

三电平逆变器SVPWM算法的研究及仿真

黄珊珊

广东工业大学 广东广州 510600

摘要: 文章分析了三电平空间矢量算法(SVPWM)的基本原理,采用一种首发矢量全部采用负小矢量的空间矢量调制算法,给出了小三角形区域判断规则、推导了各合成电压矢量的作用时间、合成参考电压矢量的相应输出电压矢量的作用顺序和SVPWM信号的产生方法,探讨了影响三电平逆变器中点电压平衡的主要因素。仿真实验结果证实了本文提出的空间电压矢量调制算法的有效性。

关键词: 逆变器 空间矢量 三电平 SVPWM算法

空间矢量脉宽调制技术(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)以获得圆形磁链轨迹为目的,具有降低转矩脉动,减小波形畸变,提高电压利用率,提高功率因数,降低消耗,易于数字化实现等优点。

而近年来,在高压、大功率变换电路中,一种新型的变换器——箝位二极管式电压型三电平逆变器,由于其相对于传统两电平电压型逆变器表现出明显的优势,引起了越来越多的关注。电压型逆变器输出性能主要取决于调制算法,SVPWM技术以其易于数字实现,电压利用率高等优点,且随着新型器件的出现,得到了广泛应用。为了更好地理解算法的原理,便于控制系统仿真的实现,本文详细介绍了三电平空间矢量SVPWM算法的基本原理,并给出了在Simulink环境下三电平空间矢量SVPWM算法的实现方法,并进行仿真验证。

一、三电平电压空间矢量基本原理

图1为三电平逆变器的主电路图。三电平逆变器每个桥臂有四个开关器件。三电平参考空间电压矢量定义为:

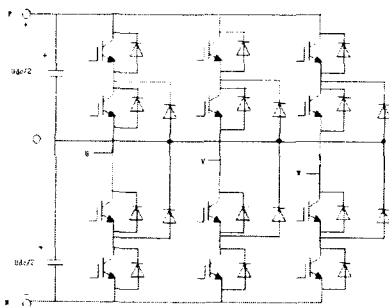


图1 三电平逆变器的主电路图

$$V_{ref} = U_a + \alpha U_b + \alpha^2 U_c \quad (1)$$

其中, $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, U_a, U_b, U_c 为输入参考电压, 仿真中用 $|V_{ref}| = abs(V_{ref})$ 和 $a = angle(V_{ref})$ 可以分别得到幅值和相角。

对于其中一相来说,以电源中点为参考点,可以输出 $+V_{dc}/2, 0$ 和 $-V_{dc}/2$ 三种电平,也即三种状态: P, O, n 。引入开关函数 S_u, S_v, S_w , 则逆变器输出矢量可记为:

$$V_{ref} = U_a + \alpha U_b + \alpha^2 U_c \quad (1)$$

$$V_{ref} = \frac{V_{dc}}{2} (S_u + \alpha S_v + \alpha^2 S_w) \quad (2)$$

$$N = ceil\left(\frac{3a}{\pi}\right) + 3 \quad (3)$$

$$\theta = a + \frac{(4-N)\pi}{3} \quad (4)$$

其中 S_u, S_v, S_w , 可取 $1, 0, -1$ 三种状态(对应 P, O, n)。所以三相三电平逆变器合成电压矢量数为27种。

图2为三电平逆变器空间电压矢量图。

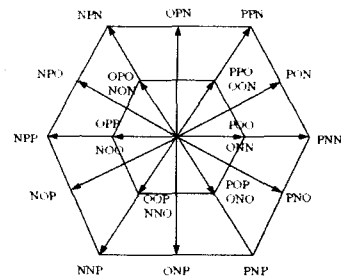


图2 三电平逆变器空间电压矢量图

电压矢量有6个幅值为 V_{dc} 的大矢量,6个幅值为

$\frac{\sqrt{3}V_{dc}}{2}$ 的中矢量,12个幅值为 $\frac{V_{dc}}{2}$ 的小矢量和3个零矢

收稿日期: 2009-02-18

作者简介: 黄珊珊, 工程硕士, 助理工程师。

量。结合空间电压矢量图可得三电平逆变器三相电压合成机理：SVPWM法就是用逆变器输出相电压的平均矢量去逼近某一空间电压矢量 V_{ref} 。以某一角频率在空间旋转，当它旋转到六角空间电压矢量图的某个小区间时，系统选中该区间的基本电压矢量中所需的矢量，并以此矢量所对应的状态去驱动功率开关元件动作。当控制矢量旋转到下一个小区间时，又选中对应区间的相应电压矢量，并以其对应的状态去驱动功率开关元件动作。当控制矢量在空间旋转 360° 后，变频器就能输出一个周期的正弦波电压。

