

# 不同散热条件对开关柜母线室温度分布影响探究

彭诗怡, 阮江军, 杜志叶, 任君鹏, 陈荆洲  
(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 开关柜的温度场仿真计算对开关柜的运行检修与设计具有重大指导意义,但由于开关柜模型复杂,计算量大,在现有仿真计算中常忽略热辐射过程以提高计算效率,缺乏对网格剖分的精细化控制,对风机开启下的强迫对流散热效果也缺乏直观对比。因此,本文以开关柜的典型结构——母线室为研究对象,建立精细三维模型,利用 ICEM 软件对网格进行局部控制的优化剖分,再将模型导入 CFX 软件进行温度-流体场仿真计算与分析,探究热辐射散热与风机对流散热对开关柜内部温度分布规律的影响,结果表明热辐射散热使母排温度下降,柜体角落处温度明显上升,整体分布更加均匀;风机散热使母线室内部流速激增,降温效果明显,并通过实验验证了仿真计算的准确性。

**关键词:** 高压开关柜; 热辐射; 网格剖分; 温度场; 流体场

**DOI:** 10.12067/ATEEE1711029      **文章编号:** 1003-3076(2018)08-0048-10      **中图分类号:** TM591

## 1 引言

随着人们对于电能的需求与依赖性不断增长,电力系统供电的可靠性逐渐成为关注的重点。开关柜作为实现电能分配和控制的电气元件,是电力系统安全稳定运行的重要一环,但在实际运行中,常常因为没有充分考虑系统后期的扩容需求,以及动静触头磨损等原因造成局部温度过高甚至引发过热故障<sup>[1,2]</sup>。除通过红外测温设备等监测手段外<sup>[3-7]</sup>,温度场仿真计算成为了解开关柜温度分布规律的最有效手段之一<sup>[8-18]</sup>,对开关柜的设计与检修都具有指导意义。但开关柜结构复杂,而温度场计算涉及传导、对流、辐射及流体场计算等多个方面<sup>[9]</sup>,对有限元计算中网格剖分要求较高<sup>[10]</sup>,模型整体计算量大,因此如何在保证计算效率的基础上对开关柜进行准确计算成为开关柜仿真的难点所在。

现有仿真中开关柜的网格剖分缺乏精细控制,多数进行全局统一剖分<sup>[8-15]</sup>,造成单元量大,区域网格质量不高,计算效率与准确率均有待提升。面对庞大的网格数,多数研究者选择简化收敛较慢的热辐射散热过程以保证计算效率,有的研究者直接忽

略热辐射影响<sup>[7-9]</sup>,有的研究者将热辐射的散热效果与热对流的散热效果结合起来用综合散热系数进行估算<sup>[10,11]</sup>;还有的研究者在物体表面设置辐射散热系数对热辐射过程进行估算<sup>[12]</sup>,这些简化条件选择随机,对于结果的偏差也无从探究。

为有效地深入研究上述开关柜仿真中存在的问题,本文以开关柜母线室为研究对象,提出局部网格的优化控制后进行母线室流体温度场仿真计算,探究热辐射散热对开关柜母线室内部温度分布的影响,从母线室小模型的计算结果中总结分析,为开关柜的整体仿真中热辐射的简化提供修正参考,提高开关柜仿真结果准确性。此外本文还进行风机散热下流体-温度场仿真计算,对比分析风机散热对温度与流速的影响效果,并通过实验加以验证,为开关柜温度控制提供量化参考。

## 2 仿真实论基础及控制方程

开关柜母线室近似封闭,仅靠风机与散热孔与外界环境相连。温度场分析主要分为发热与散热两个环节。母线室热源主要是电流流过导体产生的焦耳热,包括母排导体和母排搭接处的接触电阻产生

收稿日期: 2018-01-25  
基金项目: 湖北省自然科学基金项目(ZRMS2018000853)  
作者简介: 彭诗怡(1994-),女,江西籍,硕士研究生,研究方向为电力设备状态评估;  
阮江军(1968-),男,湖北籍,教授,博导,研究方向为多物理场耦合计算。

的焦耳热,经过热传导、热对流、热辐射等方式向热源周围的固体与气体传递热量,物体的性质与状态不同,主导的传热方式也不同,但3种传热形式同时存在。

## 2.1 热传导

热传导主要发生在固体之间,可用如下方程表达:

$$P_k = \Delta t_k \lambda A_k / l_k \quad (1)$$

式中, $P_k$  为热传导热功率; $\lambda$  为物体热导率; $l_k$  为热传导物体的长度; $A_k$  为热传导截面积; $\Delta t_k$  为传导两端温度差。

在母线室内,母排是主要的热源,母排及柜体等其他固体上的热量传递主要以热传导的方式进行,其特点是传递速度较快。

## 2.2 热对流

热对流是借助于母线室内空气等流体发生的热量交换,可表达为:

$$P_c = 1.86 S_c \Delta t_s^{1.25} \quad (2)$$

式中, $P_c$  为对流散热功率; $S_c$  为研究对象的散热表面积; $\Delta t_s$  为散热面与周围环境中空气的温度差。可见对流散热功率主要与散热表面积及温差有关。

