超星·期刊

第25卷第4期 华东交通大学学报 Vol. 25 No. 4
2008年8月 Journal of East China Jiaotong University Aug. ,2008

文章编号:1005-0523(2008)04-0033-05

基于DSP的双级式矩阵开关电源系统的研究

华 胜,高海生,姚 明

(华东交通大学 电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

摘要: 为解决传统大功率开关电源系统中,整流侧产生大量谐波电流而使得系统的输入功率因素低,且谐波畸变率(THD)高的问题,本文基于TMS3320FL2407系列DSP,采用空间矢量脉宽调制(SPWM)技术,设计出矩阵式开关电源系统. 经仿真实验分析,矩阵式开关电源系统可以有效地改善输入侧电流波形质量,并使得系统的功率密度有所提高.

关 键 词: 双级式矩阵式变换器(TSMC);空间矢量调制(SPWM);数字信号处理器(DSP)

中图分类号: TM433 **文献标识码:** A

随着全球经济的发展和人们生活水平的不断提高,电气化技术的普及与应用的愈来愈广,电能的消耗量也迅速提高,由此带来的能源短缺和电能环境污染问题已成为人类所共同面对的世纪性难题[1]. 而传统的开关电源大多需要几个并列的整流器才能获得较高的直流输出电流,从而产生大量谐波电流. 另外,这些电源中均含有大电容或大电感作为直流环节,不仅体积大重量重,而且存在多级转化电路,使得输入侧功率因素较低,对电网谐波污染严重[2].

为了解决这些问题,本文提出一种新型DSP控制的双级式矩阵式开关电源系统(如图1). 在该电源系统中,基于DSP数字化控制基础上,采用双级式三相—单相矩阵变换电路,直接将低频AC(三相)输入变换为高频AC(单相)输出,再经过高频隔离变压器和整流器整流后,直接给直流负载供电. 由于存在输出电流和电压的反馈PI控制,使得该开关电源系统更加稳定,输出电压不会随负载改变而波动. 另外,由于采用DSP控制的双级式矩阵开关电路,使得该电源系统具有以下优点:

(1) 中间直流环节无需大电感或大电容等储能元件,钳位电路简单,减少了开关器件的数量,使得装置结构紧凑,便于向模块化发展;

(2) 能在较宽范围输入电压下工作,具有良好的输入输出性能、高输入功率因素;

(3) 提高了系统的功率密度,线路电流的总谐波失真(THD)小,减少了对电网的谐波污染;

(4) 整流级开关可实现零电流换流,系统换流控制简单,提高系统的可靠性;

(5) 以DSP为控制核心,便于与系统外部通信. 控制算法通过软件编程实现使得系统升级方便,也便于用户根据自己的需要灵活使用不同的控制方法.

本文将首先详细分析双级式矩阵开关电路工作原理,并在此基础上分别讨论了其整流级空间矢量脉宽调制策略,和逆变级开关函数调制策略,最后阐述了DSP控制和驱动方法;经仿真分析后表明,数字化控制的矩阵开关电源具有良好的性能.

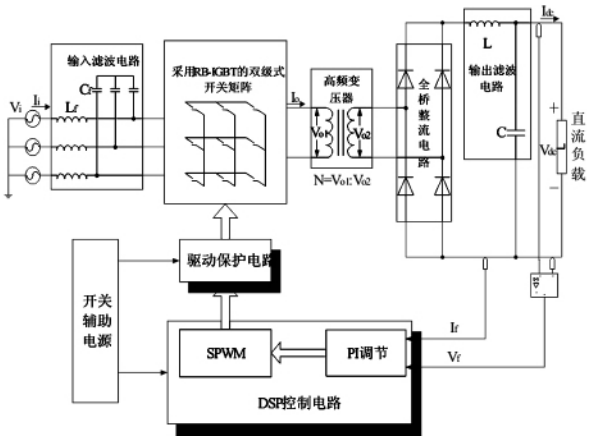

图1 基于DSP控制的矩阵式开关电源系统

收稿日期:2008-04-15

作者简介:华胜(1982-),男,安徽安庆人,在读硕士研究生,研究方向为电力电子技术及应用.

