

东南大学

电力电子技术

第 16 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com





交流—直流 (AC-DC) 变换(二)



二、 三相可控整流电路

P142页第11题：在三相半波可控整流电路中，如果触发脉冲出现在自然点之前，能否进行换流？可能会出现什么情况？

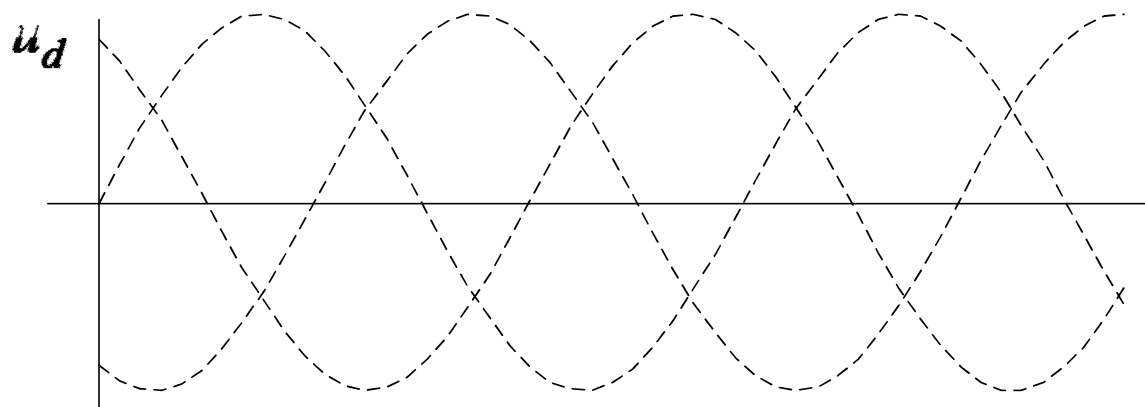
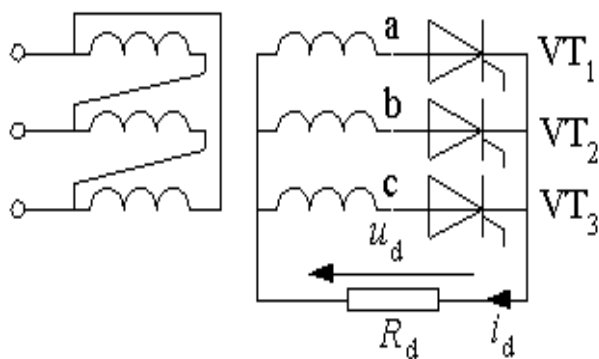
窄脉冲，宽脉冲，单个发，同时发。

什么是窄脉冲？

什么是宽脉冲？

什么是单个发？

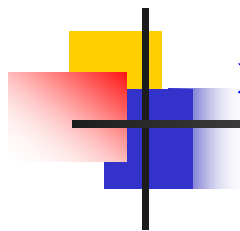
什么是同时发？



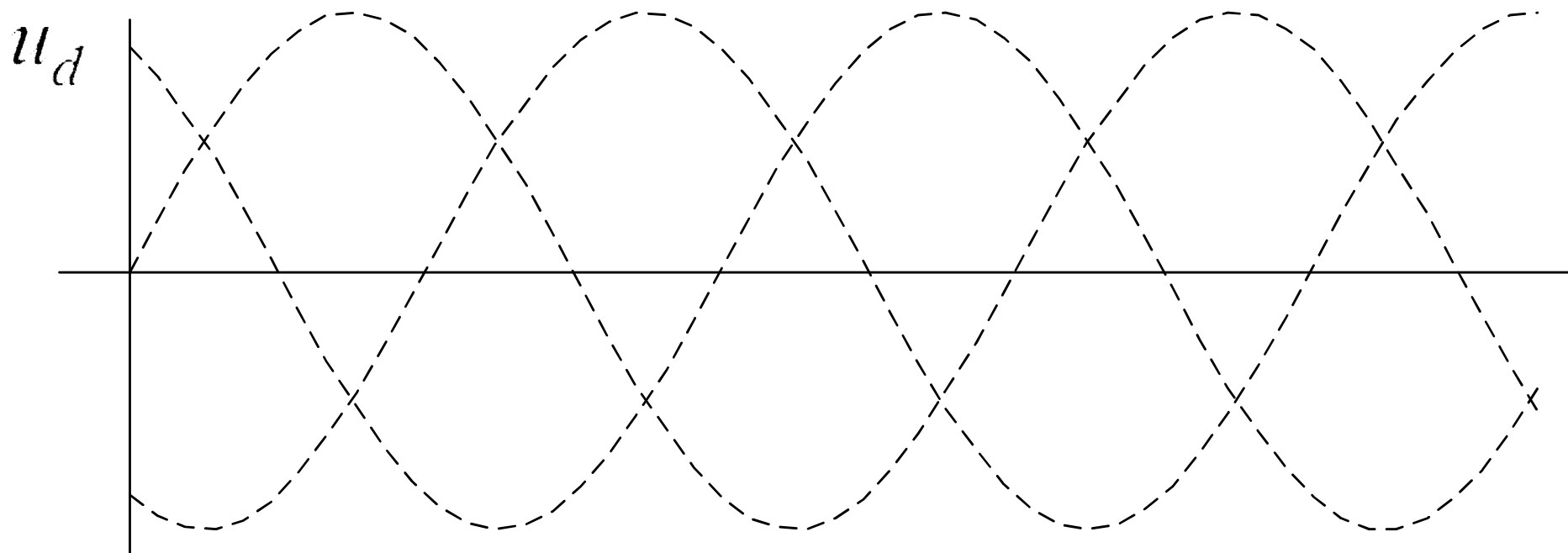
整流电路中不变的因数：

三相脉冲间隔相差120度，由同步电路通过检测电压过零点来保证，也是电力系统稳定运行的基本特征。





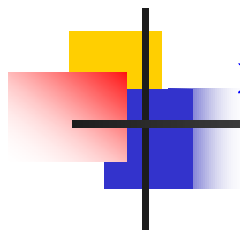
二、 三相可控整流电路



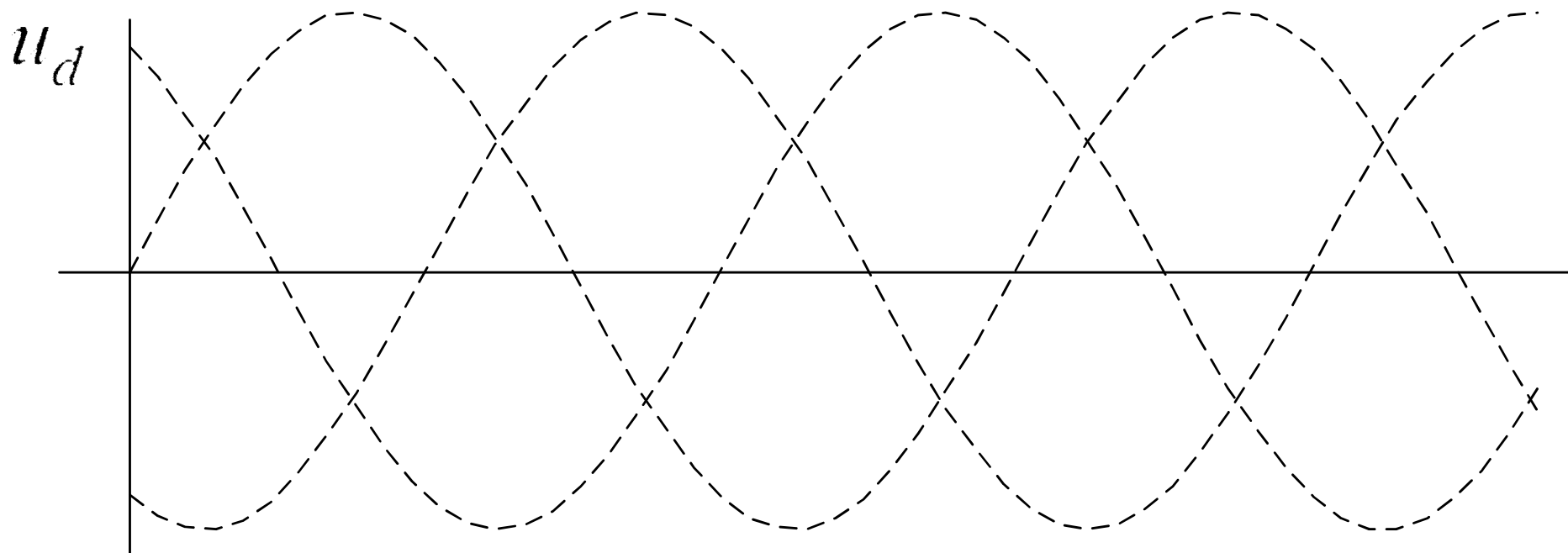
窄脉冲单个发

AC-DC



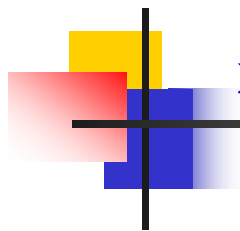


二、 三相可控整流电路

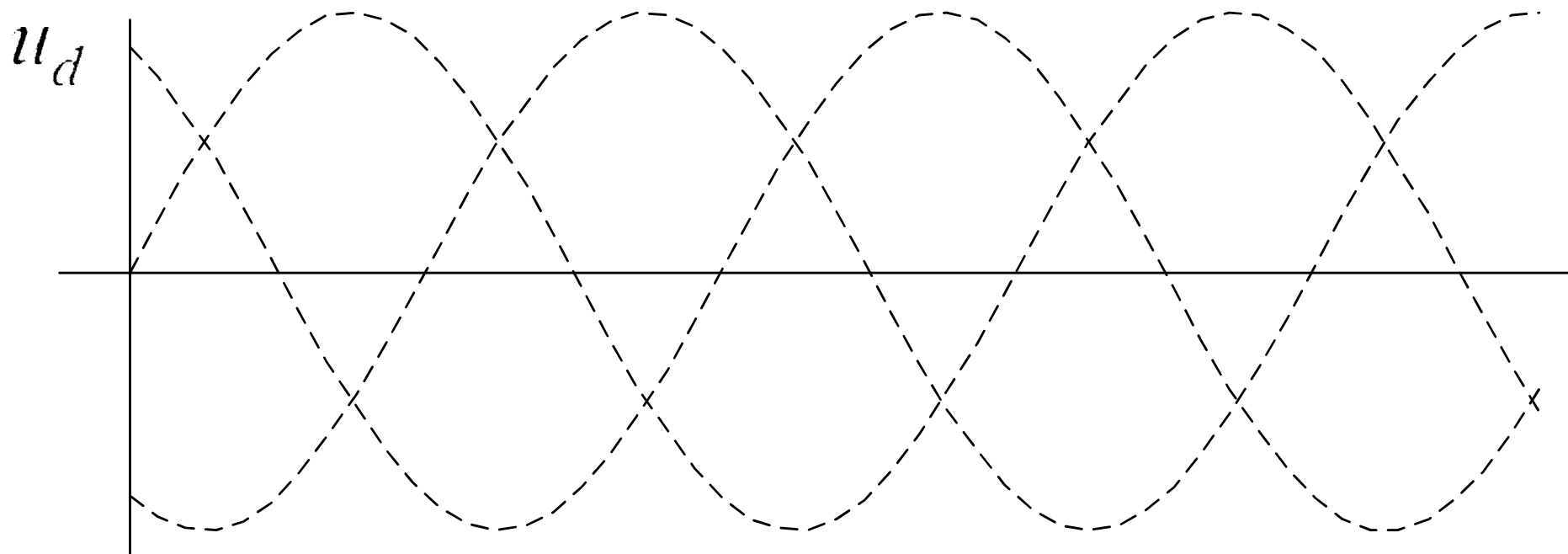


窄脉冲同时发



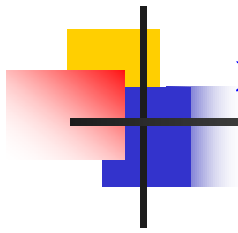


二、 三相可控整流电路

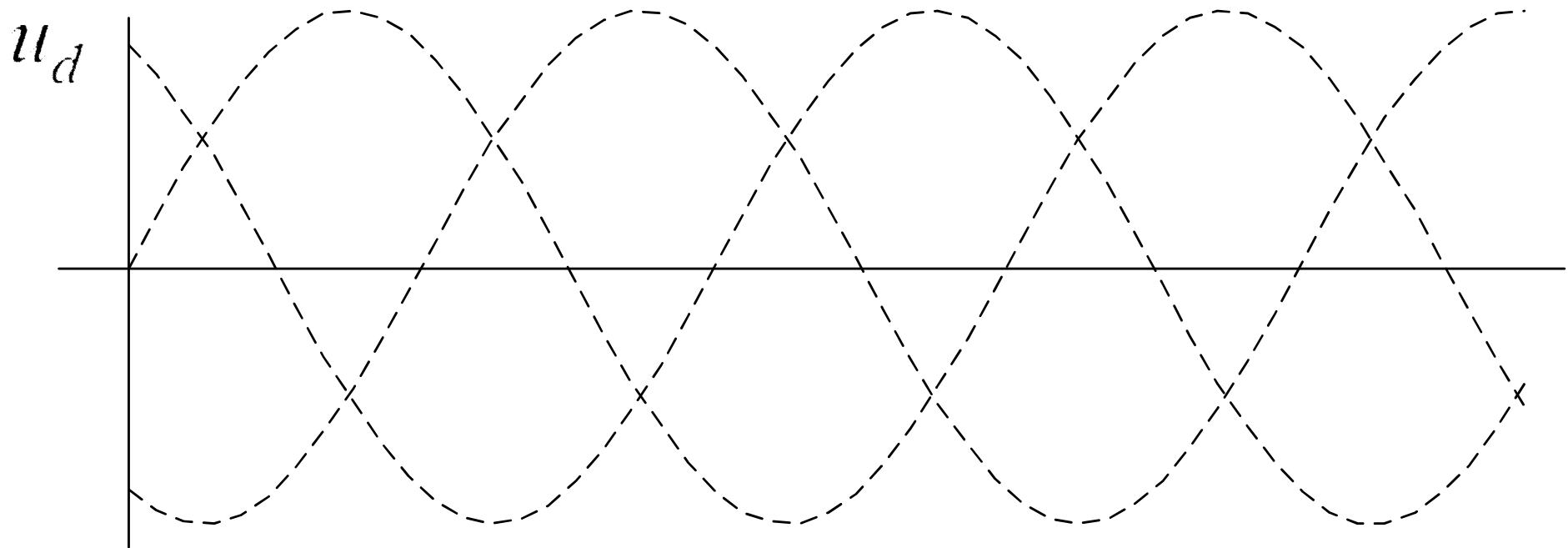


宽脉冲单个发

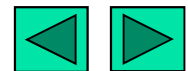




二、 三相可控整流电路



宽脉冲同时发



二、 三相可控整流电路

P142页第11题：在三相半波可控整流电路中，如果触发脉冲出现在自然点之前，能否进行换流？可能会出现什么情况？

结论：

(1) 窄脉冲单个发：

有输出电压波形，一个周期内每相输出不同，输出不对称。

(2) 窄脉冲同时发：

有输出电压波形，输出电压低，输出波形与脉冲不对应。

(3) 宽脉冲单个发：

有输出电压波形，输出电压最大，不可控。

(4) 宽脉冲同时发：

有输出电压波形，输出电压最大，不可控。



东南大学

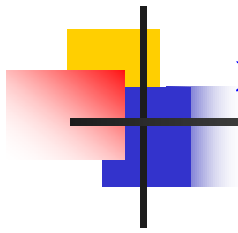
电力电子技术

第 17 讲

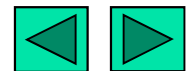
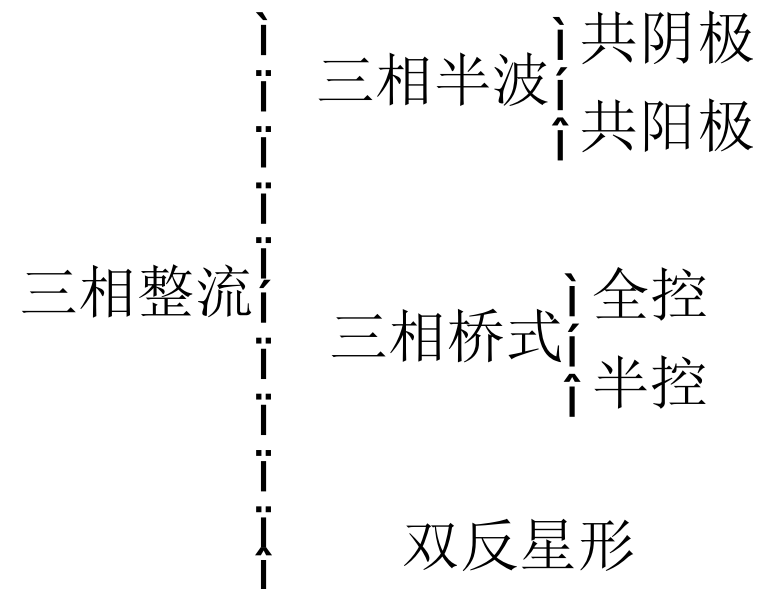
主讲教师：王念春

