

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。

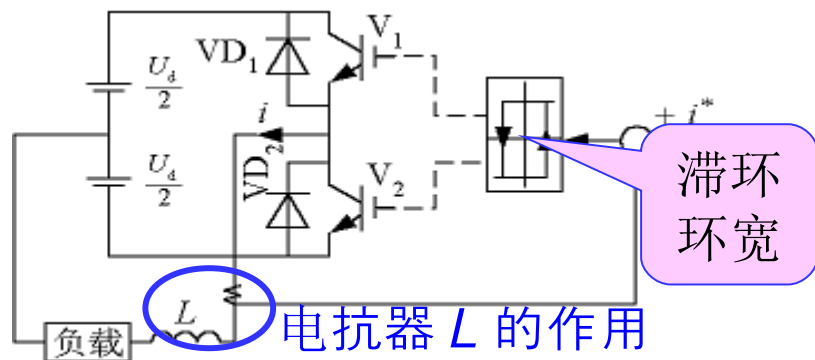


图 6-22 滞环比较方式电流跟踪控制举例

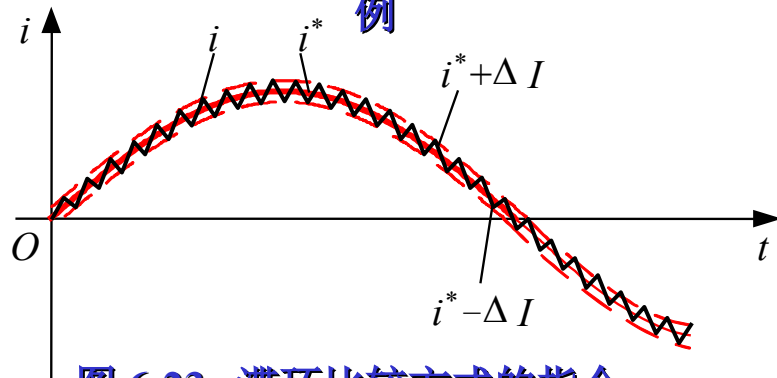


图 6-23 滞环比较方式的指令电流和输出电流

6.3.1 滞环比较方

式

2) 三相的情况

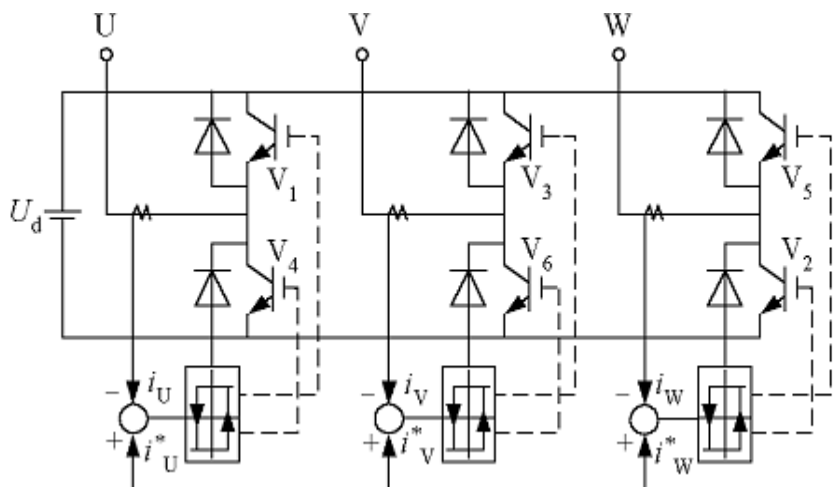


图 6-24 三相电流跟踪型 PWM 逆变电路

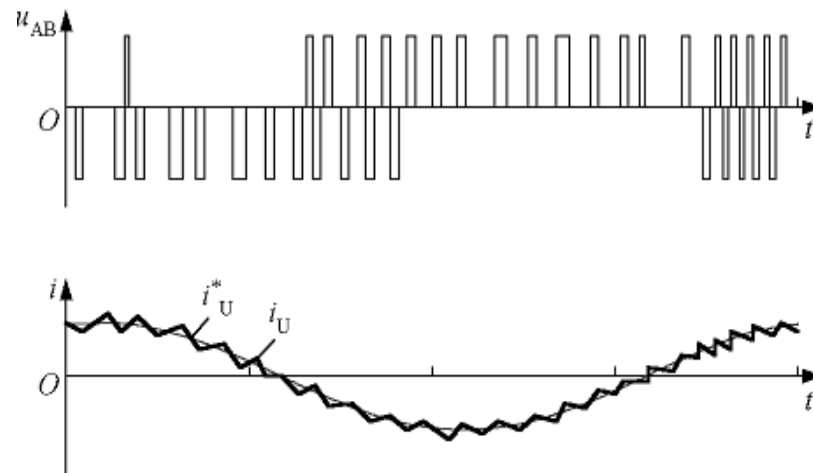


图 6-25 三相电流跟踪型 PWM 逆变电路输出波形