超星·期刊

1 双级式矩阵变换器拓扑结构

矩阵变换器(MC)是一种基于双向开关元件并采用脉宽调制得到期望输出电压的电力变换装置,可以产生交流或直流电压.目前最广泛使用的是三相–三相矩阵变换器和三相–单相矩阵变换器,而本文用于开关电源设计的是采用三相–单相矩阵变换器.矩阵变换器相对于传统的电力变换装置具有诸多优点,如可实现能量的双向流动,输入侧功率因素高,谐波含量小,电路结构紧凑体积小,可靠性高,使用寿命长等,使得越来越多的人来研究并开发利用[3].

而本文采用双级式矩阵变换器(Two–stageMatrixConverter,TSMC)来设计三相–单相开关电源,并且采用最为先进的电力电子元件,有效地降低了开关损耗.如图2所示,双级式矩阵变换器包括由6对反并联RB–IGBT双向开关组成的PWM整流器和由单向开关组成的PWM逆变器,完成三相输入–单相输出的转换.这种双级式矩阵变换器不仅在功能上可与普通矩阵变换器相媲美,而且克服了其缺点,体现了前所未有的优势[3]:

(1) 省去了中间直流环节大电容和大电感,钳位电路简单,拓扑结构紧凑;

(2) 具有良好的输入输出性能,高输入功率因素,可实现能量的双向流动;

(3) 具有中间直流环节,对整流级和逆变级可以分别采用各自的环流方法和控制策略,系统换流、控制简单,提高了系统可靠性;

(4) 在一定条件下,可以减少开关器件数量,减少开关损耗.

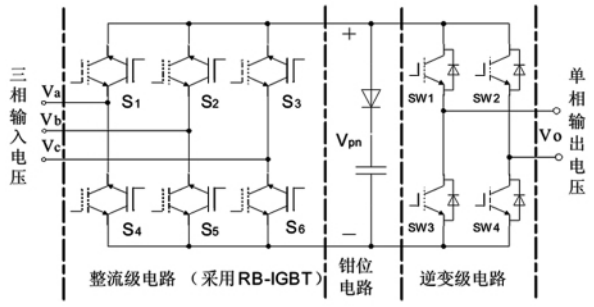

图2 采用RB–IGBT的双级式三相–单相矩阵变换器

近年来出现的逆阻式IGBT(ReverseBlockingIGBT,RB–IGBT),它不仅具有输入阻抗高、开关速度快、通态电压低、阻断电压高、承受电流大等优点,而且具有反向阻断能力,可承受接近于正向阻断电压的反向阻断电压,非常适合于构成矩阵式变换器中双向开关.逆阻式IGBT解决了普通IGBT不能反向截止的问题,使得双向开关可以简化为简单的反并联结构(如图3),省去了两个快恢复二极管,大大降低了双级式矩阵变换器的功率损耗.

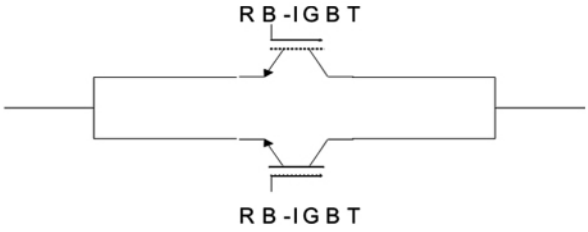

图3 反并联RB–IGBT双向开关

2 双级式矩阵开关电源调制策略

由图2可以看出,双级式矩阵变换器可以近似看作传统交–直–交变换器,即包括整流级和逆变级两个模块,所以PWM调制策略也要划分为两个部分.由于存在虚拟直流环节,所以假设存在直流电压 V_{pn}.

矩阵变换器的输入输出关系可以用一个数学矩阵方程表示.三相输入电压 V_i 和虚拟直流电压 V_{pn} 关系可以表示为

$$V_{pn} = T_{VSR} * V_i \tag{1}$$

其中,T_{VSR} 为输入侧整流矩阵传递函数.矩阵输出电压 V_0 和虚拟直流电压 V_{pn} 关系可以表示为

$$V_0 = T_{VSI} * V_{pn} \tag{2}$$

其中,T_{VSI} 为输出侧逆变矩阵传递函数;所以,由(1)、(2)式矩阵输出电压 V_0 可以表示为

$$V_0 = T_{VSO} * T_{VSR} * V_i,$$

矩阵输入电流可以表示为

$$I_0 = T_{VSR}^T * T_{VSI}^T * I_i$$

假设双级式矩阵变换器三相输入电压 V_i 为

$$V_i = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{im}\sin(\omega_i t) \\ V_{im}\sin(\omega_i t - 120°) \\ V_{im}\sin(\omega_i t + 120°) \end{bmatrix},$$

其中,V_{im} 为输入电压幅值,ω_i 为输入角频率.