380419124@qq.com





二、 三相可控整流电路



1、 三相半波可控整流电路

(1) 电阻性负载

共阴极接法

1) $\alpha=0$ 自然换流点

导通原则：阳极电位高的元件

2) $\alpha \leq 30^\circ$

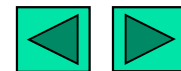
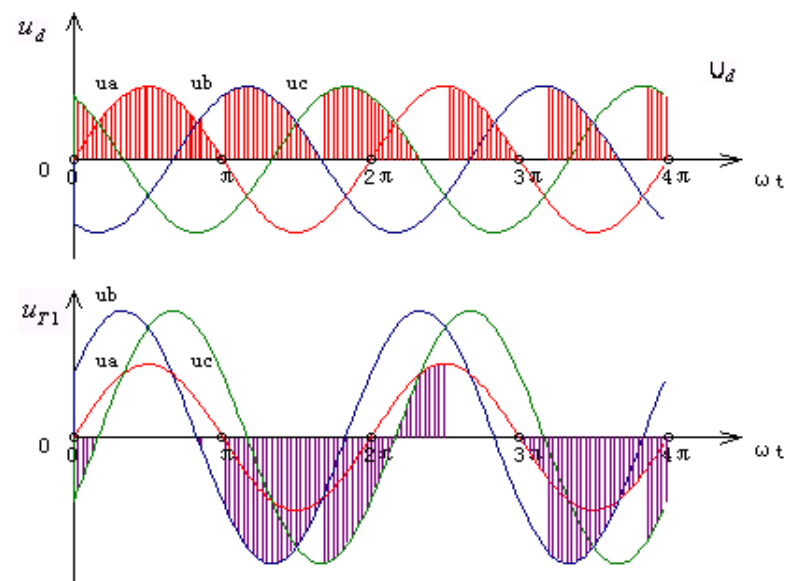
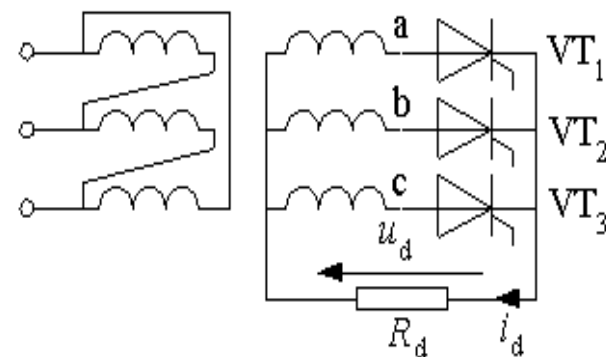
以 $\alpha=30^\circ$ 为例，负载电流处于临界状态

$$\theta = 120^\circ$$

3) $\alpha > 30^\circ$

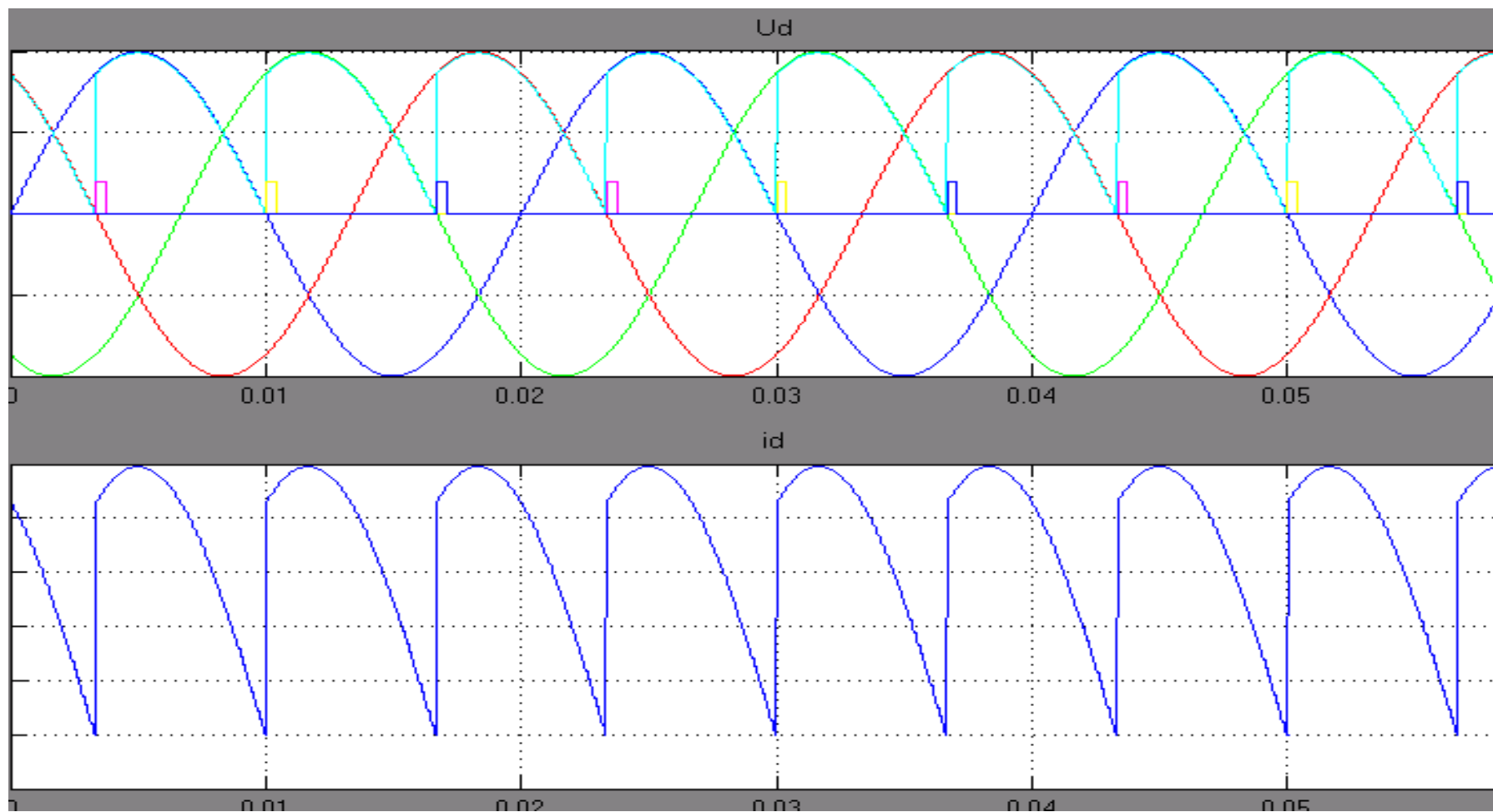
$\alpha=60^\circ$ 为例，直流电流变得不连续。

$$\theta < 120^\circ$$



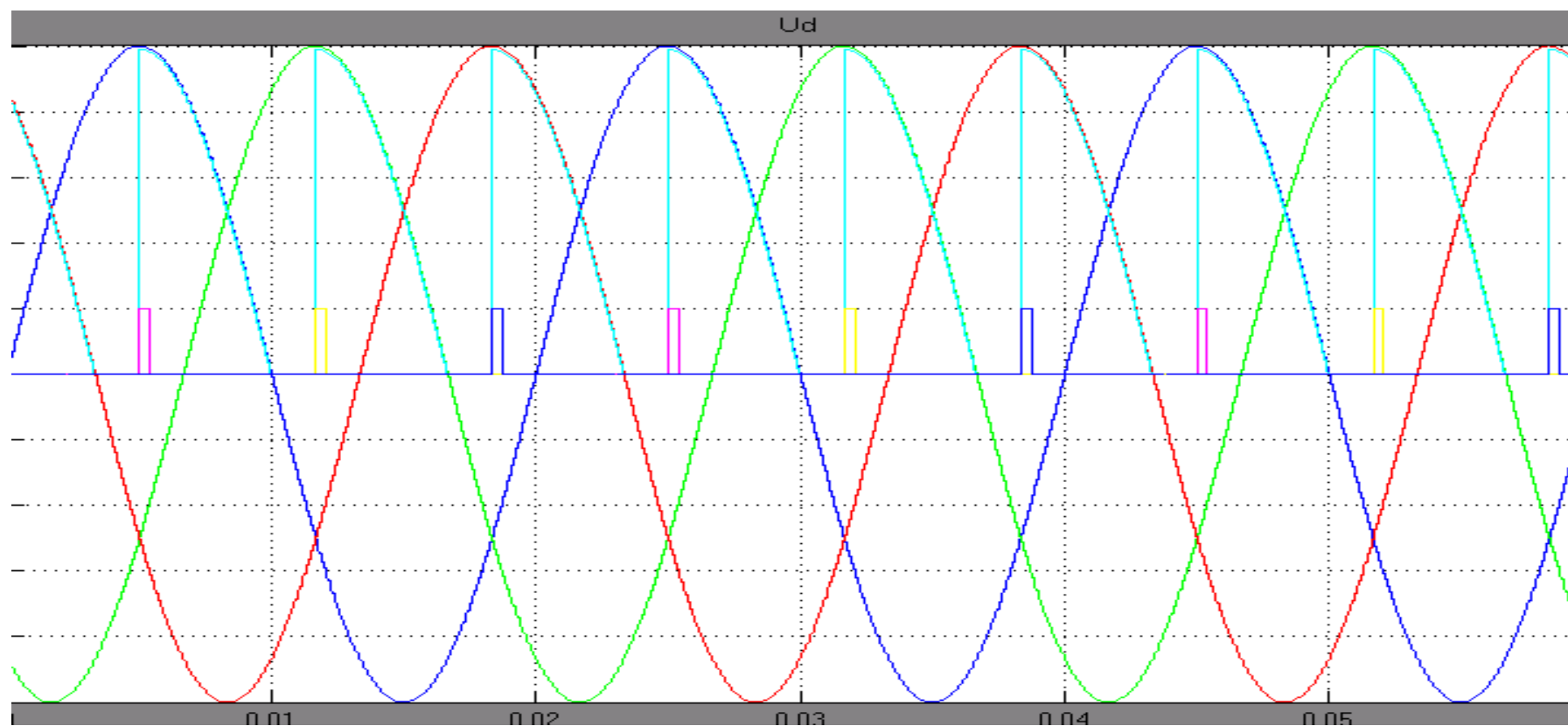
1、 三相半波可控整流电路

$\alpha=30^\circ$ 仿真波形



1、 三相半波可控整流电路

$\alpha=60^\circ$ 仿真波形



元件上的电压

$$u_{T1} = \begin{matrix} \vdots & 0 \\ \vdots & \\ \vdots & u_{ab} \\ \vdots & \\ \vdots & u_{ac} \\ \vdots & \\ \uparrow & u_a \end{matrix} \quad \begin{matrix} VT_1 \text{通} \\ VT_2 \text{通} \\ VT_3 \text{通} \\ \text{都不通} \end{matrix}$$

结论:

- ① $\alpha = 0^\circ$, u_d 最大
- ② $\alpha \leq 30^\circ$, 电流连续 $\theta = 120^\circ$
- ③ $\alpha > 30^\circ$, 电流断续, $\theta = 150^\circ - \alpha$



直流平均电压 U_d

① $\alpha \leq 30^\circ$

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} \sqrt{3} U_2 \cos \alpha = 1.17 U_2 \cos \alpha$$

② $\alpha > 30^\circ$

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha)] = 0.675 U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha)]$$

$\alpha = 150^\circ$ 时, $U_d = 0$, 故电阻性负载下三相半波可控整流电路的移相范围为 150°

晶闸管承受的最大反向电压 U_{RM} 为线电压峰值

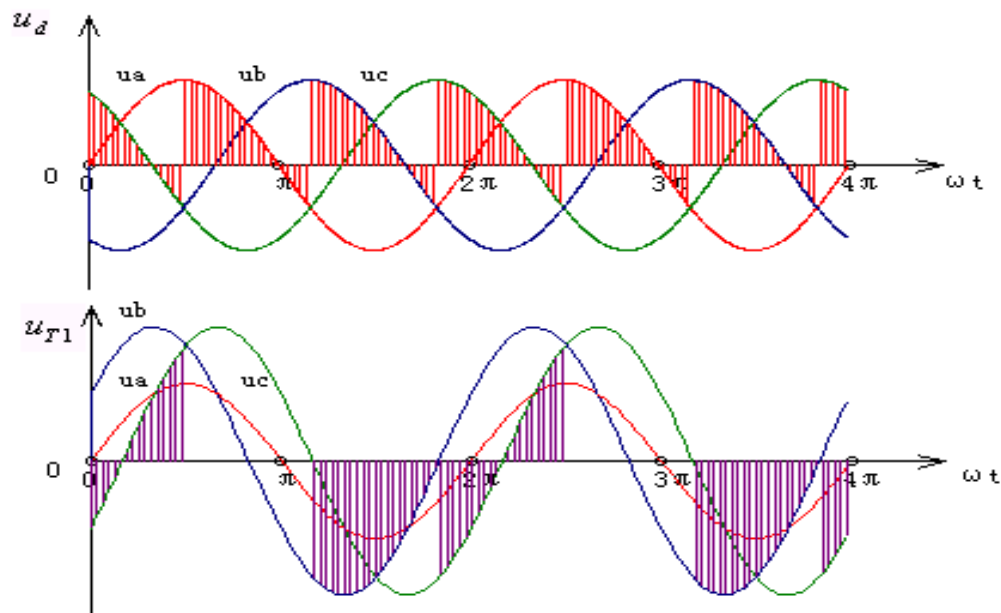
$$U_{RM} = \sqrt{6} U_2$$



(2) 电感性负载

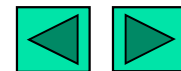
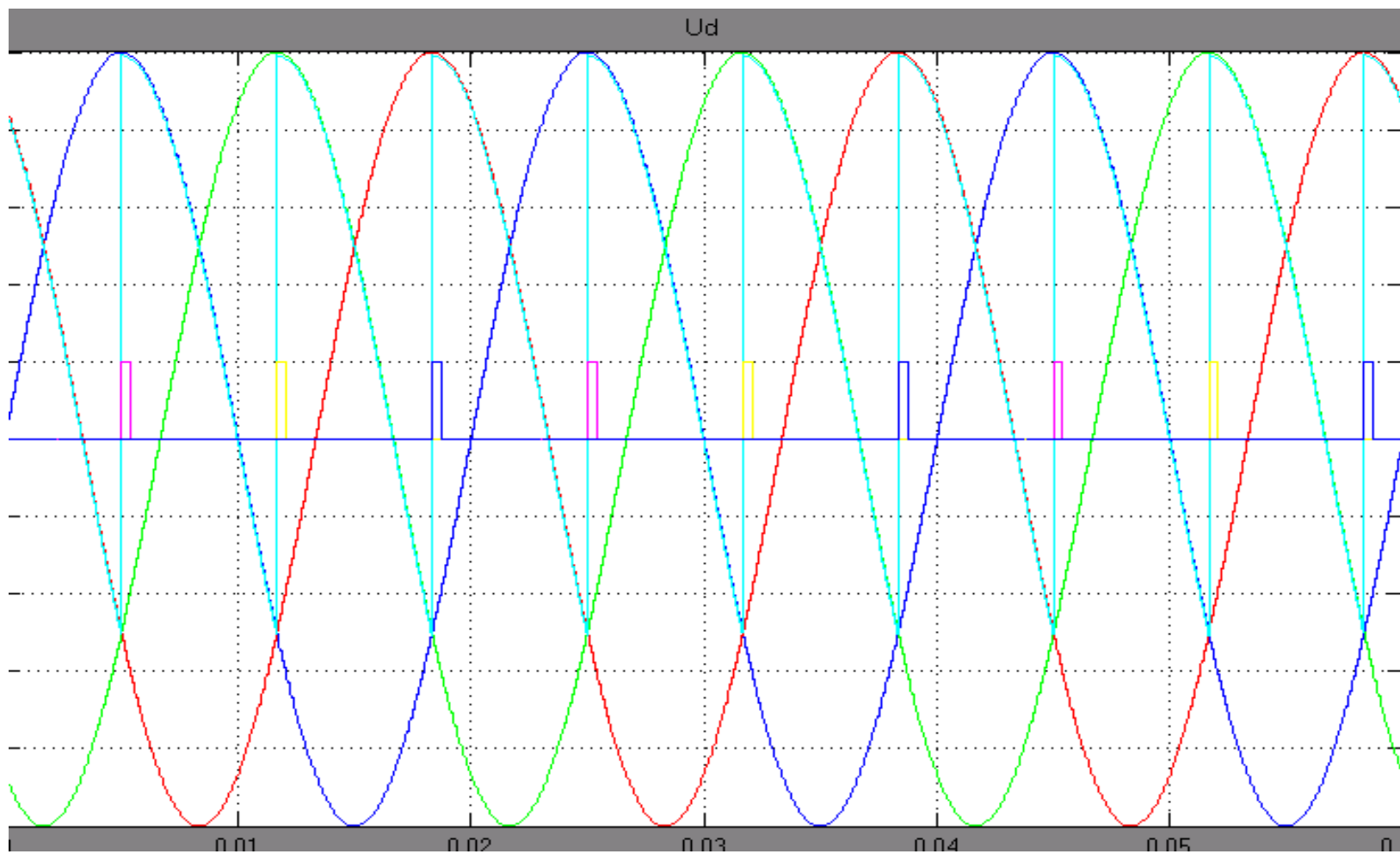
$\alpha \leq 30^\circ$ 时，大电感负载电压波形与电阻负载时相同。

