

Halbach 磁齿轮复合电机的分析与研究

王晨

(安徽机电职业技术学院电气工程系,安徽 芜湖 241000)

摘要:将磁齿轮与传统永磁电机相结合,构成磁齿轮复合电机,可减小摩擦损耗、提高传动效率。研究复合电机的传动机理,分析比较径向充磁与 Halbach 充磁复合电机的磁场分布规律,建立电机的时步有限元分析模型,综合考虑谐波磁场和斜槽的影响,对两种电机的气隙磁密及损耗分布进行对比分析,分析不同转速下两种电机的涡流损耗及铁耗分布规律。结果表明,较传统的径向式结构, Halbach 磁齿轮传动复合电机具有谐波含量小、铁耗小、效率高等优点,内转子电机的槽口宽度对永磁体涡流损耗产生较大的影响,选择合理的槽口宽度可减小损耗,进一步提高电机的效率。

关键词: Halbach; 复合电机; 涡流损耗; 磁密

中图分类号: TM306

文献标志码: A

引言

相较传统的机械齿轮,磁场调制型磁齿轮利用调磁块改变气隙磁导,使得内外永磁体均参与了转矩的传递,由于传递过程中不存在机械摩擦,使得该传动装置具有输出转矩密度大、噪声低、不存在机械损耗、传动效率高等诸多优点。鉴于磁齿轮的诸多优点,国内外许多专家学者将磁场调制型磁齿轮和永磁电机相结合,构成磁齿轮复合电机,实现了低速大转矩的直接驱动方式,同时利用了磁齿轮的内部空间,提高了整个传动系统的效率^[1-2]。此外,此类电机具有功率密度大、功率因数高等优点,将其应用于电动汽车,可省去机械齿轮箱,减小了体积,提高了传动的效率,增加了燃料的利用率;将其应用于风力发电机,可代替传统的机械齿轮,解决了风力机与发电机之间的转速匹配问题,提高了整个风电系统的效率^[3-4]。

与普通的永磁电机相比较,此类电机存在内外两层永磁体,且内外永磁体间存在调磁块,较多的永磁体以及调磁块引起较大的涡流损耗和铁耗,铁耗的准确计算

及分析对此类电机的应用具有较大意义。文献[5]是国内关于磁齿轮复合电机的第一篇博士论文,提出一种新型磁齿轮复合电机,利用解析法研究各部分磁密的变化规律,得出一些结论;文献[6]在分析磁密分布的基础上,采用全局解析法计算 Halbach 磁齿轮的气隙磁场与电磁转矩,得出 Halbach 磁齿轮所得转矩更大,更接近正弦。文献[7]将调制型磁齿轮与永磁无刷电机在机械和磁场上同时耦合,采用有限元方法分析结构参数对电机性能的影响,通过样机验证其设计的有效性。上述文献仅仅是对磁齿轮复合电机的静态特性和理论进行分析研究,对复合电机的铁损耗分析研究的尚不多见。

在径向充磁磁齿轮复合电机的基础上,研究一种 Halbach 拓扑结构的磁齿轮传动复合电机,建立不同复合电机的二维有限元分析模型,计算不同层气隙磁密分布情况,针对传统电机的铁耗计算模型,利用二维时步有限元计算方法计算复合电机的调磁块、永磁体的损耗分布情况,提出减小复合电机铁耗的一些方法,为提高磁齿轮复合电机的效率奠定基础。

收稿日期:2017-03-10

基金项目:安徽省自然科学基金重点项目(KJ2017A752)

作者简介:王晨(1987-),男,安徽桐城人,讲师,博士生,主要从事永磁电机方面的研究,(E-mail) wangchen1071@163.com

1 磁齿轮传动机理

磁齿轮复合电机的模型如图 1 所示。电机由内至外分别由外转子永磁同步电机的定子、定子绕组, 电机永磁体, 磁齿轮内永磁体, 调磁块, 磁齿轮外永磁体, 磁齿轮外转子。图 1(a) 为永磁体普通的径向式结构, 图 1(b) 为采用 Halbach 结构的永磁体。复合电机为双转子结构, 最内层为磁极对数为 3 的外转子永磁同步电机, 磁齿轮的内转子磁极对数 $p_{in}=4$, 外转子磁极对数 $p_{out}=17$, 调磁块位于内外磁极之间, 根据磁齿轮传动的机理, 中间调磁块的个数为内转磁极对数之和。内外转子的角速度关系为^[8-10]:

$$\omega_2 = -\frac{p_1}{p_2}\omega_1 \quad (1)$$

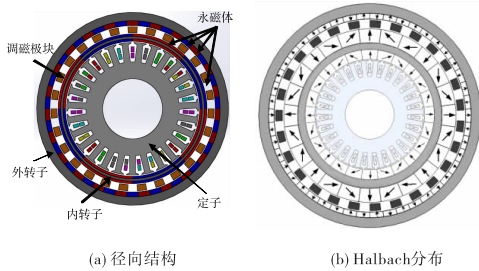


图 1 磁齿轮复合电机示意图

2 气隙磁密计算

2.1 有限元模型建立

当复合电机工作时, 永磁同步电机带动磁齿轮高速转子旋转, 根据磁齿轮传动的原理, 高速转子带动低速外转子旋转, 进而实现低速大转矩的要求。两者之间的转速比为内外层磁极对数之比。

在研究磁齿轮传动复合电机原理的基础上, 建立电机的二维电磁场有限元分析模型, 得到两者复合电机空载情况下的磁力线分布, 如图 2 所示。

由图 2 可知, 相较普通的径向充磁, 内外层永磁体采用 Halbach 充磁后, 复合电机的轭部磁密明显减少, 气隙磁通明显增强。永磁同步电机与磁齿轮的耦合能力更强, 提高了电机的动态性能和齿轮的传动效率。

2.2 气隙磁密分析

Halbach 磁齿轮复合电机内外层永磁体均采用 Halbach 充磁的方式, 各永磁体的形状相同, 充磁具有一定的规律^[6,11]。假设该复合电机每极都由 n 块永磁体构成, 第 1 块充磁方向为沿着 x 轴的正方向, 则其它永磁体的充磁方向以磁化强度的 x 、 y 分量的形式表示为:

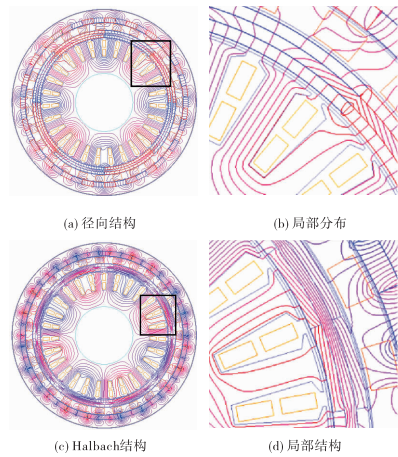


图 2 磁齿轮复合电机磁力线分布图

$$M_x(i) = M\cos\left((1 \pm p)\frac{360(i-1)}{2pn}\right) \quad (2)$$

$$M_y(i) = M\sin\left((1 \pm p)\frac{360(i-1)}{2pn}\right) \quad (3)$$

其中, 内磁场时为“+”, 外磁场时为“-”。

由于复合电机自身的特点, 该类电机具有三层气隙, 对该电机的气隙磁密进行分析计算, 得到复合电机的三层气隙磁密波形图与谐波分析图如图 3 ~ 图 5 所示。

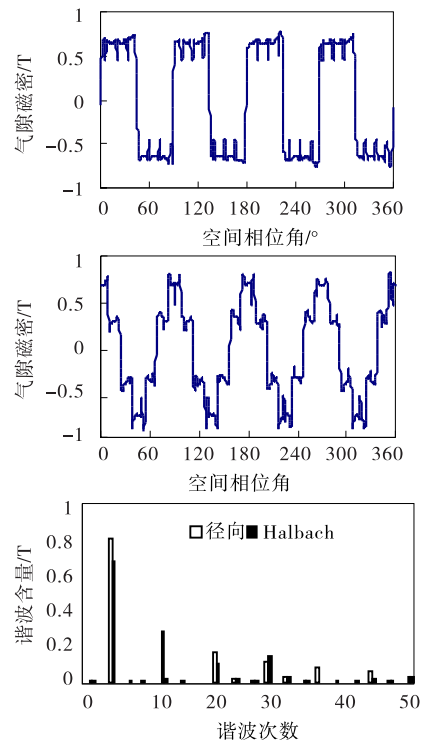


图 3 电机内层气隙磁密

由图 3 ~ 图 5 可知, 采用 Halbach 充磁时, 三层气隙的磁场强度得到有效的提高, 其谐波的幅值大大降低, 气隙磁密的正弦性大大加强, 漏磁得到有效的控制。虽

