

# 奇偶数槽对永磁无刷直流电机性能的影响

温嘉斌, 杨可新

(哈尔滨理工大学, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要** 介绍了永磁无刷直流电机设计过程中绕组形式的确定, 并利用 Maxwell 2D 有限元软件建立电机模型进行处理, 从而集中分析了电枢奇偶数槽  $Z$  的不同对永磁无刷直流电机性能的影响。结果表明,  $Z$  为奇数的  $Z/p$  会产生不平衡径向磁拉力, 不利于电机的整体性能。

**关键词** 永磁无刷直流电机; 槽极数配合; 不平衡径向磁拉力; 集中绕组

doi:10.3969/j.issn.1008-7281.2012.06.002

中图分类号: TM331 文献标识码: A 文章编号: 1008-7281(2012)06-0006-04

## Influence of Odd and Even Number of Slots on Performance of PM Brushless DC Motor

Wen Jiabin and Yang Kexin

**Abstract** This paper introduces how to determine windings type of PM brushless DC motor in design process. Based on modeling and handling of motor by Maxwell2D finite element software, the influence of odd and even number of slots on performance of the motor is intensively analyzed. The results show that  $Z/p$  will produce the unbalanced radial magnetic pull for the odd number of  $Z$ , so it is not good for overall performance of the motor.

**Key words** PM brushless DC motor; combination of slot/pole number; unbalanced radial magnetic pull; concentrated windings

## 0 引言

随着微电子技术的迅猛发展和永磁材料磁性能的提高, 近些年来永磁无刷直流电机得到了广泛的应用, 并获得了巨大的发展。永磁无刷直流电动机一般由电动机本体、电子开关线路及位置传感器组成。永磁无刷直流电动机具有固定的电枢和旋转的磁场, 电子开关线路可以直接连接电枢绕组, 而位置传感器和电子开关线路则代替了有刷直流电动机中的机械换向器。一般情况下, 无刷直流电机的绕组形式与交流电机相似, 从绕组相数上看, 最为普遍使用的是三相, 按平均到每个极下每相绕组占有的槽数不同分为整数槽绕组和分数槽绕组; 按每个槽内线圈边层数的不同又分为单层绕组和双层绕组或者多层绕组; 按一个线圈两边的跨距不同又分为整距绕组、短距绕组和长距绕组。而无刷直流电机各相绕组之间的连接方式常见的有两种: 星形连接和封闭式连接。

本文分析了无刷直流电机通常采用的分数槽

集中绕组, 并且在其基础上对奇偶数槽的选取所导致电机性能的不同进行了讨论。结果可为无刷直流电机的优化提供一些理论依据。

## 1 槽数与极对数的配合

本设计选择分数槽集中绕组, 分数槽集中绕组电机能够提高槽满率, 有效降低齿槽转矩和转矩波动, 节省铜用量, 提高电机性能, 所以这种集中绕组电机越来越被广泛的应用。

因为电角度  $\alpha = 360^\circ \times \frac{p}{Z}$ , 假设  $\beta = 180^\circ - \alpha$ , 所以  $\beta$  还可以表示为

$$\beta = 180^\circ \times (1 - \frac{2p}{Z}) \quad (1)$$

当  $Z$  为偶数时, 以  $Z = 12, p = 4, m = 3$  为例, 其星形图如图 1 所示, 分相图如图 2 所示。从两图中可见 1 与 6 间的夹角为  $360^\circ/Z$ , 并且可令  $\beta = N \times 360^\circ/Z$ ,  $N$  可以取为 1、2、3... 等整数。所以可得

$$N \times \frac{360^\circ}{Z} = 180^\circ \times (1 \pm \frac{2p}{Z}) \quad (2)$$

