

仅内部使用 郭小舟老师

电力电子技术

Power Electronics

西南交通大学



第四章 交流调压与交交变换

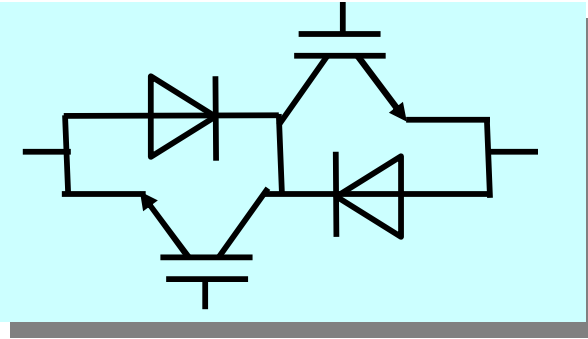
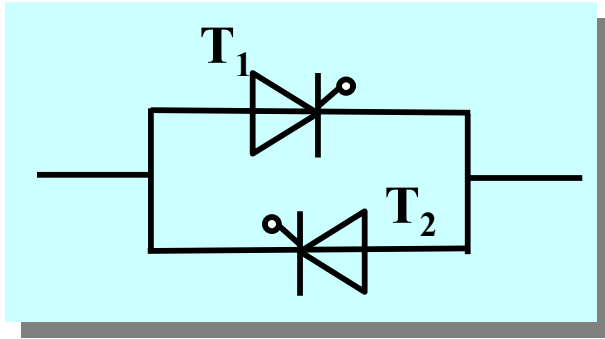
在很多场合需要采用“半导体交流开关”来控制交流电。它有如下优点：不会产生电弧、高速、无噪声、体积小重量轻。使用安装条件限制少适用于特殊环境

半导体交流开关的用途：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

另一类用途：交流功率控制。主要有整周期功率控制如加热与相控功率控制

交交直接变频：分为传统电网换相（相控）与高速自关断PWM两种。后者是一种国内外正在努力研究的一种很有前途的方法。它也称矩阵变换器

交流开关的种类：1. 双向晶闸管。它是将两个晶闸管反并联，集成在一个器件中。2. 采用自关断高速开关组合，构成交流开关。这两种开关的结构如下



在双向晶闸管构成的交流调压电路中，晶闸管的导通与关断要满足导通、维持导通与关断条件。它要依靠电网工作。而后一种则不需要依靠电网来实现电路的换相。所以有更大的控制自由度。可实现很复杂很先进的变换。

目前交交变换发展迅速。但本教材仍以相控为主

第1节 单相交流调压电路

1. 电阻负载

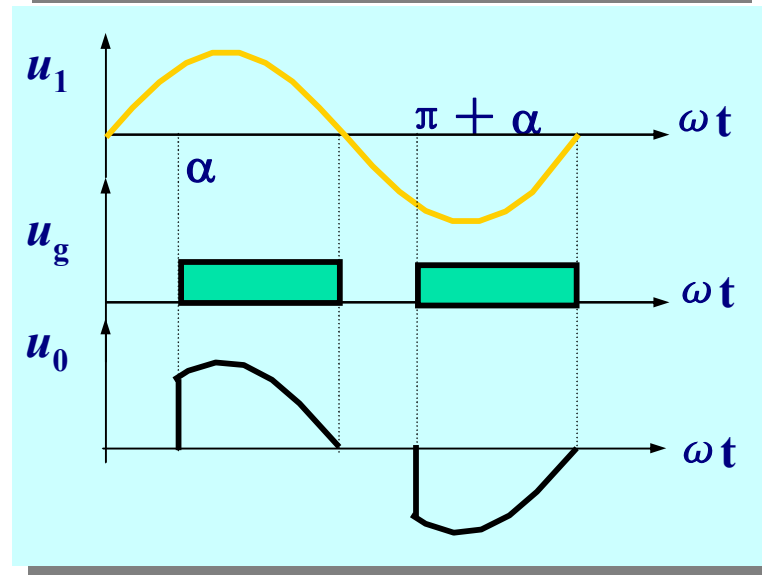
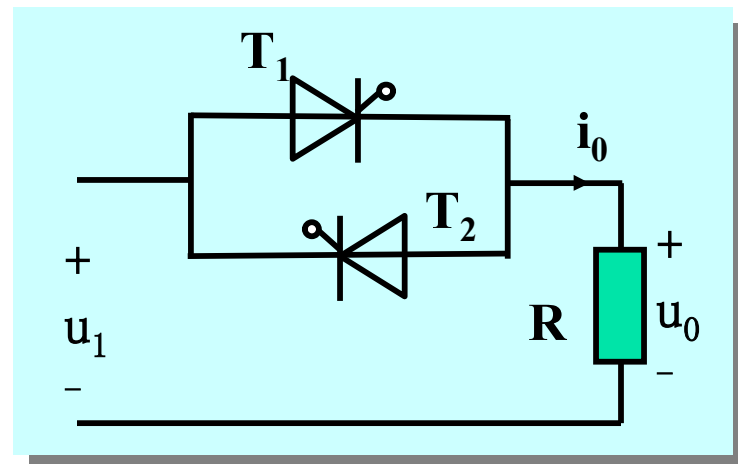
根据晶闸管的导通、维持导通与关断条件，电路工作波形如图。负载电压有效值：

