

文章编号:1671-251X(2014)02-0045-04

DOI:

张俊卿,梅奕,黄友锐,等.基于永磁同步电动机的矿用电机车调速系统设计[J].工矿自动化,2014,40(2):45-48.

基于永磁同步电动机的矿用电机车调速系统设计

张俊卿¹, 梅奕², 黄友锐¹, 凌六一¹

(1.安徽理工大学 电气与信息工程学院,安徽 淮南 232001;

2.常州信息职业技术学院 电子与电气工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:针对采用传统直流调速系统的矿用电机车在实际运行过程中存在维护量大、故障率高等问题,设计了一种基于永磁同步电动机的矿用电机车交流调速系统。该系统以 TMS320F28335 为控制核心,配合电流采样、转速测量等外围电路,采用直接转矩控制策略,实现了对电机车的高精度控制。实验结果表明,该系统调速性能良好、动态响应速度快、维护量低。

关键词:永磁同步电动机;交流调速;直接转矩控制;PMSM;DTC

中图分类号:TD64 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Design of speed regulation system of mine-used electric locomotive based on
permanent magnet synchronous motor

ZHANG Junqing¹, MEI Yi², HUANG Yourui¹, LING Liuyi

(1.School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, China; 2.Institute of Electronic and Electrical, Changzhou College of
Information Technology, Changzhou 213164, China)

Abstract:In view of problems of large amount of maintenance and high failure rate existed in actual running process of mine-used electric locomotive used traditional DC speed regulation system, a speed regulation system of mine-used electric locomotive based on permanent magnet synchronous motor was designed. The system uses TMS320F28335 as control core and realizes high-precision control of the electric locomotive combining with strategy of direct torque control as well as peripheral circuits of current sampling, speed measurement. The experimental result shows that the system has good speed regulation performance, fast dynamic response and less maintenance.

Key words: permanent magnet synchronous motor; AC speed regulation; direct torque control; PMSM; DTC

0 引言

直流调速系统由于结构简单、控制容易,在矿用电机车上使用广泛。但其所采用的直流电动机在实际运行过程中,存在转子线圈易烧毁、换向铜头易磨损、碳刷磨损高等诸多缺陷,加上煤矿井下恶劣的工

作环境,故障率较高,需要定期停车维护,严重影响了煤矿的日常生产。郭凤仪等人尝试对传统的直流调速系统控制算法进行改进^[1],提高了控制精度,但直流电动机固有的缺陷仍然无法避免。近年来有许多学者尝试将交流调速系统应用到电机车上^[2-3],取得了一定成果,但离实用化还有一定的差距。

收稿日期:2013-07-21;修回日期:2013-12-10。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274011);安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2012A091)。

作者简介:张俊卿(1989—),男,安徽六安人,硕士研究生,研究方向为智能控制,E-mail:daqing321@163.com。

永磁同步电动机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 作为交流电动机的一种,其转子采用永磁材料制成,电动机体积小,能量密度大,几乎免维护,非常适合在煤矿井下使用。但 PMSM 数学模型复杂,控制难度较大。王志宇等人提出的基于滑模变结构的 PMSM 调速系统^[4],使得电动机的转矩脉动较小。段建民等人将矢量控制技术应用于基于 PMSM 的电动助力转向控制系统^[5],控制精度高,但响应速度稍差。直接转矩控制^[6]策略将电动机的转矩作为直接控制对象,采用空间电压矢量的分析方法,实现转矩和磁链的双闭环控制,控制精度高,转矩响应快。为此,笔者在 PMSM 的基础上,采用直接转矩控制算法,设计了一种矿用电机车调速系统,可以很好地满足电机车在煤矿井下的运行要求。

1 系统总体结构

基于 PMSM 的矿用电机车调速系统总体结构如图 1 所示,电机车所携带的蓄电池为系统提供直流电压,通过电容滤波后由三相逆变电路转换成三相频率可调的交流电,进而驱动 PMSM 牵引电机车运行。

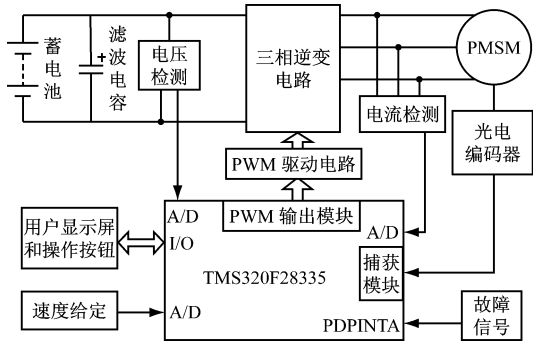


图 1 基于 PMSM 的矿用电机车调速系统总体结构

该系统主要由主电路、检测电路、控制回路 3 个部分组成。主电路包括蓄电池、滤波电容、三相逆变电路、PMSM 等,用于完成功率变换和电机车牵引。检测电路包括 PMSM 的电流检测电路、蓄电池的电压检测电路、基于光电编码器的转速检测电路以及故障检测电路,这些检测电路可以实时读取系统的电压、电流、温度等参数,用于闭环控制和故障检测。控制回路由 TMS320F28335 控制板、PWM 驱动电路、用户显示屏和操作按钮等构成,用于控制三相逆变电路和进行人机交互。

