

单相 PWM 整流器的建模与仿真分析\*

秦立新

(海军驻上海江南造船(集团)有限责任公司军事代表室 上海 200023)

**摘 要** 文章详细分析了单相 VSR 型 PWM 整流器的整流原理,建立了电流内环,电压外环的单相 VSR 型 PWM 整流控制器的数学模型和逻辑框图。在 MATLAB/Simulink 软件环境中进行了仿真,分析了模型的可行性。  
**关键词** VSR; 整流; Simulink; 建模; 仿真  
**中图分类号** TM461

Analysis of Modeling and Simulation with Single Phase PWM Rectifier

Qin Lixin

(Naval Military Representative Office in Shanghai Jangnan Shipyard(Group) Co., Ltd, Shanghai 200023)

**Abstract** The single-phase PWM Rectifier Rectifier VSR principle has been detailed analysed. The maths model and logic digram of single-phase PWM rectifier of VSR-type with an inner current, outer voltage was designed. The feasibility of the model was verified by modeling and simulation carried out under the MATLAB/Simulink.  
**Key Words** VSR, rectifier, Simulink, modeling, simulation  
**Class Number** TM461

1 引言

随着电力电子技术、自动控制技术的发展,船用晶闸管、IGBT、MOSFET 等大功率电力半导体器件的出现,以 PWM、SPWM、SAPWM 为主的各类功率转换技术在机电控制<sup>[1]</sup>领域得到了广泛的应用。本文在三相 VSR 整流模型<sup>[2]</sup>的基础之上,对单相 VSR 整流原理进行系统分析,建立电流内环、电压外环的双闭环控制整流模型,在 Simulink 环境下进行了仿真和性能分析。

2 单相 PWM 整流控制器整流原理

单相 VSR 全控整流器拓扑结构如图 1 所示,控制器通过对电路参数进行采样,输出可控的 PWM 波对 T1~T4 四只功率管实现全控整流<sup>[3]</sup>,将  $v_{dk}$  的电压控制在给定电压  $v_{dk}^*$  附近,下面我们对单相 PWM 整流的原理进行分析。

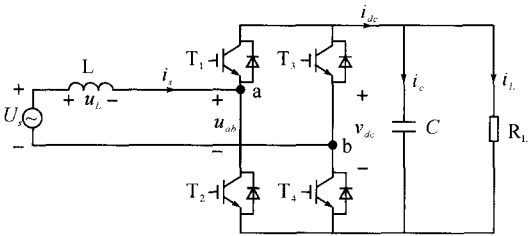


图 1 单相 VSR 全控整流器

假如忽略功率开关管的功率损耗<sup>[4]</sup>,交流侧输入功率与直流侧所消耗的功率平衡:

$$u_{ab}i_s=v_{dk}i_{dc} \tag{1}$$

由式(1)可知,电路中交流侧和直流侧可以相互控制,在直流侧负载不变的情况下,若控制交流的输入功率不变,直流侧电压可保持恒定。PWM 整流控制,一般使用电流内环,电压外环的控制策略,通过电压外环使直流侧的输出电压  $v_{dk}$  保持在设定值  $v_{dk}^*$ ,通过电流内环控制网侧电流  $i_s$  的幅值和相位,保持电流  $i_s$  与电压  $u_s$  同相位,从而实现单位功率因数整流。

\* 收稿日期:2011 年 6 月 8 日,修回日期:2011 年 7 月 19 日  
万方数据

### 3 单相 PWM 整流器电流内环控制器的设计<sup>[5]</sup>

为了提高转换效率、实现单位功率因数整流和改变虚拟电子负载的性质<sup>[3]</sup>, 电流内环控制的作用就是使网侧电流跟踪电压外环给定的电流指令进行随动控制。为了方便分析, 我们假设电压外环输出的网侧电流指令为  $i_s^*$ , 电流内环采用 PI 调节。

