

## 第3章 整流电路

**整流**：把大小和方向随时间变化的交流电变为单方向流动的直流电，又称AC/DC变换技术

■ 整流电路的分类：

- ◆ 按组成的器件：**不可控**、**半控**、**全控**三种。
- ◆ 按电路结构：**桥式**电路、**零式**电路。
- ◆ 按交流输入相数：**单相**电路、**多相**电路。
- ◆ 按变压器二次侧电流的方向是单向或双向：**单拍**电路、**双拍**电路。

**本章主要内容：**

- 单相可控整流电路
- 三相可控整流电路
- 电容滤波的不可控整流电路
- 整流电路的谐波和功率因数

**掌握内容：**

- 电路结构及工作原理
- 电路参数的计算
- 负载性质的影响
- 谐波和功率因数分析

# 目标：电路分析、计算、初步设计

---

电路分析的三个基本要点：

- 电力电子器件视为理想器件，**通态**：器件的压降为零（电阻为零），**断态**：流过器件的电流为零（电阻无穷大）。
- 不考虑开通、关断过程的暂态现象，开通与关断过程瞬时完成，仅按**稳态**电路分析。
- 分析方法：分段线性电路，注重**波形分析**，电路知识应用。

## 3.1 单相可控整流电路

### 3.1.1 单相半波可控整流电路

#### 1) 带电阻负载的工作情况

◆ 电路结构:

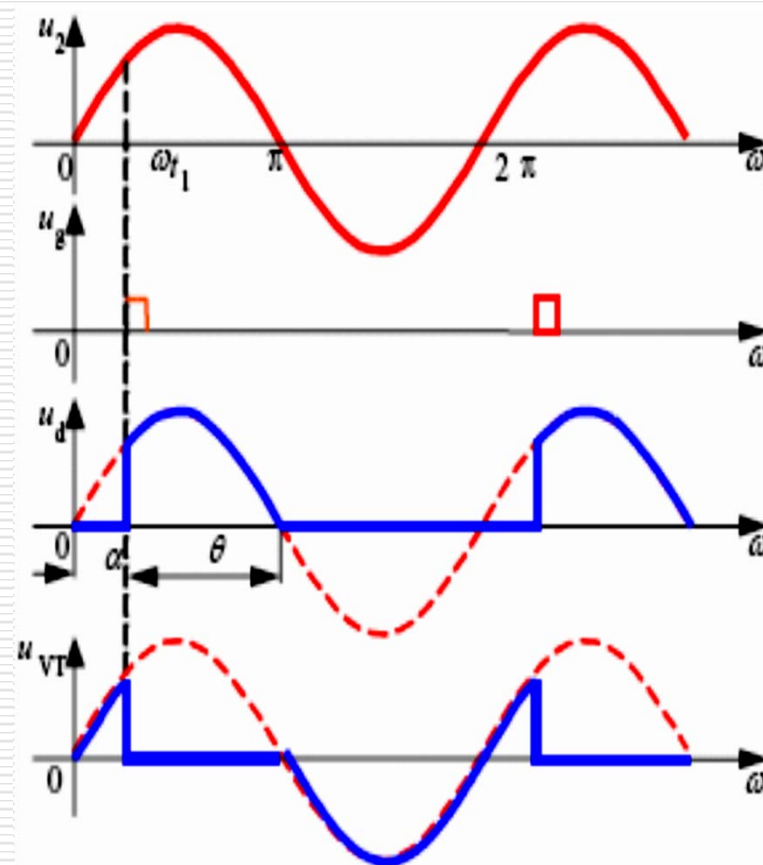
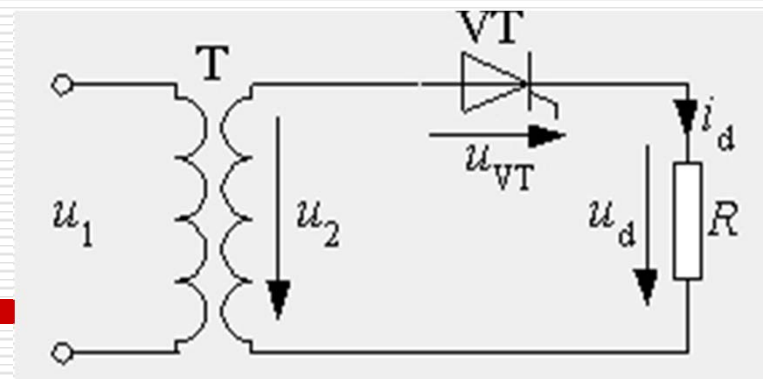
◆ 变压器 $T$ 起变换电压和隔离的作用。

◆ 注意各电流电压的表示方法。

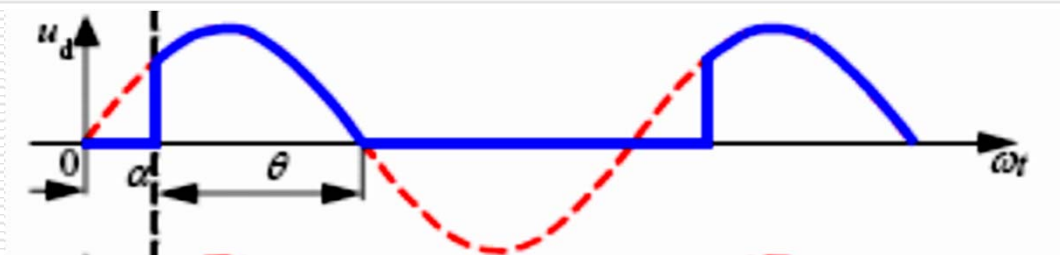
◆ 工作原理:

- SCR工作条件
- 电路分析
- 输出电压
- 控制角的变化

◆ 电阻负载的特点: 电压与电流成正比, 两者波形相同。



## 重要概念:



- 1) **触发延迟角**: 从**SCR**开始承受正向阳极电压起到施加触发脉冲止的电角度, 用 $\alpha$ 表示, 也称**触发角**或**控制角**。
- 2) **导通角**: 晶闸管在一个电源周期中处于通态的电角度, 用 $\theta$ 表示。
- 3) **移相范围**: 触发角的可以调节的最大范围, 改变输出电压的大小。
- 4) **相控方式**: 通过控制触发脉冲的相位来控制直流输出电压大小的方式称为相位控制方式。

## 单相半波可控整流输出参数:

---

- 直流输出电压平均值  $U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.45U_2 \frac{1+\cos \alpha}{2}$   
 $\alpha$ 增大,  $U_d$ 减小。
- $\alpha$ 角移相范围为 $180^\circ$
- 直流输出电流平均值:  $I_d = U_d / R$

## SCR器件上参数:

- SCR承受的正、反向峰值电压:  $\sqrt{2}U_2$
- SCR的电流有效值:
- 如何求**SCR**的额定电压和额定电流?

## 2) 带阻感负载的工作情况

### ◆电路的结构:

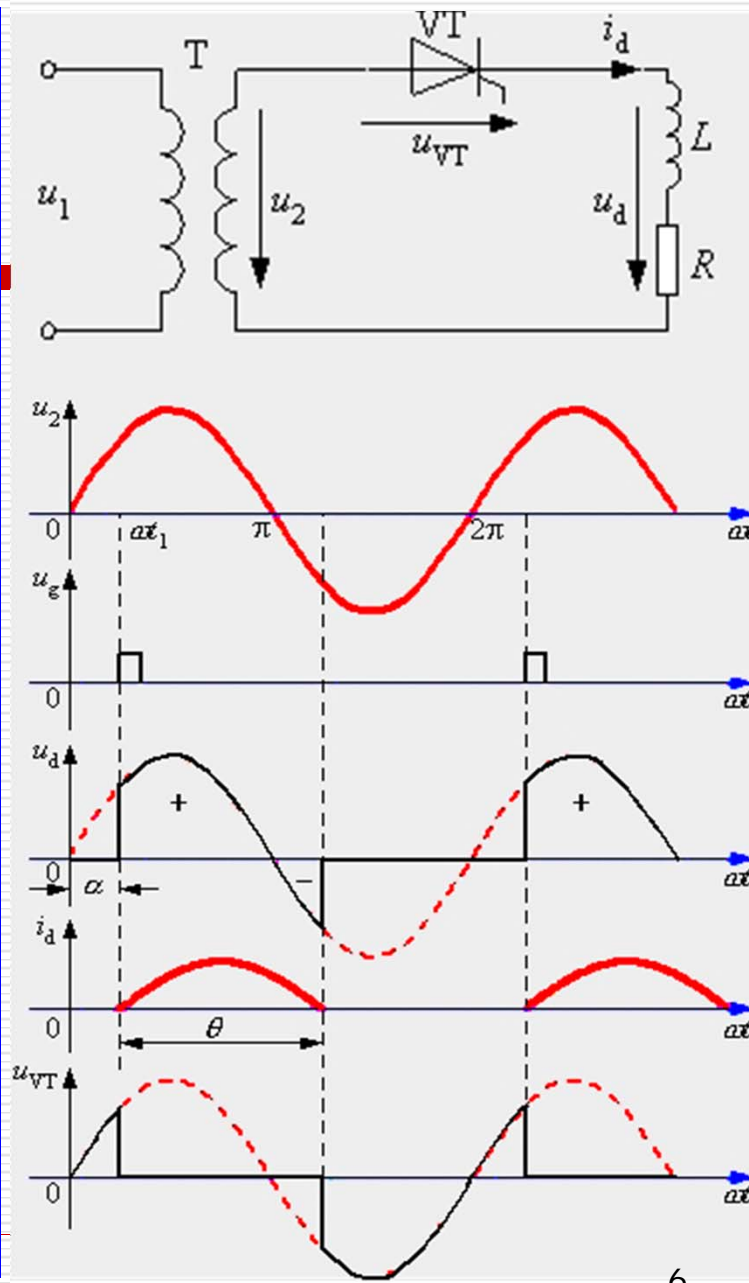
◆阻感负载特点: 电感对电流变化有抗拒作用, 使得流过电感的电流不能发生突变。

### ◆电路分析

- VT处于断态:  $i_d=0, u_d=0, u_{VT}=u_2$ 。
- VT在 $\omega t_1$ 时刻触发导通:  $u_d=u_2, i_d$ 从0开始增加。 $u_2$ 过零点处,  $i_d$ 未降到零, VT仍处于通态。 $\omega t_2$ 时刻,  $i_d$ 降至零, VT关断并立即承受反压。
- ◆电感: 延迟了VT的关断时刻, 使 $u_d$ 波形出现负的部分, 平均值 $U_d$ 下降。
- ◆阻抗角 $\varphi$ 、触发角 $\alpha$ 、导通角 $\theta$ 的关系:
  - 若 $\varphi$ 为定值,  $\alpha$ 角大,  $\theta$ 越小。
  - 若 $\alpha$ 为定值,  $\varphi$ 越大,  $\theta$ 越大,  $U_d$ 越接近零。

单相半波可控整流输出电压电流参数:

SCR器件上电压电流参数:



## 续流二极管的作用

### ◆ 电路分析

- $u_2$  正半周时的情况:
- $u_2$  负半周时的情况: 过零时,  $V_{DR}$  导通,  $u_d$  为零, VT 承受反压关断。
- L 储存的能量保证了电流  $i_d$  在 **L-R- $V_{DR}$**  回路中流通, 此过程通常称为 **续流**。
- 若 L 足够大,  $i_d$  连续, 且  $i_d$  波形接近一条水平线。
- 若 L 较小, 续流期间电流可降为 0。  
 $i_d$  断续。

