

## 四桥臂逆变器的快速三维 SVPWM 算法\*

王晓刚 谢运祥 帅定新 黄少辉

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 提出了四桥臂电压型逆变器的一种新型三维空间电压矢量脉冲宽度调制(SVPWM)快速算法, 该算法仅利用三相参考电压和简单的运算即可直接判断出矢量所处的四面体并计算合成矢量的作用时间, 克服了常规算法中坐标变换导致的计算复杂、耗时长缺点. 分析了所提三维 SVPWM 算法与逆变器时域控制方程解、四桥臂正弦脉冲宽度调制、四桥臂二维 SVPWM 三种调制方法间的关系, 指出这四种方法具有统一的矢量作用时间模型. 文中还分析了采用三维 SVPWM 时逆变器的电压利用率, 给出了基于所提算法和其它 3 种调制方法的四桥臂逆变器仿真结果. 该结果显示了算法的正确性和有效性, 证明了几种调制方法是完全等效的.

**关键词:** 四桥臂逆变器; 三维 SVPWM; 正弦脉宽调制; 快速算法

**中图分类号:** TM464 **文献标识码:** A

四桥臂逆变器具有可直接对中性线电流进行控制、使用灵活、直流侧电容电压控制简单、电流输出能力强的优点. 在非线性和不平衡负载供电及三相四线制电力系统的谐波补偿中得到较为广泛的应用<sup>[1-2]</sup>. 四桥臂逆变器常用的脉冲宽度调制(PWM)方法<sup>[3-6]</sup>有三角波正弦脉冲宽度调制(SPWM)、二维空间电压矢量脉冲宽度调制(SVPWM)加第四桥臂用 SPWM 独立控制、三维 SVPWM 等. 此外, 文献[7]中提出一种基于评价函数的电流 PWM 控制方案, 但在每个周期需要计算 48 个不同的相电流误差, 计算量较大; 文献[8]中将前三桥臂和第四桥臂分开独立控制, 实现了零序电压的解耦控制; 文献[9]中将四桥臂逆变器的控制解耦为单相电压控制; 但文献[8-9]都未探讨直流电压利用率的问题. 而且探讨各种调制方法间关系的文献很少. 实际上, 三维 SVPWM 是二维 SVPWM 的一个超集, 它同样将三相参考电压看作一个整体, 具有电压利用率高、开关次数较少的优点, 是一种值得推广的四桥臂逆变器控制方法, 且和其他调制方法间有着本质联系.

文中提出一种四桥臂逆变器的快速三维 SVPWM

算法, 该方法仍在  $\alpha\beta\gamma$  坐标下分析问题, 物理意义明确, 避免了复杂的坐标变换, 简化了矢量作用时间的计算, 仅利用三相参考电压就可以直接完成参考矢量所处四面体的判断和矢量合成时间的计算, 具有编程简单、计算时间少的优点. 文中分析了时域控制方程的解和所提算法的关系, 指出了两者的等效性; 另外, 对四桥臂逆变器的 SPWM 和二维 SVPWM 作出了分析, 指出它们和三维 SVPWM 在参考电压相同的情况下, 本质上都是用同样的开关序列作用于逆变器, 且改变 SPWM 算法中第四桥臂的调制波, 合理安排二维 SVPWM 算法中第四桥臂的动作时刻, 均可得到与三维 SVPWM 完全相同的效果, 两者具有统一的矢量作用时间模型. 文中还分析了几种调制方法的电压利用率. 对所提的算法和其它 3 种方法进行了仿真试验研究.

### 1 四桥臂逆变器和常规 3D-SVPWM 算法

图 1 所示为四桥臂逆变器的主电路,  $S_1 \sim S_6$

收稿日期: 2008-02-03

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60534040)

作者简介: 王晓刚(1976-), 男, 讲师, 博士生, 主要从事逆变器、有源电力滤波器研究. E-mail: ieeewxg@163.com

构成前三桥臂,  $S_7$  和  $S_8$  构成第四桥臂,  $U_{dc}$  为直流侧电压.

