



西南交通大学  
Southwest Jiaotong University

# 电力电子技术

---

教师名称 肖嵩

[xiaosong@home.swjtu.edu.cn](mailto:xiaosong@home.swjtu.edu.cn)

西南交通大学 电气工程学院



- 7.1 交流调压电路
- 7.2 交交变频电路

- 直接调节交流电压的大小，无需中间直流环节。
- 分为相控和斩控两种方式。
- 应用场合
  - 半导体交流开关。
    - ◆ 优点：不会产生电弧、高速、无噪声、体积小和重量轻，使用安装条件限制少，适用于特殊环境。
    - ◆ 用途：固体继电器（SSR）、舰船电路、变压器抽头切换、电机绕组的星 - 三角变换等。
  - 交流功率控制。
    - ◆ 整周期功率控制（如加热）与相控功率控制。
- 下面以**单相**交流调压为例，分别讲述两种方式的工作原理。

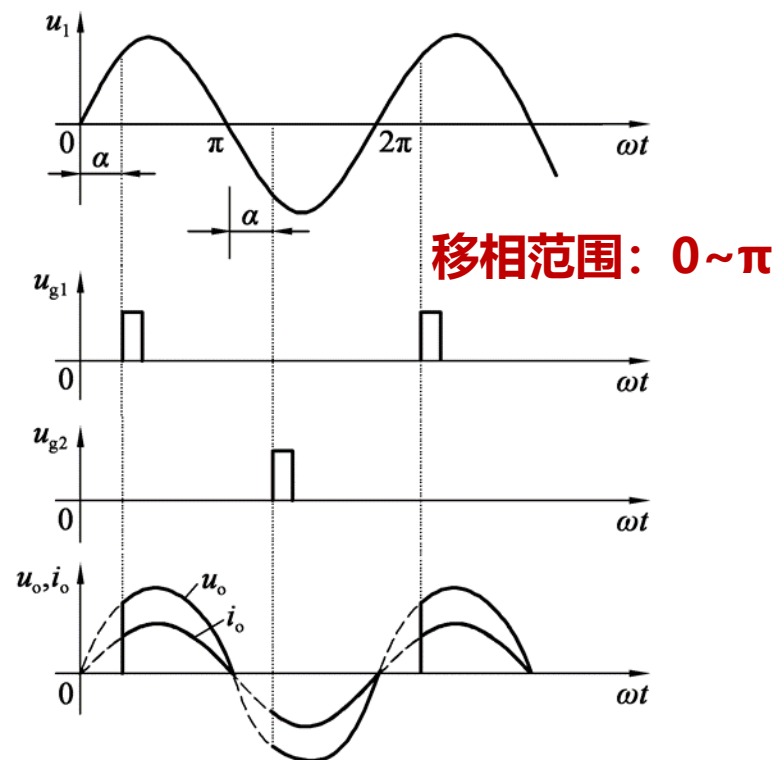
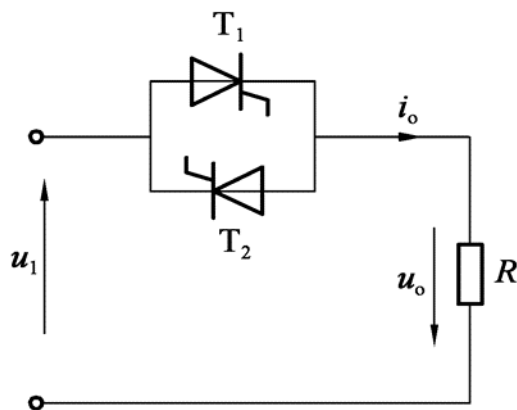
## 7.1.1 相控交流调压电路



西南交通大学  
Southwest Jiaotong University

### ■ 电阻负载

双向晶闸管



单相交流调压电路（带阻性负载）及波形  
移相范围:  $0 \sim \pi$

## 7.1.1 相控交流调压电路



### ■ 电阻负载

#### ● 负载电压有效值

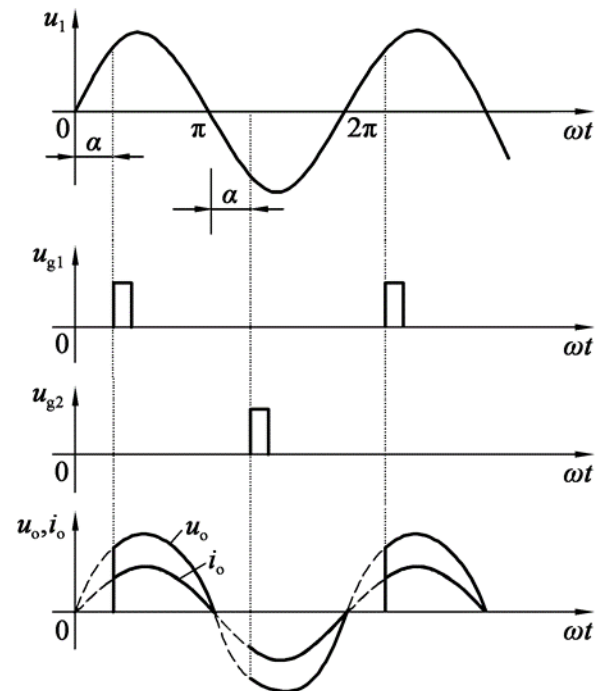
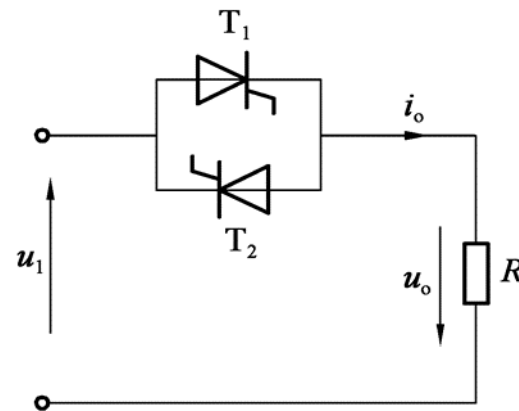
$$U_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_1^2 d(\omega t)} = U_1 \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{2\pi}}$$

