

研
究
开
发某型动车组用 SVPWM 三电平
逆变器仿真

蒲思培, 杨美传, 陆 强

(西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)



作者简介: 蒲思培(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为动车组再生制动。

摘 要: 简要介绍了某型动车组用三电平逆变器的主电路, 详细分析了空间电压矢量 SVPWM 的控制原理, 在 Matlab/Simulink 环境下建立了基于 SVPWM 的三电平逆变器模型, 并对该模型进行了仿真分析。

关键词: Matlab; SVPWM; 三电平逆变器; 仿真

中图分类号: U266.2; TM464 文献标识码: A 文章编号: 1000-128X(2011)05-0017-04

Simulation of a Certain EMUs Using Three-level Inverter Based on SVPWM

PU Si-pei, YANG Mei-chuan, LU Qiang

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Main circuit of a certain EMUs using three-level inverter was introduced, control principle of space voltage vector SVPWM was analysed in detail. Three-level inverter model based on SVPWM control was established and simulated by Matlab/Simulink.

Key words: Matlab; SVPWM; three-level inverter; simulation

0 引言

某型动车组三电平逆变器所采用的空间电压矢量(SVPWM)调制法是将逆变器与交流电机看做一个整体的一种控制方法, 它用逆变器不同开关状态所产生的交流电机实际磁通圆去逼近以三相对称交流电供电时交流电机的理想磁通圆, 并以它们的比较结果决定逆变器功率器件的开关状态。SVPWM 调制法可以降低功率器件的开关损耗, 减少逆变器输出电流的谐波成分, 使交流电机的转矩脉动减小。

1 三电平逆变器的基本原理

图1为某型动车组用二极管中点箝位型三电平逆变器电路原理图。

该三电平逆变器每相由4个IGBT功率元件串联组成, 每个功率器件反并联1个续流二极管, 直流中性点0由VD5、VD6引出, 这样每个功率器件耐压值可降低一半, 更适用于动车组等大功率交流传动系统的控制。图1中, 当VT1、VT2导通时, 点A对中性点0的电压为

$U_d/2$; 当VT2、VT3导通时, 点A对中性点0的电压为0; 当VT3、VT4导通时, 点A对0点的电压为 $-U_d/2$ 。故三电平逆变器每相可输出3种电平状态, 三相共可输出27种电平状态。

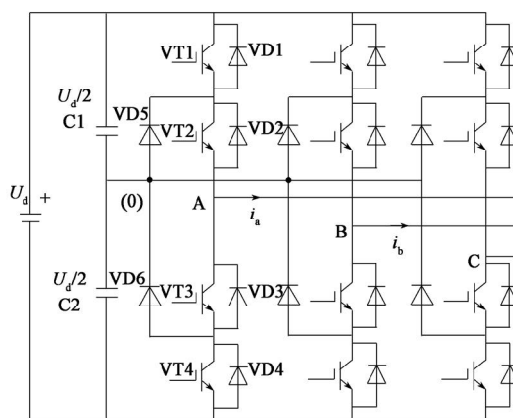


图1 三电平逆变器电路原理图

设输入电机的三相正弦电压瞬时值为 u_a 、 u_b 、 u_c , 则由它们所产生的空间电压矢量可表示为:

$$U = \frac{2}{3} \times (u_a + u_b e^{j2/3\pi} + u_c e^{-j2/3\pi}) \quad (1)$$

由式(1)可知 U 是以电角速度 $\omega = 2\pi f$ 同步旋转的,

收稿日期: 2011-03-08; 收修改稿日期: 2011-06-24

根据:

$$\Psi \approx \int U dt \quad (2)$$

可知电机磁链运动方向及速度与空间电压矢量一致。

三电平

逆变器每相桥臂输出3种可能电平:P状态 $U_d/2$;O状态,0;N状态, $-U_d/2$ 。根据矢量合成原理,三电平逆变器不同状态下输出电压合成基本矢量情况如图2所示。

