

大型空冷汽轮发电机 定子通风结构优化方案的计算与分析

霍菲阳¹, 李勇², 李伟力², 杨雪峰³

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京市 海淀区 100044; 2. 哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨市 150040; 3. 哈尔滨电机厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨市 150040)

Calculation and Analysis on Stator Ventilation Structure of Different Optimum Proposal in Air-cooled Turbogenerator

HUO Fei-yang¹, LI Yong², LI Wei-li², YANG Xue-feng³

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, Heilongjiang Province, China; 3. Harbin Electric Machinery Co. Ltd., Harbin 150040, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: With the increase of turbogenerator capacity, the heat transferability of cooling system is becoming more and more vital to the component reliability. By reasonably optimizing the stator structure in a turbogenerator, utilization rate of coolant could be improved, and the maximum temperature of turbogenerator could be reduced. Based on the experimental data and plenty of related operations of a 200 MW air-cooled turbogenerator, two optimization designs about stator structure were proposed. One was to change the iron core thickness with the stableness of overall size, total losses of stator core and the number of stator ventilations, the other is to increase the number of ventilations and reduce their length with the stableness of the overall size and total losses of stator core. With CFD principle and 3-D finite volume method, the modeling equations of air turbulent flow in cooling ducts are solved, and the effect of the ventilations' structure changing on coolant utilization ratio and distribution of stator temperature were studied. The study shows that, by adopting the two optimal structures, coolant can take away more heat from generator and the maximum temperature of generator can be reduced up to 9.13 °C more than original structure.

KEY WORDS: optimal structure; 3-D fluid field; 3-D temperature field; overloaded running; air-cooled turbogenerator

摘要: 随着空冷汽轮发电机容量增加, 其组件的可靠性依

赖于冷却系统散热能力。合理的优化发电机定子通风结构, 可以提高传热介质的利用率, 降低电机温升。在 200 MW 空冷汽轮发电机定子实验研究数据和大量相关工作基础上, 提出了 2 种方案对电机定子结构进行优化: 方案 1, 保持电机总尺寸、损耗和通风沟数量的不变, 改变铁心厚度; 方案 2, 保持电机总尺寸和损耗不变, 增加通风沟的数量同时减小通风沟尺寸。根据计算流体力学原理, 应用有限体积法求解定子各径向风沟内空气的紊流流动等三维离散方程组, 研究了通风沟尺寸结构等几何量变化对整个电机温度场和流体介质的利用率的影响。研究表明, 优化后的 2 种结构能使流体带走更多的电机内产生的热量, 使计算出电机的稳态温升比实际结构计算出的温升最大下降 9.13 °C。

关键词: 结构优化; 三维流体场; 三维温度场; 过载运行; 空冷汽轮发电机

0 引言

以往, 受计算条件的制约, 多采用等值风路图的方法计算通风系统^[1-2]。随着计算技术的发展, 二维或三维数值计算方法^[3-12]应用于电机内温度场的计算。由于在电机通风计算过程中, 需用计算流体力学的数值计算方法, 对定子^[8-9]、转子^[13]通风道内冷却气体的流场进行完整的数学描述, 确定各部分流体流量和温度分布情况, 从而为定子多风路模型和优化后的多风路模型提供必要边界条件。因此, 仅针对一个方案, 就需做大量前期工作, 所以至今还没有关于电机定子结构优化的文献。

电机内的物理场是相互影响、相互制约、具有一定耦合关系的综合场, 其电机内部的通风冷却与

基金项目: 国家自然科学基金项目(50576021); 黑龙江省教育厅振兴老工业基地项目(成果转化); 黑龙江省重大科技攻关项目(GB05A303)。

Project Supported by National Nature Science Foundation of China (50576021); Project of Revitalizing Old Industrial Base of Heilongjiang Department of Education; The Key Science-Technology Project of Heilongjiang Province(GB05A303).

