

第五章 无源逆变电路

从直流电到交流电的变换称逆变。分为有源与无源逆变两类。

有源逆变的特点：逆变产生的交流电被反馈回交流电网。依靠交流电源，晶闸管完成变换过程。产生的交流电的频率均被强制为电网频率。

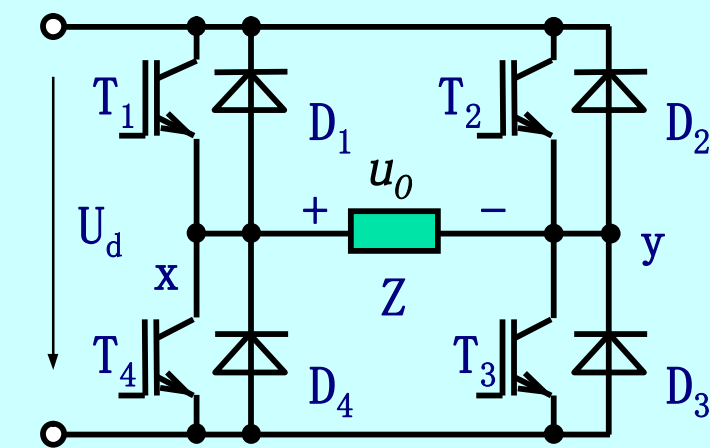
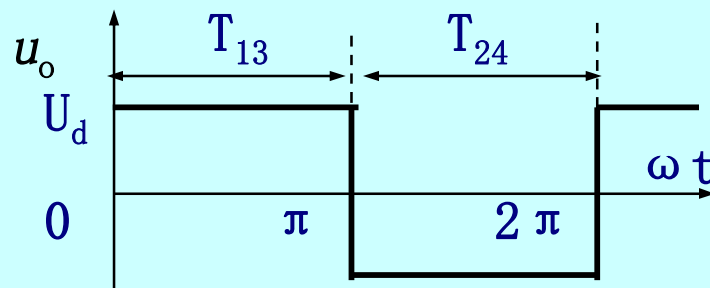
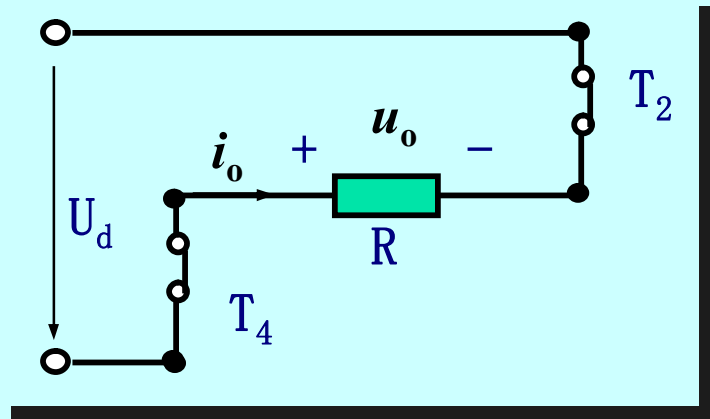
无源逆变的特点：负载不是交流电网。变换过程与交流电网无关。产生的交流电的频率不受限。需要用全控型，即导通与关断均可控制的开关。

无源逆变的应用：主要是交流调速。

第1节 直交逆变电路的原理

当 T_1 、 T_3 通 T_2 、 T_4 断时 u_0 为正；当 T_2 、 T_4 通 T_1 、 T_3 断时 u_0 为负。如果每组开关对称通、断半个周期，则





在负载电阻上就得到了交流电压 u_o ，其幅值为直流电源 U_d ，频率取决于两组开关的切换频率。

当负载中有电感时，为使电感电流能在原方向流动，必须增加与主开关并联的四个二极管以给滞后的感性电流提供续流通路。

加入 $D_1 - D_4$ 后， $T_1 - T_4$ 的控制规则与前相同。当 T_{13} 为通信号时，若 i_o 为正则 T_{13} 导通， u_o 为正；若 i_o 为负则 D_{13} 导通， u_o 同样为正。

当 T_{24} 为通信号时，若 i_o 为正则 D_{24} 导通， u_o 为负；若 i_o 为负则 T_{24} 导通， u_o 也为负。即 u_o 的波形不发生变化这表明 u_o 与 i_o 的真实极性无关，只与控制信号有关。

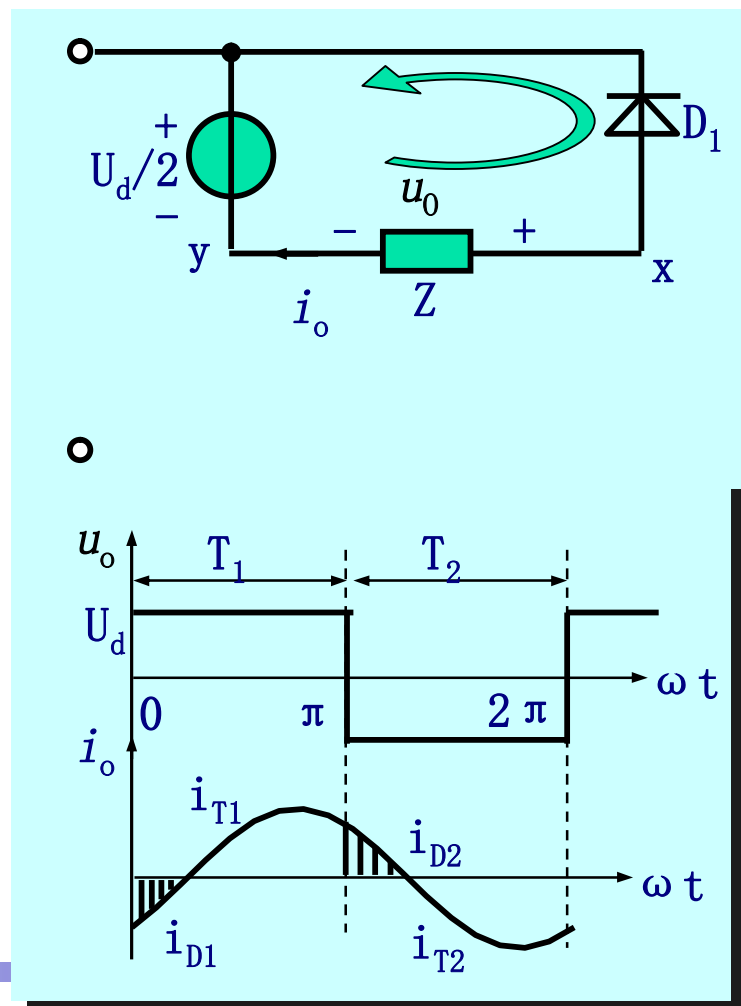
第2节 单相逆变电路

分半桥、桥式和中抽式三种

1. 单相半桥逆变电路

T_1 与 T_2 在通、断控制上互补。 i_o 由流过 T_1 、 T_2 与 D_1 、 D_2 的电流组成。当 D_1 或 D_2 导通时，负载向直流电源反馈能量。电路输出的电压波形 u_o 只与开关的状态有关而与 i_o 的方向无关。

u_o 为幅值是 $U_d/2$ 方波交流电。




$$u_o = \frac{2U_d}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots)$$

基波有效值 $U_{o(1)}$

$$U_{o(1)} = \frac{2U_d}{\pi\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}U_d}{\pi}$$

特点：电路简单，使用的器件少；输出电压低，需要两个直流电源。适用于小功率场合。

在实际应用中常用一个直流电压源与两个容量足够大的电容器串联来代替带有中点的直流电压源。

2. 单相桥式逆变电路

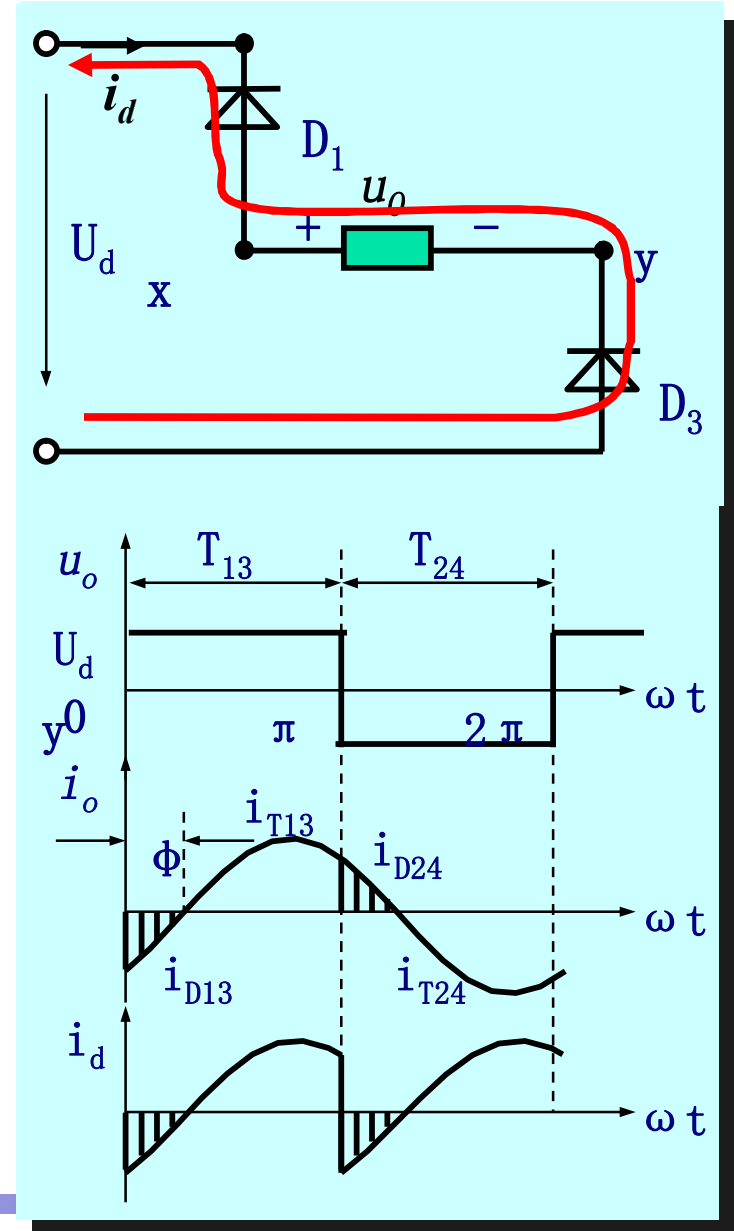
两个半桥逆变电路构成。两个半桥在控制上相差半个周期。 T_1 与 T_3 、 T_2 与 T_4 的通、断控制信号相同并且互补， u_o 为两个半桥输出的电压 u_x 与 v_y 之差。桥式电路的输出波形与半桥相同，只是幅值增大了一倍。

不同性质负载时电路的工作特点

1) 滞后负载

在 $\omega t = \pi$ 时, $T_1 T_3$ 关断并给出 $T_2 T_4$ 的导通信号。此时, i_o 从 $T_1 T_3$ 转移到 $D_2 D_4$ 与 U_d 构成的续流回路中去。在滞后角 ϕ 内, i_o 继续保持原方向流动直到零, 然后 i_o 才经 $T_2 T_4$ 反向流动。

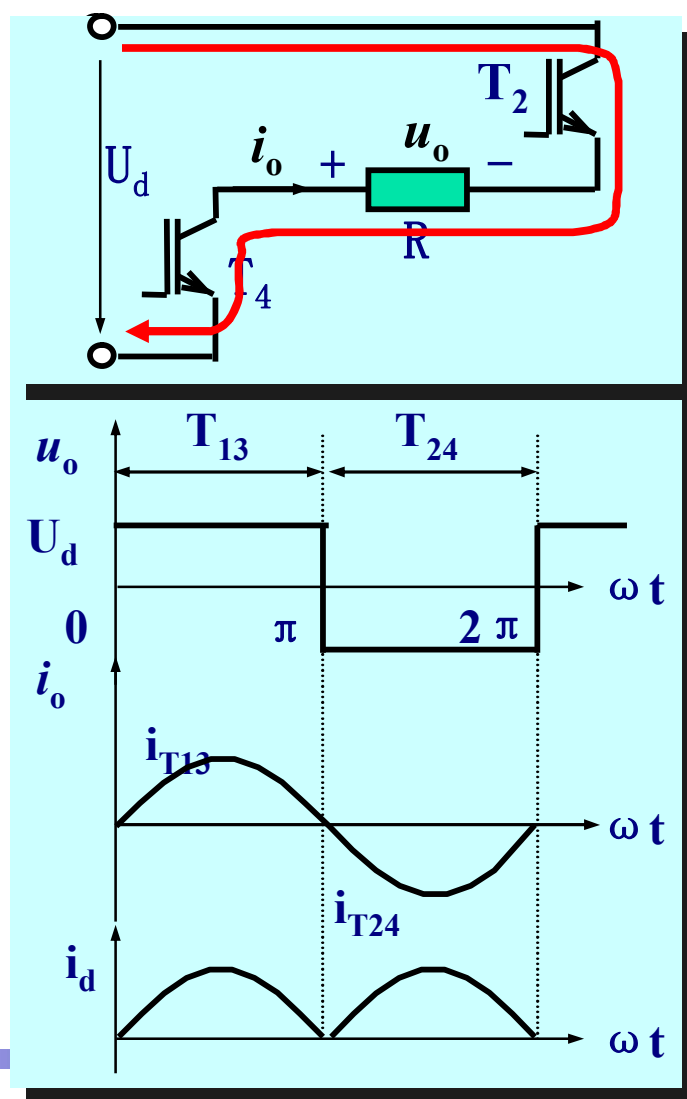
同理, 当关断 $T_2 T_4$ 、给出 $T_1 T_3$ 导通信号后, 负载电流 i_o 改经 $D_1 D_3$ 及 U_d 续流。由图可知 i_o 由 i_T 与 i_D 构成。



