
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

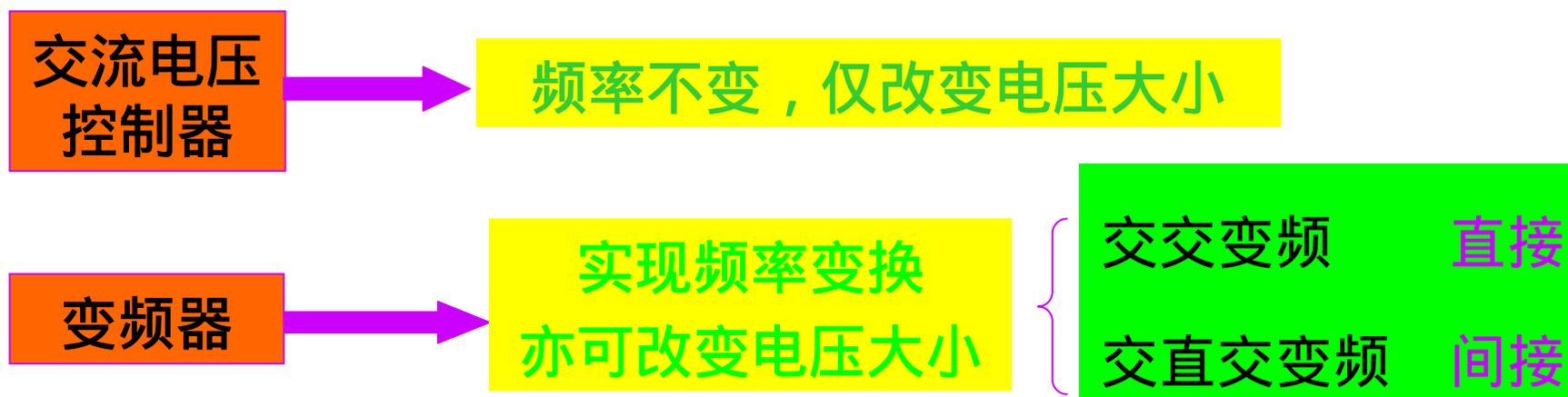
6.5* 晶闸管相控交流/交流直接变频器

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



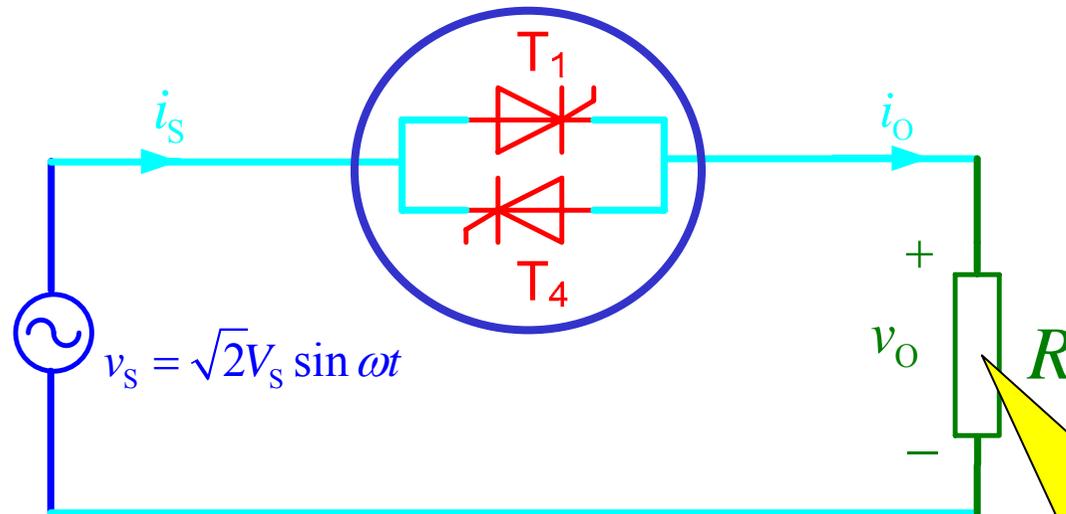
- ◆ 采用晶闸管作开关器件时，依靠交流电源瞬时值过零反向关断晶闸管。晶闸管开关器件的开通则可采用移相控制，调控变换器输出电压的大小。
- ◆ 单相电压控制器常用于小功率单相电动机、照明和电加热控制。
- ◆ 三相交流/交流电压控制器的输出是三相恒频变压交流电源，通常给三相交流异步电动机供电，实现变压调速，或作为异步电动机的启动器使用。

