

三电平逆变器的 SVPWM 调制算法研究

过希文, 祝龙记

(安徽理工大学, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 在两电平电压空间矢量算法的基础上, 分析了三电平 SVPWM 算法调制的基本原理。沿用了两电平扇区的分法, 避免了直接使用三电平空间矢量 NTV 法则的繁琐计算。此过程简洁明了, 便于三电平控制系统的实现。仿真结果证实了 SVPWM 算法的有效性。

关键词: 三电平逆变器; SVPWM; 仿真

中图分类号: TM464 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-0794(2007)08-0048-03

Research on SVPWM Modulation Algorithm of Three - level Inverter

GUO Xi - wen, ZHU Long - ji

(Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Based on SVPWM for the two - level inverter, the basic principle of space vector pulse width modulation (SVPWM) for three - level inverter is analyzed. The three - level inverter complex calculations of the NTV principle can be avoided when following the sector sub area techniques used in two - level. The process is concise and perspicuous to make the three - level controlled system be realized easily. At last, the simulated result is given, which confirmed the validity of SVPWM algorithm brought forward.

Key words: three - level inverter; SVPWM; simulation

1 三电平电压空间矢量原理

图 1 为三电平逆变器电路图, 三电平逆变器每相桥臂有 4 个开关元件 VG1 - VG4 (IGCT), 其中反

并联 4 个续流二极管 VD1 - VD4, 中间 2 个开关器件反并联 2 个箝位二极管 VC1 - VC2, 以及 2 个中点二极管 VN1 - VN2。

量定为 q_1, q_2 定为简单输出参数; 在复杂输出参数中设置 $\text{globMax}(q_1), \text{globMax}(q_2)$ 为 $\text{Max}q_1, \text{Max}q_2$, $\text{globMax}(\text{Max}q_1 - \text{Max}q_2)$ 为 Differ。

②在 Design Exploration 中定义优化参数: 设定 gasv, gasp 为输入, 下界都为 0, 上界分别为 6, 84; 设定 Differ 为输出, 下界定为 0。

③运行优化运算: 整个优化运算进行了 14 次, 仿真结果如下:

The best solution found is:

$$\text{gasp} = 7.997\ 568\ 759\ 950\ 51\text{e} + 001$$

$$\text{gasv} = 1.999\ 592\ 907\ 366\ 95\text{e} + 000$$

$$\text{Differ} = 5.714\ 280\ 379\ 373\ 80\text{e} - 002$$

④将结果运用到实际模型中, 很好地满足实际需求。

4 结语

运用 AMESim 对泥浆泵液力端进行图形化建模, 可以很方便地考察各个元件各个参数对系统的影响, 本文考察了空气室体积和空气室预压力对泥浆泵出口流量的稳流作用, 并求出了在一定条件下空气室主要参数的优化解, 为空气室的设计和匹配提供了新方法和依据:

(1) 曲轴转速和空气室预压力一定, 随着空气室体积的增大, 空气室的稳流效果越好。当体积大

于 8 L 时, 稳流效果微弱。

(2) 曲轴转速和空气室体积一定, 空气室预压力在不大于泥浆泵出口压力 8.5 MPa 的范围内, 空气室预压力越大, 空气室的稳流效果越好。

(3) 曲轴转速一定, 在排量 250 L/min, 压力 8.5 MPa 情况下, 得出空气室的优化解: 空气室预压力为 $7.997\ 568\ 759\ 950\ 51\text{e} + 0001$ MPa, 体积为 $1.999\ 592\ 907\ 366\ 95\text{e} + 000\text{L}$ 。

参考文献:

- [1] 蒲家宁, 陈明, 高松竹. 带空气室脉冲水射流系统通用分析法[J]. 后勤工程学院学报, 2006(1): 1-4.
- [2] 蒲家宁, 高松竹, 陈明. 空气室位置对脉冲水射流的影响[J]. 解放军后勤工程学院, 2006, 28(2): 1-4.
- [3] 王敏, 朱昌明, 詹永麒. 带有蓄能器的油压缓冲器的设计研究[J]. 流体传动与控制, 创刊号, 2003(11): 44-46.
- [4] 陈燎原, 尹兆友, 陈岁繁. 空气室对水煤浆隔膜泵性能影响的仿真研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(12): 41-44.
- [5] 李军, 邓晓刚, 陈器, 等. 空气室对往复泵管道系统脉动作用研究[J]. 矿山机械, 2006, 34(8): 95-96.
- [6] 李吉, 李华聪. 仿真软件 AMESim 应用研究[J]. 航空计算技术, 2006, 36(1): 56-58.

