

通过非正弦波形的电流时晶闸管额定电流如何计算？

电流有效值相等即发热相同的原则

**将非正弦半波电流的有效值 I_T 折合成
等效的正弦半波电流平均值去选择晶闸管额定值**

$$I_T = K_f I_d$$

$$I_{Tav} = I_T / 1.57$$

在实际选用时，一般取1.5—2倍的安全裕量

可以认为，额定有效值电流为 $1.57I_{Tav}$

■ 驱动电路还要提供控制电路与主电路之间的电气隔离环节，一般采用**光隔离**或**磁隔离**。

◆ 光隔离一般采用光耦合器

☞ 光耦合器由发光二极管和光敏晶体管组成，封装在一个外壳内。

☞ 有**普通**、**高速**和**高传输比**三种类型。

◆ 磁隔离的元件通常是脉冲变压器

☞ 当脉冲较宽时，为避免铁心饱和，常采用**高频调制和解调**的方法。

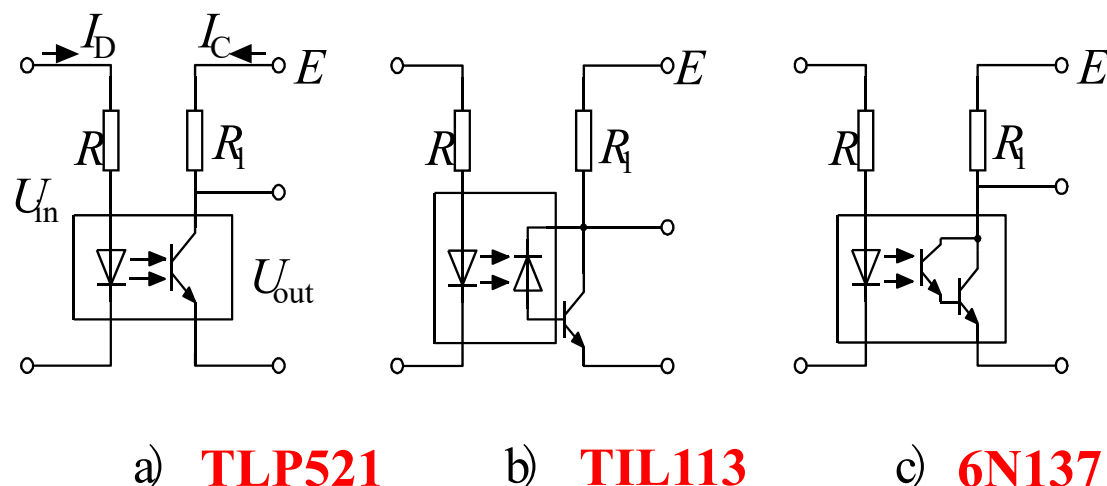


图9-1 光耦合器的类型及接法

a) 普通型 b) 高速型 c) 高传输比型

一、加速电容

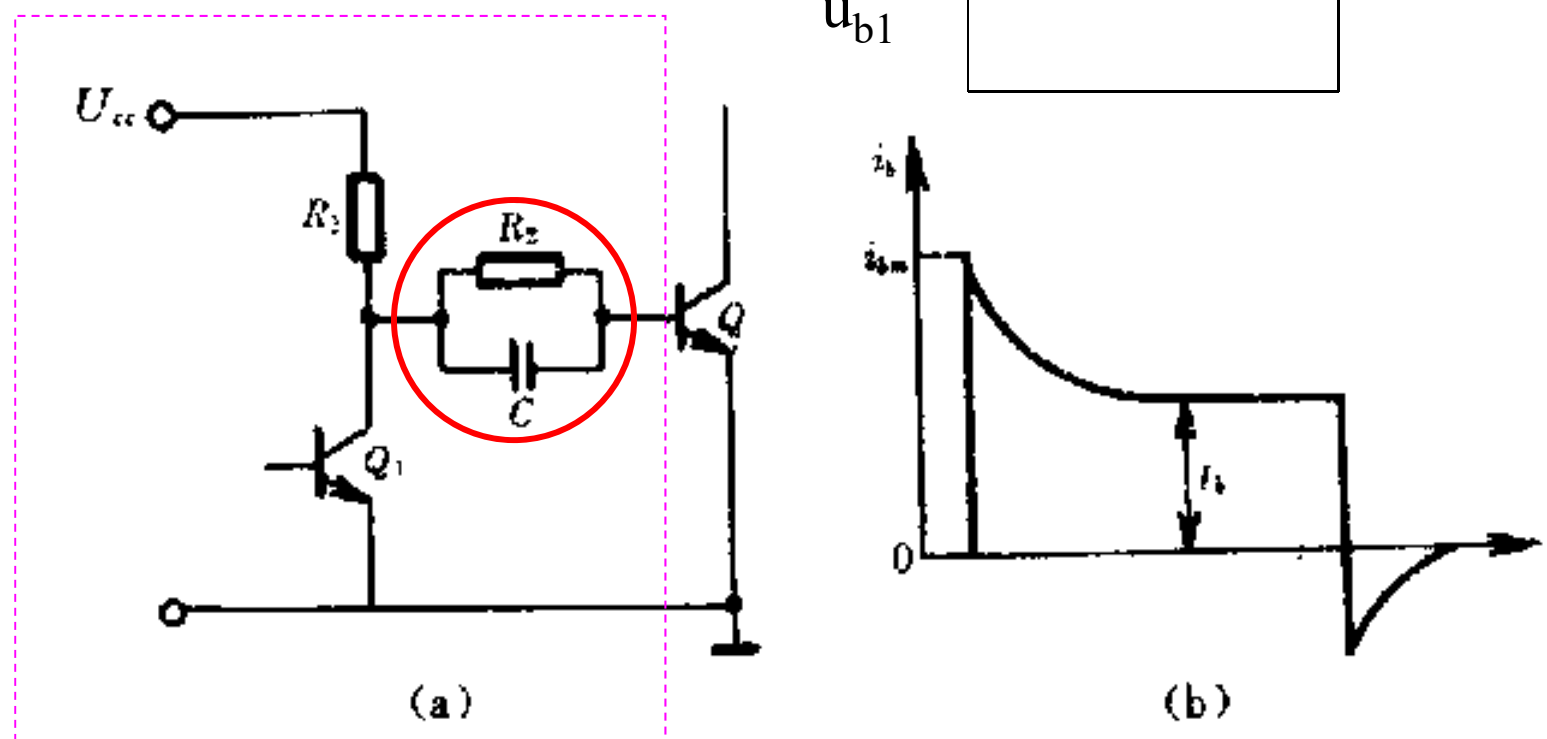


图 12-10 采用加速电容的驱动电路

二、抗饱和电路

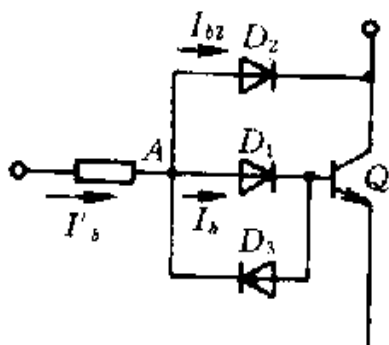


图 12-11 抗饱和电路

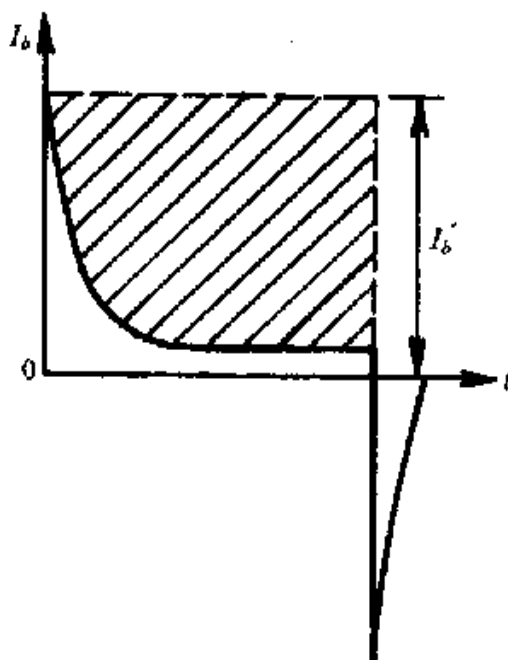


图 12-12 加抗饱和电路后的基极电流的波形

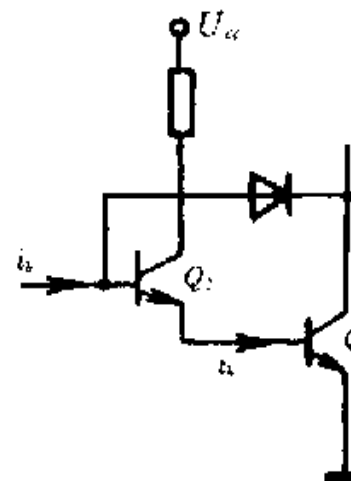


图 12-13 改进后的抗饱和电路

9.1.3 典型全控型器件的驱动电路

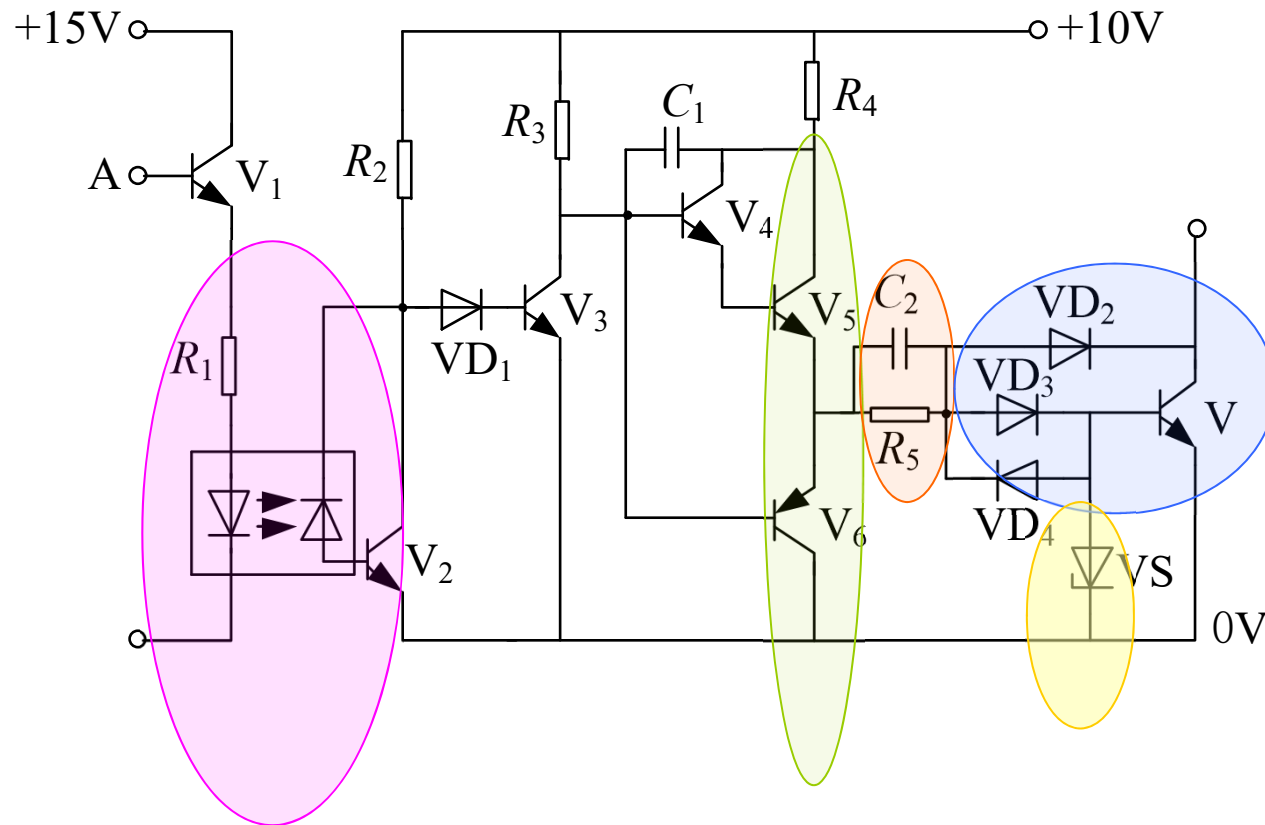


图9-7 GTR的一种驱动电路

驱动GTR的集成驱动电路中，THOMSON公司的UAA4002和三菱公司的M57215BL较为常见。

第2章 AC-DC变换电路

2.1 概述

2.2 不控整流电路

2.3 单相可控整流电路

2.4 三相可控整流电路

2.5 PWM整流电路

本章小结

● 整流电路：

- ✦ 出现最早的电力电子电路，将交流电变为直流电。

