

第4章 逆变电路

逆变的概念:

与整流相对应，把直流电变成交流电。

实现逆变的电路，称为逆变电路，也称**DC/AC**变换电路。

分类:

1. 有源逆变：交流侧接电网

2. 无源逆变：交流侧接负载

本章讲述无源逆变

逆变电路的主要应用:

新能源（氢能、太阳能、风能）的开发与应用。

直流发电机、蓄电池、太阳能电池、燃料电池等供电的逆变电源（航空静止变流器等）。

交流电机调速用变频器、不间断电源、感应加热电源中核心部分--逆变器。
以变频或恒频交流电为主的交流电源（飞机变速恒频电源等）。

本章学习内容及要求

本章主要内容:

- 换流方式
- 单相、三相电压型逆变电路
- 单相、三相电流型逆变电路

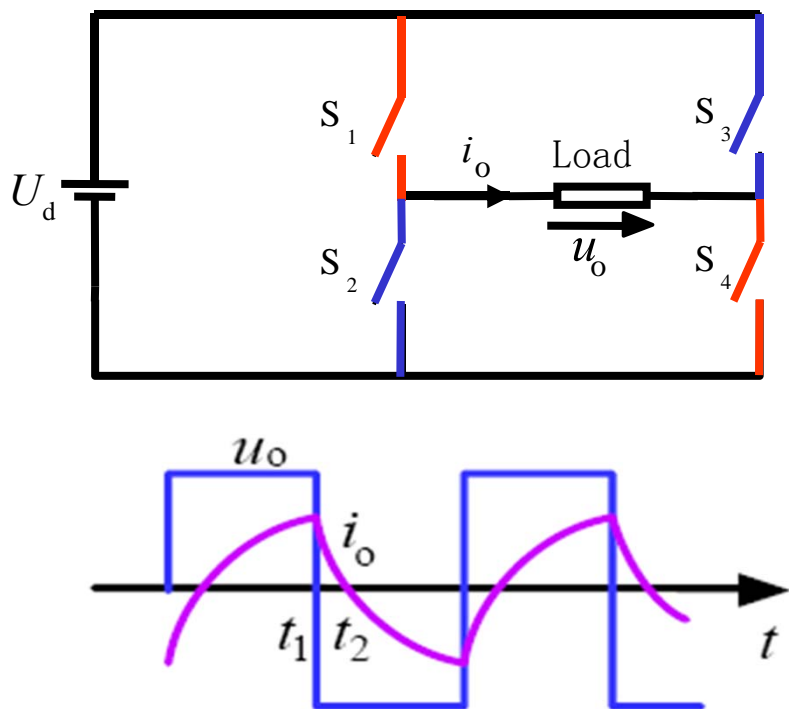
掌握的内容:

- 基本概念
- 各电路的结构、工作原理及特性
- 各电路的波形分析及有关计算分析

4.1 换流方式

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来说明换流。



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

- 当 S_1 、 S_4 闭合， S_2 、 S_3 断开时，负载电压 u_o 为正；
- 当 S_1 、 S_4 断开， S_2 、 S_3 闭合时，负载电压 u_o 为负；
- 最基本的工作原理：把直流电变成了交流电，改变两组开关的切换频率，可改变输出交流电的频率。
- 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。
- 以上过程中支路电流变化！

4.1.2 换流方式分类

换流的概念:

变流电路中，电流从一个支路向另外一条支路转移的过程。换流也被称为换相。

开通: 半控/全控型器件，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的反压，才能关断。
- ✓ 研究换流方式主要是研究如何使器件关断。尤其是**SCR**。

4.1.2 换流方式分类

1) 器件换流

- 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。

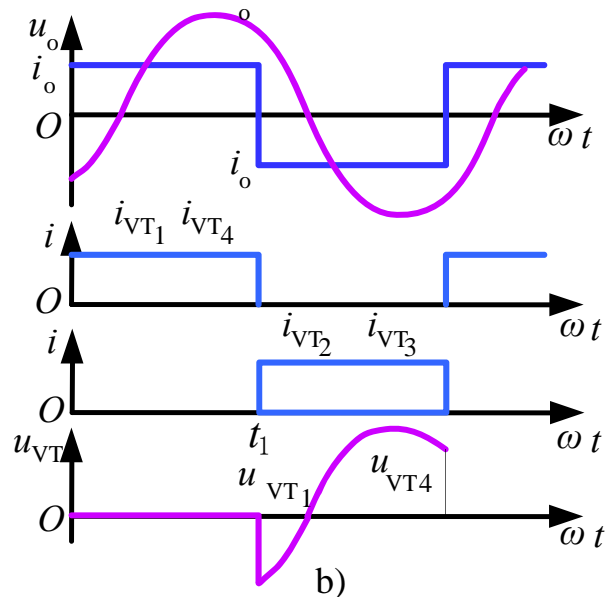
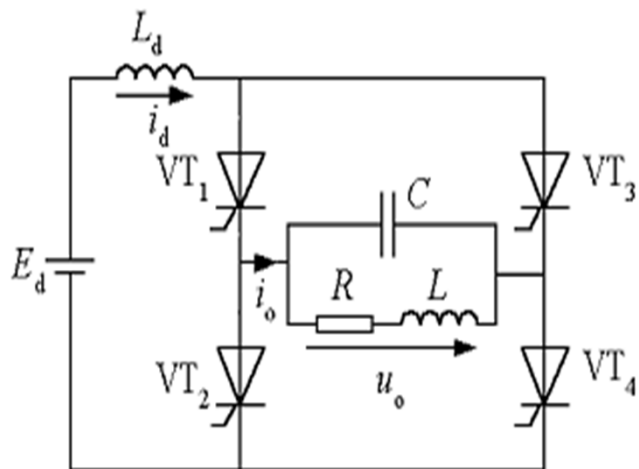
2) 电网换流

- ✓ 电网提供换流电压的换流方式。如相控整流电路。
- ✓ 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。

3) 负载换流

4) 强迫换流

4.1.2 换流方式分类



3) 负载换流

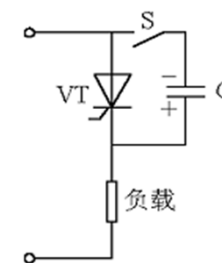
- 由负载提供换流电压的换流方式。
- 如何给SCR施加负电压？
- 负载电压落后于负载电流的相位的场合，电流过零，施加负电压，实现负载换流。
- 如图所示是基本的负载换流电路，4个桥臂均由SCR组成。
- 整个负载工作在接近并联谐振状态而略呈容性，直流侧串大电感，工作过程可认为 i_d 基本没有脉动。
- 负载对基波的阻抗大而对谐波的阻抗小，所以 u_o 接近正弦波。
- 注意：触发 VT_2 、 VT_3 的时刻 t_1 必须在 u_o 过零前并留有足够的裕量，才能使换流顺利完成。

4) 强迫换流

设置附加的换流电路，给欲关断的SCR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储存的能量来实现的，也称电容换流。

直接耦合式强迫换流：

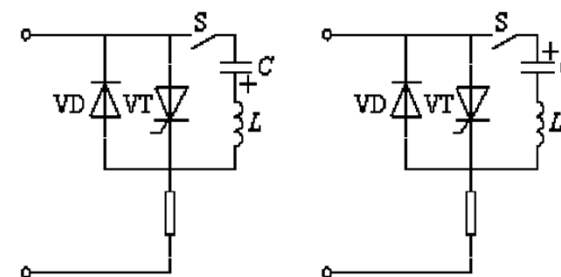
当晶闸管VT 处于通态时，预先给电容充电。当S 合上，就可使VT 被施加反压而关断。也叫电压换流。



直接耦合式

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。



电感耦合式

换流方式总结

- 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。
- 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。