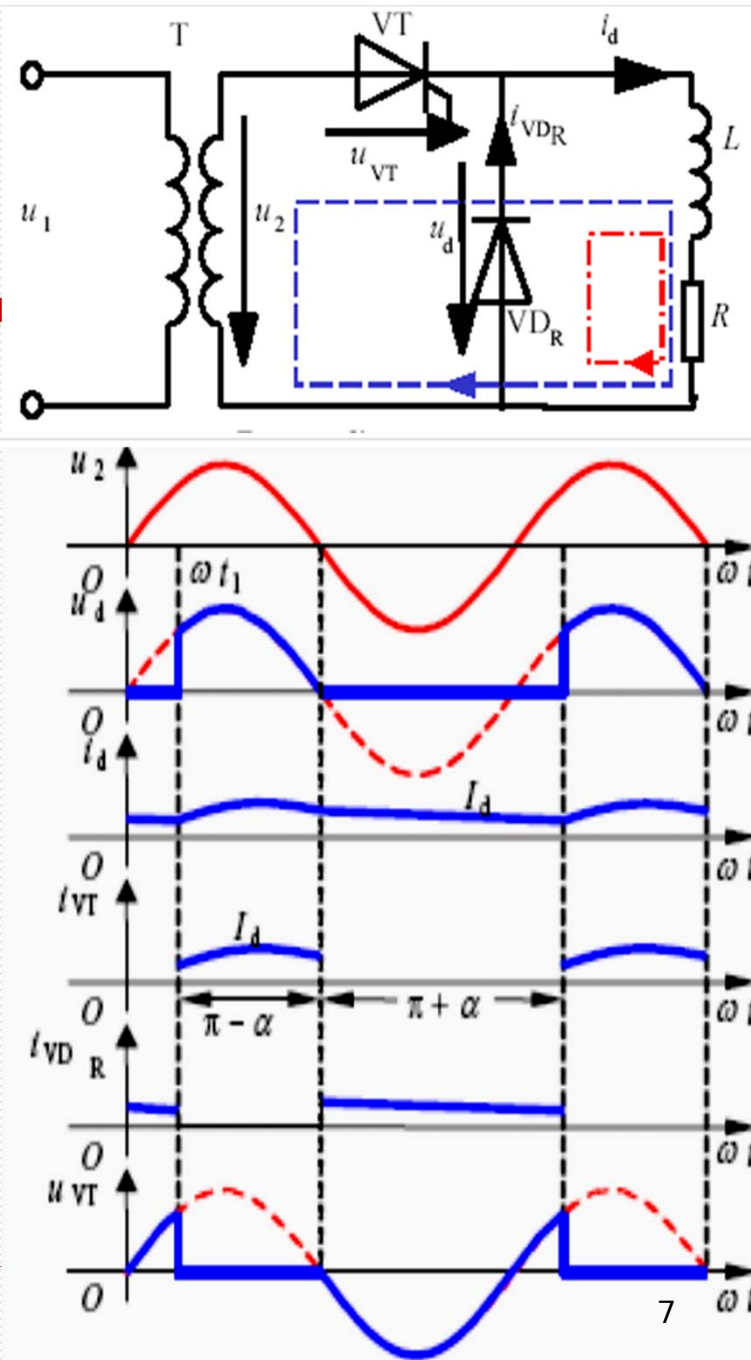
L 足够大时,

整流输出电压、电流参数:

**SCR、D** 器件上电压电流参数:

### ■ 单相半波可控整流电路的特点:

简单, 输出脉动大, 变压器铁芯有 **直流磁化**。实际很少应用。





### 3.1.2 单相桥式全控整流电路

#### 1) 带电阻负载的工作情况

◆ 电路结构：T，主电路4个SCR，负载

◆ 工作原理：

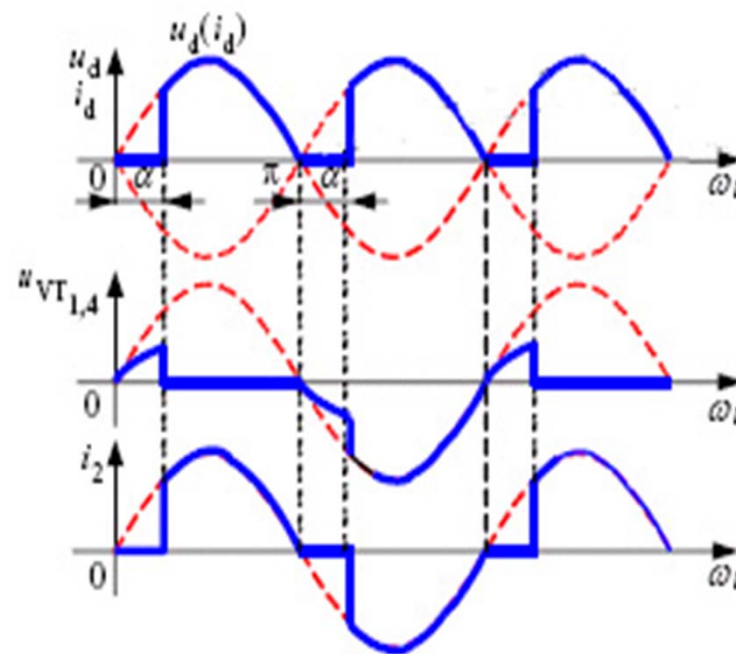
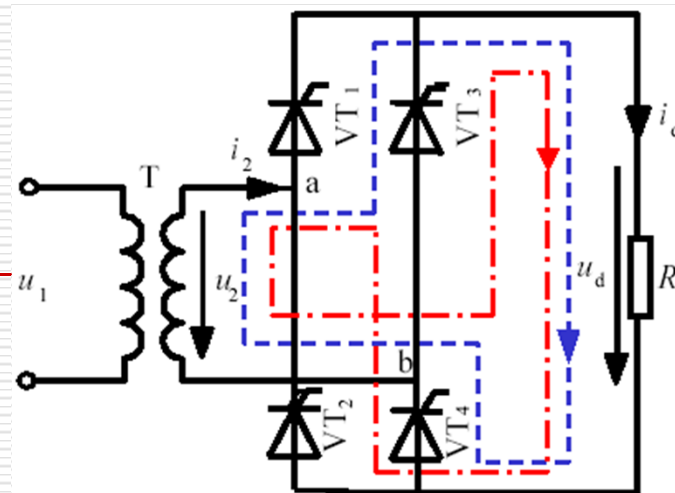
- SCR无触发脉冲时：4个SCR均不导通， $i_d=0, u_d=0$ ， $VT_1$ 、 $VT_4$ （ $VT_2$ 、 $VT_3$ ）串联承受电压 $u_2$ 。

- SCR有触发脉冲时：

- $u_2$ 正半周， $VT_1$ 和 $VT_4$ 承受正电压，触发即导通，电流从电源a端经 $VT_1$ 、R、 $VT_4$ 流回电源b端。当 $u_2$ 过零时， $VT_1$ 和 $VT_4$ 关断。

- $u_2$ 负半周， $VT_2$ 和 $VT_3$ 承受正电压，触发即导通，电流从电源b端流出，经 $VT_3$ 、R、 $VT_2$ 流回电源a端。到 $u_2$ 过零时， $VT_2$ 和 $VT_3$ 关断。

- $VT_2$ 和 $VT_3$ 的 $\alpha=0$ 处为 $\omega t=\pi$ 。





## 单相桥式全控整流输出电压电流参数: **R**负载

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

$\alpha=0$ 时,  $U_d = U_{d0} = 0.9 U_2$ 。  $\alpha=180^\circ$ 时,  $U_d=0$ 。

□ 触发角  $\alpha$  角移相范围:**180°**

□ 电流平均值:  $I_d = U_d / R$

### **SCR**的有关参数:

□ 承受的正向、反向峰值电压:  $\frac{\sqrt{2}}{2} U_2$   $\sqrt{2} U_2$

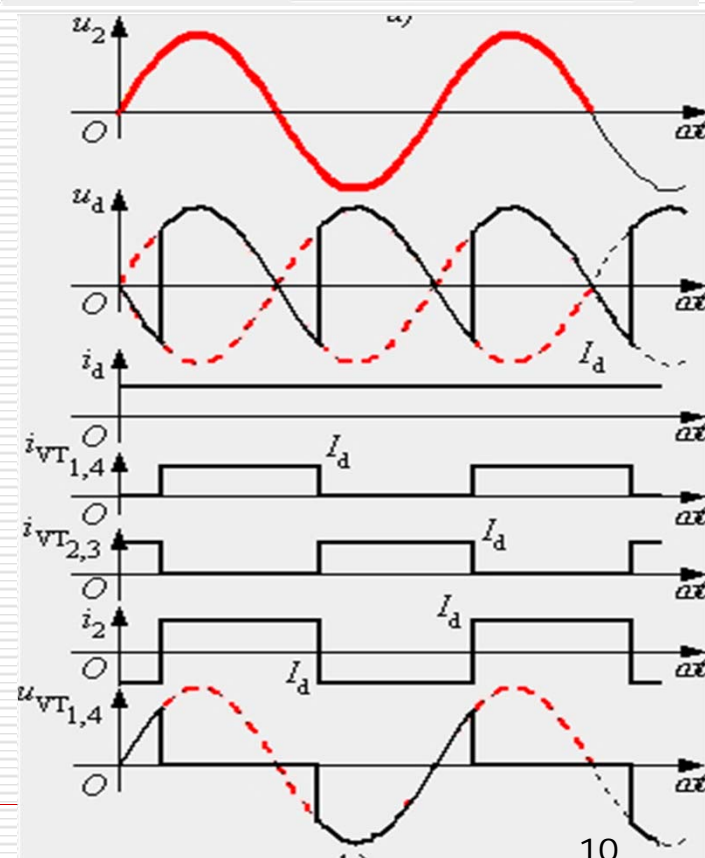
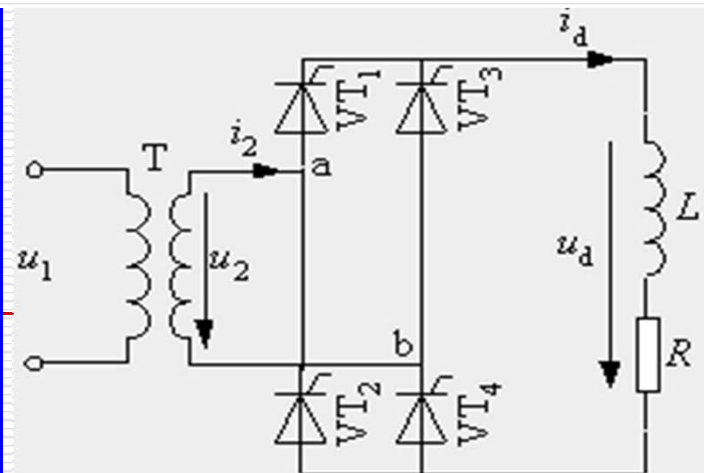
□ 电流有效值: 
$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left( \frac{\sqrt{2} U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_2}{\sqrt{2} R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