● 整流电路的分类：

- ✦ 按组成的器件可分为不可控、半控、全控三种。
- ✦ 按电路结构可分为桥式电路（全波）和零式电路（半波）
- ✦ 按交流输入相数分为单相电路和多相电路
- ✦ 按变压器二次侧电流的方向是单向或双向，又分为半波整流电路和全波整流电路。

2.2.1 单相半波可控整流电路

2.2.2 单相桥式全控整流电路

2.2.3 单相全波可控整流电路

2.2.4 单相桥式半控整流电路

1) 带电阻负载的工作情况

- 变压器T起变换电压和电气隔离的作用。
- 电阻负载的特点：电压与电流成正比，两者波形相同。

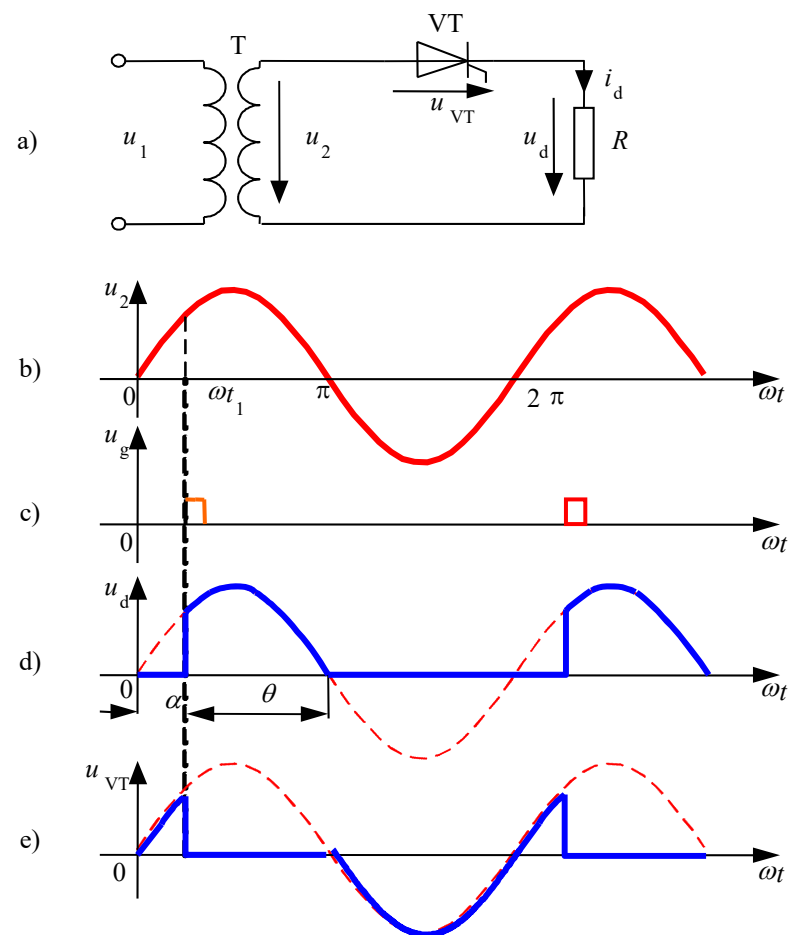


图2-1 单相半波可控整流电路及波形

2.2.1 单相半波可控整流电路

在分析整流电路工作时，认为晶闸管（开关器件）为**理想器件**，即晶闸管导通时其管压降等于零，晶闸管阻断时其漏电流等于零，除非特意研究晶闸管的开通、关断过程，一般认为晶闸管的开通与关断过程瞬时完成。

改变触发时刻， u_d 和 i_d 波形随之改变，直流输出电压 u_d 为极性不变，但瞬时值变化的**脉动直流**，其波形只在 u_2 正半周内出现，故称“半波”整流。加之电路中采用了可控器件晶闸管，且交流输入为**单相**，故该电路称为**单相半波可控整流电路**。整流电压 u_d 波形在一个电源周期中只脉动**1次** 故该电路为**单脉波整流电路**。

● 基本数量关系

首先，引入两个重要的基本概念：

- ✦ **触发延迟角**：从晶闸管开始承受正向阳极电压起到施加触发脉冲止的电角度,用 α 表示,也称**触发角**或**控制角**。
- ✦ **导通角**：晶闸管在一个电源周期中处于通态的电角度，用 θ 表示。

直流输出电压平均值为

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_2}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = 0.45U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

