



# 基于 SVPWM 调制及 p-q 算法的电气专业 DSP 综合实验研究

马鸿文<sup>1</sup>, 王香婷<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 电气与动力工程学院, 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 徐州 221116)

**摘要:** 基于三相功率变流器主电路的两个理论支柱——脉宽调制理论及瞬时功率理论, 在电气专业高年级学生中进行了 DSPTMS320F28335 综合应用实验。给出了 SVPWM 及 p-q 理论的工作原理, 主要使用的 DSP 硬件模块及关键程序代码。教学实践结果表明: 达到了对学生理论理解、程序编写、实验调试, 强弱电结合等综合能力训练的目的。

**关键词:** 空间矢量脉宽调制; 瞬时功率理论; 电气专业; 综合实验

中图分类号: TM92

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20200309

## Study of DSP Comprehensive Experiment for Electrical Specialty Based on SVPWM and p-q Theory

MA Hongwen<sup>1</sup>, WANG Xiangting<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Based on the two main theories in main circuit of three-phase power converter, namely pulse width modulation theory and instantaneous reactive power theory, comprehensive experiments of DSP TMS320F28335 are carried out aiming at senior students of electrical engineering major. During the experimental process, working principles of space vector pulse width modulation (SVPWM) and p-q theory are given, as well as the main hardware modules and key program codes used in DSP. The experimental teaching results show that the purposes of ability training such as students' ability of better understanding, practical programming, experimental debugging and the weak-current combined with heavy-current training are obtained.

**Key words:** SVPWM; instantaneous power theory; electrical major; comprehensive experiments

三相功率变流器 VSC 为三相六桥臂开关管反并联二极管的拓扑结构。该电路有两个理论支柱支持: 一个是脉宽调制理论(SPWM 或者 SVPWM)用于三相变频逆变电源的产生; 另一个是瞬时功率理论(p-q 算法), 主要是作为有源无功补偿和电力系统谐波治理技术的理论基础。PWM 或者 p-q 理论对整个电力电子、电力传动和电力调节产业有着深远的影响及其工程意义<sup>[1]</sup>。理解并掌握 PWM 调制及 p-q 算法理论, 且能熟练设计开发基于 DSP 的功率开关管控制软硬件, 是每个电气自动化专业的高年级学生必备的基本功。中国矿业大学电气专业本科学生在学习“交流电机运动控

制原理”“DSP 原理及应用”“电力系统分析”“电力电子技术”“电能质量分析”“新能源发电及储能技术”等课程的基础上, 在第七学期进行了相关电力电子及电力传动, 电力系统自动化等专业综合实验实训。目前国内外的教育界都在寻求专业综合实验教学改革的途径, 主要是沿着两条途径:

1) 使用 MATLAB 等工具软件, 对相应电路及算法进行仿真;

2) 引入已经被工程界广泛使用的 DSP 器件, 指导学生完成相关算法的实现, 特别是实时(realtime)实现。

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-12-02

基金项目: 2017 年江苏省在线开放课程立项建设(苏高教函〔2017〕13—296)。

作者简介: 马鸿文(1967-), 女, 硕士, 高级实验师, 主要从事电力电子与电力传动、电力系统自动化教学研究工作。

通信作者: 王香婷(1952-), 女, 教授, 主要从事检测技术与自动化装置研究。E-mail: xiangtingw@163.com

电气专业综合实训的任务是通过 DSPTMS 320F28335 的编程设计,对实验结果进行分析观察,加深 PWM 调制及 p-q 算法基本理论理解及工程应用<sup>[2]</sup>。教学实践证明:使学生在有限的学时内,既熟悉技术发展的前沿,又加深强弱电专业理论的理解,在真实的实验环境中完成规定的综合实验任务,达到了教学目标。