□ 导通角:  $\pi - \alpha$

## 2) 带阻感负载的工作情况

### ◆ 电路分析: 讨论 $\omega L \gg R$ 情况

- 电感很大,  $i_d$  波形近似为一水平直线。
- 在  $u_2$  正半周期: 触发角  $\alpha$  处给  $VT_1$  和  $VT_4$  加触发脉冲使其开通,  $u_d = u_2$ 。
- $u_2$  过零变负时, 由于电感的作用  $VT_1$  和  $VT_4$  中仍流过电流  $i_d$ , 并不关断。
- $\omega t = \pi + \alpha$  时刻, 触发  $VT_2$  和  $VT_3$  导通,  $VT_1$  和  $VT_4$  承受反压  $u_2$  关断, 流过  $VT_1$  和  $VT_4$  的电流迅速转移到  $VT_2$  和  $VT_3$  上, 此过程称为换相, 亦称换流。



## 单相桥式全控整流输出参数: $\omega L \gg R$

- 直流输出电压平均值:  $U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.9U_2 \cos \alpha$   
当 $\alpha=0$ 时,  $U_{d0}=0.9U_2$ 。  $\alpha=90^\circ$ 时,  $U_d=0$ 。
- 触发角 $\alpha$ 角移相范围:  $90^\circ$ 。
- 直流输出电流平均值:  $I_d=U_d/R$

### SCR的有关参数:

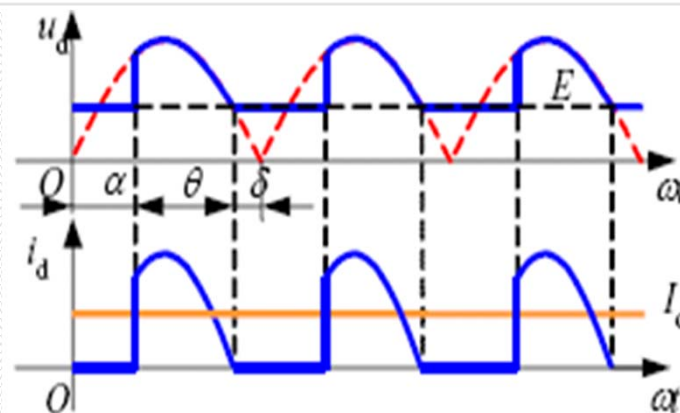
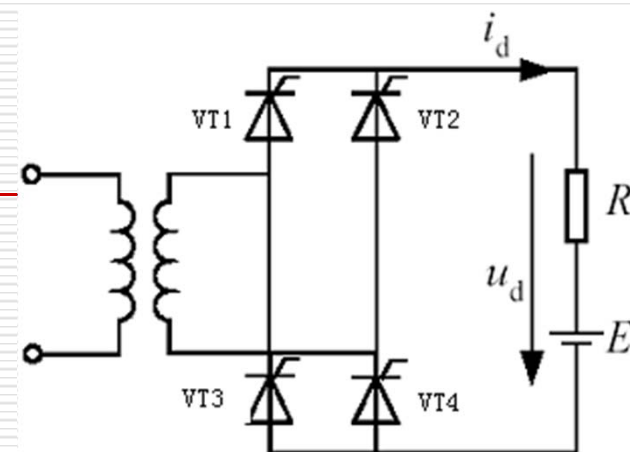
- 承受的正向、反向峰值电压:  $\sqrt{2}U_2$
- 电流有效值:  $I_T = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d = 0.707 I_d$
- 导通角:  $\alpha$ 无关, 为 $180^\circ$ 。

### 3) 带反电动势负载时的工作情况

◆ 负载为蓄电池等，可看成反电动势负载。

◆ 电路分析：

- $|u_2| > E$  时，才有SCR承受正电压，有导通的可能。
- 当  $\alpha < \delta$  时，触发脉冲到来时，SCR承受负电压，不可能导通。
- 触发脉冲保证当  $\omega t = \delta$  时刻，SCR承受正电压时仍然存在，SCR导通。相当于触发角被推迟为  $\delta$ 。即  $\alpha_{min} = \delta$ 。
- 导通后， $u_d = u_2$ ， $i_d = (u_d - E)/R$ ，直至  $|u_2| = E$ ， $i_d$  降至 0，SCR 关断，此后  $u_d = E$ 。
- 与电阻负载相比，整流输出电压增大，SCR 提前了电角度  $\delta$ （停止导电角）停止导电。
- $i_d$  电流断续。



$$\delta = \sin^{-1} \frac{E}{\sqrt{2} U_2}$$

## 3.2 三相可控整流电路

---

□ 三相半波可控整流电路

□ 三相桥式全控整流电路

- 交流侧由三相电源供电。
- 当整流负载容量较大，或要求直流电压脉动较小、易滤波时，采用三相整流电路。
- 最基本的是三相半波可控整流电路。
- 应用最为广泛的三相桥式全控整流电路等可控整流电路。

## 3.2.1 三相半波可控整流电路

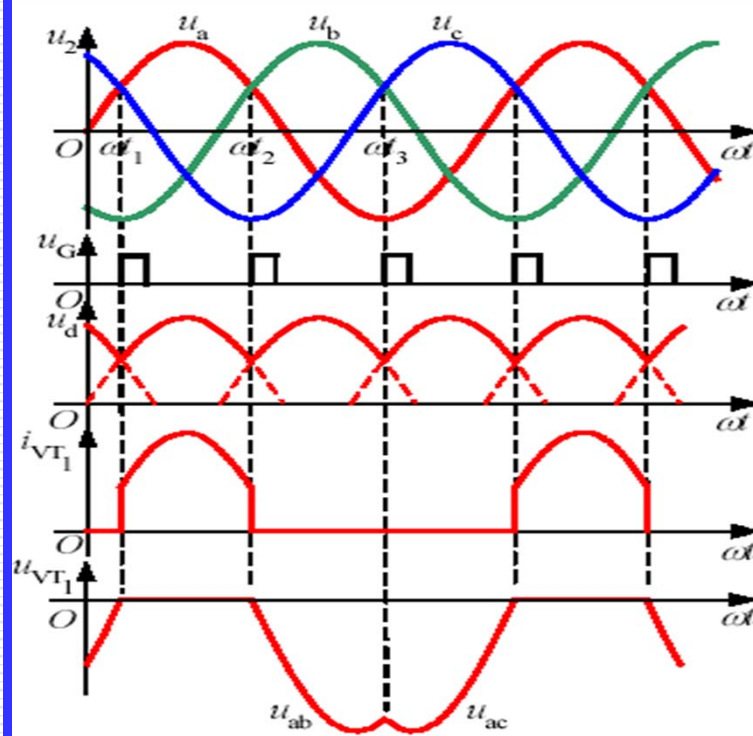
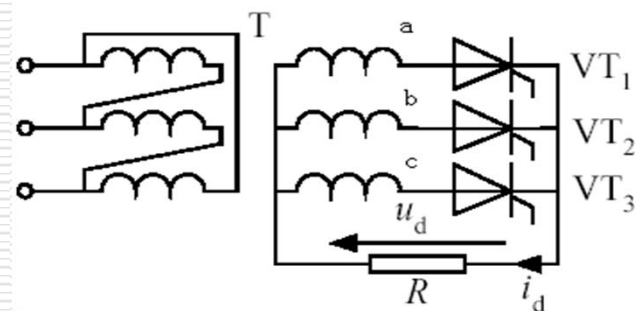
### 1. 电阻负载

#### ◆ 电路结构

- **T**是**三角形/星形接法**，一次侧避免**3次及3倍次谐波**流入电网，二次侧得到零线。
- 三个**SCR**分别接入**abc**三相电源，其阴极连接在一起---**共阴极接法**。

#### ◆ 电路分析

- 将**SCR**换作**D**，三个**D**中对应相电压最大值的导通，其它的承受反压关断，输出整流电压为该相的**相电压**。
- 三个**D**导通顺序 **$D_1$** 、 **$D_2$** 、 **$D_3$** 。在相电压的交点 $\omega t_1$ 、 $\omega t_2$ 、 $\omega t_3$ 处，均出现了**D**换相，称这些交点为**自然换相点**。
- 将**自然换相点**作为各相**SCR**触发导通的最早时刻，为计算各**SCR**触发角 $\alpha$ 的起点，即 **$\alpha=0$** 。
- $\alpha=0^\circ$ —— $\omega t=30^\circ$ ，各相 $\alpha$ 相差 $120^\circ$ 。分析负载和**SCR**电压、电流。



SCR轮流导通 $120^\circ$ ， $u_d$ 波形为三个相电压在正半周期的**包络线**。  
SCR电压由一段**管压降**和两段**线电压**组成。

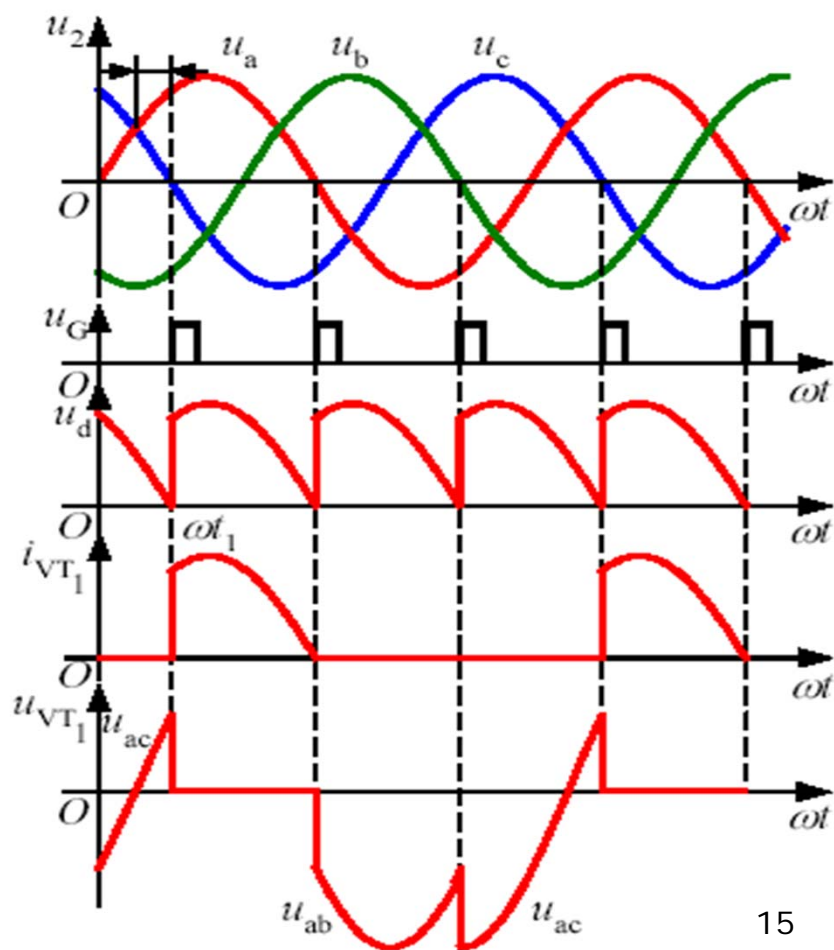
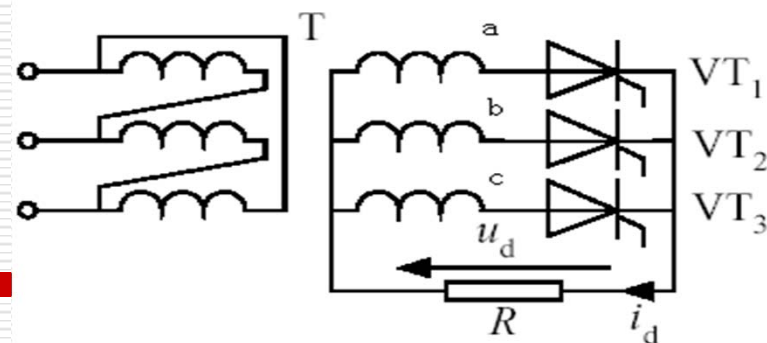


