

## 第4章 DC-AC变换电路

4.1 换流方式

4.2 电压型逆变电路

4.3 电流型逆变电路

4.4 多重逆变电路和多电平逆变电路

本章小结

## ● 逆变的概念

逆变——与整流相对应，直流电变成交流电。

✦ 交流侧接电网，为**有源逆变**。

✦ 交流侧接负载，为**无源逆变**。

本章讲述无源逆变

## ● 逆变与变频

✦ 变频电路：分为交交变频和交直交变频两种。

✦ 交直交变频由交直变换（整流）和直交变换两部分组成，后一部分就是逆变。

## ● 主要应用

✦ 各种直流电源，如蓄电池、干电池、太阳能电池等。

✦ 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。

## 1) 什么是逆变？为什么要逆变？

- 逆变（Inversion）——把直流电转变成交流电，**整流**的**逆过程**。
- 逆变电路——把直流电逆变成交流电的电路。
  - ✦ **有源逆变电路**——交流侧和电网连结。

应用：直流可逆调速系统、交流绕线转子异步电动机串级调速以及高压直流输电等。
  - ✦ **无源逆变电路**——变流电路的交流侧不与电网联接，而直接接到负载，将在第5章介绍。
- 对于可控整流电路，满足一定条件就可工作于有源逆变，其电路形式未变，只是电路工作条件转变。既工作在整流状态又工作在逆变状态，称为**变流电路**。

## 2) 直流发电机—电动机系统电能的流转

- 电路过程分析。
- 两个电动势同极性相接时，电流总是从电动势高的流向低的，回路电阻小，可在两个电动势间交换很大的功率。

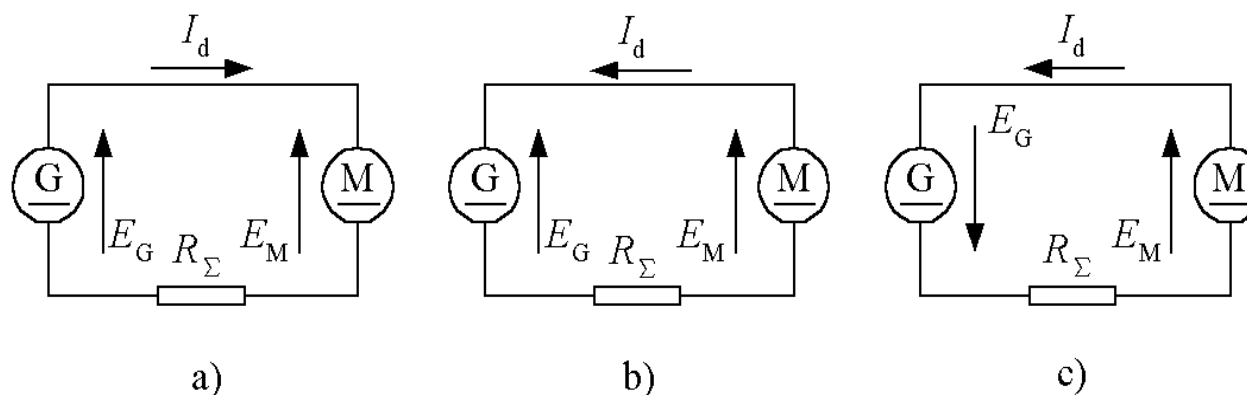


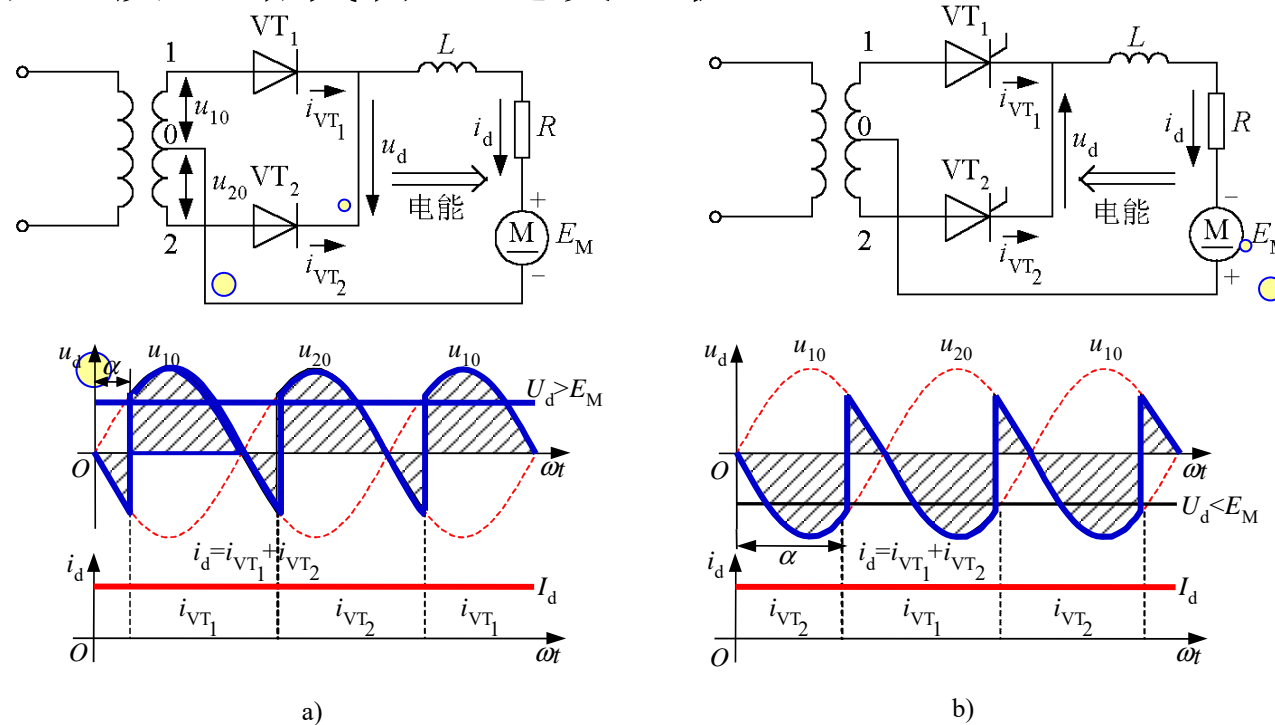
图3-46 直流发电机—电动机之间电能的流转

a) 两电动势同极性  $E_G > E_M$

b) 两电动势同极性  $E_M > E_G$  c) 两电动势反极性，形成短路

### 3) 逆变产生的条件

- 单相全波电路代替上述发电机



交流电网输出电功率

电动机输出电功率

图3-47 单相全波电路的整流和逆变

- 从上述分析中，可以归纳出产生逆变的条件有二：
  - ⊕ 有直流电动势，其极性和晶闸管导通方向一致，其值大于变流器直流侧平均电压。
  - ⊕ 晶闸管的控制角  $\alpha > \pi / 2$ ，使  $U_d$  为负值。
- 半控桥或有续流二极管的电路，因其整流电压  $u_d$  不能出现负值，也不允许直流侧出现负极性的电动势，故不能实现有源逆变。
- 欲实现有源逆变，只能采用全控电路。

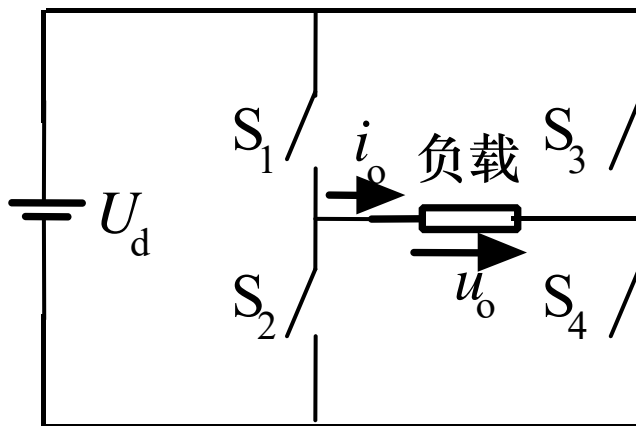
### 4.1.1 逆变电路的基本工作原理

### 4.1.2 换流方式分类

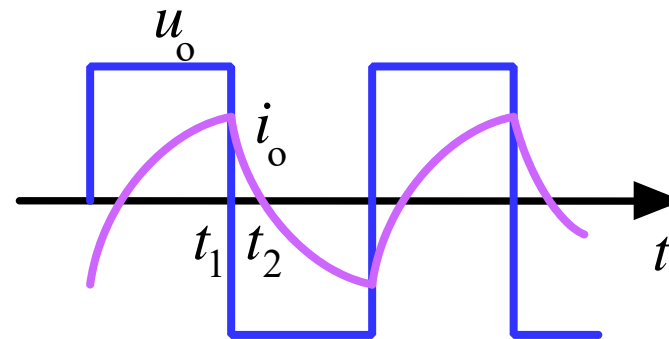
## 4.1.1 逆变电路的基本工作原理

● 以单相桥式逆变电路为例说明最基本的工作原理

✦  $S_1 \sim S_4$  是桥式电路的4个臂，由电力电子器件及辅助电路组成。



a)



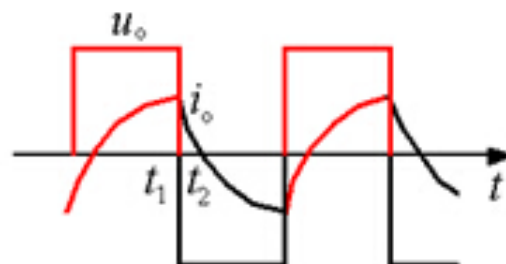
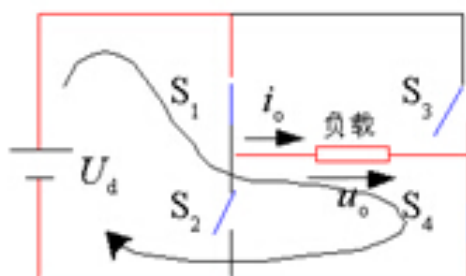
b)

图4-1 逆变电路及其波形举例

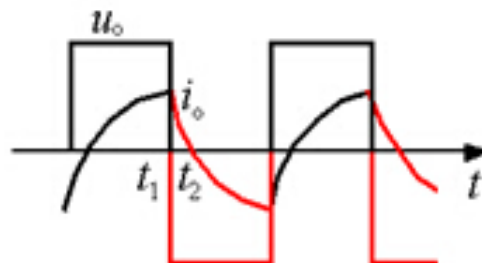
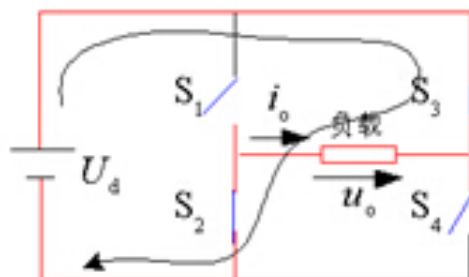


## 4.1.1 逆变电路的基本工作原理

- ◆  $S_1$ 、 $S_4$  闭合， $S_2$ 、 $S_3$  断开时，负载电压  $u_o$  为正。
- ◆  $S_1$ 、 $S_4$  断开， $S_2$ 、 $S_3$  闭合时，负载电压  $u_o$  为负。



