

第6章 交流-交流变流电路

交流-交流变流电路:

- 把一种形式的交流变成另一种形式交流的电路, 也称AC/AC变换电路。可以改变电压、电流、频率和相数
- 分为直接方式(无中间直流环节, AC-AC)和间接方式(有中间直流环节AC-DC-AC)两种。

■ 直接方式:

1. 交流电力控制电路:

只改变电压、电流或对电路的通断进行控制, 而不改变频率的电路。

- 交流调压电路--相位控制
- 交流调功电路或交流电力电子开关 --通断控制

2. 变频电路: 改变频率的电路

- 交交变频电路---直接
- 交直交变频电路---间接

◆ 应用:

1. 灯光控制、异步电动机软启动、异步电动机调速、供用电系统对无功功率的连续调节、在高压小电流或低压大电流直流电源中, 调节变压器一次电压。
2. 用于大功率交流电动机调速传动系统

主要学习内容:

- 单相交流调压电路
- 交流调功电路与交流电力电子开关
- 矩阵式变频电路原理及特点

掌握的内容:

- 电路分类及其基本概念
- 控制思想
- 电路结构
- 工作原理和电路特性
- 有关的计算与分析

在交流-交流变流电路中，把两个晶闸管反并联后串联在交流电路中，通过对晶闸管的控制就可以控制交流输出。

■ 交流电力控制电路

- ◆ **交流调压电路**：在每半个周波内通过对晶闸管开通相位的控制，调节输出电压有效值的电路。
- ◆ **交流调功电路**：以交流电的周期为单位控制晶闸管的通断，改变通态周期数和断态周期数的比，调节输出功率平均值的电路。
- ◆ **交流电力电子开关**：串入电路中根据需要接通或断开电路的晶闸管。

6.1 交流调压电路

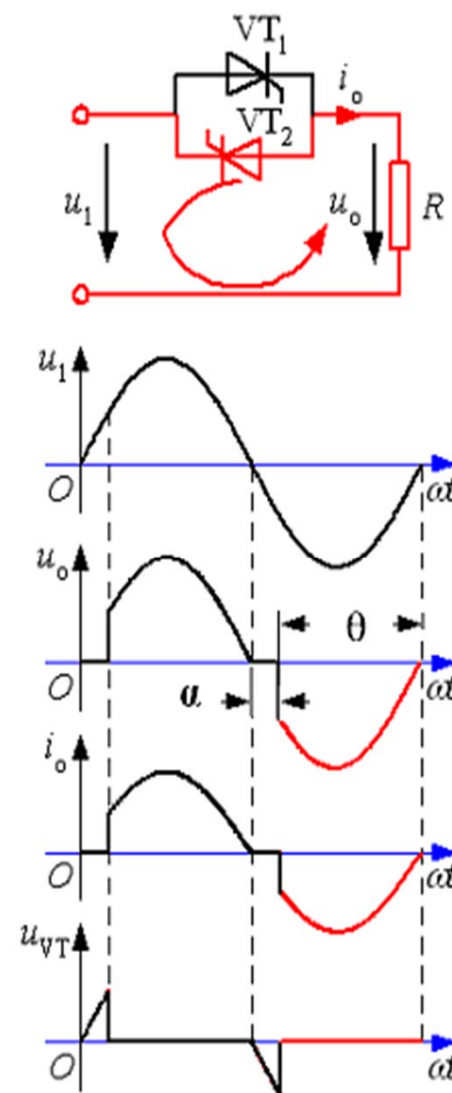
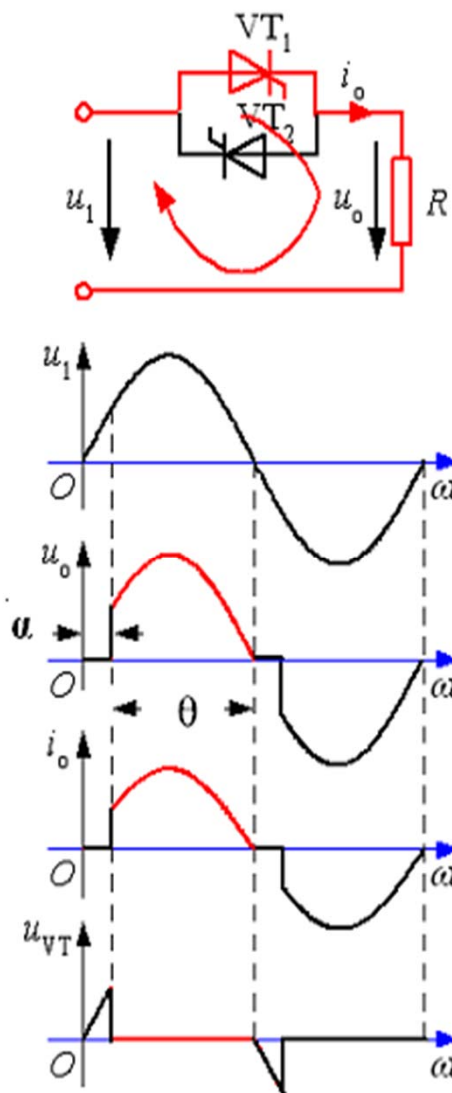
6.1.1 单相交流调压电路

