

磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机的设计与分析

曹永娟, 黄允凯, 金龙, 胡敏强

(东南大学电气工程学院, 江苏省 南京市 210096)

Design and Analysis of a Stator Coreless Axial-flux Permanent Magnet Machine With Module Poles

CAO Yongjuan, HUANG Yunkai, JIN Long, HU Minqiang

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: A novel stator coreless axial flux permanent magnet (AFPM) machine with module poles and Halbach arrays was proposed in this paper. The structure features and advantages of the novel machine were introduced. The electromagnetic torque was analyzed. Based on three dimensional (3D) finite element analysis (FEA), the sizes of permanent magnets and soft magnetic material of rotor poles were optimized. The electromagnetic torque per permanent magnet volume and air gap flux density sine distribution are the crucial factors which have to be considered in the rotor optimization procedure. Therefore, the pole arc coefficients of axial magnetization, tangential magnetization permanent magnets and soft magnetic materials in the rotor were derived. Compared to traditional stator coreless AFPM machine with Halbach arrays, the optimized novel machine has higher torque density and less permanent magnets. The experiment and FEA results on a prototype machine verify the correctness and effectiveness of the proposed novel machine.

KEY WORDS: axial-flux permanent magnet (AFPM) machine; module poles; Halbach array; finite element analysis (FEA); optimization

摘要: 在现有 Halbach 阵列永磁电机的基础上, 提出了一种磁极组合式的 Halbach 永磁阵列轴向磁场无铁心电机, 阐述了该电机的结构与优点, 分析了该电机的电磁转矩。借助三维有限元分析方法, 优化设计了组成转子磁极的 Halbach 永磁材料、软磁材料尺寸。在综合考虑单位体积永磁体所产生电磁转矩和气隙磁密正弦性的基础上, 确定了电机转子磁极上轴向磁化、切向磁化永磁体以及软磁材料的极弧系数。与传统 Halbach 结构轴向磁场无铁心永磁电机相比, 优化后的磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机, 在保证气隙磁密大小一定的基础上, 减少了永磁体用量, 降低电机造价, 从而提

高了电机性价比。样机实验和有限元分析结果验证了所设计电机的正确性和有效性。

关键词: 轴向磁场永磁电机; 磁极组合型; Halbach 磁体阵列; 有限元分析; 优化设计

0 引言

轴向磁场永磁电机(又称盘式电机)因具有轴向尺寸短、质量轻、体积小、结构紧凑等特点, 受到人们越来越多的关注。尤其在轴向尺寸有限的应用场合, 如空调外机、汽车散热器的风扇、电动车辆等, 具有明显优越性^[1-3]。现有技术中已有轴向磁场无铁心永磁电机的报道^[4-6], 其特点是由双转子和单定子组成的双气隙对称结构, 两侧转子上的永磁体 N-S 对等放置, 因此磁通不需要利用中间定子铁心来形成闭合磁路, 即形成轴向磁场无铁心永磁电机。该结构能够减小电机质量, 消除齿槽转矩和铁心损耗, 但其定子采用无铁心后, 由于有效气隙变大, 气隙磁密不高, 导致电机的转矩密度比较低^[7]。

为了提高气隙磁密, 采用 Halbach 型磁体阵列的永磁电机正在逐渐被应用。Halbach 型磁钢具有磁屏蔽功能, 经合理设计, 可获得比常规磁钢更高的气隙磁密基波幅值, 并可获得更接近正弦的气隙磁密分布波形^[8-10]。国内外文献均有无铁心永磁电机采用理想 Halbach 磁钢结构的报道^[11-14], 文献[12]提出了用于太阳能供电的电动车辆的无铁心盘式电机, 电机采用 60°磁化方向的 Halbach 磁体结构, 但该电机的材料价格高, 加工难度大。美国 Gieras 等^[13]讨论了无铁心轴向磁场永磁无刷电机的结构特点, 提出了单盘和多盘两种结构, 定转子均为无铁心, 多盘结构电机有 2 个转子, 均采用 Halbach 永磁体阵列; 同时研究了气隙磁场的分布, 并对该

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377019)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377019).

