

# 半直驱永磁风力发电机散热性能影响因素研究

孙睿<sup>✉</sup>, 葛文澎, 吴迪, 苗得胜

(明阳智慧能源集团股份有限公司, 广东 中山 528400)

**摘要:** [目的]随着风力发电技术的发展, 永磁风力发电机单机容量不断增加, 发热功率也随之增大, 发电机散热正面临前所未有的挑战, 如何有效地解决发电机温升高、散热难的问题一直是我们的研究重点。[方法]文章基于STAR-CCM+软件平台建立了发电机散热-冷却一体化数值模拟方法, 通过与实验值对比验证了数值计算方法的可靠性。在此基础上对大功率永磁风力发电机内部温度分布规律以及冷却系统散热性能影响因素进行了研究。[结果]在额定功率下, 绕组、定子铁芯的最高温度出现在中层区域, 工艺条件允许的情况下, 冷却水管位置应尽可能靠近绕组, 以带走更多的热量; 增大发电机总进风量, 可显著降低定子铁芯温度和绕组温度; 进风温度与绕组、定子铁芯最大温度呈线性关系, 进风温度每降低5℃, 最高温度降低约1.4℃, 降低进风温度可一定程度上改善发电机散热性能; 进水温度与绕组、定子铁芯最大温度呈线性关系, 进水温度每降低5℃, 最高温度降低约3.3℃, 降低进水温度可大幅提升发电机散热性能。此外, 冷却水管与定子铁芯的间隙极大地阻碍了冷却水管的换热, 在间隙中填充导热性能好的材料可有效改善发电机散热性能。[结论]文章所得结论可有效指导永磁风力发电机的散热设计, 能够保障风电机组在正常工作中安全运行。

**关键词:** 永磁风力发电机; 数值模拟; 风冷系统; 水冷系统; 热阻; 风电机组设计

中图分类号: TK89; TM315

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)04-0071-11

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on Factors Influencing the Heat Dissipation Performance of Semi-Direct Drive Permanent Magnet Wind Generator

SUN Rui<sup>✉</sup>, GE Wenpeng, WU Di, MIAO Desheng

(Ming Yang Smart Energy Group Limited, Zhongshan 528400, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] With the development of wind power generation technology, the unit capacity of permanent magnet wind generator is increasing, and the heating power is also increasing. The heat dissipation of generator is facing unprecedented challenges. How to effectively solve the problem of generator temperature rise and heat dissipation difficulty has been the focus of our study. [Method] Based on the STAR-CCM+ software platform, an integrated numerical simulation method for generator heat dissipation and cooling was proposed in this paper. The reliability of the numerical calculation method was verified by comparing the calculated values with the experimental values. On this basis, a study was conducted on the internal temperature distribution law and the factors influencing the cooling system heat dissipation performance of the high power permanent magnet wind generator. [Result] Under the rated power, the highest temperature of the winding and stator core appear in the middle area. If the process conditions allow, the cooling water pipe should be as close to the winding as possible to take away more heat. The stator core temperature and winding temperature can be reduced significantly by increasing the total intake air volume of the generator. The intake air temperature has a linear relationship with the maximum temperature of the winding and stator core. For every 5℃ decrease in the intake air temperature, the maximum temperature will be reduced by about 1.4℃. Reducing the intake air temperature can improve the heat dissipation performance of the generator to a certain extent. The intake water temperature has a linear relationship with the maximum temperature of the winding and stator core. For every 5℃ decrease in the intake water temperature, the maximum temperature will be reduced by about 3.3℃. Reducing the intake water temperature can greatly improve the heat dissipation performance of the generator. In addition, the gap between the cooling water pipe

收稿日期: 2023-01-09 修回日期: 2023-02-28

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目“10 MW 及以上海上风电永磁发电机设计和制造”(2021B0101230002)

and the stator core greatly hinders the heat transfer of the cooling water pipe. Filling the gap with materials with good thermal conductivity can effectively improve the heat dissipation performance of the generator. **[Conclusion]** The conclusions drawn in this paper can effectively guide the heat dissipation design of permanent magnet wind generator and ensure the safe operation of wind turbines in normal work.

**Key words:** permanent magnet wind generator; numerical simulation; air cooling system; water cooling system; thermal resistance; wind turbine design

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

风电行业技术飞速发展,风力发电机组容量不断提升,发电机发热功率也随之增加,这对发电机散热性能要求提出了更大的挑战<sup>[1-3]</sup>。发电机运行时若无法及时将热量散出,将导致发电机超温从而引发一系列问题,如永磁体退磁、电路绝缘层破损、降低器件寿命甚至设备损毁<sup>[4-5]</sup>。近年来,发电机散热问题日益突出,散热系统的研究已经成为学术界和工程界研究的热点<sup>[6-8]</sup>。发电机散热系统设计中,风冷散热和水冷散热是两种常用的冷却方式。风冷散热是指通过风扇或泵驱动冷空气流动,实现发电机内部的热传导、热对流从而冷却发电机的方式;水冷散热是指通过冷却水管中的冷却液与发电机内部结构进行能量交换从而实现发电机冷却的方式。由于水冷散热中冷媒热容大、导热系数高,通常用于大功率发电机散热<sup>[9-11]</sup>。因此,风冷、水冷系统冷却效率的优化是提升发电机散热性能的关键。

目前,发电机散热分析的方法主要包括等效热网络法、实验测试以及数值计算 3 种<sup>[12-13]</sup>。魏雪环等<sup>[14]</sup>采用有限元软件计算了永磁同步电机温度分布,并将结果与热网络法计算结果进行对比。成丹凤<sup>[15]</sup>搭建了 1:1 的风力发电机实验台,在不同负载条件下开展实验,分析了发电机关键部位的温升情况。施宁强等<sup>[16]</sup>采用计算流体动力学的方法分析了直驱式永磁同步发电机温度分布规律及冷却流体流动特性,为发电机设计提供参考。意大利学者 Marco Tosetti<sup>[17]</sup>采用计算流体动力学(CFD)方法,建立缩尺后的发电机模型,计算了发电机内部三维流场和温度场,并分析了各部件温度分布规律。

