

基于 TMS320F28335 DSP 的三电平逆变器

周雪松¹, 何杰¹, 张春朋², 马幼捷¹

(1.天津理工大学, 天津 300191; 2.清华大学柔性输配电研究所, 北京 100084)

摘要:研制了一台 1 kV/400 kVA 的二极管箝位三电平逆变器实验样机, 分析了其工作机理和调制算法, 在此基础上对基于三角载波层叠式调制算法进行了改进, 利用 Matlab/Simulink 仿真软件实现了该算法的仿真验证。基于先进的 TMS320F28335 浮点型 DSP 设计了改进的三角载波层叠式不规则对称采样法控制程序, 并且在新研制的 200 kVA 三电平逆变器上完成了动模实验。实验结果表明, 该算法非常适用于新型 DSP 数字化控制软件的实现, 控制性能稳定, 能获得带死区功能的控制脉冲, 输出电压和电流谐波含量小。

关键词:逆变器; 采样 / 二极管箝位; 三电平; 载波层叠式

中图分类号: TM761

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2009)04-0021-03

Three-level Inverter based on TMS320F28335 DSP

ZHOU Xue-song¹, HE Jie¹, ZHANG Chun-peng², MA You-jie¹

(1.Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China;

2.Tsinghua University Institute of Flexible Transmission and Distribution System, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper analyzes the mechanism and the modulation algorithms of the 1 kV/400 kVA diode clamped three-level inverter. An improved triangular carrier stacked modulation algorithm is validated by the simulation software Matlab/Simulink and designed by the advanced TMS320F28335 floating-point DSP based on the asymmetry rule sampling algorithm. The 200 kVA three-level inverter is developed to complete the dynamic simulation experiments. Experimental results show the algorithm is very suitable for the digital software design by the new DSP controller, and the stable control pulses with dead zone function can be obtained. The output voltage and current have the low THD.

Keywords: inverter; sampling / diode-clamped; three-level; triangular carrier stacked modulation

Foundation Project: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50877053)

1 引言

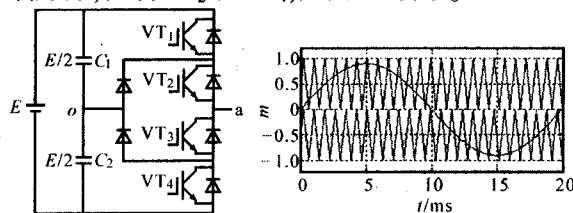
二极管中点箝位三电平(NPC)逆变器是一种开发最早、目前较为成熟的多电平逆变器拓扑, 它已广泛应用于高压变频调速、柔性输配电系统及高压直流输电系统等场合^[1]。NPC 逆变器的控制方式有多种, 如双极性正弦脉宽调制(SPWM)、三角载波层叠式 SPWM^[2-3]、电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)^[4]、特定谐波消除脉宽调制(SHEPWM)^[5]等。通过这些控制方式, NPC 逆变器可得到单相三电平、线电压五电平的输出电压, 较好地解决了开关管开关频率和开关容量间的矛盾, 因而得到了越来越广泛的关注。

深入分析了基于三角载波层叠式 SPWM 技术的工作原理, 在此基础上提出了一种适用于三电平逆变器的改进型三角载波调制策略。详细介绍了控制算法的原理, 通过 Matlab/Simulink 仿真软件对调制算法进行了仿真验证, 并利用 TMS320F28335 浮点型 DSP 完成了控制软件的编写。在自主设计研制的 1 kV/400 kVA 三电平逆变器上完成了开路 and 带电感负荷下的动模实验, 验证了三电平逆变器结构

的合理性和控制软件的正确性。实验结果表明, 该控制算法降低了输出电压的 du/dt , 提高了装置的等效开关频率, 减少了输出电压和输出电流的谐波含量, EMI 特性更好, 是一种适合工程应用的控制方案。

2 基于载波层叠式三电平逆变器工作原理

三电平逆变器是在两个开关器件串联的基础上加入一对中性点箝位二极管构成的, 其单相电路拓扑如图 1a 所示。通过对 4 个开关主管的控制得到三电平的控制电压输出。载波层叠调制算法采用同相位分布在纵坐标正、负半轴上的两列三角载波与正弦调制波进行调制比较, 正半轴的三角载波与正弦调制波进行调制, 生成互补的两列控制脉冲, 分别控制 VT_1 和 VT_3 ; 负半轴载波与正弦波进行调制, 生成互补的两列控制脉冲, 控制 VT_2 和 VT_4 , 如图 1b 所示。



