

地铁整流变压器室通风数值模拟

张晓明,刘楠

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 针对地铁车站运行时变压器室内温度过高的问题,提出空调系统优化方案,以满足变压器安全运行的要求.方法 利用商业流体计算软件 FLUENT 对地铁车站牵引变电所内整流变压器室的温度场和速度场进行数值模拟,得到整流变压器室内的温度和速度分布,并对各种工况的模拟结果进行比较分析.结果 在变压器的上方有大量的热量,并形成热羽流,影响流场分布;变压器两侧的区域由于存在热阻,影响冷气流通过.结论 通过改变风速,使变压器周围的气流组织更合理,以满足变压器正常工作的环境要求,并为今后的类似工程提供参考.

关键词 整流变压器;数值模拟;热掺混;热阻

中图分类号 TU83

文献标志码 A

Numerical Simulation of the Ventilation in the Rectifier Transformer Room

ZHANG Xiaoming, LIU Nan

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to solve the problem of that the temperature of the rectifier transformer was higher than the limit when the subway in operation state. The optimization scheme of air-conditioning system has been proposed. And then the demand of transformer security operating would be met. The temperature field and the velocity field in the rectifier transformer room of subway has been calculated by commercial software FLUENT and the distribution of temperature and velocity were obtained. The simulation results were analyzed through comparison in various conditions. The results showed that the thermal plume was driven by large quantity of thermal above the rectifier transformer could affect the distribution of flow field; The passage of cold air has been affected by the thermal resistance in the areas on both sides of the rectifier transformer. The conclusion was that, a reasonable airflow form around the rectifier transformer could be acquired through changing the air speed which could meet the demand of transformer security operating, and a reference would be provided for similar engineering.

Key words: rectifier transformer; numerical simulation; thermal mixing; thermal resistance

地铁车站变电所作为地铁系统的能源中心,能否正常运行直接影响着供电系统的稳定性.牵引变电所的整流变压器相当于地铁机车的核心,在保证地铁运行安全方面起到重要作用.然而,在变电所故障调查统计中发现,由于变压器温度过高造成的故障占总故障数的67.09%^[1].为了更好的保证变电所能够安全稳定运行,长期以来国内外学者对其做了多方面研究探索. RADAKOVIC Z^[2]对带有自动冷却系统变压器工作过程进行研究,通过建立热模型,研究冷却系统对变压器不同负载工作状态的影响规律;RADAKOVIC Z等^[3]利用热工水力网格模型和有限元法研究了变压器负载与绕组发热量之间的相互关系;李颖^[4]利用CFD数值模拟技术,对箱式变电站内变压器进行磁-流-热耦合分析计算.上述研究证明了变压器绕组发热对变压器安全运行的不利影响.众多研究者分别通过不同的方法对变压器室的通风散热效果进行模拟分析^[5-10].

为了保障变电所运行的安全稳定,整流变压器在工作时的室内环境温度和湿度都有严格要求.目前,国内各大城市的地铁车站均会不定期出现整流变压器室温度过高的现象. ARIFIANTO I等^[11]通过模拟和实验证实变压器在实际运行时,长期处于满载甚至过载运行,导致其绕组温度最大值超过其正常老化极限值,会加速设备老化,通过优化外部冷却方式,可以保证变压器在正常环境下运行.基于此,笔者针对地铁车站的特点,考虑在不改变其通风系统的前提下,通过改变送风速度,优化室内流场,在变电所满载运行时,保证整流变压器室的温度满足正常运行要求.

1 CFD数值模拟方法

1.1 数学模型

Fluent 作为一款 CFD 商业软件,已经被广泛应用在流体和热传递的研究方面.整流变压器的数学模型属于有内热源房间的对流导热问题,包含了湍流模型和辐射模型.

