

基于 SVPWM 的 Vienna 整流器矢量控制策略的研究

张 豪, 侯圣语

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对传统两电平整流器和三电平整流器的不足, 在能量不需要双向流动的应用场合, 本文深入研究了一种三相三开关三电平 Vienna 整流器; 基于该整流器的拓扑结构, 分析了其基本工作原理, 提出了一种基于 SVPWM 的 Vienna 整流器的电压外环、电流内环的双闭环矢量控制策略; 最后搭建了 Vienna 整流器矢量控制仿真模型, 通过 Matlab 环境下的仿真分析, 证实了该整流器控制简单, 具有良好的动态性能和静态性能。

关键词: Vienna 整流器; 电压空间矢量脉宽调制; 矢量控制; 中点电位平衡

中图分类号: TM461 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2691 (2012) 05-0054-05

Research of vector control strategy of the Vienna rectifier based on SVPWM

ZHANG Hao, HOU Sheng-yu

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: According to the shortcomings of the traditional two-level rectifier and three-level rectifier, In the situation of the energy don't need double-way flow, Further research on the three-phase three-switch three-level Vienna rectifier in this paper; Based on the topology structure of this rectifier, analysis on its working principle, and based on the SVPWM, A vector control strategy of the Vienna rectifier was put forward, which use dual closed loop with voltage outer loop and current inner loop; Finally, the vector control simulation model of Vienna rectifier was build, through the simulation analysis in Matlab environment, The results show that the Vienna rectifier has simple control and good dynamic performance and static performance.

Key words: vienna rectifier; space vector pluse width modulation (SVPWM); vector control; neutral-point potential balance

0 引 言

传统的不控整流器 (二极管整流器) 或相控整流器 (晶闸管整流器) 在电力电子行业中得到了广泛的应用, 但由于存在深控时网侧功率低、并且向电网注入了较高的电流谐波等诸多问题, 对电网污染严重^[1]。随着对用电设备中电流谐波含量的严格限制, 以及对变换器工作在宽范围输入电压的需求, 国内外学者相继提出了许多电流

畸变低和单位功率因数的三相 PWM 整流器, 其中就包括 Vienna 整流器。

Vienna 整流器是由 Kolar 教授 1997 年提出的一种两象限中点钳位式三电平 PWM 整流器拓扑, 在能量不需要双向流动的应用场合, Vienna 整流器存在诸多优点^[2]。一方面: 与传统的两电平结构相比, 由于电平数的增加, 降低了电流的谐波畸变率 (THD) 和功率开关器件的电压应力; 另一方面: 与三电平整流器相比, 所需的功率开关器件由 12 个减少为 3 个, 减低了开关损耗、成本 and 控制的复杂度; 此外, 当功率开关器件导通时, 连接于直流母线的二极管可以阻断直通电

流,不存在输出电压桥臂直通问题,不需要设置驱动死区时间,从而进一步提高了整流器的可靠性;由于Vienna整流器存在上述诸多优点,因此,引起了国内外学者对其拓扑结构和控制策略的广泛关注。

本文首先通过Vienna整流器的拓扑结构,介绍了其基本工作原理;然后采用电压外环和电流内环的双闭环控制策略,实现了Vienna整流器良好的动、静态性能;并且针对Vienna整流器直流侧电容不平衡问题引入了小矢量调节因子 f ,实现了其直流母线中点电位平衡控制;最后,搭建了Vienna整流器矢量控制仿真模型,通过Matlab环境下的仿真分析,证实了理论分析的正确性和控制策略的有效性。

1 Vienna整流器的工作原理

Vienna整流器的拓扑结构如下图所示,它是由3个桥臂组成,其中每个桥臂包括1个可控功率开关器件(IGBT)和6个功率二极管^[3]。

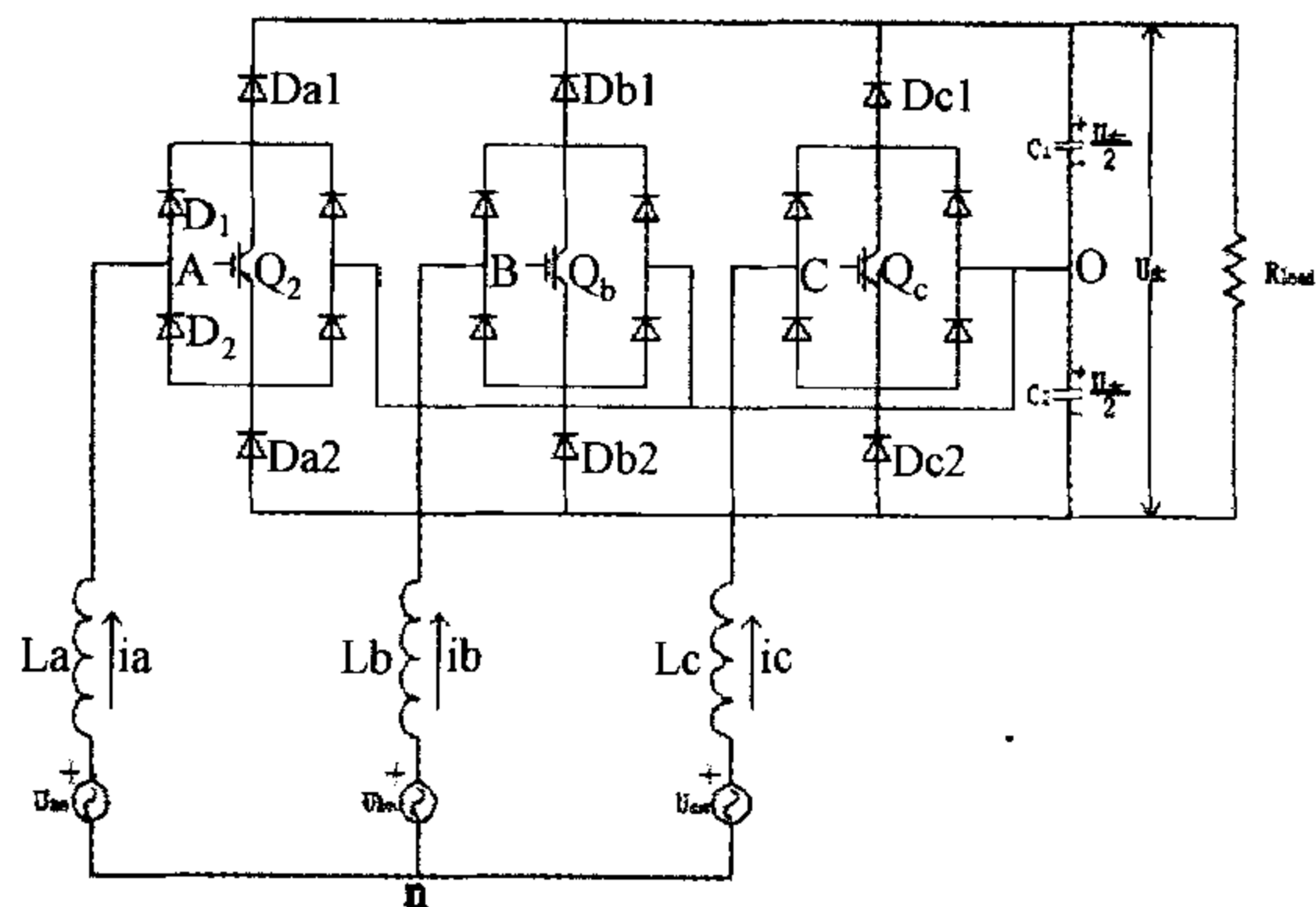


图1 Vienna整流器的拓扑结构

Fig. 1 Topology of the Vienna rectifier

下面以A相桥臂为例来分析Vienna整流器的工作原理:当功率开关器件 Q_a 开通时,整流器的A相输入端电压被钳位于直流母线中点,此时输入端电压 $U_a = 0$,如下图2(a)、(b)所示;当功率开关器件 Q_a 关断时,整流器A相输入端电压为 $U_{dc}/2$ 或 $-U_{dc}/2$,此时A相输入端电压极性取决于A相输入电流极性:若A相输入电流极性为正,则A相输入端经 D_1 、 Da_1 后与直流母线正极相连,如下图2(c)所示,此时输入端电压 $U_a = U_{dc}/2$,若A相输入电流极性为负时,A相输入端经 D_2 、 Da_2 后与直流母线负极相连,如