## 1 理论分析

### 1.1 SVPWM 脉宽调制理论

三相功率交流器 VSC 拓扑结构如图 1 所示。

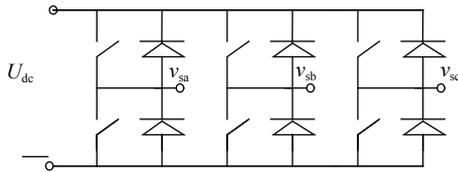


图 1 三相功率变流器拓扑结构

根据三相 a, b, c 系统向两相  $\alpha, \beta$  系统功率保持不变的原则,对于三相对称电压  $v_{sa}$ 、 $v_{sb}$ 、 $v_{sc}$ ,引入空间矢量运算,则综合电压空间矢量为<sup>[3]</sup>:

$$v_s = \sqrt{\frac{2}{3}}(v_{sa} + \alpha v_{sb} + \alpha^2 v_{sc}) \quad (1)$$

式中,  $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  为旋转算子。

如图 1 所示的主电路,变流器输出 8 个空间

$$\begin{cases} T_k = \frac{\sqrt{2}}{U_{dl}} T_s \left[ v_{sa} \sin \frac{k\pi}{3} - v_{s\beta} \cos \frac{k\pi}{3} \right] \\ T_{k+1} = \frac{\sqrt{2}}{U_{dc}} T_s \left[ v_{s\beta} \cos \frac{(k-1)\pi}{3} - v_{sa} \sin \frac{(k-1)\pi}{3} \right] \end{cases} \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (5)$$

在一个采样周期  $T_s$  内,除了  $T_k$ 、 $T_{k+1}$  外,不足的由零矢量作用  $T_0$  时间补充。令:

$$T_0 = T_7 + T_8 = T_s - T_k - T_{k+1} \quad (6)$$

式中,  $T_7$ 、 $T_8$  分别为零矢量  $v_{s7}(1, 1, 1)$ 、 $v_{s8}(1, 1, 1)$  作用时间。

采用双边对称空间矢量调制,  $v_{sref}$  在 1 扇区内的开关信号如图 3 所示。分别令  $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ , 可以得出各扇区相邻两个基本空间矢量的作用时间。考虑到式(5)计算繁琐,基于 6 个基本空间矢量的对称性,设 3 个中间变量分别为 X、Y、Z, 简化后令<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} X = \frac{\sqrt{2}U_{\beta}T_s}{U_{dc}} \\ Y = \frac{\sqrt{2}(\sqrt{3}U_{\alpha} + U_{\beta})T_s}{2U_{dc}} \\ Z = \frac{\sqrt{2}(U_{\beta} - \sqrt{3}U_{\alpha})T_s}{2U_{dc}} \end{cases} \quad (7)$$

矢量如图 2 所示。

$$v_{sk} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}e^{j\frac{(k-1)\pi}{3}} & k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \\ 0 & k = 7, 8 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $U_{dc}$  为主电路的直流母线电压。

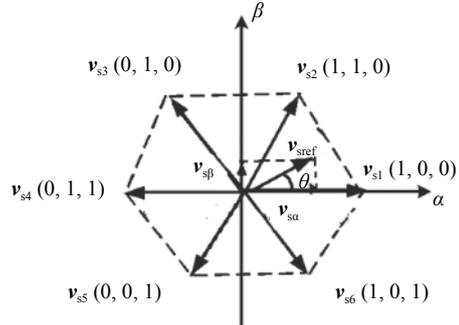


图 2 基本空间矢量及参考电压空间矢量

在两相  $\alpha, \beta$  系统中,任何一个参考空间矢量有:

$$v_{sref} = v_{sa} + v_{s\beta} \quad (3)$$

式中:  $v_{sa}$ 、 $v_{s\beta}$  为  $\alpha, \beta$  轴上的分解;  $v_{sref}$  幅角为  $\theta$ , 通过相邻两个空间矢量  $v_{sk}v_{sk+1}$  叠加获得。即:

$$v_{sref} = \frac{T_k}{T_s} v_{sk} + \frac{T_{k+1}}{T_s} v_{sk+1} \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (4)$$

式中,  $T_k$ 、 $T_{k+1}$  分别为  $v_{sk}$ 、 $v_{sk+1}$  作用的时间。

把式(2)、式(3)代入式(4),利用欧拉公式,等式两边相等得:

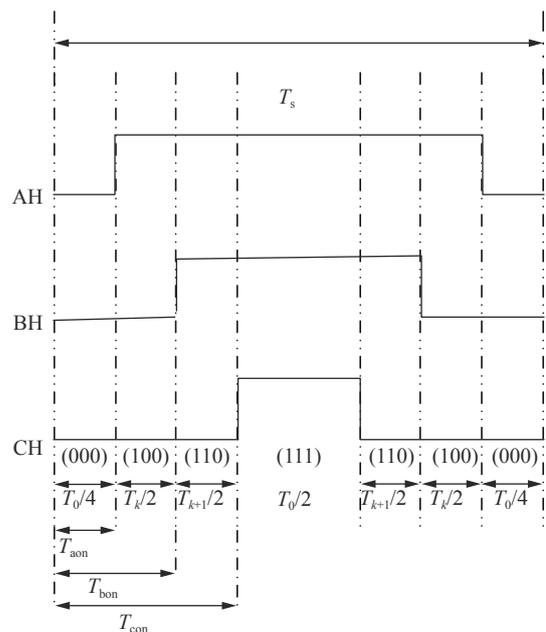


图 3 双边 7 段对称空间矢量调制

根据式(5)~式(7)得出各扇区相邻两矢量的作用时间为  $T_x$ 、 $T_y$ , 如表 1 所示。扇区号为奇数时,  $T_x$  为  $v_{s1}$ 、 $v_{s3}$ 、 $v_{s5}$  作用时间,  $T_y$  为  $v_{s2}$ 、 $v_{s4}$ 、 $v_{s6}$  作用时间; 扇区号为偶数时,  $T_x$  为  $v_{s3}$ 、 $v_{s5}$ 、 $v_{s1}$  作用时间,  $T_y$  为  $v_{s2}$ 、 $v_{s4}$ 、 $v_{s6}$  作用时间。若  $T_x+T_y>T_s$ , 则取  $T_x=T_x \times T_s / (T_x+T_y)$ ,  $T_y=T_y \times T_s / (T_x+T_y)$ 。设 DSP 的 EPWM 模块三相比较寄存器 CAMP A、CAMP B、CAMP C 分别赋值为  $T_{aon}$ 、 $T_{bon}$ 、 $T_{con}$ 。

则:

$$\begin{cases} T_{aon} = \frac{1-2T_x-2T_y}{4} \\ T_{bon} = T_{aon} + T_x \\ T_{con} = T_{bon} + T_y \end{cases} \quad (8)$$

式(7)、式(8)是 SVPWM 算法的三相比较器赋值简化计算公式。结合扇区如表 1 所示。

表 1  $T_x$ 、 $T_y$  及三相比较寄存器赋值表

参数	$\theta$					
	$0 \leq \theta < \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} \leq \theta < \frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3} \leq \theta < \pi$	$\pi \leq \theta < \frac{4\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3} \leq \theta < \frac{5\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3} \leq \theta < 2\pi$
扇区	I	II	III	IV	V	VI
$T_x$	-Z	Z	X	-X	-Y	Y
$T_y$	X	Y	-Y	Z	-Z	-X
CAMP A	$T_{aon}$	$T_{bon}$	$T_{con}$	$T_{con}$	$T_{bon}$	$T_{aon}$
CAMP B	$T_{bon}$	$T_{aon}$	$T_{aon}$	$T_{bon}$	$T_{con}$	$T_{con}$
CAMP C	$T_{con}$	$T_{con}$	$T_{bon}$	$T_{aon}$	$T_{aon}$	$T_{bon}$

### 1.2 p-q 瞬时功率理论

1983 年由文献 [5] 提出三相电路瞬时功率理论, 突破了传统的以平均值为基础的功率定义, 系统地定义了瞬时无功功率、瞬时有功功率等瞬时功率量, 简称 p-q 理论。以该理论为基础, 得出用于有源电力滤波器的谐波和无功电流的实时检测方法<sup>[6-7]</sup>。设  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 、 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  分别为三相电路 a、b、c 坐标系上电压和负载电流的瞬时值, 为了简化, 设三相电压电流中不含零序分量, 且三相电压平衡且无畸变。

$e_\alpha$ 、 $e_\beta$ 、 $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  分别为变换到两相正交的  $\alpha$ - $\beta$  坐标系上的电压电流瞬时值。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$ 。

定义瞬时有功功率  $p$ 、瞬时无功功率  $q$  为:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{pq} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,  $C_{pq} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{bmatrix}$ 。

由式(10)得出:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_\alpha}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} & \frac{e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \\ \frac{e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} & \frac{-e_\alpha}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = C_{pq}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{式中, } C_{pq}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{e_\alpha}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} & \frac{e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \\ \frac{e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} & \frac{-e_\alpha}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \end{bmatrix}。$$

式(10)、式(11)在三相电流为非正弦且不对称时,  $p$  和  $q$  分解为两个分量:

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (12)$$

$\bar{p}$ 、 $\bar{q}$ : 分别为瞬时有功和无功功率的直流成分, 对应于三相系统的基波正序电流分量, 前者对应于三相系统的基波正序有功电流分量, 后者对应于三相系统的基波正序无功电流分量。

$\tilde{p}$ 、 $\tilde{q}$ : 分别为瞬时有功和无功功率的高频分量, 对应于三相系统的高次谐波分量和基波负序电流分量。p-q 检测方法, 如图 4 所示。根据瞬时功率理论算出  $p$ 、 $q$ , 经低通滤波器(LPF)得相应直流分量  $\bar{p}$ 、 $\bar{q}$ 。在电网电压无畸变的情况下, 负载电流的基波分量为:

$$\begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} = C_{23} C_{pq}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中,  $C_{23} = C_{32}^T$ 。

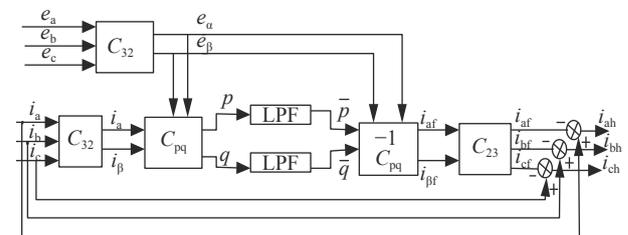


图 4 p-q 检测方法框图

将基波分量和负载电流相减, 得出需要检测的谐波电流及负序电流。当需要同时检测无功电流时, 只需断开图 4 中的  $q$  计算通道即可。

## 2 TMS320F28335DSP 及 EPWM 外设模块

TMS320F28335 DSP 是美国 TI 公司的 C2000 系列的高端产品, 应用于电力电子, 电机控制的高性能高精度的领域。TMS320F28335 DSP 具有 150 MHz 的高速处理能力, 32 位浮点处理单元, 具有功能强大的集成型外设, 有 EPWM、ECAP、EQEP、ADC 和 McBSP 等增强外设模块和诸多通信接口 MCBSP、SPI、SCI、CAN 和 I<sup>2</sup>C 等, 是理想的单芯片控制 DSP 芯片<sup>[8-10]</sup>。TMS320F28335 DSP 内部集成 6 个增强型脉宽调制 EPWM 外设模块, 发 PWM 波, 有时基设置、比较设置、周期设置、动作限定、死区配置、斩波配置和错误输入等控制部件, 只要设置好相应的控制部件各寄存器值, 所需要的 PWM 波可以自动化发出。在 EPWM 模块中有诸多中断事件可以引发中断。本实验的 SVPWM 调制及 p-q 算法的编程即是使用了增强型 EPWM 模块展开的。

## 3 DSP 技术实现及实验结果分析

### 3.1 SVPWM 脉宽调制算法的 DSP 实现过程及实验结果分析

#### 3.1.1 SVPWM 脉宽调制算法的 DSP 实现

设参考电压为:

$$\begin{cases} v_a = 220\sin(2\pi ft) \\ v_b = 220\sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_c = 220\sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (14)$$

式中, 频率  $f=50$  Hz, 直流母线电压为 400 V, 采样频率选择 6000 Hz。

项目添加必需的头文件, 相关主程序、子程序及中断程序、库文件, 以及 cmd 存储器配置文件。主程序包括系统初始化、外设初始化和中断向量表初始化等。CPU 时钟为 150 MHz。其中: EPWM 的时钟设为 37.5 MHz, 周期寄存器 TBPRD 设为 3125, 即实现采样周期为  $1/6000$  Hz=167  $\mu$ s 的定时; 计数方式为增减方式, 每相的上桥臂开关管 CMPA 为增计数比较事件发生时置“1”, 减计数比较事件发生时置“0”, 每相的下桥臂开关管 CMPB 为增计数比较发生时置“0”, 减计数比

较发生时置“1”; 死区设为  $50(1/37.5 \text{ MHz})=1.33 \mu\text{s}$ , 中断事件为采用 EPWM1 的过零中断, 每进入一次中断, 依次计算给定三相基准电压采样值, CLARKE 变换, 扇区值计算,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $T_x$ 、 $T_y$ 、 $T_{aon}$ 、 $T_{bon}$ 、 $T_{con}$  计算, 比较寄存器 CAMP A、CAMP B、CAMP C 更新, 比较寄存器采用 Shadow 模式, 在计数值为 0 时加载前一周期计算出的新脉宽比较值。这样, EPWM 模块即可自动发出 PWM 驱动脉冲。

