

单相电压型 PWM 整流电路原理分析与仿真

张军伟^{1,2}, 王兵树², 刘治安¹, 王晨悦¹, 李毅凯³

(1. 华北保定电力职业技术学院 河北 保定 071056;

2. 华北电力大学 控制科学与工程学院 河北 保定 071003; 3. 河北大学 河北 保定 071001)

摘要:详细分析单相电压型 PWM 整流电路的工作原理和工作模式,说明通过对 PWM 电路进行控制,选择合适的工作模式和工作时序,可使 PWM 整流电路的输出直流电压得到有效的稳定。同时也调节了交流侧电流的大小和相位,实现能量在交流侧和直流侧的双向流动,并使变流装置获得良好的功率因数。最后建立其 Matlab 的仿真模型,验证了设计的正确性。

关键词:单相电压型 PWM; 整流; 功率因数; Matlab; 仿真

中图分类号: TN710; TN274

文献标识码: B

文章编号: 1004-373X(2009)08-186-04

Principle Analysis and Simulation for Single-phase Voltage Type PWM Rectifier

ZHANG Junwei^{1,2}, WANG Bingshu², LIU Zhi'an¹, WANG Chenyue¹, LI Yikai³

(1. North China Baoding Electric Power Vocational & Technical College, Baoding, 071056, China;

2. Control Science and Engineering Institute, North China Electric Power University, Baoding, 071003, China; 3. Hebei University, Baoding, 071001, China)

Abstract: The theory and working modes about single-phase voltage source PWM rectifier are elaborately analysed in this paper, which illustrate that the voltage in DC side can be effectively stabilized with PWM control by selecting burst mode and time, and simultaneously give the explanation that the current in AC side can be adjusted to gain the consistent phase with the voltage, resulting in the good power factor and the both sides power commutation between the AC and DC. The simulation model of single-phase voltage source PWM rectifier is presented validating the correctness of the design.

Keywords: single-phase voltage source PWM; rectify; power factor; Matlab; simulation

0 引言

众所周知,在传统的整流电路中,晶闸管可控整流装置的功率因数会随着其触发角的增加而变坏,这不但使得电力电子类装置成为电网中的主要谐波因素,也增加了电网中无功功率的消耗^[1-3]。

PWM 整流电路是采用脉宽调制技术和全控型器件组成的整流电路,能有效地解决传统整流电路存在的问题。通过对 PWM 整流电路进行有效的控制,选择合适的工作模式和工作时序,从而调节了交流侧电流的大小和相位,使之接近正弦波并与电网电压同相或反相,不但有效地控制了电力电子装置的谐波问题,同时也使得变流装置获得良好的功率因数。

1 单相电压型桥式 PWM 整流电路的结构

单相电压型桥式 PWM 整流电路最初出现在交流机车传动系统中,为间接式变频电源提供直流中间环节,电路结构如图 1 所示。每个桥臂由一个全控器件和

反并联的整流二极管组成。 L 为交流侧附加的电抗器,起平衡电压,支撑无功功率和储存能量的作用。图 1 中 $u_N(t)$ 是正弦波电网电压; U_d 是整流器的直流侧输出电压; $u_s(t)$ 是交流侧输入电压,为 PWM 控制方式下的脉冲波,其基波与电网电压同频率,幅值和相位可控; $i_N(t)$ 是 PWM 整流器从电网吸收的电流。由图 1 所示,能量可以通过构成桥式整流的整流二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 完成从交流侧向直流侧的传递,也可以经全控器件 $VT_1 \sim VT_4$ 从直流侧逆变为交流,反馈给电网。所以 PWM 整流器的能量变换是可逆的,而能量的传递趋势是整流还是逆变,主要视 $VT_1 \sim VT_4$ 的脉宽调制方式而定。

