

盘式对转永磁风力发电机设计与分析^{*}

胡 芳, 饶志蒙, 罗德荣

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 针对现有风力发电系统普遍存在的工作风速范围较窄、风能利用率较低等问题, 设计了一种盘式双转子对转永磁风力发电机, 双转子对转运行。在介绍该电机的结构与运行原理的基础上, 推导了电机功率尺寸方程, 给出了该电机的初步设计方法。利用有限元软件对电机进行了三维建模和动态仿真分析, 得到其磁路特点和电磁性能, 验证了所提设计方法的有效性。

关键词: 风力发电; 盘式; 尺寸方程; 有限元; 电磁性能

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)04-0115-06

Design and Analysis of a Disk-Type Contra-Rotating Permanent Magnet Wind Power Generator^{*}

HU Fang, RAO Zhimeng, LUO Derong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aiming at the problems of narrow working wind speed range and low utilization rate of wind energy in wind power generation systems, a disk-type dual-rotor counter-rotating permanent magnet wind generator was designed, which operated with dual-rotor contra-rotating. On the basis of introducing the structure and operation principle of the motor, the power dimension equation of the motor was deduced, and the preliminary design method of the motor was given. The three-dimensional modeling and dynamic simulation analysis of the motor were carried out by using finite element software. The magnetic circuit characteristics and electromagnetic performance were obtained, and the effectiveness of the proposed design method was verified.

Key words: wind power generation; disk type; dimension equation; finite element; electromagnetic performance

0 引 言

风能是一种清洁环保的可再生能源, 越来越受到重视, 已成为我国第三大电源^[1]。然而现有风力发电系统普遍存在工作风速范围较窄、风能利用率较低等问题^[2-3]。即使在正常工作时, 其风能利用系数一般约在 0.3, 超过一半的风能未能得到充分的收集与转化^[4]。因此, 拓宽风力发电机的工作风速范围、提高风能利用率已经成为风力发电技术的研究重点。

双转子对转风力发电机外部安装了 2 套风叶, 分通过轴承与电机连接, 在风力作用下驱动发电机双转子对转运行^[5]。双转子对转运行提高了定转子之间相对转速, 降低了发电机最低建压转速, 拓宽了工作风速范围, 实现了在较低风速下的运行; 风力电机可二次利用风能, 提高了发电系统的风能利用率^[6]。因此, 双转子对转电机受到了越来越多的关注。

文献[7]提出一种用于风力发电的对转式永磁同步电机, 仿真结果显示, 在相同条件下该类型

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51577052)

作者简介: 胡 芳(1971—), 女, 硕士, 研究方向为特种永磁电机设计、控制。

饶志蒙(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为多相电机设计。

罗德荣(1975—), 男, 博士生导师, 研究方向为永磁电机控制。

电机能输出两倍于传统永磁电机的电压,风能利用率较高。由于电机电枢部分旋转,必须引入滑环和电刷结构。文献[8]提出一种双转子对转式永磁风力发电机,能够提高风能利用率,然而其内外双转结构不对称给电机的设计、冷却带来困难,同时其输出转矩不平衡,控制难度大。文献[6]分别对3种不同定子结构的径向双转子对转永磁风力发电机的输出反电动势作了分析,研究表明,对转电机输出反电动势的最大值与双转子的位置角有关,但内外双转子输出电压不平衡使电机的控制变得复杂。文献[9]提出一种用于海流能发电的盘式对转永磁电机,定转子相对运行不仅提高了发电效率,还省去了传统的安装底座,然而该电机没有密封,直接浸泡于海水中,可靠性较差。

基于上述径向结构双转子对转永磁电机的研究,本文设计了一种新型盘式双转子对转永磁风力发电机(DC-PMSG)。DC-PMSG没有电刷、换向器,可靠性高;电机采用三盘式结构,左右盘式转子结构对称、散热效果好、可控性佳。本文分析了DC-PMSG结构和运行原理,在此基础上建立推导了其功率、尺寸方程;利用有限元软件对双气隙磁密、空载反电动势、转矩特性进行更准确的定量分析,验证了所提出的新型DC-PMSG的各项性能,为进一步研究盘式对转永磁电机提供了理论基础。

1 电机的结构与原理

1.1 电机的基本结构

DC-PMSG采用盘式结构,绕组通过交叉环绕方式绕制在定子铁心上。2个机械上相互独立的盘式转子对称分布于定子两侧(分别通过轴承固定在基座上),并与内外嵌套的一端相连接,内外嵌套的另一端则分别连接着对转螺旋桨,如图1所示。本文所提盘式对转电机的一大特点是:相当于将2台单定子-单转子盘式电机单元复合成一台单定子-双转子盘式电机,三盘式结构完全对称,易于控制。

