

文章编号: 1000-5013(2013)02-0147-04

基于 dSPACE 的横向磁通永磁电机控制

戴茵茵¹, 林宇洲²

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在 MATLAB/Simulink 中,根据模块化建模思想,搭建了横向磁通永磁电机(TFPMM)控制系统的仿真模型,并进行离线仿真.以 dSPACE 替代常见的单片机,DSP 作为处理器核心,并与 Simulink 进行无缝连接,构建 TFPMM 驱动控制系统实验平台.对 TFPMM 控制算法进行在线分析、调试和验证.研究表明:该实验平台可靠,可为今后解决更加复杂的控制算法提供基础.

关键词: 横向磁通; 永磁电机; dSPACE 系统; 仿真模型; 双闭环控制

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A

横向磁通永磁电机(transverse-flux permanent magnet motor,简称 TFPMM)是德国教授 Weh 提出的一种新型电机结构形式.该结构理论上克服了传统电机齿槽处在同一截面,几何尺寸相互制约的缺陷,并可同时增大电机电负荷和磁负荷,从根本上提高了电机转矩密度,特别适合低速、大转矩、直接驱动等场合^[1-2].目前,国内外对 TFPMM 的研究主要集中在电机本体结构设计和电磁场分析这两方面,而对驱动控制系统方面的研究相对较少^[3].虽然 TFPMM 驱动控制策略可借鉴传统电机的控制,但作为一种新型电机结构,毕竟有其特殊性.德国 dSPACE 公司开发了一套基于 MATLAB/Simulink 的 dSPACE 实时仿真系统.该仿真系统能将控制对象以实物的形式连接在仿真回路上,允许反复修改控制器模型并进行实时仿真,直至找到理想的控制方案,这为研究驱动 TFPMM 更加复杂的控制算法提供了基础.本文在 MATLAB/Simulink 离线仿真基础上,设计了以 dSPACE 为核心的横向磁通永磁电机控制系统实验平台.

1 MATLAB/Simulink 离线仿真

1.1 TFPMM 数学模型

TFPMM 虽是一种新型结构的电机,但仍属于同步电机范畴^[4],工作于无刷直流驱动模式下.因此,其数学模型可仿照无刷直流电机的数学模型建立.与无刷直流电机不同的是,TFPMM 三相磁路无耦合,相之间不存在互感.TFPMM 电压方程、电磁转矩方程及运动方程分别为

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

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \Omega, \tag{2}$$

$$T_e - T_L = L \frac{d\Omega}{dt}. \tag{3}$$

式(1)~(3)中: u_a, u_b, u_c 均为定子相电压; i_a, i_b, i_c 均为定子相电流; e_a, e_b, e_c 均为定子相绕组反电动势; R 为相电阻; L 为每相绕组的自感; $p = d/dt$ 是微分算子; T_e 为电磁转矩; Ω 为转子机械角速度; T_L

为负载转矩; J 为转动惯量.

1.2 TFPMM 控制系统仿真模型

TFPMM 控制系统采用速度和电流双闭环无刷直流控制方案,在 MATLAB/Simulink 软件环境下,应用模块化建模方法构建的 TFPMM 控制系统仿真模型,如图 1 所示.图 1 中的各主要功能模块分别是:TFPMM 本体、逆变器脉冲宽度调制驱动信号、霍尔位置信号、速度 PI 调节、电流滞环调节等. TFPMM 本体依据 TFPMM 数学模型搭建,其参数配置和实验样机参数一致.考虑该模型要实现与 dSPACE 的连接,此控制系统仿真模型中模拟了霍尔位置传感器的作用.