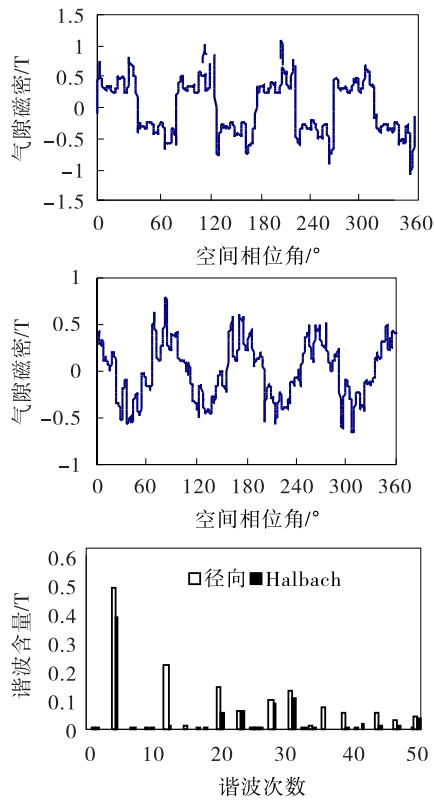


图4 电机中层气隙磁密

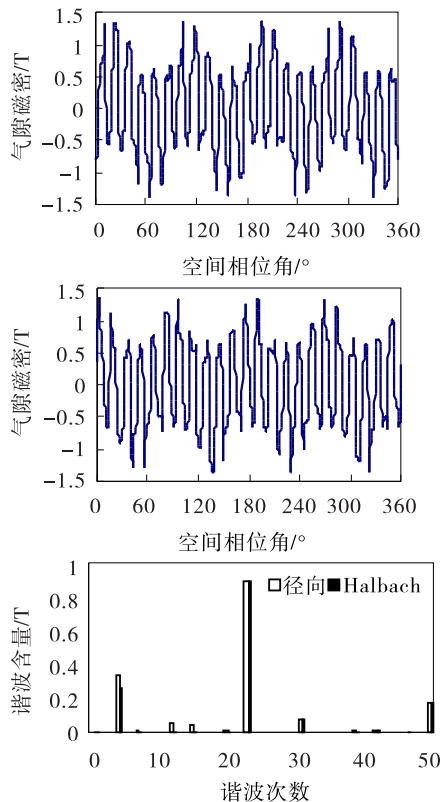


图5 电机外层气隙磁密

然气隙磁密的基波幅值较普通的径向充磁略有减小,但电机的综合性能得到增加。

3 铁耗分析

一般情况下,根据国内外专家学者对永磁电机铁耗的分析理论^[12-14],电机的铁耗分为两部分,涡流损耗与磁滞损耗,利用有限元分析软件,计算复合电机的磁密分布,得到铁耗的计算公式。

$$P_e = \oint \sum_n \rho K_e (nf)^2 (B_{nr}^2 + B_{nt}^2) dV \quad (4)$$

$$P_h = \oint \sum_n \rho K_h (nf)^2 (B_{nr}^2 + B_{nt}^2) dV \quad (5)$$

式中, P 代表铁芯密度, n 代表谐波次数, V 为铁芯的体积, $B(B_{nt}, B_{nr})$ 分别代表气隙磁密的切向分量和径向分量。

由式(4)与式(5)可知,气隙磁密的波形变化对电机的铁耗产生一定的影响。对于磁齿轮复合电机,铁损耗主要发生在外转子电机的定子轭部和中间的调磁块,调磁块的存在使得电机内部磁场的分布更加复杂,传统的电机铁耗的分析方法不适用于计算该类结构的复合电机。利用有限元分析的方法,忽略端部磁场的影响,得到 Halbach 拓扑结构的复合电机的调磁块与永磁体损耗分布,如图6所示。