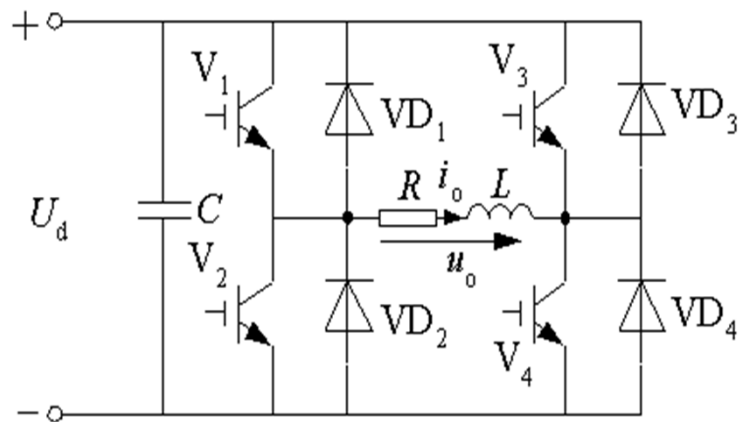
4.2 电压型逆变电路

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（电压源型逆变电路）
- 直流侧是电流源：电流型逆变电路（电流源型逆变电路）

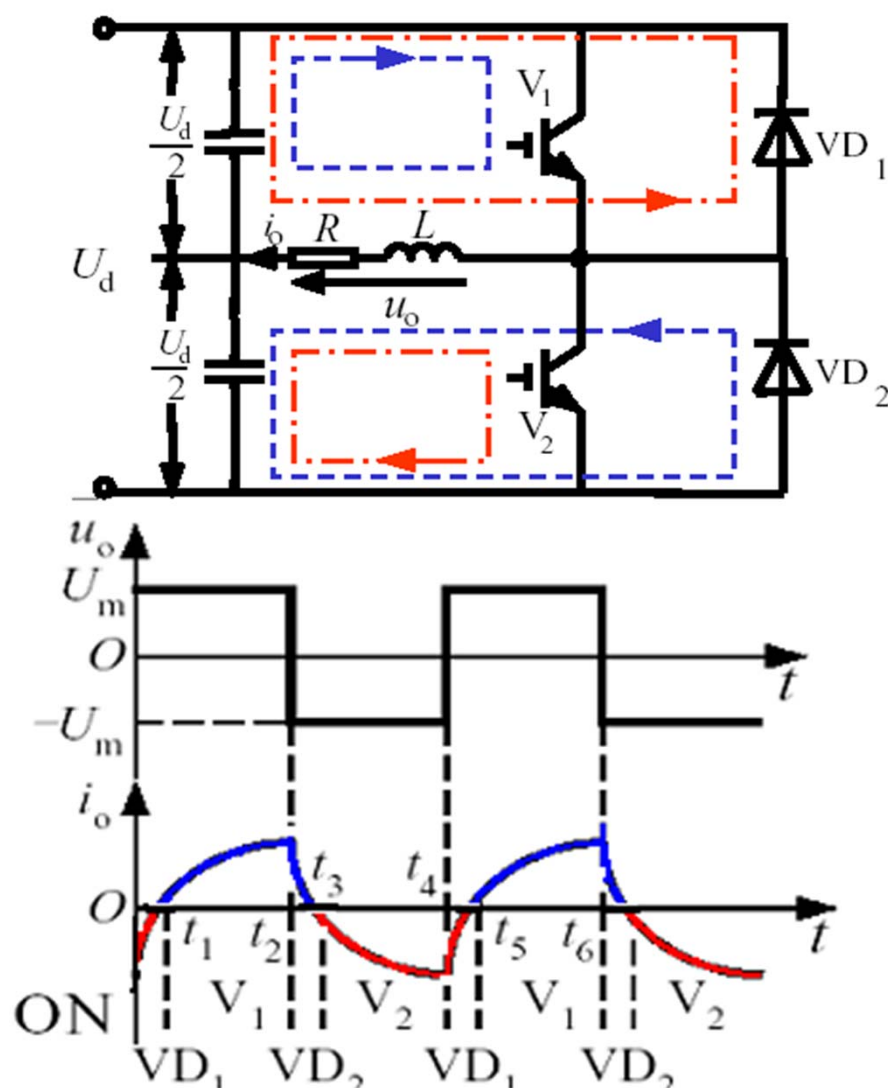
电压型逆变电路的特点：

- 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。



4.2.1 单相电压型逆变电路

1. 半桥逆变电路



➤ **电路结构：**两个桥臂，各由一个可控器件和一个反并联二极管组成。直流侧接两个串联的大电容，两个电容的联结点为直流电源的中点，负载联接在直流电源中点和两个桥臂联结点之间。

➤ **工作原理：**

V_1 和 V_2 的栅极信号在一个周期内各半周正偏，半周反偏，二者互补。输出电压 u_o 为矩形波，其幅值为 $U_m = U_d/2$ 。（分析电阻、阻感负载，负载电流的变化。）

- u_o 为交变矩形波，改变控制频率可改变输出电压的频率。 i_o 波形随负载而异。
- i_o 和 u_o 同方向，直流侧向负载提供能量； i_o 和 u_o 反向，电感中贮能反馈到直流侧。
- 需要二极管提供能量反馈、续流通路。
- 简单，使用器件少。
- 输出电压低，直流侧需两电容器串联。

2. 全桥逆变电路

- 电路结构：共四个桥臂，可看成两个半桥电路组合而成。
- 工作原理：两对桥臂交替导通 180° 。
(分析电阻、阻感负载，负载电流的变化，导通回路为红线，蓝线所示续流回路。)
- 输出电压和电流波形与半桥电路形状相同，但幅值高出一倍，即 $U_m = U_d$ 。
- ✓ 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。

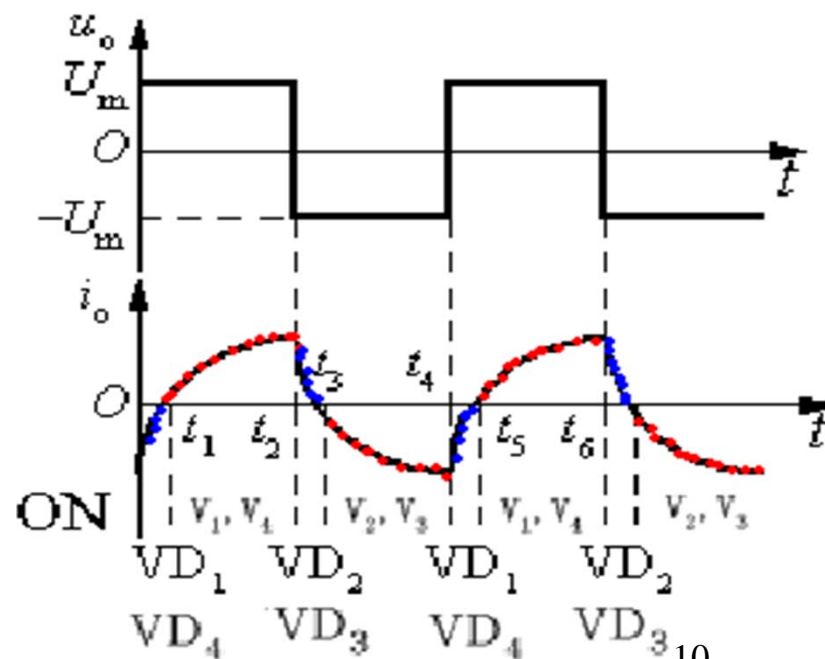
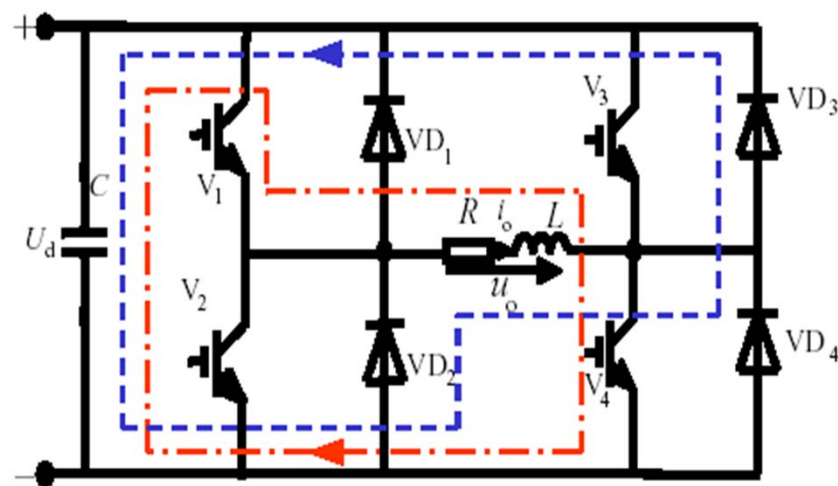
输出电压矩形波 u_o 的分析：傅里叶级数