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

$$= U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

负载电流有效值： $I_o = U_o / R$

电路的功率因数 $\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U_o I_o}{U_1 I_o} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$

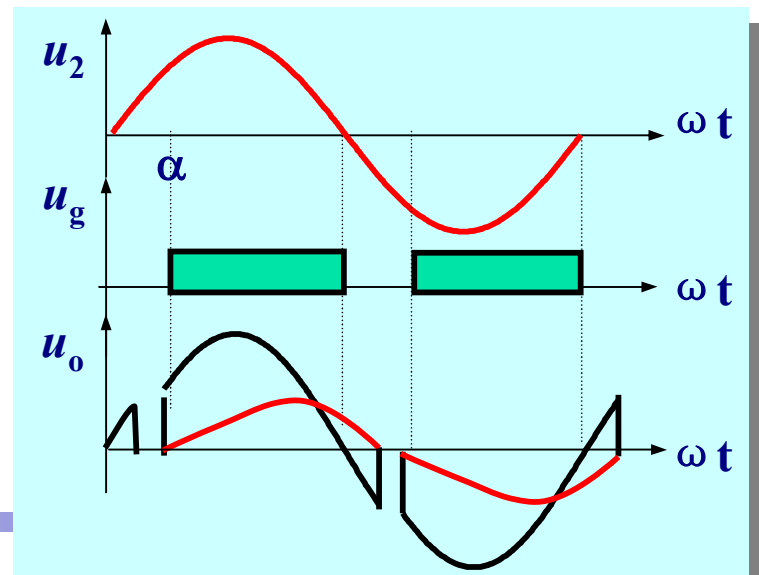
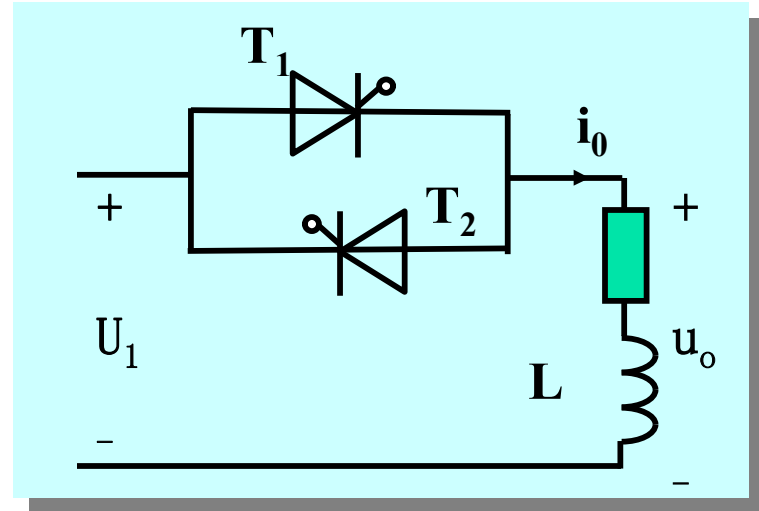


电阻负载时移相范围 $0 - \pi$ ，当 $\alpha = 0$ 时交流开关相当于一 条短路的导线。 $\alpha = \pi$ 相当于开路。

2. 电阻电感负载

当正半周 T_1 导通后，电感储能。 U_1 过零， L 储能释放 T_1 继续导通。 T_1 的导通时间与负载的阻抗角 φ 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。否则，电路将不可控制。

当 T_1 导通时，根据KVL有电路方程：



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

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

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

$$\varphi = \tan^{-1}(\omega L / R) \quad \text{称负载阻抗角}$$

设晶闸管导通角为 θ ，当 $\omega t = \alpha + \theta$ 时， $i_o = 0$ 代入 i_o 式

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

对上式的讨论:

1) $\varphi = 0$ 。即纯电阻负载。方程右边为零，所以 $\alpha + \theta = \pi$ ，晶闸管只能导通到 π 点。

2) $\varphi \neq 0$, $\alpha > \varphi$ 。此时, $\theta < \pi$ 。电流断续, 可以调压。电流非正弦。一般情况下都是这种工况。

3) $\alpha = \varphi$, $\theta = \pi$ 。两个晶闸管相当于两个二极管, 电路无调压作用。电流正弦。

4) $\alpha < \varphi$ 。电流连续, 电路没有调压的作用。此时电流为正弦。

结论: 为使交流调压电路在电感电阻负载时仍有调压的能力应当使 $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ 。

晶闸管电流与负载电流有效值的计算

输出电压有效值

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

当已知 φ 、 α 可由前式求出 θ ，就可以解出 U_o 。

晶闸管的有效值电流：将推导出的 i_o 的表达式按有效值的定义作积分：

$$I_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} i_o^2(\omega t) d(\omega t)} = \frac{U_1}{Z} \sqrt{\frac{\theta}{\pi} - \frac{\sin\theta \cos(2\alpha + \varphi + \theta)}{\pi \cos\varphi}}$$

