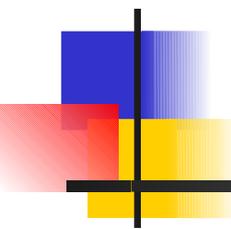


# 第二十三讲

## PWM 跟踪控制技术

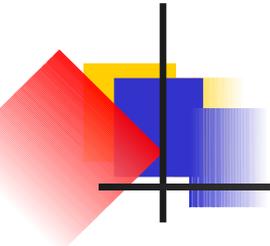


---

教师：孔祥新

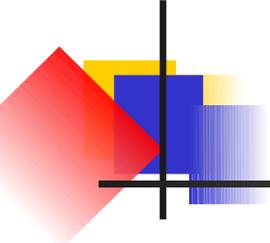
地点：JA202

曲阜师范大学 电气信息与自动化学院



# PWM 跟踪控制技术. 引言

- PWM 波形生成的第三种方法——**跟踪控制方法**。
- 把希望输出的波形作为指令信号，把实际波形作为反馈信号，通过两者的瞬时值比较来决定逆变电路各开关器件的通断，使实际的输出跟踪指令信号变化。
- 常用的有**滞环比较方式**和**三角波比较方式**。



## 6.3 PWM 跟踪控制技术

---

### 6.3.1 滞环比较方式

### 6.3.2 三角形比较方式

# 6.3.1 滞环比较方式

1) 跟踪型 PWM 变流电路中，电流跟踪控制应用最多。

## 基本原理

- 把指令电流  $i^*$  和实际输出电流  $i$  的偏差  $i^* - i$  作为滞环比较器的输入。
- $V_1$  (或  $VD_1$ ) 通时,  $i$  增大
- $V_2$  (或  $VD_2$ ) 通时,  $i$  减小
- 通过环宽为  $2DI$  的滞环比较器的控制,  $i$  就在  $i^* + DI$  和  $i^* - DI$  的范围内, 呈锯齿状地跟踪指令电流  $i^*$ 。

## 参数的影响

- 环宽过宽时, 开关频率低, 跟踪误差大; 环宽过窄时, 跟踪误差小, 但开关频率过高, 开关损耗增大。
- $L$  大时,  $i$  的变化率小, 跟踪慢;
- $L$  小时,  $i$  的变化率大, 开关频率过高。