1.2 运行原理

为了实现盘式双转子的对转运动,必须在定子绕组两侧气隙平面中产生2个对转磁场。图2所示为定子环形交叉绕组的绕线方式示意图。图2(b)中实线表示定子铁心一侧的绕组,虚线表

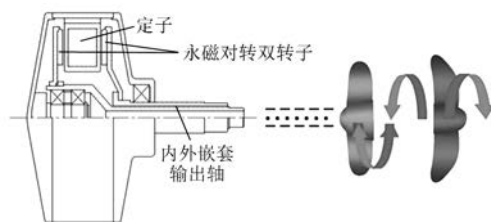


图1 盘式对转双转子永磁同步电机结构图

示定子铁心另一侧的绕组。其中实线圈①④组成A相绕组,③⑥组成B相绕组,②⑤组成C相绕组。A相与B相绕组在定子铁心端部的嵌放位置相互交换,即实现了定子两侧绕组相序相反。如果三相绕组中通入三相对称电流,那么就可以在定子铁心两侧气隙平面中得到一对转速相同、方向相反的磁场。

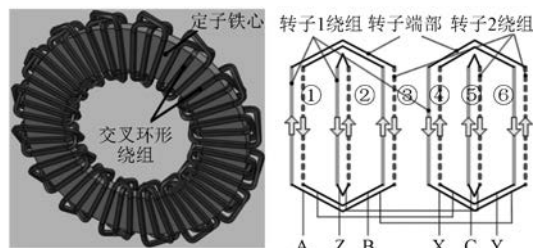


图2 环形交叉绕组示意图

2 DC-PMSG 电磁设计

2.1 DC-PMSG 功率/转矩方程

如上文所述,DC-PMSG结构上具有很好的对称性。因此,沿定子铁心轴向中心对称平面将DC-PMSG拆分为2个单定子单转子盘式电机单元;然后以传统盘式电机的电磁设计为基础,完成单个盘式电机单元的设计;最后将2个盘式电机单元绕组的端部交叉环绕在定子铁心上完成DC-PMSG的设计。参考传统盘式电机设计方法,可得DC-PMSG输出方程为

$$\begin{cases} E = 2K_e N_{ph} B_g \omega (1 - K_r^2) D_{mo}^2 \\ T_{out} = \frac{\sqrt{2}}{4} \pi \eta K_p K_e B_g A (1 - K_r^2) (1 + K_r) D_{mo}^3 \\ P_{out} = \frac{\sqrt{2}}{4} \pi \eta K_p K_e B_g \omega A (1 - K_r^2) (1 + K_r) D_{mo}^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: E ——空载反电动势峰值;

K_e ——波形系数;

N_{ph} ——每相串联匝数;
 B_g ——平均气隙磁密;
 ω ——角速度;
 K_r ——定子铁心内径与外径的比值;
 D_{mo} ——定子铁心外径;
 T_{out} ——电磁转矩;
 η ——效率;
 K_p ——绕组系数;
 A ——电负荷;
 P_{out} ——电磁功率。

为了获得良好的发电机性能,必须慎重考虑 K_r 值的选取。本文研究的盘式对转电机应用于风力发电,其运行要求为 600 r/min,盘式电机单元功率 1.1 kW,对应转矩 20 N·m。

2.2 定子铁心外径 D_{mo} 的确定

参考已成型的盘式电机的设计方案,电机线负荷 A 取 38 000 A/m。因此根据式(1)可得:

$$D_{mo} = \left\{ T_{out} \left/ \left[\frac{\sqrt{2}}{4} \pi \eta K_p K_e B_g A (1 - K_r^2) (1 + K_r) \right] \right\}^{1/3}$$
 (2)

式(2)是假定 K_r 值一定的情况下,输出电磁转矩 T_{out} 与定子铁心外径 D_{mo} 之间的关系,引入系数 K_D :

$$K_D = \frac{1}{4} (1 - K_r^2) (1 + K_r)$$
 (3)