随着 α 增大， U_d 减小，VT的 α 移相范围为 180°

- 通过控制触发脉冲的相位来控制直流输出电压大小的方式称为**相位控制方式**，简称**相控方式**

2.2.1 单相半波可控整流电路

■ 带阻感负载的工作情况

◆ 阻感负载的特点是电感对电流变化有抗拒作用，使得流过电感的电流不能发生突变。

◆ 电路分析

晶闸管VT处于断态 $i_d=0$ $u_d=0$ $u_{VT}=u_2$

在 ωt_1 时刻，即触发角 α 处

$u_d=u_2$ 。

L 的存在使 i_d 不能突变， i_d 从 0 开始增加。

u_2 由正变负的过零点处， i_d 已经处于减小的过程中，但尚未降到零，因此 VT 仍处于通态。

t_2 时刻，电感能量释放完毕， i_d 降至零，VT 关断并立即承受反压。

由于电感的存在延迟了 VT 的关断时刻，使 u_d 波形出现负的部分，与带电阻负载时相比其平均值 U_d 下降。

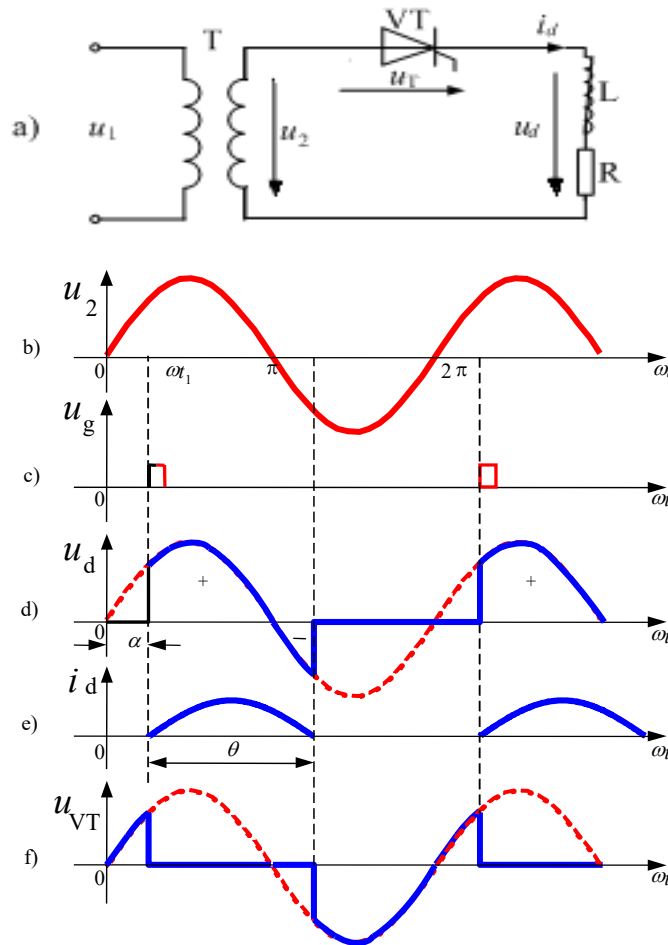


图2-2 带阻感负载的单相半波可控整流电路及其波形

● 电力电子电路的一种基本分析方法

- ✦ 通过器件的理想化，将电路简化为分段线性电路。
- ✦ 器件的每种状态对应于一种线性电路拓扑。

● 对单相半波电路的分析可基于上述方法进行：

- ✦ 当VT处于断态时，相当于电路在VT处断开， $i_d=0$ 。
- ✦ 当VT处于通态时，相当于VT短路。

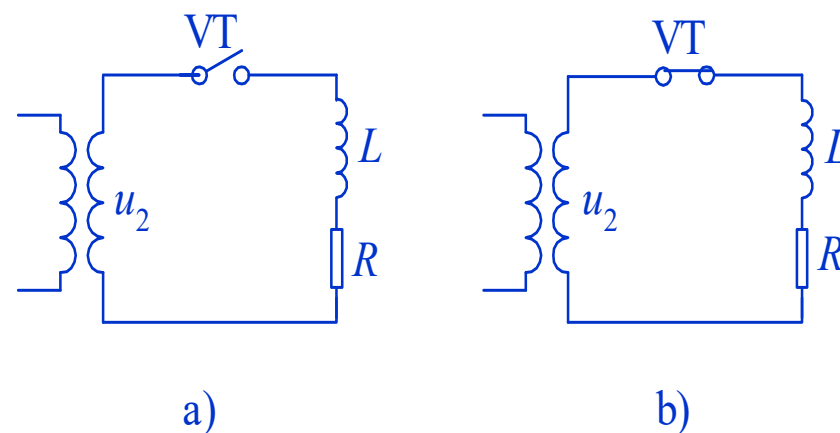


图2-3 单相半波可控整流电路的分段线性等效电路
a)VT处于关断状态
b)VT处于导通状态

2.2.1 单相半波可控整流电路

- 当VT处于通态时，如下方程成立：

$$L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \quad (2-2)$$

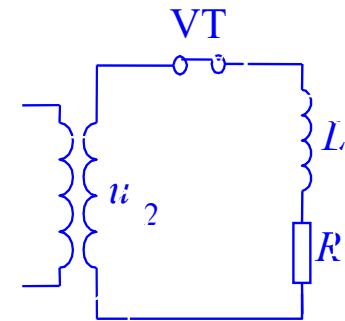
- 初始条件： $\omega t = \alpha$ ， $i_d = 0$ 。求解式 (2-2) 并将初始条件代入可得

$$i_d = -\frac{\sqrt{2}U_2}{Z} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \alpha)} + \frac{\sqrt{2}U_2}{Z} \sin(\omega t - \varphi) \quad (2-3)$$

• 其中 $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ ， $\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$

- 当 $\omega t = \theta + \alpha$ 时， $i_d = 0$ ，代入式 (2-3) 并整理得

$$\sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\theta}{\tan \varphi}} = \sin(\theta + \alpha - \varphi) \quad (2-4)$$



b)

b) VT处于导通状态

2.2.1 单相半波可控整流电路

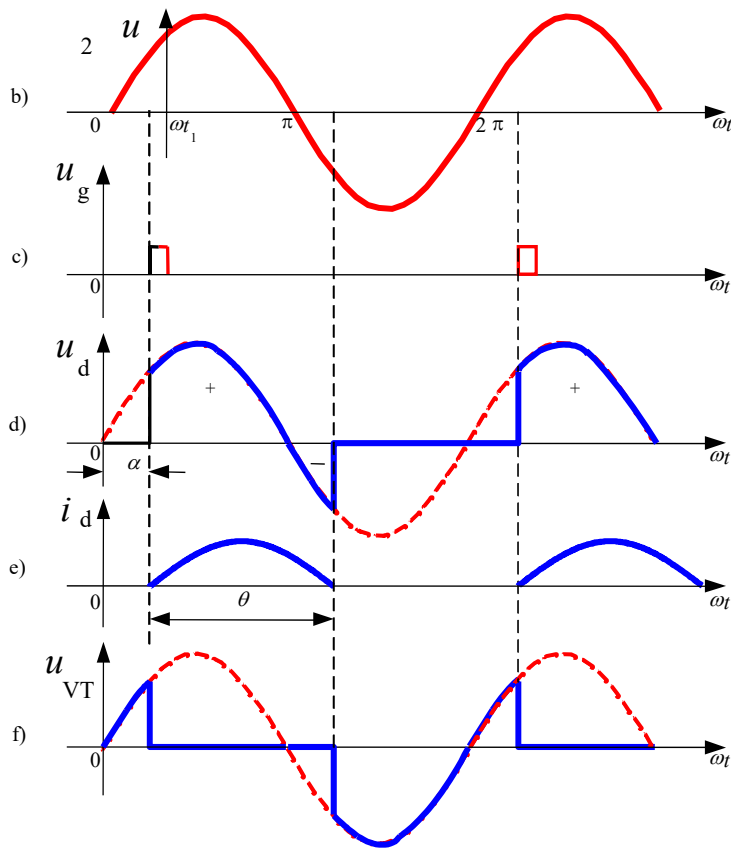
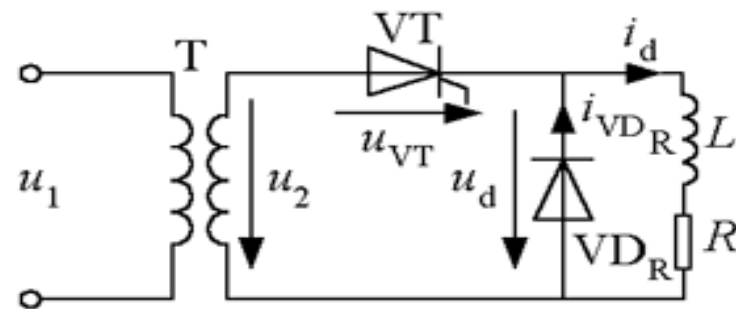


图2-2 带阻感负载的单相半波可控整流电路及其波形

若 φ 为定值， α 角大， θ 越小。若 α 为定值， φ 越大， θ 越大，且平均值 U_d 越接近零。为解决上述矛盾，在整流电路的负载两端并联一个二极管，称为续流二极管，用 VD_R 表示。



2.2.1 单相半波可控整流电路

◆有续流二极管的电路

电路分析

✓ u_2 正半周时，与没有续流二极管时的情况是一样的。

✓ 当 u_2 过零变负时， V_{DR} 导通， u_d 为零，此时为负的 u_2 通过 V_{DR} 向 VT 施加反压使其关断，L 储存的能量保证了电流 i_d 在 **L- V_{DR} 回路** 中流通，此过程通常称为**续流**。

✓ 若 L 足够大， i_d 连续，且 i_d 波形接近一条水平线。

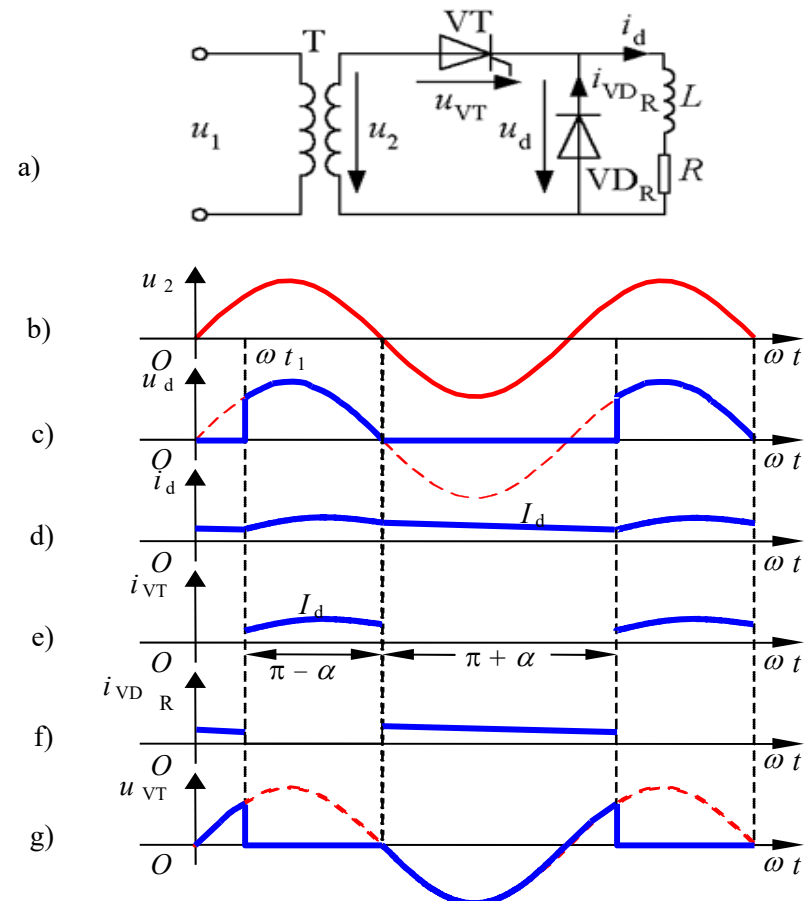


图2-4 单相半波带阻感负载有续流二极管的电路及波形

2.2.1 单相半波可控整流电路

基本数量关系

√ 流过晶闸管的电流平均值 I_{dT} 和有效值 I_T 分别为：

$$I_{dT} = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d \quad (2-5)$$

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_d^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d \quad (2-6)$$

