

双余度永磁无刷直流电机设计与实验研究

付朝阳, 刘景林, 金英汉

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 为了提高系统可靠性, 将余度技术引入到永磁无刷直流电机设计中。设计了2种定子绕组方式, 包括同槽嵌放和隔槽嵌放结构。建立了2种结构下的数学模型, 对绕组电感进行了分析计算, 推导了绕组自感和互感之间的关系。根据数学模型, 设计了双余度永磁无刷直流电机的具体结构参数, 对转速和转矩进行了仿真。利用 magtrol 测试系统对双余度永磁无刷直流电机进行了实验, 对比分析了2种结构不同工作模式下的机械特性曲线。实验结果表明: 2种结构的双余度无刷直流电机在运行过程中, 具有良好的动态特性, 2套绕组同时工作时其转矩为1套绕组工作时的2倍; 2套绕组并未对电机性能产生不良影响, 但大大提高了系统可靠性。

关键词: 双余度, 永磁无刷直流电机, 设计, 实验

中图分类号: TM301.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-2758(2012)05-0724-05

近年来, 随着稀土永磁材料的快速发展, 永磁电机不仅使电机的重量、体积明显减小, 而且改善了电机的动态特性, 减小了由于齿槽效应引起的力矩波动, 简化了磁路设计和磁场分析方法。其中永磁无刷直流电机以电子换向线路替代了传统有刷直流电机由换向器和电刷组成的机械换向结构, 既克服了一般直流电机由于电刷引起的电火花等缺点, 又保留了有刷直流电机宽阔而平滑的优良调速特性。随着电力电子技术、计算机技术和传感器技术的快速发展, 永磁无刷直流电机被广泛应用于传动系统和伺服驱动系统中。

在航空航天等高精密控制系统中, 为了提高系统的可靠性, 一般采用多余度配置方式。传统驱动系统中实现余度控制通常做法是1台电机作为1个通道, 采用多台电机并联运行, 这种方案的缺点是体积大、结构复杂、成本高。另一种方案是将余度技术引入到电机设计中来, 电机中设置2套定子电枢绕组, 每套绕组分别与控制系统构成独立的通道, 共用一个转子。该方案的特点是: 体积小、结构简单, 成本低。

1 数学模型

1.1 2套绕组同槽嵌放

定子采用12槽结构, 每个槽中嵌放2套三相集中绕组。设双余度永磁无刷直流电机采用的双Y型绕组分别为 A_1, B_1, C_1 和 A_2, B_2, C_2 , 结构如图1所示。

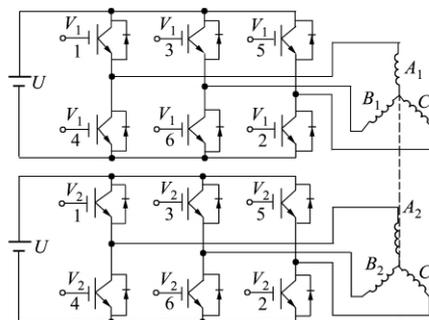


图1 同槽放置时绕组结构

2套绕组之间对应相轴线重合, 各相绕组参数对称, 由此得到以下电压平衡方程式

$$\begin{bmatrix} u_{a1} \\ u_{b1} \\ u_{c1} \\ u_{a2} \\ u_{b2} \\ u_{c2} \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} l & m_{120} & m_{120} & m_0 & m_{120} & m_{120} \\ m_{120} & l & m_{120} & m_{120} & m_0 & m_{120} \\ m_{120} & m_{120} & l & m_{120} & m_{120} & m_0 \\ m_0 & m_{120} & m_{120} & l & m_{120} & m_{120} \\ m_{120} & m_0 & m_{120} & m_{120} & l & m_{120} \\ m_{120} & m_{120} & m_0 & m_{120} & m_{120} & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{a1} \\ e_{b1} \\ e_{c1} \\ e_{a2} \\ e_{b2} \\ e_{c2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,下标 1 与 2 分别表示第 1 和第 2 余度的电压、电流、反电势变量;参数 l 为相绕组电感; m_0 与 m_{120} 分别为两相绕组差 0° 与 120° 电角度时的互感。由于 2 个余度分别采用三相绕组星形连接,且没有中线,则有