而 i_d 由正的 i_T 与负的 i_D 组成。在二极管导通期间，感性负载向直流电源反馈能量。当滞后的角度越大，开关要切断的电流幅值也越大。

2) 同相位负载

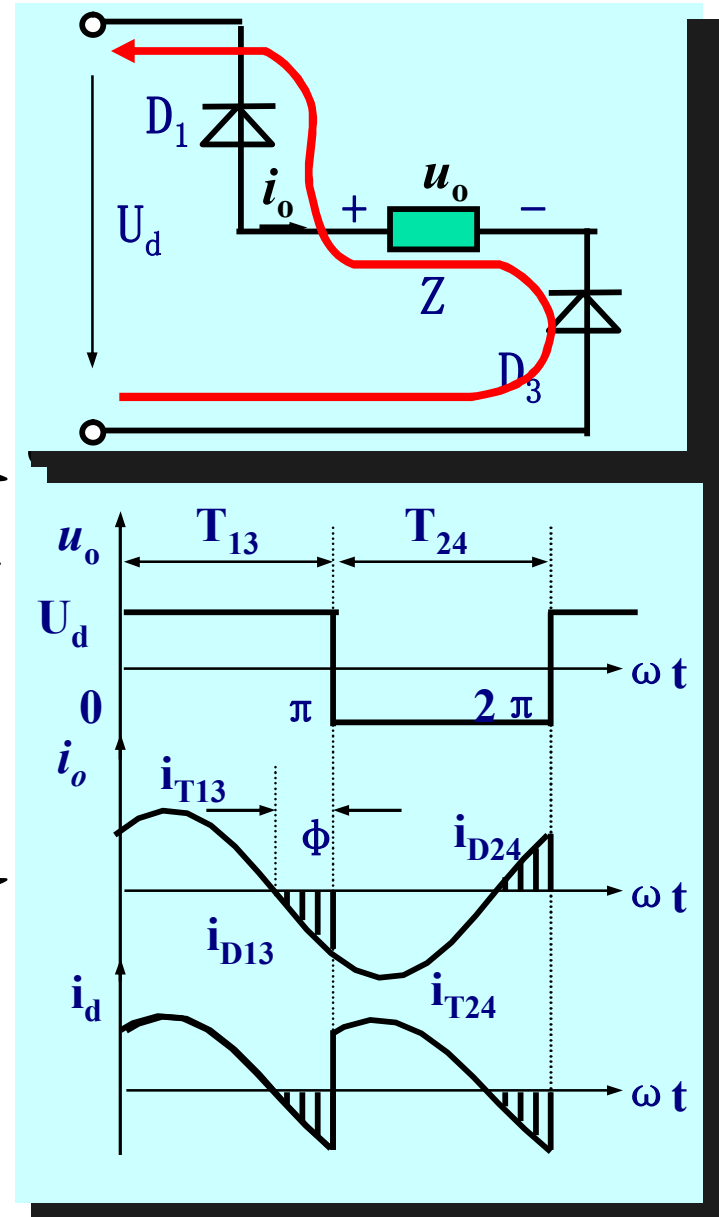
设负载电流是正弦波，且 u_o 、 i_o 同相。由于 u_o 、 i_o 的零点一致，开关 T_1T_3 与 T_2T_4 将分别流过正弦半波电流，而二极管则完全没有电流流过。开关 T_1 — T_4 的导通与关断均发生在负载电流过零处，所以开关的开通与关断损耗为零。在这种情况下直流输入电流是单向、脉动的。



3) 超前相位负载

设 i_o 为正弦且超前 u_o 一个相角 ϕ 。注意到开关（例如 T_1T_3 ）在导通 $\pi - \phi$ 后，其中的电流会自然下降到零。在这个半周的其余部分它们承受与之并联的二极管（即 $D_1 D_3$ ）导通产生的反压。

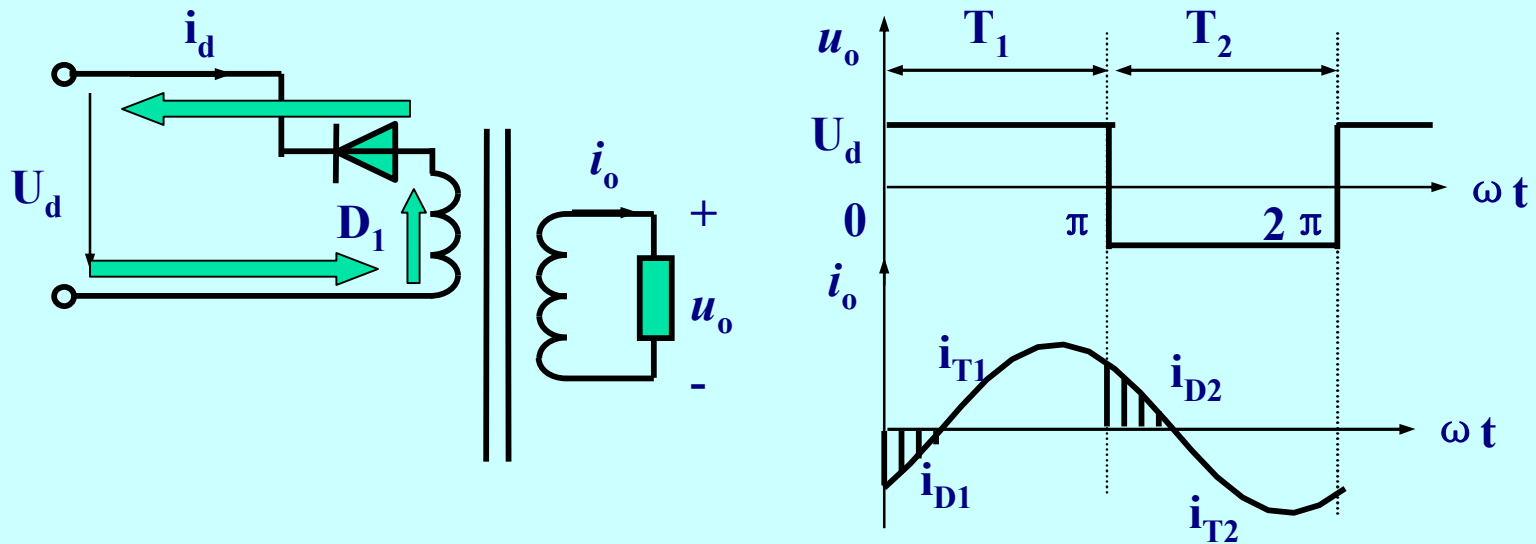
所以，开关 $T_1—T_4$ 可以使用晶闸管而不必采用强迫关断措施。这称“负载换流”。电流 i_d 也是双向的。二极管导通时 i_o 将经 U_d 续流，从而将负载的储能反馈回 U_d 。从上述分析可知：



- (1) 逆变电路需要二极管反馈负载无功。
- (2) 直流电源应是一个理想电压源。
- (3) 负载性质不同，开关切断的电流不同损耗不同。
- (4) 电路的结构与负载性质也有关系。

3 带中心抽头变压器的逆变电路

T_1 与 T_2 对称、交替地通、断，将直流电压交替地加到变压器的两个原边，在副边合成一个与负载电流性质无关的方波交流电压，从而将直流电变换成了交流电



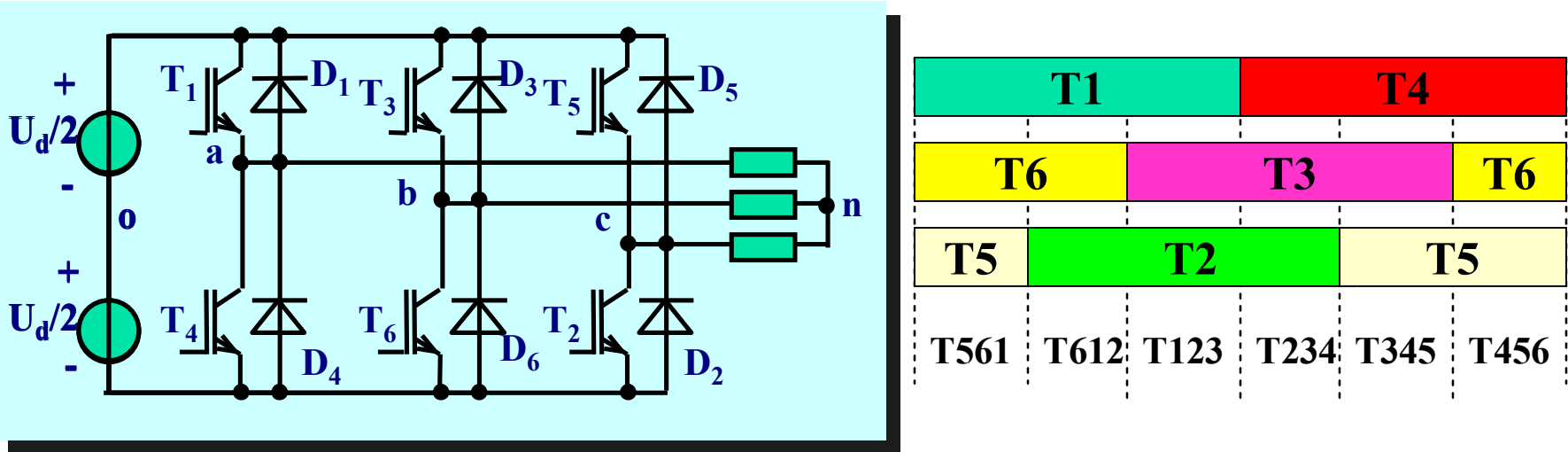
当负载为感性时，若在 π 点关断 T_1 ，由于 i_o 不能立刻改变方向，电流将从变压器原边的上绕组转移到下绕组。于是电流经 D_2 和 U_d 续流，向 U_d 反馈能量。直到该电流衰减到零后 T_2 才真正导通、负载电流反向。负半周工作过程与此相似。

电路特点：

- 1) 输出电压的幅值为 U_d/k ， k 为变压器的变比。所以可以用变压器将输出电压变到所需要的值。
 - 2) 与桥式电路相比，所需的开关器件数量少。直流电压利用好。
 - 3) 输入直流侧与输出交流侧无电的联系。
 - 4) 必须有输出变压器。
- 该电路适合小功率场合或特殊应用场合。

第3节 三相逆变电路

由三个共用一个直流电源的单相半桥逆变电路组合构成。在控制上，三个半桥间依次相差三分之一周期。三相负载接在三个半桥的输出端。



1) 工作时的波形

由于上下开关控制互补、各相相差 $1/3$ 周期所以开关的工作顺序为： $T_{123} - T_{234} - T_{345} - T_{456} - T_{561} - T_{612} - T_{123}$

