

# 四桥臂逆变器 SVPWM 的 DSP 实现

## Implementation of SVPWM for Four-leg Inverter Based on DSP

中国矿业大学信息与电气工程学院 毛苏闽 耿乙文 季海涛

Mao Sumin Geng Yiwen Ji Haitao

摘要: 本文介绍了四桥臂逆变器 SVPWM 的基本原理及其算法。在基于 TMS320LF2407 DSP 实验平台上进行了实验验证。实验结果验证了四桥臂逆变器 SVPWM 算法的正确性。

关键词: 四桥臂逆变器 空间矢量脉宽调制 数字信号处理器

Abstract: The basic principle and algorithm of SVPWM for four-leg inverter are introduced. The experiment is based on TMS320LF2407 DSP. Experimental results prove the validity of SVPWM for four-leg inverter.

Key words: Four-leg inverter SVPWM DSP

[中图分类号] TM464

[文献标识码] B

文章编号 1561-0330(2009)02-0041-03

### 1 引言

随着电力电子技术的发展, 各种非线性负载的使用越来越普遍, 四桥臂逆变器固有的处理不平衡和非线性负载的能力使其得到了广泛的重视, 其典型应用有<sup>[1-2]</sup>:

(1) 分布式发电系统。例如风力发电和基于燃料电池的电能装置, 这些装置可以在独立方式或者并网模式下运行, 这些分布式电能发生装置一般采用带中线连接的四桥臂逆变器来提供三相输出;

(2) 有源滤波及无功补偿等领域。通过中性点控制来补偿谐波电流, 对于减小电网谐波、清洁电能有着重要的意义;

(3) 三相 PWM 整流器。利用第四桥臂来处理线性畸变和不平衡问题, 及增强容错能力。

四桥臂逆变器具有电路形式简单、体积小、重量轻、控制灵活、直

流电压利用率高等优点, 因此应用前景广阔。

空间矢量脉宽调制(SVPWM)是目前广泛采用的一种方法, 它是从电机的角度出发, 着眼于如何使电机获得幅值恒定的圆形旋转磁场, 即正弦磁通。此方法较其它方法在电压利用率、电流谐波和过调制等方面具有优势, 对零矢量的控制明显降低了变流器的开关损耗, 易于数字化实现<sup>[1]</sup>。

本文简要介绍了四桥臂逆变器 SVPWM 的基本原理及其算法。采用 TI 公司面向控制领域的 DSP 芯片 TMS320LF2407 作为控制芯片, 对四桥臂逆变器 SVPWM 算法进行了数字实现。

### 2 四桥臂逆变器 SVPWM 原理

四桥臂逆变器的拓扑结构如图 1 所示, 由 a、b、c 和 f 四桥臂构成。该逆变器常用的 16 种开关状态, 包含 f 桥

臂下侧开关导通时的 8 种状态和包含 f 桥臂上侧开关导通时的 8 种状态。例如用 pnpn 表示 a 相和 f 相桥臂上侧开关导通, b 相和 c 相桥臂的下侧开关导通, 其它情况依次类推。

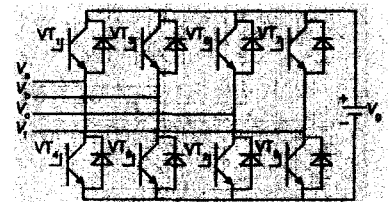


图 1 四桥臂逆变器拓扑图

16 种开关状态通过式(1)变换到  $\alpha\beta\gamma$  坐标系中:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_f \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{af} \\ V_{bf} \\ V_{cf} \end{bmatrix} \quad (1)$$

通过上述变换可以得到 16 种开关状态在  $\alpha\beta\gamma$  坐标系下的分布, 如图 2 所示, 16 个空间矢量中包含 2 个零矢

量(pppp和nnnn),其余14个非零空间矢量则构成了一个空间六棱柱。该空间六棱柱可以被分成6个空间三棱柱,每个三棱柱又能分成4个空间四面体。SVPWM技术就是用基本的电压空间矢量逼近位于给定所需参考电压空间矢量 $\vec{V}_{ref}$ ,利用这16个基本空间矢量可以合成位于24个空间四面体中的任意电压空间矢量。