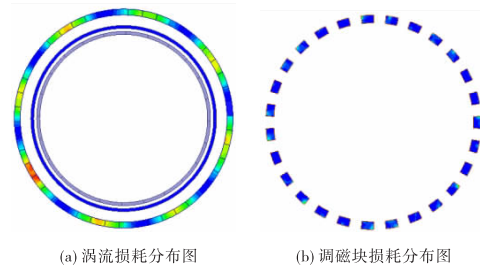


图6 Halbach 复合电机损耗分布图

由图6可知,由于调磁块的主要作用是用于传递谐波磁场,其涡流损耗较大,而永磁体本身的属性导致其涡流损耗也较大,复合电机的涡流损耗主要体现在调磁块及内外层永磁体上。

由气隙磁密的波形图以及图6可知,采用 Halbach 结构的复合电机内外转子的轭部磁密比径向式结构的复合电机更低,另外,尽管普通径向式结构的复合电机的调磁块磁密更大,但其气隙磁密的谐波含量比 Halbach 结构的复合电机更高,因此,采用 Halbach 结构的复合电机的铁耗更低,传动效率更高。两种复合电机的永磁体涡流损耗分布如图7所示。

由图7可知,永磁体径向充磁时涡流损耗大约为265 W左右,当采用 Halbach 充磁后,涡流损耗降低为178 W左右,涡流损耗降低了87 W左右。由于采用

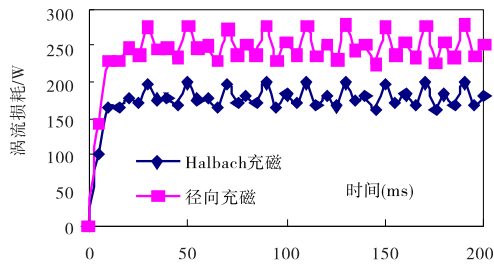


图 7 复合电机的涡流损耗

Halbach 充磁,气隙磁密的谐波大大降低,提高了复合电机的效率。

建立磁齿轮传动电机的铁耗时步有限元分析模型,得到复合电机涡流损耗与转速的变化关系(表 1)。

表 1 转速对复合电机的影响

外转子转速 /rpm	Halbach 电机涡流损耗/W	径向电机涡流损耗/W
100	78.7	97.5
150	127.9	158.75
200	178.3	222.5
250	229	285
300	292.4	361.25

由表 1 可知,随着复合电机外转子转速的升高,电机的频率升高,涡流损耗呈增大的趋势,且采用 Halbach 充磁方式后,涡流损耗大大减小,铁耗与转速曲线的斜率大大减小,增大了复合电机的带载能力。

4 铁耗的优化分析

铁耗的大小不仅影响磁齿轮复合电机的运行效率,涡流损耗会使永磁体发热,产生不可逆退磁的现象^[15],进而影响电机的运行性能。通过改变内电机的定子槽口宽度,研究槽口宽度对永磁体涡流损耗的影响,其结果如图 8 所示。

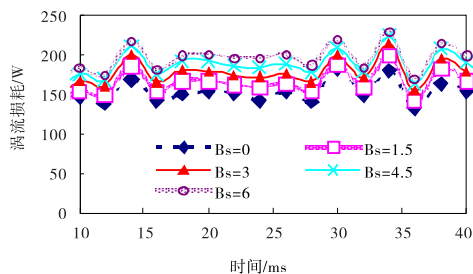


图 8 槽口宽度对涡流损耗的影响

由图 8 可知,随着槽口宽度的减小,复合电机永磁体的涡流损耗逐渐减小,但槽口宽度的减小会影响电机的其他运行性能,见表 2。槽口宽度的减小使得电机的齿槽转矩和涡流损耗均呈减小的趋势,但同时电机的出力也随之减小,综合考虑电机的运行性能,槽口宽度选

取为 1.5 mm 左右。

表 2 槽口宽度对复合电机的影响

槽口宽度 /mm	涡流损耗 /W	转矩 /(N·m)	齿槽转矩 /(N·m)
0	289	21.2	1.1
1.5	344	24.9	1.5
3	378	25.7	2.7
4.5	443	26.3	4.8
6	580	26.9	6.2

