

文章编号: 0253-9993(2007)09-01002-04

# 用 DSP 实现异步电动机直接转矩控制系统

崔江霞, 蔡文皓

(西安科技大学 电控学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 以数字信号处理器 (DSP) TMS320F2407 为实验平台完成直接转矩控制. 通过对一台 2.2 kW 异步电机的实验结果表明: 该控制技术具有优异的静、动态性能.

**关键词:** 异步电机; 直接转矩控制 (DTC); 数字信号处理器; 磁链观测器

**中图分类号:** TM346.2 **文献标识码:** A

## Direct torque control of asynchronous machine and its application using DSP

CUI Jiang-xia, CAI Wen-hao

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Presented an implementation of digital asynchronous machine control system with a DTC (direct torque control) using TMS320F2407. The experiment results are shown at low-speed range using 2.2 kW general purposed asynchronous machine. The control has a better state and dynamic performance.

**Key words:** asynchronous machine; direct torque control; digital signal processor; flux linkage observatory

直接转矩控制是继矢量控制之后的一种新方法<sup>[1]</sup>. 它以控制方案简单和性能好等特点被誉为最有前途的异步电动机控制方法<sup>[2]</sup>. 它主要有以下特点: ① 响应速度快. 电机电磁转矩可在 1~2 ms 之内从零上升到额定值, 且无超调. ② 直接转矩控制磁场定向所用的是定子磁链. ③ 计算简单. 它可直接在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型, 控制电动机的磁链和转矩. 直接转矩控制其核心为磁链和转矩的“直接自控制”, 用空间矢量理论计算电机的定子磁链和电磁转矩, 由磁链和转矩的 Band-Band 控制产生 PWM 信号, 对逆变器的开关状态进行控制, 控制思路新颖, 系统结构简捷.

数字信号处理器 (DSP) 是一种具有特殊结构的微处理器. 它的内部采用程序和数据分开的哈佛总线结构, 具有专门的硬件乘法器, 辅助算术逻辑单元以及广泛采用流水线操作, 提供特殊的 DSP 指令, 这些特性都大大加快了 DSP 芯片的运行速度, 成为实现各种复杂算法首选的微处理器. 鉴于直接转矩和 DSP 的优点, 本文以数字信号处理器 (DSP) TMS320F2407 实验平台完成直接转矩控制, 证明了利用现有的平台, 对整个 DSP 进行了工程化的设计, 通过试验和现场运行, 验证了本文提出的设计方法的正确性和可靠性.

### 1 直接转矩的基本原理

直接转矩控制系统的结构以及各个控制单元间的关系如图 1 所示. 首先电流采样信号  $i_a, i_b$  经过  $(a, b, c) \rightarrow (\alpha, \beta)$  的坐标转换得到  $i_\alpha, i_\beta$ , 然后和速度反馈信号  $n$  一起进入磁链观测器和转矩观测器分别得到磁链和转矩的估计值  $\psi_s, T_l$  在转矩滞环比较器和磁链滞环比较器中分别与转矩和磁链给定值  $\psi_s^*, T_g^*$