根据式(2)可考察转矩、外径与 K_D 的关系,如图 3 所示。

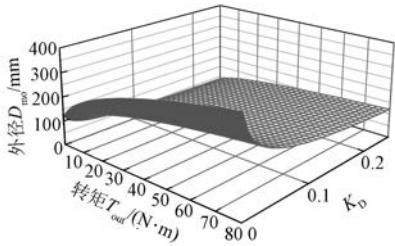


图3 转矩、外径与 K_D 关系

综合考虑对转电机的效率、转矩和转矩密度, K_r 在 0.6~0.7 之间为较优值。

2.3 永磁体、定子和转子轴向长度

永磁体充磁方向(轴向)厚度 h_m 与气隙厚度 g 、绕组厚度 W_{cu} 可由以下公式确定^[10]:

$$h_m = \frac{u_r B_g}{0.95 B_r - \frac{1}{K_l} B_g} (g + W_{cu})$$
 (4)

式中: u_r 、 B_r ——永磁体相对回复磁导率和剩磁;
 K_l ——漏磁系数,一般取 0.9~1.0。

定子铁心轴向长度为

$$l_s = \frac{B_g \pi D_{mo} (1 + K_r)}{8 p B_{cs}}$$
 (5)

式中: p ——极对数;
 B_{cs} ——定子铁心磁密,可取为 1.2~1.6 T,本例取 1.6 T。

因为是以电机对称平面的一侧进行设计,所以此处 l_s 为实际电机铁心厚度的一半。

转子铁心的轴向长度 l_r 可按以下公式计算:

$$l_r = \frac{B_u \pi D_{mo} (1 + K_r)}{8 p B_{cr}}$$
 (6)

式中: B_{cr} ——转子铁心磁密,可以参照定子铁心,取 1.6 T;
 B_u ——永磁体表面的磁感应强度。

主要尺寸参数确定后,参考传统盘式电机的设计方法完成 DC-PMSG 其他参数的设计,具体可以参考文献[11]。本文所设计的 DC-PMSG 主要尺寸如图 4、表 1 所示。

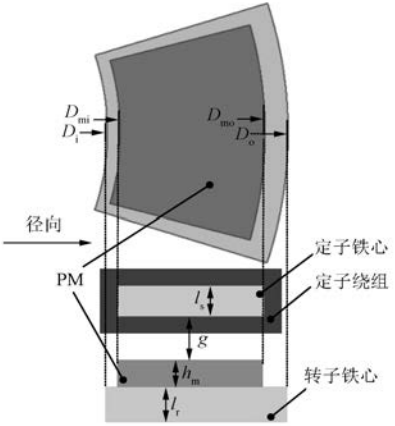


图4 DC-PMSG 结构示意图

表 1 样机主要尺寸参数 mm

参数名称	参数值	参数名称	参数值
D_{mo}	240	l_r	7
D_{mi}	150	D_i	130
h_m	8.5	D_o	250
l_s	12	g	4.5

3 DC-PMSG 有限元分析

本文设计的 DC-PMSG 磁场较为复杂且具有 2 自由度,只能借助三维电磁场对其进行分析。最终选择了 VF 公司的 Opera 软件,在三维电磁场、多运动部件的仿真分析中具有较大优势。DC-PMSG 有限元模型与网格如图 5 所示。图 5 (a)是 DC-PMSG 有限元仿真模型,为了保证计算的准确性,气隙处采用较密的四面体网格,但又为了合理地减少计算时间,最内层空气包和最外层空气包合理地选用较稀疏的四面体单元剖分,从图 5(b)可以看出,网格剖分均匀、合理。

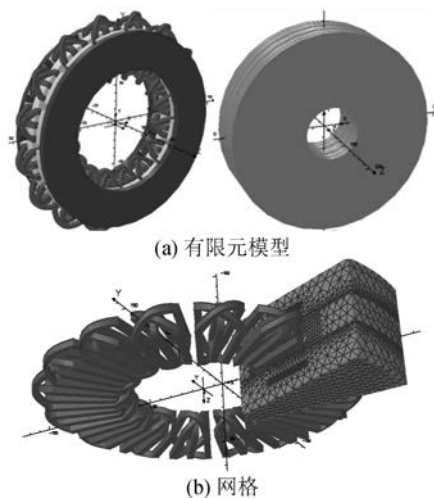


图 5 DC-PMSG 有限元模型与网格

由前文分析可知,DC-PMSG 双转子相对位置会周期性发生变化。图 6 所示为 DC-PMSG 空载磁密云图。当磁极 N-N 相对,双永磁转子磁通切向通过定子铁心,此时磁密最大,为 1.203 T。当磁极 N-S 相对,双永磁转子磁通轴向通过定子铁心,此时磁密最小,为 0.506 T。当双转子磁极交错相对时,双转子磁通切/轴向通过定子铁心,磁

