



# 第7章 逆变电路

## 7.6 三相电压型逆变电路





# 主要内容

1. 三相电压型逆变电路的结构
2. 三相电压型逆变电路的工作原理

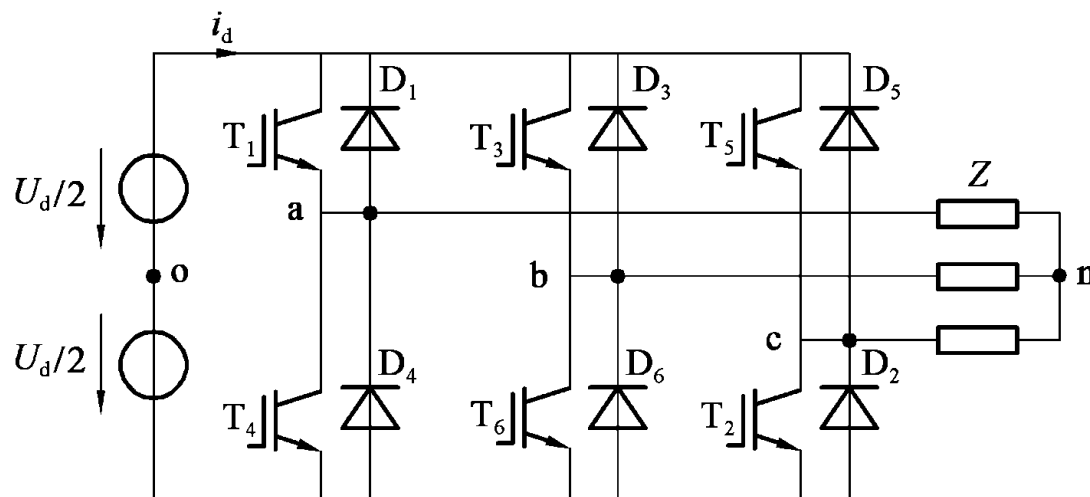


# 1.三相电压型逆变电路的结构

三相逆变电路由 6 个带无功反馈二极管的全控开关构成。

三相负载接在三个半桥的输出端。负载中点为“n”。

虽然实际上只需要一个直流电压源，但为分析方便，可将该电源看成是两个电源的串联，并有一个假想的中点“o”。



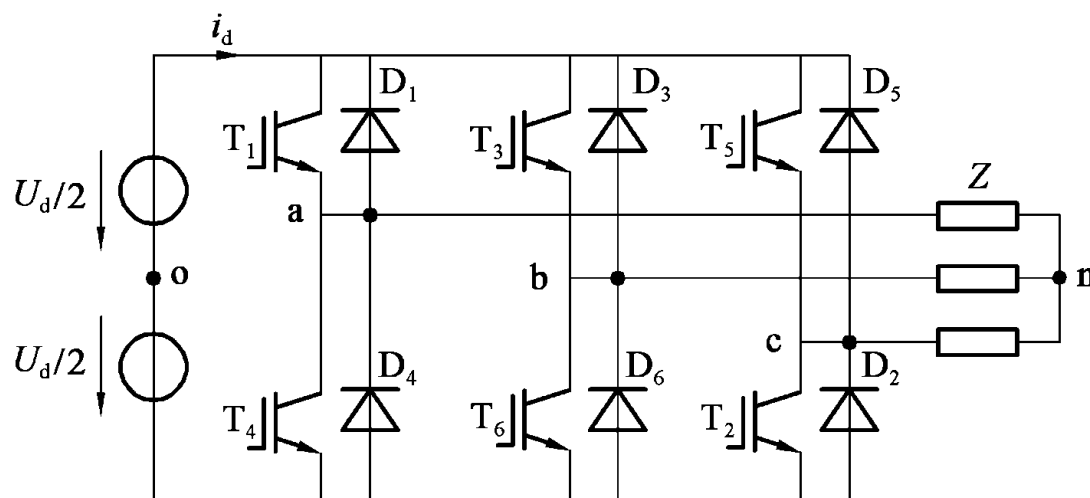
## 2.三相电压型逆变电路的工作原理

### 180°导电方式：

- 电路工作时开关 $T_1 \sim T_6$ 均导通180°。

- 导通控制顺序为：

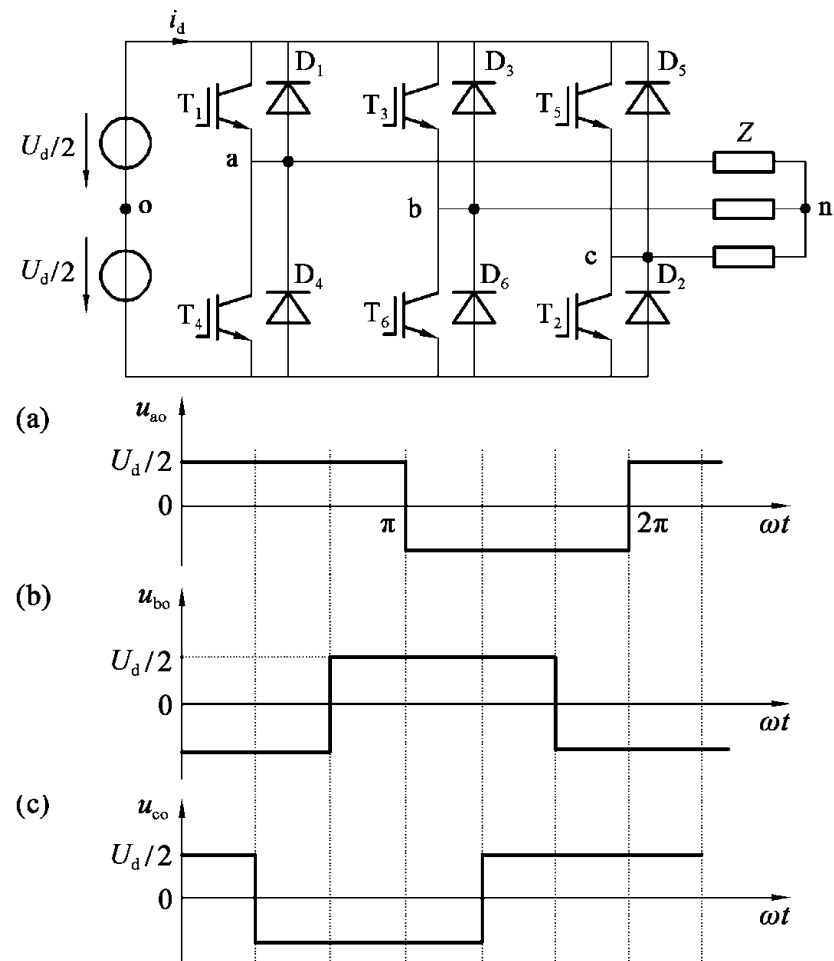
$T_1、T_2、T_3 \rightarrow T_2、T_3、T_4 \rightarrow T_3、T_4、T_5 \rightarrow T_4、T_5、T_6 \rightarrow T_5、T_6、T_1 \rightarrow T_6、T_1、T_2$ ，每个状态持续  $60^\circ$ 。



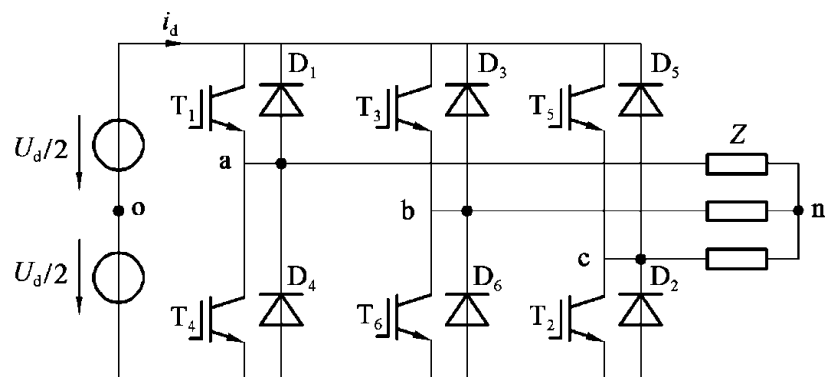
## 2.三相电压型逆变电路的工作原理

### 180°导电方式：

- 根据半桥逆变器的工作原理，可以由开关状态直接得到桥臂中点对电源中点o的电位波形。它们是180°的方波交流电压，其幅值为  $U_d/2$ 。
- 每个半桥工作180°，三个半桥相位相差120°。



