

仅内部使用 郭小舟老师

电力电子技术

Power Electronics

西南交通大学



不得以赢利为目的

第二章 相控整流电路

相控整流电路的**一般分析**方法:

假定电路中所有的元件都是**理想元件**。

当开关导通时，用短路导线代替；当开关截止时，用开路代替

由于开关通断前后电路的拓扑发生了变化，所以必须分别对开关通断前后电路进行分析

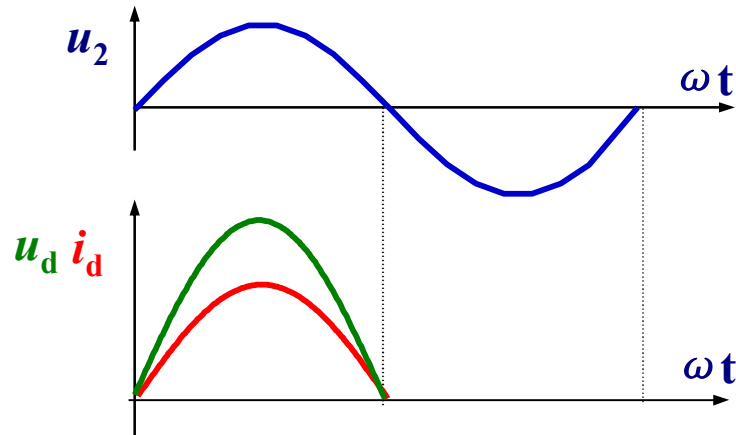
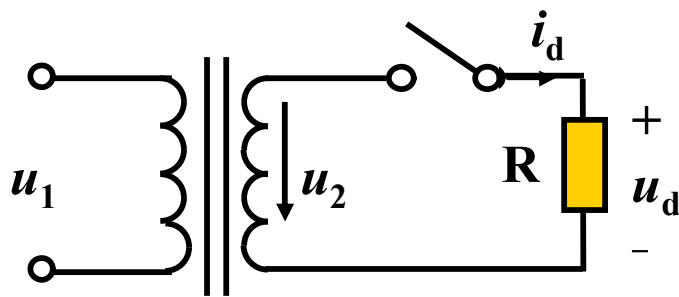
分析工具

二极管的对通与关断条件

晶闸管的导通、维持导通与关断条件

§ 2-1 单相半波整流电路

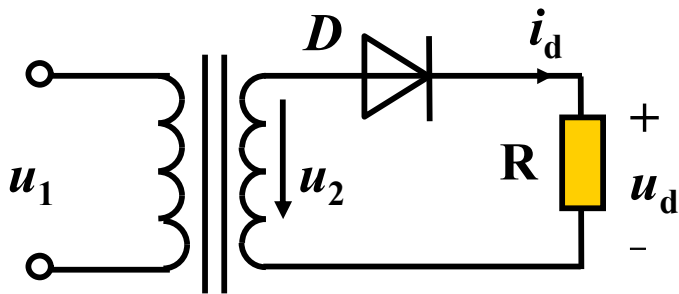
半波整流电路电路原理可用下图说明：在电源电压 u_2 的正半周（变压器副边电压上正下负）将开关全合上在 u_2 负半周将开关断开



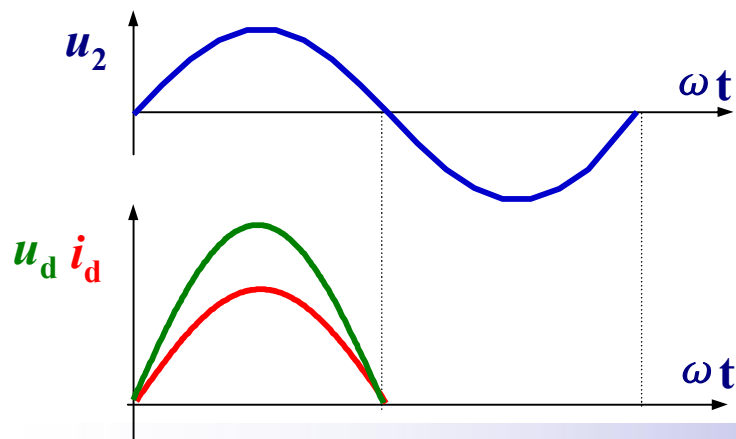
显然，负载上就得到了直流电。因为

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0.45U_2$$

现在用二极管来代替机械开关。电路如图。当电源电压 u_2 为正半周（变压器副边电压上正下负）由二极管导通条件知，D在正半周导通。

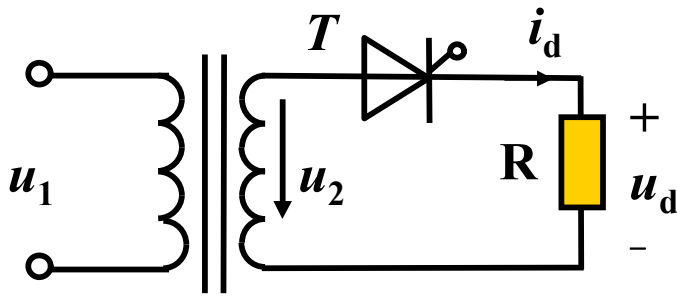


相反，当电源电压 u_2 为负半周（变压器副边电压上负下正）D关断



电路输出波形与上图完全相同。二极管自动完成了上例中开关的作用

现在用晶闸管代替二极管，电路如图。当 u_2 为正半周由KVL知T承受正向电压，反之则为反压。由导通条件知，晶闸管**可能**在正半周导通



设晶闸管的控制信号已知，**负载是电阻**。下面讨论如何应用三个条件分析电路

将电路划分几个区域：

$0 - \alpha$: $u_{AK} > 0$ 但无 u_g ，T不导通**(导通条件)**

$\alpha - \pi$: 在 α 点 $u_{AK} > 0$ 且 $u_g > 0$ ，T导通**(导通条件)**

导通后 $i_T = i_d = u_d / R = u_2 / R > 0$,
T将导通下去。直到 π 点(维持
导通条件)

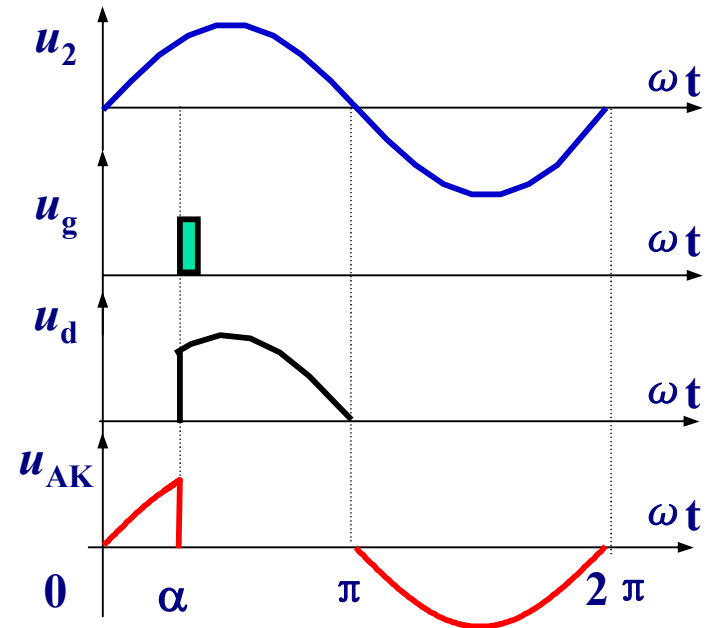
在 π 点, $u_2 = 0$, 所以 $i_T = 0$, T
关断(关断条件)

$\pi - 2\pi$: $u_{AK} < 0$, 晶闸管承受
反压不导通(导通条件)

电路输出波形如图。其平均(直流)值为:

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

$$= 0.45U_2 \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$



可见，改变控制角 α 即能改变输出电压的平均值

导通角：晶闸管在一个电周期中导通的角度

移相：改变 α 出现的相位

移相范围： α 的有效变化范围。该电路为 $0-180^\circ$

相控整流：改变 α 出现的相位来调节能整电压大小

在单相电路中， α 从 u_2 过零点（自然换相点）起算

负载平均电流
$$I_d = U_d / R$$

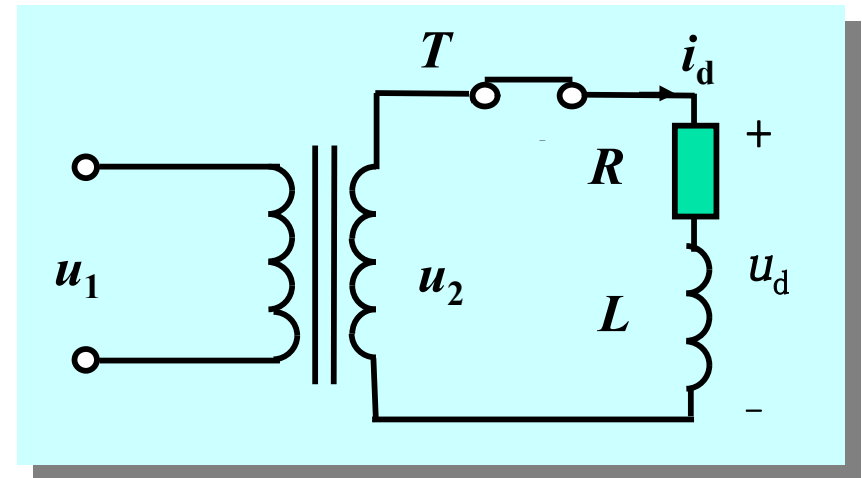
其它电量的计算：应根据波形图与定义来进行

注意 U_d 、 I_d 以及有效值等是计算值。

电阻-电感负载时工作情况

1. 分析方法与上节相同

当晶闸管不导通时，它相当于一个断开的开关，此时的等效电路如图。



当晶闸管导通后它等效成一个闭合的开关。如图。

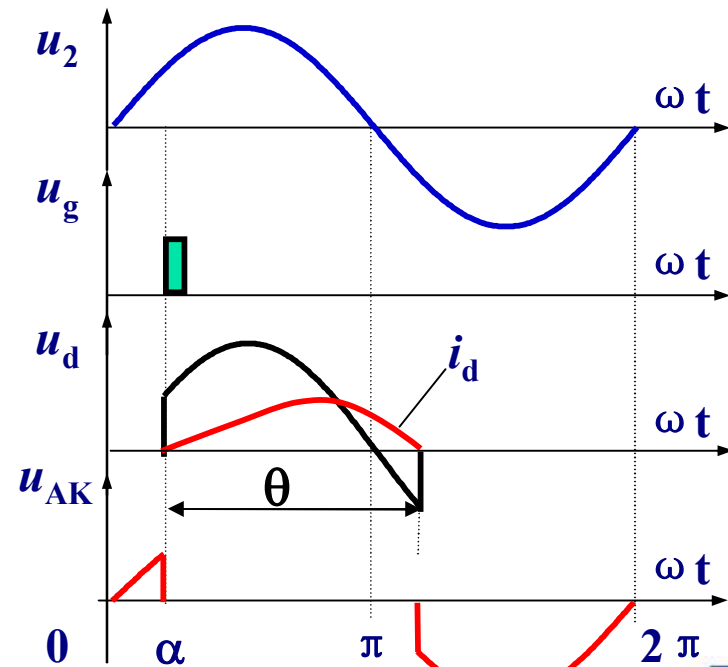
由电路可写如下方程：

$$u_2 = i_d R + L(di_d / dt)$$

$$\text{或： } L(di_d / dt) = u_2 - i_d R$$

由电流的导数可知：

当T刚导通， i_d 小，电流增大
随着电流增大，电阻压降增



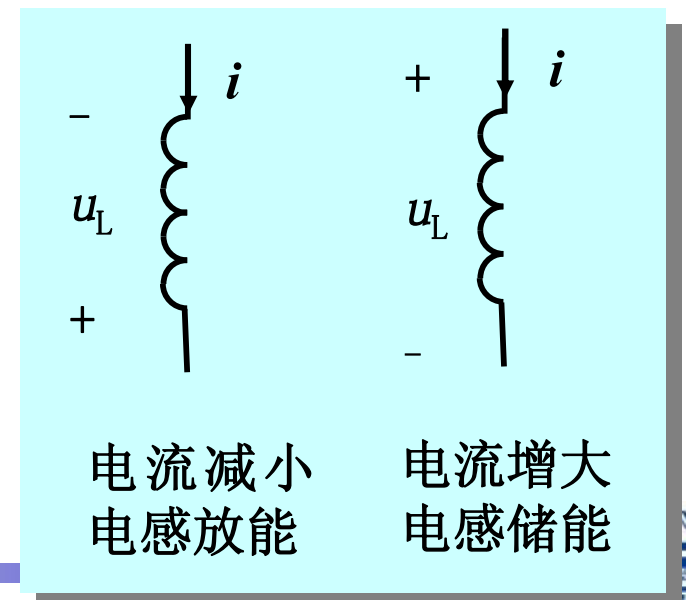
大，当电阻压降与电源电压相等时电流达到极大值
当电源电压小于电阻压降时，电流下降。

在电源电压过零时，由于回路电流大于零，晶闸管继续导通。结果负载两端电压出现负的波形。当电流衰减到零，T关断。波形图如图示。

由上述分析与波形图可看出，电感电阻负载与纯电阻负载有很大的不同。

从物理学知，通过电感的电流发生变化时电感会产生一个电势，其大小为 $L(di/dt)$ ，其方向总是阻止电流的变化。

当T导通电流增大时电感储能，




因为电流从其瞬时极性的+端流入。当电流减小时电感储能释放，因为电流从其瞬时极性的+端流出由于电感储能而不耗能，所以当它释放储能时，回路中就有电流流动，T将继续导通。从电路中看出L的储能一部分消耗在电阻上，另一部分返回到电网。只有当电感电流为零，即储能释放完毕，T才能满足关断条件关断。

电路特点：1)负载电压中出现了部分负的波形。2)负载电压与电流的变化规律不同。3)T的导通角可大于 180° ，它与R、L参数有关。4)移相范围仍为 180°

2. 输出电压的计算：

参考波形图。设晶闸管的导角为 θ ， $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$


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

直流电流的计算：因为 $u_2 = i_d R + L(di_d / dt)$

两边同时做定积分：

$$\int_{\alpha}^{\alpha+\theta} u_2 d(\omega t) = \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} i_d R d(\omega t) + \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} L(di_d / dt) d(\omega t)$$

$$\int_{\alpha}^{\alpha+\theta} u_2 d(\omega t) = U_d \quad \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} i_d R d(\omega t) = I_d R$$

$$\int_{\alpha}^{\alpha+\theta} L(di_d / dt) d(\omega t) = \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} u_L d(\omega t) = \omega L \int_{i_d(\alpha)}^{i_d(\alpha+\theta)} di_d = 0$$

所以 $I_d = U_d / R$

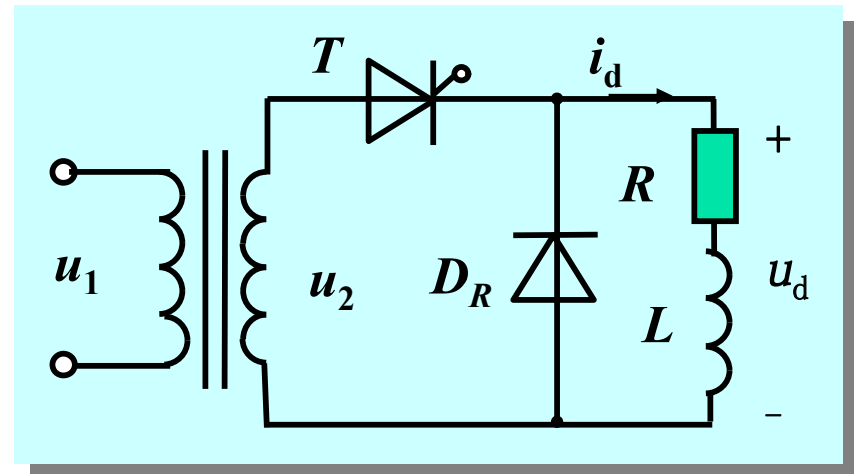
上式看似欧姆定律但实质上不是。它只是直流

分量的平衡式。其物理意义是直流分量被电阻平衡
直流电流的表达式过于复杂这里不作进一步推导

讨论：当电感值加大时，放电时间就延长。结果输出电压波形中负的部分加增加，平均直流电压就降低。
当电感很大时，正负面积几乎相等，直流电压接近零

3. 电路的改进—增加续流二极管

当增加图示二极管后，在 u_2 正半周两电路工作情况是一样的
T导通时 D_R 承受反压截止；当 u_2 过零变负时， D_R 导通，电流经 D_R 流动，不再经过T。这称续流。续流期间 u_d 为零，T承受电源施加的反压。



根据波形图可知:

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

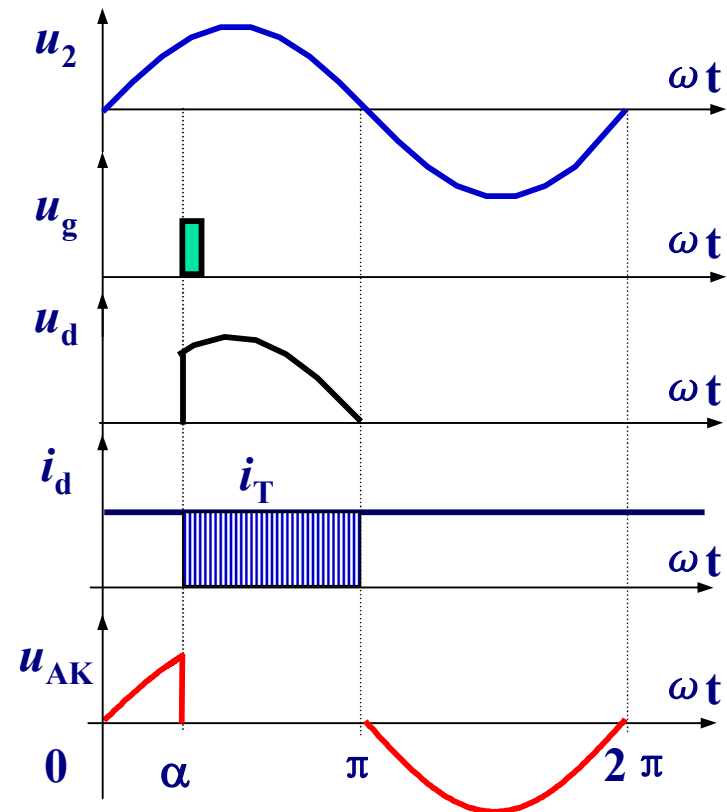
$$I_d = U_d / R$$

晶闸管的有效值电流:

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

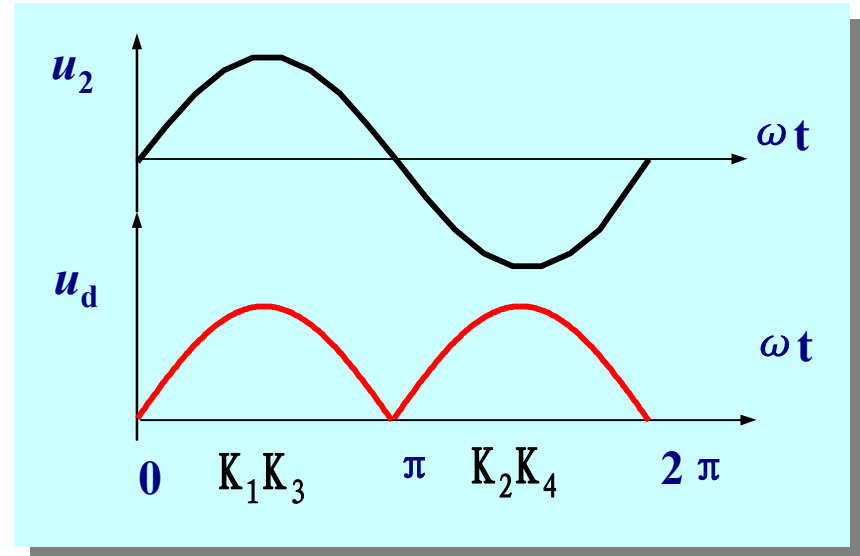
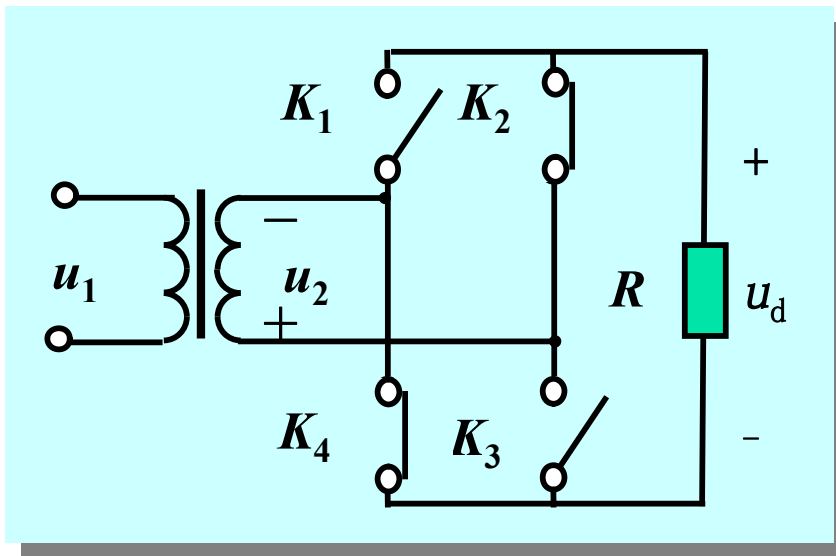
续流管的有效值电流:

$$I_D = \sqrt{\frac{\pi + \alpha}{2\pi}} I_d$$



半波电路的主要问题是输出电压脉动大，变压器有直流磁化问题实际很少应用。但它是相控整流电路的基础。所以要求掌握它。

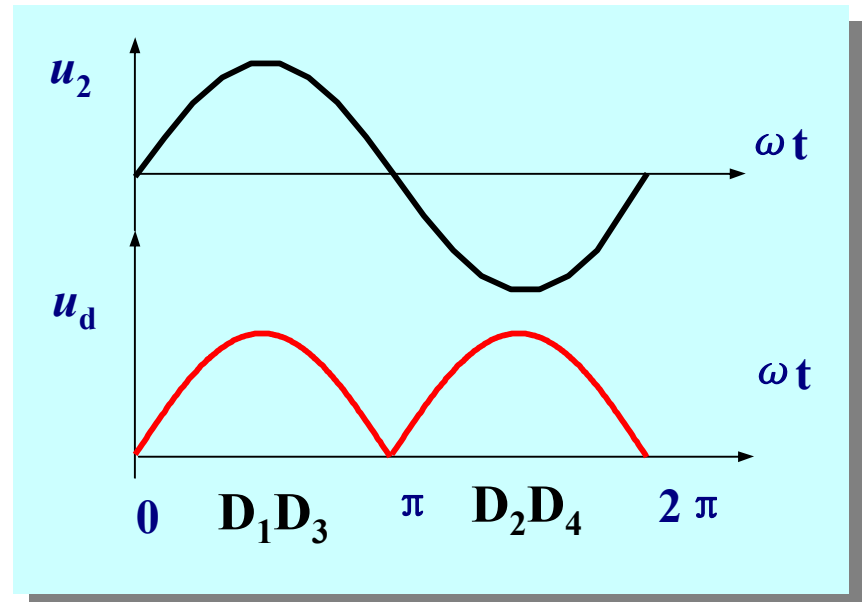
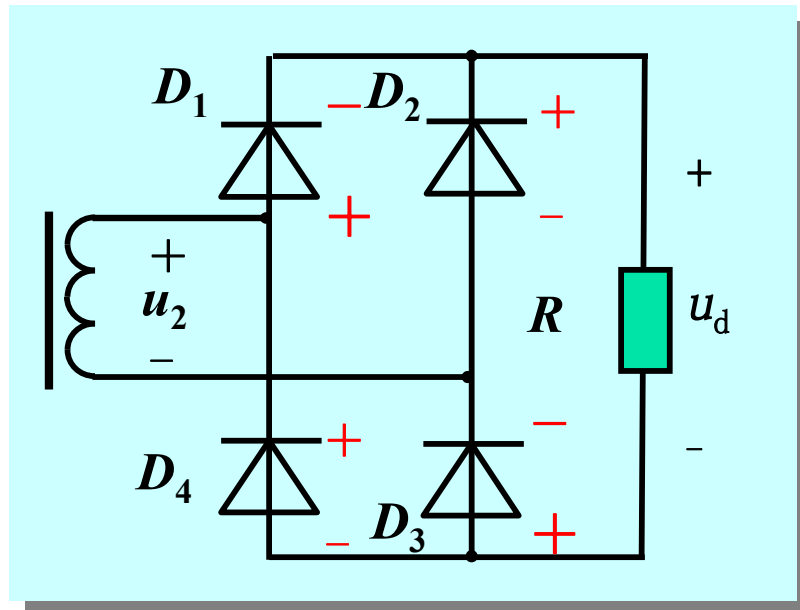
§ 2-2单相桥式全控整流电路



在 u_2 正半周 (上+下-), K_1K_3 闭合 K_2K_4 断开, 负半周
 K_2K_4 闭合 K_1K_3 断开

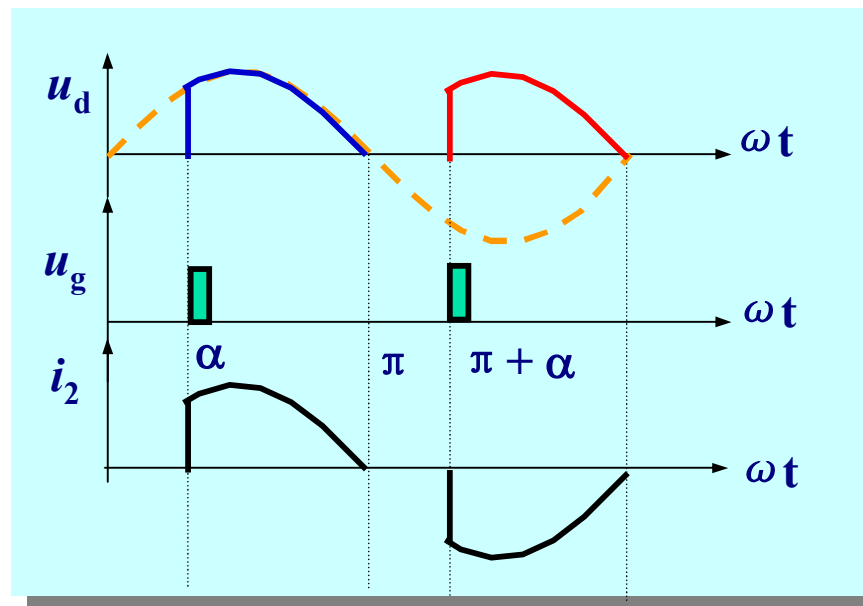
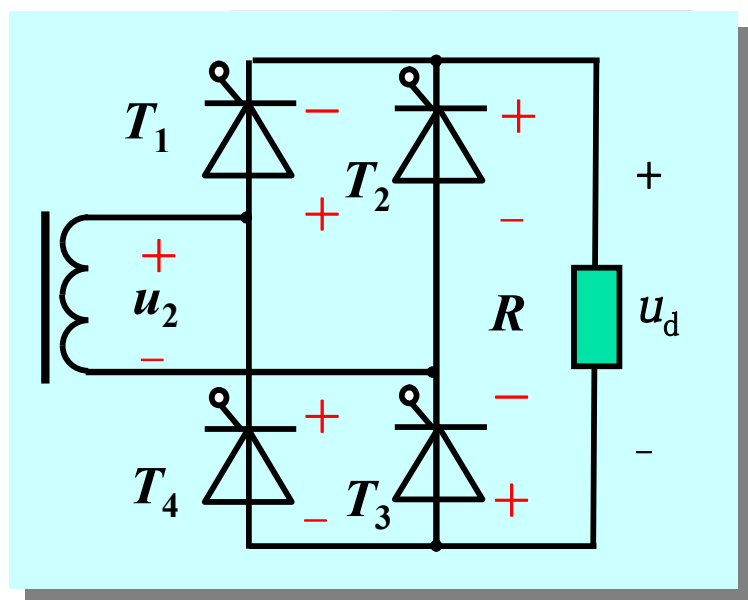
用此方法交流输入电压被变换成直流电压

将开关换成二极管



正半周 D_1D_3 导通 D_2D_4 截止负半周 D_2D_4 导通 D_1D_3 截止 D_1 - D_4 自动完成 $K_1 - K_4$ 的动作。

将开关换成晶闸管



$0-\alpha$: $u_{AK1.3} > 0$ 但无 u_g , $T_{1.3}$ 不导通。

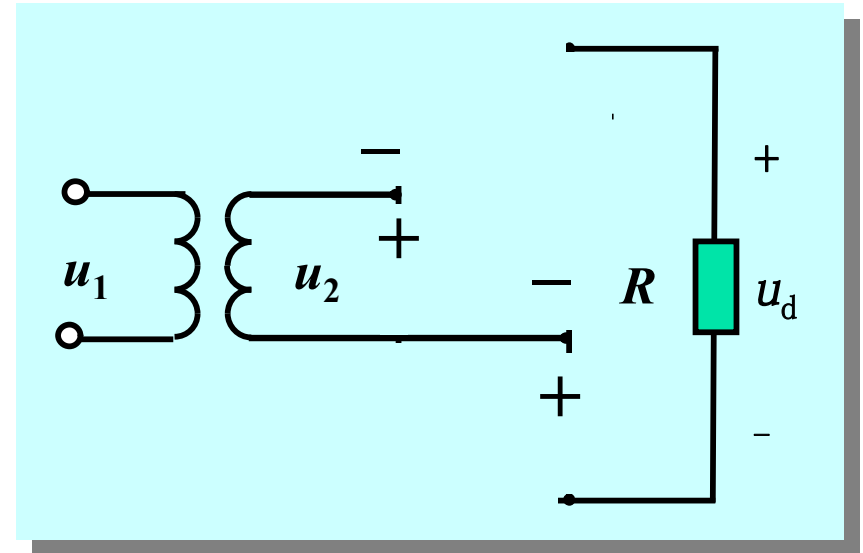
$\alpha-\pi$: 在 α 点 $u_{AK1.3} > 0$ 且 $u_g > 0$, $T_{1.3}$ 导通。 $i_{T1} = i_{T3} = i_d > 0$, $T_{1.3}$ 将导通下去, 直到 π 点。

