

单相 PWM 整流电路控制方法及仿真分析

王 成¹, 杨亚萍²

(西安航空技术高等专科学校 1. 电气工程系; 2. 车辆与医电系 陕西 西安 710077)

摘 要:分析单相 PWM 整流电路的结构、工作原理和控制方法,通过选择适当的工作模式和工作时序,可使 PWM 整流电路输出直流电压稳定。将正弦脉宽调制技术应用于 PWM 整流电路,使其交流侧输入电流非常接近正弦波,且与输入电压同相位。同时调节交流侧电流的大小和相位,使能量在交流侧和直流侧双向流动。在建立基于 Simulink7.6 的仿真模型基础上,通过分析 PWM 整流电路各处电压、电流波形,验证其控制方法及仿真设计的正确性。

关键词:PWM 整流; Simulink; 闭环控制

中图分类号:TP273+.5 **文献标识码:**B **文章编号:**1008-9233(2011)03-0048-04

随着电力电子技术的发展,自关断电力电子器件(全控式器件)大量出现,此类器件易实现脉冲宽度调制,若 PWM 整流器采用全控式器件实现,其体积更小,功率因数更高。且由于开关频率较高,电流容易连续、谐波少、快速响应性能好、动态抗干扰能力强,得到广泛应用。

1 单相 PWM 整流器电路结构

单相 PWM 整流器的结构形式有半桥型和全桥型。如图 1 所示,半桥型直流侧电容由两个电容串联,其中点和交流电源连接。和半桥型相比,全桥型整个直流环节可全部施加到负载电阻上,半桥型只有一半直流电压加到负载电阻上,是全桥型整流器的最大输出电压的两倍,即在相同的输出功率情况下,全桥型整流器的开关电流为半桥型整流器的一半。由于工作电流减小,电路中连接导线更细,各负载上的损耗也随之降低。因此全桥型整流器应用更为广泛。

2 单相 PWM 整流器工作原理

从图可以看出:PWM 整流器模型电路由交流回路、四支 IGBT 和四个续流二极管组成的功率开

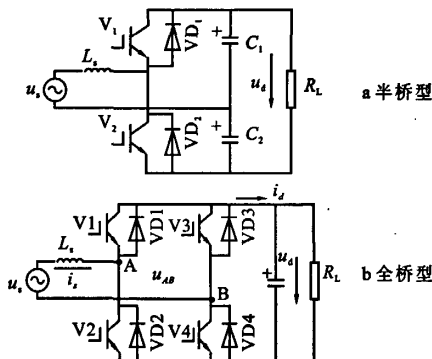


图 1 单相整流器

关桥式电路、直流回路组成。

其中交流回路由交流电源及网侧电感组成,直流回路由负载电阻及电解电容 C 组成。忽略功率桥路损耗时,交流、直流侧功率平衡关系得:

式中: u_s, i_s ——PWM 整流电路交流侧电压、电流

u_d, i_d ——PWM 整流电路直流侧电压、电流

从上式可知:通过 PWM 整流电路交流侧电压、电流的控制,就可控制直流侧电压、电流。以下从 PWM 整流电路交流侧入手,分析 PWM 整流电路的运行状态和控制原理。

收稿日期:2011-03-01

基金项目:西安航空技术高等专科学校校级科研立项(10XP207)

作者简介:王成(1977—),男,陕西西安人,讲师,从事测控技术与仪器的研究。

稳态条件下,PWM 整流电路交流侧电压、电流矢量关系如图 2 所示。

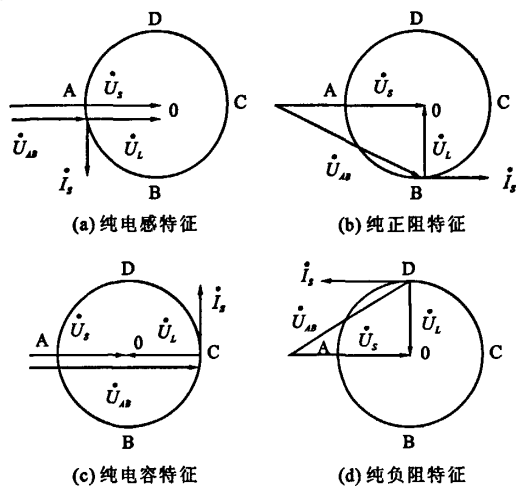


图 2 PWM 整流器交流侧稳态相量关系图

U_s :交流电网侧电压相量

U_{AB} :交流侧电压相量

U_L :交流侧电感电压相量

I_s :交流侧电流相量

为简化分析,对于 PWM 整流电路,只考虑基波分量,忽略谐波分量,且不计交流侧电阻。从上图分析得:当以交流电网侧电压相量为参考时,通过控制交流侧电压相量即可实现 PWM 整流电路的四象限运行。若假设交流侧电流相量 I_s 不变,因此 $U_L = \omega L I_s$ 也固定不变,在此情况下,PWM 整流电路交流侧电压相量 U_{AB} 端点运动轨迹构成了一个以 U_L 为半径的圆。