$\alpha > 30^\circ$ 后，负载电感 L_d 中感应电势 e_L 的作用，使得交流电压过零时晶闸管不会关断。



1、 三相半波可控整流电路

大电感负载 $\alpha=60^\circ$ 仿真波形



直流平均电压 U_d

$$U_d = 1.17U_2 \cos \alpha$$

晶闸管电流

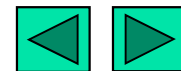
$$I_{dT} = \frac{1}{3} I_d$$

$$I_T = \sqrt{\frac{120}{360} I_d^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d = 0.578 I_d$$

$$I_2 = I_T$$

晶闸管承受的最大正、反向峰值电压均为线电压峰值

$$U_{TM} = \sqrt{6} U_2$$



东南大学

电力电子技术

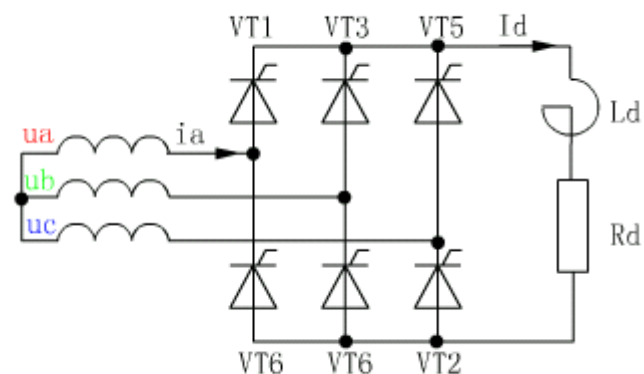
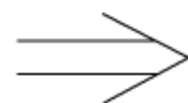
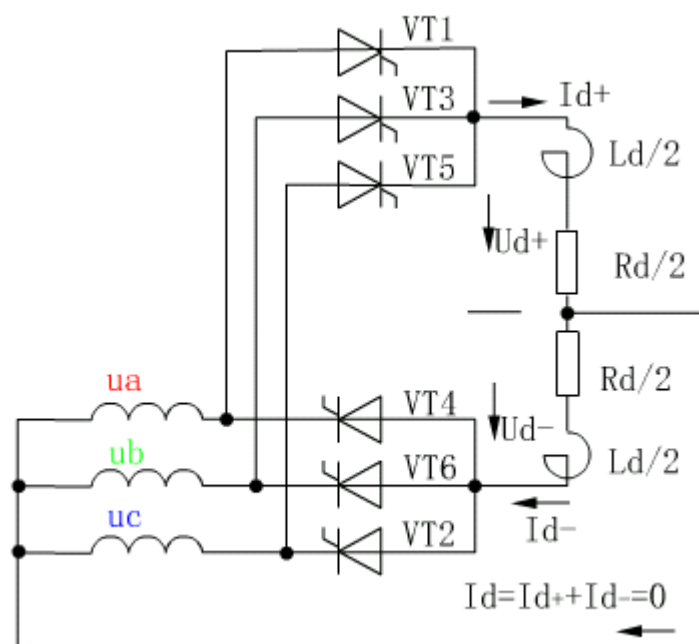
第 18 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



2、三相桥式全控整流电路



2、电感性负载

$$\omega L_d \gg R_d$$

1) $\alpha = 0^\circ$

u_a 最大, u_b 最小, VT₁、VT₆ 通, $u_d = u_{ab}$

u_a 最大, u_c 最小, VT₁、VT₂ 通, $u_d = u_{ac}$

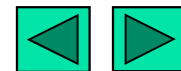
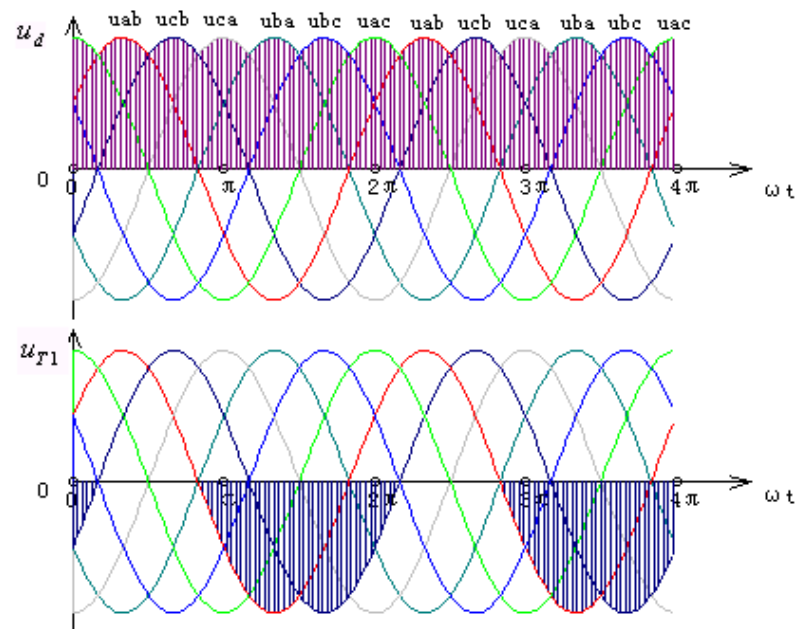
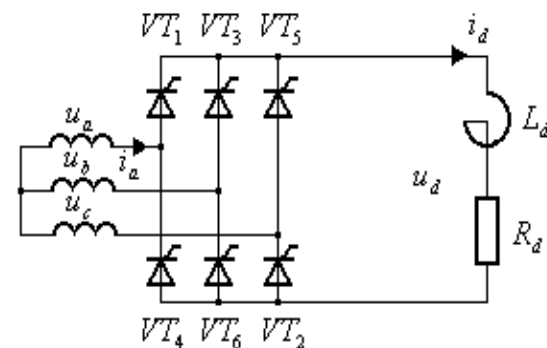
u_b 最大, u_c 最小, VT₂、VT₃ 通, $u_d = u_{bc}$

u_b 最大, u_a 最小, VT₃、VT₄ 通, $u_d = u_{ba}$

u_c 最大, u_a 最小, VT₄、VT₅ 通, $u_d = u_{ca}$

u_c 最大, u_b 最小, VT₅、VT₆ 通, $u_d = u_{cb}$

i_T 为 120° 宽的矩形波



$$U_{T1} = \begin{cases} 0 & VT1 \text{通} \\ u_{ab} & VT3 \text{通} \\ u_{ac} & VT5 \text{通} \end{cases}$$

2) $0^\circ < \alpha \leq 60^\circ$

以 $\alpha=30^\circ$ 为例

$a \rightarrow u_d \downarrow$

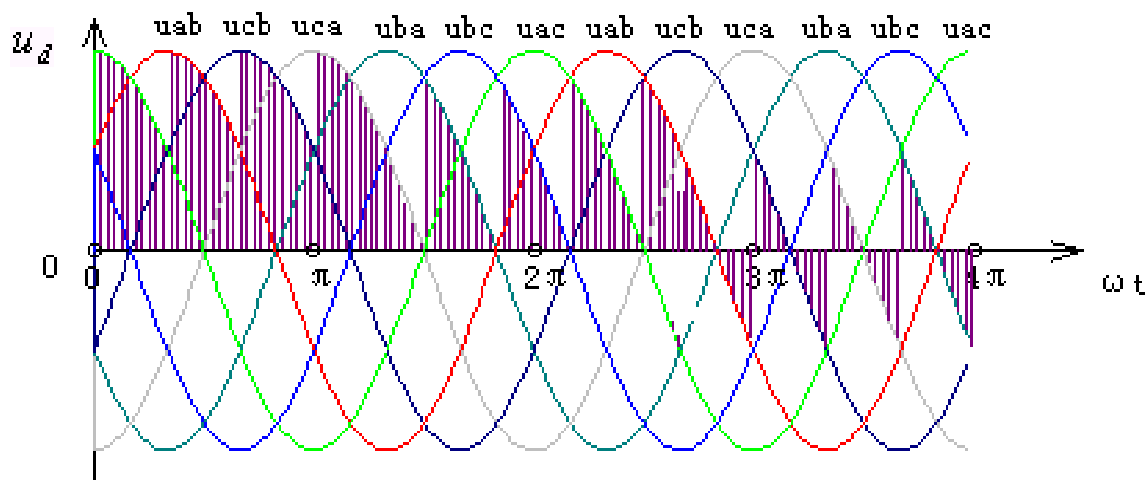
$\alpha=60^\circ$ 时

u_d 出现过零点。

3) $\alpha > 60^\circ$

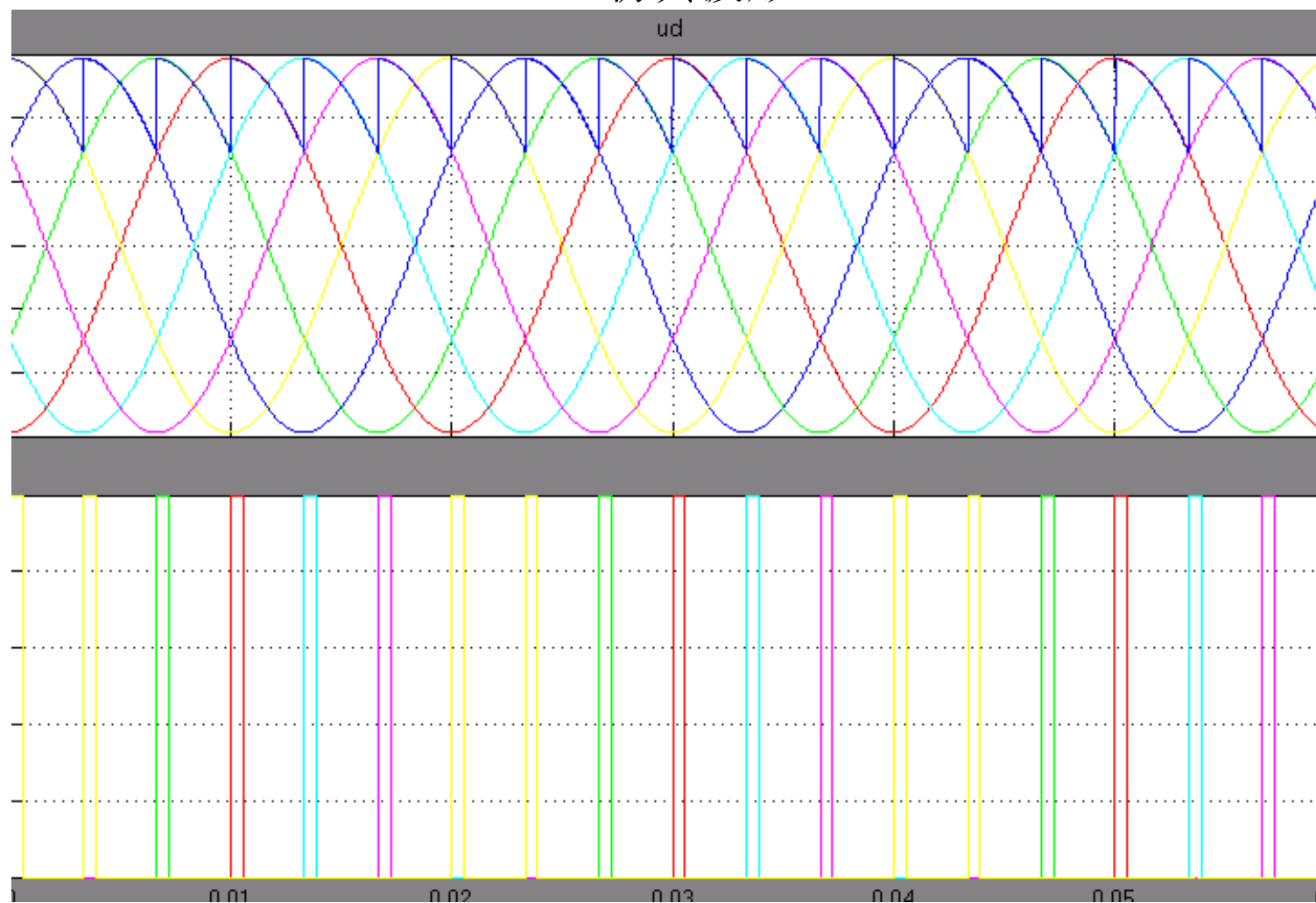
u_d 负面积, L_d 作用, $e_L + u_{21} > 0$ 仍通

$\alpha=90^\circ$ 时, $u_d=0$ 。移相范围 90°



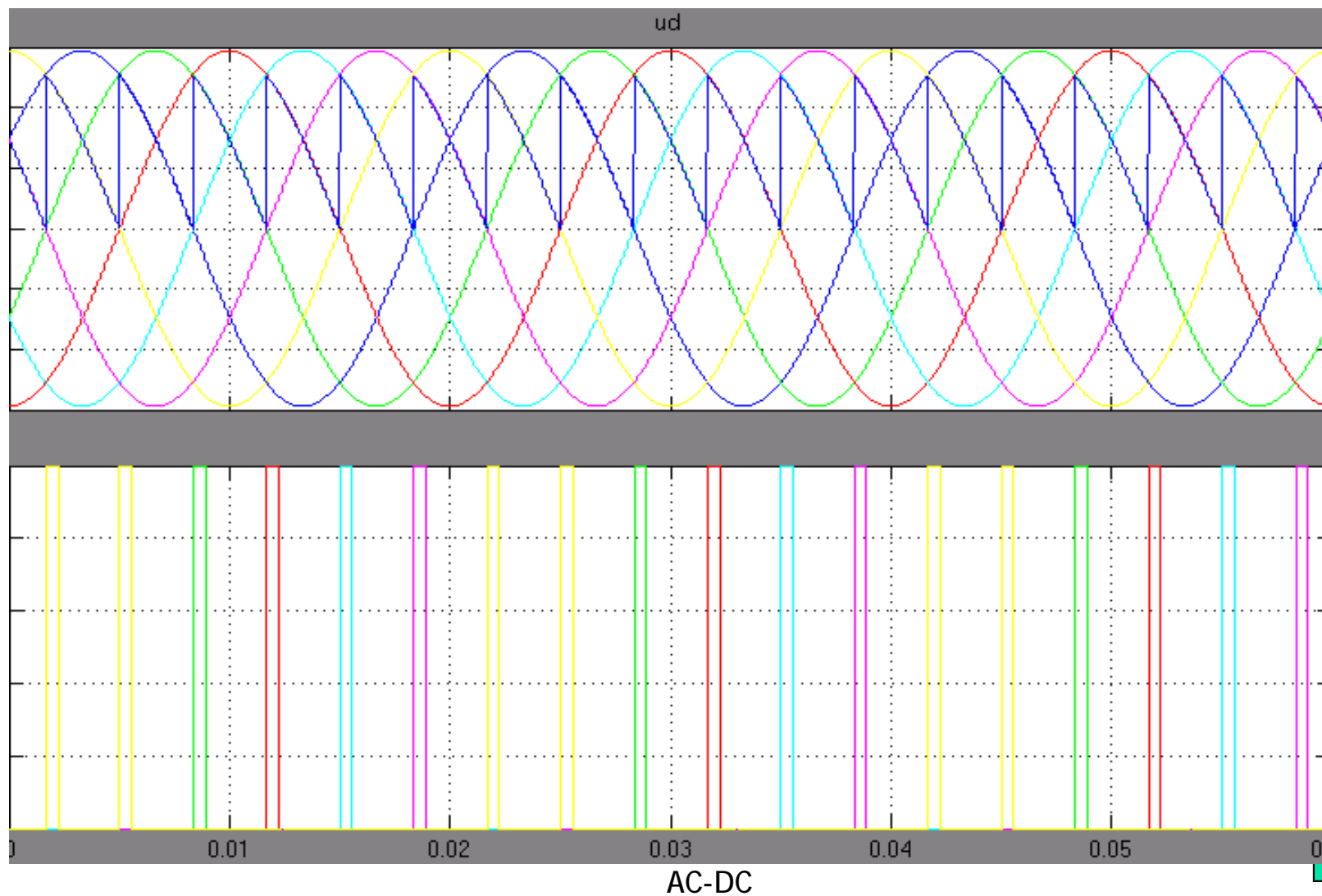
三相桥式可控整流电路

$\alpha=30^\circ$ 仿真波形



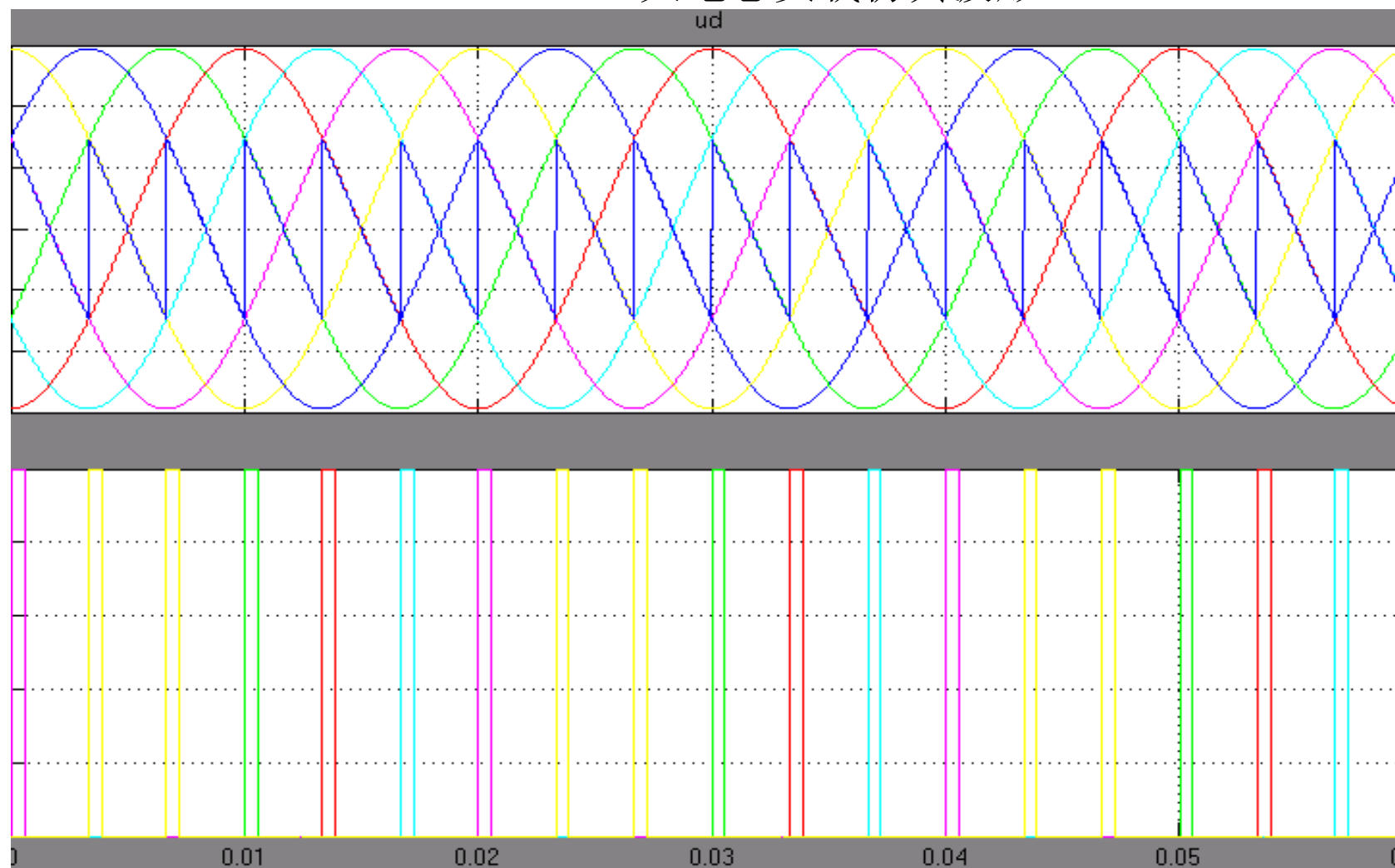
三相桥式可控整流电路

$\alpha = 60^\circ$ 仿真波形



三相桥式可控整流电路

$\alpha=90^\circ$ 大电感负载仿真波形



4) 基本数量关系

直流平均电压 U_d

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d\omega t = 2.34U_2 \cos \alpha$$

