



# 第7章 PWM控制技术

7.1 PWM控制的基本原理

7.2 PWM逆变电路及其控制方法

7.3 PWM跟踪控制技术

7.4 PWM整流电路及其控制方法



# 引言

- **PWM (Pulse Width Modulation)** 控制就是对脉冲的宽度进行调制的技术，即通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效地获得所需要波形（含形状和幅值）。
- 第5章的直流斩波电路实际上采用的就是**PWM**技术，第6章中涉及到**PWM**控制技术的地方有两处，一处是第6.1节中的斩控式交流调压电路，另一处是第6.4节矩阵式变频电路。
- **PWM**控制在逆变电路中的应用最为广泛，对逆变电路的影响也最为深刻，现在大量应用的逆变电路中，绝大部分都是**PWM型逆变电路**。



# 7.1 PWM控制的基本原理

## ■ 面积等效原理

◆ 是PWM控制技术的重要理论基础。

◆ 原理内容：冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同。

☞ 冲量即指窄脉冲的面积。

☞ 效果基本相同，是指环节的输出响应波形基本相同。

☞ 如果把各输出波形用傅里叶变换分析，则其低频段非常接近，仅在高频段略有差异。



将图7-1a、b、c、d所示的脉冲作为输入，加在图7-2a所示的**R-L电路**上，设其电流 $i(t)$ 为电路的输出，图7-2b给出了不同窄脉冲时 $i(t)$ 的响应波形。

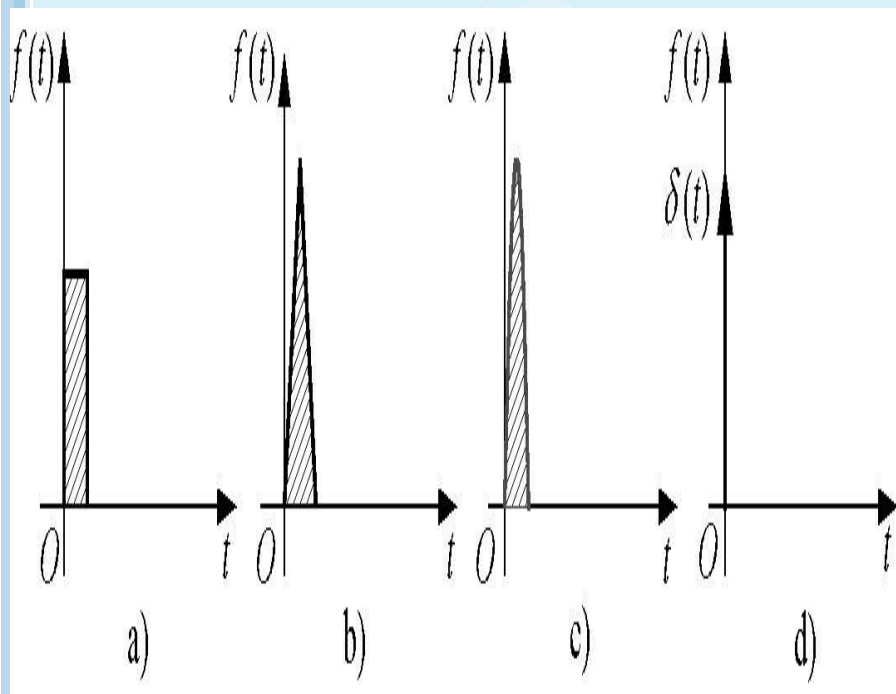


图7-1 形状不同而冲量相同的各种窄脉冲

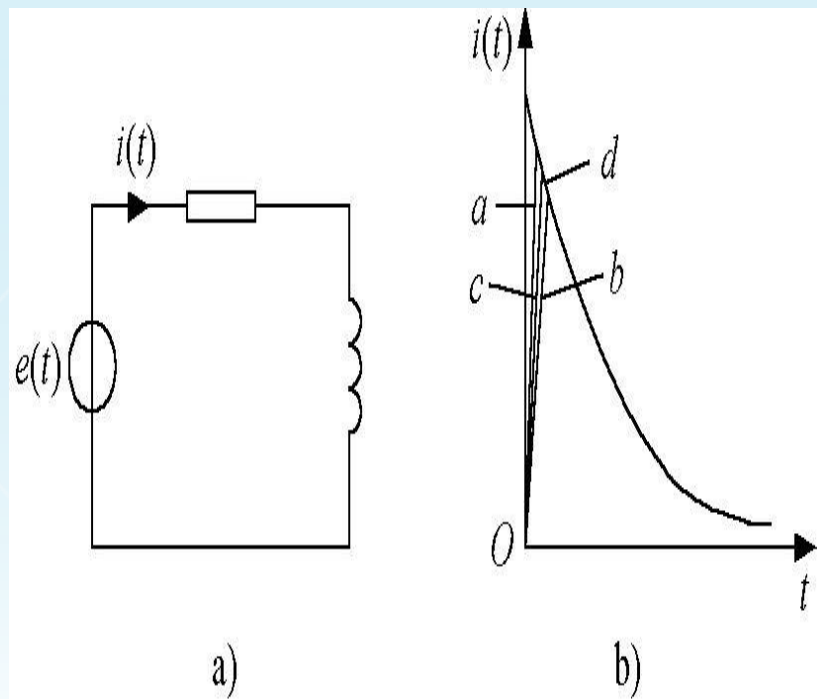
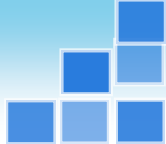


图7-2 冲量相同的各种窄脉冲的响应波形



## ■ 用PWM波代替正弦半波

第一步：

◆ 将正弦半波看成是由N个彼此相连的脉冲序列组成的：

宽度为 $\pi/N$ ，  
幅值顶部是曲线且大小按正弦规律变化的脉冲。

连续正弦半波看成N个脉冲序列

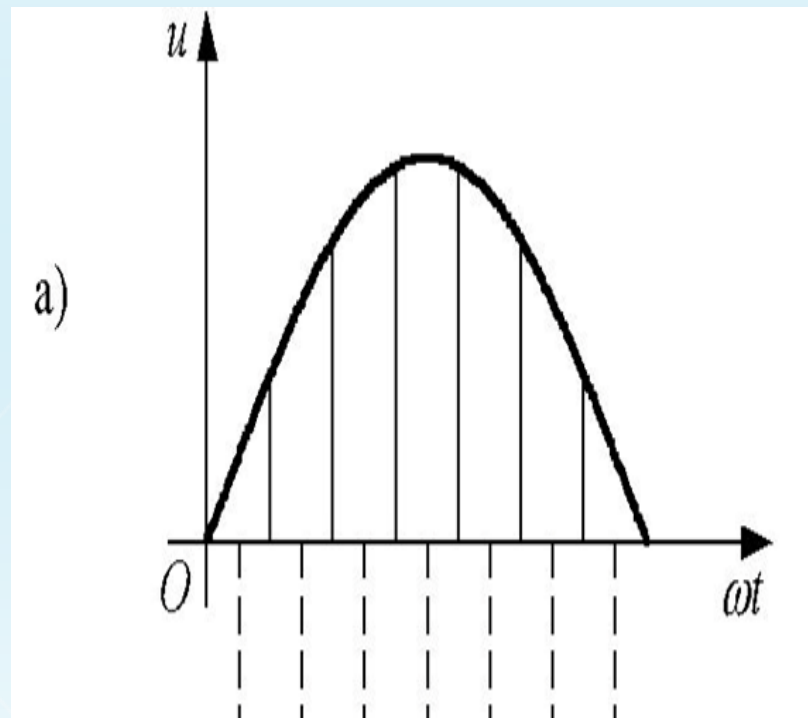


图7-3 用PWM波代替正弦半波

## 第二步:

◆把上述脉冲序列利用矩形脉冲代替:

相同数量,

等幅而不等宽的矩形脉冲,

使矩形脉冲的中点和相应正弦波部分的中点重合,

且使矩形脉冲和相应的正弦波部分面积(冲量)相等。

这就是PWM波形

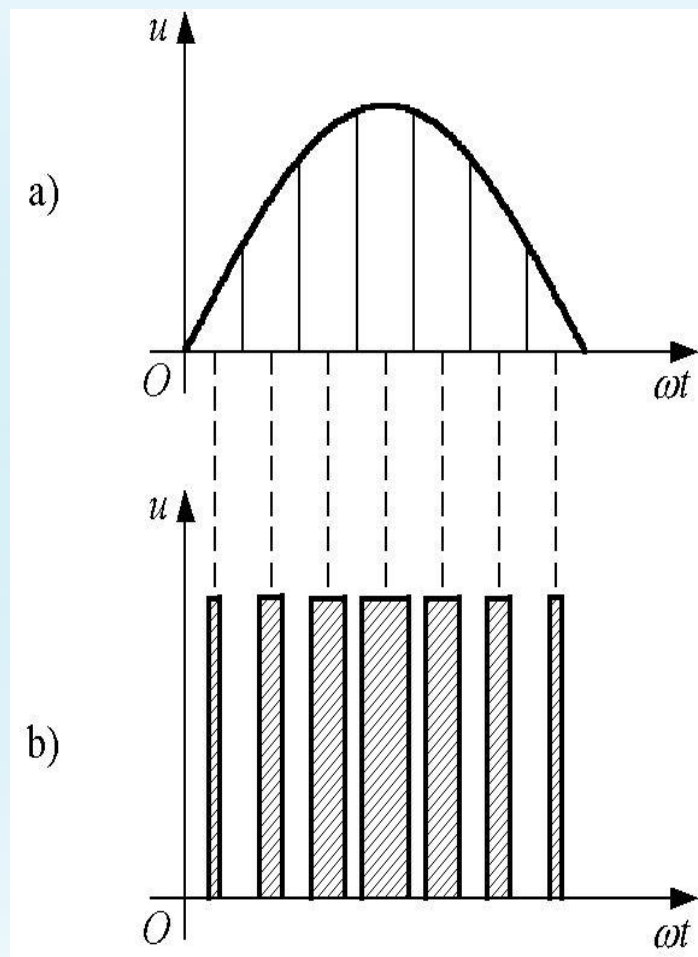


图7-3 用PWM波代替正弦半波

◆对于正弦波的负半周，也可以用同样的方法得到PWM波形。

◆脉冲的宽度按正弦规律变化而和正弦波等效的PWM波形，也称**SPWM (Sinusoidal PWM)** 波形。

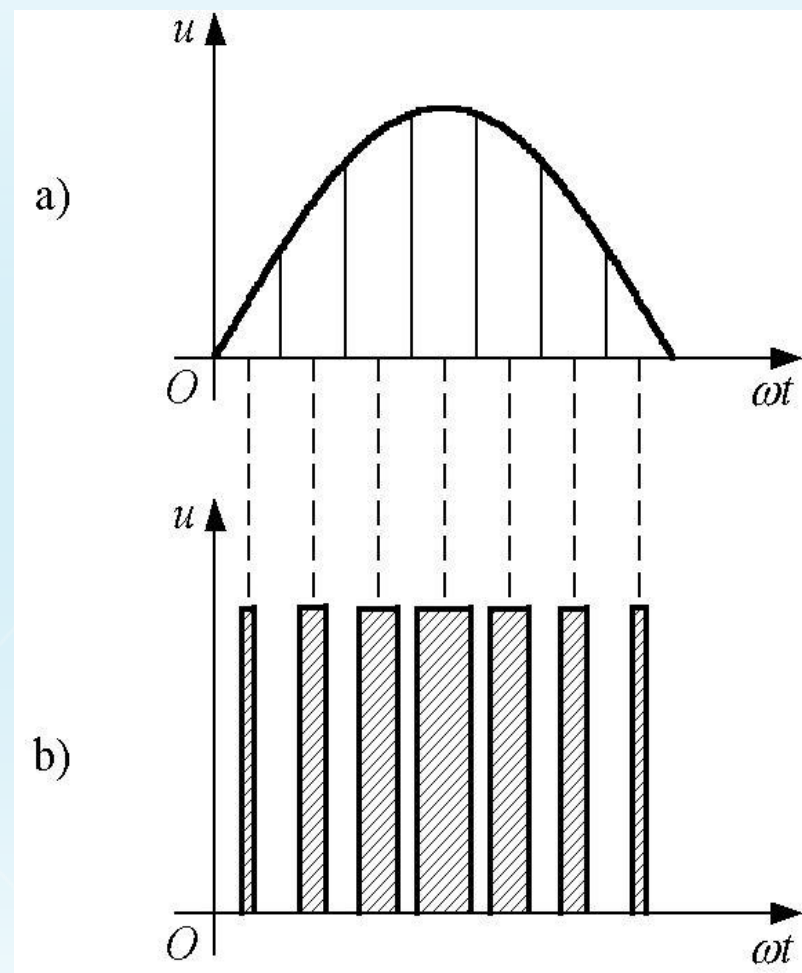


图7-3 用PWM波代替正弦半波

■ PWM波形可分为**等幅PWM波**和**不等幅PWM波**两种，由直流电源产生的PWM波通常是等幅PWM波。

■ 基于等效面积原理，PWM波形还可以等效成其他所需要的波形，如等效所需要的非正弦交流波形等。

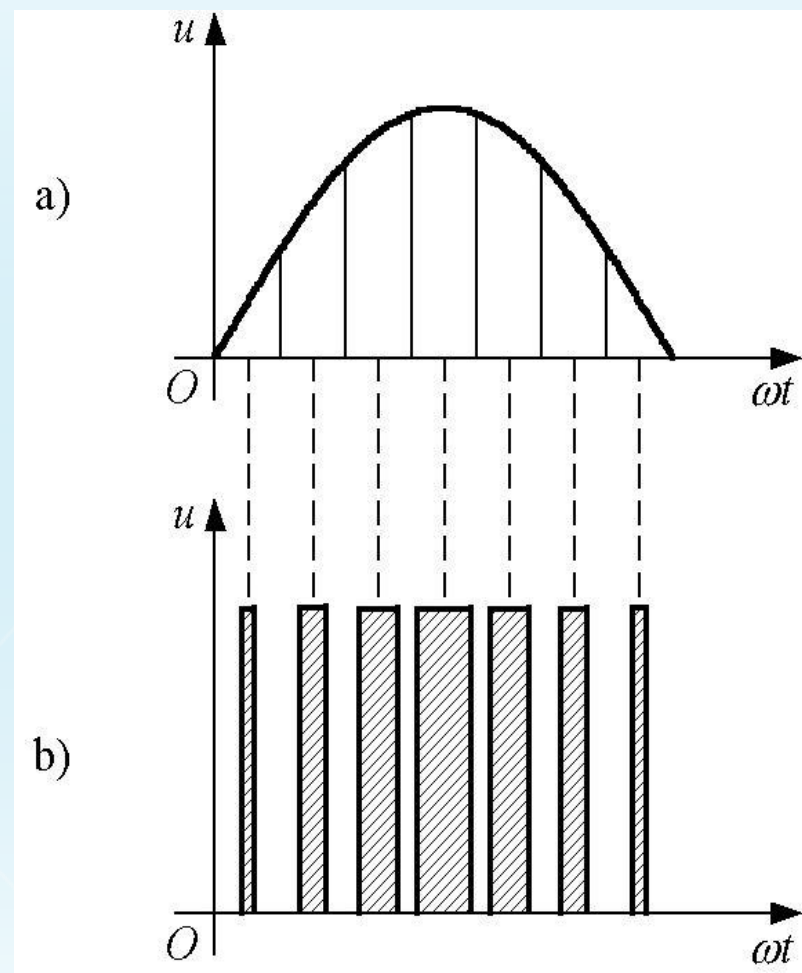


图7-3 用PWM波代替正弦半波





## 7.2 PWM逆变电路及其控制方法

7.2.1 计算法和调制法

7.2.2 异步调制和同步调制

7.2.3 规则采样法

7.2.4 PWM逆变电路的谐波分析

7.2.5 提高直流电压利用率

和减少开关次数

7.2.6 空间矢量SVPWM控制

7.2.7 PWM逆变电路的多重化



## 7.2.1 计算法和调制法

### ■ 计算法

◆ 根据逆变电路的**正弦波输出频率**、**幅值**和半个周期内的**脉冲数**，将PWM波形中各脉冲的**宽度**和**间隔**准确计算出来，

◆ 按照计算结果控制逆变电路中各开关器件的通断，就可以得到所需要的PWM波形，这种方法称之为**计算法**。

◆ 计算法是很繁琐的，当需要输出的正弦波的频率、幅值或相位变化时，结果都要变化。

## ■ 调制法

◆ 把希望输出的波形作为**调制信号**，把接受调制的信号作为**载波**，通过信号波的调制得到所期望的**PWM**波形。

◆ 通常采用**等腰三角波**或**锯齿波**作为载波，其中等腰三角波应用最多。

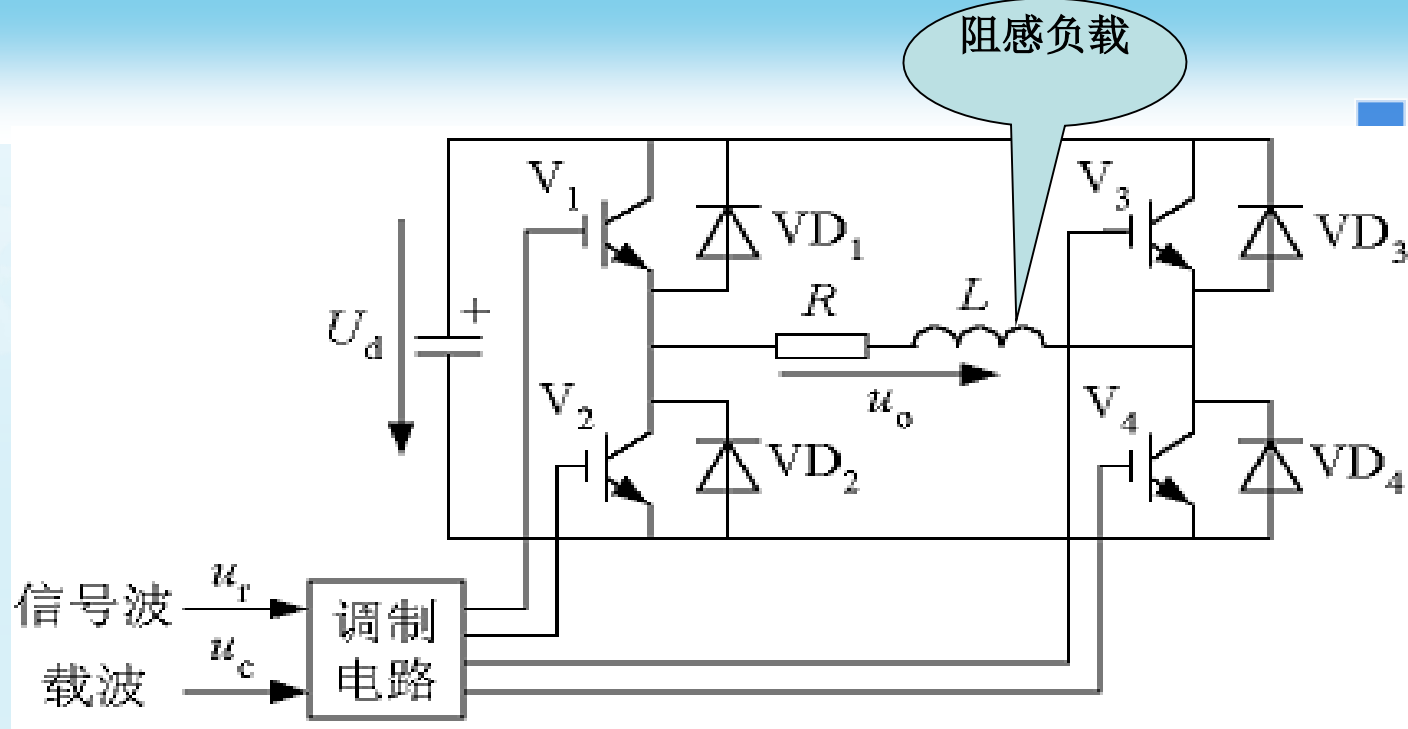


图7-4 单相桥式PWM逆变电路

## ■ 单相桥式PWM逆变电路（调制法）

### ◆ 电路工作过程

工作时 $V_1$ 和 $V_2$ 通断互补， $V_3$ 和 $V_4$ 通断也互补，比如在 $u_o$ 正半周， $V_1$ 导通， $V_2$ 关断， $V_3$ 和 $V_4$ 交替通断。

负载电流比电压滞后，在电压正半周，电流有一段区间为正，一段区间为负。

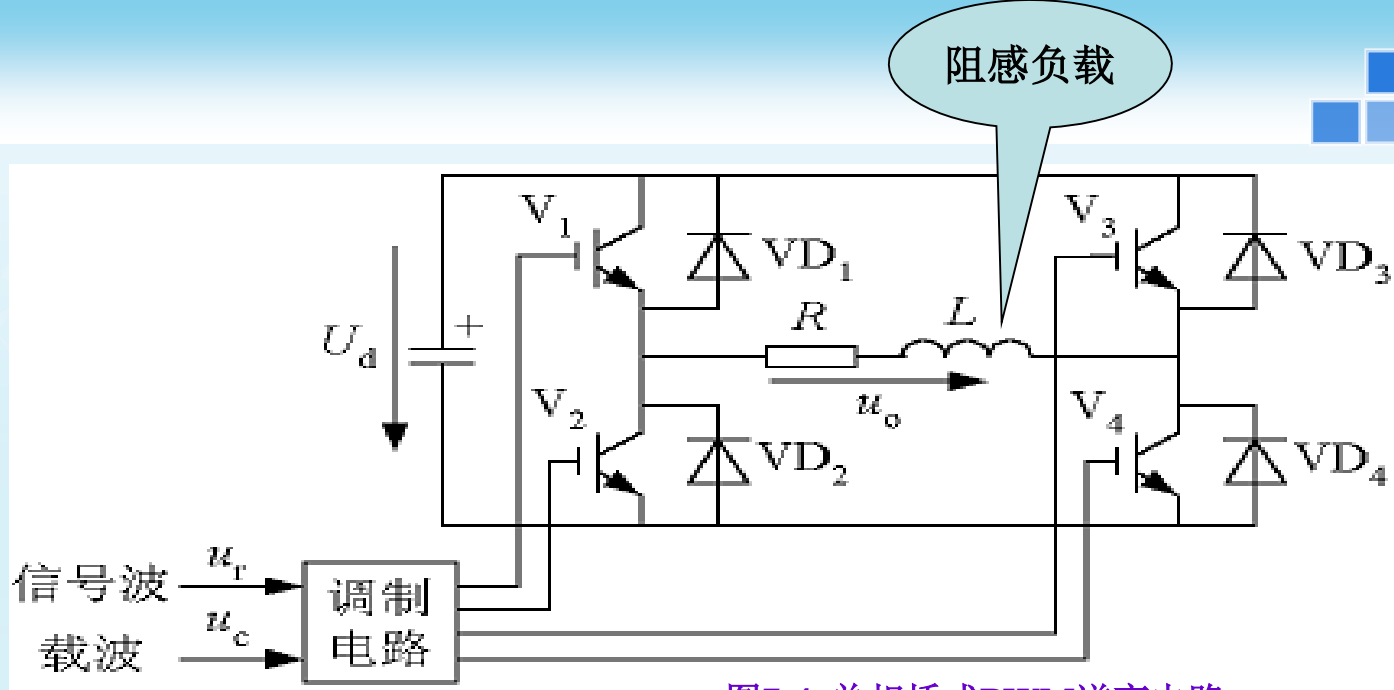


图7-4 单相桥式PWM逆变电路

- ✓在负载电流为正的区间， $V_1$ 和 $V_4$ 导通时， $u_o = U_d$ 。
- ✓ $V_4$ 关断时，负载电流通过 $V_1$ 和 $VD_3$ 续流， $u_o = 0$ 。
- ✓在负载电流为负的区间，仍为 $V_1$ 和 $V_4$ 导通时，因 $i_o$ 为负，故 $i_o$ 实际上从 $VD_1$ 和 $VD_4$ 流过，仍有 $u_o = U_d$ 。
- ✓ $V_4$ 关断， $V_3$ 开通后， $i_o$ 从 $V_3$ 和 $VD_1$ 续流， $u_o = 0$ 。
- ✓ $u_o$ 总可以得到 $U_d$ 和零两种电平。

