

基于 TC1782 的永磁同步电机直接转矩控制

谢 瑞, 王旭东, 周 凯, 王 硕, 盛炎春

(哈尔滨理工大学 汽车电子工程中心, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 为了研究如何加快永磁同步电机对于转矩变化的响应, 介绍了一种基于 TC1782 的永磁同步电机直接转矩控制系统。系统以英飞凌 TC1782 数字信号处理器为控制中心, 采用模数转换芯片 AD7606 同时采集电机相电流, 采用旋变解码芯片 AD2S1210 与旋变结合获得转子的位置和角度信号。使用 ETAS 公司的 LABCAR 电机仿真机柜作为硬件仿真平台, 与控制部分结合构成了闭环控制系统。通过实验验证, 该设计运行稳定, 由于加入了反馈线性化模块, 系统具有快速的动态响应特性, 而且转矩脉动较小, 速度和转矩调节跟随性好, 可以满足永磁同步电机的控制要求。

关键词: 永磁同步电机; 直接转矩控制; 旋转变压器

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.01.014

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2018)01-0075-06

Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on TC1782

XIE Rui, WANG Xu-dong, ZHOU Kai, WANG Shuo, SHENG Yan-chun

(Engineering Center of Automotive Electronics, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to study how to accelerate the response of permanent magnet synchronous motor to torque variation, a direct torque control system of permanent magnet synchronous motor based on TC1782 is introduced in this paper. The control center of the system is infineon TC1782. It uses ADC chip named AD7606 to acquire the motor phase current simultaneously, and uses resolver chip named AD2S1210 and resolver to obtain the position and angle of the signal rotor. LABCAR motor simulation device, as a hardware simulation platform, combined with the control portion, constitutes a closed loop control system. Through the experiment, we know this design is stable. Because of incorporating the feedback linearization module, the system has fast dynamic response characteristics and smaller torque ripple. Speed and torque can follow the system. This design can meet the requirements of controlling permanent magnet synchronous motor.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; direct torque control; resolver

收稿日期: 2016-05-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51507042)。

作者简介: 谢 瑞(1993—), 男, 硕士研究生;

王旭东(1958—), 男, 教授, 博士研究生导师。

通信作者: 周 凯(1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, E-mail: zhokai4564@163.com.

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM) 在作为伺服控制系统在工业、航天和汽车等领域得到了很广泛的应用^[1-2]。为了使伺服单元更好的工作,人们不断提出各种控制方法,如矢量控制、直接转矩控制(direct torque control, DTC)、无传感器控制和智能控制。新型的智能控制算法无法在现有的控制器上稳定的运行,所以在工业控制领域应用不是十分广泛。但是这是未来的一个发展趋势。经典的矢量控制在工业上应用广泛,但是它存在着电流采样反馈时滞的问题。为了解决这一问题,人们提出了直接转矩控制的方法,使得系统得以简化,并且提高了快速响应能力^[3]。传统的直接转矩控制采用转矩和磁链双滞环调节来得到相应的转矩和磁链控制信号,这种方法的缺点是稳态时转矩和磁链脉动较大^[4]。所以又出现了直接转矩控制和空间电压矢量脉宽调制技术(space vector pulse width modulation, SVPWM) 算法相结合的控制方法,这有效地减小了转矩和磁链的脉动。本文就是基于这一控制方法,并将转矩和磁链进行反馈线性化解耦,使转速和转矩可以准确地跟踪准确值,最终实现永磁同步电机的直接转矩控制^[4-6]。