以上研究主要局限于对发电机内部温度分布进行研究,而关于发电机冷却系统冷却效果影响因素以及冷却系统优化方面的研究还比较缺乏。本文以

1 台 3 MW 冷却方式为空-水冷结合、结构完整且可直接用于整机组装的大功率半直驱永磁同步发电机为基础,采用 CFD 的方法对半直驱永磁同步风力发电机三维温度场进行分析,探究额定功率条件下发电机温度分布规律以及冷却系统散热效果的影响因素,并对冷却系统散热性能的优化提出了解决方案。

## 1 发电机结构及基本参数

3 MW 半直驱永磁风力发电机,发电机耐温绝缘等级按 H 级(180 ℃)设计,按 F 级(155 ℃)考核、运行,允许温升 100 K。采用风冷系统和水冷系统结合的方式进行散热。风冷系统是在发电机后端盖上开孔并安装散热器进行风冷散热,冷风由进风口被吸入发电机内,与各热源充分换热后由出风口排出,实现发电机的风冷散热功能。水冷系统以安装蛇形冷却水管贯穿定子铁芯的方式对发电机进行水冷散热,进水口和出水口间隔排列,冷水由进水口流入管道内,与内热源充分换热后水温上升,最终由出水口排出。

发电机主体主要由定子总成、转子总成、轴承、机壳等结构组成,整体结构如图 1、图 2 所示。发电机坐标轴原点位于外壳底面圆心处,平行于发电机旋转轴的方向为轴向,由外壳底部指向端盖方向为正,垂直于轴向的方向为径向,由旋转轴指向外部为正。

## 2 模型建立

本文基于 STAR-CCM+ 软件搭建了发电机散热-冷却一体化三维流动和传热数值模型,物理模型、基本假设和相关参数设置如下。

### 2.1 物理模型

发电机内流体运动和传热规律满足质量守恒、动量守恒和能量守恒三大定律。

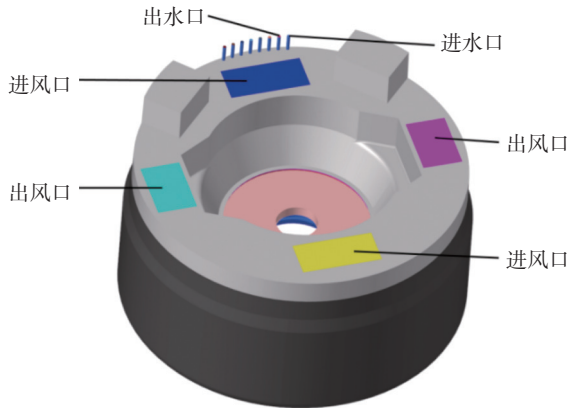


图1 发电机风、水冷却结构图

Fig. 1 Structure drawing of the generator air cooling and water cooling systems

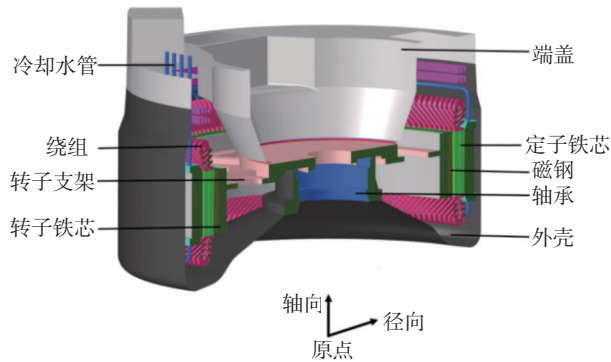


图2 发电机结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the generator structure

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

式中:

$\rho$  —— 流体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$t$  —— 时间(s);

$u$  —— 速度矢量(m/s)。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

式中:

$P$  —— 作用在流体微元上的压力(Pa);

$\mu$  —— 动力粘度( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );

$S_u$ 、 $S_v$ 、 $S_w$  —— 动量方程的广义源项( $\text{N}/\text{m}^3$ )。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v T) = \text{div}\left(\frac{h}{c_p} \text{grad} T\right) + \frac{s_t}{c_p} \quad (5)$$

式中:

$h$  —— 流体的传热系数( $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ );

$c_p$  —— 比热容( $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ );

$T$  —— 温度(K);

$s_t$  —— 流体的内热源( $\text{W}/\text{m}^3$ )。

## 2.2 基本假设

实际运行工况下的发电机三维流场、温度场非常复杂,完全还原真实情况的数值计算非常困难。因此,为了提高仿真可行性并保证计算精度,计算过程做出了以下假设<sup>[18-20]</sup>:

1) 假设发电机各部件材料均匀。

2) 绕组中的导线包裹绝缘层,假设绕组具有各向异性导热系数,铁芯由硅钢片叠加而成,硅钢片之间存在绝缘涂层,假设铁芯导热系数为各向异性。

3) 假设冷却水均匀、恒温、恒速度流入冷却水管内。

4) 忽略重力对空气的影响。

## 2.3 网格划分

综合考虑计算效率和计算精度,对发电机结构进行了简化处理,忽略螺栓、螺母、铆钉等对流场或温度场影响较小的结构,将多根导线绕扎成的绕组、多层硅钢片压制成的铁芯等效为材料均匀的整体,最终的简化模型应与原模型尽可能保持一致。采用非结构多面体网格对计算域进行离散,由于发电机气隙狭小,因此对该区域附近进行网格加密处理,以准确捕捉气隙内的流动传热。计算模型及网格划分方式如图3、图4所示。

为保证计算结果的准确性并尽可能减少计算消耗的资源,共设计了3种网格方案,网格总量分别为 $1.2\times 10^7$ 、 $1.8\times 10^7$ 、 $2.4\times 10^7$ ,以不同监测点的温度变化为参考,在此基础上开展网格无关性验证工作,验证结果如表1所示。由表知,当网格总量达到 $1.8\times 10^7$ 时,计算结果基本保持稳定,此时网格已满足计算需求。因此,本文选择方案2进行网格划分以开展进一步的研究工作。