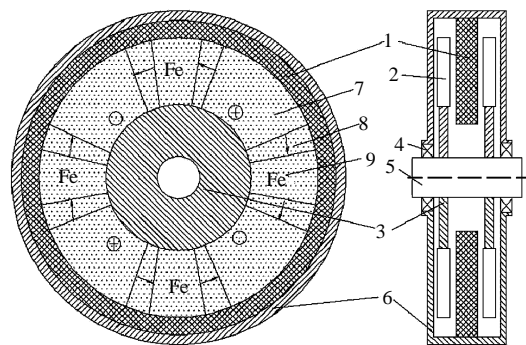
电机进行了成本分析,与同样功率和转速的径向磁场有铁心电机相比,该电机效率提高了1.2%,重量降低了45%,功率密度提高了82%,但成本增加了109.2%。文献[14]提出为了获得正弦分布的磁场, Halbach 阵列永磁体充磁方向必须多样,这对永磁体的充磁、加工技术的要求比较高,也势必提高了永磁体的制造成本,从而增加整个电机的成本。可以看出,虽然现有 Halbach 型阵列永磁体的应用提高了无铁心电机的气隙磁密,但稀土永磁体的材料要比背铁材料价格昂贵^[15],而 Halbach 磁体阵列电机需要比常规电机更多的永磁体,所以导致该类电机成本上升。

为了降低电机制作成本,文献[16]提出了采用不同磁材料组成磁极的组合型磁极技术,每个磁极采用价格不一的磁材料组合而成,降低了电机成本,通过设计不同磁材料的宽度,可以优化气隙磁密波形,减小谐波分量,但是该方法不能有效提高气隙磁密。

结合 Halbach 磁体阵列的优点以及组合型磁极技术特点,本文提出一种磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机。文中一方面分析了该电机的转矩,另一方面以提高永磁体利用率,即单位体积永磁体所产生的平均输出转矩,与气隙磁通密度波形正弦性为目标,基于三维有限元分析模型,优化设计了该电机的结构参数。

1 磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机的基本结构与特点

本文提出的一种组合型磁极与 Halbach 磁体阵列相结合的轴向磁场无铁心永磁电机,是在传统结构与理想 Halbach 结构之间取一个平衡,其基本结构如图1所示。该电机包括无铁心定子绕组盘、位于定子绕组盘两侧的两个对称的磁钢盘,以及高机械强度、非磁性材料所构成的转子外壳。无铁心定子盘由绕组直接注塑而成,绕组采用非重叠集中绕组型式。转子磁钢盘由两种不同方向的 Halbach 阵列永磁体以及嵌在永磁体中间的软磁材料构成,称为组合型磁极。每一个转子盘上每一磁极由4部分构成:轴向充磁的永磁体、软磁材料和两块切向充磁的永磁体。为保证能产生正弦分布的气隙磁密,软磁材料嵌放在两块切向充磁永磁体的中间。永磁体选用高磁能积的钕铁硼材料,软磁材料选用价格较低廉的无取向硅钢片 M19,两种材料均粘贴在高机械强度的转子外壳内表面。



1—无铁心定子绕组盘;2—永磁体;3—转子盘;4—轴承;5—转轴;6—外壳;7—轴向充磁永磁体;8—切向充磁永磁体;9—软磁材料。

图1 磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机结构

Fig. 1 Structure of novel AFPM with module poles

永磁体磁场从一侧磁钢盘的轴向充磁磁极出发,通过气隙,到定子绕组,再到另一侧磁钢盘的轴向充磁磁极,到切向充磁磁极、软磁材料、切向充磁磁极、轴向充磁磁极,最后通过气隙回到这一侧的轴向充磁磁极、切向充磁磁极、软磁材料、切向充磁磁极,如此形成一个闭合磁路。从其磁路分析来看,转子盘上的软磁材料中的磁场方向是切向的,直接采用无取向的硅钢片 M19,既可以满足磁路要求,同时也能降低成本,提高转子机械强度。

