

基于 TMX320F28335 的 3 机联动 PMSM 驱动系统的研究

梁波, 欧阳红林

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:在单台永磁同步电机驱动系统的基础上, 构建了 3 台电机的联动系统, 设计了联动系统的控制方法、硬件和软件的总体结构。介绍了一种高性能数字信号处理器 TMX320F28335, 采用这种 DSP 控制器实现对永磁同步电机驱动系统的全数字控制。通过实验证明该联动系统具有很好的转矩输出一致性。

关键词:永磁同步电机; 联动系统; 数字信号处理器

中图分类号: TM351

文献标识码: A

Study of the Three-axes Ganged PMSM Drive System Based on TMX320F28335

LIANG Bo, OUYANG Hong-lin

(Electrical and Information Engineering College, Hunan University, Changsha 410082 Hunan, China)

Abstract: The three-axes ganged PMSM system was designed on the basis of a single PMSM drive system, the control method of the three-axes ganged PMSM system and the architecture of the hardware and software were realized. Then a high performance DSP TMX320F28335 were introduced, the digital control of the PMSM drive system generated using this DSP controller. The test result indicates this system has nice consistency on torque output.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); ganged system; digital signal processor (DSP)

近 20 年来, 随着高性能永磁材料的问世及电力电子技术、自动控制技术和微电子技术的发展, 以永磁同步电动机为动力核心的驱动系统已受到国内外的普遍重视。目前国内对永磁同步电动机驱动系统的研究多集中在中小功率方面, 不能满足某些特殊场合(譬如军工产品中需要较大的功率等)的要求。因此研究多机联动永磁同步电动机驱动系统并实现其推广应用具有重要的现实意义。本文根据大功率永磁同步电动机驱动系统的性能要求选择了 TMX320F28335 作为控制芯片, 设计出 3 台电机联动系统的硬件电路和软件流程, 实验证明该联动系统可以通过 3 台小功率的电机通过机械连接实现较大功率的输出, 同时它还具有很好的转矩输出一致性。

1 联动系统的总体设计

联动系统的设计框图如图 1 所示。系统采用

3 台电机通过机械齿轮箱牵引一个负载, 控制系统由一个主控制器和 2 个从控制器组成。由于 3 台电机通过机械连接, 因此 3 台电机的转速始终保持一致。考虑到速度检测存在误差, 速度信号只送到主控制器上, 由主控制器产生 i_d 电流给定信号, 通过模拟量送到 2 个从控制器。主控制器采用双闭环结构, 外环为速度环, 内环为电流环。从控制器采用单闭环结构, 只使用电流环。主控制器和从控制器均采用 $I_d=0$ 的控制方法, 其系统控制算法框图如图 2 所示。因为对于永磁同步电动机, 转子磁通位置与转子机械位置相同, 这样通过检测转子实际位置就可以得到电机转子磁通位置, 从而使永磁同步电动机的空间矢量控制比异步电动机的空间矢量控制大大简化。主控制器测得的转子速度和给定速度比较后经过 PI 调节送到主控制器和从控制器的电流环; i_d^* , i_q^* 与实际的 i_d 和 i_q 经过 PI 调节得到电压给定 U_d^* , U_q^* 经反 Park 变换得

