

VIENNA 整流器的指令电压辅助区间判断 SVPWM 控制

牛利勇^{1 2}, 高瑞雪^{1 2}, 王晓强³

(1. 北京交通大学 国家能源主动配电网技术研发中心, 北京 100044; 2. 北京电动车辆协同创新中心, 北京 100044; 3. 华为终端有限公司, 广东 深圳 518129)

摘要: 针对三相三开关三电平整流器 (VIENNA 整流器) 的空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 控制问题, 提出了一种指令电压辅助区间判断的 SVPWM 控制方法。依据 VIENNA 整流器的拓扑结构和数学模型, 研究了传统 SVPWM 控制方法的实现流程。分析了单位功率因数工况下的交流侧相量关系, 给出了电流矢量和电压矢量的固定关系。通过对电压空间矢量平面进行扇区划分, 给出了指令电压辅助区间判断 SVPWM 控制方法的实现流程。实验结果验证了该方法的正确性和有效性。该方法不需要进行电流区间判断, 简化了控制算法实现过程, 并且该方法提高了电压空间矢量平面扇区的划分数量, 提高了电流控制分辨率。该方法可广泛应用于开关电源的输入整流模块中。

关键词: 整流器; 功率因数校正; 空间矢量脉宽调制; 区间判断; 开关电源

DOI: 10.15938/j.emc.2016.05.007

中图分类号: TM 461.3

文献标志码: A

文章编号: 1007-449X(2016)05-0045-08

Control of VIENNA rectifier with reference voltage assisted sector judgment based SVPWM

NIU Li-yong^{1 2}, GAO Rui-xue^{1 2}, WANG Xiao-qiang³

(1. National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100044, China;
3. Huawei Terminal Co., Ltd, Shenzhen 518129, China)

Abstract: Focused on control of three-phase three-switch three-level rectifier (VIENNA rectifier) with space vector pulse width modulation (SVPWM), a reference voltage assisted sector judgment based SVPWM method was presented. According to the VIENNA rectifier topology and mathematical model, the realization process of conventional SVPWM control method was studied. The relationship of AC side phasor under unity power factor was analyzed and the fixed relationship between current vector and voltage vector was presented. The reference voltage assisted sector judgment based SVPWM control method and its realization process were presented following the sector division of the voltage space vector plane. Experimental results verified the presented method's validity and effectiveness. The presented method doesn't need current sector judgment and simplifies realization process of the control method. Also, the presented method increases the sector numbers of the voltage space vector plane, which improves the current control reso-

收稿日期: 2014-04-11

基金项目: 国家能源应用技术研究项目 (NY20150303)

作者简介: 牛利勇 (1978—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子技术、电动汽车充电技术等;

高瑞雪 (1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术;

王晓强 (1988—), 男, 硕士, 研究方向为电力电子技术。

通讯作者: 牛利勇

lution. This method can be widely used in the input rectifier modules in switch power supplies.

Keywords: rectifier; power factor correction; space vector pulse width modulation; sector judgment; switch power supply

0 引言

三电平脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 整流器与两电平 PWM 整流器相比, 具有功率器件电压应力小、输入电流畸变率低、功率因数高等优点^[1-4], 因此在高电压等级场合下的应用愈加广泛。VIENNA 整流器是一种独特的三电平升压型中点箝位结构整流器, 与二极管箝位型、飞跨电容箝位型等传统三电平整流器相比, 其拓扑结构更简单, 所需功率器件较少, 无桥臂直通风险因而无需设置死区时间^[5-7], 因此吸引国内外很多学者对其进行了大量研究。空间矢量脉冲宽度调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM) 控制技术已经广泛应用于各类型 PWM 整流器的控制^[8-10], 因此也是 VIENNA 整流器控制方法的理想选择。

然而, VIENNA 整流器具有与传统三电平 PWM 整流器不同的拓扑结构特点^[11-13], 其输入端的电位在开关断开时要由交流侧电流的极性来决定, 所以 VIENNA 整流器工作时的电压空间矢量平面与传统三电平 PWM 整流器有很大不同。因此, 传统三电平 PWM 整流器应用的 SVPWM 控制方法无法直接用于 VIENNA 整流器^[14-15], 而需要依据交流侧电流的矢量位置来重新进行区间划分, 再进行指令电压位置判断、矢量合成以及矢量作用时间调制等。由于引入了电流矢量的区间判断, 使得该控制方法对于电流采样精度及控制器运算速度等都有了更高的要求。同时, 由于必须在小扇区内进行矢量调制, 虽然可以通过坐标变换等效为两电平控制, 但仍不可避免的使指令电压区间判断复杂化。