$$i_{a1} + i_{b1} + i_{c1} = 0 \quad (2)$$

$$i_{a2} + i_{b2} + i_{c2} = 0 \quad (3)$$

从而联立得

$$\begin{bmatrix} u_{a1} \\ u_{b1} \\ u_{c1} \\ u_{a2} \\ u_{b2} \\ u_{c2} \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l' & 0 & 0 & m' & 0 & 0 \\ 0 & l' & 0 & 0 & m' & 0 \\ 0 & 0 & l' & 0 & 0 & m' \\ m' & 0 & 0 & l' & 0 & 0 \\ 0 & m' & 0 & 0 & l' & 0 \\ 0 & 0 & m' & 0 & 0 & l' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{a1} \\ e_{b1} \\ e_{c1} \\ e_{a2} \\ e_{b2} \\ e_{c2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $l' = l - m_{120}$, $m' = m_0 - m_{120}$ 。由电压平衡方程式,可得到电磁转矩为

$$T_e = (e_{a1}i_{a1} + e_{b1}i_{b1} + e_{c1}i_{c1} + e_{a2}i_{a2} + e_{b2}i_{b2} + e_{c2}i_{c2}) / \omega \quad (5)$$

因 2 套绕组与控制电路结构相同,反电势记作 $e_1 = e_2 = K_e \Omega$ 。所以(5)式可以写为

$$T_e = 2(e_1 i_{s1} + e_2 i_{s2}) / \Omega = 2K_e (i_{s1} + i_{s2}) \quad (6)$$

式中, i_{s1} 与 i_{s2} 为 2 套绕组正向通电时的相电流; e_1 与 e_2 分别为两相绕组感应的反电势。

1.2 2 套绕组隔槽嵌放

定子采用 24 槽结构,2 套绕组采用隔槽放置,2 套绕组之间对应相轴线相差 30° 电角度,如图 2 所示。

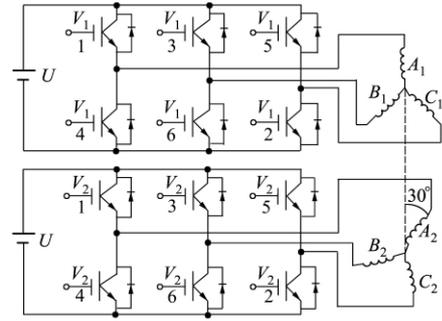


图 2 隔槽放置时绕组结构

由此得到如下电压平衡方程式

$$\begin{bmatrix} u_{a1} \\ u_{b1} \\ u_{c1} \\ u_{a2} \\ u_{b2} \\ u_{c2} \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l & m_{120} & m_{120} & m_{30} & m_{90} & m_{150} \\ m_{120} & l & m_{120} & m_{150} & m_{30} & m_{90} \\ m_{120} & m_{120} & l & m_{90} & m_{150} & m_{30} \\ m_{30} & m_{150} & m_{90} & l & m_{120} & m_{120} \\ m_{90} & m_{30} & m_{150} & m_{120} & l & m_{120} \\ m_{150} & m_{90} & m_{30} & m_{120} & m_{120} & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{a1} \\ e_{b1} \\ e_{c1} \\ e_{a2} \\ e_{b2} \\ e_{c2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,下标 1 与 2 分别表示第 1 和第 2 余度的电压、电流、反电势变量;参数 l 为相绕组电感; m_{30} 、 m_{90} 与 m_{150} 分别为两相绕组差 30° 、 90° 与 150° 电角度时的互感。

