

# 基于 DSP+CPLD 的双级矩阵变换器设计与实现

粟梅, 余岳, 覃恒思, 桂卫华  
(中南大学, 湖南长沙 410083)

摘要: 传统矩阵变换器的结构简单, 功率密度较高, 但其换流问题和复杂的 PWM 调制方法限制了它在工业领域中的应用。双级矩阵变换器 (TMC) 在保持传统矩阵变换器所有优点的同时, 可使 PWM 调制算法更加简单。整流端的开关实现了零电流换流, 没有传统矩阵变换器中的换流问题。针对 TMC 的控制要求, 提出了一种基于 DSP+CPLD 实现 TMC 的方法, 开发了一套 TMC 装置。实验结果表明, 该 TMC 具有优良的输入输出特性。

关键词: 变换器; 矩阵; 控制/数字信号处理器; 复杂可编程逻辑器件

中图分类号: TM46 文献标识码: A 文章编号: 1000-100X(2007)06-0001-03

## Design and Realization of Two-stage Matrix Converter based on DSP+CPLD

SU Mei, YU Yue, QIN Heng-si, GUI Wei-hua  
(Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Conventional Matrix Converter is very simple in structure and has powerful controllability. However, commutation problem and complicated PWM method keep it from being utilized in industry. Two-stage Matrix Converter has the same performance as a conventional matrix converter. The PWM method utilized in conventional inverter can be used, which can largely simplify its control complexity. All the switches at line side turn on and turn off at zero current, the converter does not have any commutation problems as required by the conventional matrix converter. Based on DSP and CPLD, a control algorithm is implemented to meet the control requirements of Two-stage matrix converter. An experimental prototype is developed to verify the proposed control algorithm. Experimental results are provided to verify its high performance characteristic.

Keywords: converter; matrix; control/digital signal processor; complex programmable logic device

Foundation Project: Supported by National Natural Science Foundation of Province Huan (No.05JJ30102); Supported by Technology Research Foundation of Province Huan (05GK3035)

## 1 引言

随着电力电子技术、微电子技术和计算机技术的高速发展, 交-直-交变频器已广泛用于传动系统中, 但其中也存在一些固有的缺陷。近年来, 矩阵变换器倍受重视, 已成为电力变换器中的研究热点。矩阵变换器是一种“绿色”的直接变换型交-交电力变换装置, 与传统的自然换流变频器相比, 具有许多优点。但目前, 矩阵变换器仍停留在理论研究和实验室样机阶段。主要原因是传统单级矩阵变换器也存在一些缺陷。双级矩阵变换器 (Two-stage Matrix Converter, 简称 TMC) 的提出, 在一定程度上解决了传统矩阵变换器所面临的问题。它不仅能实现传统矩阵变换器的所有功能, 而且具有: 控制容易, 电网侧的单桥可实现零电流开关, 负载侧开关控制类似于

传统的 DC/AC 逆变器; 箝位电路大大简化; TMC 的双级矩阵变换器拓扑电路结构简单, 因而可降低系统的成本。在交流调速系统中, 使用 TMC 驱动异步电机, 既能实现较好的传动性能, 又能满足日益严格的电网电能质量的要求。目前, 国内对 TMC 的研究相对较少, 已有的研究也基本上只停留在仿真研究阶段。为此, 提出了一种基于 12 开关拓扑结构的 TMC 实现方法, 开发了一套 TMC 装置。

## 2 TMC 的拓扑结构及调制算法分析

### 2.1 TMC 的拓扑结构

图 1 示出 TMC 的一种拓扑结构<sup>[1]</sup>。

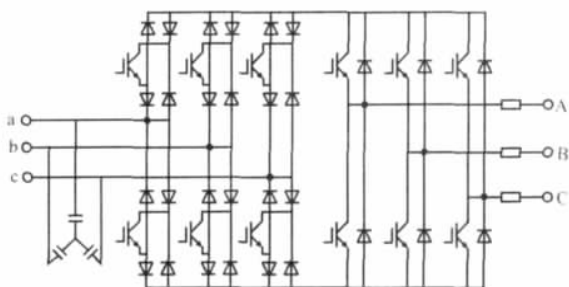


图 1 12 开关 TMC 拓扑结构图

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (05JJ30102), 湖南省科技攻关计划项目 (05GK3035)