针对图 1 所示的单相全桥 VSR 整流电路, 若采用双极性调制, 可以用双极性二值开关逻辑函数  $s(t)$  来描述开关管的工作状态<sup>[1]</sup>, 即

$$s(t) = \begin{cases} 1 & T_1, T_4 \text{ 导通} \\ -1 & T_2, T_3 \text{ 导通} \end{cases} \quad (2)$$

此时网侧电压和网测电流满足如下关系:

$$u_{ab} = v_{dc} s(t) \quad (3)$$

$$i_{dc} = i_s s(t) \quad (4)$$

若忽略 PWM 的谐波分量, 开关函数可写成如下形式

$$s(t) \approx m \sin(\omega t + \phi) \quad (5)$$

其中  $m$  为 PWM 的调制比,  $\phi$  为  $s(t)$  基波的初始相角, 根据式(3)、(4)和式(5)则

$$u_{ab} \approx v_{dc} m \sin(\omega t + \phi) \quad (6)$$

$$i_{dc} \approx i_s m \sin(\omega t + \phi) \quad (7)$$

根据式(3)通过对  $i_s^* - i_s$  得到的偏差进行 PI 控制<sup>[6]</sup>, 控制器的输出调节 PWM 的调制比  $m$ , 可以实现对网侧电压  $u_{ab}$  的控制。根据式(7), 对网侧电压  $u_{ab}$  的控制就可以实现对网侧电流的控制。根据上述分析我们可以画出电流内环的控制框图如图 2 所示。

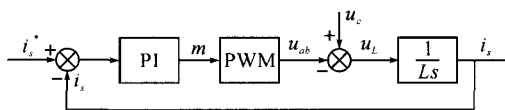


图 2 电流内环控制框图

### 4 单相 PWM 整流器电压外环控制器的设计<sup>[7]</sup>

对电压外环控制, 将直流侧电压  $v_{dc}$  与电压设定值  $v_{dc}^*$  进行比较得到偏差  $v_{dc}^* - v_{dc}$ , 然后进行 PI 控制, 输出电流内环电流  $i_s$  的幅值  $I_{sm}$ 。电压外环实际上是定值控制, 将直流侧的电压控制在给定值。为方便起见我们把电流内环的传递函数记为  $w_{ci}(s)$ , 为了进行单位功率因数整流, 需要对电流内环的输入电流  $i_s^*$  进行相位控制, 要保持网侧电流  $i_s$  与交流电压源电压  $u_s$  保持同步, 通过锁相环模

块检测  $u_s$  的相位  $\varphi$  和角频率  $\omega$ <sup>[8,11]</sup>, 令

$$i_s^* = I_{sm} \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

根据 KCL 定律列出直流侧电流方程:

$$i_{dc} = i_c + i_L = C \frac{dv_{dc}}{dt} + i_L \quad (9)$$

进行拉氏变换得:

$$\frac{I_{dc}(s) - I_L(s)}{V_{dc}(s)} = \frac{1}{Cs} \quad (10)$$

根据式(6)、(8)、(9)可以得到电压外环的控制框图, 如图 3 所示。

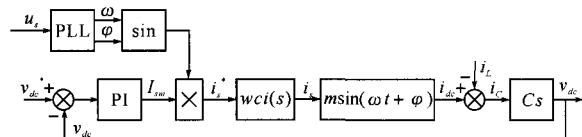


图 3 电压外环控制框图

### 5 基于 Simulink<sup>[8]</sup> 下 PWM 控制器仿真与分析

在 Simulink 应用环境下, 根据控制逻辑图搭建整流控制模型<sup>[11]</sup>, 在控制模型中对设计的参数整定和仿真。仿真过程中设定电源电压为 AC 220V, 网侧电感 4.46mH, 直流侧电容为 4.7mF, 搭建的仿真模型如图 4 和图 5。

