



# 第7章 逆变电路

## 7.1 逆变电路的概念和基本工作原理





# 主要内容

1. 逆变电路的概念
2. 基本工作原理

# 1. 逆变电路的概念



- 将直流电变换成交流电——**逆变**；
- 直流电通过逆向变换所得到的交流电不是反馈回交流电网，而是直接供给负载，即其输出的交流侧没有交流电源，直流电逆变为某一频率或可调频率的交流电供给负载，这种逆变称为**无源逆变**。
- 如果逆变出的交流电反馈回电网则成为**有源逆变**。

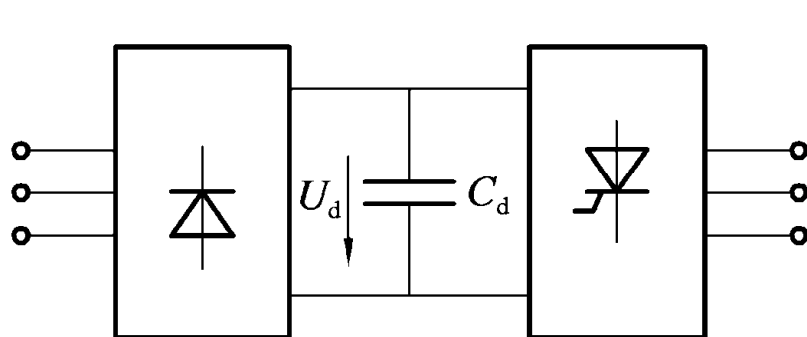


# 1. 逆变电路的概念

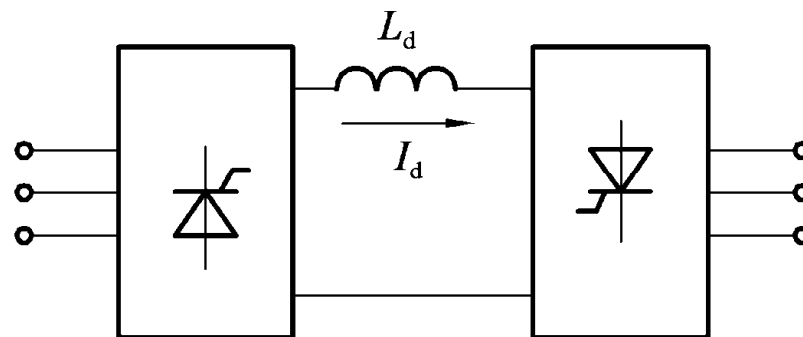
## 无源逆变电路的分类：

□ 按储能元件的性质分：

电压型逆变电路与电流型逆变电路



( a ) 电压型

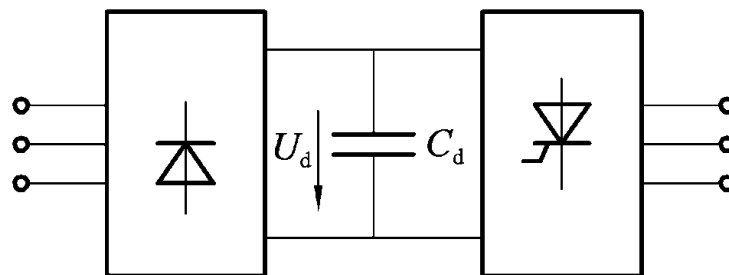


( b ) 电流型



# 1. 逆变电路的概念

## (a) 电压型逆变电路

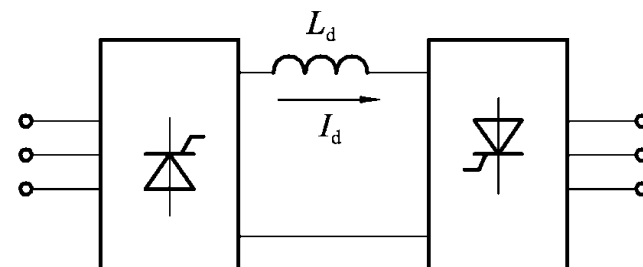


- 电压型逆变电路，其直流侧电源为电压源，直流回路呈低阻抗。
- 交流侧输出电压波形为矩形波，并且与负载阻抗角无关。
- 交流侧输出电流波形则取决于负载的性质。为了给感性（滞后）的负载电流提供流通路径，逆变桥的各桥臂必须并联无功反馈二极管。

# 1. 逆变电路的概念

## (b) 电流型逆变电路

电流型逆变电路的直流侧电源为电流源。直流电流无脉动，直流回路呈高阻抗。



交流侧输出电流的波形为矩形波，并且与负载阻抗角无关。交流侧输出电压波形则取决于负载的性质。由于电流源电流的单向性，逆变桥的各桥臂不必并联无功反馈二极管。

换相时，为了给感性负载电流提供流动路径，往往要在交流负载侧并联电容器。

# 1. 逆变电路的概念



- 按逆变器调压的方法分：  
矩形波逆变电路与脉宽调制逆变电路
- 矩形波无源逆变电路的控制最简单，将直流变换成交流所需要的开关次数最少，直流电压的利用率最高。
- 在三相逆变电路中，有  $180^\circ$  导通与  $120^\circ$  导通两种工作方式。



# 1. 逆变电路的概念



- 在三相矩形波无源逆变电路中，电压型一般都采用 $180^\circ$ 导通型，电流型只采用 $120^\circ$ 导通型。
- 矩形波无源逆变电路的主要问题是输出电压（或电流）的大小不能通过逆变电路本身来调节。
- 矩形波中谐波含量较大，往往会对负载造成不利的影响。





# 1. 逆变电路的概念

- 脉宽调制逆变电路

- 在电压型逆变电路的控制中，广泛采用了脉宽调制技术。
- 脉宽调制无源逆变电路是将通信中的调制技术推广应用到直—交变频领域。
- 它是通过控制逆变电路中各个开关的导通与关断时间的分配规律，从而达到控制输出电压中基波的幅值与频率大小的目的。



# 1. 逆变电路的概念

## □ 脉宽调制逆变电路

- 通过改变脉冲列的宽度可以改变基波分量的幅值；
- 通过改变调制周期可以改变输出基波的频率；
- 当同时改变脉冲列的宽度与调制周期时，就实现了基波的幅值与频率的同时控制。

