

端部磁钢对永磁无刷直流电动机反电动势的影响研究

殷鹏冬¹, 黄贤蕾², 周彦³, 李新华²

(1. 珠海格力电器股份有限公司, 珠海 519070; 2. 湖北工业大学, 武汉 430068; 3. 捷和电机深圳有限公司, 深圳 518104)

摘要:采用三维有限元的方法, 对含端部磁钢永磁无刷直流电动机的反电动势进行了仿真分析, 同时与无端部磁钢模型进行对比分析, 并以气隙磁密为主要研究对象, 分析了气隙磁密径向分量沿轴向的分布。在进行电磁计算时, 为了充分考虑端部磁钢对电机反电动势的影响, 可通过引入一个端部磁钢系数 k 来修正二维计算结果以接近三维仿真结果。样机的实验结果证明了其正确性, 为新开发电机估算其反电动势提供了一种切实可行的方法。

关键词: 永磁无刷直流电动机; 有限元法; 端部磁钢系数

中图分类号: TM33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7018(2015)09-0036-03

Influence of End-Magnet on EMF in Permanent Magnet Brushless DC Motor

YIN Peng-dong¹, HUANG Xian-lei², ZHOU Yan¹, LI Xin-hua²

(1. Gree Electric Appliances, Inc. of Zhuhai, Zhuhai 519070, China;

2. Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

3. McNair Motor Co., Ltd. of Shenzhen, Shenzhen 518104, China)

Abstract: This paper deals with the analysis for EMF waves of permanent magnet brushless DC motor with end-magnet using the three-dimensional finite-element method (3D FEM), some of which were compared with the motor with no end-magnet. Taking the air gap flux density as the main study object, distribution of B along the shift-axis of permanent magnet brushless DC motor were analysed. Considering the influence of end-magnet on the EMF waveforms in electromagnetic calculation, an end factor reflecting end-magnet is defined to modify the 2D predicted result. The accuracy of the approach was verified with experiment results, supplying a fast and simple method for the estimation for EMF with new motor.

Key words: permanent magnet brushless DC motor; finite element method; end magnet factor

0 引言

永磁无刷直流电动机因其结构简单、运行可靠、效率高及具有宽范围的调速能力而得到广泛的应用。永磁无刷直流电动机利用位置传感器和电子换相电路代替了传统的机械换向结构, 对电机整个系统来说, 转子位置的检测是至关重要的。目前, 检测转子位置^[1-3]的基本思想有两种, 一是直接用位置传感器对转子位置进行检测; 二是采用无位置传感器控制, 间接检测转子位置。其中无位置传感器控制主要用于运行过程中实时检测转子位置并用于换相, 但对于电机的初始位置和起动问题还有待研究。霍尔传感器因其结构简单、成本低、性能好而被广泛使用; 为了能够准确地感应出磁极的位置, 在永磁无刷直流电动机设计时磁钢的磁极长度通常比电枢铁心长度大, 如图1所示, 本文定义这一部分磁钢为端部磁钢, 由于端部磁钢的存在, 导致实际的空载反电动势幅值明显高于不考虑端部磁钢的仿真模型。

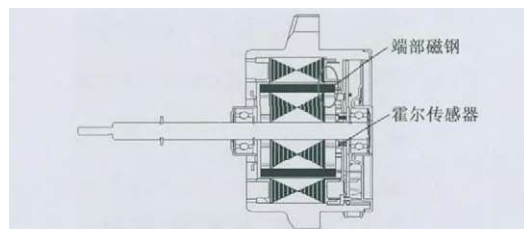


图1 电机结构图

目前, 对端部磁钢的研究还未见相关报道, 为了考虑端部磁钢对电机空载反电动势的影响, 需要进行3D有限元计算。文献[4]计算了电机三维端部磁场, 给出了磁密径向分量和轴向分量沿电机轴向的变化曲线; 文献[5]通过定义一个端部漏磁系数修正二维计算结果以接近电机的实测结果, 取代了过去繁琐耗时的纯三维计算, 但该方法计算端部漏磁系数的精度受气隙磁密径向分量沿轴向分布中取点个数的影响, 本文运用此二维等效三维的思想, 引入一个端部磁钢系数, 结合该系数对2D有限元计算结果进行修正。本文试制一台160W样机, 样机的仿真数据与实测数据刚好吻合, 证明本文方法的可行性, 为后期设计电机评估反电动势幅值提供了一些有益的结论。

