

PSCAD/EMTDC 中 SVPWM 算法的实现

刘家军¹, 姚李孝¹, 吴添森^{1,2}, 安源¹, 蔡智强³

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 福建省电力有限公司漳州电业局, 福建 漳州 363000;
3. 武警福州指挥学院, 福建 福州 350002)

摘要: 针对电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC 库文件中没有现成的能实现空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 算法元件的问题, 根据两电平 SVPWM 的基本原理, 在 PSCAD/EMTDC 里创建了自定义的两电平 SVPWM 算法元件。介绍了两电平 SVPWM 的基本原理、自定义元件的创建过程以及 SVPWM 元件主程序的流程图, 对各主要功能模块的算法也进行了详细的分析。基于该自定义 SVPWM 元件进行了仿真实验, 仿真结果表明了自定义 SVPWM 元件的正确性和有效性。

关键词: PSCAD/EMTDC; 空间矢量; 脉宽调制; 算法

Implementation of SVPWM algorithm in PSCAD/EMTDC

LIU Jia-jun¹, YAO Li-xiao¹, WU Tian-sen^{1,2}, AN Yuan¹, CAI Zhi-qiang³

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. Zhangzhou Electric Power Industry Bureau, Zhangzhou 363000, China;
3. Fuzhou Command College of Armed Police Forces, Fuzhou 350002, China)

Abstract: There isn't a component which can implement the algorithm of space vector pulse width modulation (SVPWM) in PSCAD/EMTDC master library. According to the principle of two-level SVPWM, this paper creates a self-defined two-level SVPWM component in PSCAD/EMTDC. The principle of SVPWM is explained firstly. Then the creating process of self-defined component and the program flowchart of SVPWM component are presented. The algorithms of the main subroutines are also discussed in detail. Finally, the simulation is made using the self-defined SVPWM component. Simulation results demonstrate the correctness and validity of the self-defined SVPWM component.

Key words: PSCAD/EMTDC; space vector; pulse width modulation; algorithm

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0120-06

0 引言

空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 控制策略是依据变流器空间电压 (电流) 矢量切换来控制变流器的一种新颖思路的控制策略^[1]。该控制策略早期由日本学者在 20 世纪 80 年代初针对交流电动机变频驱动而提出的。SVPWM 也叫磁通正弦 PWM 法, 是一种以三相波形整体生成效果为前提, 以逼近电机气隙的理想圆形旋转磁场轨迹为目的的 PWM 波生成方法^[2]。以后的发展使得这种 PWM 控制脱离了交流电机磁链轨迹控制的原意, 形成了电力电子技术中一类 PWM 控制方式^[3]。与 SPWM 控制相比, SVPWM 算法的主要优点是: 能提高直流电压利用率; 在每一次 PWM 波变化时, 只有一个开关管动作, 大大

减少了开关次数; 输出波形谐波含量小^[4]。EMTDC 是目前被广泛使用的一种电力系统分析软件。经过多年的发展, 既可以研究交直流电力系统问题, 又能够完成电力电子仿真及非线性控制的多功能工具。特别是 PSCAD 图形界面的开发成功, 使得用户能更方便地使用 EMTDC 以进行电力系统仿真计算^[5]。但在 PSCAD/EMTDC 库文件中没有实现 SVPWM 控制的元件, 本文通过对两电平 SVPWM 控制的基本原理进行分析, 在 PSCAD/EMTDC 中创建了实现 SVPWM 控制的元件。文中介绍了创建两电平 SVPWM 元件的过程, 并对主程序各功能模块的算法如参考矢量所在扇区判断、空间矢量工作时间计算、工作时间分配等进行了详细的分析。最后用仿真验证了自定义 SVPWM 元件的正确性和有效性。

