

# 基于 ANSYS 的风力机组发电机轴承热分析

郭艳伸<sup>1</sup>, 常喜强<sup>2</sup>, 张新燕<sup>1</sup>, 雷晨昊<sup>3</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 国网新疆电力公司调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830006;

3. 国网新疆乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 风力发电产业发展迅速, 提高发电机组可靠性成为了一个重要的课题, 其中发电机轴承运行可靠性就是其中之一。利用传热学、摩擦学理论分析了风力发电机轴承正常及风速突变状态下的发热机理和传热特点, 通过 ANSYS 软件建模求解出温度场、热流密度等热力学量并对求解结果进行分析。研究结果对风力发电机轴承故障诊断以及优化设计有参考意义。

**关键词:** 风力发电机; 可靠性; 传热; 轴承; 温度场

**Abstract:** With the rapid development of wind power industry, it has become an important subject to improve the stability of generating unit, including the reliability of generator bearing operation. Using heat transfer theory and tribology theory, the heating mechanism and heat transfer characteristics of wind turbine bearing are analyzed under the normal wind speed and the wind speed mutation. The bearing is modeled by ANSYS software to calculate the temperature field, heat flux density and other thermodynamic quantities, and the results are analyzed to deduce some conclusions, which gives a reference value to fault diagnosis of wind turbine generator bearings and its design optimization.

**Key words:** wind turbine generator; reliability; heat transfer; bearing; temperature field

中图分类号: TM14 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)04-0006-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.04.002

当今世界全球变暖、能源紧缺以及环境污染问题日趋严重, 许多国家都把发展可再生能源当做一项重要的战略举措, 所以近些年包括风电在内的可再生能源发展迅速, 风电已经成为继火电和水电之后的第三大主力电源<sup>[1]</sup>。

风力发电机组故障率偏高, 加之风电机组轮毂高以及地处环境恶劣等因素的影响, 使得维修成本高、维修周期长、维修困难的问题阻碍了风力发电产业的发展<sup>[2]</sup>。为了风力发电的大规模发展并且提高发电效益, 就要提高风力机组的故障诊断技术, 做到能预防为主, 提前发现缺陷, 防止设备故障的发生, 能科学安排检修计划, 提高风力机组稳定性, 做到效益最佳。

在风力机组常发生的故障中, 发电机轴承失效发生率较高, 故障类型包括磨损失效、疲劳剥落、腐蚀失效、断裂失效、压痕失效、胶合失效和保持架损坏<sup>[3]</sup>。这些故障无一不伴随着电机轴承温度场的变化, 所以监测轴承温度场的变化就可以了解轴承

的运行状态以及故障状况。风力发电机轴承的热力学分析为风力机组故障诊断提供了理论依据。

## 1 风力发电理论

### 1.1 风能

风力发电就是利用风能发出电能的发电设备。根据动能定理, 运动的物体就具有能量, 单位时间内流过半径为  $R$  的风力机的风能即风功率为

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (1)$$

式中  $m$  为空气质量,  $\text{kg}$ ;  $v$  为风速,  $\text{m/s}$ ;  $\rho$  为空气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $A$  为风力机叶轮扫过面积,  $\text{m}^2$ 。

当风能流过的横截面积为单位面积即为  $1 \text{ m}^2$  时所计算出的风功率就是风能密度。

$$W = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 风能密度和风速的三次方成正比, 因此单位风速的增加会造成风能密度较大

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51367015)

的增量,这在风速突变时对风力机组会形成不小的冲击力。

由于风速是随着时间不断变化的,所以风能密度也随着时间不断变化,这就提出了一个平均风能密度的概念。

$$\bar{W}_z = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho v^3(t) dt \quad (3)$$

式中,  $T$  为周期,即求取平均值的时间长度,平均风能密度表示了一段时间风能密度的平均值。

### 1.2 直驱式风力发电机组

风力发电机组有直驱式、半直驱式和双馈式。相比于双馈式风机,直驱式风机有体积小、结构简单、电磁兼容性强、维护成本低、损耗小、受风速限制小、噪音小等优点,是未来的发展趋势。此外由于运行原理的差异,直驱式风力发电机转速随着发电功率的升高而有明显的上升,当然轴承温度也随之有较明显的升高,而双馈式发电机由于控制系统的调控,转速变化较小,造成轴承温度变化不明显,轴承温度蕴含信息较少,研究价值较小。因此主要对永磁直驱式风力发电机组发电机轴承进行研究。

