

集中绕组永磁无刷电机的转矩研究

吴敬爱, 朱东起, 姜新建

(清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 集中绕组永磁无刷电机由于绕组结构与常规 60 相带分布绕组不同, 定子磁动势的谐波含量增加, 定子齿、槽的影响也加大。本文采用电机磁能虚位移原理计算电机转矩, 并编制了计算软件, 不仅可以计算电机的平均电磁转矩, 还可以得到由谐波磁场产生的谐波脉动转矩。通过实例计算, 本文还比较了整数槽绕组和分数槽绕组产生谐波转矩的情况, 采用分数槽绕组可以削弱谐波脉动转矩。

关键词: 集中绕组永磁无刷电机 (CWBLPM Motor); 能量虚位移法; 转矩

中图分类号: TM921.51

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2003)03-0059-05

1 引言

永磁无刷电动机由于功率因数高, 效率高等优点, 在数控机床进给系统及机器人伺服驱动中早已得到广泛应用, 近些年来随着家电行业由常规单相异步电机驱动向变频调速发展, 其传动部分很多都采用了变频永磁无刷电机调速系统, 加之用永磁无刷直流电机代替普通换向器直流电机成为发展趋势, 因此永磁无刷电机调速系统有广阔的发展前景。

小容量永磁无刷电机大都采用三相单层集中绕组, 图 1 表示三相 4 对极 12 槽电机, 每对极只占有 3 个槽, 分别放置三相线圈。

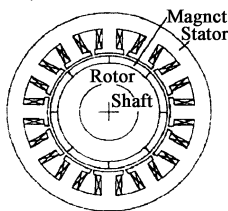


图 1 4 对极 12 槽电机模型

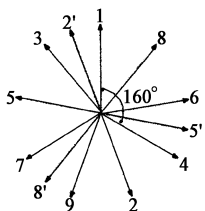


Fig. 1 8 poles 12 slots motor Fig. 2 Coil EMF vectors

这种电机制造方便、成本低, 并可减少绕组铜损耗, 提高电机的效率。但这种绕组将定子磁动势中谐波含量增加, 定子齿、槽的影响也增大。常规的电机转矩计算方法只能计算基波磁场作用下产生的平均电磁转矩, 应用电磁场数值计算方法, 虽然可以较精确地得出电机转矩, 但是计算复杂、工作量大, 为

此本文采用电机磁能虚位移原理来计算电机的转矩, 它可以计算包括谐波磁场作用在内的电机总电磁转矩, 而且物理概念清晰, 计算简便。

2 绕组特点

与常规 60 相带三相叠绕组不同, 小容量集中绕组永磁无刷电机的每相线圈放置在相邻的两个槽中, 即线圈是套在定子的一个齿上。根据每对极包含的定子槽数的不同, 集中绕组永磁电机又可分为每对极为整数槽绕组和每对极为分数槽绕组两种。

2.1 每对极整数槽绕组

举例说明: 极对数 $p = 4$, 定子槽数 $Q = 12$

定子槽数与极对数的关系为 $Q/p = 3$, 每对极包含三个定子齿、槽, 三个齿上的线圈分别属于三相, 多极对数的电机再将他们串联、并联构成三相绕组。其特点为:

每极每相槽数 $q = \frac{1}{2}$; 线圈的节距为短距 $y =$

$\frac{2}{3}$; 相邻两槽电角度 $= \frac{p \times 360^\circ}{Q} = 120^\circ$

电机的绕组因数:

$$K_{d1} = 1; k_{p1} = \sin y \frac{1}{2} = 0.866;$$

$$K_{\Phi 1} = K_{d1} K_{p1} = 0.866$$

2.2 每对极分数槽绕组

分数槽绕组的定子槽数比整数槽绕组更少, 一

收稿日期: 2002-10-21

作者简介: 吴敬爱 (1977-), 女 (朝鲜族), 吉林籍, 硕士, 研究方向为电力电子技术与电力传动;