$S_2$ 、 $S_3$  闭合， $S_1$ 、 $S_4$  断开时电路和波形图



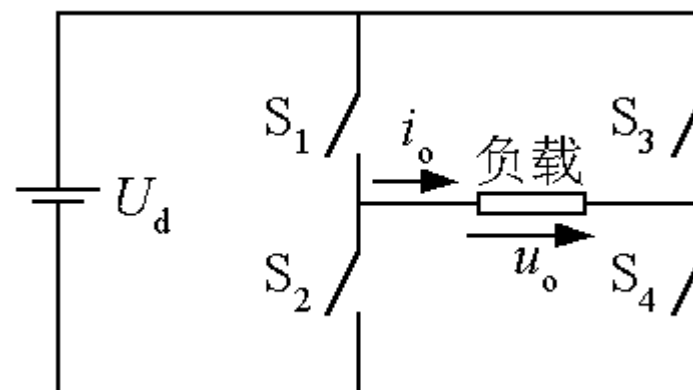
直流电



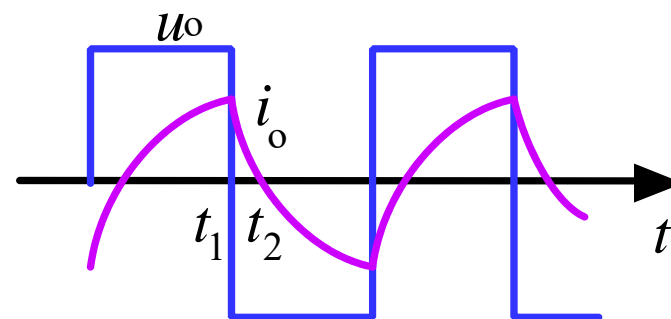
交流电

## 4.1.1 逆变电路的基本工作原理

- ◆ **逆变电路最基本的工作原理** ——改变两组开关切换频率，可改变输出交流电频率。
- ◆ **电阻负载**时，负载电流 $i_o$ 和 $u_o$ 的波形相同，相位也相同。
- ◆ **阻感负载**时， $i_o$ 相位滞后于 $u_o$ ，波形也不同。



a)



b)

图4-1 逆变电路及其波形举例

● **换流**——电流从一个支路向另一个支路转移的过程，也称为**换相**

✦ 开通：适当的门极驱动信号就可使器件开通。

✦ 关断：

➤ 全控型器件可通过门极关断。

➤ 半控型器件晶闸管，必须利用外部条件才能关断。

➤ 一般在晶闸管电流过零后施加一定时间反压，才能关断。

✦ 研究换流方式主要是研究如何使器件关断。

● 本章换流及换流方式问题最为全面集中,因此安排在本章集中讲述。

- **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。
- **电网换流 (Line Commutation)**
  - ✦ 电网提供换流电压的换流方式。-- 晶闸管整流
  - ✦ 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。
- **负载换流 (Load Commutation)**
- **强迫换流 (Forced Commutation)**

## 4.1.2 换流方式分类

- 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。
- 如图是基本的负载换流电路，4个桥臂均由晶闸管组成。
- 整个负载工作在接近并联谐振状态而略呈容性。
- 直流侧串电感，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。

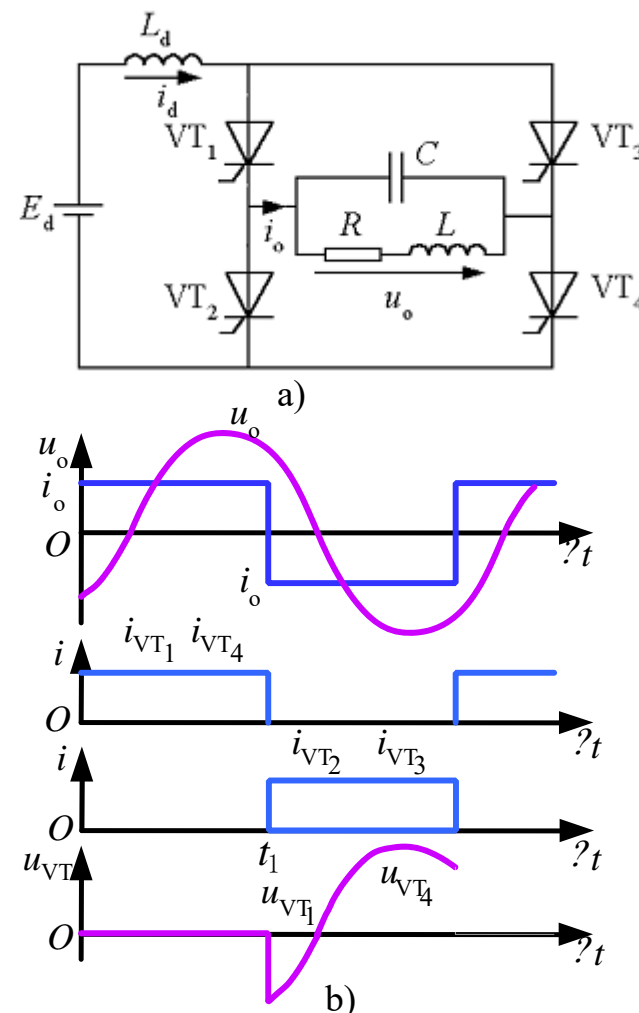
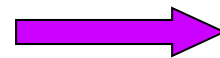


图4-2 负载换流  
电路及其工作波形

### ● 强迫换流 (Forced Commutation)

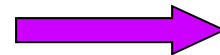
- ✦ 设置附加的换流电路，给欲关断的晶闸管强迫施加反压或反电流的换流方式称为**强迫换流**。
- ✦ 通常利用附加电容上所储存的能量来实现，因此也称为**电容换流**。
- ✦ 分类

由换流电路内电容  
直接提供换流电压



直接耦合式  
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



电感耦合式  
强迫换流

### 直接耦合式强迫换流

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**。

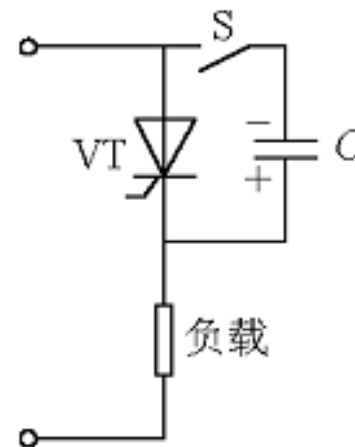


图4-3直接耦合式强迫换流原理图

### 电感耦合式强迫换流

先使晶闸管电流减为零，然后通过反并联二极管使其加上反向电压。也叫**电流换流**。

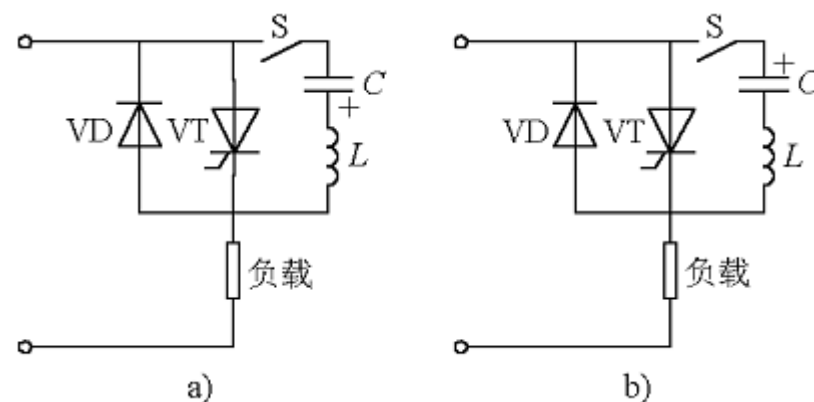


图4-4 电感耦合式强迫换流原理图

### ● 换流方式总结：

- ✦ 器件换流——适用于全控型器件。
- ✦ 其余三种方式——针对晶闸管。
- ✦ 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。
- ✦ 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**。



1. 无源逆变电路和有源逆变电路有何不同
2. 换流方式有哪几种，各有什么特点？

### ● 逆变电路的分类 —— 根据直流侧电源性质的不同

直流侧是**电压源**

电压型逆变电路——又称为电压源型逆变电路

Voltage Source Type Inverter-VSTI

直流侧是**电流源**

电流型逆变电路——又称为电流源型逆变电路

Current Source Type Inverter-VSTI

### ● 电压型逆变电路的特点

- ⊕ 直流侧为电压源或并联大电容，直流侧电压基本**无脉动**。
- ⊕ 输出电压为矩形波，输出电流因负载阻抗不同而不同。
- ⊕ 阻感负载时需提供无功功率。为了给交流侧向直流侧反馈的无功能量提供通道，逆变桥各臂并联反馈二极管。

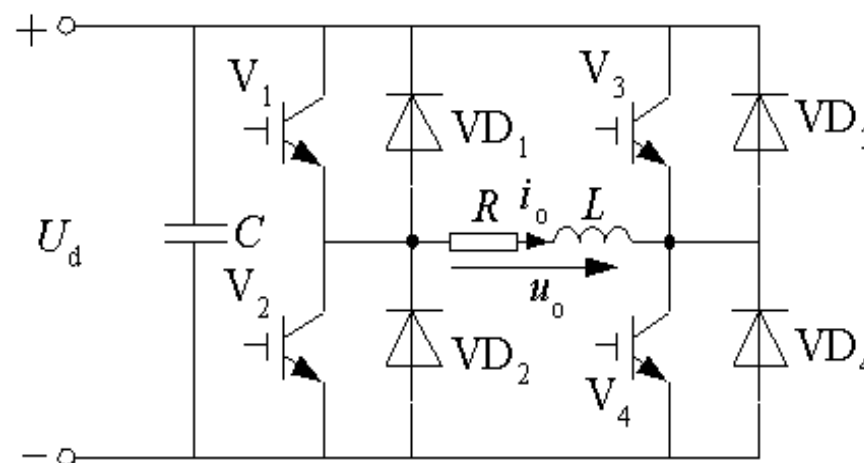


图4-5 电压型全桥逆变电路

### 4.2.1 单相电压型逆变电路

### 4.2.2 三相电压型逆变电路

## 4.2.1 单相电压型逆变电路

### 半桥逆变电路工作原理

- ◆  $V_1$ 和 $V_2$ 栅极信号在一周期内各半周正偏、半周反偏，两者互补，输出电压 $u_o$ 为矩形波，幅值为 $U_m = U_d/2$ 。
- ◆  $V_1$ 或 $V_2$ 通时， $i_o$ 和 $u_o$ 同方向，直流侧向负载提供能量； $VD_1$ 或 $VD_2$ 通时， $i_o$ 和 $u_o$ 反向，电感中贮能向直流侧反馈。 $VD_1$ 、 $VD_2$ 称为**反馈二极管**，它又起着使负载电流连续的作用，又称**续流二极管**。