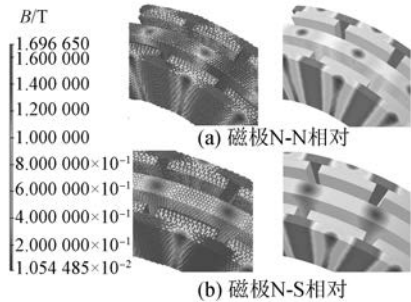


图 6 DC-PMSG 磁密云图

密处于 0.5~1.2 T 之间。仿真结果显示,定子铁心最大磁密为 1.2 T,说明此时应该适当减少定子铁心的轴向长度。

3.1 双气隙磁密

图 7 所示为 DC-PMSG 的三维双气隙磁密波形。从图 7 可知:(1)对转运行虽引起定子铁心磁密的周期变化,但未对定子铁心两侧气隙磁通与磁密造成影响;(2)双边气隙磁密波形对称,说明 DC-PMSG 结构与电磁性能具有良好的对称性;(3)定子铁心无槽结构,气隙磁密波形并未出现波动,有利于降低发电机的转矩脉动。

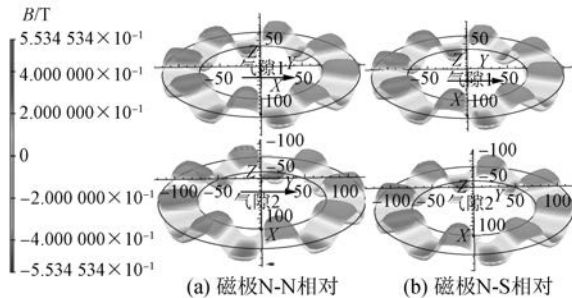


图 7 双气隙磁密波形

当磁极 N-N 与 S-N 相对时,DC-PMSG 平均半径处的双气隙磁密如图 8 所示,可以看出双气隙磁密具有较好的对称性。对其作傅里叶分解,如图 9 所示,可以看出主要含有较高的 3 次与 9 次谐波。定子绕组采用 Y 型接线,可以消去 3 倍数次谐波,但 DC-PMSG 绕组采用集中整距的方式,双气隙磁密中的 5 次和 7 次谐波尚无法消除。

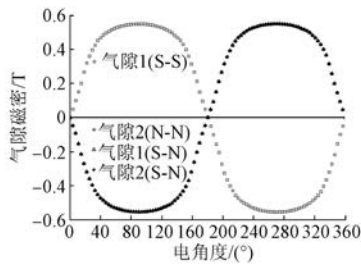


图 8 平均半径处的双气隙磁密

3.2 空载反电动势

DC-PMSG 定子绕组端部采用交叉环绕的方式,因此可以认为 DC-PMSG 总反电动势是由 2 个盘式电机单元的反电动势串联叠加而成:

$$e_{\text{tot}} = e_{\text{rot1}} + e_{\text{rot2}} =$$

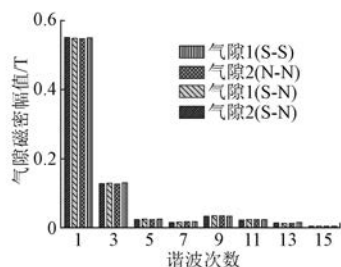


图9 双气隙谐波分析

$$k_{e1}\omega_1\cos(\omega_1t + \gamma_1) + k_{e2}\omega_2\cos(\omega_2t + \gamma_2) \quad (7)$$

式中： e_{rot1} 、 e_{rot2} ——空载反电动势；

k_{e1} 、 k_{e2} ——反电动势常数；

γ_1 、 γ_2 ——反电动势相位；

ω_1 、 ω_2 ——电角速度。

由式(7)可知,由于提高了相对风速、降低了起动风速,DC-PMSG 即使在较低风速情况下也能正常运行发电。在相同的风速条件下,DC-PMSG 比传统风力发电机风能利用率 C_p 和发电能力均提高了1倍。图10所示为DC-PMSG 空载反电动势,波形介于方波与正弦波之间。

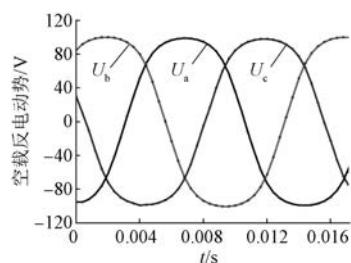


图10 空载反电动势

图11所示为DC-PMSG 一个电周期下的空载电压波形(B相)。从图11可以看出:当转子 R_1 静止不动、转子 R_2 以额定转速运行,转子 R_2 静止不动、转子 R_1 以额定转速运行时,空载电压波形基本相同,表明DC-PMSG 双转子可以相互独立运行且2个盘式电机单元在输出特性上具有很好