直驱式风力发电机主要设备有风机叶片、永磁同步发电机和整流逆变装置3个部分。如图1所示。

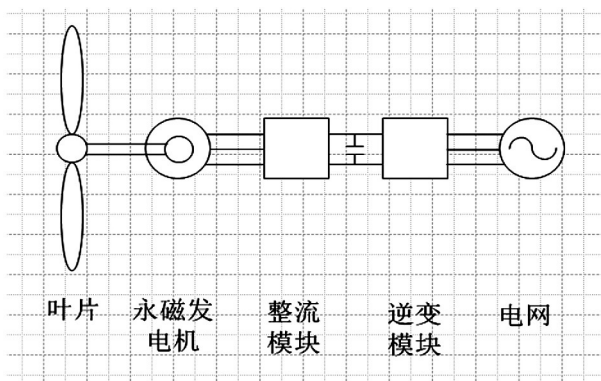


图1 直驱式风力发电机组主要组成部分

叶片是风力发电机组最主要的设备,也是风力发电机组区别于其他设备最重要的标志。它的作用是捕捉风能,将风能转化为机械能。叶片上带有避雷装置、变桨装置和锁定销,避雷装置用以保护叶片不受雷击损坏,变桨装置用于改变桨叶角,锁定销用于检修时锁定叶片防止转动。由于风速不断变化,机组发出的电能频率也随之变化,整流逆变模块可以改变所发出电能的频率,这样就可以使电能符合并入电网的条件,才能并网发电。

风吹动风机叶片将风能转化为机械能,机械能通过主轴传递到永磁同步发电机,发电机把机械能转化为频率变化的电能,再通过整流逆变器转化为符合并网条件的电能送入电网。

由贝兹理论可知:<sup>[4]</sup>

$$P = \frac{1}{2} C_p A v^3 \quad (4)$$

式中,  $C_p$  为风力机输出功率系数,它与叶尖速度与风速之比  $\lambda$  有关,又与桨叶节距角  $\alpha$  有关。在  $\alpha$  和风速不变的情况下,不同的  $\lambda$  值即不同的叶尖速度对应着不同的  $C_p$  值;但是只有一个最佳  $\lambda$  值  $\lambda_{max}$  使  $C_p$  取到最大值  $C_{pmax}$ ,这时风力发电机组的功率最大,也就是说  $\alpha$  不变时为了使风能利用率最大,风力机叶轮转速和风速是一一对应的,随着风速的不断上升,叶轮转速也要不断上升,这是下面研究的现实基础之一<sup>[5]</sup>。

## 2 传热学基本理论

传热学就是研究由温差引起的热能传递规律的学科。热能的传递有3种方式:热对流、热传导和热辐射。

物体之间没有宏观的相对移动,而是依靠分子、自由电子等等微观粒子的热运动而使热量发生传递的热量传递方式称为热传导。通过大量的实践经验总结出了导热现象的规律傅里叶定律:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (5)$$

式中:  $q$  为热流密度,  $W/m^2$ ;  $\frac{dt}{dx}$  为温度沿着  $x$  轴的变化率,即为温度梯度;负号表示热量传递的方向与温度梯度为正的方向相反。

热对流是由于流体各部分之间存在宏观上的相对运动造成冷热流体相互掺混而产生的量能传递的过程。在工程中常常最关心的是流体流过固体表面时的热能传递现象,这称之为对流传热。对流传热中热量的传递计算用牛顿冷却公式:

$$\text{流体被加热时} \quad q = h(t_w - t_f) \quad (6)$$

$$\text{流体被冷却时} \quad q = h(t_f - t_w) \quad (7)$$

式中:  $t_w$  和  $t_f$  分别为壁面温度和流体温度,  $^{\circ}C$ ;  $h$  为表面换热系数,  $W/m^2$ 。表面换热系数的大小和很多因素有关,包括流体的物理性质,换热表面的形状、

物理性质和布置、流体流速大小。<sup>[6]</sup>

热辐射是物体之间通过电磁波传递能量的传热方式。由于只用到了热传导和对流换热,所以就不再对热辐射做详细介绍。

### 3 有限元理论

有限元算法是伴随着计算机技术的发展而发展起来的一种现代计算方法,其理论基础是数值分析。它把连续的工程结构离散化,划分出许多有限的单元,推导出每个单元的单元矩阵,再把这些矩阵拼接成总矩阵,施加约束条件形成总矩阵方程,然后求解这个方程,求解方法有迭代、直接法和随机法,最后就是进行后处理,显示和提取出用户想要的求解信息。

通过有限元的思想可以看出,有限元分析的步骤包括几何建模、网格划分、施加约束条件、求解以及后处理。几何建模可以通过有限元软件自带的建模工具 DM 建模也可以导入在第三方建模软件上建立的模型。