## 2.3 热辐射

热辐射是一种物体由于具有温度而发出的电磁波现象,它的热量传递不依赖于媒质而自主发生,热辐射大小主要与物体材料和物体表面温度有关,对于同一物体,温度越高,辐射处的总能量就越大<sup>[19,20]</sup>。

$$Q_t = \delta_0 A \varepsilon_{st} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中, $\delta_0$  为玻尔兹曼常数; $A$  为辐射表面积; $\varepsilon_{st}$  为与物体材料状态等有关的系统辐射率; $T_1$  为发热体表面温度; $T_2$  为受热体温度。从式(3)可知热辐射总能量  $Q_t$  是发热体及受热体温度的4次方程,因此计算速度慢,收敛较困难,这成为多数研究者对热辐射过程进行简化的主要原因。

# 3 仿真计算

## 3.1 仿真模型

开关柜母线室是用于布置主母线和上分支母线的单独隔室,室内母线较为密集,且靠近温度最高的触头部分<sup>[21]</sup>,在运行时,其载流热效应较为显著,且母线室具备开关柜的母排发热、风机散热、散热孔散热等全部典型环节,因此,母线室的仿真结果对开关柜整体仿真具有参考意义。本文以 10kVKYN-28A

型开关柜母线室为仿真对象,简化部分对温度场计算结果影响较小的结构与部件,最终在 Solidworks 三维建模软件中建立的模型如图 1 所示。

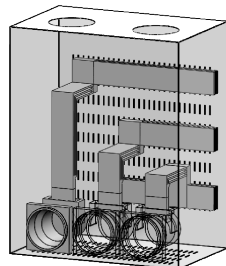


图 1 开关柜三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of switchgear

图 1 中母线室由隔板包围形成独立空间,上部圆形开口为风机出风口,在底侧与后侧的隔板上均有呈小长方形的散热孔,母线室内的主母线经过分支母线向下延伸至静触头盒内。考虑到触头盒在母线室内,也会对空气流动有一定影响,所以建立触头盒与母线室内部空气接触的轮廓面。

## 3.2 网格剖分

流体-温度场仿真对于网格的质量要求较高,划分的网格会影响计算收敛的快慢甚至最终能否达到收敛;并且网格的质量对流动与传热的数值模拟精确度也存在很大的影响<sup>[22]</sup>,因此本文采用专业网格剖分软件 ANSYS ICEM CFD 对模型进行网格划分。

与现有剖分方式相比,本文在生成指定尺寸的四面体网格后,通过网格转化功能将 12 个四面体网格转化为 1 个核心六面体网格,初步剖分完成后截面图如图 2 所示,采用核心六面体网格后,网格数量减少 60% 左右,能有效缩短计算时间。

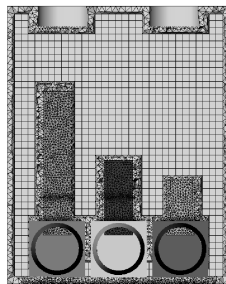


图 2 开关柜网格剖分截面图

Fig. 2 Sectional view of meshing

考虑到固体流体交接面处气体流动与传热情况较为复杂,在气体与固体交界面处采用特殊的薄片状棱柱边界网格有助于准确描述气流等在遇到固体时的运动与交界面处的热量传递,模型中某处棱柱

边界网格如图3所示,左下规则矩形区域为母排部分,右上浅色区域为气体部分,图中在气体靠近母排的部位建立厚度以1.5比例递增的3层棱柱边界网格,总厚度约为2mm,模型中棱柱边界层包裹整个母排,覆盖全部母排与气体交界面;在模型中,由于母排拐角处存在一个角度较小的锐角,若按照普通气体的网格尺寸进行剖分会出现低质量的网格,因此对网格的拐角处空气单独进行加密剖分,开关柜网格剖分局部图如图3所示,此处网格大小约为其他部位的1/4,保证网格质量良好。

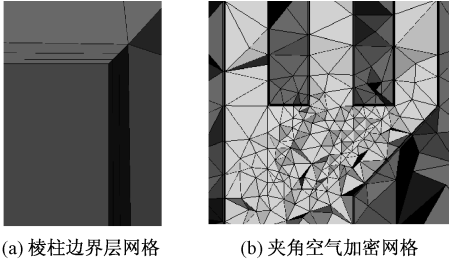


图3 开关柜网格剖分局部图

Fig. 3 Details of sectional view of meshing

### 3.3 热源计算

高压直流开关柜发热的热源包括开关柜内的载流导体和电接触的焦耳损耗。磁导体内的磁滞损耗、电绝缘材料中的介质损耗对开关柜整体温升影响较小,因此本文将焦耳热作为仿真中唯一的热源。结合实际情况与仿真软件CFX的加载方式,本文通过对母排加载热生成率(即单位体积的发热功率)来模拟母排发热,通过在母排交界面上加载热通量(即单位面积生成的热量)来模拟母排搭接处接触电阻发热。

