

大功率中速永磁风力发电机设计及性能研究

杨 波^{1,2}, 贺建湘^{1,2}, 刘中华^{1,2}, 阳雪兵^{1,2}, 刘 亚^{1,2}

(1. 湘电风能有限公司, 湖南 湘潭 411101;

2. 海上风力发电技术与检测国家重点实验室, 湖南 湘潭 411102)

摘 要: 提出了一种基于 ANSYS Maxwell 2D 等效磁路法的电磁仿真和工程热分析相结合的电机设计方法。通过 Maxwell 2D 对 4.8 MW 中速永磁风力发电机进行设计, 为了进一步研究发电机的运行特性, 建立了永磁发电机有限元分析计算模型。对发电机的空载、额定负载和短路性能进行仿真分析计算, 获得各工况下的电流、反电动势和电磁转矩等波形, 并且采用热路法对电机各部分温升情况进行计算。仿真计算结果表明该发电机设计合理, 各项指标均符合要求。电磁仿真和工程热分析相结合可以更加准确地指导电机设计, 为发电机的电磁设计和结构优化提供理论依据。

关键词: 风力发电机; 中速; 电磁分析

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)07-0035-04

doi: 10.12177/emca.2020.059

Design and Performance Research of High-Power Medium-Speed Permanent Magnet Wind Power Generator

YANG Bo^{1,2}, HE Jianxiang^{1,2}, LIU Zhonghua^{1,2}, YANG Xuebing^{1,2}, LIU Ya^{1,2}

(1. XEMC Wind Power Co., Ltd., Xiangtan 411101, China;

2. State Key Laboratory of Offshore Wind-Power Technology and Testing, Xiangtan 411102, China)

Abstract: A generator design method which is the combination of electromagnetic simulation based on equivalent magnetic-circuit method using ANSYS Maxwell 2D and engineering thermal analysis is presented. Through the analysis and calculation by ANSYS Maxwell 2D, the 4.8 MW medium-speed permanent magnet wind power generator is designed. In order to further study the operation characteristics of the generator, the finite element analysis and calculation model of the permanent magnet generator is established. The no-load, rated-load and short-circuit performances of the generator are simulated, and the current, induced voltage and electromagnetic torque are obtained. Finally, the temperature rise of each part of the generator is calculated by the thermal circuit method. The calculation results show that the design of the generator is reasonable and all indexes meet the requirements. The combination of electromagnetic simulation and engineering thermal analysis can make the generator design more accurately. It provides the theoretical basis for the electromagnetic design and structural optimization of generators.

Key words: wind power generator; medium-speed; electromagnetic analysis

0 引 言

基于陆上和海上风电“平价上网”政策的推进, 以及风电市场对陆上低风速风场的加速开发, 采用大功率、小体积、易运输、易吊装的风电机组,

可以实现对风电场整体投资成本的有效控制, 以提升项目发电量, 降低度电成本^[1]。

半直驱风力发电机组以低传动比增速箱与中速永磁发电机组成的传动链系统, 解决了大功率风力发电机组带来的永磁直驱发电机的大尺寸、

收稿日期: 2020-04-09; 收到修改稿日期: 2020-05-14

作者简介: 杨 波(1982—), 硕士, 工程师, 研究方向为风力发电机组的设计。

高成本、难运输的问题以及高传动比的齿轮箱可靠性和运维成本问题。

文献[2]对半直驱发电机电磁参数进行了分析和设计;在同等输出功率的前提下,比较了半直驱、直驱、双馈发电机的材料成本情况,结果显示了半直驱发电机在大功率机组上使用的优势。文献[3]采用热路法和有限元法对 3 MW 永磁同步发电机进行了温度场计算和实测数据对比,证明热路法具有较高的精度。文献[4]在不同的工作点对驱动电机的稳态和瞬态进行仿真,并结合电磁特性曲线和性能曲线确定了驱动电机的总体性能要求。

文献[2-4]的分析表明,采用电磁仿真分析得到电机空载、负载数据和采用热路法的温升校核可以指导电机的设计方案选型和优化。但是,以上文献均没有把电磁仿真和热分析结合在一个设计分析流程中。因此,在电机设计方案定型时存在理论分析不充分的情况。

本文以 4.8 MW 中速永磁风力发电机为研究对象,建立了永磁发电机的电磁计算模型,并对发电机的空载、额定负载、短路工况进行仿真分析计算。最后,以电磁设计方案中的损耗为基础,利用工程传热学理论,对发电机内部的传热特点和温升情况进行分析,为发电机电磁设计和结构优化提供了理论依据。