针对上面的问题, 本文首先从 VIENNA 整流器输入端相量关系入手, 分析了整流器工作在单位功率因数状态时网侧电压、交流侧电压以及交流侧电流之间的位置关系, 研究了指令电压辅助区间判断的 SVPWM 控制方法, 以简化 VIENNA 整流器的控制。同时, 研究了 VIENNA 整流器电压空间矢量平面的进一步细分问题, 以提高交流侧电流的控制分辨率。

1 VIENNA 整流器拓扑和模型

VIENNA 整流器拓扑结构如图 1 所示。

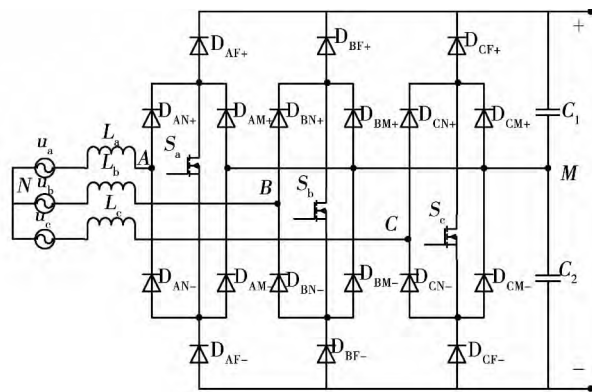


图1 VIENNA 整流器拓扑结构图

Fig.1 Topology of VIENNA rectifier

VIENNA 整流器的主电路主要由 3 个工作在升压模式下的电感、3 个功率桥臂以及直流侧两个输出电容组成。VIENNA 整流器的每一相功率桥臂均由一个双向开关来实现电流的双向流动。双向开关整体记为 S_i ($i = a, b, c$), 整流器输出直流电压记为 u_{dc} 。以 A 相为例, 在 S_a 关断时, 当电流为正时, 整流器输入端电压被箝位于 $+u_{dc}/2$, 而电流为负时, 输入端电压被箝位于 $-u_{dc}/2$; 在 S_a 开通时, 无论电流为正或为负, 输入端电压都将箝位于中点即 0 电位。因此, VIENNA 整流器的输入端电压可以描述为

$$\left. \begin{aligned} u_{AM} &= (1 - S_i) \operatorname{sign}(i_i) \frac{u_{dc}}{2} \\ u_{BM} &= (1 - S_i) \operatorname{sign}(i_i) \frac{u_{dc}}{2} \\ u_{CM} &= (1 - S_i) \operatorname{sign}(i_i) \frac{u_{dc}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $\operatorname{sign}(i_i)$ 为电流方向函数, 且

$$\operatorname{sign}(i_i) = \begin{cases} 1 & i_i \geq 0 \\ -1 & i_i < 0 \end{cases} \quad (i = a, b, c) \quad (2)$$

由于

$$\left. \begin{aligned} u_{AN} &= u_{AM} - u_{NM} \\ u_{BN} &= u_{BM} - u_{NM} \\ u_{CN} &= u_{CM} - u_{NM} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可得

$$u_{NM} = \frac{u_{dc}}{6} \sum_{i=a}^c (1 - S_i) \operatorname{sign}(i_i) \quad (4)$$

进而得到

$$\begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(1-S_a)\text{sign}(i_a) - (1-S_b)\text{sign}(i_b) - (1-S_c)\text{sign}(i_c) \\ 2(1-S_b)\text{sign}(i_b) - (1-S_a)\text{sign}(i_a) - (1-S_c)\text{sign}(i_c) \\ 2(1-S_c)\text{sign}(i_c) - (1-S_a)\text{sign}(i_a) - (1-S_b)\text{sign}(i_b) \end{bmatrix} \frac{U_{dc}}{6} \quad (5)$$

根据 VIENNA 整流器交流侧电流矢量位置的不同可以将整个电压空间矢量平面划分为 I ~ VI 个区域,如图 2 中虚线所示。由于 VIENNA 整流器输入端任意时刻的电平状态受电流极性限制,故所能形成的基本矢量只有 7 个。图 2 中深色区域为电流区间位于 I 区域时,整流器输入端电压基本矢量所构成的六边形区域。该区域包括一个大矢量 [1, 000]、两个中矢量 [1, 010] 和 [1, 001]、两个独立小矢量 [1, 110] 和 [1, 101]、零矢量 [111] 以及一个冗余小矢量 [1, 100] 和 [1, 011]。

