

东南大学

电力电子技术

第 11 讲

主讲教师：王念春

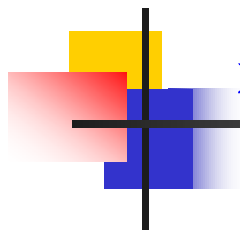
380419124@qq.com





交流—直流 (AC-DC) 变换 (一)





讨论：

- (1) 主电路形式
- (2) 结构特点
- (3) 工作原理
- (4) 工作特性
- (5) 电压电流波形
- (6) 数量关系



负载： 电阻性， 电感性， 电容性， 反电势

分类： 电路形式(桥式、 零式)

相数(单相、 三相、 多相)

控制方式(相控、 斩控)

器件(半控式、 全控式)

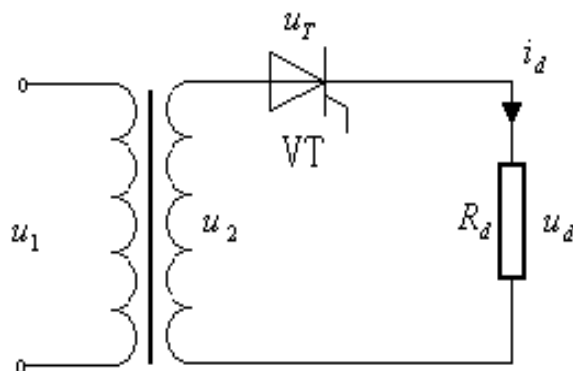
工作范围(单象限、 多象限)



一、单相可控整流电路

1、单相半波可控整流电路

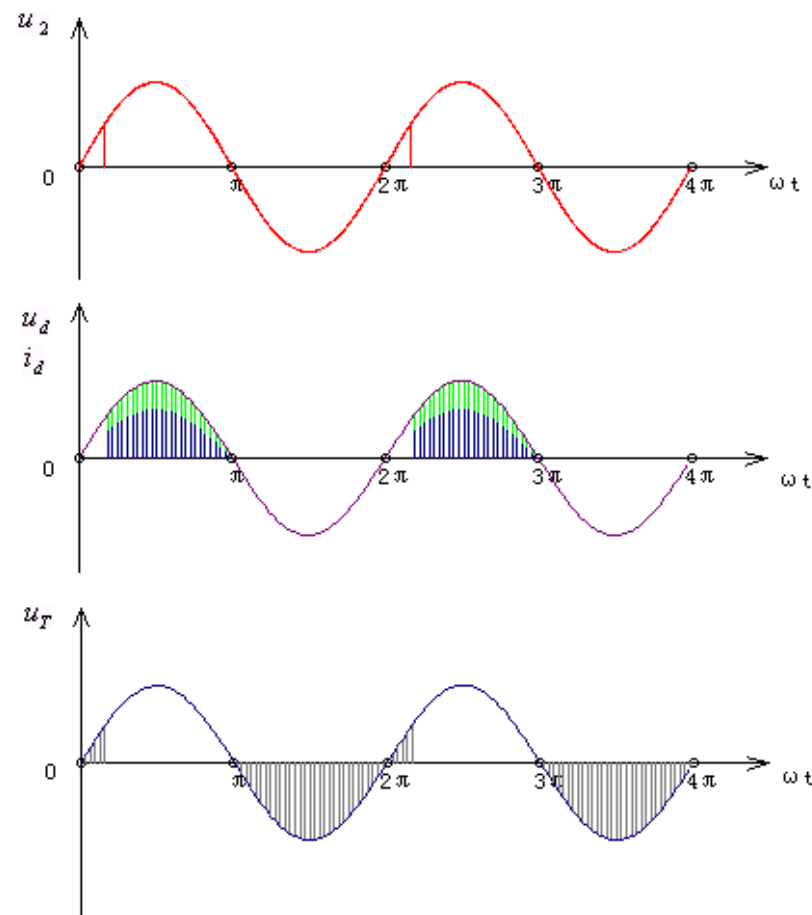
(1) 电阻性负载



α 和 θ 的定义

$$\theta = \pi - \alpha$$

移相与同步的概念



基本概念：控制角 α ，导通角 θ ，移相，移相范围，同步，换相或换流

注意符号表示：交流侧，直流侧；大写，小写，有效值，平均值，瞬时值。



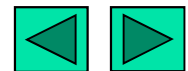
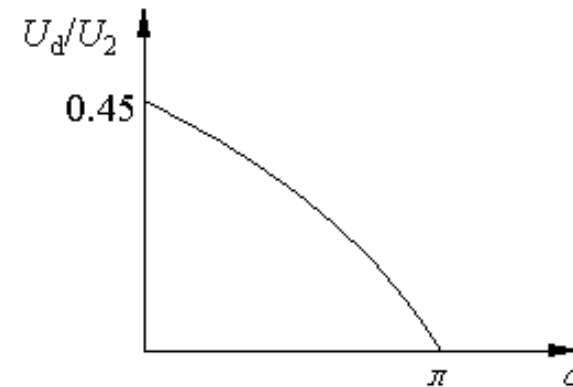
直流平均电压 U_d

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t \\
 &= \frac{\sqrt{2}U_2}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \\
 &= 0.45U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}
 \end{aligned}$$

$$U_d = f(\alpha) \quad \alpha=0 \quad \theta=\pi \quad U_d = 0.45U_2$$

$$\alpha=\pi \quad \theta=0 \quad U_d = 0$$

移相范围 180°



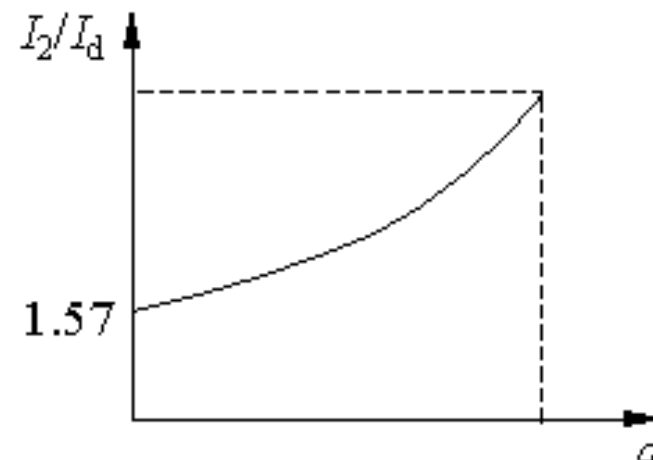
直流电流有效值

$$\begin{aligned}
 I_T = I_2 &= \sqrt{\frac{1}{2p} \int_0^p \left(\frac{U_d}{R_d} \right)^2 d\omega t} \\
 &= \frac{U_2}{R_d} \sqrt{\frac{1}{4p} \sin 2a + \frac{p-a}{2p}}
 \end{aligned}$$