当交流侧电压相量端点位于圆轨迹 A 点时,交流侧电流相量将比交流电网侧电压相量滞后 90° ,此时,PWM 整流电路电网侧呈纯电感性特性,如图 2(a) 所示。

当交流侧电压相量 U_{AB} 端点位于圆轨迹 B 点时,交流侧电流相量 I_s 与交流电网侧电压相量 U_s 平行且同向,此时 PWM 整流电路电网侧呈正电阻特性,如图 2(b) 所示。

当交流侧电压相量 U_{AB} 端点位于圆轨迹 C 点时,交流侧电流相量 I_s 比交流电网侧电压相量 U_s 超前 90° ,此时 PWM 整流电路电网侧呈纯电容特性,如图 2(c) 所示。

当交流侧电压相量 U_{AB} 端点位于圆轨迹 D 点时,交流侧电流相量 I_s 与交流电网侧电压相量 U_s 平

行且反向,此时 PWM 整流电路电网侧呈负电阻特性,如图 2(d) 所示。

由此可知,要实现 PWM 整流电路的四象限运行,关键在于电网侧电流相量的控制。一方面,可以通过控制 PWM 整流电路交流电压,间接控制其网侧电流;另一方面,也可通过网侧电流的闭环控制,直接控制 PWM 整流电路的网侧电流。

3 PWM 整流电路的控制方法

在单相电压型 PWM 整流器控制系统设计中,一般可采用双闭环控制,即电压外环和电流内环。电压外环的作用主要是控制单相电压型 PWM 整流器直流侧电压,而电流内环的作用主要是按电压外环输出的电流指令进行电流控制,可实现电网侧正弦波电流输入控制控制。基本框图如图 3 所示。

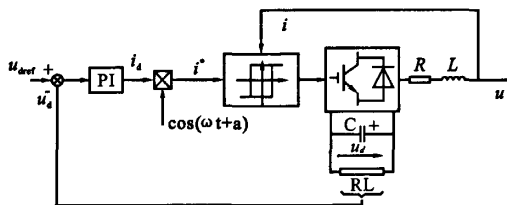


图 3 PWM 整流电路直接电流控制系统结构图

参考电压 u_{dref} 和实际直流电压 u_d 经比较器后,送入 PI 调节器,PI 调节器输出为一直流电流信号 i_d ; i_d 乘以和输入交流电压同相位的正弦信号,得到交流电流的正弦指令信号 i^* 。 i^* 与电源电压同相位,其幅值和反映负载电流大小的直流信号 i_d 成正比,这是 PWM 整流器运行时所需的交流电流指令信号。指令信号和实际交流电流信号比较后,通过滞环对器件进行控制,可使实际交流输入电流跟踪指令值。

PWM 整流电路到达稳态时, $u_d = u_{dref}$, PI 调节器输入为零值。PI 调节器的输出 i_d 与负载电流大小对应,也和交流输入电流幅值相对应。当负载电流增大时,由电容 C 放电使其电压 u_d 下降 PI 调节器的输入端出现正偏差,其输出 i_d 增大,进而使交流输入电流增大,使 u_d 上升。达到新的稳态时, u_d 和 u_{dref} 相等,PI 调节器输入重新恢复到零值。而 i_d 则稳定为新的较大值,与较大的负载电流和较大的输入电流对应。当负载电流减小时,调节过程与负载电流增大时的调节过程相反。

从整流运行向逆变运行转换:首先负载电流反向

而向 C 充电, u_d 抬高, PI 调节器出现负偏差, i_d 减小后变为负值, 使交流输入电流相位和电压相位反相, 实现逆变运行。稳态时, u_d 和 u_{dref} 仍然相等, PI 调节器输入恢复到零, 为负值, 并与逆变电流的大小对应。