#### ● 负载电流有效值

$$I_o = U_o / R$$

#### ● 电路的功率因数

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



### ■ 电阻负载

#### ● 晶闸管平均电流

$$I_{dT} = \frac{1}{R} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} u_1 d(\omega t) \right] = \frac{\sqrt{2}U_1}{2\pi R} (1 + \cos \alpha) = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} I_o (1 + \cos \alpha)$$

#### ● 晶闸管电流有效值

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left( \frac{u_1}{R} \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_1}{R} \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{4\pi}} = I_o \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{4\pi}}$$

#### ● 当 $\alpha=0^\circ$ 时, 晶闸管最大电流有效值 $I_{T\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_o$ , 应选择的晶闸管通态平均电流为

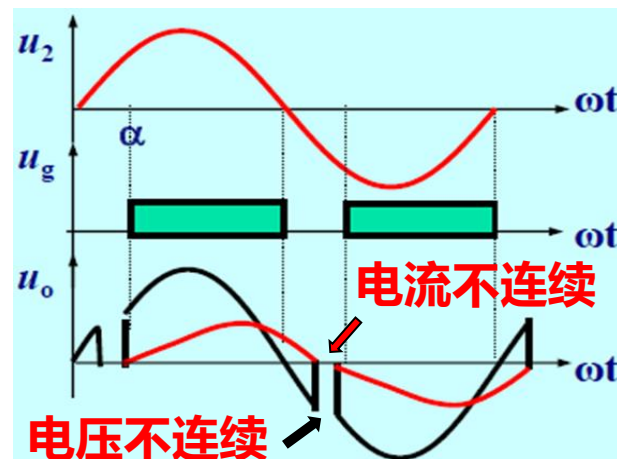
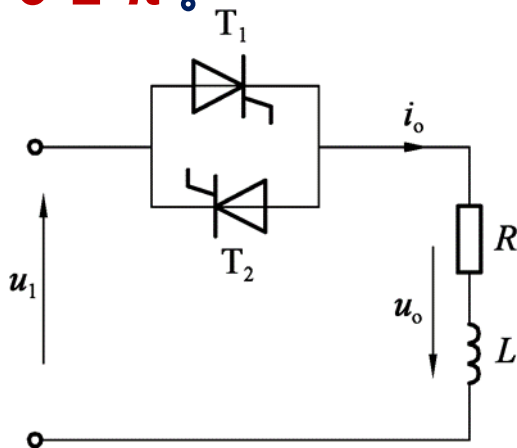
$$I_{T(av)} = \frac{I_{T\max}}{1.57} = 0.45 I_o = 0.45 \frac{U_1}{R}$$

## 7.1.1 相控交流调压电路



### ■ 阻感负载

- 当正半周 $T_1$ 导通后，电感储能。
- $U_1$ 过零时，电感储能尚未释放完毕（电流不为0）， $T_1$ 无法关断。
- $T_1$ 的导通时间与负载的阻抗角有关。
  - ◆ 电感比重越大，放能时间越长。
  - ◆ 为能够实现调压，必须使电流(电压)不连续（最多临界连续），即电感电流降为零的时刻必须在下一个晶闸管触发脉冲到来的时刻之前。否则，电路将不可控制。因此**导通角 $\theta$ 不能超过 $\pi$** ，即 **$\theta \leq \pi$** 。



### ■ 阻感负载

#### ● 电感电流 $i_o$ 的计算

◆ 当  $T_1$  导通时, 根据KVL有电路方程:

$$\sqrt{2}U_1 \sin \omega t = i_o R + L(di_o / dt), \quad i_o |_{\omega t = \alpha} = 0$$

可解得

$$i_o = \sqrt{2}I_o [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi)e^{(\alpha - \omega t) / \tan \varphi}]$$

其中

$$I_o = U_1 / Z \quad Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}(\omega L / R)$$

$\varphi$  为负载阻抗角



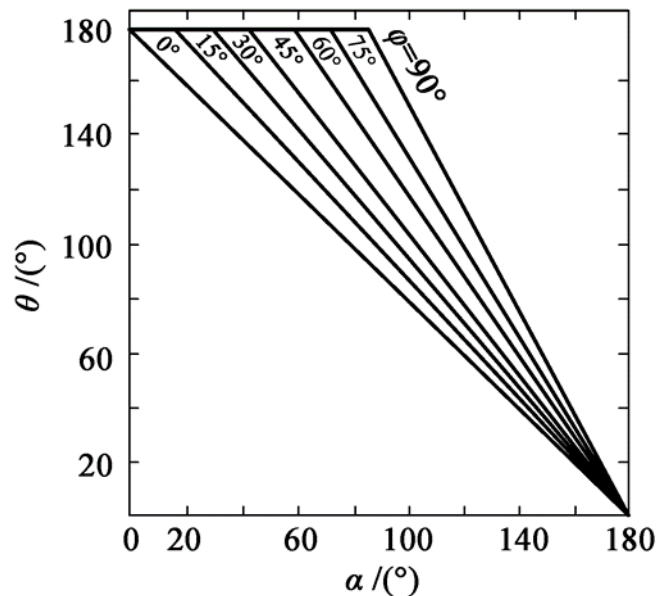
### ■ 阻感负载

#### ● 导通角计算和触发角的范围

- ◆ 设晶闸管导通角为 $\theta$ ，则 $\omega t = \alpha + \theta$ 时， $i_o = 0$ ，此时有

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

- ◆ 对上式进行分析
- ◆ 如果 $\alpha \leq \varphi$ ，则上式右边为负，因此左边也必须为负，意味着 $\theta + \alpha - \varphi \geq \pi$ ，而此时 $\alpha - \varphi \leq 0$ ，所以 $\theta \geq \pi$ ，这是不允许的。因此必须有 $\alpha \geq \varphi$ 。
- ◆ 另一方面， $T_1$ 只能在正半周触发， $T_2$ 只能在负半周触发，这就要求 $\alpha \leq \pi$ 。