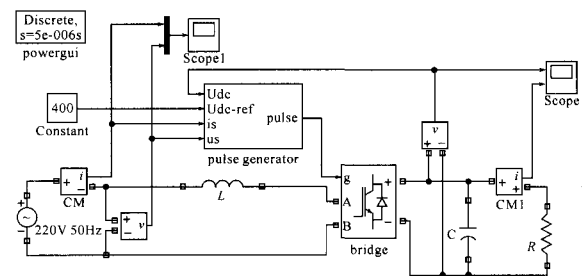


图 4 PWM 整流器 Simulink 模型

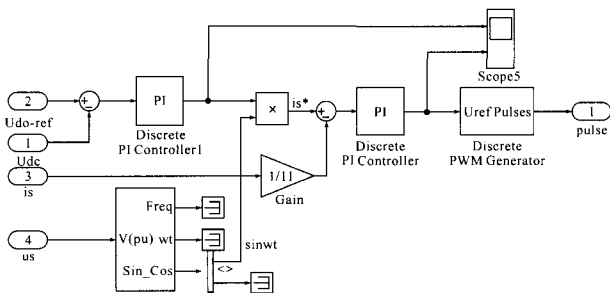


图 5 pulse generator 子模块

经过仿真运算, 利用 scope 输出电源电压  $u_s$  和网侧电路  $i_s$ 。

如图 6 所示  $u_s$  和  $i_s$  的波形, 由波形可以看出经过一段较短的过渡过程后, 可以保证网侧电流  $i_s$  与电源电压  $u_s$  同相位实现单位功率因数整流。如

(下转第 145 页)

实部队和仿真模型遂行军事行动具有一定的参考价值。论文提出的标注方法目前是在军事本体基础上进行,但这种本体在本体谱中尚属于分类学本体,对概念间关系的表达较弱,不能完全满足标注需要;另外,该标注方法的核心是动作映射函数  $f_T$ ,  $f_T$  通过降低动作的抽象程度实现机器的可理解,针对不同的仿真系统需要构造不同的  $f_T$ ,这就增大了实现的复杂性。这些问题将在以后的工作中进一步研究。

### 参考文献

- [1] Reus D, Kromp D. BML-enabling of national C2 systems for coupling to Simulation [EB/OL]. <http://www.sisostds.org>, 2010
- [2] Ulrich Schade. Formalizing Battle Management Language: A Grammar for Specifying Orders [C]//06S-SIW-068. Orlando, FL, USA: Fall Simulation Interoperation Workshop, 2006
- [3] Schade U, Michael R. H. Battle Management Language: A Grammar for Specifying Reports [C]//07S-

SIW-036, 2007 Spring Simulation Interoperability Workshop, Norfolk, VA, 2007

- [4] 袁黎苗, 鲍广宇, 朱立. 一种基于 BNF 的作战管理语言语法表示 [J]. 军事通信技术, 2010, 31(4): 35~39
- [5] Andreas Tolk, Saikou Diallo. A System View of C-BML(07F-SIW-054) [EB/OL]. <http://www.sisostds.org>, 2010
- [6] 彭勇, 彭春光, 龚建兴, 等. 作战管理语言研究综述 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5336~5339
- [7] Crocker D, Overell P. Augmented BNF for Syntax Specifications: ABNF [EB/OL]. (1997-11-13) [2010-07-08]. <http://www.IETF.org/RFC/RFC2234.txt>
- [8] Saikou Diallo, Andreas Tolk, Chuck Turnitsa. Merging Protocols, Grammar, Representation, and Ontological Approaches in Support of C-BML [C]//06S-SIW-008. Orlando, FL, USA: Fall Simulation Interoperation Workshop, 2006
- [9] 李向阳, 张亚非. 基于语义标注的信息抽取 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, 5(4): 39~43
- [10] 顾晓明. 一个基于本体的作战文书理解系统设计与实现 [D]. 南京: 东南大学硕士论文, 2006

(上接第 129 页)

图 7 所示直流侧电压  $u_{dk}$  波形, 可以看出直流侧电压  $u_{dk}$  能够稳定在给的整流电压(图上为 400V)附近, 但存在一定的谐波成分。