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

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

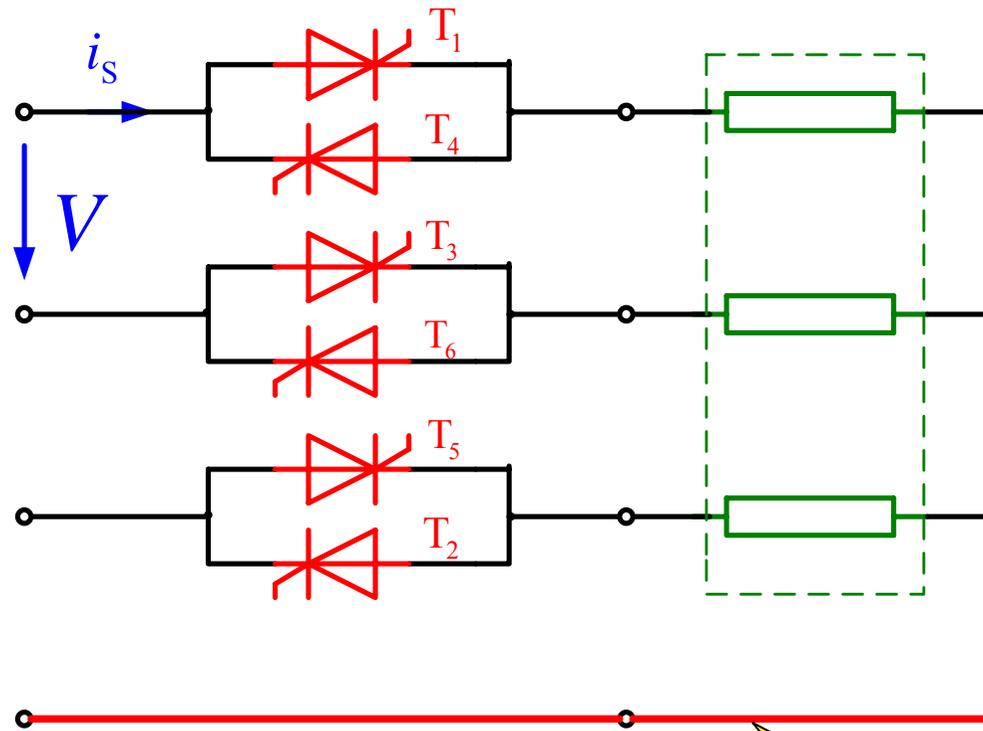
断态时

$$v_o(t) = 0$$

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



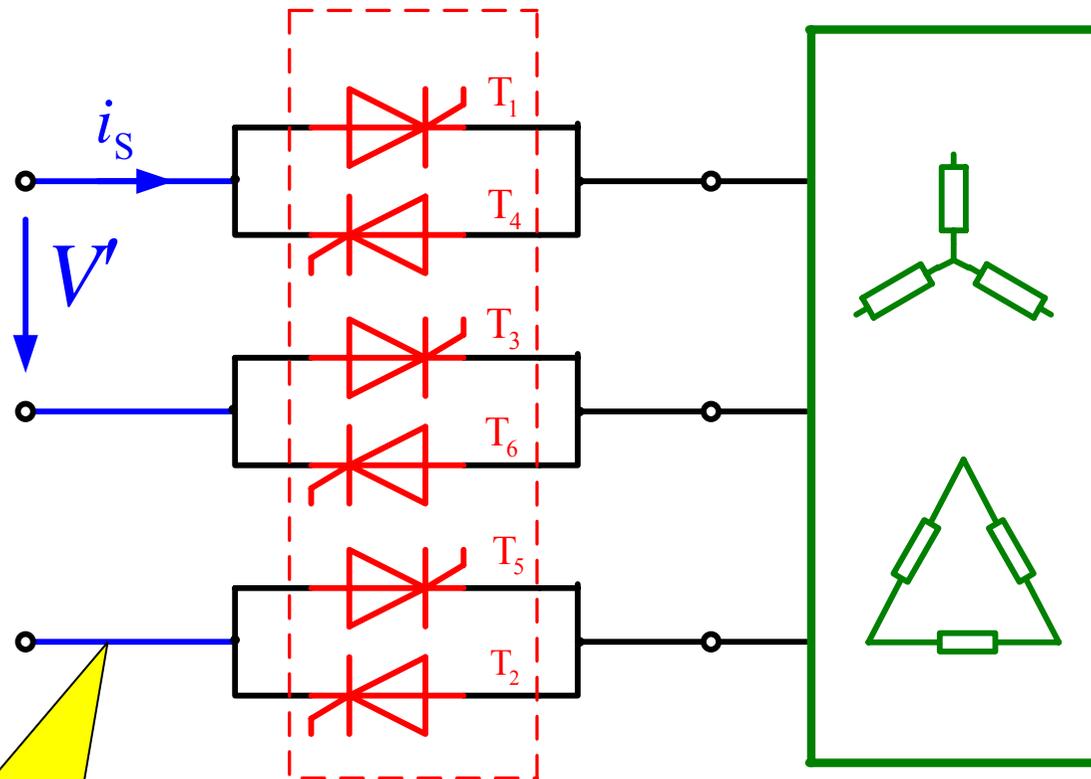
$\alpha = 90^\circ$ 时，中线电流约等于相电流

☹️ 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

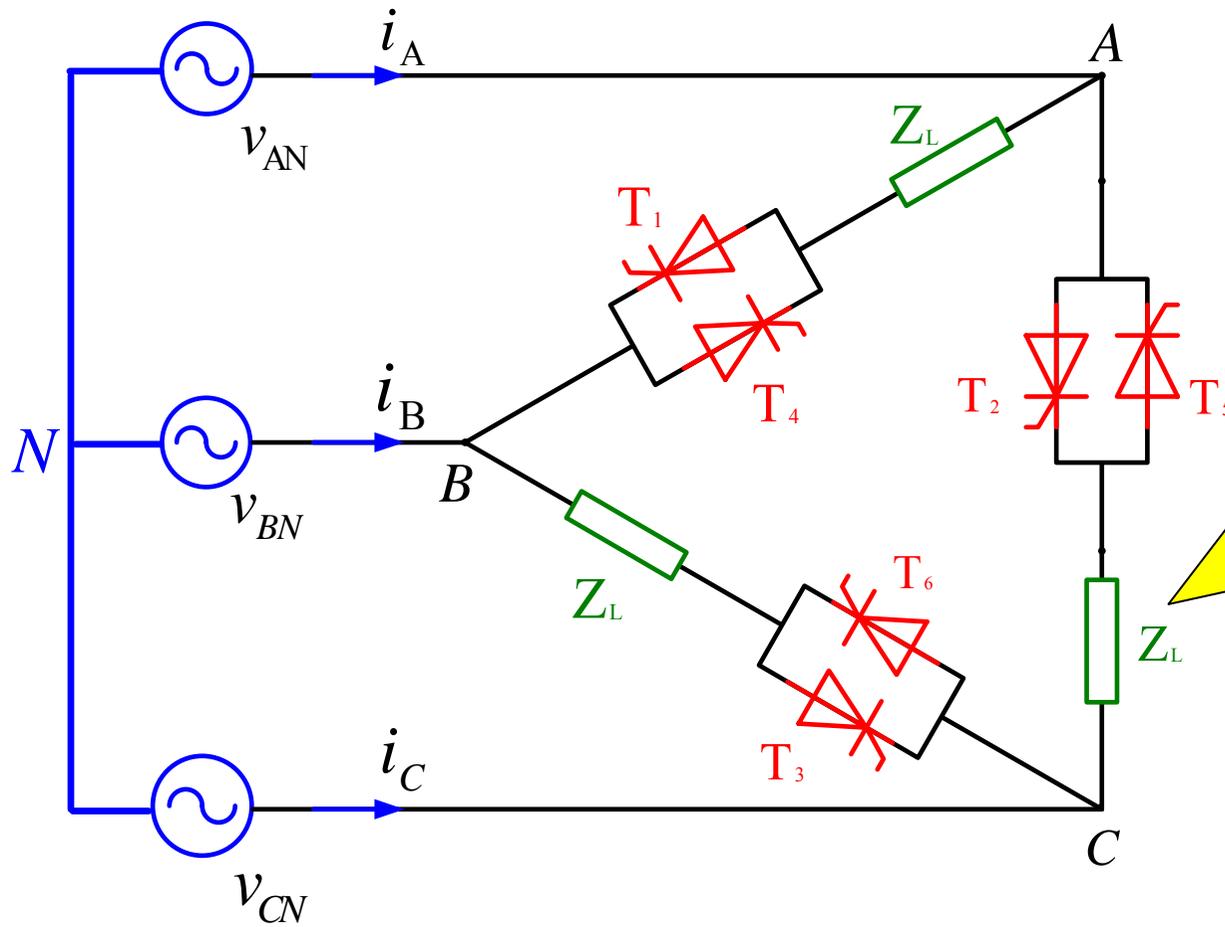


输入电流中没有3次
及3的倍数次谐波

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。

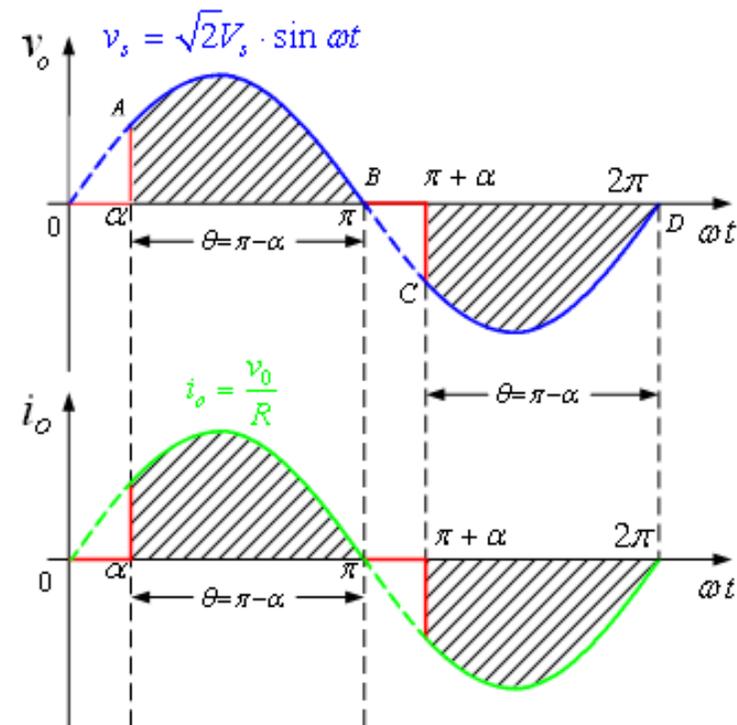
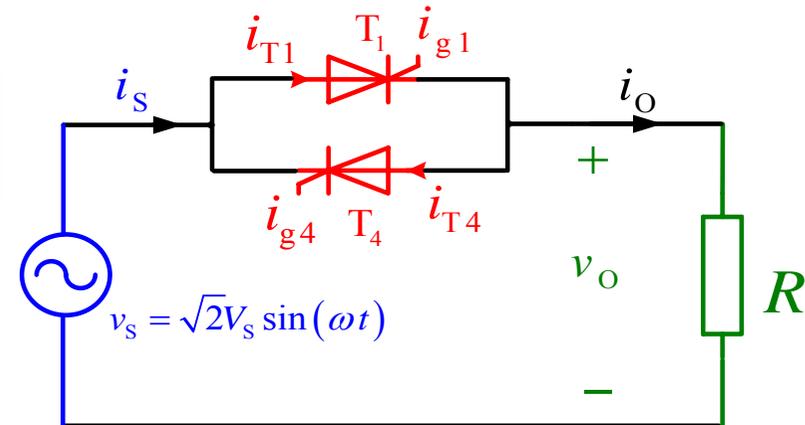
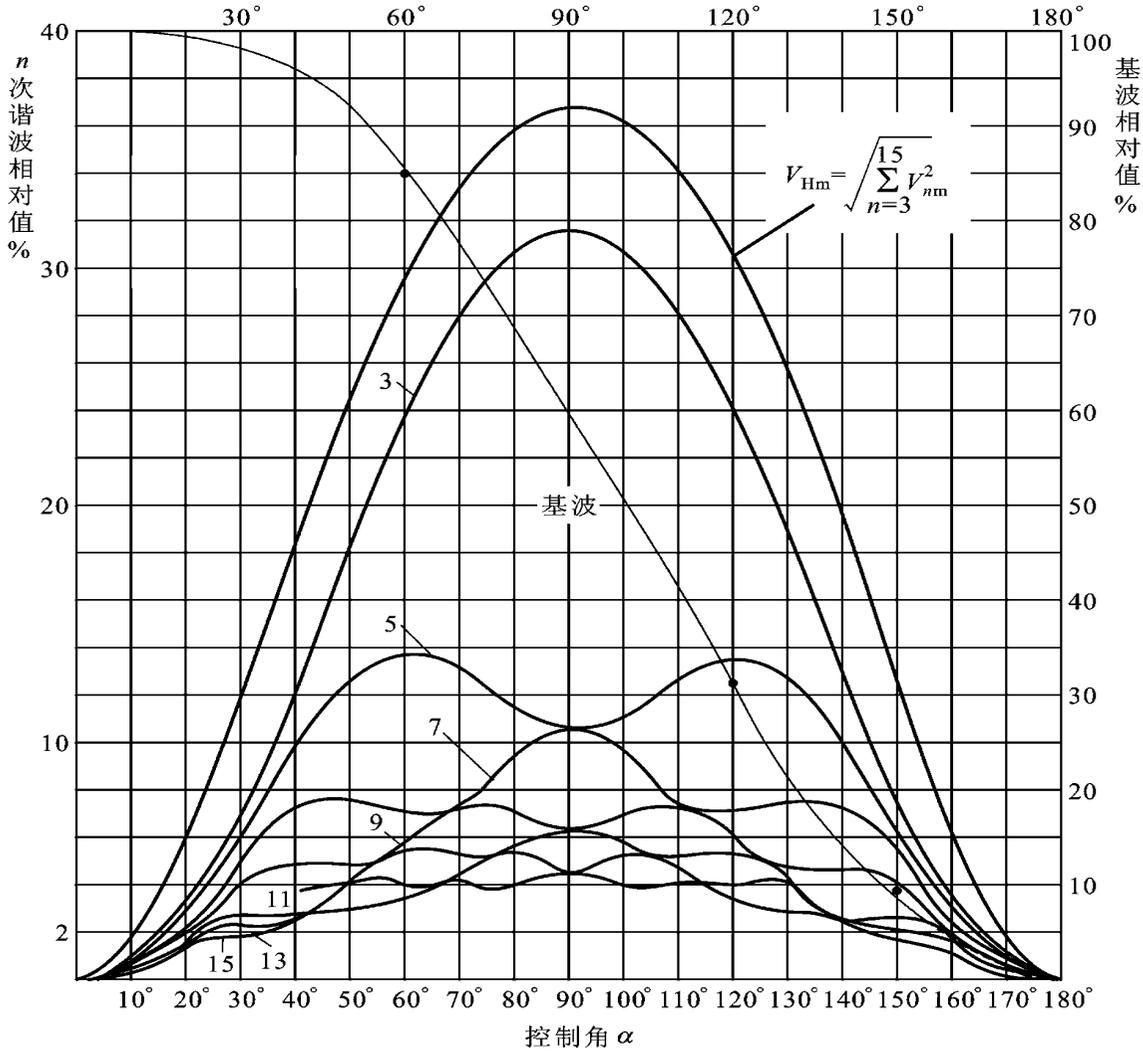