任何一种湍流模型都需要对应的假设条件和相似基础.标准 $k-\varepsilon$ 模型是由 LAUNDER B E 和 SPALDING D B^[12]于1972年提出的,建立在半经验公式模型基础上的模型,适用于湍流工况的初始迭代及设计研究,稳定性最好,可以处理导热模型、浮力模型、压缩模拟等. Realizable $k-\varepsilon$ 模型是由标准 $k-\varepsilon$ 模型发展演变而来,引用了新的湍流黏度公式,并添加了与旋转和曲率有关的方程,使其在分离流计算和带二次流的复杂流动计算方面都有出色的表现. HOME D^[13]通过数据和实测数据对比,证明了湍流模型模拟结果的可靠性.基于湍流模型, WANG Shimin^[14]利用非稳态流体动力学模型论证了不同通风方式对通风效果的影响. WANG Y^[15]通过实验论证了包括 $k-\varepsilon$ 模型在内的几种模型对传热问题的适用性,所以根据此次模拟的特点,选择 Realizable $k-\varepsilon$ 模型.

Fluent 软件的辐射模型有五种,由于此次模拟的属于对流传热兼有辐射换热,且对流传热为主导,所以首选 P-1 或 Rosseland 辐射模型.由于 Rosseland 辐射模型的计算量更小,结果更精确,所以最终选择 Rosseland 辐射模型.笔者本次模拟的求解方法选用 SIMPLE 算法. SIMPLE 算法在流场计算应用中较为广泛.它的计算核心是通过计算中假定压力场或通过上一次迭代结果来求解离散方程,也就是一个“猜测-修正”的过程. WANG F^[16]通过理论推导分析,证明 SIMPLE 算法收敛速度性和可靠性.

1.2 流体动力学方程

变压器室内空气流动与冷热交换过程需要通过质量守恒方程、动量守恒方程以及能量守恒方程来描述,对于三维对流换热问题,从流场中 (x, y, z) 处取出边界长分别为 dx, dy, dz 的微元体,对应表达式如下.

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; t 为时间; u 为微元体速度矢量在 x 方向上的分量; v 为微元体速度矢量在 y 方向上的分量; w 为微元体速度矢量在 z 方向上的分量。

(2) 动量守恒方程

任何流动系统都满足动量守恒方程,动量守恒方程也是牛顿第二定律在流体系统的表现。动量守恒是指单元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在此单元体上的各种力之和。根据牛顿第二定律可导出 x,y,z 三个方向的动量守恒方程标准形式。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x. \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y. \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z. \tag{4}$$

式中: U 为空气流速; P 为空气压力; τ_{xx} 、 τ_{yx} 和 τ_{zx} 为微元体黏性应力引起的切向应力在 x 方向分量; τ_{xy} 、 τ_{yy} 和 τ_{zy} 为微元体黏性应力引起的切向应力在 y 方向分量; τ_{xz} 、 τ_{yz} 和 τ_{zz} 为微元体黏性应力引起的切向应力在 z 方向分量; F_x 、 F_y 和 F_z 为体积力各方向分量。

(3) 能量守恒方程

所有发生热交换的过程均满足能量守恒定律,该定律的本质是热力学第一定律。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho U T) = \text{div}\left[\frac{f}{c_p} \text{grad} T\right] = S_T. \tag{5}$$