由(2)式和(3)式可得

$$\begin{bmatrix} u_{a1} \\ u_{b1} \\ u_{c1} \\ u_{a2} \\ u_{b2} \\ u_{c2} \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} l' & 0 & 0 & m_{30} & m_{90} & m_{150} \\ 0 & l' & 0 & m_{150} & m_{30} & m_{90} \\ 0 & 0 & l' & m_{90} & m_{150} & m_{30} \\ m_{30} & m_{150} & m_{90} & l' & 0 & 0 \\ m_{90} & m_{30} & m_{150} & 0 & l' & 0 \\ m_{150} & m_{90} & m_{30} & 0 & 0 & l' \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{a1} \\ e_{b1} \\ e_{c1} \\ e_{a2} \\ e_{b2} \\ e_{c2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $l' = l - m_{120}$ 。

1.3 电感分析

设 2 套电枢绕组相差 α 电角度, 当极对数 $p = 1$ 时, 如果 A 相每极绕组产生的磁势为 $F_a = WI$, 则在气隙中产生的磁感应强度为

$$B_{\delta a} = \frac{\mu_0 F_a}{2\delta_i} \quad (9)$$

式中 W 为每极绕组串联匝数, μ_0 为空气磁导率, δ_i 为气隙宽度。

绕组自感磁链为

$$\Psi_a = W l_d r_d \pi B_{\delta a} = \frac{\pi \mu_0 W^2 l_d r_d I}{2\delta_i} \quad (10)$$

式中 r_d 为电枢半径, l_d 为电枢长度。

则自感为

$$L = \frac{\Psi_a}{I} = \frac{\pi \mu_0 W^2 l_d r_d}{2\delta_i} \quad (11)$$

当电机极对数为 p 时, 每相串联匝数 $W' = pW$, 则(12)式可表示为

$$L = \frac{\pi \mu_0 W'^2 l_d r_d}{2\delta_i} \quad (12)$$

A 相绕组与 B 相绕组轴线在空间相差 α 电角度时, A 相绕组发出的磁链交 B 相绕组磁链为

$$\begin{aligned} \Psi_{ba} &= W' l_d r_d B_{\delta a} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \frac{\pi}{2} \right) + \left(-\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} - \alpha \right) \right] \\ &= (\pi - 2\alpha) \frac{\pi \mu_0 W'^2 l_d r_d I}{2\delta_i} \quad (13) \end{aligned}$$

则互感为

$$\begin{aligned} M &= \frac{\Psi_{ba}}{I} = -2\alpha \frac{\pi \mu_0 W'^2 l_d r_d}{2\delta_i} \\ &= (\pi - 2\alpha) \frac{\pi \mu_0 W'^2 l_d r_d}{2\delta_i} \quad (14) \end{aligned}$$

可得自感 L 与互感 M 的相互关系为

$$M = (\pi - 2\alpha) L \quad (15)$$

2 系统仿真

2.1 双余度无刷直流电机设计

根据设计要求, 双余度高压无刷直流电机采用 12 槽和 24 槽 2 种结构槽形, 为了减少由谐波造成的转矩脉动, 采用斜槽结构。转子部分采用表贴式瓦片型永磁体 2 对极结构。主要设计参数如表 1 所示。

表 1 双余度高压无刷直流电机主要参数

参数	数值	参数	数值
额定电压	270 V	额定转速	12 000 r/min
电枢外径	60 mm	电枢内径	30 mm
定子槽数	12/24	磁钢厚	2.5 mm
转子极数	4	铁心长	40 mm
绕组分布	双层	每槽导体数	72
永磁体材料	NNF28UH	电枢材料	35W300

2.2 仿真结果

双余度永磁无刷直流电机仿真系统主要由电压平衡方程模块、反电势模块、电磁转矩模块、机械运动模块和控制系统组成。

电机 2 套绕组的母线电压都取 $U_d = 270$ V, 绕组电阻 $r = 2.6 \Omega$, 自感 $L = 2.72$ mH, 线反电势系数 $K_e = 0.02$, 惯量 $J = 1.2 \times 10^{-4}$ kg·m², 负载 $T_L = 0.86$ N·m, 转速、转矩仿真波形分别如图 3 ~ 图 6 所示。