(a)单相三电平逆变器拓扑结构 (b)载波层叠算法调制原理
图 1 单相三电平逆变器拓扑及载波层叠算法调制原理

二极管中点箝位三电平功率模块的输出相电压 u_{ao} 和线电压 u_{ab} 如图 2 所示。可见, 与传统两电平逆变器相比, 三电平逆变器主管的耐压提高了一倍, 功

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877053)

定稿日期:2008-11-21

作者简介:周雪松(1964-), 男, 江西南昌人, 博士, 研究方向为电力电子技术在电力系统中应用和电力系统非线性控制。

率模块容量也提高了一倍,五电平的电压输出降低了输出电压的 du/dt ,其波形得到了明显改善。

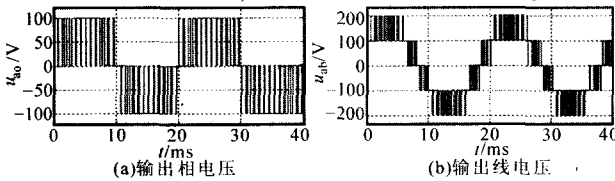


图 2 三电平逆变器的输出相电压和输出线电压

3 调制算法改进

3.1 TMS320F28335 DSP 控制脉冲产生机理

TMS320F28335 浮点型 DSP 中 EPWM 模块的功能更加完善,通过设置寄存器参数可生成 6 对相互独立的互补控制脉冲,每对控制脉冲均能独立编程。通过设置 PWM 模块中计数器初始相位、计数周期、计数方式、死区宽度等来实现计数器的递增/递减计数方式,以此来模拟三角载波的发生,如图 3 所示。通过编写正弦波的发生代码即可生成正弦调制波。由于 TMS320F28335 为浮点型 DSP,可直接参与浮点型数据的运算,无需 Q 格式的转换,只需根据所需要的调制度,将计算所得的正弦值转化为与计数器计数值相同单位的数据即可进行调制比较。

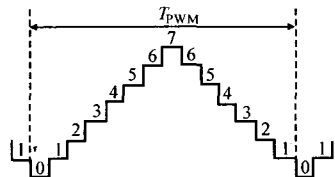


图 3 递增/递减型三角载波产生机理

3.2 调制算法的改进

改进的调制算法就是利用位于正半轴的相位相反的两列三角载波和两列相位相反的正弦波分别进行调制比较,产生两对互补的控制脉冲,其优势在于使用正半轴两列移相 180° 的三角载波进行调制,这样就能充分利用 TMS320F28335 浮点型 DSP 中 EPWM 模块的计数器功能。这种交叉层叠的调制算法与原层叠算法完全等效,非常适合二极管箝位三电平逆变器的控制。调制原理和单相控制脉冲如图 4 所示。

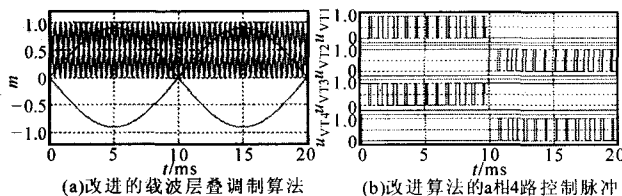


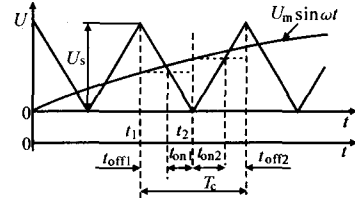
图 4 改进的载波层叠调制算法及 a 相 4 路控制脉冲

4 控制软件设计

4.1 不对称规则采样法

充分利用 DSP 提供的周期中断和下溢中断功能,采用不对称规则采样法,在每个载波周期采样两次,既在三角波顶点的对称轴位置采样,又在三角波底点的对称轴位置采样,大大提高了所形成的阶

梯波与正弦波的逼近程度,采样法生成 SPWM 波如图 5 所示。



$U_m \sin \omega t$ 为正弦调制波; T_c 为三角载波周期

U_s 三角载波幅值; t_1, t_2 为周期中断和下溢中断的采样时刻

t_{on1}, t_{on2} 为两次采样的脉冲宽度; t_{off1}, t_{off2} 为两次采样的脉冲关断时间

图 5 不对称规则采样法原理

t_1, t_2 时刻采样:

$$t_{off1} = \frac{T_c}{2} (1 - M \sin \omega t_1), \quad t_{on1} = \frac{T_c}{2} M \sin \omega t_1 \quad (1)$$

$$t_{on2} = \frac{T_c}{2} M \sin \omega t_2, \quad t_{off2} = \frac{T_c}{2} (1 - M \sin \omega t_2) \quad (2)$$