表6.1 不同触发角 α 时基波 V_{1m}^* 和3-15次谐波电压(电流)的相对值

$V_{\text{run}}^* \backslash \alpha$	10°	30°	50°	70°	90°	110°	130°	150°	170°	180°
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:

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

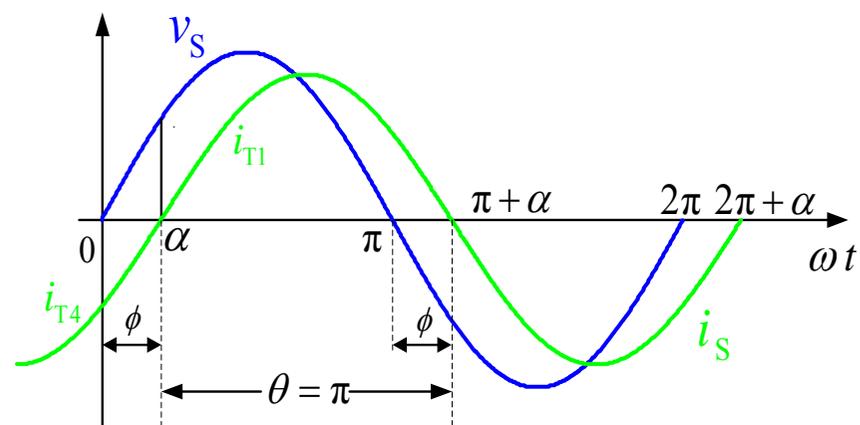
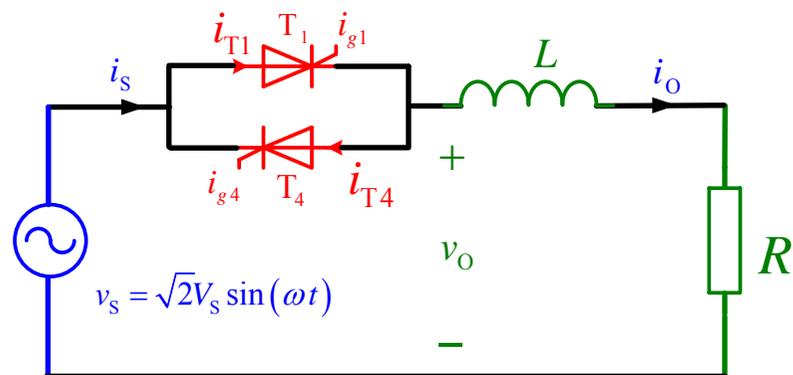
$$i_S = i_O = \frac{\sqrt{2}V_S}{Z} \sin(\omega t - \phi)$$

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

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:

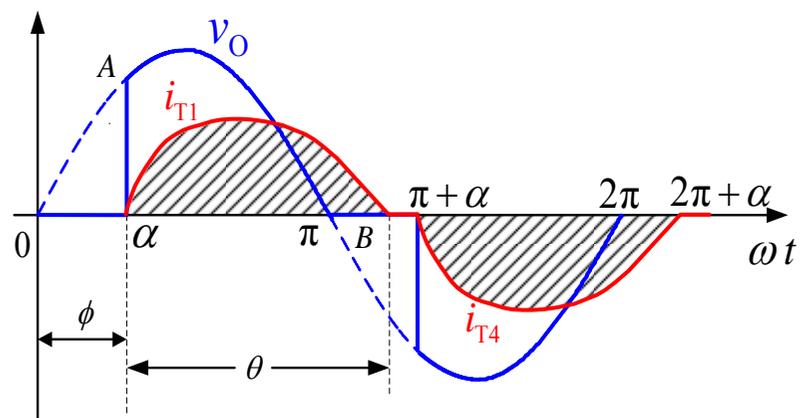
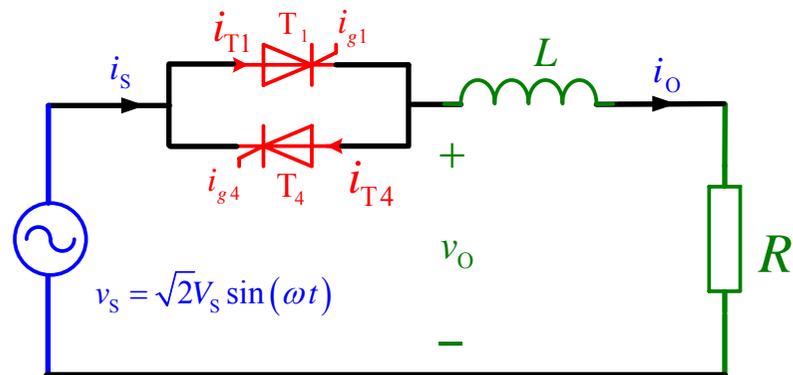
$$v_O = v_S = \sqrt{2}V_S \cdot \sin \omega t = Ri_{T1} + L \frac{di_{T1}}{dt}$$

