

# 双 PWM 变换器的异步电机矢量控制系统设计

刘晓明, 冯恩信, 何修富

(西安交通大学 城市学院, 西安 710018)

**摘要:** 针对传统的双 PWM 变换器的异步电机矢量控制误差率很高这一问题, 设计了一种新的异步电机矢量控制系统, 分别对系统硬件和软件进行设计, 硬件架构图中重点对硬件电机结构、DSP 芯片和编程器进行设计; 根据设计的系统硬件建立软件工作流程, 软件共分为系统初始化、中断控制、PWM 信号封锁、报警保护和数据通信共 5 步, 对每一个工作步骤做了详细的阐述; 通过仿真实验验证了该矢量控制系统的实际工作效果, 实验结果表明, 所设计的系统具有很强的鲁棒性, 控制性能远远好于传统系统, 市场发展潜能大, 对于异步电机发展有一定的指导意义。

**关键词:** 双 PWM 变换器; 异步电机; 控制系统; 变换器设计; 矢量优化控制

## Design of Asynchronous Motor Vector Control System Based on dual PWM Converter

Liu Xiaoming, Feng Enxin, He Xiufu

(City College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710018, China)

**Abstract:** In view of the high error rate of vector control of asynchronous motor in traditional dual PWM converter, a new vector control system for asynchronous motor is designed. The hardware and software of the system are designed respectively. The hardware architecture, the DSP chip and the programmer are emphatically designed in the hardware architecture diagram. The software workflow is set up according to the designed system hardware. The software is divided into five steps: system initialization, interruption control, PWM signal blockade, alarm protection and data communication, and each work step is elaborated. The experimental results show that the designed system has strong robustness, the control performance is far better than the traditional system, the potential of the market development is great, and it has certain guiding significance for the development of asynchronous motor.

**Keywords:** dual PWM converter; asynchronous motor; control system; converter design; vector optimization control

### 0 引言

电机驱动和运动控制在工业制造中有很广泛的应用, 任何电能的生产都离不开电机的运行, 采用智能化设备对电机的运行过程进行控制, 不仅能够满足节能环保的要求, 同时还能够为企业带来很大的经济收益。由于直流电机和交流电机的内部构造不同, 所以控制方式也有很大的不同。直流电机的电枢回路和励磁回路都是解耦回路, 若想对其进行控制, 必须要调节电枢电流和励磁电流, 这种控制方法虽然操作起来简单, 但是很容易增加故障, 使维护工作变得更多。限制电机容量和最高速度、交流电机向定子输送三相正弦交流电流, 在高速旋转下产生感应电动势, 从而形成转子电流。在感生磁场力作用下, 定子不断旋转。交流电动机无论是在结构还是制造成本上都好于直流电动机, 而且电压很高, 容量很大, 因此具有广阔的市场发展

潜能。然而, 交流电动机的系统具有高阶性、非线性和强耦合性, 所以通常的电压调速方式很难达到与直流电机相同的控制效果。矢量控制法的出现有效改善了这一问题, 而双 PWM 变换器的出现能够有效提高交流调速系统的性能<sup>[1]</sup>。

近年来, 交流电机调速与拖动应用十分广泛, 如何控制电机系统性能已经成为热门研究的问题, 人们要求控制系统拥有高性能、强鲁棒性、高效性和低能耗性。为了满足上述要求, 相关领域学者一直致力于研究各类控制技术, 其中矢量控制以电流脉动小、启动性能好、控制范围宽等优点在众多控制技术中脱颖而出, 并在各个领域中得到广阔应用。为了快速控制转速, 信息系统将得到的转速信号引入闭环中进行控制, 但是传统的控制方法使用的是传感器检测转速, 这种方法虽然工作过程简单, 但是成本很高, 尤其在一些地方安装速度传感器难以检测到转速。无速度传感器的出现有效解决了这一问题, 不仅能够检测到已有的电压电流信息, 同时能够估算出电机转速, 对于较宽范围转速和较窄范围转速而言, 这种方式都可以使用<sup>[2]</sup>。通用变频器网侧电流谐波产生的分量, 能量难以回馈, 因此必须要改进变频器的拓扑结构。

