

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2013.07.005

无刷直流电机无位置传感器控制系统仿真研究

朱 勇, 冯开平

(广东工业大学 机电工程学院, 广东广州 510000)

摘要: 通过分析无刷直流电动机数学模型, 利用 Matlab/Simulink 对无刷直流电机无位置传感器控制系统进行了建模和仿真。分别用 Simulink 库中自带的电机模型, 反电动势过零点检测法、速度 PI 控制和电流滞环 PWM 控制方式对系统仿真, 使系统更直观、简化, 更加贴近实际控制系统, 为无刷直流电机无位置传感控制系统的工作设计与调试提供了新的方法。仿真结果得到的三相行电流波形和反电动势波形与理论分析得到的波形一致, 验证了该无位置传感器控制系统的正确性。

关键词: 无刷直流电机; 无位置传感器; 反电势过零点检测; Simulink

中图分类号: TM33 文献标识码: A 文章编号: 1009-9492(2013)07-0019-05

The Simulation and Research of Sensorless Control System for Brushless DC motor

ZHU Yong, FENG Kai-ping

(Guangdong University of Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Through the analysis of the mathematical model of brushless dc motor, using Matlab/Simulink for brushless dc motor without position sensor control system modeling and simulation. Using Simulink library respectively with motor model, counter electromotive force zero method, speed PI control and current hysteresis PWM control mode of system simulation, and makes the system more intuitive, simplified, more close to the actual control system for brushless dc motor without position sensor control system design and debugging provides a new method. Simulation results obtained three phase line current waveform and back emf waveform and theoretical analysis of the wave get consistent, verify the sensorless control system accuracy.

Key words: brushless DC motor; sensorless; back EMF zero crossing detector; Simulink

0 引言

无刷直流电动机在中小功率传动场合应用日益普及, 但需要安装传感器检测转子位置信号, 这样增加了既电机的体积、成本又降低了电机的可靠性, 维护不方便, 因此发展无位置传感器技术已经成为迫切需要。而建立无刷直流电机无位置传感器控制系统的仿真模型, 能有效的缩短控制系统研发和调试的周期。

基于 Matlab 的 BLDCM 仿真研究逐渐成熟, 本文采用 Matlab 中 SimPowerSystems 元件库中自带的 BLDC 模型, 比查表法^[1]、S 函数法^[2]等电机本体建模方便, 精确了很多, 克服了文献^[3]建模方法中存在的不足; 同时为了提高控制系统的控制精度, 没有选择控制母线电压而是采用速度 PI 控制和电流滞环 PWM 控制方式对电机三相电压直接控制; 在

电机转速检测模型上, 本文根据反电动势端电压过零点检测法的原理搭建一种转速检测的新方法, 它模拟了实际控制系统中软件计算转速的方法, 使仿真系统对实际无刷直流电机无位置传感器控制系统的研究更有参考价值。

1 无刷直流电机数学模型

为简化无刷直流电机模型的建立与分析, 需要对模型进行如下假设^[4]:

- (1) 定子绕组为 60° 相带整距集中绕组星形连接;
- (2) 忽略齿槽效应, 绕组均匀分布;
- (3) 忽略磁路饱和, 不计涡流和磁带损耗;
- (4) 不考虑电枢反应气隙, 磁场为近似均匀分的矩形波, 波形平顶宽度为 120° 电角度;
- (5) 转子上的绕组永磁体不起阻尼作用。

定子三相绕组的电压平衡方程可以表示为：

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

式(1)中, P 为微分算子, u_a 、 u_b 、 u_c 为定子相绕组电压, i_a 、 i_b 、 i_c 为定子相绕组电流, e_a 、 e_b 、 e_c 为定子相绕组感应电动势, R 为定子相绕组电阻, L 为定子绕组的自感, M 为定子各绕组的互感。

由于定子绕组采用Y形接法, 所以有:

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

$$\text{并且: } M i_b + M i_c = -M i_a \quad (3)$$

将以上两式带入(1)得到电压方程:

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

根据(4)式可得到无刷直流电机的等效模型, 如图1所示。

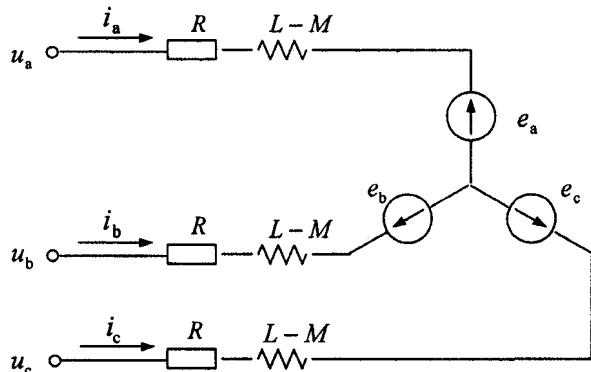


图1 无刷直流电机的等效模型图

无刷直流电机的电磁功率为:

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

不计转子的机械损耗和杂散损耗, 电磁功率全部转化为转子动能, 所以电池转矩为:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\Omega} \quad (6)$$

式(6)中, Ω 是转子的机械角速度。

2 无位置传感器反电动势过零点检测法原理与分析

无位置传感器的检测方法主要是通过检测电

机运行中的各种参数如电压值、电流值等能够测量到的物理量来间接地估计转子的位置。目前位置估计方法主要有反电动势检测法、续流二极管电流检测法和磁链观测器法等, 目前使用最为广泛的是反电动势法^[5-6]。这种方法在无刷直流电动机正常运行时, 忽略电动机电枢的反应, 通过检测关断相反电动势的过零点来获得永磁转子的关键位置信号, 从而可以控制绕组电流的切换, 实现电动机的运转^[7]。图2给出了梯形波反电动势与换相时刻的关系: 将反电动势过零点延迟30°电角度刚好对应电机的换相时刻, 通过控制IGBT的关断即可准确的实现无位置传感器控制的换相。

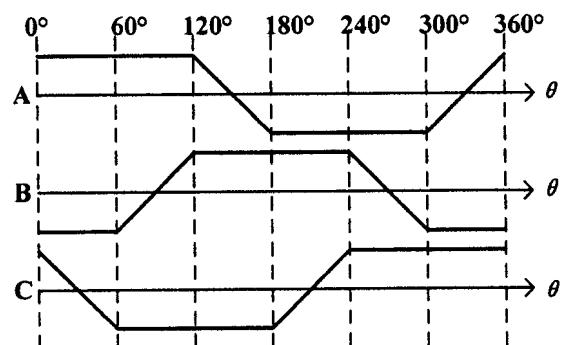


图2 定子绕组梯形波反电动势

电机采用120°电角度两两通电方式, 由(4)式可以得出电压平衡方程:

$$\begin{cases} V_a = V_n + i_a R + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_b = V_n + i_b R + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ V_c = V_n + e_c \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: V_a 、 V_b 、 V_c 为端电压, V_n 为中性点电压。

当电流为A→B时 i_a 与 i_b 大小相等方向相反, 当反电动势过零点时, 三相的反电动势之和为零。将(7)式的三式相加得:

$$V_a + V_b + V_c = 3V_n \quad (8)$$

因此, C相反电动势为零时, C相端电压与中性点电压相等既可以通过端电压与中性点电压相比较得到C相的反电动势过零点, 同样的方法可以得到其它相的反电动势过零点, 将反电动势过零点延迟30°电角度得到转子位置的换相信号, 以实现无刷直流电机的无位置传感器控制。

3控制系统仿真模型搭建

本文中的无刷直流电机无位置传感器控制系统采用的是双闭环控制系统,外环为速度PI控制环节,内环为电流滞环PWM控制环节,其系统设计框图如图3所示。

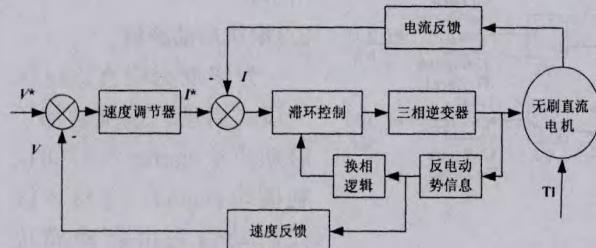


图3 系统设计框图

控制系统的仿真模型由以下模块组成:无刷直流电机本体模块(BLDC)、通用桥逆变模块(inverter)、反电动势过零点检测换相模块(BEMF)、PWM生成模块、速度PI控制与电流滞环控制模块等组成,系统仿真模型如图4所示。在以往的研究中,大多建立的无刷直流电机本体模块都是把反电势分段线性化的理想模型,常用查表法或者s函数的方法来建立,所得的模型跟实际情况存在较大误差。因此本文直接采用Simulink/SimPowersystem中库里自带的电机模块: Permanent Magnet Synchronous Machine反电动势波形设置为梯形。

