

基于 Matlab 的无刷直流电动机驱动系统仿真建模

张 健, 王笑竹

(营口理工学院, 辽宁 营口 115014)

摘 要:基于 Matlab/Simulink 工具搭建无刷直流电机驱动系统仿真平台,分别建立直流无刷电机的本体模型和驱动控制模型,详细介绍了系统中各个子模块的搭建方式和实际功能,为分析驱动控制算法和策略可行性提供有效的仿真环境。通过实验仿真曲线特征和变化规律,实现了驱动系统各项性能评价指标和 PID 参数整定的验证,模型参数也为实际电机控制系统的设计和调试提供支撑。系统模型具有很好的灵活性和通用性,在此基础上通过简单的替换和修改就可以搭建和仿真使用其他控制算法和控制策略的仿真模型,为模糊控制、模糊 PID 控制和再生制动控制策略建立仿真环境提供参考,减少验证过程中的工作量。

关键词:无刷直流电动机;驱动系统;反电动势过零检测;仿真分析

中图分类号:TM33

文献标志码:A

引 言

长期以来,随着无刷直流电机的应用日趋广泛,其控制算法和控制策略也越来越丰富,国内外学者就此做了深入研究,并取得丰硕的成果。其中反电动势法、续流二极管法、状态观测器法及锁相环法是当前的热点问题^[1-2],但是缺少对这些方法的验证环境和评价体系,这在一定程度上限制了控制算法和策略的改进。因此建立简单精确的仿真模型成为目前亟待解决的问题^[3-5]。

为了便于评价分析和验证各种控制算法和策略,有必要对各种无刷直流电机驱动系统进行正确的建模和仿真,以此作为驱动系统可行性和性能评价的依据,基于 Matlab/Simulink 搭建无刷直流电机驱动系统各项性能评价指标和 PID 参数整定的验证仿真平台,为实际电机控制系统的设计和调试提供支撑。

1 无刷直流电动机数学模型

预建立无刷直流电机的数学模型,需要在合理的

理想条件范围内对其进行必要的简化^[6-8]。

电压平衡方程式可表示为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \times p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_X 、 e_X 、 i_X 、 R_X 、 L_{XX} 和 L_{XY} 分别为三相定子相电压、反电势、相电流、相电阻、绕组自感和绕组互感, p 为微分算子。因在三相对称的电机中存在: $i_a + i_b + i_c = 0$, $L_{XX} = L$, $L_{XY} = M$, $R_X = R$, 故有 $Mi_a + Mi_b + Mi_c = 0$, 则式(1)经整理可得:

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

无刷直流电动机的运动方程可写为:

$$T_e = \frac{P_n(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\omega} \quad (3)$$

收稿日期:2016-12-09

基金项目:营口理工学院青年自然科学研究项目(QNL201614;QNL201616)

作者简介:张 健(1981-),男,高级实验师,博士生,主要从事电力电子与电力传动、电机控制等方面的研究,(E-mail) 64755512@qq.com;
王笑竹(1982-),女,讲师,硕士,主要从事超声电机与压电材料方面的研究,(E-mail) 330608566@qq.com

