

磁钢充磁方式对内转子永磁电机的电磁性能影响分析

王 晨¹, 曹光华¹, 曾 剑²

(1. 安徽机电职业技术学院电气工程系, 安徽 芜湖 241000; 2. 江西理工大学电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000)

摘 要:内转子表贴式永磁同步电机具有效率高、体积小、功率密度大等优点,其在工业机器人、数控机床等领域得到了广泛应用。在分析径向、平行充磁两种充磁方式的原理基础上,以 24 槽 4 极内转子表贴式永磁同步电机为例,利用有限元分析的方法,建立平行充磁和径向充磁两种充磁方式的分析模型,研究两种不同的充磁方式对电机齿槽转矩、气隙磁密等电磁性能的影响,给出了磁极数和永磁体尺寸对电机气隙磁场的影响。研究表明,对于极对数大于 2 的永磁同步电机,采用平行充磁的方式,电机的气隙磁密更大、齿槽转矩更小,电机的铁损耗更小,运行性能更优。

关键词:充磁方式;内转子;损耗;齿槽转矩

中图分类号:TM301.4

文献标志码:A

引 言

表面式永磁电机由于其高效率、控制精度高、加工工艺简单等优点,在伺服驱动、工业机器人等领域得到了广泛的应用。表贴式永磁电机的磁钢充磁方式有平行充磁、径向充磁及 Halbach 充磁等方式,最初出现的充磁方式是平行充磁,其成本低、加工工艺简单;而径向充磁加工工艺复杂,但对多极电机而言,可明显改变电机的电磁性能^[1-3]。

随着稀土资源的逐渐减小,对永磁体充磁方式的研究转向了提高永磁材料的利用率、提高永磁电机的电磁性能等方面。文献[4]分析了平行充磁及径向充磁电机的磁密分布特点,研究了在两种充磁方式下,气隙磁密随极对数和磁钢厚度的变化规律;文献[5]建立了内转子与外转子永磁电机的有限元分析模型,分析了 3 种充磁方式对电机气隙磁密的影响规律,为其应用奠定了基础。

诸多文献对充磁方式的研究,仅仅是研究充磁方式对气隙磁密的影响规律,以及充磁方式对极对数以及电机拓扑结构的选择上,对充磁方式对电机损耗的研究并

不多见。

本文在前人研究的基础上,采用内转子永磁同步电机,研究分析了永磁体充磁方式对电机的空载磁场、电机的损耗的影响规律,利用有限元分析软件进行对比研究,得出相关结论。

1 两种磁体结构

当永磁体的磁化方向沿着电机转子半径方向向外辐射时,称之为径向充磁;当永磁体的磁化方向与其中心线平行时,称之为平行充磁^[6]。径向充磁的磁化方向长度沿转子圆周各点相等,而平行充磁的磁化方向长度在永磁体中心线处与径向充磁相等,左右两边呈先增大后减小的趋势。其磁化方向的结构如图 1 所示。

2 永磁电机有限元磁场分析

为建立永磁同步电机的磁场分布微分方程,确定合适的求解区域和边界条件,对求解模型作出如下假设^[7-8]:

(1) 为了节省计算时间,采用二维有限元的分析方法,并且忽略端部漏磁的影响。

收稿日期:2016-04-25

基金项目:安徽省教育厅科研基金项目(kj2016A128)

作者简介:王 晨(1987-),安徽桐城人,讲师,硕士,主要从事永磁电机设计与分析方面的研究,(E-mail) wangchen1071@163.com

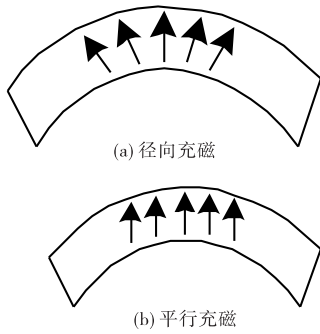


图1 两种充磁方式磁化方向对比

(2) 分析气隙磁场时,忽略磁滞和涡流损耗的影响。

(3) 电机的磁场仅限于定转子内部,定子外径及转子内部认为是零磁位线。

(4) 对于导线的涡流反应忽略不计。

基于以上的假设,电机的有限元分析模型,可表示成磁场的边值问题:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J \\ A_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ν 为磁阻率; J 为等效电流密度。