在 π 点 $u_2 = 0$, 所以 $i_{T1} = i_{T3} = 0$, $T_{1.3}$ 关断。

负半周的分析方法与正半周相同

为构成导通回路，必须使 T_1T_3 同时导通。该电路就是前述的半波电路。

同理，在 u_2 的负半周，只须考虑 T_2T_4 ，它们构成了另一个半波电路。



结论：桥式电路可看作是两个半波电路的叠加。

1. 电阻负载

负载是的电压与电流有相同的波形。

开关在正半周 α 或 $(\pi + \alpha)$ 处导通，在 π 或 2π 处关断

当 T_1 - T_4 均不导通时，认为各管的阻抗相同，所以其上的电压为电源电压的一半。

重要电量的计算

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} (1 + \cos \alpha) \\ &= 0.9 U_2 \frac{(1 + \cos \alpha)}{2} \end{aligned}$$

当 $\alpha=0$ ， $U_d=0.9U_2$ ，当 $\alpha=180^\circ$ ， $U_d=0$ 。

$$I_d = U_d / R$$

晶闸管的有效值电流:

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

变压器副边的有效值电流:

$$I_2 = \sqrt{2}I_T$$

变压器副边的功率因数:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{I^2 R}{U_2 I_2} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

导通角：晶闸管在一个电周期中导通的角度

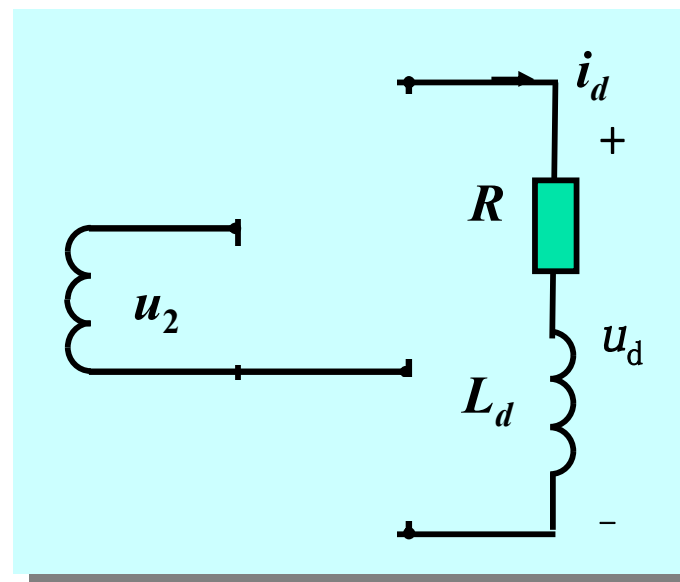
移相：改变 α 出现的相位

移相范围： α 的有效变化范围。该电路为 $0-180^\circ$

在单相电路中， α 是从 u_2 过零点起算

2. 电感电阻负载

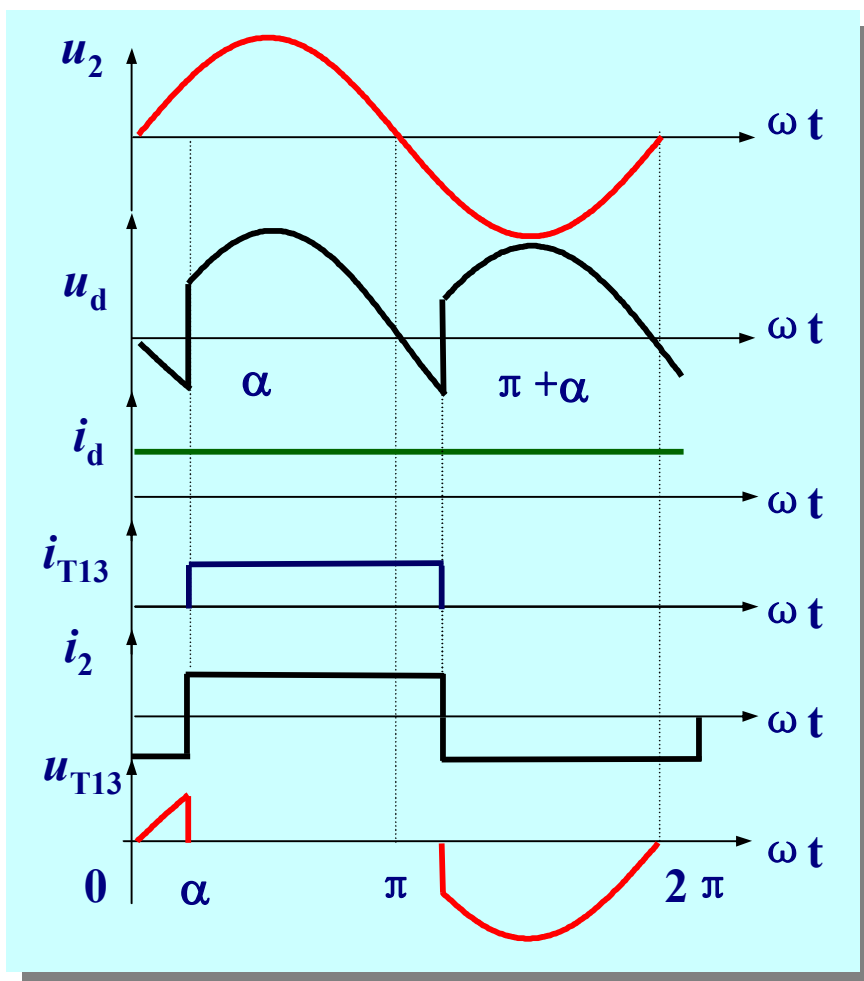
设电感 L_d 足够大，电流平直
电路已经处于稳态。



在正半周 α 处 $T_{1.3}$ 触发导通

当 u_2 过 π 变负后，由于流过 $T_{1.3}$ 的电流大于零， $T_{1.3}$ 继续导通。

到 $\pi+\alpha$ 点 $T_{2.4}$ 触发导通 $T_{1.3}$ 被反压关断。



注意到 $T_{2.4}$ 的导通将电源电压作为反压直接加到 $T_{1.3}$ 两端使它们关断。如果 $T_{2.4}$ 不导通 $T_{1.3}$ 就不会关断
同理，在正半周 α 处 $T_{1.3}$ 触发导通， $T_{2.4}$ 承受反压关断

基本电量的计算—根据波形图和定义进行

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

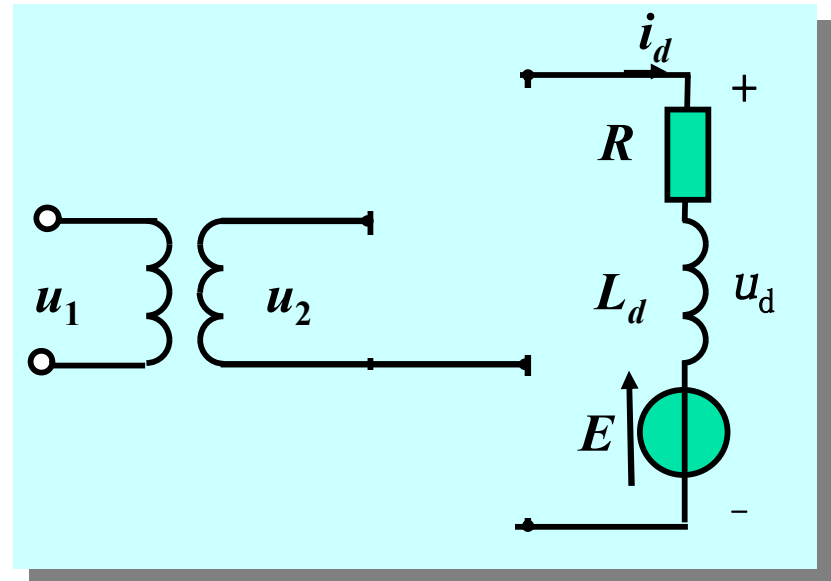
$$I_d = U_d / R \quad I_T = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d \quad I_2 = \sqrt{2} I_T$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{I^2 R}{U_2 I_2} = \frac{U_d I_d}{U_2 I_2}$$

当 $\alpha=0$, U_d 最大; $\alpha=90^\circ$, $U_d=0$; $\alpha>90^\circ$, $U_d=0$ 并且不连续。电流连续时晶闸管的导通角与 α 无关, 总为 180°

3. 电感电阻反电势负载

电路如图。其中反电势可以是直流电压源也可以是旋转的直流电动机的反电势。设控制角为 α , 并设电流 i_d 连续且平直(这表明 $U_d>E$ 成立)。



在 α 点 $T_{1.3}$ 触发导通, 电流 i_d 沿 $T_{1.3}$ 流动, 直到 $\pi+\alpha$ 点 $T_{2.4}$ 触发导通, $T_{1.3}$ 被反压关断。电流改由 $T_{2.4}$ 流动。当 u_2 再次变为正半周, 回到 α 点, $T_{1.3}$ 导通 $T_{2.4}$ 关断。电路完成一个完整周期的工作。