1 永磁同步电机直接转矩控制系统分析

1.1 永磁同步电机直接转矩控制系统框图

直接转矩控制系统框图如图1所示,该系统包括:坐标变换单元、转矩与磁链计算单元、磁链调节、转矩调节、反馈线性化控制单元和 SVPWM 模块等。

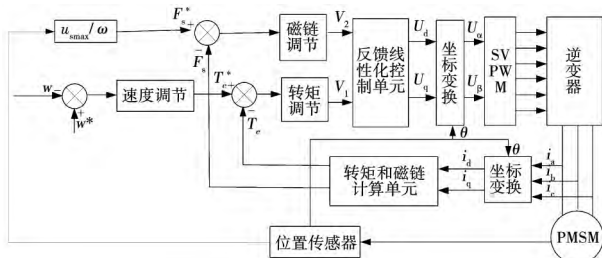


图1 永磁同步电机直接转矩控制系统框图

当电机开始运行时,首先采集电机三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c ,对于 Y 型对称绕组有三相电流之和等于 0,所

以一般可以采集两相,另外一个通过计算得出。三相电流经过 CLARK 和 PARK 变换后得到了 i_d 和 i_q ,将其送入转矩和磁链计算单元进行计算得到转矩和磁链平方和的反馈值,速度 PI 调节器的输出和转矩反馈进行计算后进行转矩调节,磁链平方和和反馈值进行计算后进行磁链调节。然后将磁链平方和和转矩送入反馈线性化模块中,得到输出电压矢量 U_d 和 U_q ,进行反 PARK 变换后送入到 SVPWM 模块,进行矢量调节后,最后生成 6 路 PWM 波驱动三相逆变桥式电路,控制电机工作运行^[1,2,4]。

1.2 反馈线性化模块的实现

永磁同步电机电压和磁链矢量方程为:

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_r \psi_s \quad (1)$$

$$\psi_s = \psi_{PM} + L_s i_s \quad (2)$$

永磁同步电机在 dq 坐标系下的数学方程为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \dot{\psi}_d - \omega_r \psi_q \\ u_q = R_s i_q + \dot{\psi}_q + \omega_r \psi_d \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \psi_d = \psi_{PM} + L_d i_d \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (4)$$

如果是表面式永磁同步电机 $L_d = L_q$,那么转矩方程可以简化为

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_{PM} i_q \quad (5)$$

对式(5)进行求导得

$$\dot{T}_e = -\frac{R_s}{L_s} T_e + k_T (u_q - \omega_r \psi_d) \quad (6)$$

其中 $k_T = \frac{3p\psi_{PM}}{2L_s}$ 为电机的力矩系数。设 F_s 为 dq 轴磁链的平方和,定义:

$$F_s = \psi_d^2 + \psi_q^2 \quad (7)$$

再对式(7)进行求导,计算结果为

$$\frac{dF_s}{dt} = -\frac{2R_s}{L_s} (F_s - \psi_{PM} \psi_d) + 2\psi_d u_d + 2\psi_q u_q \quad (8)$$

为了将转矩方程(6)和磁链方程(8)进行解耦,设 v_1 和 v_2 为两个虚拟的控制量,并定义:

$$v_1 = k_T (u_q - \omega_r \psi_d) \quad (9)$$

$$v_2 = \frac{2R_s}{L_s} \psi_{PM} \psi_d + 2\psi_d u_d + 2\psi_q u_q \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可以得出:

$$\begin{cases} u_q = \frac{v_1}{k_T} + \omega_r \psi_d \\ u_d = \frac{v_2}{2\psi_d} - \frac{v_1 \psi_q}{k_T \psi_d} - \frac{R_s}{L_s} \psi_{PM} - \omega_r \psi_q \end{cases} \quad (11)$$

根据式(11)可以使用 C 语言进行编程,将转矩和磁链 PI 调节的输出送入反馈线性化模块中,模块的输出就是电压矢量 U_d 和 U_q 了^[8]。

2 控制系统的硬件系统结构分析

整个控制系统是由控制器部分和 LABCAR 仿真机柜组成的。其中实际控制器是由控制芯片英飞凌 TC1782、模数转换模块 AD7606 和旋转变压器解码模块 AD2S1210 组成的。LABCAR 仿真机柜包括永磁同步电机的驱动电路、逆变器、电机和旋转变压器。整个系统的结构如图 2 所示。

