

文章编号:1005-0523(2015)03-0050-05

基于 Ansys 的盘式永磁同步电动机的仿真和试验

涂耀文,陆正刚,孙效杰

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院,上海 201804)

摘要:采用8对极18槽的单盘式电机为实验原型,在试验台上测出其能带动的最大负载,定子绕组的最大电流等,并用 Ansys 公司的 RMXprt 和 Maxwell 3D 模型建立永磁同步电机模型,给予电机以电流激励,构建一个完整的仿真系统。通过对 PMSM 模型的有限元分析,得出反电势曲线,以及随时间变化的输出转矩曲线及电流密度的分布情况。并将仿真结果与试验测试结果相比较。对比结果给盘式 PMSM 的优化设计及进一步研究提供了依据。

关键词:盘式 PMSM;有限元法;Ansys Maxwell;反电势

中图分类号:U262.11;TP391.72

文献标志码:A

盘式永磁同步电动机(简称盘式电机),又称轴向磁通电机,电机定子与转子为相对布置的盘式结构,磁通沿轴向分布。盘式电机具有轴向尺寸短、结构紧凑、硅钢片利用率高等优点。近年来,盘式电机被普遍用于航空航天、计算机、机器人、数控机床、电动汽车等领域,亦是国内外研究和发展的一个热点^[1]。在传统轨道车辆牵引电机使用中,异步绕线式电机因其制造与控制技术的成熟占据了主导地位,并广泛应用于普通铁路的牵引使用中。然而,城市轻轨车辆对于转向架的空间布置要求更为紧凑,利用异步绕线电机难以完成这点。而新型永磁电机具有效率高、噪声低、功率密度大等优秀特性^[2-3],故其作为牵引电动机,兼有永磁同步电机和盘式电机二者的优势。

针对现有的低地板有轨电车轮边电机驱动系统的问题,首次将盘式永磁电机技术引入轨道车辆,提出一种盘式永磁同步电机轮边直驱独立车轮技术方案。电机整体悬挂于构架外侧,使得电机为簧上质量。电机通过弹性万向节连接独立车轮短轴,直接驱动车轮,降低车轮的摇头和横移对电机输出的影响^[4]。另外,其轴向尺寸小,方便布置在车轮外侧,满足铁路限界的要求。考虑电机安装空间条件,并根据经典电磁场理论对电机基础参数进行估计,再利用电磁有限元软件 Ansys Maxwell 进行电机的分析校核。在此基础上,研制功率为 1 kW 的小功率盘式永磁同步电机并展开实验研究,对电机设计方法进行验证。

1 永磁同步电机三维瞬态场的计算原理

Ansys Maxwell 处理三维瞬态磁场问题采用的是 $T-\Omega$ 算法,但是可以用局部剖分法来计算三维瞬态运动所带来的效应,对于低频瞬态磁场,麦克斯韦方程组^[5]可以写为式(1)形式

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times H &= \sigma E \\ \nabla \times E &= \frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times B &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

收稿日期:2014-10-11

基金项目:科技部科技支撑计划项目(2009BAG11B02)

作者简介:涂耀文(1991—),女,硕士研究生,研究方向为轨道车辆牵引电机研究;陆正刚(1966—),男,教授,博士生导师,研究方向为轨道车辆多体动力学研究。

式中: H 为磁场强度; E 为电场强度; B 为磁感应强度。

在式(1)的基础上可以构造出两个恒等式,如式(2)所示

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times H + \frac{\partial B}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \cdot B &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在求解三维瞬态磁场时,其棱边上的矢量位自由度采用了一阶元计算,而节点上的标量位自由度采用二阶元计算。由于是变化的磁场,那么还应该计算绕组反电势,反电势可以按照式(3)计算

$$E_i = \iiint_{R_i} H_i \cdot B_i dR \quad (3)$$

在三维瞬态磁场中,瞬态包含两个含义,一个是瞬态的电磁过程,一个是瞬态的机械过程。在处理机械瞬态过程中,需要引入对位移或角度的离散计算,其离散格式可以按照式(4)来描述

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)^{t+\Delta t} = \frac{x^{t+\Delta t} - x^t}{\Delta t} \quad (4)$$