本电机原理简单,加工工艺也简单,通过简单的拼装技术就可完成。同其他永磁电机相比,该新型轴向磁场无铁心永磁电机由于采用了上述结构,有如下显著优点:

- 1) 定子盘采用无铁心结构,消除了齿槽转矩与铁心损耗,提高了电机效率,减轻了电机质量;
- 2) 磁钢盘采用轴向与切向相结合的 Halbach 永磁体阵列,省去了转子背铁,减轻了转子质量,也提高了气隙磁密,从而提高了电机输出转矩,转矩密度增大;
- 3) 在相邻两块切向充磁的永磁体中间嵌入软磁材料,减少了高价格的钕铁硼永磁体用量,降低了电机成本;
- 4) 通过合理安排永磁材料与软磁材料尺寸及其位置,在不增加永磁材料用量的基础上,可以很容易地获得正弦分布的气隙磁密,削弱谐波,减小转矩波动。

2 设计与分析

2.1 设计方案

磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机的设计不同于常规轴向磁场永磁电机之处在于转子结构的设计,转子结构尺寸的正确选择对气隙磁密大小及波形影响很大,且电机成本主要取决于转子所用

永磁体的体积，因此必须对转子盘上的永磁材料及软磁材料的尺寸进行优化设计，以获得正弦分布、幅值较大的气隙磁密分布。通过与常规轴向磁场永磁电机相似的设计方法^[13]，可获取一个满足设计要求的可行方案，然后再以提高单位体积永磁体所产生的平均输出转矩和气隙磁密正弦性为优化目标，以转子结构参数为优化变量，对电机进行优化设计，从而得到一个较好的设计方案。基于设计要求，考虑到电机安装空间尺寸限制，将所设计的样机主要参数列于表 1 中。

表 1 设计参数

Tab. 1 Design parameters of the AFPM machine

参数	数值	参数	数值
额定功率/W	100	额定电压/V	220
额定转速 $n/(r/min)$	1 000	极对数 p	4
线圈数 Q	12	定子盘厚度/mm	10.5
磁极外径 D_{out}/mm	80	磁极内径 D_{in}/mm	53.2
单边气隙长度 g/mm	0.7	单边永磁体轴向厚度 h_m/mm	7
永磁材料型号	N42H	软磁材料型号	M19

为了减少无铁心定子绕组端部漏磁，设计时无铁心定子绕组的外径尺寸比转子磁钢盘尺寸略小。

2.2 转矩分析

与径向磁场永磁电机电磁转矩不同，轴向磁场无铁心永磁电机电磁转矩是由作用于转子盘上的切向电磁力产生的，与电机内、外径及垂直于转子盘的轴向磁密密切相关。假设电机中气隙轴向磁密为正弦分布，即

$$B_g = B_{mg1} \sin \theta \quad (1)$$

式中： B_{mg1} 为轴向磁密基波幅值； θ 为电角度。

线圈为非重叠集中绕组型式，其节距为

$$\theta_m = 2\pi \times p / Q \quad (2)$$

设线圈边占有的宽度为 θ_{re} ，该非重叠集中绕组的绕组系数^[17]为

$$k_{w1} = \frac{\sin(\theta_m / 2) \sin(\theta_{re} / 2)}{\theta_{re} / 2} \quad (3)$$

根据电磁感应原理，相电动势有效值可由轴向磁密基波幅值求出：

$$E_a = \frac{q \sqrt{2}}{a 4 p} \omega B_{mg1} N D_{out}^2 (1 + k_d)(1 - k_d) k_{w1} \quad (4)$$

式中： a 为相绕组并联支路数； q 为每极每相槽数； ω 为电角速度； N 为线圈匝数； k_d 为内外径比， $k_d = D_{in} / D_{out}$ 。

根据电磁转矩与电磁功率的关系，即可得出电

磁转矩：

$$T_e = \frac{P}{\omega} P_e = \frac{mp}{\omega} E_a I_a = \frac{\sqrt{2} m}{4} N_1 k_{w1} B_{mg1} D_{out}^2 \cdot (1 - k_d)(1 + k_d) I_a \quad (5)$$