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

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

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

◆ 控制角范围: $\phi \sim \pi$

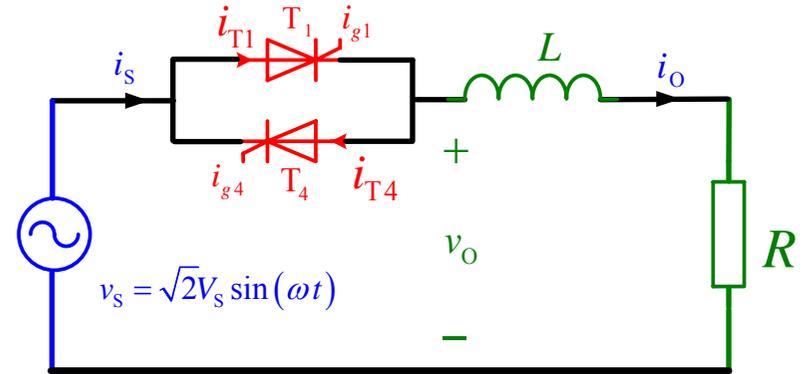


单相交流电压控制器:阻感负载

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：

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

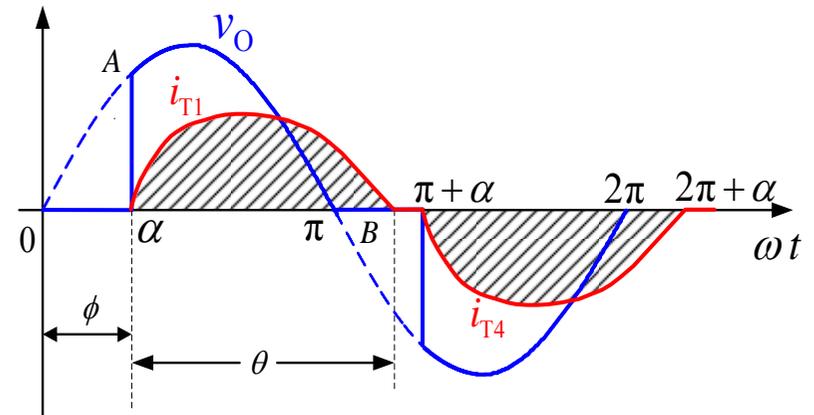
$$= V_S \cdot \sqrt{\frac{\theta}{\pi} + \frac{1}{\pi} [\sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \theta)]}$$



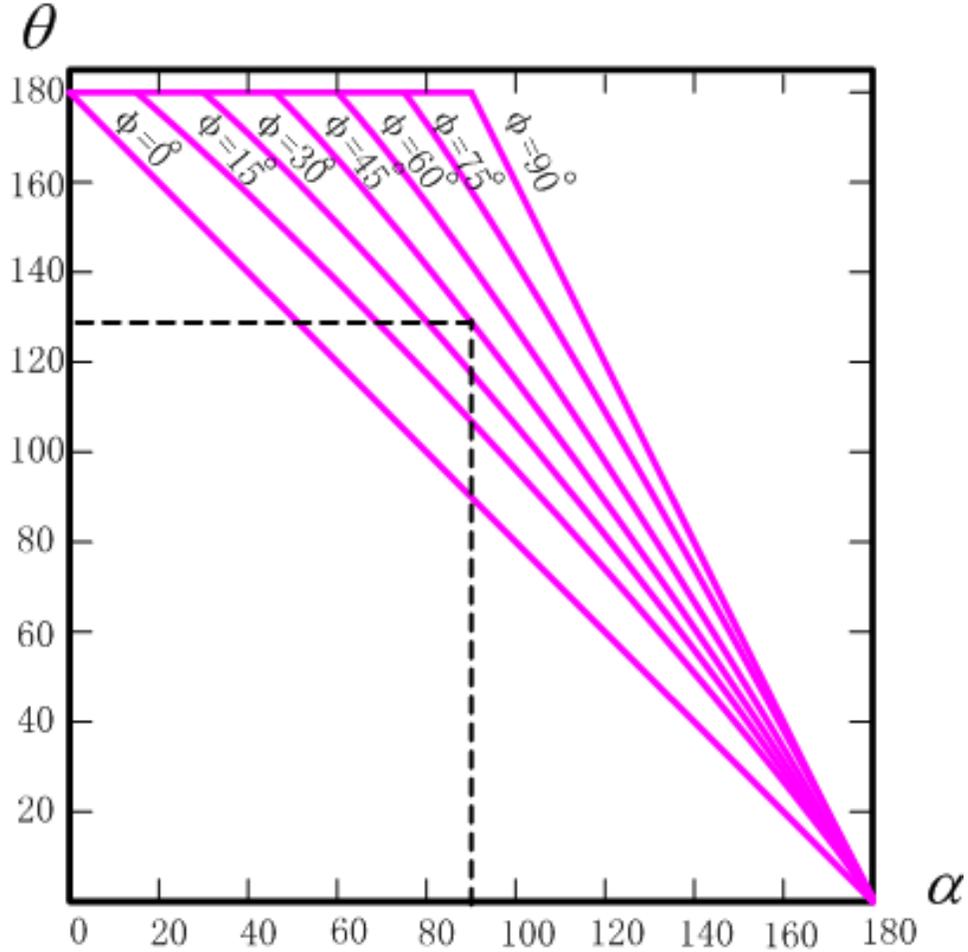
$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_a^{a+\theta} \left(\frac{\sqrt{2}V_S}{Z}\right)^2 [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(a - \varphi)e^{-\frac{\omega t - a}{\text{tg}\varphi}}]^2 d(\omega t)}$$

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

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



单相交流电压控制器:阻感负载



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

$$a \leq \phi, \quad \theta = 180^\circ$$

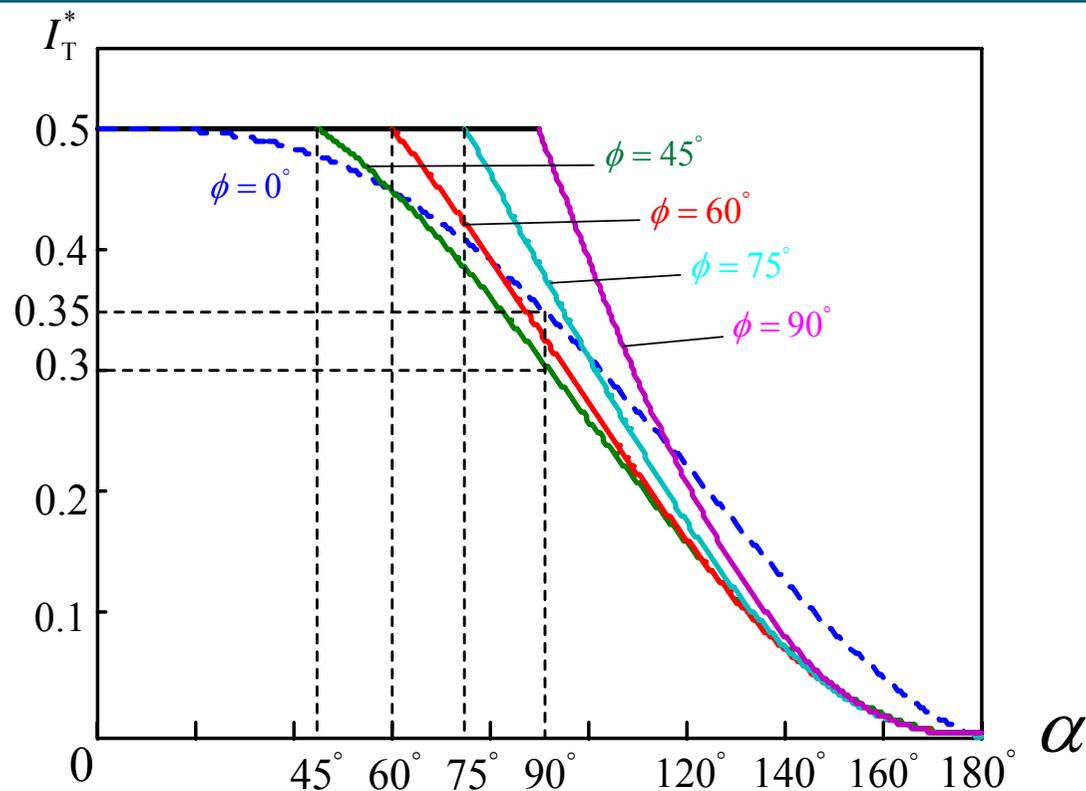
$a > \phi$ 时,

由 ϕ, a 可求出 θ

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

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 α 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 Ω 、感抗为23 Ω ，求（1） α 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_0 为：

$$I_0 = \frac{V}{[R^2 + (\omega L)^2]^{1/2}} = \frac{230}{[23^2 + 23^2]^{1/2}} = 7.07 \text{ A}$$