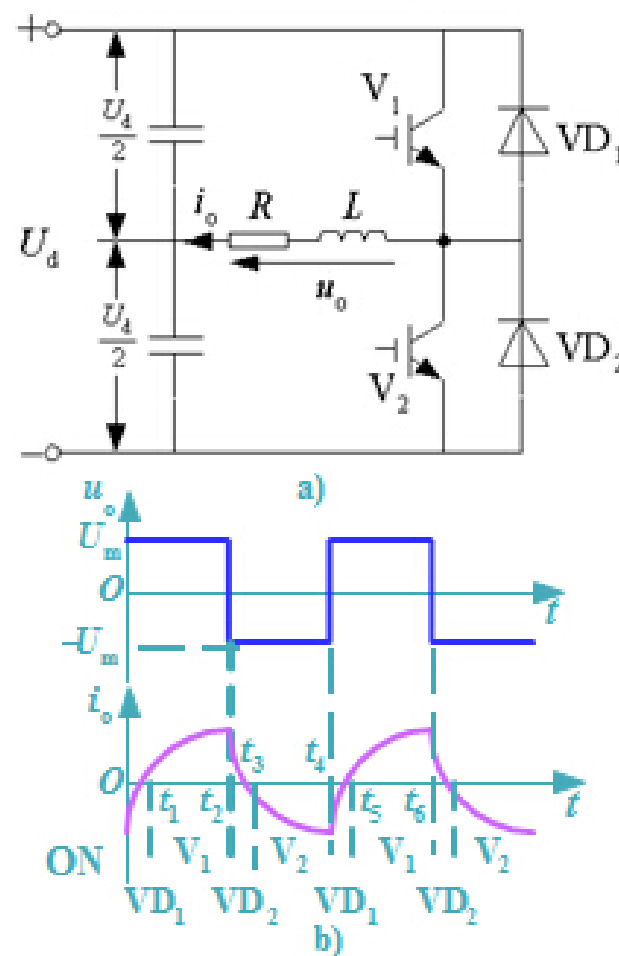
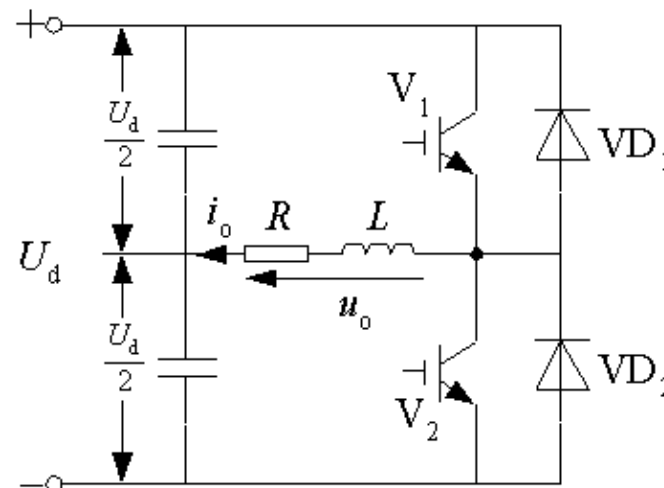


图4-6 单相半桥电压型逆变电路及其工作波形

## 4.2.1 单相电压型逆变电路

- 优点：电路简单，使用器件少。
- 缺点：输出交流电压幅值为  $U_d/2$ ，且直流侧需两电容器串联，要控制两者电压均衡。
- 应用：
  - ⊕ 用于几kW以下的小功率逆变电源。
  - ⊕ 单相全桥、三相桥式都可看成若干个半桥逆变电路的组合。



## 4.2.1 单相电压型逆变电路

### ● 全桥逆变电路

- ◆ 共四个桥臂，可看成两个半桥电路组合而成。
- ◆ 两对桥臂交替导通 $180^\circ$ 。
- ◆ 输出电压合电流波形与半桥电路形状相同，幅值高出一倍。
- ◆ 改变输出交流电压的有效值只能通过改变直流电压 $U_d$ 来实现。

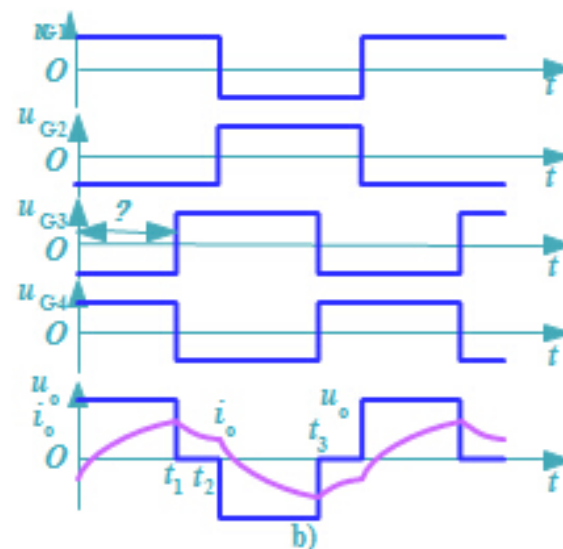
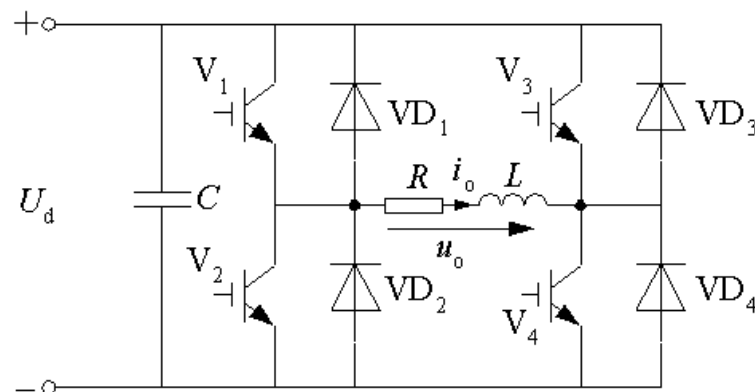


图4-7 单相全桥逆变电路的移相调压方式

## 4.2.1 单相电压型逆变电路

### ● 全桥逆变电路

- 阻感负载时，还可采用移相方式来调节输出电压  
— 移相调压
- $V_3$  的基极信号比  $V_1$  落后  $q$  ( $0 < q < 180^\circ$ )。  $V_3$ 、 $V_4$  的栅极信号分别比  $V_2$ 、 $V_1$  的前移  $180^\circ - q$ 。输出电压是正负各为  $q$  的脉冲。
- 改变  $\theta$  就可调节输出电压。

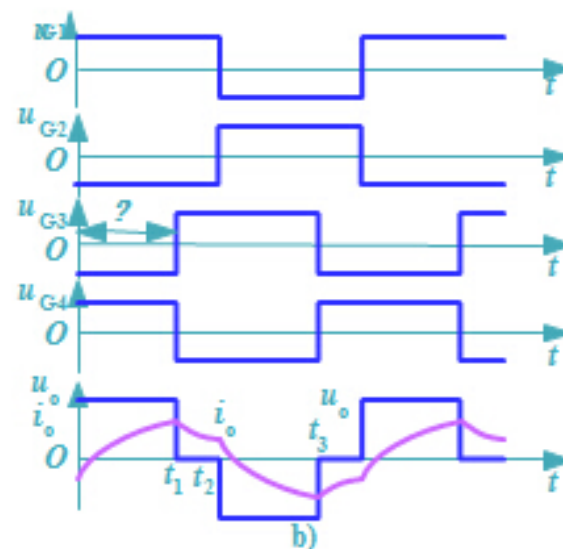
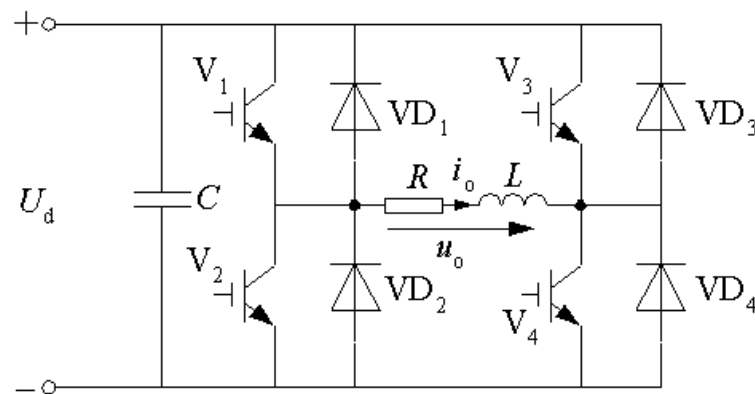


图4-7 单相全桥逆变电路的移相调压方式



### 带中心抽头变压器的逆变电路

- 交替驱动两个IGBT，经变压器耦合给负载加上矩形波交流电压。
- 两个二极管的作用也是提供无功能量的反馈通道。

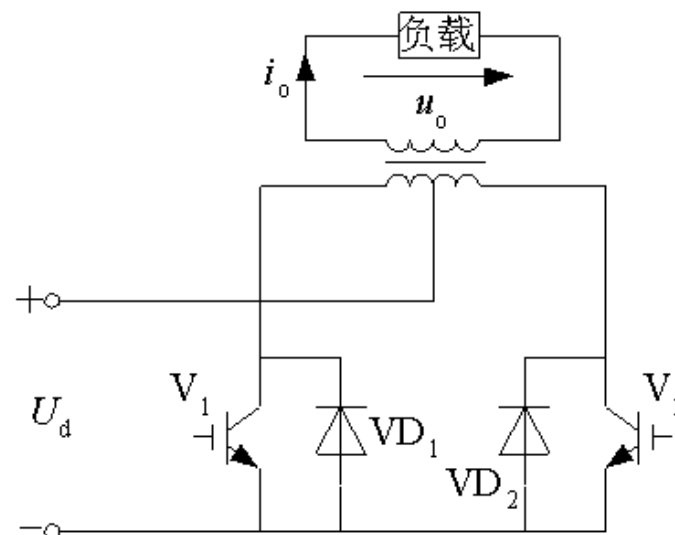


图4-8 带中心抽头变压器的逆变电路

- $U_d$ 和负载参数相同，变压器匝比为1: 1: 1时， $u_o$ 和 $i_o$ 波形及幅值与全桥逆变电路完全相同。
- 与全桥电路的比较：
  - 比全桥电路少用一半开关器件。
  - 器件承受的电压为 $2U_d$ ，比全桥电路高一倍。
  - 必须有一个变压器。

## 4.2.2 三相电压型逆变电路

- 三个单相逆变电路可组合成一个三相逆变电路
- 应用最广的是三相桥式逆变电路

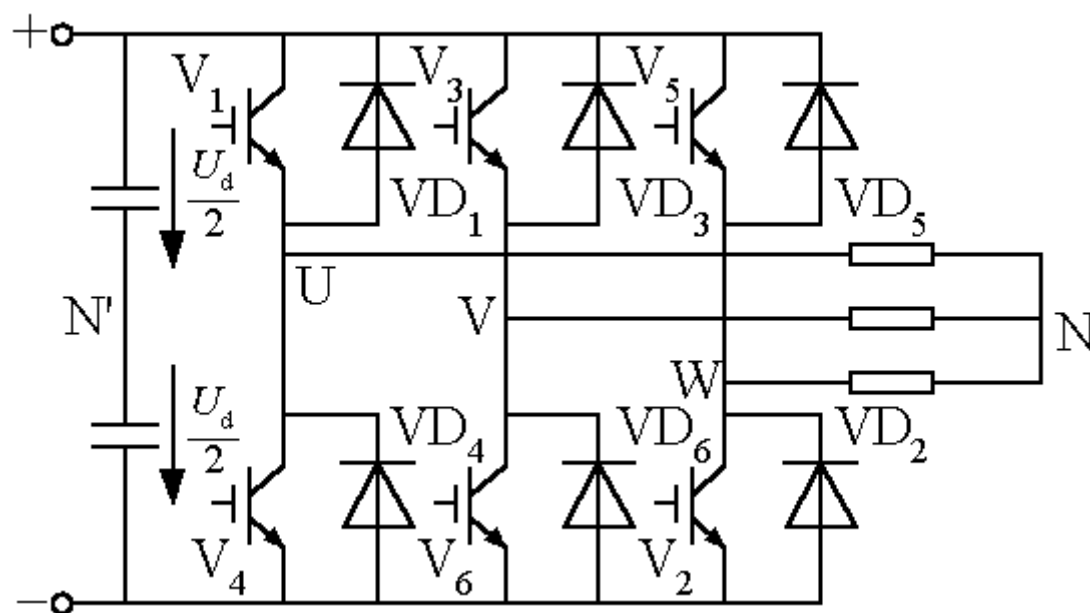


图4-9 三相电压型桥式逆变电路

## 4.2.2 三相电压型逆变电路

### ● 基本工作方式—— 180° 导电方式

- ✦ 每桥臂导电180°，同一相上下两臂交替导电，各相开始导电的角度差120°。
- ✦ 任一瞬间有三个桥臂同时导通。
- ✦ 每次换流都是在同一相上下两臂之间进行，也称为**纵向换流**。