到 U_a^*, U_β^* 然后通过空间矢量调制得到 PWM 输出。

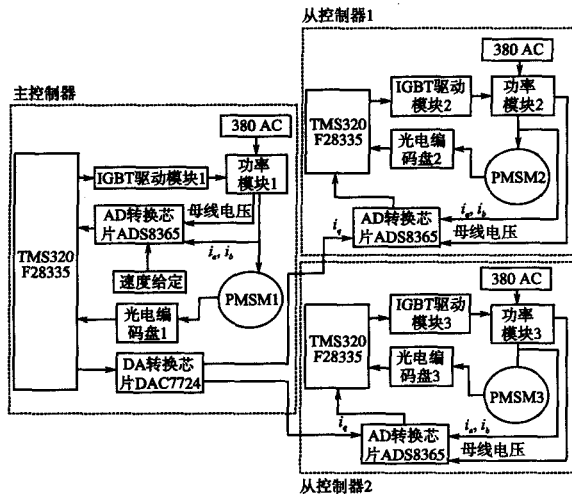


图1 联动系统的总体构成

Fig.1 The architecture of ganged system

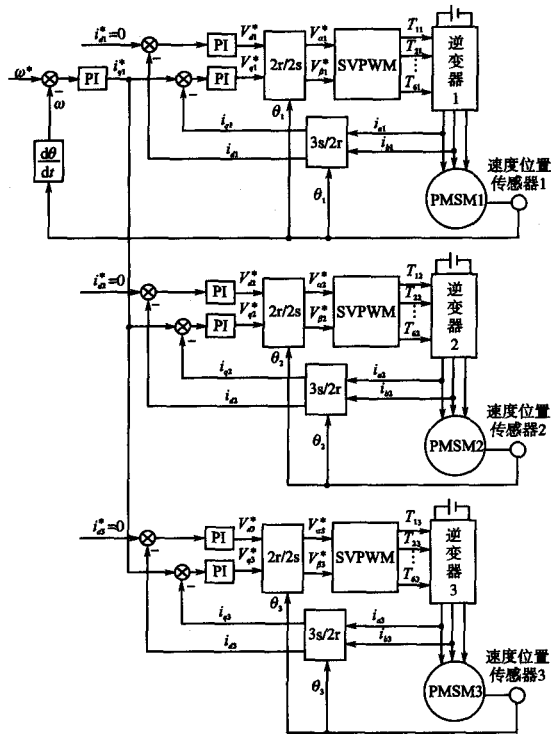


图2 联动系统控制算法框图

Fig.2 Control algorithm diagram of ganged system

2 主电路设计

主电路由于直接采用直流电源供电,省去了整流环节,为直-交逆变电路。在整体上包括IGBT 逆变电路、电容滤波电路、预充电电阻电路。其逆变电路拓扑结构如图3所示。

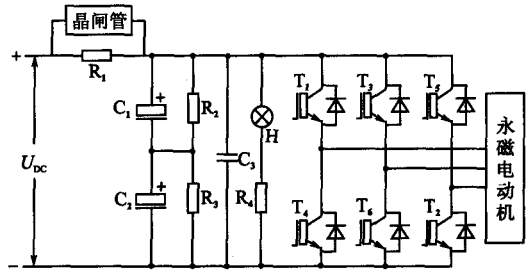


图3 逆变电路拓扑结构

Fig.3 The topology structure of inverting circuit

2.1 IGBT 模块选择

1) 确定电压额定值 U_{CEP} 。直流母线电压 $U_{DC} = 650 V$, 考虑到电流波动引起的过电压以及关断时的过电压, 取 2~3 倍过电压裕量。

$$U_{IGBT} = (2 \sim 3) \times U_{DC} = 1300 \sim 1950 V \quad (1)$$

因此, 可取 IGBT 的实际电压等级 $U_{CEP} = 1700 V$ 。

2) 确定电流额定值 I_c 。根据要求, 逆变桥每相额定输出电流为 $I_0 = 200 A$ 。电流定额可按下列式计算:

$$I \geq \sqrt{2} I_0 K_I \beta_I = 636 A \quad (2)$$

式中: I_0 为变频器额定输出电流; K_I 为过载能力, 选 1.5; β_I 为电流安全系数, 选 1.5。

因此, 可取 IGBT 的实际电流定额 $I_c = 800 A$ 。

IGBT 的参数选择为: 1700 V, 800 A, 选用英国 DYNEX 公司生产的 IGBT 模块。

2.2 滤波电容及预充电电路的选择

1) 本系统采用直流电源供电, 滤波电容 C_1, C_2 的作用主要是当负载变化时, 使直流电压保持平稳。本系统在采用直流电源直接供电时的电压为 650 V, 考虑到电压裕量, 因此, 选择滤波电容的电压等级为 450 V。滤波电容量 C 可按下列式计算:

$$\begin{aligned} C &= \frac{I_L}{\sigma f_{min} U_d} K_\varphi \\ &= \frac{200}{0.1 \times 3.5 \times 650} \times 3070 \\ &= 2698 \mu F \end{aligned} \quad (3)$$