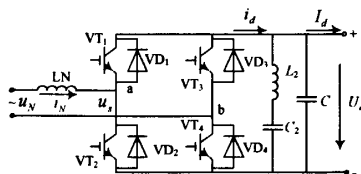


图 1 单相电压型 PWM 整流电路结构

因为 PWM 整流器从交流电网吸取跟电网电压同

相位的正弦电流,其输入端的功率是电网频率脉动的两倍。

由于理想状况下输出电压恒定,所以此时的输出电流 i_d 与输入功率一样也是网频脉动的两倍,于是设置串联型谐振滤波器 L_2C_2 ,让其谐振输出电流基波频率的2倍,从而短路掉交流侧的2倍频谐波^[4]。

2 单相电压型桥式整流电路的工作原理

图2是单相PWM电压型整流电路的运行方式相量图, $u_{a1}(t)$ 设为交流侧电压 $U_s(t)$ 的基波分量, $i_{N1}(t)$ 为电流 $i_N(t)$ 的基波分量,忽略电网电阻的条件下,对于基波分量,有下面的相量方程成立,即:

$$U_N = U_{a1} + j\omega L_N I_{N1} \quad (1)$$

可以看出,如果采用合适的PWM方式,使产生的调制电压与网压同频率,并且调节调制电压,以使得流出电网电流的基波分量与网压相位一致或正好相反,从而使得PWM整流器工作在如图2所示的整流或逆变的不同工况,来完成能量的双向流动。

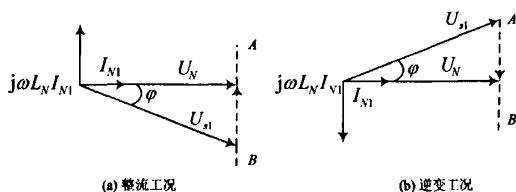


图2 单相电压型PWM整流电路运行方式相量图

假设整流时有:

$$u_N(t) = U_{Nm} \sin \omega t \quad (2)$$

调制波为:

$$u_g(t) = U_{gm} \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

设 U_{cm} 为三角载波幅值; $u_s(t)$ 为单极性 SPWM 波,采用状态空间平均模型分析, u_s 在一个开关周期内的平均值表示为:

$$\hat{u}_s = \frac{U_d}{U_{cm}} U_{gm} \sin(\omega t - \varphi) = m U_d \sin(\omega t - \varphi) \quad (4)$$

定义正弦脉宽调制比:

$$m = U_{gm} / U_{cm} \quad (5)$$

并取:

$$U_{s1m} = m U_d \quad (6)$$

则根据相量图,相角表达式为:

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega I_{N1} L_N}{U_N} \quad (7)$$

时能否使得交流侧获得高功率因数,此时有:

$$u_{a1}(t) = m U_d \sin(\omega t - \varphi) \quad (8)$$

从相量图及式(8)可以看出为保持单位功率因数,通过脉宽调制的适当控制,在不同的负载电流下,使向量端点轨迹沿直线AB运动。同理也能得到逆变工况下的运行条件,这里不再赘述。

3 单相电压型PWM整流电路工作过程分析

可以将电压型单相桥式PWM整流电路的4个桥臂看成4个开关,任一时刻应有两个桥臂导通。为避免输出短路,1,2桥臂和3,4桥臂都不允许同时导通。因此PWM整流电路有4种工作模式。图3(c)给出PWM整流电路在整流工况下的控制信号时序分布。从图中可以看出随着调制信号的正、负半周变化,电路在如图3(a),(b)所示的短路、整流、短路3个状态中交替变换。因此交流侧电压 $u_s(t)$ 是一个单极性PWM波形,输出幅值为 $\pm U_d$ 和0;而对应的电感L上压降 u_L 分别取 $u_N, u_N - U_d$ 和 $u_N + U_d$ 三种不同的值,这样通过调节调制比 m 就能有效控制 u_{a1} ,进而使得电路的功率因数为1。

