

文章编号:1674-5949(2010)02-0145-07

# 三电平逆变器中点电压控制新方法

周昌鸿, 曹建明, 杜 军

(上海船舶运输科学研究所, 上海 200135)

**摘 要:**以三电平电压源型逆变器为研究对象,分析了三电平电压源型逆变器中点电压不平衡产生的原因及影响。针对三电平逆变器中常用的空间电矢量脉宽调制(Space Vector PWM, SVPWM)算法,提出了一种调节中点电压的新方法。该方法控制算法简单,避免了因合成矢量作用时间过短导致的电压脉冲和作用时间小于死区时间的情况,并能控制中点电压波动在合理范围,同时,对所提出的算法进行了仿真验证,取得了良好的效果(中点电压波动控制在桥臂电压 $\pm 5\%$ 以内),证实了提出中点电压控制算法的正确性。

**关键词:**中点电压平衡问题;三电平逆变器;空间矢量合成脉宽调制

**中图分类号:**TM464

**文献标志码:**A

## A New Approach for Neutral-Point Potential Stabilization in Three-Level Inverter

ZHOU Chang-hong, CAO Jian-ming, DU Jun

(Shanghai Ship and Shipping Research Institute, Shanghai 200135, China)

**Abstract:** The causes and effects of the neutral-point potential unbalance in three-level voltage source inverters are studied. A new method of neutral-point potential stabilization for commonly used space vector PWM scheme is proposed. The control algorithm is simple and avoids the situation where the acting time of voltage pulses is shorter than dead zone caused by the short duration of synthesizing vector. Simulation shows that the proposed algorithm is efficient (controlling the neutral point potential fluctuation within  $\pm 5\%$  of that of bridge arms).

**Key words:** NPC problem; three-level inverter; SVPWM

## 0 前 言

近年来,应用于高压大功率领域的多电平逆变器引起了电力电子行业的极大关注。由于受电力电子器件电压容量的限制,传统的两电平变频器通常采用“高一低—高”方式经变压器降压和升压来获得高压大功率,或采用多个小容量逆变单元经多绕组变压器多重化来实现,这使得系统效率和可靠性下降。因而,人们希望实现直接的高压逆变技术。基于电力电子器件直接串联的高压变频器对动态的均压电路要求较高,并且输出电压高次谐波含量高,需设置输出滤波器。而多电平逆变电路的提出为解决上述问题取得了突破性的进展<sup>[1]</sup>。

多电平逆变器克服了传统逆变器较高的电压、电流变化率所引起的开关应力,改善了其输出波形,在高压大功率变频调速及静态无功补偿方面有着越来越多的应用。10 kV 以下的中压大功率多电平逆变器大多已使用二极管嵌位式三电平结构来实现<sup>[2]</sup>。

**收稿日期:**2010-06-25

**作者简介:**周昌鸿(1986-),男,江西省东安县人,硕士,主要从事电力推进研究工作。

三电平逆变器中点电位的平衡是保证电机安全高效运行的一个重要标志,若中点电位不平衡,会使其输出电流谐波含量加大,三相输出不对称,严重时导致开关器件的损坏。目前,针对三电平逆变器中点电压的控制方法有 2 个方向:一是利用改进硬件电路实现中点电压平衡的方法;二是通过改变开关时序或控制矢量电压持续时间的方法实现电压平衡<sup>[3]</sup>。文献[4]采用了改进硬件电路的方法,但改进的电路及控制算法较为复杂。文献[2,3]采用了控制合成矢量电压持续时间的方法,但计算也显得复杂,容易引起矢量合成作用时间过小导致开关切换过于频繁和尖峰电流、电压浪涌的问题。

针对目前在使用三电平逆变器驱动电机多采用 SVPWM 算法,本文以 SVPWM 算法为基础,提出了一种根据中点电容电位差,通过变换输出作用序列,使得合成矢量中正负小矢量作用时间不平衡来控制三电平中点电压的方法,简化了控制运算,并对其进行了仿真验证。

# 1 三电平电压型逆变器分析

## 1.1 三电平电压型逆变器主电路

图 1 是三电平逆变器拓扑结构,其中  $U, V, W$  为逆变器三相输出,  $P, O, N$  为直流电容侧桥臂。每一桥臂由 4 个 IGBT 管和 2 个嵌位二极管组成。在保证 1,3 和 2,4 位置 IGBT 管互补的情况下,对应各开关状态,输出端输出电压见表 1。