为使交流调压电路在阻感负载时仍有调压的能力，应当使触发角的范围为：  
 $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ 。

## 7.1.1 相控交流调压电路

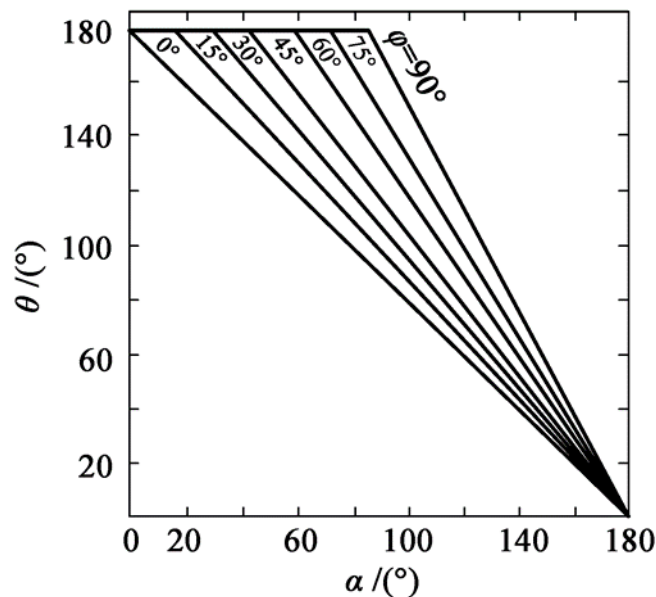


西南交通大学  
Southwest Jiaotong University

### ■ 阻感负载

#### ● 导通角计算和触发角的范围

- ◆ 综合得到，为使交流调压电路在阻感负载时仍有调压的能力，应当使触发角的范围为： $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ 。
- ◆ 已知  $\alpha$  和  $\varphi$ ，可由上式计算  $\theta$ （可用计算机求解），然后求得输出电压的有效值和晶闸管电流的有效值。



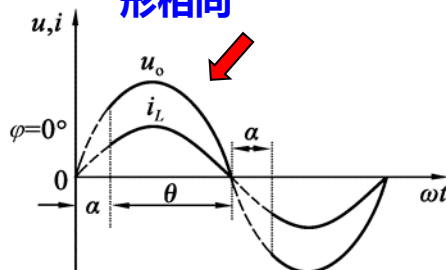
为使交流调压电路在阻感负载时仍有调压的能力，应当使触发角的范围为： $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ 。

# 7.1.1 相控交流调压电路



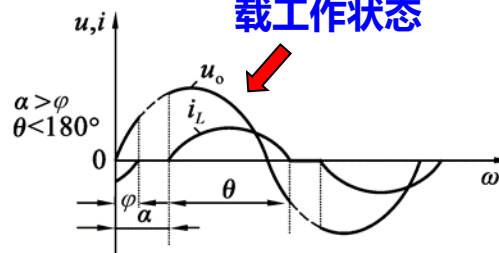
## ■ 阻感负载

$\varphi=0$ , 退化为阻性负载, 此时电压电流波形相同



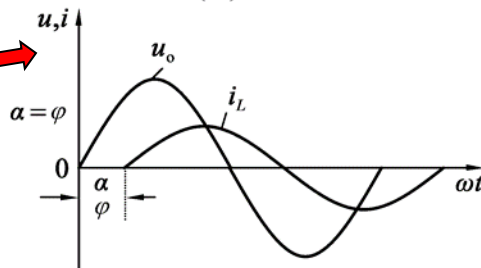
(a)

正常的阻感负载工作状态



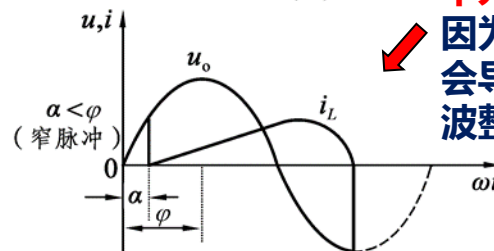
(b)

电压和电流刚刚到达连续的临界模式, 此时 $\alpha=\varphi$



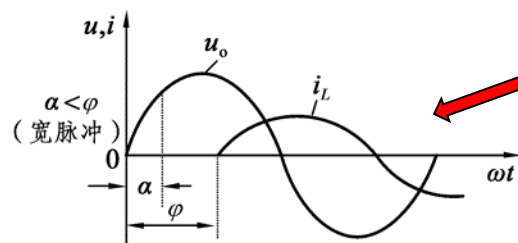
(c)

不允许工作在这种模式  
因为这种模式下, T2 永远不会导通, 电路退化为单相半波整流电路



(d)

不允许工作在这种模式  
因为这种模式下, 尽管采用宽脉冲触发, 能使两个晶闸管都工作, 但电路没有调压能力, 负载上始终获得完整的正弦波。



(e)

### ■ 例题：

- 有一个带感性负载的单相调压电路，电源电压为  $u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin(2\pi f_1 t)$ ，其参数为  $U_1 = 220\text{ V}$ ， $f_1 = 50\text{ Hz}$ ， $L_m = 5.516\text{mH}$ ， $R = 1\Omega$ 。
- 试求：
  - ① 控制角  $\alpha$  的移相范围；
  - ② 负载电流的最大有效值  $I_{oM}$ ；
  - ③ 最大输出功率  $P_{oM}$  和功率因数  $\cos \varphi$ 。