定稿日期: 2006-09-15

作者简介: 粟梅 (1967-), 女, 湖南汉寿人, 博士, 教授。研究方向为电力电子及电力传动。

与传统单级矩阵变换器相比, TMC 的开关器件数目减少了, 整流级加逆变级一起总共只需要 12 只 IGBT, 并且还可根据不同的需要进一步减少开关数目。图 2 示出等效的 TMC 拓扑结构。

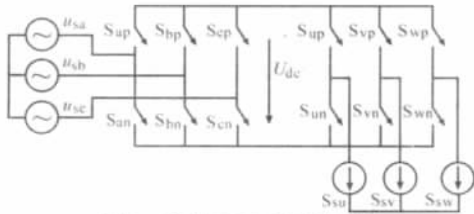


图 2 等效 TMC 拓扑结构图

## 2.2 TMC 调制算法分析

(1) 整流级 PWM 调制 为了保持在中间直流上正下负的同时, 尽可能大地充分利用三相输入线电压, 以合成较大的直流电压, 将三相正弦输入电压划分为 6 个区间。图 3 示出整流的分区。在每个区间内有一相绝对值最大, 另两相电压极性与之相反。在保证整流级输入端为单位功率因数的条件下, 以区间 1 为例, 整流级的调制策略<sup>[2]</sup>可表示为:

$$d_b = -\cos \theta_b / \cos \theta_a, \quad d_c = -\cos \theta_c / \cos \theta_a \quad (1)$$

式中  $d_b, d_c$ —— $S_{bn}$  和  $S_{cn}$  在该 PWM 开关周期中的占空比  
其它区间的占空比可由上述分析方法得到。

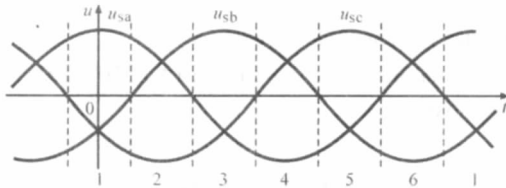


图 3 整流分区

(2) 逆变级空间矢量调制 因逆变级的结构与传统逆变器一样, 所以可采用性能优良的空间矢量调制策略。由于整流级每一个开关周期分为两段, 为了协调好整流级和逆变级, 把逆变级每个开关周期也分为两段, 仍然以区间 1 为例。

在整流级区间 1 的第一时段, 可求逆变级  $u_1$ ,

$$u_2 \text{ 和 } u_0 \text{ 的占空比为: } \begin{cases} d_{1b} = d_1 d_b = d_1 (-\cos \theta_b / \cos \theta_a) \\ d_{2b} = d_2 d_b = d_2 (-\cos \theta_b / \cos \theta_a) \\ d_{0b} = d_0 d_b = d_0 (-\cos \theta_b / \cos \theta_a) \end{cases} \quad (2)$$

在整流级区间 1 的第二时段, 可求逆变级  $u_1$ ,

$$u_2 \text{ 和 } u_0 \text{ 的占空比为: } \begin{cases} d_{1c} = d_1 d_c = d_1 (-\cos \theta_c / \cos \theta_a) \\ d_{2c} = d_2 d_c = d_2 (-\cos \theta_c / \cos \theta_a) \\ d_{0c} = d_0 d_c = d_0 (-\cos \theta_c / \cos \theta_a) \end{cases} \quad (3)$$

同样依照上述方法, 其他区间的占空比也可通过相应的计算得到。

## 3 系统的结构与硬件设计

依据 TMC 调制算法的要求, 系统所需完成的功能主要是检测当前的三相输入电源幅值和相位, 再计

算出 TMC 整流级和逆变级的控制所需的占空比数据, 然后将这些占空比的数据转换为开关开启和闭合的时间来控制开关的通断, 从而达到控制交流异步电机的目的。根据上述分析, 系统按模块化的设计思想, 其总体结构上可分为图 4 灰色框内所示的 3 大模块。