1 永磁发电机结构

4.8 MW 中速永磁风力发电机采用内转子、外定子的结构形式。依据电机的结构形式和损耗的分布情况,发电机采用径向和轴向通风冷却相结合的混合通风方式,如图 1 所示。

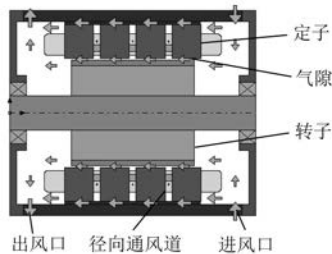


图 1 中速发电机结构及风路布局

根据中速风力发电机组总体设计电气及机械参数要求,4.8 MW 中速永磁风力发电机的主要技

术参数如表 1 所示。

表 1 发电机主要技术参数

参数名称	参数值
额定线电压/V	1 140
额定电流/A	2 559
额定输出功率/kW	4 800
额定转速/(r·min ⁻¹)	412
功率因素	0.95
效率	0.98
相数	Y
电机外径/mm	≤2 500
绝缘等级	F 级

中速永磁发电机主要尺寸的确定是设计的关键步骤。发电机的质量、主要成本构成和工作特性与电机的主要尺寸及其比值有密切关系^[5]。永磁发电机的主要尺寸一般为定子内径 D 和定子铁心有效长度 L_{eff} ,满足电机基本关系式^[6]:

$$\frac{D^2 L_{\text{eff}} n}{P'} = \frac{6.1 \times 10^4}{\alpha_p A B_\delta K_{\text{pd}}} \tag{1}$$

式中: n 为电机转速; P' 为电机功率; α_p 为计算极弧系数; A 为线负荷; B_δ 为气隙磁密; K_{pd} 为绕组系数。

2 有限元建模及仿真计算

以表 1 的发电机基本参数为基础,采用 RMxpirt 对发电机进行方案设计。将 RMxpirt 磁路法分析确定的电机设计方案导入 Maxwell 2D,通过边界条件添加、网格划分和激励施加,建立二维有限元分析模型。分析电机在空载、额定负载和短路等不同工况下的特征状况。

2.1 空载特性

空载特性是发电机的基本特性之一,通过空载特性可以得到电机磁力线和磁场分布情况、空载反电动势和气隙磁密波形情况,从而判断电机磁路的设计是否合理^[7]。

空载磁力线分布如图 2 所示。从图 2 可以看出,永磁体产生的漏磁较小,电机的磁路结构设计合理。

空载反电动势波形如图 3 所示。其空载相电压有效值为 693 V,空载线电压有效值为 1 193 V,满足设计要求。

空载径向气隙磁密波形如图 4 所示。从图 4

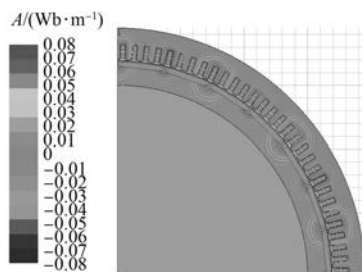


图2 空载磁力线分布图

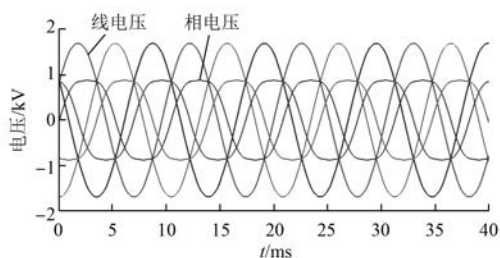


图3 空载反电动势波形

可以看出,由于定子采用较宽的平行槽,径向气隙磁密在槽部和齿部出现了畸变。该发电机定子线圈采用分数槽星形接法,可有效地抑制和消除齿谐波。

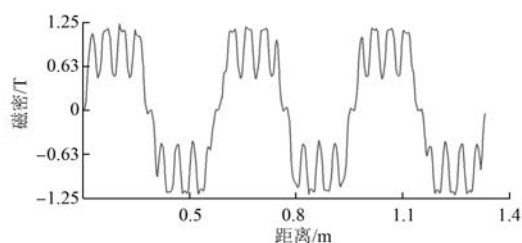


图4 空载径向气隙磁密波形

对空载反电动势波形进行傅里叶分解,如图5所示,可知该电机的电动势波形正弦性好,仅有少量的相电动势谐波,其空载相反电动势波形畸变率为0.75%。

2.2 负载特性

在负载情况下,由叶轮传递过来的机械能通过气隙磁场转化为电能。定子绕组产生的电流最终通过全功率变流器并入电网。与空载特性曲线图相比,负载情况下电机的反电动势及其FFT分解发生了变化。负载情况下,定子线圈绕组中的电流产生了电枢反应,使得气隙磁场发生了畸变。负载电流、反电动势波形和反电动势FFT分解图