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。

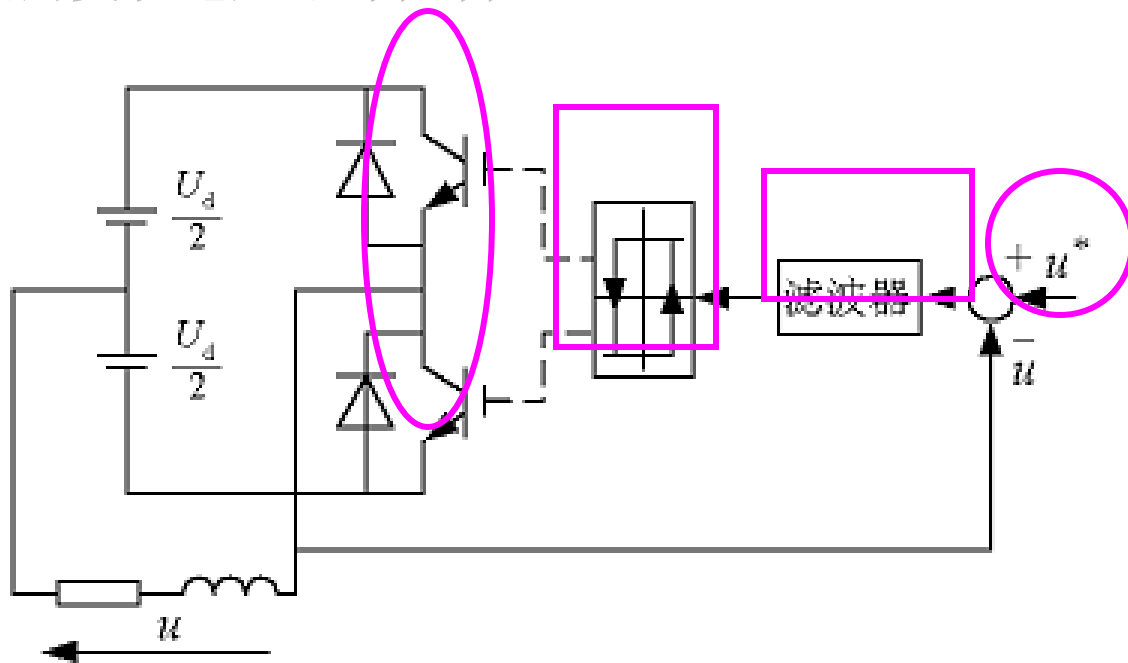


图 6-26 电压跟踪控制电路举例

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。

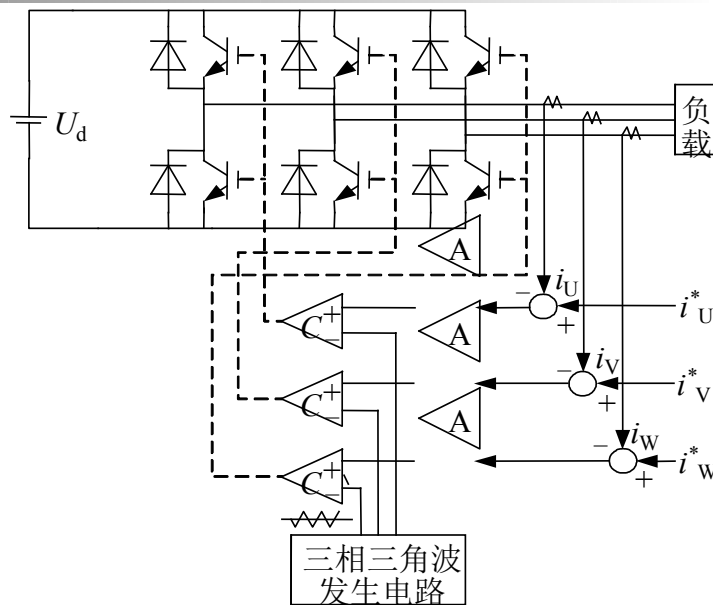


图 6-27 三角波比较方式电流跟踪型逆变电路

(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

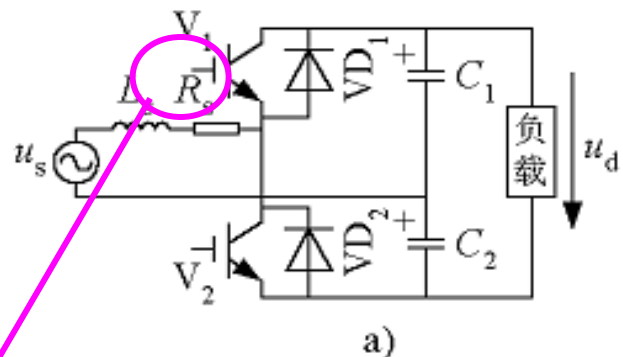