√ 续流二极管的电流平均值 I_{dDR} 和有效值 I_{DR} 分别为

$$I_{dDR} = \frac{\pi + \alpha}{2\pi} I_d \quad (2-7)$$

$$I_{DR} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi + \alpha} I_d^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\pi + \alpha}{2\pi}} I_d \quad (2-8)$$

√ 其移相范围为 180° ，其承受的最大正反向电压均为 u_2 的峰值。续流二极管承受的电压为 $-u_d$ ，其最大反向电压 u_2 的峰值。

● 单相半波可控整流电路的特点

- ✦ VT的 α 移相范围为**180°**。
- ✦ 简单，但输出脉动大，变压器二次侧电流中含直流分量，造成变压器铁芯**直流磁化**。
- ✦ 实际上很少应用此种电路。
- ✦ 分析该电路的主要目的建立起整流电路的基本概念。

1) 带电阻负载的工作情况

● 电路结构

● 工作原理及波形分析

- VT₁和VT₄组成一对桥臂，在 u_2 正半周承受电压 u_2 ，得到触发脉冲即导通，当 u_2 过零时关断。
- VT₂和VT₃组成另一对桥臂，在 u_2 正半周承受电压 $-u_2$ ，得到触发脉冲即导通，当 u_2 过零时关断。

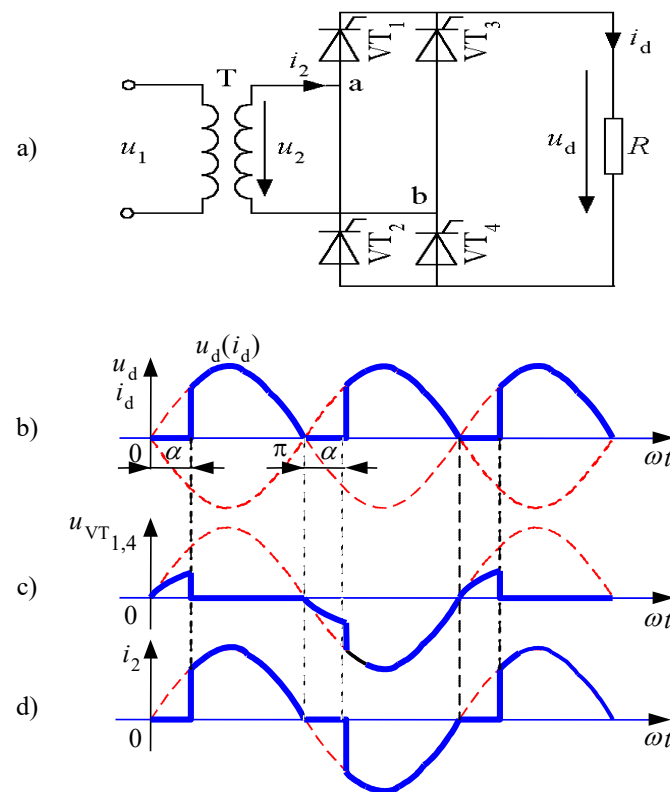


图2-5 单相全控桥式
带电阻负载时的电路及波形

2.2.2 单相桥式全控整流电路

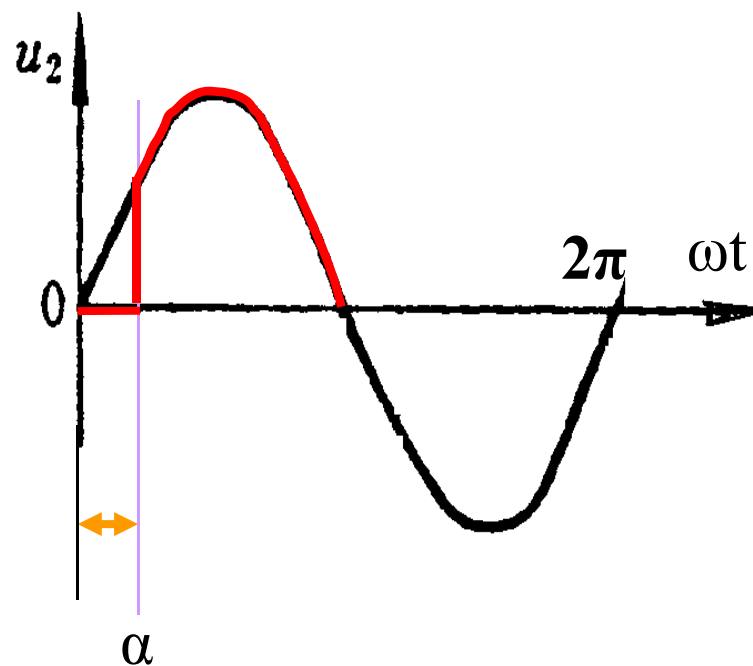
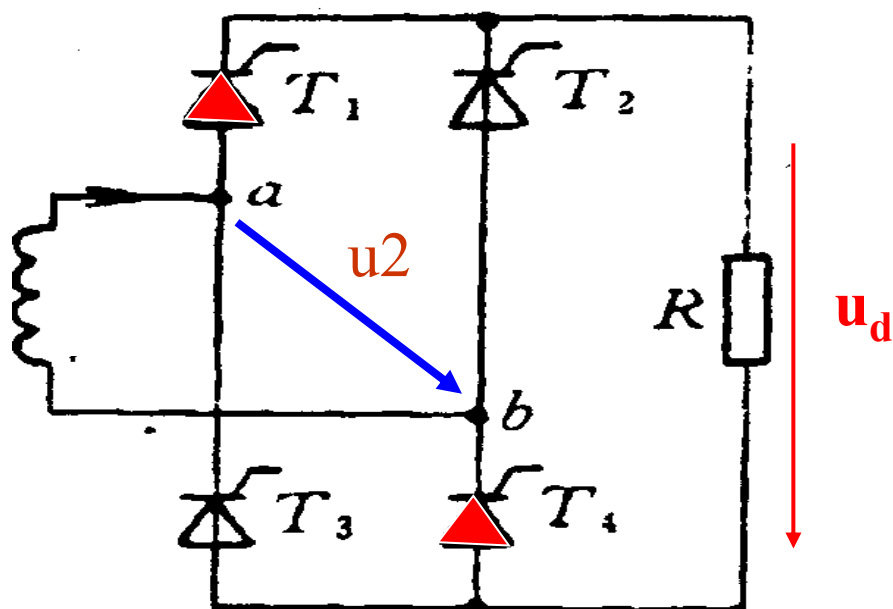
输出电压和电流波形

■ $\omega t=0\sim\alpha$: T1~T4都关断

$$u_d=0$$

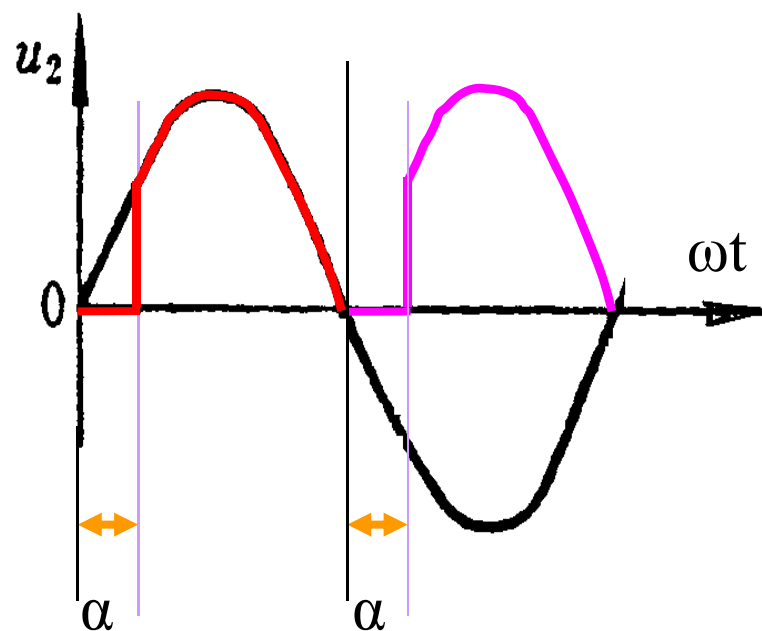
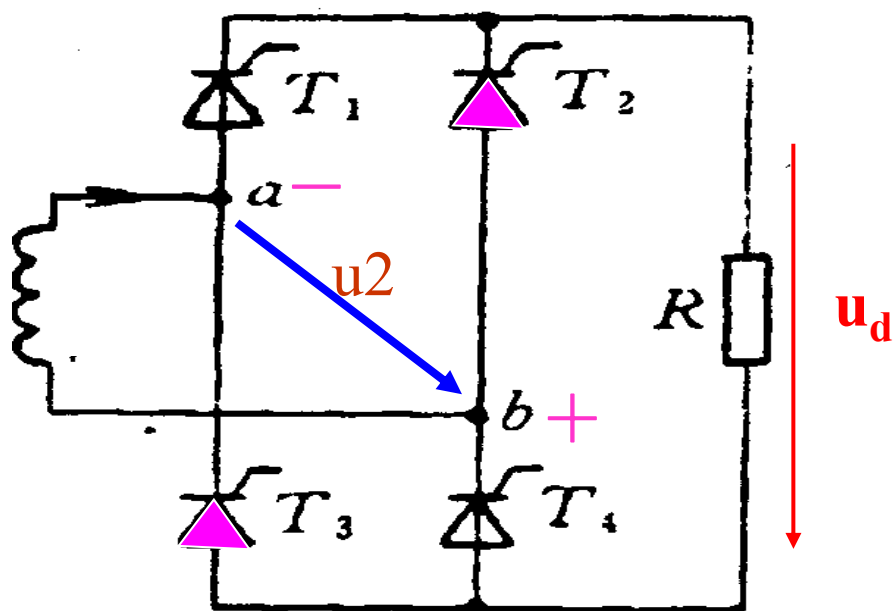
■ $\omega t=\alpha\sim\pi$: T1、T4导通