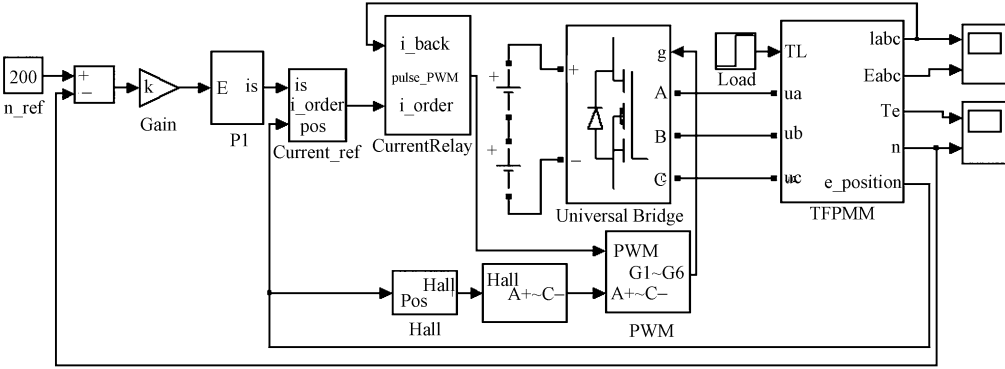
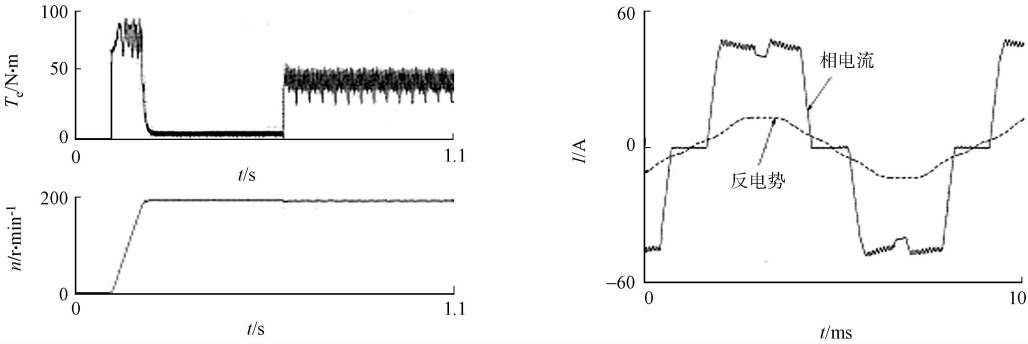


图 1 TFPMM 双闭环控制系统仿真模型

Fig. 1 Model of double-closed loop control system of TFPMM

1.3 仿真结果的分析

TFPMM 双闭环控制系统仿真波形图,如图 2 所示.图 2(a)中:参考转速 $n=200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$; $t=0.5\text{ s}$;额定负载 $T_L=45\text{ N}\cdot\text{m}$.由图 2(a)可知:电机起动后很快达到给定转速并稳定下来,且负载变化时,由于双闭环的调节作用,转速基本不受干扰,始终稳定在给定值.图 2(b)给出了相反电势与相电流的仿真波形.由图 2(b)可知:TFPMM 反电势波形接近正弦波,这与对 TFPMM 样机做发电机实验得出的结果相一致,说明该控制系统仿真模型能够反映实际电机性能.



(a) 转矩与转速仿真

(b) 相反电势与相电流仿真

图 2 TFPMM 双闭环控制系统仿真波形图

Fig. 2 Simulation waves of TFPMM control system

2 基于 dSPACE 的实验控制系统

dSPACE 系统最大的特点是实现了与 MATLAB/Simulink 的完全无缝连接,并拥有实时性强,可靠性高,扩充性好等优点.它主要由硬件系统和软件环境两部分组成,其强大的软件环境支持在线模型代码的自动生成、编译、链接、下载,并实现对实际对象的实时驱动控制^[5].

2.1 系统硬件构成

TFPMM 控制系统实验平台结构框图,如图 3 所示.平台结构包括了以 dSPACE 和计算机为基础的控制核心、逆变器电路、信号检测电路、光耦隔离电路和 TFPMM 实验样机等几部分.其中计算机部