直流电流的平均值为

$$I_d = U_d / R_d = 0.45 U_2 / R_d \frac{1 + \cos a}{2}$$

$$\frac{I_2}{I_d} = \frac{\sqrt{p \sin 2a + 2p(p-a)}}{\sqrt{2}(1 + \cos a)}$$



功率因数

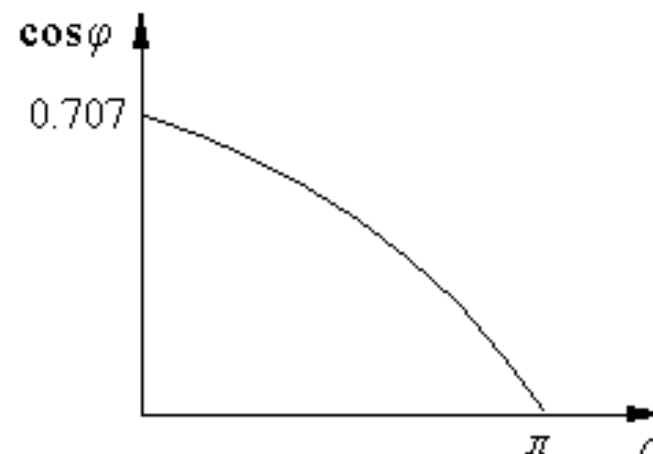
$$\cos j = \frac{p}{s} = \frac{UI_2}{U_2 I_2}$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{2p} \int_0^p (\sqrt{2}U_2 \sin \omega t)^2 d\omega t}$$

$$= U_2 \sqrt{\frac{1}{4p} \sin 2a + \frac{p-a}{2p}}$$

$$\cos j = \sqrt{\frac{1}{4p} \sin 2a + \frac{p-a}{2p}}$$

$\alpha = 0$, $\cos \varphi = 0.707$ 纯电阻负载，功率因数为什么不等于1？



注意功率因数概念的扩展。电感、电容影响功率因数，波形缺失也影响功率因数。



东南大学

电力电子技术

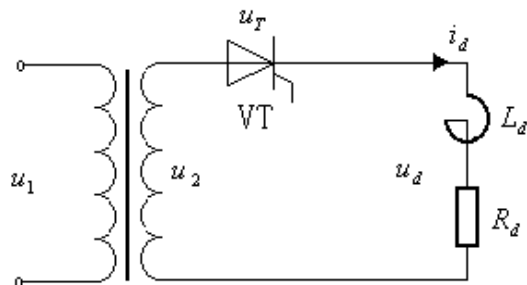
第 12 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



(2) 电感性负载



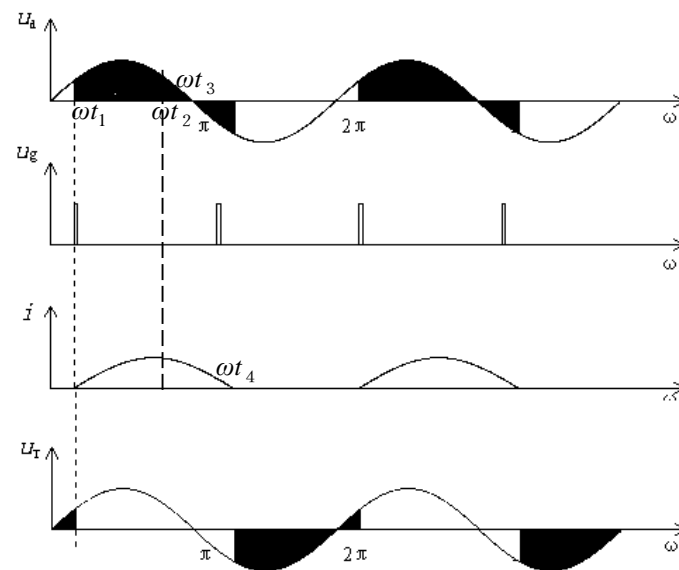
$\omega t = 0 \sim \alpha$: 阻断 $u_d = 0$, $u_T = u_2$
 $\omega t_1 \sim \omega t_2$: 导通 $u_d = u_2$, $u_T = 0$

I_d 在 ωt_2 时 i_d 最大, e_L 上(+)下(-), 但 $(u_2 + e_L) > 0$ 导通

$\omega t_2 \sim \omega t_3$: 导通 $u_d = u_2$, $u_T = 0$

I_d 达 i_{dmax} 时, e_L 上(-)下(+), 维持导通 $(u_2 + e_L) > 0$

$\omega t_3 \sim \omega t_4$: $u_2 < 0$, 但 e_L 上(-)下(+), 仍导通 $(u_2 + e_L) > 0$



结论:

L_d 存在, 使 $\theta \uparrow \rightarrow U_d \downarrow$ (有负面积)

$\alpha \uparrow \rightarrow$ 导通延迟 \rightarrow 正半周储能 $\downarrow \rightarrow$ 导通能力差 $\theta \downarrow$

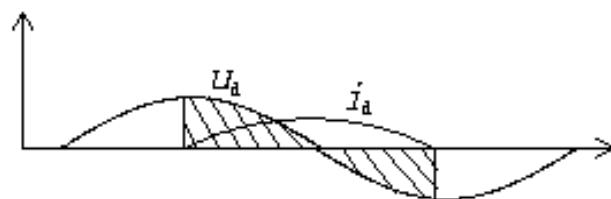
$j = tg^{-1} \frac{\omega L_d}{R_d} \uparrow \rightarrow L_d \uparrow \rightarrow$ 储能 $\uparrow \rightarrow$ 导通能力 $\theta \uparrow$