本章主要介绍矩形波逆变电路。



# 1. 逆变电路的概念



## □ 逆变电路的应用

- 蓄电池、干电池、太阳能电池等直流电源向交流负载供电时，需要逆变电路
- 交流电机调速用变频器、不间断电源、感应加热电源等电力电子装置的核心部分都是逆变电路

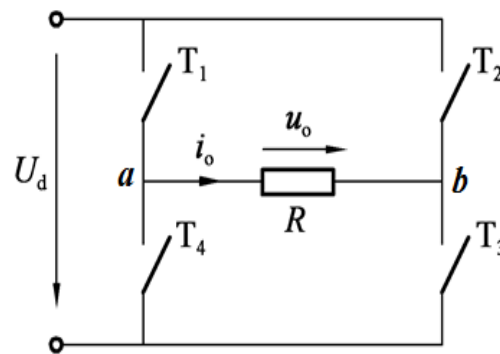


## 2. 基本工作原理

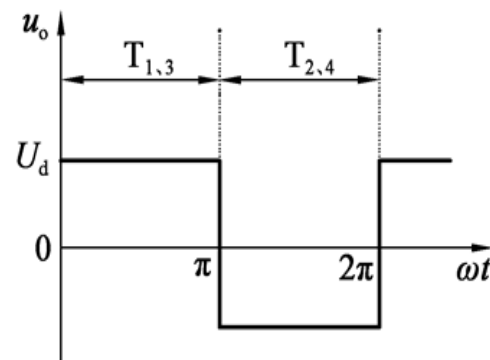
当  $T_1$ 、 $T_3$  接通， $T_2$ 、 $T_4$  断开时，负载电压  $u_o$  为正；

当  $T_2$ 、 $T_4$  接通， $T_1$ 、 $T_3$  断开时， $u_o$  为负。

如果每组开关都接通所需输出电压的半个周期，在负载电阻上就得到了交流电压  $u_o$ ，其幅值为直流电压源  $U_d$ ，频率取决于两组开关的切换频率。



(a) 电路



(b) 工作波形

图1 单相桥式直—交逆变电路的原理示意图



## 2. 基本工作原理

如果负载是阻感性负载，  
则负载电流滞后电压，图1中  
的电路将不能正常工作。

在图2中，图1中的机械  
开关被自关断的电力半导体开  
关（图中是 IGBT）取代，这种  
自关断开关与无功反馈二极管  
并联构成的桥臂具有全控双向  
开关的效果。

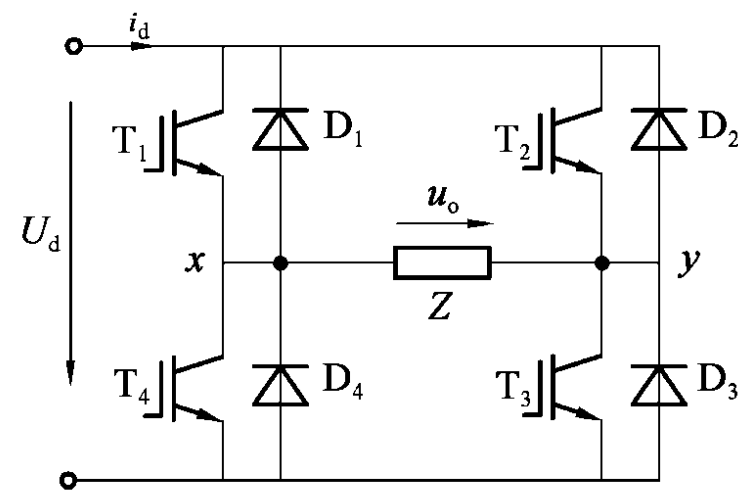
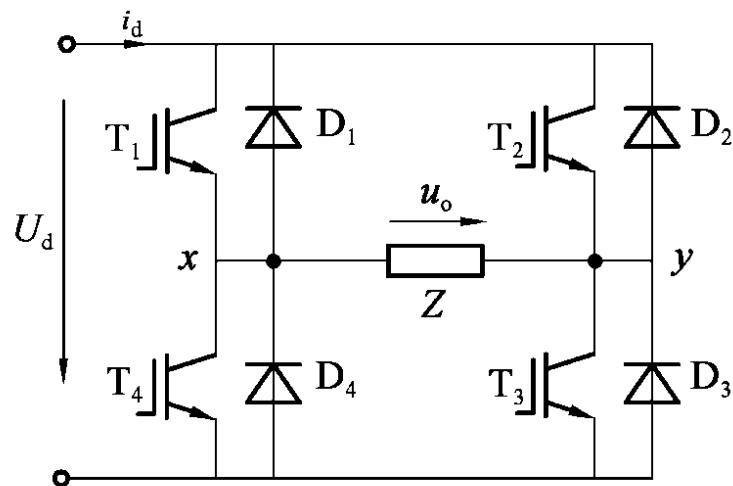


图2 有无功反馈二极管的无源逆变电路



## 2. 基本工作原理



如果  $T_1$  导通， $T_4$  阻断，负载电流由  $x$  点流向  $y$  点，那么， $x$  点就通过  $T_1$  接到了直流电源  $U_d$  的正极；如果此时负载电流是反向流动的，即由  $y$  点流向  $x$  点，则二极管  $D_1$  必然导通（ $T_1$  实际上不能导通）， $x$  点通过  $D_1$  也接到电源正极。

输出电压的极性只取决于主电路开关的状态，而与负载电流的性质无关。



# 第7章 逆变电路

## 7.2 逆变电路的换流方式





# 主要内容

1. 换流的定义
2. 换流的几种方式





# 1. 换流的定义

定义：电流从一个支路向另一个支路转移的过程，也称为换相。

研究换流方式主要是研究如何使器件关断。



## 2. 换流的几种方式



### 1 ) 器件换流 ( Device Commutation )

- 利用全控型器件的自关断能力进行换流。
- 在采用IGBT、电力MOSFET、GTO、GTR等全控型器件的电路中的换流方式是器件换流。



## 2. 换流的几种方式



### 2 ) 电网换流 ( Line Commutation )

- 电网提供换流电压的换流方式。
- 将负的电网电压施加在欲关断的晶闸管上即可使其关断。不需要器件具有门极可关断能力，但不适用于没有交流电网的无源逆变电路。



## 2. 换流的几种方式



### 3 ) 负载换流 ( Load Commutation )

- 由负载提供换流电压的换流方式。
- 负载电流的相位超前于负载电压的场合，都可实现负载换流，如电容性负载和同步电动机。



## 2. 换流的几种方式

### 3) 负载换流 (Load Commutation)

图1是基本的负载换流逆变电路，整个负载工作在接近并联谐振状态而略呈容性，直流侧串大电感，工作过程可认为 $i_d$ 基本没有脉动。

- 负载对基波的阻抗大而对谐波的阻抗小，所以 $u_o$ 接近正弦波。
- 注意触发 $VT_2$ 、 $VT_3$ 的时刻 $t_1$ 必须在 $u_o$ 过零前并留有足够的裕量，才能使换流顺利完成。

