

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.12.006

气体绝缘开关柜多物理耦合场仿真及分析

付鲁军, 陈雪飞, 辛昭昭, 赵 鑫
(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 气体绝缘开关柜(C-GIS)的导电回路封闭在充有绝缘气体的隔室内。由于隔室内气体不能有效地与外界空气进行热交换,因此内部热量难于散出,特别是大电流的气体绝缘开关柜尤为突出。因此大电流气体绝缘开关柜的发热成为设备制造企业和用户共同关注的问题。文中采用多物理场耦合方法对充入干燥空气的气体绝缘开关柜进行了温度仿真,分析了内部温度分布特性,并将温升试验结果与仿真结果进行了对比,验证了该仿真方法的准确性,为气体绝缘开关柜散热优化设计提供了依据。

关键词: 气体绝缘; 开关柜; 温度; 仿真

Coupling Field Simulation and Analysis of Gas Insulated Switchgear

FU Lujun, CHEN Xuefei, XIN Zhaozhao, ZHAO Chu
(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The conductor circuit of gas insulated switchgear is sealed in the gas chamber. The inner heat can not be effectively exchanged with outer air so the heat couldn't dissipate. Especially when the current is very large. Therefore the temperature-rise of gas insulated switchgear is becoming a focus for manufactures and users. In this paper we simulated a 3-D model of dry air insulated switchgear by coupling field approach and analyzed the properties of inner heat distribution identified the accuracy of simulation by comparing the data of temperature-rise between experiment and simulation and provided the evidences of optimized design for gas insulated switchgear heat dissipation.

Key words: gas insulation; switchgear; temperature; simulation

0 引言

随着中国电网的不断发展,对开关设备提出了更高的要求,具有不受外界环境影响、可靠性高的气体绝缘开关柜在配电网中应用越来越多。导电回路密封在气室(将导体、绝缘件等元件安装在气箱内部)内是气体绝缘开关柜不受环境影响提高可靠性的关键,由于导电回路周围的气体被密封在气室内部,只能通过气箱与外部空气进行热交换,气室内部的热量如何高效地传递到气箱,需要了解气室内的温度分布情况。开关柜在运行时都会发热,如果发热问题不能很好的控制将导致气室内部零部件温度过高,造成材料的物理、化学性能变化,机械性能和电气性能下降,甚至引发故障^[1-4]。随着计

算机技术的迅速发展,有限元分析越来越多地应用于仿真模拟来求解工程问题。传统的基于单独传热和热流仿真的解析算法均不能准确的描述气室内部温度的分布情况。国内外在温度仿真中主要采用通过电磁场、流体及热场多物理场耦合方法^[5-7],该方法可以精确地分析设备的温度分布特性,对于设备结构优化以及降温优化设计具有重要意义^[8-11]。

文中以一台额定电流2 000 A的SF₆气体绝缘开关柜(简称开关柜)为研究对象,采用多物理场耦合方法进行仿真,通过温升试验和仿真结果来对比气室内部温度分布特性,从而验证仿真方法的准确性。

1 开关柜发热估算

开关柜的基本结构见图1,柜体外型尺寸为:

800 mm×2 100 mm×1 400 mm(宽×高×深),两个气箱总和尺寸约为:800 mm×1 500 mm×1 000 mm(宽×高×深)。

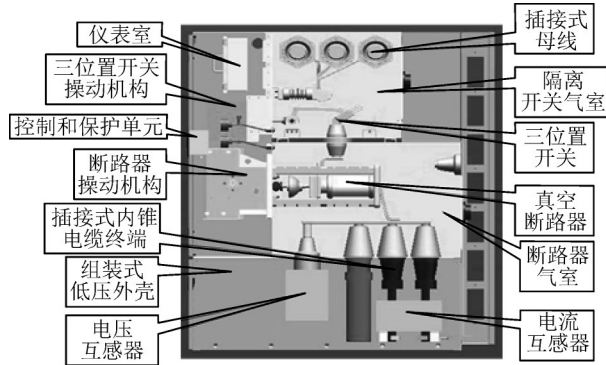


图1 开关柜结构

Fig. 1 Structure of switchgear cabinet

由于开关柜的导电回路封闭在气室内部,可以将气室看作一个整体,通过气箱表面温度来估算开关柜的整体发热功率。开关柜在热平衡的情况下,内部的热功率 P 等于辐射功率 P_r 与对流散热功率 P_c 的和,这就是热平衡方程式^[12]。

$$P = P_r + P_c \quad (1)$$

对于辐射热功率 P_r

$$P_r = 5.67 \times 10^{-8} S_c \varepsilon [(273 + T_1)^4 - (273 + T_2)^4] \quad (2)$$