4 PWM 整流电路仿真分析

根据基本框图分析, 在 Simulink 7.6 中, 对单相 PWM 整流电路建立仿真模型, 如图 4 所示。

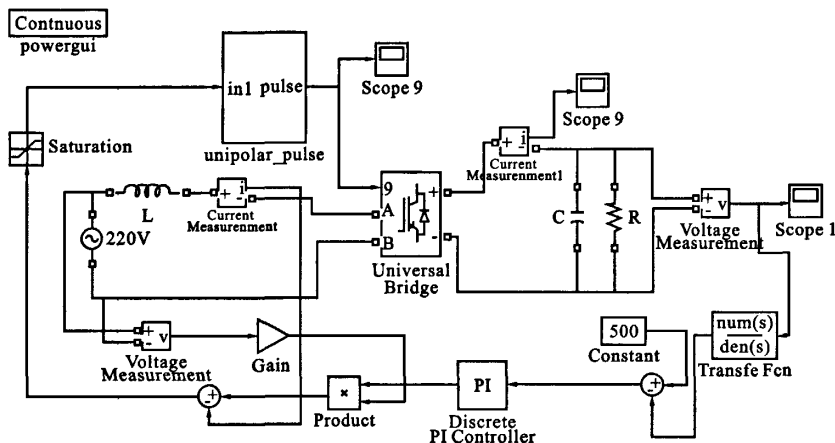


图 4 PWM 整流电路建立仿真模型

直流侧电压在电压环控制下, 迅速到达稳定值, 使系统可稳定工作。

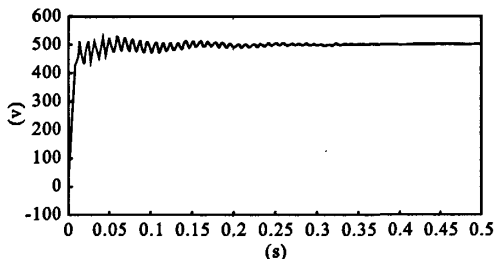


图 5 直流侧电压波形 (u_d)

PWM 整流电路采用双级式控制时, 四个功率管 IGBT 的栅极驱动电压分为两组, VT_1 和 VT_4 同时导通和关断, 其栅极控制电压 $U_{VT1} = U_{VT4}$; VT_2 和 VT_3 同时导通和关断, 其栅极控制电压 $U_{VT2} = U_{VT3}$ 。电路工作时, 交流侧正弦波信号和三角波信号进行比较的方法对 V1 ~ V4 进行 SPWM 控制, 就可在交流输入端 AB 产生 SPWM 波 u_{AB} 。 u_{AB} 中含有和交流侧正弦信号波同频率且幅值成比例的基波、和载波有关的高频谐波, 不含低次谐波。如图 6 所示。

在一个开关周期内, 四支功率管栅极控制电压如图 7 所示, 同一桥臂上下两个 IGBT 交替导通, 处

具体仿真参数如下: 电网电压 220V/50Hz, 直流侧电压 500V, 交流侧电感 2.5mH, 直流侧电容 3000uF。仿真结果如图 5 所示。图中“unipolar_pulse”模块中可设定载波频率, 本例设定载波频率为 4000Hz, 经示波器观察, 载波周期 $T = 0.00025s$ 由此可得 PWNN 载波比为:

$$N = \frac{f_s}{f_i} = \frac{4000}{50} = 80$$

于互补的状态, 且其宽度按正弦规律变化。

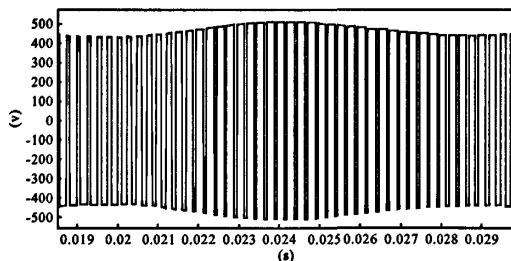


图 6 交流侧电压波形 (u_{AB})

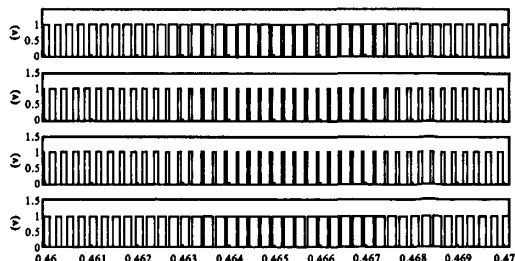


图 7 功率管栅极控制脉冲波形 ($u_{VT1}, u_{VT2}, u_{VT3}, u_{VT4}$)

滞环 PWM 电流控制则具有较快的电流响应, 且电流跟踪动态偏差由滞环宽度确定, 而不随电流变化率变化而变动。引入电流闭环控制, 让实际电流的瞬时值实时的与标准的正弦波进行比较, 由比较

