

永磁无刷直流电动机的静动态特性分析

王淑红 刘会飞 熊光煜

太原理工大学电气动力学院,山西太原(030024)

摘要 利用 Ansoft软件分析计算了空载和负载时,永磁无刷直流电动机(BLDCM)的磁场分布、静态特性,并在此基础上讨论了几种减小此种电机转矩脉动的方法。同时用 Ansoft/transient软件对电机起动和突然改变负载时的动态特性进行了仿真。静动态特性的分析结果对设计、使用该种电机,特别是对电机控制系统的设计有参考价值。

关键词 永磁无刷直流电动机 静态特性 动态特性

中图分类号 TM351 文献标识码 A 文章编号 1008 - 7281(2005)06 - 0017 - 04

Characteristic Analysis of Permanent Magnet Brushless DC Motor at Static and Dynamic State

Wang Shuhong, Liu Huifei and Xiong Guangyu

Abstract Magnet field distribution and static characteristic of permanent magnet brushless dc motor (BLDCM) at no-load and load are analyzed and calculated by Ansoft software and various methods of reducing torque pulsation of this kind of motor are discussed on this basis. In the meantime, dynamic state characteristic of motor during starting and transient load changing are simulated by Ansoft/transient software. Analytic results can be referred for design and using of this kind of motor in particular for design of controlling system.

Key words Permanent magnet brushless dc motor, static state characteristic, dynamic state characteristic

1 引言

由于永磁无刷直流电动机(BLDCM)具有效率高、转动惯量小、控制方便、控制精度高等优点,在自动控制、航空航天、汽车工业和家用电器等领域都得到了越来越广泛的应用^[1]。但由于定转子齿槽及电枢反应的存在,使得就正弦型 BLDCM而言,绕组的反电势并非正弦型;而方波型 BLDCM反电势并非理想的梯形波,其中含有较大的齿谐波磁场,会引起电机转矩的脉动,电机的振动和噪声。如何减小电磁转矩的脉动是近年来从事电机研究的人员普遍关心的问题,而要分析电磁转矩的脉动,首先就应分析电机气隙磁场的分布。本文在有限元分析电机内电磁场分布的基础上提出减小电机转矩脉动的一些方法,并同时电机起动和突然改变负载时的动态过程进行了仿真。

2 静特性

图1为求解过程中所使用样机的结构图。我们讨论的是一台转子采用稀土瓦型磁极的外转子电机,定子绕组分A、B、C、D四相,采用四相四状态通电方式,每一运行状态下只有一相绕组导通,转子每转过90电角度进行一次换相。电机是通过转子位置传感器控制逆变器的触发信号来实现同步的,逆变器响应触发信号使电流以一定的顺序流过定子绕组。定子绕组导通的顺序不同则电机的转向不同。

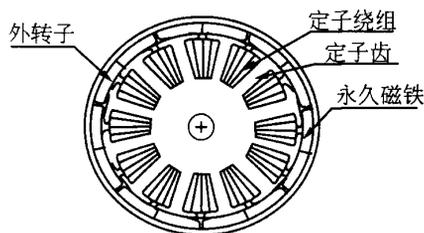


图1 电机结构

收稿日期:2005-08-16.

王淑红 女 1965年生;太原理工大学教师,在读博士,主要从事特种电机方面的研究.

假设：(1)忽略电机端部的影响,对电机进行二维场分析

$$A = A_z$$

(2)忽略材料的各向异性

由电磁场理论分析可知,电机中的电磁场总是满足泊松方程(在考虑整个电机时 Ansoft 软件是用矢量磁位来求解)

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 A_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \theta^2} = -\mu J_z \\ S_1: A_z = A_{z0} \\ S_2: \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial r} = q \end{cases} \quad (1)$$

要直接求解上述偏微分方程的边值问题,数学分析中很难求出精确的解析解,而随着计算机容量的增大和计算速度的加快,许多情况下对上述方程进行数值分析。

有限元法将上述偏微分方程的边值问题等价于能量泛函的求极值(条件变分)问题,进而等价于求解区域磁场能量函数的求极值问题,将求解区域进行剖分,通过求磁场能量的极小值,即可求出各节点的矢量磁位 A_z ,而利用

$$\begin{cases} B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} \\ B_\theta = -\frac{\partial A_z}{\partial r} \end{cases} \quad (2)$$