式(2)中: S_c 为辐射表面积, m^2 ;发热体温度, $^{\circ}C$; T_2 为受热体温度, $^{\circ}C$; ε 为辐射系数。

在空气中自然对流情况下的散热功率 P_c 。

$$P_c = 1.86 S_c \Delta \theta^{1.25} \quad (3)$$

式(3)中: S_c 为对流表面积, m^2 ; $\Delta \theta$ 为散热面与周围空气温度差。

对密封式开关柜,散热面积的选取方法为

$$S_c = S_{side} + 1.33 S_{top} + 0.67 S_{bottom} \quad (4)$$

式(4)中: S_{side} 为开关柜侧面积, m^2 ; S_{top} 为开关柜顶面积, m^2 ; S_{bottom} 为开关柜低面积, m^2 。

该开关柜2 500 A温升试验测得气箱表面平均温度为65.1 $^{\circ}C$,环境温度为31.2 $^{\circ}C$ 。根据式(1)–(4)可以估算出辐射功率 $P_r = 716$ W,对流散热功率 $P_c = 1 068.9$ W,开关柜整体发热功率为 $P = 1 784.9$ W。由估算结果可以看出开关柜的辐射功率占整体发热功率40.1%^[13],因此在设计过程中对于辐射功率的考虑不可忽视。

2 开关柜发热仿真

在开关柜温度仿真前,需要准确定位开关柜的发热热源,热源的分布及大小直接决定了开关柜的温度分布,发热仿真就是为了提供温度仿真的热源输入,从而实现电磁场到热流场的发热传递和加载^[14],

磁—热流场耦合过程见图2。开关柜在正常工作时的发热热源包括:载流导体的发热、电接触发热、磁性材料的涡流和磁滞发热、绝缘材料中的介质发热等^[15–16]。在更复杂的计算中,可能还需要考虑柜外设备的发热以及自然环境中太阳辐射等热源形式。文中仿真中只考虑开关柜内部热源,且由于绝缘材料介质发热很小,对其影响进行忽略。

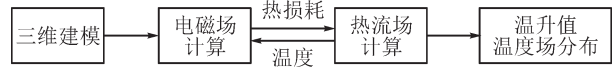


图2 磁—热流场耦合过程

Fig. 2 Magnet-heat flow field coupling process

开关柜正常工作在工频交流状态下,各类母排、断路器动/静端及触头、隔离开关触座及触指等载流导体,都会因为集肤效应、邻近效应、感应涡流等引起电流密度的不均匀分布^[17]。同时,如采用高导磁性材料其感应发热也是不容忽视的。对于电接触发热,电流流过触头的接触处时电流的收缩,导致电流密度增加、发热增大,接触处的发热远高于导体的发热^[18];由于装配等因素的影响,实际接触电阻的准确计算非常困难,文中结合实测数据,并采用等效接触电阻建模方式加以处理。

仿真模型见图3,A、B、C三相上部母排差异较大。根据理论分析及既往经验,文中对模型做了适当简化,去掉了发热很小的部分金属件及绝缘支撑,对部分结构进行适当的规则化,但保留主要发热体及关键特征。

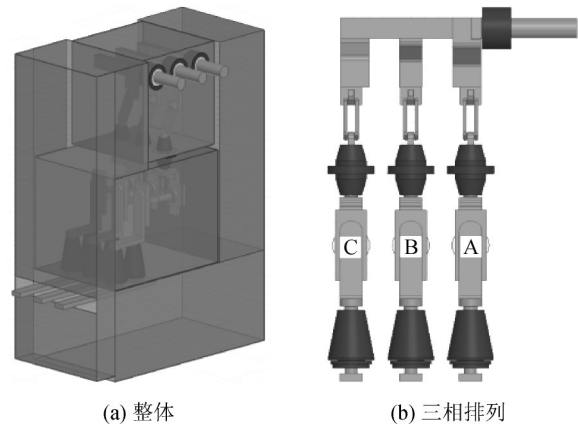


图3 仿真模型

Fig. 3 Side view of simulation model

文中采用Ansys Maxwell电磁场仿真工具,Maxwell软件支持多种CAD格式的导入,且提供了多种网格划分工具以及强大的自适应功能,保证电接触等重点区域网格划分的精确性。同时软件自带常用材料库供仿真选择,并且通过自定义功能保证材料设定更符合实际和更加灵活。电磁场仿真中主要金属材料参数见表1^[19]。

表1 主要金属材料参数

Table 1 Parameter of metal material

部件	电导率/ ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	相对磁 导率	质量密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
铜件(母排、触座、 触指等)	58 000 000	0.999 991	8 933
不锈钢件(触头 盒、箱体等)	1 100 000	1.000 000	8 055

考虑开关柜并柜使用和温升试验要求,在计算时开关柜模型左右侧增加了一层隔热层。各相电流有效值取 2 500 A,设置相应磁场边界,并对导电回路导体、电接触等部位进行重点网格加密。B 相导电回路截面上磁通密度分布见图 4。