1 永磁无刷直流电动机端部磁钢影响和研究

1.1 端部磁钢对空载反电动势的影响

首先对图 2(a) 含端部磁钢电机模型及图 2(b) 无端部磁钢电机模型分别进行三维有限元分析, 结果发现含端部磁钢电机反电动势幅值明显高于无端部磁钢电机。

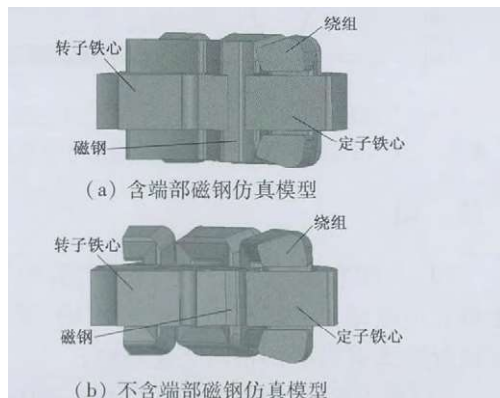


图 2 电机三维仿真模型

进一步对上述 3D 模型进行电磁场分析, 该反电动势幅值受磁钢磁极长度的影响, 图 3 给出了不同磁钢磁极长度下电机的反电动势幅值的变化曲线。

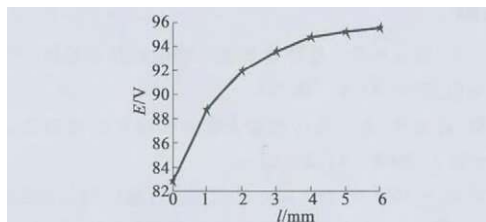


图 3 端部磁钢长度与反电动势变化曲线

由图 3 可以看出, 随着端部磁钢磁极长度的增加, 反电动势幅值呈增大的趋势, 最终增大趋势逐渐平缓。图 4 给出了通过转子铁心、磁钢、气隙、定子铁心的截面磁密云图, 从图中可以看出, 端部磁钢产生的磁场通过气隙到达定子铁心, 从而使电机反电动势增大, 另外远离转子铁心端面的磁钢由于磁阻较大而产生漏磁。在实际电机生产过程中, 结合霍尔支架的长度, 通常设计端部磁钢的长度为 6 mm (下文中端部磁钢默认为 6 mm)。

端部磁钢的存在使电机反电动势幅值增加, 同时加强电机轭部、齿部的饱和。从图 4 中可以看出, 电机齿部磁密已接近 1.5 T, 随着电机叠厚减小, 饱和程度加强。图 5 给出了电机空载反电动势波形图

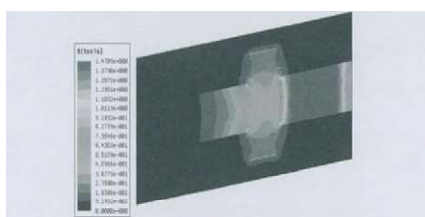


图 4 截面磁密云图

及傅里叶分析结果, 可见反电动势呈梯形波, 其中 5、7 次谐波较大, 会引起电机电磁噪声。

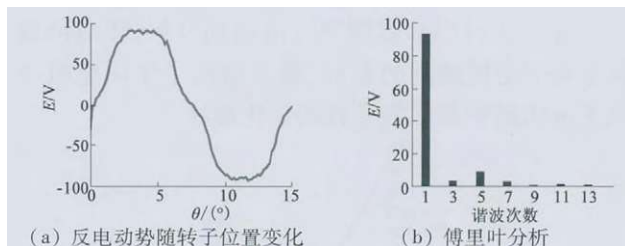


图 5 空载反电动势波形

图 6 给出了电机静态情况下, 含端部磁钢电机模型以及图无端部磁钢电机模型气隙磁密径向分量沿电机圆周方向的对比曲线。运用 MATLAB 软件对上述数据进行傅里叶分析, 求出不同轴向位置气隙磁密基波分量。