1 SVPWM 基本原理简介

以三相桥式电压型逆变电路为例来说明两电平空间矢量调制的基本原理。典型的三相电压型逆变电路及其 PWM 等效电路如图 1 所示^[6]。

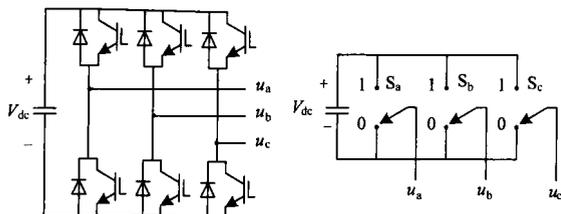


图 1 三相电压型逆变电路及其 PWM 等效电路

Fig.1 Three-phase voltage source inverter circuit and its equivalent circuit

PWM 等效电路中逆变器各桥臂的开关状态分别为 S_a 、 S_b 、 S_c ，其值为 1 时表示上桥臂导通下桥臂关断，为 0 时表示上桥臂关断下桥臂导通^[7]。

假设期望输出的三相基波电压为：

$$\begin{cases} u_a = U \cos(\omega t) \\ u_b = U \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ u_c = U \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

定义电压空间矢量为：

$$V = \frac{2}{3}(u_a + u_b e^{j2\pi/3} + u_c e^{-j2\pi/3}) = U e^{j\alpha} = V_\alpha + jV_\beta \quad (2)$$

式 (2) 表明：矢量 V 是模为 U 且以角频率 ω 按逆时针方向匀速旋转的空间矢量。若定义逆变器的开关状态为 $(S_a S_b S_c)$ ，则共有八个开关状态组合，可得到模为 $2V_{dc}/3$ 相位依次相差 $\pi/3$ 的六个非零矢量 $V_1 \sim V_6$ 和两个零矢量 V_0 、 V_7 ，如图 2 所示。

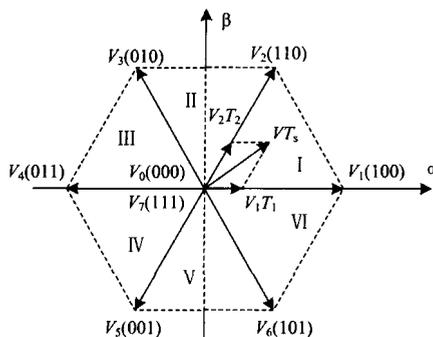


图 2 三相 VSC 空间矢量

Fig.2 Space vector of three-phase VSC

按照矢量合成的平行四边形法则和 PWM 的等

面积原则利用这 8 个矢量可以合成任意角度有限模长的空间矢量，也就是在一个开关周期内，选择与参考矢量最接近的 3 个空间矢量 V_a 、 V_b 、 V_c ，并控制它们的作用时间，使得各开关矢量的控制效果在平均伏秒意义上与参考矢量的控制效果等效^[8]。即 $VT_s = V_a T_a + V_b T_b + V_c T_c$ ，其中 V_a 、 V_b 为非零矢量， V_c 为零矢量，如图 2 所示。

2 SVPWM 算法元件的创建及其主程序流程

2.1 自定义功能元件的创建

PSCAD/EMTDC 之所以是一个强有力的仿真工具，一个重要原因是它允许用户根据需要创建自定义功能的新元件^[9]。用户可通过元件向导创建新元件。在“Circuit”视图中单击主工具栏的“New Component”或右键单击空白区域后选择“Create New Component...”，将弹出元件向导对话框。在元件向导对话框中可确定新元件的名称、说明、输入输出节点的数量、名称及数据类型，最后单击“完成”并将新元件放置在电路视图中。接着可右键单击新元件，选择“Edit Definition...”，在“Graphic”选项卡中可编辑新元件外观、输入输出节点的数量、名称及数据类型，在“Parameters”选项卡中可以设计一些用户与元件的基本接口，在“Script”选项卡中包含了“Component Definition”的核心部分，元件的基本功能都将在此被定义。SVPWM 算法主程序均写在“Script”选项卡中。

图 3 为在 PSCAD 中创建的“SVPWM”元件外观图。该元件有 4 个输入参数 6 个输出参数，其中， V_{dc} 为直流侧电压， V_α 和 V_β 为电压空间矢量 V 在 α 轴和 β 轴的分量， T_s 为 PWM 开关周期，P1~P6 输出为各桥臂开关管控制脉冲。