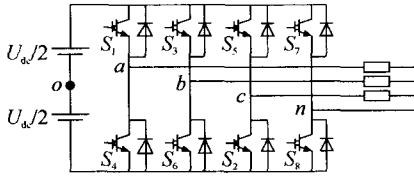


图1 四桥臂逆变器主电路

Fig. 1 Main circuit of four-leg inverter

定义  $S_a, S_b, S_c, S_n \in \{-1, 1\}$  为四个桥臂的开关函数,  $S_j = 1 (j = a, b, c, n)$  时表示上桥臂器件导通, 下桥臂器件关断, 通常也表示成  $S_j$  为 p;  $S_j = -1$  时表示下桥臂器件导通, 上桥臂器件关断, 通常也表示成  $S_j$  为 n. 由图 1 可以列出以下方程:

$$\begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ao} - u_{no} \\ u_{bo} - u_{no} \\ u_{co} - u_{no} \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{2} \begin{bmatrix} S_a - S_n \\ S_b - S_n \\ S_c - S_n \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \\ S_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $u_{an}, u_{bn}, u_{cn}$  为  $a, b, c$  三点相对于  $n$  点的电压, 即逆变器的三相输出电压;  $u_{ao}, u_{bo}, u_{co}, u_{no}$  为  $a, b, c, n$  四点相对于  $o$  点的电压.

开关状态 ( $S_a S_b S_c S_n$ ) 共有 16 种, 对应着 16 个电压矢量, 包括 14 个非零矢量和 2 个零矢量, 它们在  $\alpha\beta\gamma$  三维空间的分布如图 2 所示, 相邻的 3 个电压矢量可构成一个四面体, 一共 24 个.

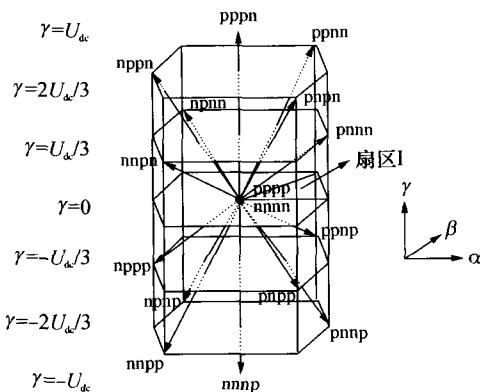


图2  $\alpha\beta\gamma$  空间中的四桥臂逆变器电压矢量

Fig. 2 Voltage vectors of four-leg inverter in  $\alpha\beta\gamma$  space

将三相电压变换至  $\alpha\beta\gamma$  坐标下电压的方程为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_\gamma \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{an}^* \\ u_{bn}^* \\ u_{cn}^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

常规三维 SVPWM 算法可描述为<sup>[4]</sup>: 三相参考电压  $u_{an}^*, u_{bn}^*, u_{cn}^*$  利用式(2)得到  $u_\alpha, u_\beta, u_\gamma$ . 然后判断参考电压矢量  $U_{ref}$  处于哪个四面体中, 进而用矢量合成的方法计算 3 个标准矢量的作用时间. 如当  $U_{ref}$  位于四面体  $A_5$  中时, 作用时间为

$$\begin{cases} t_1 = \frac{\sqrt{6}u_\alpha + \sqrt{3}u_\gamma T_s}{3U_{dc}} \\ t_2 = \frac{\sqrt{6}u_\alpha - 3\sqrt{2}u_\beta - 2\sqrt{3}u_\gamma T_s}{6U_{dc}} \\ t_3 = \frac{\sqrt{2}u_\beta T_s}{U_{dc}} \end{cases} \quad (3)$$

可见每个控制周期  $T_s$  中都要进行坐标变换, 且在作用时间的计算中还要进行多次乘法运算. 所以, 常规算法计算复杂耗时长.

## 2 快速三维 SVPWM 算法

### 2.1 算法推导

以  $U_{ref}$  位于四面体  $A_5$  中为例, 此时包围四面体的 3 个非零矢量为  $u_1(pnnn), u_2(pnpn), u_3(ppnp)$ , 如图 3 所示.