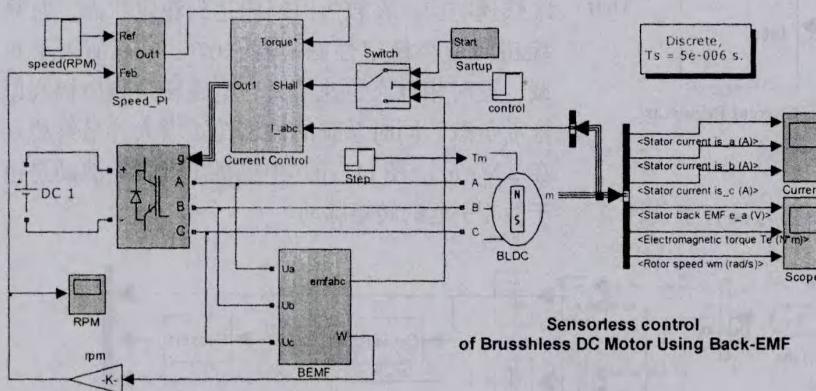


图4 仿真模型

3.1 反电动势位置检测模块

BEMF为转子位置速度检测模块,其包含了三个模块,分别是反电动势过零点检测模块

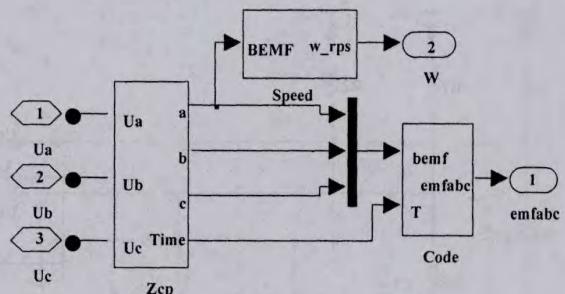


图5 BEMF模块

ZCP、信号延时模块Code和速度计算模块Speed,如图5所示。过零点检测模块ZCP内部结构如图6所示,将三相端电压 u_a 、 u_b 、 u_c 分压后,经过电容滤波得到检测信号 u_{ao} 、 u_{bo} 、 u_{co} ,三相端电压的平均值作为电机重构的中性点电压,将检测信号与中性电压 u_o 进行比较,就得到了相位互差120°的电机三相反电动势过零点换相信号a、b和c。其中period_T子模块为信号周期检测模块,用于作为延时标准。速度计算模块Speed模块实现无位置传感器控制系统电机转速的计算,反电动势变化的频率与电机转速的关系: $n=60f/p$,其中p为电机的极对数。因此通过检测反电动势的变化频率就可以计算出电机的转速了,其模块内部结构如图7所示。

3.2 速度电流控制模块

近年来,多种智能控制算法已经应用到速度控制器上,如模糊控制、神经网络控制、自适应控制等,这些方法都能够在一定程度上达到很好的效果,但应用条件复杂。本研究采用传统PI控制器,输入为给定转数与实际反馈转数的偏差,输出为电流参考值,Speed_PI模块实现此功能。

电流控制模块Current Control采用电流滞环PWM控制方式,该方法直接控制电动机的相电流,能较好的抑制电流的脉动,由于相电流的改善可以减小电流脉动,从而可以改善电动机的运行特性,减小电流转矩脉

