

基于 DSP 控制的永磁同步电机变频调速系统的设计

刘少军¹ 张思雨²

(1. 西安航空职业技术学院 西安 710089; 2. 中航飞机股份有限公司西安飞机分公司总装厂 西安 710089)

摘要: 分析了永磁同步电机系统的研究现状,设计了一种以 TMS320F2407 为控制核心的变频调速系统。首先对系统的硬件及软件结构进行介绍,接下来分析了永磁同步电机磁场定向矢量控制的工作原理及控制方法,并对永磁同步电机伺服系统进行了数学建模。在此基础上设计了 PI 控制器,将该控制器用于永磁同步电机变频调速系统。最后用 MATLAB 仿真工具进行了仿真,仿真结果表明:对于具有非线性、耦合性强及参数漂移较大等特点的永磁同步电机来说,系统既可适应对象参数的变化,又能很好的消除稳态误差,获得了较高的控制精度。

关键词: 永磁同步电机; TMS320F2407; 矢量控制; 仿真

中图分类号: TN606 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Design of PMSM variable frequency speed control system based on DSP

Liu Shaojun¹ Zhang Siyu²

(1. Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China; 2. Avic Aircraft Limited Company Xi'an Aircraft Branch Assembly Plant, Xi'an 710089, China)

Abstract: This paper analyzed the present research situation of the permanent magnet synchronous motor system, and designed the variable frequency regulation speed system using TMS320F2407 as the control core. Firstly, the structure of hardware and software of the system were introduced. Then the working principle and control method of the PMSM vector control were analyzed and the mathematical modeling of permanent magnet synchronous motor servo system was built. On this basis the PI controller was designed and used in permanent magnet synchronous motor variable frequency speed control system. Finally the system was simulated using the MATLAB simulation tool, and the simulation results show that the system not only can adapt to the changes of object parameters, but also eliminate the steady state error and obtain a higher control precision for the permanent magnet synchronous motor with the characteristics of nonlinear, strong coupling and the parameters excursion.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; TMS320F2407; vector control; simulation

1 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)伺服系统由于具有控制简单,低速运行性能好、运行效率高、转动惯量小、转矩脉动小、可高速行驶、较高的性价比等特点,在诸多高性能领域等到了广泛应用,已逐渐成为交流伺服系统的主流。纵观 PMSM 伺服系统的研究现状,取得了一些令人可喜的成果。尤其是进年来围绕提高其伺服控制器性能目标在系统控制策略上作了大胆的探索和研究,采用了具有智能性的先进控制策略并取得了具有实用性意义的

成果。但是 PMSM 自身就是具有一定非线性、强耦合性及时变性的“系统”,加之系统运行时还受到不同程度的干扰,因此按常规控制策略很难满足高性能 PMSM 伺服系统的控制要求。为此,采用先进控制策略提高控制器性能;同时采用先进的控制系统实现方式(如基于 DSP 控制)以从整体上提高系统的“智能化、数字化”水平。以 DSP 为核心的全数字伺服系统,已成为当今交流伺服系统发展的趋势和研究的重点。基于此本文提出了基于 DSP 控制的同步永磁电机变频调速系统。设计 PI 控制器并且利用 Simulink 仿真软件对系统进行了仿真。

收稿日期:2015-05

2 系统硬件设计

2.1 系统硬件结构设计

整个伺服系统是由主电路、控制电路和辅助电路等构成。其中主电路由三相整流电路、逆变器和永磁同步电机等构成,其中逆变器采用6个IGBT功率逆变器完成功率转换;

控制电路由 TMS320F2407 为核心的 DSP 控制器组成,用来完成永磁同步电机的电流环,速度环和位置环的控制器的算法实现,空间矢量 PWM 波(SVPWM)的产生等;辅助环节主要包括光电编码器、电流检测电路、故障检测保护以及显示电路,用来完成 PMSM 转速检测、位置检测、电流检测和系统保护等^[1-2]。系统具体的硬件结构如图 1 所示。

