# 基于 S 函数的 SVPWM 改进算法的研究

赵　转　曹以龙　黄　锦

（上海电力学院，上海　200090）

**摘要**　传统的 SVPWM 算法，需要坐标变换、矢量运算等，导致仿真时所占用的物理内存较多，CPU 运算时间较长。本文通过对传统算法的分析，提出了一种基于标幺值的 SVPWM 算法，简化了运算步骤，节省了内存空间与仿真时间，克服了传统算法的缺点。最后通过基于 S 函数的 Simulink 仿真及 DSP 实验验证了算法的可行性及优越性。

**关键词**：SVPWM；算法；标幺值；S 函数；仿真；DSP

# The Research on Improved Algorithm of SVPWM Based on S Function

*Zhao Zhuan　Cao Yilong　Huang Jin*

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai　200090)

**Abstract**　The traditional SVPWM algorithm, Which needs coordinate transformation, vector operations and others, leads to too many steps to realize simulation and occupies CPU time. Through the analysis of the traditional algorithm, this paper proposes an algorithm of SVPWM based on normalized value. This method can simplify operation steps and save time, overcoming the shortcomings of the traditional algorithm of SVPWM. At last, based on s-function of the simulation and the experiment of DSP, verify the feasibility and superiority of the algorithm.

**Key words**：SVPWM；algorithm；normalized value；s-function；Simulation；DSP

近年来，电压空间矢量脉宽（SVPWM）技术以其直流电压利用率高、易于数字实现等优点，广泛应用于电机调速、逆变器、变频器、滤波器等电力电子领域，因此对 SVPWM 的研究是一个重要方向。其基本原理是由三相逆变器的六个功率开关管的不同组合，使输出电压空间矢量的运行轨迹尽量接近圆形[1]。但是，传统的 SVPWM 算法需要大量的三角函数计算，扇区的判断和基本矢量作用时间的确定，需要用不同的公式来判定，工作量大、占用大量 CPU 资源；并且逆变器输出电压的谐波含量大[2]。

针对传统 SVPWM 的这些缺点，本文提出了一种改进的 SVPWM 算法，对三相相电压经过标幺化处理[3]后，得出扇区的判断和矢量作用时间的确定只需要一个公式的结论。最后，根据改进的算法，给出 Simulink 仿真[4-5]、S 函数的编写[6]验证了算法的正确性，另外通过 DSP 软件实现[7]，对比仿真结果进一步论证了改进算法的正确性和可行性。

## 1　改进算法的 SVPWM 原理

### 1.1　基本空间电压矢量

三相逆变器的空间电压矢量总共有 8 个，其中包括两个零矢量。对于任一给定的 $U_{\mathrm{ref}}$，都可以由基本电压矢量来合成，如图 2 所示[2-4]。

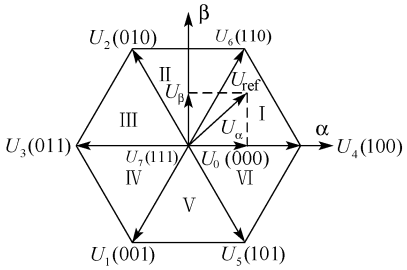



**图 1　开关状态与空间矢量关系**

### 1.2　扇区判断

通过计算，参考电压所处扇区的判断与 $U_\beta$、$\frac{1}{2}(\sqrt{3}U_\alpha - U_\beta)$、$\frac{1}{2}(-\sqrt{3}U_\alpha - U_\beta)$ 的大小有关系[1, 6-7]。

上海市科技创新行动计划地方院校能力建设项目（13160500900）

定义如下三个变量：

$$\begin{cases} U_{\text{ref}1}=U_{\beta} \\ U_{\text{ref}2}=\dfrac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha}-U_{\beta}) \\ U_{\text{ref}3}=\dfrac{1}{2}(-\sqrt{3}U_{\alpha}-U_{\beta}) \end{cases} \tag{1}$$

把 $U_{\alpha}$、$U_{\beta}$ 利用最大相电压为基做标幺化。最大线电压为 $U_{\text{dc}}$，则最大相电压为 $\dfrac{U_{\text{dc}}}{\sqrt{3}}$。标幺化后式（1）可以变为

$$\begin{cases} U_{\text{ref}1}=U_{\beta 1} \\ U_{\text{ref}2}=\dfrac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha 1}-U_{\beta 1}) \\ U_{\text{ref}3}=\dfrac{1}{2}(-\sqrt{3}U_{\alpha 1}-U_{\beta 1}) \end{cases} \tag{2}$$

