

异步风力发电机流动与传热分析及优化设计

徐起连, 陈秀平, 李岩
(江苏中车电机有限公司, 江苏 大丰 224115)

摘要: 为了研究兆瓦级风力发电机内部流体流动与传热特性, 以 1 台异步风力发电机为研究对象, 基于计算流体力学(CFD)与数值传热学(NHT)基本原理, 采用有限体积法对发电机进行整机建模, 对流场与温度场进行数值计算。通过与试验数据的对比分析, 验证了计算方法的正确性与准确性。对发电机内部流场温度场进行了分析, 获得兆瓦级风力发电机冷却介质流动特性。最后, 对发电机通风道布置方案下进行了优化, 有效降低了发电机热点温升。

关键词: 异步风力发电机; 整机流场; 发电机温升; 有限体积法; 优化设计

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)04-0081-06

doi: 10.12177/emca.2019.189

Flow and Heat Transfer Analysis and Optimum Design of Asynchronous Wind Power Generator

XU Qilian, CHEN Xiuping, LI Yan
(Jiangsu CRRC Electric Co., Ltd., Dafeng 224115, China)

Abstract: In order to study the fluid flow and heat transfer characteristics in a megawatt wind power generator, based on the basic principles of computational fluid dynamics (CFD) and numerical heat transfer (NHT), the finite volume method is used to model the generator, and the flow and temperature fields are calculated numerically. The correctness and accuracy of the calculation method are verified by comparing the calculation results with the experimental data. The temperature field of the internal flow field of the generator is analyzed, and the flow characteristics of the cooling medium of the megawatt wind power generator are revealed. Based on the analysis, the generator ventilation duct layout scheme is optimized, effectively reducing the temperature rise at the generator hot spots.

Key words: asynchronous wind power generator; whole machine fluid field; generator temperature rise; finite volume method; optimum design

0 引言

近年来, 风电行业发展迅速, 使高功率密度风力发电机广泛普及。随着发电机单机容量的增大, 发电机损耗也不断增加。在极端过热天气下, 电机温升会出现过高现象, 导致电机绝缘烧毁^[1], 降低发电机运行的安全性与可靠性, 增加维修费用。异步风力发电机由于过载能力强、动态响应

速度快、起动加速性能好等优点^[2], 正广泛应用于风力发电领域。因此, 对兆瓦级异步风力发电机进行整机模型的流动与传热数值分析及优化较为迫切。

目前对电机温升的研究方法主要包括: 有限元法^[3]、有限体积法^[4]、等效热路法^[5]等。对风力发电机进行温度场计算, 研究的机型主要包括双馈异步风力发电机^[6]、中速永磁风力发电

收稿日期: 2019-12-25; 收到修改稿日期: 2020-03-02

作者简介: 徐起连(1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电机传热与流动数值模拟。

陈秀平(1993—), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电机传热与流动数值模拟。

机^[7]、直驱永磁风力发电机^[8]。主要冷却方式包括空空冷^[9-10]、空水冷^[11]等,为风力发电机产品的高性能设计提供了充足的理论依据。针对兆瓦级异步风力发电机在全域范围内流体流动特性的研究以及对通风道排布进行优化设计的研究成果较少。

本文以 4.8 MW 的异步风力发电机为研究对象,采用有限体积法对发电机流场及温度场进行全域范围内的仿真计算,并进行了该电机的温升试验。通过对比仿真计算结果与温升试验结果,验证了该计算方法的可靠性与准确性。对发电机全域范围内的温度场流场进行了分析,得到了兆瓦级异步风力发电机全域范围内的温度分布。在此基础上,提出通风道优化布置方案,对异步风力发电机通风冷却结构设计具有一定的指导意义。

1 物理数学模型及网格剖分

1.1 物理模型

根据异步风力发电机的结构及通风系统特点,既不存在对称性也不存在周期性,因此温度场计算模型为发电机整机的三维模型。发电机三维全模型结构如图 1 所示。发电机铁心段共计 31 段,通风道 30 段。通风道布置规律如下:靠近非驱动端(N 端) 16 段铁心,每段厚 20 mm;中间 5 段铁心,每段厚 24 mm;靠近驱动端(D 端) 10 段铁心,每段厚 35 mm;径向通风道轴向宽度为 6 mm,共 30 个通风道。

