

# 基于 DSP 和 FPGA 的三电平逆变器快速控制方法

贾辰东, Boris L. Corral Martinez, 胡长生, 徐德鸿  
(浙江大学 电力电子与电力传动研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 在传统的三电平电压型逆变器空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 控制算法基础上, 结合“DSP + FPGA”, 实现了一种快速的空间矢量调制算法, 详细阐述了基于 FPGA 和 DSP 的硬件平台实现方法, 实现了资源的最大化利用, 提高了逆变器控制的快速性, 为并网实验控制提供了更多资源。最后, 通过仿真和实验结果对比验证了这一调制算法的可行性。

**关键词:** 逆变器; 三电平; 空间矢量脉宽调制; 数字信号处理器; 现场可编程门阵列

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2008)10-0018-03

## Fast control method in three-level inverter based on DSP and FPGA

JIA Chen-dong, Boris L. Corral Martinez, HU Chang-sheng, XV De-hong

(Institute of Power Electronics and Electric Drive, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Based on the traditional space-vector pulse width modulation (SVPWM) algorithm for three-level inverter, a fast SVPWM algorithm was realized by using a “DSP + FPGA” combination. With the control method, the new method was carried out based on FPGA and DSP. The maximum utilization of the resources was realized, the rapidity of the inverter control was improved, the more resources were provided for the grid connected experiment. Finally, simulation and experimental results were compared. It shows high degree of concordance.

**Key words:** inverter; three-level; space-vector pulse width modulation (SVPWM); digital signal processing (DSP); field-programmable gate array (FPGA)

## 0 前 言

目前, 随着电力电子技术的发展, 高压大容量电力电子变换技术应用越来越广泛, 有进一步延伸为我国新的生产力和经济增长点的趋势, 其发展前景与计算机信息产业等行业并驾齐驱<sup>[1]</sup>。为了满足高压大功率的要求, 在变换器中常用的有器件串并联, 但器件的串并联会带来开关器件的均压、均流等一系列问题。20 世纪 80 年代以来, 多电平变换器拓扑的提出, 无疑是一种解决这些问题的好方法。它是一种通过改进变换器本身拓扑结构来实现高压大功率输出的新型变换器, 它无需升降压变换器和均压电路; 同时, 由于输出电压电平数的增加, 使得输出波形更接近调制波, 降低了输出电压的畸变, 减少了输出电压谐波。

本研究以二极管箝位型三电平逆变器拓扑为例, 分析其控制策略, 并采用“DSP + FPGA”结合来实现三电平逆变器的快速控制。

## 1 SVPWM 控制策略

二极管箝位型三电平逆变器的主电路拓扑如图 1 所示。 $S_1$  和  $S_3$ ,  $S_2$  和  $S_4$  的驱动信号完全互补。因此, 每一相有 3 种输出开关状态, 假设输出的三个电平从高到低依次为“2”、“1”和“0”, “2”表示正电平, “1”表示零电平, “0”表示负电平。

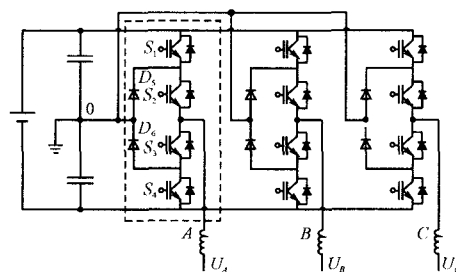


图 1 二极管箝位型三电平逆变器

SVPWM 以其输出电压利用率高<sup>[2-3]</sup>, 中点电压平衡易于控制等优势, 目前得到了广泛应用。由图 1 可

收稿日期: 2008-04-14

作者简介: 贾辰东 (1984-), 男, 山西朔州人, 主要从事电力电子与电力传动方面的研究。E-mail: carty2002@163.com

通信联系人: 徐德鸿, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: xdh@cee.zju.cn

知,由于每相有 3 种输出状态,因此三相三电平逆变器有 27 种开关状态,有效开关状态有 19 种,即 19 种电压矢量。本研究算法的本质是把给定参考矢量由三维参考系转换成  $(g, h)$  参考系<sup>[4-6]</sup>:

$$\mathbf{V}_{\text{ref}(g,h)} = \mathbf{T} \mathbf{V}_{\text{ref}(V_{ab}V_{bc}V_{ca})} \quad (1)$$

$$\mathbf{T} = \frac{1}{3 \cdot V_{dc}} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在转换的  $(g, h)$  参考系中,三电平逆变器的开关状态矢量如图 2 所示。

