

三电平逆变器 SVPWM 方法的分析与研究

◆文/易礼智

【摘要】 SVPWM 是三电平逆变器中最应用最广泛的控制方法之一,本文分析了三电平逆变器 SVPWM 的控制方法。通过深入研究影响三电平逆变器中点电压平衡的主要因素,本文提出了针对中点电位平衡的控制算法,所提出的控制算法能有效平衡三电平逆变器中点电压。理论分析和仿真实验结果表明,对改善三电平逆变器的性能有一定的工程参考价值。

【关键词】 三电平逆变器 SVPWM 中点电位控制

矢量

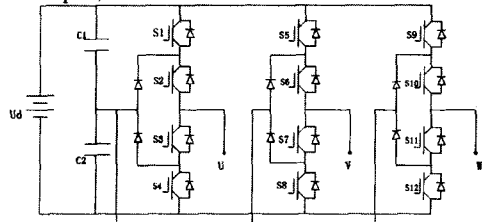
1、引言

三电平逆变器较之传统的两电平逆变器的主要优点有:更好的输出电压、电流波形;器件具有两倍的正向阻断电压能力;能降低开关频率,从而使系统损耗减小让低压开关器件应用于高压逆变器中。然而由于其逆变状态比传统的两电平逆变器多若干倍,加之中点电压的不均衡问题给三电平逆变器加大了很多控制方面的复杂性。

在所有三电平逆变器的控制方法中,SVPWM 控制方法由于其物理概念清晰,更容易且适合数字化实现,故得到了广泛的应用。其实现手段主要是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。

2、三电平逆变器结构

目前较为流行的三电平逆变器结构主要是二极管中点钳位(neutral point camped)方式。(如图一)



图一

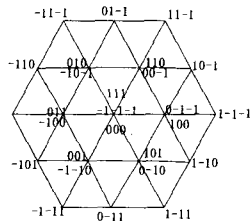
由图可知,任一相以电源中点为参考点可输出 E,0,-E 三种电平。

3、控制策略

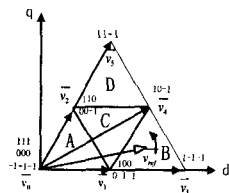
由电压空间矢量的定义可知,当电机端电压为三相平衡的正弦电压时,其合成矢量的端点轨迹是一个与电压幅值及频率有关的圆(即磁链圆)。三电平逆变器 SVPWM 由此原理出发,根据所选矢量和矢量作用时间的变化来合成一个理想等效圆。

$$\vec{V} = V_{vm} + V_{vm}e^{2\pi t} + V_{vm}e^{4\pi t} \quad (1)$$

由图一可以知道,三电平逆变器每一相有三种开关状态,因此在整个三电平逆变器中总共有 $3^3=27$ 种开关状态。我们可以由两电平逆变器矢量构成原理推出三电平逆变器的矢量图(如图二)



图二



图三

由矢量图,结合最近三矢量合成机理(NTV)我们可以得到:任意时刻的三相电压可由所在三角形三个顶点的电压矢量合成。结合图三,假设参考矢量所在三角形三个顶点的矢量为 V1、V2、V3,它们分别作用的时间为 t1、t2、t3,结合付秒平衡原则可以得到:

$$V_1 \cdot t_1 + V_2 \cdot t_2 + V_3 \cdot t_3 = T V_{vm}$$

$$t_1 + t_2 + t_3 = T \quad (2)$$

如果当让参考电压矢量沿着顺时针或逆时针的方向旋转时,空

间矢量由一个有效状态转移到另一个有效状态就能产生输出的电压频率与参考矢量的旋转频率一致的连续三相电压。

4、中点电位控制问题。

4.1 中点电位不平衡的原因

在实际控制中,三电平逆变器的直流侧两个电容的电压并不是完全相等的,而是存在一定的波动,中点电位的波动会造成上下两个电容上的电压不对称,这一方面会加剧交流输出侧电压的畸变,另一方面会造成 IGBT 等开关元件关断时承受的电压不一致,严重时会造成开关器件击穿,所以中点电位必须加以抑制。