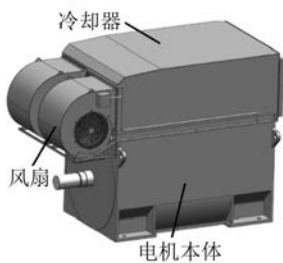


图 1 发电机三维全模型结构

发电机冷却方式为 IC616,通风系统如图 2 所示。该异步风力发电机冷却方式采用空空冷。外风路由 2 台离心风扇并联,向换热管内甩入冷空气,并带走发电机内部的发热量;内风路为双侧对称径向通风系统,在发电机转子作用下,发电机内的热空气依次流经发电机定子通风槽以及机座

通风道后进入冷却器,通过冷却器隔板的作用流动方向发生转变,热空气被冷却后从发电机的两端进入电机,在通过发电机转轴进入转子通风槽内,形成 2 个独立的并联风路。

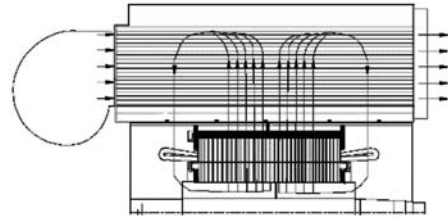


图 2 发电机通风系统示意图

1.2 控制方程及边界条件

考虑到异步风力发电机内部流体流动的复杂性,为了简化求解过程,作出如下假设^[12-13]:

- (1) 由于电机转速较高,电机内的流动为湍流流动;
- (2) 流体为不可压缩的牛顿流体;
- (3) 壁面采用无滑移边界条件;
- (4) 忽略辐射的影响。

基于以上假设以及计算流体力学(CFD)^[14]、数值传热学的基本原理^[15],可得本文模型求解的基本控制方程^[16-17],具体如下。

连续性方程为

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

式中: u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度矢量。

动量方程为

$$\begin{cases} F_x - \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{du}{dt} \\ F_y - \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{dv}{dt} \\ F_z - \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{dw}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_x 、 F_y 、 F_z 为 x 、 y 、 z 方向质量力; p 为压力; ν 为运动黏度。

能量方程为

$$\frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_T \quad (3)$$

式中: T 为温度; λ 为流体的导热系数; C_p 为定压

比热容; S_T 为流体的内热源及因流体黏性导致的机械能转换为热能的部分。

基于以上假设和数学模型, 设定求解边界条件如下:

- (1) 外风路离心风扇转速为 1 720 r/min, 发电机转子旋转域转速 1 480 r/min;
- (2) 发电机外表面为自然对流, 设置对流换热系数为 $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
- (3) 在发电机定子绕组、转子导条及端环等发热部件根据发电机损耗设置发热源。
- (4) 以一个标准大气压为初值, 设置出风口为压力出口。

1.3 网格剖分

由于异步风力发电机结构细节特征较多, 考虑到计算资源的有限性, 对发电机进行以下简化:

- (1) 计算模型去除发电机零部件一些微小倒角、台阶;
- (2) 发电机损耗在相应部件均匀分布;
- (3) 绝缘等效处理, 处理方法如图 3 所示。

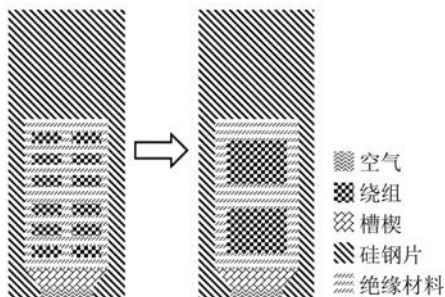


图3 绝缘等效处理办法

采用 ICEM 以结构化网格为主, 结合非结构化网格对发电机进行网格剖分, 共计网格数量 5 400 余万, 最低网格质量大于 0.1, 平均网格质量 0.9, 能够满足流体计算要求, 网格剖分细节如图 4 所示。

2 试验与计算结果对比分析

在基本假设的前提下, 对计算模型输入发电机额定运行工况下的边界条件及损耗值, 采用有限体积法对异步风力发电及内部的流场温度场进行计算, 以得到全域范围内异步风力发电机各部件温度分布以及冷却介质在各个通风位置的流场分布情况。

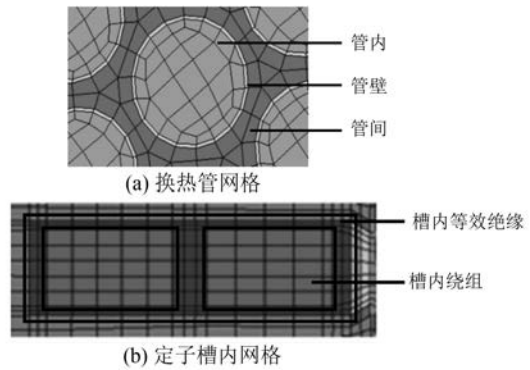


图4 发电机网格划分情况

为了验证本文计算方法的可靠性以及计算结果的准确性, 将异步风力发电机在额定工况下运行。在试验刚开始、刚停机以及在试验过程中每隔 5 min 记录定子绕组温度传感器测量的温度值。当发电机定子温度传感器测得的温度值在 1 h 内温度变化小于 1 K 时, 即可认定发电机温升达到稳定状态。将达到稳定状态的发电机绕组温升值与数值计算结果对比, 图 5 所示为从外风路出风口视角看定子绕组周向 6 个测温点埋置位置。图 6 所示为定子绕组测温点轴向位置。图 6 中 A 点为定子绕组测温点轴向分布位置。

