

# 基于空间矢量调制的 Vienna 电路控制研究

李寅飞, 张 军, 郑常宝

(1.安徽大学, 电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601; 2.教育部电能质量工程研究中心, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**针对三电平整流器存在开关损耗大、控制复杂的问题, 提出一种基于空间矢量调制(SVM)的三相三电平(Vienna)电路控制策略。通过分析 Vienna 整流器的工作原理, 研究了电路的空间矢量分布, 且详细给出 Vienna 电路的 SVM 实现策略及中点电压平衡策略。Matlab 仿真表明, 基于 SVM 策略的 Vienna 电路控制简单, 具有良好的动、静态特性, 交流侧电流保持了良好的正弦度, 且可实现单位功率因数运行。

**关键词:**整流器; 空间矢量调制; 中点电压平衡

中图分类号: TM461

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2013)12-0087-03

## Research on Vienna Circuit Control Based on Space Vector Modulation

LI Yin-fei, ZHANG Jun, ZHENG Chang-bao

(1. Anhui University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** In view of problems of big switching loss and complex control of three-level rectifier, the paper proposes a control strategy of three-phase three-level(Vienna) circuit based on space vector modulation(SVM). By analyzing the working principle of Vienna rectifier, the circuit of space vector distribution is studied, and the strategy of SVM and neutral-point potential balance is given. The Matlab simulation shows that Vienna circuit based on SVM strategy has simple control, good dynamic and static performance, the AC current keeps a good sine degree, and the circuit can realize unit power factor operation.

**Keywords:** rectifier; space vector modulation; neutral-point potential balance

**Foundation Project:** Supported by the Key Research Project From Education Department of Anhui Province (No. KJ2011A024)

## 1 引言

随着电力电子技术的飞速发展, 人们对电能质量的要求越来越高, 高压大功率变流器已广泛应用于工业场合, 其前端整流器的性能直接影响变流器整体的控制效果<sup>[1]</sup>。Vienna 整流器具有控制简单, 开关耐压要求低, 功率密度高及电流谐波小等特点, 它在三相功率因数校正(PFC)中有明显优势和很大的发展潜力, 而 SVM 具有利于数字实现, 控制策略灵活的优势, 具有良好的研究和发展前景<sup>[2]</sup>。所介绍的基于 SVM 的 Vienna 整流器与传统二电平 PWM 整流器相比, 采用相同的开关器件, 每个开关器件所承受的电压仅为直流母线电压的一半; 与三电平整流器相比, 所需的功率开关器件仅为三电平整流器的一半, 降低了开关损耗和控制复杂度, 进而提高了整流器可靠性<sup>[3]</sup>。

## 2 主电路原理

图 1 示出 Vienna 的主电路拓扑, 图中  $S_i (i=a, b, c)$  为双向开关, 由此可列写电路方程<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} u_i = L di_i/dt + Ri_i + u_{iO} + u_{ON} \\ C_1 dU_{C1}/dt = \sum_{i=a,b,c} (1-s_i) \text{sign}(i_i) i_i - I_o \\ C_2 dU_{C2}/dt = \sum_{i=a,b,c} (1-s_i) \text{sign}(i_i) i_i - I_o \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_{C1}, U_{C2}$  为电容  $C_1, C_2$  电压,  $U_{C1} = U_{C2} = U_{dc}/2$ ,  $U_{dc}$  为直流母线电压;  $u_{iO} = (1-s_i) \text{sign}(i_i) U_{dc}/2$ ;  $S_i$  开通时,  $s_i = 1$ ,  $S_i$  关断时,  $s_i = 0$ ;  $i_i > 0$  时,  $\text{sign}(i_i) = 1$ ,  $i_i < 0$  时,  $\text{sign}(i_i) = -1$ 。

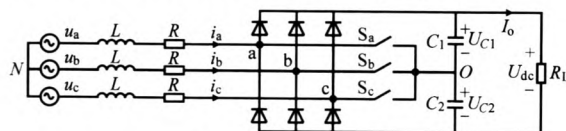


图 1 Vienna 主电路

Fig. 1 The main circuit of Vienna

## 3 空间矢量控制策略分析

### 3.1 矢量分布

根据三相平衡电网交流电压、电流之和为零的特性, 可推导出:

基金项目: 安徽省教育厅重点科研项目(KJ2011A024)

