

海上中速永磁风力发电机设计与分析

丛啸桀^{1,2}, 李丹², 王晓明^{1,2}, 俞文斌^{1,2}, 陈记春^{1,2}
(1. 西安中车永电捷力风能有限公司, 陕西 西安 710016;
2. 中车永济电机有限公司, 山西 永济 044502)

摘要: 以1台海上6 MW中速永磁风力发电机为研究对象, 针对不同电磁方案进行电机电磁特性仿真分析, 结果显示: 采用不等气隙斜槽电磁方案产生的齿槽转矩仅为额定转矩的0.74%, 线电压波形畸变率为1.72%, 该电磁方案下的负载特性和短路特性均能满足产品设计要求。冷却方案采用空-空冷却方式, 并通过温度特性分析验证了方案的可行性。根据该设计方案制作了2台样机进行试验验证, 结果表明电机空载电压、空载损耗、定子绕组温升和效率特性试验结果与仿真分析结果基本吻合, 验证了该设计的合理性。

关键词: 永磁风力发电机; 电磁特性; 温度特性

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)12-0076-05

doi: 10.12177/emca.2020.154

Design and Analysis of Offshore Medium-Speed Permanent Magnet Wind Generator

CONG Xiaojie^{1,2}, LI Dan², WANG Xiaoming^{1,2}, YU Wenbin^{1,2}, CHEN Jichun^{1,2}

(1. CRRC Xi'an Yonge Jieli Wind Energy Co., Ltd., Xi'an 710016, China;
2. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji 044502, China)

Abstract: Taking an offshore 6 MW medium-speed permanent magnet wind generator as the research object, the electromagnetic characteristics of the motor are simulated and analyzed for different electromagnetic schemes. The results show that the cogging torque generated by the unequal air gap skew-slot electromagnetic scheme is only 0.74% of the rated torque, and the line-voltage waveform distortion rate is 1.72%. The load characteristics and short circuit characteristics of the electromagnetic scheme can meet the requirements of product design. The air-to-air cooling scheme is adopted, and the feasibility of the scheme is verified by the analysis of temperature characteristics. According to the design scheme, two prototypes are made for test and verification. The test results of no-load voltage, no-load loss, temperature rise of stator winding and efficiency characteristics of the motor are basically consistent with the simulation analysis results, which verifies the rationality of the design.

Key words: permanent magnet wind generator; electromagnetic characteristics; temperature characteristics

0 引言

随着经济的快速发展和人民生活水平的极大提高, 对能源的需求量日益增加。同时, 全球能源

面临着很多的问题, 大量的化石燃料导致了气候变化、空气污染等, 风能作为一种储量丰富的可再生清洁能源已受世界各国的关注^[1-2]。在新能源的大航海时代, 风能无疑是一片新大陆, 因具有资

收稿日期: 2020-07-31; 收到修改稿日期: 2020-09-27

作者简介: 丛啸桀(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为风力发电机设计与分析。

李丹(1986—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电机绝缘结构设计。

王晓明(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为风力发电机设计与分析。

源丰富、发电小时数高、单机容量大、不占用陆地资源等优点,已成为可再生能源发展的重要领域之一^[3]。常规的海上风力发电机主要有鼠笼异步风力发电机、中速永磁风力发电机和低速永磁风力发电机。其中,中速永磁风力发电机具有较短且更加结实的结构,减少了易疲劳部件的使用;更紧凑的设计可确保机舱与外部更好的隔离,防止盐雾侵蚀;并且润滑系统具有高精度过滤功能,可确保轴承和齿轮传动系统的高可靠性和更长的使用寿命,因此中速永磁风力发电机已成为风电领域的研究热点。文献[4]对2 MW半直驱永磁风力发电机的绕组结构和电磁性能进行了研究。文献[5-6]对永磁直驱风力发电机定子温度场和永磁风力发电机风冷结构进行了设计与分析。由上述分析可知,对大功率中速永磁风力发电机的电磁设计和冷却系统分析的相关研究较少。