作者简介: 江进国(1955-), 教授, 硕士, 中国地质大学(武汉)机电学院副院长, 从事机械专业的本科和研究生教学及相关领域的科研, 研究方向: 岩土工程机械及其自动化。

收稿日期: 2007-03-26

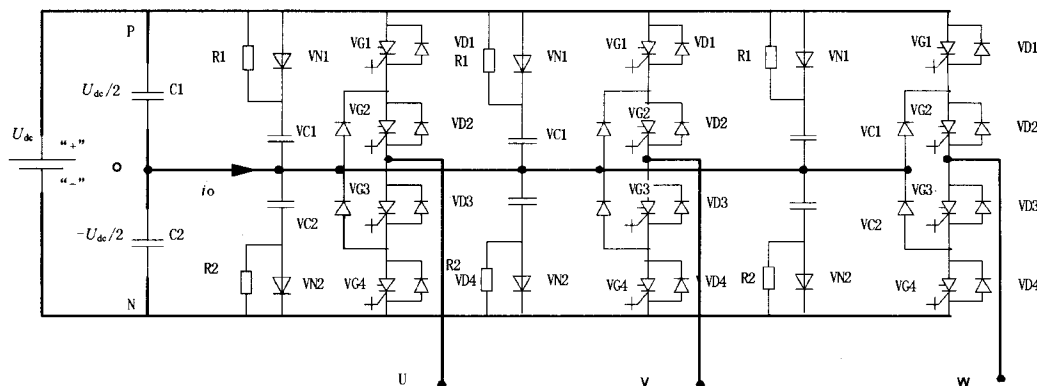


图 1 三电平逆变器电路图

这里引入开关函数 S_a, S_b, S_c , 则其对应的三态开关量, 分别定义为 1、0、-1 (P, O, N) 3 种状态, 对应的输出相电压为 $+U_d/2, 0, -U_d/2$ (U_d 为直流回路电压), 故逆变器共有 27 种电压矢量。系统的开关状态和空间矢量如图 2 所示。

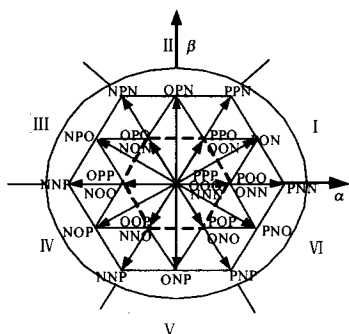


图 2 三电平逆变器空间电压矢量图

依照它们在空间上的分布情况以及结合如何将三电平矢量向两电平矢量转化的特点, 将电压矢量分为长矢量、中矢量、小矢量、零矢量 4 种类型。结合图 2, 其中长矢量为外围实线正六边形的 6 个顶点, 幅值为 $\frac{2}{3}U_{dc}$ 。中矢量为相邻长矢量的 6 个中点, 幅值 $\frac{\sqrt{3}}{3}U_{dc}$ 。小矢量为内侧虚线正六边形的 6 个顶点, 分别有正负 2 个矢量, 幅值均为 $\frac{1}{3}U_{dc}$ 。中心点为 3 个零矢量。

把整个大正六边形化为 6 个小六边形, 如图 3 所示(划分类比两电平空间矢量扇区的划分)。结合图 2 可以看出, 每个小六边形之间都有 60° 的重叠部分。为了便于分析, 以第 6 扇区为例, 将其划分为 6 个区域, 如图 4 所示。结合空间矢量图可得三电平逆变器电压合成机理: 任意时刻的三相电压 u_a, u_b, u_c 可由 3 个相邻的空间电压矢量沿着逆时针或顺时针时, 空间电压矢量由一个有效状态转移到另一

