

三电平逆变器简化 SVPWM 算法仿真与实现

刘成友, 周鑫, 张华伟, 徐路钊, 蒋红兵, 秦航

(南京医科大学附属南京医院 医疗设备处, 江苏 南京 210006)

摘要:为了简化三电平逆变器控制算法、提高系统稳定性,提出通过交替使用不同空间电压矢量以实现磁链跟踪控制的二极管箝位型三电平逆变器 SVPWM 控制算法.依据 Matlab/Simulink 的仿真结果,进行以 TMS320F2812 DSP 为控制核心的三电平逆变器整机试验.结果表明,SVPWM 算法简单,易于掌握,二极管箝位型三电平逆变器输出电压经滤波后十分接近正弦波,且系统稳定性较高,能够较好地满足工程需要.

关键词:三电平逆变器;SVPWM 算法;Matlab/Simulink 系统仿真

中图分类号:TM464 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.5/6.024

Simulation and implementation of three level inverter simplified SVPWM algorithm

LIU Cheng-you, ZHOU Xin, ZHANG Hua-wei, XU Lu-zhao, JIANG Hong-bing, QIN Hang
(Department of Equipment, Nanjing Affiliated Hospital, Nanjing Medical University, Nanjing 210006, China)

Abstract: In order to simplify the control algorithm of three level inverter and improve the stability of the system, diode clamped three level inverter SVPWM control algorithm was put forward which based on the change of the space voltage vector to realize magnetic chain tracking control. By Matlab/Simulink simulation output, the machine testing was made with TMS320F2812 DSP as the control core of diode clamped three level inverter. The results showed that SVPWM algorithm was simple and easy to master, the output voltage of diode clamped three level inverter was close to sine wave, the system had better stability to better meet the needs of engineering.

Key words: three level inverter; SVPWM algorithm; Matlab/Simulink system simulation

0 引言

现代科技日新月异,人们在体验现代科技带来便利的同时,也加剧了对它的依赖性.电力能源是近现代科技的推动力,人类对电能的依赖程度尤为突出.逆变器是一种电能转换和优化的电气装置,现已被广泛地应用于家电、汽车、轧钢、油田和医疗

卫生系统中^[1].然而,随着高压大功率电力电子装置的发展,逆变器从最初的两电平向三电平以上的多电平持续发展^[2].三电平逆变器是多电平逆变器中结构最简单、使用最广泛的一种电路,相对于传统的两电平逆变器,三电平逆变器主要优点在于:开关管承受电压小,仅为直流母线电压的一半;逆变器输出端电流谐波含量低;器件具有很强的正向

收稿日期:2015-01-26

基金项目:南京医科大学创新基金项目(NJMU20140035)

作者简介:刘成友(1988—),男,安徽省亳州市人,南京医科大学附属南京医院助理工程师,硕士,主要研究方向为电气智能控制、UPS 供电设计.

阻断电压能力;系统损耗小、转换效率高等^[3].虽然三电平逆变器在技术上已较为成熟,但仍存在不少问题,如控制算法较为复杂、中点电压平衡难以控制、高压环境中系统稳定性较差等^[4].

鉴于此,本文拟通过分析传统三电平逆变器控制方法,研究二极管箝位型三电平逆变器 PWM 控制方法,以及三电平 SVPWM 控制策略,提出 SVPWM 新算法,据此设计三电平逆变器硬件电路;使用交互式仿真软件 Matlab/Simulink 对系统进行仿真,以验证 SVPWM 新算法的正确性和有效性.

1 二极管箝位型三电平逆变器工作原理及算法设计

1.1 工作原理

对于两电平逆变器,每个桥臂只能输出非正即负的电平,而三电平逆变器除了能够输出正负电平外,还可以输出零电平. 本文主要研究二极管箝位型三电平逆变器的输出特性,其工作原理见图 1.

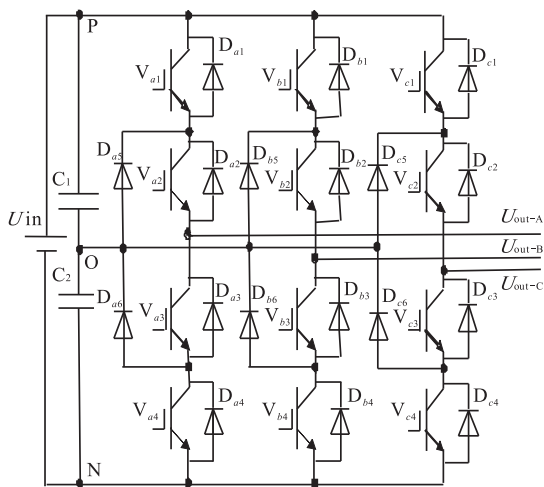


图1 二极管箝位型三电平逆变器原理图

从图1可知,在二极管箝位型三电平逆变器中每一项均含有4个续流二极管、4个开关器件、2个箝位二极管,且每项输出端均含有3种工作状态,即“0”状态(零电平状态)、“1”状态(正电平状态)、“-1”状态(负电平状态).以A相为例,A相输出与相关开关状态关系见表1.值得注意的是,逆变器A相输出可在状态间变化,正电平状态和负电平状态需经零电平状态过渡.