式中: M 为幅度调制比。

对采样时间离散化,则有:

$$\begin{cases} \omega t_1 = 2\pi f t_1 = 2\pi f \frac{T_c}{2} k = \frac{\pi k}{N} & (k=0, 2, 4 \dots 2N-2) \\ \omega t_2 = 2\pi f t_2 = 2\pi f \frac{T_c}{2} k = \frac{\pi k}{N} & (k=1, 3, 5 \dots 2N-1) \end{cases} \quad (3)$$

生成 SPWM 的脉宽为:

$$\begin{cases} t_{on1} = \frac{T_c}{2} M \sin \frac{\pi k}{N} & (k=0, 2, 4 \dots 2N-2) \\ t_{on2} = \frac{T_c}{2} M \sin \frac{\pi k}{N} & (k=1, 3, 5 \dots 2N-1) \\ t_{on} = t_{on1} + t_{on2} \end{cases} \quad (4)$$

4.2 控制程序设计

整个控制程序由主程序、周期中断子程序和下溢中断子程序、正弦波采样计算程序组成。每个载波周期都产生周期中断和下溢中断,并调用相应的中断子程序。中断子程序根据采样点调用正弦波采样计算程序,计算出该时刻正弦调制波对应的值,根据调制度转化成计数器的计数值,作为比较寄存器的值。三角载波的发生通过 DSP EPWM Module 中计数器的计数来模拟,该模块已经为 SPWM 开辟了周期寄存器、相位设置、三角载波模式选择、中断位置、死区发生以及比较寄存器等一系列寄存器,计数器设置为上升-下降模式(从零计数到周期值,然后降为零)反复计数来获取。

拟采用载波比为 25, 所以一个正弦波周期响应 50 次中断,实时值与计数器值比较产生控制脉冲,再通过死区单元产生两列 IGBT 互补信号 U_{PWB1} , U_{PWB2} , 设置死区时间 $T_d=8 \mu s$ 且删除小于 $16 \mu s$ 的窄脉冲。控制程序流程图如图 6 所示。

TMS320F28335 浮点型 DSP 的最高指令执行速度为 150 MHz,使得指令周期缩短到 6.67 ns。程序设计载波频率 $f_c=1.25 \text{ kHz}$, 调制波为 50 Hz 标准正弦波。DSP 内部将时钟频率分频为 75 MHz,所以 75 个计数周期为 $1 \mu s$,由于载波周期为 $800 \mu s$,所以周

期寄存器的值为 $T_c/2=30\ 000$, 幅度调制比 $M=0.9$, 而两个计数器相位初始值分别设为 0 和 30 000 就实现了两列相位相差 180° 的三角载波。

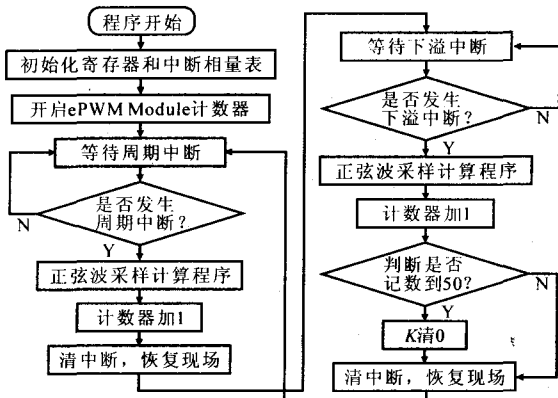


图 6 控制程序流程图

根据不对称规则采样法, 每列载波都在计数器计数值达到 0 和 30 000 时分别产生下溢中断和周期中断, 并分别调用各自的中断子程序实时计算该采样点的比较寄存器值, 在接下来的半个周期内与三角载波实时产生比较调制, 当比较寄存器中的值与计数器中的值匹配时, 通过对程序死区发生单元和输出 PWM 引脚极性的设置, 达到输出互补控制脉冲的目的。TMS320F28335 的浮点型数据可直接参与程序运算, 提高了代码的工作效率。图 7 示出产生的各 IGBT 的驱动脉冲。

