

基于矢量控制的永磁同步电动机控制器设计

项目为20 kW永磁同步电动机(PMSM)控制器的开发,应用TI公司TMS320F2812芯片和三菱公司智能功率模块(IPM),采用强弱电隔离技术构建了控制器硬件结构。控制策略采用矢量解耦控制结合PI控制算法,对永磁同步电动机进行实时磁场定向控制(FOC),始终保持最大转矩输出。控制器同时集成了温度检测、电压检测、电流检测、缺相保护、过载保护和功率故障保护功能。产品具有体积小、重量轻、控制准确度高、效率高和运行安全可靠的特点。

王 升 许傲然 谷彩连 白 迪 李 晶/沈阳工程学院电力学院

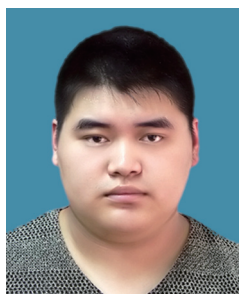
近年来基于永磁同步电动机的功率驱动系统开始广泛应用于快速、准确的工业驱动控制领域,并且功率越来越大。其具有动态特性优良、转动惯量和时间常数较小、运行可靠以及维护方便等特点。针对市场需求,以20 kW功率为标点开发了大功率系列永磁同步电动机控制器。项目采用了当前较先进的数

字信号处理器(DSP)、智能功率模块(IPM)等器件,实现了产品的全数字化、智能化和小型化。为了实现控制系统的高性能要求,采用了先进的空间矢量解耦控制算法,并结合了改进型的PI控制策略。

硬件电路设计

1. 控制器硬件结构

硬件原理结构如图1所示,整个控制系统是由速度环和电流环组成的双闭环结构。主控制芯片采用TI公司的32位数字信号处理器(DSP)——TMS320F2812,该芯片具有高速、高准确度、低功耗、抗干扰能力强和资源丰富等特点,特别适合电动机控制及各种工业自动化的应用。芯片内核是当今数字控制应用方面性能最高的DSP内核。系统采用旋转变压器作为电动机转子