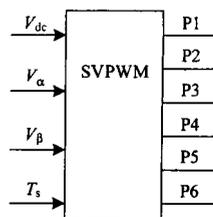


图 3 自定义 SVPWM 元件外观图

Fig.3 Graph of self-defined SVPWM component

2.2 主程序流程

主程序流程如图 4 所示，采用 FORTRAN 语言编写。主要包含以下功能模块：初始化变量、判断 V 所在扇区、计算空间矢量的工作时间、判断当前所处时段、分配空间矢量工作时间、根据 V 所在扇区和当前所处时段查空间矢量工作时间分配表产生开

关管控制脉冲。与文献[10]的程序流程相比,本流程省略了“到达设定的仿真时间?”,此功能由仿真软件自动实现,当到达设定的仿真时间仿真将自动结束,且无需每个仿真时间步长 DELT 都判断 V 所在的扇区,只需在完成一个开关周期仿真后开始一个新的开关周期仿真时,才重新判断 V 所在的扇区并计算空间矢量的工作时间。

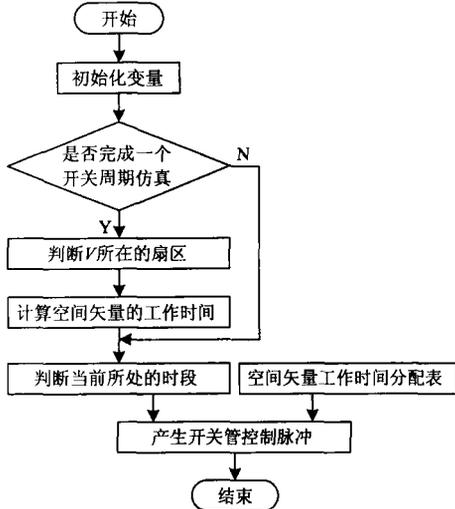


图4 自定义 SVPWM 元件主程序流程图

Fig.4 Program flowchart of self-defined SVPWM component

3 各功能模块的详细算法

PWM 控制的关键就是确定 6 个开关管的开通状态和时间,其状态必须满足在同一时间只有 3 个开关管处于导通状态,另 3 个开关管处于关断状态;同一桥臂上下两个开关管处于互补状态,避免上下桥臂导通。SVPWM 一般算法的步骤是^[11]:将给定的 abc 轴指令电压合成电压空间矢量 V , 然后将其在 $\alpha\beta$ 直角坐标系上进行分解形成 V_α 和 V_β , 最后确定开关管工作状态。

3.1 初始化变量

以当前仿真时间 TIME 为初始化的依据,当 TIME 小于一个仿真时间步长 DELT 时进行变量的初始化。初始化的变量为程序中用到的一些变量,如角度、时间等变量以及对一些计数器赋初值。

3.2 判断是否完成一个开关周期仿真

根据开关周期 T_s 和仿真时间步长 DELT 可确定一个开关周期内的计算次数 i , 以 i 为计数器可判断是否完成一个开关周期仿真。如果完成一个开关周期仿真,则重新判断 V 所在的扇区,如果未完成一个开关周期仿真,则直接判断当前时刻所处的时段,然后根据 V 所在扇区和当前所处时段查空间矢量工作时间分配表后产生开关管控制脉冲。

3.3 判断 V 所在扇区

根据 V 在 α 轴和 β 轴的分量 V_α 和 V_β 可判断 V 所在扇区。最直观的判断方法为:以 V 与 α 轴的夹角 γ 进行判断。首先计算 V 与 α 轴的夹角 γ , 定义逆时针方向为正,取值范围为 $(0, 2\pi)$ 。计算 γ 角的方法如式 (3) 所示。

$$\gamma = \begin{cases} \arctan(V_\beta/V_\alpha) & (V_\alpha > 0, V_\beta \geq 0) \\ \arctan(V_\beta/V_\alpha) + 2\pi & (V_\alpha > 0, V_\beta < 0) \\ \pi/2 & (V_\alpha = 0, V_\beta \geq 0) \\ 3\pi/2 & (V_\alpha = 0, V_\beta < 0) \\ \arctan(V_\beta/V_\alpha) + \pi & (V_\alpha < 0) \end{cases} \quad (3)$$

