

盘式永磁电机的分数槽绕组齿槽转矩分析

上官景仕¹, 范磊², 王琇¹, 范承志^{1*}

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 余杭电力局, 浙江 杭州 311100)

摘要: 由齿槽转矩造成的推力波动是影响盘式永磁电机运行性能的一个重要因素。为削弱齿槽转矩, 采用基于能量法和傅里叶分解的解析分析方法推导出了齿槽转矩解析表达式, 在此基础上研究了分数槽绕组对齿槽转矩的削弱作用, 结合定子槽口宽度对齿槽转矩的影响, 提出了减少盘式永磁电机齿槽转矩的优化方案, 并利用有限元法对此优化方案进行了仿真分析和验证。研究结果证明, 采用分数槽绕组和槽口优化相结合的方法能有效地削弱盘式电机的齿槽转矩。

关键词: 盘式永磁电机; 齿槽转矩; 分数槽; 槽口优化; 三维有限元

中图分类号: TM351; TH39 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)10-1195-03

Cogging torque analysis in disc-type permanent magnet motors with fractional-slot windings

SHANGGUAN Jing-shi¹, FAN Lei², WANG Xiu¹, FAN Cheng-zhi¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Yuhang Electric Power Bureau, Hangzhou 311100, China)

Abstract: Force ripple caused by cogging torque is one of the important issues which prevent the motor from acquiring high performance. Aiming at reducing the cogging torque, an analytical method based on the energy method and the Fourier series was applied to obtain the expression of cogging force. Based on the expressions, a method of weakening cogging torque by adopting fractional-slot windings combined with slot opening optimization was proposed. The results acquired by finite element analysis show that the proposed method of combination of fractional-slot winding and slot opening optimization can effectively reduce the cogging torque in disc-type permanent magnet motors.

Key words: disc-type permanent magnet motors; cogging torque; fractional-slot windings; slot opening; 3D finite element

0 引言

作为直驱式抽油机的核心驱动部分, 大力矩、低速盘式永磁电机在运行时需要考虑齿槽转矩的影响。齿槽转矩是由永磁电机绕组不通电时永磁体与电枢齿间相互作用力的切向分量的波动引起的, 由齿槽转矩造成的推力波动大大影响了永磁电机的运行性能, 造成电机运行时的振动和噪声。因此, 对齿槽转矩削弱方法的研究是永磁电机设计时需要考虑的一个重要因素。齿槽转矩的抑制有很多方法, 如不同极弧系数的组合、斜槽、斜极和电枢上开辅助槽等^[1-3],

但这些方法大多都以外转子永磁电机为研究对象。

本研究采用基于能量法和傅里叶分解的解析分析方法推导出盘式永磁电机的齿槽转矩表达式, 在此基础上提出分数槽绕组对齿槽转矩的削弱方法, 并结合分析槽口宽度对齿槽转矩的影响, 通过槽口优化进一步削弱齿槽转矩。

1 盘式永磁电机齿槽转矩的解析分析

参考文献[1], 齿槽转矩定义为电机不通电时的磁场能量 W 相对位置角 α 的负导数:

$$T_{\text{cog}} = -\frac{\partial W}{\partial \alpha} \quad (1)$$

收稿日期: 2012-07-04

作者简介: 上官景仕(1989-), 男, 浙江温州人, 主要从事永磁电机设计及驱动方面的研究。E-mail: chrisshangguan@163.com

通信联系人: 范承志, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: fanchengzhi@zju.edu.cn

假设电枢铁芯的磁导率无穷大,即 $\mu_{Fe} = \infty$ 。则电机内存储的磁场能量近似为电机气隙和永磁体中的磁场能量之和,得到:

$$W \approx W_{\text{airgap}} = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV \quad (2)$$

式中: μ_0 , B —真空磁导率和气隙磁密。

气隙磁密沿电枢表面的分布可近似表示为:

$$B(\theta, \alpha) = B_r(\theta) \frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \quad (3)$$

式中: θ —空间电角度, $\theta=0$ 的位置设定在某一参考磁极的中心线上, θ 表示定、转子间的相对位置角。 $B_r(\theta)$, $\delta(\theta, \alpha)$, $h_m(\theta)$ —永磁体剩磁、有效气隙长度、永磁体充磁方向长度沿圆周方向的分布。

因此有:

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B_r^2(\theta) \left[\frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \right]^2 dV \quad (4)$$

进一步将有关参数进行傅里叶分解,令:

$$B_r^2(\theta) = B_{r0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_m \cos 2np, \quad (5)$$

$$[h_m(\theta)/(h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha))]^2 = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \cos nz\theta$$

再对位置角 α 求导,进而得到齿槽转矩的表达式为:

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi z L_a}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{r \frac{nz}{2p}} \sin(nz\alpha) \quad (6)$$

式中: L_a —电枢铁心的轴向长度; R_1 , R_2 —电枢外半径和定子轭内半径; Z —电枢槽数; p —电机极对数; n —使 $nz/(2p)$ 为整数的整数; G_n , $B_{r \frac{nz}{2p}}$ —相关的傅里叶系数。