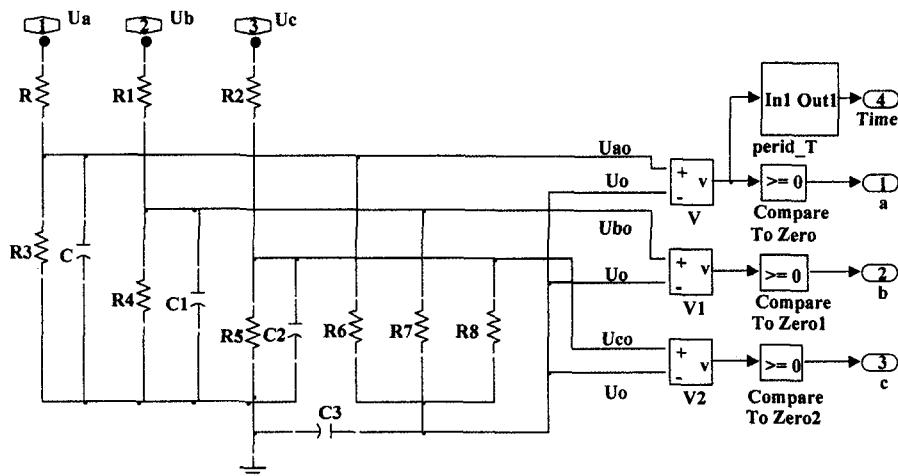


图6 ZCP模块

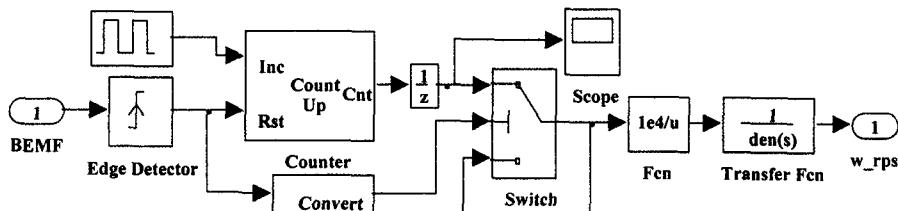


图7 Speed模块

动, 其内部结构如图8所示: 由 Decode 模块与 Current Regulator 模块组成, Decode 模块将类似于

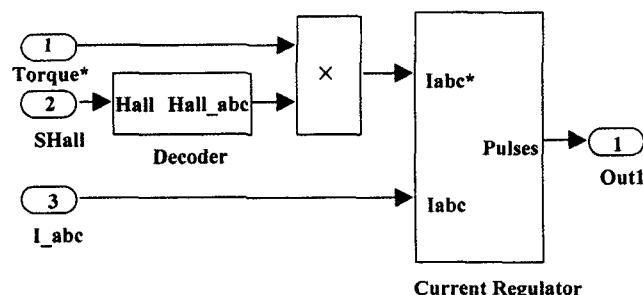


图8 Current Control模块

Hall 信号的位置反电动势信号转变为具有正负性质的反电动势信号, Speed_PI 速度调节模块输出参考电流大小信号与 Hall_abc 信号相乘, 使电流信号具有方向性, 得到矢量电流信号。矢量电流信号与反馈的电机三相电流信号一起输入 Current Control 模块进行电流滞环 PWM

控制。给定参考电流与实际电流作比较, 三个 Relay block 控制滞环宽度, 形成 PWM 三相逆变桥开关控制信号, 其内部结构如图 9 所示。

3.3 电机启动模块

为实现无刷直流电机三段式启动, 系统增加了启动模块 startup 与时间控制模块 control。电机三段式启动首先由启动模块 startup 按预定的时间进行有序换相, 如图 10 所示。

4 仿真结果与分析

仿真时, 无刷直流电动机的参数如下: 定子相绕组: $R=2.875 \Omega$, 定子每相绕组电感: $L=0.0085 \text{ H}$, 转动惯量: $J=0.008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 极对数: $P=4$, 给定转速: 给定的直流电压: $U=220 \text{ V}$, 设定转速: $n=1000 \text{ r/min}$ 。在系统仿真实验中, 电机空载启动, 在 $t=0.3 \text{ s}$ 时加入负载 $T_m=2 \text{ N} \cdot \text{m}$, 得到系统仿真波形如图 11 所示。在空载起动时, 相电流达到最大值如图 11 (a) 所示, 且启动转矩达到最大如图 11 (d) 所示。系统快速响应, 在较短时间内达到稳定状态, 且系统超调量小稳定性好。在 $t=0.3 \text{ s}$ 时刻加入了负载, 这时相电流快速增大, 电磁转矩相应提高以拖动负载。同时系统的输出转矩增大并最终稳定在 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。图 11 (d) 中电机出现转矩波动是由于换相引起的转矩脉动。