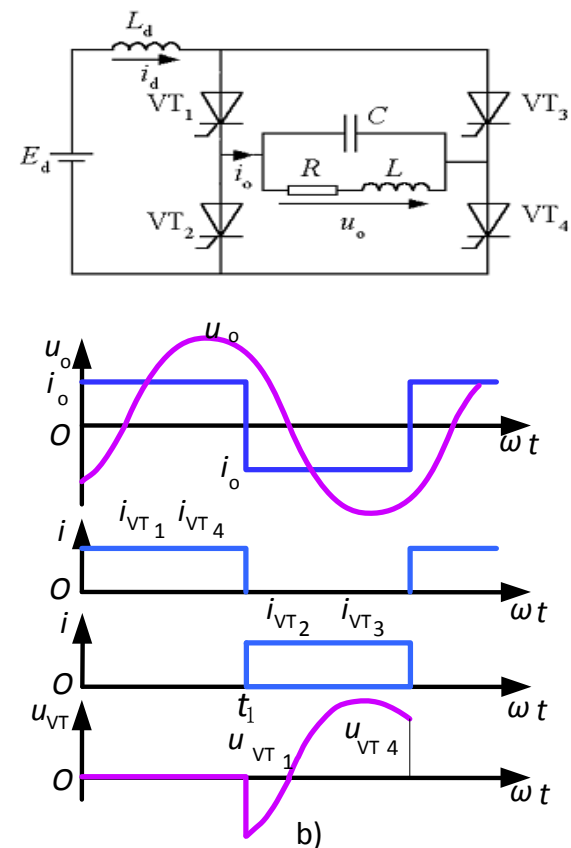


图1 负载换流电路及其工作波形

## 2. 换流的几种方式



### 4) 强迫换流 ( Forced Commutation )

- 设置附加的换流电路，给欲关断的晶闸管强迫施加反压或反电流的换流方式称为强迫换流。
- 通常利用附加电容上所储存的能量来实现，因此也称为电容换流。



## 2. 换流的几种方式



### 4) 强迫换流 ( Forced Commutation )

分类:

- ① 直接耦合式强迫换流：由换流电路内电容直接提供换流电压。
- ② 电感耦合式强迫换流：通过换流电路内的电容和电感的耦合来提供换流电压或换流电流。



## 2. 换流的几种方式

### 4) 强迫换流 ( Forced Commutation )

#### 直接耦合式强迫换流

如图2，当晶闸管VT处于通态时，预先给电容充电。当S合上，就可使VT被施加反压而关断，也叫**电压换流**。

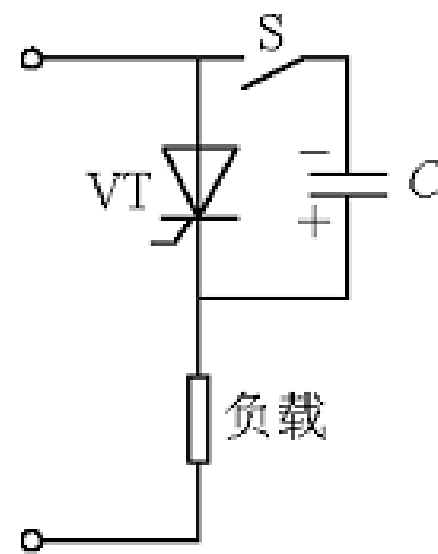


图2 直接耦合式强迫换流原理图





## 2. 换流的几种方式

### ② 电感耦合式强迫换流

图3a中晶闸管在LC振荡第一个半周期内关断，图3b中晶闸管在LC振荡第二个半周期内关断，注意两图中电容所充的电压极性不同。

在这两种情况下，晶闸管都是在正向电流减至零且二极管开始流过电流时关断，二极管上的管压降就是加在晶闸管上的反向电压。也叫**电流换流**。

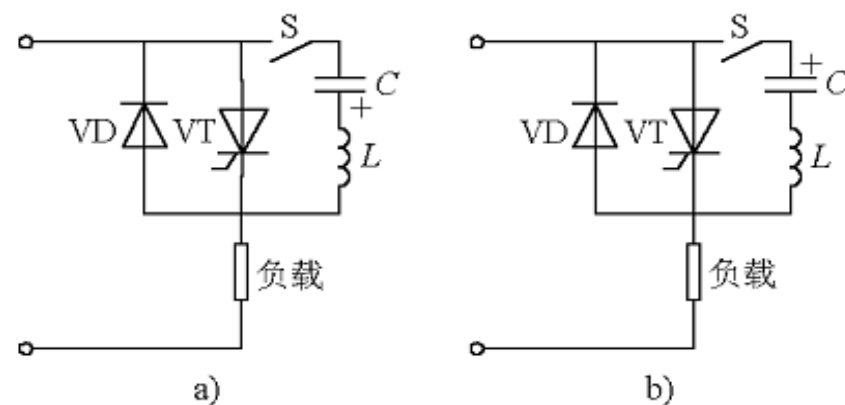


图3 电感耦合式强迫换流原理图



## 2. 换流的几种方式



### 换流方式总结：

1. 器件换流只适用于全控型器件，其余三种方式主要是针对晶闸管而言的。
2. 器件换流和强迫换流属于自换流，电网换流和负载换流属于外部换流。
3. 当电流不是从一个支路向另一个支路转移，而是在支路内部终止流通而变为零，则称为熄灭。





