

三电平逆变器的SVPWM方法研究

李晓翔

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为了解决三电平逆变器的控制方法相对比较复杂的问题, 文中给出了采用数字化空间矢量脉宽调制方法来实现三电平逆变器的SVPWM控制, 从而简化控制设计的原理和实现方法。

关键字: SVPWM; 三电平逆变器; 电力电子; 电力传动

0 引言

三电平逆变器相对于传统的两电平而言, 它可以使主开关器件的电压降低一半。由于其三电平输出比二电平多了一个电平, 故可使 du/dt 降低一半, 从而使输出电压谐波减小, 有利于实现输出电压波形的正弦化, 特别适合于高压大容量的电力电子变换系统。而空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 方法具有输出电流谐波成分少和比SPWM高15%的电源利用率, 同时具有概念清晰、算法简单且适合数字化等特点, 因而是三电平逆变器首选的PWM控制方法。其主要可通过选择开关器件的开关状态以及开关矢量作用的时间来实现。

1 三电平逆变器结构

目前的三电平逆变器结构主要是二极管中点钳位 (neutral point clamped) 方式, 其电路结构如图1所示。该方式是多电平逆变电路拓扑结构中发展最早的一种, 又称为中点钳位逆变电路 (Diode-Clamped)。它是日本学者Ajura Nabae教授于1981年提出来的。这种电路通过多个功率器件串联, 并按一定的开关控制方式来产生需要的电平级数, 从而在输出端合成相应的正弦波。虽然二极管箝位多电平变换器存在中点电位平衡问题, 但是可以通过适当的控制来解决。因此, 低成本、控制简单的二极管箝位三电平PWM逆变器的应用非常广泛。图1所示是一个二极管中点钳位三电平逆变电路, 其中电容 $C1$ 、 $C2$ 可为变换电路

提供2个相同的直流电压, 二极管则用于电平钳位。图1中的第一个桥臂可同时导通 $S1$ 、 $S2$, 而当关断 $S3$ 、 $S4$ 时, 即可在逆变电路输出端获得一个正电平; 同时导通 $S2$ 、 $S3$, 并在关断 $S1$ 、 $S4$ 时使输出电压为零; 同时导通 $S3$ 、 $S4$, 并关断 $S1$ 、 $S2$ 时, 即可在输出端得到一个负电平。从电路结构可以看出: 零电平是靠 $S2$ 、 $S3$ 和二极管共同作用实现的。通过对 $S1$ ~ $S4$ 四个开关器件的控制, 可以在输出端合成三电平的波形, 但所有这些管子的耐压要相同。其他两个桥臂也是同理。三相桥的输出接负载, 负载可采用Y联结方式, 也可以采用 Δ 联结。各组钳位二极管的中间抽头均连到直流侧两个电容的中间抽头。直流侧两个电容的参数是相同的。任一相 (桥臂) 以电源中点为参考点可输出 $U_d/2$, 0 , $-U_d/2$ 这三种电平。

2 SVPWM算法的实现

2.1 SVPWM的工作原理

当用三相平衡的正弦电压为交流电机供电

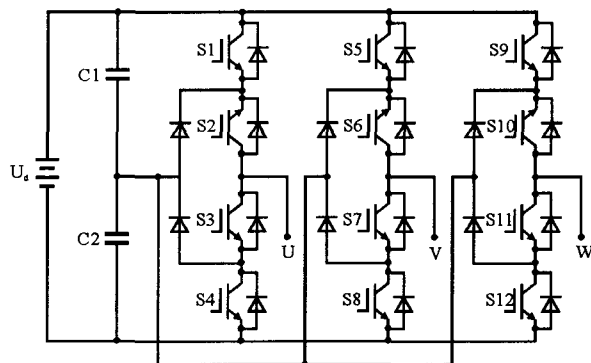


图1 二极管中点钳位方式电路

时,电机定子磁链具有恒定的空间矢量幅值,并以恒速旋转,磁链矢量的运动轨迹是圆形的空间旋转磁场(磁链园)。因此,若可以找到一种方法使逆变电路能向交流电机提供可变频电源、并保证电动机形成定子磁链园,就可以实现交流电动机的变频调速。电压空间矢量SVPWM技术就是从电机角度出发,其目标就是使交流电机产生圆形磁场。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,使这个空间矢量以某一角频率在空间旋转。当其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。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。

