

DOI: 10.7652/xjtuxb201611014

空间矢量脉宽调制方法在单相三电平中点箝位型整流器中的应用

段文岩¹, 何英杰^{1,2}, 刘云峰¹, 刘进军¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 401121, 重庆)

摘要: 针对单相三电平中点箝位型(NPC)整流器中多个开关管同时导通或关断的问题,在分析电路拓扑和工作原理的基础上,提出了一种单相空间矢量脉宽调制(SVPWM)方法。这种 SVPWM 方法合理地设计各个扇区内部的调制序列,并且在扇区切换时加入过渡调制序列,从而保证了开关状态的连续性。在分析各个开关状态对中点电压影响的基础上,该方法根据中点电压和网侧电流的情况来选择合适的冗余小矢量,从而实现直流侧中点电压控制。另外,通过使用冗余零矢量,该方法能够达到倍频的效果。针对这种 SVPWM 方法,搭建样机进行了实验研究,实验结果表明: SVPWM 方法能够保证在同一时刻只有一个开关管导通或关断,而且输出电压的跳变量为直流侧电压的 1/2;网侧电压与网侧电流保持了较好的同相位,且动态性能良好;该方法能够实现中点电压控制,并且具有较好的动态响应速度和稳态控制精度。

关键词: 单相三电平中点箝位型整流器;扇区过渡;中点电压控制

中图分类号: TM46 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)11-0091-06

Application of SVPWM in Single Phase Three-Level Neutral Point Clamped Rectifiers

DUAN Wenyan¹, HE Yingjie^{1,2}, LIU Yunfeng¹, LIU Jinjun¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 401121, China)

Abstract: Aiming at the problem of multiple switches simultaneous turning on or off in single-phase three-level neutral point clamped (NPC) rectifiers, we put forward a space vector pulse width modulation (SVPWM) method. This method can reasonably design the modulation sequences inside each sector, and add transition modulation sequences in sector switch, so as to ensure the continuity of switching states. On the basis of analyzing the influence of each switching state on the neutral point voltage, this method selects appropriate redundant small vector according to the neutral point voltage and grid current, so as to achieve the neutral point voltage control. In addition, by using redundant zero vectors, this method can achieve the effect of frequency doubling. For this SVPWM method, a prototype was built to carry out experimental research. The experimental results showed that the proposed SVPWM method can guarantee only one switch turning on or off at one time, and the change of the output voltage is always half the

收稿日期: 2016-03-29。 作者简介: 段文岩(1990—),男,硕士生;何英杰(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50907052);陕西省自然科学基金资助项目(2014JQ7271);输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室访问学者资助项目(2007DA10512714405)。

网络出版时间: 2016-09-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160914.1805.004.html>

DC side voltage, and that the phase of the grid voltage is the same as that of the grid current, with good dynamic performance. This method can realize the neutral point voltage control with fast dynamic response speed and accurate steady control.

Keywords: single phase three-level neutral point clamped (NPC) rectifier; sector transition; neutral point voltage control

相比于直流调速系统,交流传动系统具有质量轻、体积小、牵引力大、调速范围宽等优点,电力牵引交流传动技术在高速动车组及和谐号大功率机车中已经得到广泛应用。由于在铁路供电系统中采用的是单相供电,单相脉冲整流器成为牵引传动系统的重要组成部分。现有运行的很多高速动车组中,牵引变流器由单相三电平中点箝位型(NPC)整流器和三相三电平 NPC 牵引逆变器组成。