下图2(d)所示,此时输入端电压 $U_a = -U_{dc}/2$ 。B、C相桥臂的分析与A相相同。

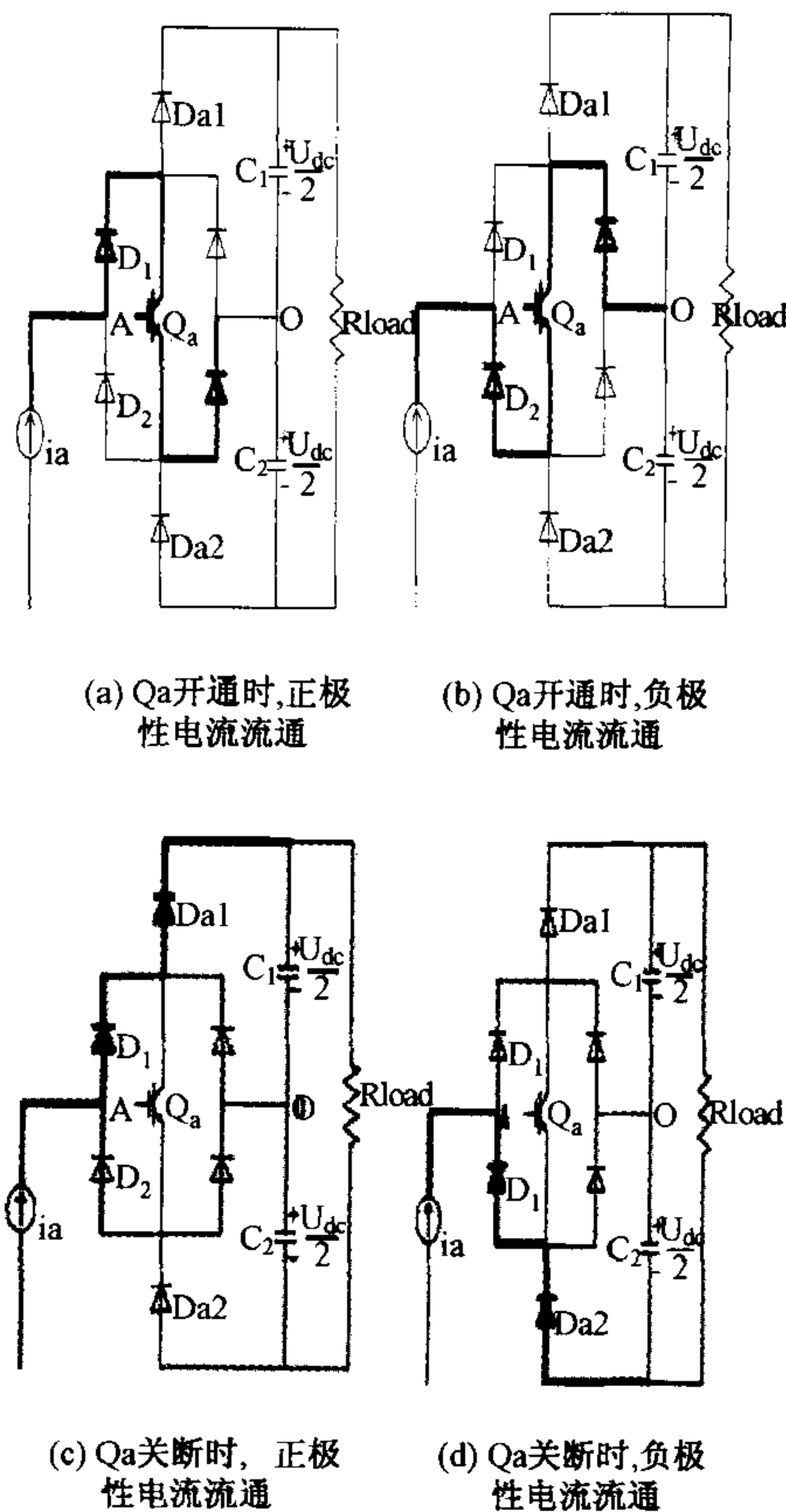


图2 A相电流流向分析

Fig. 2 Analysis on the conduction paths for phase-leg A

2 SVPWM控制策略

2.1 Vienna整流器的开关状态

以A相为例,由上文可知,Vienna整流器的A相输入端电压可以分为 $U_{dc}/2$, 0 , $-U_{dc}/2$,因此,A桥臂对应应有3个开关“1”,“0”,“-1”;依次类推,B、C两相与A相一样也具有3种开关状态,因此可以把图1的Vienna整流器拓扑结构理想简化为图3所示:

由上图3可以发现:Vienna整流器由A、B、C三相桥臂组成,并且每相桥臂有3个开关状态,总共对应27种开关状态;但由于三相电流的对称性,因此三相电流不可能同时为正或为负,即Vienna整流器没有“111”和“-1-1-1”两种开关状态,所以Vienna整流器的开关状态一共有 $27 - 2 = 25$ 种,可以产生19个不同的电压矢量^[4];Vienna电路中所有的开关状态如下图所示:

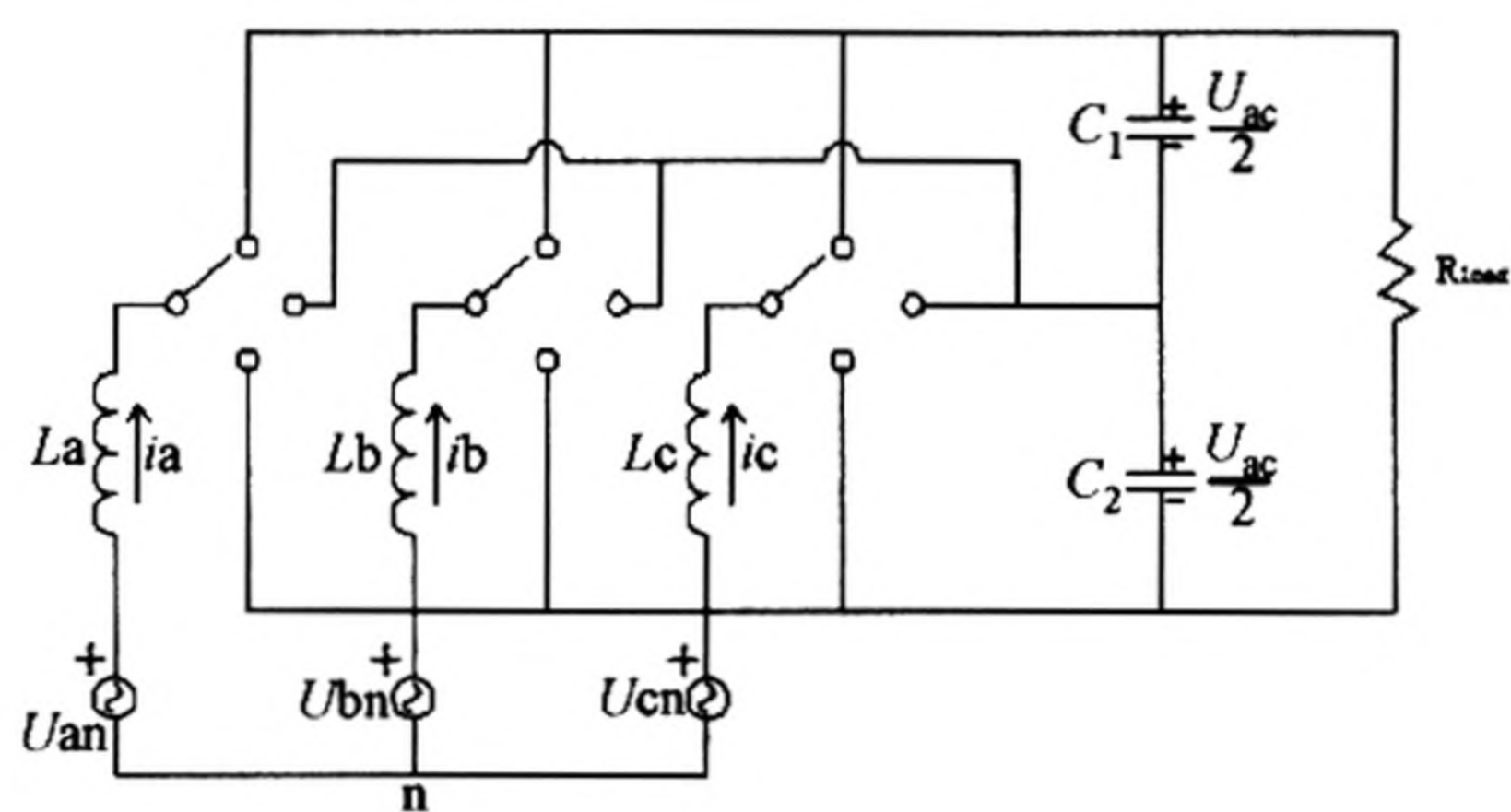


图3 Vienna整流的拓扑结构的理想简化图
Fig. 3 The ideal simple diagram for topology of the Vienna rectifier

