

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.07.018

磁钢充磁方式对高速永磁电机性能的影响研究

张炳义, 蒋 鑫, 冯桂宏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:针对高速永磁电机的充磁方式问题,对一台 250 kW, 67 000 r/min 高速永磁电机的径向充磁、平行充磁和 Halbach 充磁 3 种永磁体充磁方式进行了研究,对不同充磁方式给高速永磁电机气隙磁场、齿槽转矩、损耗的影响进行了分析。利用有限元分析的方法,根据实际的充磁方式,在有限元软件中建立了高速永磁电机模型,对高速永磁电机不同充磁方式下的性能进行了研究,对比分析了平行充磁、径向充磁及 Halbach 充磁这 3 种充磁方式对高速永磁电机气隙磁场、齿槽转矩、定子空载铁耗、转子涡流损耗、额定运行时总损耗等的影响,并且总结了高速永磁电机理想的充磁方式。研究表明:采用平行充磁方式时高速永磁电机的气隙磁密波形更趋于正弦、齿槽转矩更小,电机的总损耗最小,运行性能更优。

关键词:高速;永磁电机;充磁方式

中图分类号:TM303

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)07-0751-04

Effect of magnetic magnetizing method on the performance of high speed permanent magnet motor

ZHANG Bing-yi, JIANG Xin, FENG Gui-hong

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the magnetizing methods of high speed permanent magnet motor, three kinds of permanent magnet magnetization was investigated in a high speed permanent magnet motor (250 kW, 67 000 r/min), which include radial magnetization parallel magnetization and Halbach. And the influence of air gap magnetic field, cogging torque and loss brought by different magnetizing methods was analyzed. According to the actual magnetization method, the high speed permanent magnet motor model was established in the finite element software to study the performance of high speed permanent magnet motor under different magnetization methods. The finite element method was employed to study the effects of air gap magnetic field, cogging torque, no-load stator iron loss, rotor eddy current loss, and rated total loss etc., and conclude the ideal magnetizing method of high speed permanent magnet motor. The result indicate that more sinusoidal air gap flux density, less cogging, smaller total loss and better running performance can be gotten when parallel magnetizing method is adopted.

Key words: high-speed; permanent magnet motor; magnetizing method

0 引 言

高速永磁电机由于具有效率高、功率密度大、体积小,并可以省去增速箱等诸多优点,在压缩机、飞轮储能、电主轴以及高速机床上得到了越来越广泛的应用^[1-4]。该电机永磁体通常采用表贴式。表贴式永磁

电机的磁钢充磁方式又分为平行充磁、径向充磁及 Halbach 充磁等结构。气隙磁密和反电势的波形与幅值等均受磁钢充磁方式的影响。

如何提高永磁材料的利用率、提高永磁电机的电磁性能成为对永磁体充磁方式研究的重点。文献[5]分析了平行充磁及径向充磁对电机电磁性能的影响;

收稿日期:2017-11-22

作者简介:张炳义(1954-),男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,主要从事低速大转矩电机、特种电机及控制等方面研究。E-mail:1392326904@

qq.com

文献[6]通过建立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;文献[7]对一台2.3 kW, 150 000 r/min 高速无刷直流电机进行了平行和径向两种充磁方式对比研究。对于不同充磁方式,目前针对常规速度永磁电机的研究较多,以高速永磁电机为对象研究充磁方式对电机性能影响的文献较少。

在现有研究的基础上,本研究将分析高速永磁电机3种充磁方式对电机气隙磁场、齿槽转矩等的影响,在有限元分析软件的辅助下,分析总结不同充磁方式对高速永磁电机铁耗、铜耗、涡流损耗等损耗的影响规律。

1 3种永磁体充磁方式结构模型

平行充磁的磁化方向长度是由中心线至两端为先增大后减小的变化规律;而径向充磁的磁化方向长度沿转子圆周各点相等;Halbach 磁化结构的每极磁钢分成多块,每块磁体的充磁方向不同。