在三相交流逆变输出中,相应的逆变器输出电压空间矢量可表示为

$$V(S_U, S_V, S_W) = \frac{2}{3} V_{dc} (S_U + a S_V + a^2 S_W)$$

式中,  $S_x = 0, 1, 2 (x=U, V, W)$  分别表示开关接通负电位、零电位和正电位。可以看出,由于每相电压都有 3 种状态,即  $+1/2V_{dc}, 0$  和  $-1/2V_{dc}$ , 这样三相系统中就有  $3^3 = 27$  个电压矢量。图 2 为三电平空间电矢量分布图。其中  $P, O, N$  分别表示每相开关接通正电位、零电位和负电位。

可以看出该开关电压矢量将复平面分成了 6 个扇区,每个扇区又分为 6 个小区域。

表 1 三电平开关切换动作及其输出电压

开关状态				输出电压
$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{a3}$	$S_{a4}$	
ON	ON	OFF	OFF	$+1/2V_{dc}$
OFF	ON	ON	OFF	0
OFF	OFF	ON	ON	$-1/2V_{dc}$

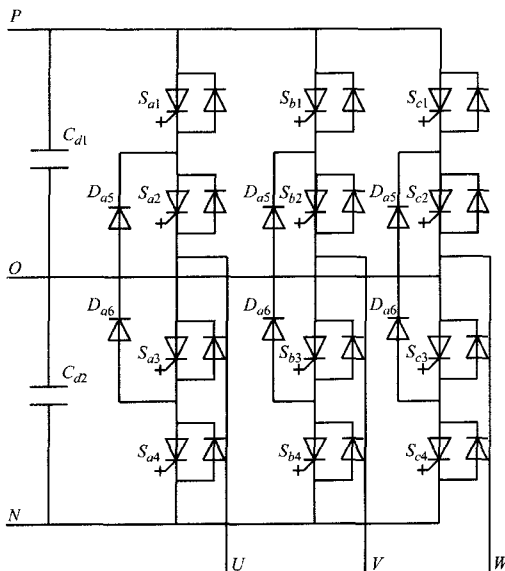


图 1 二极管钳位式三电平逆变器主电路结构

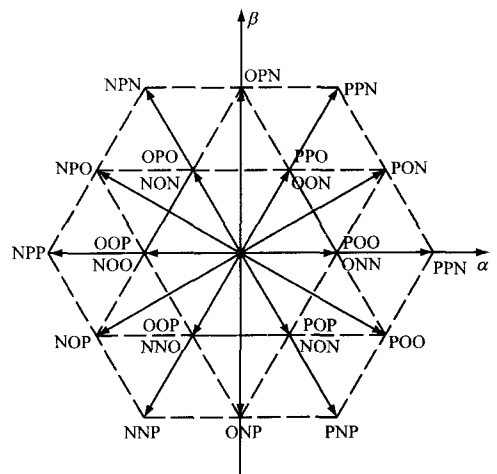


图 2 三电平逆变器空间电矢量

按空间电压的幅值可将上述空间电矢量分为 4 类,共 19 个有效电压矢量。

零电压开关矢量:幅值为 0,包括  $O_P, O_O, O_N$ ,分别表示变频器交流侧三相输出同时接正电平、零电平或负电平。

小电压开关矢量:幅值为  $V_{dc}/\sqrt{6}$ ,包括正小矢量  $SP_1 \dots SP_6$ 、负小矢量  $SN_1 \dots SN_6$ 。

中电压开关矢量:幅值为  $\sqrt{2}V_{dc}/2$ ,包括中矢量  $M_1 \dots M_6$ 。其共同特点是变频器的 3 个桥臂分别接在直流侧电压的正电平、负电平和零电平上。

大电压开关矢量,幅值为  $2V_{dc}/\sqrt{6}$ ,包括小矢量  $L_1 \cdots L_6$ 。大电压开关矢量均有一相接正电平或负电平,另外两侧则对应负电平及正电平。

## 1.2 对中点电压的影响

三电平逆变器在使用中容易造成直流侧电压不平衡。造成直流侧电压不平衡的原因有多种:网侧整流器造成电容器电压固有的波动,负载动态过程中有功、无功功率的变化导致的波动等。网侧整流造成电容电压固有的波动大小有限,通常不会影响系统的正常运行,而负载情况造成的波动对电容电压影响较大,需采取适当的方法加以抑制或消除。通常控制中点电压的波动在直流母线电压的  $\pm 5\%$  以内,否则桥臂上的某些开关器件承受的反压将比原先的高  $10\%$ ,加上由于器件动作引起的尖峰电压,使得器件的耐压裕度大大降低,也对器件的稳定工作和安全造成影响<sup>[5]</sup>。

