

文章编号:1671-6833(2015)03-0011-05

单相 500 kV GIS 电子式组合互感器发热有限元分析

许 珉¹, 岐召阳¹, 刘 玮², 武 杰²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州供电公司, 河南 郑州 450000)

摘 要: 温度变化会影响电子式互感器的测量准确度, 500 kV GIS 电子式组合互感器通常布置在户外, 在实际运行中由于电阻损耗、太阳照射等因素而温度上升, 甚至超过允许温升, 从而影响其工作性能。为了准确分析其损耗发热问题, 保证其工作的安全性和可靠性, 运用有限元方法, 建立了损耗发热的流场-温度场耦合求解模型, 在综合考虑了太阳照射、外壳环流、气体流动以及重力等因素影响的基础上, 计算分析了其流场和温度场分布规律。结果表明: 温度场分布呈左右基本对称, 上部温度高于下部温度, 最高温度在导体顶部, 最低温度在导体正下方。所得结论对于电子式互感器的散热设计具有一定的参考价值。

关键词: GIS; 电子式组合互感器; 流场; 温度场; 损耗发热

中图分类号: TM451 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.03.003

0 引言

随着智能电网的发展, 作为数字化变电站的重要组成部分, 有关电子式互感器的研究越来越多^[1-2]。电子式互感器具有传统电磁式互感器的全部功能, 由于光电转换技术与数字化处理技术的运用, 使其在绝缘性能、抗饱和性能、安全性、热稳性及动稳定特性等方面比传统的电磁式互感器更具优势。由于电子式互感器中采用了光学器件和有源电子器件, 这些器件的特性容易受到温度影响; 另一方面, 由于 GIS (SF₆ 全封闭组合电器) 电子式组合互感器封闭性好、体积有限、电流较大, 其温升发热问题不可忽视, 所以在实际运行中必须考虑温度对其测量准确度的影响。

IEC 标准中, 对电子式互感器的工作环境温度范围规定为 -5 ~ 40 °C、-25 ~ 40 °C 和 -40 ~ 40 °C^[3-4]。在实际运行过程中, 户外型 GIS 电子式互感器设备内的最高温度可能达到 90 °C, 这么高的温度将会严重影响电子式互感器的测量误差性能。在 GIS 设备的温度计算方面, 由于受到材料特性、几何形状、重力加速度及表面辐射等因素的制约, 使传统的温度计算方法, 如热平衡方程联合传热学解析公式的方法^[5-7]或是散热系数解析计

算与温度场有限元求解相结合的方法^[8-10], 都难以全面把握其散热状况, 从而对温度计算结果造成不利影响。于是, 有人提出了运用有限元建模的方法对 GIS 母线的损耗发热进行分析^[11], 也取得了不错的效果, 但是却忽略了太阳照射对于户外型 GIS 设备温升发热的影响, 而关于 GIS 电子式互感器温升发热的计算鲜见相关报道。

针对以上问题, 笔者在全面考虑以上诸多影响因素的基础上, 以水平放置的单相 500 kV GIS 电子式组合互感器为例, 应用有限元方法建立了损耗发热的流场-温度场耦合求解模型, 计算分析了其流场和温度场分布规律。

1 互感器物理模型

在本文中, 使用 ANSYS 软件中的 FLOTTRAN CFD 模块进行建模, 求解其流场和温度场分布。为了便于求解, 对模型进行简化。导体内部的气体在互感器内热平衡的过程中参与了热传导与热对流, 在模型当中必须予以考虑。同时, 由于绝缘部件对温升发热的影响甚微, 因此模型忽略了互感器内部的绝缘部件, 仅对导体、外壳及 SF₆ 气体进行了建模。笔者以某厂家生产的 500 kV GIS 电子式组合互感器为研究对象, 其物理模型由导体、外

收稿日期: 2015-02-11; 修订日期: 2015-03-19

基金项目: 河南省科技攻关计划资助项目 (132102210403)

作者简介: 许珉 (1956-), 男, 河南开封人, 郑州大学教授, 主要从事电力系统监测与控制研究, E-mail: xumin@zzu.edu.cn.

