

# 无刷直流电机模糊 PI 控制系统建模与仿真

雷金莉

(宝鸡文理学院 电子电气工程系, 陕西 宝鸡 721007)

**摘要:**从无刷直流电机(BLDCM)的工作原理和结构出发,在分析了BLDCM数学模型的基础上,采用模块化方法,在Matlab/Simulink中建立了BLDCM转速、电流双闭环控制系统模型。利用该模型进行了电动机静态性能的仿真研究,仿真结果与理论分析一致,表明该方法建立的BLDCM控制系统仿真模型合理、有效。该模型简单、直观、参数易于修改和替换,可方便地用于其他控制算法仿真研究。

**关键词:**无刷直流电机; Matlab/Simulink; 双闭环控制系统模型; 仿真模型

**中图分类号:**TN911-34; TP391      **文献标识码:**A      **文章编号:**1004-373X(2012)06-0161-03

## Modeling and simulation of fuzzy-PI control system for brushless DC motors

LEI Jin-li

(Department Electronics & Electric Engineering, Baoji University of Arts & Science, Baoji 721007, China)

**Abstract:** According to the principle and structure of the brushless DC motor (BLDCM), based on analysis of BLDCM mathematic model, a simulation model of BLDCM speed and current double-closed-loop control system was established in Matlab/Simulink by means of modularization method. The static and dynamic performances of BLDCM were simulated. The reasonability and validity were testified by the coincidence of the simulation results and theoretical analysis. This model has the virtues of simpleness and understandability. its parameters are easy to modify and replace. It is convinient to be applied to the research of other control algorithms.

**Keywords:** brushless DC motor; Matlab/Simulink; double-closed-loop control system model; simulation model

随着新型永磁材料、自动控制技术、电力电子技术以及电子技术的迅速发展,无刷直流电机(BLDCM)也随之发展起来并已成熟为一种新型的机电一体化设备,它是现代工业设备中重要的运动部件。无刷直流电机采用电子换相器替代直流电机的机械换向器,实现直流到交流的逆变,采用位置传感器控制绕组电流的切换,既保持了直流电机的良好调速特性,又具有交流电机结构简单、运行可靠、维护方便的特点。BLDCM以体积小、速度高、可靠性好等优点广泛地应用于航空航天、机器人、电动汽车、仪器仪表、家用电器以及数控装置等领域<sup>[1]</sup>。近年来,无刷直流电机的应用领域不断扩大,其控制系统的要求也随之越来越高。无刷直流电机控制系统设计的过程中,为了缩短设计周期、降低研究成本和风险,通常先采用计算机仿真技术,建立无刷直流电机控制系统的仿真模型,分析电机转速、转矩等参数变化情况,研究整个电机系统的各类定量关系,提取设计、分析和调试电机及其驱动系统所需数据,施加不同的控制算法以寻求最佳参数,有效地节省控制系统设计时间,加快了实际系统设计和调试的进程<sup>[2]</sup>。

## 1 无刷直流电机的数学模型

由于无刷直流电机的气隙磁场、反电动势以及电流是非正弦的,因此,采用直、交轴坐标变换已不是有效的分析方法。而在分析和仿真BLDCM控制系统时,直接利用电机原有的相变量来建立数学模型却比较方便,又能获得较准确的结果。本文以两相导通星形三相六状态BLDCM为例,分析其数学模型及电磁转矩等特性。为了便于分析,假定<sup>[3]</sup>:

- (1) 三相绕组完全对称,气隙磁场为方波,定子电流、转子磁场分布皆对称
- (2) 忽略齿槽、换相过程和电枢反应等的影响;
- (3) 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。

根据无刷直流电机的特性,可建立其电压、转矩以及运动方程。

### 1.1 无刷直流电机电压方程

BLDCM的定子三相绕组电压平衡方程可表示为:

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

式中:  $U_a, U_b, U_c$  为三相定子绕组相电压(单位: V);  $i_a, i_b, i_c$  为三相定子绕组相电流(单位: A);  $e_a, e_b, e_c$  为三相定子绕组反电动势(单位: V);  $R$  为三相定子绕组的电阻(单位:  $\Omega$ );  $L$  为三相定子绕组的自感(单位: H);  $M$  为三相定子绕组之间的互感(单位: H);  $p$  为微分算子  $p = d/dt$ 。

由于定子三相绕组完全对称, 为星形连接, 且没有中线, 故:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2)$$

且:

$$M_i_a + M_i_b + M_i_c = 0 \quad (3)$$

则式(1)所示的电压平衡方程可简化为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \cdot p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 1.2 转矩方程

无刷直流电机的电磁转矩是由定子绕组中的电流与转子磁钢产生的磁场相互作用而产生的。定子绕组产生的电磁转矩可表示为:

$$T_{em} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (5)$$

其中:  $T_{em}$  为电磁转矩(单位: N·m);  $\omega$  为电机机械转速(单位: rad/s),  $\omega = 2\pi n/60$ 。

由式(5)可看出, 无刷直流电动机的电磁转矩方程与普通直流电动机相似, 其电磁转矩大小与磁通和电流幅值成正比, 所以控制逆变器输出方波电流的幅值即可控制无刷直流电动机的转矩。

## 1.3 运动方程

无刷直流电机的电磁转、负载转矩以及转速之间的关系可用电机的机械运动方程来描述, 如下式所示。

$$T_{em} - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

式中:  $T_L$  为负载转矩(单位: N·m);  $B$  为阻尼系数(单位: N·m·s);  $J$  为转子的转动惯量(单位: kg·m<sup>2</sup>);  $d\omega/dt$  为转子机械角加速度。

## 2 无刷直流电机调速系统仿真模型建立

为使调速系统具有较好的动静态性能, 无刷直流电机控制系统采用转速、电流双闭环串级控制。外环为速度环, 使转速跟随给定速度变化, 实现转速稳态无静差, 采用模糊 PI 控制算法。内环为电流环, 使电流跟随电

流给定的变化, 保证起动时电机能获得允许的最大电流, 提高系统的动态性能, 采用滞环调节方法<sup>[4-6]</sup>。

在 Matlab 的 Simulink 环境下, 利用 S 函数和 SimPowerSystem Toolbox 提供的丰富模块库, 在分析 BLDCM 数学模型的基础上, 采用模块化建模方法, 建立 BLDCM 控制系统的仿真模型如图 1 所示, 其中主要包括: BLDCM 本体模块、控制模块、三相电压逆变器模块和逻辑换相模块<sup>[7-8]</sup>。