注意到逆变电路的输出波形只与控制有关，与负载电流无关。所以通过控制信号可确定输出电压波形。

方法1：由半桥概念来确定输出电压波形。

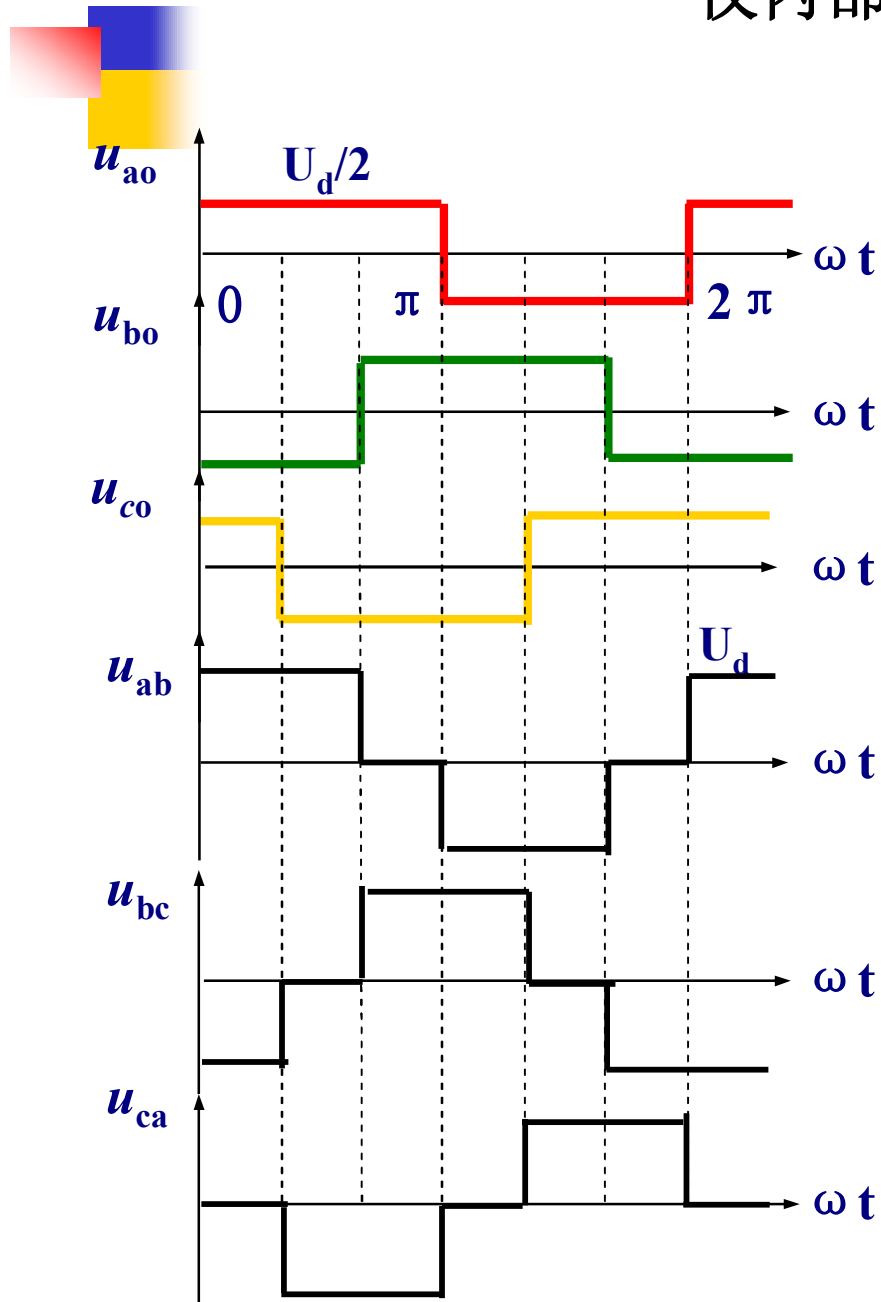
从前边分析知，半桥逆变器的输出电压与负载电流无关。所以可以分别作出abc三相对假想直流电源中点的输出电压 u_{ao} 、 u_{bo} 和 u_{co} 的波形。显然， u_{ao} 、 u_{bo} 和 u_{co} 是幅值为 $U_d/2$ ，相位依次相差120度的交流电压，如图。

电路的输出线电压 u_{ab} u_{bc} u_{ca} 可以由下式求出：
即直接通过半桥的输出就可得到逆变电路的输出线电压波形，不需要进行额外的计算。

$$u_{ab} = u_{ao} - u_{bo}$$

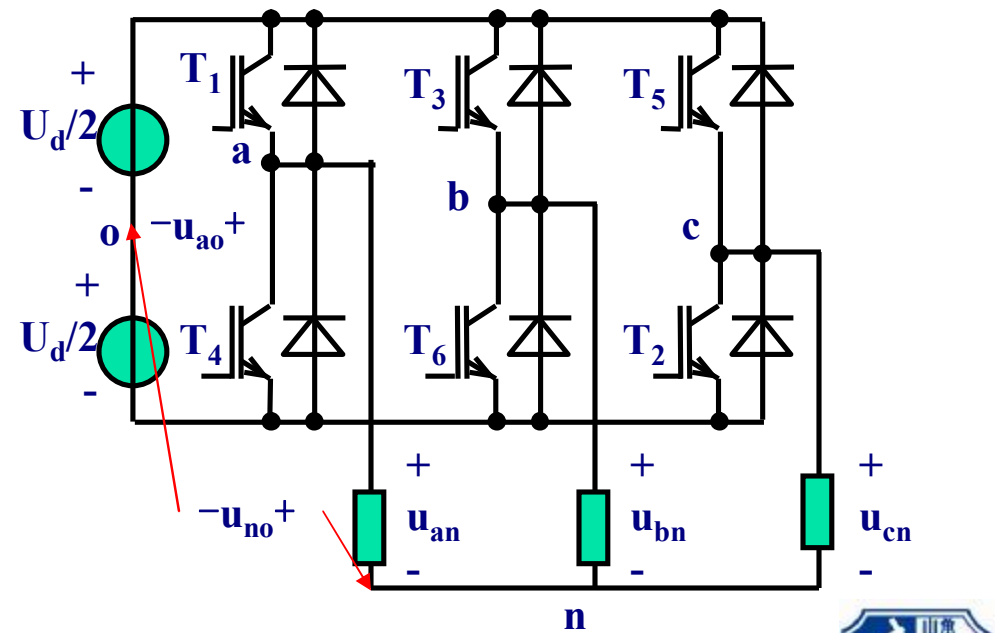
$$u_{bc} = u_{bo} - u_{co}$$

$$u_{ca} = u_{co} - u_{ao}$$



若负载星 (Y) 接, 三相
对称, 负载上的三相电压
波形如何确定?

将电路改画如下。考查a
相电路 (bc两相相同)



即，有如下关系成立：

$$u_{an} = u_{ao} - u_{no}$$

$$u_{bn} = u_{bo} - u_{no}$$

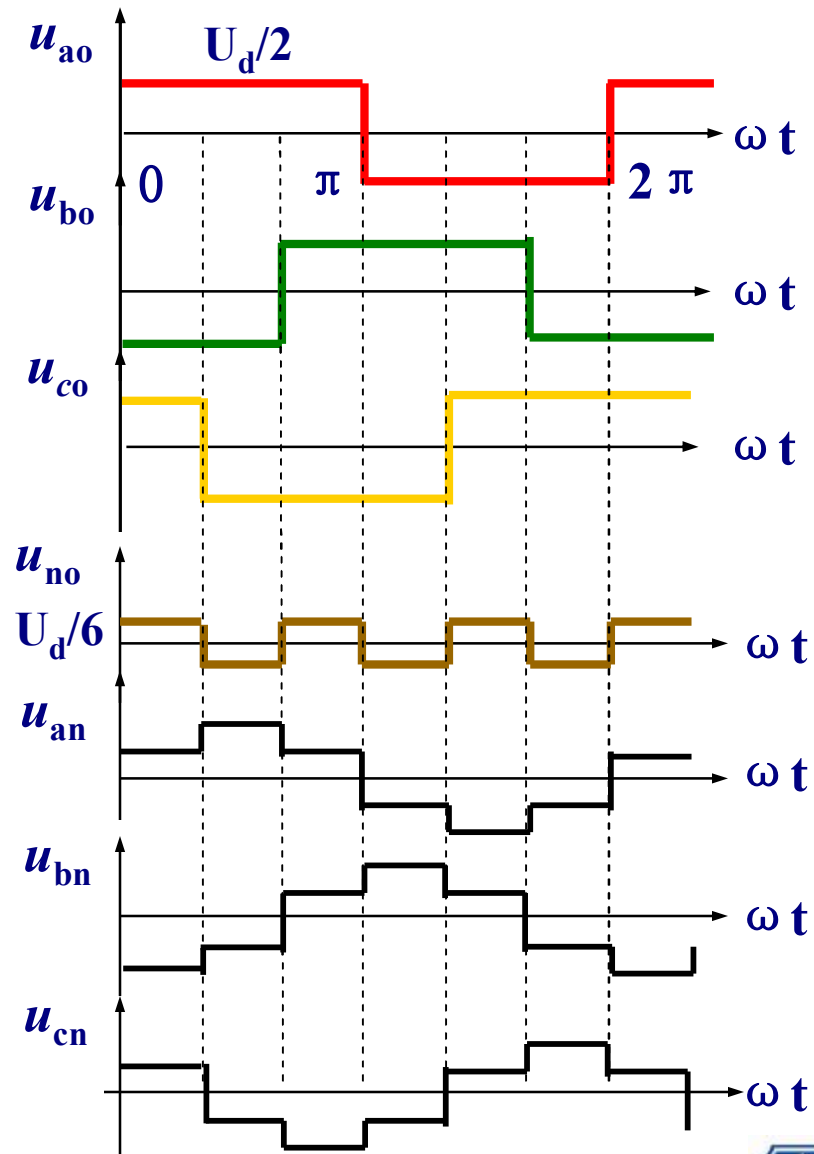
$$u_{cn} = u_{co} - u_{no}$$

将方程组的左、右分别相加。因为三相对称必然有

$$u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0$$

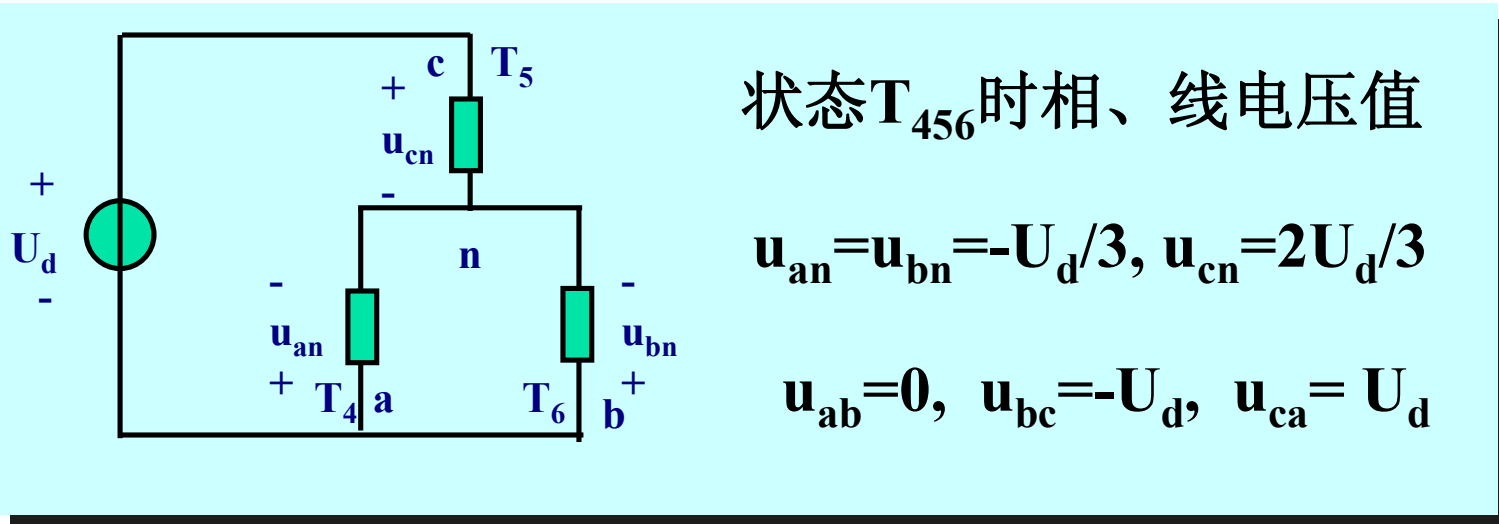
$$\text{所以 } u_{no} = \frac{1}{3}(u_{ao} + u_{bo} + u_{co})$$

根据半桥输出得到 u_{no} 。据此可绘出负载上的相电压波形。



方法2: 由状态等效电路概念来确定输出电压波形。

从前边知电路的工作状态是 $T_{123} - T_{234} - T_{345} - T_{456} - T_{561} - T_{612} - T_{123}$ 。所以可作出6个状态等效电路:



由6个状态等效电路求出逆变电路的输出线电压与负载相电压值，再在图上绘出。即得到所需要的波形。这两种方法各有优点。可以根据自己的理解选择一种即可。

2) 输出电压波形分析

将逆变电路的输出线电压与负载上的相电压波形分别用付立叶级数展开得:

$$u_{ab} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi} \left(\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t - \dots \right)$$

线电压有效值 $U_{ab} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d = 0.816 U_d$

基波幅值 $U_{abm(1)} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi} = 1.1 U_d$

基波有效值 $U_{ab(1)} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d = 0.78 U_d$

$$u_{an} = \frac{2U_d}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \dots \right)$$