壳以及互感器内部 SF₆ 气体构成,其求解区域如图 1 所示,具体尺寸及相关参数如表 1 所示.

导体与外壳为铝材,在导体与金属外壳之间的环状封闭空间内以及导体内部,填充气体为 SF₆,额定压力为 0.1 MPa. 此处环境温度取夏季最高温度 40 ℃,日照功率为 1 000 W/m². 根据相关测量数据,对于户外型 GIS 设备,当其外壳材料为铝材时,由于太阳照射使得其外壳表面温度能够达到 70 ℃. 组合互感器中电子式电流互感器的额定电流为 5 000 A,相关的材料特性参照高压电器设计标准选用.

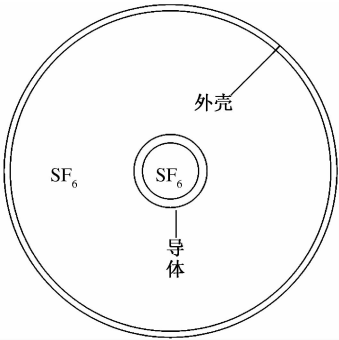


图 1 互感器物理模型
Fig. 1 Physical model of transformer

表 1 互感器模型尺寸

Tab. 1 Model size of transformer

参数	内径/mm	外径/mm
导体	130	160
外壳	672	692

2 流场 - 温度场耦合计算模型

在进行流场与温度场耦合分析时,利用 ANSYS 软件中的 Fluid141 二维平面单元实现流场与温度场的直接耦合,通过有限元方法同时求解热传导、热对流与热辐射方程组,进行稳态、湍流、可压缩流分析. 在求解时,采用自由式、智能网格划分,施加无滑移边界条件,为了提高计算的精确性,在进行温度场分析时考虑了流体物性参数随温度变化的关系.

2.1 互感器中的热平衡

笔者所研究的单相 500 kV GIS 电子式组合互感器中的热平衡过程如下.

(1) 由于电阻损耗发热,主导体与外壳所产生的热量,将由它们内部通过热传导方式传到其外表面.

(2) 当主导体内部的热量传到表面后,其表面温度与周围介质(SF₆ 气体)产生温差,通过对

流作用将部分热量传给附近的 SF₆ 气体,从而使气体温度逐渐上升.

(3) 由于对流作用,当 SF₆ 气体碰到外壳时,将一部分热量传给外壳,使外壳温度升高;又通过热传导方式,热量从外壳的内侧传递到外侧,与周围的介质(空气)产生温差;再通过对流和辐射换热作用,将热量散发到周围的空气中.

2.2 热传导与热对流方程

在二维温度场求解中,该类导体在直角坐标系下的热传导微分方程为

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = -Q_v, \tag{1}$$

式中: λ 为介质导热系数; T 为待求温度; Q_v 为生热率,即单位体积在单位时间内所发的热量.

由于 SF₆ 气体受热不均而形成温差,温差造成气体局部密度不均匀而引起的流动属于自然对流. 互感器外壳与周围空气之间的对流换热属于大空间自然对流,导体与外壳之间的对流换热则属于有限空间自然对流换热. 自然对流换热控制方程由连续性方程、动量微分方程以及能量微分方程构成,具体可分别表述为^[12]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \tag{2}$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right); \tag{3}$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta\Delta T; \tag{4}$$

$$\rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q_v. \tag{5}$$

式中: ρ 、 λ 及 μ 分别表示 SF₆ 气体的密度、导热系数及动力黏度; P 为气体压力; u 、 v 分别为 x 方向与 y 方向气体流速; g 为重力加速度,此处仅包含 y 轴分量; β 为体胀系数; ΔT 为冷热面之间的温差; c 为比热容; Q_v 为体积热源.