2.1 整流级调制策略

双向开关整流级的调制目的是要在直流侧输出极性为正的直流电压,且使得输入电流随输入电压按正弦规律变化、输入功率因数为1,并获得最大的电压利用率.为此,把输入相电压的周期分成如图4所示6个区间.每个区间具有相同的特点,即一相电压绝对值最大,另两相电压极性同它相反.

超星·期刊

在每个 PWM 调制周期分为两段,分别在两段时间内使得相应的两个最大且极性为正的线电流从直流侧输出,因而整流级在一个 PWM 周期内只产生两个有效空间矢量,而不会产生零矢量. 以第 2 区间为例来说明开关工作选择,此时 V_a 极性为正且绝对值最大,V_b、V_c 极性为负,则在这个 PWM 周期内分别使开关 S_1,S_5 和 S_1,S_6 相继导通,在整流级的直流侧分别得到线电压 $V_{ab}=V_a-V_b$ 和 $V_{ac}=V_a-V_c$. 依此类推,可得到输入电压在其他 5 个区间时各周期对应的开关组合和直流电压. 在第 2 区间内,a 相始终连到直流正极 p,b 相和 c 相按照开关状态交替连到直流 n 极. 设 d_{ab},d_{ac} 分别为 V_{ab},V_{ac} 对应的两个时间段的占空比,则 $d_{ab}+d_{ac}=1$.

为使输入电流矢量随输入电压矢量按正弦规律变化,且输入功率因数为 1,则 d_{ab},d_{ac} 应与相应的输入相电压幅值成正比,即

$$d_{ab}=-\frac{\cos\theta_b}{\cos\theta_a}=-\frac{V_b}{V_a};$$

$$d_{ac}=-\frac{\cos\theta_c}{\cos\theta_a}=-\frac{V_c}{V_a}$$

一个 PWM 周期内的局部平均直流电压为[1]

$$\overline{V}_{pn}=d_{ab}V_{ab}+d_{ac}V_{ac}=\frac{3V}{2|\cos\theta_a|}$$

设 τ_{ab}、τ_{ac} 分别为直流电压 V_{ab}、V_{ac} 在一个 PWM 调制周期 T_s 内占用的时间,则

$$\tau_{ab}=d_{ab}T_s,\tau_{ac}=d_{ac}T_s,T_s=\tau_{ab}+\tau_{ac}$$

同理,可得其它区间内各 PWM 周期内的开关组合对应的占空比和局部平均直流电压.

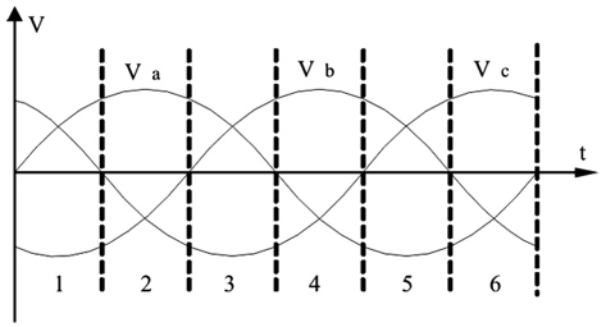

图 4　输入电压 6 区间的划分

$$\overline{V}_{pn}=\frac{3V}{2|\cos\theta_i|},$$

$$\cos\theta_i=\max(|\cos\theta_a|,|\cos\theta_\beta|,|\cos\theta_c|)$$

2.2　逆变级调制策略

本文双级 MC 的逆变器调制目的是要在输出端得到频率和幅值均可调节的单相高频输出电压. 由于传统的空间矢量调制法以及双电压法均不能直接用于双级式矩阵变换器逆变级调制策略,所以本文采用开关函数调制法[4],即当输入电压函数、期望输出电压函数以及约束条件均已给订的情况下,使矩阵变换器中的开关器件的占空比由一个连续函数或分段连续函数表示,并根据此函数来控制开关的导通和关断.