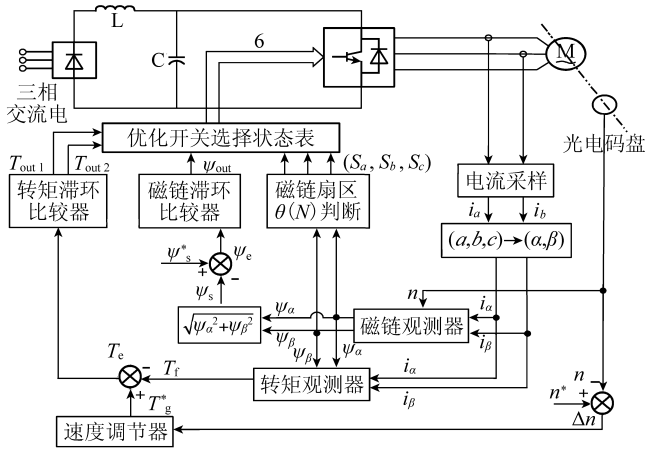


图1 直接转矩控制系统原理  
Fig. 1 DTC system principle

进行比较，获得系统的状态信息，然后根据磁链区间判断模块的输出信号，从优化开关表中选出适合的电压开关状态去驱动逆变器，给电机提供合适的电压空间矢量来满足电机动态特性变化的需要，实现高性能的直接转矩控制。给定速度  $n^*$  和光电码盘反馈速度  $n$  的差值作为输入信号进入速度调节器，由速度调节器根据速度的变化产生转矩给定  $T_g^*$  信号，以增强控制系统对外界扰动的抗干扰能力，以及具有适应负载变化的能力。

直接转矩控制就是根据磁链幅值  $\psi_s$ 、转矩  $T_e$  的瞬时值进行控制。这些瞬时值都是由电机定子参数计算得到，并且通过控制逆变器开关模式分别控制磁通和转矩在一定的误差范围内。在这种控制方法中，为了获得高品质的动态特性，必须快速跟随圆形磁链轨迹。因此选择一最佳控制矢量，使电机运行在特定的状态。

## 2 直接转矩控制在 DSP 平台上的应用

全数字化异步电机直接转矩控制系统以前面介绍的直接转矩控制系统原理为理论基础，只是采用数字化方式实现各控制部分功能，整个系统分硬件和软件系统两部分。该控制系统采用高性能微处理器，并配以相应的外设电路来完成各种数据采集，显示和完成复杂的运算。用高性能微处理器控制交流调速系统可以简化系统结构，提供完善的系统功能，实施复杂的控制策略，保证系统具有高可靠性。在这套 DSP 开发兼实验系统的平台上，采用了 TI 公司的 TMS320F2407 芯片，用它作为核心器件来构成整个控制回路。

### 2.1 硬件系统

采用 TMS320F2407 作为主控 CPU 的模块化设计方法系统硬件框图如图 2 所示，该硬件系统主要由两大部分组成：控制部分和主回路部分。

主回路硬件部分结构和一般电压型逆变器的结构完全相同。只是这里的功率开关管采用了日本三菱公司的新技术产品——智能型功率模块 IPM (Intelligent Power Model)，该模块将功率管 IGBT 及其驱动、保护等电路都集成在一起，从而使主回路设计简单，结构紧凑，工作更加可靠。该模块具体驱动功能：过流保护、短路保护、过热保护、欠压保护、控制关断功能。

由于 IPM 内部本身没有故障记忆单元，因此外部控制系统对其故障信号作出处理，并采取相应措施，彻底封锁 IPM 的驱动信号，以保证 IPM 的安全。图中故障检测模块即完成主回路故障信号采集，并反馈给控制系统，由控制系统根据故障状态作出判断，并给出相应的处理方案。

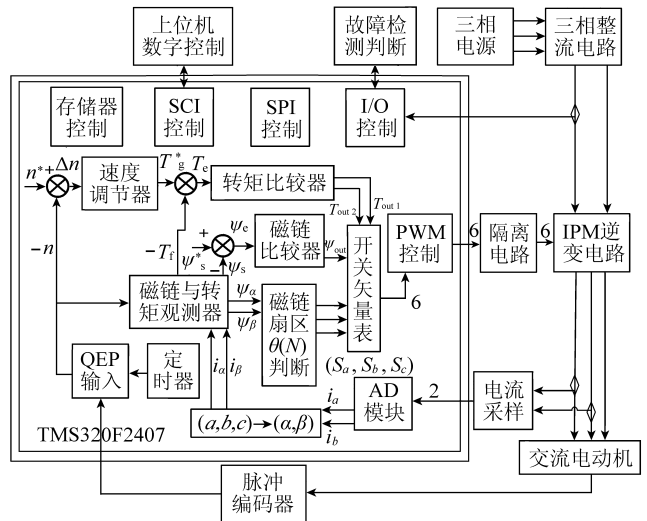


图2 DSP 实验开发装置硬件系统结构

Fig. 2 The hardware system construction of experiment & development equipment based on DSP

控制回路主要模块功能有电流采样, 模数 (A/D)、数模 (D/A) 转换电路, 速度检测和控制电路, PWM 信号发生电路.

