

新型直流电动机特性仿真研究

陈敏祥¹, 李凤才¹, 王宗培²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 珠海运控电机有限公司, 广东 珠海 519000)

摘要: 为了进一步提高电机的性能, 引入了新型直流电动机, 首先介绍了其绕组结构和工作原理, 进而建立了电机的数学模型和仿真模型, 然后利用该仿真模型得到新型直流电动机不同负载下的绕组电流波形和总电流波形, 将仿真结果与实验结果进行对比, 验证了模型的正确性。之后利用仿真模型进一步分析了新型直流电动机的机械特性, 并说明了仿真结果和实验结果的差异及其原因。仿真结果显示, 新型直流电动机的机械特性硬度好, 转矩波动小。

关键词: 新型直流电动机; 机械特性曲线; 仿真/Simulink

中图分类号: TM302

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)09-1086-04

Simulation analysis of new DC motor

CHEN Min-xiang¹, LI Feng-cai¹, WANG Zong-pei²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhuhai Motion Control Motor Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: In order to enhance the performance of motor, the new DC motor was presented. Then the winding structure of the new DC motor was introduced and its working principle was analyzed, the motor's mathematics model was established and simulation model based on Simulink was analyzed. By comparing the winding current waveforms and the total current waveforms under different load conditions which were derived from the simulation model with the actual experiment results, the models were proved to be right and exact. The torque-speed curves were further studied by using the simulation models, the differences and their causes with the simulation results and experimental results were illustrated. The simulation results show that the torque-speed curves of the new DC motor is hard and the torque ripple is small.

Key words: new DC motor; torque-speed curves; simulation/Simulink

0 引言

近代三相和多相无刷直流电动机(BLDCM)没有滑动电接触, 具有调速方便和转矩控制性能好等类似直流电动机的特性, 已成为近代运控电动机的主流。但是它本质上是具有自同步功能的交流永磁同步电动机, 与真正的直流电动机相比较仍有两项弱点: ①绕组电感限制电动机的极限功率输出; ②电枢交流电流使电流实时检测和控制复杂化, 文献[1-2]从电机的发展历史以及直流电机和现代无刷电机的结构原理出发, 提出了发展新一代电子换向直流电机的新思想, 文献

[3-5]通过样机的实验数据验证了新思想的正确性。

本研究以9换向单元新型直流电机为例, 简要介绍了这一新型直流电机的绕组结构和工作原理, 进而建立了电机的数学模型, 并进行仿真分析, 实验数据验证了数学模型的正确性, 为后续的深入研究提供了理论基础和方法。

1 新型直流电动机的基本结构和工作原理

新型直流电动机与传统的无刷直流电动机的区别主要在于绕组连接方式和电子换向的拓扑结构^[6]。

收稿日期: 2011-01-12

作者简介: 陈敏祥(1963-), 男, 浙江武义人, 博士, 副教授, 主要从事电力电子技术、电机驱动与控制、运控电机等方面的研究。E-mail: hxmotor2000@yahoo.com.cn