晶闸管电流与三相半波时相同，即平均值为

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} \quad I_{dT} = \frac{1}{3} I_d \quad I_T = \frac{I_d}{\sqrt{3}}$$

变压器次级绕组电流有效值为

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} I_d^2 d\omega t + (-I_d)^2 \frac{2\pi}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$$

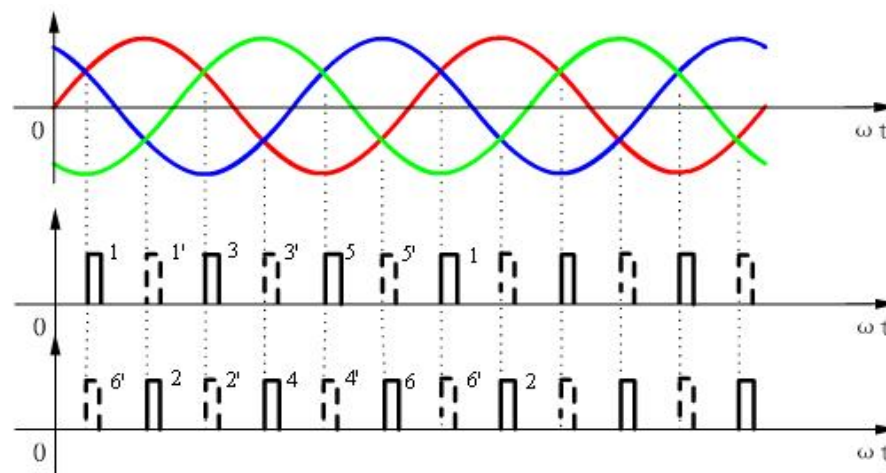
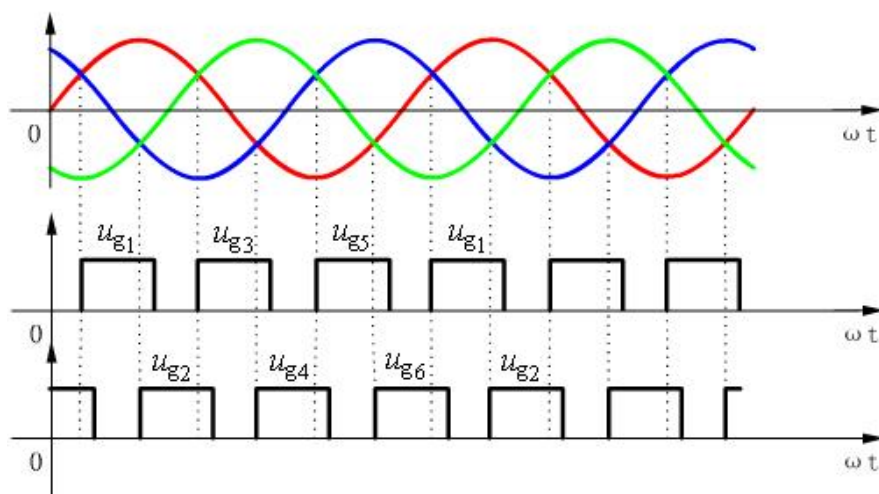
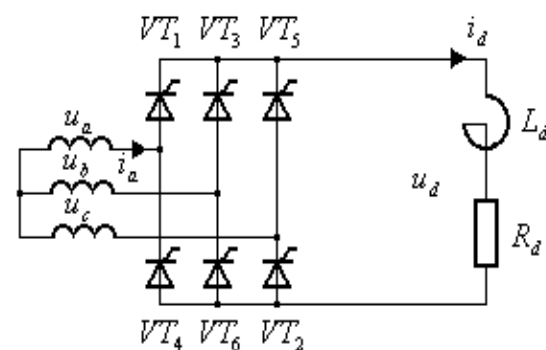
其值比三相半波时高2倍，说明绕组的利用率提高了。



5) 对触发脉冲的要求

宽脉冲

双窄脉冲

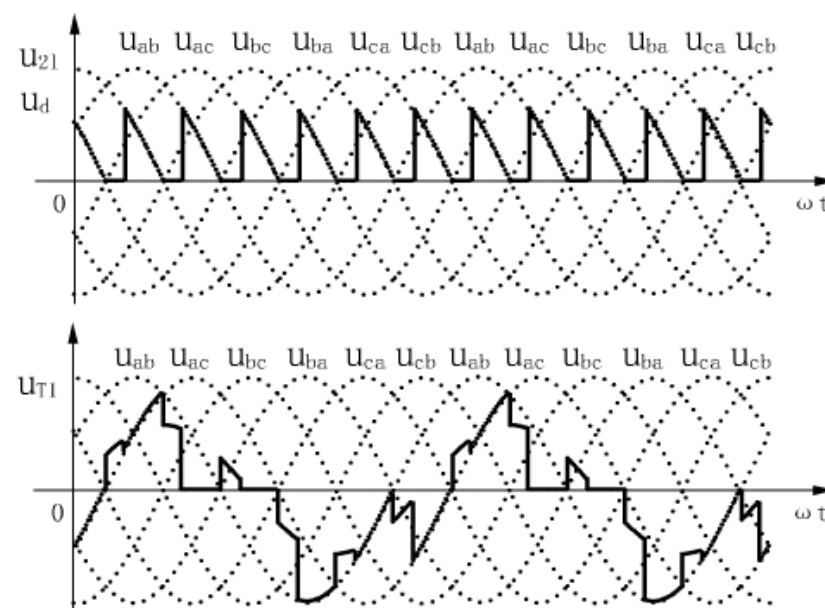
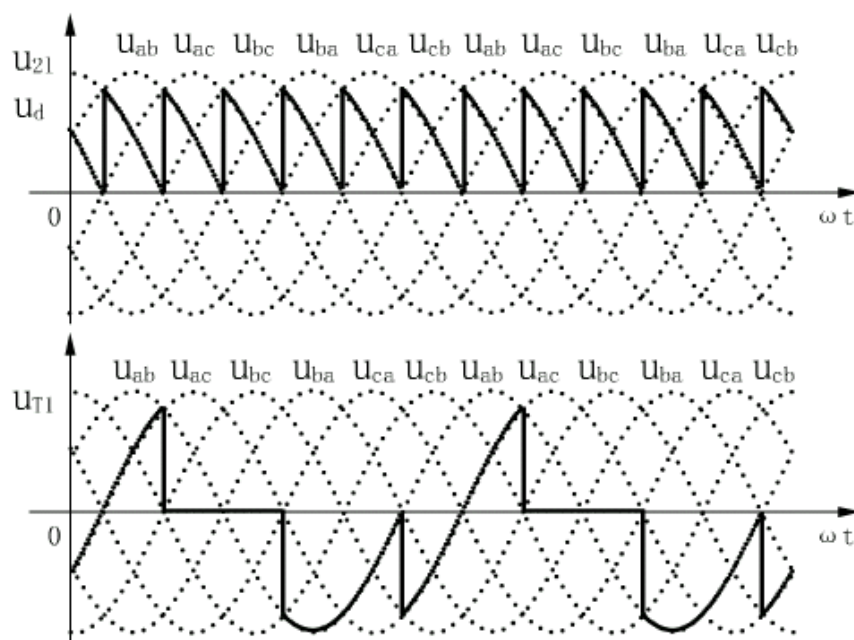


(2) 电阻性负载

$$\alpha \leq 60^\circ$$

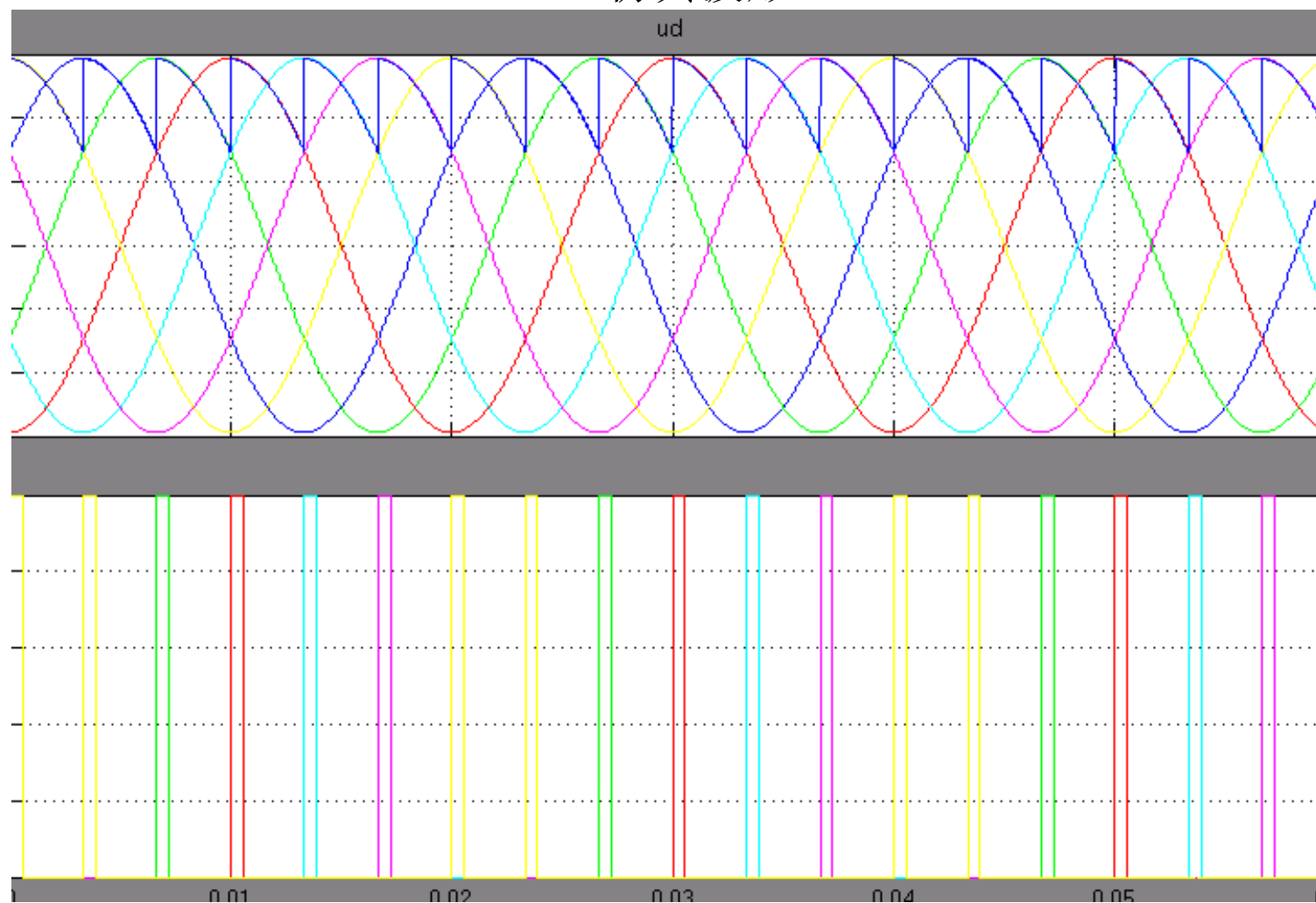
$= 60^\circ$ 是电阻负载下电流连续与否的临界点

$$> 60^\circ$$



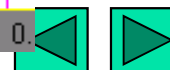
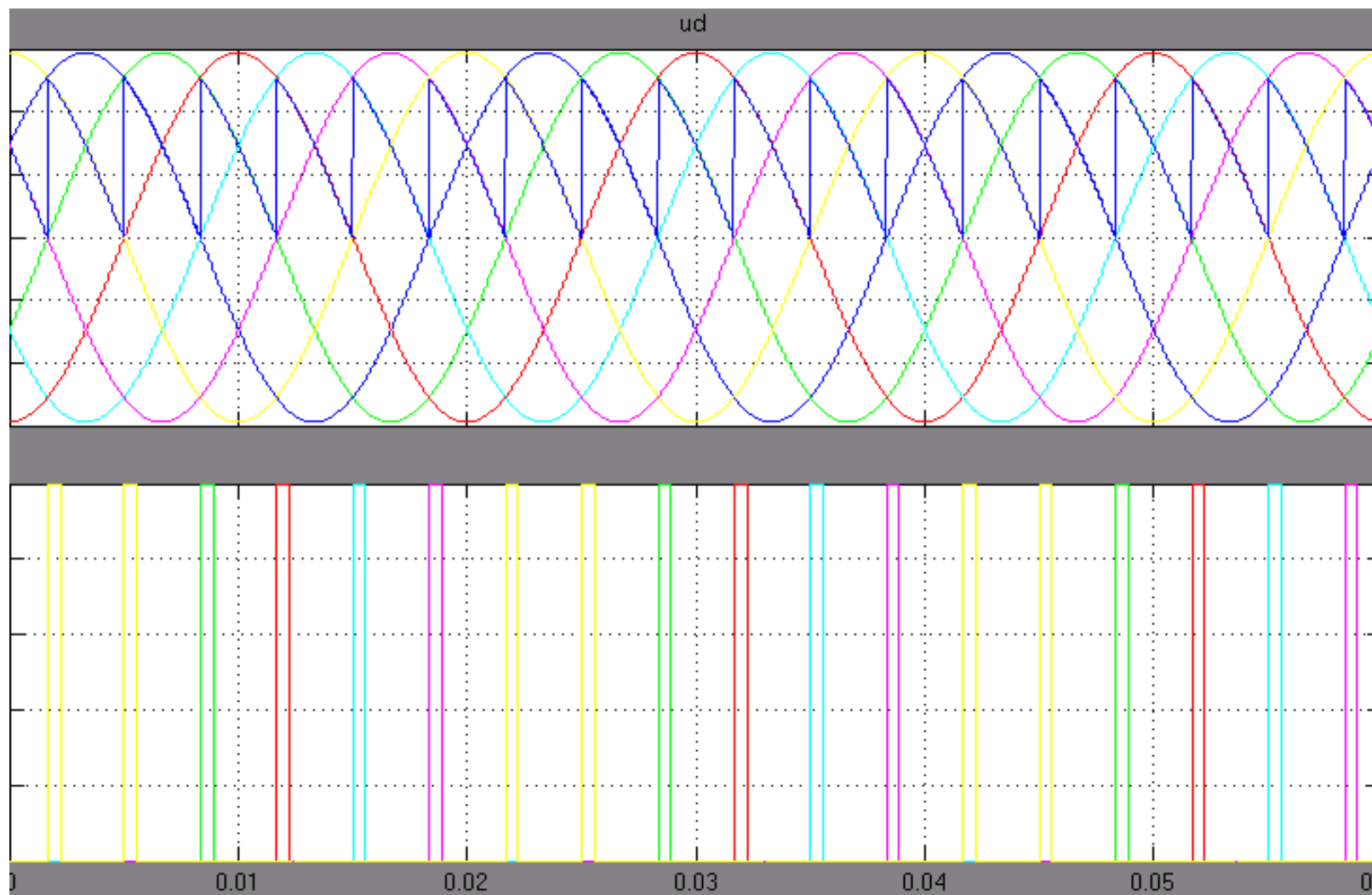
三相桥式可控整流电路

