(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 102611346 B
(45)授权公告日 2014.12.10

(21)申请号 201210116432.X

(22)申请日 2012.04.19

(73)专利权人 南车株洲电力机车研究所有限公司
地址 412001 湖南省株洲市石峰区田心北门时代路169号

(72)发明人 冯江华 甘韦韦 刘可安 尚敬 杨大成 梅文庆

(74)专利代理机构 上海硕力知识产权代理事务所 31251
代理人 王法男

(51)Int.Cl.
H02M 7/483(2007.01)

(56)对比文件
CN 101442290 A,2009.05.27, 权利要求1-2, 说明书第2页第3至5段,第7页第3段, 第8页第6段, 第9页第4-9段, 第10页第3-4段及公式7-8, 第12页1-4段及公式12,第14页第5－14段,及附图8.
CN 101615860 A,2009.12.30, 说明书第3页第2段至第4页第1段.
CN 101340156 B,2010.12.29, 全文.
US 4024342 A,1977.05.17, 全文.

审查员 付文英

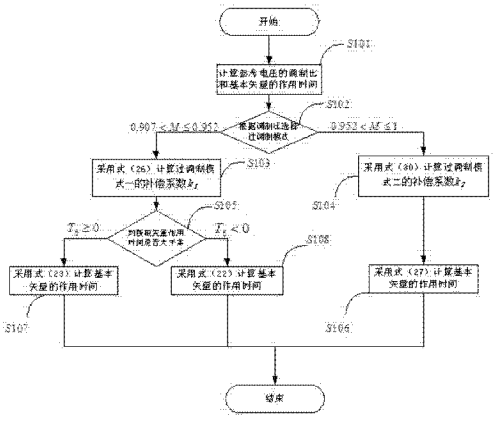
权利要求书4页 说明书16页 附图7页

(54)发明名称

一种三电平双模式空间矢量过调制方法及其系统

(57)摘要

本发明公开了一种三电平双模式空间矢量过调制方法及其系统,三电平双模式空间矢量过调制方法包括:计算参考电压矢量的调制比和基本矢量的作用时间;根据调制比确定参考电压矢量所处的过调制区,从而选择不同的过调制模式;若参考电压矢量处于过调制模式一,则根据调制比计算过调制模式一的补偿系数,并根据短矢量的作用时间和补偿系数修正基本矢量作用时间;若参考电压矢量处于过调制模式二,则根据调制比计算过调制模式二的补偿系数,并根据补偿系数修正基本矢量作用时间。本发明原理直观、易于理解、步骤简单、计算量小,便于工程化应用;输出电压幅值相位误差小,谐波含量低,能够有效减少过调制区的中点电位波动。



CN 102611346 B

1. 一种三电平双模式空间矢量过调制方法，其特征在于，包括以下步骤：

(A)：按照线性调制区的方法计算参考矢量的调制比和基本矢量的作用时间；

(B)：根据调制比确定参考电压矢量所处的过调制区为过调制Ⅰ区，或是过调制Ⅱ区，从而选择不同过调制模式；

(C)：若参考电压矢量所处的过调制区为过调制Ⅰ区，则选择空间矢量过调制模式一，并计算模式一的补偿系数，同时根据补偿系数和短矢量的作用时间修正包括短矢量、中矢量和长矢量在内的基本矢量的作用时间；

(D)：若参考电压矢量所处的过调制区为过调制Ⅱ区，则选择空间矢量过调制模式二，并计算模式二的补偿系数，同时根据补偿系数修正包括短矢量、中矢量和长矢量在内的基本矢量的作用时间；

当采用过调制模式一，同时短矢量的作用时间 $T_6 \geq 0$ 时，根据以下公式修正基本矢量的作用时间：

$$\begin{cases} T_4' = T_4 + \dfrac{k_1(T_4 + T_s)T_6}{2T_s - T_6} \\ T_5' = T_5 + \dfrac{k_1 T_5 T_6}{2T_s - T_6} \\ T_6' = T_6 - k_1 * T_6 \end{cases}$$

其中，T_4'、T_5'、T_6' 分别为过调制模式一经过修正后合成输出电压矢量的长矢量 U_4、中矢量 U_5 和短矢量 U_6 的作用时间，T_4、T_5、T_6 分别为过调制Ⅰ区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_4、中矢量 U_5、短矢量 U_6 的作用时间，k_1 为过调制模式一的补偿系数，T_s 为参考电压矢量 U_{ref} 总的作用时间；

按照以下公式计算过调制模式一的补偿系数 k_1：

$k_1 = M \times 22.222 - 20.155$

其中，M 为参考电压矢量的调制比；

所述参考电压矢量的调制比 M 根据以下公式进行计算：

$$M = \frac{U_{ref}}{\frac{2}{\pi} * U_{dc}}$$

其中，U_{ref} 为参考电压矢量的幅值，U_{dc} 为直流侧电压。

2. 根据权利要求 1 所述的一种三电平双模式空间矢量过调制方法，其特征在于，所述步骤 C 中根据短矢量的作用时间和补偿系数修正基本矢量的作用时间的过程包括：当所述基本矢量中的短矢量的作用时间大于零时，将短矢量的作用时间按照设定比例和分配规则分别补偿给长矢量和中矢量，并将补偿系数与调制比进行线性化处理。

3. 根据权利要求 2 所述的一种三电平双模式空间矢量过调制方法，其特征在于，所述步骤 D 中根据补偿系数修正基本矢量的作用时间的过程包括：将所述基本矢量中的中矢量的作用时间按照设定的比例补偿给长矢量，并将补偿系数与调制比进行线性化处理。

4. 根据权利要求 3 所述的一种三电平双模式空间矢量过调制方法，其特征在于：当所

述参考电压矢量的调制比 M 为 :0.907<M ≤ 0.952 时,参考电压矢量所处的过调制区为过调制Ⅰ区,选择过调制模式一。

5. 根据权利要求 3 所述的一种三电平双模式空间矢量过调制方法,其特征在于 :当所述参考电压矢量的调制比 M 为 :0.952<M ≤ 1 时,参考电压矢量所处的过调制区为过调制Ⅱ区,选择过调制模式二。

6. 根据权利要求 5 所述的一种三电平双模式空间矢量过调制方法,其特征在于,当采用过调制模式二时,按照以下公式计算过调制模式二的补偿系数 k_2 :

$k_2 = M \times 20.833 - 19.833$

其中,M 为参考电压矢量的调制比。

7. 根据权利要求 6 所述的一种三电平双模式空间矢量过调制方法,其特征在于,当采用过调制模式一,同时短矢量的作用时间 $T_6<0$ 时,根据以下公式修正基本矢量的作用时间 :

$$\begin{cases} T_4' = T_s * \dfrac{T_4 + 0.5T_6}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_5' = T_s * \dfrac{T_5}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_6' = 0 \end{cases}$$

其中,T_4' 、T_5' 、T_6' 分别为过调制模式一经过修正后合成输出电压矢量的长矢量 U_4、中矢量 U_5 和短矢量 U_6 的作用时间,T_4、T_5、T_6 分别为过调制Ⅰ区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_4、中矢量 U_5、短矢量 U_6 的作用时间,T_s 为参考电压矢量 U_{ref} 总的作用时间。

8. 根据权利要求 6 所述的一种三电平双模式空间矢量过调制方法,其特征在于,当采用过调制模式二时,根据以下公式修正基本矢量的作用时间 :

$$\begin{cases} T_7' = T_7 + (T_s - T_7) * k_2 \\ T_8' = (T_s - T_7) * (1 - k_2) \\ T_9' = 0 \end{cases}$$

其中,T_7' 、T_8' 、T_9' 分别为过调制模式二经过修正后合成输出电压矢量的长矢量 U_7、中矢量 U_8 和短矢量 U_9 的作用时间,T_7、T_8、T_9 分别为过调制Ⅱ区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_7、中矢量 U_8 和短矢量 U_9 的作用时间,k_2 为过调制模式二的补偿系数。

9. 一种三电平双模式空间矢量过调制系统,其特征在于,包括 :

作用时间和调制比计算单元 (101)、过调制模式选择单元 (102)、基本矢量作用时间计算单元 (103) 和基本矢量作用时间输出单元 (104) ;

所述作用时间和调制比计算单元 (101) 的输入给定为参考矢量,按照线性调制区的方法计算参考矢量的调制比和基本矢量的作用时间,并将调制比计算结果输出至过调制模式选择单元 (102) ;

所述过调制模式选择单元 (102) 根据调制比确定参考矢量所处的过调制区为过调制Ⅰ区,还是过调制Ⅱ区,从而选择不同的过调制模式,过调制模式选择单元 (102) 将参考矢

量所处的过调制模式选择结果输出至基本矢量作用时间计算单元（103）；

所述基本矢量作用时间计算单元（103）根据参考矢量所处的过调制模式计算相应过调制模式的补偿系数，若参考电压矢量所处的过调制区为过调制Ⅰ区，则选择空间矢量过调制模式一，并计算模式一的补偿系数，同时根据补偿系数和短矢量的作用时间修正包括短矢量、中矢量和长矢量在内的基本矢量的作用时间，将基本矢量的作用时间输出至基本矢量作用时间输出单元（104）；若参考电压矢量所处的过调制区为过调制Ⅱ区，则选择空间矢量过调制模式二，并计算模式二的补偿系数，同时根据补偿系数修正包括短矢量、中矢量和长矢量在内的基本矢量的作用时间，将基本矢量的作用时间输出至基本矢量作用时间输出单元（104）；

当参考电压矢量处于过调制模式一，且短矢量的作用时间 $T_6 \geqslant 0$ 时，修正基本矢量的作用时间为：

$$\begin{cases} T_4' = T_4 + \dfrac{k_1(T_4 + T_s)T_6}{2T_s - T_6} \\ T_5' = T_5 + \dfrac{k_1 T_5 T_6}{2T_s - T_6} \\ T_6' = T_6 - k_1 * T_6 \end{cases}$$

其中，T_4'、T_5'、T_6' 分别为过调制模式一经过修正后合成输出电压矢量的长矢量 U_4、中矢量 U_5 和短矢量 U_6 的作用时间，T_4、T_5、T_6 分别为过调制Ⅰ区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_4、中矢量 U_5、短矢量 U_6 的作用时间，k_1 为过调制模式一的补偿系数，T_s 为参考电压矢量 U_{ref} 总的作用时间；

过调制模式一的补偿系数 $k_1 = M \times 22.222 - 20.155$；

其中，M 为参考电压矢量的调制比；

所述参考电压矢量的调制比 M 根据以下公式进行计算：

$$M = \frac{U_{ref}}{\frac{2}{\pi} * U_{dc}}$$

其中，U_{ref} 为参考电压矢量的幅值，U_{dc} 为直流侧电压。

10. 根据权利要求 9 所述的一种三电平双模式空间矢量过调制系统，其特征在于，

所述的过调制Ⅰ区设定为：$0.907 < M \leqslant 0.952$，此时参考电压矢量所处的过调制区为过调制Ⅰ区，同时选择过调制模式一；

所述的过调制Ⅱ区设定为：$0.952 < M \leqslant 1$，此时参考电压矢量所处的过调制区为过调制Ⅱ区，同时选择过调制模式二；

其中，M 为参考电压矢量的调制比。

11. 根据权利要求 10 所述的一种三电平双模式空间矢量过调制系统，其特征在于，所述基本矢量作用时间计算单元（103）根据以下规则计算相应过调制模式的补偿系数：