三电平逆变器中点电位与中点流入与流出的电流是密切相关的,其关系可推导得出。

$$i_1 = C_1 \frac{d(U_a/2 - U_o)}{dt} \quad (3)$$

$$i_2 = C_2 \frac{d(U_o - U_a/2)}{dt} \quad (4)$$

$$C_1 = C_2 = C \quad (5)$$

$$i_o = i_1 - i_2 = -2C \frac{di_o}{dt} \quad (6)$$

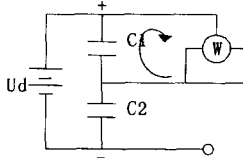
其中 i_1 为流入 C1 的电流, i_2 为流入 C2 的电流,+ i_o 为流出中点的电流, U_0 为中点电位。

可以得出中点电压 U_o 随着 i_o 的变化而变化,然而并非所有 27 种控制矢量都会对中点电位产生影响。其中大矢量的每相直接接到直流母线的正端或负端,因此它对中点电位不产生影响;中矢量的某一相的输出是直接接到中点的,因此会对中点电位产生影响的;小矢量至少有一相是直接连到中点的因此会影响中点电位的平衡。零矢量对外输出为零,对中点电位自然不产生影响。

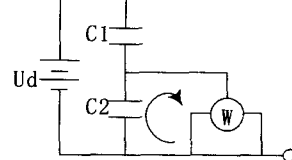
综上所述,对中点电位产生影响的主要是中矢量,和小矢量。从图二中可以看到由于中矢量在一个矢量开关状态中选择的唯一性不能通过改变中矢量来平衡中点电位,但是观察小矢量,发现在整个矢量圆中都是以正、负小矢量成对出现的。

4.2 小矢量对中点电位的影响

由图一,在上下两个电容 C1 C2 中,当电流流入两电容中点时,将会对下面电容充电,下面电容电压高于上面电容电压;当电流流出两电容中点时,对上面电容充电,上面电压高于下面电容电压。对一组小矢量 110,00-1 进行分析,如图四、图五



图四



图五

此组小矢量的输出电压相同,但是对中点电位的影响却是相反的。我们可以对所有矢量圆中的小矢量进行分析,可以得到同样的规律。因此,为了使中点电位平衡,可以通过检测比较两电容的电压来调整对应小矢量作用的时间实现对中点电位的控制。为了减小开关损耗,防止参考矢量扇区转换时矢量突变,每次以小矢量作为起始矢量,拿 I 扇区 B 三角形为例:矢量作用的顺序是:100,10-1,1-

1-1, 0-1-1, 1-1-1, 10-1, 100。其矢量作用时间可由(7)式计算得出:

$$v_{s0} \cdot t_{s0} + v_m \cdot t_m + v_{s1} \cdot t_{s1} = T v_{ref} \quad (7)$$

$$\text{令 } d_{s0} = \frac{t_{s0}}{T}, d_M = \frac{t_m}{T}, d_{s1} = \frac{t_{s1}}{T} \quad (8)$$

$$\text{则, } d_{s0} + d_M + d_{s1} = 1 \quad (9)$$

在图三中,合成参考矢量的中矢量及小矢量对中点电位的影响为:

$$i_{NP} = i_{NP,c} + i_{NP,s} \quad (10)$$

4.3 关于中点电位平衡控制的讨论

鉴于中矢量的不可选择性,控制中点电位的平衡可以由控制 d_0, d_1 实现,引入变量 $m_0, m_s \in [-1, 1]$,那么 d_0 可以分解为 $(1-m_0)/2, (1+m_0)/2$,同理也可以分解为 $(1-m_s)/2, (1+m_s)/2$ 。

在图三的C区中,可以分析得到:

$$i_{wp} = d_u \cdot [M_u \ M_v \ M_w] \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + [m_0 \ m_s] \begin{bmatrix} d_{s0} & 0 \\ 0 & d_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{0x} & S_{0y} & S_{0z} \\ S_{1x} & S_{1y} & S_{1z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 M_x 为中矢量 V_m 流入中点电流的开关函数, S_{0x}, S_{1x} 分别为小矢量 V_0, V_1 流入中点电流的开关函数。他们的值于表 I II III:

表 I

角度	S1 小矢量	电流开关函数			i_{NP}
		S_{1u}	S_{1v}	S_{1w}	
0-120	11000-1	0	0	1	i_u
120-240	011-100	1	0	0	i_v
240-360	101/0-10	0	1	0	i_w