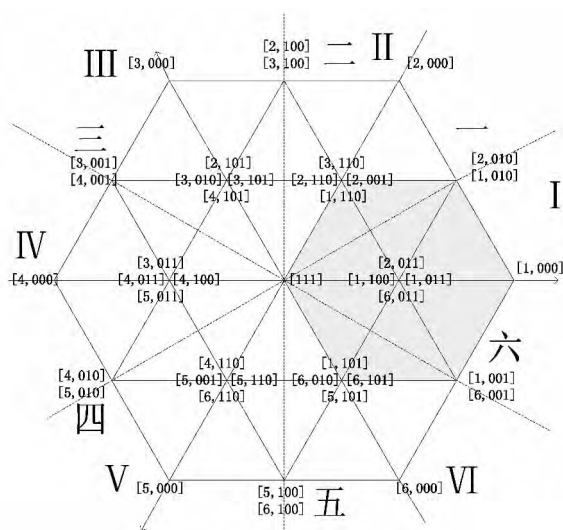


图 2 VIENNA 整流器电压空间矢量平面

Fig. 2 Voltage space vector plane of VIENNA rectifier

传统的三电平整流器在进行 SVPWM 控制时,一般通过 3 条规则的组合判断将矢量平面划分为 6 个扇区即 6 个大三角形区域,再在大三角形区域内进行小扇区判断并进行矢量调制。传统方法显然无法直接应用于 VIENNA 整流器的控制,而是需要先判断电流矢量的位置从而进行电流区间判断,再由电流区间确定的小六边形区域内进行矢量调制。矢量调制最直接的方法是按照矢量位置将小六边形划分为 6 个三角形区域,再根据边界条件判断指令电压所处的位置并进行调制,控制流程如图 3(a) 所示。该方法虽然原理简单直接,但由于调制区域为六边形,其边界判断条件较为繁杂。另外一种常见的方法是文献[6]中论述的将三电平等效为两电平的控制方法,通过坐标变换将指令电压变换至小两

电平平面,并利用两电平的调制算法进行控制,控制流程如图 3(b) 所示。该方法虽然避免了复杂的区域划分和边界判断,但在必须进行电流区间判断的同时,还需要进行额外的坐标变换。

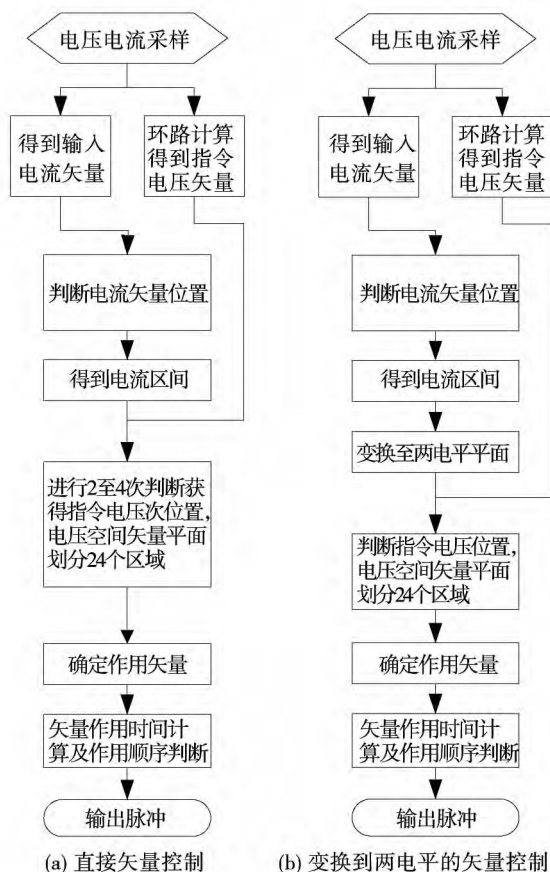


图 3 VIENNA 整流器的传统 SVPWM 控制流程图

Fig. 3 Flowchart of traditional SVPWM control for VIENNA rectifier

从图 3 中的调制过程可以明显看出,这两种方法在进行调制时都不可避免的需要进行电流矢量的区间判断,增加了控制方法的复杂性。

2 单位功率因数下的交流侧相量关系

当 VIENNA 整流器工作时,其交流电网电动势、交流侧电压、交流侧电感电压以及交流侧电流等存在着固定的关系,其在单位功率因数工况时的交流侧关系如图 4 所示。

VIENNA 整流器工作在单位功率因数工况下时,电网电动势 E 与交流侧电流 I 同相位,图 4 中的 V_L 为交流侧电感电压, V_R 为电感及开关管等效电阻电压, θ 为电网电动势 E 与整流器输入端电压 V 的夹角。通过图 4 所示的几何关系,可以得出 θ 的计算公式为