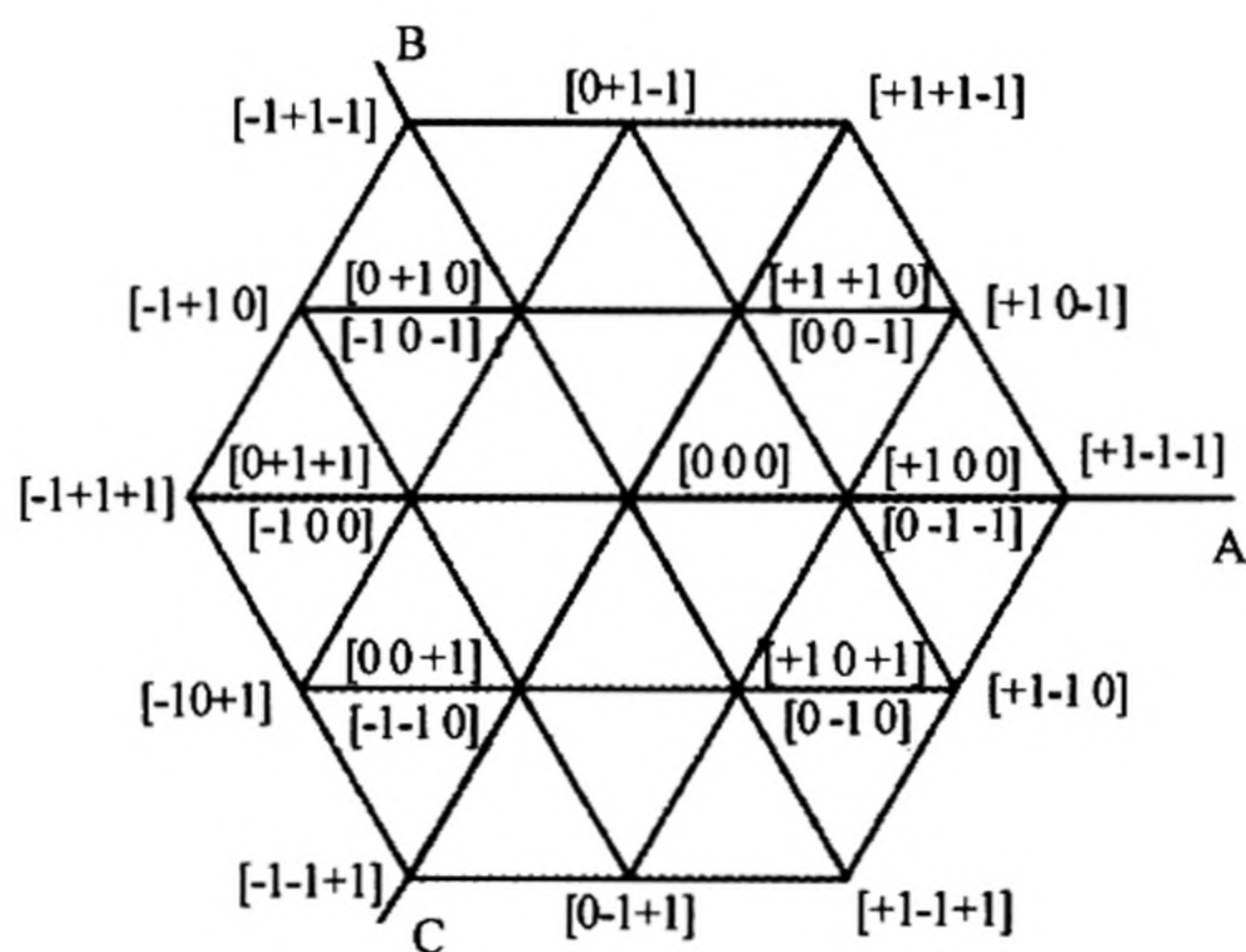


图4 Vienna整流的开关状态
Fig. 4 The switch states of the Vienna rectifier

2.2 Vienna 整流 SVPWM 脉冲调制的实现

Vienna 整流器的拓扑结构有其固有的局限性，在实现电压调制时，必须满足电压和电流矢量同极性；首先根据电流矢量的极性，可以将整个三电平大六边形平面划分成6个小扇区，记为 S_i ($i = \text{I、II、III、IV、V、VI}$)；同理，电压矢量在两电平小六边形平面中的小扇区可以记为 S_u ($u = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)；如下图5所示：

下面以第I扇区为例进行分析， $i_{\alpha\beta}$ 位于第I扇区时，电压矢量可调制的范围为图5中的阴影部分；当 $S_i = \text{I}$ 、 $S_u = 1$ 时，根据空间脉宽调制中常用的7段法，选择开关顺序为011-010-000-100-100-000-010-011（选择使中点电位降低的矢量为初始小矢量）^[5]，对应的Vienna整流器的PWM波形及作用时间如下图6所示，令 $T_a = t_p + t_z + t_c$ ， $T_b = t_p + t_z$ ， $T_c = t_p$ ，将 T_a 、 T_b 、 T_c 的值与三角载波相比较便可得到开关脉冲输出。