式中: x 为机械位移量,可以是距离,也可以是角度。

2 盘式永磁同步电机模型的建立与仿真计算

2.1 电机基本参数

采用一个双边定子夹单转子结构^[6]如图 1,8对极 18槽的三相盘式永磁同步电机为模型,并联支路数为 1, Y型连接的双层短距定子绕组,等比例扇形永磁体,槽型采用上小下大的梨形槽,具体结构参数如表 1。

表 1 电机基本结构参数

Tab.1 Basic structural parameters of motor

参数	数值	参数	数值	参数	数值
定子内外径/mm	118 /210	气隙/mm	2	永磁体磁化长度/mm	4
转子内外径/mm	120 /200	导体线径/mm	0.6	每槽导体数	300
永磁体内外径/mm	120 /200	计算极弧系数	0.8	转子背铁厚度/mm	16
额定功率/kW	1	额定转速/(r·min ⁻¹)	600	定子铁芯长度/mm	20

2.2 3D 盘式电机的模型建立

在 Ansys Maxwell 中的 RMxpert 模块中,包含有盘式永磁电机的设计模块 Generic Rotor Motor,可以对盘式永磁同步电机直接进行参数建模,只需手动输入电机基本结构参数,软件便会自动生成三维有限元模型^[7],无须在三维 cad 中建模导入 Ansys。由于盘式电机结构的对称性,为缩减计算量和计算周期,可以将其简化为 1/4 模型,将单转子双定子的盘式结构,简化成单转子单定子模型,从而在不影响求解精度的前提下使计算量大为减小。在完成初步模型后,在生成的几何模型里定义电机的材料属性、边界条件和绕组的激励源^[8]。直接采用三相交流电源供电,如下:

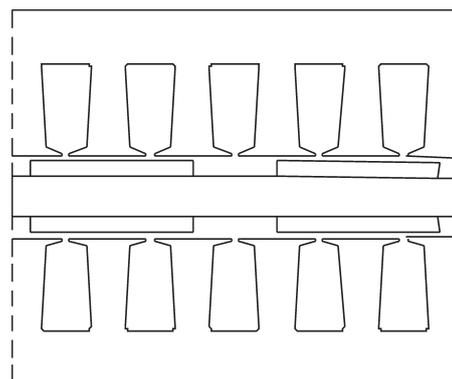


图 1 盘式电机模型结构图

Fig.1 Structure of disc motor model

$$I_A = 2.12 \sqrt{2} \sin(80\pi \cdot time)$$

$$I_B = 2.12 \sqrt{2} \sin\left(80\pi \cdot time - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$I_C = 2.12 \sqrt{2} \sin\left(80\pi \cdot time + \frac{2}{3}\pi\right)$$

其中: I_A , I_B , I_C 分别为三相给予的电流激励; π 圆周率。

2.3 仿真试验结果对比分析

在对永磁电机进行结构参数的优化与修正时,其评价指标是用以表征该修正与优化是否提升电机功率密度的关键。故选择正确的评价指标是对永磁电机进行分析的重要预备工作。在此选择了电机绕组通电时的输出转矩和电机负载反电动势以及通电绕组的电流密度为电机电磁性能的评价指标。首先在试验台上进行空载试验,让电机三相开路,然后把电机拖转到某一恒定的转速,慢慢加负载至其临界负荷值处测得其单盘输出最大转矩,由于反向电动势不可测量,在此采取盘式电机单盘带负载,另一边接发动机的方式粗测其反向电动势,测量三相之间的线电压 U_{AB} 和 U_{BC} ,通过计算可得到单相相电压。实验测得电机各项参数如表 2。

表 2 实验测得电机各参数
Tab.2 Test results of motor parameters

参数	数值
输出转矩/(N·m)	19
线反电动势/V	320
电流密度/(A·mm ⁻²)	6.43

2.3.1 输出转矩结果对比

在瞬态场仿真方式下,赋予电流源激励,可以得出轴上的电磁转矩,如图 2 所示。一般情况下,输出转矩会出现一定的周期波动性^[9],引起这种情况的可能因素除磁路设计不合理外还可能是由于给予的电流激励中含有谐波分量,从而在电机内部产生旋转磁场的超前或者延迟,导致与转子磁场互相作用而产生转矩波动。抑或是永磁体与开槽定子电枢或转子相互作用而产生的齿槽转矩而引起的转矩波动等。