3种磁化方向的结构如图1所示。

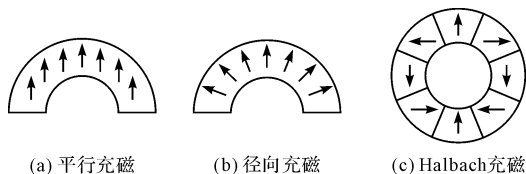


图1 3种充磁方式(2极)磁化方向对比

为了保证分析的准确性,本文分析研究不同充磁方式对高速永磁电机的影响时,电机的其他参数均保持不变。

电机主要参数如表1所示。

表1 电机主要参数

参数	数值	参数	数值
定子外径/mm	368	转速/(r · min ⁻¹)	67 000
定子内径/mm	105	频率/Hz	1 116.7
气隙长度/mm	5	极数	2
铁芯长度/mm	155	永磁体厚度/mm	13

2 高速永磁电机有限元分析

根据表1中的数据,本研究利用ANSYS 仿真软件建立了电机的有限元分析模型,分析了在不同充磁方式下对高速永磁电机性能的影响。仿真时,对模型做如下假设^[8-9]:

(1)采用二维平面场分析,忽略电机磁场的轴向变化;

(2)忽略铁磁材料中的涡流和磁滞损耗;

(3)磁场仅被限制于电机的内部,定子的外部边界及转子的内部边界认为是零矢量磁位线。

2.1 不同充磁方式对气隙磁场的影响

气隙磁场的波形及谐波含量直接影响永磁电机的性能。本文在平行充磁、径向充磁、Halbach 充磁3种情况下,对高速永磁电机的气隙磁场进行了仿真分析,仿真结果如图2所示。

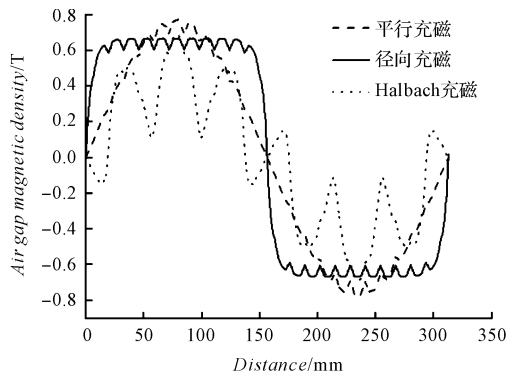


图2 气隙磁密分布图

从图2中可以看出,在3种充磁方式中:

(1)采用平行充磁时气隙磁密波形最接近正弦,并且具有较大的磁密幅值,相比于径向充磁和Halbach 充磁,更适用于高速永磁同步电机;

(2)采用径向充磁的方式时,磁密幅值小,波形接近矩形波,波形的畸变是由于定子开槽引起的谐波含量的增加导致;

(3)Halbach 充磁方式,气隙磁密波形有接近正弦波的趋势,但突变严重,可能是由于永磁体分块数量太少,且每块充磁方向不同导致。

气隙磁密的各次谐波含量分布情况如图3所示。

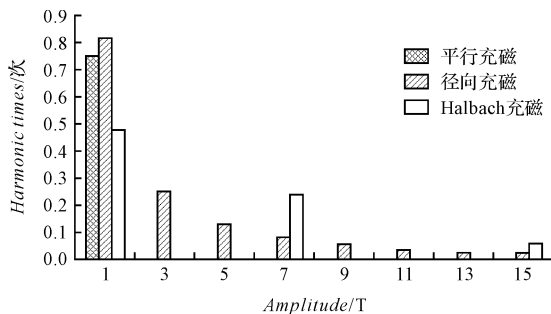


图3 气隙磁密谐波含量

由图3可知:平行充磁时气隙磁密的基波幅值0.75 T,径向充磁基波幅值为0.81 T,比平行充磁时高8%,但其他次谐波均大于平行充磁结构;Halbach 磁化结构气隙磁密基波幅值为0.48 T,比平行充磁和径向充磁时都要低,且7次谐波和15次谐波稍高,其他次谐波和平行充磁时一样,基本可以忽略。

2.2 不同充磁方式对齿槽转矩的影响

齿槽转矩是永磁电机绕组不通电时永磁体和定子铁心之间相互作用产生的转矩。过大的齿槽转矩会引起电机噪声大、运行不平稳等问题,故对齿槽转矩的抑制十分重要^[10-12]。