朱东起 (1938-), 男, 江苏籍, 教授, 研究方向为电机及其控制, 电力电子技术。

般 $Q/p < 3$, 但必须满足 $Q/3 = \text{整数}$, 才能构成三相
对称绕组。下面举例说明其绕组构成: 极对数 $p =$
4, 定子槽数 $Q = 9$ 。

每对极槽数: $\frac{Q}{p} = \frac{9}{4} = 2 \frac{1}{4}$; 绕组节距: $y_1 = 1$;

极距: $= \frac{Q}{2p} = \frac{9}{8}$; 节距系数: $y = \frac{y_1}{9} = \frac{8}{9}$;

相邻两槽电角度: $= \frac{p \times 360^\circ}{Q} = 160^\circ$

画出每个线圈的电动势星形相量图如图 2 所示, 将 2, 5, 8 三个电动势相量反方向, 成为 2', 5', 8' 电动势相量。1, 2', 3 三个相量构成 A 相电动势相量; 4, 5', 6 三个相量构成 B 相电动势相量; 7, 8', 9 三个相量构成 C 相电动势相量。

画出三相绕组连接图如下:

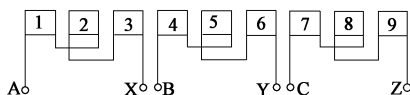


图 3 绕组连接图

Fig. 3 Winding connection graph

相邻两个电动势相量的电角度: $= 20^\circ$

每相的串联的线圈数: $q = 3$

电机的绕组因数:

$$K_{d1} = \frac{\sin q \frac{\gamma}{2}}{q \sin \frac{\gamma}{2}} = 0.96;$$

$$K_{p1} = \sin y \frac{\gamma}{2} = 0.9848;$$

$$K_{dp1} = 0.9454$$

这种绕组比每对极为整数槽的绕组因数大。

3 转矩计算

永磁无刷电动机为一种自控式同步电动机, 逆变器通电方式往往采用三相 6 拍导通方式, 每一瞬间都有两相同时通电, 有一相不通电。在这种通电方式下, 常规的 60 相带三相叠绕组产生的磁动势在电机圆周上是对称分布的, 而集中绕组在电机圆周上分布不对称, 会有丰富的谐波磁动势。另外, 永磁体产生的气隙磁场一般为梯形波, 除基波外还包含了较大的三次谐波。

常规的转矩计算方法, 只能计算基波磁场作用下产生的平均电磁转矩, 为此本文采用电机磁场能量虚位移原理来计算电机的转矩。它可以计算包括

谐波磁场作用的总的电磁转矩。

由电机的能量守恒可导出电磁转矩

$$T = - p \frac{\partial W_m}{\partial \theta} \quad (1)$$

其中 θ : 转子位移角(电角度)

W_m : 电机的磁场储能

对于永磁电机来说, 电机的磁能包括三个部分

$$W_m = W_{m1} + W_{m2} + W_{m21}$$

W_{m1} : 定子电流产生的磁能

W_{m2} : 转子永磁体产生的磁能

W_{m21} : 转子在定子中产生磁链与定子电流作用产生的磁能

经过推导, 可以得到永磁电机的转矩公式为^[2]:

$$T = p \left[\frac{1}{2} i_{10}^2 \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} - \frac{\partial W_{m2}}{\partial \theta} + i_{10} \frac{\partial \lambda_{12}}{\partial \theta} \right] = T_1 + T_2 + T_3 \quad (2)$$

式中: i_{10} ——定子相电流; L_{11} ——定子绕组自感

λ_{12} ——永磁体在定子一相绕组中产生的磁链

电磁转矩每个分量的物理意义为:

第一项: 定子电流产生的磁阻转矩, 对表面永磁电机, $L_d = L_q$ 即 L_{11} 不随 θ 变, 因而转矩为 0; 对于内埋式永磁电机 $L_d \neq L_q$, L_{11} 随 θ 而变, 会产生磁阻转矩。

