

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.019

低速高效垂直轴风力发电机及其特性分析^{*}

朱 军, 刘慧君, 王 栋, 岳云凯
(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要:针对低风速区风力发电机需要低风速切入问题,研究了一种低速高效的定子无铁芯轴向磁通永磁风力发电机。对影响发电机性能的关键参数进行了归纳,提出了一种单层非重叠集中绕组和优选“切饼”型磁极组合的设计理念。确定了定子无铁芯轴向磁通永磁风力发电机性能分析参数方案。利用三维有限元发电机设计平台,对发电机的空载输出特性、交、直流负载输出特性和不同转速下的负载输出特性进行了对比研究。研究表明,该结构发电机的各项基本电磁参数和输出特性均能满足低速风力发电系统的特殊要求:优选的磁极结构使发电机总永磁体耗用量节约11.5%,发电机最大输出效率达87.75%;低转速范围运行时,效率维持在85%以上;不同工况下输出电能总谐波畸变率低于3%。

关键词:低速;永磁风力发电机;定子无铁芯;轴向磁场;磁极优选;效率

中图分类号:TM315

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0602-06

Low speed high efficiency generator and performances analysis for vertical axis wind power

ZHU Jun, LIU Hui-jun, WANG Dong, YUE Yun-kai

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454000, China)

Abstract: Aiming at the problem of wind generators need to cut-in low wind speed in low wind speed areas, a coreless stator axial flux permanent magnet generator with low speed and high efficiency was studied. The key parameters that affected the performance of generator were summarized, the design concept which combined a single layer non-overlapping concentrated winding and the optimization of “cut cake” type magnetic pole shape was proposed, and the parameter scheme of performance analysis of the coreless stator axial flux permanent magnet wind generator was determined. The three dimensional finite element generator design platform was utilized to study contrastively the load output characteristics of the no load, AC load and DC load and different speeds of the generator. The result indicate that the basic electromagnetic parameters and output characteristics of the structure generator are able to meet the special requirements of low speed wind power generation system; the consumption of the permanent magnet materials is saved about 11.5% by applying the optimization magnetic pole shape, the generator maximum output efficiency is up to 87.75%; the efficiency is maintained at more than 85% in the low speed range, the total harmonic distortion (THD) of the electric energy output under different working conditions is less than 3%.

Key words: low speed; permanent magnet wind generator; coreless stator; axial magnetic field; magnet pole optimization; efficiency

0 引言

目前,在风能资源较好地区风电开发受限于并网

瓶颈而不断“弃风”的背景下,风电正逐渐聚焦在低风速与近负荷地区。开发适应于低风速地区需求的新型风力发电机将进一步带动我国风电设备制造产业的发展^[1]。

收稿日期:2015-12-17

基金项目:中国煤炭工业协会科学技术研究项目(MTKJJ2012-376);河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NSFRF140115);河南省教育厅科学技术重点研究项目(12A4700);河南理工大学博士基金(B2011-104)

作者简介:朱 军(1984-),男,内蒙古乌兰察布人,博士、副教授,主要从事新能源发电装备、特种电机驱动与控制方面的研究. E-mail: zhujun@hpu.edu.cn

定子无铁芯轴向永磁发电机不仅具有轴向尺寸小、结构紧凑、效率高、功率密度高等轴向磁通电机共有的优点,同时因其定子无槽无铁芯,消除了齿槽转矩及电枢铁心损耗,启动转矩低^[2-4],减轻了电机重量,尤其适用于中小功率低风速垂直轴风力发电^[5-6]。

因定子无铁芯轴向磁通永磁发电机等效气隙长,与同等情况下的有铁芯电机相比,永磁体材料使用量大,永磁体总重量约占电机总质量的一半^[7],本研究优选一种磁极形状,以节约磁极材料用量;采用单层非重叠集中绕组以降低发电机铜耗,提高电能输出质量。

本研究在分析定子无铁芯轴向磁通永磁发电机磁路和关键参数对电机性能参数影响基础上,设计一台输出功率 300 W,适用于低风速地区垂直轴风力发电的高效永磁风力发电机,并运用三维有限元分析软件,对电机磁场和输出特性进行评估。