本文采用双 PWM 变换器代替了传统的二极管, 带动电机电能从双向流动, 使电机能够在四象限中运行。在双

收稿日期: 2018-08-02; 修回日期: 2018-08-27。

**作者简介:** 刘晓明(1981-), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事信号与信息处理方向的研究。

冯恩信(1955-), 男, 陕西蓝田人, 硕士研究生, 教授, 主要从事电磁理论与数值计算, 微波和光纤通信方向的研究。

何修富(1961-), 男, 四川南江人, 博士研究生, 教授, 主要从事无线移动通信, 时频编码方向的研究。

PWM 变换器的操纵下,发电机的电能可以直接在电网中回馈。本文设计了一种新的异步电机矢量控制系统,对系统的主要硬件模块和软件算法进行介绍,并通过实验验证了双 PWM 变换器控制系统的工作效率,实验结果表明,所设计的系统性能十分优越,理论分析的结果与电脑仿真的结果相同,该系统具有很高的实用价值,值得大力推广使用。

### 1 双 PWM 变换器的异步电机矢量控制系统硬件设计

在交流调速系统中,变频器是主要的核心部件,设计其异步电机矢量控制系统对于提高调速效率、优化生产过程、提升电机质量、推动技术发展有重要意义。本章主要对电机矢量控制系统的硬件进行设计<sup>[3]</sup>。双 PWM 变换器的异步电机矢量控制系统硬件总体架构如图 1 所示。

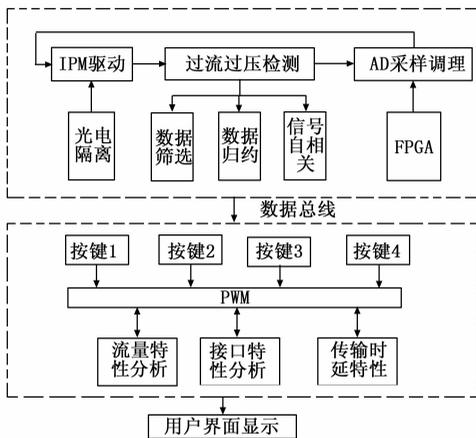


图 1 双 PWM 变换器的异步电机矢量控制系统硬件

#### 1.1 电机结构创新设计

传统的变频器电机结构为电压型拓扑结构,电流流动方式为交流—直流—交流,整流采用的是不可控二极管整流。电机工作原理为:将电网中的交流电整流,取出中间级的电压,分析其是否处于恒压恒频状态,通过逆变器改变直流电幅值频率,将直流电转变成交流电,帮助电机提供电能,这种方式不适用于回馈制动状态和发电运行状态,其电机具体参数设计如表 1 所示。

表 1 电机性能参数设计表

| 定子铁芯      |           |           | 气隙/<br>mm | 线圈<br>匝数 | 容量/<br>kW | 额定<br>功率/<br>kW | 额定<br>电流/<br>A | 转速/<br>$r \cdot \text{min}^{-1}$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------------|----------------|----------------------------------|
| 外径/<br>mm | 内径/<br>mm | 长度/<br>mm |           |          |           |                 |                |                                  |
| 155       | 98        | 105       | 0.30      | 40       | 2.5       | 0.75            | 2              | 1400                             |

当电机处于非正常运行状态时,电能不能直接回馈到电网中,只能在变频器周围存储能量,存储的电能和电压热量不断升高,致使电容器和功率器件被破坏<sup>[4]</sup>。传统方法是在电机各个节点上安装制动电阻,以此来回馈电机电能,这种方式虽然能在一定程度上缓解变频器器件损坏,但是也会造成电能浪费,使设备的额外热量增加,对环境造成不良影响。使用二极管设计的电机结构,整流电路功

率因数很低,致使电网出现谐波污染,波形也产生了严重的畸变<sup>[5]</sup>。传统电机结构如图 2 所示。

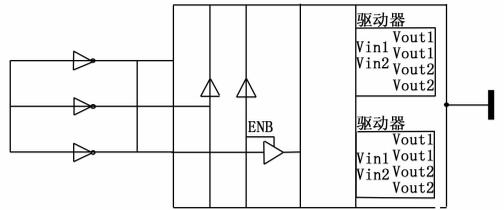


图 2 传统变频器电机结构

传统变频器的电机结构有很大的缺陷,难以得到高性能的控制变频器,为了提高矢量控制系统的工作效率,必须对系统结构进行改善。传统结构在整流侧上采用的是不可控二极管,本文选用 PWM 整流器代替不可控二极管,结构对称方式为整流侧和逆变侧,电网电流具备双向流动特点,当电机处于回馈制动状态时,电能可以直接反馈到电网中,从而起到节能的作用。新的双 PWM 变换器,电机结构如图 3 所示。

