

东南大学

# 电力电子技术

## 第 39 讲

主讲教师：王念春

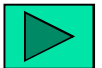
380419124@qq.com





# 交流-交流 (AC-AC)

---



## 交流调压的意义

在工业生产和日用电气设备中，有不少由交流供电如加热炉的温度，电光源的亮度，小型交流电动机的转速等，要根据工作需要调节。这些设备的功率调节都可用改变交流电压的大小来实现。

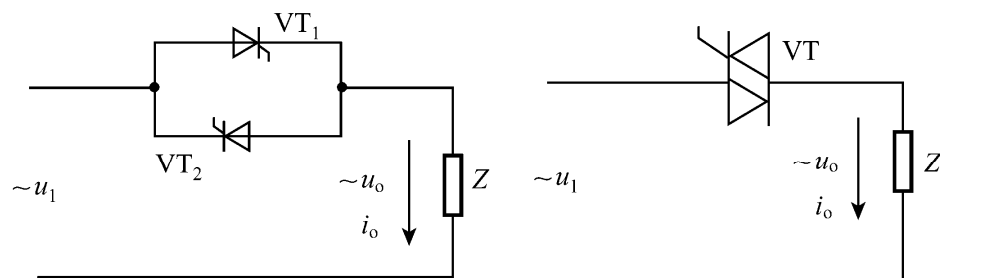
对于大惯性负载，例电阻炉，可以用整流来调节功率，也可用交流调压来调节，交流调压电路更简便。

注意交流调压电路与电力变压器的区别。

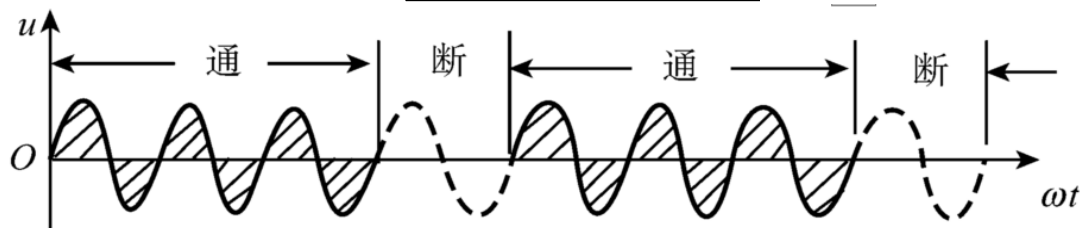
交流调压电路输入与输出都是交流，交流强调**有效值**。



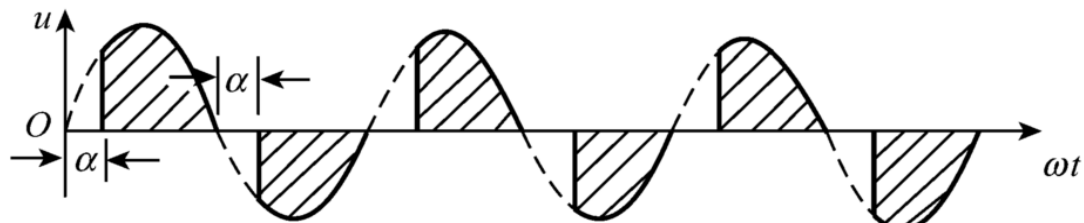
# 一、交流调压电路



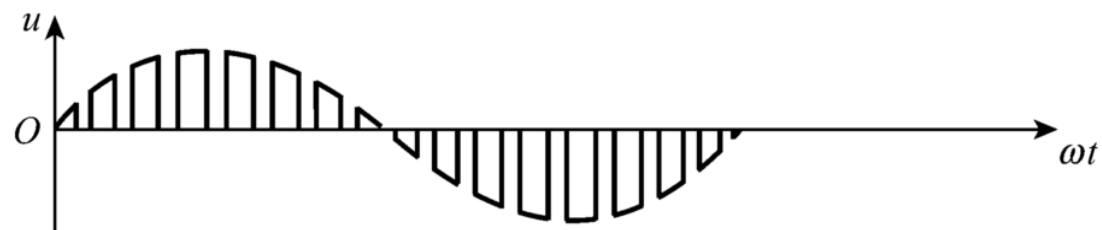
控制方式: (1) 通断控制



(2) 相位控制

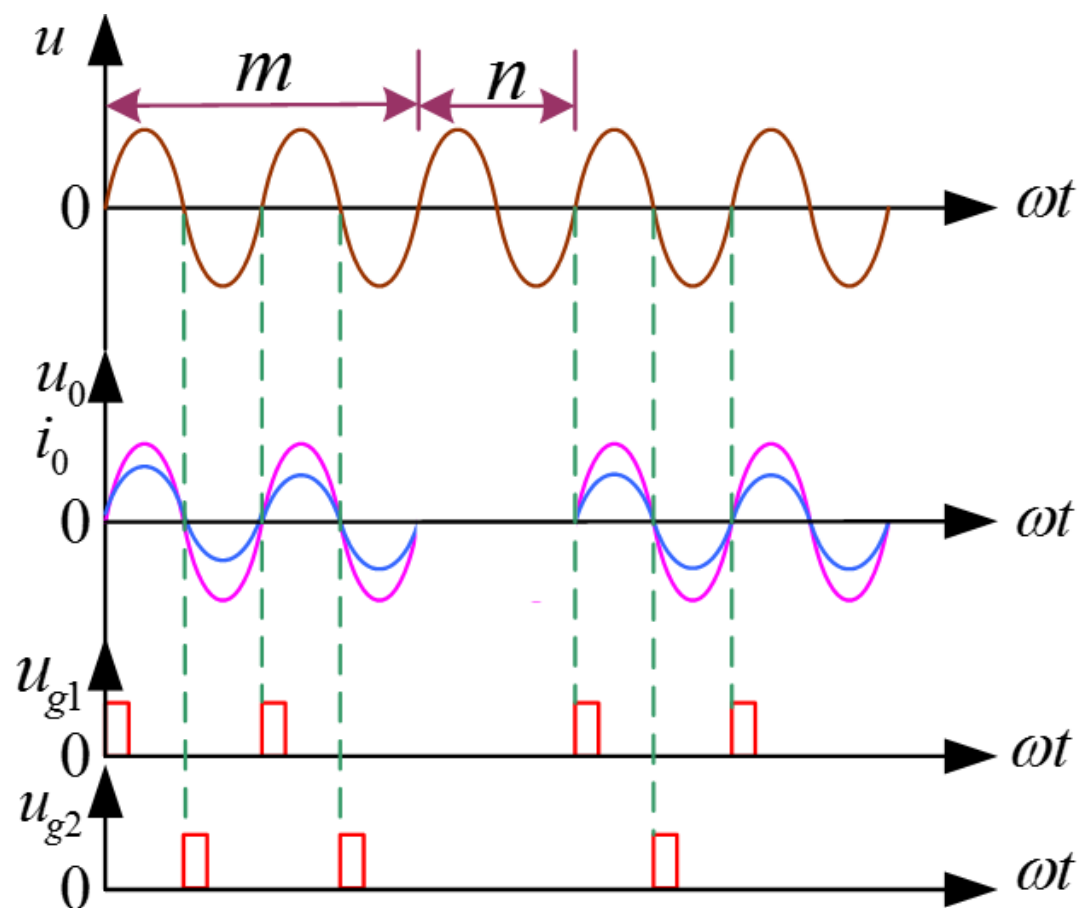


(3) 斩波控制



## 通断控制

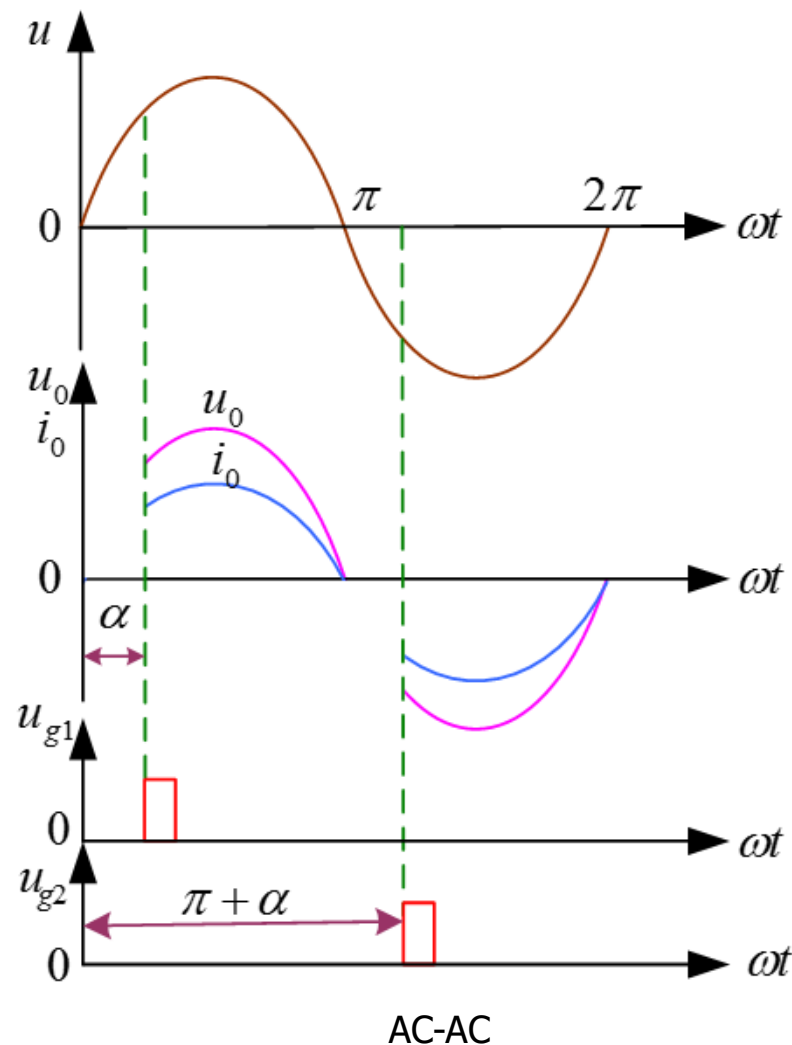
晶闸管导通 $m$ 个电源周期，然后关断 $n$ 个周期，一般控制角 $\alpha = 0^\circ$ 。如下图所示，改变 $m$ 和 $n$ 的比值，就改变了一个开关周期输出电压的有效值。



AC-AC

## 相位控制

改变 $T_1$ 和 $T_2$ 的触发角，以调整输出电压，如下图所示。此时的输入电流波形与单相全波整流电路的电源电流波形相同。



## 开关通断控制计算

若负载为电阻负载，对它的电压用开关通断进行控制。  
一般在电源电压正，负过零时，分别触发 $T_1$ 和 $T_2$ ，它们又在每半周电流过零时自然关断。

设电源电压为： $u = U_m \sin \omega t = \sqrt{2}U \sin \omega t$

导通 $m$ 个周期，关断 $n$ 个周期，则输出电压的有效值为：

$$\begin{aligned} U_0 &= \left[ \frac{1}{2(m+n)\pi} \int_0^{2m\pi} u^2 d(\omega t) \right]^{1/2} \\ &= \sqrt{\frac{m}{m+n}} U = \sqrt{D} U \end{aligned}$$

注意计算周期

式中： $D = \frac{m}{m+n}$   $\longrightarrow$  周期占空比



输出电流在一个通断周期的有效值为：

$$I_0 = \sqrt{D}I$$

负载功率为：

$$P_0 = U_0 I_0 = DUI$$

由上可见，改变周期占空比D的大小，就改变了负载功率。这种方式常用来控制有大的机械惯性和热惯性的负载功率。通断控制开关作用产生的谐波较少。

P240页，**交流调功电路**

通过改变接通负载周波数与断开负载周波数的比例，实现负载平均功率的调节，称为交流调功电路。



输入功率因数可由负载在一个通断周期中的有功功率与电源视在功率之比求得。由于输入电流等于输出电流，故：

$$\cos \phi_i = \frac{P_0}{UI_0} = \frac{U_0}{U} = \sqrt{D}$$

当D很小时，功率因数是最低的。

但在选择晶闸管电流定额时，由于管芯热容量很小，导通m个周期管芯已达稳定温升，故晶闸管电流定额应以D=1来选。

注意电器的工作制与稳态温升：

- (1) 长期工作制；
- (2) 短期工作制；
- (3) 周期工作制。



## 例

有一交流220V供电的交流调压电路，电路前面图形所示，负载电阻 $R=5\Omega$ ，晶闸管导通20个周期，关断40个周期。

- (1) 输出电压有效值 $U_0$ 。
- (2) 负载功率 $P_0$ 。
- (3) 输入功率因数 $\cos\phi_i$ 。

解：  $U = 220V$ ,  $D = \frac{m}{m+n} = \frac{20}{20+40} = 0.33$

(1)  $U_0 = \sqrt{DU} = \sqrt{0.33} \times 220 = 127.01(V)$

(2)  $P_0 = \frac{DU^2}{R} = \frac{0.33 \times 220^2}{5} = 3226.67(W)$



## 例

有一交流220V供电的交流调压电路，电路前面图形所示，负载电阻 $R=5\Omega$ ，晶闸管导通20个周期，关断40个周期。

(1) 输出电压有效值 $U_0$ 。

(2) 负载功率 $P_0$ 。

(3) 输入功率因数 $\cos\phi_i$ 。

解：  $U = 220V$ ,  $D = \frac{m}{m+n} = \frac{20}{20+40} = 0.33$

(3)  $\cos\phi_i = \sqrt{D} = \sqrt{0.33} = 0.5774$

扩展：安全裕量为1选择晶闸管电流

D=1时晶闸管流过电流的有效值：  $I_{T\text{有效值}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{U}{R}}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{220}{5}}{\sqrt{2}} = 31.11(A)$

$$I_{T\text{额定}} = \frac{I_{T\text{有效值}}}{1.57} = \frac{31.11}{1.57} = 19.82(A)$$