由于三电平逆变器的中性点电位是由串联连接的平波电容器的分压决定的(见图3),当中性点与输出相负载接通时,经过分压电容  $C_1, C_2$  和直流侧母线形成电流回路,这将有可能引起中点电压的波动。

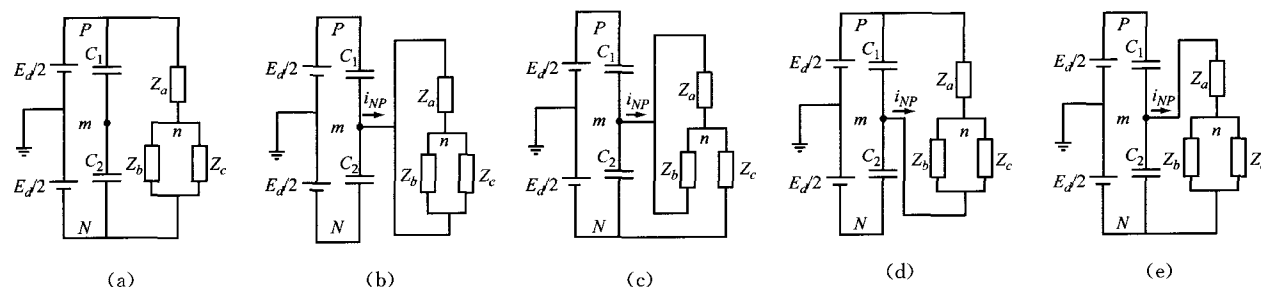


图3 电压矢量作用下的实际电路拓扑和电流回路

大矢量所对应的开关状态使得对应的负载和直流侧正负母线直接相连,不会影响中点电压;零矢量使得负载三相短路,并挂载正、负、零母线之一上,也不会导致中点电压的波动;而中矢量和小矢量使得三相负载的一相或者两相被连接到中性点上,通过分压电容  $C_1, C_2$  和直流侧母线形成电流回路,这将产生经由负载流动的中点电流,使得中点电压偏离平衡位置。

三电平逆变器的开关模式有 27 种,作为电压矢量有 19 种,根据各开关模式对中点电位的变化关系可以分为 5 类电压矢量(如表 2 所示)。因零矢量  $O_P, O_O, O_N$  以及大矢量  $a, b$  没有把中性点接到负载,所以对中性点电压无影响。而中矢量  $c$  同时接通正侧和负侧直流电源,所以中点电位的上升和下降依赖于输出电压的相位和负载的功率因数。 $P$  型小矢量  $a_P, b_P$  连接正侧电压源,所以带载时中性点电位上升,再生时中性点电位下降。 $N$  型小矢量  $a_N, b_N$  连接负侧电压源,所以带载时中性点电位下降,再生时中性点电位上升。

表 2 开关模式与中性点电位变化关系

电矢量名称		符号	零相电压	中性点电位变化	
				带载时	再生时
零矢量 $O$	$O_P$	PPP	$E_d/2$	无变化	无变化
	$O_O$	OOO	0		
	$O_N$	NNN	$-E_d/2$		
大矢量 $L$	$a$	PNN, NPN, NNP	$-E_d/6$	无变化	无变化
	$b$	PPN, PNP, NPP	$E_d/6$		
中矢量 $M$	$c$	POO, OPN, NPO	0	由相位引起	由相位引起
		NOP, ONP, PNO			
正小矢量 $SP$	$a_P$	POO, OPO, OOP	$E_d/6$	上升	下降
	$b_P$	PPO, OPP, POP	$E_d/3$		
负小矢量 $SN$	$a_N$	ONN, NON, NNO	$-E_d/3$	下降	上升
	$b_N$	OON, NOO, ONO	$-E_d/6$		

