

三电平逆变器 SVPWM 控制算法及其仿真研究

张毅,许月霞

(合肥工业大学电气与自动化学院,安徽合肥,230009)

摘要: 空间矢量调制(SVPWM)在多电平逆变器的控制中应用广泛,但是随着电平数增加控制算法渐趋复杂化。文中提出的三电平 SVPWM 控制方法,将三电平电压矢量区变换为由两电平空间矢量区构成,从而通过使用两电平 SVPWM 调制方法简化了控制算法。该方法理论上可应用于更高电平逆变器的控制中。仿真实验验证了方法的可行性。

关键词: 空间电压矢量调制(SVPWM);多电平逆变器;三电平

中图分类号: TN86, TN712

文献标识码: A

Research and Simulation of Three-level SVPWM

ZHANG Yi, XU Yue-xia

(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Space-vector PWM has been used widely in control of multi-level inverters, but the control arithmetic will be more complicated as the number of level increases. This paper presents a kind of SVPWM that can use two-level SVPWM to simplify arithmetic through converting three-level reference voltage and can be used in multi-level SVPWM above three-level. The simulation results prove the feasibility of given control arithmetic.

Key words: space-vector PWM; multi-level inverter; three-level

0 引言

采用由多电平电力电子装置构成的无功补偿设备和电力有源滤波器及其相关技术补偿电网中的无功,治理谐波是无功补偿和电力滤波技术的发展趋势^[1]。在多电平电力电子装置中常采用的 PWM 调制方法为基于载波的 PWM 和空间矢量 PWM(SVPWM)。其中 SVPWM 可以更灵活地组合开关模式,开关损耗小,易于数字实现,电压利用率高,所以受到了重视和研究。但是,目前通常采用的 SVPWM 仍是从空间矢量图中寻找参考电压矢量所在的小三角形而后计算作用时间^[2],这使算法在应用于更高电平的变换器控制时,变得尤为复杂。而且,主电路为二极管箝位电路时,存在着固有的直流侧电容电压不平衡问题,将导致输出电压中包含偶次谐波,因此在 PWM 算法中必须考虑中点电位控制^[3]。

针对上述问题,本文提出了一种简化的 SVPWM 算法,以三电平逆变器为例,对其空间矢量区进行了等效变换,从而实现利用已有的成熟的两电平 SVPWM 技术进行调制。另外,根据电容电压偏差和负载的状态,采用了一定的中点电位控制技术解决了三电平逆变器固有的电容电压偏移问题。

收稿日期: 2007-11-14

作者简介: 张毅(1980-),女,安徽合肥人,合肥工业大学电气与自动化工程学院电气工程系,教师。

许月霞(1958-),女,江苏徐州人,合肥工业大学电气与自动化工程学院专业实验中心,工程师。

1 简化的三电平 SVPWM 算法

图 1 为二极管箝位型三电平逆变器的主电路。各相桥臂具有相同的三种开关状态:2,1,0。因此三电平逆变器共有 27 个开关状态,如图 2 所示。表 1 示出了三电平逆变器 B 相的开关状态及相应的输出终端电压。

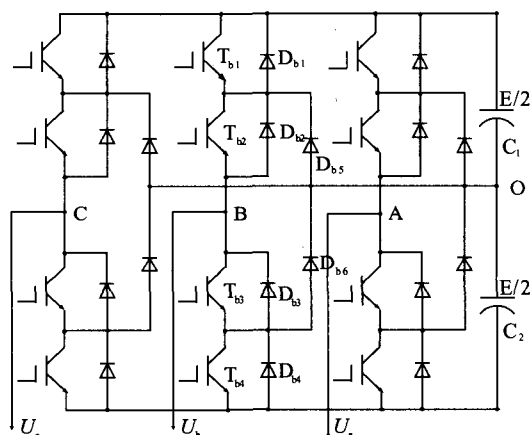


图 1 三电平逆变器主电路

表 1 B 相关关状态和输出终端电压

开关变量	开关状态				终端电压
	T_{b1}	T_{b2}	T_{b3}	T_{b4}	
2	通	通	断	断	$E/2$
1	断	通	通	断	0
0	断	断	通	通	$-E/2$