最终整理得

$$Z = 2p \pm 2N, N = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

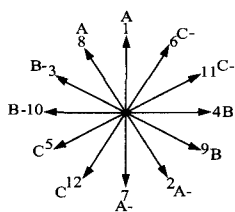


图1 偶数槽永磁电机星形图

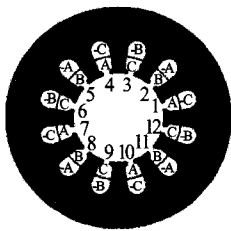


图2 偶数槽永磁电机分相图

当  $Z$  为奇数时,以  $Z=9, p=4, m=3$  为例,如图3、图4所示。同样从两图中可见1与3间的夹角为  $360^\circ/Z$ ,但此时  $\beta \neq N \times 360^\circ/Z$ ,从图中可见  $\beta$  只能被写为

$$\beta = 0.5 \times N \times \frac{360^\circ}{Z}, N = 1, 3, 5 \dots \quad (4)$$

$$N \times \frac{180^\circ}{Z} = 180^\circ \times (1 \pm \frac{2p}{Z}) \quad (5)$$

整理得

$$Z = 2p \pm N, N = 1, 3, 5 \dots \quad (6)$$

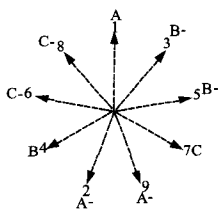


图3 奇数槽永磁电机星形图

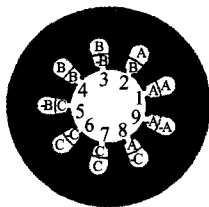


图4 奇数槽永磁电机分相图

最终可得一个统一的公式,即

$$Z = 2p \pm N \quad (7)$$

$$\beta = 180^\circ \times \frac{N}{Z}, N = 1, 2, 3 \dots \quad (8)$$

由式(7)可知若要设计一台节距  $y=1$  的电机,不论  $Z$  为奇数或者是偶数,只要  $Z$  与  $p$  首先是满足分数槽的要求,其次是满足式(7)就可以判定所选择的  $Z$  与  $p$  可以设计出一台  $y=1$  的电机,但从电机绕组系数上考虑,为了能得到较高的绕组系数,  $\beta$  还应满足不大于  $60^\circ$ ,这是为了保证其短距系数不小于  $0.866$ 。通过以上槽数与极对数组组合条件的分析后,本文选择  $Z=12, p=4$  的偶数槽无刷直流电机与  $Z=9, p=4$  的奇数槽无刷直流电机进行对比研究。具体模型见图5、图6。

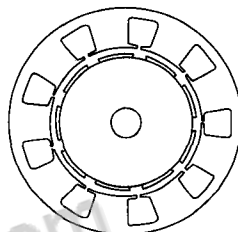


图5 9槽电机模型

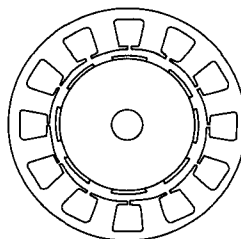


图6 12槽电机模型

## 2 奇偶数槽电机性能的比较

以讨论的9槽与12槽无刷直流电机为代表,通过 Maxwell 软件对二者进行有限元模型的建立,相同额定功率  $1000\text{W}$ ,额定电压  $60\text{V}$ ,额定转速  $2720\text{r/min}$  的条件下,仅改变定子槽数分析奇偶数槽的不同对无刷直流电机性能的影响。图7、图8分别为两电机负载电流曲线。