当参考矢量处于过调制模式二时，过调制模式二的补偿系数 $k_2 = M \times 20.833 - 19.833$。

12. 根据权利要求 11 所述的一种三电平双模式空间矢量过调制系统，其特征在于，所

述基本矢量作用时间计算单元 (103) 进一步根据以下规则得到并输出经过修正的基本矢量作用时间：

当参考电压矢量处于过调制模式一，且短矢量的作用时间 T6<0 时，修正基本矢量的作用时间为：

$$\begin{cases} T_4' = T_s * \dfrac{T_4 + 0.5T_6}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_5' = T_s * \dfrac{T_5}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_6' = 0 \end{cases}$$

其中，T_4' 、T_5' 、T_6' 分别为过调制模式一经过修正后合成输出电压矢量的长矢量 U_4、中矢量 U_5 和短矢量 U_6 的作用时间，T_4、T_5、T_6 分别为过调制 I 区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_4、中矢量 U_5、短矢量 U_6 的作用时间，T_s 为参考电压矢量 U_{ref} 总的作用时间。

13. 根据权利要求 12 所述的一种三电平双模式空间矢量过调制系统，其特征在于，所述基本矢量作用时间计算单元 (103) 进一步根据以下规则得到并输出经过修正的基本矢量作用时间：

当参考电压矢量处于过调制模式二时，修正基本矢量的作用时间为：

$$\begin{cases} T_7' = T_7 + (T_s - T_7) * k_2 \\ T_8' = (T_s - T_7) * (1 - k_2) \\ T_9' = 0 \end{cases}$$

其中，T_7' 、T_8' 、T_9' 分别为过调制模式二经过修正后合成输出电压矢量的长矢量 U_7、中矢量 U_8 和短矢量 U_9 的作用时间，T_7、T_8、T_9 分别为过调制 II 区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_7、中矢量 U_8 和短矢量 U_9 的作用时间，k_2 为过调制模式二的补偿系数。

一种三电平双模式空间矢量过调制方法及其系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种空间矢量脉宽调制方法及其系统，尤其是涉及一种应用于交流传动控制系统的三电平空间矢量脉宽调制的简易过调制方法及其系统。

背景技术

[0002] PWM(Pulse Width Modulation，脉冲宽度调制）技术是一种现代电气系统电压输出控制方法。其原理主要基于当冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同，这就是面积等效原理。脉冲宽度调制就是利用这个原理对脉冲的宽度进行调制的技术，即通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效地获得所需要的波形（含幅值和相位）。脉冲宽度调制应用在交流传动领域，主要的功能是根据参考电压，调制出 PWM 波，控制主电路的开关器件从而获得与参考电压效果一致的输出电压。三电平变流器是指输出电压（相电压）的电平数等于 3 的变流器，三电平变流器相比于传统的两电平变流器具有控制方式灵活、输出电压的相位和幅值便于调节和控制、输出电压的谐波含量低、开关器件的电压应力小、适于大功率输出等特点。因此在各种大功率领域得到了广泛应用，如高压大功率交流变频调速、直流输电、大功率电能质量综合治理、大功率感应加热、大功率不间断电源以及风力发电和太阳能发电等新能源发电。

[0003] SVPWM(空间矢量脉冲宽度调制，Space Vector Pulse Width Modulation)控制策略是依据变流器空间电压矢量切换来控制变流器的一种控制策略。SVPWM 早期是由日本学者针对交流电动机变频驱动而提出的，后来因其比正弦脉宽调制 (SPWM) 具有更高的直流侧电压利用率、更好的电机动态响应、更小的转矩脉动、同时易于数字实现等特点，因此在交流电机变频调速等得到了广泛应用。

[0004] 1980 年日本长冈科技大学的南波江章 (A.Kira Nabae) 在德国学者 Holtz 的基础上提出了二极管箝位三电平主电路的拓扑，这是开发最早的一种三电平变流器拓扑，同时也是目前发展最成熟的三电平变流器拓扑。二极管箝位三电平主电路如图 1 所示。这种逆变器每一相输出电压有三种状态 :+Vdc/2、0、-Vdc/2，即每一相输出分别有 :正 (P)、零 (O)、负 (N) 三个开关状态。因此三相三电平逆变器就可以输出 33 = 27 种电压状态组合，对应 27 组不同的逆变器开关状态，在 α-β 平面上，三电平逆变器 27 组开关状态所对应的空间相量如附图 2 所示。图中标出不同开关状态组合和空间相量的对应关系，如其中的 [PON] 表示 A、B、C 三相的输出对应的开关状态为 :正 (P)、零 (O)、负 (N)。

[0005] 根据基本矢量的长度，可以将附图 2 中的 27 个矢量分为四类 :

[0006] 长矢量 :位于外六边形的各个顶点，长度为 $2*V_{dc}/3$，共有 6 个。

[0007] 中矢量 :位于外六边形各边的中点，长度为 $V_{dc}/\sqrt{3}$，共有 6 个。

[0008] 短矢量 :位于内六边形的各个顶点，长度为 $V_{dc}/3$，共有 12 个。

[0009] 零矢量 :位于原点，长度为 0，共有 3 个。

[0010] 如附图3所示为二电平SVPWM的基本矢量的分布图。其中$\vec{V}_0 \sim \vec{V}_7$是基本矢量，$\vec{V}_1 \sim \vec{V}_6$称为有效矢量，矢量的模 2*Vdc/3，为$\vec{V}_0$、$\vec{V}_7$的模为零，则称为零矢量，$\vec{V}_s$为参考电压矢量。

SVPWM 的基本原理是利用靠近参考电压矢量的两个有效矢量来合成参考电压矢量，不足的时间用零矢量来补齐。假设参考电压矢量在第一扇区，假设 $\vec{V}_1$ 的作用时间为 T_1，$\vec{V}_2$ 的作用时间为 T_2，零矢量的作用时间为 T_0，T_s 为开关周期，则根据平行四边形合成原则可得：

[0011] $T_1+T_2+T_0 = T_s$

[0012]
$$\frac{V_s}{\sin\frac{2}{3}\pi} = \frac{\frac{T_1}{T_s}V_1}{\sin(\frac{\pi}{3}-\theta)} = \frac{\frac{T_2}{T_s}V_2}{\sin\theta} \qquad (1)$$

[0013] 通过公式 (1) 可得：

[0014]
$$\begin{cases} T_1 = \dfrac{\sqrt{3}V_sT_s}{V_{dc}}\sin(\dfrac{\pi}{3}-\theta) \\ T_2 = \dfrac{\sqrt{3}V_sT_s}{V_{dc}}\sin\theta \\ T_0 = T_s - T_1 - T_2 \end{cases} \qquad (2)$$

[0015] 其他扇区的计算可以同理类推，计算获得基本矢量的作用时间，根据矢量排列顺序便可以实现两电平的 SVPWM 调制。

[0016] 三电平的 SVPWM 调制的基本原理和两电平类似。但因为三电平有 27 个基本矢量，所以比两电平复杂。三电平 SVPWM 的基本思路是根据参考电压矢量所在扇区以及小三角形区域选择其临近的三个基本矢量，再利用伏秒平衡的原理，计算每个基本矢量的作用时间，最后按照一定原则排列的矢量顺序调制出脉宽调制波形。三电平 SVPWM 调制的算法主要有三类：一类为基于正交坐标系的 SVPWM 算法；一类为基于 60。坐标系的 SVPWM 算法；另外一类为基于矢量分解的 SVPWM 算法。

[0017] 对三电平变流器的参考电压进行空间矢量脉宽调制时，如果参考电压的幅值大于 $\sqrt{3}/3$ 倍的直流侧电压，此时将进入非线性调制区，如果还继续采用线性区的，调制方法将不能使变流器的输出电压跟随参考电压，导致系统控制的紊乱，因此在非线性调制区应采用不同于线性调制区的调制方法，即过调制方法。而现有的过调制方法缺陷在于，其空间矢量 PWM 调制在线性区只能达到 90.7％的调制比，为了进一步提高直流电压利用率以及满足调速系统高转矩的需求，学者们提出了 SVPWM 过调制策略。采用 SVPWM 过调制策略能将 SVPWM 的调制区间拓展到非线性区，从而将系统的调制范围从 0 ～ 90.7％延伸至 0 ～ 100％。目前学者提出了很多的过调制策略，如最小相位误差过调制、最小幅值误差过调制、基于叠加原理 SVPWM 过调制、基于空间矢量分类技术过调制等等。但现有的过调制方法及其系统仍然比较复杂，并且调制的输出电压与参考电压差别较大。

[0018] 申请人于 2009 年 03 月 11 日递交了申请号为 CN200910118197.8 的发明专利申请，该申请于 2009 年 08 月 12 日公开，公开号为 CN101505111A。该专利公开了一种三电平空间矢量的过调制方法及系统，虽然实现了三电平的过调制，但是在过调制 I 区不能保证输出电压与参考电压的相位一致，同时在过调制 II 区采用保持角的策略，实现比较复杂。

发明内容

[0019] 本发明的目的是提供一种三电平双模式空间矢量过调制方法及其系统，解决现有过调制方法算法复杂，同时输出电压和参考电压差别较大的技术问题，提出一种实现简单、输出电压准确、同时能抑制中点电位波动的过调制方法及其系统。

[0020] 为了实现上述发明目的，本发明具体提供了一种三电平双模式空间矢量过调制方法的技术实现方案，一种三电平双模式空间矢量过调制方法，包括以下步骤：

[0021] (A)：按照线性调制区的方法计算参考矢量的调制比和基本矢量的作用时间；

[0022] (B)：根据调制比确定参考电压矢量所处的过调制区为过调制 I 区，或是过调制 II 区，从而选择不同的过调制模式；

[0023] (C)：若参考电压矢量所处的过调制区为过调制 I 区，则采用空间矢量过调制模式一，并计算模式一的补偿系数，同时根据短矢量的作用时间修正基本矢量（短矢量、中矢量和长矢量）的作用时间；

[0024] (D)：若参考电压矢量所处的过调制区为过调制 II 区，则采用空间矢量过调制模式二，同时计算模式二的补偿系数，并根据补偿系数修正基本矢量（短矢量、中矢量和长矢量）的作用时间。

[0025] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，前述步骤 C 中根据短矢量的作用时间和补偿系数修正基本矢量的作用时间的过程包括：当基本矢量中的短矢量的作用时间大于零时，将短矢量的作用时间按照设定比例和分配规则分别补偿给长矢量和中矢量，并将补偿系数与调制比进行线性化处理。

[0026] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，前述步骤 D 中根据补偿系数修正基本矢量的作用时间的过程包括：将基本矢量中的中矢量的作用时间按照设定的比例补偿给长矢量，并将补偿系数与调制比进行线性化处理。

[0027] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，参考电压矢量的调制比 M 根据以下公式进行计算：

[0028] $$M = \frac{U_{ref}}{\frac{2}{\pi} * U_{dc}}$$

[0029] 其中，U_{ref} 为参考电压矢量的幅值，U_{dc} 为直流侧电压。

[0030] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，当参考电压矢量的调制比 M 为：$0.907 < M \leqslant 0.952$ 时，参考电压矢量所处的过调制区为过调制 I 区，采用过调制模式一。

[0031] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，当参考电压矢量的调制比 M 为：$0.952 < M \leqslant 1$ 时，参考电压矢量所处的过调制区为过调制 II 区，采用过调制模式二。