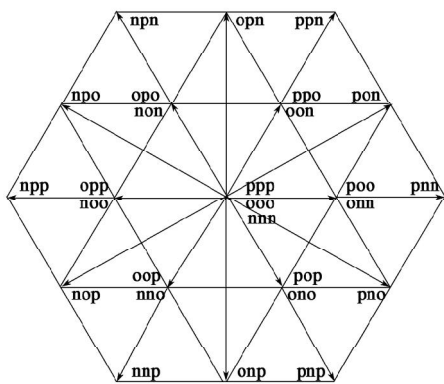


图2 三电平逆变器空间矢量图

由于冗余的存在,27个电平状态实际对应了19种电压矢量。其中有6个长矢量,对应开关状态为PNN、PPN、NPN等,为 $(2/3)U_d$,位于正六边形6个顶点。6个中矢量,对应开关状态为PON、OPN、NPO等,为 $(\sqrt{3}/3)U_d$,这是正六边形内6个等边三角形的高。6个短矢量,对应开关状态为POO、PPO、OPO等,为 $U_d/3$,位于内部六边形的6个顶点,1个0矢量位于原点,长度为0。

为了实现三电平逆变器的SVPWM控制,在每个采样周期里应首先判断参考矢量的具体位置,找出用于合成它的3个基本矢量;其次计算每个基本矢量的作用时间;最后将每个基本矢量所对应的逆变器功率器件开关状态和作用时间分配给相应的功率器件,完成对三电平逆变器主电路的控制。

2 SVPWM控制方法仿真

2.1 参考矢量区域判断

2.1.1 大区域判断

三电平逆变器空间矢量以 60° 角为一划分,整个空间矢量作用区域可分为6块,如图3中~所示,通过参考矢量 U 的中心角 θ 大小即可判断其位于哪个大区域。

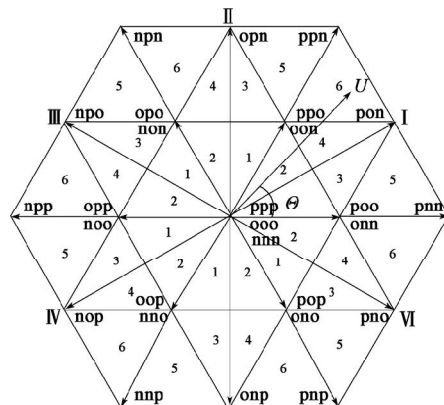


图3 空间矢量大区域划分图

大区域判断仿真模型如图4所示。

2.1.2 小区域判断

每个 60° 角大区域可以细分为6个小区域,如图5

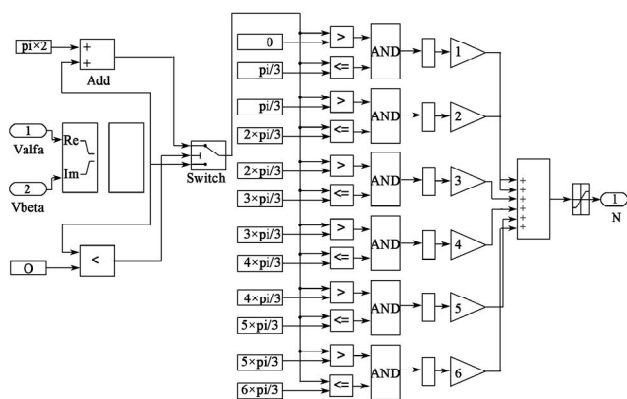


图4 大区域判断仿真图

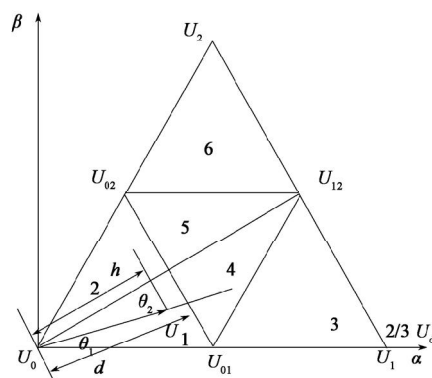


图5 空间矢量小区域划分图

所示。

可以根据参考矢量在垂直方向上的投影判断参考矢量所在小区域的位置,现以 大区1 小区为例判断如下:

根据三角形外角定理, $\theta_2 = \theta_1 + 60^\circ$, 若 $h = U \sin \theta_2 < d$ 且 $\theta_1 < 30^\circ$, 即:

$U \sin(60^\circ + \theta_1) < \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} U_d$, 则参考矢量 U 落在小区域1

中。同理可得 U 在其他小区域的判断依据如表1所示。

其中小区域1判断仿真模型如图6所示,由于搭建的仿真模块过多,本文不再给出整体的仿真图。

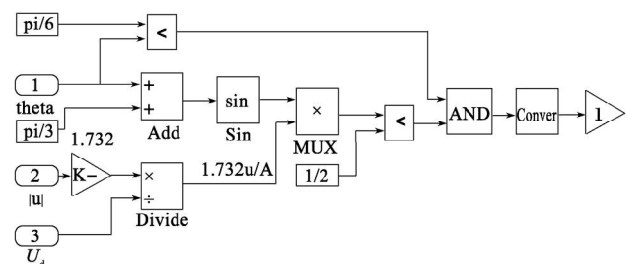


图6 大区1 小区判断图

2.2 矢量作用时间计算

判断出了参考矢量所在区域也就相应地找到了合成参考矢量所需要的3个基本矢量 V_1, V_2, V_3 , 设采样时间为 T_s , 根据伏秒平衡方程即可得出3个基本矢量的作用时间 T_1, T_2, T_3 。现以 大区3 小区为例计算如下:

表1 小区域判定表

旋转矢量所在小区判定	小区编号
$U \sin(60^\circ + \theta_1) < \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} U_d$ $\theta_1 < 30^\circ$	区域 1
$U \sin(60^\circ + \theta_1) < \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} U_d$ $\theta_1 \geq 30^\circ$	区域 2
$U \sin(60^\circ - \theta_1) \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} U_d$ $\theta_1 < 30^\circ$	区域 3
$U \sin(60^\circ + \theta_1) \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} U_d$ $U \sin(60^\circ - \theta_1) \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} U_d$ $U \sin \theta_1 < \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} U_d$ $\theta_1 < 30^\circ$	区域 4
$U \sin(60^\circ + \theta_1) \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} U_d$ $U \sin(60^\circ - \theta_1) \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} U_d$ $U \sin \theta_1 < \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} U_d$ $\theta_1 \geq 30^\circ$	区域 5
$U \sin \theta_1 \geq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} U_d$ $\theta_1 \geq 30^\circ$	区域 6

$$\left. \begin{aligned} U_{01}T_{01} + U_1T_1 + U_{12}T_{12} &= UT_s \\ T_{01} + T_1 + T_{12} &= T_s \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $U_{01}=(1/3)U_d$; $U_1=(2/3)U_d$; $U_{12}=(\sqrt{3}/3)U_d$ 。
令 α 轴与 β 轴分别相等, 可得:

$$\left. \begin{aligned} T_{01} &= 2[T_s - mT_s \sin(\pi/3 + \theta)] \\ T_{12} &= 2mT_s \sin \theta \\ T_1 &= -2mT_s \sin(\pi/3 - \theta) - T_s \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $m=\sqrt{3} U/U_d$ 为调制比。同理求出参考矢量在其他区域时的作用时间如表 2 所示。

表2 大区矢量作用时间表

小区编号	T_a	T_b	T_c
I1	$2mT_s \sin(\pi/3 - \theta)$	$T_s - 2mT_s \sin(\pi/3 + \theta)$	$2mT_s \sin \theta$
I2	$2mT_s \sin(\pi/3 - \theta)$	$T_s - 2mT_s \sin(\pi/3 + \theta)$	$2mT_s \sin \theta$
I3	$2[T_s - mT_s \sin(\pi/3 - \theta)]$	$2mT_s \sin \theta$	$2mT_s \sin(\pi/3 - \theta) - T_s$
I4	$T_s - 2mT_s \sin \theta$	$2mT_s \sin(\pi/3 + \theta) - T_s$	$T_s - 2mT_s \sin(\pi/3 - \theta)$
I5	$T_s - 2mT_s \sin \theta$	$2mT_s \sin(\pi/3 + \theta) - T_s$	$T_s - 2mT_s \sin(\pi/3 - \theta)$
I6	$2mT_s \sin \theta - T_s$	$2mT_s \sin(\pi/3 - \theta)$	$2[T_s - mT_s \sin(\pi/3 + \theta)]$