# 第7章 逆变电路

## 7.3 单相半桥型逆变电路





# 主要内容

1. 单相半桥型逆变电路的结构
2. 单相半桥型逆变电路的工作原理
3. 单相半桥型逆变电路的电量计算



# 1、单相半桥型逆变电路的结构

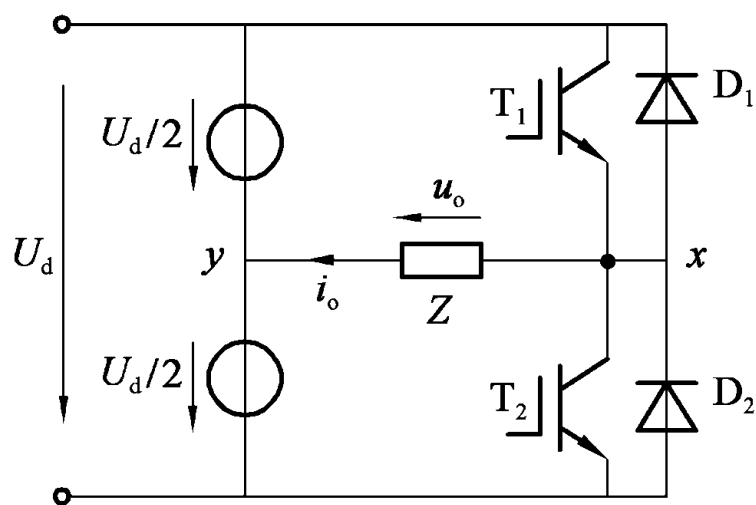


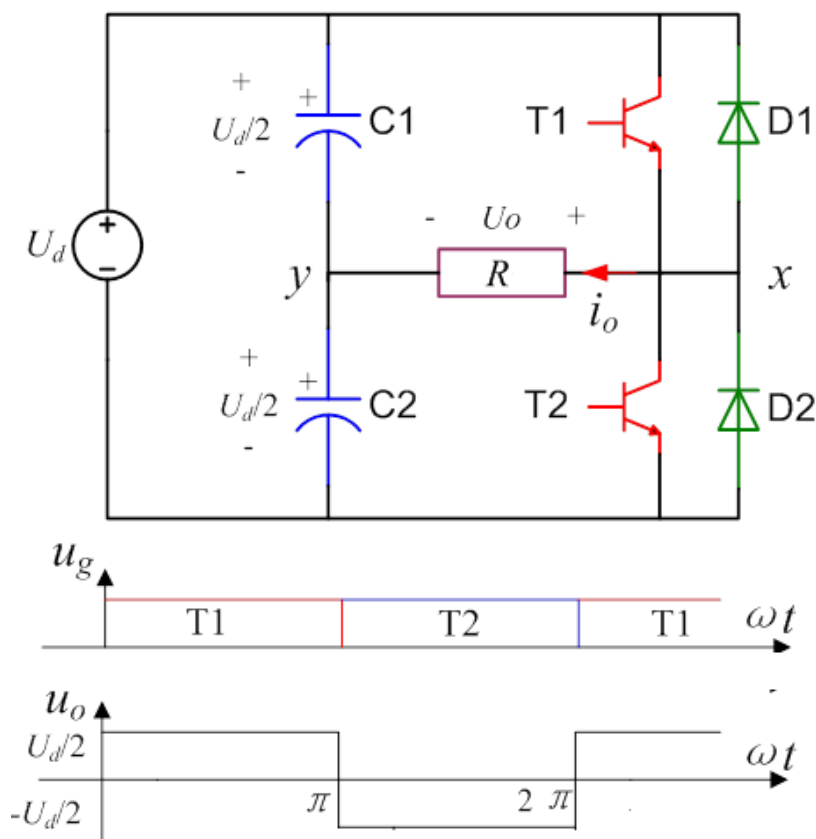
图1 单相半桥逆变电路

- 单相半桥逆变电路由一对桥臂和一个带有中点的直流电源构成。
- 负载连接在直流电源中点 $y$ 与两个桥臂连接点 $x$ 之间。
- 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中点的直流电压源。



## 2、单相半桥型逆变电路的工作原理

### 1) 带电阻性负载时的工作原理

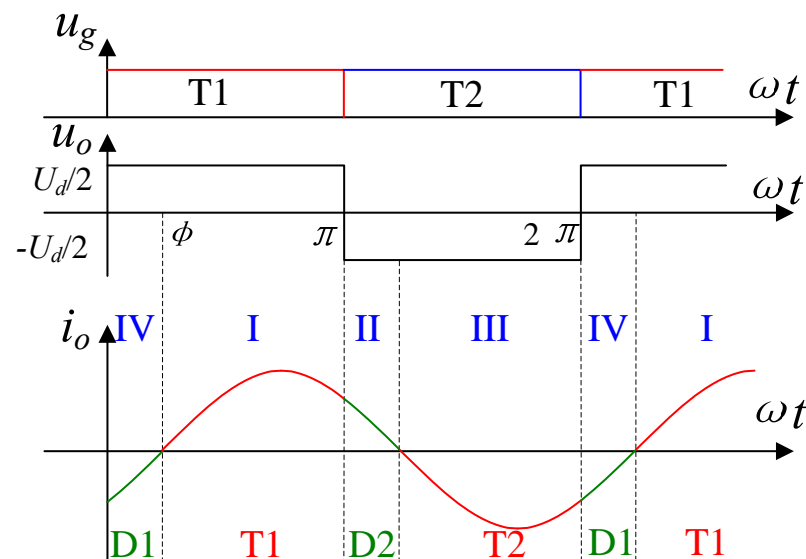
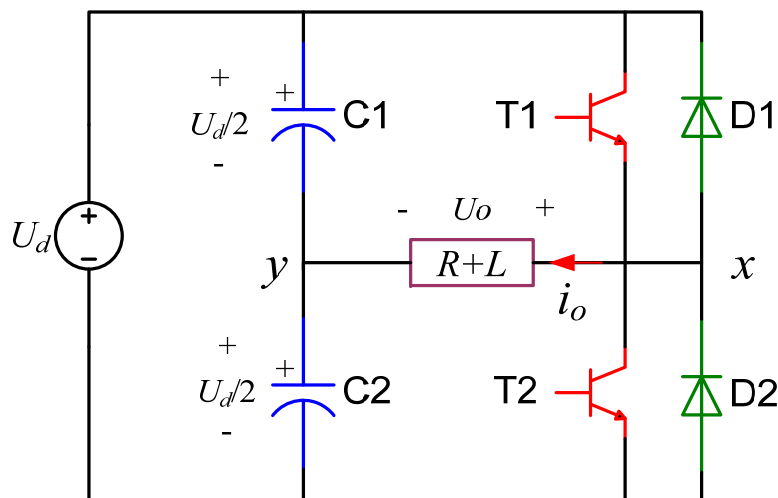


- $T_1$ 与 $T_2$ 两个开关在导通、关断控制上互补。
- 在 $0 < \omega t < \pi$  期间,  $T_1$ 通、 $T_2$ 断,  $i_o$ 经 $T_1$ 和直流电源(上)流动, 输出电压 $u_o$ 为正。  $u_o = +U_d/2$
- 在 $\pi < \omega t < 2\pi$  期间,  $T_2$ 通、 $T_1$ 断,  $i_o$ 经 $T_2$ 和直流电源(下)流动, 输出电压 $u_o$ 为负。  $u_o = -U_d/2$
- 由于是电阻负载, 因此电流与电压同相位。



## 2.单相半桥型逆变电路的工作原理

### 2) 带电感性负载时的工作原理

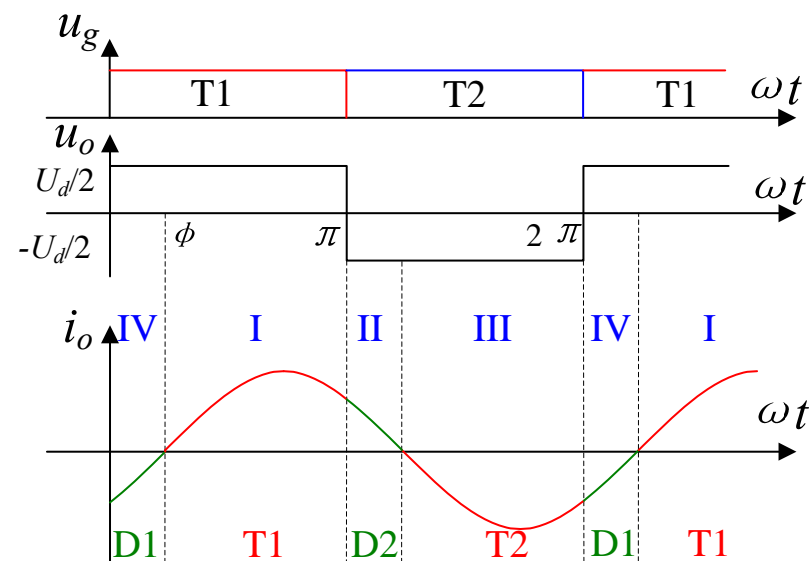
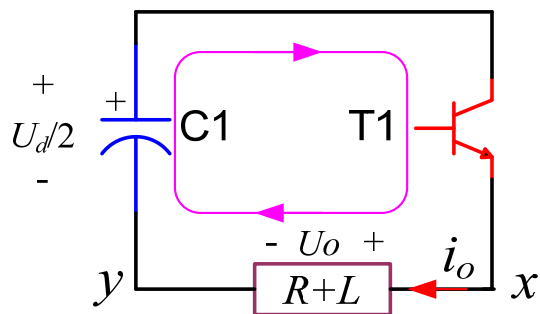