EPWM1 周期性过零中断服务程序如下:

```
Interruptvoid epwm1_isr(void)
{
    sin_gen(); //采样点产生
    clarke(); // CLARKE 变换, 计算 X, Y, Z
    sector_select(); //计算扇区值
    switching_time_calculate(sector); //计算  $T_x$ ,  $T_y$ ,
     $T_{aon}$ ,  $T_{bon}$ ,  $T_{con}$ 
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_
    TIMER_TBPRD *  $T_{aon}$ ; //更新 A 相比较寄存器值
    EPwm1Regs.CMPB=EPWM1_TIMER_TBPRD
    *  $T_{aon}$ ;
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_
    TIMER_TBPRD *  $T_{bon}$ ; //更新 B 相比较寄存器值
    EPwm2Regs.CMPB=
    EPWM1_TIMER_TBPRD *  $T_{bon}$ ;
    EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = EPWM1_
    TIMER_TBPRD *  $T_{con}$ ; //更新 C 相比较寄存器值
    EPwm3Regs.CMPB=
    EPWM1_TIMER_TBPRD *  $T_{con}$ ;
    n++; // 设置软件断点
    ....
}
```

按照表 1 计算  $T_{aon}$ 、 $T_{bon}$ 、 $T_{con}$  的子程序如下:

```
voidswitching_time_calculate(int i)
{
    switch(i)
    {
        case 1: {
             $T_x=-Z$ ;
             $T_y=X$ ;
             $T_{aon}=(1-T_x-T_y)/2$ ;
             $T_{bon}=T_{aon}+T_x$ ;
             $T_{con}=T_{bon}+T_y$ ;
```

```

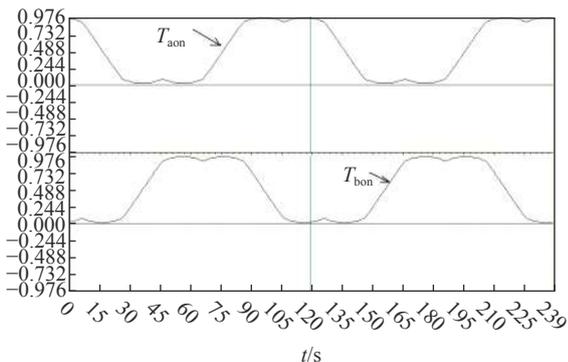
} break;
.....
}
    
```

### 3.1.2 SVPWM 脉宽调制算法试验结果分析

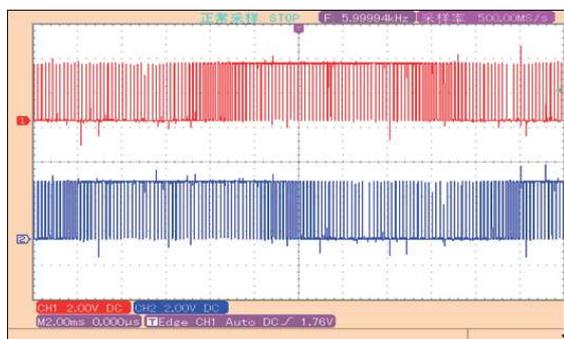
实验设备为计算机、示波器及北京精仪达盛科技有限公司 EL-DSP-E300-2008 实验箱。在 CCS3.3 开发环境下进行。SVPWM 算法实验结果如图 5 所示。图 5(a)为加断点动画调试 CCS 软件示波器同时显示 AB 两相上桥臂开关管的  $T_{aon}$ 、 $T_{bon}$  导通时间(标么值), 可见为典型的马鞍形波, 频率为 50 Hz, A 相超前 B 相  $120^\circ$ 。图 5(b)为程序全速运行硬仿真 EL-DSP-E300-2008 试验箱上的 EPWM1A, EPWM2A 输出在示波器的显示波形, 可见为 PWM 脉冲调制波。

$$\begin{cases} i_a = 10\sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{6}\right) - \left(\frac{10}{5}\right)\sin\left(5(2\pi ft) - \frac{\pi}{6}\right) + \left(\frac{10}{7}\right)\sin\left(7(2\pi ft) - \frac{\pi}{6}\right) \\ i_b = 10\sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) - \left(\frac{10}{5}\right)\sin\left(5(2\pi ft) + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) + \left(\frac{10}{7}\right)\sin\left(7(2\pi ft) - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) \\ i_c = 10\sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) - \left(\frac{10}{5}\right)\sin\left(5(2\pi ft) - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) + \left(\frac{10}{7}\right)\sin\left(7(2\pi ft) + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right) \end{cases} \quad (16)$$