式中： m 为相数； N_1 为每相串联匝数， $N_1 = 2qN/a$ ； I_a 为相电流有效值。

电机成本主要取决于所用永磁体的价格，近几年钕铁硼材料价格快速增长，因此使得永磁体利用率，即单位体积永磁体所产生的电磁转矩指标成为永磁电机设计者所关注的一个重要指标。本文所研究电机的永磁体体积为

$$V_{pm} = \frac{\pi}{4} (D_{out}^2 - D_{in}^2) (k_A + k_T) h_m \quad (6)$$

式中 k_A 、 k_T 分别为轴向充磁永磁体与切向充磁永磁体的极弧系数。

从式(5)可以看出，当电机内外径以及定子绕组确定后，电磁转矩大小与轴向磁密基波幅值成正比。因此，对于评价永磁体利用率的“单位体积永磁体所产生的电磁转矩 T_e/V_{pm} ”，也可转换为“单位体积永磁体所产生的基波磁密幅值 B_{mg1}/V_{pm} ”来衡量其性能优劣。

3 优化设计

3.1 优化设计方法及目标

气隙磁通密度不仅直接影响电机输出转矩，而且其波形还影响电机噪声振动^[18]，所以以气隙磁通密度作为优化目标很有实用价值。

本文采用有限元分析方法对该新型 Halbach 阵列轴向磁场无铁心永磁电机气隙磁通密度进行分析，严格来讲，该电机磁场呈三维分布，很难简化为二维模型，所以对该电机磁场进行三维分析就显得尤为重要。利用建立的有限元模型既可以进行静态分析，也可以进行动态分析^[19]，相对来说，三维静态有限元分析相对简单，耗时较少，因此本文利用三维静态有限元分析方法对电机进行优化设计。为了减少计算量，充分考虑电机结构的对称性和周期性，整个求解域可取一对极区域^[20]，如图 2 所示；模型主要的优化结构参数如图 3 所示。图 3 中，每一对极所占机械角度为 $\alpha_p = \pi/p$ ，轴向磁化永磁体所占极角为 $k_A \alpha_p$ ，每块切向磁化永磁体所占极角为 $k_T \alpha_p / 2$ ，软磁材料所占极角即为 $(1 - k_A - k_T) \alpha_p$ 。在其他参数固定不变的情况下，软磁材料以及 Halbach 永磁体阵列所占极角参数对气隙磁通密度大小及波形有很大影响，该参数不仅影响气隙磁通

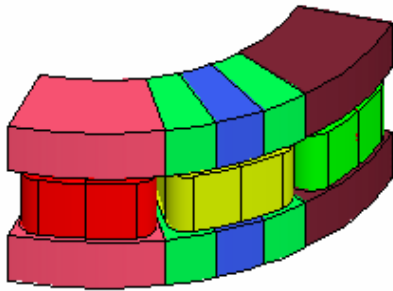


图 2 3D 有限元分析模型
Fig. 2 3D FEA model

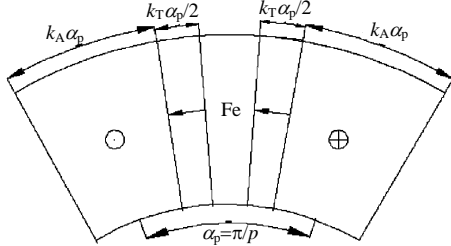


图 3 转子磁极结构参数
Fig. 3 Parameters of rotor pole

密度基波幅值，而且影响气隙磁通密度波形的正弦性。为提高永磁体利用率，同时削弱谐波，本文以式(7)作为优化目标， k_A 、 k_T 作为优化变量。

$$\begin{cases} f_1 = \max \frac{B_{mg1}}{V_{pm}} \\ f_2 = \min \frac{\sqrt{B_{mg3}^2 + B_{mg5}^2}}{B_{mg1}} \end{cases} \quad (7)$$