温度场是通过对流换热的方式联系在一起的。因此,要获得温度合理的分布,就要对通风结构尺寸进行优化计算。在这个寻优过程中,每重组一次通风结构,便使电机结构件和流体温度及其分布发生变化。可见,空间中任一个优化方案的确定都对应着2个复杂的数值函数——三维温度场和流体场的求解。本文在200 MW空冷汽轮发电机定子实验研究和文献[14-17]基础上,提出了2种方案,采用三维有限元的计算方法进行计算,对电机结构进行合理优化。方案被证实有效减低了电机内股线和铁心的温升,对电机结构优化有重要指导意义。

1 数学模型

1.1 运动方程

定子端部通风系统内的流体流动满足质量守恒定律、动量守恒定律。如果流动处于紊流状态,还要遵守附加的湍流运输方程。采用使用最广泛的标准 $k-\epsilon$ 方程模型^[18-20]。

1.2 能量方程和热传导方程

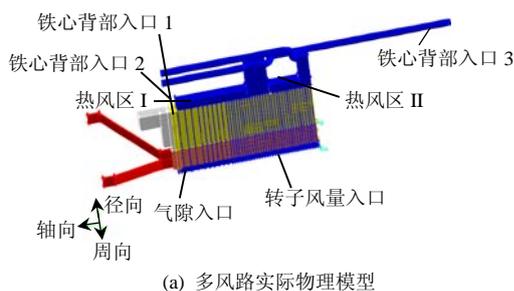
流体内的流动如果还伴随着对流换热等热能传递形式,则需要引入能量方程和热传导方程^[21],对新引入的未知量进行约束。

2 物理模型和基本假设

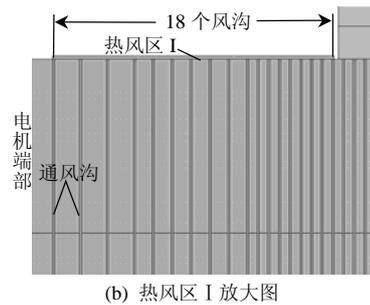
2.1 物理模型

在轴向,认为中心处截面为绝热面,两侧对称分布;周向选取1个槽和2个半齿,认为垂直周向处两侧截面都为绝热面,如图1(a)所示^[22]。模型中热风区I由19个沿轴向厚度不等的铁心叠片和18个沿轴向等长的通风沟及相应的齿槽等组成,如图1(b)所示。

由于靠近电机端部的10铁心叠片较厚,热容量较大,电机的最热段分布在热风区I的中间位置,但通风条件和叠片段较薄处相比基本相同。从而,造成了这部分绕组和铁心的温度高于其他位置。所以采用减薄铁心叠片厚度和增加通风沟个数,同时相应减小通风沟尺寸,2种方法对热风区I进行优化。



(a) 多风路实际物理模型



(b) 热风区 I 放大图

图1 多风路求解实际物理模型及热风区 I 放大图
Fig. 1 Physical model of multipath ventilation system and enlarged view

方案1:保持电机总体外部尺寸和铁心有效长度不变,同时保持热风区I通风沟总数和每个通风沟轴向长度不变,如图2所示。从电机端部起,保持第1个通风沟两侧的2个铁心叠片长度和实际模型相同,仅将剩余的铁心用17个通风沟,按长度平均分成17段。同时保持其他结构件尺寸均不变。

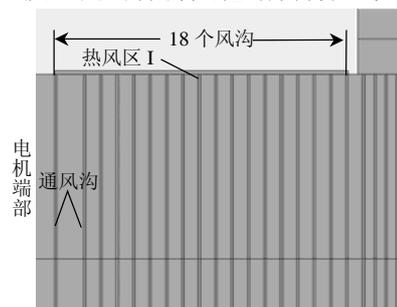


图2 热风区 I 18个通风沟优化模型

Fig. 2 Optimum structure of eighteen ventilations

方案2:在电机总体外部尺寸和铁心有效长度不变的情况下,增加通风沟数量,由18个增加到20个,同时减小20个通风沟的轴向长度,如图3所示。细化通风结构:从电机端部起,保持第1和第2个通风沟两侧的3个铁心叠片长度与实际模型相同;保持12~20共9个通风沟一侧的9个铁心叠片长度与实际模型相同。剩余的10通风沟将剩余的铁心按长度平均分配成9段。