为此,本文对1台6 MW中速永磁风力发电机进行了电磁设计与冷却系统理论与试验分析,并验证了发电机设计方法的合理性。

1 主要参数

表1为6 MW中速永磁风力发电机技术参数。该电机采用216槽,24极结构,为了解决永磁电机的转矩脉动问题采用不等气隙结构^[7-9]。

表1 6 MW中速永磁风力发电机技术参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
功率/MW	6.0	电压/V	690
转速/(r·min ⁻¹)	278	电流/A	2 620
效率/%	≥97.5	功率因数	0.95
定子槽数	216	极数	24

2 电磁特性分析

为了得到准确的发电机电磁特性,以电机实际结构为原型建立了该电机的2D有限元模型。因为发电机采用2套绕组(0°相位差),所以本文建立1/12有限元模型,如图1所示。

2.1 空载特性分析

永磁电机的永磁体和定子槽之间相互作用产生齿槽转矩,进而引起电机产生不同程度的振动和噪声。齿槽转矩是永磁电机特有问题之一,是高性能永磁电机设计和制造必须考虑的问题,本

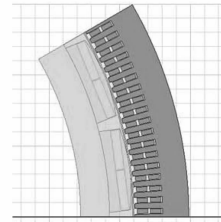


图1 发电机1/12有限元模型

文分别对直槽、斜槽+等气隙、斜槽+不等气隙对齿槽转矩进行分析,如图2所示。同时,仿真得到其空载反电势波形,如图3所示。对反电动势波形进行谐波分析,可得到反电动势的基波和各次谐波的分布情况^[10],如图4所示。

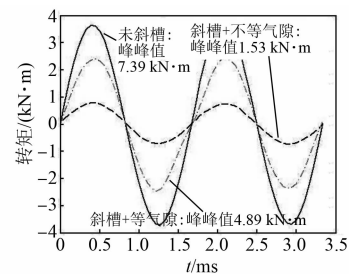


图2 齿槽转矩

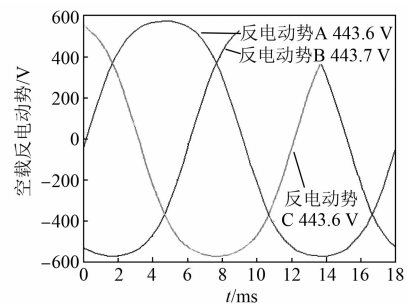


图3 空载反电动势

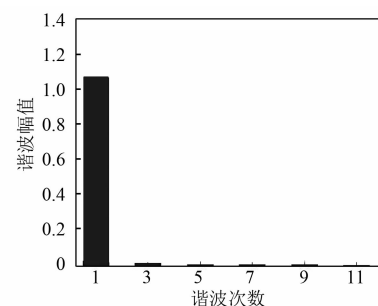


图4 空载线电压反电动势谐波分析

由图2可看出,采用斜槽加上不等气隙时,齿槽转矩最小为1.53 kN·m,仅为额定转矩的

0.74%, 可有效降低电机的齿槽转矩。

根据图5可计算线电压波形畸变率(THD)为1.72%, 满足设计小于5%的要求。

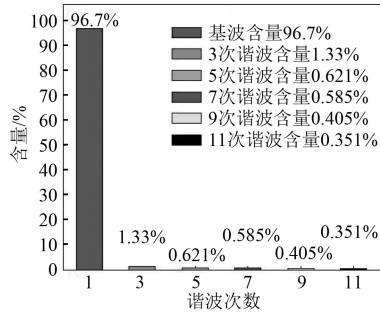


图5 各次谐波所占比例

2.2 负载特性

基于有限元模型,对电机进行额定负载时电磁特性分析,磁密云图和电机各部位磁密如图6和表2所示。额定负载转矩,如图7所示,其转矩脉动为2.8%。表3为发电机的负载特性。