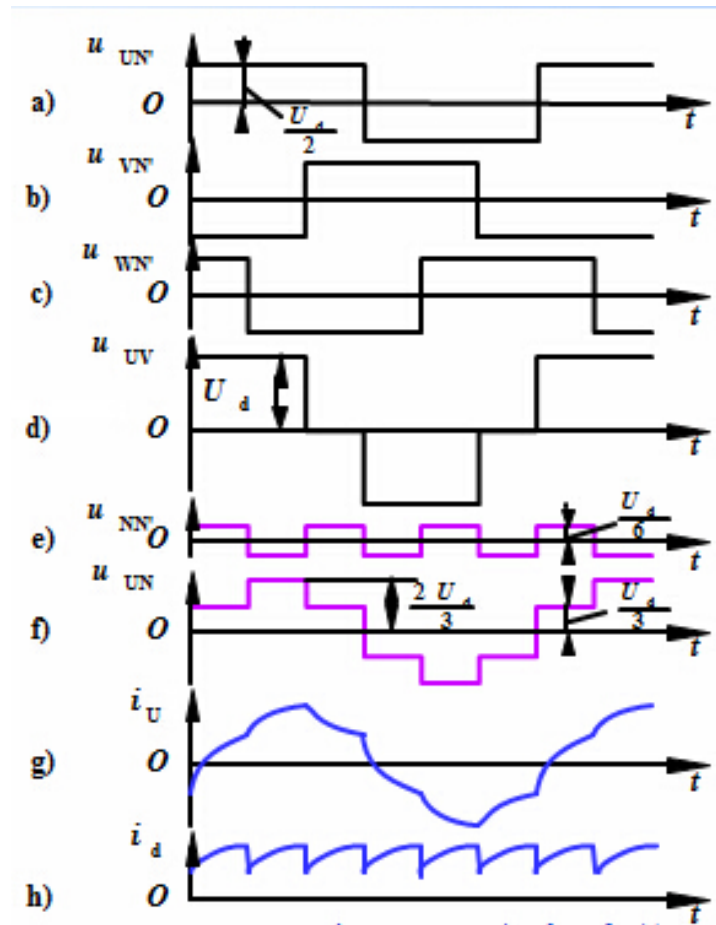


图4-10 电压型三相桥式逆变电路的工作波形

### 波形分析

- 负载各相到电源中点N'的电压：U相，1通，

$$u_{UN'} = U_d/2, \text{ 4通, } u_{UN'} = -U_d/2。$$

- 负载线电压

$$u_{UV} = u_{UN'} - u_{VN'}$$

$$u_{VW} = u_{VN'} - u_{WN'}$$

$$u_{WU} = u_{WN'} - u_{UN'}$$

- 负载相电压

$$u_{UN} = u_{UN'} - u_{NN'}$$

$$u_{VN} = u_{VN'} - u_{NN'}$$

$$u_{WN} = u_{WN'} - u_{NN'}$$

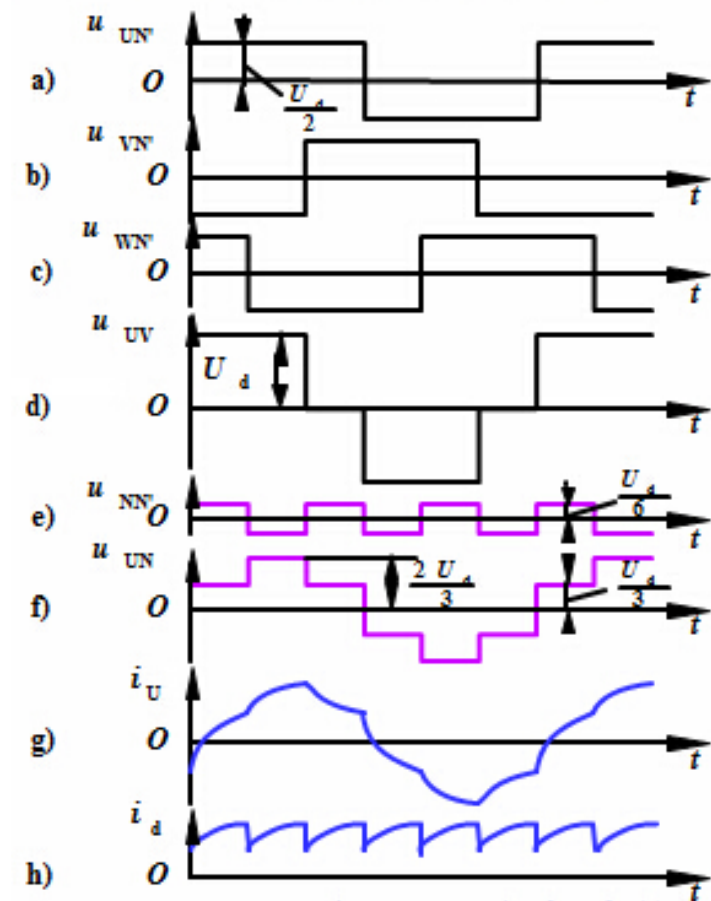


图4-10 电压型三相桥式逆变电路的工作波形

- ❖ 负载中点和电源中点间电压

$$u_{NN'} = \frac{1}{3}(u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'}) - \frac{1}{3}(u_{UN} + u_{VN} + u_{WN}) \quad (4-6)$$

- ❖ 负载三相对称时有 $u_{UN} + u_{VN} + u_{WN} = 0$ ，于是

$$u_{NN'} = \frac{1}{3}(u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'}) \quad (4-7)$$

- ❖ 负载已知时，可由 $u_{UN}$ 波形求出 $i_U$ 波形。
- ❖ 一相上下两桥臂间的换流过程和半桥电路相似。
- ❖ 桥臂1、3、5的电流相加可得直流侧电流 $i_d$ 的波形， $i_d$ 每 $60^\circ$ 脉动一次，直流电压基本无脉动，因此逆变器从交流侧向直流侧传送的功率是脉动的，电压型逆变电路的一个特点。
- ❖ 防止同一相上下两桥臂的开关器件同时导通而引起直流侧电源短路，应采取“先断后通”
- ❖ 数量分析见教材。

## 4.3 电流型逆变电路

- 直流电源为电流源的逆变电路称为**电流型逆变电路**。

- 电流型逆变电路主要**特点**

(1) 直流侧串大电感，电流基本无脉动，相当于电流源。

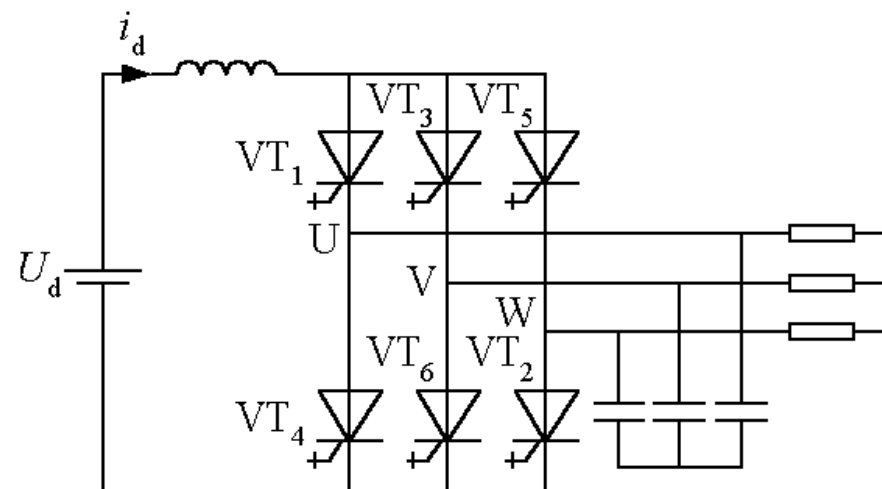


图4-11 电流型三相桥式逆变电路

(2) 交流输出电流为矩形波，与负载阻抗角无关。输出电压波形和相位因负载不同而不同。

(3) 直流侧电感起缓冲无功能量的作用，不必给开关器件反并联二极管。

- 电流型逆变电路中，采用半控型器件的电路仍应用较多。
- 换流方式有负载换流、强迫换流。

### 4.3.1 单相电流型逆变电路

### 4.3.2 三相电流型逆变电路

### ● 单相桥式电流型电路原理

- 由四个桥臂构成，每个桥臂的晶闸管各串联一个电抗器，用来限制晶闸管开通时的 $di/dt$ 。
- 工作方式**为负载换相**。
- 电容 $C$ 和 $L$ 、 $R$ 构成并联谐振电路。
- 输出电流波形接近矩形波，含基波和各奇次谐波，且谐波幅值远小于基波。

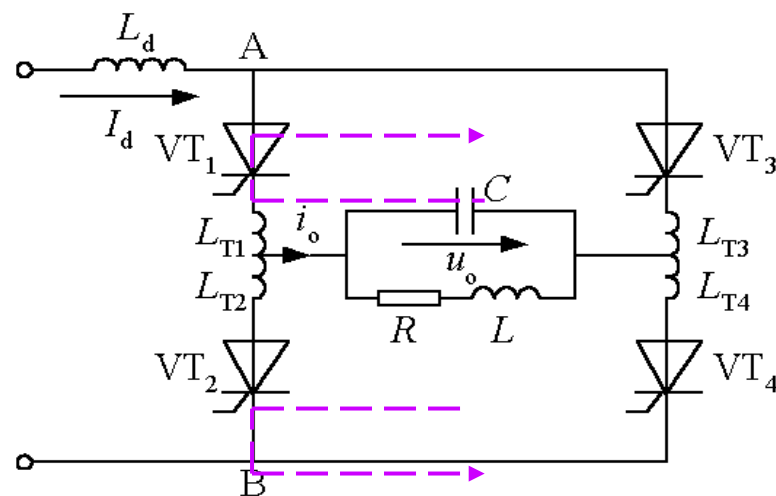


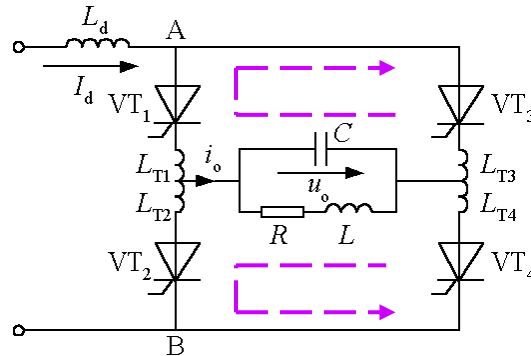
图4-12 单相桥式电流型  
(并联谐振式) 逆变电路



## 4.3.1 单相电流型逆变电路

### 单相桥式电流型电路工作分析

一个周期内有两个导通阶段和两个换流阶段。



- ✦  $t_1 \sim t_2$ :  $VT_1$  和  $VT_4$  稳定导通阶段,  $i_o = I_d$ ,  $t_2$  时刻前在 C 上建立了左正右负的电电压。
- ✦  $t_2 \sim t_4$ :  $t_2$  时触发  $VT_2$  和  $VT_3$  开通, 进入换流阶段。
- ✦  $L_T$  使  $VT_1$ 、 $VT_4$  不能立刻关断, 电流有一个减小过程。 $VT_2$ 、 $VT_3$  电流有一个增大过程。
- ✦ 4 个晶闸管全部导通, 负载电容电压经两个并联的放电回路同时放电。
- ✦  $L_{T1}$ 、 $VT_1$ 、 $VT_3$ 、 $L_{T3}$  到 C; 另一个经  $L_{T2}$ 、 $VT_2$ 、 $VT_4$ 、 $L_{T4}$  到 C。