为了分析的方便,式(1)可等效为变分问题:

$$\begin{cases} W(A_z) = \iint_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right)^2 - A_z J \right] dx dy = \min \\ A_z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

同时,为了保证模型分析的准确性,保证两种充磁方式下,电机的结构尺寸与永磁体材料的尺寸相同,电机采用24槽4极的结构,见表1。

表1 电机的主要参数

参数	值	参数	值
定子外径/mm	120	定子槽数	24
定子内径/mm	75	每槽导体数	50
转子外径/mm	74	铁心长度/mm	65
转子内径/mm	26	永磁体厚度/mm	3.5

根据表1提供的数据,建立电机的有限元分析模型,分析在不同充磁方式下永磁电机的磁场分布情况。两种充磁方式下,电机的空载磁力线度分布图如图2与图3所示。

由图2与图3可知,电机磁场分布均匀,磁力线分布情况与图1中永磁体充磁方向一致,设计合理。相比较平行充磁的电机,径向充磁的电机的漏磁现象更严重,电机漏磁系数较大。

径向充磁结构沿着转子半径方向,磁密逐渐增加,

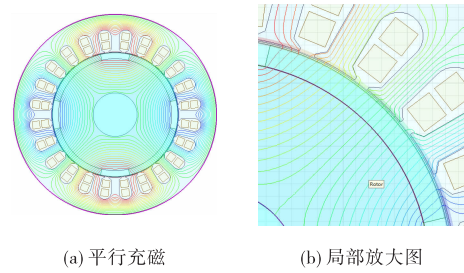


图2 平行充磁磁力线分布图

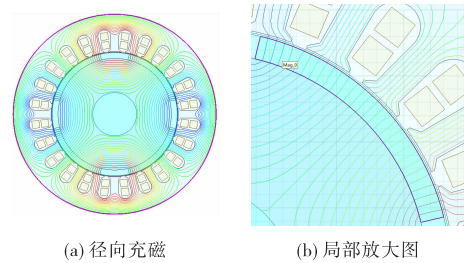


图3 径向充磁磁力线分布图

在永磁体内径处达到最大,故转子轭部易发生磁路饱和的现象;而平行充磁的电机永磁体内部磁密近似均匀,转子轭部不易产生局部饱和的现象。

2.1 气隙磁场对比

保持内转子永磁电机的尺寸相同,电机的材料相同,得到两种不同充磁方式下电机的气隙磁密,如图4所示。

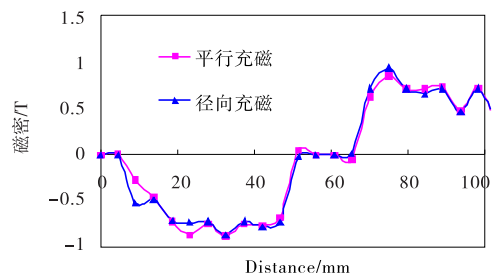


图4 气隙磁密分布图

由图4可知,采用平行充磁的方式时,磁密幅值较大,波形接近正弦波,比较适用于永磁同步电机;而采用径向充磁的方式时,磁密幅值小,波形接近矩形波,适用于永磁无刷直流电机。波形的畸变是由于定子开槽引起的谐波含量的增加。

2.1.1 磁极数对气隙磁密的影响

气隙磁密的大小不仅受永磁体充磁方式的影响,也受电机其他参数的影响,如磁极数、气隙的长度、永磁体的尺寸等^[9-10]。

保持电机的定转子内外径不变,材料的属性不变,得到两种不同充磁方式下,电机的气隙磁密平均值随磁极数的变化见表2。

表 2 气隙磁密随极对数变化

磁极数	2	4	6	8
平行充磁	0.648	0.853	0.868	0.85
径向充磁	0.751	0.786	0.767	0.75

由表 2 可知,随着极对数的增加,无论是平行充磁还是径向充磁,气隙磁密均呈先增大后减小的趋势。当磁极数大于等于 4 时,平行充磁的气隙磁密大于径向充磁;当极对数为 2 时,平行充磁的气隙磁密小于径向充磁。

