

文章编号:1672-6413(2014)05-0017-03

无刷直流电机控制系统的建模仿真分析*

石江涛, 潘 峰, 罗方利

(太原科技大学, 山西 太原 030024)

摘要: 分析了BLDCM的数学模型, 运用MATLAB仿真软件搭建了无刷直流电机控制系统的仿真模型。本系统采用了速度PID控制、电流迟滞控制的双闭环控制方案, 电流迟滞控制是为了更方便地跟踪PWM信号并控制逆变器开关的导通与关断。通过试验结果可以看出系统能够稳定运行, 进而验证了该方案的可行性。

关键词: 无刷直流电机; MATLAB; 建模; 仿真

中图分类号: TM33: TP391.7

文献标识码: A

0 引言

无刷直流电机(BLDCM)不需要机械电刷, 这样就会消除机械电刷带来的负面效果, 而且它还具有质量小、规格小、惯量小、效率高和控制精度高等优点, 并保留了普通直流电动机优良的机械特性, 故被广泛应用于伺服控制、数控机床、机器人等领域^[1,2]。MATLAB是一种强大的建模仿真软件, 本文借助它的仿真能力, 并运用MATLAB/Simulink中的相关模块元件与S-function模块建立了BLDCM控制系统的仿真模型, 并通过试验观察系统的各项输出参数波形, 同时人为地改变系统的仿真结构并对参数进行另设, 由此对系统在不同仿真结构与不同参数下的动、静态特性进行对比研究^[3,4]。

1 BLDCM的数学模型

为了方便分析系统的动、静态特性, 以两相导通星形三相六状态为例, 假定以下条件成立: ①电机的气隙磁场为方波, 三相绕组完全对称, 同时定子电流、转子磁场分布也都对称^[5,6]; ②忽略电机的齿槽、换相过程和电枢反应等的影响; ③电机的电枢绕组在定子内表面均匀连续分布; ④磁路不饱和, 不计涡流和磁滞损耗。

在以上假定条件下, 根据BLDCM的机械特性, 可建立电机的状态方程及电机的等效电路。

1.1 BLDCM的电压状态方程

BLDCM的电压平衡状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} p \cdot$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: u_a, u_b, u_c 为三相定子电压, V; R_a, R_b, R_c 为三相定子绕组的相电阻, Ω ; i_a, i_b, i_c 为电机定子相电流, A; L_a, L_b, L_c 为电机定子自感, H; $L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$ 为电机定子绕组之间的互感, H; p 为微分算子 d/dt ; e_a, e_b, e_c 为电机定子的反电动势, V。

通过了解无刷直流电机的结构, 并假定电机的三相绕组是完全对称的, 那么就会有以下关系:

$$\begin{aligned} L_a &= L_b = L_c = L, \\ L_{ab} &= L_{ac} = L_{ba} = L_{bc} = L_{ca} = L_{cb} = M, \\ R_a &= R_b = R_c = R. \end{aligned}$$

在三相对称的电机中, $i_a + i_b + i_c = 0$, 同时 $Mi_b + Mi_c = -Mi_a$, 所以可将式(1)变换为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

1.2 BLDCM的转矩方程

BLDCM的电磁转矩方程可表示为:

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega. \quad (3)$$

其中: T_e 为电磁转矩, N·m; ω 为电机的角速度, rad/s。无刷直流电机的运动方程为:

$$T_e = T_L + B\omega + J \frac{d\omega}{dt}. \quad (4)$$

* 太原科技大学优秀研究生创新项目 (20125011)

收稿日期: 2013-12-20; 修回日期: 2014-04-20

作者简介: 石江涛 (1986-), 男, 河北保定人, 在读硕士研究生, 研究方向为现代交流传动与控制。

其中: T_L 为负载转矩, $N \cdot m$; B 为阻尼系数, $N \cdot m \cdot s/rad$; J 为电机的转动惯量, $kg \cdot m^2$ 。

1.3 BLDCM 的状态方程

由电机的电压方程, 可得其状态方程:

$$p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-M} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-M} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.4 BLDCM 的等效电路

根据式(2)的电压方程, 可以用图 1 的等效电路图表示电机。

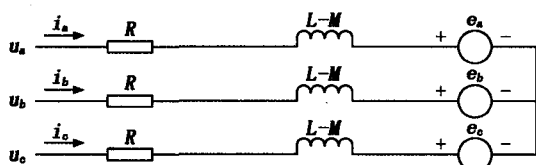


图 1 BLDCM 等效电路图

2 BLDCM 控制系统仿真模型的建立^[7-9]

2.1 BLDCM 控制系统模块

在 MATLAB 7.0 的 Simulink 环境下, 建立 BLDCM 控制系统的结构框图, 如图 2 所示。其中, θ 为角位移, I_{ar} , I_{br} , I_{cr} 为参考电流, I_s 为给定电流。