王 升/助理工程师

关键词/Keywords

矢量控制·
永磁同步·
PMSM 矢量解耦·
磁场定向控制FOC·

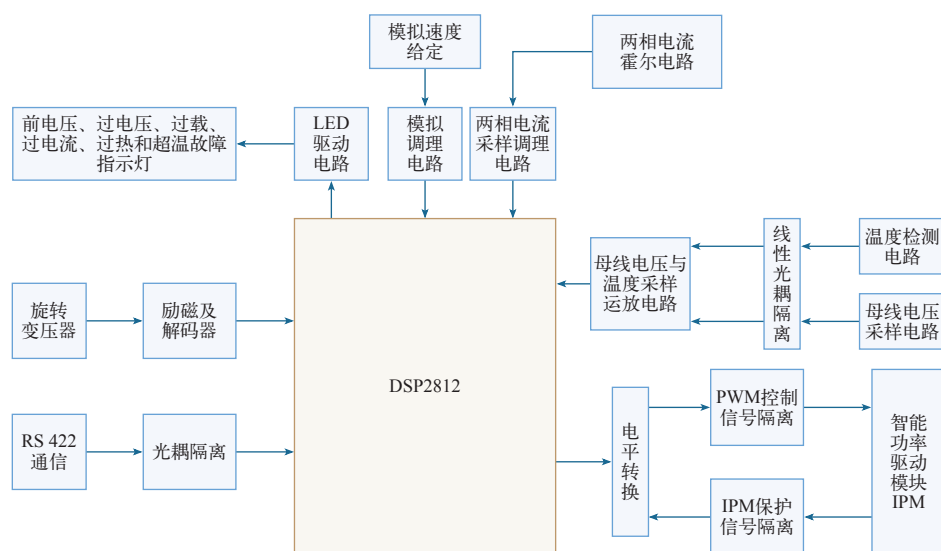


图1 硬件原理结构图

位置传感器, 并采用AD公司专门的RD转换芯片AD2S1200作为解码芯片。旋转变压器实际上是一种精密控制微电动机, 具有运行可靠的特点。AD2S1200内置了旋转变压器的励磁输出, 只需要经过放大即可, 它可将旋转变压器的正余弦输出转换为可配置的10~16位数据, 转换准确度高达11'。功率模块选用了三菱公司的第五代智能功率模块(IPM), 它将IGBT以及外围驱动和保护电路集成在一个模块内, 缩小了产品体积, 同时缩短了产品开发周期。DSP生成的6路电动机驱动PWM信号经过光耦隔离后送至IPM驱动, 实现了控制系统内的强弱电隔离。系统的外部设定输入可以通过RS 422接口或者模拟设定给出。系统同时集成了温度检测、电压检测、电流检测、缺相保护、过载保护和功率故障保护功能, 可以通过面板LED指示并经串口RS 422上传给上位机。

2. 控制器电源系统

控制器电路为数模混合、强弱电混合电路, 为避免功率电干扰控制电路, 母线电压采样与主控制电路通过线性光耦隔离、PWM驱动信号与IPM功率保护等采用光耦隔离, RS 422通信电路与主控制电路也采用光耦隔离。外部仅为电子控制器提供24 V控制电源和310 V功率电源, 其他电源均需由内部DC-DC模块转换获得。电源电路方案如图2所示。

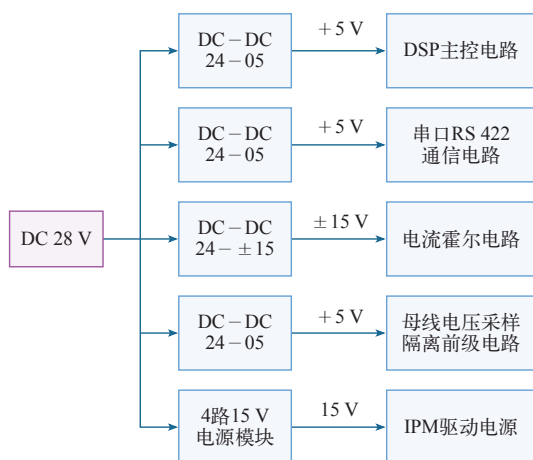


图2 控制器电源系统

控制策略与实现

1. 永磁同步电动机矢量控制原理

本设计采用转子磁场定向矢量控制(FOC)作为永磁同步电动机的控制方式。该控制方式通过坐标变换的方法使交流三相永磁同步电动机与传统的直流电动机控制模型相同, 便于系统控制, 即将定子电流分解为电动机转子的同步坐标轴上的两个电流: 磁场电流 i_d 和转矩电流 i_q , 分别独立控制这两个电流分量。

在永磁同步电动机控制中, 为了简化分析过程, 可以忽略一些影响较小的参数, 假设电动机是线性的, 并且定子绕组在空间上对称分布, 忽略谐波及铁心磁饱和现象, 不计磁滞及涡流^[1], 永磁材料的电导率为零, 并且电动机三相绕组中的感应电动势波形是在正弦条件下, 使用Park和Clark坐标变换后, 永磁同步电动机的基本电流方程可表示为

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_r & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} \quad (1)$$

将 d 、 q 轴系下的两相电压转换为定子A、B和C相上的三相电压, 即

$$\begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

由式(2)经过推导可以得到电动机的稳态电压方程为

$$\begin{aligned} u_q &= R_s i_q - \omega_r L_d I_d - \omega_r \Psi \\ u_d &= R_s i_d + \omega_r L_q I_q \end{aligned} \quad (3)$$

电磁转矩的计算公式为

$$T_{em} = -p_n |\Psi_r i_q + (L_d - L_q) i_d i_q| \quad (4)$$

由于矢量变换中 L_d 与 L_q 相等, 所以式(4)可得

$$T_{em} = -p_n \Psi_f i_q \quad (5)$$

式中, i_A 、 i_B 和 i_C 为永磁电动机的三相电流; u_d 、 i_d 为变换后 d 轴的电压和电流值; u_q 、 i_q 为 q 轴电压和电流; p_n 为永磁同步电动机的极对数。