式中，$U_{\alpha 1}$、$U_{\beta 1}$ 是 $U_{\alpha}$、$U_{\beta}$ 经过标幺化处理后的量。根据式（2）可确定矢量所处的扇区号，sector=$4C+2B+A$（sector 不是扇区号）。如果 $U_{\text{ref}1}>0$，则 $A=1$，反之 $A=0$；如果 $U_{\text{ref}2}>0$，则 $B=1$，反之 $B=0$；如果 $U_{\text{ref}3}>0$，则 $C=1$，反之 $C=0$。

### 1.3 矢量作用时间的确定

图 2 给出了给定电压矢量 $U_{\text{ref}}$ 和基本电压矢量 $U_4$ 和 $U_6$ 之间的关系[2]。

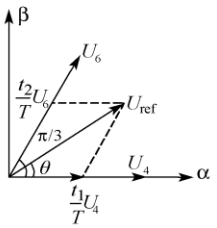



**图 2　第一扇区矢量图**

根据伏秒平衡可得

$$\begin{cases} U_{\alpha}T=U_4T_1+U_6T_2\cos 60^{\circ} \\ U_{\beta}T=U_6T_2\sin 60^{\circ} \end{cases} \tag{3}$$

把基本电压矢量也作标幺化处理后 $|U_4|=|U_6|=\dfrac{2}{\sqrt{3}}$ 则式（3）变为

$$\begin{cases} U_{\alpha 1}T=\dfrac{2}{\sqrt{3}}T_1+\dfrac{2}{\sqrt{3}}T_2\cos 60^{\circ} \\ U_{\beta 1}T=\dfrac{2}{\sqrt{3}}T_2\sin 60^{\circ} \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} T_1=\dfrac{T}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha 1}-U_{\beta 1}) \\ T_2=TU_{\beta 1} \end{cases} \tag{5}$$

两个基本矢量的占空比为

$$\begin{cases} t_1=\dfrac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha 1}-U_{\beta 1}) \\ t_2=U_{\beta 1} \end{cases} \tag{6}$$

采用同样的方法，可以得到矢量在其他扇区时的占空比，发现开关矢量的作用时间在不同的扇区，总与这三个量 $U_{\beta 1}$、$\dfrac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha 1}-U_{\beta 1})$、$\dfrac{1}{2}(-\sqrt{3}U_{\alpha 1}-U_{\beta 1})$ 其中的两个有关系[1, 6-7]，定义如下三个变量：

$$\begin{cases} X=U_{\beta 1} \\ Y=\dfrac{1}{2}(\sqrt{3}U_{\alpha 1}-U_{\beta 1}) \\ Z=\dfrac{1}{2}(-\sqrt{3}U_{\alpha 1}-U_{\beta 1}) \end{cases} \tag{7}$$

从式（2）和式（7），可以看出经过标幺处理，矢量扇区的判断与开关作用时间的确定，可以用同样的变量来表示，即都可以通过式（7）来判断。

设三相相电压为

$$\begin{cases} U_{\text{a}}(t)=U_{\text{m}}\cos(\omega t) \\ U_{\text{b}}(t)=U_{\text{m}}\cos(\omega t-120^{\circ}) \\ U_{\text{c}}(t)=U_{\text{m}}\cos(\omega t+120^{\circ}) \end{cases} \tag{8}$$

同样的式（8）也用 $\dfrac{U_{\text{dc}}}{\sqrt{3}}$ 作标幺化处理，得

$$\begin{cases} U_{\text{a}1}(t)=M\cos(\omega t) \\ U_{\text{b}1}(t)=M\cos(\omega t-120^{\circ}) \\ U_{\text{c}1}(t)=M\cos(\omega t+120^{\circ}) \end{cases} \tag{9}$$

式中，$M=\dfrac{\sqrt{3}U_{\text{m}}}{U_{\text{dc}}}$ 式（9）经过坐标变化，可以得到两相静止坐标坐标系下的量

$$\begin{cases} U_{\alpha 1}=M\cos(\omega t) \\ U_{\beta 1}=M\sin(\omega t) \end{cases} \tag{10}$$