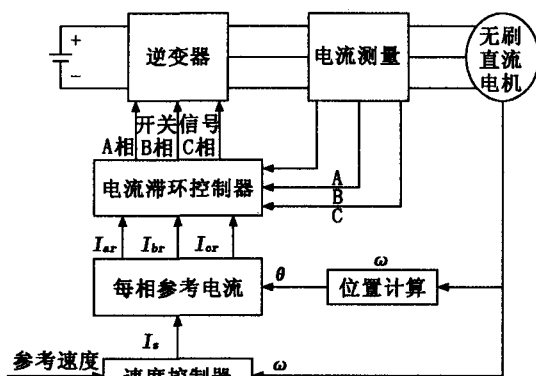


图 2 BLDCM 控制系统结构框图

本文的 BLDCM 控制系统采用转速 PID、电流迟滞同时作用的双闭环控制方案。通过对图 2 的分析可以将整体模块分为电机本体模块(见图 3)、电机速度模块(见图 4)、转矩计算模块(见图 5)。

2.2 S 函数部分子程序

(1) 参考电流子程序如下:

```
if (u[1]>=0 & u[1]<=pi/3)
{ Ia=u[0]; Ib=-u[0]; Ic=0; }
else if (u[1]>pi/3 & u[1]<=2*pi/3)
{ Ia=u[0]; Ib=0; Ic=-u[0]; }
else if (u[1]>2*pi/3 & u[1]<=pi)
{ Ia=0; Ib=u[0]; Ic=-u[0]; }
```

```
else if (u[1]>pi & u[1]<=4*pi/3)
{ Ia=-u[0]; Ib=u[0]; Ic=0; }
else if (u[1]>4*pi/3 & u[1]<=5*pi/3)
{ Ia=-u[0]; Ib=0; Ic=u[0]; }
Else { Ia=0; Ib=-u[0]; Ic=u[0]; }
* y1=Ia;
* y2=Ib;
* y3=Ic;
```

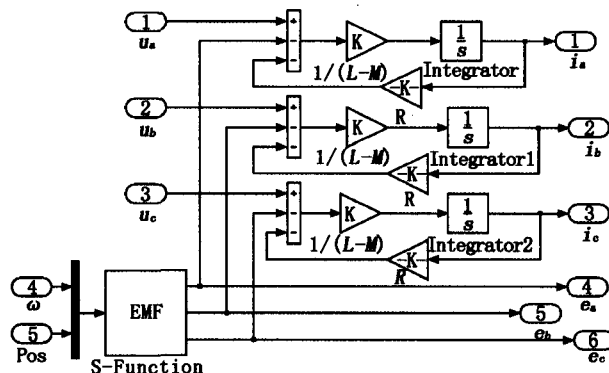


图 3 电机本体模块

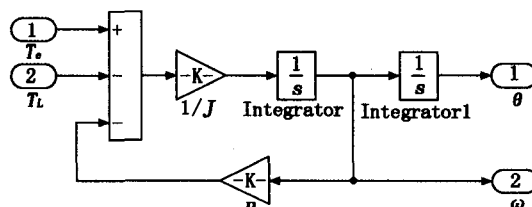


图 4 电机速度模块

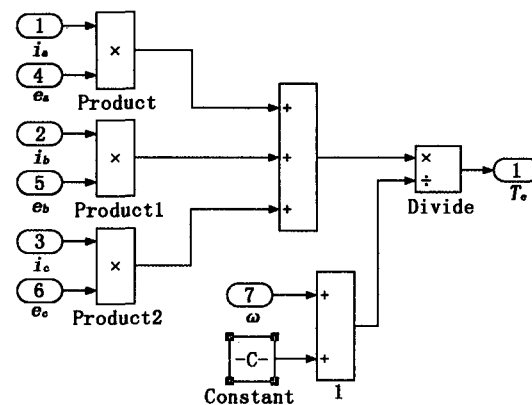


图 5 转矩计算模块

(2) 位置检测子程序如下:

```
b=(Theta/(2*pi));
a=floor(b);
if (Theta==0)
y[0]=0;
else if ((Theta/(2*pi))==a)
y[0]=2*pi;
else y[0]=Theta-a*2*pi;
* y=y[0];
```

(3) 反电动势子程序如下:

```
If (u[0]>=0 & u[0]<=pi/3)
{ ea=k; eb=-k; ec=k*((-u[0])/(pi/6)+1); }
else if (u[0]>pi/3 & u[0]<=2*pi/3)
{ ea=k; eb=k*((u[0]-pi/3)/(pi/6)-1); ec=-k; }
else if (u[0]>2*pi/3 & u[0]<=pi)
```

```

{ea=k*((2*pi/3-u[0])/(pi/6)+1);eb=k;ec=-k;}
else if (u[0]>pi&&u[0]<=4*pi/3)
{ea=-k;eb=k;ec=k*((u[0]-pi)/(pi/6)-1);}
else if (u[0]>4*pi/3&&u[0]<=5*pi/3)
{ea=-k;eb=k*((4*pi/3-u[0])/(pi/6)+1);ec=k;}
else{ea=k*((u[0]-5*pi/3)/(pi/6)-1);eb=-k;ec=k;}

*y1=ea;
*y2=eb;
*y3=ec;
    
```