对于单相三电平 NPC 整流器,调制方法是研究的一个关键问题。目前,空间矢量脉宽调制(SVPWM)方法是一种广泛应用于三相拓扑结构的调制策略,具有物理概念清晰、易于数字化实现、算法灵活方便等优点^[1]。然而,在单相系统中,SVPWM 调制技术的应用还较少。文献[2]通过平面坐标旋转变换,将三相 SVPWM 调制技术引入单相变流器,但其只讨论了 SVPWM 调制技术在两电平逆变器中的应用,没有对多电平逆变器进行研究。文献[3-4]将 SVPWM 技术应用于单相三电平 NPC,并通过在算法中选择性插入零矢量,使每相桥臂中间两个开关管的发热量得到降低,但是并未考虑开关状态的连续性,会导致多个开关管同时导通或关断,增加开关损耗和产生电磁干扰。文献[5]将 SVPWM 调制技术应用于对称三电平变流器拓扑和不对称三电平变流器拓扑,文献[6]提出了一种单相三电平 SVPWM 方法和一种基于零序分量注入的单相三电平单极性层叠载波的正弦脉宽调制方法,并对这两种方法的内在联系进行了研究,但是不能保证扇区过渡时开关状态的连续性。本文通过对单相三电平 NPC 整流器进行研究,提出了一种 SVPWM 调制方法。该方法给出了各个扇区内部和扇区过渡时的调制序列,在扇区内部和扇区过渡时都不会出现多个开关管同时导通或关断,并且输出电压每次的跳变量都为直流侧电压的 1/2。

1 单相三电平 NPC 整流器的工作原理

单相三电平 NPC 整流器的主电路如图 1 所示。单相三电平 NPC 整流器由两组对称的桥臂组成,将左侧的桥臂称为 a 桥臂,右侧的桥臂称为 b 桥臂。

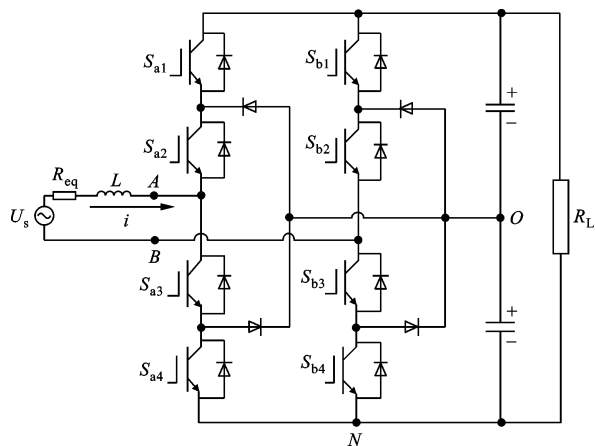


图 1 单相三电平 NPC 整流器主电路

其中, U_s 为网侧电压, i 为网侧电流, L 为网侧电感, R_{eq} 为网侧电感的等效电阻, R_L 为直流侧的负载电阻, U_{C1} 、 U_{C2} 为直流侧上、下电容电压。

假设 $U_{C1} = U_{C2} = E$, E 为直流侧电容上的参考电压。相对于直流侧中点,每个桥臂能输出 0、 E 、 $-E$ 3 种电平。以桥臂 a 为例,当开关管 S_{a1} 、 S_{a2} 导通,开关管 S_{a3} 、 S_{a4} 关断时,桥臂 a 输出 E 电平;当开关管 S_{a3} 、 S_{a4} 导通,开关管 S_{a1} 、 S_{a2} 关断时,桥臂 a 输出 $-E$ 电平;当开关管 S_{a2} 、 S_{a3} 导通,开关管 S_{a1} 、 S_{a4} 关断时,桥臂 a 输出 0 电平。定义桥臂 a、b 的开关状态函数

$$S_a = \begin{cases} 1, & S_{a1}, S_{a2} \text{ 导通}, S_{a3}, S_{a4} \text{ 关断} \\ 0, & S_{a2}, S_{a3} \text{ 导通}, S_{a1}, S_{a4} \text{ 关断} \\ -1, & S_{a3}, S_{a4} \text{ 导通}, S_{a1}, S_{a2} \text{ 关断} \end{cases} \quad (1)$$

$$S_b = \begin{cases} 1, & S_{b1}, S_{b2} \text{ 导通}, S_{b3}, S_{b4} \text{ 关断} \\ 0, & S_{b2}, S_{b3} \text{ 导通}, S_{b1}, S_{b4} \text{ 关断} \\ -1, & S_{b3}, S_{b4} \text{ 导通}, S_{b1}, S_{b2} \text{ 关断} \end{cases} \quad (2)$$