PWM 整流电路也可分为电压型和电流型两大类，目前电压型的较多。

1. 单相 PWM 整流电路

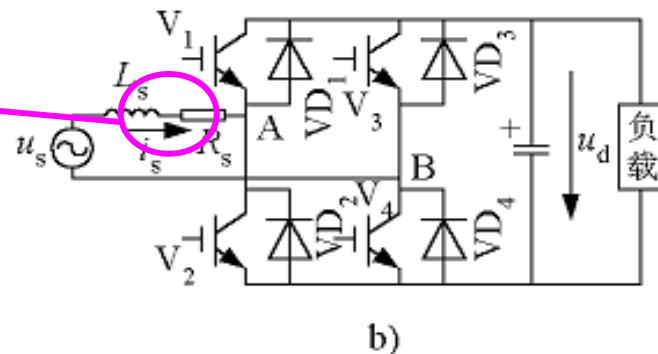
半桥电路直流侧电容必须由两个电容串联，其中点和交流电源连接。

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



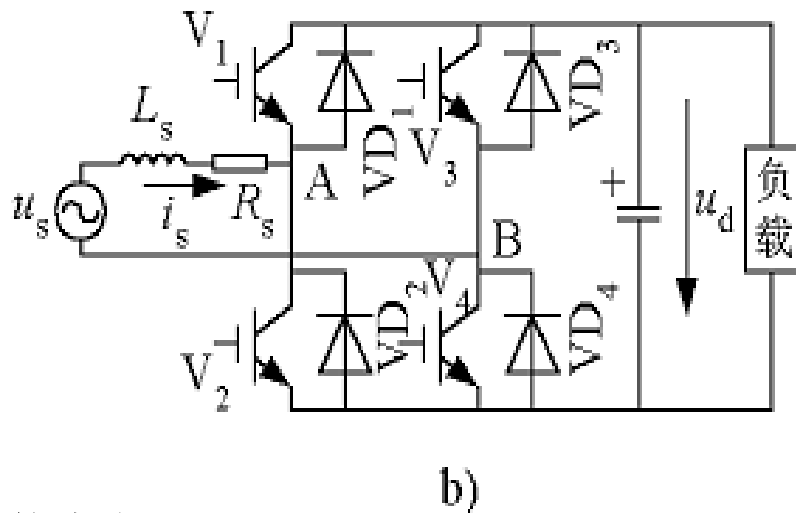
单相全桥电路

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° ，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