新型直流电动机的绕组接线图如图1所示,该电动机由9个绕组元件组成,这些绕组元件连成一个环形。电子换向单元与绕组元件连接的示意图如图2所示。

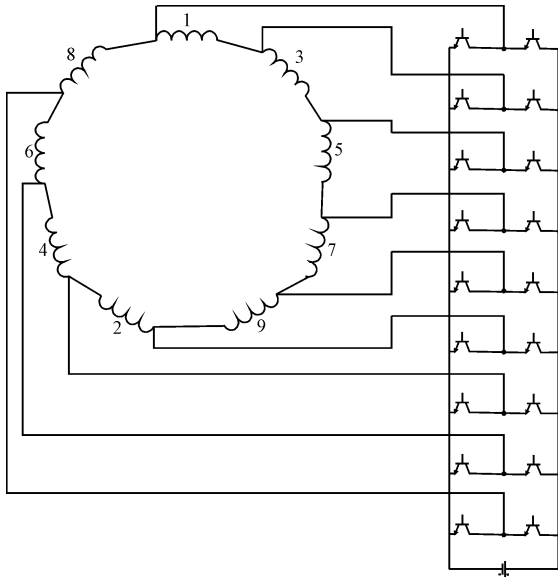


图1 新型电动机的基本结构图

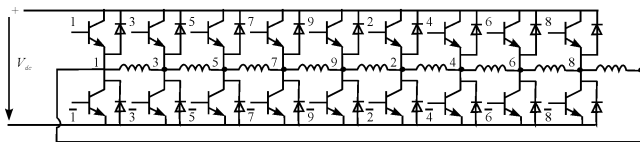


图2 电子换向单元与绕组元件连接示意图

样机用 Hall 元件检测转子位置,每个绕组元件对应一个 Hall 元件,Hall 信号从 0 到 1,或从 1 到 0 翻转时,正好对应相应绕组元件电势过零点。9 个霍尔信号将一个周期 360° 电角度划分为 18 个区域,如图 3 所示,假定图 3 中从左到右的区域编号依次为 1~18,以方便说明各个功率管的通断方式。在第 1 个区域内 1、2、4、6、8 号绕组反电势为正,3、5、7、9 号绕组反电势为负,为了保证各个绕组都输出正向转矩,此时需要给 1、2、4、6、8 号绕组通正向电流,3、5、7、9 号绕组通反向电流,则此时输出的正向转矩最大,由图 2 可知此时要开通功率管 2 和 3,关闭其他的功率管。当电机转过 20° 电角度,进入第 2 个区域后,2 号绕组的反电势由正过零变负,此时为了使各个绕组都输出正转矩,需要给 2 号绕组通反向电流,应关断 2 号功率管,开通 4 号功率管。再转过 20° 电角度后,3 号绕组反电势发生变化,于是断 3 通 5,以如此方式通断各个功率管,保证电机时刻运行在转矩最大的状态。

2 新型直流电动机的数学模型

本研究假设新型直流电动机的 9 个绕组完全对

称;忽略定子铁心齿槽和定子绕组电枢反应的影响;电机气隙磁导均匀,不考虑磁饱和,不计涡流和磁滞的损耗。根据电势平衡方程式:

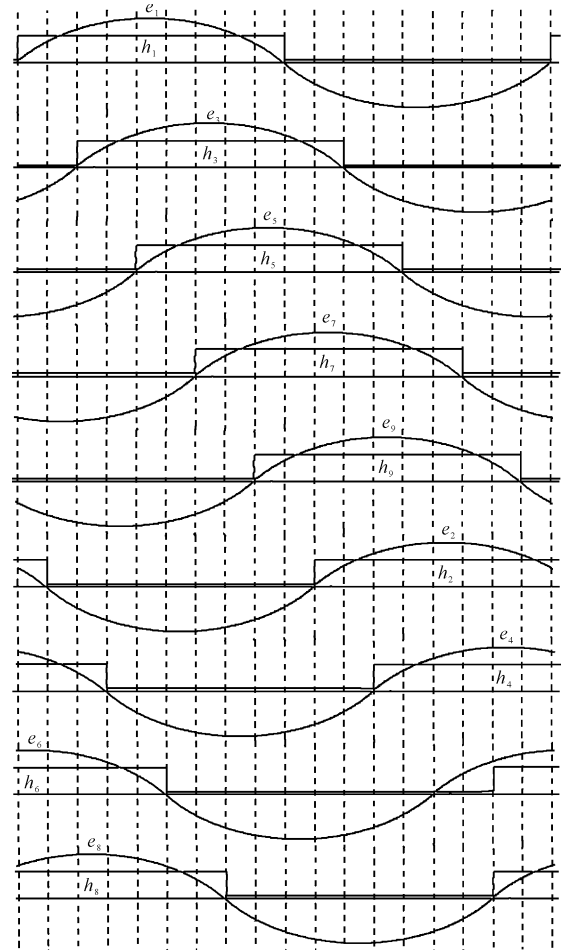


图3 正转时,霍尔信号和反电势波形汇总

$$U = R \cdot I + \frac{d\psi}{dt}$$

其中:

$$\Psi = L \cdot I + \Psi_f$$

从而有:

$$U = R \cdot I + \frac{dL}{dt} \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} + E \quad (1)$$

