

基于 DSP 的 SVPWM 逆变电源的仿真研究

胡 娜^{1,2} 祝龙记¹

(1.安徽理工大学,安徽淮南 232001; 2.安徽机械工业学校,安徽淮南 232001)

摘要 针对传统脉冲宽度调制(SVPWM)的逆变电源,效率低,可靠性差等缺点,采用空间电压脉宽调制(SVPWM)技术改善逆变电源的输出波形质量,并在 Matlab/Simulink 环境下对 SVPWM 控制的逆变器系统进行了仿真,给出了相应的仿真结果。为了实现全数字化控制,提出了用 DSP 生成 SVPWM 的方法。在分析 TMS320LF2407 数字信号处理器芯片特点的基础上,给出系统实现的软硬件结构。该系统电路简单、可靠性高。

关键词: 逆变器; 空间矢量脉宽调制; 仿真; 数字信号处理器

Simulation Research of SVPWM Inverter Power Source Based on DSP

Hu Na^{1,2} Zhu Longji¹

(1.Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001 ;

2.Anhui Mechanical Industry School, Huainan, Anhui 232001)

Abstract Aiming at the disadvantages of SVPWM inverter power source using Traditional pulse width modulation those efficiency is not high and the reliability is bad, the paper introduces the Space Vector PWM (SVPWM) in order to improve the output wave quality of the inverter power supply. The Simulation models of SVPWM inverter are built up by Matlab/Simulink and the simulation results are shown. To accomplish full digital control, SVPWM wave is produced by using DSP. On the base of analyzing the characteristic of TMS320LF2407 DSP chip, the soft-hardware structure of the system design is given. The system circuit is simple, of high reliability.

Key words : inverter ; space vector PWM ; Matlab/Simulink ; DSP

1 引言

目前大部分逆变电源控制电路都采用模拟电路或模数混合电路,系统维护不便且不易升级改造。本文结合三相电压逆变器,采用 SVPWM 技术,提高了直流电压利用率,降低了电流波形畸变,用 Simulink 工具箱对系统进行建模,验证了该算法的可行性。近年来,随着 DSP 等数字化芯片的出现,数字化控制方式将成为逆变器发展不可替代的趋势。

本文采用 DSP 生成 SVPWM 波作为控制信号,以改善逆变电源的输出性能及提高逆变电源的可靠性。

2 SVPWM 原理

电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)是以获得

圆形磁场为目的,把三相对称的正弦波电压供电时交流电机的理想磁通作为基准,通过控制功率管的通断,逼近此理想磁通^[1]。设输出三相交流电各相电压为

$$U_{UN} = U_m \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$U_{VN} = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad (2)$$

$$U_{WN} = U_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \quad (3)$$

U_m 是三相交流电压的幅值, ω 表示角速度。

则三相电压可用合成矢量表示

$$U = \frac{2}{3}(U_{UN} + U_{VN} + U_{WN}) \quad (4)$$

式中, $a = e^{j2\pi/3}$, $a^2 = e^{j4\pi/3}$ 。

图 1 为一种典型的三相电压源逆变器的结构逆

变器中功率开关管的导通原则是：任意时刻有三个开关导通；同一桥臂中，上下两个开关不能同时导通，得到六个非零矢量（ U_0 、 U_{60} 、 U_{120} 、 U_{180} 、 U_{240} 、 U_{300} ）和两个零矢量（ U_{000} 和 U_{111} ）。

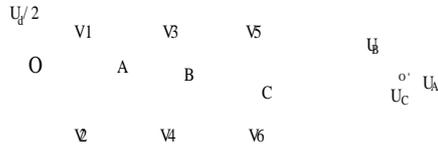


图1 三相电压源逆变器

瞬时矢量 U 是 SVPWM 控制的关键，实际上是通过将三相静止坐标系 ABC 变换到两相静止坐标系（ U_d, U_q ）来求取的^[2]。令 U_d 轴与 A 轴重合，则有