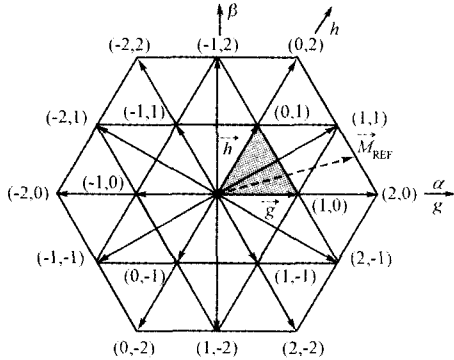


图 2 三电平逆变器的开关矢量

由于在  $(g, h)$  坐标系中的坐标都采用截尾法处理,所有开关状态矢量只有整数坐标。所有开关矢量都用整数坐标表示是非常有利的,因此,可以很容易求得最接近参考矢量的 4 个基本矢量坐标:

$$\mathbf{V}_{ul} = \begin{bmatrix} \lceil V_{\text{REF}g} \rceil \\ \lfloor V_{\text{REF}h} \rfloor \end{bmatrix}, \mathbf{V}_{lu} = \begin{bmatrix} \lfloor V_{\text{REF}g} \rfloor \\ \lceil V_{\text{REF}h} \rceil \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_{uu} = \begin{bmatrix} \lceil V_{\text{REF}g} \rceil \\ \lceil V_{\text{REF}h} \rceil \end{bmatrix}, \mathbf{V}_{ll} = \begin{bmatrix} \lfloor V_{\text{REF}g} \rfloor \\ \lfloor V_{\text{REF}h} \rfloor \end{bmatrix}$$

这些矢量的坐标组合成参考矢量坐标的整数值。矢量下标  $U$  代表其中的变量向上取整,  $L$  代表向下取整。

$\mathbf{V}_{ul}$  和  $\mathbf{V}_{lu}$  始终是合成参考矢量的两个基本矢量。第 3 个矢量由下面计算公式的正负号决定:

$$V_{\text{REF}g} + V_{\text{REF}h} - (V_{ulg} + V_{ulh}) \quad (4)$$

式(4)中若结果为正,则  $\mathbf{V}_3 = \mathbf{V}_{uu}$ ; 否则  $\mathbf{V}_3 = \mathbf{V}_{ll}$ 。一旦 NTVS 被确定下来,由于所有的开关状态矢量都有整数坐标,它们相应的占空比可以很快、很精确的求出。如果  $\mathbf{V}_3 = \mathbf{V}_{ll}$ , 则:

$$\begin{aligned} d_{ul} &= V_{\text{REF}g} - V_{llg} \\ d_{lu} &= V_{\text{REF}h} - V_{llh} \\ d_{ll} &= 1 - d_{ul} - d_{lu} \end{aligned} \quad (5)$$

如果  $\mathbf{V}_3 = \mathbf{V}_{uu}$ , 则:

$$\begin{aligned} d_{ul} &= -(V_{\text{REF}h} - V_{uuh}) \\ d_{lu} &= -(V_{\text{REF}g} - V_{uug}) \\ d_{ll} &= 1 - d_{ul} - d_{lu} \end{aligned} \quad (6)$$

最后一步是把求得的  $(g, h)$  两维坐标转换成开关状态的三维坐标:

$$\begin{bmatrix} k \\ k - g \\ k - g - h \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $k, k - g, k - g - h \in [0, 2]$ 。