4 单相电压型PWM电路控制策略分析

根据功率平衡原理,系统稳定运行时有下式成立:

$$\frac{dU_d}{dt} = \frac{U_N i_d}{C U_d^*} - \frac{U_d}{R_L C} \quad (9)$$

式中: U_d^* 是直流输出参考电压。对式(9)做拉氏变换,得到 I_d 与 U_d 的传递函数:

$$\frac{U_d(s)}{I_d(s)} = \frac{U_N R_L}{U_d^* (1 + R_L C s)} \quad (10)$$

假设PWM开关频率足够高,电流滞环可以使用一个小惯性环节代替,从而产生网侧参考电流 I_d^* 到 I_d 的传递关系:

$$W_i(s) = 1 / (T_i s + 1) \quad (11)$$

式中: T_i 电流滞环等效时间常数。为了滤除直流电压偏差中的二次纹波,可设计一个低通滤波器,若采用简单的一阶低通滤波器,则截止频率($f_c = 1/T_c$)一般选在二分之一基波频率以下,滤波器传递函数为^[5]:

$$G_L(s) = \frac{1}{T_c s + 1} \quad (12)$$

根据前述分析得到采用直接电流控制策略时单相PWM整流器的控制框图如图4所示。参考电压 U_{dref} 与直流侧输出电压 U_d 的差值,经低通滤波器后经PI调节与正弦同步信号相乘,产生参考电流信号 i_{dref} ,与相应的源侧电流反馈信号 i_{df} 做比较,形成电流偏差信号,这样随着桥入端电平更迭,网侧电流将始终围绕电流给定值升降,把偏差信号加入相应的输入调节电压前