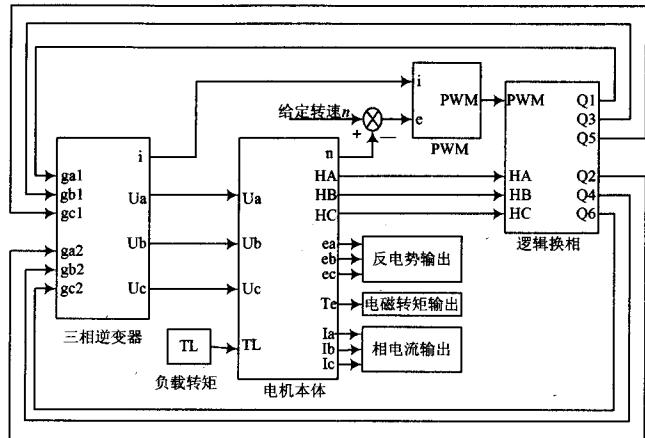


图 1 永磁无刷直流电机系统仿真模型图

### 2.1 BLDCM 本体模块

在无刷直流电机调速系统的整体模型中, BLDCM 本体模块是最重要的模块, 也是最难实现的部分。BLDCM 模块建立的依据即为电机的数学模型, 由电压平衡方程式(4)可知, 要获得三相电流信号  $I_a, I_b, I_c$ , 必需首先求得三相反电动势信号  $e_a, e_b, e_c$ 。而 BLDCM 建模过程中, 反电动势的求取方法一直是较难解决的问题, 反电动势波形不理想会造成转矩脉动增大、相电流波形不理想等问题, 严重时会导致换向失败, 电机失控, 因此, 获得理想的反电动势波形是 BLDCM 仿真建模的关键问题之一。根据转子位置将电机的一个运行周期 0~360° 分为 6 个阶段, 每 60° 为一个换向阶段, 每一相的每一个运行阶段都可用一段直线进行表示, 根据某一时刻的转子位置和转速信号, 确定该时刻各相所处的运行状态, 通过直线方程即可求得反电动势波形。按照这种规律即可得到定子反电动势与转子位置和转速之间的函数关系, 如表 1 所示, 采用 Simulink 的 S 函数编程实现, 通过 S 函数得到三相定子反电动势以及转子位置信号, 结合电压方程即可得到三相电流。根据 BLDCM 的电压平衡方程、转矩方程以及运动方程, 利用 Simulink 的 SimPowerSystems 工具箱提供的器件即可搭建成无刷直流电机的本体模型。

### 2.2 控制模块

无刷直流电机的控制系统最经典的控制方式是内

环为电流环,外环为速度环的双闭环控制结构。由于 PI 控制算法简单,参数调整方便,广泛应用于电机的双闭环控制,但是 PI 控制属于线性控制,当被控对象具有非线性特性时,将无法保持设计时的性能指标,鲁棒性也无法达到令人满意的效果。

因此,本文对转速、电流双闭环系统的 PI 控制加以改善,提出模糊 PI 控制的速度环和 PI 控制的电流环的控制方法。参考转速信号和实际转速反馈信号进行比

较,其差值输入到速度模糊 PI 调节器中,输出为参考电流信号。

速度调节器输出的参考电流信号与实际电流反馈值比较后,作为电流 PI 调节器的输入,其输出与周期序列信号进行合成,形成 PWM 逻辑控制信号,根据逻辑换相模块,顺序控制功率开关器件的导通,从而控制逆变器电压幅值,控制绕组的相电流,这样逆变器的输出电流就跟随给定电流的变化,且稳态无静差。

表 1 转子位置与反电势关系表

转子位置 $\theta/(\text{°})$	$e_a$	$e_b$	$e_c$
0~60	$k_e n$	$-k_e n$	$k_e n \left(1 - \frac{\theta}{30^\circ}\right)$
60~120	$k_e n$	$k_e n \left(\frac{\theta - 60^\circ}{30^\circ} - 1\right)$	$-k_e n$
120~180	$k_e n \left(\frac{120^\circ - \theta}{30^\circ} + 1\right)$	$k_e n$	$-k_e n$
180~240	$-k_e n$	$k_e n$	$k_e n \left(\frac{\theta - 90^\circ}{30^\circ} - 1\right)$
240~300	$-k_e n$	$k_e n \left(\frac{240^\circ - \theta}{30^\circ} + 1\right)$	$k_e n$
300~360	$k_e n \left(\frac{\theta - 300^\circ}{30^\circ} - 1\right)$	$-k_e n$	$k_e n$

速度模糊 PI 控制器和电流 PI 控制器可采用 Simulink 提供的模糊控制器和 PI 控制器搭建而成。

### 2.3 逻辑换相模块

逻辑换相模块接收转子位置信号,结合控制模块输出的 PWM 信号,输出 6 个电机换相及速度控制脉冲。输入为三相霍尔位置信号 HA, HB, HC 和 PWM 信号,输出为三相逆变器功率管的通断控制信号 Q1~Q6。其中,Q1, Q3, Q5 控制上侧功率管,Q2, Q4, Q6 控制下侧功率管。三相逆变器采用上管调制的方式,输入输出信号间的逻辑关系可表示为。

$$\begin{aligned} Q1 &= HB \cdot \overline{HC} \cdot PWM, Q2 = \overline{HB} \cdot HC, \\ Q3 &= \overline{HA} \cdot HC \cdot PWM, Q4 = HA \cdot \overline{HC}, Q5 = \\ HA \cdot \overline{HB} \cdot PWM, Q6 = \overline{HA} \cdot HB \end{aligned}$$