2.3 SVPWM 的中点点位平衡控制

中点电位平衡问题是Vienna整流器拓扑结构在应用中必须要关注的问题，如果不考虑中点电

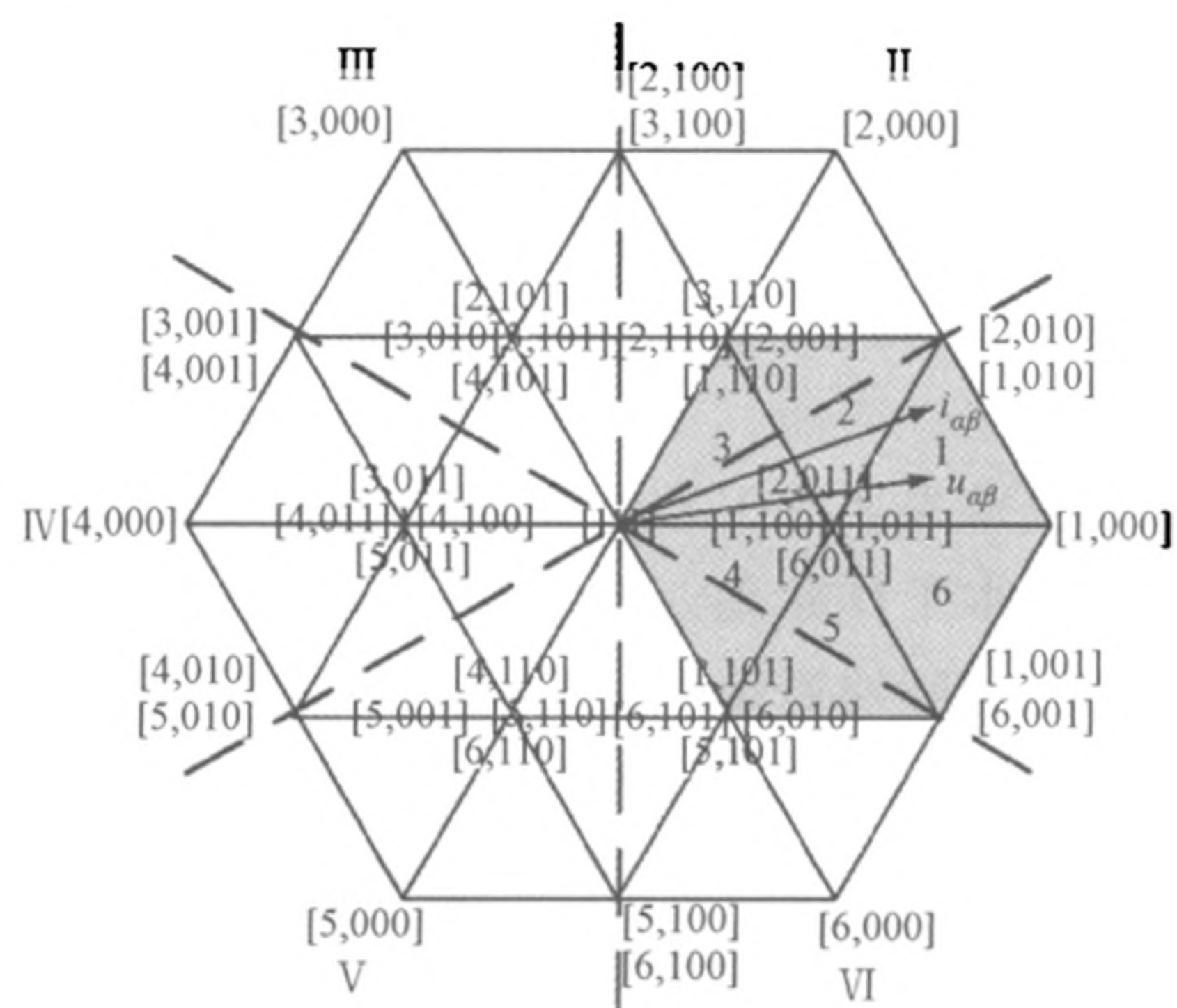


图5 Vienna整流的电压矢量
Fig. 5 The voltage vector of the Vienna rectifier

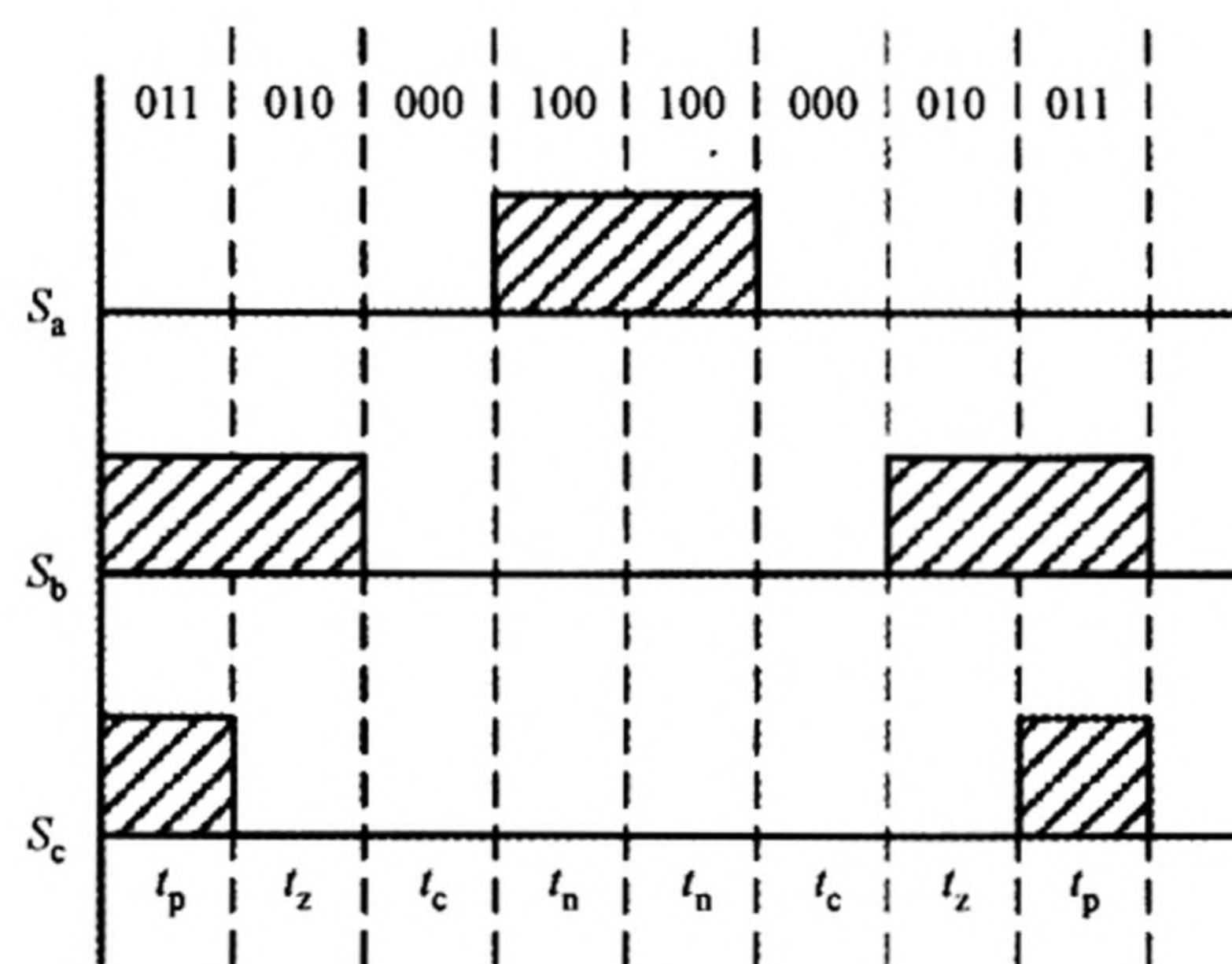


图6 Vienna整流的PWM脉冲波形
Fig. 6 The PWM pluse shape of the Vienna rectifier

压的控制，注入电网的电流谐波分量将显著增加，而且电压偏离严重时可能导致开关器件及直流侧电容承受过高电压而损坏。

在中点点位控制方面，由于大矢量和零矢量对中点电位的波动无影响；中矢量会导致中点波动，且对中点电位的影响是不可控的；而正负冗余小矢量对中点电位的影响是相反的，负小矢量使直流侧电容C1放电、C2充电，中点电位将上升，正小矢量使直流侧电容C1充电、C2放电，中点电位将下降，假设小矢量对应正、负冗余开关状态的作用时间为 t_p 、 t_n ，且 $t_p + t_n = t$ ，引入控制因子 f ($-1 \leq f \leq 1$)，使 $t_p = t \frac{1+f}{2}$ ， $t_n = t \frac{1-f}{2}$ ；根据中点电位的波动情况相应的改变控制因子 f 的大小，即重新分配正、负小矢量的作用时间，便可以有效的抑制中点电位的波动^[6-8]。