式中: c_p 为定压比热容; T 为空气温度; f 为空气传热系数; S_T 为流体的内热源和机械能转换为热能的部分。

1.3 物理模型

用于数值模拟的整流变压器室的平面尺寸:长 6 500 mm,宽 4 000 mm,房间净高

4 400 mm,如图 1 所示。房间内变压器的外轮廓尺寸:长 3 000 mm,宽 1 600 mm,高 2 800 mm。

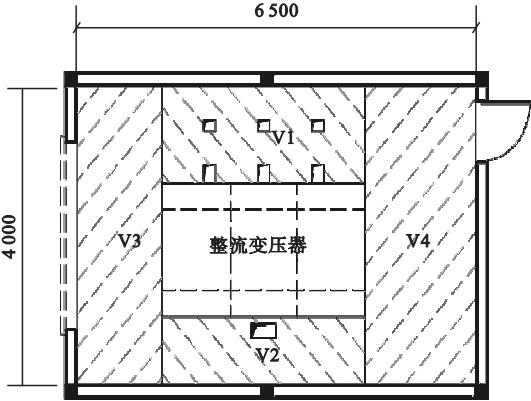


图 1 整流变压器室平面图

Fig. 1 Rectifier transformer room plan

图 1 中,V1、V2 区域为变压器接线方向,不允许任何管线在此区域穿越,所以风管只能设置在 V3、V4 区域内,此区域也是检修人员对变压器设备进行维护作业的空间。文献[17-18]通过实验和模拟分析的方式,分析研究了高温辐射条件下,风口形式及送风参数对工作人员舒适度的影响,为了保证人员身体健康和维护检修的需求,人员通行的区域温度不宜超过 309.15 K。同时由于此房间为气体灭火房间,要求排风口为下排风口,所以对于整流变压器室的标准风口布置形式为异侧上送下排式。

本次模拟根据沈阳某地铁车站牵引变电所运行实际情况,采用直流空调的通风空调方案。已知的整流变压器发热量 36 kW,通过计算,空调送风量约为 3 800 m³/h。首先,将实际风口的尺寸,通过其实际通风量及风速换算成模型需要的矩形风口尺寸,满足简化模型模拟计算需求。风口简化后为一个矩形开口,开口的长宽比与实际风口一致,开口的面积取实际风口的有效通风面积,据此计算得出模型的风口面积。

不同送风速度下对应的风口尺寸见表 1。

表1 送风速度及风口面积

风速 $v/(m \cdot s^{-1})$	有效送风面积/ m^2	实际风口长 \times 宽/ m
2.5	0.42	1.0 \times 0.5
3.0	0.35	0.8 \times 0.5
3.5	0.30	0.6 \times 0.5
4.0	0.26	0.55 \times 0.5
4.5	0.23	0.5 \times 0.5
5.0	0.21	0.5 \times 0.4

1.4 边界条件

本次模拟用数值模拟软件 Fluent 对整流变压器室的 6 种送风工况下的速度场和温度场进行数值模拟。在空调送风气流的作用下会在变压器周围的水平方向和垂直方向产生绕流,因此采用三维模型。

数值模拟的边界条件如下:

- (1)送风口边界条件设定为速度入口;
- (2)下排风口边界条件设定为压力出口;
- (3)整流变压器的边界为壁面,整流变压器室的墙体属于壁面,绝热,无滑移条件。

1.5 基本假设

整流变压器模型房间内部除变压器外流场内部无其他热源,且室内无其他障碍物。模型室内周围墙体均为绝热表面,室内外不发生热传递。变压器模型忽略实际几何形状,假定为立方体,且表面发热均匀。假设流场为稳态,空气为不可压缩流体。送、排风口的参数稳定,送入的空气与室内热空气充分混合。空气的物性参数遵循 Boussinesq 模型。

