

第6章 交流交流变流电路

6.1 交流调压电路

6.2 其他交流电力控制电路

6.3 交交变频电路

本章小结

第6章 交流交流变流电路·引言

- 本章主要讲述 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

交流电力
控制电路



只改变电压,电
流或控制电路
的通断,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 通断控制

变频电路



改变频率的电路

交交变频 直接

交直交变频 间接

第6章 交流交流变流电路·引言

● 交流电力控制电路的类型

交流调压电路: 每半个周波控制晶闸管开通相位, 调节输出电压有效值

交流调功电路: 以交流电周期为单位控制晶闸管通断, 改变通断周期数的比, 调节输出功率的平均值

交流电力电子开关: 并不着意调节输出平均功率, 而只是根据需要接通或断开电路

第6章 交流交流变流电路·引言

- **交流电力控制电路应用**
 - ◆ 灯光控制（如调光台灯和舞台灯光控制）。
 - ◆ 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，用于调节变压器一次电压。

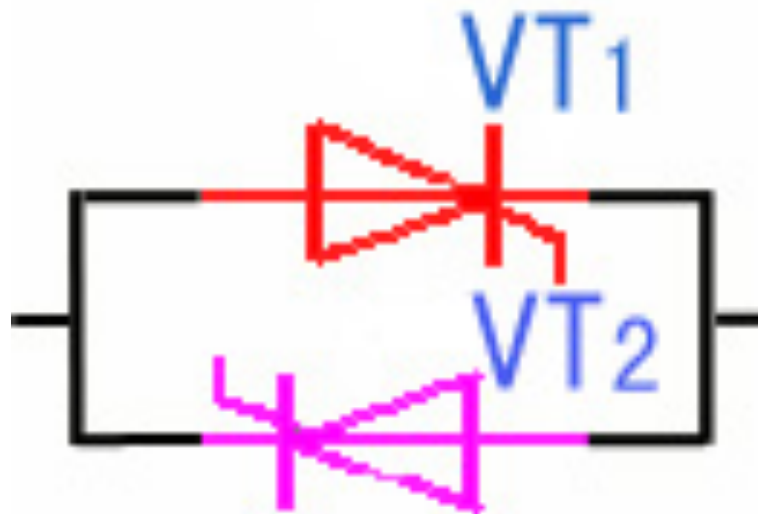
6.1 交流调压电路

6.1.1 单相交流调压电路

6.1.2 三相交流调压电路

6.1 交流调压电路-引言

- 电路图



- 原理

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控制交流电力。

6.1.1 单相交流调压电路

1. 电阻负载

◆ 输出电压与 α 的关系

👉 调节 α ，移相范围为 $0 \leq \alpha \leq \pi$ 。 $\alpha = 0$ 时，输出电压

最大 $U_o = U_1$ ， α 增大， U_o 降低， $\alpha = \pi$ 时， $U_o = 0$ 。

👉 负载电压有效值 U_o

$$U_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U_1 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (6-1)$$

👉 负载电流有效值 I_o

$$I_o = \frac{U_o}{R} \quad (6-2)$$

👉 晶闸管电流有效值 I_T

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_1 \sin \omega t}{R} \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_1}{R} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)} \quad (6-3)$$

👉 功率因数 λ

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

◆ λ 与 α 的关系:

👉 $\alpha = 0$ 时，功率因数 $\lambda = 1$ ， α 增大，输入电
流滞后于电压且畸变， λ 降低。

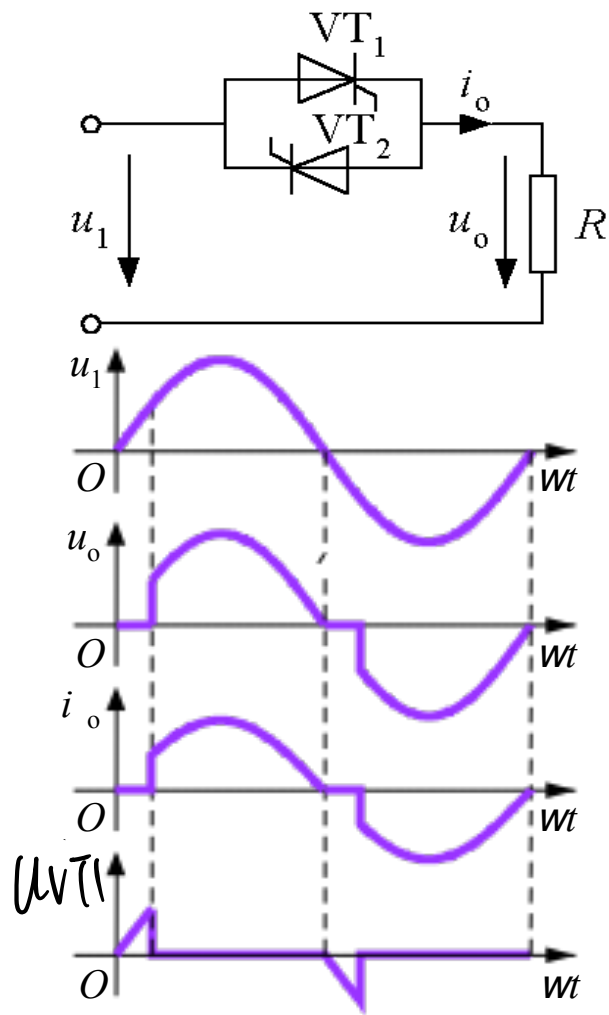


图6-1 电阻负载单相交流调压电路及其波形

(6-4)

0/53

6.1.1 单相交流调压电路

2. 阻感负载

◆工作过程

若晶闸管短接，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。

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

设负载的阻抗角为 φ ，稳态时 α 的移相范围应为 $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ 。

在 $\omega t = \alpha$ 时刻开通晶闸管VT1，可求得导通角 θ ，即

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

(6-7)

当 $a = j$ 时 $\theta = \pi$

当 $a > j$ 时 $\theta < \pi$

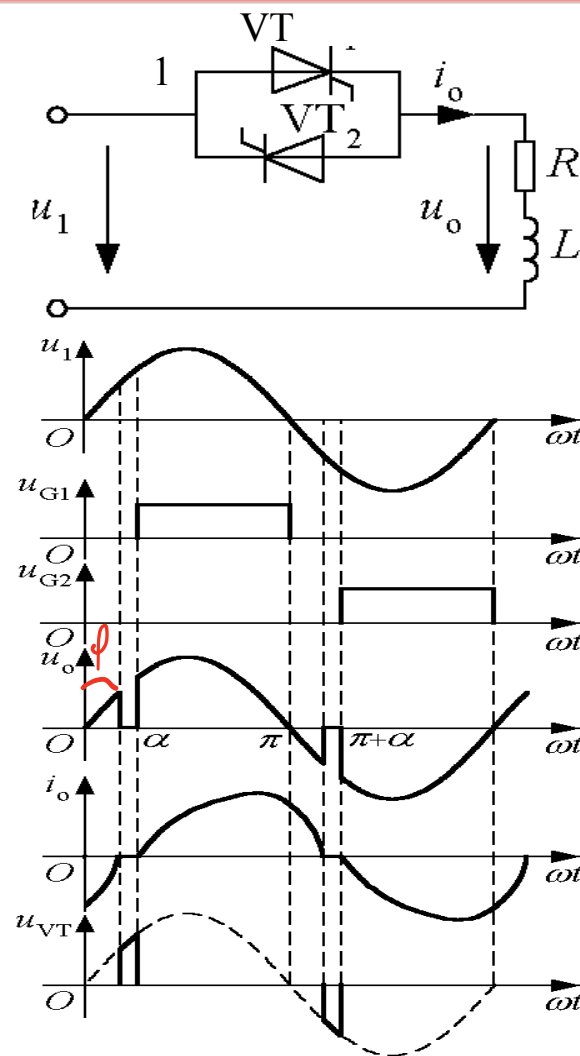
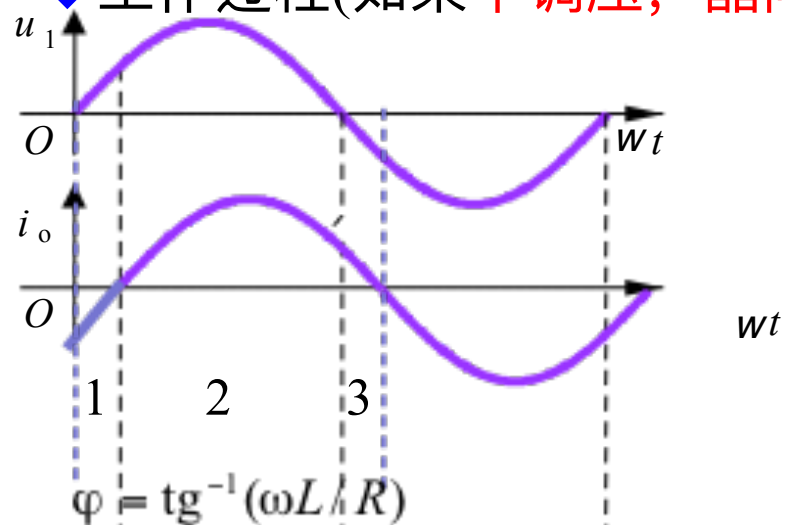


图6-2 阻感负载单相交流调压电路及其波形

6.1.1 单相交流调压电路

2. 阻感负载

◆工作过程(如果不调压, 晶闸管短接)