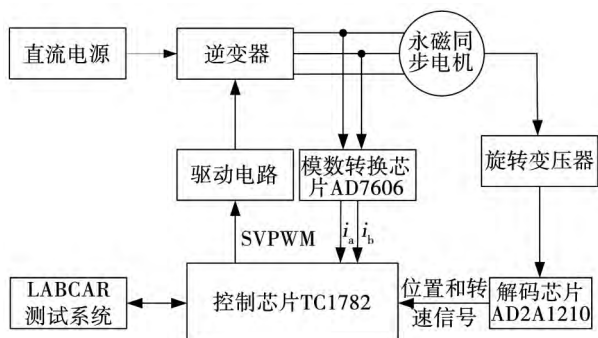


图 2 硬件系统结构框图

2.1 控制核心 TC1782

TC1782 是 32 位微控制器芯片,集成了 CPU、程序和存储器、总线仲裁、中断控制器、外设控制处理器和多种片上外设,用于满足高要求的嵌入式控制系统应用的需求,具有性价比高、实时响应速度快和计算能力强大等特性。主频高达 180 M,片上 FLASH 容量 2.5 M,具有 DSP 浮点运算的功能,丰富的 IIC、SPI、定时器和 CAN 接口,非常适用于汽车电子电机控制和电源控制领域^[9]。本设计用到了英飞凌 TC1782 的 GPTA 定时器模块,用来生成 6 路互补 PWM 信号、定时器中断^[8]。用到 SPI 模块,用来串行读取 AD7606 采样的电流。用到了 GPIO,并行处理旋变解码 AD2S1210 的并行信息,解算出位置和角度。

2.2 AD7606 模数转换模块

AD7606 模块的原理图如图 3 所示。AD7606 是 16 位可以同时 8 通道采集信息的 ADC 芯片。通过配置 RANGE 引脚可以选择正负 10 V 或正负 5 V 的输入范围^[8]。我们将机柜电机相电流经过一阶滤波电路和偏置电路采样范围限制在自己配置的电

压范围内,然后将处理过的信号送到 AD7606 中,TC1782 通过串行方式读取数据,经过量化转换后得到实际结果。之后开始系统的其他运算。本设计的 AD7606 采用串行接口方式与 TC1782 进行连接,相应的连接图如图 4 所示。