## 阻感性负载通断控制计算

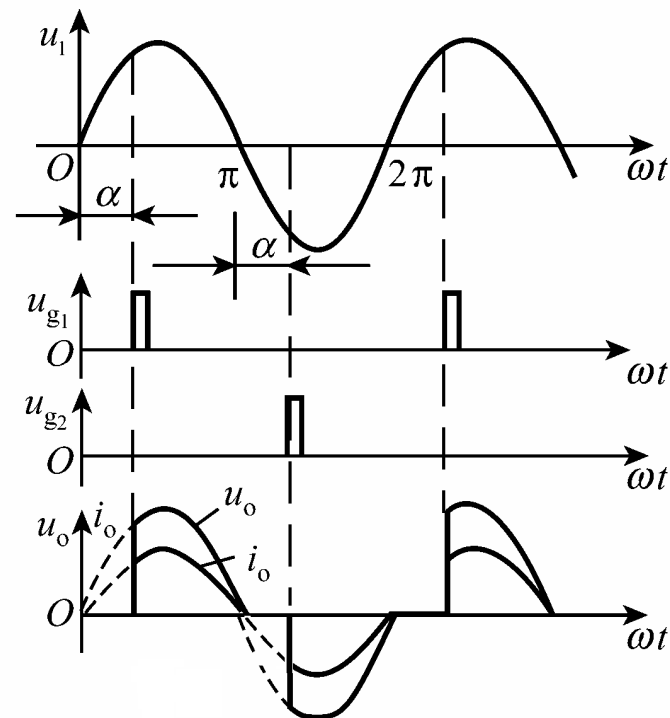
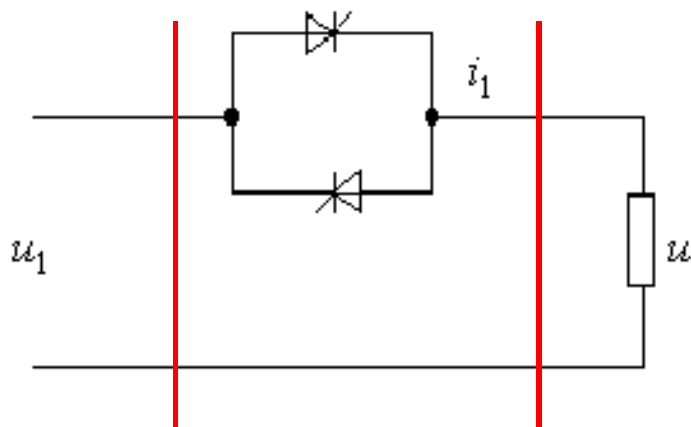
注意，若负载为电感性，即如负载功率因数很低，晶闸管导通后也仅**3—4**个周期电流就趋于稳态值，在晶闸管关断时，晶闸管电流滞后 $\phi$ 角到**0**才能使晶闸管关断，这些过渡过程的持续时间与**m**个周期相比可以忽略，因此在一定条件下，输出的电压和电流有效值均可用电阻性负载的表达式来近似计算。

## 单相交流调压电路—相位控制

## (1) 电阻性负载

$$\alpha=0, u=u_1$$

$$\alpha=\pi, u=0$$



$$U = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U_1 \sin \omega t)^2 d\omega t} = U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

注意公式中的弧度与角度

对称相位控制与非对称相位控制



## 输入功率因数 $\cos\phi_i$ 计算

由于输入电流与输出电流相同，故有：

$$\cos\phi_i = \frac{P_0}{UI} = \frac{U_0}{U}$$

对于反并联的两个晶闸管，驱动信号间没有公共连接，其控制极触发电路必须隔离，通常采用脉冲变压器实现，脉冲变压器原副边绝缘耐压应能承受电源电压。

## 例

单相交流调压电路中，电阻 $R=5\Omega$ ，输入电压 $U=220V$ ，若控制角 $\alpha=60^\circ$ 。求

- (1) 输出电压有效值 $U_0$ 。
- (2) 负载功率。
- (3) 输入功率因数 $\cos\phi_i$ 。

答： (1)

$$U_0 = U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} = 220 \times \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 120^\circ + \frac{\pi - \frac{\pi}{3}}{\pi}} = 197.33(V)$$

(2)

$$P_0 = \frac{U_0^2}{R} = \frac{197.3^2}{5} = 7785.5(W)$$



## 例

单相交流调压电路中，电阻 $R=5\Omega$ ，输入电压 $U=220V$ ，若控制角 $\alpha=60^\circ$ 。求

- (1) 输出电压有效值 $U_0$ 。
- (2) 负载功率。
- (3) 输入功率因数 $\cos\phi_i$ 。

答： (3)

$$\cos\phi_i = \frac{U_0}{U} = \frac{197.3}{220} = 0.897$$





东南大学

# 电力电子技术

## 第 40 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



### 例 P257页第3题

有一调光台灯由单相交流调压电路供电，灯泡为电阻性负载，在 $\alpha=0^\circ$ 时输出功率达到最大值，试求80%，50%最大功率时的移相触发角 $\alpha$ 。

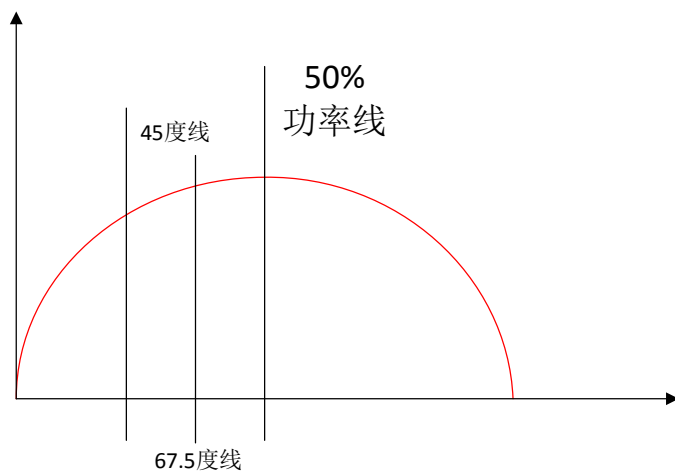
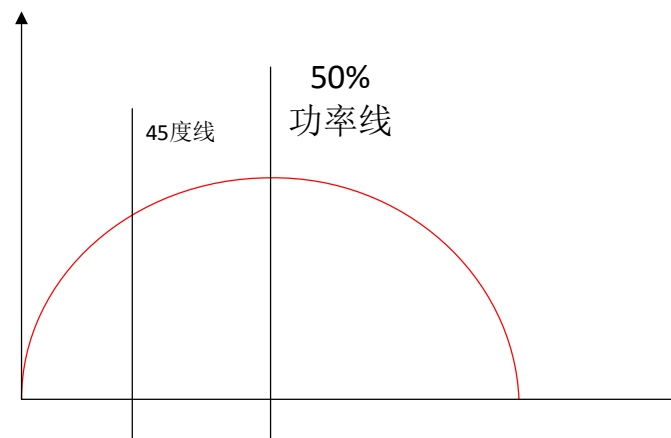
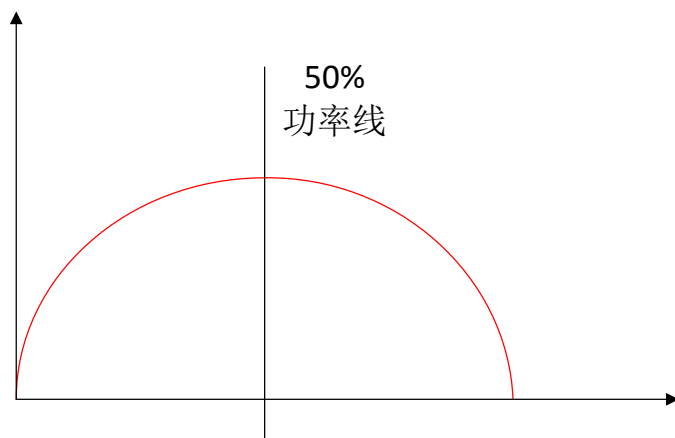
分析要点：输出功率已知，已可功率得出输出电压大小，这是一个输出电压已知，要求控制角 $\alpha$ 的问题。输出电压的表达式为：

$$U_0 = U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

最终转化为一个求解超越方程的问题



## 求解超越方程中点法介绍:



5步左右可得出有一定精度的解  
 计算结果小于目标，在左边  
 计算结果大于目标，在右边。

80%负载时输出电压与最大输出功率电压之比:

$$\left. \begin{aligned} P_{\max} &= \frac{U_1^2}{R} \\ P_{80\%} &= \frac{U_{80\%}^2}{R} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{U_{80\%}}{U_1} = 0.8944$$

求解如下方程:

$$0.8944 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha_{80\%} + \frac{\pi - \alpha_{80\%}}{\pi}}$$

从前面分析得知,  $\alpha_{80\%}$  小于  $90^\circ$ , 计算  $\alpha=45^\circ$  时表达式的值:

$$\sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2 \times 45^\circ + \frac{\pi - \pi / 4}{\pi}} = 0.9535 > 0.8944 \quad \text{由此判断 } \alpha_{80\%} \text{ 大于 } 45^\circ, \text{ 右侧}$$



$$\sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2 \times 45^\circ + \frac{\pi - \pi/4}{\pi}} = 0.9535 > 0.8944$$

由此判断 $\alpha_{80\%}$ 大于 $45^\circ$

计算 $\alpha=67.5^\circ$  时表达式的值:

$$\sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2 \times 67.5^\circ + \frac{\pi - 1.1781}{\pi}} = 0.8588 < 0.8944, \text{ 左侧}$$

由此判断 $\alpha_{80\%}$ 在 $45^\circ \sim 67.5^\circ$  之间, 计算两者中值 $56.25^\circ$  表达式的值:

$$\sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2 \times 56.25^\circ + \frac{\pi - 0.9817}{\pi}} = 0.9415 > 0.8944, \text{ 右侧}$$

由此判断 $\alpha_{80\%}$ 在 $56.25^\circ \sim 67.5^\circ$  之间, 计算两者中值 $61.875^\circ$  表达式的值:



由此判断 $\alpha_{80\%}$ 在 $56.25^\circ \sim 67.5^\circ$  之间，计算两者中值 $61.875^\circ$  表达式的值：

$$\sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2 \times 61.875^\circ + \frac{\pi - 1.078}{\pi}} = 0.8884 < 0.8944, \text{ 左侧}$$

由此判断 $\alpha_{80\%}$ 在 $56.25^\circ \sim 61.875^\circ$  之间，计算两者中值 $59.0625^\circ$  表达式的值：

$$\sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2 \times 59.0625^\circ + \frac{\pi - 1.0308}{\pi}} = 0.9012 > 0.8944, \text{ 右侧}$$

由此判断 $\alpha_{80\%}$ 在 $59.0625^\circ \sim 61.875^\circ$  之间，计算两者中值 $60.5^\circ$  表达式的值：

$$\sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2 \times 60.5^\circ + \frac{180^\circ - 60.5^\circ}{180^\circ}} = 0.8946 \approx 0.8944, \text{ 近似相等}$$



$$\sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2 \times 60.5^\circ + \frac{180^\circ - 60.5^\circ}{180^\circ}} = 0.8946 \approx 0.8944, \text{ 近似相等}$$

所得结果与目标误差非常小，所以：

80%输出功率时移相控制角 $\alpha=60.5^\circ$



## (2) 电感性负载

 $\theta$ 与 $\alpha$ ,  $\Phi$ 有关

$$L \frac{di_0}{dt} + Ri_0 = \sqrt{2}U_1 \sin \omega t$$

$$i_0 = \frac{\sqrt{2}U_1}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + A_1 e^{-\frac{R}{L}t}$$

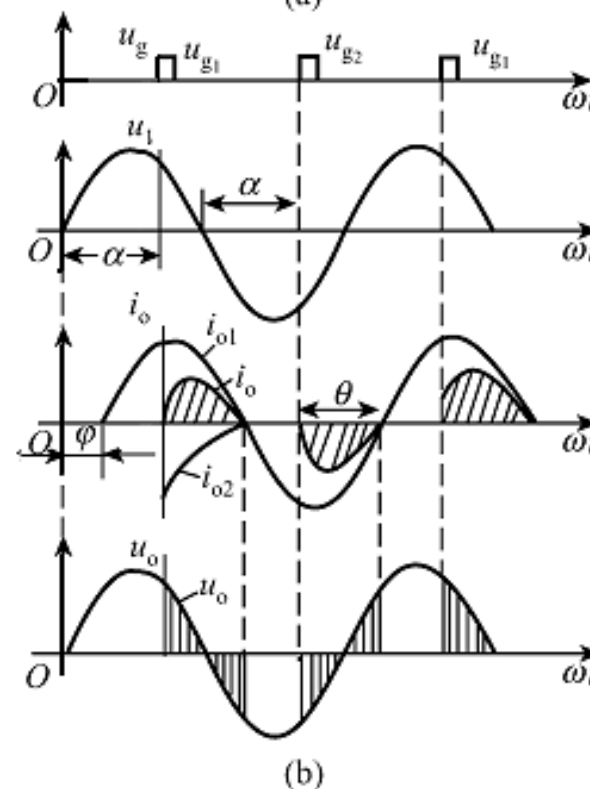
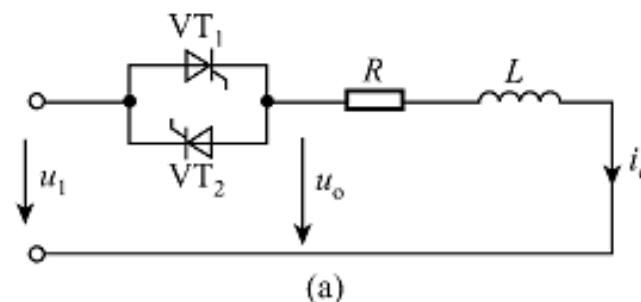
$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}(\omega L / R)$$

$$i_0 \big|_{\omega t = \alpha} = 0$$

$$A_1 = -\frac{\sqrt{2}U_1}{Z} \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{R}{L} \frac{\alpha}{\omega}}$$

$$i_0 = \frac{\sqrt{2}U_1}{Z} \left[ \sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \theta) e^{\frac{R}{L}(\frac{\alpha}{\omega} - t)} \right]$$



稳态分量，暂态分量。初始条件





$$\text{由 } i_0|_{\omega t=\alpha+\theta} = 0$$

$$\sin(\alpha + \theta - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi)e^{\frac{R}{L} \cdot (-\theta)/\omega}$$

①  $\alpha = \varphi$

由上式得到  $\sin \theta = \sin(\alpha - \varphi)e^{\frac{R}{L} \cdot (-\theta)/\omega}$