设负载为感性，负载电流 $i_o$ 为正弦波。负载电流滞后电压 $\phi$ 角。



## 2.单相半桥型逆变电路的工作原理

2) 带电感性负载时的工作原理  
将电路的工作过程分4个阶段分析：  
阶段I：

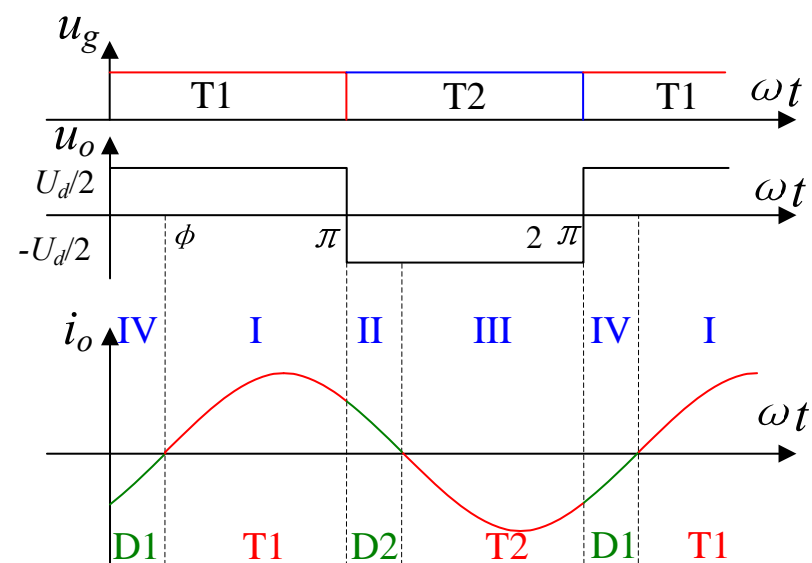
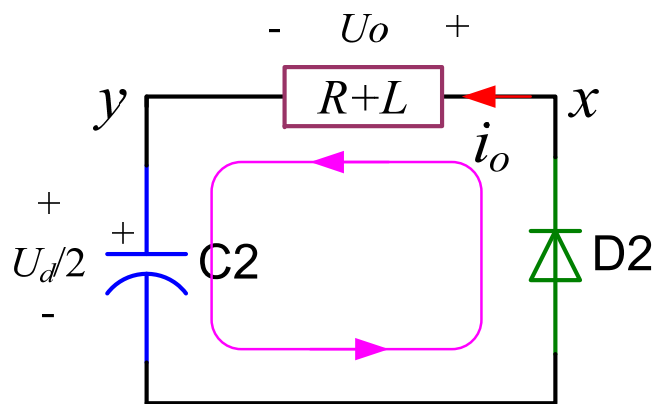


- 在  $\varphi < \omega t < \pi$  期间， $T_1$  通、 $T_2$  断， $i_o$  经  $T_1$  和直流电源（上）流动，输出电压  $u_o$  为正。  $u_o = +U_d/2$ ，电流为正向。



## 2.单相半桥型逆变电路的工作原理

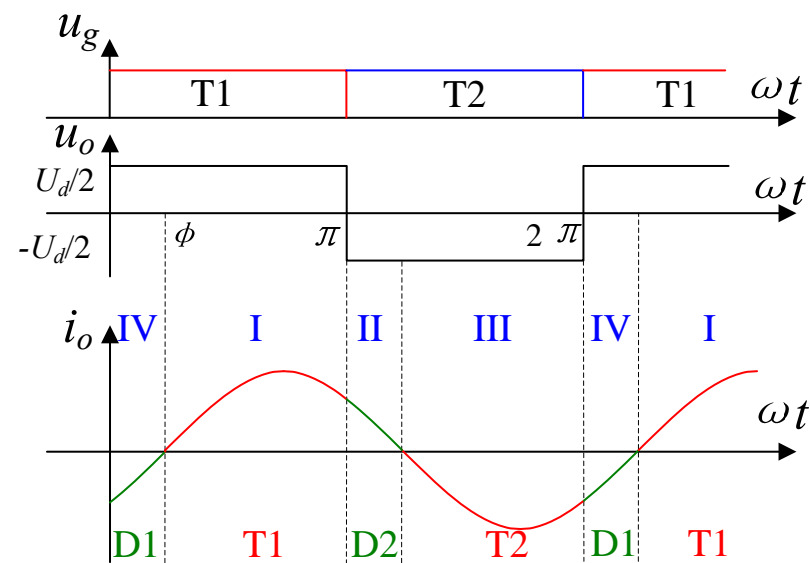
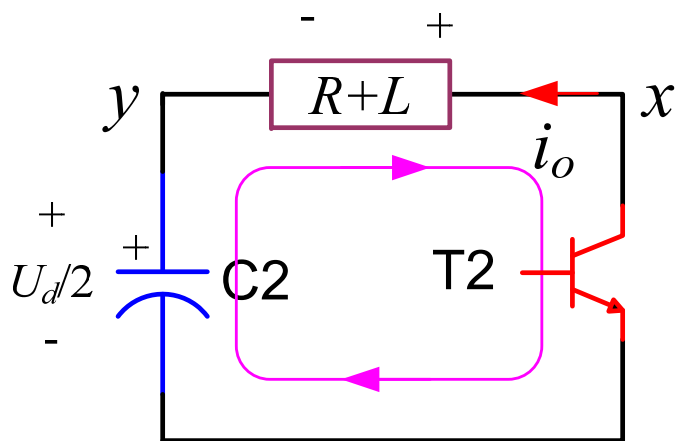
### 2) 带电感性负载时的工作原理 阶段II：



在  $\omega t = \pi$  时，关断  $T_1$  并给  $T_2$  导通信号，由于感性负载电流不能立刻改变方向，于是  $D_2$  导通， $i_o$  经  $D_2$  与直流电源（下）续流，直到  $i_o$  衰减到零， $T_2$  才真正导通， $i_o$  开始反向。  $u_o = -U_d/2$