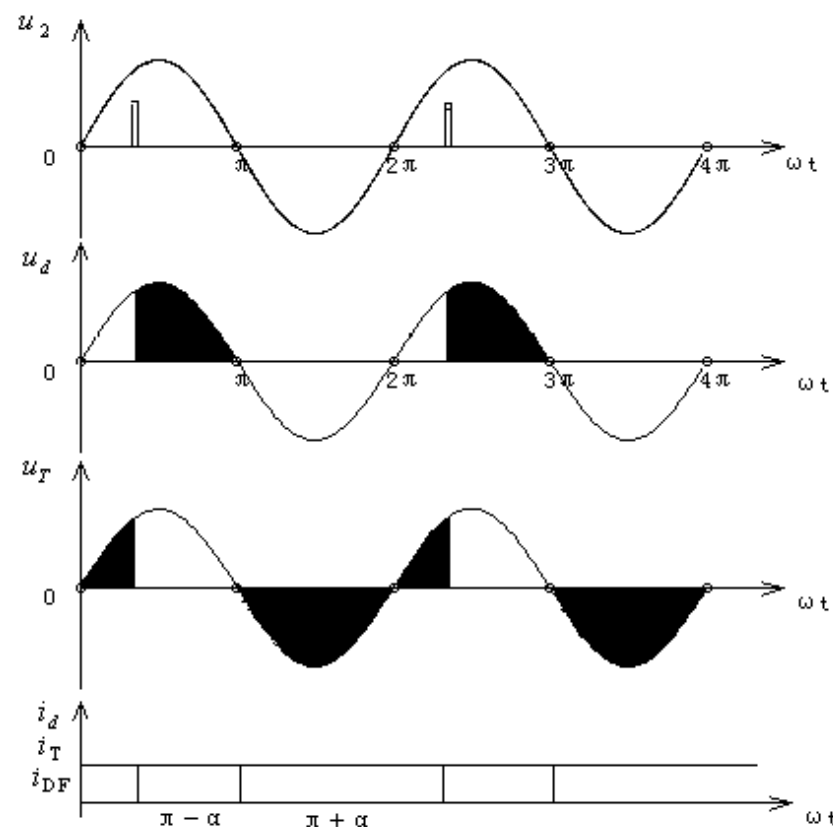
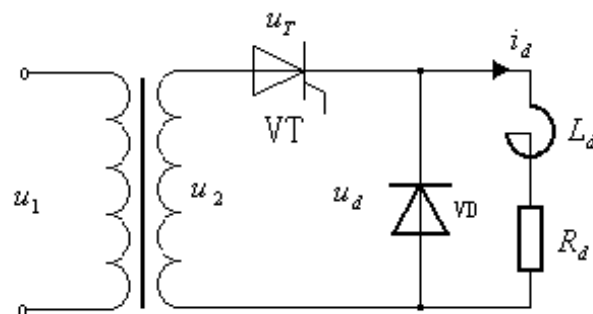
(3) 续流二极管的作用

如 $\omega L_d \gg R_d$, $\varphi = \pi/2$

正负面积近似相等, $U_d \approx 0$



加 VD_F 改进



直流平均电压 U_d

$$U_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{2p} (1 + \cos\alpha) = 0.45U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

晶闸管电流 $\theta = \pi - \alpha$

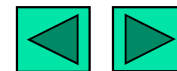
$$I_{dT} = \frac{p - \alpha}{2p} I_d$$

$$I_T = \sqrt{\frac{p - \alpha}{2p}} I_d$$

续流二极管电流 $\theta = \pi + \alpha$

$$I_{dDF} = \frac{p + \alpha}{2p} I_d$$

$$I_{DF} = \sqrt{\frac{p + \alpha}{2p}} I_d$$



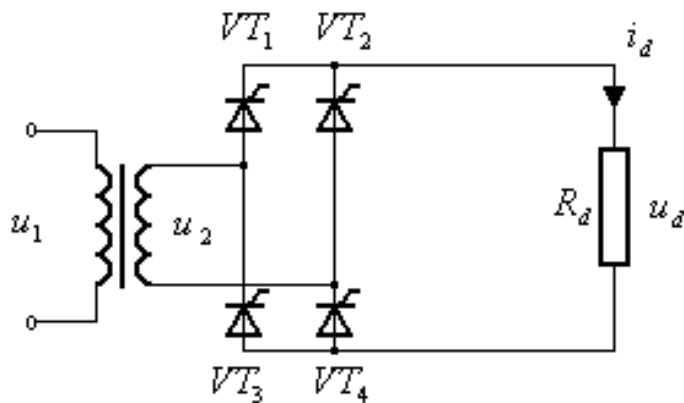
晶闸管及续流二极管承受的最大正、反向峰值电压均为
交流电压的最大值 $\sqrt{2}U_2$

特点： 简单，成本低，调整方便
波形差，脉动、 I_2/I_d 大

直流分量 \rightarrow 直流磁化 \rightarrow 饱和 $\rightarrow B \downarrow \rightarrow S_{fe} \uparrow \rightarrow$ 变压器体积 $\uparrow \rightarrow Cu, Fe \uparrow$

2、 单相桥式全控整流电路

(1) 电阻性负载

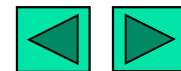
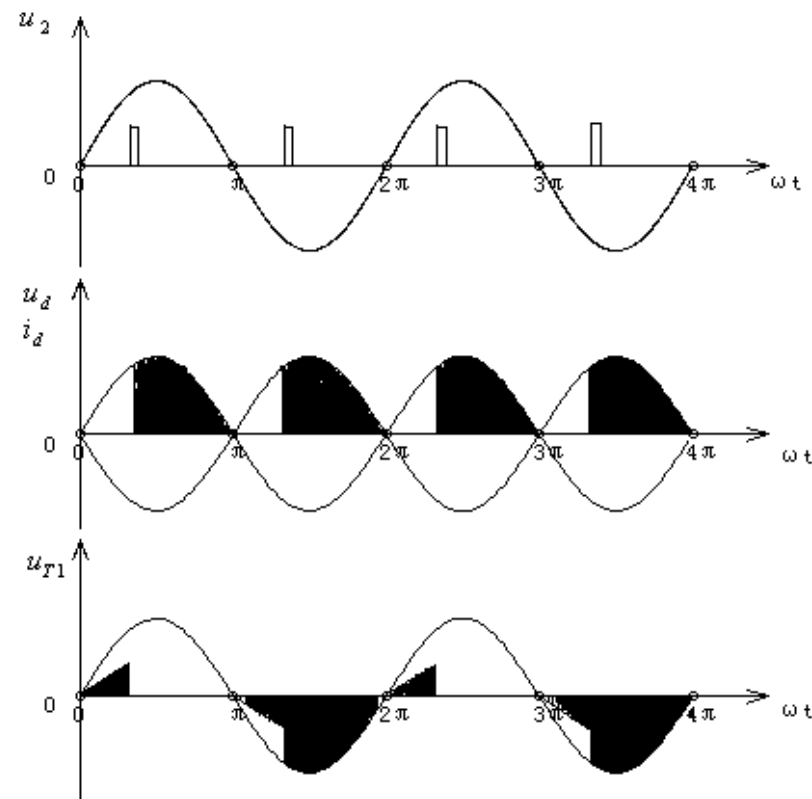