## 2.4 计算参数及边界条件设置

采用二阶迎风格式对有限体积方程进行离散,

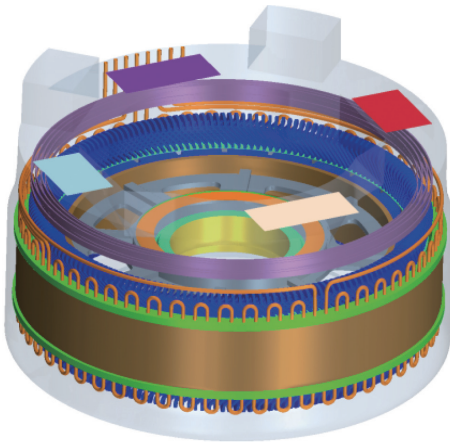


图 3 发电机简化模型

Fig. 3 Simplified model of the generator

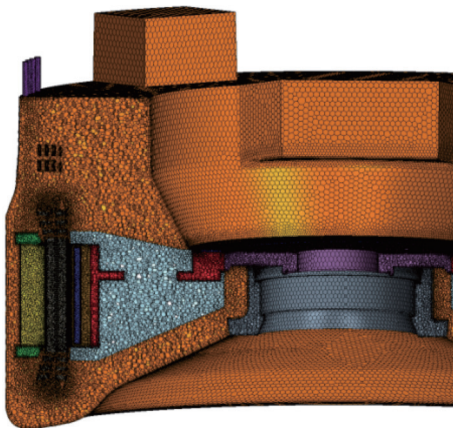


图 4 发电机网格示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the generator grid

表 1 3 种网格方案计算结果对比

Tab. 1 Comparison of calculation results of three grid schemes

监测点	方案1/℃	方案2/℃	方案3/℃
1	119.1	122.7	123.0
2	118.2	120.8	120.9
3	119.3	121.2	121.1
4	115.0	119.0	118.6
5	118.7	122.2	122.0
6	117.8	121.0	121.3
7	115.6	120.7	120.5
8	114.2	121.8	122.2
9	116.5	123.7	124.2
10	117.6	122.7	123.0
11	45.3	49.7	49.7
12	55.2	57.7	57.9

时间离散格式为隐式, 湍流模型采用  $\text{Realizable } k-\varepsilon$  模型。当残差值均小于 0.001 并且计算域内各物理量数值保持稳定后, 视为计算收敛。

本文数值模型边界条件设置如下, 风冷和水冷系统中, 进水口、进风口的速度由冷媒总进流量确定, 边界条件设置为速度入口, 出水口、出风口设置为压力出口。本文仿真是以发电机温升实验为参考, 实验测试时室内环境温度为  $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 故数值模拟外环境温度也设置为  $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 实验时发电机置于开放环境中, 因此四周边界设置为压力出口, 压力为一倍的标准大气压。发电机内发热体设置为功率热源。

### 3 模型可靠性验证

为验证上述建模方法的可行性以及计算结果的正确性, 实验过程中, 在发电机绕组、冷却水管出水口、风冷系统出风口不同位置共安装了 12 个温度传感器, 即测点 1~12, 其中测点 1~10 布置于不同位置绕组表面, 测点 11、12 分别布置于出水口和出风口处。实时监测额定功率工况和 96% 额定功率工况的发电机温升情况, 实验测试平台如图 5 所示。

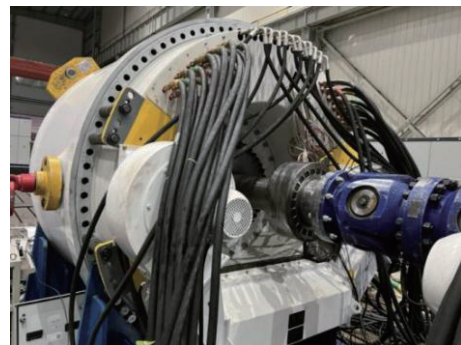


图 5 实验测试平台

Fig. 5 Experimental test platform

将数值模拟结果与实验结果对比, 如表 2、表 3 所示。结果表明, 数值模拟结果与实验结果吻合较好, 最小误差值为  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 误差比例为 0.2%, 最大误差值为  $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 误差比例为 5.1%, 误差均在工程误差要求范围内, 满足计算精度要求<sup>[6]</sup>, 说明本文数值模拟的方法准确可靠。

### 4 发电机温度场特性分析

额定工况为机组满发状态, 发电功率达到最大值, 此时发电机内部各热源发热量达到最大值, 是发

表2 额定功率下数值结果与实验结果对比

Tab. 2 Comparison of numerical results with experimental results at rated power

测点	实测值/℃	计算值/℃	误差值/℃	误差比例/%
1	123.5	122.7	-0.8	-0.6
2	117.8	120.8	3.0	2.6
3	118.4	121.2	2.8	2.4
4	120.5	119.0	-1.5	-1.2
5	123.7	122.2	-1.5	-1.2
6	120.7	121.0	0.3	0.2
7	121.0	120.7	-0.3	-0.2
8	122.3	121.8	-0.5	-0.4
9	122.6	123.7	1.1	0.9
10	122.3	122.7	0.4	0.3
11	49.3	49.7	0.4	0.8
12	54.8	57.7	2.9	5.3

表3 96%额定功率下数值结果与实验结果对比

Tab. 3 Comparison of numerical results with experimental results at 96% rated power

测点	实测值/℃	计算值/℃	误差值/℃	误差比例/%
5	114.5	113.1	-1.4	-1.2
6	117.4	111.9	-5.5	-4.7
7	107.3	111.6	4.3	4.0
8	111.0	112.5	1.5	1.4
9	108.8	114.3	5.5	5.1
10	114.9	113.5	-1.4	-1.2
11	40.0	41.5	1.5	3.8
12	55.4	53.7	-1.7	-3.1

电机工作的极限状态,也是工程关注的重点工况。永磁风力发电机工作中的主要发热部件为定子绕组和定子铁芯。因此,本文主要对额定工况下永磁同步发电机的定子和绕组进行温度特性分析。

#### 4.1 发电机温度分布特性

图6为发电机内部温度分布。从图中可以看出,发电机内部温度呈四周高中间低的趋势,这是因为端盖开孔向发电机中部区域输送冷风,降低了发电机中间区域温度。各部件中,绕组温度最高,定子铁芯次之,这是因为定子铁芯、绕组是发电机内的主要发热元件。