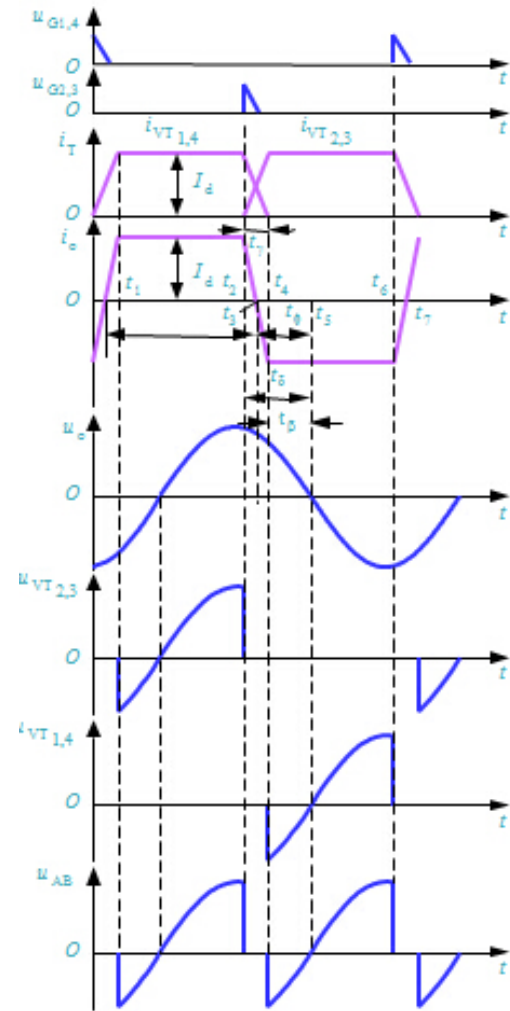


图4-13 并联谐振式逆变电路工作波形

## 4.3.1 单相电流型逆变电路

### 单相桥式电流型电路工作分析

✦  $i_o$  在  $t_3$  时刻，即  $i_{VT1}=i_{VT2}$  时刻过零， $t_3$ 时刻大体位于 $t_2$ 和 $t_4$ 的中点。

✦  $t=t_4$ 时， $VT_1$ 、 $VT_4$ 电流减至零而关断，换流阶段结束。

✦  $t_4-t_2=t_g$  称为**换流时间**。

✦ **保证晶闸管的可靠关断**

- 晶闸管需一段时间才能恢复正向阻断能力，换流结束后还要使 $VT_1$ 、 $VT_4$ 承受一段反压时间 $t_b$ 。

- $t_b = t_5 - t_4$ 应大于晶闸管的关断时间 $t_q$ 。

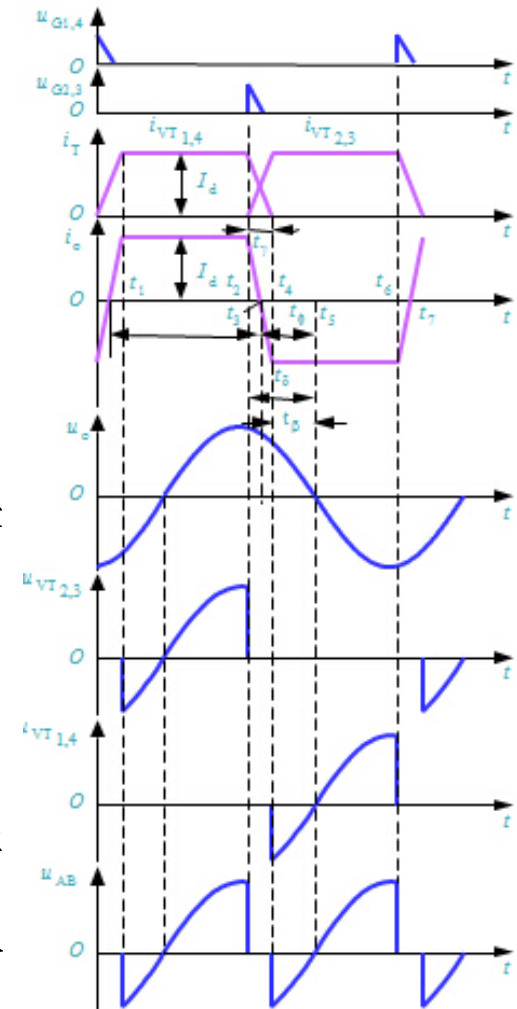
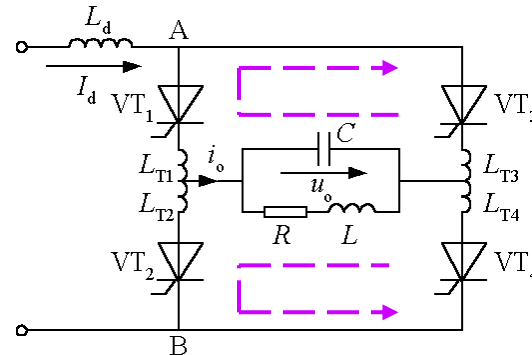


图4-13 并联谐振式逆变电路工作波形

- 实际工作过程中，感应线圈参数随时间变化，必须使工作频率适应负载的变化而自动调整，这种控制方式称为**自励方式**。
- 固定工作频率的控制方式称为**他励方式**。
- 自励方式存在起动问题，解决方法：
  - ⊕ 先用他励方式，系统开始工作后再转入自励方式。
  - ⊕ 附加预充电起动电路。

### ● 电路分析

- 基本工作方式是 $120^\circ$  导电方式—每个臂一周期内导电 $120^\circ$ ，每个时刻上下桥臂组各有一个臂导通，换流方式为横向换流。

### ● 波形分析

- 输出电流波形和负载性质无关，正负脉冲各 $120^\circ$  的矩形波。
- 输出电流和三相桥整流带大电感负载时的交流电流波形相同，谐波分析表达式也相同。
- 输出线电压波形和负载性质有关，大体为正弦波。
- 输出交流电流的基波有效值。

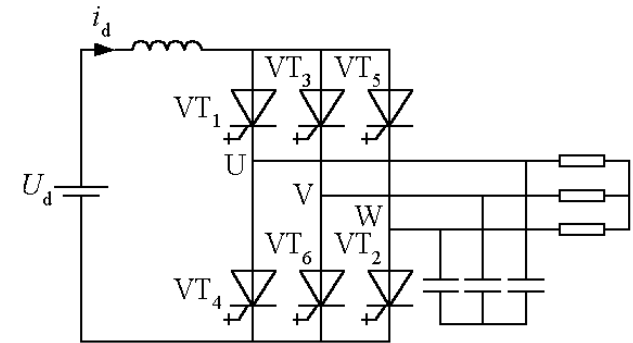


图4-11 电流型三相桥式逆变电路

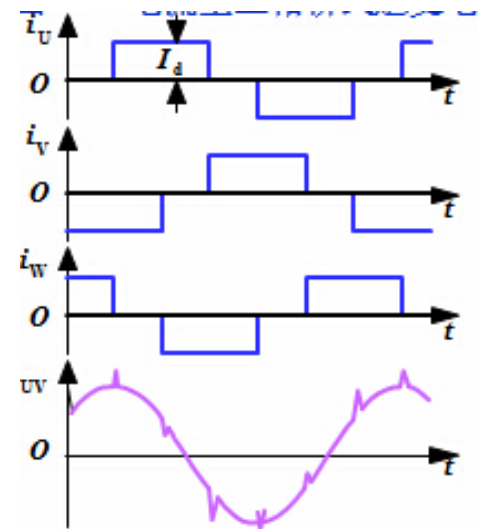


图4-14 电流型三相桥式逆变电路的输出波形

### ● 串联二极管式晶闸管逆变电路

- ✦ 主要用于中大功率交流电动机调速系统。
- ✦ 是**电流型**三相桥式逆变电路。
- ✦ 各桥臂的晶闸管和二极管串联使用。
- ✦ **120° 导电工作方式**，输出波形和图5-14的波形大体相同。
- ✦ **强迫换流**方式，电容 $C_1 \sim C_6$ 为换流电容。

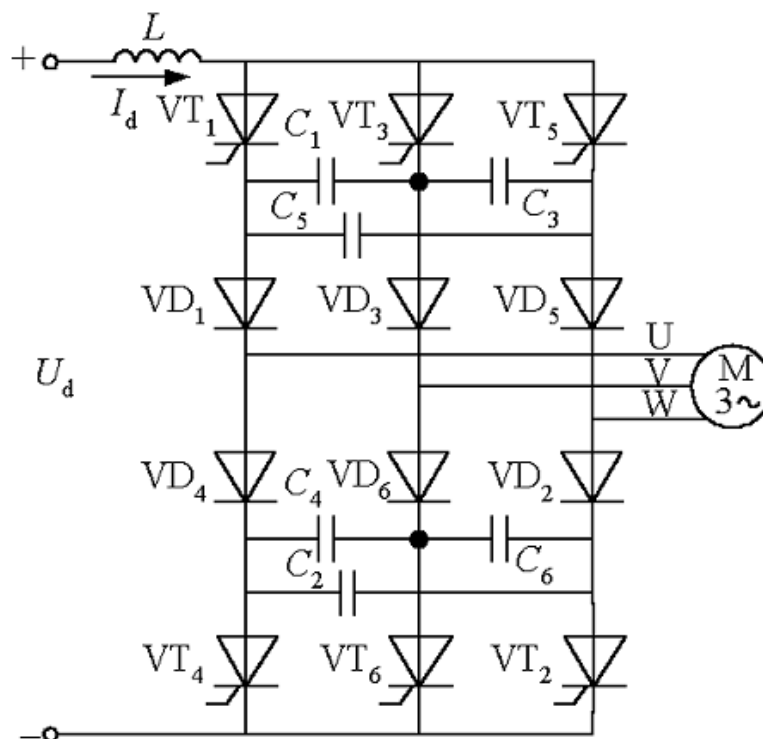


图5-15 串联二极管式  
晶闸管逆变电路

### ● 换流过程分析

#### ✦ 电容器所充电压的规律：

对于共阳极晶闸管，它与导通晶闸管相连一端极性为正，另一端为负，不与导通晶闸管相连的电容器电压为零。

#### ✦ 等效换流电容概念：

分析从 $VT_1$ 向 $VT_3$ 换流时，图4-16中的 $C_{13}$ 就是图4-14中的 $C_3$ 与 $C_5$ 串联后再与 $C_1$ 并联的等效电容。

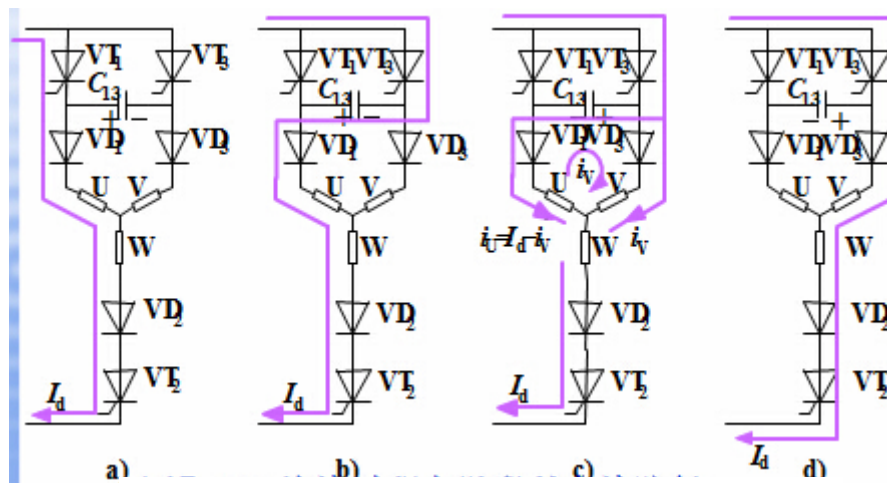


图4-16 换流过程各阶段的电流路径

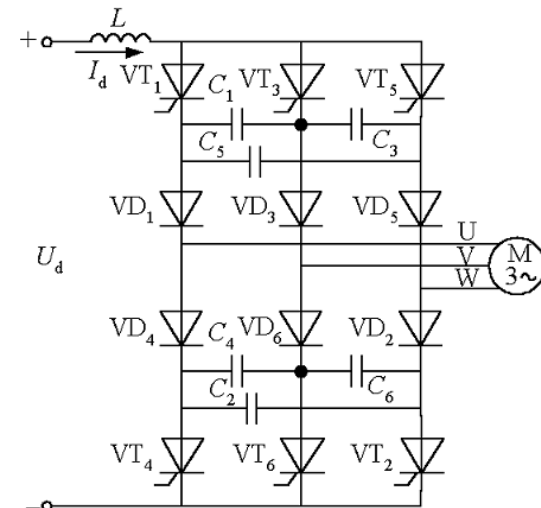


图4-15 串联二极管式晶闸管逆变电路



## 4.3.2 三相电流型逆变电路

### ◆ 分析从 $VT_1$ 向 $VT_3$ 换流的过程:

假设换流前 $VT_1$ 和 $VT_2$ 通,  $C_{13}$ 电压 $U_{C0}$ 左正右负。如图4-16a。

换流阶段分为**恒流放电**和**二极管换流**两个阶段。

- $t_1$ 时刻触发 $VT_3$ **导通**,  $VT_1$ 被施以反压而**关断**。
- $I_d$ 从 $VT_1$ 换到 $VT_3$ ,  $C_{13}$ 通过 $VD_1$ 、U相负载、W相负载、 $VD_2$ 、 $VT_2$ 、直流电源和 $VT_3$ 放电, 放电电流恒为 $I_d$ , 故称**恒流放电阶段**。如图4-16b。
- $u_{C13}$ 下降到零之前,  $VT_1$ 承受反压, 反压时间大于 $t_q$ 就能保证关断。