$\theta = \pi$ , 连续,  $u = u_1$ , 不起调压作用。作为开关使用。

②  $\varphi < \alpha < \pi$

电流延后角  $\gamma < \alpha$ , 电流断续, 电压有效值随  $\alpha$  变化

$$\theta = 180^\circ - \alpha + \gamma$$

③  $\alpha < \varphi$  (窄脉冲)

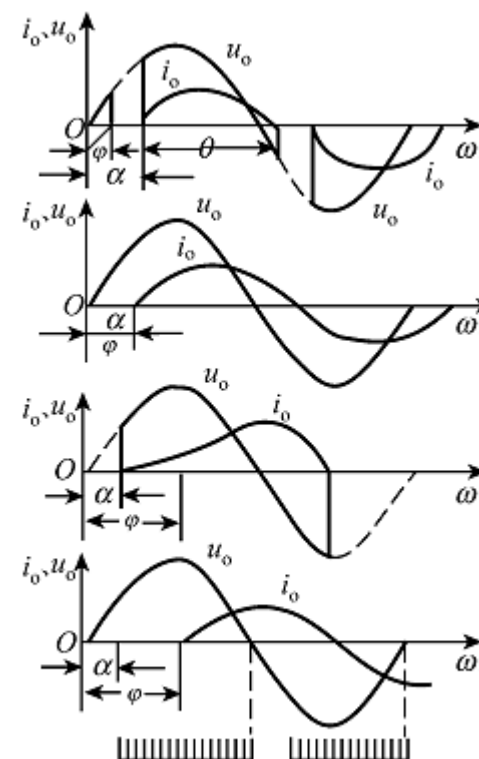
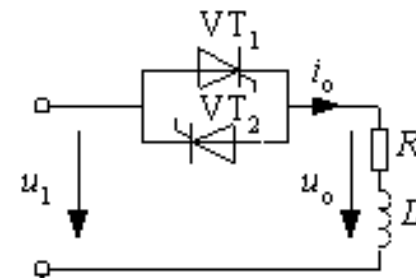
$VT_1$  持续导通时,  $VT_2$  不通,  $VT_1$  关断后,  $u_{g2}$  消失,  $VT_2$  仍不通。

单管导通, 直流分量

④  $\alpha < \varphi$  (宽脉冲)

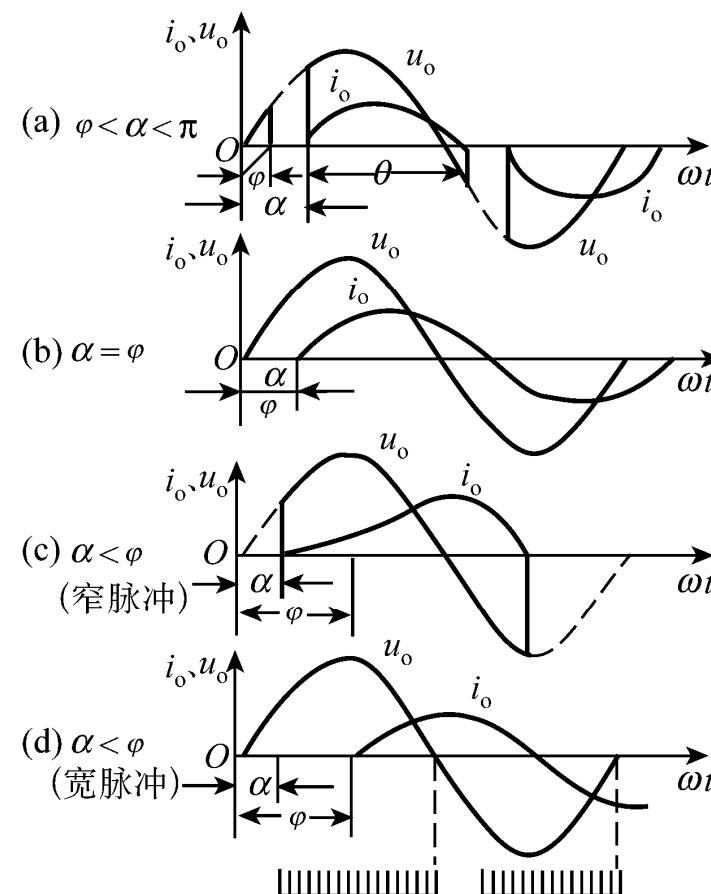
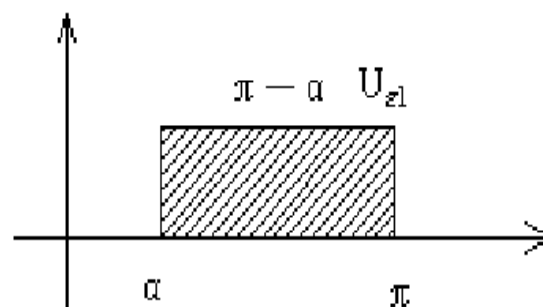
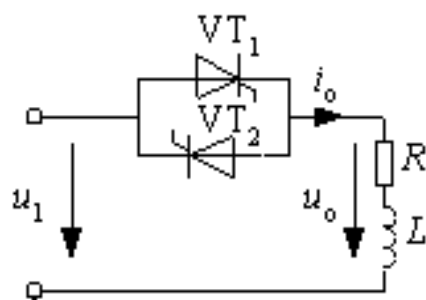
$\gamma > \alpha$ , 实际上  $VT_1, VT_2$  均导通  $180^\circ$

$u$  为完整的正弦波, 只要  $\alpha < \varphi$ ,  $u$  不受  $\alpha$  影响, 失控。

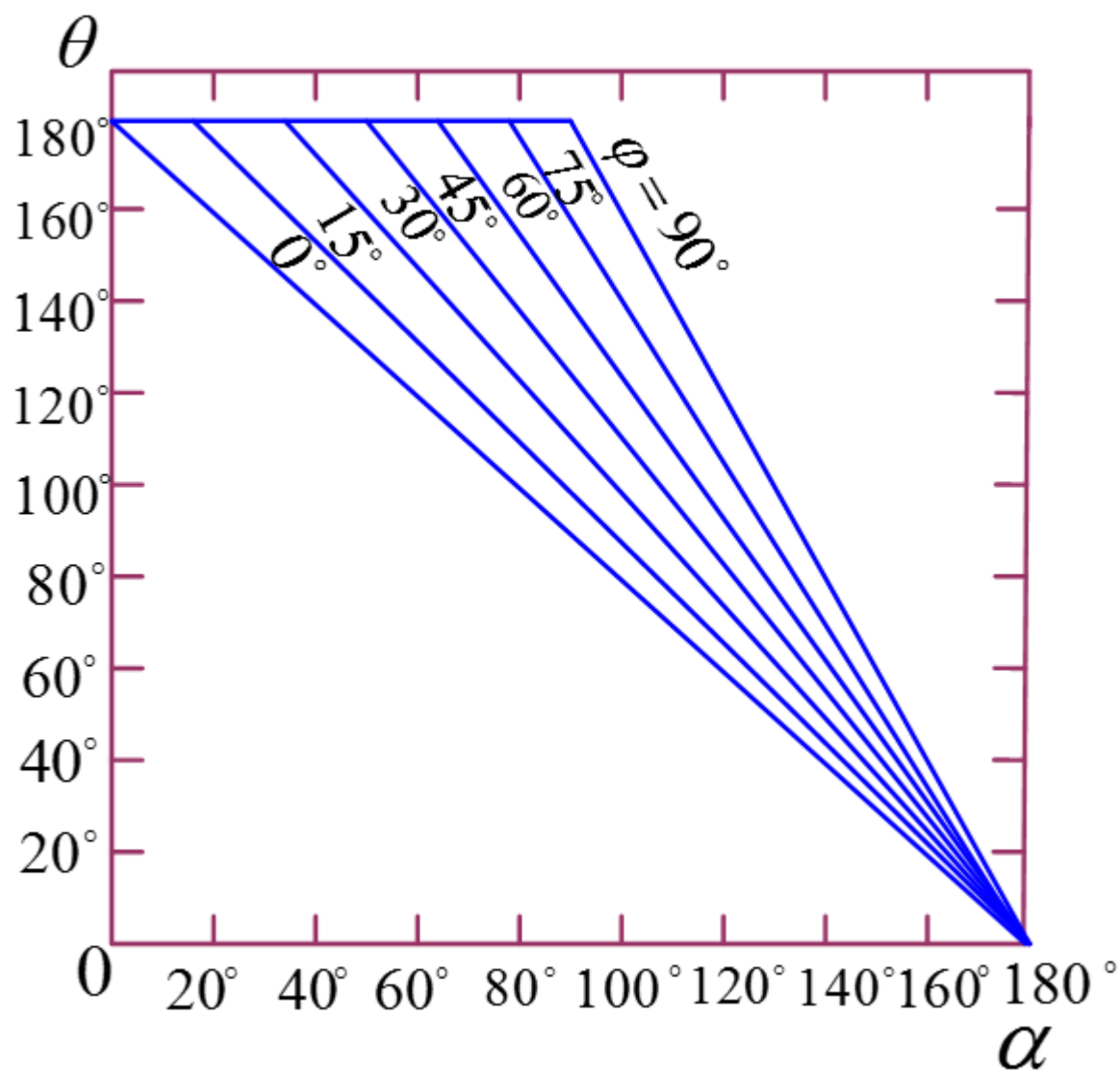


宽脉冲的要求:

$VT_1$ 通,  $VT_2$ 无法通。 $VT_1$ 断后,  $u_{g2}$ 消失,  
 $VT_2$ 不通, 不对称电压, 直流分量。



$VT_1$ ,  $VT_2$ 互锁, 导通的电压对另外一只管子为反向阳极电压



$\alpha > \phi$ 时，导通角关系图

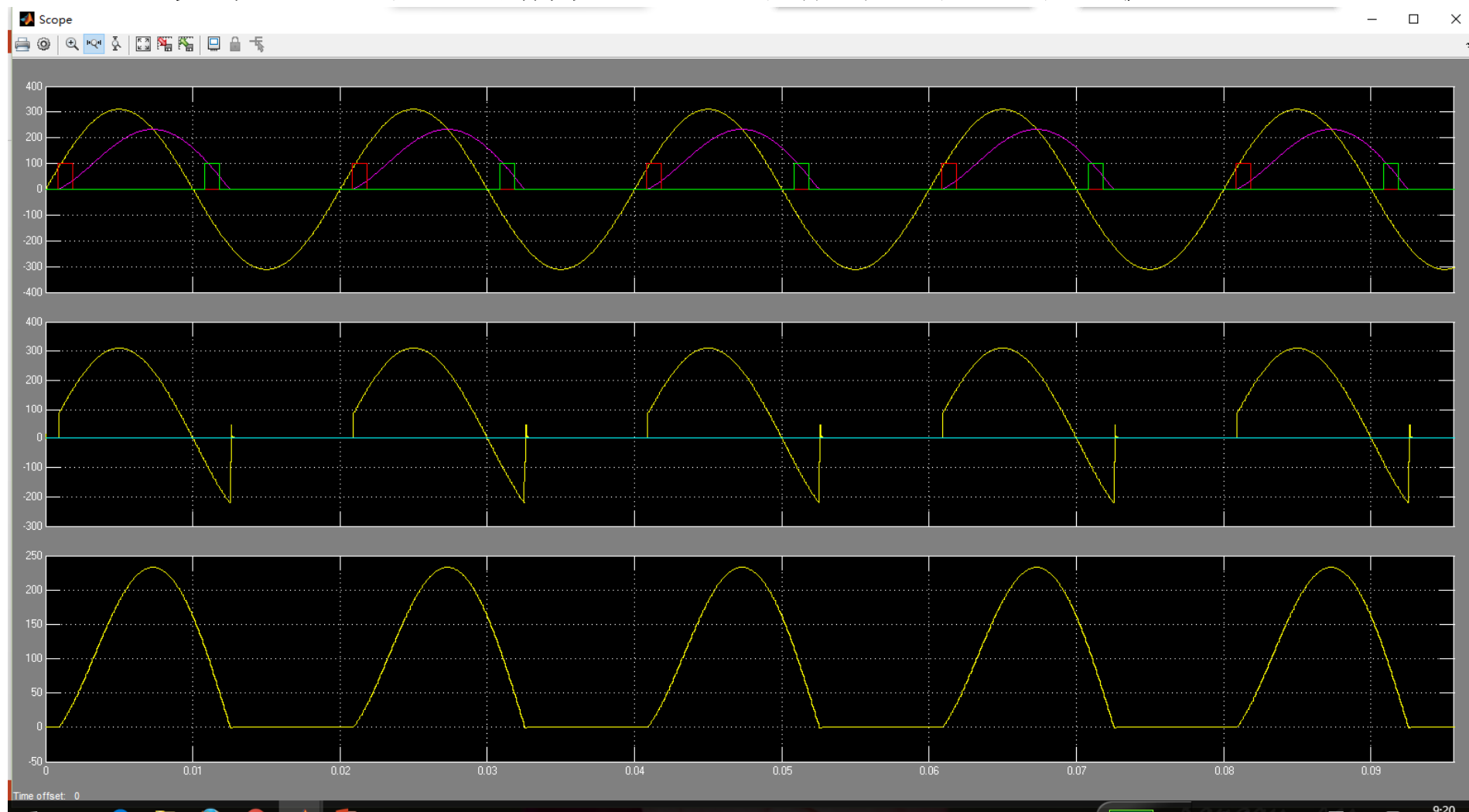


## 单相交流调压电路阻感负载详细波形

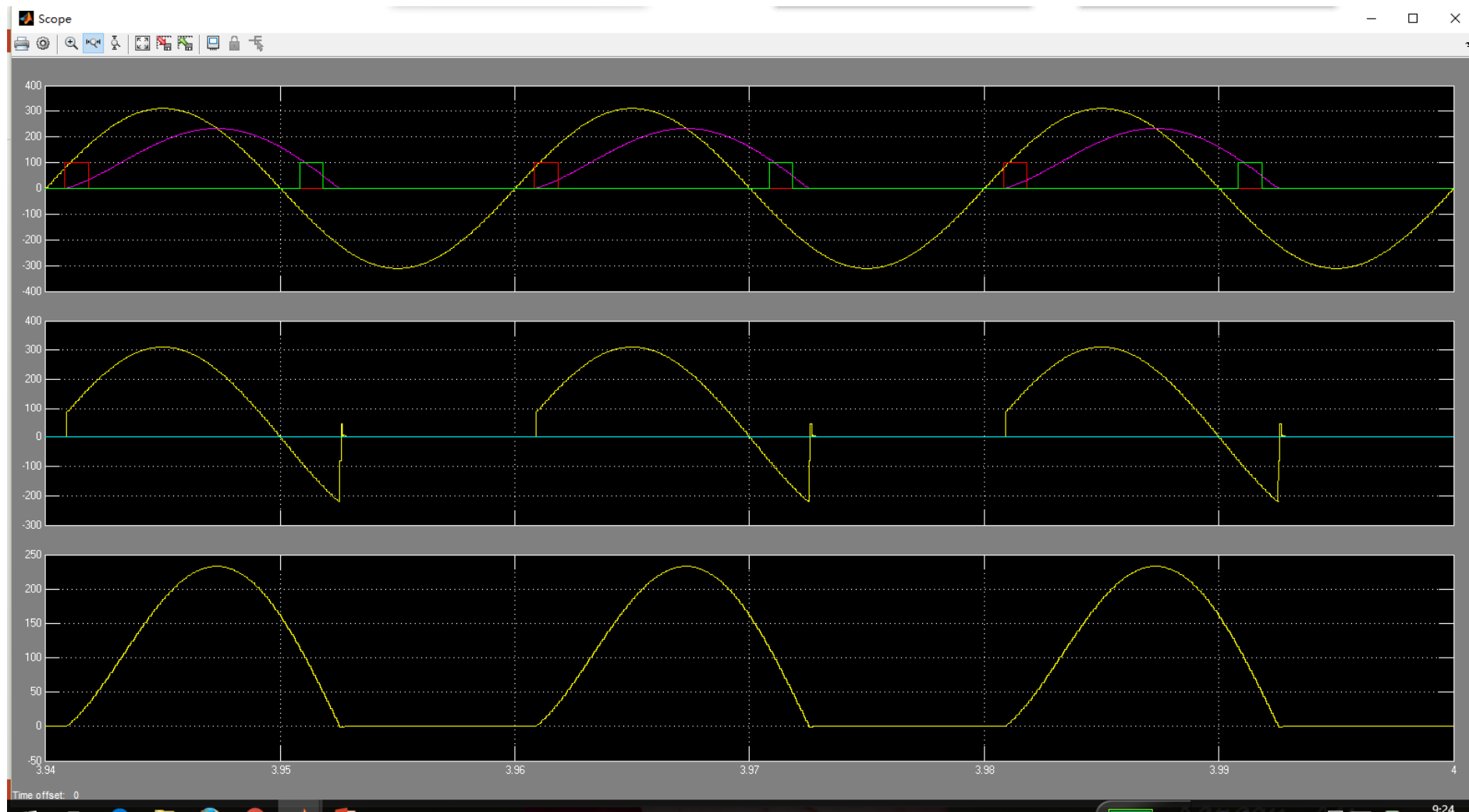
电路条件：输入电压220V，负载电阻 $R=1\Omega$ ，负载电感 $L=3.183\text{mH}$ ，负载功率因数角为 $45^\circ$ 。下面给出控制角 $\alpha=15^\circ$ ，不同触发脉冲宽度情况下的初始状态与稳态下的波形，注意区分！



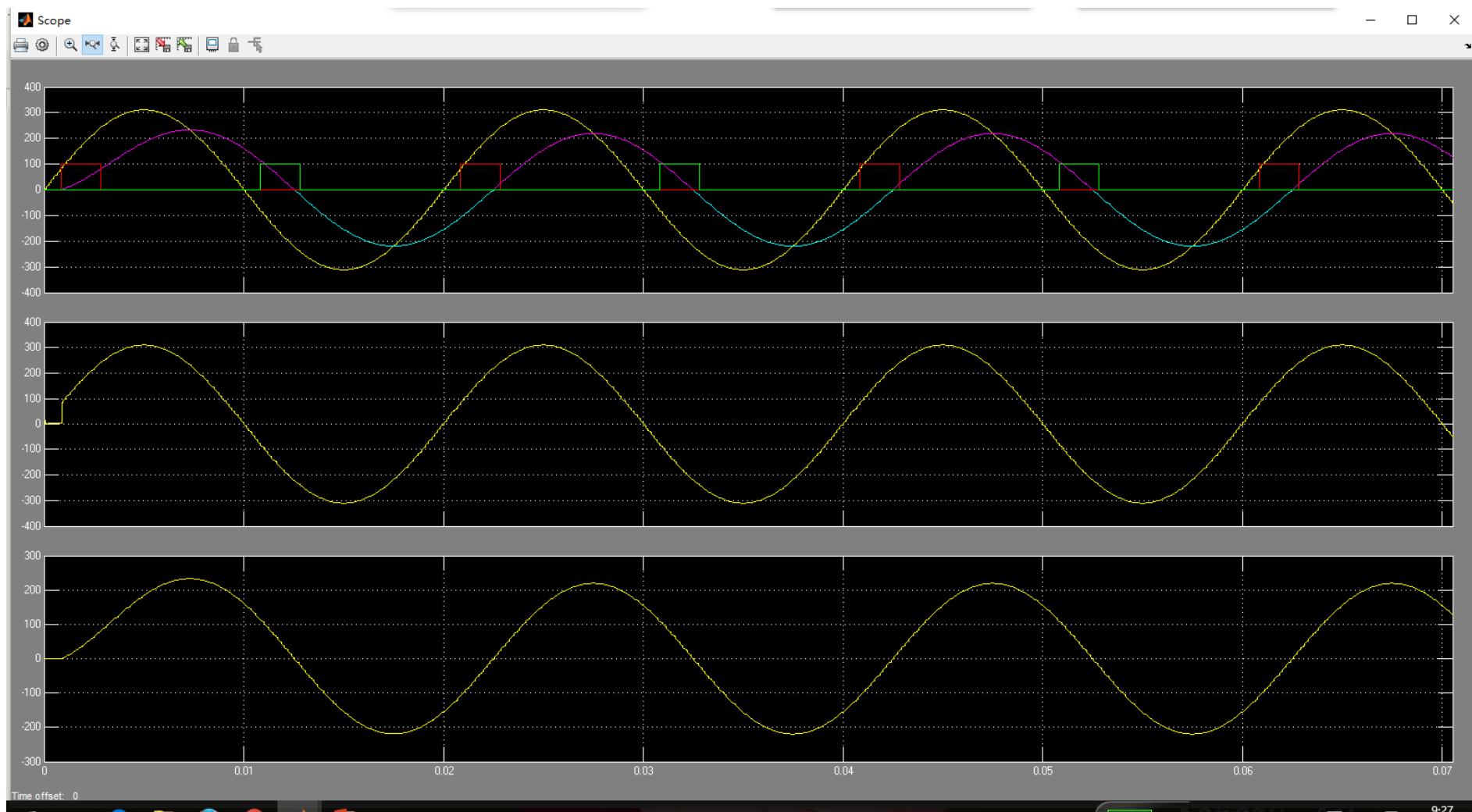
触发脉冲宽度=18°，没有跨过晶闸电流过零点，出现一个管子一直导通的情况。这是刚开始导通时的状态。



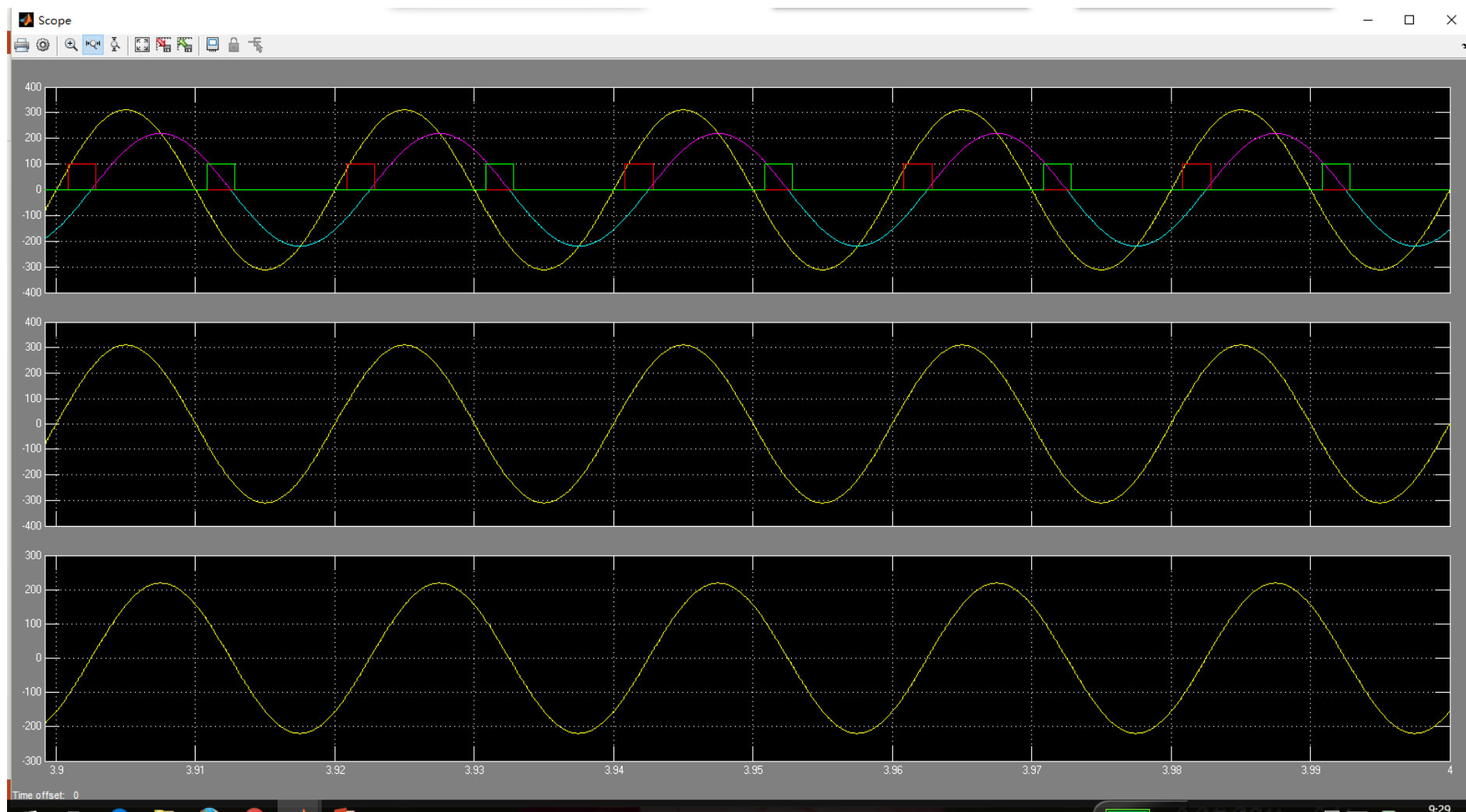
触发脉冲宽度=18°，没有跨过晶闸电流过零点，出现一个管子一直导通的情况。这是稳态时的状态。