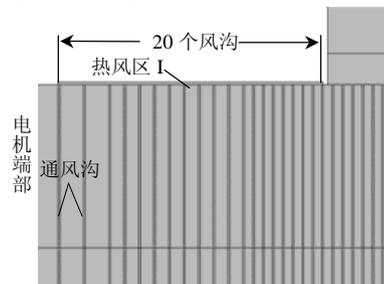


图3 热风区 I 20个通风沟优化模型

Fig. 3 Optimum structure of twenty ventilations

2.2 基本假设

基本假设^[14-17]如下:

1) 由于电机中流体的雷诺数很大($Re > 2\ 300$), 属于紊流, 因此采用紊流模型对电机内流场进行求解。

2) 在标准大气压下, 忽略大型空冷汽轮发电机中空气的浮力和重力的影响。

3) 电机内流场中, 流体流速远小于声速, 即马赫数(Ma 数)很小, 故把流体作为不可压缩粘性流体处理。

4) 槽楔近似当作与槽同宽, 槽内的所有绝缘热性能均认为与主绝缘相同。

5) 考虑定子绕组铜耗时, 上层线棒与下层线棒的损耗按照各股线的平均值加以考虑。

6) 定子铁心齿部损耗和定子铁心轭部损耗分别在定子齿部和轭部中平均分布。

7) 电机各固体部件间接触良好, 认为接触热阻为零。

2.3 边界条件

流体各入口边界条件^[18]给定如下:

1) 1 号和 2 号热风区出口给定为压力出口边界条件, 压力为 1 个标准大气压。

2) 入口 1、入口 2、入口 3、气隙入口以及转子流量入口均给定为质量流量入口边界条件, 且考虑流体经风扇升温的影响入口 1、入口 2、入口 3、气隙入口流体温度给定为 45 °C。

3) 转子流量入口流体温度和速度值根据参考文献^[12]计算得到。

4) 模型中的铁心齿部、铁心轭部和上层绕组、下层绕组均给定为热源体。

3 流体流速和温度计算结果及分析

3.1 流体速度计算结果

为了解和分析定子热风区径向通风沟内的流体流速和温度分布趋势, 以未优化前电机的第 34 号风沟(即从端部数第 9 个风沟, 位于热风区 I 的中部)为研究对象, 图 4 给出了它们的流体速度和温度分布情况。可以看到, 所有热风区内(由于选取的风沟位于热风区处)流体速度和温度分布趋势为齿根位置处流体速度最大, 分布于绕组两侧; 沿径向方向, 离齿顶越远流体速度越小, 同时流体的温度越高。同理, 所有冷风区内流体的速度和温度分布特性与热风区的相反。

