

基于 CPLD 的双级矩阵变换器研究与实现

Research and Realization of CPLD-Based Two-stage Matrix Converter

中南大学 信息科学与工程学院 栗梅 谢红军 孙尧 危韧勇

摘要: 本文提出了一种完全基于 CPLD(复杂可编程逻辑器件)的双级矩阵变换器的实现方案, 该方案摒弃了常规的采用 DSP(数字信号处理器)计算占空比、CPLD 进行调制的思路, 将调制部分的占空比计算也完全集成到 CPLD 内部, 同时采用了状态机输出整流逆变开关状态。实验结果表明了这种方案的可行性, 为日后生产双级矩阵变换器的专业集成芯片及工业化打下了基础。

关键词: 矩阵变换器 复杂可编程逻辑器件 状态机

Abstract: A totally CPLD(Complex Programmable Logic Device)-Based realization scheme of Two-Stage Matrix Converter is proposed in this study. Discarding the traditional method, in which DSP(Digital Signal Processor) is used to calculate the duty ratio and CPLD to generate pulse-width-modulation signals, this scheme integrates the duty-cycle calculation part into CPLD and state-machine technology is also used to generate rectifier-inverter switch states. Experiment results show the feasibility of the proposed scheme and pave the way for Two-Stage Matrix Converter ASIC(Application Specific Integrated Circuits) product and industrialization process.

Key words: Matrix converter Complex programmable logic device State-machine

1 引言

控制技术、微电子技术和计算机技术的飞速发展极大地推动了电力电子技术的发展。随着人们对电网质量要求的提高以及谐波治理力度的加大, 矩阵变换器日益受到人们的重视, 成为近年来电力变换器中的研究热点。矩阵变换器作为一种“绿色”全硅型交-交变换装置, 具有能量双向流动、正弦输入输出电流、输入功率因数可控、功率密度高等特点^[1]。但是传统单级矩阵变换器(CMC)存在开关器件数量多、控制算法复杂以及换流困难等问题。双级矩阵变换器(TMC)的出现一定程度上解决了 CMC 所面临的问题。TMC 不仅能够实现 CMC 的所有功能, 并且具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、调制算法复杂度降低等优点。文章在介绍了双级矩阵变换器拓扑结构和调制策略之后, 提出了一种完全基于 CPLD 的实现方案。不同于传统的采用 DSP 计算占空比、CPLD 进行调制的思路^[2], 该方案将双级矩阵变换器的整流、逆变占空比计算也完全采用 CPLD

实现。实验结果表明这种方案是行之有效的。

2 双级矩阵变换器拓扑结构

实验室样机采用的双级矩阵变换器拓扑结构如图 1 所示:

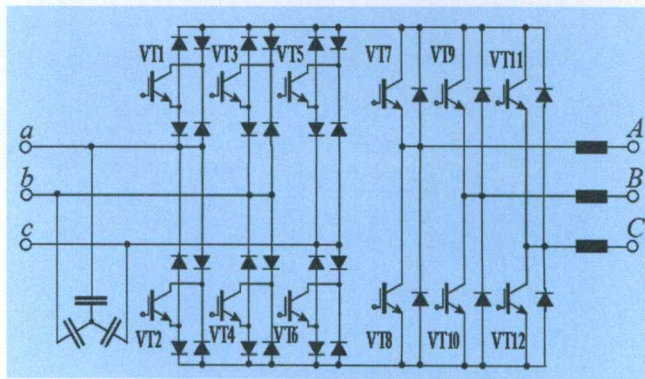


图1 双级矩阵变换器拓扑结构

图示双级矩阵变换器拓扑由整流、逆变两级构成, 共需要 12 个 IGBT。相比于传统 18 开关矩阵变换器, 其

开关数目减少,因此双级矩阵变换器也被称作稀疏矩阵变换器(Sparse matrix converter)。

从图1可以进一步看到,双级矩阵变换器的拓扑结构类似于传统AC-DC-AC变换器,不同之处在于没有大的中间直流电容。其控制方式也分为两级:整流级采用简化PWM调制,逆变级采用空间矢量调制。由于没有中间直流电容,输入输出直接耦合,整流级与逆变级需要协调控制。在整流级换流时刻,逆变级输出零空间矢量,迫使直流端输出开路,那么整流端的开关就可以在零电流的条件下自由换流,几乎没有开关损耗^[3]。