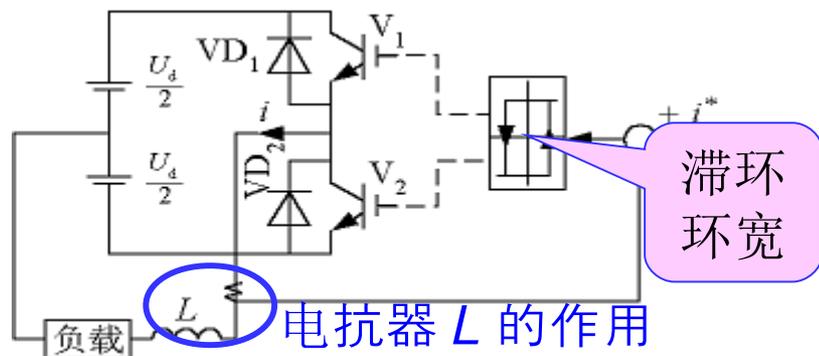


图 6-22 滞环比较方式电流跟踪控制举例

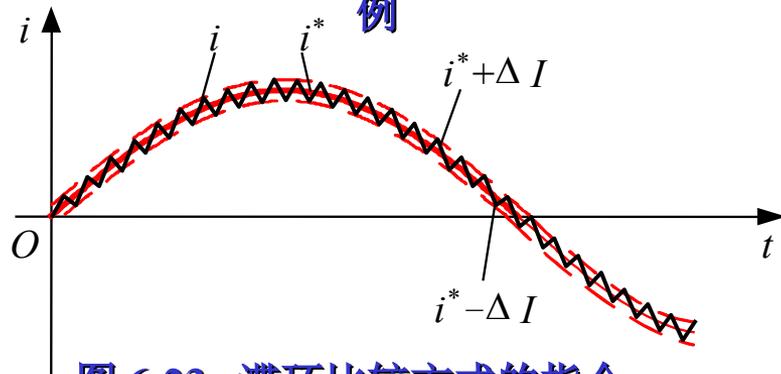


图 6-23 滞环比较方式的指令电流和输出电流

# 6.3.1 滞环比较方 式

## 2) 三相的情况

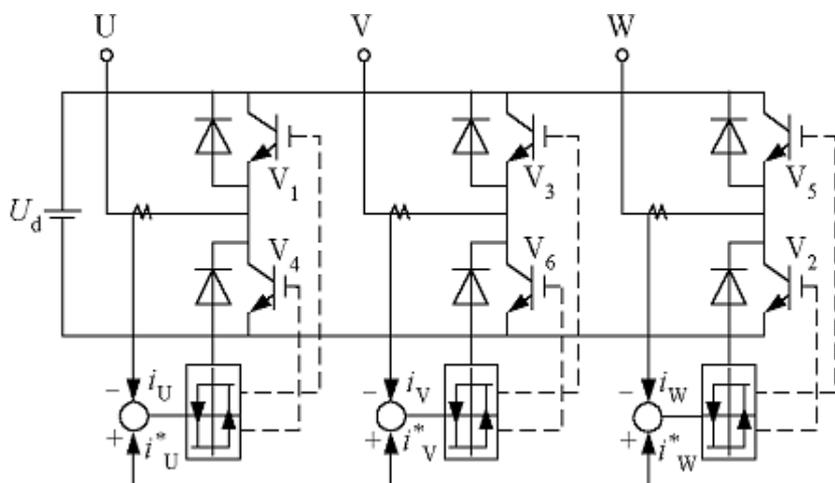


图 6-24 三相电流跟踪型 PWM 逆变电路

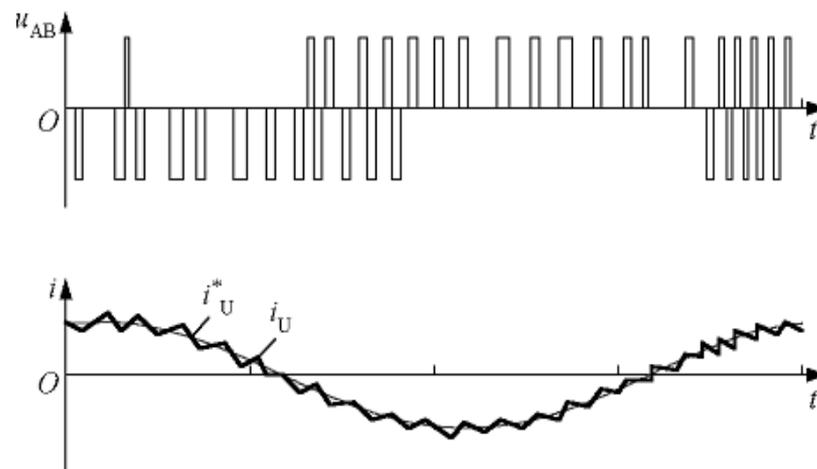


图 6-25 三相电流跟踪型 PWM 逆变电路输出波形

## 6.3.1 滞环比较方式

3) 采用滞环比较方式的电流跟踪型 PWM 变流电路有如下特

点。  
(1) 硬件电路简单。

(2) 实时控制，电流响应快。

(3) 不用载波，输出电压波形中不含特定频率的谐波。

(4) 和计算法及调制法相比，相同开关频率时输出电流

中高次谐波含量多。

(5) 闭环控制，是各种跟踪型 PWM 变流电路的共同特点。

## 6.3.1 滞环比较方式

### 4) 采用滞环比较方式实现电压跟踪控制

- 把指令电压  $u^*$  和输出电压  $u$  进行比较，滤除偏差信号中的谐波，滤波器的输出送入滞环比较器，由比较器输出控制开关器件的通断，从而实现电压跟踪控制。