第二项: 永磁体产生的磁阻转矩, 对于 60 相带分布绕组, 由于每极每相槽数 q 较大(一般 2 以上), 可认为气隙磁能 W_{m2} 不随转子的转动变化, 但对于集中绕组, 齿槽对 W_{m2} 的变化将会产生脉动转矩。

第三项: 这是电机产生的主转矩, 是由定、转子磁动势相互作用产生的。

下面具体说明利用能量虚位移法求集中绕组永磁无刷电机转矩的计算方法。图 4 为集中绕组式永磁无刷电机的展开图。这是一个表面永磁体电机, 由于 dq 轴磁阻相等, 计算转矩时, 第一项磁阻转矩 T_1 为零。

其中: L_{1f} ——定子齿宽;

l_c ——电机轴向长度;

l_g ——气隙长度;

r_g ——气隙半径;

θ ——转子 N 极中心与定子一个齿的中心之间的夹角(重合时设为零)

永磁体磁势分布表达式为:

$$F = F_{m1} \cos \theta + F_{m3} \cos 3\theta + K \quad (3)$$

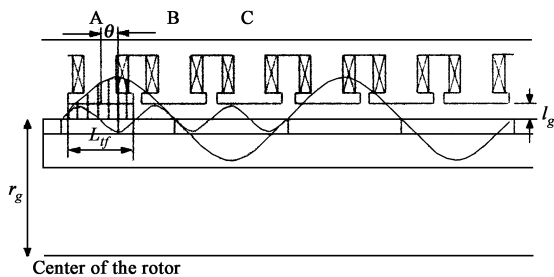


图 4 集中绕组永磁无刷电机的展开图
Fig. 4 CWBLPM motor developed representation

式中: F_{m1} 是永磁体磁势的基波幅值;

F_{m3} 是三次谐波磁势的幅值;

是转子坐标轴的电角度(N 极中心为 0°)。

首先只考虑基波磁势,则第 j 个齿对应的基波磁势

为
$$F_j = \frac{(j-1)\frac{2\pi}{Q} + \frac{\pi}{2}}{(j-1)\frac{2\pi}{Q} - \frac{\pi}{2}} F \cos d \quad (4)$$

得到第 j 个齿的磁势后,可以根据欧姆定律得到第 j 个齿的磁通,磁通除以每一个齿中穿过磁力线的面积,就可以得到平均磁密,然后根据 w_{2j} 计算公式得到每个齿中永磁体产生的能量。能量对转子位移角的微分就是永磁体产生的电磁转矩 T_{2j} 。计算定、转子相互作用产生的电磁转矩时,为了使同样电流幅值得到最大的转矩,控制 $id = 0$,对永磁体无去磁作用,根据三相电流表达式可求出主转矩 T_{3j} 。由此可得到电机的总电磁转矩。采用同样的方法也

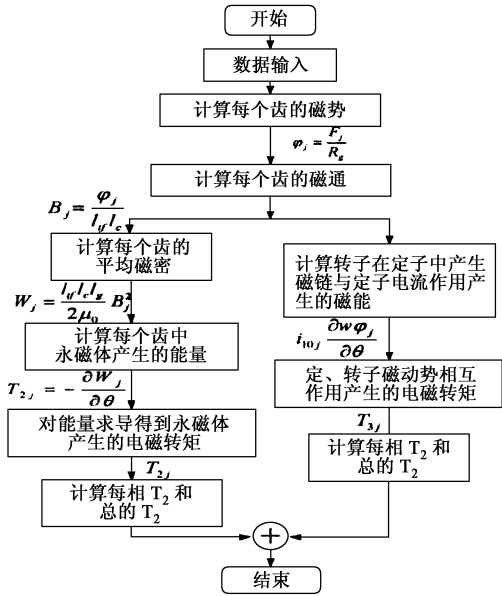


图 5 求电机转矩的流程图
Fig. 5 Flowchart of calculating torque of motor

可以计算永磁体三次谐波作用下的电机转矩。

计算电机转矩的流程图示于图 5。

4 应用实例

下面比较 4 对极 9 槽(每对极分数槽)电机和 4 对极 12 槽(每对极整数槽)电机的转矩。两种电机的转子材料及尺寸完全一样,定子的外径也一样,只是每个齿的宽度不一样。其参数如下表。