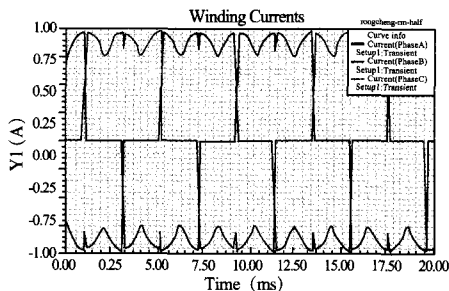


图7 12槽电流波形

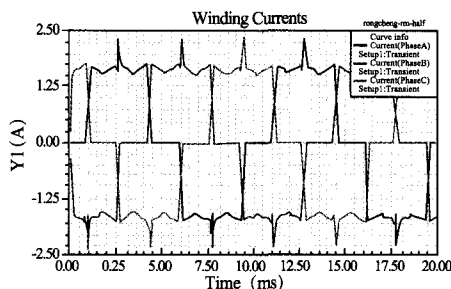


图8 9槽电流波形

比较图7、图8可知,在槽极配合良好的前提下,奇偶数槽无刷直流电机呈现的负载电流波形整体皆相对良好,呈矩形波,都较为理想。偶数槽电机较奇数槽电机波形稍为圆润,波动稍小。

图9、图10为两电机的相反电动势波形,二者波形仍比较均匀圆滑,脉动情况较好。细微比较,偶数槽较奇数槽更为理想,贴近梯形波。

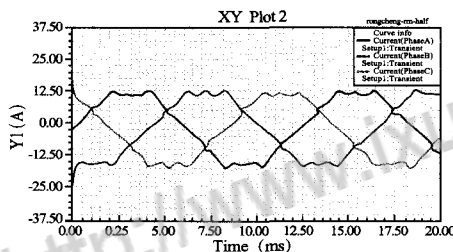


图9 12槽相反电势波形

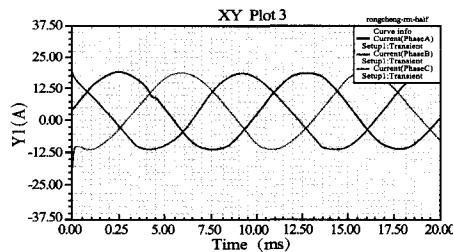


图10 9槽相反电势波形

图11、图12分别为两电机的齿槽转矩波形,如图所示,可以看到偶数槽电机的转矩脉动略小于奇数槽。

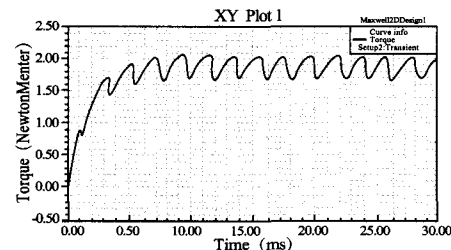


图11 12槽齿槽转矩波形

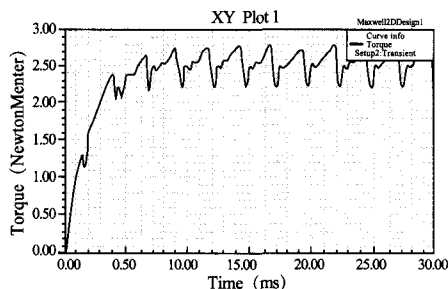


图12 9槽齿槽转矩波形

### 3 奇数槽的不平衡径向磁拉力

Z为奇数时,绕组排列沿着电机气隙圆周360°分为三个区,每相线圈集中到约120°的一个区内,这样,对每一相绕组来说在气隙圆周上的分布是偏向一边的,不平衡的。利用有限元软件仿真出的奇偶数槽电机的磁场分布见图13、图14。

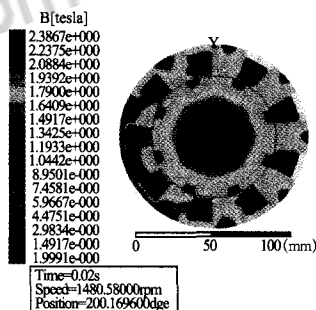


图13 9槽电机磁场分布云图

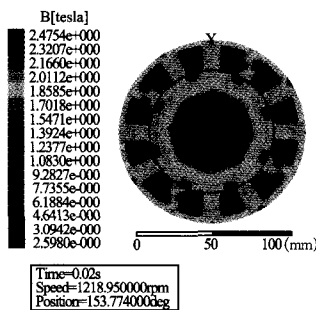


图14 12槽电机磁场分布云图

图中我们可以清楚的看到,偶数槽无刷直流电机磁场分布均匀,而奇数槽电机则存在局部少磁情况。

图15、图16为9槽电机与12槽电机通电时的径向磁拉力分布图。

(下转12页)