馈,经滞环控制就得到调制信号,该调制信号与三角波载波相比较产生开关脉冲,经输出控制理想开关。

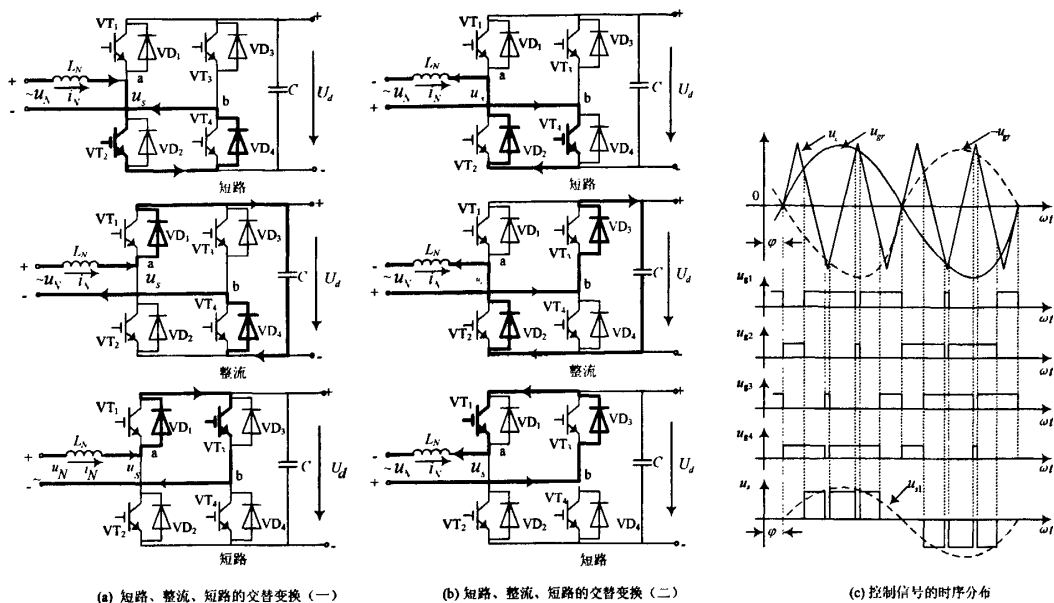


图3 单相电压型 PWM 整流电路控制时序与整流运行模式图

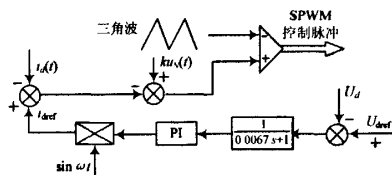


图4 单相电压型 PWM 整流电路直接电流控制策略

全桥整流部分进行了封装,结构和图 1 所示相同。

系统仿真参数如下:交流侧电网电压 220 V,工频 50 Hz,直流侧电阻 $R=10 \Omega$ 。主电路储能元件参数为 $L_N=3 \text{ mH}$, $C=143 \mu\text{F}$ 。PI 参数 $K_i=2.3$, $\tau_i=128$ 。

直流侧参考电压仿真结果如图 6 所示。

5 单相电压型桥式 PWM 整流电路的仿真

基于前述分析在 Simulink 6.0 软件中,对单相电压型 PWM 整流电路建立仿真电路,如图 5 所示。

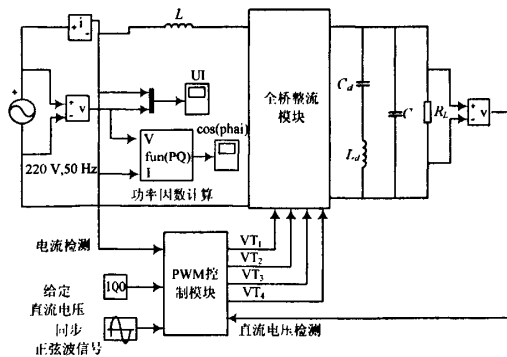
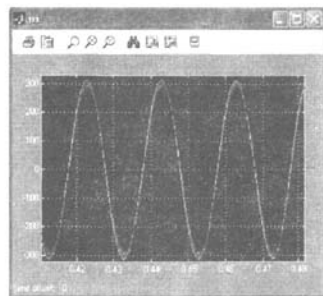
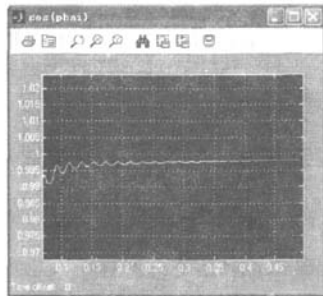


图5 单相电压型 PWM 整流电路仿真模型

其中各个功能块用子系统封装好。主要有控制功能块:包括电压比较,电流比较,PI, P 调节,低通滤波,三角载波信号功能子模块,正弦同步信号输出模块。对



(a) 电压电流波形仿真结果



(b) 功率因数仿真结果

图6 直流侧参考电压仿真结果

从图6中可看出仿真电路稳定运行后交流侧电流为规则正弦波且与交流侧电压同相位。仿真后的电路功率因数稳定后,大于0.995基本接近于1。

6 结 语

由于传统教学中有关PWM整流电路与应用等方面的论述中没有很详细地分析PWM整流电路的原理及其具体工作过程,在此以单相电压型PWM整流电路为例,详尽地讨论其工作原理,分析具体的工作模式,给出了系统相应的控制策略,设计了单相电压型PWM整流电路的仿真模型,并加以验证取得了满意的控制效果。对有关PWM整流电路教学实践与工程实际应用有一定的参考意义。