根据计算出的 γ 角可以很容易地判断出 V 所在的扇区,如 $\gamma \in [0, \pi/3)$, V 在 I 扇区;……; $\gamma \in [5\pi/3, 2\pi)$, V 在 VI 扇区。

此方法虽然直观,但是三角函数的计算将占用大量的时间。文献[12]介绍了采用简单的加减和逻辑运算确定 V 所在扇区的方法。方法如下:

$$\text{令 } A = V_\beta, B = \sqrt{3}V_\alpha - V_\beta, C = -\sqrt{3}V_\alpha - V_\beta,$$

$$N = \text{sign}(A) + 2\text{sign}(B) + 4\text{sign}(C) \quad (4)$$

$$\text{式 (4) 中, } \text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (5)$$

经过分析,扇区号 n 与 N 有一确定的对应关系,见表 1。

表 1 扇区号 n 与 N 的对应关系

N	3	1	5	4	6	2
n	I	II	III	IV	V	VI

当判断出电压空间矢量 V 所在的扇区后,即可根据所在扇区选取三个空间矢量 V_a 、 V_b 、 V_c , 选取结果见表 2。

表 2 不同扇区空间矢量的选取

扇区	I	II	III	IV	V	VI
V_a	V_1	V_3	V_3	V_5	V_5	V_1
V_b	V_2	V_2	V_4	V_4	V_6	V_6
V_c			V_0 、 V_7			

对于零矢量 V_c 的选择,主要考虑选择 V_0 或 V_7 应使开关变化尽可能少,以降低开关损耗。

3.4 计算空间矢量的工作时间

文献[1]推导了电压空间矢量 V 在 I 扇区时,开

关管导通时间计算式。当 V 在其他扇区时, 计算式中除了 θ 参数外其余都一致。因此, 只需在计算导通时间前根据 V 所在的扇区求出相应的 θ 角, 即可使用如下计算式:

$$\begin{cases} T_a = mT_s \sin(\pi/3 - \theta) \\ T_b = mT_s \sin \theta \\ T_c = T_s - T_a - T_b \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 中, T_a 、 T_b 、 T_c 分别为矢量 V_a 、 V_b 、 V_c 的作用时间, m 为 SVPWM 调制系数, 并且

$$m = \frac{\sqrt{3}}{V_{dc}} |V| = \frac{\sqrt{3}}{V_{dc}} \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (7)$$

θ 角称为参考矢量的方位角^[13]。其计算也比较简单, 用前面计算出的 V 与 α 轴的夹角 γ 减去 V 所在扇区的起始空间矢量 (以逆时针方向计算扇区的起始和终止) 与 α 轴的夹角即可得到 θ 角。如 V 在 I 扇区时, $\theta = \gamma - 0$; ...; 在 VI 扇区时, $\theta = \gamma - 5\pi/3$ 。

若某扇区的 T_a 和 T_b 之和大于 T_s , 即出现过饱和现象^[12]。对此, 需对 T_a 和 T_b 进行归一化处理

$$\begin{cases} T_a^* = \frac{T_a T_s}{T_a + T_b} \\ T_b^* = \frac{T_b T_s}{T_a + T_b} \end{cases} \quad (8)$$

3.5 分配空间矢量的工作时间

空间矢量工作时间的分配有多种方法, 这里介绍其中的两种方法。若要获得最低的开关损耗, 则每次开关状态变化只改变一相桥臂的开关状态^[14], 且在每个开关周期内每相桥臂的开关状态变化不超过一次。则在一个开关周期内, 开关状态输出可按式 (9) 或式 (10) 交替顺序输出。此脉冲输出方式每个开关周期内有 4 个开关矢量, 包括两个零矢量, 需要确定每个零矢量的具体作用时间, 设 (000) 的作用时间为 kT_c , 则 (111) 的作用时间为 $(1-k)T_c$, k 在 $[0,1]$ 内取值, 所取数值的不同会得到不同的三相平均输出电压效果, 其本质为影响一个开关周期三相输出电压中的零序分量的大小, 为简化计算其值可取为 1/2。