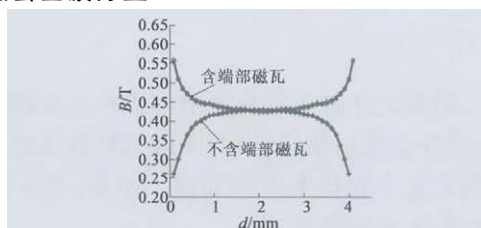


图 6 气隙磁密沿电机轴向变化曲线

从图 6 中可以看出, 含端部磁钢电机两端面磁密较中心面磁密高, 说明端部磁钢的存在对电机气隙磁密起增大作用; 不含端部磁钢电机两端面磁密较中心面磁密低, 这与电机实际运行时由于端部漏磁引起的磁场衰减是相符的。两款电机气隙磁密沿轴向方向变化趋势刚好相反; 电机气隙磁密径向分量幅值沿轴向发生变化, 因此采用三维有限元计算可以充分考虑端部磁钢对电机径向磁密分量的影响, 提高电机仿真计算准确性。

1.2 端部磁钢系数定义

电机一相绕组中感应的反电动势:

$$E = C_e \Phi n \quad (1)$$

式中: C_e 为电动势常数, 对已制成的电机来说是一常数; Φ 为每极气隙磁通; n 为电机转速。二维磁场仿真空载气隙磁密是沿轴向为恒值, 而三维仿真气隙磁密沿电机轴向是变化的, 即两种仿真中每极气隙磁通不等, 这也是二维仿真结果偏小的原因, 由上述关系式可知:

$$\frac{E_{3D}}{E_{2D}} = \frac{C_e \Phi_{3D} n}{C_e \Phi_{2D} n} = \frac{\Phi_{3D}}{\Phi_{2D}} \quad (2)$$

三维有限元计算仿真耗时长, 数据处理复杂, 针对上述问题, 本文提出了一种 2D 等效的方法, 定义一个端部磁钢系数, 结合该系数对 2D 有限元计算结果进行修正。定义端部磁钢系数 K 来衡量端部磁钢对电机空载反电动势的影响。

$$k = \frac{\Phi_{3D}}{\Phi_{2D}} \quad (3)$$

式中： Φ_{3D} 为三维仿真模型每极气隙磁通； Φ_{2D} 为二维仿真模型每极气隙磁通。

进一步对端部磁钢进行电磁场分析，该端部磁钢系数受电机叠高的影响，图7给出了不同电机叠高下电机的端部磁钢系数的变化曲线。

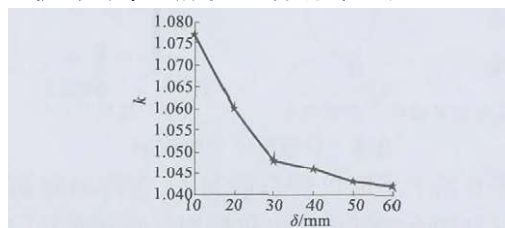


图7 端部系数随电机叠厚的变化曲线

从图7可看出，随着电机叠厚增加，端部磁钢系数逐渐减小，即端部磁钢对电机性能影响逐渐减弱。

2 实验

本文研究的永磁无刷直流电动机机壳采用塑封结构，定子铁心采用拼块结构，永磁无刷直流电动机的基本参数及主要技术指标如表1所示，图8给出了转子结构及试验样机。

表1 永磁无刷直流电动机基本参数

参数	数值	参数	数值
额定功率 P_e/W	160	定子外径 D_1/mm	105
母线电压 U/V	310	转子外径 D_2/mm	67
极槽数	8/12	叠厚 δ/mm	30
转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	900	磁钢牌号	JPM-6N