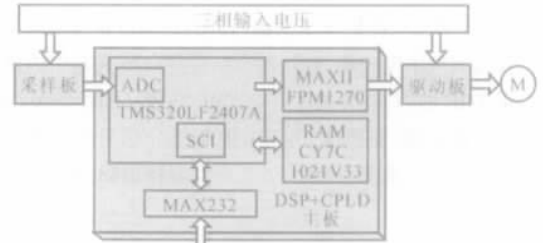


图 4 系统总体结构框图

(1) 采样板 主要对三相交流输入电源进行信号变换处理, 使得该信号幅值符合 TMS320LF2407A 的 A/D 端口输入 0~3.3V 的要求, 然后送入 TMS320LF2407A 的 ADC 采样端口进行模数转换。

(2) DSP+FPGA 主板 选用 TMS320LF2407A 型 DSP 器件, 主要用于采样和对采样得到的数据进行数值处理。引入 CPLD, 一是为了减轻 DSP 的工作负担, 使 DSP 有充足的时间进行数值运算; 二是增强系统对开关器件控制的可靠性。CPLD 选用 MAXII 系列中的 EPM1270 器件, 其内部主要完成计数和死区补偿的功能, 即将 DSP 传送来的计数值存储在 CPLD 的寄存器里, 然后 CPLD 根据计数值进行计数, 计数时间到了后, 再将控制开关的通断信号送到驱动板。DSP 同时通过 SCI 与 MAX232 接口, 通过 RS232 完成与上位机的通讯工作。上位机既可通过 RS232 接口将电机的运行参数给定于 DSP 进行控制, 也可接收 DSP 传送的系统运行状态数据, 以达到实时分析实验数据的功能。为了增加 DSP 的数据处理量, 还扩展了 64K 16bit 外部存储器。

(3) 驱动板 主要功能是接收主板上的 CPLD 传送的开关动作信号, 以作用于开关器件。该套装置在开关器件的选择上使用了集成度较高、可靠性较好的 IPM 模块, 通过适当的 IPM 连接就可组合成图 1 所示的 12 个开关 TMC 的拓扑结构。由于 IPM 模块内部的 IGBT 自带驱动和保护电路, 使得驱动板主电路部分的设计简化了很多。

## 4 系统软件设计

### 4.1 DSP 部分

图 5 示出 DSP 主程序流程图。主要完成定时器、串口、模数转换单元的初始化工作。在 TMS320LF2407A 中 ADC 的采样由一个定时器控制,

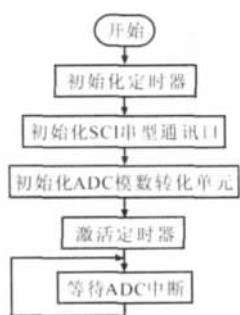


图5 DSP 主程序流程图

可实现连续定时采样,不需要人工干预。ADC采样完成后会产生采样完成中断,程序会自动进入ADC模数转换单元中断子程序。通过串口,上位机可发送命令给DSP,完成给定参考电源数值、启动系统运转、检测系统运行状态等工作。

图6示出ADC模数转换单元中断子程序流程图。主要完成占空比的计算工作。进入中断子程序后,首先读取已检测并转换的三相电源数据,然后进行分析计算。在计算占空比的过程中值得注意的是,由于TMS320LF2407A属于定点运算型处理器,且指令系统中不含除法指令,而占空比计算中含有大量浮点运算,特别是浮点除法运算,为了缩短程序的运行时间,可以提高系统的运行能力,程序设计中使用了浮点数的定点表示法和大量的查表算法,在充分利用DSP内部程序储存器的同时,提高了程序的运行效率。