定稿日期: 2013-09-30

作者简介: 李寅飞(1986-), 男, 安徽寿县人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术和电能质量分析与控制。

$$u_{0N}=(-U_{dc}/6) \sum_{i=a,b,c} (1-s_i) \text{sign}(i_i) \tag{2}$$

由  $u_{in}=u_{i0}+u_{0N}$  可得出 Vienna 电路的空间矢量分布,如图 2 所示。

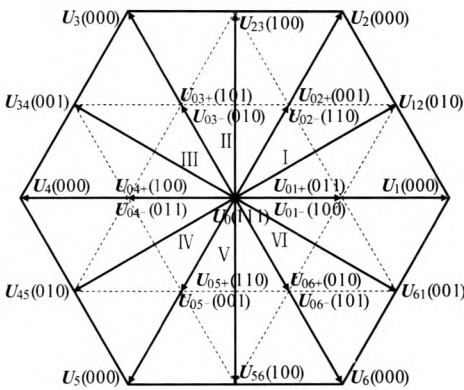


图 2 Vienna 矢量分布图  
Fig. 2 Diagram of Vienna vector distribution

图 2 中 3 个开关的 8 个组合可在不同的区间得到 25 个向量,其中  $U_0(1\ 1\ 1)$  为零向量,  $U_{01-} \sim U_{06-}$  和  $U_{01+} \sim U_{06+}$  的模均为  $U_{dc}/3$ ,  $U_1 \sim U_6$  的模为  $2U_{dc}/3$ ,  $U_{12} \sim U_{61}$  的模为  $\sqrt{3}U_{dc}/3$ ,  $U_1 \sim U_6$  将整个区域分为 6 个扇区。

3.2 矢量合成和作用时间计算

由于二极管的单向特性,在每个扇区根据相电流的流向有的矢量是冗余矢量,故每个区间应继续划分以实现矢量调制。给定任意参考矢量,经坐标变换可得两相静止坐标系下  $U_\alpha$  和  $U_\beta$  的值,且由三角关系可求出其在相应的两相邻向量  $U_i$  和  $U_{i+1}$  上的投影值  $DX$  和  $DY$ ,令:  $X=2\sqrt{3}U_\beta/3$ ,  $Y=U_\alpha+\sqrt{3}U_\beta/3$ ,  $Z=-U_\alpha+\sqrt{3}U_\beta/3$ 。由此可得各主扇区内参考矢量在相邻两矢量上的投影,见表 1。

表 1 矢量投影表  
Table 1 Table of vector projection

	$U_1, U_2$	$U_2, U_3$	$U_3, U_4$	$U_4, U_5$	$U_5, U_6$	$U_6, U_1$
$DX$	$-Z$	$Y$	$X$	$Z$	$-Y$	$-X$
$DY$	$X$	$Z$	$-Y$	$-X$	$-Z$	$Y$

由此继续对每个主扇区进行子扇区划分,计算作用时间,以主扇区 I 为例,如图 3 所示。

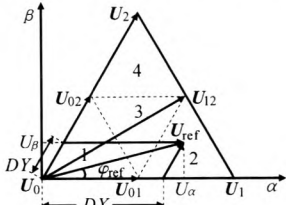


图 3 主扇区 I 的矢量合成  
Fig. 3 Vector synthesis of main sector I

再令:  $dx=DX/(U_{dc}/3)$ ,  $dy=DY/(U_{dc}/3)$ , 则可由下式判断每个主扇区中小扇区的分配。

$$\text{sub}=\begin{cases} 1, & dx+dy \leq 1 \\ 2, & dx > 1 \\ 3, & dx+dy > 1 \text{ 且 } dx \leq 1, dy \leq 1 \\ 4, & dy > 1 \end{cases} \tag{3}$$

每个子扇区用其相邻 3 个矢量合成,则扇区 I 的矢量合成分配如表 2 所示。

表 2 各子扇区矢量合成分配  
Table 2 Vector synthesis distribution of each sub sector

1		2		3		4	
$U_i$	$di$	$U_i$	$di$	$U_i$	$di$	$U_i$	$di$
$U_{01}$	$dx$	$U_1$	$dx-1$	$U_{02}$	$1-dx$	$U_2$	$dy-1$
$U_{02}$	$dy$	$U_{12}$	$dy$	$U_{01}$	$1-dy$	$U_{12}$	$dx$
$U_0$	$1-dx-dy$	$U_{01}$	$2-dx-dy$	$U_{12}$	$dx+dy-1$	$U_{02}$	$2-dx-dy$

