

自动门用永磁无刷直流电动机的设计^{*}

张宏涛, 刘国海, 田翔, 周文娟
(江苏大学 电气学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 对永磁无刷直流电机的拓扑结构和运行原理进行了研究, 给出了一种分数槽电机选取极数和槽数配合减小自定位转矩的方法。为进一步提高电机内部空间利用率, 提出了一种双层短距的绕组连接方式。在考虑整个无刷直流电动机系统工作的情况下, 以端电压为输入量, 采用场路耦合时步有限元法, 对一台六极永磁无刷直流电动机的瞬态电磁场进行了计算和仿真分析, 并以样机驱动系统作为试验平台, 完成了试验验证工作。仿真和试验结果充分证明了所提出方法的正确性和有效性。该电机的应用会加快永磁无刷直流电机在工业领域中的推广、普及, 也展示出了其广阔的发展前景。

关键词: 永磁无刷直流电机; 双层短距; 场路耦合

中图分类号: TM302 TM33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2009)07-0001-04

Design of Permanent Magnet BLDC Motor for Automatic Door

ZHANG Hong-tao, LIU Guo-hai, TIAN Xiang, ZHOU Wen-juan

(School of Electrical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The topology and operation principle of the permanent magnet BLDC motor are researched. A method for decreasing cogging torque by cooperating of pole number and slot number is given. To increase the inner space utilization rate and the motor efficiency, the double-layer-and-short-pitch windings are employed. Taking into account the whole permanent magnet BLDC motor system, taking terminal voltage as input quantity, transient electromagnetic field of a six poles permanent magnet BLDC motor was calculated and simulated through the circuit-field coupled time-stepping finite element method. Then, the driving system of the permanent magnet BLDC motor was used as experimental platform, and the experimental verification of the research work was completed. Finally, Both simulation and experimental results are given to verify the validity and the efficiency of the proposed machine. The application of the motor will accelerate the popularizing process of the permanent magnet BLDC motor in the industrial field, and show its broad development prospect.

Key words: permanent magnet brushless DC motor; double-layer-and-short-pitch; field-circuit and movement coupled

0 引言

当前,我国门业的发展态势很好,其中自动门的年需求量为 250 万平方米。市场上的自动门大多是从国外进口,虽然性能稳定,但价格昂贵;国内鲜有企业能够生产自动门。因此,研制高质量和高可靠性的自动门系统非常重要。用无刷直流电机实现自动门的直接驱动,不仅使自动门装置机械结构简化,制造成本降低,而且安装调试方便,故障率低。国外著名的电机制造厂商,以及国

内的电机制造厂商、研究机构、高等院校等都对工业用的永磁无刷电机进行了研究、开发和生产。

本文针对工业领域的实际需要,即直接驱动自动门的要求,设计了一台分数槽永磁无刷直流电动机 (EMBLDCM)。对电机的拓扑结构进行了研究,使用二维场路耦合时步有限元法对电机的性能和磁场分布进行分析,给出了仿真结果。通过样机试验验证,计算结果和试验结果均与理论波形吻合,证明了该设计计算方法是正确、可靠的,对该型电机的进一步推广和使用有一定意义。

^{*}国家自然科学基金 (60874014)

该电机经适当修改,可应用于自动卷门、自动卷帘等的控制。

1 拓扑结构和运行原理

电机结构如图 1 所示。该电机采用 6 极设计,这样可以使电机轭部的厚度变薄,电机的体积缩小,重量减轻。槽数为 9 槽,因此图 1 所示三相 6 极 PMBLDCM 相邻两槽间的距离与极距比为 6/9,构成分数槽绕组。由文献 [4, 5] 可知,这种极槽配合使得定、转子间的电磁力在任何转子位置上均相等,有效减小了自定位转矩。电机的绕组连接如果采用单层绕组连接方式,由于每相磁路基本上是独立的,可以忽略各相绕组之间的互感;但是如果采用双层绕组连接方式,绕组之间的互感就存在了。由于转子永磁体采用表面式结构放置,因此电机各相绕组的电感不随转子位置变化。

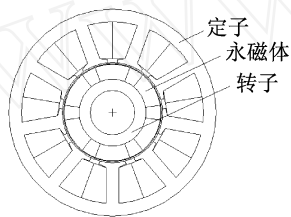


图 1 三相 6 极永磁直流无刷电动机结构

本文介绍的电机绕组采用了一种双层短距的绕组连接方式,如图 2 所示。相对文献 [6] 中提到的单层集中绕组,双层短距绕组可以减小绕组的端部长度,提高电机内部空间和铜线的利用率,同时减小铜耗,提高电机效率。为节约成本,电机运行的控制方式采用传统的 3/2 通电 120 导通控制模式,根据位置传感器的信号来决定导通相。