#### 3.3.1 母排本体焦耳热

假定开关柜环境温度为25℃,此时铜电阻率取 $0.018 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{M}$ ,本模型中母排横截面积为 $125 \times 10 \text{ mm}^2$ ,结合电阻计算公式,可求出单位体积的发热功率,即热生成率 $H$ :

$$H = \frac{P}{V} = \frac{I^2 R}{Sl} = \frac{I^2 \rho}{S^2} = \frac{(4000/3)^2 \times 0.018 \times 10^{-6}}{(0.125 \times 0.01)^2} = 20480 (\text{W/m}^3) \quad (4)$$

式中, $P$ 为根据焦耳定律计算的母排发热功率; $V$ 为对应的母排体积; $I$ 为母排流过的电流; $R$ 为电流流经的导体电阻; $S$ 为电流流经的母排横截面积; $l$ 为电流流经的长度; $\rho$ 为母排材料黄铜的电阻率。

#### 3.3.2 母排搭接处焦耳热

开关柜内部母排主要通过螺栓进行连接,按照参考文献[23]的方法对母排搭接处的接触电阻进行计算:

$$R_j = K_c / (F_j / 9.8)^m \quad (5)$$

式中, $R_j$ 为接触电阻( $\mu\Omega$ ); $F_j$ 为接触面的接触压力(N); $K_c$ 为与材料有关系数; $m$ 为接触系数,与接触面形态有关。本模型中母排为铜制导体,因此 $K_c$ 取160,母排接触属于较小的面接触,接触系数 $m$ 取0.7<sup>[24]</sup>;  $F_j$ 通过螺栓施工时的标准扭矩通过公式计算出。

母排之间的连接是通过4个8.8级M20高强度螺栓进行连接,开关柜内母排实物图如图4所示。



图4 开关柜内母排实物图

Fig. 4 Photos of busbars

查阅相关文献得到预紧力 $F$ 计算公式<sup>[25]</sup>,有:

$$F = \frac{T}{KD} \quad (6)$$

式中, $T$ 为拧紧力矩; $K$ 为拧紧力矩系数; $F$ 为预紧力; $D$ 为螺纹的公称直径。本模型中母排使用的M20高强度螺栓的紧固力矩 $T$ 为156.9N·M,螺栓直径为0.02m;假定接触面为干燥的粗加工表面, $K$ 取0.3,因此预紧力 $F_j$ 有:

$$F_j = \frac{T}{KD} = \frac{156.9}{0.3 \times 0.02} = 61667 (\text{N}) \quad (7)$$

求出预紧力后代入接触电阻计算公式,求得接触电阻 $R_c$ 有:

$$R_c = \frac{K_c}{(F_j / 9.8)^m} = \frac{160}{(26150 \times 4 / 9.8)^1} = 0.015 (\mu\Omega) \quad (8)$$

接触电阻对应的发热功率可通过焦耳定律进行计算:

$$P_c = I^2 R = (4000/3)^2 \times 1.5 \times 10^{-8} = 0.0267 (\text{W}) \quad (9)$$

因此,每个接触面上的热通量 $FLUX$ 为:



$$FLUX = \frac{P}{S} = \frac{0.0267}{0.125 \times 0.125} = 1.7088(\text{W}/\text{m}^2)$$

(10)

3.4 仿真参数设置

将剖分好的开关柜母线室模型导入计算软件CFX中,按照各部件材质定义物理材料属性,并按照上述结果加载热源,但考虑到实际中母线室是开关柜柜体的一部分,其他隔室内的温度会传递至母线室对温升造成影响,不能直接忽略,因此通过在分支母排与静触头连接的部分以及母线室与断路器室间的隔板散热孔上设置初始温度进行简化替代,整个柜体处于室温空气中,故将环境温度设为25℃,并在柜体表面设置对流换热系数10W/(m²·K)<sup>[23]</sup>。根据软件自动计算出的雷诺数和瑞利数选择湍流模型,在柜体上的散热孔和顶部风机开口处设置为开放式边界,相对压力为0,即气体自由进出。为了加快求解速度采用多核并行计算,以10<sup>-4</sup>为残差收敛目标。此次仿真仅考虑热传导和热对流,未激活热辐射模型,仿真设置具体情况见表1。

表1 仿真参数具体取值表

Tab.1 Values of the simulation parameters	
参数	数值
各个域的初始温度/K	298(25℃)
散热孔的初始温度/K	308(35℃)
分支母排A与静触头连接处/K	327(54℃)
分支母排B与静触头连接处/K	328.2(55.2℃)
分支母排C与静触头连接处/K	327.5(54.5℃)
风机个数及功率	0
散热孔的边界条件	设置为 Opening,压力为0
求解控制对流项	迎风模式(Upwind)
残差目标	10 <sup>-4</sup>
单机多核并行计算	4核

3.5 仿真结果分析

3.5.1 温度场分析

额定工况下开关柜母线室外壳与内部选取的典型截面的温度分布如图5所示。由图5可知,最高温度出现在B相分支母排与静触头连接处,可达55.2℃,最低温为25.1℃,出现在柜体内底部的4个角落处,说明柜体角落处热对流与热传导较弱,柜体内部空气受热膨胀,密度较低,向上运动,因此柜体内上部空气温度较高。