2 模型结果与分析

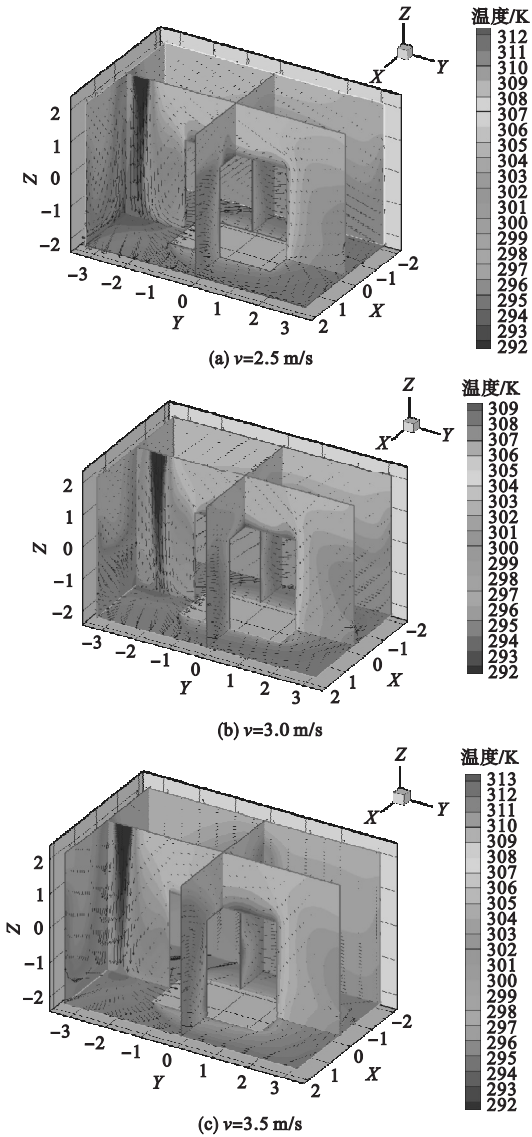
模拟过程中,整流变压器由于其发热量大,受到浮力因素的影响,存在自然对流。OLSSON C O^[19]和 RADAKOVIC Z^[20]通过数值模拟证明变压器发热产生的浮力影响着整个房间内部流场变化,且效果较为明显。因此保证送风量恒定不变的前提下,设定不同的送风速度,然后对各种速度工况进行数值模拟,研究整流变压器室在异侧上送下排模

式下的温度场和速度场分布情况。

2.1 各种工况下速度场和温度场分析

根据整流变压器室模拟结果,选取 $X = 0m$ (YOZ 面)、 $Y = 0m$ (XOZ 面)以及靠近墙体的几个面组成三维模式的围墙图(见图2)。围墙图可以更直观的显示出整流变压器室内的速度场和温度场分布情况。

由图2(a)、(b)、(c)可知:各工况下变压器周围温度场分布均匀,热边界层明显,变压器上方热量聚集区域稳定。图中流线显示,风口送风的同时,有部分室内热空气通过浮力影响形成顶棚射流,又与送风掺混,相当于将送风温度升高。此时由于送风的风速较低,



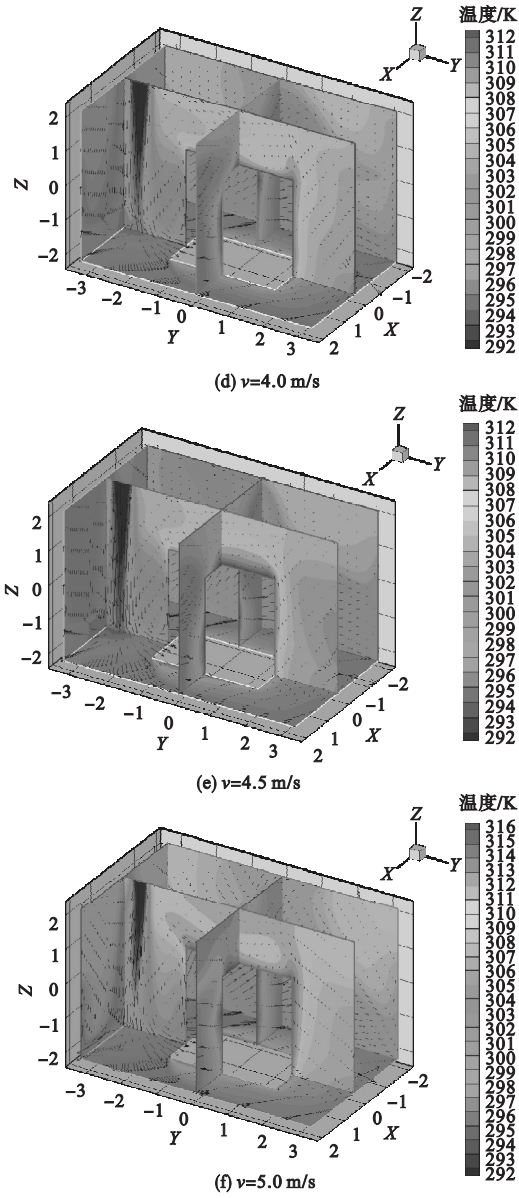


图2 各工况下温度场和速度场分布

Fig. 2 The distribution of temperature field and velocity field in various conditions