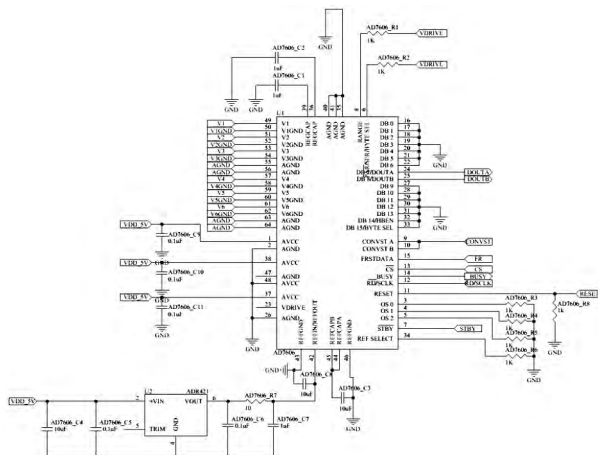


图 3 AD7606 模块的原理图

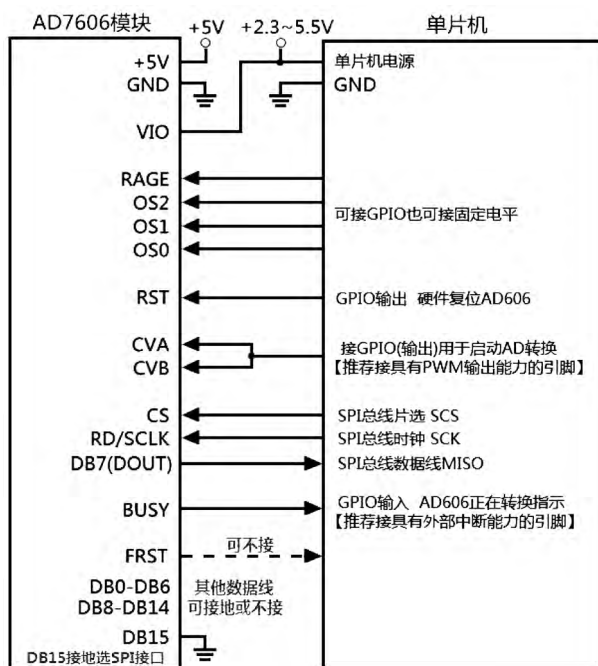


图 4 TC1782 与 AD7606 连接图

2.3 AD2S1210 旋变解码模块

AD2S1210 旋变解码模块如图 5 所示。AD2S1210 用来对电机的位置和转速进行解码,它是一款 10 位至 16 位分辨率旋变数字转换器,集成片上可编程正弦波振荡器,为旋变器提供正弦波激励。TypeII 伺服环路可以跟踪输入量,把输入端的信息转化成角度和速度对应的数字量^[10]。

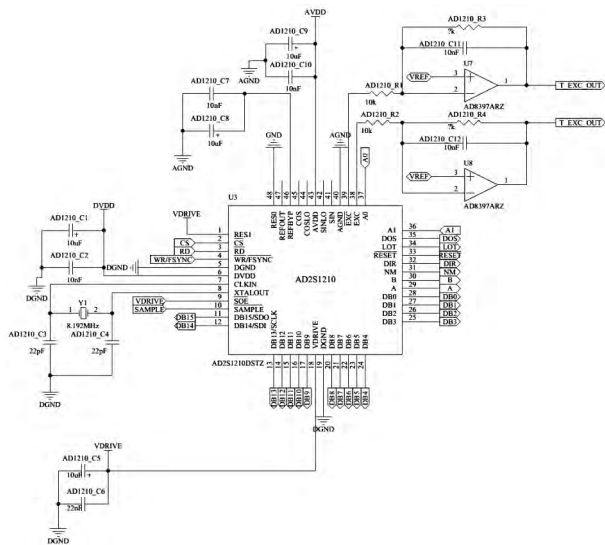


图5 AD2S1210 旋变解码模块原理图

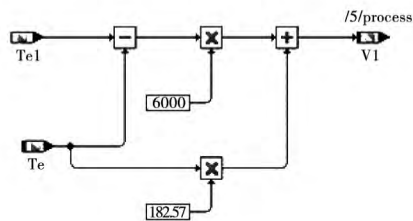


图7 反馈线性化模块

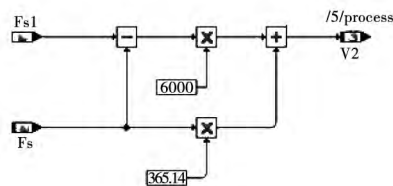


图8 反馈线性化模块

3 控制系统的软件程序设计

3.1 使用 ASCET 软件生成反馈线性化模块的程序

ASCET 软件是 ETAS 的发动机控制功能图形化建模工具,可以将图形化的模型自动生成 C 代码,类似于 MATLAB,从使用上来说 ASCET 偏向于逻辑控制,它可以设置生成代码的顺序,而 MATLAB/Simulink 着重于数学运算,生成的代码执行顺序有一定的不确定性,所以 ASCET 生成的代码比 Simulink 的代码效率高、更简洁易懂。所以选用前者进行代码生成功能。

ASCETV6.2.1 的模型搭建软件界面如图 6 所示。在一个新的 database 中建立工程文件,并对基于直接转矩控制的反馈线性化系统模型进行搭建,系统模型中的反馈线性化模块 fbl1、fbl2 和 fbl3 如图 7~9 所示。