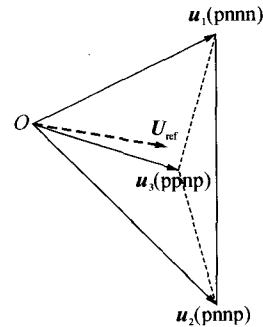


图3 位于四面体  $A_5$  中的  $U_{ref}$

Fig. 3  $U_{ref}$  in tetrahedron  $A_5$

$A_5$  在  $\alpha\beta$  平面的投影位于二维 SVPWM 的扇区 I, 根据二维 SVPWM 算法, 位于扇区 I 的判断为

$$\begin{cases} u_{ab}^* > 0 \\ u_{bc}^* > 0 \\ u_{ca}^* < 0 \end{cases} \quad (4)$$

而三维 SVPWM 中, 在满足式(4)后, 进一步利用三相参考电压的极性判断  $U_{ref}$  所处的四面体, 在  $A_5$  中有

$$\begin{cases} u_{an}^* > 0 \\ u_{bn}^* < 0 \\ u_{cn}^* < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式(4)和(5)即为  $U_{ref}$  位于四面体  $A_5$  中的判据。

下面计算3个矢量的作用时间  $t_1, t_2, t_3$ 。首先计算  $t_1$  和  $t_2$ ，图4为  $u_1$  与  $u_2$  所在的平面， $U_{ref}$  在上面的投影为  $U_{ref}'(OC)$ ，则  $U_{ref}'$  可分解为矢量  $u_1$  和  $u_2$  的合成。从  $C$  点作线段  $CA$  平行于  $u_2$ ，和线段  $CB$  平行于  $u_1$ ，则

$$|OA| = |u_1| t_1 / T_s \tag{6}$$

$$|OB| = |u_2| t_2 / T_s \tag{7}$$

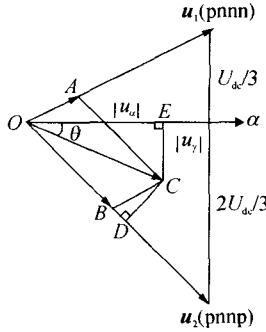


图4 矢量  $u_1$  和  $u_2$  作用时间的计算

Fig.4 Calculation of time duration of vectors  $u_1$  and  $u_2$

图中，线段  $OE$  的长度为  $|u_\alpha|$ ， $CE$  的长度为  $|u_\gamma|$ ，则

$$|OC| = |u_\alpha| / \cos\theta \tag{8}$$

再作线段  $CD$  垂直于  $u_2$ ，有

$$|CD| = |OC| \sin(45^\circ - \theta) = |u_\alpha| \sin(45^\circ - \theta) / \cos\theta \tag{9}$$

注意到  $\angle CBD = 45^\circ + \arctan 0.5$ ，所以

$$|OA| = |BC| = |CD| / \sin(45^\circ + \arctan 0.5) = \frac{\sqrt{5}}{3} u_{an}^* \tag{10}$$

将式(10)和式(6)联立，有

$$|OA| = |u_1| t_1 / T_s = \frac{\sqrt{5}}{3} U_{dc} t_1 / T_s = \frac{\sqrt{5}}{3} u_{an}^* \tag{11}$$

进一步可得：

$$t_1 = u_{an}^* T_s / U_{dc} \tag{12}$$

这样就得到了矢量  $u_1$  的作用时间  $t_1$ 。类似地，通过求线段  $OB$  的长度可得到矢量  $u_2$  的作用时间  $t_2$ ：

$$t_2 = -u_{bn}^* T_s / U_{dc} \tag{13}$$

按照上述方法，将  $U_{ref}$  投影至  $u_1$  和  $u_3$  所在的平面，可计算出矢量  $u_3$  的作用时间：

$$t_3 = u_{bc}^* T_s / U_{dc} \tag{14}$$

在  $T_s$  内剩余的时间由零矢量  $u_0$  和  $u_{15}$  补充：

$$t_0 = t_{15} = (T_s - t_1 - t_2 - t_3) / 2 = T_s / 2 - u_{ac}^* T_s / (2U_{dc}) \tag{15}$$