$$\theta = \arctan \frac{V_L}{E - V_R} \quad (6)$$

进一步得到

$$\theta = \arctan \frac{\omega L I_m}{U_m - R I_m} \quad (7)$$

式中: U_m 为电网电动势幅值; I_m 为交流侧电流幅值; ω 为电网电动势的角频率; L 为交流侧电感值; R 为交流侧等效电阻值。

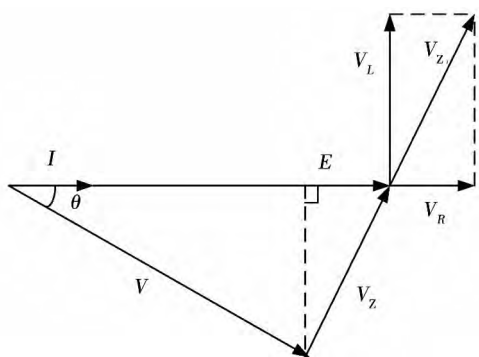
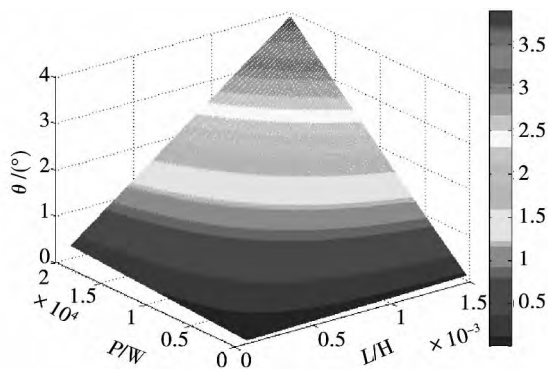
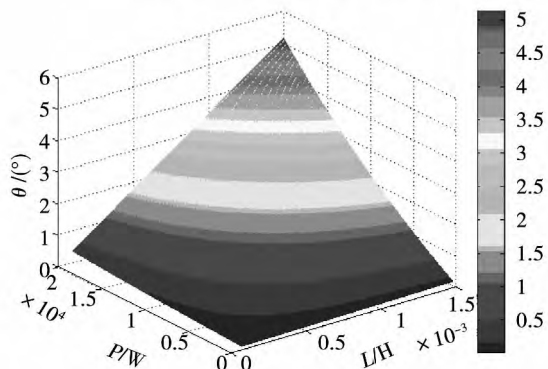


图4 VIENNA 整流器交流侧关系

Fig. 4 Relations of VIENNA rectifier AC side phasors



(a) $R=0.3 \Omega$ 时 $\theta=f(P,L)$ 函数图像



(b) $R=2 \Omega$ 时 $\theta=f(P,L)$ 函数图像

图5 θ 取值随主电路参数变化图

Fig. 5 θ values change map with the main circuit parameters

将式 $P=1.5U_m I_m$ 代入式 (7) 得

$$\theta = \arctan \frac{2\omega L P}{3U_m^2 - 2RP} \quad (8)$$

式中 P 为整流器输入功率。

分别取参数 $R=0.3 \Omega$ 和 $R=2 \Omega$, $\omega=100\pi$ rad/s, $U_m=311$ V, $L=100 \sim 1500 \mu\text{H}$, $P=500 \sim 20000$ W, 根据式 (8) 绘制 θ 的函数图像如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 主电路参数变化时 θ 始终在一个很小的角度范围内波动。整流器交流侧电压 V 即为 SVPWM 控制中的指令电压, 所以基于整流器交流侧电流 I 与电压 V 之间的固定关系, 可以利用指令电压在电压空间矢量平面上的位置推断出电流矢量 I 的位置。