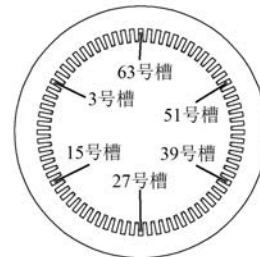


图5 定子绕组周向测温点埋置位置

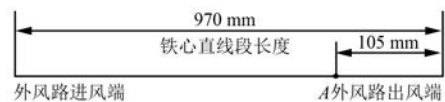


图6 定子绕组测温点轴向位置

发电机在测温点温升计算值与试验值对比如表 1 所示。从表 1 可以看出, 最大计算误差在 5% 以内, 满足工程计算精度要求, 由此可知, 本文采用的计算方法可靠, 计算结果较为准确。

表 1 发电机温升仿真值与试验值对比

测温槽号	仿真/K	试验/K	相对误差/%
3	94.9	98.9	4.04
15	95.1	92.1	3.26
27	94.8	96.7	1.96
39	94.9	94.1	0.85
51	98.2	97.1	1.13
63	92.8	91.0	1.98

3 发电机内流动与传热特性分析

3.1 发电机内流场分析

对现有电机结构采用与试验相同的环境温度(24 ℃)进行仿真计算。图 7 所示为发电机内部空气迹线。从图 7 可以看出,随着发电机的转动,内部空气被搅拌,发电机内风路走向为两端进风,中间出风,与图 2 的风路设计思路相吻合,发电机内空气的转动方向为,从驱动端沿轴向看,空气逆时针流动,与发电机的转速方向一致,发电机内空气最大流速约为 72.2 m/s,分布于定转子气隙处。

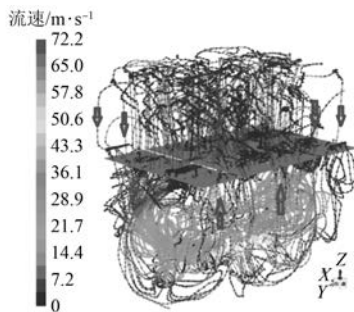


图 7 发电机内部空气迹线

发电机模型在各通风道内流量分布如图 8 所示。从图 8 可以看出,通风道内的流量分布在轴向上,左右对称,两侧通风道内流量较小,靠近发电机轴向中间位置流量较大。这是因为流体经端部后流进转轴辐板内,由于惯性的作用,冲击到电机中间位置的流体较多,所以两侧通风层内流量分配较少。

3.2 发电机内温度场分析

图 9 所示为电机内风路进口风温。电机内风路靠近驱动端的进口温度分别为 48.3 ℃,靠近非驱动端进口温度 50.9 ℃,发电机内风路进口非驱动端比驱动端高了 3 K。图 10 所示为发电机绕组、转子导条及端环温度分布。外风路的冷却介质是由电机驱动端流向非驱动端,但该电机热点

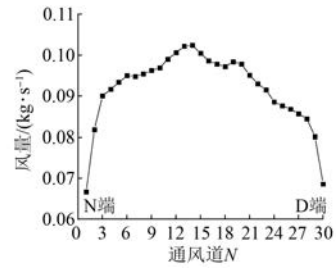


图 8 通风道内流量分布

位置出现在靠近驱动端绕组上,这是因为在电机初步设计阶段考虑到电机两端进口风温的差异性,对通风道的排布进行了调整,但由于缺乏经验,调整过度,造成电机温升依然存在较大不均匀性。

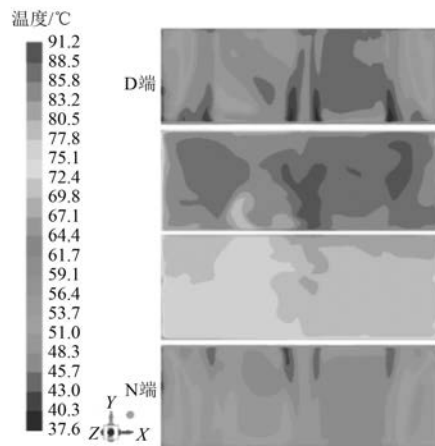


图 9 内风路进出口温度

图 11 所示为定转子铁心段最大温升及平均温升。从图 11 可以看出,发电机温度在轴向上呈现不均匀分布,靠近驱动端定子铁心及绕组温度较高,发电机热点位于靠近驱动端第 5、6 段铁心附近的绕组上。该发电机采用 H 级绝缘,发电机热点温升为 101.89 K,在 H 级绝缘材料的耐温极限范围内。定转子铁心的最高温升比平均温升约高了 10 K。