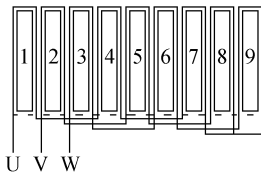


图 2 绕组连接图

2 基于二维场路耦合时步有限元法的样机研究

本文以星形连接三相六状态二相导通的 PM-

BLCM 为例进行分析,系统结构见图 3。

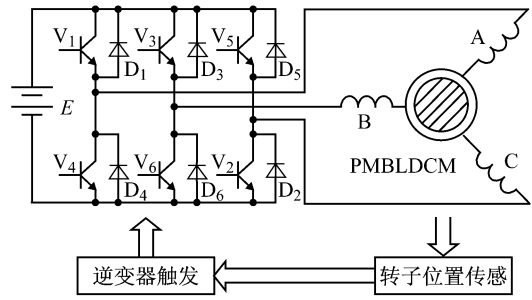


图 3 PMBLDCM 系统结构图

PMBLDCM 定子采用集中绕组。假设无刷直流电动机磁场沿轴向均匀分布,采用二维场分析,矢量磁位只有 z 轴分量。忽略转子铁心中的涡流、磁滞损耗,电机满足的电磁场和电路方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) + J = 0, & () \\ \frac{\partial A}{\partial n_1} - \frac{\partial A}{\partial n_2} = J_m, & () \\ [e] + [i][R_1] + [L] \frac{d}{dt} [i] = [u] \end{cases} \quad (1)$$

式中: ——电机求解域;

——永磁体和其他媒质的交界;

J_m ——永磁体的等效电流密度;

J ——绕组电流密度。

$$J = J_a + J_b + J_c$$

$$= \frac{N}{aS_b} a i_a + \frac{N}{aS_b} b i_b + \frac{N}{aS_b} c i_c \quad (2)$$

式中: J_a, J_b, J_c ——三相绕组电流密度;

N ——一个线圈的匝数;

a ——绕组并联支路数;

S_b ——一个线圈边的面积;

$a、b、c$ ——单元的绕组电流系数。

此外:

$$[i] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad [R_1] = \begin{bmatrix} R_1 & & \\ & R_1 & \\ & & R_1 \end{bmatrix},$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L & & \\ & L & \\ & & L \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $[e]$ 和 $[u]$ 的值根据工作状态的不同有两种取法,工作在换流区间时:

$$\left\{ \begin{aligned} [e] &= \begin{bmatrix} e_a - \frac{e_a + e_b + e_c}{3} \\ e_b - \frac{e_a + e_b + e_c}{3} \\ e_c - \frac{e_a + e_b + e_c}{3} \end{bmatrix} \\ [u] &= \begin{bmatrix} u_a - \frac{u_a + u_b + u_c}{3} \\ u_b - \frac{u_a + u_b + u_c}{3} \\ u_c - \frac{u_a + u_b + u_c}{3} \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

工作在单流区间, 且 A、C 相同时导通时为:

$$\left\{ \begin{aligned} [e] &= \begin{bmatrix} e_a - \frac{e_a + e_c}{3} \\ 0 \\ e_c - \frac{e_a + e_c}{3} \end{bmatrix} \\ [u] &= \begin{bmatrix} u_a \\ 0 \\ u_c \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式 (1) 中, 感应电势是把定子区域磁场和电路结合起来的关键参数。A 相感应电势为:

$$e_a = - \frac{d \psi_a}{dt} = - \frac{d}{dt} \left(\frac{NL_{ef} p}{a S_b} \sum_{i=1}^n \psi_i \frac{A_i + A_j + A_m}{3} \right) \quad (6)$$

式中: ψ_a —— A 相绕组磁链;

L_{ef} —— 电机有效长度;

n —— 单元总数;

p —— 极对数;

e —— 单元面积;

A_i, A_j, A_m —— 三角形单元三节点的矢量磁位。

同理可得另外二相感应电势。

用加权余量法建立有限元离散化方程, 取权函数等于形状函数, 对式 (1) 中的电磁场方程作离散化处理, 耦合定子电路方程得到系统总体方程。用时间差分代替微分, 得到空间和时间离散的系统方程。

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ \frac{D_{21}}{t} & C_{22} + \frac{D_{22}}{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{D_{21}}{t} & \frac{D_{22}}{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A' \\ i' \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: A' —— 场域的矢量磁位;

i' —— 电流相量;

P_1 —— 永磁体的励磁作用;

P_2 —— 三相定子电压向量。

以电源电压、超前导通角为输入变量, 将电磁场方程结合逆变器控制电路, 采用时步有限元法求解, 即可得到电机的运行特性。图 4 给出了某位置的有限元剖分图, 图 5 给出了额定运行时相应图 4 位置的磁力线分布图。