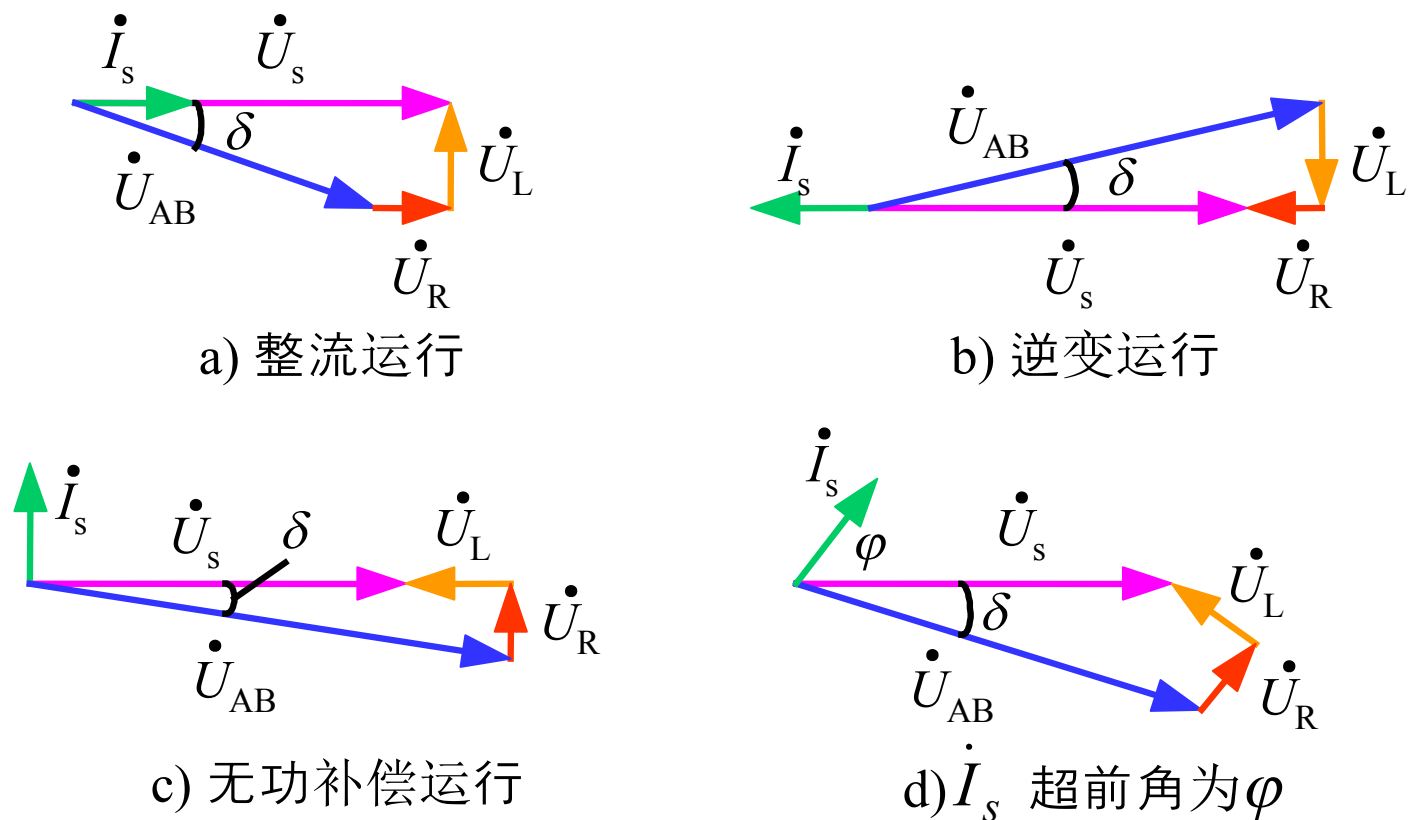
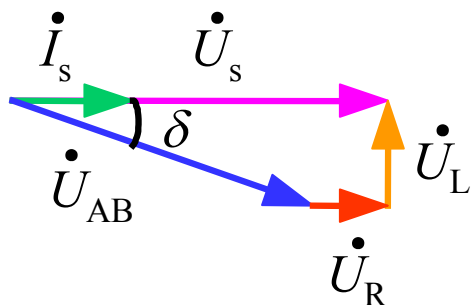


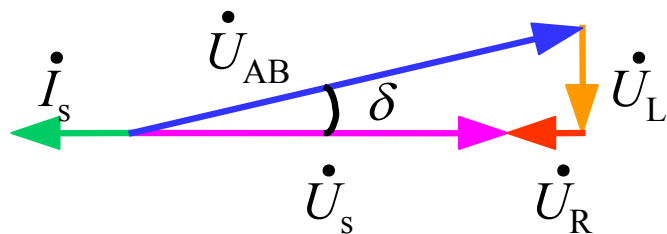
图 6-29 PWM 整流电路的运行方式向量图

6.4.1 PWM 整流电路的工作原理



a) 整流运行

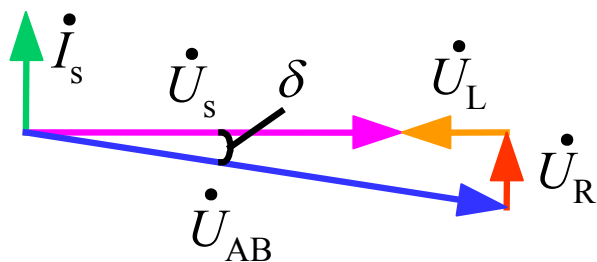
✦ a \dot{U}_{AB} 滞后 \dot{U}_s 相角 δ_s , \dot{U} 和 \dot{U}_s 同相, **整流状态**, 功率因数为 1。PWM 整流电路最基本的工作状态。



