

三电平逆变器空间矢量调制 及中点电位平衡研究

张晔, 汤钰鹏, 王文军

(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要:多电平逆变器在中高压大功率场合得到了广泛的研究和应用。研究了二极管钳位型三电平逆变器的拓扑结构和7段式空间矢量SVPWM调制方法。给出了参考矢量所在区域的判断方法, 推导工作矢量的作用时间。为解决中点电位平衡问题, 提出了一种充分利用冗余电压矢量的中点控制方法。通过仿真验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词:三电平逆变器; 空间矢量脉宽调制; 中点电位平衡

中图分类号: TM464

文献标识码: A

Research on SVPWM Method and Neutral-point Voltage Balance in Three-level Inverter

ZHANG Ye, TANG Yu-peng, WANG Wen-jun

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The multilevel inverter has been studied and widely used in high power applications for medium or high voltage. The structure of the three-level NPC inverter and seven-stage SVPWM modulation was described. Introduced the judging method of which region the reference vector is located, deduced the duty time of each vector. To solve neutral-point voltage balancing problem, a control method fully utilizing redundant voltage vectors was proposed. The validity of proposed method is demonstrated by the simulation results.

Key words: three-level inverter; space vector pulse width modulation (SVPWM); neutral-point voltage balance

1 引言

近年来, 随着工业领域对大功率变换装置的使用日益增加, 多电平逆变器相对于传统的两电平表现出明显的优势, 已受到越来越多的关注, 并得到了广泛的研究和应用。

逆变器输出性能取决于调制算法的优劣, 三电平逆变器由于采用了比传统两电平多一倍的器件, 不可避免增加了控制策略的复杂性, 同时会产生中点电压平衡问题。本文采用电压利用率较高, 易于数字实现的空间矢量(SVPWM)调制方法, 并全部采用负小矢量开头以保证各矢量间平滑切换。在中点电压平衡问题上, 引入并计算调节因子, 通过调节冗余小矢量的作用时间达到抑制中点偏移的目的, 该方法只需测量三相电压电流简便易行, 作用明显。同时详细分析了调节因子在部分区域失效的原因, 并给出解决办法。通

过仿真试验验证了所提方法的正确性。

2 三电平中点钳位式逆变器主电路拓扑结构

三电平逆变器主电路如图1所示, 可见每一相有3个输出状态 $U_d/2, 0, -U_d/2$ 分别定义对应

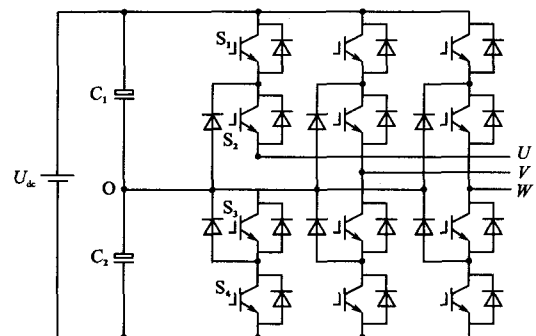


图1 三电平中点钳位式逆变器主电路结构

Fig. 1 Power stage of three-level NPC inverter

的输出状态为 P, O, N 。输出电压共有 27 种状态,根据幅值的大小分为大矢量(模长 $2V_{dc}/3$),中矢量(模长 $V_{dc}/3$),小矢量(模长 $V_{dc}/\sqrt{3}$)和零矢量(模长 0),其中小矢量和零矢量的状态存在冗余,后面我们将利用得到这一点。

3 空间矢量 SVPWM 调制方法

3.1 区域判断

三电平空间矢量电压调制,首先要判断参考矢量落在哪一个大区域,然后判断具体落在大区域中的哪个小区域。

如图 2 所示,从 α 轴开始,逆时针方向每 60° 定义为一个区域,这样空间被分为 6 个大区域(I~VI),在每一个大区域中以矢量的顶点为界,又分为 4 个小区域,共分为 24 个小区域。