$$u_o = \frac{4U_d}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$$

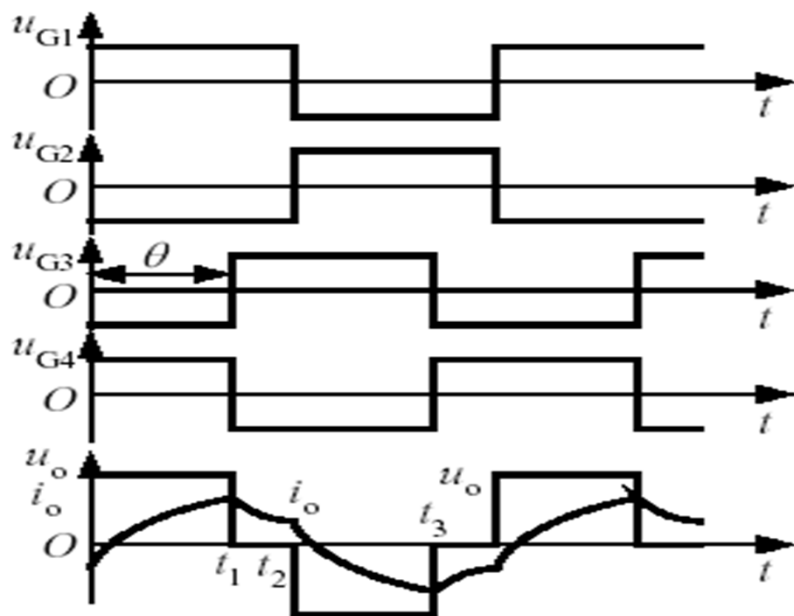
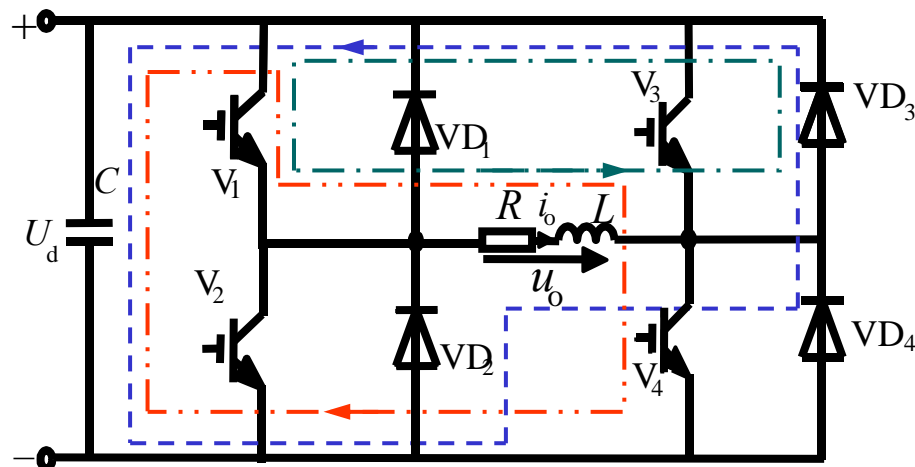
基波的幅值 U_{o1m} 和基波有效值 U_{o1} 分别为

$$U_{o1m} = \frac{4U_d}{\pi} = 1.27U_d$$

$$U_{o1} = \frac{2\sqrt{2}U_d}{\pi} = 0.9U_d$$



调节输出电压的方法 - 移相调压



阻感负载时，可采用移相的方式来调节输出电压。

◆ **控制要求：**各栅极控制信号时间及互补关系同前。但 V_3 的栅极信号比 V_1 落后 θ ($0 < \theta < 180^\circ$)，不是 180° 。 V_3 、 V_4 的栅极信号分别比 V_2 、 V_1 的前移 $180^\circ - \theta$ 。

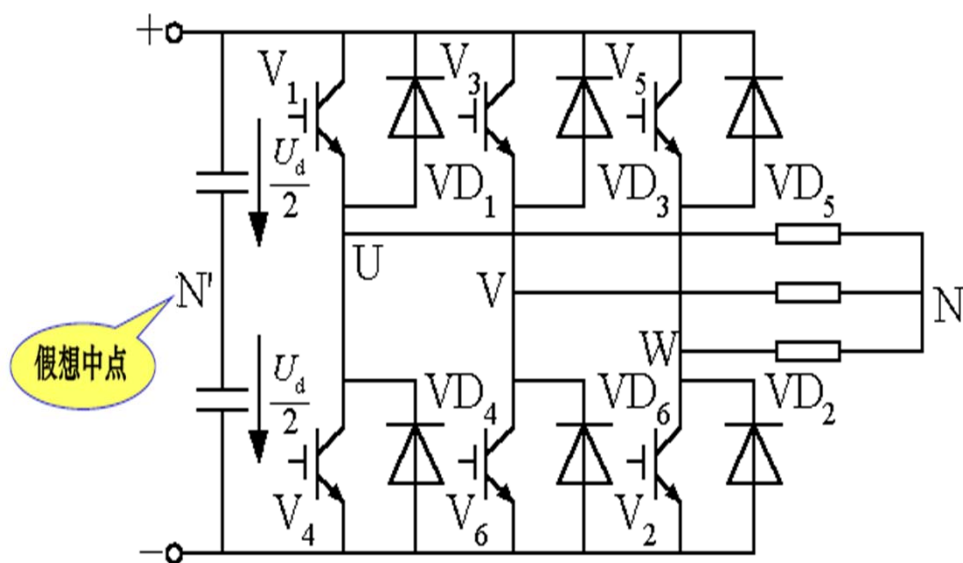
◆ **工作原理：**（一个周期）

- t_1 时刻前 V_1 和 V_4 导通， $u_o = U_d$ 。（红线）
- t_1 时刻 V_4 截止， VD_3 导通续流， $u_o = 0$ 。（绿线）
- t_2 时刻 V_1 截止， VD_2 导通和 VD_3 构成续流， $u_o = -U_d$ 。（蓝线）
- 负载电流过零并开始反向时， VD_2 和 VD_3 截止， V_2 和 V_3 开始导通， u_o 仍为 $-U_d$ 。
- t_3 时刻 V_3 截止， VD_4 导通续流， u_o 再次为零。
- 之后 VD_1 导通和 VD_4 构成续流， $u_o = U_d$ 。
- ◆ 输出电压是正负各为 θ 的脉冲。改变 θ 就可调节输出电压。

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

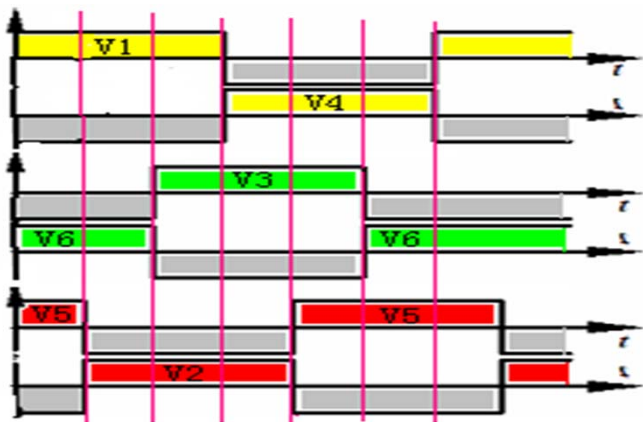
电路结构：三个半桥逆变电路，IGBT为开关（注意元件顺序）；三相输出点分别为U、V、W。三相负载为星形连接。N为中点。



开关时序工作要求：

- 各桥臂导电是 180° ，同一相上下两个桥臂交替导通。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。
- 设 N' 为假象中点，对于U相输出，当V1导通时， $u_{UN'} = U_d/2$ ，当V4导通时， $u_{UN'} = -U_d/2$ ， $u_{UN'}$ 的波形是幅值为 $U_d/2$ 的矩形波，V、W两相类似。
- 控制方面：先断后通，死区时间 t_{12} ，（同前）

电路工作分析:

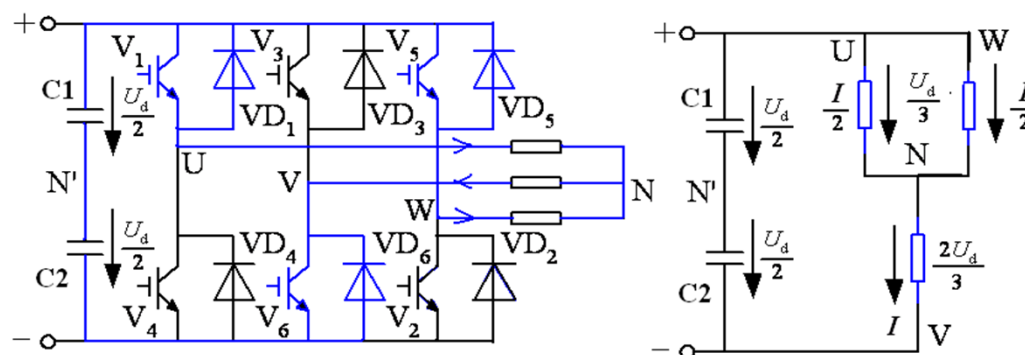


控制信号如图，按60度间隔划分360度为6个间隔，每个间隔3个器件导通，每隔60度均发生一次换流。

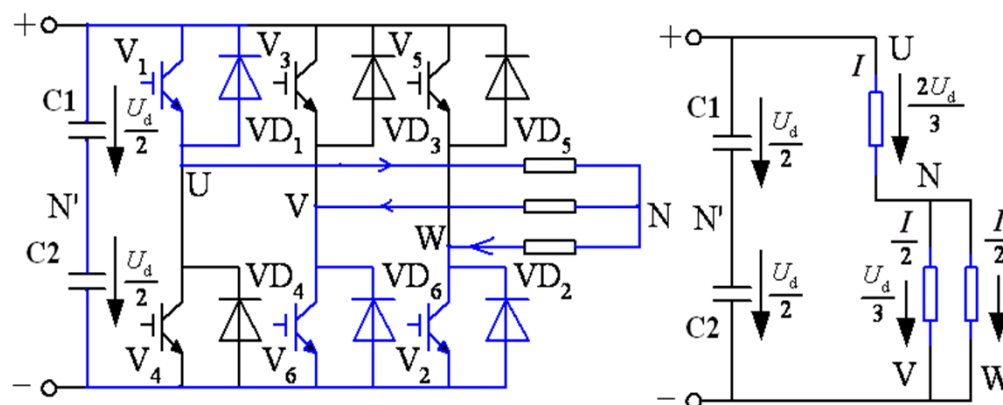
器件导通后，等效电路有两种：两个上桥臂一个下桥臂，或一个上桥臂两个下桥臂。

分析输出电压：线电压 u_{UV} 、相电压 u_{UN} 。（三相对称负载）。

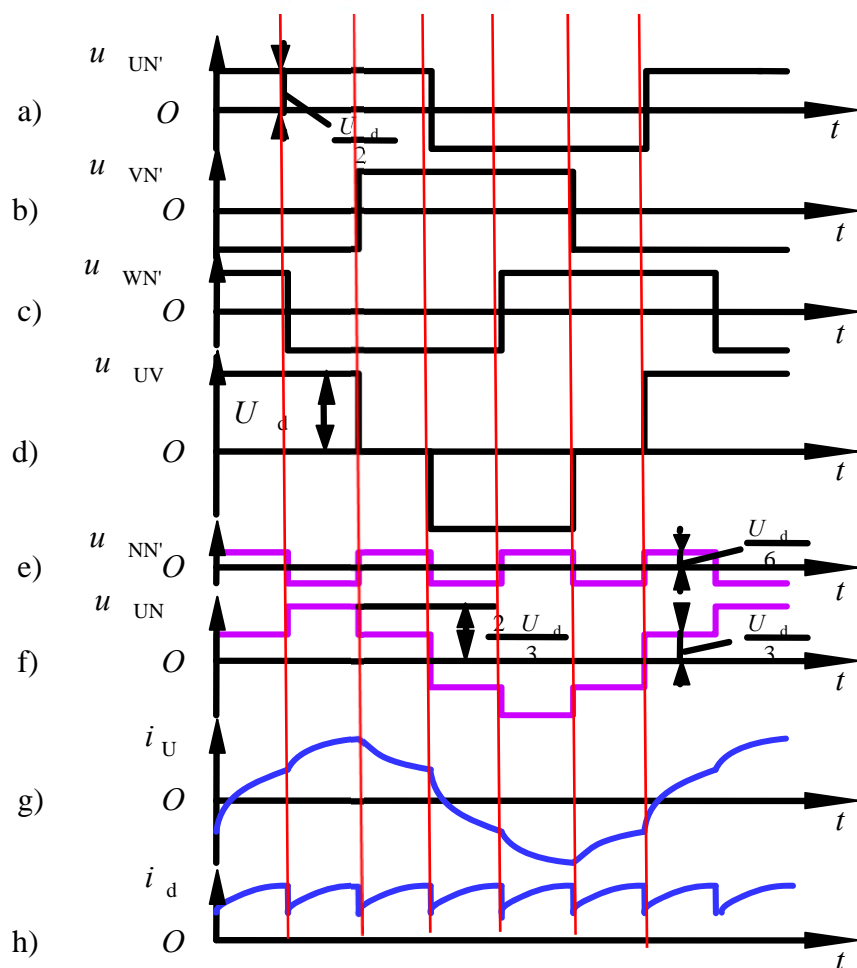
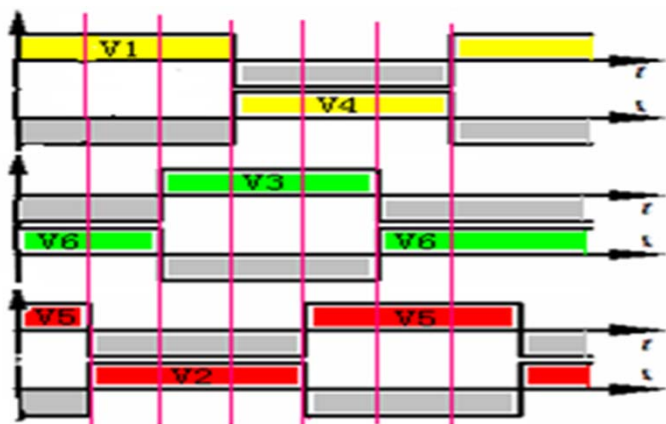
如当V1和V5，V6导通时， $u_{UN} = u_{WN} = U_d/3$ （上）， $u_{VN} = -2U_d/3$ （下）； $u_{UV} = U_d$ ；
相电压之和 $u_{UN} + u_{VN} + u_{WN} = U_d/3 - 2U_d/3 + U_d/3 = 0$



如当V6和V2，V1时， $u_{UN} = 2U_d/3$ （上）， $u_{VN} = u_{WN} = -U_d/3$ （下）； $u_{UV} = U_d$ ；
相电压之和 $u_{UN} + u_{VN} + u_{WN} = 2U_d/3 - U_d/3 - U_d/3 = 0$



如当V1和V3，V2时， $u_{UN} = u_{VN} = U_d/3$ （上）， $u_{WN} = -2U_d/3$ （下）； $u_{UV} = 0$ ；
相电压之和 $u_{UN} + u_{VN} + u_{WN} = 0$



- 输出线电压波形为图d(三电平波), 相电压波形为图f(四电平波)。其它两项波形相同, 但相位依次相差120度。
- 教材中给出负载线电压 u_{UV} 、 u_{VW} 、 u_{WU} 可由式(4-4)求出, 负载各相的相电压式可以(4-5)求出的计算方法。
- 另外中点N和N'之间电压可通过式(4-4)和式(4-5)求得式(4-7), 波形如图e。幅值 $U_d/6$, 是控制频率的3倍。

输入输出电流分析:

- 输入电流 i_d 为三个上桥臂电流之和。
- 输出电流 i_U 、 i_V 、 i_W 为相电流。
- 输出电流, 可由 u_N 解析表达式和负载性质求出。R负载。RL负载时, i_U 波形如图g。
- 电流 i_V 、 i_W 的波形与 i_U 相同, 但相位依次相差120度。
- 把3个上桥臂的电流在一个周期内相加, 得到直流侧的电流 i_d 如图h所示, 为每间隔60度脉动一次的波形。