## 2.三相电压型逆变电路的工作原理



在任一瞬间，将有三个桥臂同时导通，可以是上面一个桥臂下面两个桥臂，也可能是上面两个桥臂下面一个桥臂同时导通。由于每次换流都在同一相上下两个桥臂之间进行，因此也被称为**纵向换流**。





## 第7章 逆变电路

### 7.7 三相电压型逆变电路的基本数量关系



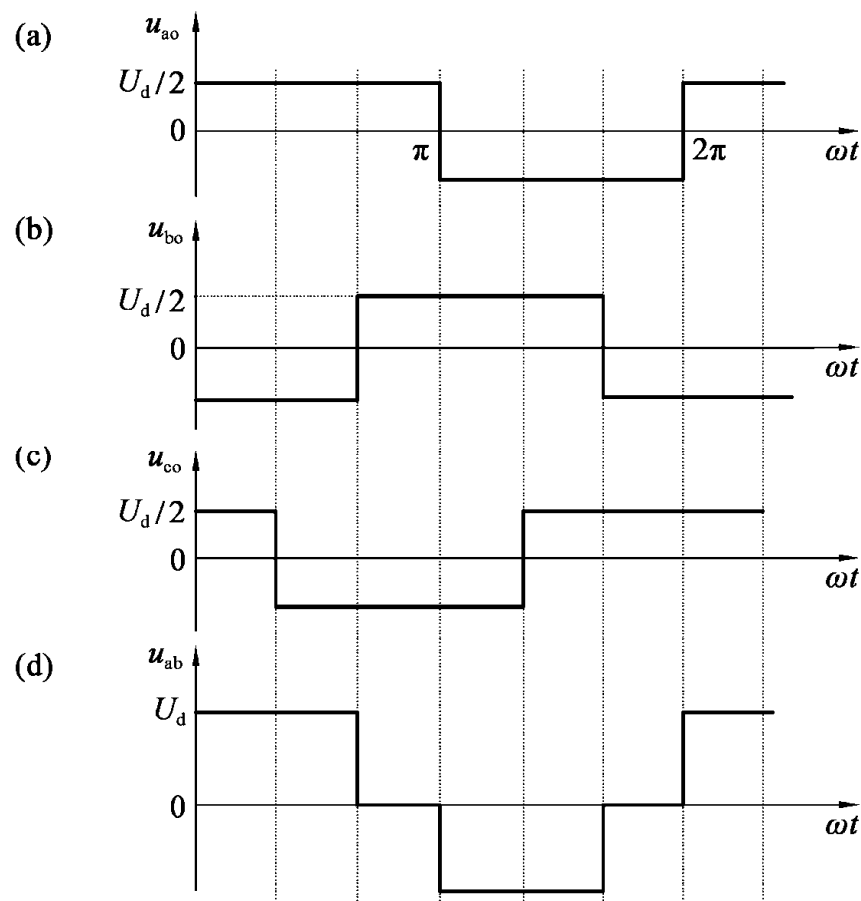
## 7.7 三相电压型逆变电路的基本数量关系

180°导电方式：

逆变电路的输出线电压可由两个半桥间的电压差得到，即

$$\left. \begin{aligned} u_{ab} &= u_{ao} - u_{bo} \\ u_{bc} &= u_{bo} - u_{co} \\ u_{ca} &= u_{co} - u_{ao} \end{aligned} \right\}$$

线电压是120°的矩形波，幅值为 $U_d$

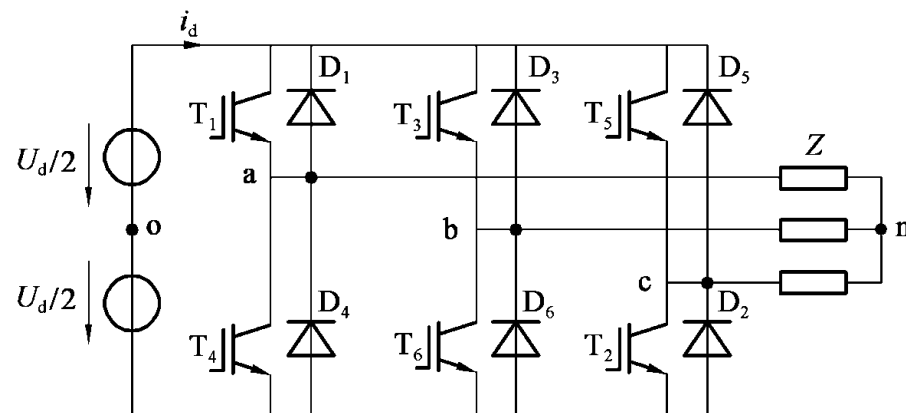




## 7.7 三相电压型逆变电路的基本数量关系

若三相负载对称、星形连接，  
可得到负载相电压( $u_{an}$ 、 $u_{bn}$ 、 $u_{cn}$ )、桥臂输出电压( $u_{ao}$ 、 $u_{bo}$ 、 $u_{co}$ )、三相负载中点  $n$  与假想的直流电源中点  $o$  间的电压  $u_{no}$  三者间的电压平衡方程，即

$$\left. \begin{aligned} u_{an} &= u_{ao} - u_{no} \\ u_{bn} &= u_{bo} - u_{no} \\ u_{cn} &= u_{co} - u_{no} \end{aligned} \right\}$$

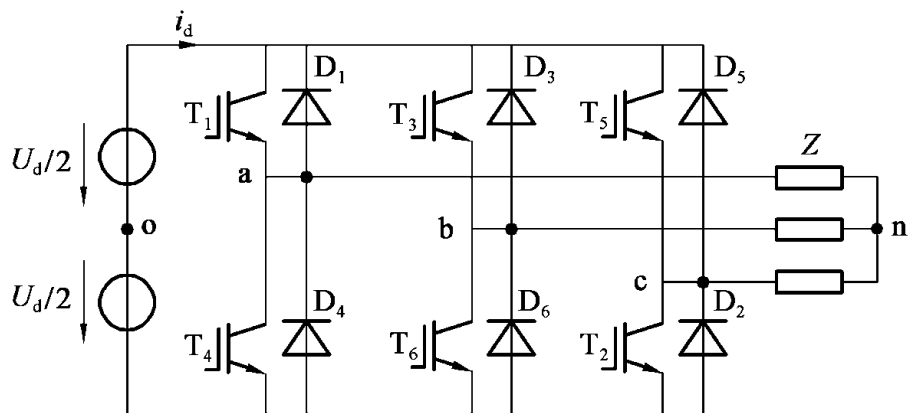


$$u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0$$

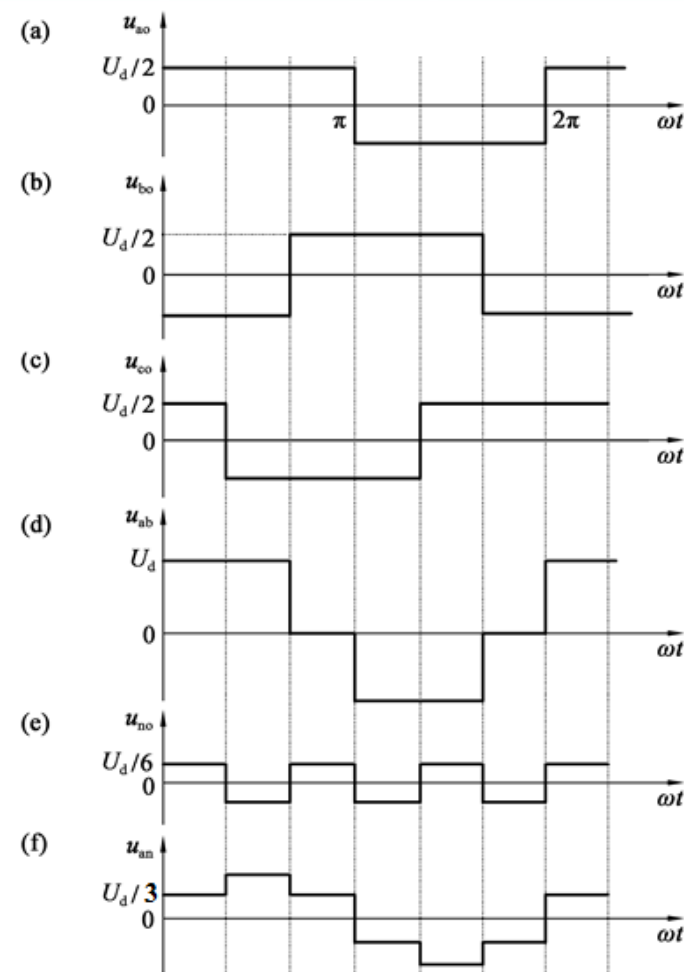
$$u_{no} = \frac{1}{3} (u_{ao} + u_{bo} + u_{co})$$