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}$$

假设参考矢量 U_r 在第 i 扇区，其等效开关时间由平均值等效原理（即使矢量 U_0 ， U_{60} 线性组合并恰好等于理想电压矢量在此区间中点的值）得

$$U_0 t_1 + U_{60} t_2 = U_r T_s \quad (5)$$

由图2将其写成标量形式时，得

$$\begin{cases} \frac{2}{3} U_d T_1 + \frac{2}{3} U_d \cos 60^\circ T_2 = T_s U_r \cos 0 \\ \frac{2}{3} \sin 60^\circ T_2 = T_s U_r \sin 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中， $0 \leq \theta \leq 60^\circ$ ； θ 为参考矢量 U_r 与 U_0 之间的夹角； T_s 为开关周期，与载波周期相等； T_1 为矢量 U_0 的作用时间； T_2 为矢量 U_{60} 的作用时间。

并且 $T_1 + T_2 + T_0 = T_s$ ， T_0 表示零矢量作用时间。

2.1 参考电压矢量所在扇区的判断

用 U_{r1} 和 U_{r2} 表示参考电压矢量 U_r 在 U_d 、 U_q 轴上的分量，令矢量 U_{r1} 、 U_{r2} 、 U_{r3} 分别为

$$\begin{cases} U_{r1} = U_r \\ U_{r2} = \frac{3}{2} U_r - \frac{1}{2} U_q \\ U_{r3} = -\frac{3}{2} U_r - \frac{1}{2} U_q \end{cases} \quad (7)$$

定义3个变量 a 、 b 、 c 。如果 $U_{r1} > 0$ ，则 $a=1$ ，否则 $a=0$ ；如果 $U_{r2} > 0$ ，则 $b=1$ ，否则 $b=0$ ；如果 $U_{r3} > 0$ ，则 $c=1$ ，否则 $c=0$ 。设 $N=4c+2b+a$ ，则 N 与扇区数 sector 的对应关系如表1所示。

表1 N 与扇区数 sector 的对应关系

N	1	2	3	4	5	6
sector	1	2	3	4	5	6

2.2 相邻两矢量作用时间的确定

用 T_1 、 T_2 表示相邻两矢量的作用时间，以第一扇区为例，由式（6）得

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T_s}{U_d} \left(\frac{3}{2} U_r - \frac{3}{2} U_q \right) \\ T_2 = \frac{T_s}{U_d} 3 U_q \end{cases} \quad (8)$$

同理，可以得到其他扇区矢量的作用时间。如果定义

$$\begin{cases} X = \frac{T_s}{U_d} (3U) \\ Y = \frac{T_s}{U_d} \left(\frac{3}{2} U + \frac{3}{2} U_q \right) \\ Z = \frac{T_s}{U_d} \left(-\frac{3}{2} U + \frac{3}{2} U_q \right) \end{cases}$$

则它们的对应关系如表2所示。

表2 扇区编号与作用时间的关系

T_1	-Z	Z	X	-X	-Y	Y
T_2	X	Y	-Y	Z	-Z	-X

如果当 $T_1 + T_2 > T_s$ ，必须进行饱和判断，则

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T_1 T_s}{(T_1 + T_2)} \\ T_2 = \frac{T_2 T_s}{(T_1 + T_2)} \end{cases}$$

2.3 确定空间电压矢量切换点 T_{Aon} 、 T_{Bon} 、 T_{Con}

为了限制开关频率，减少开关损耗，必须合理选择零矢量 000 和零矢量 111 ，使逆变器开关状态每次只变化一次^[3]。假设零矢量 000 和零矢量 111 在一个开关周期中作用时间相同，生成的是对称 PWM 波形，把每个基本空间电压矢量作用时间一分为二，逆变器开关状态编码序列为 $000, 100, 110, 111, 110, 100, 000$ 。先定义

$$\begin{cases} T_a = (T_s - T_1 - T_2) / 4 \\ T_b = T_a + T_1 / 2 \\ T_c = T_b + T_2 / 2 \end{cases}$$