#### 4.2 绕组温度分布特性

图7(a)为绕组温度分布图。绕组中间段与上、下端部温度分布规律存在明显差别。结合图7(a)、

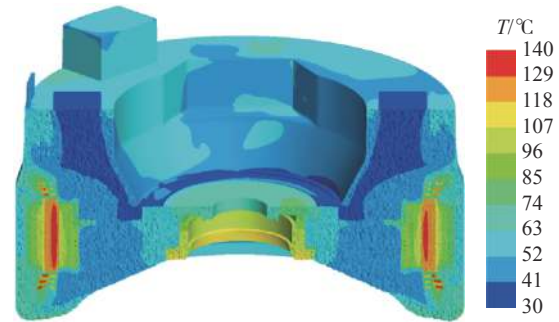


图6 发电机内部温度分布

Fig. 6 Internal temperature distribution of generator

图7(d)知,绕组中间段内,外侧温度较内侧温度更低,这是因为定子铁芯装配有水冷系统,冷却水管与定子铁芯能量交换带走大量的热,绕组外侧距水管更近,换热效率更高,故绕组外侧温度更低。而绕组上、下端部区域内,内侧温度较外侧温度更低,这是因为受冷空气进风和转子旋转的影响,气流在发电机中部旋转,绕组内侧对流换热效果更好。

为详细分析绕组内各区域温度分布规律,在绕组的中间段区域内,沿径向在低层、中层以及高层各布置20个温度测点,沿轴向在内层、中层以及外层各布置20个温度测点。如图7(b)所示。

从图7(c)中可知,随着径向距离的增大,绕组温度整体呈先增大后减小的变化趋势。这是因为当径向距离较小时,绕组靠近气隙、转子铁芯,而气隙、转子铁芯的温度均低于绕组温度,对绕组有一定的冷却作用。随着径向距离的增大,绕组换热效率逐渐降低,温度逐渐上升并达到最大值。当距离冷却水管较近时,绕组温度迅速降低,且距离冷却水管越近温度下降速度越快。绕组温度变化曲线存在下凹部分,这是因为该区域定子铁芯温度较绕组低,绕组外表面包裹绝缘层,绝缘层导热性能较差,换热不充分,因此存在较大的温度梯度。

结合图7(c)、图7(d)知,沿径向方向,绕组低层、高层温度相差不大,绕组中层较低、高层的温度更高,最大温差达28.1℃。这是因为绕组中层的散热方式仅包含固体之间的热交换,而绕组低、高层的散热方式还包括固体和气体之间的热传递,散热效率更高,故低层、上层的温度更低。由上述分析可以总结出,在发电机的制造过程中,冷却水管位置应尽可能靠近绕组,以带走更多的热量。

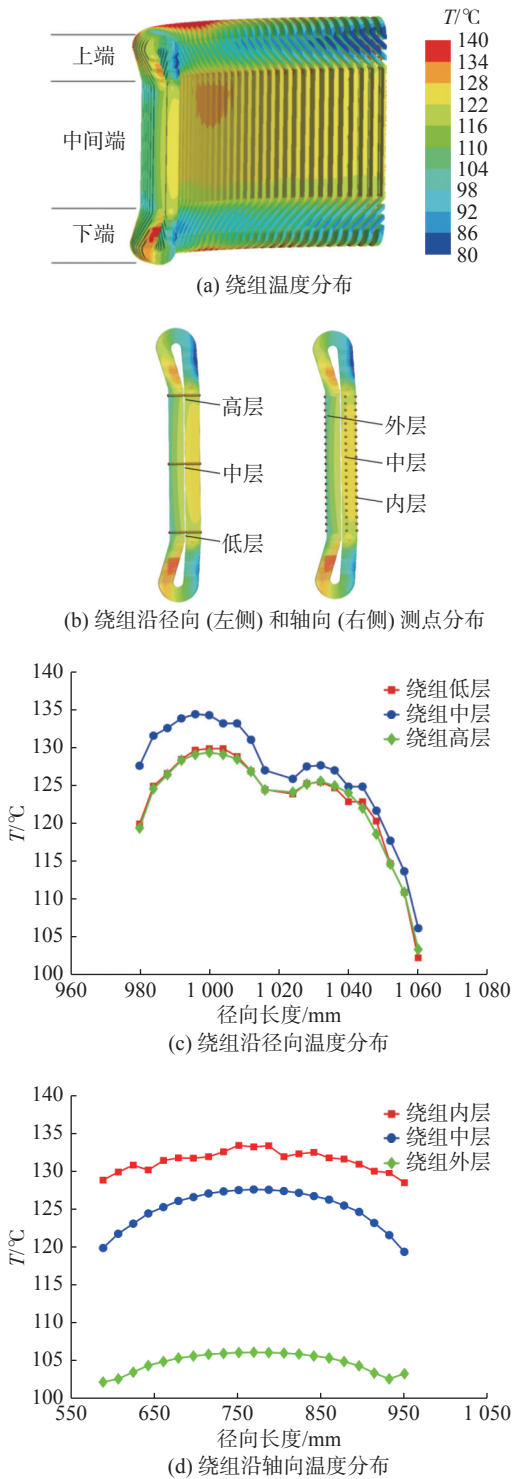


图 7 绕组温度分布特性

Fig. 7 Winding temperature distribution characteristics

### 4.3 定子铁芯温度分布特性

为详细分析定子铁芯内各区域温度分布规律,沿径向在定子铁芯低层、中层以及上层各布置 20 个温度测点,沿轴向在定子铁芯内层、中层以及外层各

布置 20 个温度测点,铁芯测点位置布置方式参照绕组。

结合图 8(a)、图 8(b)知,3 个层面的定子铁芯温度变化规律相同,均随径向距离的增大温度逐渐降低,这是因为定子铁芯外层装有冷却水管,冷却水流动带走了大量的热。定子铁芯中层温度较低层、高层温度更高,最大温差达 53.1°C,产生该现象的原因与绕组一致。低层温度略高于高层温度,这是由于发电机底部空气流速较上部要小,换热效果较弱。由图 8(c)知,定子铁芯温度沿轴向分为 3 个阶段,第一阶段为上升阶段,第二阶段为平稳阶段,第三阶段