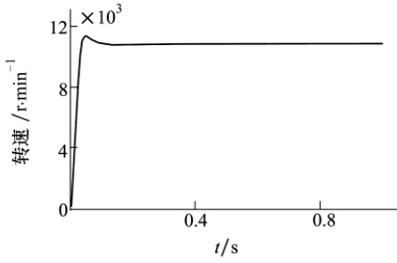


图 3 同槽放置时转速曲线

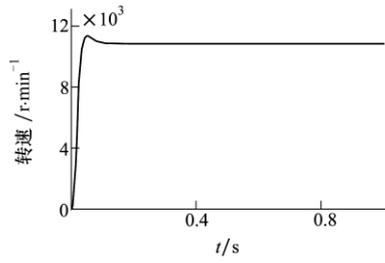


图 4 不同槽放置时转速曲线

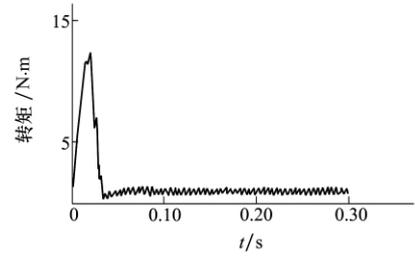


图 5 同槽放置时转矩曲线

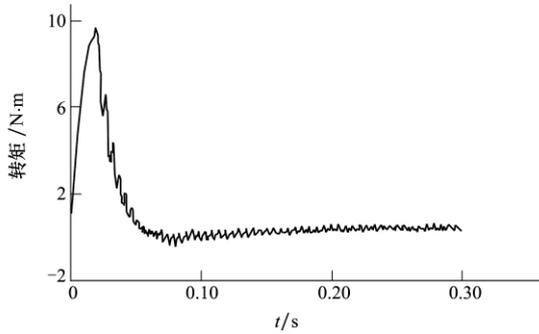


图 6 不同槽放置时转矩曲线

3 实验结果

利用 magtrol 测试系统分别对同槽嵌放时和不同槽嵌放时电机单余度工作和双余度工作进行了实验。图 7 为同轴线时 1 余度为其特性曲线; 图 8 为同轴线时 2 余度特性曲线; 图 9 为同轴线时双余度特性曲线; 图 10 为不同轴线时 1 余度特性曲线; 图 11 为不同轴线时 2 余度特性曲线; 图 12 为不同轴线时双余度特性曲线。