表 1 电机参数表

Tab. 1 Parameters of motor

| | 9 槽电机 | 12 槽电机 |
|-------------|-----------|-----------|
| 极对数 | 4 | 4 |
| 额定电流 | 2.5A | 2.5A |
| 转子轴长 l_c | 64mm | 64mm |
| 气隙长度 l_g | 0.75mm | 0.75mm |
| 齿宽 l_t | 12.1183mm | 10.5785mm |
| PM 基波磁势幅值 | 1500A | 1500A |
| PM 三次谐波磁势幅值 | 500A | 500A |

对两种电机均采用三相六拍导通方式,每一瞬间均有两相绕组同时通电,分别计算永磁体基波磁场与三次谐波磁场作用下电机的转矩,如图 6 所示。

从图 6 可以看到,永磁体基波磁场作用下,电机产生的电磁转矩除平均转矩外还产生了 6 次谐波转矩。在永磁体 3 次谐波磁场作用下,电机产生的平均电磁转矩为零,但在 4 对极 12 槽电机中仍会产生 6 次谐波转矩。

对 12 槽整数槽绕组和 9 槽分数槽绕组的转矩比较可得出:

- 1) 当基波磁势的幅值一样时,12 槽的总电磁转矩的平均值比 9 槽的总电磁转矩的平均值要大;
- 2) 当基波磁势的幅值一样时,12 槽电机的电磁转矩脉动比 9 槽电机的脉动要大;
- 3) 考虑 3 次谐波时,由 12 槽电机产生的脉动电磁转矩明显比 9 槽的电机大。