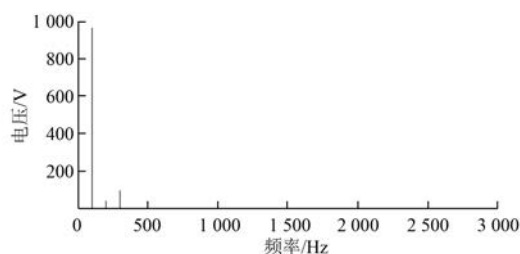


图5 空载反电动势FFT分解图

如图6~图8所示。

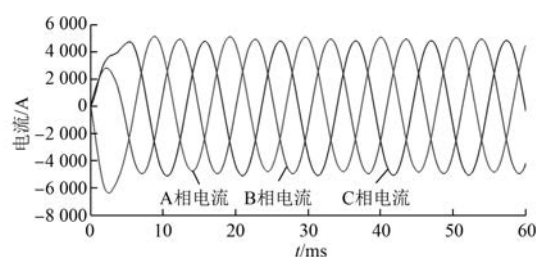


图6 负载电流波形

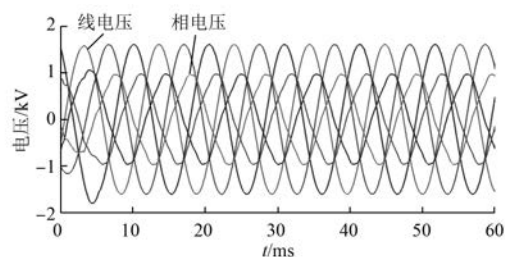


图7 负载反电动势波形

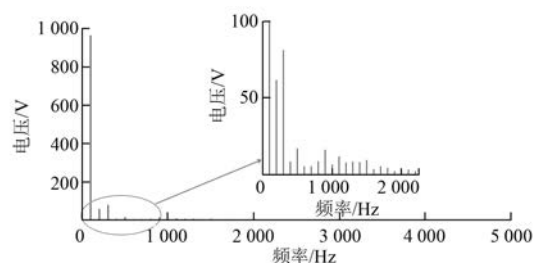


图8 负载反电动势FFT分解图

从图7可以看出,相电压有效值为654 V,线电压有效值为1126 V,同时负载反电动势的谐波成分有所增加,但是幅值均较小。

2.3 短路分析

永磁发电机在短路情况下,会产生较大的短路扭矩和短路电流。通过建立短路仿真模型进行

稳态短路分析,获得峰值扭矩和电流,为后续结构和电磁校核提供基础数据。图 9、图 10 所示为短路电流和转矩波形图。短路峰值电流为 13 284 A,达到负载电流的 4 倍;短路峰值转矩 231 kN·m,为额定转矩的 2.1 倍。

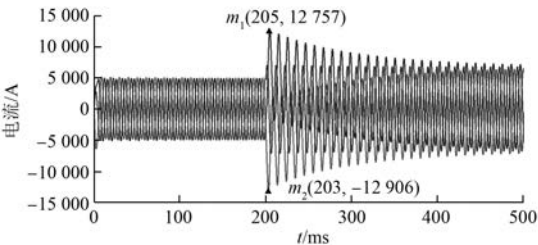


图 9 短路电流波形图

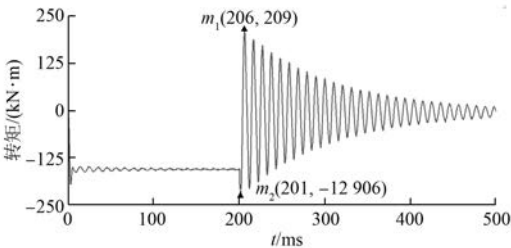


图 10 短路扭矩波形图

3 热分析

电机内部热量的传递主要有 3 种基本形式:热传导、热对流和热辐射。以发电机电磁设计为基础,建立电机各部分损耗的参数如表 2 所示。对于以强制对流散热的电机而言,辐射换热可以忽略不计^[8-9]。

表 2 发电机损耗分布及内风参数

参数名称	参数值
外部环境温度/℃	40
内进风温度/℃	50
内风量/(m ³ ·s ⁻¹)	5
线圈铜耗/kW	65
定子齿部损耗/kW	14
定子轭部损耗/kW	8
磁钢损耗/kW	2
转子铁心损耗/kW	3
机械损耗/kW	10

电机的热计算主要有简化公式法、等效热路法、温度场法。其中,热路法计算量小、计算难度

低,可作为永磁电机前期温升设计的校核方法。本文热分析在工程传热学中的热传导、热对流关系式及热阻表达形式基础上,建立发电机热路模型,获得电机各部分温度分布情况。

热传导基本表达式^[8]为

$$\Phi_1 = \frac{\Delta t_1}{\delta/(\lambda A_1)} = \frac{\Delta t_1}{R_1} \tag{2}$$