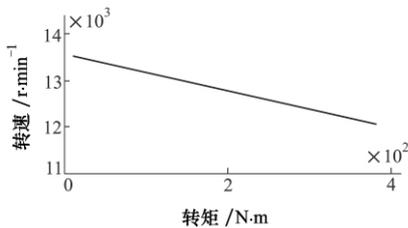


图 7 同轴线时 1 余度特性曲线

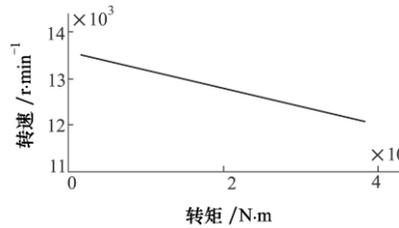


图 8 同轴线时 2 余度特性曲线

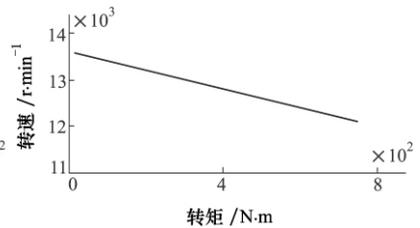


图 9 同轴线时双余度特性曲线

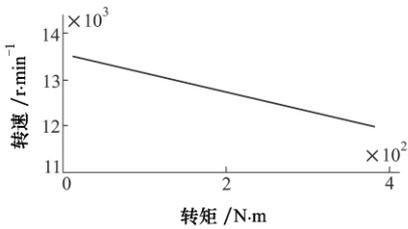


图 10 不同轴线时 1 余度特性曲线

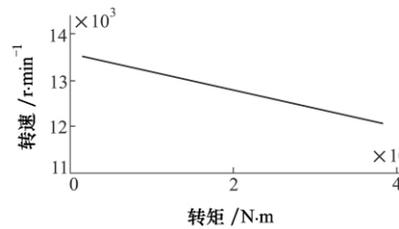


图 11 不同轴线时 2 余度特性曲线

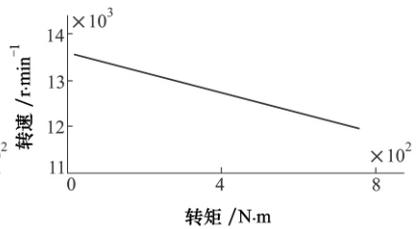


图 12 不同轴线时双余度特性曲线

由特性曲线可以看到,电机性能与理论分析及仿真结果相吻合,其中双余度同时工作时的转矩为单余度工作时的 2 倍。

4 结论

本文将余度技术引入到永磁无刷直流电机中,设计了双余度永磁无刷直流电机,包括同槽嵌放和不同槽嵌放两种结构。仿真和实验结果表明:电机性能与理论分析结果相吻合,达到了预期效果,表明本文所提出的双余度永磁无刷直流电机设计方法合理可行。

参考文献:

- [1] 马瑞卿, 刘卫国, 解恩. 双冗余无刷电动机位置伺服系统仿真与试验. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 98-103
Ma Ruiqing, Liu Weiguo, Xie En. Simulation and Test of Position Servo System Based on Dual-Redundancy BLDCM. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 98-103 (in Chinese)
- [2] 董慧芬, 周元钧, 沈颂华. 双通道无刷直流电动机容错动态性能分析. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 89-94
Dong Huifen, Zhou Yuanjun, Shen Songhua. Analysis on the Fault-Tolerant Dynamic Performance of a Brushless DC Motor with Double Channels. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 89-94 (in Chinese)
- [3] Yan Hongsen, Wu Yichang. A Novel Configuration for a Brushless DC Motor with an Integrated Planetary Gear train. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 301(2): 532-540
- [4] Abd Hafez A A, Todd R, Forsyth A J. Direct Current Ripple Compensation for Multi-Phase Fault-Tolerant Machines. IET Electr Power Appl, 2011, 5(1): 28-36
- [5] 王巍, 郭宏, 李艳明, 于凯平. 电气双冗余无刷直流电动机转子极弧系数研究. 电机与控制学报, 2009, 13(6): 862-866
Wang Wei, Guo Hong, Li Yanming, Yu Kaiping. Research on Rotor Pole-Arc of Electrical Dual-Redundancy Brushless DC Motor. Electric Machines and Control, 2009, 13(6): 862-866 (in Chinese)
- [6] Guo Hong, Wang Wei, Xing Wei, Li Yanming. Design of Electrical/Mechanical Hybrid 4-Redundancy Brushless DC Torque Motor. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23: 211-215

An Effective Design of and Experimental Research on Dual-Redundancy Brushless DC Motor(BLDCM)

Fu Zhaoyang, Liu Jinglin, Jin Yinghan

(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to improve the reliability of the system, the redundancy technology is introduced into the design of permanent magnet BLDCM. Sections 1 through 3 of the full paper explain our design, computer simulation and experimental research; we believe that our design is effective. The core of section 1 consists of: (1) two kinds of stator structure are designed, including one slot and two slots; (2) the mathematical model of the motor is set up; the winding inductance is analyzed and calculated, and the relationship between the winding inductance and mutual inductance is deduced. The core of section 2 is that, according to the mathematical model, the parameters of the motor are designed and the rotational speed and torque are simulated. The core of section 3 consists of: (1) the motor is tested on the MAGTROL testing system; (2) the mechanical characteristic curves of both kinds of stator structure under different working modes are compared. The simulation results are given in Figs. 3 through 6 and the experimental results are given in Figs. 7 through 12. Both the simulation and the experiment results show that: (1) the motor of each kind can achieve good dynamic characteristics and the torque is increased by 100% with two sets of windings; (2) two sets of winding did not affect motor performance, but it did indeed greatly improve the system reliability.

Key words: brushless DC motors, computer simulation, control, design, experiments, fault tolerance, mathematical models, permanent magnets reliability; dual-redundancy