式中, 基频  $f=50$  Hz。负载电流含有 5 次及 7 次谐波, 且电流基波相位滞后电压相位为  $30^\circ$ 。



(a) CCS 开发环境下虚拟示波器  $T_{aon}$ 、 $T_{bon}$  (标么值) 波形



(b) 示波器 EPWM1A, EPWM2A 输出引脚显示波形

图 5 SVPWM 算法实验结果

### 3.2.1 p-q 瞬时功率算法的 DSP 实现

采用 p-q 瞬时功率算法如图 4 框图实现无功

### 3.2 p-q 瞬时功率算法的 DSP 实现过程及实验结果分析

本文设电网电压为:

$$\begin{cases} e_a = 220\sin(2\pi ft) \\ e_b = 220\sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c = 220\sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (15)$$

式中, 基频  $f=50$  Hz。负载设为运行于触发角  $30^\circ$  的三相晶闸管整流器, 其电流除基波外, 还包含次数为  $6n\pm 1$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) 的谐波分量。其中  $(6n-1)$  次谐波是负序的,  $(6n+1)$  次谐波是正序的, 此处为了简化分析舍去 7 次以上的电流谐波, 则负载电流为:

电流和谐波电流的检测。项目添加必需的头文件, 相关主程序、子程序及中断程序, 库文件及 .cmd 存储器配置文件。主程序包括系统初始化、外设初始化、中断向量表初始化等。CPU 时钟为 150 MHz。由于采样频率选择 5000 Hz, 采用 EPWM1 过零周期性中断实现  $1/5000$  Hz = 200  $\mu$ s 的时间离散, EPWM 的时钟设为 37.5 MHz, 周期寄存器 TBPRD 设为 7500, 采用增计数模式, 过零中断事件为 1 次, 如此可实现 200  $\mu$ s 的定时周期, 每进入一次中断, 三相电压电流离散化取值, 依照图 4 依次计算出电流基波及谐波, 以及无功电流部分。

EPWM1 过零周期性中断服务程序如下:

```

Interrupt void epwm_isr(void)
{
    E1=Ea[j]; E2=Eb[j]; E3=Ec[j]; //三相电压离散化;
    I1=Ia[j]; I2=Ib[j]; I3=Ic[j]; //三相电流离散化;
    transform_3_to_2(); //CLACKE 变换;
    transform_2_to_pq(); //计算瞬时有功无功功率;
    P1=butterworth_filter_1(P); //低通滤波;
    Q1=butterworth_filter_2(Q); //低通滤波;
    transform_pq_to_Iabf(); //计算三相电流基波值;
    transform_Iabf_to_result(); //计算三相电流谐
    
```

波值;

```

j++; // 设置软件断点
.....
}

```

低通滤波器选择巴特沃思二阶低通滤波器<sup>[11-12]</sup>, 采样频率 5000 Hz, 截止频率 5 Hz。差分方程为:  $y(n)=0.000\ 009\ 82x(n)+0.000\ 019\ 65x(n-1)+0.000\ 009\ 82x(n-2)-0.991\ 153\ y(n-2)+1.991\ 114\ y(n-1)$ 。

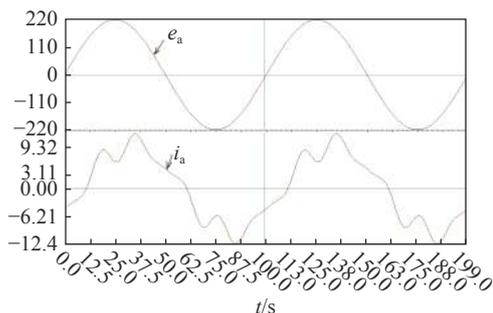
### 3.2.2 p-q 瞬时功率算法的实验结果

如图 6 所示, 为调试加断点 CCS 软件示波器 p-q 算法结果波形显示。图 6(a) 为电网电压  $e_a$  及负载 A 相电流  $i_a$ , 与所设式 (15)、式 (16) 吻