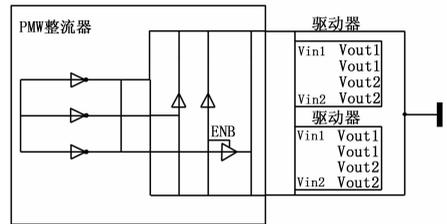


图 3 双 PWM 变换器电机结构

观察图 3,双 PWM 变换器的整流侧和逆变侧通过直流电连接,确保大电容顺利通过,直流母线两端的电压值固定,利用解耦原理控制两侧电压和电流。在电机矢量控制系统中,关键的一步是控制转环的转速,调节转环的性能。如果传感器安装位置不妥当,则很有可能影响测量精度,图 3 的电机结构选用无速度传感器调节变频速度,检测电流量值和电压值,这种方式不仅能够有效降低系统成本,同时能够提高系统可靠性<sup>[6]</sup>。

#### 1.2 DSP 芯片设计

选取的 DSP 产品是 TI 公司生产的,共有三个系列,分别为:TW4356 系列、TW4357 系列和 TW4358 系列。三个系列产品负责不同项目的工作,其中,TW4356 系列的 DSP 产品拥有丰富的 I/O 端口、通讯接口、A/D 接口和输出接口,利用数字控制技术和运动控制技术来控制电机和数字电源;TW4357 系列的 DSP 产品负责控制设备能耗,确保设备能够使用低能耗的手持设备,在无线终端(PDA、GPS)领域得以应用;TW4358 系列的 DSP 产品负责处理复杂的图片。

DSP 芯片具有极高的数字信号处理能力和强大的控制性能,在工业控制领域拥有很广的应用。同时本文在 DSP 平台上加入了新的内核,应用 32 位定点结构确定芯片 CPU 各个节点所在位置,同时包含 32 个单精度浮点单元。此款

芯片不仅能够计算复杂的浮点, 同时具备精度高、成本低的优点。运算能力满足 32 位运算能力, 处理能力高达 64 位, 内存访问为 8 级保护流水线式访问, 确保执行速度。

DSP 的最高运行频率为 150 MHz, 同时拥有 852K 的 Flash, 既能支持内部电压, 同时也能确保外部参考电压, 使电机拥有丰富的控制外环, 输出电路为 18 路 EPWM 输出, 输入电路为 6 路 ECAP 输入。设备配有 SPI 通讯接口、SCI 通讯接口和 I2C 通讯接口, 外部中断高达 8 个, 系统的主控芯片为 DSP 芯片<sup>[7]</sup>。

### 1.3 编程控制器设计

本文设定的可编程控制器利用用户代码设定, 并且能够反复书写, 有效降低了开发需要花费的成本, 缩短工作时间, 确保工作在保密的条件下运行。设计的编程控制器各项参数如表 2 所示。

表 2 编程控制器各项参数

| 控制器名称  | CPLD          |
|--------|---------------|
| 内部结构   | 查找表结构与乘积项结构并列 |
| 程序存储   | 片内存储、片外存储     |
| 集成度    | 触发器集成         |
| 使用场合   | 完全逻辑控制场合      |
| 速度     | 较快            |
| 主要资源类型 | 组合电路资源        |
| 其它资源类型 | 触发器资源         |

CPLD 具有很高的功能扩展能力, 针对一些复杂算法而言, CPLD 也能够准确快速地计算出来。CPLD 在开发测试阶段就可以保护信号, 并对逻辑做出判断, 利用按键和 LED 灯控制系统运行<sup>[8]</sup>。CPLD 与 DSP 存在互相关联的关系, 同时加置 ALTERA 公司生产的 FEEW 处理器做辅助。

系统的配置功能为 SRAM 功能, 编程方式为重复编程。为了防止系统与电源失去连接时, SRAM 数据丢失, 在 FPGA 上安装 EPROM 芯片, 并在里面写上备用配置数据, 系统在接入电源之后, 数据就会自动引入 SRAM 中。串行配置芯片为 16 Mbit, 系统出现掉电后就可以再次加载。