2 PMSM 直接转矩控制策略

2.1 PMSM 数学模型

在进行直接转矩控制的过程中,首先需要进行

Clarke 变换,将 abc 三相静止坐标系变换到两相静止 α - β 坐标系。

三相电流坐标变换公式为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: i_α, i_β 分别为定子电流在 α - β 轴上的分量; i_a, i_b, i_c 分别为三相定子电流。

α - β 坐标系下定子磁链方程为

$$\begin{cases} \Psi_\alpha = \int (u_\alpha - Ri_\alpha) dt \\ \Psi_\beta = \int (u_\beta - Ri_\beta) dt \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_\alpha, u_\beta, \Psi_\alpha, \Psi_\beta$ 分别为定子电压和磁链在 α - β 轴上的分量; R 为定子绕组的阻值。

PMSM 电磁转矩方程为

$$T_e = 1.5p(\Psi_\alpha i_\beta - \Psi_\beta i_\alpha) \quad (3)$$

式中: p 为电动机极对数。

磁链的模和位置角的计算公式分别为

$$\Psi_s = \sqrt{\Psi_\alpha^2 + \Psi_\beta^2} \quad (4)$$

$$\theta_k = \arctan\left(\frac{\Psi_\beta}{\Psi_\alpha}\right) \quad (5)$$

2.2 直接转矩控制策略

直接转矩控制的核心思想就是采用空间电压矢量的分析方法,根据测量得到的电动机三相定子电流和逆变器直流侧电压 u_{dc} 等参数,实时计算出电动机的电磁转矩和磁链,并通过双闭环的控制方法对定子磁链和电磁转矩进行直接跟踪控制。PMSM 直接转矩控制原理如图 2 所示,虚线框中的功能全部由 DSP 中的程序实现。

如图 2 所示,PMSM 的三相定子电流 i_a, i_b, i_c 通过 Clarke 坐标变换可以得到定子电流在 α - β 轴上的分量 i_α, i_β 。通过开关状态和逆变器的直流侧母线电压 u_{dc} 可以计算出定子电压在 α - β 轴上的分量 u_α, u_β 。将 $i_\alpha, i_\beta, u_\alpha, u_\beta$ 代入式(2)得到 Ψ_α, Ψ_β ,并由此求取 Ψ_s 和 θ_k 。将 Ψ_s 与圆形旋转磁链给定 Ψ_s^* 作比较,结果输入磁链滞环得到磁链的变化方向 λ 。由式(3)可以计算得到电磁转矩 T_e ,将实测的转速 ω 同给定转速 ω^* 做比较,通过 PI 环节得到转矩给定 T_e^* ,将 T_e^* 与 T_e 比较输入转矩滞环得到转矩的变化方向 τ 。根据 τ, λ, θ_k 查开关状态选择表得到逆变器的控制信号 S_a, S_b, S_c ,从而实现 PMSM 的直接转矩控制。

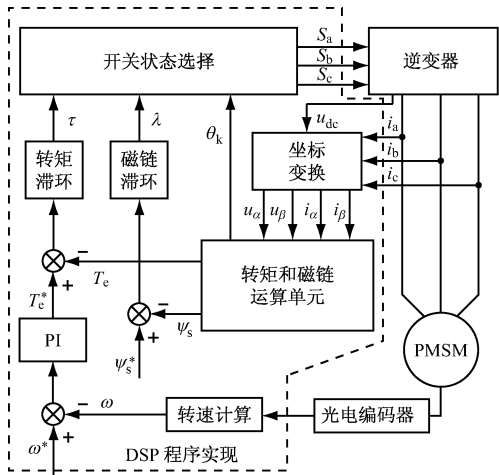


图 2 PMSM 直接转矩控制原理

3 系统主要电路设计

3.1 三相逆变电路

为了提高系统的可靠性,三相逆变电路采用 IGBT 模块。与传统分离式的 IGBT 功率组件不同,IGBT 模块把功率器件集成在一起,体积更小,可靠性更高。其内部还含有过流、过压、欠压和过热等故障检测电路,当相关故障发生时,一方面可以通过故障输出引脚向 DSP 发送相应的故障信号,另一方面内置的快速保护电路也会迅速动作,保证 IGBT 模块本身不受损坏。