3 指令电压辅助区间判断的 SVPWM 控制方法

当 VIENNA 整流器稳定运行时, 图 4 中各个相量对应的矢量均以 $2\pi f$ rad/s 的角速度在图 2 中的电压空间矢量平面上旋转。按照常规的三电平 SVPWM 控制方法, 将图 2 中的电压矢量空间平面划分“一~六”共 6 个扇区, 每个扇区又被划分为 A1、A2、B、C1、C2 和 D 六个小扇区, 则将扇区数从 24 增加到 36。其中扇区一的区域划分如图 6 所示。

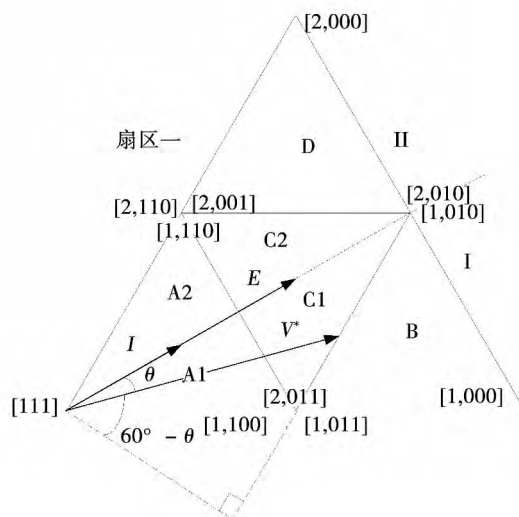


图6 扇区一的小区域划分

Fig. 6 Small regional division of sector one

图 6 中的扇区一包含区间 I 和 II 两种电流矢量状态, 两种状态下 3 个开关管开关状态对应的矢量情况有所不同, 如电流矢量在区间 I 时的开关状态 $[1,1,0]$ 、 $[1,0,1]$ 与区间 II 的 $[2,0,1]$ 对应的都是

同一个小矢量。因此当电流矢量旋转越过图6中虚线即电流从区间Ⅰ变化为区间Ⅱ时,控制器输出的脉冲序列需要调整。当VIENNA整流器工作在单位功率因数状态时,交流侧电流矢量 I 与整流器交流侧电压矢量 V 以夹角 θ 的位置关系同步旋转,而通过前面的计算证明 θ 的数值相对较小。因此以图6中的扇区一为例,当矢量 V 处于区间Ⅰ时的大部分时间中矢量 I 同样处于区间Ⅰ,而矢量 V 与矢量 I 所处电流区间不同的情况只可能发生在矢量 V 处于A1、C1以及B三个小扇区的情况下。当矢量 V 位于小扇区B而矢量 I 处于区间Ⅱ时的临界状态如图6所示,由几何关系及式(5)中的相电压幅值我们可以得出此时交流侧电压幅值的计算公式为