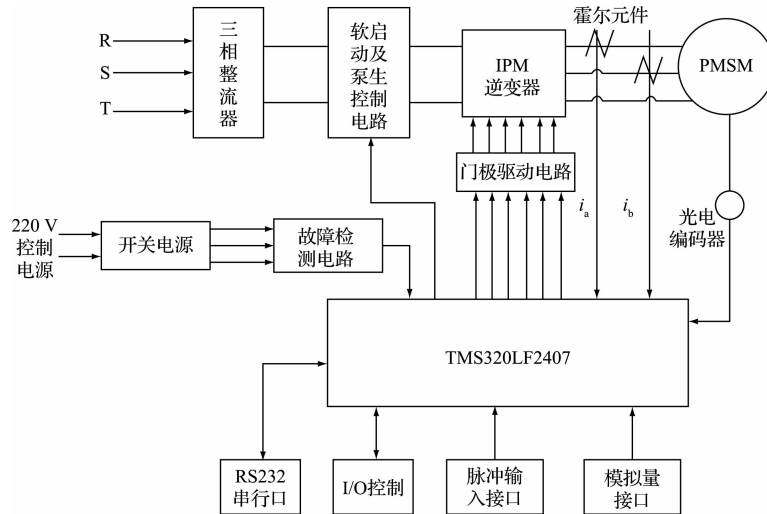


图 1 系统硬件原理

2.2 系统工作原理

系统的具体工作过程为:作为检测元件的光电编码器不停的对 PMSM 的转速进行采集,并将此速度信号转化为电信号,经过信号调理及 A/D 转换后再将此电信号传输给 DSP,DSP 将此速度值与给定值进行比较,然后根据 PID 控制算法计算出相应的控制量实时控制变频器的输出频率^[3],用于控制电机转速,最终达到维持系统转速恒定不变的目的。由此可见,此控制方式设备投资少、灵活性高,并且在系统中采用变频调速控制具有节电率高、控制精度高及控制效率高等优点。

3 系统软件的设计

3.1 系统主程序流程

该系统中,数据(速度信号、工频电网的电压、电机电流监控信号)采集、键盘输入、液晶显示、PI 控制等都要靠软、硬件的配合才能实现。系统主程序完成的功能有:系统初始化、数据采集比较、LED 显示、键盘扫描、故障处理、速度闭环控制等。主程序流程如图 2 所示。

3.2 PI 控制算法子程序设计

PI 控制子程序流程图如图 3 所示^[4]。主要完成采样系统的输出,获得当前的实际转速,该转速与转速设定值相比较,即可得当前误差,当前误差与前一误差相比较可得误差的变化量,误差和误差的变化经过量化得到控制量,此控制量必须乘以比例因子变成实际控制量,传送给 A/D 转换器去控制变频器,从而实现调速系统的控制。

