

基于 SVPWM 的 VIENNA 整流器研究

王正¹, 谭国俊¹, 曾维俊², 柳萌¹

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221006;

2. 江苏天奇物流系统工程股份有限公司, 江苏 无锡 214187)

摘要: 分析了三相三开关三电平(VIENNA)整流器的工作原理, 研究了其空间矢量脉宽调制(SVPWM)的实现方法, 提出了此整流器的矢量控制策略。采用电压外环和电流内环的双闭环控制, 实现了 VIENNA 整流器的高性能特性。基于 Matlab 仿真平台, 搭建了 VIENNA 整流器的仿真模型, 仿真结果表明, 该整流器能实现良好的动态性能和稳态性能。

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

中图分类号: TM461

文献标识码: A

Study on the VIENNA Rectifier Based on Space Vector Pulse Width Modulation

WANG Zheng¹, TAN Guo-jun¹, ZENG Wei-jun², LIU Meng¹

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology,

Xuzhou 221006, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Miracle Logistics System

Engineering Co. Ltd, Wuxi 214187, Jiangsu, China)

Abstract: The working principle of three-phase three-switch three-level (VIENNA) rectifier was analyzed, and its implement method of space vector pulse width modulation (SVPWM) was researched. On that basis, the vector control strategy of VIENNA was proposed. It achieved the high performance characteristics of VIENNA rectifier by using dual closed loop with voltage outer loop and current inner loop. Furthermore, based on the platform of Matlab simulation, the simulation model of VIENNA rectifier was built. The simulation results show that the rectifier can achieve both good dynamic performance and good static performance.

Key words: VIENNA rectifier; vector control; space vector pulse width modulation; neutral-point potential balance

1 引言

二极管和晶闸管整流器在电力电子行业中得到广泛应用, 但由于其功率因数低并向电网注入了较高的电流谐波, 所以对电网污染严重。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, 其中包括 VIENNA 整流器。VIENNA 整流器(三电平三开关 BOOST 整流器)是由 Kolar 教授 1997 年在文献[1]中提出的一种两象限中点钳位式三电平 PWM 整流器拓

扑, 与传统的两电平结构相比, 由于电平数的增加, 降低了功率器件的电压应力和电流的谐波畸变率(THD)。与 4 象限运行的三电平相比, 该三电平结构的拓扑所需开关器件少, 成本和开关损耗相对较低, 此外, 当开关器件开通时, 连接于直流母线的二极管可以阻断直通电流, 无输出电压桥臂直通问题, 不需要设置驱动死区时间, 提高了整流器的可靠性^[2]。由于其具有上述优点, 而引起国内外学者对其拓扑结构及控制策略和方法的广泛关注与深入研究。

本文分析了 VIENNA 整流器的基本工作原理, 通过采用电压外环和电流内环的双闭环控制, 整流器得到了较高的动态和稳态性能。针对三电

作者简介: 王正(1986—), 男, 硕士, Email: wangzheng96998@163.com

平拓扑所固有的直流侧电容中点电位波动问题,引入小矢量调节因子 f ,实现了直流母线中点电位平衡的控制,解决了三电平中点平衡问题。最后在负载突变的工况下,对 VIENNA 整流器进行了仿真研究与分析。

2 VIENNA 整流器的工作原理

VIENNA 整流器结构图如图 1 所示,该三电平 Boost 整流器由 3 个桥臂组成,其中每个桥臂包含 6 个功率二极管和一个可控关断电力电子器件。

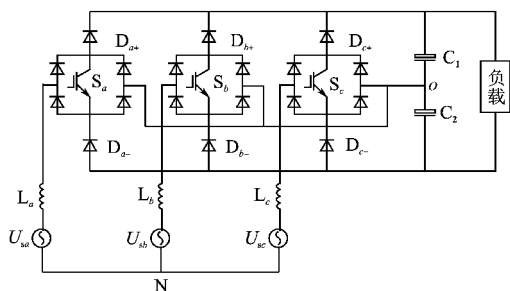


图 1 VIENNA 整流器结构图

Fig. 1 The structure chart of VIENNA rectifier

其运行原理如下:就桥臂 I 而言,当开关 S_a 开通时,整流器的输入端电压被钳位于直流母线中点;当开关 S_a 关断时,整流器的输入端电压为 $+V_{dc}/2$ 或 $-V_{dc}/2$,电压极性由 a 相电流的极性决定,因此,桥臂 I 有 3 个开关状态“1”,“0”,“-1”,整流器的输入端被分别钳位于直流母线的正极、中点和负极,依次类推,可以对 b, c 相进行相应分析。整流器由 3 个桥臂组成,但没有开关状态 111 和 -1-1-1,因此开关状态的总数为 $3^3 - 2 = 25$,可以产生 19 个不同的电压矢量,电路中所有的开关模式和电压矢量如图 2 所示。