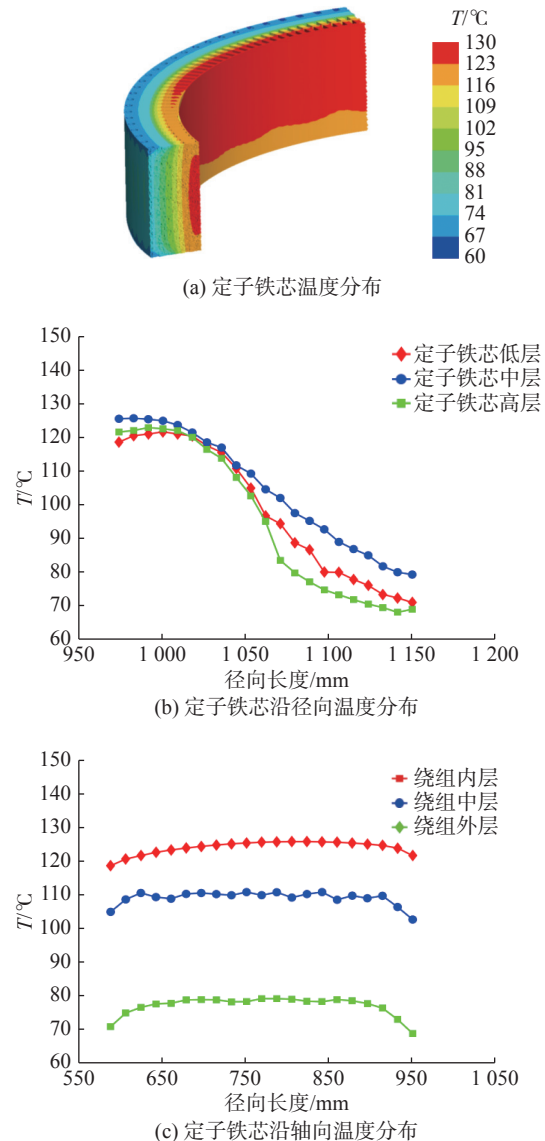


图 8 定子铁芯温度分布特性

Fig. 8 Temperature distribution characteristics of stator core

为下降阶段。这是因为位于中间部分的定子铁芯的换热方式主要是固体之间的热传导, 而轴向距离较小或较大的位置处温度较低, 这是因为此处热传递方式不仅包含固体之间的热传导, 还包括定子铁芯与冷空气的对流换热。

### 5 冷却系统冷却效果关键因素分析

为研究发电机散热性能的影响因素, 选取了风冷系统中的总进风量、进风温度以及水冷系统中的进水温度、冷却液属性、冷却水管与定子铁芯的间隙共 5 个参数进行分析, 每个参数设有 4 组工况, 总计 20 个工况, 各工况具体参数如表 4、表 5 所示。

表 4 仿真工况总表  
Tab. 4 Summary of simulation conditions

工况编号	总进风量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	进风温 度/°C	进水温 度/°C	冷却液	冷却水管与定子 铁芯的间隙/mm
Case1	3 550	39.6	45.8	乙二醇(50%)	0.05
Case2	7 100	39.6	45.8	乙二醇(50%)	0.05
Case3	10 650	39.6	45.8	乙二醇(50%)	0.05
Case4	14 200	39.6	45.8	乙二醇(50%)	0.05
Case5	7 100	34.6	45.8	乙二醇(50%)	0.05
Case6	7 100	39.6	45.8	乙二醇(50%)	0.05
Case7	7 100	44.6	45.8	乙二醇(50%)	0.05
Case8	7 100	49.6	45.8	乙二醇(50%)	0.05
Case9	7 100	39.6	40.8	乙二醇(50%)	0.05
Case10	7 100	39.6	45.8	乙二醇(50%)	0.05
Case11	7 100	39.6	50.8	乙二醇(50%)	0.05
Case12	7 100	39.6	55.8	乙二醇(50%)	0.05
Case13	7 100	39.6	45.8	丙二醇(40%)	0.05
Case14	7 100	39.6	45.8	水	0.05
Case15	7 100	39.6	45.8	乙醇	0.05
Case16	7 100	39.6	45.8	乙二醇(50%)	0.05
Case17	7 100	39.6	45.8	乙二醇(50%)	0.00
Case18	7 100	39.6	45.8	乙二醇(50%)	0.05
Case19	7 100	39.6	45.8	乙二醇(50%)	0.10
Case20	7 100	39.6	45.8	乙二醇(50%)	0.15

#### 5.1 总进风量对发电机散热的影响

总进风量对绕组温度、定子铁芯温度的影响如图 9、图 10 所示。横坐标中的测点 1~10 与实验布置的测点 1~10 位置一致。从图中可以看出, 进风量对发电机散热情况影响显著, 当总进风量为 3 550

m<sup>3</sup>/h 时, 绕组测点最高温度为 147.2 °C, 总进风量为 14 200 m<sup>3</sup>/h 时, 绕组测点最高温度为 111.6 °C, 最高温度降低了 35.6 °C。可见, 总进风量增大后, 发电机散热情况明显改善。结合图 9、图 10 知, 随着总进风量的增大, 绕组温度降低速率逐渐减小而定子铁芯最高温度下降速率逐渐增加, 这是因为定子铁芯完全包裹住了绕组中间段, 定子铁芯绝大部分面积能够与空气进行换热, 而绕组的换热能力受限。当总风量较低时, 换热效果较差, 主要原因包括两部分,

表 5 冷媒属性表  
Tab. 5 Refrigerant property

名称	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	热容/ [J·(kg·°C) <sup>-1</sup> ]	导热系数/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	冰点/ °C
丙二醇(40%)	1 025	2 210	0.415	-23
水	1 000	4 180	0.62	0
乙醇	772	2 560	0.162	-11.5
乙二醇(50%)	1 080	3 350	0.385	-35

