

---

# 第六章 交流/交流变换器

## 第六章 交流/交流变换器

---

6.1 晶闸管交流电压控制器的类型

6.2 单相交流电压控制器

6.3 三相交流电压控制器

6.4\* 变压器抽头的电压控制器

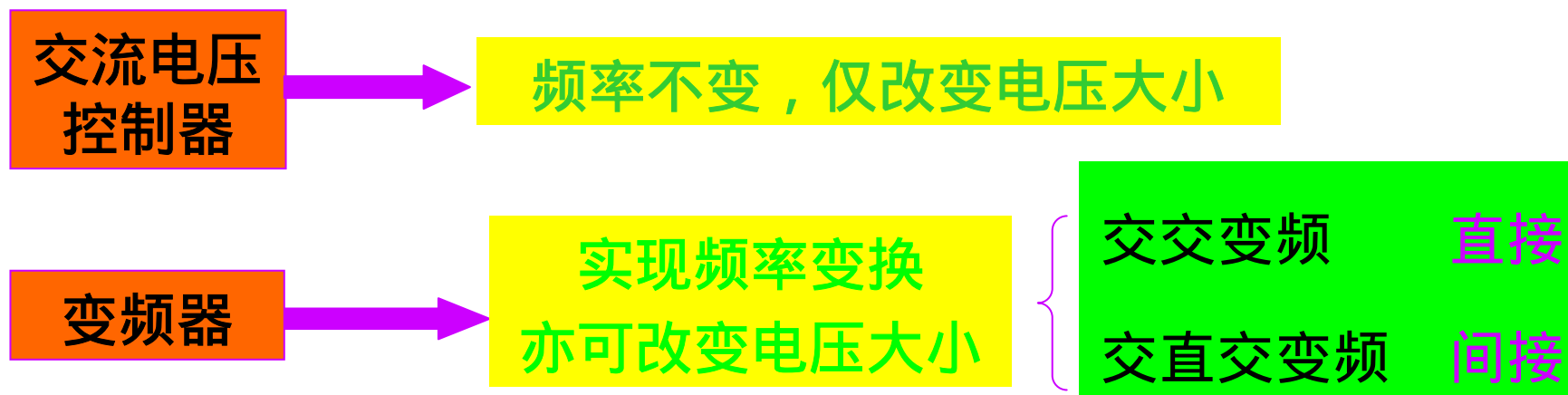
6.5\* 晶闸管相控交流/交流直接变频器

6.6\* 矩阵式交流/交流变频器

本章小结

## 第六章

- 本章主要讲述 **交流/交流变流电路**
  - 把一种形式交流电变成另一种形式交流电的电路



- ◆ 采用晶闸管作开关器件时，依靠交流电源瞬时值过零反向关断晶闸管。晶闸管开关器件的开通则可采用移相控制，调控变换器输出电压的大小。
- ◆ 单相电压控制器常用于小功率单相电动机、照明和电加热控制。
- ◆ 三相交流/交流电压控制器的输出是三相恒频变压交流电源，通常给三相交流异步电动机供电，实现变压调速，或作为异步电动机的启动器使用。