分主要用于系统在线模型的设计,实时代码的生成、下载,以及实验仿真的研究。

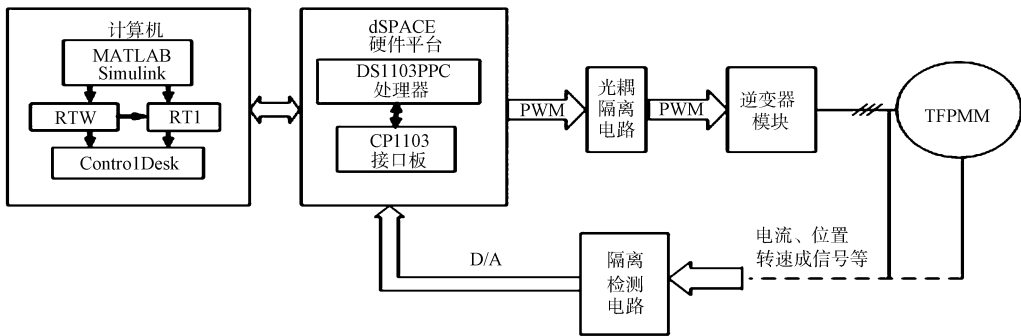


图 3 TFPMM 控制系统实验平台结构框图

Fig. 3 Diagram of TFPMM control system for experiment

dSPACE 硬件平台采用 DS1103PPC 作为控制算法处理核心,承担所有的实时计算. 逆变器的功率器件采用 IGBT(insulated gate bipolar transistor)智能功率模块(IPM),其额定值为 60 V,80 A. IPM 内部集成了三相逆变桥、驱动电路、制动电路和保护电路. 在实际应用中,只要辅以光耦隔离电路,驱动电源,以及各开关管子的 PWM 控制信号即可. 三路霍尔位置传感器提供转子位置,及计算电机的实际转速. 两路霍尔电流传感器将检测到的定子相电流通过隔离转换,送入 DS1103PPC 处理器. 经过相应的算法处理后,便可产生使各 IGBT 管依次开通的 PWM 脉冲信号,驱动 TFPMM 的运转.

2.2 系统软件实现

在实际控制系统中,用实物替代图 1 中的 TFPMM、逆变器等模块,引入相应的 I/O,D/A 转换接口,并对其进行相应配置,便可得到控制系统快速控制原型,如图 4 所示. 图 4 中:Subsystem 模块为 MATLAB 离线仿真所搭模块的封装;虚线框表示实际电路的接口.

利用 MATLAB 中的 RTW(real time workshop)与 dSPACE 系统中的 RTI(real time interface), Simulink 模型生成 dSPACE 系统可执行程序代码,并将其下载到硬件中. RTI 根据信号参数,产生一个变量文件,借助于测试软件 ControlDesk,建立虚拟仪表,对数据进行采集、变量访问、参数在线调试^[6]. 运用 ControlDesk 所建立的虚拟控制实验面板,如图 5 所示. 该控制面板可对仿真参数如 PI 系数、给定转速值等进行在线修改,还可实时跟踪显示各参量波形.