3 调制算法简述

3.1 整流级 PWM 调制

输入三相电压可按图2分为6个区段(interval),以区段1为例,为了保证中间直流上正下负并尽可能合成大的中间直流电压,在一个调制周期内保持 U_b 持续导通, U_a 、 U_c 轮流导通。 U_a 、 U_c 的占空比计算^[3]公式为:

$$\begin{cases} D_1 = U_a / (-U_b) \\ D_2 = U_c / (-U_b) \end{cases} \quad (1)$$

类似容易得到其他区段的占空比计算公式。

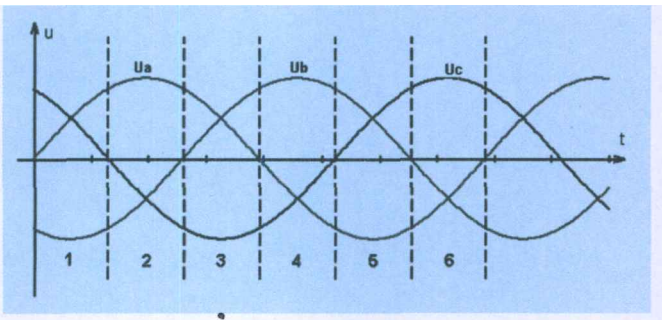


图2 整流分区

3.2 逆变级 SVM 调制

逆变级采用空间矢量调制技术,空间矢量分布图如图3所示,平面被分为6个区间(sector)。假定参考空间矢量 U_s 位于区间1, D_m 、 D_n 、 D_0 分别为 u_1 、 u_2 和零矢量的占空比,为了与整流级协调以满足零电流换流,因此逆变级分为两段调制,占空比计算公式为:

$$\begin{cases} D_{1m} = D_1 D_m \\ D_{1n} = D_1 D_n \\ D_{10} = D_1 D_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} D_{2m} = D_2 D_m \\ D_{2n} = D_2 D_n \\ D_{20} = D_2 D_0 \end{cases} \quad (3)$$

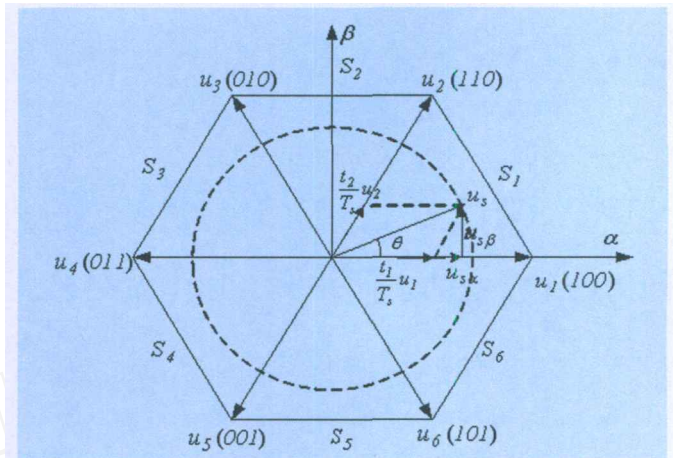


图3 逆变级电压空间矢量分布图

4 系统实现

4.1 硬件平台

实验系统主要由电压采样板、控制板、驱动板、主电路构成。系统结构框图如图2所示:

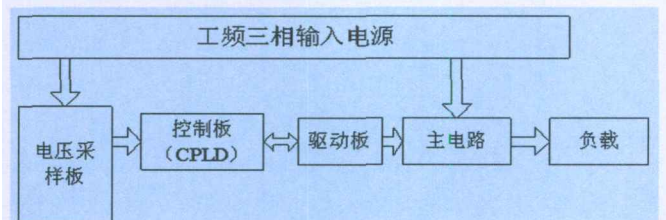


图4 系统结构框图

(1) 采样板采集输入相电压。由式(1)知,整流级占空比计算需要知道输入三相电压瞬时值,可以利用AD采样获得。但这种方法受AD精度的制约,并且公网电压并非理想三相对称正弦,实际调制效果不尽人意。本文采用采过零点的方法,结合查正弦表来获得输入三相电压。该方法简单可靠,硬件成本低。采样板的核心部件为一个电压互感器和一个电压比较器。电压比较器输出频率为50Hz的方波,经电平调整后送入CPLD,该信号的上升沿通知CPLD进行0度同步,而下降沿进行180度同步,也就是说一个调制周期内能够与实际相电压同步两次。

(2) 控制板是整个系统的核心部分。控制板核心为一片Ateral Flex系列型号为10K100ARC240-1的CPLD, Flex系列CPLD采用SRAM工艺,需要外挂EPROM配置芯片,因此很多人习惯将flex系列CPLD也称作FPGA(现场可编程门阵列)。控制板上CPLD输入输出管脚均通过16245与外部接口隔离,起到一级保护作用。

(3) 驱动板采用了三菱公司的集成化驱动芯片M57962L,该芯片内部带有驱动保护电路,通过检测IGBT C-E极之间电压,判定系统是否出现短路过流故障。在系

统出现短路过流故障时，驱动板慢关断 IGBT，并给出 F_0 （故障输出）信号通知控制板。

4.2 调制算法实现

双级矩阵变换器实现采用 VHDL 硬件描述语言编写，其系统结构框图如图 5 所示。

(1) 正余弦查找表采用 LPM 模块定制，位宽为 8 位。

(2) 本设计中，整流与逆变部分调制均采用了状态机实现。使用状态机除了前文所述优点之外，开关死区的安排也变得非常容易，只需要将死区状态定义为状态机中的一个状态即可。

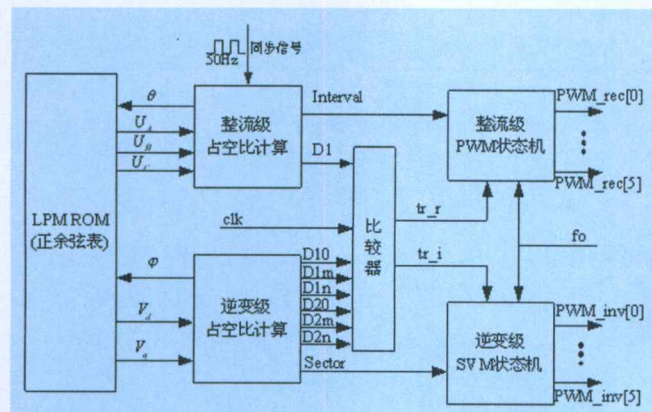


图5 双级矩阵变换器的VHDL实现结构框图

根据图 6 所示的双级矩阵变换器整流级和逆变级的开关序列，容易得到图 7 所示的状态机。由于整流级进行的是横向换流，且任意时刻只有两个开关导通，为了防止输入端电源短路并保障器件安全，死区状态要求整流级 IGBT 全部关断。而逆变级属纵向换流，死区状态必须保障任一桥臂不能直通。