1 发电机磁路及电磁特性分析

本研究发电机主结构^[8]如图 1 所示,中间定子,双外转子。背铁和永磁体组成电机转子;定子采用无槽无铁芯结构,各线圈按照顺序连接后经环氧树脂浇注成型。双转子结构,有利于转子受力均匀。

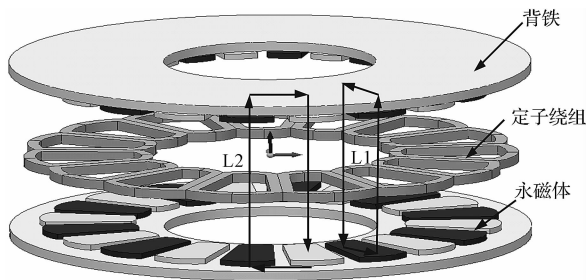


图1 定子无铁芯轴向磁通发电机结构和主磁通示意图

永磁体采用具有高磁能密度的钕铁硼材料,轴向均匀充磁,N、S 磁极均匀交替沿圆周方向布置在转子背铁表面。按照磁通流动方向,电机主磁路分为两个方向^[9]:沿半径流通(如图 1 中 L1),沿径向经转子边沿穿过上下各一片磁极;沿轴向流通(如图 1 中 L2),穿过上、下转子盘上各两片磁极形成闭合。由于发电机工作气隙分布复杂,且磁路长度随半径变化,常取气隙长度对称中心与永磁体平均半径交汇处的磁场进行分析计算和气隙磁场分布规律研究。

因定子无铁芯结构,发电机定、转子间不存在磁引力,启动仅需克服轴承、空气等摩擦力,因此,其能够在低风或微风速下启动发电。

1.1 发电机主要电磁关系

发电机定子采用非重叠集中绕组,每相感应电动势为:

$$E_p = 2N_c q B_{\delta av} l v k_w = 2N_c q B_{\delta av} l R_e \omega k_w \quad (1)$$

式中: $B_{\delta av}$ ——平均气隙磁密; D_o, D_i ——永磁体内外直径; l ——导体有效长度, $l = (D_o + D_i)/2$; R_e ——等效计算半径, $R_e = (D_o - D_i)/2$; N_c ——单个线圈匝数; q ——每相线圈总数; k_w ——绕组系数。

发电机输出功率和电磁转矩分别为:

$$P_o = \frac{\pi^2}{120} m n \alpha_i k_w B_{\delta} A_{av} (\gamma^2 - 1) (\gamma + 1) D_i^3 \quad (2)$$

$$T_{em} = \frac{P_o}{\omega} = \frac{\pi}{4} m \alpha_i k_w B_{\delta} A_{av} (\gamma^2 - 1) (\gamma + 1) D_i^3 \quad (3)$$

式中: m ——发电机相数, n ——额定转速, $D_o = \gamma D_i$, A_{av} ——平均电负荷, α_i ——计算极弧系数。

1.2 关键参数对发电机性能影响分析

单层非重叠集中绕组和磁极的一些主要参数对减小电机材料损耗和效率提升非常重要^[10-13]:

(1) 极弧系数 α_p : 增大极弧系数,有利于提高气隙磁密,减小极弧系数有利于减少漏磁,但会降低每极磁通, α_p 取值范围(0.5 ~ 1);

(2) 磁极外径和内径比 γ : 内径越小,导体有效长度越长,线圈内径处空间减小,不利于线圈放置, γ 取值范围(1.25 ~ 2.5);

(3) 磁极厚度 h_m : 在一定范围内,增加永磁体厚度,有利于提高气隙磁密, h_m 取值范围(2 ~ 12mm);

(4) 电枢绕组厚度 h_w 与磁极厚度 h_m 比 β : 线圈越厚,气隙长度增大,主磁通减小。 β 取值范围(0.5 ~ 2);

(5) 线圈边宽 W_c 与磁极内半径 R_i 比 K_i : 增加线圈边宽,有利于提高电磁转矩,不利于降低损耗和温升, K_i 取值范围(0 ~ $\pi/15$)。