2.3 边界条件

热分析中常用的边界条件分为 3 类:第 1 类为物体边界上的温度已知;第 2 类为物体边界上的热流密度已知;第 3 类为与物体相接触的流体介质的温度和换热系数已知. 考虑到辐射换热的影响,在导体外表面与金属外壳的内、外表面还需要施加相应的辐射换热条件.

互感器外壳外表面边界条件:

$$-\lambda \frac{dT}{dx} - \lambda \frac{dT}{dy} = h_1(T - T_0) + \varepsilon_1\sigma(T^4 - T_0^4). \tag{6}$$

导体外表面和外壳内表面之间的边界条件:

$$-\lambda \frac{dT}{dx} - \lambda \frac{dT}{dy} = h_2(T_i - T_s) + \varepsilon_2 \sigma F_{ij}(T_i^4 - T_j^4). \quad (7)$$

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \iint_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j. \quad (8)$$

式中: h_1 、 h_2 为对流换热系数; ε 为辐射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; T_0 为环境温度; T_s 为 SF₆ 气体定性温度; F_{ij} 为角系数; θ_i 与 θ_j 表示两个单元面 A_i 与 A_j 的法线与二者连线的夹角; r 表示单元 i 与单元 j 之间的距离.

外壳外表面的对流换热系数通常采用以下特征数关联式进行计算^[13]:

$$Nu = C (GrPr)^n; \quad (9)$$

$$Gr = g\alpha\Delta TD^3/\nu^2; \quad (10)$$

$$Pr = \nu/a; \quad (11)$$

$$h = Nu \cdot \lambda/D. \quad (12)$$

式中: Nu 为努赛尔数; Gr 为格拉晓夫数; Pr 为普朗特数; C 、 n 为常数,文中分别取为 0.5 与 0.25; g 为重力加速度; α 为体胀系数; ΔT 为外壳与环境温度的差值; D 为外壳外径; ν 为空气的运动黏度; a 为热扩散率; λ 为空气的导热系数.

3 计算结果与分析

由于互感器外壳两端用短路板连成闭合回路,当导体通过电流时,在外壳中感应出的环流近似等于导体电流. 电子式电流互感器的额定电流为 5 000 A,在此计算导体流过额定电流时的流场和温度场分布,分为考虑环流和不考虑环流两种情况进行建模和仿真.

考虑外壳环流时,温度场和流场分布如图 2 所示. 不考虑外壳环流时,温度场和流场分布如图 3 所示.

由温度场分布图可知,无论是否考虑外壳环流,温度场分布都呈左右基本对称,上部温度高于下部温度的分布规律,其中最高温度出现在导体顶部,最低温度出现在导体的正下方.

由气体流动矢量图可以看出:由于互感器模型几何结构的对称性,使得气体流动散热路径在左右两侧基本相同. 导体正上方的气体流动速度最大,为 0.094 7 m/s,气体流动携带了大量的热量上升至此,使其传热过程更加强烈,使得导体顶部的温度最高. 而由于重力对气体流动的影响,使竖直方向上的气体流动呈现回流的形态,这也导致了温度分布上部高于下部的现象. 另外,由于回流作用,导体正下方的气体向下流动,带走了大部分的热量,使得此处的温度最低.

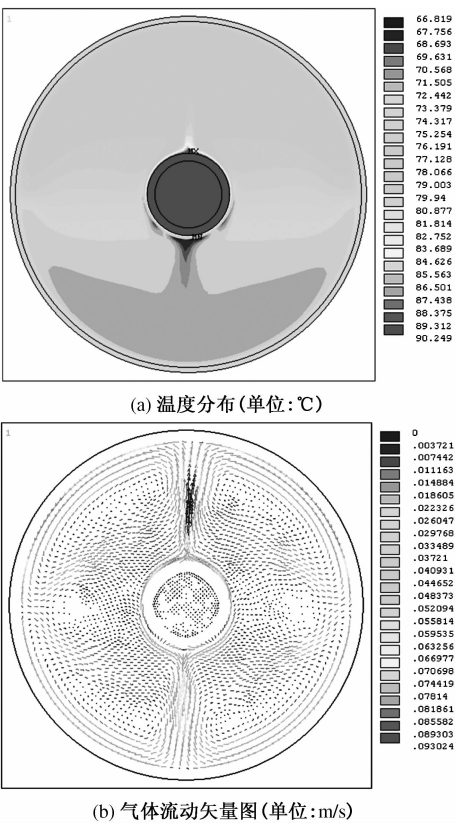


图 2 考虑环流时温度场和流场分布
Fig. 2 Thermal field and fluid field distribution in consideration of current circulation