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

其中: ω 为电机的角速度; P_n 为电机的磁极对数; T_e 为电机电磁转矩; T_L 为电机的负载转矩; B 为粘性阻尼系数; J 为电机的转动惯量。

2 无刷直流电动机仿真建模

2.1 无刷直流电动机本体的建模

电机本体是整个系统的核心,系统以模块式搭建,功能彼此独立每个模块构成一个有机整体,实现电机本体仿真平台^[9-11]。

(1) 电压方程模块

根据电压方程可搭建电机电压方程模块,如图 1 所示。

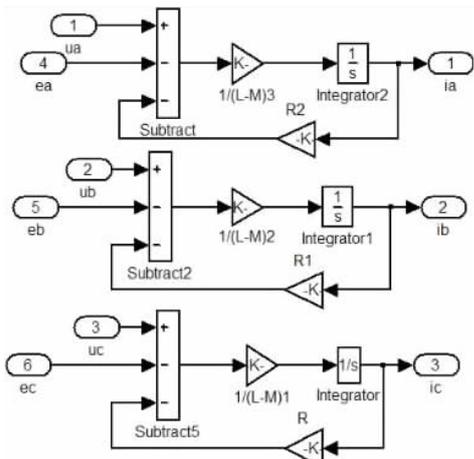


图 1 电压方程模块

(2) 电机反电动势模块

反电动势模块采用分段线性查表法^[12],其仿真结构如图 2 所示。

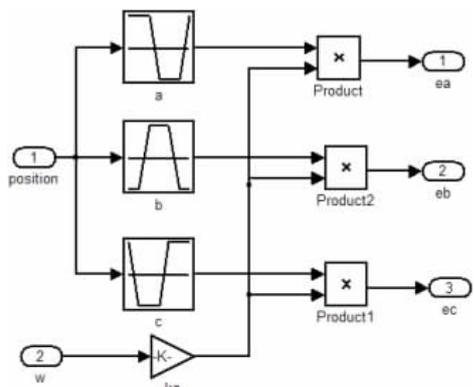


图 2 反电动势模块及其封装

图 2 中,反馈回来的转子位置信号 position(范围为 $0 \sim 2\pi$) 经过 Lookup Tablet 模块,与转速信号增益后分别相乘,得到三相绕组的反电动势。其中 Lookup Tablet 模块

是完成查表法的关键环节^[13-15]。

(3) 电机转矩计算模块

由式(3)和式(4)很容易得到电磁转矩与转速模块,如图 3 所示。转子位置检测模块如图 4 所示。

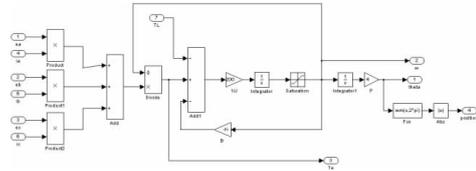


图 3 电机转矩计算模块

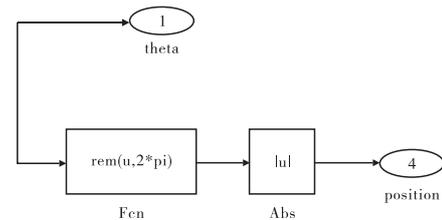


图 4 转子位置检测模块

建模完成后,就可以通过适当的链接完成电机本体总模型的建模,各环节的链接及电机本体的总模型如图 5 所示。

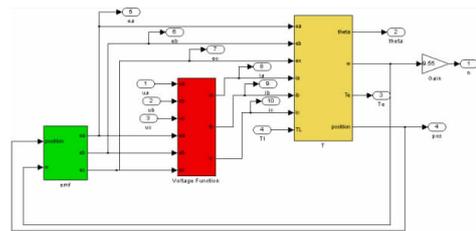


图 5 电机本体的总模型

2.2 无刷直流电动机驱动系统建模

利用 Matlab7.0 的 Simulink 模块对无刷直流电机驱动系统进行建模,建立的整体驱动系统如图 6 所示。

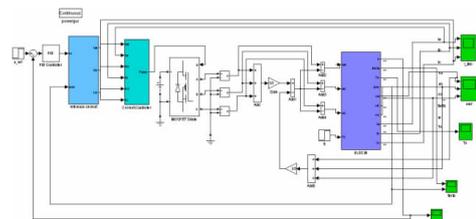


图 6 无刷直流电机驱动系统模型

无刷直流电机驱动仿真系统的工作原理可简要介绍为:预定的转速信号 (n_{ref}) 与实际转速信号 n 进行比较,求其偏差 e ,经 PID 控制器计算得电流幅值信号 I_s ,参考电流模块(reference current)利用 PID 控制器输出的电流幅值信号 I_s 和反馈的转子位置信号(position)计算

三相绕组各自的参考电流 i_{ar} 、 i_{br} 、 i_{cr} ，然后经电流滞环控制模块(Current Controller)实现各相实际电流 i_a 、 i_b 、 i_c 对参考电流 i_{ar} 、 i_{br} 、 i_{cr} 的滞环跟踪,输出 PWM 逆变器控制信号(Pulse),用于控制逆变器模块(MOSFET Diode)的导通和关断,从而产生驱动电机的输入相电压 u_a 、 u_b 、 u_c ，同时在给定时间对电机施加给定的负载转矩 t_l ，利用示波器观察各相电流 (i_{abc})、各相反电动势 (emf)、电磁转矩 (T_e)、转过角度及转子位置 (θ) 和转速 (n)，并反馈给前面的模块作为反馈信号,实现闭环控制。

(1) 速度控制模块

BLDC 驱动系统的速度环控制由速度控制模块实现,其结构如图 7(a)所示。速度控制采用 PID 控制器实现,转速预设值 (n_{ref}) 与反馈回来的实际转速信号 (n) 求其差值 e ，输入 PID 控制器作为其输入,经 PID 算法计算后输出电流幅值信号 I_s ，作为参考电流模块的输入信号。离散 PID 控制器的内部结构如图 7(b)所示。