$\alpha = 30^\circ$  —  $\omega t = 60^\circ$

- 确定SCR的触发时刻，SCR开始导通。
- 确定SCR的导通时间。
- 确定SCR的关断时刻。
- 分析负载电压、电流。
- 分析SCR的电压、电流。

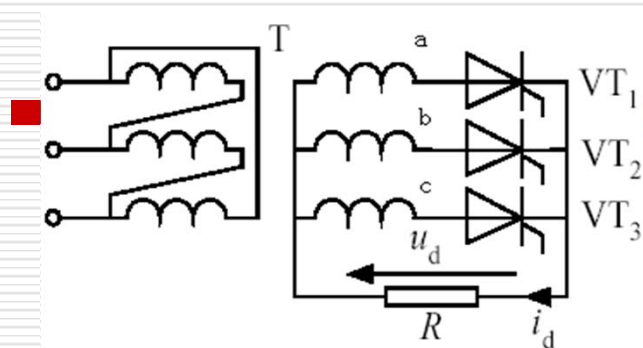
**特点：**负载电流处于连续和断续之间的临界状态。

**0-30°各相SCR导电120°。**

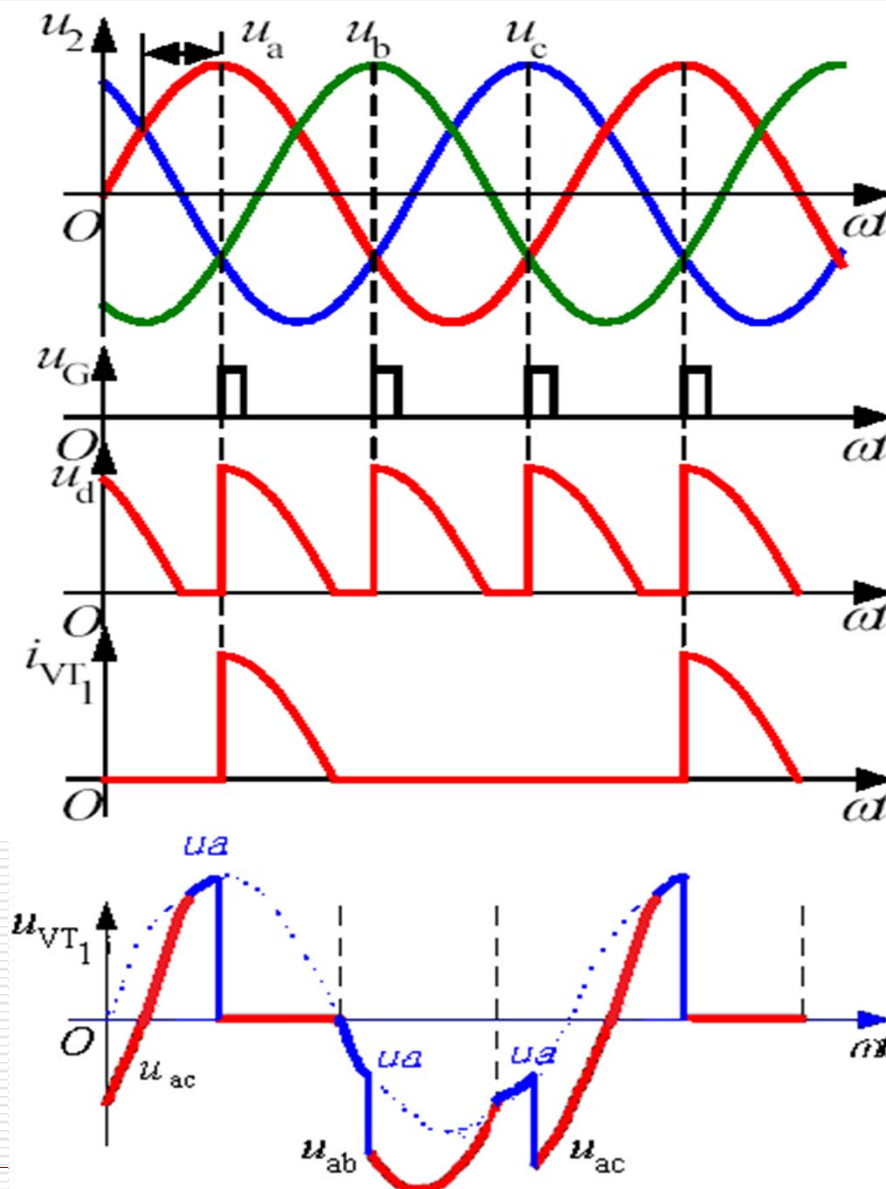


$\alpha > 30^\circ$ :

$\alpha = 60^\circ$  —  $\omega t = 90^\circ$



- 确定SCR的触发时刻，SCR开始导通。
  - 确定SCR的导通时间。
  - 确定SCR的关断时刻。
  - 分析负载电压、电流。
  - 分析SCR的电压、电流。
- ✓ 当导通一相的相电压过零变负时，该相SCR关断，但下一相SCR因未触发而不导通，此时输出电压电流为零。
- ✓ 负载电流断续，各SCR导通角小于 $120^\circ$ 。为 $150^\circ - \alpha$ 。



## 基本数量关系

$\alpha$ 的移相范围:  $150^\circ$

整流输出电压平均值:

$\alpha < 30^\circ$ 时, 负载电流连续

$\alpha > 30^\circ$ 时, 负载电流断续

输出电流平均值:  $I_d = U_d / R$

SCR的电流、电压:

□ SCR的导通角:

□ 有效值:

□ 反向峰值电压:

□ 正向峰值电压:

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

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

电流连续 $120^\circ$ 。电流断续 $150^\circ - \alpha$ 。

由波形来计算出

$$U_{RM} = \sqrt{2} \times \sqrt{3} U_2 = \sqrt{6} U_2 = 2.45 U_2$$

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

## 2. 阻感负载

### ◆ 电路分析:

- **L**值很大,  $i_d$ 波形基本平直, **SCR**电流接近**矩形波**。
- $\alpha \leq 30^\circ$ 时, 整流电压波形与电阻负载时相同。
- $\alpha > 30^\circ$ 时, 例如  $\alpha = 60^\circ$ ,  $u_2$ 过零时, **VT1**继续导通, 直到**VT2**的触发脉冲到来时才换流, **VT1**承受反压关断。 $u_d$ 波形中出现**负的部分**。

### ◆ 基本数量关系

$\alpha$ 的**移相范围**为 **$90^\circ$** 。

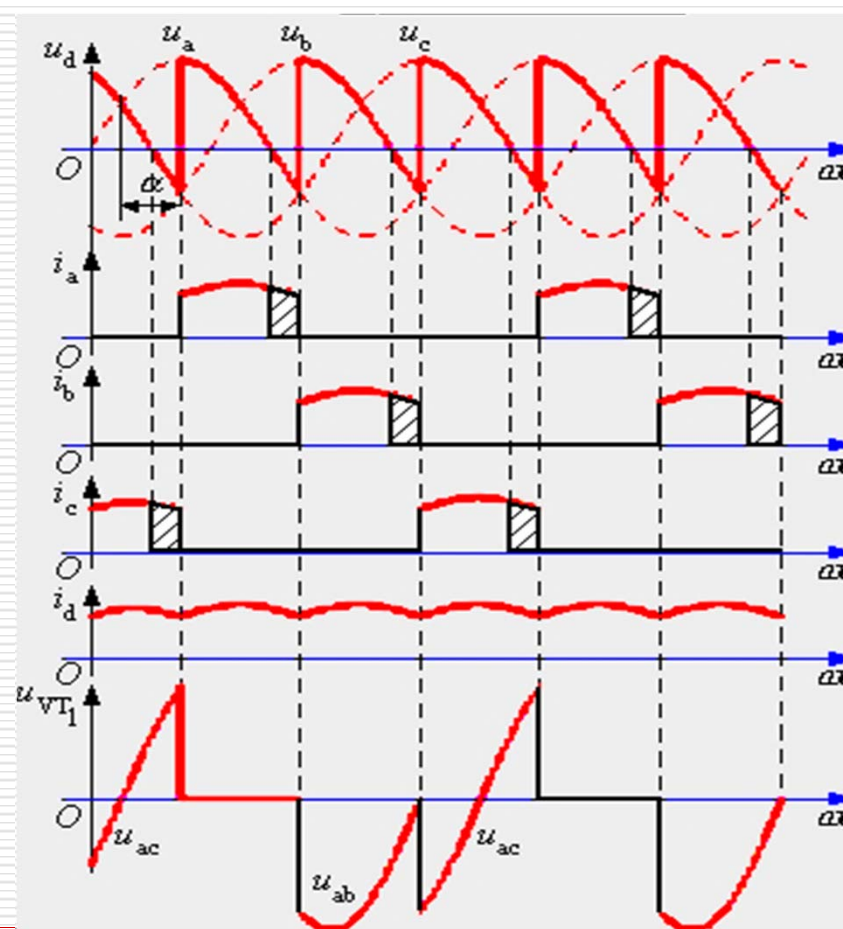
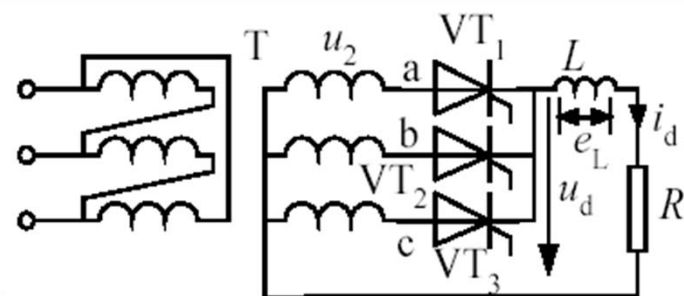
整流电压平均值:  $U_d = 1.17 U_2 \cos \alpha$

输出电流平均值:  $I_d = U_d / R$

**SCR**的导通角:  **$120^\circ$**

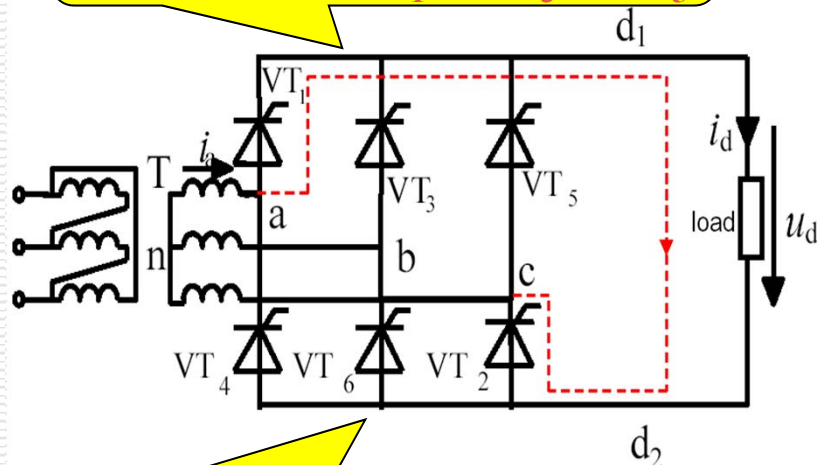
**SCR**电流的有效值:  $I_2 = I_T = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d = 0.577 I_d$

