

60°坐标系矿用变频器 SVPWM 算法研究

王 畅, 王 聪, 刘建东, 程 红

(中国矿业大学(北京) 电力电子与电力传动国家重点学科实验室, 北京 100083)

摘 要: 针对传统的煤矿井下矿用变频器 SVPWM 算法计算复杂的缺点, 研究了基于 60°坐标系的矿用变频器的 SVPWM 算法, 该算法只需进行简单的逻辑判断就可以得到参考矢量的具体位置, 并且用简单的加减运算就可以得到基本矢量作用时间, 能够大幅简化 SVPWM 的运算。在此基础上, 对 60°坐标系下的 SVPWM 算法过调制进行了研究, DSP 的波形表明了基于 60°坐标系的煤矿井下矿用变频器 SVPWM 算法的正确性。

关键词: 矿用变频器; 空间矢量; 60°坐标系; SVPWM; 煤矿

中图分类号: TD605 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2012)02-0094-04

Study on SVPWM Algorithm of 60° Coordinate System Mine Frequency Converter

WANG Chang, WANG Cong, LIU Jian-dong, CHENG Hong

(State Key Lab of Electric Electron and Electric Driving, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: According to the complicated calculation shortage of the SVPWM algorithm for the conventional frequency converter in the underground mine, the paper had a study on the SVPWM algorithm of the mine frequency converter based on the 60° coordinate system. With a simple logical judgment, the algorithm could have the certain location of the reference vector. With the simple plus and minus operation, the basic vector function time could be obtained and the SVPWM operation could be highly simplified. Based on the circumstances, a study was conducted on the over modulation of the SVPWM algorithm under the 60° coordinate system. DSP waves showed that based on the mine with the 60° coordinate system, the SVPWM algorithm of the mine frequency converter would be correct.

Key words: mine frequency converter; space vector; 60° coordinate system; SVPWM; coal mine

近年来, 基于直角坐标系控制算法的多电平技术越来越多地应用到逆变设备上, 特别是大功率设备。在煤矿井下的变频器也越来越多地运用到多电平技术^[1]。虽然多电平技术具有很多优越性, 但是由于其控制和算法的原因, 高于三电平的多电平逆变器还没有被大规模采用。而三电平逆变电路具有功率管损耗低、效率高、输出纹波电流小及输出电压失真度低的优点^[2-3]。煤矿井下矿用变频器是煤矿生产中重要的调速控制设备。目前, 此类防爆变频器多是由地面通用变频器改装而来, 煤矿生产环境复杂: 电网电压波动大、干扰因素多、空间有限、爆炸气体、煤尘等, 为了满足煤矿生产的要

求, 并且不对电网造成污染而影响其他通信、监测等电子设备的正常工作, 低污染、高性能、调试方便、使用安全、具有良好人机界面的矿用变频拖动控制装置成为煤矿生产的一种必需产品。笔者在研发用于煤矿生产的 500 kW 背靠背三电平变频拖动控制装置中得到试验结果, 并希望以此能够在矿用三电平变频器上利用新的控制算法。笔者采用基于 60°坐标系的空问矢量算法, 避免了直角坐标系 SVPWM 算法中三角函数等复杂的运算, 将空间矢量算法大幅简化, 并且在此基础上, 对 60°坐标系下空间矢量过调制进行研究。试验结果验证了该算法的正确性和有效性。

收稿日期: 2011-09-27; 责任编辑: 赵 瑞

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077125); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009KJ02, 2010YJ03)

作者简介: 王 畅(1985—), 男, 河南沈丘人, 硕士研究生。Tel: 15120015685, E-mail: 443658861@qq.com

网络出版时间: 2012-02-15 11:28; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120215.1128.027.html>

引用格式: 王 畅, 王 聪, 刘建东, 等. 60°坐标系矿用变频器 SVPWM 算法研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 94-97.