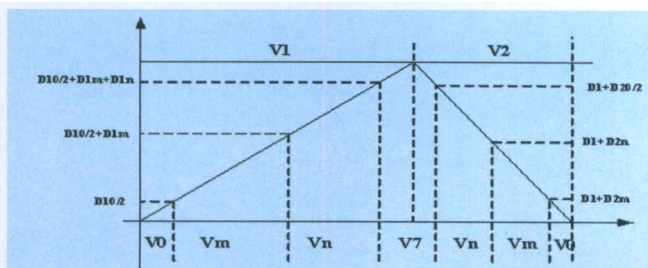


图6 整流、逆变开关序列

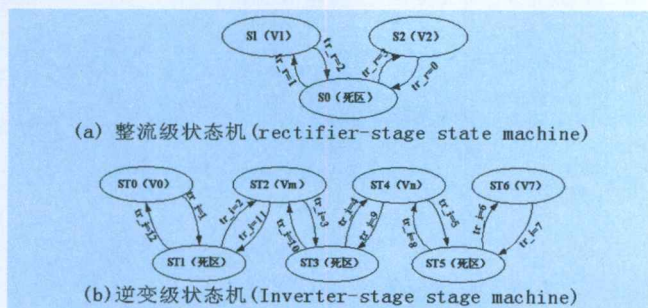


图7 整流、逆变状态机

4.3 时序仿真

时序仿真图如图 8 所示，图示给出了三个调制周期的时序图，这三个调制周期分别对应于整流、逆变的 1~3 区间。

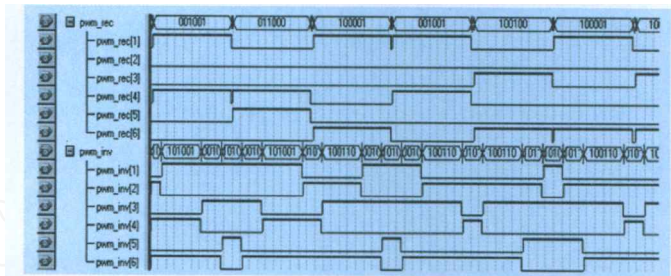


图8 整流、逆变PWM信号时序图

5 实验

实验中调制频率设定为 2.5KHz，开关死区时间设定为 4 微秒，逆变级参考空间矢量给定输出频率为 25Hz，调制系数为 0.7。图 9(a)给出了整流级驱动门极信号和逆变级驱动相间门极信号实验曲线。图 9(b)给出了逆变级 A 相桥臂门极驱动及微观死区波形。图 9(c)(d)分别为输入线电压约 100V 空载情况下中间直流电压波形和逆变级输出线电压波形。

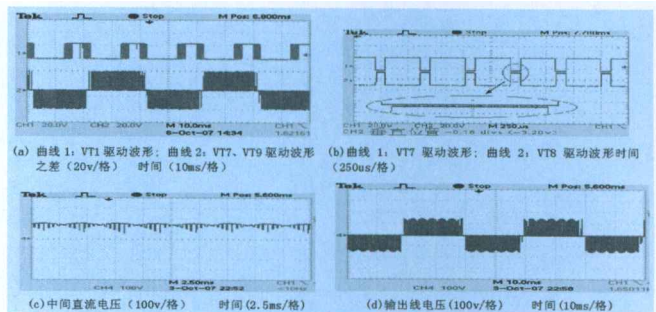


图9 实验曲线

6 结论

本文实现方案的好处是显而易见的：(1)系统具有高的可靠性。由于整流和逆变部分的调制均采用了状态机实现，在受到外部干扰或者不确定性异常时，系统从非法状态中恢复过来通常只需要几个机器周期，不足以对系统的运行构成危害，而 DSP 通过看门狗复位系统对于本高速控制系统是不可接受的；(2)运行速度快。软件的硬件化使得在 DSP 中只能顺序执行的指令，而在用 CPLD 实现时可以得到并发执行。(3)控制板体积小。由于整个控制器集成在一块 CPLD 芯片内，控制板体积大幅度减小，系统成本也进一步降低。

(下转第 26 页)

图5是在一台10kw样机上进行三相短路时的实验波形。图5(a)是直流母线电流波形,图5(b)是IGBT封锁信号波形。与仿真波形类似,短路开始时母线电流峰值超过硬件限定值126A,IGBT频繁封锁。由于实际逆变器直流母线自身存在的电感限制了电流的突变,故在硬件限流期间,母线电流峰值被限制在限流值126A附近。短路0.3s后,软件限流占主导作用,硬件限流不再动作。因此图5(b)中封锁信号为逻辑1,硬件限流不再动作。