由上述分析知，该电路的工作情况与电阻电感负载相同，波形也完全相同。差别仅在于 i_d 的大小受电势的影响。此时：

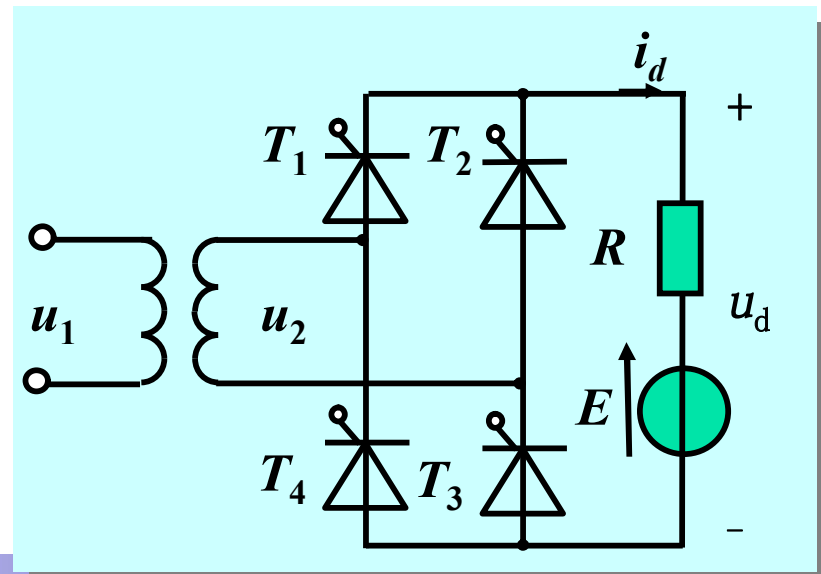
$$I_d = \frac{U_d - E}{R}$$

其它的计算公式与电阻电感负载完全相同。

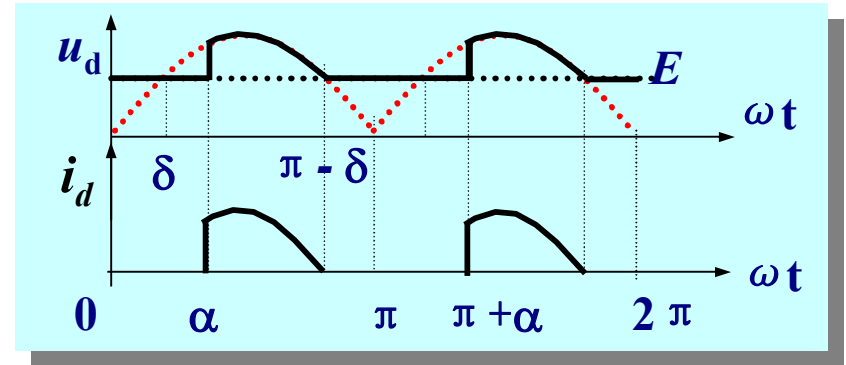
讨论：当 $U_d < E$ 时， $I_d = 0$ 而不为负。因为晶闸管的单向导电性，不可能流过反向电流。

4. 电阻反电势负载

与上一种情况不同，在这种情况下，只有 $|u_2| > E$ 时晶闸管才能承受正向电压，可能导通。具体的导通点与 α 有关。



在正半周，若 $\alpha < \delta$ ， $T_{1,3}$ 承受反压不能导通，此时 $u_d = E$ ；当 $\alpha > \delta$ ， $T_{1,3}$ 满足导通条件导通， $u_d = u_2$ 。



当 u_2 下降到 E (即 $\pi - \delta$ 点) 时负载电流为零， $T_{1,3}$ 关断 $u_d = E$ 。负半周的工作过程相似。因此 i_d 的表达式是

$$i_d = (u_2 - E) / R = (\sqrt{2}U_2 \sin \omega t - E) / R \quad (i_d > 0)$$

停止导电角 δ 是 $\delta = \sin^{-1}(E / \sqrt{2}U_2)$

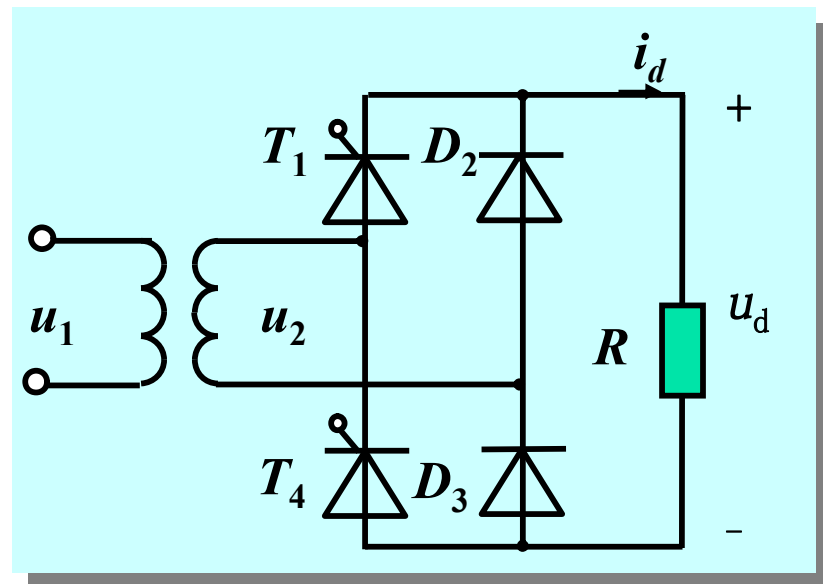
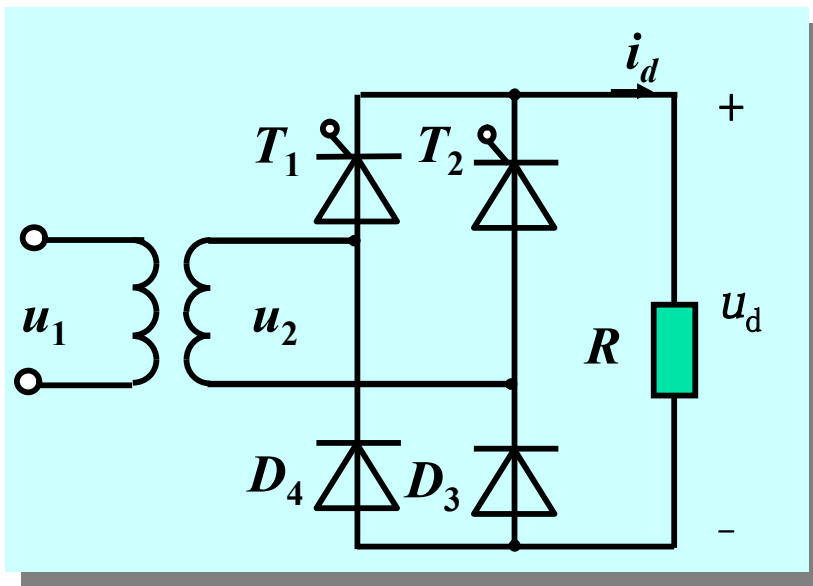
输出直流电压 U_d
$$U_d = E + \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\delta} (\sqrt{2}U_2 \sin \omega t - E) d(\omega t)$$

直流电流 I_d
$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\delta} \frac{(\sqrt{2}U_2 \sin \omega t - E)}{R} d(\omega t) = \frac{U_d - E}{R}$$

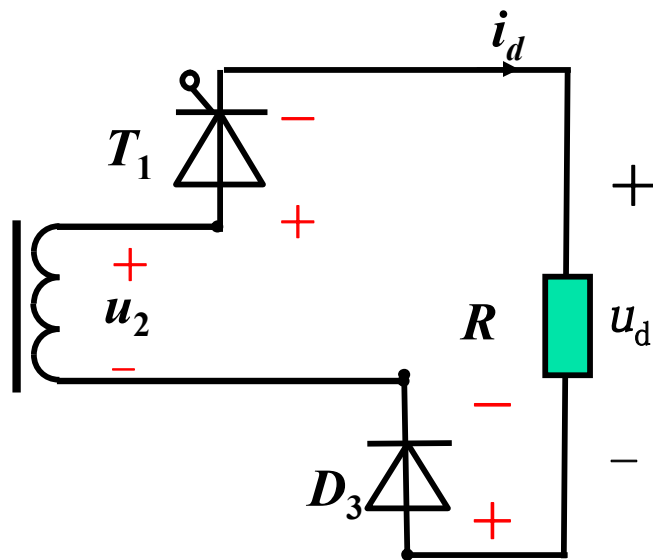
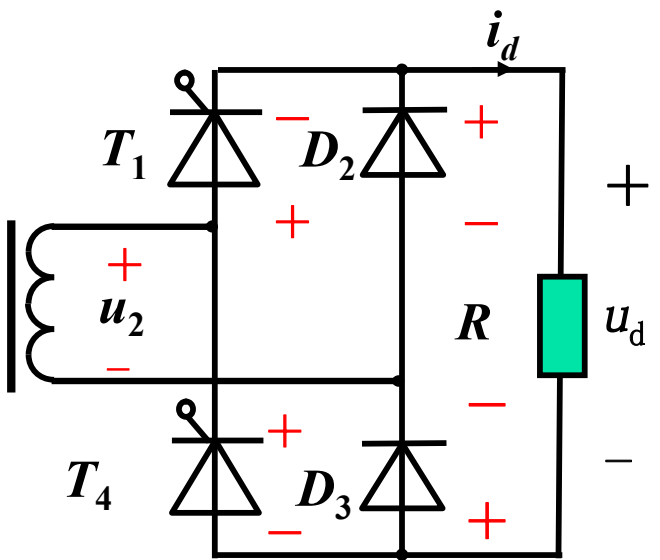
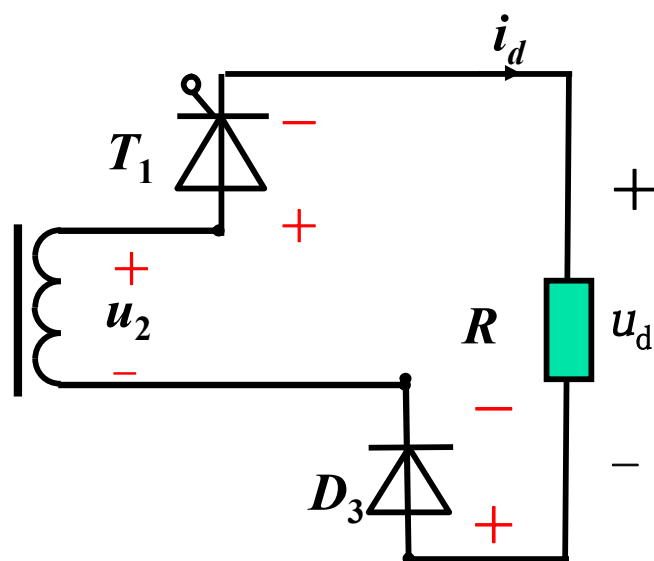
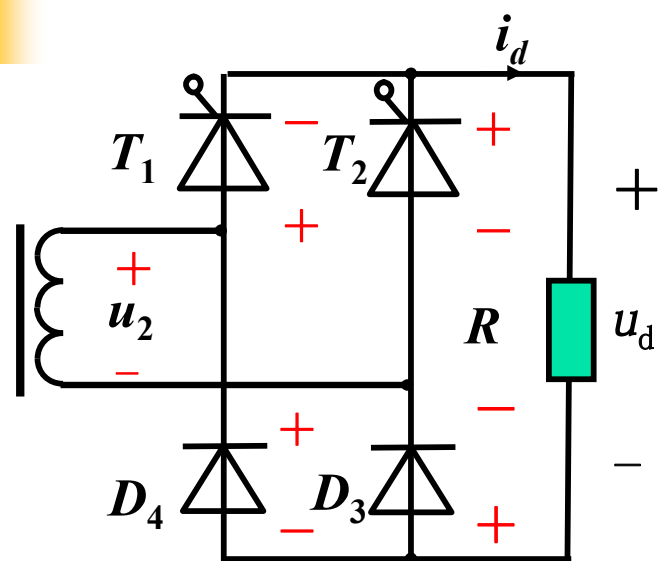
讨论：直流电流是不连续的脉冲电流，对设备不利
当整流电路不工作时仍有直流电压 E ，应当注意。

