

基于 Simplorer 的无刷直流电动机系统设计仿真

李海波

(贵州航天林泉电机有限公司, 贵阳 550008)

摘要: 针对无刷直流电动机的控制系统, 设计了以 TMS320F2812 DSP 为核心的数字控制器, 采用速度环和电流环双闭环的控制策略, 给出了系统设计框图和部分外围电路硬件设计图; 介绍了基于 Simplorer 的无刷直流电动机系统建模仿真的实现过程, 仿真结果表明: 系统具有良好的动静态性能, 所提出控制策略实现简单且具有实用价值。

关键词: 无刷直流电动机; TMS320F2812; Simplorer

本文引用格式: 李海波. 基于 Simplorer 的无刷直流电动机系统设计与仿真[J]. 四川兵工学报, 2014(10): 107-110.

中图分类号: TM33

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2014)10-0107-04

Design and Simulation of Brushless DC Motor Based on Simplorer

LI Hai-bo

(Guizhou Aerospace Linquan Motor Co. Ltd., Guiyang 550008, China)

Abstract: In allusion to control system of Brushless DC Motor (BLDCM), the paper designs a digital controller based on TMS320F2812 DSP. The controller adopts a control strategy of both speed closed loop and circuit closed loop. The architecture blocks of system design and hardware are presented. It focuses on the realization of BLDCM system simulation. The results of simulation show that the control system has good control performance and the control strategy is implemented simply and has utility value.

Key words: BLDCM; TMS320F2812; Simplorer

Citation format: LI Hai-bo. Design and Simulation of Brushless DC Motor Based on Simplorer[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(10): 107-110.

随着电力电子技术、微电子技术、新型电机控制理论和稀土永磁材料的快速发展, 无刷直流电动机得到迅速推广, 且其体积小、性能好、结构简单、可靠性高、输出转矩高等特点, 无刷直流电动机受到广泛关注。无刷直流电动机应用领域的不断拓宽, 对电机控制系统设计要求也越来越高, 既要考虑成本低廉, 控制算法合理, 又需兼顾控制性能好, 开发周期短。因此, 建立无刷直流电动机系统的仿真模型对系统设计和性能分析具有十分重要的意义。

Simplorer 是 Ansoft 公司提供的集电子线路、电气传动、机电一体化等多领域复杂物理量的系统级仿真软件, 其具有图形化的编程技术、主电路与控制电路分离以及控制电路时序流程图编程方法等一系列特点, 内部自带的仿真器能够利

用多种仿真语言和丰富的元件模型实现多领域的协同仿真。Maxwell 是电机设计的专用软件, 其包含的 RMXprt 具有独特的电机设计模板、标准脚本接口、便捷的自定义材料库和自动设计功能, 用户可以轻松地输入电机设计参数, 能自动创建一个完整的电机 2D/3D 模型。介绍了基于 Simplorer 和 Maxwell 的无刷直流电动机系统建模协同仿真, 以某型号的无刷直流电动机为例, 给出了仿真结果以及结果分析。

1 系统构成及控制策略

系统主要由无刷直流电动机、霍尔传感器、逆变器、驱动电路和控制器等构成。系统控制总体框图如图 1 所示。其

中,控制器以 TMS320F2812 DSP 芯片为核心、采用速度环和电流环双闭环串级控制,速度环为外环,电流环为内环,速度调节采用 PI 算法。TMS320F2812 的 3 个捕获单元 CAP1/CAP2/CAP3 接收霍尔传感器的三路输出方波信号 HA/HB/HC,经转速计算后作为速度调节的输入值,同给定转速比较得出的误差,经 PI 调节后得到的输出作为电流环的参考电流 I_{ref} , I_{ref} 与电流反馈值的偏差值在电流调节后,形成 PWM 占空比的控制量,在换相逻辑使能后, TMS320F2812 产生六路 PWM 脉冲,经过光电隔离电路以及 IR2310D 功率驱动电路驱动 6 个 IGBT,从而达到控制三相逆变器工作的目的,实现对无刷直流电机转速的控制。