在 4 个子扇区中子扇区 1,3 需要结合参考矢量运行的角度  $\varphi_{ref}$  来进行矢量合成,当  $\varphi_{ref} < \pi/6$  时, b 相电流  $i_b < 0$ ,  $U_{02}$  只能取  $U_{02-}$ ; 当  $\varphi_{ref} > \pi/6$  时,  $i_b > 0$ ,  $U_{01}$  只能取  $U_{01+}$ ,合成矢量时在每个矢量变化过程中每一次使开关管只有一个动作,这样有利于降低开关损耗。载波采取对称的三角波进行比较,由此可得扇区 I 的矢量序列如表 3 所示,每个开关周期的占空比,即可得到时间。其他的区间矢量合成和作用时间以此类推可得到。

表 3 扇区 I 子扇区 1 的矢量序列  
Table 3 Vector sequence of sector I sub sector 1

$i_b < 0$	矢量	$U_{01-}$	$U_{02-}$	$U_0$	$U_{01+}$	$U_0$	$U_{02-}$	$U_{01-}$
	$s_a$	1	1	1	0	1	1	1
	$s_b$	0	1	1	1	1	1	0
	$s_c$	0	0	1	1	1	0	0
$i_b > 0$	矢量	$U_{02-}$	$U_0$	$U_{01+}$	$U_{02+}$	$U_{01+}$	$U_0$	$U_{02-}$
	$s_a$	1	1	0	0	0	1	1
	$s_b$	1	1	1	0	1	1	1
	$s_c$	0	1	1	1	1	1	0

3.3 电容均压策略

由表 3 的矢量分配可见,每次合成中均有  $U_{0x}$ ,且被分解为  $U_{0x-}$  和  $U_{0x+}$ ,由电路分析可知  $U_{0x-}$  均对  $C_2$  充电,  $U_{0x+}$  均对  $C_1$  充电,所以调节  $U_{0x-}$  和  $U_{0x+}$  的作用时间  $T_{U_{0x-}}$  和  $T_{U_{0x+}}$  可达到对两电容均压的目的,现在引入加权量  $r(-1 < r < 1)$ ,可得:

$$T_{U_{0x-}} = \frac{(1-r)}{2} T_{U_{0x}}, \quad T_{U_{0x+}} = \frac{(1+r)}{2} T_{U_{0x}} \tag{4}$$

$T_{U_{0x}}$  为  $U_{0x}$  的作用时间,两电容的电压差做调节即可得到  $r$ ,达到均压目的。

## 4 仿真和实验

基于以上分析搭建 Matlab 仿真平台,主电路滤波电感 2 mH,电容为两个 2.3 mF 电容串联,电压外环与电流内环均为 PI 调节。开关频率 10 kHz,  $U_{dc}=800$  V。带 50  $\Omega$  负载时 a 相电流谐波含量为 1.82%;带 100  $\Omega$  负载时为 3.8%。图 4 示出直流电压和中性点与交流侧 a 相电压仿真波形。

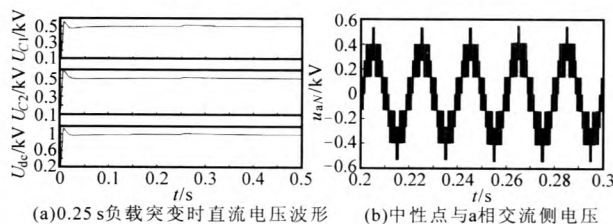


图 4 仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms

由仿真结果可知,Vienna 电路交流侧输入电流谐波很小,THD 较小,但 THD 会随负载增加而相应变大。在直流侧  $U_{dc}$  能快速稳定并保持不变,具有良好的动、静态特性,且交流侧电流可保持良好的正弦度,其相电压与电流波形几乎同相位,实现了单位功率因数整流。

根据以上理论分析,选取 TMS320F2812 作为控制芯片,主要实验参数如下:主电路电感选取为 4 mH,电容为两个 3.9 mF 串联,  $U_{dc}=800$  V,  $U_{C1}=U_{C2}=400$  V,开关频率设置为 15 kHz,负载为 100  $\Omega$  电阻,额定功率为 6 kW。图 5 示出实验波形。图 5a 为额定功率下 a 相电压、电流波形,由图可见,功率因数接近 1。图 5b 为由空载到带载的直流电压和 a 相电流波形。