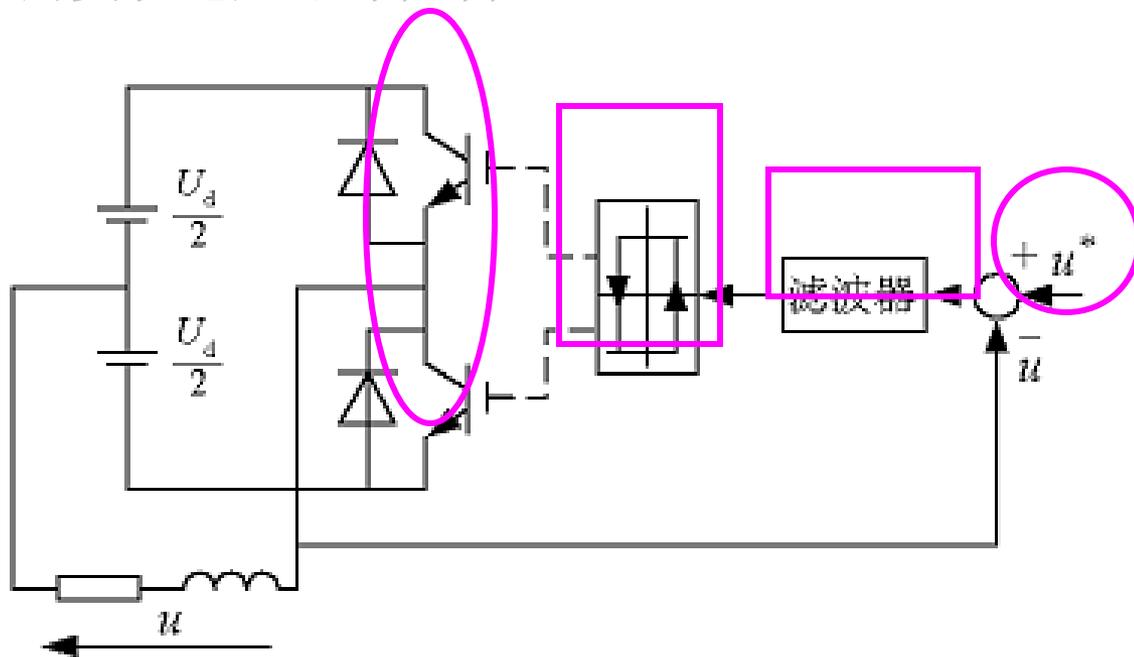


图 6-26 电压跟踪控制电路举例

## 6.3.1 滞环比较方 式

- ✦ 和电流跟踪控制电路相比，只是把指令和反馈信号从电流变为电压。
- ✦ 输出电压 PWM 波形中含大量高次谐波，必须用适当的滤波器滤除。
- ✦  $u^*=0$  时，输出电压  $u$  为频率较高的矩形波，相当于一个自励振荡电路。
- ✦  $u^*$  为直流信号时， $u$  产生直流偏移，变为正负脉冲宽度不等，正宽负窄或正窄负宽的矩形波。
- ✦  $u^*$  为交流信号时，只要其频率远低于上述自励振荡频率，从  $u$  中滤除由器件通断产生的高次谐波后，所得的波形就几乎和  $u^*$  相同，从而实现电压跟踪控制。

## 6.3.2 三角形比较方式

### (1) 基本原理

- ✦ 不是把指令信号和三角波直接进行比较，而是通过闭环来进行控制。
- ✦ 把指令电流  $i_U^*$ 、 $i_V^*$  和  $i_W^*$  和实际输出电流  $i_U$ 、 $i_V$ 、 $i_W$  进行比较，求出偏差，通过放大器 A 放大后，再去和三角波进行比较，产生 PWM 波形。
- ✦ 放大器 A 通常具有比例积分特性或比例特性，其系数直接影响电流跟踪特性。

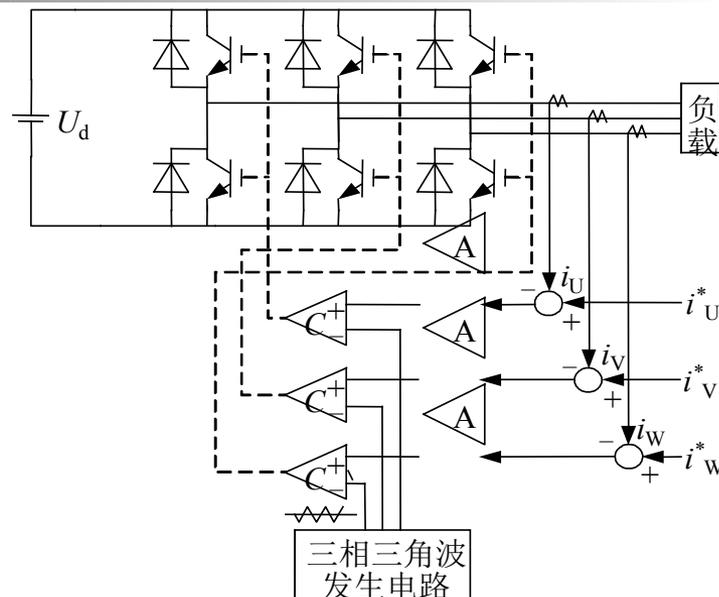


图 6-27 三角波比较方式电流跟踪型逆变电路

### (2) 特点

- ✦ 开关频率固定，等于载波频率，高频滤波器设计方便。
- ✦ 为改善输出电压波形，三角波载波常用三相三角波载波。
- ✦ 和滞环比较控制方式相比，这种控制方式输出电流所含的谐波少。

