

# 直流无刷电机控制系统的仿真研究

黄智铭, 吴 辉, 吴玉辉, 周立求

(黄石理工学院 电气与电子信息工程学院, 湖北 黄石 435003)

**摘要:** 分析了直流无刷电机的数学模型, 并以之为基础构建了基于 MATLAB/Simulink 的直流无刷电机控制系统的仿真模型。直流无刷电机控制系统采用 PI 控制, 电流环采用滞环电流控制。对直流无刷电机进行了仿真, 仿真曲线正确反映了直流无刷电机的运行特性, 证明了该方法的有效性。

**关键词:** 直流无刷电机; 仿真; 数学模型

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)05-0102-03

## Simulation Study on Control System for Brushless DC Motor

Huang Zhiming, Wu Hui, Wu Yuhui, Zhou Liqiu

(Department of Electrical and Electronic Information Engineering, Huangshi Institute of Technology, Huangshi Hubei 435003, China)

**Abstract:** Simulation model of the brushless DC motor control system based on MATLAB / Simulink is constructed according to analyzing the mathematical model of brushless DC motor. In this control system, PI controller is adopted in the speed loop and a hysteresis current controller is adopted in the current loop. Simulation curve reflects the brushless DC motor operation characteristics accurately, which proves that the simulation results is reasonable and validity.

**Key words:** brushless DC motor; simulation; mathematical model

## 0 引言

直流无刷电机 (BLDCM) 是功率半导体和永磁材料一体化的新型电机, 它既具有直流电机优良的调速性能, 又具有交流电机结构简单、易于控制、运行效率高、运行可靠, 维护方便等优点<sup>[1]</sup>。广泛应用于伺服控制、数控机床、机器人等领域, 随着无刷直流电机应用领域的不断扩大, 要求控制系统设计简易、成本低廉、控制算法合理、开发周期短。为此, 建立无刷直流电机控制系统的仿真模型, 可有效节省控制系统设计时间, 及时验证施加于系统的控制算法, 观察系统的控制输出; 同时可充分利用计算机仿真的优越性, 人为地改变系统的结构、加入不同的扰动和参数变化, 以考察系统在不同结构和工况下的动、静态特性。本文在分析无刷直流电机数学模型的基础上, 建

立了 BLDCM 控制系统的计算机仿真模型, 利用该模型, 进行了控制系统的仿真试验, 结果表明, 通过该模型可进行各种控制策略和算法的验证, 加快了实际系统设计和调试的进程。

## 1 直流无刷电机的工作原理

直流无刷电机可设计成单相、两相、三相, 近年来还有设计成多相的, 但其中应用最广的是星形联接的三相绕组形式。本文采用全桥驱动的三相星形绕组 BLDCM, 见图 1<sup>[2]</sup>。换相逻辑电路根据电机转子位置, 控制开关元件  $T_1 \sim T_6$  的开通和关断。根据通电方式的不同, 有两两导通和三三导通两种常用工作方式, 下面仅以两两导通方式为例分析其工作原理。

驱动系统按两两导通方式工作时, 任意时刻都只

收稿日期: 2008-07-18

作者简介: 黄智铭 (1986-), 男, 湖北咸宁人, 黄石理工学院电气工程及其自动化专业学生;

周立求 (1960-), 男, 湖北黄梅人, 黄石理工学院教授, 博士, 主要从事电机与控制方面的教学与科研工作。

有两相绕组导通, 余下一相绕组处于悬空状态。每个电气周期内, 每相绕组正反导通各  $120^\circ$  电角度, 正向导通和反向导通之间间隔  $60^\circ$  电角度。而整个系统在一个电气周期内有 6 个状态, 每个状态下只有 2 个开关元件导通工作, 并持续  $60^\circ$  电角度<sup>[3]</sup>。开关元件的导通顺序是:  $T_6T_1$ 、 $T_1T_2$ 、 $T_2T_3$ 、 $T_3T_4$ 、 $T_4T_5$ 、 $T_5T_6$ 、 $T_6T_1$ ……。反电动势和相电流的相位关系如图 2 所示。