（3）最大功率（ $\alpha = \alpha_{\min}$ 时）

$$P_{\max} = RI_0^2 = 23 \times 7.07^2 = 1.15 \times 10^3 \text{ W}$$

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

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。

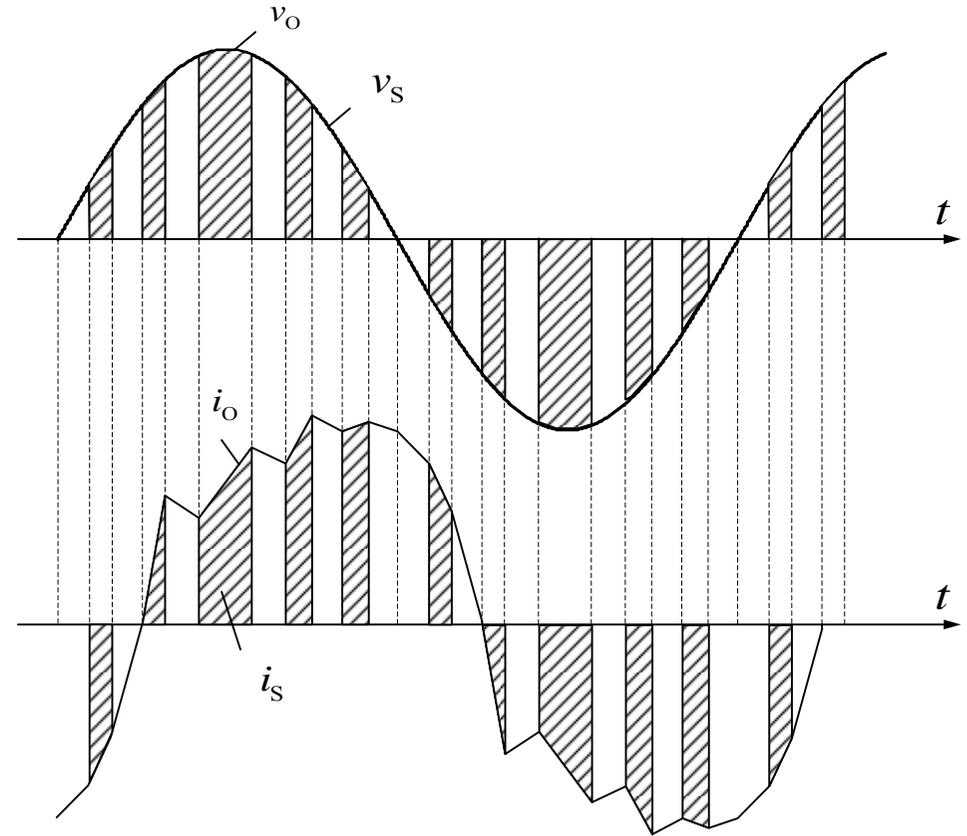
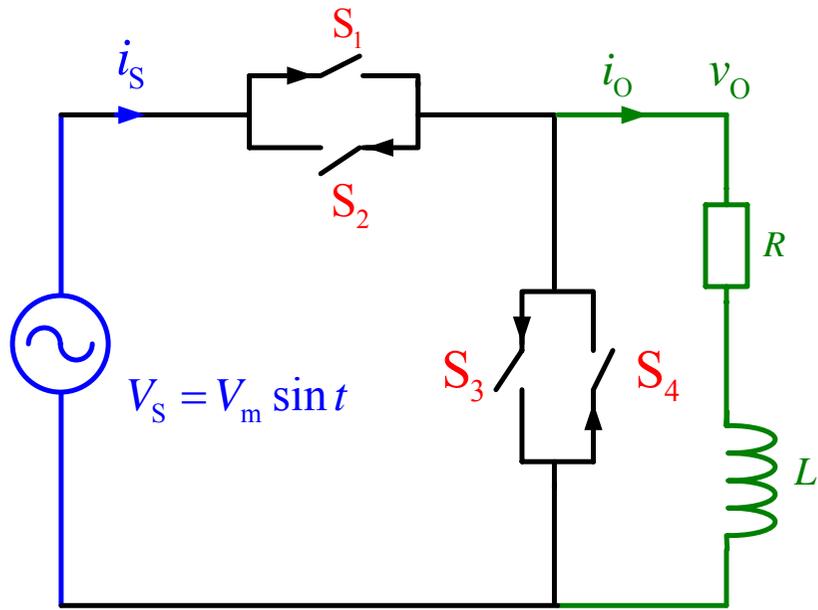
6.2 单相交流电压控制器