## 7.1.1 相控交流调压电路



- 例题：有一个带感性负载的单相调压电路，电源电压为  $u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin(2\pi f_1 t)$ ，其参数为  $U_1 = 220 \text{ V}$ ， $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ， $L_m = 5.516 \text{ mH}$ ， $R = 1 \Omega$ 。试求：

①控制角  $\alpha$  的移相范围；②负载电流的最大有效值  $I_{oM}$ ；③最大输出功率  $P_{oM}$  和功率因数  $\cos \varphi$ 。

解：①感性负载时，控制角 的移相范围为： ，而负载功率因数角

$$\varphi = \arctan \left( \frac{\omega L}{R} \right) = \arctan \left( \frac{2\pi \times 50 \times 5.516 \times 10^{-3}}{1} \right) = 60^\circ$$

故控制角的移相范围是：  $60^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 。

②当  $\alpha = \varphi$  时，电流为连续状态，此时负载电流最大，由

$$i_o = \frac{\sqrt{2}U_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t - \varphi)$$

得负载电流最大有效值

$$I_{oM} = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{220}{\sqrt{1^2 + 1.732^2}} = 110 (\text{A})$$

## 7.1.1 相控交流调压电路



### ③最大输出有功功率

$$P_{oM} = U_1 I_{oM} \cos \varphi = 220 \times 110 \times \cos 60^\circ = 12.1(kW)$$