2.2 空间电压矢量图

六角形空间电压矢量图是利用空间电压矢量的概念来描述三电平PWM逆变器输出电压内在关系的一种图形。在二极管钳位式三电平逆变器的拓扑结构中,每相的开关状态均有三种(-1、0、1),对应的交流侧输出电压为 $U_d/2, 0, -U_d/2$ 。对三相对称系统来说,共可组合成 3^3 (27)种开关状态,且每一种开关状态对应一个电压空间矢量,因此,三电平逆变器电压空间矢量共由27个不同的矢量组成。图2所示是三电平逆变器的矢量图。图中,大六边形的6个顶点为6个大矢量所在的位置,小六边形的每个顶点代表两个矢量,因此,小矢量共有12个矢量且总是成对出现,它们对中性点电压的作用刚好相反,这种特性在中点电压平衡的控制系统中将会得到应用。零电压矢量一般由3个矢量组成,且都位于六边形的中点,

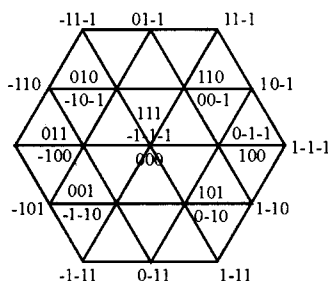


图2 三电平逆变器的矢量图

其余的矢量是六个中矢量。

2.3 判断扇区

SVPWM的首要任务是判断参考电压矢量位于哪个区域及哪个小三角形,然后来依此确定相应的输出电压矢量。为了防止输出电压产生很高的 dV/dt ,在每次输出状态切换时,开关状态应只切换一个电平,如从111到011。第一象限6个的正三角形中的矢量分区如图3所示,其他象限其他三角形中矢量的分析可参照第一象限。首先,应根据参考矢量的角度确定出该矢量位于图2所示的大正三角形区域中的哪一个。然后进一步确定是那个小三角形。参考电压矢量所在的小三角形的3个顶点所对应的电压矢量可作为参考电压矢量的输出电压矢量,即这些电压矢量可合成参考电压,其矢量合成图如图3所示。

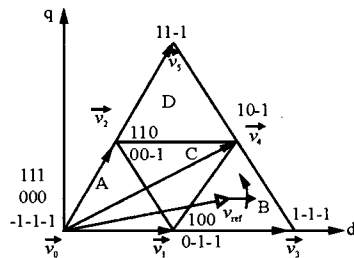


图3 矢量合成图

2.4 区域内各矢量作用时间的计算

计算时,若参考电压矢量是: $V_{ref} = V_{ref\alpha} + jV_{ref\beta} = V < \theta$, 那么有:

$$\text{规则一: } V_{ref\alpha} + V_{ref\beta}/\sqrt{3} - V_{\alpha} \leq 0$$

$$\text{规则二: } V_{ref\alpha} - V_{ref\beta}/\sqrt{3} - V_{\alpha} \geq 0$$

$$\text{规则三: } V_{ref\beta} - V_{\beta} < 0$$

这样,在计算输出电压矢量的作用时间时,在采样周期内,对于一个给定的参考电压矢量 V_{ref} ,可以利用三个基本电压矢量来进行合成。根据伏秒平衡原理,该计算应满足方程组:

$$\begin{cases} T_1 V_1 + T_2 V_2 + T_3 V_3 = T_s V_{ref} \\ T_1 + T_2 + T_3 = T_s \end{cases}$$

其中 T_1, T_2, T_3 分别为 V_1, V_2, V_3 矢量所对应的作用时间, T_s 为采样周期。根据此方程组得到各基本矢量的作用时间后即可根据基本矢量与开关状态的对应关系,并结合其他要求确定所有的开关状态及其输出形式。