像  $(1, 0)$  这种小矢量坐标,可以转换成 2 种开关状态  $(1, 0, 0)$  和  $(2, 1, 1)$ , 这个是小矢量的 2 种情况。可以通过输入电容充放电平衡控制来选择最合适的小矢量,它是由基于每个电容的电压值和负载电流方向来决定的。

## 2 DSP 和 FPGA 功能

本研究采用的“DSP + FPGA”是实现多电平实验平台的一种方案,可以快速方便地实现 PWM 的输出,而且采用逻辑运算更方便。

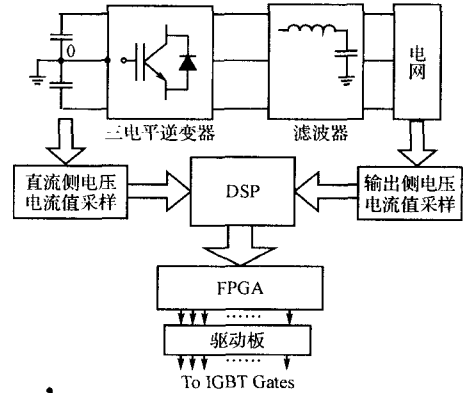


图 3 系统控制框图

三电平逆变器的系统控制框图如图 3 所示。图 3 中, DSP 功能采样电压电流信号后,把它们从静止的三相坐标  $(abc)$  转换成旋转三相坐标  $(dqo)$ , 并与给定参考值比较以得到差值。这个差值信号在 PI 调节器环节中补偿后,由补偿后的三相坐标  $(dqo)$  转换成参考三相坐标  $(abc)$ , 并合成参考矢量。再由空间矢量调制方法计算得到合成参考矢量的开关状态,并计算得到相应的矢量占空比,接着求出每个矢量的时间间隔,最后把相应的合成参考矢量的基本矢量和时间间隔传送到 FPGA。

FPGA 的最主要功能是接受从 DSP 传输过来的数据,并产生驱动开关器件的 PWM 控制信号如图 4 所示。在 FPGA 程序中,总共有 5 对缓冲的寄存器存储数据,存储了 2 个开关周期的数据,包括 2 个时间间隔  $t_1$  和  $t_2$  ( $t_3 = T - t_1 - t_2$ ) 和 3 个开关状态 ( $V_1, V_2$  和  $V_3$ )。图 4 中,2 个时间间隔  $t_1, t_2$  和 3 个开关状态 ( $V_1, V_2$  和  $V_3$ ) 是第 1 个周期从 DSP 传送到 FPGA 的数据,而 2 个时间间隔  $t_4, t_5$  和 3 个开关状态 ( $V_4, V_5$  和  $V_6$ ) 是下一个周期从 DSP 传送到 FPGA 的数据。 $t_1, t_2$  和  $t_3$  通过比较器计算

得到,做为控制信号的时间间隔,从 DSP 接受到的矢量  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$  则可通过 MUX 查询得到相应的 PWM 控制信号,这样不仅快速简洁地实现了 PWM 功能,而且也节省了一部分 DSP 产生 PWM 所占用的资源。

FPGA 的功能如图 4 所示。这些功能在 FPGA 硬件平台上都可以通过简单的编程快速实现。尤其是 FPGA 编程具有很多的优势:工作可靠、编程简单、容易实现、工作频率高、程序运行时间短、占用资源少等。