触发脉冲宽度=36°，刚跨过晶闸电流过零点，这是刚开始时的状态。



触发脉冲宽度=36°，刚跨过晶闸电流过零点，这是稳态时的状态。

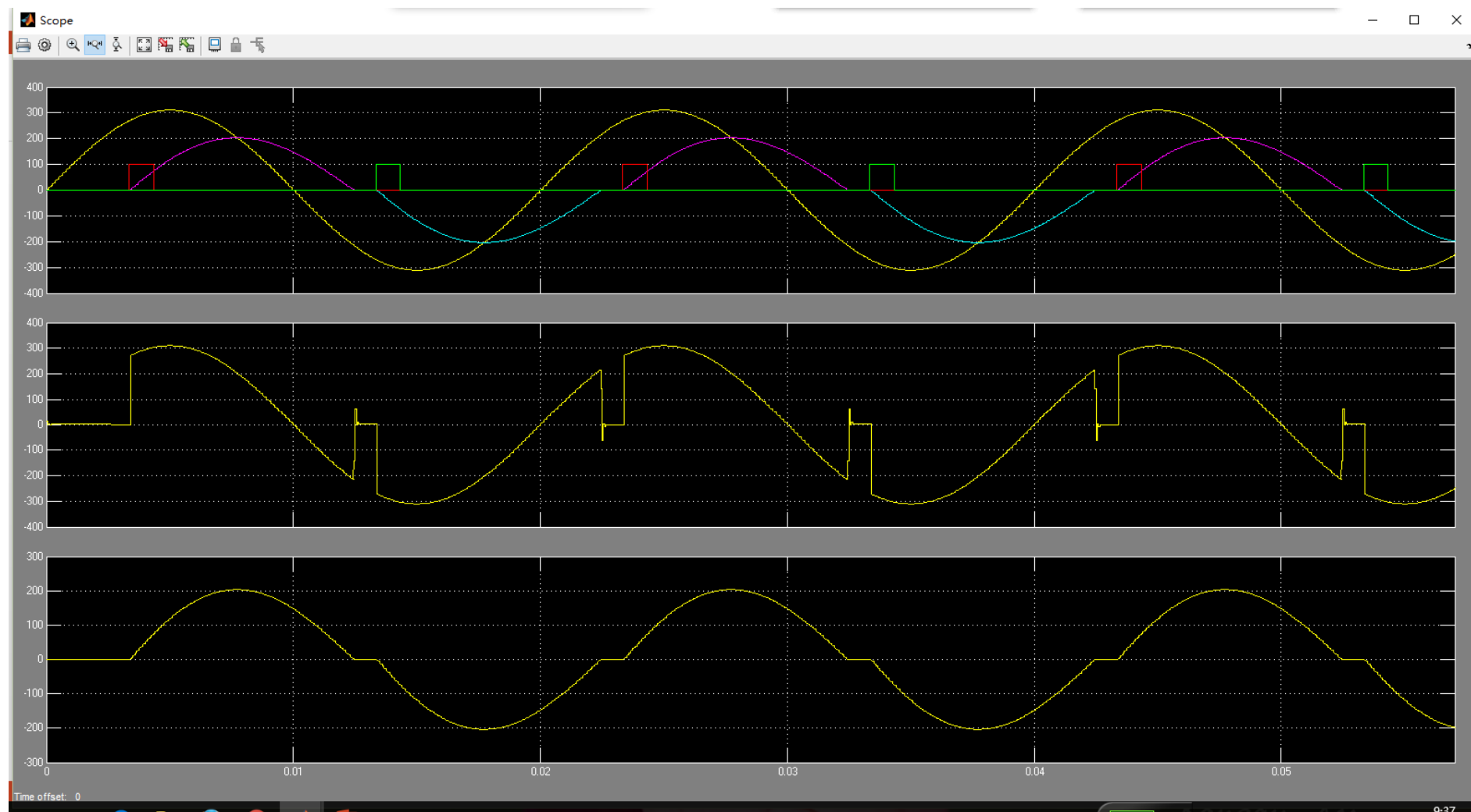




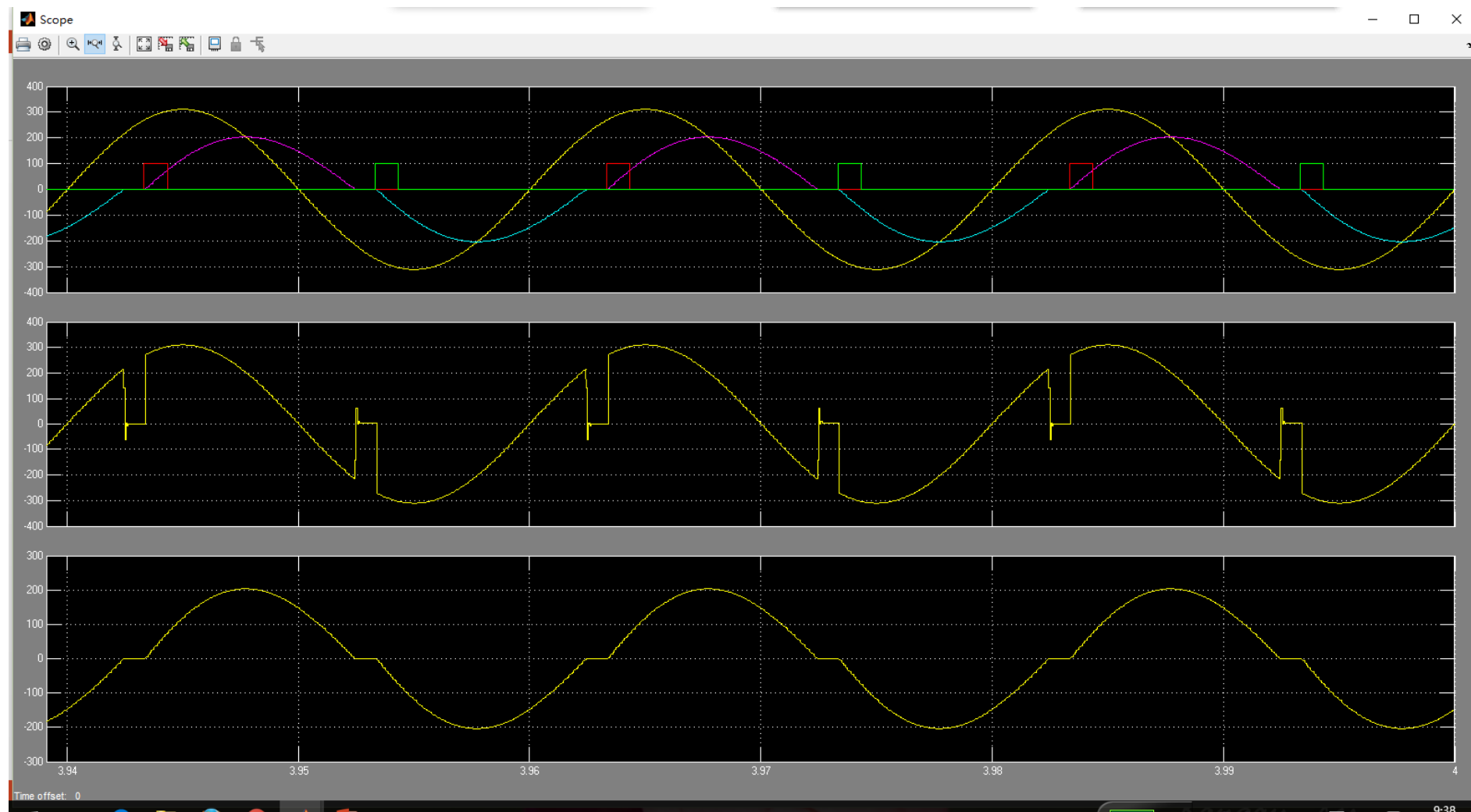
## 单相交流调压电路阻感负载详细波形

电路条件：输入电压220V，负载电阻 $R=1\Omega$ ，负载电感 $L=3.183\text{mH}$ ，负载功率因数角为 $45^\circ$ 。下面给出控制角 $\alpha=60^\circ$  情况下的初始状态与稳态下的波形，注意区分！

触发脉冲宽度=18°，刚开始导通时的波形



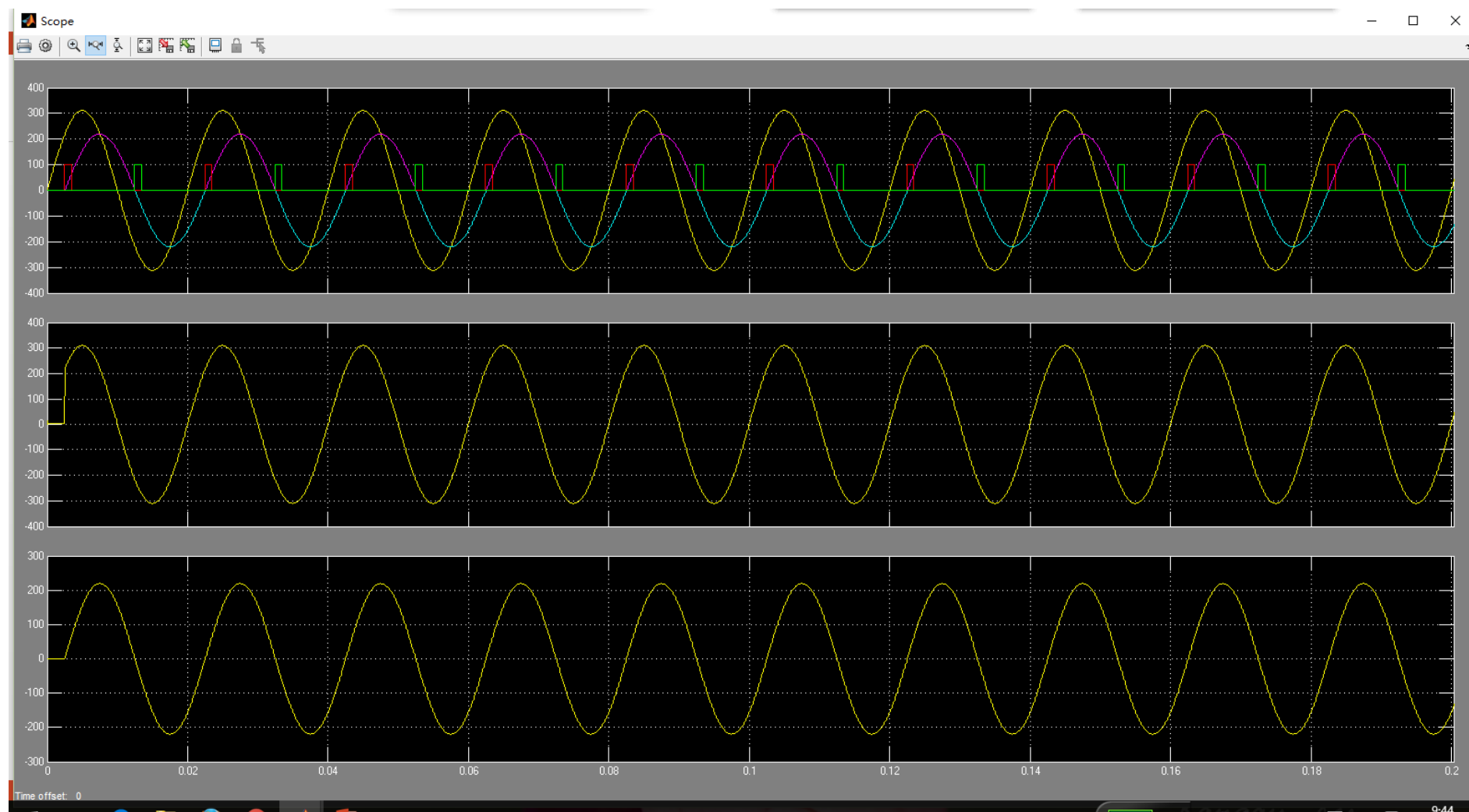
触发脉冲宽度=18°，稳态时的波形



## 单相交流调压电路阻感负载详细波形

电路条件：输入电压220V，负载电阻 $R=1\Omega$ ，负载电感 $L=3.183\text{mH}$ ，负载功率因数角为 $45^\circ$ 。下面给出控制角 $\alpha=45^\circ$  情况下的波形。

## 触发脉冲宽度=18° 波形



东南大学

# 电力电子技术

## 第 41 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



## 例

单相交流调压电路中，输入电压 $U=220V$ ， $f=50Hz$ ， $R=10\Omega$ ， $\omega L=10\Omega$ ，若控制角 $\alpha=90^\circ$ ，求：

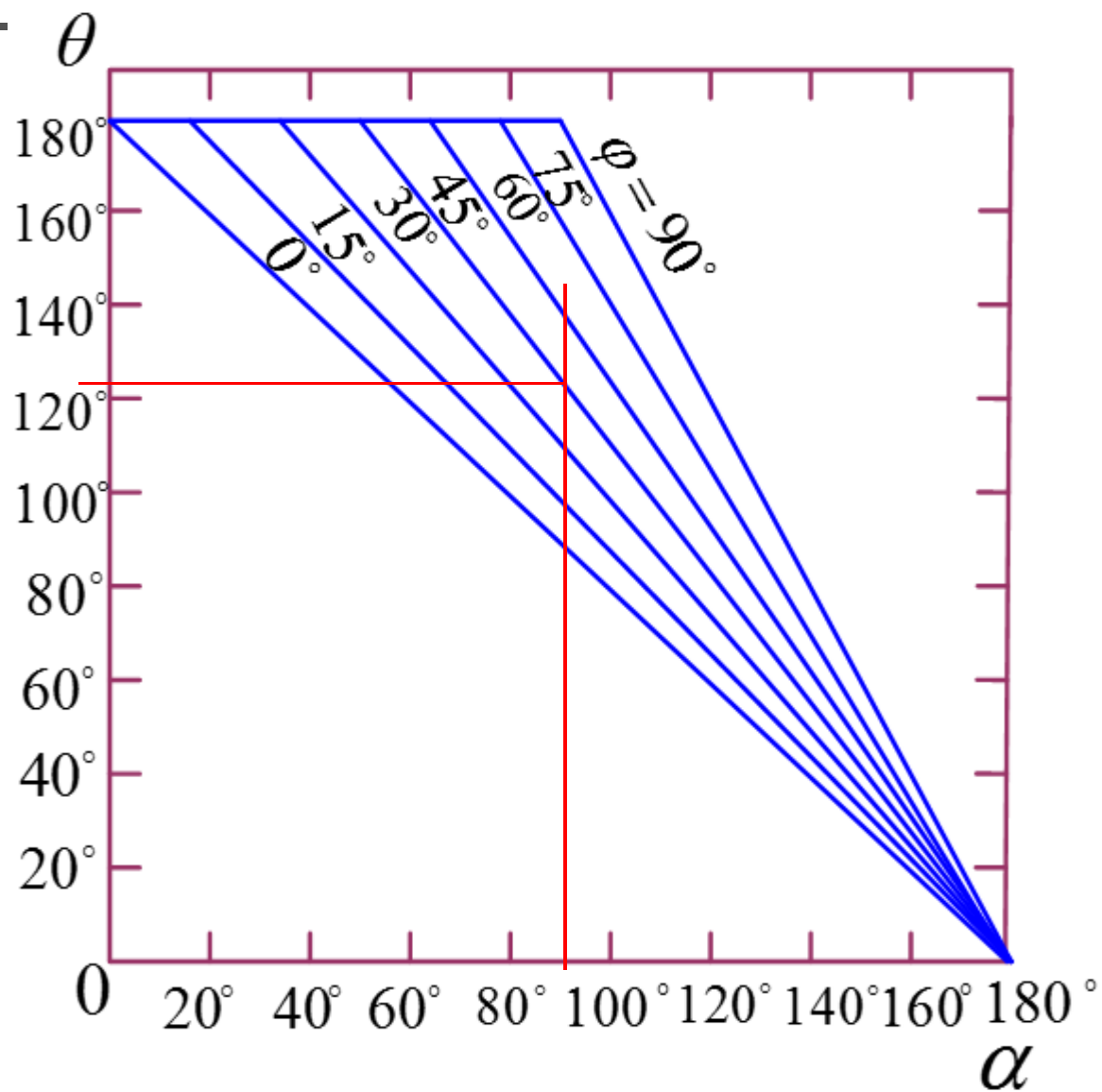
- (1) 晶闸管的导通角 $\theta$ 。
- (2) 输出电压有效值 $U_0$ 。
- (3) 输出电流有效值 $I_0$ 。
- (4) 输入功率因数 $\cos\phi_i$ 。

分析要点：为 $\alpha > \phi$ 情况，要通过查图表得出导通角 $\theta$ 。电流有过渡过程影响，计算复杂。

答：负载功率因数角为 $45^\circ$ ，控制角为 $90^\circ$ ，通过查图得出：

- (1) 导通角 $\theta=2.32\text{rad}=133^\circ$





$\alpha > \phi$ 时，导通角关系图（图不很准确）





## 例

单相交流调压电路中，输入电压 $U=220V$ ， $f=50Hz$ ， $R=10\Omega$ ， $\omega L=10\Omega$ ，若控制角 $\alpha=90^\circ$ ，求：

- (1) 晶闸管的导通角 $\theta$ 。
- (2) 输出电压有效值 $U_0$ 。
- (3) 输出电流有效值 $I_0$ 。
- (4) 输入功率因数 $\cos\phi_i$ 。

答： (2)

$$\begin{aligned} U_0 &= \left[ \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} \left( \sqrt{2}U \sin \omega t \right)^2 d(\omega t) \right]^{1/2} \\ &= U \left[ \frac{1}{\pi} \left( \theta + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2(\alpha + \theta)}{2} \right) \right]^{1/2} \\ &= 220 \times \left[ \frac{1}{3.14} \left( 2.32 + \frac{\sin 180^\circ}{2} - \frac{\sin 2(90^\circ + 133^\circ)}{2} \right) \right]^{1/2} \\ &= 167.5(V) \end{aligned}$$