图 5 给出了优化前、方案 1、方案 2, 3 种结构下, 各个通风沟内流体速度的分布情况。

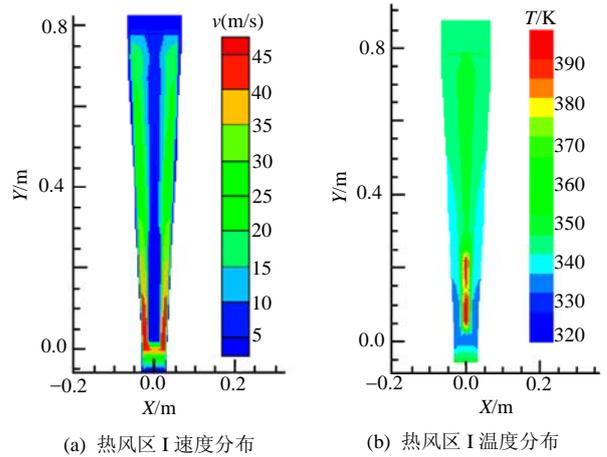


图 4 第 34 号风沟内流体速度和温度分布

Fig. 4 Distribution of temperature and velocity at No.34 ventilation

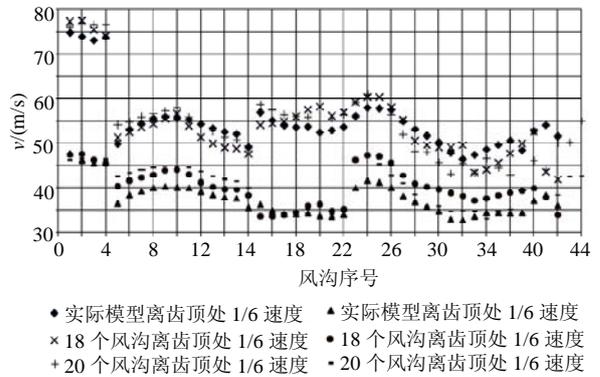


图 5 3 种方案定子齿部不同位置处流体流速分布

Fig. 5 Velocity distribution at different tooth zone of three physical models

图 5 中, 第 1 个风沟位于紧邻电机轴中心位置处, 之后编号依此递增, 靠近端部处的通风沟编号最大。所有风沟内流体的速度和温度数据采样点, 均位于每个通风沟沿轴向横截面处(若通风沟轴向长度为 6 mm, 则选取 3 mm 处做剖面), 在此剖面处, 每个通风沟都选取 2 个采样点, 如图 6 所示。

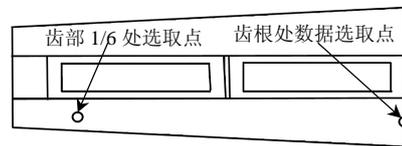


图 6 通风沟轴向剖面处数据选取点位置

Fig. 6 Position of calculation point physical model of multipath ventilation system

从图 5 可以看出, 方案 1 和方案 2 的 29~42(44)号风沟内流体, 在齿顶 1/6 处的速度小于优化前; 在 5~28 号风沟内流体在齿顶 1/6 处的速度一部分大于优化前速度, 还有一部分小于优化前速度, 分布于实际模型两侧, 变化不大; 而在 1~4 号风沟处位

置的速度大于优化前速度。同时,还可以看出两优化方案有一个共同趋势:25~42(44)号风沟齿根的速度高于未优化前的速度,虽然入口速度没有变大,齿根处的速度却有所增加。从以上分析可以看见,优化后通风沟内流体在定子齿部通风沟中流动时,流体的阻力变小了,冷却介质的利用率提高了。

3.2 流体温度场计算结果

图7给出了实际模型、方案1、方案2模型各通风沟齿顶1/6和齿根处流体的温度。可以看到,方案1和方案2中,热风区I(26~42(44)号风沟组成)和热风区II(5~16号风沟组成)内流体在齿根处温度与齿顶1/6处温度变化较大,不同方案、相同位置处温度点有较大的温差;2个冷风区(风沟1~4和风沟17~24)内流体温度变化不大,不同方案、相同位置处,温度点基本重合。

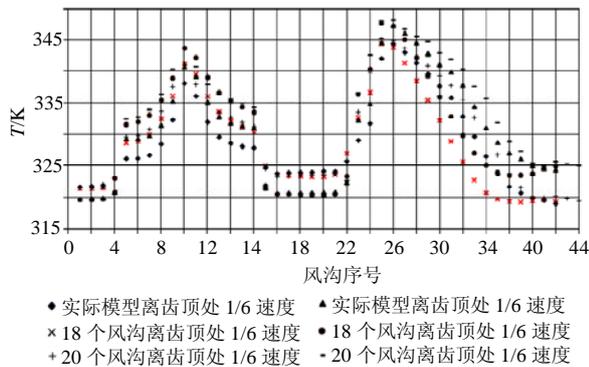


图7 3种方案定子齿部不同位置处流体温度分布

Fig. 7 Temperature distribution at different tooth zone of three physical models

为更加直观的看出流体在各通风沟内的温升情况,确定3种方案的流体冷却能力。选取上述3种方案温度的差值($T_{\text{齿根}} - T_{\text{齿1/6}}$)数据曲线,如图8所示。