### 1.3 SVPWM 电矢量合成原理

对于三电平逆变器而言,其空间电矢量如图 2 所示。为了获得最小的谐波畸变,通常将参考电矢量 ( $U_{ref}$ )分解为所在三角形的 3 个顶点所对应的 3 个电矢量(见图 4)。

$$U_1 \cdot T_a + U_3 \cdot T_b + U_4 \cdot T_c = U_{ref} \cdot T_s$$

$$T_a + T_b + T_c = T_s$$

式中:  $T_a, T_b, T_c$  分别为矢量  $U_1, U_2, U_3$  的作用时间;  $T_s$  为空间矢量调制的控制周期。

三电平空间电矢量的合成,其首要任务就是判断参考电矢量位于哪个区域以及该区域中的哪个三角形,然后依此确定出相应的输出电压矢量。对应不同的逆变器调制深度和参考电矢量所在三角形区域,可将每个扇标记为 A, B, C, D。为使输出电压矢量不发生突变,减少电压波形畸变和降低器件开关损耗,通常输出的电压矢量按一定的序列作用于逆变器。其开关模式遵循以下原则<sup>[6]</sup>:

1. P, O, N 之间的开关状态切换可以在 P, O 之间和 O, N 之间相互自由切换,但不允许在两电平 P 和 N 之间切换。
2. 原则上不允许两相同时进行开关动作,即顺序发出的电压矢量具有邻接关系。

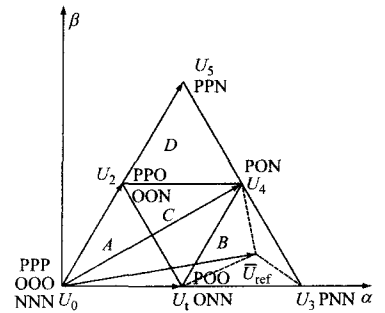


图 4 三电平虚拟空间电矢量合成

对于三电平逆变器而言,比较常见的电压矢量合成选择序列有对称的 8 段方式和不对称的 4 段方式。在相同的调制频率下,对称的 8 段方式比不对称的 4 段方式实现方便,电压谐波大大减少,但电压分辨率下降 50%。

在确定输出电压矢量及其开关输出序列后,进一步需要知道每个输出电压矢量的作用时间。设 4 个输出电压矢量的作用时间分别为  $T_1, T_2, T_3$  和  $T_4$ , 满足如下关系

$$T_2 = T_c, T_3 = T_b$$

$$T_1 + T_4 = T_a$$

通常采用中心化对称的矢量发送次序,即 PWM 控制周期关于  $T_s/2$  对称,得到关于  $T_s/2$  对称的作用时间

$$T_{2s} = T_c/2, T_{3s} = T_b/2$$

$$T_{1s} = T_{4s} = T_a/4$$

对每个扇区的三角形区域进行分析,根据对称性很容易得到整个复平面虚拟空间电矢量合成的情况。

### 1.4 合成矢量的确定及作用时间的计算

假定中点电压能很好地控制在平衡状态,则三电平逆变器有效输出电矢量在空间的分布如图 2 所示。根据式(1)很容易计算出各有效输出电矢量在  $\alpha\beta$  平面上的坐标。通过使用与参考输出空间电矢量最接近的 3 个电矢量来合成参考矢量,就能计算出各合成矢量作用的时间(假设作用时间为  $d_1, d_2, d_3$ , 参考输出电矢量为  $\vec{V}^*$ , 合成矢量  $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$ ), 表示为矩阵形式则有

$$\begin{bmatrix} V_\alpha^* \\ V_\beta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha 1} & V_{\alpha 2} & V_{\alpha 3} \\ V_{\beta 1} & V_{\beta 2} & V_{\beta 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \tag{1}$$

合成矢量作用的时间  $d_1, d_2, d_3$  满足

$$d_1 + d_2 + d_3 = 1 \tag{2}$$

综合式(1)和式(2),得到计算合成矢量作用时间的唯一表达式

$$\begin{bmatrix} V_\alpha^* \\ V_\beta^* \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha 1} & V_{\alpha 2} & V_{\alpha 3} \\ V_{\beta 1} & V_{\beta 2} & V_{\beta 3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式(3)可进一步变换为

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha 1} & V_{\alpha 2} & V_{\alpha 3} \\ V_{\beta 1} & V_{\beta 2} & V_{\beta 3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_\alpha^* \\ V_\beta^* \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

对图 2 所示的所有三角形区域进行编号,将每个三角形的 3 个顶点所对应的的 3 个空间电矢量作为合成矢量候选电矢量。采用这一模式,由于参考矢量最接近的 3 个电压矢量可以唯一确定输出该参考矢量,故仅当合成矢量  $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$  为参考矢量所在三角形 3 个顶点时,式(4)所计算的作用时间  $d_1, d_2, d_3$  全部大于 0,从而可以确定参考空间电矢量所在扇区和三角形区域。