$$u_d=u_2$$



输出电压和电流波形

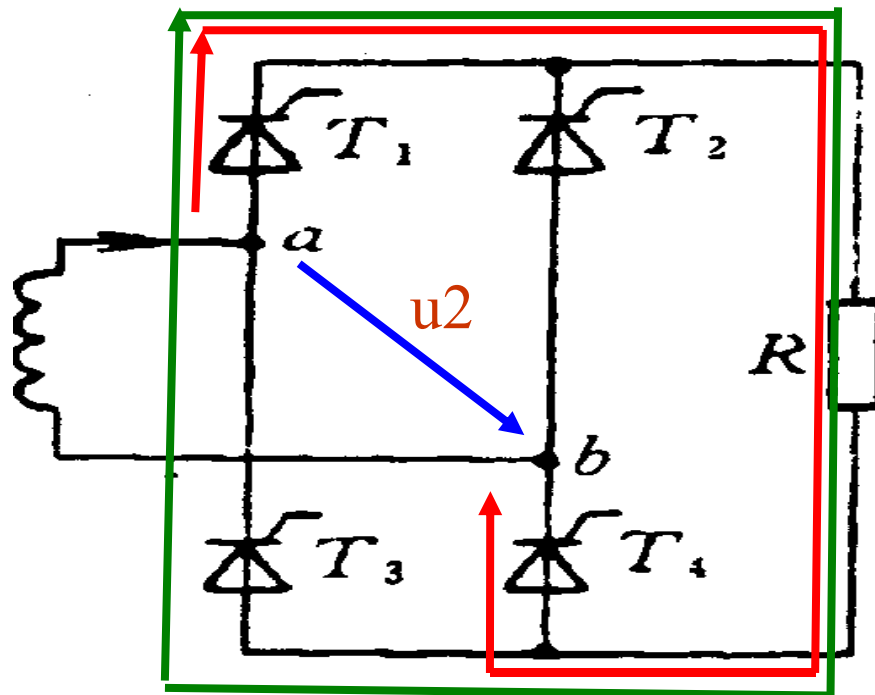
推论： $\omega t = \pi \sim 2\pi$



2.2.2 单相桥式全控整流电路

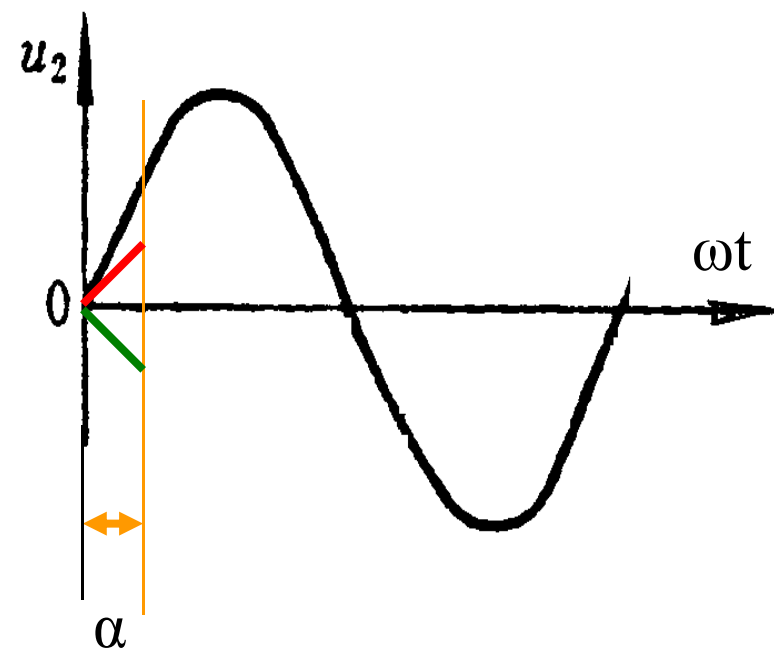
晶闸管上的压降

■ $\omega t=0\sim\alpha$: $T_1\sim T_4$ 都关断



$$u_{T1}=u_{T4}=u_2/2$$

$$u_{T2}=u_{T3}=-u_{T1}=-u_2/2$$



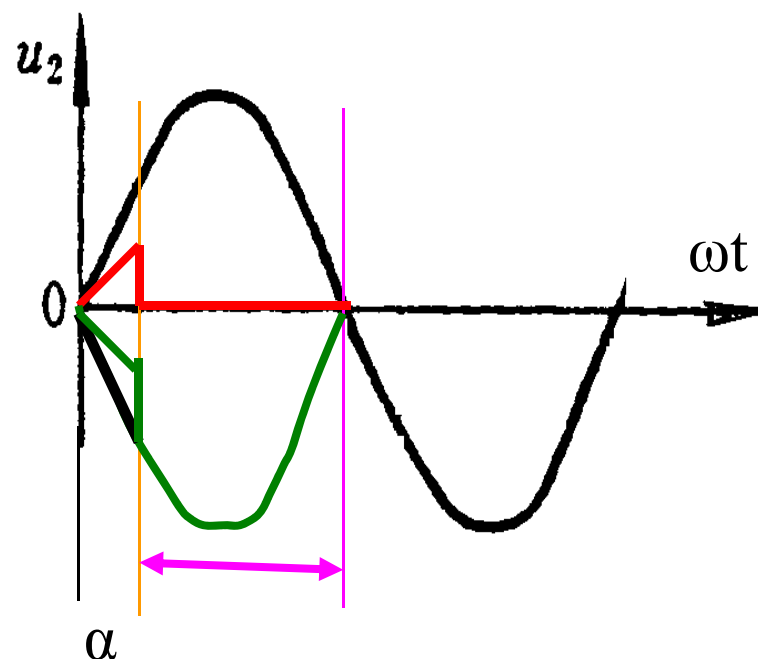
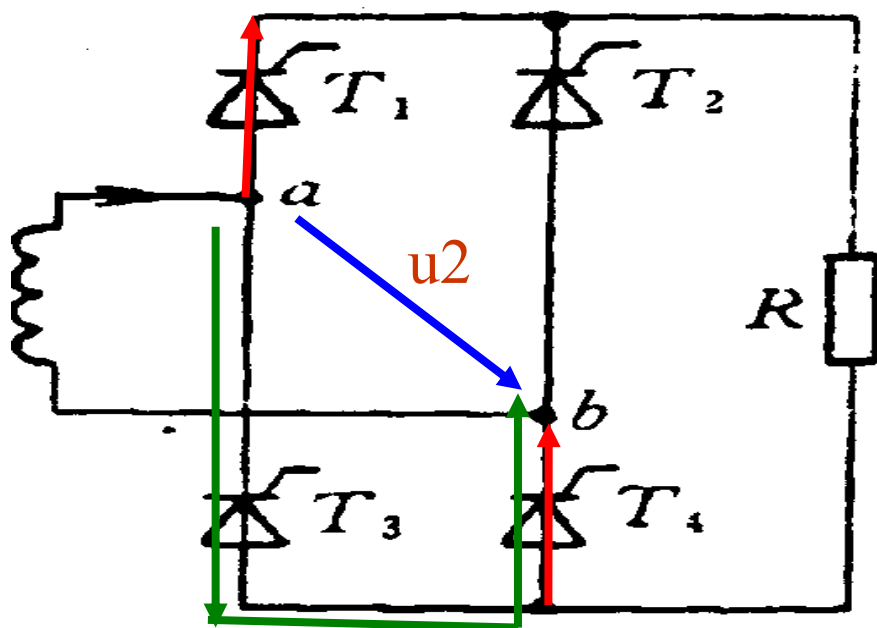
2.2.2 单相桥式全控整流电路