$$V^* = \frac{V_{dc}/2\sqrt{3}}{\cos(60^\circ - \theta)} \quad (9)$$

同样采用图5中所使用的主电路参数,输出电压 $V_{dc} = 700\text{ V}$ 根据式(9)绘制得到的 V^* 函数图像如图7所示。

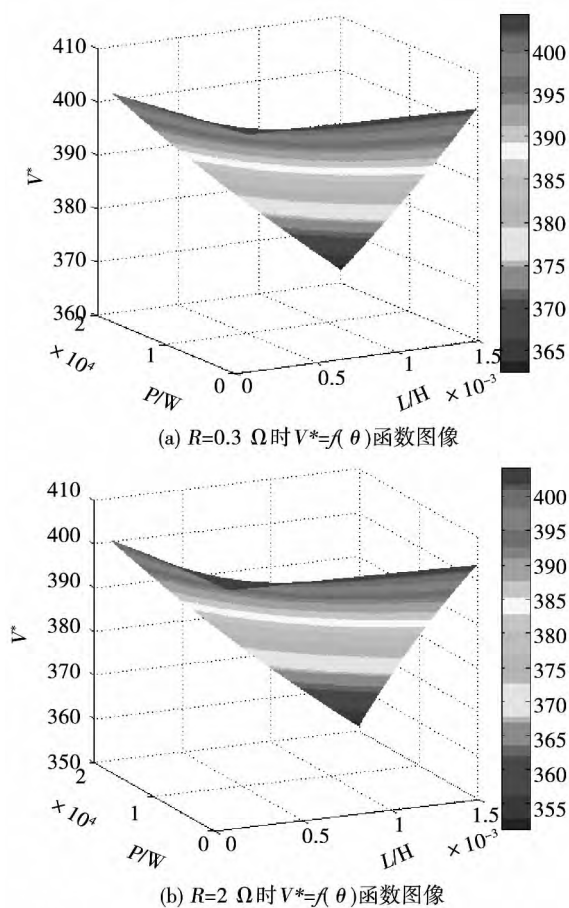


图7 V^* 幅值随主电路参数变化图

Fig.7 V^* values change map with the main circuit parameters

从图4中各相量之间的关系同样可以得到交流侧电压幅值的计算公式为

$$V = \frac{V_L}{\sin\theta} \quad (10)$$

定义通用电压矢量为

$$U_s = \frac{2}{3}(U_a + U_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + U_c e^{-j\frac{2\pi}{3}}) = U_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (11)$$

可以进一步得到交流侧电压幅值的计算公式为

$$V = \frac{\omega L I_m}{\sin\theta} = \frac{2\omega L P}{3U_m \sin(\arctan \frac{2\omega L P}{3U_m^2 - 2RP})} \quad (12)$$

采用图5中所使用的主电路参数,根据式(12)绘制得到的 V 函数图像如图8所示。

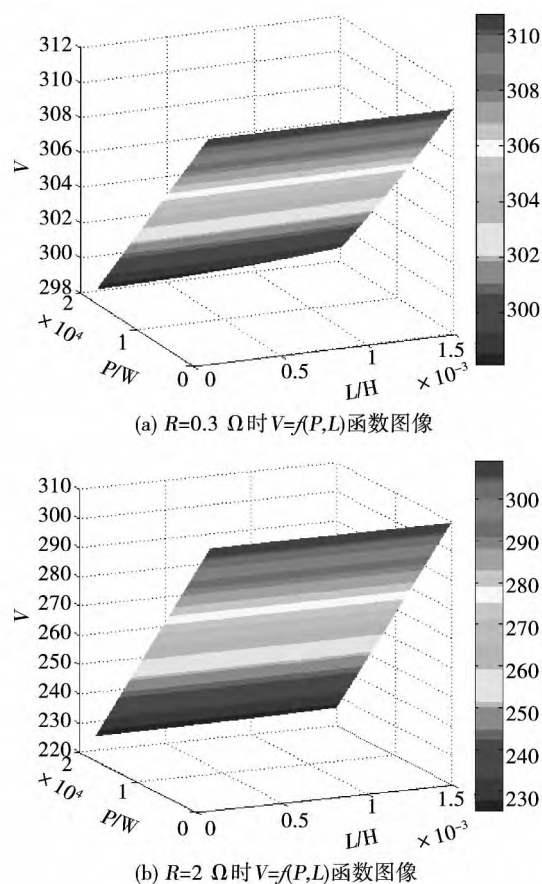


图8 V 幅值随主电路参数变化图

Fig.8 V values change map with the main circuit parameters

通过图8与图7的对比可知,相同条件下 V^* 的幅值明显要比 V 的幅值大,因此在正常的主电路参数下,当VIENNA整流器工作在单位功率因数工况下时,矢量 V 与矢量 I 所处电流区间不同的情况只

可能发生在矢量 V 处于 A1、C1 两个小扇区的时候。

综上所述,在进行基于 SVPWM 的 VIENNA 整流器控制系统设计时,无需进行交流侧电流矢量 I 的区间判断。以扇区一为例:当输入端电压矢量 V 位于小扇区 B 时,矢量 I 位于区间 I;矢量 V 位于小扇区 A2、C2 和 D 时,矢量 I 位于区间 II;矢量 V 位于小扇区 A1 和 C1 时,只需判断某一相输入电流的极性即可获得矢量 I 所处的区间,各扇区进行补充判断的具体关系如表 1 所示。

VIENNA 整流器 SVPWM 控制流程如图 9(a) 所示,脉冲序列判断逻辑以扇区一为例如图 9(b) 所示。

表 1 补充判断关系
Table 1 Supplemental judgment relations

所在扇区	相电流 I_i	$I_i > 0$ 所在区间	$I_i < 0$ 所在区间
一	I_b	II	I
二	I_a	II	III
三	I_c	IV	III
四	I_b	IV	V
五	I_a	VI	V
六	I_c	VI	I

