果表明:该方法能实现对 GIS 设备内部是否存在过热缺陷的评估。

参考文献 (References):

- [1] 吴晓文,舒乃秋,李洪涛,等. 气体绝缘输电线路温升数值计算及相关因素分析[J]. 电工技术学报,2013,28(1): 65-72.
- [2] 周 鑫,鲁铁成,罗容波,等. 气体绝缘组合电器触头电接触状态检测与评估方法[J]. 高电压技术,2015,41(1): 217-224.
- [3] SCHOEFFNER G, GORGIUS D. Temperature measurement system for gas insulated transmission lines for an effective load scheduling of underground bulk power transmission [C]. 2005 IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, Durban: IEEE,2005.
- [4] 武胜斌,郑 研,陈志彬. 基于红外测温技术的 GIS 导体温度在线监测的方案[J]. 高压电器,2009,45(4): 100-102,110.
- [5] 陈 强,李庆民,丛浩熹,等. 基于多点分布式光纤光栅的 GIS 隔离开关触头温度在线监测技术[J]. 电工技术学报,2015,30(12): 298-306.
- [6] 罗建华,范镇南,田 劲,等. 三相 GIS 母线损耗发热的电磁场-流场-温度场计算分析[J]. 电站系统工程,2010,26(4): 6-8.
- [7] 武安波,张国刚,王建华,等. 基于磁场-流场-温度场耦合计算的母线槽热性能分析[J]. 电工电能新技术,2002, (3): 62-66.
- [8] 曾 嵘,周佩朋,王 森,等. 接地系统中接触电阻的仿真模型及其影响因素分析[J]. 高电压技术,2010,36(10): 2393-2397.
- [9] JIN L. PENG C. System-level electric field exposure assessment by the fault tree analysis[J]. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**,2017,59(4): 1095-1102.
- [10] 鲍晓华,方 勇,程晓巍,等. 基于三维有限元的大型充水式潜水电机端部涡流损耗[J]. 电工技术学报,2014, 29(7): 83-89.
- [11] PAWAR, S, JOSHI K, ANDREWS L, et al. Application of computational fluid dynamics to reduce the new product development cycle time of the SF₆ gas circuit breaker[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2012, 27(1): 156-163.
- [12] 张森林. GIS 接触电阻与温升关系研究[D]. 北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2015.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

戴伟伟,高 凯,马 利,等. 基于多物理场耦合的 GIS 温升异常状态评估研究[J]. 机电工程,2018,35(6): 623-626.

DAI Wei-wei, GAO Kai, MA Li, et al. Condition assessment of abnormal temperature rise of GIS based on multi-physics coupling[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(6): 623-626.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>