1、电压 >0 , 电流 <0 , VT1反偏电压, VT2正偏电压

2、电压 >0 , 电流 >0 , VT1正偏电压, VT2反偏电压

3、电压 <0 , 电流 <0 , VT1正偏电压, VT2反偏电压

所以 $a > j$

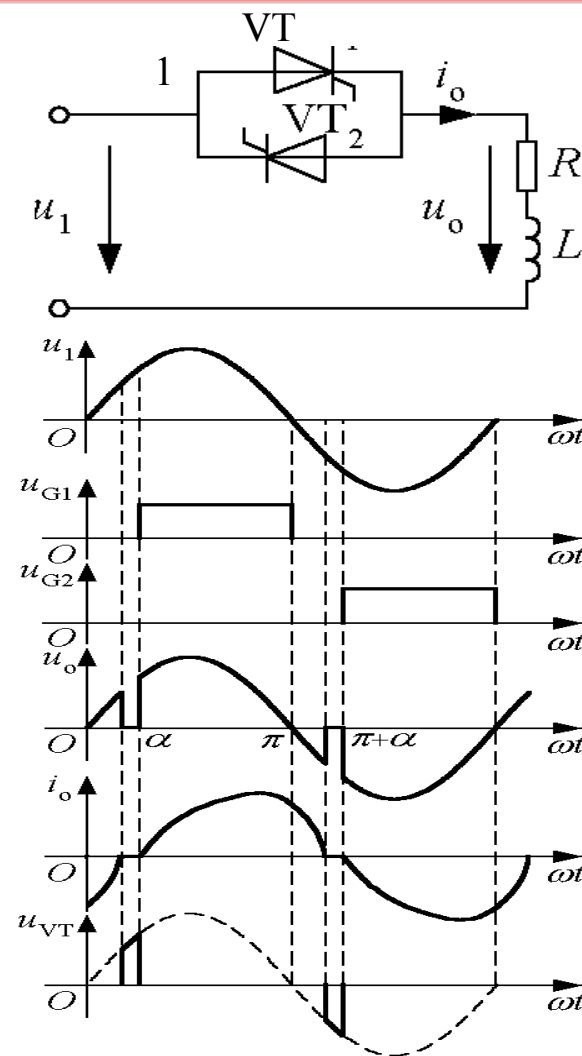
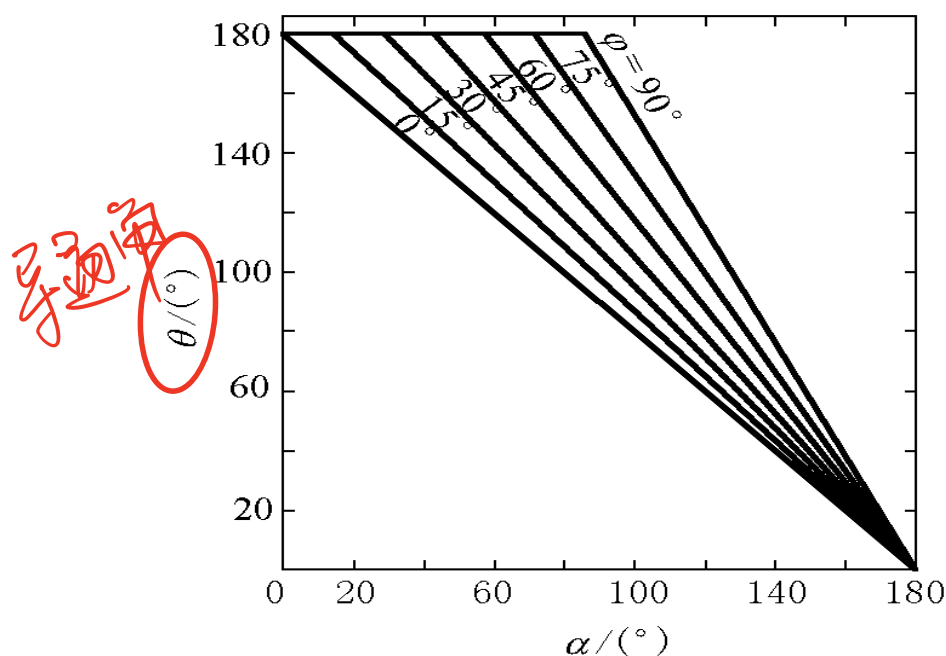


图6-2 阻感负载单相交流调压电路及其波形

2. 阻感负载 6.1.1 单相交流调压电路

◆ $\alpha > \varphi$ 时的工作情况

◆ 以 α 为参变量，利用式(6-7)可以把 θ 和 α 的关系用图6-3的一簇曲线来表示。



1、功率因数越大，导通角越小

2、触发角越大，导通角越小

当 $a = j$ 时 $\theta = \pi$

当 $a > j$ 时 $\theta < \pi$

图6-3 单相交流调压电路以 α 为参变量的 θ 和 α 关系曲线

2. 阻感负载 6.1.1 单相交流调压电路

◆基本的数量关系

👉 负载电压有效值 U_o

$$\begin{aligned} U_o &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} (\sqrt{2}U_1 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} \\ &= U_1 \sqrt{\frac{\theta}{\pi} + \frac{1}{2\pi} [\sin 2\alpha - \sin(2\alpha + 2\theta)]} \end{aligned} \quad (6-8)$$

👉 晶闸管电流有效值 I_{VT}

$$\begin{aligned} I_{VT} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} \left\{ \frac{\sqrt{2}U_1}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha - \omega t}{\tan \varphi}} \right] \right\}^2 d(\omega t)} \\ &= \frac{U_1}{\sqrt{2\pi} Z} \sqrt{\theta - \frac{\sin \theta \cos(2\alpha + \varphi + \theta)}{\cos \varphi}} \end{aligned} \quad (6-9)$$

2. 阻感负载 6.1.1 单相交流调压电路

👉 负载电流有效值 I_o

$$I_o = \sqrt{2} I_{VT} \quad (6-10)$$

👉 晶闸管电流 I_{VT} 的标么值

$$I_{VTN} = I_{VT} \frac{|Z|}{\sqrt{2} U_1} \quad (6-11)$$

式中 $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$

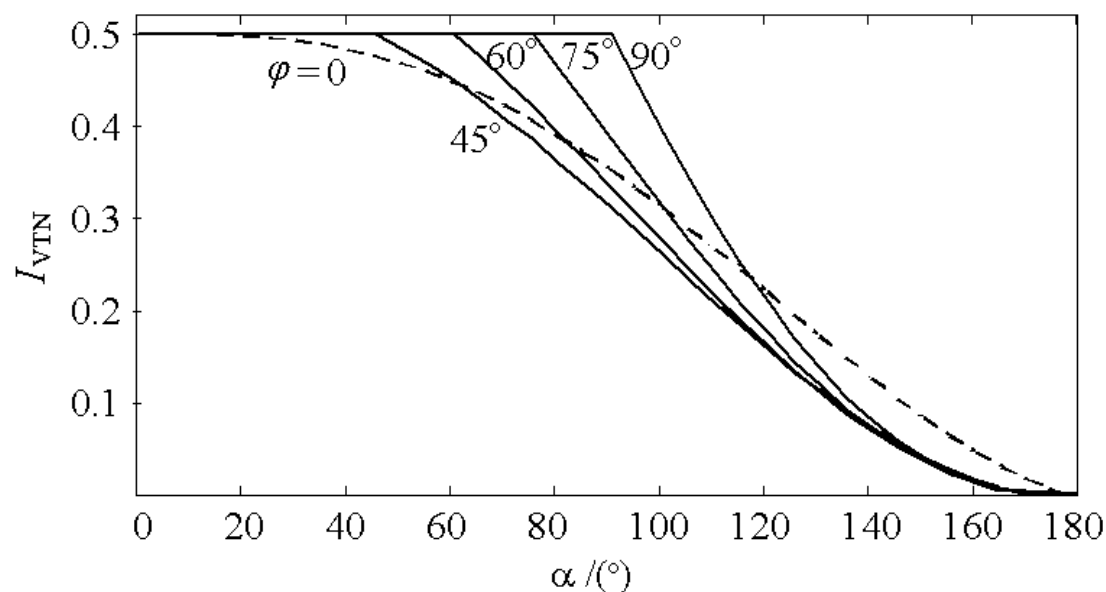


图6-4 单相交流调压电路 ϕ 为参变量时 I_{VTN} 和 ϕ 关系曲线

2. 阻感负载 6.1.1 单相交流调压电路

◆ $\varphi < \alpha$ 时的工作情况

👉 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。

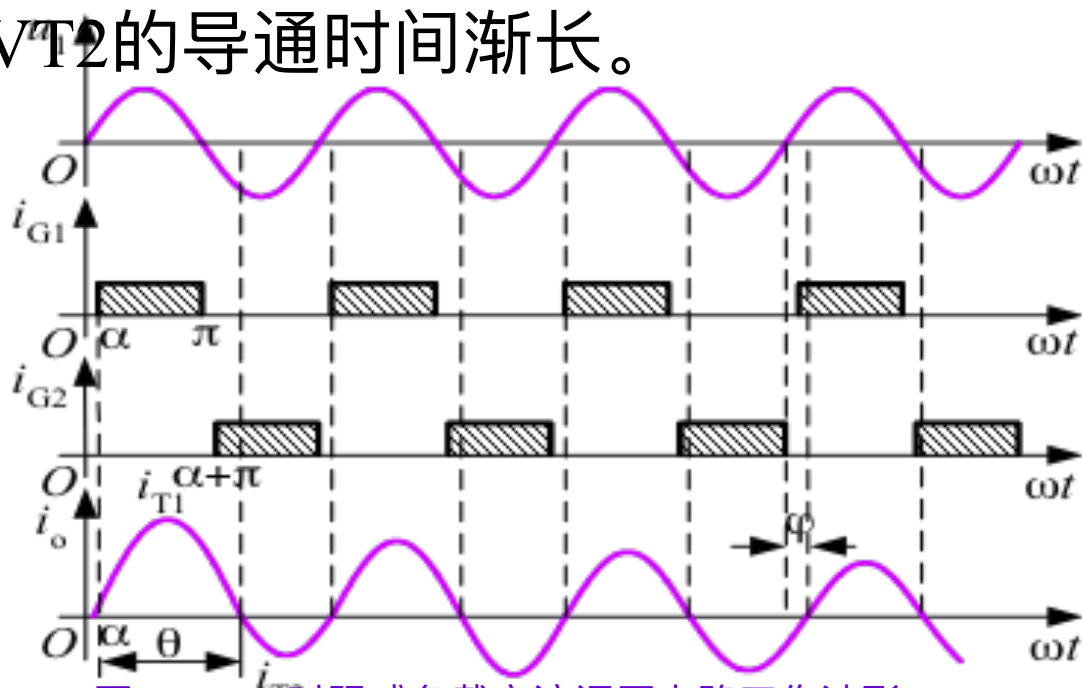


图6-5 $\varphi < \alpha$ 时阻感负载交流调压电路工作波形

2. 阻感负载 6.1.1 单相交流调压电路

◆例6-1 一单相交流调压器，输入交流电压为220V，50Hz，负载为电阻电感，其中 $R=8\Omega$ ， $X_L=6\Omega$ 。试求 $\alpha=\pi/6$ 、 $\pi/3$ 时的输出电压、电流有效值及输入功率和功率因数。

解：负载阻抗及负载阻抗角分别为：

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = 10\Omega$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) = \arctan\left(\frac{6}{8}\right) = 0.6435 = 36.87^\circ$$

因此开通角 α 的变化范围为：

$$\varphi \leq \alpha < \pi$$

即

$$0.6435 \leq \alpha < \pi$$

①当 $\alpha=\pi/6$ 时，由于 $\alpha < \varphi$ ，因此晶闸管调压器全开放，输出电压为完整的正弦波，负载电流也为最大，此时输出功率最大，为

$$I_{in} = I_o = \frac{220}{Z} = 22(A)$$

2. 阻感负载 6.1.1 单相交流调压电路

$$P_{in} = I_{in}^2 R = 3872(W)$$

功率因数为

$$\lambda = \frac{P_{in}}{U_1 I_o} = \frac{3872}{220 \times 22} = 0.8$$

实际上，此时的功率因数也就是负载阻抗角的余弦。

② $\alpha = \frac{\pi}{3}$ 时，先计算晶闸管的导通角，由式 (6-7) 得

$$\sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta - 0.6435\right) = \sin\left(\frac{\pi}{3} - 0.6435\right) e^{\frac{-\theta}{\tan \varphi}}$$

解上式可得晶闸管导通角为：

$$\theta = 2.727 = 156.2^\circ$$

2. 阻感负载 6.1.1 单相交流调压电路

$$\begin{aligned} I_{VT} &= \frac{U_1}{\sqrt{2\pi} Z} \sqrt{\theta - \frac{\sin\theta \cos(2\alpha + \varphi + \theta)}{\cos\varphi}} \\ &= \frac{220}{\sqrt{2\pi} \times 10} \times \sqrt{2.727 - \frac{\sin 2.727 \times \cos(\frac{2\pi}{3} + 0.6435 + 2.727)}{0.8}} \\ &= 13.55(A) \end{aligned}$$

$$I_{in} = I_o = \sqrt{2} I_{VT} = 19.16(A)$$

$$P_{in} = I_{in}^2 R = 2937(W)$$

$$\lambda = \frac{P_{in}}{U_1 I_o} = \frac{2937}{220 \times 19.16} = 0.697$$

3. 谐波分析

6.1.1 单相交流调压电路

■ 单相交流调压电路的谐波分析

◆ 带电阻负载时，对负载电压 u_o 进行谐波分析

$$u_o(\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (6-12)$$

式中

$$a_1 = \frac{\sqrt{2}U_1}{2\pi}(\cos 2\alpha - 1)$$

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

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

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

6.1.1 单相交流调压电路

3. 谐波分析

基波和各次谐波的有效值可按下式求出

$$U_{on} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (n=1,3,5,7,\dots) \quad (6-13)$$