可以看出并,不是 $B_r^2(\theta)$ 所有的傅里叶分解系数都对齿槽转矩有影响,只有 $nz/(2p)$ 次傅里叶系数才对齿槽转矩有作用。

2 分数槽绕组对齿槽转矩的影响

在交流电机中,三相绕组的每极每相槽数为 $q = z/(2mp)$, 当其不为整数时的绕组称为分数槽绕组。整数槽绕组在任意时刻,定子磁极和电枢齿槽的相对位置对所有磁极来说都是一样的,因此所有动子磁极所受的齿槽转矩都是同相位的,因其相互叠加而使齿槽转矩增大。但采用分数槽绕组时,由于每极所占的槽数为分数,任一时刻各磁极所受齿槽转矩具有一定的相位差,研究者通过合理设置齿间的相位可有效减小齿槽转矩^[4]。

分数槽绕组的最大优点之一就是本身已具有对低阶齿槽转矩的削弱功能^[5],因此研究者在设计时,根

据具体情况选择适当的极槽比,能有效削弱齿槽转矩^[6],相对其他齿槽转矩削弱方法能减少电机结构的复杂性和加工复杂度。

在分数槽绕组结构下,电机齿槽转矩基波次数等于定子槽数 z 和极数 P 的最小公倍数 (LCM)^[7],即:

$$LCM(z, P) = \gamma z \quad (7)$$

式中: γ —整数。

将磁极分为 P/γ 组,每组 γ 个磁极之间的齿槽转矩都存在一定的相位差, P 为极数,为便于表述,令:

$$T_{zn} = \frac{\pi z L_a}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) n G_n B_{r \frac{nz}{2p}} \quad (8)$$

在式(6)的基础上,本研究得到分数槽绕组时盘式电机总的齿槽转矩^[8]为:

$$T_{\text{cog总}} = \frac{P}{\gamma} \sum_{h=0}^{\gamma-1} \sum_{n=1}^{\infty} T_{zn} \sin \left(nz \left(\theta - \frac{2\pi}{z\gamma} h \right) \right) \quad (9)$$

通过求和,化简上式为:

$$T_{\text{cog总}} = P \sum_{n=1}^{\infty} T_{zn} \sin(\gamma n z \theta) \quad (10)$$

可见低次谐波均被消去,仅 γn 次谐波分量。参考文献[7]中所讨论的三相分数槽集中绕组 z/P 组合列表,该设计中盘式电机的极槽数为 64 极 168 槽。根据以上分析,削弱齿槽转矩仅剩 $8n$ 次谐波,进而可有效地削弱齿槽转矩的低次谐波。

3 槽口宽度对齿槽转矩的影响

齿槽转矩是由电枢开槽引起的,槽口越大,齿槽转矩也越大。可通过减小槽口宽度,进一步减小齿槽转矩,由式(5)得:

$$G_n = -\frac{2}{n\pi} \left(\frac{h_m}{h_m + \delta} \right)^2 \sin \left(\frac{nz\theta_s}{2} \right) \quad (11)$$

式中: θ_s —槽口宽度,用弧度表示。

从式中可知,最直观的减小齿槽转矩的方法是减小定子槽开口宽度或采用磁性槽楔,或在可能的情况下,采用闭口槽、磁性槽楔或无齿槽铁心。但减小定子槽开口宽度会增加嵌入绕组难度,采用闭口槽则会减小电机出力,使定子结构复杂化^[9-10]。

本研究在分数槽绕组的基础上使齿槽转矩削弱至仅存在 γn 次谐波分量,因此将式(11)变换为:

$$G_{n\gamma} = -\frac{2}{n\gamma\pi} \left(\frac{hm}{hm + \delta} \right)^2 \sin \left(\frac{n\gamma z \theta_s}{2} \right) \quad (12)$$

当 $n=1$, 齿槽转矩为 $\gamma(\gamma=8)$ 次分量,使 $z\gamma\theta_s/2 = \pi$, 求得 $\theta_s = 0.2344^\circ$ 。原槽口宽度 $\theta = 1.146^\circ$, 因此在原有槽口宽度的基础上适当减小槽口宽度至 $\theta_s = 4 \times 0.2344^\circ = 0.9376^\circ$, 得到 $z\gamma\theta_s/2 = 4\pi$ 。则针对 $n\gamma$ 次谐波 $z\gamma\theta_s/2 = 4n\pi$, 得到 $G_{n\gamma} = 0$, 从而削弱了所有

