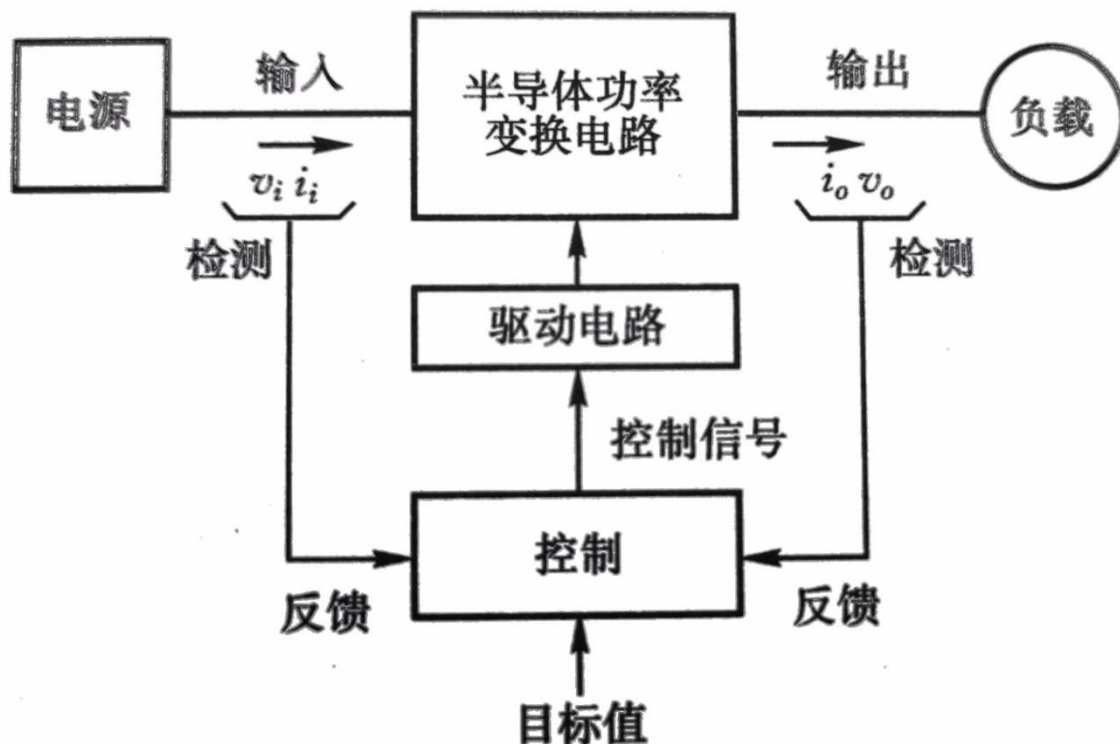




第3章 整流电路

■ **电力电子技术的内涵** 通过控制电子运动实现对电能的变换和控制

□ **引言** 理解电能变换系统的系统构成

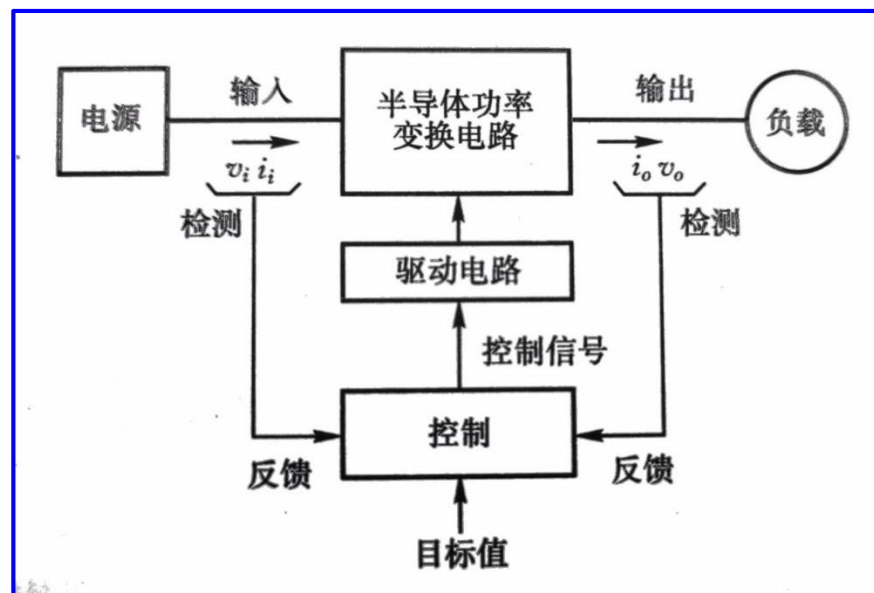
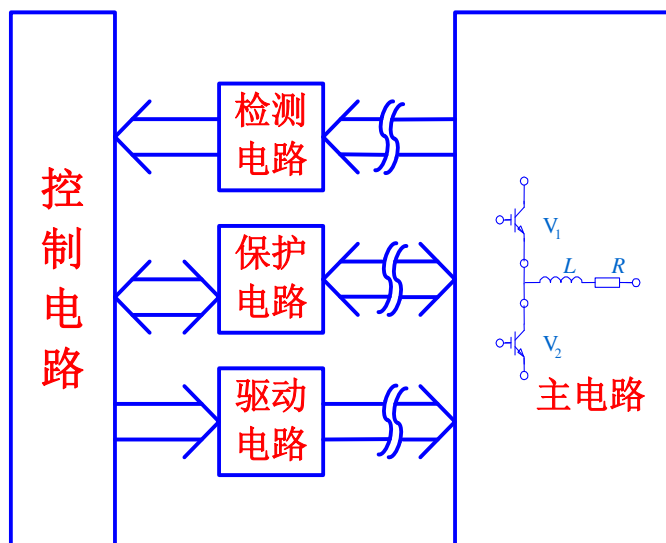


- **目标值**: 电能参数期望值
- **控制**: 电能状态变换控制
- **检测**: 电能状态感知
- **半导体功率变换电路**: 主电路
- **电源**: 原始电能