负载电流基波和各次谐波的有效值为

$$I_{on} = U_{on} / R \quad (6-14)$$

◆ 电流基波和各次谐波标么值随 α 变化的曲线，如图6-6所示，其中基准电流为 $\alpha=0$ 时的电流有效值。

◆ 阻感负载时

👉 电流谐波次数和电阻负载时相同，也只含3、5、7...等次谐波。

👉 随着次数的增加，谐波含量减少。

👉 和电阻负载时相比，阻感负载时的谐波电流含量少一些。

👉 当 α 角相同时，随着阻抗角 φ 的增大，谐波含量有所减少。

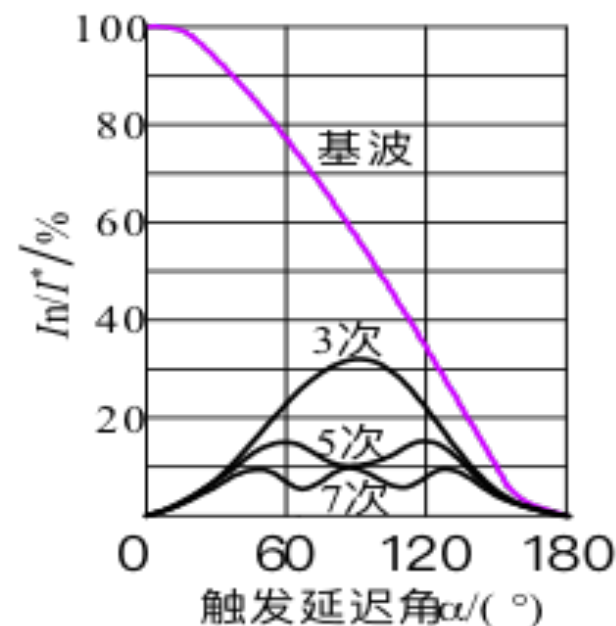


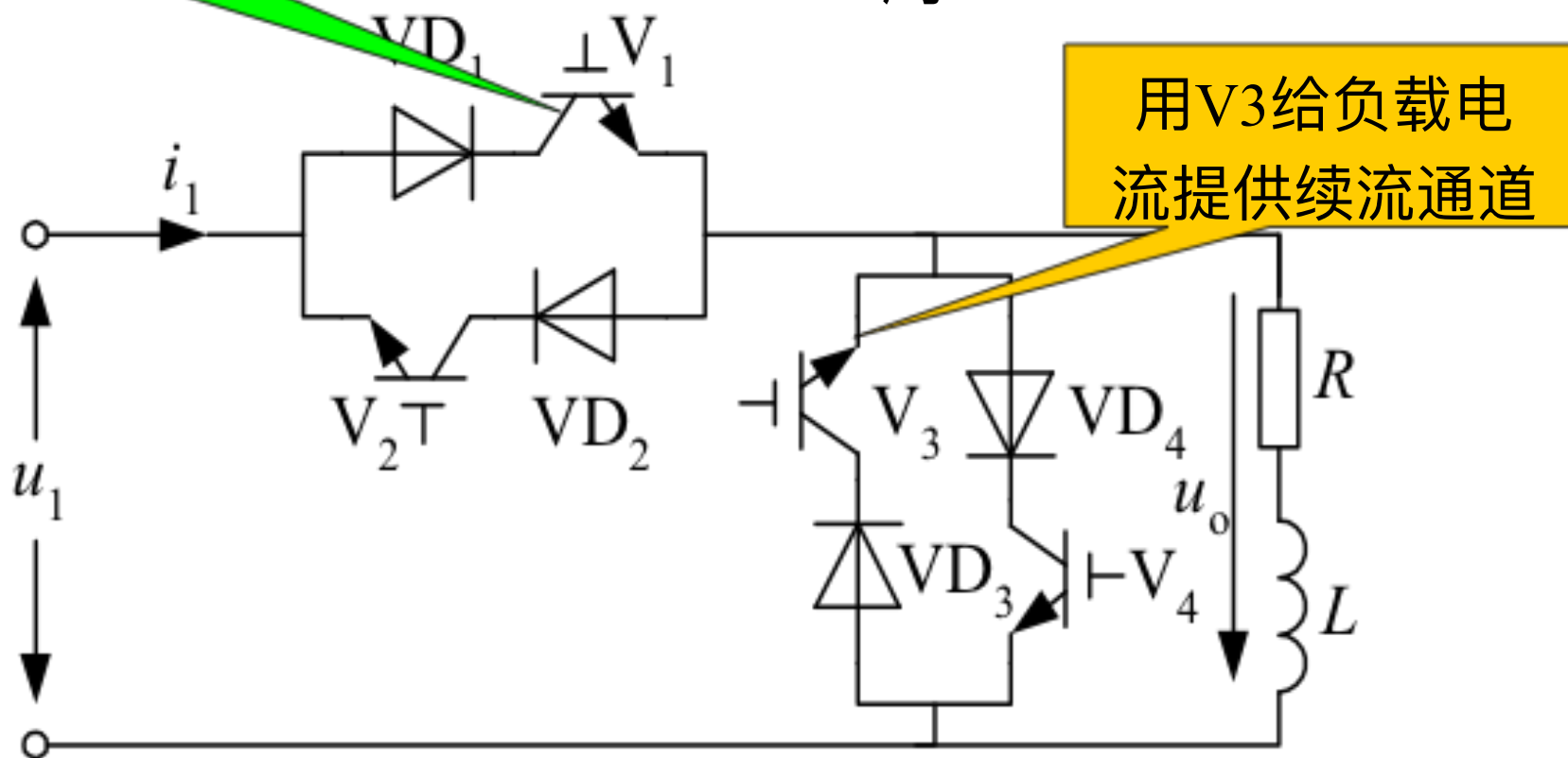
图6-6 电阻负载单相交流调压电路基波和谐波电流含量

6.1.1 单相交流调压电路

4. 斩控式交流调压电路

用V1进行斩波控制

在交流电源 u_1 的正半周



设斩波器件（V1或V2）导通时间为 t_{on} ，开关周期为 T ，则导通比 $a = t_{on}/T$ ，改变 a 可调节输出电

6.1.1 单相交流调压电路

4. 斩控式交流调压电路

◆ 工作原理

👉 用 V_1 ， V_2 进行斩波控制，
用 V_3 ， V_4 给负载电流提供续流通道。

👉 设斩波器件 (V_1 ， V_2) 导通时间为 ton ，开关周期为 T ，则导通比 $\square = ton/T$ ，通过改变 \square 来调节输出电压。

◆ 特性

- 电源电流的基波分量是和电源电压同相位的，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
- 电路的功率因数接近1。

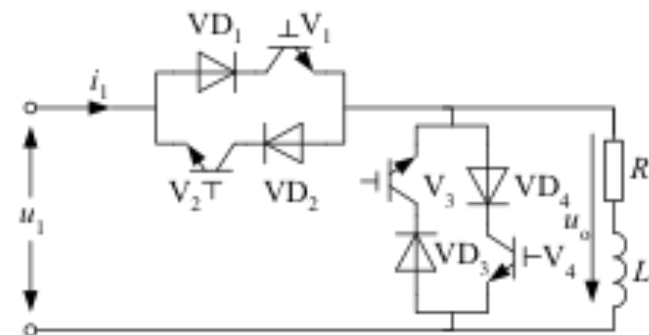


图6-7 斩控式交流调压电路

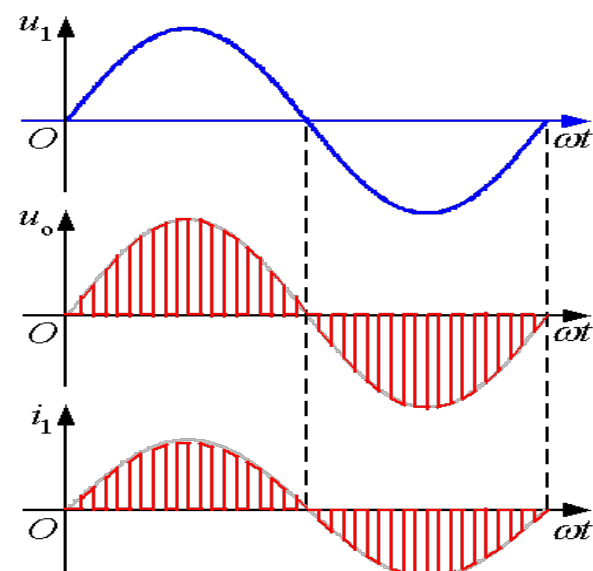


图6-8 电阻负载斩控式交流调压电路波形

6.1.2 三相交流调压电路

- 根据三相联结形式的不同，三相交流调压电路具有多种形式：

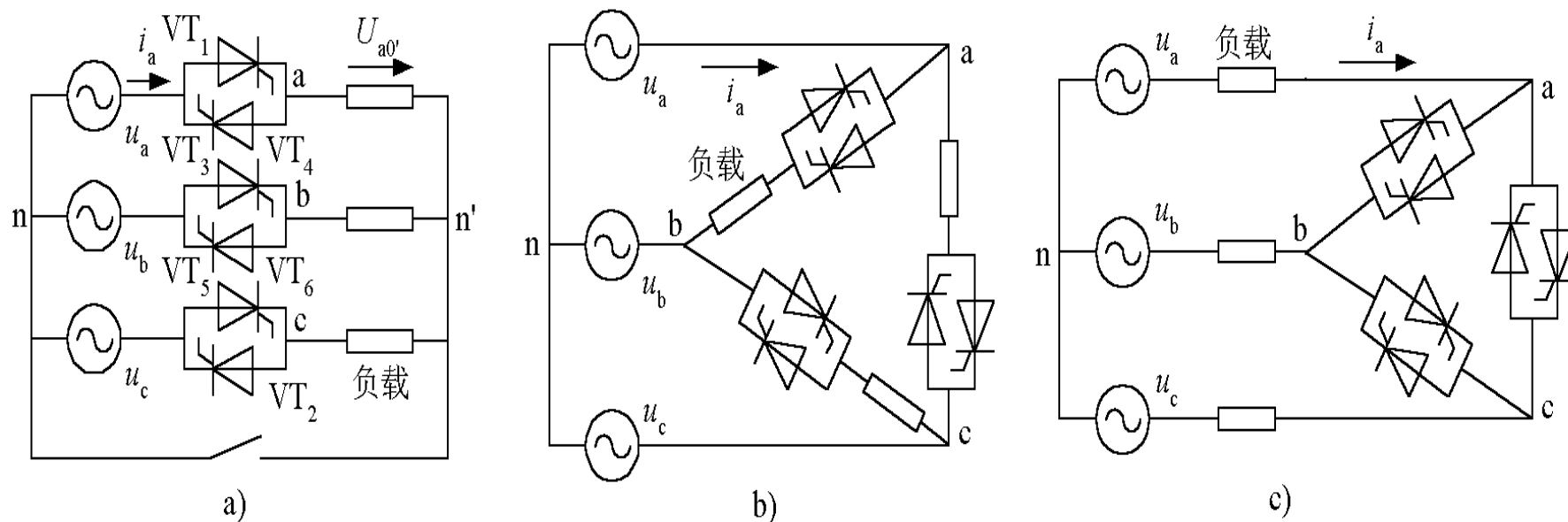


图6-9 三相交流调压电路

a)星形联结 b)支路控制三角形联结 c)中点控制三角形联结

6.1.2 三相交流调压电路

1、星形联结电路

■ 星形联结电路

分为三相三线和三相四线两种情况。

(1) 三线四相(YN)