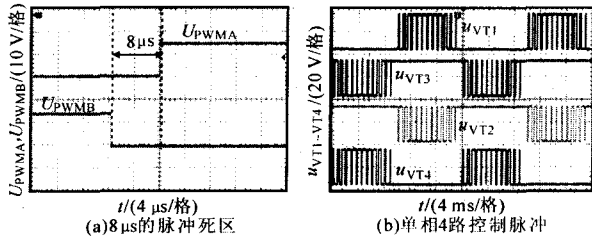


图 7 DSP 产生的驱动脉冲

5 动模实验

自主研制开发了 1 kV/400 kVA 二极管箝位三电平逆变器装置。目前, 三电平功率模块系统已经安装完毕, 为验证功率模块设计的合理性和控制算法的可行性, 设计了图 8 所示的动模实验平台, 分别进行了低压空载实验和负载实验。

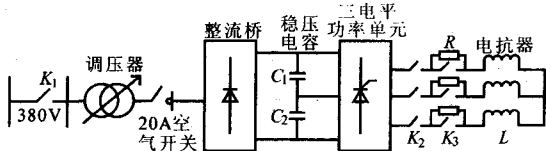


图 8 三电平功率单元实验样机和动模平台

实验平台中的调压器通过空气开关 K_1 接入 380 V 系统, 为三相整流桥提供可调的三相交流电压, 整流器直流侧电压接入三电平逆变器电容 C_1, C_2 两端, 且 $C_1=C_2=2\ 000\ \mu\text{F}$, 两电容中点接入三电平逆变器的 N 相铜排, 逆变器输出电压通过主电路接触

器 K_2 连接感性负载 $L=8.5\ \text{mH}$ 。为防止上电时产生涌流, 在主电路中串入了 $50\ \Omega/100\ \text{W}$ 电阻, 由电阻消耗涌流产生的能量, 然后通过接触器 K_3 将其旁路。系统工作在纯感性负载状态, 负载实验波形如图 9a 所示。空载实验时, 将 K_2 断开, 系统工作在空载模式, 系统的输出相电压和线电压波形如图 9b, c 所示。

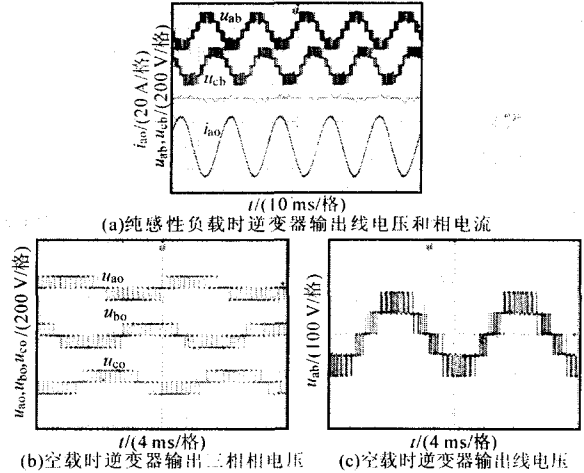


图 9 实验波形

6 结论

研制了 1 kV/400 kVA 二极管箝位三电平逆变器装置; 采用 TMS320F28335 浮点型 DSP 作为系统的控制芯片; 改进了传统的层叠三角载波脉宽调制方法。利用改进的算法做了仿真验证, 并编制了 DSP 的控制程序。在实验装置上进行的空载和负载实验结果表明, 装置的电气性能良好, 绝缘和保护等功能也正常, 改进后的算法使得 DSP 编程非常容易, 且脉冲序列工作稳定, 动模实验取得了与仿真验证同样理想的实验波形。该装置将进一步应用于 SVG 的主电路拓扑, 是一种适用于 FACTS 设备、大功率变频器等装置的功率模块, 对工程应用有较强的指导意义。

参考文献

- [1] Ashish Bendre, Giri Venkataramanan. Radial State Space Vector Modulation—A new Space Vector Technique for Reducing DC Link Capacitor Harmonic Currents in Three Level Converters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2003, 18(3): 684–693.
- [2] Poh Chiang Loh, Donald Grahame Holmes, Thomas A Lipo. Implementation and Control of Distributed PWM Cascaded Multilevel Inverters with Minimal Harmonic Distortion and Common-Mode Voltage[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2005, 20(1): 90–99.
- [3] 赵慧杰, 钱照明, 李 骏, 等. 载波 PWM 方法三电平逆变器中点电位控制研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(3): 28–30.
- [4] 张卫丰, 余岳辉, 刘 璐. 三电平逆变器空间电压矢量控制算法仿真研究[J]. 电力电子技术, 2006, 40(1): 3–5.
- [5] 胡存刚, 王群京, 夏秋实, 等. 三电平逆变器 SHEPWM 优化方法的研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(10): 90–92.