

磁极组合型无铁心永磁直驱风力发电机转子结构设计

夏莉¹, 戴爱瑜², 申锋¹, 赵朝会¹

(1. 上海电机学院, 上海 201306;

2. 河南林业职业学院, 河南 洛阳 471002)

摘要: Halbach 阵列用在电机上有很多好处, 但却造成成本上升, 研究了一种适用于无铁心永磁直驱风力发电机的径向磁场磁极组合型 Halbach 阵列, 阐述了该新型磁极的结构与优点。借助二维有限元分析方法, 找到了利于实现 Halbach 阵列单边磁屏蔽能力磁极组合方式, 并且优化了软磁材料的尺寸, 确定了电机的极弧系数。与常规 Halbach 阵列相比, 优化后的组合磁极型电机在保证一定气隙磁密的基础上, 减少了永磁体用量, 降低了电机成本。

关键词: 无铁心永磁直驱风力发电机; 磁极组合; Halbach 阵列; 有限元分析

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)08-0069-05

Design and Analysis of Coreless Direct Drive Permanent Magnet Wind Generator with Module Poles

XIA Li¹, Dai Aiyu², SHEN Feng¹, ZHAO Chaohui¹

(1. Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. Henan Forestry Vocational College, Luoyang 471002, China)

Abstract: On the basis of the conventional Halbach array permanent magnet motor. A coreless direct drive permanent magnet wind generator with module poles and Halbach arrays was proposed. The structure and advantages of this kind of motor were introduced. With the help of two dimensional (2D) finite element analysis (FEA), we find out the correct combination way of realizing the unilateral magnetic shielding capability and the size of soft magnetic material of rotor poles was optimized, the pole arc coefficients of motor were determined. Compared to traditional permanent magnet motor with Halbach arrays, the optimized novel machine improved the waveform sine degree, reduced the cost and has less permanent magnets based on ensuring a certain extent of air gap magnetic density.

Key words: coreless direct drive permanent magnet wind generator; module poles; Halbach array; finite element analysis

0 引言

风力发电是人类利用风能解决能源紧缺和环境污染问题的重要途径。风力发电机是风力发电系统的核心能量转换部件。永磁直驱风力发电机效率高、可靠性强, 但定转子之间的电磁吸力和齿槽转矩大, 使得电机结构重量大, 装配困难, 且铁

耗严重。国内外学者通过引用无铁心技术, 解决了永磁直驱风力发电机存在的一些问题, 并取得了一定的进展^[1-3]。

文献[4]提出了一种径向磁场定子无铁心永磁直驱风力发电机, 与有铁心永磁直驱风力发电机相比, 重量减轻 70%~80%, 效率大于 90%, 但是气隙磁密较低, 有效的气隙磁密仅 0.25 T。

作者简介: 夏莉(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为无铁心永磁直驱风力发电机本体设计。

戴爱瑜(1964—), 高级讲师, 研究方向为机械工程。

Halbach 阵列具有单边磁屏蔽能力,气隙磁密大,波形正弦度高,采用 Halbach 阵列的永磁电机具有较高的气隙磁密,有利于实现无铁心结构^[5-7]。文献[8]对比了不同拓扑结构的风力发电机,得出采用 Halbach 阵列的无铁心风力发电机有效材料重量低、电机效率最高,但是成本高。Halbach 阵列一般采用稀土永磁材料,价格昂贵,且永磁体用量高于常规永磁电机,电机制造成本高。

文献[9]提出了一种能够有效降低成本的新型磁极——组合磁极,每极磁钢由磁能积不同的永磁材料构成,利用磁材料的宽度组合可以优化气隙磁密,降低波形谐波畸变率,同时由于磁能积小的磁材料价格较低,降低了电机的制造成本,但是气隙磁密较低。

文献[10]结合组合磁极与 Halbach 阵列结构,设计制造了轴向磁场无铁心永磁电机,并以电机转矩和永磁体的利用率为优化目标,通过合理安排软磁材料与永磁体的宽度,提高了气隙磁密与转矩密度。