👉 相当于三个单相交流调压电路的组合，三相相互错开 120° 工作。

👉 基波和3倍次以外的谐波在三相之间流动，不流过零线，3的整数倍次谐波是同相位的，不能在各相之间流动，全部流过零线。

👉 $\alpha=90^\circ$ 时，零线电流和相电流有效值接近。

(2) 三相三线带电阻负载时的工作原理

👉 任一相导通须和另一相构成回路，因此电流通路中至少有两个晶闸管，应采用双脉冲或宽脉冲触发。

👉 触发脉冲顺序和三相桥式全控整流电路一样，为VT1~VT6,依次相差 60° 。

零线电流均值是0
瞬时值不是0

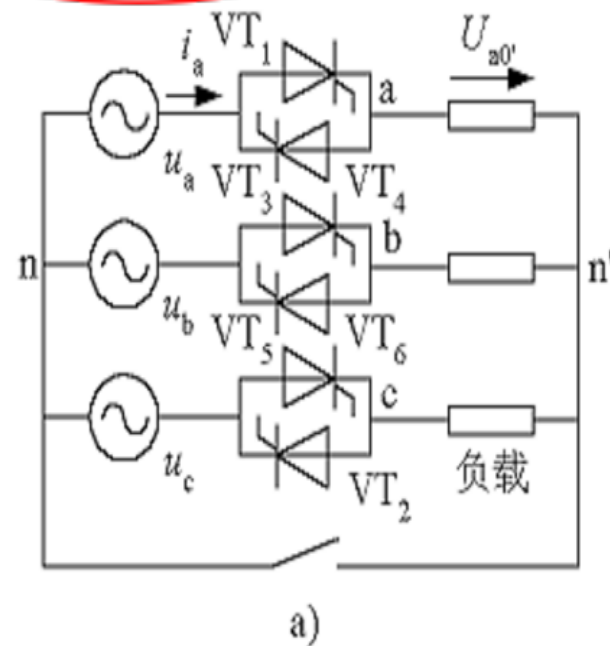


图6-9 a)星形联结

6.1.2 三相交流调压电路

👉把相电压过零点定为开通角 α 的起点，三相三线电路中，两相间导通时是靠线电压导通的，而线电压超前相电压 30° ，因此 α 角的移相范围是 $0^\circ \sim 150^\circ$ 。

👉根据任一时刻导通晶闸管个数以及半个周波内电流是否连续可将 $0^\circ \sim 150^\circ$ 的移相范围分为如下三段

✓ $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 范围内，电路处于三个晶闸管导通与两个晶闸管导通的交替状态，每个晶闸管导通角度为 $180^\circ - \alpha$ ，但 $\alpha = 0^\circ$ 时是一种特殊情况，一直是三个晶闸管导通。

✓ $60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 范围内，任一时刻都是两个晶闸管导通，每个晶闸管的导通角度为 120° 。

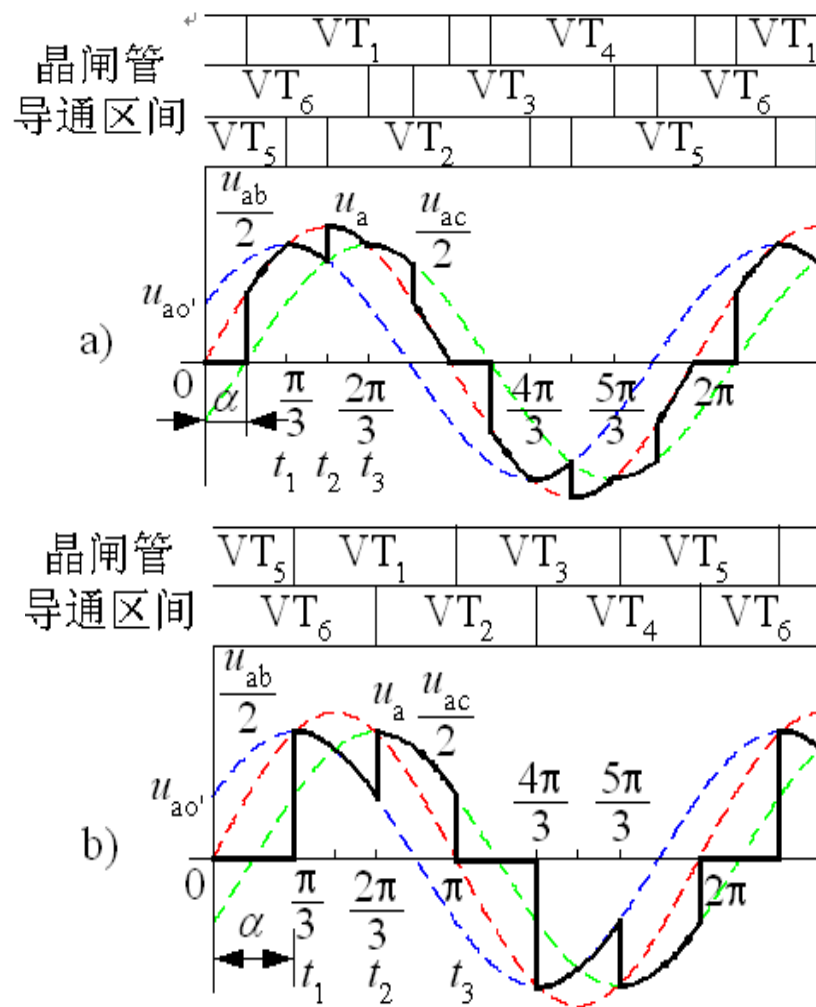


图6-10 不同 α 角时负载相电压波形
a) $\alpha = 30^\circ$ b) $\alpha = 60^\circ$

6.1.2 三相交流调压电路

✓ $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$ 范围内，电路处于两个晶闸管导通与无晶闸管导通的交替状态，每个晶闸管导通角度为 $300^\circ - 2\alpha$ ，而且这个导通角度被分割为不连续的两部分，在半周波内形成两个断续的波头，各占 $150^\circ - \alpha$ 。

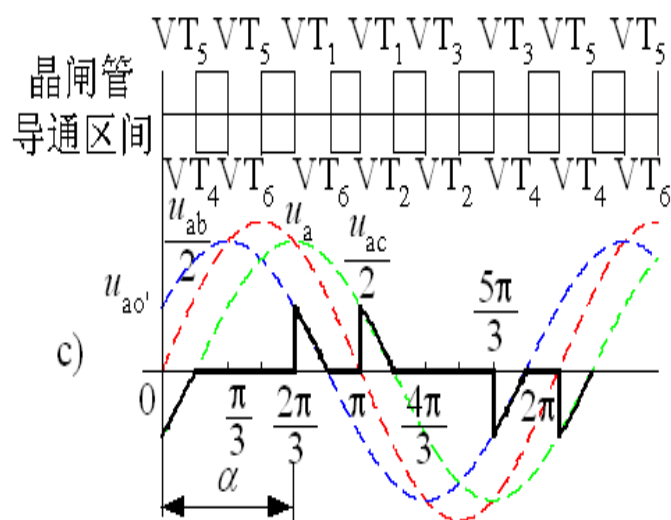


图6-10 不同 α 角时负载相电压波形
c) $\alpha = 120^\circ$

谐波分析

✓ 电流谐波次数为 $6k \pm 1$ ($k=1, 2, 3, \dots$)。

✓ 谐波次数越低，含量越大。

✓ 和单相交流调压电路相比，没有3的整数倍次谐波，因为三相对称时，它们不能流过三相三线电路。

6.1.2 三相交流调压电路

2、支路控制三角联结电路

◆由三个单相交流调压电路组成，分别在不同的线电压作用下工作。

◆单相交流调压电路的分析方法和结论完全适用，输入线电流（即电源电流）为与该线相连的两个负载相电流之和。

◆谐波分析

👉3倍次谐波相位和大小相同，在三角形回路中流动，而不出现在线电流中。

👉线电流中所谐波次数为 $6k \pm 1$ (k 为正整数)。

👉在相同负载和 α 角时，线电流中谐波含量少于三相三线星形电路。

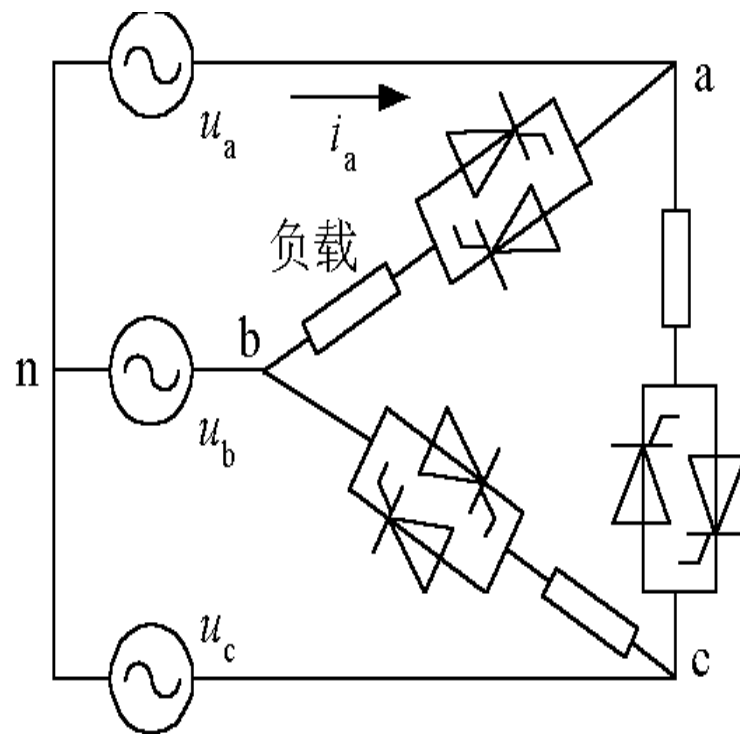


图6-9 三相交流调压电路
b)支路控制三角形联结

6.2 其他交流电力控制电路

6.2.1 交流调功电路(AC power controller)

——以**交流电源周波数**为控制单位

6.2.2 交流电力电子开关(Electronic AC switch)

——对**电路通断**进行控制

6.2.2 交流电力电子开关

- **交流电力电子开关**：把**晶闸管**反并联串入交流电路中，代替机械开关，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。
 - ◆ 通常没有明确的控制周期，只是根据需要控制电路的接通和断开。

6.3 交交变频电路

- **本节讲述：**晶闸管交交变频电路，也称**周波变流器**(Cycloconverter)
- **交交变频电路**——把电网频率的交流电变成可调频率的交流电，属于**直接变频电路**
- **应用：**广泛用于**大功率交流电动机调速**传动系统，实用的主要是三相输出交交变频电路