相电压有效值

$$U_{an} = \frac{\sqrt{2}}{3} U_d = 0.471 U_d$$

相电压基波幅值

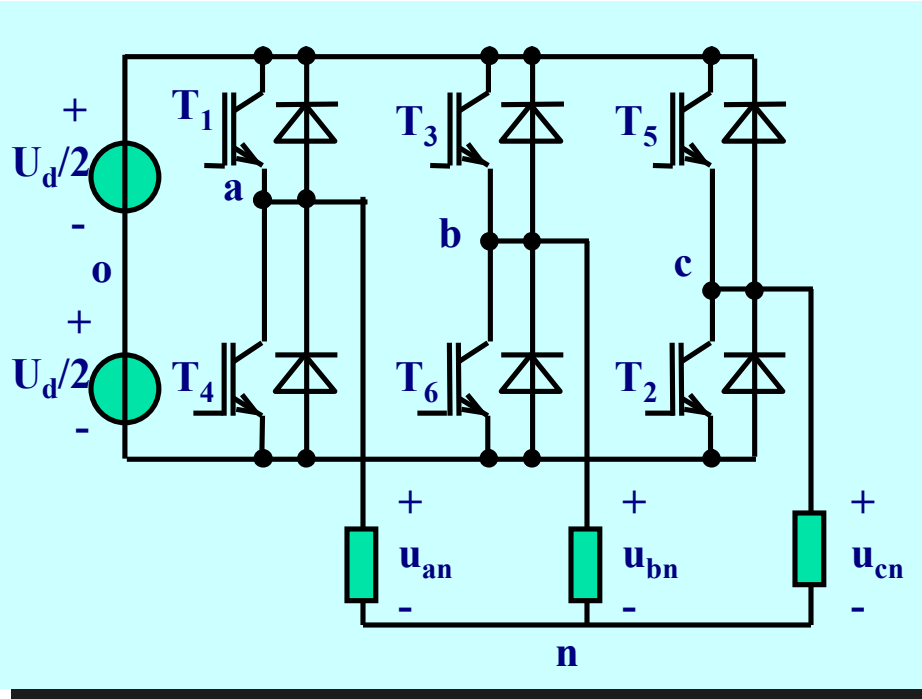
$$U_{anm(1)} = \frac{2U_d}{\pi} = 0.637 U_d$$

基波有效值

$$U_{an(1)} = \frac{2U_d}{\pi \sqrt{2}} = 0.45 U_d$$

从波形分析中知，线电压与相电压有相同的谐波成分和比例。它们满足一般线与相值的数量关系

3) 逆变电路在不同负载时的特点



1. 当逆变电路的负载是三相对称电阻时，续流二极管将不工作。或者说电路中可以取消它。此时：

$$\begin{aligned} i_d &= i_{T1} + i_{T3} + i_{T5} \\ &= i_{T2} + i_{T4} + i_{T6} \end{aligned}$$

逆变电路在任意一个工作状态时 $i_d = 2U_d/3R$ 。例如，根据状态等效电路知， T_{561} 工作时 $i_d = 2U_d/3R$ ； T_{612} 工作时 $i_d = 2U_d/3R$...

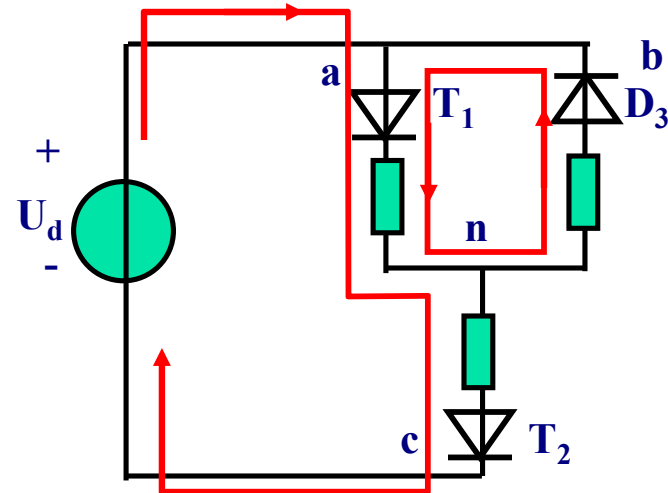
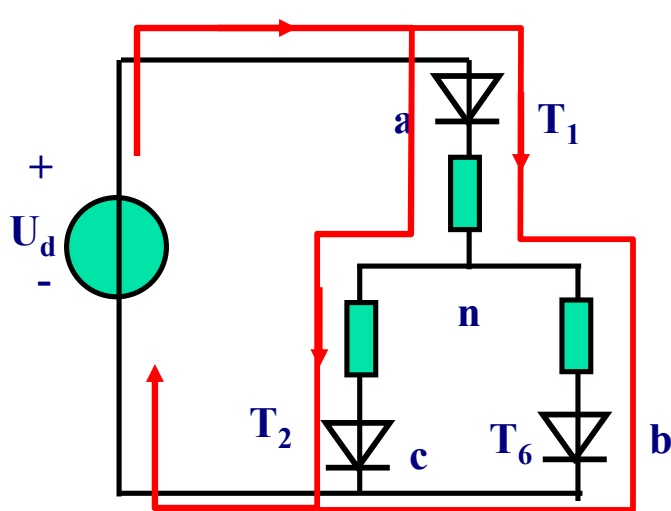
结论，电阻负载时直流输入电流为正的常数值。在

任何时候只有可控开关工作，二极管不工作。

2. 负载是三相对称电阻电感时

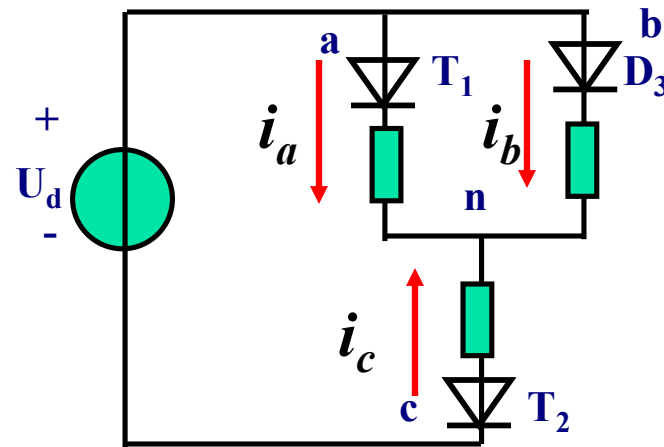
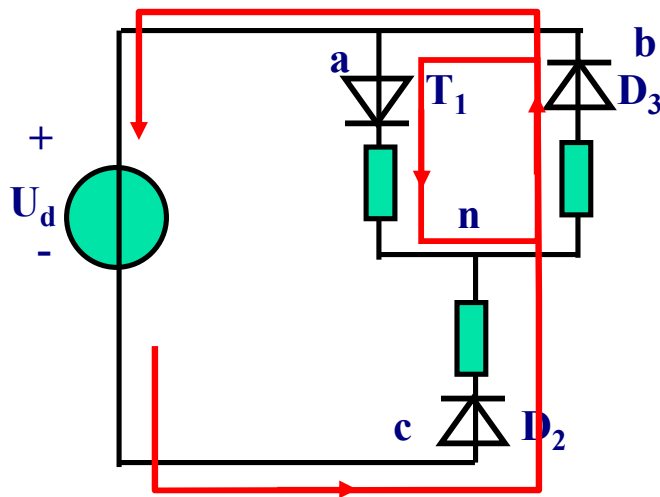
此时电路可能有如下的工作模式：

a) 三个可控开关导通。例如 T_{612} 导通。此时负载从直流电源获得能量。

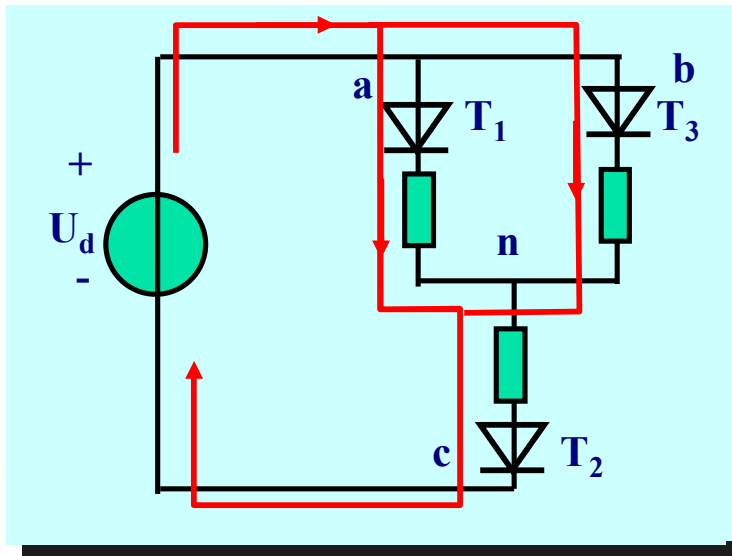
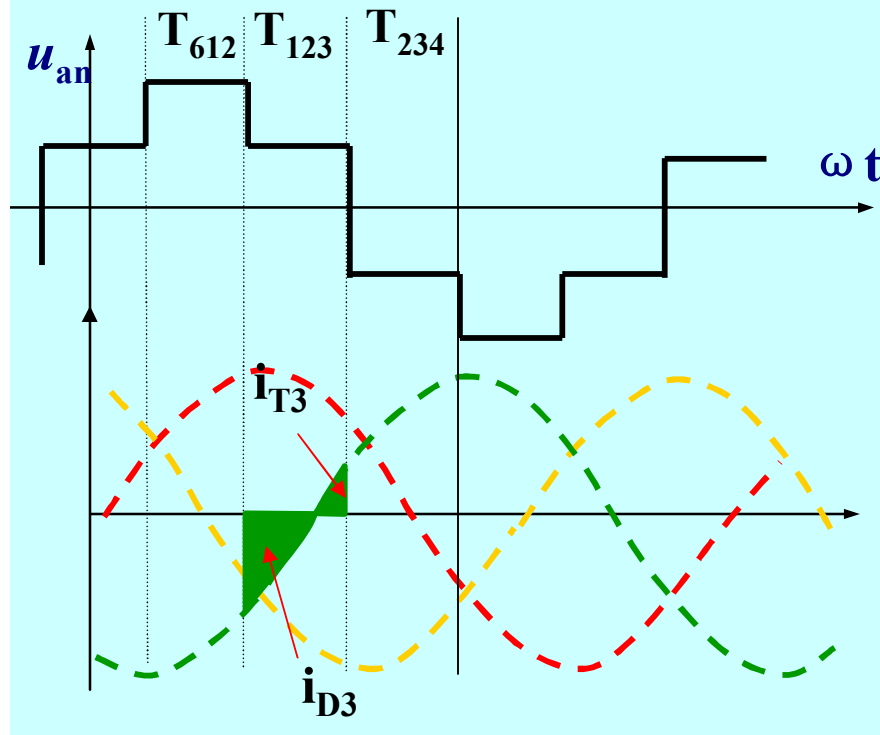


b) 二个可控开关和一个二极管导通。例如 T_1T_2 和 D_3 导通。此时一方面电源沿 T_1T_2 给负载提供能量同时 T_1D_3 形成回路，交换能量。但输出电压波形不变。

c) 二个二极管和一个可控开关导通。例如 T_1 和 D_2D_3 导通。此时一方面负载沿 T_1D_3 形成回路，另一方面负载中的储量经 D_2D_3 向电源反馈能量。但输出电压波形不变。

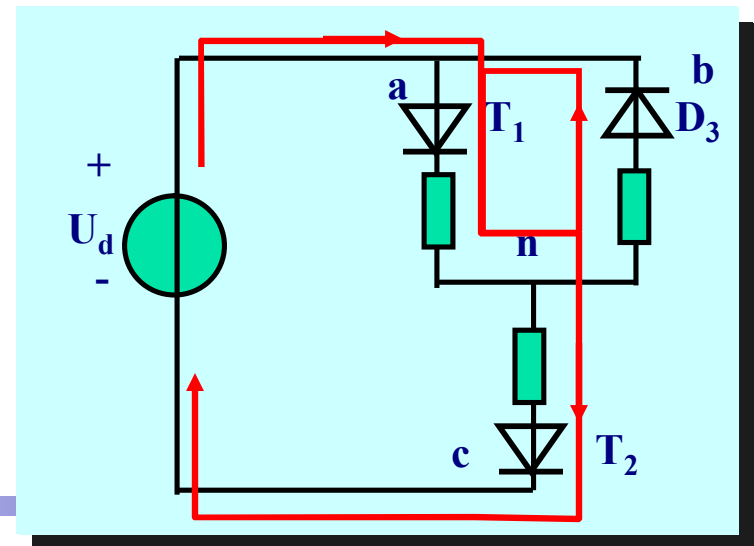
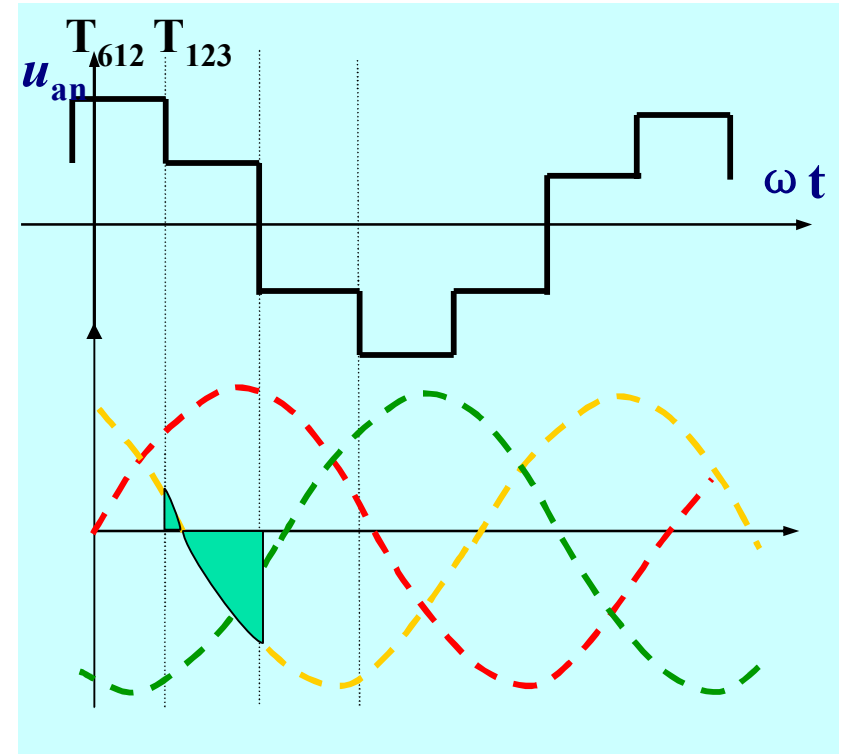