其中:

$$U = [u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9]^T;$$

$$I = [i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, i_7, i_8, i_9]^T;$$

$$E = [e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9]^T。$$

且:

$$e_i = K_e \Omega \sin(\theta - 2\pi(i-1)/9) + 1.1/5.9 \cdot K_e \Omega \sin(3(\theta - 2\pi(i-1)/9)), i = 1, 2, \dots, 8, 9, \Omega \text{ 为机械角速度, } \Omega = 2\pi n/60。$$

$$R = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r \end{bmatrix}_{9 \times 9}, r \text{—绕组电阻}; L = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} & M_{17} & M_{18} & M_{19} \\ M_{21} & L_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & M_{27} & M_{28} & M_{29} \\ M_{31} & M_{32} & L_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & M_{37} & M_{38} & M_{39} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_{44} & M_{45} & M_{46} & M_{47} & M_{48} & M_{49} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_{55} & M_{56} & M_{57} & M_{58} & M_{59} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_{66} & M_{67} & M_{68} & M_{69} \\ M_{71} & M_{72} & M_{73} & M_{74} & M_{75} & M_{76} & L_{77} & M_{78} & M_{79} \\ M_{81} & M_{82} & M_{83} & M_{84} & M_{85} & M_{86} & M_{87} & L_{88} & M_{89} \\ M_{91} & M_{92} & M_{93} & M_{94} & M_{95} & M_{96} & M_{97} & M_{98} & L_{99} \end{bmatrix} \circ$$

按照初始假定,电感矩阵是恒值矩阵。本研究将上面的各矩阵式入式(1)得电压平衡方程矩阵:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & & & & & & & & \\ & r & & & & & & & \\ & & r & & & & & & \\ & & & \ddots & & & & & \\ & & & & r & & & & \\ & & & & & r & & & \\ & & & & & & r & & \\ & & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ i_7 \\ i_8 \\ i_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} & M_{17} & M_{18} & M_{19} \\ M_{21} & L_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & M_{27} & M_{28} & M_{29} \\ M_{31} & M_{32} & L_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & M_{37} & M_{38} & M_{39} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_{44} & M_{45} & M_{46} & M_{47} & M_{48} & M_{49} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_{55} & M_{56} & M_{57} & M_{58} & M_{59} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_{66} & M_{67} & M_{68} & M_{69} \\ M_{71} & M_{72} & M_{73} & M_{74} & M_{75} & M_{76} & L_{77} & M_{78} & M_{79} \\ M_{81} & M_{82} & M_{83} & M_{84} & M_{85} & M_{86} & M_{87} & L_{88} & M_{89} \\ M_{91} & M_{92} & M_{93} & M_{94} & M_{95} & M_{96} & M_{97} & M_{98} & L_{99} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ i_7 \\ i_8 \\ i_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ \vdots \\ e_7 \\ e_8 \\ e_9 \end{bmatrix} \quad (2)$$

电机的电磁转矩表达式为:

$$T_{em} = p \frac{\sum_{j=1}^9 e_j i_j}{\omega} = \frac{\sum_{j=1}^9 e_j i_j}{\Omega} \quad (3)$$

式中: p —电机的极对数。

3 仿真与实验结果

3.1 仿真分析

本研究根据以上数学模型搭建了 Simulink 仿真模型^[7-11],对新型直流电动机进行仿真。仿真电机的参数如下:电机极对数 $p = 2$;额定电压为 $U_s = 150 \text{ V}$;绕组元件的电阻 $r = 1.55 \text{ }\Omega$;转动惯量为 $J = 0.0006 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;反电势波形系数 $K_e = 0.03082 \text{ V/rad}$;绕组1的自感 $L_{11} = 1.415 \text{ mH}$;绕组1和其它绕组间的互感 $M_{12} = -0.4375 \text{ mH}$, $M_{13} = 0.4300 \text{ mH}$, $M_{14} = -0.0572 \text{ mH}$, $M_{15} = 0.1810 \text{ mH}$,根据对称关系可知其他各个绕组间的互感值。