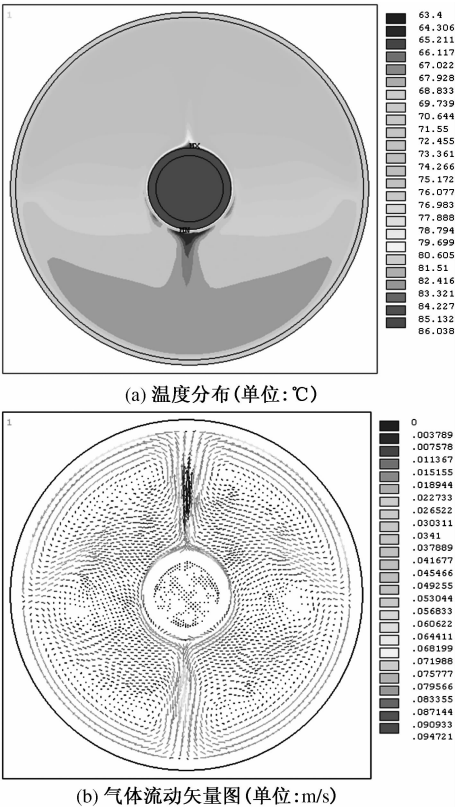


图 3 不考虑环流时温度场和流场分布
Fig. 3 Thermal field and fluid field distribution regardless of current circulation

这和文献[11]中没有考虑太阳照射时,最低温度出现在外壳底部的结果有所不同,原因在于铝是热的良导体,可以迅速传热,考虑太阳照射时,外壳温度分布比较均匀.由温度场分布图可以看出,达到稳态时外壳温度较高,在70℃左右.如此高的温度,容易发生烫伤事故,在现场运行中应有隔离栏等相应的防护措施.

另外,互感器内部环状空间的等温线呈弯曲的S型分布,这是因为在环形空间内部,气体对流换热作用较为强烈,存在较强的回流流动,这从气体流动矢量图上也可以直观地看出.

由图2和图3的温度分布图可知,电流为5 000 A时,考虑外壳环流时的最高温度为90.249℃,不考虑外壳环流时的最高温度为86.038℃,两种情况下最高温度相差4.211℃.所以在进行GIS电子式组合互感器的温度场计算和分析时,必须考虑外壳环流的影响.

将发热温度计算结果与实测结果进行对比,选取导体温度最高位置,即导体顶部,作为测量点.对比结果如下:实测值89.5℃,计算值为90.249℃,误差为0.83%,可以看出该计算方法具有较高的精确度.

在GIS装置相关标准中规定温升极限时,主要的对象是针对主导体部分和外壳,我国国标中规定的高压GIS设备的温升极限值如表2所示.所研究的GIS电子式组合互感器的导体和外壳均为铝材,导体允许最大温升为115℃,外壳允许最大温升为80℃.可以看出,该厂所生产的单相500 kV GIS电子式组合互感器可以满足温升发热要求.

表2 高压GIS设备的温升极限值^[14]

Tab.2 The maximum temperature-rise of high voltage GIS equipments

部件类别	工作状态	温度的最大值/℃
裸铜、裸铜合金或裸铝合金	在空气中	90
	在SF ₆ 中	115
	在油中	100
可触及的部件	在正常操作中可触及	70
	在正常操作中不需触及	80

4 结论

笔者在综合考虑太阳照射、外壳环流、气体流动以及重力等因素影响的基础上,建立了单相500 kV GIS电子式组合互感器损耗发热的流场-

温度场耦合求解模型,得出了以下结论:

(1)由于互感器模型几何结构对称,导致气体流动散热路径左右两侧基本相同,从而使温度分布左右基本对称.