## 6.1 晶闸管交流电压控制器的类型

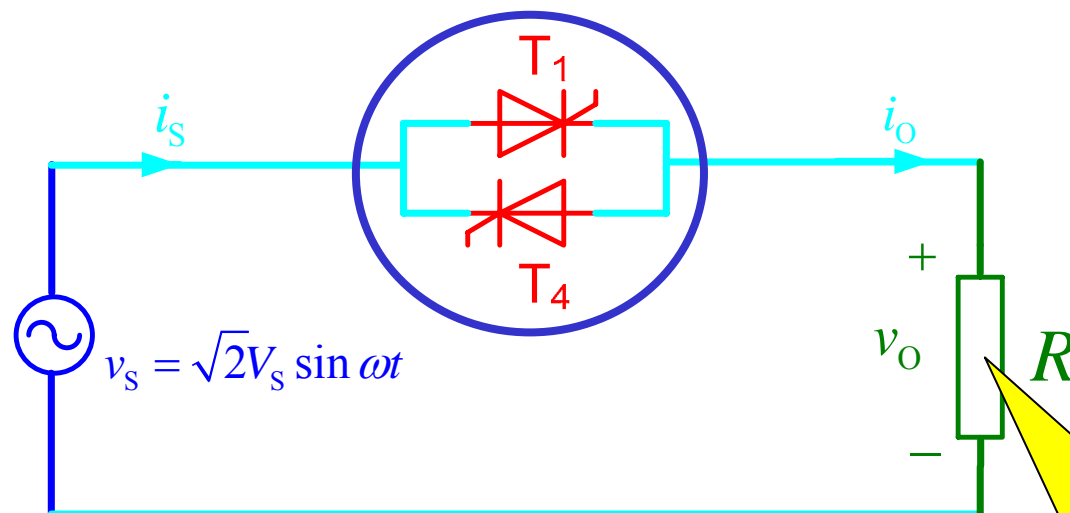
---

1. 单相全控
2. 带中线星形联结
3. 无中线的三相连接
4. 三角形联结的控制器

## 6.1 晶闸管交流电压控制器的类型

---

- 1. 单相全控**
2. 带中线星形联结
3. 无中线的三相连接
4. 三角形联结的控制器



负载电压、负载功率的大小由控制角确定

两个晶闸管反并联

通态时

$$v_o(t) = v_s(t)$$

断态时

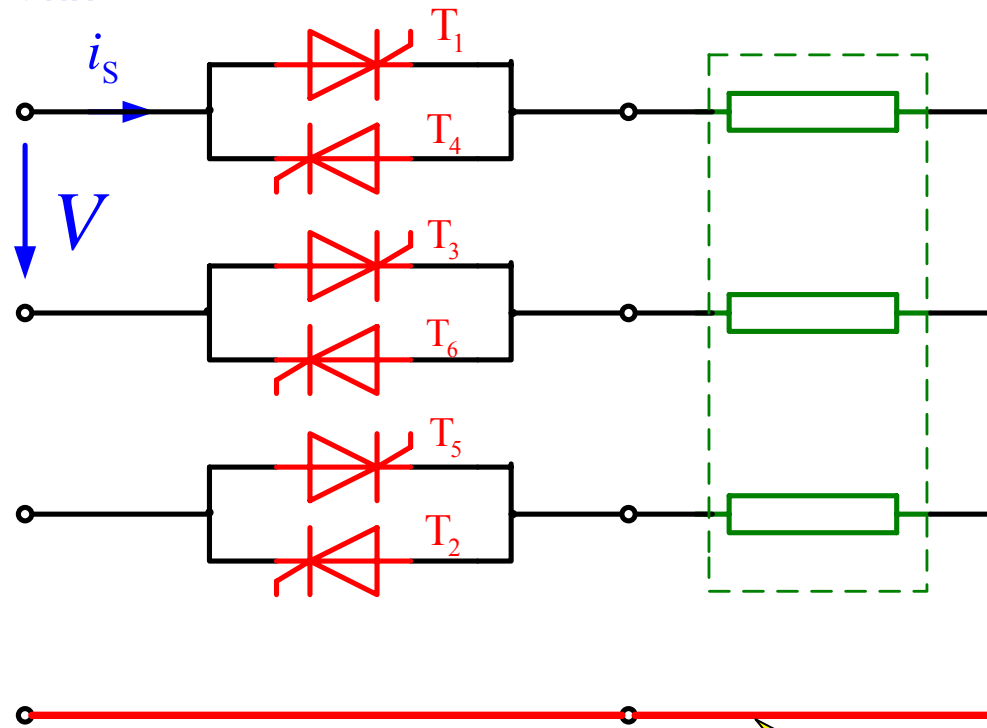
$$v_o(t) = 0$$

## 6.1 晶闸管交流电压控制器的类型

---

1. 单相全控
- 2. 带中线星形联结**
3. 无中线的三相连接
4. 三角形联结的控制器

- 三个单相交流电压控制器可组合成带中线的三相交流电压控制器



$\alpha = 90^\circ$  时，中线电流约等于相电流

☹️ 中线电流大

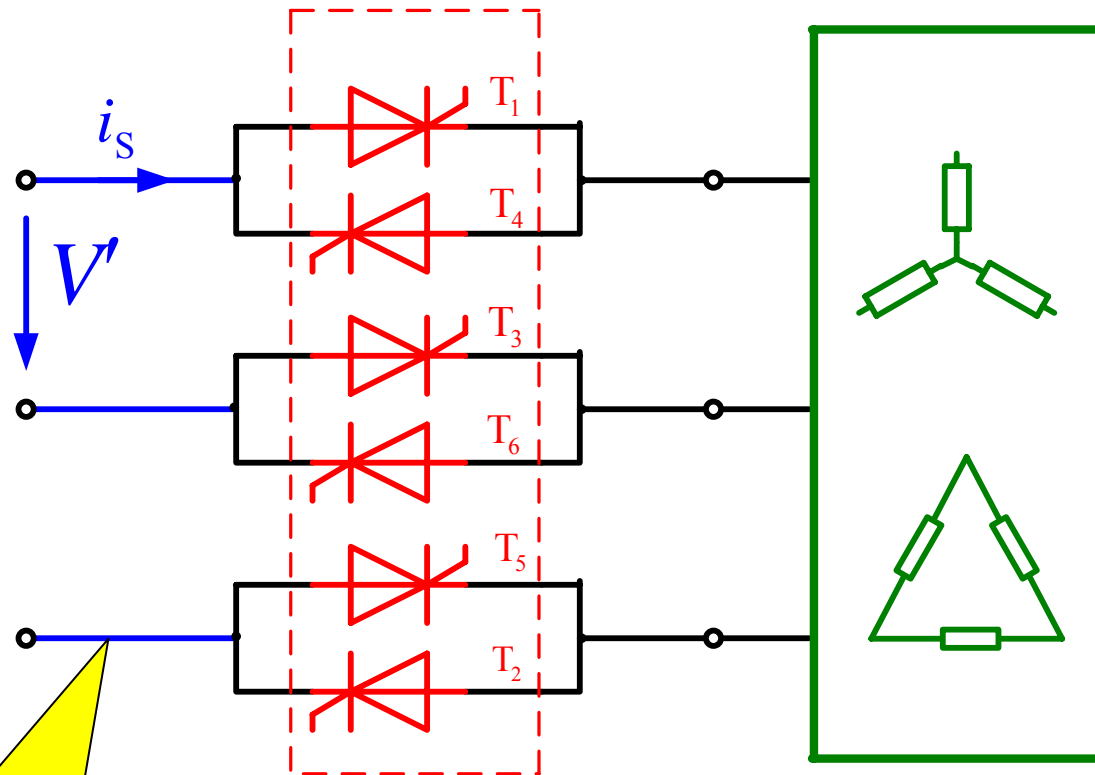


## 6.1 晶闸管交流电压控制器的类型

---

1. 单相全控
2. 带中线星形联结
- 3. 无中线的三相连接**
4. 三角形联结的控制器

## 无中线的三相连接



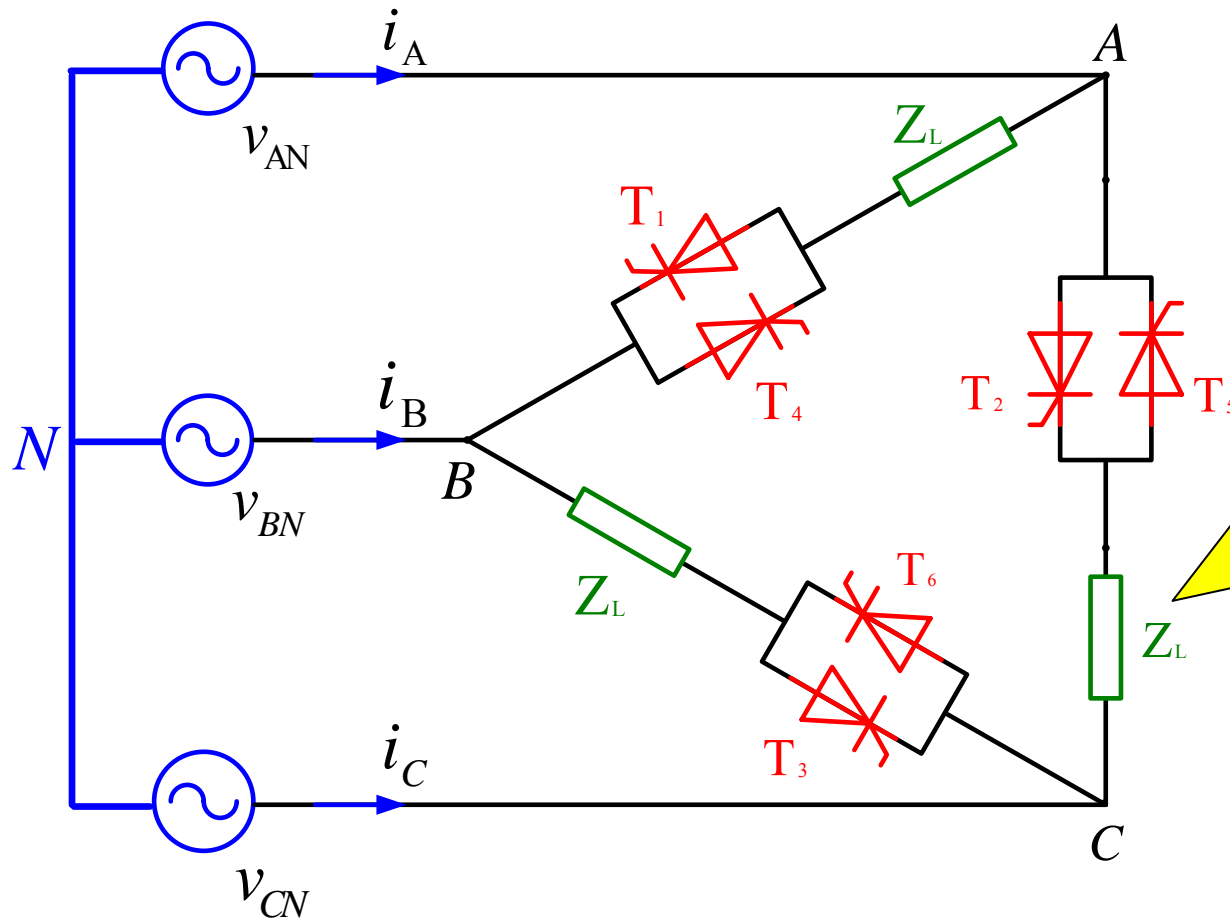
输入电流中没有3次  
及3的倍数次谐波

## 6.1 晶闸管交流电压控制器的类型

---

1. 单相全控
2. 带中线星形联结
3. 无中线的三相连接
4. **三角形联结的控制器**

## 三角形联结的控制器



只适用于  
允许断开  
6根出线  
端子的三  
相负载

## 6.2 单相交流电压控制器

---

### 6.2.1 电阻负载

### 6.2.2 电阻、电感性负载

### 6.2.3\* PWM交流电压控制器

## 6.2 单相交流电压控制器

---

### 6.2.1 电阻负载

### 6.2.2 电阻、电感性负载

### 6.2.3\* PWM交流电压控制器

## 单相交流电压控制器：电阻负载

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

$$I_o = I_s = V_o / R$$

$$I_T = I_s / \sqrt{2} = V_o / \sqrt{2}R$$

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_s \cdot I_s} = \frac{V_o}{V_s} = \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

- 利用傅里叶级数可求出基波及各次谐波。

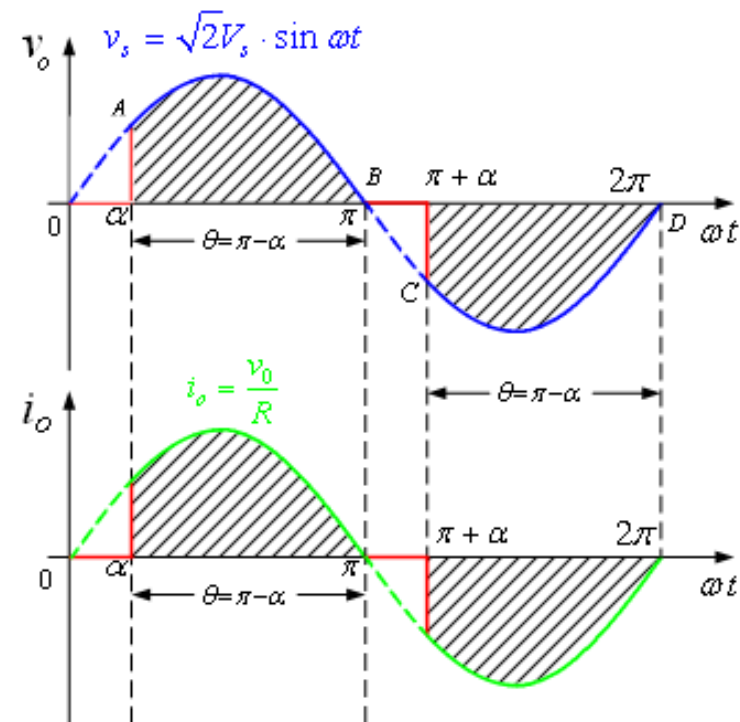
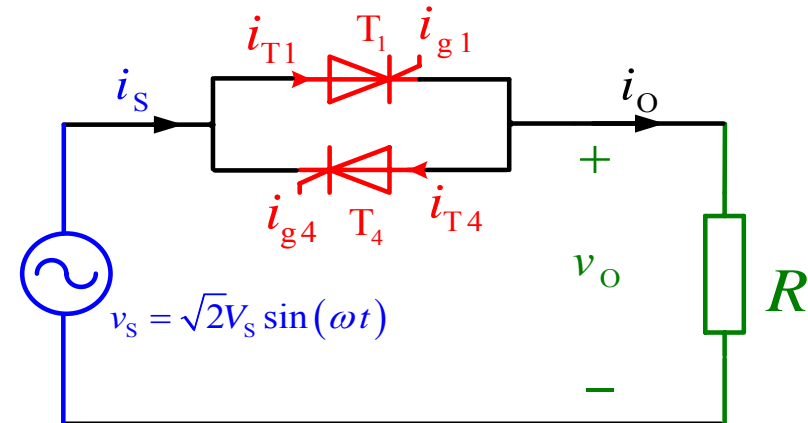
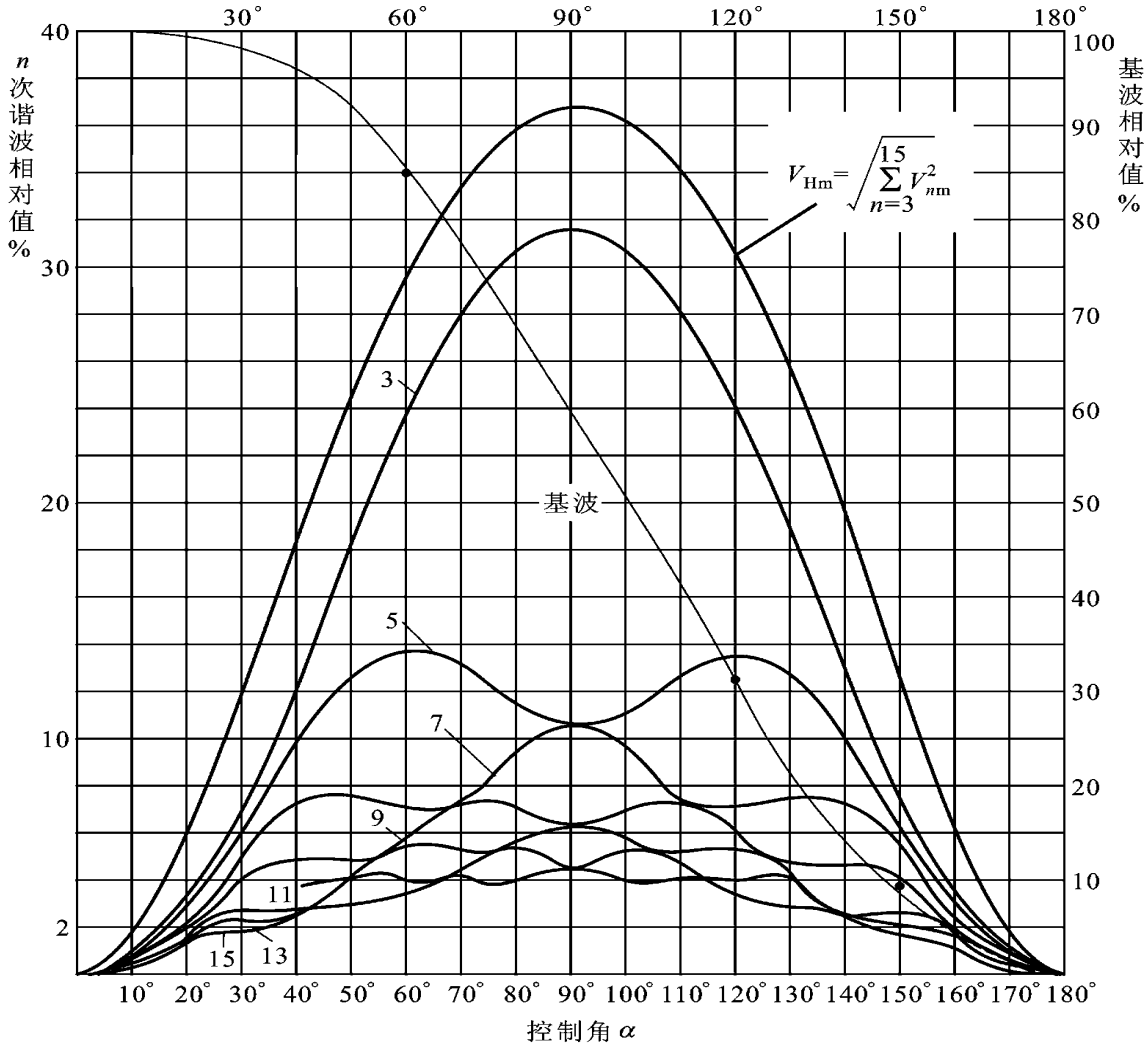