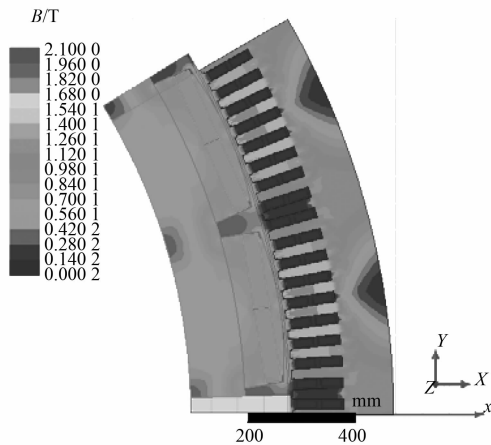


图6 负载磁密云图

表2 各部分磁密 T

气隙	定子齿部	定子轭部	转子轭部
0.70	1.79	1.40	1.30

表3 负载特性

参数名称	参数值	参数名称	参数值
功率/kW	6 008	铜耗/kW	42.35
电压/V	688	铁耗/kW	38.23
电流/A	2 604	杂散损耗/kW	30
转矩/(kN·m)	206.4	机械损耗/kW	21
转矩脉动/%	2.8	总损耗/kW	131.58
功率因数	0.965	效率/%	97.86

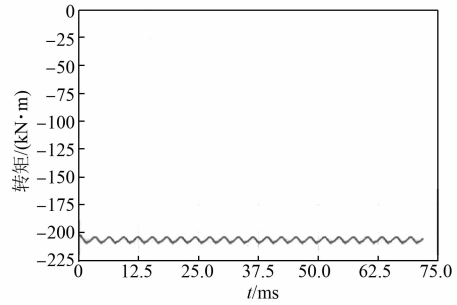


图7 负载转矩

2.3 短路特性

永磁电机发生短路后,短路电流会产生磁场,该磁场会对磁钢产生影响,因此永磁电机设计时需考虑短路状态下的磁钢退磁情况。根据风力发电机运行状态监控,实际运行时发电机本体发生短路故障基本为零,一般风力发电机短路均是在变流器侧短路,其中以两相短路最为严重。本文按照发电机两相短路进行仿真处理,两相短路电流如图8所示,最大短路电流时刻的磁钢处场强云图如图9所示。该电机磁钢采用38UH磁钢,磁钢在90℃时临界场强 $H_K = 1\ 203\ \text{kA/m}$,由图9可知发电机在最大短路时刻磁钢退磁面积为零,满足设计要求。

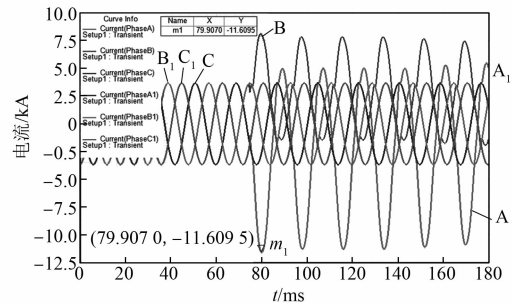


图8 两相短路电流

3 温度特性分析

发电机的温升对于其安全可靠的运行尤为重要。该电机为大功率永磁半直驱风力发电机首次采用空-空冷却措施,与传统的定子水冷或者空-水冷却相比,空-空冷却发电机的经济性好,但对发电机的冷却结构提出更高的要求。为了准确计算发电机的温度特性,分别采用三维有限元和Motor-CAD对电机进行分析。根据发电机的特