首先将三电平空间矢量图分为 7 个部分,代表着 7 个等效二电平空间矢量区。图 3 小三角中所示数字

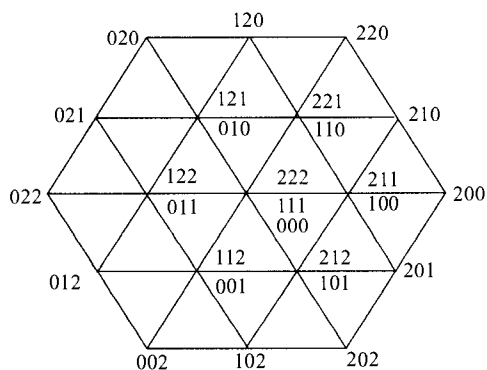


图2 三电平空间矢量图

即为该处所属等效二电平空间矢量区号。7个区分别以零矢量和6个小矢量作为中心点。各区的判断规则如下。

先根据下列条件判断是否属于1区：

$$C_1: U_{ref} - U_{\beta} \geq 0 \quad (1)$$

$$C_2: (U_{ref-\alpha} + U_{ref-\beta}/\sqrt{3}) - U_{\alpha} \geq 0 \quad (2)$$

$$C_3: (U_{ref-\alpha} - U_{ref-\beta}/\sqrt{3}) - U_{\alpha} \geq 0 \quad (3)$$

U_{ref} 、 $U_{ref-\alpha}$ 和 $U_{ref-\beta}$ 分别为参考电压及其在 $\alpha\beta$ 轴上的分量。 U_{α} 和 U_{β} 如图3所示。

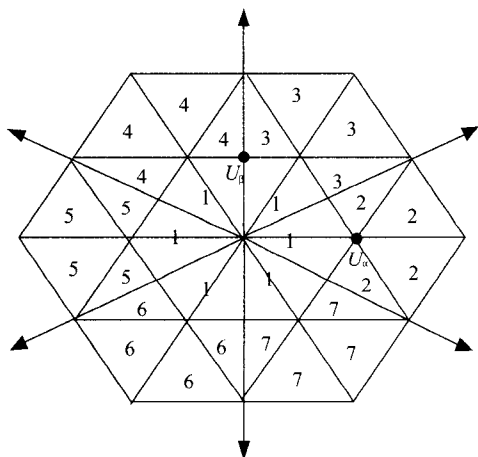


图3 三电平空间矢量区的划分图

当以上三条条件都不满足时，则参考电压落在1号二电平空间矢量区。2-7号二电平区的判断则是根据参考电压的相角来确定，见表2。

表2 2-7号二电平区的判断

N	θ
2	$(0, \pi/6)$ or $(-\pi/6, 0)$
3	$(\pi/6, \pi/2)$
4	$(\pi/2, 5\pi/6)$
5	$(5\pi/6, \pi)$ or $(-\pi, -5\pi/6)$
6	$(-5\pi/6, -\pi/2)$
7	$(-\pi/2, -\pi/6)$

如此即确定了三电平参考电压矢量所属等效二电平矢量区号，再进行参考矢量的变换。

$$U_{ref2} = U_{ref3} - U_{jz}$$

式中， U_{jz} 为各区的基准矢量(见表3)； U_{ref3} 为三电平参

考矢量； U_{ref2} 即为等效二电平参考矢量。

表3 各区基准矢量及其开关变量

N	U_{jza}	$U_{jz\beta}$	开关变量
1	0	0	111
2	E/3	0	100
3	E/6	$E \cdot \sqrt{3}/6$	110
4	-E/6	$E \cdot \sqrt{3}/6$	010
5	-E/3	0	011
6	-E/6	$-E \cdot \sqrt{3}/6$	001
7	E/6	$-E \cdot \sqrt{3}/6$	101

