

基于 DSP 的变频压缩机 PMSM 数字控制系统

文 / 张开飞, 黄道 华东理工大学 信息科学与工程学院 200237

摘要 目前变频空调压缩机大多采用的感应电动机, 效率低, 变频控制比较复杂。本文介绍一种新设计的变频压缩机驱动控制器。该控制系统采用永磁同步电动机作为压缩机驱动电机, 从永磁同步电机控制特性出发, 引进转子磁场定向的无位置传感器矢量控制方案。在此基础上, 研究了以 TMS320F2801 DSP 芯片为控制核心的永磁同步电动机数字控制系统的硬件结构和软件设计, 最后在空调样机上进行了实验, 结果表明, 该控制器工作可靠, 稳定。

Abstract Presently, induction motor is mostly used for frequency-variable air conditioner compressor, but it has such drawbacks as low efficiency and complicated controller. So, a novel frequency-variable air conditioner drive controller is presented in this paper. First the control system selects PMSM as the drive motor of the frequency-variable air conditioner compressor and from the control characteristics of PMSM, this paper gives the control strategy of sensorless field orientated control. Based on the strategy, the paper researches the hardware composition and software structure of the PMSM digital control with TMS320f2801 chips as its core, finally the system experimentalizes on the sample machine. The result shows that the controller is efficiency and stable.

一、引言

全球能源紧张, 节能至关重要。传统的空调器由于其运行效率低下正在逐渐退出市场。变频空调器因为节能效果明显而大受市场关注。目前国内外生产的变频空调压缩机大部分用感应电动机驱动, 但感应电动机效率低, 变频控制复杂。永磁同步电机具有节能

效果明显、温升低、起动性能好、轻载时效率高等优点, 是空调压缩机中感应电动机的理想替代电机。

本文将永磁同步电动机作为变频压缩机驱动电机, 在此基础上提出了一种新型的永磁同步电机数字控制系统; 在硬件方面, 选用电机控制专用的 DSP 芯片以及智能功率模块(IPM), 简化了控制器的结构, 提

高了可靠性；软件设计方面采用模块化编程方法，便于修改维护。实验结果表明稳定，可靠，已具有商业生产价值和广阔的应用前景。

二、永磁同步电动机的控制特性

永磁同步电机主要是在转子的磁极上安装永磁体，定子槽中缠绕电枢导线。为保证电枢电流产生正确的电磁转矩，通过开关元件控制定子电枢电流的导通顺序和导通时间，前提条件是保证转子磁极在任何时刻都使其电枢导体产生正确的电磁转矩。因此稀土永磁电动机必须正确检测转子磁极的位置，以转子磁极位置信号作为控制电枢绕组通电的依据。

为获得高性能的正弦波永磁同步电机驱动控制，通常需要转子位置传感器。传感器提供转子的确切位置，通过定子电流幅值和空间矢量控制，可以很好的控制转矩，从而完成高性能的矢量控制。但是在家用空调器中，永磁电动机处于密封的压缩机中，压缩机内温度超过120℃，且充满强腐蚀性的高压制冷剂，无法安装位置传感器，因此必须采用无位置传感器控制方法。

三、系统基本控制策略

永磁同步电机本身具有非线性和强耦合性，常规控制很难满足高性能控制系统的要求。为了能够使三相电流实现完全解耦，系统采用矢量控制，即磁场定向控制(FOC)：把磁场矢量的方向作为坐标轴的基准方向，电动机电流矢量的大小、方向均用瞬时值来表示，经过坐标变换之后，可以对定子电流的两个分量(励磁分量和转矩分量)分别控制，这样同步电动机就可以等效为直流电机。该控制算法可以适时的控制电机的转矩、速度和位置状态。这种控制算法在各种工作状态下都有良好的控制功能，并且不需要过大体积的能量变换装置即可随意控制瞬态电流的幅值。另外，用滑模观测器取代位置传感器，对转子的位置进行估算，实现了无传感器矢量控制。