### 4 风力发电机轴承的摩擦生热以及散热分析

#### 4.1 轴承的摩擦生热

研究发电机轴承的热源是首要工作,发电机轴承的热量主要来自于摩擦功率损失,其中包括滚子的自旋生热、滚子与油脂的拖动生热、油脂与内外圈的拖动生热、保持架与滚子的摩擦生热<sup>[8]</sup>。在不考虑每一项摩擦生热大小的情况下,把轴承作为一个整体考虑,其摩擦生热计算公式为

$$N_f = \pi n_i \frac{M_f}{30} \quad (8)$$

式中:  $n_i$  为轴的转速  $r/min$ ;  $M_f$  为轴承摩擦力矩  $N \cdot m$ 。

#### 4.2 轴承的散热分析

内圈、滚子、外圈和润滑油脂都有摩擦生热,轴承承载区和非承载区发热特性区别较大,滚子在内外圈接触面滚动产生热量,对于内外圈接触面来说是一个周期变化的移动热源,这样计算过于复杂以至于无法进行研究,需要对模型进行必要的简化。由于滚子滚动速度快,在这样短暂的时间内摩擦产生的热量无法传导入轴承内部,所以设定内外圈接

触面被均匀加热,轴承温度分布中心对称。设定内套圈与电机主轴接触的表面,外套圈与电机定子接触的表面温度不变<sup>[9]</sup>,轴承两侧与空气强制对流换热,滚子与滚道间油膜厚度忽略不计,滚子与润滑油脂有对流换热,摩擦生热产生的热量折合入内外圈表面热源。

### 5 风力发电机轴承有限元建模以及网格划分

#### 5.1 ANSYS - Workbench 软件简介

ANSYS 是结合有限元思想和现代计算机技术开发出来的一款计算机仿真软件,在 CAE 领域有着巨大的市场,自 ANSYS7.0 之后,ANSYS 公司推出了 Mechanical APDL 和 ANSYS - Workbench 两个版本,两个版本用同一个求解器,所以求解精度是基本相同的。ANSYS - Workbench 软件求解过程分为 6 个步骤:添加材料库、几何模型数据、网格控制划分、边界条件设定和载荷施加、分析计算、计算结果后处理显示<sup>[7]</sup>,如图 2。



图 2 ANSYS - Workbench 项目流程图

图中 B2 到 B7 每一个单元格代表分析流程中的一个步骤,根据分析项目图由上到下执行每一个单元格命令,就可以完成所要研究问题的数值模拟工作。对比于经典版的命令流即 Mechanical APDL 方式,ANSYS - Workbench 具有更好的用户交互界面,更容易操作,学习入门相对容易,是未来的发展趋势。

#### 5.2 轴承建模及网格划分

利用 ANSYS - workbench 自带建模工具 Design-Modeler 对轴承进行建模。由于轴承温度场中心对称,所以只对一个滚子进行建模。建模完成后对模型进行网格划分,在 Details of mesh 中的 Relevance Center 选项中选择 fine 选项,其他为默认值,划分结果如图 3。

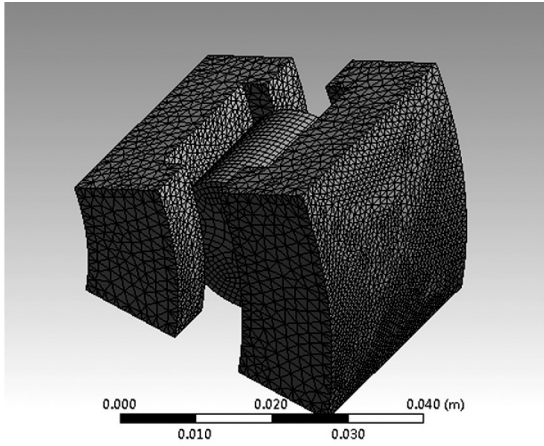


图 3 模型及网格划分

网格划分是有限元分析中的重要一步,网格质量的好坏对求解结果影响非常大,提高网格质量可以显著提高求解结果精度,只有划分好网格才能进行下一步的分析计算。网格划分得到 8 6317 个节点,3 8134 个单元,单元质量平均值为 0.79,纵横比平均值为 1.97,雅克比比率为 1.08,翘曲因子为  $3.44 \times 10^{-15}$ ,平行偏差为 9.18,倾斜度为 0.318。从这些数据来看网格质量较好,无需再对网格划分进行调整。