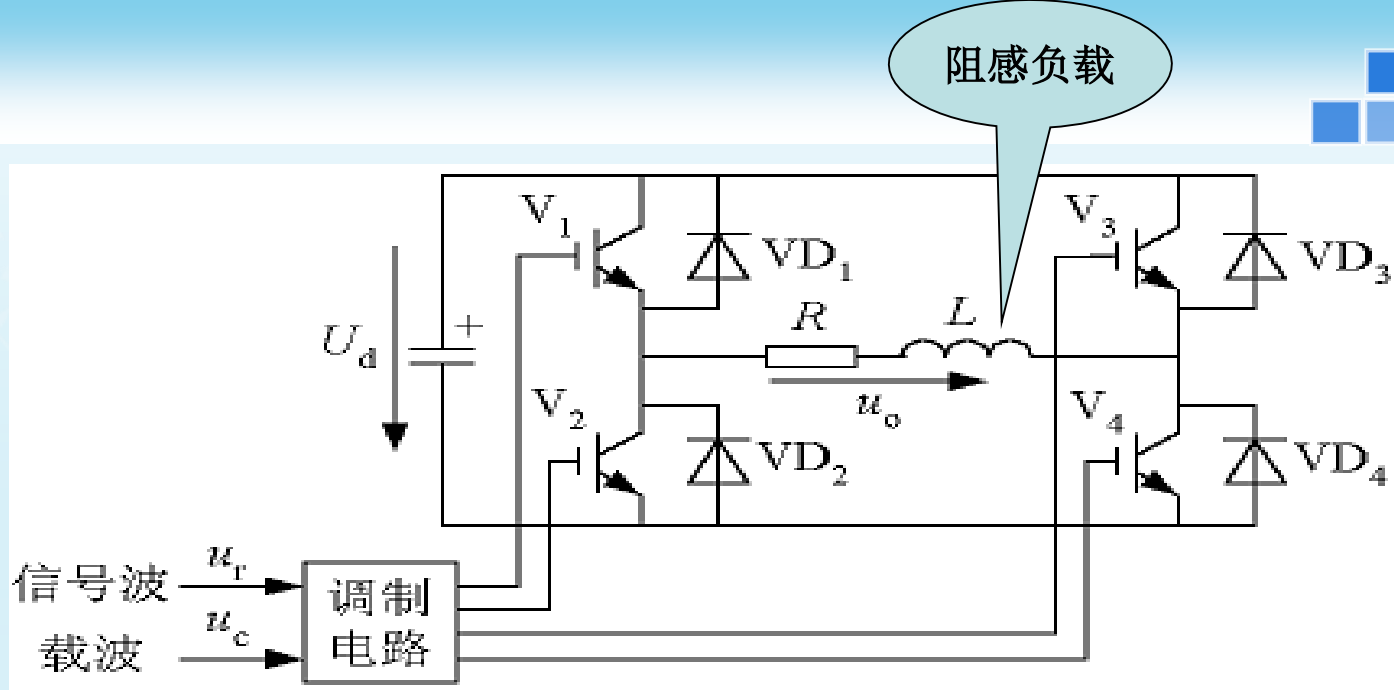


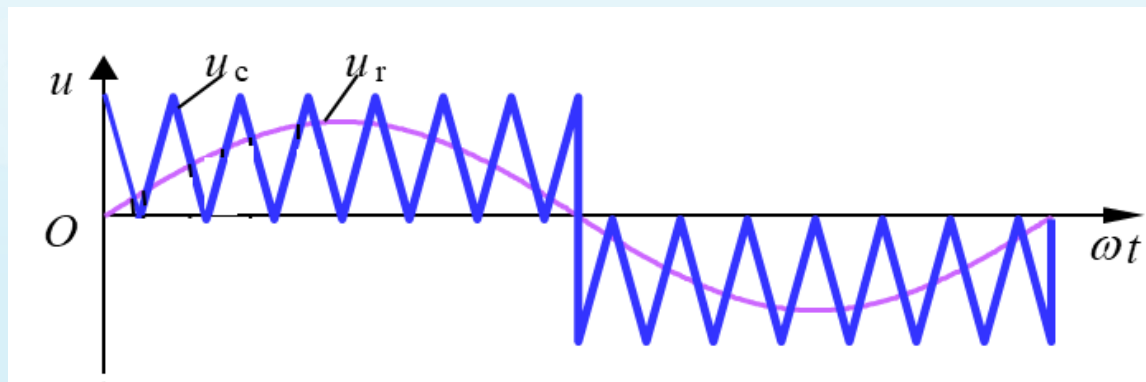
图7-4 单相桥式PWM逆变电路

✎在 $u_o$ 的负半周:

让 $V_2$ 保持通态,  $V_1$ 保持断态,  $V_3$ 和 $V_4$ 交替通断,

负载电压 $u_o$ 可以得到 $-U_d$ 和零两种电平。

## ◆ 单极性PWM控制方式



调制信号 $u_r$ :  $u_r$ 为正弦波

载波 $u_c$ :

$u_c$ 在 $u_r$ 的正半周为**正极性**的三角波,

$u_c$ 在 $u_r$ 的负半周为**负极性**的三角波。

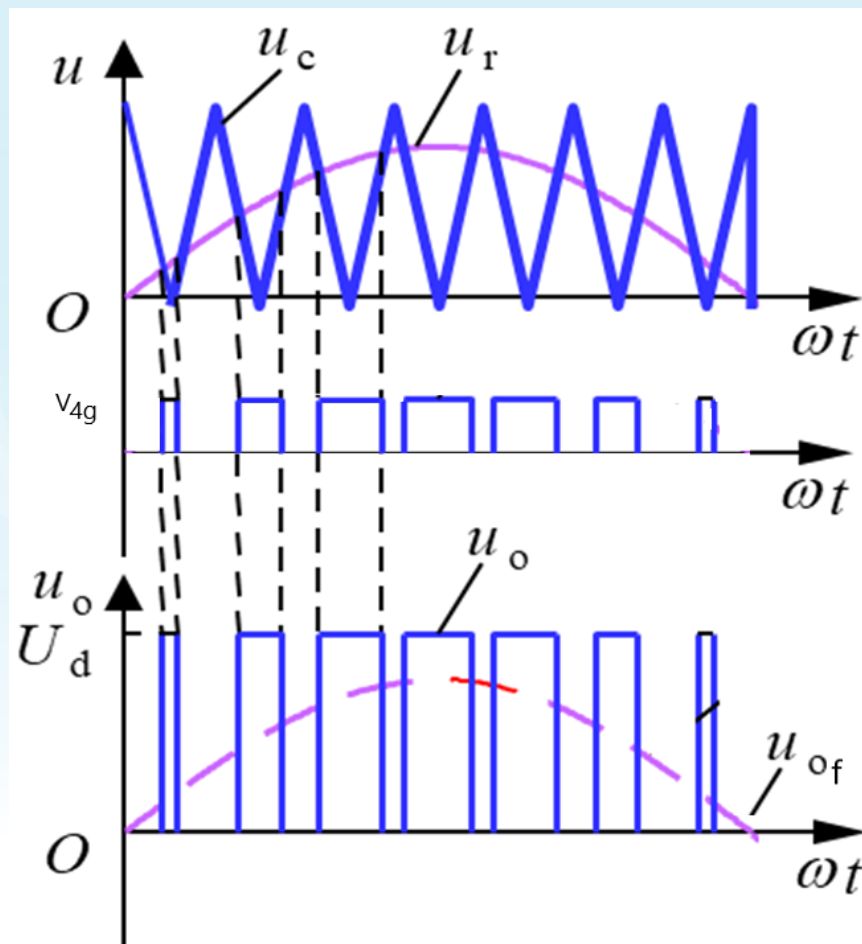
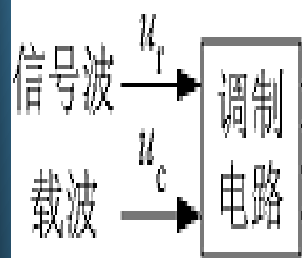
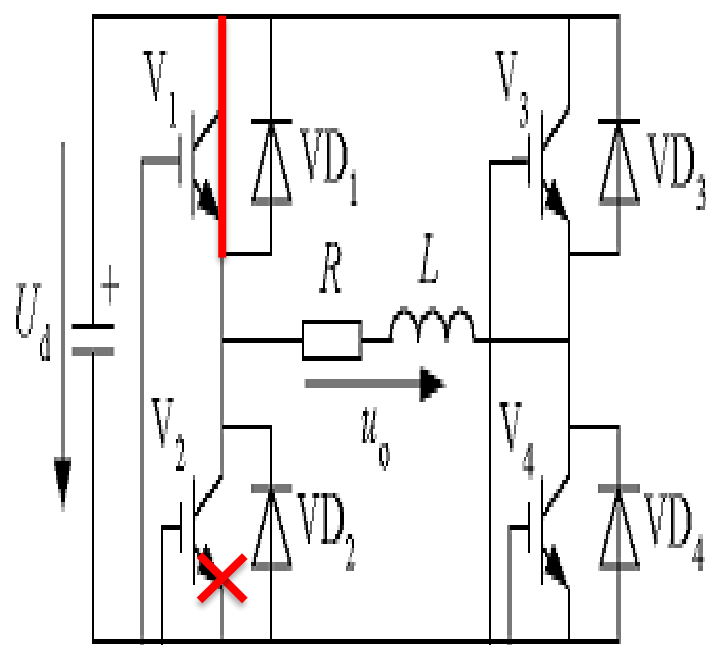


# ◆单极性PWM控制方式

在 $u_r$ 的正半周， $V_1$ 保持通态， $V_2$ 保持断态。

✓当 $u_r > u_c$ 时使 $V_4$ 导通， $V_3$ 关断， $u_o = U_d$ 。

✓当 $u_r < u_c$ 时使 $V_4$ 关断， $V_3$ 导通， $u_o = 0$ 。



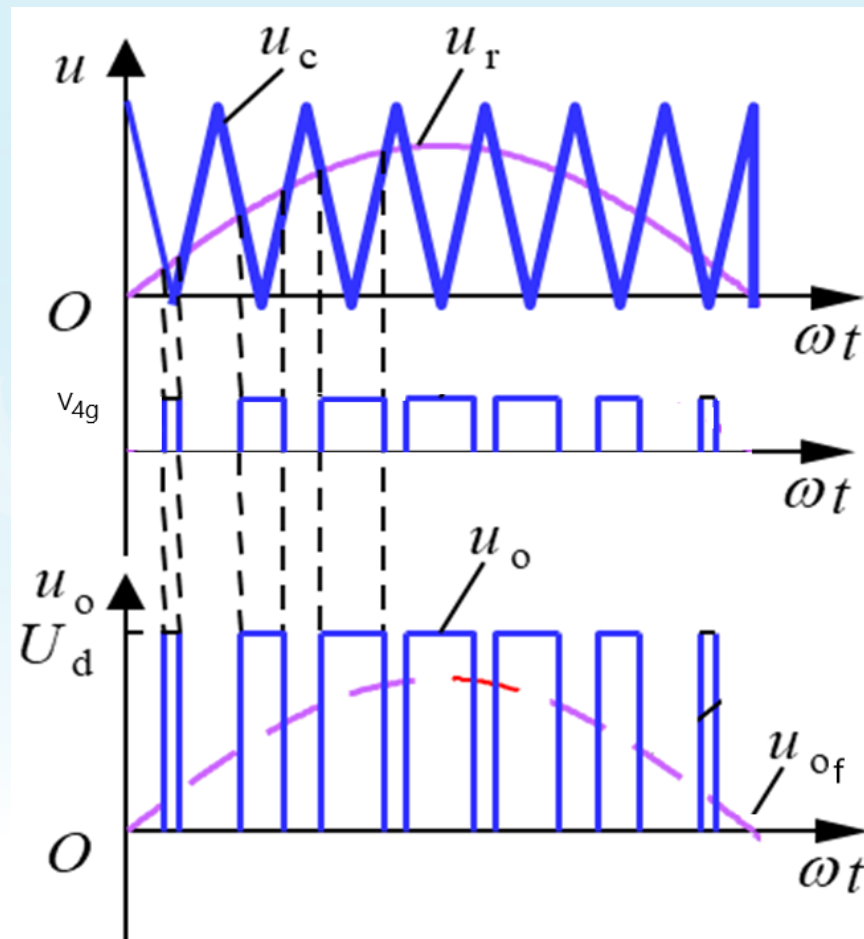
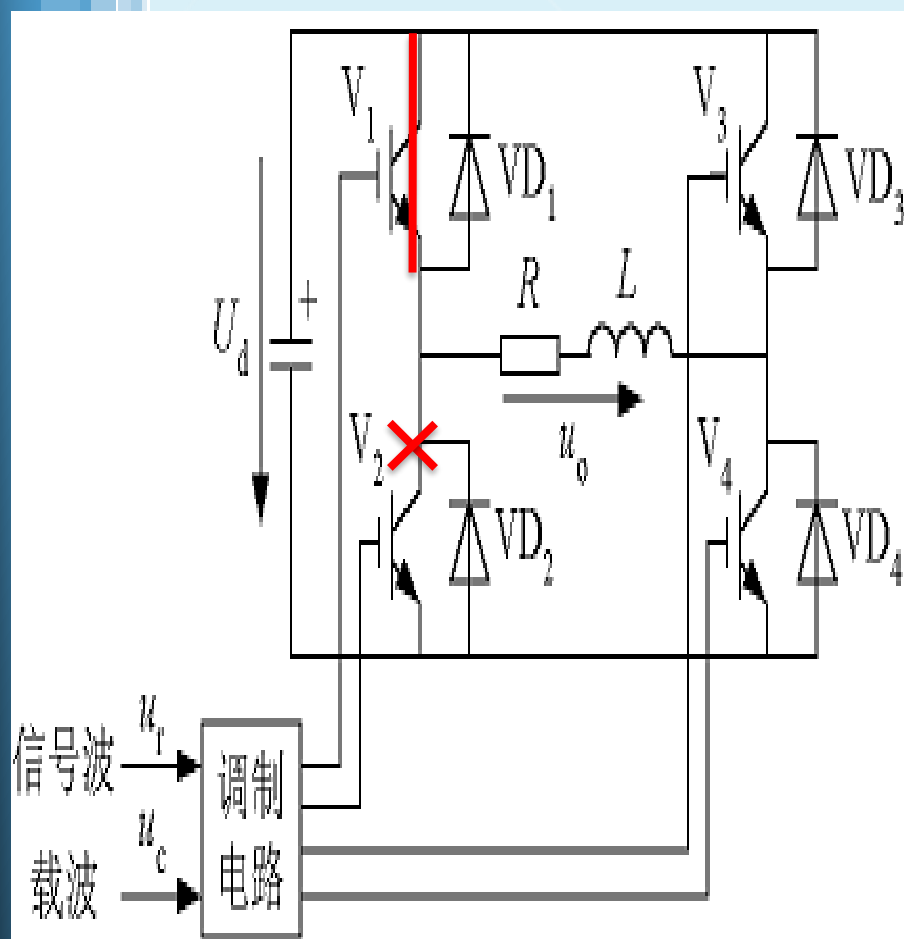


反过来说:

想输出 $u_o$ 或 $u_{of}$ 的正弦半波, 可通过这种调制的方法得到。

问题是: 如何构造载波信号和调制信号?

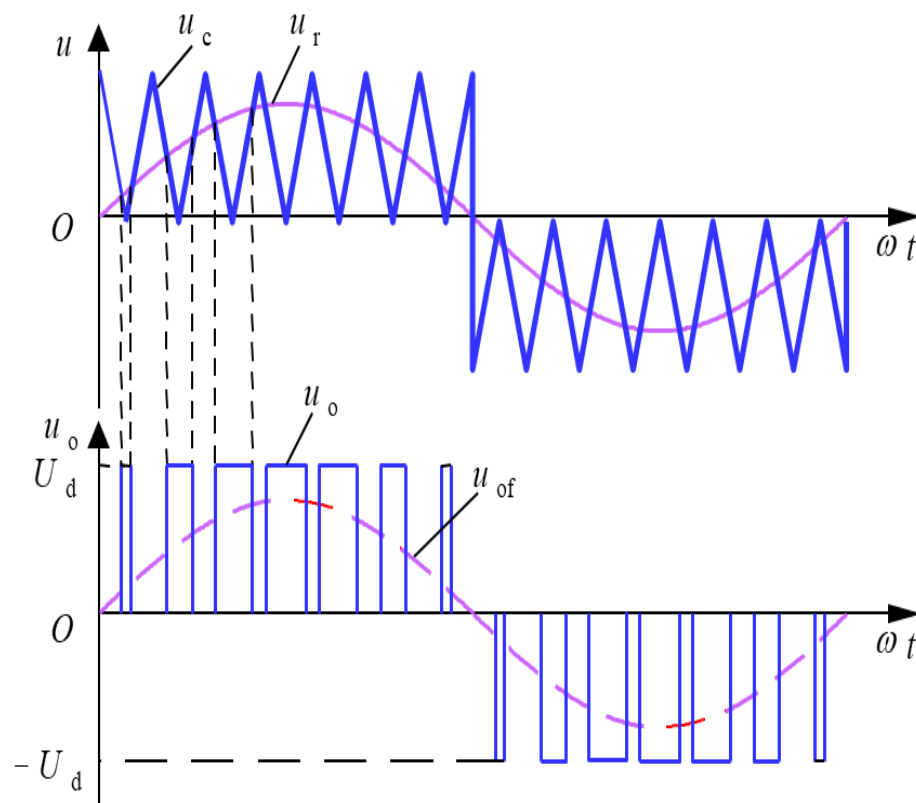
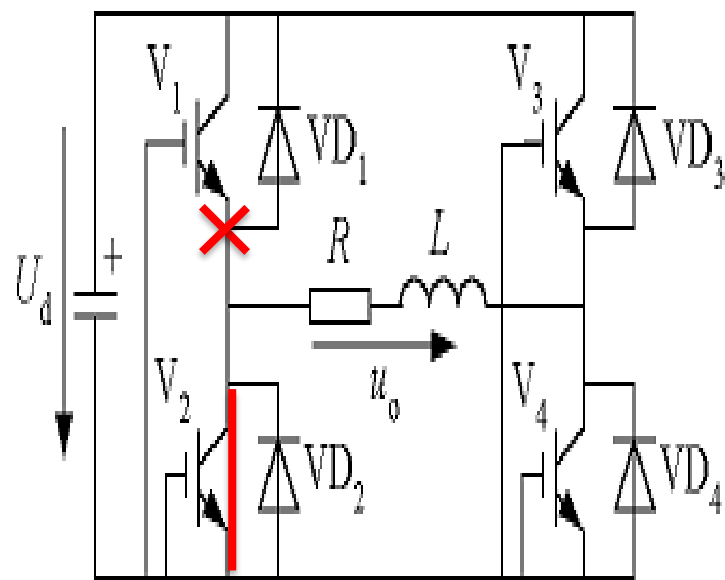
$u_r$  和  $u_o$  的关系到底如何?