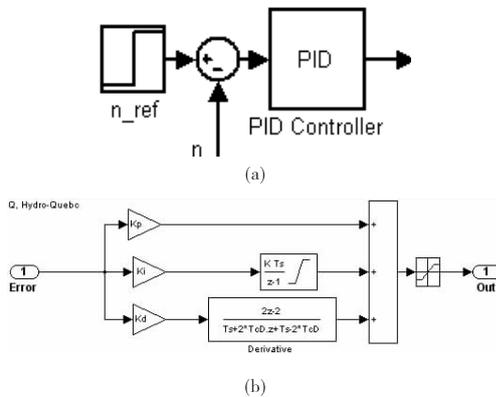


图 7 速度控制模块

(2) 参考电流模块

如图 8 所示,参考电流模块根据 PID 控制器输出的电流幅值信号 (I_s) 和反馈回来的转子位置信号 (position) 作为参考电流 i_{ar} 、 i_{br} 、 i_{cr} 完成电流滞环控制。

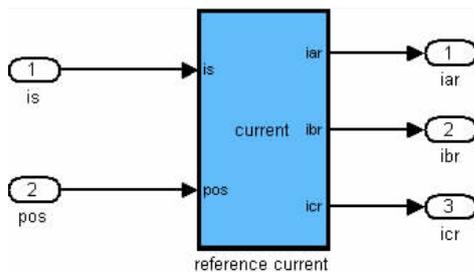


图 8 参考电流模块

参考电流模块的代码为:

```
function [ iar,ibr,icr ] = current ( is, pos )
```

% This block supports an embeddable subset of the MATLAB language.

% See the help menu for details.

```
iar = is;
ibr = -is;
icr = 0;
if ( pos >= 0 && pos < pi/3 )
    iar = is; ibr = -is; icr = 0;
elseif ( pos >= pi/3 && pos < 2 * pi/3 )
    iar = is; ibr = 0; icr = -is;
elseif ( pos >= 2 * pi/3 && pos < pi )
    iar = 0; ibr = is; icr = -is;
elseif ( pos >= pi && pos < 4 * pi/3 )
    iar = -is; ibr = is; icr = 0;
elseif ( pos >= 4 * pi/3 && pos < 5 * pi/3 )
    iar = -is; ibr = 0; icr = is;
elseif ( pos >= 5 * pi/3 && pos <= 2 * pi )
    iar = 0; ibr = -is; icr = is;
end
```

(3) 电流滞环控制模块

如图 9 所示,电流滞环控制模块(Current Controller)实现各相实际电流 i_a 、 i_b 、 i_c 对参考电流 i_{ar} 、 i_{br} 、 i_{cr} 的滞环跟踪,输出 PWM 逆变器控制信号(Pulse)。

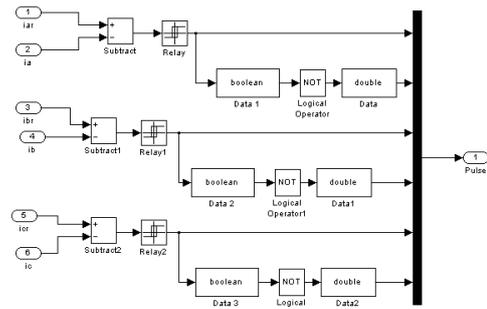


图 9 电流滞环控制模块

(4) 电压逆变器模块

采用 SimPowerSystems 工具箱的直流电源模块(DC Voltage Source)和全桥模块(Universal Bridge),其中全桥模块选择桥臂数为 3 个,功率器件为 MOSFET,电流滞环控制模块输出的 PWM 波形(Pulse)控制 MOSFET 的导通与关断,从而实现无刷直流电机的三相全桥控制,如图 10 所示。

由于 SimPowerSystems 里的模块不能直接相连 Simulink 里的模块,因此,全桥模块(Universal Bridge)与电机本体模块之间加上了三个受控电压源,实现两者的连接。