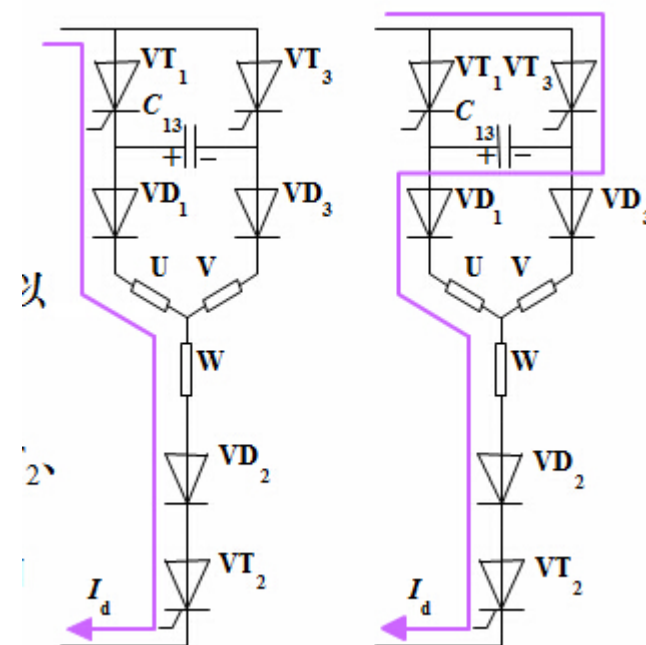


图4-16 换流过程各阶段的  
电流路径 a) b)

## 4.3.2 三相电流型逆变电路

- $t_2$ 时刻 $u_{C13}$ 降到零，之后 $C_{13}$ 反向充电。忽略负载电阻压降，则二极管 $VD_3$ 导通，电流为 $i_V$ ， $VD_1$ 电流为 $i_U = I_d - i_V$ ， $VD_1$ 和 $VD_3$ 同时通，进入**二极管换流阶段**。
- 随着 $C_{13}$ 电压增高，充电电流渐小， $i_V$ 渐大， $t_3$ 时刻 $i_U$ 减到零， $i_V = I_d$ ， $VD_1$ 承受反压而关断，二极管换流阶段**结束**。
- $t_3$ 以后， $VT_2$ 、 $VT_3$ **稳定导通阶段**。

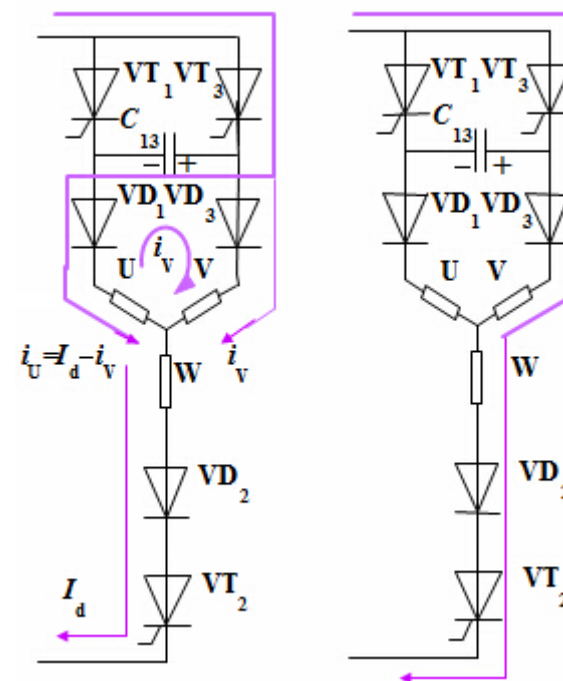


图4-16 换流过程各阶段的  
电流路径 c) d)



### ✦ 波形分析

- 电感负载时， $u_{C13}$ 、 $i_U$ 、 $i_V$  及  $u_{C1}$ 、 $u_{C3}$ 、 $u_{C5}$  波形。
- $u_{C1}$  的波形和  $u_{C13}$  完全相同，从  $U_{C0}$  降为  $-U_{C0}$ 。
- $C_3$  和  $C_5$  是串联后再和  $C_1$  并联的，电压变化的幅度是  $C_1$  的一半。
- $u_{C3}$  从零变到  $-U_{C0}$ ， $u_{C5}$  从  $U_{C0}$  变到零。
- 这些电压恰好符合相隔  $120^\circ$  后从  $VT_3$  到  $VT_5$  换流时的要求。