✎ 在  $u_r$  的负半周， $V_1$  保持断态， $V_2$  保持通态。

✓ 当  $u_r < u_c$  时使  $V_3$  导通， $V_4$  关断， $u_o = -U_d$ 。

✓ 当  $u_r > u_c$  时使  $V_3$  关断， $V_4$  导通， $u_o = 0$ 。

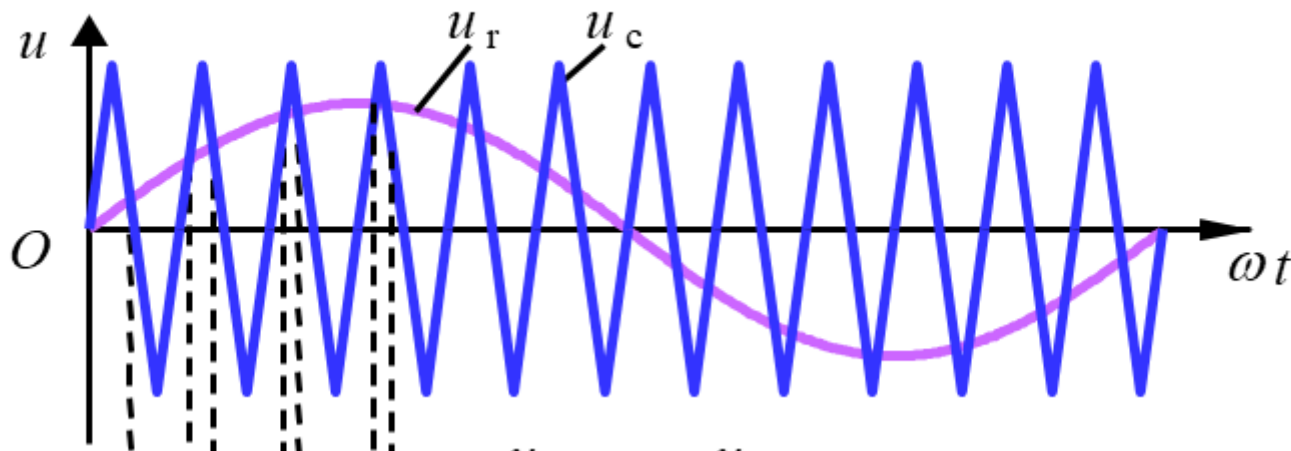


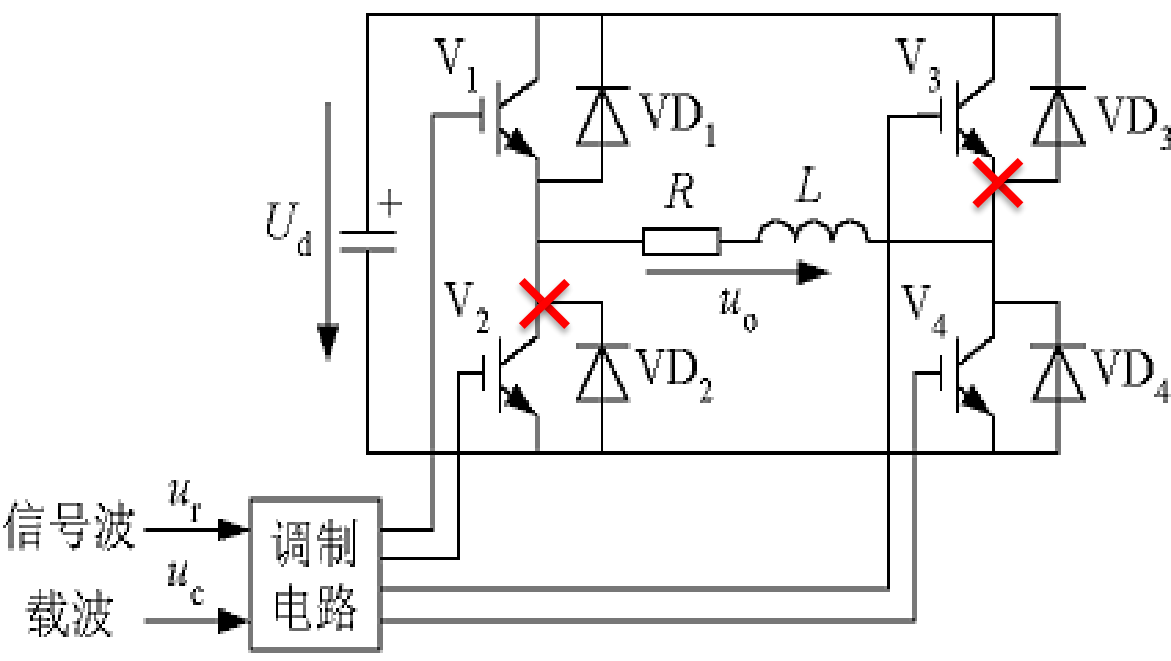
# ◆双极性PWM控制方式

在调制信号 $u_r$ 和载波信号 $u_c$ 的交点时刻控制各开关器件的通断。

在 $u_r$ 的半个周期内，三角波载波有正有负，所得的PWM波也是有正有负，

在 $u_r$ 的一个周期内，输出的PWM波只有 $\pm U_d$ 两种电平。

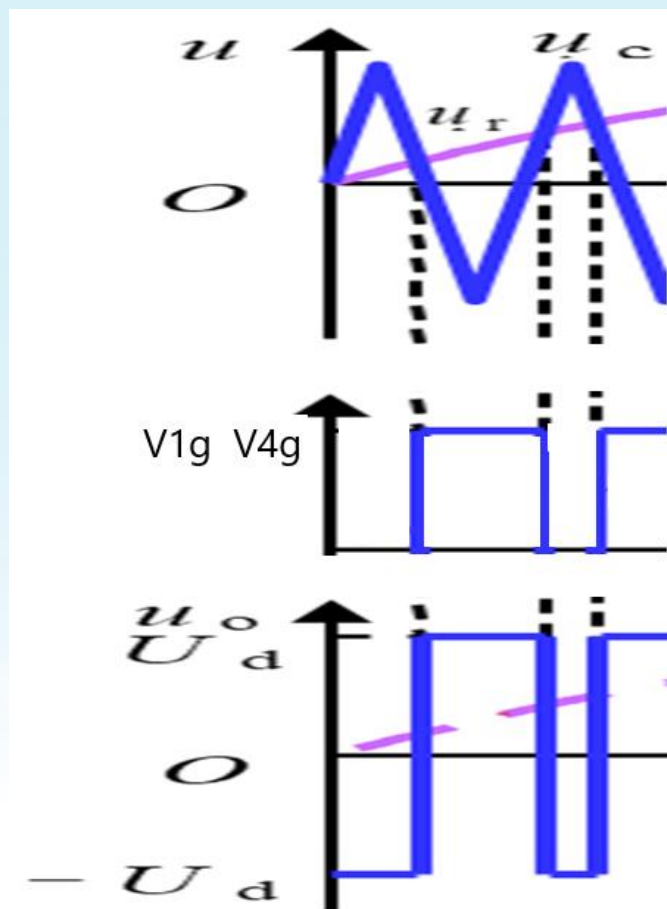


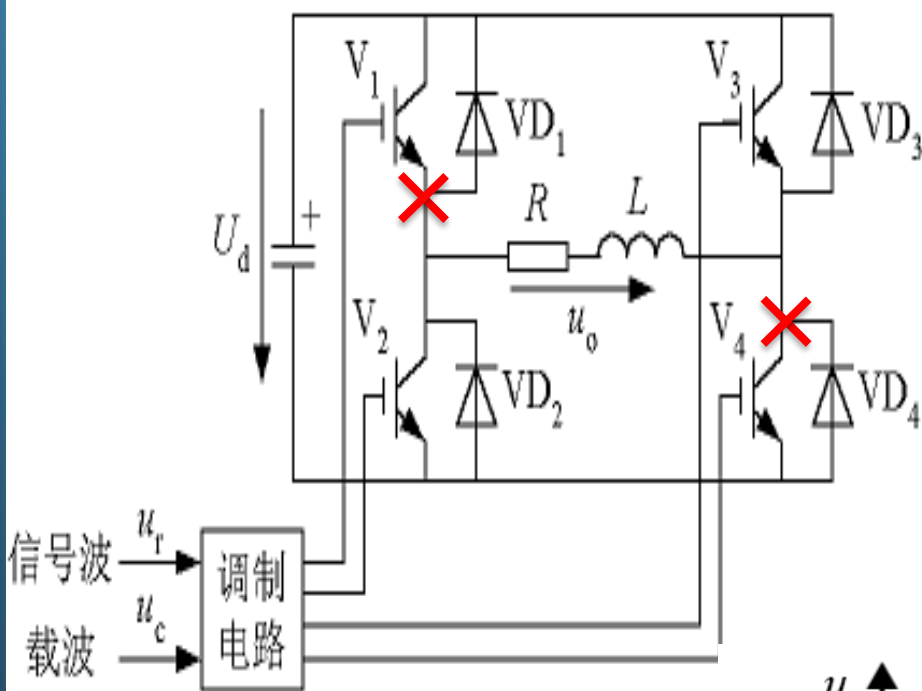


在 $u_r$ 的正负半周，对各开关器件的控制规律相同。

当 $u_r > u_c$ 时， $V_1$ 和 $V_4$ 导通， $V_2$ 和 $V_3$ 关断，

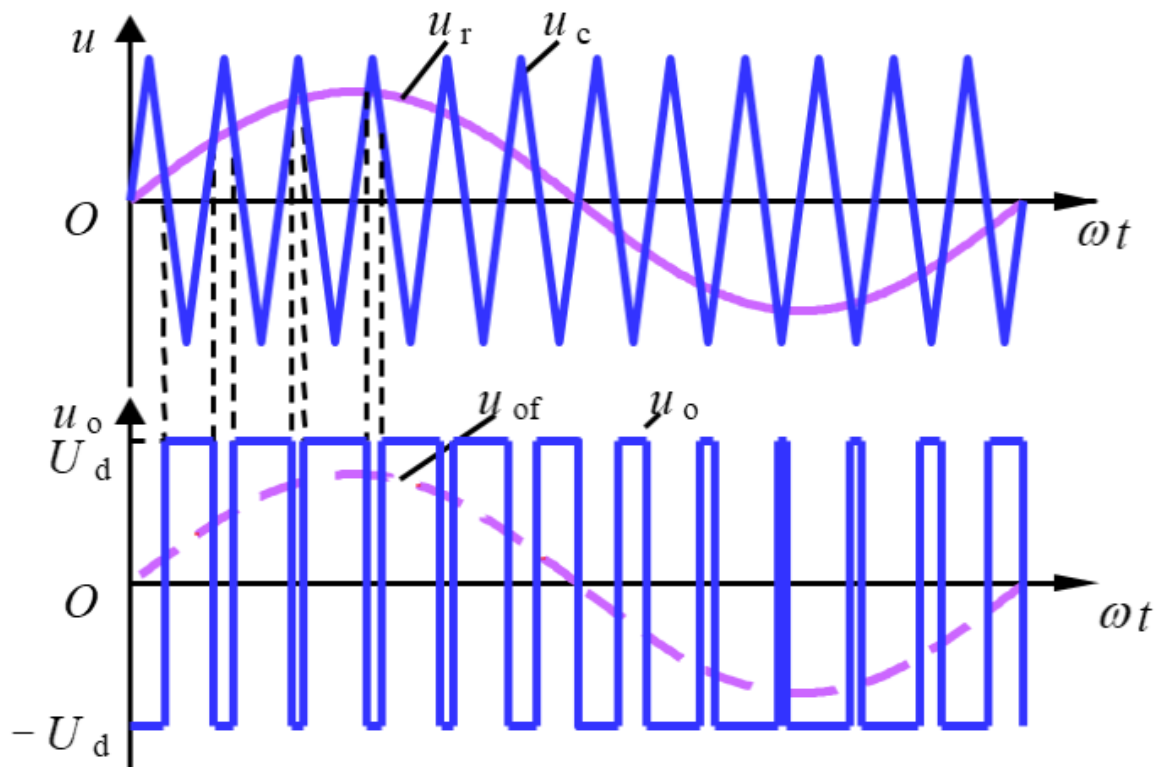
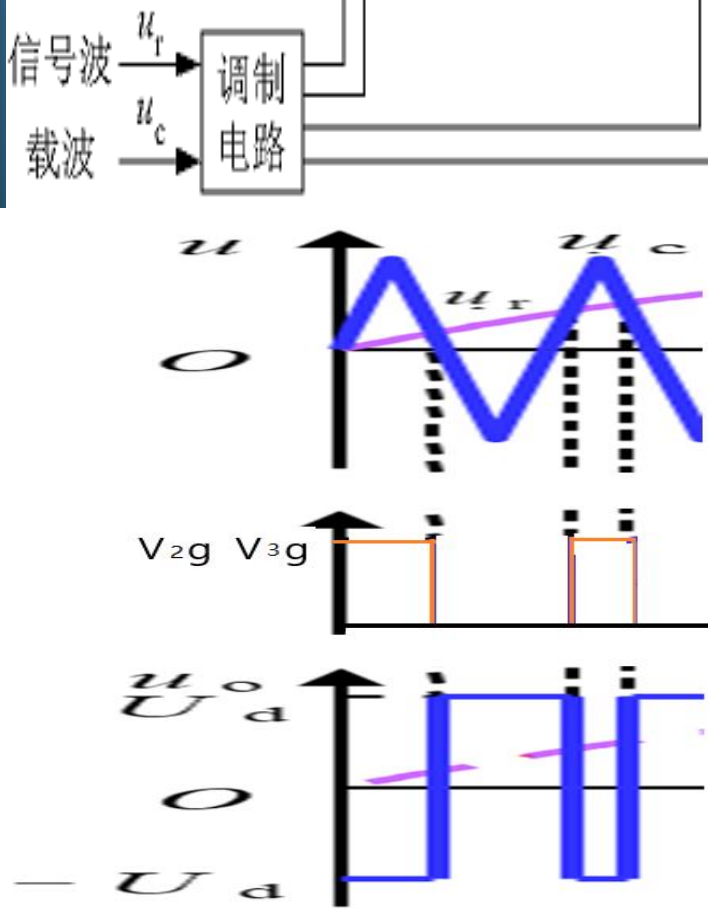
如 $i_o > 0$ ，则 $V_1$ 和 $V_4$ 通，  
如 $i_o < 0$ ，则 $VD_1$ 和 $VD_4$ 通，  
不管哪种情况都是 $u_o = U_d$ 。





✓当 $u_r < u_c$ 时,  $V_2$ 和 $V_3$ 导通,  
 $V_1$ 和 $V_4$ 关断,

如 $i_o < 0$ , 则 $V_2$ 和 $V_3$ 通,  
 如 $i_o > 0$ , 则 $VD_2$ 和 $VD_3$ 通,  
 不管哪种情况都是 $u_o = -U_d$ 。



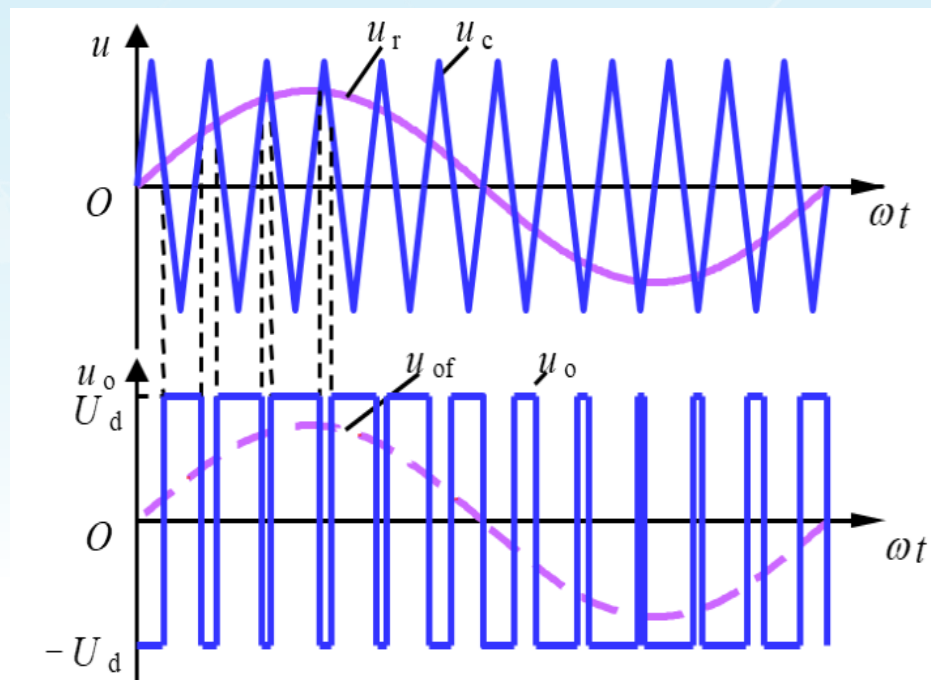
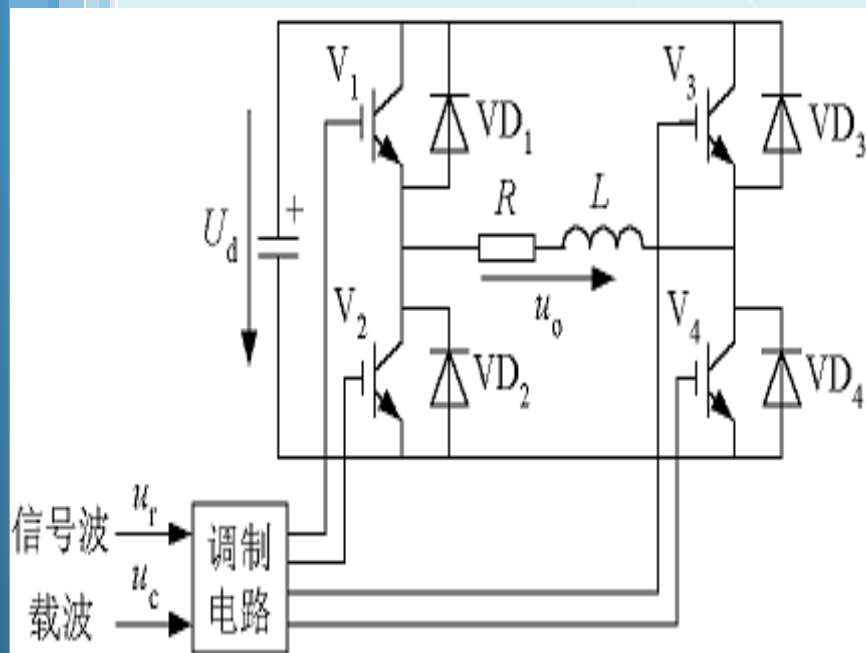


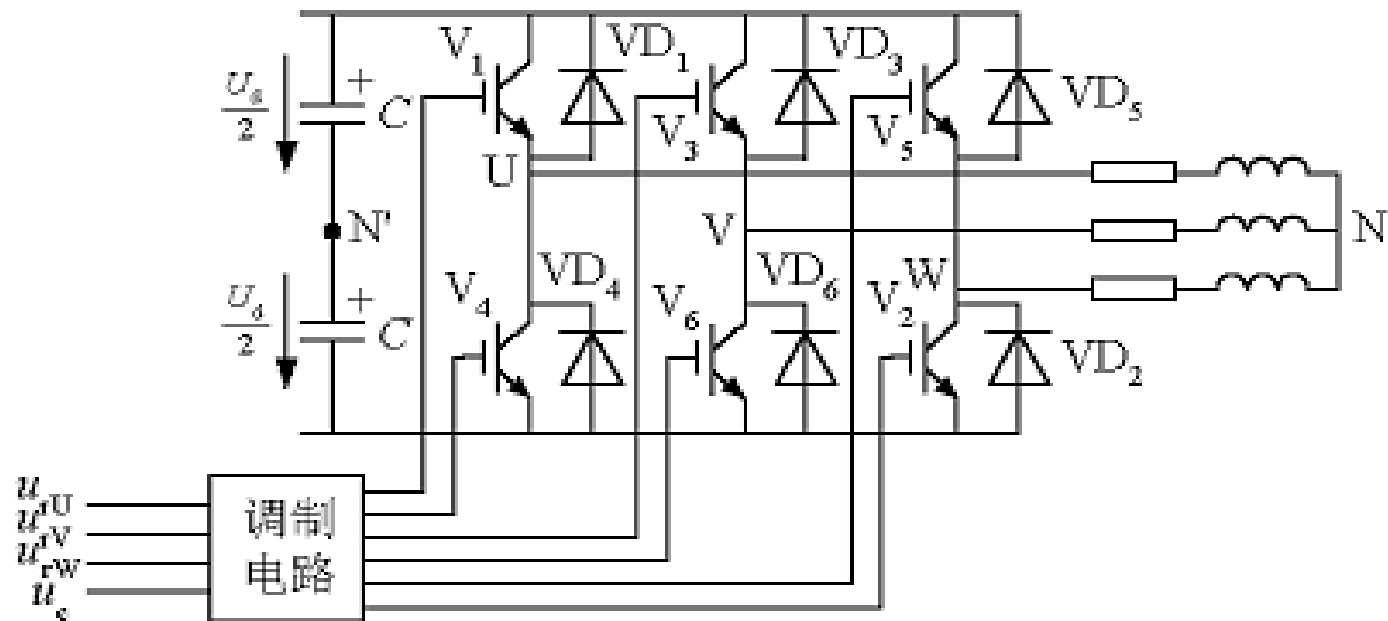
## PWM逆变器---功率放大器

调制信号 $u_r$ 和载波信号 $u_c$ 一般为弱电信号，通常载波 $u_c$ 的幅值为1，那么 $u_r$ 的最大值不超过1；

直流电压为 $u_d$ ，输出电压 $u_o$ 是将 $u_r$ 放大 $u_d$ 倍。!!!

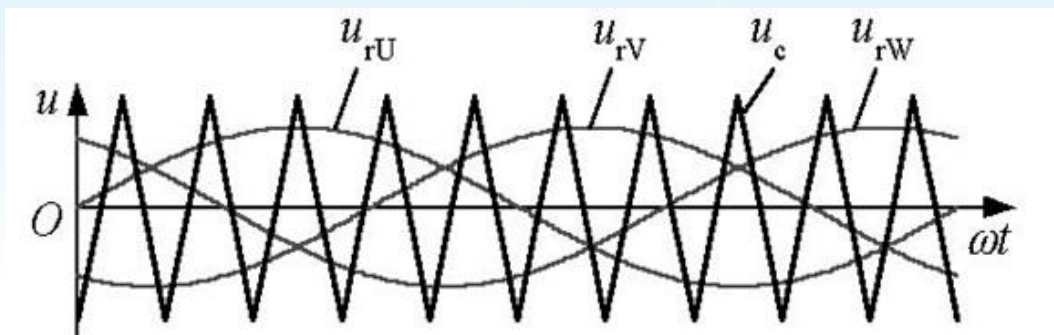
怎么证明？！





## ■ 三相桥式PWM逆变电路（调制法）

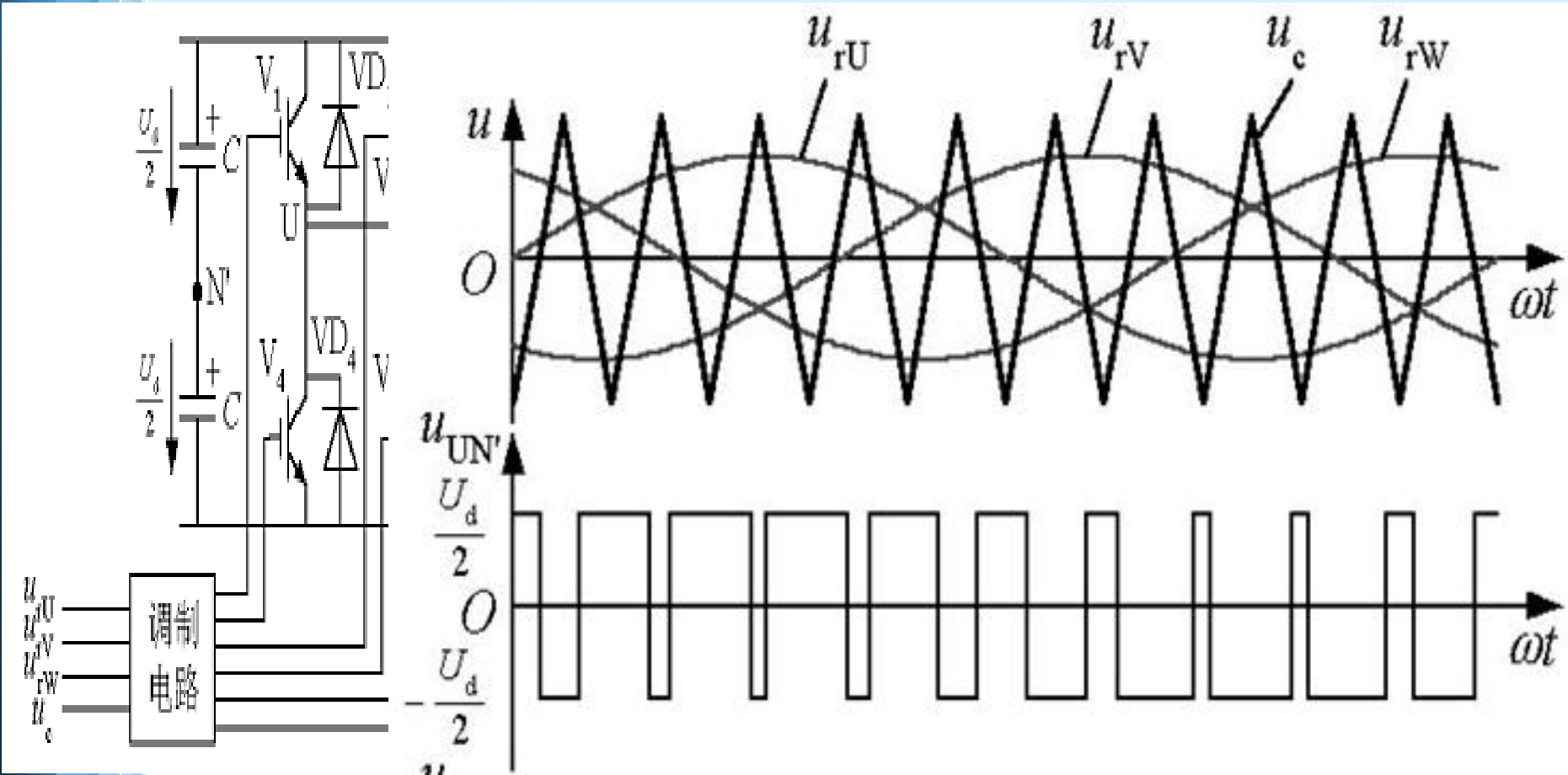
- ◆ 采用双极性控制方式。
- ◆ U、V和W三相的PWM控制通常公用一个三角波载波 $u_c$ ，三相的调制信号 $u_{rU}$ 、 $u_{rV}$ 和 $u_{rW}$ 依次相差 $120^\circ$ 。



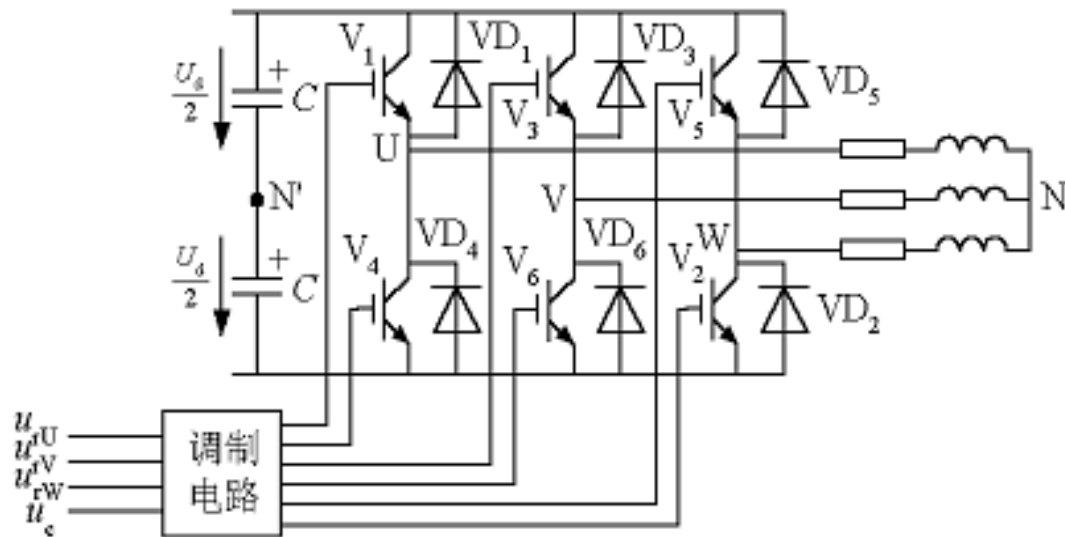
## ◆ 电路工作过程（U相为例）

当  $u_{rU} > u_c$  时，上桥臂  $V_1$  导通，下桥臂  $V_4$  关断，则U相相对于直流电源假想中点  $N'$  的输出电压  $u_{UN'} = U_d/2$ 。