式中 B_{mg3} 、 B_{mg5} 分别为轴向磁密 3 次谐波、5 次谐波幅值。

3.2 永磁体极角参数对气隙磁密的影响

由于永磁体价格越来越高，在保持永磁体用量相同的情况下，希望能够通过改变轴向磁化和切向磁化永磁体的极弧系数尽可能增大气隙磁通密度。

本文所设计电机极对数为 4，常规轴向磁场无铁心永磁电机中永磁体只有轴向充磁一个方向，极弧系数 α 一般取为 0.8，则永磁体所占角度为 $\theta_m = \alpha\pi/p = 36^\circ$ 。保持永磁体用量与此相同，即轴向磁化与切向磁化永磁体共占角度为 36° ， $k_A + k_T = 0.8$ 。

分别改变 k_A 、 k_T 的取值，建立三维周期性模型，采用有限元方法对模型进行分析，表 2 给出当永磁体用量保持不变，而轴向充磁和切向充磁角度大小变化时曲线谐波分析的结果。可以看出，当 $k_T \leq k_A \leq 2k_T$ 时，气隙轴向磁密基波分量达到最大，但是当 $k_A = 2k_T$ 时，即 $k_A \alpha_p = 24^\circ$ ， $k_T \alpha_p = 12^\circ$ ，谐波分量最小，即磁密最接近正弦波。

由上述分析可知，当轴向磁化永磁体极角约为

表 2 气隙磁密谐波分析

极角参数	基波/T	3 次谐波/T	5 次谐波/T
$k_A \alpha_p = 36^\circ, k_T \alpha_p = 0^\circ$	0.46	0.02	0.020
$k_A \alpha_p = 30^\circ, k_T \alpha_p = 6^\circ$	0.48	0.01	0.025
$k_A \alpha_p = 28^\circ, k_T \alpha_p = 8^\circ$	0.55	0.02	0.030
$k_A \alpha_p = 26^\circ, k_T \alpha_p = 10^\circ$	0.57	0.01	0.030
$k_A \alpha_p = 24^\circ, k_T \alpha_p = 12^\circ$	0.58	0.02	0.030
$k_A \alpha_p = 20^\circ, k_T \alpha_p = 16^\circ$	0.58	0.06	0.030
$k_A \alpha_p = 18^\circ, k_T \alpha_p = 18^\circ$	0.58	0.08	0.030
$k_A \alpha_p = 12^\circ, k_T \alpha_p = 24^\circ$	0.52	0.13	0.010
$k_A \alpha_p = 8^\circ, k_T \alpha_p = 28^\circ$	0.485	0.14	0.010
$k_A \alpha_p = 6^\circ, k_T \alpha_p = 30^\circ$	0.455	0.14	0.020

切向磁化永磁体极角的 2 倍时，气隙磁密达到最大，且磁密谐波分量最小。由于永磁体用量相同，所以这种情况下转矩密度也最大。与相同永磁体用量情况下的常规轴向磁场无铁心永磁电机相比，其磁密分布如图 4 所示，磁密基波幅值仅为 0.48 T，3 次谐波分量达到 0.06 T。上述最优情况下的磁极组合型电机与此相比，磁密基波幅值增大 21%，即单位体积永磁体所产生的电磁转矩增大 21%。

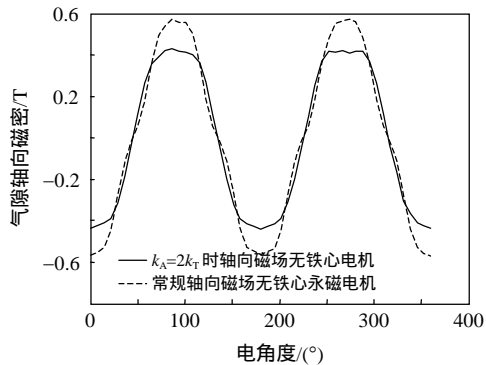


图 4 气隙磁密分布图

Fig. 4 Air-gap flux density distribution

3.3 软磁材料尺寸对气隙磁密的影响

为提高永磁材料利用率，即增大单位体积永磁体所产生的平均输出转矩，保持轴向磁化极角为切向磁化的 2 倍，即满足式(8)前提下，改变软磁材料尺寸，分析不同软磁材料尺寸情况下气隙磁密的分布。