4 通风道布置优化设计

4.1 通风道优化布置方案

发电机绕组温度过高会对绝缘材料产生不利影响:(1)影响绝缘性能和寿命,对于 A、B、H 级绝缘,温度每升高 8、10、18 ℃,绝缘寿命会降低一半^[18];(2)电机绕组温度过高会引起某些相关零

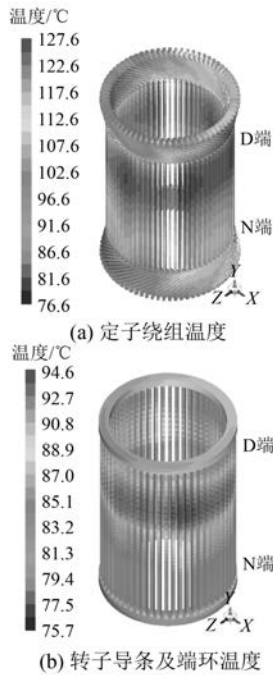


图 10 发电机绕组、转子导条及端环温度分布

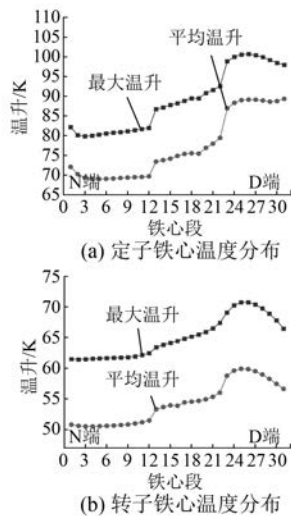


图 11 发电机定转子温升

部件材料热应力增大,铁心轴向温度分布不均匀,会增加因热膨胀不均匀引起的变形量从而导致绝缘寿命缩短^[19-20]。因此,发电机温升计算不仅需要核算发电机温升是否超出绝缘等级对应的温升极限,还需要使绕组沿轴向温度分布尽可能均匀。

根据发电机内风路两端进风温度的差异,合理布置定转子通风道,可以使发电机内风路冷却介质在定转子冷却风道内按照适当比例分配,保

证冷却介质与各发热部件具有合适的温升。发电机其他结构尺寸不变,仅改变定转子铁心分段,对其通风道布置进行优化设计。基于以上思想,提出了 2 种通风道布置优化方案。

方案 1:靠近非驱动端 16 段铁心,每段厚 25 mm,靠近驱动端的 15 段铁心,每段厚 26 mm,径向通风道轴向宽度为 6 mm,共分布 30 个通风道。

方案 2:靠近非驱动端第 1 段铁心厚 30 mm,中间有 24 mm 厚铁心 12 段,26 mm 厚铁心 17 段,最后 1 段靠近驱动端铁心厚 30 mm,径向通风道轴向宽度为 6 mm,共分布 30 个通风道。

4.2 通风道优化布置方案下的计算结果

根据发电机运行环境的最高温度(42 ℃),对原有通风道布置方案以及 2 种优化通风道布置方案下发电机温升进行了计算。图 12 所示为不同通风道布置方案下发电机轴向温度分布。从图 2 可以看出,原有通风道布置方案下发电机的温度在轴向上呈现不均匀分布,靠近 D 端定子定转子铁心温度较高,发电机热点位于靠近 D 端第 5、6 端铁心附近的绕组上。在 2 种优化通风道方案布

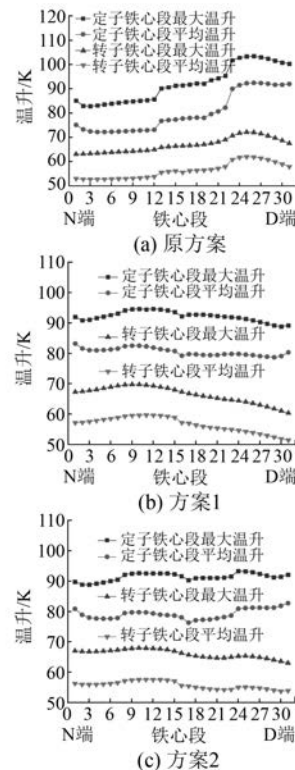


图 12 不同通风道布置方案下定转子铁心温度分布

置下,发电机定转子通风道内冷却介质的流量分配合适,发电机轴向温升均匀性较好。

不同通风道布置方案下发电机的温升如表 2 所示。从表 2 可以看出,2 种优化通风道布置方案下绕组最高温升比原方案分别降低了 6.14 K 和 7.17 K,平均温升降低不明显。通风道优化布置方案能明显降低绕组热点温升,对于提高发电机运行的安全可靠意义意义重大。从工艺实施难易程度方面考虑,方案 1 更具优势。