1. 电阻负载

电路如图：

工作原理：

- 在交流电源 u_1 的正半周和负半周，控制 VT_1 和 VT_2 的开通角度 α 就可以调节输出交流电压。
- 正负半周 α 起始时刻($\alpha=0$)均为电压过零时刻，稳态时正负半周的 α 相等。
- 负载电压波形是电源电压的一部分，负载电流(也即电源电流)和负载电压的波形相同。



◆基本的数量关系

负载电压有效值 U_o

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

负载电流有效值 I_o

$$I_o = \frac{U_o}{R}$$

晶闸管电流有效值 I_{VT}

$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_1 \sin \omega t}{R} \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_1}{R} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)}$$

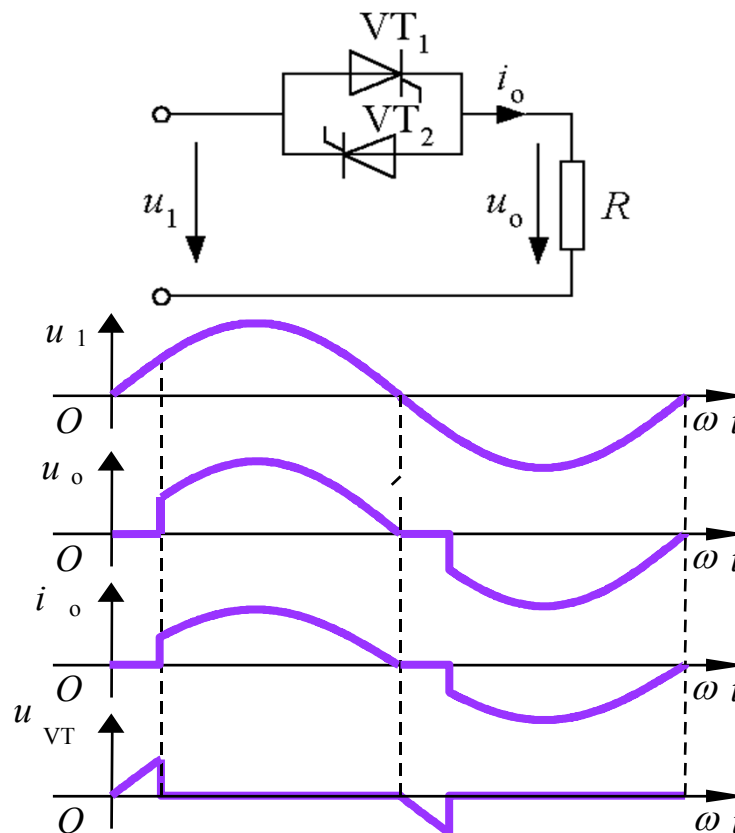
$$I_{VT} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_o$$

晶闸管电压最大值

$$U_{\max} = \sqrt{2}U_1$$

功率因数 λ

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U_o I_o}{U_1 I_o} = \frac{U_o}{U_1} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$



◆输出电压与 α 的关系

α 的移相范围为 $0 \leq \alpha \leq \pi$ ，随着 α 的增大， U_o 逐渐降低。 $\alpha=0$ ， $U_o=U_1$ ，最大； $\alpha=\pi$ ， $U_o=0$ ，最小。