送风与室内热空气掺混后送风的动量与自然对流产生的动量相比较,自然对流产生的动量仍占主导地位,送风无法破坏变压器四周自然对流的流场的整体形态,不能对变压器进行有效的降温。

由图2(d)可知:随着送风风速的逐渐增加,较前三种工况相比,这种工况变压器上方的高温区面积明显减少,并且变压器热边界

层明显不完整,尽管仍然有热空气与送风掺混,但是室内温度明显低于之前几种工况,说明此时空调送风产生的动量已经可以克服自然对流产生的动量,并占据主导地位,送入的冷风已经可以突破变压器热边界层的保护,对变压器本体进行更加有效的降温。

图2(e)中的分布温度明显呈现不均匀状态.变压器上部的高温区面积增加,同时两侧的高温也存在,而且速度场分布也存在明显变化,送风到地面的风速明显大于前几种工况,而上部风速较之前相比有所减弱.这是由于随着送风风速增加,送风的惯性力增大,因此冷气流核心受外界影响减小,使送风气流直冲地面,同时由于送入的空气未经过与室内热空气的充分掺混,使其温度较低,密度较大,由此产生冷热气流分层.此种工况虽然气流温度较低,但是由于其流场分布不均,未能经过变压器的高温区域,将会导致排风温度偏低,所以其冷却降温的效果很不理想。

图2(f)中的温度场分布很不均匀,并且环境温度严重超标.速度场分布也很不理想,分析其原因与图2(e)类似,都是受送风速度影响,导致冷热分层现象,不同点在于,图2(f)的工况在送风过程由于冷空气与变压器周围的热边界层未充分进行热交换,因此变压器周围依然处于高温状态。

经过上述分析,变压器室的冷却降温主要存在以下问题:①冷空气经送风口进入室内,与室内空气进行掺混,使送风温度升高,需要保证送风的动量占据主导地位,使冷气流能冲开自然对流时变压器的热边界层,对变压器进行有效的降温.②送风速度过小,室内空气的浮力作用会使送风路径发生变化,流场分布不均,影响局部散热;送风速度过大,会导致冷热气流分层,排风温度过低的问题。

2.2 各送风工况下对变压器绕组周围速度场和温度场的影响

经过上述研究分析,各种工况下变压器室迎风侧的温度均能保证,但是其余三个侧面的温度呈现从高到低又升高的变化,因此需要对变压器室的绕流问题进行分析. PERUMAL D A 等^[21]利用玻尔兹曼对方形柱体绕流的问题进行计算,并详细研究了雷诺数和几何尺寸对方柱体绕流计算的影响.

变压器室内的流场比较复杂,几种工况的模拟结果表明,经过变压器绕组两侧的气流状态是影响变压器室温度的重要因素. 崔伟^[22]通过实验证明了自然对流状态下,变压器低压绕组温度高于高压绕组,温度分布随高度增加而增大. 单东雷^[23]通过实验证明绕组高度大于0.7 m ($Z = -1.5$ m)时,绕组损耗均匀分布. 图3是各工况下 $Z = -1.5$ m (XOY 面)温度场和速度场分布.