表6.1 不同触发角  $\alpha$  时基波 $V_{1m}^*$ 和3-15次谐波电压(电流)的相对值

$V_{\text{run}}^* \backslash \alpha$	$10^\circ$	$30^\circ$	$50^\circ$	$70^\circ$	$90^\circ$	$110^\circ$	$130^\circ$	$150^\circ$	$170^\circ$	$180^\circ$
$V_{1m}^*$	99.9	97.4	89.9	76.7	59.3	40.1	22.3	8.5	1.0	0
$V_{3m}^*$	0.96	8.0	18.7	28.1	31.8	28.1	18.7	8.0	0.96	0
$V_{5m}^*$	0.95	7.0	12.9	13	10.6	13	12.9	7.0	0.95	0
$V_{7m}^*$	0.93	5.8	7.4	7.8	10.6	7.8	7.4	5.8	0.93	0
$V_{9m}^*$	0.90	4.4	4.7	7.5	6.4	7.5	4.7	4.4	0.90	0
$V_{11m}^*$	0.87	3.2	4.6	5.1	6.4	5.1	4.6	3.2	0.87	0
$V_{13m}^*$	0.84	2.27	4.13	4.72	4.55	4.72	4.13	2.27	0.84	0
$V_{15m}^*$	0.8	1.86	3.12	4.15	4.55	4.15	3.12	1.86	0.8	0
$V_{Hm}^*$	2.4	13.6	25.3	33.8	36.9	33.8	25.3	13.6	2.4	0



# 单相交流电压控制器：电阻负载



电阻负载、不同触发角 时基波及谐波幅值分布图

## 6.2 单相交流电压控制器

---

6.2.1 电阻负载

**6.2.2 电阻、电感性负载**

6.2.3\* PWM交流电压控制器

## 单相交流电压控制器:阻感负载

➤ = 时:

$$v_O = v_S = \sqrt{2}V_S \sin \omega t$$

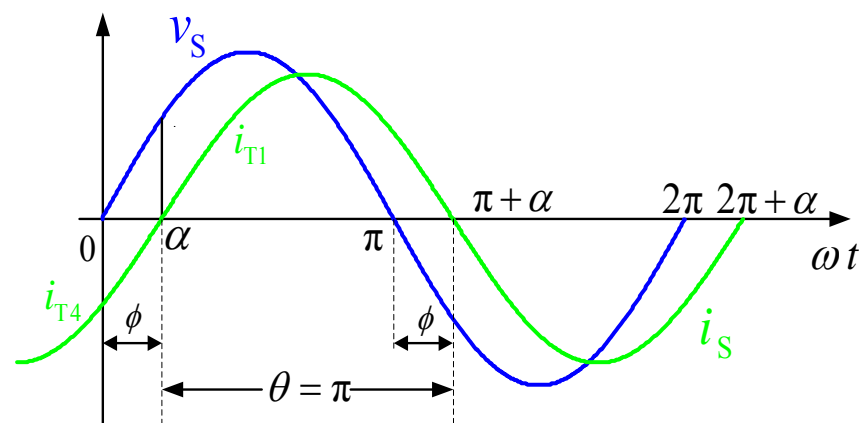
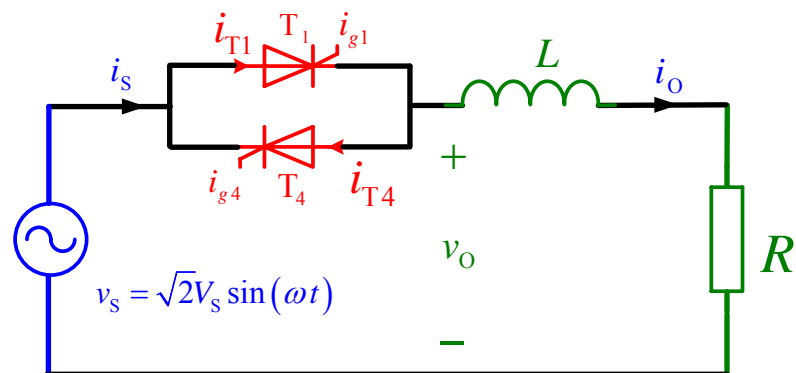
$$i_S = i_O = \frac{\sqrt{2}V_S}{Z} \sin(\omega t - \phi)$$

$$Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} \quad \phi = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

$v_O$ 、 $i_S$ 、 $i_O$ 均为正弦波

➤ < 时, 同 = 。

■  $i_{g1}$ 、 $i_{g4}$ 必须是宽脉冲



## 单相交流电压控制器:阻感负载

➤ > 时:

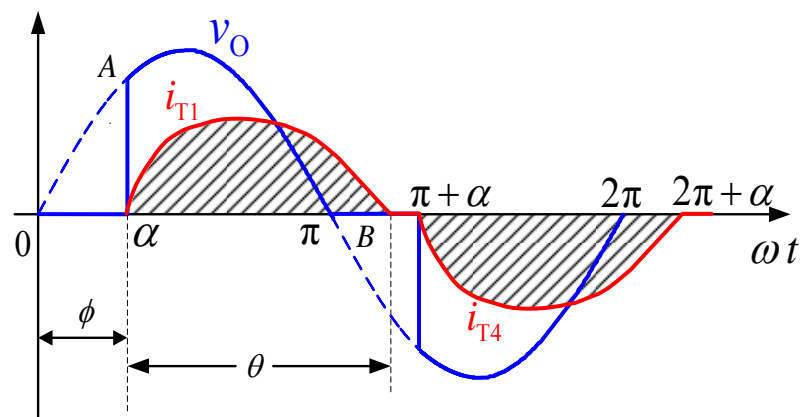
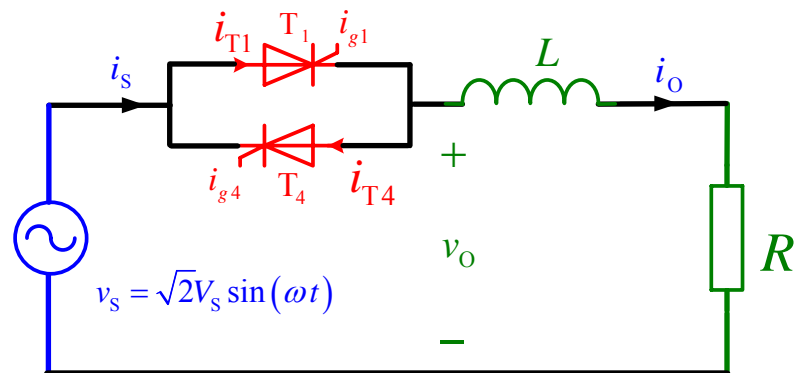
$$v_O = v_S = \sqrt{2}V_S \cdot \sin \omega t = Ri_{T1} + L \frac{di_{T1}}{dt}$$

$$i_{T1} = \frac{\sqrt{2}V_S}{Z} [\sin(\omega t - \phi) - \sin(a - \phi) e^{-\frac{1}{\text{tg}\phi}(\omega t - a)}]$$

$$\sin(\theta + a - \phi) = \sin(a - \phi) e^{-\theta/\text{tg}\phi}$$

$$\text{tg}(\alpha - \phi) = \frac{\sin \theta}{e^{-\theta/\text{tg}\phi} - \cos \theta}$$

◆ 控制角范围:  $\phi \sim \pi$

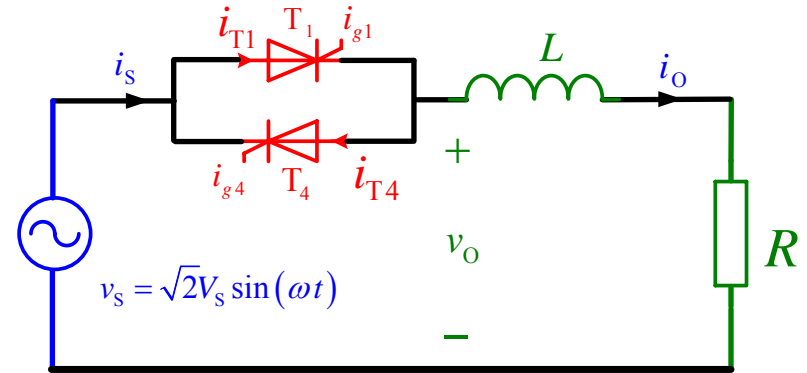


## 单相交流电压控制器:阻感负载

输出有效值  $V_O$ 、负载电流有效值  $I_O$ 、晶闸管电流有效值  $I_T$  为：

$$V_O = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} (\sqrt{2}V_S \sin \omega t)^2 d(\omega t)}$$