工作原理

正半周: $0 \sim a$, $a \sim p$

负半周: $p \sim p + a$, $p + a \sim 2p$

变压器副边绕组有正反电流, 平均值为零, 没有直流磁化现象



基本数量关系

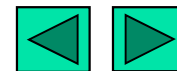
直流平均电压 U_d

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

直流电流平均值 I_d 、有效值 I_2

$$I_d = U_d / R_d = 0.9 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2} U_2}{R_d} \sin \omega t \right)^2 d\omega t} = \frac{U_2}{R_d} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$



晶闸管电流平均值、有效值

$$I_{dT} = \frac{1}{2} I_d = 0.45 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_2}{R_d} \sin \omega t \right)^2 d\omega t} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_2$$

晶闸管承受的最大反向峰值电压为相电压峰值

$$U_{TM} = \sqrt{2}U_2$$



东南大学

电力电子技术

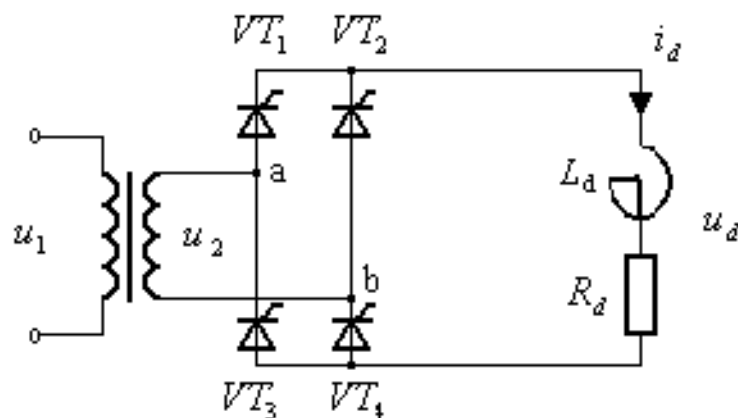
第 13 讲

主讲教师：王念春

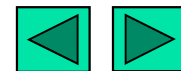
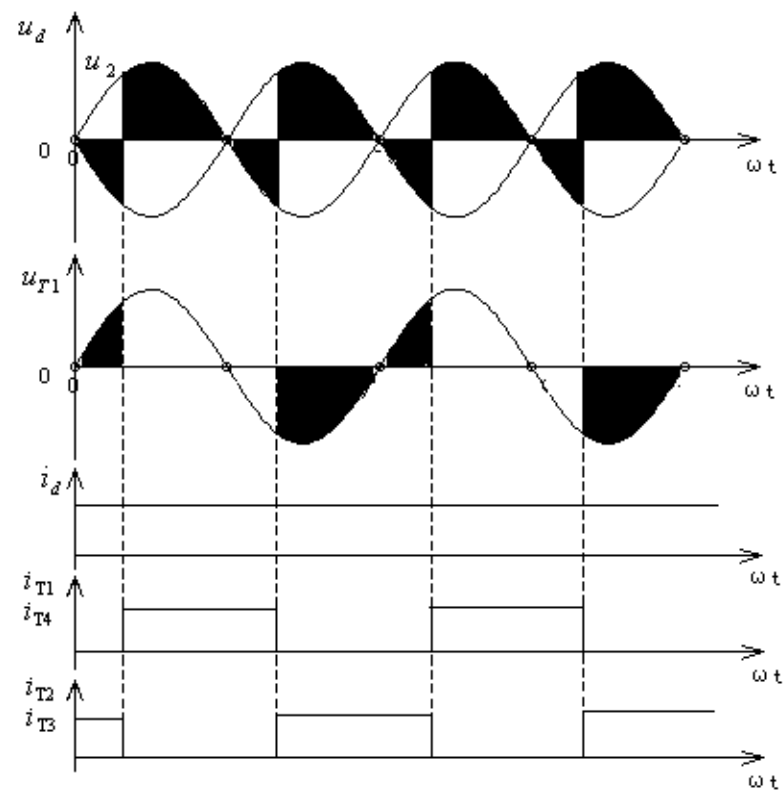
380419124@qq.com



(2) 电感性负载P99页

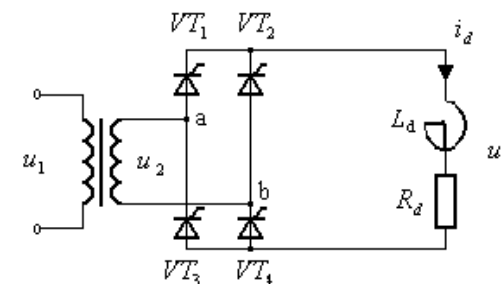


工作原理

 ωL_d 很大, i_d 连续、平直在 $\omega t = 0 \sim \pi$: u_2 正半周内, a点电位为(+), b点(-)在 $\omega t = \pi \sim 2\pi$: u_2 负半周, b点为(+), a点为(-)

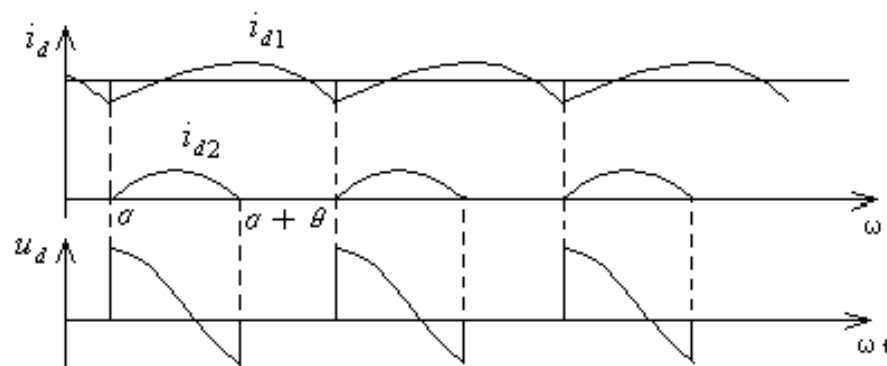
直流平均电压

$$U_d = \frac{1}{\rho} \int_a^{p+a} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.9 U_2 \cos \alpha$$