二、三电平电压空间矢量算法

1. 判断参考电压矢量 V_{ref} 所处的扇区和区域

图3为扇区和区域划分图。

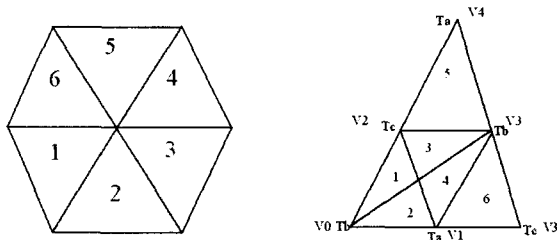


图3 扇区和区域划分图

通过参考电压矢量的角度 α 判断扇区，其范围为

$[-\pi, \pi]$ 。通过 $\frac{3\alpha}{\pi}$ 向上取整得到扇区 N 。

$$N = \text{ceil}\left(\frac{3\alpha}{\pi}\right) + 3 \quad (3)$$

对于区域的判断，因为每个扇区的区域划分一样，可通过下面式子归一到4扇区得到新的相角 θ 的范围是 $\left[0, \frac{\pi}{3}\right]$ 再进行区域 n 的判断，而且对别的扇区每个矢量作用时间均可以由4扇区各个矢量作用时间得到。

$$\theta = \alpha + \frac{(4-N)\pi}{3} \quad (4)$$

由新的相角和幅值得到新的参考矢量：

$$V_{ref} = V_\alpha + V_{j\beta}$$

$$\theta \geq \frac{\pi}{6} \text{ 时, } V_\beta > \frac{V_{dc}}{2}, n=5;$$

$$V_\beta + \sqrt{3}V_\alpha - \frac{\sqrt{3}V_{dc}}{2} < 0, n=1;$$

其他情况下, $n=3$;

$$\theta < \frac{\pi}{6} \text{ 时, } V_\beta + \sqrt{3}V_\alpha - \frac{\sqrt{3}V_{dc}}{2} < 0, n=2;$$

$$V_\beta - \sqrt{3}V_\alpha + \frac{\sqrt{3}V_{dc}}{2} < 0, n=6;$$

其他情况下, $n=4$ 。

2. 计算各合成电压矢量的作用时间

以4扇区1区域为例。作用时间合成原则：

$$T_a \vec{V}_1 + T_b \vec{V}_0 + T_c \vec{V}_2 = \vec{V}_{ref} \quad (5)$$

$$T_a + T_b + T_c = T_s \quad (6)$$

$$\text{其中 } \vec{V}_1 = \frac{V_{dc}}{2} e^{j0}, \vec{V}_2 = \frac{V_{dc}}{2} e^{j\frac{\pi}{3}}, \vec{V}_0 = 0,$$

因此可以得到，

$$\vec{V}_{ref} = V_{ref} (\cos\theta + j\sin\theta).$$

$$T_a = 2KT_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right),$$

$$T_b = T_s - 2KT_s \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right), T_c = 2KT_s \sin\theta.$$

其中, $K = \frac{2V_{ref}}{\sqrt{3}V_{dc}}$, T_s 为采样周期。别的区域矢量计算原则一样。

3. 确定各合成电压矢量的作用顺序

在三电平逆变器中，由于冗余开关状态的存在，使得一个电压矢量对应于两个或者是三个开关状态。因此必须使用一定的算法来减少开关动作次数，从而减少开关损耗。基本原则是，每次开关状态的变化只引起一相电压的变化。

在判断出矢量所在的位置后就可以根据表1得到合成 V_{ref} 的输出电压矢量(选定的4个矢量一次对称发出输出矢量)。以4扇区为例。

表1 第四扇区作用矢量及时间分配表

1区域	OON	OOO	POO	PPO
2区域	ONN	OON	OOO	POO
3区域	OON	PON	POO	PPO
4区域	ONN	OON	PON	POO
5区域	OON	PON	PPN	PPO
6区域	ONN	PNN	PON	POO

从表中可以看到，用于合成 V_{ref} 的首发矢量都是负小矢量，这样从某一小矢量ONN出发并在中间返回其冗余小矢量POO，然后按相反规律再回到起始小矢量ONN，可满足矢量变化时仅有三相逆变器的1个桥臂的一相发生变化，其状态变化服从最小变化原理。这样可以有效地避免扇区切换过程中的矢量突变，减少了开关动作次数，从而减少开关损耗(即每次开关状态的变化，只引起一相电压的变化，并且只有两个互补开关管的触发信号发生变化)。