2.1.2 永磁体厚度对气隙磁密的影响

保持电机的磁极数不变,仅改变表贴式永磁电机的永磁体厚度,研究不同充磁方式下,永磁体厚度对气隙磁密的影响,如图 5 所示。

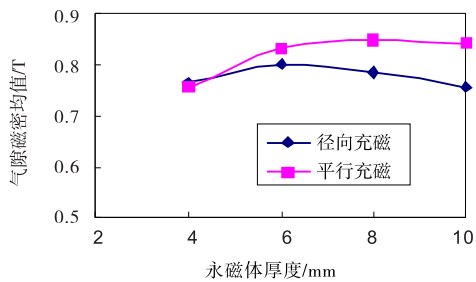


图 5 不同充磁方式气隙磁密随永磁体厚度变化

由图 5 可知,随着永磁体厚度的增大,对于径向充磁,气隙磁密均呈先增大后减小的趋势,且趋势较明显;对于平行充磁的电机,随着永磁体厚度的增大,气隙磁密先增大后接近不变,但较径向充磁,其均值较大。因此,对于内转子电机,在永磁体厚度较大时,可采用平行充磁的方式来提高永磁体的利用率。

2.2 齿槽转矩对比

齿槽转矩对电机的运行及噪声产生较大的影响,较小的齿槽转矩不仅可以减小电机的转矩脉动,提高电机的运行性能,也可以使得电机运行过程中的噪声更小,运行更加平稳^[11-12]。确定零激励的条件,得到两种充磁方式下电机的齿槽转矩波形如图 6 所示。

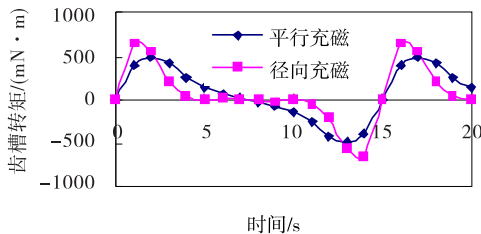


图 6 齿槽转矩波形图

由图 6 可知,平行充磁的永磁电机的齿槽转矩大约为 0.5 N·m,而径向充磁的永磁电机的齿槽转矩大约为 0.8 N·m。采用平行充磁的方式使得电机的运行更加平

稳,噪声更小。

3 电机的损耗分析

对于永磁电机而言,交变的磁通使得铁磁材料产生损耗,称之为铁损耗。为了分析永磁电机的铁损耗,通常需要建立铁耗的分析模型,其模型的建立多种多样,应用最广的为意大利专家 Bertotti 提出的一种铁损耗分离的计算方法,其计算模型为:^[13-15]

$$p = p_c + p_e + p_h = k_c f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} + k_h f B^\alpha \quad (3)$$

式中: f 为频率, B 为永磁电机的磁密, k_c 、 k_a 、 k_h 为与铁磁材料相关的涡流、附加及磁滞损耗系数。

由式(3)可知,铁耗的准确计算取决于磁密的准确计算以及铁耗系数选取的准确性。本文采取最小二乘法拟合多频率下的 B-P 曲线,得到与铁耗相关的系数。其计算公式:

$$f(k_c, k_a, k_h) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [p_{ij} - (k_c f_i^\alpha B_{mij}^\alpha + k_a f_i^{1.5} B_{mij}^{1.5} + k_h f_i B_{mij}^2)]^2 = \min \quad (4)$$

对式(4)的各未知数进行偏导数为 0 的求解,会得到一个三元一次的方程组,求解该方程组即可得到铁耗的三个系数,得到铁耗的相关系数见表 3。

表 3 铁耗相关系数的拟合值

损耗系数	k_c	k_a	k_h
拟合值	1.36842	1.76468	172.842

根据确定的损耗系数,建立电机的损耗有限元分析模型。为了模拟电机的实际工况,利用联合仿真的方法,建立 Maxwell-Simplorer 联合仿真模型,给定额定激励,分析电机额定运行时的铁损耗分布情况。由于本文采用的电机模型非高速电机,不必考虑肌肤效应的影响,得到额定运行条件下,两种充磁方式下,电机的损耗波形图如图 7 所示。

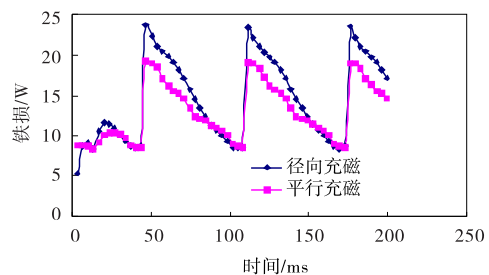


图 7 定子铁芯铁耗波形图

由图 7 可知,在额定励磁的条件下,相同电机的尺寸条件下,采用径向充磁的方式电机的铁损耗大约为 24 W,而采用平行充磁的方式电机的铁损耗大约为 19 W,损耗降低了 20% 左右。