当  $u_{rU} < u_c$  时， $V_4$  导通， $V_1$  关断，则  $u_{UN'} = -U_d/2$ 。



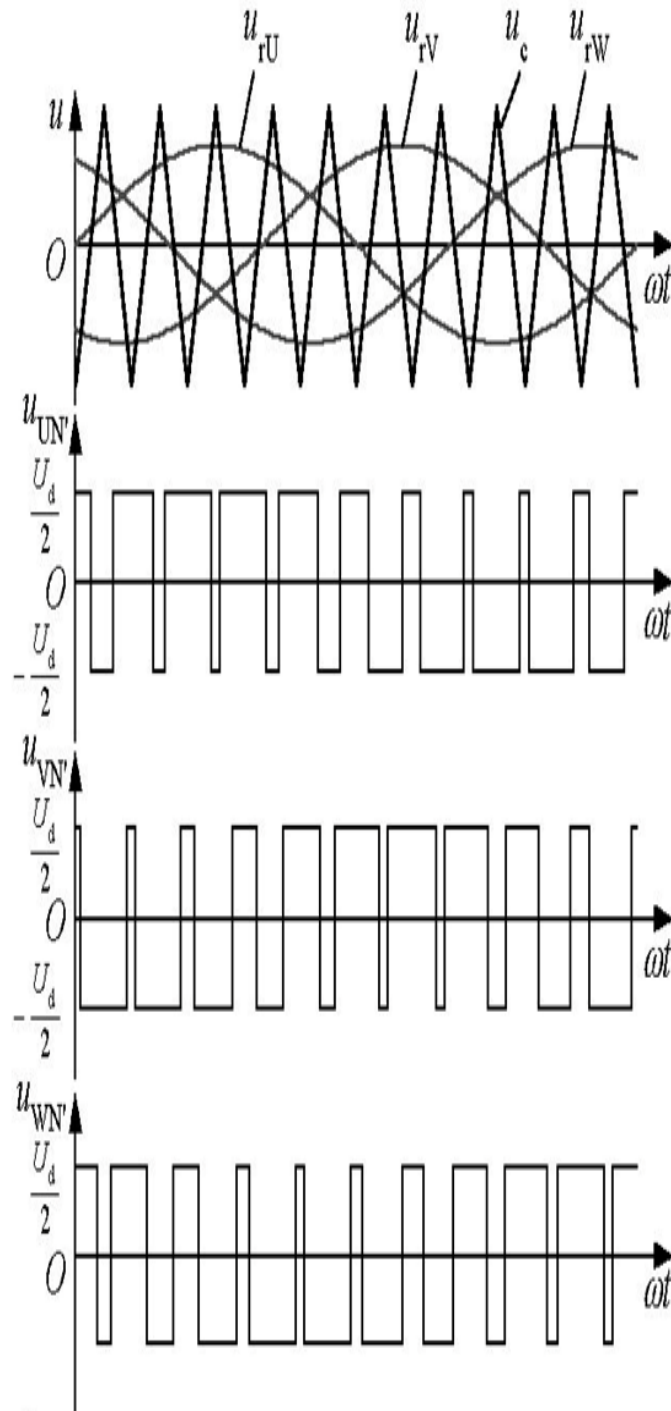


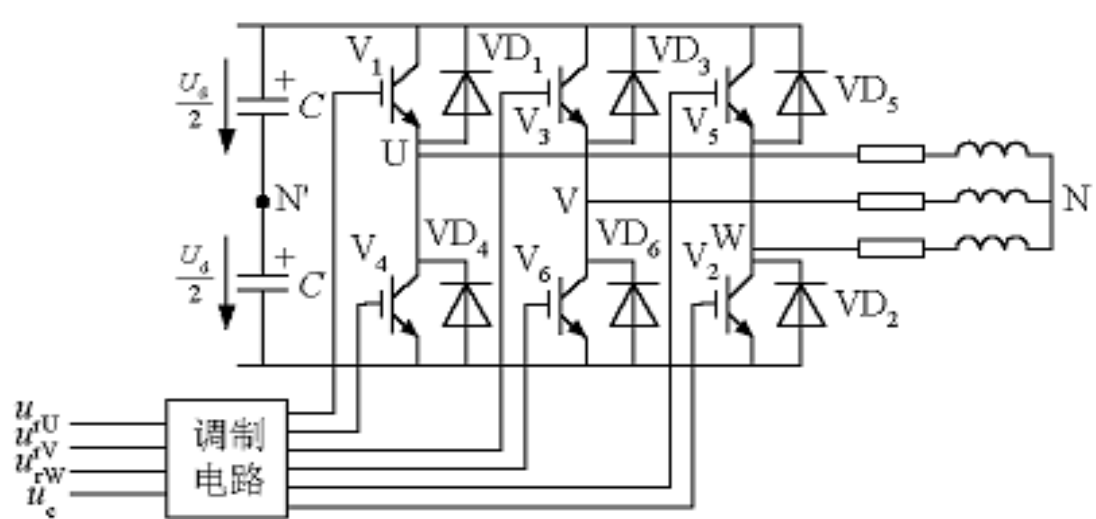
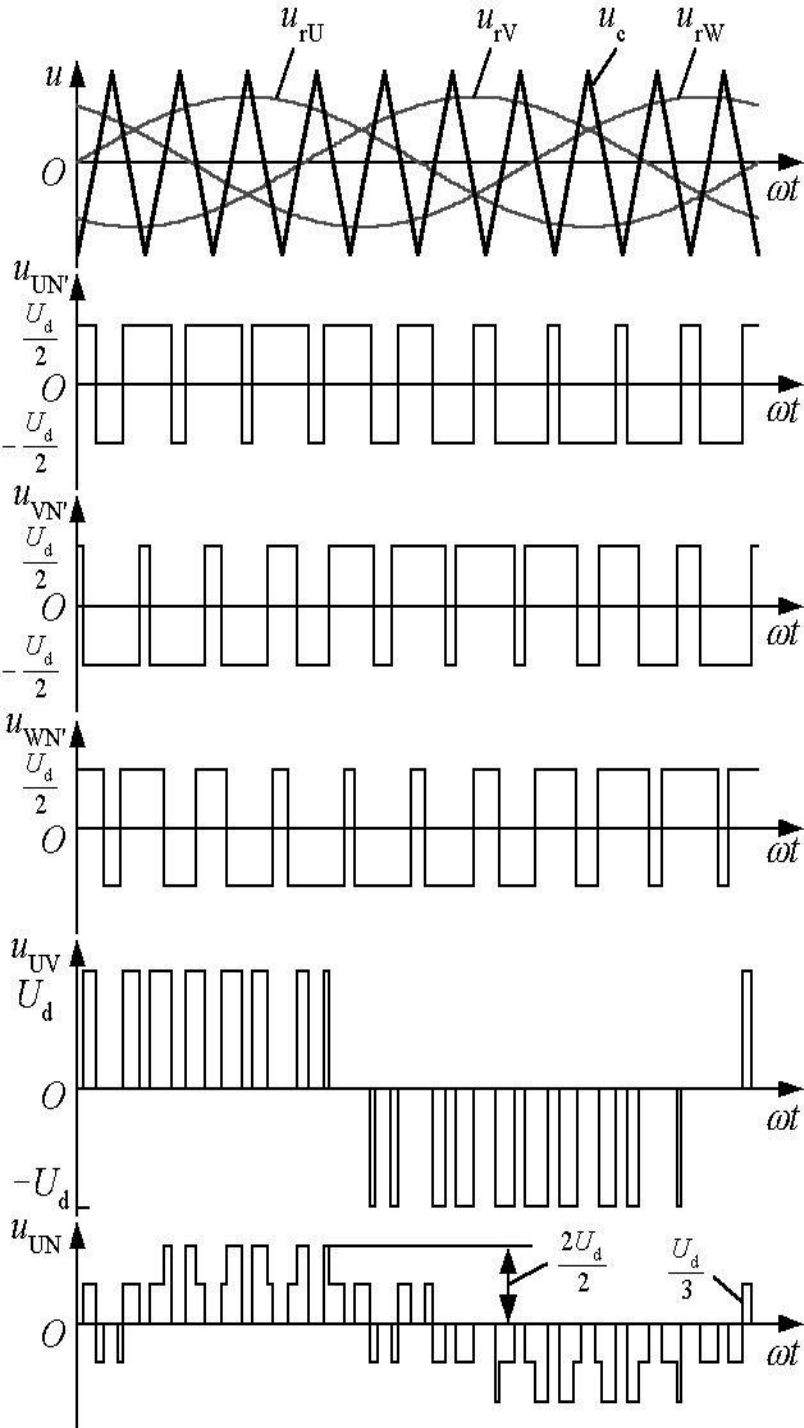


✎  $V_1$ 和 $V_4$ 的驱动信号始终是互补的。

✎ 当给 $V_1(V_4)$ 加导通信号时，可能是 $V_1(V_4)$ 导通，也可能是二极管 $VD_1(VD_4)$ 续流导通，这要由阻感负载中电流的方向来决定。

✎  $u_{UN'}$ 、 $u_{VN'}$ 和 $u_{WN'}$ 的PWM波形都只有 $\pm U_d/2$ 两种电平。



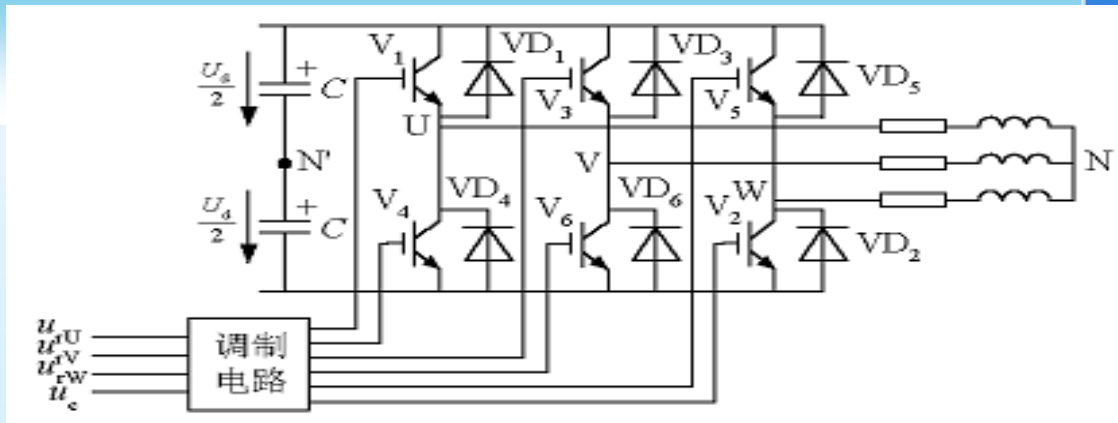
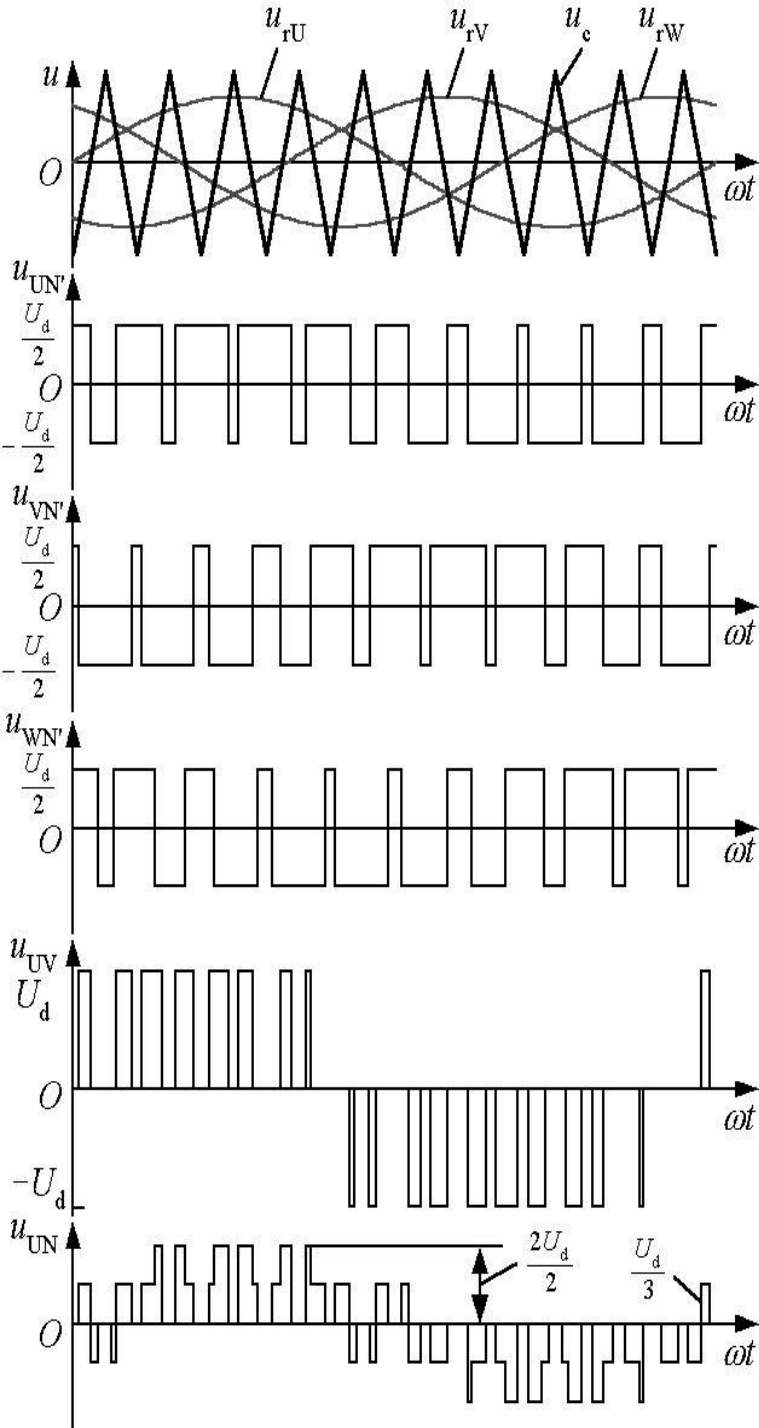


✓ 输出线电压PWM波由  $\pm U_d$  和 0 三种电平构成。

✓ 当臂1和6导通时， $u_{UV} = U_d$ 。

✓ 当臂3和4导通时， $u_{UV} = -U_d$ 。

✓ 当臂1和3或臂4和6导通时， $u_{UV} = 0$ 。



❏ 负载相电压  $u_{UN}$  可由下式求得

$$u_{UN} = u_{UN'} - \frac{u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'}}{3}$$

负载相电压的PWM波由  $(\pm 2/3)U_d$ 、 $(\pm 1/3)U_d$  和  $0$  共5种电平组成。

◆ 为了防止上下两个臂直通而造成短路，在上下两臂通断切换时要留一小段上下臂都施加关断信号的**死区时间**。



## 7.2.1 计算法和调制法

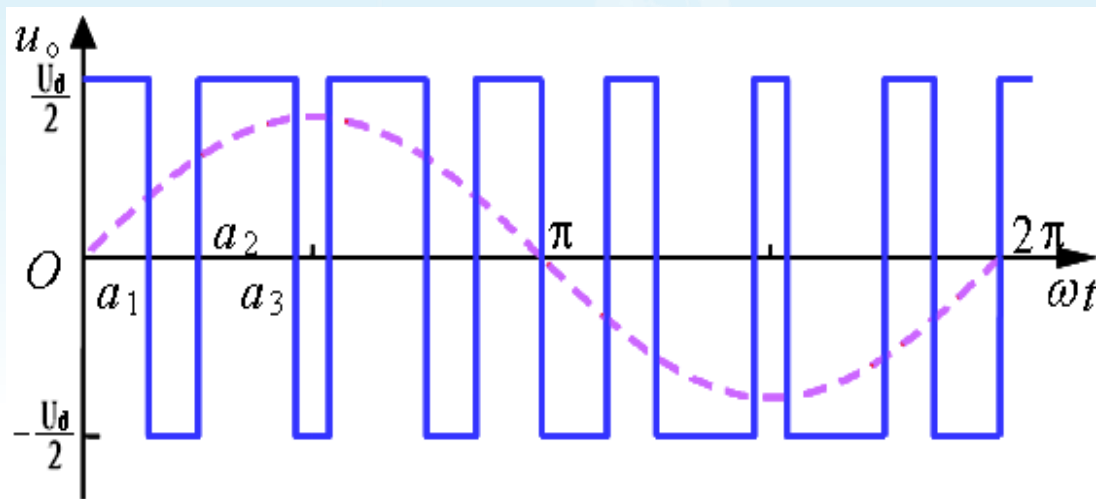
### ■ 特定谐波消去法

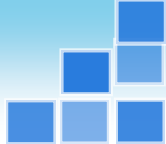
◆ 是**计算法**中一种较有代表性的方法:

如果在输出电压半个周期内开关器件开通和关断各**k**次,

考虑到PWM波四分之一周期对称, 共有**k**个开关时刻可以控制,

除去用一个自由度来控制基波幅值外, 可以**消去k-1个频率的特定谐波**。





## 7.2.2 异步调制和同步调制

### ■ 载波比:

载波频率 $f_c$ 与调制信号频率 $f_r$ 之比 $N=f_c/f_r$ ,

### ■ PWM调制方式分类方式:

根据载波和信号波是否同步及载波比的变化情况,

可分为异步调制和同步调制两种。



## ■ 异步调制

### ◆ 载波信号和调制信号不保持同步的调制方式

◆ 通常保持载波频率 $f_c$ 固定不变，因而当信号波频率 $f_r$ 变化时，载波比 $N$ 是变化的。

◆ 在信号波的半个周期内，PWM波的脉冲个数不固定，相位也不固定，正负半周期的脉冲不对称，半周期内前后1/4周期的脉冲也不对称。

◆ 当 $f_r$ 较低时， $N$ 较大，一周期内脉冲数较多，脉冲不对称产生的不利影响都较小，PWM波形接近正弦波。

◆ 当 $f_r$ 增高时， $N$ 减小，一周期内的脉冲数减少，PWM脉冲不对称的影响就变大，输出PWM波和正弦波差异变大，对于三相PWM型逆变电路来说，三相输出的对称性也变差。

◆ 在采用异步调制方式时，希望采用较高的载波频率，以使在信号波频率较高时仍能保持较大的载波比。

# ■ 同步调制

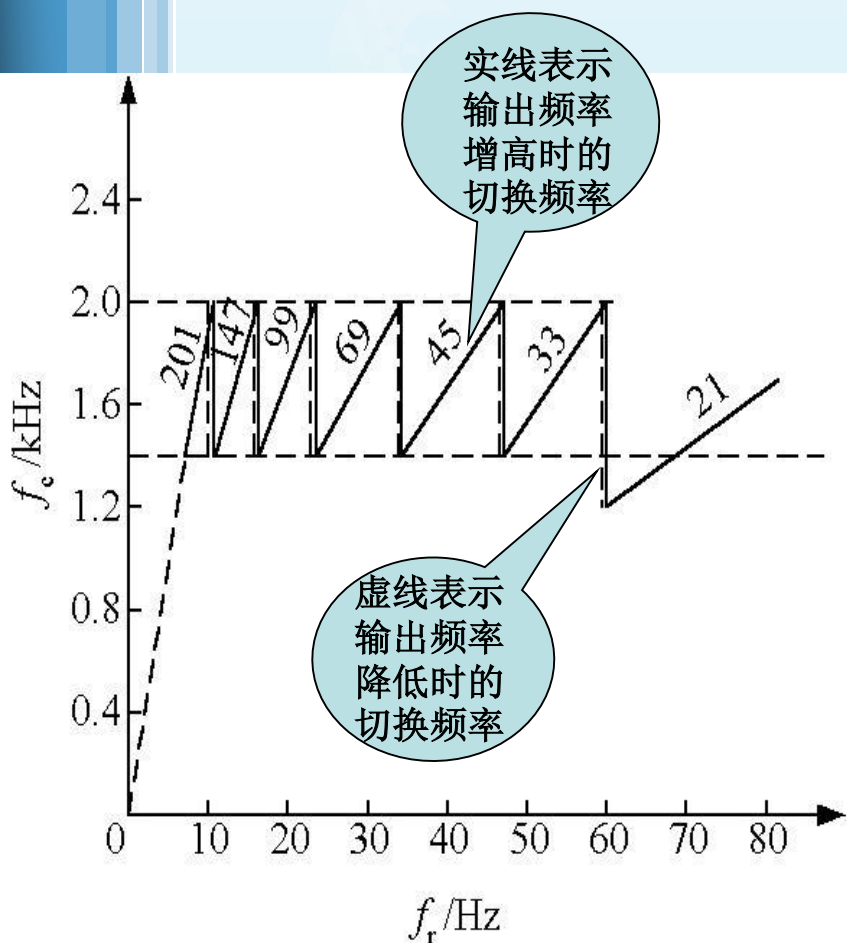
载波比 $N$ 等于常数，并在变频时使载波和信号波保持同步的方式称为同步调制。

◆  $f_r$ 变化时载波比 $N$ 不变，信号波一个周期内输出的脉冲数是固定的，脉冲相位也是固定的。

◆ 在三相PWM逆变电路中，通常公用一个三角波载波，为了使三相输出波形严格对称和一相的PWM波正负半周镜对称，取 $N$ 为3的整数倍且为奇数。

◆ 当逆变电路输出频率很低时，同步调制时的 $f_c$ 也很低， $f_c$ 过低时由调制带来的谐波不易滤除，当负载为电动机时也会带来较大的转矩脉动和噪声；当逆变电路输出频率很高时，同步调制时的 $f_c$ 会过高，使开关器件难以承受。





## 分段同步调制

◆把 $f_r$ 范围划分成若干个频段，每个频段内都保持载波比 $N$ 为恒定，不同频段的载波比不同。

◆在 $f_r$ 高的频段采用**较低的载波比**，以使 $f_c$ 不致过高，限制在功率开关器件允许的范围。

◆在 $f_r$ 低的频段采用**较高的载波比**，以使 $f_c$ 不致过低而对负载产生不利影响。

◆为了防止 $f_c$ 在切换点附近的来回跳动，在各频率切换点采用了**滞后切换**的方法。

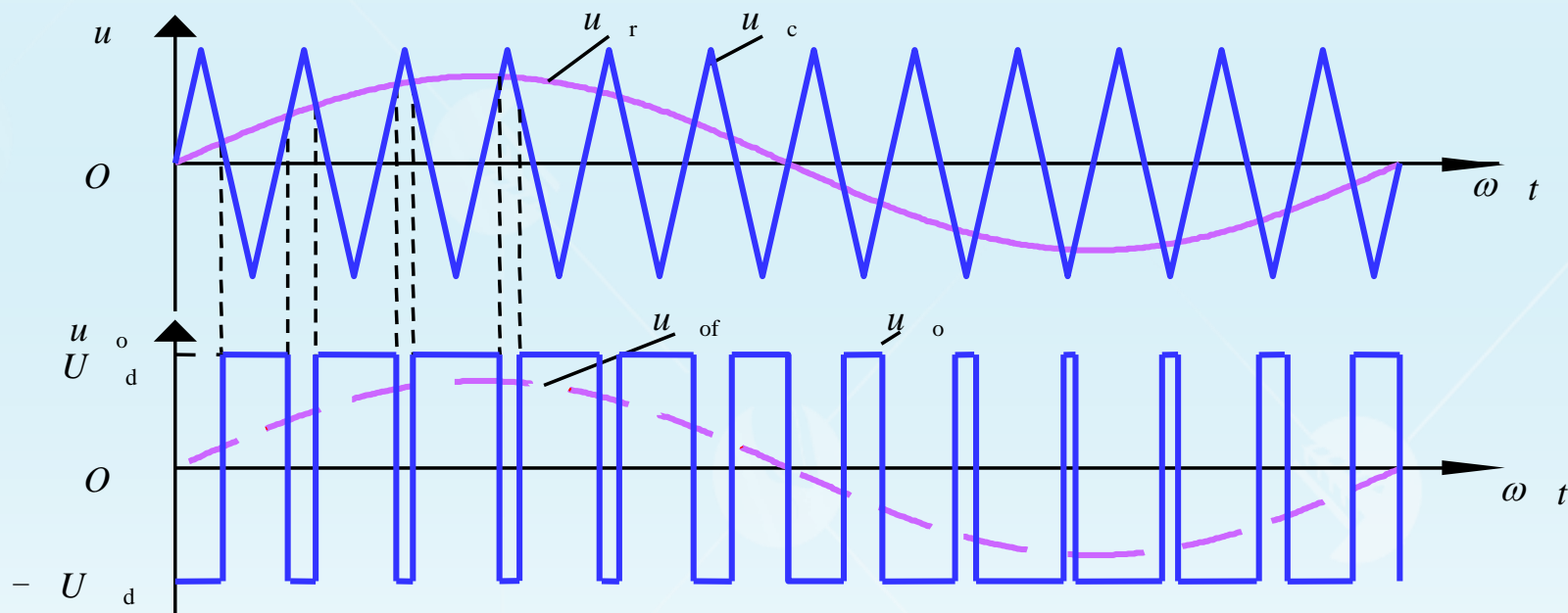
◆有的装置在低频输出时采用异步调制方式，而在高频输出时切换到同步调制方式，这样可以把两者的优点结合起来，和分段同步方式的效果接近。