由以上的公式可以看出, 经过Park变换后, 三相永磁同步电动机具有和直流电动机一样的转矩表达式。所以在硬件设计上, 通过霍尔电流传感器和旋转编码器检测出定子电流和转子的旋转位置, 就可以计算出 i_d 和 i_q , 从而实现永磁同步电动机的矢量控制^[2]。

2. PI控制算法

PI调节的控制规律为

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) + u_0 \quad (6)$$

式中, k_p 为比例系数; T_i 为积分常数。

对式(6)离散化处理就可以得到数字PI调节的算法, 即

$$u_k = k_p (e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j) + u_0 \quad (7)$$

式中, k 为采样次数, $k=1, 2, \dots$; u_k 为被控目标在第 k 个采样时的目标值; e_k 为第 k 个目标值时对应的误差值; u_0 为积分系数。

对式(7)进一步变化, 令第 k 次采样时刻的输出值增量为

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} = k_p (e_k - e_{k-1}) + T k_i e_k \quad (8)$$

$$u_k = u_{k-1} + k_1 e_k + k_2 e_{k-1} \quad (9)$$

在PI调节中, P参数增大, 将使系统动作响应速度加快。在不引起系统振荡的情况下, 增大比例增益P, 可以减小系统的稳态误差, 进而提高系统的控制准确度。但是随着比例增益 k_p 的增大, 系统向稳态调节中的振荡次数会增加, 从而增加系统的调节时间。因此太大的 k_p 会造成系统的不稳定。积分时间常数 Tk_i 设置太小, 系统的动态调节时间加快, 调节次数增多, 也会造成系统的不稳定; 反之, 如果时间常数 Tk_i 太大, 会加长系统的动态调节时间, 不利于消除系统的稳态误差, 同时会降低系统的控制准确度^[3]。

3. 算法实现和程序流程

在速度控制模式下, 算法实现步骤如下:

1) 根据旋转变压器解码数据计算电动机转速和当前转子位置角。

2) 根据转速设定和转速反馈值进行速度环PI计算, 并将速度环计算结果作为 i_q 电流环的设定值^[4]。

3) 通过霍尔传感器分别获得电动机的三相电流 i_A 、 i_B 和 i_C , 根据磁场定向工作原理, 将其转换为旋转坐标系下的用以控制转子励磁的电流 i_d 和用以控制永磁电动机的电磁转矩输出的电流 i_q 。

4) 励磁电流与转矩电流给定值分别与 i_d 与 i_q 的实际值进行比较得到各自的误差信号。该误差信号作为PI控制器的输入, PI控制器输出电压分量 u_d 和 u_q 。

5) 将PI控制器输出的交直流轴电压值 u_d 和 u_q , 再经过坐标变换后生成电压值 u_α 和 u_β , 最后利用SVPWM方法输出满足逆变器驱动控制用的六脉冲信号。

矢量控制实现结构如图3所示。图3显示了坐标变换、PI迭代、反变换以及PWM驱动波形产生的整个过程。此控制系统的设计中, 包括PWM波形的产生、转子位置和电流采集都是通过中断方式调用的, 为了避免在同一时间多个事件对DSP进行操作导致竞争冒险, 因此设计中将控制周期设为100 μ s, PWM的载波频率设为16 kHz, 速度环和电流环的采样周期设为78.5 μ s, 无倍数关系存在^[5]。软件实现流程如图4所示。