1.3 发电机主要损耗

发电机定子无铁芯结构主要是绕组铜损耗,其次是绕组和转子涡流损耗,以及风摩擦和轴承摩擦等杂散损耗。

(1) 绕组铜耗

绕组采用单层非重叠集中绕组,假定电机温升和铜损耗均为常数,每相等效电枢电阻 R_a 为:

$$R_a = \rho_{cu} \left(2l + \frac{4\pi R_e}{q} \right) \frac{q N_c}{S_c} \quad (4)$$

电枢绕组铜耗为:

$$P_{cu} = \frac{I_p^2 \rho_{cu} (2ql + 4\pi R_e) W_c h_c S_f}{S_c^2} \quad (5)$$

式中: S_f —槽满率, $S_f = N_c S_c / W_c h_c$; ρ_{cu} —铜导线电阻率; W_c, h_c —线圈单边宽度和厚度。

(2) 涡流损耗和杂损耗

永磁体随转子旋转时, 电枢绕组直接暴露在交变的气隙磁场中, 导体以及并联的导体间因感应而产生涡流, 交变磁场频率越高, 电机涡流损耗越大, 绕组温升升高, 发电机效率降低, 发电机低速运行时, 涡流损耗更小, 而杂损耗由风摩擦和轴承摩擦组成, 涡流损耗和杂损耗占发电机额定功率 1% 左右, 可以忽略。涡流损耗 ΔP_e 为:

$$\Delta P_e = \frac{m\pi\omega^2 d^4 B_\delta}{32\rho_{cu}} (R_o - R_i) N_c \quad (6)$$

式中: d —导体直径; B_δ —气隙磁密; B_r, μ_r —永磁体剩磁密度和相对磁导率; d_m —永磁体平均半径处宽度; h_m —永磁体厚度。

2 发电机磁极和绕组优选

2.1 磁极形状优选

低速风力发电机, 为提高发电机效率, 多采用较多的极数, 一般为 6 ~ 12 极对数, 但这会增加永磁体用量。在同等条件下, 最简单有效方案是改善永磁体形状, 以提高永磁体利用率, 节约磁性材料消耗。目前, 轴向磁通电机较多采用扇形或梯形永磁体, 但是它们不易切割加工, 且永磁体利用率不高。

本研究采用图 2(a) 中“切饼”形永磁体, 它是在圆形永磁体基础上演变而来, 具有加工制作简单和节约永磁材料的特点^[14], 对 3 种形状永磁体作用面积比较, “切饼”形永磁体面积最小, 相对扇形和梯形分别节约 3.5% 和 11.5% 用量, 其产生的磁通效果与扇形或梯形并无明显差异, 3 种永磁形状作用下气隙磁场分布, 如图 2(b)、2(c) 所示。

2.2 单层非重叠集中绕组

无铁芯结构定子绕组中损耗主要是铜损耗, 这部分损耗与绕组因数、分布系数、导体材料、横截面积、匝数等参数有关, 针对该设计采用的单层非重叠集中绕组, 铜耗还与线圈单边宽度、厚度以及边宽与内半径比值有关。

轴向磁通电机较多采用波绕组, 但作为发电机, 波绕组端部长, 铜耗大, 不利于效率提升。集中绕组很适用于定子无槽无铁芯结构, 单层非重叠集中绕组如图 3 所示: 其绕组端部短, 明显减小用铜量; 绕组短距和分布系数大, 削弱电势和磁势的谐波, 有效改善电势波形正弦性; 因无槽型限制, 线圈绕制自由灵活, 简化嵌