**SCR**最大正反向电压峰值:  $U_{FM} = U_{RM} = 2.45 U_2$



## 3.2.2 三相桥式全控整流电路

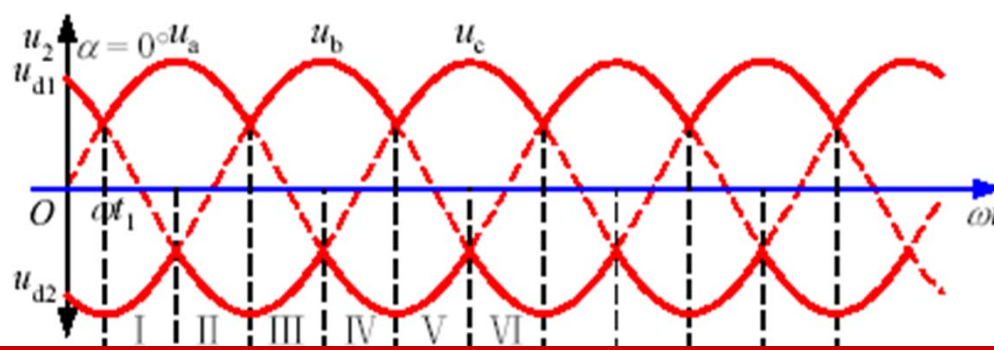
共阴极组: 阴极连接在一起的3个晶闸管 ( $VT_1, VT_3, VT_5$ )



共阳极组: 阳极连接在一起的3个晶闸管 ( $VT_4, VT_6, VT_2$ )

◆  $VT_1, VT_3, VT_5$  的阳极以及  $VT_4, VT_6, VT_2$  阴极分别与 a, b, c 三相电源相接。

◆ 晶闸管的导通顺序为  $VT_1$ - $VT_2$ - $VT_3$ - $VT_4$ - $VT_5$ - $VT_6$ 。



时 段	I	II	III	IV	V	VI
共阴极组中导通的晶闸管	$VT_1$	$VT_1$	$VT_3$	$VT_3$	$VT_5$	$VT_5$
共阳极组中导通的晶闸管	$VT_6$	$VT_2$	$VT_2$	$VT_4$	$VT_4$	$VT_6$
整流输出电压 $u_d$	$u_a - u_b$ $= u_{ab}$	$u_a - u_c$ $= u_{ac}$	$u_b - u_c$ $= u_{bc}$	$u_b - u_a$ $= u_{ba}$	$u_c - u_a$ $= u_{ca}$	$u_c - u_b$ $= u_{cb}$

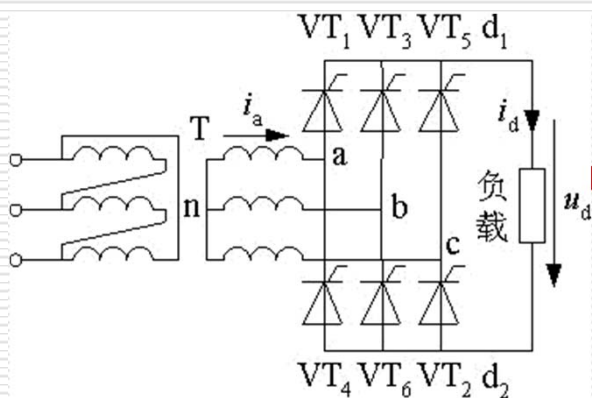
输出电压顺序:  $u_{ab} - u_{ac} - u_{bc} - u_{ba} - u_{ca} - u_{cb}$  重复循环。

触发脉冲: 相差60度。

注: 注意6只晶闸管的编号与其导通顺序的关系。



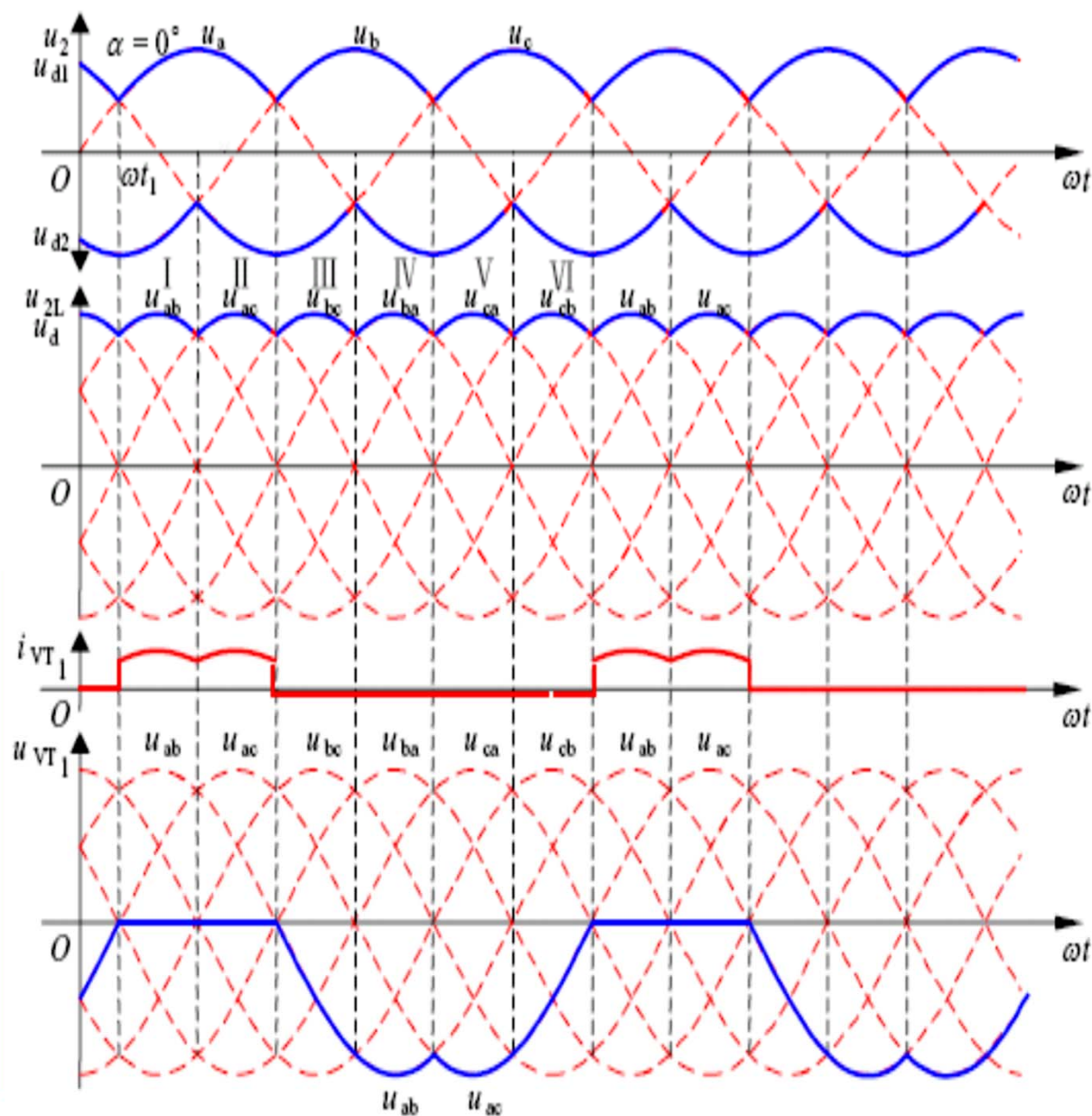
# 1. 电阻负载



$$\alpha=0^\circ$$

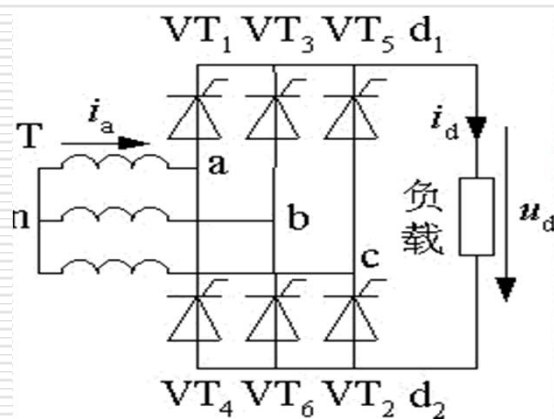
## ◆ 电路分析

- 各自然换相点：相电压的交点，也是线电压的交点。
- $u_d$  波形连续，对于电阻负载， $i_d$  波形与  $u_d$  波形的形状相同，也连续。
- $u_d$  为线电压在正半周的包络线。