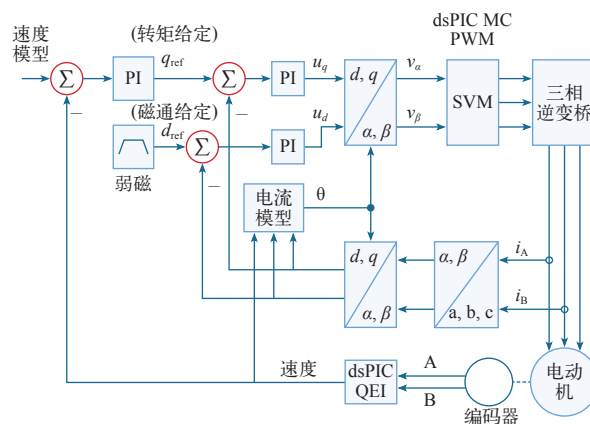


图3 矢量控制实现结构

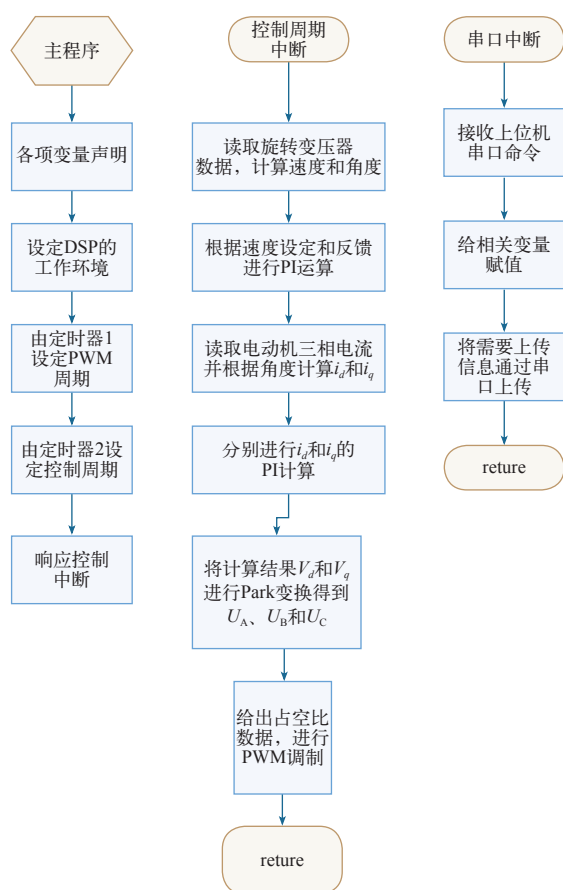


图4 程序流程

设计中的重点问题

1. 电磁兼容设计

电磁兼容设计是指设备在复杂的电磁环境中既不干扰其他设备,也不受其他设备干扰的影响而能正常工作,设计的目的是使电子设备或系统在预期的电磁环境中实现电磁兼容,控制器在电磁兼容设计时需要考虑如下内容。

(1) PCB布线

首先确定元器件的布局,布局时要综合考虑强电、弱电信号以及模拟量器件原理控制器的主回路;然后进行信号线的走线,合理地布置模拟量地线和数字量地线,通过大面积的铺铜处理,降低差模干扰。

(2) 屏蔽设计

良好的屏蔽是解决电磁兼容最有效的手段,屏蔽可以抑制干扰在空间的传播。控制器的壳体采用全封闭的铁壳设计,驱动板与控制板之间使

用屏蔽板进行隔离。所有外接信号线都采用屏蔽电缆,并将屏蔽层可靠接地。

(3) 降低电磁辐射

一般综合系统中,电动机及驱动都会作为辐射源存在。合适的开关频率及PWM波形可以有效地降低电磁辐射的高频成分。在驱动电路部分增加合适的吸收电路,可以有效地降低电磁辐射能量。另外,控制器内部的功率电路走线会极大地影响控制器的辐射量级,这是因为PWM斩波中的高频成分会由于导线上的寄生电感产生能量较大的高频辐射,所以布线设计时应尽量减少导线寄生电感,建议用大面积平面导线传导电流。结构设计上尽量避免功率电路在控制器内部形成回路,且应保持直进直出的电路结构。

2. 热设计

热设计对提高产品的可靠性至关重要,良好的散热直接关系到产品的运行状态和寿命。设计过程中,主要考虑了以下几个方面的内容。

(1) 功率器件的冷却

电动机控制中的功率器件需要流过电动机的驱动电流,其开关损耗和管压降损耗会在功率器件本身产生较大的热量,一般损耗在总功率的5%左右。设计中选择液冷对功率器件进行冷板散热,有效地降低了控制器的体积要求,并有很好的冷却效果,保持额定负载下冷板温升不超过25℃。