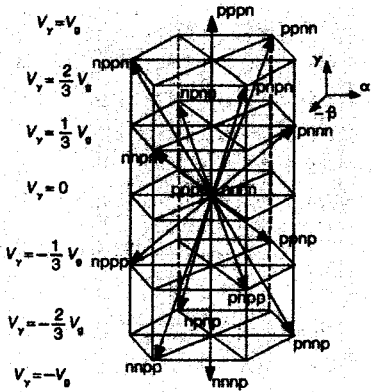


图2  $\alpha\beta\gamma$ 坐标系下四桥臂逆变器空间矢量

四桥臂逆变器SVPWM算法产生的具体步骤<sup>[3-4]</sup>如下:

(1) 参考电压空间矢量 $\vec{V}_{ref}$ 所在棱柱的判断

把参考电压空间矢量 $\vec{V}_{ref}$ 投影到 $\alpha\beta$ 平面上,如图3所示。 $\vec{V}_{ref}$ 在 $\alpha\beta$ 轴上的投影分别是 $V_\alpha$ 、 $V_\beta$ ,当 $V_\alpha \cdot V_\beta > 0$ 、 $V_\beta > 0$ 、 $V_\alpha \geq \sqrt{3}V_\beta/3$ 时, $\vec{V}_{ref}$ 分布在棱柱1。其他情况依次类推,由此可以确定参考电压空间矢量 $\vec{V}_{ref}$ 的所在棱柱。

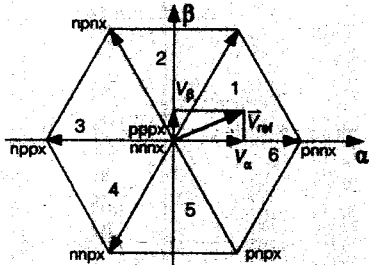


图3  $\vec{V}_{ref}$ 在 $\alpha\beta$ 平面中的投影

(2) 参考电压空间矢量 $\vec{V}_{ref}$ 所在四面体的判断

每一个棱柱又分为四个四面体,

如图4所示。假设 $\vec{V}_{ref}$ 位于编号为T1的四面体内,其相邻矢量为ppnp、pnnp和pnnn所对应的电压空间矢量。当开关状态为ppnp时, $V_{af}$ 、 $V_{bf}$ 、 $V_{cf}$ 的极性分别为“0”、“0”、“-”;当开关状态为pnnp时, $V_{af}$ 、 $V_{bf}$ 、 $V_{cf}$ 的极性分别为“0”、“-”、“-”;当开关状态为pnnn时, $V_{af}$ 、 $V_{bf}$ 、 $V_{cf}$ 的极性分别为“+”、“0”、“0”,而 $\vec{V}_{ref}$ 是由ppnp、pnnp和pnnn所对应的电压空间矢量按一定的比例合成的,从而可以得到交流侧电压 $V_{af}$ 、 $V_{bf}$ 、 $V_{cf}$ 的极性应该满足 $V_{af} > 0$ 、 $V_{bf} < 0$ 、 $V_{cf} < 0$ 。其它情况依次类推,由此可以确定参考电压空间矢量 $\vec{V}_{ref}$ 的所在四面体。

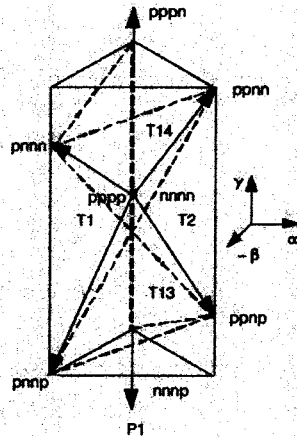


图4 棱柱P1包含四个四面体(T1、T2、T13、T14)