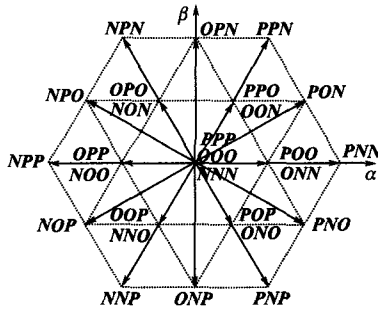


图 2 三电平逆变器空间电压矢量状态图

Fig. 2 Space voltage vector diagram of three-level inverter

首先对参考矢量的角度进行判断,得出参考矢量落在哪个大区域中。然后对参考矢量 V_{ref} 在 0° 和 60° 向上进行分解,分别得到矢量 V_{ref-0} 和 V_{ref-60} 。定义调制比 $m = |V_{ref}| / |V_{PNN}|$, $a = |V_{ref-0}| / |V_{PNN}|$, $b = |V_{ref-60}| / |V_{PNN}|$ 进行如下判断得出参考矢量具体落在哪一个小三角形区域中。参考矢量位置判断如表 1 所示。

表 1 参考矢量位置判断

Tab. 1 Reference space vector judging method

a	b	$a+b$	目标矢量
<0.5	<0.5	<0.5	1 区
<0.5	<0.5	>0.5	2 区
>0.5	<0.5	>0.5	3 区
<0.5	>0.5	>0.5	4 区

3.2 电压矢量作用时间计算

判断参考矢量落在哪个扇区后,然后根据组成该区域三角形的顶点矢量合成该参考矢量,算

出各个合成矢量对应的作用时间,从而得出开关管的开关状态。

如图 3 所示,以参考矢量落在 3 区为例, T_x, T_y, T_z 为 $V_{PON}, V_{PNN}, V_{POO}$ 作用时间, T_s 为开关周期,具体计算方法如下:

$$T_s = T_x + T_y + T_z$$

$$T_s V_{ref} = T_x V_{PON} + T_y V_{PNN} + T_z V_{POO}$$

联立可以解出 3 个合成矢量各自作用的时间:

$$T_x = \frac{4m \sin \theta}{\sqrt{3}} T_s$$

$$T_y = [2m(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}}) - 1] T_s$$

$$T_z = T_s - T_x - T_y$$

同理可以得出其他各扇区矢量作用时间,并可以从 I 区推广到其他区域。

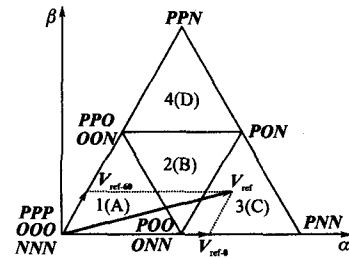


图 3 参考矢量合成图

Fig. 3 Reference space vector composition

为了降低输出电压谐波,减少器件开关损耗,采用 7 段式对称 SVPWM,每次状态切换时只切换一个电平。由于零矢量和短矢量存在冗余的状态,充分利用冗余可达到上述目的。为了避免各个扇区切换的时候发生突变,所有扇区均是以负小矢量开头,以第 3 区为例: $OON \rightarrow PON \rightarrow POO \rightarrow PPO \rightarrow POO \rightarrow PON \rightarrow OON$,电压时序如图 4 所示。

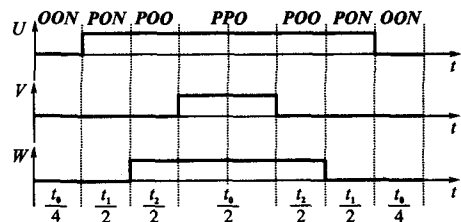


图 4 电压时序图

Fig. 4 Voltage sequence diagram

4 中点电压平衡控制策略

中点不平衡分为两类:一是中点电位的波动,

二是中点电位的偏移。大矢量三相负载不与中点相连,零矢量使三相负载短路,都不会引起中点电压的变化;小矢量和中矢量,三相负载中至少有一相接到电容中点,并和直流电源正、负极形成电流,从而导致电容 C_1, C_2 充放电,使中点电压产生波动。要想使三电平逆变器正常工作,就一定要把中点电压控制在允许范围内波动。

每对冗余的小矢量虽然输出状态的电压状态是一样的,但是引起的中点电流方向却完全相反。本文就是系统运行过程中,中点电压偏离平衡点时,调整冗余小矢量的作用时间,使电压尽量向平衡点变化,使每个控制周期 T_s 中流经中点的电流为零。

不同时刻流入中点的电流可表示为

$$i_{invz}(t) = [1 - abs(S_a)] \times i_a + [1 - abs(S_b)] \times i_b + [1 - abs(S_c)] \times i_c$$

式中: S_i 为 $i(i=a, b, c)$ 函数, $S_i=1$ (输出为 P), $S_i=0$ (输出为 O), $S_i=-1$ (输出为 N); $abs(\cdot)$ 为绝对值函数。