此时的功率因数为

$$\cos \varphi = \cos \alpha = \cos 60^\circ = 0.5$$

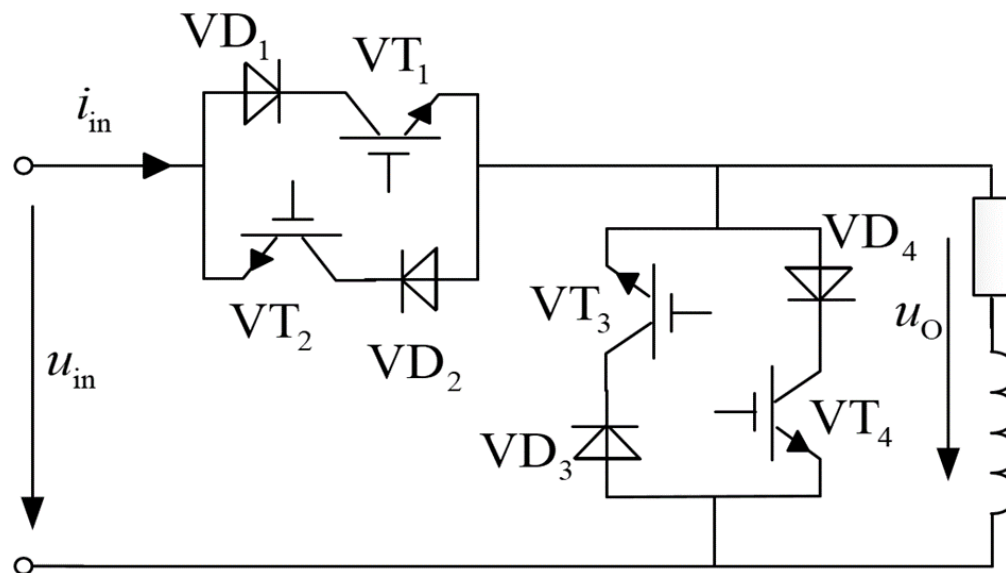
## 7.1.2 斩控交流调压电路



### ■ 斩控式 (PWM) 交流调压电路

### ■ 电路

- IGBT与二极管串联再反并联，共两组，4个支路。
- 开关管导通方向与所串联的二极管相同。

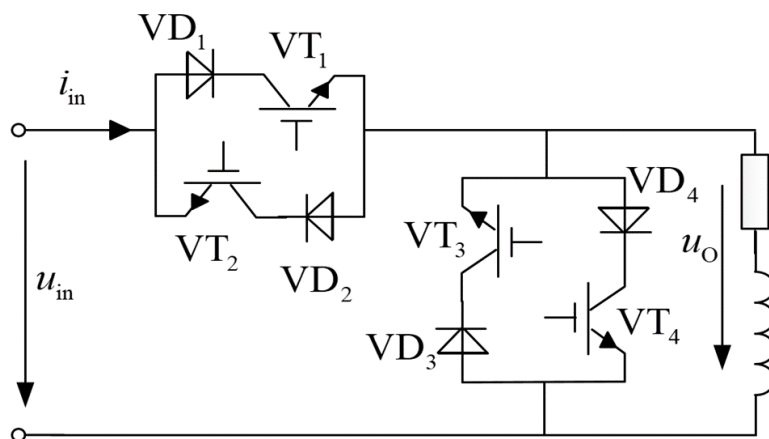


## 7.1.2 斩控交流调压电路

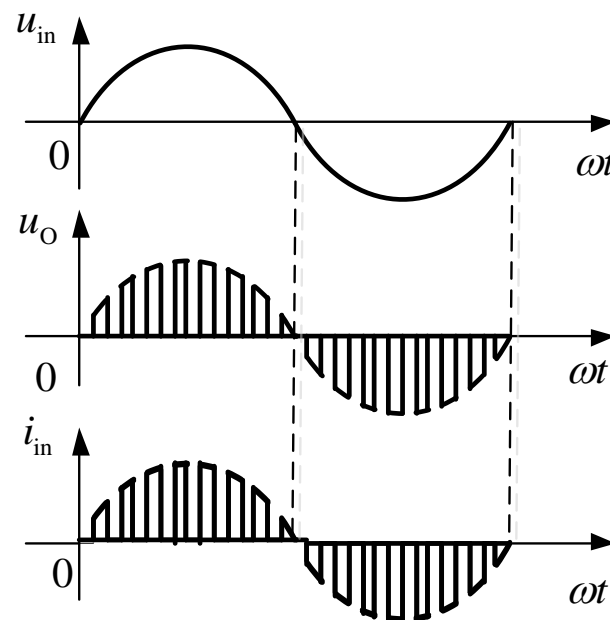


### 工作原理

- 以  $u_{in}$  处于正半周时为例， $VT_3$  一直开通， $VT_4$  一直关断， $VT_1$  进行斩波控制： $VT_1$  导通时  $u_O = u_{in}$ ； $VT_1$  断开时， $u_O = 0$ 。
- 用  $VT_1$ ， $VT_2$  斩波控制，用  $VT_3$ ， $VT_4$  提供续流通道。 $VT_1$ ， $VT_2$  导通时间  $t_{on}$ ，开关周期  $T_S$ ，则导通占空比  $\rho = t_{on}/T_S$ ，改变  $\rho$  来改变输出电压平均值。
- 高次谐波用很小的滤波器即可滤除。



斩控式交流调压电路



斩控式交流调压电路波形



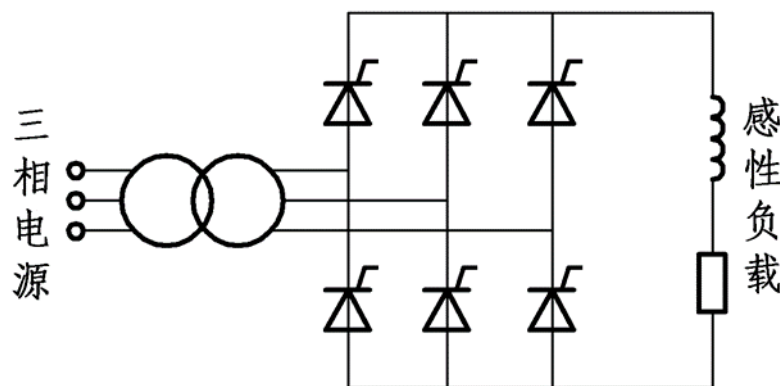


- 7.1 交流调压电路
- 7.2 交交变频电路

### ■ 交交变频器

- 直接将一种频率的交流电变换成另一种频率的交流电
- 没有中间直流环节。
- 可用于电机调速
- 包括**单相**和**三相**交交变频电路
- 包括基于晶闸管的**相控交交变频电路**（也称为**周波变换器**），和基于高速全控器件的**矩阵式变换器**。

### ■ 相控变频的基本原理

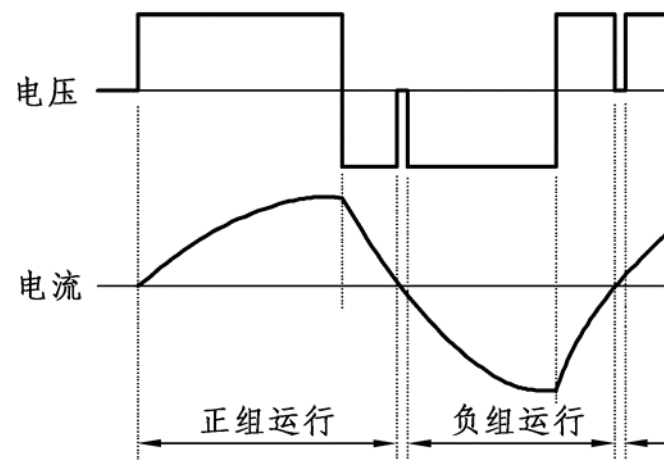
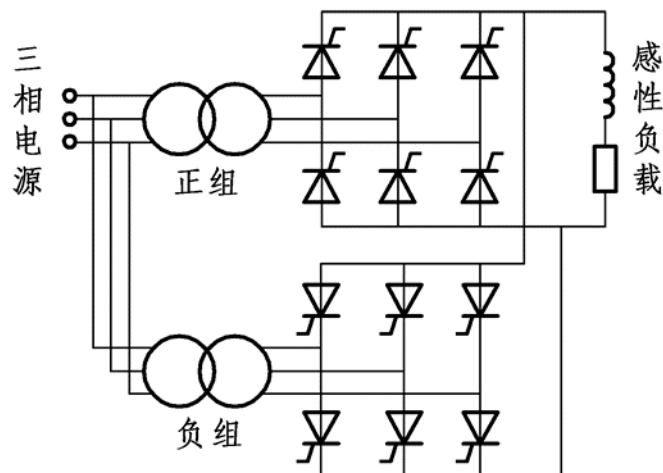