由式（10）可把式（7）化简得

$$\begin{cases} X=M\sin(\omega t) \\ Y=M\sin(\omega t+120^{\circ}) \\ Z=M\sin(\omega t-120^{\circ}) \end{cases} \tag{11}$$

可以看到式（11）只需把式（9）微分之后除以$\omega$便可得到，即把三相的采样电压通过微分变化之后便可得到判断扇区和矢量作用时间确定的表达式。表1所示扇区、矢量与时间的关系。

**表1　扇区号与作用时间对应关系**

| sector | 3 | 1 | 5 | 4 | 6 | 2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 扇区号 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | Ⅵ |
| $t_1$ | Y | –Y | X | –X | Z | –Z |
| $t_2$ | X | –Z | Z | –Y | Y | –X |

## 2　SVPWM 仿真模型

对于以上所改进的算法，通过对模块进行 S 函数编写[6]，建立了基于 S 函数的 Simulink 仿真模型如图 5 所示。

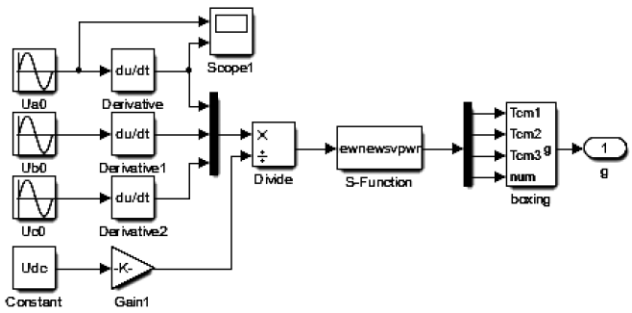



**图 3　基于 S 函数的 SVPWM 的仿真模型**

### 2.1　扇区判断函数模块

$x=U_{a1}$；

$y=U_{c1}$；

$z=U_{b1}$；

if($x>0$)

sector=1;

end

if($y>0$)

sector=sector+2;

end

if($z>0$)

sector=sector+4;

end

sector%与扇区的对应关系见表1，$U_{a1}$、$U_{b1}$、$U_{c1}$为经过微分标幺化处理后的三相电压。

### 2.2　两个基本矢量作用时间函数模块

以sector=1（第二扇区）为例，其他扇区的程序与第二扇区相类似。

if(sector==1)

$t_1=-y$；

$t_2=-z$；

$T=t_1+t_2$；

if($T>1$)

$t_1=t_1/T$；

$t_2=t_2/T$；

end

### 2.3　开关矢量切换时刻分配函数模块

$T_b=0.25*(1-t_1-t_2)$；

$T_a=T_b+0.5*t_1$；

$T_c=T_a+0.5*t_2$；

COMPARE1=$T_a$；

COMPARE2=$T_b$；

COMPARE3=$T_c$；

num=2;

%COMPARE1、COMPARE2、COMPARE3为开关器件的切换时间。num为对应的扇区号。

## 3　三相电压源型逆变器的仿真模型

在 SVPWM 仿真基础上搭建了三相电压源型逆变器的仿真模型[5]如图 6 所示。仿真参数：指令三相电压为 220V，频率为 50Hz，直流母线电压为 380V，交流侧电感为 0.01H，电阻为 1Ω，开关频率为 10kHz。