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

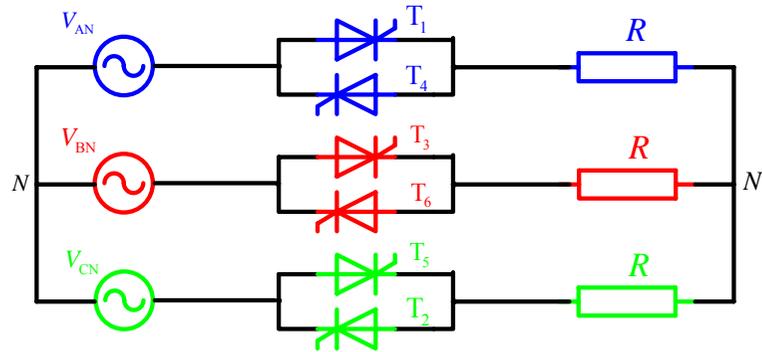
6.3.2 三相开口三角形交流电压控制器

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：

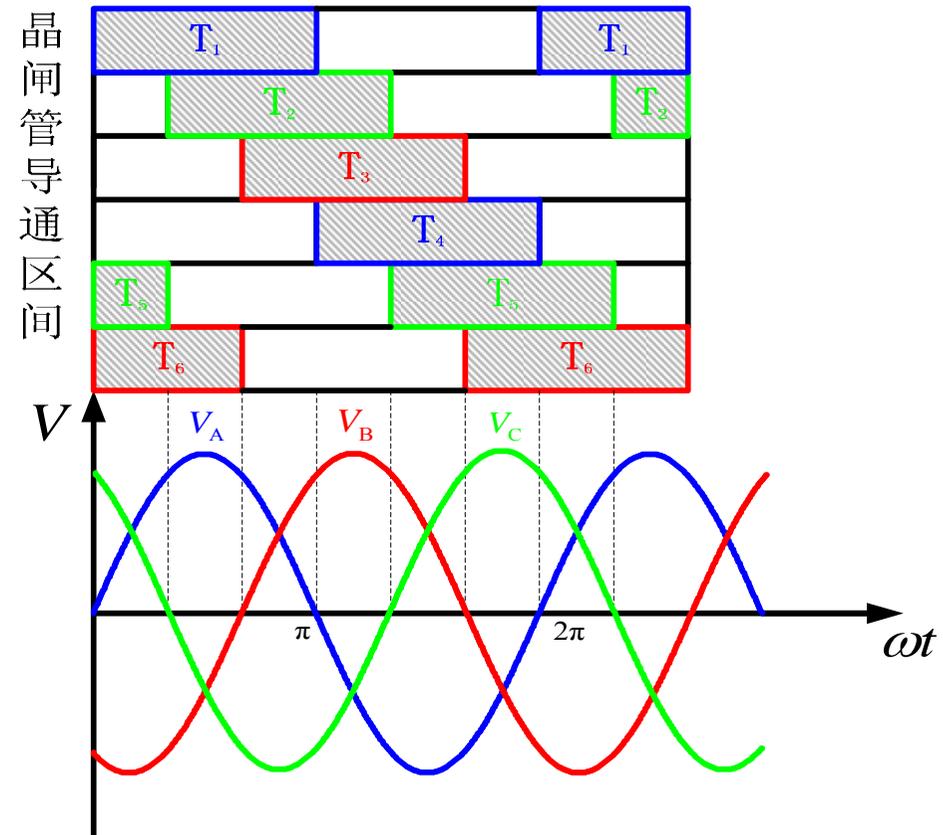
三相同步工作，在同一时刻，每一相有一个晶闸管导电。

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。

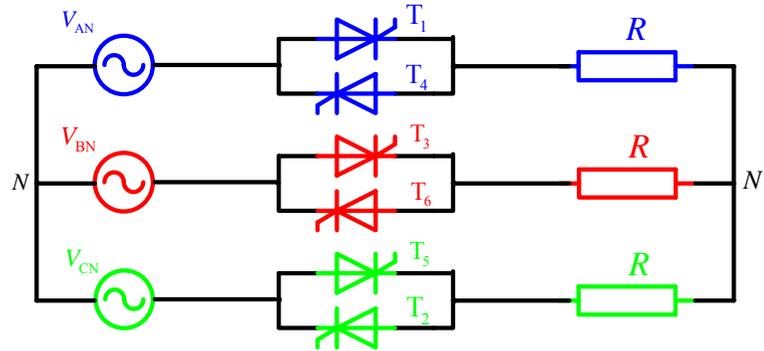
✓ T_1 - T_6 依序相差 60° 触发，脉宽大于 60°

✓ 各相电源的过零点为 计算起点



控制角 $=0$ ，三相同步导电， 180° 导电。

三相Y联结电压控制器

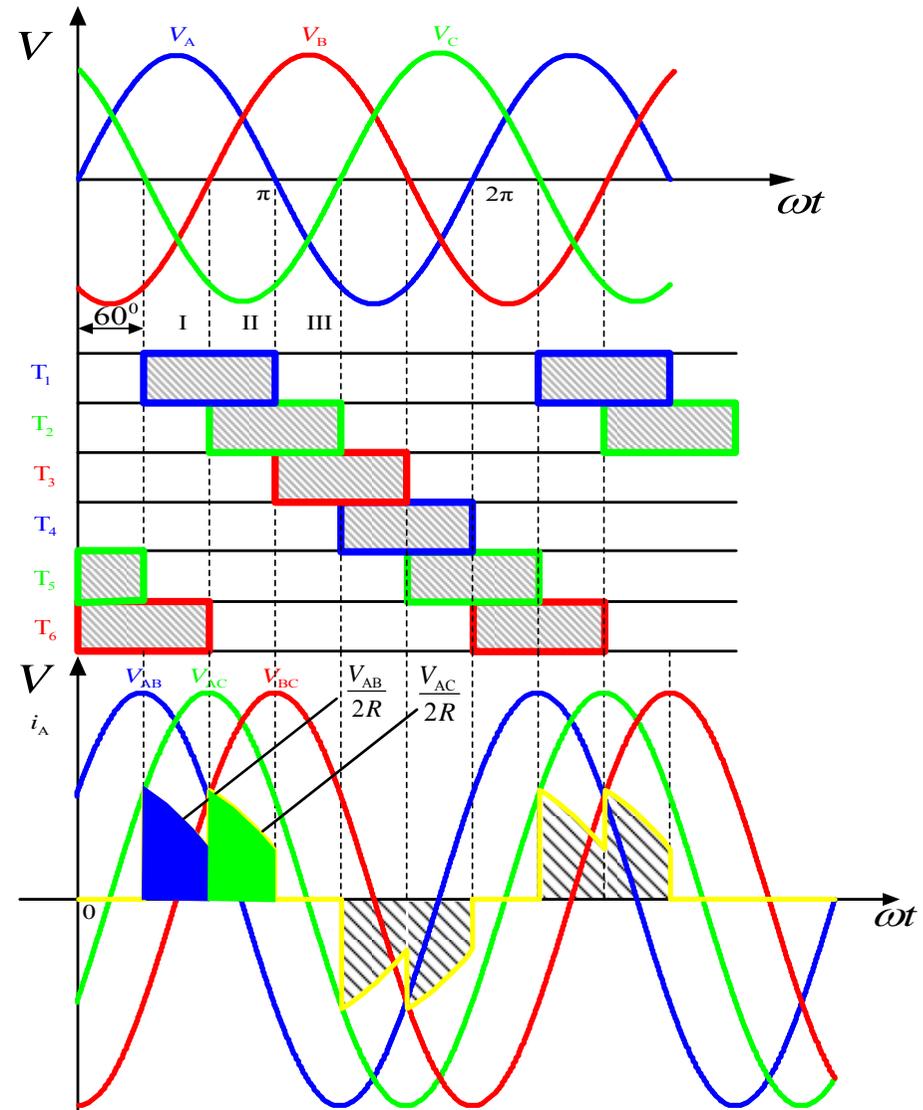


$\alpha = 60^\circ$

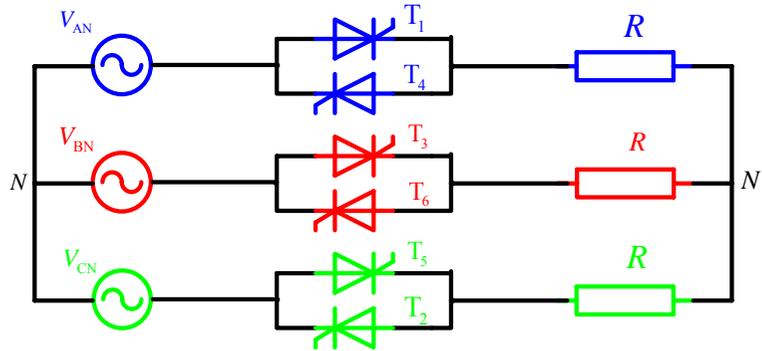
: 两相同时导电, 120° 导电

➤ 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°

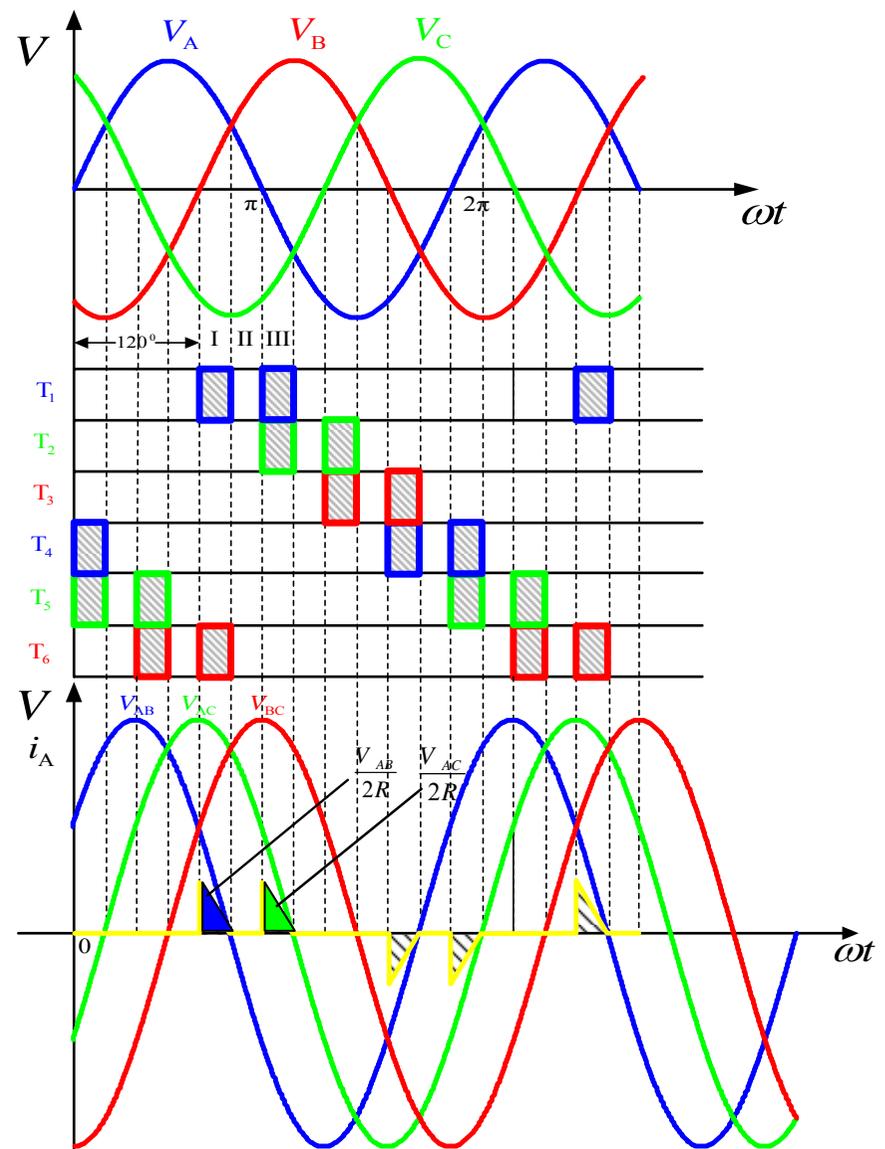
▶ 区间 I:

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

▶ 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（三相同步导电）。
- 👉 $0^\circ < \alpha < 60^\circ$: 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（两相同步导电）
- 👉 $90^\circ < \alpha < 150^\circ$: 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 α 的调控范围为： $0^\circ - 150^\circ$