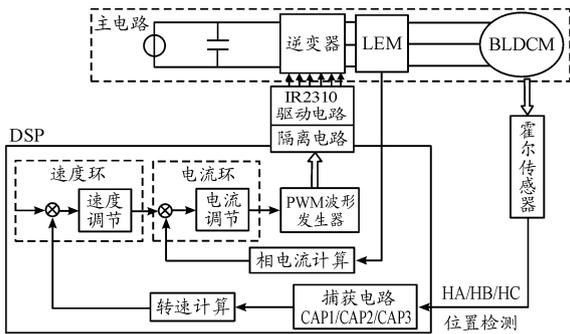


图 1 无刷直流电动机系统控制系统框图

1.1 速度调节

由图 2 可知,霍尔传感器的三路输出信号 HA、HB、HC 为三个相位互差 120° 电角度、脉宽 180° 电角度的矩形波。每一个 HAHBHC 的编码对应 30° 机械角度,即 60° 电角度,测速时选择与捕获单元相联系的定时器, CAP1/CAP2 选择通用定时器 1 作为它们的时基, CAP3 有自己独立的时基,由于捕获单元选择的是上升沿和下降沿均触发中断的模式,这样转子每转过 1 转 (360° 机械角度),即 720° 电角度就有 12 个中断信号。假设定时器计数速率为 T ,周期寄存器设为 65 535 ($2^{16} - 1$),当相邻两次中断间隔 (120° 电角度) 为一个整周期 $65\,535 * T$ 时,对应的转速: $n = 120 / (65\,535 * T * 12)$; 当电机以转速 n 转动时,定时器对应的读数为 $120 / (T * 12 * n)$ 。

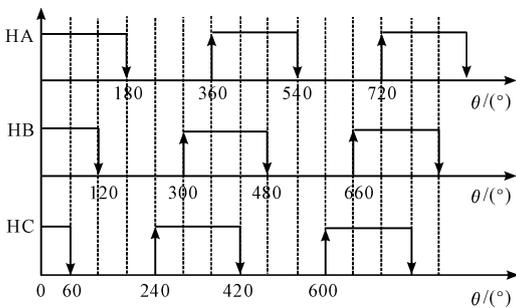


图 2 霍尔传感器输出波形

速度调节采用的是 PI 算法,假设测量的转速为 n_f ,转速的给定参考值为 n_{ref} ,速度调节输出 $u_s(k)$,则根据数字 PI 算法公式,速度调节的算法如下:

$$e_s(k) = n_{ref} - n_f \quad (1)$$

$$\Delta e_s(k) = e_s(k) - e_s(k-1) \quad (2)$$

$$u_s(k) = u_s(k-1) + k_i e_s(k) + k_p \Delta e_s(k) \quad (3)$$

其中, k_p 为速度环比例积分; k_i 为速度环比例积分。

1.2 电流调节

电流调节过程也就是 PWM 信号的调节过程。PWM 周期固定,改变的是占空比,通过调节 PWM 信号的占空比就可以改变电流的平均值, PWM 信号的占空比由电流参考值和电流检测值的差值决定。

$$I_{error} = I_{ref} - I_f \quad (4)$$

$$d_{new} = d_{old} + I_{error} * K \quad (5)$$

其中, I_{error} 为电流误差; I_{ref} 为电流参考值; I_f 为电流检测值; d 为 PWM 脉冲的宽度; K 为比例系数,由电机参数、电压值和电流值决定。

如果 $d_{new} \geq$ 计数器周期值,那么 $d_{new} =$ 计数器周期值; 如果 $d_{new} \leq 0$,那么 $d_{new} = 0$ 。

2 硬件电路设计

2.1 PWM 驱动信号隔离电路

DSP 芯片 TMS320F2812 中的 PWM1 ~ PWM6 口产生六路 PWM 信号,经隔离电路电平转换,控制逆变器的六个功率管的通断,产生三相脉宽调制的交流信号驱动电机工作。其中一路 PWM 信号的隔离电路如图 3 所示。