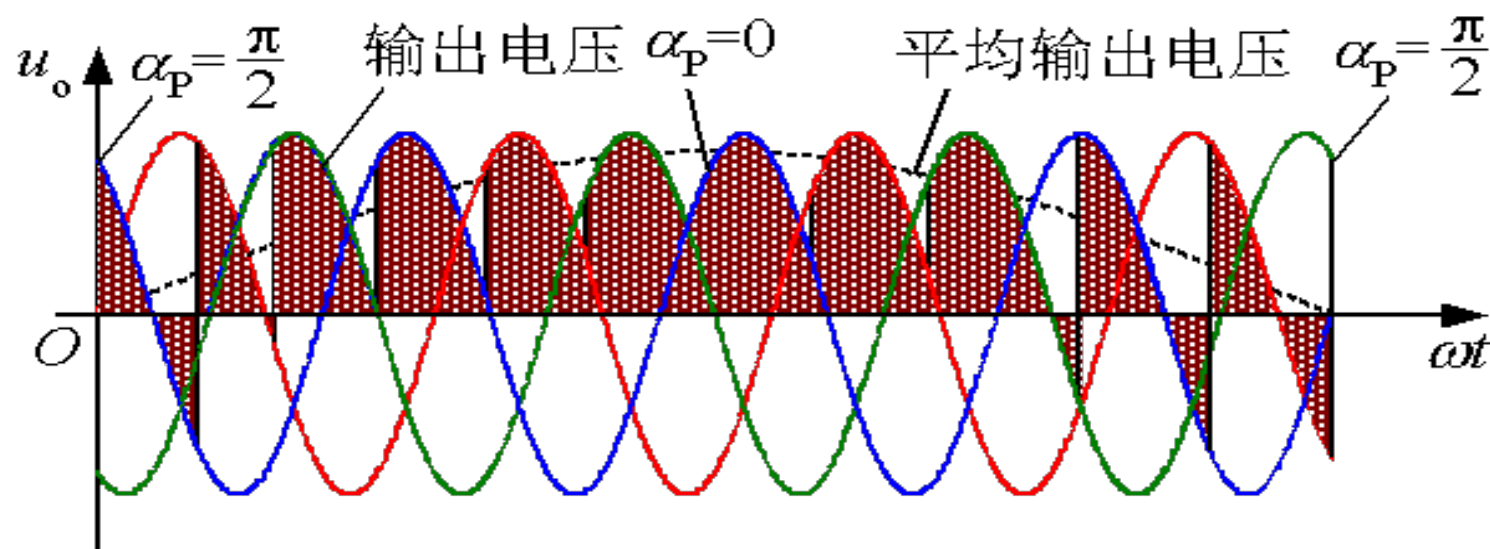
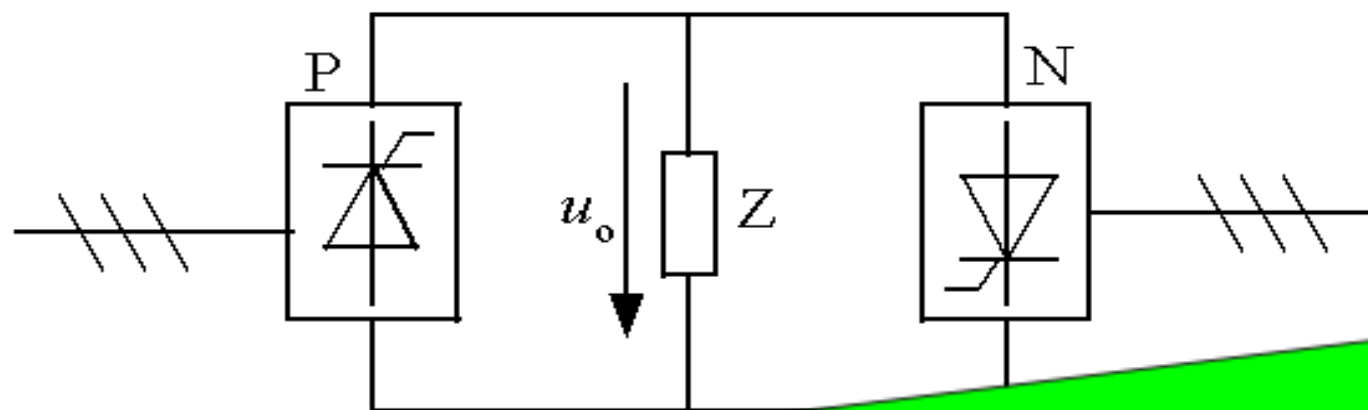
6.3 交交变频电路

6.3.1 单相交交变频电路

6.3.2 三相交交变频电路

6.3.1 单相交交变频电路

1、电路构成



由P
组和
N组
反并
联的
晶闸
管相
控整
流电
路构
成

6.3.1 单相交交变频电路

2、工作原理

👉P组工作时，负载电流 i_o 为**正**，N组工作时， i_o 为**负**。

👉**两组变流器**按一定的**频率交替工作**，负载就得到该频率的交流电

- 改变两组变流器的**切换频率**，就可以改变**输出频率**
 $\square 0$
- 改变变流电路的**控制角**
 \square ，就可以改变**交流输出**

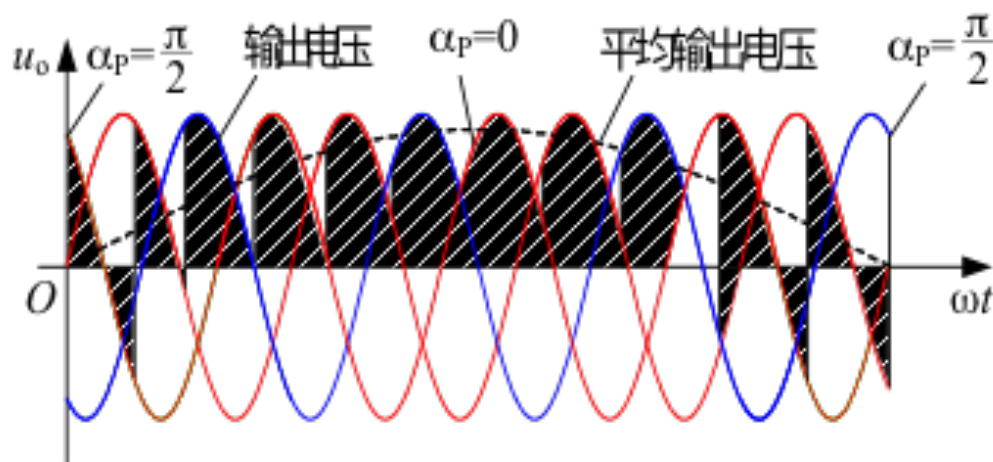
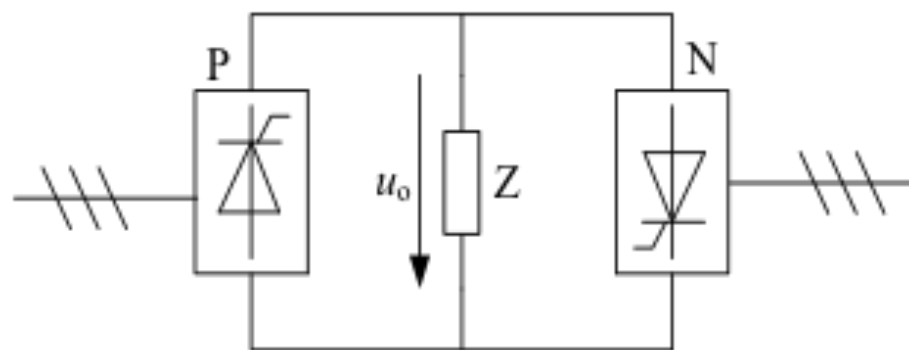
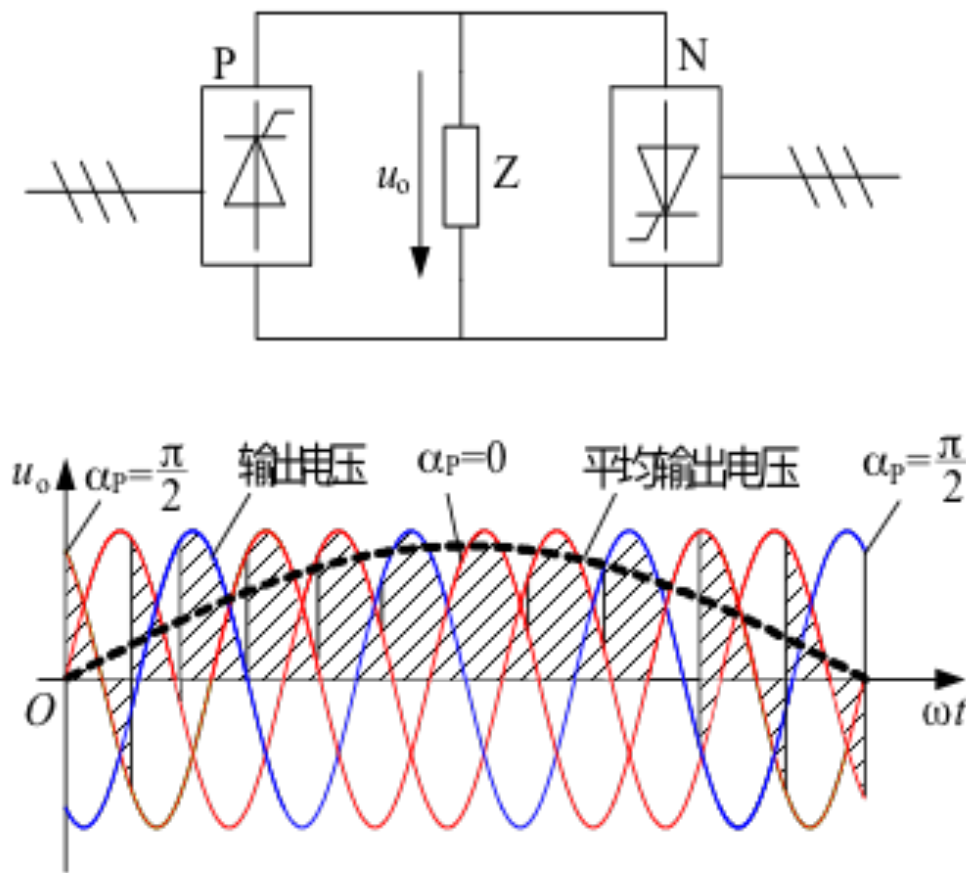


图6-13 单相交交变频电路原理图和输出电压波形

6.3.1 单相交交变频电路

2、工作原理



◆为使 u_o 波形接近正弦波，可按正弦规律对 α 角进行调制。

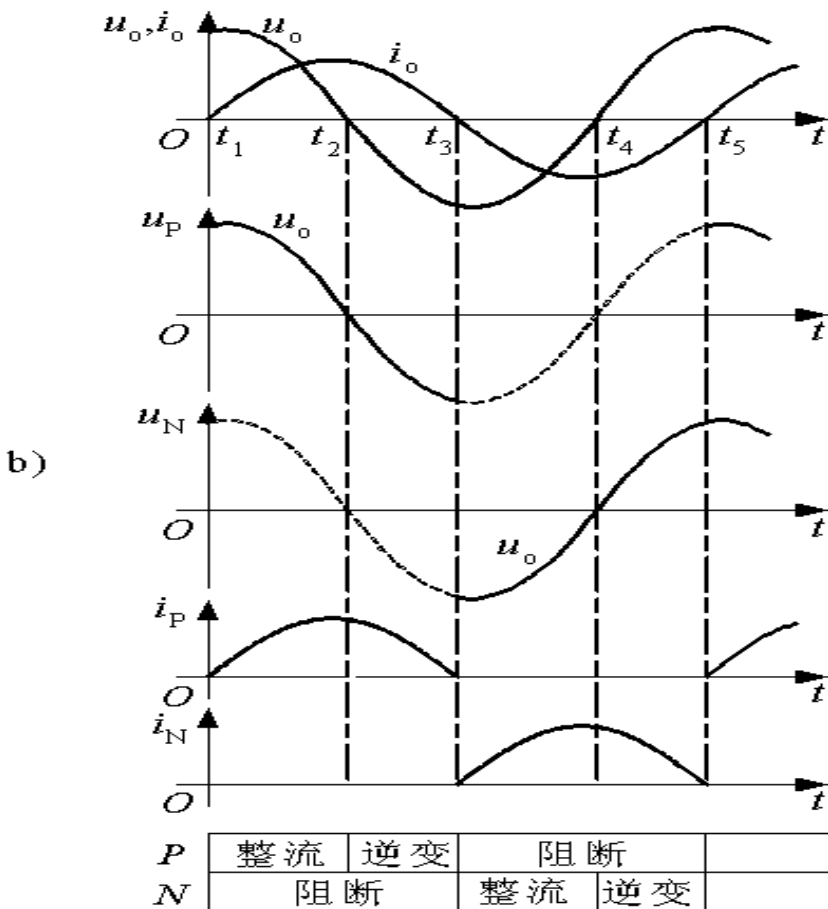
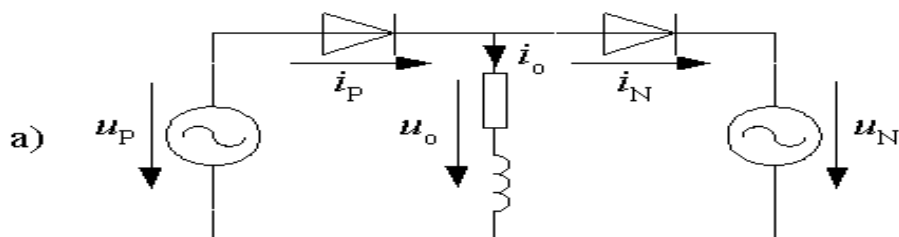
👉在半周期内让P组 α 角按正弦规律从 90° 减到 0° 或某个值，再增加到 90° ，每个控制间隔内的平均输出电压就按正弦规律从零增至最高，再减到零；另外半个周期可对N组进行同样的控制。

