

机电技术

基于 SPWM 的 SVPWM 算法

利 剑¹ 窦金生²

(江苏科技大学¹, 镇江 212003; 镇江船舶学院², 镇江 212003)

摘要 传统的 SVPWM 算法中存在大量的三角函数和求根运算, 不利于数字信号处理器的实时运算。为此提出了一种基于 SPWM 算法的 SVPWM 算法, 将 SVPWM 像 SPWM 那样找出其隐含的调制函数, 采用 SPWM 中调制波与载波相比的规则采样思路, 在静止坐标系下直接查表得到每个参考电压矢量所对应的三相调制波的函数值。进而得到每相电压在一个 PWM 周期中的占空比, 有利于数字化的实现。经过 Matlab 仿真实验验证了该方法的正确性。

关键词 电压型逆变器 SVPWM SPWM 调制函数

中图法分类号 TM423; 文献标志码 A

随着 PWM(脉冲宽度调制)技术的不断应用和发展, 现在已经成为变频调速技术的核心技术, 优化各种变频调速系统的性能。PWM 现在主要 SPWM 和 SVPWM 两种主流形式, 两者相比, SVPWM 控制的物理意义直观, 数学模型简单, 便于计算机实时控制, 并且具有转矩脉动小, 噪声低, 控制简单, 损耗较小, 直流电压利用率高等优点, 但是 SVPWM 存在大量的非线性运算, 采用大量的三角函数, 计算复杂, 不利于数字化的实现。

本文将两种算法相结合, 找出 SVPWM 波的隐含调制波, 将所求的调制波形离散成数据表, 就可以像 SPWM 那样直接查表, 使得算法大大简化, 便于数字化的实现。

1 SPWM 与 SVPWM 原理

1.1 SPWM

SPWM 是从电源的角度出发, 着手如何生成一个可以调压调频的三相正弦波电源, 是基于载波比较原理产生 PWM 波形, SPWM 生成的方法有很多, 一般在数字系统中利用规则采样的方法来实现^[1],

如图 1 所示。

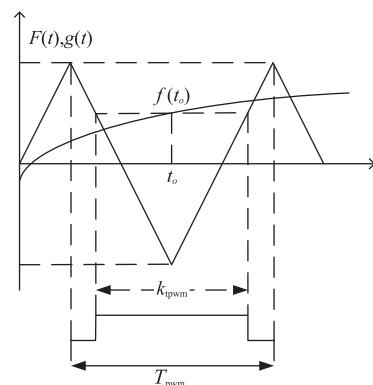


图 1 规则采样

这里, 载波 $g(t)$ 为幅值为 1 的三角波, $f(t)$ 为关于时间 t 的调制函数^[2], 根据规则采样法, PWM 波形的占空比与 PWM 周期中点 $f(t_0)$ 的调制函数有关

$$k = \frac{1 + f(t_0)}{2} \quad (1)$$

式(1)中 $f(t) = m \sin(\omega t)$; m : 调制波峰值与载波峰值之比;

ω : 基波角频率。

由三角型相似的原理, 取样时间脉冲宽度

$$k_{T_{\text{pwm}}} = \frac{1}{2} T_{\text{pwm}} [1 + f(t_0)] \quad (3)$$

T_{pwm} : SPWM 脉冲的周期。

当 $m > 1$ 时, 比较器输出就会在一段时间内处于饱和状态, 输出基波分量的幅值和输入调制波幅值不再保持简单的线性关系, 且输出波形产生畸变, 谐波增加。因此, SPWM 的最大线性调制比为 1, 相应的输出相电压幅值为直流母线电压的一半, $U_{dc}/2$ ^[3]。

将调制波离散成数据表存储起来, 当比较寄存器的值匹配时比较器发出信号控制电子器件的通断, 这就是 SPWM 的基本原理。

1.2 SVPWM

SVPWM 与 SPWM 的思想截然不同, 它把电动机与 PWM 逆变器看作一体, 以三相对称正弦电压供电时交流电动机中的理想磁链圆为基准, 利用逆变器不同的开关模式所产生的磁链有效矢量来逼近基准圆, 即用多边形来近似逼近圆形^[4]。