## 2.单相半桥型逆变电路的工作原理

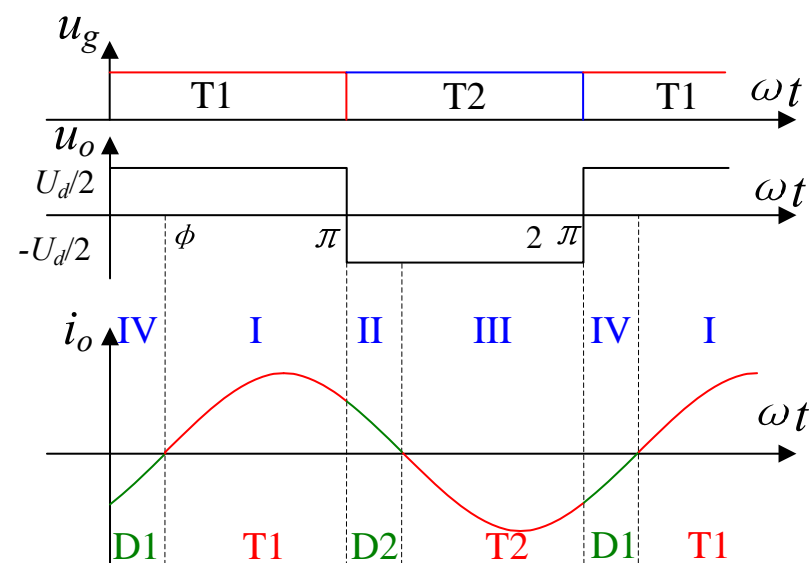
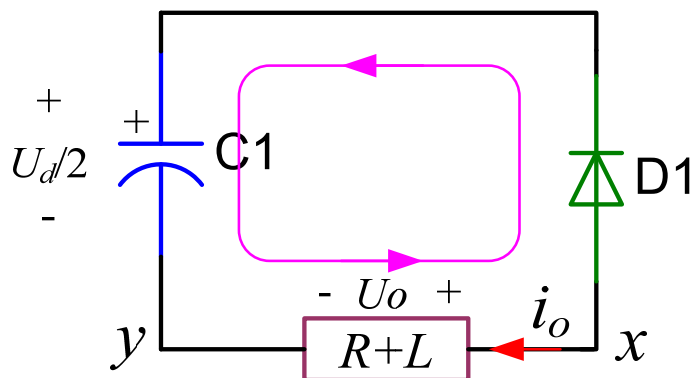
### 2) 带电感性负载时的工作原理 阶段III：



- 在  $\pi + \varphi < \omega t < 2\pi$  期间， $T_2$ 通、 $T_1$ 断， $i_o$ 经 $T_2$ 和直流电源（下）流动，输出电压 $u_o$ 为负。 $u_o = -U_d/2$ ，电流为反向。

## 2.单相半桥型逆变电路的工作原理

### 2) 带电感性负载时的工作原理 阶段IV：



在 $\omega t = 2\pi$ 时，关断 $T_2$ 并给 $T_1$ 导通信号，由于感性负载电流不能立刻改变方向，于是 $D_1$ 导通， $i_o$ 经 $D_1$ 与直流电源（上）续流，直到 $i_o$ 衰减到零， $T_1$ 才真正导通， $i_o$ 开始反向。  $u_o = +U_d/2$