# 7.7 三相电压型逆变电路的基本数量关系



$$\left. \begin{aligned} u_{an} &= u_{ao} - u_{no} \\ u_{bn} &= u_{bo} - u_{no} \\ u_{cn} &= u_{co} - u_{no} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} u_{no} &= \frac{1}{3} (u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \\ u_{an} + u_{bn} + u_{cn} &= 0 \end{aligned}$$



## 7.7 三相电压型逆变电路的基本数量关系

将输出线电压展开成傅里叶级数，得

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

可见，线电压中没有余弦项，偶次项和三的倍数次项。

输出线电压的有效值为

$$U_{ab} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d = 0.816 U_d$$

输出线电压的基波幅值为

$$U_{ab(1)M} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi} = 1.1 U_d$$

输出线电压的基波有效值为

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



## 7.7 三相电压型逆变电路的基本数量关系

将负载相电压展开成傅里叶级数，得

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

可见，相电压中没有余弦项，偶次项和三的倍数次项。谐波含量与线电压一样，但是符号不同。

输出相电压的有效值为

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

输出相电压的基波幅值为

$$U_{\text{an(1)M}} = \frac{2U_d}{\pi} = 0.637 U_d$$

输出相电压的基波有效值为

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





## 第7章 逆变电路

### 7.8 负载并联谐振型逆变电路





# 主要内容

1. 负载并联谐振型逆变电路的结构
2. 负载并联谐振型逆变电路的工作原理



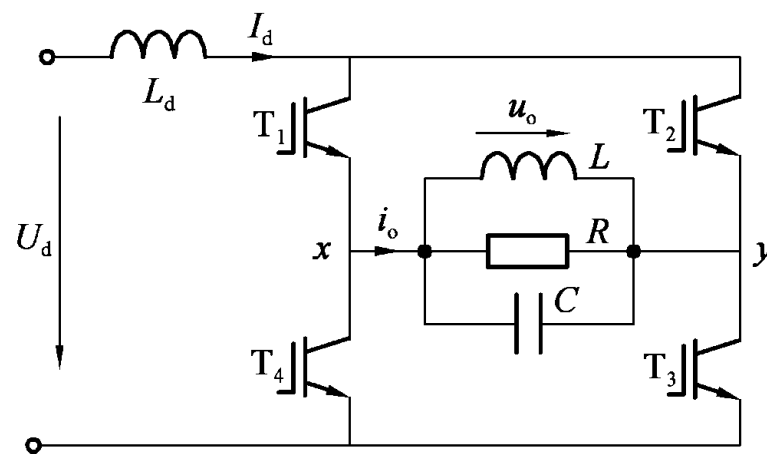
# 1. 负载并联谐振型逆变电路的结构

$L$ ——感应加热线圈的等效电感；

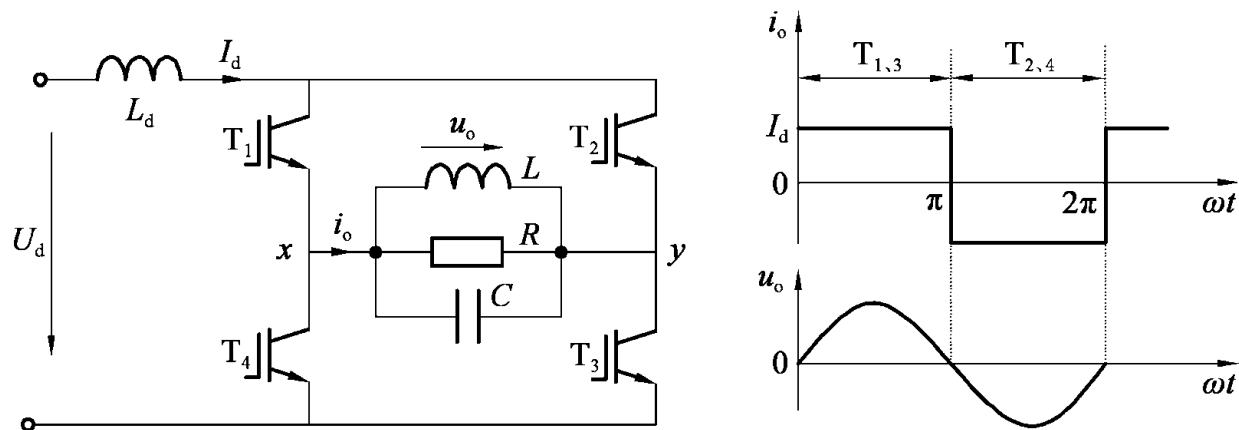
$C$ ——补偿电容器；

$R$ ——代表感应线圈中的能耗。

直流侧电流源用电压源与一个足够大的电感 $L_d$ 串联来实现。



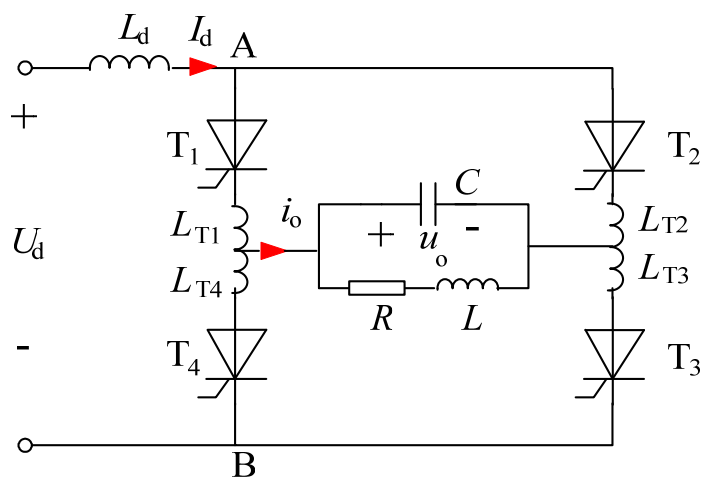
# 1. 负载并联谐振型逆变电路的结构



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，而对其他频率分量呈现低阻抗，所以，负载电压波形基本上是正弦波。