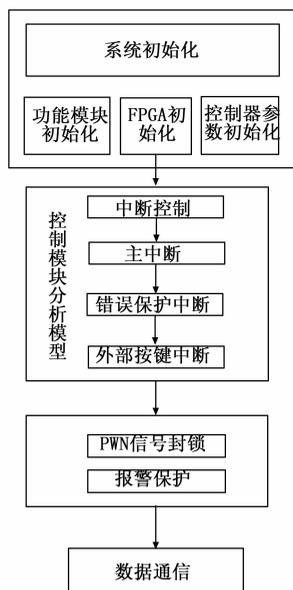
## 2 双 PWM 变换器的异步电机矢量控制系统软件设计

根据设计的系统硬件框架和整体电路, 设计矢量控制系统软件部分。软件是系统的核心环节, 能够帮助系统起到很好的控制效果。系统软件主要从 PWM 整流器侧和 PWM 逆变器侧两端设计, 设计程序的开发环境为 CCS4 集成环境, 不同类型的 DSP 负责不同信号的工作, 采样和信号处理方式为 AD 处理, 通过 CPLD 对主要的信号和逻辑做出计算。

双 PWM 变换器的异步电机矢量控制系统软件主程序如图 4 所示。

观察图 4, 双 PWM 变换器矢量控制系统软件利用子系统完成软件工作, 工作过程共分为如下几步:

第一步: 系统初始化。系统初始化主要包括功能模块初



WM 变换器的异步电机矢量控制系统软件

始化、FPGA 初始化、控制器参数初始化、AD 采样初始化以及 PWM 模块初始化等。在结束初始化工作以后, 系统开始进入等待模式, 各个向量不断中断, 响应服务器程序。

第二步: 中断控制。中断系统包括主中断 (ePWM 中断)、错误保护中断 (TZ 中断) 以及外部按键中断。主中断是中断系统的主要部分, 负责计算核心模块, 实现主要的控制功能。使用 Park 和 Clarke 对各个坐标点进行控制, 调节电流内环与外环的 PI 值, 重构定向电压, 估测双 PWM 变化器的转速<sup>[9]</sup>。

TZ 错误保护中断是系统的警报器。系统在运行时, 电流和电压可能会出现故障, 电压值和电流值可能直接超过母线, 造成数值偏大或者偏小, 这样 IPM 报警器就会发出警报声, 警报信号进入 FPGA 后, 中心系统做出封锁处理, 防止错误 PWM 信号输出。在处理后, 系统的信号生成统一信号传入 DSP 的 TZ 引脚中, 从而下发中断指令, 切断 PWM 信号后, 故障类型存入上位机, 在 LED 等中显示故障所属类型、

外部按键中断处理负责系统的变频处理、外环切入、编码器测速以及转速估算, 设计的按键共有 4 个, 颜色分为红黄蓝绿, 负责不同的功能, 以颜色判断各个按键负责哪项功能。利用 DSP 连接将地址总线 AB 与数据总线 DB 判断哪一个键被按下, 使对应的功能能够得到执行。

第三步: PWM 信号封锁。信号在输出和缓冲时, IGBT 的驱动信号和 PWM 信号可以通过逆变桥检测出来, 在一个桥臂上会出现不同的 PWM 信号, 同时还能封锁 FPGA 信号, 使输出的组态为高阻态, 线路呈现关闭状态。上述情况如果未发生, 则证明 FPGA 接收的是 DSP 传过来的 PWM 信号, 可以直接传送给 IGBT 中, 做驱动信号。

第四步: 报警保护。针对系统过压和过流问题处理, 如果信号流过的持续时间大于 5  $\mu$ s, 则证明该信号为干扰

信号。一旦确定系统被干扰信号入侵,系统就要向上位机传输情况,读取按键信息,根据按键信息对各部分做出相应处理<sup>[10]</sup>。

第五步:数据通信。在得到矢量控制结果后,DSP与FPGA以外设形式连接到一起,利用地址线 and 数据线进行通信,控制继电器的工作状态,切换各个数据。DSP在移动终端中读取各个数据,判断报警类型,并按下按键信号,确保在通信的同时可以执行响应的功能任务。

### 3 双 PWM 变换器的异步电机矢量控制系统验证实验

#### 3.1 实验目的

为了检测本文设计的电机控制系统实际效果,与传统系统进行实验对比。

#### 3.2 实验参数设置

设置实验参数如表 3 所示。

表 3 优化控制方法实验参数

| 项目        | 参数数值    |
|-----------|---------|
| 硬件接口      | DSP 接口  |
| 电网电压      | 2000V   |
| 电网电流      | 400A    |
| 相位检测模式    | 过零相位检测  |
| 报警模式      | IPM 报警  |
| 中断响应信号值   | 0.42    |
| IGBT 驱动信号 | EPWM1A  |
| 数据线       | CAN 总线  |
| 输出方式      | DA 输出   |
| 编码器接口     | ADIN 结构 |
| 报警器       | TZI     |

