

## PWM 整流电路及其控制方法

- Ø 实用的整流电路几乎都是晶闸管整流或二极管整流
- Ø 晶闸管相控整流电路：输入电流滞后于电压，且谐波分量大，因此功率因数很低
- Ø 二极管整流电路：虽位移因数接近 1，但输入电流谐波很大，所以功率因数也很低
- Ø 把逆变电路中的 SPWM 控制技术用于整流电路，就形成了 **PWM 整流电路**  
可使其输入电流非常接近正弦波，且和输入电压同相位，功率因数近似为 1，也称**单位功率因数变流器**，或**高功率因数整流器**

### 6.4.1 PWM 整流电路的工作原理

PWM 整流电路也可分为电压型和电流型两大类，目前电压型的较多

#### 1. 单相 PWM 整流电路

图 6-28a 和 b 分别为**单相半桥**和**全桥** PWM 整流电路

半桥电路直流侧电容必须由两个电容串联，其中点和交流电源连接

全桥电路直流侧电容只要一个就可以

交流侧电感  $L_s$  包括外接电抗器的电感和交流电源内部电感，是电路正常工作所必须的

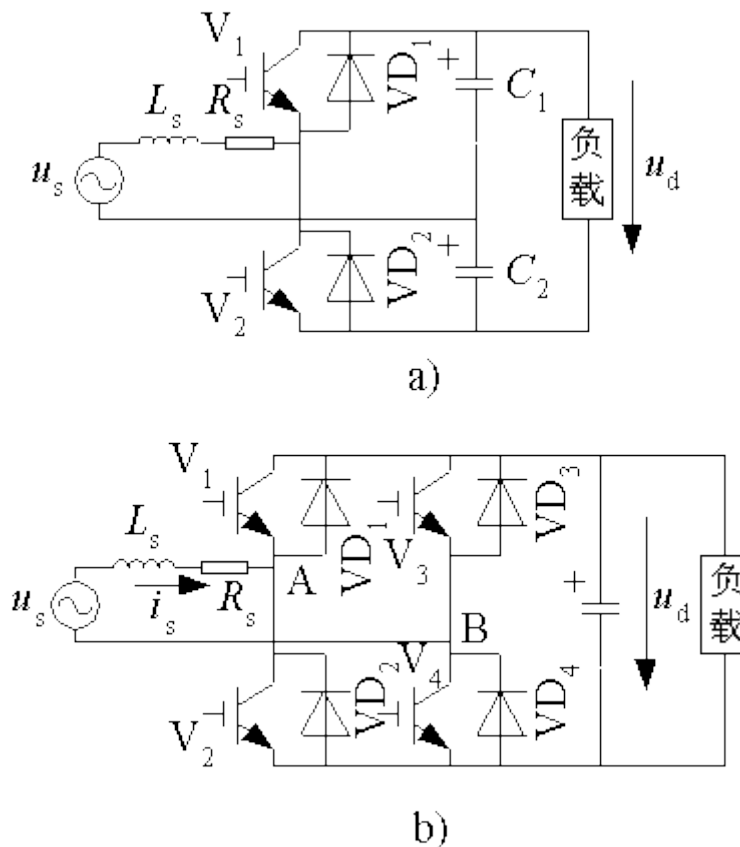


图 6-28 单相 PWM 整流电路

a) 单相半桥电路

b) 单相全桥电路

- Ø **单相全桥 PWM 整流电路的工作原理**

正弦信号波和三角波相比较的方法对  $V_1 \sim V_4$  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

由于  $L_s$  的滤波作用，谐波电压只使  $i_s$  产生很小的脉动

当信号波频率和电源频率相同时， $i_s$  也为与电源频率相同的正弦波

$u_s$  一定时， $i_s$  幅值和相位仅由  $u_{AB}$  中基波  $u_{ABf}$  的幅值及其与  $u_s$  的相位差决定

改变  $u_{ABf}$  的幅值和相位，可使  $i_s$  和  $u_s$  同相或反相， $i_s$  比  $u_s$  超前  $90^\circ$ ，或  $i_s$  与  $u_s$  相位差为所需角度