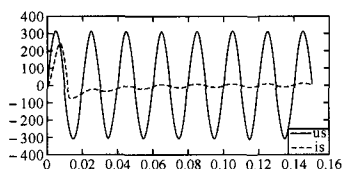


图 6 电源电压  $u_s$  与网侧电流  $i_s$  的波形图

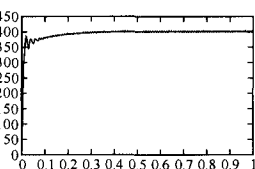


图 7 直流侧电压  $u_{dk}$  的波形图

## 6 结语

本文根据三相 VSR 整流模型, 设计了单相 VSR 型 PWM 整流控制器控制逻辑框图, 在 Simulink 环境中建立了仿真数学模型。经参数整定和仿真分析表明, 本控制器能够实现单位功率因数整流, 并能够维持直流侧输出电压的基本恒定。

### 参考文献

- [1] 张悦. 基于 FPGA 的单相 PWM 整流器的设计 [D]. 天

津理工大学, 2008

- [2] 张崇巍, 张兴. PWM 整流及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [3] 王立明, 王久和, 王栓庆, 等. 单相 PWM 整流器的一种建模方法 [J]. 华北科学院学报, 2006, 3(3): 78~80
- [4] 李鑫, 姚勇涛, 张逸成, 等. 采用电容电流内环的逆变器双闭环控制研究 [J]. 电气传动, 2008, 38(2): 22~26
- [5] 齐乐. 电力系统模拟中的可控负载的研究 [D]. 天津大学, 2006
- [6] 舒为亮, 张昌盛, 段善旭, 等. 逆变电源 PI 双环数字控制技术 [J]. 电工电能新技术, 2003, 24(2): 52~54
- [7] 张军伟. 单相电压源 PWM 整流电路原理分析与仿真 [J]. 现代电子技术, 2008
- [8] 朱霞清. 给予 Matlab 的三相电压型 PWM 整流器的仿真研究 [J]. 齐齐哈尔大学学报, 2011, 27(5): 6~10
- [9] 朱浩锋, 邱飞岳. 基于 PWM 的弱视治疗仪光源设计与实现 [J]. 计算机与数字工程, 2009, 37(5)
- [10] 曾喜良, 赵欢. 基于 C8051F020 的 PWM 调速控制 [J]. 计算机与数字工程, 2008, 36(8)
- [11] 王正林, 郭阳宽. 过程控制与 Simulink 应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006

作者: 秦立新  
作者单位: 海军驻上海江南造船集团有限责任公司军事代表室, 上海, 200023  
刊名: 舰船电子工程  
英文刊名: Ship Electronic Engineering  
年, 卷(期): 2011, 31(12)

## 参考文献(11条)

1. 张悦 基于FPGA的单相PWM整流器的设计[学位论文] 2008
2. 张崇巍;张兴 PWM整流及其控制 2003
3. 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)
4. 李鑫;姚勇涛;张逸成 采用电容电流内环的逆变器双闭环控制研究[期刊论文]-电气传动 2008(02)
5. 齐乐 电力系统模拟中的可控负载的研究 2006
6. 舒为亮;张昌盛;段善旭 逆变电源PI双环数字控制技术研究[期刊论文]-电工电能新技术 2003(02)
7. 张军伟 单相电压源PWM整流电路原理分析与仿真 2008
8. 朱霞清 给予Matlab的三相电压型PWM整流器的仿真研究 2011(05)
9. 朱浩锋;邱飞岳 基于PWM的弱视治疗仪光源设计与实现[期刊论文]-计算机与数字工程 2009(05)
10. 曾喜良;赵欢 基于C8051F020的PWM调速控制[期刊论文]-计算机与数字工程 2008(08)
11. 王正林;郭阳宽 过程控制与Simulink应用 2006

引用本文格式: 秦立新 单相PWM整流器的建模与仿真分析[期刊论文]-舰船电子工程 2011(12)