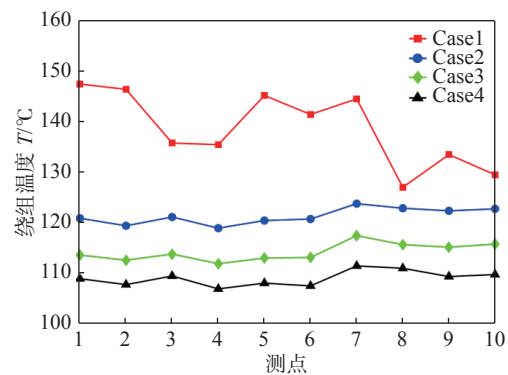


图 9 总进风量对绕组温度的影响

Fig. 9 Influence of total intake air volume on winding temperature

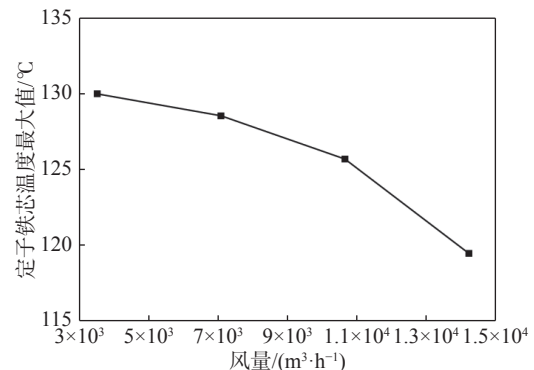


图 10 总进风量对定子铁芯温度的影响

Fig. 10 Influence of total intake air volume on stator core temperature

首先进风量降低直接导致换热量不足,其次进风量低导致进风口流速较低,发电机内气流湍流度低,换热效果减弱,这说明提高散热器功率更有利于发电机散热。

### 5.2 进风温度对发电机散热的影响

进风温度对绕组温度、定子铁芯温度的影响如图 11、图 12 所示。由图知,随着进风温度的降低,绕组、定子铁芯的最高温度均有所减小,当进风温度由 49.6 °C 降低至 34.6 °C 时,绕组、定子铁芯最高温度降低 4.2 °C,且进风温度与绕组、定子铁芯最大温度呈线性关系,每降低 5 °C,绕组、定子铁芯最大温度降低约 1.4 °C,这说明降低进风温度可一定程度上改善发电机散热效果。极限工况下,发电机进风温度较高,可先对热风进行冷却处理,使进入发电机内的空气满足温度要求,以降低发电机热载荷。

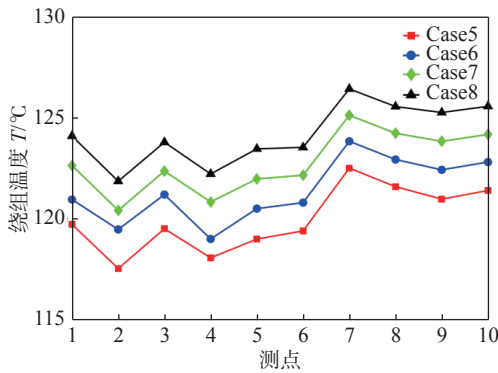


图 11 进风温度对绕组温度的影响

Fig. 11 Influence of intake air temperature on winding temperature

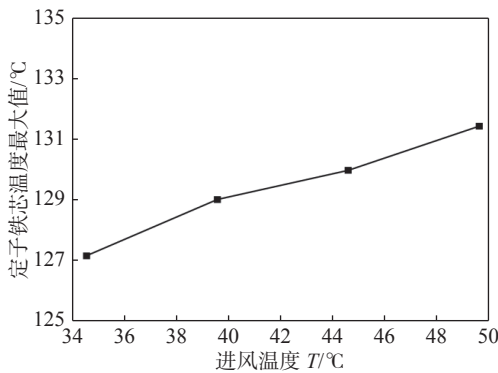


图 12 进风温度对定子铁芯温度的影响

Fig. 12 Influence of intake air temperature on stator core temperature

### 5.3 进水温度对发电机散热的影响

图 13、图 14 给出了进风温度对绕组温度、定子

铁芯温度的影响。进水温度降低时,绕组、定子铁芯温度下降明显。当进水温度由 55.8 °C 降低至 40.8 °C 时,发电机最高温度降低了约 10 °C。同时,进水温度与绕组、定子温度呈线性关系,水温每降低 5 °C,绕组、定子铁芯最大温度降低约 3.3 °C,说明降低进水温度可显著改善发电机散热性能。

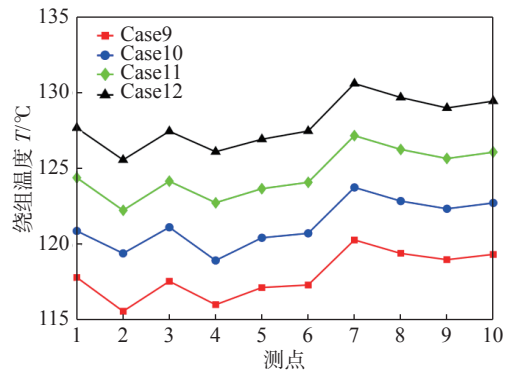


图 13 进水温度对绕组温度的影响

Fig. 13 Influence of water intake temperature on winding temperature

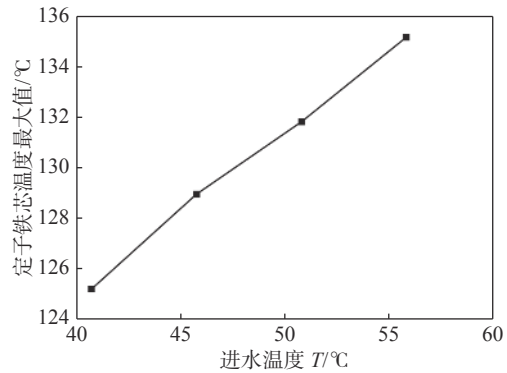


图 14 进水温度对定子铁芯温度的影响

Fig. 14 Influence of intake water temperature on stator core temperature

### 5.4 不同冷却液对发电机散热的影响

图 15、图 16 给出了 4 种冷却液对绕组温度、定子铁芯温度的影响。从图中可以看出,相同条件下,水的冷却效果最佳,乙醇的冷却效果最差,这是因为水的热容大、导热系数高,而乙醇恰好相反。根据不同区域环境温度的差别,风力机一般分为常温型和低温型。低温型风力发电机一般布置于寒冷区域,温度可达零下 30 °C,因此冷却液的冰点须足够低,4 种冷却液中乙二醇的凝固点最低,抗冻性能好,并且冷却效果较好,可作为低温区的冷却液使用,其余 3 种冷却液可作为常温机型的冷却液使用。