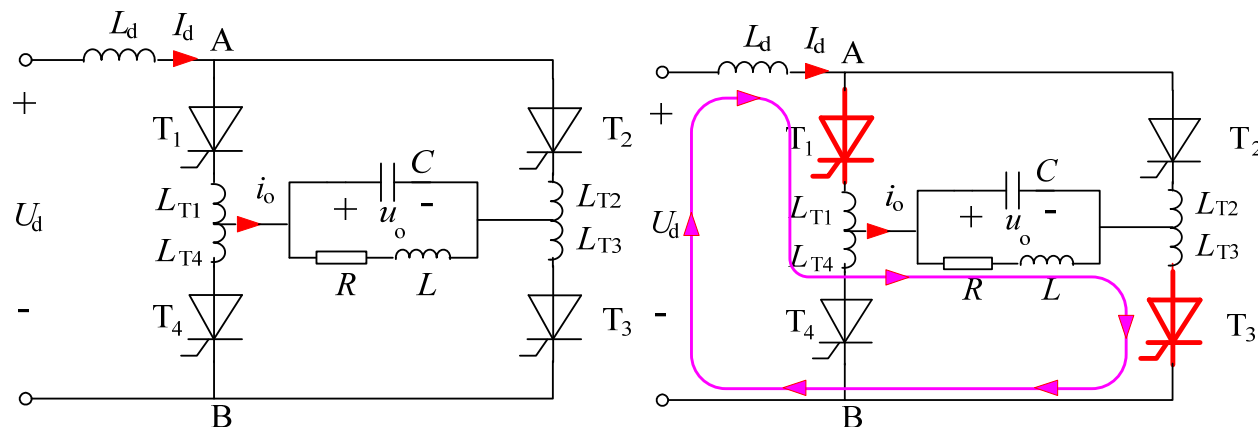
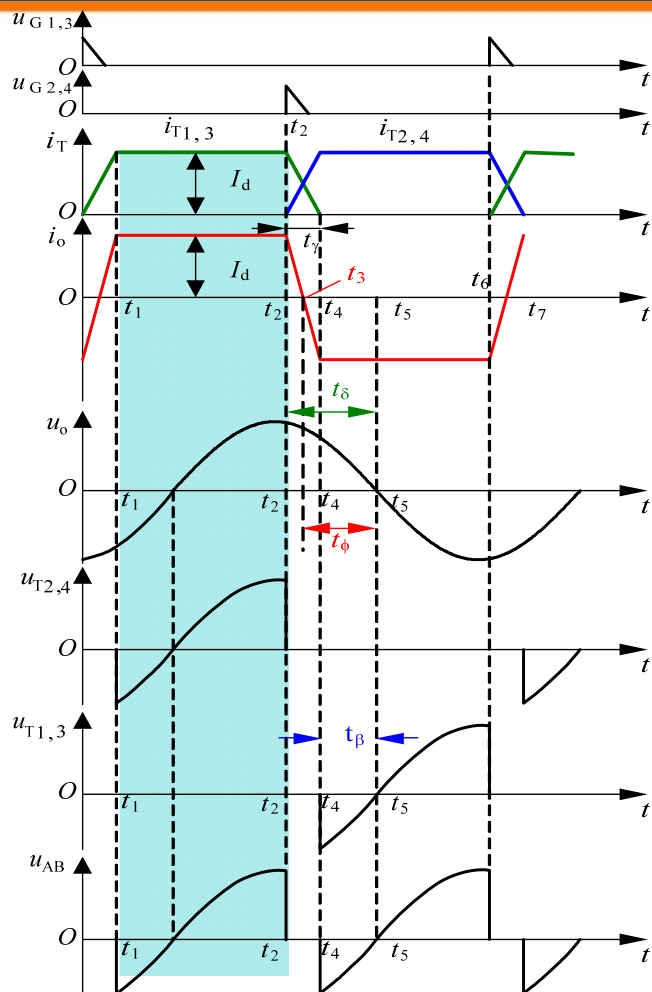


## 2. 负载并联谐振型逆变电路的工作原理



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 $L_T$ 。

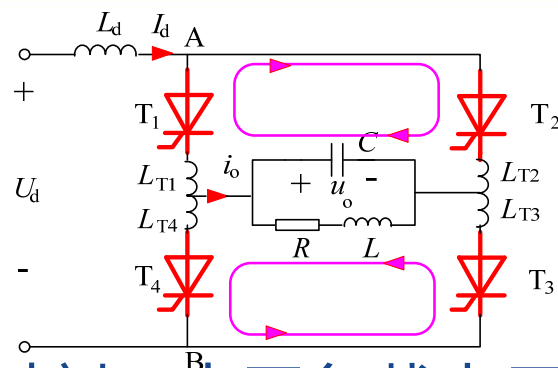
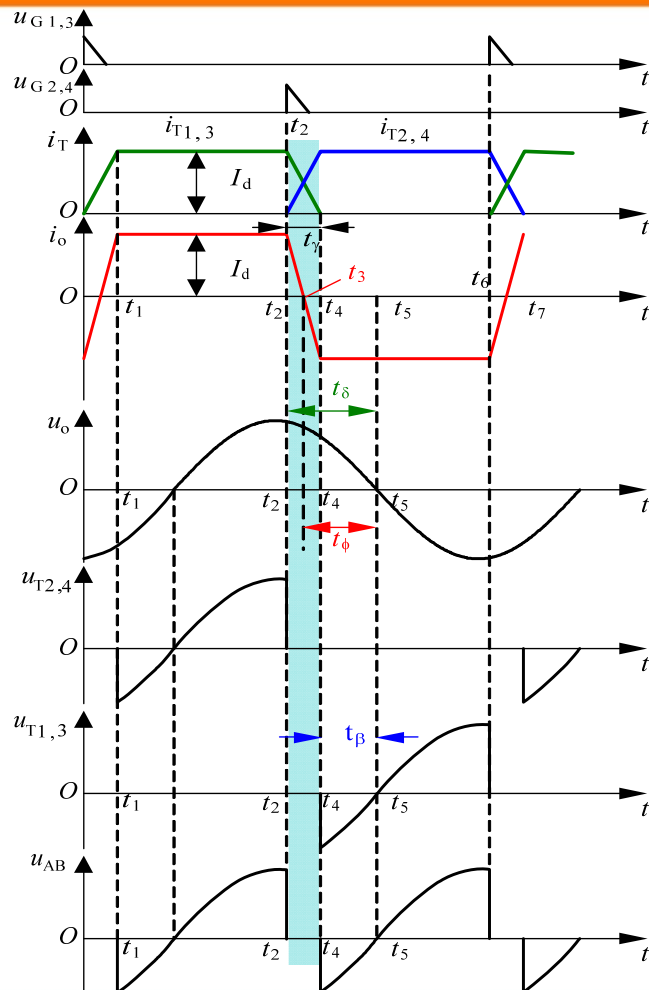
## 2. 负载并联谐振型逆变电路的工作原理



1. 在 $t_1 \sim t_2$ 期间， $T_1$ 、 $T_3$ 稳定导通，负载电流 $i_o$ 为电流源电流 $I_d$ ，电感 $L_{T1}$ 、 $L_{T3}$ 两端电压为零。
2.  $u_{T2} = u_{T4} = u_o$
3.  $u_{T1} = u_{T3} = 0$



## 2. 负载并联谐振型逆变电路的工作原理

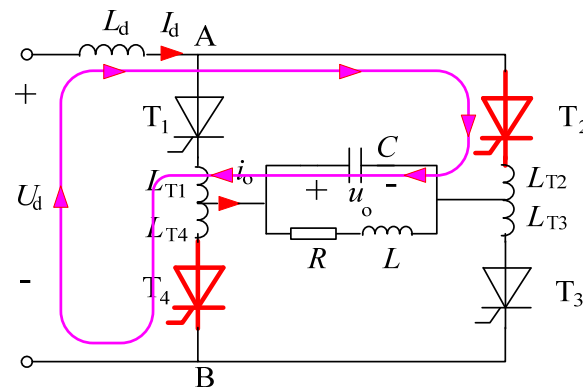
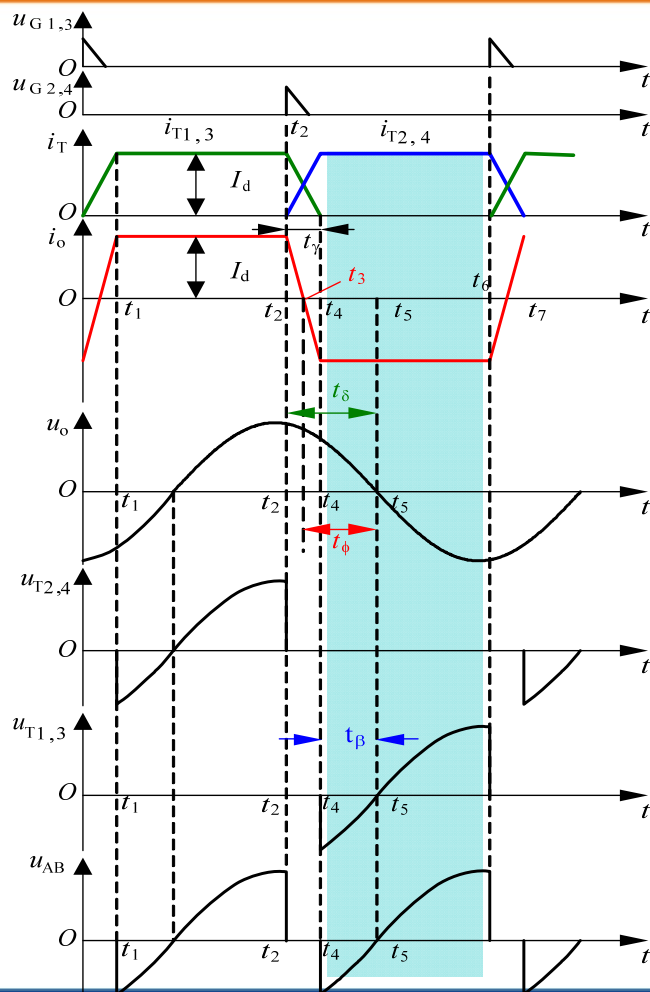