§ 2-3 单相桥式半控整流电路

单相半控桥有两种结构



单相半控桥在电阻负载时的工作情况与全控桥完全相同。



单相半控桥在电阻负载时的工作情况与全控桥几乎完全相同。其原因是全控桥用两个同步动作的开关来控制导通回路。而只要一个可控开关也可控制导通回路。此时，二极管只起到规定导通路径的作用。注意到晶闸管的关断时刻是固定的(在 π 点与 2π 点)

2 电感电阻负载(电感电阻电势负载)

当在电感性负载时，半控桥与全控桥完全不同。以对称半控桥为例，设直流电流 i_d 连续平直(直流电感很大) **注意：二极管的导通条件**

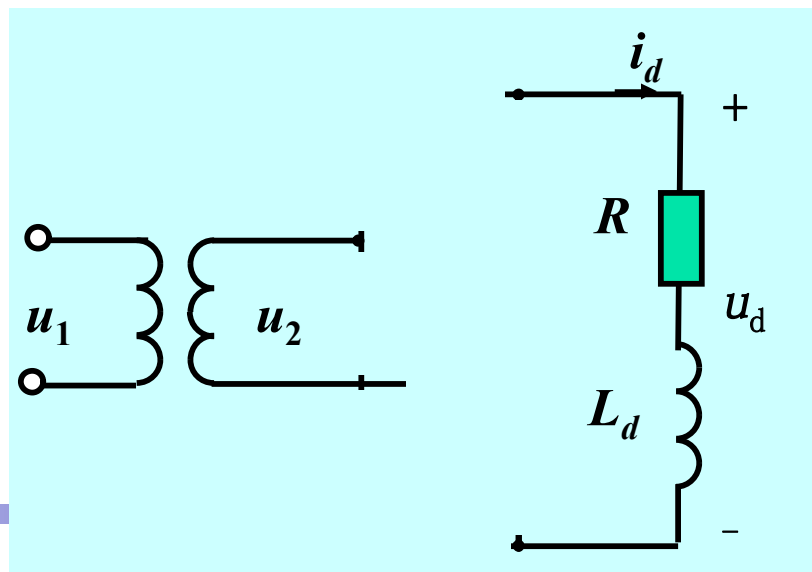
在正半周时 T_2D_4 承受反压不能导通而 D_3 是自然导通的，反之负半周时 T_1D_3 承受反压不能导通而 D_4 是自然导通的。

正半周 α 处 T_1 导通，电流的流动路径如图。

当 u_2 过 π 变负时， D_4 自然导通而 D_3 关断。由于 i_d 连续此时 T_1 仍然导通，结果电流沿 D_4T_1 流动，称续流。续流时电流不经过变压器，输出电压为零。

在负半周 $\pi+\alpha$ 处 T_2 导通，结果 T_1 被关断。 i_d 沿 D_4T_2 流动当 u_2 过 2π 变正时， D_3 自然导通而 D_4 关断。此时 T_2 仍然导通，结果电流 i_d 沿 D_3T_2 续流。输出电压为零。

该半控桥的主要特点是存在二极管自然交换、电路产生续流的过程。续流时电流不经过变压器，输出电压为零
晶闸管触发换流；二极管自然换流



基本电量的计算

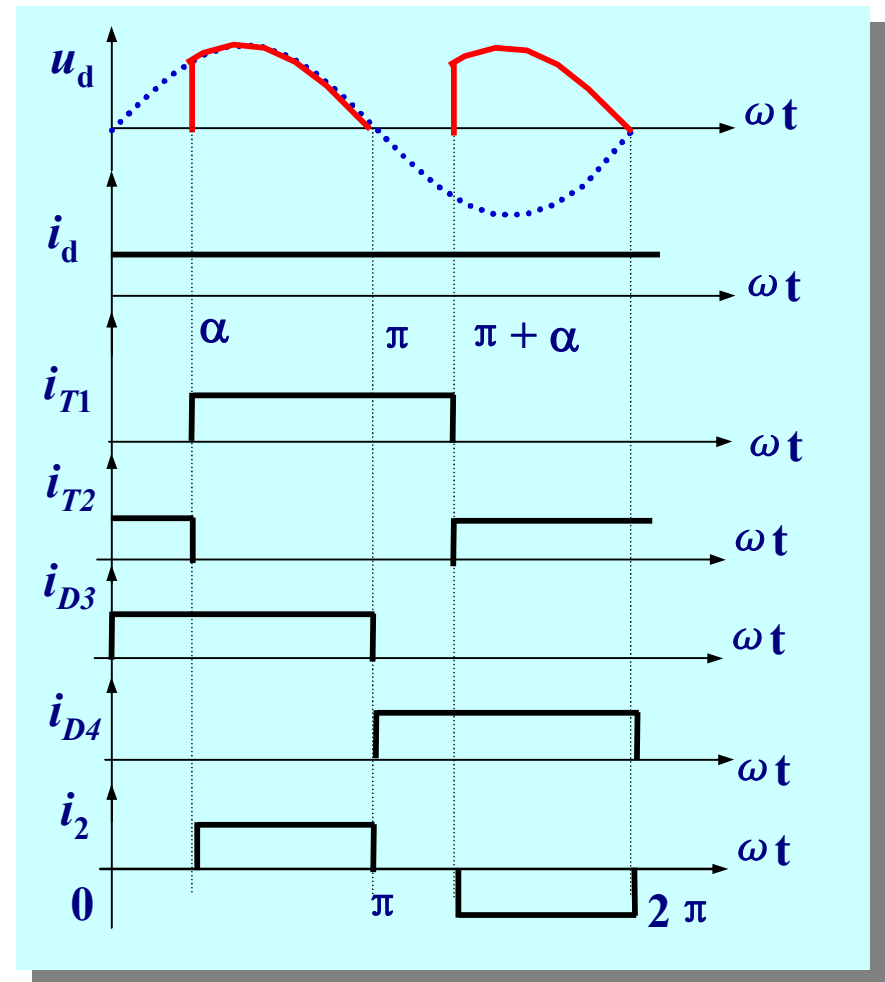
$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$= 0.9 U_2 \frac{(1 + \cos \alpha)}{2}$$

$$I_d = U_d / R$$

$$I_T = I_D \frac{1}{\sqrt{2}} I_d$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} I_d$$

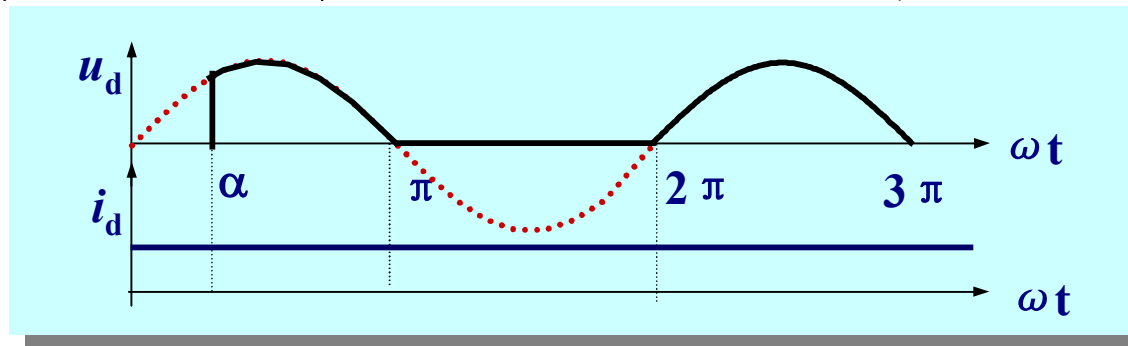


对称半控桥的失控及防止

若~~在电感性负载，电流连续条件下去掉晶闸管的触发~~

脉冲，将出现一个晶闸管永远导通，两个二极管轮流导通的现象，电路失去控制，称失控。

设原 T_1 导通。负半周 $\pi + \alpha$ 前 $T_1 D_4$ 续流。由于 T_2 不能导通， T_1 就不能关断。 $T_1 D_4$ 续流持续到 2π ，当 u_2 过零变正时 D_3 导通 D_4 关断，电路输出为正半波。以后重复