每组桥臂有 3 种开关状态,两组桥臂共有 9 种开关状态,可输出 $2E$ 、 E 、0、 $-E$ 、 $-2E$ 5 种电平。通过之前定义的开关状态函数,用 $(S_a S_b)$ 的形式表示这 9 种开关状态,单相三电平 NPC 的 9 种开关状态如图 2 所示。由图 2 可知,假设 $i > 0$,对于开关状态 (00)、(11) 和 $(-1-1)$,电流没有经过电容,中点电压平衡不受影响;对于开关状态 (10)、 $(0-1)$,这两种开关状态都是输出 E 电平,但是开关状态 (10) 对

上电容充电,开关状态(0-1)对下电容充电,对 midpoint 电压平衡的影响相反;开关状态(01)、(-10)的情况与开关状态(10)、(0-1)类似;开关状态(1-1)对两个电容都充电,开关状态(-11)对两个电容都放电,不影响中点电压平衡。

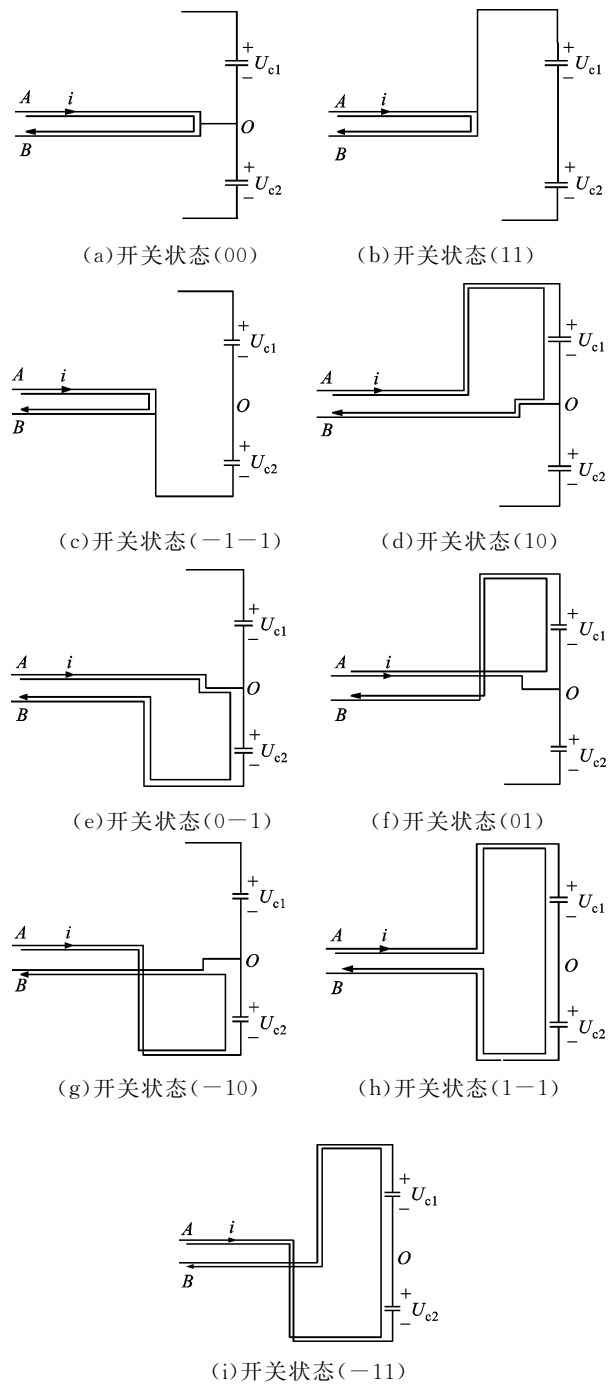


图 2 单相三电平 NPC 整流器的 9 种开关状态

2 单相三电平 NPC 的 SVPWM 调制方法

单相三电平 NPC 的空间矢量如图 3 所示。 $\mathbf{V}$

是一个虚拟的电压矢量,以角速度 ω 沿逆时针方向旋转,矢量 $\mathbf{V}$ 在坐标轴上的投影即为单相三电平 NPC 的输出指令电压。图 3 中共有 9 个电压矢量,可输出 5 种电平,其中(1-1)和(-11)为大矢量,(10)、(0-1)、(01)和(-10)为小矢量,(00)、(11)和(-1-1)为零矢量。

