

基于多物理场耦合的直驱永磁同步风力发电机定子绕组优化设计

龚天明, 李 华

(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 直驱永磁风力发电机具有结构简单、成本低、运行可靠等优点, 在风能发电领域具有潜在的应用价值。以 1 台 1 200 kW 直驱永磁同步风力发电机为研究对象, 进行了电磁场、温度场及热应力场等多物理场耦合分析, 考虑由于温度变化及热变形对永磁体、铜线等电磁材料性能的影响, 最终实现电磁性能、温度及形变的收敛, 从而更为准确地分析发电机性能。以多物理场耦合分析方法对该发电机进行定子绕组优化设计, 使绕组设计更加合理。所得结论对直驱永磁同步风力发电机设计具有一定的参考价值。

关键词: 直驱永磁同步风力发电机; 多物理场耦合; 绕组; 优化设计

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)07-0067-05

Optimum Design of Stator Winding of the Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Wind-Power Generator Based on Multi-Physical-Field Coupling

GONG Tianming, LI Hua

(CRRC Zhuzhou Motor Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: As a wind power generation method, direct-drive permanent synchronous wind-power generator had the advantages of simple structure, low cost, and reliable operation, so it had potential application value in the wind power generation field. Taking a 1 200 kW direct-drive permanent magnet synchronous wind-power generator as the research object, the coupling analysis of electromagnetic field, temperature field and thermal stress field was carried out, and the influences of temperature change and thermal deformation on the properties of permanent magnet, copper wire and other electromagnetic materials were considered, achieving the convergence of electromagnetic performances, temperature and deformation, so that the performances of the generator could be more accurately analyzed. The stator winding optimum design of the generator was carried out through the multi-physical-field coupling analysis method, which made the winding design more reasonable. The conclusions had certain reference value for the design of direct-drive permanent magnet synchronous wind-power generator.

Key words: direct-drive permanent magnet synchronous wind-power generator; multi-physical-field coupling; winding; optimum design

0 引 言

直驱永磁同步风力发电机组是由风轮直接驱动永磁发电机的风力发电机组。这种机组一般采用多极同步发电机与风轮直接连接进行驱动的方式, 免去了齿轮箱。多配置齿轮箱部件会增加机

组的故障率, 无齿轮箱的直驱方式能有效地减少此类故障, 增加系统运行的可靠性, 减少维护成本, 因而受到了市场青睐。同时, 永磁同步发电机配套的全功率变流技术是低电压穿越技术很好的解决途径, 为直驱永磁同步风力发电机进一步发展增加了优势。采用高磁能积的钕铁硼永磁体励

作者简介: 龚天明(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为风力发电机。

李 华(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为风力发电机。

磁,不仅可以提高永磁发电机的效率,而且能在增大发电机容量的同时减小体积,提高了机组的可靠性^[1]。

一般风力发电机电磁计算仅仅基于电磁场的单物理场分析,未考虑因电磁损耗产生的温升及热变形对发电机电磁性能的影响^[2]。本文主要对电磁场、温度场及热应力场的耦合场进行研究,并基于耦合场对1台1200 kW直驱永磁同步风力发电机进行电磁计算分析,同时对不同线规、不同并绕根数的绕组结构的发电机进行对比分析,完成了对发电机绕组的优化设计。

1 电机中多耦合场的基本理论

在电机设计中,一般涉及到电磁、绝缘、发热、通风冷却、结构力学等多种多样的问题,是各个学科相互关联的耦合场问题。但这类耦合问题的研究十分复杂,一般将各个物理场分开计算,但计算精确度不足,要准确计算则需要考虑各个物理场之间的耦合关系^[3]。

一般耦合场分析方法有间接耦合和直接耦合。直接耦合将多种物理场同时考虑,所有分析计算交叉进行,但计算时间长、分析较难收敛。间接耦合指多个物理场按顺序逐个进行分析,前一个物理场分析结果作为后一个物理场分析的载荷。本文主要研究间接耦合。基于间接耦合分析永磁同步风力发电机计算流程如图1所示。