失控的危害：失控时电路变成了单相半波电路。变压器出现直流磁化问题。

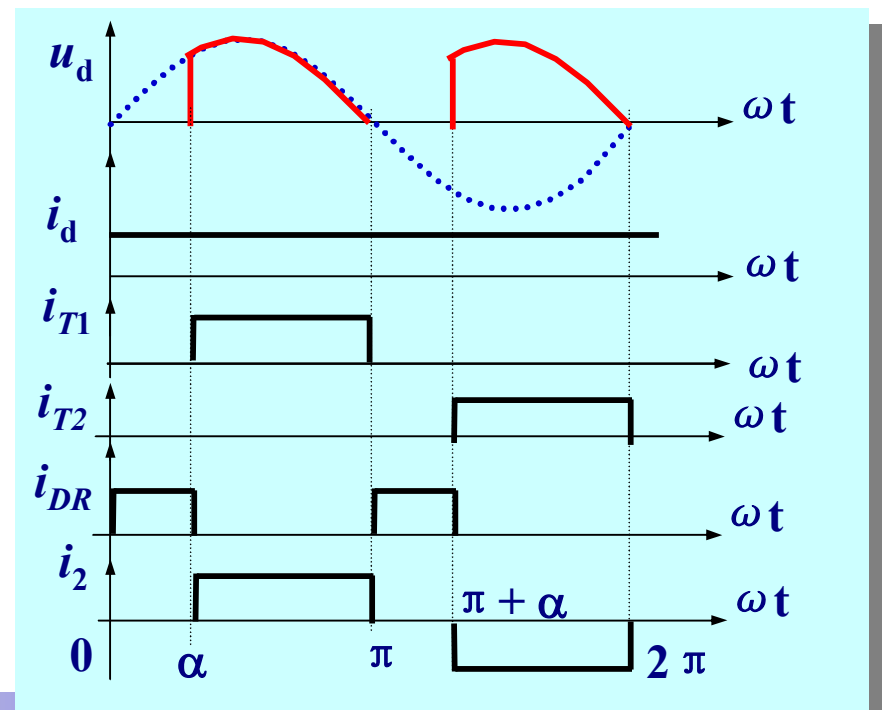
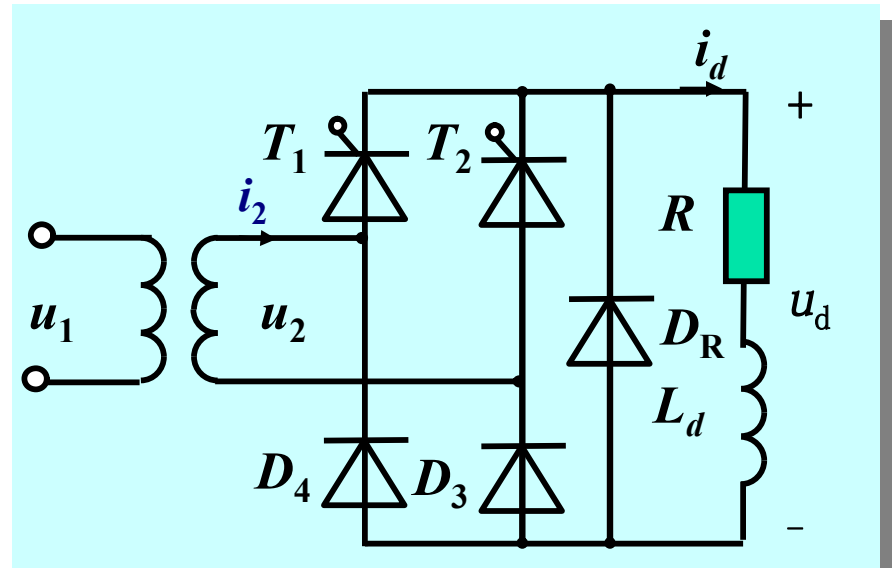
解决失控的方法：加续流二极管，如图。电路续流过程由 D_R 完成，晶闸管关断，从而消除了失控的条件

与原电路波形相比，只有各开关的电流波形发生了改变各器件电流有效值为

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

$$I_{DR} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} I_d$$

其余各量的计算式不变。由于在感性负载时对称半控桥有失控的可能，需要增加一个二极管。所以在大功率电路中一般不采用这种电路，而采用**不对称半控桥**。



不对称半控桥有由二极管 D_2D_3 构成的续流通道。所以不需要再加续流管。它不会失控。工作过程简述如下：

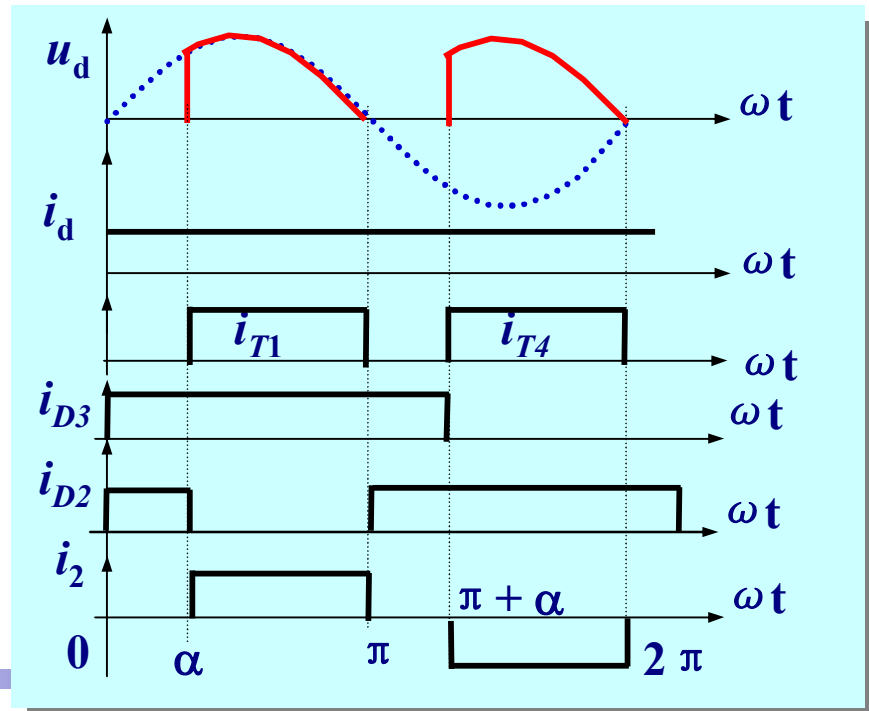
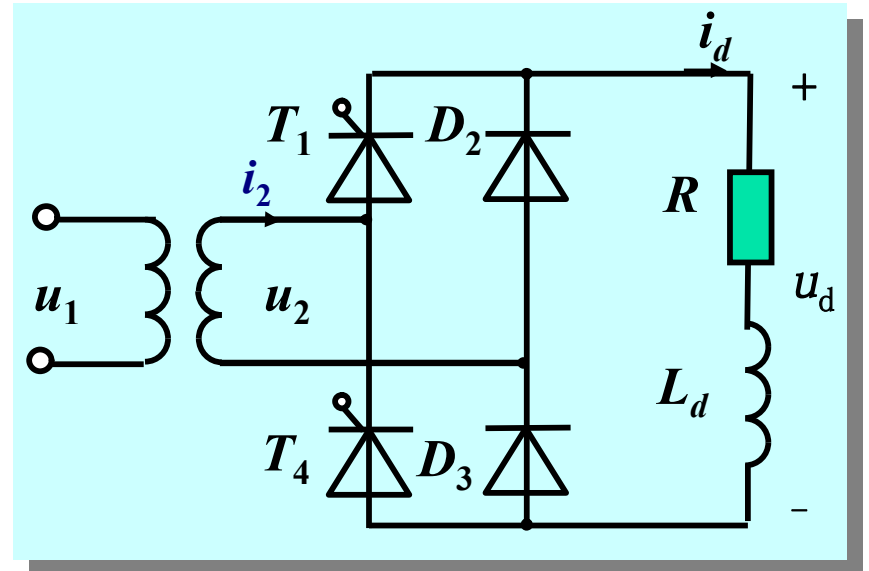
正半周 α 处 T_1D_3 导通。