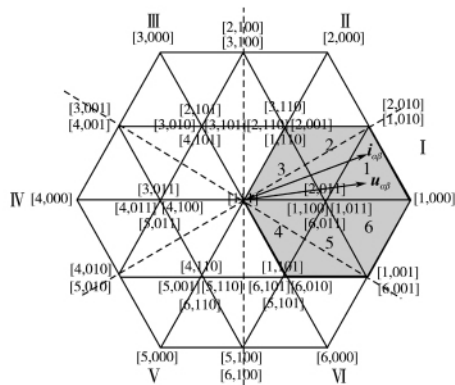


图 2 VIENNA 整流器的开关状态和电压矢量图

Fig. 2 The switch states and voltage vector diagram of VIENNA rectifier

3 VIENNA 整流器 SVPWM 脉冲调制的实现

该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。根据电流矢量的极性,可将整个三电平平面划分成 6 个扇区,用标号 S_I 表示电流矢量所在扇区,其划分方法如图 2 所示,电流矢量扇区号 S_I 依次为 I, II, III, IV, V, VI。用标号 S_V 表示电压矢量在小两电平平面中所在的小扇区,电压矢量的扇区号 S_V 依次为 1, 2, 3, 4, 5, 6。

如图 2 所示,当电流矢量 $i_{q\beta}$ 位于第 I 扇区时 ($S_I = I$),电压空间矢量可调制的范围为阴影部分,即第 1 个小两电平 ($S_V = 1$),当电压矢量 $u_{q\beta}$ 超出了这个范围,可以采用文献[3-4]提出的过调制方法,即在阴影区域内选取尽可能接近于 $u_{q\beta}$ 的电压矢量进行调制,同理可知,当电流矢量位于第 X (I, II, III, IV, V, VI) 扇区时,处在第 X 个小两电平平面内的电压矢量可调制。

当电压矢量 $u_{q\beta}$ 位于第 1 个两电平平面的第 I 扇区,根据空间脉宽调制中常用的 7 段法,选择的开关顺序为 011-010-000-100-100-000-010-011(这里选择使中点电位降低的矢量为初始小矢量),对应三相开关管的 PWM 波形如图 3a 所示。

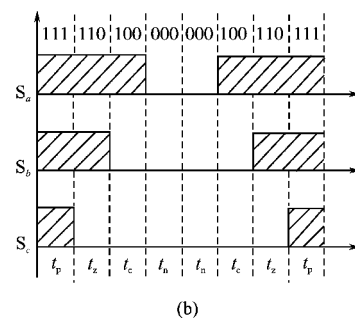
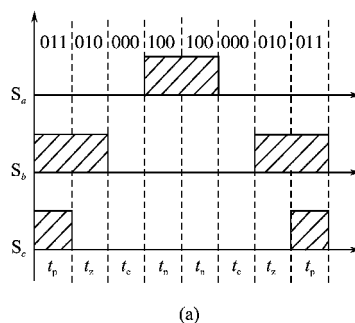


图 3 三相开关的 PWM 脉冲波形 ($S_I = I, S_V = 1$)

Fig. 3 The PWM pulse shape of three phase switch ($S_I = I, S_V = 1$)

取 $P_x(x=a,b,c)$ 为开关管 S_x 的标志位,采用 7 段法时,如果 $S_x(x=a,b,c)$ 的值由 0 变为 1,则 $P_x=0$,反之 $P_x=1$,当 $P_x=0$ 时,须将 S_x 的开关状态取反,反之,则不变。当 $S_I=1,2,6$ 时, $P_a=0$,反之 $P_a=1$;当 $S_I=2,3,4$ 时, $P_b=0$;反之 $P_b=1$;当 $S_I=4,5,6$ 时, $P_c=0$;反之 $P_c=1$ 。例如图 3a 所示, $S_I=1$, $S_V=1$,开关 S_a 的状态由 0 变为 1,那么将 S_a 的开关状态取反可以得到新的开关顺序 111-110-100-000-000-100-110-111,新的三相开关管 PWM 波形如图 3b 所示。 t_p 为小矢量作用时间的 $1/4$, t_z 为主矢量作用时间的 $1/2$, t_c 为次矢量作用时间的 $1/2$,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得到开关脉冲输出,如果 $P_x=0$,那么 x 相的脉冲信号经取反后控制开关 S_x ,反之,则不变。