永磁同步风力发电机运行过程中温度影响各

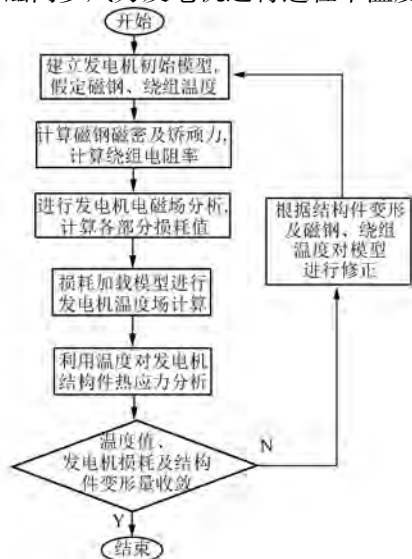


图1 间接耦合分析永磁同步风力发电机流程

个材料的属性,如永磁体的剩磁及矫顽力随着温度的升高而降低,铜的电阻率随着温度的升高而升高,而各个材料在受热情况下会产生热变形,变形后定转子间的气隙长度有所减小,发电机极间漏磁也会随之减小,虽然永磁体磁性能减弱,但空载反电动势可能还会增大。只有通过多物理场耦合计算才能考虑各个物理场的相互影响^[4]。

根据热传导方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\lambda \partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda \partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda \partial^2 T}{\partial z^2} + q \right) / \rho c \quad (1)$$

式中: T ——温度;

t ——时间;

λ ——导热系数;

q ——热流密度;

ρ ——密度;

c ——比热容。

对于该发电机,沿轴向的剖面为绝热面,可简化为二维有限元分析。对于定子外圆,其表面散热存在:

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = k(T - T_0) \quad (2)$$

式中: $\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s$ ——沿定子外圆节点的热梯度;

s ——定子外圆散热面;

k ——定子表面散热系数;

T_0 ——环境温度。

定子外表面由风带走热量,散热系数可以表达为

$$k = (1 + 0.25v) / 45\,000 \quad (3)$$

式中: v ——定子外表面风速。

计算电机内各单元温度分布,若物体内部温升为 ΔT ,其内各点将发生变化,变形量为

$$\alpha_T = \alpha \Delta T \quad (4)$$

式中: α ——材料热膨胀系数。

由于物体被约束,故会产生热应力,热应力则引起物体变形。对于平面问题,变形量可表达为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = (\sigma_x - \mu \sigma_y) / E + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_y = (\sigma_y - \mu \sigma_x) / E + \alpha \Delta T \\ \gamma_{xy} = \tau_{xy} / G \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_x, σ_y —— x, y 方向应力;

μ ——泊松比;

E ——弹性模量;

τ_{xy} ——剪切应力;
 G ——剪切模量。

2 基于多物理场耦合的 1 200 kW 直驱永磁同步风力发电机电磁仿真分析

仿真用发电机基本参数如表 1 所示。

表 1 发电机基本参数

参数名称	参数值
功率/kW	1 260
电压/V	720
槽数	360
极数	60
转速/(r·min ⁻¹)	20
定子接法	Y
功率因数	0.985(容性)
轴向长度/mm	700
定子内径/mm	3 440
定子外径/mm	3 800
最小气隙长度/mm	5

发电机定子冲片采用 50W470 牌号的冷轧硅钢片,转子永磁体采用 N42H 的钕铁硼表贴式结构,冷却方式为自然风冷。1 200 kW 直驱永磁同步风力发电机仿真模型如图 2 所示。

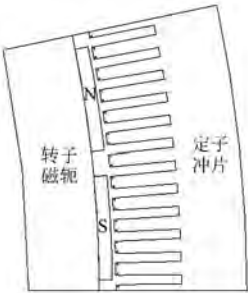


图 2 1 200 kW 直驱永磁同步风力发电机仿真模型

对发电机进行电磁仿真分析,空载和负载气隙磁密如图 3 和图 4 所示。对应的磁密云图如图 5 和图 6 所示。

对发电机进行负载计算时,假设初始永磁体温度为 80 ℃,绕组温度为 110 ℃,得到发电机定子绕组电阻为 0.019 08 Ω。额定负载时各部分损耗如表 2 所示。将定子铜耗均匀加载到线圈上,