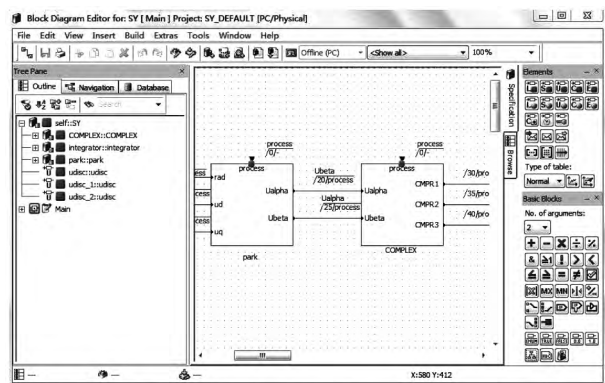


图6 ASCET 软件界面

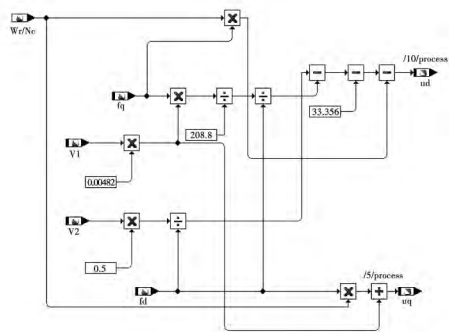


图9 反馈线性化模块 fbl3

搭建完整个控制系统的仿真模型后,对其进行编译,如无错误,便可以自动生成可执行反馈线性化模块的程序。

3.2 系统主体程序流程图

系统主体流程图如图 10 所示。

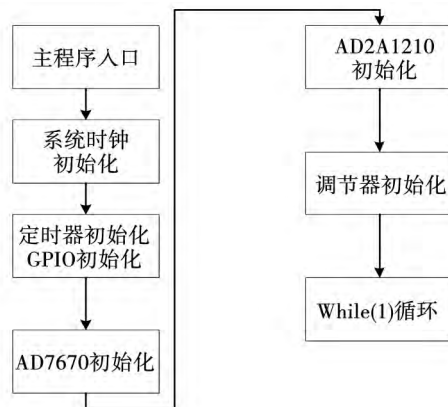


图10 系统主体流程图

3.3 定时器中断程序流程图

定时器中断服务程序流程图如图 11 所示。

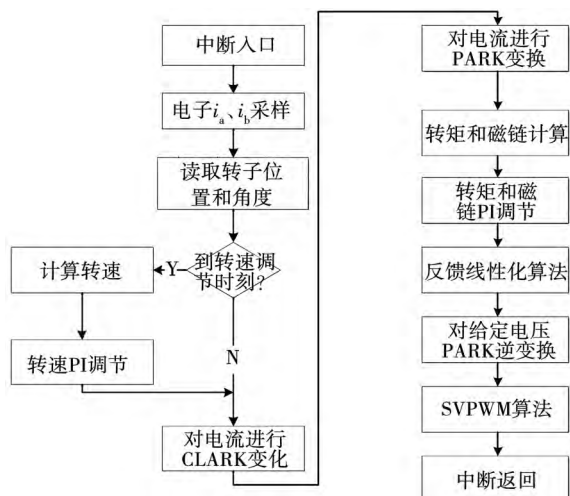


图 11 定时器中断服务程序流程图 [2,5,8]

4 LABCAR 硬件仿真实验

4.1 实验平台的搭建

采用 ETAS 公司的硬件在环测试系统 LABCAR 来实现对基于直接转矩控制的永磁同步电机反馈线性化控制系统的仿真实验。在硬件在环仿真实验过程中,实际控制器先对虚拟电机发出控制指令,HIL 机柜中的 FPGA 板卡接收到虚拟电机运行时的数据,产生传感器信号回馈给实际控制器,再通过软件把数据读取出来,并分析实验波形,解决真正的实验平台搭建前可能出现的问题。硬件在环实验平台如图 12 所示。