如图 2 所示,由开关 SW_1、SW_2、SW_3、SW_4 组成的逆变级电路将直流电压 V_{pn} 变换成单相交流电压 V_0 输出. 假设预期输出电压 V_0 表示为:

$V_0=V_{om}\cos(\omega_0 t)$,其中 V_{om} 为输出电压幅值,ω_0 为输出电压角频率.

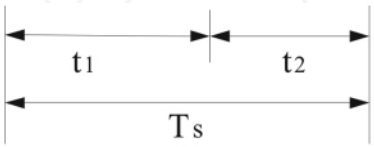

图 5　采样周期

在这个调制策略中,把采样周期 T_s' 分为两个时间段,即 t_1 和 t_2,如图 5 所示. 在采样周期 T_s' 内,开关 SW_1、SW_4(t_1 时间段)和 SW_2、SW_3(t_2 时间段)依次导通,它们的占空比分别为

$$d_1=\frac{t_1}{T_s'}=\frac{1+\frac{V_0}{V_{pn}}}{2},$$

$$d_2=\frac{t_2}{T_s'}=\frac{1-\frac{V_0}{V_{pn}}}{2},\text{其中}\left|\frac{V_0}{V_{pn}}\right|\leqslant 1. \quad (4)$$

由于直流输入电压 V_{pn} 中存在高次谐波电压 V_r,所以 V_{pn} 可以表示为

$$V_{pn}=V_{dc}+V_r\cos(\omega_r t),$$

其中 V_{dc} 为直流电压,ω_r 为高次谐波角频率.

故(4)式占空比又可表示为

$$d_1=\frac{1+\frac{V_{om}\cos\theta_0}{V_{dc}+V_r\cos(\omega_r t)}}{2},$$

$$d_2=\frac{1-\frac{V_{om}\cos\theta_0}{V_{dc}+V_r\cos(\omega_r t)}}{2},$$

其中　$\frac{|V_{om}|}{|V_{dc}|+|V_r|}\leqslant 1$

3　DSP 控制系统

本系统控制回路由 TI 公司的 TMS320LF2407DSP 控制器、同步电压比较器、译码电路和驱动电路组成. DSP 芯片和 CPLD 芯片是整

超星·期刊

个弱电控制电路的核心，它完成整流级空间矢量调制策略、逆变级开关占空比的计算和触发信号的输出. 译码电路将 DSP 的输出信号还原成 MC 的控制信号; EPM9320LC84 – 20CPLD 芯片用于 RB – IGBT 双向开关的两步换流方式，向开关矩阵发出 18 路驱动电路. 每个 IGBT 驱动模块都有隔离的工作电源和输入信号电源.

由各路传感器采集到的矩阵变换器输入输出侧电压、电流波形，经信号调理电路处理后送入 DSP 芯片的各 A/D 输入通道. 根据这些输入信息，DSP 芯片执行空间矢量调制算法和各开关占空比算法，并向 CPLD 芯片发出 4 路 PWM 信号、6 路输入电流空间矢量信号.

矩阵变换器的控制主要通过 DSP 的软件来完成. 软件由主程序、定时器的周期中断、比较中断、3 个全比较中断程序和捕捉中断程序构成. 主程序主要完成系统的参数设置和初始化. 它包含系统初始化、控制策略参数设置、根据输出频率 ω_0 计算 T_s 和中断程序初始化设定. 定时器的周期中断程序完成双级 MC 的空间矢量调制策略，包括输入电压和输出电压矢量计算、查找开关组合、计算导通时间，并根据零电流换流原则，转化为对应的时间常数后，分别送给比较中断寄存器和 3 个全比较中断寄存器. 3 个全比较中断按照中断内设置中断方式，依次输出开关组合信号.

4 实验结果分析

基于上述原理设计的开关电源模型进行了相关仿真实验，本实验主要参数如表 1 所示.

表 1 实验参数表

实验参数	数值
输入线电压	208 V
输入频率	50 Hz
开关频率	10 kHz
输出直流电压	43 V
负载功率	1 kW

图 6 所示为三相输入电压在带负载工作情况下其中两相的线电压波形和线电流波形; 图 7 所示为输出的直流电压(43 V)和负载电流波形.