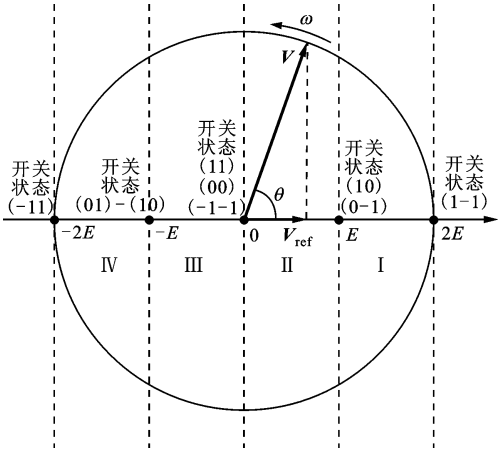


图 3 单相三电平 NPC 空间矢量图

由图 3 可看出,单相三电平 NPC 的空间矢量图被分为 I、II、III、IV 4 个扇区。在各个扇区中,指令电压矢量 $\mathbf{V}_{\text{ref}}$ 由最近的两个矢量 $\mathbf{V}_0$ 、 $\mathbf{V}_1$ 来合成,根据伏秒平衡原理,矢量应满足

$$\begin{cases} \mathbf{V}_0 T_0 + \mathbf{V}_1 T_1 = \mathbf{V}_{\text{ref}} T_s \\ T_0 + T_1 = T_s \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_0 = \frac{|\mathbf{V}_{\text{ref}} - \mathbf{V}_1|}{|\mathbf{V}_0 - \mathbf{V}_1|} T_s \\ T_1 = T_s - T_0 \end{cases} \quad (4)$$

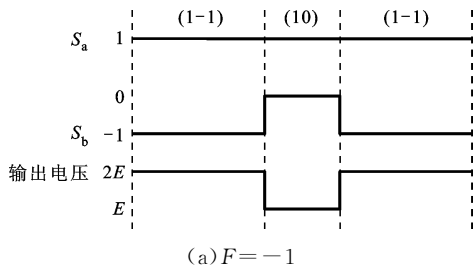
式中: T_0 、 T_1 分别为矢量 $\mathbf{V}_0$ 、 $\mathbf{V}_1$ 的作用时间; T_s 为开关周期。

由分析可知:(10)、(0-1)互为冗余矢量,二者对 midpoint 电压的影响相反;(01)、(-10)互为冗余矢量,二者对 midpoint 电压的影响相反;(-1-1)、(00)和(11)互为冗余矢量,且都不会对 midpoint 电压产生影响。因此,在合成指令电压矢量时应当根据网侧电流和 midpoint 电压的情况,选择合适的冗余小矢量来实现 midpoint 电压的平衡。定义 $F = \text{sign}(\Delta U_{\text{NP}}) \text{sign}(i)$, $\Delta U_{\text{NP}} = U_{\text{C1}} - U_{\text{C2}}$ 为上下电容电压偏差, i 为网侧电流。

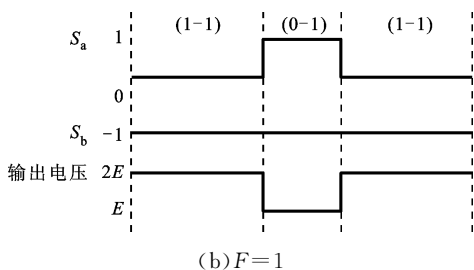
在扇区 I 中,用大矢量(1-1)和 2 个正小矢量(10)、(0-1)来合成指令电压矢量。当 $F = -1$ 时,应当选择冗余小矢量(10)来控制 midpoint 电压平衡,考虑到调制序列从上一个开关周期到下一个开关周期的连续性,将(1-1)作为首发矢量,采用调制序列(1-1)→(10)→(1-1);当 $F = 1$ 时,应当选择冗余