由于 DSP 输出的 3.3 V 电平无法直接驱动 IGBT 模块,同时为了实现高压回路和控制回路的隔离,需要在两者之间添加一个 PWM 驱动电路。这里采用 IR2110 驱动器,它具有光电隔离的优点,内部主要由 3 部分组成:逻辑输入、电平转换及输出保护。由于采用了自举电源,只需要 1 路电源即可实现对主电路 1 个桥臂的控制。图 3 为基于 IR2110 的单桥臂驱动电路。

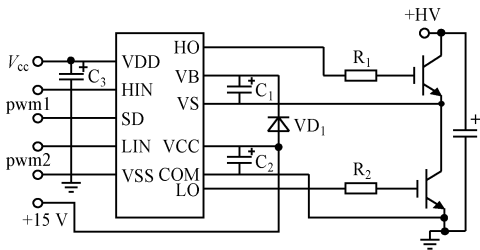


图 3 基于 IR2110 的单桥臂驱动电路

3.2 电流检测电路

根据需要采用霍尔传感器(LEM)对电动机的电流信号进行检测,如图 4 所示。传统的电阻分压

测量方法需要电压跟随、信号放大等电路,结构复杂,可靠性差。LEM 由霍尔电磁感应原理制成,其外围电路简单、测量精度高、动态性能好,电流跟踪速度高于 60 A/ μ s,并且抗外界磁场干扰能力强,可以长时间无故障工作,适合在煤矿井下使用。

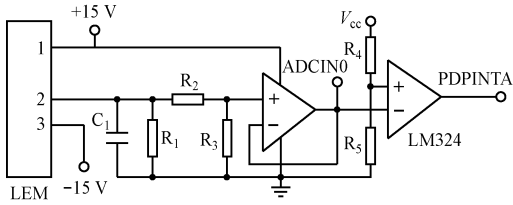


图 4 电流检测电路

LEM 输出的信号通过 C_1 和 R_1 滤波后,再由 R_2 和 R_3 进行分压输入电压跟随器的正向输入端。输出的信号接 DSP 的 ADCIN0 引脚,进行电流信号的 AD 采样。同时信号输入由 LM324 构成的电压比较器的反向输入端,通过改变 R_4 和 R_5 的大小就可以改变比较器的阈值。一旦 LEM 检测到的电流大于设定值,就会使 DSP 的 PDPINTA 引脚置 0,从而触发 DSP 内部的硬件中断,快速关闭 PWM 信号输出。

3.3 电动机转速检测

在 PMSM 的轴上安装增量式光电编码器,实时检测电动机的转速。光电编码器一共输出 A、B、Z 三路脉冲信号,其中 A 相和 B 相每输出一个脉冲就代表转子的一个增量位移,同时 A、B 的相位互差 90°,通过相位的比较可以判断转子的旋转方向。Z 相在转子旋转 1 周时才会产生 1 个脉冲,用来指示转子的机械位置。转速检测电路如图 5 所示。

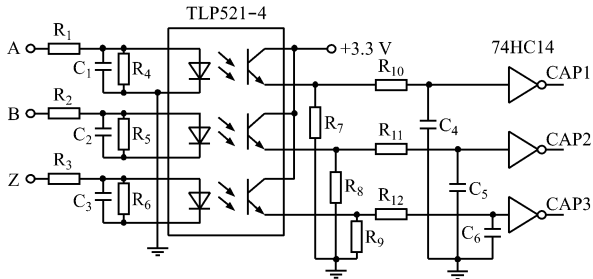


图 5 转速检测电路

A、B、Z 三路信号经过滤波后,通过光耦 TLP521-4 的隔离和 74HC14 的整形,送到 DSP 的捕获接口 CAP1, CAP2, CAP3 进行捕获中断处理, DSP 通过计算每个通道 2 次捕获之间的时间差,就可以进一步计算出转子的转速和位置。