上图所示电路：

1. 输出**电压**的极性是否可正可负？**电压**大小是否可调？
2. 输出**电流**的极性是否可正可负？**电流**大小是否可调？

**电压可正可负，大小（平均值）可调，通过改变触发角调节**  
**电流只能为正，大小可调**  
因此是**二象限**变换装置

### ■ 相控变频的基本原理



上图所示电路：

1. 输出**电压**的极性是否可正可负？**电压**大小是否可调？
2. 输出**电流**的极性是否可正可负？**电流**大小是否可调？

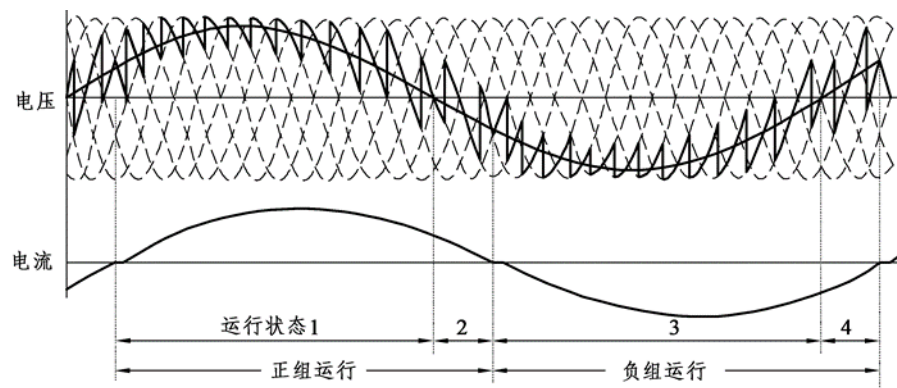
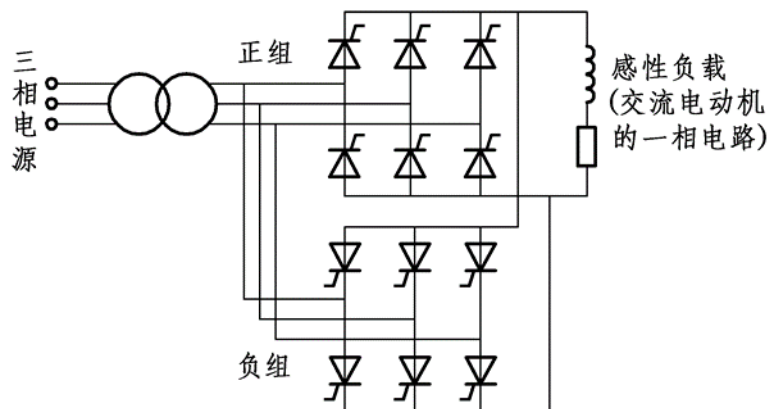
**电压可正可负，大小（平均值）可调，通过改变触发角调节**  
**电流可正可负，大小可调**  
因此是**四象限**变换装置

## 7.2.2 无环流型相控交交变频电路



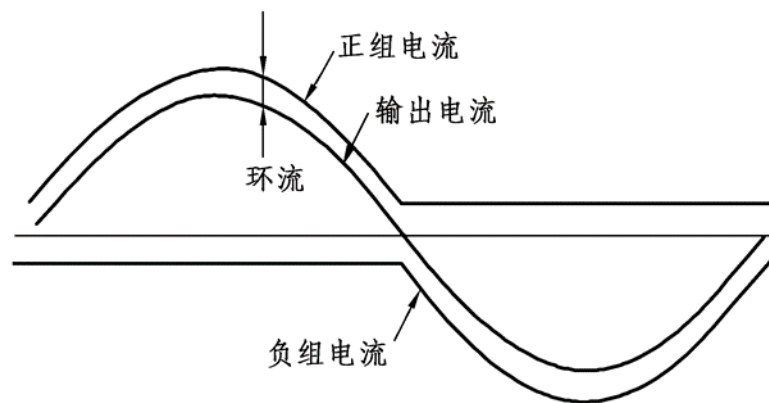
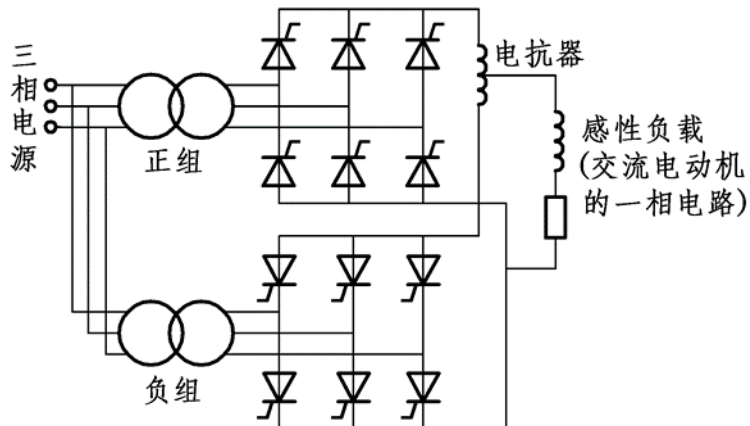
西南交通大学  
Southwest Jiaotong University

### ■ 电路和工作原理



- 使输出电压波形正弦变化，就可以输出正弦交流电流
- 电流滞后于电压
- 共用一台变压器时，正组和负组变换装置不能同时工作，否则会相间短路
- 为避免短路，两组切换时间要达到毫秒级（一个工频周波是多少毫秒？）
- 仅能输出**低频**交流电（比工频还要低）

### ■ 电路和工作原理



- 正、负组变换装置间插入电抗器（一般称为扼流电抗器），负载连接到电抗器的中点上
- 两组变换装置之间允许形成环流，两组装置可以同时工作，而不会发生短路
- 在正、负电流切换时，可实现平滑、连续转换
- 输出频率可以得到提高
- 输出交流电压的畸变率得到减小

## 7.2.4 相控交交变频电路的特点



### ■ 优点

- 省去中间直流环节，能量转换简便，效率一般比整流器加逆变器方案略高。
- 利用交流电源换相（相控），无需强迫换流电路；主开关管采用晶闸管，成本低。
  - ◆ 常用于大功率（几兆瓦~几十兆瓦）、高电压、低速的交流传动
- 功率可双向传输（四象限变换装置）
  - ◆ 能够在整个交流调速范围内实现再生制动。
  - ◆ 对于需要快速正、反转的大功率交流可逆传动装置特别有利，例如大型轧机等。
- 在输出低频交流电压时波形较好
  - ◆ 波形由大量的电源波碎片拼接而成，仅能保证平均值是正弦，而瞬时值不是正弦。