T_a 分给占空比最大的相， T_c 分给占空比最小的相，对不同扇区，空间矢量切换点 T_{Aon} 、 T_{Bon} 、 T_{Con} 依据表3进行取值。再用载波和 T_{Aon} 、 T_{Bon} 、 T_{Con} 比较就可以得到 SVPWM 的输出时序。

表3 切换点赋值表

扇区	T_a	T_b	T_c	T_c	T_b	T_a
T_{Aon}	T_a	T_b	T_c	T_c	T_b	T_a
T_{Bon}	T_b	T_a	T_c	T_c	T_b	T_a
T_{Con}	T_c	T_c	T_b	T_a	T_a	T_b

3 基于 Matlab 的 SVPWM 仿真实现

基于以上的理论分析，利用 MATLAB 中的 Simulink 对 SVPWM 控制的逆变器整个系统进行了建模仿真。

取调制周期 $T_s=0.0006s$ ，参考三相交流电压输入交流电压幅值为 380V，50Hz 的三相交流电压，直流侧输入为 310V 直流电压。以 A 相为例，仿真结果见图 2~3。

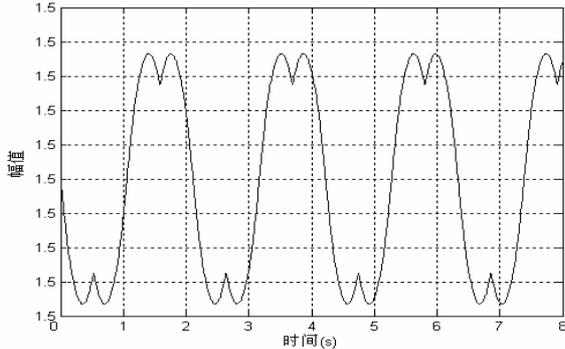


图 2 A 相切换点波形

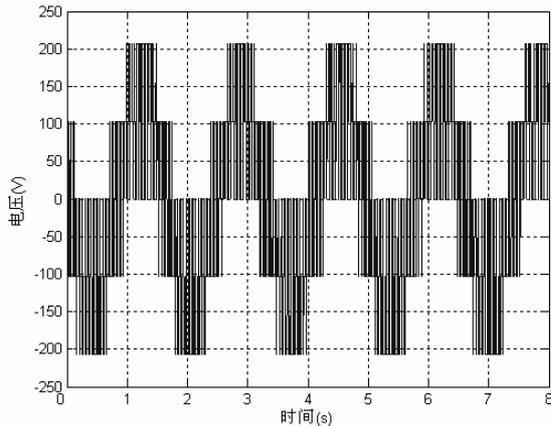


图 3 相电压波形

从图 2 看出由 SVPWM 算法得到的调制波呈马鞍形，这样有利于提高直流电压利用率，而且有效抑制谐波。由图 3 看出，SVPWM 控制方式能够更好地实现对逆变器的控制，得到的相电压为 6 拍阶梯波。

4 系统软硬件设计

4.1 硬件结构

该系统为三相逆变电路，主电路是典型的 AC—DC—AC 逆变电路，AC 交流信号经整流电路、滤波电路、逆变电路输出，此外还有控制电路，驱动电路以及辅助电路。

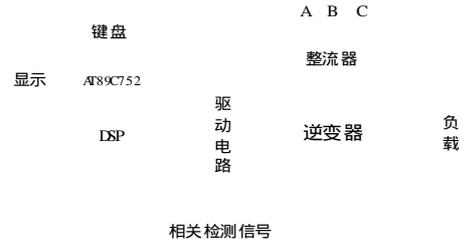


图 4 逆变器的硬件结构图

逆变电源的核心是 DSP 芯片，也是实现数字化控制的关键。TI 公司的 TMS320LF2407DSP 可以实时产生 SVPWM 控制信号。以第一扇区为例，设置相应寄存器如下：

(1) 比较寄存器 COMCON[12]为 0，COMCON[15]为 1，COMCON[11-10]为 00，COMCON[2-0]为 111。

(2) 定时器控制寄存器 T1CON[12-11]为 01，设为连续增/减模式。

(3) 将 $0.25T_0$ 写入 COMPR1， $0.25 T_0+0.5 T_1$ 写入 COMPR2， $0.25 T_0+0.5 T_1+0.5 T_2$ 写入 COMPR2。