■基本的数量关系分析（线电压、相电压的分析）

◆输出线电压 u_{UV} 和相电压 u_{UN} 展开成傅里叶级数：

$$u_{UV} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi} [\sin \omega t + \sum_n \frac{1}{n} (-1)^k \sin n\omega t]$$

$$u_{UN} = \frac{2U_d}{\pi} \left(\sin \omega t + \sum_n \frac{1}{n} \sin n\omega t \right)$$

◆输出线电压、相电压的有效值

$$U_{UV} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{UV}^2 d\omega t} = 0.816 U_d$$

式中， $n=6k \pm 1$ ， k 为自然数。

$$U_{UN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{UN}^2 d\omega t} = 0.471 U_d$$

其中基波幅值和基波有效值分别为

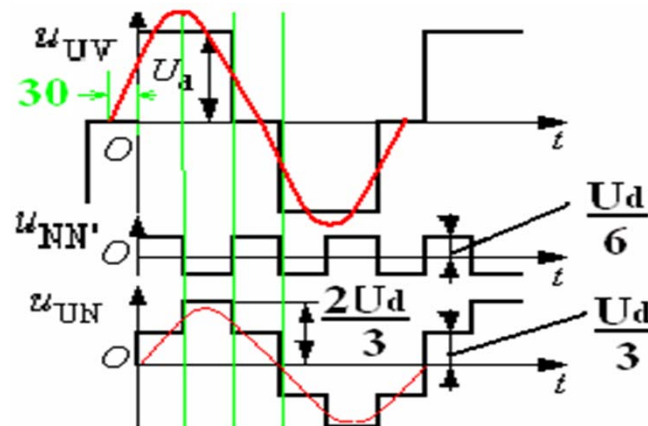
$$U_{UV1m} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi} = 1.1U_d$$

$$U_{UN1m} = \frac{2U_d}{\pi} = 0.637 U_d$$

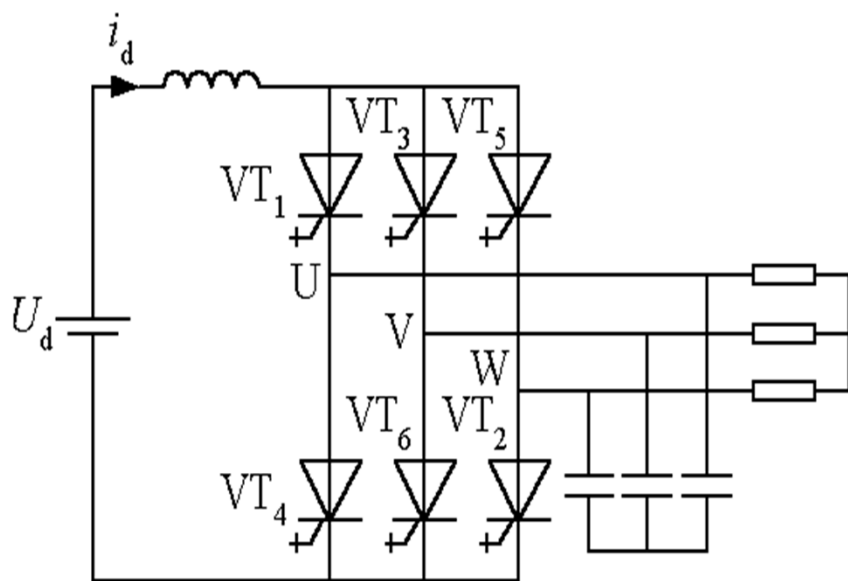
$$U_{UV1} = \frac{U_{UV1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d = 0.78 U_d$$

$$U_{UN1} = \frac{U_{UN1m}}{\sqrt{2}} = 0.45 U_d$$

基波幅值： $U_{UV1m} > U_d$ ； $U_{UN1m} < 2U_d/3$ 。
线电压为相电压的1.732倍，相位差30度。
两者无3次及3的整数倍次谐波。



4.3 电流型逆变电路



如图所示，在逆变电路直流侧串联大电感，近似成电流源。采用全控器件，电容是吸收换流时负载电感中存储的能量。

■ 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：

◆ 直流侧串**大电感**，电流基本无脉动，相当于电流源。

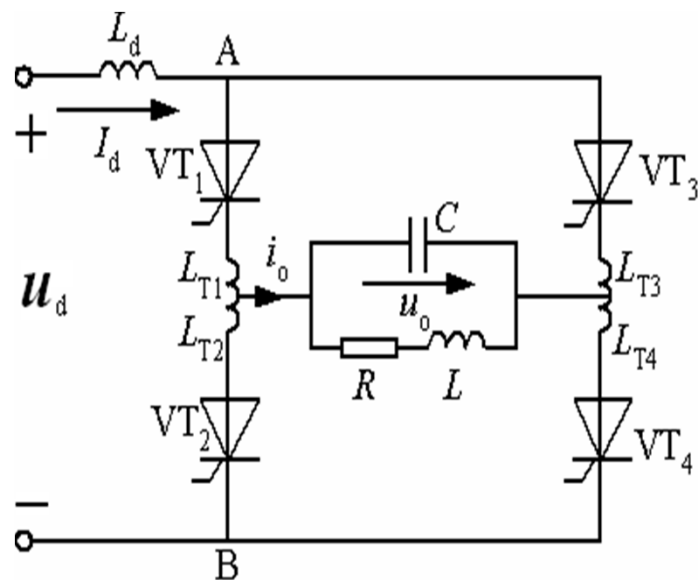
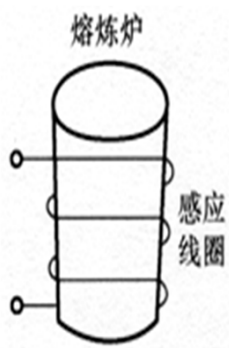
◆ 交流输出电流为**矩形波**，与负载阻抗角无关，输出电压波形和相位与负载有关。