3 Vienna 整流器的矢量控制

本文设计的 Vienna 整流器矢量控制系统结构框图如下图 7 所示：

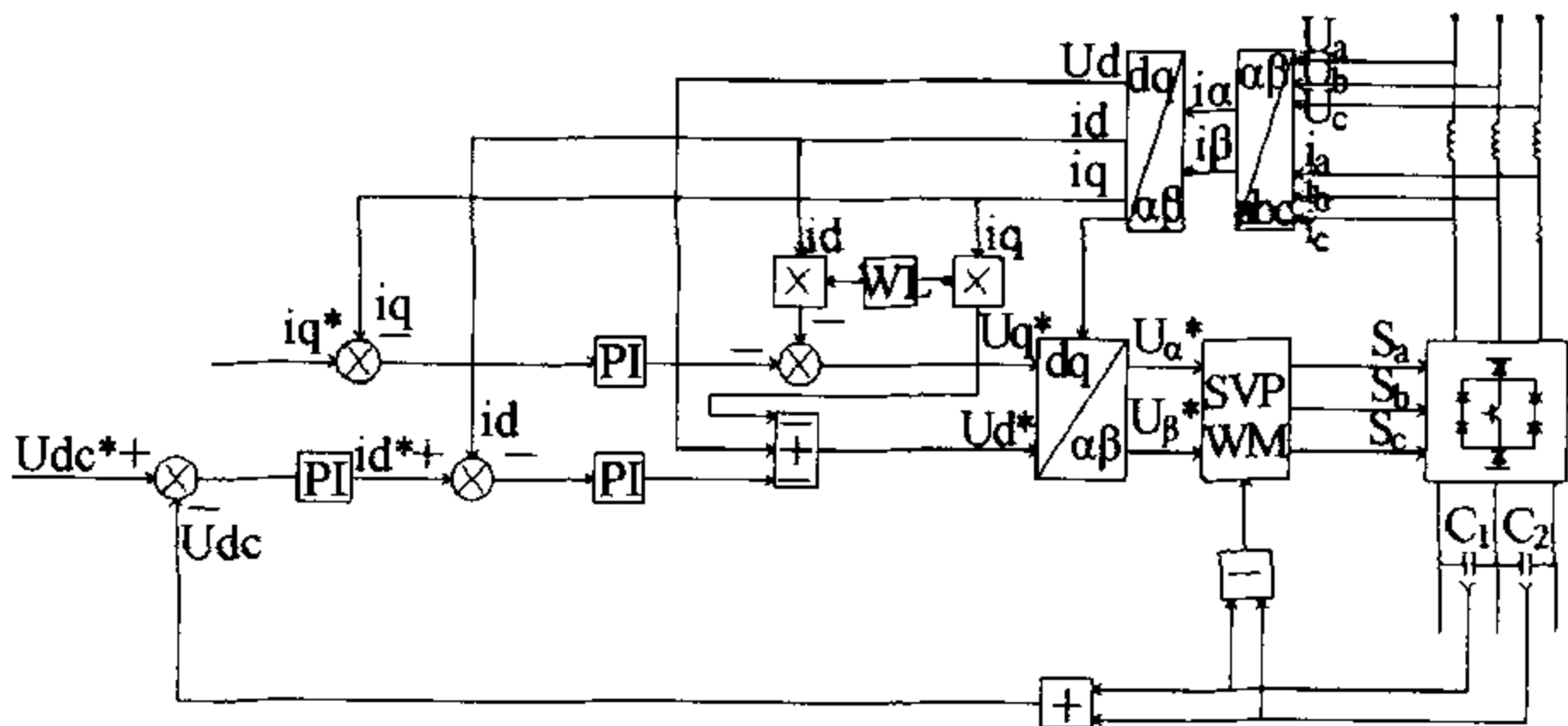


图 7 Vienna 整流器矢量控制系统框图

Fig. 7 The vector control diagram of the Vienna rectifier

如上图 7 所示：Vienna 整流器矢量控制采用电压外环，电流内环的双闭环控制策略^[9]。电压外环控制使直流母线电压保持稳定，且采样到的直流母线电压 U_{dc} 与参考电压给定值 U_{dc}^* 比较后的偏差值经过 PI 调节后作为 d 轴电流给定参考值；内环电流的控制引入 i_d 、 i_q 的前馈解耦控制，且 i_d 、 i_q 的电流环均采用 PI 调节控制，以此来实现网侧电流的正弦化，最后经 SVPWM 调制产生控制 Vienna 整流器的触发脉冲。

4 仿真结果及分析

为了验证上述理论和控制策略的正确性与可行性，基于 Matlab 的仿真平台搭建了 Vienna 整流器矢量控制仿真模型，如下图 8 所示；

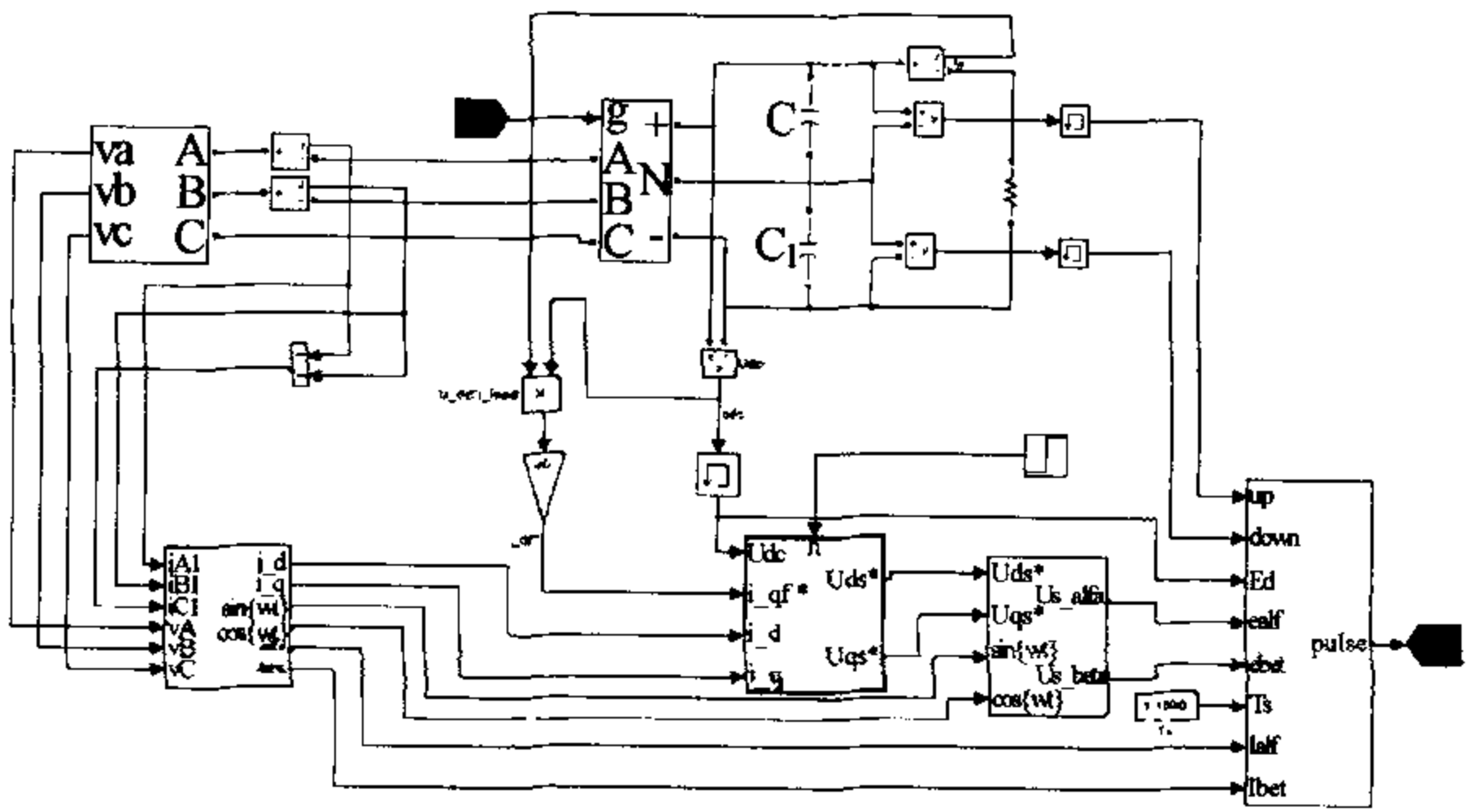


图 8 Vienna 整流器矢量控制仿真模型

Fig. 8 The simulation model for vector control of the Vienna rectifier

其中仿真模型中的主要参数如下表 1 所示：

表 1 仿真模型参数

Tab. 1 The parameter of the simulation mode

参数名称	大小
交流电源线电压/V	660
输入电阻/ Ω	0.005
输入滤波电感/mH	0.1
直流母线电压/V	1 100
直流母线电容/F	0.007
开关频率/kHz	1.5