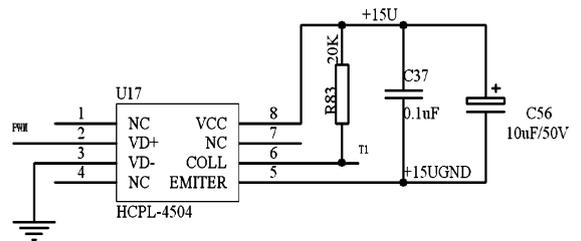


图 3 PWM 信号隔离电路

2.2 功率驱动电路

六路 PWM 信号经过隔离电路电平转换后,分别接入功率驱动模块 IR2310D 的下桥臂功率管驱动端口 L1, L2, L3, 和驱动上桥臂功率管的信号 H1, H2, H3。L1 ~ L3 经输出驱动器功放直接送往被驱动的下桥臂功率管,驱动上桥臂功率管的信号 H1 ~ H3 先经集成于 IR2310D 内部的 3 个脉冲处理器和电平移位器中的自举电路进行电位变换,变为 3 路电位悬浮的驱动脉冲,再经对应的 3 路输出锁存器锁存并经严格的驱动脉冲与否检验之后,送到输出驱动器进行功放后才加到被驱动的功率管。电路图如图 4 所示。

2.3 过流、超温检测信号电路

逆变器三路桥臂功率管短路过流信号,由采样电阻直接检测到实时电流,如果输出电流大于电流极限值,功率管将被立即关断,输出高电平。一路功率管过热信号,由逆变器内温度传感器检测到的温度大于设定的参考温度,功率管被立即关断,输出高电平。此四路状态检测信号输入 CD4010B,进行电平转换,再由 CD4010B 的 1Y, 2Y, 3Y, 4Y 接

入 74LS244 的 A1,A2,A3,A4 口,经 74LS244 送入 DSP 的 I/O 口。电路图如图 5 所示。

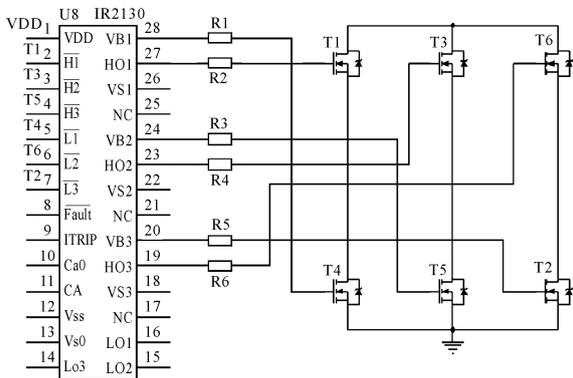


图 4 功率驱动电路

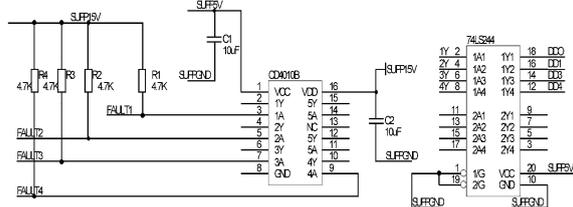


图 5 检测信号输入输出电路

3 基于 Simplerer 和 Maxwell 的无刷直流电动机系统协同仿真实现

3.1 基于 Maxwell 的无刷直流电动机建模

利用 RMxpert 创建的 Y 形三相六状态无刷直流电动机,该无刷直流电动机具有 4 个磁极对,定子插槽的数目为 12 个,进行仿真分析后,右键 Analysis-Setup1,选择自动创建一个 Maxwell 2D 模型。

3.2 主电路建模

Simplorer 内部自带 4 种仿真器:VHDL-AMS、电子线路、框图和状态机,仿真器能够利用多种仿真语言和丰富的元件模型实现多领域的协同仿真。

无刷直流电动机系统由主电路和控制电路两部分组成,Simplorer 处理这两部分模型时采用不同的仿真方法。主电路部分采用电路模型建模,在构建主电路模型时,只要在模型库中选择相关的元件按实际电路连接起来即可。图 6 为无刷直流电动机系统主电路仿真模型。