$\alpha=30^\circ$ 仿真波形



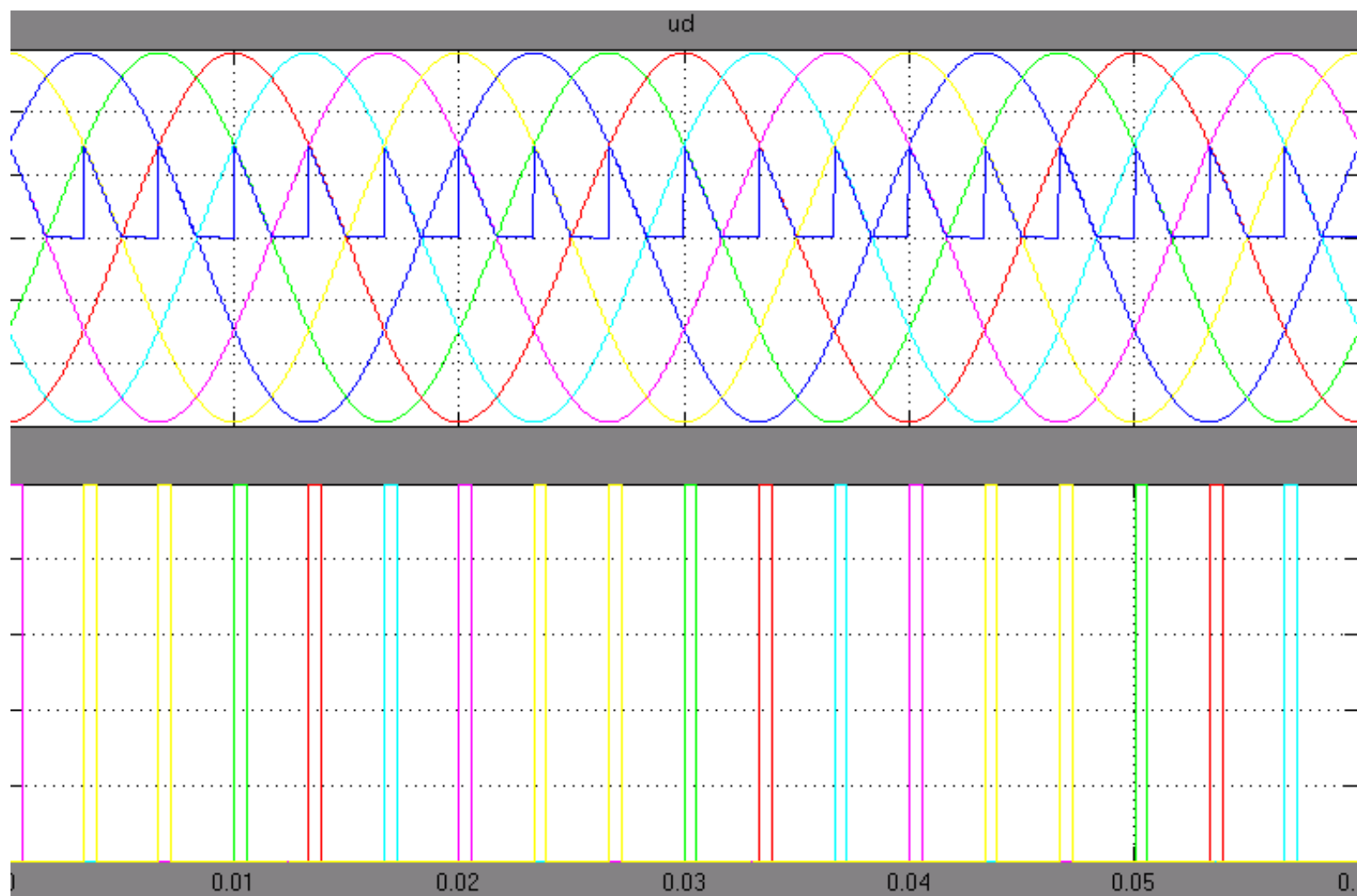
三相桥式可控整流电路

$\alpha=60^\circ$ 仿真波形

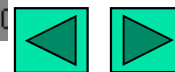


三相桥式可控整流电路

$\alpha=90^\circ$ 电阻仿真波形



AC-DC



(2) 电阻性负载输出电压公式

$$U_d = \frac{1}{\pi / 3} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_{2l} \sin \omega t d(\omega t)$$
$$= 2.34 U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \alpha)]$$



东南大学

电力电子技术

第 19 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



三相半波可控整流电路大电感负载+续流二极管分析

教材中没有分析，后面作业题有这种情况。

续流二极管特点：阻力小，电感从它释放能量，这时负载电压为零。

$\alpha \leq 30^\circ$ 情况下，输出波形 大电感负载，纯电阻负载，大电感负载+续流二极管是相同的，输出电压的表达式也是相同的。

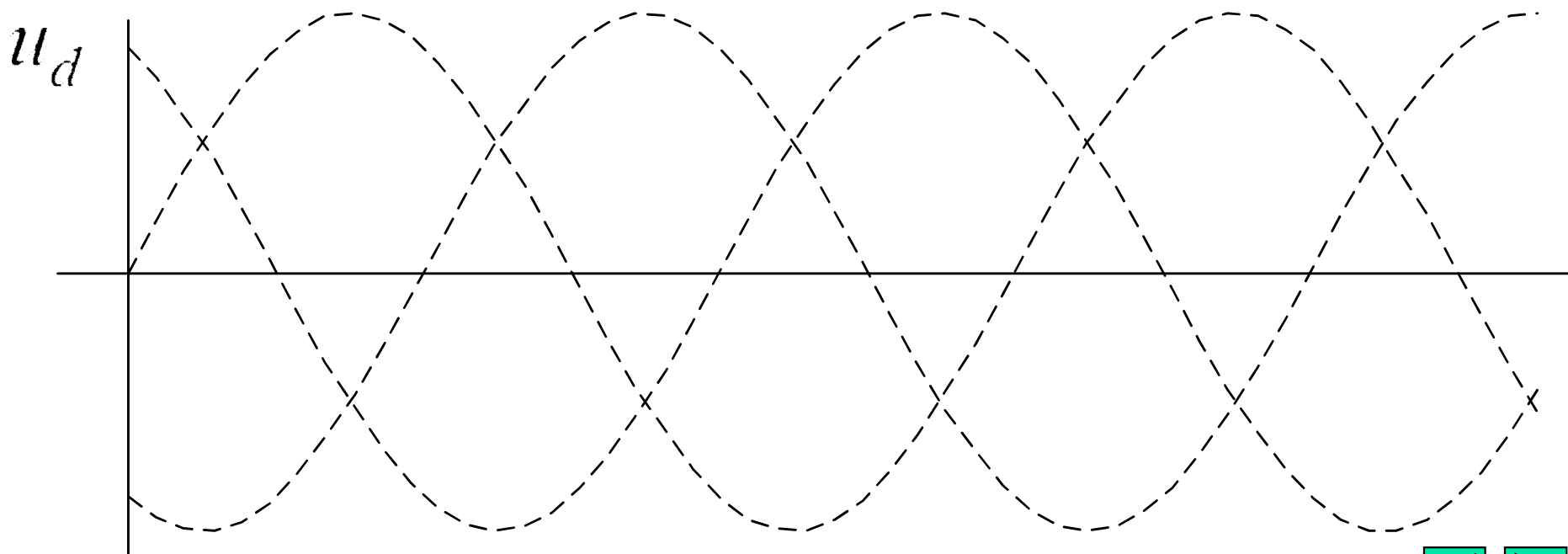
$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} \sqrt{3} U_2 \cos \alpha = 1.17 U_2 \cos \alpha$$



三相半波可控整流电路大电感负载+续流二极管分析

续流二极管特点：阻力小，电感从它释放能量，这时负载电压为零。

$\alpha \geq 30^\circ$ 情况下，大电感负载上由于电感通过变压器副边续流，电压出现负值。有续流二极管后，电感从续流二极管续流，负载上电压不会出现负值。下面给出 $\alpha = 60^\circ$ 的波形。



三相半波可控整流电路大电感负载+续流二极管分析

从波形可以看出，与纯电阻负载下波形一致，因此输出电压的表达式为：

$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin\omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha)] = 0.675U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha)]$$

结论：

① $\alpha \leq 30^\circ$

$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin\omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} \sqrt{3}U_2 \cos\alpha = 1.17U_2 \cos\alpha$$

② $\alpha > 30^\circ$

$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin\omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha)] = 0.675U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha)]$$



三相桥可控整流电路大电感负载+续流二极管分析

分析过程与三相半波整流电路相同，直接给出结论。与三相桥式全控整流电路纯电阻负载相同。

结论：

① $\alpha \leq 60^\circ$

$$U_d = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d\omega t = 2.34U_2 \cos \alpha$$

② $\alpha > 60^\circ$

$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_{2l} \sin \omega t d(\omega t) = 2.34U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \alpha)]$$



三相桥半控整流电路大电感负载

在半控整流电路中，电感续流通过二极管与晶闸管进行，与单相半控整流电路分析类似，直接给出结论。与纯电阻负载全控整流电路相同，但要注意：**存在失控问题**。

结论：

① $\alpha \leq 60^\circ$

$$U_d = \frac{1}{\frac{p}{3}} \int_{\frac{p}{3} + \alpha}^{\frac{2p}{3} + \alpha} \sqrt{6} U_2 \sin \omega t d\omega t = 2.34 U_2 \cos \alpha$$

② $\alpha > 60^\circ$

$$U_d = \frac{1}{p/3} \int_{\frac{p}{3} + \alpha}^{\frac{p}{3}} \sqrt{2} U_{2l} \sin \omega t d(\omega t) = 2.34 U_2 [1 + \cos(\frac{p}{3} + \alpha)]$$



三相桥半控整流电路大电感负载+续流二极管

解决了半控电路的失控问题，但输出电压表达式相同。

结论：

① $\alpha \leq 60^\circ$

$$U_d = \frac{1}{\frac{p}{3}} \int_{\frac{p}{3}+\alpha}^{\frac{2p}{3}+\alpha} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d\omega t = 2.34U_2 \cos \alpha$$

② $\alpha > 60^\circ$

$$U_d = \frac{1}{p/3} \int_{\frac{p}{3}+\alpha}^p \sqrt{2}U_{2l} \sin \omega t d(\omega t) = 2.34U_2 [1 + \cos(\frac{p}{3} + \alpha)]$$



如何理解三相桥式整流电路是三相半波整流电路的串联？

串联的特征：

- (1) 元件中流过的电流相同；
- (2) 总电压为串联电压相加。

电路知识中有电阻，电感，电容的串联，这些元件的串联比较简单，没有什么条件。

两个三相半波可控整流电路的串联比较复杂，要满足一条的条件，这个条件就是**负载要为大电感负载**。

如何理解三相桥式整流电路是三相半波整流电路的串联？

下面对比一下大电感负载情况下三相半波电路与三相桥式电路参数，看看是否满足串联的特征：

三相半波可控整流电路输出电压：

$$U_d = \frac{1}{\frac{2p}{3}} \oint_{\frac{p}{6}+a}^{\frac{5p}{6}+a} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{2p} \sqrt{3}U_2 \cos \alpha = 1.17U_2 \cos \alpha$$

三相桥式可控整流电路输出电压：

$$U_d = \frac{1}{\frac{p}{3}} \oint_{\frac{p}{3}+a}^{\frac{2p}{3}+a} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d\omega t = 2.34U_2 \cos \alpha$$



如何理解三相桥式整流电路是三相半波整流电路的串联？

$$1.17U_2\cos\alpha$$

$$2.34U_2\cos\alpha$$

输出电压满足两个三相半波可控整流电路串联的特征，三相桥式可控整流电路输出电压为三相半波可控整流电路的一倍。



如何理解三相桥式整流电路是三相半波整流电路的串联？

元件中流过的电流是否相同呢？

三相半波可控整流电路，大电感负载情况下，每个晶闸管每个波头内导通 120° ，每个周期内导通 120° ，得出流过晶闸管电流的平均值、有效值与负载电流平均值 I_d 间的关系（负载电流平直，因此，负载电流平均值与有效值相等）：

$$I_{dT} = \frac{1}{3} I_d \quad \longrightarrow \quad \text{晶闸管电流的平均值}$$

$$I_T = \sqrt{\frac{120}{360} I_d^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d = 0.578 I_d \quad \longrightarrow \quad \text{晶闸管电流的有效值}$$



如何理解三相桥式整流电路是三相半波整流电路的串联？

元件中流过的电流是否相同呢？

三相桥式可控整流电路，大电感负载情况下，每个晶闸管每个波头内导通 60° ，每个周期内连续导通两个波头累计导通 120° ，得出流过晶闸管电流的平均值、有效值与负载电流平均值 I_d 间的关系（负载电流平直，因此，负载电流平均值与有效值相等）：

$$I_{dT} = \frac{1}{3} I_d \quad \longrightarrow \quad \text{晶闸管电流的平均值}$$

$$I_T = \sqrt{\frac{120}{360} I_d^2} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d = 0.578 I_d \quad \longrightarrow \quad \text{晶闸管电流的有效值}$$



如何理解三相桥式整流电路是三相半波整流电路的串联？

通过分析对比流过晶闸管电流的平均值与有效值，得出结论：

三相半波可控整流电路与三相桥式整流电路，流过每个晶闸管电流的平均值与有效值相等，也即流过元件的电流相同。

满足串联的两个特征：

- (1) 元件中流过的电流相同；
- (2) 总电压为串联电压相加。

因此，在大电感负载情况下，三相桥式可控整流电路，可以看成是两个三相半波可控整流电路的串联。

如何理解三相桥式整流电路是三相半波整流电路的串联？

串联的特征：

- (1) 元件中流过的电流相同；
- (2) 总电压为串联电压相加。

纯电阻负载情况下，三相桥式整流电路能否看成是两个三相关波可按整流电路的串联呢？

纯电阻负载情况下，输出电压分成两个表达式，在负载电流连续的情况下，大家可以按前面的情况进行分析；在负载电流断续的情况下，同样按前面的方法分析，就可以得出结论。**要点：输出电压是否为一倍，流过的电流是否相同？**

东南大学

电力电子技术

第 20 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



P142习题

第14题：现有单相半波、单相桥式、三相半波三种电路，直流平均电流 I_d 都是40A，问串在晶闸管中的保护用熔断器电流是否一样大？为什么？

思考要点：

(1) 首先要了解熔断器的保护特性，熔断器的保护特性是流过它的电流有效值来决定的。与平均值无关；

(2) 题目中是平均值相等，如何转换成有效值呢？

(3) 波头的概念，波头持续的时间。

(A) 单相半波电路，不失一般性，波头为180度，晶闸管平均电流与负载平均电流相等；

(B) 单相桥式电路，不失一般性，波头为180度，晶闸管平均电流为负载电流一半；

(C) 三相半波电路，不失一般性，波头为120度，晶闸管的平均电流为负载电流的1/3。

很明显流过每个晶闸管电流的平均值不相等，时间不相同，有效值也不相同，因此保护用的熔断器电流是不相同的。



P142习题

第12题：三相半波可控整流电路，如果A相的触发脉冲消失，试绘制出电阻性负载下的直流电压 U_d 波形。（电感性负载请同学们自己思考，难度比较大，要点后面会给出来）

思考要点：晶闸管什么情况下关断

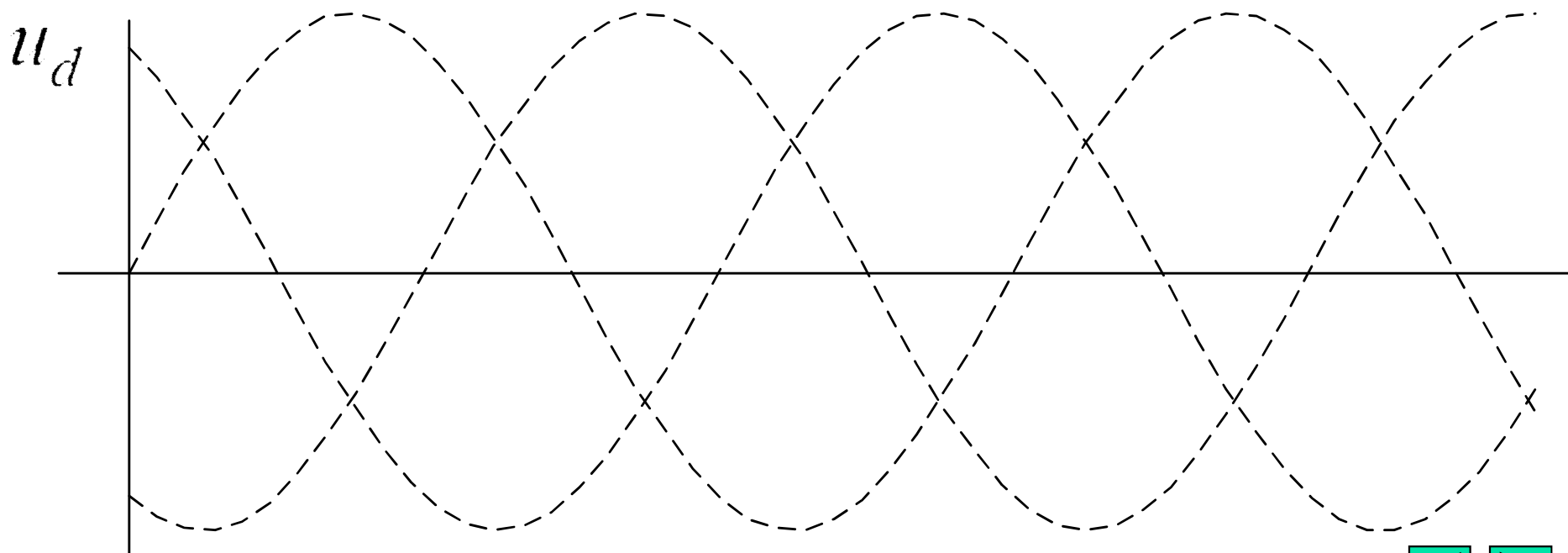
电阻性负载以 30° 为临界点，有电流连续与断续两种情况，因此，如果A相触发脉冲丢失，同样，也有分析两种不同情况。下面分别进行讨论。

P142习题

第12题：三相半波可控整流电路，如果A相的触发脉冲消失，试绘制出电阻性负载下的直流电压 U_d 波形。（电感性负载请同学们自己思考，难度比较大，要点后面会给出来）【为简化画图与分析，这里给出B相触发脉冲丢失的情况】