参 考 文 献

- [1] 刘志刚,叶斌,梁辉. 电力电子学[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [2] 徐德鸿,马皓. 电力电子学[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [3] 林渭勋. 现代电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 王立明,王久和,王栓庆,等. 单相PWM整流器的一种建模方法[J]. 华北科技学院学报,2006,3(3):78-80.
- [5] 黄群,李方正. 单相电压型PWM整流器控制系统设计与仿真[J]. 装甲兵工程学院学报,2007,21(3):65-68.
- [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.
- [7] 张兴,杨孝志,刘正之,等. 单相电压型PWM整流器交流侧电感的设计[J]. 合肥工业大学学报,2004,27(1):31-34.
- [8] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动的Matlab仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [9] 黄海宏,王海欣,张毅,等. PWM整流电路的原理分析[J]. 电气电子教学学报,2007,29(4):28-30,33.
- [10] 叶其峰,金新民. 应用Matlab仿真单相PWM整流器的一种简单方法[J]. 电源技术应用,2003,6(2):37-40.
- [11] 易映萍,浣喜明,蔡子亮,等. 单相高频PWM整流逆变器能量回馈控制方法的研究[J]. 电气应用,2005,24(10):92-94.
- [12] 张加胜,李浩光. 单相PWM可逆整流器的动态控制建模方法[J]. 电力电子技术,2008,42(3):66-68.
- [13] 刘志敏,冯晓云,宋文胜,等. 单相三电平PWM整流器主电路统一数学模型的研究[J]. 机车电传动,2007(6):38-41.
- [14] 许赞,邹云屏,刘雄,等. 单相三电平PWM整流器双环控制系统的研究[J]. 电力电子技术,2008,42(9):1-3.

作者简介 张军伟 男,1974年出生,河北保定人,讲师,在读博士。研究方向为电力电子传动技术与大电机调速技术。

王兵树 男,1950年出生,河北平山人,教授,博士生导师。研究方向为电站机组仿真与大电机调速技术。

刘治安 男,1957年出生,山西合顺人,副教授。研究方向为计算机软件工程与信息系统。

安徽电力系统最大的光伏并网示范电站并网发电

安徽省电力公司建设和运营的省内电力系统最大光伏并网示范电站——蚌埠供电公司110 kV锥山变电站30 kW光伏电站于2008年12月成功并网发电。该项目是安徽省电力公司2008年重点科技项目。电站总装机容量30 kW,由安徽继远电网技术有限责任公司承建,合肥阳光电源有限公司参与设计、制造、安装。每年可发4万千瓦时的清洁电力,并可减少二氧化碳排放30多吨,社会环保效益明显,成为安徽省电力建设的新亮点。该电站的投入使用,必将为安徽省乃至全国的光伏并网电站商业运行起到良好的示范作用。

传统的火力发电多以煤炭为燃料,产生大量污染,主要为粉尘、二氧化碳、二氧化硫、热污染和化学药品污染等。利用新能源—太阳能发电则无需消耗燃料,没有空气污染,不排放废水,保护了环

境,且节约了能源。其电能传输距离近,线路损耗低,有效的实现了节能降耗。变电站光伏并网发电系统的应用,可以有效的在不影响原有电站用电系统的情况下引入太阳能这一清洁环保能源,有效减少变电站自身的电能需求。实现节能降耗,保护了环境和绿色用电。同时可以树立电力系统绿色环保的社会形象。

安徽继远电网技术有限责任公司是为电力系统服务的从事高新技术产品生产和技术服务的高新技术企业。公司先后承接了智能图像监控系统工程、继电保护、自动化、通信系统工程及计算机网络工程和安徽省城乡电网改造项目中的变电所综合自动化设备的开发、设计、生产、安装、调试工作,均通过了客户的工程验收,并获得较高的评价。

(摘自电源网)

单相电压型PWM整流电路原理分析与仿真

作者: [张军伟](#), [王兵树](#), [刘治安](#), [王晨悦](#), [李毅凯](#), [ZHANG Junwei](#), [WANG Bingshu](#), [LIU Zhian](#), [WANG Chenyue](#), [LI Yikai](#)

作者单位: [张军伟, ZHANG Junwei \(华北保定电力职业技术学院, 河北, 保定, 071056; 华北电力大学, 控制科学与工程学院, 河北, 保定, 071003\)](#), [王兵树, WANG Bingshu \(华北电力大学, 控制科学与工程学院, 河北, 保定, 071003\)](#), [刘治安, 王晨悦, LIU Zhian, WANG Chenyue \(华北保定电力职业技术学院, 河北, 保定, 071056\)](#), [李毅凯, LI Yikai \(河北大学, 河北, 保定, 071001\)](#)