◆功率因数与 α 的关系：

随着 α 的增大， λ 逐渐降低。 $\alpha=0$ ， $\lambda=1$ ，最大； $\alpha=\pi$ ， $\lambda=0$ ，最小。

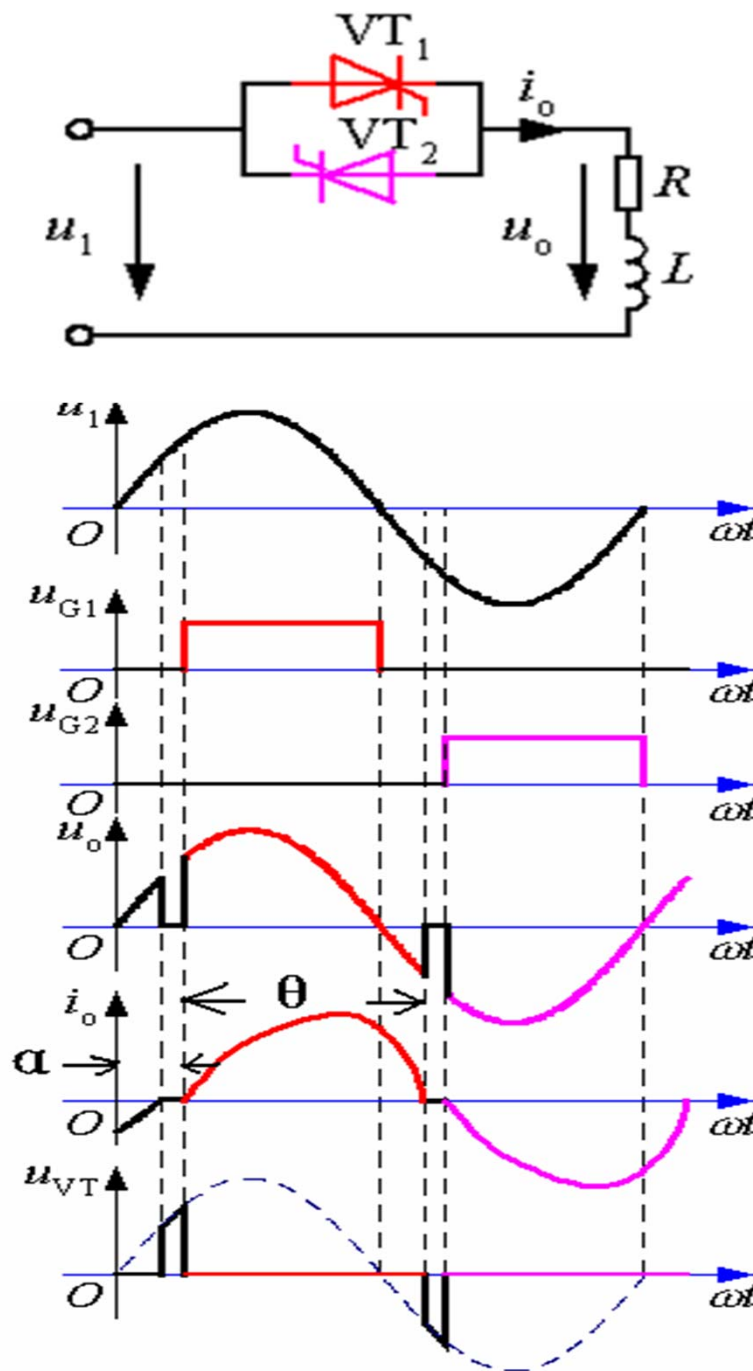
2. 阻感负载

电路如图：

负载的阻抗角： $\varphi = \arctan(\omega L / R)$

◆ 工作过程

- 若没有SCR，稳态时负载电流为正弦波，相位滞后于 u_1 的角度为 φ 。
- 当用晶闸管控制时，只能进行**滞后控制**，使负载电流更为滞后。
- $\alpha=0$ 时刻仍定为电压 u_1 过零的时刻， α 的**移相范围**应为 $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ 。
- 在 $\omega t = \alpha$ 时刻开通晶闸管 VT_1 ，电流开始增加。L的存在，电压过零时，电流不为零，直到L储能放完，电流为零，SCR关断，电源电压在负半周。同理， VT_2 。得到如图所示负载和SCR的电压、电流波形。



在不同的 φ 角下, θ 与 α 关系图

求SCR-VT1的导通角 θ , 即对于RL电路, 求出电流的表达式:

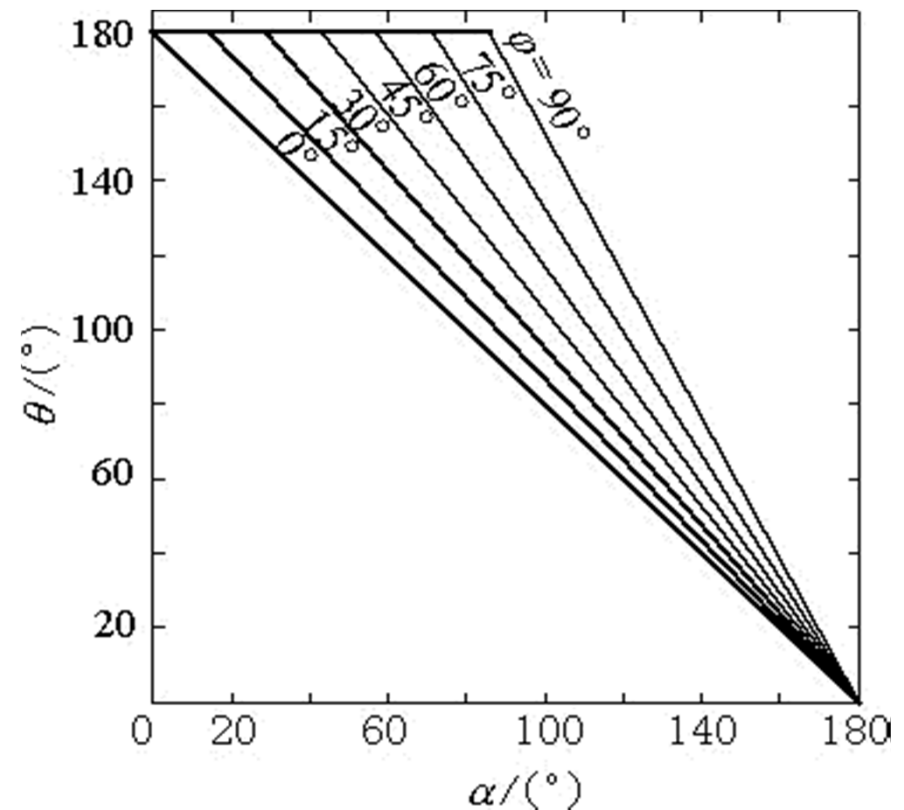
$$L \frac{di_0}{dt} + Ri_0 = \sqrt{2}U_1 \sin \omega t$$

$$i \Big|_{\omega t = \alpha} = 0$$

$$i_0 = \frac{\sqrt{2}U_1}{Z} [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi)e^{\frac{\alpha - \omega t}{\tan \varphi}}]$$

$$\text{当 } \omega t = \alpha + \theta \text{ 时, } i_0 = 0 \quad \varphi \leq \omega t \leq \alpha + \theta$$

$$\sin(\alpha + \theta - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi)e^{\frac{-\theta}{\tan \varphi}}$$