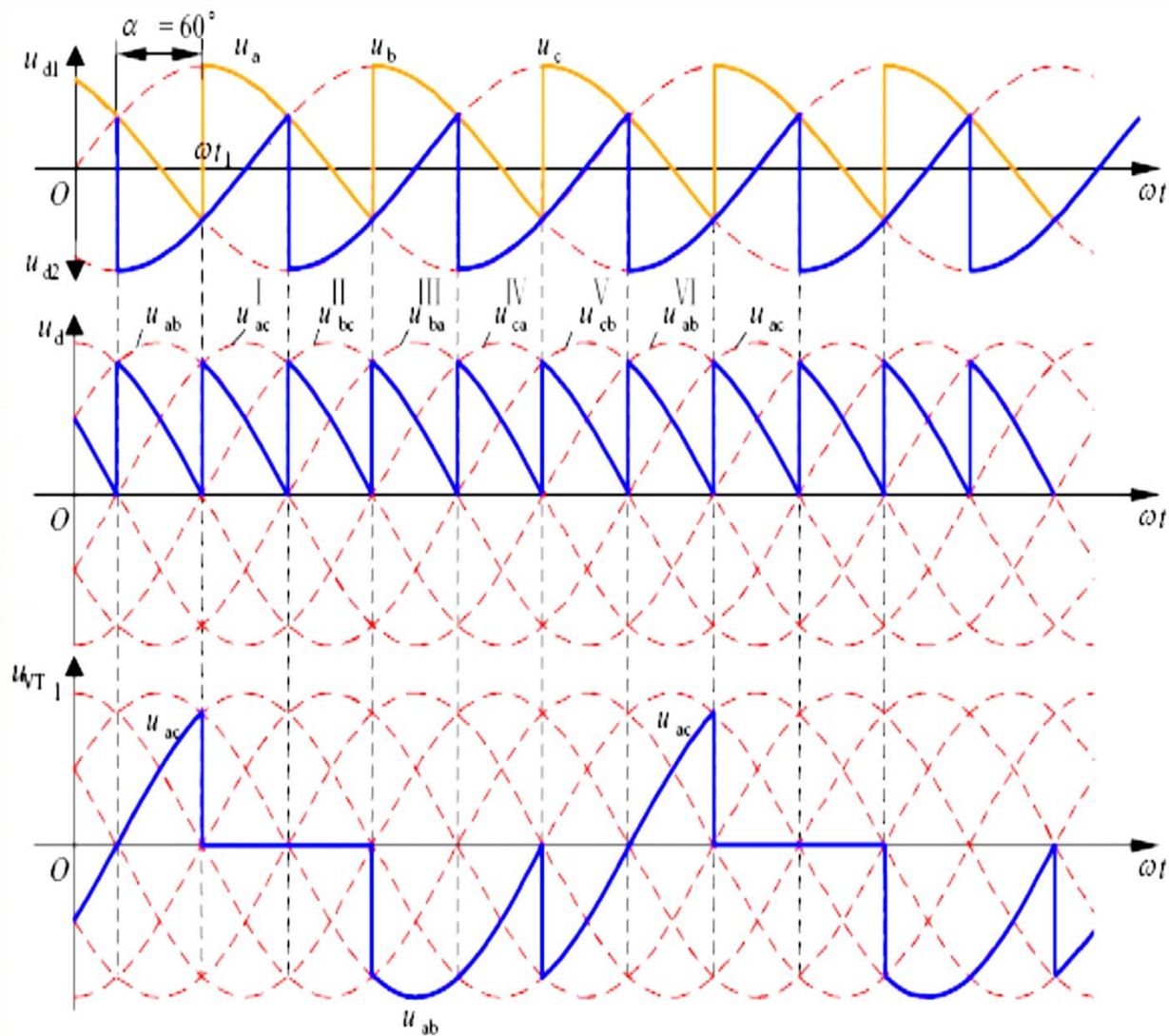




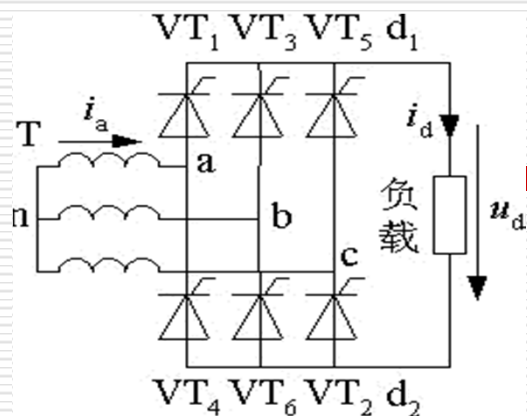
$$\alpha = 60^\circ$$



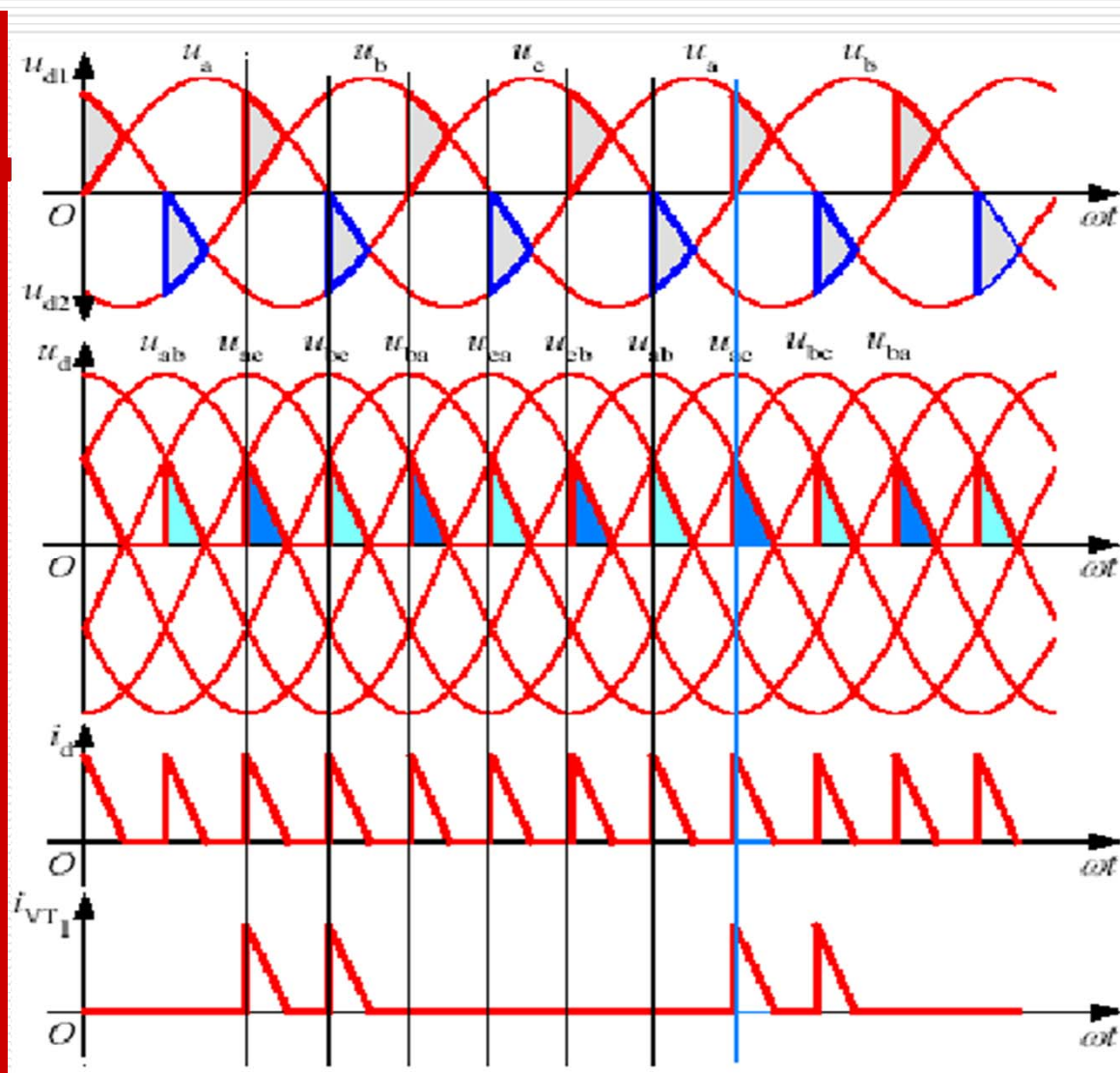
- 起始导通时刻推迟了  $60^\circ$ ， $u_d$  波形中每段线电压的波形向后移了  $60^\circ$ ， $u_d$  平均值降低。
- $u_d$  出现了为零的点，电流连续与断续的临界状态。



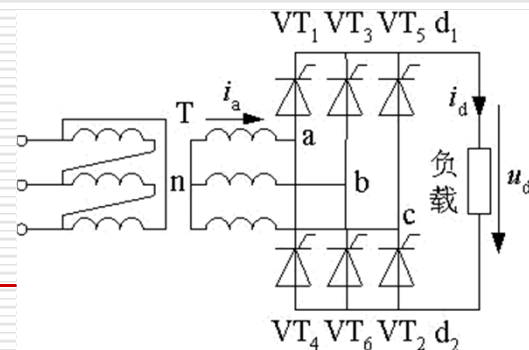
$$\alpha = 90^\circ$$



- SCR导通到线电压过零，关断。
- 因为 $i_d$ 与 $u_d$ 一致，一旦 $u_d$ 降为零， $i_d$ 也降至零，SCR关断，输出整流电压 $u_d$ 为零， $u_d$ 波形不能出现负值。



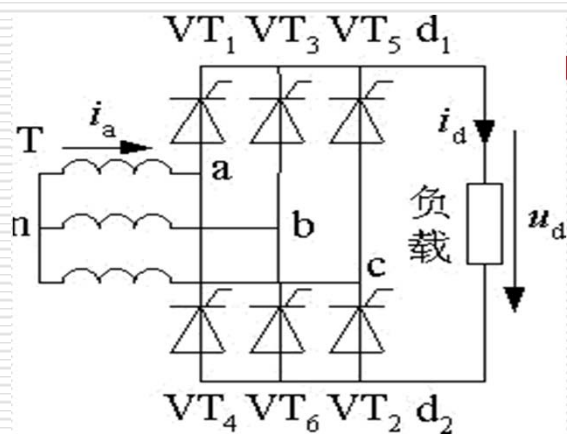
## ◆ 三相桥式全控整流电路的特点



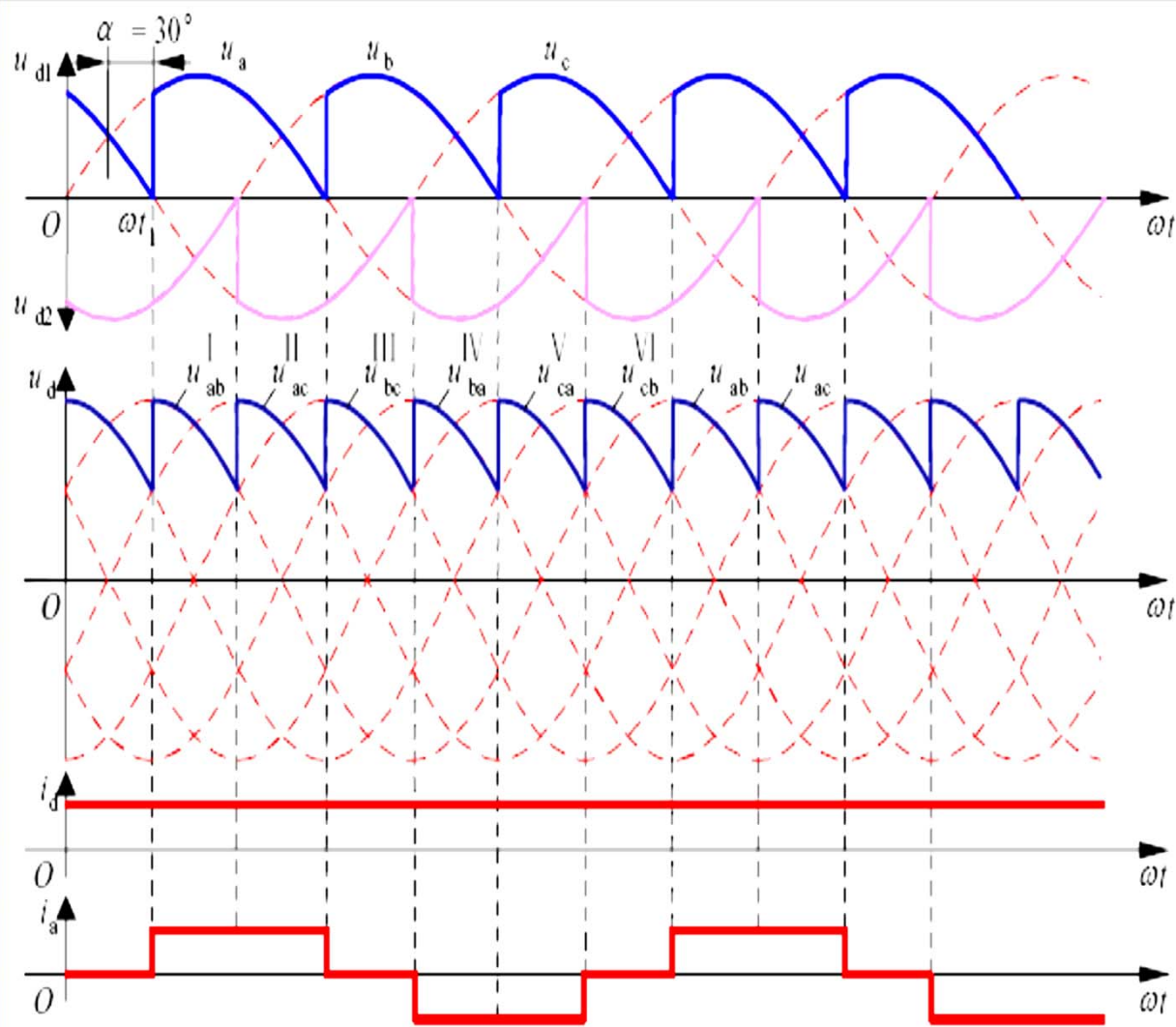
- 2个SCR同时导通形成供电回路，共阴极组的和共阳极组的各1个，且不能为同一相的SCR。
- 对触发脉冲的要求
  - 6个SCR的脉冲按 $VT_1$ - $VT_2$ - $VT_3$ - $VT_4$ - $VT_5$ - $VT_6$ 的顺序，相位依次差 $60^\circ$ 。
  - 共阴极组 $VT_1$ 、 $VT_3$ 、 $VT_5$ 的脉冲依次差 $120^\circ$ ，共阳极组 $VT_4$ 、 $VT_6$ 、 $VT_2$ 也依次差 $120^\circ$ 。
  - 同一相的上下两个桥臂，即 $VT_1$ 与 $VT_4$ ， $VT_3$ 与 $VT_6$ ， $VT_5$ 与 $VT_2$ ，脉冲相差 $180^\circ$ 。
- $u_d$ 一周脉动6次，每次脉动的波形都一样，故该电路为6脉波整流电路。
- 需保证同时导通的2个晶闸管均有脉冲
  - 宽脉冲触发；双脉冲触发（常用）：
- SCR承受最大正、反向电压均为输入线电压的峰值。