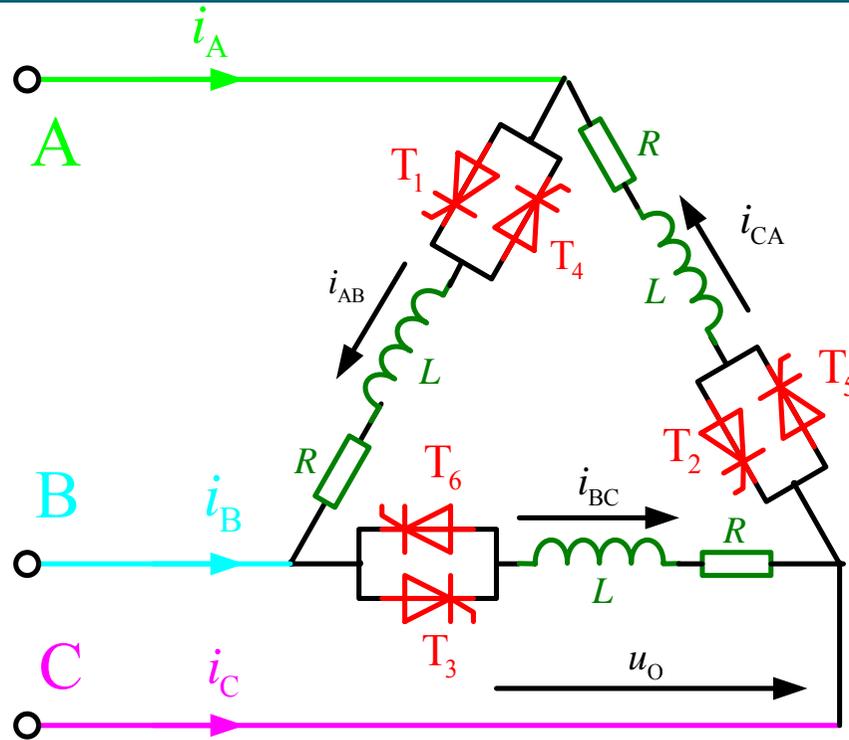
◆ 三相阻感性负载，分析方法与单相电路相同。

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



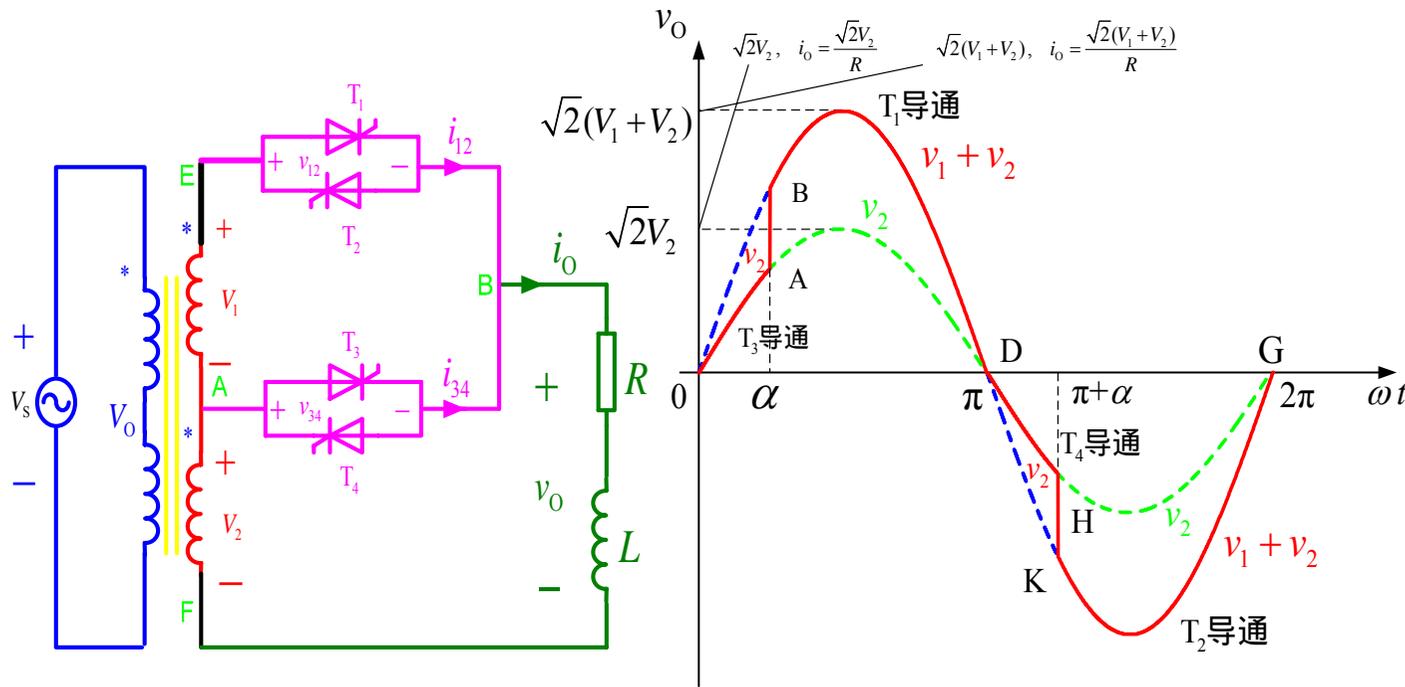
可看作三个独立的单相电路分别分析。

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

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

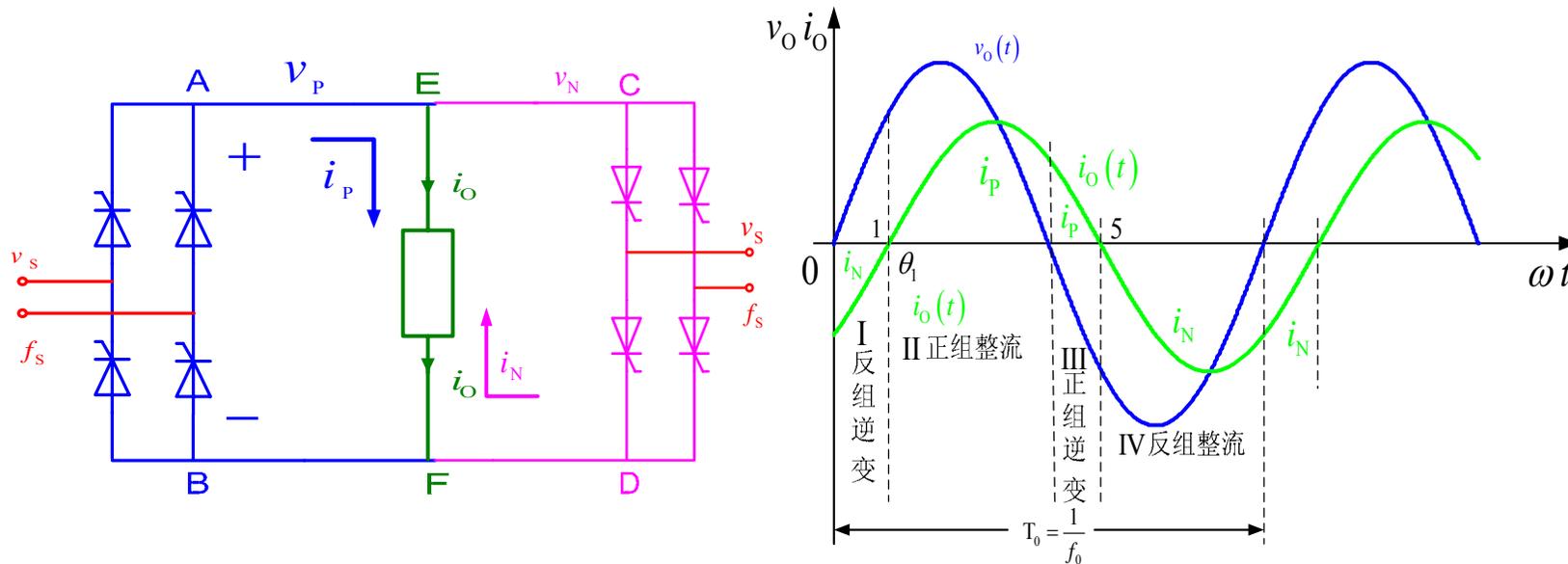
6.5.1 基本工作原理

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 α_p α_n 随时间周期性变化。



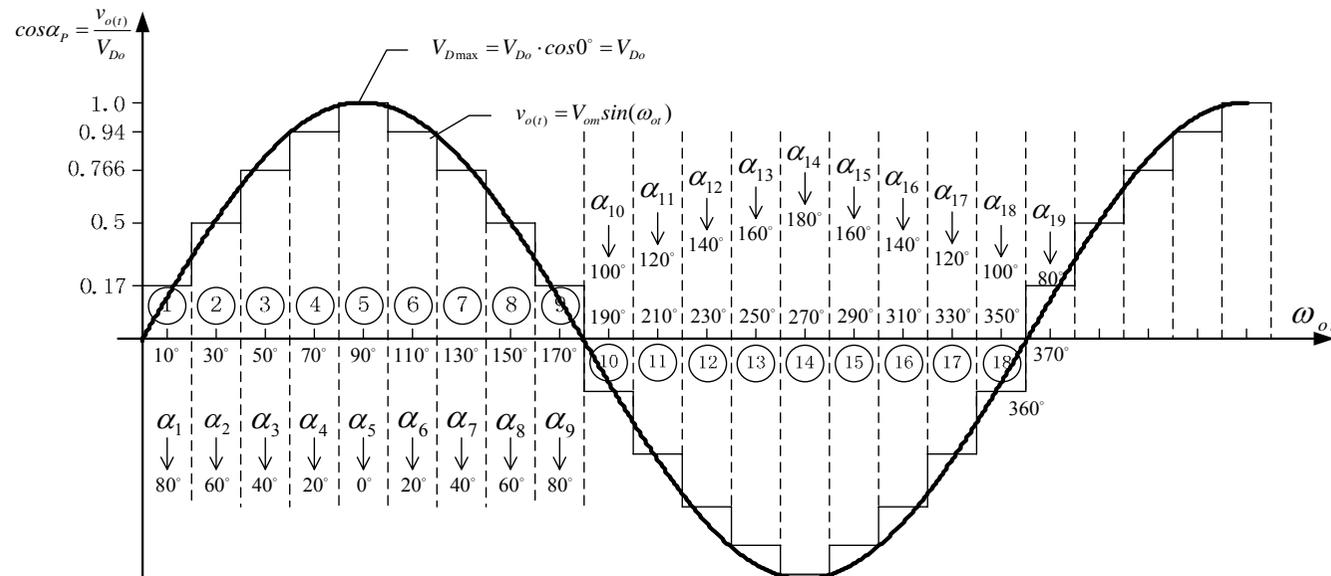
负载输出电流与输出电压不同相位时，正反组变流器在不同时段工作在整流或有源逆变工况。

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(α_P 或 α_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。