## 7.2.3 规则采样法

■ 在正弦波和三角波的自然交点时刻控制功率开关器件的通断，这种生成SPWM波形的方法称为自然采样法。



### ■ 规则采样法

◆ 是一种应用较广的工程实用方法，其效果接近自然采样法，但计算量却比自然采样法小得多。

## ◆方法说明

取三角波两个正峰值之间为一个采样周期 $T_c$ ，使每个脉冲的中点都以相应的三角波中点（即负峰点）为对称。

在三角波的负峰时刻 $t_D$ 对正弦信号波采样而得到D点，过D点作一水平直线和三角波分别交于A点和B点，在A点时刻 $t_A$ 和B点时刻 $t_B$ 控制功率开关器件的通断。

可以看出，用这种规则采样法得到的脉冲宽度 $\delta$ 和用自然采样法得到的脉冲宽度非常接近。

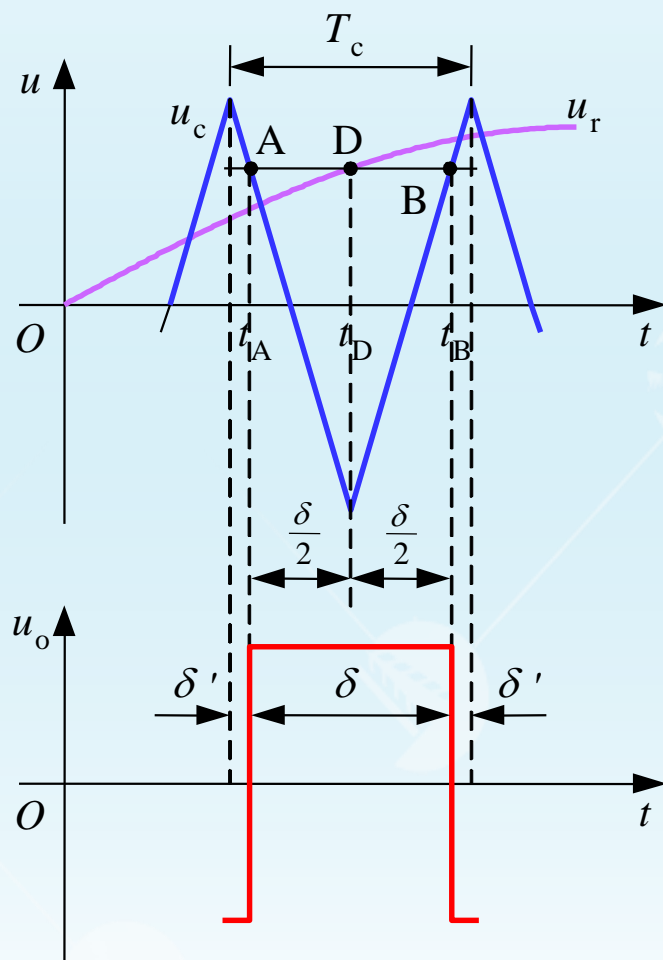


图7-12 规则采样法

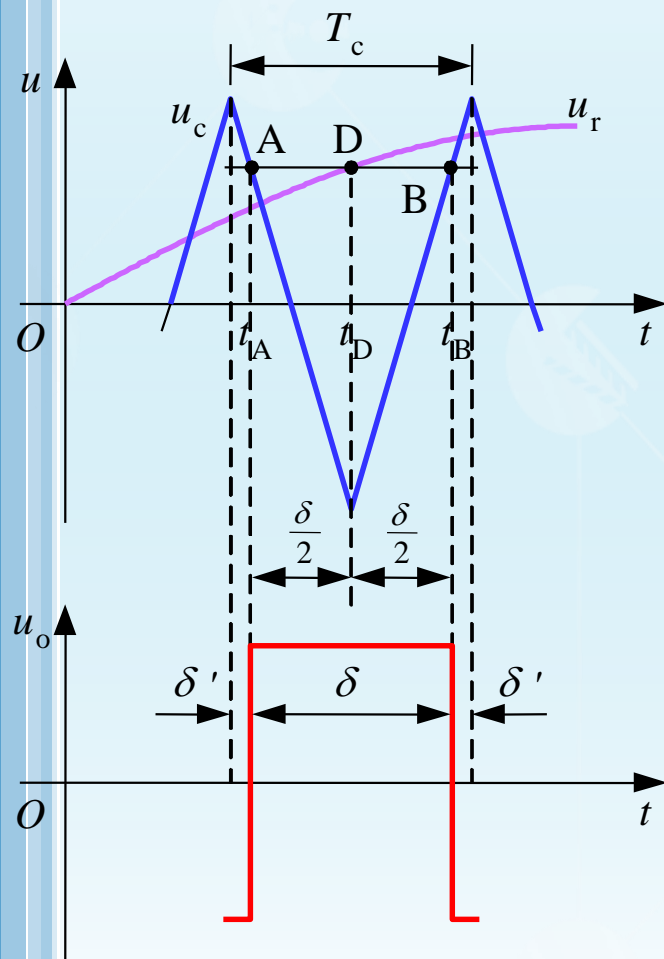


图7-12 规则采样法

## 🔑 $\delta$ 和 $\delta'$ 的确定

设正弦调制信号波为

$$u_r = a \sin \omega_r t$$

式中,  $a$  称为调制度,  $0 \leq a < 1$ ;  $\omega_r$  为正弦信号波角频率, 从图7-12中可得如下关系式

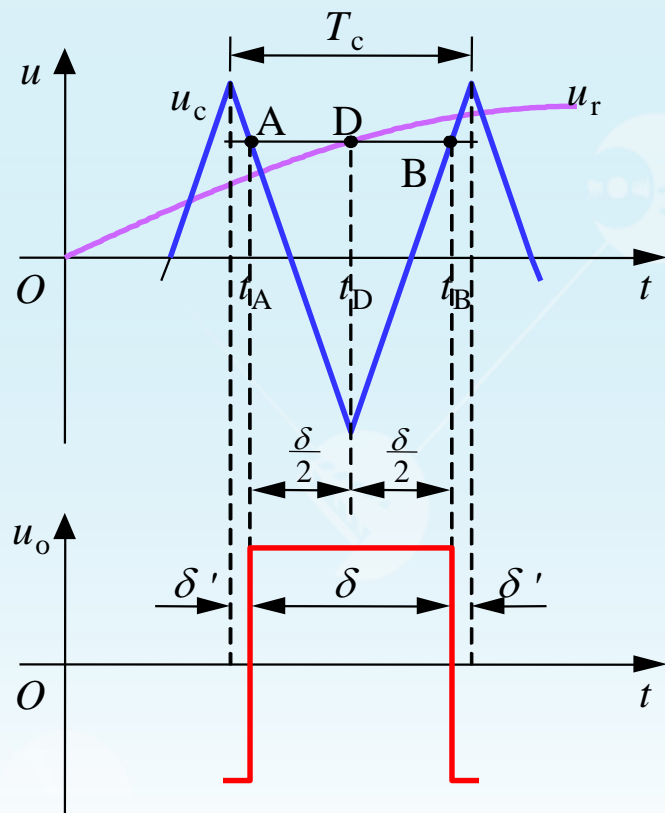
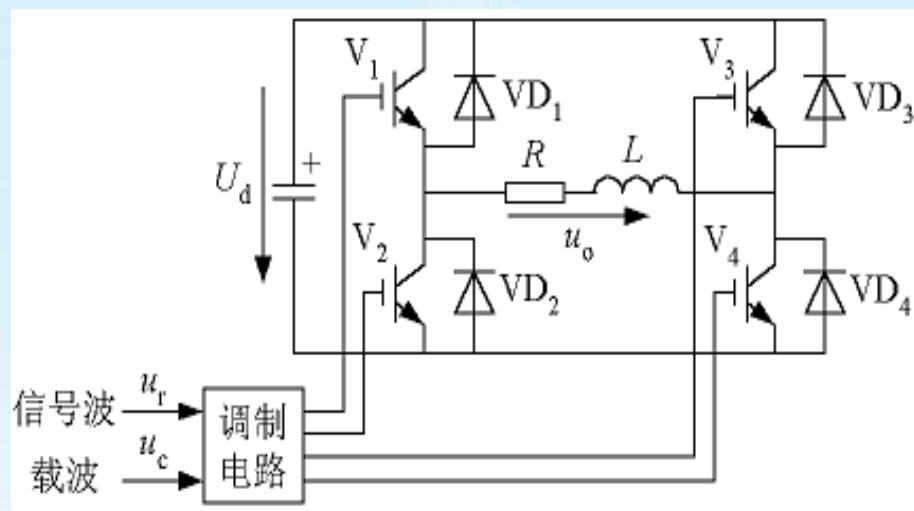
$$\frac{1 + a \sin \omega_r t_D}{\delta / 2} = \frac{2}{T_c / 2}$$

因此可得

$$\delta = \frac{T_c}{2} (1 + a \sin \omega_r t_D) \quad (7-6)$$



脉冲两边的间隙宽度 $\delta'$ 为 
$$\delta' = \frac{1}{2}(T_c - \delta) = \frac{T_c}{4}(1 - a \sin \omega_r t_D) \quad (7-7)$$

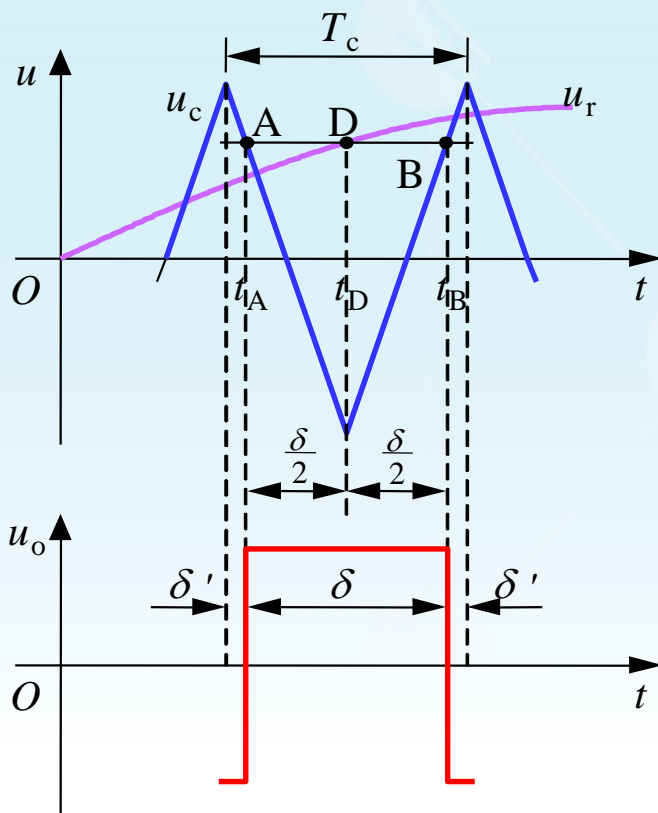


期望输出电压:

$$U_d a \sin \omega_r t$$

期望输出电压的冲量:

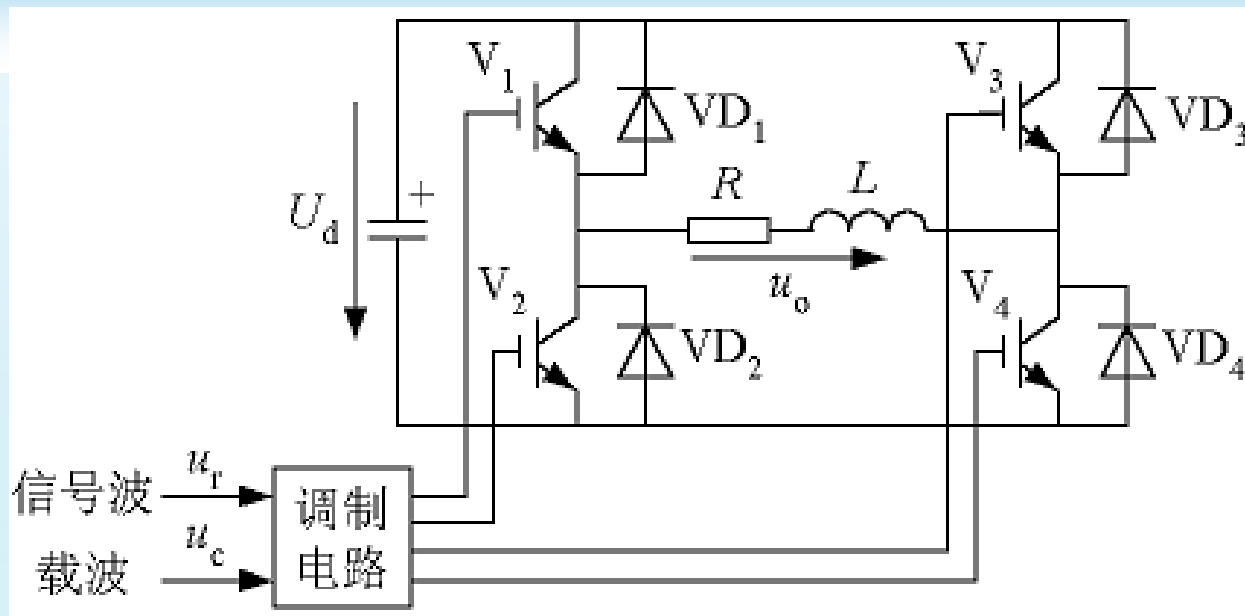
$$\int_{t_D - 0.5T_c}^{t_D + 0.5T_c} U_d a \sin \omega_r t dt \approx U_d T_c a \sin \omega_r t_D$$



实际PWM电压的冲量:

$$(\delta - 2\delta')E = U_d T_c a \sin \omega_r t_D$$

冲量相等!!!

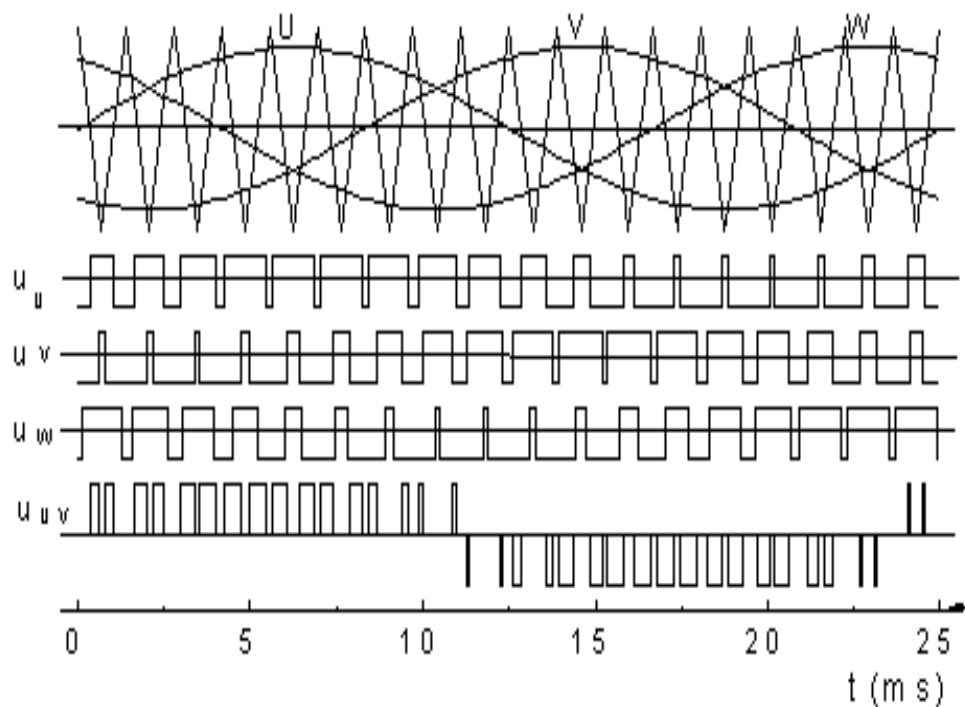
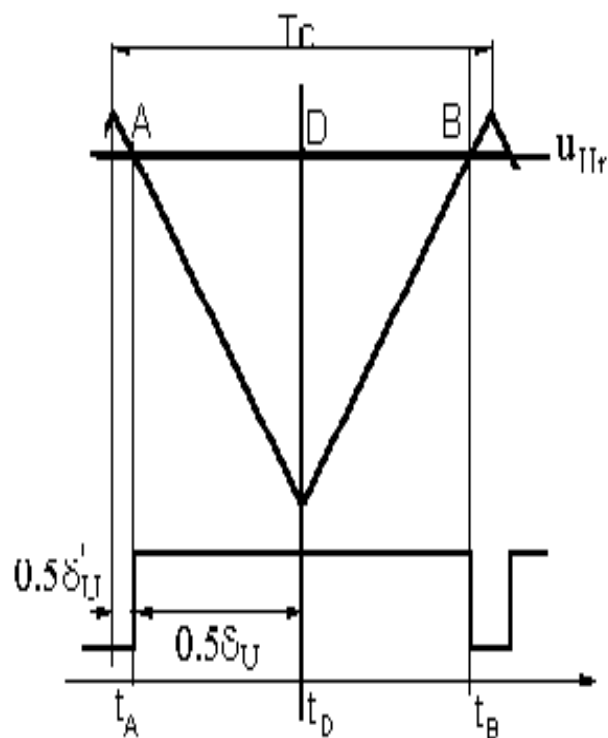


## 思考题：

$U_d=200\text{V}$ , 希望得到有效值  $70\text{V}$  频率  $60\text{Hz}$  的交流输出，调制函数？

## 三相桥式逆变电路

- 通常三相的三角波载波是公用的，  
三相正弦调制波的相位依次相差 $120^\circ$



U相的正弦调制信号是 $a\sin\omega t$ 。

$a$ 为调制系数（Modulation Index）， $0 < a < 1$ 。

三角载波 $u_c$ 的频率为 $f_c$ ，角频率为 $\omega_c$ ，周期为 $T_c$ 。

很容易得到：

$$\delta_U = \frac{T_c}{2} (1 + a \sin \omega t_D) \qquad \delta'_U = \frac{1}{2} (T_c - \delta_U)$$

对V相和W相，同理可得到

$$\delta_V = \frac{T_c}{2} (1 + a \sin(\omega t_D - 120^\circ))$$

$$\delta_W = \frac{T_c}{2} (1 + a \sin(\omega t_D + 120^\circ))$$





设在同一三角波周期内三相的脉冲宽度分别为 $\delta_U$ 、 $\delta_V$ 和 $\delta_W$ ，脉冲两边的间隙宽度分别为 $\delta'_U$ 、 $\delta'_V$ 和 $\delta'_W$ ，由于在同一时刻三相正弦调制波电压之和为零，故由式(7-6)可得

$$\delta_U + \delta_V + \delta_W = \frac{3T_c}{2} \quad (7-8)$$

同样，由式(7-7)可得

$$\delta'_U + \delta'_V + \delta'_W = \frac{3T_c}{4} \quad (7-9)$$

利用式(7-8)、式(7-9)可以简化生成三相SPWM波形时的计算。

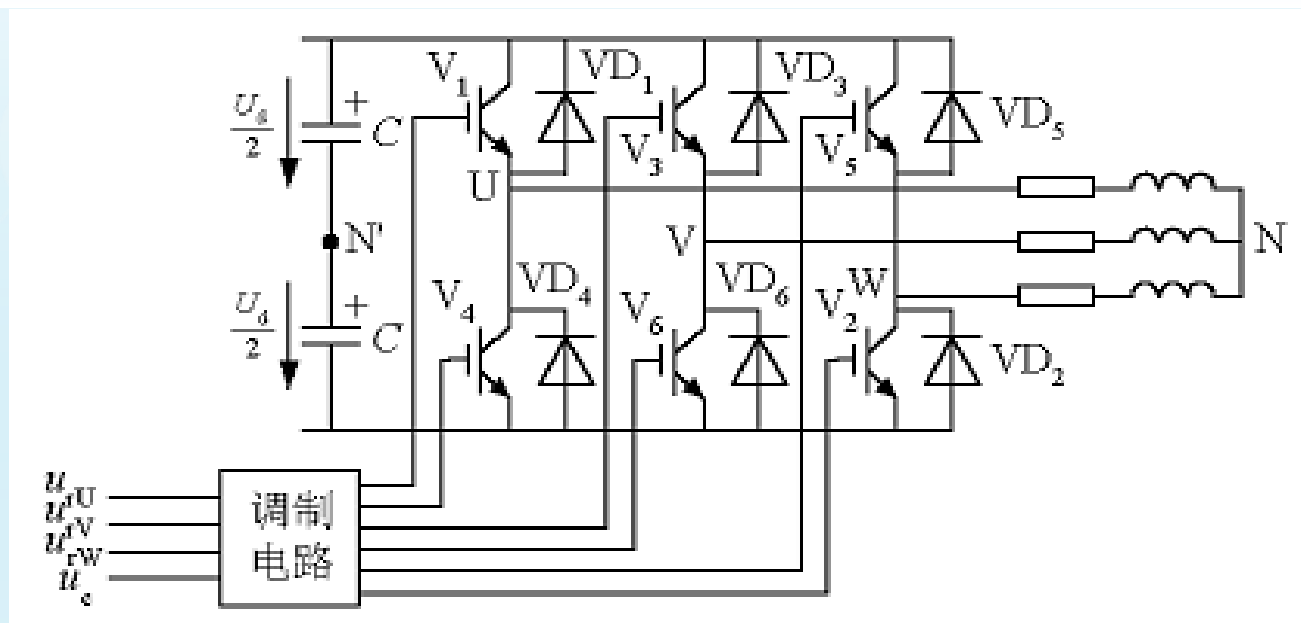
数量关系如何？  
能够实现想要的输出吗？

$$u_{UN'} = 0.5u_d a \sin \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2u_d}{n\pi} \sin\left(\frac{1}{4}T_c n\omega_c (1 + a \sin \omega t)\right) \cos \omega_c t$$

$$u_{UV} = 0.5u_d a \sin \omega t - 0.5u_d a \sin(\omega t - 120^\circ) + \dots\dots\dots$$

$$u_{UN} = u_{UN'} - \frac{1}{3}(u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'}) \\ = 0.5u_d a \sin \omega t + \dots\dots\dots$$

?