母排的具体温升情况如图6所示,经过后处理计算得出,平均温度为49.935℃,最高温出现在B相与静触头接触处,主要原因是静触头与动触头之间存在较大接触电阻,会产生较为严重的发热,而B

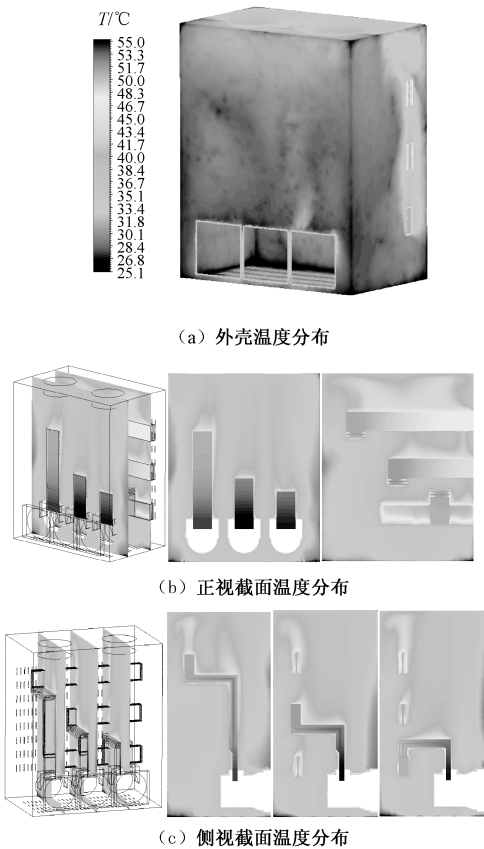


图5 母线室温度场仿真结果  
Fig.5 Temperature distribution of busbars room

相夹在A、C两相之间,受到A、C两相发热影响,且散热条件相对较差,因此温度高于A、C两相。因为水平方向的主母排更靠近隔板上的通风口,离触头盒也更远,因此温度低于竖直的分支母排,又因为A相位置最高,最靠近顶部的散热孔,因此温度略低于下面的B、C两相。

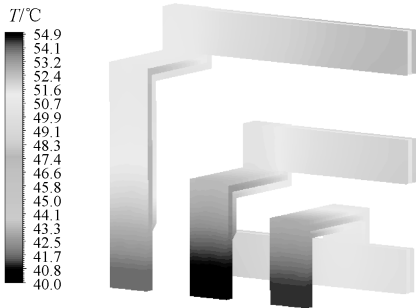


图6 母排三维温度分布  
Fig.6 Three dimensional temperature distribution of busbars

3.5.2 流体场分析

流体的运动对于散热过程有很大的影响,因此查看风机内部流体场计算结果能了解内部散热路

径,帮助分析温度分布规律。在柜体中通过风机沿着两个方向分别做截面,查看截面上的流速分布云图,结果如图 7 所示。

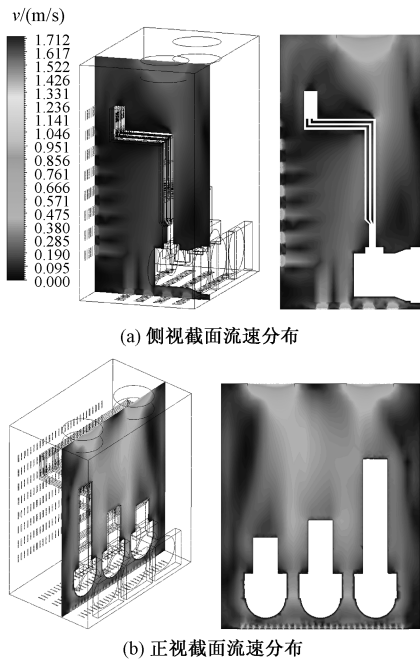


图 7 母线室流体场结果

Fig. 7 Velocity distribution of air current

可以看到流速最高达到 1.7m/s,出现在柜体上的散热孔和顶部风机开口处,这些区域的空气流速明显大于其他部分,气体流动效果明显,具有良好散热效果。

为进一步探究气流方向,查看流体的三维流速矢量图,如图 8 所示。可明显看到各个散热孔处的流速较大,其中柜体底部的散热孔流速大于侧面散热孔,这是因为出口在柜体顶部,底部的正好与之相对,因此流速较大。同理侧壁上越靠近底部的孔越正对顶部的风机开口,所以流速较大。侧面的散热孔多数气流方向朝内,即气体由外侧流涌入。室内热空气密度小,聚集在柜体上部,使柜体内上部气压

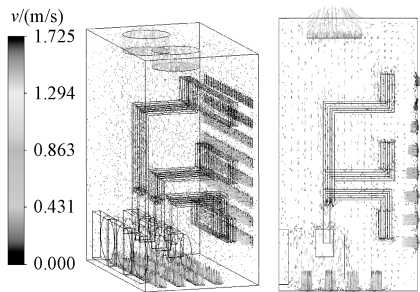


图 8 三维流速矢量图

Fig. 8 Three dimensional velocity vector diagram

较大,最上面一层的散热孔气体流动方向已发生改变,由外界室温气体涌入变为室内温度较高气流溢出,与柜体顶部开口一样,对室内温度较高气流起发散作用。

4 不同散热条件下仿真计算结果分析

4.1 辐射散热

4.1.1 仿真设置

为了分析辐射散热对温度分布影响,为开关柜仿真简化提供参考,本文对热辐射对温升的影响进行了仿真。CFX 中提供了多种热辐射模型,常见的为 Rosseland 模型、PI 模型、DTRM 模型、MCM 模型。考虑到本模型中室内主要气体为空气,光学厚度小于 3,所以选用 PI 模型。