直流电流平均值、有效值

$$I_d = \frac{1}{\rho} \int_a^{p+a} i_d d\omega t$$



回路电压方程 $L_d \frac{di_d}{dt} + R_d i_d = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$

$$\int_a^{p+a} L_d \frac{di_d}{dt} d\omega t + \int_a^{p+a} R_d i_d d\omega t = \int_a^{p+a} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t$$

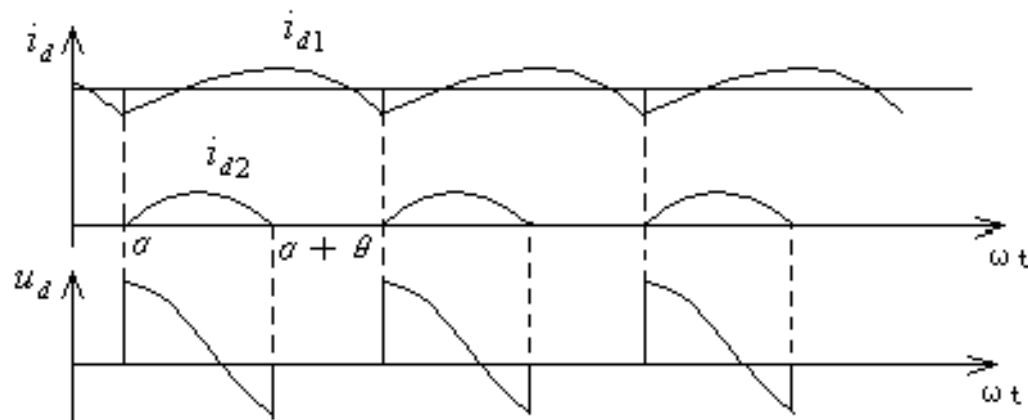


注意：电感电压一个导通周期内的平均值等于零

$$\int_0^{I_a+q} \omega L_d di_d + \int_0^{a+q} R_d i_d d\omega t = \int_0^{a+q} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t$$

$$0 + R_d I_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} \int_0^{a+q} \sin \omega t d\omega t = U_d$$

$$\text{即 } I_d = \frac{U_d}{R_d}$$



晶闸管电流平均值、有效值

$$I_{dT} = \frac{1}{2} I_d$$

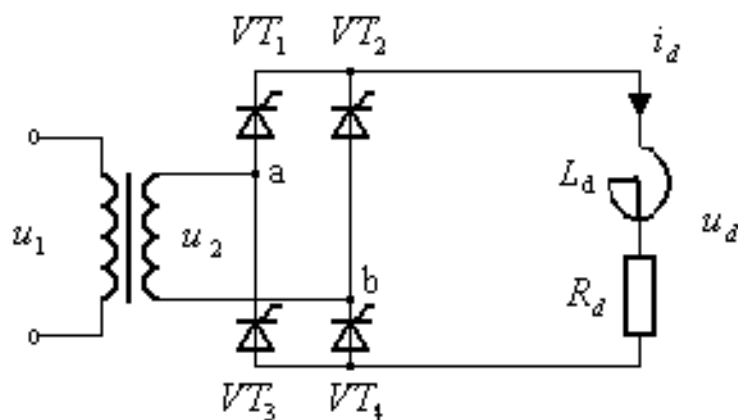
$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \pi I_d^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d$$

晶闸管承受的最大正、反向电压均为相电压峰值

$$U_{TM} = \sqrt{2} U_2$$



大电感负载加续流二极管



加续流二极管后的变化？

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

大电感负载加续流二极管

负载电流由晶闸管与二极管提供，确定晶闸管一个周期内的导通时间，二极管一个周期内的导通时间后确定。

注意电流平直近似为直线，计算得到简化。

(3) 反电势负载

1) 电阻—反电势负载

$$\textcircled{1} U_2 > E \text{ 导通 } U_d = U_2 = E + i_d R_d$$

$$U_2 = E \text{ 关断 } i_d = 0$$

\textcircled{2} 停止导电角 δ

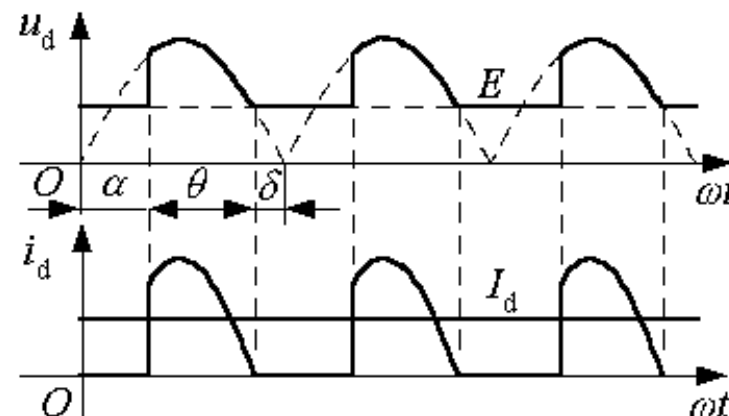
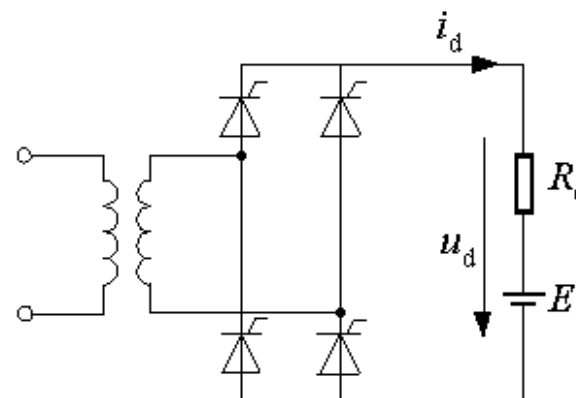
$$\delta = \sin^{-1}(E / \sqrt{2} U_2)$$