- α 的移相范围应为 $\varphi \leq \alpha \leq \pi$, θ 随 α 的增加而减小。
- $\alpha=180^{\circ}$ 时, $\theta=0$ 。
- 当 $\alpha=\varphi$ 时, 是最上面的 $\theta=180^{\circ}$ 。
- 当 $\alpha > \varphi$, θ 总是小于 180° , 负载电流为断续状态。起到调压作用。
- 当 $\alpha > 180^{\circ}$ 时, SCR承受反压, 不导通。

给定负载RL参数, 可从图中求出改变开通角 α 下对应的导通角 θ 的大小。该曲线向上弯曲, 工程中可近似直线方程求出不同 α 下的 θ 。

◆基本的数量关系

负载电压有效值 U_o ：

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

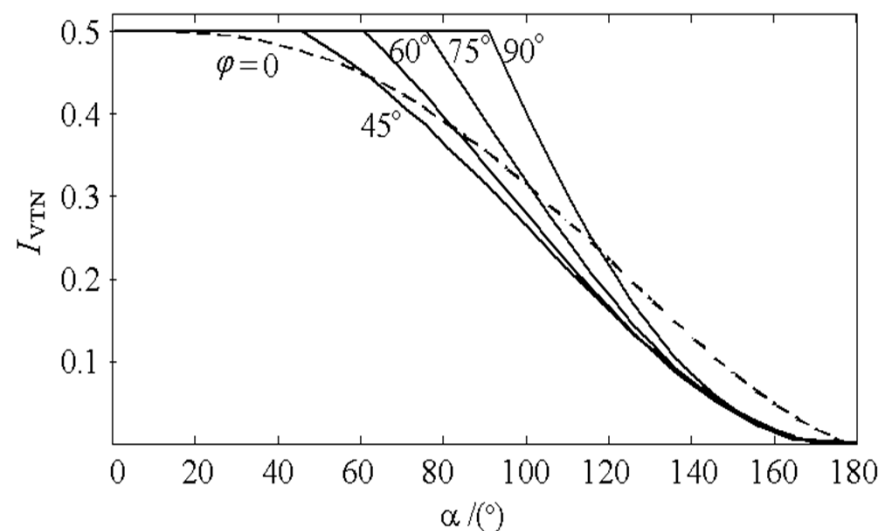
晶闸管电流有效值 I_{VT} ：

$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} \left\{ \frac{\sqrt{2}U_1}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha - \omega t}{\tan \varphi}} \right] \right\}^2 d(\omega t)}$$
$$= \frac{U_1}{\sqrt{2}\pi Z} \sqrt{\theta - \frac{\sin \theta \cos(2\alpha + \varphi + \theta)}{\cos \varphi}}$$