$$\begin{cases} k_A + k_T \leq 1 \\ k_A = 2k_T \end{cases} \quad (8)$$

当 $k_A + k_T = 1$ 时，即为常规 Halbach 结构轴向磁场无铁心永磁电机，此时永磁体用量最多，单位体积永磁体所产生的基波磁密为 $30\,700\text{ T/m}^3$ ，磁密基波谐波分布如图 5 所示。

在满足式(8)的前提下，同时考虑到磁极尺寸太

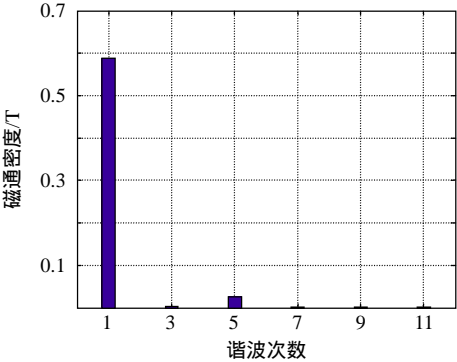


图 5 常规 Halbach 结构轴向磁场无铁心永磁电机谐波分析

Fig. 5 Harmonic analysis of conventional Halbach magnet AFPM machine

小时增加加工难度等因素，取不同软磁材料尺寸和永磁材料尺寸。表 3 中列出了所取极角参数的组合，此外，还列出了磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机的气隙磁密基波、3 次、5 次谐波大小以及单位体积永磁体所产生磁密基波的大小。

表 3 不同永磁体尺寸下气隙磁密分析

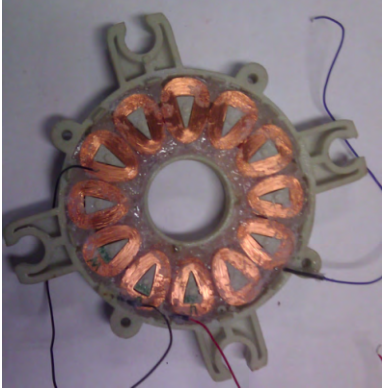
Tab. 3 Air-gap flux density analysis

极角参数	基波/T	3 次谐波/T	5 次谐波/T	$(B_{\text{mag}}/V_{\text{pm}})/(\text{T}/\text{m}^3)$
$k_A\alpha_p=28^\circ, k_T\alpha_p=14^\circ$	0.620	0.05	0.02	34 275
$k_A\alpha_p=26^\circ, k_T\alpha_p=13^\circ$	0.595	0.02	0.03	35 423
$k_A\alpha_p=24^\circ, k_T\alpha_p=12^\circ$	0.580	0.02	0.03	37 408
$k_A\alpha_p=22^\circ, k_T\alpha_p=11^\circ$	0.545	0.05	0.04	38 346
$k_A\alpha_p=20^\circ, k_T\alpha_p=10^\circ$	0.510	0.09	0.04	39 471
$k_A\alpha_p=1^\circ, k_T\alpha_p=9^\circ$	0.465	0.12	0.03	39 987
$k_A\alpha_p=16^\circ, k_T\alpha_p=8^\circ$	0.420	0.14	0.01	40 632
$k_A\alpha_p=14^\circ, k_T\alpha_p=7^\circ$	0.360	0.14	0.01	39 803
$k_A\alpha_p=12^\circ, k_T\alpha_p=6^\circ$	0.300	0.14	0.02	38 698

从表 3 可以看出，与常规 Halbach 结构相比，随着永磁体用量的减小，单位体积永磁体所产生气隙磁密基波幅值得到提高，这说明通过适当加入软磁材料可以提高永磁体利用率。但是当永磁体用量减少过多时，磁密基波幅值变小，而且谐波分量显著增加，达不到设计要求。从表 3 中的数据可以看出，以式(7)为优化目标，永磁体极角参数取第三种情况($k_A\alpha_p=24^\circ, k_T\alpha_p=12^\circ$)最优。极角参数为第三种情况的磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机与常规 Halbach 型轴向磁场无铁心永磁电机相比，每单位体积永磁体的磁通密度提高了 22%。