按照上面的逻辑关系,在 Simulink 中采用逻辑运算元件建立的逻辑换相模型。

### 2.4 电压逆变模块

电压逆变模块可直接采用 Simulink 的 SimPowerSystem 工具箱提供的 MOSFET 模块和直流电源模块构成,电压逆变器的三相输出 A, B, C 端分别加在三个电压表上,该模型输出的电压信号可直接作为永磁无刷直流电机本体的电压输入信号。三相电压逆变器的各个功率管根据逻辑换相模块输出的换相脉冲信号,顺序导通和关断。

## 3 仿真实验

根据文中建立的无刷直流电机转速、电流双闭环控

制系统模型,进行仿真实验。仿真实验用永磁无刷直流电机参数如下:电机工作状态为三相六状态,电机极对数  $p$  为 4,额定电压  $U_N$  为 500 V,额定转速  $n$  为 3 000 r/min,相电阻  $R$  为 0.285 Ω,相电感  $L-M=0.0085$  H,转动惯量  $J=0.008$  kg·m<sup>2</sup>。

仿真实验时,给定转速  $n=2500$  r/min,电机空载启动,在  $t=0.1$  s 时,突加负载转矩为 3 N·m,得到速度、转矩响应曲线如图 2 所示,相电流和反电势波形如图 3 所示。

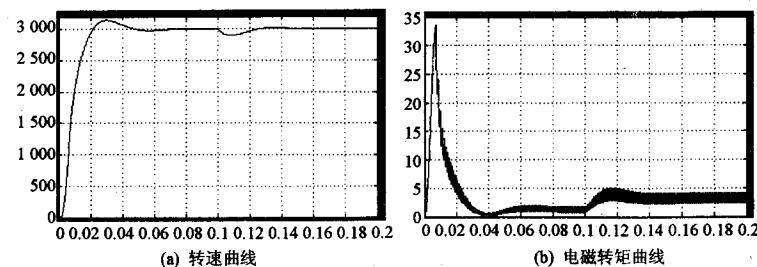


图 2 转速和电磁转矩仿真曲线

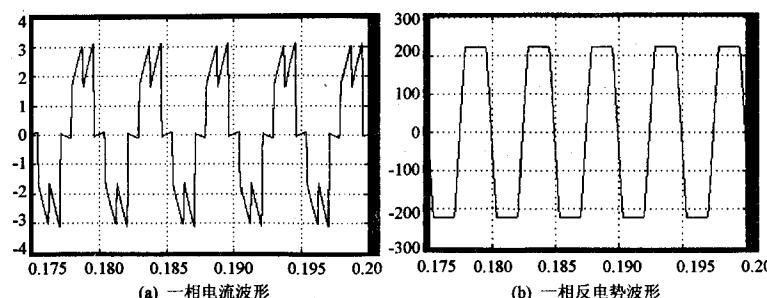


图 3 相电流和反电势波形

由仿真结果可见,电机系统在 0.017 s 进入稳态,

(下转第 167 页)

计中把已知参数带入上述公式,可得储能电容充电时间。

### 3 结语

本文采用简单的电路形式实现了通过点火准备作为点火安全保护,具备两级安全延时等多重保护的高可靠的点火执行级电路。比较其他点火执行电路,本文具有以下创新之处:采用了多电容并联的储能电容组,即使部分失效,其他电容储存的能量仍能可靠点燃火工品,提高了系统可靠性;具备点火后点火头短路保护功能,具有较高的可靠性、安全性;具备两级延时保护功能,确保系统安全;充电限流电阻前串接二极管,保证了储能电容组电能不会因为供电电压的下降而反向释放;具备指令安全接收、信号干扰滤除等功能,能有效吸收点火指令上幅度不大于 10 V,脉冲宽度小于 100 μs 的干扰脉冲,抗干扰能力强;采用精密微恒流源为电容充电,采用高精度电压基准作为参考电压,具有较高的延时精度,较好的实现了火工品的点火控制。

### 参 考 文 献

[1] 冯泽琴,朱素英.一种引信执行级电路的优化设计[J].航空

兵器,2011(2):44-46.