## 2.2 直接转矩控制系统软件的实现

软件是控制系统的核心, 本系统中的所有运算都是用软件实现的. TMS320F2407 的高速数据处理能力是实现直接转矩控制的硬件基础, 设计软件时充分考虑了它的特点, 能够保证软件的实时性和计算精度.

在 TMS320F2407 的 DTC 系统中, 由于 TMS320F2407 有限的中断资源及其保护措施, DTC 的全部控制过程将在定时器中断服务程序中完成. 主程序及定时中断服务程序的程序流程如图 3 所示.

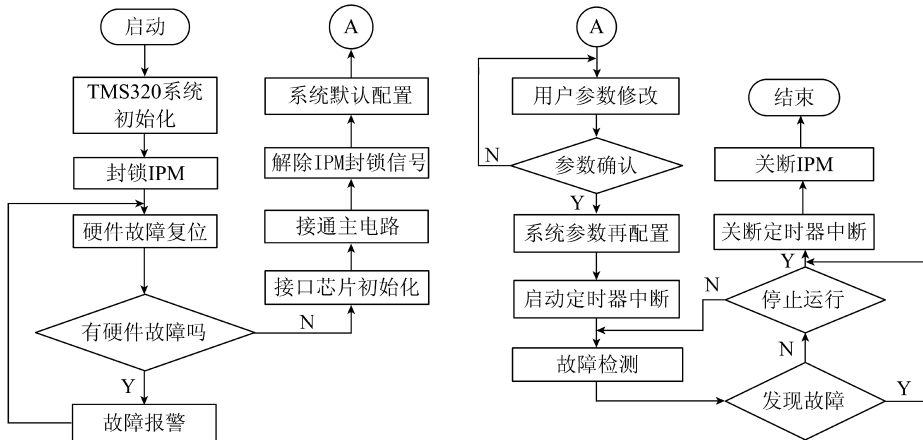


图 3 主程序流程

Fig. 3 Main program flow chart

主程序一开始完成 TMS320F2407 的内部初始化, 紧接着对外部硬件故障进行检查, 当发现有未排除的硬件故障时发出警报. 而一旦该硬件故障排除后, 即取消警报, 程序继续运行. 可见程序设计具有自恢复能力. 在系统的默认配置中, 依据用户的意图, 对需要修改的参数 (如调节器参数、速度给定、采样周期等) 以及与之相关的部分进行重新配置. 用户一旦确认了这些参数, 程序即进入实际的控制部分, 启动系统运行, 完成 DTC 的全部控制.

在用户发出停车指令后, 程序自动关闭逆变器中的智能功率模块 IPM, 以避免直通现象发生.

## 3 试验结果

本文主要针对直接转矩控制系统低速运行时的动态性能进行实验. 系统实验在所介绍的 DSP 实验及开发平台上进行, 被试电机参数:  $\Delta$  联接, 额定功率  $P_N = 2.2 \text{ kW}$ , 额定电压  $U_N = 380 \text{ V}$ , 额定电流  $I_N = 5 \text{ A}$ , 额定频率  $f_N = 50 \text{ Hz}$ . 额定转矩  $T_N = 14.48 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

实验结果图形由 DSP 实验及开发平台面板上信号输出端口输出, 并由 Tektronix TDS3014 数字示波器实时采样得到.