得到等效两电平参考矢量后，即可套用传统两电平空间矢量方法进行计算，确定最终的输出矢量组，和各组成矢量的作用时间。作用时间计算公式如下：

$$T_0 U_0 + T_1 (2E/3) e^{jn(n-1)\pi/3} + T_2 (2E/3) e^{jn\pi/3} = T_s U_{ref2} \quad (4)$$

$$T_0 + T_1 + T_2 = T_s \quad (5)$$

式中， n 代表扇区号， $n=1, 2, \dots, 6$ ； T_s 为采样周期； T_0 代表零矢量作用时间； T_1 和 T_2 为其它两个矢量的作用时间。由式(4)、(5)可得各区矢量计算时间：

$$T_1 = \sqrt{3} |U_{ref2}| T_s \sin(n\pi/3 - \theta) / E \quad (6)$$

$$T_2 = \sqrt{3} |U_{ref2}| T_s \sin(\theta - (n-1)\pi/3) / E \quad (7)$$

确定输出矢量顺序的同时，考虑减少开关器件的开关损耗，避免相邻扇区切换时的突变问题，每个扇区的输出矢量组都需以零矢量(0,0,0)作为开始和结束的矢量。

确定了输出矢量组及其输出顺序后，即可得到该二电平参考矢量的开关模式(S_{2a}, S_{2b}, S_{2c})，而后加上对应的基准矢量的开关变量，即是最终输出的三电平参考矢量的开关模式(S_{3a}, S_{3b}, S_{3c})。三电平矢量空间中1号二电平矢量分区的开关模式见表4。其他各区同理可得。

表4 1号二电平矢量区开关模式

矢量区	开关状态							
1	111	211	221	222	222	221	211	111
2	111	121	221	222	222	221	121	111
3	111	121	122	222	222	122	121	111
4	111	112	122	222	222	122	112	111
5	111	112	212	222	222	212	112	111
6	111	211	212	222	222	212	211	111

2 中点电位控制

二极管箝位型三电平逆变电路存在着的直流侧电容电压不平衡问题^[3](Capacitor Voltage Unbalance, 简称CVU)，若不对其加以控制，会造成输出电压波形的畸变，从而令部分开关器件承受过高的电压应力而破坏^[5]。CVU产生的原因是因为各电压矢量引起的中点电流导致中点电位的振荡。而在各矢量中，一对小矢量中的正、负模式矢量产生的中点电流相反，对输出电压的作用等效，所以可以通过调节正、负小矢量的

作用时间来实现平衡中点电位。

各矢量产生的中点电流可由下式求出：

$$i_0 = i_a S_a (2 - S_a) + i_b S_b (2 - S_b) + i_c S_c (2 - S_c) \quad (8)$$

设上下电容量均为 C ，则各矢量产生的中点电流在上电容 C_1 和下电容 C_2 上引起的电压变化为^[5]：

$$dU_1 = i_0 t / (2C) \quad (9)$$

$$dU_2 = -i_0 t / (2C) \quad (10)$$

上式中的 i_a, i_b, i_c 是输出电流，其方向以流向负荷为正。中点电流以流出电容为正。

若 U_{ref} 落在 1 号二电平矢量区中，计算输出矢量组中两个小矢量产生的中点电流与电容电压差 ΔU ($\Delta U = U_{c1} - U_{c2}$) 之积。如果积为负，则说明该组矢量可以减小上下电容电压偏差，输出之；如果积为正，则说明该组矢量会增加偏差，换用另一组矢量。比如， U_{ref} 落在 1 号等效二电平矢量区中的 1 号扇区中，若原矢量组 (111, 211, 221, 222) 不能减小偏差，则换用矢量组 (000, 100, 110, 111)，即用原开关矢量减去基准矢量 (111) 得到。

若 U_{ref} 落在 2-7 号二电平矢量区中，计算输出矢量组中的第 1 个输出矢量 (即是一对小矢量中的负小矢量，也是各区的基准矢量) 产生的中点电流与 ΔU 之积。如果积为负，则说明该矢量可以减小上下电容电压偏差，加大其作用时间 T_{on} ；反之加大正小矢量作用时间 T_{op} 。