- [2] 蔡瑞娇,董海平.一种火工品可靠性评估的新方法[J].航空兵器,2009(1):46-49.
- [3] 朱伯鹏.靶弹回收点火控制器的设计[J].导弹与航天运载技术,2001(4):53-56.
- [4] Analog Device Inc. Pin programmable precision voltage reference AD584 [M]. [S. l.]: Analog Device Inc., 2001.
- [5] Hewlett-Packard Co. Hermetically sealed, low IF, wide VCC, high gain optocouplers technical data [M]. USA: Hewlett-Packard Co., 2002.
- [6] 张正喜,董余良.微控制器在精密延时点火装置中的应用[J].火工品,2002(1):5-7.
- [7] 罗振中,洪澜,道焰,等.模拟电子技术[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [8] 邹开凤,李勋章,殷合香.电容放电点火装置参数的选择研究[J].汽车工程,2007,29(5):401-403.
- [9] 沈超,付丽璋,吴世通,等.电容放电式火工品点火电路参数设计与仿真[J].航天返回与遥感,2011,32(1):67-73.
- [10] 康华光,陈大钦.电子技术基础模拟部分[M].北京:高等教育出版社,1998.
- [11] 刘明芳,张小兵.半导体桥点火电路的设计和仿真[J].火工品,2008(2):1-5.

**作者简介:**高先锋 男,1979 年出生,江苏丰县人,工程师。主要从事空空导弹回收和数据记录方面的研究工作。

(上接第 163 页)

无超调,转速变化平稳,转矩脉动较小;当负载突变时,系统能迅速恢复到平衡状态,稳态运行时无静差,转矩也能迅速调整到相应的稳态,系统对负载扰动有较好的抗干扰性能;相电流和反电势波形与理论分析波形一致,证明了文中所提出的 BLDCM 仿真模型正确。

### 4 结语

本文利用 Matlab/Simulink 中的电力系统仿真模块集、S 函数以及模糊控制工具箱建立了无刷直流电机转速、电流双闭环控制系统模型,仿真过程中可以通过二维视图直观的反映系统运行过程中的各个模块的状态和各种信号的变化情况,从而可以方便的调整控制参数,由于该仿真模型采用模块化方法设计,可以方便得修改电机参数,改换或改进控制策略也十分便捷,为电机控制系统设计提供了方便。文中速度环采用模糊 PI 控制,电流环采用 PI 控制方法。仿真实验结果表明:系统响应快且运行平稳,具有较好的静、动态特性。

### 参 考 文 献

- [1] 刘刚,王志强,房建成.永磁无刷直流电机控制技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 殷云华,郑宾,郑浩鑫.一种基于 Matlab 的无刷直流电机控制系统建模仿真方法[J].系统仿真学报,2008,20(2):293-298.
- [3] 李钟明,刘卫国,刘景林,等.稀土永磁电机[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [4] HANSEN H B, KALLESOE C S, BENDTSEN J D. A hybrid model of a brushless DC motor [C]// Proceedings of IEEE 2007 International Conference on Control Applications. Singapore: IEEE, 2007: 1124-1129.
- [5] 蒋海波,崔新艺,曾凌波,等.无刷直流电机模糊控制系统建模与仿真[J].西安交通大学学报,2005,39(10):1116-1120.
- [6] 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.
- [7] 胡双,马志云,周理兵,等.永磁无刷直流电机系统建模研究[J].电工技术杂志,2003(8):67-98.
- [8] 钟君柳,姜孝华.基于 S 函数的无刷直流电机系统建模研究[J].微计算机信息,2007,23(7):273-275.

**作者简介:**雷金莉 女,1979 年出生,陕西高陵人,博士研究生,讲师。主要从事电机智能控制技术研究工作。