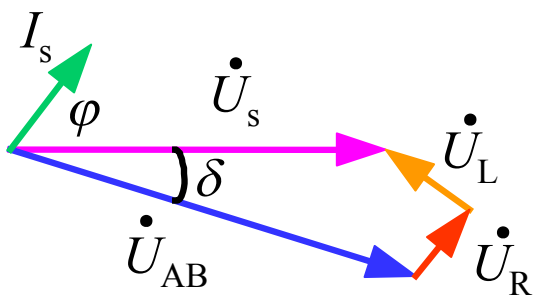
b) 逆变运行

✦ b \dot{U}_{AB} 超前 \dot{U}_s 相角 δ_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 φ

\dot{U}_{AB} 滞后 \dot{I}_s 相角 δ ，
 \dot{U}_{AB} 超前 90° ，
 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 φ^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

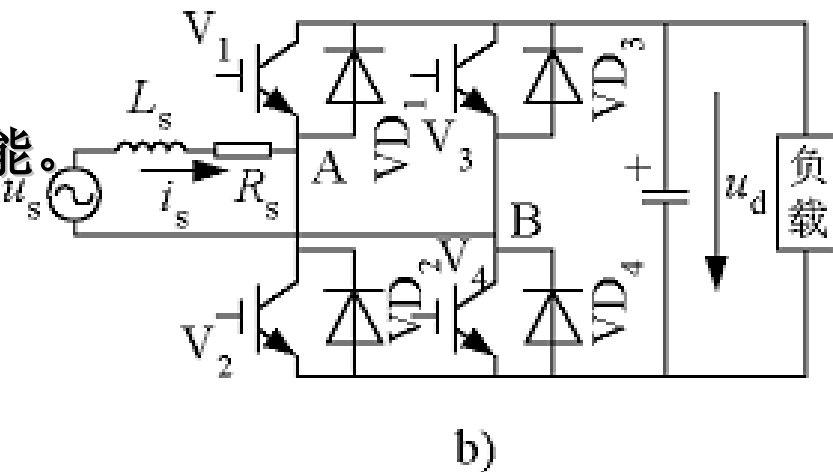
⊕ $u_s > 0$ 时， $(V_2、VD_4、VD_1、L_s)$ 和 $(V_3、VD_1、VD_4、L_s)$ 分别组成两个升压斩波电路，以 $(V_2、VD_4、VD_1、L_s)$ 为例