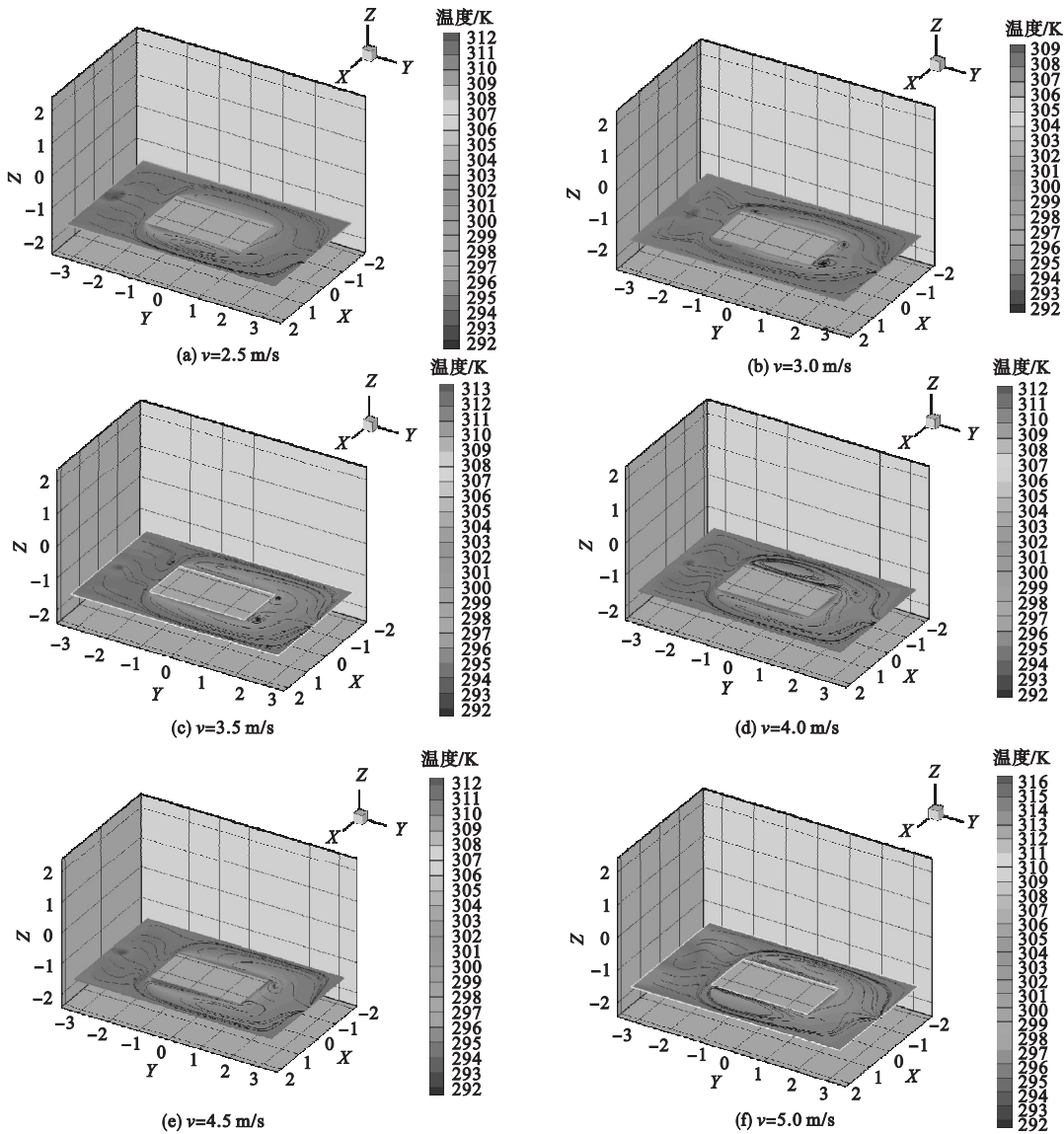


图3 各工况下 $Z = -1.5$ m (XOY 面)流线图

Fig. 3 Streamline figures in various conditions of the plane of $Z = -1.5$ m (XOY)

由图3(a)、(b)可知:送风口送入的冷空气与地面碰撞后会有一部分经过变压器两侧. 变压器两侧的气流较为平顺,流线分布均匀,变压器侧面和背风侧温度均较为理想. 这

是由于图3(a)、(b)工况下,变压器两侧的空气流速较慢,空气流过变压器周围时,由于变压器的高温辐射,使冷空气温度升高,周围空气密度降低,在自然对流占主导地位的情况下,受迫上升,同时降低了变压器底部温度。