👉 u_o 由若干段电源电压拼接而成，在 u_o 的一个周期内，包含的电源电压段数越多，其波形就越接近正弦波。

图6-13 单相交交变频电路原理图和输出电压波形

6.3.1 单相交交变频电路

3、整流与逆变



■ 整流与逆变工作状态

◆ 以阻感负载为例，把电路等效成图6-14a，二极管体现了交流电流的单方向性。

◆ 设负载阻抗角为 φ ，则输出电流滞后输出电压 φ 角，两组变流电路采取**无环流工作方式**。

◆ 工作状态

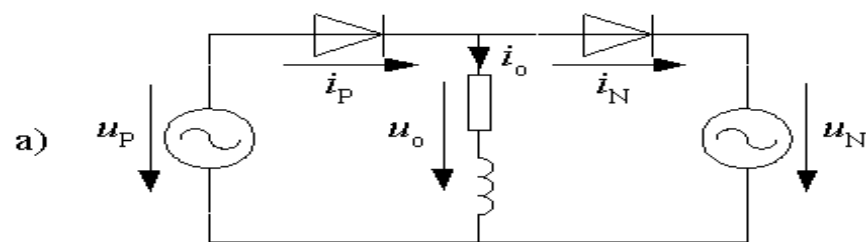
👉 $t1 \sim t3$ 期间： i_o 处于正半周，正组工作，反组被封锁。

✓ $t1 \sim t2$ 阶段： u_o 和 i_o 均为正，正组整流，输出功率为正，**正组整流**。

✓ $t2 \sim t3$ 阶段： u_o 反向， i_o 仍为正，正组逆变，输出功率为负，**正组逆变**。

图6-14 理想化交交变频电

6.3.1 单相交交变频电路



👉 $t_3 \sim t_5$ 期间: i_o 处于负半周, 反组工作, 正组被封锁。

✓ $t_3 \sim t_4$ 阶段: u_o 和 i_o 均为负, 反组整流, 输出功率为正, 反组整流。

✓ $t_4 \sim t_5$ 阶段: u_o 反向, i_o 仍为负, 反组逆变, 输出功率为负, 反组逆变。

◆ 结论

👉 哪组变流电路工作由 i_o 方向决定, 与 u_o 极性无关, 正组或反组。

👉 变流电路工作在整流还是逆变状态, 根据 u_o 方向与 i_o 方向是否相同来确定。

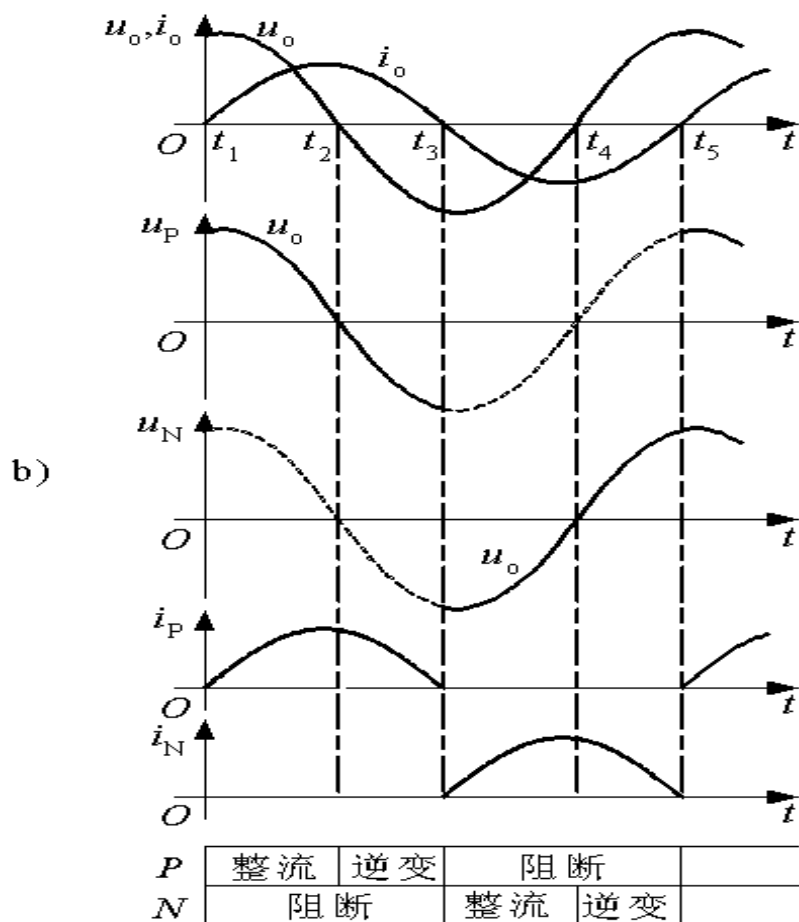


图6-14 理想化交交变频电

6.3.1 单相交交变频电路

◆ 考虑到无环流工作方式下负载电流过零的正反组切换死区时间，一周期的波形可分为6段：

第1段 $i_o < 0$, $u_o > 0$, 为反组逆变；

第2段 电流过零，为切换死区；

第3段 $i_o > 0$, $u_o > 0$, 为正组整流；

第4段 $i_o > 0$, $u_o < 0$, 为正组逆变；

第5段 又是切换死区；

第6段 $i_o < 0$, $u_o < 0$, 为反组整流。

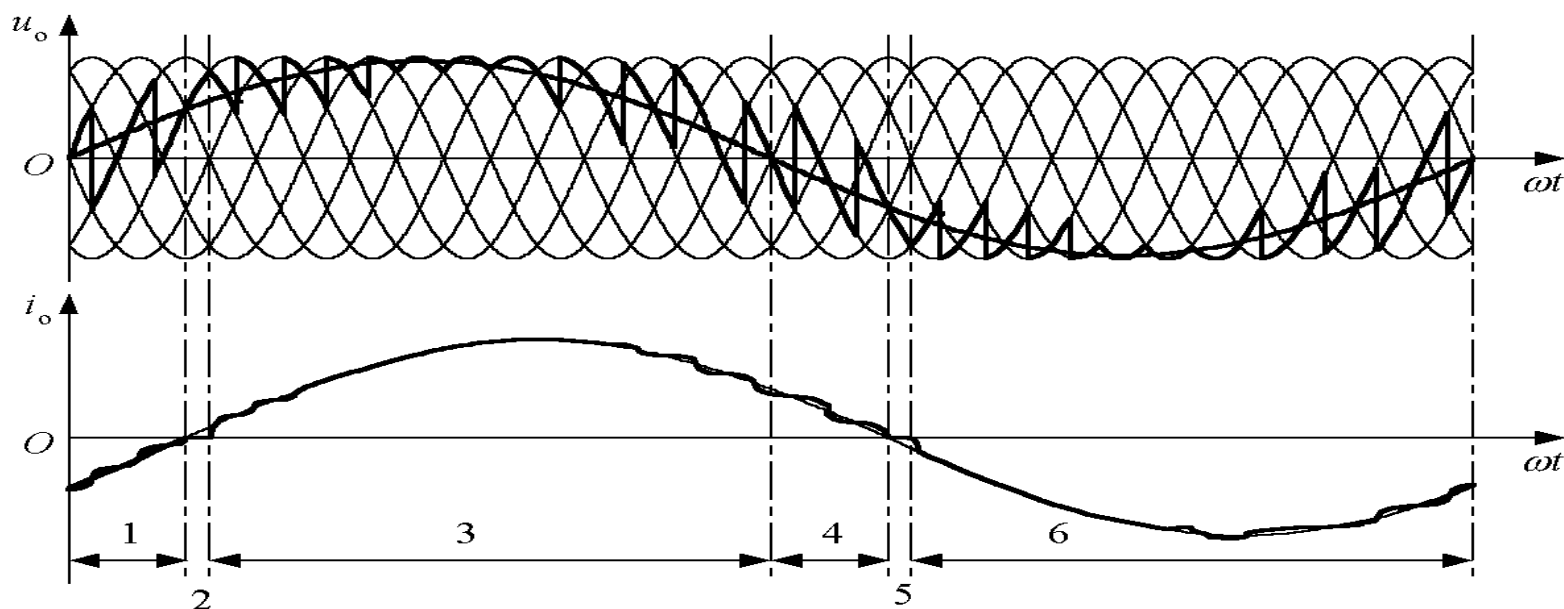


图6-15 单相交交变频电路输出电压和电流波形

6.3.1 单相交交变频电路

■ 输出正弦波电压的调制方法

◆ 主要介绍最基本的余弦交点法。

◆ 用余弦交点法求交交变频电路 α 角的基本公式
每次控制间隔内输出电压的平均值为

$$\bar{u}_o = U_{d0} \cos \alpha \quad (6-15)$$

要得到的正弦波输出电压为

$$u_o = U_{om} \sin \omega_o t \quad (6-16)$$

比较式(6-15)和(6-16)，应使

$$\cos \alpha = \frac{U_{om}}{U_{d0}} \sin \omega_o t = \gamma \sin \omega_o t \quad (6-17)$$