## 7.2.4 相控交—交变频电路的特点



### ■ 缺点

- 输出最高频率必须小于输入频率的 $1/3$ 
  - ◆ 否则将会出现较大的谐波分量，从而降低系统的效率和功率因数。
- 相控交—交变频电路换流失败时，会造成交流电源的短路
  - ◆ 扼流电抗器不会太大，长时间换流失败会导致短路
- 晶闸管数量较多，控制电路也较复杂，
  - ◆ 小功率交流传动装置采用相控交—交变频电路是不经济的。
- 输入功率因数较低
  - ◆ 尤其在输出电压较低时，由于各触发延迟角处于相对较大的状态，其功率因数更低。
  - ◆ 需要对输入端的功率因数进行补偿，并对谐波进行滤波。



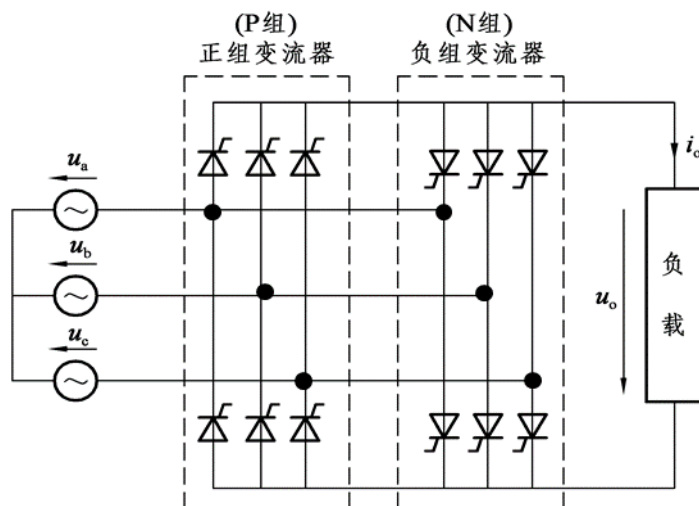
## 7.2.5 单相相控交交变频电路



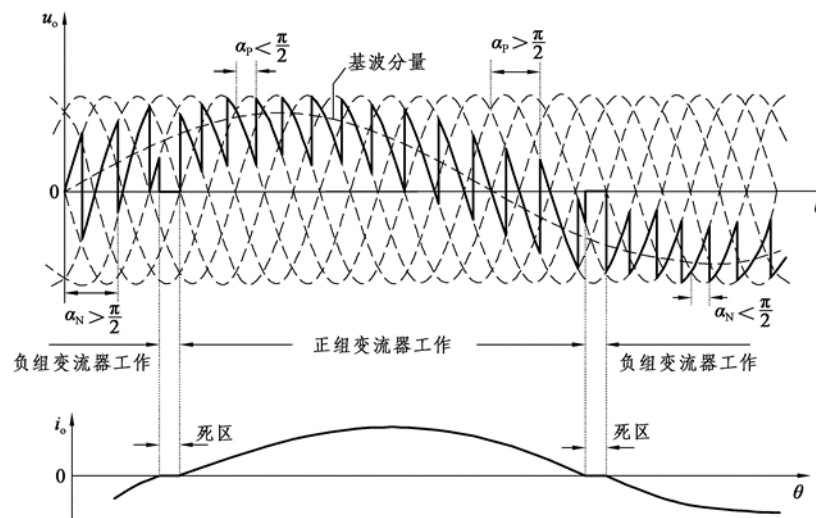
西南交通大学  
Southwest Jiaotong University

### ■ 工作原理

#### ● 四象限变流电路



电流的方向决定哪组变流器工作，电压与电流的方向是否一致决定是整流还是逆变状态。

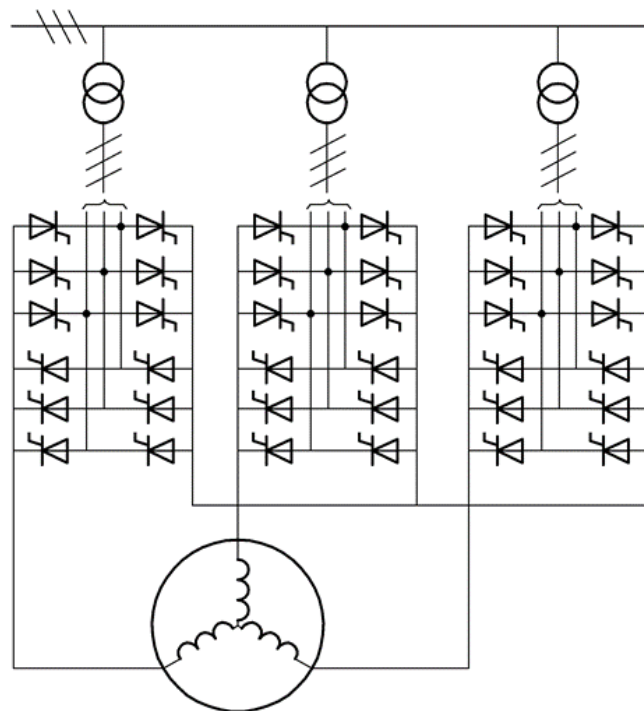


- 按正弦规律对 $\alpha$ 进行控制： $90^\circ \sim 0^\circ \sim 90^\circ$
- 改变两组变流器切换频率即可改变输出频率
- 改变 $\alpha$ ，即可改变幅值
- 输出瞬时电压不是正弦波，由电源电压碎片拼接而成，谐波较大