图 12 LABCAR 实验平台

这里 HIL 机柜采用的 FPGA 板卡为 ES5340 电动仿真板卡(包含电机和逆变器模型),它可以测量 ECU 驱动的 IGBT 门极信号,使它的传感器产生转速、位置和电流等相关信号。它还可以对永磁同步电机进行模拟,模型还细致的考虑到了电机参数饱和和温度效应等因素,而且电机参数可以实时在线修改,易于实现精确计算。

4.2 直接转矩控制系统的验证

硬件在环实验平台搭建完毕后,在 TASKING 软件中,将 ASCET 软件生成的控制算法 C 语言代码和 DAVE 软件生成的外设配置 C 语言代码结合在一起,并进行编译,编译成功后烧入控制芯片 TC1782 中,然后将模数转换器 AD7606、旋变解码芯片 AD2S1210 与 TC1782 和 HIL 机柜正确连接,运用 LABCAR OPERATOR 软件对系统进行硬件在环仿真实验。该软件通过用户界面对 LABCAR 的硬件进行配置,并控制电机启停,生成可以执行的测试代码。图 13 为 LABCAR OPERATOR 的实验环境界面。

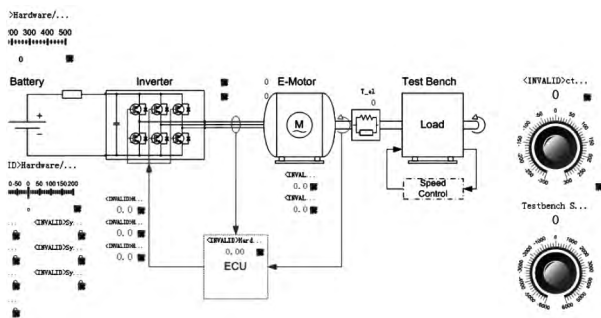


图 13 LCO 实验界面

基于硬件在环测试系统 LABCAR 仿真平台,电机负载给定 40 N·m,给定转速为 1 500 r/min 时的转矩、转速和相电流响应波形如图 14 ~ 16 所示。

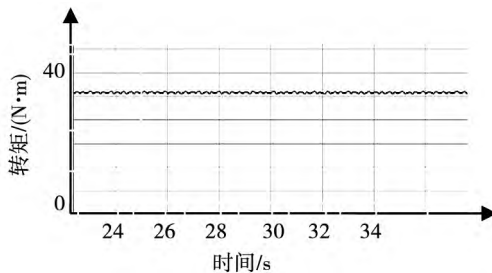


图 14 转矩波形图

从仿真波形图中可以看出,基于直接转矩控制的永磁同步电机宽调速范围反馈线性化控制系统输出的转矩和转速波形比较平稳,脉动比较小,输出相电流波形较接近正弦波,验证了本文设计控制方法的可行性。