思考要点：晶闸管什么情况下关断

$\alpha=0^\circ$ 波形

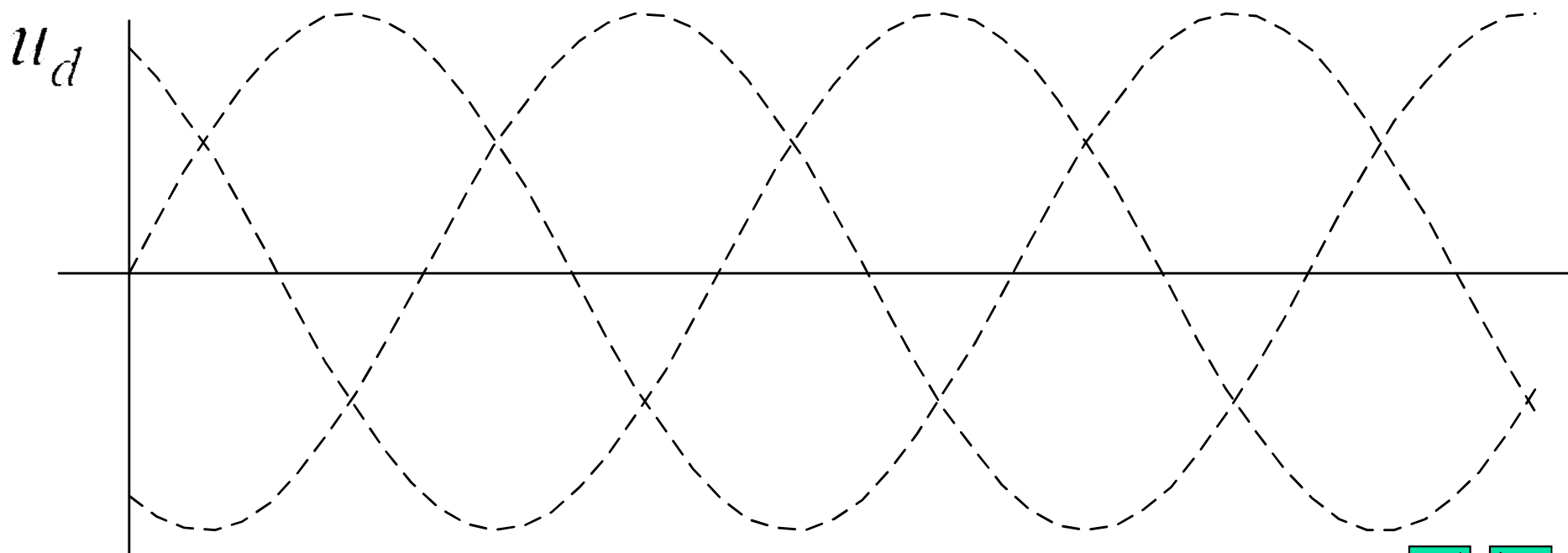


P142习题

第12题：三相半波可控整流电路，如果A相的触发脉冲消失，试绘制出电阻性负载下的直流电压 U_d 波形。（电感性负载请同学们自己思考，难度比较大，要点后面会给出来）【为简化画图与分析，这里给出B相触发脉冲丢失的情况】

思考要点：晶闸管什么情况下关断

$\alpha = 30^\circ$ 波形

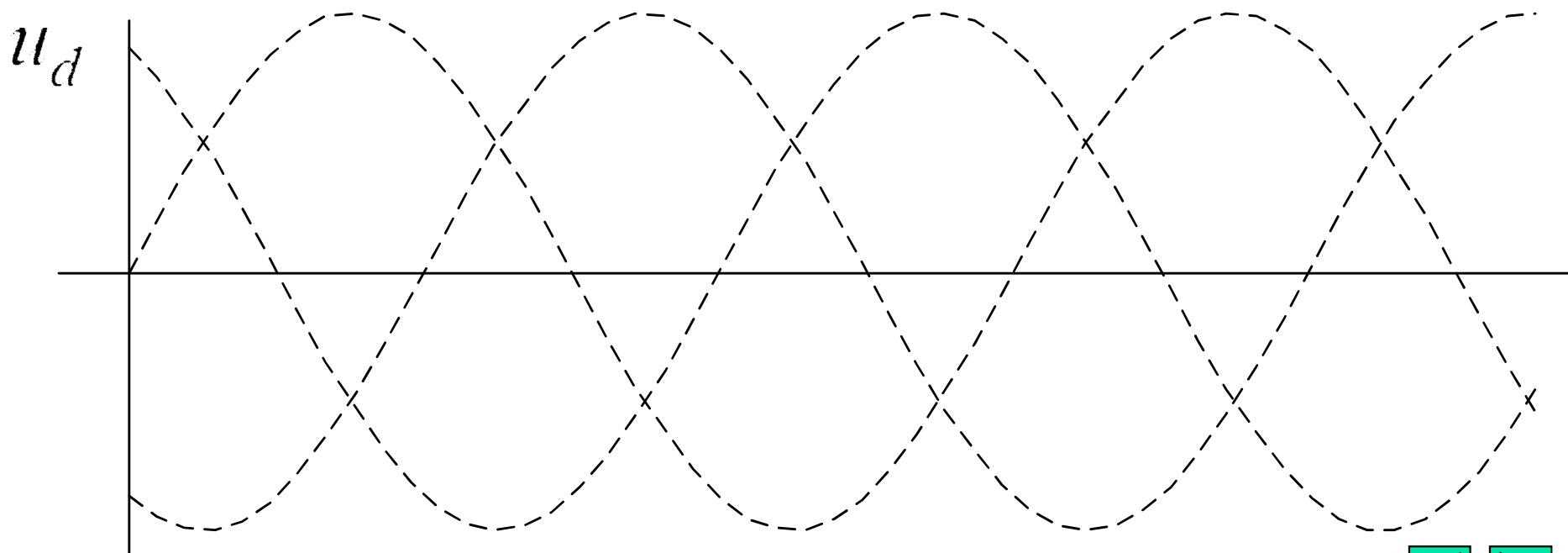


P142习题

第12题：三相半波可控整流电路，如果A相的触发脉冲消失，试绘制出电阻性负载下的直流电压 U_d 波形。（电感性负载请同学们自己思考，难度比较大，要点后面会给出来）【为简化画图与分析，这里给出B相触发脉冲丢失的情况】

思考要点：晶闸管什么情况下关断

$\alpha = 60^\circ$ 波形

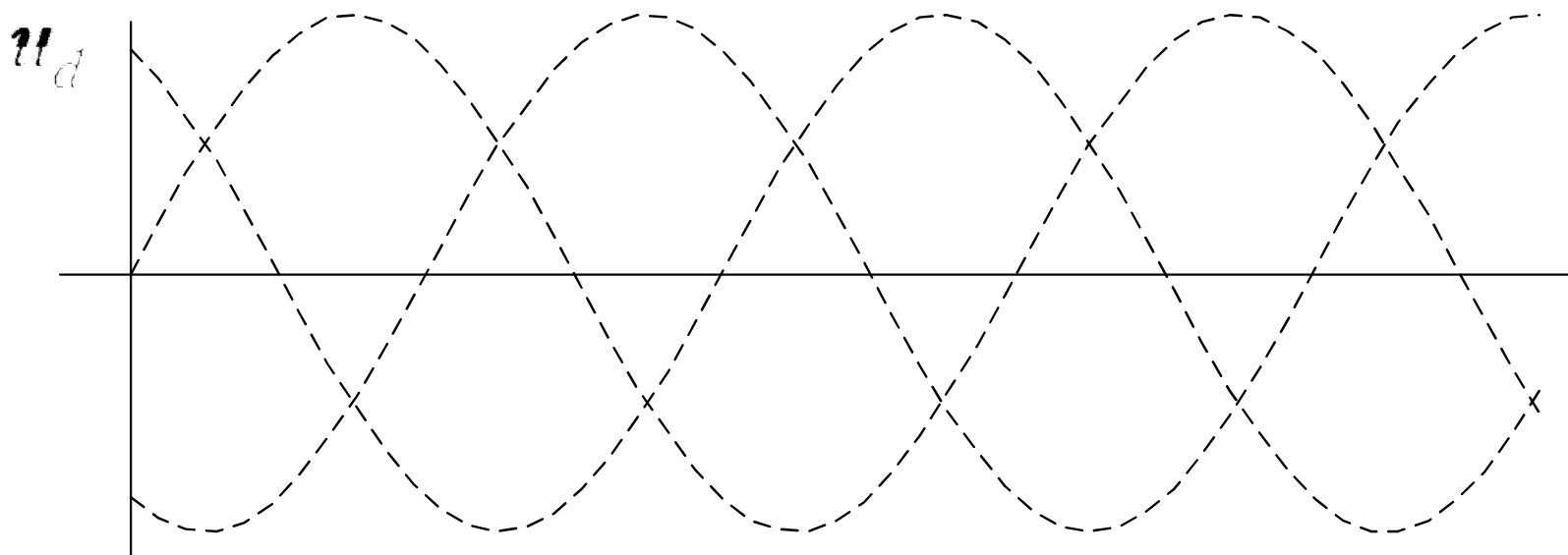


P142习题

第12题：三相半波可控整流电路，如果A相的触发脉冲消失，试绘制出电阻性负载下的直流电压 U_d 波形。

加深：如何推导出这种情况下输出电压的表达式呢？

$\alpha=0^\circ$ 波形



$$U_d = \frac{2}{3} U_d|_{\alpha=0^\circ} + \frac{1}{3} U_d|_{\alpha=120^\circ}$$

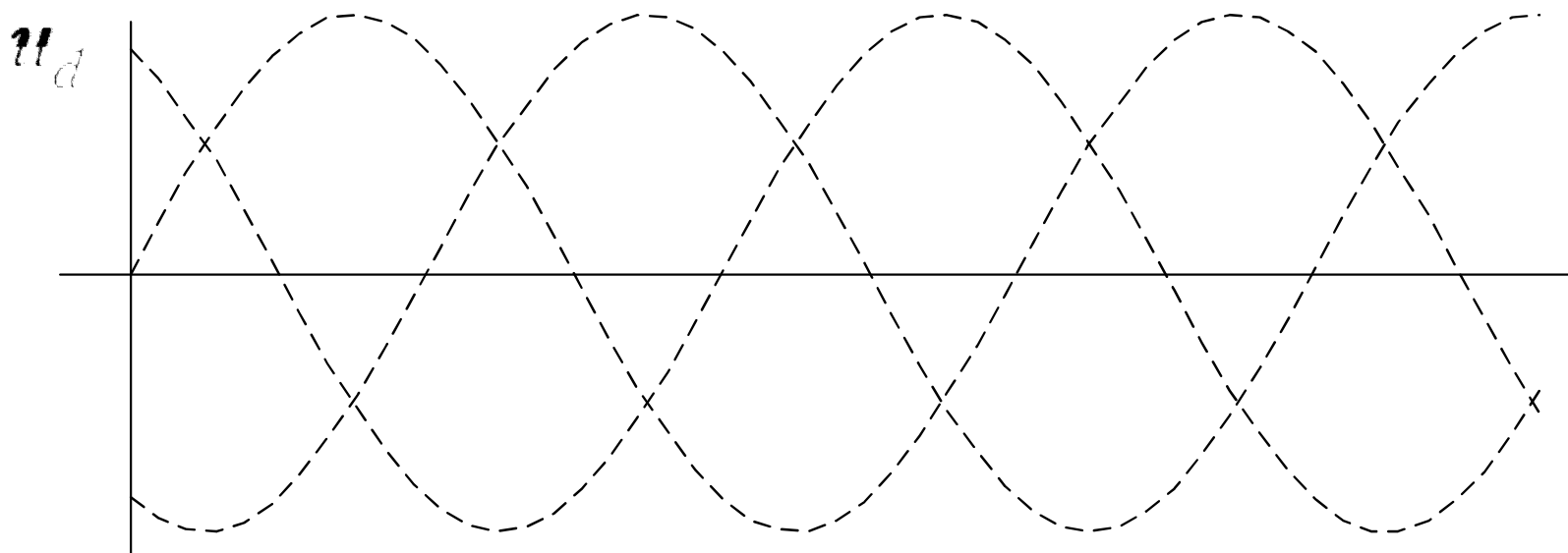


P142习题

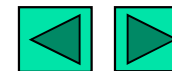
第12题：三相半波可控整流电路，如果A相的触发脉冲消失，试绘制出电阻性负载下的直流电压 U_d 波形。

加深：如何推导出这种情况下输出电压的表达式呢？

$\alpha = 30^\circ$ 波形



$$U_d = \frac{2}{3} U_d|_{\alpha=30^\circ} + \frac{1}{3} U_d|_{\alpha=150^\circ} = 0 = \frac{2}{3} U_d|_{\alpha=30^\circ}$$

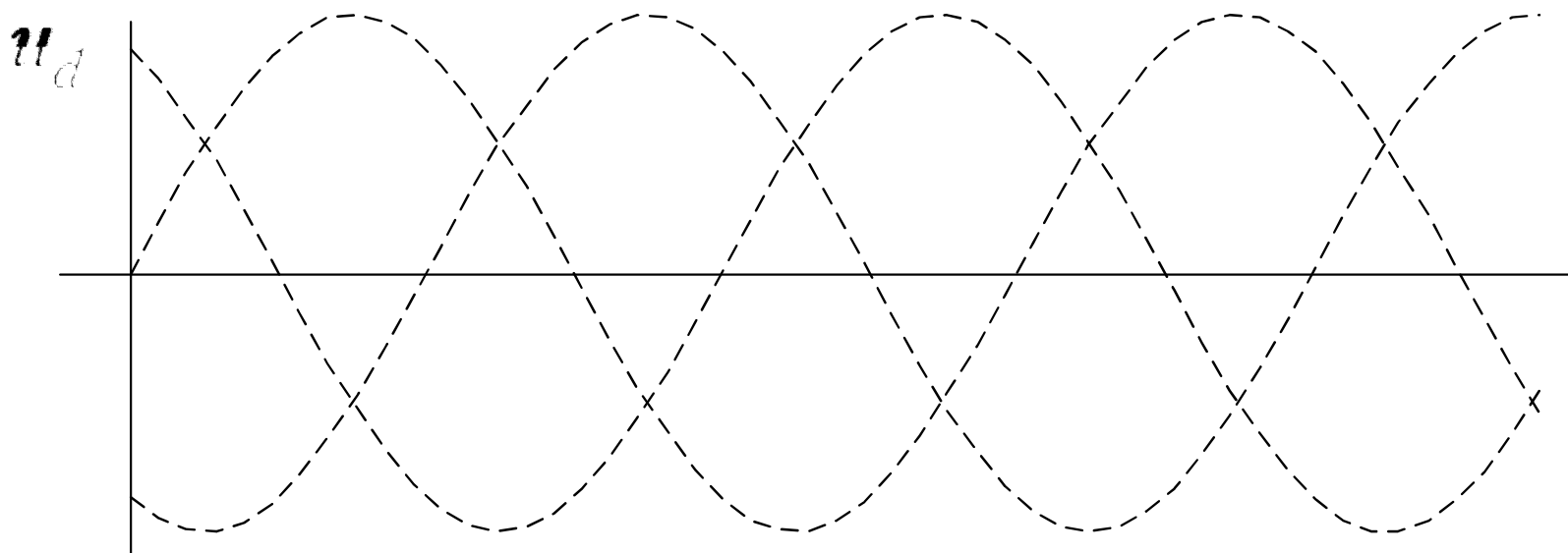


P142习题

第12题：三相半波可控整流电路，如果A相的触发脉冲消失，试绘制出电阻性负载下的直流电压 U_d 波形。

加深：如何推导出这种情况下输出电压的表达式呢？

$\alpha = 60^\circ$ 波形



$$U_d = \frac{2}{3} U_d |_{\alpha=60^\circ}$$

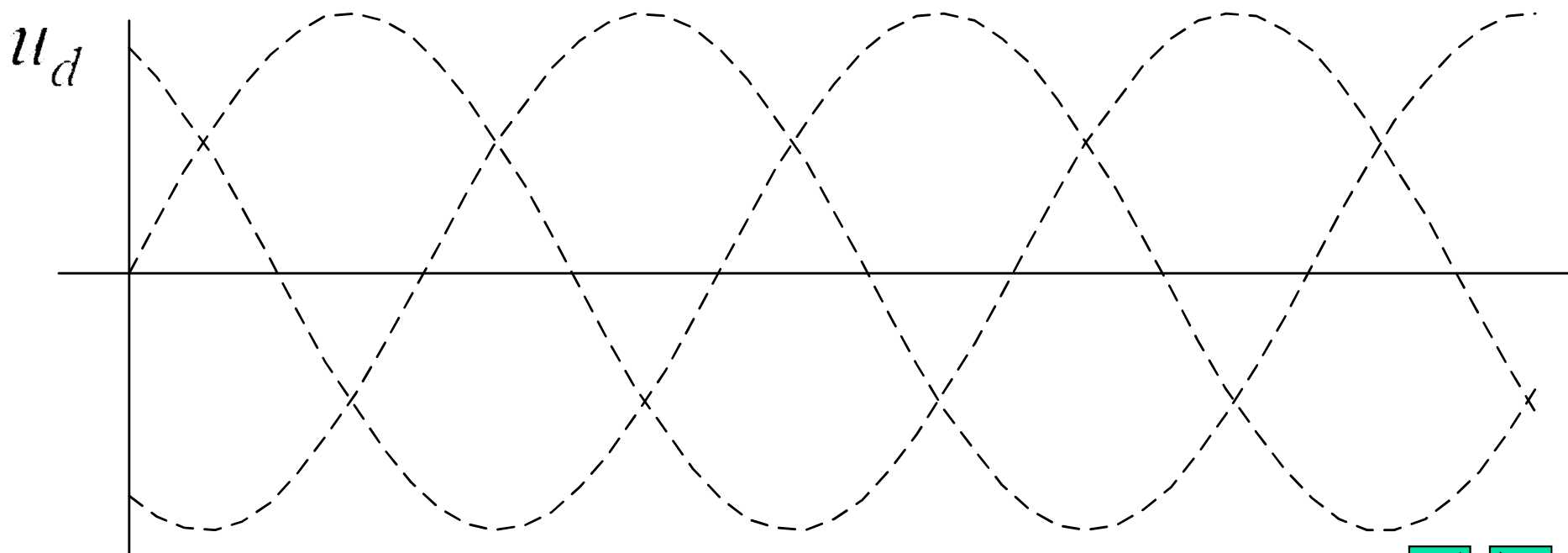


P142习题

第12题：三相半波可控整流电路，如果A相的触发脉冲消失，试绘制出电阻性负载下的直流电压 U_d 波形。

（**电感性负载分析要点**）还是晶闸管的关断问题，在电感续流的作用下，晶闸管如何关断，核心：，这个的分析要点。**电感放出去的能量不能大于电感吸收的能量，也即负半周的面积不能大于正半周的面积**