(II)

到 $t_2$ 时刻，由于负载电压 $u_o$ 的极性为正，且 $T_1$ 、 $T_3$ 导通，所以晶闸管 $T_2$ 、 $T_4$ 承受正向电压，在此时触发 $T_2$ 、 $T_4$ 导通。由于电感 $L_T$ 中的电流不能跳变，所以， $T_1$ 、 $T_3$ 中的电流将在 $u_o$ 的作用下逐渐减小， $T_2$ 、 $T_4$ 中的电流逐渐增大；当 $T_1$ 、 $T_3$ 中电流下降为零时， $T_1$ 、 $T_3$ 关断，电流 $I_d$ 经 $T_2$ 、负载、 $T_4$ 流动，电路完成换流过程。在换流期间 $t_2 \sim t_4$ ， $T_1 \sim T_4$ 全部导通形成换流重叠角 $\gamma$ 。



## 2. 负载并联谐振型逆变电路的工作原理



在 $t_4 \sim t_6$ 期间， $T_2$ 、 $T_4$ 稳定导通，负载电流 $i_o$ 为电流源电流 $I_d$ ，电感 $L_{T2}$ 、 $L_{T4}$ 两端电压为零。

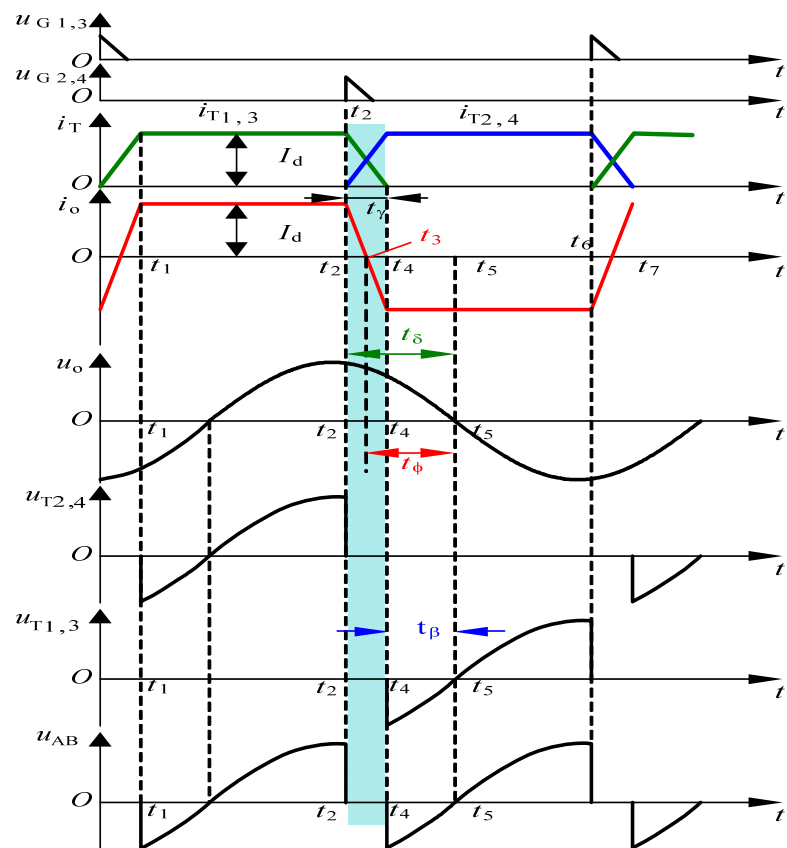
$$u_{T2} = u_{T4} = 0$$

$$u_{T1} = u_{T3} = -u_o$$



## 2. 负载并联谐振型逆变电路的工作原理

问题：如何保证晶闸管的可靠关断？



晶闸管需要一段时间才能恢复正向阻断能力，因此换流结束后还要使晶闸管承受一段反压时间 $t_\beta$ 。  $t_\beta = t_5 - t_4$

$t_\beta$ 应大于晶闸管的关断时间 $t_q$ 。

为保证可靠换流应在 $u_o$ 过零前触发 $T_2, T_4$ 。

触发引前时间 $t_\delta = t_5 - t_2 = t_\beta + t_\gamma$

输出电流超前输出电压的时间

$t_\phi = t_5 - t_3 = t_\beta + t_\gamma / 2$

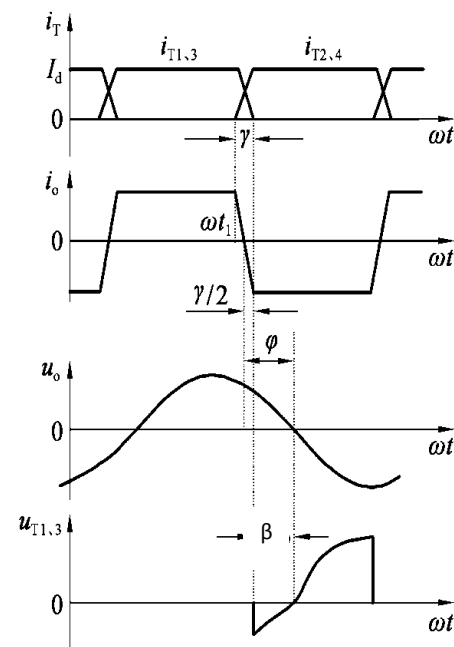
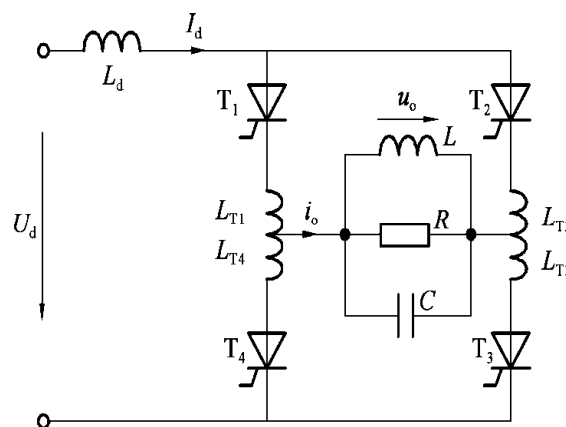


## 2. 负载并联谐振型逆变电路的工作原理

问题：如何保证晶闸管的可靠关断？

- 由于晶闸管有不能忽略的关断时间。因此，负载电流必须超前负载电压的角度为

$$\varphi = \beta + \frac{\gamma}{2}$$



## 2. 负载并联谐振型逆变电路的工作原理

问题：如何保证晶闸管的可靠关断？

换流重叠角  $\gamma$  可用与整流电路相同的方法推出

$$\gamma = \arccos \left( \cos \omega t_{\beta} - \frac{2 \omega L_T I_d}{U_{oM}} \right) - \omega t_{\beta}$$

为了保证电路可靠换流，当电路参数发生变化时，必须调节工作频率。比如在感应加热中，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。