1.2 逆变器等效模型

在理想状态下,逆变器电路每相臂电路可等效为一个与直流侧相同的三掷开关.根据三电平逆变器的定义可以将原理图结构简化(见图2).

表1 三相逆变器A相输出的开关状态

工作状态	V_{a1}	V_{a2}	V_{a3}	V_{a4}
零电平状态	0	1	1	0
正电平状态	1	1	0	0
负电平状态	0	0	1	1

注:“0”表示断开、“1”表示闭合.

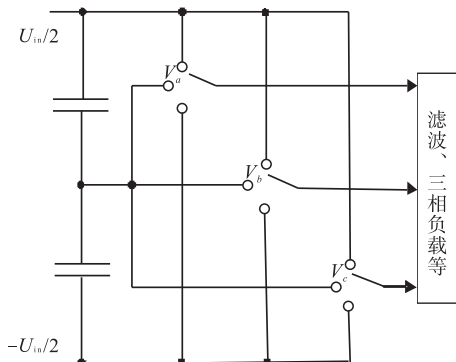


图2 三电平逆变器等效电路结构图

为简化模型,本文定义 V_a, V_b, V_c 分别为三相电输出状态的取值(0, 1, -1),则有

$$\begin{bmatrix} U_{out_AB} \\ U_{out_BC} \\ U_{out_CA} \end{bmatrix} = \frac{U_{in}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于负载段有

$$\begin{cases} U_{out_AB} = U_{AN} - U_{BN} \\ U_{out_BC} = U_{BN} - U_{CN} \\ U_{out_CA} = U_{CN} - U_{AN} \\ U_{AN} + U_{BN} + U_{CN} = 0 \end{cases}$$

整理得

$$\begin{bmatrix} U_{AN} \\ U_{BN} \\ U_{CN} \end{bmatrix} = \frac{U_{in}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

1.3 三电平逆变器 SVPWM 算法设计

SVPWM 是一种交替使用不同空间电压矢量以实现磁链跟踪的控制方法,通过建立在空间电压矢量合成概念上的脉宽调制方法,以实现高质量波形输出.研究表明,三相静止电压可在 (a, b, c) 坐标系与两相静止坐标系 (α, β) 之间相互转换^[5],电压空间矢量变换形式如下:

$$\vec{v} = U_{\alpha} + jU_{\beta} = \frac{2}{3} (U_{out-A} + e^{j\frac{2}{3}\pi} U_{out-B} + e^{-j\frac{2}{3}\pi} U_{out-C}) \quad (2)$$

由公式①知,公式②可化简为

$$\vec{v} = \frac{U_{in}}{6} [(2V_a - V_b - V_c) + j\sqrt{3}(V_b - V_c)] \quad (3)$$

把等效三通开关 (V_a, V_b, V_c) 的 $3 \times 3 \times 3$ 种状态

带入公式③,并在 (α, β) 坐标系描绘各电压空间矢量 $\vec{v}$ 的投影,结果如图 3 所示。

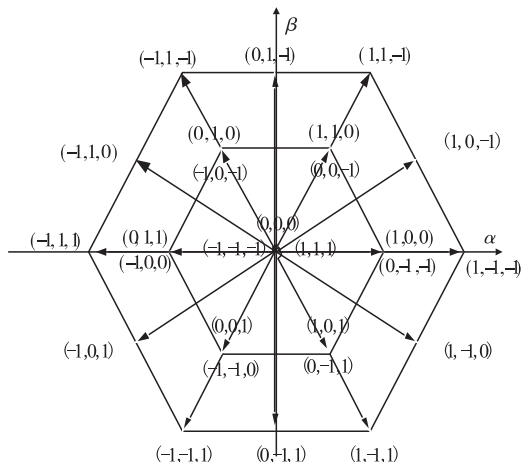


图 3 三相电压空间矢量分布图

由图 3 可知,三电平逆变器有 27 个基本矢量可供选择,但实际上仅有 19 个有效基本矢量,其中有 1 个零矢量位于原点,记作 V_0 ;6 个小矢量位于小六边形的 6 个顶点,记作 $V_1 \sim V_6$;6 个中矢量位于大六边形的 6 边中点,记作 $V_7 \sim V_{12}$;有 6 个大矢量位于大六边形的 6 个顶点,记作 $V_{13} \sim V_{18}$ 。