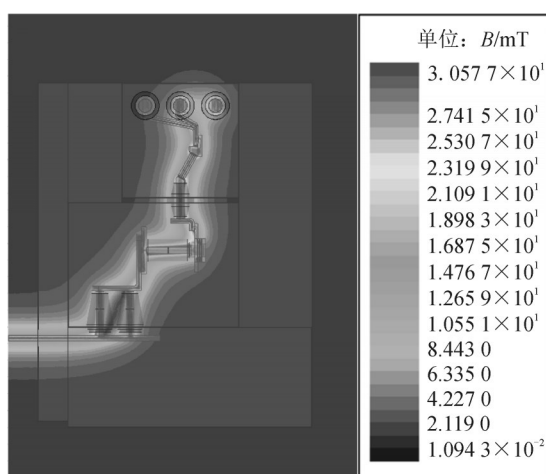


图4 磁通密度分布

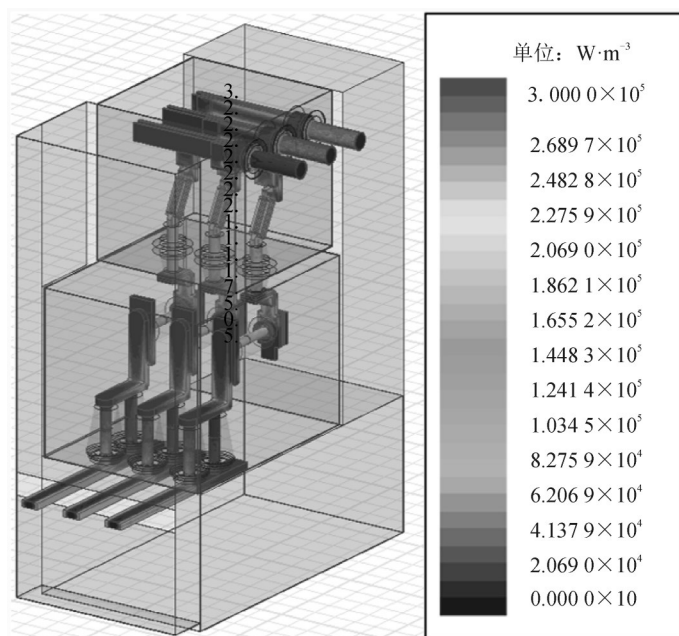
Fig. 4 Distribution of magnetic flux density

仿真所得的导电回路及气箱发热功率分布见图 5,相应的可以统计出各部件的发热功率值。导电回路中 A、B、C 三相结构基本相同,只是上部母线结构差异较大,开关柜整体发热功率情况见表 2,开关柜的总发热功率为 1 742 W,各相单独发热功率在 560 W 左右。

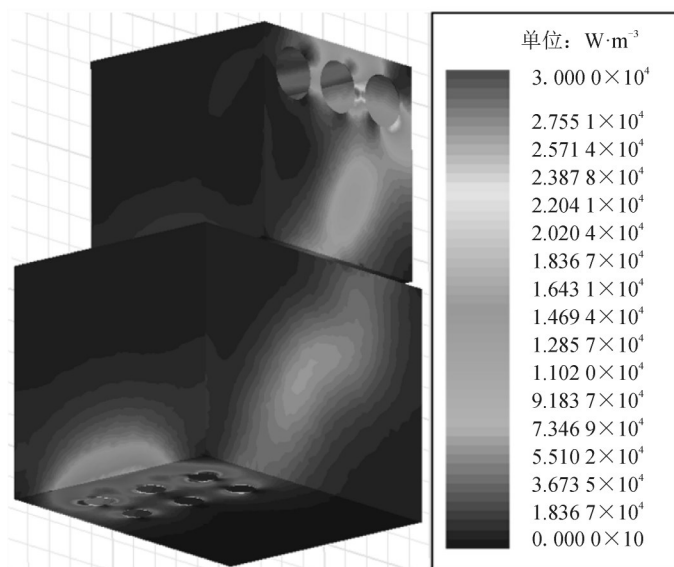
按照自上而下的顺序(母线—隔离开关—断路器—出线)对中相(B相)按部件及接触进行发热功率统计,得到的变化趋势见图 6。发热功率极值点出现在隔离触座与触指接触、隔离触指与穿墙导杆接触、断路器断口等处。仿真计算的开关柜整体发热功率为 1 742.3 W,开关柜整体发热功率估算为 $P=1\,784.9\text{ W}$,两者相差 42.6 W,采用等效接触电阻建模方式加以处理能够满足工程应用。

3 开关柜温度仿真

开关柜的热流场仿真模型主要包括产生发热的导体和接触、断路器气箱、隔离开关气箱和开关外壳。根据仿真需求,还需要在柜体外部添加空气



(a) 导电回路发热功率



(b) 气箱发热功率

图5 发热功率分布

Fig. 5 Distribution of heating power

表2 开关柜整体发热功率情况

Table 2 Heating power of switchgear

部件名称	发热功率/W
开关柜整体发热功率	1 742.3
断路器气箱发热功率	24.3
隔离开关气箱发热功率	23.6
三相导电回路发热功率	1 694.4
A 相发热功率	556.4
B 相发热功率	570.5
C 相发热功率	567.5

域,对于磁场和热流场的仿真,空气域大小可以不同。因为开关柜中的主要发热源是气室内的导体和接触,所以对外壳中的配件(如:操动机构、仪表、互感器等)做了简化处理。同时对气室内的螺钉和尖角等不影响仿真的不规则形状进行了优化处理^[20]。