#### Ø 相量图（图 6-29）

a:  $\dot{U}_{AB}$  滞后  $\dot{U}_s$  相角  $d$ ， $\dot{I}_s$  和  $\dot{U}_s$  同相，整流状态，功率因数为 1，PWM 整流电路最基本的工作状态

b:  $\dot{U}_{AB}$  超前  $\dot{U}_s$  相角  $d$ ， $\dot{I}_s$  和  $\dot{U}_s$  反相，逆变状态，说明 PWM 整流电路可实现能量正反两方向流动，这一特点对于需再生制动的交流电动机调速系统很重要

c:  $\dot{U}_{AB}$  滞后  $\dot{U}_s$  相角  $d$ ， $\dot{I}_s$  超前  $\dot{U}_s$   $90^\circ$ ，电路向交流电源送出无功功率，这时称为静止无功功率发送器（Static Var Generator—SVG）

d: 通过对  $\dot{U}_{AB}$  幅值和相位的控制，可以使  $\dot{I}_s$  比  $\dot{U}_s$  超前或滞后任一角度

j

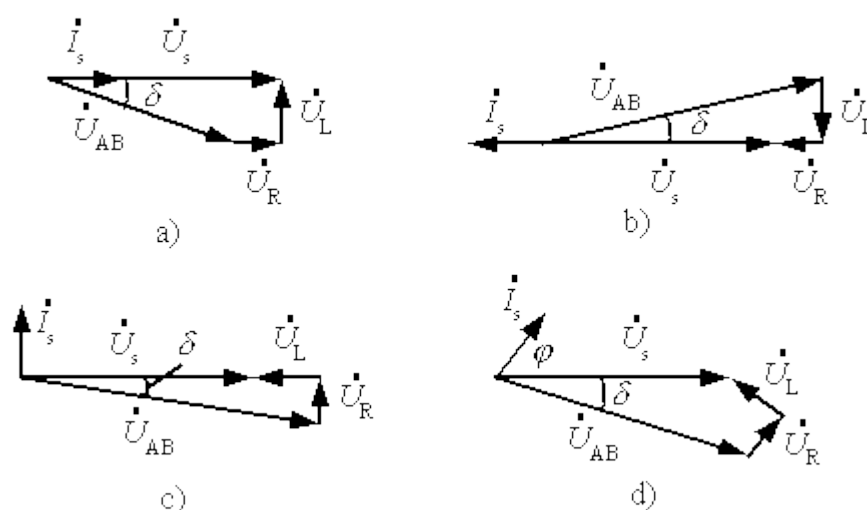


图 6-29 PWM 整流电路的运行方式相量图

a) 整流运行 b) 逆变运行 c) 无功补偿运行 d)  $\dot{I}_s$  超前角为

#### Ø 对单相全桥 PWM 整流电路工作原理的进一步说明

整流状态下

$u_s > 0$  时， $(V_2、VD_4、VD_1、L_s)$  和  $(V_3、VD_1、VD_4、L_s)$  分别组成两个升压斩波电路，以  $(V_2、VD_4、VD_1、L_s)$  为例

$V_2$  通时， $u_s$  通过  $V_2、VD_4$  向  $L_s$  储能

$V_2$  关断时， $L_s$  中的储能通过  $VD_1、VD_4$  向  $C$  充电

$u_s < 0$  时， $(V_1、VD_3、VD_2、L_s)$  和  $(V_4、VD_2、VD_3、L_s)$  分别组成两个升压斩波电路

由于是按升压斩波电路工作，如控制不当，直流侧电容电压可能比交流电压峰值高出许多倍，对器件形成威胁

另一方面，如直流侧电压过低，例如低于  $u_s$  的峰值，则  $u_{AB}$  中就得不到图 6-29a 中所需的足够高的基波电压幅值，或  $u_{AB}$  中含有较大的低次谐波，这样就不能按需要控制  $i_s$ ， $i_s$  波形会畸变