式中， γ 称为输出电压比， $\gamma = \frac{U_{om}}{U_{d0}} (0 \leq \gamma \leq 1)$

因此

$$\alpha = \cos^{-1}(\gamma \sin \omega_o t) \quad (6-18)$$

6.3.1 单相交交变频电路

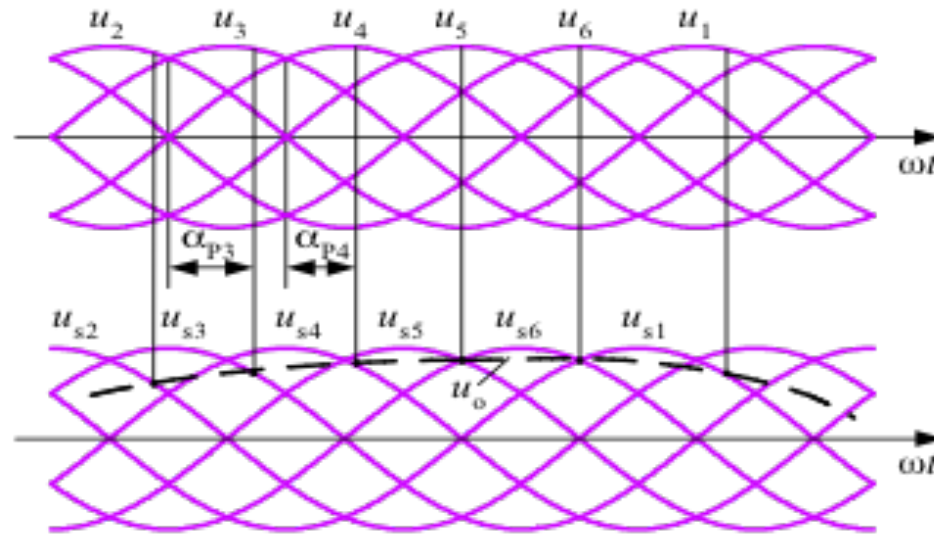


图6-16 余弦交点法原理

◆ 余弦交点法图解

👉 线电压 u_{ab} 、 u_{ac} 、 u_{bc} 、 u_{ba} 、 u_{ca} 和 u_{cb} 依次用 $u_1 \sim u_6$ 表示，相邻两个线电压的交点对应于 $\varphi=0$ 。

👉 $u_1 \sim u_6$ 所对应的同步信号分别用 $u_{s1} \sim u_{s6}$ 表示， $u_{s1} \sim u_{s6}$ 比相应的 $u_1 \sim u_6$ 超前 30° ， $u_{s1} \sim u_{s6}$ 的最大值和相应线电压 $\varphi=0$ 的时刻对应，以 $\varphi=0$ 为零时刻，则 $u_{s1} \sim u_{s6}$ 为余弦信号。

👉 希望输出电压为 u_o ，则各晶闸管触发时刻由相应的同步电压 $u_{s1} \sim u_{s6}$ 的下降段和 u_o 的交点来决定。

6.3.1 单相交交变频电路

◆不同输出 γ 的情况下，在输出电压的一个周期内，控制角 α 随 $\omega_0 t$ 变化的情况如图6-17，图中

$$\begin{aligned}\alpha &= \cos^{-1}(\gamma \sin \omega_0 t) \\ &= \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}(\gamma \sin \omega_0 t)\end{aligned}$$

γ 较小，即输出电压较低时， α 只在离 90° 很近的范围内变化，电路的输入功率因数非常低。

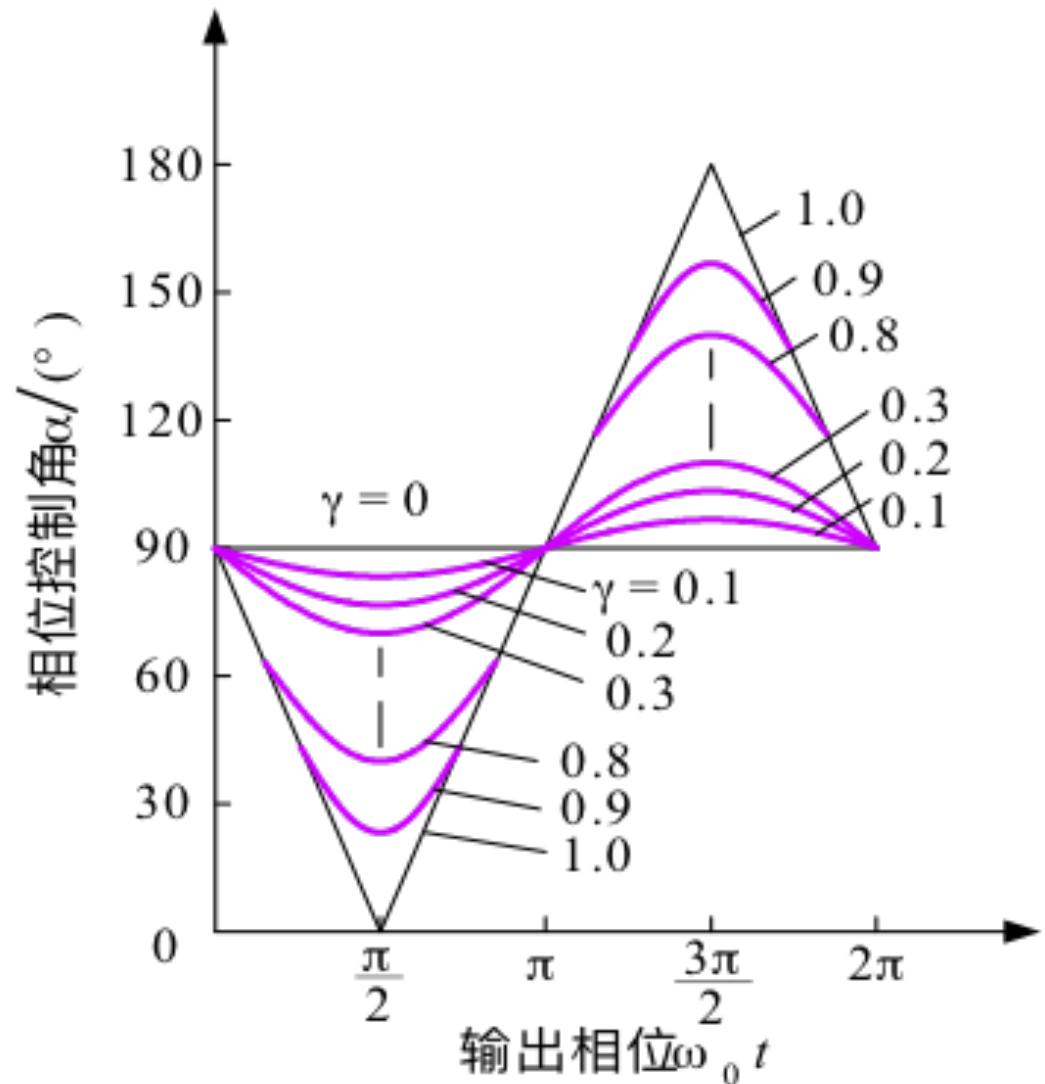


图6-17 不同 γ 时 α 和 $\omega_0 t$ 的关系

6.3.1 单相交交变频电路

4、输入输出特性

◆ 输出上限频率

👉 电网电压段多，输出接近正弦波，输出频率增高时，输出电压一周期所含电网电压段数减少，波形畸变严重，**电压波形畸变**及其导致的**电流波形畸变和转矩脉动**，是限制输出频率提高的主要因素。

👉 就输出波形畸变和输出上限频率的关系而言，很难确定一个明确的界限。

👉 当采用6脉波三相桥式电路时，一般认为输出上限频率不高于电网频率的 **$1/3 \sim 1/2$** ，电网频率为50Hz时，交交变频电路的输出上限频率约为**20Hz**。

6.3.1 单相交交变频电路

4、输入输出特性

◆输入功率因数

☞ 输入电流相位总是滞后于输入电压，需要电网提供无功功率。

☞ 在输出电压的一个周期内， α 角以 90° 为中心而前后变化。

☞ 输出电压比 α 越小，半周期内 α 的平均值越靠近 90° ，位移因数越低；负载功率因数越低，输入功率因数也越低。

☞ 不论负载功率因数是滞后的

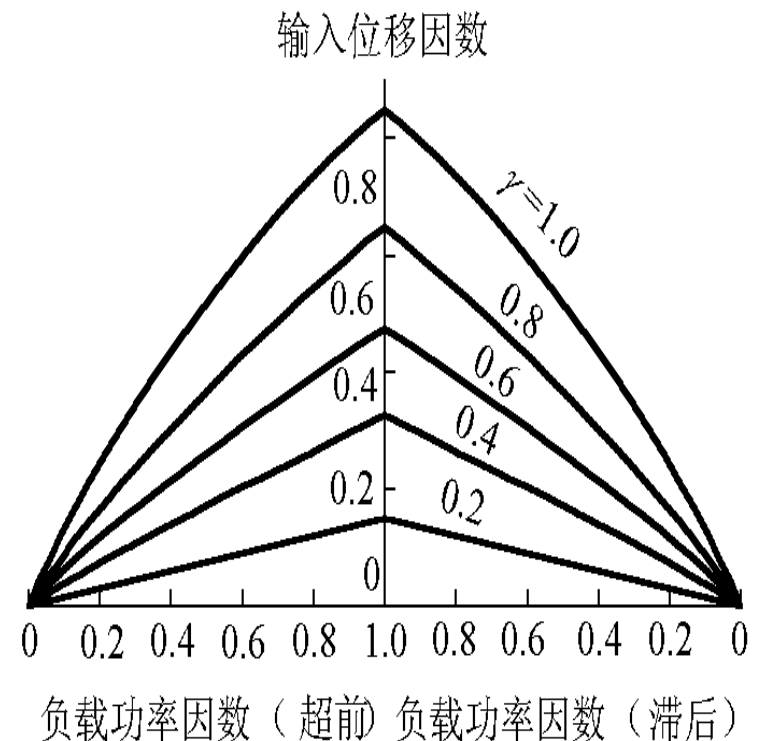


图6-18 交交变频电路的输入位移因数

6.3.1 单相交交变频电路

4、输入输出特性

◆ 输出电压谐波

👉 输出电压的谐波频谱非常复杂，既和**电网频率 f_i** 以及**变流电路的脉波数**有关，也和**输出频率 f_o** 有关。

👉 采用三相桥式电路时，输出电压主要谐波的频率为

$$6f_i \pm f_o, 6f_i \pm 3f_o, 6f_i \pm 5f_o, \dots$$

$$12f_i \pm f_o, 12f_i \pm 3f_o, 12f_i \pm 5f_o, \dots$$

👉 采用无环流控制方式时，由于电流方向改变时死区的影响，将增加 **$5f_o$** 、 **$7f_o$** 等次谐波。

6.3.1 单相交交变频电路

4、输入输出特性

◆输入电流谐波

☞输入电流波形和可控整流电路的输入波形类似，但其幅值和相位均按正弦规律被调制。

☞采用三相桥式电路的交交变频电路输入电流谐波频率为

$$f_{\text{in}} = |(6k \pm 1)f_i \pm 2lf_o| \quad (6-19)$$

和

$$f_{\text{in}} = |f_i \pm 2kf_o| \quad (6-20)$$

式中， $k=1,2,3,\dots$ ； $l=0,1,2,\dots$ 。

6.3.2 三相交交变频电路

交交变频电路主要应用于大功率交流电机调速系统，使用的是三相交交变频电路。

- 由三组输出电压相位各差 120° 的单相交交变频电路组成。

公共交流母线进线方式

- 电路接线方式

输出星形联结方式

6.3.2 三相交交变频电路

1、电路接线方式

式

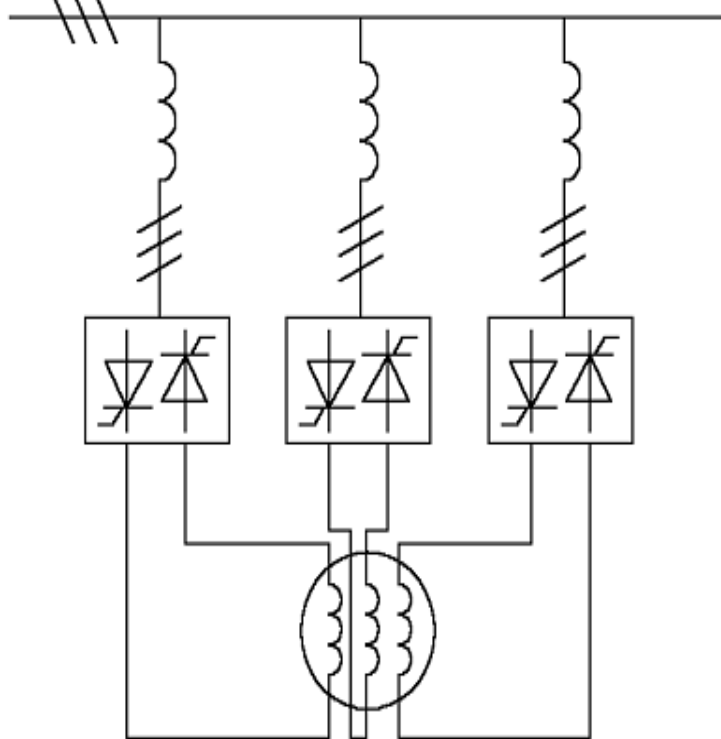


图6-19 公共交流母线进线
三相交交变频电路（简图）

◆ 公共交流母线进线方式

👉 由三组彼此独立的、输出电压相位相互错开 120° 的单相交交变频电路构成。

👉 电源进线通过进线电抗器接在公共的交流母线上。

👉 因为电源进线端公用，所以三组的输出端必须隔离；

👉 主要用于中等容量的交流调速系统。

6.3.2 三相交交变频电路

1、电路接线方式

❖ 输出星形联结方式

- 👉 三组输出端是**星形联结**，电动机的三个绕组也是**星形联结**。
- 👉 因为三组输出联接在一起，其**电源进线必须隔离**，因此用三个变压器供电。
- 👉 构成三相变频电路的六组桥式电路中，至少要有**不同输出相的两组桥中的四个晶闸管**同时导通才能构成回路，形成电流。