3 仿真结果及分析

选用的电动机为 57BL 系列,仿真参数可依照所选用的电动机说明书设置,见表 1。

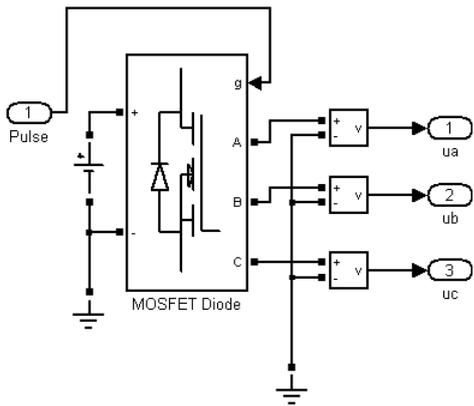


图 10 电压逆变器模块

表 1 电机参数

项 目	参 数
额定电压	24 V
额定电流	5.18 A
额定转矩	0.22 Nm
额定功率	70 W
额定转速	3000 r/min
磁极对数	5 对
反电动势系数	0.0482 VS/r
转动惯量	1.89×10^{-6} kgm ²
相电感	1.19 mH
阻尼系数	4.53×10^{-6} NmS/r
比例系数 K_p	3
积分系数 K_i	0.02
微分系数 K_d	0(无微分环节)
电流幅值信号 I_s 限幅范围	-35 ~ +35
采样周期 T	0.0001 s

仿真过程中,绕组电流、反电动势、位置信号和转速、转矩波形图如图 11 ~ 图 15 所示。

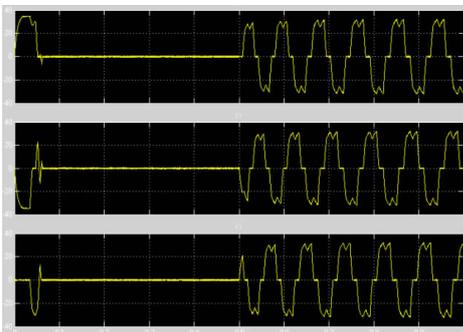


图 11 绕组电流仿真波形图

其中,图 13 的上半部分所示为转子转过的角度 θ 仿真波形,单位是 rad。可以看出,在初始转速上升阶段, θ 直线上升,斜率逐渐增大,随后斜率稳定直线上升,在 $t = 0.5$ s 时加负载后角度上升斜率几乎不变,说明转速波动不大,这与后面的转速仿真结果相符。由于仿真时间为 1 s,在转速为 $n = 1000$ r/min 的条件下转过的圈数约为 16.7 圈,且极对数 $P = 4$,故 1 s 时转过的

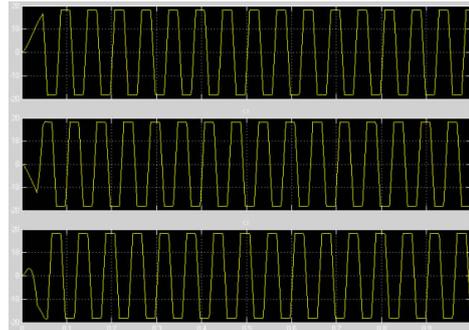


图 12 绕组反电动势仿真波形图

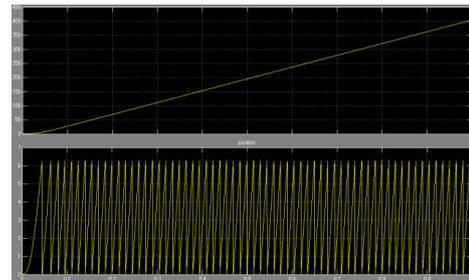


图 13 转子转过角度和转子位置仿真波形图

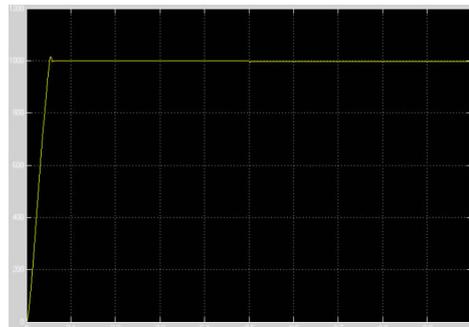


图 14 电机转速仿真波形图

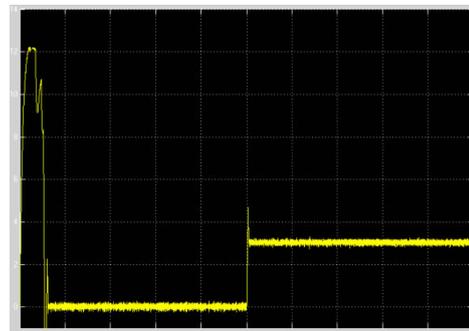


图 15 电机转矩仿真波形图

角度 θ 为 $16.7 \times 4 \times 2\pi = 419.7$,与图 13 中所示相符。

图 13 的下半部分为转子位置 position 的仿真波形。转速稳定后转子位置呈周期性变化,且由于极对数 $P = 4$,故转子转动一个周期其位置变化 4 个周期。由于仿真时间为 1 s,在转速为 $n = 1000$ r/min 的条件下转过的

