

三电平变频器控制策略的仿真与实现

谭国俊, 叶宗彬, 景巍
(中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

摘要:采用新型电压空间矢量脉宽调制算法对三电平逆变器的电压空间矢量平面进行简化, 将其电压空间矢量平面简化至两电平空间矢量平面, 使用两电平逆变器脉宽调制方法对三电平逆变器进行调制, 简化了中点电位平衡控制策略。分别建立了 MATLAB7.0 下的仿真平台及 DSP F2812 为主控制器的硬件实验平台, 通过仿真及实验验证了该算法及其对中点电位控制的有效性。

关键词: 逆变器; 空间矢量; 脉宽调制

中图分类号: TN773

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2007)08-0086-03

Simulation and Realization of the Controlling Method for Three-level Inverter

TAN Guo-jun, YE Zong-bin, JING Wei

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: A novel simplified space-vector pulse width modulation (SVPWM) method is implied to simplify the space-vector diagram of a three-level inverter into that of a two-level inverter, all the procedures for the three-level SVPWM are done like conventional two-level inverter. Two platforms are build up for this research, one of which is based on MATLAB7.0 for the purpose of simulation and the other is based on DSP F2812. The validity of the control for solving neutral-point voltage balancing and the convenience of the realization in program are demonstrated by the both of the simulation and experimental results.

Keywords: inverter; space-vector; pulse width modulation

1 引言

近年来, 在高压大功率场合, 多电平逆变器倍受重视。1977 年德国学者 Holtz 提出三电平逆变器主电路及其方案, 其中每相桥臂中带一对开关器件, 以辅助中点箝位, 1988 年日本 A.Nabae 等人提出将这些辅助开关器件变成为一对二极管, 分别与上下桥臂串联的主开关器件中点相连, 以辅助中点箝位^[1]。该电路更易于控制, 且主开关器件在关断时仅承受直流母线电压的一半, 因此更为实用。三电平逆变器作为一种新型高压大容量功率变换器, 从电路拓扑结构入手, 在得到高质量输出波形的同时, 克服了两电平逆变器的诸多缺点, 无需输出变压器和动态均压电路, 开关频率低, 因而开关器件应力小, 系统效率高等。

鉴于传统的三电平逆变器控制算法过于烦琐, 需要求解各个小三角形及其工作模式^[2]。在此采用了一种新颖三电平逆变器控制算法, 并很好地实现了中点电位波动的控制。

2 三电平逆变器的简化控制算法^[3,4]

三电平逆变器的电压空间矢量图比两电平逆变器的复杂得多。以往的三电平逆变器电压空间矢量控

制大都采用将一个扇区分成 4 个小三角形^[2], 然后分别对各小三角形求解各有效矢量的作用时间。如此一来, 则需对 24 个小三角形进行求解, 进而判断参考电压空间矢量所在的具体小三角形号。此外, 还需求出每个扇区内各小三角形之间的切换角度, 以判断合成矢量的工作模式, 从而提供计算与三角载波相比较时比较值的依据。这种计算方式繁琐, 而且不易于用于三电平以上的多电平逆变器^[3]。图 1a 示出常规三电平空间矢量区域的划分。图 1b, c 示出三电平逆变器电压空间矢量的简化图。它可视为由 6 个两电平电压空间矢量构成的小六边形相互叠合而成。