## 2 三电平逆变器中点电压的平衡控制

表 2 显示小矢量  $SP$  和  $SN$  输出相同的电压矢量,而对中点电压的影响却相反。从空间电压矢量控制的角度看,中点电压控制的关键就在于采用合适的小矢量以产生期望极性的平均中点电流来平衡电容电压。因此,可以考虑在保证输出线电压不畸变的情况下控制正负小矢量的输出来平衡中点电位。

采用对称的 8 段方式矢量合成序列能得到至少 1 对正负小矢量,通过检测该矢量作用时连接到中点的某相交流电流方向,就可以知道该小矢量对直流侧电容电压的影响方向,并考虑直流电容电压  $U_{c1}$  和  $U_{c2}$  的不平衡方向,来调整正负小矢量的相对作用时间,即对  $T_1$  和  $T_4$  进行合理分配就可以调节中点电位。

以参考输出矢量在图 4 中  $B$  三角形区域为例,设  $k$  为中点电压调整系数,一般取  $0.25 < k < 0.75$ 。使矢量  $U_1$  的正小矢量作用时间  $T_1 = kT_a$ ,其负小矢量作用时间  $T_4 = (1-k)T_a$ ,具体控制规律是:① 当中点电压平衡时,即  $U_{c1} = U_{c2}$  时, $k$  取 0.5,输出正负小矢量作用时间相同,对 中点电压不产生影响;② 当  $U_{c1} > U_{c2}$  时,且此时首发小矢量中点电流的方向为流入,则  $k > 0.5$ ,否则  $k < 0.5$ ;③ 当  $U_{c1} < U_{c2}$  时,且此时首发小矢量中点电流的方向为流入,则  $k < 0.5$ ,否则  $k > 0.5$ 。

这种闭环中点控制方案实质上是一种磅-磅滞环控制,该控制方法算法简单,易于实现,而且仅需要每相电流的方向信息(不需要大小)。

这里介绍另外一种更简单的中点电位控制方法。

以图 4 为例,参考矢量位于三角形区域  $A$  和  $C$  时,输出开关模式切换序列可以如图 5 所示的 2 种情况。

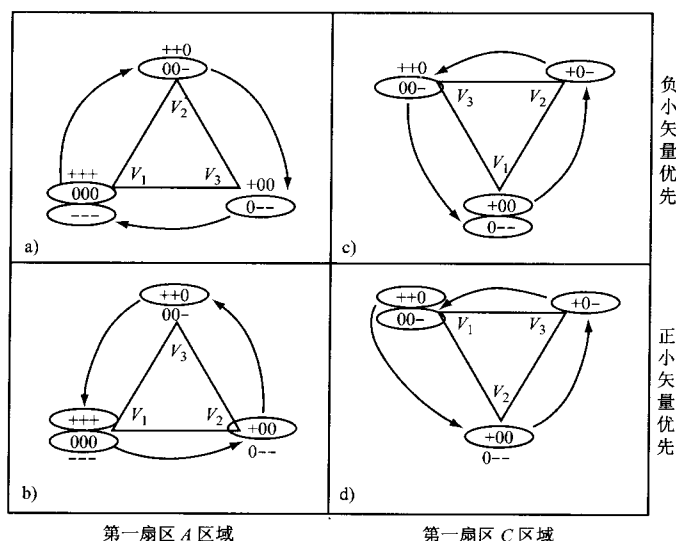


图 5 中点电位控制开关切换模式

图 4A 三角形区域:a) 输出作用序列只采用负小矢量,采用这种开关模式切换序列,当中点电流的方向为流入,导致中点电位上升,而中点电流的方向为流出时,导致中点电位下降;b) 输出作用序列只采用负小矢量,采用这种开关模式切换序列,当中点电流的方向为流入,导致中点电位下降,而中点电流的方向为流出时,导致中点电位上升。而在  $C$  三角形区域:c) 输出正小矢量  $+00$  和负小矢量  $0--$  作用时间相同,而负小矢量  $00-$  在中点电流的方向为流入,导致中点电位上升,中点电流的方向为流出时,导致中点电位下降;d) 输出正小矢量  $++0$  和负小矢量  $00-$  作用时间相同,而正小矢量  $++0$  在中点电流的方向为流入,导致中点电位下降,中点电流的方向为流出时,导致中点电位上升。在  $B$  和  $D$  三角形区域,由于只有 1 种输出序列,且输出序列中两正负小矢量作用时间相同,不能进行中点电压控制。