得到的仿真波形如下图 9 ~ 13 所示：

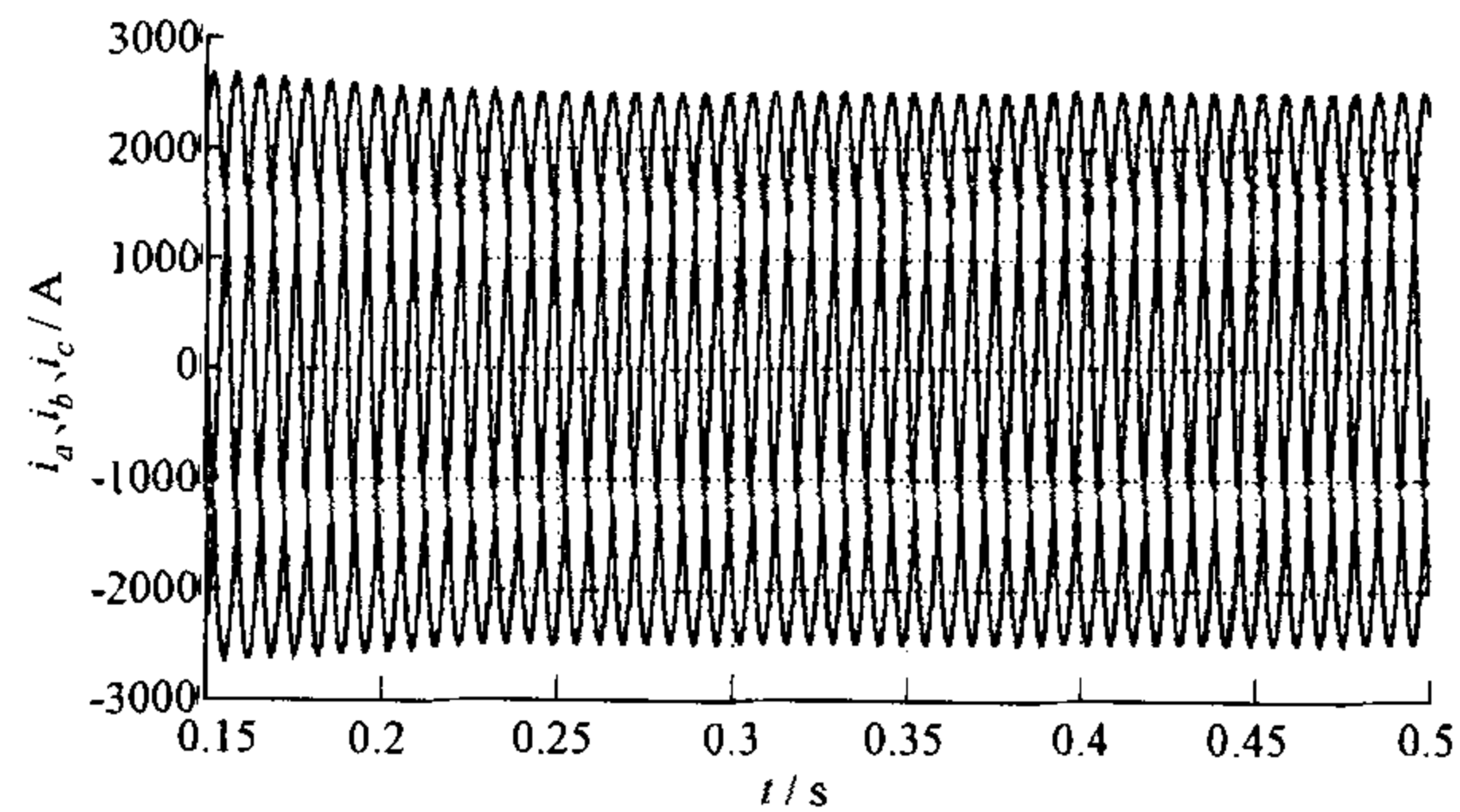


图 9 网侧三相输入电流波形

Fig. 9 The input three-phase grid-side current waveforms

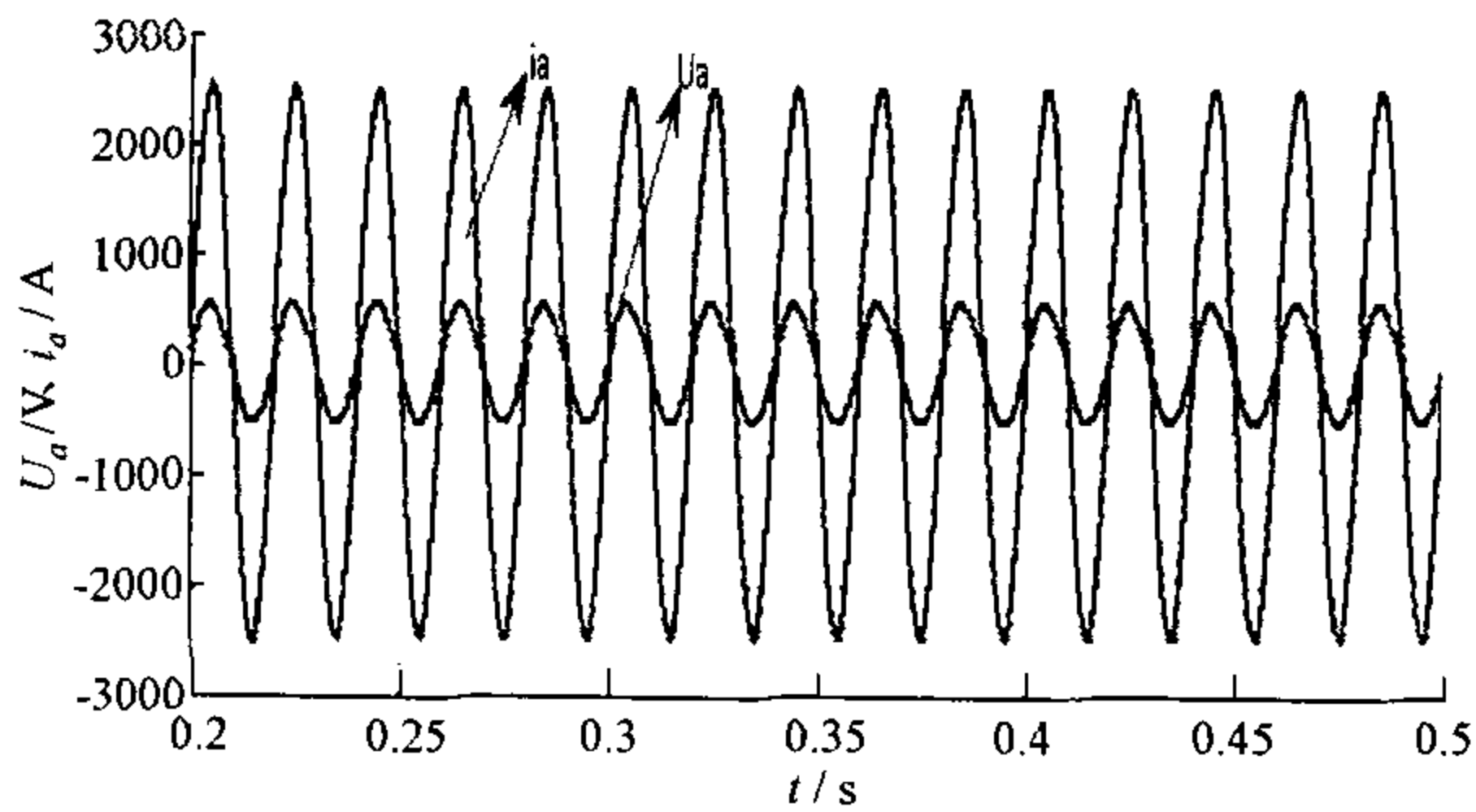


图 10 网侧 A 相输入电流与电压波形

Fig. 10 The input current and voltage waveforms of grid-side phase A

从图 9 和图 10 可以发现：网侧三相电流保持良好的正弦度，且网侧 A 相电压和电流同相位，实现了单位功率因数控制；从图 11 可以发现：直流母线电压可以快速进入稳定状态保持不变，具有良好的动、静态性能；从图 12 可以发现：直流母线中点电位波动较小，证明了本文所采取的中点点位平衡控制策略的有效性；从图 13 可以发现：网侧输入电流总的谐波畸变率为 0.44%，可见网侧输入电流谐波含量低。