。

⊕ 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。

$D_1、VD_4$ 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



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。

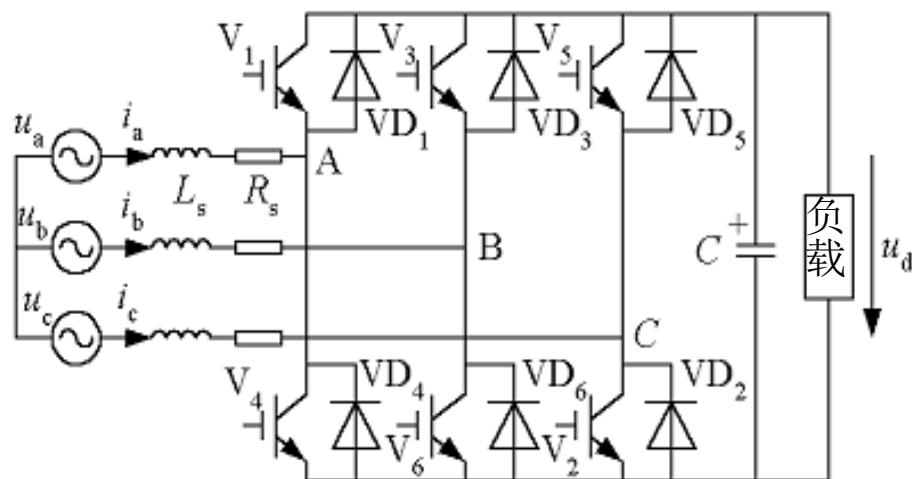


图 6-30 三相桥式 PWM 整流电路

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。

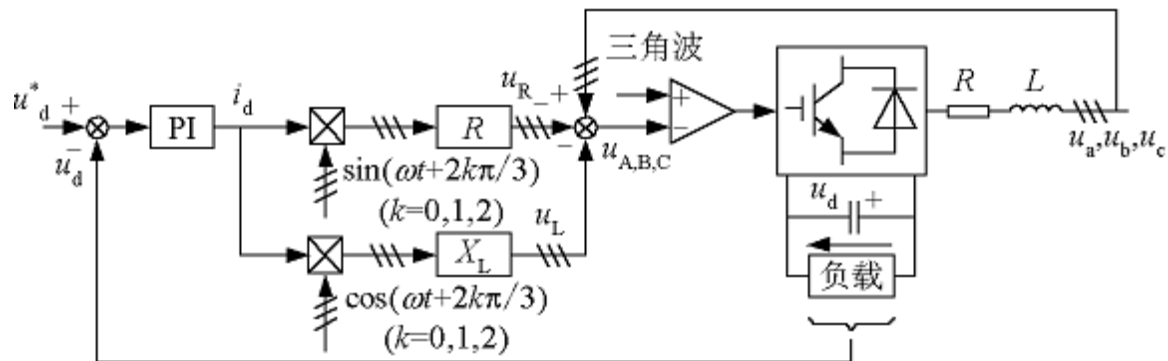


图 6-31 间接电流控制系统结构

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。

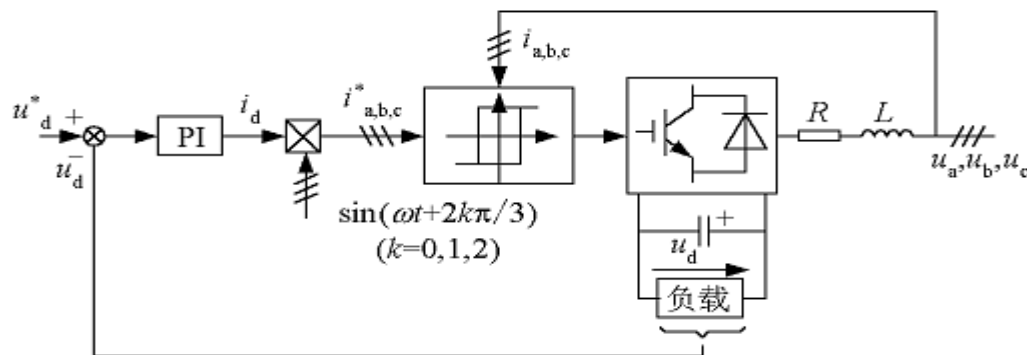


图 6-32 直接电流控制系统结构图

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

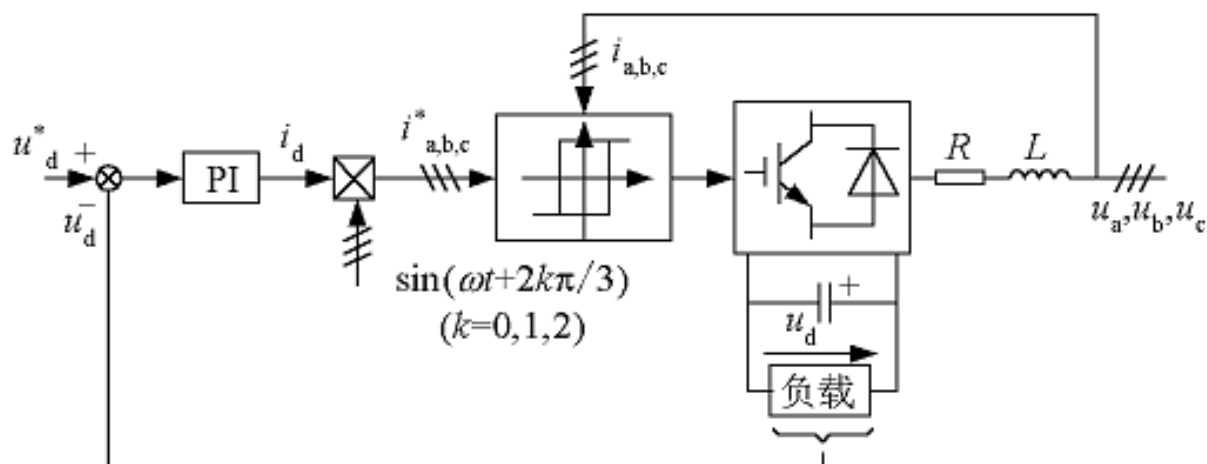


图 6-32 直接电流控制系统结构图

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