采用以上方式的中点电压控制方式有几个好处:控制更简单,仅需要改变输出合成矢量的作用序列就可

以调节中点电位;避免了  $T_1$  和  $T_4$  作用时间的计算过程中可能导致的输出作用时间小于器件死区时间,也降低了器件切换时间过短导致的电压脉冲。但是该方法有一个缺点,即不能在整个复平面的范围内控制中点电压的波动。

### 3 仿真及结果分析

为验证提出的中点电压平衡控制方法,建立了二极管嵌位式三电平逆变器的主电路,以三相交流电动机为负载,针对电机启动、突加额定负载到停机的整个过程进行了仿真。构建的系统仿真模型如图 6 所示。

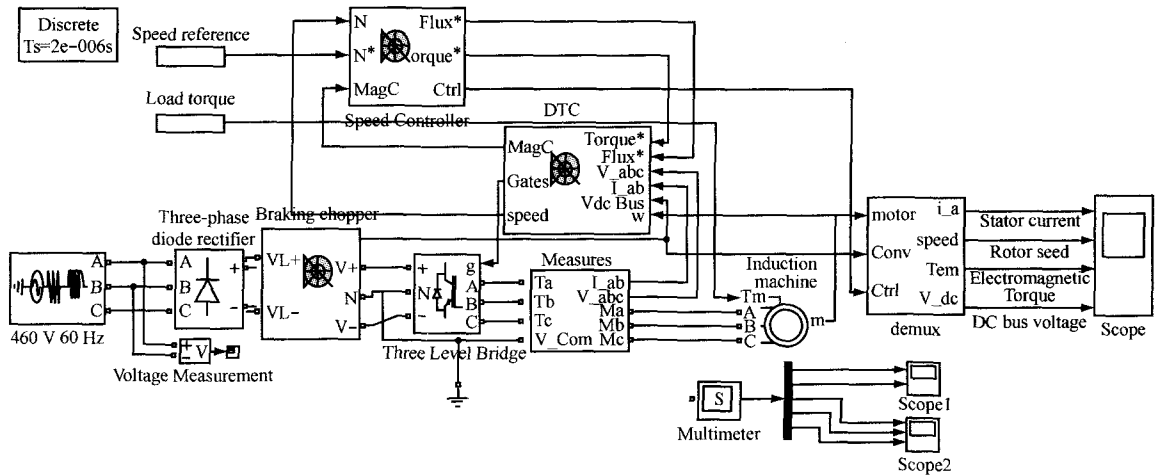


图 6 系统仿真模型

空间电矢量的合成采用 SVPWM 控制算法,模型的具体实现见图 7。其中,三电平逆变器虚拟空间电矢量模型通过 ramp generator 模块产生调制脉冲,合成矢量的确定和开关时间的计算由 switching time calculator 模块计算,通过 gates logic 模块产生合成矢量序列开关控制信号,此外,gates logic 模块还负责中点电压的控制。中点电压的控制采用了前述的简单改变合成矢量输出作用序列控制中点电压的方法。

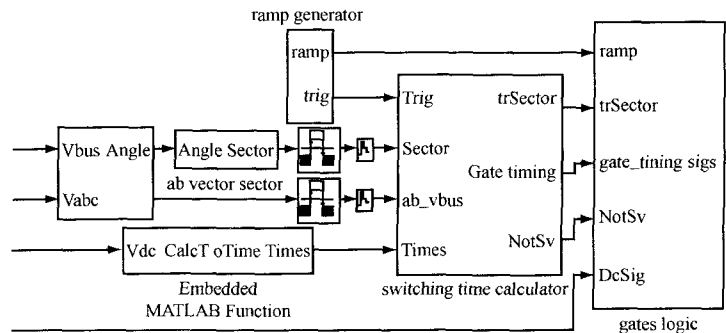


图 7 三电平虚拟矢量的合成

仿真模型采用三相鼠笼式交流电动机为负载,参数设置见表 3。模型对负载交流电机在空载启动、突加和突卸额定负载以及停止等典型应用情景进行了仿真。得到的仿真结果见表 3。

图 8 为负载电机在给定转速 500 r/min,空载启动,待系统稳定后 1.5 s 突加额定负载转矩 792 N·m,系统稳定后 2.5 s 突加反向负载转矩 -792 N·m,0—2.8 s 给定控制转速为 500 r/min,2.8—3.5 s 给定控制转速为 0 r/min 的转速和转矩响应曲线。图 9 为负载电机对应工况下的 A 相电压、电流波形。图 10 为给定转速 500 r/min,空载启动,待系统稳定后 1.5 s 突加额定负载转矩 792 N·m 中点电压波动曲线。