## 思考题：

$U_d=540\text{V}$ , 希望得到线电压有效值 $X$ 、频率为 $Y$ 的交流输出，三相调制函数？



## 7.2.4 PWM逆变电路的谐波分析

■ **载波**对正弦信号波调制，会产生和载波有关的谐波分量，这些谐波分量的频率和幅值是衡量PWM逆变电路性能的重要指标之一。

### ■ 双极性SPWM波形的谐波分析

◆ 同步调制可以看成异步调制的特殊情况，因此只分析异步调制方式。

#### ◆ 分析方法

✎ 以载波周期为基础，再利用 **贝塞尔函数** 可以推导出PWM波的傅里叶级数表达式。

✎ **这种分析过程相当复杂，而其结论却是很简单而直观的。**

◆ 单相桥式PWM逆变电路  
 所包含的谐波角频率为

$$n\omega_c \pm k\omega_r \quad (7-10)$$

式中,  $n=1,3,5,\dots$ 时,  
 $k=0,2,4,\dots$ ;  $n=2,4,6,\dots$ 时,  
 $k=1,3,5,\dots$

其PWM波中不含有低次谐波, 只含有角频率为 $\omega_c$ 及其附近的谐波, 以及 $2\omega_c$ 、 $3\omega_c$ 等及其附近的谐波。

幅值最高影响最大的是角频率为 $\omega_c$ 的谐波分量。

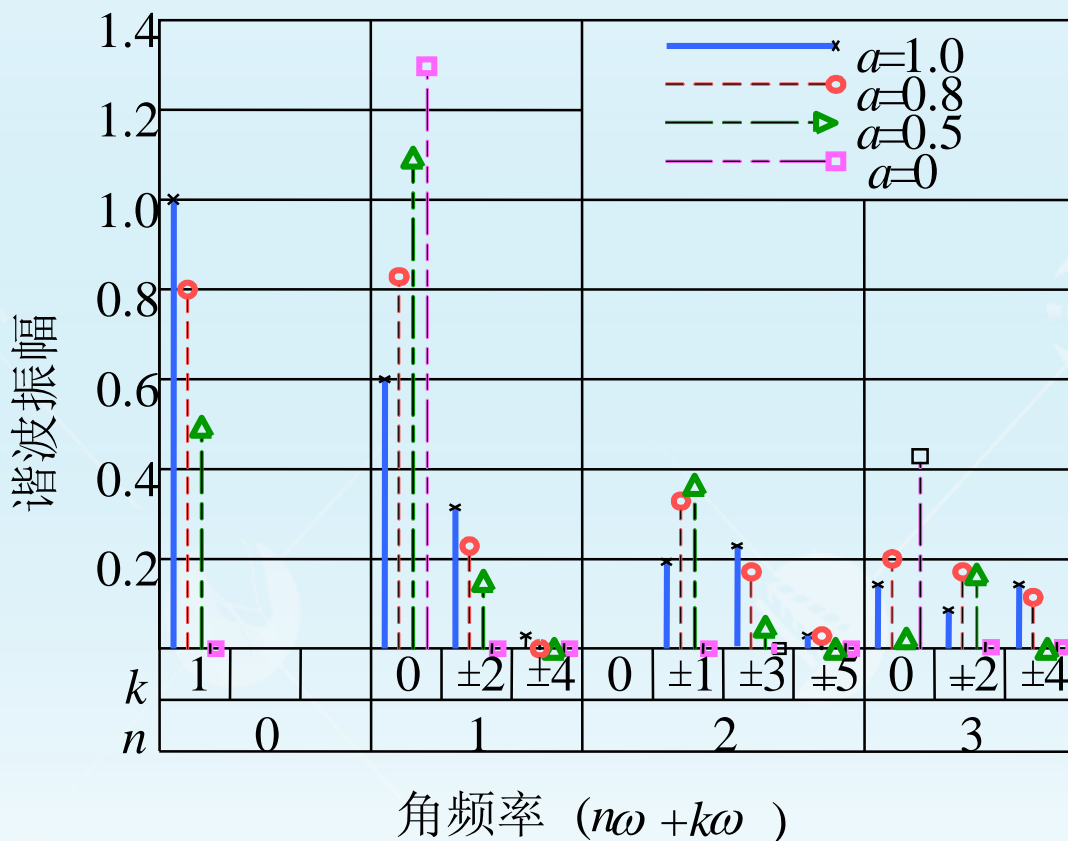
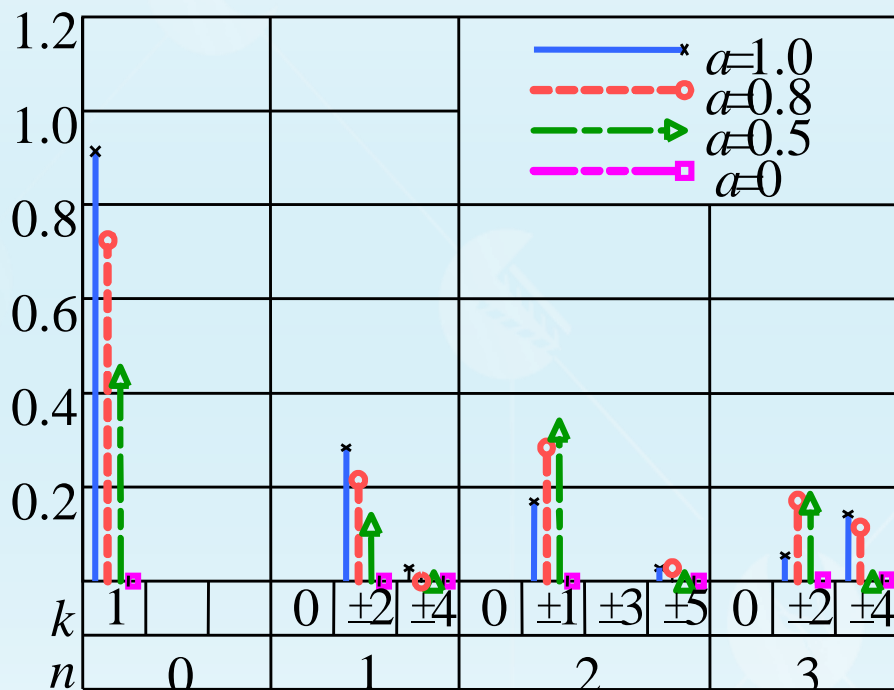


图7-13 单相PWM桥式逆变电路输出电压频谱图



角频率( $n\omega_c + k\omega_r$ )

图7-14 三相桥式PWM逆变电路输出电压频谱图

### ◆ 三相桥式PWM逆变电路

分析应用较多的公用载波信号时的情况，在其输出线电压中，所包含的谐波角频率为

$$n\omega_c \pm k\omega_r \quad (7-11)$$

式中， $n=1,3,5,\dots$ 时， $k=3(2m-1)\pm 1$ ， $m=1,2,\dots$ ； $n=2,4,6,\dots$

$$\text{时, } k = \begin{cases} 6m+1 & m=0,1,\dots \\ 6m-1 & m=1,2,\dots \end{cases}$$

不含低次谐波。

载波角频率 $\omega_c$ 整数倍的谐波没有了，谐波中幅值较高的是 $\omega_c \pm 2\omega_r$ 和 $2\omega_c \pm \omega_r$ 。



## ■ 谐波分析小结

◆ 在**实际电路**中，由于采样时刻的误差以及为避免同一相上下桥臂直通而设置的死区的影响，谐波的分布情况将更为复杂，谐波含量比理想条件下要多一些，甚至还会出现少量的低次谐波。

◆ **SPWM**波形中所含的谐波主要是角频率为 $\omega_c$ 、 $2\omega_c$ 及其**附近的谐波**，一般情况下 $\omega_c \gg \omega_r$ ，是很容易滤除的。

◆ 当调制信号波不是正弦波，而是其它波形时，其谐波由两部分组成，一部分是对信号波本身进行谐波分析所得的结果，另一部分是由于信号波对载波的调制而产生的谐波。



## 7.2.5 提高直流电压利用率和减少开关次数

■ 提高直流电压利用率、减少开关次数在PWM型逆变电路中是很重要的。

◆ 直流电压利用率是指逆变电路所能输出的交流电压基波最大幅值  $U_{1m}$  和直流电压  $U_d$  之比。

◆ 提高直流电压利用率可以提高逆变器的输出能力。

◆ 减少功率器件的开关次数可以降低开关损耗。





■ 正弦波调制的三相**PWM**逆变电路的直流电压利用率很低。

◆ 在调制度 $a$ 为最大值1时，  
输出相电压的基波幅值为 $U_d/2$ ，  
输出线电压的基波幅值为 $(\sqrt{3}/2)U_d$ ，即直流电压利用率  
仅为**0.866**。

◆ 实际电路工作时，考虑到功率器件的开通和关断都需要时间，如不采取其他措施，调制度不可能达到1，实际能得到的直流电压利用率比**0.866**还要低。

## ■ 线电压控制方式

◆ 目标是使输出的线电压波形中不含低次谐波，同时尽可能提高直流电压利用率，也应尽量减少功率器件的开关次数。

◆ 在相电压正弦波调制信号中叠加适当大小的3次谐波，使之成为鞍形波，则经过PWM调制后逆变电路输出的相电压中也必然包含3次谐波，且三相的三次谐波相位相同，在合成线电压时，各相电压的3次谐波相互抵消，线电压为正弦波。



◆ 图7-18中，调制信号 $u_r$ 成为鞍形波，基波分量 $u_{r1}$ 的幅值更大，但 $u_r$ 的最大值不超过三角波载波最大值。

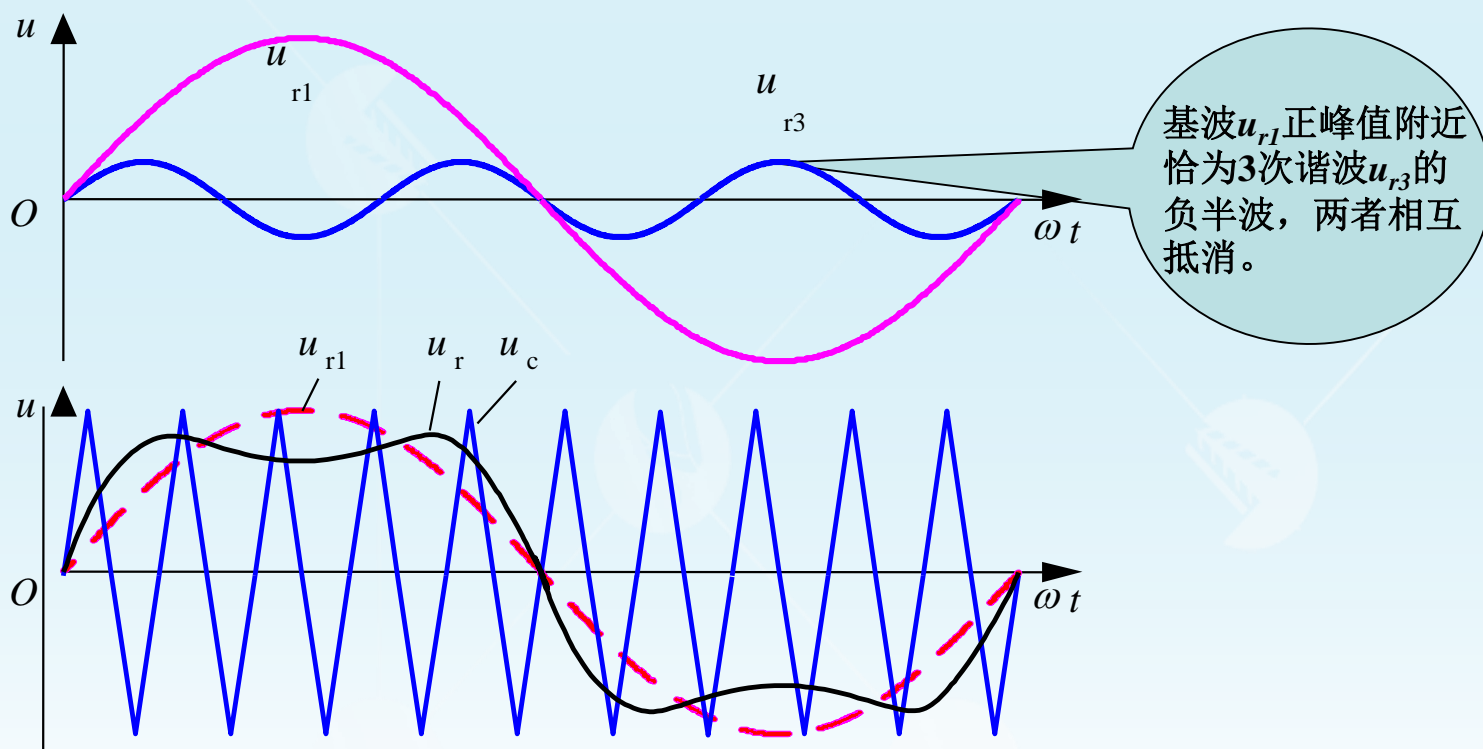


图7-18 叠加3次谐波的调制信号

对逆变器 U 相来说，调制信号为  $u_{Ur}=a(\sin\omega t+d\sin3\omega t)$ ，d为三次谐波注入比，同规则采样SPWM分析，得到

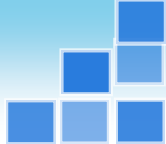
$$\delta_U = \frac{T_c}{2} (1 + a \sin(\omega t + d \sin 3\omega t))$$

$$\delta_V = \frac{T_c}{2} (1 + a(\sin(\omega t - 120^\circ) + d \sin 3\omega t))$$

$$\delta_W = \frac{T_c}{2} (1 + a(\sin(\omega t + 120^\circ) + d \sin 3\omega t))$$

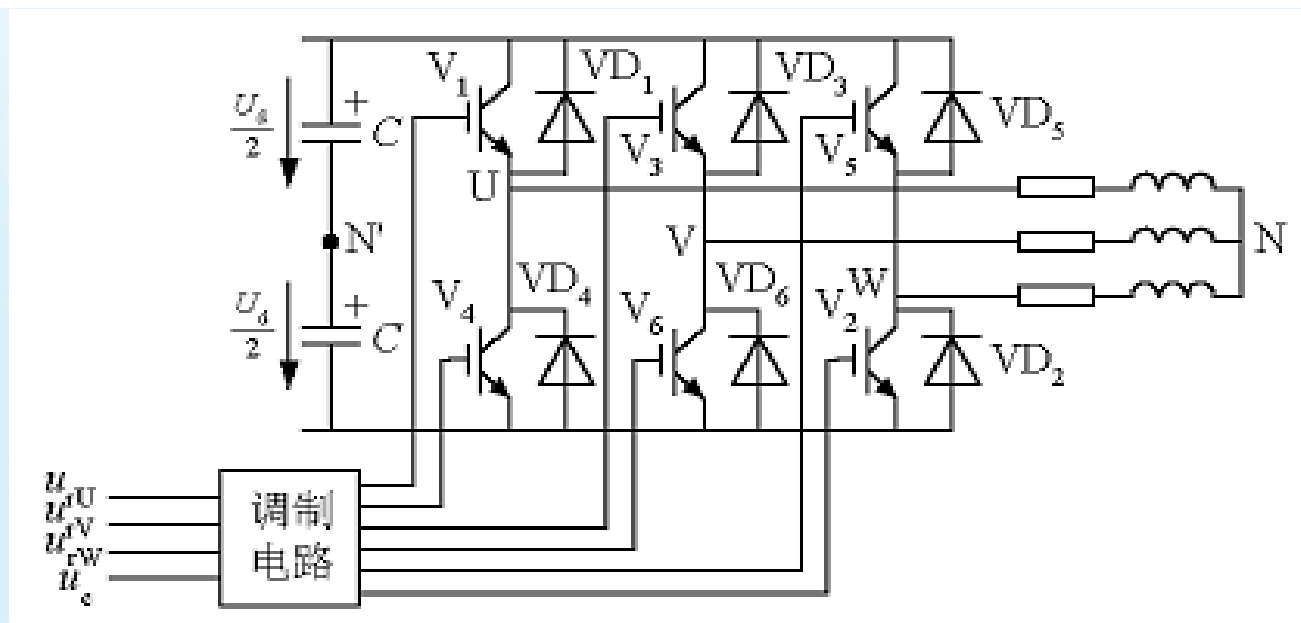
通常  $d=0.15$ ，  $0 \leq a < 1.15$

下图为  $a=0.92$ ，  $d=1.15$  时的注入三次谐波的 SPWM 波形图，载波比为 18。



## ◆ 线电压控制方式举例

可以在正弦调制信号中叠加3次谐波外，  
还可以叠加其他3倍频于正弦波的信号，  
也可以再叠加直流分量，  
这些都不会影响线电压。



**思考题：**

$U_d=540\text{V}$ ,线电压有效值X的最大值是多少？



## 7.3 PWM跟踪控制技术

7.3.1 滞环比较方式

7.3.2 三角波比较方式



## ■ 开关预置式控制方法

SPWM

SVPWM

## ■ 跟踪控制方法：

把希望输出的电流或电压波形作为指令信号，  
把实际电流或电压波形作为反馈信号，

通过**两者的瞬时值比较**来决定逆变电路各功率开关器件的通断，

使实际的输出跟踪指令信号变化



## 7.3.1 滞环比较方式

■ 滞环比较方式

◆ 电流跟踪控制应用最多。

◆ PWM电流跟踪控制单相半桥式逆变电路

把指令电流 $i^*$ 和实际输出电流 $i$ 的偏差 $i^* - i$ 作为带有滞环特性的比较器的输入，通过其输出来控制功率器件 $V_1$ 和 $V_2$ 的通断。

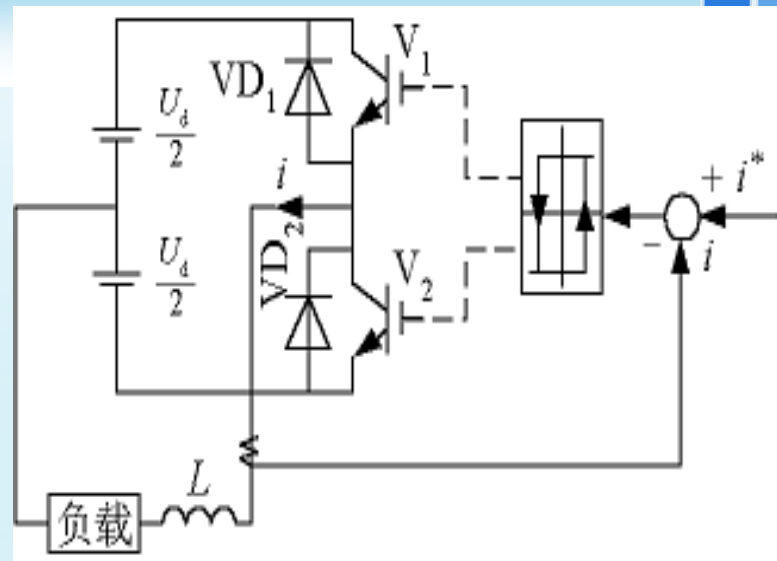


图7-24 滞环比较方式电流跟踪控制举例

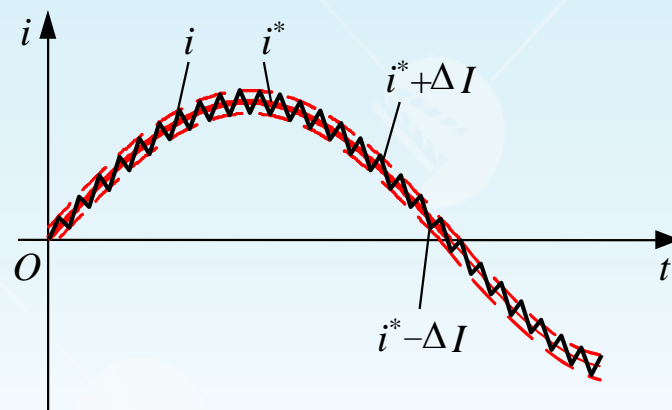


图7-25 滞环比较方式的指令电流和输出电流

## 控制规律

- ✓当 $V_1$ （或 $VD_1$ ）导通时， $i$ 增大。
- ✓当 $V_2$ （或 $VD_2$ ）导通时， $i$ 减小。
- ✓通过环宽为 $2\Delta I$ 的滞环比较器的控制， $i$ 就在 $i^* + \Delta I$ 和 $i^* - \Delta I$ 的范围内，呈锯齿状地跟踪指令电流 $i^*$ 。

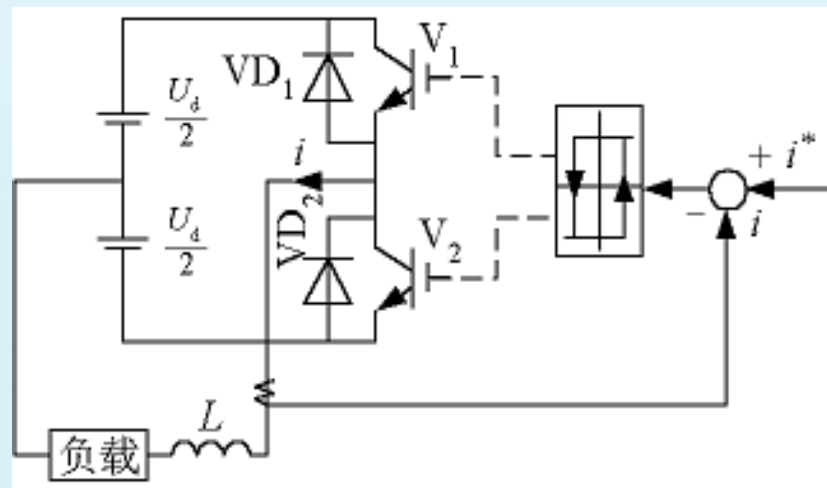


图7-24 滞环比较方式电流跟踪控制举例

- 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。

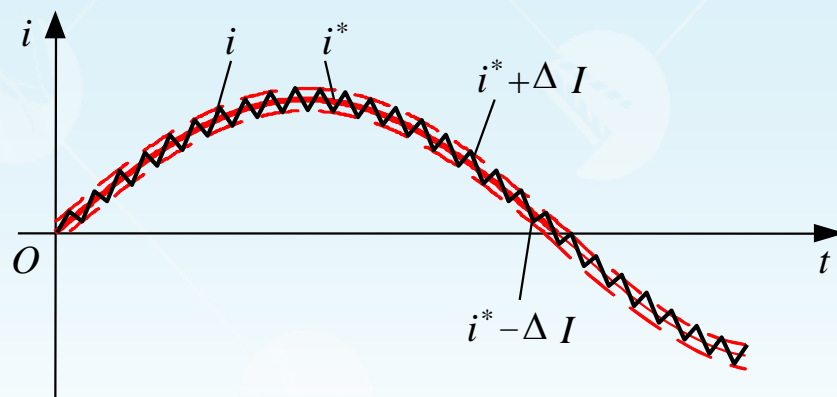


图7-25 滞环比较方式的指令电流和输出电流

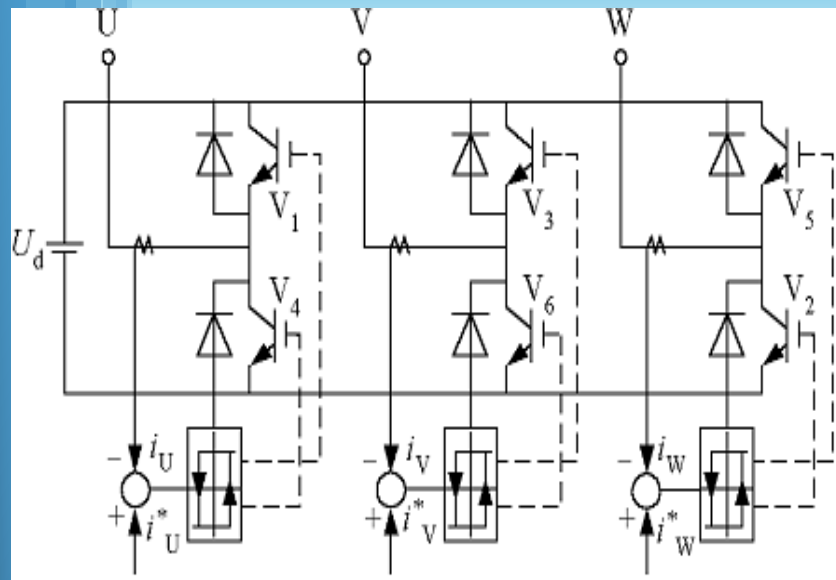


图7-26 三相电流跟踪型PWM逆变电路

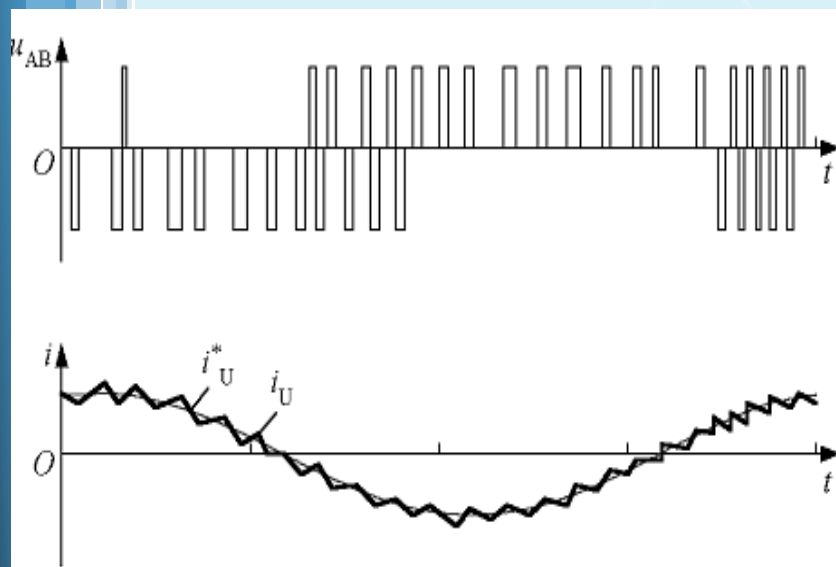


图7-25 滞环比较方式的指令电流和输出电流

### ◆三相电流跟踪型PWM逆变电路

由三个单相半桥电路组成，三相电流指令信号 $i_U^*$ 、 $i_V^*$ 和 $i_W^*$ 依次相差 $120^\circ$ 。

在线电压的正半周和负半周内，都有极性相反的脉冲输出，这将使输出电压中的谐波分量增大，也使负载的谐波损耗增加。

### ◆采用滞环比较方式的电流跟踪型PWM变流电路有如下特点

- 硬件电路简单。
- 实时控制，电流响应快。
- 不用载波，输出电压波形中不含特定频率的谐波。
- 和算法及调制法相比，相同开关频率时输出电流中高次谐波含量多。
- 属于闭环控制，是各种跟踪型PWM变流电路的共同特点。