观察表 2 可发现所有作用时间可以用如下 3 个基本时基经过组合而成:

$$\left. \begin{aligned} T_a &= 2mT_s \sin(\pi/3 + \theta) \\ T_b &= 2mT_s \sin(\pi/3 - \theta) \\ T_c &= 2mT_s \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

如 大区 3 小区时间计算仿真模型如图 7 所示。

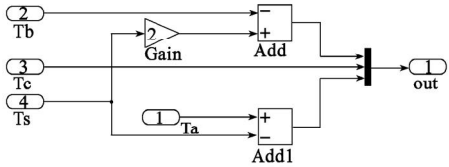


图 7 大区 3 小区作用时间计算

依次搭建好每个区域的全部作用时间后, 通过多路选择器即可得到任意一个大区域中任意一个小区的 3 个基本矢量的作用时间。

2.3 状态时间分配

2.3.1 状态分配

判断出了参考矢量所在区域也就判断出了合成参考矢量所需要的 3 个基本矢量, 每个基本矢量即对应了一个逆变器的开关状态。为了减少功率元件的开关次数, 选择小矢量为起始矢量, 采用七段式 SVPWM 方法, 大区共 6 个小区矢量发送顺序如表 3 所示。

表3 矢量发送顺序表

编号	发送矢量						
1	POO	OOO	OON	ONN	OON	OOO	POO
2	PPO	POO	OOO	OON	OOO	POO	PPO
3	POO	PON	PNN	ONN	PNN	PON	POO
4	POO	PON	OON	ONN	OON	PON	POO
5	PPO	POO	PON	OON	PON	POO	PPO
6	PPO	PPN	PON	OON	PON	PPN	PPO

矢量状态决定了逆变器功率器件的开关状态, 以 1 表示逆变器对应功率元件导通, 0 表示关断, 从左至右依次表示每相 4 个功率元件由上到下的开关状态, 则以 1 小区 A 相为例, 开关状态次序为:

1100; 0110; 0110; 0110; 0110; 0110; 1100

2.3.2 时间分配

将基本矢量的作用时间分配给相应的逆变器开关状态生成触发三电平逆变器主电路功率元件的脉冲波形, 是 SVPWM 算法的关键部分。A 相功率元件触发脉冲波形如图 8 所示。

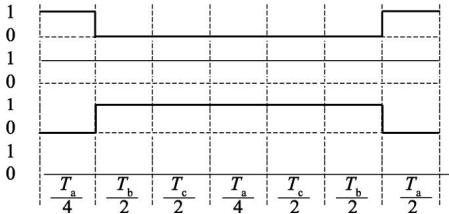


图 8 A 相触发脉冲波形

基本矢量状态时间分配仿真模块如图 9 所示, M 为

矢量状态选择信号。

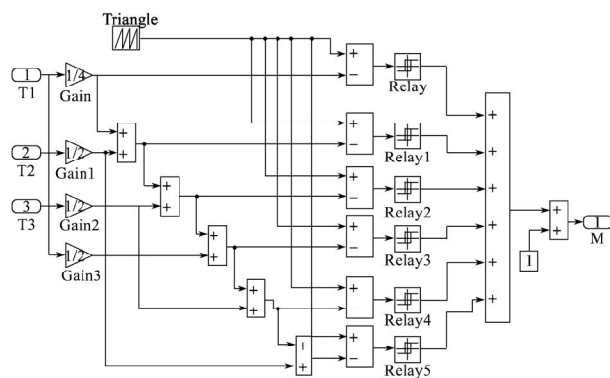


图9 矢量状态时间分配图

3 仿真结果

应用以上搭建的模块对某型动车组用三电平逆变器进行了仿真,输入为线电压2 000 V的三相正弦交流信号;开关频率为10 kHz,即 $T_s=0.000\ 1\text{ s}$ 。输出端相电压波形如图10所示,线电压波形如图11所示,扇区判断仿真波形如图12所示。