若已知负载性质和控制角，通过式（*）可计算出 θ 再根据上式即可计算出 I_o 的值。

一般将式（*）预先计算好做出曲线，计算时采用查表的方法求 θ 。也有的书将上式中根号一项预先计算好，绘成曲线。计算时根据阻抗角与控制角直接查表。

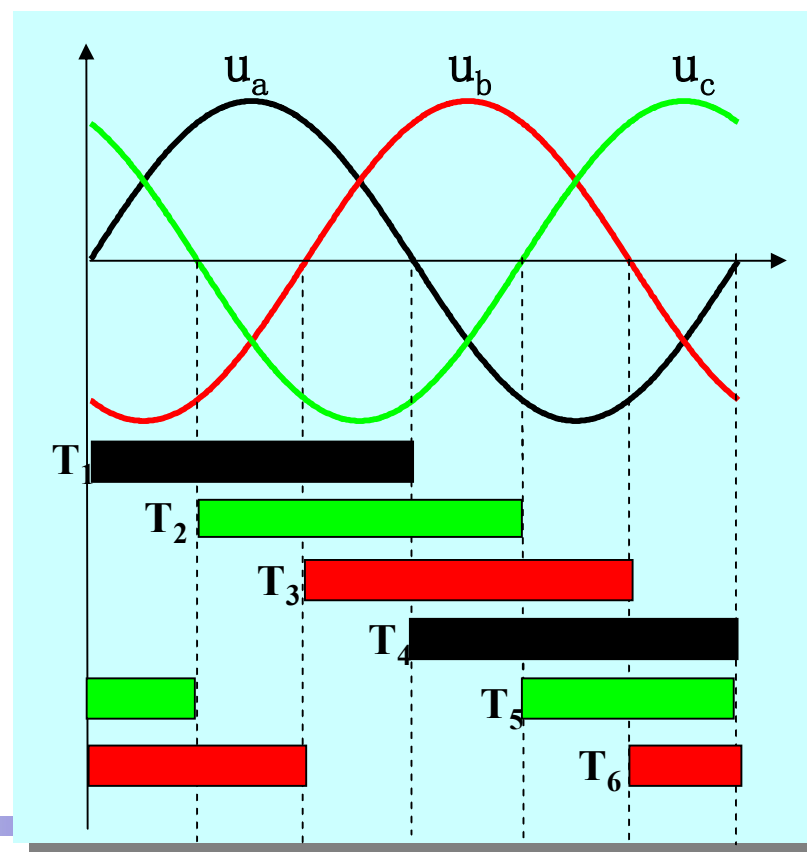
本教材不要求计算，计算方法略。

第2节 三相交流调压电路

三相调压电路有多种接线方法。交流开关的结构也有两种：二个都是晶闸管；一个晶闸管与一个反并联二极管。它们分别适用于不同的场合。这里只研究负载星接电路。

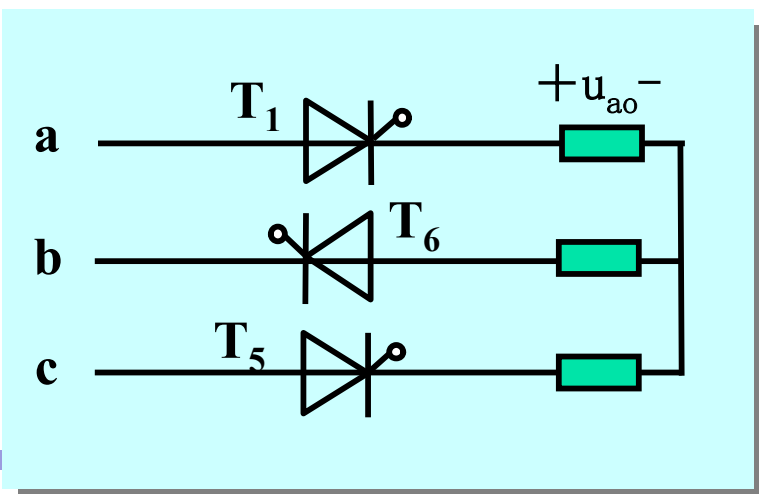
控制信号的安排与整流电路不同。控制角起算点在电源电压过零处。为使电路可靠工作，采用宽脉冲。由于设有零线每相电流必须与另一相或两相构成回路。