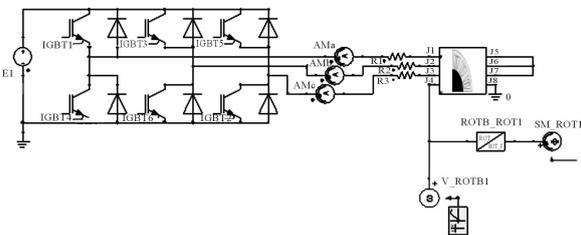


图 6 主电路仿真模型

3.3 控制电路建模

采用 Simplerer 的框图仿真方式,建立的无刷直流电动机控制策略算法如图 7 所示。根据本文第二部分所述可知,控制电路采用速度环和电流环双闭环控制策略。如图 7 所示,速度调节采用 PI 算法,输入为参考转速 speed_ref 和反馈转速 speed_test,在 P_Gain 和 I_Gain 中设置好比例和积分系数,输出作为电流环的参考输入,经限流模块和实际电流比较形成偏差作为电流滞环模块的输入,电流滞环模块的输出为逆变器的控制信号。当实际电流低于参考电流且偏差大于滞环模块的环宽时,对应相正向导通,负向关断;当实际电流超过参考电流且偏差大于滞环模块的环宽时,对应相正向关断,负向导通。选择适当的滞环环宽,可使实际电流不断跟踪参考电流的波形,实现电流闭环控制。

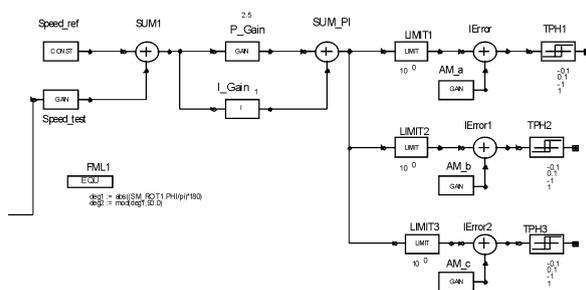


图 7 控制策略仿真模型

3.4 定子绕组电流换相的状态机建模

无刷直流电动机绕组电流的换相时刻是由转子磁极位置确定的,而由霍尔位置传感器的输出状态可以确定转子的磁极位置,这样就可以将位置传感器输出的三路信号的编码结果与逆变器的开关管导通顺序一一对地联系起来,形成一个换相时刻表。对于三相六状态电机,在 1 个周期内每项绕组连续导通 120°,每个时刻有两相同时导通。霍尔传感器三路输出信号 ABC 的导通顺序:AB - AC - BC - BA - CA - CB - AB,循环导通,对应开关管导通顺序: M₁M₅ - M₁M₆ - M₂M₆ - M₂M₄ - M₃M₄ - M₃M₅ - M₁M₅,则开关管输入控制状态与位置传感器输出状态的换相时刻表如表 1 所示。

表 1 换相时刻表

A	B	C	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
1	0	1	1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	1	0	0	1	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0
0	0	1	0	0	1	0	1	0

结合 Simplerer 的状态机仿真方式,建立的绕组电流换相状态机模型如图 8 所示。图中每一个圆圈 (STATE) 代表一种状态,中间带点的圆圈表示当前被激活的状态;中间带有箭头的竖线 (TRANS) 代表状态转化条件,当条件满足时,状

态机就从当前的状态转到下一个状态,即下一个状态被激活。功率开关管的每一个时刻的驱动信号状态都由这样的状态机来表示。

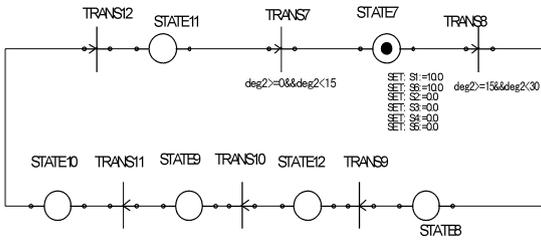


图 8 绕组电流换相状态机模型

3.5 仿真结果及分析

以某型号无刷直流电动机为例,电机设计参数如下:额定电压 28 V,额定电流 10 A,额定转速 7 400 rpm,速度环的额定转速 Speed_ref = 7 400 rpm,取比例系数 P_Gain = 5,积分系数 I_Gain = 1。电流环中的电流限幅取为 10 A,电流滞环环宽为 0.1。仿真结果如下:图 9 为 BLDCM 速度仿真波形,图 10 为 BLDCM 的绕组相电流,图 11 为 BLDCM 的 AB 相之间的反电动势,图 12 为 BLDCM 的扭矩波形。