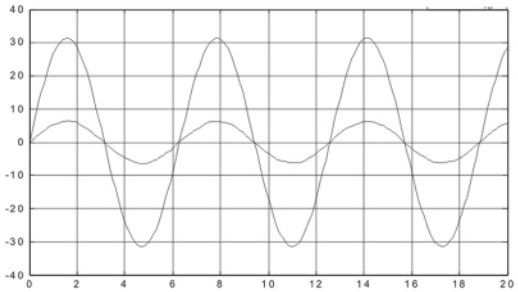

图 6 A 相输入电压和电流波形

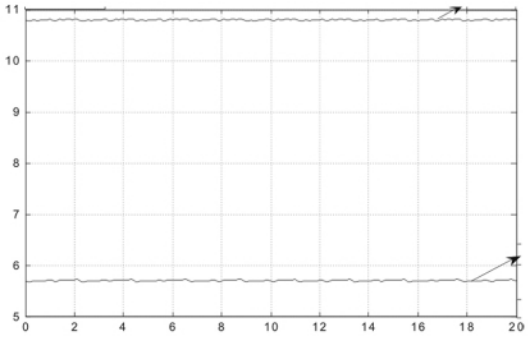

图 7 输出直流电压和电流波形

5 结论

综上所述，基于 DSP 控制的双级式矩阵式开关电源结构简单、控制方便、系统可靠. 试验结果证明了采用该系统实现三相 AC 到单相 AC 转变的可行性，空间矢量 PWM 调制策略可用于各种负载情况下高频率线电流的产生，并在一定程度上改善输入侧电流波形质量，并使得的系统的功率密度有所提高.

参考文献:

[1] 孙 凯，周大宁，等. 矩阵式变换器技术及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社，2007.

[2] Somnida Ratanapanachote，Han JuCha，*et al*. A digitally controlled switch mode power supply based on matrix converter [J]. IEEE: Ansactions on Power Ectronics，2006，21(1): 124 – 130.

[3] 陈伯时，陆海慧. 矩阵式交 – 交变频器及其控制 [J]. 电力电子技术，1999，33(1): 8 – 11.

[4] Seyed Hossein Hosseini. A novel modulation method for DC/AC matrix converters under distorted DC supply voltage [J]. Proceedings of IEEE TENCON，2002: 1970 – 1973.

[5] 蔡 灏，李志勇，等. 基于 DSP 的双级矩阵变换器设计 [J]. 电力电子技术，2007，41: 1 – 13.

超星·期刊

Design of Two – stage Matrix Converter Switch Mode Power Supply Based on DSP

HUA Sheng,GAO Hai – sheng,YAO Ming

(School of Electrical and Electronic Eingineering,East China Jiaotong University,Nanchang 330013,China)

Abstract: In traditional large power switch mode power supply system,the rectifiers draw significant harmonic currents from the utility,resulting in poor input power factor with high total harmonic distortion(THD). To solve this problem,based on TMS3320FL2407 DSP,by means of space vector modulation technology,the paper designs a matrix converter switch mode power supply system. Analysis of simulating experiment shows that matrix converter switch mode power supply system can improve input current quality,and that power density of the proposed rectifier is expected to be higher.

Key words: two – stage matrix converter; space vector modulation; digital signal processor

(责任编辑:王建华)

(上接第32页)

[3] 贾爱琴. ADS774在烟支重量检测系统的应用[J]. 现代电子技术,2003,7(150):82 – 84.

[4] 唐明明,邵根富. 多通道同步A/D采集卡的设计与实现[J]. 中国水运,2007,7(7):161 – 163.

Data Acquisition Card Design Based on the PC104 Bus

LIU Xiao – fei,YANG Feng – ping

(School of Electrical and Electronica Engineering,East China Jiaotong University,Nanchang 330013,China)

Abstract: The paper introduces a method of data acquisition card design based on the PC104 bus,and describes the design of the acquisition card hardware interface circuit,including the design of A/D convert,the input and output of switch state,and the module of timing counting. The data acquisition card is applied in the vacuum circuit breaker's mechanical characteristics detector to achieve the acquisition of analog,switch state and timing counting functions.

Key words: PC104 bus; A/D convert; timing and counting

(责任编辑:王建华)