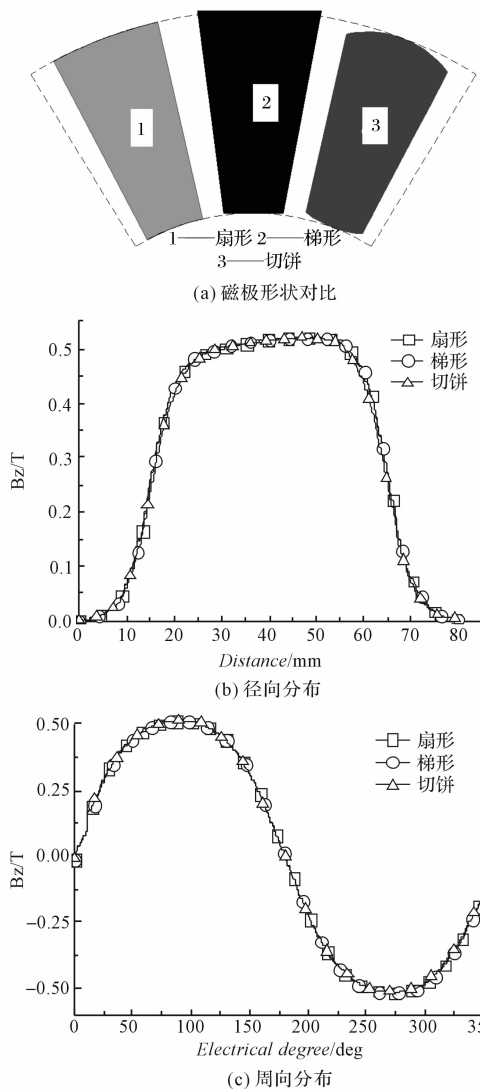


图 2 不同磁极形状及气隙磁场分布

线工艺和接线, 有利于降低成本, 绕组最后由环氧树脂浇注成型。此外, 定子无铁芯结构, 有利于绕组散热, 所以允许导体流过较大电流, 同时也降低电机运行中振动和噪声。

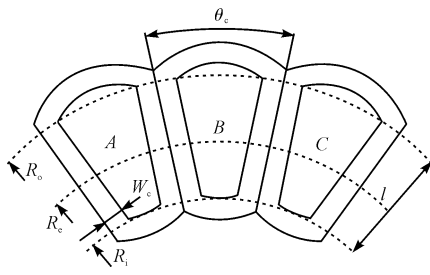


图 3 单层非重叠集中绕组

研究表明, 当线圈的节距夹角为 225 ~ 255 电角度, 线圈边宽与跨距比小于 0.3 时, 线圈系数最大, 电机转矩和功率密度最好。因气隙磁场在圆周方向呈正弦规律分布, 为提高发电机输出功率, 希望线圈中导体尽可能多的集中到线圈平均边宽处, 但这样会增加绕

组厚度,绕组铜耗增加,同时拉长气隙有效长度,降低气隙磁通,不利于效率的提高。为保证气隙磁通不变,可以通过适当改变永磁体厚度和气隙长度。

3 发电机特性分析

为验证发电机参数和性能的合理性,需在有限元分析软件中建立发电机分析模型,根据轴向磁通电机结构和磁场分布特性,必须建立三维有限元分析模型。考虑到三维有限元分析时占用较多的计算机内存和时间,模型中只建立发电机主要部件:背铁、磁极和定子绕组,因定子无铁芯结构,定子绕组填充物用空气代替。为精确求解,本研究设置模型最内侧空气包最大剖分网格大小 2 mm,发电机模型参数如表 1 所示。

表 1 发电机有限元模型参数

参数	数值	参数	数值
额定功率 P_o/W	300	额定转速 $n/r \cdot \text{min}^{-1}$	300
额定电压 U_N/V	30	相数 m	3
磁极外径 D_o/mm	240	磁极内径 D_i/mm	140
磁极对数 p	10	极弧系数 α_p	0.78
绕组厚度 h_w/mm	8	线圈边宽 W_c/mm	7.8
磁极厚度 h_m/mm	4.5	线圈总数 Q	15
单侧气隙长度 h_g/mm	1.2	背铁厚度 h_b/mm	6
导体直径 d/mm	1.25	单个线圈匝数 N_c	36

3.1 空载特性

首先进行发电机磁场有限元分析,气隙磁场波形在半径方向上呈平顶波分布,在磁极内外径处因边缘漏磁大,磁密值急剧变化,在平均半径处磁密最大,取气隙磁密最大值 0.51 T 为计算值;圆周方向正弦分布性好。发电机磁场分布云图如图 4(a) 所示,最大磁密 1.23 T,其小于转子材料的磁饱和最大值 2.0 T,电机各部件未出现磁饱和现象,避免了铁磁性材料浪费。