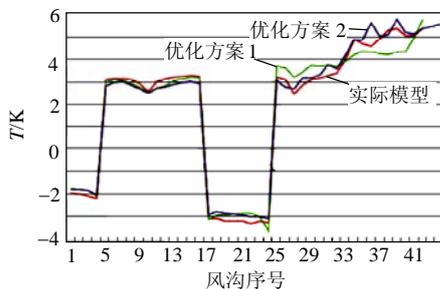


图8 通风沟内流体齿根处温度与齿部1/6处温度差

Fig. 8 Temperature subtraction of different region at ventilations of stator tooth

从图8可以直观的看出,方案1中,25~31号风沟内流体在齿根的温升大于实际模型温升,而32~42号风沟内流体温升小于实际模型温升;方案2中,25~44号风沟内流体齿根部温升大于实际模型

温升;3个模型1~24号风沟内流体温度变化不大,且5~16号风沟实际模型的流体温升略高于2种优化模型。

流体作为冷却介质,温度和速度是冷却介质的重要物理参数,不能分开单独考虑。结合以上流体流速和温度的分析结果可知,由于模型优化后热风区I温度和流速变化最大,其他位置变化不明显。这里只分析热风区I流体的冷却能力。未优化前计算得到该区域内各通风沟齿根处与齿顶1/6处,流体的温度差为 $4.09\text{ }^{\circ}\text{C}$;方案1中各风沟2位置处,流体的平均温度差为 $4.10\text{ }^{\circ}\text{C}$,可以看到此方案流体温度略高于优化前,且热风区I处通风沟齿根处流体速度大于其他2方案,平均比未优化前大 5 m/s 。其冷却能力优于优化前;方案2各通风沟内求取流体在2位置温差的平均值为 $4.39\text{ }^{\circ}\text{C}$,且流体流速大于优化前,所以同样可以很容易的判断优化模型2流体的冷却效果好于实际模型。但两优化方案哪个更好,并不能很容易的判断出来,需要经过分别计算出此区域方案1和方案2中流体带走的总热量 Q 后才能确定。

4 优化前后定子温度场计算结果对比分析

4.1 不同结构下定子上层股线温度对比分析

为了更加直观的看出哪种方案流体的散热能力更强,选取电机内重要结构件,分析其在不同方案下温度场的分布情况。由于电机内最热部分一般出现在电机定子上层绕组上,定子齿部铁心温度次之。本文对这两部分的温度分布,进行对比分析。

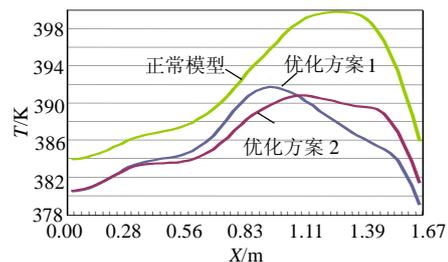


图9 3种方案中定子上层股线温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of upper coil in three physical model

从图9可以看出,优化后的2种方案计算出的上层股线温度值低于未优化前的温度,且温度在半个轴向范围整体下降,冷却效果明显好于为优化前,且优化方案2上层股线的最高温度低于方案1。与第3节流体分析结论一致,2优化方案流体冷却能力好于优化前,对应的定子上层股线温度低于优化前温度的计算值。同时还可以看到,2条优化后

的股线温度曲线都有一个共同的特点：有 5 个拐点，3 个极大值。经过分析不难看出，3 个极大值都分布在热风区位置处。曲线的分布趋势可以从侧面反映出第 3 节每个位置处流体冷却能力的大小，即在同一条股线温度分布曲线上，斜率绝对值较大的，对应位置处流体散热能力越强。

表 1 给出了 3 种方案电机定子上层股线的最高温度值及其所在位置。

表 1 3 种方案上层股线的最高温度及位置
Tab. 1 Maximum temperature distribution of upper coil in three physical model

方案	最高温度/℃	轴向位置/m
实际模型	126.77	1.318
方案 1	118.55	0.927
方案 2	117.64	1.102

从表 1 可以看出，对电机模型进行优化后，电机的最高温度下降了 9.13℃，最高温度位置向电机中部移动，可以明显反应出优化方案 2 效果稍好于方案 1，但此结构增加了铁心和通风沟个数，制造起来较为复杂。