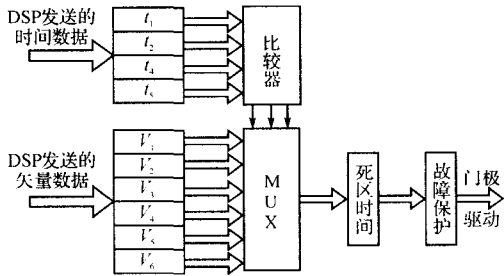


图 4 FPGA 功能

### 3 仿真和实验验证

本研究在三电平变换器实验平台上进行了并网实验,装置的并网实验波形如图 5 所示,分别为并网实验的相电压波形和相电流波形,电压波形  $THD = 2.449\%$ , 电流波形  $THD = 3.439\%$ 。从图 5 中可以看出,三电平实验波形的  $THD$  较小,极大地改善了电网质量。同时采用“DSP + FPGA”结合的方法,提高了资源的利用率,可以节省更多的 DSP 资源来进行并网实验的控制。在本研究三电平逆变器实验系统中,控制系统中 DSP 板采用 Texas Instruments 320LF2407 最小系统板,作为并网实验的核心控制资源,FPGA 板选用 Xilinx Spartan 3E 开发板做为辅助功能,以提高 DSP 的资源利用率。

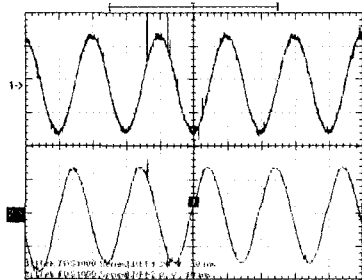


图 5 三电平变换器并网实验波形

同时,本研究通过 Matlab 软件仿真和实验结果对比来验证该控制策略的可行性以及准确性。驱动信号和线电压波形的仿真结果和实验结果如图 6、图 7 所示。

通过对上述图 6、图 7 中所示的驱动信号和线电压波形的仿真和实验结果做比较后,得到的实验结果

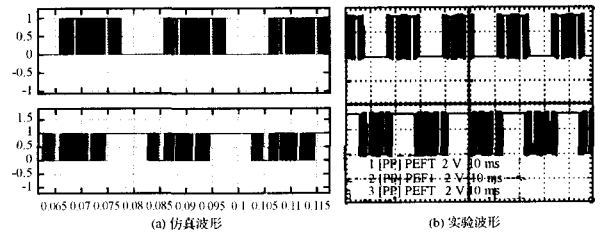


图 6 驱动信号的仿真和实验波形

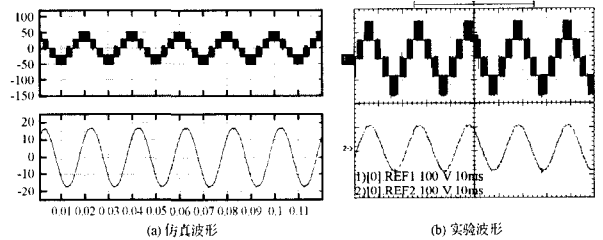


图 7 线电压波形的仿真和实验波形

和软件仿真是一致的,同时验证了该控制方法的正确性。图 6 中,波形采样点是  $a, b$  两相的驱动波形。图 7 中,波形中采样点分别是滤波前的线电压波形和滤波后的线电压波形。

### 4 结束语

本研究所实现的是 DSP 和 FPGA 的三电平变换器并网实验,实验中所采用的空间矢量控制方法简单易行,不但相应地最大化利用了软件资源,而且控制方法快速可靠。研究表明,这种控制方法适合于任意电平的控制,可节省大量资源,并可以实现更多功能。

#### 参考文献 (References):

- [1] 李永东,肖 曦,高 跃. 大容量多电平变换器[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [2] 吴洪洋,何湘宁. 多电平载波 PWM 法与 SVPWM 法之间的本质联系及其应用[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8):51-55.
- [3] CELANOVIC N, BORROYEVICH D. A comprehensive study of neutral-point voltage balancing problems in three-levels neutral point clamped voltage source PWM inverters [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**,2000,15(2):242-249.
- [4] CELANOVIC N, BORROYEVICH D. A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters [J]. **IEEE Trans. Ind. Applicat.**, 2001,37(2):637-641.
- [5] POU J, PINDADO R, BORROYEVICH D, et al. Limits of the neutral-point balance in back-to-back connected three-level converters[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**,2004,19(3):722-731.
- [6] 薛法洪,陈其工,江 明. 基于 DSP 的双闭环 SPWM 逆变器研究[J]. 机电工程,2007,24(12):63-65.

[编辑:张 翔]