u_2 过 π 变负时， D_2 自然导通使 T_1 关断。 i_d 经 $D_3 D_2$ 续流。

$\pi+\alpha$ 处 T_4 导通， D_3 被关断电流沿 T_4D_2 流动。

u_2 过 2π 变正时， D_3 自然导通使 T_4 关断。 i_d 经 $D_3 D_2$ 续流。

到 α 点 T_1 导通 D_2 关断， T_1D_3 导通。电路工作一个周期。



与有续流管的对称半控桥相比，只有二极管电流发生了变化。其计算式为：

$$I_D = \sqrt{\frac{\pi + \alpha}{2\pi}} I_d$$

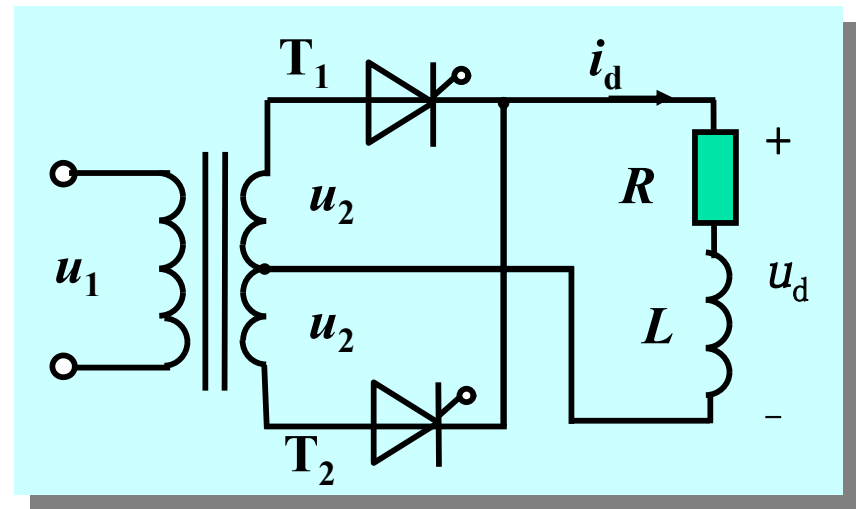
其它计算式与前一个电路相同。

§ 2-4 单相双半波整流电路

电路如图。当电源 u_2 为正半周时 T_1 可能导通而 T_2 不能导通；负半周时 T_2 能导通 T_1 不能导通。

该电路的输出电压波形与桥式电路相同计算式也相同。

其优点是使用的开关少损耗小。缺点是需要二个副边绕组，变压器容量大，开关器件承受2倍副边峰值电压。



例题与作业

本课程的作业有其特点：首先要分清电路。半波电路与桥式电路是不同的电路；单相与三相不同；全控与半控也不一样。

同一类型的电路负载不同，它工作时的过程就不同，波形也相差很远。需要记住电路的基本特点。

解题的一般过程是首先要明确电路是如何工作的。根据负载的性质作出波形图。然后直接套用计算式。

整流电路只有几种典型的电路，数量很少不难记住。

平时要听课做作业。否则很难取得好成绩。

作业P121： 2.4—2.8

例1.单相半波电路如图。 $R=5$ 欧， L_d 很大， $I_d=10$ 安。由交流220伏电网供电。求晶闸管、二极管电流有效值、电压值。

解：电路主要波形如图

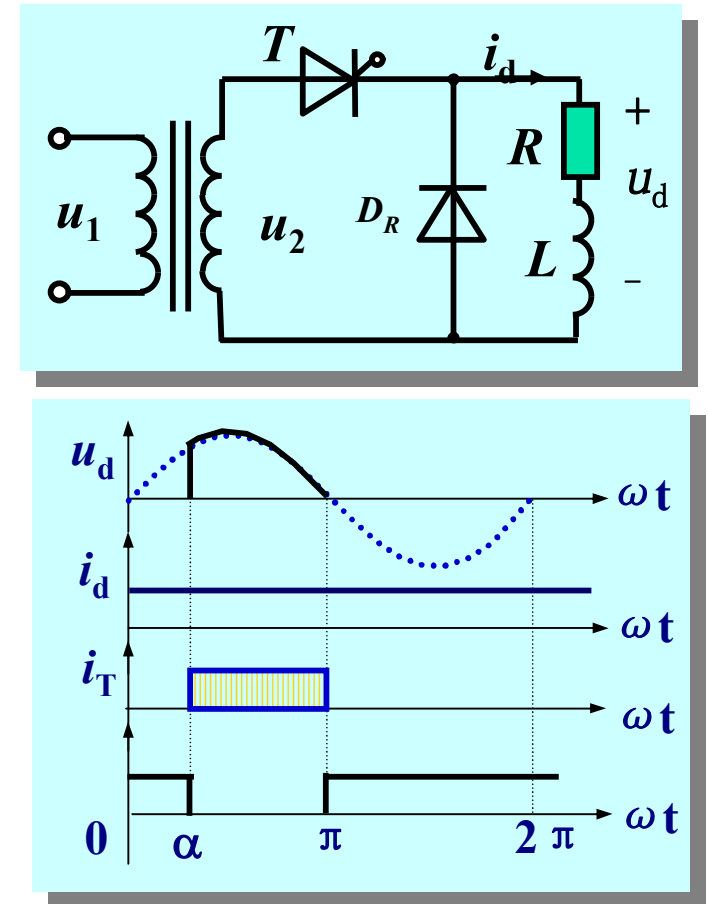
$$U_d = I_d R = 10 \times 5 = 50 \text{ (V)}$$

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

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{2U_d}{0.45U_2} - 1 \right) = 89^\circ \approx 90^\circ$$

$$I_T = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d = 5 \text{ (A)}$$

$$I_D = \sqrt{\frac{\pi + \alpha}{2\pi}} I_d = 8.67 \text{ (A)}$$



器件承受的最大电压为电源电压的峰值，即311伏。

例2. 电路如图。R=10欧，U₂=220伏，α=0。分别求当有、无L_d时的U_d、I_d、晶闸管电流有效值、平均值；变压器电流有效值

解1：无L_d时为纯电阻载，波形如图：

$$U_d = 0.9U_2 = 0.9 \times 220 = 198 \text{ (V)}$$

$$I_d = U_d / R = 19.8 \text{ (A)}$$

$$I_{Td} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{\sqrt{2} \times 220}{10} \sin \omega t d(\omega t) = 9.9$$

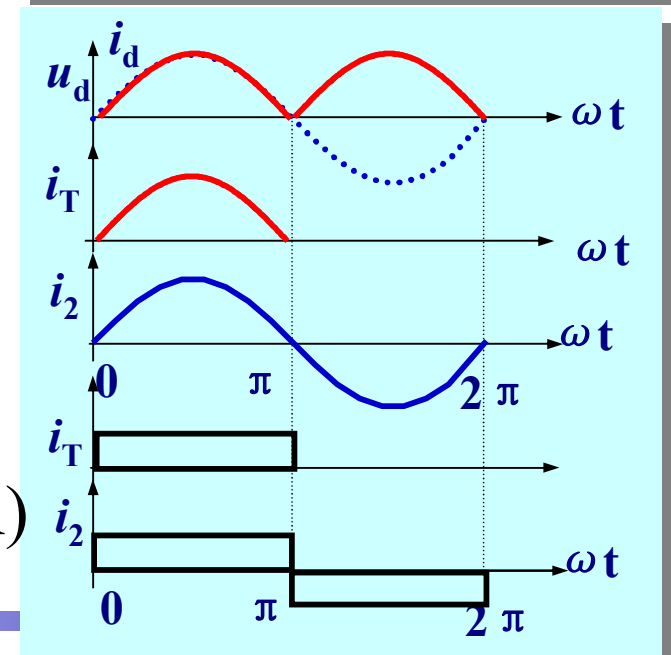
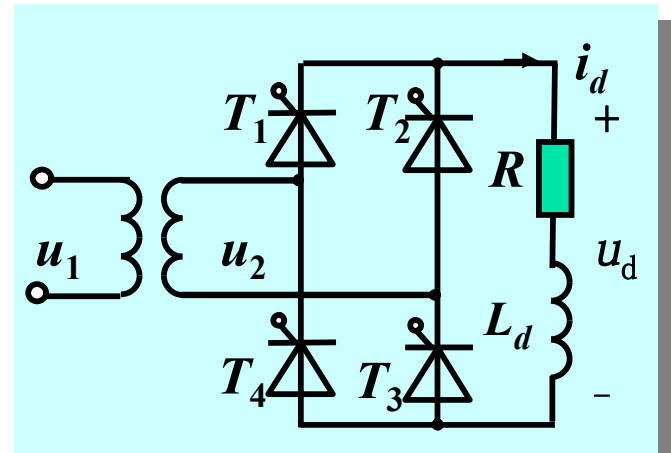
$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sqrt{2} \times 220}{10} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = 15.6$$

$$I_2 = \sqrt{2}I_T = 22 \text{ (A)}$$

解2：有L_d时I_d平直，波形如图：

$$I_T = I_d / \sqrt{2} = 14 \text{ (A)} \quad I_2 = \sqrt{2}I_T = 19.8 \text{ (A)}$$

$$I_{dT} = I_d / 2 = 9.9$$



例3. 单相全控桥给恒转矩调速运行的直流电动机供电。其调速范围是1: 10。问：调速与晶闸管的电流定额有无关系？调速范围与移相范围关系如何？

解：根据直流电机转矩公式知 $T = C_m \Phi I_a$

恒转矩调速与晶闸管的电流定额无关。

根据直流电机转速公式知调节电枢电压可以调节转速。

$$n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U_d - I_d R}{C_e \Phi} \approx \frac{U_d}{C_e \Phi}$$

为使 $n_1 : n_2 = 10 : 1$ 应使 $U_{d1} : U_{d2} = 10 : 1$

$$U_d = 0.9U_2 \cos \alpha$$

$$\frac{U_{d1}}{U_{d2}} = \frac{0.9U_2 \cos \alpha_1}{0.9U_2 \cos \alpha_2} = \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} = \frac{10}{1}$$

例4. 单相不对称半控桥 $U_2=100$ 伏, $R=2$ 欧, L_d 很大, $\alpha=60^\circ$ 度, 求流过器件的电流有效值。

解: 电路与波形如图。

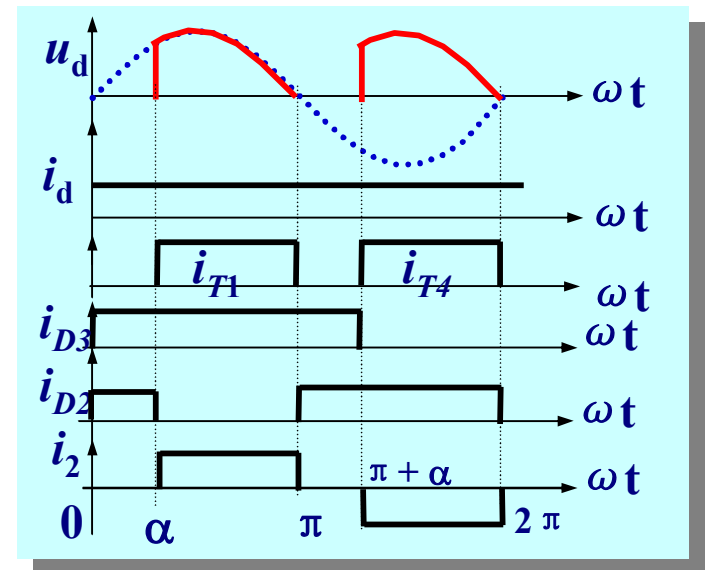
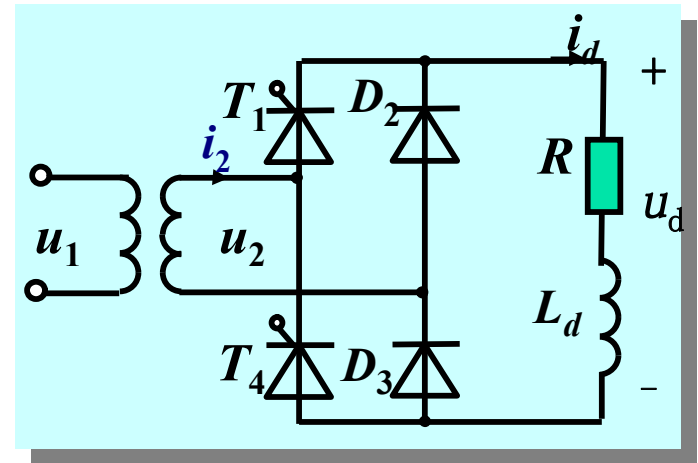
$$U_d = 0.9U_2 \frac{(1 + \cos \alpha)}{2} = 67.5$$

$$I_d = U_d / R = 33.75 \text{ (A)}$$

$$I_D = \sqrt{\frac{\pi + \alpha}{2\pi}} I_d = 27.56$$

$$I_T = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d = 19.5$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} I_d = 27.56$$



例5. 电路如图。控制角 $\alpha=90^\circ$ ，计算输出电压 U_d

解：解题要点：先得弄清电路的工作过程。当晶闸管不导通时，它是二极管单相双半波电路。正半周时 D_1 导通，负半周时 D_2 导通。

正半周时 D_1 导通时， T_1 可以导通。 T_1 通 D_1 即被反压关断。所以作用在电阻上的电压是两个绕组的电压。

负半周的分析相同。波形如图。

根据波形图可得：

$$U_d = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi/2} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) + \int_{\pi/2}^{\pi} 2\sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) \right] = \frac{3\sqrt{2}U_2}{\pi}$$

思考：电感性负载时的波形如何