刊名: [现代电子技术](#) **ISTIC**

英文刊名: [MODERN ELECTRONICS TECHNIQUE](#)

年, 卷(期): 2009, 32 (8)

被引用次数: 4次

参考文献(14条)

1. [刘志刚;叶斌;梁辉 电力电子学](#) 2004
2. [徐德鸿;马皓 电力电子学](#) 2004
3. [林渭勋 现代电力电子技术](#) 2005
4. [王立明;王久和;王栓庆 单相PWM整流器的一种建模方法](#)[期刊论文]-[华北科技学院学报](#) 2006 (03)
5. [黄群;李方正 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 (03)
6. [张崇巍;张兴 PWM整流器及其控制](#) 2003
7. [张兴;杨孝志;刘正之 单相电压型PWM整流器交流侧电感的设计](#)[期刊论文]-[合肥工业大学学报\(自然科学版\)](#) 2004 (01)
8. [洪乃刚 电力电子和电力拖动的Matlab仿真](#) 2006
9. [黄海宏;王海欣;张毅 PWM整流电路的原理分析](#)[期刊论文]-[电气电子教学学报](#) 2007 (04)
10. [叶其峰;金新民 应用Matlab仿真单相PWM整流器的一种简单方法](#) 2003 (02)
11. [易映萍;浣喜明;蔡子亮 单相高频PWM整流逆变能量回馈控制方法的研究](#)[期刊论文]-[电气应用](#) 2005 (10)
12. [张加胜;李浩光 单相PWM可逆整流器的动态控制建模方法](#)[期刊论文]-[电力电子技术](#) 2008 (03)
13. [刘志敏;冯晓云;宋文胜 单相三电平PWM整流器主电路统一数学模型的研究](#)[期刊论文]-[机车电传动](#) 2007 (06)
14. [许赞;邹云屏;刘雄 单相三电平PWM整流器双环控制系统的研究](#)[期刊论文]-[电力电子技术](#) 2008 (09)

本文读者也读过(5条)

1. [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)
2. [朱文超, 卢健康, 王萑, ZHU Wen-chao, LU Jian-kang, WANG Huan 电压型PWM整流电路动态设计方法的改进](#)[期刊论文]-[机械与电子](#)2010 (5)
3. [黄海宏, 王海欣, 张毅, 许月霞, HUANG Hai-hong, WANG Hai-xin, ZHANG Yi, XU Yue-xia PWM整流电路的原理分析](#)[期刊论文]-[电气电子教学学报](#)2007, 29 (4)
4. [张兴, 杨孝志, 刘正之, 张崇巍 单相电压型PWM整流器交流侧电感的设计](#)[期刊论文]-[合肥工业大学学报\(自然科学版\)](#)2004, 27 (1)
5. [王立明 单相电压型PWM整流器无源控制研究](#)[学位论文]2007

引证文献(4条)

1. [彭伟发 单相PWM变流器的设计与仿真](#)[期刊论文]-[枣庄学院学报](#) 2011 (2)
2. [王成, 杨亚萍 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)

3. [张泾周](#), [左永泽](#), [滕炯华](#) [单相航空PWM整流器研究与设计](#)[期刊论文]-[计算机仿真](#) 2011(7)
4. [谢瑶](#) [单片机控制的变频调速系统](#)[期刊论文]-[物联网技术](#) 2011(3)

引用本文格式: [张军伟](#), [王兵树](#), [刘治安](#), [王晨悦](#), [李毅凯](#), [ZHANG Junwei](#), [WANG Bingshu](#), [LIU Zhian](#), [WANG Chenyue](#), [LI Yikai](#) [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(8)