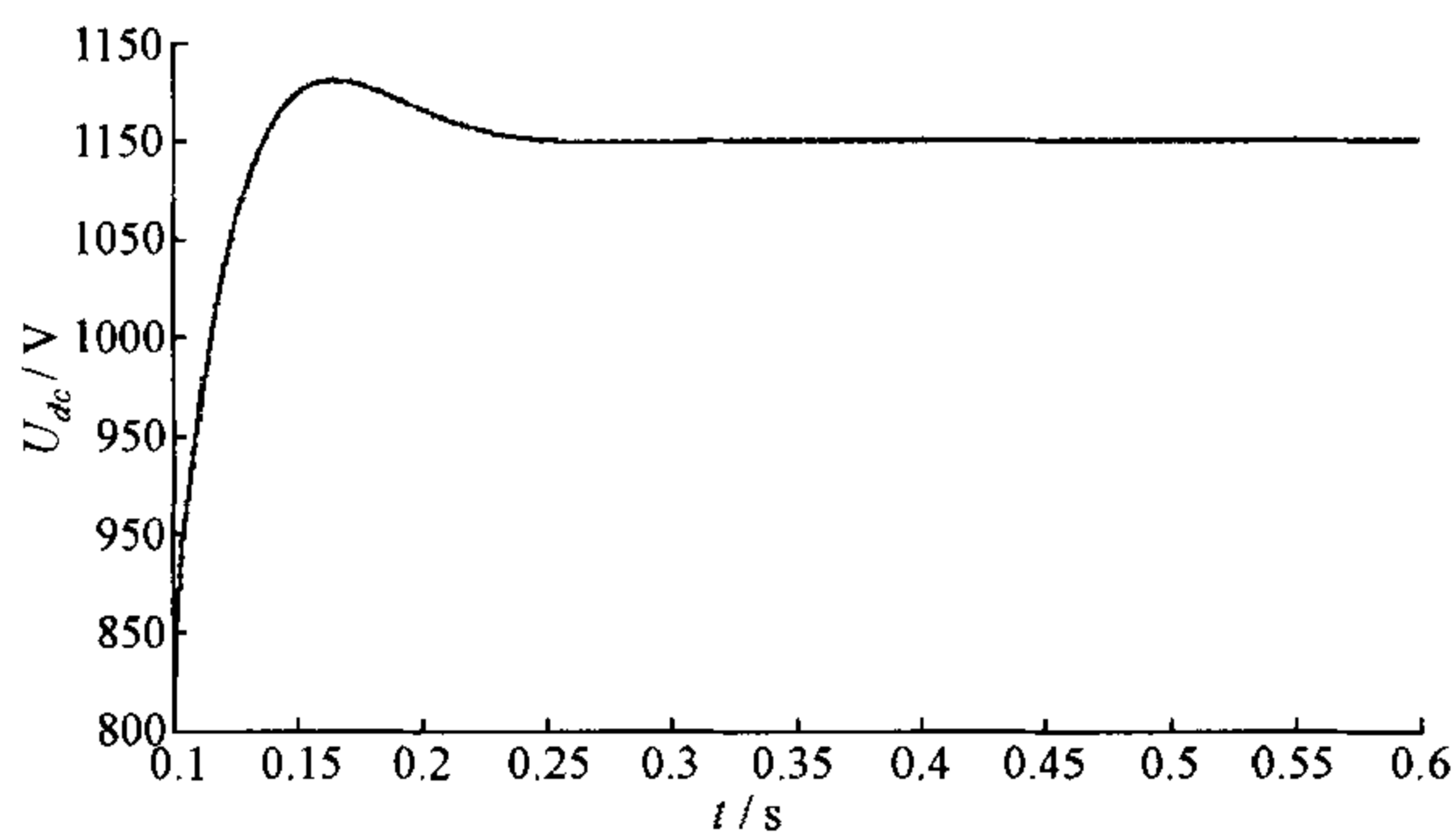


图 11 直流母线电压波形

Fig. 11 The voltage waveform of DC bus

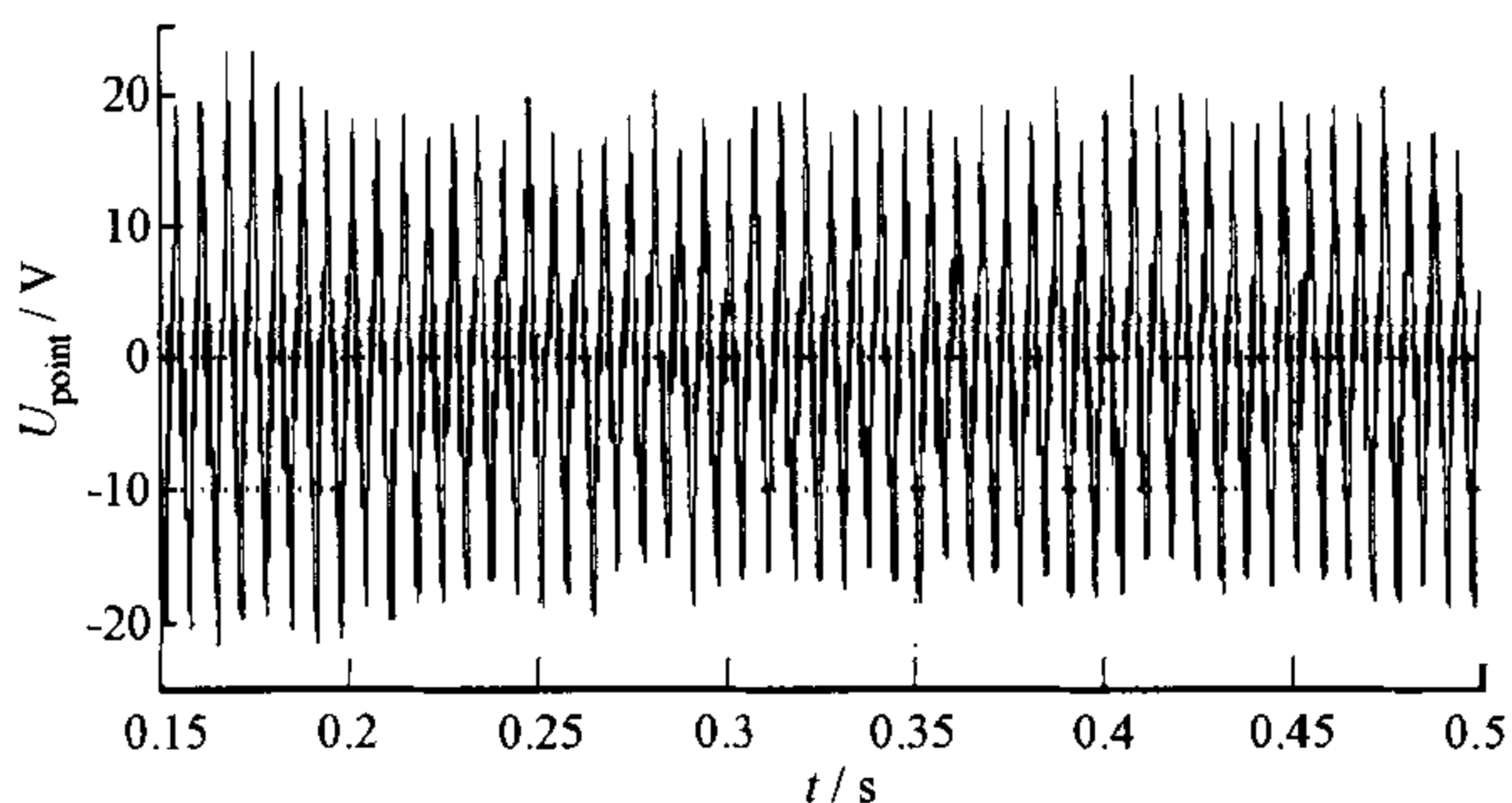


图 12 直流母线中点电位波形

Fig. 12 The waveforms for neutral-point potential of DC bus

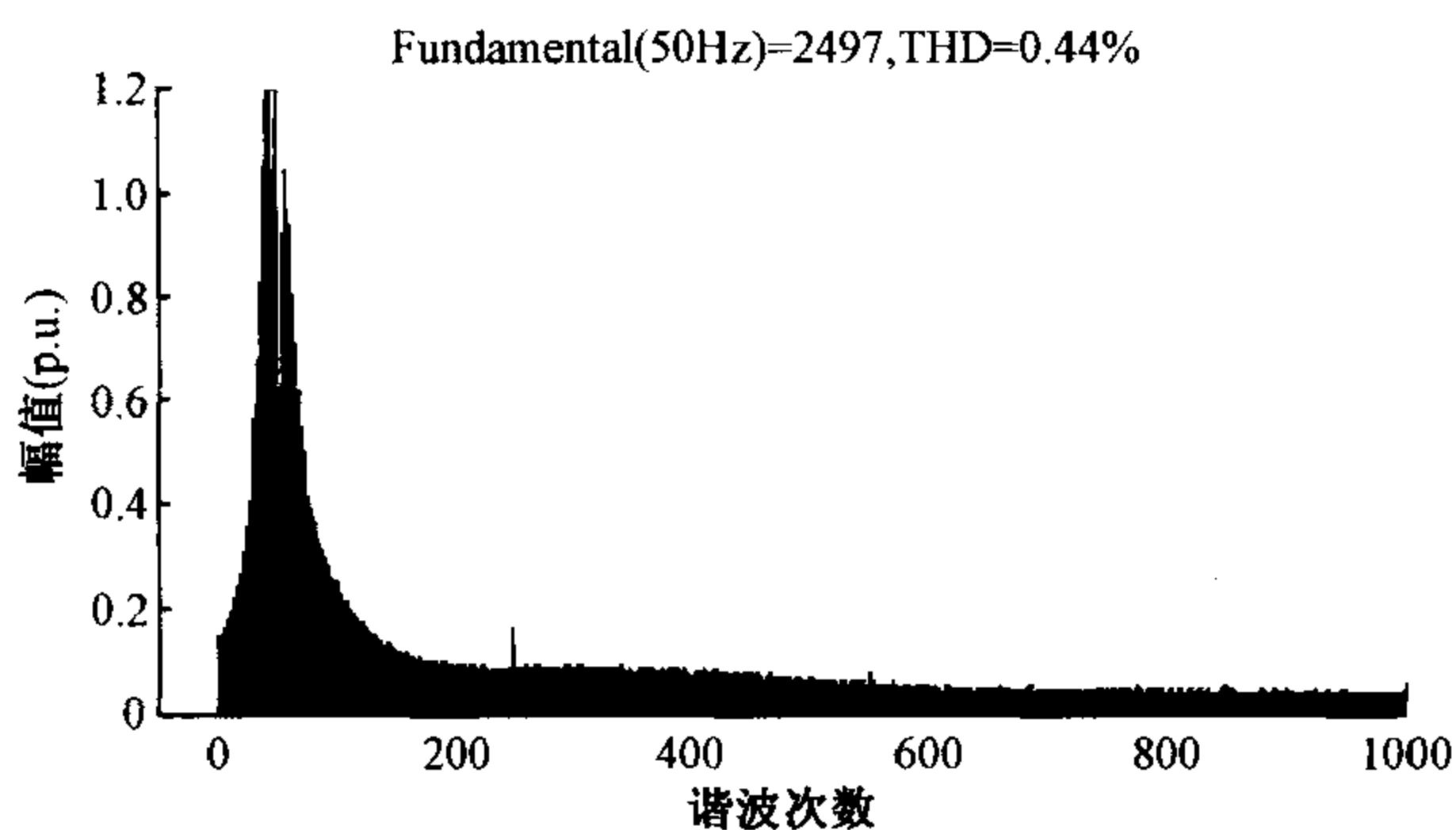


图 13 网侧电流谐波畸变率

Fig. 13 The current harmonic distortion of network side

5 结 论

本文基于 Vienna 整流器的拓扑结构, 详细分析了其基本工作原理, 提出了一种基于 SVPWM 的 Vienna 整流器的电压外环, 电流内环的双闭环控制策略, 并搭建了 Vienna 整流器矢量控制仿真模型, 通过 Matlab 环境下的仿真分析, 证实了该

整流器控制简单, 具有良好的动态性能和静态性能, 实现了单位功率因数运行, 网侧电流谐波含量少, 保持了良好的正弦度。

参考文献:

- [1] 张兴. PWM 整流器及其控制策略的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [2] Kolar J, Zach F. A novel three-phase unity interface minimizing line current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44 (4): 456 - 467.
- [3] Chongming Qiao, Keyue Ma Smedley. Three-phase unity-power-factor star-connected switch (Vienna) rectifier with unified constant-frequency integration control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18 (4): 952 - 957.
- [4] Johann W. Kolar, Uwe Drofenik, Franz C. Zach. Vienna rectifier II - a novel single-stage high-frequency isolated three-phase PWM rectifier system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46 (4): 674 - 691.
- [5] Burgos R, Lai R, Pei Y, 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.
- [6] 邓先明, 王东东, 叶宗彬, 等. 基于简化三电平 SVPWM 算法的整流器研究 [J]. 电力电子技术, 2008, 42 (5): 3 - 9.
- [7] 叶宗彬, 谭国俊, 景巍, 等. 三电平整流器中性点平衡控制策略的研究 [J]. 电力电子技术, 2010, 44 (9): 18 - 20.
- [8] 宋文祥, 陈国呈, 武慧, 等. 一种具有中点电压平衡控制的三电平空间矢量调制方法及其实现 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (12): 95 - 100.