当 α 为0时，例如，在区间1， T_1T_5 与 T_6 形成回路。



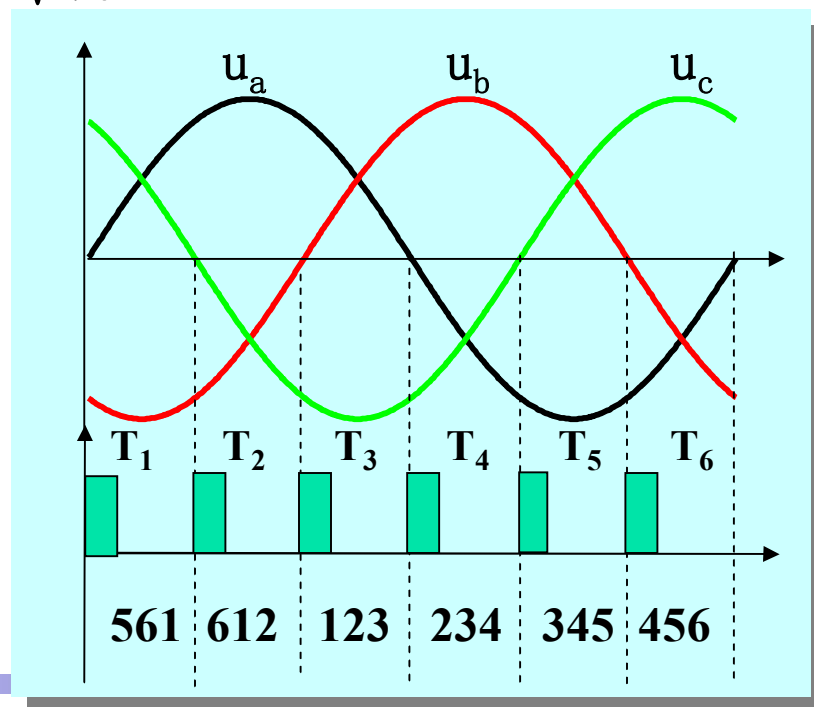
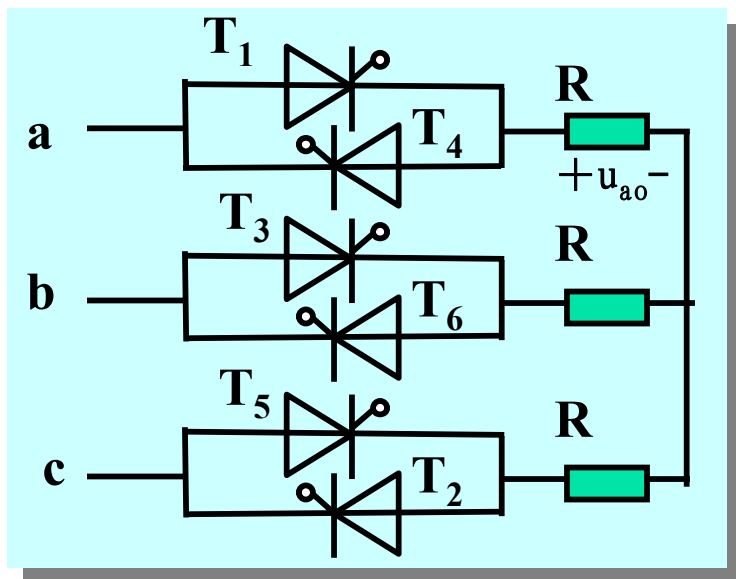
为方便理解，将晶闸管换成二极管。在电阻负载时，在相电压的过零点相应的二极管导通与关断。当 α 为0时工作顺序是 $T_{123} - T_{234} - T_{345} - T_{456} - T_{561} - T_{612}$ 。

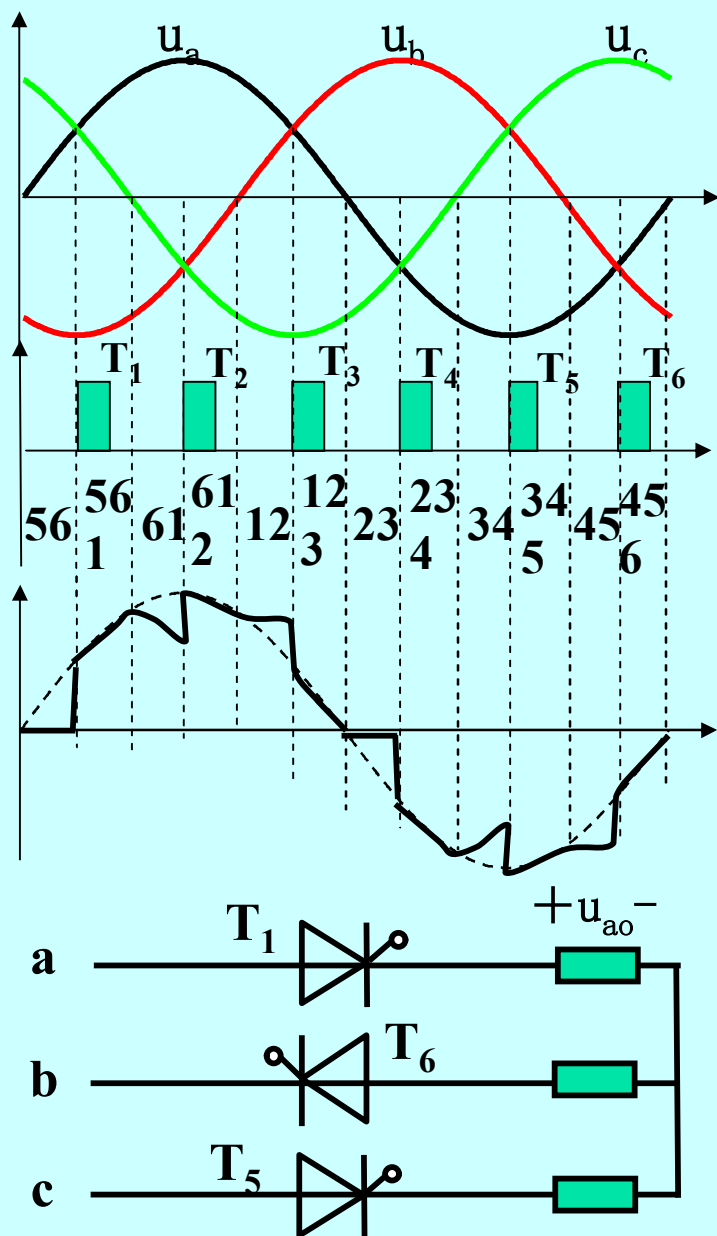
1. 电阻负载：为求出负载上电压与电流的有效值应当首先确定负载上的电压波形。设 $\alpha = 0$ ，以第一个区域即 T_{561} 为例。由于 $u_{ab} > 0$ 和 $u_{cb} > 0$ ， $T_5 T_6 T_1$ 可以导通；参考等效电路和三相电势波形。 $T_5 T_6 T_1$ 导通后由于负载对称，负载电压也就对称，它们就是相电压。在c相过零点，由于 u_c 为零，所以 T_5 因其电流为零而关断。而 T_2 因满足导通条件而导通