5 结论

本文提出一种 Halbach 充磁的磁齿轮复合电机,分析电机的传动原理,建立电机的有限元分析模型,分析电机的气隙磁场,得到相关结论:

(1) Halbach 充磁复合电机比径向充磁复合电机耦合能力更强,传动效率更高。

(2) Halbach 充磁复合电机的气隙磁密正弦性更高,谐波更小,但磁密幅值相对减小;同时,Halbach 复合电机的涡流损耗更小,电机的效率更高;带载能力增强。

(3) 定子槽口宽度对复合电机的涡流损耗有重要影响,槽口越小,涡流损耗更小,效率更高;但槽口的大小影响电机转矩的大小,应选择合适的槽口宽度。

参考文献:

- [1] 杜世勤,章跃进,江建中.新型永磁复合电机研究[J].微特电机,2010,38(4):1-3.
- [2] 陈栋,王敏,易靓,等.磁齿轮复合永磁电机综述[J].电机与控制应用,2015,42(3):1-6.
- [3] 包广清,刘美钧.圆筒型永磁直线磁齿轮复合发电机的设计[J].微特电机,2016,44(1):1-5.
- [4] 王凤翔.永磁电机在风力发电系统中的应用及其发展趋势[J].电工技术学报,2012,27(3):12-24.
- [5] 杜世勤.新型磁齿轮复合电机的设计研究[D].上海:上海大学,2010.
- [6] 井立兵,柳霖,章跃进,等.Halbach 阵列同心式磁力齿轮参数分析与优化设计[J].电机控制学报,2016,20(3):6-12.
- [7] 刘细平,易靓,刁艳美,等.磁齿轮传动永磁同步风力发电机分析[J].微特电机,2013,41(7):34-37.
- [8] 黄松柏.Halbach 阵列共轴磁齿轮电机的有限元分析[J].微特电机,2016,44(3):32-35.
- [9] DU Y, CHAU K T, CHENG M, et al. Design and analysis linear stator permanent magnet vernier machines

- [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47 (10): 4219-4222.
- [10] 蒋一诚, 刘国海, 赵文祥, 等. 新型磁齿轮复合电机的设计与分析[J]. 微电机, 2014, 47(3): 24-28.
- [11] 井立兵, 章跃进. 同心式磁力齿轮磁场及转矩全局解析法分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 139-146.
- [12] 张冬冬, 赵海森, 王义龙, 等. 用于电机损耗精细化分析的分段变系数铁耗计算模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 17-23.
- [13] HWANG K Y, LIN H, RHYU S H. A study on the novel coefficient modeling for a skewed permanent magnet and overhang structure for optimal design of brushless DC motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(5): 1918-1923.
- [14] 龚宇, 崔巍, 章跃进. 考虑局部磁滞损耗的复合电机铁损耗计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5395-5400.
- [15] RASMUSSEN P O, FRANDBSEN T V, JENSEN K K, et al. Experimental evaluation of a motor-integrated permanent-magnet gear[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(2): 850-859.

Analysis and Research of Halbach Magnetic-gear Permanent-magnet Motor

WANG Chen

(Department of Electrical Engineering, Anhui Technological College of Machinery and Electricity, Wuhu 241000, China)

Abstract: The magnetic gear is combined with the traditional permanent magnet motor to form the magnetic gear compound motor, which can improve the efficiency of the transmission system very effectively. A Halbach magnetic gear drive motor is presented and the transmission mechanism is analyzed. The finite element analysis model of the composite motor is established and compared with the traditional radial magnetizing compound motor. The harmonic analysis of the air gap magnetic flux is carried out. Considering the influence of the harmonic magnetic field and the chute, the eddy current loss and hysteresis loss of the composite motor are analyzed and optimized. The results show that the Halbach magnetic gear compound motor has the advantages of low harmonic content, small iron consumption and high efficiency; the width of the slot of the inner rotor motor has a great influence on the eddy current loss of the permanent magnet. Choosing a reasonable notch width can reduce the loss and further improve the efficiency of the motor.

Key words: Halbach; magnetic-gear permanent-magnet motor; eddy current loss; magnetic density