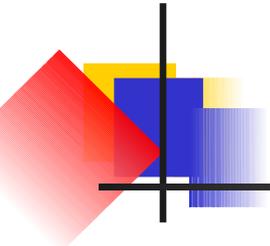
## 6.3.2 三角形比较方式

(3) 除上述两种比较方式外，还有**定时比较方式**。

- ⊕ 不用滞环比较器，而是设置一个固定的时钟。
- ⊕ 以固定采样周期对指令信号和被控制变量进行采样，根据偏差的极性来控制开关器件通断。
- ⊕ 在时钟信号到来的时刻，
  - 如  $i < i^*$ ， $V_1$  通， $V_2$  断，使  $I$  增大。
  - 如  $i > i^*$ ， $V_1$  断， $V_2$  通，使  $I$  减小。
- ⊕ 每个采样时刻的控制作用都使实际电流与指令电流的误差减小。
- ⊕ 采用定时比较方式时，器件的最高开关频率为时钟频率的  $1/2$ 。
- ⊕ 和滞环比较方式相比，电流控制误差没有一定的环宽，控制的精度低一些。

## 6.4 PWM 整流电路及其控制方法

- ✦ 实用的整流电路几乎都是晶闸管整流或二极管整流。
- ✦ 晶闸管相控整流电路：输入电流滞后于电压，且其中谐波分量很大，因此功率因数很低。
- ✦ 二极管整流电路：虽位移因数接近 1，但输入电流中谐波分量很大，所以功率因数也很低。
- ✦ 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**。
- ✦ 控制 PWM 整流电路，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 PWM 整流电路及其控制方法**