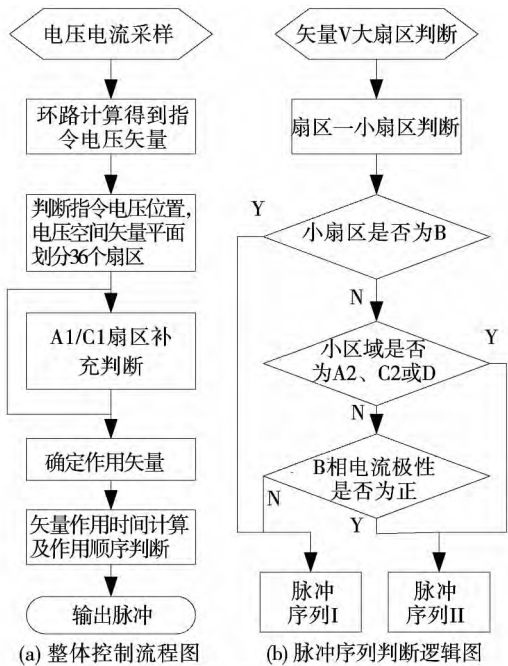


图 9 指令电压辅助区间判断 VIENNA 整流器 SVPWM 控制流程图及扇区一脉冲序列判断逻辑

Fig. 9 Flowchart of VIENNA rectifier control with reference voltage assisted sector judgment based SVPWM and pulse sequence judgment logic of sector one

将图 9 与图 3 中的控制流程进行对比,可以看出图 9 中的方法减少了电流矢量的区间判断过程,同时由于对矢量平面进行了进一步细分,所以对交流侧电流的控制分辨率更高。

对于直流侧电压以及电容中点电位平衡的控制,本方法与常规三电平 SVPWM 控制方法相同,不再赘述。

4 系统实验验证

为了验证本文论述的指令电压辅助区间判断的 VIENNA 整流器 SVPWM 控制方法的正确性,搭建了一套三相三线制、基于 DSP28335 的数字控制实验平台,其主电路参数如表 2 所示。

表 2 主电路参数
Table 2 Main circuit parameters

参数	数值
输入电压/V	线电压有效值 380
输出电压/V	700
开关频率/kHz	30
输出功率/W	4 900
输入电感/ μ H	600
输出电容/ μ F	3 200

实验平台的输入为本地电网,系统实验结果及输入电流谐波分析如图 11 所示。

图 11 中的实验结果表明,本文所论述的控制方法能够很好的实现 VIENNA 整流器的单位功率因数控制。

从图 11(a) 中可以看出,电流波形整体平滑,说明进行 SVPWM 调制过程中,在电流区间进行切换时输入电流和输出电压依然保持稳定,验证了本文提出的区间判断方法。在直接接入本地电网的输入条件下,各相输入电流都实现了正弦化,并且跟踪各相输入电压,良好的实现了 VIENNA 整流器的功能。由于输入电压三相之间存在一定的不平衡度,因此三相电流的谐波性能相互之间有所差异。

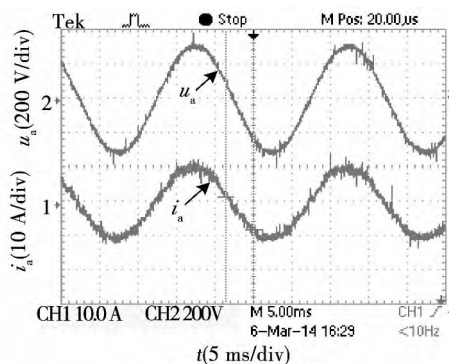
5 结 论

本文提出了一种适用于 VIENNA 整流器的指令电压辅助区间判断 SVPWM 控制方法,具有以下

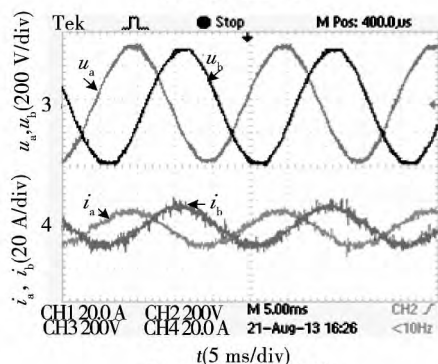
优点:

1) 无需进行输入端电流矢量的区间判断, 在进行指令电压区间判断的过程中利用其与电流矢量的位置关系完成电流区间的判断, 避免了复杂的区间判断过程, 控制系统结构简单。