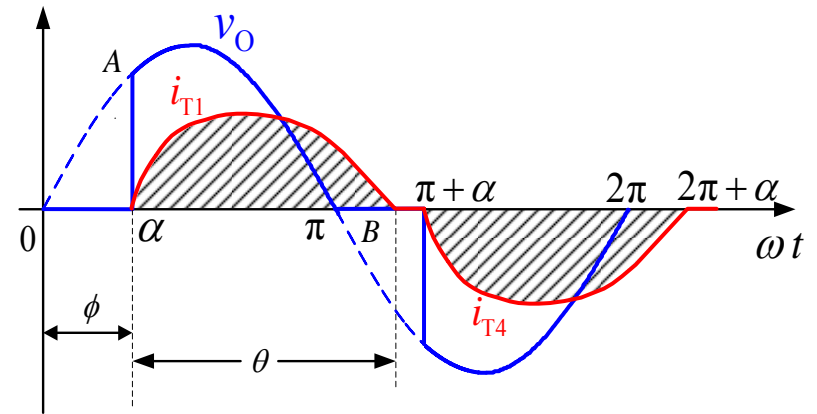
$$= V_S \cdot \sqrt{\frac{\theta}{\pi} + \frac{1}{\pi} [\sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \theta)]}$$



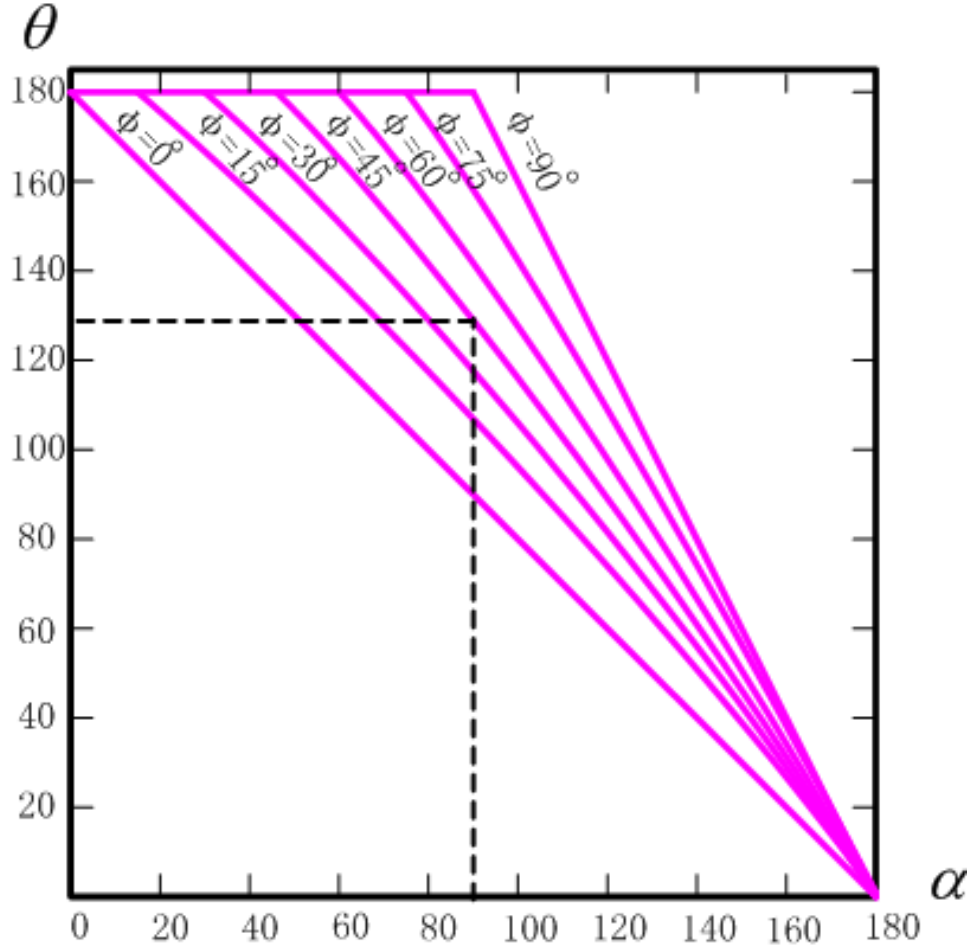
$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_a^{a+\theta} \left(\frac{\sqrt{2}V_S}{Z}\right)^2 [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(a - \varphi)e^{-\frac{\omega t - a}{\text{tg}\varphi}}]^2 d(\omega t)}$$

$$I_O = \sqrt{2}I_T = \frac{V_S}{Z} \sqrt{\frac{\theta}{\pi} - \frac{\sin \theta \cos(2\alpha + \varphi + \theta)}{\pi \cos \varphi}}$$

$$= \frac{V_S}{\sqrt{2}Z} \sqrt{\frac{\theta}{\pi} - \frac{\sin \theta \cos(2\alpha + \varphi + \theta)}{\pi \cdot \cos \varphi}}$$



# 单相交流电压控制器:阻感负载



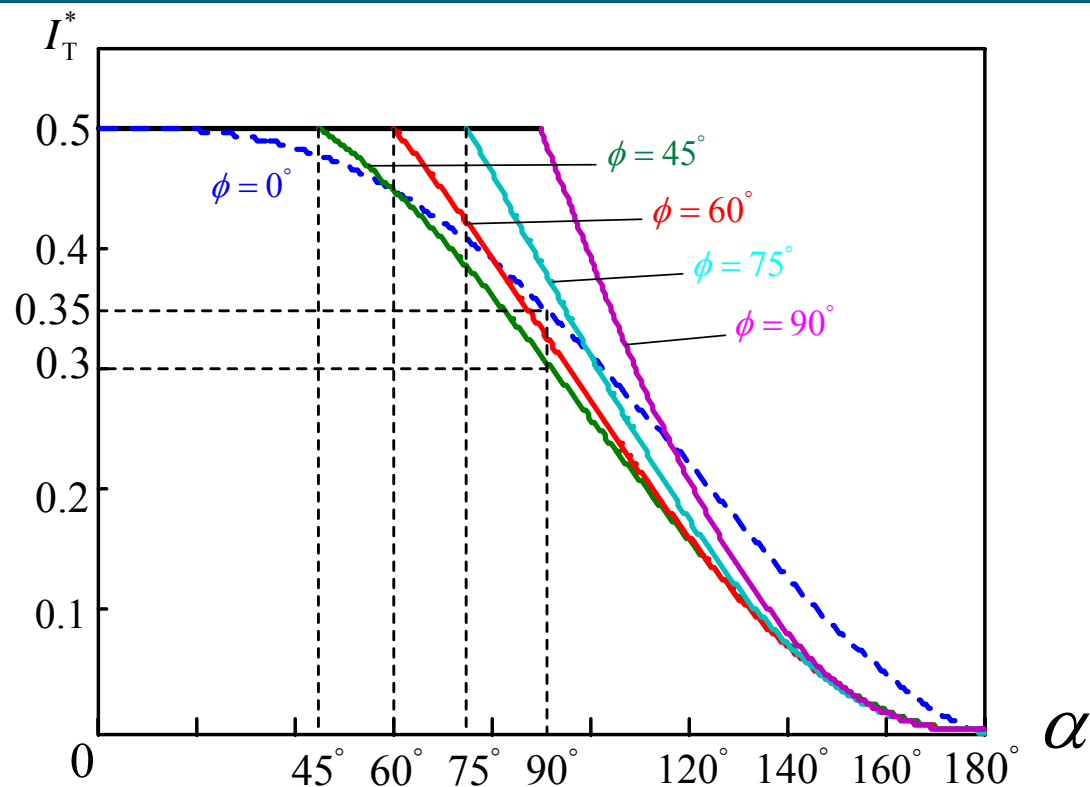
$$\phi = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R},$$

$a \leq \phi, \theta = 180^\circ$   
 $a > \phi$  时,  
由  $\phi, a$  可求出  $\theta$

$$\text{tg}(a - \phi) = \frac{\sin \theta}{e^{-\theta/\text{tg} \phi} - \cos \theta}$$

导通角 与控制角 的关系曲线  
(以负载阻抗角 为参变量)

## 单相交流电压控制器:阻感负载



晶闸管电流的标么值  $I_T^*$  与控制角  $\alpha$  的关系曲线

$$I_T^* = I_T / \frac{\sqrt{2}V_S}{Z} = \frac{Z}{\sqrt{2}V_S} \cdot I_T = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\theta}{2\pi} - \frac{\sin \theta \cos(2\alpha + \phi + \theta)}{2\pi \cos \phi}}$$

## 例题6-1

单相交流调压器控制230V交流电源的输出功率，负载电阻为23 $\Omega$ 、感抗为23 $\Omega$ ，求（1） $\alpha$ 角控制范围；（2）最大电流有效值；（3）最大功率和功率因数。

解 （1） $\alpha_{\min} = \varphi = \arctan \frac{\omega L}{R} = \arctan \frac{23}{23} = \frac{\pi}{4}$        $\alpha_{\max} = \pi$

（2） $\alpha = \alpha_{\min}$  时，最大电流有效值  $I_o$  为：

$$I_o = \frac{V}{[R^2 + (\omega L)^2]^{1/2}} = \frac{230}{[23^2 + 23^2]^{1/2}} = 7.07 \text{ A}$$

（3）最大功率（ $\alpha = \alpha_{\min}$  时）

$$P_{\max} = RI_o^2 = 23 \times 7.07^2 = 1.15 \times 10^3 \text{ W}$$

$$\text{功率因数} = \frac{\text{有效功率}}{\text{视在功率}} = \frac{1150}{230 \times 7.07} = 0.707$$