晶闸管上的压降

■ $\omega t = \alpha \sim \pi$: T_1 、 T_4 通； T_2 、 T_3 断

$$u_{T1} = u_{T4} = 0$$

$$u_{T2} = u_{T3} = -u_2$$

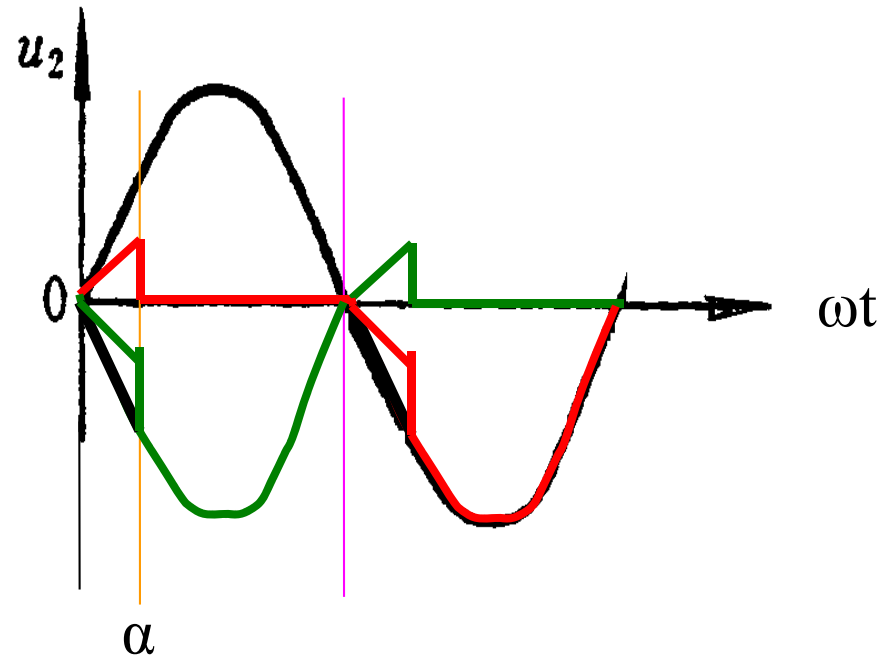


2.2.2 单相桥式全控整流电路

推论: $\omega t = \pi \sim 2\pi$

$$u_{T1} = u_{T4}$$

$$u_{T2} = u_{T3}$$



2.2.2 单相桥式全控整流电路

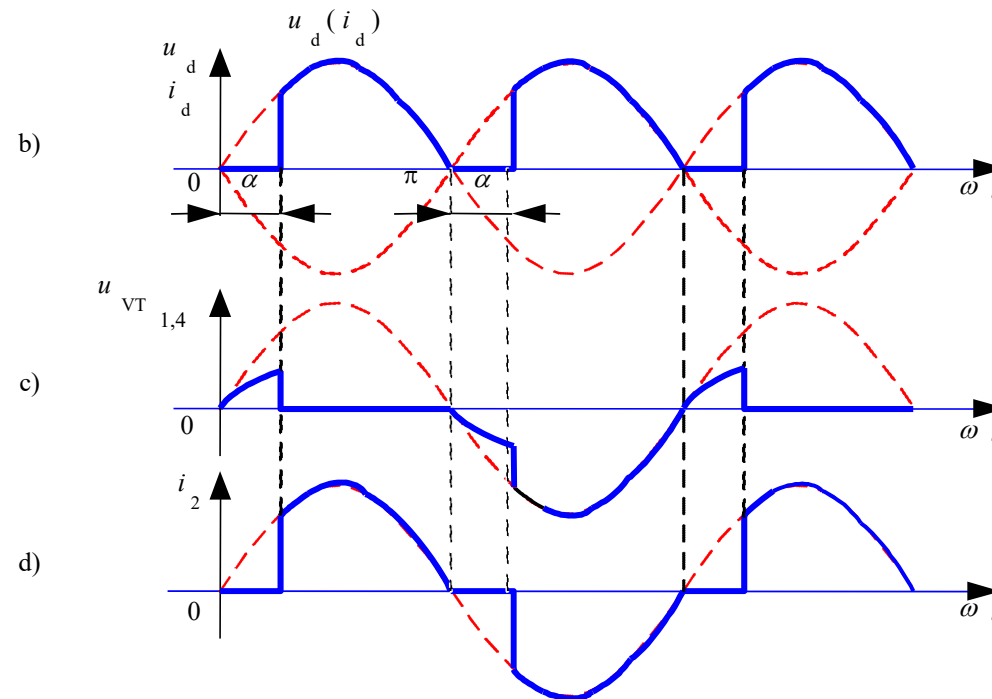


图2-5 单相全控桥式
带电阻负载时的电路及波形

波形分析要点：

输出电压波形分析：

- 。共阴极连接的可控硅：有触发脉冲且阳极电位最高的T导通；
- 。共阳极连接的可控硅：有触发脉冲且阴极电位最低的T导通；
- 。是否构成电流回路、且电流方向正确？
- 。T关断的条件：
- 。先分析输出电压，后T上压降
- 。回路电压定律
- 。有触发脉冲且承受正压的T才能由关断变为导通；
承受反压的T关断才由导通变为关断

2.2.2 单相桥式全控整流电路

基本数量关系

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2} U_2}{\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (2-9)$$

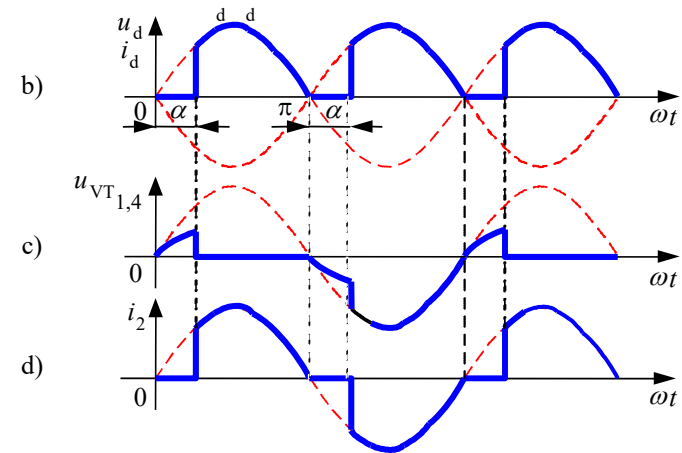
α 角的移相范围为 180° 。

向负载输出的平均电流值为：

$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{2\sqrt{2} U_2}{\pi R} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0.9 \frac{U_2}{R} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (2-10)$$

流过晶闸管的电流平均值只有输出直流平均值的一半，即：

$$I_{dVT} = \frac{1}{2} I_d = 0.45 \frac{U_2}{R} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (2-11)$$



2.2.2 单相桥式全控整流电路

✦ 流过晶闸管的电流有效值:

$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_2}{\sqrt{2}R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (2-12)$$

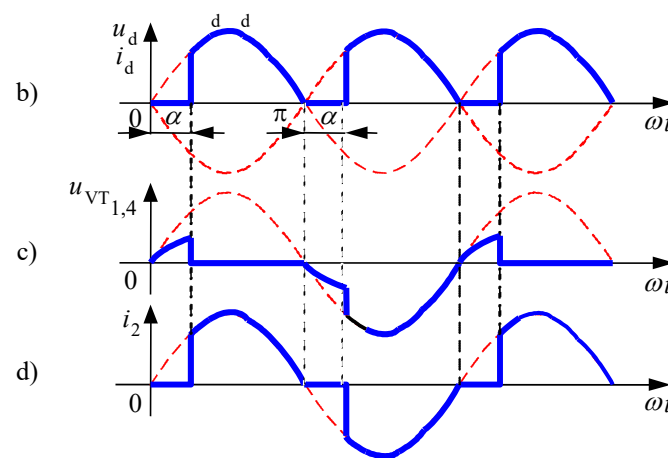
✦ 变压器二次侧电流有效值 I_2 与输出直流电流 I 有效值相等:

$$I = I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (2-13)$$

✦ 由式 (2-12) 和式 (2-13) 得:

$$I_{VT} = \frac{1}{\sqrt{2}} I \quad (2-14)$$

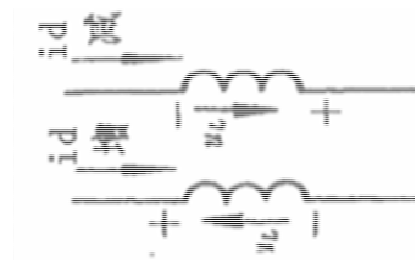
● 不考虑变压器的损耗时, 要求变压器的容量 $S = U_2 I_2$ 。



电感的特性

- 根据电磁感应定律：当有变动电流通过电感时，由于穿过线圈的磁通随之而变动，线圈中将会有感应电动势产生；
- 根据楞次定律：感应电流产生的磁通总是反抗回路中原磁通量的变化，即与电流净增加方向相反；
- 根据电感电流的变化，可以得知感应电动势的大小和方向

$$u = \frac{d(Li)}{dt} = L \frac{di}{dt}$$



- 所以，感应电动势的实际方向总是企图阻止电流的变化；电感电流不能发生突变。

电感的能量守恒

- 电感所储存的磁场能量：

$$W_L(t) = \frac{1}{2} Li^2(t)$$

- 当电流绝对值增加时，电感元件储能增加，元件吸收电能转变为磁场能量；
- 当电流绝对值减小时，电感元件储能减小，元件将磁场能量释放出来转变成电能；
- 电感是一种储能元件，并不将吸收的能量消耗掉，而是以磁场能量形式储存，也不会释放出多于吸收储存的能量

2.2.2 单相桥式全控整流电路

■ 带阻感负载的工作情况

◆ 电路分析

在 u_2 正半周期

✓ 触发角 α 处给晶闸管 VT_1 和 VT_4 加触发脉冲使其开通, $u_d = u_2$ 。

✓ 负载电感很大, i_d 不能突变且波形近似为一条水平线。

在 u_2 过零变负时, 由于电感的作用晶闸管 VT_1 和 VT_4 中仍流过电流 i_d , 并不关断。

在 $\omega t = \pi + \alpha$ 时刻, 触发 VT_2 和 VT_3 , VT_2 和 VT_3 导通, u_2 通过 VT_2 和 VT_3 分别向 VT_1 和 VT_4 施加反压使 VT_1 和 VT_4 关断, 流过 VT_1 和 VT_4 的电流迅速转移到 VT_2 和 VT_3 上, 此过程称为换相, 亦称换流。