- [9] 金红元, 邹云屏, 林磊, 等. 三电平 PWM 整流器双环控制技术及中点电压平衡控制技术的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (20): 64 - 68.

作者简介: 张豪 (1987 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

基于SVPWM的Vienna整流器矢量控制策略的研究

作者:
作者单位:
刊名:
英文刊名:
年, 卷(期):
被引用次数:

张豪, 侯圣岳, ZHANG Hao, HOU Sheng-yu
中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏徐州, 221116
华北电力大学学报 [\[ISTIC\]](#) [\[PKU\]](#)
Journal of North China Electric Power University
2012, 39(5)
7次



参考文献(6条)

1. 张兴 PWM整流器及其控制策略的研究[学位论文] 2003

2. Kolar J.;Zach F A novel three-phase unility interface minimizing line current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules 1997(04)

3. Chongming Qiao;Keyue Ma Shedley Three-phase unity-power-factor star-connected switch (VIENNA) rectifier with unified constant-frequency integration control[外文期刊] 2003(4)

4. Johann W.Kolar;Uwe Drofenik;Franz C.Zach Vienna rectifer II—a novel sigle-stage high-frequency isolated three-phase PWM rectifier system 1999(04)

5. Burgos R.;Lai R.;Pei Y.;Wang F. (P).;Boroyevich D.;Pou J. Space Vector Modulator for Vienna-Type RectifiersBased on the Equivalence BetweenTwo- and Three-Level Converters:A Carrier-Based Implementation[外文期刊] 2008(4)

6. 郑先明, 王冬冬, 叶宗彬, 张敏 基于简化三电平SVPWM算法的整流器研究[期刊论文]•电力电子技术 2008(5)

7. 叶宗彬, 谭国俊, 景巍, 吴轩敏 三电平整流器中性点平衡控制策略的研究[期刊论文]•电力电子技术 2010(9)

8. 宋文祥, 陈国星, 武慧, 孙承波 一种具有中点电位平衡功能的三电平空间矢量调制方法及其实现[期刊论文]•中国电机工程学报 2006(12)

9. 金红元, 邹云凯, 林磊, 陈伟, 邹旭东, 钟和清, 张柯 三电平PWM整流器双环控制技术及中点电压平衡控制技术研究[期刊论文]•中国电机工程学报 2006(20)

引证文献(1条)

1. 张玉地, 钱伟, 孙福佳, 王君会 基于 DSP 的 PM SM 伺服控制系统设计[期刊论文]•电力科学与工程 2015(03)

引用本文格式：张豪, 侯圣岳, ZHANG Hao, HOU Sheng-yu 基于SVPWM的Vienna整流器矢量控制策略的研究[期刊论文]•华北电力大学学报 2012(5)