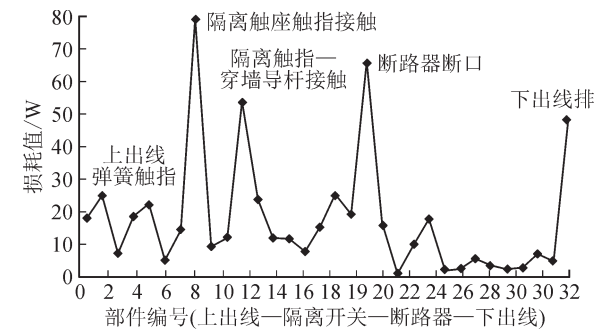


图6 B相发热功率变化趋势
Fig. 6 Tendency of heating power in phase B

基于 Ansys 多物理耦合场平台,可将电磁仿真结果以发热功率形式按网格节点导入流体仿真模型中,见图7,作为体积热源,这一导入保持了各部件发热功率的不均匀分布特性。

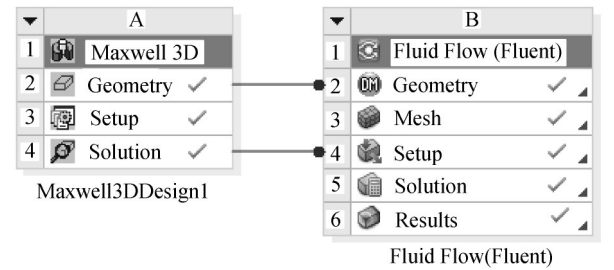


图7 发热功率的数据传递过程
Fig. 7 Transmission of heating power's data

由于开关柜结构复杂,整体结构尺寸较大,而局部结构尺寸(电接触)又较小,尺寸差别较大。采用非结构化网格进行网格剖分,对气室内重点区域进行加密等精细化处理,同时生成棱柱边界层网格来满足流体仿真中边界层精度要求。由于开关柜气箱钢板厚度只有3 mm,且钢板厚度对温度仿真结果没有明显影响,所以采用无厚度壁面进行简化处理,导入到求解软件之后设置为交界面薄壁材料进行模拟。见图8,对几何模型进行流场网格划分,并考虑流场的边界层网格,网格量达到4 300万,网格质量0.2以上,满足仿真要求。

开关柜的温度仿真主要以自然对流散热的形式进行,根据估算结果仿真计算还需要考虑辐射传热。文中电磁—热—流场耦合计算方法,需要在 Workbench 中进行数据传递,将通过电磁软件仿真得到的发热功率,传递到流体仿真软件 Fluent 中。在仿真中根据 Ra 数确定流动形式为湍流,选择

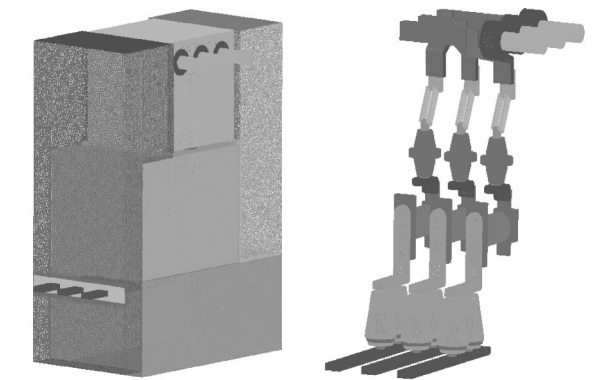


图8 仿真模型网格
Fig. 8 Mesh of simulation model

Realizable k - ε 湍流模型并以增强型壁面函数作为气、固界面的边界条件,添加 DO 辐射模型和重力模型进行计算,设置空气的参考密度为 1.211 kg/m^3 ,设置初始温度为 $31 \text{ }^\circ\text{C}$,采用二阶迎风格式计算^[21]。在外壳中选取 Boussinesq 模型来计算,膨胀系数为 0.003 3 。其余流体域采用密度为温度函数关系拟合成的多项式为

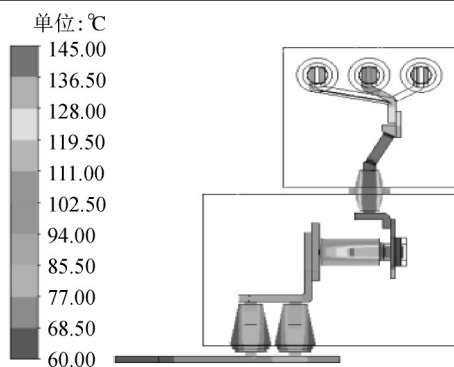
$$y=a+bx^1+cx^2+dx^3+ex^4 \tag{5}$$

式(5)中, y 表示各物性参数,多项式的系数见表3。设置铜、环氧树脂和镀铝锌钢板的物理参数见表4^[22]。

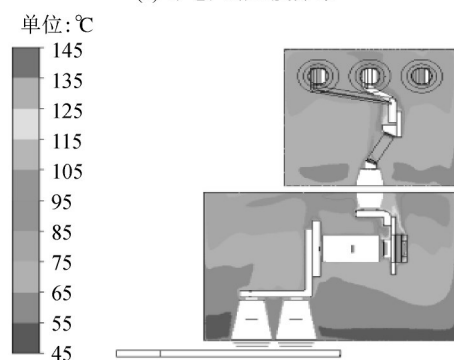
表3 空气物理参数表				
Table 3 Mesh of simulation model				
系数	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热/ [$\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	比热/ [$\text{kJ}(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	粘度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
a	4.384	3.238×10^{-3}		-6.068×10^{-6}
b	2.043×10^{-2}	7.665×10^{-5}		5.155×10^{-8}
c	4.645×10^{-5}	8.216×10^{-9}	1 009	5.897×10^{-11}
d	5.156×10^{-8}	-1.655×10^{-11}		1.790×10^{-14}
e	2.236×10^{-11}	-6.959×10^{-15}		0.000