负载电流有效值 I_o ： $I_o = \sqrt{2}I_{VT}$

SCR电流 I_{VT} 的标么值： $I_{VTN} = I_{VT} \frac{Z}{\sqrt{2}U_1}$

得到单相交流调压电路 φ 为参变量时 I_{VTN} 和 α 关系曲线如图，工程中可求出不同 α 下的 I_{VTN} 。



◆ $\alpha < \varphi$ 时的工作情况

触发VT₁，暂态分量的影响，用前式，求得VT₁的导通时间超过 π 。

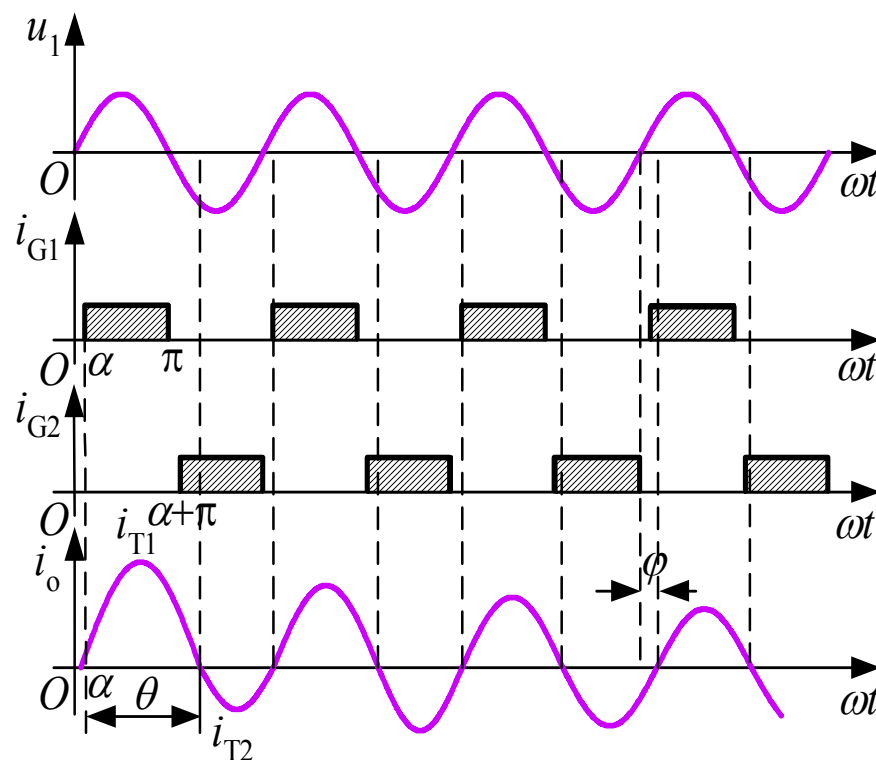
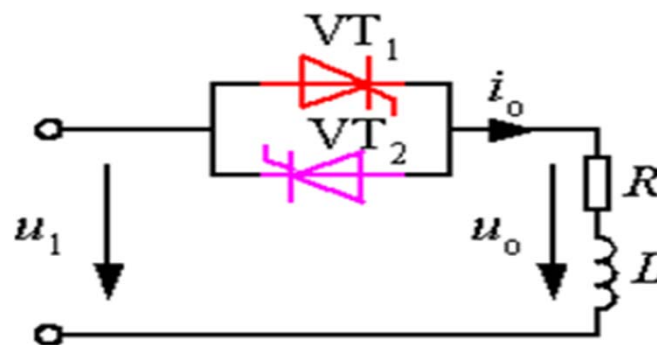
触发VT₂时， i_o 尚未过零，VT₁仍导通，VT₂不会导通， i_o 过零后，VT₂才可开通，VT₂导通角小于 π 。

i_o 有指数衰减分量，在指数分量衰减过程中，VT₁导通时间渐短，VT₂的导通时间渐长。直到都趋于 π ，只有周期分量。

稳态工况和 $\alpha = \varphi$ 时相同。电流 i_o 一直保持连续状态。与电路中的RL电路的合闸过渡过程是一样的。

如果SCR为窄脉冲开通，当电流过零，VT₁关断，VT₂的脉冲已经消失，VT₂不会导通，直到下一次VT₁的脉冲再开通VT₁。这样循环下去，负载中只有正向电流。

控制开通角不能控制负载电压的，无调压作用，失去相控意义。



3. 单相调压电路的谐波分析

带电阻负载时，负载电压 u_o 的谐波分析

$$u_o(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

式中

$$a_1 = \frac{\sqrt{2}U_1}{2\pi}(\cos 2\alpha - 1) \quad b_1 = \frac{\sqrt{2}U_1}{2\pi}[\sin 2\alpha + 2(\pi - \alpha)]$$

$$a_n = \frac{\sqrt{2}U_1}{\pi} \left\{ \frac{1}{n+1} [\cos(n+1)\alpha - 1] - \frac{1}{n-1} [\cos(n-1)\alpha - 1] \right\}$$

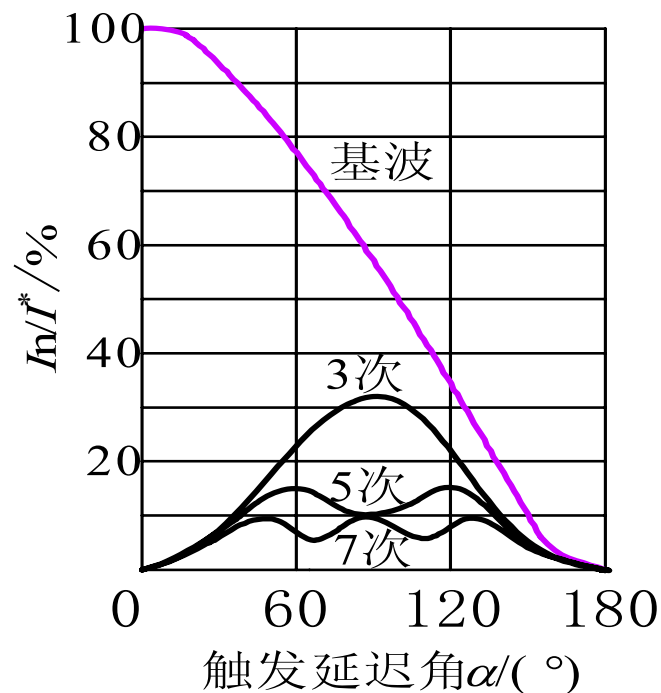
$$b_n = \frac{\sqrt{2}U_1}{\pi} \left[\frac{1}{n+1} \sin(n+1)\alpha - \frac{1}{n-1} \sin(n-1)\alpha \right] \quad (n=3,5,7,\dots)$$

基波和各次谐波的有效值： $U_{on} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$

负载电流基波和各次谐波的有效值： $I_{on} = U_{on} / R$

电流基波和各次谐波标么值随 α 变化的曲线如图

- 负载的电压、电流（电源电流）为非正弦波。
- 仅含奇次谐波，无直流分量、偶次谐波。
- 傅立叶级数描述上述电流和电压，并确定谐波含量。
- 随次数增加，谐波含量减小。
- $\alpha=90^\circ$ 时谐波含量较高。