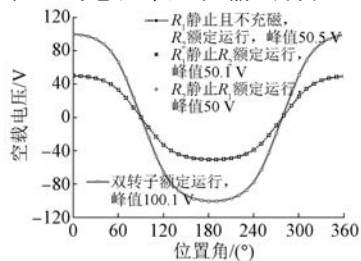


图11 空载反电动势

的对称性。2种情形下的电压刚好为双转子对转运行时的一半,验证了上文所提的DC-PMSG 总反电动势是由2个盘式电机单元的反电动势串联叠加而成的结论。

3.3 双转子转矩

图12所示为转子转矩波形,可以看出,空载状态下,由于DC-PMSG 定子铁心采用无槽结构,电机转矩脉动较小,峰-峰值小于 $0.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。在电机交叉环形绕组通入14 A三相对称电流,此时双转子输出转矩大小相等、方向相反,转子 R_1 输出平均转矩为 $20.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、转矩脉动为3.7%;转子 R_2 输出平均转矩为 $-20.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、转矩脉动为3.3%,双转子输出转矩具有较好的对称性。

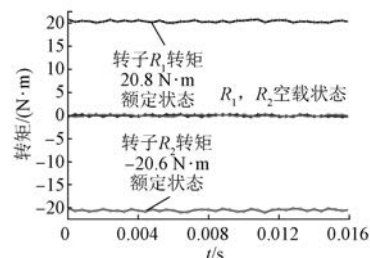


图12 双转子转矩波形

4 结 语

本文设计了一种新型DC-PMSG 发电机。在详细介绍了该电机的结构和运行原理的基础上,推导了其功率、尺寸方程,给出了该类电机的初步设计方法。基于三维有限元软件分析了新型DC-PMSG 电机的气隙磁密、空载反电动势、转矩等电磁特性,验证了新型电机设计方法的有效性,得出如下结论:

(1) DC-PMSG 定子绕组交叉环绕在定子铁心上,绕组端部短、铜耗小。

(2) 与传统发电机对比,DC-PMSG 双转子对转运行,降低了建压转速,拓宽了工作风速范围,提高了风能利用率。

(3) 定子无槽结构降低了DC-PMSG 转矩波动,但绕组直接环形缠绕于定子铁心上,工艺上对电机的制造也提出了更高的要求。

(4) DC-PMSG 在对转风力发电、潮流发电与对转螺旋桨驱动等领域应用前景较好。

【参考文献】

- [1] 高虎,王红芳.2012 年我国风电市场发展综述[J].中国能源,2013,35(4): 11.
- [2] 付晓阳,滕青芳,罗维多,等.基于 ESO 的 PMSG 风力发电系统无源自抗扰控制[J].兰州交通大学学报,2018,37(4): 62.
- [3] 张立勋,梁迎彬,尉越啸,等.垂直轴风力机主动式变桨距控制规律[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(6): 2561.
- [4] 陈杰,陈冉,陈家伟,等.变速风力发电机组的模糊-单神经元 PID 控制[J].中国电机工程学报,2011,31(27): 88.
- [5] 朱文娟,杨向宇.双转子电机及其在风力发电中的应用综述[J].微电机,2011,44(5): 73.
- [6] RANLOF M,CONNOR G,LUNDIN U.Simulation of a radial flux permanent magnet generator with two contra-rotating rotors [C] // 2008 18th International Conference on Electrical Machines,2008.
- [7] CAO J H, YANG X Y. Design and magnetic field analysis of a dual-rotor permanent-magnet synchronous wind generator [C] // 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008: 3202.
- [8] 高钰阁.对转双转子永磁同步风力发电机的设计与分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2010.
- [9] CLARKE J,CONNOR G,GRANT A,et al.Analysis of a single point tensioned mooring system for station keeping of a contra-rotating marine current turbine [J].IET Renewable Power Generation,2010,4(6): 473.
- [10] HUANG S, AYDIN M, LIPO T A. Torque quality assessment and sizing optimization for surface mounted permanent magnet machines [C] // Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference: 36th IAS Annual Meeting, 2001: 1603.
- [11] GIERAS J F, WANG R J, KAMPER M J. Axial flux permanent magnet brushless machines [M]. Dordrecht:Springer,2005.

收稿日期: 2018-10-11

【期刊简介】

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行人,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。