## 2. 负载并联谐振型逆变电路的工作原理



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**。







# 第7章 逆变电路

## 7.9 电流型逆变电路





# 主要内容

1. 电流型逆变电路的结构
2. 电流型逆变电路的工作原理



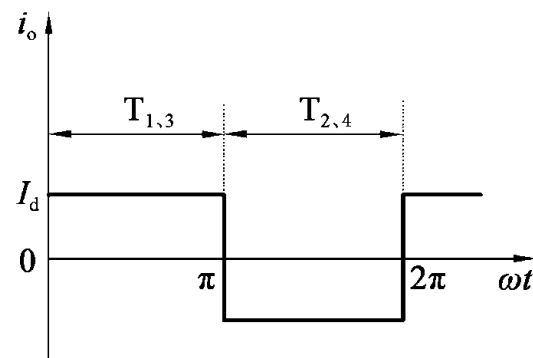
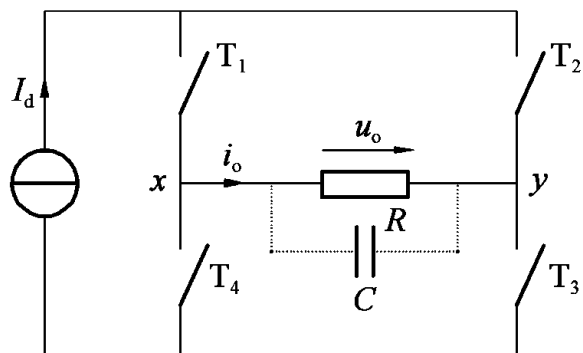
# 1.电流型逆变电路的结构



- ① 在电流型逆变电路中，直流侧电源为电流源，输出电流的波形由逆变电路确定，输出电压的波形取决于负载的性质。
- ② 这种逆变电路直流侧的电流源由可控整流电路在直流侧串联一个大电感构成。
- ③ 电流型逆变电路的突出特点是可以直接确定输出电流的波形。



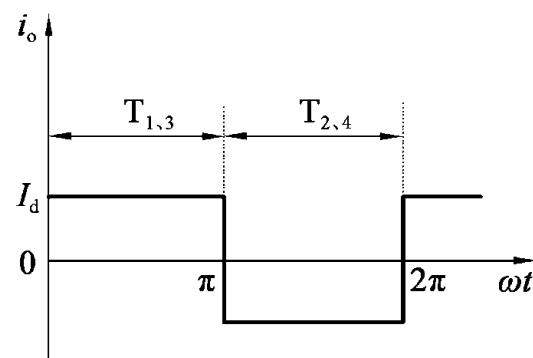
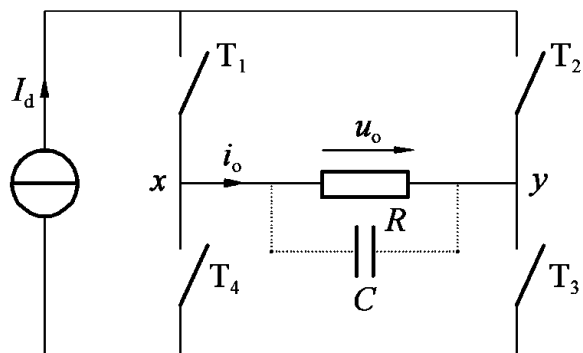
# 1. 电流型逆变电路的结构



当开关 $T_1$ 、 $T_3$ 闭合， $T_2$ 、 $T_4$ 断开时，负载电流 $i_o$ 为正；当 $T_2$ 、 $T_4$ 闭合， $T_1$ 、 $T_3$ 断开时，直流电流 $i_o$ 为负。所以， $i_o$ 为 $180^\circ$ 导通角的方波交流电流。

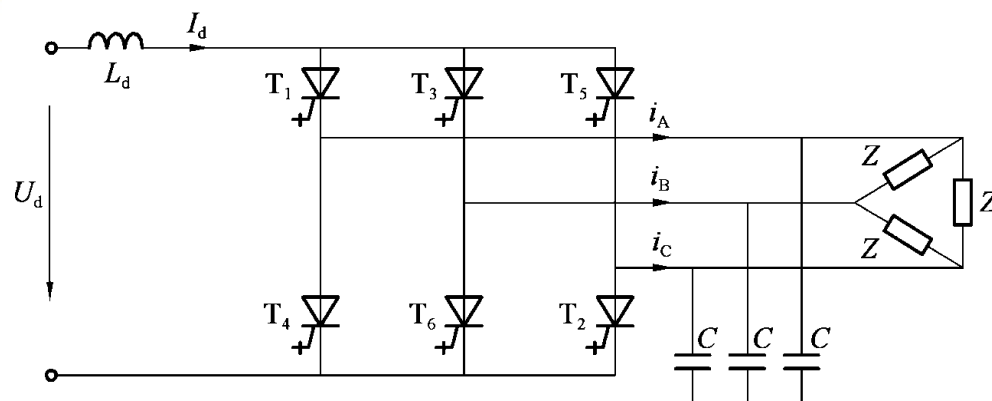


# 1. 电流型逆变电路的结构



当负载为感性时，在交流输出端需要并联电容 $C$ ，以便在换流时为感性负载电流提供流通路径，吸收负载电感的储能。

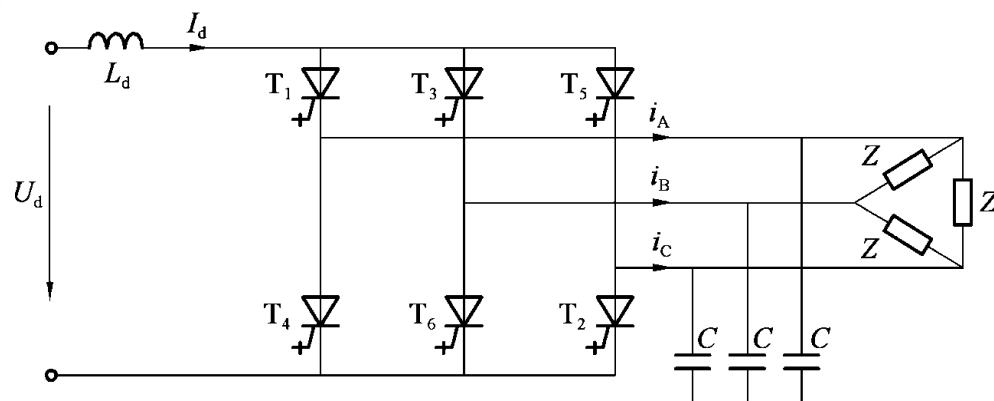
## 2.三相电流型逆变电路的工作原理



- ① 电路中开关 $T_1 \sim T_6$ 为GTO。
- ② 在一个周期内，各管均导通 $120^\circ$ ，导通顺序是 $T_1$ 、 $T_2 \rightarrow T_2$ 、 $T_3 \rightarrow T_3$ 、 $T_4 \rightarrow T_4$ 、 $T_5 \rightarrow T_5$ 、 $T_6 \rightarrow T_6$ 、 $T_1$ ，每个状态持续 $60^\circ$ 。