## 2. 阻感负载

$$\alpha = 30^\circ$$

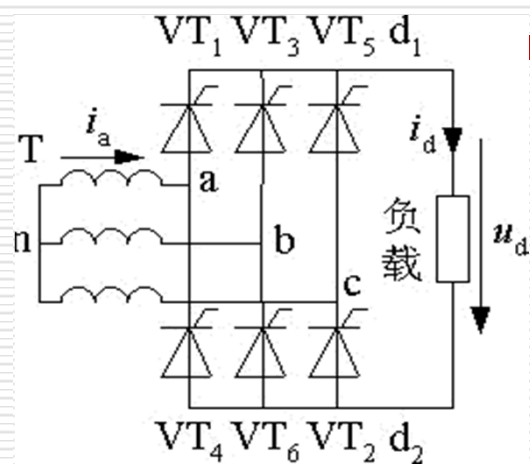


- $u_d$  波形连续，电路的工作情况与带电阻负载时十分相似，通断情况、 $u_d$  波形、SCR 承受的电压波形等都一样。
- 区别在于 **电流**，当电感足够大的时候， $i_d$ 、 $i_{VT}$ 、 $i_a$  的波形在导通段都可近似为一条水平线。



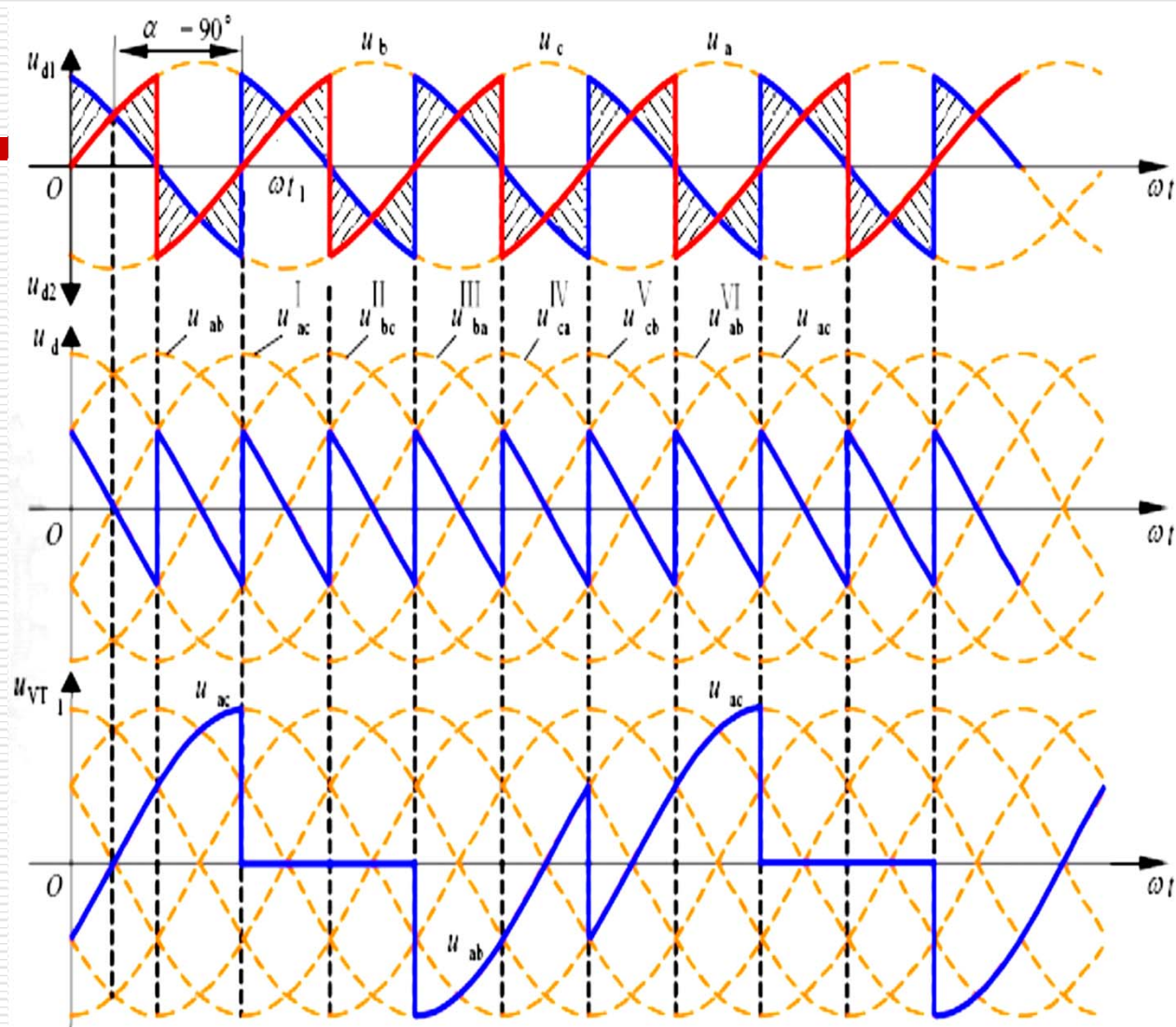


$\alpha > 60^\circ$ 时



$\alpha=90^\circ$

由于电感L的作用，  
 $u_d$ 波形会出现负的部分。



## 基本数量关系

$\alpha$ 的移相范围:

整流输出电压平均值:

阻感负载, 或电阻负载 $\alpha \leq 60^\circ$ 时,

电阻负载且 $\alpha > 60^\circ$ 时,

整流输出电流平均值:

SCR的电流、电压:

□ 各SCR的导通范围:

□ 有效值: 电阻负载, 阻感负载

□ 反向峰值电压:

□ 正向峰值电压:

**R负载  $120^\circ$ ; RL负载,  $\omega L \gg R$ ,  $90^\circ$**

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

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\pi} \sqrt{6} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34 U_2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right]$$

$$I_d = U_d / R$$

电流连续  $120^\circ$ ; R负载 且 电流断续,  
 $(120^\circ - \alpha) * 2$ 。

由波形来计算出

$$U_{RM} = U_{FM} = \sqrt{6} U_2 = 2.45 U_2$$



## 3.4 电容滤波的不可控整流电路

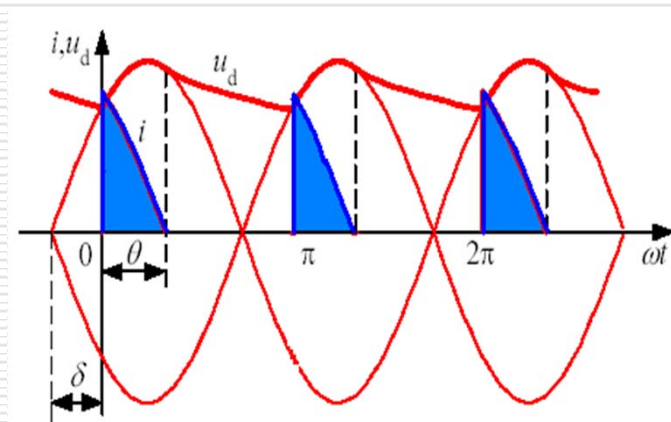
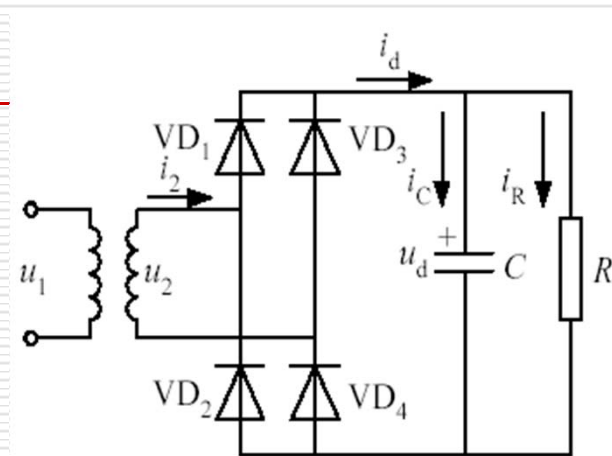
---

- 在交—直—交变频器、不间断电源、开关电源等应用场合大都采用不可控整流电路。
- 最常用的是单相桥式和三相桥式两种接法。
- 由于电路中的电力电子器件采用整流二极管，故也称这类电路为二极管整流电路。
- 与电子学课中学过的二极管整流电路原理完全一样。
- 单相交流输入的场所常用于小功率负载，如目前大量普及的微机、电视机等家电产品中。