这样电路进入第二个区域，即 T_{612} 导通状态。其它状态的分析相同。

从上述分析知，当在任意时刻有分属不同相的三个开关导通时，由于负载对称，所以负载电压也对称。负载中点与电源中点等电位，输出波形是正弦波。电路按相电压的规则换相。

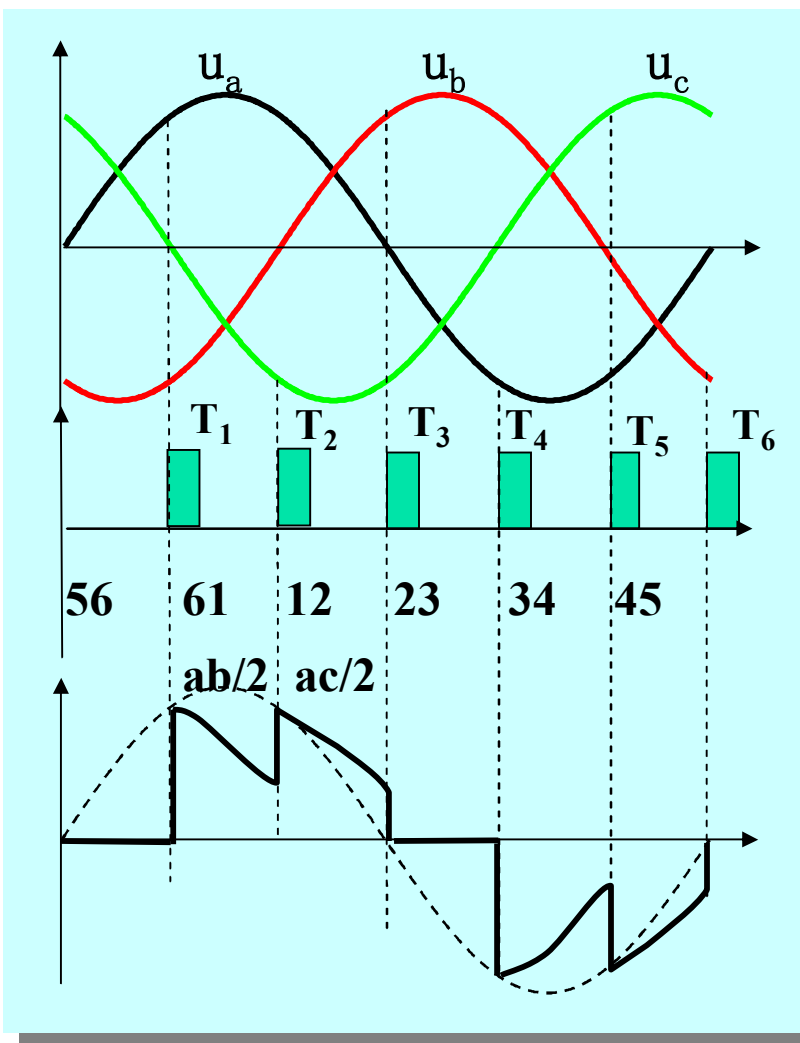




当 $\alpha = 30^\circ$ 时触发脉冲的安排如图。在区域1，由于 $u_{cb} > 0$ ， T_{56} 导通（宽脉冲）。因a相不工作所以 $u_{a0} = 0$ 。到区域2， $u_{AK1} = 3u_a/2 > 0$ ，所以 T_1 导通。由于三管导通负载对称，所以 $u_{a0} = u_a$ 。当c相电压过零时，由于 T_5 的电流为零而关断。 T_{61} 继续导通，电路进入区域3。