1 传统三电平逆变器 PWM 算法弊端

三电平空间矢量算法是根据参考电压矢量合成的原则, 分成区域判断、时间计算、时间状态分配 3 个步骤, 实现三电平变频器空间矢量 PWM 控制。经过一系列的判断确定参考电压所在区域之后, 可得出合成参考电压矢量的基本矢量。假设参考矢量落在第一大扇区内, 计算可得出每个特定电压矢量的合成时间, 合成时间的关系式中含有三角函数, 计算较复杂, 计算量也较大。同时传统的矢量分区算法中含有大量的三角运算, 这给三电平变频器空间电压矢量 PWM 的实时控制带来一定的困难。

2 矿用变频器 SVPWM 线性调制区算法

2.1 三电平矿用变频器的空间电压矢量的转化

在直角坐标系中, 考虑到三电平基本空间矢量为正六边形, 电压矢量再做一次坐标变换将直角坐标系变换成 60°坐标系, 应用几何理论, 可知直角坐标系和 60°坐标系下的坐标变换为

$$\begin{bmatrix} u_g \\ u_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{3} \\ 0 & 2/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: u_g 、 u_h 分别为 60°坐标系下 g 和 h 轴上的坐标分量; u_α 、 u_β 分别为两相静止坐标系下 α 和 β 轴上的坐标分量。当参考电压 u 用 abc 坐标表示时, 设三相电压为 u_a 、 u_b 、 u_c , 由 Clark 变换可以得到 abc 坐标系到 60°坐标系的坐标变换公式为

$$\begin{bmatrix} u_g \\ u_h \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, u_a 、 u_b 、 u_c 为三相电电压某时刻瞬时值。

这样在新的坐标系统中, 原来的空间电压矢量用坐标刻度来表示, 对应的开关矢量坐标都变成整数点, 新的坐标系统中原来的空间电压矢量可以用整数点坐标来表示^[4-7]。

假设需要得到的参考电压为 u , 先将 u 归一化, 使得 u 的归一值落在六边形之内。六边形的最大值为 $2u_d/3$, 即最大输出电压 u_d 为直流侧电压的 0.66 倍, 而此时对应的长度为 2。所以用目标电压矢量除以 $u_d/3$, 即将电压矢量归一到六边形之内。

将得到的电压矢量投影到三相轴上, 就可以得到 u_a 、 u_b 、 u_c , 坐标公式为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos (\theta - 120^\circ) \\ \cos (\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} \frac{u}{u_d} \quad (3)$$

其中, θ 为电压矢量与三相轴的夹角。根据式 (2)、式 (3) 就将给定的 u 值转化为 u_g 和 u_h , 这样给定的 u 只通过 3 个余弦变换就得到了 60°坐标系的数值。

2.2 区域判断和 3 个临近基本电压矢量的确定

将 60°坐标系划分为 6 个大扇区, 见表 1 和表 2, 设参考电压矢量在 gh 坐标系中的坐标为 (u_g , u_h), 参考矢量所处的大扇区和小扇区的位置可以通过表 1 和表 2 简单的逻辑判断得到。

表 1 大区间判断逻辑运算

扇区	u_g	u_h	$u_g + u_h$	扇区	u_g	u_h	$u_g + u_h$
1	>0	>0	>0	4	<0	<0	<0
2	<0	>0	>0	5	>0	<0	<0
3	<0	>0	<0	6	>0	<0	>0

表 2 小区间判断逻辑运算和对应基本参考矢量

判断条件	区域判断	最近基本矢量
$u_g < 1$ $u_h < 1$ $u_g + u_h < 1$	第 1 小扇区	(0 0)、(0 1)、(1 0)
$u_g < 1$ $u_h < 1$ $u_g + u_h > 1$	第 2 小扇区	(1 0)、(2 0)、(1 1)
$u_g > 1$ $u_h < 1$ $u_g + u_h > 1$	第 3 小扇区	(0 1)、(1 1)、(1 2)
$u_g < 1$ $u_h > 1$ $u_g + u_h > 1$	第 4 小扇区	(0 1)、(0 2)、(1 1)