由图 10 可知直流侧上桥臂电容电压在中心电压 0 V 上下波动,动态时波动幅值不超过  $\pm 30$  V,幅度变化不超过  $\pm 5\%$ (对应直流侧电压 790 V);稳态时波动幅值不超过  $\pm 10$  V,幅度变化不超过  $\pm 2\%$ ,控制效果较好。系统稳定时控制效果更佳,如 0.6 s 左右到达空载转矩,中点电压波动明显变小。

表3 交流电机参数

参数名称	值	参数名称	值
仿真步长	$2 \times 10^{-6} \text{ s}$	仿真时间	3.5 s
额定功率	150 kW	定子电阻	$14.85 \times 10^{-3} \Omega$
额定电压	460 V	定子电感	$0.3027 \times 10^{-3} \text{ H}$
电压频率	60 Hz	转子电阻	$9.295 \times 10^{-3} \Omega$
转动惯量	$3.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	转子电感	$0.3027 \times 10^{-3} \text{ H}$
电机极对数	2	定转子互感	$10.46 \times 10^{-3} \text{ H}$
直流电容	$6 \times 10^{-3} \text{ F}$	制动电阻	$8 \Omega$
转速控制周期	140 ns	转矩控制周期	20 ns

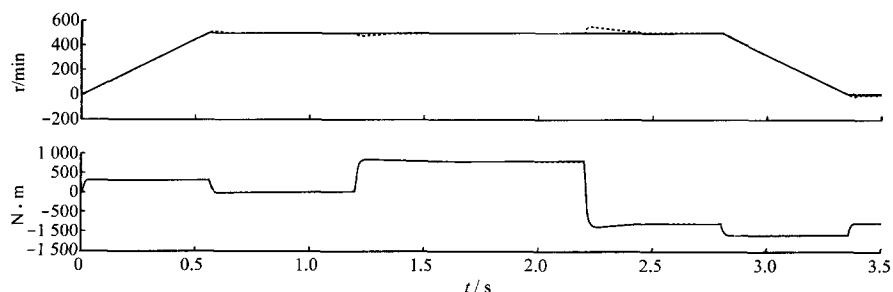


图8 三相交流电动机转速、转矩响应曲线

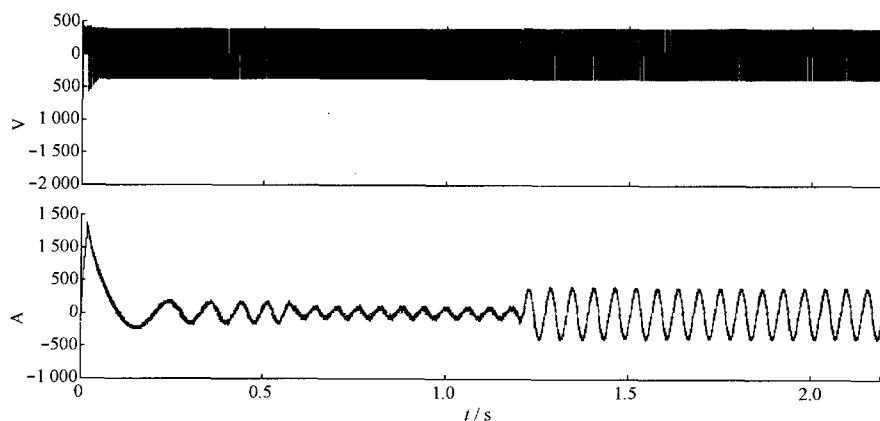


图9 A相电压、电流仿真曲线

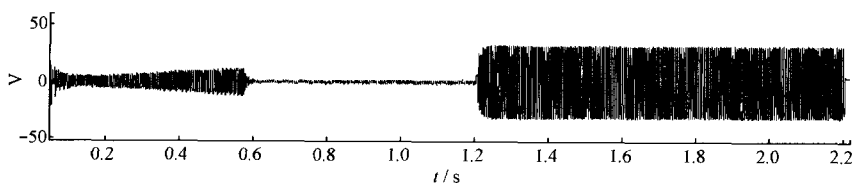


图10 中点电压变化曲线

## 4 总结

提出通过变换输出作用序列控制三电平中点电压的方法,仅需要改变输出合成矢量的作用序列就可以调节中点电位,避免了复杂的运算,控制算法更为简单。同时在矢量合成中避免了  $T_1$  和  $T_4$  作用时间的计算,降低了因计算得到的  $T_1$  和  $T_4$  输出作用时间小于器件死区时间的可能性,因此也降低了器件切换时间过短导致的电压尖峰脉冲。提出中点电压控制方法虽然不能在整个复平面的范围内控制中点电压的波动,