### 3.1 负载突变实验

图 4 为 20, 100 r/min, 电机在空载运行状态下突加额定负载时的实验结果, 图中给出了转矩给定  $T_g^*$ 、转矩反馈  $T_f$  以及线电流  $i$  的动态波

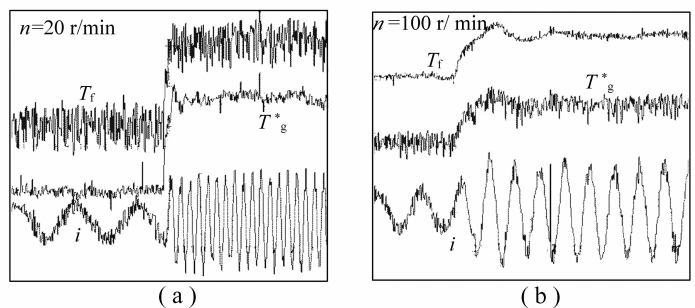


图 4 突加负载转矩及相电流波形

Fig. 4 Torque and phase current waves when load suddenly loading

形.从图中可以看出,转矩给定  $T_g^*$  具有较强的跟随能力,负载突变时,给定转矩响应快,过渡过程短,系统在约 150 ms 时便进入稳定运行状态,从而证明该调节器在低速时具有较高的动态调节性能.

图5为速度给定 20, 100 r/min, 负载突变时速度变化波形.从图中可以看到负载突变时,速度相应出现突然增大或减小的趋势,如图中 A, B 两点位置,负载突然增加时, A 点速度出现急速下降,负载突然减小时, B 点速度产生急速上升,但在 150 ms 内速度都恢复到给定速度附近.

可见,速度调节器和转矩调节器具有很好的协调能力,能及时跟随系统的动态变化,提高了系统的抗干扰能力和带负载能力.

### 3.2 定子磁链轨迹

直接转矩控制的基本思想是空间磁场定向理论,目标是实现电机磁场近似圆形旋转,幅值在基频以下范围内保持不变.图6为实验过程中采样得到的定子磁链轨迹,该轨迹近似圆形运行.由此得出结论:通过改进的磁链观测器实现了磁链圆形运行,较好地符合了空间磁场定向理论的思想,实现了电机在低速时仍有较高的动态特性,解决了低速磁场产生畸变所带来的转速脉动和电流谐波含量较高的问题,验证了该观测器的可行性和有效性.

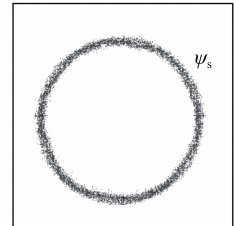


图6 定子磁链轨迹  
Fig. 6 Stator flux linkage trajectory

## 4 结 语

对全数字化的直接转矩控制系统进行了深入研究,通过在一台 DSP 开发平台上实现直接转矩控制系统,验证了改进型转矩和磁链调节器的在工程实现中具有一定的实用价值.实验结果表明,直接转矩控制具有良好的静、动态性能.

### 参考文献:

- [1] 薛峰. 直接转矩控制系统的转速估计模型及参数补偿方法 [J]. 电工技术学报, 1998 (10): 26~30.
- [2] 孙宗海. 一种新型无速度传感器的直接转矩控制方案 [J]. 武汉汽车工业大学学报, 1999 (10): 41~45.
- [3] 李永东. 交流电机数字控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] James N Nash. Direct torque control: Induction motor vector control without an encoder [J]. IEEE Trans. on Ind. Appl., 1997, 33 (2): 333~341.
- [5] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001. 250~251.
- [6] 高景德. 交流电机及其系统的分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993. 451~452.
- [7] Peter Vas. Sensorless vector and direct torque control [M]. England: Oxford Science Publications, 1998.
- [8] 李夙. 异步电动机直接转矩控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 41~43.

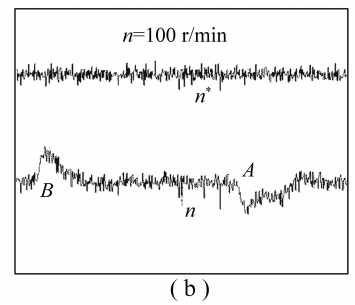
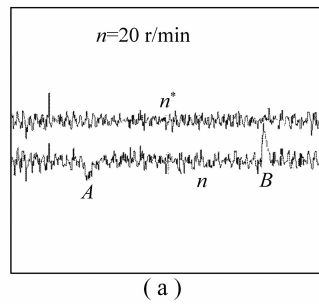


图5 负载突变时的转速波形  
Fig. 5 Speed waves when load suddenly changed