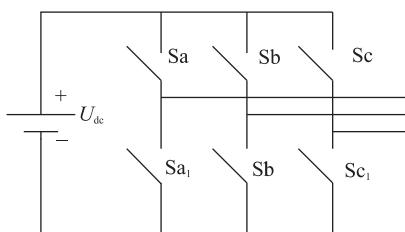


图 2 三相 PWM 逆变器原理图

图 2 给出了三相 PWM 逆变器的原理图, 为使电机对称工作, 必须三相同时供电。a, b, c 分别代表 3 个桥臂的开关状态, 规定上桥臂器件导通用“1”表示, 下桥臂器件导通用“0”表示, 并依 UVW 相序依次代表 ABC 排列。因此, a, b, c 共有 000、001、010、011、100、101、110、111 八种开关模式, 其中 000、111 开关模式使逆变器输出电压为零, 这八种模式对应着八个空间电压矢量 (000, 111 为原点)^[5]。如图 3 所示。

SVPWM 的目的就是通过控制 6 个功率开关的 8 种工作状态逼近电机工作所需要的任意时刻电压矢量 U_{out} , 图 3 给出的是在 I 扇区的情况, U_{out} 是输出的参考相电压矢量, 其幅值代表相电压的幅值, 其旋转角速度为输出正弦电压的角频率, U_{out} 由构成扇区 I 的空间电压矢量 V_1, V_2 合成, T_1, T_2 分别是它们的作用时间^[6]

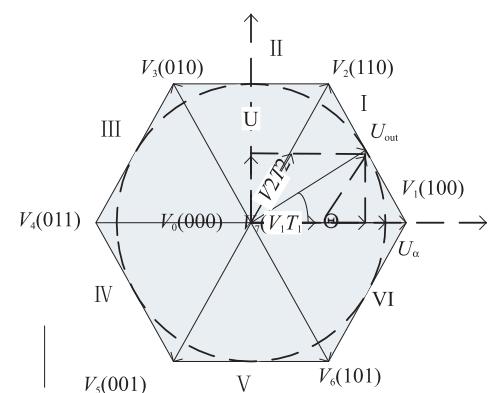


图 3 基本空间电压矢量

$$U_{out}T_c = V_1T_1 + V_2T_2; T_c : U_{out} \text{ 的作用时间} \quad (4)$$

如此下去, 下一个 T_c 任然由 V_1, V_2 合成 U_{out} , 只是各自的作用时间改变, 但是要保证合成电压矢量的幅值不变, 如此下去, 在每个 T_c 期间, 都改变相邻基本矢量作用的时间, 并保证所合成电压空间矢量的幅值都相等。因此, 当 T_c 取足够小时, 电压空间矢量的轨迹是一个近似圆形的正多边形^[7]。扇区的判断如下, 将 U_{out} 在进行矢量分解, 得到在静止坐标系 $\alpha\beta$ 的投影值 U_α, U_β , 以直流母线电压 U_{dc} 作参数, U_a, U_b, U_c 在分别为 $\alpha\beta$ 坐标系上的分量为

$$\begin{cases} U_a = U_\beta \\ U_b = -U_\beta \cos 60^\circ + U_\alpha \sin 60^\circ \\ U_c = -U_\beta \cos 60^\circ - U_\alpha \sin 60^\circ \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_a > 0, A = 1, \text{否则 } A = 0 \\ U_b > 0, B = 1, \text{否则 } B = 0 \\ U_c > 0, C = 1, \text{否则 } C = 0 \end{cases} \quad (6)$$

扇区号 $N = A + 2B + 4C$, 再引入 X, Y, Z 来计算 t_1, t_2 。

$$\begin{cases} X = \frac{\sqrt{3}U_\beta}{U_{dc}}T_c \\ Y = \frac{\frac{3}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta}{U_{dc}}T_c \\ Z = \frac{-\frac{3}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta}{U_{dc}}T_c \end{cases} \quad (7)$$

T_{pwm} 为 pwm 波的一个周期。

扇区	1	2	3	4	5	6
T_1	Z	Y	$-Z$	$-X$	X	$-Y$
T_2	Y	$-X$	X	Z	$-Y$	$-Z$

由于直流电源电压的下降可能使电压矢量的幅值减小,因此计算时间 t_1 和 t_2 之和有可能超过 T_c 的一半,这种情况为饱和,设定

$$\begin{cases} T_1 = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \frac{T_c}{2} \\ T_2 = \frac{t_2}{t_1 + t_2} \frac{T_c}{2} \end{cases} \quad (8)$$