4.1.2 结果分析

经过 20h 后,残差达到  $10^{-4}$ ,计算收敛,整体计算收敛时间约为不激活热辐射模型时的 10 倍,各部分平均温度变化情况见表 2。

表 2 各部分平均温度与最低温

Tab. 2 Temperature of different parts

平均 温度/℃	不考虑 热辐射/℃	考虑 热辐射/℃	温差 /℃	变化 (%)
横相母排	49. 935	47. 236	- 2. 599	- 5. 2
纵向母排	52. 316	51. 134	- 1. 182	- 2. 26
空气	35. 697	36. 898	1. 201	3. 36
最低温	25. 1226	33. 7078	8. 5852	34. 17

由结果可知,考虑热辐射后,散热效果增强,热源母排的温度下降,横相主母排与纵向分支母排分别比不考虑热辐射时温度低 2. 599℃ 和 1. 182℃,变化百分比 -5. 2% 和 -2. 26%,热源周围的空气温度升高 0. 969℃,百分比 2. 71%。在不考虑热辐射时,最低温接近环境温度,为 25. 1226℃。考虑热辐射后,柜体内部空气的温度更加均匀,最低温与空气平均温度接近,为 33. 7078℃,相差 8℃,变化百分比高达 34% 以上。

取与不考虑热辐射时相同的正、侧视截面与外壳温度分布云图,对比情况如图 9 所示。

从图 9 中可知,考虑辐射散热后,除了母排与空气的平均温度有所变化外,柜体内部的温度分布明显更加均匀,温差变小。在不考虑辐射散热时,温度最低点处于柜体 8 个角落,主要是由于角落处空气流动受阻,十分缓慢,热量难以传达到。但考虑辐射散热后,角落处虽然热对流难以到达,但热辐射不会受阻,因此热量也能传递到,最低温度由接近室温升



图9 考虑热辐射前后温度分布对比  
Fig. 9 Comparison of temperature distribution

高至接近气体平均温度。受内部气体温度分布规律影响,考虑热辐射后柜体表面温度分布也更加均匀,仅在母排触头与触头盒处偏大,整体温差较小。

从上述结果分析可知,热辐射散热过程会使热源温度下降,其他部位温度上升,本模型中平均温度差异在3℃以内,但对于流体的温度分布影响较大,整体温度分布更加均匀,对柜体角落等对流难以到达或散热孔等温度较低部位的温度影响较大,若研究者关注内部气体温度分布情况或柜体表面温度分布,则不应该忽略热辐射过程。

4.2 风机散热  
4.2.1 仿真设置

在电流较大的工作状况下时,会开启开关柜顶部的风扇进行强迫对流散热,以防出现温度过高现象。该型号开关柜母线室顶部有2个功率均为150W风机。在CFX中,通过气体流量与大气压力的曲线关系式定义交界面压力的变化情况来模拟风机效果。查阅对应型号的风扇说明书得到风机的压力*P*与流量*Q*的对应关系,由多点数据拟合得到函数表达式:

$$P = -5.9867Q^2 + 53.108Q + 986.3 \tag{11}$$

式中,*P*为风机口处的压力;*Q*为风机流量。  
在模型中风机的出风口处进行压力曲线设置,如图10所示,其他仿真初始条件不变。

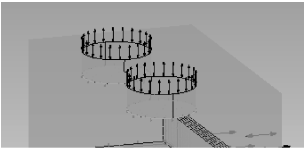


图10 风机出风口示意图  
Fig. 10 Position of fans

4.2.2 结果分析  
(1) 温度场分析

开启风机后各部分平均温度变化情况见表3,母排和室内气体的温度变化百分比均在15%以上,可见风机散热效果良好,能有效降低母排与室内气体温度。最低温变化很小,主要由于环境温度为25℃,开启风机后最低温已与环境温度一致。

表3 各部分平均温度与最低温				
Tab. 3 Part of the temperature result				
平均 温度/℃	自然 对流/℃	风机 散热/℃	温差 /℃	变比 (%)
横相母排	49.935	44.255	-11.407	-22.84
纵向母排	52.316	49.029	-8.369	-15.00
空气	35.697	28.056	-7.641	-21.41
最低温	25.1226	25	-0.1225	-0.049

自然对流与开启风机后强迫对流下的母排温度云图对比如图11所示。可见母排温度明显下降,且横向母排散热效果比纵向要好,主要原因是横向母排垂直于气流方向,受气流散热面积大,且纵向母排下端与触头接触处为了模拟其他隔室的传热设置了初始温度,所以变化不明显。



图11 母排三维温度分布对比  
Fig. 11 Compasion of three dimensional temperature distribution of busbars