不同充磁方式下高速永磁电机的齿槽转矩如图4所示。

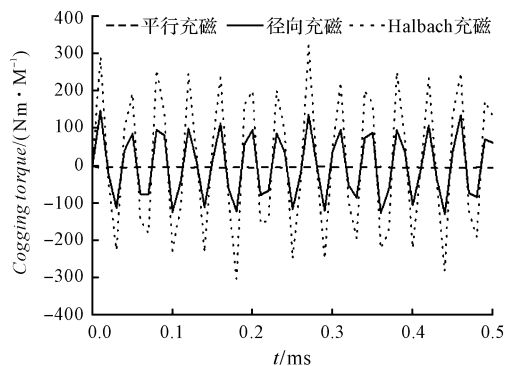


图4 齿槽转矩波形图

由图4可知:平行充磁的永磁电机的齿槽转矩接近于0,而径向充磁和Halbach充磁的永磁电机的齿槽转矩远大于平行充磁电机的齿槽转矩。由于在平行充磁时,电机的气隙磁密波形最接近于正弦波,径向充磁和Halbach充磁的气隙磁密畸变比较大,从而导致电机的齿槽转矩也随之增大。因此,采用平行充磁的方式有助于降低齿槽转矩,提升电机性能。

3 高速永磁电机损耗分析

高速电机体积小、功率密度大、散热困难,如果电机的损耗过大、温升过高,会导致永磁体不可逆性退磁。为了分析永磁体充磁方式对高速电机的损耗影响,本文建立了电机的损耗有限元分析模型,对不同充磁方式下的高速永磁电机的损耗进行仿真分析。

3.1 高速电机定子空载铁耗

高速永磁电机供电频率高,并且转速越高铁耗占高速电机损耗的比例越大。本文中的样机额定频率达1 116.7 Hz,由此带来的定子铁耗问题不容忽视。在高速永磁电机中,定子铁耗包括转子永磁磁场旋转引起的空载铁耗和绕组电流引起的附加铁耗,定子空载铁耗对定子铁耗的影响不容忽视。

250 kW、67 000 r/min 高速永磁电机采用平行充磁、径向充磁和Halbach充磁时的空载铁耗变化曲线如图5所示。

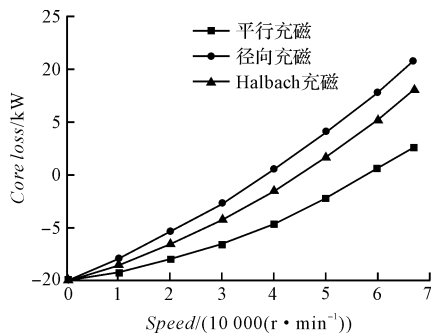


图5 3种充磁方式不同转速下的空载铁耗

从图5中可以看出:平行充磁时电机的定子空载损耗最小,径向充磁和Halbach充磁时的定子空载损耗均大于平行充磁,原因是径向充磁和Halbach充磁时谐波分量较大,使得每极磁通量和定子铁心磁密较大,由此带来了较大的定子空载损耗。

3.2 高速电机转子涡流损耗

在永磁同步电机中,由于定子磁场与永磁体同步旋转,在分析电机损耗时通常不会将转子涡流损耗考虑在内,但是在高速永磁电机中,定子齿槽效应、绕组磁动势的非正弦分布及绕组中的谐波电流所产生的谐波磁势在转子永磁体内部产生的涡流损耗不可忽略,过大的涡流损耗带来电机散热困难、永磁体退磁等一系列问题。

本文对250 kW、67 000 r/min 高速永磁电机永磁体的空载涡流损耗进行了计算,如图6所示。

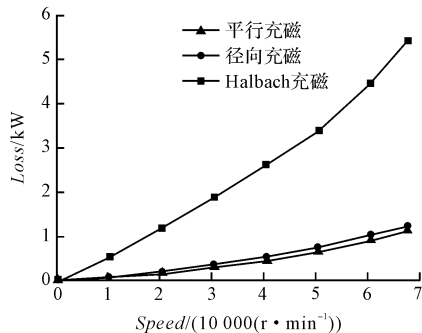


图6 涡流损耗

从图6中可以看出:Halbach充磁方式的空载转子涡流损耗远大于平行充磁和径向充磁,而平行充磁时高速永磁电机的转子涡流损耗最小。这是由于,在采用Halbach充磁时,气隙磁密中含有较高的7次与15次谐波,导致其转子的空载涡流损耗远大于其他两种充磁方式。