## 7.2.6 三相相控交—交变频电路\*



### ■ 由三组单相相控交—交变频电路组成



- 三组变频电路输出电压相位互差 $120^\circ$
- 三组变频电路Y连接，各自需要变压器隔离
- 电机无中线，至少两组变频电路同时工作才能构成回路

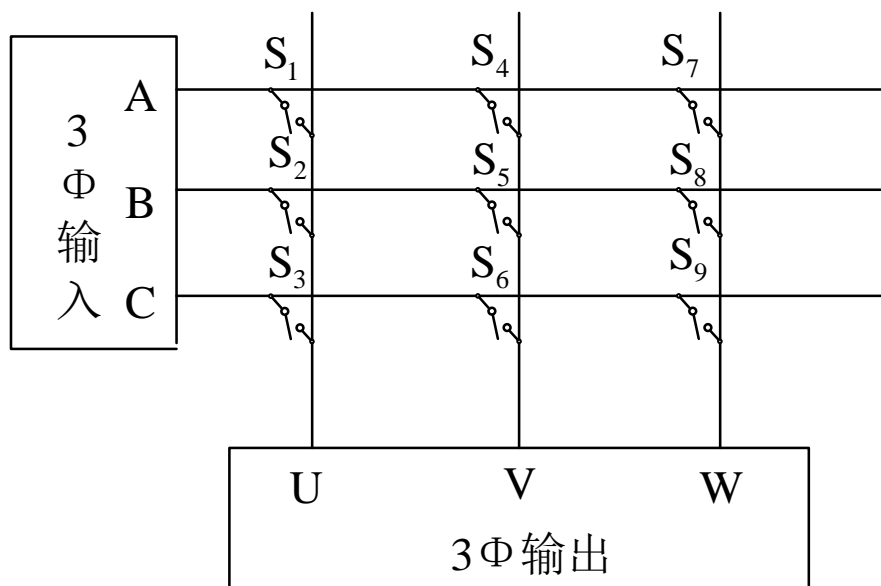
## 问题

- **相控交—交变频电路的最高输出频率是多少？制约输出频率提高的因素是什么？**
  - 电源频率 $1/3$ ;
  - 死区（相当于开关速度）和谐波。
  
- **相控交—交变频电路的主要特点和不足之处是什么？其主要用途是什么？**
  - 见前面PPT内容
  - 高压、大功率、低频的电机调速和调压。

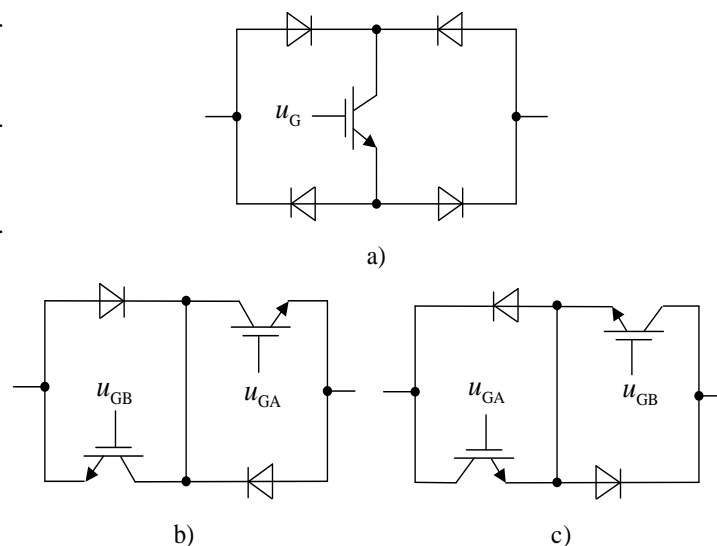
## 7.2.7 矩阵式变换器



- 矩阵变换器 (Matrix Converter) 是一种**控制性能优良**的电力电子变换器。
- 三相到三相(3 $\Phi$ / 3 $\Phi$ )矩阵式变换器的拓扑结构
  - 包括**9个双向开关**,



3 $\Phi$ / 3 $\Phi$ 矩阵变换器的拓扑示意图



常见双向开关的构成方法

### ■ 矩阵变换器的主要优缺点

#### ● 优点

- ◆ 输出频率**不受输入电源频率的影响**；
- ◆ 可获得**正弦波形**的输入电流、输出电压和电流；
- ◆ 可实现能量的**双向传递，可四象限运行**；
- ◆ **功率因数可任意调节**；
- ◆ **无中间环节，动态响应快**。

#### ● 缺点

- ◆ 输入、输出**电压增益小于1**；
- ◆ 开关元件过多造成的**开关损耗大、控制复杂**等。

■ 矩阵变换器是一种“广义变换器”，采用不同的控制算法，可以实现**整流器、逆变器、斩波器**的功能。

■教材179页

■6.3

■6.4

## ■ 教材179页

### ● 6.3

解：由于  $U_O = U_I \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad P_O = \frac{U_O^2}{R}$

R不变， $\alpha=0$ 时， $U_O$ 和 $P_O$ 取得最大值；

欲求功率为最大输出功率的80%和50%时的控制角 $\alpha$ ，即求：

$$\frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{2\pi} = 0.8$$

与

$$\frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{2\pi} = 0.5$$

对应的 $\alpha$ 值，分别解得：

功率为最大输出功率的80%时， $\alpha_1 = 61^\circ$

功率为最大输出功率的50%时， $\alpha_2 = 90^\circ$

## ■ 教材179页

### ● 6.4

解：(1)  $\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R} = \arctan \frac{2 \times 3.14 \times 50 \times 0.002}{0.5} = 51.5^\circ$

所以控制角  $\alpha$  的变化范围是  $51.5^\circ < \alpha < 180^\circ$

(2) 当  $\alpha = \varphi$  时,  $I_o$  取得最大值  $I_{omax}$  ,

$$I_{omax} = \frac{U_1}{Z} = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{220}{0.8} = 274A$$

(3) 当  $\alpha = \varphi$  时,  $I_o$  取得最大值  $I_{omax}$  ,

$$\lambda = \cos \varphi = \cos 51.5^\circ = 0.623$$

$$P_{\max} = U_o I_{omax} \cos \varphi = 220 \times 274 \times 0.623 = 37.554kW$$