**注：**在  $\alpha > \alpha_{\min}$  的非正弦电流工作情况下，功率因数将小于基波相移因数。



## 6.2 单相交流电压控制器

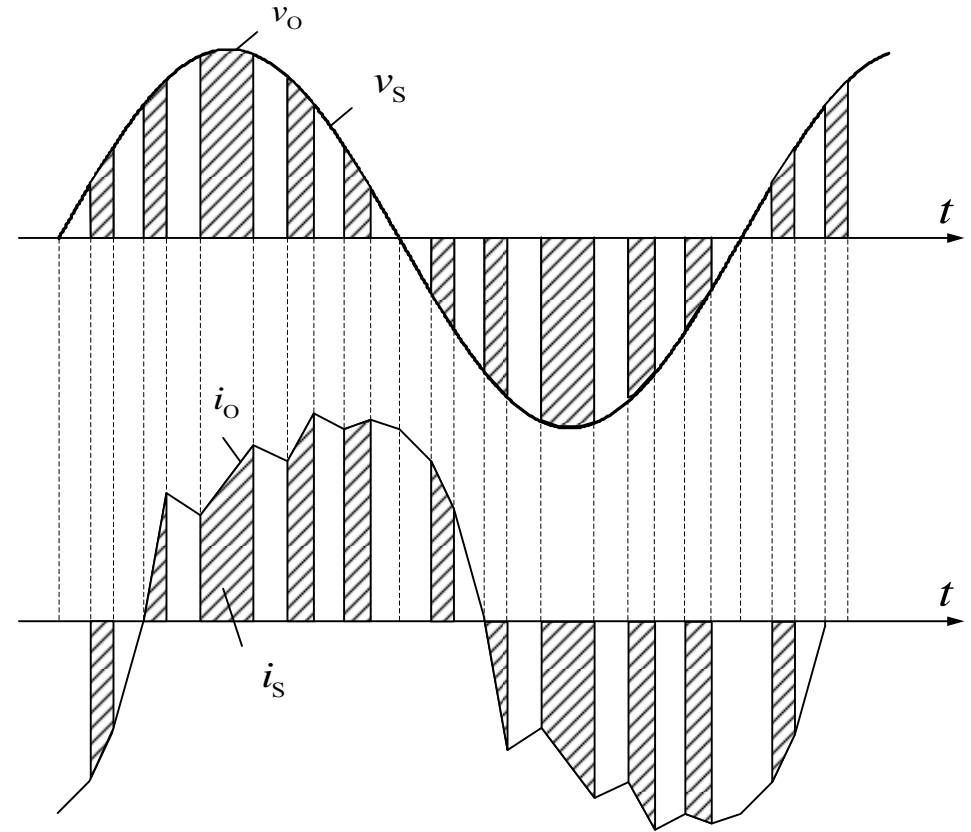
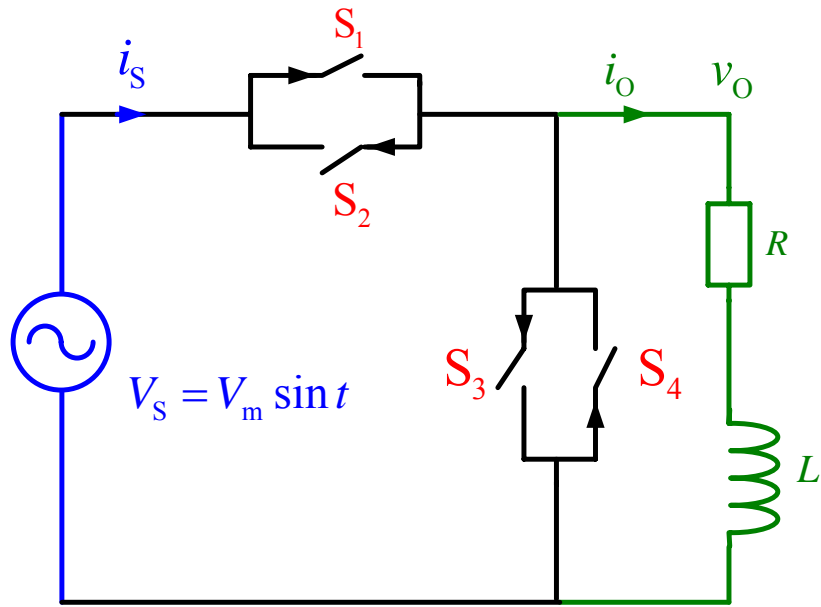
---

6.2.1 电阻负载

6.2.2 电阻、电感性负载

**6.2.3\* PWM交流电压控制器**

## PWM交流电压控制器



$S_1$ 、 $S_2$ 导通时， $S_3$ 、 $S_4$ 断开：

$$v_O = v_S$$

$S_3$ 、 $S_4$ 导通时， $S_1$ 、 $S_2$ 断开：

$$v_O = 0$$

## 6.3 三相全波交流电压控制器

---

### 6.3.1 三相星形联结交流电压控制器

### 6.3.2 三相开口三角形交流电压控制器

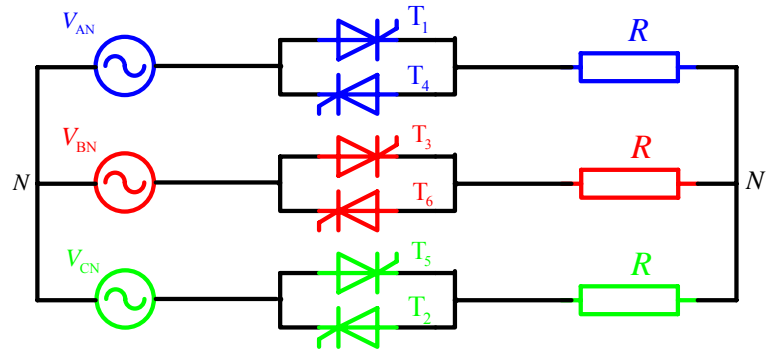
## 6.3 三相全波交流电压控制器

---

### 6.3.1 三相星形联结交流电压控制器

### 6.3.2 三相开口三角形交流电压控制器

## 三相Y联结电压控制器



**第一类工作状态：**

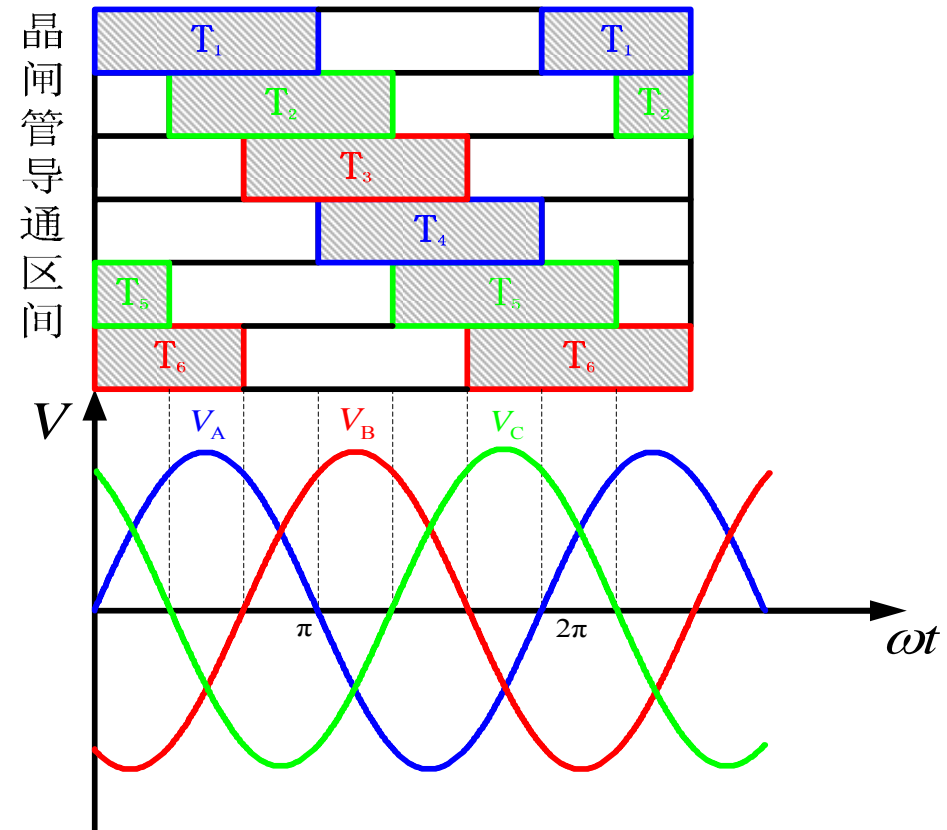
三相同步工作，在同一时刻，每一相有一个晶闸管导电。

**第二类工作状态：**

二相同步工作，同一时刻仅二相各有一个晶闸管导电，第三相中的两个晶闸管都不导电。

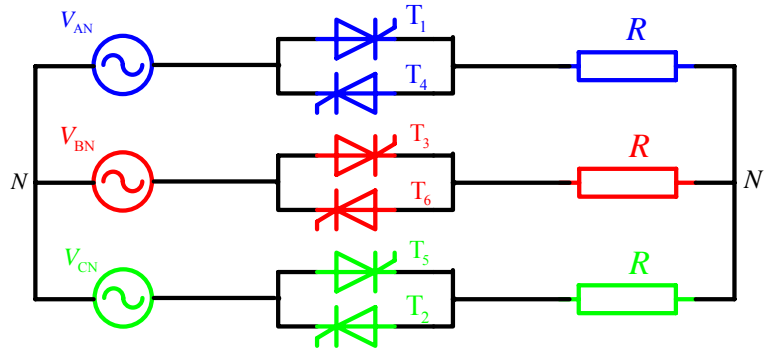
✓  $T_1$ - $T_6$ 依序相差 $60^\circ$ 触发，脉宽大于 $60^\circ$