式中: f_{min} 为逆变器的最低输出频率, Hz; I_L 为逆变器输出电流有效值, A; U_d 为直流侧电压平均值, V; σ 为允许的直流电压低频峰值纹波因数; K_φ 为与负载位移因数角 φ 有关的系数。

考虑 2 个电容串联, 可取每个电容的容量为 450 V, 5600 μF 。

由于电解电容器的电容量有很大的离散性,

故电容器组 C_1 和 C_2 的电容量不能完全相等,这将使他们承受的电压不相等。为了使它们最终承受的电压相同,在 C_1 和 C_2 旁各并联一个阻值相等的均压电阻 $R_2=R_3=50\text{ k}\Omega$ 。

2)限流电阻 R_1 和开关 S_1 。为了减小冲击电流,在变频器刚接通电源后的一段时间内,电路内串联限流电阻 R_1 ,其作用是将电容器的充电电流限定在允许的范围内。当驱动器驱动电动机工作时开关 S_1 闭合,从而将电阻 R_1 短路掉。该系统选择晶闸管作为开关器件,其参数选择如下。

电流:一般取其通态平均电流为按此原则所得计算结果的 1.5~2.5 倍,所以,

$$I_{F(AV)} = (1.5 \sim 2.5) \times 200 = 300 \sim 500\text{ A} \quad (4)$$

电压:取线电压的幅值并留 1.5 倍的裕量,

$$U = \sqrt{2} \times 450 \times 3 = 1908\text{ V} \quad (5)$$

所以,电压定额可取 2000 V。

参数选择为:2000 V,464 A,选用 IXYS 公司的 MCO450-20i01 晶闸管。

3 控制电路设计

3.1 控制芯片

主控制芯片采用 TI 公司推出的 TMX320-F28335,主频达到 150 MHz(时钟周期 6.67 ns),采用核心电压 1.8 V,I/O 电压 3.3 V 的低功耗设计,高性能的 32 位中央处理器,16×16 位和 32×32 位的乘法累加操作,16×16 位的双乘法累加器,哈佛总线结构,快速中断响应和处理能力,统一寻址模式,高效的代码转换功能(支持 C/C++ 和汇编语言)。具有 32 位浮点处理单元,能更快地处理数据,峰值运算速度可达每秒 3 亿次浮点操作(MFLOPS),这是它与以往 DSP 的最大不同。有 88 个可配置的 I/O 口,增强型 PWM 模块有多达 18 路的 PWM 输出,带死区设置,高频截波,灵活跳闸,事件触发等功能,其中有 6 路为 TI 特有的更高精度的 PWM 输出(HRPWM),增强型 QEP 模块具有速度测量,频率测量,位置比较,轴拖延侦测等功能,AD 模块带内置采样/保持的 12 位 16 通道 ADC,增强型 CAP 模块拥有 4 个 32 位捕捉单元,具有边缘限定器,事件预分频器,序列发生器,增量和绝对时间模式以及 32 位 PWM,支持 6 个 DMA 通道,MCBSP 和 EMIF。与前代 DSP 相比,平均性能提升 50%,并与定点 C28x 控制器软件兼容。

3.2 电流检测和 DA 转换电路

在电动机闭环控制系统中,电流反馈信号是最主要的反馈信号之一,它的精确与否将直接影响着整个系统的性能,因此在选型时要特别注意。本驱动系统采用 LEM 公司生产的 LF205-P 型电流传感器与 16 位模数转换器 ADS8365 组成了电流采样系统。ADS8365 与 TMX320F28335 的连接图如图 4 所示。