$$(000) \rightarrow V_a \rightarrow V_b \rightarrow (111) \quad (9)$$

$$(111) \rightarrow V_b \rightarrow V_a \rightarrow (000) \quad (10)$$

另外一种方法是将零矢量周期分成三段, 矢量 V 的起、终点上均匀地分布矢量 V_0 , 而在矢量 V 的

中点处分布矢量 V_7 , 开关状态输出按式 (11) 交替顺序输出。

$$\begin{aligned} (000) &\rightarrow V_a \rightarrow V_b \rightarrow (111) \\ \Delta &\rightarrow V_b \rightarrow V_a \rightarrow (000) \end{aligned} \quad (11)$$

且 $T_0 = T_7 = T_c/2$, 为简化计算取 $t_1 = t_7 = T_0/2 = T_c/4$, $t_4 = T_7 = T_c/2$ 。 $t_1 \sim t_7$ 为一个开关周期 T_s 中的 7 个不同时段。以扇区 I 为例, 空间矢量工作时间分配如图 5 所示。

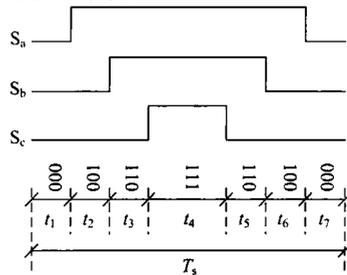


图 5 扇区 I 空间矢量工作时间分配

Fig.5 Distribution of space vector operating time in sector I

由于第一种脉冲输出方式在开关频率 f_s 处的谐波幅值较大, 第二种方式在开关频率 f_s 附近处的谐波幅值降低十分明显, 因此本文采用第二种脉冲输出方式。采用第二种脉冲输出方式时, 各扇区对应的开关管导通时间分配规律如图 6 所示。

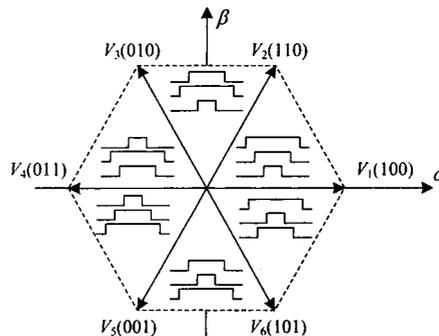


图 6 空间矢量工作时间分配规律

Fig.6 Distribution law of space vector operating time

根据图 6 的各扇区对应的空间矢量工作时间分配规律可得到空间矢量工作时间分配表, 见表 3。

表 3 空间矢量工作时间分配表

Tab.3 Distribution of space vector acting time

扇区	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
I	000	100	110	111	110	100	000
II	000	010	110	111	110	010	000
III	000	010	011	111	011	010	000
IV	000	001	011	111	011	001	000
V	000	001	101	111	101	001	000
VI	000	100	101	111	101	100	000

3.6 判断当前所处的时段

到这里, 已判断出 V 所在的扇区, 且有了不同扇区的空间矢量工作时间分配表, 现在只需判断当前仿真时间处于一个开关周期的哪个时段即可输出开关管控制脉冲。

首先在初始化变量时设置一个计数器 M 用以储存当前时刻已进行的完整的开关周期个数, 每完成一个完整的开关周期计算 M 值自动加 1。则当前所处的时段与当前仿真时间 $TIME$ 有一确定的对应关系, 见表 4。

表 4 所处时段与 $TIME$ 的对应关系

Tab.4 Corresponding relation between current period of time and $TIME$

时段	$TIME$
t_1	$TIME \in [(MT_s), (T_c/4+MT_s)]$
t_2	$TIME \in [(T_c/4+MT_s), (T_c/4+T_d/2+MT_s)]$
t_3	$TIME \in [(T_c/4+T_d/2+MT_s), (T_c/4+T_d/2+T_b/2+MT_s)]$
t_4	$TIME \in [(T_c/4+T_d/2+T_b/2+MT_s), (T_s/2+T_c/4+MT_s)]$
t_5	$TIME \in [(T_s/2+T_c/4+MT_s), (T_s/2+T_c/4+T_b/2+MT_s)]$
t_6	$TIME \in [(T_s/2+T_c/4+T_b/2+MT_s), (T_s/2+T_c/4+T_b/2+T_d/2+MT_s)]$
t_7	$TIME \in [(T_s/2+T_c/4+T_b/2+T_d/2+MT_s), (T_s+MT_s)]$