采用 011,001,101,100,110,010 分别作为 I-V 扇区的起始小矢量。VIENNA 整流器仅工作在整流状态, t_p 所作用的时间为小矢量向上母线电容充电的时间, t_n 为小矢量向下母线电容充电的时间,可设立调节因子 $f(-1 \leq f \leq 1)$,使

$$\begin{cases} t_p=t_p \frac{1+f}{2} \\ t_n=t_n \frac{1-f}{2} \end{cases} \quad (1)$$

根据中点电位波动的情况相应改变控制因子的大小,便可改变正负小矢量的作用时间,从而控制直流母线的中点电位^[5]。

4 VIENNA 整流器的控制单元

VIENNA 整流器输入电路在 d, q 坐标系下的等效框图如图 4 所示, d, q 轴电流分量 i_d, i_q 相互耦合,给电流内环控制器的设计造成了不便。为此,引入 i_d, i_q 的前馈解耦控制^[6],且 i_d, i_q 电流环均采用 PI 调节控制。由此,可得三相同步旋转 d, q 坐标系下三相 VSR 电流控制时的电压指令:

$$\begin{cases} u_d=-(K_{ip}+\frac{K_{il}}{s})(i_d^*-i_d)+\omega Li_q+e_d \\ u_q=-(K_{ip}+\frac{K_{il}}{s})(i_q^*-i_q)-\omega Li_d+e_q \end{cases} \quad (2)$$

为实现电网侧功率因数为 1 和直流侧电压稳定运行,整个控制电路主要由直流电压外环, d, q 电流内环控制环及空间矢量调制环节组成。整流器矢量控制系统结构框图如图 5 所示,其中电压反馈控制 PI 调节器的输出作为 d 轴电流的给定;

电流反馈和电流控制器构成内环电流 PI 调节器的输出,再加上电流状态反馈和电网电压扰动的前馈补偿,组成整流器输入侧的控制电压,并经过 SVPWM 调制后产生开关信号送到整流器主电路。

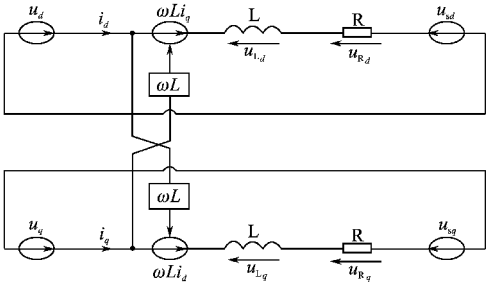


图 4 整流器输入侧的等效电路图

Fig. 4 The equivalent circuit diagram of rectifier on input side

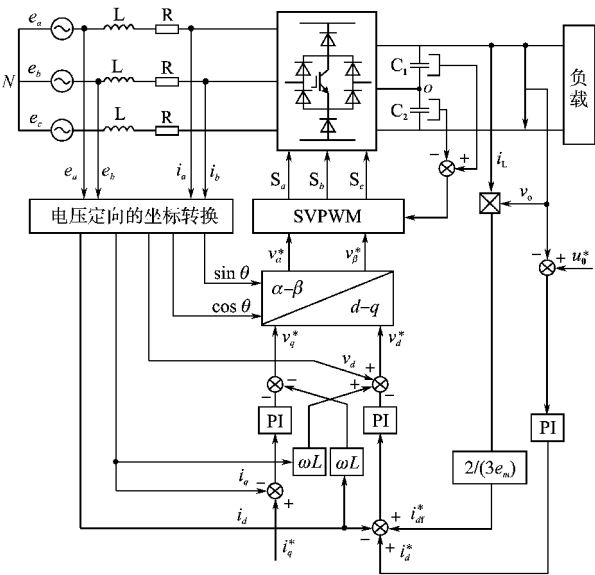


图 5 VIENNA 整流器矢量控制框图

Fig. 5 The vector control diagram of VIENNA rectifier

5 仿真结果

为证明 VIENNA 整流器控制方法的可行性,通过 Matlab/Simulink 仿真环境建立了 VIENNA 整流器的电力电子模型,并对其进行了数字化仿真。其仿真参数为:电源线电压 $U_n=690\text{ V}$,直流母线电压 $U_{dc}=1\,500\text{ V}$,输入侧 $R_s=0.01\,\Omega$, $L_s=0.5\text{ mH}$,直流母线电容 $C_1=C_2=6\,000\,\mu\text{F}$,载波频率 $f_{\text{PWM}}=2\text{ kHz}$,最大输出功率 $P_{\text{max}}=600\text{ kW}$ 。