若负载上的电压与电流如图所示，下面讨论电路的换流过程：设电路原先是 T_{612} 工作，然后变成 T_{123} 。在 T_{612} 工作结束之前，电流如图所示。



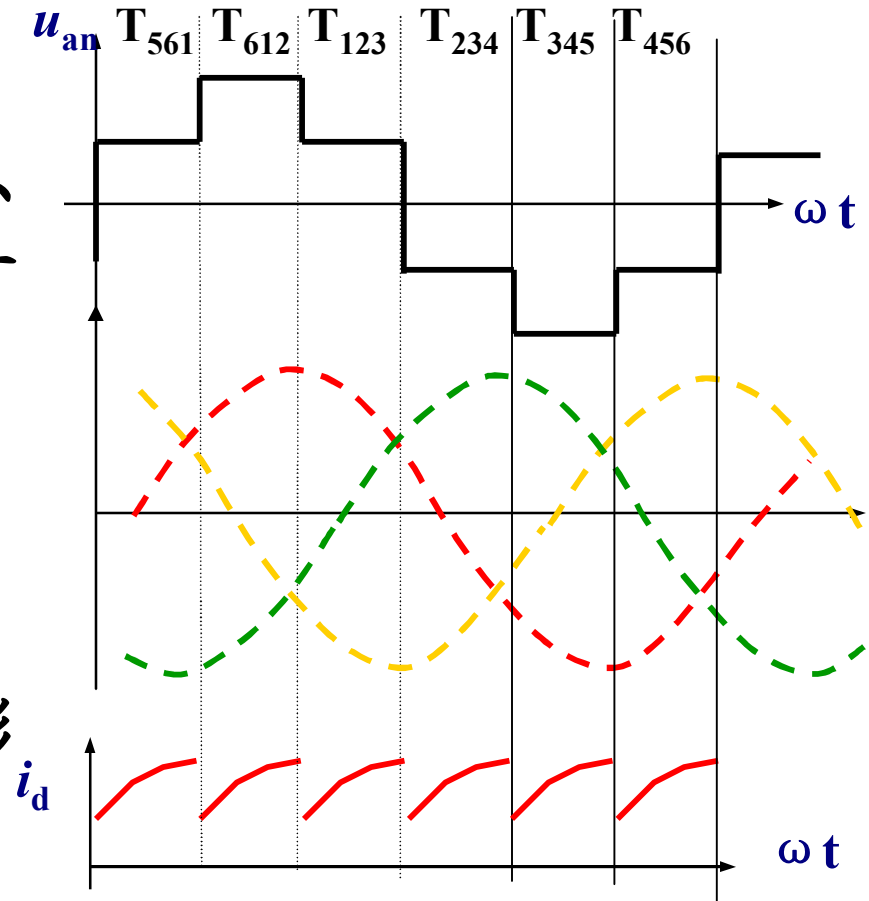
此时a (红)相电流为正, b (绿) c (蓝)相电流为负。当T6关断T3导通后, 由于b相电流不跳变, 它继续流动, 所以二极管 D_3 导通。这时 D_3T_1 形成环路, 它们交换能量。当b相电流到零后, i_{D3} 为零, T_3 才真正导通。注意到不论是 D_3 还是 T_3 导通, 输出线电压与负载上的相电压均相同。其它的换流过程分析与此相同。

若负载电流滞后电压的角度超过60度，如图所示，电路的换流过程有所不同。仍设电路原先是 T_{612} 工作，然后变成 T_{123} 。在 T_{612} 工作结束之前，a相c相电流为正b相电流为负，如图示。显然电路实际上是 $T_1D_2T_6$ 在工作。当 T_6 关断 T_3 给出通信号后，由于c相的电流方向不能立刻改变，所以 D_2 导通，此时 D_2D_3 导通，向电源反馈。当c相电流为零后 T_2 才导通。此时 $T_1T_2D_3$ 导通，电源供能。



输入电流（直流电源电流） 的确定：

设负载电流正弦。滞后角小于90度。由状态等效电路可知， T_{612} 时 $i_d=i_a$ ， T_{123} 时 $i_d=-i_c$ ， T_{234} 时 $i_d=i_b$ ， T_{345} 时 $i_d=-i_a$ ， T_{456} 时 $i_d=i_c$ ， T_{561} 时 $i_d=-i_b$ 。波形如图所示。当滞后角增大时， i_d 的波形就会相应发生变化。



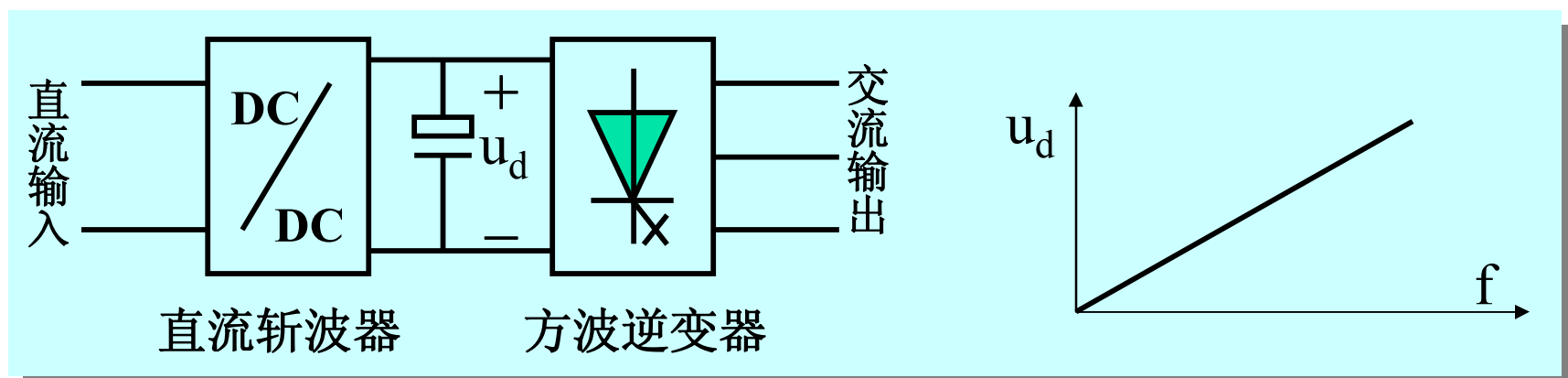
从上述分析可以知：在电压源供电的逆变电路中，直流电源电流是波动的，某些情况下是双向的。电路中必须需要二极管以给感性的负载电流提供通道。

当滞后角小于60度时，无功在绕组间交换，而大于60度时经直流电源交换。

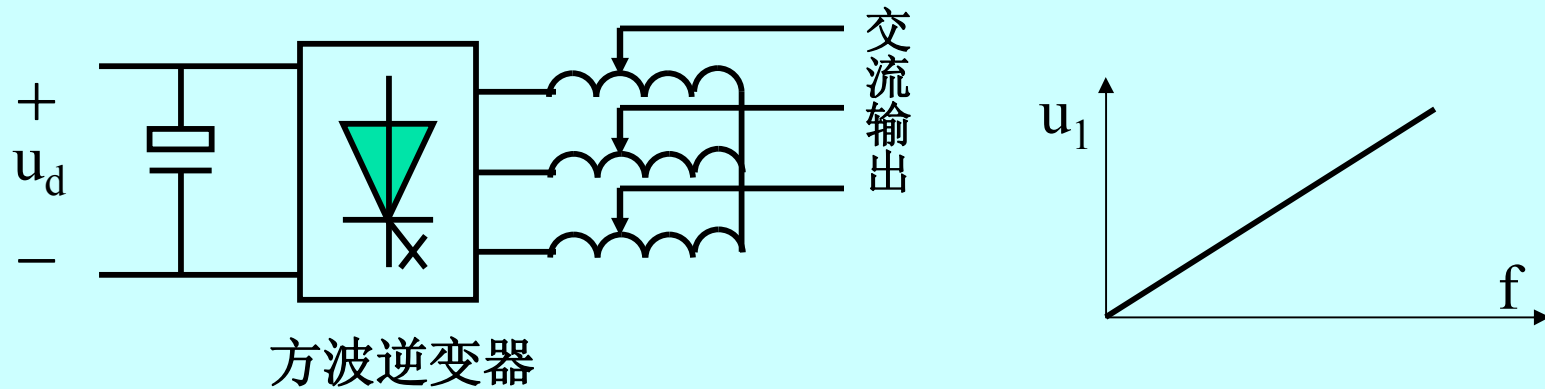
第4节 方波逆变电路的电压调节与谐波抑制

以上讲述的逆变电路的输出电压均不可改变。但在许多场合需要改变输出电压。其主要方法有：

1) 通过改变输入直流电源的电压来调节输出电压
如采用相控整流电路、直流斩波电路来调节 U_d 。
主要问题除电路复杂外，系统的快速性不能保证



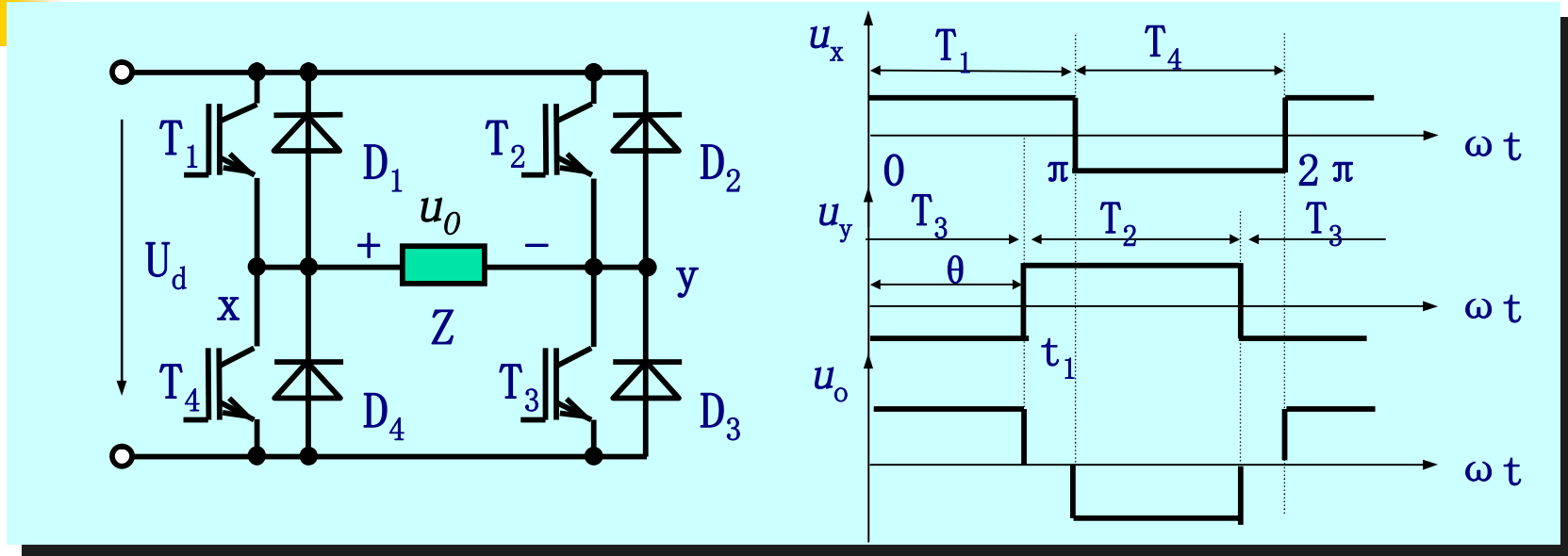
2) 接入一个自动控制的调压变压器。主要问题是机械系统的惯性大，调节速度跟不上，变压器很难设计。