可求出求解区域中各点对应的磁通密度以及磁场强度。如图 2 所示为用有限元分析软件—Ansoft 求解所得的电机空载时由永久磁铁单独作用所产生的气隙磁场分布图。

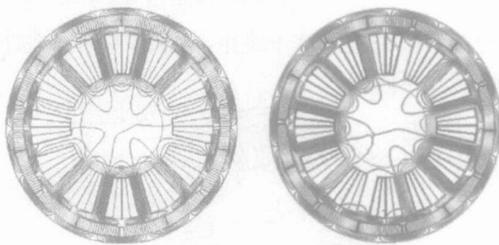


图 2 空载转子不同位置时电机磁场分布

图 3 为此时磁通密度(绝对值)沿圆周的分布波形(计算所用样机:外转子永久磁铁共 14 极,内定子铁心共 12 个齿)。从图 3 中可以清楚地看到即使不考虑电枢反应的影响,由于定子齿

槽的存在,空载时电机气隙磁密分布也并非理想的梯形波,这势必引起电机负载时电磁转矩的脉动。

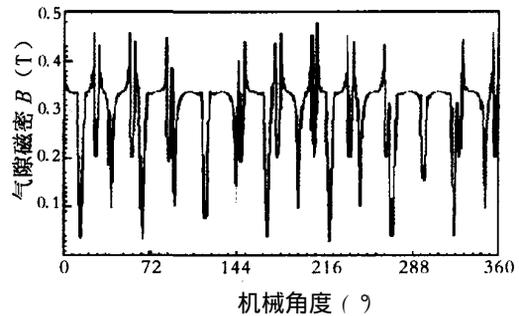


图 3 空载时 ($\theta = 0^\circ$) 气隙磁密沿圆周分布

图 4 为只考虑电枢反应(仅 A 相绕组通电,电机采用四相通电方式)时,转子处于不同位置时,电机气隙中磁场分布图。图 5 为此时气隙磁密(绝对值)沿电机圆周分布曲线。对比图 3 和图 5 可见永磁无刷直流电机内的磁场主要由永久磁铁产生,通电方式不变时电枢反应磁场分布与转子所处位置关系不大,电枢电流所产生磁场较弱,这有利于减小转矩的脉动。但由于齿槽存在,气隙磁阻变化较大,电枢反应磁密变化较大。

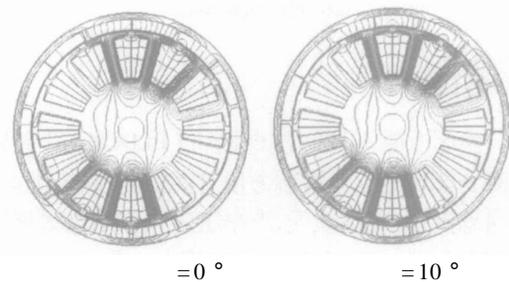


图 4 A 相绕组通电转子不同位置时磁场分布

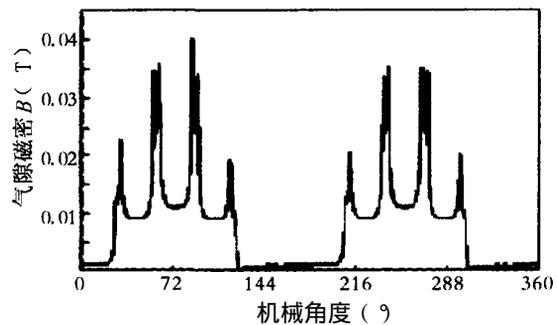


图 5 A 相绕组通电 ($\theta = 0^\circ$) 时磁密沿圆周分布

图 6 为电机负载,转子处于不同位置时电机磁场分布图,图 7 为 $\theta = 0^\circ$ 时,合成磁场(磁通密度绝对值)沿气隙圆周的分布,比较图 3 和图 7 可见电枢反应将引起磁场谐波分量的增加,这将会