---

### **6.4.1 PWM 整流电路的工作原理**

### **6.4.2 PWM 整流电路的控制方法**

# 6.4.1 PWM 整流电路的工作原理

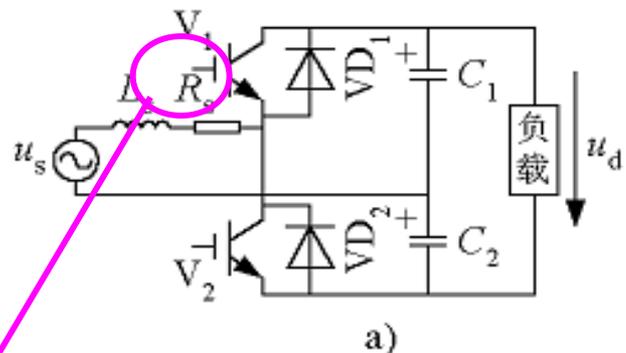
PWM 整流电路也可分为电压型和电流型两大类，目前电压型的较多。

## 1. 单相 PWM 整流电路

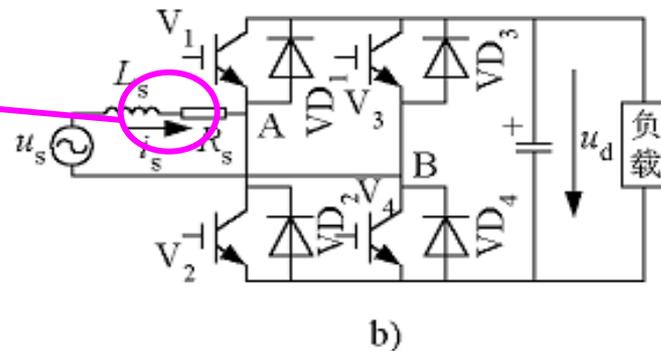
半桥电路直流侧电容必须由两个电容串联，其中点和交流电源连接。

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。

全桥电路直流侧电容只要一个就可以。



单相半桥电路



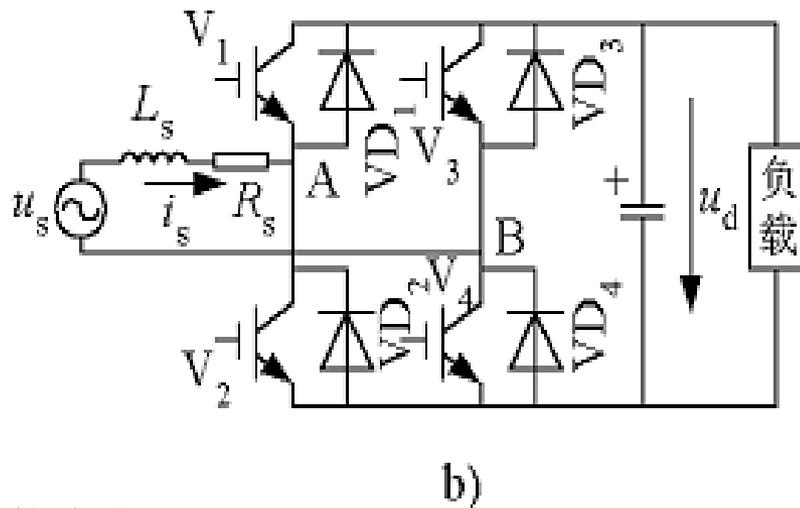
单相全桥电路

图 6-28 单相 PWM 整流电

# 6.4.1 PWM 整流电路的工作原理

## (1) 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图 6-2 8b 中的  $V_1 \sim V_4$  进行 SPWM 控制，就可以在桥的交流输入端 AB 产生一个 SPWM 波  $u_{AB}$ 。
- ✦  $u_{AB}$  中含有和正弦信号波同频率且幅值成比例的基波分量，以及和三角波载波有关的频率很高的谐波，不含有低次谐波。
- ✦ 由于  $L_s$  的滤波作用，谐波电压只使  $i_s$  产生很小的脉动。
- ✦ 当正弦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  $90^\circ$ ，或使  $i_s$  与  $u_s$  相位差为所需角度。



# 6.4.1 PWM 整流电路的工作原理

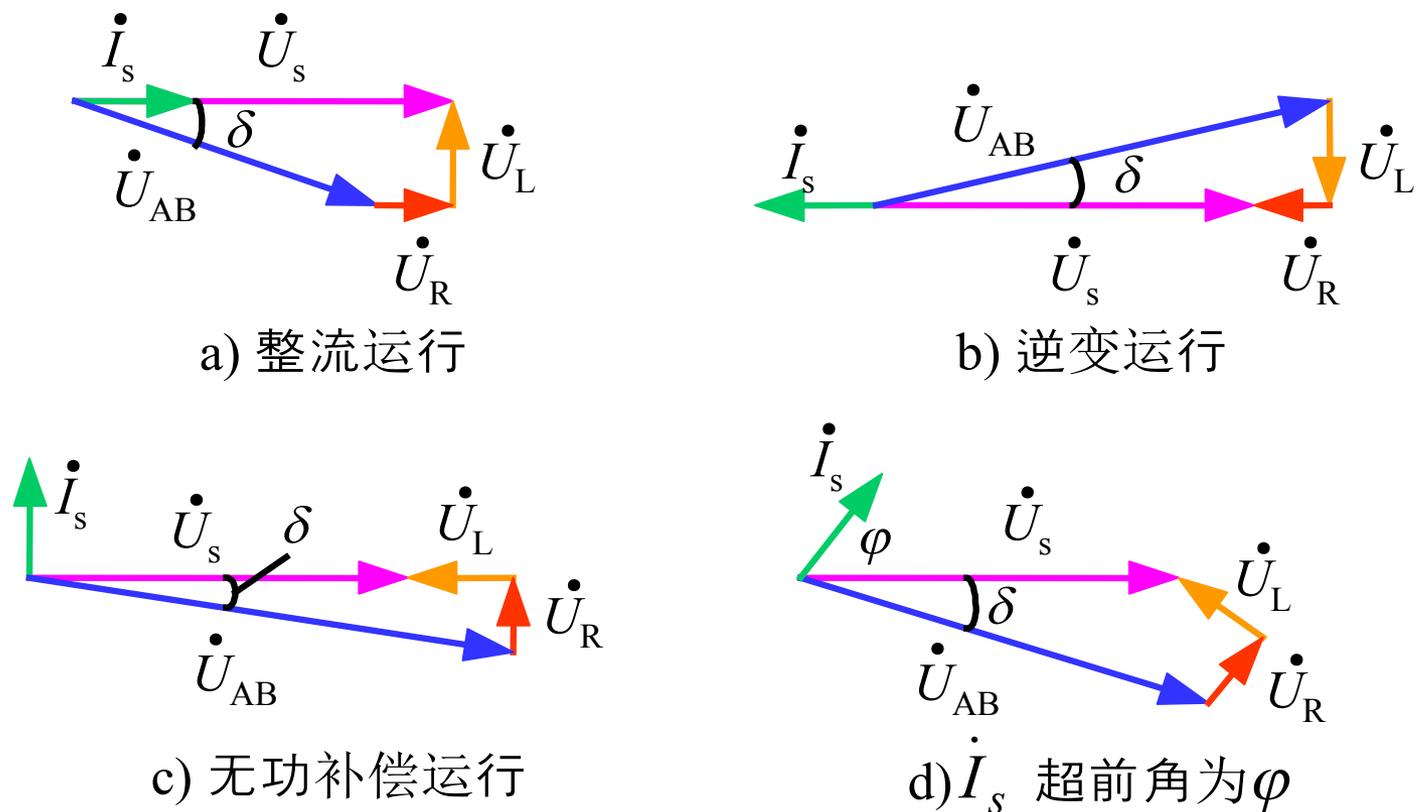
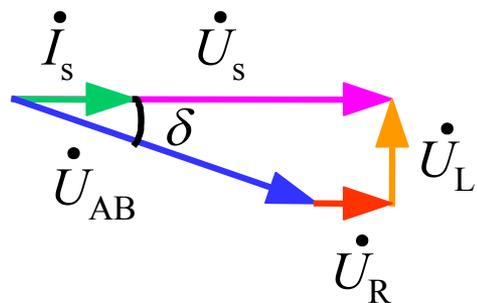


