

# 无耦合双闭环 PWM 整流器的设计

马军波, 屈有哲

(中国矿业大学电气与信息工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 常规整流环节广泛采用的二极管整流电路和晶闸管相控整流电路对电网注入了大量谐波, 给电网造成污染。随着绿色能源的发展, PWM 整流器技术已成为电力电子技术研究的热点和亮点。由于可以实现电网无污染、功率因数可控以及电能的双向传输, PWM 整流器可以作为理想的用电设备或电网与其它电气设备的接口。本文分析了 PWM 整流器的基本原理, 给出了三相电压型 PWM 整流器的拓扑结构, 在此基础上提出了基于 d-q 坐标下, 对 PWM 整流器进行无耦合双闭环的控制方法, 并通过 MATLAB/SIMULINK 进行仿真, 验证了这种控制方法可以实现单位功率因素整流, 且提高了直流侧电压响应速度。

**关键词:** 电力系统及其自动化; 基本原理; 拓扑结构; 双闭环控制; 无耦合; 空间矢量

中图分类号: TM77

## The design of PWM rectifier Based on Independent coupling and Double Close-Loop Control

Ma Junbo, Qu Youzhe

(School of information and Electrical Engineering CUMT, JiangSu XuZhou 221008)

**Abstract:** The conventional rectifier section widely consists of diode-rectifier circuit and phase-control thyristor rectifier, which injects large amounts of harmonics into the power networks and produces much contamination. With the development of the green power technology, PWM rectifier has become a highlight in the field of power electronics. Due to the merits of pollution-free, adjustable power factor and bi-direction power transfer, the PWM rectifier can be an ideal electric appliance or a linkage between grid-line and other electric facilities. This paper analyzes the basic principle of PWM rectifier and gives three-phase voltage-type PWM rectifier topology, in this based on the d-q coordinates is proposed based on the PWM rectifier coupled pair of loop-free control method, and through the MATLAB / SIMULINK simulations show that this control method can achieve unity power factor rectifier, and improve the response speed of DC-side voltage.

**Keywords:** electric power system and automation; basic principles; topological structure; double-loop control; independent coupling; space vector

### 1 引言

随着功率半导体开关器件技术的进步, 促进了电力电子变流装置技术的迅速发展, 出现了以脉宽调制 (PWM) 控制为基础的各类变流装置, 如变频器、逆变电源、高频开关电源以及各类特种变流器等, 这些变流装置在国民经济各领域中取得了广泛的应用。但是, 目前这些变流装置很大一部分需要整流环节, 以获得直流电压, 由于常规整流环节广泛采用了二极管不控整流电路或晶闸管相控整流电路, 因而对电网注入了大量谐波及无功, 造成了严重的电网“污染”。治理这种电网“污染”最根本措施就是, 要求变流装置实现网侧电流正弦化, 且运行于单位功率因数。因此, 作为电网主要“污染”源的整流器, 首先受到了学术界的关注, 并开展了大量研究工作。

针对上述不足, PWM 整流器<sup>[1-2]</sup>对传统的二极管及相控整流器进行了全面的改进。其关键性改进在于用全控型功率开关管取代了半控型功率开关管或二极管, 以 PWM 整流器取代了相控整流或不可控整流。PWM 整流器具有的优良性能诸如: 网侧实现功率因数的控制