小矢量(0-1)来控制中点电压平衡,采用调制序列(1-1)→(0-1)→(1-1)。

扇区 I 中的调制序列如图 4 所示,每次开关状态改变时只有一个开关函数发生变化,且没有出现从 1 到-1 或从-1 到 1 的跳变,这就保证了在同一时刻只有一个开关管开通或关断,从而减小了开关损耗,降低了开关频率。扇区 IV 的情况与扇区 I 类似。



(a) $F = -1$



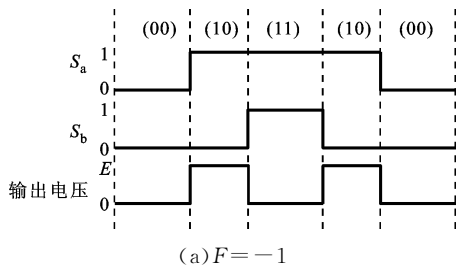
(b) $F = 1$

图 4 扇区 I 中的调制序列

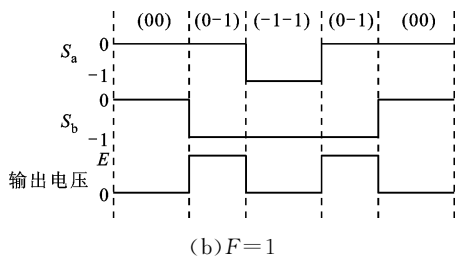
在扇区 II 中,用 3 个零矢量(-1-1)、(00)、(11)和 2 个正小矢量(10)、(0-1)来合成指令电压矢量。当 $F = -1$ 时,应该选择冗余矢量(10)进行调制,考虑到调制序列从上一个开关周期到下一个开关周期的连续性,将(00)作为首发矢量,采用调制序列(00)→(10)→(11)→(10)→(00);当 $F = 1$ 时,应该选择冗余矢量(0-1)进行调制,采用调制序列(00)→(0-1)→(-1-1)→(0-1)→(00)。

扇区 II 中的调制序列如图 5 所示,每次开关状态改变时只有一个开关函数发生变化,且没有出现从 1 到-1 或从-1 到 1 的跳变,保证了在同一时刻只有一个开关管开通或关断,从而减小了开关损耗,降低了开关频率。由于在调制序列中使用了两个零矢量,输出电压变化的频率是开关频率的两倍,这就实现了倍频的效果,可使输出的波形质量更好。扇区 III 的情况与扇区 II 类似。

为了实现各个扇区之间的平滑过渡,防止在扇区过渡时多个开关管同时动作,加入了扇区过渡时的调制序列。当指令电压矢量从扇区 I 过渡到扇区 II 时,上一个开关周期结束时的开关状态为(1-1),



(a) $F = -1$



(b) $F = 1$

图 5 扇区 II 中的调制序列

而当前开关周期开始时的开关状态为(00)。开关状态由(1-1)跳到(00),会导致两个开关管同时导通,两个开关管同时关断。为避免这种情况发生,需加入扇区过渡时的调制序列,此时指令电压矢量位于扇区 II 中,可用 3 个零矢量(-1-1)、(00)、(11)和 2 个正小矢量(10)、(0-1)来合成指令电压矢量,因此可采用调制序列(10)→(00)→(0-1)→(00)→(10)作为过渡调制序列。从上一个开关周期过渡到当前开关周期时,开关状态由(1-1)变为(10);从当前开关周期过渡到下一个开关周期时,开关状态由(10)变为(00),不会出现两个开关管同时导通或关断的情况。当指令电压矢量在其他扇区间过渡时,可用类似方法设计过渡调制序列。