4.2 不同结构下定子齿部铁心温度对比分析

由于定子齿部铁心紧邻电机的上下层股线，并且其热密和绕组为同一数量级，加之靠近电机端部铁心段较厚，其温度往往和绕组相差无几。未优化前，电机靠近端部的 4 段铁心叠片较厚；方案 1 中，端部处较厚的铁心叠片改为 2 段；方案 2，端部处较厚铁心改为 3 段。图 10 为 3 种结构下，齿部铁心几何中心处温度轴线分布曲线。

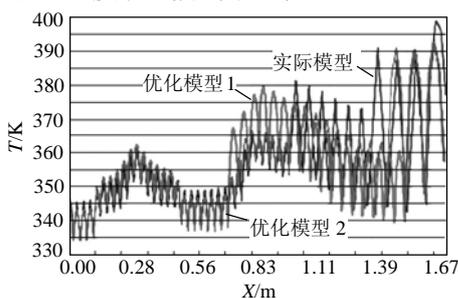


图 10 3 种方案时定子铁心温度场分布
Fig. 10 Temperature distribution of stator core in three physical models

从图 10 可以看到，铁心齿部的温度在轴向方向上，呈现锯齿状分布。这是由于铁心两侧通风沟的作用，带走了铁心内部的热量，同时又由于铁心叠片两侧的散热系数远大于铁心的轴向导热系数，造成了同一铁心叠片温差较大，中部高，两侧低的分布趋势；同时还看到，热风区的温度较高，冷风区的温度较低。这是由于流入热风区的流体，大部分

已经经过了冷风区铁心或转子绕组加热，流体温度升高，造成温差较小，同时热风区的流速低于冷风区流速，这样会使流体的散热能力变差。针对这部分温度分布的分析同样可用于解释第 3 节中定子上层股线处温度的极大值为何分布在电机的热风区。

从图 10 的 3 条曲线还可以看出，优化后的两方案，端部第 1 个铁心叠片的最高温度低于优化前的温度值：未优化前铁心齿部最高温度为 125.31℃，而采用优化方案 1 时铁心最高降低了 5.48℃，方案 2 对铁心的冷却效果也较好，最高温度为 119.34℃，但最高温度出现的位置 3 种方案基本相同，位置都分布在距离电机轴中心切面 1.661 m 位置处(如图 9 所示)。

在 0~0.73 m 位置处，两优化方案温度分布与优化前温度分布没有显著变化。方案 1 在 0.73~1.06 m 位置处铁心的温度高于未优化前；方案 2 在整个轴向段温度都低于优化前。

4.3 不同方案时定子层间绝缘计算温度与实测温度对比

测温区域如图 11 所示，温度的实测结果为测温区温度的平均值，计算结果也是在此区域选取多点温度值后计算的平均值。

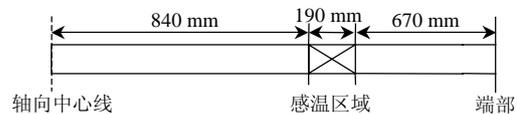


图 11 定子层间绝缘测温元件分布图
Fig. 11 Thermometric component distribution in inter-layer insulation

由于实际模型已经得到了温度的实验数据，而方案 1、2 目前正处在理论设计阶段，为了验证计算方法的准确性，给出了实际模型层间绝缘温度的实测值和计算值及 2 优化模型的计算值，如表 2 所示。实际模型中层间绝缘温度计算值和实测值的计算误差为 3.7%，符合工程要求。

表 2 层间绝缘计算结果与实测值比较
Tab. 2 Calculation results comparing with test value at inter-layer insulation

方案	计算结果/℃	实测结果/℃
实际模型	104	108
方案 1	108	—
方案 2	103	—

从表 2 可以看出，虽然优化方案 1 在测温区中层间绝缘间的温度有所上升，但此区域的温度值不是电机内的最高温度。这部分温度上升的主要原因是这个位置铁心相应加厚造成的。由图 10 可知，铁