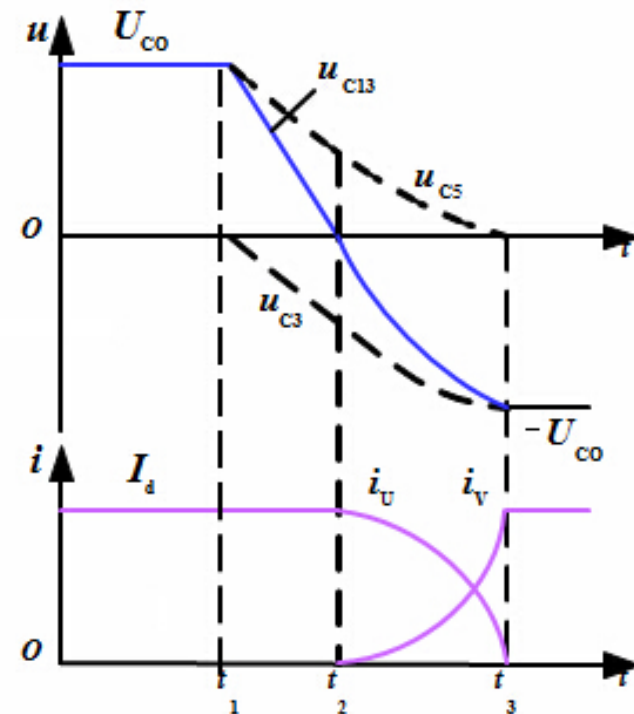


图4-17 串联二极管晶闸管逆变电路换流过程波形

### 实例：

#### 无换向器电动机

- ⊕ 电流型三相桥式逆变器驱动同步电动机，负载换流。
- ⊕ 工作特性和调速方式和直流电动机相似，但无换向器，因此称为**无换向器电动机**。

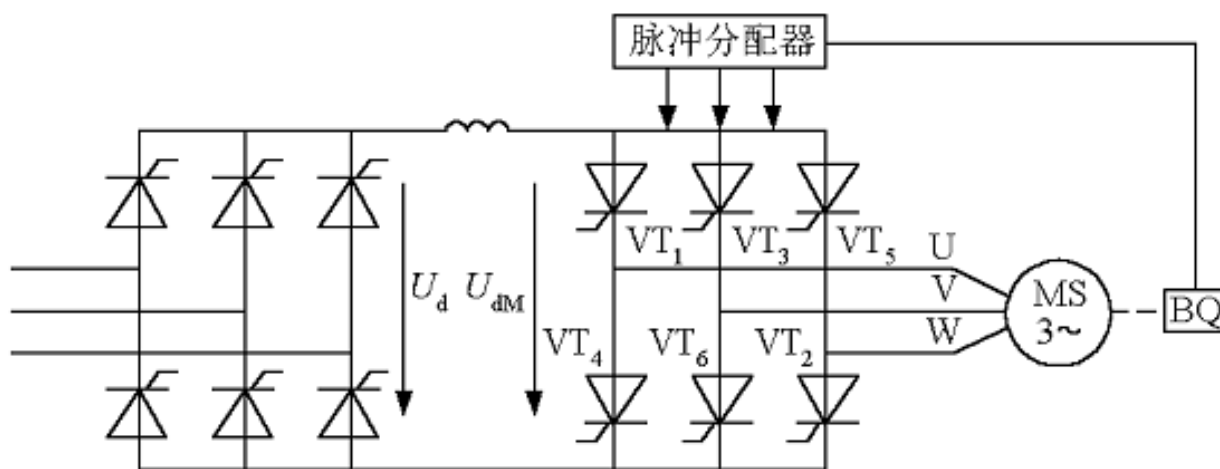


图4-18 无换相器电动机的基本电路

## 4.3.2 三相电流型逆变电路

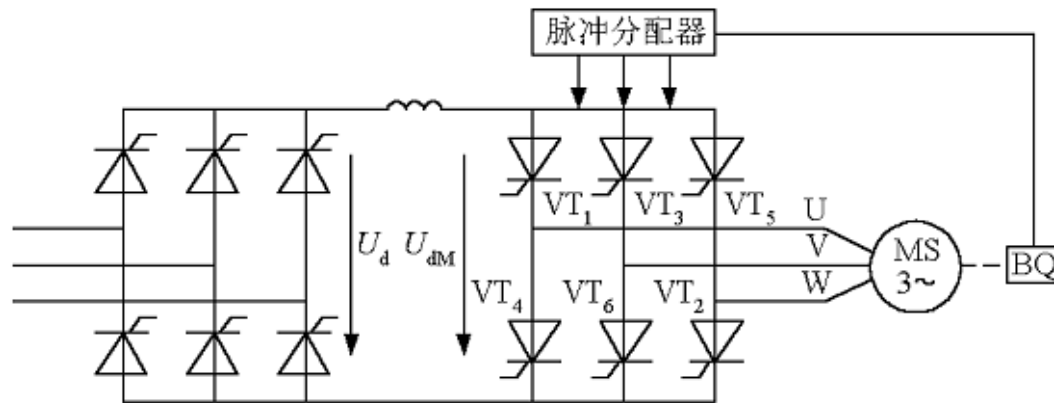


图5-18 无换相器电动机的基本电路

⊕ **BQ——转子位置检测器**，  
检测磁极位置以决定什么时候给哪个晶闸管发出触发脉冲。

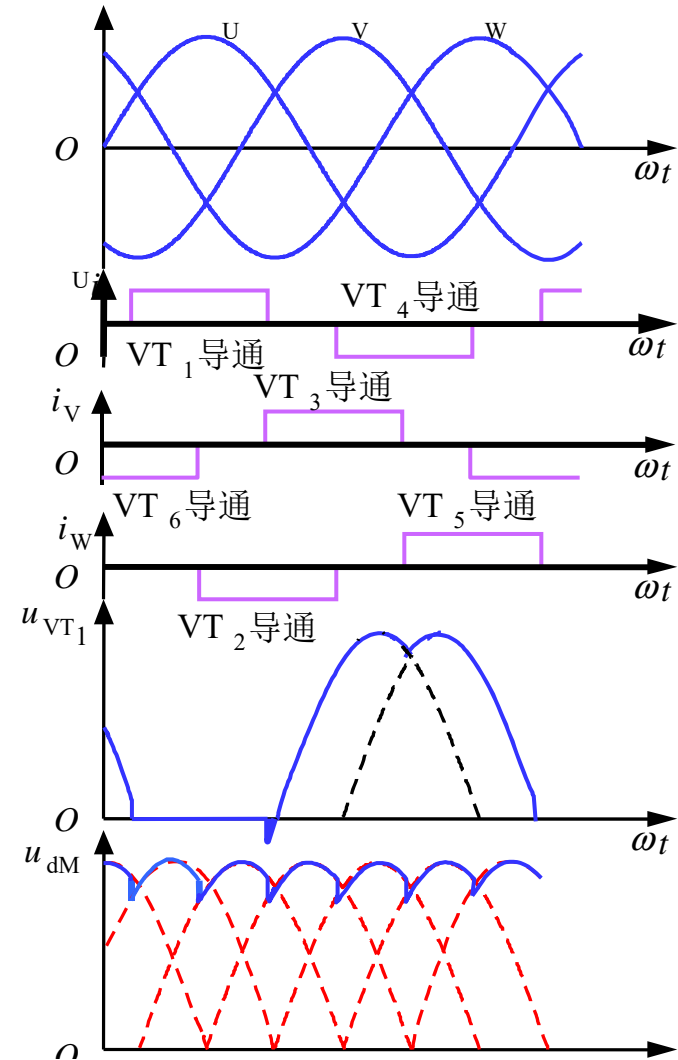


图4-19 无换相器电动机电路工作波形

### 4.4.1 多重逆变电路

### 4.4.2 多电平逆变电路

- **电压型**逆变电路——输出电压是矩形波。
- **电流型**逆变电路——输出电流是矩形波，含有较多谐波。
- **多重逆变电路**把几个矩形波组合起来，接近正弦。
- **多电平逆变电路**输出较多电平，使输出接近正弦。

● 正弦波电压可表示为： $u(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi_u)$

● 对于非正弦波电压，满足狄里赫利条件，可分解为**傅里叶级数**：

✦ 基波 (fundamental) —— 频率与工频相同的分量

✦ 谐波 —— 频率为基波频率大于1整数倍的分量

✦ 谐波次数 —— 谐波频率和基波频率的整数比

✦  $n$ 次谐波电流含有率以  $HRI_n$  (Harmonic Ratio for  $I_n$ ) 表示

$$HRI_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (3-57)$$

✦ 电流谐波总畸变率  $THD_i$  (Total Harmonic distortion) 定义为

$$THD_i = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (3-58)$$

### ● 多重逆变电路

电压型、电流型都可多重化，以**电压型**为例。

### ● 单相电压型二重逆变电路

- 两个单相全桥逆变电路组成，输出通过变压器 $T_1$ 和 $T_2$ 串联起来。
- 输出波形：两个单相的输出 $u_1$ 和 $u_2$ 是 $180^\circ$  矩形波。

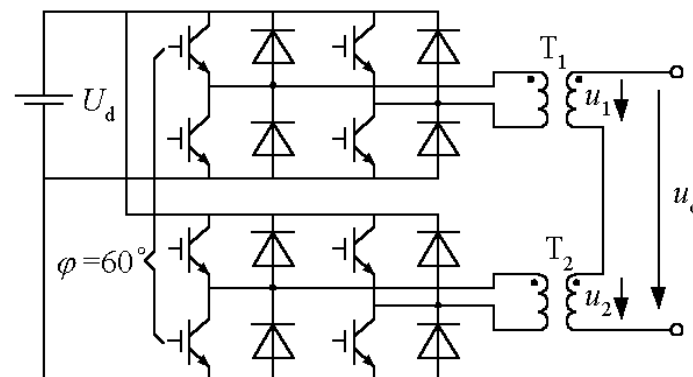


图4-20 二重单相逆变电路

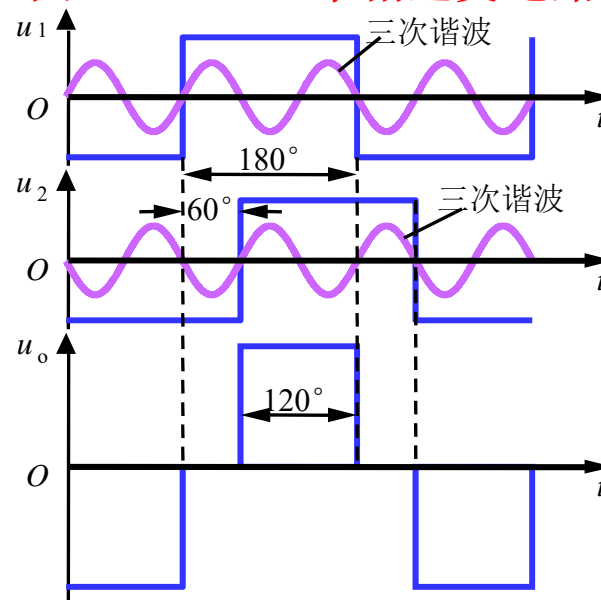


图4-21 二重逆变电路的工作波形

## 4.4.1 多重逆变电路

- ✦  $u_1$  和  $u_2$  相位错开  $j=60^\circ$ ，其中的3次谐波就错开了  $3 \times 60^\circ = 180^\circ$ 。
- ✦ 变压器串联合成后，3次谐波互相抵消，总输出电压中不含3次谐波。
- ✦  $u_o$  波形是  $120^\circ$  矩形波，含  $6k \pm 1$  次谐波， $3k$  次谐波都被抵消。

● 多重逆变电路有串联多重和并联多重两种

- ✦ **串联多重**——把几个逆变电路的输出串联起来，多用于**电压型**。
- ✦ **并联多重**——把几个逆变电路的输出并联起来，多用于**电流型**。

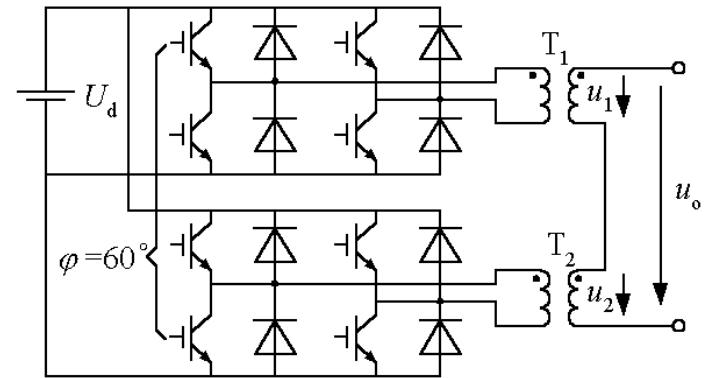


图4-20 二重单相逆变电路

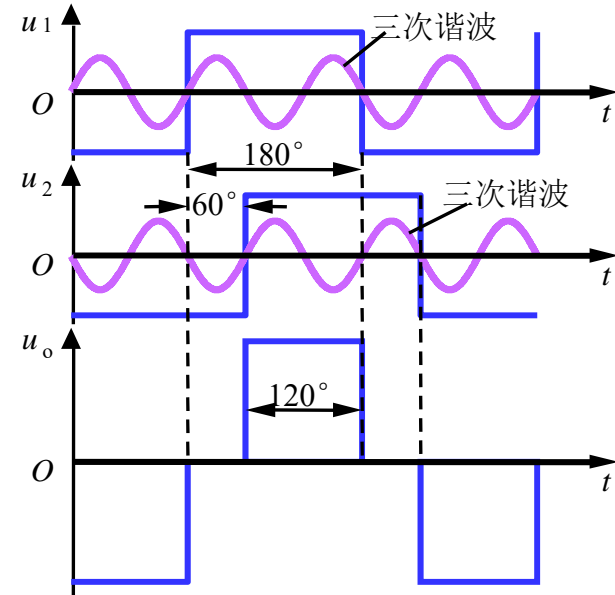


图4-21 二重逆变电路的工作波形



### ● 三相电压型二重逆变电路的工作原理

- 由两个三相桥式逆变电路构成，输出通过变压器串联合成。
- 两个逆变电路均为 $180^\circ$  导通方式。
- 逆变桥II的相位逆变桥I滞后 $30^\circ$ 。
- $T_1$ 为 $\Delta/Y$ 联结，线电压变比为 $1:1.732$ (一次和二次绕组匝数相等)。
- $T_2$ 一次侧 $\Delta$ 联结，二次侧两绕组曲折星形接法，其二次电压相对于一次电压而言，比 $T_1$ 的接法超前 $30^\circ$ ，以抵消逆变桥II比逆变桥I滞后的 $30^\circ$ 。这样， $u_{U2}$ 和 $u_{U1}$ 的基波相位就相同。

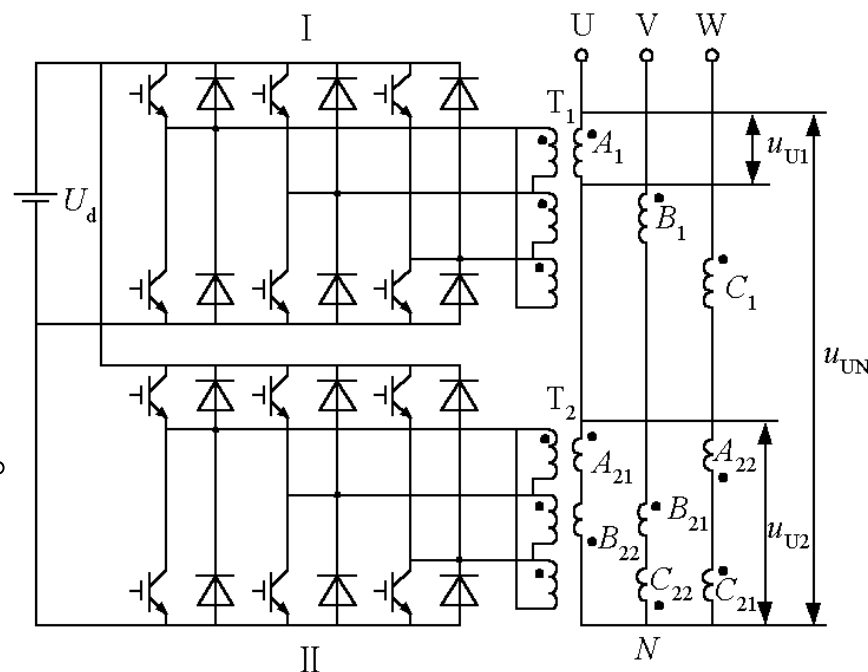


图4-22 三相电压型二重逆变电路

## 4.4.1 多重逆变电路

- 由图4-24可看出 $u_{UN}$ 比 $u_{U1}$ 接近正弦波。
- 具体数量关系见教材P114。
- 直流侧电流每周期脉动12次，称为**12脉波逆变电路**。
- 使 $m$ 个三相桥逆变电路的相位依次错开 $\pi/(3m)$ ，连同合成输出电压并抵消上述相位差的变压器，就可构成 $6m$ 的脉波逆变电路。