◆ 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

常用于1kHz-2.5kHz中频冶炼炉的单相桥式电流型逆变电路原理如图， L 等效为钢料及线圈构成的电感， R 等效为钢料中产生涡流损耗的电阻。



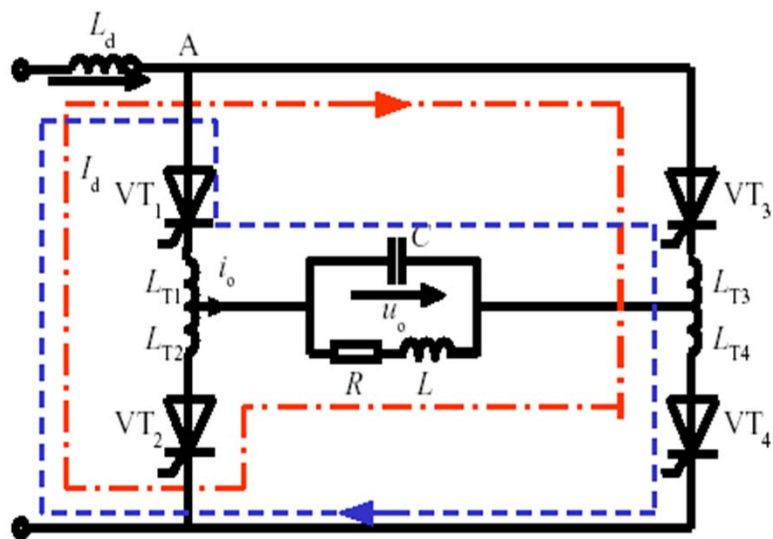
■ 电路结构及分析

◆ 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 。

◆ 采用负载换相方式工作的，要求负载电流略超前于负载电压，即负载略呈容性。并联的补偿电容器 C 和 L 、 R 构成并联谐振电路。 C 使负载过补偿，略失谐。

◆ 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，负载电压波形接近正弦波。

控制思想：同电压型逆变电路一样， VT_1 、 VT_4 和 VT_2 、 VT_3 各控制导通180度。



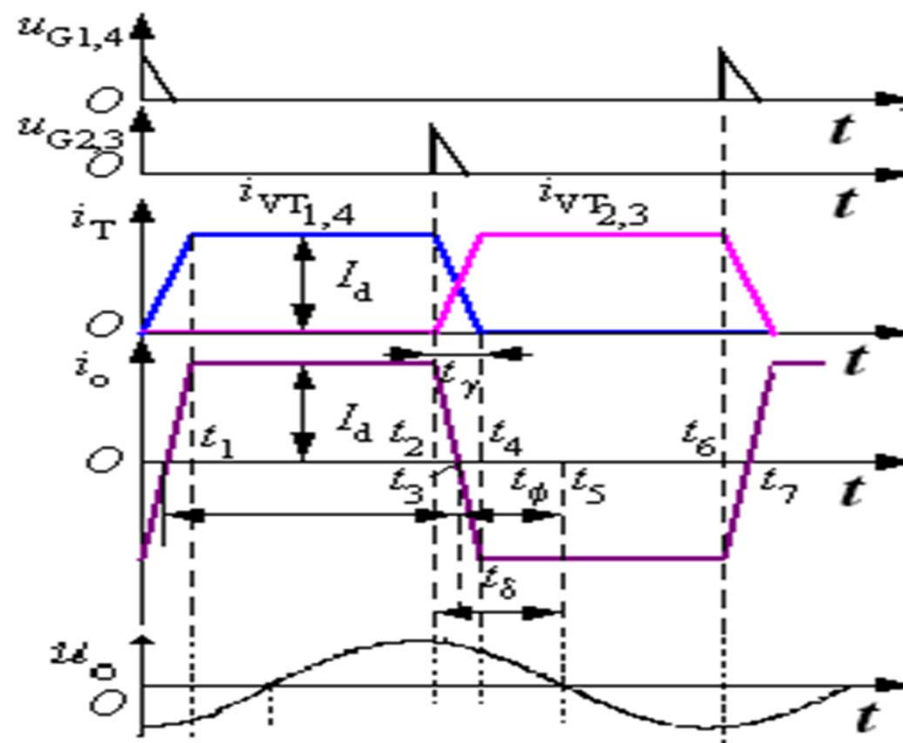
工作波形分析

◆在交流电流的一个周期内，**电流**如图所示，有**两个稳定导通阶段**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**的电压。

◆在 t_2 时刻触发 VT_2 和 VT_3 开通，开始进入换流阶段。

由于**电抗器 L_T** 的作用， VT_1 和 VT_4 不能立刻关断，其电流有一个减小过程， VT_2 和 VT_3 的电流也有一个增大过程。

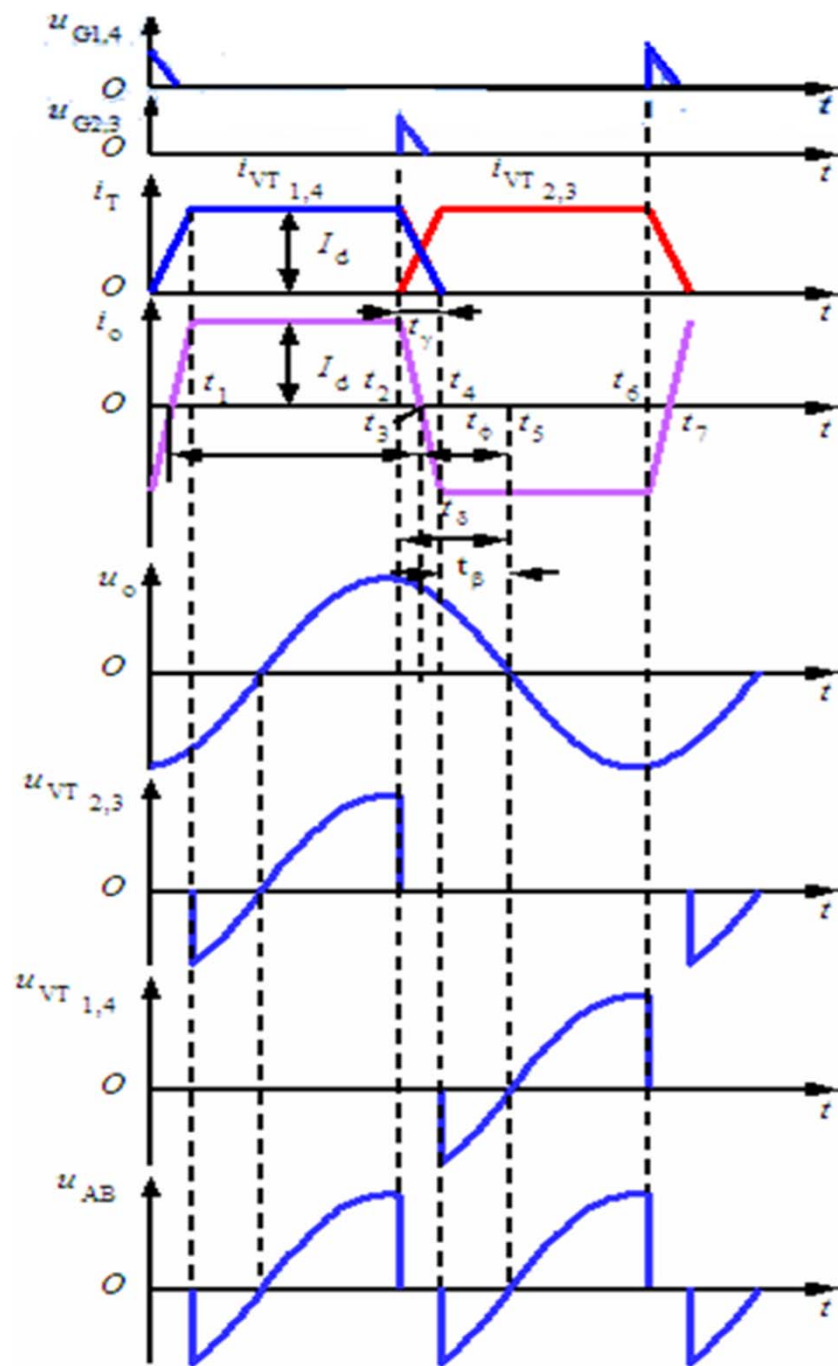


此时，4个晶闸管全部导通，负载电容电压经两个并联的放电回路同时放电。

$C-L_{T1}-VT_1-VT_3-L_{T3}-C$; $C-L_{T2}-VT_2-VT_4-L_{T4}-C$ 。

◆当 $t=t_4$ 时， VT_1 、 VT_4 电流减至零而关断，直流侧电流 I_d 全部从 VT_1 、 VT_4 转移到 VT_2 、 VT_3 ，**换流阶段结束**。

$t_4 - t_2 = t_\gamma$ ，为换流时间。（**先通后断**）
电流过零点 t_3 位于 t_2 和 t_4 的中点。 18



◆在交流电流的一个周期内，如图所示负载电压、晶闸管承受的电压、AB间的电压。负载电压基波呈正弦（主要为基波），滞后于负载电流。

◆滞后负载电流的时间要至少保证晶闸管恢复正向阻断能力， t_4 时刻换流结束后还要使VT₁、VT₄承受一段反压时间 t_β ， $t_\beta = t_5 - t_4$ 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 $t_\delta = t_5 - t_2$ 时间内触发VT₂、VT₃， t_δ 为触发引前时间， $t_\delta = t_\gamma + t_\beta$

◆ i_o 超前于 u_o 的时间 φ （负载的功率因数角）， $t_\phi = t_\gamma/2 + t_\beta$ 。负载参数的配合，应满足这个电流至少超前电压时间条件，保证逆变正常进行。

◆晶闸管截止期间承受的电压为负载电压。

◆换流期间， $u_{AB}=0$ 。其它时间， u_{AB} 决定于负载电压。

■基本的数量关系分析（电流、电压的分析）

◆ i_o 展开成傅里叶级数可得

$$i_o = \frac{4I_d}{\pi} \sum_n \frac{1}{n} \sin n\omega t \quad n=1,3,5\dots \quad \text{基波电流有效值:} \quad I_{o1} = \frac{4I_d}{\sqrt{2}\pi} = 0.9I_d$$

◆ 负载电压有效值 U_o 和直流电压 U_d 的关系

认为 u_{AB} 的平均值等于 U_d

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\beta}^{\pi-(\gamma+\beta)} u_{AB} d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_{-\beta}^{\pi-(\gamma+\beta)} \sqrt{2}U_o \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}U_o}{\pi} \cos(\beta + \frac{\gamma}{2}) \cos \frac{\gamma}{2}$$