本文针对径向磁通无铁心永磁直驱风力发电机,利用组合磁极与 Halbach 阵列的技术特点,基于有限元计算软件,一方面讨论了利于实现 Halbach 单边磁屏蔽特性的组合方法,另一方面以气隙磁密谐波畸变率 THD 为评价标准,优化设计了该电机的转子结构参数。

1 磁极结构与参数

无铁心永磁直驱风力发电机径向尺寸大,一般具有低速多极的特点,适用于外转子 Halbach 磁体结构。本文设计了一个 90 极的外转子径向磁通无铁心永磁直驱风力发电机。其转子在常规 Halbach 阵列的基础上,将软磁材料嵌入径向、切向磁钢之间,称为组合磁极,基本结构如图 1 所示。永磁体和软磁材料粘贴在转子背轭上,由于

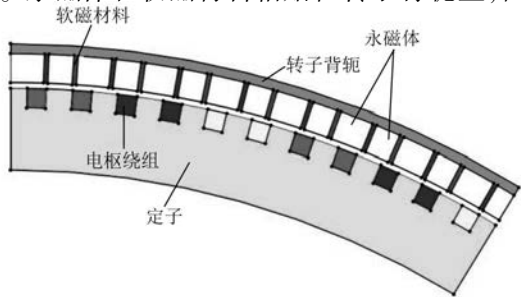


图 1 电机结构示意图

Halbach 阵列的单边磁屏蔽特性,转子背轭的磁通较小^[11],轭部选用非导磁导电材料,电机重量小。组合磁极由径向和切向充磁的永磁体以及嵌在永磁体之间的软磁材料构成,永磁体选用高磁能积的钕铁硼材料,软磁材料采用价格较低廉的无取向硅钢片。利用 Ansoft Maxwell 2D 建立了电机模型,其主要结构参数如表 1 所示。

表 1 电机主要结构参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
转子外径/mm	1 010	转子内径/mm	970
定子外径/mm	964	定子内径/mm	880
气隙长度/mm	6	极对数	45
轴长/mm	80	每极永磁体段数	2
转子轭厚度/mm	10	磁钢厚度/mm	30
磁钢型号	NdFe35	软磁材料型号	M19

2 组合磁极对 Halbach 阵列磁屏蔽能力的影响

单边磁屏蔽能力是 Halbach 阵列的一大特性,不仅有效增大了气隙磁场强度,而且实现了转子背轭无铁化。组合磁极分多种组合方式,不同的组合宽度配比对 Halbach 阵列磁屏蔽能力的影响不同。

组合磁极条件下电机的极角参数如图 2 所示。每极所占机械角度 $\theta_p = \pi/p$,每极径向磁钢宽度为 θ_R ,切向磁钢宽度为 θ_T ,软磁材料每极 2 块,嵌于两种磁钢之间,共占机械角度 θ_{Fe} 。常规 Halbach 阵列结构没有软磁材料, θ_R 与 θ_T 相等,均为 $\theta_p/2 = 2^\circ$ 。组合磁极结构,不同充磁磁钢用量不等。尝试两种组合方式,通过有限元仿真,探讨组合磁极对 Halbach 阵列磁屏蔽能力的影响。其一,保持 $\theta_T = 2^\circ$ 不变,减小 θ_R 嵌入软磁材料;其二,保持 $\theta_R = 2^\circ$ 不变,减小 θ_T 嵌入软磁材料。在软磁材料用量相同的情况下,比较两种组合方式的磁力线分布情况,以每块软磁材料宽度 $\theta_{Fe}/2$