表4 各材料物理参数			
Table 4 Physical properties of materials			
材料	铜	环氧树脂	钢板
热导率/[$\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	392.000	0.276	46.000
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	8.90	0.98	7.80
比热容/[$\text{J}(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$]	0.39	1.40	0.50

温度分布见图9,导电回路温度分布和气室内气体温度分布,导电回路上隔离开关至穿墙套管处导体温度最高达到 $145 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这是由于隔离开关处的发热量最大,同时穿墙套管处的散热条件较差所导致。流线分布见图10,两个气室内的气体温度呈现上高下低的现象;这是由于受到了流场的影响,高温气体聚积在气室上部导致的。



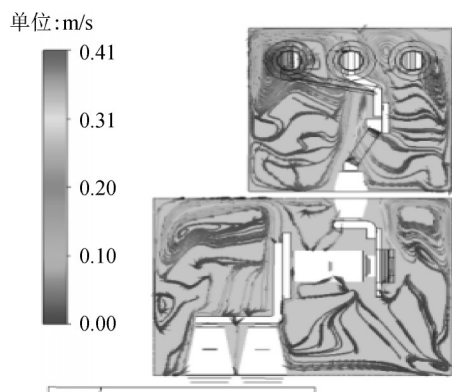
(a) 导电回路温度分布



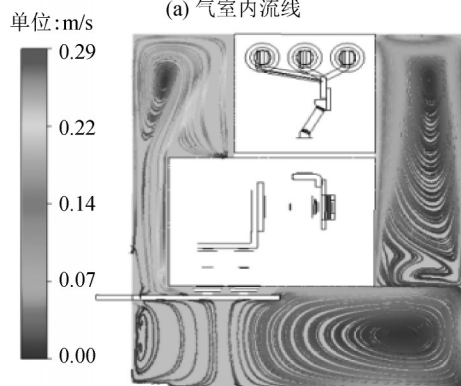
(b) 气室内气体温度分布

图9 温度分布

Fig. 9 Distribution of temperature



(a) 气室内流线



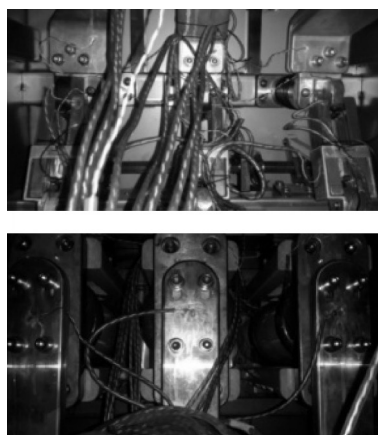
(b) 外壳内流线

图10 流线分布

Fig. 10 Distribution of streamline

4 开关柜温升试验

为了验证该多物理耦合场仿真方法的准确性,在一台与仿真模型一致的开关柜上进行温升试验。为了考虑并柜的影响,柜体外表面覆盖有10 mm厚度的发泡海绵板^[23-24]。温升试验现场布置见图11,开关柜温度测量点分布见图12。



(a) 隔离开关和断路器温度测点照片



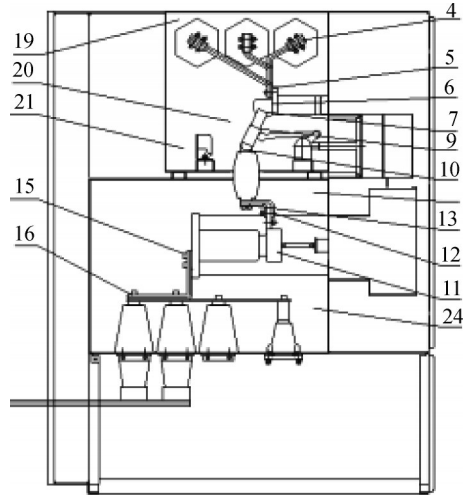
(b) 开关柜温升试验布置照片

图11 温升试验现场布置

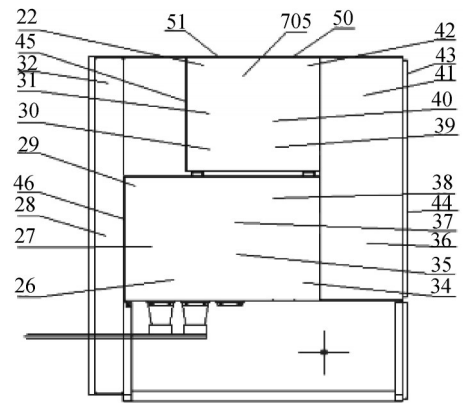
Fig. 11 Setup of temperature-rise experiment