表 II

角度	中矢量	电流开关函数			i_{NP}
		M_u	M_v	M_w	
0-60	10-1	0	1	0	i_v
60-120	01-1	1	0	0	i_u
120-180	-110	0	0	1	i_w
180-240	-101	0	1	0	i_v
240-300	0-11	1	0	0	i_u
300-360	1-10	0	0	1	i_w

表 III

角度	小矢量 S_0	电流开关函数			i_{NP}
		S_{0u}	S_{0v}	S_{0w}	
300-60	0-1-1/100	1	0	0	i_u
60-180	-10-1/010	0	1	0	i_v
180-300	001-1-10	0	0	1	i_w

将坐标同步旋转,通过式(12)

$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos(\theta - 2 \cdot \pi / 3) & \sin(\theta - 2 \cdot \pi / 3) \\ \cos(\theta + 2 \cdot \pi / 3) & \sin(\theta + 2 \cdot \pi / 3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (12)$$

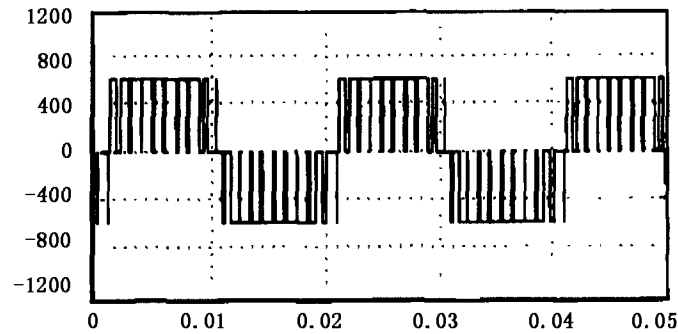
的 d-q 变换可以得到:

$$i_{wp} = [d_u \cdot M_u \ d_u \cdot M_v] \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + [m_0 d_{s0} S_{0u} \ m_s d_{s0} S_{0v} \\ m_0 d_{s1} S_{1u} \ m_s d_{s1} S_{1v}] \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (13)$$

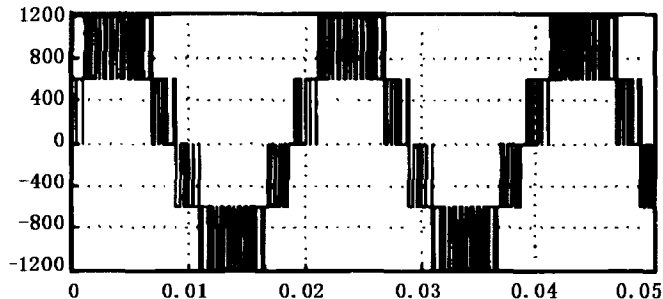
可以知道,通过实时改变电流调制系数 m_0, m_s 能够实现中点电位的平衡。但是为了准确的控制中点电位必须要实时测量中点电位及流入中点的各相电流值来计算 m_0, m_s 值以平衡中点电位。

5、仿真研究

为了验证本文提出的 SVPWM 算法以及中点电位平衡的方法,采用 MATLAB 仿真工具 Simulink 建立了三电平逆变器的仿真模型。功率器件采用 IGBT 元件,直流侧电压为 1200V。系统输出频率为 50HZ, $m=0.8$ 时运行的相电压(图六)和线电压波形(图七)



相对于直流侧中点的 U 相相电压波形(图六)



线电压波形(图七)

图(八)给出了有中点电位控制时的中点电位波形。

6 结论

本文论述了三电平中点箝位式逆变器空间电压矢量调制工作原理和实现方法,并详细分析了导致中点电位波动的原因。为了防止中点电位的波动,文中推导了通过改变引入的两个参数稳定中点电位的方法,此方法也在仿真实验中得到了论证。

参考文献

- [1] 蒲保中, 苏彦民, 三电平逆变器的分析与控制, 电气传动, 2003
- [2] 刘凤君, 多电平逆变技术及其应用, 机械工业出版社, 2007
- [3] Nilkola Celanvic, Dushan Boroyevich, A Fast Space Vector Modulation Algorithm for Multilevel Three-phase Converters[C]. CPES Power Electronics Seminar 2000:210~214

(作者单位系湖南工程职业技术学院 信息工程系)