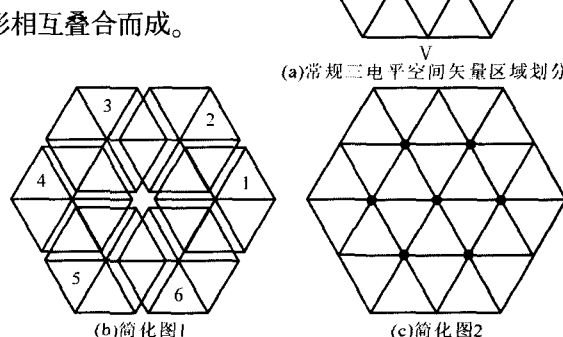


图 1 三电平电压空间矢量图的简化
判断参考电压矢量所在的位置只需判定其所处

定稿日期: 2007-01-30

作者简介: 谭国俊 (1962-), 男, 江苏徐州人, 教授, 博士。

研究方向为电力电子与电力传动。

的小六边形即可。下面用 S 表示参考电压矢量位于的小六边形号。判定出参考电压矢量所在小六边形后, 经过坐标平移即可将三电平电压矢量平面简化

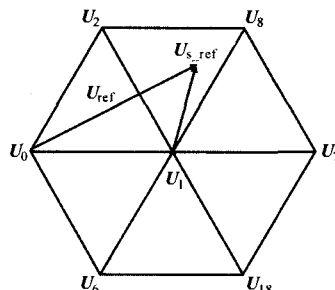


图2 参考电压空间矢量的修正
图中 U_{ref} ——原参考电压矢量
 $U_{s,ref}$ ——新参考电压矢量

为两电平电压矢量平面。在由三电平平面向两电平平面过渡时, 还需对参考电压矢量进行修正。图2示出 $S=1$ 时, 参考电压矢量修正示意图。表1给出 S 值的判断表格。表2给出参考电压矢量的修正表。

表1 S 值判断表

相	A	B	C
1	0,1	-1,0	-1,0
2	0,1	0,1	-1,0
3	-1,0	0,1	-1,0
4	-1,0	0,1	0,1
5	-1,0	-1,0	0,1
6	0,1	-1,0	0,1

表2 参考电压矢量修正表

S	$U_{\alpha s,ref}$	$U_{\beta s,ref}$
1	$U_{\alpha}-U_{\alpha}/3$	U_{β}
2	$U_{\alpha}-U_{\alpha}/6$	$U_{\beta}-U_{\alpha}/2\sqrt{3}$
3	$U_{\alpha}+U_{\alpha}/3$	$U_{\beta}-U_{\alpha}/2\sqrt{3}$
4	$U_{\alpha}+U_{\alpha}/3$	U_{β}
5	$U_{\alpha}+U_{\alpha}/6$	$U_{\beta}+U_{\alpha}/2\sqrt{3}$
6	$U_{\alpha}-U_{\alpha}/6$	$U_{\beta}+U_{\alpha}/2\sqrt{3}$

表中 -1,0,1——各相的开关状态

3 中点电位平衡的控制

3.1 改变 S 值法

在判断参考电压空间矢量位置时, 若参考电压空间矢量位于两个小六边形的重叠区域, 此时 S 取值不唯一。这即是图3示出重叠区域 S 值的二择性。下述使中点电位上升的小电压矢量称为正组小矢量, 反之, 称为反组小矢量。此时, 可将参考电压空间矢量由三电

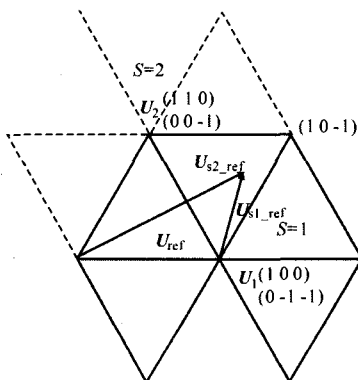


图3 重叠区域 S 值的二择性

平平面化简至 $S=1$ 或 $S=2$ 中的任何一个两电平平面。如果选择化简至 $S=1$ 的两电平平面, 则在这个平面内, 参考电压所确定的矢量作用顺序为:

$$T_{1N}(0-1-1) \rightarrow T_{2N}(00-1) \rightarrow T_8(10-1) \rightarrow T_{1P}(100) \quad (1)$$

式中 $T_{1N}, T_{2N}, T_8, T_{1P}$ ——对应矢量的作用时间

由于整个控制周期内调制波形关于中心对称, 故作用顺序仅列出一半。在该作用顺序中, 反组小矢量的作用时间多于正组小矢量的作用时间, 上电容

C_{up} 被充电, 下电容 C_{down} 被放电, 中点电位 u_N 将下降。如果选择化简至 $S=2$ 的两电平平面, 参考电压所确定的矢量作用顺序为:

$$T_{2N}(00-1) \rightarrow T_8(10-1) \rightarrow T_{1P}(100) \rightarrow T_{2P}(110) \quad (2)$$