3) 移相调压：通过改变控制规则实现输出电压的控制的方法。

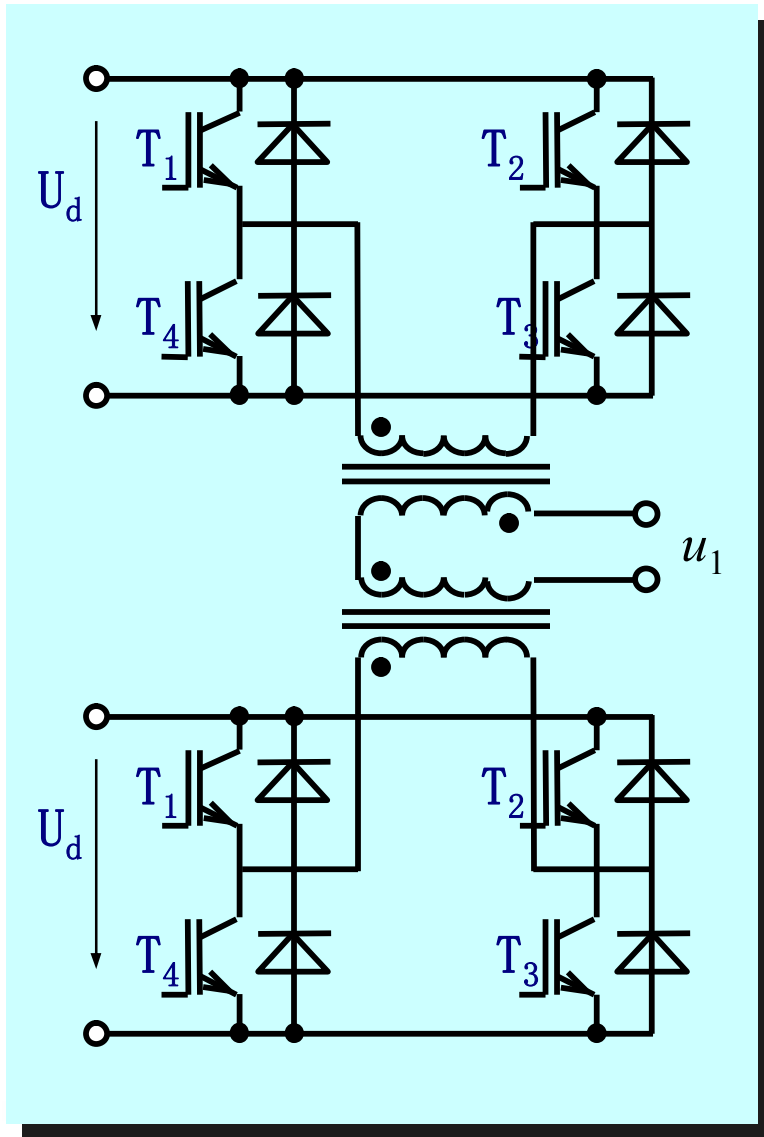
a) 单相电路的移相调压控制

方法1，在桥式逆变电路中通过控制另一个半桥的控制信号的相位来控制输出电压。

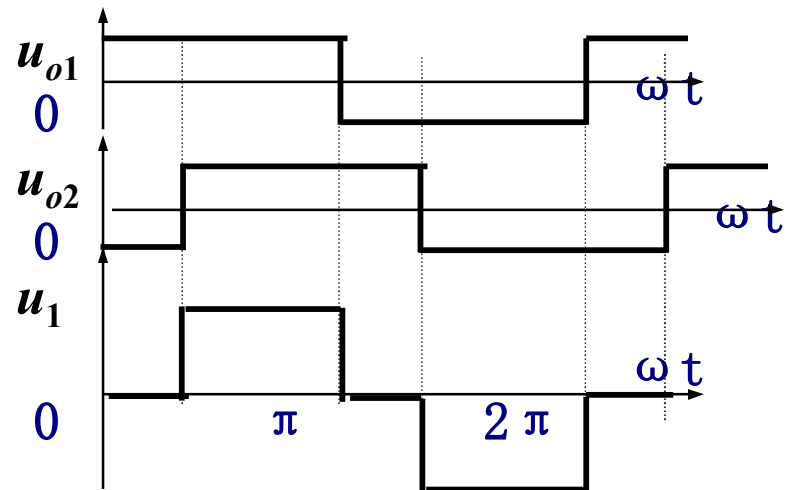


两个半桥上、下桥臂开关的导通、关断控制仍然是互补的。但开关 T_1 与 T_2 的控制信号并不相差180度，而是滞后一个角度 θ ， θ 可以在0—180度间变化。负载上电压为两个半桥输出电压的差。很显然，改变移相角 θ 就可以改变 u_o 的脉冲宽度从而改变 u_o 基波的大小。

方法2，采用二个逆变电路的桥间移相调压方式



电路的输出电压 U_1 是两个逆变电路输出电压的和



改变两个逆变电路输出电压的相位，可以调节输出电压
移相调压的主要问题

进行付立叶分解

$$u_o = \sum_{n=1,3,5\ldots}^{\infty} \frac{4U_d}{n\pi} \sin \frac{n\theta}{2} \sin n\omega t$$

有效值 $U_o = \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} U_d$

基波有效值 $U_{o(1)} = \frac{2\sqrt{2}U_d}{\pi} \sin \frac{\theta}{2}$

当改变 θ 时，除基波有效值发生变化外，谐波值也发生变化。当 θ 较小时，较低次的谐波幅值将与基波的幅值相当。这种调压方式不适合大范围的调压。单相半桥逆变电路不能用移相调压法

b) 三相电路的电压控制

由于电路结构的限制，三相逆变电路不能采用移相控制。但可以采用**逆变电路的多重化**的方法来实现调压。这与单相**桥间移相调压**类似。

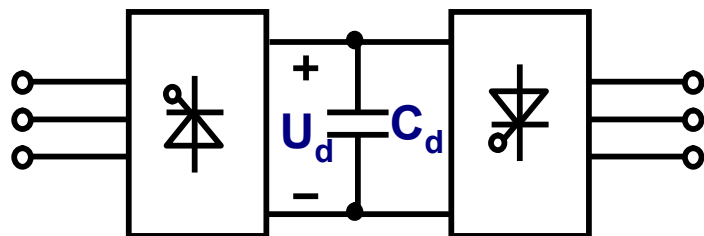


第5节 电流源逆变电路

1. 电压源与电流源

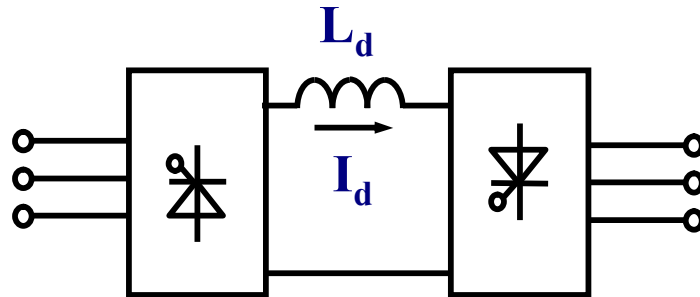
输出电压与电流无关的电源是电压源。其特点是无论输出电流的大小方向如何，输出电压保持为常数。由电压源作为电源的逆变电路称电压源逆变电路。

在工程上电压源由可控整流器与足够大的电容构成。



电容器的作用：保持直流电压的恒定；缓冲无功能量；将整流环节与逆变环节的交流量隔离开来，为谐波电流提供通路。由于需要处理整流与逆变二个环节的无功，电容值应当足够大。

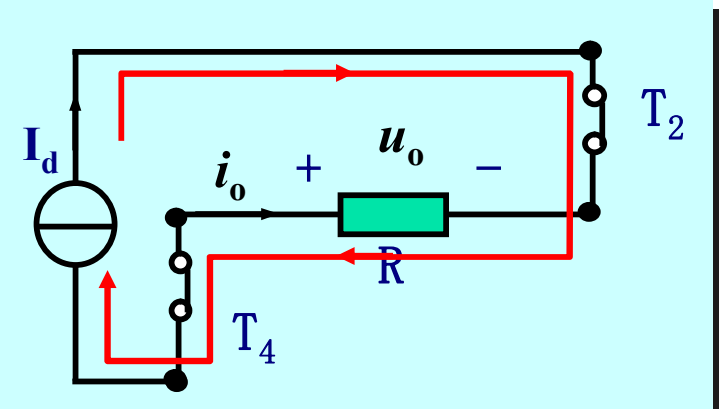
输出电流与电压无关的电源是电流源。它是电压源的对偶元件。其特点是输出电流总保持为常数。在工程上电流源由可控整流器与足够大的电感构成。



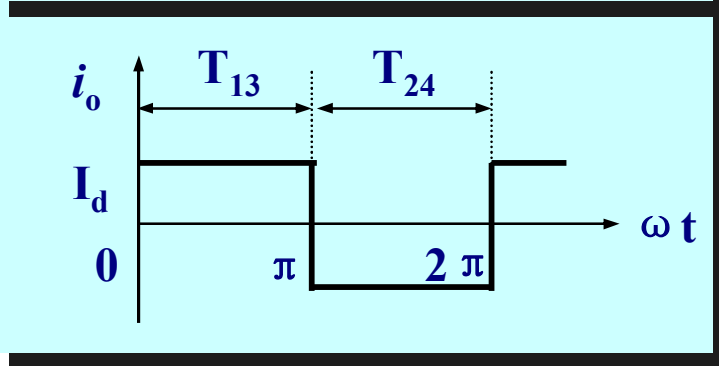
电感的作用：保持直流电流的恒定；缓冲无功能量；将整流环节与逆变环节的电压隔离开来。为获得电流源特性，电感要足够大。

2. 电流源逆变电路的特点

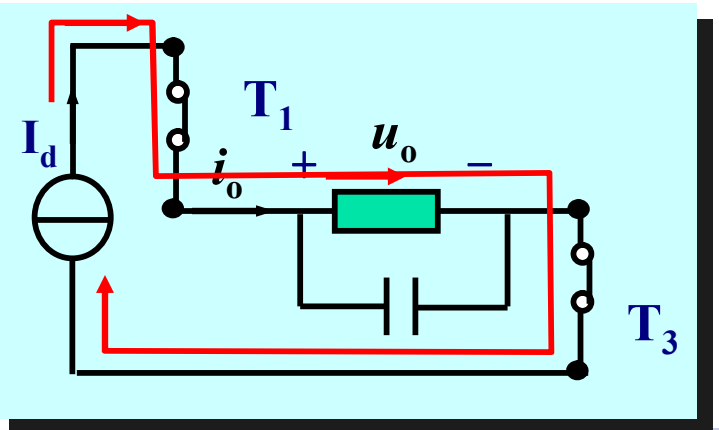
由于电流源的强制作用，电流不可能反向流动。所以逆变电路中可控开关上不必反并无功反馈二极管。



当 T_1T_3 闭合 T_2T_4 断开时，负载电流 i_o 为正；当 T_2T_4 闭合 T_1 、 T_3 断开时 i_o 为负。所以 i_o 为180度的方波交流电流。



当负载为感性时，在交流输出端需要并联电容 C ，它为感性负载电流提供流通路径。这是必不可少的。当 T_1T_3 稳定导通时负载电流与 I_d 同向当 T_2T_4 导通时负载电流与电流源电流都经 C 流动。负载电流衰减到零再反向增大。当负载电流为 I_d 电容电流为零。同理 T_1T_3 导通



时，由于负载上的电流不跳变，负载电流与 I_d 都经C流动。直到负载电流反向增大到 I_d 时止。此后，电路进入稳定导通阶段。

将 i_o 展开成付立叶级数

$$i_o = \frac{2I_d}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \cdots)$$

基波有效值 $I_{O(1)}$ 为
$$I_{O(1)} = \frac{2I_d}{\pi\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}I_d}{\pi}$$

负载电压 u_o 与负载阻抗 Z 的性质有关

$$U_{(n)} = I_{(n)} Z_{(n)}$$

负载电压 u_o 与负载阻抗 Z 的性质有关。

当负载为电阻时

$$U_{(n)} = I_{(n)} R$$

负载的电压与电流的波形相同。它们有相同的谐波成分和比例。

当负载为电感时

$$U_{(n)} = I_{(n)} n \omega L$$

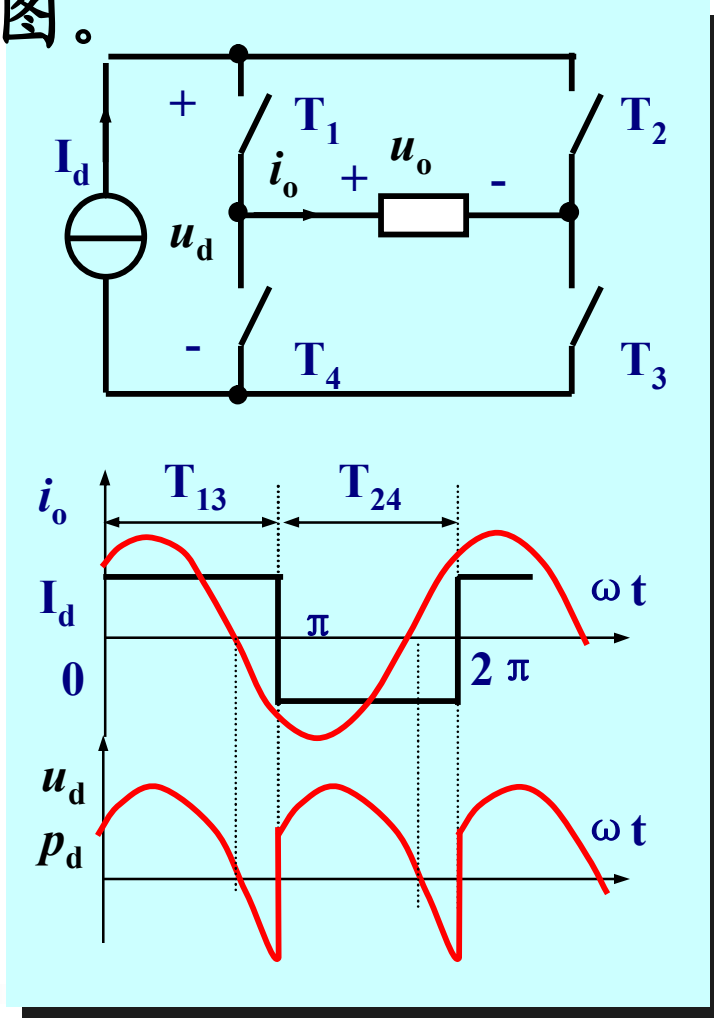
负载电压中谐波电压的比重显著增大。虽然谐波电流的幅值反比于谐波次数但谐波阻抗却正比于谐波次数。这表明，谐波阻抗大的负载不适合于电流源逆变电路。