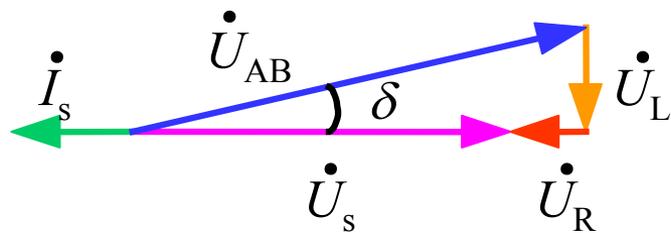
图 6-29 PWM 整流电路的运行方式向量图

# 6.4.1 PWM 整流电路的工作原理



a) 整流运行

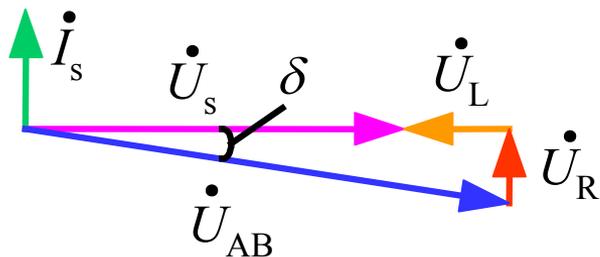
✦ a  $\dot{U}_{AB}$  滞后  $\dot{U}_s$  相角  $\delta_s$ ， $\dot{U}$  和  $\dot{U}_s$  同相，**整流状态**，功率因数为 1。PWM 整流电路最基本的工作状态。



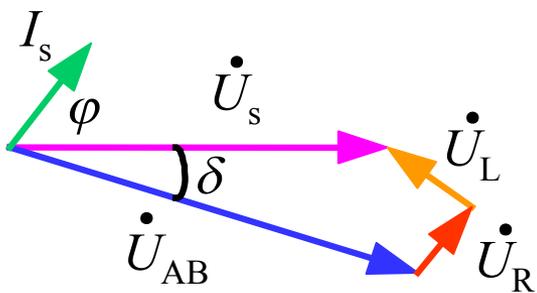
b) 逆变运行

✦ b  $\dot{U}_{AB}$  超前  $\dot{U}_s$  相角  $\delta_s$ ， $\dot{U}$  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个方向的流动，这一特点对于需再生制动的交流电动机调速系统很重要

# 6.4.1 PWM 整流电路的工作原理



c) 无功补偿运行



d) 超前角为  $\varphi$

$\dot{U}_{AB}$  滞后  $\dot{I}_s$  相角  $\delta$ ，  
 $\dot{U}_{AB}$  超前  $90^\circ$ ，  
 电路向交流电源送出无功功率，这时称为**静止无功功率发生器 (Static Var Generator—SVG)**。