✓ 各相电源的过零点为 计算起点



控制角  $=0$ ，三相同步导电， $180^\circ$  导电。

# 三相Y联结电压控制器

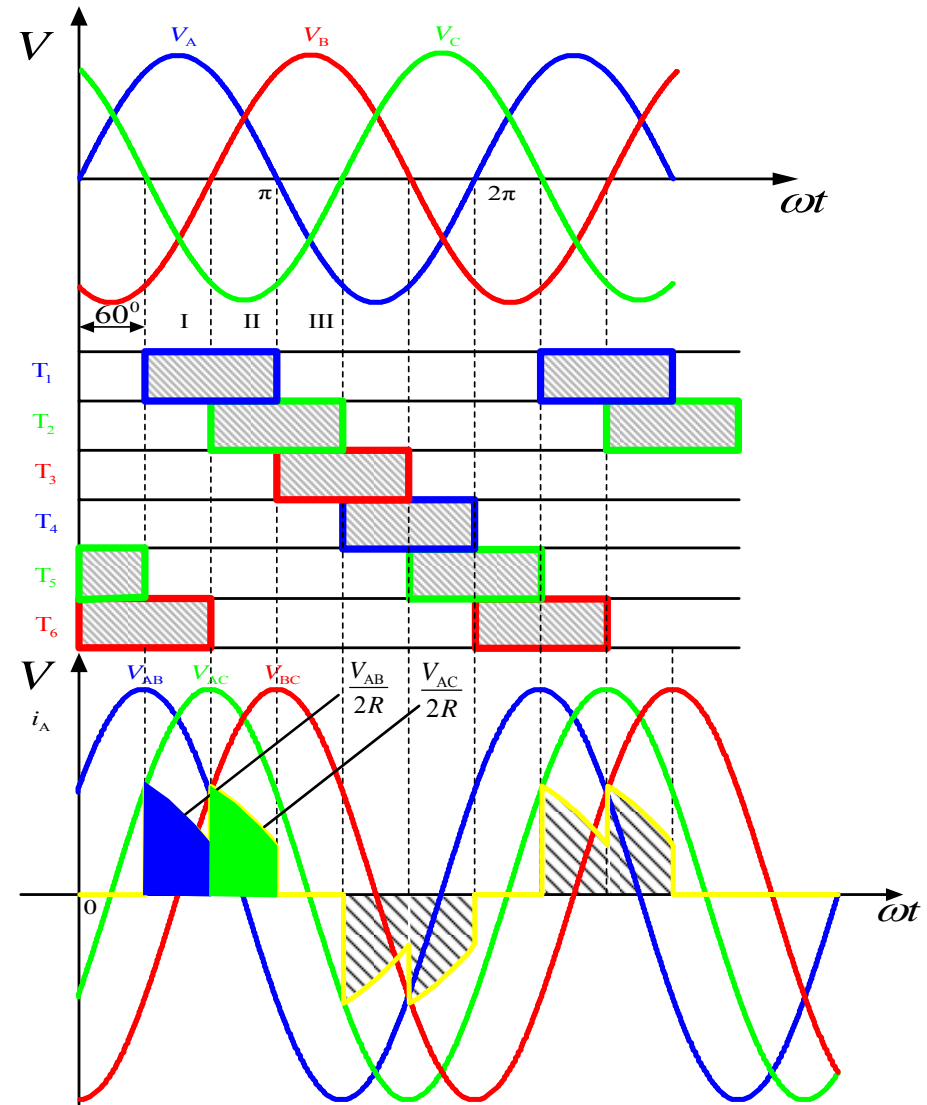


$\alpha = 60^\circ$

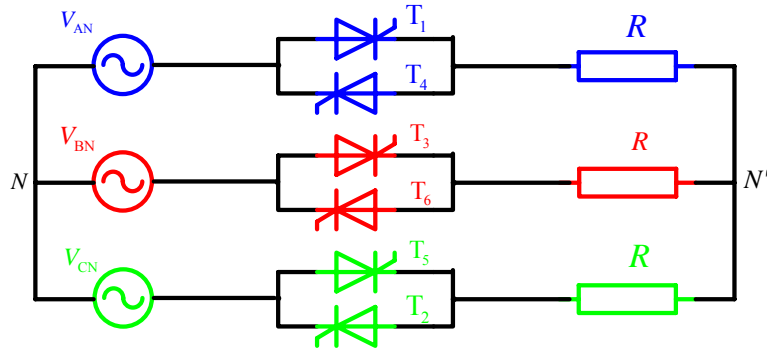
: 两相同时导电,  $120^\circ$  导电

➤ 区间 I: 
$$i_A = \frac{v_{AB}(t)}{2R}$$

➤ 区间 II: 
$$i_A = \frac{v_{AC}(t)}{2R}$$



# 三相Y联结电压控制器



$= 120^\circ$

: 两相间断续导电，  
导电角小于  $120^\circ$

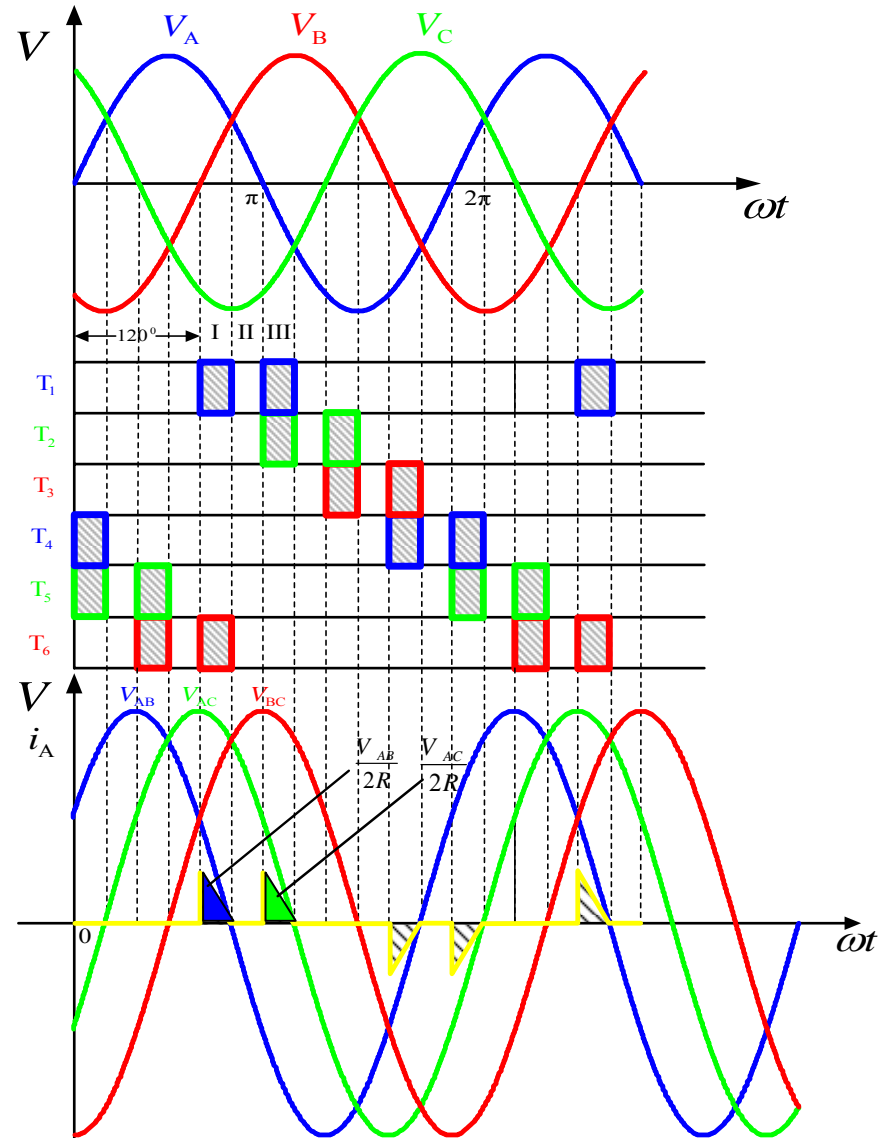
➤ 区间 I:

$$i_A = \frac{v_{AB}(t)}{2R}$$

➤ 区间 II:

$$i_A = \frac{v_{AC}(t)}{2R}$$

$= 150^\circ$  : 完全不能导电。



### 👉 工作状态小结：

- 👉  $\alpha = 0^\circ$  : 处于第一类工作状态（三相同同时导电）。
- 👉  $0^\circ < \alpha < 60^\circ$  : 交替出现第一类和第二类工作状态。
- 👉  $60^\circ < \alpha < 90^\circ$  : 处于第二类工作状态（两相同同时导电）
- 👉  $90^\circ < \alpha < 150^\circ$  : 交替处于第二类工作状态和断流状态。
- 👉  $\alpha > 150^\circ$  : 电路全断流，不能工作。