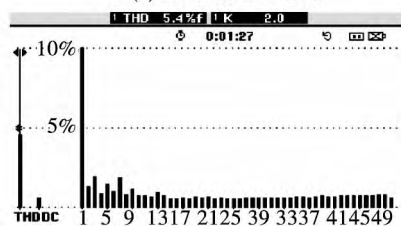
2) 将电压空间矢量平面的扇区划分从 24 个提升至 36 个, 使得电流控制分辨率更高。



(a) A相电压电流



(b) A、B相电压电流



(c) A相谐波电流柱状图

Amp	L1	L2	L3
THD%f	4.6	5.2	6.6
H3%f	2.5	3.5	5.3
H5%f	1.5	1.5	1.3
H7%f	2.1	1.7	0.8
H9%f	0.8	1.4	1.7
H11%f	1.0	1.1	0.7
H13%f	1.2	0.6	1.0
H15%f	0.8	0.6	1.0

(d) A、B、C三相电流谐波含量

图 11 实验结果

Fig. 11 Experimental results

但是本文所提出的控制方法仅适用于单位功率

因数的整流工况, 在其他特殊工况下, 如使用 VIENNA 整流器进行无功功率补偿, 则仍需采用传统 SVPWM 控制。

本文所提出的控制方法可广泛应用于各类开关电源中的输入整流模块, 如通信电源、电动汽车充电机等。

参考文献:

- [1] Bor-Ren Lin. Analysis and implementation of a three-level PWM rectifier/inverter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 948-956.
- [2] ZHAO Yifan, LI Yue, LIPO T. Force commutated three level boost type rectifier [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(1): 155-161.
- [3] 张东升, 张东来, 王陶, 等. 三电平整流器的 PFC 及中点平衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 81-86.
- [4] ZHANG Dongsheng, ZHANG Donglai, WANG Tao, et al. PFC and neutral point balanced control method of three-level rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 81-86.
- [5] SCHWEIZER M, FRIEDLI T, KOLAR J. Comparative evaluation of advanced three-phase three-level inverter/converter topologies against two-level systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5515-5527.
- [6] KOLAR J, ZACH F. A novel three-phase utility interface minimizing line current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(4): 456-467.
- [7] BURGOS R, LAI Rixin, PEI Yunqing, et al. Space vector modulator for vienna-type rectifiers based on the equivalence between two- and three-level converters: a carrier-based implementation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1888-1898.
- [8] KOLAR J, FRIEDLI T. The essence of three-phase PFC rectifier systems [C]//Telecommunication Energy Conference (IN-TELEC), October 9-13, 2011, Amsterdam, 2011: 1-27.
- [9] 宋文胜, 冯晓云, 蒋威. 一种单相三电平中点钳位整流器的 SVPWM 控制方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(7): 69-73.
- [10] SONG Wensheng, FENG Xiaoyun, JIANG Wei. A SVPWM method for single phase three-level NPC voltage-source rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(7): 69-73.
- [11] BOTAO M, LIU Congwei, ZHANG Yang, et al. New SVPWM control scheme for three-phase diode clamping multilevel inverter with balanced DC voltages [C]//IEEE 2002 28th Annual Conference

- of the Industrial Electronics Society ,November 5 – 8 ,2002 ,IEEE , 2002: 903 – 907.
- [10] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [11] BURGOS R ,LAI R ,ROSADO S ,et al. A full frequency range average model for Vienna-type rectifiers [C]//Power Electronics Specialists Conference ,June 15 – 19 ,2008 ,Rhodes ,IEEE. 2008: 4495 – 4502.
- [12] RAJAEI A ,MOHAMADIAN M ,YAZDIAN Varjani V. Vienna-rectifier-based direct torque control of PMSG for wind energy application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics ,2013 , 60(7) : 2919 – 2929.
- [13] RAM V ,DINESH C ,VENKATRAMANAN C ,et al. A study of squirrel cage induction generator using a prototype Vienna rectifier providing variable and constant input voltage [C]//Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS) ,April 10 – 12 , 2013 ,Nagercoil ,IEEE. 2013: 891 – 895.
- [14] Jae-Hyeong Suh ,Chang-Ho Choi ,Dong-seok Hyun. A new simplified space-vector PWM method for three-level inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics ,2001 ,16 (4) : 545 – 550.
- [15] LOPEZ O ,ALVAREZ J ,Doval-Gandoy J ,et al. Multilevel multi-phase space vector PWM algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics ,2008 ,55(5) : 1933 – 1942.

(编辑: 刘琳琳)