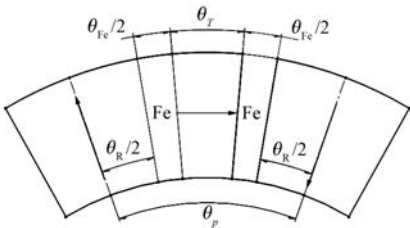
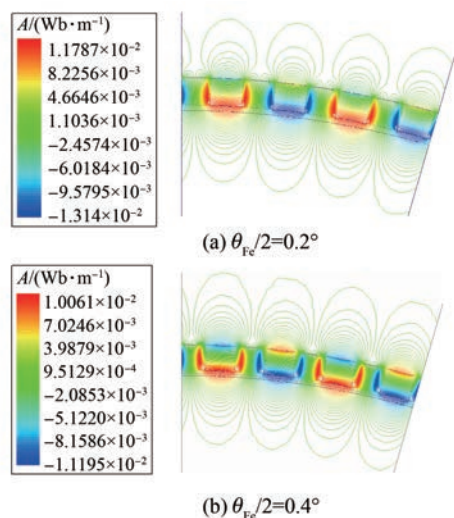
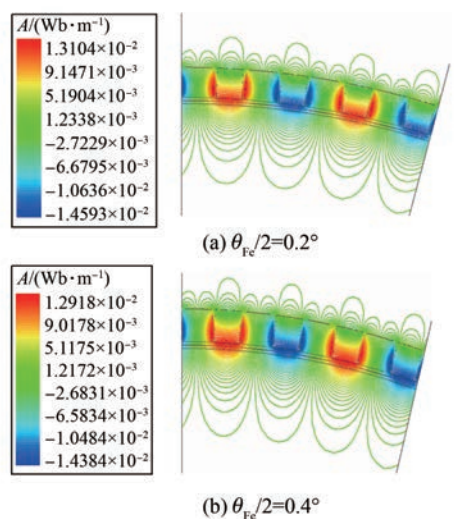


图 2 转子磁极结构参数

图3 减小 θ_R 组合磁极磁力线分布图图4 减小 θ_T 组合磁极磁力线分布图

分别为 0.2° 和 0.4° 为例,如图 3、4 所示。

如图 3 所示,当每块软磁材料宽度为 0.2° ,即 $\theta_R/2$ 仅减小 0.2° 时,电机外侧即出现较大磁通, Halbach 阵列的单边磁屏蔽特性不明显,继续使 $\theta_R/2$ 减小 0.4° 时已基本体现不出 Halbach 阵列的磁屏蔽能力,该种组合方式不可取;相反,第二种方式很好地保持了 Halbach 阵列的单边磁屏蔽能力。对比两种组合方法可知, Halbach 阵列的单边磁屏蔽特性对径向充磁磁钢的宽度较为敏感,软磁材料用量相同的条件下,应保持径向充磁的磁钢宽度不变,减小切向充磁的磁钢宽度。

通过观察磁力线走向,总结上述现象形成原因。 Halbach 阵列的单边磁屏蔽特性是径向和切

向永磁体磁场合成的结果,由于径向和切向交替排列,使得阵列一侧的磁场增强,另一侧的磁场减弱,减弱侧两种磁场相互抵消^[12-14];组合磁极包括径向、切向永磁体和软磁材料,由于软磁材料磁阻低,径向磁钢的部分磁场直接通过软磁材料,产生极间漏磁,在切向磁钢宽度不变的情况下,径向磁钢宽度越小,软磁材料越多,抵消作用越弱,单边效应消失。原理示意如图 5 所示。

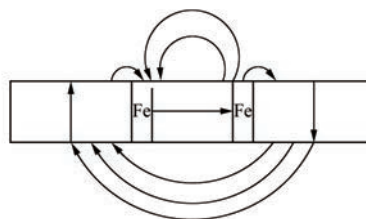


图5 Halbach 阵列示意图

对图 4 所示组合方式进一步分析,保持径向磁钢宽度不变,每块软磁材料的宽度在 $0 \sim 0.67^\circ$ (极弧系数 $a \geq 0.665$) 范围内,组合磁极保有 Halbach 阵列特性,最大节省了 $2/3$ 的切向磁钢使用量。

3 软磁材料尺寸对气隙磁密的影响

气隙磁密是电机的重要参数,不仅直接影响电机的输出转矩,而且影响电机的振动与噪声^[15]。对气隙磁密的优化主要有两个方面,包括增大基波幅值与提高波形正弦度。无铁心永磁直驱风力发电机,由于没有铁心的聚磁作用,电枢绕组完全暴露在磁场中,容易造成较大的涡流损耗^[16],所以对气隙磁密的谐波含量有较高的要求。以气隙磁密谐波畸变率 THD 为优化目标,取一对极为求解区域,分析软磁材料尺寸对空载气隙磁密的影响。