式中:Φ₁ 为传导热量;Δt₁ 为热传导物体表面温度梯度;δ 为热传导壁厚;λ 为导热系数;A₁ 为导热面积;R₁ 为传导热阻。

对流传热基本表达式^[8]为

$$\Phi_2 = hA_2(\Delta t_2) = \frac{\Delta t_2}{1/(hA_2)} = \frac{\Delta t_2}{R_2} \tag{3}$$

式中:Φ₂ 为对流换热量;h 为对流换热系数;Δt₂ 为对流换热物体表面温度梯度;A₂ 为传热面积;R₂ 为对流热阻。

电机的定子铁心、线圈、绝缘材料的导热系数可以查询文献或材料性能手册。定子径向通风道、气隙、定子齿部、定子轭部的对流换热系数可以根据内部通风量及其通风截面积求得气流速度导入工程传热学相关关系式得出;线圈端部的换热系数采用经验公式来确定^[10]。

根据发电机的损耗分布及通风参数,采用热路法计算出电机各部位的温度分布情况如表 3 所示。从计算结果可以看出,电机主体风路布局合理,温升也满足绝缘的使用要求,进一步验证了电磁方案的合理性。

表 3 热路法温度计算分布表

电机部位	温度/℃
定子线圈	129.5
定子铁心齿部	110
定子铁心轭部	93
机座	65.8
转子永磁体	72.4
转子支架	71.2

4 结 语

本文以磁路法对 4.8 MW 中速永磁发电机进行了方案设计,在此基础上建立了 Maxwell 2D 有限元仿真模型,对发电机的空载、负载和短路等工况进行了分析。最后,采用热路法对电机各部分温升情况进行计算。(下转第 47 页)

此方法解决;(2) 该结构与传统风罩风扇相比,损耗较小;(3) 外观比较漂亮。

该方法缺点是:为了制造出性能良好的产品,该蜗壳风罩结构及叶轮结构都需要不同的模具,导致成本增加。

3 结 语

本文介绍的 3 种降低外通风噪声的方法是湘潭电机股份有限公司实际采用过的方法,经过多次试验证明行之有效。3 种方法各有优缺点,达到不同程度的降噪效果,具体降噪程度还需参考设计能力、材料、制造能力等因素。电机噪声实际影响因素比较多,未来将进一步展开研究。

【参 考 文 献】

- [1] 中国电器工业协会. GB 10069.3—2008: 旋转电机噪声测定方法及限值, 第 3 部分: 噪声限值[S]. 北

京: 中国标准出版社, 2008.

- [2] 崔伟, 史建萍, 吴若欣, 等. 降低电机通风噪声的一种可行方案[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(11): 50.
- [3] 庄重, 张国强. 空空冷却高压异步电动机的降噪措施[J]. 电机技术, 2016(2): 29.
- [4] 张玉成, 仪登利, 冯殿义. 通风机设计与选型[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [5] 吴若欣, 崔伟, 史建萍. 空空冷异步电机降低噪声方法探讨[J]. 通讯世界, 2015(8): 199.
- [6] 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] 周玲慧, 向善海, 陈华. 高效高功率密度低噪声电机研究[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(7): 71.
- [8] 周志勇, 王宗娟, 周滕佳, 等. 吸声蜗壳在离心风机降噪中的应用研究[J]. 机械制造, 2018(1): 59.
- [9] 王立名, 苏国霞. 降低异步电动机通风噪声的方法研究[J]. 防爆电机, 2018, 53(4): 22.

(上接第 38 页)

电磁仿真和工程热分析的计算结果较准确地反映了电机的外特性和温升特性, 从而更加准确地指导电机设计。该设计流程可快速完成电机方案的初步设计, 适用于设计初期的选型计算, 为下一步发电机成本估算、结构优化设计和最终方案确定提供理论依据。

【参 考 文 献】

- [1] 夏荣立, 贺小兵, 彭怀午. 陆上风电场 2.5 MW 及以上风电机组发展综述[J]. 西北水电, 2017(3): 5.
- [2] 欧金生, 雷雄, 尹曾锋. 大型半直驱式永磁风力发电机的电磁设计[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(5): 58.
- [3] 刘万平, 张新丽, 赵祥, 等. 大功率永磁电机温度场数值计算及实测对比[J]. 船电技术, 2010, 30(9): 7.

- [4] BUKHARI A A S, ALALIBO B P, CAO W, et al. Switched reluctance motor design for electric vehicles based on harmonics and back EMF analysis[J]. The Journal of Engineering, 2019, 17: 4220.
- [5] 陈世坤. 电机设计[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [6] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [7] 朱公栋, 王益轩, 高丹. 基于 Ansoft/RMxpert 的大功率永磁同步风力发电机优化设计[J]. 上海大中型电机, 2014(1): 28.
- [8] 汪文博. 永磁同步电机的热路模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [9] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [10] 魏永田. 电机内热交换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.