(2)由于重力对气体流动的影响,对水平放置的单相GIS电子式组合互感器而言,内部空间温度呈上高下低的分布规律,同时由于考虑了太阳照射使外壳温度升高的影响,最高温度出现在导体顶部,最低温度出现在导体的正下方.

(3)温度变化会影响电子式互感器的测量准确度,笔者计算了当电流为额定电流5 000 A时互感器的温度场分布,所得出的结论对电子式互感器的散热设计具有一定的参考价值.

(4)在后续的研究工作中,计划将本文的仿真计算结果与GIS电子式组合互感器的温度特性试验进一步结合,获取更加丰富的测量数据,为电子式互感器的散热设计提供更加详尽可信的依据.

参考文献:

[1] 蒋汉儒,易灿江,刘华,等. 新型电子式组合互感器研究[J]. 高压电器,2013,49(1):77-80.

[2] 李洪涛,张巍,刘忠战. 220 kV 组合电子式互感器原理结构及挂网试验[J]. 高压电器,2011,47(8):112-116.

[3] IEC. IEC 60044-7—1999 Instrument transformer-part7: Electronic voltage transformer[S].

[4] IEC. IEC 60044-8—2002 Instrument transformer-part8: Electronic current transformer[S].

[5] 刘绍峻. GIS的热计算(Ⅰ)[J]. 华通技术,1993(3):2-4.

[6] 刘绍峻. GIS的热计算(Ⅱ)[J]. 华通技术,1994(1):10-15.

[7] 刘绍峻. GIS的热计算(Ⅲ)[J]. 华通技术,1994(3):7-14.

[8] KIM S W, KIM H H, HAHN S C. Coupled finite element-analytic technique for prediction of temperature rise in power apparatus [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2002,38(2):921-924.

[9] KIM J K, HAHN S C, PARK K Y, et al. Temperature rise prediction of EHV GIS bus bar by coupled magnetic-thermal finite element method [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2005,41(5):1636-1639.

[10] LABRIDIS D, HATZIATHANASSIOU V. Finite element computation of field force and inductance in underground SF₆ insulated cables using a coupled magnetic-thermal formulation [J]. IEEE Transactions on

Power Delivery,1994,30(4):1407-1415.

[11] 范镇南,张德威,陈显坡,等. GIS 母线损耗发热状况的电磁场与流场计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊):241-244.

[12] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001:242-243.

[13] 赵镇南. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2008: 220-223.

[14] 宋帆. 特高压 GIS 设备的涡流及其相关问题的研究 [D]. 沈阳:沈阳工业大学电气工程学院,2009:190-191.

Finite Element Calculation about the Heat of Single-phase
500 kV GIS Electronic Combined Transformer

XU Min¹, QI Zhao-yang¹, LIU Wei², WU Jie²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The variation of temperature may influence the measuring accuracy of electronic transformer. 500kV GIS electronic combined transformer is usually arranged in the open air, so the temperature will rise because of factors such as resistance loss, sun exposure, etc, even exceed the permitted temperature in practical operation, which will influence its work performance. To analyze its loss and heat accurately and ensure the safety and reliability of its operation, a fluid-thermal coupled solution model was established by using finite element method, which calculated and analyzed the distribution regularities of the fluid field and thermal field in consideration of factors such as sun exposure, shell current circulation, gas flow and gravity. The results show that thermal field distribution has the geometric regularity of basic symmetry on both sides and upper temperature is higher than the lower temperature. The highest temperature appears on the top of the conductor and the lowest temperature appears directly below the conductor. The conclusions can provide some reference for the heat dissipation design of electronic transformer.

Key words: GIS;electronic combined transformer;fluid field;thermal field;loss and heat