当负载为电容时

$$U_{(n)} = I_{(n)} \cdot \frac{1}{n \omega C}$$

此时谐波电流分量产生的谐波电压很小， u_o 基本上是正弦波。所以电流型逆变电路适合于谐波阻抗低、功率因数高的负载。

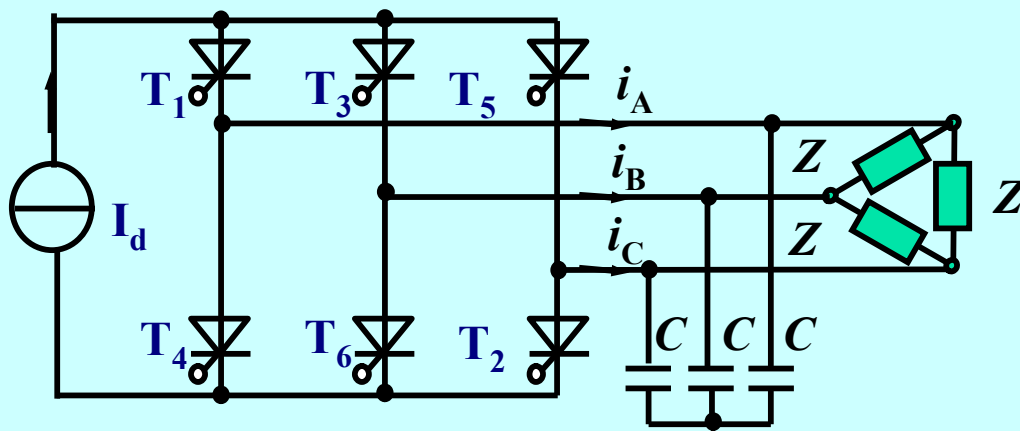
电流源逆变电路中的无功功率： 设负载上的电压波形 u_o 是正弦波。电路工作时直流电压 u_d 的波形如图。



u_d 的波形可以这样确定：当 T_{13} 导通时 u_d 为 u_o ；当 T_{24} 导通时 u_d 为 $-u_o$ 。 u_d 同时也是直流电源的输出功率 p_d 波形。 P_d 为正表示电流源发出功率；为负表示能量反馈回电流源。这与电压源逆变电路是不同的。当负载的阻抗角（功率因数角）不同 p_d 的波形也就不同。注意到电流源的电流大小与方向是始终不变的。

3. 三相电流源逆变电路

三相电流源逆变电路如图示。由于是电流源，所以主



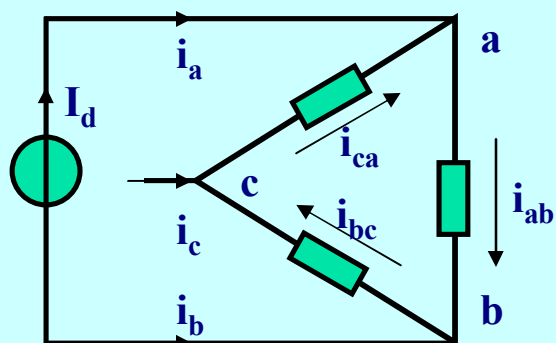
电路中不需要二极管在一个周期内各开关导通120度, 顺序是

$T_1T_2 - T_2T_3 - T_3T_4 -$
 $T_4T_5 - T_5T_6 - T_6T_1。$

负载一般采用角接。在换流时，为给负载中的感性电流提供流通路径，必须在负载端并联三相电容器。

a) 逆变电路输出电流的确定

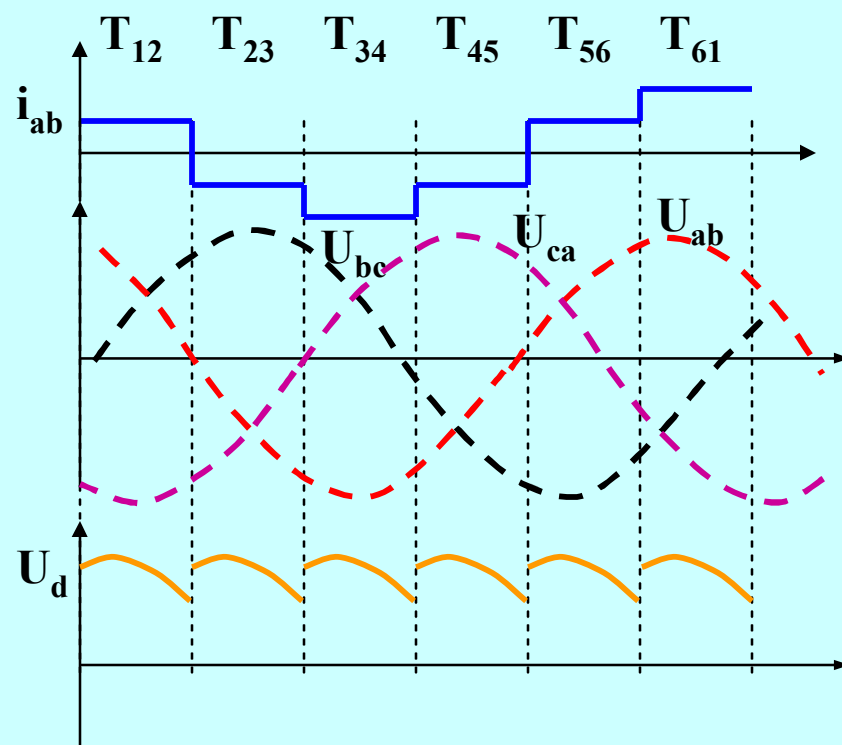
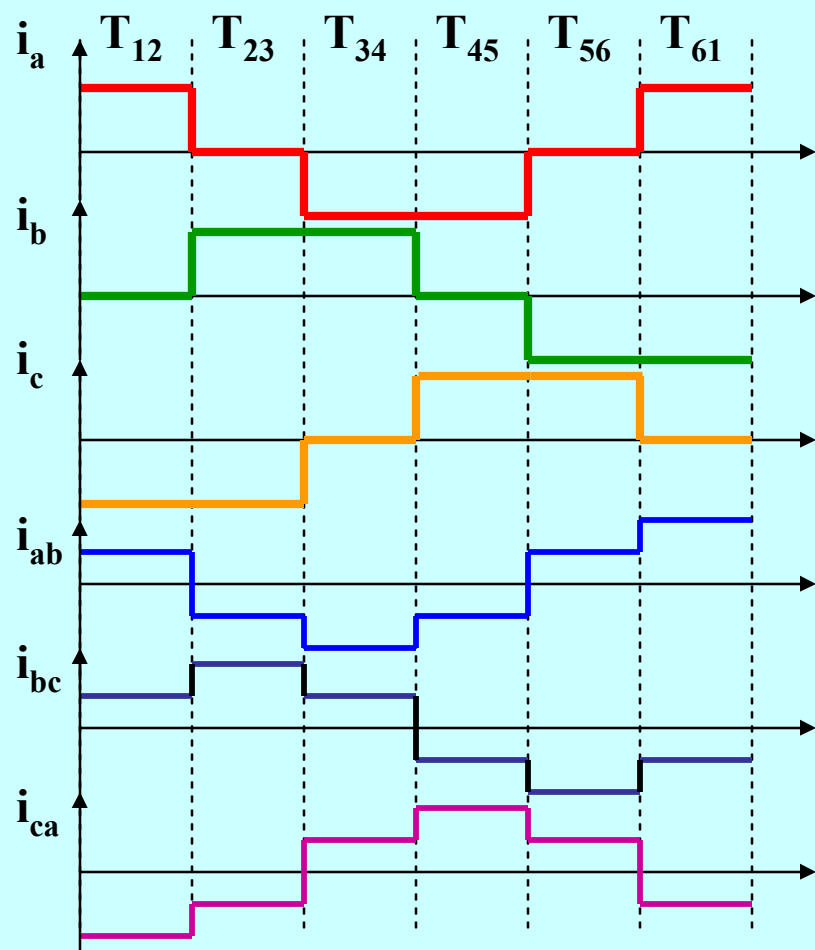
方法：等值电路法。忽略换流过程。分别作出在不同工作状态时的等值电路，再利用电路的分流公式，求出各个线电流与负载相电流。



状态 T_{61} 时各个电流值

$$i_c=0, i_b=-I_d, i_a=I_d$$

$$i_{ab}=2I_d/3, i_{bc}=i_{ca}=-I_d/3$$

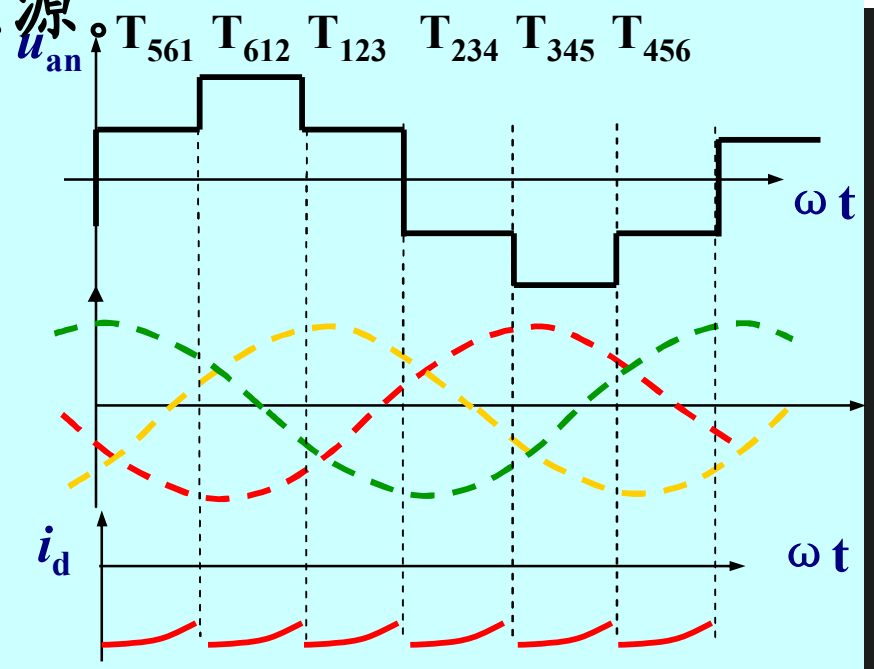


与电压源逆变器的输出相比较，除量纲单位不同外，线、相的波形图完全相同。所以它们有相同的数学表达式。这在电路理论中称对偶关系。

b) 三相逆变电路中能量的反馈

在交直交传动系统中，当电机的转速低于同步速时，它作为电动机运行。能量由逆变器输送到电机。而当电机的转速超过同步速时电机作发电机运行。电能由电机返回到电源。

当电机发电时，其电压与电流间的相位差超过90度。**电压源**逆变电路中电机作发电机运行时的波形如图。此时电机的能量由 $D_1 - D_6$ 反馈到直流电源，如图。



例如 T_{612} 时，由于 i_a 为负，所以 D_1 导通； i_c 为正，所以 D_2 导通； i_b 为正时 D_6 导通， i_b 为负时 T_6 导通。可见当电机发电时，直流电流的极性将颠倒。由于逆变电路的直流电源由整流器构成，它不允许电流反向流动。要实现能量逆转，需要双向传递电能的直流电源。