最后根据 V 所在的扇区号和当前所处的时段以及空间矢量工作时间分配表, 采用查表法可确定当前时刻开关管的状态。

4 仿真实验

为了验证自定义 SVPWM 元件的正确性和有效性, 在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中进行了基于自定义 SVPWM 元件的仿真逆变实验, 仿真主电路如图 7 所示。仿真参数如下: 直流电压 $V_{dc} = 1 \text{ kV}$, 调制系数 $m = 0.658$, 开关周期 $T_s = 200 \mu\text{s}$, 负载为对称星形连接负载 $R = 0.4 \Omega$, $L = 0.0025 \text{ H}$ 。

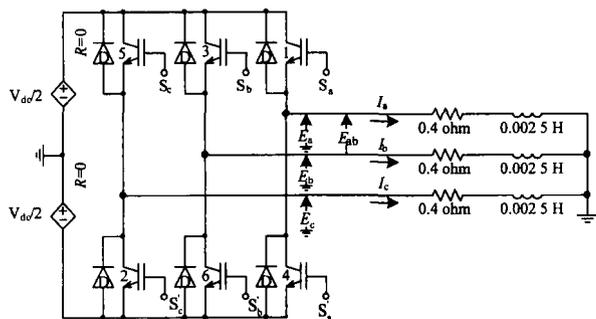


图 7 SVPWM 仿真主电路图

Fig.7 Simulation circuit diagram of two-level inverter using SVPWM

图 8 为逆变器输出的相电压和线电压波形。图 9 给出了逆变器输出的相电压经过低通滤波器后的波形, 可以看出相电压里面含有三次谐波。图 10 给出了逆变器输出的相电流波形及其频谱图。从相电流波形可看出输出电流接近正弦波。从频谱图可看出, 基波电流为 0.2485 kA , 三次谐波为 0.0186 kA , 除了三次谐波外还有一个相对比较明显的谐波为 100 次谐波, 其频率等于开关频率 f_s , 值为 0.00395 kA 。可见谐波含量很小。

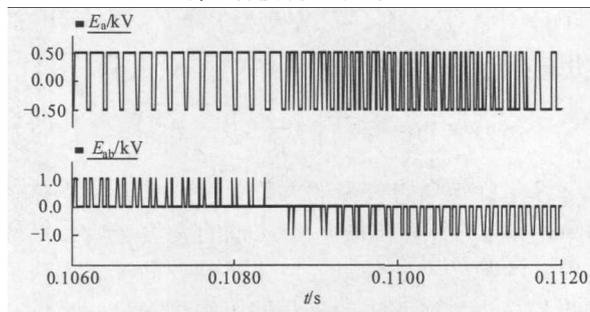


图 8 逆变器输出的相电压和线电压波形

Fig.8 Output phase voltage and line voltage waveforms of the inverter

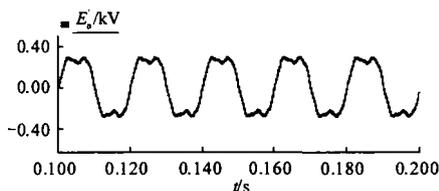


图 9 经低通滤波器后的相电压波形

Fig.9 Output phase voltage waveform of the low pass filter

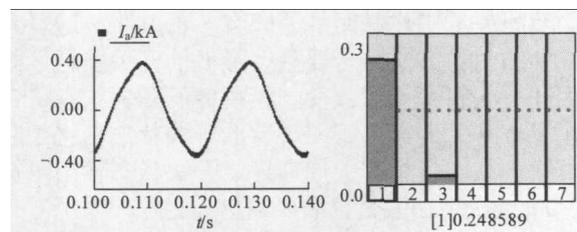


图 10 逆变器输出的相电流波形及其频谱分析

Fig.10 Output phase current waveform of the inverter and its spectrum analysis

5 结论

本文在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中创建了自定义的 SVPWM 元件, 并用程序实现了其功能。程序首先判断参考矢量所在的扇区, 然后判断当前时刻所处的时段, 根据所在扇区和所处时段采用查空间矢量工作时间分配表的方法确定开关管状态, 该方法计算量小, 便于数字化实现。最后用仿真实验