## 6 正常运行状态分析

风力发电机正常运行状态下转速不变,轴承摩擦生热不变,是一个稳态热分析。以一台 2 MW 的风力发电机组为例,满载运行状态下轴承摩擦生热损失按照 1% 计算,热功率为 10 kW。取轴承钢及滚子导热系数  $\lambda$  为  $50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,油脂与滚子对流换热系数为  $90 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,轴承两侧表面与空气强制对流换热系数为  $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,轴承滚道表面热源热流密度  $q$  为  $8.9 \times 10^5 \text{ W}/\text{m}^2$ ,轴承外表面温度为  $42^\circ\text{C}$ ,轴承内表面温度为  $67^\circ\text{C}$ 。分别在不同运行功率下对模型加载求解得到如图 4 的轴承稳态温度场云图。

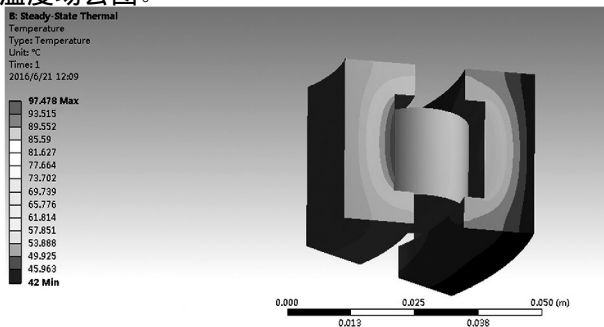


图 4 1/4 满载功率时稳态温度场分布图

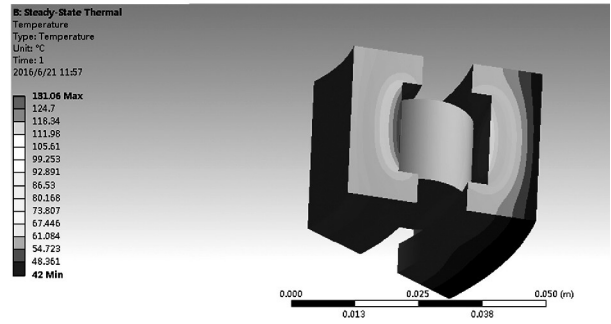


图 5 1/2 满载功率时稳态温度场分布图

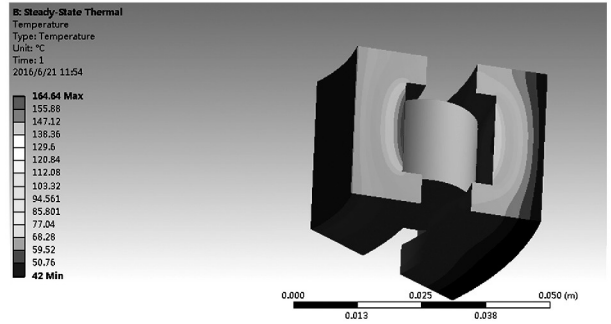


图 6 3/4 满载功率时稳态温度场分布图

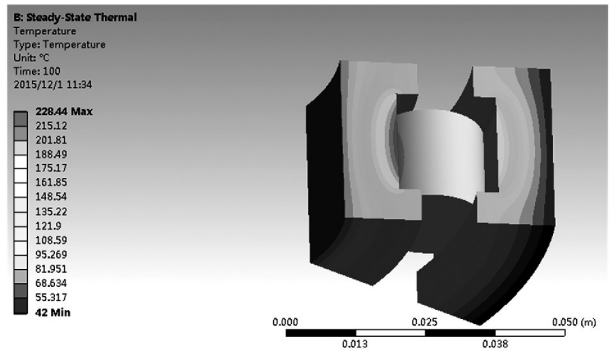


图 7 满载功率时稳态温度场分布图

由满载稳态温度场云图可以看出轴承运行最高温度出现在内圈滚道上,最高温度  $228.44^\circ\text{C}$ ,所以内圈滚道材料表面要采用更耐热材料或者添加镀层。内圈最高温度到最低温度有  $186^\circ\text{C}$  的温度差,产生了一个从红色区域辐射而出的温度梯度,这将产生热变形。外圈温度和温度梯度都较低,承受的热应力较小。对比不同功率下稳态温度场云图可以发现随着功率的提高,轴承温度和温度梯度都不断上升,对轴承的损害越大。