(下转第 158 页)

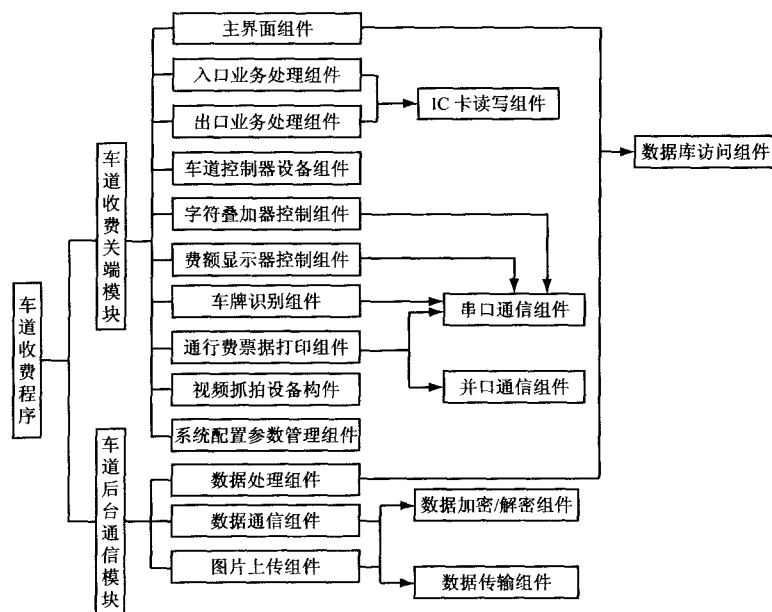


图10 车道软件体系结构

## 5 结 语

基于高速公路综合营运的管理理念,吸收 SOA 软件设计思想精髓,采用开放式企业级软件体系架构进行系统设计,提高了营运单位的管理信息化和办公自动化水平,发挥了高速公路营运管理优势,增强了高速公路营运管理单位的综合竞争能力。目前,基于该设计思路的高速公路综合营运业务管理系统已经应用于重庆市高速公路的收费系统中,达到了预期目标。

### 参考文献:

- [1] 魏东,陈晓江,房鼎益. 基于 SOA 体系结构的软件开发方法研究[J]. 微电子学与计算机, 2005(6): 75-78.
- [2] 杨春金,郑国栋. 高速公路综合信息管理系统设计与实现[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007(1): 125-128.
- [3] 陈泽徐. 粤赣高速公路信息系统设计与实现[J]. 中国科技信息, 2009(8): 281-282.
- [3] 胡文鹏,刘静,周小波. 基于构件总线的物流信息平台的设计与实现[J]. 电脑知识与技术, 2009(13): 89-91.
- [5] 刘绍健. 高速公路运营状况分析评价与对策研究. 华东公路, 2010(4): 86-88.

### (上接第 151 页)

但是在实际仿真应用中显示其控制效果良好,达到了控制中点电压的波动在直流母线电压的 $\pm 5\%$ 以内的控制要求,不失为一种在工程应用中可以采用的简化方法。另外,当电机拖动负载发生变化时,中点电压波动较大,特殊情况下应考虑负载变化对中点电压控制效果的影响,仔细评估其影响后决定是否采用本文的方法。

### 参考文献:

- [1] 张晓丽,石新春,王毅. 多电平变换器拓扑结构和控制方法研究[J]. 电源技术应用, 2003, 6(7): 330-335.
- [2] 谢鸣静,钟彦如,徐波. 一种新型的三电平逆变器中点电压平衡控制策略[J]. 变频器世界, 2006(5): 47-50.
- [3] 梁英. 三电平逆变器空间电压矢量调制算法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2009.
- [4] Jouanne A. A Simple Method for Balancing the DC link Voltage of Three level Inverters[C]//IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 739-745.
- [5] 吴守箴. 电气传动的脉宽调制控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [6] 李崇坚. 交流同步电机调速系统[M]. 北京:科学出版社, 2007.