(2) 电解电容散热

电动机控制中铝电解电容用于滤除控制中产生的高次谐波,该谐波具有频率高、能量大的特点,会使电容有一定的温升,而电容的工作温度直接关系到电容的寿命和可靠性。本次设计中将电解电容用定制的夹板固定在控制箱体上,并在电解电容底部与壳体接触部位用导热硅胶固定,一来增加控制器抗振动能力,二来降低热阻。另外有效滤除电解电容上的高频分量会极大程度地降低电容的损耗,设计中还选用高频无感CBB电容并联在电解电容接线端和IPM接线端上。

(3) 控制板电子器件布局

印制板上的器件尽可能按其发热量大小及散

热程度分区排列,发热量大或耐热性差的器件布置在散热较好的部位,在水平方向上将充分利用控制器壳体进行散热,并在控制器外壳上增加散热筋。

3. 环境适应性设计

环境适应性包括高低温设计、抗振动能力、防水防尘、防雨淋和烟雾等。设计中,在元器件选择上充分考虑了产品的高低温适应能力。在抗振动方面,首先考虑产品结构,其次考虑装配。产品生产中再进行其他防护处理。

特别要强调的是,由于控制器应用环境振动量级较大,控制器结构采用框架式结构,即采用一体化成型的铝制框架作为控制器整体的支撑部件,其他器件与部件均安装在框架上。框架安装上采用抗振胶垫在增强产品的抗高频振动能力。

结束语

基于矢量控制的永磁同步电动机控制系统,利用先进的TMS320F2812芯片和智能功率驱动模块,实现了电动机的快速、准确控制,并实现了可靠的保护功能和良好的用户接口^[7]。产品具有体积小、重量轻、控制准确度高、效率高和运行安全可靠的特点,可广泛应用于航空航天、采矿冶金、交通工具和空调系统制冷等行业需要高准确

度驱动的控制领域。在此产品开发的基础上,还可进行小功率和更大功率的永磁电动机控制器开发,正弦波矢量解耦控制方案非常实用于高性能伺服控制产品。

参考文献

- [1] 王成元,夏加宽,等.现代电机控制技术[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [3] 严洁,阮毅,徐静.基于DSP的SVPWM研究[J].电气传动自动化,2005(6).
- [4] 郎宝华,刘卫国,周熙炜,等.空间矢量脉宽调制的仿真研究及应用[J].电机与控制应用,2007(8).
- [5] 施丽婷,黄筱调,杨勇.数控交流伺服系统三环整定及应用[J].南京工业大学学报:自然科学版,2006(4).
- [6] 陈敏俊,南余荣,王刚.基于空间矢量脉宽调制的新型永磁同步电机矢量控制调速系统[J].电机与控制应用,2007(4).
- [7] 王正,常浩.永磁同步电机矢量控制系统研究[J].沈阳工业大学学报,2007(3).

(收稿日期:2015-02-10) EA



bai-po 佰珀新型材料
青春 谦学 责任 奉献

上海佰珀新型材料有限公司地处上海青浦,以独特的区位优势,深得中国经济发展先机。佰珀新型材料已经成为中国知名的SMC材料、模压制品、绝缘板材供应商。

产品广泛应用于电工电气、汽车、卡车、农业机械、轨道交通、建材、卫浴用品等领域。公司拥有丰富的研发资源,出众的工程技术。

地址:上海市青浦区天淀路168号 Post Code:201713
Add: Shanghai city Qingpu District days Lake Road No.168
Fax: 021-59831666 57766999
M.T: 138 1612 7328
http: www.bai-poo.com
E-mail:401071998@qq.com

让绝缘变得轻松自如!

干变、油变绝缘件、高低压开关柜绝缘件、充气柜绝缘件,
SMC板、环氧板销售加工

中国知网 <https://www.cnki.net>