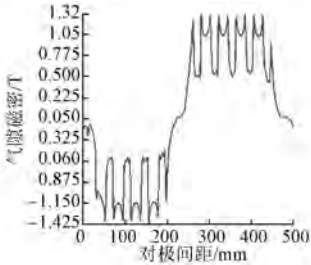


图 3 发电机空载气隙磁密

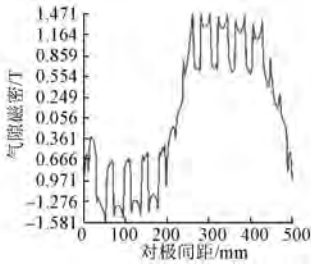


图 4 发电机负载气隙磁密

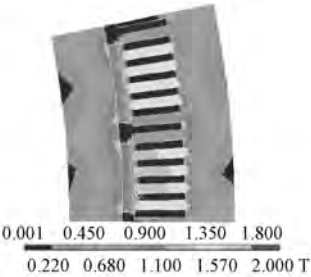


图 5 发电机空载磁密云图

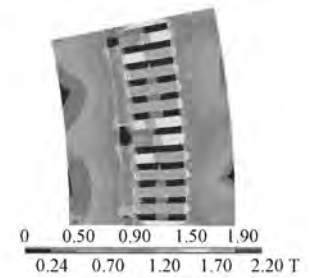


图 6 发电机负载磁密云图

定子铁耗及 1/2(杂散损耗+机械损耗)加载在定子铁心,另外 1/2(杂散损耗+机械损耗)及永磁体涡流损耗加载在转子永磁体上。

对发电机进行流固耦合仿真分析,计算过程中考虑外界风速为额定风速 12 m/s,外界空气温度为 40 ℃,转子内部无通风,由于转子旋转速度

较低,可忽略转子旋转产生的气流影响。材料属性设置如表 3 所示。

表 2 发电机额定负载时损耗		kW
损耗类型	损耗值	
铜耗	64.77	
定子铁耗	5.58	
杂散损耗	5.04	
机械损耗	10.49	
永磁体涡流损耗	0.40	

表 3 发电机材料属性设置			
材料	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	热膨胀系数/ (10 ⁻⁵ K ⁻¹)	弹性模量/ (10 ¹¹ N·mm ⁻²)
铜扁线	377.00	1.77	1.15
永磁体	7.00	1.12	1.13
硅钢片	40.00	1.20	2.00
绝缘材料	0.16	5.65	5.00

定子绕组导线为紫铜扁线,为了准确分析,将槽内导体逐层建模;铁心为冷轧硅钢片叠压而成,由于分析模型为二维模型,仅考虑径向导热及变形;槽内绝缘材料通过真空浸漆(VPI)后可以认为材质均匀。

经计算,发电机绕组温度云图如图 7 所示,最高温度 110.888 ℃,主要集中在槽口位置。铁心温度分布云图如图 8 所示,最高温度 89.526 ℃,主要分布在齿部。永磁体温度分布云图如图 9 所示,最高温度 77.876 ℃,主要分布在靠近气隙侧。

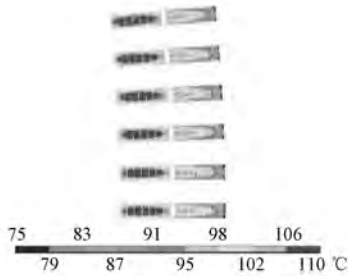


图 7 绕组温度分布图

用于永磁体表面粘接的胶具有一定韧性,可以忽略其影响,仅考虑铁心及永磁体受热膨胀的变形。转子变形示意图如图 10 所示。定子受热变形示意图如图 11 所示。受热变形后,定子铁心内径向内、外径向外变形,转子外径向外、内径向