式(12)~(15)即为参考电压矢量是否位于四面体  $A_5$  的简单判别方法和矢量作用时间的简单计算公式，采用同样的方法可得到参考电压矢量位于其它23个四面体时的计算公式，与四桥臂常规三维SVPWM算法相比，快速算法避免了坐标变换和较复杂的运算，考虑参考电压矢量在  $\alpha\beta$  平面的投影位于各扇区交界的情况，可得出完整的三维SVPWM算法。限于篇幅，仅列出投影至扇区I的4个四面体中的快速算法，如表1所示。其中  $x = u_{bc}^* T_s / U_{dc}$ ， $y = u_{an}^* T_s / U_{dc}$ ， $z = u_{ac}^* T_s / U_{dc}$ ， $s = u_{ab}^* T_s / U_{dc}$ ， $q = u_{cn}^* T_s / U_{dc}$ ， $w = u_{bn}^* T_s / U_{dc}$ 。

### 2.2 与常规算法的比较

常规三维SVPWM算法中，在得到三相参考电压后，每个周期都要进行  $\alpha\beta\gamma$  变换，由式(2)，一次变换包括10次乘法和5次加法。此外，计算作用时间的式(3)包含8次乘法和3次加(减)法。即不包括零矢量的计算，常规算法一个周期总共要进行18次乘法和8次加(减)法。而式(12)~(14)的计算仅仅包含3次乘法，运算量大大减少，处理器可节省出时间完成其它控制算法，减小了计算延时。

## 3 四桥臂逆变器的其他调制方法及其与快速三维SVPWM算法的等效性

### 3.1 基于电压跟踪控制方程解的调制方法

四桥臂逆变器的开关状态共有16种，用  $k_i (i = 0, \dots, 15)$  表示，每一种开关状态对应的控制电压向量  $U(i) = [U_{ao}(i) \ U_{bo}(i) \ U_{co}(i)]^T$  可由式(1)得到。设在数字控制的一个周期  $T_s$  中，开关状态  $k_i$

表1 快速三维SVPWM算法

Table 1 Fast three-dimension SVPWM algorithm

四面体	$\alpha\beta$ 平面投影		判断条件					开关模式			作用时间			
	所处扇区		$u_{ab}^*$	$u_{bc}^*$	$u_{ca}^*$	$u_{an}^*$	$u_{bn}^*$	$u_{cn}^*$	与 $u_1$ 对应	与 $u_2$ 对应	与 $u_3$ 对应	$t_1$	$t_2$	$t_3$
$A_5$	I		$\geq 0$	$\geq 0$	$> 0$	$> 0$	$< 0$	$< 0$	pnnn	pnpn	ppnp	y	-w	x
$A_6$	I		$\geq 0$	$\geq 0$	$> 0$	$> 0$	$> 0$	$< 0$	pnnn	ppnn	ppnp	s	w	-q
$A_{17}$	I		$\geq 0$	$\geq 0$	$> 0$	$< 0$	$< 0$	$< 0$	nnnp	pnpn	ppnp	-y	s	x
$A_{18}$	I		$\geq 0$	$\geq 0$	$> 0$	$> 0$	$> 0$	$> 0$	pnnn	ppnn	pppn	s	x	q

对应的时间为  $t_i$ , 则逆变器的控制方程为

$$[\mathbf{U} \cdot \mathbf{t}] / T_s = [\mathbf{u}_{an}^* \ \mathbf{u}_{bn}^* \ \mathbf{u}_{cn}^*]^T \quad (16)$$

式中:  $\mathbf{U}$  为电压向量,  $\mathbf{U} = [\mathbf{U}(0) \ \mathbf{U}(1) \ \dots \ \mathbf{U}(15)]$ ;  $\mathbf{t}$  为作用时间构成的时间向量,  $\mathbf{t} = [t_0 \ t_1 \ \dots \ t_{15}]$ .