4 样机实验

根据上述优化设计结果，取轴向磁化永磁体极角为 24° ，每块切向磁化永磁体极角为 6° ，软磁材料极角为 9° ，制作一台磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机样机，样机定转子如图 6 所示。样机在



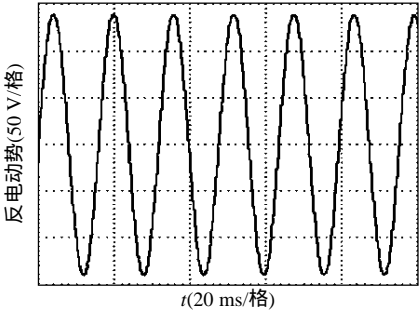
(a) 无铁心定子



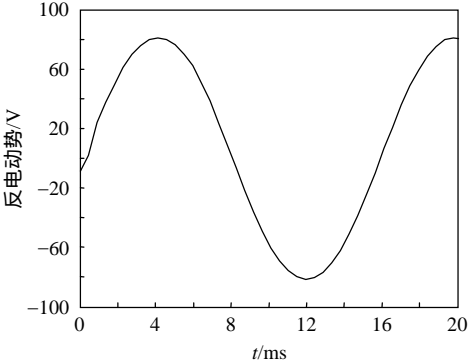
(b) 磁极组合型转子

图 6 磁极组合型轴向磁场无铁心永磁电机样机照片

Fig. 6 Photo of the AFPM machine with module poles 950 r/min 转速条件下的反电势(线电势)实验波形与仿真波形(相电势)如图 7 所示。由图 7 可知，



(a) 实测线电势波形



(b) 相电势有限元仿真结果

图 7 电机反电势实验与仿真结果

Fig. 7 EMF waveform from experiment and FEA

实验波形和仿真波形基本呈正弦分布,吻合较好。经过换算,有限元仿真结果略小于实验结果,产生误差的原因主要是制造样机时存在的人为误差。

5 结论

本文针对轴向磁场无铁心永磁电机的特性,提出了 Halbach 磁体阵列与软磁材料组合而成的组合型磁极转子结构,基于有限元软件,优化设计了该电机转子结构参数,并制作了样机,实验结果验证了该设计的正确性。得到以下结论:

1) 软磁材料的适当加入减少了永磁体用量,提高永磁体利用率,降低了电机成本;且保证了单位体积永磁体输出转矩相对较大,气隙磁密谐波较小。

2) 与常规盘式无铁心永磁电机性能相比,在永磁体用量相同情况下,磁极组合型盘式无铁心永磁电机磁密提高了 21%,从而转矩也提高 21%,提高了永磁体的利用率。

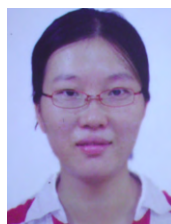
3) 与常规 Halbach 型盘式无铁心永磁电机相比,该电机每单位体积永磁体下磁通密度提高了 22%。