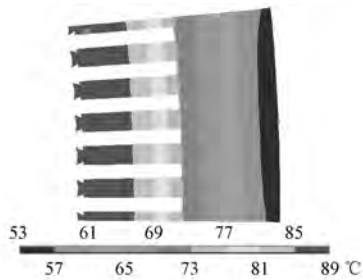


图 8 铁心温度分布图

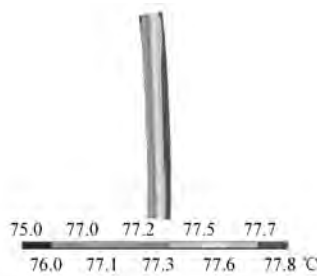


图 9 永磁体温度分布图

内变形,热变形后气隙长度由 5.00 mm 变为 4.62 mm。考虑模型周期性分布,仅存在径向变形,圆周方向约束处理。

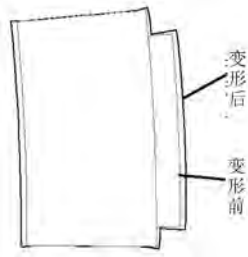


图 10 转子变形示意图

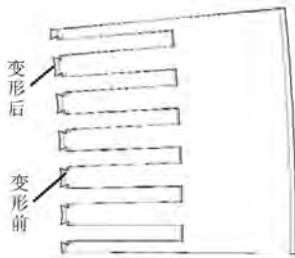


图 11 定子受热变形示意图

对变形后的模型进行重新加载计算,考虑永磁体及绕组温度变化对定子电阻及永磁体磁性能的影响,直到各部分温度收敛。最终计算结果:绕

组温度为 110.316 °C, 铁心温度为 89.162 °C, 永磁体为 77.775 °C, 气隙长度为 4.66 mm。

由此可见, 通过耦合场进行有限元分析, 能够更加全面地考虑发电机运行过程中电磁场、温度场及热应力场的交叉影响, 更能准确反映电机实际运行情况。

3 不同绕组结构发电机性能对比分析

对并绕根数 N_l 固定为 1, 铜扁线线规 $a \times b$ 为 11 mm×5 mm 等(厚度固定为 5 mm, 宽度分别为 11.0、11.5、12.0、12.5、13.0、13.5、14.0 mm) 的方案进行多物理场耦合计算。发电机性能对比如表 4 所示。

表 4 铜扁线线规宽度不同绕组的发电机性能对比

$a \times b /$ mm	槽型尺寸/ mm	绕组 温度/°C	铁心 温度/°C	永磁体 温度/°C	效率 /%
11.0×5	13.0×87	112.6	91.0	79.0	93.57
11.5×5	13.5×87	110.7	89.9	78.2	93.68
12.0×5	14.0×87	108.9	88.7	77.9	93.86
12.5×5	14.5×87	106.8	87.4	77.7	94.01
13.0×5	15.0×87	105.3	86.3	77.4	94.16
13.5×5	15.5×87	104.5	85.8	77.3	94.29
14.0×5	16.0×87	103.7	85.0	77.0	94.42

随着线规宽度的增加, 发电机电阻有所下降, 铜耗降低, 虽然随着槽宽的加宽, 齿部减小, 铁耗有所增加, 但是发电机的效率还是呈现出升高的趋势。随着线规宽度的增加, 齿部磁密不断升高到接近饱和, 同时用铜量逐渐增大, 成本增加^[5-6]。同时, 按密度折算, 用铜量的增加大于用钢量的减少, 即发电机的重量也会有所增大。设计时应综合考虑, 在保证温升及效率等性能的同时减少材料的用量、成本及发电机重量。

对不同并绕根数(1 根、2 根或 3 根并绕) 及不同线规(宽度固定为 11 mm, 厚度分别为 5.3、5.0、4.7、4.5、2.7、2.5、2.3、1.7 mm) 方案进行多物理场耦合计算, 结果如表 5 所示。

随着铜扁线线规厚度方向的增加, 效率会提高。当线规厚度较大时会增加低集肤效应带来的损耗; 为了减少带来的损耗, 将线规减小, 采用双

根并绕方式提高效率。

表 5 并绕根数不同、铜扁线线规厚度不同绕组的发电机性能对比

$a \times b /$ mm	N_l	槽型尺寸/ mm	绕组 温度/°C	铁心 温度/°C	永磁体 温度/°C	效率 /%
11×5.3	1	13×91.5	103.65	84.1	77.4	93.67
11×5.0	1	13×87.0	107.36	85.9	77.9	93.57
11×4.7	1	13×84.5	111.49	87.6	78.5	93.27
11×4.5	1	13×80.0	113.53	89.1	79.9	93.12
11×2.7	2	13×99.5	101.40	83.9	77.3	94.05
11×2.5	2	13×94.0	107.60	87.3	78.3	93.74
11×2.3	2	13×88.5	109.50	89.2	79.4	93.38
11×1.7	3	13×101.0	120.40	100.0	81.4	93.75

从表 5 可见, 线规 11 mm×5.3 mm 单根并绕相比 11 mm×2.5 mm 双根并绕用铜量增大, 但效率却低于后者; 采用 11 mm×1.7 mm 3 根并绕方案用铜量相当的情况下效率值更高, 但会降低槽满率, 增加温升。因此, 采用合理的线规和并绕根数会有利于电机性能的提高, 比如小线规双根并绕有利于电机性能的提高。但是随着线规继续减小, 并绕根数增多, 槽满率下降, 发电机效率提升效果不明显。同时, 随着并绕根数的增多, 给梭型线圈的绕制及涨型、嵌线带来了一定的难度。基于发电机性能与工艺匹配最佳原则, 选取 11 mm×2.7 mm 双根并绕绕组结构。

4 结 语

本文介绍了基于多物理场耦合的直驱永磁同步风力发电机计算方法, 并对 1 台 1 200 kW 直驱永磁同步风力发电机进行基于多物理场耦合的计算, 同时对不同绕组结构的发电机进行对比分析以完成对发电机定子绕组的优化设计。该方法为以后其他结构形式及功率等级的直驱永磁同步风力发电机设计提供了一定的参考。

【参考文献】

- [1] 张兆强. MW 级直驱永磁同步风力发电机设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [2] 刘培帅. 大容量笼型异步风力发电机多物理场分析 [D]. 天津: 天津大学, 2018.