### 3.4.1 电容滤波的单相不可控整流电路

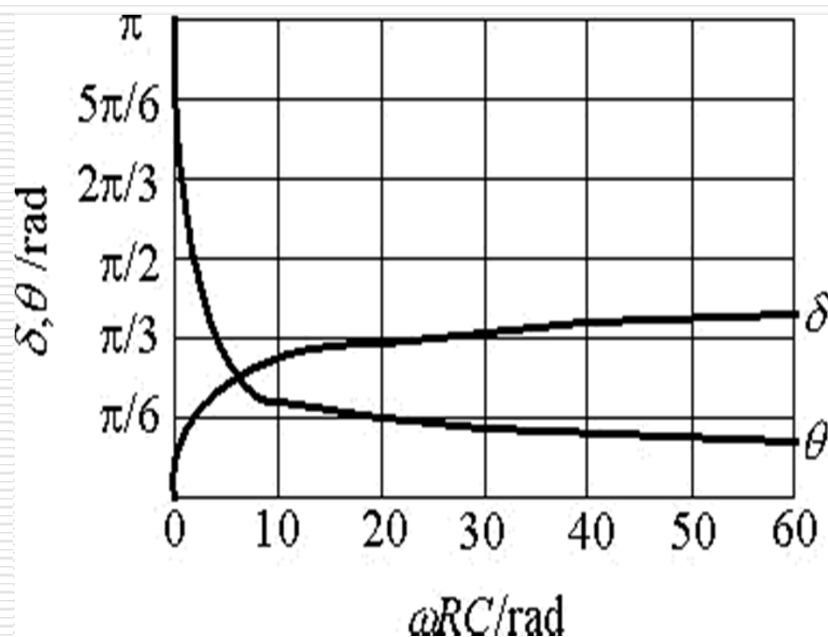
#### 1. 工作原理及波形分析

- 在 $u_2$ 正半周过零点至 $\omega t=0$ 期间,  $u_2 < u_d$ , 二极管均不导通, 电容 $C$ 向 $R$ 放电, 提供负载所需电流, 同时 $u_d$ 下降。
- 至 $\omega t=0$ 之后,  $u_2$ 将要超过 $u_d$ , 使得 $VD_1$ 和 $VD_4$ 开通,  $u_d = u_2$ , 交流电源向电容充电, 同时向负载 $R$ 供电。
- 电容被充电到 $\omega t = \theta$ 时,  $u_d = u_2$ ,  $VD_1$ 和 $VD_4$ 关断。电容开始以时间常数 $RC$ 按指数函数放电。
- 当 $\omega t = \pi$ , 即放电经过 $\pi - \theta$ 角时,  $u_d$ 降至开始充电时的初值, 二极管 $VD_2$ 和 $VD_3$ 导通, 此后 $u_2$ 又向 $C$ 充电, 与 $u_2$ 正半周的情况一样。



稳定状态下电压 $u_d$ 和电流 $i_d$ 波形, 求解 $u_d$ 、 $i_d$ 过程见 (3-37) - (3-45)

$\theta$ 、 $\delta$ 与 $\omega RC$ 的关系曲线，由(3-44)和(3-45)求出， $\theta$ 、 $\delta$



$\delta$ 指 $VD_1$ 和 $VD_4$ 导通的时刻与 $u_2$ 过零点相距的角度。

$\theta$ 指 $VD_1$ 和 $VD_4$ 的导通角。

$\theta$ 、 $\delta$ 由仅 $\omega RC$ 决定。

注意 $\omega RC$ 大于10rad后 $\theta$ 的意义。

## 2.主要的数量关系

(1) 输出电压平均值:

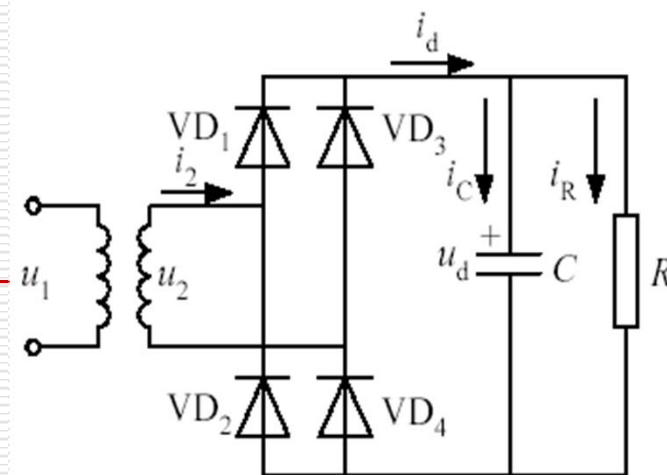
- 空载输出电压  $U_d = 1.414U_2$
- 重载时 (3.1.2中 (3-9)) 输出电压  $U_d = 0.9U_2$ , 即趋近于接近电阻负载时的特性。
- 设计时根据负载  $R$  的情况选择电容  $C$ , 使  $RC \geq (3-5)T/2$ , 此时输出电压为:  $U_d \approx 1.2U_2$

(2) 输出电流平均值:  $I_d = U_d / R$

(3) 二极管承受的电压及电流:

电压:  $\sqrt{2}U_2$

电流: (平均值)  $I_d/2$



## 3.5 整流电路的谐波和功率因数

电力电子装置应用所带  
来的问题:

- ☐ 谐波
- ☐ 无功

对公共电网的不利影响和产生的危害

无功带来的不利影响:

- ☐ 使设备容量增加。
- ☐ 总电流增加，设备和线路的损耗增加。
- ☐ 线路压降增大；冲击性负载使电压剧烈波动。

谐波产生的危害:

- ☐ 谐波损耗降低设备效率；中线过热、火灾。
- ☐ 使设备振动、噪声、过热、绝缘老化、损坏；影响用电设备的正常工作。
- ☐ 引起电网局部的谐振，使谐波放大，加剧危害。
- ☐ 继保误动；电气计量不准。
- ☐ 干扰通信。

## 解决措施:

依据**1**:

### **□ 中华人民共和国电力法:**

第**28**条: 供电企业应当保证供给用户的供电质量符合国家标准。对公用供电设施引起的供电质量问题, 应当及时处理。

第**31**条: 用户受电装置的设计、施工安装和运行管理, 应当符合国家标准或者电力行业标准。

第**32**条: 用户用电不得危害供电、用电安全和扰乱供电、用电秩序。对危害供电、用电安全和扰乱供电、用电秩序的, 供电企业有权制止。

第**34**条: 供电企业和用户应当遵守国家有关规定, 采取有效措施, 做好安全用电、节约用电和计划用电工作。

第**59**、**65**条: 违反法律条款所负法律责任。



依据2:

□ 国家标准  
(GB/T14549—1993)  
《电能质量 公用电网谐波》

#### 4 谐波电压限值

公用电网谐波电压（相电压）限值见表1。

表1 公用电网谐波电压（相电压）

电网标称电压 kV	电压总谐波畸变率 %	各次谐波电压含有率，%	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

#### 5 谐波电流允许值

5.1 公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量（方均根值）不应超过表2中规定的允许值。当公共连接点处的最小短路容量不同于基准短路容量时，表2中的谐波电流允许值的换算见附录B（补充件）。

表2 注入公共连接点的谐波电流允许值

标准电压 kV	基准短路容量 MVA	谐波次数及谐波电流允许值，A																							
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0	2.6	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7	1.9	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

注：220kV基准短路容量取2000MVA。

## 方法:

---

### □ 合理设计:

- 从谐波源出发, 减少谐波的产生。
- 高功率因数变流器: 多相整流技术、脉宽调制整流技术、有源功率因数校正器。

### □ 谐波的治理

- 安装滤波装置。
- 无源滤波器 (**LC**)、有源电力滤波器 (注入谐波)

## 3.5.1 谐波和无功功率分析基础

### 1. 谐波

正弦波电压：

$$u(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi_u)$$

施加到：

- ☐ 线性无源元件上，u、i 情况
- ☐ 非线性电路上，u、i 情况

非正弦电压：

$$u(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

施加到：

- ☐ 线性电路上，u、i 情况
- ☐ 非线性电路上，u、i 情况

非正弦电压、电流。 
$$u(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

---

**基波：**

频率与工频相同的分量。

**谐波：**

基波频率大于1整数倍的分量。

**谐波次数：**

谐波频率与基波频率的整数比。

**n次谐波电流含有率：**

$$\text{HRI}_n = (I_n / I_1) \times 100\%$$

**电流谐波总畸变率：**

$$\text{THD}_i = (I_h / I_1) \times 100\%$$

## 2. 功率因数

正弦电路:

- 有功功率:  $P=UI\cos\varphi$
- 视在功率:  $S=UI$
- 无功功率:  $Q=UI\sin\varphi$
- 功率因数:  $\lambda=P/S$
- **$Q$ 与 $P$ 、 $S$ 之间关系:**  
 $S^2=P^2+Q^2$
- 正弦电路中, 功率因数是由电压和电流的相位差 $\varphi$ 决定的, 其值为:  $\lambda=\cos\varphi$ 。

非正弦电路: 定义一致

在电压为正弦波, 电流为非正弦波下:

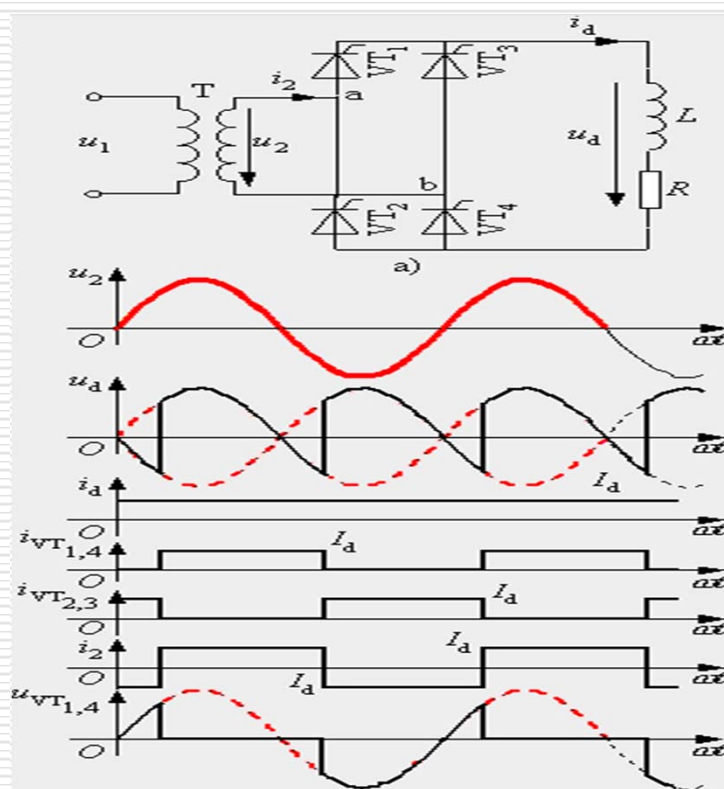
- 有功功率:  $P=UI_1\cos\varphi_1$
- 功率因数:  $\lambda=I_1\cos\varphi_1/I=v\cos\varphi_1$
- 无功功率: 1)  $Q=(S^2-P^2)^{1/2}$   
2)  $Q_f=UI_1\sin\varphi_1$
- 畸变功率 $D$ :  $Q^2=Q_f^2+D^2$
- 谐波电流产生的无功功率  
 $S^2=P^2+Q_f^2+D^2$

其中,  $v=I_1/I$ , 即基波电流有效值和总电流有效值之比, 称为**基波因数**, 而 $\cos\varphi_1$ 称为**位移因数**或**基波功率因数**。



### 3.5.2 带阻感负载时可控整流电路交流侧谐波和功率因数分析

#### 1. 单相桥式全控整流电路



$$i_2 = \frac{4}{\pi} I_d \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n\alpha t = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin n\alpha t$$

基波和  
谐波:

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}I_d}{n\pi} \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

$$\text{HRI}_n = I_n / I_1 = 1/n$$

$$\text{THDi} = 0.48$$

功率因数:

$$I_1 = \frac{2\sqrt{2}I_d}{\pi} \quad \nu = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0.9$$

基波因数

$$\lambda_1 = \cos\varphi_1 = \cos\alpha$$

位移因数

$$\lambda = \nu \lambda_1 = 0.9 \cos\alpha$$