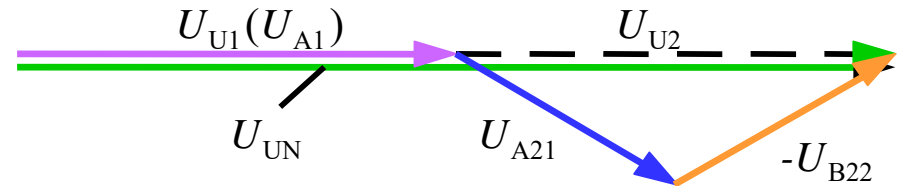


图4-23 二次侧基波电压合成相量图

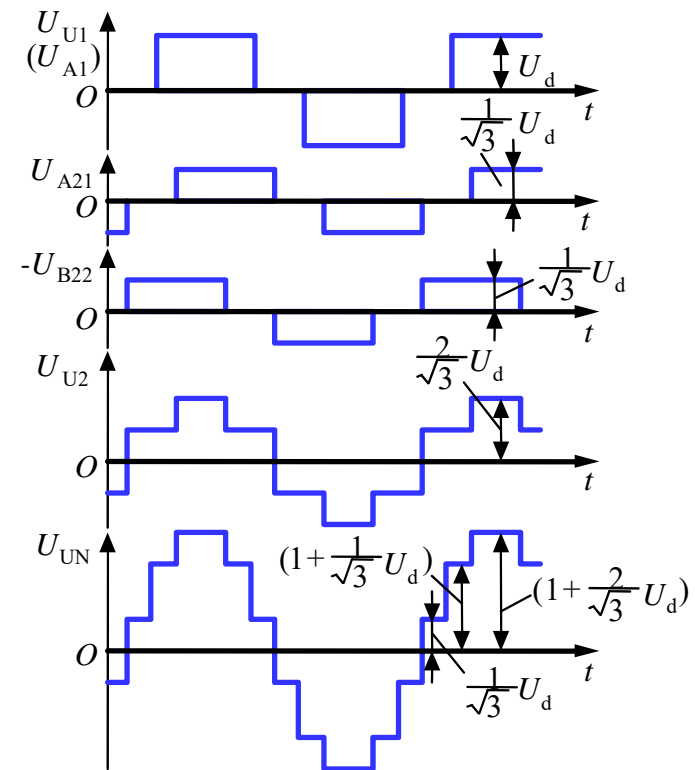
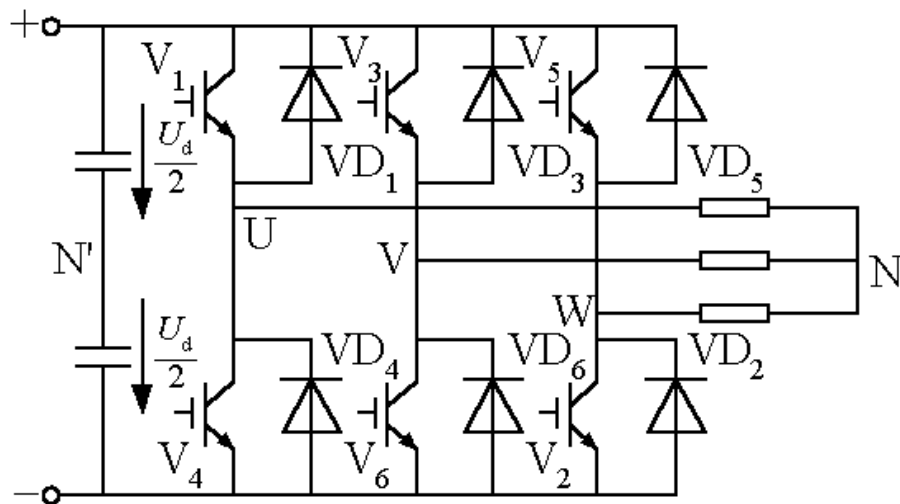


图4-24 三相电压型二重逆变电路波形图

## 4.4.2 多电平逆变电路



- 回顾图4-9三相电压型桥式逆变电路和图4-10的波形。
- 以N'为参考点，输出相电压有  $U_d/2$  和  $-U_d/2$  两种电平，称为**两电平逆变电路**。

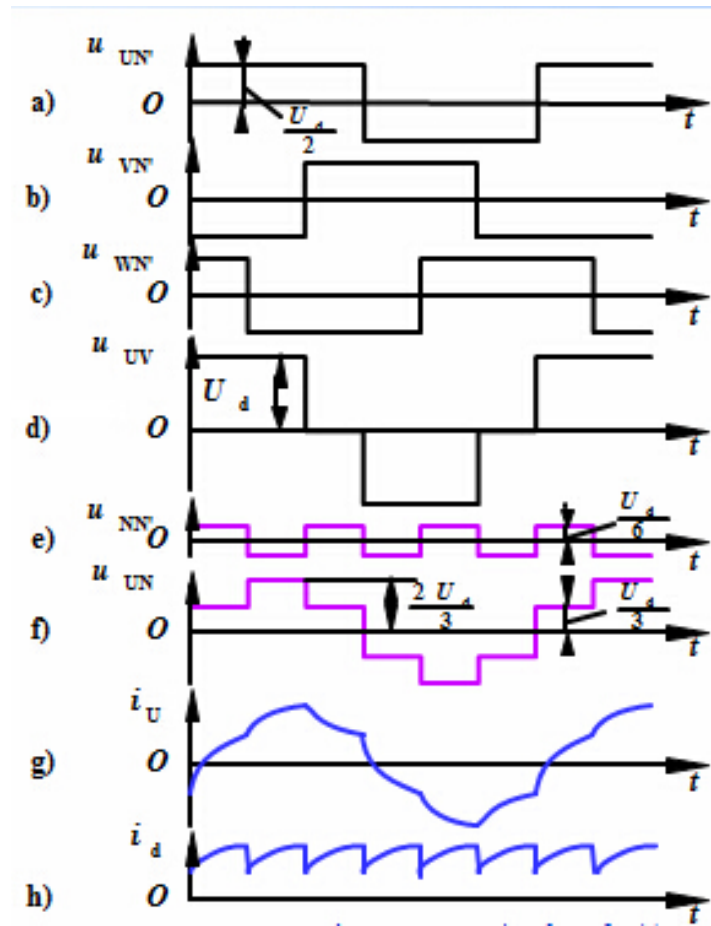


图4-10 电压型三相桥式逆变电路的工作波形

- 三电平逆变电路
  - ⊕ 也称中点钳位型  
(Neutral Point Clamped)  
逆变电路
  - ⊕ 每桥臂由两个全控器件串联构成，两者中点通过钳位二极管和直流侧中点相连。

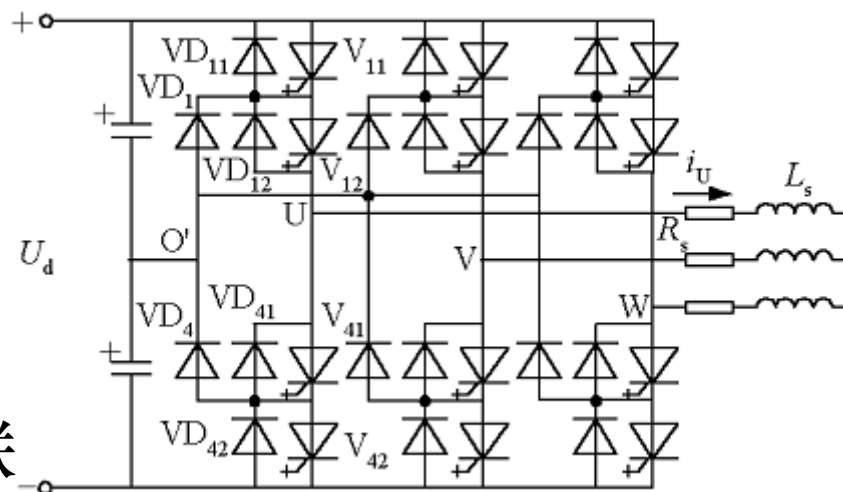


图4-26 三电平逆变电路

## 4.4.2 多电平逆变电路

### 以U相为例分析工作情况

- ✦  $V_{11}$  和  $V_{12}$  (或  $VD_{11}$  和  $VD_{12}$ ) 通,  $V_{41}$  和  $V_{42}$  断,  $UO'$  间电位差为  $U_d/2$ 。
- ✦  $V_{41}$  和  $V_{42}$  (或  $VD_{41}$  和  $VD_{42}$ ) 通,  $V_{11}$  和  $V_{12}$  断,  $UO'$  间电位差为  $-U_d/2$ 。
- ✦  $V_{12}$  和  $V_{41}$  导通,  $V_{11}$  和  $V_{42}$  关断时,  $UO'$  间电位差为 0。
- ✦  $V_{12}$  和  $V_{41}$  不可能同时导通。
- ✦  $i_U > 0$  时,  $V_{12}$  和  $VD_{11}$  导通。
- ✦  $i_U < 0$  时,  $V_{41}$  和  $VD_{42}$  导通。

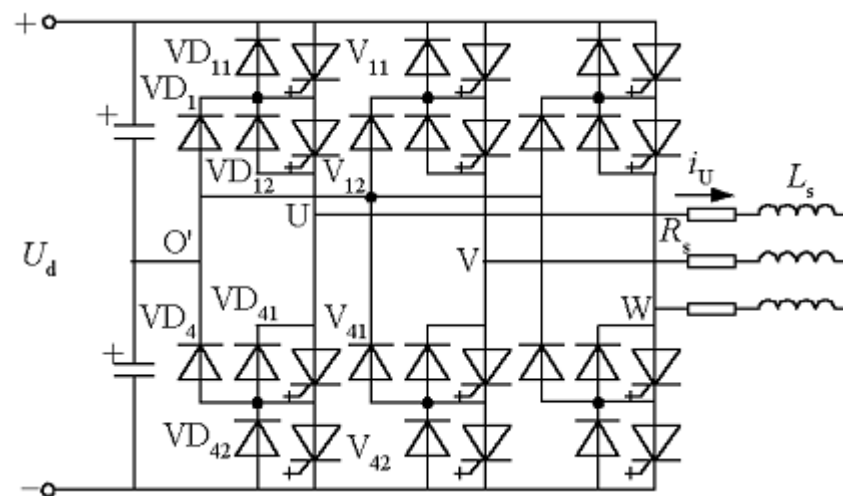


图4-26 三电平逆变电路

### ● 线电压的电平

- ✦ 相电压相减得到线电压。
- ✦ 两电平逆变电路的输出线电压有  $\pm U_d$  和 0 三种电平。
- ✦ 三电平逆变电路的输出线电压有  $\pm U_d$ 、 $\pm U_d/2$  和 0 五种电平。
- ✦ 三电平逆变电路输出电压谐波可大大少于两电平逆变电路。
- ✦ 三电平逆变电路另一突出优点：每个主开关器件承受电压为直流侧电压的一半。

## ● 讲述基本的逆变电路的结构及其工作原理

- ✦ 四大类基本变流电路中，AC/DC和DC/AC两类电路更为基本、更为重要

## ● 换流方式

- ✦ 分为外部换流和自换流两大类，外部换流包括电网换流和负载换流两种，自换流包括器件换流和强迫换流两种。
- ✦ 晶闸管时代十分重要，全控型器件时代其重要性有所下降。

## ● 逆变电路分类方法

- ✦ 可按换流方式、输出相数、直流电源的性质或用途等分类。
- ✦ 本章主要采用按直流侧电源性质分类的方法，分为电压型和电流型两类。
- ✦ 电压型和电流型的概念用于其他电路，会对这些电路有更深刻的认识。
- ✦ 负载为大电感的整流电路可看为电流型整流电路。
- ✦ 电容滤波的整流电路可看成为电压型整流



## ● 与其它章的关系

- ⊕ 本章对逆变电路的讲述是很基本的，还远不完整。
- ⊕ PWM控制在逆变电路中应用最多，绝大部分逆变电路都是PWM控制的，学完PWM控制技术才能对逆变电路有一个较为完整的认识。
- ⊕ 逆变电路的直流电源往往由整流电路而来，二者结合构成间接交流变流电路。
- ⊕ 此外，间接直流变流电路大量用于开关电源，其中的核心电路仍是逆变电路。