心和层间绝缘的温度分布趋势相同, 这里就不再列举层间绝缘的数据加以说明了。

5 结论

1) 优化后的方案在热风区 I 处流体速度变化最明显。齿根 1/6 处流体的速度小于优化前, 而齿根速度大于优化前优化方案, 表明优化后方案流体在热风区通风沟内风阻减小了, 冷却介质的利用率提高了。

2) 优化方案 2 热风区 I 处, 各通风沟内流体经过齿顶 1/6 到齿根处电机定子内结构件的加热后, 平均温升比未优化时高, 且速度大, 冷却效果比未优化方案好; 而对于优化方案 1 热风区 I, 虽然各流体的平均温升低于优化前, 但流体流速较快, 流体冷却效果同样好于未优化方案。

3) 采用方案 1 时, 电机定子上层股线温度的最大值比未优化前低 8.22 °C; 采用方案 2 时, 电机定子上层股线温度的最大值比未优化前低 9.13 °C。最高温度位置向电机中部移动。

4) 采用方案 1 端部铁心最高温度的计算值下降 5.48 °C; 方案 2 端部铁心最高温度的计算值下降 5.97 °C。两优化方案对热风区 I 处温度变化较明显。

5) 电机内温度较高的 2 个结构件温度计算值在两方案下都有一定程度下降, 所以采用优化后方案制造出的电机可以提供更大的负载电流, 使电机处于超发状态, 提高经济效益和安全性。

参考文献

- [1] 温嘉斌, 孟大伟, 周美兰, 等. 大型水轮发电机通风发热场模型研究及通风结构优化计算[J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 1-5.
Wen Jiabin, Meng Dawei, Zhou Meilan, et al. Field model research of ventilation and heat and optimal calculation of ventilation structure for large water wheel generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(6): 1-5(in Chinese).
- [2] 石中文, 许承千. 大中型异步电机混合通风及发热的综合计算[J]. 大电机技术, 1993(5): 33-39.
Shi Zhongwen, Xu Chengqian. Synthesis calculation of mixed ventilation and heat for large and medium induction motor [J]. 1993(5): 33-39(in Chinese).
- [3] 李德基, 曹国宣. 汽轮发电机氢气直接冷却转子的三维温度场计算[J]. 电工技术学报, 1986, 1(3): 1-8.
Li Deji, Cao Guoxuan. Three-dimensional temperature field calculation of turbo generator rotors by hydrogen direct cooling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1986, 1(3): 1-8.
- [4] 李德基, 白亚民, 曹国宣. 发电机暂态三维温度场的计算[J]. 中国电机工程学报, 1989, 9(5): 56-63.
Li Deji, Bai Yamin, Cao Guoxuan. Transient three dimensional temperature field calculation in generators[J]. Proceedings of the CSEE, 1989, 9(5): 56-63.
- [5] 李和明, 李俊卿. 电机中温度计算方法及其应用综述[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(1): 1-5.
Li Heming, Li Junqi. Review on temperature computation and application in electric machines[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(1): 1-5(in Chinese).
- [6] 姚若萍, 饶芳权. 蒸发冷却水轮发电机定子温度场研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 87-90.
Yao Ruoping, Rao Fangquan. Research on stator thermal field of evaporation cooling hydro-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 87-90(in Chinese).
- [7] Aldo D, Andre C, Maria L, et al. A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 945-952.
- [8] Rajagopal M S, Seetharamu K N, Aswatha PA, et al. Finite element analysis of radial cooled rotating electrical machines[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 1999, 9(1): 18-38.
- [9] 李伟力, 靳慧勇, 丁树业, 等. 大型同步发电机定子多元流场与表面散热系数数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 138-143.
Li Weili, Jin Huiyong, Ding Shuye, et al. Numerical calculation and analysis of large synchronous generator stator multidimensional fluid fields and surface heat transfer coefficients[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 138-143.
- [10] 李伟力, 丁树业, 靳慧勇. 基于耦合场的大型同步发电机定子温度场的数值计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 129-134.
Li Weili, Ding Shuye, Jin Huiyong. Numerical calculation of large synchronous generator stator temperature fields based on coupled fields[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 129-134.
- [11] 靳慧勇, 李伟力, 马贤好, 等. 大型空冷汽轮发电机定子内流体速度与流体温度数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 168-173.
Jin Huiyong, Li Weili, Ma Xianhao, et al. Calculation and analysis of fluid velocity and fluid temperature in large air-cooled turbo-generator stator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 168-173.
- [12] 路义萍, 李伟力, 马贤好, 等. 大型空冷汽轮发电机转子温度场数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 7-13.
Lu Yiping, Li Weili, Ma Xianhao, et al. Numerical simulation of temperature field in rotor of large turbo generator with air-coolant [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(12): 7-13.
- [13] 路义萍, 阴文豪, 谈和平, 等. 汽轮发电机转子三维温度场耦合计算[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(4): 659-661.
Lu Yiping, Yin Wenhao, Tan Heping, et al. Coupled calculation of three dimensional temperature field in rotor of turbo generator [J]. Journal of Engineering Thermo physics, 2008, 29(4): 659-661(in Chinese).
- [14] 李伟力, 侯云鹏, 周封, 等. 汽轮发电机径切两向空冷系统转子温度场的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 74-78.
Li Weili, Hou Yunpeng, Zhou Feng, et al. Calculating method of rotor temperature fields of turbo-generator with radial and tangential air-cooling system[J]. Proceeding of the CSEE, 2000, 20(8): 74-78(in Chinese).
- [15] 丁树业, 李伟力, 马贤好, 等. 特殊绕组结构的空冷汽轮发电机定子三维温度场计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 140-145.
Ding Shuye, Li Weili, Ma Xianhao, et al. Calculation and analysis of