结果来确定 PWM 脉冲宽度的上升沿和下降沿,从而使网侧的输出电流无限接近于正弦波。如图 8 所示。

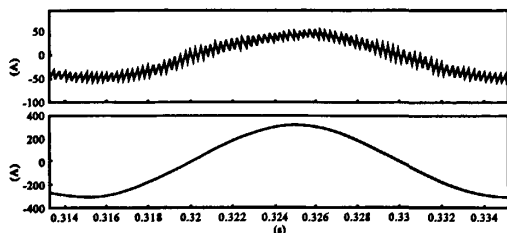


图 8 电网侧电流电压波形(i_a, u_a)

5 结语

本文分析了 PWM 整流电路的原理及具体工作过程,以单相电压型 PWM 整流电路为例,讨论其工作原理,分析具体的工作模式,给出相应的控制策略,利用 simulink7.6 建立了单相电压型 PWM 整

流电路的仿真模型,得到满意的控制效果。对有关 PWM 整流电路教学实践与和电子负载的设计有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 周克亮. 电力电子变换器 PWM 技术原理与实践[M]. 北京:人民邮电出版社,2010:105-112.
- [2] 张宗巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2003:23-70.
- [3] 黄忠霖,黄京. 控制系统 MATLAB 计算及仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2009:165-170.
- [4] 张军伟. 单相电压型 PWM 整流电路原理分析与仿真[J]. 现代电子技术,2009(8):186-189.
- [5] J Bauer. Single-Phase Pulse Width Modulated Rectifier[J]. Acta Polytechnica, 2008, 48(3):84-87.

[责任编辑、校对:郝 杰]

Control Method & Emulation Analysis of Single-phase PWM Rectifier Circuit

WANG Cheng¹, YANG Ya-ping²

(1. Department of Electrical Engineering, Xi'an Aerotechnical College, Xi'an 710077, China;

2. Vehicle & Medical Engineering Department, Xi'an Aerotechnical College, Xi'an 710077, China)

Abstract: The article analyzes the structure, working principle, and control method of single-phase PWM rectifier circuit. Through the selection of appropriate working mode and time sequence, PWM rectifier circuit can generate stable DC voltage. The sine pulse width modulation technology is applied in PWM rectifier circuit to make the output current at the AC side extremely close to the sine wave and at the same phase with input voltage. Meanwhile, the adjustment of the value and phase of the current at the AC side can enable the bi-directional flow of energy between the AC side and DC side. On the basis of Simulink7.6 emulated model and through the analysis of voltage and current wave at each points of PWM rectifier circuit, the article verifies the correctness of the control method and emulated design.

Key Words: PWM rectification; Simulink; closed loop control

单相PWM整流电路控制方法及仿真分析

作者: [王成](#), [杨亚萍](#), [WANG Cheng](#), [YANG Ya-ping](#)
作者单位: [王成, WANG Cheng\(西安航空技术高等专科学校电气工程系, 陕西西安, 710077\)](#), [杨亚萍, YANG Ya-ping\(西安航空技术高等专科学校车辆与医电系, 陕西西安, 710077\)](#)
刊名: [西安航空技术高等专科学校学报](#)
英文刊名: [JOURNAL OF XI'AN AEROTECHNICAL COLLEGE](#)
年, 卷(期): 2011, 29(3)

参考文献(5条)

1. 周克亮 [电力电子变换器PWM技术原理与实践](#) 2010
2. 张宗巍;张兴 [PWM整流器及其控制](#) 2003
3. 黄忠霖;黄京 [控制系统MATLAB计算及仿真](#) 2009
4. 张军伟 [单相电压型PWM整流电路原理分析与仿真](#)[期刊论文]-[现代电子技术](#) 2009(08)
5. J Bauer [Single-Phase Pulse Width Modulated Rectifier](#)[外文期刊] 2008(03)

本文读者也读过(2条)

1. [谢建平](#), [杨玉山](#) [农网配电变压器常见故障的分析和探讨](#)[期刊论文]-[科技致富向导](#)2011(23)
2. [黄群](#), [李方正](#), [HUANG Qun](#), [LI Fang-zheng](#) [单相电压型PWM整流器控制系统设计与仿真](#)[期刊论文]-[装甲兵工程学院学报](#)2007, 21(3)

引用本文格式: [王成](#), [杨亚萍](#), [WANG Cheng](#), [YANG Ya-ping](#) [单相PWM整流电路控制方法及仿真分析](#)[期刊论文]-[西安航空技术高等专科学校学报](#) 2011(3)