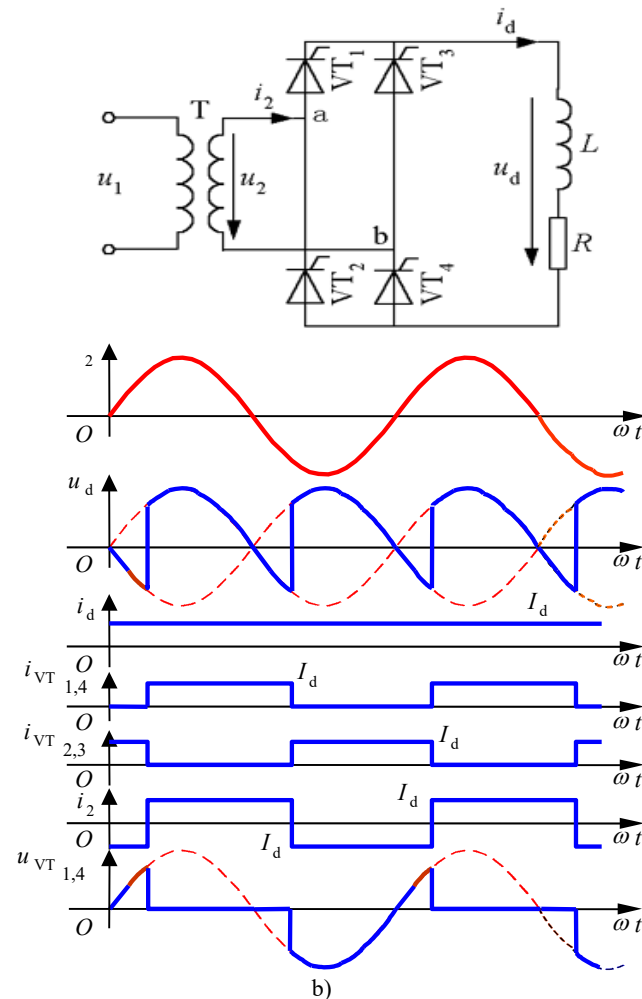


图2-6 单相全控桥带阻感负载时的电路及波形

基本数量关系

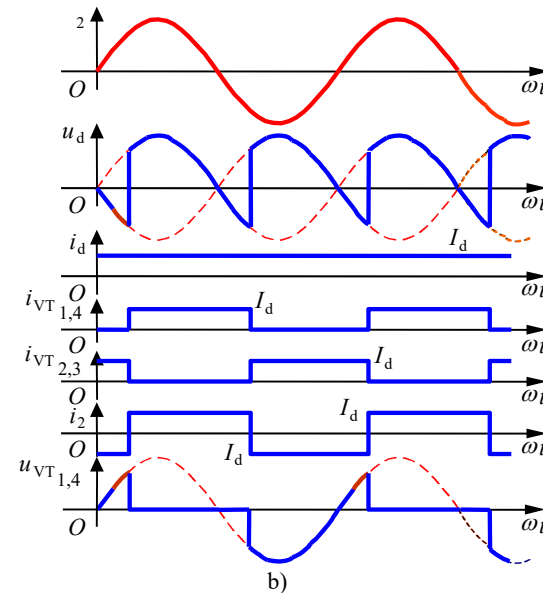
$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha = 0.9U_2 \cos \alpha \quad (2-15)$$

- 晶闸管移相范围为 90° 。
- 晶闸管承受的最大正反向电压均为 $\sqrt{2}U_2$ 。
- 晶闸管导通角 θ 与 α 无关，均为 180° 。

电流的平均值和有效值：

$$I_{dT} = \frac{1}{2} I_d \quad I_T = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d = 0.707 I_d$$

- 变压器二次侧电流 i_2 的波形为正负各 180° 的矩形波，其相位由 α 角决定，有效值 $I_2 = I_d$ 。



单相桥式全控整流电路，接电阻性负载，要求电路输出的直流平均电压 U_d 从20---100V连续可调，负载平均电流均能达到20A,考虑最小控制角为30度。试计算晶闸管导通角的变化范围，要求的电源容量，计算晶闸管额定电压和电流。

(1) 利用公式（2-9），计算出

$\alpha_{\min}=30^\circ$ 时对应 $U_d=100V$ ，可以得到： $U_2=119V$

(2) 将 $U_d=20V$ 带入式（2-9），可得 α_{\max} ， $\alpha_{\max}=129^\circ$

由于 α 越大， U_d 越小，故将 α_{\max} 代入（2-10），得出 $R=1$

将上述计算结果代入式（2-13），可得 $I_{2\max}=42.8A$

单相桥式全控整流电路，接电阻性负载，要求电路输出的直流平均电压 U_d 从20---100V连续可调，负载平均电流均能达到20A,考虑最小控制角为30度。试计算晶闸管导通角的变化范围，要求的电源容量，计算晶闸管额定电压和电流。