- 3d stator temperature field for air cooled turbo-generator with special windings structure[J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(22): 140-145(in Chinese).
- [16] 李伟力, 周封, 侯云鹏, 等. 大型水轮发电机转子温度场的有限元计算及相关因素的分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 85-90.
Li Weili, Zhou Feng, Hou Yunpeng, et al. Calculation of rotor temperature field for hydro-generator as well as the analysis on relevant factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 85-90(in Chinese).
- [17] 李伟力, 付敏, 周封, 等. 基于流体相似理论和三维有限元法计算大中型异步电动机的定子三维温度场[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 14-17, 21.
Li Weili, Fu Min, Zhou Feng, et al. Calculation of 3D stator temperature fields of large and medium scale synchronous motor on the basis of theory of fluid similarity and 3D FEM[J]. Proceeding of the CSEE, 2000, 20(7): 14-17, 21(in Chinese).
- [18] A. N. 鲍里先科. 电机中的空气动力学与热传递[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985: 121-183.
A. N. Borisenko. Aerodynamics and heat transfer in the motor [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1985: 121-183.
- [19] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 48-142.
Zhang Zixiong, Dong Zengnan. Viscous hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 48-142.
- [20] Wiggert P. 液体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 106-183.
Wiggert P. Mechanics of fluids[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003: 106-183.
- [21] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 54-157.
Tao Wenquan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 54-157.
- [22] 李伟力, 杨雪峰, 顾德宝. 空冷汽轮发电机冷却气流流量对定子内流体的影响[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 53-61.
Li Weili, Yang Xuefeng, Gu Debao. Influence of air current flow change on fluid flow and heat transfer of air-cooled turbo-generator with multipath ventilation[J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(21): 53-61(in Chinese).



霍菲阳

收稿日期: 2009-11-04。

作者简介:

霍菲阳(1979—), 女, 助理研究员, 主要研究方向为电机与电器, Huofei1980mail@126.com;

李勇(1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大电机综合物理场的数值计算, erhei1215@163.com;

李伟力(1962—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为大型电机综合物理场和特种电机理论, li.weili@yeah.net;

杨雪峰(1982—), 男, 主要研究方向为大电机综合物理场的数值计算, yang7932955@163.com。

(责任编辑 王剑乔)