3 仿真结果分析

对仿真系统的参数进行如下设置:绕组电阻 $R=1\ \Omega$, 电机的互感 $M=-0.061\ \text{H}$, 电机的自感 $L=0.02\ \text{H}$, 电机的转动惯量 $J=0.005\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$, 电机的阻尼系数 $B=0.0002\ \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$, 电机的反电动势系数 $K_e=0.185\ \text{V}\cdot\text{s}/\text{rad}$, 极对数 $P=1$, 额定转速 $n=1000\ \text{r}/\text{min}$, 峰值电流 $35\ \text{A}$, $220\ \text{V}$ 直流电源。

图6为仿真得到的电机转速图,初始时不加负载启动,在电机达到稳定状态后,在 $t=1\ \text{s}$ 时突然加入负载 $T_L=2.5\ \text{N}\cdot\text{m}$,然后再在 $t=3\ \text{s}$ 时突然撤去负载。

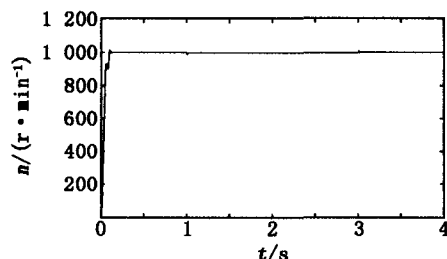


图6 电机转速图

图7为三相反电动势波形图,图8为电机运行过程中的转矩响应波形图。

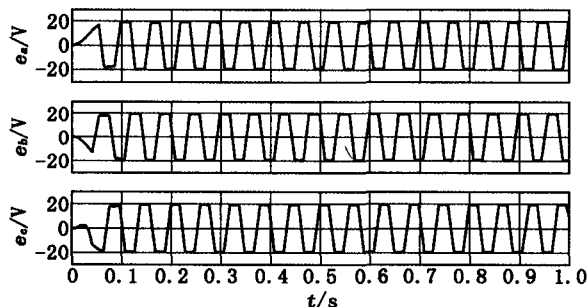


图7 三相反电动势波形图

4 结论

本文基于对 BLDCM 数学模型的分析,在 MATLAB 仿真软件下构建了 BLDCM 的双闭环仿真模型,由系统输出的转速图、反电动势图与转矩图可以看出此系统能够稳定运行,具有很好的静、动态特性。

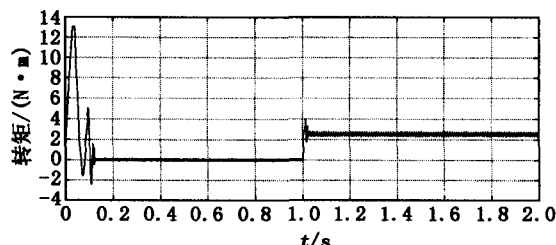


图8 转矩响应波形图

参考文献:

- [1] 薛定宇,陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [2] 王季铁,曲家骥. 执行电动机[M]. 北京:电子工业出版社,1997.
- [3] 邓兵,潘俊民. 无刷直流电机控制系统仿真[J]. 计算机仿真,2002,19(5):50-100.
- [4] 徐昕,李涛. MATLAB 工具箱应用指南[M]. 北京:电子工业出版社,2000.
- [5] 纪志成,沈艳霞,姜建国. 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.
- [6] Miller T J E. Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives [M]. New York: Clarendon Press, 1989.
- [7] Thomas Salem, Tim A Haskew. Simulation of the brushless DC machine [G]// Proceedings of the Twenty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory (SSST95). USA:[s. n.], 1995: 18-22.
- [8] Ionel D M, Eastham J F, Betzer T. Finite element analysis of a novel brushless DC motor with flux barriers [J]. IEEE Trans on Magnetics,1995,31(6):3749-3751.
- [9] Jeon Y S, Mok H S, Choe G H, et al. A new simulation model of BLDC motor with real back EMF waveform [G]// Proceeding of the 7th Workshop on Volume Computers in Power Electronics. USA:[s. n.], 2000: 217-220.

Modeling and Simulation Analysis of Brushless DC Motor Control System

SHI Jiang-tao, PAN Feng, LUO Fang-li

(Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The mathematical model of a BLDCM was analysed, and the simulation model of BLDCM control system was set up using MATLAB simulation software. This system adopted the scheme of double closed loop control including PID speed control and the current hysteresis control, in order to track PWM signal and control the inverter switch on and off more conveniently. The test result shows that system works well, and the feasibility of the scheme is verified.

Key words: brushless DC motor; MATLAB; modeling; simulation