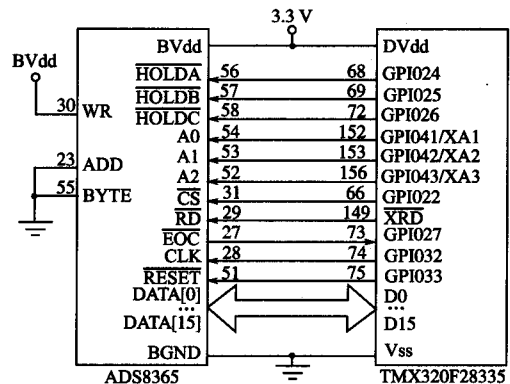


图 4 ADS8365 与 TMX320F28335 连接图

Fig. 4 The connection graph of ADS8365 and TMX320F28335

电机三相电流经 LF205-P 电流传感器检测后,其幅值在 -5~+5 V 之间。当 ADS8365 采用单极性模式时,其输入电压范围为 0~5 V 之间。因此,需要在 LF205-P 与 ADS8365 之间添加相应的电压调理电路,将输入信号调整到 ADS8365 要求的输入范围,如图 5 所示。 R_m 将 LF205-P 输出的电流信号转化为 -5~+5 V 之间的电压信号。图 4 中的 D_1 和 D_2 为 4.7 V 的稳压管,其导通电压约为 0.5 V,这样就可以使输入的电压限制在 -5.2~+5.2 V 之间以保护 ADS8365。根据运算放大器“虚短”和“虚断”的分析方法,可以求得该调理电路的增益和偏移量。令 $R_1=4\text{ k}\Omega$, $R_2=20\text{ k}\Omega$ 为常量,以 R_3, R_4 为变量,推导过程如下。

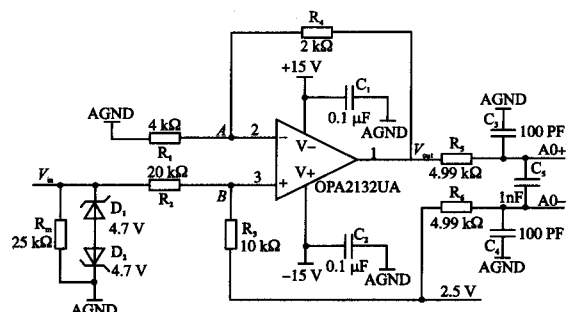


图 5 电压调理电路

Fig. 5 The voltage regulator circuit

A点电压:

$$V_A = \frac{V_{out}}{R_1 + R_4} \times R_1$$

$$= \frac{V_{out}}{4 \text{ k}\Omega + R_4} \times 4 \text{ k}\Omega \quad (6)$$

B点电压:

$$V_B = \frac{V_{in} - 2.5}{R_2 + R_3} \times R_3 + 2.5$$

$$= \frac{V_{in} - 2.5}{20 \text{ k}\Omega + R_3} \times R_3 + 2.5 \quad (7)$$

根据“虚短”原则, $V_A = V_B$, 整理得:

$$V_{out} = \left[\frac{(V_{in} - 2.5) \times R_3}{4 \times (20 - R_3)} + \frac{2.5}{4} \right] \times (R_4 + 4) \quad (8)$$

通过调节 R_3 和 R_4 的阻值可以改变调理电路的增益和偏移量,使 V_{out} 的输出在 $0 \sim +5 \text{ V}$ 之间。当 $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 2 \text{ k}\Omega$ 时, $V_{out} = 0.5 V_{in} + 2.5$ 。

主控制器产生的 i_q 电流给定信号,需要通过主控制板上的 DA 模块转换成模拟量送给 2 个从控制器,这里选择了 DAC7724 芯片,由于 DSP 与 DA 芯片电平不同,所以在 DSP 和 DA 之间使用了 $3.3 \sim 5 \text{ V}$ 的电平转换芯片 SN74ALVC164245,电流信号通过 DAC7724 转换成模拟量,通过 DA 的两个输出口(如图 6 所示) VOUTA 和 VOUTB 送入 2 个从控制器。