4. 斩控式交流调压电路

◆ 电路结构如图： V_1 ， V_2 ， VD_1 ， VD_2 为双向可控开关，电路结构与直流斩波电路相似。

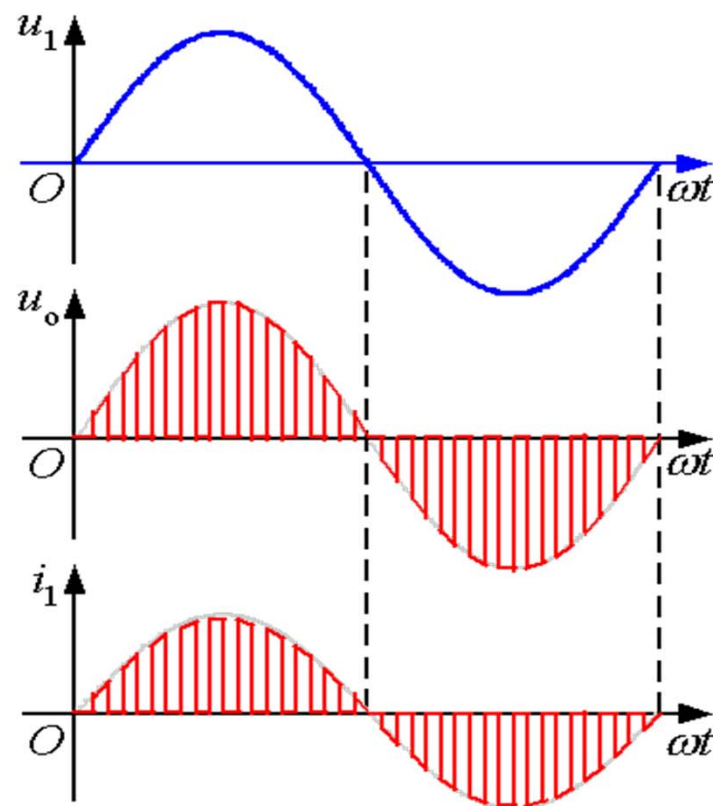
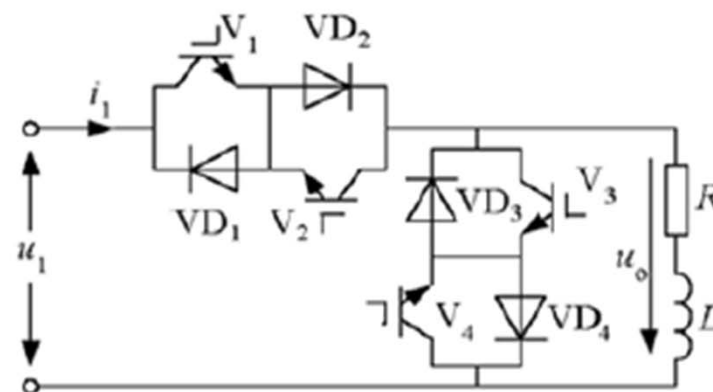
◆ 工作原理

➤ 正半波 V_1 斩波控制， V_4 续流；负半波 V_2 斩波控制， V_3 续流。

➤ 设斩波器件（ V_1 ， V_2 ）导通时间为 t_{on} ，开关周期为 T ，则导通比 $\alpha = t_{on}/T$ ，通过改变 α 来调节输出电压。

◆ 电阻负载斩控式交流调压电路波形。电源电流的基波分量和电源电压同相位，即位移因数为1，电源电流中不含低次谐波，只含和开关周期 T 有关的高次谐波，用很小的滤波器即可滤除，这时电路的功率因数接近1。

◆ 优点：无低次谐波。缺点：耐压及通流低，全控器件较多、结构复杂。



6.2 其它交流电力控制电路

6.2.1 交流调功电路

◆ 交流调功电路与交流调压电路的比较:

相同点: 电路形式 完全相同

不同点: 控制方式 不同

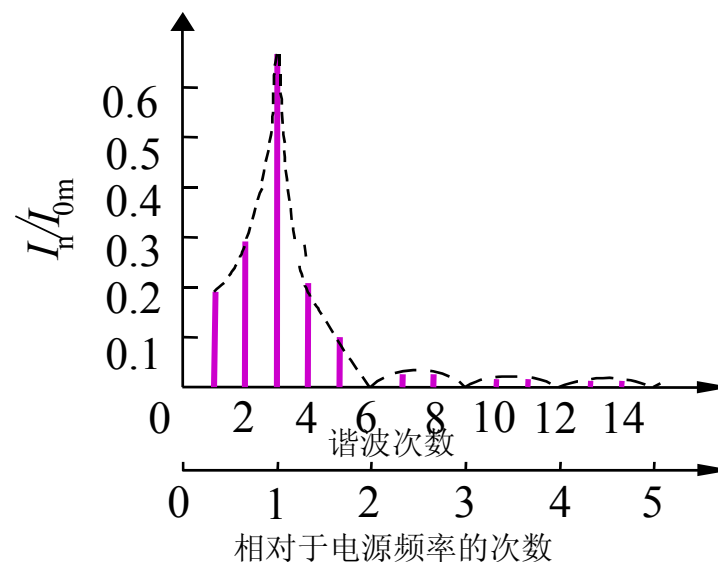
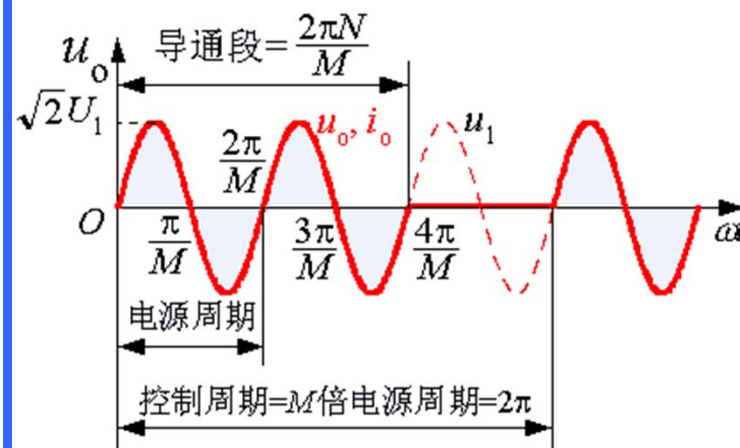
- 前者: 每个电源周期都控制输出电压波形。
- 后者: 负载与电源接通几个周期, 再断开几个周期, 控制通断周波数的比值来调节负载所消耗的平均功率。

◆ 电阻负载时的工作情况

控制周期为 M 倍电源周期, SCR在前 N 个电源周期导通, 后 $M-N$ 个周期关断。如图($M=3$ 、 $N=2$)。负载电压和负载电流(也即电源电流)的重复周期为 M 倍电源周期。

◆ 谐波情况

- 负载电压电流都是正弦波, 不对电网电压电流造成通常意义的谐波污染。
- 以控制周期为基准, 傅里叶分析的电流频谱图如图。
- 以电源周期为基准, 电流中不含整数倍频率的谐波, 但含有非整数倍频率的谐波, 而且在电源频率附近, 非整数倍频率谐波的含量较大。



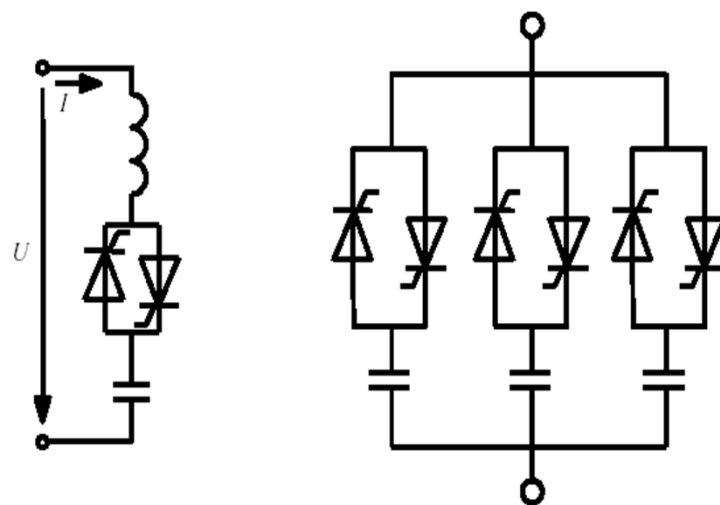
6.2.2 交流电力电子开关

- 把晶闸管反并联后串入交流电路中，代替电路中的机械开关，起接通和断开电路的作用。
- 优点：响应速度快，没有触点，寿命长，可以频繁控制通断。
- 与交流调功电路的区别
 - ◆并不控制电路的平均输出功率。
 - ◆没有明确的控制周期，根据需要控制电路的接通和断开。
 - ◆控制频度比交流调功电路低得多。

典型应用：

晶闸管投切电容器（TSC）

控制无功功率，提高功率因数，稳定电网电压，改善供电质量。
性能优于机械开关投切的电容器。



TSC基本原理图，基本单元，分组投切

6.4 矩阵式变频电路

◆一种直接变频电路，控制方式是斩控方式。采用全控型开关器件。使AC频率及幅值均变化。

◆图a是矩阵式变频电路的主电路拓扑，9个开关器件组成 3×3 矩阵，每个开关都是矩阵中的一个元素；b常用的一种开关单元--双向可控开关；三相输入电压为 u_a 、 u_b 和 u_c ，三相输出电压为 u_u 、 u_v 和 u_w 。