当指令电压矢量从扇区 II 过渡到扇区 III 或者从扇区 III 过渡到扇区 II 时,由于在扇区 II 和扇区 III 中的调制序列都是以开关状态(00)开头和结尾,不需要加入过渡调制序列。4 个扇区中的调制序列和扇区过渡时的调制序列如表 1、表 2 所示。

3 实验验证

为了进一步验证 SVPWM 调制方法的正确性和有效性,在样机上进行了实验验证。实验平台由 DSP+FPGA 共同实现,DSP 选择 TI 公司的 TMS 320F28335,FPGA 选择 Altera 公司的 EP2C35F484 C8。实验基本参数:网侧电压幅值为 70 V,网侧电压频率为 50 Hz,网侧电感值为 6 mH,网侧电感等效电阻值为 0.5 Ω ,直流侧电容为 3.94 μF ,直流侧总电压给定值为 100 V,直流侧负载电阻为 25 Ω 。

表 1 4 个扇区内部的调制序列

扇区	F	调制序列
I	-1	(1-1)→(10)→(1-1)
	1	(1-1)→(0-1)→(1-1)
II	-1	(00)→(10)→(11)→(10)→(00)
	1	(00)→(0-1)→(-1-1)→(0-1)→(00)
III	-1	(00)→(-10)→(-1-1)→(-10)→(00)
	1	(00)→(01)→(11)→(01)→(00)
IV	-1	(-11)→(-10)→(-11)
	1	(-11)→(01)→(-11)

表 2 扇区过渡时的调制序列

过渡扇区	过渡调制序列
I→II	(10)→(00)→(0-1)→(00)→(10)
II→I	(10)→(1-1)→(0-1)→(1-1)→(10)
III→IV	(01)→(-11)→(-10)→(-11)→(01)
IV→III	(01)→(00)→(-10)→(00)→(01)

桥臂 a、b 的输入端电压和总的输入端电压如图 6 所示,桥臂 a 的输入端电压 u_{AO} 和桥臂 b 的输入端电压 u_{BO} 为三电平,叠加之后得到总的输入端电压 u_{AB} 为五电平。网侧电压 u_s 和网侧电流 i 的实验波

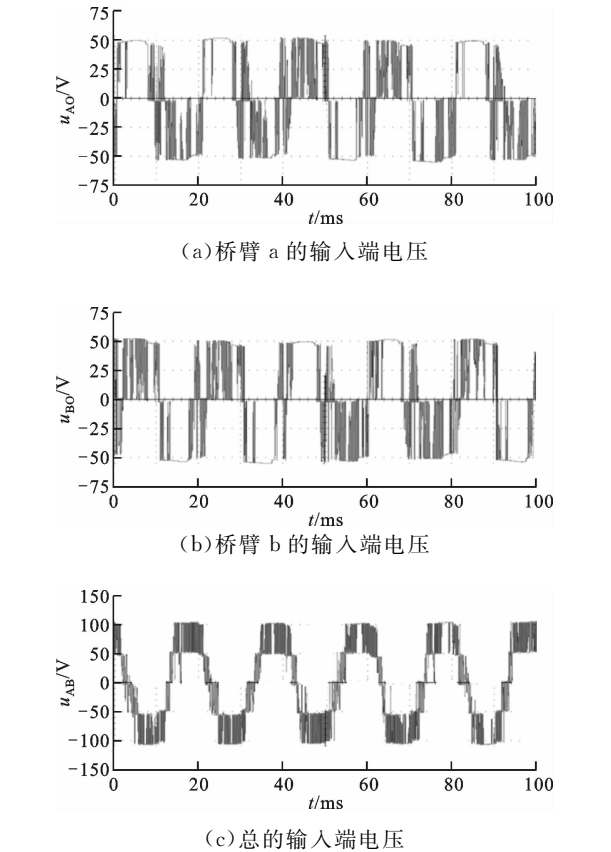


图 6 桥臂 a、b 的输入端电压和总的输入端电压

形如图 7 所示, u_s 和 i 保持了较好的同相位。直流侧电压波形如图 8 所示, 1.6 s 前, 设置上下电容电压存在 60 V 左右的偏差; 1.6 s 后, 开始采用中点电压平衡控制, 上下电容电压趋于平衡。由此看出, 中点电压平衡控制具有很好的动态响应速度和稳态控制精度。