参考文献

- [1] Nair S S, Nalakath S, Dhinagar S J. Design and analysis of axial flux permanent magnet BLDC motor for automotive applications[C]//IEEE International Electric Machines & Drives Conference. Harita, India: IEEE, 2011: 1615-1618.
- [2] Chan T F, Lai L L. An axial-flux permanent-magnet synchronous generator for a direct-coupled wind-turbine system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 86-94.
- [3] 辜承林. 转子无铁心式直流永磁盘式电机的磁场和解析分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2): 125-129.
Gu Chenglin. Optimization of permanent-magnet axial-field coreless dc motors based on magnetic-field-network method[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(2): 125-129(in Chinese).
- [4] Sadeghierad M, Lesani H, Monsef H, et al. High-speed axial-flux permanent-magnet generator with coreless stator[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2009, 34(2): 63-67.
- [5] Bumby J R, Martin R. Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbines[J]. IEE Proceedings—Electrical Power Application, 2005, 152(5): 1065-1075.
- [6] Javadi S, Mirsalim M. A coreless axial-flux permanent-magnet generator for automotive applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(12): 4591-4598.
- [7] Gieras J F, Gieras I A. Performance analysis of a coreless permanent magnet brushless motor[C]//37th IAS Annual Meeting of the Industry Applications Conference. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2002: 2477-2482.
- [8] 范坚坚, 吴建华. 计及齿槽极间隔断 Halbach 型磁钢的 PMSM 气隙磁场解析分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 20(12): 98-105.
Fan Jianjian, Wu Jianhua. Analytical solution and analysis of airgap magnetic field of PMSM with partition-between-poles Halbach magnet considering effect of slotting [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 20(12): 98-105(in Chinese).
- [9] Zhu Z Q. Recent development of Halbach permanent magnet machines and application[C]//Power Conversion Conference. Nagoya, Japan: IEEE, 2007: 9-16.
- [10] 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.
Xu Yanliang, Yao Fuan, Fang Jiancheng. Halbach array permanent magnet machine and performance comparison with the normal array one(I)[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 79-82(in Chinese).
- [11] 徐衍亮, 赵建辉, 房建成. 高速储能飞轮用无铁心永磁无刷直流电动机的分析与设计[J]. 电工技术学报, 2004, 19(12): 24-28.
Xu Yanliang, Zhao Jianhui, Fang Jiancheng. Analysis and design of coreless permanent magnet brushless dc machine in high-speed energy storage flywheel application[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2004, 19(12): 24-28(in Chinese).
- [12] Lovatt H C, Ramden V S, Mecrow B C. Design of an in-wheel motor for a solar-powered electric vehicle [J]. IEE Proceedings—Electrical Power Application, 1998, 145(5): 402-408.
- [13] Gieras J F, Wang R J, Kamper M J. Axial fulx permanent magnet brushless machines[M]. Berlin: Springer, 2008: 153-178.
- [14] 王晓远. 基于 Halbach 阵列盘式无铁心永磁同步电机的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2006.
Wang Xiaoyuan. Study on disk coreless permanent magnet synchronous motor based on Halbach [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2006(in Chinese).
- [15] Dubois M R, Polinder H, Ferreira J A. Contribution of permanent-magnet volume elements to no-load voltage in machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1784-1792.
- [16] Arash H, Sadegh V, Rahman M A. Using module poles for shape optimization of flux density distribution in permanent-magnet machines[J]. IEEE Transactions on

- Magnetics, 2008, 44(8): 2009-2015.
- [17] Kamper M J, Wang R J, Rossouw 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): 1495-1504.
- [18] 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.
- Wang Xinghua, Li Qingfu, Wang Shuhong. Analytical calculation of no-load air-gap magnetic field and back electromotive force in brushless DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 126-130(in Chinese).
- [19] 卢琴芬, 谢舸, 金勇, 等. 混合铁心横向磁通永磁电机的设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 66-70.
- Lu Qinfen, Xie Ge, Jin Yong, et al. Design and analysis of a transverse-flux permanent magnet motor with hybrid iron-core[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 66-70(in Chinese).
- [20] 褚文强, 辜承林. 新型横向磁通永磁电机磁场研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(24): 58-62.
- Chu Wenqiang, Gu Chenglin. Study on magnet field of

novel transverse-flux permanent magnet machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(24): 66-70(in Chinese).



曹永娟

收稿日期：2013-07-10。

作者简介：

曹永娟(1979), 女, 博士研究生, 研究方向为新型永磁电机设计及控制研究, cyjzxx@163.com;

黄允凯(1977), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电机设计与控制、电气设备在线监测与故障诊断, huangyk@seu.edu.cn;

金龙(1965), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为微特电机及其驱动控制技术、智能电源技术;

胡敏强(1961), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机设计和运行理论、新型电机研制、电机物理场和电气故障诊断。

(责任编辑 李婧妍)