## 2.单相半桥型逆变电路的工作原理

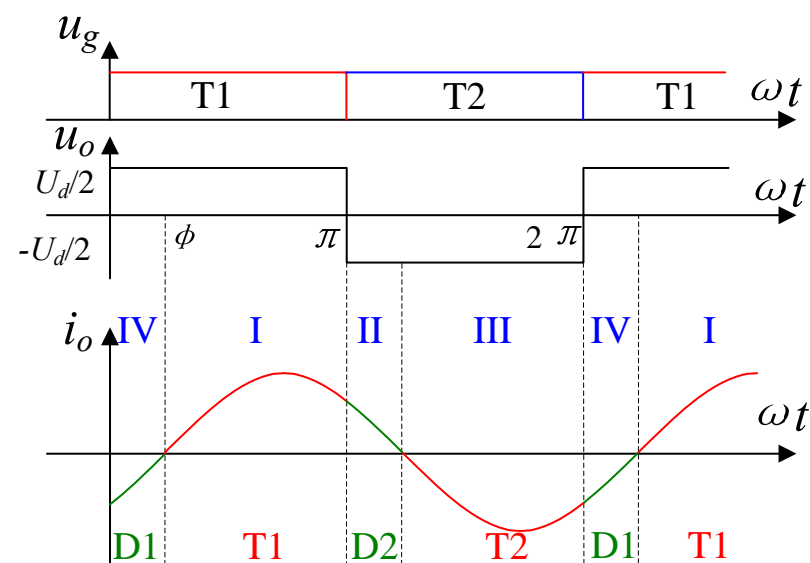
### 2) 带电感性负载时的工作原理

负载电流  $i_o$  由流过开关  $T_1$ 、 $T_2$  与二极管  $D_1$ 、 $D_2$  的电流组成。

当  $D_1$  导通或  $D_2$  导通时，负载向直流电源反馈能量。

但是不管实际导通的是T管还是D管，只要触发信号是给桥臂上管 $T_1$ 的，

则负载端输出电压为 $=+U_d/2$ ；如果触发信号是给桥臂下管 $T_2$ 的，则负载端输出电压为 $= -U_d/2$



### 3.单相半桥型逆变电路的电量计算

输出电压 $u_o$ 为方波交流电，其幅值为 $U_d/2$ 。  
将输出电压 $u_o$ 展开成傅里叶级数为：

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

输出电压的基波有效值为

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





# 第7章 逆变电路

## 7.4 单相桥式逆变电路



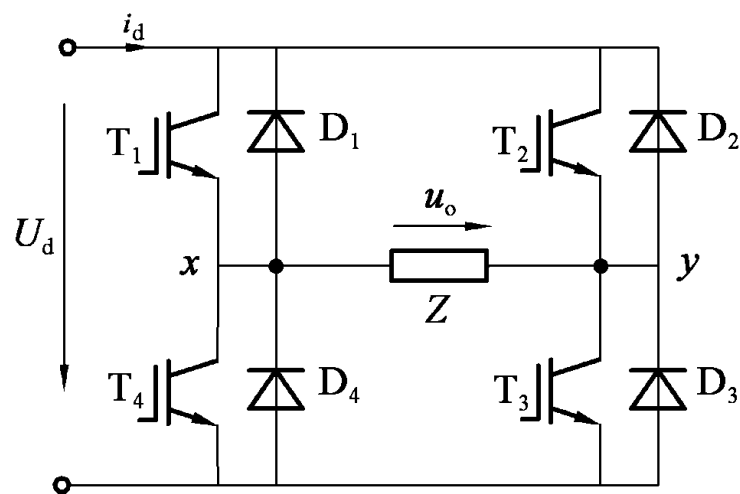


## 主要内容

1. 单相桥式逆变器的电路结构
2. 单相桥式逆变器的工作原理



# 1.单相桥式逆变器的电路结构



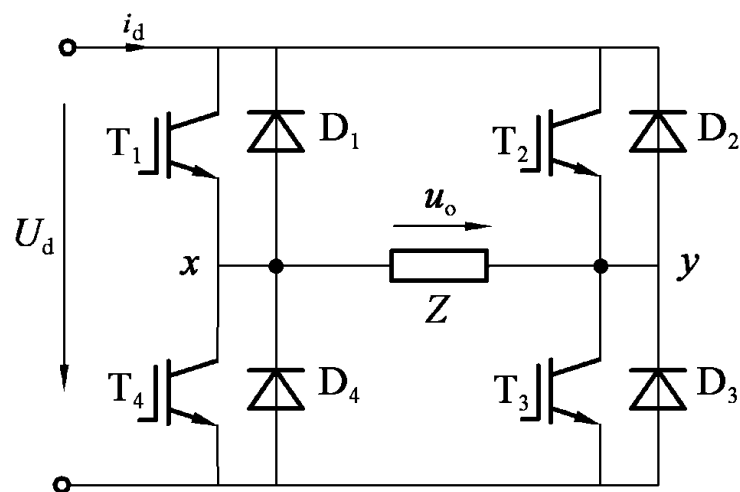
单相桥式逆变电路的结构

- 电路由四个开关管 T1~T4 以及反并联的 4 个二极管 D1~D4 组成。
- 负载接在两个桥臂的中点 x, y 处。





## 2.单相桥式逆变器的的工作原理

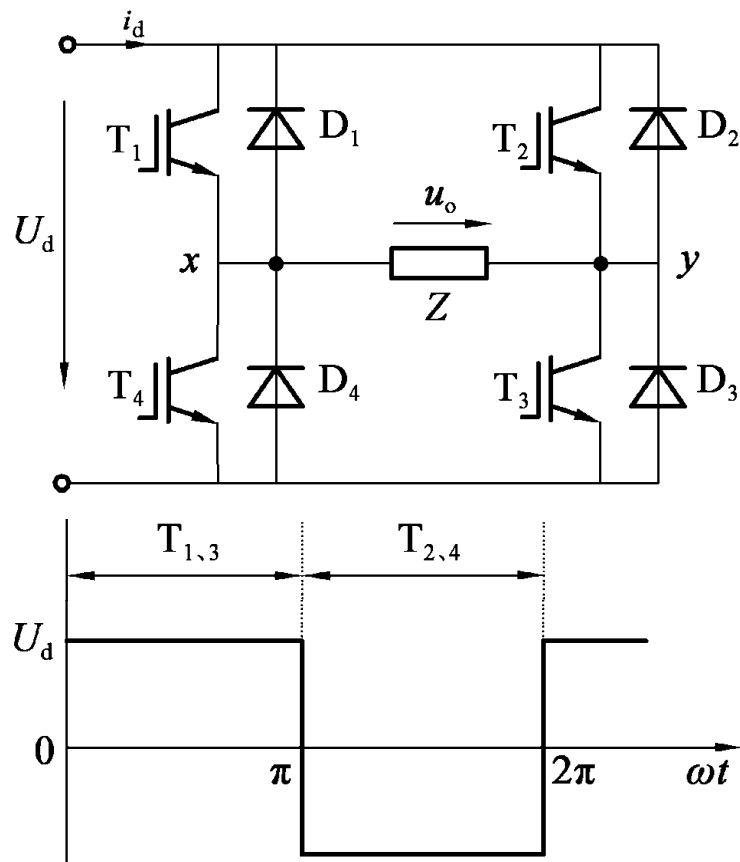


单相桥式逆变电路的结构

- ① 电路中开关 $T_1$ 与 $T_3$ 、 $T_2$ 与 $T_4$ 的通、断控制信号相同并且互补，即 $T_1$ 、 $T_3$ 是导通信号时 $T_2$ 、 $T_4$ 为关断信号； $T_2$ 、 $T_4$ 是导通信号时 $T_1$ 、 $T_3$ 为关断信号。