再定义占空比 $\begin{cases} T_{\text{aon}} = (T_c - t_1 - t_2)/4 \\ T_{\text{bon}} = T_{\text{aon}} + t_1/2 \\ T_{\text{con}} = T_{\text{bon}} + t_2/2 \end{cases}$ (9)

最后确定实际控制所需三相 PWM 波的占空比 $T_{\text{cm1}}, T_{\text{cm2}}, T_{\text{cm3}}$

扇区	1	2	3	4	5	6
T_{cm1}	T_{bon}	T_{aon}	T_{aon}	T_{con}	T_{con}	T_{bon}
T_{cm2}	T_{aon}	T_{con}	T_{bon}	T_{bon}	T_{aon}	T_{con}
T_{cm3}	T_{con}	T_{bon}	T_{con}	T_{aon}	T_{bon}	T_{aon}

2 SPWM 与 SVPWM 相结合的优化算法

常规的 SVPWM 实现方法虽然比较直观,但存在大量的非线性运算,算法复杂,影响 SVPWM 的执行速度。如果可以像 SPWM 调制那样直接查表计算的话,执行起来就方便多了,因此将两种算法相结合,从 SVPWM 的生成方式出发,推导其调制函数。

以扇区 k 为例,将 U_{out}, V_1, V_2 分别在静止坐标系 $\alpha\beta$ 下分解, $U_{\text{out}} = U_\alpha + U_\beta = \frac{2}{3}(U_\alpha + \alpha U_b + \alpha^2 U_c)$ 。其中 $\alpha = e^{\frac{2\pi}{3}}$ 由式(4)

$U_{\text{out}} T_c = V_k T_k + V_k + 1 T_k + 1; T_c: U_{\text{out}}$ 的作用时间可以得到三者在静止坐标系 $\alpha\beta$ 下的关系。

$$\begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{pmatrix} T_c = \frac{4}{3} U_{\text{dc}} \begin{bmatrix} \cos \frac{(k-1)\pi}{3} & \cos \frac{k\pi}{3} \\ \sin \frac{(k-1)\pi}{3} & \sin \frac{\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_k \\ T_k + 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

对式(12)求其逆矩阵得

$$\begin{pmatrix} T_k \\ T_k + 1 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{T_c}{U_{\text{dc}}} \begin{bmatrix} \sin \frac{k\pi}{3} & -\cos \frac{k\pi}{3} \\ -\sin \frac{(k-1)\pi}{3} & \cos \frac{(k-1)\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{pmatrix} \quad (12)$$

为了产生对称的三相正弦电压,要求所产生的空间矢量的轨迹是一个圆。所以要满足:

$$U_{\text{out}} = |U_{\text{out}}| e^{j\omega t} = |U_{\text{out}}| (\cos \omega t + j \sin \omega t)。$$

其中 ωt 为 U_{out} 与 V_k 夹角。

所以上式又可以化成

$$\begin{pmatrix} T_k \\ T_k + 1 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{|U_{\text{out}}| T_c}{U_{\text{dc}}} \begin{bmatrix} \sin \frac{k\pi}{3} & -\cos \frac{k\pi}{3} \\ -\sin \frac{(k-1)\pi}{3} & \cos \frac{(k-1)\pi}{3} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{pmatrix} \quad (13)$$

以扇区 I 为例,当 $k=1$ 时

$$\begin{cases} T_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{|U_{\text{out}}| T_c}{U_{\text{dc}}} \sin \left(\frac{\pi}{3} - \omega t \right) \\ T_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{|U_{\text{out}}| T_c}{U_{\text{dc}}} \sin \omega t \end{cases} \quad (14)$$