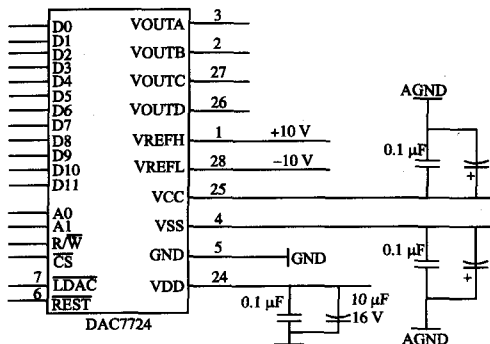


图 6 DAC7724 应用电路图

Fig. 6 The application circuit diagram of DAC7724

3.3 IGBT 驱动模块

本系统使用 $800 \text{ A}/1700 \text{ V}$ 的 IGBT 作为逆变电路的主开关元件,由于它所需要的瞬时驱动电流很大,且本系统的性能要求相当高,IGBT 常用的驱动器件 TLP250, EXB840/841/850/851 系列等驱动模块驱动电流、保护功能不够完善等,不能满足要求。经研究分析,选用瑞士 Concept 公司生产的 2SD106AI-17 作为 IGBT 的驱动器件,该

驱动器件可驱动 1700 V 的 IGBT,隔离性能好,保护功能强,抗干扰能力强,使用简单,实践表明该驱动器件性能优异,其应用电路如图 7 所示。

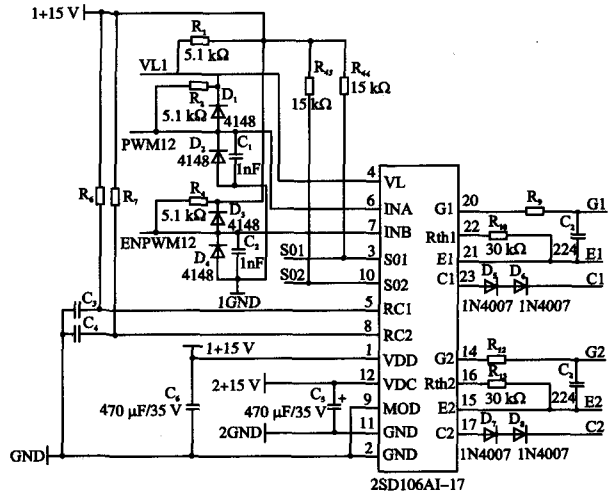


图 7 2SD106AI-17 应用电路

Fig. 7 The application circuit of 2SD106AI-17

4 软件设计

系统的软件流程主要包括:主控制器控制程序和从控制器控制程序。

主控制器程序包括速度测量,速度调节,DA 输出,角度测量,电流测量,CLARKE 变换,PARK 变换,电流调节,IPARK 变换,ICLARKE 变换,空间矢量计算和 PWM 输出。主控制器程序流程图见图 8。

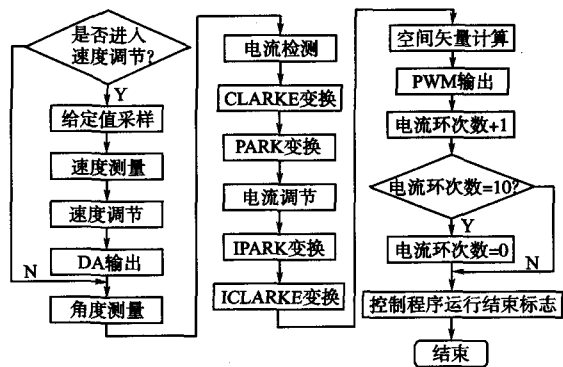


图 8 主控制器程序流程图

Fig. 8 The program flow diagram of main controller

由于从控制器控制程序是单闭环系统,因此只包括角度测量,电流测量,CLARKE 变换,PARK 变换,电流调节,IPARK 变换,ICLARKE 变换,空间矢量计算和 PWM 输出。从控制器控制程序流程图见图 9。