2.3 计算各个基本电压矢量的作用时间

根据上述方法得到最近 3 个矢量后, 对于一个给定的参考电压矢量 u , 由伏秒平衡原理, 可以计算出在 gh 坐标系 SVPWM 算法中各个电压矢量的作用时间。假设某一扇区选择好的 3 个临近基本矢量为 (x_1 , y_1)、(x_2 , y_2)、(x_3 , y_3), 其所对应的作用时间分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 。将选择好的基本矢量用于伏秒平衡方程组, 列出下列矩阵方程式:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} t_1 + \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} t_2 + \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ 1 \end{bmatrix} t_3 = \begin{bmatrix} u_g \\ u_h \\ 1 \end{bmatrix} T$$

其中 T 为开关周期。通过矩阵方程可计算出 3 个基本矢量的作用时间, 即 $t_3 = T p_1 / p_2$, $t_2 = T (q_3 - q_2 p_1 / p_2) / q_1$, $t_1 = T - t_2 - t_3$, 式中: $q_1 = x_1 y_2 - x_2 y_1$; $q_2 = x_1 y_3 - x_3 y_1$; $q_3 = u_h x_1 - u_g y_1$; $p_1 = q_1 (y_1 - u_h) - q_3 (y_1 - y_2)$; $p_2 = q_1 (y_1 - y_3) - q_2 (y_1 - y_2)$ 。

由于在此情况下, p_2 和 q_1 不为零, 所以对于 60°

坐标系下的基本矢量和原有坐标系下的基本矢量对应关系应加以限制,以保证 p_2 和 q_1 不为零。在第 1 大扇区的第 1 小扇区,基本矢量为 $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$,无论怎样调整对应关系, p_2 和 q_1 总会为零,所以必须对其特殊考虑。在第 1 大扇区第 1 小扇区, $(0,0)$ 对应时间 t_1 , $(1,0)$ 对应时间 t_2 , $(0,1)$ 对应时间 t_3 。运用伏秒平衡关系,解出 $t_2 = u_g$, $t_3 = u_h$, $t_1 = 1 - u_g - u_h$ 。以第 2 大扇区为例,根据表 3 得出的 3 个基本矢量对应的作用时间。

表 3 小扇区对应基本矢量的作用时间

第 2 大扇区	时 间		
	t_1	t_2	t_3
第 1 小扇区	$u_g + u_h$	$-u_g$	$1 - u_h$
第 2 小扇区	$1 + u_g$	$u_h - 1$	$1 - u_g - u_h$
第 3 小扇区	$2 - u_h$	$-u_g$	$u_g + u_h - 1$
第 4 小扇区	$u_g + u_h$	$2 - u_h$	$-u_g - 1$

从表 3 可知,大区间和小区间的判断只需将得到的 u_g 、 u_h 和 $u_g + u_h$ 与 0 和 1 相比较就可得出具体的区间值,这样使得区间判断的方法大幅简化,并且使得判断的运算时间大幅减少,这样很利于 SVPWM 算法的计算机实现。在时间计算中,不仅利用了区间运算得到的结果,并且计算的时间也只是 u_g 和 u_h 的简单运算,使得传统三电平 SVPWM 中的最复杂的三角运算转化为简单的加减运算。

3 矿用变频器 SVPWM 非线性调制区算法

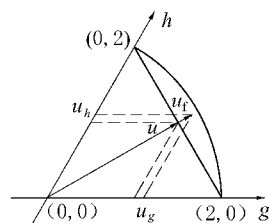
在空间矢量算法中,SVPWM 仅能够将输出电压提高到方波工况时的 90.69%,为了获得更大的输出电压,逆变器必须工作在过调制区,直至达到方波工况。进入过调制区后,输出电压将出现严重畸变,影响变频器驱动的负载^[8]。

典型的过调制控制策略有最小相角误差过调制策略和最小幅值误差过调制策略。其中最小相角误差过调制策略控制简单,但是调制度不高,并且能引起较大的 THD。最小幅值误差过调制策略调制度高,引起的 THD 很小,但是这种过调制策略方法复杂,计算量大,并且数字化需要很大的内存空间^[9]。对于双模式过调制策略和单模式过调制策略在文献 [10-11] 中做了详细的介绍。