在该作用顺序中, 反组小矢量的作用时间少于正组小矢量的作用时间, 在此矢量作用序列下, C_{up} 被放电, C_{down} 被充电, u_N 将上升。

同理, 对其他 S 值的两电平平面进行分析。最终发现, 当 $S=1, 3, 5$ 时, 所得的开关序列中, 反组小矢量作用时间占优; 当 $S=2, 4, 6$ 时, 正组小矢量作用时间占优。所以当参考电压空间矢量位于两电平平面重叠区域时, 只需根据 u_N 的波动情况相应改变 S 值即可对波动进行有效抑制。在编写程序时, 改变 S 值只需对 S 进行简单的加减运算, 结合所在的两电平平面的扇区号 N 即可达到控制 u_N 的目的。

3.2 改变小矢量作用时间法

控制 u_N 的核心是控制正反组小矢量的作用时间, 所以还可采取改变小矢量作用时间的分配法对 u_N 进行控制, 而不对 S 值进行修正。

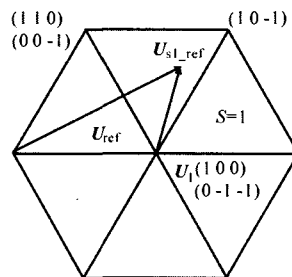


图4 改变小矢量作用时间法示意图

图4示出改变小矢量作用时间法示意图。当参考电压空间矢量落在 $S=1, N=2$ 的区域时, 其电压空间矢量的作用顺序为:

$$T_{1N}(0-1-1) \rightarrow T_{2N}(00-1) \rightarrow T_8(10-1) \rightarrow T_{1P}(100) \quad (3)$$

由于 T_{1N}, T_{1P} 对应的电压空间矢量在输出电压上是一致的, 而这两种不同的开关状态对 u_N 造成的影响效果相反。所以在获得 u_N 偏差时, 针对偏差的不同情况, 动态地改变正、反组小矢量的作用时间分配, 即可对 u_N 的波动进行抑制。有:

$$T_{1N}+T_{1P}=T_1 \quad (4)$$

式中 $T_{1N}=T_1(1+f)/2, T_{1P}=T_1(1-f)/2$ f ——调节因子

由上述可知, 改变 S 值法和改变小矢量作用时间法在本质上是一样的, 都是通过动态改变影响 u_N 的小矢量作用时间分配, 从而对 u_N 的平衡进行有效控制。现对两种控制 u_N 平衡的方法进行仿真研究。从控制灵活性来说, 改变 S 值法所改变的正负小矢量作用时间分配固定, 不能根据 u_N 偏差的大小动态改变, 这会使 u_N 的波动相对较大; 改变小矢量作用时间法较有优势, 如果采用自适应算法, 根据 u_N 偏差的大小动态地改变 f 的

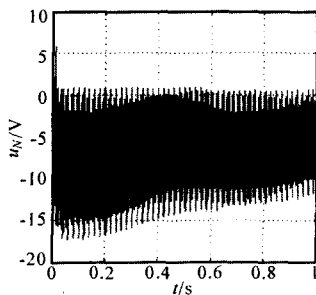


图 5 f 取值不当时 u_N 的波动

4 三电平逆变器系统仿真

为了验证该简化算法的正确性,采用 MATLAB 软件 Simulink 下 Simpowersystem 库中的电力器件搭建了三电平逆变器的系统,通过三相对称阻感负载进行了仿真。仿真参数:直流电压 $U=540V$,直流侧分压电容 $C=4700\mu F$,负载电阻 $R=0.9\Omega$,电感 $L=0.04H$ 。图 6a 示出开关频率 $f_c=1kHz$ 时,在给定幅值 $220V$, $50Hz$ 下相电流 i_a 和相电压 u_a 仿真波形。图 6b 示出采用改变 S 值法,当 $f_c=1kHz$ 时,在给定电压有效值 $220V$ 下 u_N 的仿真波形。