在进行温升试验时,由于通电初期各个测量点的温度从环境温度逐渐上升且上升率较大,因此笔者在温度试验通电3.5 h后开始记录每个测温点的数据,并每隔0.5 h进行记录一次,直到各个测温点的温度稳定,整个试验过程持续了8 h。试验环温曲线见图13,通过3个测温点测得的平均环境温度为31.2℃。

气室内导体连接处测温点的温度变化曲线,见图14。其中测量点4为母排与母线连接绝缘子处的连接点,测量点7和10为隔离开关两侧可动处连接点,测量点11和15为断路器动、静两端连接点,测量点16为出线绝缘子连接点。



(a) 气室内温度测量点分布



(b) 气箱表面温度测温点分布

图12 开关柜温度测量点分布

Fig. 12 Distribution of temperature measurement point

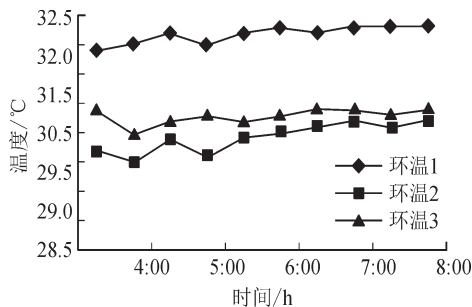


图13 环境温度变化曲线

Fig. 13 Curve of environment temperature change

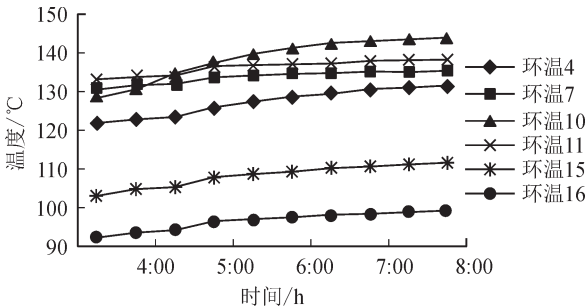


图14 导体连接处温度变化曲线

Fig. 14 Curve of joint of conductor temperature change

气室内部气体温度变化曲线,见图15。其中隔离开关气室内气体的测量点为19和21,断路器气室内气体的测量点为23和24;测量点19和23分别位于气室上部,测量点21和24分别位于气室下部。

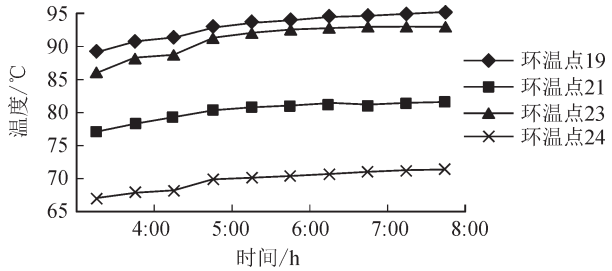


图15 气室内部气体温度变化曲线

Fig. 15 Curve of gas temperature change in chamber

气箱表面温度变化曲线见图16。其中隔离开关气箱表面的测量点为30和42,断路器气箱表面的测量点为26和38;测量点38和42分别位于气箱上部,测量点26和30分别位于气箱下部。

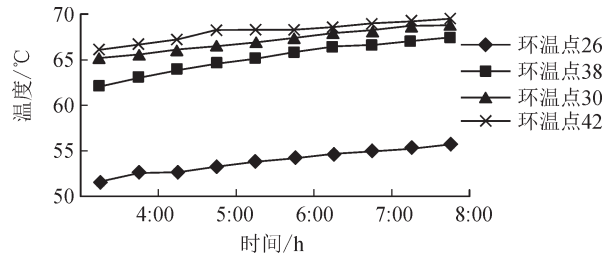


图16 气箱表面温度变化曲线

Fig. 16 Curve of surface temperature change

5 对比分析

温升试验的样机和试验条件是根据仿真模型和设置边界条件经过长时间通流,开关柜各测温点的温度已经稳定。由于温升试验测温点较多,笔者从众多测温点选取较为关注的几个点进行数据比较,其试验实测温度和仿真温度分布情况,见图17。

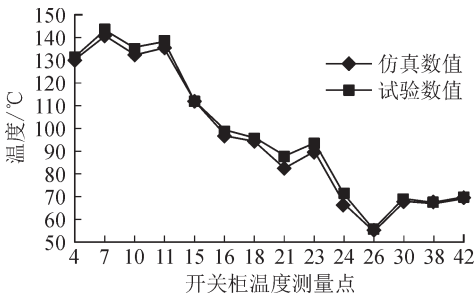


图17 试验实测温度和仿真温度

Fig. 17 Distribution of temperature between measurement and simulation

从导体温度分布来看,温度最高的点主要集中在隔离开关两侧(7和10)和断路器的动端(11),这是

因为这几处均是可动连接点,且接触电阻较大、发热比较高;由于气室上部气体温度较高不利于导体散热,因此固定测量点4的温度也较高;位于气室下部的气体温度较低,有利于导体散热,因此固定测量点15和16,相对温度较低。从气室内部气体温度分布来看,位于气室上部的温度要明显高于气室下部的温度,隔离开关气室内气体的平均温度高于断路器气室内气体的平均温度。从气箱表面温度分布可以看出,不论是断路器还是隔离开关的气箱表面与气室内部的导体/气体之间的温差过大,热量主要集中在气室内部,热量没有通过气箱表面较好的对外散出,这是由于气箱上没有加装散热元件,热量无法高效率的传递至外界空气所导致的。这些结果与仿真结果是一致的。