负载为 $0.051 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,仿真出来的绕组电流波形如图4所示;负载为 $0.27 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时仿真出来的总电流波形如图5所示。

3.2 实验结果

在本研究中,实验样机采用飞思卡尔的

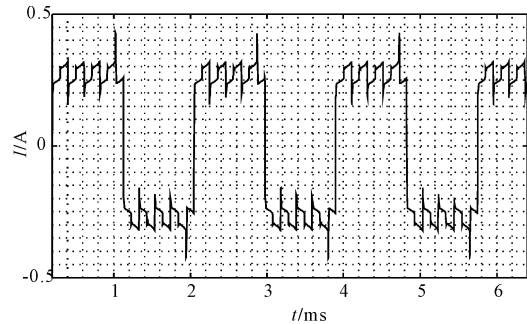


图4 绕组电流波形图(负载为 $0.051 \text{ N} \cdot \text{m}$)

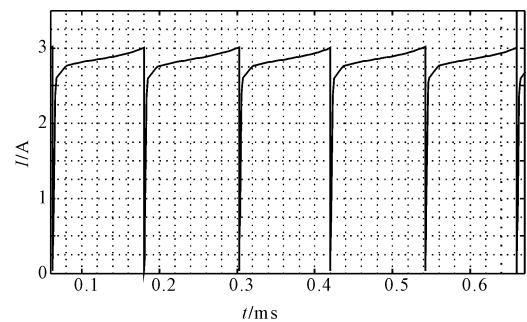


图5 总电流波形图(负载为 $0.27 \text{ N} \cdot \text{m}$)

DSP56F8037 作为主控芯片。实验在电压 150 V ,负载转矩 $0.051 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $0.27 \text{ N} \cdot \text{m}$ 条件下进行,采用电阻法测量电流,测取 $0.1 \text{ }\Omega$ 电阻两端的电压值,实验得出的绕组电流和总电流的波形图如图6、图7所示。

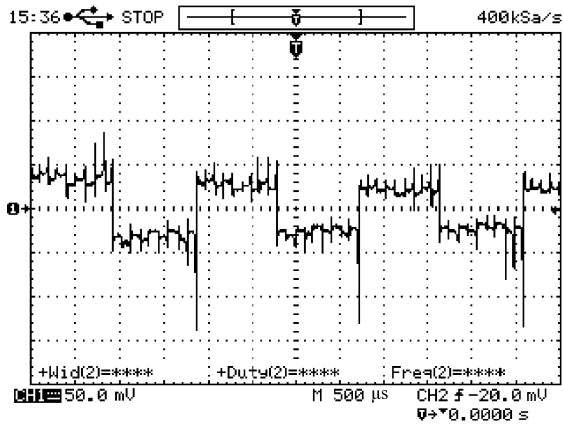


图6 绕组电流实验波形图(负载为0.051 N·m)

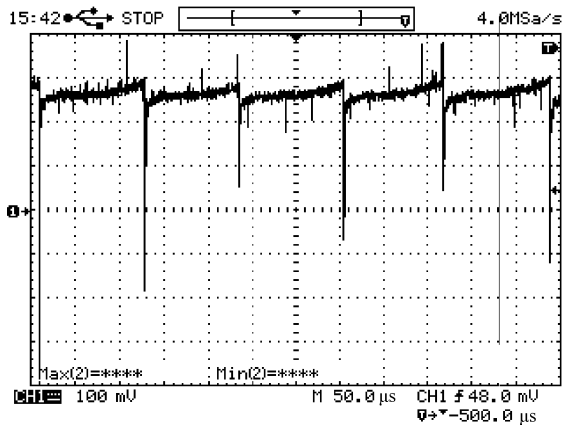


图7 总电流实验波形图(负载为0.27 N·m)