以  $u_{ab}^* \geq 0, u_{bc}^* \geq 0, u_{ca}^* < 0$  且  $u_{an}^* > 0, u_{bn}^* < 0, u_{cn}^* < 0$  的情况为例, 此时满足条件的开关状态量只能从  $k_1$  (pnnn)、 $k_2$  (pnnp)、 $k_3$  (ppnp) 中选择, 才能保证对参考电压的有效跟踪, 从时域方程可得:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \frac{T_s}{U_{dc}} \begin{bmatrix} u_{an}^* \\ u_{bn}^* \\ u_{cn}^* \end{bmatrix} \quad (17)$$

方程的解恰为式(12)~(14), 在  $T_s$  内剩余的时间仍由  $\mathbf{u}_0$  和  $\mathbf{u}_{15}$  补充, 作用时间与式(15)相同.

### 3.2 四桥臂逆变器的 SPWM

四桥臂逆变器的常规 SPWM 方法(文中用 SPWM I 表示)可描述为: 将三相参考电压  $u_{an}^*, u_{bn}^*, u_{cn}^*$  去除零序分量后得到  $u_{ao}^*, u_{bo}^*, u_{co}^*$ , 连同第四桥臂的参考电压  $u_{no}^*$  (三相参考电压的零序分量) 一起与同一个三角载波进行比较产生 8 路开关信号. 这种方法简单易实现, 但可输出三相平衡电压的幅值最大为  $U_{dc}/2$ , 电压利用率不高.

实际上, 第四桥臂的存在增加了控制的灵活性, 考虑将  $u_{no}^*$  选为<sup>[3]</sup>

$$u_{no}^* = \text{mid} \left( -\frac{V_{\max}}{2}, -\frac{V_{\min}}{2}, -\frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \right) \quad (18)$$

式中:  $V_{\min}, V_{\max}$  分别表示取三相参考电压的瞬时最小值和最大值,  $V_{\min} = \min(u_{an}^*, u_{bn}^*, u_{cn}^*)$ ,  $V_{\max} = \max(u_{an}^*, u_{bn}^*, u_{cn}^*)$ ,  $\text{mid}(\cdot)$  表示取中位数. 经分析, 当  $\mathbf{U}_{\text{ref}}$  位于四面体  $A_5$  中时, 根据式(18)有

$$u_{no}^* = -(u_{an}^* + u_{cn}^*)/2 \quad (19)$$

则前三桥臂的调制信号为

$$\begin{cases} u_{ao}^* = u_{an}^* + u_{no}^* = u_{an}^* - (u_{an}^* + u_{cn}^*)/2 \\ u_{bo}^* = u_{bn}^* + u_{no}^* = u_{bn}^* - (u_{an}^* + u_{cn}^*)/2 \\ u_{co}^* = u_{cn}^* + u_{no}^* = u_{cn}^* - (u_{an}^* + u_{cn}^*)/2 \end{cases} \quad (20)$$

式(19)和(20)即为四路与同一三角载波比较的参考电压(文中用 SPWM II 表示), 若采用规则采样法, 则上桥臂器件在一个周期  $T_s$  中的导通时间为

$$\begin{cases} t_a = u_{ao}^* T_s / U_{dc} + T_s / 2 \\ t_b = u_{bo}^* T_s / U_{dc} + T_s / 2 \\ t_c = u_{co}^* T_s / U_{dc} + T_s / 2 \\ t_n = u_{no}^* T_s / U_{dc} + T_s / 2 \end{cases} \quad (21)$$

此时  $t_a > t_n > t_b > t_c$ , 由上式得矢量 pnnn, pnnp, ppnp 的作用时间与式(12)~(14)相同, 零矢量 nnnn, pppp 的作用时间与式(15)相同.

### 3.3 四桥臂逆变器的二维 SVPWM

三相三桥臂逆变器的二维 SVPWM 也可应用于四桥臂逆变器中, 其思路是首先将参考电压矢量投影于  $\alpha\beta$  平面上, 根据二维 SVPWM 的等效算法<sup>[10]</sup> 得出前三桥臂的动作时刻, 然后再确定第四桥臂的动作时刻. 仍假设投影位于扇区 I 中, 矢量 pnn, ppn 以及零矢量的作用时间  $t_x, t_y, t_0$  为

$$\begin{cases} t_x = u_{ab}^* T_s / U_{dc} \\ t_y = u_{bc}^* T_s / U_{dc} \\ t_0 = (T_s - t_x - t_y) / 2 \end{cases} \quad (22)$$