由经典 SVPWM 控制理论可知,大区域按照矢量角度每 60° 划分为一个区,则对于 I 区(图 3 中 $(0,0,0), (1, -1, -1), (1,1, -1)$ 组成的区域),采用中心对称七段式 SVPWM 波形将基本作用时间分配给矢量状态,扇区判断、计算各个矢量的作用时间,结合 DSA 数字信号处理窗函数或矩形序列函数,以 I 区第一小区为例,则式③可整理为

$$\vec{v} = \frac{U_{in}}{6} \{ 2R_1(t-4) - [1 - R_5(t-4)] - [1 - R_3(t-4)] + j\sqrt{3} \{ [1 - R_5(t-4)] - [1 - R_3(t-4)] \} \} \quad (4)$$

其中, $R_N(t-n)$ 表示向七段中心平移的窗函数,其他区域空间矢量与式④类似,唯一需要改变的为 N 值大小,式④即为 SVPWM 优化控制策略。

2 系统仿真与整机试验

本文完成二极管箝位型三电平逆变器系统参数设计后,利用 Matlab 中的 Simulink 电力电子模块建立三电平逆变器模型,并进行仿真;在此基础上以 TMS320F2812 DSP 为系统控制核心,用 IRFP450 MOS 系列开关器件进行电路设计,用泰克 TDS1000B 数字示波器显示整机试验波形。

2.1 Matlab 系统仿真

仿真参数设置如下:直流母线输入电压 550 V,调制比为 0.888 89,开关频率为 2 000 Hz,载波频率为 50 Hz,负载采用三相对称负载,电阻为 100Ω ,电容为 $47 \mu\text{F}$,电感为 20 mH。对三电平逆变器 SVPWM 控制方法下的 50 Hz 输出特性进行研究,仿真结果如图 4—6 所示。

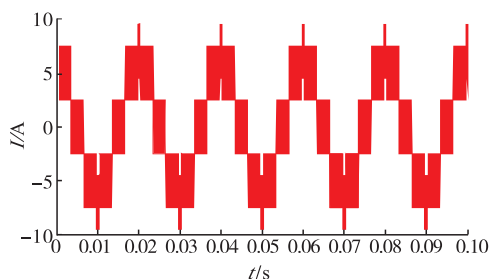


图 4 电阻负载电流仿真波形

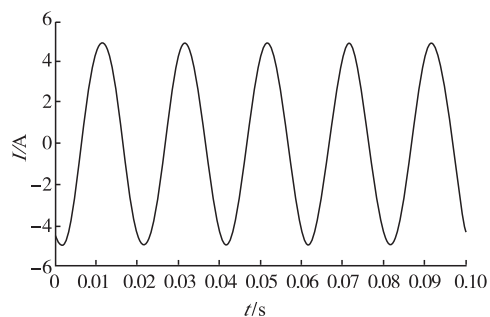


图 5 电感负载电流仿真波形

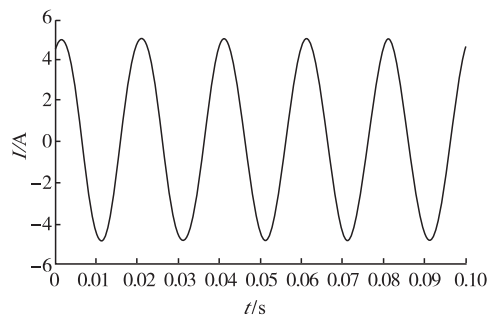


图 6 电阻电感负载电流仿真波形

由图 4—6 可知,二极管箝位型三电平逆变器可以较稳定地输出 50 Hz 电压和负载电流,在频率上能够满足工程需要;负载电压输出波形轮廓接近正弦波或三角波,输出电压呈现阶跃跳变,各组成成分较稳定;纯电阻负载仿真波形和电压仿真波形相似,电容对高频电流滤波作用较小,纯电容负载仿真波形和纯电阻负载仿真波形相似,不再赘述;从图 5—6 可以看出,以纯电感、电阻电感或电容电感作为输出端负载时,电流仿真波形十分接近正弦波

($R^2=0.999$),这是由于电感具有滤波作用,但还是含有较少的高次谐波。

2.2 整机试验

如前所述,在系统仿真的基础上,使用 TMS320F2812 DSP 作为系统控制核心设计二极管箝位型三电平逆变器,同样采用 550 V 直流电压输入,使用阻值为 100 Ω 和 500 Ω 的线圈式滑动变阻器,电容为 47 μF ,电感为 20 mH 用作负载,并使用数字示波器显示试验结果,波形如图 7—10 所示。