[0032] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，当采用过调制模式一时，按照以下公式计算过调制模式一的补偿系数 k_1：

[0033] $k_1 = M \times 22.222 - 20.155$

[0034] 其中，M 为参考电压矢量的调制比。

[0035] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，当采用过调制模式二时，按照以下公式计算过调制模式二的补偿系数 k_2：

[0036] $k_2 = M \times 20.833 - 19.833$

[0037] 其中，M 为参考电压矢量的调制比。

[0038] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，当处于过调制模式一并且零矢量的作用时间 $T_6 \geq 0$ 时，根据以下公式计算基本矢量的作用时间：

[0039]
$$\begin{cases} T_4' = T_4 + \dfrac{k_1(T_4 + T_s)T_6}{2T_s - T_6} \\ T_5' = T_5 + \dfrac{k_1 T_5 T_6}{2T_s - T_6} \\ T_6' = T_6 - k_1 * T_6 \end{cases}$$

[0040] 其中，T'_4、T'_5、T'_6 分别为过调制模式一经过修正后合成输出电压矢量的长矢量 U_4、中矢量 U_5 和短矢量 U_6 的作用时间，T_4、T_5、T_6 分别为过调制 I 区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_4、中矢量 U_5、短矢量 U_6 的作用时间，k_1 为过调制模式一的补偿系数。

[0041] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，当处于过调制模式一并且零矢量的作用时间 $T_6 < 0$ 时，根据以下公式计算基本矢量的作用时间：

[0042]
$$\begin{cases} T_4' = T_s * \dfrac{T_4 + 0.5T_6}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_5' = T_s * \dfrac{T_5}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_6' = 0 \end{cases}$$

[0043] 其中，T'_4、T'_5、T'_6 分别为过调制模式一经过调整后合成输出电压矢量的长矢量 U_4、中矢量 U_5 和短矢量 U_6 的作用时间，T_4、T_5、T_6 分别为过调制 I 区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_4、中矢量 U_5、短矢量 U_6 的作用时间，T_s 为参考电压矢量 U_{ref} 总的作用时间。

[0044] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，当处于过调制模式二时，根据以下公式计算基本矢量的作用时间：

[0045]
$$\begin{cases} T_7' = T_7 + (T_s - T_7) * k_2 \\ T_8' = (T_s - T_7) * (1 - k_2) \\ T_9' = 0 \end{cases}$$

[0046] 其中，T'_7、T'_8、T'_9 分别为过调制模式二经过调整后合成输出电压矢量的长矢量 U_7、中矢量 U_9 和短矢量 U_9 的作用时间，T_7、T_8、T_9 分别为过调制 II 区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_7、中矢量 U_8 和短矢量 U_9 的作用时间，k_2 为过调制模式二的补偿系数。

[0047] 本发明还另外具体提供了一种三电平双模式空间矢量过调制系统的技术实现方案，一种三电平双模式空间矢量过调制系统，包括：作用时间和调制比计算单元、过调制模

式选择单元、基本矢量作用时间计算单元和基本矢量作用时间输出单元；

[0048] 作用时间和调制比计算单元的输入给定为参考矢量，按照线性调制区的方法计算参考矢量的调制比和基本矢量的作用时间，并将调制比计算结果输出至过调制模式选择单元；

[0049] 过调制模式选择单元根据调制比确定参考矢量所处的过调制区为过调制 I 区，还是过调制 II 区，从而选择不同的过调制模式，过调制模式选择单元将参考矢量所处的过调制模式选择结果输出至基本矢量作用时间计算单元；

[0050] 基本矢量作用时间计算单元根据参考矢量所处的过调制模式计算相应过调制模式的补偿系数，若参考电压矢量所处的过调制区为过调制 I 区，则选择空间矢量过调制模式一，并计算模式一的补偿系数，同时根据补偿系数和短矢量的作用时间修正包括短矢量、中矢量和长矢量在内的基本矢量的作用时间，将基本矢量的作用时间输出至基本矢量作用时间输出单元；若参考电压矢量所处的过调制区为过调制 II 区，则选择空间矢量过调制模式二，并计算模式二的补偿系数，同时根据补偿系数修正包括短矢量、中矢量和长矢量在内的基本矢量的作用时间，将基本矢量的作用时间输出至基本矢量作用时间输出单元。

[0051] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，过调制 I 区设定为：$0.907 < M \leq 0.952$，此时参考电压矢量所处的过调制区为过调制 I 区，同时选择过调制模式一；过调制 II 区设定为：$0.952 < M \leq 1$，此时参考电压矢量所处的过调制区为过调制 II 区，同时选择过调制模式二；其中，M 为参考电压矢量的调制比。

[0052] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，基本矢量作用时间计算单元根据以下规则计算相应过调制模式的补偿系数：

[0053] 当参考矢量处于过调制模式一时，过调制模式一的补偿系数 $k_1 = M \times 22.222 - 20.155$；

[0054] 当参考矢量处于过调制模式二时，过调制模式二的补偿系数 $k_2 = M \times 20.833 - 19.833$；

[0055] 其中，M 为参考矢量的调制比。

[0056] 作为本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法技术方案的进一步改进，基本矢量作用时间计算单元根据以下规则得到并输出经过修正的基本矢量作用时间：

[0057] 当参考电压矢量处于过调制模式一，且零矢量的作用时间 $T_6 \geq 0$ 时，修正基本矢量的作用时间为：

[0058]
$$\begin{cases} T_4' = T_4 + \dfrac{k_1(T_4 + T_s)T_6}{2T_s - T_6} \\ T_5' = T_5 + \dfrac{k_1 T_5 T_6}{2T_s - T_6} \\ T_6' = T_6 - k_1 * T_6 \end{cases}$$

[0059] 当参考电压矢量处于过调制模式一，且零矢量的作用时间 $T_6 < 0$ 时，修正基本矢量的作用时间为：

[0060] $$\begin{cases} T_4' = T_s * \dfrac{T_4 + 0.5T_6}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_5' = T_s * \dfrac{T_5}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_6' = 0 \end{cases}$$

[0061] 其中，T'_4、T'_5、T'_6 分别为过调制模式一经过修正后合成输出电压矢量的长矢量 U_4、中矢量 U_5 和短矢量 U_6 的作用时间，T_4、T_5、T_6 分别为过调制 I 区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_4、中矢量 U_5、短矢量 U_6 的作用时间，k_1 为过调制模式一的补偿系数，T_s 为参考电压矢量 U_{ref} 总的作用时间；

[0062] 当参考电压矢量处于过调制模式二时，修正基本矢量的作用时间为：

[0063] $$\begin{cases} T_7' = T_7 + (T_s - T_7) * k_2 \\ T_8' = (T_s - T_7) * (1 - k_2) \\ T_9' = 0 \end{cases}$$

[0064] 其中，T'_7、T'_8、T'_9 分别为过调制模式二经过修正后合成输出电压矢量的长矢量 U_7、中矢量 U_8 和短矢量 U_9 的作用时间，T_7、T_8、T_9 分别为过调制 II 区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_7、中矢量 U_8 和短矢量 U_9 的作用时间，k_2 为过调制模式二的补偿系数。

[0065] 通过实施上述本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法及其系统的技术方案，具有以下技术效果：

[0066] (1) 本发明过调制算法原理直观，易于理解；

[0067] (2) 本发明过调制算法实现步骤简单，计算量小，便于工程化应用；

[0068] (3) 本发明输出电压幅值和相位误差小，谐波含量低；

[0069] (4) 本发明有效减少过调制区的直流侧中点电位的波动。

附图说明

[0070] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0071] 图 1 是本发明所应用的二极管箝位三电平逆变器的主电路原理图；

[0072] 图 2 是本发明所应用的三电平逆变器的基本空间矢量分布及三角形区域标号示意图；

[0073] 图 3 是二电平 SVPWM 调制基本矢量分布示意图；

[0074] 图 4 是本发明三电平 SVPWM 调制分区示意图；

[0075] 图 5 是本发明三电平双模式空间矢量过调制方法一种具体实施方式在过调制 I 区的参考电压矢量轨迹示意图；

[0076] 图 6 是本发明三电平双模式空间矢量过调制方法一种具体实施方式在过调制 II

区的参考电压矢量轨迹示意图；

[0077] 图 7 是本发明三电平双模式空间矢量过调制方法一种具体实施方式在过调制模式一的输出电压矢量和参考电压矢量示意图；

[0078] 图 8(a) 是本发明三电平双模式空间矢量过调制方法中过调制模式一当 M ＝ 0.907 时的输出电压矢量轨迹示意图；

[0079] 图 8(b) 是本发明三电平双模式空间矢量过调制方法中过调制模式一当 0.907 ＜ M ＜ 0.952 时的输出电压矢量轨迹示意图；

[0080] 8(c) 是本发明三电平双模式空间矢量过调制方法中当 M ＝ 0.952 时处于过调制 I 区和过调制 II 区临界状态的输出电压矢量轨迹示意图；

[0081] 图 9(a) 是本发明三电平双模式空间矢量过调制方法中过调制模式二当 M ＝ 0.952 时的输出电压矢量轨迹示意图；

[0082] 图 9(b) 是本发明三电平双模式空间矢量过调制方法中过调制模式二当 0.952 ＜ M ＜ 1 时的输出电压矢量轨迹示意图；

[0083] 图 9(c) 是本发明三电平双模式空间矢量过调制方法中当 M ＝ 1 时处于过调制 II 区的极限状态的输出电压矢量轨迹示意图；

[0084] 图 10 是本发明三电平双模式空间矢量过调制方法一种具体实施方式的程序流程图；

[0085] 图 11 是基于本发明三电平双模式空间矢量过调制方法的过调制系统一种具体实施方式的结构框图；

[0086] 图 12 是利用本发明三电平双模式空间矢量过调制方法在 M ＝ 0.8901 时的输出线电压波形图；

[0087] 图 13 是利用本发明三电平双模式空间矢量过调制方法在 M ＝ 0.8901 时的输出线电流波形图；

[0088] 图 14 是利用本发明三电平双模式空间矢量过调制方法在 M ＝ 0.9690 时的输出线电压波形图；

[0089] 图 15 是利用本发明三电平双模式空间矢量过调制方法在 M ＝ 0.9690 时的输出线电流波形图；

[0090] 图 16 是利用本发明三电平双模式空间矢量过调制方法在 M ＝ 0.9687 时的输出线电压波形图；

[0091] 图 17 是利用本发明三电平双模式空间矢量过调制方法在 M ＝ 0.9687 时的输出线电流波形图；

[0092] 图 18 是利用本发明三电平双模式空间矢量过调制方法在 M ＝ 1 时的输出线电压波形图；

[0093] 图 19 是利用本发明三电平双模式空间矢量过调制方法在 M ＝ 1 时的输出线电流波形图；

[0094] 图中：101- 作用时间和调制比计算单元，102- 过调制模式选择单元，103- 基本矢量作用时间计算单元，104- 基本矢量作用时间输出单元。

具体实施方式

[0095] 下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明的一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0096] 如附图 1 至附图 19 中所示，给出了本发明一种三电平双模式空间矢量过调制方法及其系统的具体实施例，下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明。

[0097] 三电平的 SVPWM 调制涉及到 27 个基本矢量，其基本思路是：根据参考电压矢量所在扇区以及小三角形区域选择其临近的三个基本矢量，再利用伏秒平衡的原理，计算每个基本矢量的作用时间，最后按照一定原则排列的矢量顺序调制出脉宽调制波形。