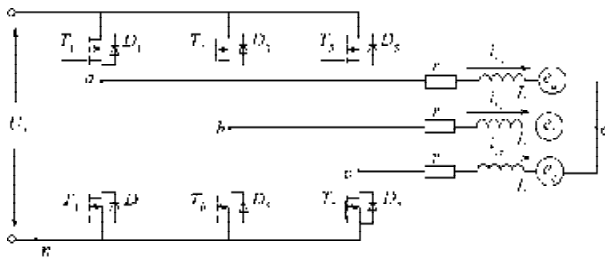


图 1 BLDCM 系统的主电路

Fig. 1 Main circuit of brushless DC motor

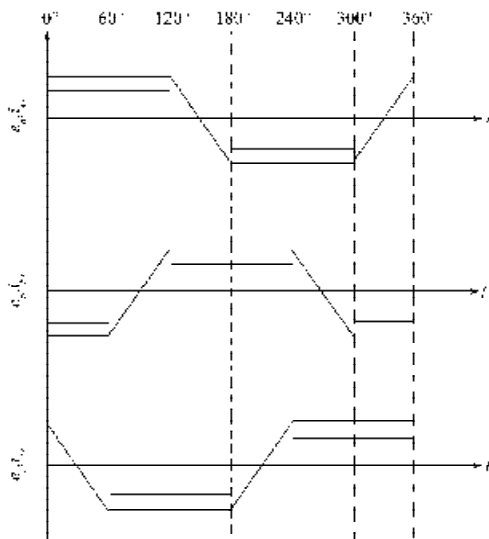


图 2 BLDCM 反电动势和相电流波形

Fig. 2 Waveforms of BLDCM reverse electromotive force and phase currents

假定流入绕组的电流所产生的转矩为正, 流出绕组的电流所产生的转矩则为负。在开关元件  $T_6T_1$  导通时,  $a$  相绕组中电流为正,  $b$  相绕组中电流为负, 根据假定  $a$  相绕组电流产生正的电磁转矩  $T_a$ ,  $b$  相绕组电流产生负的电磁转矩  $-T_b$ , 由于电机三相完全对称, 故每相转矩大小相等。由于电机三相绕组在空间对称, 可得大小为单相转矩  $\sqrt{3}$  倍的合成转矩。BLDCM 就是在这一转矩下运行的。

## 2 直流无刷电机的数学模型

### 2.1 电压方程

由电机学可知, 定子三相绕组的电压方程可以表示为<sup>[4]</sup>:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - p \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中:  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$  为电机三相相电压, 单位 V;  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为电机三相反电势, 单位 V;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为电机三相相电流, 单位 A;  $R_a$ 、 $R_b$ 、 $R_c$  为三相绕组的电阻, 单位  $\Omega$ ;  $L_a$ 、 $L_b$ 、 $L_c$  为三相绕组的自感, 单位 H;  $L_{ab}$  为  $a$  相和  $b$  相绕组的互感(其它类推), 单位 H;  $p$  为微分算子, 且  $p = \frac{d}{dt}$ 。

由于转子是永磁体, 其影响可忽略。故可认为  $L_a$ 、 $L_b$ 、 $L_c$ 、 $L_{ab}$ 、 $L_{ba}$ 、 $L_{ac}$ 、 $L_{ca}$ 、 $L_{bc}$ 、 $L_{cb}$  为常数, 与转子位置无关。且  $L_a=L_b=L_c=L$ 、 $L_{ab}=L_{ba}=L_{ac}=L_{ca}=L_{bc}=L_{cb}=M$  ( $M$  为定子绕组间互感)。令  $R_a=R_b=R_c=R$ , 则:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于定子三相绕组为三相星形连接, 且无中线, 则有:

$$i_a + i_b + i_c = 0, \quad (3)$$

并且  $Mi_a + Mi_b + Mi_c = 0$ ,  $(4)$

由此电压方程变为:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.2 状态方程

可将方程(5)写成状态方程的形式, 即:

$$p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/L-M & 0 & 0 \\ 0 & 1/L & M \\ 0 & 0 & 1/L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.3 电磁转矩方程

在通电期间, 直流无刷电机的带电导体处于相同的磁场下, 各相绕组的感应电动势为:

$$E_a = \frac{P_m N}{30} \phi_m \omega \quad (7)$$

式中:  $p_m$  为极对数;  $N$  为总导体数;  $\phi_m$  为主磁通。

从变频器的直流端看, Y 型联结的直流无刷电机感应电动势  $E$  由两相绕组经逆变器串联组成, 所以有

$$E_d = 2E_m = \frac{p_m N}{15} \phi_m n \quad (8)$$

因此，电磁转矩表达式可化为：

$$T_e = \frac{2E_m I_d}{\Omega} = \frac{4p_m N}{\pi n} \phi_m I_d \quad (9)$$

式中： $I_d$ 为方波电流的幅值； $n$ 为电动机转速， $\Omega = 2\pi n/60$ 。

由式(9)可看出，直流无刷方波电机的电磁转矩表达式与普通直流电机相同，其电磁转矩大小与磁通和电流的幅值成正比，所以控制逆变器输出方波电流的幅值即可控制直流无刷方波电机的转矩。

### 2.4 运动方程

$$T_e = J \frac{d\Omega}{dt} - B\Omega + T_l \quad (10)$$

$$\text{进一步化简可得: } \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_l) - \frac{B\Omega}{J} \quad (11)$$