3.3 额定运行高速电机总损耗

采用电压源激励,本文分析计算了电机额定运行稳定时的铁耗、铜耗和涡流损耗。3种充磁方式下,高速电机铁耗、铜耗及涡流损耗大小如图7所示。

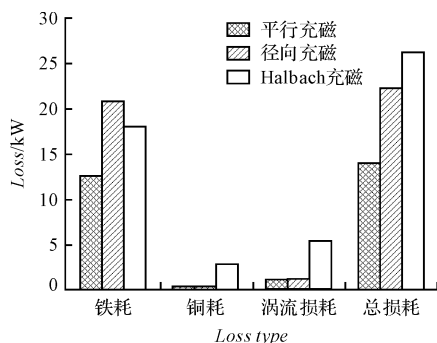


图 7 3 种充磁方式损耗对比

由图 7 可知:在电机尺寸相同,加入同样额定激励的条件下,采用径向充磁的方式电机的铁耗最大,为 20.8 kW;采用 Halbach 充磁的方式电机的铜耗和涡流损耗最大,分别为 2.88 kW 和 5.42 kW;而采用平行充磁时,电机的铁耗、铜耗和涡流损耗都是最小的,气隙磁密波形的畸变导致了径向充磁方式与 Halbach 充磁方式的各项损耗均比平行充磁方式的损耗大,因此平行充磁总损耗最小,为 14.04 kW,相比于径向充磁的总损耗 22.32 kW 和 Halbach 充磁的总损耗 26.34 kW,平行充磁的总损耗要降低 37.1% 和 46.7%。

4 结束语

本研究以一台 250 kW、67 000 r/min 高速永磁电机为例,研究了永磁体的充磁方式对高速电机的电磁性能影响,得到了如下结论:

(1) 对于高速永磁电机,采用平行充磁时,气隙磁密幅值更大,且更接近于正弦;

(2) 相比较径向充磁和 Halbach 充磁高速永磁电机,平行充磁方式下的齿槽转矩更小,电机的振动与噪音更小;

(3) 采用平行充磁时,电机的铁耗、铜耗和涡流损耗都是最小的,效率最高,且在相同冷却条件下,温升最低,能够保证电机长期平稳运行。

参考文献 (References):

- [1] 王凤翔. 高速电机的设计特点及相关技术研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, 28(3): 258-263.
- [2] CHO H W, KO K J, CHOI J Y, et al. Rotor natural frequency in high-speed permanent magnet synchronous motor for turbo-compressor application [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2011, 47(10): 4258-4261.
- [3] 黄云凯, 余 莉, 胡虔生. 高速永磁电动机设计的关键问题[J]. 微电机, 2006, 39(8): 6-9.
- [4] PAULIDES J J H, JEWELL G W, HOWE D. An evaluation of alternative stator lamination materials for a high-speed, 1.5 MW, permanent-magnet generator [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2004, 40(4): 2041-2043.
- [5] 王 晨, 曹光华, 曾 剑. 磁钢充磁方式对内转子永磁电机的电磁性能影响分析[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2016, 29(4): 31-34.
- [6] 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.
- [7] 周风争, 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): 82-83.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 杨雅薇, 马钧华. 基于特定换相调制占空比的永磁无刷直流电机换相转矩脉动研究[J]. 轻工机械, 2017(5): 37-42.
- [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.

[编辑: 张豪]

本文引用格式:

张炳义, 蒋 鑫, 冯桂宏. 磁钢充磁方式对高速永磁电机性能的影响研究[J]. 机电工程, 2018, 35(7): 751-754.

ZHANG Bing-yi, JIANG Xin, FENG Gui-hong. Effect of magnetic magnetizing method on the performance of high speed permanent magnet motor [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(7): 751-754.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>