根据当前矢量所在扇区，当定时器的计数器值与 COMPR_x 相匹配时，就输出如图 5 的 PWM 波形。

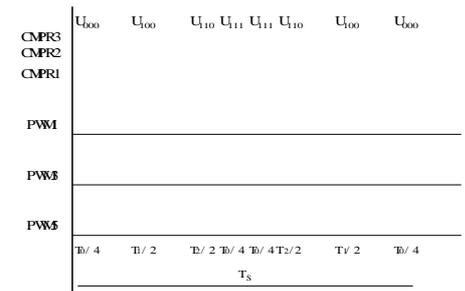


图 5 七段式对称 PWM 波形

4.2 软件设计

TMS320LF2407 有两种软件编程语言，汇编语言和 C/C++ 语言，本文采用 DSP 的汇编语言进行程序设计。程序编写包括主程序^[4]，主要完成系统级工作：对 TMS320LF2407 进行初始化、配置片上外围资源、计算出调制频率和产生中断；子程序就是产生 SVPWM 波形的中断程序。程序流程图如图 6~7。

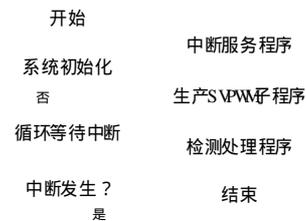


图 6 主程序

(下转第 39 页)

表 1 负载变化时实验数据

速度/(r/min)	1506	1500	1500	1500	1495
电枢电流/A	1.0	7.0	10.5	12.5	14.0

4 结论

从上面的实验曲线和数据可以看出, 由该方案组建的自动控制系统能满足一定的静态性能和动态性能, 说明利用平均开关模型方法建立的数学模型具有合理性。为工程技术人员设计和调试提供了一定的理论指导。

参考文献

- [1] 张卫平. 开关变换器的建模与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006

(上接第 36 页)

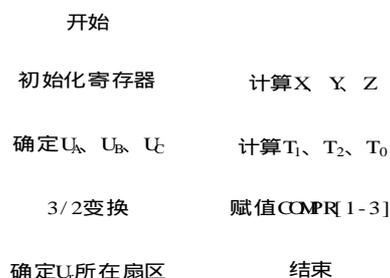


图 7 SVPWM 生产子程序

5 结论

利用空间电压矢量脉宽调制方法可以有效抑制电流谐波, 提高电压利用率。采用 TMS320LF2407DSP 可以方便实现对逆变电源的数字化控制, 电路简单, 系统可靠性高。

News 新闻与动态

“核电汽轮机焊接转子的开发”重点项目通过可行性论证

近日, “十一五”国家科技支撑计划“核电汽轮机焊接转子的开发”重点项目可行性论证会在四川顺利召开。

该项目开展转子结构及材料的焊接性能、焊接工艺、焊接接头的力学性能、焊后热处理及无损检验等技术研究, 攻克焊接关键技术, 为核电焊接转子制造国产化及产业化奠定基础, 形成核电转子焊接技术规范或行业标准

- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] 吴麒. 自动控制原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

作者简介

周文卫 (1966-), 陕西汉中人, 工程师, 主要从事电气设备设计、运行、维护、技术管理工作。

参考文献

- [1] 刘凤君. 现代逆变技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.9.
- [2] 陈伯时, 陈敏逊. 交流调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.4.
- [3] 李翠萍, 王新生, 张华强. 基于 Matlab 的空间电压矢量 PWM 仿真研究[J]. 机床与液压, 2007, 35(7): 219-221.
- [4] 王晶晶, 徐国卿, 王麾. 基于 DSP 的两种 SVPWM 技术实现方案研究[J]. 电工技术杂志, 2003(1): 39-42.

作者简介

胡娜 (1981-), 女, 安徽寿县人, 大学本科毕业, 目前为安徽理工大学在读研究生, 主要从事电力电子与电力传动的研究。