但从输出转矩图中可知仿真所得的单边转矩均值约为 21 N·m,而实验所得电机能稳定运转时所带负载为 19 N·m,误差约为 9%。

2.3.2 负载相反电动势对比

给电机的三相绕组赋予电流源激励并设定其以额定转速运转。三相负载反电势如图 3, A 相负载反电势频谱如图 4。从图 3 看出, A, B, C 三相的相反电动势的走势均为稍有波动的正弦波,而且三相的反电动势的峰值均相差不大,符合电机设计中较为理想的波形,同时可以看出,反电动势含有一定的谐波分量,但谐波分量较小。从图 4 可知负载反电势的频率在 80 Hz 左右,与给予电流源激励频率大抵相当,符合电机学基本规律。

整机采用 Y 连接方式,通常试验中反电势测试出的为线反电动势^[10],折算为相反电动势约为 260 V,仿真所得相反电动势为 290 V,误差约为 10%。

2.3.3 绕组线圈内电流密度

永磁同步电机的损耗可具体分为铜耗与铁耗两大部分。其中铜耗为定子嵌槽中导线因通过电流而引起的放热效应,即来自于铜绕组的通电放热,其数值可通过基本的安培-楞次定律进行计算。故而定子线圈绕组内的电流密度极大地影响着线圈发热量、冷却效果的好坏以及铜耗^[11]。在设计时通常希望绕组线

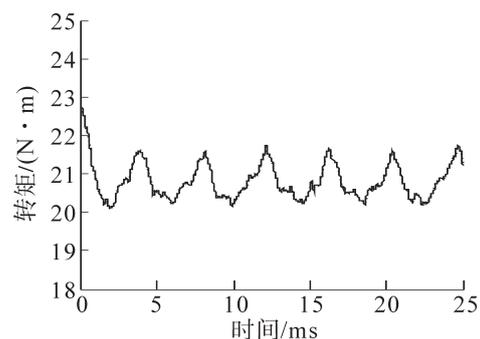


图 2 输出转矩图
Fig.2 Output torque

圈内的电流密度不要偏离计算额定值太多。仿真所得绕组线圈的电流密度如图5。

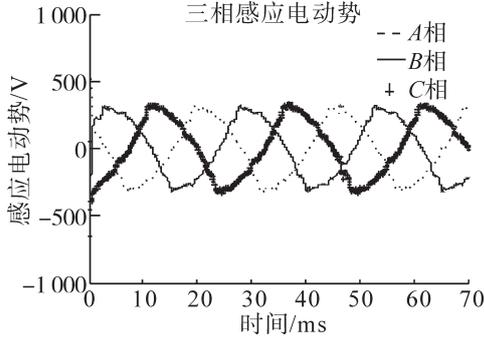


图3 三相反向电动势图

Fig. 3 Induced voltage of 3 phases

由图可知,仿真所得定子绕组电流密度最大值为 $6.99 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。实测电流密度为 $6.43 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$,误差约为8%。

2.3.4 盘式电机转子磁链

电机转子磁链与定子绕组反电势存在如下关系

$$\psi_r = \frac{e_{ab}}{2\sqrt{3}f} \quad (5)$$

式中: ψ_r 为电机转子磁链; e_{ab} 为电机反电势的线电压; f 为电机转子频率。

在试验中将电机驱动到一定转速后断电让其空转,使用示波器测量电机定子断路时电压波形,获得电压幅值和转子频率,即可根据式(5)计算出转子磁链。实验数据如表3,平均后转子磁链为 1.225 Wb ,与电磁场有限元计算的 1.230 Wb 差别很小,如图6。

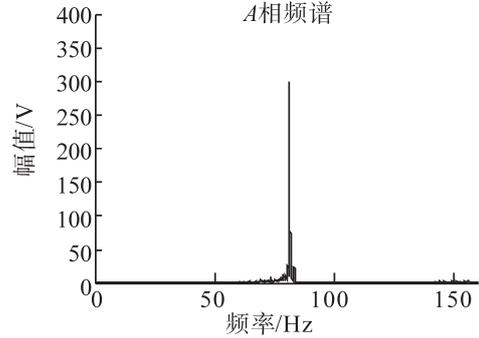


图4 A相反向电动势频谱图

Fig. 4 Spectral figure of phase A

表3 电机定子磁链测量

Tab.3 Flux linkage results of stator

反电势/V	转子频率/Hz	磁链/Wb
51	15	1.233
67.7	20	1.227
84.5	25	1.225
101.3	30	1.228
117.3	35	1.223
136.8	40	1.220