圈数约为 16.7 圈,且极对数 $P = 4$,故 1 s 内 position 周期数应为 16.7×4 ,约 66 个周期,与图 13 中所示相符。

由图 14 中可知,当初始时刻提供 1000 r/min 的参考转速时,电机实际转速逐渐增大,并在 0.1 s 之前达到 1000 r/min,然后保持稳定下来,说明系统响应快速且平稳,无静态误差。

在 0.5 s 时突然增加 $T_L = 3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载转矩,此时电机实际转速会发生突降,且在短时间内恢复稳定,稳定转速在略低于 1000 r/min 的转速下小范围脉动,这主要是由电流换相和电流滞环控制器的频繁切换引起的。在此过程中没有发生大范围波动,这说明系统的稳定性较好,满足设计要求。

图 15 为电机转矩的仿真波形图,与转速仿真图类似,从电机转矩的仿真波形来看,转矩数值与实际情况相符,转矩响应快速、脉动小,满足设计要求。

4 结束语

基于 Matlab/Simulink 仿真环境,搭建的无刷直流电机本体仿真模型和转速-电流双闭环驱动控制系统模型具有很好的灵活性,在此基础上通过简单的替换和修改就可以搭建和仿真使用其他控制算法和控制策略的仿真模型,具有良好的通用性。

参考文献:

- [1] 张健,王笑竹.dsPIC30F6010 的直流无刷电机控制系统[J].单片机与嵌入式系统应用,2015,15(9):57-60.
- [2] 郎宝华,闵喜艳,张婧.基于 dsPIC30F3010 的无刷直流电动机控制系统设计[J].电子设计工程,2012,20(2):104-107,111.
- [3] 王晓明,王玲.电动机的 DSP 控制:TI 公司的 DSP 应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- [4] 王晓明.电动机的单片机控制[M].北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [5] 吴青萍.基于 dsPIC30F4012 的无刷直流电动机控制系统设计[J].微特电机,2012,40(8):43-45.
- [6] 马瑞卿,李颖,刘冠志.基于 dsPIC30F2010 的无刷直流电动机正弦波驱动系统设计[J].微特电机,2010,38(8):11-14.
- [7] 张冉,王秀和,王道涵.基于 dsPIC30F2010 的无刷直流电动机控制系统设计[J].微特电机,2008,36(5):30-31,42.
- [8] 张健,王笑竹.dsPIC30F6010 双闭环矢量法在电机控制中的应用[J].单片机与嵌入式系统应用,2015,15(12):15-18.
- [9] 岳学磊,白鹏.关于无刷直流电机调速系统优化控制研究[J].计算机仿真,2015,32(10):414-419,425.
- [10] 吕志宽,李声晋,卢刚,等.基于卡尔曼滤波器的无刷直流电动机仿真[J].微特电机,2011,39(4):24-28.
- [11] 梅亮,刘景林,董亮辉,等.基于 Simulink 无刷直流电机直接转矩控制研究[J].微电机,2013,46(6):62-66.
- [12] 李亚美.交流伺服控制系统的模型与仿真[J].伺服控制,2012(5):40-42,36.
- [13] 刘维维,张亚,崔瑞男,等.电动车无刷直流电机控制系统 Matlab 仿真[J].工业控制计算机,2011,24(6):32-33,35.
- [14] 吕伟鹏.无刷直流电机双闭环串级控制系统仿真研究[J].电子设计工程,2011,19(24):30-34.
- [15] 郭伟,张爱华,陈琛,等.无刷直流电机调速优化控制与仿真[J].计算机仿真,2015,32(10):360-364.

Simulation Model of Brushless DC Motor Drive System Based on Matlab

ZHANG Jian, WANG Xiaozhu

(Yingkou Institute of Technology, Yingkou 115014, China)

Abstract: Simulation platform of Brushless DC motor drive system is established based on Matlab/Simulink. The ontology model and drive control model of DC brushless DC motor are set up, and the construction methods and practical functions of each sub module are introduced in detail which provide the simulation environment to analyse the drive control strategy and algorithm feasibility effectively. Based on the characteristic and variation law of simulation curve, the performance of the evaluation index system and the setting of PID parameter validation are texted, besides, the design and debugging of the actual motor control system are supported by the model parameters. On this basis, through simple modifications or replacement, the simulation model which can use other control algorithms and control strategies are built and it can provide a reference for fuzzy control, fuzzy PID control and regenerative braking control strategy in simulation environment to reduce the workload of the process validation.

Key words: Brushless DC motor; motor control system; anti EMF zero crossing detection; simulation analysis