[0098] 首先，通过坐标变换将参考电压 U_s 从 α－β 正交坐标系转换到非正交的 60° 坐标系。设非正交的 60° 坐标系为 g-h 坐标系，假设参考电压 U_s 在 α－β 正交坐标系的坐标为 (U_α, U_β)，在 g-h 坐标系的坐标为 (U_g, U_h)。两个坐标系的转换公式如公式 (3) 所示。

[0099]
$$\begin{bmatrix} U_g \\ U_h \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} \tag{3}$$

[0100] 其次，确定基本矢量。将参考电压 U_s 转换到 g-h 坐标系后，所有的基本矢量的坐标都为整数。根据参考电压矢量的坐标利用公式 (4) 便可以获得参考电压矢量所在三角形区域的编号，三角形区域编号规则如附图 2 所示，即确定了合成参考电压矢量的三个基本矢量。

[0101] $g = [U_g]$ $h = [U_h]$

[0102] $b = 4*h-h^2$

[0103] $num = b+2*g$

[0104] if $U_g+U_h > g+h+1$

[0105] then $num = num+1$ (4)

[0106] 其中 $[U_g]$ 表示对 U_g 取整，$[U_h]$ 表示对 U_h 取整，b 为中间变量，num 为三角形编号。

[0107] 第三步，计算基本矢量的作用时间和调制比。确定了合成参考电压矢量的三个基本矢量，然后利用伏秒平衡的原理计算基本矢量的作用时间，计算方法如公式 (5) 所示：

[0108] $$\vec{U}_{ref} * T_s = t_1 * \vec{U}_1 + t_2 * \vec{U}_2 + t_3 * \vec{U}_3$$

[0109] (5)

[0110] $T_s = t_1+t_2+t_3$

[0111] 式中：

[0112] $\vec{U}_{ref}$：为参考电压矢量；

[0113] T_s：为参考电压矢量作用的时间；

[0114] $\vec{U}_x$：为基本电压矢量，x = 1,2,3；

[0115] t_x：为基本电压矢量的作用时间，x = 1,2,3；

[0116] 假设电压矢量的坐标为：

[0117] $\vec{U}_{ref}(U_g\ U_h)$，$\vec{U}_1(U_{g1}\ U_{h1})$，$\vec{U}_2(U_{g2}\ U_{h2})$，$\vec{U}_3(U_{g3}\ U_{h3})$，则公式 (5) 可以转化为公式

(6)：

[0118] $U_g*T_s = t_1*U_{g1}+t_2*U_{g2}+t_3*U_{g3}$

[0119] $U_h*T_s = t_1*U_{h1}+t_2*U_{h2}+t_3*U_{h3}$ (6)

[0120] $T_s = t_1+t_2+t_3$

[0121] 通过公式 (6) 便可以得出三个基本矢量的作用时间。

[0122] 关于参考电压矢量调制比的计算，为了叙述准确，先定义 SVPWM 的参考电压矢量调制比 M：

[0123] $$M = \frac{U_{ref}}{\frac{2}{\pi}*U_{dc}} \quad (7)$$

[0124] 其中，U_{ref} 为参考电压矢量的幅值，U_{dc} 为直流侧电压。

[0125] 当调制比 M 小于 0.907 时，也就是参考电压矢量位于空间矢量六边形的内切圆内时（如附图 4 所示的阴影部分），通过 SVPWM 调制，逆变器的输出电压与参考电压等效，输出电压随着调制比的增加而线性增加，因此把这个区域称作线性调制区。在线性调制区，输出电压的轨迹为圆形。而当调制比 M 大于 0.907 的时候，参考电压的轨迹将不会完全在空间矢量六边形内，将会有一部分超出空间矢量六边形。在空间矢量六边形里面的部分，输出电压和参考电压是等效；但是超出空间矢量六边形的部分，输出电压便不能和参考电压等效，因此输出电压的轨迹不再是圆形，输出电压也不会随着调制比的增加而线性增加，因此将这个区域称作非线性调制区，也称作过调制区。当调制比等于 1 的时候，也就是过调制区的极限，三电平变流器系统将进入 6 阶梯波运行模式，即方波运行模式。

[0126] 在过调制区，如果依然按照线性调制区的方法进行调制，那么输出电压将不能随着调制比的增加而线性增加，甚至不能保证输出电压和调制比是单调增加的关系，从而出现输出电压的突变，导致控制的紊乱。因此需要在过调制区采用新的控制策略，从而保证输出电压的准确性。

[0127] 本发明具体实施方式中描述的三电平双模式空间矢量调制方法将过调制区分为过调制 I 区和过调制 II 区，在过调制 I 区采用过调制模式一，在过调制 II 区采用过调制模式二。

[0128] 其中，过调制模式一的基本原理如下所述。

[0129] 当调制比 M 大于 0.907 时，参考电压的轨迹如附图 5 所示，参考电压一部分在空间矢量六边形外（即附图中 5 所示的 M 区域），一部分在空间矢量六边形内（即附图 5 中所示的 N 区域）。在 N 区域中，输出电压的轨迹为弧线，输出电压能跟随参考电压；而在 M 区域中，输出电压的轨迹为弦，输出电压小于参考电压。

[0130] 由于在 M 区域内，输出电压小于参考电压，因此在一个基波周期内，输出电压和参考电压不满足伏秒平衡，则输出电压的基波成分将和参考电压有偏差。为了使得输出电压和参考电压满足伏秒平衡，可以利用 N 区域中输出电压幅值的裕量来补偿 M 区域中幅值的损失，（即将附图 5 中 N 区域的阴影部分来补偿 M 区域的阴影部分），从而使得输出电压和参考电压在六分之一个基波周期内满足伏秒平衡。

[0131] 这样补偿通常是有限度的，极限情况就是 N 区域中的全部裕量刚好补偿 M 区域中的幅值损失，（即 N 区域中参考电压轨迹和空间矢量六边形包围的面积等于 M 区域中阴影

部分的面积），此时对应于附图 5 中三角形区域的面积等于参考电压轨迹形成的六分之一扇形的面积。假设参考电压为 U_{ref}，直流侧电压为 U_{dc}，调制比为 M，则：

[0132] $$\frac{1}{2}*\frac{2}{3}*U_{dc}*\frac{2}{3}*U_{dc}*\sin\frac{\pi}{3}=\frac{1}{6}*\pi*U_{ref}^{2} \quad (8)$$

[0133] $$M=\frac{U_{ref}}{\frac{2}{\pi}*U_{dc}} \quad (9)$$

[0134] 由公式 (8) 和 (9) 可求得此时的调制比 M = 0.952。

[0135] 也就是说调制比在 0.907 ～ 0.952 之间，可以通过上述的补偿策略来实现输出电压和参考电压的等效，将这个区域称为过调制 I 区，在这个区域采用过调制模式一。当调制比为 0.952 时，也就是在过调制模式一的极限时，此时输出电压的轨迹将为空间矢量六边形的六条边。

[0136] 其中，过调制模式二的基本原理如下所述。

[0137] 当三电平变流器系统的最大输出为方波输出时，此时调制比为 1。将调制比从 0.952 ～ 1 这个区域称作过调制 II 区，在这个区域采用过调制模式二。当调制比大于 0.952 时，采用过调制模式一的补偿策略已经不能满足要求，输出电压和参考电压不能满足伏秒平衡，因此必须采用其他的补偿策略。

[0138] 如附图 6 所示为过调制 II 区的参考电压矢量的轨迹图，假设 U_1、U_2 为两个输出电压矢量，他们对应的作用时间分别为：t_1、t_2，对应的参考电压矢量为：U_{ref1}、U_{ref2}，按照过调制模式一的策略，则输出电压的伏秒乘积的和将小于参考电压伏秒乘积的和，即：

[0139] $$U_1*t_1+U_2*t_2 < U_{ref1}*t_1+U_{ref2}*t_2 \quad (10)$$

[0140] 因为输出电压只能在空间矢量六边形内，而此时的输出电压矢量在空间矢量六边形的边上，输出电压的幅值已经达到极限了，不可能再增加了。为了满足输出电压和参考电压的伏秒平衡，可以调整输出电压矢量的作用时间。在前述的例子中，因为 $U_1 > U_2$，因此可以增加 U_1 的作用时间，延长至 t_1'；同时减少 U_2 的作用时间，缩短至 t_2'，总的时间不变，即满足公式 (11)：

[0141] $$t_1'+t_2'=t_1+t_2 \quad (11)$$ 与此同时，使 t_1'、t_2' 满足公式 (12)：

[0142] $$U_1*t_1'+U_2*t_2'=U_{ref1}*t_1+U_{ref2}*t_2 \quad (12)$$

[0143] 这样输出电压和参考电压将在这个时间段内将满足伏秒平衡。如果将其规律拓展至如附图 6 中所示的整个三角形区域，即增加靠近长矢量的输出电压矢量的作用时间，减少靠近中矢量的输出电压矢量的作用时间，而输出电压矢量作用的总时间不变，这样就可以实现输出电压和参考电压在六分之一个基波周期内满足伏秒平衡，同样输出电压和参考电压在基波周期内也满足伏秒平衡。由前述过调制模式一的原理可知，在过调制模式一的补偿策略是利用附图 5 中 N 区域的幅值裕量来弥补 M 区域的幅值损失。具体来说就是：在 M 区域内输出电压保持在空间矢量六边形的边上，所以输出电压的幅值小于参考电压；在 N 区域，增大输出电压的幅值，使得输出电压大于参考电压。

[0144] 在这个区间内，输出电压矢量由长矢量、中矢量和短矢量来合成。假设 T_4、T_5、T_6 分别为采用前述方法根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_4、中矢量 U_5、短矢量 U_6 的作用时间；参考电压矢量为 U_{ref}，作用的总时间为 T_s。如果参考电压处于 M 区域，则 $T_6 < 0$，将输出电压保持在空间矢量六边形的边上；如果参考电压处于 N 区域，则 $T_6 > 0$，可以通过减少短

矢量的作用时间，增加长矢量和中矢量的作用时间，而总的作用时间保持不变，这样就可以增大输出电压的幅值，从而保持输出电压和参考电压的伏秒平衡。假设调整后合成输出电压矢量的长矢量、中矢量和短矢量的时间分别为 T_4' 、T_5' 、T_6' 。

[0145] 在过调制模式一需要保持输出电压的相位和参考电压的相位一致，即如附图 7 中所示，在 M 区域，参考电压矢量为 $\overrightarrow{OA}$，则输出电压矢量应为 $\overrightarrow{OB}$；在 N 区域，参考电压矢量为 $\overrightarrow{OF}$，则输出电压矢量应为 $\overrightarrow{OE}$。如附图 7 所示，从 A 点引出一条平行于长矢量直线交中矢量于 C 点，从 B 点引出一条平行于长矢量的直线交中矢量于 D 点。由三角形 OBD 与三角形 OAC 相似可得：

[0146] $$\frac{|AC|}{|BD|}=\frac{|OC|}{|OD|} \tag{13}$$

[0147] 由平行四边形矢量合成原则可得：

[0148] $$\frac{|U_4|*\frac{T_4}{T_s}+|U_6|*\frac{T_6}{T_s}}{|U_5|*\frac{T_5}{T_s}}=\frac{|U_4|*\frac{T_4'}{T_s}+|U_6|*\frac{T_6'}{T_s}}{|U_5|*\frac{T_5'}{T_s}} \tag{14}$$