一个有效状态, 从而产生所需要的连续的三相电压。

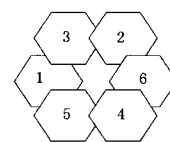


图 3 等效的扇区划分

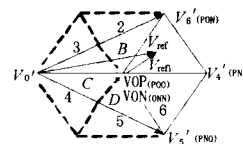


图 4 第 6 扇区空间矢量的选择以及区间的划分

2 三电平空间电压矢量算法

(1) 参考电压矢量 V_{ref} 所处扇区的判断

如图 2 所示, SVPWM 的首要任务就是判断 V_{ref} 所处的扇区以及处于扇区中的哪个区域, 然后就能确定出相应的输出电压矢量。首先, 需将三相参考电压做 $3/2$ 变换, 然后依据 V_{ref} 的幅角 θ 与简单的数学关系, 即可判断出该矢量所在的扇区。具体关系如表 1 所示。

表 1 扇区 S 与 $V_{a3}, V_{\beta3}$ 的关系

S	V_{a3}	$V_{a3} + \sqrt{3}/3 V_{\beta3}$	$V_{a3} - \sqrt{3}/3 V_{\beta3}$
1	-	-	+
2	+	+	+
3	-	+	+
4	+	-	-
5	-	-	-
6	+	+	-

(2) 参考电压的转换

一旦扇区 S 确定以后, 可将参考电压的起点转移到确定的小六边形的中心点上, 这一步骤可以通过将矢量合成原理求得—从原来的参考电压中减去对应小六边形中心电压在三相坐标系上的投影得到。以 $S=6, N=1$ 为例(见图 4), 由于两电平的空间矢量图中等边三角形的边长为 $2/3 U_{dc}$, 此时转换到 A 相的公式为: $V_{a2} = V_{a3} - \frac{1}{3} U_{dc}$, 同理可推倒其

他两相的转换,这样就完成了从三电平向两电平算法的过渡。具体转换关系如表 2 所示(其中下标表示的某一相电平数目)。

表 2 空间电压矢量的电平转换表

S	V_{a2}	V_{b2}	V_{c2}
1	$V_{a3} + V_{dc}/3$	$V_{b3} - V_{dc}/6$	$V_{c3} - V_{dc}/6$
2	$V_{a3} - V_{dc}/6$	$V_{b3} - V_{dc}/6$	$V_{c3} + V_{dc}/3$
3	$V_{a3} + V_{dc}/6$	$V_{b3} - V_{dc}/3$	$V_{c3} + V_{dc}/6$
4	$V_{a3} - V_{dc}/6$	$V_{b3} + V_{dc}/3$	$V_{c3} - V_{dc}/6$
5	$V_{a3} + V_{dc}/6$	$V_{b3} + V_{dc}/6$	$V_{c3} - V_{dc}/3$
6	$V_{a3} - V_{dc}/3$	$V_{b3} + V_{dc}/6$	$V_{c3} + V_{dc}/6$

显然,转换后的电压矢量仍符合三相电压和为零的原则。

(3)确定电压矢量的作用时间

为了计算电压矢量的作用时间,必须再对转换后的两电平三相电压做一次 3/2 变换,其变换如表 3 所示。

表 3 3/2 变换表

S	$V_{a2} = V_{a2}$	$V_{\beta 2} = \sqrt{3}/3 V_{a2} + 2\sqrt{3}/3 V_{b2}$
1	$V_{a3} + V_{dc}/3$	$\sqrt{3}/3 V_{a3} + 2\sqrt{3}/3 V_{b3}$
2	$V_{a3} - V_{dc}/6$	$\sqrt{3}/3 V_{a3} + 2\sqrt{3}/3 V_{b3} - \sqrt{3}/6 V_{dc}$
3	$V_{a3} + V_{dc}/6$	$\sqrt{3}/3 V_{a3} + 2\sqrt{3}/3 V_{b3} - \sqrt{3}/6 V_{dc}$
4	$V_{a3} - V_{dc}/6$	$\sqrt{3}/3 V_{a3} + 2\sqrt{3}/3 V_{b3} + \sqrt{3}/6 V_{dc}$
5	$V_{a3} + V_{dc}/6$	$\sqrt{3}/3 V_{a3} + 2\sqrt{3}/3 V_{b3} + \sqrt{3}/6 V_{dc}$
6	$V_{a3} - V_{dc}/3$	$\sqrt{3}/3 V_{a3} + 2\sqrt{3}/3 V_{b3}$