(2) 流体场分析

风机开启后,对气体流动的速度产生较大影响,



进而影响散热与温度分布。取与自然对流时相同的截面,绘制流速云图如图 12 所示。

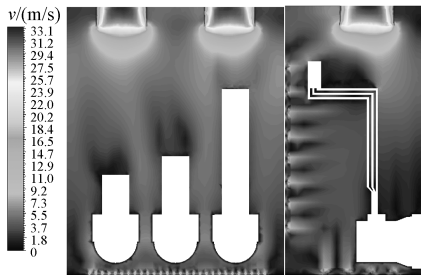


图 12 风机散热下截面流速云图

Fig. 12 Velocity distribution of air current

与自然对流时不同,开启风机散热后,最大流速出现部位由各个散热孔空气流入口改变至风机部位,且风机部位流速明显大于母线室内其他部位,最高可达 33m/s,远远高于自然对流时的最大流速 1.712m/s。柜体内空气的平局流速也由自然对流时的 0.192m/s 提高至 4.068m/s。柜体部分流速的平均值与最大值对比结果见表 4。

表 4 各部分平均流速与最大流速

Tab. 4 Air current velocity of different parts

流速	空气平均 流速	空气最大 流速	(单位:m/s)	
			风机 平均流速	风机 最大流速
自然对流	0.19164	1.72537	0.6099	0.870
风机散热	4.06761	31.7924	24.5526	33.3166

风机散热下流速矢量图如图 13 所示,由图 13 可知,风机开启前后气体流动的整体趋势一致,由各散热孔涌入后由风机处排出,但整体流速显著增大,气体进出更加剧烈,尤其是风机处排出的气体流速更大,方向也更加垂直于风机出口。此外,开启风机后,母线室背面隔板上第一排散热孔的气流方向由气体向外流出变为向内流入。

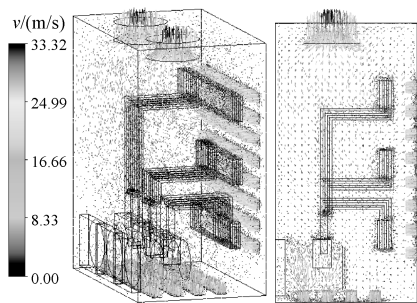


图 13 风机散热下流速矢量图

Fig. 13 Three dimensional velocity vector diagram

4.3 实验验证

为了进一步验证仿真结果准确性,与平高集团合作进行了开关柜温升实验。采用电阻法,对 KYN28A-12 型铠装移开式金属封闭开关设备进行温升试验,试验样机的柜体尺寸为 800mm × 1800mm × 2300mm,母线室构造与所建模型一致。根据平高公司产品技术条件及国标文件要求,在开关柜相应的部位选取了 12 个测温度点,其中母线室三相横向母排中间位置各一个,即母线室内共有 3 个测温点,温升实验测温点布置如图 14 所示。利用大电流发生器对开关柜施加 4000A 电流,开启风机散热,至少运行 8h,当 1h 内温升的增加不超过 1℃ 时停止实验,记录温升数据。

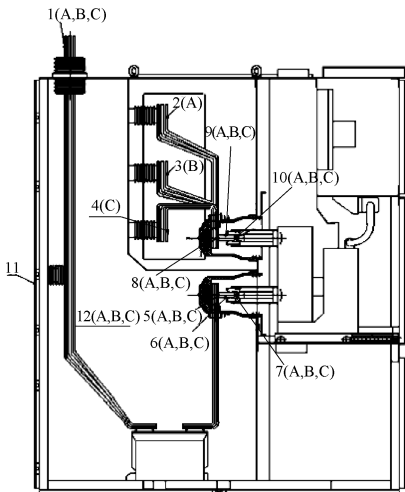


图 14 温升实验测温点布置示意图

Fig. 14 The position of the monitoring sites

仿真所得 3 个测温点数据与实际测量数据对比见表 5 和图 15 所示。通过风机散热温差均小于 2.5℃,仿真与实测结果接近,证明仿真结果可靠,存在些许误差的主要原因可能在于本文仿真对象仅为开关柜内母线室,虽然通过在部分区域设置固定温度来模拟其他隔室对母线室的影响,但与试验中整体开关柜的温度分布情况还是存在一定差异,主要体现在单独隔室比整体开关柜散热情况好,以及触头等其他高温部件热量会向母线室传递。此外,本仿真中没有考虑涡流损耗、电阻率随温度变化等情况也会造成仿真结果与试验结果存在部分差异,但误差较小,在合理范围内,可认为本文仿真基本正确。通过 3 种不同散热情况下对比可知,辐射散热使内部温度略有下降,而风机散热带来的降温效果更加显著。

表 5 各部分实验结果与仿真对比

Tab. 5 The compare of the simulation and experiment results

(单位:℃)			
温度	A 相主母排	B 相主母排	C 相主母排
自然对流	48.5	49.4	50.5
辐射散热	46.1	46.9	47.6
风机散热	38.013	38.404	39.852
试验结果	39.5	38	42.2