 $\alpha \geq \delta$ 时

 $\theta: \alpha \sim \pi - \delta$
 $\theta = \pi - \delta - \alpha < \pi$ 断续

 $\alpha < \delta$ 时

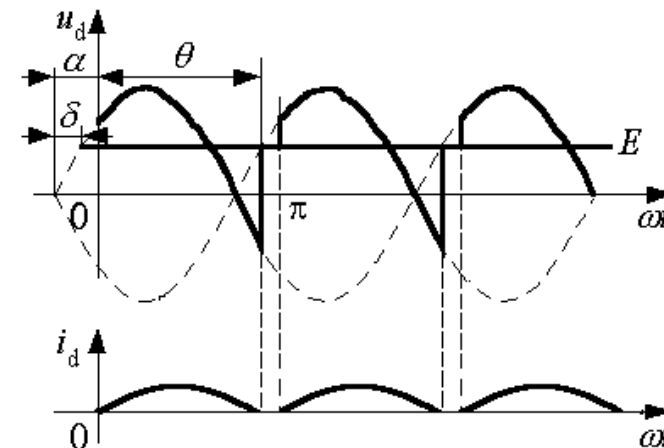
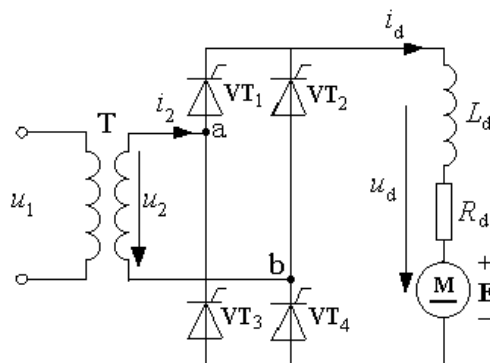
 $\theta: \delta \sim \pi - \delta, \theta = \pi - 2\delta < \pi$

 断续 (要正常导通, 脉宽应 $> \delta - \alpha$)


2) 电感-反电势负载

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t + a)$$

$$u_2 = L_d \frac{di_d}{dt} + R_d i_d + E$$



$$i_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{R_d} \left[\frac{E}{\sqrt{2}U_2} - \cos j \sin(a - j) \right] \frac{\omega}{\omega} + \cos j \sin(\omega t + a - j) - \frac{E}{\sqrt{2}U_2} \frac{\omega}{\omega}$$

$$j = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_d}{R_d} \right)$$



代入 $\omega t = 0$ 时, $i_d = 0$

$\omega t = \theta$ 时, $i_d = 0$

$$\frac{E}{\sqrt{2}U_2} (1 - e^{-\frac{\alpha}{\tan \beta}}) = \frac{\hat{e}}{\hat{e}} \sin(\alpha + \beta - \gamma) - \sin(\beta - \alpha) e^{-\frac{\alpha}{\tan \beta}} \frac{\hat{u}}{\hat{u}} \cos \beta$$

给定 E 、 φ 、 α , 图解法求 θ

反电势的影响:

- (1) 机械特性变软
- (2) 换向困难
- (3) 电流容量上升

P142页第7题。加入大电感使电流连续，平直近似一条直线。



东南大学

电力电子技术

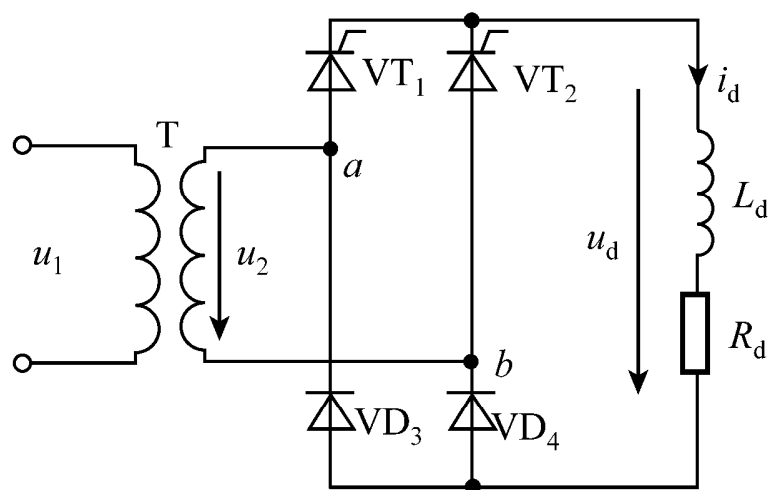
第 14 讲

主讲教师：王念春

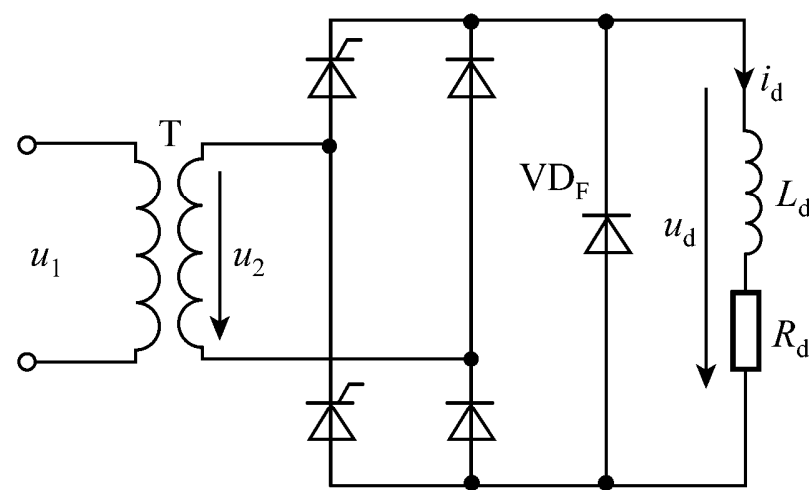
380419124@qq.com



(4) 单相桥式半控整流电路



(a)