3 改进 SVPWM 方法在五电平逆变器控制中的应用

上述改进的 SVPWM 控制算法在理论上还可以应用在更高电平的逆变器控制中。

以五电平逆变器为例。先将五电平电压空间矢量六边形划分成 7 个小六边形，即 7 个等效三电平电压空间矢量区，如图 4 所示。图中所示数字即为该区所属等效三电平电压空间矢量区号。然后根据三电平 SVPWM 的判断规则——公式 (1)、(2)、(3) 和表 2——确定参考电压矢量所属的等效三电平空间矢量区号，再由公式 $U_{ref3} = U_{ref5} - U_{jz}$ 将参考电压转换成等效三电平参考矢量。而后即可完全按照上述方法进行计算，得到三电平逆变器开关模式，只需再加上相应的基准矢量就可得到所要求的五电平逆变器开关模式。

可见，五电平 SVPWM 算法除少许数据 (如基准矢量) 需要改动外，基本可以照搬改进后的三电平 SVPWM 算法，包括判断规则及计算公式等，从而实现了简单化算法的目的。

4 改进的 SVPWM 控制仿真结果

本文利用 MATLAB 中的电力系统仿真库对文中提出的方法进行了仿真验证。图 6 为仿真系统框图。

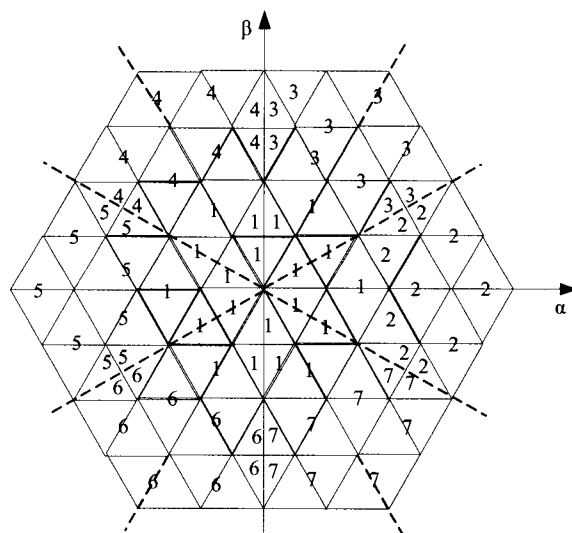


图 4 五电平电压空间矢量划分图

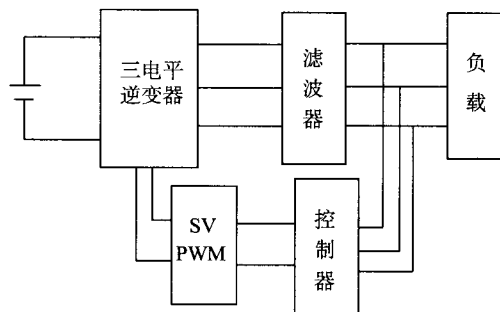


图 5 仿真系统框图

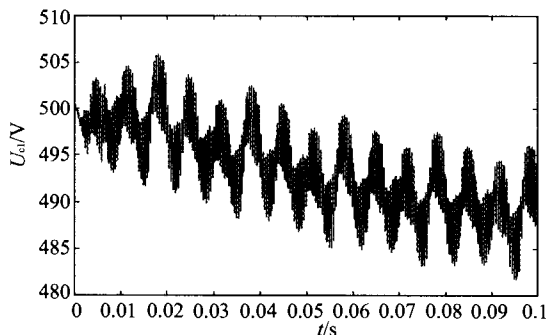


图 6 没有中点电位控制时 C_1 电压变化曲线

仿真系统中采用的电容电压为 $U_c = 1\ 000\ V$ ，所带负载为阻抗负载，三电平逆变器主电路则直接使用了电力系统仿真库中的现有模块。

图 6、图 7 分别为无中点电位控制和有中点电位控制时上部电容电压变化曲线。从图中可以看出，经过中点电位控制后，上部电容电压 C_1 变化量有所减小，而且围绕平衡值上下变化。下部电容电压 C_2 电压变化情况与 C_1 类似。图 8 为中点电位控制后的逆变器线电压、电流波形。