一般情况下 γ 值较小, $\cos(\gamma/2) \approx 1$, 再有 $t_\phi = t_\gamma/2 + t_\beta$, 得

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_o \cos \varphi$$

$$U_o = 1.11 \frac{U_d}{\cos \varphi}$$

■ 触发脉冲的控制方式:

◆ 自励方式: 触发脉冲的工作频率随负载变化而自动调整。

◆ 他励方式: 触发脉冲的工作频率固定。

◆ 自励方式存在起励问题, 解决方法:

先用他励方式, 系统开始工作后再转入自励方式。

附加预充电起励电路, 形成振荡来自励。

4.3.2 三相电流型逆变电路

■ 电路结构

◆ 由六个桥臂构成，每个桥臂由全控型器件GTO构成，器件排列顺序如图。

■ 电路分析

◆ 基本工作方式：一周期每个臂内导电 120° ，上（下）桥臂相差 120° ，按VT1-VT6顺序每隔 60° 依次导通，每个时刻上下桥臂组各有一个臂导通。

◆ 换流方式：横向换流。

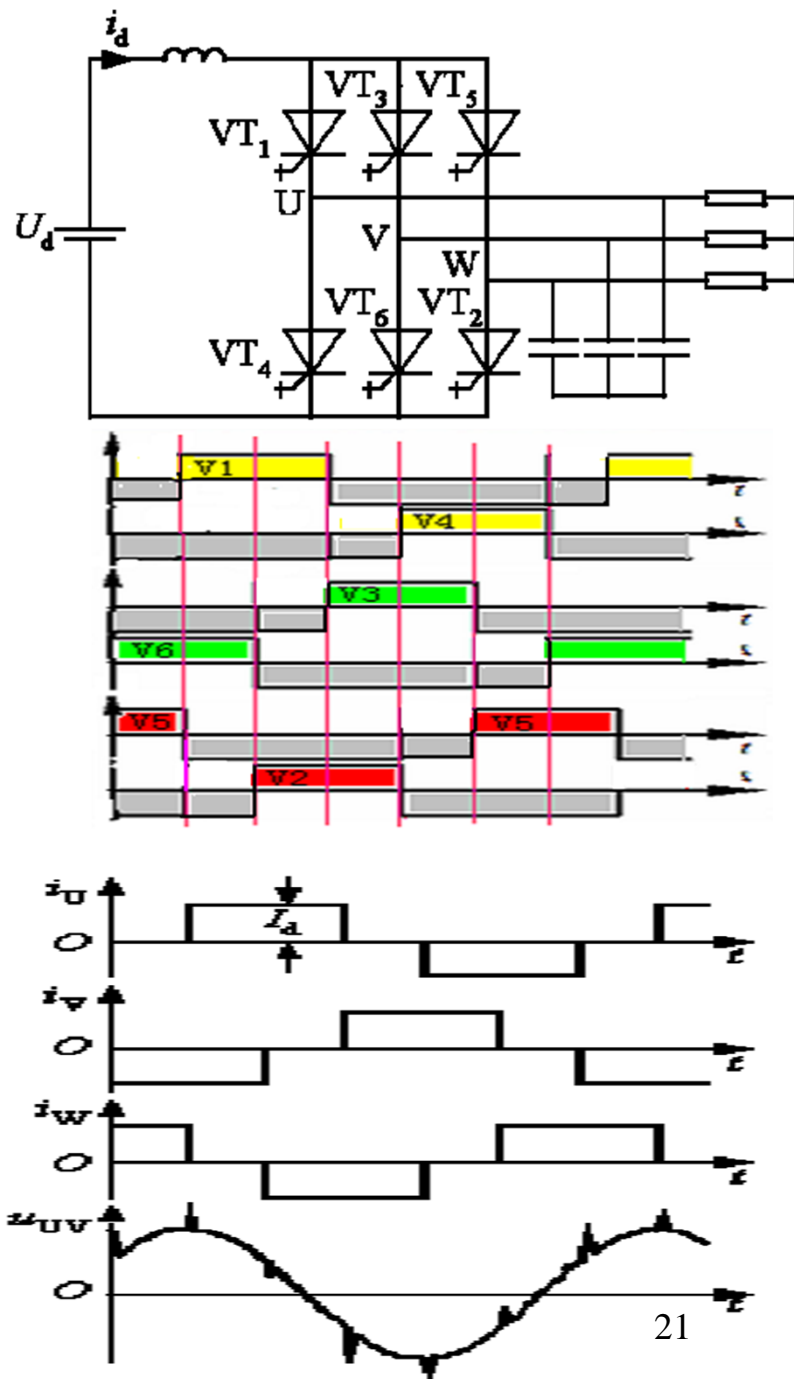
■ 波形分析

◆ 输出电流波形和负载性质无关，正负脉冲各 120° 的矩形波。

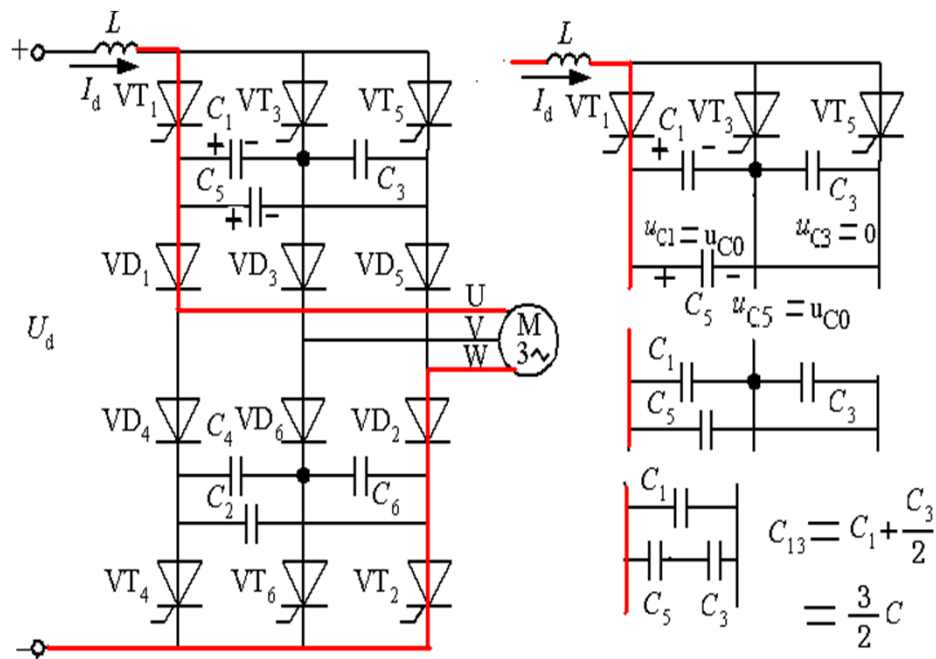
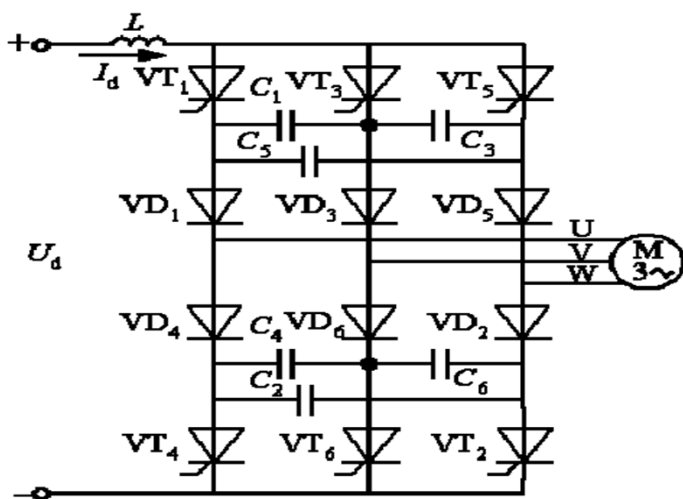
◆ 输出线电压波形和负载性质有关，大体为正弦波，但叠加了一些脉冲。