表 2 不同通风道布置方案下发电机绕组温升 K

	原方案	方案 1	方案 2
平均温升	88.21	87.98	87.73
最高温升	104.29	99.18	98.05

5 结 语

本文以某兆瓦级异步风力发电机为研究对象,对发电机整机模型进行了流场及温度场计算,并对原有通风道排布方案进行了优化设计,得出以下结论:

(1) 计算异步风力发电机在与试验相同环境下绕组的温升,并与试验值进行了对比,最大计算误差在 5% 以内,在工程允许误差范围内,验证了本文所采用计算方法的可靠性。

(2) 在原有通风道布置方案下发电机轴向温度分布不均匀,靠近 D 端定子铁心及绕组温度较高,发电机热点就位于靠近 D 端第 5、6 端铁心附近的绕组上。

(3) 在 2 种优化通风道方案布置下,发电机定转子通风道内冷却介质的流量分配合适,发电机轴向温升具有较好均匀性,绕组最高温升比于原方案分别降低了 6.14 K 和 7.17 K。

(4) 在对通风道进行优化设计时,不仅要考虑发电机的温升,还要考虑工艺实施的难易程度。与方案 2 相比,方案 1 在使发电机轴向温度均匀分布的同时具有更好的工艺性。

【参考文献】

[1] 曾凡辉,姜其斌,陈宏宪,等.风力发电机用表面绝缘涂料的研究[J].绝缘材料,2010,43(2): 17.
 [2] 寿海明,冀路明,马守军.现代船用推进电机技术研究[J].船电技术,2007,27(1): 36.
 [3] 石晶,魏丹,牟晓松.汽车发电机温度场有限元分析

与计算[J].微电机,2015,48(5): 41.
 [4] 丁树业,王海涛,邓艳秋,等.异步驱动电机流体流动特性数值研究[J].中国电机工程学报,2016,36(4): 1127.
 [5] 姜洋,黄晓艳.基于热网络的机载直流无刷电机散热仿真分析[J].微电机,2013,46(6): 19.
 [6] 丁树业,孙兆琼,徐殿国,等.3 MW 双馈风力发电机传热特性数值研究[J].中国电机工程学报,2012,32(3): 137.
 [7] 李伟力,程鹏,张美巍,等.1.5 MW 永磁风力发电机电磁场与温度场计算与分析[J].电机与控制学报,2010,14(12): 52.
 [8] 邵平安,王晓慧,付小敏.高海拔直驱永磁风力发电机的绕组温升分析[J].电机技术,2018(1),9.
 [9] 李宗树,杨万青.大中型异步电机的通风散热[J].防爆电机,2017,52(6): 50.
 [10] TRAXLER-SAMEKG, ZICKERMANN R, SCHWERY A. Cooling airflow, losses, and temperature in large air-cooled synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 172.
 [11] 葛铭纬,高洁,邓英,等.1.5 MW 风力发电机组电机散热系统设计研究[J].太阳能学报,2017,38(3): 648.
 [12] LIU Y, LEE Y, JUNG H K, et al. 3D thermal stress analysis of the rotor of an introduction motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1394.
 [13] 丁舜年.大型电机的发热与冷却[M].北京:科学出版社,1992: 15-43.
 [14] 王福军.计算流体力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004: 7-11.
 [15] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2001: 347-353.
 [16] 丁树业,葛云中,孙兆琼,等.高海拔用风力发电机流体场与温度场的计算分析[J].中国电机工程学报,2012,32(24): 74.
 [17] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006: 205-206.
 [18] 魏雪环,兰志勇,谢先铭,等.永磁体涡流损耗与永磁同步电机温度场研究[J].电机与控制应用,2015,42(5): 28.
 [19] 丰帆,郑国丽,黄鹏程,等.异步牵引电机冷却设计的分析与验证[J].电机控制与应用,2017,44(6): 63.
 [20] 陈敏祥.温度应力对电动机可靠性及寿命的影响[J].中小型电机,1998,25(3): 18.