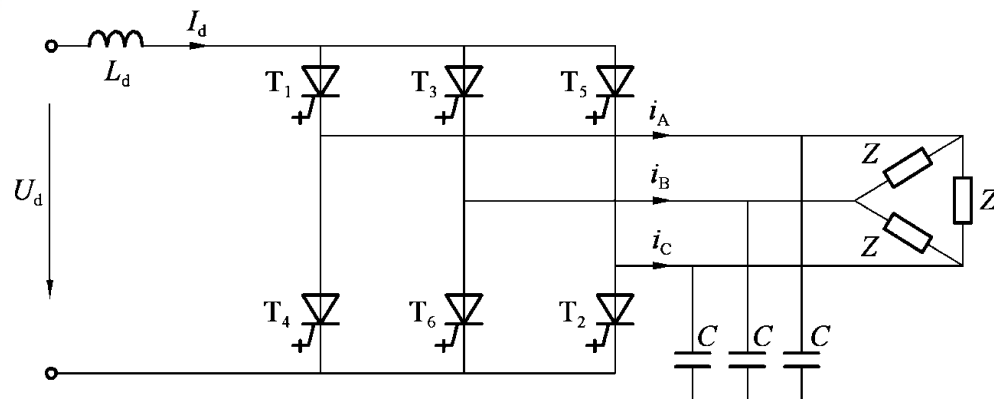
## 2.三相电流型逆变电路的工作原理



- ③ 电路工作时，任何瞬时都只有两个开关导通，一个在共阴极组，另一个在共阳极组。
- ④ 为使每相绕组在任何时刻都有电流，一般负载多采用三角形连接。



## 2.三相电流型逆变电路的工作原理

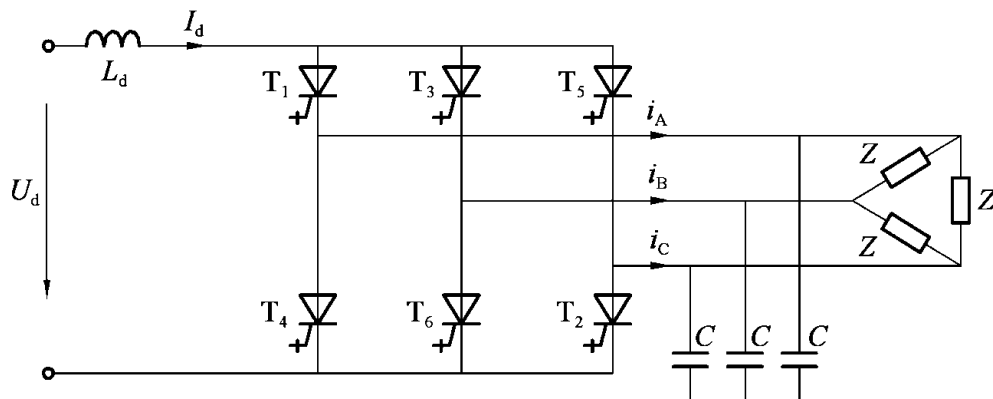


在换流时，为吸收负载电感中储存的能量，必须在负载端并联三相电容器。



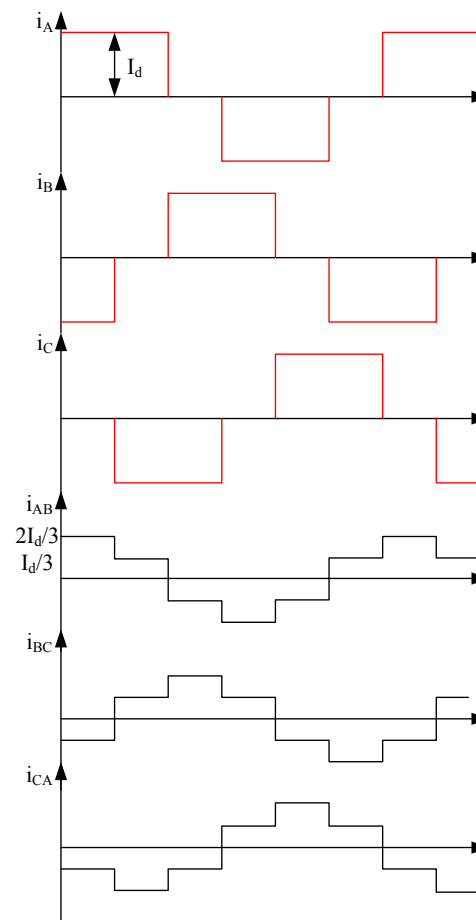


## 2.三相电流型逆变电路的工作原理

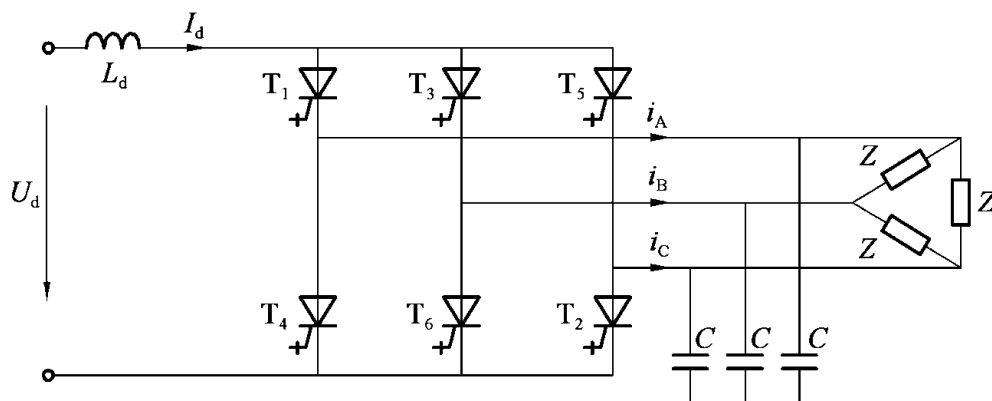


忽略换流过程，假定 $T_1 \sim T_6$ 为理想开关。

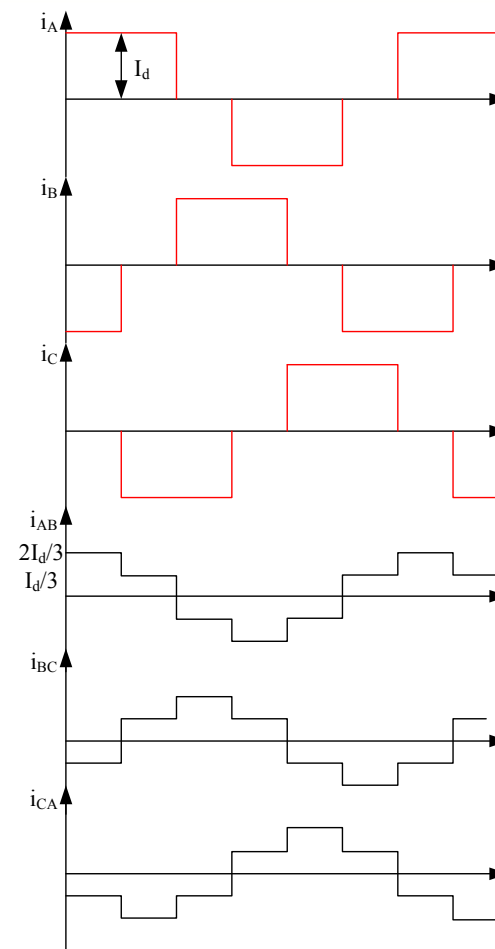
在一个周期内，各管均导通 $120^\circ$ ，导通顺序是 $T_1$ 、 $T_2 \rightarrow T_2$ 、 $T_3 \rightarrow T_3$ 、 $T_4 \rightarrow T_4$ 、 $T_5 \rightarrow T_5$ 、 $T_6 \rightarrow T_6$ 、 $T_1$ ，每个状态持续 $60^\circ$ 。