其次分析发电机空载条件下输出特性,空载相电压如图 4(b) 所示,空载相电压正弦性对称性好,额定转速下,频率稳定,空载电压中主要是三次谐波,其他高次谐波不明显,谐波分布如图 4(c) 所示。空载电压总谐波畸变率 THD_u 为 2.38%,小于 3% 的标准。对称负载星形接线,可有效抑制三次谐波。

3.2 交流负载特性

因风力发电机运行于不同风速下,较多运行于低风速。交流负载特性主要研究发电机变速下输出功率、电磁转矩、铜耗及效率特性。因发电机内部绕组为星形接线,为研究方便,发电机输出接三相对称的纯电阻负载,负载接线方式为星形。

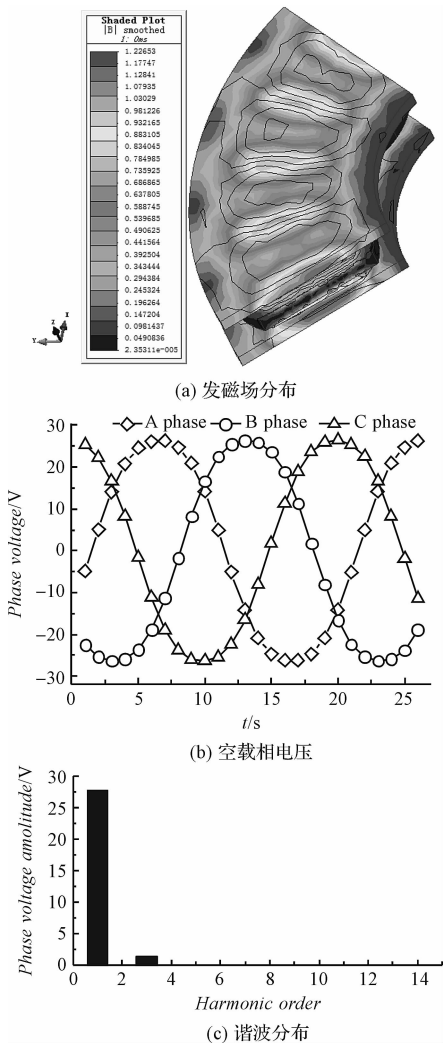


图 4 发电机空载特性

额定转速下发电机输出电压电流波形如图 5(a) 所示,由于定子无铁芯,绕组电感很小,通过计算电流、电压初相角差,得到发电机功率因数高达 0.99。同样,因定子绕组无铁芯,电机额定转速低,高次谐波含量少,电流总谐波畸变率 THD_i 为 0.0024%。因绕组电枢反应和涡流损耗很小,可忽略不计。绕组铜耗、输出功率和发电机输出电磁转矩如图 5(b) 所示,不计涡流损耗及杂损耗,发电机效率为 87.75%,电压调整率为 2.34%。

保持负载不变,逐渐增大发电机转速,有式(1)和式(2)分析可知,若负载不变,发电机输出电压和电流(电负荷)与转速呈比例增大,则发电机输出功率随转速升高以类似几何曲线趋势升高;同时绕组铜耗因电流升高而显著增大;发电机输出电磁转矩随转速呈线性变化。考虑到风力发电机较多情况下运行在额定转速以下,假设发电机实际运行时平均转速 200 r/min,则输出功率 130 W,铜耗 20 W,效率依然在 85% 以上;同样也考虑发电机短时运行在超过额定转速情况,超