式中： $T_l$ 为负载转矩； $J$ 为转子与负载的转动惯量； $B$ 为粘滞阻尼系数。

## 3 直流无刷电机控制系统的仿真

为了在MATLAB/Simulink环境下建立BLDCM的仿真模型，先分别建立速度控制模块、参考电流模块、电流滞环控制模块、电压逆变模块和BLDCM本体模块，然后将速度控制模块、参考电流模块、电流滞环控制模块、电压逆变模块和BLDCM本体模块等各功能模块进行有机整合，可得BLDCM控制系统的仿真模型<sup>[5]</sup>，如图3所示。

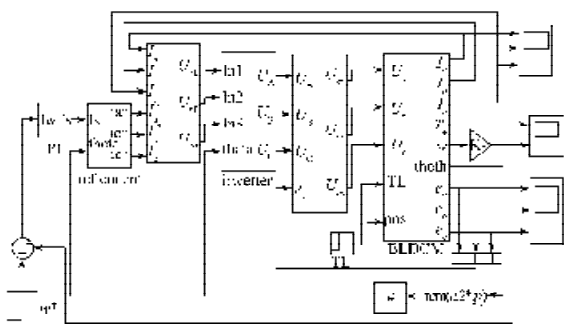


图3 BLDCM控制系统仿真模型

Fig. 3 The simulation model of BLDCM control system

仿真用BLDCM参数为：定子相绕组电阻 $r=1\ \Omega$ ，定子相绕组自感 $L=0.02\ \text{H}$ ，相绕组互感 $M=-0.0067\ \text{H}$ ，转动惯量 $J=0.005\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ ，极对数 $p=1$ ，反电动势系数 $J=0.4536\ \text{V}\cdot\text{s}/\text{rad}$ ，200V直流电源供电。

为验证BLDCM控制系统仿真模型的动、静态性能，给定转速 $\omega_r^*=1000\ \text{r}/\text{min}$ ，PI参数 $K_p=3$ ， $K_i=0.5$ ，电流限幅值20A，滞环宽度0.2。系统空载起动，待进入稳态后，在 $t=0.3\ \text{s}$ 时突加负载 $T_l=5\ \text{N}\cdot\text{m}$ ，可得系统转速、转矩、电流和反电动势的仿真曲线，如图4所示。

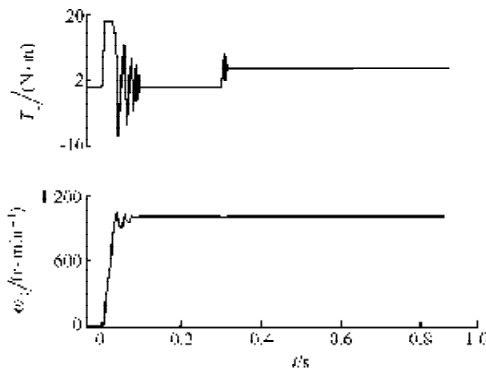


图4 转矩和转速响应曲线

Fig. 4 Curve of torque and speed

从仿真波形可看出，在给定转速下，系统能快速平稳地起动到给定转速，起动时间约0.1s。图4是转矩和电流响应曲线，为使开始时的曲线更清晰，将仿真曲线纵坐标略微左移。图4转矩波形表明，起动阶段系统保持转矩恒定，因而没有造成较大的转矩和相电流冲击，这是参考电流限幅作用的结果。空载稳态运行时，忽略系统的摩擦转矩，此时的电流和电磁转矩均值为零；在 $t=0.3\ \text{s}$ 突加负载后，转速发生突降，但又能迅速恢复到指令值，稳态运行时转速静差小于0.2%。

## 4 结语

本文在分析BLDCM数学模型的基础上，建立了BLDCM控制系统仿真模型，仿真结果符合理论分析，并具有良好的动态、静态响应。采用该仿真模型可灵活实现各种控制算法和控制策略，能有效地节省系统设计周期，为分析和设计BLDCM控制系统提供了有效的手段和工具。

### 参考文献：

- [1] 邓兵,潘俊民.无刷直流电机控制系统计算机仿真[J].计算机仿真, 2002, 19(5): 104.
- [2] 熊志学,邱建琪,林瑞光.无刷直流电机新型弱磁控制的仿真研究[J].微电机, 2006, 39(3): 3-6.
- [3] 卿浩,辜承林,唐小琦,等.无刷直流电机模糊控制系统的建模及仿真分析[J].微电机, 2006, 39(3): 19-21.
- [4] 辜承林.机电动力系统分析[M].武汉:华中理工大学出版社, 1998.
- [5] 鄢波涛,李叶松.基于Matlab无刷直流电机无传感器控制系统建模与仿真[J].电气传动, 2006, 36(11): 16-18.

(责任编辑:廖友媛)