试验实测温度和仿真温度差值是温升试验在各个测温点所测得温度数值减去仿真计算结果所对应各点得计算数值,见图18。

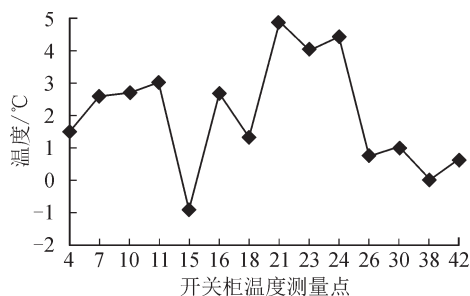


图18 试验实测温度和仿真温度差值

Fig. 18 Deviation distribution of temperature between measurement and simulation

由试验实测温度和仿真温度差值图可以看出气室内部气体测温点21的温度值与仿真结果差值最大为5°,这是由于在试验过程中内部测温点和读取仿真分布的数值点的位置存在一定的偏差;气箱表面的测温点38的温度值与仿真结果误差小于1°;导电回路表面的测温点4~16的温度值与仿真结果误差小于3°。

6 结论

文中研究了气体绝缘开关柜多物理耦合场仿真方法,通过解析计算及有限元电磁场分析,将开关柜电磁发热作为热源以及边界条件加载至流体—温度场的分析中,实现多物理场的耦合分析计算。采用流体分析软件对开关柜进行流体—温度场数值仿真,得到开关柜三维温度场和气流场的仿真结果,并对三维温度场的温度分布特性进行了分析。通过开关柜温升试验结果验证了采用多物理耦合场仿真的可行性和准确度,得出以下结论:

1)内部绝缘气体被密封在气室内,导体辐射功率占整体发热功率40.1%,在气体绝缘开关柜温度仿真过程中对于辐射功率不可忽视。

2)开关柜整体发热功率仿真计算为1 742.3 W,公式估算为1 784.9 W,两者相差42.6 W,采用等效接触电阻建模方式加以处理能够满足工程应用。

3)在气体绝缘开关柜温度仿真时,气室内部绝缘气体的密度、导热、比热、粘度等物性参数随温度变化特性需要在温度仿真中迭代计算。

4)温度最高的点主要集中在可动连接点处,由于接触电阻较大、发热比较高;两个气室内的气体温度呈现上高下低的现象,这是由于受到了流场的影响,高温气体聚积在柜内上部导致的。

5)气箱表面温度与气室内部的导体/气体之间的温差过大,热量主要集中在气室内部,热量没有通过气箱表面较好地对外散出,热量无法高效率的传递至外界空气。

6)将试验结果和仿真结果进行了对比分析,开关柜整体温度仿真数值与试验结果最大误差在5°以内。其中气室内部气体的测温点的温度值与仿真结果误差为5°,气箱表面的测温点的温度值与仿真结果误差小于1°,导电回路表面的测温点的温度值与仿真结果误差小于3°。开关柜整体温度仿真能够满足工程设计的需求。

参考文献:

- [1] 丁 健. 金属封闭高压开关柜触头发热机理分析及预防过热故障措施探讨[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 114-117.
DING Jian. Heating mechanism analysis on metal - enclosed high voltage switchgear contact with measures to prevent overheating[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 114-117.
- [2] 巩宪锋, 衣红钢, 王长松, 等. 高压开关柜隔离触头温度监测研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 155-158.
GONG Xianfeng, YI Honggang, WANG Changsong, et al. Research on temperature monitoring of isolators in HV switchgear[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(1): 155-158.
- [3] 田 毅, 黄新波. 高压开关柜温升在线监测系统[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 64-67.
TIAN Yi, HUANG Xinbo. On-line monitoring system of temperature inside HV switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 64-67.
- [4] 候 静. 基于光纤测温的高压开关柜温度故障预警[D]. 济南: 山东大学, 2009.
HOU Jing. High-voltage switch assemblies temperature breakdown early warning based on fiber optic temperature measurement[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [5] 范春桥. 10 kV干式变压器温度场仿真计算与寿命评估