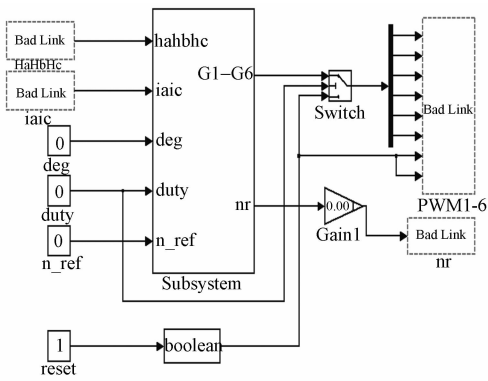


图 4 控制系统快速控制原型

Fig. 4 Rapid control prototype

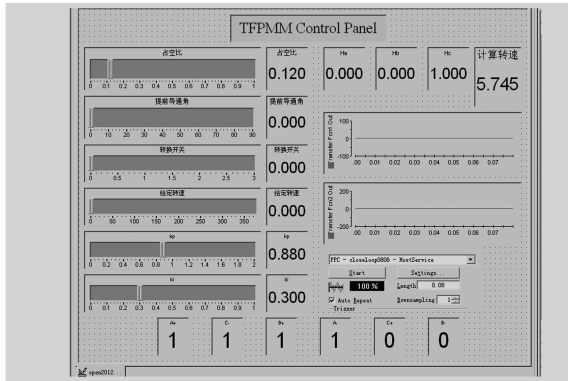


图 5 Controldesk 综合控制实验面板

Fig. 5 Control panel built by Controldesk for experiment

2.3 实验结果分析

实验采用的 TFPMM 实验样机为三相 Y 形连接、8 对极、外转子轮毂结构. 实验中,额定电压为 60 V,额定电流为 50 A. 在给定转速 $n=200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,电机负载转矩 $T_L=35 \text{ N} \cdot \text{m}$ 下,通过 Controldesk 综合控制实验面板,观测到的电机相电流波形,以及用示波器测量的电机相电流波形,分别如图 6,7 所示. 通过软件计算得出实际转速为 $199.392 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 这与给定转速基本一致,也与用测速工具所测量结果基本一致,说明了本双闭环控制系统能较好地实现电机的稳速性能. 对比实验与仿真结果,进一步论证了该控制系统方案的可行性.

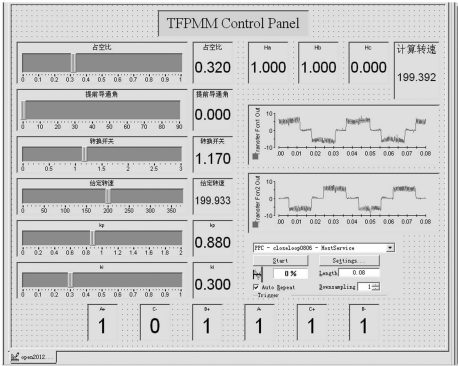


图 6 虚拟控制面板参数及波形显示

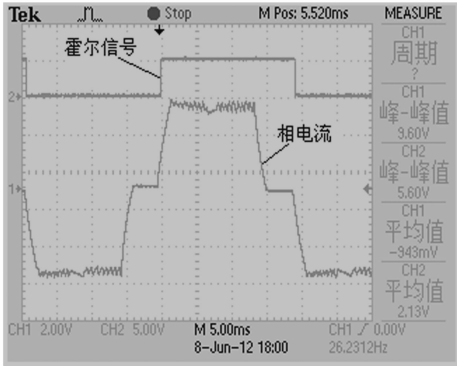


图 7 相电流实验波形

Fig. 6 Display of parameters and waves on the virtual panel Fig. 7 Actual waves of a phase current

3 结 束 论

通过 MATLAB/simulink 软件平台与 dSPACE 实时仿真系统的相结合,构建了新型 TFPMM 的速度和电流双闭环控制实验系统. 仿真和实验结果均表明:该实验平台的可靠性,为今后解决更复杂的 TFPMM 驱动控制算法提供了基础.

参考文献:

[1] 陈金涛,辜承林. 新型横向磁通永磁电机研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(15):155-160.
[2] 褚文强,辜承林. 新型横向磁通永磁电机磁场研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(24):58-62.
[3] 王建宽,施进浩,江建中. 横向磁场永磁电动机及其驱动系统的研究[J]. 微特电机,2005(11):14-16.
[4] 涂小涛. 直驱式电动汽车用新型横向磁通永磁电机控制应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012:14-16.
[5] 杨涤. 系统实时仿真开发环境与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003:339-342.
[6] 舒杨,李辉,孙永奎. 基于 dSPACE 的无刷直流电机控制器快速开发方法[J]. 系统仿真学报,2008,20(8):2023-2025.

Control System for Transverse-Flux Permanent
Magnet Motor Based on dSPACE

DAI Yin-yin¹, LIN Yu-zhou²

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. College of Electrical and Electronic, Huazhong University, Wuhan 430074, China)

Abstract: In MATLAB/Simulink, simulation model of control system for transverse-flux permanent magnet motor is built and off-line simulated by modular modeling method. Single-chip and DSP is replaced by dSPACE as microprocessors. Through the seamless connection of Simulink and dSPACE, an experimental platform for control of transverse-flux permanent magnet motor is built and control algorithms about TFPMM control are analyzed、tested and demonstrated. Results of experiment confirm the reliability of the platform and provide the foundation for research of more complex control algorithms.

Keywords: transverse-flux; permanent magnet motor; dSPACE system; simulation model; double-closed loop control

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)