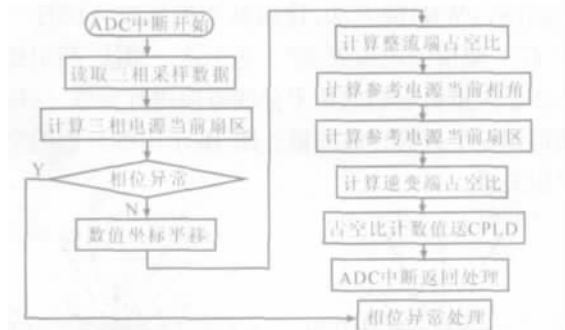


图6 模数转换单元中断子程序流程图

#### 4.2 CPLD 部分

CPLD的软件设计采用Verilog硬件开发语言开发。图7示出CPLD硬件功能框图。

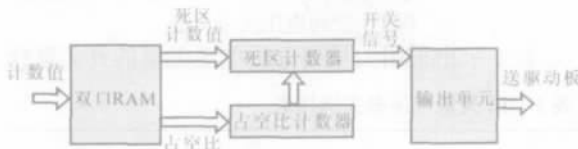


图7 CPLD 硬件功能框图

在一个PWM周期开始后,DSP将检测到的三相电源信号,经计算得到控制开关通断的占空比信号,然后送入CPLD内部的一个双口RAM,再由占空比计数器读入。由于TMS320LF2407A运算速度足够快,这一过程远远小于一个PWM周期,因此CPLD有足够的时间准备好当前的数据为下一个PWM周期计数。送入双口RAM的还有死区计数时

间,由于实际的物理开关存在开关滞后问题,DSP同时也发送死区补偿量给CPLD进行软件功能上的死区补偿。这种用软件进行补偿的方法可对不同的开关对象进行调节,实际应用十分灵活。

### 5 实验结果

图8示出由上述设计方法研制的TMC实验系统。实验参数:输入三相交流电压为120V,输入滤波器 $L=3\text{mH}$ <sup>[3]</sup>, $C=10\mu\text{F}$ ;系统开关频率为5kHz;异步电机的额定功率为750W。图9示出给定输出电压频率为16.67Hz时,输入电流 $i_{in}$ ,输出线电压 $u_{ab}$ ,输出电流 $i_o$ 和中间直流电压 $U_{dc}$ 的实验波形。实验结果表明,TMC的 $i_{in}$ 为正弦, $u_{ab}$ 为正弦脉冲宽度调制, $i_o$ 为正弦变化, $i_{in}$ 和 $u_{ab}$ 中的基波分量占绝对主要成分,具有优良的输入输出特性。

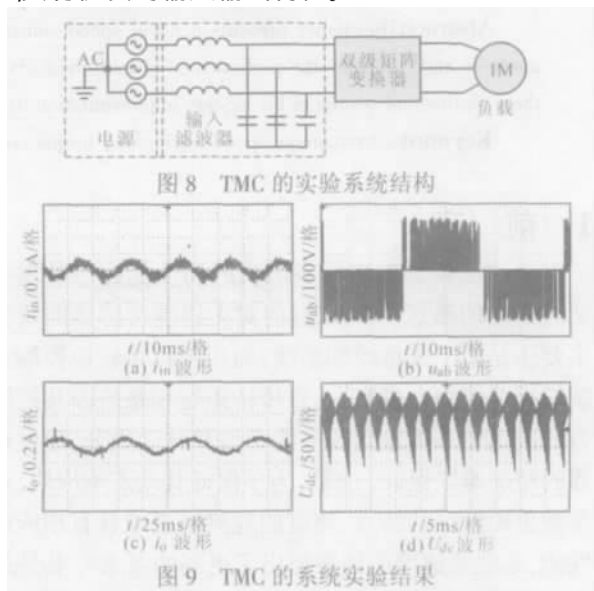


图9 TMC 的系统实验结果

### 6 结论

双级矩阵变换器不仅能实现传统矩阵变换器的所有功能,而且有功率开关器件相对较少,箝位电路大大简化,换流简单可靠,控制算法的复杂性降低等优点,能够实现较好的传动性能,可以满足日益严格的电网电能质量的要求。双级矩阵变换器的实现为双级矩阵变换器投入到工业应用奠定了基础。

#### 参考文献

- [1] Kolar J W, Baunman M, Schafmeister F. Novel Three-phase AC/DC/AC Sparse Matrix Converter[A]. Proc. of APEC '02 [C]. 2002, (2): 777~791.
- [2] 粟梅,许新东,李丹云,等.双级矩阵变换器驱动异步电动机特性研究[J].中南大学学报,2005,36(6):658-663.
- [3] 粟梅,覃恒思,孙尧,等.矩阵变换器系统的稳定性分析[J].中国电机工程学报,2005,25(8):62-69.