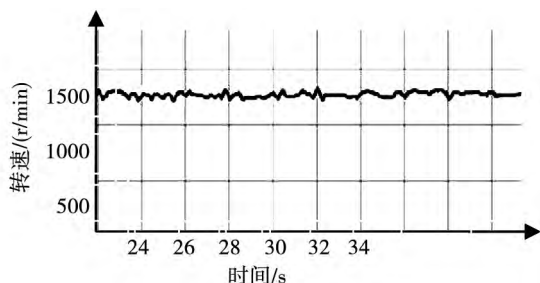


图 15 转速波形图

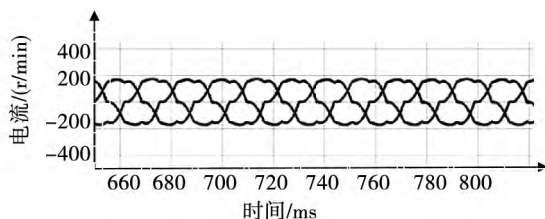


图 16 相电流波形图

图 17 基于直接转矩控制的永磁同步电机控制系统的输出转矩波形图,图 18 为相应的转速变化波形图。在 $t = 30\text{ s}$ 时刻,给定转速为 1500 r/min ,负载转矩由 $18\text{ N}\cdot\text{m}$ 降至 $10\text{ N}\cdot\text{m}$ 。由图可见,当负载突变时,反馈转速和给定速度之间的误差变大,经过速度调节器后将误差送给转矩,转矩调节器进行调节后送入后面的环节,最终使得系统重新恢复到稳态。本文设计的控制系统受电动机转子参数影响较小,动态响应好,可获得快速的转矩相应,控制算法和系统结构简单,而且转矩脉动更小。

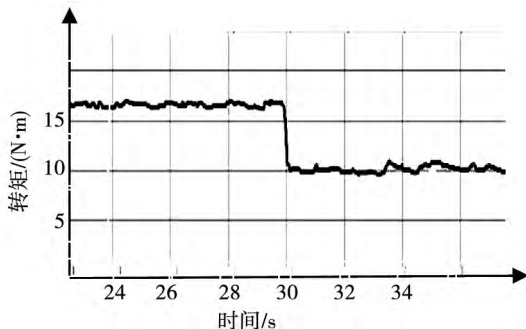


图 17 输出转矩波形图

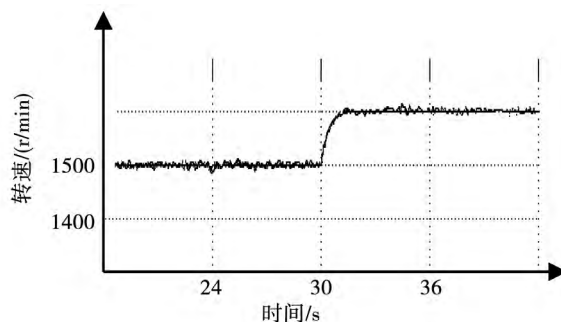


图 18 输出转速波形图

5 结 语

本文通过硬件在环测试系统 LABCAR 搭建了基于直接转矩控制的永磁同步电机宽调速范围反馈线性化控制系统的仿真平台,并对该系统进行了硬件在环仿真测试。通过实验波形可知,本设计的永磁同步电机直接转矩控制系统具有快速的动态响应特性,而且转矩脉动较小。

参 考 文 献:

- [1] 李谟发,彭晓,李永坚,等. 基于模糊 PI 调节器的无刷双馈电机直接转矩控制 [J]. 电机与控制应用, 2012(10): 30-33.
- [2] 杨健飞. 永磁同步电机直接转矩控制系统若干关键问题研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011: 5-8.
- [3] ZHANG Y, ZHU J. Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor With Reduced Torque Ripple and Commutation Frequency [J]. IEEE Transactions On Power Electronics, 2011, 26(1): 235-248.
- [4] JASWANT S, SINGH B, SINGH S P. Performance Evaluation of Direct Torque Control with Permanent Magnet Synchronous Motor [J]. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 2012, 1(2): 165-178.
- [5] 谢爱华. 基于空间矢量调制技术的永磁同步电机直接转矩控制系统的研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009: 68-71.
- [6] VENUGOPAL R. Feedback Linearization-Based Position Control of an Electrohydraulic Servo System With Supply Pressure Uncertainty [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(4): 1092-1099.
- [7] 韩洪洪,夏超英. 基于 Infineon TC1782 的电机控制器设计 [J]. 电源技术, 2014(1): 120-122.
- [8] 庞博. TC1782 在车用永磁同步电机控制中的应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 6-32.
- [9] 陶海军,张一鸣. 基于 AD7606 的多通道数据采集系统设计 [J]. 工矿自动化, 2013, 39(12): 110-113.
- [10] 梁家威,钟汉如. 基于 AD2S1210 的转子位置转速检测方法研究 [J]. 微电机, 2013, 46(5): 48-49.

(编辑: 温泽宇)