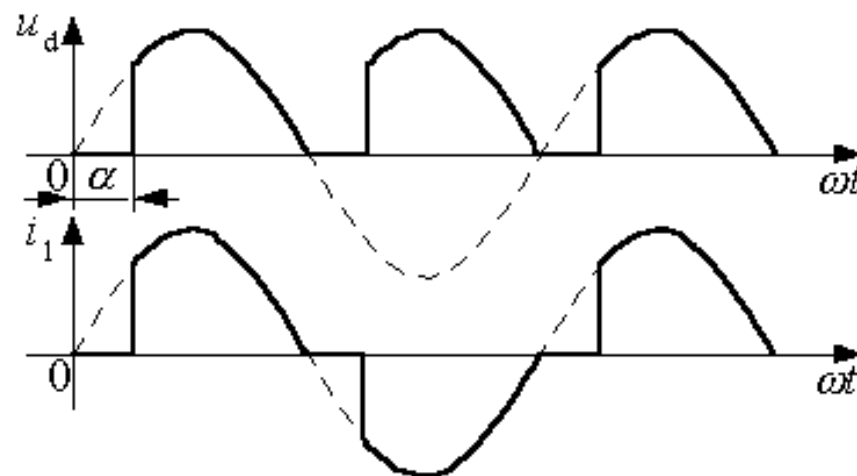
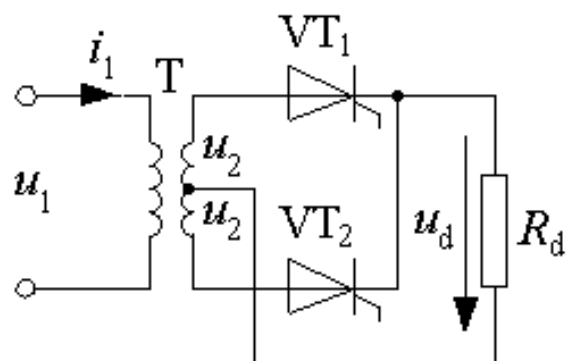


(b)

注意阻力最小路径！

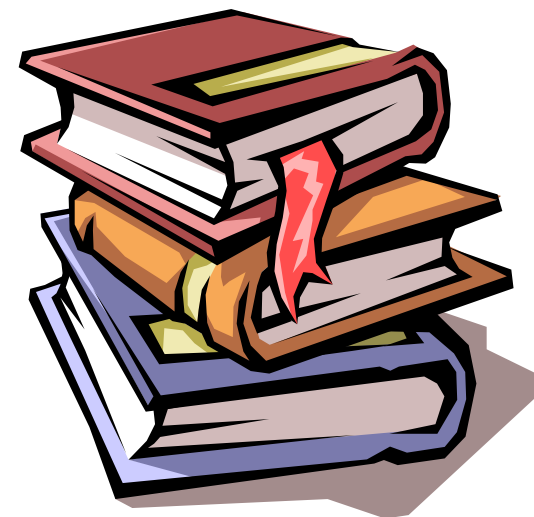
4、单相双半波可控整流电路

P142页第5题



建议作业:

P.142 习题 4、6、8



东南大学

电力电子技术

第 15 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



P141习题

第1题：可控整流电路纯电阻负载下，电阻上的平均电流与平均电压的乘积 $U_d I_d$ 是否等于负载功率？为什么？大电感负载下， $U_d I_d$ 是否又等于负载功率，为什么？

思考要点：

负载功率是负载上电流有效值与电压有效值乘积。

电阻性负载时波形的特点，平均值与有效值相等吗？

大电感负载时，电流平直近似为一条直线，电感上电压的平均值为零，负载电压的平均值与电阻电压的平均值相等，这样，负载上的电压与电流均可近似看成方波，方波的平均值与有效值是什么关系？

P141习题

第2题：某单相可控整流电路，给电阻性负载供电和给蓄电池充电时，流过负载电流的平均值相等，试问哪种情况下晶闸管的发热厉害些？

思考要点：

- (1) 晶闸管的发热由流过晶闸管电流的平均值决定，还是有效值决定？
- (2) 蓄电池是反电势负载，在电流平均值相等的情况下，那种情况下晶闸管导通时间要短些？
- (3) 有效值表达式的特点，瞬时值的平方，瞬时值大，有效值也会大！
- (4) 得出合理的结论。

P141习题

第6题：单相桥式可控整流电路，大感负载， $R_d=4\Omega$ ， $U_2=220V$ ，计算当控制角 $\alpha=60^\circ$ 时，直流电压、电流平均值。如果负载两端并接一个续流二极管，直流电压、电流平均值为多少？

思考要点：

大电感负载，用什么公式计算的问题。

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.9U_2 \cos \alpha$$

直流电压

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.9U_2 \cos \alpha = 0.9 \times 220 \times \cos 60^\circ = 99(V)$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 99 / 4 = 24.75(A)$$



P141习题

第6题：单相桥式可控整流电路，大感负载， $R_d=4\Omega$ ， $U_2=220V$ ，计算当控制角 $\alpha=60^\circ$ 时，**直流电压、电流平均值**。如果负载两端并接一个续流二极管，直流电压、电流平均值为多少？

加入续流二极管后，用什么公式计算？

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.9U_2 \cos \alpha$$

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.9U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$



P141习题

第6题：单相桥式可控整流电路，大感负载， $R_d=4\Omega$ ， $U_2=220V$ ，计算当控制角 $\alpha=60^\circ$ 时，直流电压、电流平均值。如果负载两端并接一个续流二极管，直流电压、电流平均值为多少？

加入续流二极管后，用什么公式计算？

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$U_d = 0.9 * 220 \frac{1 + \cos 60^\circ}{2} = 148.5(V)$$

$$I_d = 148.5 / 4 = 37.125(A)$$



P141习题

第6题：单相桥式可控整流电路，大感负载， $R_d=4\Omega$ ， $U_2=220V$ ，计算当控制角 $\alpha=60^\circ$ 时，直流电压、电流平均值。如果负载两端并接一个续流二极管，直流电压、电流平均值为多少？

晶闸管与流过续流二极管电流的平均值，有效值。

一个周期内晶闸管导通时间是多少？

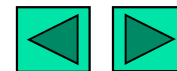
$$180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$$

$$I_{TAV} = \frac{120}{360} I_d = 37.125 / 3 = 12.375(A)$$

一个周期内二极管导通时间是多少？

$$2 * (180^\circ - 120^\circ) = 120^\circ$$

$$I_{DAV} = \frac{120}{360} I_d = 37.125 / 3 = 12.375(A)$$



P141习题

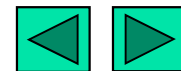
第6题：单相桥式可控整流电路，大感负载， $R_d=4\Omega$ ， $U_2=220V$ ，计算当控制角 $\alpha=60^\circ$ 时，直流电压、电流平均值。如果负载两端并接一个续流二极管，直流电压、电流平均值为多少？