额定转速 15%, 输出功率达 400 W, 超额定功率 30%。此外, 无槽无铁芯结构电枢绕组电感小, 发电机功率特性具有线性化特征, 如图 5(c) 所示。

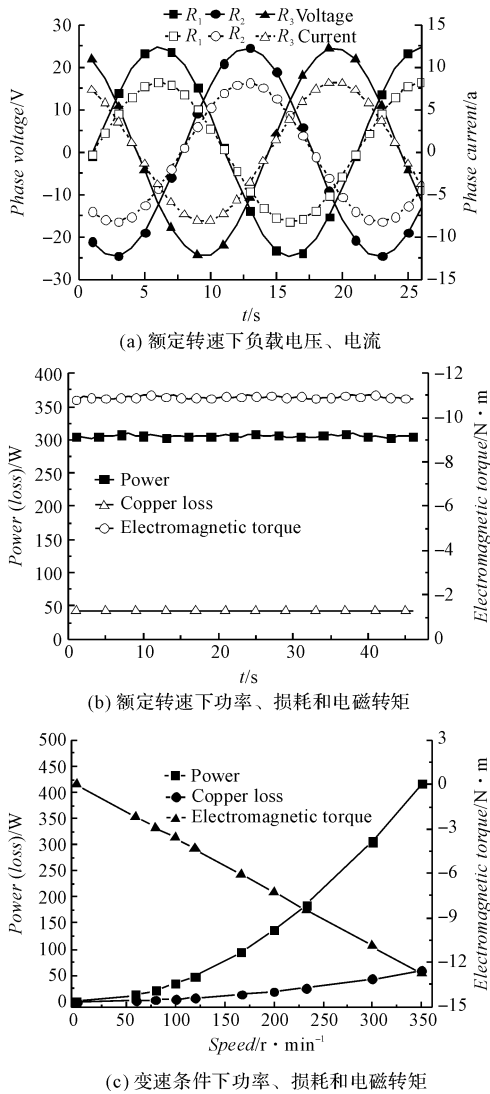


图 5 发电机交流负载输出特性

3.3 直流负载特性

考虑到风力发电机后期运行环境, 笔者研究发电机直流负载输出和恒流源特性。额定转速下, 发电输出端经三相不可控全桥整流, 不经滤波直接接入电阻负载。负载电压、电流如图 6(a) 所示, 因不可控二极管元器件导通与截止作用, 直流负载侧, 电压和电流波形周期性波动, 频率为 6 倍的交流侧频率, 这与二极管一个周期内开关频率有关。

直流负载侧电压谐波分布如图 6(b) 所示, 高次谐波主要是 6 次等偶次谐波, 负载电压总谐波畸变率 THD_u 为 3%, 后期可设计滤波电路得到有效抑制。同等条件下, 直流负载绕组平均铜耗比交流负载高 19.5 W, 忽略电枢涡流损耗及杂损耗, 直流负载下发

电机平均输出效率为 83.94%。

由图 6(c) 所示, 发电机转速超过额定转速时, 转速变化对直流负载电流和绕组铜耗变化影响较小, 随转速升高, 直流电流值趋于平稳。负载电阻越小, 维持发电机恒流源特性的转速范围就越广。