图8 转子结构及样机

图9分别给出了电机在900 r/min时二维仿真模型、样机实测空载线反电动势波形。其中二维仿

真反电动势有效值为120.08 V，通过端部磁钢系数修正后的二维等效模型反电动势有效值为125.8 V，与电机实测值124.3接近，可见本文提出的二维等效思想是正确、可行的。

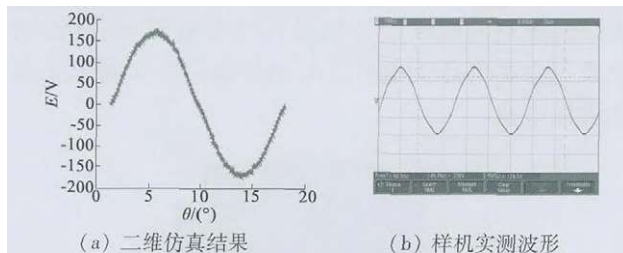


图9 二维仿真结果模型与样机实测反电动势波形比较

3 结 语

(1)应用有限元方法，分析了端部磁钢对永磁无刷直流电动机空载反电动势的影响，重点研究了空载气隙磁密沿电机轴向变化趋势；

(2)提出采用二维等效的方法替代传统耗时较长的三维仿真，通过定义一个端部磁钢系数对二维仿真结果进行修正。有限元仿真数据与样机实测数据刚好吻合，验证该方法的正确性及可行性。

参考文献

- [1] 郭小华. 低成本的正弦驱动直流无刷电机控制系统设计[J]. 微电机, 2010, 43(8): 76-79.
- [2] 周群, 向加其. 无位置传感器无刷直流电机的换相控制[J]. 电机技术, 2008, (5): 20-23.
- [3] 马宏革, 张晓晖. 直流无刷电机的转子位置检测与电机起动的研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2008, (19): 107-108.
- [4] 花为, 程明, 朱孝勇, 等. 端部效应对新型定子永磁型双凸极电机反电动势的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(24): 65-69.
- [5] 邱洪波, 李伟力, 张晓晨, 等. 背绕式定子绕组高速永磁电机三维端部区域电磁场分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 80-87.

- [6] 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 108-111, 127.
- [7] 赵荣理, 王昕, 张爱玲. 无刷双馈电机数学模型的研究和分析[J]. 微特电机, 2013, 41(7): 18-23.
- [8] 胡堃, 何凤有, 薛冰. 深槽式笼型转子无刷双馈电机的仿真分析[J]. 微特电机, 2011, 39(11): 34-36, 43.
- [9] 邓先明, 方荣惠, 王抗, 等. 等距笼型转子无刷双馈电机的有限元分析[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(4): 507-510, 522.
- [10] 许实章. 交流电机的绕组理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [11] 熊飞. 绕线转子无刷双馈电机建模分析和电磁设计研究[J]. 武汉: 华中科技大学, 2010.

作者简介:周韬(1988-)男,硕士研究生,研究方向为电机设计及控制。

(上接第35页)

- [1] WILLAMSON S, FERRERIA A C, WALLACE A K. Generalized theory of the brushless doubly-fed machine (Part1) [J]. IEE Proceedings on Electric Power Applications, 1997, 144(2): 111-122.
- [2] WALLACE A K, SPEE R, LAUW H K. Dynamic modeling of brushless doubly-fed machines [C] // Industry Applications Society Annual Meeting, San Diego, USA, 1989: 329-334.
- [3] RBOERTS P C, MCMAHON R A. Performance of BDFM as generator and motor [J]. IEEE Proceedings on Electric Power Applications, 2006, 153(2): 289-299.
- [4] 卞松江, 贺益康, 潘再平. 级联式无刷双馈电机的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 33-37.
- [5] 高强, 韩力, 李辉, 等. 级联式无刷双馈电机的四种动态数学模型[J]. 微特电机, 2010, 38(3): 18-23.
- [6] 王雪帆. 一种转子绕组采用变极法设计的新型无刷双馈电机