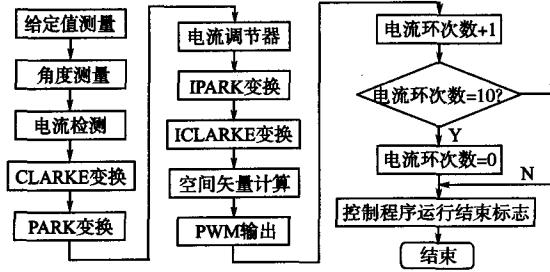


图9 从控制器控制程序流程图

Fig. 9 The program flow diagram of secondary controller

5 实验结果

实验参数为直流母线电压 $U_{dc} = 690\text{ V}$, PWM死区时间为 $4.5\ \mu\text{s}$ 时测得的, 速度控制器的比例系数设置为 0.2, 积分系数设置为 0.04, 限幅值为 ± 350 , 直轴电流控制器的比例系数设置为 1, 积分系数设置为 0.025, 限幅值为 ± 500 , 交轴电流控制器的比例系数设置为 1, 积分系数设置为 0.025, 限幅值为 ± 500 , 试验平台的转动惯量为 0.42。电机参数为: 极对数 2, 定子电阻 $0.061\ \Omega$, 永磁体磁链 $0.2646\ \text{Wb}$, 交轴电感 $0.684\ \text{mH}$, 直轴电感 $0.684\ \text{mH}$, 转动惯量 $0.042\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$, 额定转速 $6000\ \text{r/min}$, 额定电流 $62\ \text{A}$ 。本实验对单台电机和 3 台电机的空载启动制动时的转速和电流做了比较, 包括单台电机启动制动的转速和 I_a 波形(见图 10, 图 11); 3 机联动系统启动转速波形, 空载启动制动 I_a 波形(见图 12、图 13); 启动时 3 台电机 I_a 的波形(见图 14)。从实验波形中可以看到联动系统的上升时间仅为 $0.25\ \text{s}$ 左右, 几乎是单台永磁同步电机驱动系统上升时间的 3 倍, 从这一点可以看出联动系统具有很好的转矩输出, 从图 14 中的 3 台电机的 I_a 波形中也可以看到这一点。

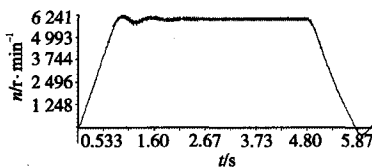


图 10 单台电机空载启动和制动时转速波形

Fig. 10 The speed waveform of a single motor in unload conditions of starting and braking

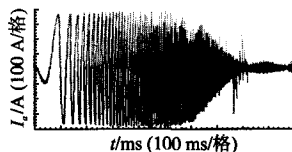


图 11 单台电机启动时 I_a 波形

Fig. 11 The I_a waveform of a single motor starting

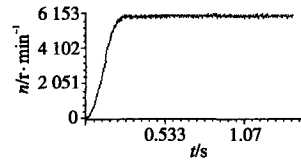


图 12 3 机联动系统空载启动时转速波形

Fig. 12 The speed waveform of three-axes ganged system unloaded starting

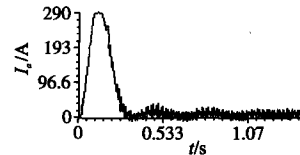


图 13 3 机联动系统空载启动的 I_a 波形

Fig. 13 The I_a waveform of three-axes ganged system unloaded starting

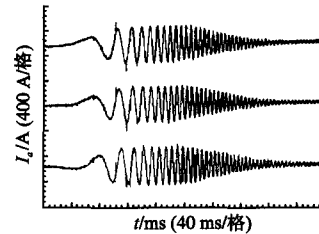


图 14 联动系统启动时 3 台电机的 I_a 波形

Fig. 14 The I_a waveform of three motors starting

6 结论

本文以现代信号处理器 TMX320F28335 为核心, 根据多机联动系统的性能指标构建了 3 台永磁同步电机连轴转动系统, 并对整个系统进行了分析和设计, 实验证明该系统运行稳定, 具有良好的动、静态特性, 性能达到了预期的效果, 实现了以 3 台小功率电机通过良好的机械连接输出较大功率的目标。

参考文献

- [1] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 许大中, 贺益康. 电机控制[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2002.
- [3] 谢宝昌. 电机的 DSP 控制技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [4] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

收稿日期: 2008-07-03

修改稿日期: 2009-03-21