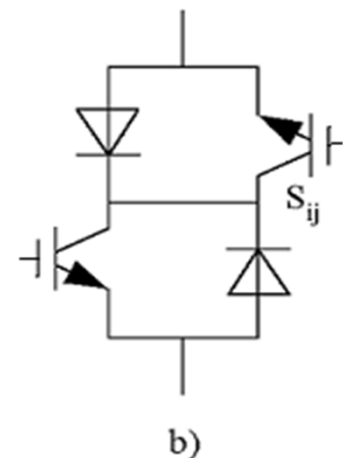
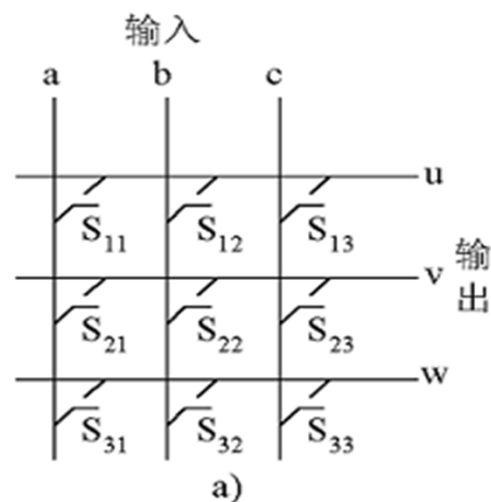
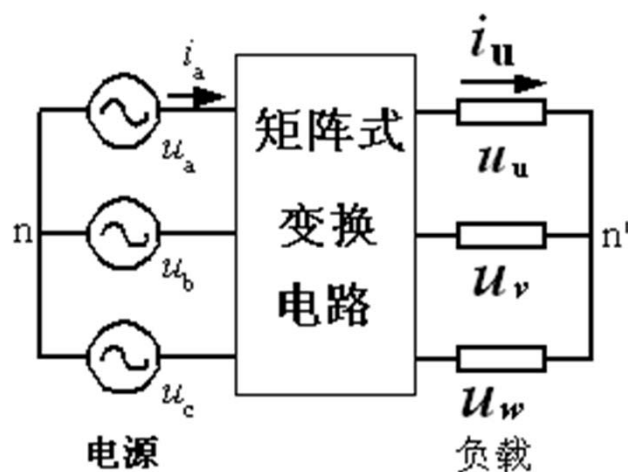
◆优点：

输出电压可控制为正弦波，频率不受电网频率的限制。

输入电流可控制成正弦波且和电压同相，功率因数为1，也可控制为需要的功率因数。

能量可双向流动，适用于交流电动机的四象限运行。

不通过中间直流环节而直接实现变频，效率较高。



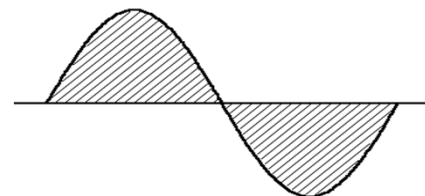
■ 矩阵式变频电路的基本工作原理

◆ 构造输出电压，如同斩控式交流调压电路控制输出电压，输出电压 u_o 为：

$$u_o = \frac{t_{\text{on}}}{T_c} u_s = \sigma u_s$$

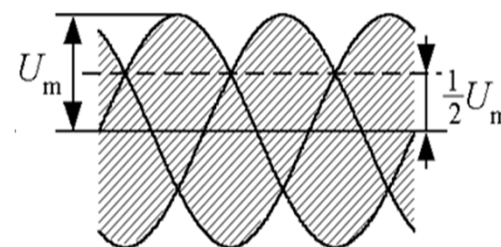
◆ 在不同的开关周期采用不同的 σ ，可得到所构造的 u_o 。

➤ 单相输入电压可利用来构造 u_o （变频）的部分只有如图所示的阴影部分，因此 u_o 受到很大的局限，无法得到所需要的输出波形。



➤ 三相输入相电压构造 u 相输出电压 u_u （变频）

✓ 用矩阵式变频电路第一行的3个开关 S_{11} 、 S_{12} 和 S_{13} 共同作用来构造 u_u ，可利用三相相电压包络线中所有的阴影部分。

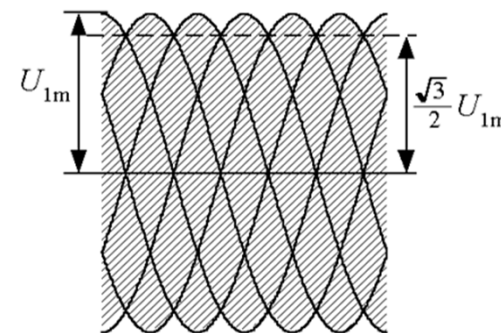


✓ 理论上所构造的 u_u 的频率可不受限制，但其最大幅值仅为输入相电压幅值的0.5倍。

➤ 三相输入线电压构造输出线电压 u_{uv} （变频）

✓ 用矩阵式变频电路第一行和第二行的6个开关共同作用来构造 u_{uv} ，就利用6个线电压包络线中所有的阴影部分。

✓ 其最大幅值可达到输入线电压幅值的0.866倍，这也是正弦波输出条件下矩阵式变频电路理论上最大的输出输入电压比。



■ 发展现状和突出优点

◆ 尚未进入实用化，主要原因：

所用的开关器件为18个，电路结构较复杂，成本较高，控制方法还不算成熟。

输出输入最大电压比只有0.866，用于交流电机调速时输出电压偏低。

◆ 突出优点

有十分理想的电气性能，它可使输出电压和输入电流均为正弦波，输入功率因数为1，且能量可双向流动，可实现四象限运行。

和目前广泛应用的交直交变频电路相比（6个整流，6个逆变），虽多用了6个开关器件（18个-12个=6个），却省去了直流侧大电容，将使体积减小，且容易实现集成化和功率模块化。

◆ 在电力电子器件制造技术飞速进步和计算机技术日新月异的今天，矩阵式变频电路将有很好的发展前景。