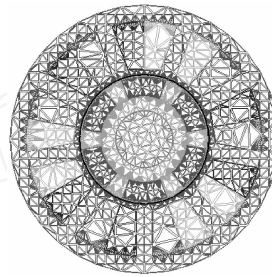


图 4 有限元剖分图

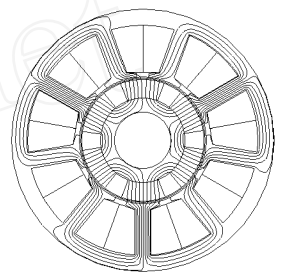


图 5 磁力线分布图

3 电机性能分析

所设计样机的主要技术参数如表 1 所示, 由此可建立电机的场路耦合时步有限元计算模型, 对电机性能进行分析。

首先计算电机的空载反电势。此时驱动电流为 0 A, 电机在额定转速时的空载相反电势波形如图 6 所示, 同时可以计算得到由于齿槽原因造成的自定位转矩变化波形, 如图 7 所示, 从而验证了这种结构的电机具有较小的自定位转矩。

表 1 样机的主要技术参数

项目	参数值	项目	参数值
额定功率 /W	50	额定电压 /V	24
额定电流 /A	3	额定转速 / (r · min ⁻¹)	3 350
槽数	9	极数	6
定子外径 /mm	56	转子外径 /mm	26
气隙 /mm	0.5	电枢铁心长度 /mm	60

其次计算电机的起动性能和额定运行状态时的性能。使电机模型运行在电压驱动状态, 并且驱动电压为额定输入电压, 同时, 电机的三相绕组

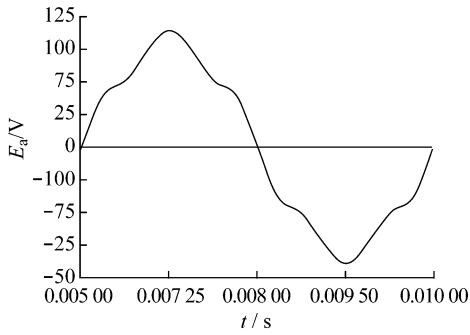


图 6 额定转速时的空载反电势

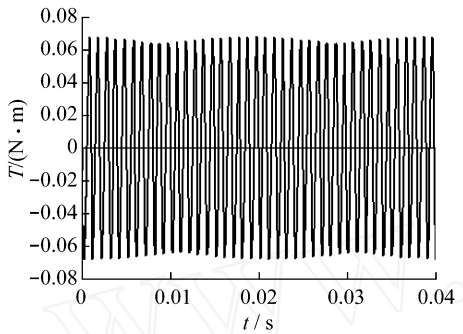


图 7 自定位转矩变化

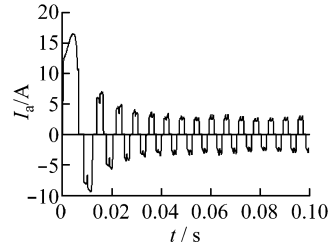


图 9 额定负载时起动过程 A 相电流变化波形

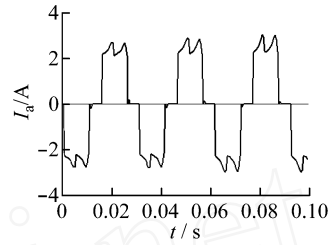


图 10 额定负载时 A 相电流波形

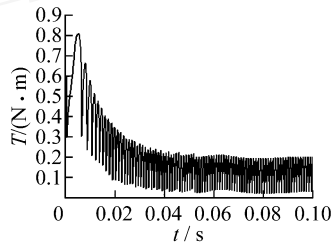


图 11 额定负载时起动过程电磁转矩变化波形

要接成星型。这时可以计算得到在负载转矩为额定转矩时的电机起动过程转速变化波形,如图 8 所示;在额定负载情况下,整个起动过程 A 相电流的变化波形如图 9 所示;额定负载稳定运行时 A 相电流的局部放大波形如图 10 所示;同时计算得到额定负载情况下,整个起动过程的电磁转矩变化波形如图 11 所示。以上计算分析表明,电机满足设计要求。