按照表 3 计算后,要判断该矢量位于小六边形的哪个扇区,其方法同上类似。

以图 4 的第 6 扇区为例来计算空间矢量的作用时间。结合图 4,假设 V_{ref} 落在第 6 小六边形的第 1 扇区中,此时的计算已经转换到两电平的 SVPWM 算法。按照两电平矢量的分类,根据矢量合成原则, V_{ref} 由两电平等效矢量 V_0' 、 V_4' 和 V_6' 合成。由伏秒平衡原则,则有

$$V_0' T_x + V_4' T_y + V_6' T_z = V_{ref} T \quad (3)$$

$$T = T_x + T_y + T_z \quad (4)$$

$$V_4 = \frac{1}{3} U_{dc}, V_6 = (\frac{1}{6} U_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{6} U_{dc})$$

式中 T_x 、 T_y 、 T_z ——矢量 V_0 、 V_4 、 V_6 的作用时间;
 T ——开关周期。

考虑到 $V_{ref} = V_{ref} (\cos \theta + j \sin \theta)$,可得

$$\begin{cases} T_x = T [1 - 3m \sin(\theta + \frac{\pi}{3})] \\ T_y = 3mT \sin(\frac{\pi}{3} - \theta) \\ T_z = 3mT \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中 m ——调制比, $m = 2V_{ref} / \sqrt{3} U_{dc}$ 。

参考矢量落在其他扇区,同理可以计算出合成矢量作用时间。

3 仿真研究

依据上述三相三电平空间矢量算法理论,在 Matlab 环境下建立了其模型,进行了仿真。仿真参数为 $U_d = 300$ V,输出频率 $f_0 = 50$ Hz,调制度 $m = 0.85$,开关周期 $T = 5e - 6$ s,图 5(a)示出仿真波形,图 6(b)示出同等条件下的两电平逆变器的波形。对比两图可见,三电平输出电压波形更接近正弦波。图 6 示出逆变器输出频谱图,由图可见,在相同开关频率条件下,采用三电平逆变器可以大大降低谐波污染。

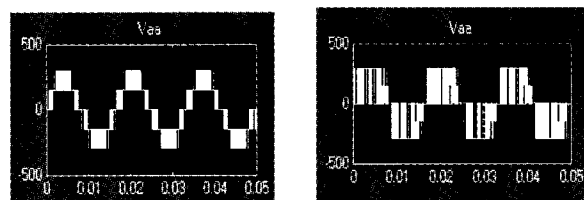


图 5 仿真波形

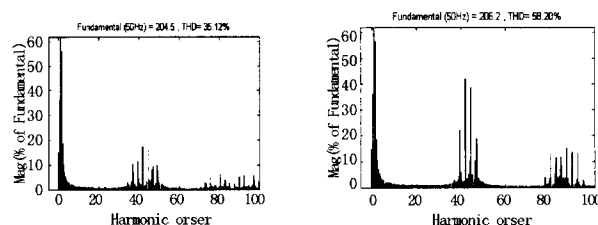


图 6 频谱分析

4 结语

本文以第 6 扇区的 1 区域为例,详细论述了三电平逆变器空间矢量调制的工作原理,提出了一种直接从两电平 SVPWM 过渡到三电平 SVPWM 的算法,通俗易懂且易于实现。最后给出了仿真结果,结果证实了 SVPWM 算法的有效性。

参考文献:

[1]李永东,高跃,侯轩.大容量多电平变换器 PWM 控制技术现状及进展[J].电力电子技术,2005(5):2-6.
 [2]B. K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives[B], 2004, 190-194.
 [3]Song Wen-xiang, Ding Xiao-yu, ShuMan-tan, etc.. Study on SVPWM Method and its implementation for Three-level Inverter[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2005(5).

作者简介:过希文(1983-),安徽六安人,现为安徽理工大学电气工程系电力电子专业 05 级在读研究生,主要研究方向:三电平变频调速系统,电子信箱: xwguo2008@163.com.

收稿日期:2007-01-15