由图3(c)可知:变压器的温度要高于前两种工况,并且流线靠近墙体一侧较为密集。这是由于此时的风速增加,只有靠近变压器一侧的空气受热上升,为变压器降温,另外一部分冷空气由于动量影响穿过变压器两侧来到背风侧,排出室外,此工况依然是自然对流占主导地位。由于此工况下经过变压器升温的冷空气较少,因此在变压器上方的剩余热量较多。

由图3(d)可知:变压器两侧的气流存在涡旋,但是变压器侧壁温度还在设计范围内,说明在这个高度的冷空气能够与变压器热边界层的热空气进行充分的热交换,此时的冷空气的降温效果较好。结合图2中相同工况围墙图分析,此种工况下机械通风的对流换热占据主导地位,同时,由于送风速度的原因,使一部分气流通过与室内掺混后,改变气流组织形态,能够突破热边界层,直接对变压器上部进行降温,因此,此种工况自然对流也起到了辅助作用。

由图3(e)可知:随着风速增加,冷空气在经过变压器两侧时,流线呈现较大变化,变压器温度也随之升高。此种现象是由于变压器近壁面的温度与两侧的气流温度梯度增加,黏滞力增加,所以近壁面的气流阻力增大,形成了不均匀的流线形态。

由图3(f)可知:在变压器侧面形成涡旋,流线分布趋向两侧,此高度下的变压器温度不高。这是由于此工况的冷空气温度过低,经过地面改变方向后,气流高速流经变压器两侧,送风的动量远大于自然对流的动量,所以在变压器两侧直接通过,同时受黏滞力影响,受迫形成涡旋气流。但是此工况的气流分布不均匀,因此整体冷却效果依然不理想。

本次模拟中,当冷气流经过高温区域,流速过慢或流速过快,都会影响冷热空气热掺混效果。同时由于存在较大的温度梯度,冷热气流此时由于黏滞力影响,就会出现热绕流现象,温度梯度越大,热绕流现象就越明显,就相当于降低了传热过程的效率,也就是热阻。热阻的存在会影响实际流场的变化,进而影响室内温度分布状况。根据数学模型模拟的工况特点,随着送风速度的增加,冷空气的截面会不断减小,使热阻的变化更加明显。

图3(a)、(b)的工况由于热阻小,基本不会对流场造成影响。图3(c)、(d)、(e)的工况,热阻对冷气流的通过产生明显影响,这两种工况的冷气流会有一部分受迫向变压器上方扩散,影响变压器背风侧及上方的散热效果;图3(f)的工况,冷气流受到热阻的严重影响,会有大部分气流在此受迫向变压器上方扩散,导致变压器表面温度超标。

总结各工况下 $Z = -1.5\text{ m}$ (XOY面)温度场和速度场分布情况。前5种工况的温度场和速度场都基本满足变压器室的环境要求,图3(f)的工况,环境温度超过了变压器室的设计极限温度。图3(d)的工况,温度场分布均匀,排除余热效果明显,各方面均优于其他工况,能够保证室内环境温度满足设计要求。