## 2.三相电流型逆变电路的工作原理

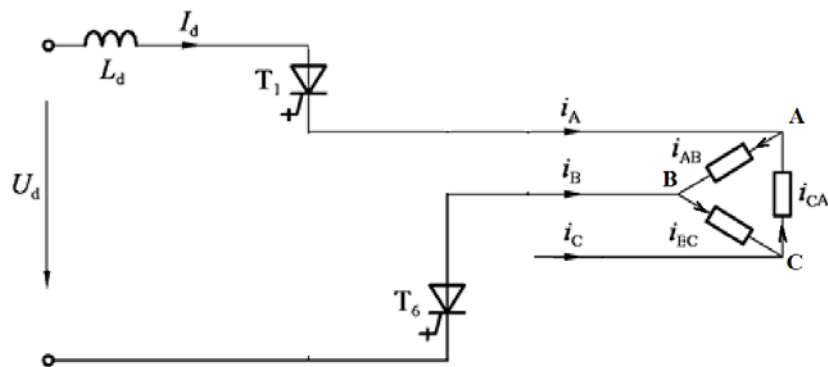


为确定逆变电路的输出线电流及负载的相电流波形，可以首先分别作出在不同工作状态时的等值电路，再利用电路的分流公式，求出各个线电流与负载相电流。



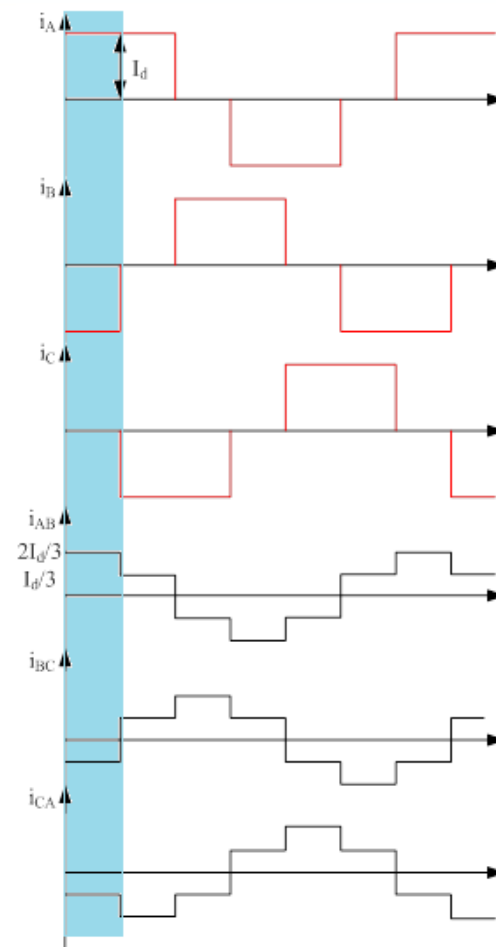
## 2.三相电流型逆变电路的工作原理

例：  $T_6$ 、 $T_1$ 导通，则等效电路为



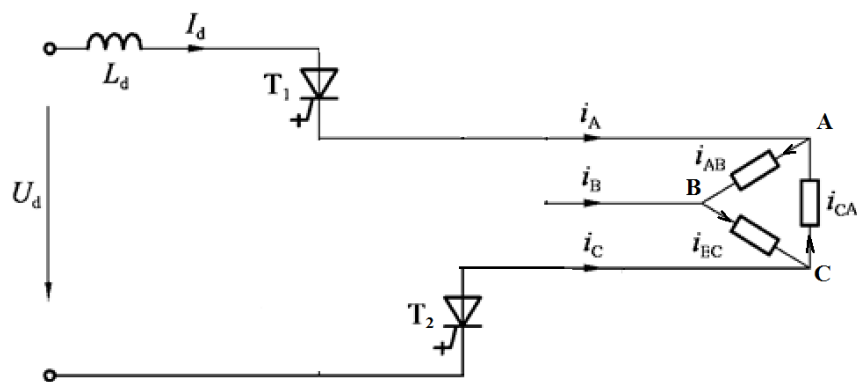
则：  $i_A = I_d$  ,  $i_B = -I_d$  ,  $i_C = 0$

$i_{AB} = 2I_d/3$  ,  $i_{BC} = -I_d/3$  ,  $i_{CA} = i_{BC} = -I_d/3$

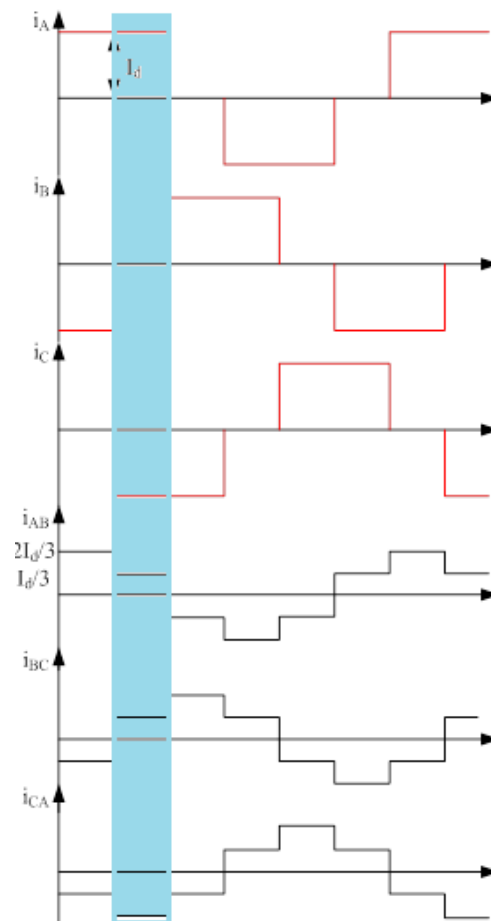


## 2.三相电流型逆变电路的工作原理

例：  $T_1$ 、 $T_2$  导通，则等效电路为



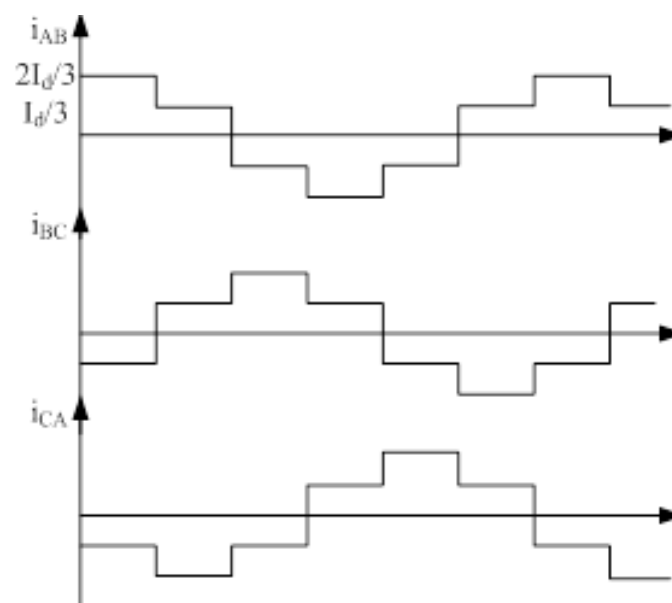
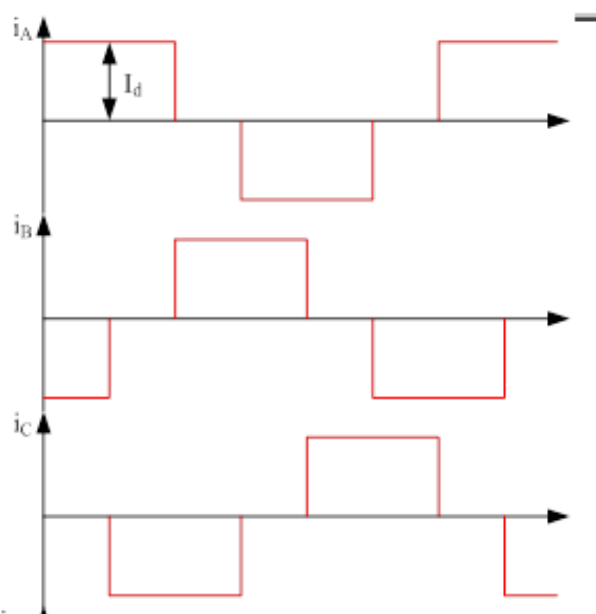
则：  $i_A = I_d$  ,  $i_B = 0$  ,  $i_C = -I_d$   
 $i_{AB} = i_{BC} = I_d/3$  ,  $i_{CA} = -2I_d/3$  ,



## 2.三相电流型逆变电路的工作原理



按照前面的分析的方法，可以依次画出各阶段的负载线电流和相电流波形。如右图所示。线电流为120°方波，相电流为六阶梯波。



## 2.三相电流型逆变电路的工作原理



将线电流 $i_A$ 和相电流 $i_{AB}$ 展开成傅里叶级数，得

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

$$i_{AB} = \frac{2I_d}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + \frac{1}{7} \sin 7 \omega t + \frac{1}{11} \sin 11 \omega t + \frac{1}{13} \sin 13 \omega t + \dots \right)$$

线电流有效值为

$$I_A = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0.816 I_d$$

线电流基波有效值为

线电流基波幅值为

$$I_{A(1)M} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d = 1.1 I_d$$

$$I_{A(1)} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = 0.78 I_d$$





谢谢