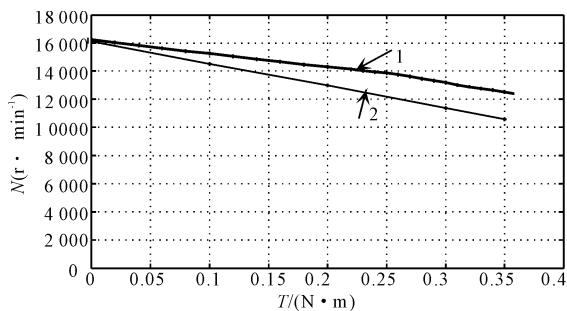


图8 新型电动机机械特性曲线对比关系图

对比图4和图6,仿真所得的相电流峰值稳定在0.3 A附近,周期大概是1.8 ms,实验得到的相电流峰值也基本稳定在0.3 A附近,周期约是1.7 ms;对比图5和图7,仿真所得的总电流峰值在3 A附近,周期大概是0.12 ms,实验得到的总电流峰值也基本稳定在3 A附近,周期约是0.12 ms;可见仿真模型是基本正确的^[12-14]。

本研究对电机的机械特性进行仿真,仿真得到的机械特性曲线如图8所示(曲线1),实验测得的机械特性曲线如图8所示(曲线2)。实验时,负载增加,电流变大,线路上的电压降增加,电机的给定电压下降,

实测电压从150 V降到140 V附近,而仿真时的外加电压150 V恒定,所以仿真得到机械特性硬一些是可以理解的。

4 结束语

本研究分析了新型直流电动机的工作原理,建立了其数学模型,并在此基础上建立了新型直流电动机的仿真模型,实验结果验证了仿真模型的正确性,为该电机的后续研究工作提供了基础。由图8可以看出新型直流电动机的机械特性较硬。仿真结果还显示,新型直流电动机性能优秀,可以高速平稳运行,正常工作时,电机转矩脉动小,运行效率高。

参考文献(References):

- [1] 王宗培,陈敏祥. 运控电机之无刷直流电机[J]. 微电机, 2009(12):58-63.
- [2] 王宗培,陈敏祥. 运控电机之无刷直流电动机[C]//微特电机技术创新与发展论坛,2009:1-6.
- [3] 王宗培,陈敏祥. 九换向单元电子换向直流电动机:中国, ZL. 2008 2 0205978. 1[P]. 2009-12-02.
- [4] 王宗培,陈敏祥. 新一代直流电动机的实践[C]//微特电机技术创新与发展论坛,中国,西安,2010:1-6.
- [5] 陈敏祥,王宗培. 新一代无刷直流电动机[C]//全电战车车辆发展趋势及关键技术论文集,兵器工业出版社, 2010:141-147.
- [6] 许明有. 基于新型 BLDCM 的倍捻机电驱动系统. [D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2010.
- [7] 乔鸣忠,张晓峰,郑乐. 九相三Y移20°无刷直流电动机及其控制系统[J]. 微特电机,2002,30(6):20-22.
- [8] 让余奇,熊浩,李槐树. 六相无刷直流电动机谐波转矩的分析与计算[J]. 海军工程大学学报,2008,20(5):5-9.
- [9] AL-ADSANI A S, SCHOFIELD N. Comparison of Three- and Nine-Phase Hybrid Permanent Magnet Generators[C]// Industrial Electronics, 2009. IECON 09. 35th Annual Conference of IEEE, 2009: 3880-3885.
- [10] 纪志成,沈艳霞. 基于 Matlab 无刷直流电机系统仿真建模的新方法[J]. 系统仿真学报,2003,15(12):1745-1749.
- [11] 韦海文. 船用六相无刷直流电动机驱动系统的仿真分析[J]. 广东造船,2009,28(4):35-38.
- [12] 颜建军,刘哲纬. 单相电机的无线遥控调速控制器[J]. 轻工机械,2010,28(5):69-72.
- [13] 陈宇,乌日图. 无刷直流电动机双闭环调速系统[J]. 轻工机械,2009,27(1):76-79.
- [14] 李登峰. 无刷直流电动机无位置传感器检测技术[J]. 机电技术,2010,27(3):68-70. [编辑:张翔]