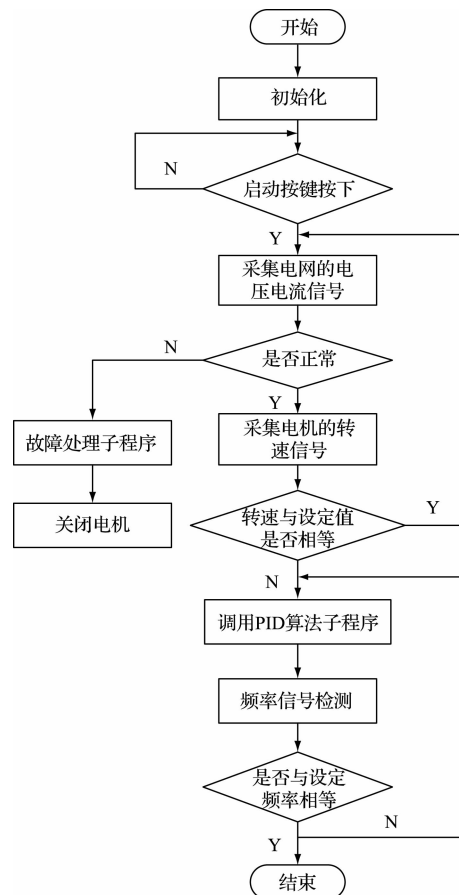


图 2 系统主程序流程

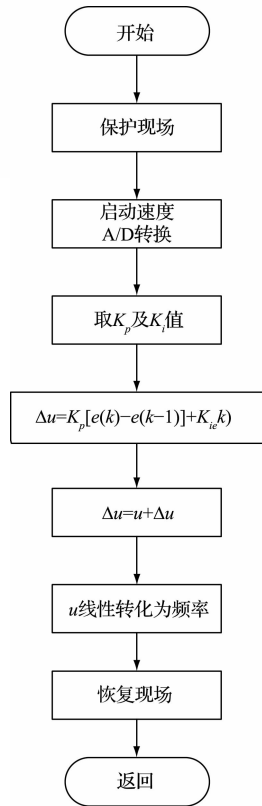


图3 PI控制子程序流程

4 永磁同步电机的控制原理

4.1 永磁同步电机的数学模型

用三相静止坐标系 abc 来分析永磁同步电机的数学模型困难重重,为此引入了空间矢量坐标系 $dq0$ 。不仅可以到达简化数学模型的效果,而且便于分析电机的动态特性。具体的空间坐标变换矢量图如图4所示^[5]。其中 ω_e 为转子的角速度, θ_e 为 A 相绕组与转子轴线之间的夹角。

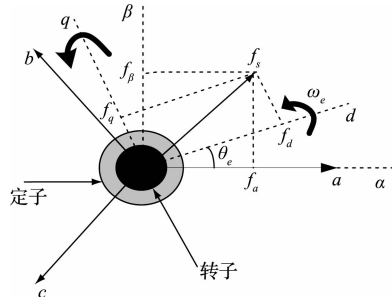


图4 空间坐标转换矢量

根据上图可得到 abc 坐标系转换为 $\alpha\beta$ 坐标系的转换矩阵(Clarke 矩阵)为:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

同理可得到将 $\alpha\beta$ 坐标系转换到旋转坐标系 dq 的转换矩阵(Park)为:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

最后得到从 abc 坐标系到 dq 同步旋转坐标系之间的变换(等功率变换)为:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

永磁同步电动机在转子旋转坐标系 dq 中的数学模型可以表达如下:

定子电压:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (4)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_e \psi_d$$

定子磁链:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q &= L_q i_q \end{aligned} \quad (5)$$

电磁转矩:

$$T_e = \frac{3}{2} P_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

4.2 永磁同步电机的控制方式

众所周知,电机调速的关键是实现转矩的控制,而这恰好与矢量控制的实质不谋而合。在系统参数不发生任何变化的情况下,矢量控制对电磁转矩的控制最终可归结为对 dq 轴电流的控制^[6-7]。正是采用了双闭环的矢量控制,具体控制结构如图5所示。依据模块化建模的思想,将图中所示的控制系统划分为功能独立的多个子模块。主要包括:PMSM 本体模块、三相逆变器模块、 dq 向 abc 转换模块、速度控制器模块等。其中速度环由 PI 调节器构成,电流环采用滞环控制产生二路基准信号。

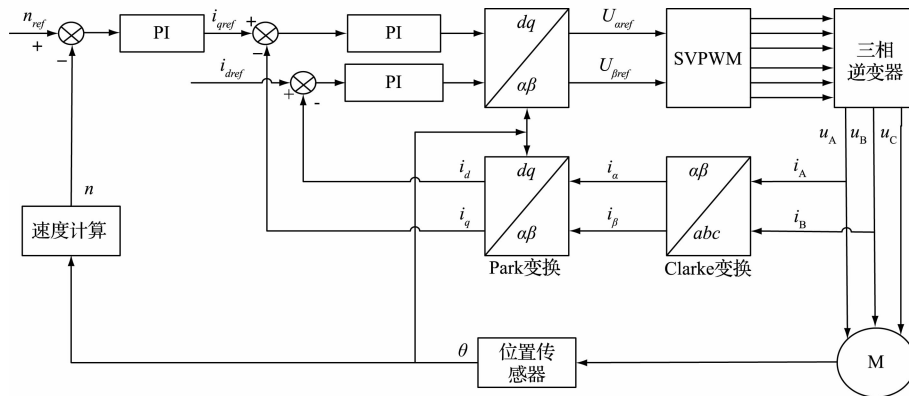


图5 永磁同步电机矢量控制结构

矢量控制具体的过程为:设定的速度信号与反馈的速度信号进行比较后,经由速度 PI 控制器进行运算,输出电流信号作为电流 PI 控制器的给定信号 i_{qref} ,与此同时电机定子电流经过 Clarke 和 Park 变换后,分别变为 i_d 和 i_q 。 i_d 和 i_q 分别与设定电流 i_{dref} 和 i_{qref} 进行比较后经由电流 PI 控制器和 Park 逆变换后得到 α 和 β 轴电压^[8]。最后经过 SVPWM 模块输出 6 路信号驱动逆变器工作,逆变器输出