可见，电压型 PWM 整流电路是升压型整流电路，其输出直流电压可从交流电源电压峰值附近向高调节，如要向低调节就会使性能恶化，以至不能工作。

## 2. 三相 PWM 整流电路

图 6-30，三相桥式 PWM 整流电路，最基本的 PWM 整流电路之一，应用最广

工作原理和前述的单相全桥电路相似，只是从单相扩展到三相

进行 SPWM 控制，在交流输入端 A、B 和 C 可得 SPWM 电压，按图 6-29a 的相量图控制，可使  $i_a、i_b、i_c$  为正弦波且和电压同相且功率因数近似为 1 和单相相同，该电路也可工作在逆变运行状态及图 c 或 d 的状态

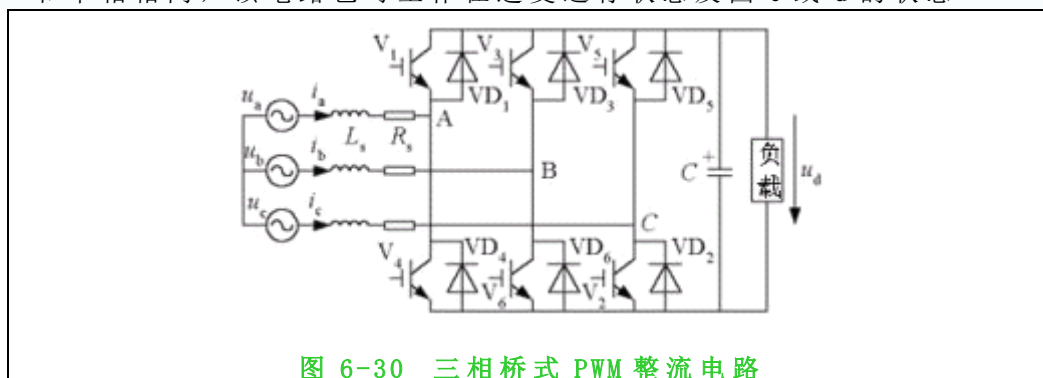


图 6-30 三相桥式 PWM 整流电路

### 6.4.2 PWM 整流电路的控制方法

Ø 有多种控制方法，根据有没有引入电流反馈可分为两种

没有引入交流电流反馈的——**间接电流控制**

引入交流电流反馈的——**直接电流控制**

#### 1. 间接电流控制

间接电流控制也称为**相位和幅值控制**

按图 6-29a（逆变时为图 6-29b）的相量关系来控制整流桥交流输入端电压，使得输入电流和电压同相位，从而得到功率因数为 1 的控制效果

图 6-31，间接电流控制的系统结构图

图中的 PWM 整流电路为图 6-30 的三相桥式电路

控制系统的闭环是整流器直流侧电压控制环

## Ø 控制原理

$u_d^*$  和实际直流电压  $u_d$  比较后送入 PI 调节器，PI 调节器的输出为一直流电流信号  $i_d$ ， $i_d$  的大小和交流输入电流幅值成正比

稳态时， $u_d = u_d^*$ ，PI 调节器输入为零，PI 调节器的输出  $i_d$  和负载电流大小对应，也和交流输入电流幅值对应

负载电流增大时，C 放电而使  $u_d$  下降，PI 的输入端正偏差，使其输出  $i_d$  增大，进而使交流输入电流增大，也使  $u_d$  回升。达到新的稳态时， $u_d$  和  $u_d^*$  相等， $i_d$  为新的较大的值，与较大的负载电流和较大的交流输入电流对应  
负载电流减小时，调节过程和上述过程相反