## 7 风速突变状态下分析

风力发电机组开始在 1 MW 负荷下稳定运行,做一个稳态热分析,得到瞬态热分析的初始温度场,风速突变,机组功率在 5 s 内从 1 MW 均匀升高至 2 MW

满载状态并保持满载运行。前面已述随着发电机组功率的提高叶轮转速也不断升高,摩擦生热产生热量也随之上升,达到满载状态时摩擦生热量不再变化,摩擦热损失功率为20 kW。从1 s时发电机功率开始上升,6 s时发电机达到额定功率,做一个时长为60 s的瞬态热分析。轴承钢密度为 $7810 \text{ kg/m}^3$ ,比热容为 $465 \text{ J/(kg} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$ ,导热系数恒定不变,其他边界条件不变,图8为第6.0 s轴承瞬态温度场云图,图9为轴承最高温度点温度变化曲线。

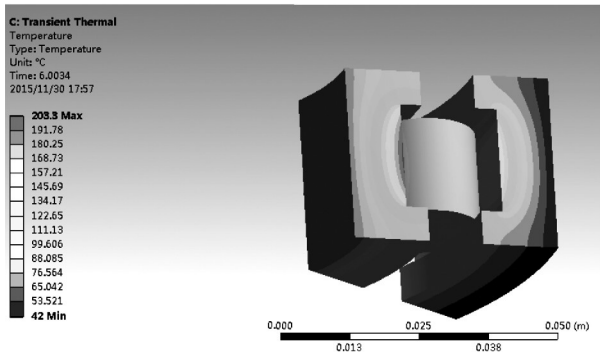


图8 第6.0 s时轴承温度场云图

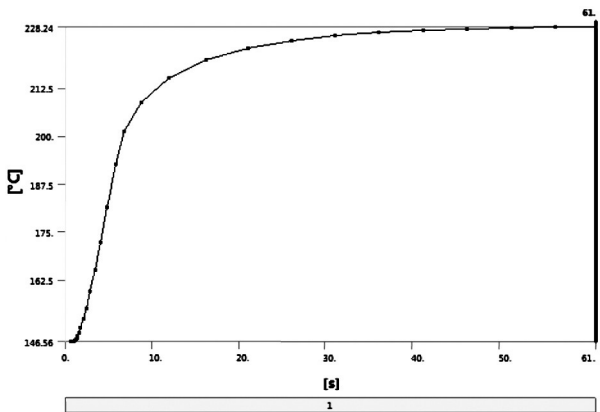


图9 轴承最高温度点温度变化曲线

从图8可以看出相比于稳态状态,当发电机功率上升时轴承温度场温度梯度更大,会产生更大的热应力,对轴承的健康运行不利,所以发电机应尽量减少功率波动或者风力机组要尽量安装在风速稳定地区。

从图9可以看出,在1~6 s的功率增加阶段,温度几乎呈直线上升,在6 s后的功率不变阶段温度上升速度开始下降,但温度还是在持续上升,直到40 s时温度场基本达到稳态,变化的温度场将会产生非正常热应力,轴承长期承受非正常热应力作用易使轴承失效。

## 8 结 语

前面分析了风力发电机轴承的摩擦生热和散热特点,通过 ANSYS - Workbench 建立起了风力发电机轴承的模型并在正常运行和风速突变两种工况下进行了仿真分析。稳态分析表明正常运行状态下轴承存在定常热应力,对轴承运行影响较小。瞬态分析结果表明在发电机转速变化时会产生非正常热应力,易使轴承疲劳,减短轴承寿命。由于风力发电机安装位置很高加之轴承本身结构原因,造成风力发电机轴承温度很难用仪器仪表直接测量,所以对于风力发电机轴承运行状态的了解和优化设计有参考意义。

### 参考文献

- [1] 徐涛,梁伟. 第十三届世界风能大会暨第八届(上海)国际风能展览会成功举办[C]. 中国农机工业协会风能设备分会风能产业, 2014.
- [2] 周方明. 基于分形分析的轴承故障状态分类研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- [3] 曲弋. MW级风力发电机组关键部件振动分析与故障诊断方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [4] 周双喜,鲁宗相. 风力发电与电力系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [5] 吴迪,张健文. 变速直驱永磁风力发电机控制系统的研究[J]. 大电机技术, 2006(6): 51-55.
- [6] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [7] 黄志新,刘成柱. ANSYS Workbench 14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [8] Servais C, Bozet J L, Kreit P, et al. Experimental Validation of a Thermal Model of a LOx Flooded Ball Bearing [J]. Tribology International, 2014, 80: 71-75.
- [9] 王志强. 基于 ANSYS 的高速电主轴温度场分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.

### 作者简介:

郭艳伸(1989), 硕士研究生, 研究方向为风力机组故障诊断;

常喜强(1976), 高级工程师, 从事电力系统分析与控制、调度运行控制工作。

(收稿日期: 2016-06-08)