#### 3.3 实验结果与分析

根据上述参数进行实验,选用本文设计的控制系统和传统的控制系统对同一个双 PWM 变换器异步电机矢量进行控制,记录对比实验结果。

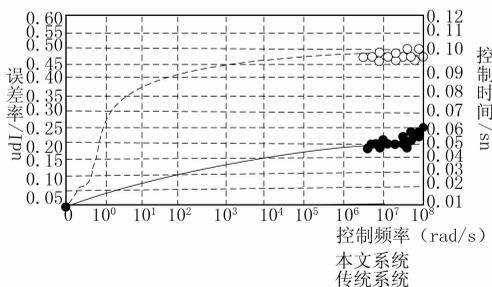


图 5 误差率实验结果

分析图 5,随着控制频率的增加,误差率也在不断加大,传统控制系统的误差率始终在一个较高的水平上。观察上图,当控制频率为 0 rad/s,两种系统都不会产生误差率。当控制频率为  $10^0$  rad/s,传统控制系统的误差率变化极快,高达 0.34 rpm,变化幅度较大,本文设计系统误差率变化幅度很小,只有 0.04 rpm。控制频率在  $10^0 \sim 10^2$

rad/s 时,传统系统误差率上升很快,可以高达 0.42 rpm,本文设计控制系统误差率上升幅度很小,为 0.10 rpm。控制频率在  $10^2 \sim 10^4$  rad/s 时,传统系统误差率上升相对较慢,为 0.47 rpm,本文设计的控制系统误差率上升速度出现轻微加快,为 0.15 rpm。

控制频率在  $10^4 \sim 10^8$  rad/s 时,传统控制系统误差率始终维持在一个较高水平,稳定在 0.47 rpm 之间,控制频率在  $10^4 \sim 10^6$  rad/s,本文设计控制系统误差率处于上升状态,上升过程有轻微的波动,最高误差率为 0.17 rpm。当控制频率为  $10^8$  rad/s 时,本文系统的误差率达到最大值,为 0.25 rpm。虽然本文设计系统的误差率突然增大,但始终低于传统控制系统误差率。

在不同的控制频率下,对应的控制时间也有所不同。当控制频率为  $10^2$  rad/s 时,传统控制系统的控制时间为 0.085  $\mu$ s,本文控制系统的控制时间为 0.020  $\mu$ s;当控制频率为  $10^4$  rad/s 时,传统控制系统和本文控制系统的控制时间都有所增加,分别为 0.092  $\mu$ s 和 0.031  $\mu$ s;当控制频率上升到  $10^6$  rad/s 时,传统控制系统花费的控制时间有小程度的增加,为 0.097  $\mu$ s,本文控制系统的花费时间 0.038  $\mu$ s。

#### 3.4 实验结论

根据上述实验结果与分析,得到如下实验结论:传统的矢量控制系统和本文研究的矢量控制系统都能对双 PWM 变化器的异步电机矢量进行控制,但是取得的控制效果有很大的不同。传统的控制系统在控制过程中很容易受到外界干扰,产生的误差率很大,而且抗干扰能力很弱,一旦干扰程度增强,整个系统都可能进入瘫痪状态。本文设计控制系统具备抗干扰能力,能够有效过滤掉部分干扰信号,减少感染信号对系统的影响,确保工作效果。

传统的控制系统采用的是二极管控制,系统在工作时会产生大量谐波,污染周围环境。本文使用的控制系统采用的是网侧子系统,控制性能极好。在系统出现故障时,本文设计的矢量系统中的多个子系统会联合调试,直接控制电机电能。双 PWM 变换器可以控制异步电机电子信号,确保电网电流正弦化,解决谐波污染问题。同时,在电机运行过程中,所设计的系统内部电能可以直接反馈给 PWM 整流器中,在整流器中传输电能,避免多余的能量损耗,达到节能减排的目的。传统的系统只适用于安装传感器的电机,而本文研究的系统可以利用磁链观测法计算出矢量值,系统不需要安装传感器就可以计算,无论电机运行速度过高还是过低,该系统都可使用。同时使用无速传感器能够大大节省系统成本,让各个环节更加紧凑的拼接到一起。

综上所述,本文设计的控制系统无论是在控制能力、控制效果和控制在花费时间上,都较传统系统有很大程度的提高,更值得大力推广和使用。

### 4 总结与展望

本文着重对双 PWM 变换器异步电机矢量控制系统的硬件和软件部分进行设计,分析如何利用无速度传感器控

(下转第 97 页)