4. 三相SVPWM信号的产生

根据电压矢量作用时间和表1的矢量作用顺序,给出了如图4所示2区域的输出时序。将周期为T和幅值为T/2三角波与 T_1, T_2, T_3 相比较,即可得到图4的三相SVPWM信号,两者相等时,就转换对应的开关信号。其中, $T_1=kT_a/2, T_2=T_1+T_b/2, T_3=T_2+T_c/2$ 。此时的k为中点电压调整系数。

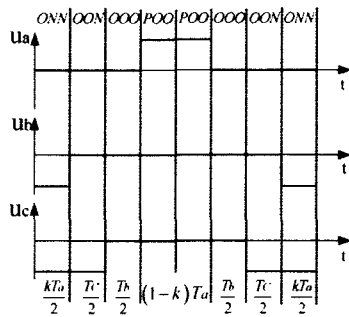


图4 2区域的输出时序

5. 中点电压平衡控制讨论

中点电压平衡问题是影响三电平逆变器在高压、大功率领域应用的重要因素。定义输出中点的电流为正,表2给出了中点电流与电压矢量系。

表2 中点电流与电压矢量状态关系

正小矢量 i_o	正小矢量 i_o	中矢量 i_o
POO -	ONN -	PON i_b
PPO -	OON +	OPN i_a
OPO -	NON +	NPO i_c
OPP -	NOO +	NOP i_b
OOP -	NNO +	ONP i_a
POP -	ONO +	PNO i_c

由表知道,中、小矢量都影响三电平逆变器中点电压平衡,由于正负小矢量产生的中点电流方向相反,且成对出现,因而可以相互抵消,不影响中点电压平衡。而对于中矢量,其中有一相直接接入中点,因为使得中线有电流,这也是电压不平衡的根本原因。首发小矢量采用负小矢量,通过检测该矢量时连接到中点的某相电流方向,可以知道该小矢量对直流电容电压的影响,并根据电压的不平衡方向,通过调整中点电压调整系数来调整正负小矢量相对作用时间,从而达到平衡中点电压的目的。

三、仿真结果

依据三相三电平空间电压矢量算法,在MATLAB环境下建立了模型,部分模块采用程序编程实现,并进行了仿真验证。仿真参数为: $V_{dc}=600V$,输出频率为 $f_o=50Hz$, $R=100\Omega$, $L=1mH$, $C=4\mu F$,采样周期

$T=0.02ms$,中点电压调整系数k设为0.5,图5为输出仿真波形,和输出谐波仿真频谱图。

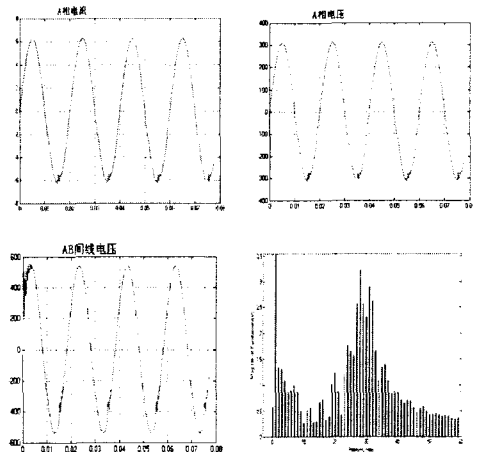


图5 仿真波形和仿真频谱图

参照两电平情况,采用三电平逆变器可大大降低谐波污染。

四、结束语

以第4扇区为例,详细论述了三电平逆变器空间电压矢量调制工作原理和实现方法,提出了一种首发矢量全部采用负小矢量的空间矢量调制算法,使用归一法,把其他5扇区全部划归4扇区计算。探讨了通过检测负载电流方向和直流电容的电压,合理分配正负小矢量对的作用时间,来实现电容电压的平衡的方法。仿真过程中将中点电压调整系数设为0.5。实际中点电压平衡可通过前面探讨的方法对k进行设置,来更好的实现中点电压平衡。这也是下一步工作要做的。

研究结果证实了本文提出的空间矢量调制算法的有效性。

参考文献

- [1] 张德宽.一种实用中点钳位(NPC)逆变器的空间矢量方法[J].电气传动,2003(2):4-7.
- [2] 林磊,邹云平,钟和清,等.二极管箝位型三电平逆变器控制系统研究[J].中国电机工程学报,2005,25(15):33-39.
- [3] 薄保中.三电平逆变器的分析与控制[J].电气传动,2003(2):14-17.
- [4] 刘学超.三电平逆变器中点电压平衡的电压空间矢量控制原理及算法,电源技术应用[J],2003,6(5):235-238.
- [5] 钟彦儒,高永军,曾光,等.采用空间电压矢量PWM方法三电平逆变器研究[J].电力电子技术,2000(1),10-13.