**作者简介:** 马军波, 中国矿业大学在校研究生, Email:junbogoodnight@126.com



整流器交流电压矢量 $\vec{V}$ 端点运动轨迹构成了一个以 $|\vec{V}_L|$ 为半径的圆。当电压矢量 $\vec{v}$ 端点位于圆轨迹 A 点时, 电流矢量 $\vec{i}$ 比电动势矢量 $\vec{E}$ 滞后 $90^\circ$ , 此时 PWM 整流器网侧呈现纯电感特性, 如图 2(a)所示; 当电压矢量 $\vec{v}$ 端点运动至圆轨迹 B 点时, 电流矢量 $\vec{i}$ 与电动势矢量 $\vec{E}$ 平行且同向, 此时 PWM 整流器网侧呈现正电阻特性, 如图 2(b)所示; 当电压矢量 $\vec{v}$ 端点运动至圆轨迹 C 点时, 电流矢量 $\vec{i}$ 比电动势矢量 $\vec{E}$ 超前 $90^\circ$ , 此时 PWM 整流器网侧呈现纯电容特性, 如图 2(c)所示; 当电压矢量 $\vec{v}$ 端点运动至圆轨迹 D 点时, 电流矢量 $\vec{i}$ 与电动势矢量 $\vec{E}$ 平行且反向, 此时 PWM 整流器网侧呈现负阻特性, 如图 2(d)所示。以上, A、B、C、D 四点是 PWM 整流器四象限运行的四个特殊工作状态点。

### 3 三相电压型 PWM 整流器的拓扑结构

随着 PWM 整流器技术的发展, 已设计出多种 PWM 整流器。基本的分类方法就是将 PWM 整流器分类成电压源型和电流源型两大类。相对于电流源型 PWM 整流器而言, 电压源型 PWM 整流器有较快的响应速度, 且易于实现, 所以目前 PWM 整流器一般采用电压源型 PWM 整流电路。本文研究的 PWM 整流器的三相 VSR 拓扑结构如图 3 所示。

三相 SVR 直流侧采用电容进行直流储能, 从而使它的直流侧呈低阻抗的电压源特性, 同时在交流侧有一个电感, 使它具有 Boost AC/DC 变换性能以及交流侧受控电流源特性。

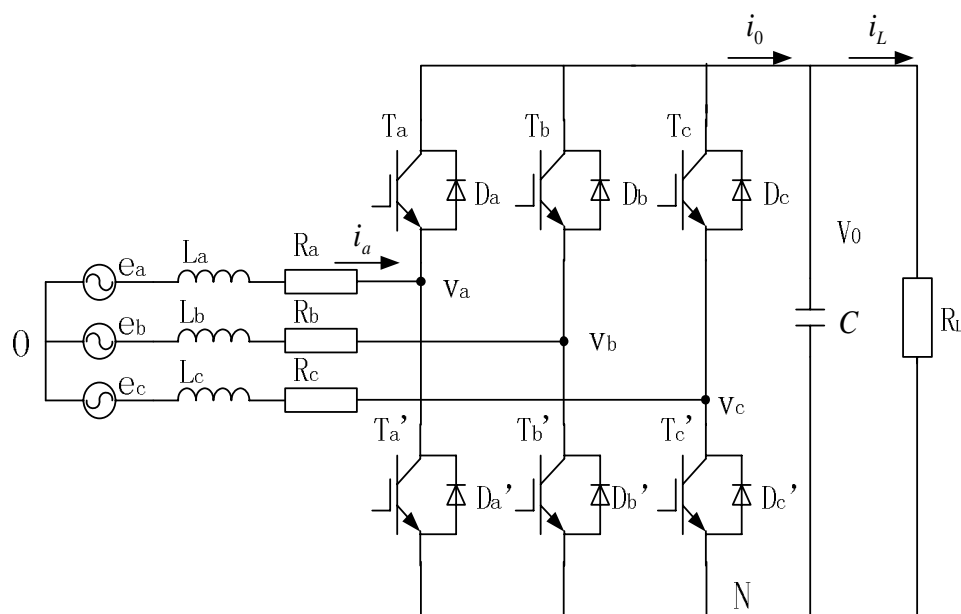


图 3 三相 VSR 的拓扑结构  
Fig.3 Topological Structure of three-phase VSR

### 4 基于同步旋转坐标下的 PWM 整流器的双闭环控制设计

由于静止坐标系中的三相电源是互相耦合的, 控制起来比较复杂, 所以一般采用旋转坐标系模型的控制方法<sup>[4]</sup>。如果电网输入电压平衡, 此时 d、q 分量均为直流, 且 dq 坐标系中的 d 轴电流为系统输入有功电流, q 轴电流为系统无功电流。这样就可以实现三相 VSR 网侧有功和无功分量无耦合、独立控制。所以调节器的设计方便, 运算简单, 而且很容易实现输入功率因素为 1<sup>[5]</sup>。具体分析如下:

假设三相电压源输入电压:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_m \cos(\omega t) \\ E_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ E_m \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

式中,  $E_m$ 、 $\omega$  是网侧三相输入电源电压幅值与角速度。将三相电压变换到  $dq$  坐标系, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

通过给定系统有功功率  $P^*$  和无功功率  $Q^*$  可以得到其所对应的电流给定:

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e_d & e_q \\ -e_q & e_d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

为了实现 PWM 整流器的单位功率因素, 给定无功功率  $Q^*$  等于 0。同时, 将式 (3-2) 代入上式可以得到:

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} P^* \\ E_m \\ Q^* \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

由已知的两相旋转坐标系  $dq$  系统模型, 可以得到  $dq$  两相电流微分方程为:

$$\begin{cases} L_{re} \frac{di_d}{dt} = e_d - R_{re} i_d - V_d + \omega L_{re} i_q \\ L_{re} \frac{di_q}{dt} = e_q - R_{re} i_q - V_q + \omega L_{re} i_d \end{cases} \quad (3-5)$$

由此, 可以将电流内环设计为:

$$\begin{cases} V_d^* = -\left(K_{dp} + \frac{K_{di}}{S}\right)(i_d^* - i_d) + e_d + \omega L_{re} i_q \\ V_q^* = -\left(K_{qp} + \frac{K_{qi}}{S}\right)(i_q^* - i_q) + e_q + \omega L_{re} i_d \end{cases} \quad (3-6)$$

根据上述分析, 构造如下图所示的变流系统双环控制结构。外环为电压环, 控制直流母线电压的输出, 通过直流母线电压给定和反馈得到系统输出电压误差, 经过电压调节器计算有功电流给定  $i_d^*$ 。其值决定有功功率的大小, 符号决定功率的流向。系统内环为点六环, 其作用是控制电流响应。控制框图如图 4 所示:

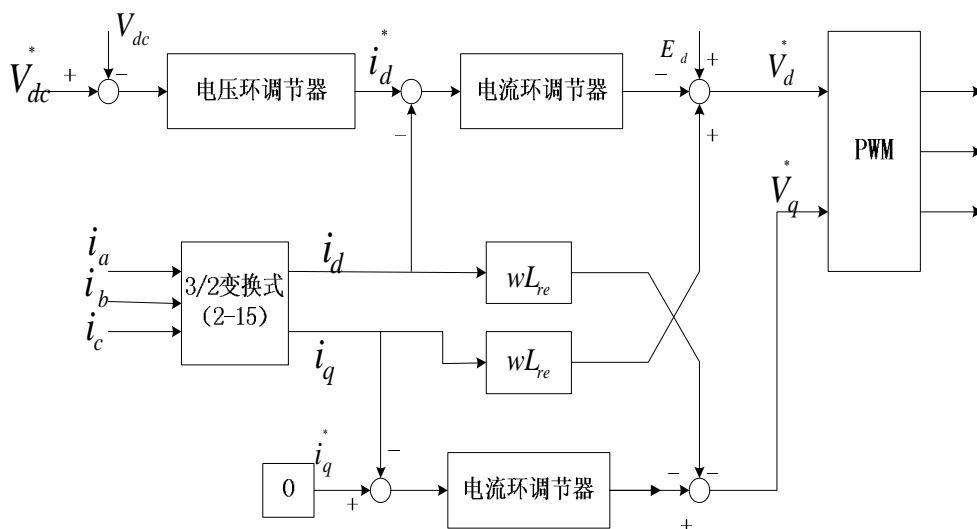


图 4 三相 VSR 基于同步旋转变换的控制框图

Fig.4 three-phase VSR control program based on d-q Coordinate System

## 5 基于 MATLAB/SIMULINK 的三相 VSR 仿真分析

根据第 4 节得到的三相 VSR 同步旋转坐标下的控制框图，利用 MATLAB/SIMULINK 搭建系统的仿真模型<sup>[6]</sup>如下，图 5 为主电路仿真模型，图 6 为控制电路仿真模型。