[0149] 其中：$|U_4|=2*|U_4|=\frac{2}{3}U_{dc}|U_5|=\frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}$

[0150] 如果点 A 在 M 区域内，则 T6′ ＝ 0，代入公式 (14) 中可得：

[0151] $$\frac{T_4+0.5T_6}{T_5}=\frac{T_4'}{T_5'} \tag{15}$$

[0152] $T'_4+T'_5=T_s$ (16)

[0153] 联合公式 (15) 和 (16) 可得：

[0154] $$T_4'=T_s*\frac{T_4+0.5T_6}{T_5+T_4+0.5T_6} \tag{17}$$

[0155] $$T_5'=T_s*\frac{T_5}{T_5+T_4+0.5T_6}$$

[0156] 如果点 A 在 N 区域内，则：

[0157] $T'_6=T_6-k_1*T_6$ (18)

[0158] $$\frac{2T_4+T_6}{T_5}=\frac{2T_4'+T_6'}{T_5'} \tag{19}$$

[0159] $T'_4+T'_5+T'_6=T_s$ (20)

[0160] 其中 k_1 为过调制模式一的补偿系数，由调制比 M 决定。

[0161] 联合公式 (18)、(19) 和 (20) 可得：

[0162] $$T_4'=T_4+\frac{k_1(T_4+T_s)T_6}{2T_s-T_6} \tag{21}$$

[0163] $$T_5'=T_5+\frac{k_1T_5T_6}{2T_s-T_6}$$

[0164] 综上所述，过调制模式一控制策略的具体实现方法如下：

[0165] 当 $T_6 < 0$ 时，修改各个基本电压矢量的作用时间如式 (22)：

[0166]
$$\begin{cases} T_4' = T_s * \dfrac{T_4 + 0.5T_6}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_5' = T_s * \dfrac{T_5}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_6' = 0 \end{cases} \quad (22)$$

[0167] 当 $T_6 \geq 0$ 时，修改各个基本电压矢量的作用时间如式 (23)：

[0168]
$$\begin{cases} T_4' = T_4 + \dfrac{k_1(T_4 + T_s)T_6}{2T_s - T_6} \\ T_5' = T_5 + \dfrac{k_1 T_5 T_6}{2T_s - T_6} \\ T_6' = T_6 - k_1 * T_6 \end{cases} \quad (23)$$

[0169] 其中 k_1 为过调制模式一的补偿系数，由调制比 M 决定。

[0170] 因为补偿系数 k_1 和调制比 M 是一种非线性关系，为了实现简单，将其线性化，即：

[0171] $k_1 = M \times A - B$ (24)

[0172] 同时当 $M = 0.907$ 时，参考电压的轨迹为空间矢量六边形的内切圆，是线性调制区和过调制模式一的临界点，此时不需要补偿；因此 $k_1 = 0$；当 $M = 0.952$ 时，输出电压的轨迹为空间矢量六边形的边，是过调制模式一和过调制模式二的临界点，此时短矢量在整个区域内的作用时间都为零，因此 $k_1 = 1$。将这两个条件代入公式 (24) 中可得方程组 (25)：

[0173]
$$\begin{cases} 0 = 0.907 \times A - B \\ 1 = 0.952 \times A - B \end{cases} \quad (25)$$

[0174] 求解方程组 (25) 可得 $A = 22.222$，$B = 20.155$；代入式 (24) 可得补偿系数 k_1 和调制比 M 线性化的关系式为：

[0175] $k_1 = M \times 22.222 - 20.155$ (26)

[0176] 如附图 8 所示为采用上述方法后输出电压矢量的轨迹图。当 $M = 0.907$ 时，是线性调制区和过调制模式一的临界状态，输出电压矢量的轨迹如图 8(a) 所示，为空间矢量六边形的内切圆，此时补偿系数 $k_1 = 0$；当 $0.907 < M < 0.952$ 时，处于过调制模式一，输出电压矢量的轨迹如图 8(b) 所示，输出电压矢量的轨迹一部分在空间矢量六边形的边上，一部分处于空间矢量六边形内，并且随着调制比的增加，处于空间矢量六边形内的部分逐渐减少，这个阶段补偿系数 $0 < k_1 < 1$；当 $M = 0.952$ 时，处于过调制模式一和过调制模式二的临界状态，输出电压矢量的轨迹如图 8(c) 所示，为空间矢量六边形的六条边，此时补偿系数 $k_1 = 1$。

[0177] 通过上述方法，就可以实现过调制模式一的调制策略，从而实现输出电压和参考电压的伏秒平衡，同时保证输出电压的相位和参考电压一致。

[0178] 而过调制模式二的工作基本原理是增加靠近长矢量的输出电压矢量的作用时间，减少靠近中矢量的输出电压矢量的作用时间。在过调制模式二，输出电压的轨迹都在空间矢量六边形的边上，因此此时输出电压矢量只由长矢量和中矢量来合成。因此可以在每一

个开关周期内增加长矢量的作用时间，同时相应的减少中矢量的作用时间，这样也就等效的实现了过调制模式二的控制策略。具体的实现方法如下所述：

[0179] 假设 T_7、T_8、T_9 分别为采用前述方法根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_7、中矢量 U_8、短矢量 U_9 的作用时间；参考电压矢量为 U_{ref}，作用的总时间为 T_s。在整个区域内，修改各个基本电压矢量的时间如公式 (27)：

[0180] $$\begin{cases} T_7' = T_7 + (T_s - T_7) * k_2 \\ T_8' = (T_s - T_7) * (1 - k_2) \\ T_9' = 0 \end{cases} \quad (27)$$

[0181] 其中 k_2 为过调制模式二的补偿系数，由调制比 M 决定。

[0182] 因为补偿系数 k_2 和调制比 M 也是一种非线性关系，为了实现简单，同样将其线性化，即：

[0183] $k_2 = M \times C - D$ (28)

[0184] 同时当 $M = 0.952$ 时，输出电压的轨迹为空间矢量六边形的六条边，是过调制模式一和过调制模式二的临界点，此时不需要采用过调制模式二的补偿，因此 $k_2 = 0$；当 $M = 1$ 时，三电平变流器系统进入方波运行状态，输出电压矢量的轨迹只在空间矢量六边形的六个顶点，此时在整个周期内只有六个长矢量作用，中矢量的作用时间也为零，因此 $k_2 = 1$。将这两个条件代入公式 (28) 中可得方程组 (29)：

[0185] $$\begin{cases} 0 = 0.952 \times C - D \\ 1 = 1 \times C - D \end{cases} \quad (29)$$

[0186] 解方程组 (29) 可得 $C = 20.833$，$D = 19.833$；代入公式 (28) 可得补偿系数 k_2 和调制比 M 线性化的关系式为：

[0187] $k_2 = M \times 20.833 - 19.833$ (30)

[0188] 如附图 9 所示为采用上述方法后过调制模式二输出电压矢量的轨迹图。当 $M = 0.952$ 时，为过调制模式一和过调制模式二的临界状态，输出电压矢量的轨迹如附图 9(a) 所示，为空间矢量六边形的六条边，此时补偿系数 $k_2 = 0$；当 $0.952 < M < 1$ 时，处于过调制模式二，输出电压矢量的轨迹如附图 9(b) 所示，输出电压矢量的轨迹也在空间矢量六边形的边上，但是不是完整的六条边，并且输出电压矢量的轨迹的长度也随着调制比的增加而越来越短，这个阶段补偿系数 $0 < k2 < 1$；当 $M = 1$ 时，处于过调制模式二的极限状态，输出电压矢量的轨迹如图 9(c) 所示，为空间矢量六边形的六个顶点，此时补偿系数 $k_2 = 1$。

[0189] 在过调制模式二，输出电压矢量仅由长矢量和中矢量合成，长矢量对中点电位没有影响，而中矢量对中点电位有影响，在一个基波周期内，中矢量对中点电位的影响总效果为零，但过程中会引起中点电位的波动，同时波动的幅值与中矢量的作用时间成正比。传统的控制方法在这个区域内没有改变中矢量的作用时间，例如当输出电压矢量的相位在 30° 的时候，中矢量的作用时间将为整个开关周期，因此对中点电位的波动影响较大。采用本发明具体实施方式所描述的过调制控制策略，在过调制模式二，减少了中矢量的作用时间，例如当输出电压矢量的相位在 30° 的时候，中矢量的作用时间小于开关周期，因此采用本发明能减少对中点电位的影响。

[0190] 而传统的过调制方法在过调制 II 区，一般都采用将长矢量先保持一段时间的方

法来实现，和过调制 I 区的实现方法截然不同，整体实现起来比较复杂。而从前述实现方法的分析可以看出，本文发明具体实施方式描述的过调制方法在过调制 I 区的实现方法是调整长矢量、中矢量和短矢量的作用时间，在过调制 II 区的实现方法是调整长矢量和中矢量的作用时间，这两个区域内的实现方法其实是一致，因此整体实现比较简单。

[0191] 最后是确定矢量输出顺序。基于开关动作次数最少，每次应该只有 2 个开关器件动作，而且开关状态不能突变，即只能是$P\leftrightarrow O\leftrightarrow N$变化，不能是$P\leftrightarrow N$变化，各个三角形区域之间切换平滑等原则，则可以确定矢量的输出顺序。根据确定的矢量输出顺序便可以输出脉宽调制波形，完成参考电压的 SVPWM 调制。如附图 10 所示是本发明三电平双模式空间矢量过调制方法一种具体实施方式的程序流程图，具体包括以下步骤：

[0192] 程序开始

[0193] S101：按照线性调制区的方法计算基本矢量的作用时间以及调制比 M；

[0194] S102：根据调制比选择过调制模式：当 0.907 ＜ M ≤ 0.952 时，执行步骤 S103，当 0.952 ＜ M ≤ 1 时，执行步骤 S104；

[0195] S103：当参考电压矢量处在过调制模式一，采用公式 (26) 计算过调制模式一的补偿系数 k_1，并执行步骤 S105；

[0196] S104：当参考电压矢量处在过调制模式二，采用公式 (30) 计算过调制模式二的补偿系数 k_2，并执行步骤 S106；

[0197] S105：判断短矢量计算时间的正负，当短矢量的计算时间大于等于零时，执行步骤 S107，当短矢量的计算时间小于零时，执行步骤 S108；

[0198] S106：采用公式 (27) 修正基本矢量的作用时间；

[0199] S107：采用公式 (23) 修正基本矢量的作用时间；

[0200] S108：采用公式 (22) 修正基本矢量的作用时间。

[0201] 程序结束。

[0202] 以上步骤仅为过调制方法需要的流程，按顺序依次执行。

[0203] 上述步骤中当参考电压矢量处在过调制模式一，基本矢量中的短矢量的作用时间大于零时，将短矢量的作用时间按照一定的比例和一定的分配规则分别补偿给长矢量和中矢量，并将补偿系数与调制比进行线性化处理。

[0204] 上述步骤中当参考电压矢量处在过调制模式二时，将基本矢量中的中矢量的作用时间按照一定的比例补偿给长矢量，并将补偿系数与调制比进行线性化处理。

[0205] 如附图 11 所示是基于本发明三电平双模式空间矢量过调制方法的过调制系统一种具体实施方式的结构框图。三电平双模式空间矢量过调制系统包括：作用时间和调制比计算单元 101、过调制模式选择单元 102、基本矢量作用时间计算单元 103 和基本矢量作用时间输出单元 104；