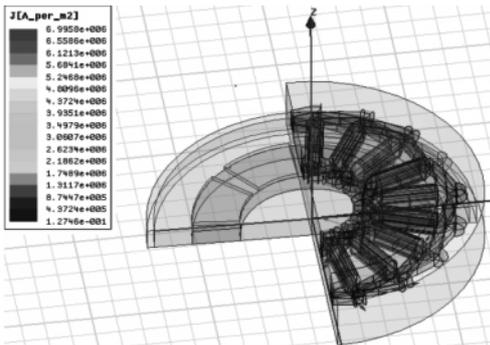


图5 定子绕组线圈电流密度图

Fig.5 Current density of stator coil

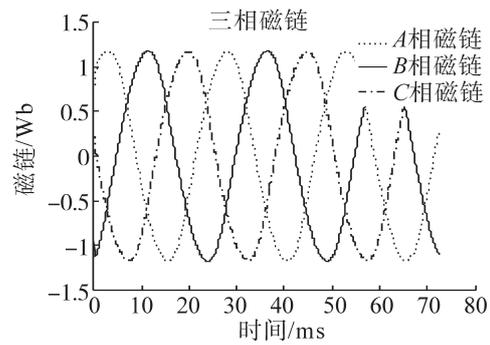


图6 转子磁链图

Fig.6 Flux linkage of rotor

3 结束语

利用 Ansys Maxwell 软件中的 RMXprt 和 Maxwell 3D 模块建立了盘式永磁同步电动机的仿真模型,完成了对盘式永磁同步电机系统的仿真研究,并与试验台上相关实测数据进行对比。反应了模型仿真的电动机瞬态运动过程以及电动机的输出转矩,三相反向电动势以及电流密度和转子磁链等特性和试验台实测瞬态运动过程的偏差。为盘式永磁同步电机后续电磁特性的研究以及冷却系统的设计提供了基础支撑。

参考文献:

- [1] 赵汝彬,冯玲玲.盘式无铁心永磁同步发电机的设计[J].电机技术,2012(3):1-4.
- [2] 薛蔚,漆晖,任利惠,等.永磁直驱柔性构架转向架的动力学模型研究[J].华东交通大学学报,2013,30(2):1-5.
- [3] KOICHI MATSUOKA, SENIOR MEMBER. Development trend of the permanent magnet synchronous motor for railway traction[J]. Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2007(2):1-4.
- [4] 盛义发,喻寿益,桂卫华,等.轨道车辆用永磁同步电机系统弱磁控制策略[J].中国电机工程学报,2010,30(9):9-15.
- [5] 李发海,朱东起.电机学[M].3版.北京:科学出版社,2005:55-58.
- [6] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997:218-220.
- [7] 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,2010:48-50.
- [8] 张榴晨,徐松.有限元法在电磁计算中的应用[M].北京:中国铁道出版社,1996:66-70.
- [9] 李景灿,廖勇.考虑饱和及转子磁场谐波的永磁同步电机模型[J].中国电机工程学报,2011,31(3):60-66.
- [10] 张蕾,李广.基于Ansoft的永磁同步发电机空载反电势波形畸变率分析[J].防爆电机,2012(4):13-19.
- [11] 符荣,窦满锋.稀土永磁同步电动机稳态运行时的转子铜耗分析[J].微特电机,2006(9):20-26.

Simulation Study of Disc Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Ansys

Tu Yaowen, Lu Zhenggang, Sun Xiaojie

(Institute of Railway and Urban Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor model has been established by using RMXprt and Maxwell 3D models of Ansys. A complete simulation system has been built via giving the motor current excitation. The back electromotive force curve and the distribution of the output torque curve and the current density varying with time have been obtained through the finite element analysis of PMSM model. By comparing simulation results with experimental results, this paper provides further references for disc PMSM's optimization design.

Key words: disc PMSM; finite element method; Ansys Maxwell; the back electromotive force

(责任编辑 刘棉玲)