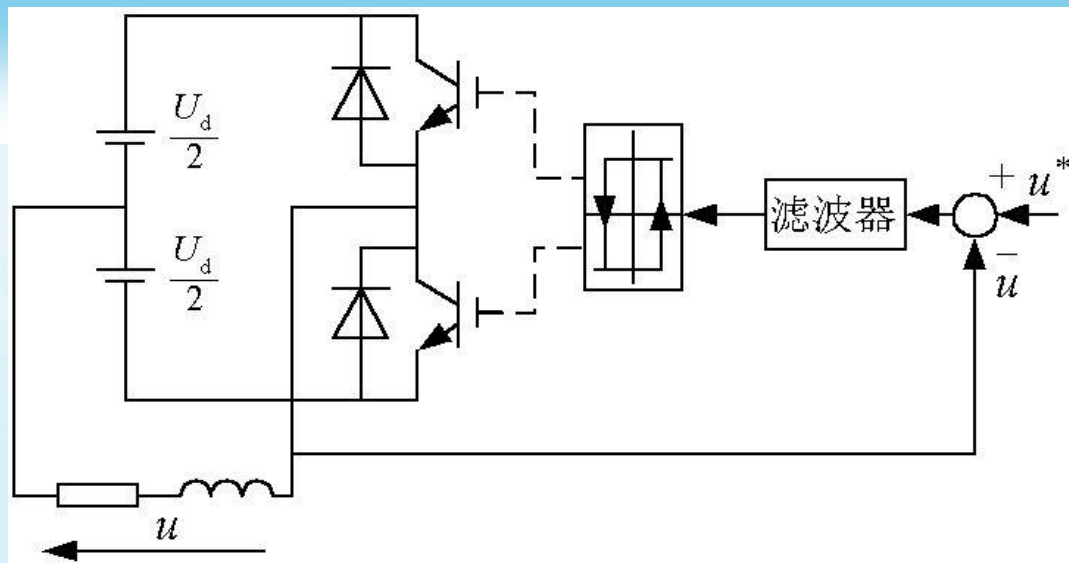


图7-28 电压跟踪控制电路举例

### ◆ 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。

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。



## 7.3.2 三角波比较方式

### ■ 三角波比较方式

◆ 把指令电流  $i_U^*$ 、 $i_V^*$  和  $i_W^*$  和逆变电路实际输出的电流  $i_U$ 、 $i_V$ 、 $i_W$  进行比较，求出偏差电流，

通过放大器A放大后，

再去和三角波进行比较，产生PWM波形。

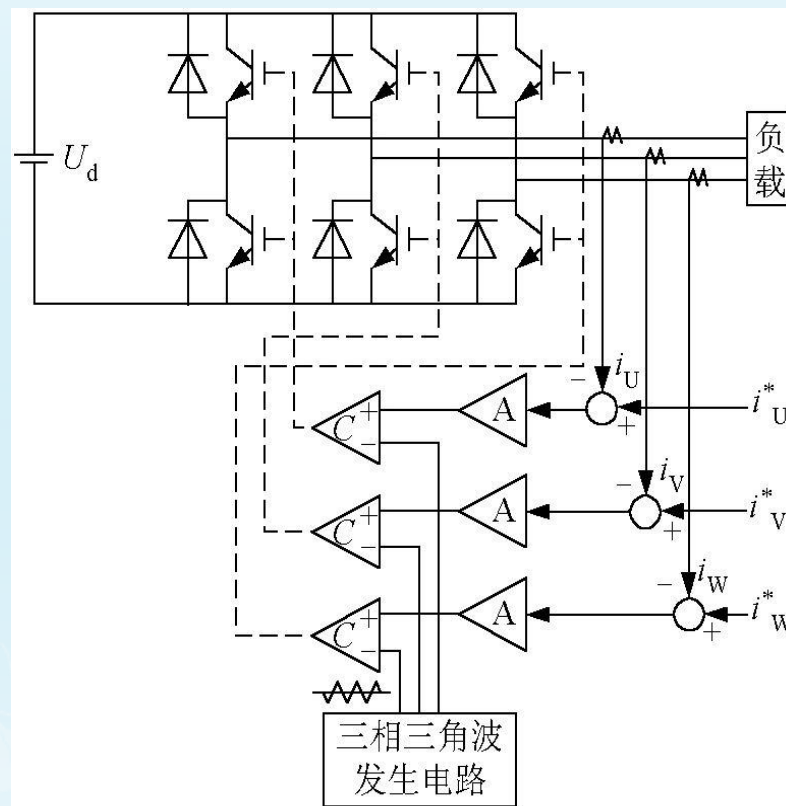


图7-29 三角波比较方式电流跟踪型逆变电路

## 三角波比较方式

◆ 放大器A通常具有比例积分特性或比例特性，其系数直接影响着逆变电路的电流跟踪特性。

### ◆ 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。

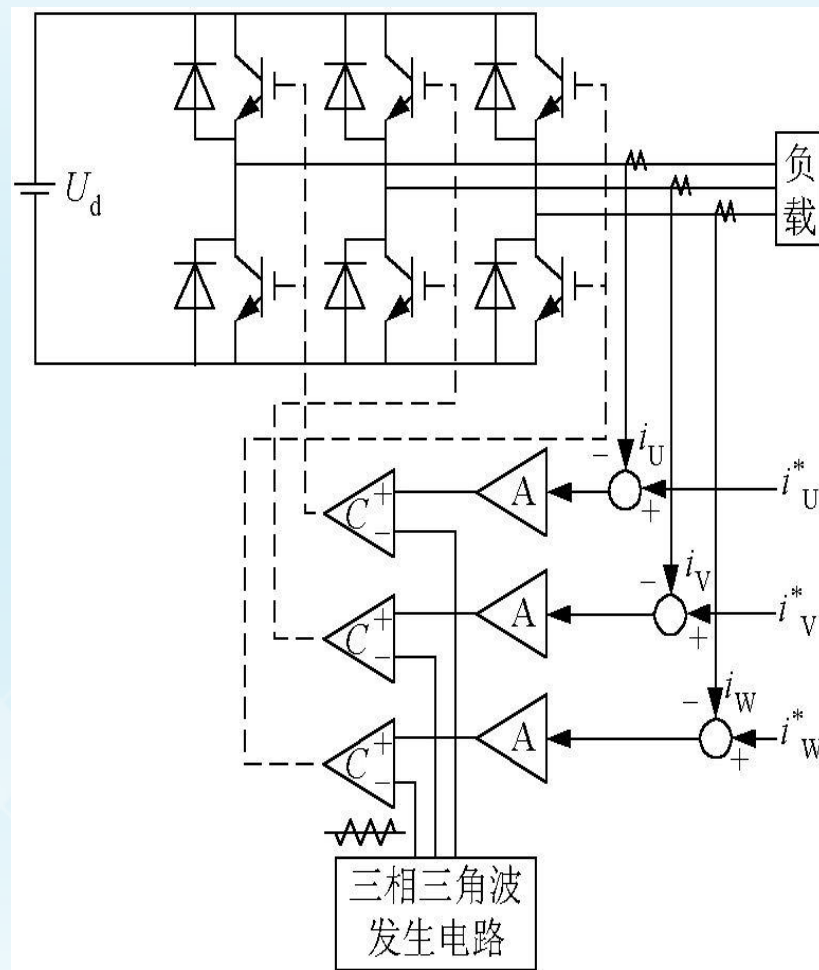


图7-29 三角波比较方式电流跟踪型逆变电路



**V<sub>1</sub>导通**  $L \frac{di}{dt} + Ri = 0.5U_d$

**V<sub>1</sub>导通期间（时间为t<sub>1</sub>）电流的增量：**

$$\Delta i_1 = t_1(0.5U_d - Ri^*) / L$$

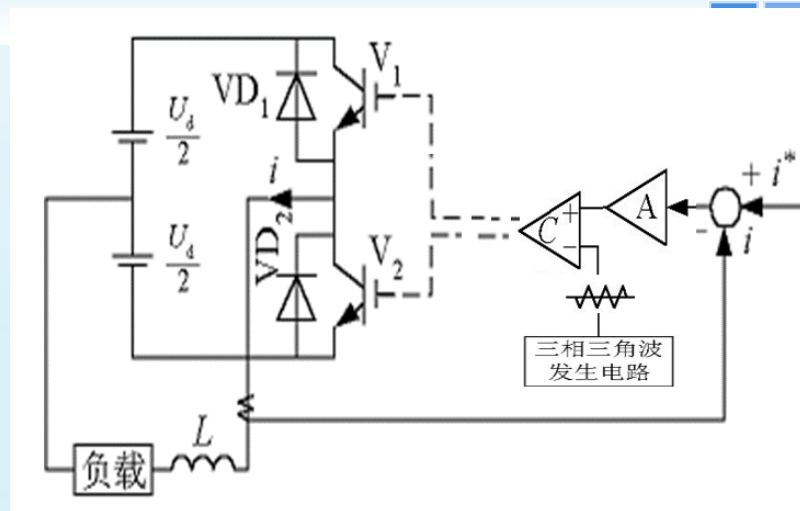
**V<sub>2</sub>导通**  $L \frac{di}{dt} + Ri = -0.5U_d$

**V<sub>2</sub>导通期间（时间为(T<sub>c</sub>-t<sub>1</sub>）电流的增量：**

$$\Delta i_2 = (T_c - t_1) (-0.5U_d - Ri^*) / L$$

**一个PWM周期内，电流的改变量为：**

$$\Delta i = \Delta i_1 + \Delta i_2 = (-0.5T_c + t_1) U_d / L$$



三角波比较方式电流控制

## 三角波比较方式电流控制的原理

给定电流和实际电流存在误差：

$$\Delta I = i^* - i$$

如果需要在下个PWM周期内消除掉这误差，则需要在下个PWM周期内导通时间为：

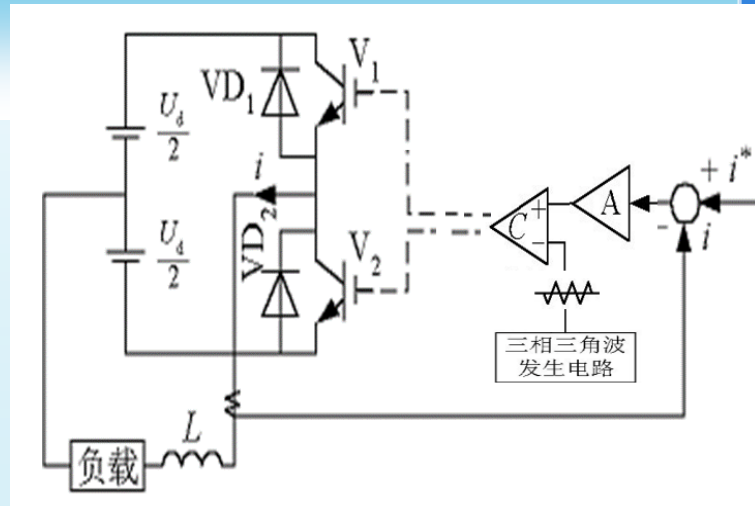
$$t_1 = \Delta I * L / U_d + 0.5T_c$$

下个PWM周期内，逆变器提供的电压为：

$$(0.5U_d t_1 - 0.5U_d (T_c - t_1)) / T_c = \frac{\Delta I * L}{T_c}$$

也就是如果图中放大器的放大倍数为  $L/T_c$

那么，下个PWM周期，电流的反馈值会跟踪上给定值



三角波比较方式电流控制





## ■ 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**固定的采样周期**对指令信号和被控制变量进行采样，并根据二者偏差的极性来控制变流电路开关器件的通断，使被控制量跟踪指令信号。
- ◆ 以单相半桥逆变电路为例，在时钟信号到来的采样时刻
  - ☞ 如  $i < i^*$ ， $V_1$  导通， $V_2$  关断，使  $i$  增大。
  - ☞ 如  $i > i^*$ ， $V_1$  关断， $V_2$  导通，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。



# 7.4 PWM整流电路及其控制方法

7.4.1 PWM整流电路的工作原理

7.4.2 PWM整流电路的控制方法



## 7.4 PWM整流电路及其控制方法·引言

- 实际应用的整流电路几乎都是晶闸管相控整流电路或二极管整流电路。
  - ◆ 随着触发延迟角 $\alpha$ 的增大，位移因数降低。
  - ◆ 输入电流中谐波分量相当大，功率因数很低。
- 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**。
  - ◆ 通过对**PWM**整流电路的适当控制，可以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。
  - ◆ 也称为单位功率因数变流器，或高功率因数整流器。



## 7.4.1 PWM整流电路的工作原理

■可分为电压型和电流型两大类，目前研究和应用较多的是电压型PWM整流电路。

### ■单相PWM整流电路

对于半桥电路来说，直流侧电容必须由两个电容串联，其中点和交流电源连接，

对于全桥电路来说，直流侧电容只要一个就可以了。

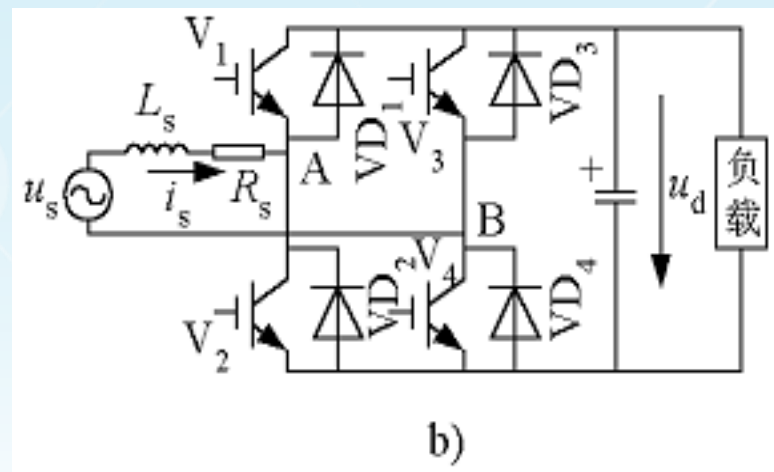
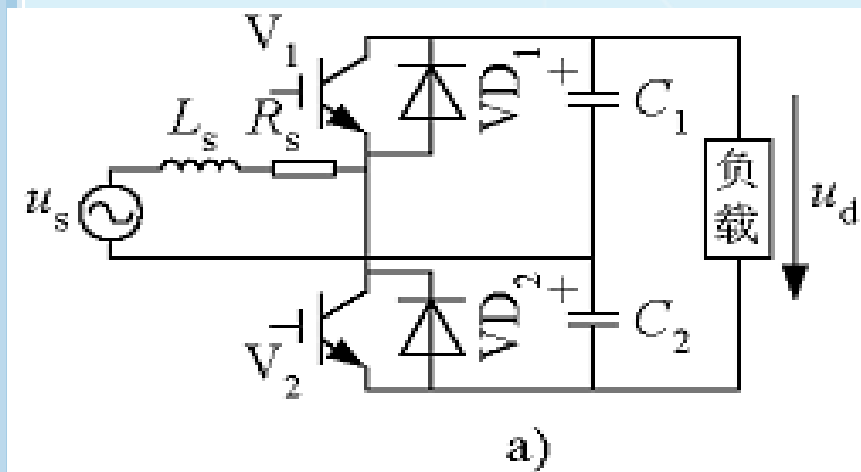
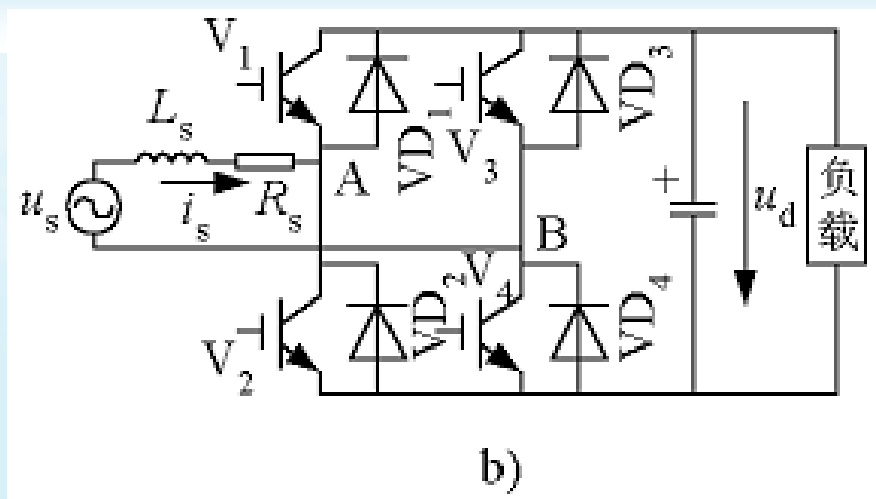


图7-30 单相PWM整流电路

a)单相半桥电路 b)单相全桥电路

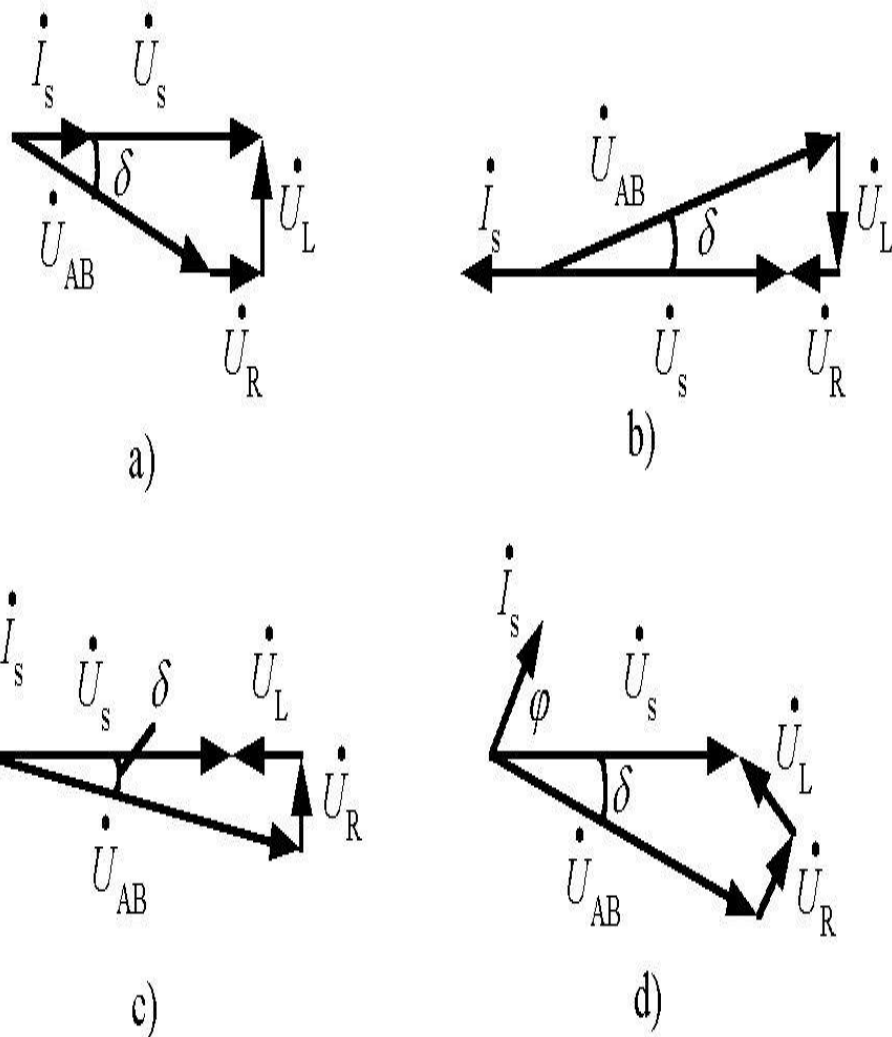


### ◆工作原理（以全桥电路为例）

按照正弦信号波和三角波相比较的方法对图7-30b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，而不含有低次谐波。

由于 $L_s$ 的滤波作用， $i_s$ 脉动很小，可以忽略，所以当正弦信号波的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。



在 $u_s$ 一定的情况下,

$i_s$ 的幅值和相位仅由 $u_{AB}$ 中基波分量 $u_{ABf}$ 的幅值及其与 $u_s$ 的相位差来决定,

改变 $u_{ABf}$ 的幅值和相位, 就可以使:

$i_s$ 和 $u_s$ 同相位、  
反相位,

$i_s$ 比 $u_s$ 超前 $90^\circ$ ,

或使 $i_s$ 与 $u_s$ 的相位差为所需要的角度。

图7-31 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)  $I_s$ 超前角为 $\varphi$

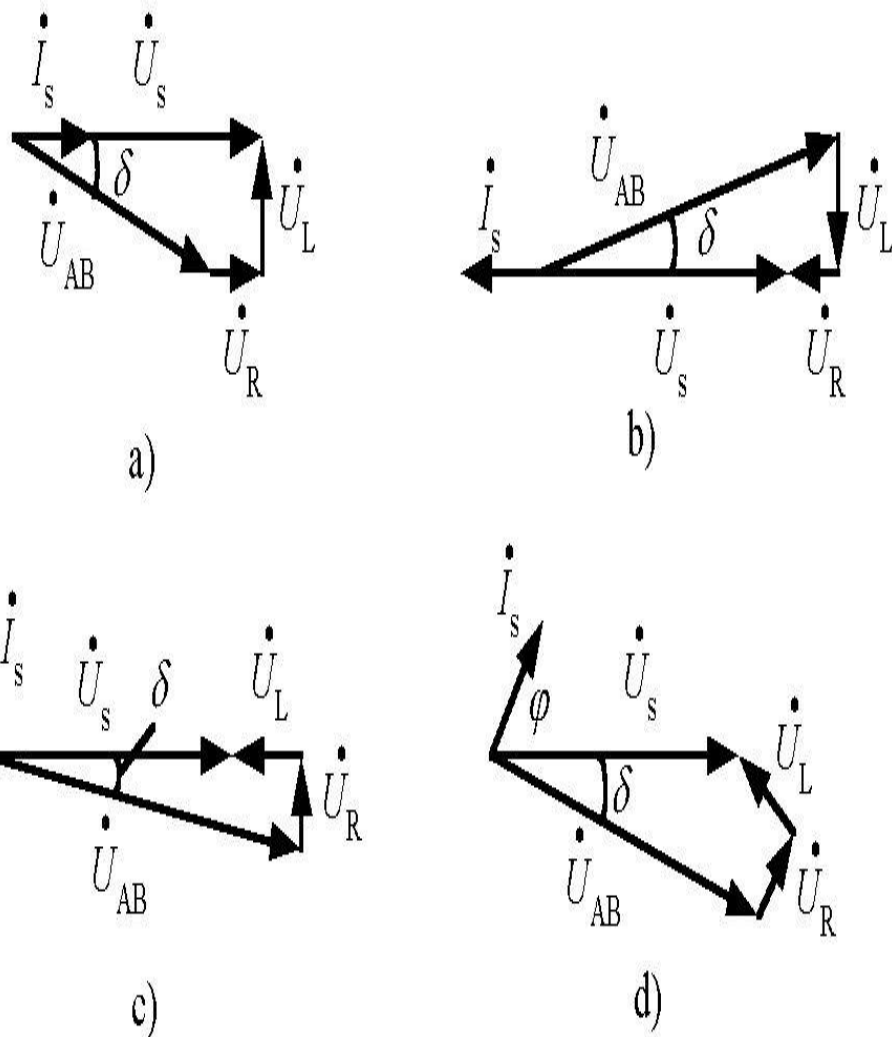


图7-31 PWM整流电路的运行方式相量图

- 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 $\phi$

√图a中,

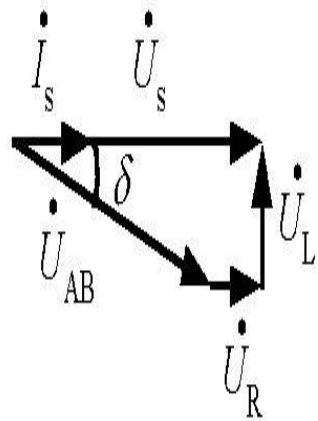
$\dot{I}_s$ 滞后的相角为 $\delta$ , 和电源电压完全同相位, 电路工作在**整流状态**, 且功率因数为1, 是PWM整流电路最基本的工作状态。