从上述分析知，当只有二个开关导通时，输出电压是线电压的一半。电路按线电压的规则工作。

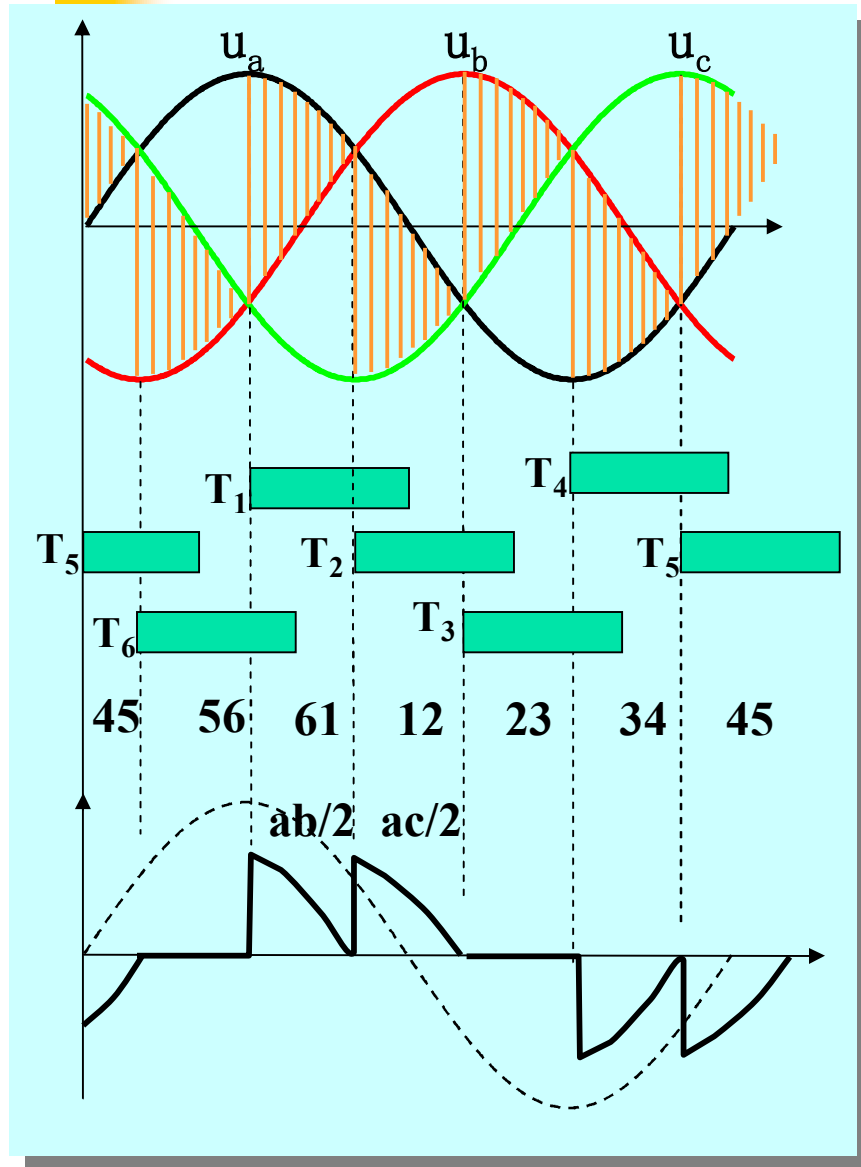
当 α 大于 60° 后，在任意时刻只有两个晶闸管导通，电路的工作情况如下：以 α 等于 60° 为例。控制信号的



安排如图。在区域1， T_{56} 导通。 T_1 断开，a相输出为零。当 T_1 导通时（导通条件），电路在这瞬间是三个开关导通，结果 T_5 立刻关断。电路中只有 T_{61} 导通。

注意到 $\alpha = 60^\circ$ 是临界情况。当 $\alpha < 60^\circ$ 时有三个开关导通的情况；当 $\alpha > 60^\circ$ 时就只有二个开关导通了。

其它区域的分析与此类似。电路a相输出波形如图



$\alpha = 90^\circ$ 时的控制信号布置与波形如图。要说明的是电路实际上是采用的宽脉冲触发。

当 T_{16} 导通，由于回路中电压大于零，电路将一直导通到线电压为零点。此时晶闸管才能满足关断条件。由于a相仍在正半周其触发存在，所以 T_{12} 可以导通，电路过渡到下一状态。当 T_{23} 工作时由于a相 T_1 不工作，其输出为零。

当 α 大于 150° 晶闸管不能满足导通条件。所以电路的移相范围： $0-150^\circ$ 。在三相调压电路中输出波形复杂有效值计算也很复杂。一般要根据波形进行计算。计算方法：查表法。本书不作查表计算要求。

2. 电阻电感负载：电路的分析方法依照单相电路进行。其分析与计算都比较难，本书略去了这部分。

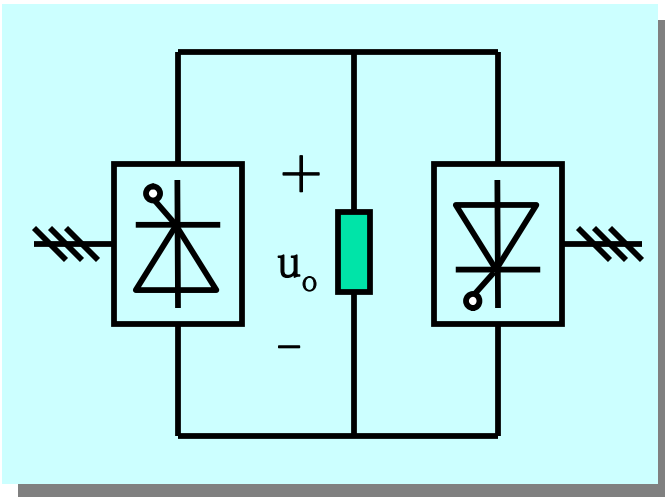
第3节 相控交流-交流变频电路

交交变换也称为周波变换。它直接将一种频率的交流电变换成另一种频率的交流电。它没有中间直流环节，只用一次变换就实现了变频，所以效率高。在近年来出现了由全控开关构成的直接变频电路，称矩阵变换电路。它实现了输入与输出电流的正弦化。功率因数为1。电路可四象限运行，能量双向流动，