## Ø 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  $u_d^*$  仍然相等，PI 调节器输入恢复到零， $i_d$  为负值，并与逆变电流的大小对应

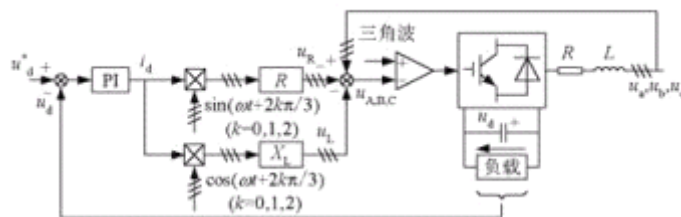


图 6-31 间接电流控制系统结构

## Ø 控制系统中其余部分的工作原理

上面的乘法器是  $i_d$  分别乘以和 a、b、c 三相相电压同相位的正弦信号，再乘以电阻  $R$ ，得到各相电流在  $R_s$  上的压降  $u_{Ra}$ 、 $u_{Rb}$  和  $u_{Rc}$

下面的乘法器是  $i_d$  分别乘以比 a、b、c 三相相电压相位超前  $\pi/2$  的余弦信号，再乘以电感  $L$  的感抗，得到各相电流在电感  $L_s$  上的压降  $u_{La}$ 、 $u_{Lb}$  和  $u_{Lc}$

各相电源相电压  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  分别减去前面求得的输入电流在电阻  $R$  和电感  $L$  上的压降，就可得到所需要的交流输入端各相的相电压  $u_A$ 、 $u_B$  和  $u_C$  的信号，用该信号对三角波载波进行调制，得到 PWM 开关信号去控制整流桥，就可以得到需要的控制效果

## Ø 存在的问题

在信号运算过程中用到电路参数  $L_s$  和  $R_s$ ，当  $L_s$  和  $R_s$  的运算值和实际值有误差时，会影响到控制效果

基于系统的静态模型设计，动态特性较差  
应用较少

## 2. 直接电流控制

通过运算求出交流输入电流指令值，再引入交流电流反馈，通过对交流电流的直接控制而使其跟踪指令电流值，因此称为**直接电流控制**

有不同的电流跟踪控制方法，图 6-32，一种最常用的采用电流滞环比较方式的控制系统结构图

### Ø 控制系统组成

双闭环控制系统，外环是直流电压控制环，内环是交流电流控制环

外环的结构、工作原理和图 6-31 间接电流控制系统相同

外环 PI 的输出为  $i_d$ ， $i_d$  分别乘以和 a、b、c 三相相电压同相位的正弦信号，

得到三相交流电流的正弦指令信号  $i_a^*$ ， $i_b^*$  和  $i_c^*$

$i_a^*$ ， $i_b^*$  和  $i_c^*$  分别和各自的电源电压同相位，其幅值和反映负载电流大小的直流信号  $i_d$  成正比

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，便可使实际交流输入电流跟踪指令值

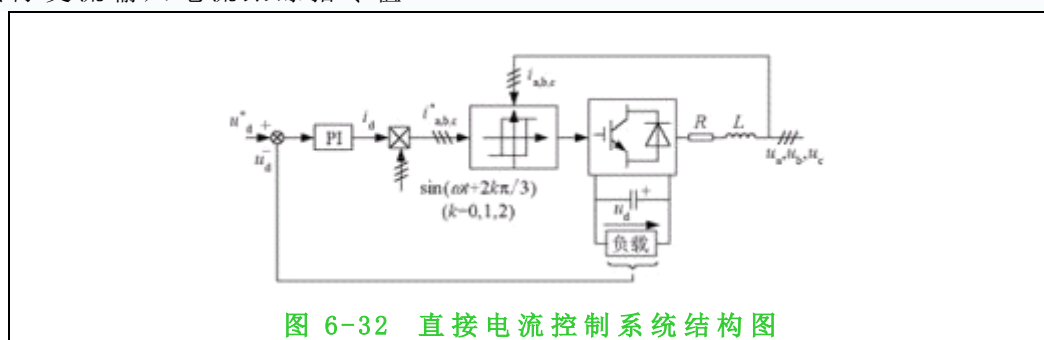


图 6-32 直接电流控制系统结构图

### Ø 优点

控制系统结构简单，电流响应速度快，系统鲁棒性好  
获得了较多的应用