3 结 论

(1)在通风量不变前提下,通过优化送风速度的方法,可以改变变压器室内流场分布,使气流组织更合理,能有效地解决变压器超温运行的问题。

(2)在存在内热源房间,当热源发热量较大时,必须考虑热浮力对气流组织的影响。

(3)对于发热量大的房间,送风时必须考虑热阻对冷却效果的影响,同时合理调整房间内设备布局或调整风口布置方案,都会使房间内的冷却效果得到改善。

(4)通过优化变压器形状和气流通道,可降低通风时热阻对传热效率的影响。

参考文献

- [1] 王香丽. 地下变电站通风空调系统的节能性研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.
(WANG Xiangli. Energy-saving research in underground transformer substation with ventilation and air conditioning system [D]. Shanghai: Donghua University, 2012.)
- [2] RADAKOVIC Z, RADOMAN U, KOSTIC P. Decomposition of the hot-spot factor [J]. IEEE transactions on power delivery, 2015, 30 (1): 403 – 411.
- [3] RADAKOVIC Z, TENBOHLEN S. Thermal model of oil power transformers with tap changer [J]. Turkish journal of electrical engineering & computer sciences, 2016, 24: 3293 – 3308.
- [4] 李颖. 箱式变电站损耗及热问题研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
(LI Ying. Research of loss and thermal studies in box-type substation [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.)
- [5] 郭长兴. 变压器室通风散热智能控制系统研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2013.
(GUO Changxing. Study on intelligent control of the transformer room ventilation [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2013.)
- [6] 王林. 户内变电站降温通风数值模拟研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
(WANG Lin. Numerical simulation research of cooling ventilation in an indoor substation [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.)
- [7] 杨欢. 户内变电站通风换热仿真研究与实现 [D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
(YANG Huan. Numerical simulation research and implementation of cooling ventilation in an indoor substation [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.)
- [8] 邢海斌. 户内变电站通风换热问题的数值模拟研究及其对策 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2013.
(XING Haibin. Indoor substation ventilation heat transformer numerical simulation study and countermeasures [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2013.)
- [9] 邵志伟. 全户内变电站通风系统数值模拟及优化研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
(SHAO Zhiwei. Investigation on numerical simulation and optimization of ventilation system for indoor substations [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.)
- [10] GUSTAFSSON J, DELSING J, DEVENTER J V. Experimental evaluation of radiator control based on primary supply temperature for district heating substations [J]. Applied energy, 2011, 88 (12): 4945 – 4951.
- [11] ARIFANTO I, CAHYONO B. Power transformer cooling system optimization [C]. Properties and applications of dielectric materials, 2009. Icpadm; International conference on the IEEE, 2009: 57 – 59.
- [12] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence [M]. London: Academic Press, 1972.
- [13] HOME D, ARVANITIS G, LIGHTSTONE M F, et al. Simulation of flow pulsations in a twin rectangular subchannel geometry using unsteady reynolds averaged navier-stokes modeling [J]. Nuclear engineering and design, 2009, 239 (12): 2964 – 2980.
- [14] WANG Shimin, SHEN Zhigang. Impacts of ventilation ratio and vent balance on cooling load and air flow of naturally ventilated attics [J]. Energies, 2012, 5 (9): 3218 – 3232.
- [15] WANG Y, DUAN H, ZHANG H, et al. Modeling on heat and mass transfer in stored wheat during forced cooling ventilation [J]. Journal of thermal science, 2010, 19 (2): 167 – 172.
- [16] WANG F, LI Y T. An approaching fourier analysis of the relaxation effect on the simple algorithm [J]. Numerical heat transfer, 2012, 62 (6): 499 – 511.
- [17] WANG Y, GAO J, XING X, et al. Measurement and evaluation of indoor thermal environment in a naturally ventilated industrial building with high temperature heat sources [J]. Building & environment, 2016, 96: 35 – 45.
- [18] ZHECHO B, ARSEN M, MICHAL S, et al. Improved inhaled air quality at reduced ventilation rate by control of airflow interaction at the breathing zone with lobed jets [J]. HVAC & research, 2014, 20 (2): 238 – 250.
- [19] OLSSON C O. Buoyancy driven flow in counter flow heat exchangers [J]. Journal of physics: conference series, 2012, 395 (1): 2058.
- [20] RADAKOVIC Z, JEVTIC M, DAS B. Dynamic thermal model of kiosk oil immersed transformers based on the thermal buoyancy driven air flow [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2017, 92: 14 – 24.
- [21] PERUMAL D A, KUMAR G V S, DASS A K. Numerical simulation of viscous flow over a square cylinder using lattice boltzmann method [J]. ISRN mathematical physics, 2012, 2012: 630801 – 630816.
- [22] 崔伟. 变压器绕组温度场的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
(CUI Wei. The research on the temperature field of transformer winding [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.)
- [23] 单东雷. 大型变压器绕组温度场的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
(SHAN Donglei. The research on the temperature field of oil-immersed transformer winding [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.)