由仿真结果可以看出,无刷直流电动机转速达到要求 7 400 rpm,绕组相电流稳定在 10 A,反电动势总体上为梯形波,仅在在换相时刻波形有所波动。

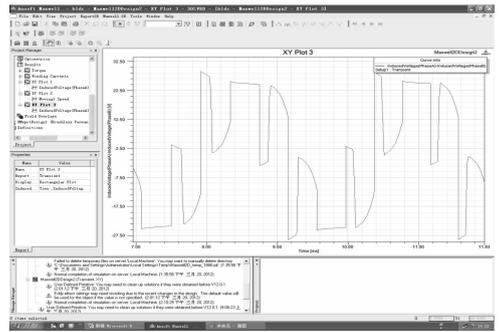


图 11 BLDCM 的反电动势

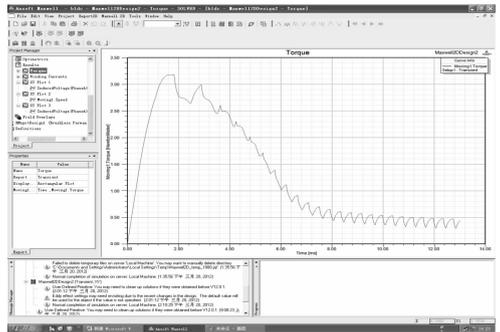


图 12 BLDCM 的扭矩波形

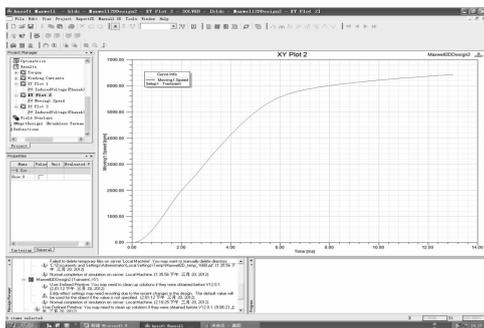


图 9 BLDCM 速度仿真波形

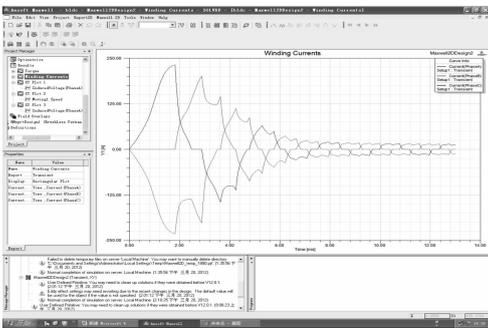


图 10 BLDCM 的绕组相电流

4 结论

本文采用 TMS320F2812 构成高性能的无刷直流电动机双闭环控制系统,介绍了基于 Simpleror 的无刷直流电动机系统建模仿真,详细阐述了速度调节和电流调节以及绕组电流换相建模的实现过程。以某型号无刷直流电动机为例,给出了仿真结果,仿真结果表明:该控制系统具有良好的控制特性和动态性能,具有一定的实用性。

参考文献:

- [1] 刘勇.基于 DSP 的无位置传感器无刷直流电动机控制系统[J].微特电机,2004(1):40-42.
- [2] 李先祥,王宪生,朱自芳.基于数字信号处理器永磁无刷电机无位置检测器控制系统设计[J].电机与控制应用,2007,34(2):32-34.
- [3] 安群涛,李波,王有琨.永磁同步电动机系统建模仿真及性能分析[J].电气自动化,2007,29(1):16-17.
- [4] 闫英敏,刘卫国.基于 SimplerorPro 的无刷直流电机伺服系统仿真[J].电气传动,2005(11):18-20.
- [5] 高洁,孙鹤旭.基于 Simolorer 的 SRD 动态建模与实验研究[J].电气传动,2011(10):37-40.
- [6] 赵向阳,王峥浩.控制系统对无刷直流电机偏心故障的影响分析[J].电机与控制应用,2013,40(3):17-21.