◆ 输出交流电流的基波有效值 I_{U1} 和直流电流 I_d 的关系为

$$I_{U1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = 0.78 I_d$$



4.3.2 三相电流型逆变电路



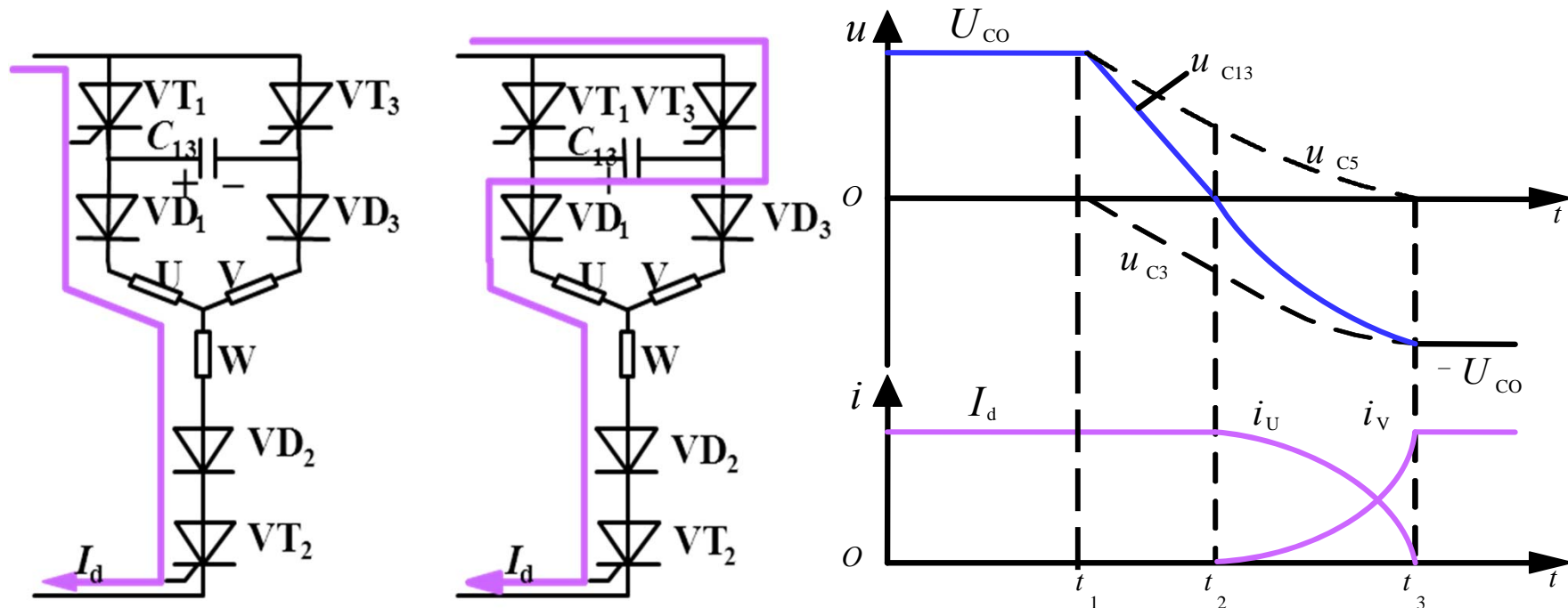
- 串联二极管式晶闸管逆变电路
- ◆ 用于中大功率交流电动机调速系统。
- ◆ 电路结构与分析

电流型三相桥式逆变电路，各桥臂的SCR和二极管串联使用。器件排列顺序如图。导通顺序同前。采取 120° 导电工作方式，输出波形和前面的波形基本相同。采用强迫换流方式，电容 $C_1 \sim C_6$ 为换流电容。

◆ 换流过程分析

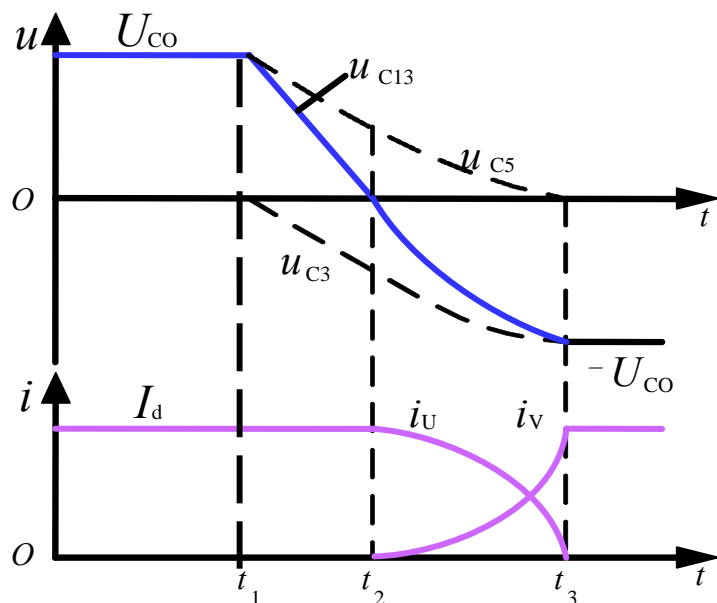
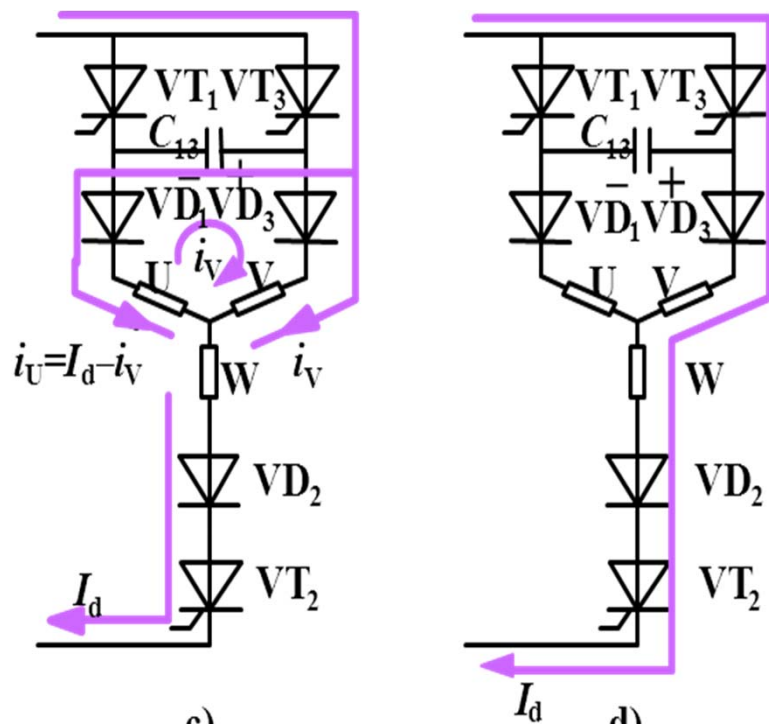
首先，稳定状态下，电容器电压：对于共阳极SCR，它与导通SCR相连一端极性为正，另一端为负，不与导通SCR相连的电容器电压为零；共阴极的情况与此类似，只是电压极性相反。

等效换流电容：VT1-VT3换流， C_3 与 C_5 串联后再与 C_1 并联的等效电容为 C_{13} 。



分析从 VT_1 向 VT_3 换流的过程：换流阶段分为**恒流放电**和**二极管换流**两个阶段。

- 换流前 VT_1 和 VT_2 通， C_{13} 电压 U_{C0} 左正右负。
- 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 （**强迫换流**）， 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**。电压变化如图。
- u_{C13} 下降到零之前， VT_1 承受反压，反压时间大于 t_q 就能保证可靠关断。



- t_2 时刻 u_{C13} 降到零，之后 C_{13} 反向充电，二极管 VD_3 正偏导通，电流为 i_v ， VD_1 电流为 $i_U = I_d - i_v$ ， VD_1 和 VD_3 同时导通，进入**二极管换流阶段**。
- 如何为阻感负载，则 u_{C13} 降至零时，反电动势 $e_{VU} > 0$ ， VD_3 仍承受反向电压，直到 u_{C13} 高于 e_{VU} 后，才正偏导通，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，进入 VT_2 、 VT_3 **稳定导通阶段**。

由于C3与C5串联，再与C1并联。电容C1、C3和C5的电压波形图：

- ◆ u_{C1} 的波形和 u_{C13} 完全相同。
- ◆ u_{C3} 从零变到 $-U_{C0}$ ， u_{C5} 从 U_{C0} 变到零，变化幅度是 C_1 的一半。
- ◆ 电压符合相隔 120° 后从 VT_3 到 VT_5 换流时的要求，为下次换流准备好了条件。