- [D]. 北京:华北电力大学, 2012:25-26.
- FAN Chunqiao. The simulation of temperature field and life assessment of 10 kV dry - type transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012:25-26.
- [6] 熊 兰, 赵艳龙, 杨子康, 等. 树脂浇注干式变压器温升分析与计算[J]. 高电压技术, 2013, 39(2):265-271.
- XIONG Lan, ZHAO Yanlong, YANG Zikang, et al. Temperature rise analysis and calculation of cast resin dry-type transformers[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):265-271.
- [7] 纽春萍, 陈德桂, 刘颖异, 等. 交流接触器温度场仿真及影响因素的分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5):71-77.
- NIU Chunping, CHEN Degui, LIU Yingyi, et al. Temperature field simulation of AC contactor and analysis of its influence factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5):71-77.
- [8] 李 晶, 满家健, 周电波, 等. 金属封闭高压开关柜手车触头温度场仿真分析及实验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(8):74-79.
- LI Jing, MAN Jiajian, ZHOU Dianbo, et al. Simulation analysis and experimental research on temperature distribution of metal-enclosed high voltage switchgear handcart contactor[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8):74-79.
- [9] 徐立群, 申 亮, 倪福生. KYN28A-12kV/4000A 开关柜的结构改进与温度场分析[J]. 高压电器, 2017, 53(3):254-258.
- XU Liqun, SHEN Liang, NI Fusheng. Structure modification and temperature field analysis of KYN28A - 12kV/4000A switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):254-258.
- [10] 张俊民, 侯振华, 张春朋, 等. 27.5 kV GIS 母线室三维温度场的数值计算[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12):62-67.
- ZHANG Junmin, HOU Zhenhua, ZHANG Chunpeng, et al. Three dimensional thermal field numerical calculation of 27.5 kV gas-insulated switchgear bus bar's cabinet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12):62-67.
- [11] 赵力楠, 赵力鹏. 真空发电机断路器用铝支架的设计和发热仿真计算的试验验证[J]. 高压电器, 2012, 48(9):63-66.
- ZHAO Linan, ZHAO Lipeng. Design of the aluminum frame of GCB and experimental verification of the heat simulation[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9):63-66.
- [12] 钱家骊, 袁大陆, 杨丽华, 等. 高压开关柜-结构计算运行发展[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- QIAN Jiali, YUAN Dalu, YANG Lihua, et al. High voltage switchgear-structure calculation operation development[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2007.
- [13] 郭 庆, 郭建炎, 杨长洲, 等. 12 kV 气体绝缘开关柜热分析[J]. 电器与能效管理技术, 2017(21):48-53.
- GUO Qing, GUO Jianyan, YANG Changzhou, et al. Thermal analysis of 12 kV gas insulated switchgear[J]. Electrical & Energy Management, 2017(21):48-53.
- [14] 康添慧. 高压 GIS 多物理耦合场分析及温度监测系统的研发[D]. 长沙:湖南大学, 2014:6-8.
- KANG Tianhui. Analysis of coupling field for high voltage GIS and development of the temperature monitoring system [D]. Changsha: Hunan University, 2014:6-8.
- [15] 辛昭昭, 张京业, 张润理, 等. 1 MJ 高温超导储能-限流磁体导冷件涡流损耗的计算分析[J]. 低温与超导, 2015, 43(8):1-7.
- XIN Zhaozhao, ZHANG Jingye, ZHANG Runli, et al. Electromagnetic optimal design of a 1 MJ HTS magnet for SMES-FCL[J]. Cryo. & Supercond, 2015, 43(8):1-7.
- [16] 王秉政, 江健武, 赵 灵, 等. 高压开关柜接触发热温度场数值计算[J]. 高压电器, 2013, 49(12):42-48.
- WABG Bingzheng, JIANG Jianwu, ZHAO Ling, et al. Temperature field simulation of contact heating in high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12):42-48.
- [17] 黎 斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- LI Bin. SF₆ high voltage apparatus design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009.
- [18] 何荣涛. 基于自然对流作用的开关柜热仿真及改进设计[J]. 电气开关, 2017(6):27-30.
- HE Rongtao. Thermal simulation and design improvements of the switchgear based on the natural convection[J]. Electric Switchgear, 2017(6):27-30.
- [19] 许国政. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2010:46-63.
- XU Guozheng. Principle and application of high voltage breaker[M]. Beijing:Qinghua University Press, 2010:46-63.
- [20] 纪兵兵, 陈金瓶. Ansys ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- JI Bingbing, CHEN Jingping. Detail examples on mesh generation in Ansys ICEM CFD[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012.
- [21] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- TAO Wenqun. Heat transfer theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [22] 任君鹏, 王 栋, 杜志叶, 等. 强迫空气冷却高压开关柜三维气流-温升仿真分析[J]. 高压电器, 2017, 53(3):12-17.
- REN Junpeng, WANG Dong, DU Zhiye et al. Simulation analysis of 3-D airflow-temperature rise for high-voltage switchgear under forced air cooling[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):12-17.
- [23] 贾一凡, 王 博, 陆 瑶, 等. 开关柜温升试验方法研究[J]. 高压电器, 2013, 49(8):87-91.
- JIA Yifan, WANG Bo, LU Yao, et al. Research on temperature-rise test method of switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8):87-91.
- [24] 赵焕敏, 姚永其. 高压开关温升试验方法浅谈[J]. 科技视界, 2012(9):237-238.
- ZHAO Huanmin, YAO Yongqi. On temperature - rise test method of HV switchgear[J]. Science & Technology Vision, 2012(9):237-238.
- 付鲁军(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事中高压开关设备研究和产品设计。