引起电磁转矩的脉动。

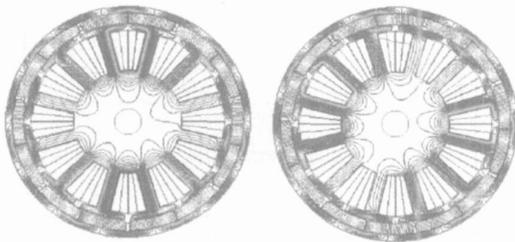


图6 负载转子处于不同位置时电机磁场分布

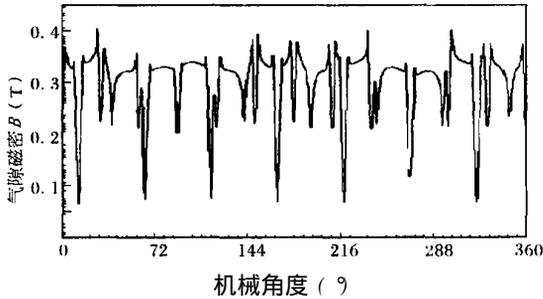


图7 负载时(=0°)气隙磁密沿圆周分布
利用磁场能量密度

$$w_m = \int_0^B H dB \quad (3)$$

磁场能量

$$W_m = \int_0^r w_m dv = \int_0^r w_m r dr \quad (4)$$

以及 $T_e = \frac{\partial W_m}{\partial \theta}$ 可以求出电机的静态力一位移特性 $T_e = f(i)$ 。图8为A、B相绕组分别通恒定电流时一个周期范围内电磁转矩沿圆周的分布曲线。

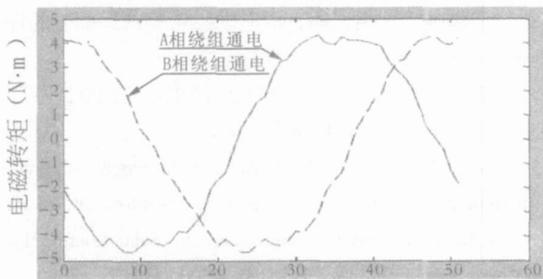


图8 数值分析法所得 A、B相绕组分别通
恒定电流时电机的静特性

由图可以看出,采用四相通电方式时,从A相绕组导通换为B相绕组导通,由于换相势必引起电机电磁转矩的脉动,这需要合理选择位置传感器的安装位置,以减小转矩的脉动,如所计算的样机采用四相通电方式时,则每相绕组一个周期导通的机械角度应为: $\frac{360^\circ}{p \cdot 4} = 12.857^\circ$;由计算所

得的转矩曲线应选 $[4.286^\circ; 17.143^\circ]$ 区间让A相绕组导通,而在 $\theta = 17.143^\circ$ 时进行换相,这样就可减小电机因换相引起的转矩脉动。同时由于齿槽的存在,即使某相绕组通恒定电流也会有较大的齿槽转矩,引起电机电磁转矩的脉动,此脉动将引起电机的噪声和振动。

3 转矩脉动的减小

为了减小上述电磁转矩的脉动一般可从两方面下手:电机设计和电机控制。本文仅只从电机设计方面分析抑制转矩脉动的方法。

3.1 减小齿槽引起的转矩脉动

齿槽转矩是由转子永磁磁通和随角度变化的定子磁阻相互作用而产生的。它与电机本身的结构密切相关。文献[2][3]等提出了计算齿槽转矩的经验公式

$$T_C = \sum_{i=1}^{N_c} k_{sk} T_i \sin(N_c \theta) \quad (5)$$

其中,

k_{sk} —斜槽因子;

$$k_{sk} = \frac{\sin(N_c \theta_{sk} / Q_s)}{N_c \theta_{sk} / Q_s} \quad (6)$$

N_c —定子槽数 Q_s 与极数 $2p$ 的最小公倍数;

θ_{sk} —一定、转子轴线之间的机械角度;

θ_{sk} —斜槽系数,斜槽的斜距与齿距之比;

齿槽转矩的谐波次数

$$v = \frac{2pQ_s}{N_m} k \quad (7)$$

其中, N_m —定子槽数 Q_s 与极数 $2p$ 的最大公约数。

由式(5)、(6)可知:

(1)采用定子斜槽或转子斜极均可削弱谐波转矩。在考虑不同齿极数配合的基础上提出斜槽系数,当斜槽系数: $k_{sk} = \frac{kQ_s}{N_c}$ ($k = 1, 2, \dots, \frac{N_c}{Q_s}$) 时可以消除齿槽转矩。该方法主要用于定子槽数较多且轴向较长的电机。