三相大小和频率都可变的正弦交流电驱动电机进行调速控制。

5 系统仿真

前面已经对系统进行了数学模型及仿真控制图的建立,现在系统利用 MATLAB7.0 中的 Simulink 对所设计的调速系统性能进行仿真,系统仿真原理如图 6 所示^[9]。

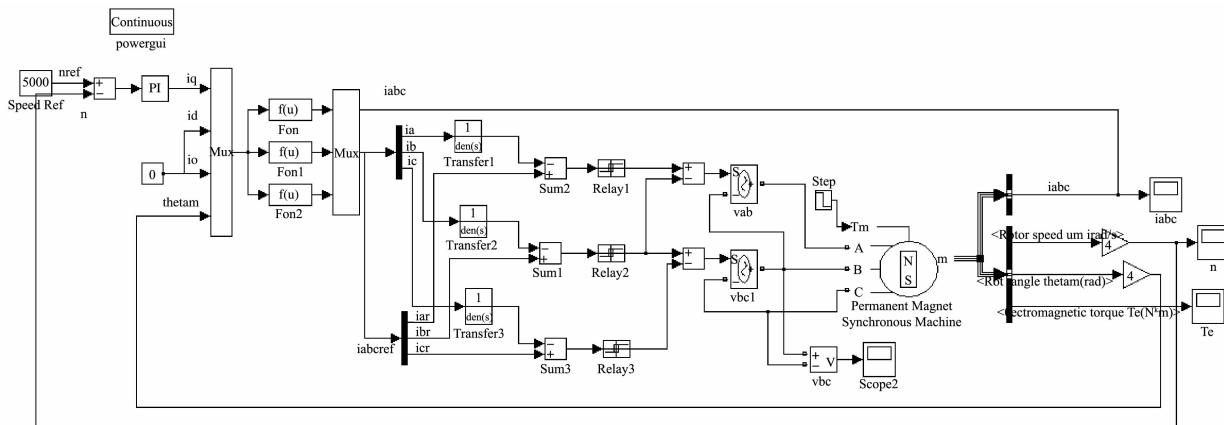


图6 系统控制仿真原理

电机参数要求:额定转速:5 000 r/min;反电势系数:0.02 V·s/rad;极对数:2;额定转矩:0.05 N·m;每相电枢绕组电阻:0.3 Ω;一相绕组电感:0.14 mH;两相绕组互感:0.05 mH。

为了使实验结果更具说服力,仿真时间设为 0.3 s,起始负载为 3 N·m,在 0.1 s 时负载变为 1 N·m。先设定转速 $n=5\ 000$ r/min,分别对定子电流 i_{abc} ,转速 n ,转矩 T_e 进行了仿真,对应的具体仿真结果如图 7~9 所示。

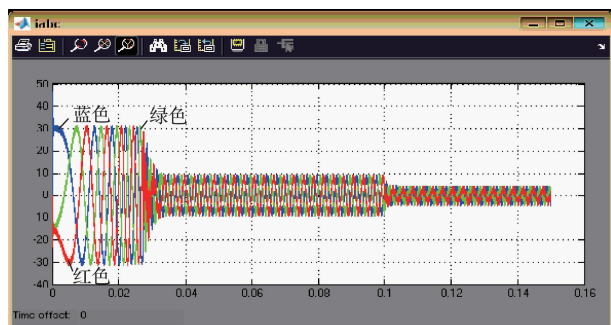


图7 定子电流 i_{abc} 仿真结果

仿真结果及分析:由图7定子电流仿真结果图可以看出,定子三相电流为对称三相(分别对应图中的蓝色、绿色、红色)电流,启动时电流较大,是额定电流的3倍左右,大约在0.03 s时稳定^[10]。稳定后在0.1 s负载发生变化时也相应的发生变化,当负载从 $3\text{ N}\cdot\text{m}$ 变为 $1\text{ N}\cdot\text{m}$ 时电流幅值相应变小。