对比上式和式(12)~(15), 可以看出零矢量的作用时间是相同的, 且  $t_y = t_3, t_x = t_1 + t_2$ . 利用此时三相电压的关系  $u_{an}^* > 0, u_{bn}^* < 0, u_{cn}^* < 0$ , 经过简单的分析可以发现若将第四桥臂上管的导通时间  $t_n$  与前三桥臂上管导通时间  $t_a, t_b, t_c$  的关系安排为  $t_a > t_n > t_b > t_c$ , 且

$$t_n = T_s - t_0 - t_1 \quad (23)$$

则矢量 pnnn, pnnp, ppnp 的作用时间与式(12)~(14)完全相同.

### 3.4 几种调制方法的等效性

可以看出, 当参考电压矢量位于四面体  $A_5$  中时, 快速三维 SVPWM 算法就是电压跟踪控制方程的解; 对 SPWM I 算法进行改进后, 得出的 SPWM II 算法与快速算法是等效的; 而二维 SVPWM 算法在第四桥臂的动作时刻满足一定关系时, 与快速三维 SVPWM 算法也是完全等效的. 可以推出, 当参考电压矢量位于其它四面体时, 以上 3 种调制方法均可得出与所提快速算法的矢量作用时间一致的结论, 即 4 种 PWM 方法在本质上是一致的, 对于同样的三相参考电压, 一个控制周期  $T_s$  内, 都等效于 3 个相同非零矢量和 2 个零矢量依次作用, 三维 SVPWM 是二维 SVPWM 的一个超集. 4 种调制方法具有统一

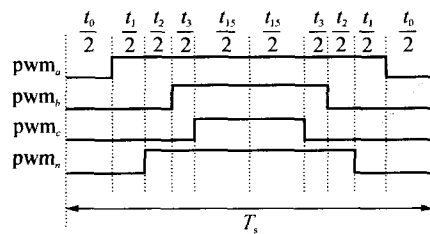


图5 四面体  $A_5$  中的矢量作用序列

Fig. 5 Switching sequence with respect to tetrahedron  $A_5$

的矢量作用时间模型. 电压矢量在四面体  $A_5$  中的作用序列如图 5 所示. 图中  $\text{pwm}_i (i = a, b, c, n)$  为 4 个桥臂上开关管的 PWM 信号.

### 4 电压利用率比较

由于 4 种调制方法完全等效, 它们的直流电压利用率相同. 在三相电压平衡时有

$$t_1 + t_2 + t_3 = \frac{u_{ac}^* T_s}{U_{dc}} \leq T_s \quad (24)$$

设输出电压平衡时的幅值为  $U_m$ , 由上式可得:

$$U_m \leq \frac{1}{\sqrt{3}} U_{dc} \approx 0.5774 U_{dc} \quad (25)$$

而 SPWM I 算法在电压平衡时  $U_m$  不可能超过  $0.5 U_{dc}$ . 即在电压平衡时, 4 种调制方法比 SPWM I 算法高约 15.5%.

在三相电压不平衡时, 采用三维 SVPWM 算法时最大输出相的电压幅值  $U_m$  根据下式计算:

$$t_1 = \frac{u_{an}^* T_s}{U_{dc}} = \frac{U_m \sin(\omega t + \varphi)}{U_{dc}} \leq T_s \quad (26)$$

式中:  $\omega$  为角频率;  $\varphi$  为电压相角.

由式(26)可得出:

$$U_m \leq U_{dc} \quad (27)$$

即相电压峰值最大可达到  $U_{dc}$ , 与 SPWM I 算法相同.