5 结论

(1) 对于集中绕组永磁无刷电机,采用电机能量虚位移法计算电机的转矩,不仅可得到电机的平均转矩,还可得到谐波脉动转矩,其中最主要的是 6 次谐波转矩。

(2) 谐波转矩的产生主要是由于绕组结构、通电方式、定子齿槽影响等因素引起的,采用每对极分数槽绕组可以削弱谐波脉动转矩。

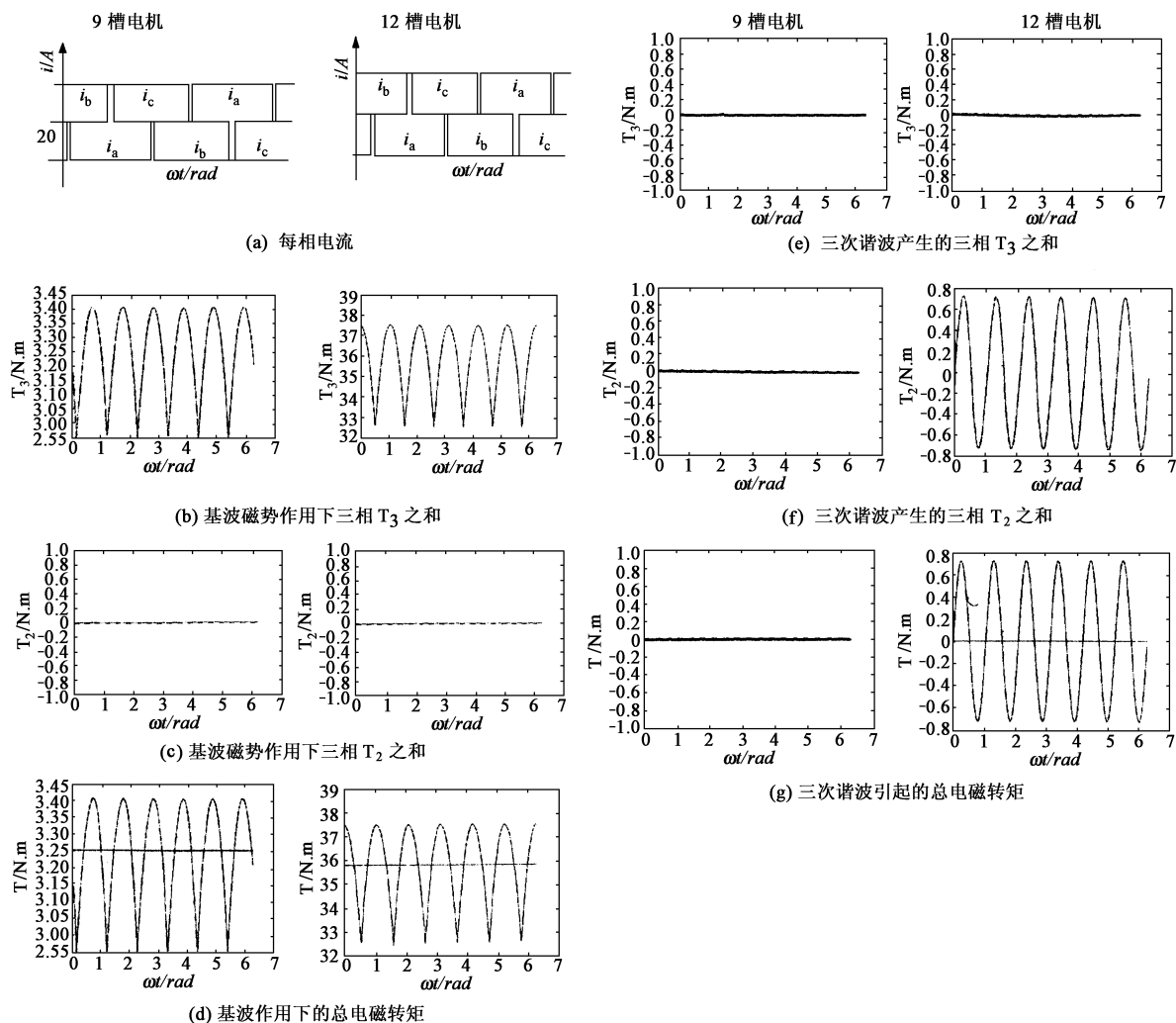


图6 电机转矩

Fig. 6 Motor torque

参考文献 (References):

- [1] M Marinescu, N Marinescu. Numerical computation of torque in permanent magnet motors by Maxwell stresses and energy method [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1988, 24 (1): 463-466.
- [2] Kazuo Ohnishi, Iwao Sugiyama, Fumio Tajima. Reduction of cogging torque in permanent magnet motors [A]. 平成6年电气学会产业应用部门全国大会 (JIEE IAS, 1994) [C]. Japan, 1994. 125-130.
- [3] Touzhu Li, Slemom G. Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet motors [J]. IEEE. Trans. on Magnetics, 1988, 24 (6): 2901-2903.
- [4] 陈阳生, 林友仰, 陶志鹏 (Chen Yangshen, Lin Youyang, Tao Zhipeng). 无刷直流电力矩的解析计算 (Calculation of torque in brushless DC motor) [J]. 中国电子工程学报 (Proc. of the CSEE), 1995, (7): 253-260.
- [5] Coulomb J L. Finite element implementation of virtual work principle for magnetic or electric force and torque computation [J]. IEEE Trans. Magnetics, 1984, 20(5): 1894-1896.
- [6] 王秀和, 李岩, 吴延中, 等 (Wang Xiuhe, Li Yan, Wu Yanzhong, et al.). 径向充磁永磁电机永磁体工作点的确定 (Working point determination of radial-magnetized permanent magnet in PM machine) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 1998, 17(3): 44-46.
- [7] K Reichert, H Freudl, W Vogt. The calculation of forces and torques within numerical magnetic field calculation methods [A]. COMPUMAG 1976 [C]. Oxford, UK, 1976.
- [8] Sang-Moon Hwang, Jae-Boo Eom, Geun-Bae Hwang, et al. Cogging torque and acoustic noise reduction in permanent magnet motors by teeth pairing [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2000, 36(5): 3144-3146.