(3) 参考电压空间矢量 $\vec{V}_{ref}$ 相邻矢量作用时间的计算

设参考矢量 $\vec{V}_{ref}$ 位于四面体T1中其三个非零的相邻矢量记为 $\vec{V}_1$ 、 $\vec{V}_2$ 、 $\vec{V}_3$ ,其作用时间分别为 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ ,零矢量的作用时间为 $t_0$ ,直流侧电压为 $V_g$ ,SVPWM的调制周期为 $T_s$ 。根据伏秒平衡原则,有

$$\vec{V}_{ref} T_s = \vec{V}_1 t_1 + \vec{V}_2 t_2 + \vec{V}_3 t_3 + \vec{V}_0 t_0 \quad (2)$$

即可求出四桥臂逆变器参考电压空间矢量 $\vec{V}_{ref}$ 的相邻矢量作用时间。

(4) 调制方案的选择

调制方案选择对称调制,此时SVPWM是九段式的。九段式SVPWM在每个PWM调制周期内有9种开关状

态,采用这种方法所遵循的基本原则是开关动作次数最少,每个开关在一个调制周期内最多动作两次。九段式SVPWM总是以零矢量(nnnn)开始,以零矢量(pppp)作为中间矢量,为了实现每次切换只有一个开关动作,就必须人为的改变开关作用顺序。由于波形的对称性具有较低的畸变率(THD),且容易实现。

### 3 SVPWM的DSP实现

相对于三桥臂逆变器的SVPWM,四桥臂逆变器的控制较为复杂,它需要8路带可编程死区控制的PWM脉冲去触发功率管,所以一个事件管理器是不可能实现的。可以同时使用两个事件管理器(EVA和EVB),使用EVA模块中的3个全比较单元(CMPR1、2和3)以及EVB模块的CMPR4,实现对四桥臂逆变器的控制。

利用EVA的3个比较寄存器CMPR1、CMPR2、CMPR3和通用定时器T1,EVB的一个比较寄存器CMPR4和通用定时器T3就可以实现九段式的SVPWM。将每个采样周期内各矢量切换点 $T_{cm1}$ 、 $T_{cm2}$ 、 $T_{cm3}$ 和 $T_{cm4}$ 送入比较寄存器,让计数器从0开始计数,从0开始增加到 $T_s/2$ ,再从 $T_s/2$ 减小到0,同时将计数器的值 $T_x$ 与比较寄存器的值相比较,遵循以下原则:

若 $T_{cm1} < T_x$ ,则 $PWM_1 = 1$ ,否则 $PWM_1 = 0$ ;

若 $T_{cm2} < T_x$ ,则 $PWM_3 = 1$ ,否则 $PWM_3 = 0$ ;

若 $T_{cm3} < T_x$ ,则 $PWM_5 = 1$ ,否则 $PWM_5 = 0$ ;

若 $T_{cm4} < T_x$ ,则 $PWM_7 = 1$ ,否则 $PWM_7 = 0$ ;

而 $PWM_2$ 、 $PWM_4$ 、 $PWM_6$ 、 $PWM_8$ 为 $PWM_1$ 、 $PWM_3$ 、 $PWM_5$ 、 $PWM_7$ 的互补输出,这样就实现了九段式的SVPWM。现以四面体T1为