### 5 仿真研究

利用 Matlab 建立了四桥臂逆变器仿真模型, 三维 SVPWM 算法用  $s$  函数实现. 直流侧电压  $U_{dc}$  为 100 V, 开关频率  $f_s$  为 10 kHz. 图 6(a) 所示为三相电压平衡时, 幅值为 57.74 V 时的输出电压波形; 图 6(b) 为在幅值 50 V 的对称三相参考电压上叠加了大小为  $50 \sin \omega t$  的零序电压时的波形,  $a$  相电压峰值为 100 V; 图 7 为上述两种情况下输出电压矢量的轨迹图, 三相平衡时轨迹完全在  $\alpha\beta$  平面上, 不平衡时轨迹为倾斜的椭圆形. 该结果首先证实了文中所提快速算法的正确性和有效性, 此外还验证了对电压利用率的分析结论. 基于电压跟踪控制方程解和二维 SVPWM 的仿真结果与图 6 和 7 完全相同. 图 8 是采用 SPWM II 法的输出电压, 图 8(a)、(b) 分别为三相电压平衡时和在幅值为 50 V 的对称三相参考电压基础上叠加了  $50 \sin \omega t$  的零序电压时的  $a$  相输出电压  $u_{an}$  波形, 其峰值分别为 57.74 V 和 100 V, 在同一坐标中还给出了  $u_{ao}$  和  $u_{no}$  的波形, 验证了理论分析的结论.

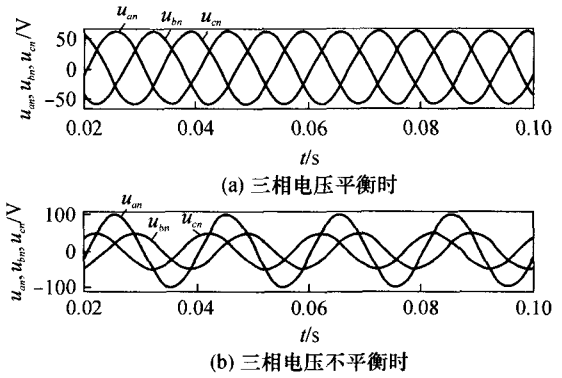


图 6 采用快速三维 SVPWM 算法时逆变器输出的三相电压  
Fig. 6 Three-phase output voltages of the inverter based on fast 3D-SVPWM algorithm

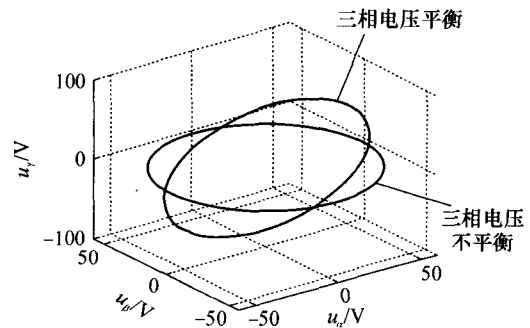


图 7 采用快速三维 SVPWM 算法时输出电压矢量的轨迹  
Fig. 7 Trajectories of the output voltage vector based on fast 3D-SVPWM algorithm

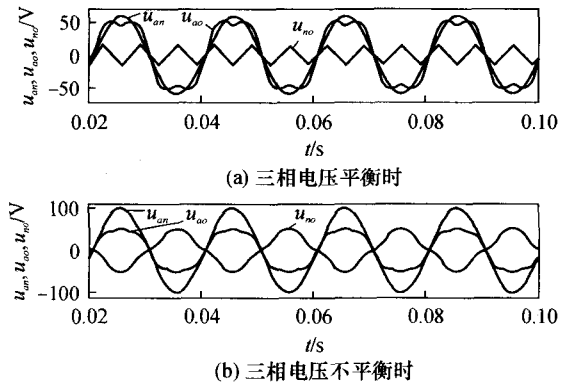


图 8 采用 SPWM II 算法时逆变器 a 相输出电压  
Fig. 8 Phase-a output voltage of the inverter based on SPWM II algorithm

### 6 结语

提出了一种四桥臂逆变器的三维 SVPWM 快速算法, 在  $\alpha\beta\gamma$  坐标系下进行分析, 不仅物理意义明确, 还省略了复杂的坐标变换, 简化了矢量作用时间的计算, 直接利用三相参考电压, 运算速度快, 易于用数字信号处理器 (DSP) 编程实现. 证明了快速算

法与四桥臂逆变器跟踪控制方程的解、改进后的SPWM算法和二维SVPWM算法是等效的,四者的矢量作用时间表达式完全相同。三维SVPWM是二维SVPWM的一个超集。三相输出电压平衡时,三维SVPWM算法的相电压峰值比常规SPWM高15.5%;三相输出电压不平衡时,三维SVPWM和常规SPWM算法相电压峰值能达到的最大值均为 $U_{dc}$ 。文中的结论对四桥臂逆变器PWM方法的研究有一定的理论指导意义。