没有中间电容或电感，电路简单可靠，容易实现模块化。是公认为最有前途的变换电路。

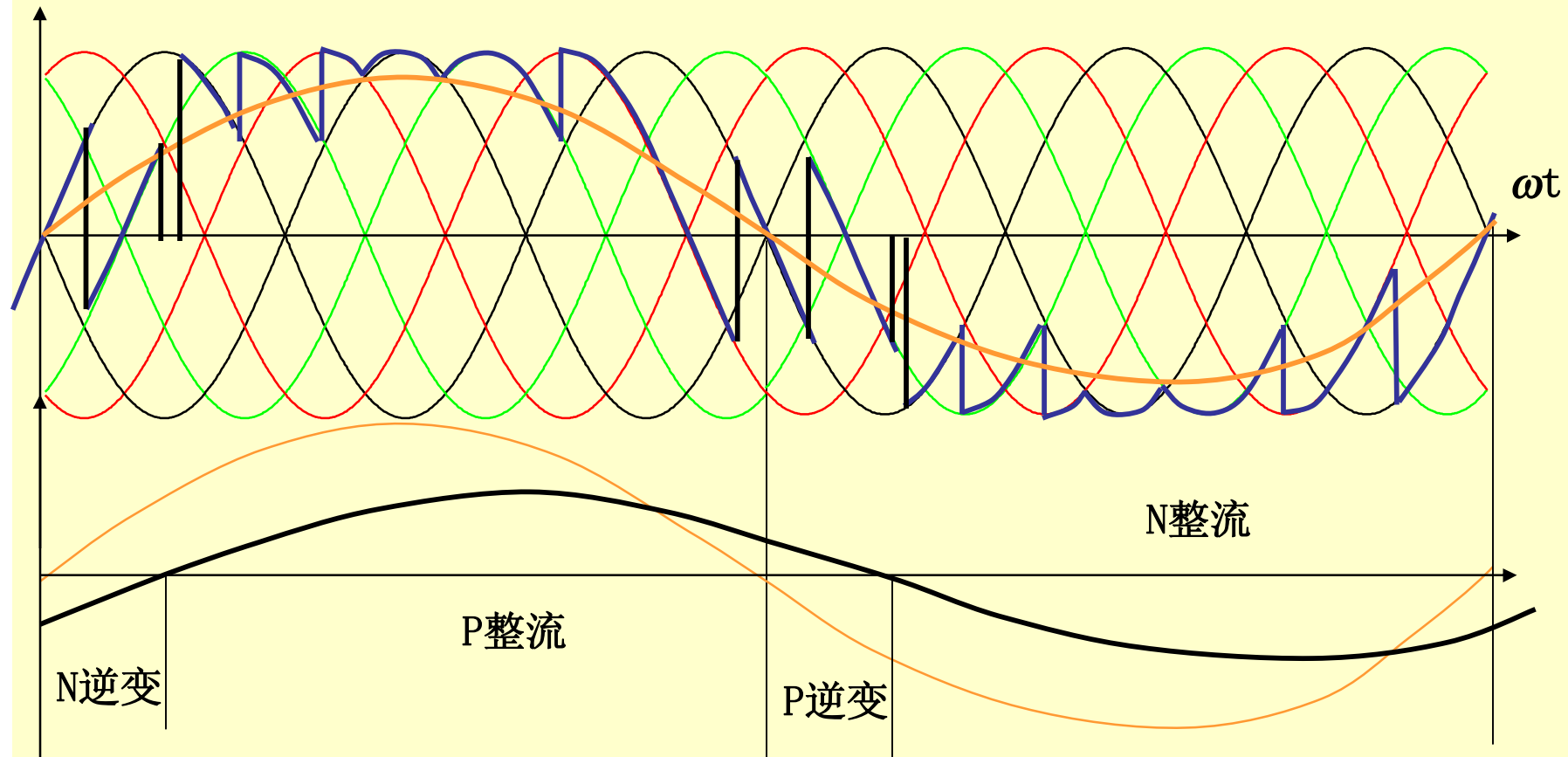
单相控交-交变频电路的基本结构与原理

从相控整流电路知，当调节控制角 α 时可以调节输出电压的大小。将两台整流器反并联后给一个负载供电

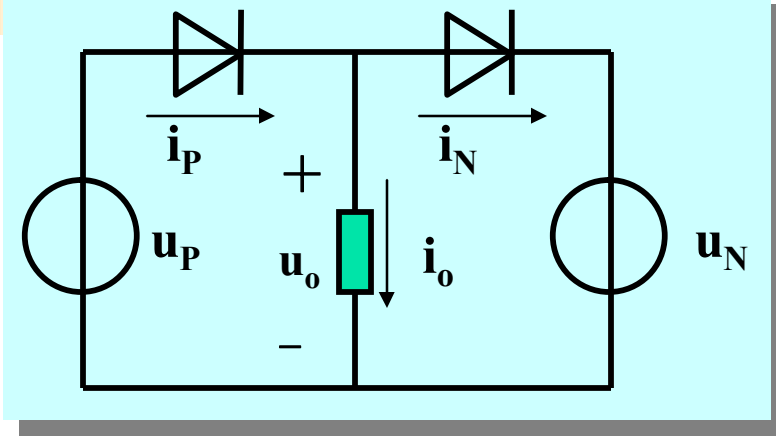


正组整流器工作时，负载的电压为正；而负组整流器供电时负载的电压为负。若正负组电压对称，则负载上只有交流电压。这样三相交流就变换成了单相交流电压了。

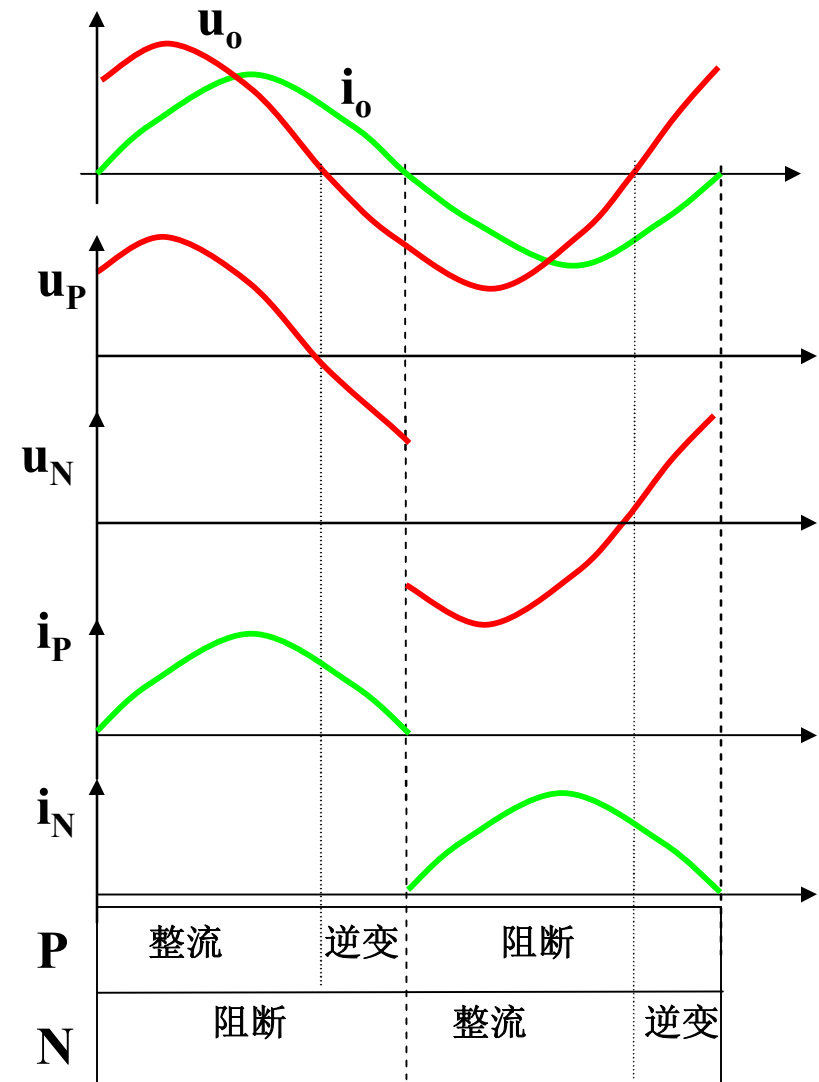
如果在一个周期中让控制角 α 按正弦规律变化那么就可以得到近似正弦的输出电压波形。晶闸管的换相与整流时相同。它们依靠电网通、断。



由于晶闸管的单向导电性，如果负载电流为正电压为负，只能让正组整流器工作于逆变状态；同样，若负载电流为负时，负组整流器必须工作于逆变状态。



下边对此进行解释：在区域1中 i_o 、 u_o 均为正，故正组整流输出功率为正。区域2中 i_o 为正但 u_o 已反向，故正组逆变，输出功率为负。区域3中 i_o 、 u_o 均为负，负组整流；区域4中 i_o 为负 u_o 为正，它工作在逆变状态



从以上分析看出，在一个周期中交交变频器有四种工作状态。负载电流的方向决定哪组变流器工作而与输出电压的极性无关。变流器工作在整流还是逆变则由输出电压与输出电流的方向是否相同来确定。

此外，从电路中看出，为防止两组变流器间的环流，正组工作时负组必须封锁，反之也一样。这种方式称无环流方式。

习题与作业P173 4.2、4.4

例1 单相调压电路电阻负载。若 $\alpha = 0$ 送出最大功率试求80%与50%最大功率时的控制角 α 。

解 $\alpha = 0$ 时电阻两端电压即为电源电压。所以有功

$$P_m = U_O I_O = U_1^2 / R$$

当 $P_1 = 0.8P_m$ 时，控制角为 α ，即：

$$P_1 = \frac{U_o^2}{R} = \frac{U_1^2}{R} \left(\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi} \right) = 0.8 \frac{U_1^2}{R}$$

就是：

$$\left(\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi} \right) = 0.8$$

解这个超越方程，求出 $\alpha = 60^\circ$

当 $P_1 = 0.5P_m$ 时，即：

$$P_1 = \frac{U_o^2}{R} = \frac{U_1^2}{R} \left(\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi} \right) = 0.5 \frac{U_1^2}{R}$$

就是：

$$\left(\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi} \right) = 0.5 \quad \alpha = 90^\circ$$

例2单相调压电路 $U_1 = 2300$ 伏, $R = \omega L = 2.3\Omega$, 求 α 的范围、最大有效值电流、最大功率和功率因数。

解
$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} = \frac{\pi}{4}$$

所以 α 最小为 $\pi/4$, 最大为 π 。

最大有效值电流发生在 $\alpha = \phi$ 。此时电流为正弦

$$I_o = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{2300}{\sqrt{2.3^2 + 2.3^2}} = 707(A)$$

最大功率
$$P_{\max} = I_o^2 R = 707^2 \times 2.3 = 1150 (kW)$$

功率因数
$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_o^2 R}{U_1 I_o} = \frac{1150 \times 10^3}{2300 \times 707} = 0.707$$