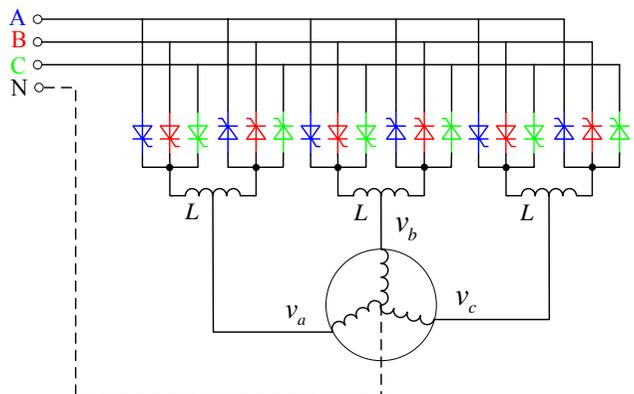
*6.5 晶闸管相控交流/交流直接变频器

6.5.1 基本工作原理

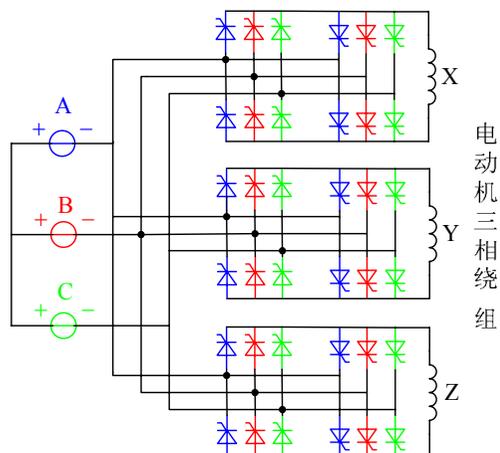
6.5.2 实用电路结构

6.5.3 交流/交流相控直接变频的优缺点

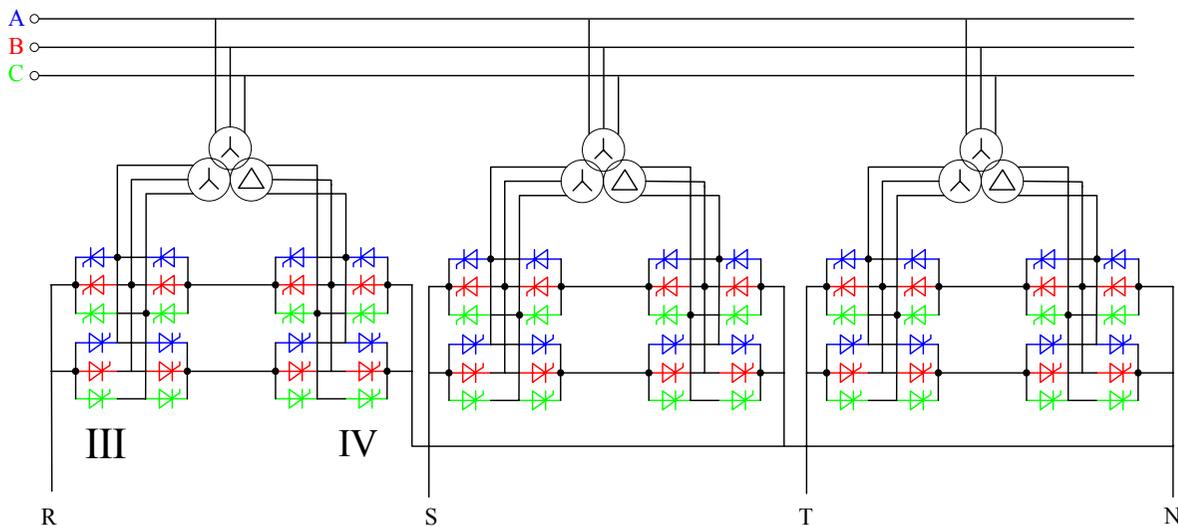
实用电路结构



(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

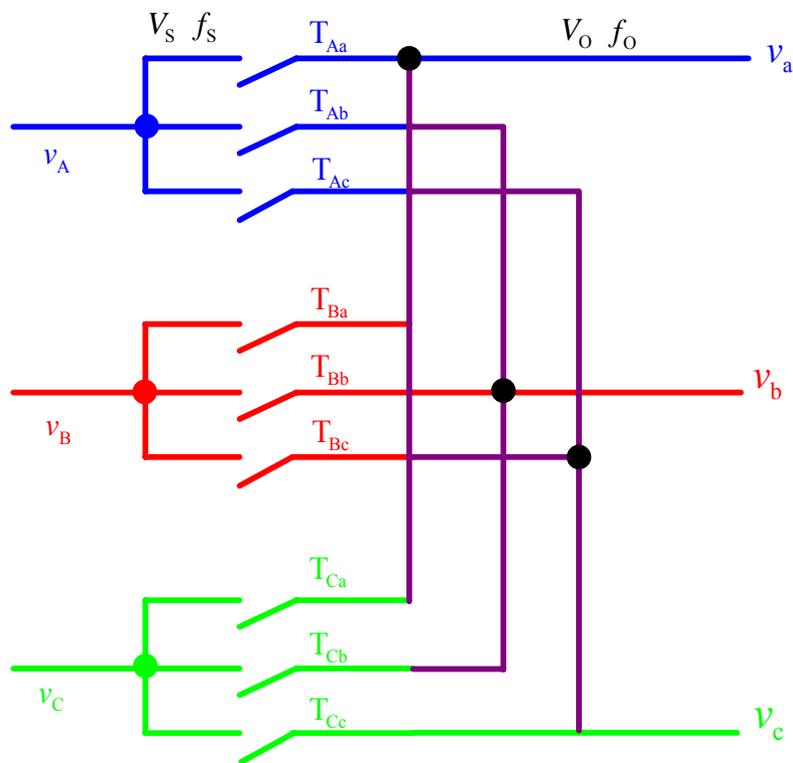
*6.6 矩阵式交流/交流变频器

6.6.0 概述

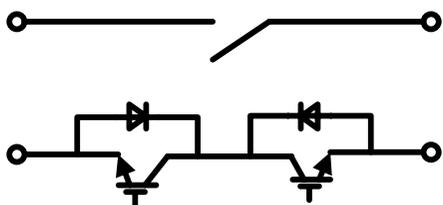
6.6.1 矩阵式交流/交流变频器的控制方法

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

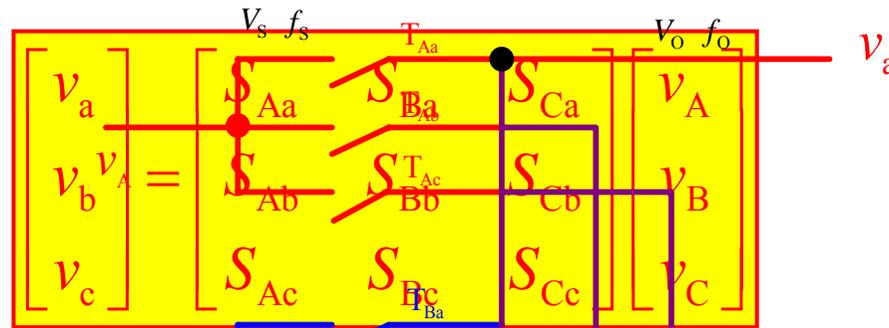
*6.6 矩阵式交流/交流变频器

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