由于空间矢量的 PWM 控制具有更好的控制性能，所以本系统在控制电路中采用了 SVPWM 控制。仿真参数忽略电感电阻的影响，三相输入为三相对称正弦电压，相位上互差 120 度，相电压幅值  $V_a=V_b=V_c=110V$ ，输入侧等效电阻为  $R=0.1\Omega$ ，系统采样频率  $f=50HZ$ ，电感  $L=0.0025H$ ，直流侧电容  $C=0.0025F$ ，负载  $R=13\Omega$ 。

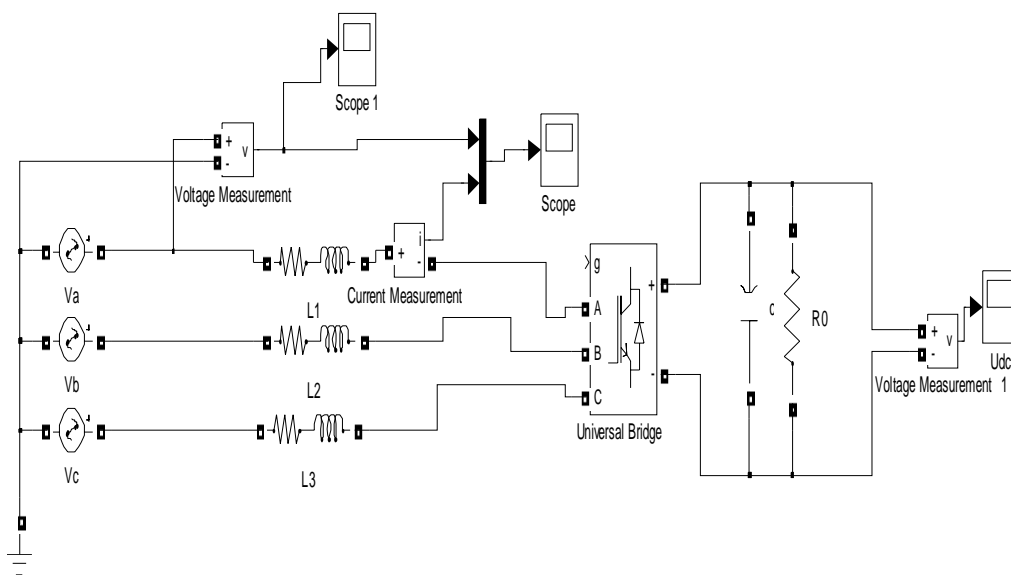


图 5 主电路仿真模型

Fig.5 simulation model of Main Circuits

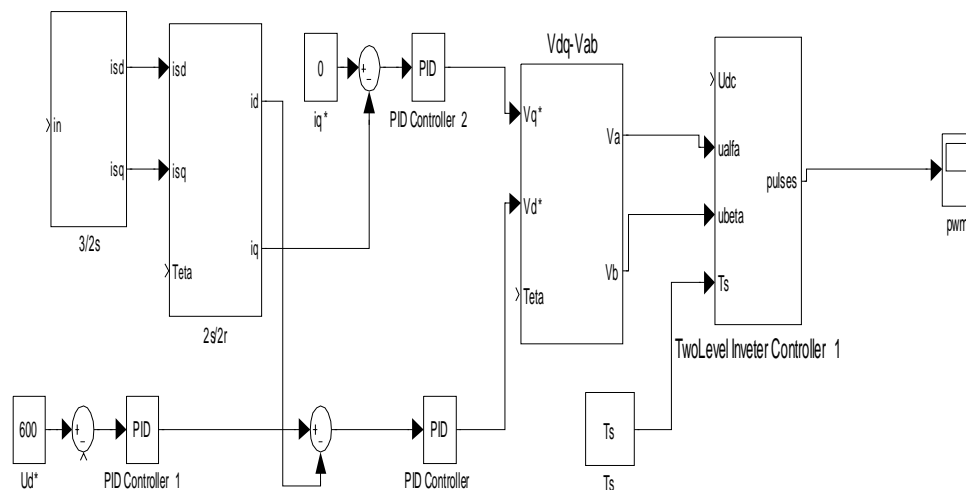


图 6 控制电路仿真模型  
Fig.6 simulation model of control Circuits

1. 根据以上仿真模型和参数设置，得到以下仿真波形图

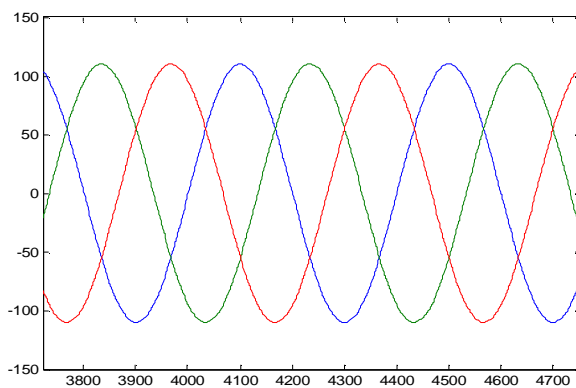


图 7 三相电压波形  
Fig.7 wave of three-phase voltage

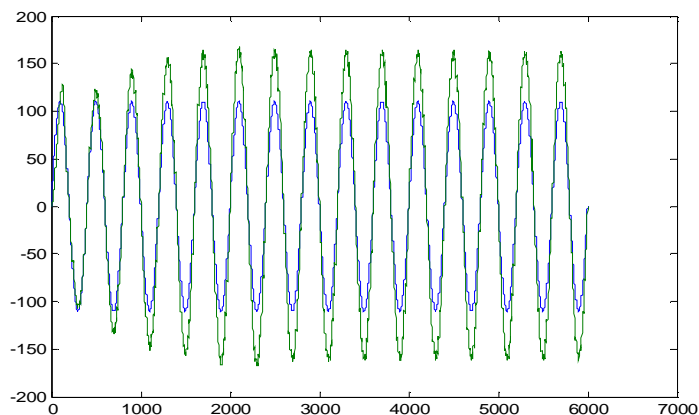