图 12 所示,对比计算所得到的电流波形,可以看出计算结果和实测结果非常吻合。试验结果验证了计算分析的正确性。

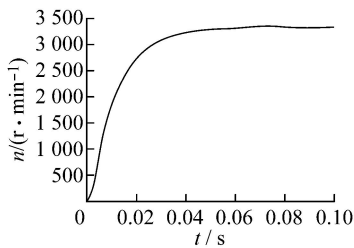


图 8 额定负载时起动过程转速变化波形

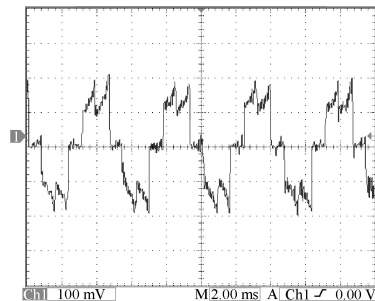


图 12 电流实测结果

4 试验结果

在实验室测试台上对电机性能进行了测试,试验时测得的自定位转矩非常小,同时还测得输出额定转矩时的 A 相电流随时间的变化波形,如

5 结语

本文论述了一台采用分数槽的自动门用 PM-BLDCM 的设计,采用场路耦合时步有限元法对电

(下转第 13 页)

能利用系数。

(3) 额定风速以上 (11 ~ 24 m/s) 时, 为了防止频繁的往复变桨, 功率偏差在 10 kW 时不进行变桨。偏航系统保证风力机始终正对风向。

(4) 风速高于 24 m/s 时发电机组制动刹车。

4 结 语

本文介绍了风力发电机组无刷励磁系统的设计方案。励磁调节系统是同步发电机的重要组成部分, 无论是在稳态运行还是在暂态运行过程中, 同步发电机运行状态都在很大程度上与励磁有关, 励磁系统性能的好坏直接影响到风力发电机及电力系统运行的可靠性、安全性和稳定性。在本励磁系统的设计中, 充分发挥了 PLC 的强抗干扰、接口及驱动能力, 提高了系统的可靠性。运用其软件所具有的 PD 调节模块, 根据系统的运行特点, 采用改进的 PD 控制方法附加 PSS, 简化了编程, 并可根据运行要求实现在线调整参量。

【参考文献】

[1] 杨冠城. 电力系统自动装置原理 [M]. 北京: 水力

电力出版社, 1989.

- [2] 卢强, 王仲鸿, 韩英. 输电系统最优控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [3] Marino R. An example of a nonlinear regulator [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1984, 29 (3): 276-279.
- [4] 王幼毅, 郭国晓. 带电压调节功能的非线性鲁棒控制器 [J]. 电力自动化, 2001, 25 (12): 23-29.
- [5] Tapia A, Tapia G, Ostolaza J X, et al. Modeling and control of a wind turbine design doubly fed induction generator [J]. IEEE Trans on energy conversion, 2003, 18 (2): 194-204.
- [6] 杨菊元, 伍政团. 无刷励磁系统及励磁控制系统原理分析与应用 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (11): 74-78.
- [7] 李家坤. 同步发电机励磁控制方式发展综述 [J]. 电力学报, 2005, 20 (1): 26-29.
- [8] 周双喜, 李丹. 同步发电机数字式励磁调节器 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [9] 丁志东, 刘国海. 同步发电机励磁对稳定性影响的研究 [J]. 大电机技术, 2007 (4): 60-64.

收稿日期: 2008-12-29

(上接第 4 页)

动机的性能进行了分析。在永磁体采用等效面电流处理时, 文中给出了对应的磁场方程和相应的离散方程。由于场路耦合时步有限元法在计算过程中考虑到了电机铁心饱和、电枢反应和永磁体内涡流等复杂情况, 因此更加适合用于研究电机的运行性能, 仿真结果也验证了这一点。由于采用了特殊的设计, 使得电机具有高转矩密度、低转动惯量和小自定位转矩等优点, 并且通过试验得到了验证, 电机运行情况稳定、可靠, 达到了设计的目的, 它非常适合用作自动门的驱动电机。

【参考文献】

- [1] 马长山, 周波. 永磁式双凸极电机新型开通关断角控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2007 (8): 68-72.
- [2] 罗宏浩, 吴峻, 常文森. 动磁式永磁无刷直流直线电机的齿槽力最小化 [J]. 微电机, 2007 (2): 12-16.

- [3] Yong-Su Kim, Sung Hong Won. Analysis of the linear DC motor for the automatic door system [C]. Proceedings of ICMS, 2005 (1): 255-257.
- [4] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani. Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors [J]. IEEE Trans on Industry Application, 2002 (38): 1259-1265.
- [5] Weh H, Mosebach H. Design concepts and force generation in inverter-fed synchronous machines with permanent magnet excitation [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1984 (20): 1756-1761.
- [6] Chan CC, Jiang JZ, Chen GH, et al. A novel polyphase multipole square-wave permanent magnet motor drive for electric vehicles [J]. IEEE Trans on Industry Application, 1994 (30): 1258-1266.

收稿日期: 2008-06-17