[0206] 作用时间和调制比计算单元 101 的输入给定为参考矢量，按照线性调制区的方法计算参考矢量的调制比和基本矢量的作用时间，并将调制比计算结果输出至过调制模式选择单元 102；

[0207] 过调制模式选择单元 102 根据调制比确定参考矢量所处的过调制区为过调制 I 区，还是过调制 II 区，从而选择不同的过调制模式，过调制模式选择单元 102 将参考矢量所处的过调制模式选择结果输出至基本矢量作用时间计算单元 103；

[0208] 基本矢量作用时间计算单元 103 根据参考矢量所处的过调制模式计算相应过调制模式的补偿系数，若参考电压矢量所处的过调制区为过调制 I 区，则选择空间矢量过调制模式一，并计算模式一的补偿系数，同时根据补偿系数和短矢量的作用时间修正包括短矢量、中矢量和长矢量在内的基本矢量的作用时间，将基本矢量的作用时间输出至基本矢量作用时间输出单元 104；若参考电压矢量所处的过调制区为过调制 II 区，则选择空间矢量过调制模式二，并计算模式二的补偿系数，同时根据补偿系数修正包括短矢量、中矢量和长矢量在内的基本矢量的作用时间，将基本矢量的作用时间输出至基本矢量作用时间输出单元 104。

[0209] 上述过调制 I 区进一步设定为：0.907 ＜ M ≤ 0.952，此时参考电压矢量所处的过调制区为过调制 I 区，同时选择过调制模式一；过调制 II 区进一步设定为：0.952 ＜ M ≤ 1，此时参考电压矢量所处的过调制区为过调制 II 区，同时选择过调制模式二；其中，M 为参考电压矢量的调制比。

[0210] 基本矢量作用时间计算单元 103 进一步根据以下规则计算相应过调制模式的补偿系数：

[0211] 当参考矢量处于过调制模式一时，过调制模式一的补偿系数 k_1 = M×22.222-20.155；

[0212] 当参考矢量处于过调制模式二时，过调制模式二的补偿系数 k_2 = M×20.833-19.833；

[0213] 其中，M 为参考矢量的调制比。

[0214] 基本矢量作用时间计算单元 103 进一步根据以下规则得到并输出经过修正的基本矢量作用时间：

[0215] 当参考电压矢量处于过调制模式一，且零矢量的作用时间 $T_6 \geq 0$ 时，修正基本矢量的作用时间为：

[0216] $$\begin{cases} T_4' = T_4 + \dfrac{k_1(T_4+T_s)T_6}{2T_s - T_6} \\ T_5' = T_5 + \dfrac{k_1 T_5 T_6}{2T_s - T_6} \\ T_6' = T_6 - k_1 * T_6 \end{cases}$$

[0217] 当参考电压矢量处于过调制模式一，且零矢量的作用时间 T6 ＜ 0 时，修正基本矢量的作用时间为：

[0218] $$\begin{cases} T_4' = T_s * \dfrac{T_4 + 0.5T_6}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_5' = T_s * \dfrac{T_5}{T_5 + T_4 + 0.5T_6} \\ T_6' = 0 \end{cases}$$

[0219] 其中，T'_4、T'_5、T'_6 分别为过调制模式一经过修正后合成输出电压矢量的长矢量 U_4、中矢量 U_5 和短矢量 U_6 的作用时间，T_4、T_5、T_6 分别为过调制 I 区根据参考电压矢量计

算获得的长矢量 U_4、中矢量 U_5、短矢量 U_6 的作用时间，k_1 为过调制模式一的补偿系数，T_s 为参考电压矢量 U_{ref} 总的作用时间；

[0220] 当参考电压矢量处于过调制模式二时，修正基本矢量的作用时间为：

[0221]
$$\begin{cases} T_7' = T_7 + (T_s - T_7) * k_2 \\ T_8' = (T_s - T_7) * (1 - k_2) \\ T_9' = 0 \end{cases}$$

[0222] 其中，T'_7、T'_8、T'_9 分别为过调制模式二经过修正后合成输出电压矢量的长矢量 U_7、中矢量 U_8 和短矢量 U_9 的作用时间，T_7、T_8、T_9 分别为过调制 II 区根据参考电压矢量计算获得的长矢量 U_7、中矢量 U_8 和短矢量 U_9 的作用时间，k_2 为过调制模式二的补偿系数。

[0223] 如附图 12 至 19 所示是利用上述过调制方法及其系统，在 MATLAB 仿真平台上，搭建的三电平逆变器 SVPWM 仿真模型的模拟仿真波形图。其中，模型的直流侧电压为 2000V，输出频率为 50Hz，负载为三相阻感负载，电阻为 2.2Ω，电感为 1mH。

[0224] 如附图 12 和 13 所示分别为调制比 M = 0.8901 时输出线电压、线电流的波形图。其中，附图 12 中线电压的基波有效值为 1384V，如附图 13 中线电流的基波有效值为 359.3A；

[0225] 如附图 14 和 15 所示分别为调制比 M = 0.9320 时输出线电压、线电流的波形图。其中，附图 14 中线电压的基波有效值为 1444.8V，如附图 15 中线电流的基波有效值为 375.2A；

[0226] 如附图 16 和 17 所示分别为调制比 M = 0.9690 时输出线电压、线电流的波形图。其中，附图 16 中线电压的基波有效值为 1502.8V，如附图 17 中线电流的基波有效值为 390.4A；

[0227] 如附图 18 和 19 所示分别为调制比 M = 1 时输出线电压、线电流的波形图。其中，附图 18 中线电压的基波有效值为 1557.3V，如附图 19 中线电流的基波有效值为 404.7A；

[0228] 本发明的具体实施方式中，在过调制模式一引入补偿系数 k_1，通过将短矢量的一部分作用时间（k_1 倍短矢量时间）按照一定规则分别补偿给长矢量和中矢量的方法，不仅实现输出电压与参考电压之间的伏秒平衡，同时保持输出电压和参考电压的相位一致，并对补偿系数和调制比进行了线性化处理；而过调制模式二中放弃了传统的保持角的方法，引入补偿系数 k_2，通过将中矢量的一部分作用时间（k_2 倍中矢量时间）补偿给长矢量方法，不仅实现输出电压与参考电压之间的伏秒平衡，同时能有效减少中点电位的波动，并对补偿系数和调制比进行了线性化处理。本发明具体实施方式描述的三电平双模式空间矢量过调制方法算法原理直观，易于理解，实现步骤简单，计算量小，便于工程化应用；同时，输出电压幅值和相位误差小，谐波含量低，而且能够有效减少过调制区的中点电位的波动。以上所述，仅是本发明的较佳实施例而已，并非对本发明作任何形式上的限制。虽然本发明已以较佳实施例揭露如上，然而并非用以限定本发明。任何熟悉本领域的技术人员，在不脱离本发明技术方案范围情况下，都可利用上述揭示的方法和技术内容对本发明技术方案做出许多可能的变动和修饰，或修改为等同变化的等效实施例。因此，凡是未脱离本发明技术方案的内容，依据本发明的技术实质对以上实施例所做的任何简单修改、等同替换、等效变化及修饰，均仍属于本发明技术方案保护的范围内。

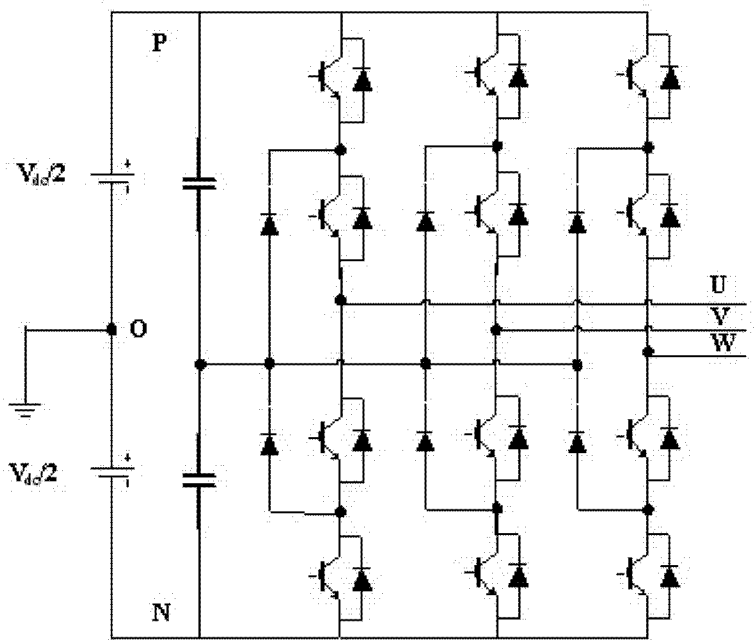

P
$V_{dc}/2$
O
$V_{dc}/2$
N
U
V
W

图 1

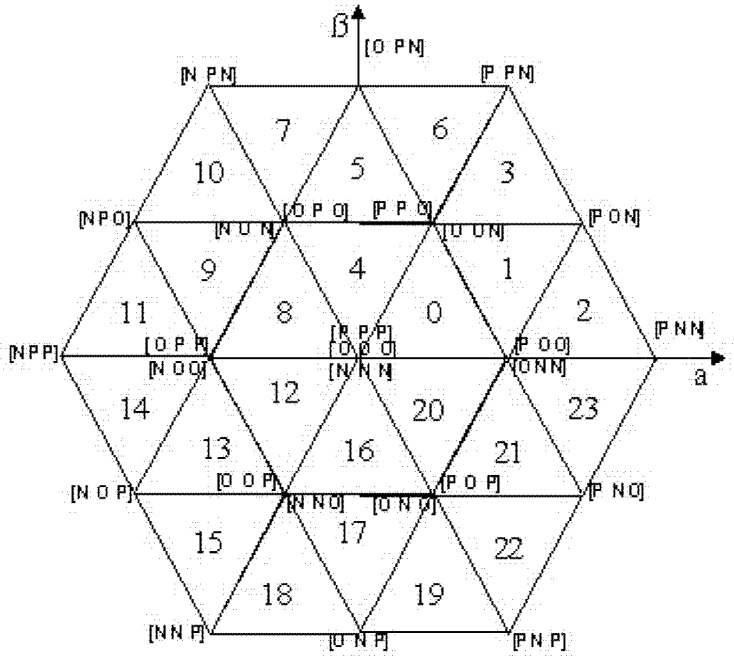

β
a
[O P N]
[N P N]
[P P N]
[N P O]
[O P O]
[P P O]
[P O N]
[N O N]
[O O N]
[N P P]
[O P P]
[O O O]
[P O O]
[P N N]
[N O O]
[N N N]
[O N N]
[N O P]
[O O P]
[P O P]
[P N O]
[N N O]
[O N O]
[N N P]
[O N P]
[P N P]
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23