图 6 为 VIENNA 整流器矢量控制仿真波形。

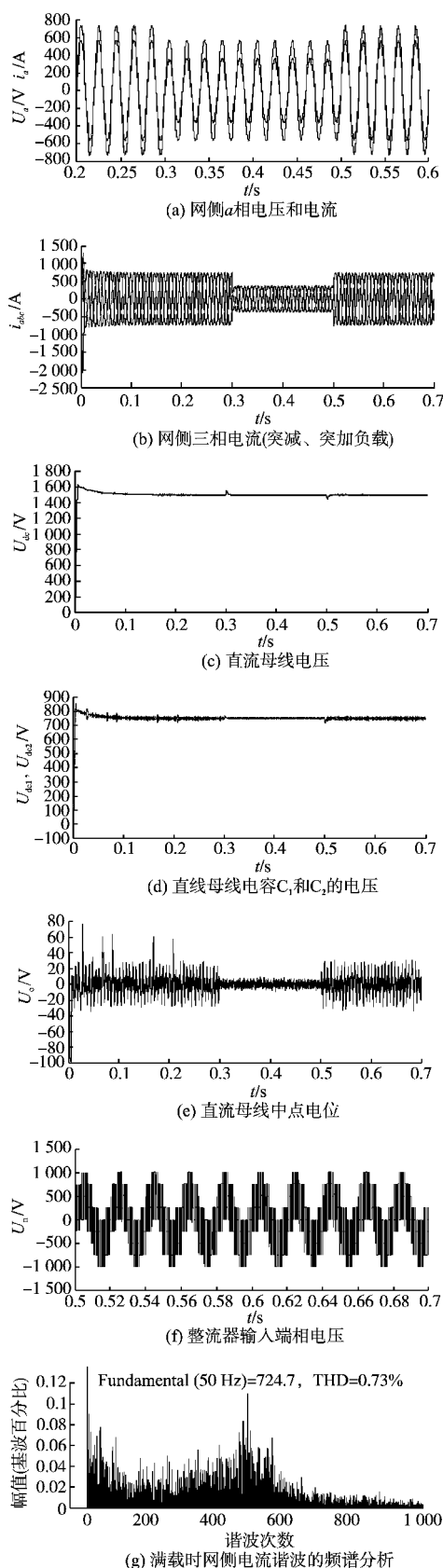


图 6 VIENNA 整流器矢量控制仿真波形

Fig. 6 The vector control simulation waves of VIENNA rectifier

图 6a 为整流器网侧的 a 相电压和电流波形, 其中电压与电流同相位实现了单位功率因数运行; 图 6b 为网侧三相电流的波形图, 其中 0.3~0.5 s 时, 负载减半; 图 6c 为直流母线电压的波形, 由图 6c 可知, 直流母线电压在突减、突加负载时, 电压波动幅度小, 动态响应速度快; 由图 6d、图 6e 可知, 直流母线电容 C_1 和 C_2 的电压基本保持一致, 中点电位波动小; 图 6f 为整流器的输入端电压波形; 图 6g 为整流器最大负载时网侧电流谐波的频谱分析, 总的电流谐波为 0.73%。

6 结论

本文分析了 VIENNA 整流器拓扑的基本工作原理, 详细分析了该结构的 SVPWM 脉宽调制器的实现方法, 提出了基于电压空间矢量脉冲宽度调制的矢量控制策略。采用电压外环和电流内环的双闭环控制实现了 VIENNA 整流器的高性能特性。通过 Matlab 仿真平台搭建了 VIENNA 整流器的仿真模型, 仿真结果表明, 该整流器具有良好的动态性能和稳态性能, 实现了单位功率因数运行的目标, 网侧谐波含量少, 直流母线纹波小, 负载突变时, 动态响应快。

参考文献

- [1] Kolar J, Zach F. A Novel Three-phase Utility Interface Minimizing Line Current Harmonics of High-power Telecommunications Rectifier Modules[J]. IEEE Trans. on Ind. Elec., 1997, 44(4): 456-467.
- [2] Round S, Karutz P, Heldwein M L, et al. Towards a 30 kW/liter Three-phase Unity Power Factor Rectifier[C]// Proc. Power Conversion Conf., 2007: 1251-1259.
- [3] Burgos R, Lai R, Pei Y, et al. Space Vector Modulation for Vienna-type Rectifiers Based on the Equivalence Between Two-and Three-level Converters; a Carrier-based Implementation[C]// Conf. IEEE PESC, 2007: 2861-2867.
- [4] 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 Trans. Power Electron., 2008, 23(4): 1888-1898.
- [5] 邓先明, 王冬冬, 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.
- [6] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

收稿日期: 2010-09-14

修改稿日期: 2010-11-25