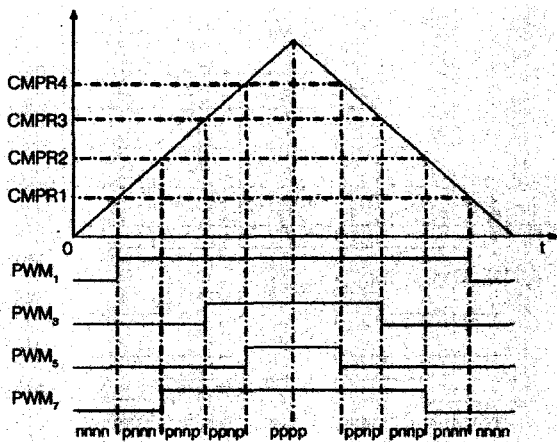


图5 参考电压空间矢量在四面体 T1 时 PWM 模式

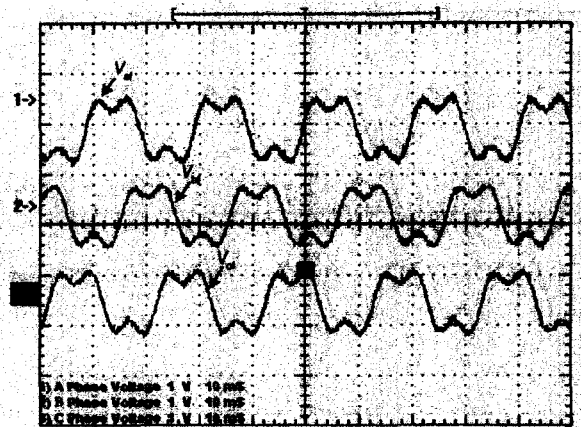


图7 输出三相 SVPWM 调制波形

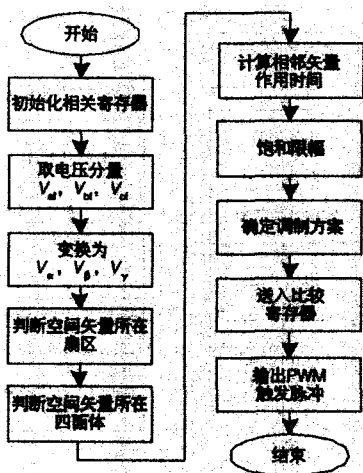


图6 SVPWM 程序框图

例, PWM输出模式如图5所示。

利用TMS320LF2407内部集成的PWM信号发生电路,根据逆变器功率管的触发方式和通断特性,选择产生八路具有可编程死区(设置死区控制寄存器DTBCON)和可变输出极性的PWM信号(在程序初始化时,设置比较方式控制寄存器ACTR),以确保逆变器上、下桥臂的功率管不会同时导通而损坏。设置比较控制寄存器COMCON来使能比较操作和空间矢量PWM模式,并且把CMPR的重装入条件设置成下溢,将通用定时器T1和T3设置成连续增/减计数模式以产生对称的PWM,并启动定时器。图6为SVPWM算法中断子程序框图。

对于事件管理器EVB而言,在产生空间矢量PWM输出时只使用到比较寄存器CMPR4。但CMPR5和CMPR6寄存器也一直在和通用定时器T3进行比较。当发生一次比较匹配时,如相应的比较中断没有被屏蔽,则相应的比较标志位将置位并发出中断请求信号。所以,没有用于SVPWM输出的CMPR5和CMPR6寄存器仍可应用于其他定时事件的发生。

#### 4 实验结果

给定频率为50Hz三相对称电压,并在该三相电压各相上叠加一定幅值的三次谐波源。将九段式SVPWM程序加载到TMS320LF2407 DSP芯片中,运行后PWM输出波经RC低通滤波后在示波器中得到三相电压 $V_{uf}$ 、 $V_{vf}$ 、 $V_{wf}$ 调制波形,如图7所示。由图可知,实验结果与给定电压波形一致,从而验证了四桥臂逆变器SVPWM算法的正确性。

#### 5 结束语

本文研究的四桥臂逆变器SVPWM算法在基于TMS320LF2407 DSP实验平台上得到了验证,并取得了良好的控制效果。利用DSP可以方便的实现复杂的SVPWM算法,是目前逆变器控制的理想选择。

#### 作者简介

毛苏闽(1984-) 男 中国矿业大学硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

耿乙文(1977-) 男 中国矿业大学助教,主要从事电力电子与电力传动方面的教学与科研工作。

#### 参考文献

- [1] Zhou Juan, Wu Xiaojie, Geng Yiwen. Simulation research on a SVPWM control algorithm for a four-leg active power filter. Journal of China University of Mining & Technology, 2007,17(4)
- [2] Richard Zhang, V.Himamshu Prasad, Dushan Boroyevich. Three-Dimensional space vector modulation for four-leg voltage-source converters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002 (3) 17

(上接第76页)

1750高炉电气自动化设备维护,确保正常生产,负责创新创效技改项目立项、实施,来达到节能降耗效果。

#### 参考文献

- [1] 曾毅等. 调速控制系统的设计与维护. 济南: 山东科学技术出版社, 2002
- [2] 中国将建钢铁企业能源管控中心. 兰格钢铁网, 2008