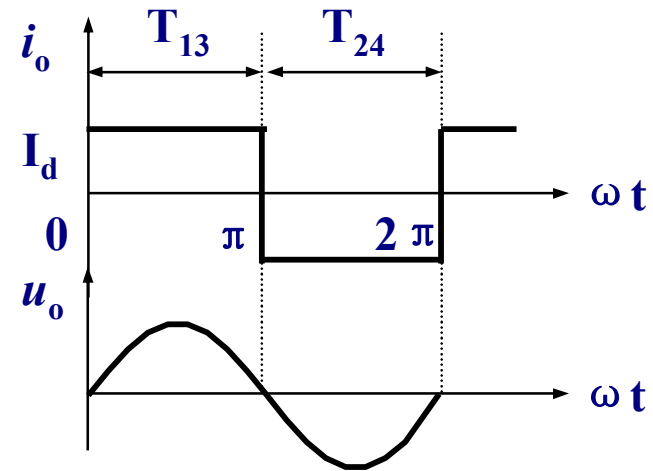
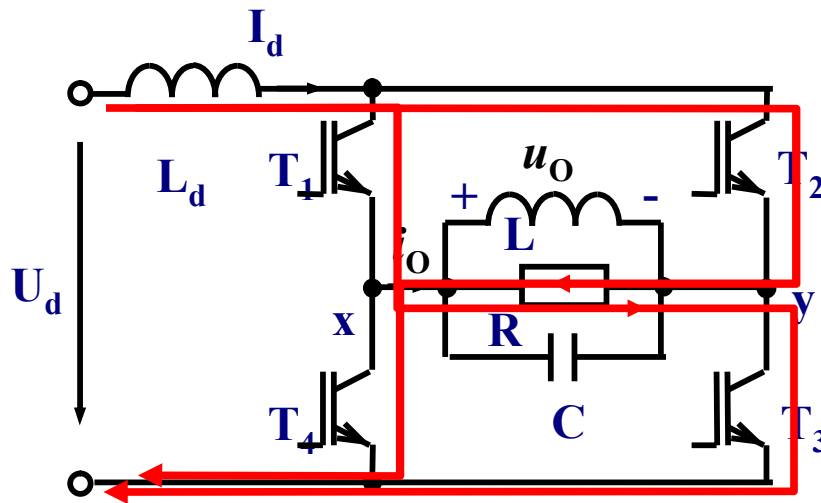
电流源逆变电路中的电机作发电机运行时，相电压与相电流仍相差90度以上。但由于电流的方向不变，只需要改变电压的方向就可实现能量的逆转。这可用普通相控整流器就能实现，而不需要另加任何装置。在主电路的简单与反馈能量的处理简单这两点，电流源逆变电路有自己的优点。目前在电力牵引与传动中广泛使用电压源逆变器。

4. 单相并联谐振逆变电路

a) 用具有自关断能力的器件组成的并联谐振电路

L 是感应加热线圈的等效电感， C 是补偿电容器，它补偿负载的感性无功功率，使负载在电路工作频率上产生并联谐振。 R 代表感应线圈中的能耗。直流电流源用电压源与一个足够大的电感 L_d 串联来实现。

工作过程：



电路的工作波形如图。由于负载发生并联谐振，它对 i_o 中频率为谐振频率的分量（即 i_o 的基波频率）表现出高阻抗而对其它频率分量呈现低阻抗，所以，负载电压波形基本上是正弦波。

并联谐振时 u_o 与 i_o 是同相位的，开关 T_1 、 T_3 与 T_2 、 T_4 是在 u_o 的零电压点进行导通、关断转换的。所以，开关导通与关断时产生的损耗较小。

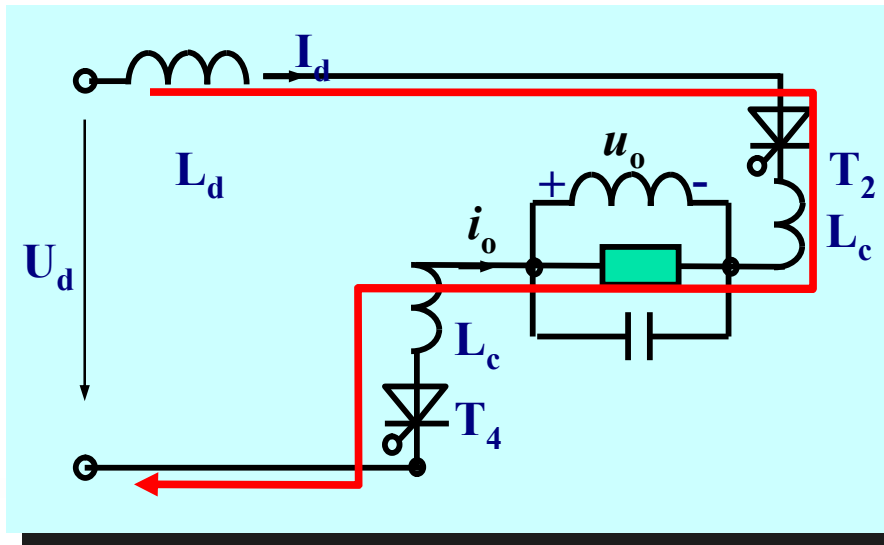
若电路中电感为 L ，电阻为 R ，工作频率为 f 。若要使电路并联谐振，应并联的电容 C 可以根据并联谐振的条件求出。

在并联谐振时，等效负载具有最大的阻抗，所以电压最大，功率也最大。而偏离谐振点时，负载电压就下降，同时电压电流也不同相。所以负载的功率

也下降。谐振逆变电路利用这种方法来实现功率调节。

b) 晶闸管并联谐振逆变电路

用晶闸管构成的并联谐振逆变电路如图。在单相逆变电路时指出，当负载为容性时主管将自己关断。它不需要强迫换流。这里采用了这个规则：**并联的电容使负载为容性**。为防止过大的 di/dt 损坏晶闸管，给每个晶闸管都串入一个电感 L_c 。



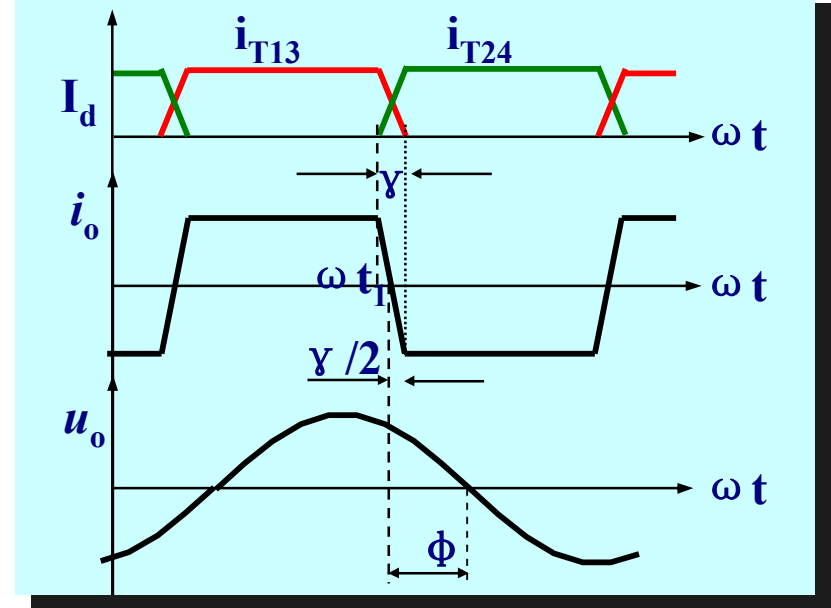
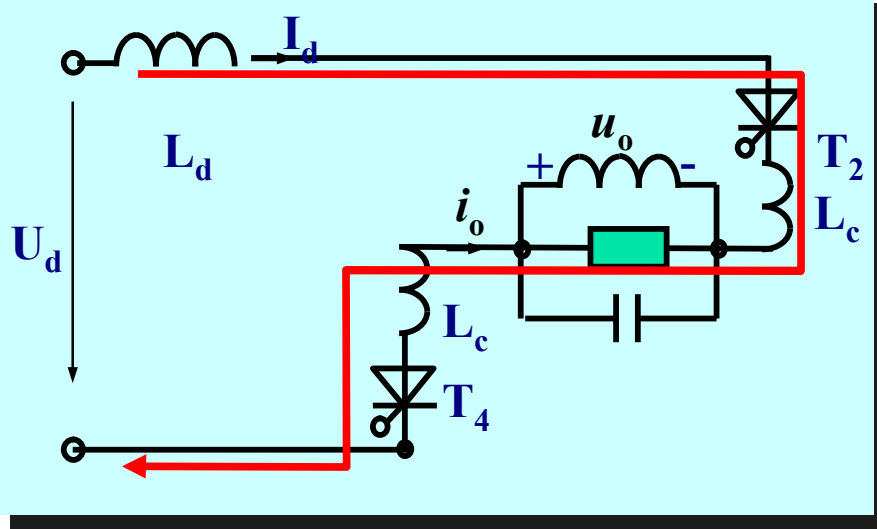
电路的工作过程是：

T_1T_3 导通， I_d 经 T_{13} 流动。由于负载是容性的，负载电压滞后负载电流。在换流时 u_o 左+右-。根据导通条件

T_2T_4 可以

西南交通大学





导通。所以在 ωt_1 点 T_{24} 导通。

T_{24} 导通后，由于 L_c 是电感，它的电流不跳变，所以电路中产生环流，出现4个晶闸管导通现象。在电压 u_o 作用下， T_{13} 中的电流逐渐减小而 T_{24} 中的电流逐渐增大。当 $i_{T13}=0$ 时 $i_{T24}=I_d$ ，电路换流完成。

此后 T_{24} 稳定导通，直到下次换流。

从上分析知，在换流期间 $T_1—T_4$ 全部导通形成换流重叠角 γ 。电路的工作过程与整流电路完全相同。

换流重叠角 γ 可用与整流电路相同的方法推出：

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\cos \omega t_o - \frac{2\omega L_c I_d}{U_{om}} \right) - \omega t_o$$

由于晶闸管有固有关断时间，电流下降到零后，必须再承受一段时间的反向电压才能恢复其正向阻断能力。负载电流必须超前负载电压的角度 ϕ ：

$$\phi = \omega t_o + \frac{\gamma}{2}$$

否则电路将不能正常换流。晶闸管不能关断。需要说明的是在感应加热中，电路中等效的L、R值都在不断变化。为使电路始终保持并联谐振，控制电路必须跟随主电路参数的变化调节逆变频率。

例题与作业

例1 三相桥式电压源逆变器 $U_d=100$ 伏，求负载相电压的基波幅值 $U_{an(1)m}$ 与有效值 $U_{an(1)}$ 、线电压的基波幅值 $U_{ab(1)m}$ 与有效值 $U_{ab(1)}$ 、5次谐波有效值。

解：相电压基波幅值 $U_{anm(1)} = \frac{2U_d}{\pi} = 0.637U_d = 67.3(V)$

相电压基波有效值 $U_{an(1)} = \frac{2U_d}{\pi\sqrt{2}} = 0.45U_d = 45(V)$

线电压基波幅值 $U_{abm(1)} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi} = 1.1U_d = 110(V)$

线电压基波有效值 $U_{ab(1)} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi}U_d = 0.78U_d = 78(V)$

相电压5次谐波幅值 $U_{anm(5)} = \frac{1}{5} U_{anm(1)} = 67.3/5 = 13.46(V)$

相电压5次谐波有效值 $U_{an(5)} = \frac{1}{5} U_{an(1)} = 9(V)$

线电压5次谐波幅值 $U_{abm(5)} = \frac{1}{5} U_{abm(1)} = 110/5 = 22(V)$

线电压5次谐波有效值 $U_{ab(5)} = \frac{1}{5} U_{ab(1)} = 15.6(V)$

例2 单相桥式电压源逆变器 $U_d=100$ 伏，采用移相调压，移相角 $\theta = 120$ 度求输出电压有效值与基波有效值。

解：有效值 $U_o = \sqrt{\theta / \pi} U_d = 57.7(V)$

基波有效值 $U_{o(1)} = \frac{2\sqrt{2}U_d}{\pi} \sin \frac{\theta}{2} = 45(V)$

例3 三相桥式电压源逆变器输出线电压为380伏，现在用三相可控整流桥来提供 U_d 。若交流电源为380伏，求 U_d 与控制角。

解：由
$$U_{ab} = \sqrt{2/3}U_d = 0.816U_d$$

所以，直流电压 U_d 为：
$$U_d = \sqrt{3/2}U_{ab} = 465.4(V)$$

三相可控整流桥输出 U_d ，就是：

$$U_d = 2.34U_2 \cos \alpha = 465.4(V)$$

所以
$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{U_d}{2.34U_2}\right) = 25.3^\circ$$

说明：本题中三相整流桥当作大电感负载。此时整流桥输出电压中的谐波全部降落在电感上。滤波电容上是输出电压的直流分量。

例4 并联谐振逆变器中 $I_d = 250$ 安, $f = 1000\text{Hz}$, 晶闸管的最大 $di/dt = 10\text{A}/\mu\text{s}$ 。关断时间 $t_q = 35 \mu\text{s}$, 求负载的功率因数。

解: 换相时间:

$$t_\gamma = I_d / \frac{di}{dt} = 250 / 10 = 25(\mu\text{s})$$

超前时间 $t = t_q + t_\gamma / 2 = 35 + 25 / 2 = 47.5(\mu\text{s})$

在 1000Hz 时, 即周期 1ms 时对应的角度:

$$1000 : 360 = 47.5 : x$$

$$x = 360 \times 47.5 / 1000 = 17.1^\circ$$

负载的功率因数 $\cos 17.1^\circ = 0.9558$