事实上,当图3中的参考矢量在A区时,其 V_{ref} 可由 V_0, V_1, V_3 合成,作用时间分别为 T_0, T_1, T_3 的计算公式如下:

$$T_0 = \left[1 - 2k \sin \left(\theta + \frac{\lambda}{3} \right) \right] T_s$$

$$T_1 = 2k T_s \sin \left(\frac{\lambda}{3} - \theta \right)$$

$$T_3 = 2k T_s \sin \theta$$

当图3中的参考矢量在B区时, V_{ref} 可由 V_1, V_3, V_4 合成,作用时间分别为 T_1, T_3, T_4 的计算公式如下:

$$T_1 = (1 - 2k \sin \theta) T_s$$

$$T_3 = \left[1 - 2k \sin \left(\frac{\lambda}{3} - \theta \right) \right] T_s$$

$$T_4 = \left[2k \sin \left(\theta + \frac{\lambda}{3} \right) - 1 \right] T_s$$

当图3中的参考矢量在C区时, V_{ref} 可由 V_1, V_2, V_4 合成,作用时间分别为 T_1, T_2, T_4 的计算公式如下:

$$T_1 = \left[2 - 2k \sin \left(\theta + \frac{\lambda}{3} \right) \right] T_s$$

$$T_2 = \left[2k \sin \left(\frac{\lambda}{3} - \theta \right) - 1 \right] T_s$$

$$T_4 = 2k T_s \sin \theta$$

当图3中的参考矢量在D区时, V_{ref} 可由 V_3, V_4, V_5 合成,作用时间分别为 T_3, T_4, T_5 的计算公式如下:

$$T_3 = \left[2 - 2k \sin \left(\theta + \frac{\lambda}{3} \right) \right] T_s$$

$$T_4 = 2k T_s \sin \left(\frac{\lambda}{3} - \theta \right)$$

$$T_5 = (2k \sin \theta - 1) T_s$$

其中: $\sqrt{2} |V_{ref}| / V_{dc}$

同理可计算其它扇区各区域的矢量作用时间,以上所有计算均不涉及非线性函数,完全可以通过实时计算来实现。

3 电压空间矢量 (SVPWM) 技术的实现

确定某一时刻的输出空间矢量时,可根据空间矢量的优化选择原则,先确定出每个扇区每个区域的矢量组,然后确定出空间电压矢量的作用顺序。最后将空间矢量转化为触发脉冲。

从这些原理出发,可分析仿真实现三电平的空间矢量方法,其关键是产生SVPWM的控制信号,也即空间矢量方法的合成调制波。三电平空间矢量实质也是一种载波方法。三电平空间矢量SVPWM方法也可以通过载波的方法来实现,因此,实现这种方法的关键问题是合成三电平空间矢量SVPWM的等效调制波。通常可以利用TI公司的TMS320C2000系列DSP来实现电压空间矢量的PWM控制,并可用软件来实现,同时也可以利用DSP特有的硬件SVPWM功能来实现。

3.1 软件实现法

用软件实现时要注意:由于对每一个电压空间矢量PWM波的零矢量分割方法不同,以及对零矢量的选择不同,所产生的电压空间矢量PWM波也会多种多样。其选择原则:一是尽可能使功率开关的开关次数减少;二是任意一次电压空间矢量的变化只能有一个桥臂的开关动作;三是要编程容易。

3.2 硬件实现法

TI公司的TMS320LF2407系列DSP含有实现SVPWM的硬件功能。通过对硬件的正确设置可以产生空间电压矢量PWM波,从而简化控制程序。对硬件的设置,一是对COMCONA的第12位置1,以允许使用空间矢量PWM功能;二是在每一个扇区,将起始空间零矢量的开关状态写入ACTRA寄存器的第12~14位,并将方向参数写入ACTRA寄存器的第15位,其中0代表逆时针;1代表顺时针;三是将比较值写入比较寄存器CMPR1和CMPR2(注意CMPR3不用)。

4 结束语

本文介绍了三电平逆变器的SVPWM控制算法,着重分析了空间电压矢量算法的原理及其实现步骤。并通过两种方法的比较,阐明了硬件和软件两方面的实现方法。事实上,三电平逆变器应用十分广泛,具有很高的研究价值。

参考文献

- [1] 薄保中,苏彦民.三电平逆变器的分析与控制[J].电气传动,2003,(2):14-17.