d) 通过对  $\dot{U}_{AB}$  幅值和相位的控制，可以使  $\dot{U}_{AB}$  超前或滞后任一角度  $\varphi^s$ 。

# 6.4.1 PWM 整流电路的工作原理

(2) 对单相全桥 PWM 整流电路工作原理的进一步说明

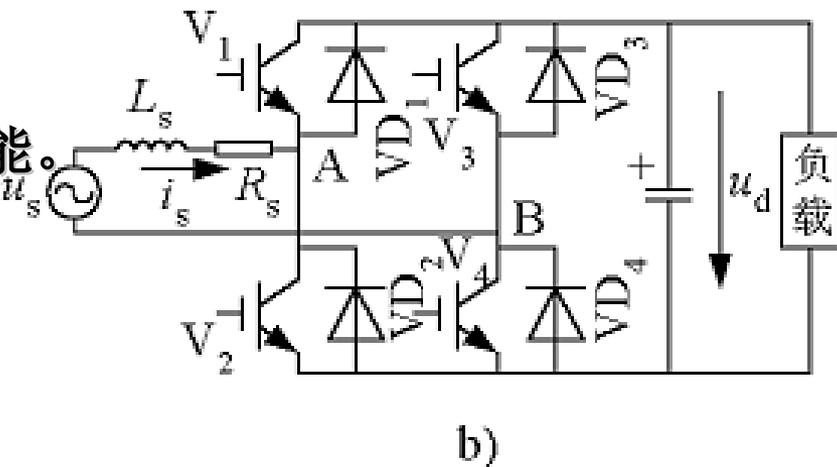
## 整流状态下

⊕  $u_s > 0$  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  $V_2、VD_1$  向  $L_s$  储能。  
⊕  $V_2$  关断时， $L_s$  中的储能通过  $V_3、VD_4$  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



# 6.4.1 PWM 整流电路的工作原理

## 2. 三相 PWM 整流电路

- 三相桥式 PWM 整流电路，是最基本的 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。

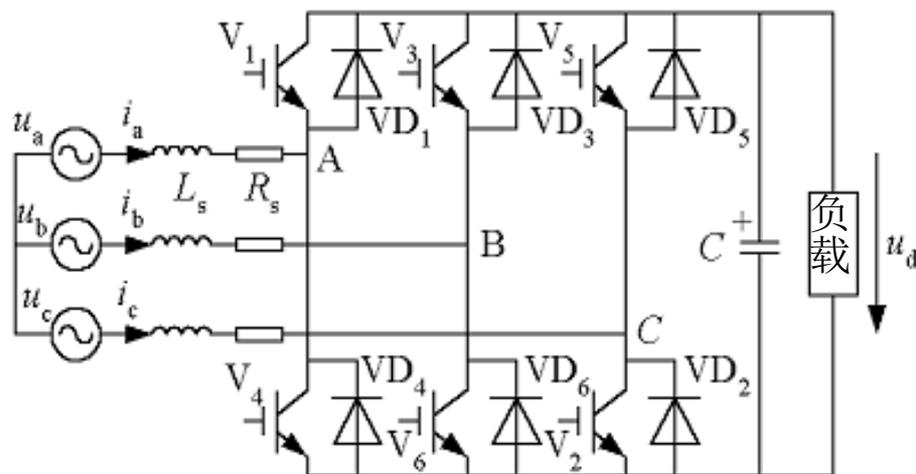


图 6-30 三相桥式 PWM 整流电路

## 6.4.2 PWM 整流电路的控制方法

- 有多种控制方法，根据有没有引入电流反馈可分为两种：  
间接电流控制、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。

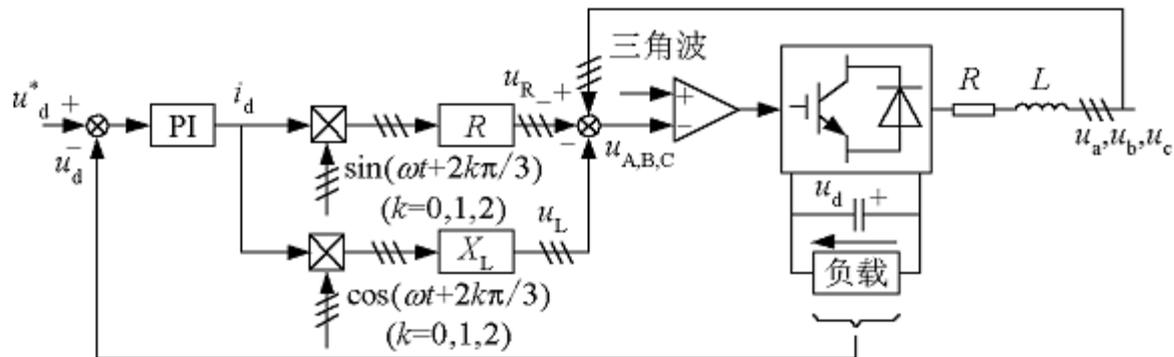


图 6-31 间接电流控制系统结构

## 6.4.2 PWM 整流电路的控制方法

### 控制原理

- ◆  $u_d$  和实际的直流电压  $u_d$  比较后送入PI调节器，PI调节器的输出为一直流电流信号  $i_d^*$ ， $i_d^*$  的大小和整流器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相对应。
  - ◆ 负载电流增大时， $C$  放电而使  $u_d$  下降，PI的输入端出现正偏差，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，PI调节器输入仍恢复到零，而  $i_d^*$  则稳定为新的较大的值，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。
- ### 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  $u_d^*$  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。