4 结 论

本文以 24 槽 4 极永磁同步电机为例,研究平行充磁与径向充磁两种充磁方式对电机电磁性能的影响,得出:

(1) 对于内转子电机,永磁电机磁极数大于 2 时,采用平行充磁,气隙磁密更大。

(2) 相比较径向充磁永磁电机,平行充磁的齿槽转矩更小,电机的噪音更小。

(3) 平行充磁的内转子永磁电机的铁耗更小,电机的效率更高。

参 考 文 献:

- [1] URRESTY J, RIBA J R, ROMERAL L, et al. A simple 2-D finite-element geometry for analyzing surface-mounted synchronous machines with skewed rotor magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(11): 3948-3954.
- [2] 周凤争, 刘宝成, 唐庆华, 等. 高速无刷直流电机转子充磁方式研究[J]. 微电机, 2009, 42(8): 88-92.
- [3] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 刘景林, 王立. 磁钢充磁方式对稀土永磁斜槽电机性能的影响分析[J]. 稀土, 2014, 35(1): 16-22.
- [5] 李延升, 窦满峰, 骆光照. 不同充磁方式的对转永磁电机气隙磁场性能研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2014, 46(1): 140-147.
- [6] 徐丽琴, 黄焦宏, 张雪峰, 等. 钕铁硼磁体磁性的近似普适规律的研究[J]. 稀土, 2011, 32(3): 72-74.
- [7] 李延升, 窦满峰, 张春雷. Halbach 型磁钢的永磁电机气隙磁场解析计算[J]. 微电机, 2013, 46(3): 6-13.
- [8] 李延升, 窦满峰, 樊鑫. 表贴式永磁电机气隙磁场及齿槽转矩解析计算[J]. 微特电机, 2012, 40(12): 9-15.
- [9] 汪旭东, 吴俊, 许孝卓. 分数槽低速大转矩永磁同步电机设计[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2015, 34(6): 855-859.
- [10] HU Jia, LUO Yingli, LIU Mingji. Analysis of the iron loss of line start permanent magnet synchronous motor using time-stepping finite element method [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, October 17-20, 2008: 3237-3240.
- [11] 黄守道, 刘婷, 欧阳红林. 基于槽口偏移的永磁电机齿槽转矩削弱方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 100-105.
- [12] WANG D H, WANG X H, QIAO D W. Reducing cogging torque in surface-mounted permanent-magnet motors by nonuniformly distributed teeth method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(9): 2231-2239.
- [13] 石坚, 李铁才. 一种消除无刷直流电动机换相转矩脉动的 PWM 调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 110-116.
- [14] 李界华, 胡佳, 文泽军. 考虑磁钢磁化方式的永磁电机空载气隙磁场性能分析[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2015, 37(3): 35-42.
- [15] 孔小光, 王凤翔, 徐云龙. 高速永磁电机铁耗的分析和计算[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(9): 26-30.

Analysis of the Effect on the Electromagnetic Properties of the Inner Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor by Magnetic Steel Magnetizing Method

WANG Chen¹, CAO Guanghua¹, ZENG Jian²

(1. Department of Electrical Engineering, Anhui Technological College of Machinery and Electricity Engineering, Wuhu 241000, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The inner rotor surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) is widely used in industrial robots, machine tools and other fields for its many advantages such as high efficiency, small size, high power density, ect. In this paper, based on the analysis of radial and parallel magnetization magnetizing principles, taking the 24 slots 4 pole permanent magnet synchronous motor for example, and using the finite element analysis method, the two kinds of magnetizing models of parallel magnetization and radial magnetizing are established. The effects of two kinds of magnetizing on electromagnetic properties are researched, then the effects of the number of poles and the permanent magnet's size on gap magnetic field are given. The study shows that permanent magnet synchronous motor (the number of pole pairs is greater than 2) have the greater flux density, smaller motor cogging torque, less iron losses and better operation performance with the method of parallel magnetization.

Key words: magnetization methods; inner rotor; loss; cogging torque