参照图 2,保持径向磁钢宽度 $\theta_R = 2^\circ$ 不变,减少切向永磁体,其所占极角 $\theta_T = a\theta_p - \theta_R$,软磁材料共占极角 $\theta_{Fe} = (1 - a)\theta_p$, a 为极弧系数。其他参数不变时,改变 a 即可得到软磁材料尺寸对空载气隙磁密基波幅值以及谐波畸变率 THD 的影响。本文仅对不大于 11 次的奇次谐波进行约束,因此,THD 的公式为

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=3,5,7,9,11} B_{mi}^2}}{B_{m1}} \times 100\%$$

式中： B_{m1} ——气隙磁密基波幅值；
 B_{mi} ——其高次谐波幅值。
以 0.025 为梯度,使 a 从 1 减小到 0.8,表 2 给出了该变化下的气隙谐波分析。

表 2 空载气隙磁密谐波分析

极角参数	基波幅值/T	THD
1	0.692	16.24%
0.975	0.666	14.24%
0.95	0.639	11.41%
0.925	0.614	8.34%
0.9	0.588	5.64%
0.875	0.564	5.13%
0.85	0.541	7.84%
0.825	0.518	11.98%
0.8	0.496	15.02%

由表 2 可知,随着 a 的降低,气隙磁密基波幅值基本呈线性减少,谐波畸变率先降低再升高,在极弧系数为 1 时最高,0.875 时最低,前者近乎是后者的 3 倍。综上所述,与常规 Halbach 阵列相比,组合型磁极气隙磁密基波较小,但是,软磁材料尺寸合适时,其气隙磁密的正弦度远高于常规 Halbach 阵列,本文中 a 取 0.875,每块软磁材料的机械角度 $\theta_{Fe}/2$ 为 0.25° 。常规 Halbach 阵列与该值下的组合磁极气隙磁密波形及其傅里叶分解如图 6、图 7 所示。

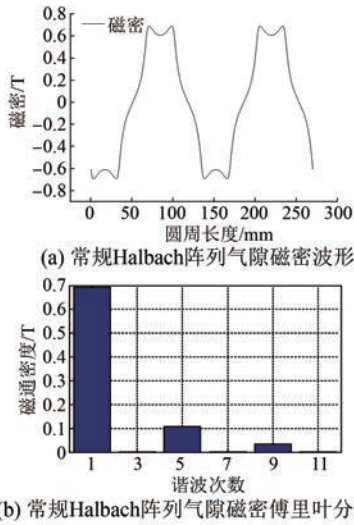


图 6 常规 Halbach 阵列气隙磁密分析

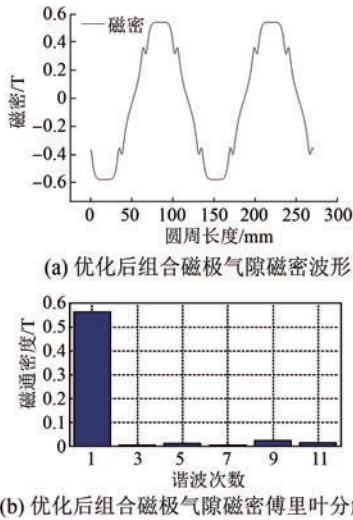


图 7 优化后组合磁极气隙磁密分析

4 结 语

本文针对径向磁场无铁心永磁直驱风力发电机,设计了一种磁极组合型 Halbach 阵列转子结构,基于有限元软件,优化了结构参数,得到以下结论:

- (1) 磁极组合型 Halbach 阵列磁极结构,减少了永磁体的用量,降低了电机制造成本。
- (2) 组合磁极条件下, Halbach 阵列的单边磁屏蔽特性对径向充磁磁钢的宽度较为敏感,应采取保持径向磁钢不变,以软磁材料替代部分切向磁钢的磁极组合方式,最大可节省 2/3 切向磁钢使用量。
- (3) 组合磁极降低了常规 Halbach 阵列气隙磁密的大小,但是依然保持较高的气隙磁密,并且软磁材料尺寸合适的情况下,大大降低了谐波畸变率 THD。

【参考文献】

[1] MUELLER M, McDONALD A S. A lightweight low speed permanent magnet electrical generator for direct-drive wind turbines[J]. Wind Energy, 2009, 12 (8) : 768-780.