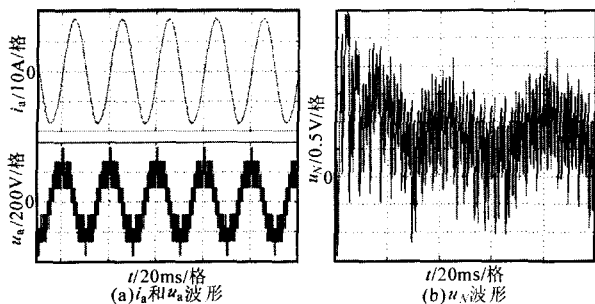


图 6 仿真结果

5 硬件实现

该实验采用 TMS320F2812 型 DSP 及相关外围电路作为控制器,一套 $37kW$ 的中点箝位式逆变器及一台鼠笼式异步电机作为负载。构成的三电平逆变平台,对上述算法进行硬件实验验证。三相鼠笼式异步电机采用 TYPEY180L-4,其额定功率为 $22kW$,额定电压为 $380V$,额定电流为 $42.5A$,额定转速为 $1470r/min$,额定频率为 $50Hz$ 。图 7a,b 示出不同的给定电压幅值 U_m 、不同的频率下相电流 i_a 和相电压 u_a 的实验波形。图 7c,d,e 示出电机在额定电压、工频下空载运行时,直流侧的上电容电压 u_{Cup} 和下电容电压 u_{Cdown} 、中点电位 u_N 及其展开的实验波形。采用 D/A 输出至示波器观察,由于使用的 D/A 为单极性输出方式,采用叠加一直流偏移量,以实现正负的输出,故通道的零点实际被认为上移了 $2V$ 。

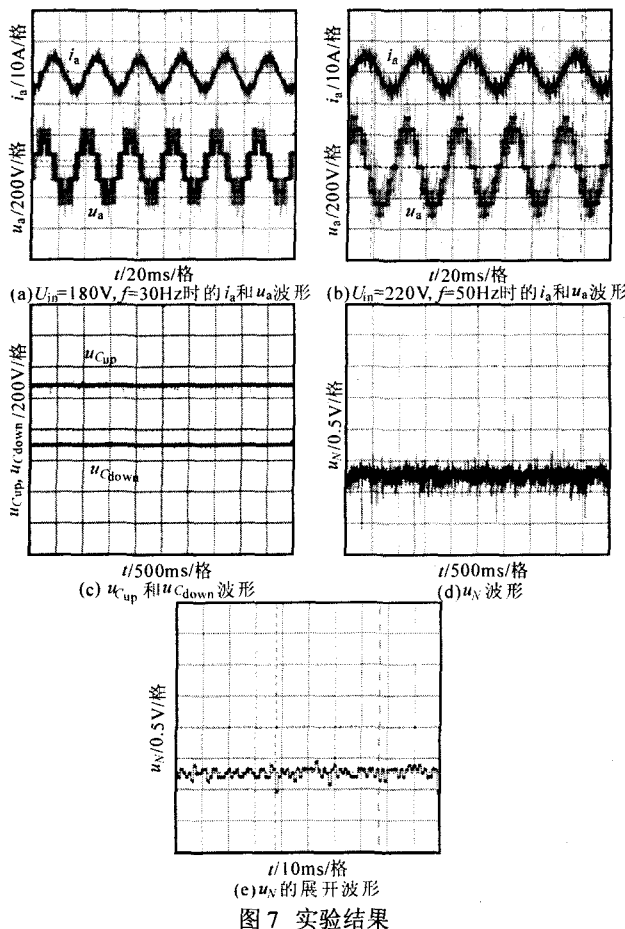


图 7 实验结果

6 结论

对三电平逆变器的简化控制算法进行了分析,通过仿真及硬件验证得出下述结论:①三电平逆变器可输出三电平值阶梯波的相电压、五电平值阶梯波的线电压,且输出的电压波形比两电平逆变器的更接近正弦波;②由于三电平逆变器自身拓扑结构的缺陷,存在直流侧中点电位波动的问题,这会导致输出电压谐波含量上升,使各开关器件受压不均,缩短电容寿命,对整个装置造成极大损害。提出了两种解决方案,分别对其进行了分析,并采用其中一种方案进行了硬件实现,中点电位波动很小;③试验结果证明,采用简化的三电平电压空间矢量 PWM 算法,并利用两电平的控制方法,大大简化了编程。

参考文献

- [1] 刘智超,吴学智,黄立培.多电平变换器发展现状及其实现[J].自动化博览,2003,(1):162-165.
- [2] 王长兵.三电平逆变器 SVPWM 控制算法的研究[D].哈尔滨工业大学[硕士论文],2002.
- [3] J H Seo, A New Simplified Space-vector PWM Method for Three-level Inverters[J].IEEE Trans. on Power Electron., 2001,(4):545-547.
- [4] 黄文新,胡育文,李磊.一种新颖的空间电压矢量调制逆变器的死区补偿方法[J].南京航空航天大学学报,2002,(2):143-147.