- [9] Sang-Moon Hwang, Jae-Boo Eom, Yoong-Ho Jung, et al. Various design techniques to reduce cogging torque by controlling energy variation in permanent magnet motors [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2001, 37(4): 2806-2809.

trolling energy variation in permanent magnet motors [J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2001, 37(4): 2806-2809.

Calculating torque of concentrated winding brushless PM motor

WU Jing-ai, ZHU Dong-qi, JIANG Xin-jian

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In small capacity brushless PM motor the stator adopts mostly three-phase monolayer concentrated winding. In concentrated winding brushless PM motor, because of the effect of winding's magnetic motive force and slot there is ripple in torque. The paper describes how to calculate the torque of concentrated winding brushless PM motor by using the energy method.

Key words: concentrated winding brushless PM motor (CWBLPM); energy method; torque

(上接第31页, cont. on p.31)

系统模型,使输入工作直观而且快速,大幅度减轻了输入工作量。此外,模型还可以通过传统设计方法或数据库方式得到。本文提供两种方法——网格插值法和迭代法求解动态微分方程组,动态特性计算结果用图形形式直观地显示出来,从而使许多冗繁而枯燥的数据变得生动有趣了。借助 ANSYS 软件推导出磁路模型气隙磁导公式为计算结果的准确性提供了可靠保证,实验结果也证明了这一点,所以该软件具有较强的通用性。面向对象技术,可视化技术,人机交互技术等综合应用后,其所具有的强大功能在本软件系统中表现得淋漓尽致。

参考文献 (References):

- [1] 吴重光 (Wu Zhongguang). 仿真技术 (Simulation Technique) [M]. 北京: 化学工业出版社 (Beijing: Chemical

Industry Press), 2000. 117-136.

- [2] 潘爱民,王国印译, David J Kruglinski 著. Visual C++ 技术内幕 (Programming in Visual C++) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1999. 671-722.
- [3] 夏天伟,丁明道 (Xia Tianwei, Ding Mingdao). 电器学 (Electric Apparatus Theory) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1999. 7-16.
- [4] Chen Degui. Application of visualization in scientific computation for low voltage apparatus [A]. Proceedings of the Int. conf. on Electrical Contacts, Electromechanical Components and their Application [C]. Nagoya Japan, 1999. 263-267.
- [5] T Yamaguchi, Y Kawase, H Shiomoto, et al. 3-D finite element analysis of dynamic characteristics of twirtype electromagnetic relay [J]. IEEE Trans. on Magn., 2002, 38(2): 361-364.

Dynamic characteristics of DC contactor electromagnetic system and its visual simulation

ZHANG Jing-shu, CHEN De-gui, XIANG Hong-gang, LIU Gang, HUANG Lin-min

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, the software of electromagnetic system design and characteristics calculation is developed using Object-Oriented Programming, visualization technology and human-computer interaction technology, which makes it convenient to create 3D model. The dynamic characteristics of DC contactor electromagnetic system can reflect the working behavior in practice. Two methods — two-variable interpolation method and iteration method are proposed to solve the dynamic differential equations. The equivalent magnetic conductance formulas are derived by applying software ANSYS. The computation results of the static and dynamic characteristics are in better agreement with the experiment.

Key words: DC contactor; ANSYS software; dynamic characteristics; visualization simulation; OpenGL