图 2

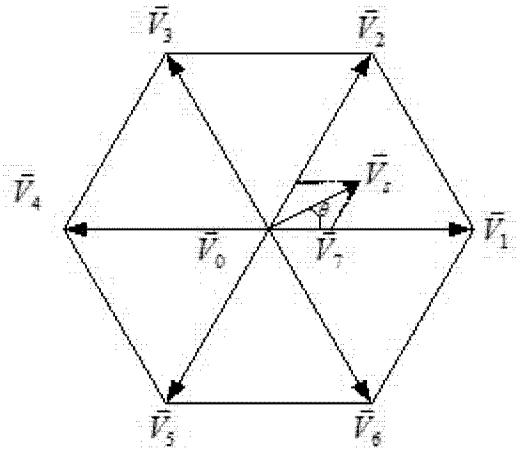

$\bar{V}_3$
$\bar{V}_2$
$\bar{V}_4$
$\bar{V}_s$
θ
$\bar{V}_1$
$\bar{V}_0$
$\bar{V}_7$
$\bar{V}_5$
$\bar{V}_6$

图 3

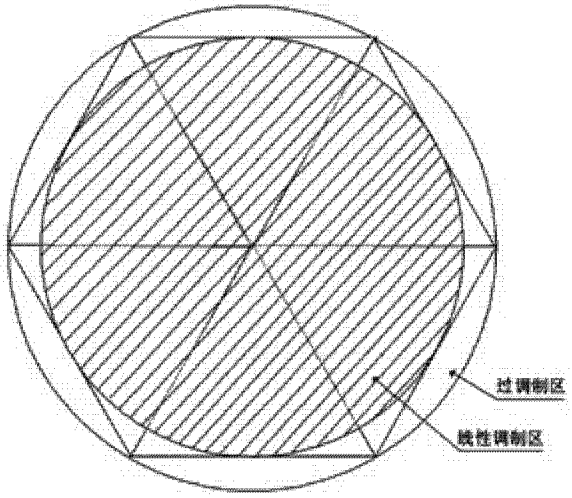

过调制区
线性调制区

图 4

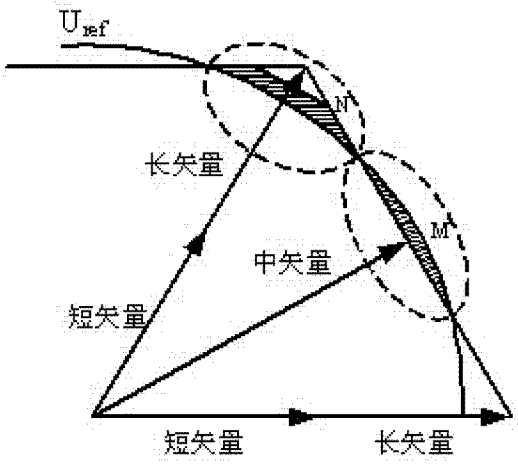

U_{ref}
M
长矢量
M'
中矢量
短矢量
短矢量
长矢量

图 5

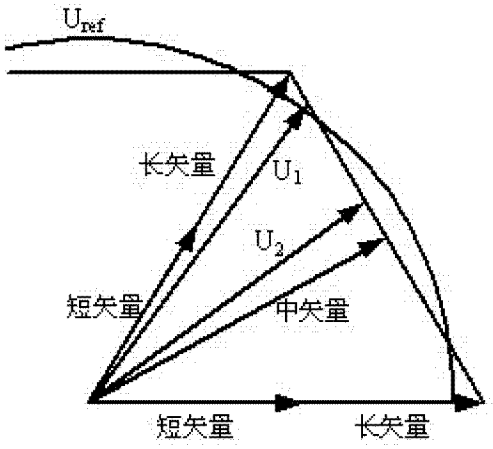

U_{ref}
长矢量
U_1
U_2
短矢量
中矢量
短矢量
长矢量

图 6

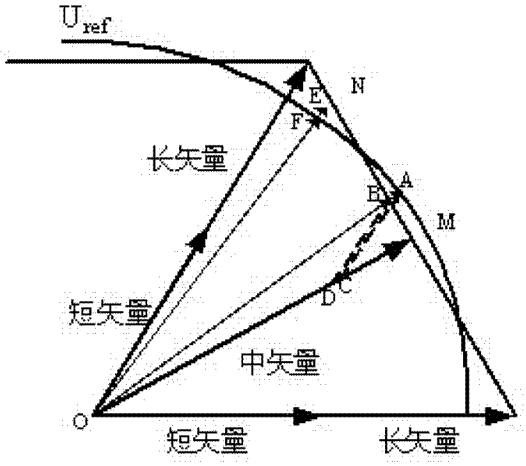


图 7

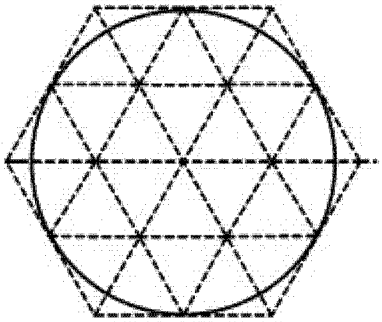


图 8（a）

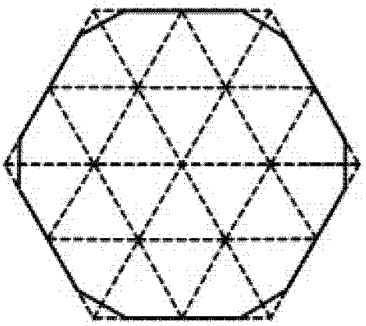


图 8(b)

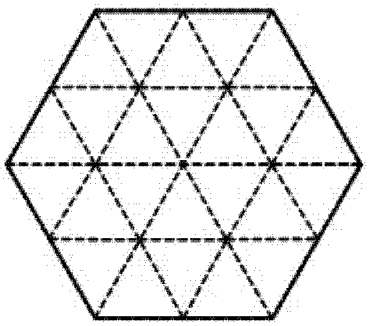


图 8(c)

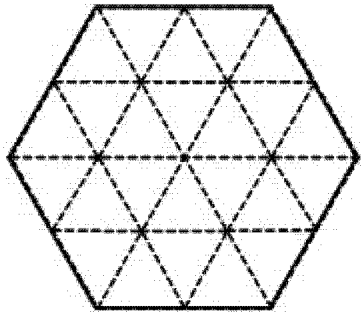


图 9(a)

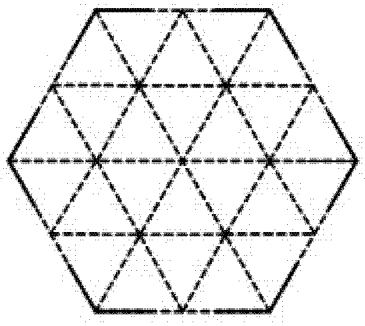


图 9(b)

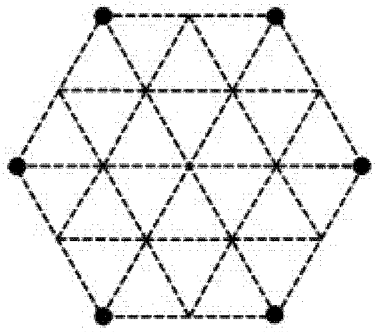


图 9(c)

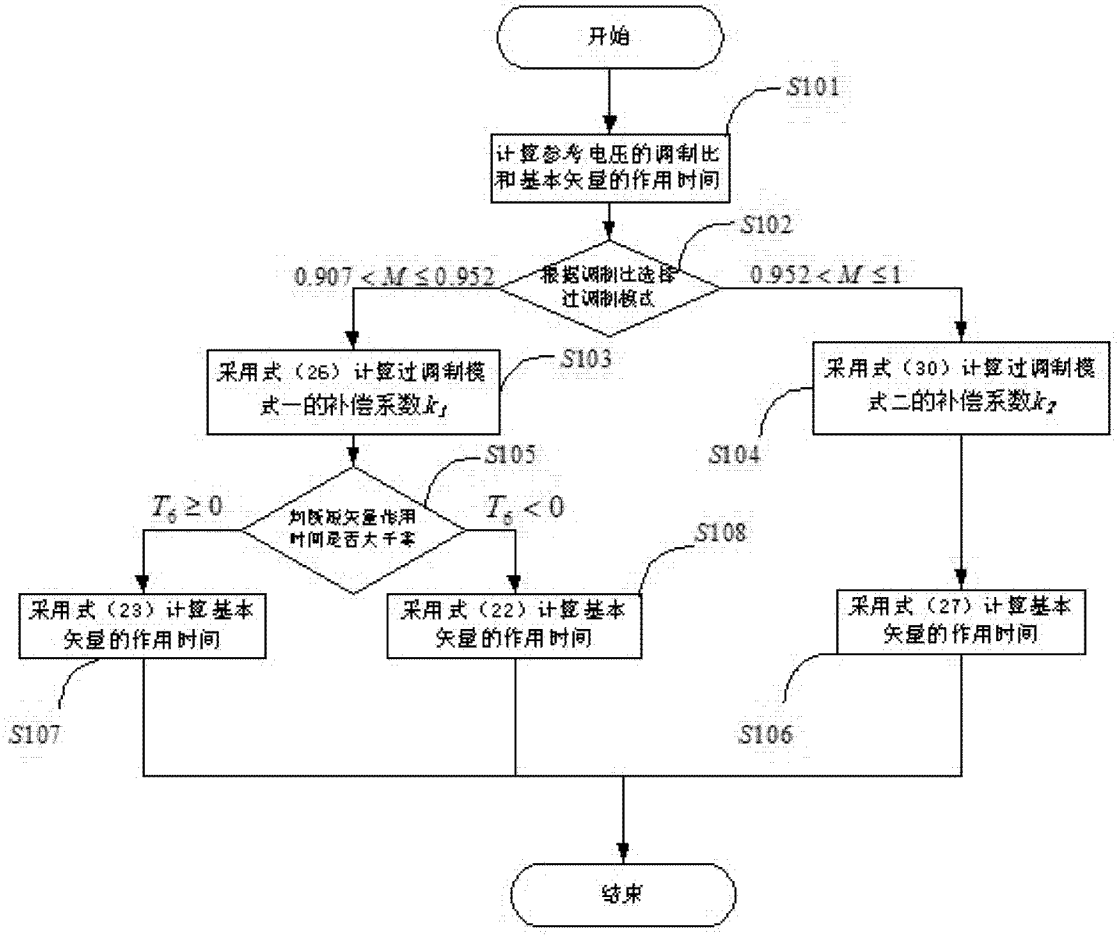

开始
S101
计算参考电压的调制比和基本矢量的作用时间
S102
根据调制比选择过调制模式
0.907 < M ≤ 0.952
0.952 < M ≤ 1
采用式（26）计算过调制模式一的补偿系数k1
S103
采用式（30）计算过调制模式二的补偿系数k2
S104
S105
判断基本矢量作用时间是否大于零
T6 ≥ 0
T6 < 0
S108
采用式（23）计算基本矢量的作用时间
采用式（22）计算基本矢量的作用时间
采用式（27）计算基本矢量的作用时间
S107
S106
结束