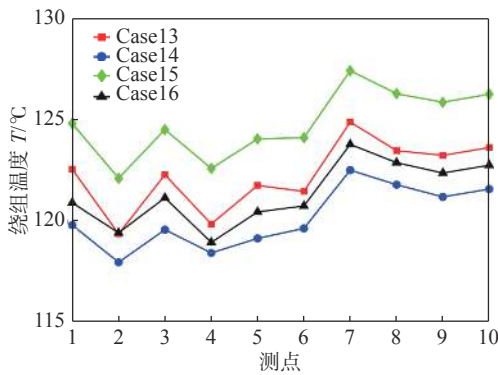


图 15 不同冷却液对绕组温度的影响

Fig. 15 Influence of different coolants on winding temperature

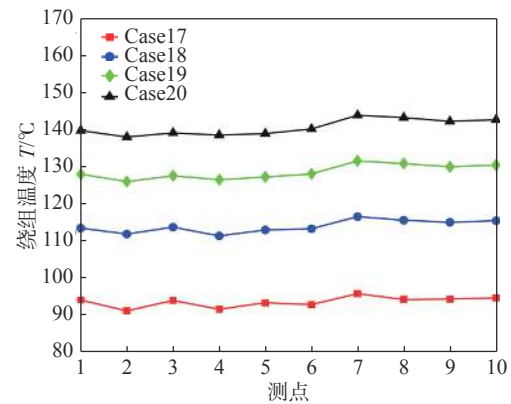


图 17 管孔间隙对绕组温度的影响

Fig. 17 Influence of hole clearance on winding temperature

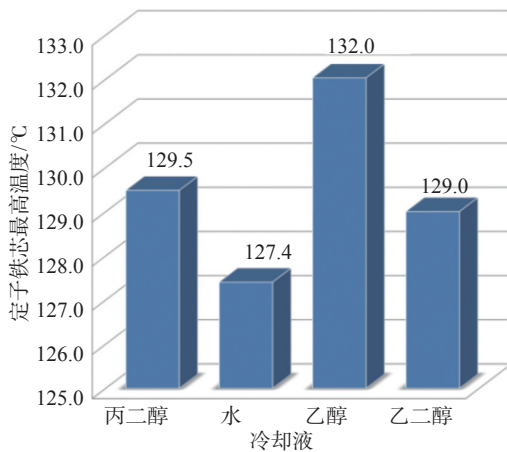


图 16 不同冷却液对定子铁芯温度的影响

Fig. 16 Influence of different coolants on stator core temperature

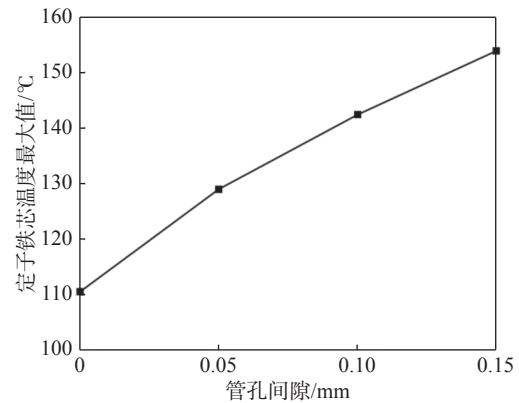


图 18 管孔间隙对定子铁芯温度的影响

Fig. 18 Influence of hole clearance on stator core temperature

### 5.5 冷却水管与铁芯间隙对发电机散热的影响

定子铁芯由硅钢片叠压而成,受冷却水管、定子铁芯表面粗糙度以及组装工艺精度的影响,装配过程中,冷却水管与定子铁芯之间会存在间隙,即管孔间隙,间隙大小对绕组温度、定子铁芯温度的影响如图 17、图 18 所示。从图中可以看出,间隙对发电机散热效果影响显著。当管孔间隙为 0 mm 时,即冷却水管与铁芯完全接触时,测点最大温度为 104.7°C;当管孔间隙为 0.15 mm 时,测点最大温度高达 149°C。间隙每增大 0.05 mm,测点温度上升数值超过 10°C。可见,管孔间隙使得冷却水管换热受到极大的阻碍。产生该现象的原因是间隙的成分主要为空气,空气的热容以及导热系数极低,阻挡了定子与水管的换热。因此,在制造、装配工艺精度无法进一步改善的条件下,可以在间隙中填充导热材料,如导热硅脂等,降低间隙的热阻,增强冷却水管的换热效率。

## 6 结论

本文采用 CFD 的方法对半直驱永磁风力发电机三维温度分布规律及发电机散热效果影响因素进行研究,得到的主要结论为:

1) 本文的仿真计算结果与实验结果误差小于 5.1%,证明了本文建立的三维流动传热模型的准确性,这为后续的发电机设计和散热评估提供帮助。

2) 发电机绕组、定子铁芯的最大温度出现在中层区域,最低温度出现在外侧两端,绕组温度最大温差达 28.1°C,定子铁芯最大温差达 53.1°C,工艺条件允许的情况下,冷却水管位置应尽可能靠近绕组,以带走更多的热量。

3) 风冷系统中,增大总进风量对发电机散热效果改善显著,提高散热器功率更有利于发电机散热。降低进风温度可一定程度上改善发电机的散热效果,进风温度每降低 5°C,最高温度降低约 1.4°C。极限

工况下,发电机进风温度较高,可先对热风进行冷却处理,使进入发电机内的空气满足温度要求,以降低发电机热载荷。

4)水冷系统中,降低冷却水管进水温度对发电机散热效果影响显著,进水温度每降低 5 ℃,最高温度降低约 3.3 ℃。

5)4 种冷却液中,水的冷却效果最好,乙二醇次之。乙二醇的凝固点最低,抗冻性能好,适用于低温机型的冷却,水、丙二醇、乙醇可作为常温机型的冷却液使用。

6)管孔间隙极大地阻碍了冷却水管和定子之间的热交换。在定子组装过程中,在冷却水管表面涂抹导热性能较好的材料再进行装配,降低冷却水管与定子铁芯之间的热阻,增强冷却水管的换热效率。