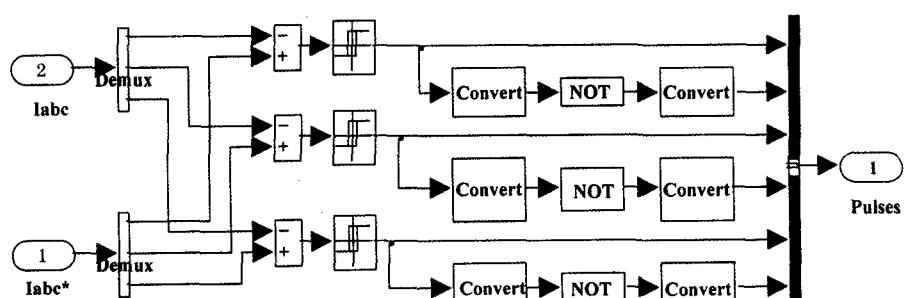


图9 startup模块

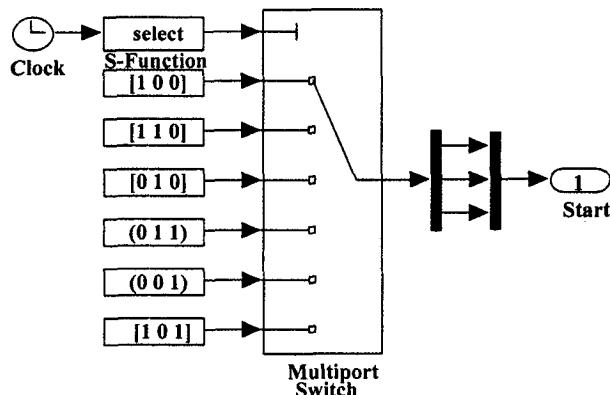
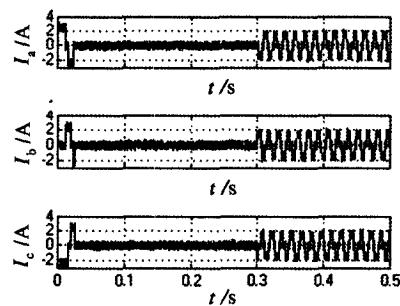
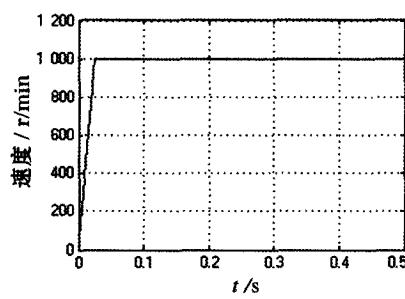


图 10 Current Control 模块

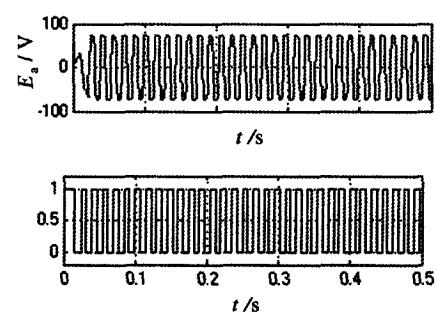
从上面的结果可以看出, 反电动势端电压检测法通过检测三相端电压来估计反电动势, 进而利用反电动势与转子位置的关系获得正确的换向信号, 这种方法能够很好地实现无刷直流电机无位置传感器控制。从电机三相电流波形可以看出电流变化几乎呈矩形变化, 电流脉动较小, 说明电流滞环 PWM 控制方式能有效地抑制电流的脉动。



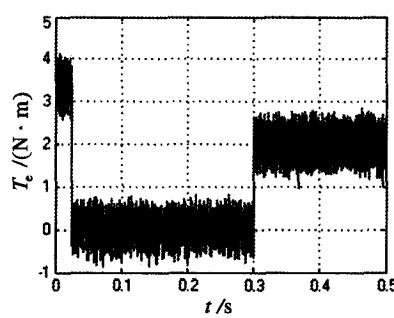
(a) 电机三相电流波形



(b) 速度响应波形



(c) A 相反电动势, A 相过零点检测波形



(d) 输出转矩波形

图 11 仿真实验结果图

5 结论

本文利用经典的速度 PI、电流滞环 PWM 控制方式提出了一种基于反电动势过零点检测的 BLD-CM 无位置传感器控制系统建模仿真方法及速度计算的新方法。仿真实验结果证明: 利用反电动势过零点检测法的无刷直流电机无位置传感器控制系统与理论结果一致, 系统反馈速度精准, 能平稳运行且能够快速响应。同时所搭建的仿真系统平台以实际控制系统设计为基础, 可直接转换供实际程序系统设计时使用, 为实际系统设计的控制参数给定, 滤波电路参数提供验证。

参考文献:

- [1] 孙君道. 基于 Matlab 无刷直流电机建模与仿真 [J]. 科学技术与工程, 2008, 8 (6): 1563-1564.
- [2] 叶长青, 尹华杰, 赵海波. 无刷直流电动机驱动系统 Matlab 仿真建模及模型中 S 函数的实现 [J]. 微电机, 2008 (10): 90-93.
- [3] Yilmaz S. Direct adaptive control of permanent magnet motors [D]. The office of graduate studies of Rensselaer Polytechnic Institute of Rensselaer Polytechnic Institute, 2000.
- [4] 孙冠群, 于少娟. 控制电机与特种电机及其控制系统 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.
- [5] 吕鲁莹, 陈敏祥. 无刷直流电动机无位置传感器技术的新发展 [J]. 微特电机, 2008, 36 (9): 56-58.
- [6] 钟德刚, 方浩. 两相无槽无刷直流电机的无位置传感器控制 [J]. 机电工程, 2011 (12): 1502-1505.
- [7] 梅妮, 尹华杰. 反电势法在无刷直流电机位置检测中的应用 [J]. 电机技术, 2006 (1): 44-46.

第一作者简介: 朱 勇, 男, 1989 年生, 湖北荆州人, 硕士研究生。研究领域: 电机控制系统。

(编辑: 向 飞)