[2] MUELLER M, McDONALD A S. C-Gen-a lightweight permanent magnet generator for directdrive power take off systems[C] // Proceedings of ICOE 2008, 2008: 1-7.

[3] KALLASTE A, VAIMANN T, PABUT O. Slow-speed

- ring-shaped permanent magnet generator for wind applications [C] // 11th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II", 2012: 66-69.
- [4] SPOONER E, GORDON P, BUMBY J R, et al. Lightweight ironless-stator PM generators for direct-drive wind turbines [J]. IEE Proc Electr Power Appl, 2005, 152(1): 17-26.
- [5] ZHU Z Q, HOWE D. Halbach permanent magnet machines and applications: a review [J]. IEE Proc Electr Power Appl, 2001, 148(4): 299-308.
- [6] XIA Z P, ZHU Z Q, HOWE D. Analytical magnetic field analysis of Halbach magnetized permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2004(4): 1864-1871.
- [7] 张鲁, 寇宝泉, 赵斌超, 等. 新型 Halbach 次级结构永磁同步直线电机 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 39-45.
- [8] ZHAO Q Z. Ironless permanent magnet generators for direct-driven offshore wind turbines [J]. Industry Applications IEEE Transactions on, 2014, 50(3): 1835-1846.
- [9] ISFAHANI A H, VAEZ-ZADEH S, RAHMAN M A. Using modular poles for shape optimization of flux density distribution in permanent-magnet machines [J]. IEEE Trans on Magnetism, 2008, 44(8): 2009-2014.
- [10] 曹永娟, 黄允凯, 金龙, 等. 磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机的设计与分析 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 903-908.
- [11] 徐衍亮, 姚福安, 房建成. Halbach 磁体结构电动机及其与常规磁体结构电动机的比较研究 (I) [J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 79-82.
- [12] 王晓远, 唐任远, 杜静娟. 基于 Halbach 阵列盘式无铁心永磁同步电机优化设计-楔形气隙结构电机 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 2-5.
- [13] 范坚坚, 吴建华. 极间隔断 Halbach 型磁钢的永磁同步电机气隙磁场解析计算及参数分析 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 40-47.
- [14] 夏长亮, 李洪凤, 宋鹏. 基于 Halbach 阵列的永磁球形电动机磁场 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(7): 126-130.
- [15] 王兴华, 励庆孚, 王曙鸿. 永磁无刷直流电机空载气隙磁场和绕组反电势的解析计算 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 126-130.
- [16] 耿伟伟, 张卓然. 新型外转子 Halbach 永磁阵列定子无铁心电机设计与分析 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 130-137. 收稿日期: 2017-01-31

本刊投稿须知

随着技术发展和创新升级, 尤其是感测、信号处理、仿真分析等技术快速发展, 电机行业发展迎来新机遇, 技术领域拓展到高效电机及再制造、风电并网控制、系统节能运行、智能调速与保护、电驱动等专业领域。

《电机与控制应用》期刊内容涉及五大板块: (1) 电机设计与制造: 涉及电机制造新工艺、新材料、高效电机及再制造、智能制造等技术; (2) 电机测试与检测: 涉及电机及系统运行的状态感测、快速信号处理、电机运行故障诊断、智能在线检测等技术; (3) 电机调速与保护: 涉及变频调

速、高性能调速、运动控制、电机起动及运行保护、智能调速等技术; (4) 并网与电驱动: 涉及风电并网控制、电动汽车驱动等技术; (5) 系统节能运行: 涉及电机应用系统节能相关技术。

为及时、全面刊载上述技术领域的最新技术动态, 推广研发成果、工程经验及新产品应用方案, 推动研究与应用的紧密结合, 欢迎广大科技人员及团队向本刊投稿!

本刊只接受官网在线投稿系统 (www.motor-abc.cn) 的投稿。一经投稿, 不可一稿多投, 稿件确定不录用后方可另投他刊, 敬请注意!