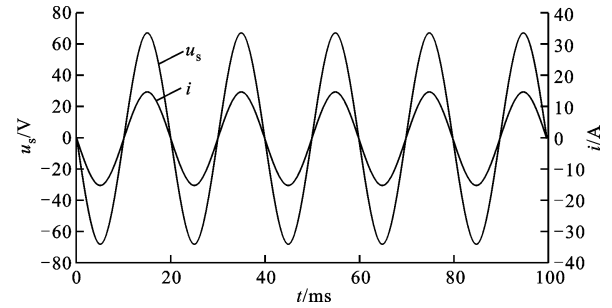


图 7 网侧电压与电流波形

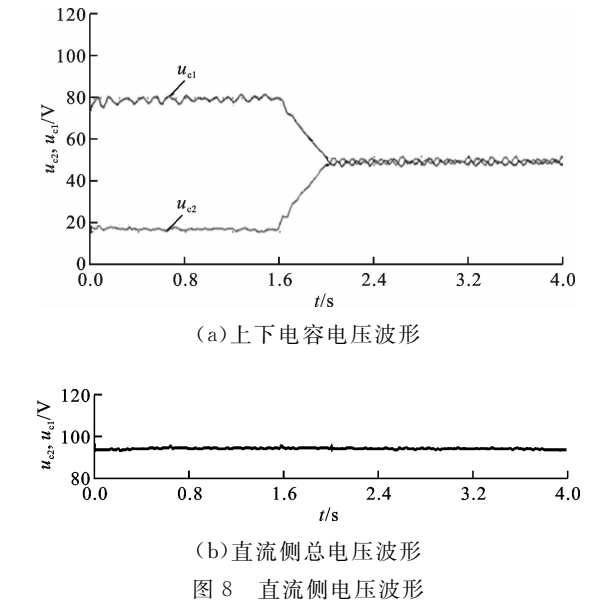


图 8 直流侧电压波形

负载发生突变时的网侧电压 u_s 和网侧电流 i 的实验波形如图 9 所示, 当负载发生突变时, 网侧电压 u_s 和网侧电流 i 能够很好地保持同相位。扇区过渡时桥臂 a、b 的输入端电压波形如图 10 所示, 当

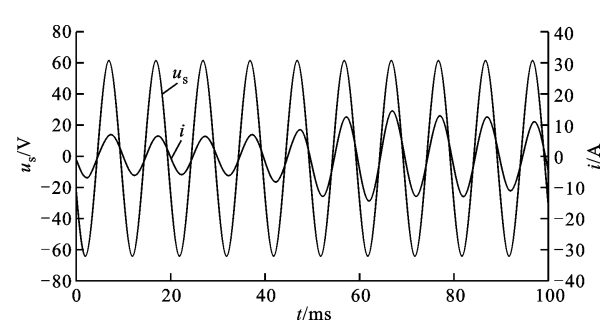


图 9 负载发生突变时网侧电压和电流波形

指令电压矢量位于扇区内部及在扇区间过渡时,桥臂 a、b 的输入端电压没有出现 100 V 的电压跳变,这说明开关函数没有出现从 1 到 -1 或从 -1 到 1 的跳变;另外,桥臂 a、b 的输入端电压没有同时发生跳变,这说明两个桥臂的开关函数没有同时发生变化,与本文所提 SVPWM 算法相吻合。