高次谐波。

4 有限元验证

为验证上述提出的削弱盘式永磁电机齿槽转矩方法的有效性,本研究应用有限元软件 Maxwell 进行电磁场分析和齿槽转矩的计算。

本研究以应用于抽油机的盘式永磁电机为仿真对象,基本参数如表 1 所示。

表 1 盘式永磁电机的基本参数

定子内径/mm	1 000	电机总槽数 z	168
定子外径/mm	1 500	磁极角度 β	0.75 极距
电机极数 P	64	永磁体厚度/mm	10

本研究根据表 1 中参数建立电机有限元模型进行仿真。

分数槽绕组情形时,齿槽转矩的仿真结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,分数槽绕组对齿槽转矩有较大影响,通过设置合理的极槽数可有效地减小齿槽转矩,分数槽绕组齿槽转矩峰值为 $350.451 \text{ N}\cdot\text{m}$,优化前为 $2\,477.856 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

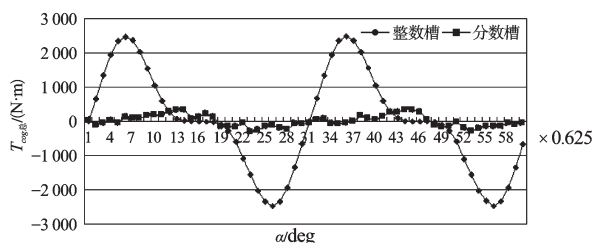


图 1 分数槽对齿槽转矩的影响仿真曲线

本研究在采用分数槽绕组的基础上对槽口进行优化选择后的仿真曲线如图 2 所示。

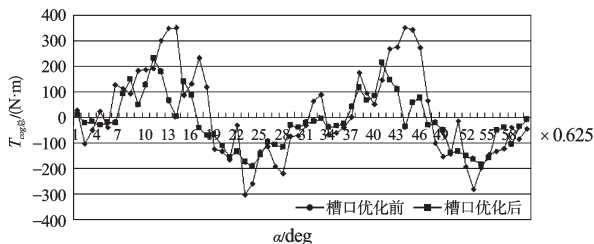


图 2 槽口优化前后的齿槽转矩仿真曲线

由仿真曲线可知,优化后的齿槽转矩峰值减小为 $229.946 \text{ N}\cdot\text{m}$,为优化前 $2\,477.856 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的 9.28%,齿槽转矩得到进一步减小。

永磁盘式电机实物如图 3 所示。实验证明,本研究所提出的优化方案能用于有效减小盘式永磁电机的齿槽转矩,符合实际应用要求。

5 结束语

本研究利用电磁场仿真分析,参考旋转电机的齿槽转矩分析方法,推导出了盘式永磁电机的齿槽转矩

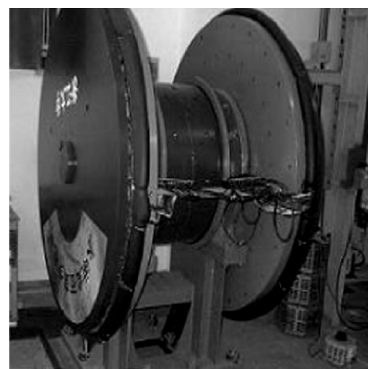


图 3 盘式永磁电机实物图

表达式。根据表达式,通过合理地选择极数和槽数来构成分数槽绕组,以削弱齿槽转矩的低次谐波。在分数槽绕组的基础上,本研究分析了定子齿槽槽口宽度对齿槽转矩的影响,在考虑工程实际应用效果和经济性的基础上,通过合理选择槽口宽度,削弱了齿槽转矩的高次谐波。

最后,本研究应用三维有限元分析软件进行软件仿真验证,仿真结果显示,通过采用分数槽绕组和槽口优化相结合的方法可有效地减小齿槽转矩。

参考文献(References):

- [1] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] ZHU Z Q, HOWE D. Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines [J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2000, 15 (14): 407-212.
- [3] 周俊杰,范承志,叶云岳. 盘式永磁电机齿槽转矩的分析和抑制[J]. 机电工程,2009,26(2):79-81.
- [4] 蔡炯炯,卢琴芬,叶云岳. PMLSM 推力波动分析及其优化设计[C]//全国直线电机现代驱动及系统学术年会. 焦作: [出版者不详],2010:84-88.
- [5] 莫会成. 分数槽集中绕组永磁交流伺服电动机齿槽转矩分析[J]. 微电机,2011,44(8):1-5.
- [6] GÜEMES J A, IRAOLAGOITIA A M, FERNÁNDEZ P, et al., Comparative Study of PMSM with Integer-slot and Fractional-slot Windings [C]//International Conference on Electrical Machines (ICEM). Rome: [s.n.], 2010:1-6.
- [7] 谭建成. 无刷直流电动机分数槽集中绕组槽极数组合规律研究[J]. 微电机,2008,41(2):74-88.
- [8] DOSIEK L, PILLAY P. Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines [C]//Industry Applications Conference. Tampa: [s.n.], 2006:44-49.
- [9] JAHNS T M, SOONG W L. Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac motor drives—a review [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1996, 43(2):321-330.
- [10] 张颖. 定子槽开口宽度对永磁无刷直流电机定位转矩的影响[J]. 湖南工程学院学报,2010,20(1):28-30.

[编辑:李辉]