验证了自定义 SVPWM 元件的正确性和有效性。文章对自定义元件的创建过程和主程序流程图进行了详细的剖析,读者可据此创建自定义的 SVPWM 元件。

参考文献

- [1] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
ZHANG Chong-wei, ZHANG Xing. PWM rectifiers and their control [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [2] Yu Z, Mohammed A, Panahi I. A review of three PWM techniques[C]. //Proceedings of the American Control Conference. Albuquerque (New Mexico): 1997: 257-261.
- [3] 华晓萍,王奔,孟凌凌,等. 空间电压矢量 PWM 算法的 SIMULINK 仿真实现[J]. 电气开关, 2006 (3): 26-28.
HUA Xiao-ping, WANG Ben, MENG Ling-ling, et al. Simulation of algorithm of voltage space vector PWM[J]. Electric Switchgear, 2006 (3): 26-28.
- [4] 邱卫. 基于 ADSP21992 的空间矢量控制三相逆变电源设计[J]. 电网技术, 2008, 32 (S2): 103-106.
QIU Wei. Design of SVPWM three phase inverter power source based on ADSP21992[J]. Electric Switchgear, 2008, 32 (S2): 103-106.
- [5] 林良真,叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC [J]. 电网技术, 2000, 24 (1): 65-66.
LIN Liang-zhen, YE Lin. An introduction to PSCAD/EMTDC[J]. Power System Technology, 2000, 24 (1): 65-66.
- [6] Boys J T, Handley P G. Harmonic analysis of space vector modulated PWM waveforms[J]. IEE Proceedings B, 1990, 137 (4): 197-204.
- [7] Youm J H, Kwon B H. An effective software implementation of the space-vector modulation[J]. IEEE Trans, 1999, 46 (4): 866-868.
- [8] Holtz J, Lammert P, Lotzkat W. High-speed drive system with ultrasonic MOSFET PWM inverter and single-chip microprocessor control[J]. IEEE Trans on IA, 1987, 23 (6): 1010-1015.
- [9] Manitoba HVDC research center. PSCAD on-line help system[R], 2005.
- [10] 戴武昌,尚尔发,王健,等. 基于 PSCAD /EMTDC 的空间矢量 PWM 仿真研究[J]. 黑龙江电力, 2008, 30 (3): 181-184.
DAI Wu-chang, SHANG Er-fa, WANG Jian, et al. Simulation study of space vector pulse width modulation based on PSCAD/EMTDC[J]. Heilongjiang Electric Power, 2008, 30 (3): 181-184.
- [11] 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[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (2): 133-137.
ZHOU Wei-ping, WU Zheng-guo, TANG Jin-song, et al. A novel algorithm of SVPWM and the study on the essential relationship between SVPWM and SPWM[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (2): 133-137.
- [12] 王久和. 电压型 PWM 整流器的非线性控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
WANG Jiu-he. Nonlinear control for the boost-type PWM rectifiers[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [13] 姜卫东,王群京,陈权,等. 一种完全基于两电平空间矢量调制的三电平空间矢量调制算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (1): 108-114.
JIANG Wei-dong, WANG Qun-jing, CHEN Quan, et al. SVPWM strategy for three-level inverter based on SVPWM strategy for two-level inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 108-114.
- [14] Van Der Broeck H W, Skudelny H C, Stanke G V. Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors[J]. IEEE Trans, 1988, 24 (1): 142-150.

收稿日期: 2009-10-20; 修回日期: 2009-11-05

作者简介:

刘家军(1967-),男,副教授,硕士生导师,研究方向为电力系统监控与调度自动化;

姚李孝(1962-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统规划与运行;

吴添森(1978-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统测量与控制。E-mail: senzai@tom.com