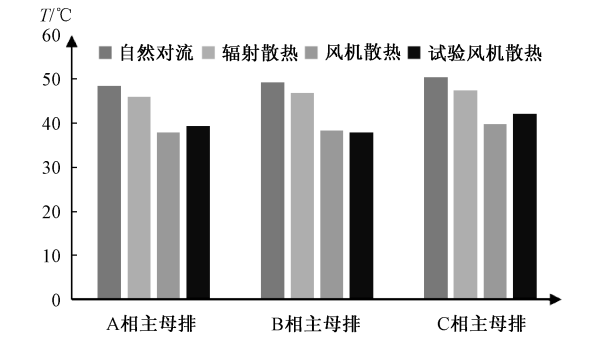


图 15 各部分实验结果与仿真对比

Fig. 15 The compare of the simulation and experiment results

5 结论

本文以开关柜母线室为研究对象,采用棱柱边界层等方式优化网格剖分后进行温度-流体场仿真计算与分析,探究热辐射散热与风机对流散热对开关柜内部温度分布规律的影响,得到以下结论:

- (1)采用核心六面体网格、棱柱边界网格与局部加密等措施对开关柜母线室网格剖分进行优化控制能有效减少网格数量,提高计算效率。
- (2)考虑母线室内部母排与接触电阻发热功率时,母线室工况下最高温度出现在 B 相分支母排与静触头连接处,最低温出现在柜体角落处。
- (3)考虑辐射散热后,母线室内的温度分布发生改变,具体表现为母排温度下降,室内空气温度上升,整体温度分布更加均匀,原本温度最低的柜体角落处温度上升明显,与气体平均温度一致,证明辐射散热能有效提高气体温度分布的均匀性。
- (4)通过在风机出口处设置气体流量-压力函数关系来模拟风机的作用,对开启风机后处于强迫对流散热条件下的母线室进行流体温度场仿真计算,结果表明母排与空气温度下降 15% 以上,降温效果明显,气体平均流速为自然对流时的 20 倍,最大流速出现在风机处,达 30m/s 以上。并通过温升实验对仿真结果进行验证,误差在 6% 以内,验证了仿真

计算的准确性。

本文通过 3 次仿真对自然对流、强迫对流与辐射散热不同情况下母线室内部温度分布情况进行分析归纳,其规律能为完整开关柜仿真研究提供参考。但本文多用公式对热源进行计算,在后续研究中,若能通过电磁场仿真得出发热功率再与本文流体-温度场计算进行耦合,可获得更加精确的结果。

参考文献 (References):

[ 1 ] 丁健 (Ding Jian). 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 (Heating mechanism analysis on metal-enclosed high voltage switchgear contact with measures to prevent overheating) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2012, 48 (8): 114-117, 122.

[ 2 ] 朱根良 (Zhu Genliang). 浅议中压开关柜事故调查中的故障分析 (Simple explanation of faults analysis in incident investigation of medlum voltage switchgear) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2002, 38 (5): 62-63.

[ 3 ] 熊兰, 徐敏捷, 杨子康, 等 (Xiong Lan, Xu Minjie, Yang Zikang, et al.). 高压开关柜电缆室温度场分析及在线监测系统构建 (Analysis of temperature field in cable chamber of high voltage switchgear and construction of on line monitoring system) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2014, 34 (6): 153-157.

[ 4 ] 徐敏捷 (Xu Minjie). 中压开关柜内组件温度场分析及监测系统开发 (Temperature field analysis of components in medium voltage switch cabinet and development of its monitoring system) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2014.

[ 5 ] 王新彤 (Wang Xintong). 基于光纤光栅的开关柜温度在线监测系统的开发与应用 (The development and application of switchgear temperature monitoring system based on fiber bragg grating) [D]. 河北: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2010.

[ 6 ] 赵炳成 (Zhao Bingcheng). 高压开关柜在线监测系统的开发与应用 (Development and application of on-line monitoring of high voltage switchgear) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2011.

[ 7 ] 李成榕, 马国明 (Li Chengrong, Ma Guoming). 光纤布格光栅传感器应用于电气设备监测的研究进展 (Research and development of fiber bragg grating monitoring in electrical engineering) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (12), 114-