## 例

单相交流调压电路中，输入电压 $U=220V$ ， $f=50Hz$ ， $R=10\Omega$ ， $\omega L=10\Omega$ ，若控制角 $\alpha=90^\circ$ ，求：

- (1) 晶闸管的导通角 $\theta$ 。
- (2) 输出电压有效值 $U_0$ 。
- (3) 输出电流有效值 $I_0$ 。
- (4) 输入功率因数 $\cos\phi_i$ 。

答： (3)

$$\begin{aligned}
 I_0 &= \left\{ \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} \left[ \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left( \sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{(\alpha - \omega t)/\tan\phi} \right) \right]^2 d(\omega t) \right\}^{1/2} \\
 &= \left\{ \frac{2}{2\pi} \int_{\pi/2}^{(\pi/2)+2.32} \left[ \frac{\sqrt{2} \times 220}{14.1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) e^{(\pi/2 - \omega t)/\tan(\pi/4)} \right]^2 d(\omega t) \right\}^{1/2} \\
 &= 12.8(A)
 \end{aligned}$$



## 例

单相交流调压电路中，输入电压 $U=220\text{V}$ ， $f=50\text{Hz}$ ， $R=10\Omega$ ， $\omega L=10\Omega$ ，若控制角 $\alpha=90^\circ$ ，求：

- (1) 晶闸管的导通角 $\theta$ 。
- (2) 输出电压有效值 $U_0$ 。
- (3) 输出电流有效值 $I_0$ 。
- (4) 输入功率因数 $\cos\phi_i$ 。

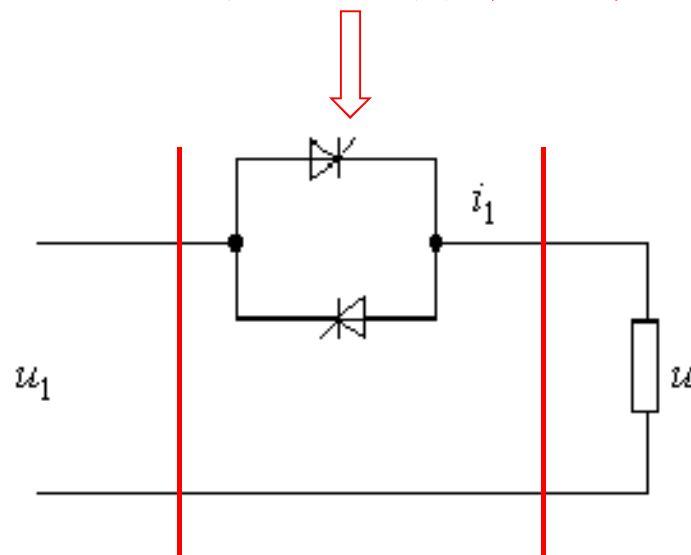
答：(4)

由于输入电流等于输出电流，有：

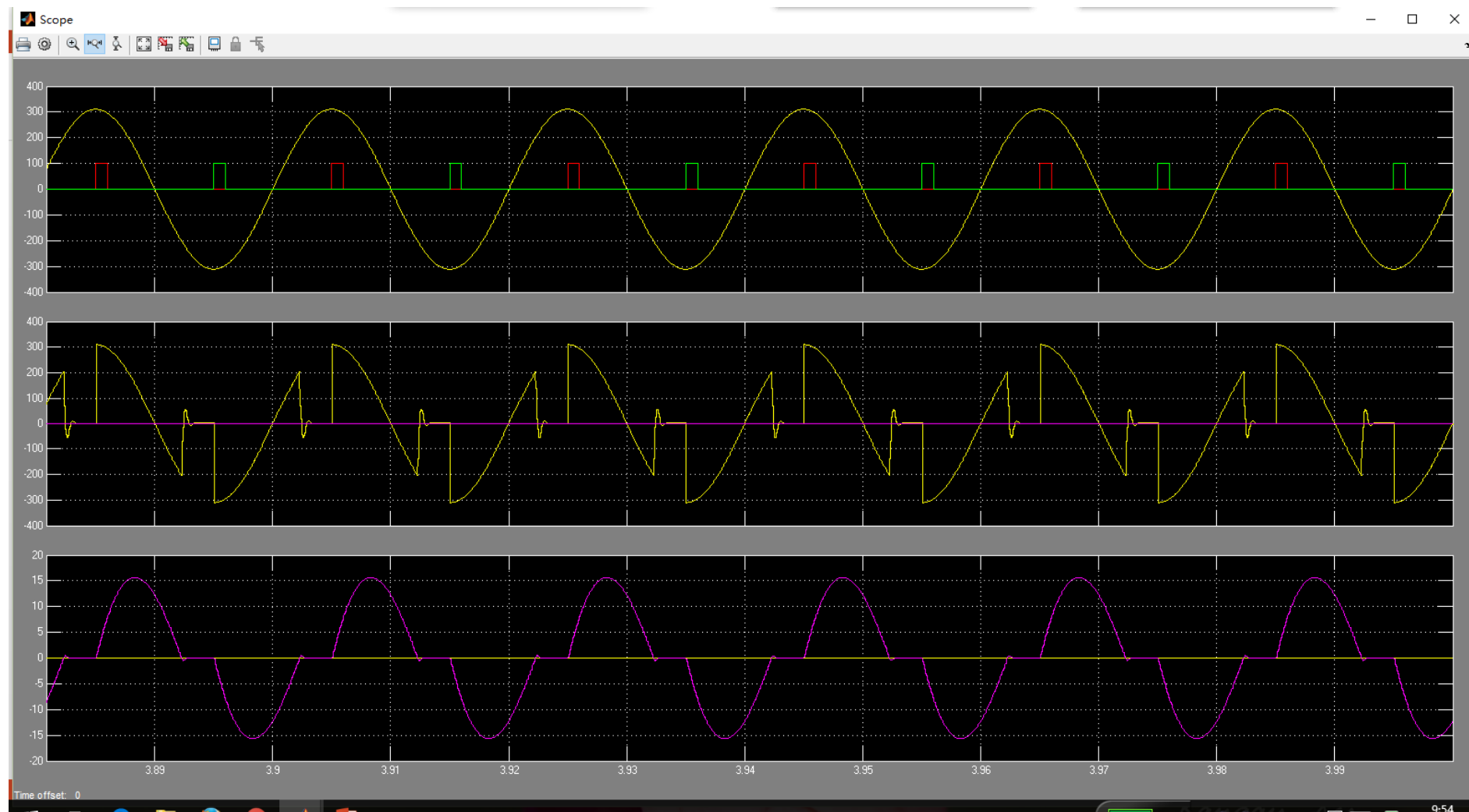
$$\cos\phi_i = \frac{U_0}{U} = \frac{167.5}{220} = 0.76$$

课后请看教材P235页例题

调压装置的功率因数

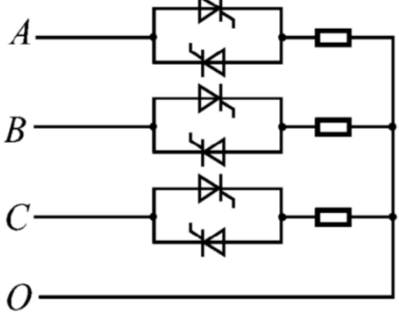
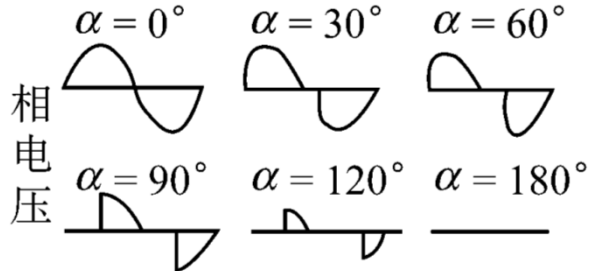
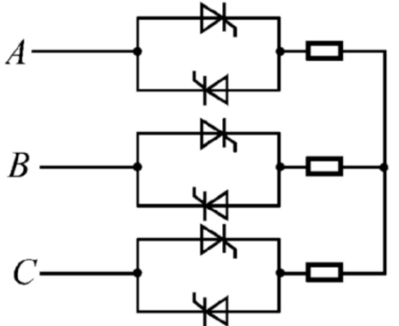
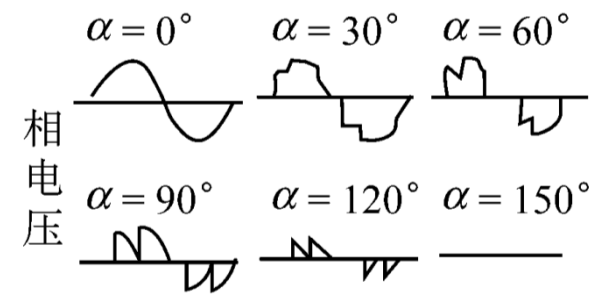


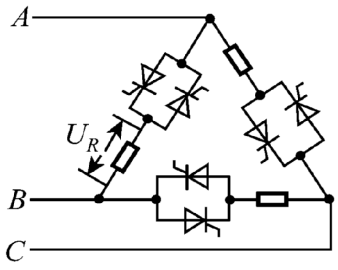
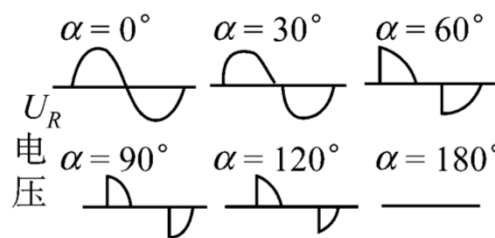
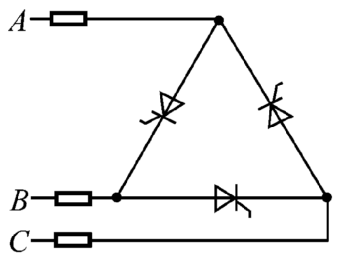
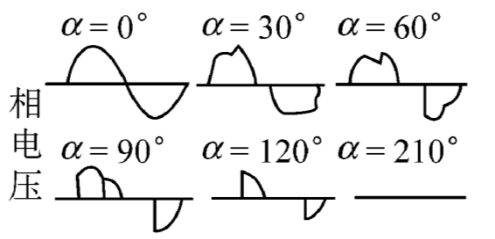
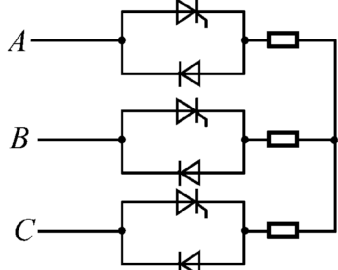
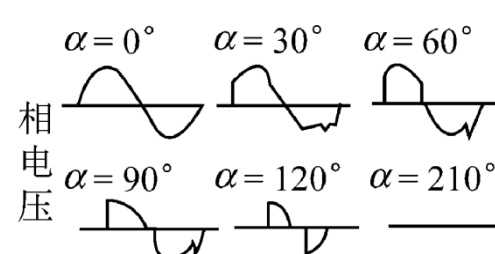
## 例题的波形



## 2、三相交流调压器

### (1) 常见三相交流调压器

名称	线路图	输出电压波形(电阻负载)
三相 $Y_0$ 型		
三相 Y 型		

<p>三相负载 △型</p>		<p> <math>\alpha = 0^\circ</math>   <math>\alpha = 30^\circ</math>   <math>\alpha = 60^\circ</math>  <math>\alpha = 90^\circ</math>   <math>\alpha = 120^\circ</math>   <math>\alpha = 180^\circ</math> </p> 
<p>三相晶闸管 △型</p>		<p> <math>\alpha = 0^\circ</math>   <math>\alpha = 30^\circ</math>   <math>\alpha = 60^\circ</math>  <math>\alpha = 90^\circ</math>   <math>\alpha = 120^\circ</math>   <math>\alpha = 210^\circ</math> </p> 
<p>三相半控 Y型</p>		<p> <math>\alpha = 0^\circ</math>   <math>\alpha = 30^\circ</math>   <math>\alpha = 60^\circ</math>  <math>\alpha = 90^\circ</math>   <math>\alpha = 120^\circ</math>   <math>\alpha = 210^\circ</math> </p> 

## (2) 三相三线Y型交流调压器

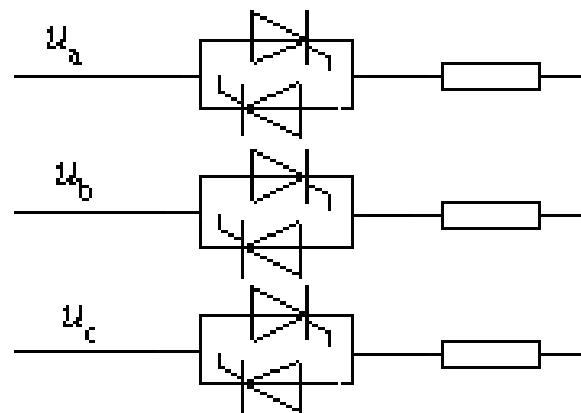
导通条件:

- ① 至少两相导通才能构成回路，一为正向，另一为反向。
- ② 脉宽应大于**60**度，依次触发**1→2→3→4→5→6→1**。

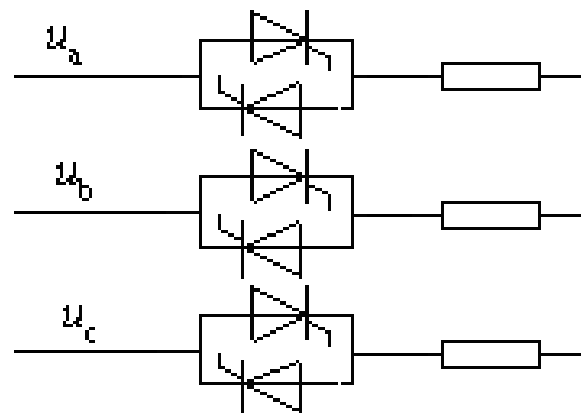
电阻性负载：移相范围**150°**

电感性负载：电压波形比较复杂， $\theta$ 与 $\alpha$ 和 $\varphi$ 都有关。

用Pspice等软件进行仿真



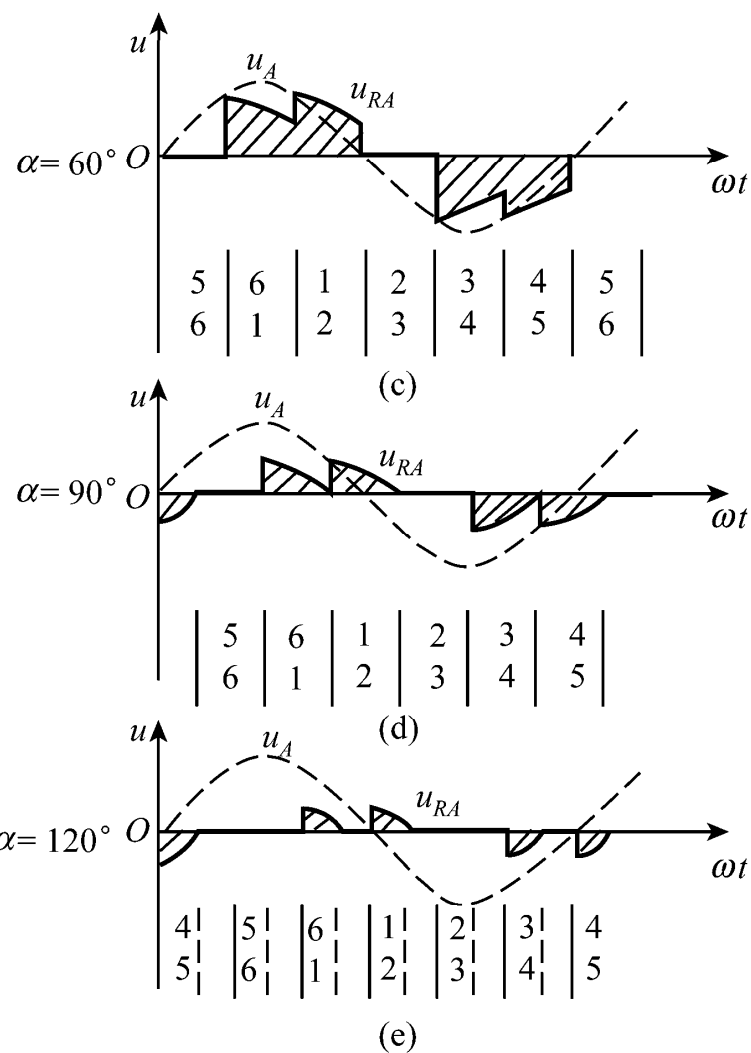
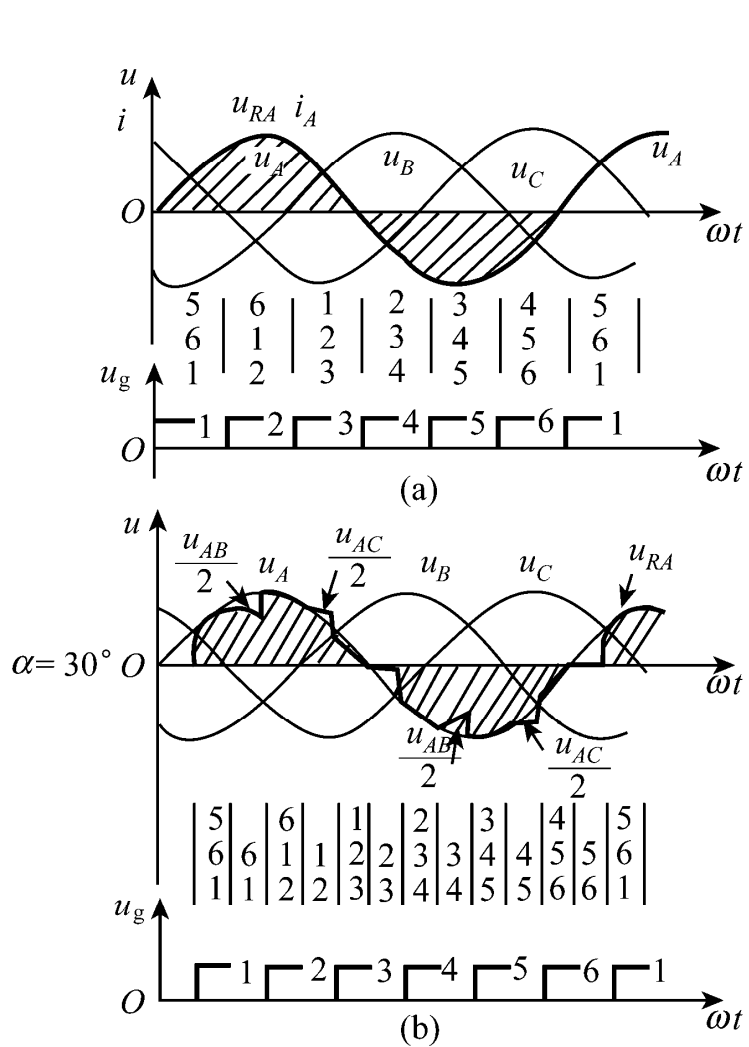
## (2) 三相三线Y型交流调压器



P238页图形:

- (1) 输出波形是相电压;
- (2) 三个管子都导通, 中点电压为零, 负载电压为相电压;
- (3) 两个管子导通, 中点电压为线电压的一半, 负载电压为导通两管相应线电压的一半;
- (4) 三个管子都不导通, 负载电压为零。





## 交流调功电路与交流无触点开关

交流调功电路就是前面所述的开关周期通断控制。

交流无触点开关广泛应用于防爆的场合，由于开关管压降的存在，与机械开关相比，电力电子开关的管压降数值较大，只适合于小功率负载长期使用。

## 二、交—交变频电路

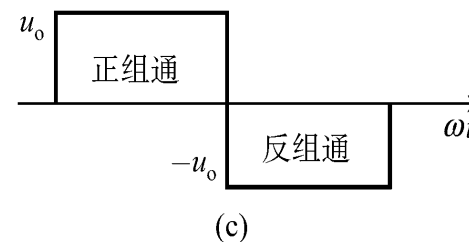
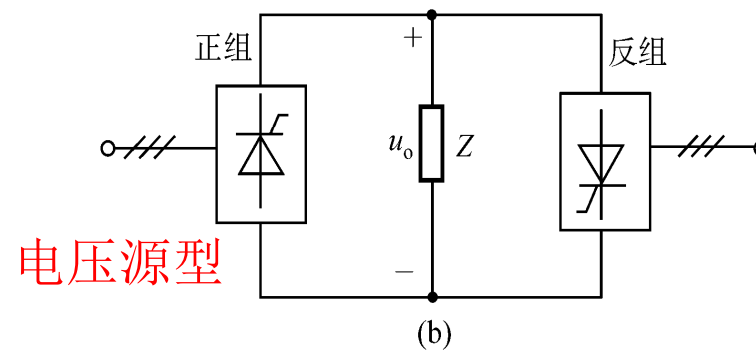
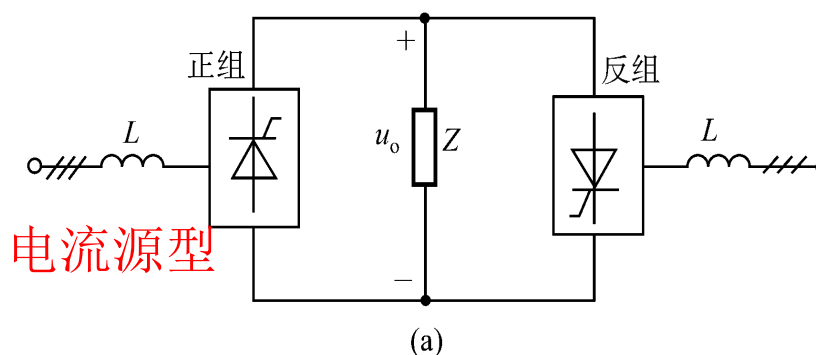
直接将某固定频率交流

→ 可调频率交流的频率变换电路

特点：

一次变换、 $\eta \uparrow$ 、可采用电网换流

### 1、三相—单相交—交变频电路



## (1) 工作原理

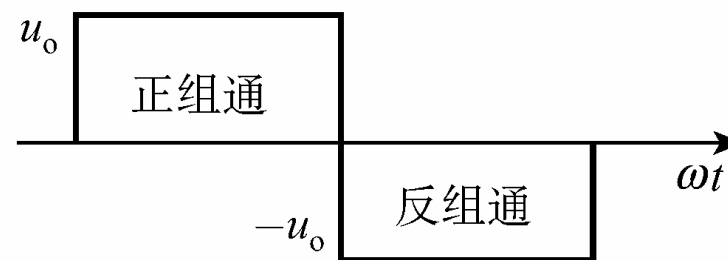
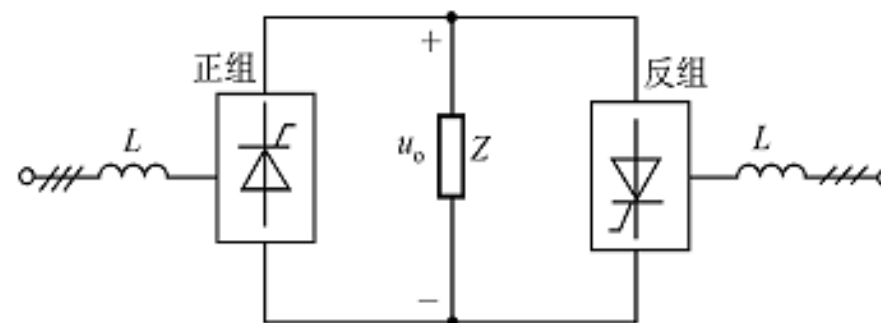
正组整流，反组封锁， $u_o$ 上(+)下(-)

反组整流，正组封锁， $u_o$ 上(-)下(+)

可得交变电压  $f_1$  为切换频率

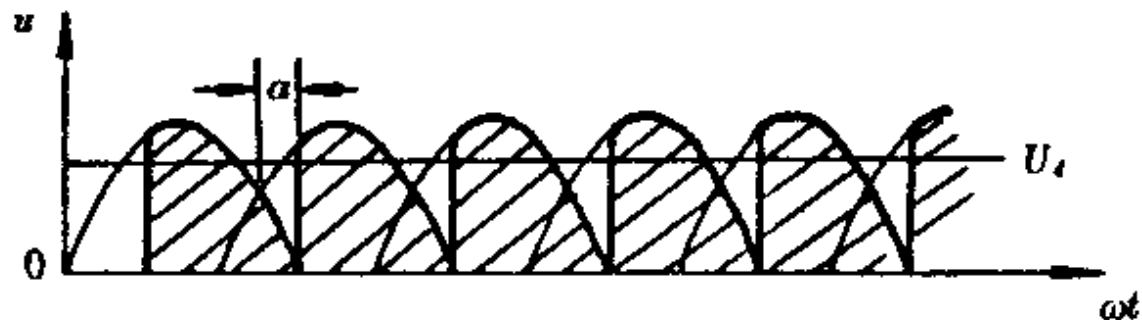
经晶闸管整流后得到，故不能高于电网频率

最高频率为电网频率的  $1/3 \sim 1/2$



## (2) 正弦波交—交变频器

方波:



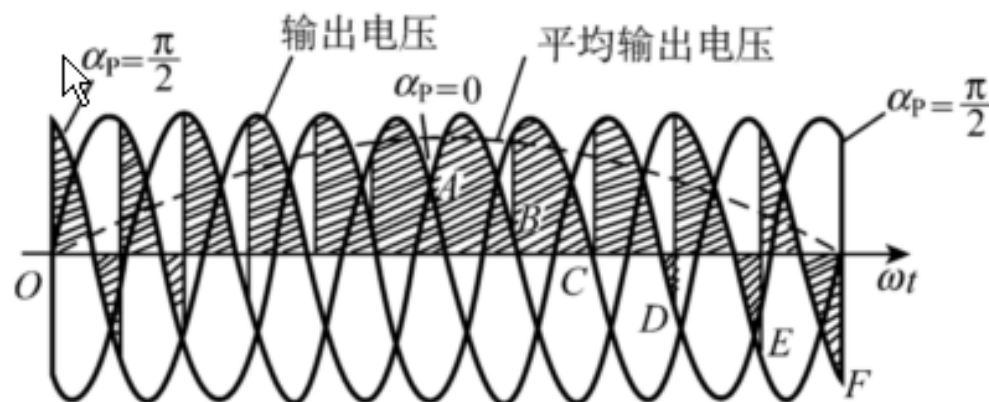
正弦波:

半个周期内，导通组控制角不是固定值。

$$\alpha = 90^\circ \rightarrow \alpha = 0^\circ \rightarrow \alpha = 90^\circ$$

整流输出平均值

近似正弦波 变化



### (3) 余弦交点控制法

正反组为三相桥式电路时，加在负载上的瞬时电压可能是 $u_{ab}$ ， $u_{ac}$ ， $u_{bc}$ ， $u_{ba}$ ， $u_{ca}$ ， $u_{cb}$ ，六种线电压，它们在相位关系上依次相差 $60^\circ$ ，用 $u_1 \sim u_6$ 表示为：

$$u_1 = \sqrt{2}U \sin \omega t$$

$$u_2 = \sqrt{2}U \left( \sin \omega t - 1\frac{\pi}{3} \right)$$

$$u_3 = \sqrt{2}U \left( \sin \omega t - 2\frac{\pi}{3} \right)$$

$$u_4 = \sqrt{2}U \left( \sin \omega t - 3\frac{\pi}{3} \right)$$

$$u_5 = \sqrt{2}U \left( \sin \omega t - 4\frac{\pi}{3} \right)$$

$$u_6 = \sqrt{2}U \left( \sin \omega t - 5\frac{\pi}{3} \right)$$



### (3) 余弦交点控制法

期望输出电压为一个理想的正弦波，可表示为：

$$u_R = \sqrt{2}U_1 \sin \omega_1 t$$

为使实际输出正弦电压波形的偏差尽可能小，应随时将第一个晶闸管导通时电压偏差 $u_R - u_1$ 与让下一个管子导通时的偏差 $u_R - u_2$ 相比较，如果 $(u_R - u_1) < (u_R - u_2)$ ，则第一个管子继续导通；若 $(u_R - u_1) > (u_R - u_2)$ ，则应该及时切换至下一个管子使其导通。因此 $u_1$ 导通换相至 $u_2$ 导通的条件为：

$$u_R - u_1 = u_2 - u_R \quad \Rightarrow \quad u_R = \frac{u_1 + u_2}{2}$$

$u_i$ 导通换相至 $u_{i+1}$ 导通的条件为：

$$u_R = \frac{u_i + u_{i+1}}{2}$$



### (3) 余弦交点控制法

$$u_R = \frac{u_i + u_{i+1}}{2}$$

当 $u_i$ 与 $u_{i+1}$ 都为正弦波时， $u_R$ 也为正弦波，如下图虚线所示。这些正弦波的峰值正好处于 $u_{i+1}$ 波上相当于触发角 $\alpha=0^\circ$ 的位置上，因此这个波即为 $u_{i+1}$ 波触发角 $\alpha$ 的余弦函数，常称为处于 $u_{i+1}$ 的同步波。