$\alpha=0^\circ$ 波形



东南大学

电力电子技术

第 21 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



P142习题

第15题：三相半波可控整流电路，大电感负载， $U_2=220V$ ， $R_d=10\Omega$ ，求 $\alpha=45^\circ$ 时直流平均电压 U_d ，晶闸管电流平均值及有效值，并画出输出直流电压 u_d 及晶闸管电流 i_T 的波形。

要点：首先要根据电路的结构与负载性质及控制角 α 的大小正确选择计算公式。

(1) 直流平均电压 U_d

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin\omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} \sqrt{3}U_2 \cos\alpha = 1.17U_2 \cos\alpha$$

$$U_d = 1.17U_2 \cos\alpha = 1.17 \times 220 \times \cos 45^\circ = 182.0(V)$$



P142习题

第15题：三相半波可控整流电路，大电感负载， $U_2=220V$ ， $R_d=10\Omega$ ，求 $\alpha=45^\circ$ 时直流平均电压 U_d ，晶闸管电流平均值及有效值，并画出输出直流电压 u_d 及晶闸管电流 i_T 的波形。

(2) 晶闸管电流平均值及有效值

负载电流平均值
$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{182}{10} = 18.2(A)$$

晶闸管电流平均值
$$I_{dT} = \frac{1}{3} I_d = \frac{1}{3} \times 18.2 = 6.07(A)$$

晶闸管电流有效值
$$I_T = \frac{I_d}{\sqrt{3}} = \frac{18.2}{\sqrt{3}} = 10.51(A)$$

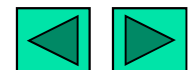
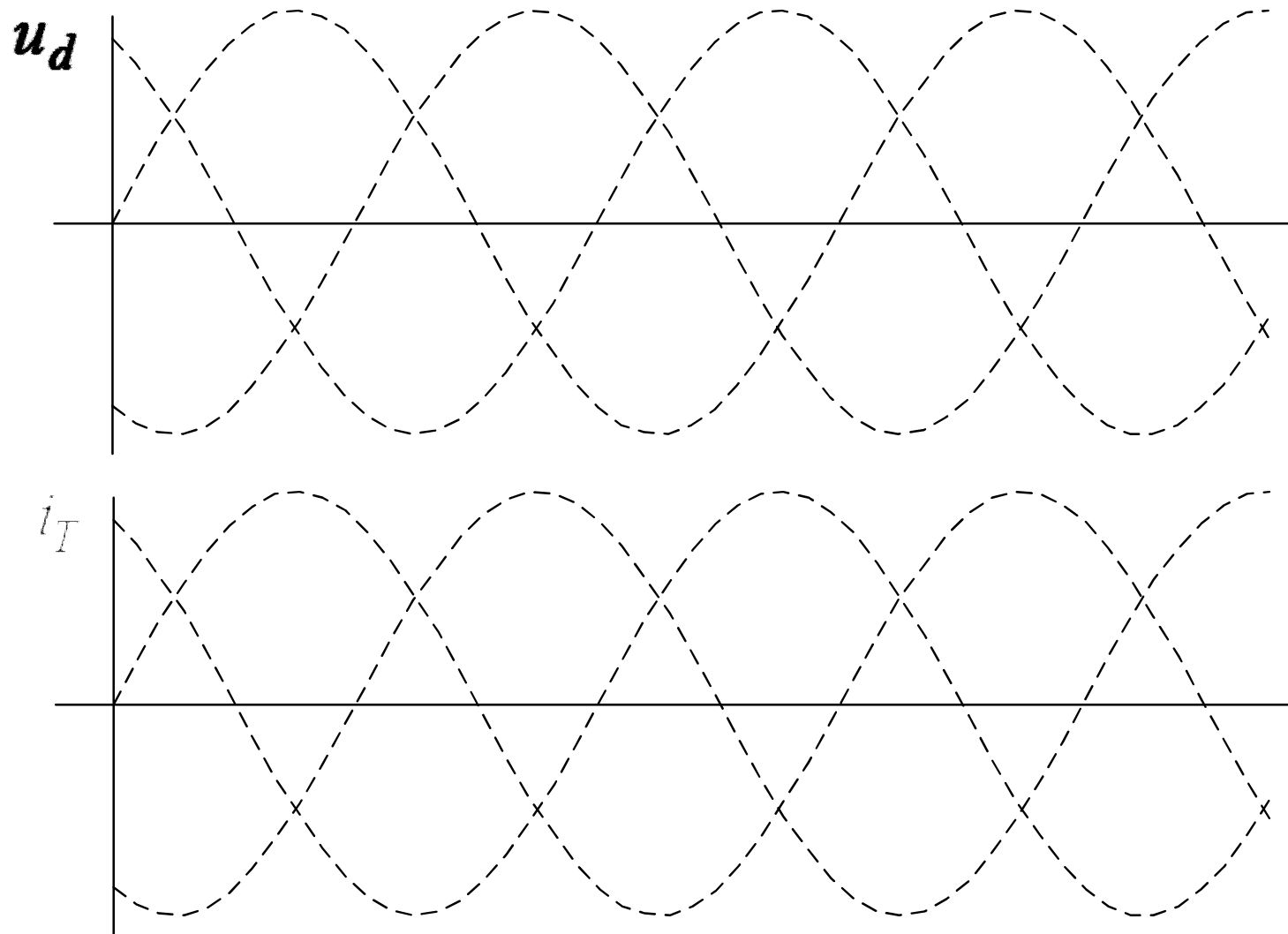
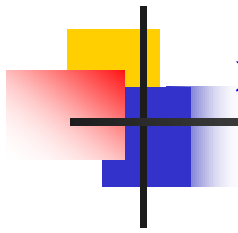


P142习题

第15题：三相半波可控整流电路，大电感负载， $U_2=220\text{V}$ ， $R_d=10\ \Omega$ ，求 $\alpha=45^\circ$ 时直流平均电压 U_d ，晶闸管电流平均值及有效值，并画出输出直流电压 u_d 及晶闸管电流 i_T 的波形。

(3) 直流电压 u_d 及晶闸管电流 i_T 的波形





P142习题

第16题：上题如负载两端并接续流二极管，此时直流平均电压 U_d 及直流平均电流 I_d 多少？晶闸管及续流二极管的电流平均值及有效值各是多少？画出输出直流电压 u_d ，晶闸管及续流二极管电流波形。

要点：首先要根据电路的结构与负载性质及控制角 α 的大小正确选择计算公式。

(1) 直流平均电压 U_d 及直流平均电流 I_d

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin\omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha)] = 0.675U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{6} + \alpha)]$$

$$U_d = 0.675 \times 220 [1 + \cos(30^\circ + 45^\circ)] = 186.93(\text{V})$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{186.93}{10} = 18.69(\text{A})$$



P142习题

第16题：上题如负载两端并接续流二极管，此时直流平均电压 U_d 及直流平均电流 I_d 多少？晶闸管及续流二极管的电流平均值及有效值各是多少？画出输出直流电压 u_d ，晶闸管及续流二极管电流波形。

(2) 晶闸管及续流二极管的电流平均值

晶闸管一个周期内导通多少时间？ $180^\circ - 30^\circ - 45^\circ = 105^\circ$

续流二极管一个周期内导通多少时间？ $3 * (120^\circ - 105^\circ) = 45^\circ$

$$I_{dT} = \frac{105^\circ}{360^\circ} I_d = \frac{105^\circ}{360^\circ} \cdot 18.69 = 5.45(\text{A}) \quad \text{晶闸管电流平均值}$$

$$I_{dD} = \frac{45^\circ}{360^\circ} I_d = \frac{45^\circ}{360^\circ} \cdot 18.69 = 2.34(\text{A}) \quad \text{续流二极管电流平均值}$$



P142习题

第16题：上题如负载两端并接续流二极管，此时直流平均电压 U_d 及直流平均电流 I_d 多少？晶闸管及续流二极管的电流平均值及有效值各是多少？画出输出直流电压 u_d ，晶闸管及续流二极管电流波形。

(3) 晶闸管及续流二极管的电流有效值

晶闸管一个周期内导通多少时间？ $180^\circ - 30^\circ - 45^\circ = 105^\circ$

续流二极管一个周期内导通多少时间？ $3 * (120^\circ - 105^\circ) = 45^\circ$

$$I_{dT\text{有效值}} = \sqrt{\frac{105^\circ}{360^\circ}} I_d = \sqrt{\frac{105^\circ}{360^\circ}} \cdot 18.69 = 10.09(\text{A}) \quad \text{晶闸管电流有效值}$$

$$I_{dD\text{有效值}} = \sqrt{\frac{45^\circ}{360^\circ}} I_d = \sqrt{\frac{45^\circ}{360^\circ}} \cdot 18.69 = 6.61(\text{A}) \quad \text{续流二极管电流有效值}$$

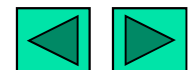
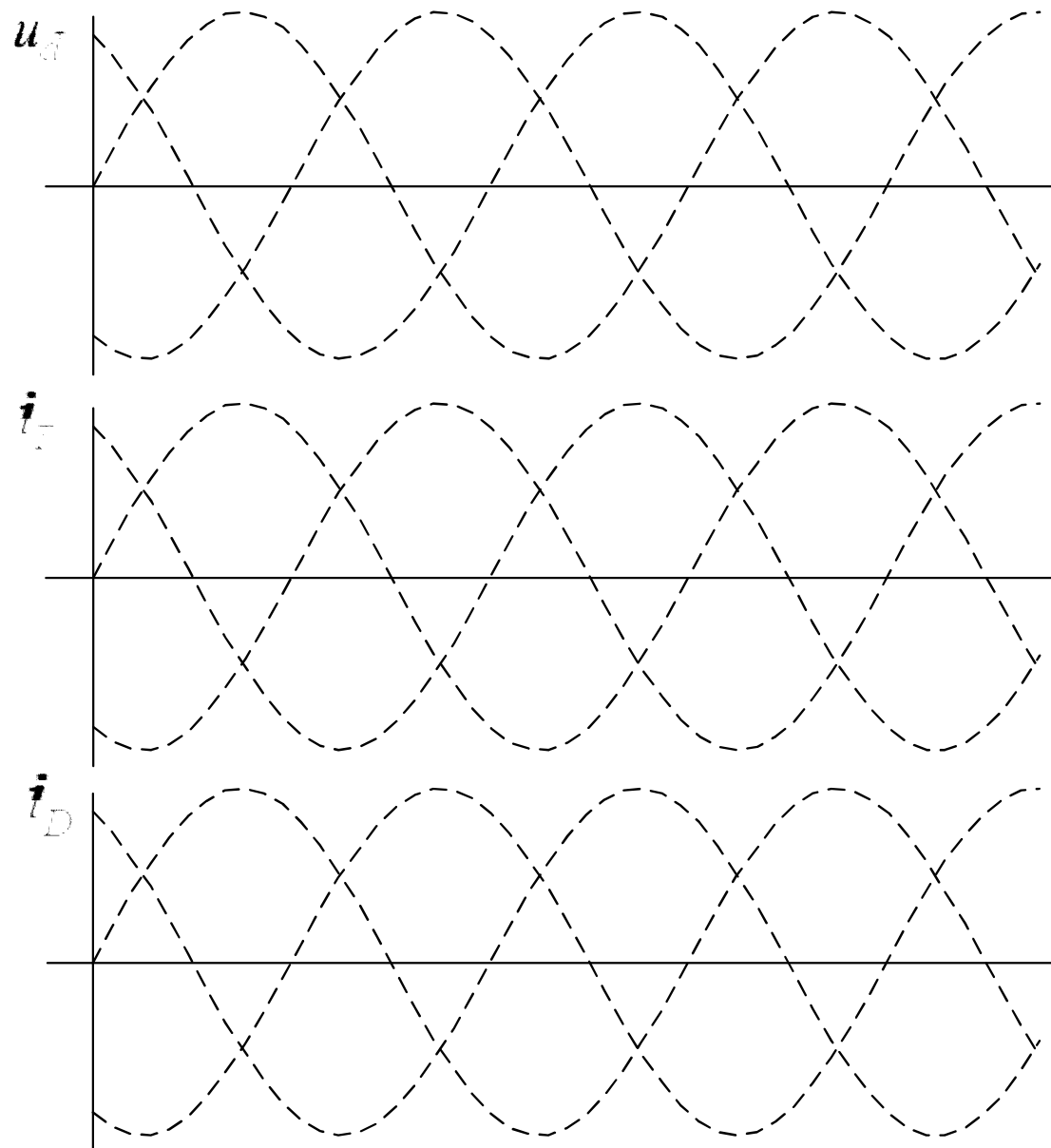
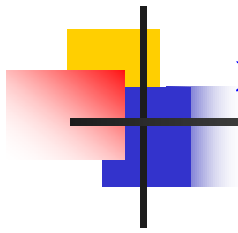


P142习题

第16题：上题如负载两端并接续流二极管，此时直流平均电压 U_d 及直流平均电流 I_d 多少？晶闸管及续流二极管的电流平均值及有效值各是多少？画出输出直流电压 u_d ，晶闸管及续流二极管电流波形。

(4) 直流电压 u_d ，晶闸管及续流二极管电流波形





东南大学

电力电子技术

第 22 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



3、换流重叠现象

1 、换流压降

a 相向b相换流

“1” 时, VT_2 触通, 开始换流

$$i_b: 0^- , i_a: I_d^-$$

“2” 时, $i_b \textcircled{R} I_d$, $i_a \textcircled{R} 0$

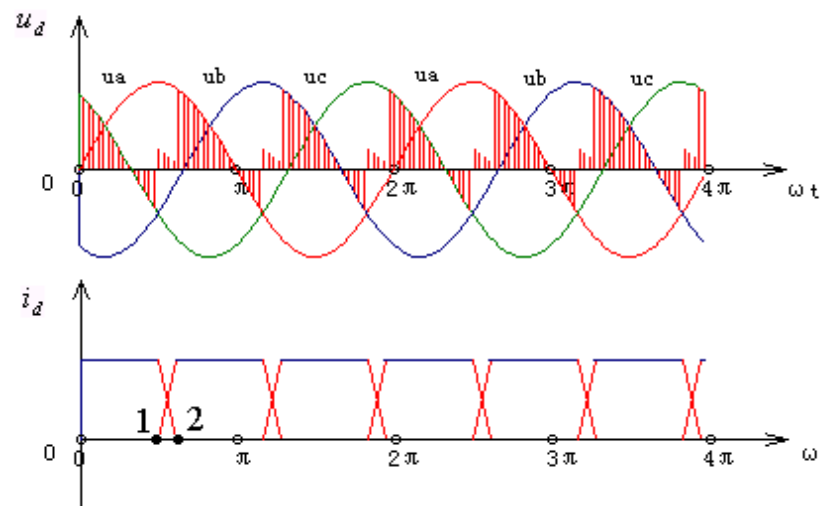
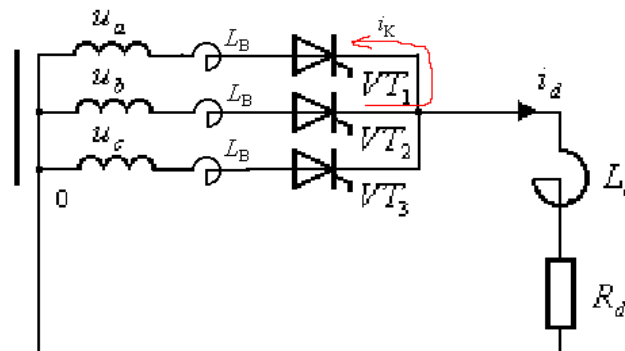
VT_1 、 VT_2 同时导通时间为**换流重叠时间**, μ 角内, VT_1 、 VT_2 都通, 相当于短路。