4 软件流程

基于 PMSM 的矿用电机车调速系统的程序主

要包括 1 个主程序和 2 个中断子程序,如图 6 所示。

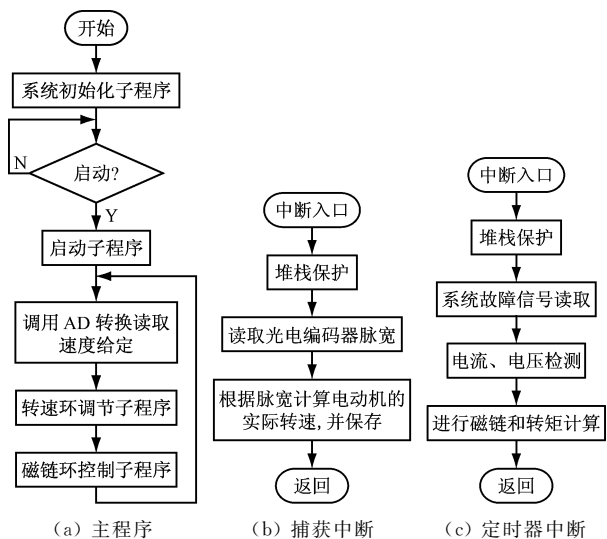


图 6 系统程序流程

系统上电以后,首先调用初始化子程序对系统进行初始化操作,包括 TMS320F28335 内部时钟的初始化、中断子程序的初始化、A/D 采样模块的初始化、I/O 口对应寄存器的初始化以及 PWM 输出模块的初始化等。然后检测是否有启动指令,一旦检测到用户下达启动指令,立刻调用启动子程序,完成电机车的启动。接着循环读取用户的速度给定,通过转速环调节子程序和磁链环控制子程序实现电机车转速和磁链的双闭环控制。

5 实验结果

实验采用 TBQ-22YC 矿用隔爆型 PMSM,额定功率为 22 kW,额定电压为 130 V,额定电流为 140 A,电动机转速为 200~1 500 r/min。控制芯片为 TMS320F28335,采用直接转矩控制策略进行调速。在电动机带额定负载运行时,对其进行相关测量。图 7(a)为通过霍尔电流传感器测得的相电流波形,图中纵向每格表示电流为 50 A。图 7(b)为电动机的线电压波形,采用 50 倍衰减电压探头测量,图中纵向每格表示电压为 50 V。图 7(c)为测量的电动机转矩波形,由测功机输出,纵向每格表示转矩为 60 N·m。图 7(d)为安装在电动机轴上的光电编码器输出,曲线 1 和曲线 2 分别为光电编码器 A 相和 B 相的波形,其中 A 相超前 B 相 90°,表示电动机处于正转状态。A、B 两相脉冲的周期相同,均为 40 μs。

从图 7(a)、图 7(b)可看出,该调速系统输出电

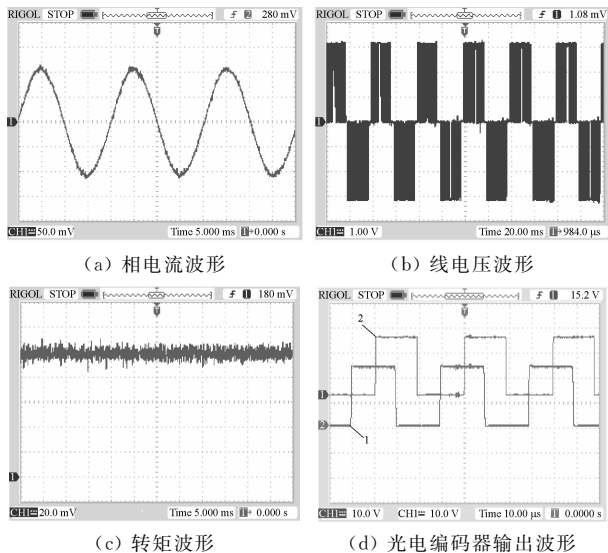


图 7 实测波形

压稳定,输出电流波形接近于正弦波。从图 7(c)、图 7(d)可看出,该系统工作性能良好,电动机转矩脉动小,转速稳定,调速系统的动态响应速度快。

6 结语

针对井下特殊的工作环境和蓄电池电机车运行的实际需要,设计了一种基于 PMSM 的矿用电机车调速系统。该系统采用模块化设计方法并且使用永磁电动机牵引电机车,可靠性高、维护量小。实验结果表明,该系统启动转矩大、启动速度快。在低速运行时,转速稳定,转矩脉动较小,系统的整体调速性能良好,适合在煤矿井下使用。

参考文献:

- [1] 郭凤仪,史艳影,王建跃,等. 矿用电机车直流斩波调速系统的研究与实现[J]. 测控技术, 2011, 30(10): 40-43.
- [2] 邓永红,潘玉民,张全柱,等. 矿用电机车矢量控制系统的设计[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(4): 23-27.
- [3] 栗忠魁,阮毅,宗剑,等. 直流架线式矿用电机车变频调速控制系统的设计[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(5): 27-30.
- [4] 王志宇,王长松,范普成,等. 基于滑模变结构的永磁同步电机调速系统设计[J]. 微电机, 2011, 44(6): 52-56.
- [5] 段建民,胡建峰. 基于 PMSM 的电动助力转向控制系统设计[J]. 微特电机, 2012, 40(2): 48-50.
- [6] 黄友锐,杭俊. 基于递归神经网络定子磁链观测器的凸极同步电动机直接转矩控制系统[J]. 工矿自动化, 2010, 36(9): 59-61.