## 6.4.2 PWM 整流电路的控制方法

### 控制系统中其余部分的工作原理

- 图中上面的乘法器是  $i_d$  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  $u_{Rc}$ 。
- 图中下面的乘法器是  $i_d$  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。

- 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。
- 是基于系统的静态模型设计的，其动态特性较差。
- 间接电流控制的系统应用较少。

# 6.4.2 PWM 整流电路的控制方法

## 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。
- 有不同的电流跟踪控制方法，图 6-32 给出一种最常用的采用电流滞环比较方式的控制系统结构图。

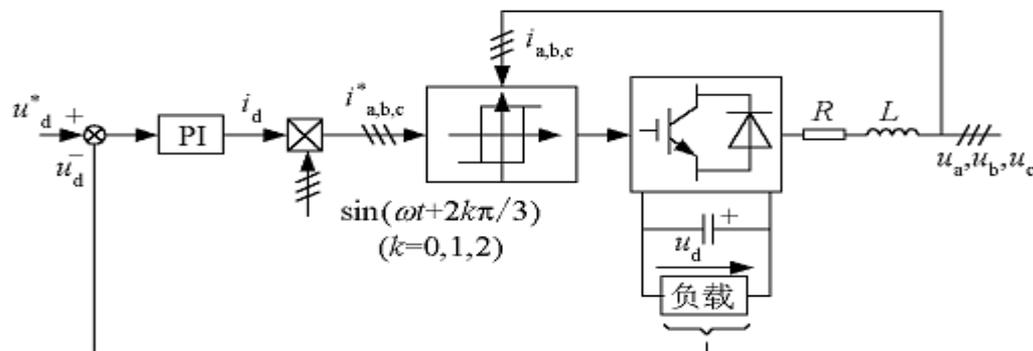


图 6-32 直接电流控制系统结构图

## 6.4.2 PWM 整流电路的控制方

### 法

#### ■ 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 调节器的输出为  $i_d$ ， $i_d$  分别乘以和 a、 $i_b^*$ 、 $i_c^*$  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，这是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，便可使实际交流输入电流跟踪指令值。

## 6.4.2 PWM 整流电路的控制方法

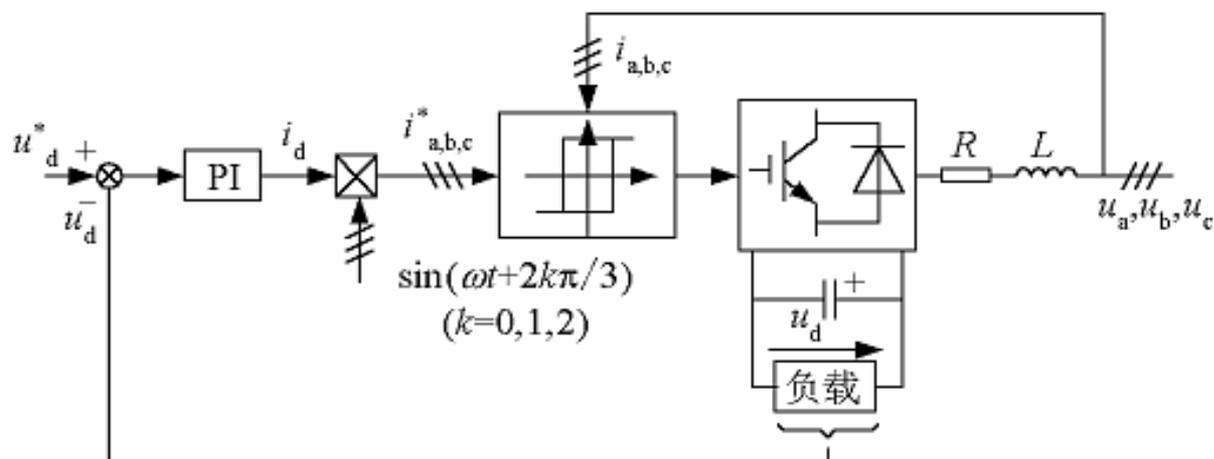


图 6-32 直接电流控制系统结构图

### 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