检测电容电压 V_{dc1}, V_{dc2} , 三相电流 i_a, i_b, i_c 。标准的 7 段式 SVPWM 由 4 个矢量作用, 每一矢量作用时对应流入中点的电流分别为 $i_{invz0}, i_{invz1}, i_{invz2}, i_{invz3}$, 并假设它们在各自的作用时间内保持大小不变, 显然 $i_{invz0} = -i_{invz3}$ 。

在一个 PWM 控制周期 T_s 内, 检测直流侧电容电压可得:

$$\Delta V_{dc} = V_{dc2} - V_{dc1}$$

中点电荷为

$$Q = Q_2 - Q_1 = C \times \Delta V_{dc}$$

当标准 7 段对称式 SVPWM 波形作用到逆变电路时, 中点电荷变化量为

$$\Delta Q = \frac{t_0}{2} \times i_{invz0} + t_1 \times i_{invz1} + t_2 \times i_{invz2} + \frac{t_0}{2} \times i_{invz3}$$

为了使 $Q + \Delta Q = 0$, 则一个开关周期内中点电荷变化为零, 引入调节因子 ϵ 重新分配 7 段式作用时间为 $(1 + \epsilon)t_0/4, t_1/2, t_2/2, (1 - \epsilon)t_0/2, t_1/2, t_2/2, (1 + \epsilon)t_0/4$ 。

$$\Delta Q = (1 + \epsilon) \frac{t_0}{2} \times i_{invz0} + t_1 \times i_{invz1} +$$

$$t_2 \times i_{invz2} + (1 - \epsilon) \frac{t_0}{2} \times i_{invz3}$$

$$= \epsilon \times t_0 \times i_{invz0} + t_1 \times i_{invz1} + t_2 \times i_{invz2}$$

联立解得

$$\epsilon = - \frac{C \times \Delta V_{dc} + t_1 \times i_{invz1} + t_2 \times i_{invz2}}{t_0 \times i_{invz0}}$$

实际调节因子受到幅值的限制, 必须满足 $-1 < \epsilon < 1$, 在此约束下调整正负小矢量的作用时间, 中点电位可以得到很好的抑制。

实验发现上述方法会出现电压在某些区段不可控的现象。分析如下, 当参考矢量位于 1, 2 小区时, 有两对冗余小矢量 $PPO(OON)$ 和 $POO(ONN)$ 可供选择。如果利用 POO 和 ONN 冗余矢量, 当 $\theta < 30^\circ$ 时, $V_{ref-\alpha}$ 的分解矢量 $V_{1-\alpha}$ 较大, 即 7 段式中的 1, 4, 7 段作用时间较长 ($t_0/4, t_0/2, t_0/4$ 较大)。当 $\theta > 30^\circ$ 时, POO 和 ONN 在 α 方向矢量作用时间将会变小, 越靠近 60° 时, 作用时间越短, 甚至趋于零 ($t_0/4, t_0/2, t_0/4$ 趋于零), 此时调节因子 ϵ 将无法起到作用。即 $\theta > 30^\circ$ 中点电压开始变大, 并在 60° 时达到最大。当步入 II 区时, 中点电压在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时将中点电压控回零点附近, 在 $90^\circ \sim 120^\circ$ 时再次失控, 在其他区域也是如此。

为了解决这一问题, 采取不同区段不同冗余小矢量作用的方法, 可以使该问题得到良好的解决。当参考矢量位于 1, 2 小区时, 判断参考矢量的位置, 如图 5 所示, 以目标矢量落在 2 小区为例, 当 $0^\circ < \theta < 30^\circ$ 时, 选择 $PPO(OON)$ 这对矢量, 作用顺序为 $OON \rightarrow PON \rightarrow POO \rightarrow PPO \rightarrow POO \rightarrow PON \rightarrow OON$; 当 $30^\circ < \theta < 60^\circ$ 时, 选择 $POO(ONN)$ 矢量, 作用顺序为 $ONN \rightarrow OON \rightarrow PON \rightarrow POO \rightarrow PON \rightarrow OON \rightarrow ONN$ 作用。这样可以保证 t_0 始终较大, 调节因子 ϵ 能充分发挥作用。