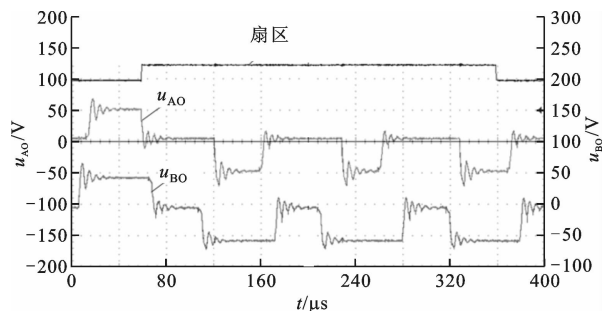


图 10 扇区过渡时桥臂 a、b 的输入端电压波形

4 结 论

本文通过对单相三电平 NPC 整流器进行研究,提出了一种 SVPWM 调制方法。该方法给出了各个扇区内部的调制序列和扇区过渡时的调制序列,在扇区内部和扇区过渡时都不会出现多个开关管同时导通或关断的问题,并且输出电压每次的跳变量都为直流侧电压的 1/2。该方法能够实现中点电压控制,且具有倍频的效果,通过实验验证了该方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] 李睿,孙岩桦,邱洪,等. 三态空间电压矢量分布三桥臂开关功放控制 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 71-76.
LI Rui, SUN Yanhua, QIU Hong, et al. A control method of switching power amplifiers with triple-arm SVPWM [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(12): 71-76.
- [2] 易龙强,戴瑜兴. SVPWM 技术在单相逆变电源中的应用 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 112-123.
YI Longqiang, DAI Yuxing. SVPWM technique applied to single-phase inverter power [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 112-123.
- [3] SONG Wensheng, WANG Shunliang, XIONG Chenglin, et al. Single-phase three-level space vector pulse width modulation algorithm for grid-side railway traction converter and its relationship of carrier-based pulse width modulation [J]. IET Electrical System in

Transportation, 2014, 4(3): 78-87.

- [4] 宋文胜,冯晓云. 一种单相空间矢量脉宽调制优化方法 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 107-113.
SONG Wensheng, FENG Xiaoyun. A single phase SVPWM optimized method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 107-113.
- [5] 张志,谢运祥,乐江源,等. 二极管钳位型单相三电平逆变器空间矢量脉宽调制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 62-68.
ZHANG Zhi, XIE Yunxiang, LE Jiangyuan, et al. Study of SVPWM method for single-phase three-level diode-clamped inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 62-68.
- [6] 宋文胜,冯晓云. 一种单相三电平 SVPWM 调制与载波 SPWM 内在联系 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 131-138.
SONG Wensheng, FENG Xiaoyun. Relationship between single phase three-level SVPWM and carrier SPWM [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 131-138.

[本刊相关文献链接]

- 谢桢,付立军,肖飞,等. 三电平直流变换器平衡中点电位的双移相 PWM 控制研究. 2013, 47(4): 64-72. [doi:10.7652/xjtuxb201304012]
- 梁法春,王栋,杨桂云,等. 气液两相流临界分配特性及相分离控制. 2015, 49(1): 53-58. [doi:10.7652/xjtuxb201501009]
- 李睿,孙岩桦,邱洪,等. 三态空间电压矢量分布三桥臂开关功放的控制. 2015, 49(12): 71-76. [doi:10.7652/xjtuxb201512012]
- 谢桢,付立军,肖飞,等. 三电平直流变换器全模式小信号建模和控制设计. 2013, 47(6): 109-116. [doi:10.7652/xjtuxb201306019]
- 王昆明,谢建,周召发,等. 双轴旋转捷联惯导的误差参数标定方法. 2016, 50(10): 153-160. [doi:10.7652/xjtuxb201610023]
- 郭仁飞,庄健,于德弘. 用于三维形貌定量测量的调制电流式扫描离子电导显微镜. 2016, 50(7): 83-88. [doi:10.7652/xjtuxb201607013]
- 张平,张小栋,董晓妮,等. 滑动轴承润滑油膜厚度光纤动态精密检测模型. 2016, 50(5): 45-50. [doi:10.7652/xjtuxb201605007]
- 刘健伶,陈志刚,王磊. 一种自适应广义空间调制及其低复杂度算法. 2016, 50(4): 48-53. [doi:10.7652/xjtuxb201604008]
- 常雪剑,彭博,刘凌,等. 新型非奇异终端滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制. 2016, 50(1): 85-91. [doi:10.7652/xjtuxb201601014]

(编辑 赵炜)