◆电阻负载：控制角  $\alpha$  的调控范围为： $0^\circ - 150^\circ$

◆三相阻感性负载，分析方法与单相电路相同。



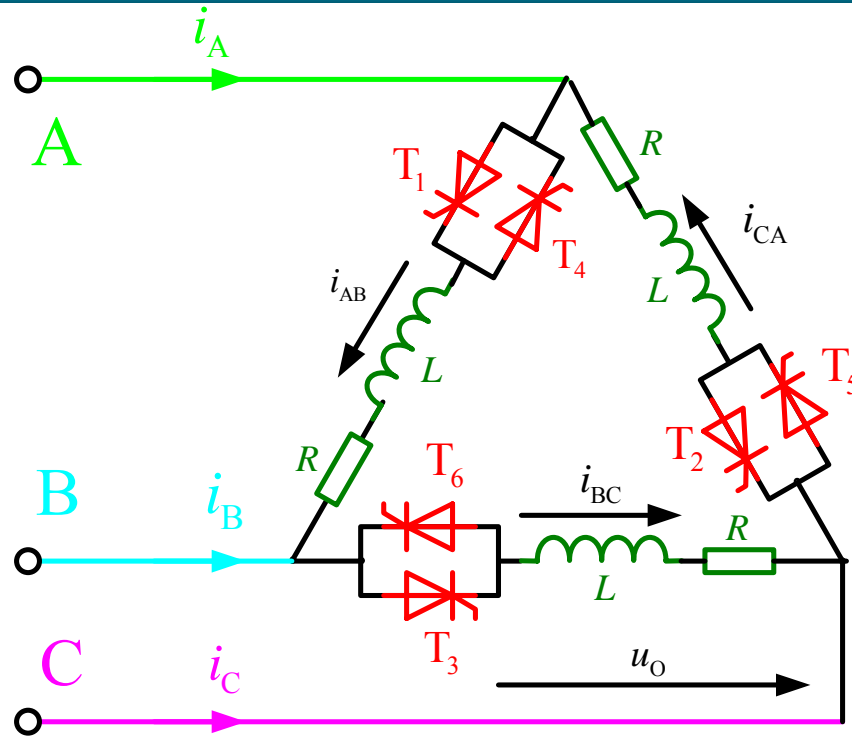
## 6.3 三相全波交流电压控制器

---

### 6.3.1 三相星形联结交流电压控制器

### **6.3.2 三相开口三角形交流电压控制器**

## 三相开口三角形交流电压控制器



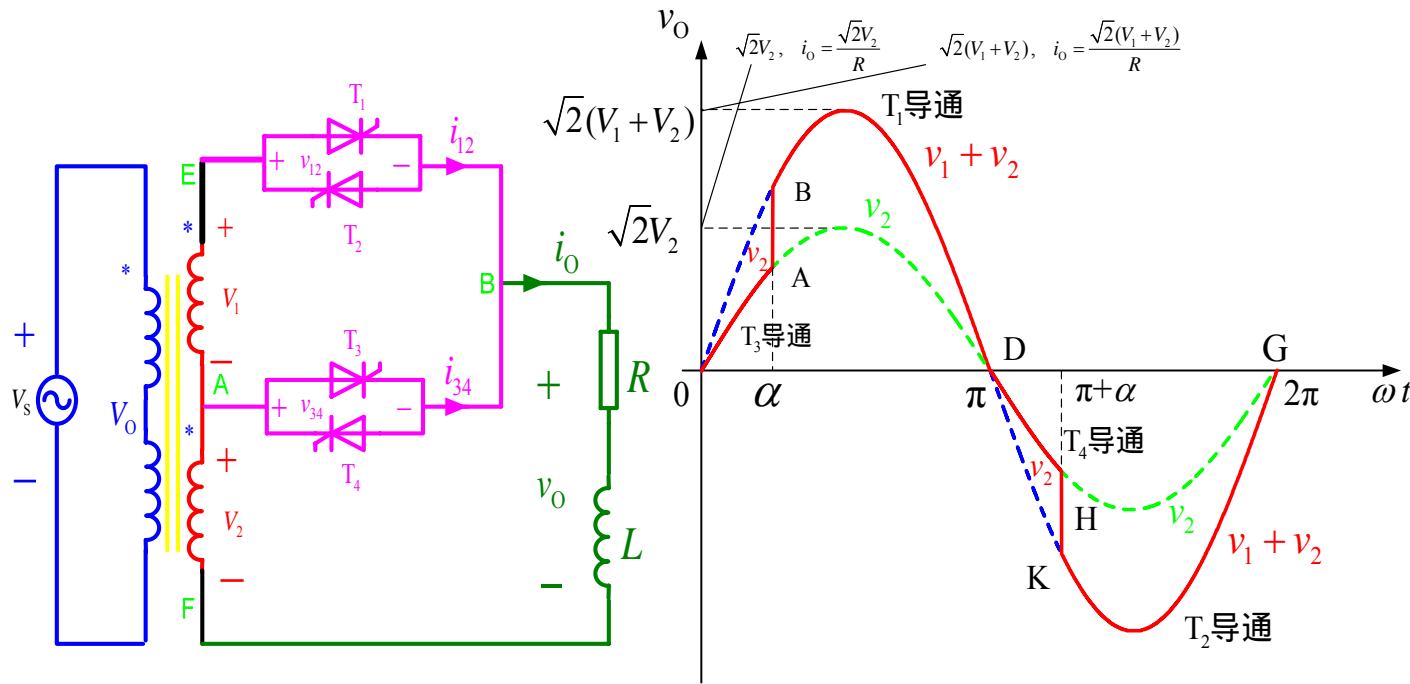
可看作三个独立的单相电路分别分析。

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i_{AB} - i_{CA} \\ i_B &= i_{BC} - i_{AB} \\ i_C &= i_{CA} - i_{BC} \end{aligned} \right\}$$

三相开口三角形电压控制器

$i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$ 中无3次及3的倍数次谐波电流

## \*6.4 有变压器抽头的电压控制器



图中输出电压的包络线：  
**OABDHKG**

优点：负载电压、电流谐波可控性好，输入电流的谐波含量少

$$V_o = V_2, k\pi < \omega t < k\pi + \alpha$$

$$k=0,1,2,\dots$$

$$V_o = V_1 + V_2, k\pi + \alpha < \omega t < (k+1)\pi$$

## \*6.5 晶闸管相控交流 - 交流直接变频器

---

### 6.5.1 基本工作原理

### 6.5.2 实用电路结构

### 6.5.3 交流/交流相控直接变频的优缺点

## \*6.5 晶闸管相控交流/交流直接变频器

---

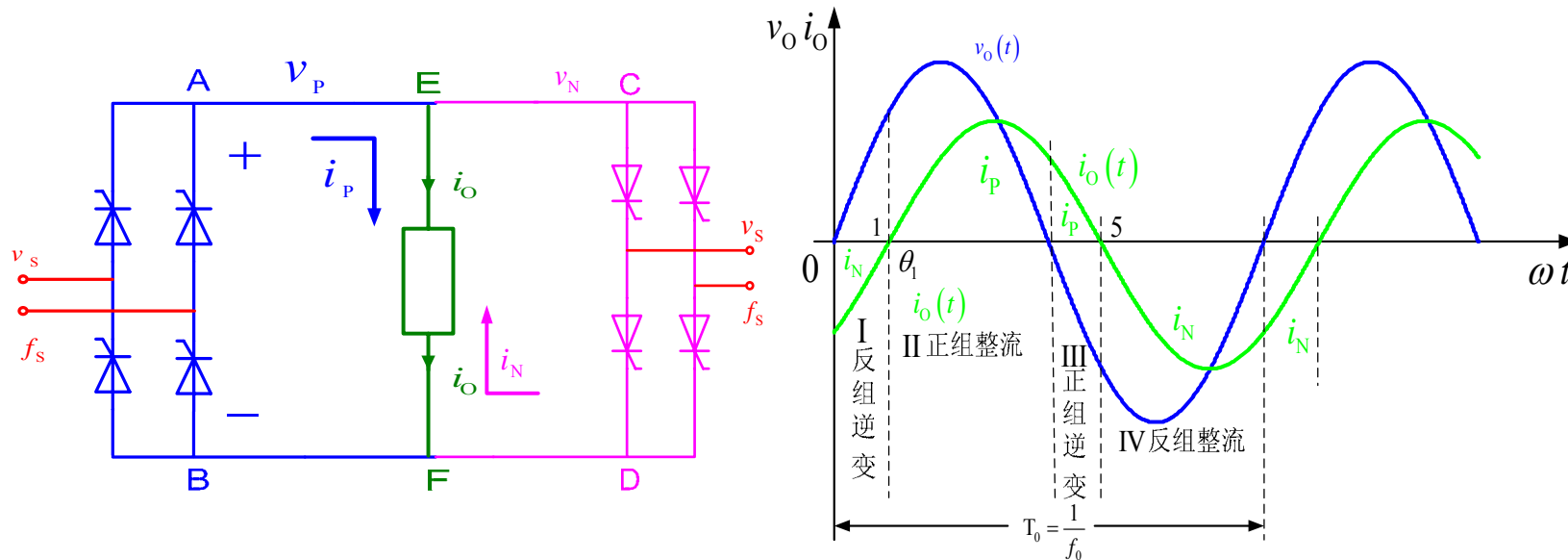
### 6.5.1 基本工作原理

### 6.5.2 实用电路结构

### 6.5.3 交流/交流相控直接变频的优缺点

正反组单相全控桥变流器并联构成单相直接变频器。

控制正反组变流器的  $\alpha_p$   $\alpha_n$  随时间周期性变化。



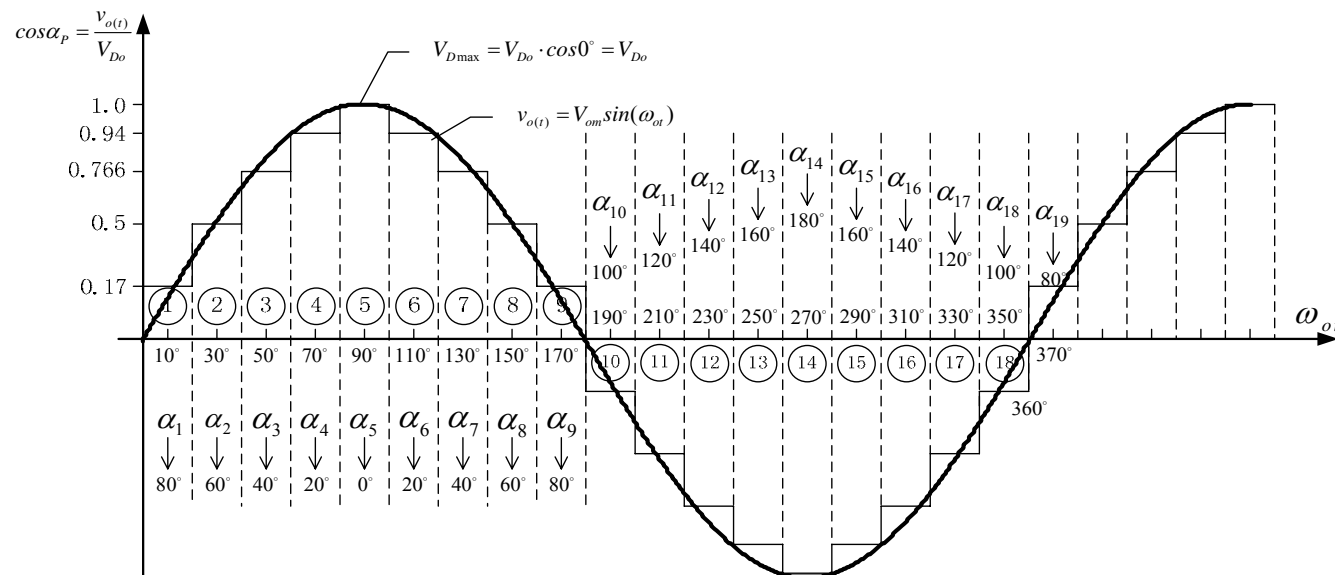
负载输出电流与输出电压不同相位时，正反组变流器在不同时段工作在整流或有源逆变工况。

半控桥变流器不能构成交流/交流变频器。

## 改善相控交流/交流变频器输出波形的措施：

改变相控角( $\alpha_P$ 或 $\alpha_N$ )在一个脉波周期中只能得到一个输出电压平均值，因此：

- ◆ 相同拓扑结构的相控交流/交流变频器输出频率越低，输出电压的脉波数越多，谐波含量越少；
- ◆ 输出相同频率的交流/交流变频器，拓扑结构输入的相数越多，脉波数越多，输出电压的脉波数就越多，谐波含量越少。