问题,建立了二维有限元物理模型,得到了电机空载时的二维磁场分布,对空载气隙波形进行了谐波分析,并进一步得到了电机的空载特性曲线。通过分析可以看出,本物理模型能够对电机内部磁场分布进行观测计算,有利于电机的进一步优化设计及动态运行分析。

#### 参考文献

- [1] 秦明,张坤,郭靖. 中国风电产业发展综述[C]//第十二届中国科协年会. 福州,2011-11-01,2010:1-7.
- [2] 孙国伟,程小华. 变速恒频双馈风力发电系统及其发展趋势[J]. 电机与控制应用,2007,34(1):58-61,64.
- [3] 吴国祥,马炜,陈国呈,等. 双馈变速恒频风力发电

空载并网控制策略[J]. 电工技术学报,2007,22(7):169-175.

- [4] 朱先玲,吴雷. 双馈风力发电系统空载并网控制与实验研究[J]. 电力电子技术,2011(8):86-88.
- [5] 汤蕴璆,梁艳萍. 电机电磁场的分析与计算[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [6] 赵博,张洪亮. Ansoft12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

作者简介:范吉松 男 1981 年生;2007 年毕业于哈尔滨理工大学,硕士,现从事电机电磁场专业工作.

收稿日期:2012-08-29

(上接 8 页)

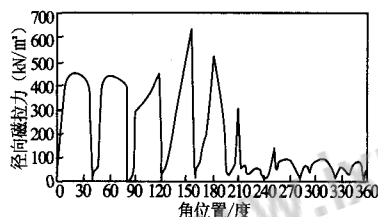


图 15 9 槽电机径向磁拉力分布图

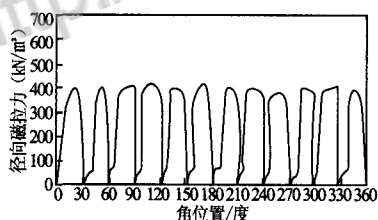


图 16 12 槽电机径向磁拉力分布图

9 槽电机比之 12 槽电机显示出明显的不平衡的径向磁拉力,会引起定子(和转子)的单向偏移。在径向磁场电动机的气隙中,电磁效应产生的切向力、径向力和磁致伸缩力都会引起电磁噪声。径向力是定子和转子之间的吸引力,它是径向磁场永磁电动机电磁噪声的主要来源,对电机的使用来说非常不利。

## 4 结语

由上文分析我们可知,偶数槽永磁无刷直流电机较奇数槽电机有更小的齿槽转矩,整体性能也更为优良。更重要的是奇数槽电机产生的不平衡径向磁拉力对电机有非常不利的影响。所以,槽极配合合理的情况下应尽量选用偶数槽。

#### 参考文献

- [1] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [2] 梁文毅. 表贴式调速永磁同步电动机径向磁拉力分析[J]. 微特电机,2011,25(24).
- [3] M. A. ALHAMADI, Student Member, N. A. DEMERDASH, Fellow. MAGNETS ON THE PERFORMANCE OF BRUSHLESS DC MOTORS.
- [4] 叶金虎. 现代无刷直流永磁电动机的原理和设计[M]. 北京:科学出版社,2005.

作者简介:温嘉斌 男 1961 年生;哈尔滨理工大学教授,哈尔滨工业大学博士后,研究方向为电机、电机控制。

收稿日期:2012-04-26



知网查重限时 **7折** 最高可优惠 **120元**

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: [http://www.paperyy.com/reduce\\_repetition](http://www.paperyy.com/reduce_repetition)

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>

---