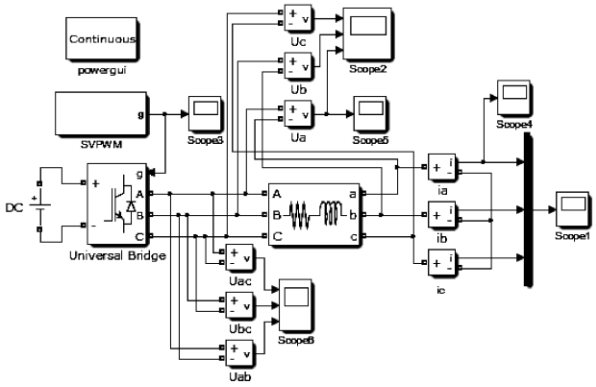



**图 4　三相电压源型逆变器的仿真模型**

## 4　仿真与实验结果分析

图5所示为线电压的输出波形图，图6所示为A相输出电压波形，图7所示为线电压的谐波分析，图8所示实验条件下的扇区波形，图9所示为实验条件下带死区的SVPWM波形。

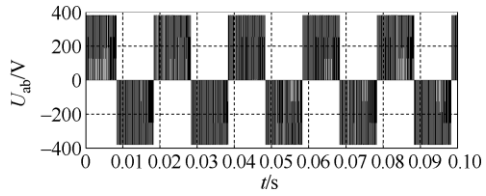



图 5　线电压输出波形

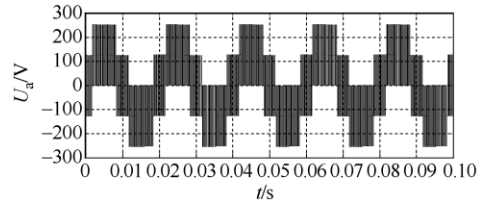



图 6　A 相输出电压波形

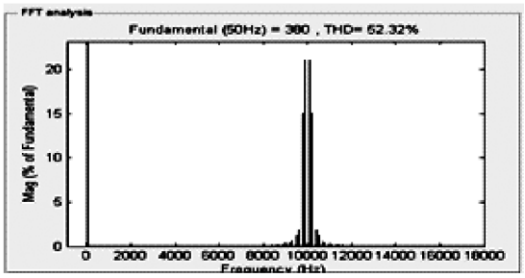



图 7　线电压的谐波分析图

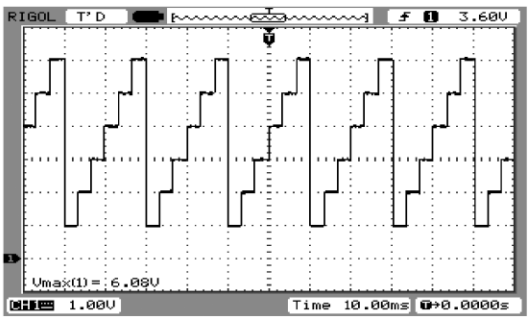



图 8　实验下的扇区波形

由仿真结果图5和图6知道线电压和相电压的值与理论计算值相符合。从图7的结果可知，线电压的基波幅值达到380V与直流侧的电压幅值相等，可知电压的利用率达到了100%。并且，谐波都集中在开关频率附近。图8是把对应扇区的号通过D/A转换而来的，可以看出实验结果与理论计算相一致。图9可以看到SVPWM波形呈正弦变化。

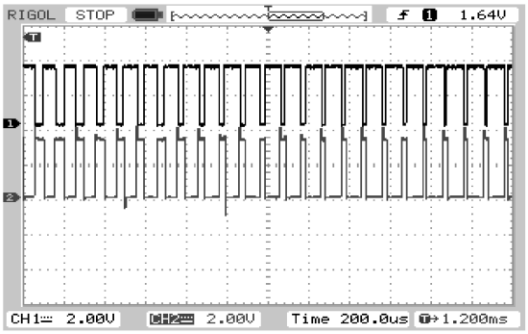



图 9　实验下带死区的 PWM1、PWM2 的波形

## 5　结论

本文基于传统的 SVPWM 算法，详细推导了改进的 SVPWM 算法，采用了一种标幺值的方法，大大简化了算法的复杂程度，由给定的信号，可以直接判断矢量所在扇区和开关切换的时刻，缩短了仿真和程序执行时间。通过仿真和实验的方法分别验证了改进算法的正确性和可行性，为后续研究提供了重要的理论依据。

### 参考文献

[1] 张崇巍，张兴. 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.

[2] 张雪原. SVPWM 调制下逆变器输出电压谐波分析[J]. 电气传动, 2011(7).

[3] 艾红,樊生文. DSP 原理及应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2012: 626-632.

[4] 邢绍邦，罗印，升沈琳. 一种新颖的SVPWM 算法及其仿真[J]. 系统仿真学报，2013(1).

[5] 赵峰，理文祥，葛莲. 基于 SVPWM 控制的逆变器仿真研究[J]. 电源技术研究与设计，2012, 36(9).

[6] 王庆贤，理文祥. 基于 S 函数的 SVPWM 算法研究[J]. 自动化与仪器仪表，2011(4).

[7] 周梅辉，吴章标，蒋顺.基于 TMS320C6747 的 SVPWM 实现方法研究[J]. 电气技术，2013(9).

**作者简介**

赵　转（1989-），女，硕士在读，河南南阳人。主要从事电动汽车充电电源的研究。