假想电流 $i_k: 0^- I_d$

$$i_a = i_{a0} - i_k \quad i_{a0} = I_d$$

$$i_b = i_{b0} + i_k \quad i_{b0} = 0$$

$$i_k = I_d \quad i_a = 0 \quad i_b = I_d \quad \text{换流结束}$$



虚拟环流概念

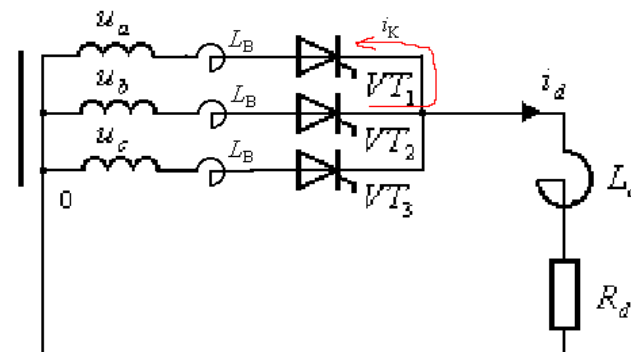
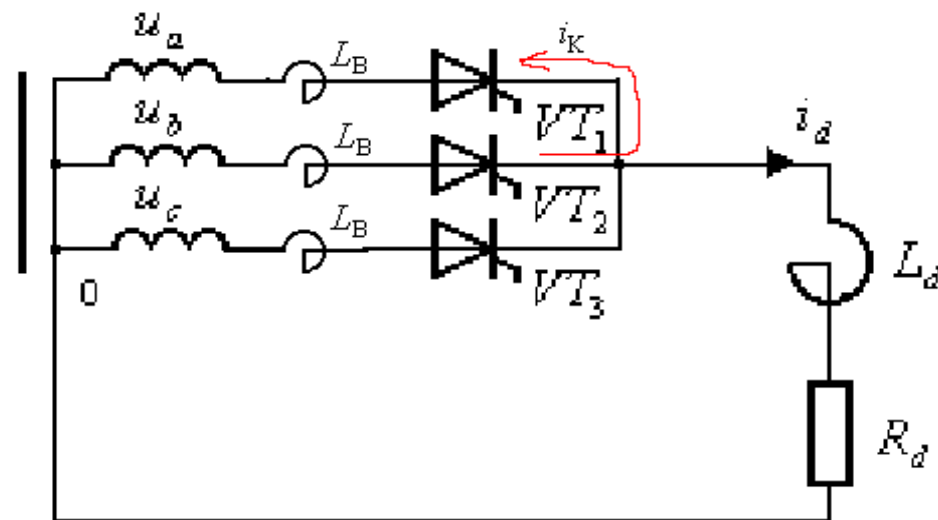
$i_k \uparrow$ 时, L_B 上产生感应电势

a相: $L_B \frac{di_k}{dt}$ 左 (-) 右 (+)

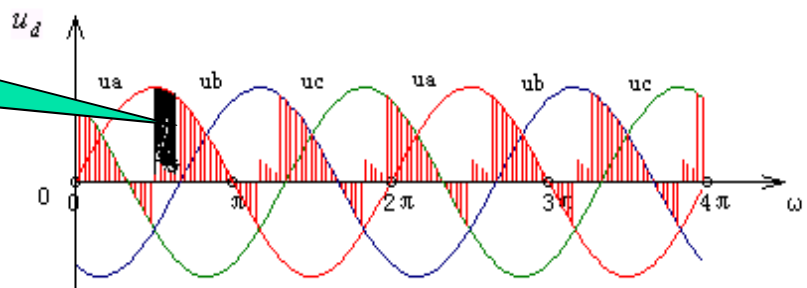
b相: $L_B \frac{di_k}{dt}$ 左 (+) 右 (-)

$$u_b - u_a = 2L_B \frac{di_k}{dt}$$

$$u_d = u_b - L_B \frac{di_k}{dt} = u_b - \frac{u_b - u_a}{2} = \frac{u_a + u_b}{2}$$



换流压降



u_a 、 u_b 的平均值 与 $\mu=0$ 的相比，少了部分面积，称换流压降 ΔU_d

$$\begin{aligned} \Delta U_d &= \frac{1}{2p/m} \int_0^{a+m} (u_b - u_d) d\omega t = \frac{m}{2p} \int_0^{a+m} L_B \frac{di_k}{dt} d\omega t \\ &= \frac{m}{2p} \int_0^{a+m} L_B \omega \frac{di_k}{d\omega t} d\omega t = \frac{m}{2p} \int_0^{I_d} \omega L_B di_k = \frac{m}{2p} \omega L_B I_d = \frac{m X_B}{2p} I_d \end{aligned}$$

注意表达式中积分对象的转换

三相半波 $m=3$

三相桥式 $m=6$

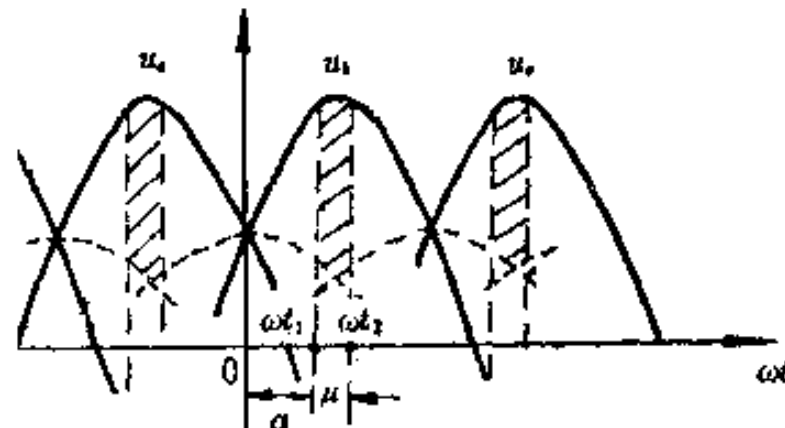
m相整流的概念



2、换流重叠角 μ 计算

$$u_a = \sqrt{2}U_2 \cos(\omega t + \frac{p}{m})$$

$$u_b = \sqrt{2}U_2 \cos(\omega t - \frac{p}{m})$$



$$\frac{di_k}{dt} = \frac{1}{2L_B} (u_b - u_a) = \frac{1}{2L_B} 2\sqrt{2}U_2 \sin \frac{p}{m} \sin \omega t$$

$$di_k = \frac{1}{\omega L_B} \sqrt{2}U_2 \sin \frac{p}{m} \sin \omega t d\omega t$$



$$\int_0^{I_d} di_k = \frac{\sqrt{2}U_2 \sin \frac{p}{m}}{X_B} \int_a^{a+m} \sin \omega t d\omega t$$

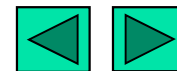
$$I_d = \frac{\sqrt{2}U_2 \sin \frac{p}{m}}{X_B} [\cos a - \cos(a + m)]$$

$$\cos a - \cos(a + m) = \frac{X_B I_d}{\sqrt{2}U_2 \sin \frac{p}{m}} \left\langle \begin{array}{l} \text{半波 } U_2, \quad m=3 \\ \text{桥式 } \sqrt{3}U_2, \quad m=6 \end{array} \right\rangle = \frac{2I_d X_B}{\sqrt{6}U_2}$$

α 、 I_d 的大小对 μ 的影响

换流重叠现象的影响：谐波 - 、 $\cos j$ -

换流重叠的本质原因：变压器漏感要释放能量



3、考虑换流重叠后的直流平均电压

$$U_d = \frac{1.17}{2.34} U_2 \cos\left(\alpha + \frac{m}{2}\right) \cos \frac{m}{2}$$

已知 U_2 、 L_B 、 I_d 时，可按 $I_d \rightarrow \mu \rightarrow U_d$

已知 U_2 、 L_B 、 R_d 时，可按 $U_d = U_d' - \Delta U_d$ 和回路电压方程计算 I_d 、 $U_d \rightarrow \mu$

$$U_d = U_d' - V U_d$$

注意有两种题目类型，教材P119页例题为第2种。



东南大学

电力电子技术

第 23 讲

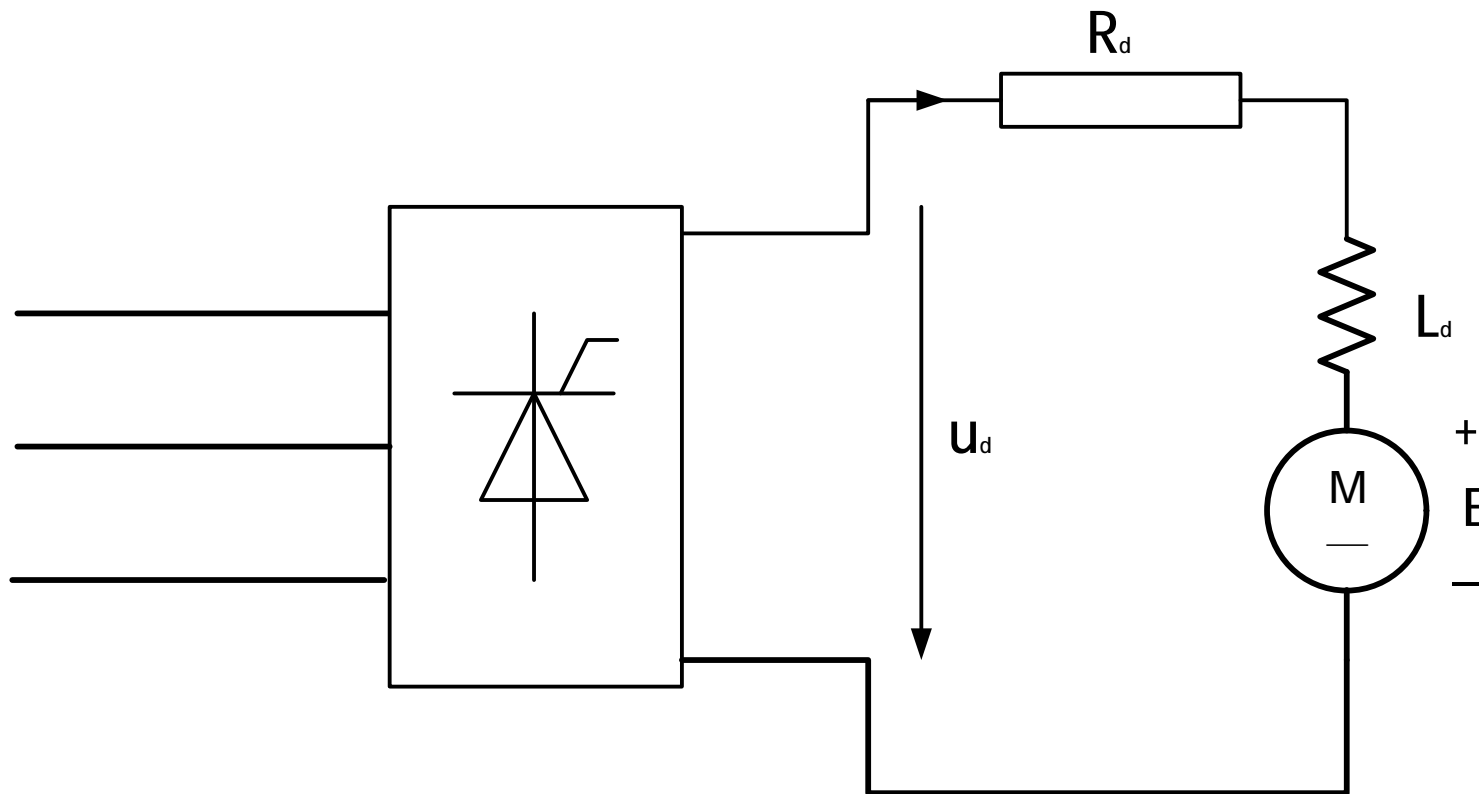
主讲教师：王念春

380419124@qq.com



教材P119页例题。

三相桥式全控整流电路对直流电动机负载供电，其中直流电机反电势 $E=200\text{V}$ ，回路电阻 $R_d=1\Omega$ ，平波电抗器的电感 L_d 的数值很大，整流变压器副边漏抗 $L_B=1\text{mH}$ ，整流桥输入交流相电压 $U_2=220\text{V}$ ，移相控制角 $\alpha=60^\circ$ ，求整流桥输出直流电压 U_d 、直流电流 I_d 和换相重叠角 μ 。



教材P119页例题。

三相桥式全控整流电路对直流电动机负载供电，其中直流电机反电势 $E=200\text{V}$ ，回路电阻 $R_d=1\ \Omega$ ，平波电抗器的电感 L_d 的数值很大，整流变压器副边漏抗 $L_B=1\text{mH}$ ，整流桥输入交流相电压 $U_2=220\text{V}$ ，移相控制角 $\alpha=60^\circ$ ，求整流桥输出直流电压 U_d 、直流电流 I_d 和换相重叠角 μ 。

如果不考虑换相重叠角，求出输出电压 U'_d

$$U'_d = 2.34 U_2 \cos \alpha = 2.34 \times 220 \times \cos 60^\circ = 257.5 (\text{V})$$

考虑换相重叠角后，输出电压与电流与不考虑换相重叠角不同，可以用下面方程得出：

$$\begin{cases} U_d = U'_d - \Delta U_d \\ U_d - E = I_d R_d \end{cases}$$



教材P119页例题。

三相桥式全控整流电路对直流电动机负载供电，其中直流电机反电势 $E=200\text{V}$ ，回路电阻 $R_d=1\ \Omega$ ，平波电抗器的电感 L_d 的数值很大，整流变压器副边漏抗 $L_B=1\text{mH}$ ，整流桥输入交流相电压 $U_2=220\text{V}$ ，移相控制角 $\alpha=60^\circ$ ，求整流桥输出直流电压 U_d 、直流电流 I_d 和换相重叠角 μ 。

$$\dot{U}_d = U'_d - \mathbf{V}U_d$$

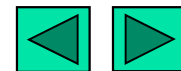
$$\dot{U}_d - E = I_d R_d$$

$$\mathbf{V}U_d = \frac{mX_B}{2p} I_d = \frac{6}{2p} \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot I_d = 0.3I_d$$

$$U_d = U'_d - \mathbf{V}U_d = 257.5 - 0.3I_d$$

$$257.5 - 0.3I_d - E = I_d R_d$$

$$I_d = \frac{257.5 - 200}{1.3} = 44.23(\text{A})$$



教材P119页例题。

三相桥式全控整流电路对直流电动机负载供电，其中直流电机反电势 $E=200\text{V}$ ，回路电阻 $R_d=1\ \Omega$ ，平波电抗器的电感 L_d 的数值很大，整流变压器副边漏抗 $L_B=1\text{mH}$ ，整流桥输入交流相电压 $U_2=220\text{V}$ ，移相控制角 $\alpha=60^\circ$ ，求整流桥输出直流电压 U_d 、直流电流 I_d 和换相重叠角 μ 。

$$U_d = U_d' - \Delta U_d = 257.5 - 0.3I_d$$

$$I_d = \frac{257.5 - 200}{1.3} = 44.23(\text{A})$$

$$U_d = U_d' - \Delta U_d = 257.5 - 0.3 \times 44.23 = 244.23(\text{V})$$



教材P119页例题。

三相桥式全控整流电路对直流电动机负载供电，其中直流电机反电势 $E=200\text{V}$ ，回路电阻 $R_d=1\Omega$ ，平波电抗器的电感 L_d 的数值很大，整流变压器副边漏抗 $L_B=1\text{mH}$ ，整流桥输入交流相电压 $U_2=220\text{V}$ ，移相控制角 $\alpha=60^\circ$ ，求整流桥输出直流电压 U_d 、直流电流 I_d 和换相重叠角 μ 。

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + m) = \frac{X_B I_d}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\rho}{m}} = \frac{X_B I_d}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} U_2 \sin \frac{\rho}{6}} = \frac{2 I_d X_B}{\sqrt{6} U_2}$$

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + m) = \frac{2 I_d X_B}{\sqrt{6} U_2} = \frac{2 \cdot 44.23 \cdot 10^{-3} \cdot 314}{\sqrt{6} \cdot 220} = 0.0515$$

$$\cos(60^\circ + m) = \cos 60^\circ - 0.0515 = 0.5 - 0.0515 \Rightarrow m = 3.36^\circ$$



教材P143页18题。

三相桥式全控整流电路，通过电抗器 L_d 向直流电动机供电。已知变压器副边电压 $U_2=100V$ ，变压器每相线绕组漏感（折算到副边） $L_B=100\mu H$ ，直流平均电流 $I_d=150A$ ，求漏抗引起的换相压降 ΔU_d 及 $\alpha=0^\circ$ 时的重叠角 μ 。

答：这种题目类型为已知负载电流 I_d 大小。

$$\Delta U_d = \frac{mX_B}{2p} I_d = \frac{6}{2p} \cdot 10^{-4} \cdot 314 \cdot 150 = 4.5(V)$$



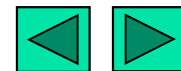
教材P143页18题。

三相桥式全控整流电路，通过电抗器 L_d 向直流电动机供电。已知变压器副边电压 $U_2=100V$ ，变压器每相线绕组漏感（折算到副边） $L_B=100\mu H$ ，直流平均电流 $I_d=150A$ ，求漏抗引起的换相压降 ΔU_d 及 $\alpha=0^\circ$ 时的重叠角 μ 。

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + m) = \frac{X_B I_d}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{p}{m}} = \frac{X_B I_d}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} U_2 \sin \frac{p}{6}} = \frac{2 I_d X_B}{\sqrt{6} U_2}$$

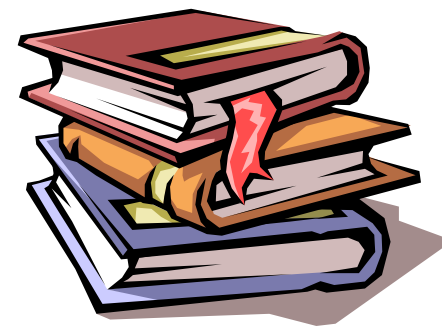
$$1 - \cos m = \frac{2 I_d X_B}{\sqrt{6} U_2} = \frac{2 \cdot 150 \cdot 10^{-4} \cdot 314}{\sqrt{6} \cdot 100} = 0.038457$$

$$\cos m = 1 - 0.038457 = 0.96154 \Rightarrow m = 15.94^\circ$$



作业:

P.142 习题 17、 20



20题本质上是第12题的具体应用，大家参照第12题做即可。