系统的控制原理(如图1)是一个电流内环、转速外环的双闭环控制系统。其控制原理为：首先测量定子相电流和直流母线电压，然后对电流进行Clarke变换，对直流母线电压进行相电压重构，作为滑模观测器的

输入量，估算转子的角位移；基于估算的转子位置，估算转子的实际转速，根据估算的转速与参考速度的偏移量，利用PI控制算法，得到定子电流的参考输入；调用Clarke变换把定子相电流矢量从三相定子A-B-C坐标系变换到两相静止 α - β 坐标系中；计算 $\sin\theta$ 和 $\cos\theta$ ，进行Park变换，然后分别根据q坐标轴和d坐标轴上的相电流分量与参考电流的偏差，进行电流环PI控制，把得到的新电流通过Park逆变换；再调用空间矢量PWM产生模块，计算得到PWM信号的占空比，送到DSP的6路PWM控制寄存器中；最后将产生的PWM信号送入逆变桥，驱动永磁同步电动机，实现完整的速度FOC控制。

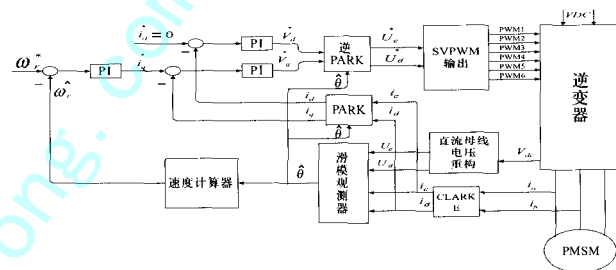


图1 永磁同步无传感器FOC控制结构图

四、全数字控制永磁同步电机系统设计

本文提出的永磁同步电动机驱动器实现了全数字化设计。控制芯片采用TI公司的电机专用DSP芯片TMS320f2801，主回路采用飞兆公司的智能功率模块(IPM)。模块驱动电路采用隔离方式。系统整体结构(如图2)由主电路，驱动电路，检测电路，保护电路组成。

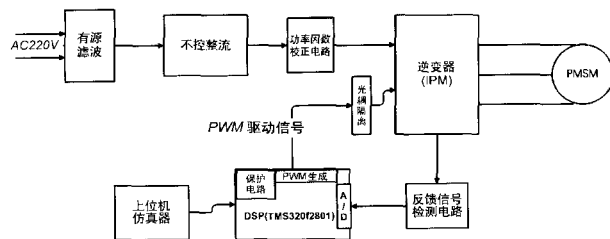


图2 永磁同步电机控制系统总体结构

1. 系统主电路设计

系统主电路采用电压型逆变器结构，以飞兆公司的智能化功率模块(IPM)及其驱动电路为核心，交流电压经过不控整流电路、有源滤波电路和功率因数校正

电路为逆变器提供稳定的直流电压源。逆变器的核心采用飞兆半导体公司推出的新一代智能功率模块 FSBB30CH60，它除了具有上述一般智能功率模块的优点外，还具有下列特点：

- 上桥臂驱动器电源使用自举(Bootstrap)电源技术，全部驱动共用一个电源；
- 内含隔离高压的快速电平移位电路(level shifter)；
- 由于采用了 DBC 技术，因而热阻极小；
- 3个独立N极接线端子结构，有助用户方便、高效地检测各相的负载电流，从而实现高效率、低成本电机驱动算法与检测；
- 输入端信号高电平有效，更有利于与 CPU 的控制连接；
- 控制信号不需要光耦隔离；
- 高压侧外接栅极电阻能让设计人员调节 SPM 的开关速度，有助于优化开关损耗和开关噪声，并且降低电压应力(可能在极端条件下引起 HVIC 闭锁)。

2. 数字控制系统硬件体系设计

系统的驱动控制电路是以 TI C2000 系列 DSP 为核心，采用了 FOC 控制，这是整个系统的控制中枢。由于采用了面向电机控制的高速数字信号处理器，无论是速度控制器的设计，还是电流控制器的实现，以及各种反馈信号的处理，PARK 变换及其逆变换、CLARK 变换、SVPWM 调制输出和 D/A 的输出均采用了数字信号处理技术，用软件实现硬件电路的功能，实现永磁同步电动机的实时控制。与传统的控制方式相比，数字控制系统不仅大大降低硬件电路的复杂程度，而且获得了更高的性价比。