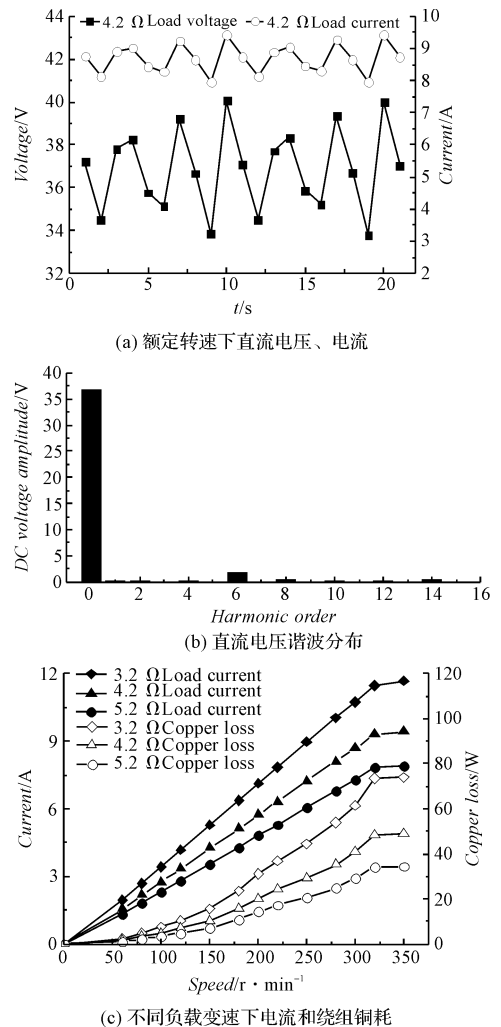


图 6 发电机直流负载输出特性

4 结束语

本研究针对低风速地区风力发电对发电机的新要求, 设计了一台输出功率 300 W 的定子无铁芯轴向磁通永磁风力发电机。发电机采用“切饼”状永磁体, 有效的减少了永磁体的用量, 在总结影响发电机性能的几个关键设计参数基础上, 设计了电机定、转子、绕组结构, 并在有限元软件中建立了电机的三维模型, 通过仿真计算对电机的相关性能进行了验证, 结果分析表明电机具有良好的电磁性能: 优选的磁极形状可节约永磁体用量 11.5%, 且气隙磁场分布正弦性好; 不同工况下发电机输出电能总谐波畸变率小于 3%; 发电机低速运行时, 发电效率依然在 85% 以上, 这为下一

步样机制作和发电系统测试提供了依据。

因发电机整体呈扁平形,定子无铁芯的双外转子结构,且绕组电感值小,发电机机械特性线性化好。从控制特性和应用场合考虑,该结构发电机较适应于离网垂直轴风力发电系统。

参考文献(References):

- [1] 吴春莹. 风电发展框架初现十三五[J]. 风力发电. 2014, 11(125):1-3.
- [2] 黄允凯,周 涛,董剑宁,等. 轴向永磁电机及其研究发展综述[J]. 中国电机工程学报. 2015,35(1):192-205.
- [3] Pop A A, Jurca F, Oprea C, et al. Axial-flux vs. radial-flux permanent-magnet synchronous generators for micro-wind turbine application[C]. Power Electronics and Applications (EPE), Lille: IEEE, 2013.
- [4] Kahourzade S, Mahmoudi A. A Comprehensive Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Machines [J]. **Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering**. 2014, 14(37):19-33.
- [5] 周浩波,林勇刚,徐晓峰,等. 便携式船用海流能发电机[J]. 机电工程. 2009,26(11):5-8.
- [6] Ahmed D, Karim F, Ahmad A. Design and Modeling of Low-Speed Axial Flux Permanent Magnet Generator for Wind Based Micro-Generation Systems[C]. Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering (iCREATE), Islamabad, Pakistan: IEEE, 2014.
- [7] Chirca M, Breban S, Oprea C A, et al. Analysis of Innovative Design Variations for Double-Sided Coreless-Stator Axial-Flux Permanent-Magnet Generators in Micro-Wind Power Applications[C]. Electrical Machines (ICEM), Berlin: IEEE, 2014.
- [8] 朱 军,刘慧君,朱艺锋. 一种无铁芯双气隙轴向磁通永磁风力发电机[P]. 中国:CN104578634A, 2015-2-4.
- [9] 刘 波,娄 佳. 提高盘式微电机电磁转矩的分析测试与改进设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24):6519-6526.
- [10] XIA B, LUK P C K, FEI W, et al. Particle Swarm Optimization of Air-cored Axial Flux Permanent Magnet Generator for Small-Scale Wind Power Systems[C]. Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), Manchester: IET, 2014.
- [11] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 第一版,北京:机械工业出版社,2012:309-329.
- [12] XIA B, SHEN J, LUK P C, et al. Comparative Study of Air-Cored Axial-Flux Permanent-Magnet Machines With Different Stator Winding Configurations[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 2015, 62(2):846-856.
- [13] KAMPER M J, WANG R, ROSSOUW A F G. Analysis and Performance of Axial Flux Permanent-Magnet Machine With Air-Cored Nonoverlapping Concentrated Stator Windings[J]. **Ieee Transactions on Industry Applications**. 2008, 44(5):1495-1503.
- [14] 辜承林. 转子无铁心式直流永磁盘式电机的磁场和解析解分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2):125-129.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

朱 军,刘慧君,王 栋,等. 低速高效垂直轴风力发电机及其特性分析[J]. 机电工程, 2016, 33(5):602-607.

ZHU Jun, LIU Hui-jun, WANG Dong, et al. Low speed high efficiency generator and performances analysis for vertical axis wind power[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(5):602-607.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>