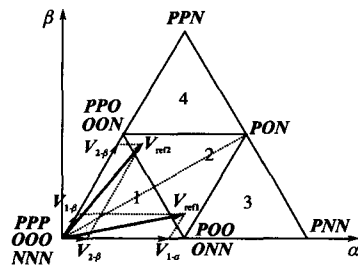


图 5 矢量不同位置分解

Fig. 5 Space vector composition in different position

5 实验结果

为了验证本文所提出的调制算法及中点平衡控制的有效性, 利用 Matlab 中的 Simulink 搭建了仿真平台。实验参数为: 直流侧电压 $U_{dc} = 1000$ V; 直流电容 $C_1 = C_2 = 2000 \mu F$; 基波频率 50 Hz; 控制周期 200 μs ; 负载为三相对称的阻感

性负载 $L=1\text{ mH}, 50\text{ kW}$ 。

图6给出了 m 为 0.3, 0.47 和 0.75 时的线电压波形,其分别工作在如图3所示的 A, AB, BCD 工作模式。A 工作模式下退化为两电平工作状态。图7是在调制比 $m=0.6$ 的情况下,有无中点控制的中点电压波形对比,可见加入中点控制的电压明显减小,且变化幅度很小,仅为 10% 左右。图8给出逆变器输出电压的傅立叶分析, $\text{THD}=2.56\%$, 谐波含量较低。

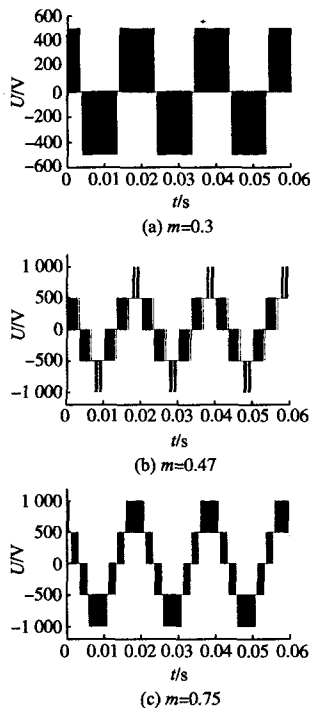


图6 线电压波形

Fig. 6 Line voltage waveforms

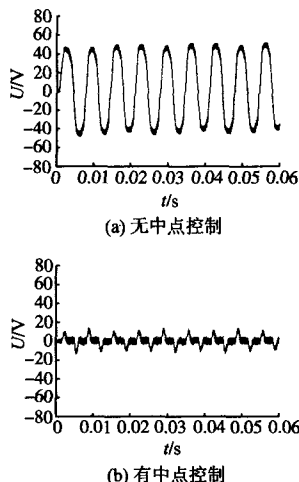


图7 $m=0.6$ 中点电压校正前后波形

Fig. 7 $m=0.6$ NP voltage waves before and after correction

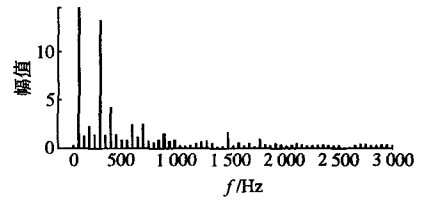


图8 逆变器输出电压谐波分析

Fig. 8 Output voltage FFT of the inverter

由实验结果可以看出,本文的调制方法正确可行,采用了中点控制策略后,中点电位得到了有效的抑制。

6 结论

本文详细论述了三电平中点钳位式逆变器空间矢量电压调制方法的工作原理及实现方法,根据所给规则很容易判断参考矢量所在扇区,提出全部采用负小矢量首发的方法避免扇区切换时产生突变。提出了推导调节因子调节冗余小矢量的作用时间来调节中点电压平衡的方法,该方法简单易行。对调节因子失效问题进行了详尽的分析,并通过判断不同区域利用不同的冗余矢量的方法得到了良好的解决。仿真结果验证了理论所提方法的有效性,具有一定实际应用价值。

参考文献

- [1] 刘凤君. 多电平逆变技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 何湘宁. 多电平变换器的理论和应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [3] 田凯. 一种新型三电平变频器拓扑及其控制策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [4] Akira Nabae, Isao Takahashi, Hirofumi A kagi. A New Neutral-point Clamped PWM Inverter[J]. IEEE Tran. on Industry Applications, 1981, 17(3):518-523.
- [5] Steinke J K. Switching Frequency Optimal PWM Control of a Three-level Inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3):487-496.
- [6] 宋文祥. 一种具有中点电位平衡功能的三电平空间矢量调制方法及其实现[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12):95-100.
- [7] 余明峰. 一种三电平逆变器空间矢量 PWM 控制算法的实现[J]. 电力电子技术, 2005, 39(1):48-50.

收稿日期:2009-03-02

修改稿日期:2009-08-30