图 10

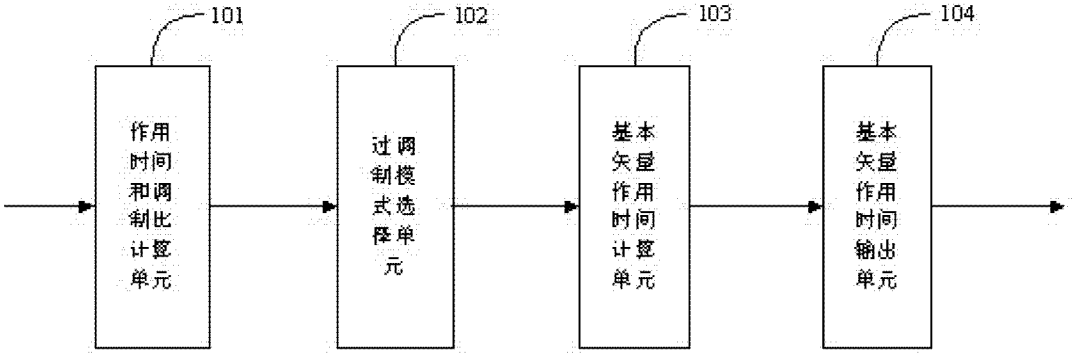

101
102
103
104
作用时间和调制比计算单元
过调制模式选择单元
基本矢量作用时间计算单元
基本矢量作用时间输出单元

图 11

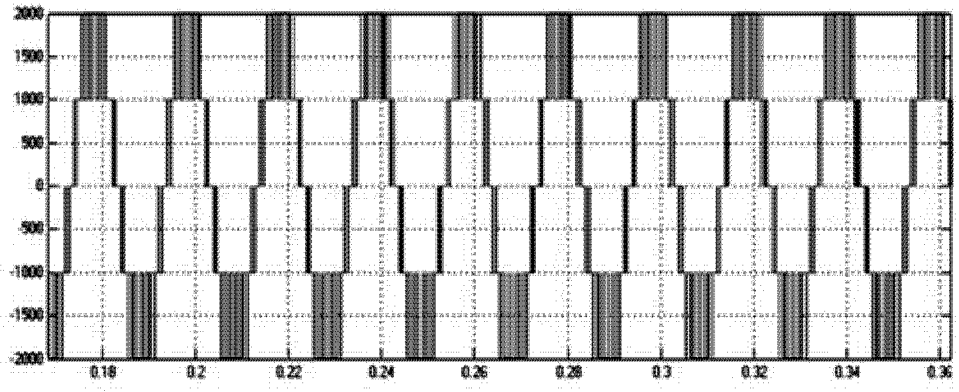

2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
0.18
0.2
0.22
0.24
0.26
0.28
0.3
0.32
0.34
0.36

图 12

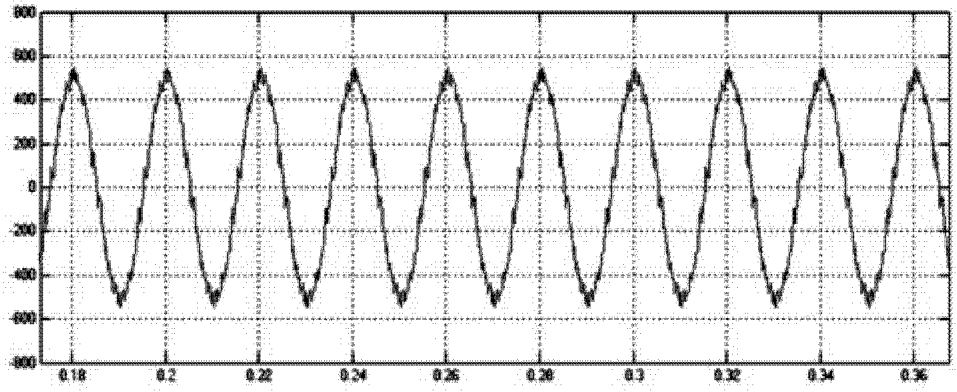

800
600
400
200
0
-200
-400
-600
-800
0.18
0.2
0.22
0.24
0.26
0.28
0.3
0.32
0.34
0.36

图 13

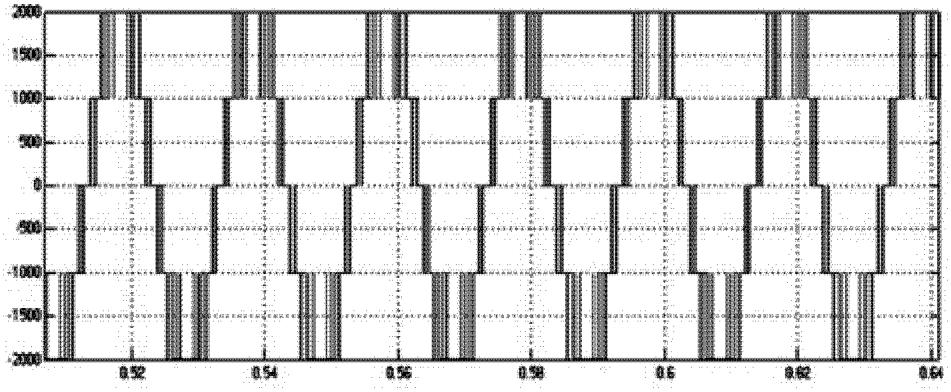

2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
0.52
0.54
0.56
0.58
0.6
0.62
0.64

图 14

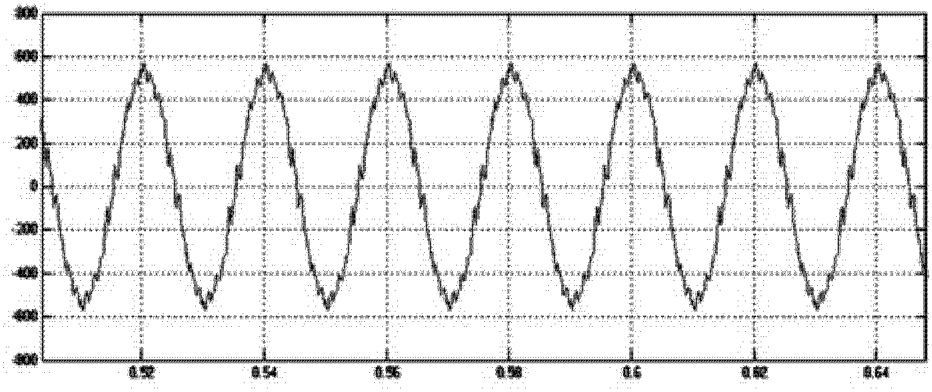

800
600
400
200
0
-200
-400
-600
0.52
0.54
0.56
0.58
0.6
0.62
0.64

图 15

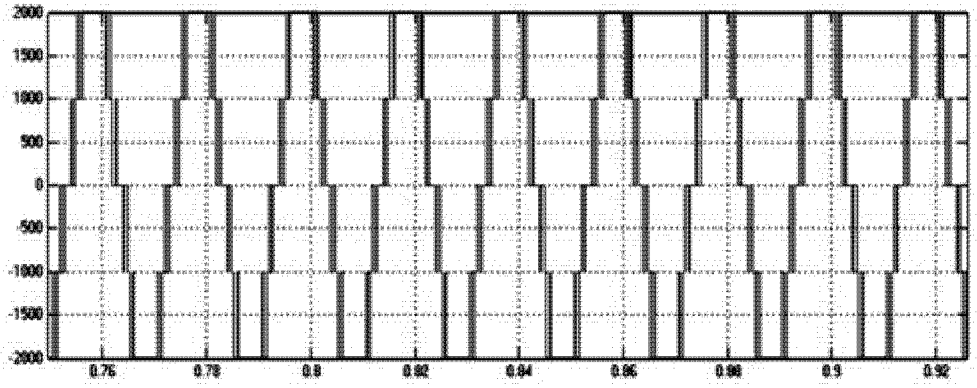

2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
0.76
0.78
0.8
0.82
0.84
0.86
0.88
0.9
0.92

图 16

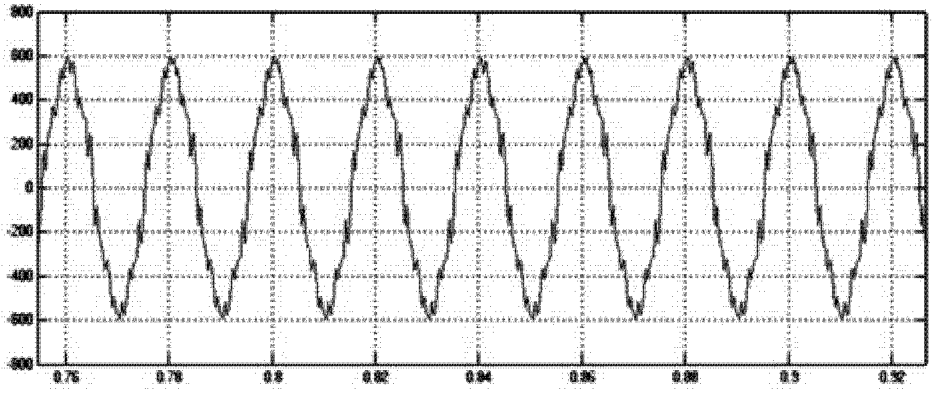

800
600
400
200
0
-200
-400
-600
-800
0.76
0.78
0.8
0.82
0.84
0.86
0.88
0.9
0.92

图 17

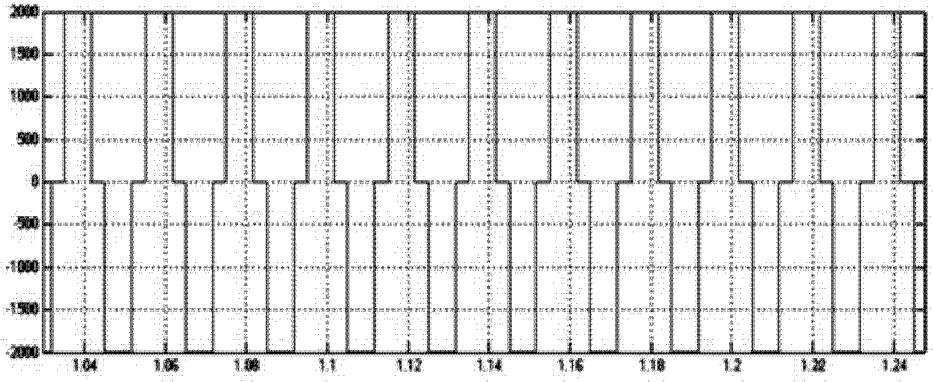

2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
1.04
1.06
1.08
1.1
1.12
1.14
1.16
1.18
1.2
1.22
1.24

图 18

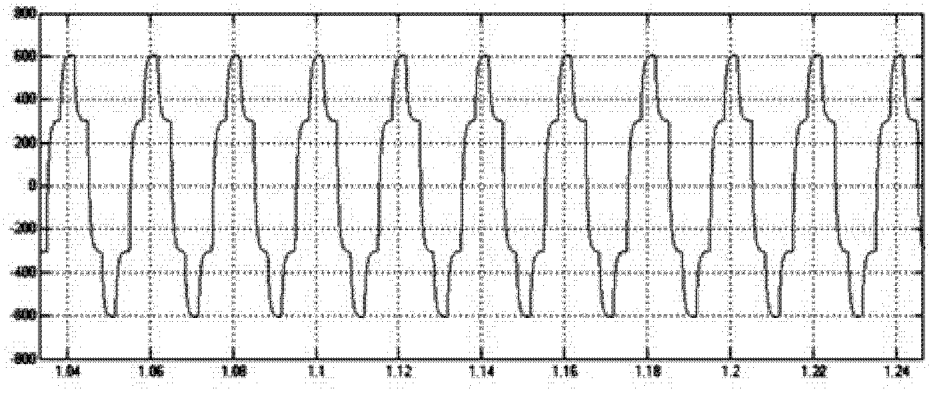

800
600
400
200
0
-200
-400
-600
-800
1.04
1.06
1.08
1.1
1.12
1.14
1.16
1.18
1.2
1.22
1.24

图 19