√图b中

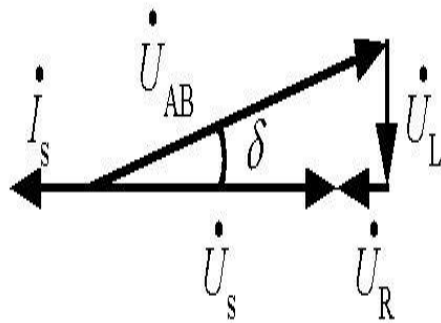
$\dot{I}_s$ 超前的相角为 $\delta$ , 和电源电压的相位正好相反, 电路工作在**逆变状态**,

说明PWM整流电路可以实现能量正反两个方向的流动。

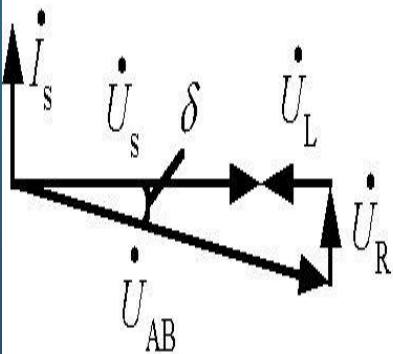




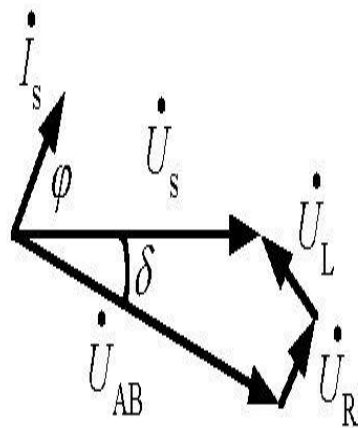
a)



b)



c)



d)

√图c中电流滞后的相角为 $\delta$ , 超前 $90^\circ$ , 电路在向交流电源送出无功功率, 这时的电路被称为**静止无功功率发生器 (Static Var Generator—SVG)**。

√在图d的情况下, 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 $\varphi$ 。

图7-31 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 $\varphi$



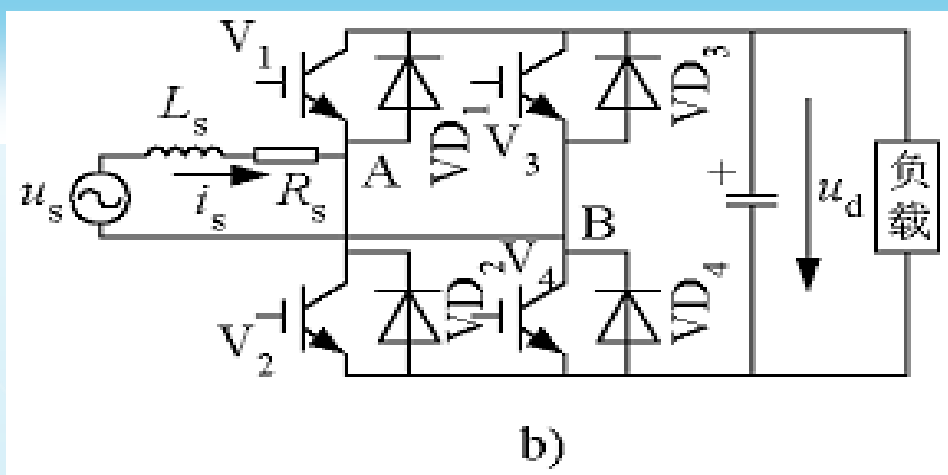


图7-30 b)单相全桥电路

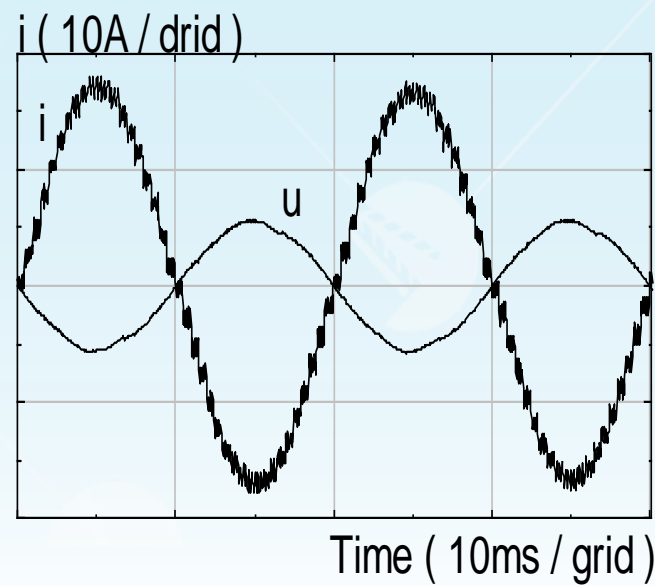
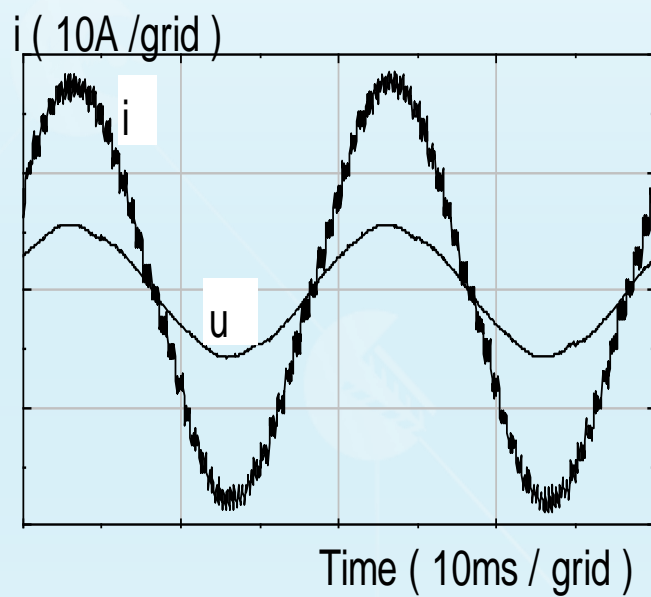
### 整流运行状态

✓当 $u_s > 0$ 时，由 $V_2$ 、 $VD_4$ 、 $VD_1$ 、 $L_s$ 和 $V_3$ 、 $VD_1$ 、 $VD_4$ 、 $L_s$ 分别组成了两个升压斩波电路。

✓以包含 $V_2$ 的升压斩波电路为例，当 $V_2$ 导通时， $u_s$ 通过 $V_2$ 、 $VD_4$ 向 $L_s$ 储能，当 $V_2$ 关断时， $L_s$ 中储存的能量通过 $VD_1$ 、 $VD_4$ 向直流侧电容 $C$ 充电。

✓当 $u_s < 0$ 时，由 $V_1$ 、 $VD_3$ 、 $VD_2$ 、 $L_s$ 和 $V_4$ 、 $VD_2$ 、 $VD_3$ 、 $L_s$ 分别组成了两个升压斩波电路，工作原理和 $u_s > 0$ 时类似。

◆电压型PWM整流电路是升压型整流电路，其输出直流电压可以从交流电源电压峰值附近向高调节，使用时要注意电力半导体器件的保护；同时也要注意，向低调节就会使电路性能恶化，以至不能工作。



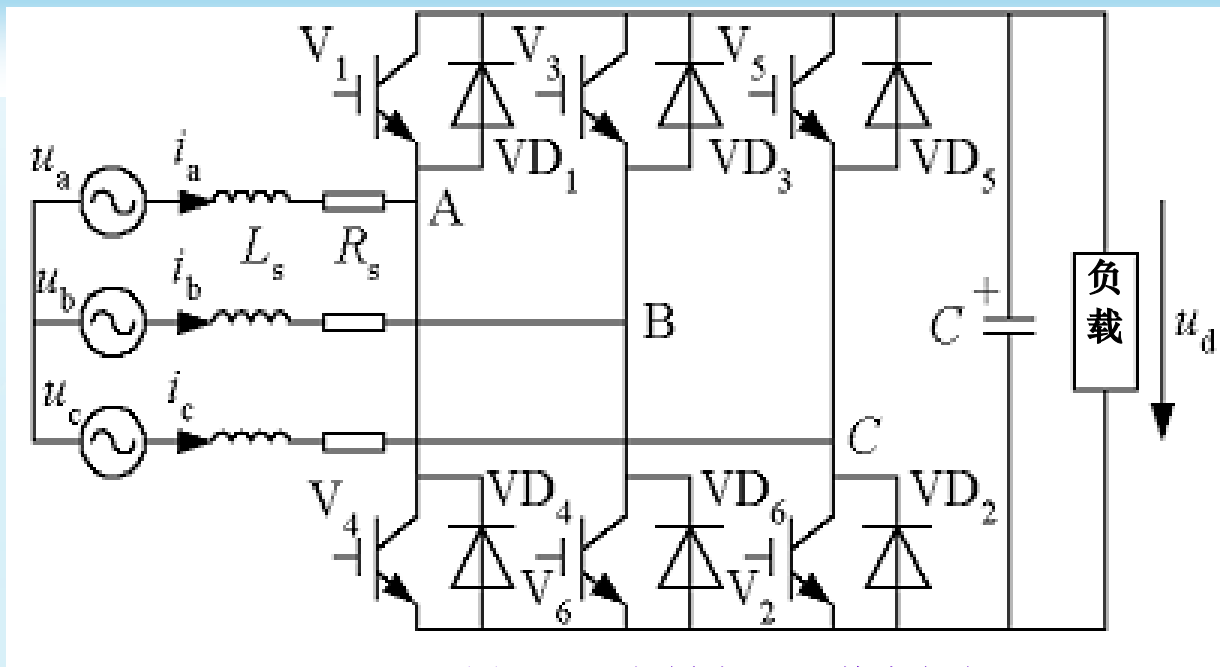


图7-32 三相桥式PWM整流电路

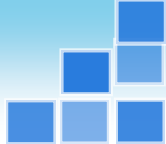
### ■ 三相PWM整流电路

- ◆ 是最基本的PWM整流电路之一，其应用也最为广泛。
- ◆ 电路的工作原理也和前述的单相全桥电路相似，只是从单相扩展到三相。
- ◆ 对电路进行**SPWM控制**，在桥的交流输入端A、B和C可得到SPWM电压，对各相电压按图7-31a的相量图进行控制，就可以使各相电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 为正弦波且和电压相位相同，功率因数近似为1。
- ◆ 该电路也可以工作在图7-31b的逆变运行状态及图c或d的状态。



## 7.4.2 PWM整流电路的控制方法

- 根据有没有引入**电流反馈**可以将这些控制方法分为两种，  
没有引入交流电流反馈的称为**间接电流控制**，  
引入交流电流反馈的称为**直接电流控制**。



## ■ 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。

◆ 图7-34的控制系统是一个双闭环控制系统，其外环是直流电压控制环，内环是交流电流控制环。

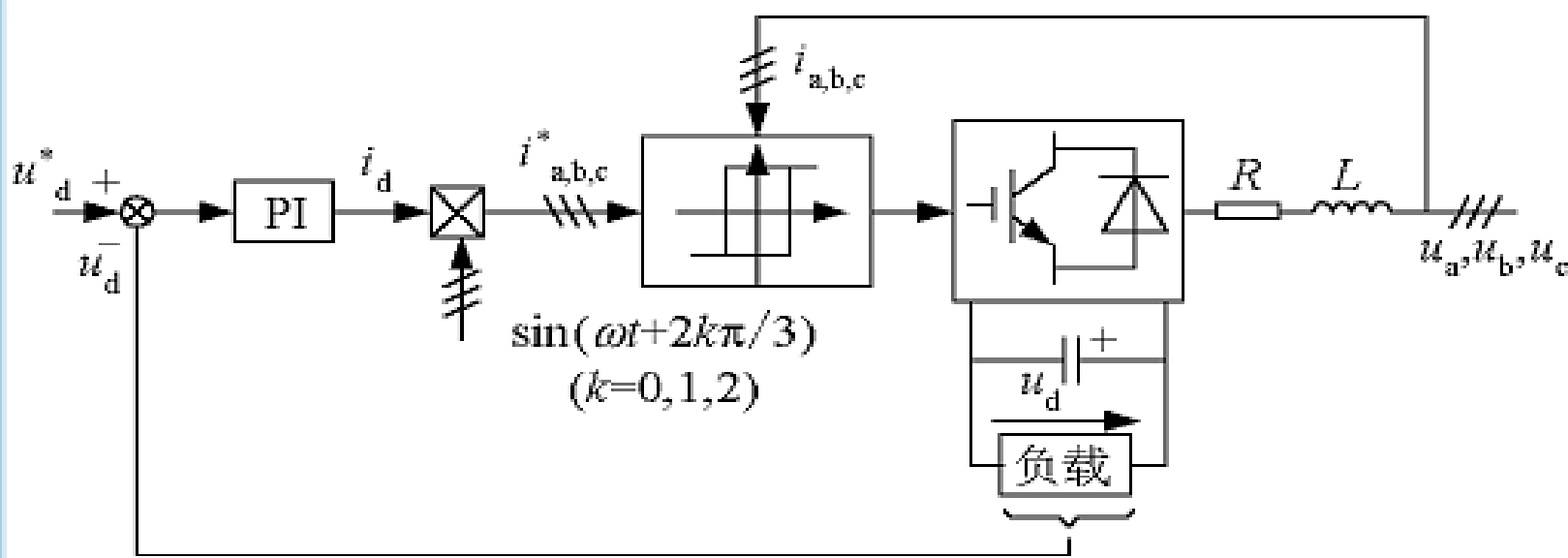


图7-34 直接电流控制系统结构图



## ◆ 控制原理

外环PI调节器的输出为 $i_d$ ， $i_d$ 分别乘以和 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 三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 $i_c^*$ 。

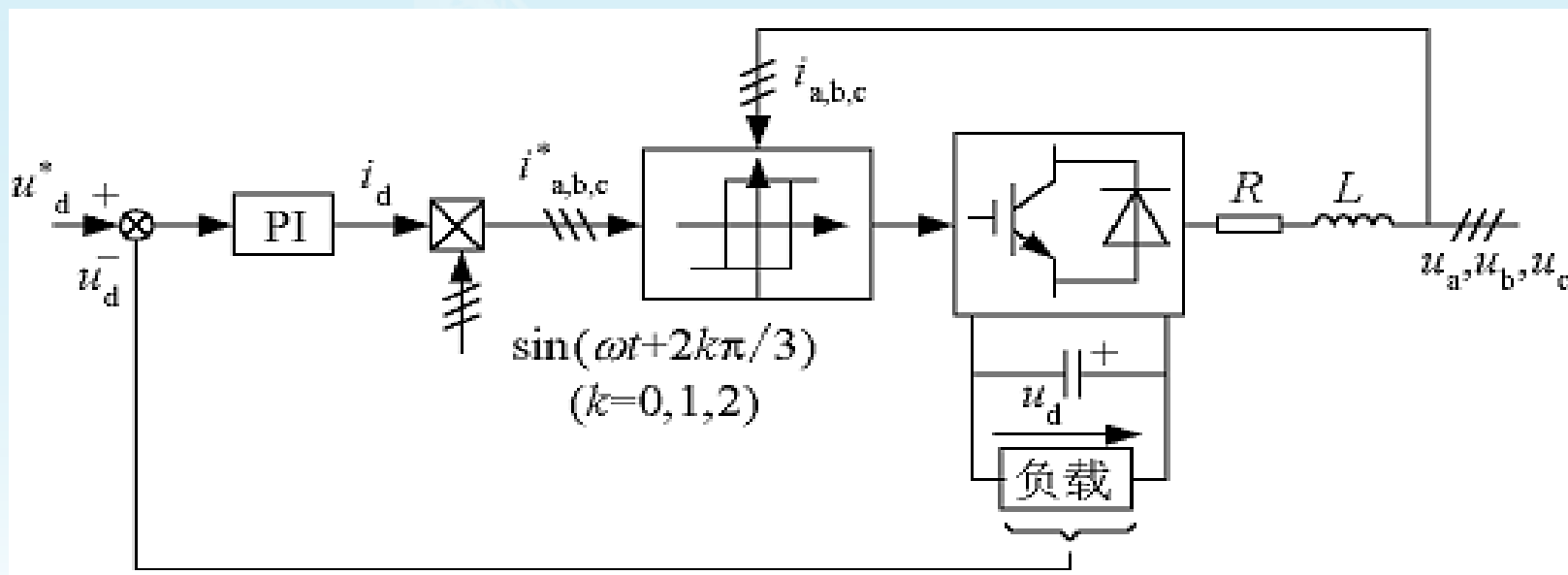


图7-34 直接电流控制系统结构图

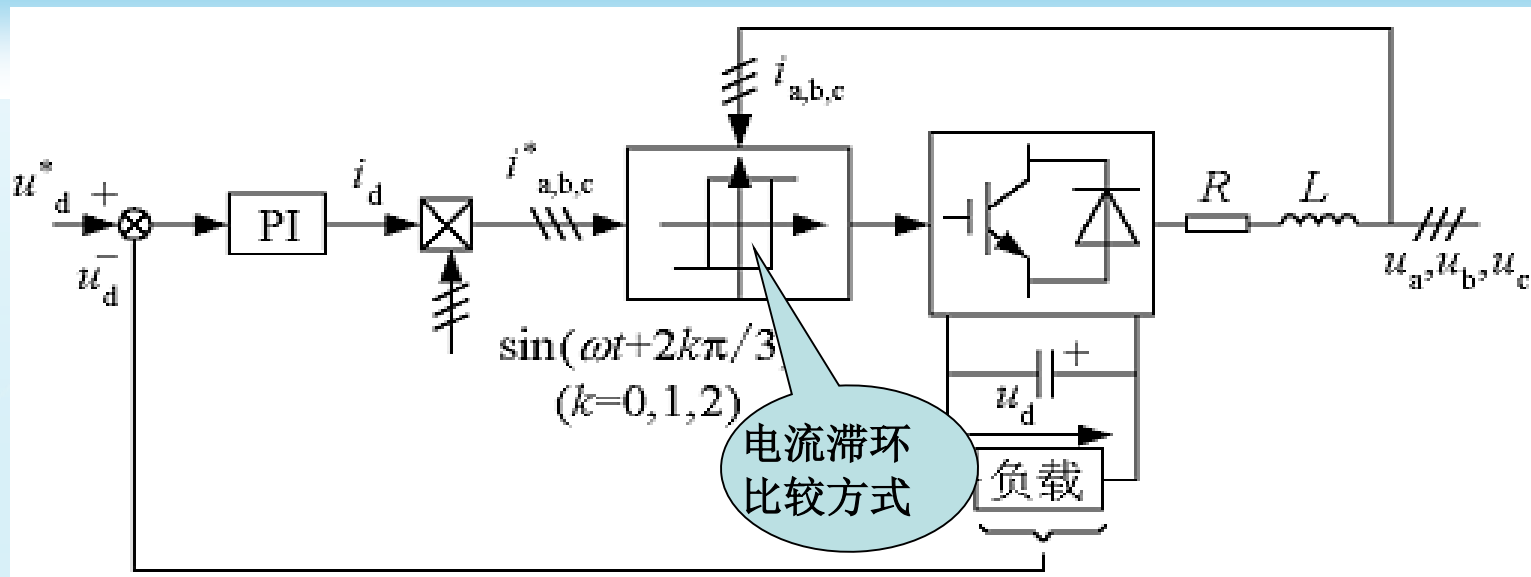


图7-34 直接电流控制系统结构图

✎  $i_a^*$ ,  $i_b^*$  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。

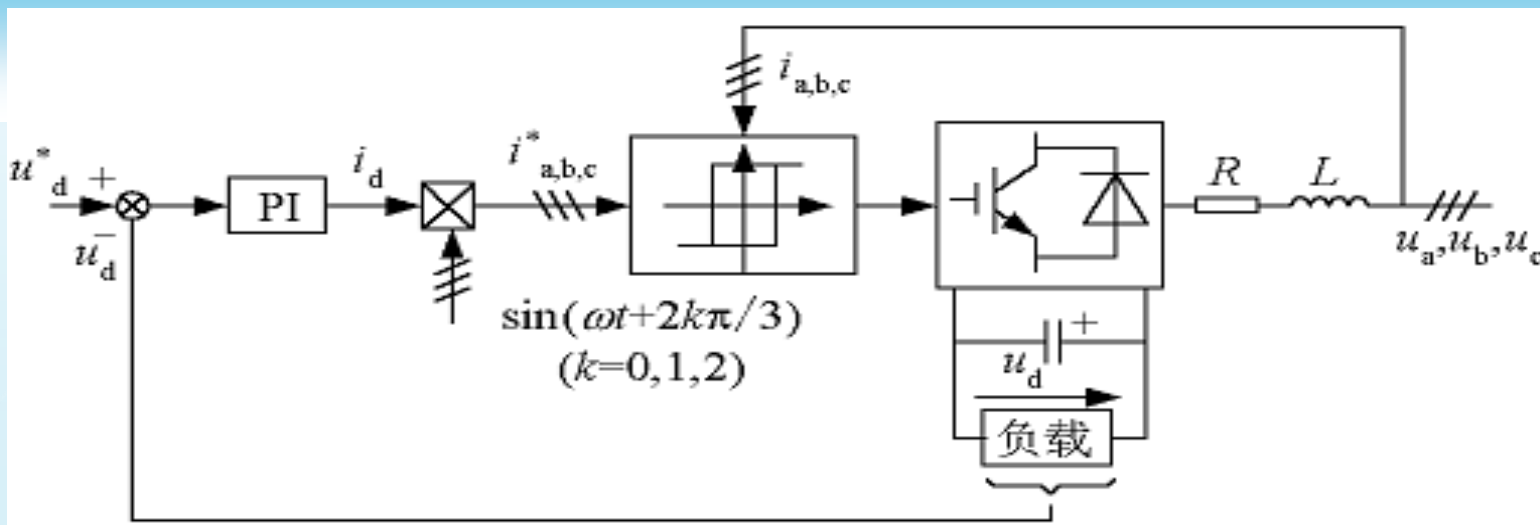


图7-34 直接电流控制系统结构图

- ◆采用滞环电流比较的直接电流控制系统结构简单，电流响应速度快，控制运算中未使用电路参数，系统鲁棒性好，因而获得了较多的应用。
- ◆现在更多的人采用SVPWM控制方式，  
Why? How?





# 本章小结

## ■ PWM控制技术的地位

◆ PWM控制技术是在电力电子领域有着广泛的应用，并对电力电子技术产生了十分深远影响的一项技术。

## ■ PWM技术与器件的关系

◆ IGBT、电力MOSFET等为代表的全控型器件的不断完善给PWM控制技术提供了强大的物质基础。

## ■ PWM控制技术用于直流斩波电路

◆ 直流斩波电路实际上就是直流PWM电路，是PWM控制技术应用较早也成熟较早的一类电路，应用于直流电动机调速系统就构成广泛应用的直流脉宽调速系统。

## ■ PWM控制技术用于交流—交流变流电路

◆ 斩控式交流调压电路和矩阵式变频电路是PWM控制技术在这类电路中应用的代表。

◆ 目前其应用都还不多，但矩阵式变频电路因其容易实现集成化，可望有良好的发展前景。



# 本章小结

## ■ PWM控制技术用于逆变电路

- ◆ PWM控制在逆变电路中的应用最具代表性。
- ◆ 正是由于在逆变电路中广泛而成功的应用，才奠定了PWM控制在电力电子技术中的突出地位。
- ◆ 除功率很大的逆变装置外，不用PWM控制的逆变电路已十分少见。
- ◆ 第4章因尚未涉及到PWM控制技术，因此对逆变电路的介绍是不完整的，学完本章才能对逆变电路有较完整的认识。

## ■ PWM控制技术用于整流电路

- ◆ PWM控制技术用于整流电路即构成PWM整流电路。
- ◆ 可看成逆变电路中的PWM技术向整流电路的延伸。
- ◆ PWM整流电路已获得了一些应用，并有良好的应用前景。
- ◆ PWM整流电路作为对第3章的补充，可使我们对整流电路有更全面的认识。



# 本章小结

## ■ PWM控制技术与相位控制技术

- ◆ 以第3章相控整流电路和第6章交流调压电路为代表的相位控制技术至今在电力电子电路中仍占据着重要地位。
- ◆ 以PWM控制技术为代表的斩波控制技术正在越来越占据着主导地位。
- ◆ 相位控制和斩波控制分别简称相控和斩控。
- ◆ 把两种技术对照学习，对电力电子电路的控制技术会有更明晰的认识。