如图8所示转速刚启动瞬间为零,但大约经过0.02 s的时间能迅速达到要求的转速。当负载发生变化时,速度基本上没有变化,转速比较稳定,效果较为理想。

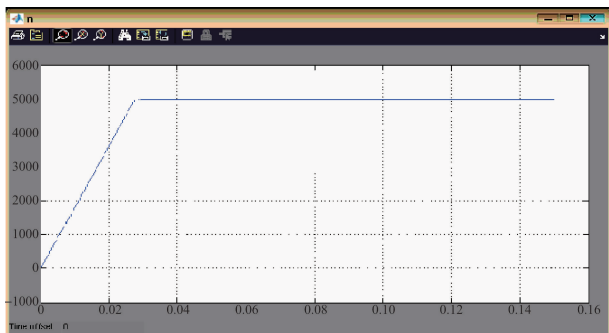


图8 转速 n 仿真结果

图9可以看到电磁转矩在电机启动时较大约有 $12\text{ N}\cdot\text{m}$,在大约0.03 s时达到负载转矩 $3\text{ N}\cdot\text{m}$,且较稳定,在0.1 s负载变为 $1\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,转矩 T_e 也发生相应的变化。

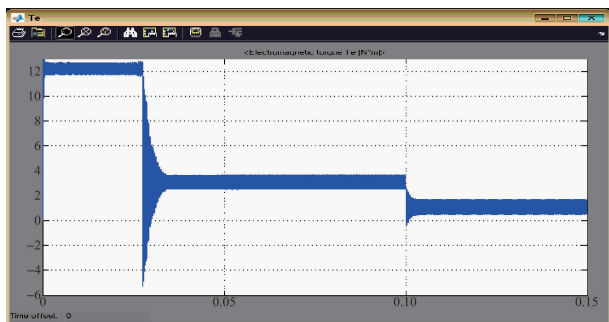


图9 转矩 T_e 仿真结果

6 结论

本文在分析PMSM研究现状的基础上,设计了一种以TMS320F2407为控制核心的PMSM变频调速控制系统。本文不仅介绍了该系统的硬件组成及软件程序设计,而且分析了磁场定向矢量控制的工作原理及控制方法。

由于永磁同步电动机具有参数的非线性、耦合性强,以及运行过程中因发引起的电动机参数漂移较大等特点,因此采用一般的控制手段难以获得满意的效果。在诸多的控制方法中,本文设计了PI控制器。最后利用MATLAB仿真工具对系统的电流、转速及转矩分别进行了仿真,仿真结果表明使用PI控制的变频调速系统既可适应对象参数的变化,又能很好的消除稳态误差,获得了较高的控制精度。

参考文献

- [1] 任枫轩. 基于DSP的数字滤波器制作与实现[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(1): 56-59.
- [2] 廖明栋, 范缜煜, 董福庆, 等. 基于DSP的直流伺服电机驱动电路研究与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8): 77-80.
- [3] 林连冬. 基于误差拍控制的PMSM电流预测控制算法[J]. 电子测量技术, 2013, 36(10): 38-42.
- [4] 郭红霞, 刘磊. 基于PID控制算法的自动取暖控制器的设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2): 29-32.
- [5] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [6] 刘岩俊. 基于DSP的嵌入式温度测量系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(1): 78-81.
- [7] 丁硕, 崔总泽, 巫庆辉, 等. 基于SVPWM的永磁同步电机矢量控制仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(6): 81-85.
- [8] 崔茂振, 张昌凡, 朱剑, 等. 永磁同步电机滑模调速控制及其实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(6): 84-92.
- [9] 朱俊杰, 栗梅, 王湘中, 等. 分段式滑模变结构无刷直流电机直接转矩控制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2634-2640.
- [10] 冯江华, 桂卫华. 考虑参数变化的永磁同步电机弱磁控制研究[J]. 微电机, 2008, 41(4): 20-31.

作者简介

刘少军, 1982年出生, 实验师。主要研究方向为电力电子技术及自动化理论。

E-mail: yuyuer826@126.com

张思雨, 1992年出生, 助理工程师, 主要研究方向为机械设计及自动化控制理论。

E-mail: 1160803293@qq.com