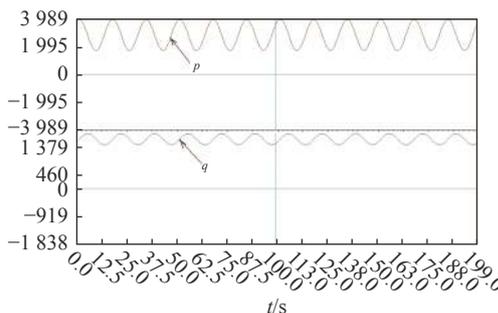
合。根据式 (10) 分析得瞬时功率为<sup>[4,6]</sup>:

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} = 2857 + 1131\cos\left(6 \times 2\pi ft - \frac{\pi}{6}\right) \\ q = \bar{q} + \tilde{q} = 1650 + 189\cos\left(6 \times 2\pi ft - \frac{\pi}{6}\right) \end{cases} \quad (17)$$

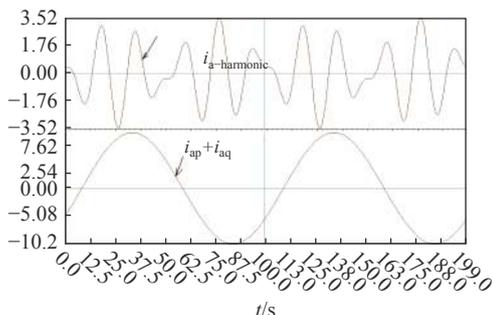
图 6(b) 分别为三相瞬时有功、无功功率  $p, q$  波形。直流量  $\bar{p}$  为平均有功功率 2857 W, 直流量  $\bar{q}$  为平均无功功率 1650 Var, 300 Hz 即 6 倍频波动交流量  $\tilde{p}, \tilde{q}$  的幅值分别为 1131 W 和 189 Var, 与式 (17) 是吻合的。图 6(c) 为检测出的 A 相负载总谐波电流  $i_{a-harmonic}$  波形及基波电流 ( $i_{ap}+i_{aq}$ )。总谐波电流含有 5 次及 7 次谐波。基波电流滞后电压 30° 相角。



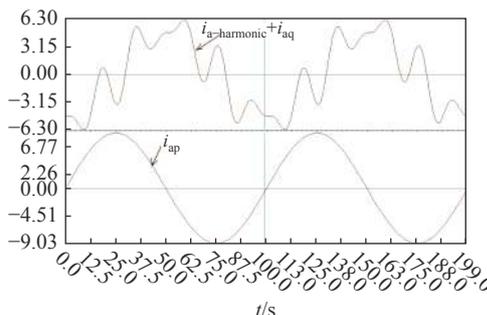
(a) A 相电网电压, 负载电流波形图



(b) 三相瞬时有功, 无功功率波形图



(c) A 相负载谐波及无功电流, 基波有功电流波形图



(d) A 相负载谐波电流, 基波电流波形图

图 6 CCS 软件示波器显示各电量波形图

图 6(d) 为检测出的 A 相负载电流总谐波及无功电流之和 ( $i_{a-harmonic} + i_{aq}$ ) 基波有功分量  $i_{ap}$  波形的波形 (此时按照断开图 4 中的  $q$  计算通道编写程序)。基波有功分量  $i_{ap}$  与电压同相。

图 6 实验结果表明 p-q 瞬时功率算法及程序准确检测出谐波及无功电流成分。若设计有源电力滤波器 (主电路如图 1, 直流侧并联稳压电容) 与三相晶闸管整流器并联, 控制有源滤波器的 A 相输出电流与 ( $i_{a-harmonic} + i_{aq}$ ) 相反的电流 (B、C 相控制相同), 则可使得运行于触发角 30° 的三相晶闸管整流器不从电网汲取谐波及无功, 呈现阻性线性

负载性质。此时有源滤波器起到滤波又无功补偿的作用。这样, 在实验中加强学生对 p-q 理论应用理解, 生动形象地了解有源电力滤波及无功补偿器作用。

## 4 结束语

围绕三相功率变流器的两个重要理论即: SVPWM 及 p-q 理论, 本文通过开发 DSP TMS320-F28335 程序的两个例子, 引导学生从专业理论知识向工程应用过渡, 提高了学生强弱电两个领域

(下转第 21 页)