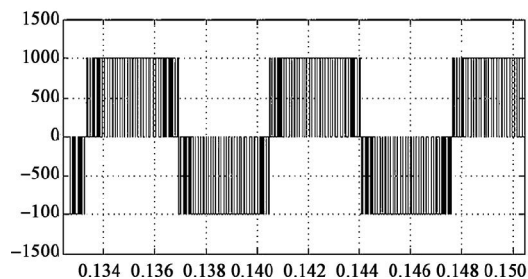


图10 三电平逆变器输出相电压波形

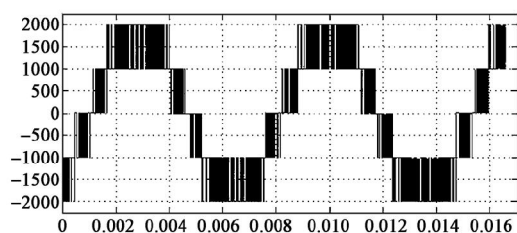


图11 三电平逆变器输出线电压波形

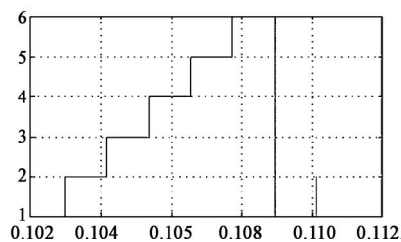


图12 扇区判断仿真波形

从图10、图11可以看出,三电平逆变器输出端相电压为3个电平,线电压为5个电平,与理论分析基本一致。从图12可以看出扇区 N 的变化规律为1-2-3-4-5-6,对应于图2的 - - - - - 扇区,说明空间电压矢量 U 正好以逆时针的方向沿着磁链圆的轨迹旋转。综合以上可知本文针对某型动车组用三电平逆变器SVPWM控制算法所搭建的模型是正确的。

4 结语

三电平逆变器相对于二电平逆变器而言,输出电压波形阶梯数增加,更加接近于正弦波。另外,计算机仿真技术能以较低的成本,在较短的时间内完成系统的前期研究,为动车组设计提供了一种较为简便的方法。

参考文献:

- [1] 李启明. 三电平SVPWM算法研究及仿真[D]. 合肥:合肥工业大学,2007:17-26.
- [2] 王利军. 高速动车组再生制动工况变流器控制算法研究与实现[D]. 成都:西南交通大学,2008:31-38.
- [3] 杨毅. 基于空间电压矢量法_SVPWM_的三电平逆变器的研究[D]. 上海:东华大学,2007:40-48.
- [4] 陶然,苏建徽. 三电平SVPWM算法的研究[J]. 测试技术,2008(1):23-25.
- [5] 侯春,何凤友. 基于Matlab_Simulink的三电平SVPWM的仿真设计[J]. 冶金自动化,2007(s2):229-231.
- [6] 宋飞,林烨. 基于SVPWM的三电平逆变器仿真研究[J]. 船电技术,2005(2):42-44.
- [7] 肖庆恩,何礼高. 三电平逆变器SVPWM控制的一种简化算法及实现[M]. 电气传动自动化,2004,26(5):21-24.

(上接第9页)

- 电现象的机理研究[J]. 中国铁道科学,2009,30(5):83-87.
- [29] 郭凤仪,侯刚,等. 基于电气化铁路的高性能滑动磨损实验机研制[C]//第十八届煤矿自动化与信息化学术会议论文集. 北京:中国矿业大学出版社,2008:204-210.

- [30] 胡道春,孙乐平,上官宝,张永振. 电弧能量对浸金属碳滑板材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报,2009,29(1):36-42.
- [31] 王中辉,蒋力培,起铂金,焦向东. 发展中的电弧等离子体温度场诊断技术[J]. 材料科学与工艺,2007,15(5):654-657.