电机控制专用 DSP 芯片 TMS320f2801 是 TI 公司最新推出的电机控制高端产品，整合了 DSP 和 MCU 双重功能并进行了优化，最高运算速度可达 100MIPS，有一个 32 位中央处理器，具有 16~64k 闪存和 10k RAM，ROM 具有基本中断服务例程。F2801 的内核还集成了许多外设选件，例如，增强型事件管理器中增加了计时器的数量和灵活的 PWM 通道。ADC 具有高速吞吐能力，可实现同时采样或次序采样的模式有 16 通道和多路复用输入。在 I/O 能力上，共有 4 通道 SPI 和 2 个 SCI，以及 I2C 接口和 2 个 CAN 端口。

这一高度集成的器件代表了传统微处理器及通用 DSP 处理器方案的重大突破，使电机驱动及调速控制器开发更为简单易行。

3. 检测电路设计

在无位置传感器的情况下，可以从系统得到的状态信息只要是电流，电压信号。因为转子的位置信息包含在这些模拟信号中，所以电流和电压的检测对电机的驱动非常重要。电路设计要求热稳定性好，信号复原度高。检测电路包括电流的检测和直流母线电压的检测。为了确保系统强弱电完全隔离，交流进线电流检测通过电流传感器加全桥整流滤波、电阻分压实现输出电平匹配。信号输出主要用于过流保护，使用前需要与软件进行配合标定。电流信号通过两个 HALL 电流传感器检测电流信号，并经过运算调理电路进行幅值标定，输出信号送入 DSP 的 A/D 端口。其检测电路如图 3。

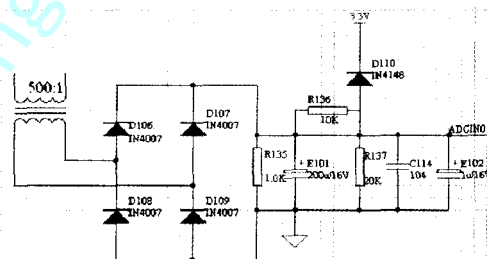


图3 相电流检测电路

直流电压隔离采集模式，DC_BUS 经电阻分压，由线性光耦隔离输出后进 DSP 的 A/D 口，然后利用软件实现相电压重构，并与设定阈值电平比较，实现过压欠压报警判别。其电压检测电路如图 4。

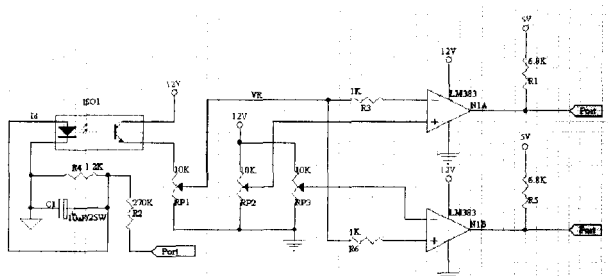


图4 直流母线电压检测电路

五、系统软件设计

利用TI公司的DSP系统集成开发环境CCS3.1，进行了系统的软件设计。本文研究的软件算法中采用了

磁场定向控制算法,并且利用滑模观测器来估算转子位置。算法中主要包括 Clarke, Park 及其逆变换以及速度、电流PID控制器和空间矢量调制(SVPWM)产生部分。对于 TMS320F2801 芯片,采用 C 语言来实现,对程序的运行时间和寄存器的使用进行控制。

永磁同步电机 FOC 无位置传感器控制系统的软件包括三部分: 1、系统初始化程序; 2、主循环等待; 3、中断服务子程序。FOC 控制软件模块时序如图 5, 系统在每次软件复位后, 首先执行初始化程序, 主要完成 DSP 内部各功能模块工作模式的设定、软/硬件初始化; 完成上述工作后, 开总中断, DSP 系统循环执行后台程序(见等待部分); 当中断软件满足时, 系统响应中断, 并执行中断子程序。