5 结论

本文提出的简化的三电平 SVPWM 算法，经过参考电压转换后，可以直接使用已有二电平 SVPWM 算法来确定输出矢量组及其作用时间，该方法理论上可

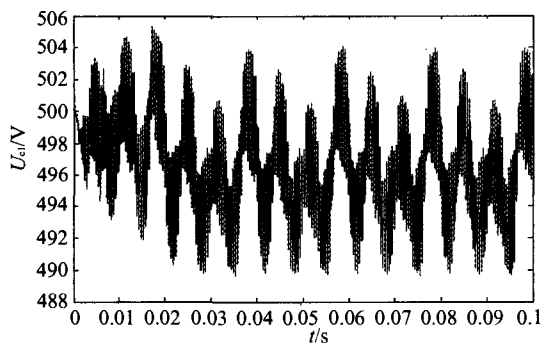


图7 有 midpoint 电位控制时 C_1 电压变化曲线

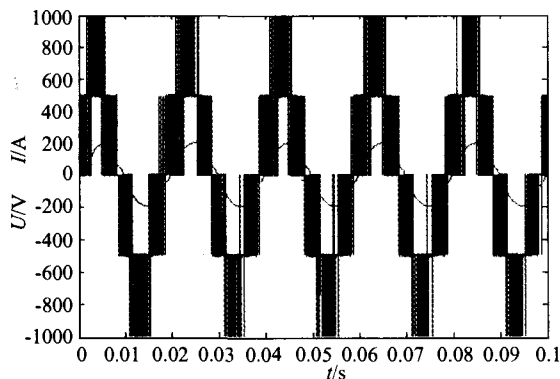


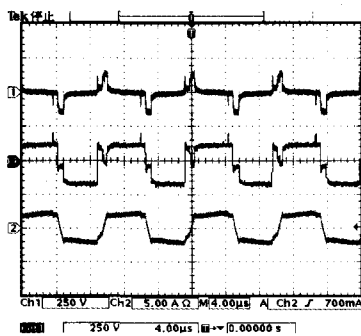
图8 中点电位控制后的逆变器线电压、电流波形

应用于各种电平数目。而相应的中点电位控制方法，则可以实现平衡二极管箝位电路直流侧电容中点电位的目。

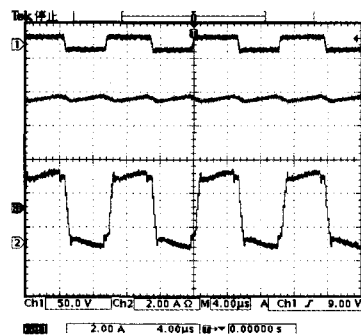
参考文献:

- [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] 宋强,刘文华,姜齐荣,王仲鸿. 基于参考电压分解的新型多电平逆变器空间矢量调制方法[J]. 电力系统自动化,2002,10(25):20-25.
- [3] 刘亚东,黄立培. 三电平电压型逆变器空间矢量调制算法的研究[J]. 电工电能新技术,2002,21(4):15-19.
- [4] 吴洪洋. 多电平变换器及其相关技术研究[D]. 杭州:浙江大学博士学位论文,2001.
- [5] 谭永辉. 基于 DSP 的三电平 SVPWM 逆变器的研究[D]. 长沙:湖南大学硕士学位论文,2004.
- [6] 刘亚东,黄立培. 三电平电压型逆变器空间矢量调制算法的研究[J]. 电工电能新技术,2002,21(4):26-28.

(上接第 5 页)



(c) L 电压 T 电压 T 电流



(d) S 栅源电压 T 电压 T 电流

图4 满载时主要实验波形

4 结 论

分析了半桥串联三电平直流变换器的工作原理，并在一台实验原理样机上进行了验证，结论如下：①主开关管的电压应力均为输入电压的一半；②四个开关管能在宽范围内实现零电压开通；③次级有效占空比丢失小；该变换器控制电路简单，适合于中大功率的高压输入场合。

参考文献:

- [1] 丁道宏. 电力电子技术(修订版)[M]. 北京:航空工业出版社,1999.
- [2] 阮新波. 三电平直流变换器及其软开关技术[M]. 上海:科学出版社,2006.
- [3] Eduardo Deschamps, Ivo Barbi. A Comparison Among Three-Level ZVS-PWM Isolated DC-DC Converters [J]. IEEE IECON'98. 1998, 1024-1029.