(3) $S=119*42.8VA$

流过晶闸管的最大电流有效值 $I_T = I_{2max}/1.414 = 30A$

晶闸管的电流定额: $I_{Tav} = (1.5 \sim 2) I_T / 1.57 = 29 \sim 38A$

晶闸管电压定额 $U_{RRM} = (2 \sim 3) * 1.414 * U_2 = 337 \sim 505V$

2.2.3 单相全波可控整流电路

又称单相双半波可控整流电路。

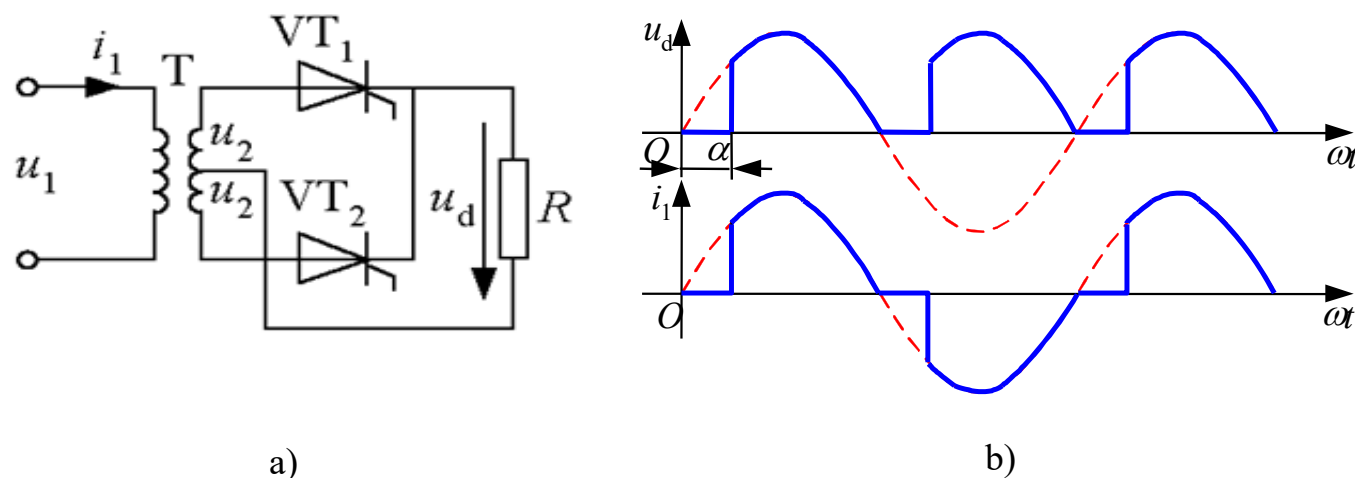


图2-10 单相全波可控整流电路及波形

- 单相全波与单相全控桥从直流输出端或从交流输入端看均是基本一致的。
- 变压器不存在直流磁化的问题。

◆ 单相全波与单相全控桥的区别

☞ 单相全波中**变压器**结构较复杂，材料的消耗多。

☞ 单相全波只用**2**个晶闸管，比单相全控桥少**2**个，相应地，门极驱动电路也少**2**个；但是晶闸管承受的最大电压是单相全控桥的**2**倍。

☞ 单相全波**导电回路**只含**1**个晶闸管，比单相桥少**1**个，因而管压降也少**1**个。

◆ 从上述后两点考虑，单相全波电路有利于在**低输出电压**的场合应用。

2.2.4 单相桥式半控整流电路

电路结构

单相全控桥中，每个导电回路中有2个晶闸管，1个晶闸管可以用二极管代替，从而简化整个电路。

如此即成为单相桥式半控整流电路（先不考虑 V_{DR} ）。

电阻负载

半控电路与全控电路在电阻负载时的工作情况相同。

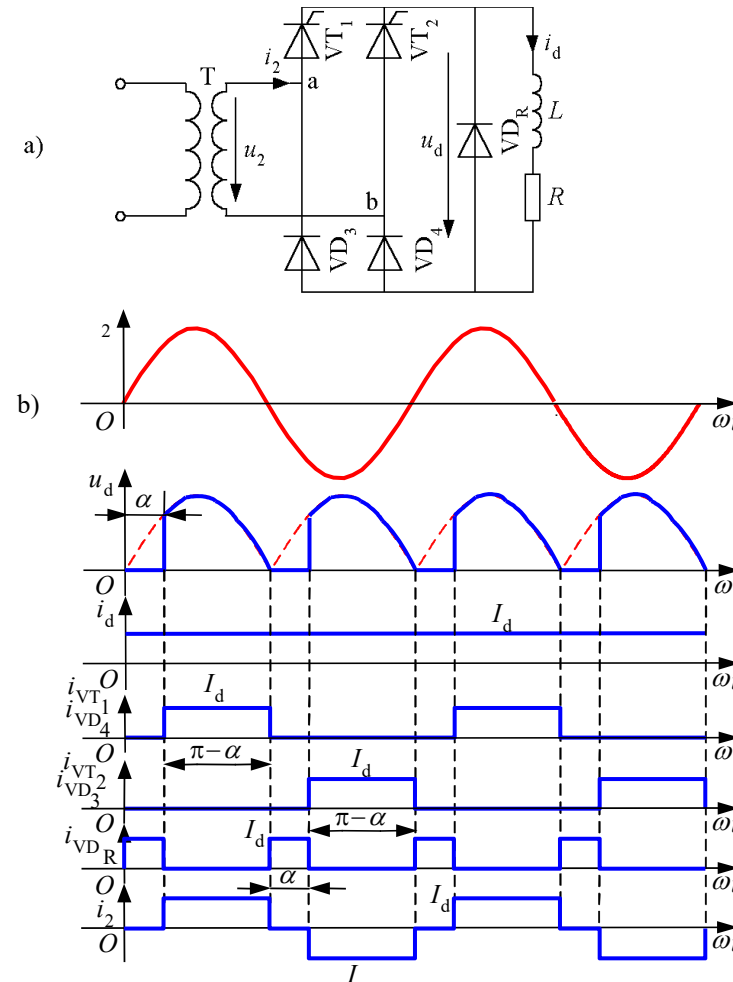


图2-11 单相桥式半控整流电路，有续流二极管，阻感负载时的电路及波形

2.2.4 单相桥式半控整流电路

● 单相半控桥带阻感负载的情况

每一个导电回路由1个晶闸管和1个二极管构成。

在 u_2 正半周， α 处触发 VT_1 ， u_2 经 VT_1 和 VD_4 向负载供电。

u_2 过零变负时，因电感作用使电流连续， VT_1 继续导通，但因a点电位低于b点电位，电流是由 VT_1 和 VD_2 续流， $u_d=0$ 。

在 u_2 负半周， α 处触发 VT_3 ，向 VT_1 加反压使之关断， u_2 经 VT_3 和 VD_2 向负载供电。

u_2 过零变正时， VD_4 导通， VD_2 关断。 VT_3 和 VD_4 续流， u_d 又为零。

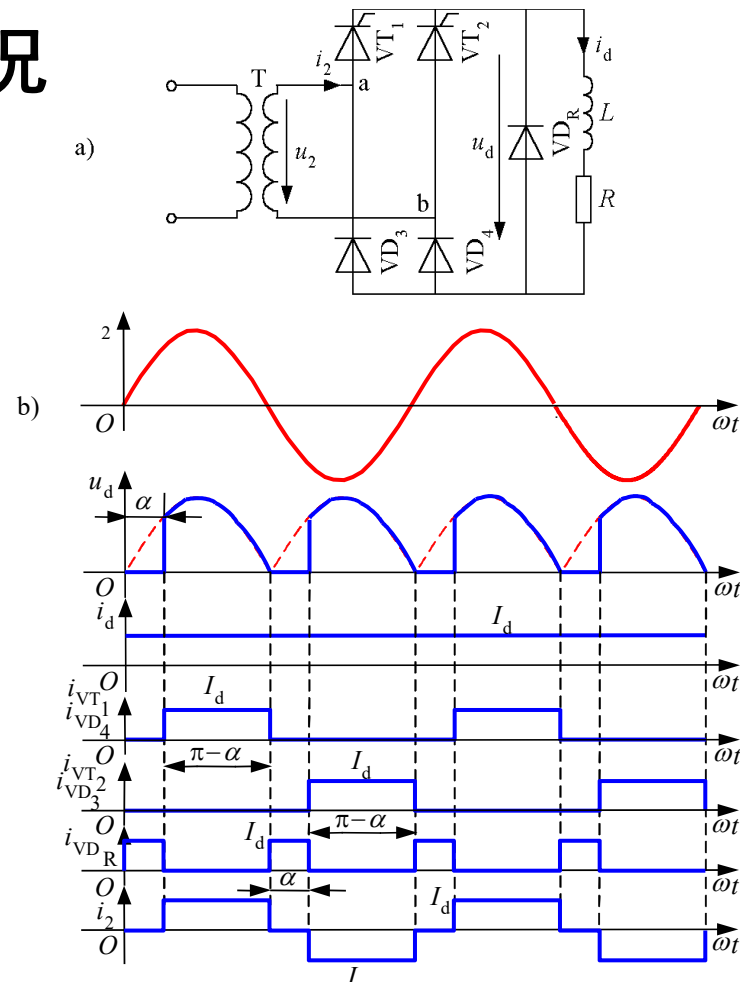


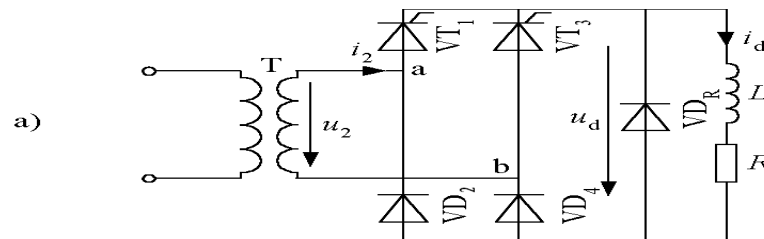
图3-11 单相桥式半控整流电路，有续流二极管，阻感负载时的电路及波形

续流二极管的作用

- 避免可能发生的失控现象。

若无续流二极管，则当 α 突然增大至 180° 或触发脉冲丢失时，会发生一个晶闸管持续导通而两个二极管轮流导通的情况，这使 u_d 成为正弦半波，其平均值保持恒定，称为**失控**。

- 有续流二极管 VD_R 时，续流过程由 VD_R 完成，避免了失控的现象。
- 续流期间导电回路中只有一个管压降，有利于降低损耗。



2.2.4 单相桥式半控整流电路

● 单相桥式半控整流电路的另一种接法

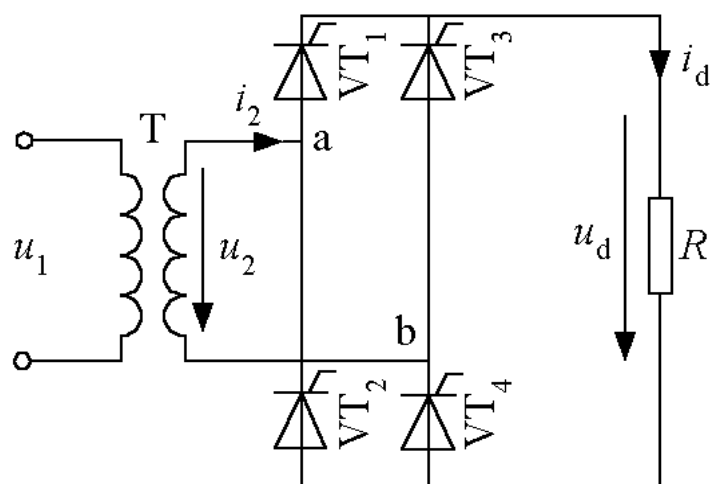


图2-5 单相全控桥式
带电阻负载时的电路及波形

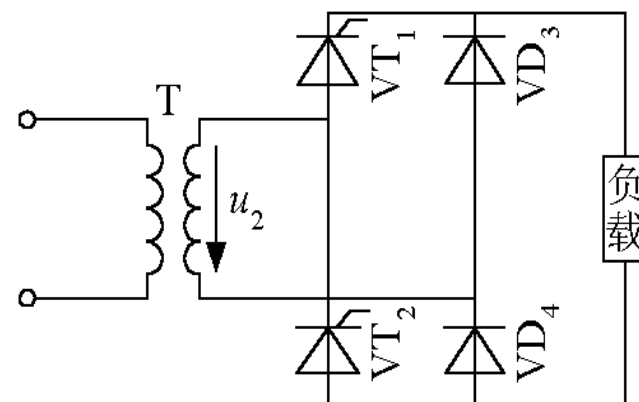
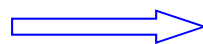


图2-12 单相桥式半控整流
电路的另一接法

- ⊕ 相当于把图3-5a中的 VT_3 和 VT_4 换为二极管 VD_3 和 VD_4 ，这样可以省去续流二极管 VD_R ，续流由 VD_3 和 VD_4 来实现。

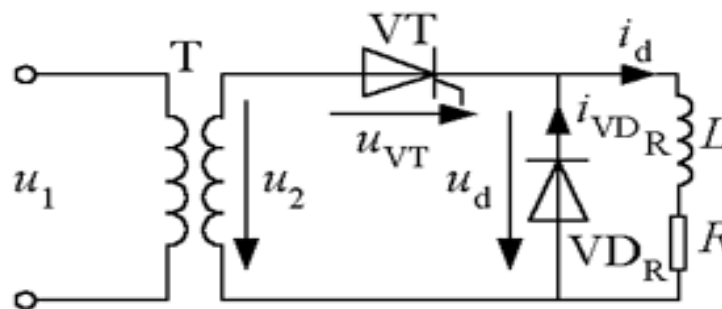
输出电压波形分析：

- 。共阴极连接的可控硅：有触发脉冲且阳极电位最高的T导通；
- 。共阳极连接的可控硅：有触发脉冲且阴极电位最低的T导通；
- 。二极管：总是在自然换相点换相
- 。是否构成电流回路、且电流方向正确？ 否则电流为零
- 。SCR何时关断？ 强迫换流或电流自然下降到零

- 。先分析输出电压，后T上压降
- 。回路电压定律

P73 7 (画出 U_d , I_d , 变压器二次侧电流波形)

补充1: 下图为带有续流二极管的单相半波可控整流电路，大电感负载保证电流连续。请画出控制角 $\alpha=30^\circ$ 时的输出整流电压 u_d 、晶闸管承受电压 u_T 的波形。若 $U_2=220V$ ， $R=10\Omega$ ，要求输出整流电压平均值 $0\sim 30V$ 连续可调。试计算控制角 α 、导通角 θ 的变化范围，计算晶闸管定额（安全裕量取2），并计算变压器次级容量。



补充2：单相桥式全控整流电路大电感负载（ i_d 为直线），已知 $U_2=100V$ ， $R=10\Omega$ ， $\alpha=45^\circ$ 。

(1) 负载端不接续流二极管**D**，计算输出整流电压、电流平均值及晶闸管电流有效值。

(2) 负载端接续流二极管**D**，计算输出整流电压、电流平均值及晶闸管、续流二极管电流有效值，画出 u_d 、 i_d 、 i_T 、 i_D 及变压器次级电流 i_2 的波形。