(2)采用分数槽绕组,这样定子槽数和转子永久磁铁极数之间不是整数倍关系,齿槽转矩也可减小。例如分析计算所用的样机,定子为12个齿槽,而转子为14极,这样较大分母的分数槽,齿

槽转矩的幅值会显著减小的。

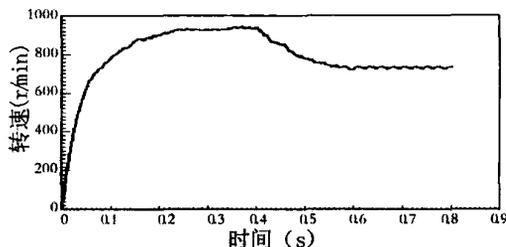
(3)通过调整永久磁极的宽度、采用虚槽、减小定子槽口宽度和使用磁性槽楔来削弱齿槽转矩。但磁性槽楔会引起槽漏抗增加,增大了电路的时间常数,影响电机控制系统的动态特性。

3.2 减小纹波转矩

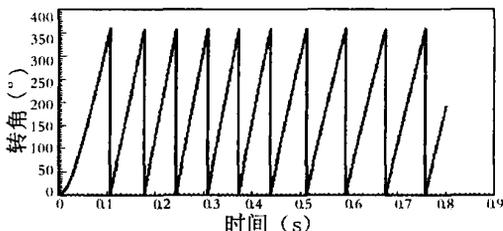
纹波转矩主要是由于定子电流产生的磁动势和转子相互作用而产生的同时还包括换相引起的转矩脉动。

4 动态特性分析

由电机的静特性分析可知电磁转矩是转子位置角和绕组电流的函数。一般情况下总是绕组外加电压信号已知,而转子位置和绕组电流都随时间在变化,所以除分析电机的静特性外,还应对电机动态过程进行分析研究。本文在静态计算基础上,利用 Ansoft/transient 软件对电机起动和负载突然变化时的动态特性进行了仿真,得到其电流、转矩、速度和转子转角随时间变化曲线,如图 9 中 (a) (b) (c) (d) 所示。



(c) 转速随时间变化曲线



(d) 转角随时间变化曲线

图 9 电机动态仿真结果

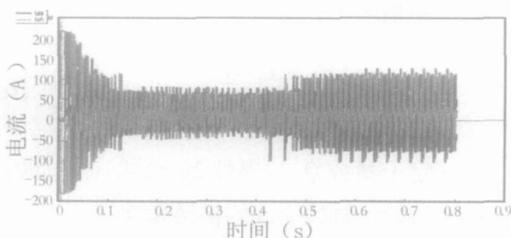
其中当 $t < 0.4$ (s) 时 $T_L = 1.6$ (N · m), 当 $t > 0.4$ (s) 时 $T_L = 2.6$ (N · m), 在 $t = 0.4$ (s) 时负载突然变化。

5 结论

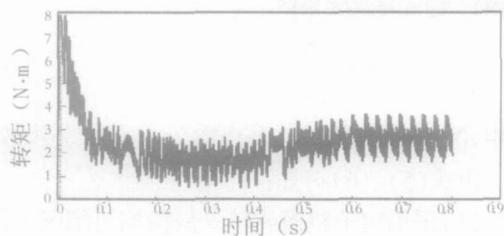
本文利用有限元计算软件分析计算了永磁无刷直流电动机的静、动态特性,并对减小电机电磁转矩的脉动方法做了综述,论文结果对该种电机的优化设计、控制系统的设计有参考价值。

参考文献

- [1] 贡俊,陆国林.“无刷直流电动机在工业中的应用和发展”微特电机. 2000. 5.
- [2] 邱建琪.“永磁无刷直流电动机转矩脉动抑制的控制策略研究”浙江大学博士学位论文.
- [3] 陈阳生,林友仰.“永磁电机气隙磁密的分析计算”中国电机工程学报. 第 14 卷第五期.
- [4] C. L. Putta Swamy, B. Singh*, B. P. Singh "Dynamic performance of a permanent magnet brushless DC motor powered by a PV array for water pumping" Solar Energy Material and Solar Cells 36 (1995) 187 - 200.



(a) 电流随时间变化曲线



(b) 转矩随时间变化曲线

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

垂询电话: 0454—8326352