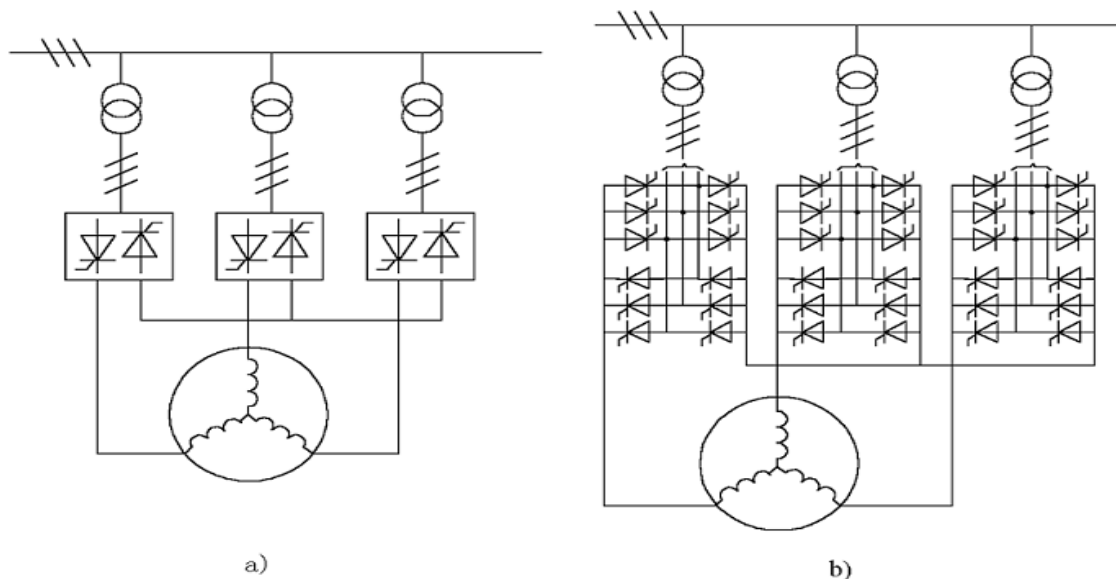


图6-20 输出星形联结方式三相交交变频电路

a) 简图 b) 详图

6.3.2 三相交交变频电路

2、输入输出特性

◆ **输出上限频率**和**输出电压谐波**与单相交交变频电路是一致的。

◆ **输入电流**

☞ 总的输入电流由三个单相电路的同一相输入电流合成而得到。

☞ 有些谐波相互抵消，谐波种类有所减少，总的谐波幅值也有所降低。

☞ 谐波频率为

$$f_{in} = |(6k \pm 1)f_i \pm 6lf_o| \quad (6-21)$$

和

$$f_{in} = |f_i \pm 6kf_o| \quad (6-22)$$

式中 $k=1,2,3,\dots$ ； $l=0,1,2,\dots$ 。

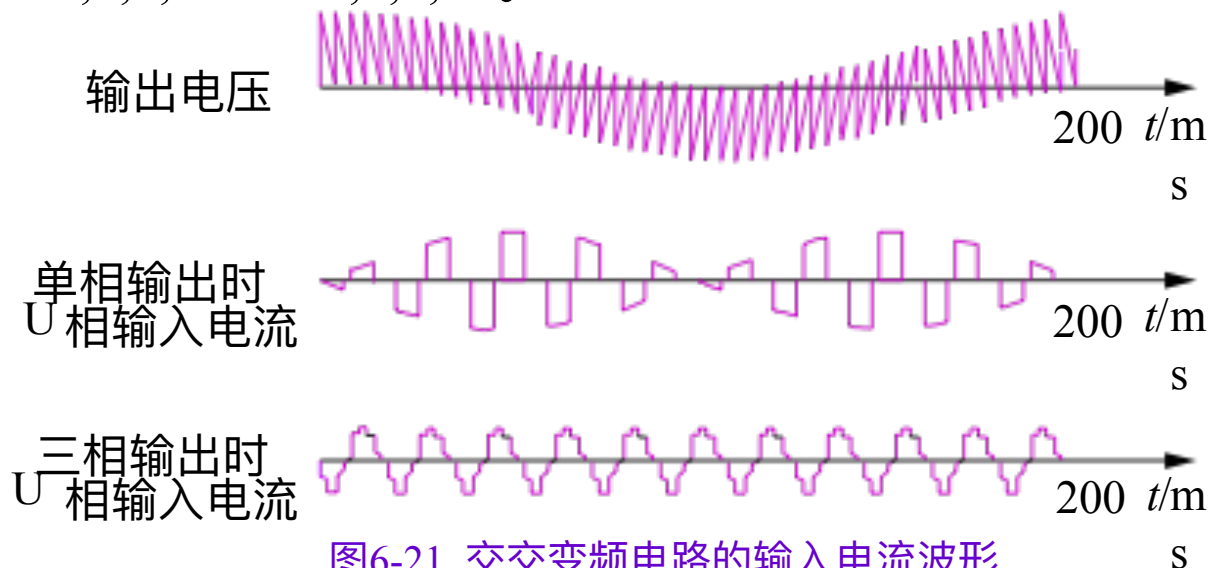


图6-21 交交变频电路的输入电流波形

6.3.2 三相交交变频电路

2、输入输出特性

◆ 输入功率因数

👉 总输入功率因数为

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P_a + P_b + P_c}{S} \quad (6-23)$$

👉 三相电路总的有功功率为各相有功功率之和。

👉 视在功率不能简单相加，而应该由总输入电流有效值和输入电压有效值来计算，比三相各自的视在功率之和要小，因此三相交交变频电路总输入功率因数要高于单相交交变频电路。

👉 从另一个角度看，三相的输入位移因数与单相输出时相同，由于三个单相交交变频电路的部分输入电流谐波相互抵消，三相系统的基波因数增大，使其功率因数得以提高。

👉 功率因数低仍是三相交交变频电路的一个主要缺点。

6.3.2 三相交交变频电路

2、输入输出特性

■改善输入功率因数和提高输出电压

◆基本思路：三相交交变频电路中，各相输出的是相电压，而加在负载上的是线电压，如果在各相电压中叠加同样的直流分量或3倍于输出频率的谐波分量，它们都不会在线电压中反映出来，因而也加不到负载上，利用这一特性可以使输入功率因数得到改善并提高输出电压。

◆直流偏置

👉当负载电动机低速运行时，变频器输出电压幅值很低，各组变流电路的 α 角都在 90° 附近，因此输入功率因数很低。

👉如果给各相的输出电压都叠加同样的直流分量，控制角 α 将减小，但变频器输出线电压并不改变。

6.3.2 三相交交变频电路

2、输入输出特性

◆ 梯形波输出控制方式

👉 相当于给相电压中叠加了三次谐波，也称为**交流偏置**。

👉 使三组单相变频器的输出电压 $u_{AN'}$ 均为梯形波（也称准梯形波），梯形波的主要谐波成分是**三次谐波**，在线电压中，三次谐波相互抵消，结果线电压 u_{AB} 仍为**正弦波**。

👉 电路工作在高输出电压区域（即梯形波的平顶区）时间增加， α 角较小，因此输入功率因数可得到改善。

👉 可以使变频器的输出电压提高约**15%**。

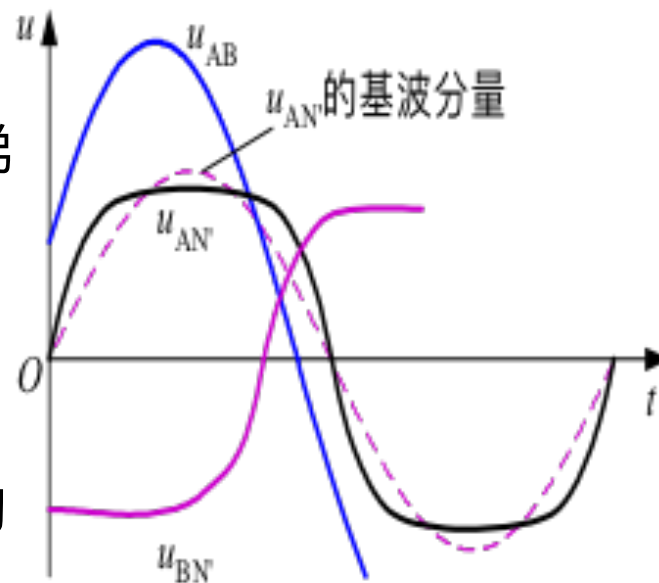


图6-22 梯形波控制方式的理想输出电压波形

6.3.2 三相交交变频电路

- 交交变频电路是一种**直接变频电路**。
 - ◆ 和交直交变频电路比较，优点是
 - ☞ 只用**一次**变流，效率较高。
 - ☞ 可方便地实现**四象限**工作。
 - ☞ 低频输出波形接近**正弦波**。
 - ◆ 缺点是
 - ☞ 接线复杂，如采用三相桥式电路的三相交交变频器至少要用**36**只晶闸管。
 - ☞ 受电网频率和变流电路脉波数的限制，**输出频率较低；输入功率因数较低**。
 - ☞ 输入电流**谐波**含量大，频谱复杂。
 - ◆ 交交变频电路主要用于**500kW或1000kW以上的大功率、低转速**的交流调速电路中，目前已在轧机主传动装置、鼓风机、矿石破碎机、球磨机、卷扬机等场合获得了较多的应用，既可用于异步电动机传动，也可用于同步电动机传动。

本章小结

■本章的要点如下

- ◆交流—交流变流电路的分类及其基本概念。
- ◆单相交流调压电路的电路构成，在电阻负载和阻感负载时的工作原理和电路特性。
- ◆三相交流调压电路的基本构成和基本工作原理。
- ◆交流调功电路和交流电力电子开关的基本概念。
- ◆晶闸管相位控制交交变频电路的电路构成、工作原理和输入输出特性。
- ◆各种交流—交流变流电路的主要应用。
- ◆矩阵式交交变频电路的基本概念。