图5(c)和图5(d)是输出电压与输出电流波形。从图中可以看出硬件限流、软件限流和正常运行的切换过程。图5(c)可见,当三相短路故障解除后,软件限流将使输出电压渐渐抬高,当输出电压回升到额定值时,再由软件控制切换至正常工作状态。由图5(d)输出电流波形可见,在发生短路后,输出电流经硬件和软件配合限流后,最终稳定在输出平均电流给定值33A,亦即幅值52.3A。在硬件限流仍在作用时,电流波形为非正弦,当完全进入软件限流后,硬件限流不再动作,波形被调制成正弦波,且其平均值达到给定,这一点在图5(e)的输出电流细节中可以清楚地看到。这与仿真与理论分析时完全一致。

5 结论

本文对软硬件综合的限流策略在组合式逆变器上的应用进行了研究,对逆变器两相短路与三相短路的情况进行了理论分析,以此为依据进行了限流点的整定,进行了限流策略的仿真和样机的实验验证。理论与实验均证明了分析的正确性与限流策略的可靠性与有效性。此外,针对不同电路结构对限流点进行整定计算,可知本限流策略能广泛应用于各类型的逆变电源中。

参考文献

- [1] 侯婷,裴雪军,张宁,康勇.三相逆变电源抗负荷冲击策略研究[J].电气传动.2007,37(4):35-37.
- [2] 王林兵,何湘宁,张超.逆变器输出限流技术研究[J].电力电子技术.2006,40(4):65-67
- [3] 张宁,裴雪军,康勇,侯婷.三相逆变器限流策略研究[J].通信电源技术.2006,23(1):31-32.
- [4] Xuejuan Kong, Li peng, Yong Kang. The model of coupled three-phase inverter and research of the output voltage control [C]. Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on Volume 2, 2005.
- [5] 陈敏. 9kVA 组合式三相逆变器的研制[D]. 南京航空

航天大学. 2002, (2):7.

- [6] 侯婷,裴雪军,刘明先,康勇.大功率组合式三相逆变电源的统一控制技术[J].中国电机工程学报.2006,26(25):46-50.
- [7] 王萍,孙雨耕,许会军,张珂,宋良瑜.逆变器直流侧面谐波分析与有源补偿[J].中国电机工程学报.2005,25(14):52-55.
- [8] 陈坚.电力电子学——电力电子变换和控制技术[M].第二版.北京:高等教育出版社.2004.

作者简介

陈宇(1983-)男 博士研究生,研究方向为大功率逆变器控制技术及电磁兼容。

汪洪亮(1982-)男 博士研究生,研究方向为逆变器控制技术。

裴雪军(1978-)男 博士,研究方向为大功率逆变电源及其控制技术。

康勇(1965-)男 教授/博士生导师,研究方向为电力电子与电力传动技术。

(上接第17页)

本文研究对于生产双级矩阵变换器专用集成芯片(ASIC)及工业化打下了基础。

参考文献

- [1] 陈伯时,陆海慧.矩阵式交-交变换器及其控制[J].电力电子技术.1999,33(1):8-11.
- [2] 粟梅,余岳,覃恒思,桂卫华.基于DSP+CPLD的双级矩阵变换器设计与实现[J].电力电子技术.2007,41(6):1-3.
- [3] 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(8):658-663.

作者简介

粟梅(1967-)女 博士/教授/博士生导师,从事电力系统自动化、电力电子及电力传动方面的研究。

谢红军(1983-)男 硕士研究生,从事电力电子及电力传动方面的研究。

孙尧(1981-)男 博士研究生,从事非线性控制在电力电子方面的应用研究。

危初勇(1962-)男 教授,从事电力系统自动化、电力电子及电力传动方面的研究。