## \*6.5 晶闸管相控交流/交流直接变频器

---

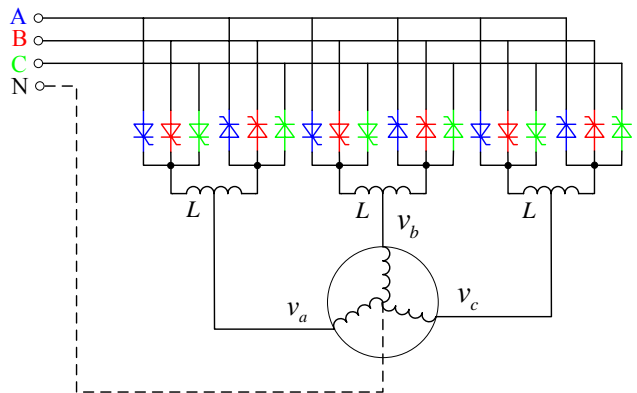
6.5.1 基本工作原理

**6.5.2 实用电路结构**

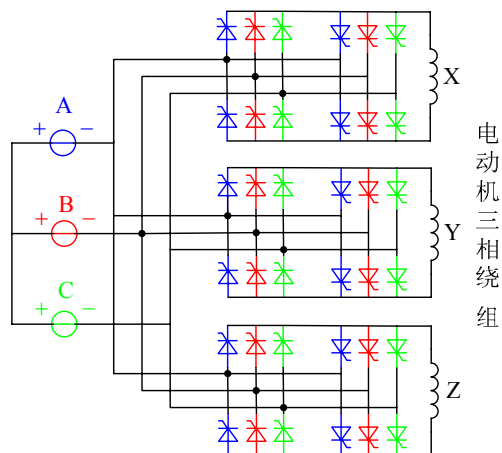
6.5.3 交流/交流相控直接变频的优缺点



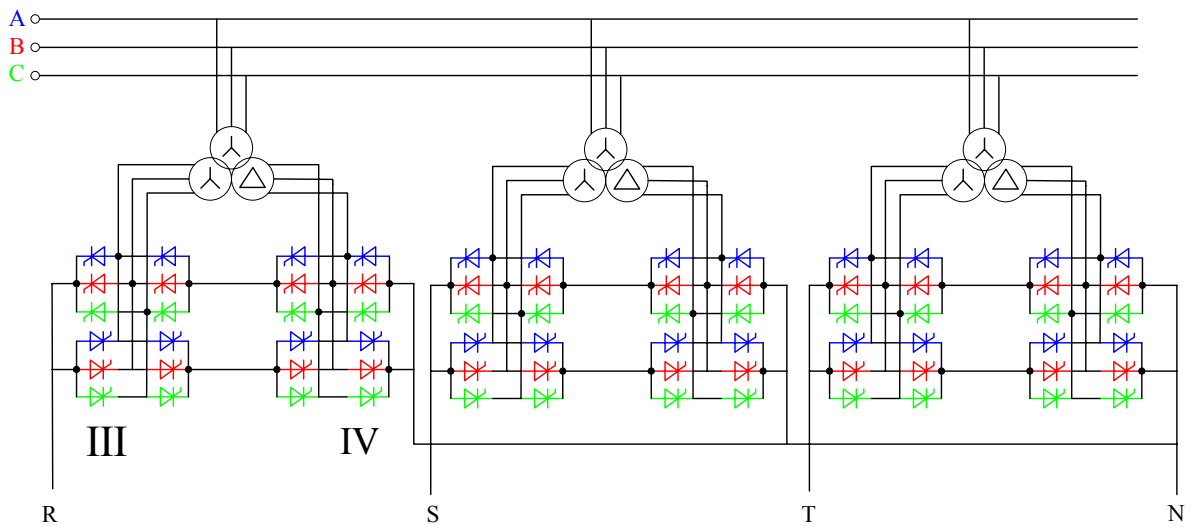
# 实用电路结构



(a) 三相半波整流器构成的三相直接变频器



(b) 三相桥式整流器构成的三相直接变频器



(c) 六相整流 三相交交变频器

三相交流/交流  
变频器每相采  
用的晶闸管元  
件越多，输出  
波形越好

## \*6.5 晶闸管相控交流/交流直接变频器

---

6.5.1 基本工作原理

6.5.2 实用电路结构

**6.5.3 交流/交流相控直接变频的优缺点**

### 6.5.3 交流/交流相控直接变频的优缺点

#### ☺优点：

- ◆只需一级变换环节；
- ◆晶闸管工作在自然换流工况；
- ◆能量可双向传递，易实现电机的四象限运行；
- ◆低频输出时可获得较高质量的正弦电压波形。

#### ☹缺点：

- ◆输出频率低；
- ◆输入功率因数低；
- ◆晶闸管用量多，且控制复杂；
- ◆交流电源输入电流谐波严重，且难于抑制。

- 适用范围：大功率低速可逆传动系统

## \*6.6 矩阵式交流/交流变频器

---

### 6.6.0 概述

### 6.6.1 矩阵式交流/交流变频器的控制方法

### 6.6.2 矩阵式交流/交流变频器的优缺点

## \*6.6 矩阵式交流/交流变频器

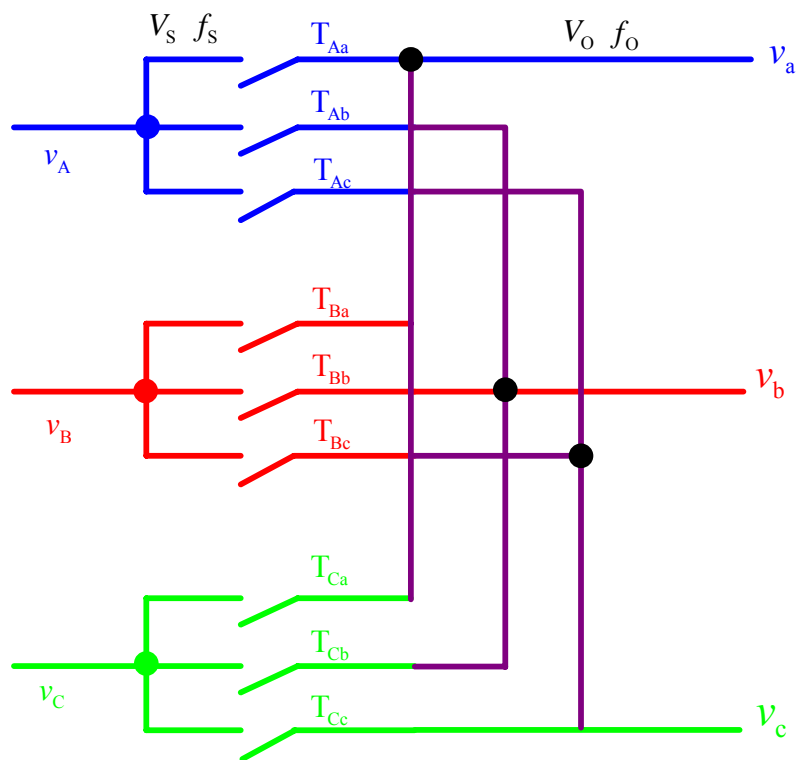
---

### 6.6.0 概述

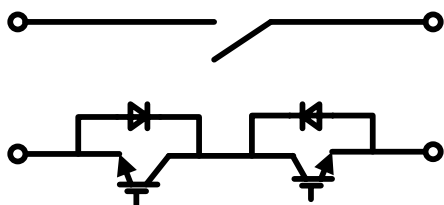
6.6.1 矩阵式交流/交流变频器的控制方法

6.6.2 矩阵式交流/交流变频器的优缺点

## 概述



6.11(a)



6.11(b)

交流/交流直接变频器中的**半控**元件晶闸管改为**全控**元件（如IGBT）可以构成**矩阵式交流/交流直接变频器**（Matrix AC/AC Converter）

图(a)中任一开关都是双向可控开关

图(b)是构成双向开关的方案之一

对图(a)中的9个双向开关器件进行高频SPWM控制，就可获得频率、电压均可调控的三相对称的交流输出电压

## \*6.6 矩阵式交流/交流变频器

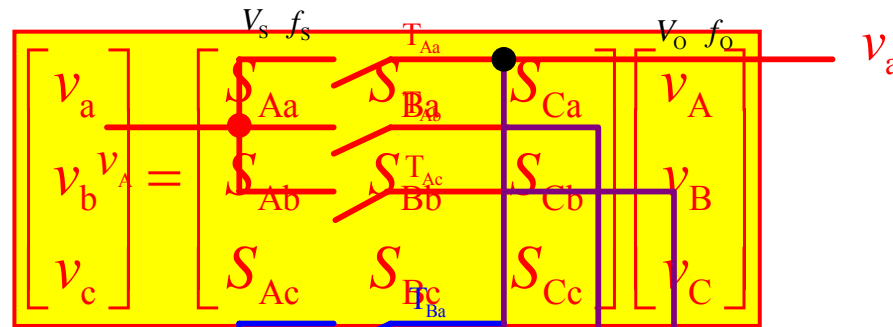
---

### 6.6.0 概述

### 6.6.1 矩阵式交流/交流变频器的控制方法

### 6.6.2 矩阵式交流/交流变频器的优缺点

图6.11a中的输出电压 $v_a$ 、 $v_b$ 、 $v_c$ 满足以下关系：



9个开关函数表明了图6.11a中9个可控开关（18个IGBT）的工作状态

其开通、关断切换原则：

◆ 满足矩阵函数关系

◆ 不造成交流电源两相短路

◆ 不引起感性负载开路过电压

6.11(a)



## \*6.6 矩阵式交流/交流变频器

---

### 6.6.0 概述

### 6.6.1 矩阵式交流 - 交流变频器的控制方法

### 6.6.2 矩阵式交流/交流变频器的优缺点

### ☺优点：

- ◆ 自关断元件工作频率高，采用SPWM波工作方式可获得较理想的正弦电压
- ◆ 输出波形交流输入功率因数高
- ◆ 交流输入电流谐波频率高，便于滤波抑制

### ☹缺点：

- ◆ 采用价格偏高的自关断元件
- ◆ 自关断元件耐冲击能力不如半控元件晶闸管
- ◆ 系统检测、控制复杂

# 本章小结

相控晶闸管构成的交流/交流变换器分为两类：

◆ 变压不变频的交流电压控制器(交流调压器)；

◆ 变压变频的直接变频器

单相调压器纯电阻负载晶闸管控制角范围： $0 \sim \pi$

电阻电感性负载晶闸管控制角范围： $\phi \sim \pi$

三相调压器最常见的结构为：无中线的三相连接方式

阻感性负载时具有多类工作状态

采用晶闸管的相控交流/交流直接变频器可自然换流

主要用于大功率可逆传动系统

全可控元件(如IGBT)构成的矩阵式交流/交流变频器性能优越