#### 参考文献:

- [1] 陈秀平,徐起连,李岩. 大功率永磁同步发电机定子冷却系统优化分析 [J]. *大电机技术*, 2020(5): 29-33. DOI: [10.3969/j.issn.1000-3983.2020.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3983.2020.05.006).  
CHEN X P, XU Q L, LI Y. Optimal analysis of stator cooling system of large power permanent magnet synchronous generator [J]. *Large electric machine and hydraulic turbine*, 2020(5): 29-33. DOI: [10.3969/j.issn.1000-3983.2020.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3983.2020.05.006).
- [2] 王振国. 半直驱永磁同步风力发电机流热耦合研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.  
WANG Z G. Research on fluid-thermal coupling of semi-direct drive permanent magnet synchronous wind turbine [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [3] 赵舵. 3.0 MW 风冷双馈风力发电机冷却风道设计及温度场数值模拟 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.  
ZHAO D. Design of cooling duct of 3.0 MW doubly-fed wind generator and numerical simulation of temperature field [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [4] 周冰. 海上风电机组智能故障预警系统研究 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(2): 133-137. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.019](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.019).  
ZHOU B. Research on intelligent fault warning system of offshore wind turbines [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(2): 133-137. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.019](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.019).
- [5] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, STATON D, et al. Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2009, 56(3): 871-882. DOI: [10.1109/TIE.2008.2011622](https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2011622).
- [6] 杨丽伟,张奕黄. 异步牵引电机的温度场分析 [J]. *大电机技术*, 2008(3): 4-7, 10. DOI: [10.3969/j.issn.1000-3983.2008.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3983.2008.03.002).  
YANG L W, ZHANG Y H. Analysis of temperature field for asynchronous traction motor [J]. *Large electric machine and hydraulic turbine*, 2008(3): 4-7, 10. DOI: [10.3969/j.issn.1000-3983.2008.03.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3983.2008.03.002).
- [7] 刘娇,黄守道,成本权,等. 循油冷却永磁同步电动机的温度场分析 [J]. *微电机*, 2010, 43(5): 10-12,26. DOI: [10.3969/j.issn.1001-6848.2010.05.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-6848.2010.05.003).  
LIU J, HUANG S D, CHENG B Q, et al. Analysis of temperature field in a cycling oil cooled permanent magnet synchronous motor [J]. *Micromotors*, 2010, 43(5): 10-12,26. DOI: [10.3969/j.issn.1001-6848.2010.05.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-6848.2010.05.003).
- [8] 刘海涛,章双全,王海龙. 海上双馈机组的散热布置优化研究 [J]. *机电工程*, 2014, 31(5): 634-638. DOI: [10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.020).  
LIU H T, ZHANG S Q, WANG H L. Cooling layout optimization of offshore double-fed wind turbine [J]. *Journal of mechanical & electrical engineering*, 2014, 31(5): 634-638. DOI: [10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.020).
- [9] 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): 648-654. DOI: [10.19912/j.0254-0096.2017.03.011](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.2017.03.011).  
GE M W, GAO J, DENG Y, et al. Study on design of cooling system for a 1.5 MW wind turbine generator [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2017, 38(3): 648-654. DOI: [10.19912/j.0254-0096.2017.03.011](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.2017.03.011).
- [10] 徐玮宏. 双转子永磁风力发电机热管理技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.  
XU W H. Research on thermal management technologies of dual rotor permanent magnet wind power [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [11] 邓智春,王其君. 直驱风力发电机强制通过滤散热系统设计应用 [J]. *机械研究与应用*, 2020, 33(4): 95-97. DOI: [10.16576/j.cnki.1007-4414.2020.04.026](https://doi.org/10.16576/j.cnki.1007-4414.2020.04.026).  
DENG Z C, WANG Q J. Design and application of the forced ventilation filtering cooling system in direct-driven wind turbine generator [J]. *Mechanical research & application*, 2020, 33(4): 95-97. DOI: [10.16576/j.cnki.1007-4414.2020.04.026](https://doi.org/10.16576/j.cnki.1007-4414.2020.04.026).
- [12] 郑国丽,丰帆,周黎民,等. 电机的热分析方法与应用 [J]. *微特电机*, 2017, 45(10): 78-80. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7018.2017.10.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7018.2017.10.019).  
ZHENG G L, FENG F, ZHOU L M, et al. Thermal analysis method and application of motor [J]. *Small & special electrical machines*, 2017, 45(10): 78-80. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7018.2017.10.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7018.2017.10.019).
- [13] 王晓远,高鹏,赵玉双. 电动汽车用高功率密度电机关键技术 [J]. *电工技术学报*, 2015, 30(6): 53-59. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6753.2015.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6753.2015.06.007).  
WANG X Y, GAO P, ZHAO Y S. Key technology of high power density motors in electric vehicles [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2015, 30(6): 53-59. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6753.2015.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6753.2015.06.007).
- [14] 魏雪环. 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): 28-31,41. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6540.2015.05.006.
- WEI X H. Research of eddy current loss of permanent magnet and temperature filed of PMSM [J]. *Electric machines & control application*, 2015, 42(5): 28-31,41. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6540.2015.05.006.
- [15] 成丹凤. 风力发电机冷却系统实验研究及数值模拟 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- CHENG D F. Experimental study and numerical simulation research of wind turbine cooling system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [16] 施宁强, 魏敏, 张新旺, 等. 2.5 MW直驱永磁风力发电机温度场的耦合研究 [J]. *计算机仿真*, 2020, 37(11): 92-96,249. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2020.11.019.
- SHI N Q, WEI M, ZHANG X W, et al. Calculation and analysis of three-dimensional temperature field coupling of 2.5 MW permanent magnet wind turbine [J]. *Computer simulation*, 2020, 37(11): 92-96,249. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2020.11.019.
- [17] TOSETTI, MARCO, MAGGIORE, et al. Conjugate heat transfer analysis of integrated brushless generators for more electric engines [C] //Anon. 2013 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition, Denver, CO, USA, September 15-19, 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013: 1518-1525.
- [18] 温志伟, 顾国彪, 王海峰. 浸润式与强迫内冷结合的蒸发冷却汽轮发电机定子三维温度场计算 [J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(23): 133-138. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2006.23.024.
- WEN Z W, GU G B, WANG H F. Calculation of 3D thermal field in the stator of turbo-generator with immersion evaporative-cooling system and forced inner-cooling [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(23): 133-138. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2006.23.024.
- [19] 丁树业, 孙兆琼. 永磁风力发电机流场与温度场耦合分析 [J]. *电工技术学报*, 2012, 27(11): 118-124. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.11.016.
- DING S Y, SUN Z Q. Investigation of fluid field and thermal field coupled for permanent magnet wind generator [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2012, 27(11): 118-124. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.11.016.
- [20] 路义萍, 陈朋飞, 李俊亭, 等. 某新型空冷汽轮发电机转子通风方式的流场分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(6): 63-68. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.06.009.
- LU Y P, CHEN P F, LI J T, et al. Flow field analysis of new type ventilation method in one air-cooled turbo-generator rotor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(6): 63-68. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.06.009.

---

 作者简介:


孙睿

孙睿 (第一作者, 通信作者)

1995-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事风电机组设计工作(e-mail)wysunrui01@163.com。

## 葛文澎

1990-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事风电机组设计工作(e-mail)gewenpeng@mywind.com.cn。

## 吴迪

1982-, 女, 工程师, 硕士, 主要从事风电机组设计工作(e-mail)wudi02@mywind.com.cn。

## 苗得胜

1989-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事风电机组设计工作(e-mail)miaodesheng@mywind.com.cn。

(编辑 孙舒)