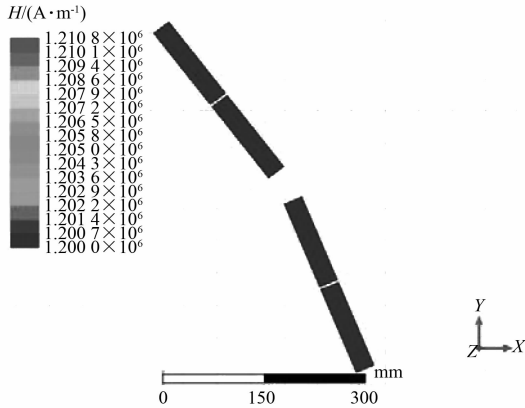


图9 磁钢场强云图

性,其边界条件:

- (1) 通风方式为强迫通风,风量 $5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- (2) 进风温度为 $54 \text{ }^\circ\text{C}$;
- (3) 转速为 $278 \text{ r}/\text{min}$;
- (4) 采用表3中的损耗。

3.1 三维温度场分析

本文三维有限元模型完全基于电机的实际结构尺寸进行建模,在不影响计算结果的前提下,对模型作适当简化。为了保证工程所需精度,该算例的网格在保证计算精度、计算耗时及稳定的前提下,选用合适边界层网格疏密度以及对应的 $k-\varepsilon$ 湍流模型。发电机径向温度如图10所示。发电机各部件温度如表4所示。

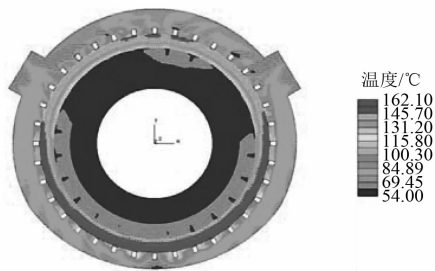


图10 径向温度分布

表4 三维有限元分析电机各部件温升

参数名称	最高值	平均值
定子绕组温升/K	99.19	72.76
定子铁心温升/K	108.5	87.96
磁钢温度/ $^\circ\text{C}$	67.28	62.94