(下转第 81 页)

路,制成铝基板 PCB,并进行测试。测试曲线表明:该控制器运行效能高,能够应用于实际生产。

【参考文献】

- [1] 许晖,李执山,王莉,等.基于 STM32 的无刷直流电机控制驱动器硬件设计[J].测控技术,2012,31(12): 73.
- [2] 颜松祯,王炳文.基于双 DSP 的无刷直流电机控制器硬件设计和实现[J].电子技术,2015,44(6): 75.
- [3] 方力,张建华.电动车用无刷直流电机模糊自整定控制器设计[J].微电机,2012,45(3): 51.
- [4] 崔方,刘芳华,邱忠华,等.基于 DSP 的电动车用无刷直流电机控制器的设计[J].电机与控制应用,2014,41(4): 52.
- [5] 支长义,王瑞玲,唐道奎.无刷直流电动机模糊自适应 PID 控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(8): 35.
- [6] 杨成顺,葛乐,杜九江.计及等效电阻的无刷直流电机换相转矩脉动的分析与抑制[J].电力系统保护与控制,2016,44(23): 115.
- [7] 吴大勇,贾敏智.STM32 在三相无刷直流电机控制系统中的应用[J].微电机,2014,47(3): 47.
- [8] 张修太,翟亚芳,赵建周.基于 STM32 的无刷直流电机控制器硬件电路设计及实验研究[J].电子器件,2018,41(1): 141.
- [9] 程明,张淦,花为.定子永磁型无刷电机系统及其关键技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(29): 5204.
- [10] 周尧.高转速无刷直流电机的无位置传感器控制技

- 术研究与实现[D].武汉:武汉工程大学,2015.
- [11] 杨广羽,马玉新,傅亚光,等.光电耦合 MOS 栅固态继电器回路研究与误触发改进措施[J].电力系统保护与控制,2016,44(15): 135.
- [12] CHOKHAWALA R, CATT J, KIRALY L. A discussion on IGBT short circuit behavior and fault protection schemes[J].IEEE Transactions on Industry Applications,1995,31(2): 256.
- [13] 蔡宝京.直流无刷电机自适应模糊控制系统设计[D].成都:电子科技大学,2016.
- [14] 李江,张永利,刘强,等.分布式光储微电网系统并网控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(23): 90.
- [15] 胡春,肖国龙,龚正平,等.LED 电源的短路保护电路设计[J].机电工程技术,2013,42(5): 71.
- [16] 潘依波.基于 MOSFET 低电压大电流逆变器设计与应用研究[D].上海:上海交通大学,2014.
- [17] CICHOWSKI A, NIEZNANSKI J. Self-tuning dead-time compensation method for voltage-source inverters[J].IEEE Power Electronics Letters,2005,3(2): 72.
- [18] 孟光,张文明.微机电系统动力学[M].北京:科学出版社,2008.
- [19] 陈策.静电微泵动态特性和流量分析[D].秦皇岛:燕山大学,2013.
- [20] 张东花,梁俊,屠秉慧.无刷直流电机电流检测新技术[J].电测与仪表,2011,48(6): 19.
- [21] 熊英英.车用低压大电流 MOSFET 模块驱动与保护研究[D].北京:北京交通大学,2012.

收稿日期: 2019-03-21

(上接第 71 页)

- [3] 张毅,刘慧娟,宋腾飞,等.300 MW 大型汽轮发电机多物理域耦合计算分析[J].西南科技大学学报,2017,32(2): 90.
- [4] LUAN R, GU G. Coupled electromagnetic and thermal analysis of stator insulating structure[C] // Sixth International Conference on Electrical Machines

and Systems (ICEMS),2003.

- [5] 汤蕴璆,梁艳萍.电机电磁场的分析与计算[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [6] 邢福超.直驱式永磁风力发电机的设计与研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2018.

收稿日期: 2019-02-26