### 参考文献:

- [1] 戴宁怡,黄民聪,唐净,等. 新型三维空间矢量脉宽调制在三相四线系统中的应用[J]. 电力系统自动化,2003,27(17):45-49.  
Dai Ning-yi, Huang Min-cong, Tang Jing, et al. Performance analysis of three-phase four-wire shunt APF based on the unified mathematic model [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(17):45-49.
- [2] 乐健,姜齐荣,韩英铎. 三相四线并联APF的电流滞环控制策略分析[J]. 电力系统自动化,2006,30(17):70-75.  
Le Jian, Jiang Qi-rong, Han Ying-duo. Analysis of hysteresis current control strategy of three-phase four-wire shunt APF [J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(17):70-75.
- [3] Kim Jang-Hwan, Sul Seung-Ki. A carrier-based PWM method for three-phase four-leg voltage source converters [J]. IEEE Trans on Power Electr,2004,19(1):66-75.
- [4] Ojo Olorunfemi, Kshirsagar Parag M. Concise modulation strategies for four-leg voltage source inverters [J]. IEEE Trans on Power Electr,2004,19(1):46-53.
- [5] Zhang Richard, Himamshu Prasad V, Dushan Boroyevich, et al. Three-dimensional space vector modulation for four-leg voltage-source converters [J]. IEEE Trans on Power Electr,2002,17(3):314-326.
- [6] Shen D, Lehn P W. Fixed-frequency space-vector-modulation control for three-phase four-leg active power filters [J]. IEE Proc-ElectrPower Appl,2002,149(4):268-274.
- [7] Venkataramanan G, Deepakraj M Divan, Thomas M Jahns. Discrete pulse modulation strategies for high-frequency inverter systems [J]. IEEE Trans on Power Electr,1993,8(3):279-287.
- [8] 孙驰,鲁军勇,马伟明. 一种新的三相四桥臂逆变器控制方法[J]. 电工技术学报,2007,22(2):57-63.  
Sun Chi, Lu Jun-yong, Ma Wei-ming. A novel control method for three-phase four-leg inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(2):57-63.
- [9] 陈宏志,刘秀冲. 四桥臂三相逆变器的解耦控制[J]. 中国电机工程学报,2007,27(19):74-79.  
Chen Hong-zhi, Liu Xiu-chong. Decoupling control of three-phase four-legged inverter [J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(19):74-79.
- [10] 周卫平,吴正国,唐劲松,等. SVPWM的等效算法及SVPWM与SPWM的本质联系[J]. 中国电机工程学报,2006,26(2):133-137.  
Zhou Wei-ping, Wu Zheng-guo, Tang Jin-song, et al. A novel algorithm of SVPWM and the study on the essential relationship between SVPWM and SPWM [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(2):133-137.

## Fast Three-Dimension SVPWM Algorithm for Four-Leg Inverter

Wang Xiao-gang Xie Yun-xiang Shuai Ding-xin Huang Shao-hui

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** Proposed in this paper is a novel fast three-dimension space-vector pulse-width modulation (3D-SVPWM) algorithm for controlling the four-leg voltage source inverter. In this algorithm, the tetrahedron and action duration of the vector are directly determined by using three-phase reference voltages with simple calculation, thus remedying the shortcomings of complex calculation and large time cost of the conventional algorithm with coordinate transformation. The relationships between the proposed algorithm and three other modulation methods, including the time-domain control equation solution, the sinusoidal pulse-width modulation and the 2D-SVPWM of four-leg inverter, are analyzed, with an uniform action duration model of vector being also found. Moreover, the voltage utilization ratio of the inverter with 3D-SVPWM is analyzed, and the simulated results of the four-leg inverter with the four above-mentioned methods are compared. It is found that the proposed algorithm is correct and effective, and that the four above-mentioned methods are equivalent.

**Key words:** four-leg inverter; 3D space-vector pulse-width modulation; sinusoidal pulse-width modulation; fast algorithm