晶闸管与流过续流二极管电流的平均值，有效值。

有效值：

$$I_T = \sqrt{\frac{120}{360}} I_d = 37.125 / \sqrt{3} = 21.43(A)$$

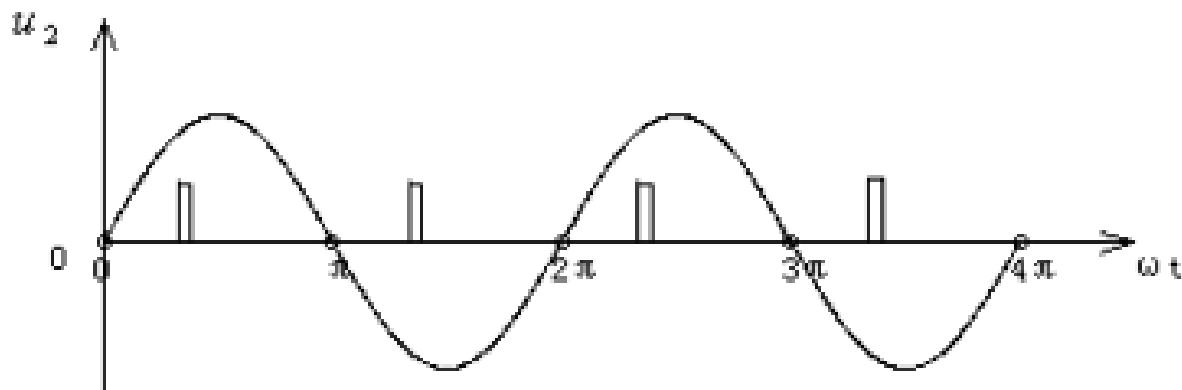
$$I_D = \sqrt{\frac{120}{360}} I_d = 37.125 / \sqrt{3} = 21.43(A)$$



P141习题

第6题：单相桥式可控整流电路，大感负载， $R_d=4\Omega$ ， $U_2=220V$ ，计算当控制角 $\alpha=60^\circ$ 时，直流电压、电流平均值。如果负载两端并接一个续流二极管，直流电压、电流平均值为多少？

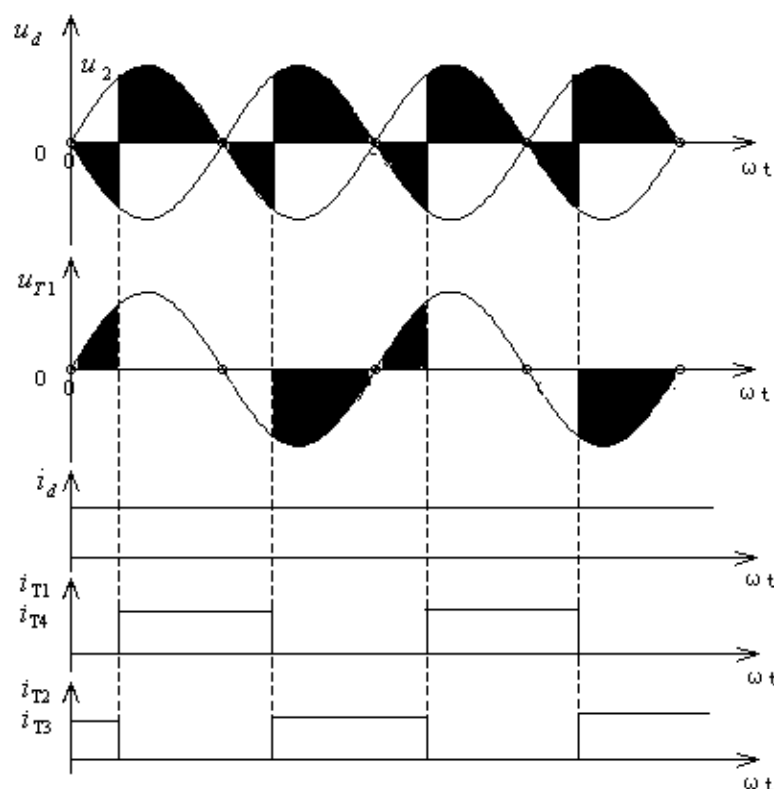
输出电压与电流的波形（无续流二极管）



P141习题

第6题：单相桥式可控整流电路，大感负载， $R_d=4\Omega$ ， $U_2=220V$ ，计算当控制角 $\alpha=60^\circ$ 时，直流电压、电流平均值。如果负载两端并接一个续流二极管，直流电压、电流平均值为多少？

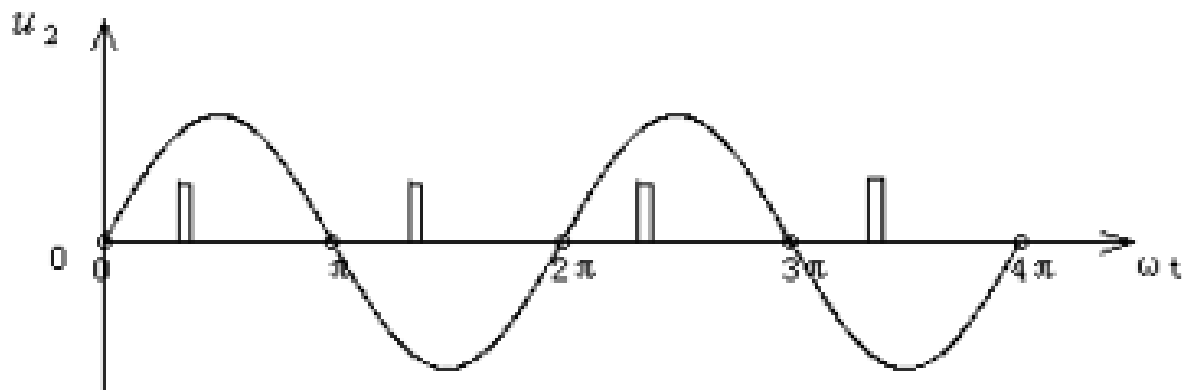
输出电压与电流的波形（无续流二极管）



P141习题

第6题：单相桥式可控整流电路，大感负载， $R_d=4\Omega$ ， $U_2=220V$ ，计算当控制角 $\alpha=60^\circ$ 时，直流电压、电流平均值。如果负载两端并接一个续流二极管，直流电压、电流平均值为多少？

输出电压与电流的波形（有续流二极管）



P141习题

第6题：单相桥式可控整流电路，大感负载， $R_d=4\Omega$ ， $U_2=220V$ ，计算当控制角 $\alpha=60^\circ$ 时，直流电压、电流平均值。如果负载两端并接一个续流二极管，直流电压、电流平均值为多少？

输出电压与电流的波形（有续流二极管）