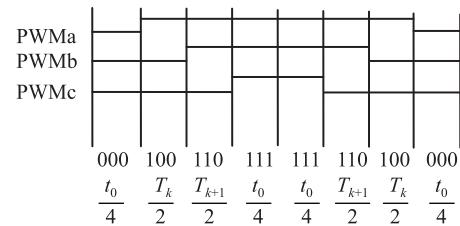


图4 参考矢量位于扇区 I 时的 SVPWM 的逆变器开关信号

可以求出扇区 I 中各逆变器的输出端 A, B, C 相对直流端中点 O 的电压为:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{AC}(wt) = \frac{U_{dc}}{2T_c} \left(-\frac{t_0}{4} + \frac{T_k}{2} + \frac{T_{k+1}}{2} + \frac{t_0}{4} + \frac{t_0}{4} + \right. \\ \quad \left. \frac{T_{k+1}}{2} + \frac{T_k}{2} - \frac{t_0}{4} \right) = \frac{\sqrt{3}}{2} |U_{out}| \cos \left(wt - \frac{\pi}{6} \right) \\ U_{BC}(wt) = \frac{U_{dc}}{2T_c} \left(-\frac{t_0}{4} - \frac{T_k}{2} + \frac{T_{k+1}}{2} + \frac{t_0}{4} + \frac{t_0}{4} + \right. \\ \quad \left. \frac{T_{k+1}}{2} - \frac{T_k}{2} - \frac{t_0}{4} \right) = \frac{\sqrt{3}}{2} |U_{out}| \sin \left(wt - \frac{\pi}{6} \right) \\ U_{CO}(wt) = -U_{AC}(wt) \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\sqrt{3}}{2} |U_{out}| \cos \left(wt - \frac{\pi}{6} \right); & C \leq wt \leq \frac{\pi}{3} \\ \frac{3}{2} |U_{out}| \cos wt; & \frac{\pi}{3} < wt < \frac{2\pi}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} |U_{out}| \cos \left(wt + \frac{\pi}{6} \right); & \frac{2\pi}{3} \leq wt \leq \pi \\ \frac{\sqrt{3}}{2} |U_{out}| \cos \left(wt - \frac{\pi}{6} \right); & \pi \leq wt \leq \frac{2\pi}{3} \\ \frac{3}{2} |U_{out}| \cos wt; & \frac{4\pi}{3} < wt < \frac{5\pi}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} |U_{out}| \cos \left(wt + \frac{\pi}{6} \right); & \frac{5\pi}{3} \leq wt \leq 2\pi \\ U_{BC}(wt) = U_{AO} \left(wt - \frac{2\pi}{3} \right); U_{CO} - U_{AO} \left(wt - \frac{4\pi}{3} \right) & \end{array} \right.$$

参考电压矢量在其他扇区的 SVPWM 波形如下:

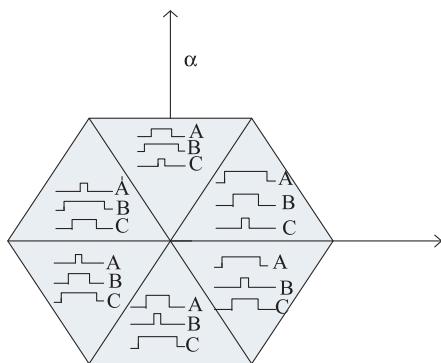


图 5 参考电压矢量在各个扇区的 SVPWM 波形图

由图同理可以求得 U_{out} 位于其他扇区时的相电压,6 个区域的表达式为:

这样 A,B,C 各相的隐含的调制函数就求出来啊,以 A 相为例画出其调制函数如图 6。

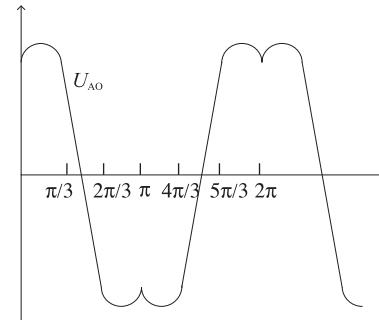


图 6 电压矢量对应 A 相的调制函数的波形图

θ 为 U_{out} 与 U_a 的夹角。B 相、C 相的波形图由 A 相的波形平移得到。

Matlab 的仿真系统如下

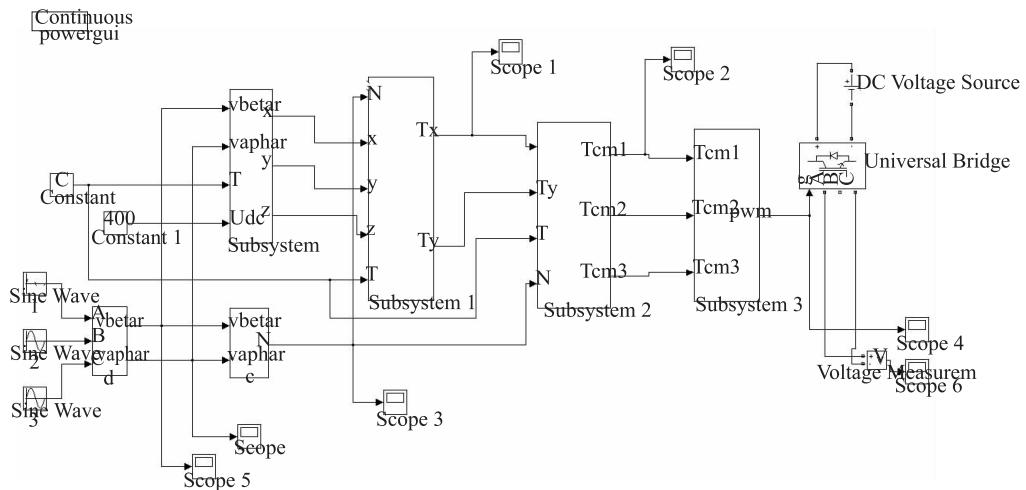


图 7 仿真系统

实验逆变器直流电压 $U_d = 300$ V,采样周期 $T_s = 0.0002$ s,三相交流电频率为 60π ,幅值为 173 V,相位分别相差 120° ,三角载波的周期为 0.0002 s,幅值为 0.0001 s。仿真得出隐含调制波的波形如图 8。

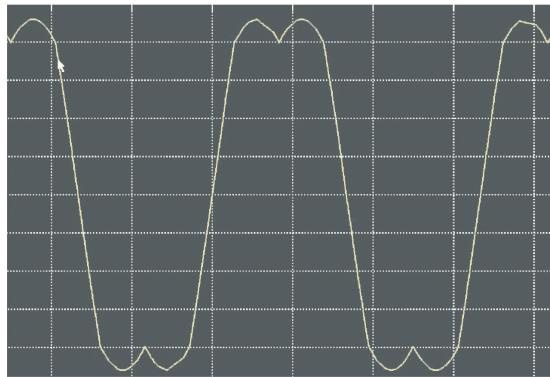


图 8 示波器显示的隐含调制函数波形
与所推出的波形相吻合

这样就可以采用 SPWM 中调制波与载波相比的规则采样的思路,通过在静止坐标系下直接计算每个参考电压矢量多对应的三相调制波的函数值,进而得到每相电压在一个 PWM 周期中的占空比,省去了传统的 SVPWM 中大量的非线性函数和

三角函数的运算,可以不用单独计算每个矢量的作用时间也不用考虑矢量的作用次序,使得控制算法大大简化。在数字化控制系统中,每相调制电压波形进行离散成数据表,在得知电压空间矢量的大小情况下,按照所要求的频率进行顺序或者逆序查表即可得到经 SVPWM 控制的变频器输出。

参 考 文 献

- 周卫平,吴正国,唐劲松,等. SVPWM 的等效算法及 SVPWM 与 SPWM 的本质联系. 中国电机工程学报,2006,26(2):133—137
- 王兆安,黄俊. 电力电子技术(第四版). 北京:机械工业出版社,2000:50—75
- 熊健,康勇,张凯,等. 电压空间矢量调制与常规 SPWM 的比较研究. 电力电子技术,1999;(1):25—28
- 杨贵杰,孙力,崔乃政,等. 空间矢量脉宽调制方法的研究. 中国电机工程学报,2001;21(5):79—83
- 于飞,张晓峰,王素华. 空间矢量 PWM 的比较分析. 武汉理工大学学报,2006;30(1):46—57
- 陆海峰,瞿文龙,张磊,等. 基于调制函数的 SVPWM 算法. 电工技术学报,2008;23(2):37—43
- 杨勇,张建峡,许德志,等. 基于电压空间矢量调制的交流调速系. 机械与电子,2005,10:48—50

The Algorithm Based on SPWM Implementing SVPWM

LI Jian¹, DOU Jin-sheng²

(Jiangsu University of Science and Technology¹, Zhenjiang 212003, P. R. China;

Zhenjiang Watercraft College², Zhenjiang 212003, P. R. China)

[Abstract] The traditional SVPWM algorithm, there are a lot of trigonometric functions and beg root operation, go against digital signal processor, therefore the real-time operation is proposed based on SPWM algorithm, the SVPWM algorithm as SPWM that find out the implementing SVPWM modulation of the function, using hidden with carrier modulation wave SPWM compared in the rules in the stationary coordinate system, sampling ideas directly look-up table get each corresponding reference voltage vector modulation wave function value three-phase, then get each phase voltage in a PWM cycle, be helpful for digital realization. Through matlab simulation verify the waveform implied modulation function.

[Key words] the voltage type inverter implementing SVPWM SPWM modulation function