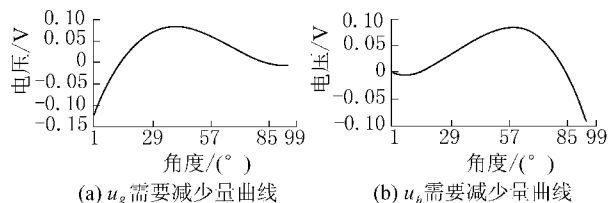
3.1 最小相角误差过调制策略

对需要逆变电压的端点轨迹超出六边形的部

分,保持逆变电压的相位角不变,将其端点强制固定在六边形上形成新的矢量 u ,同时未超出六边形的部分仍保留为圆形。对于 60° 坐标系下,如图 1 所示, u_i 为需要逆变的电压归一值,其中三角形为六边形在坐标系中第一象限部分。由于逆变电压在过调制区,将 u_i 固定到六边形的边上。当逆变电压为 U 时,逆变器实际输出电压为 u 。

图 1 60° 坐标系下最小相角误差过调制策略示意

从图 1 可得出:参考电压矢量已经从 u_i 减小到了 u 。此时,对于 g 轴,减小了 u_g ,对于 h 轴,减小了 u_h 。进行编程,并在 DSP 上进行实现。将 U 从 1.732 增长到 2,也就是将参考矢量从过调制的最小值增大到最大值。求出需要减少的 u_g 和 u_h 。取单位化后的参考电压矢量中间值 1.866,可以得到当参考电压矢量从 0° 旋转到 60° 时, u_g 和 u_h 减少的量。将 u_g 和 u_h 减少的量绘成图形如图 2 所示。从图 2 中可得出,随着角度的变化, u_g 和 u_h 需要减少的量是一个不规则的曲线,并且拟合较为困难。

图 2 最小相角误差过调制策略下角度增加时 u_g 和 u_h 需要减少量曲线

3.2 最小幅值误差过调制策略

当逆变电压的端点位于六边形外时,将其投影到对应六边形的边上,形成以垂足为端点的新参考电压矢量 u ,端点位于六边形边上的矢量中, u_i 与 u 之间误差矢量的幅值最小,但是矢量的相角已发生改变,使得电压,电流波形的失真程度很大,且这种方法计算量很大,不利于计算机的在线实现。 60° 坐标系下最小幅值误差过调制策略如图 3 所示。运用第 3.1 节的方法步骤可得出 u_g 和 u_h 的变化,将 u_g 和 u_h 需要减少的量绘成图形。图 4 为 $U = 1.866 \text{ V}$ 和 2 V 时, u_g 和 u_h 需要减少量的曲线。

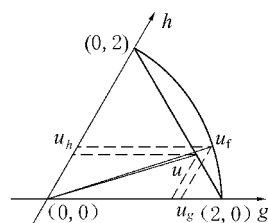


图 3 60°坐标系下最小幅值误差过调制策略

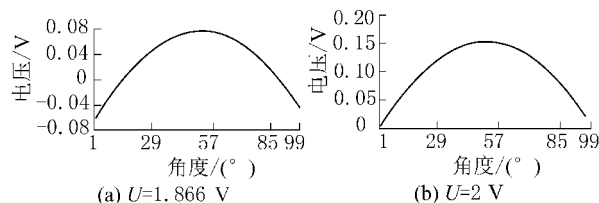
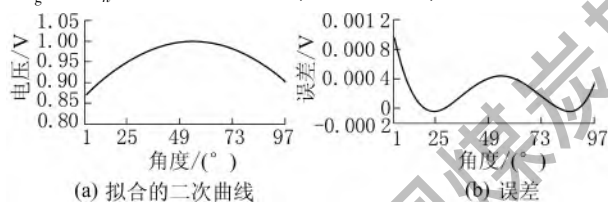