## 2.单相桥式逆变器的的工作原理

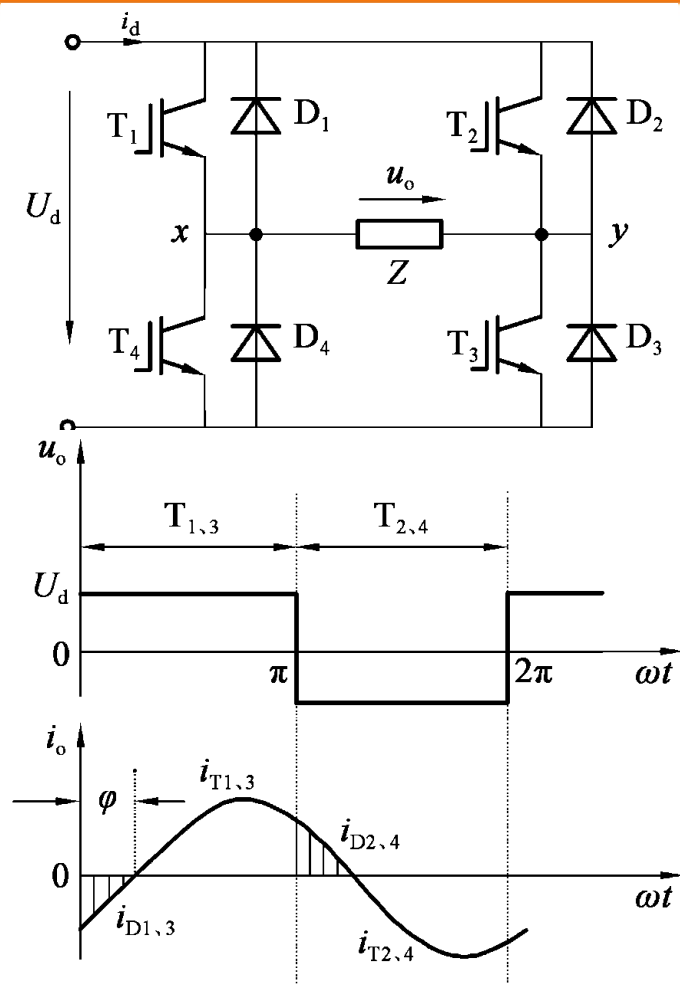


②当 $T_1$ 、 $T_3$ 导通时， $u_o = u_d$ ；当 $T_2$ 、 $T_4$ 导通时， $u_o = -u_d$ 。

③可见单相桥式逆变电路负载电压的输出波形与半桥电路的输出波形相同，其谐波成分也完全相同，只是幅值增大了一倍。



## 2.单相桥式逆变器的的工作原理

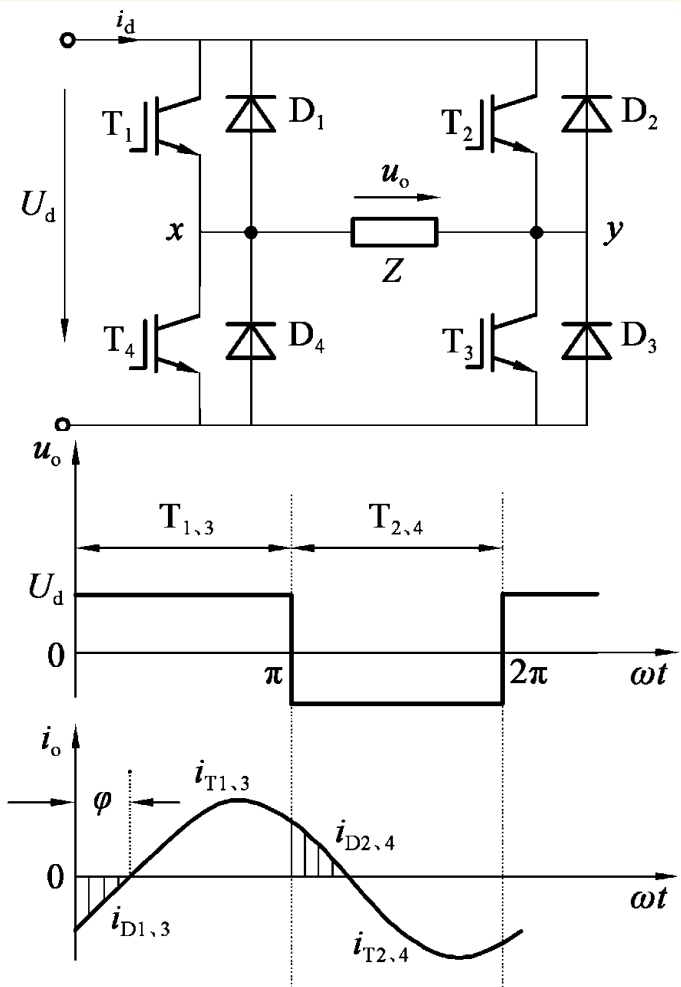


### 1) 滞后负载

假定负载电流  $i_o$  是正弦波。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  $D_2$ 、 $D_4$  与直流电源  $U_d$  构成的续流回路中去。



## 2.单相桥式逆变器的的工作原理

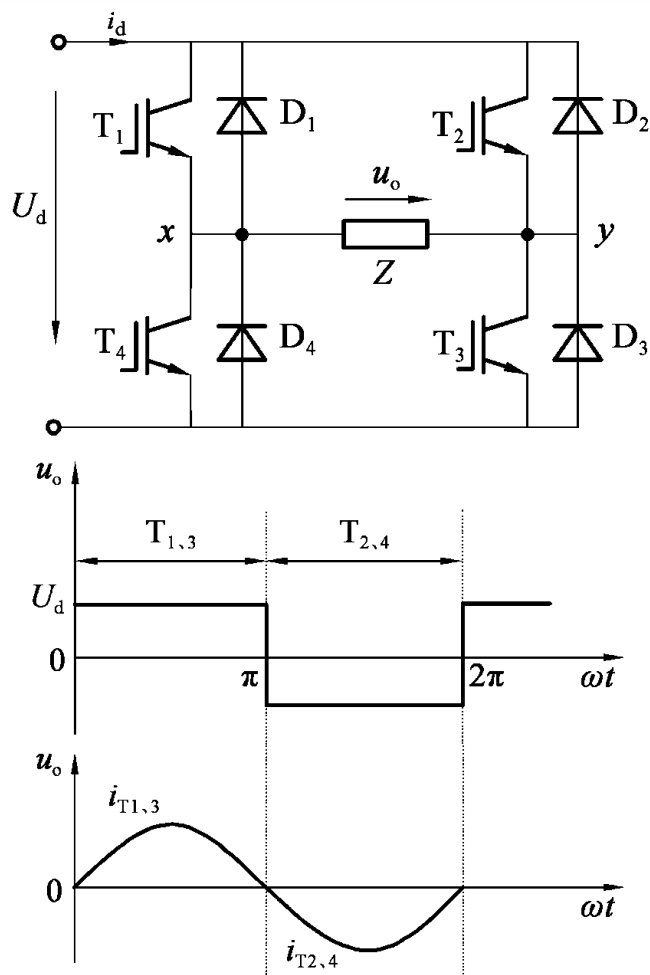


### 1) 滞后负载

- 在滞后角  $\varphi$  内,  $i_o$  继续保持原方向流动直到该电流为零, 然后  $i_o$  才经 T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub> 反向流动。
- 同理, 当关断 T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>, 给出 T<sub>1</sub>、T<sub>3</sub> 导通信号后, 负载电流  $i_o$  改经 D<sub>1</sub>、D<sub>3</sub> 及直流电源  $U_d$  续流。



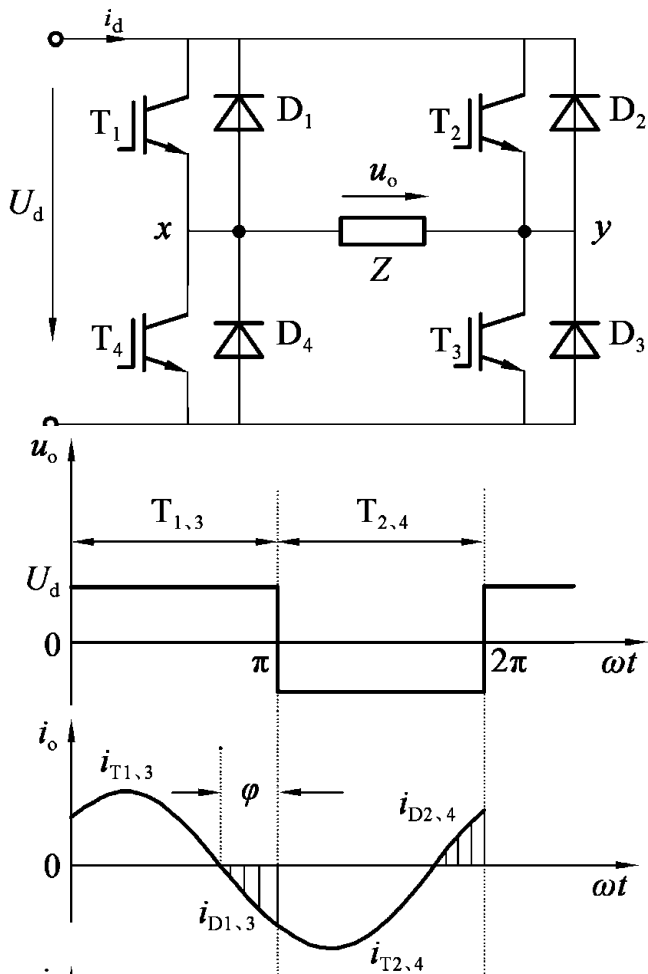
## 2.单相桥式逆变器的的工作原理



- 2) 同相位负载
- 设负载电流是正弦波，且负载电压与电流同相（例如串联谐振时）。
- 由于负载电压与负载电流的零点一致，开关 $T_1$ 、 $T_3$ 与 $T_2$ 、 $T_4$ 将分别流过正弦半波电流，而二极管 $D_1 \sim D_4$ 则完全没有电流流过。
- 开关 $T_1 \sim T_4$ 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。



## 2.单相桥式逆变器的的工作原理



- 3 ) 超前负载
- 设负载电流  $i_o$  为正弦波且超前负载电压  $u_o$  一个相角  $\varphi$ 。开关（例如  $T_1$ 、 $T_3$ ）在导通  $\pi - \varphi$  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  $T_1 \sim T_4$  可以使用诸如晶闸管一类的半控开关而不必采用强迫换流措施。





谢谢