由于换相点满足

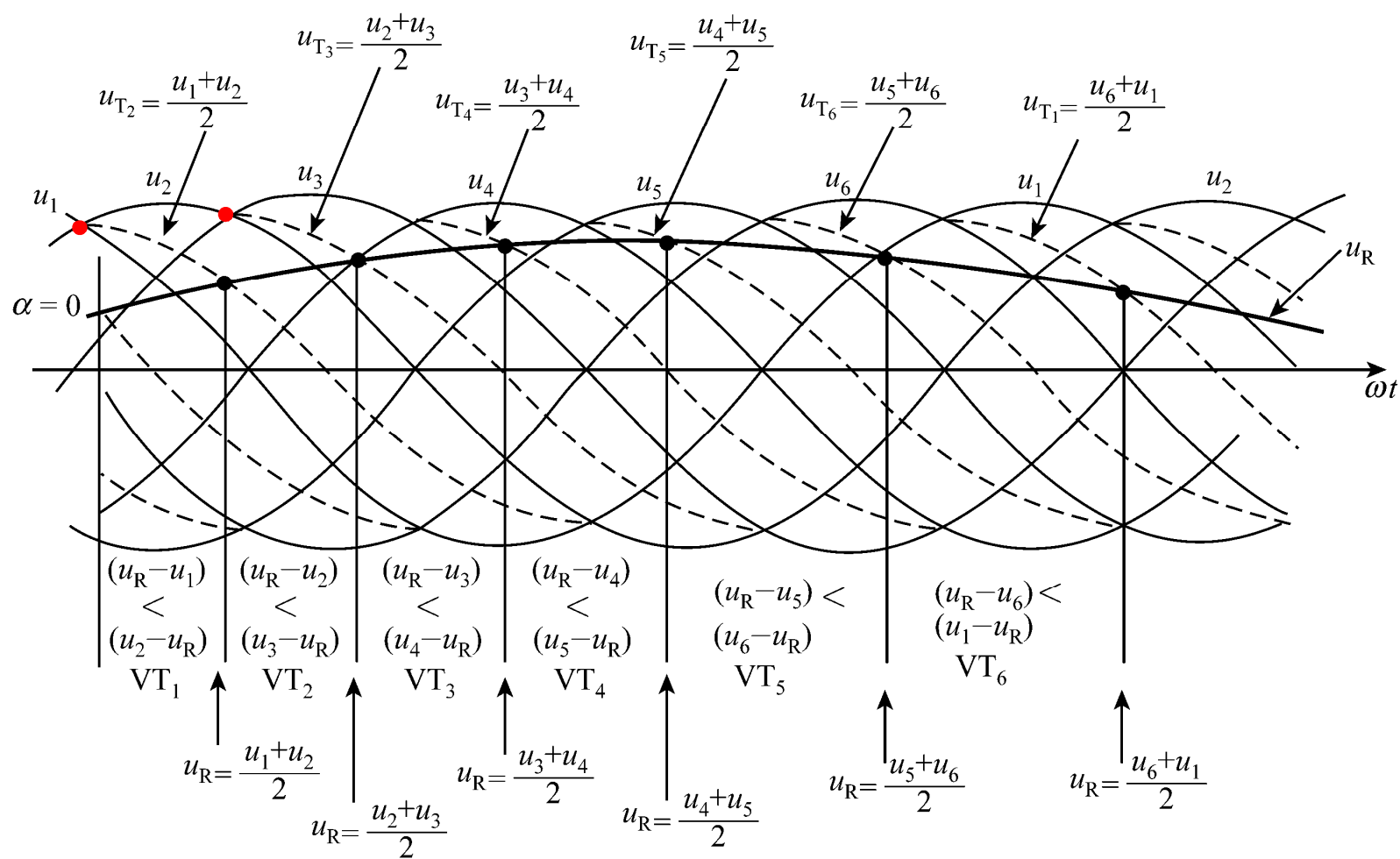
$$u_R = u_T = \frac{u_i + u_{i+1}}{2}$$

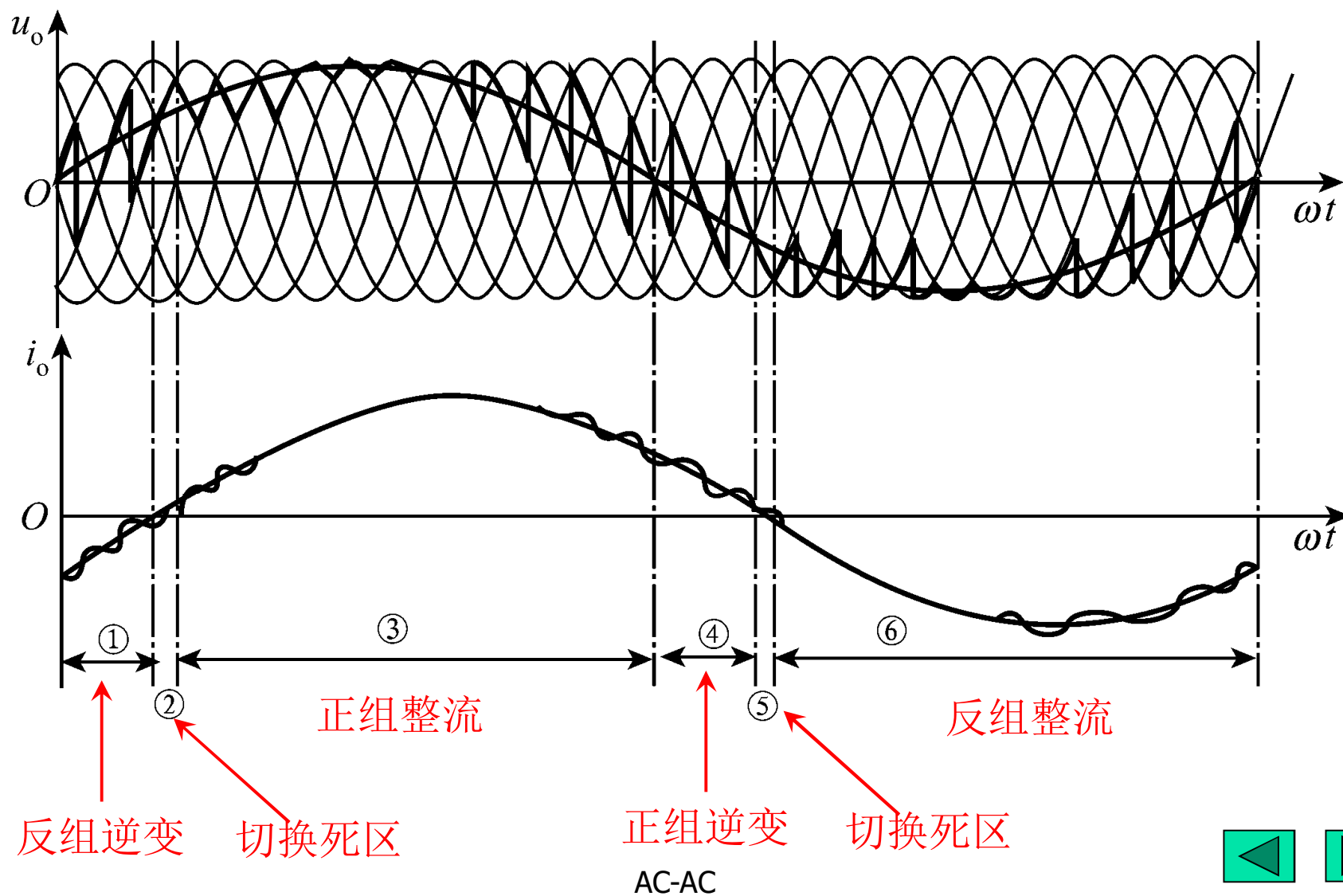
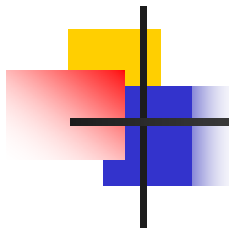
故应该在 $u_R$ 与 $u_T$ 的交点上发出触发脉冲。





### (3) 余弦交点控制法





输出频率上限:

常用的六脉波三相桥式变频电路的上限频率不能高于电网频率的 $1/3 \sim 1/2$ , 否则输出电压波形畸变严重。

输入功率因数:

分析复杂, 可参考P248页教材

输出电压谐波:

与输入频率, 输出频率, 电路脉动数有关。参考教材P249页。

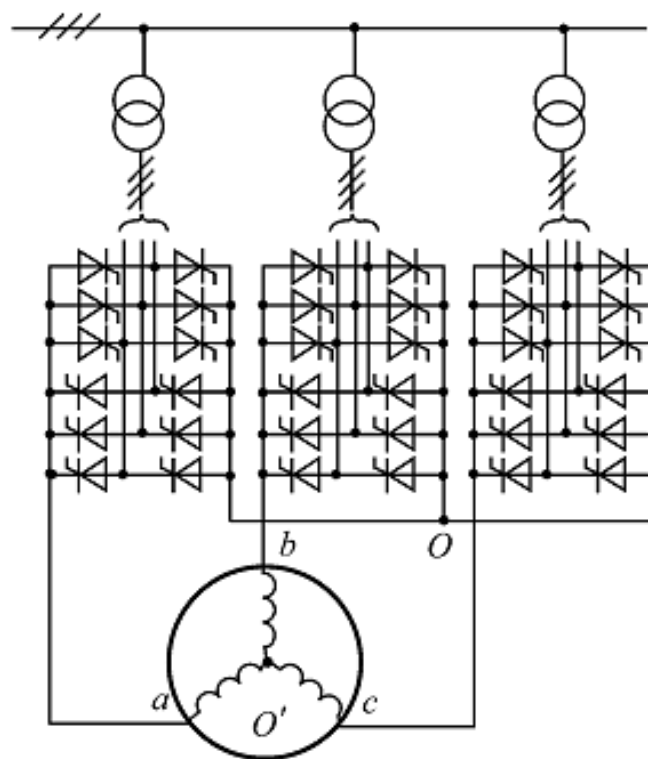
输入电流谐波:

与输入频率及输出频率有关, 参考教材P249页。

## 2、三相—三相 交—交变频电路

半波整流：18个元件

桥式整流：36个元件



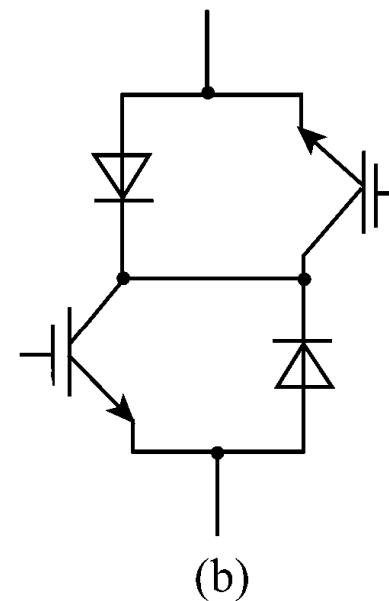
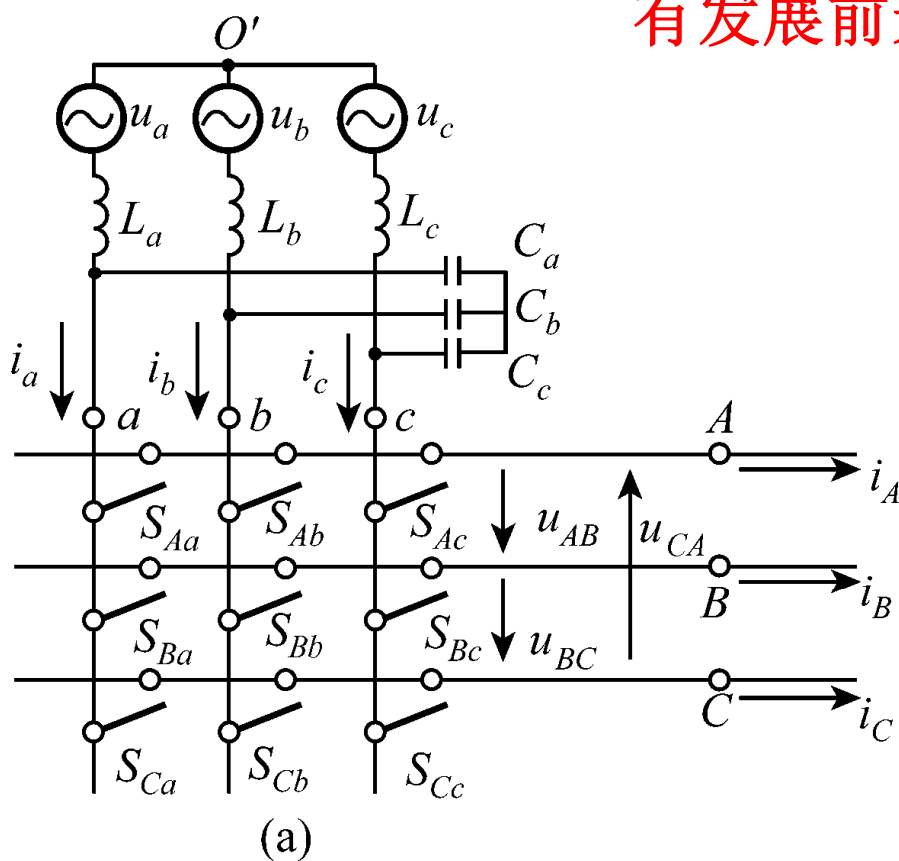
## 2、三相—三相交—交变频电路

分析复杂，参见教材P250页。

P251页 表6-2 交交变频与交直交变频电路的比较。

### 三、矩阵式变换电路

有发展前景，分析建模复杂



组合双向开关，有多种形式

作业:

P. 250 习题1、7