图 4 最小幅值误差过调制策略下角度增加时

u_g 和 u_h 需要减少量曲线

从图 5a 可知, u_g 和 u_h 的变化接近二次函数, 所以对其中的函数进行拟合。运用数学关系求出相应的数学曲线, 其中 a 为自变量。

$$u_g = u_h = -0.491\,073(a - 0.523)^2 + 0.999\,56$$

图 5 拟合的二次曲线和实际的 u_g 和 u_h 变化之间的误差

将求出的二次函数表达曲线和实际得到的曲线做差, 得出拟合误差曲线, 从图 5b 可看出, 误差已经小于千分之一。所以能够将 u_g 和 u_h 的曲线表达式进行简单化, 不用以前的三角函数, 直接使用简单的一次和二次函数, 计算量大幅减少。

4 三电平逆变器 SVPWM 算法的实现

根据上述理论以及运算所得结果, 进行 TMS320F2812 编程, 并且烧进 DSP2812 中, 对其中的管脚进行波形观察, 将 DSP 的模拟输入管脚设定为逆变输入和电压输入, 同时在 DSP 运算时, 将得到的数字信号进行相应的运算, 可以得到需要的逆变频率和逆变电压。当改变模拟输入口的电压时, DSP 内部的数据跟着变化。经试验证实, 外界电压从 0 增长到最大电压时, 输出的频率和电压也随之变化。由于不能动态显示, 取逆变频率为 50 和 25 Hz, 逆变电压为 500 和 250 V。用特殊的电压作为研究对象。通过对逆变电压 250、500 V,

逆变频率 25 和 50 Hz 下 DSP 的管脚发出的触发脉冲波形与理论脉冲波形进行对比分析, 发现实际波形和理论波形完全一致, 即当逆变频率增加时, 波形的数量也会随之增加, 并且成线性正比例关系; 当逆变电压增加时, 波形的疏密度会随之增加。

5 结 语

在传统的煤矿井下矿用变频器的空间电压矢量 PWM 控制算法的基础上, 讨论了一种基于 60°坐标变换的空间电压矢量控制的简便算法, 并且在此基础上对过调制策略进行研究。该算法在参考电压矢量区间判断和基本矢量作用时间计算上都避免了三角函数运算, 以及在传统的过调制策略中都大幅降低了计算量, 更易于数字化的实现, 并且能大幅增加控制回路的开关频率。通过在 DSP2812 上的试验验证了所提出的空间电压矢量 PWM 简便算法在线性调制去和非线性调制区的正确性和有效性。由此得到可以在煤矿井下矿用的变频设备上大量使用 60°坐标系的 SVPWM 控制算法。这样不仅能使控制更加准确, 也能使其控制的速度大幅增加。

参考文献:

- [1] 张 晔, 汤钰鹏, 王文军. 三电平逆变器空间矢量调制及中点电位平衡研究 [J]. 电气传动, 2010, 40 (2): 8-11.
- [2] 袁义生. 一种软开关交错式三电平逆变电路的研究 [J]. 电力电子技术, 2010, 44 (1): 8-10.
- [3] Nabae, Takahashi I, Akagi H. A New Neutral - Point - Clamped PWM Inverter [J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1981, 17 (5): 518-523.
- [4] 邹学渊, 王 京, 张勇军. 三电平电压型 PWM 整流器的 SVPWM 算法研究 [J]. 电气传动, 2010, 40 (6): 8-11.
- [5] 梁 英, 庄圣贤, 舒鑫东. 基于 DSP 的三电平逆变器 SVPWM 调制研究 [J]. 变流技术与电力牵引, 2008(4): 8-11.
- [6] 焦陈丰. 中点箝位型三电平变流器空间矢量发生技术研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009: 23-26.
- [7] 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, 2006: 20-25.
- [8] 张艳芳, 林 飞, 马志文. 两种 SVPWM 过调制方法的比较研究 [J]. 北京交通大学学报, 2005, 29 (2): 39-43.
- [9] 李 阳, 戴 鹏, 于月森. 三电平逆变器 SVPWM 过调制控制策略综述 [J]. 电气传动, 2010, 40 (7): 8-11.
- [10] 全恒立, 张 钢, 陈 杰. 一种 SVPWM 过调制算法的数字化实现 [J]. 电气传动, 2010, 40 (5): 44-48.
- [11] 王旭东, 张思艳, 余腾伟. SVPWM 过调制中控制角算法的分析与应用 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14(12): 63-68.