图 7—10 为系统整机试验实际测量值,从中可以看出,整机试验与系统仿真结果相似,但整机试验测量曲线较为粗糙,在波峰波谷上有较明显的“毛刺”,其原因可能是外界噪声干扰、高次谐波叠加影响、IRFP450 MOS 系列开关器件反应时间间隔,以及其他电子器件非理想化的干扰所致。随着时

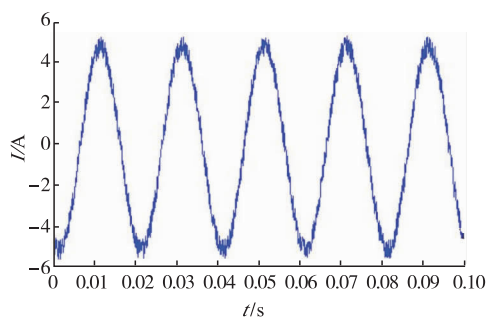


图 7 电感负载输出电流波形

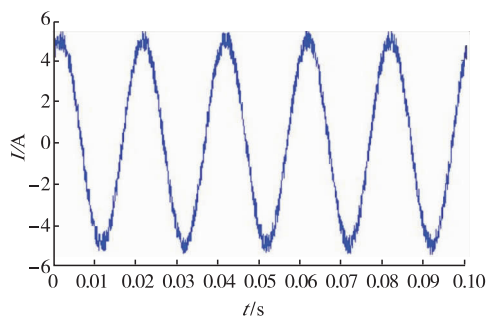


图 8 电阻电感负载输出电流波形

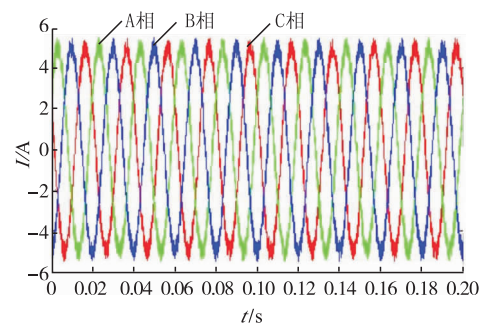


图 9 三相电平输出波形

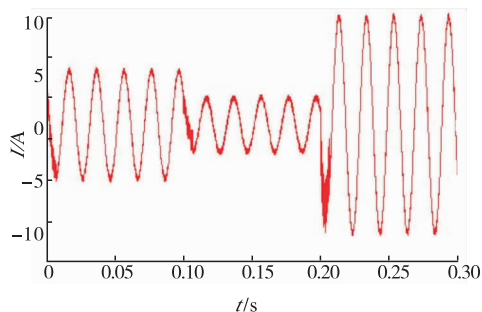


图 10 电阻电感负载输入放大/缩小
输出电流波形

间的延续,图 7 和图 8 显示输出波形趋于平稳。图 9 为经过电阻电感电路滤波后的电流波形,三相电平电压趋于相等,且各波形相位差接近 120° ,相位差为 $(120 \pm 1.23)^\circ$ 。图 10 为改变负载电阻电感大小时的电流图,由图可见:当电阻电感负载增大时,电流幅值减小,相位不变;当电阻电感负载减少时,电流幅值增大,相位不变,符合工程要求;在电阻电感负载大小变化瞬间,输出电流幅值波动较大,之后趋于稳定。以上各图电流/电压频率均为 50 Hz,可满足工程需要。

3 结论

本文通过分析二极管箝位型三电平逆变器的组成及工作原理,提出了易于掌握和实现的简化 SVPWM 算法,并基于该算法使用 Matlab/Simulink 对二极管箝位型三电平逆变器进行了仿真实验。同时根据仿真结果,以 TMS320F2812 DSP 为控制核心,进行了二极管箝位型三电平逆变器整机试验。试验结果显示:三电平逆变器的输出电压经滤波后波形近似于正弦波,能够较好地满足工程需要。

参考文献:

- [1] 马兰珍,王明渝,徐四勤,等. 新型多电平光伏并网逆变器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2012(17):72.
- [2] 何湘宁,吴岩松,杨兵建,等. 大功率三电平逆变器的开关模态转换状态的实时监测[J]. 中国电机工程学报,2012(30):54.
- [3] 李明,易灵芝,彭寒梅,等. 光伏并网逆变器的三环控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2010(19):46.
- [4] 尹成俊,江明. 基于 TMS320LF2407A 的 SVPWM 的研究实现[J]. 自动化仪器与仪表,2009,27(1):12.
- [5] 胡应占,郭素娜. 适用于电网不平衡时的广义积分器锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制,2014(11):148.