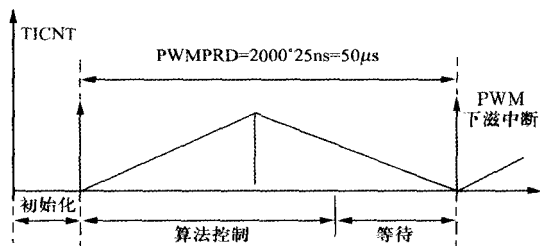


图 5 FOC 控制软件模块时序图

系统的主程序主要是完成硬件初始化和软件初始化的工作。系统初始化以后, 软件进入等待循环。当中断发生时, 控制模块就被激活, 完成一个周期的 PWM 设置。整个控制算法是在 PWM 中断服务程序中完成, 在一个 PWM 中断周期内, 通过对相电流的检测, 对直流母线电压的采样, 采用滑模观测器方法, 计算出转子转角和转速, 然后对电流采样值经过 CLARKE 和 PARK 变换得到电流的反馈值; 再调用正向通道的速度 PI 调节和电流 PI 调节模块, 调节出转子坐标系下的两相正交电压, 通过 PARK 逆变换模块, 转换为定子坐标下的两相正交电压, 再经过 SVPWM 调制, 最后得到驱动 IPM 的 PWM 控制信号。系统的主程序和中断服务的子程序的控制结构如图 6。

六、实验结果

通过硬件软件设计, 所研制的驱动控制系统进行了变频压缩机机器的实验研究。结果表明, 控制系统实时性好, 具有较好的控制效果, 获得较高的运行性

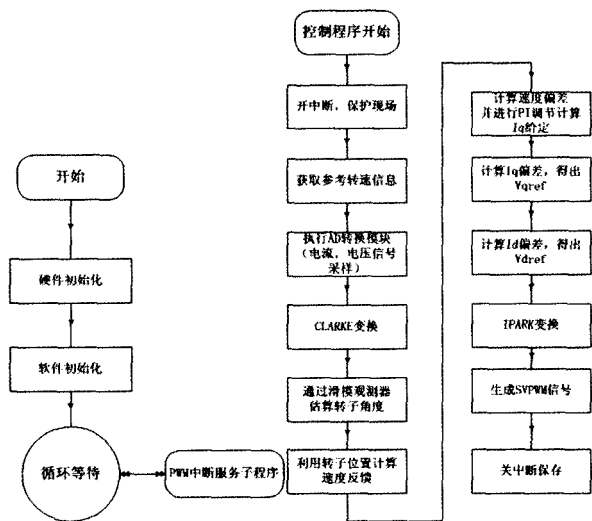


图 6 软件流程图

能。图7为定子电流的波形和直流母线电压的波形, 从整体实验结果可以看出电机运行平稳, 动静态特性良好, 且相电流保持较高的正弦度, 且电流与电压成正比, 实现了无位置传感器矢量控制。

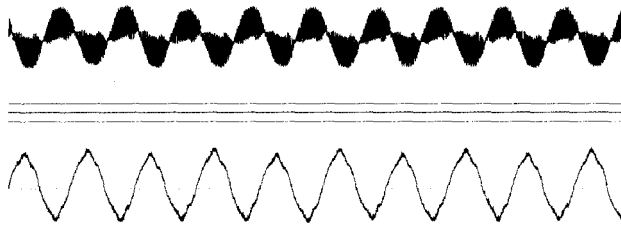


图 7 高速时相电流(上), 反电动势(下)波形

七、结论

本文介绍了变频压缩机永磁同步电机的控制特性。根据其特性, 将无传感器矢量控制引入到永磁同步电机的全数字控制系统中, 分析设计了硬件结构和软件组成, 基于高性能的 DSP 芯片, 研制出一种新型的变频压缩机驱动控制器。实验结果表明, 基于 DSP 的永磁同步电动机数字控制系统具有良好的控制性能和调速性能, 获得了较好的动态性能和较高的稳态精度, 运行效率高, 抗干扰能力强。因此, 该系统具有较高的应用价值。