图 8 A 相电压与电流波形  
Fig.8 wave of A-phase voltage and current

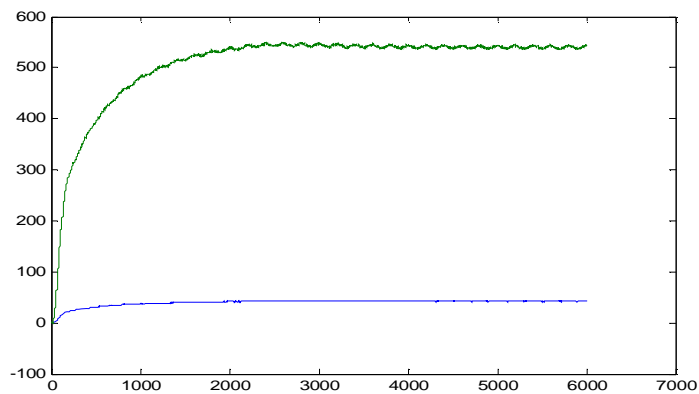


图9 直流侧电流、电压波形  
Fig.9 wave of DC-side voltage and current

2. 负载突变时的波形图

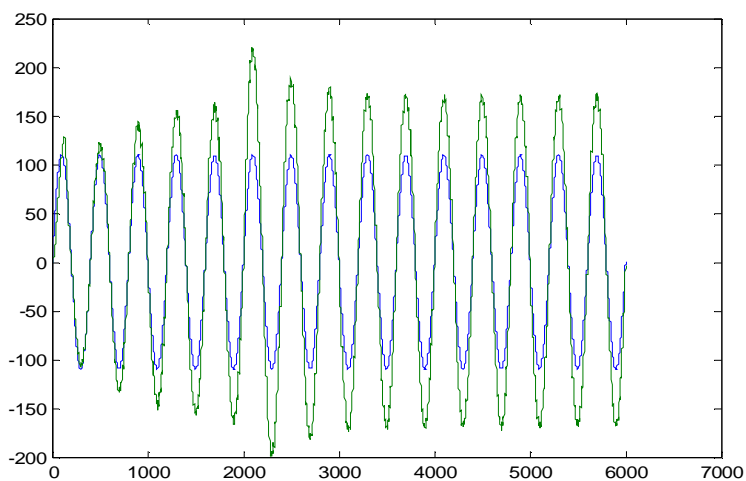


图10 突变时A相电压与电流波形  
Fig.8 wave of A-phase voltage and current when sudden change

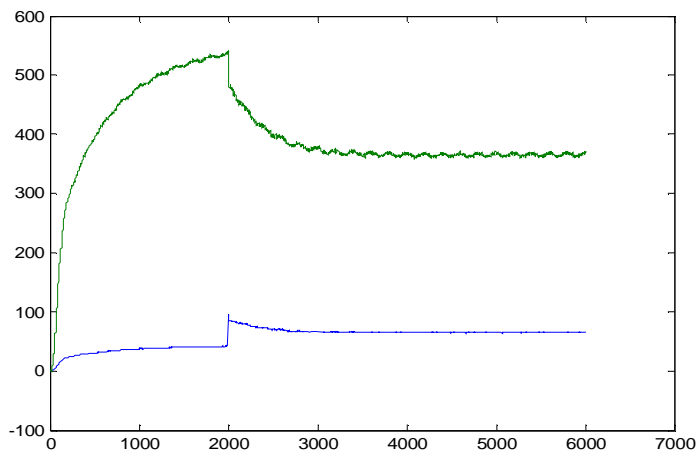


图11 突变时直流侧电流、电压波形  
Fig.11 wave of DC-side voltage and current when sudden change

仿真结果分析：PWM 整流器的电压响应速度很快，而且超调很小，稳定后电压非常平

稳; PWM 整流器基波实现了电压与电流的同相位, 并且电流波形近似正弦, 谐波含量小, 实现了单位功率因数整流; 当突然减小负载时, 整流器输入侧电流有少许波动, 并很快恢复为正弦波, 输入侧电压降低并很快恢复到平衡。

所以, 系统所采用的双闭环空间矢量控制方法具有较好的动态性能和稳态性能。

## 6 小结

本文所研究的 PWM 整流器, 是基于同步旋转坐标下, 采用双闭环进行控制, 并且通过仿真验证了这种控制方法, 不但可以实现整流直流侧电压响应速度快, 超调量小, 实现单位功率因数整流, 且在负载突变的情况下很快恢复稳定。

## 参考文献 (References)

- [1] 袁文华. 电压型 PWM 整流器及其控制策略研究[D]. 徐州:中国矿业大学硕士学位论文, 2007.
- [2] 张崇魏, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 机械工业出版社. 2003.
- [3] 接峰. 三相PWM整流器及其控制[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2006.
- [4] 武志贤, 蔡丽娟, 汤酉元. 相高功率因数整流器的研究现状及展望[J]. 电气传动, 2005 (35) . .
- [5] 董晓鹏, 王兆安. 相电压型单位功率因数PWM整流器的研究[J]. 电力电子技术, 1997 (11):39-41.
- [6] 林飞. 电力电子应用技术的 MATLAB 仿真[M]. 北京:中国电力出版社, 2009.