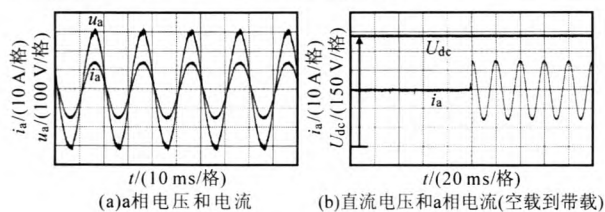


图 5 实验波形

Fig. 5 Experimental waveforms

## 5 结论

通过对 Vienna 电路的工作原理和空间矢量控制策略的分析,给出 Vienna 电路的矢量控制策略和中点电压平衡策略。通过仿真验证实验的可行性,并搭建电路样机进行实验,对该控制方法在稳态和负载突变的条件下进行分析,可知其电路控制简单,具有良好的动、静态特性,且可实现单位功率因数运行。因此在中大功率三相功率因数校正的应用场合有着重要的研究意义。

## 参考文献

- [1] Stankovicav, Lipota. A Novel Control Method for Input Output Harmonic Elimination of the PWM Boost Type Rectifier Under Unbalanced Operating Condition[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2001, 16(5): 601-611.
- [2] 张东升. 高功率因数 VIENNA 整流器控制策略的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [3] 刘平, 陈希有. 三相三电平 VIENNA 整流器的仿真分析[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2006, 23(6): 47-51.
- [4] Ligao He, Xinbing Chen. A Neutral Point Potential Balance Control Strategy Based on Vector Controlled Vienna Rectifier[A]. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)[C]. 2010: 2060-2065.

(上接第 86 页)

此处提出的三相两相混合导通法不仅能快速有效地检测出转子初始位置,且估计误差亦在  $\pm 15^\circ$  电角度以内,可满足直驱永磁风力发电机起动要求。

## 5 结论

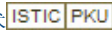
从直驱永磁风力发电机无传感器控制的磁链位置观测与初始位置检测技术入手,对现有转子初始位置检测方法存在的问题进行分析,研究出基于带坐标变换的饱和反馈双积分器磁链位置积分器和基于低通滤波补偿积分器磁链位置积分器无传感器控制技术均适用于直驱永磁风力发电系统,并在此基础上提出使用三相两相混合导通法来进行转子初始位置检测,之后进行仿真分析,并让风力发电机运行于低转速状态,在直驱永磁风

力发电机对拖实验平台进行实验。最终验证了该理论研究的正确性和实用性,并且该方法成本低、实施方便,值得推广。

## 参考文献

- [1] 谢宝昌. 兆瓦级风力发电机综述[J]. 电机与控制应用, 2007, 34(2): 1-4.
- [2] H Li, Z Chen. Overview of Different Wind Generator Systems and Their Comparisons[J]. IET Renewable Power Generation, 2008, 2(2): 123-138.
- [3] M Liserre, R Cardenas, M Molinas, et al. Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1081-1095.
- [4] 薛玉石, 韩力, 李辉. 直驱永磁同步风力发电机组研究现状与发展前景[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(4): 1-5, 21.

# 基于空间矢量调制的Vienna电路控制研究

作者: [李寅飞](#), [张军](#), [郑常宝](#), [LI Yin-fei](#), [ZHANG Jun](#), [ZHENG Chang-bao](#)  
作者单位: [李寅飞, 郑常宝, ZHANG Jun, ZHENG Chang-bao \(安徽大学, 电气工程与自动化学院, 安徽合肥230601\)](#), [张军, LI Yin-fei \(教育部电能质量工程研究中心, 安徽合肥, 230601\)](#)  
刊名: [电力电子技术](#)   
英文刊名: [Power Electronics](#)  
年, 卷(期): 2013, 47 (12)  
被引用次数: 1次

## 参考文献(4条)

1. [Stankovicav;Lipota A Novel Control Method for Input Output Harmonic Elimination of the PWM Boost Type Rectifier Under Unbalanced Operating Condition](#) 2001 (05)
2. [张东升 高功率因数VIENNA整流器控制策略的研究](#)[学位论文] 2009
3. [刘平, 陈希有 三相电平VIENNA整流器的仿真分析](#)[期刊论文]-[哈尔滨师范大学自然科学学报](#) 2006 (6)
4. [Ligao He;Xinbing Chen A Neutral Point Potential Balance Control Strategy Based on Vector Controlled Vienna Rectifier](#) 2010

引用本文格式: [李寅飞](#), [张军](#), [郑常宝](#), [LI Yin-fei](#), [ZHANG Jun](#), [ZHENG Chang-bao](#) [基于空间矢量调制的Vienna电路控制研究](#)[期刊论文]-[电力电子技术](#) 2013 (12)