- 122.
- [8] 贾文卓 (Jia Wenzhuo). 基于 ANSYS 的开关柜电场与温度场仿真计算电气工程 (Simulation calculation of electric field and temperature field of switch cabinet based on ANSYS) [D]. 天津: 天津大学 (Tianjing: Tianjing University), 2013.
- [9] 陈荆洲, 杜志叶, 王栋, 等 (Chen Jingzhou, Du Zhiye, Wang dong, et al.). 高压开关柜温度场数值分析 (Numerical analysis of temperature field of high votage switchgear) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 38-44.
- [10] 叶茂泉, 万四维, 巫环科, 等 (Ye Maoquan, Wan Siwei, Wu Huanke, et al.). 基于 Icpak 的大电流开关柜热仿真 (Thermal simulation of high-current switch cabinet based on icepak) [J]. 电器与能效管理技术 (Low Voltage Apparatus), 2015, (16): 27-30.
- [11] 侯国斌, 邓晓峰, 吴艺红, 等 (Hou Guobin, Deng Xiaofeng, Wu Yihong, et al.). 电力开关设备温升仿真研究综述 (Review of temperature rise simulation of power switchgear) [J]. 电器与能效管理技术 (Low Voltage Aparatus), 2017, (11): 1-6.
- [12] 张登, 薛继鹏, 王永源, 等 (Zhang Deng, Xue Jipeng, Wang Yongyuan, et al.). 基于热管散热的大电流开关柜触头温度场分析 (Analysis of contacts temperature field in large current switchgear based on heat pipe) [J]. 云南电力技术 (Yunnan Electric Power), 2016, 44 (3): 80-83.
- [13] Wang Lihuo, Wang Lijun, Li Xiaolin, et al. Multi physical field simulation of medium voltage switchgear and optimal design [A]. 2016 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (IS-DEIV) [C]. Suzhou, China, 2016.
- [14] Wang Lijun, Li Xiaolin, Lin Jing, et al. Studies of modeling and simulation method of temperature rise in medium-voltage switchgear and its optimum design [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8 (3): 439-446.
- [15] Nesrine Rezbani, Philippe Marty, Edith Clavel. Influence of the conductor design on the temperature field in a high voltage gas insulated switchgear [A]. 2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) [C]. Australia, 2014. 1175-1178.
- [16] 刘云鹏, 郭沁 (Liu Yunpeng, Guo Qin). 高压开关柜电缆室温湿度场数值计算分析 (Numerical calculation of temperature and humidity fields in cable room of high-voltage switchgears) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2017, 53 (9): 6-10, 16.
- [17] 李晶, 满家健, 周电波, 等 (Lin Jing, Man Jiajian, Zhou Dianbo, et al.). 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 (Simulation analysis and experimental research on temperature distribution of metal-enclosed high voltage switchgear handcart contactor) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2015, 51 (8): 74-79.
- [18] 周岩, 高杨, 刘婷婷, 等 (Zhou Yan, Gao Yang, Liu Tingting, et al.). 高压开关柜触头温度场的数值仿真分析 (Numerical simulation of high voltage switchgear panel contact temperature) [J]. 传感器与微系统 (Transducer and Microsystem Technologies), 2008, 27 (12): 102-105.
- [19] 康添慧 (Kang Tianhui). 高压 GIS 多物理耦合场分析及温度监测系统的研发 (Analysis of coupling field for high voltage GIS and development of the temperature monitoring system) [D]. 湖南: 湖南大学 (Hunan: Hunan University), 2014.
- [20] 宋帆, 申春红, 徐建源, 等 (Song Fan, Shen Chunhong, Xu Jianyuan, et al.). 800kV GIS 隔离开关磁场—温度场计算与分析 (Calculation and analysis on magneto-thermal fields of 800 kV GIS disconnecter) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2008, 34 (7): 1383-1388.
- [21] 邬钢 (Wu Gang). 光纤在开关柜触头温度监测中的应用 (Application of optical fiber in temperature monitoring of the contacts of switchgear) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2006, 32 (2): 122-122.
- [22] 纪兵兵, 陈金瓶 (Ji Bingbing, Chen Jinping). ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解 (Detailed explanation of ANSYS ICEM CFD meshing technology) [M]. 北京: 中国水利水电出版社 (Beijing: China Water & Power Press), 2012. 2-4.
- [23] 任君鹏, 王栋, 杜志叶, 等 (Ren Junpeng, Wang Dong, Du Zhiye, et al.). 强迫空气冷却高压开关柜三维气流——温升仿真分析 (Simulation analysis of 3-D airflow-temperature rise for high-voltage switchgear underforced air cooling) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2017, 53 (10): 12-18.
- [24] 郭凤仪 (Guo Fengyi). 电接触理论及实用技术 (Electrical contact theory and practical technology) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Power Press), 2008.
- [25] 张振华, 应秉斌, 矫明 (Zhang Zhenhua, Ying Bingbin, Jiao Ming). 螺栓拧紧力矩的确定方法及相关探讨 (Determination method and related discussion of bolt tightening torque) [J]. 化学工程与装备 (Chemical Engineering & Equipment), 2009, (8): 105-107, 96.

# Influence of different heat dissipation conditions on temperature distribution in busbar room of switchgear

PENG Shi-yi, RUAN Jiang-jun, DU Zhi-ye, REN Jun-peng, CHEN Jing-zhou  
(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Temperature field simulation of high voltage switchgear is of great significance to the design and daily operation of switchgear. But considering the huge amount of the switchgear model, existing simulation often simplifies the thermal radiation progress in order to improve the computational efficiency, but pays little attention to the improvement of the meshing skills, and the impact of the fans are inadequate in existing simulations. To solve these problems, the typical structure of switchgear—the busbar room is used to establish the accurately 3-D finite element model, and the local control mesh skill of the busbars room is put forward. Then the temperature field and fluid field of this model are calculated based on CFX. The differences between considering the thermal radiation or not are compared in this paper, and the result shows that the thermal radiation decreases the temperature of the busbar while increases the temperature of the air, and has an appreciable impact on evening the distribution of the temperature. The cooling effects of the fans are also shown in temperature field and fluid field, and the temperature rise test is done to verify the accuracy of the simulation.

**Key words:** high voltage switchgear; thermal radiation; meshing; temperature field; fluid field