3.2 Motor-CAD 热计算

采用上述边界条件进行建模计算,结果如图

11、图12所示。各部分温升如表5所示。

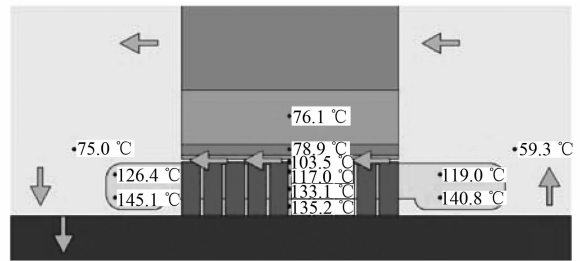


图11 电机轴向温度分布

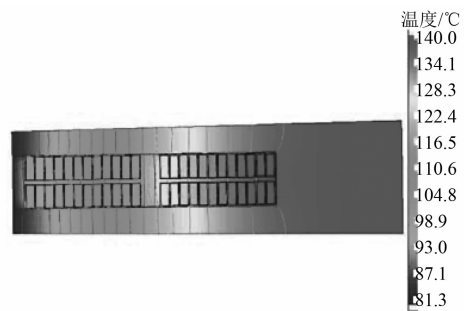


图12 电机定子温度云图

表5 Motor-CAD 分析电机各部件温升

参数名称	最高值	平均值
定子绕组温升/K	91.1	76.8
定子铁心温升/K	92.5	—
磁钢温度/ $^\circ\text{C}$	76.9	—

通过对电机的温度特性仿真分析可知,该电机采用的冷却方案可满足电机的设计要求。

4 试验分析

通过对发电机的电磁及温度特性的分析,制造了2台6 MW 中速永磁风力发电机,样机如图13所示。

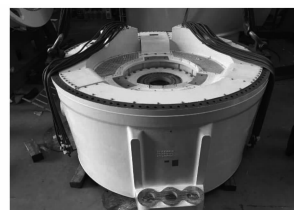


图13 6 MW 中速永磁风力发电机样机

对2台发电机采用对拖进行型式试验,电机空载电压、空载损耗、定子绕组温升和效率特性曲线,如图14所示。部分试验数据如表6所示。

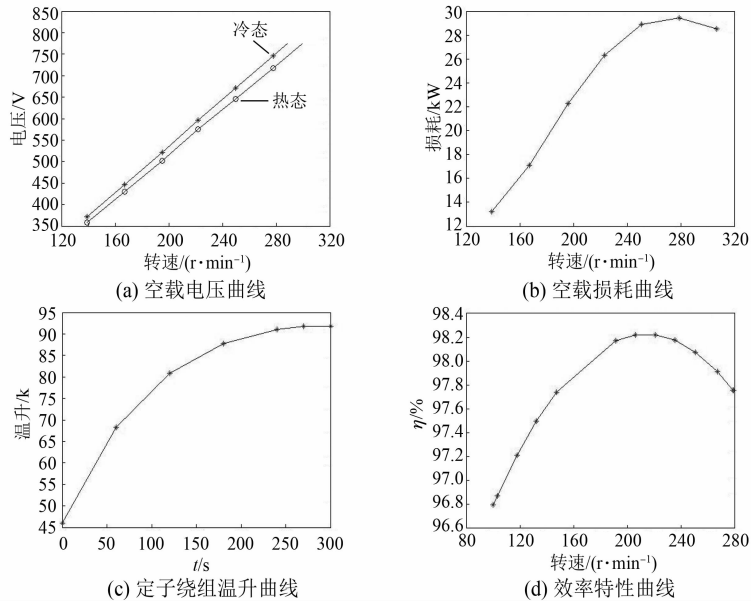


图 14 型式试验结果曲线

表 6 部分试验数据

试验项目	试验值	试验项目	试验值
功率/kW	6 000	定子铁心温升/K	100
电压/V	695	磁钢温度/℃	86
电流/A	2 602.5	定子绕组温升/K	91.9
空载反电动势(20℃)/V	761	功率因数	0.957
线电压波形畸变率/%	2.3	效率/%	97.9

样机型式试验结果与本文的理论分析结果基本相符合,而且发电机的各项性能均满足设计要求,进一步验证了该设计方案的可行性。

5 结 语

本文对1台6 MW, 278 r/min的空-空冷永磁风力发电机进行了电磁设计,对冷却方案进行了理论和试验分析,得到以下结论:

- (1) 发电机采用斜槽+不等气隙结构可以有效地降低发电机的齿槽转矩和转矩波动;
- (2) 发电机采用空-空冷却措施,可以保证发电机温升在设计要求范围内,以保证发电机安全可靠的运行;
- (3) 样机型式试验结果与仿真分析结果基本吻合,试验和理论分析的一致性验证了电磁及冷却方案的可行性。

本文的论证分析与试验数据对大功率中速永磁风力发电机的设计具有一定参考价值。

【参考文献】

- [1] 王凤翔. 永磁电机在风力发电系统中的应用及其发展趋势[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 12.
- [2] 王彩霞, 李琼慧. 促进我国分散式风电发展的政策研究[J]. 风能, 2013(9): 46.
- [3] 赵祥, 范瑜, 夏静, 等. 大型海上风力发电机组的可靠性设计[J]. 防爆电机, 2019, 54(4): 16.
- [4] 张岳, 王凤翔. 半直驱永磁风力发电机多相绕组结构设计及性能分析[J]. 微特电机, 2014, 42(3): 33.
- [5] 张海平, 王金辉, 艾厚刚. 永磁直驱风力发电机定子温度场研究[J]. 风能, 2020(1): 108.
- [6] 朱高嘉, 刘晓明, 李龙女, 等. 永磁风力发电机风冷结构设计与分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 946.
- [7] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 21, 80-83.
- [8] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [9] 汤蕴璆. 电机内的电磁场[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] 郑阿奇. MATLAB 实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.