- **负载**: 承载变换后电能
- **驱动电路**: 开通和关断电力电子器件
- **输入与输出**: 种类/参数不同。



第3章 整流电路

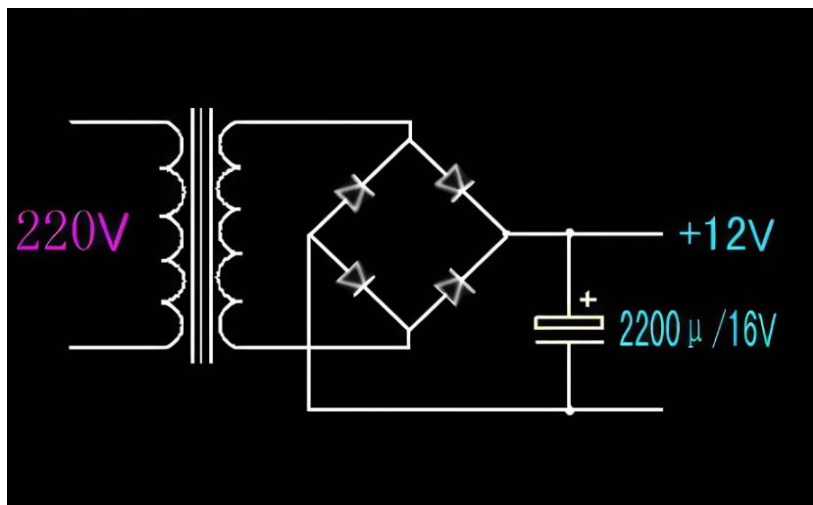
■ 比较：电力电子器件的系统组成与电能变换系统的系统构成





第3章 整流电路

- **整流 (Rectification)** : 将交流电能转换为直流电能供给直流用电设备的技术
- **可控整流 (Controlled Rectification)** : 将交流电压变为平均值大小可调的直流电压
- **整流电路 (Rectifier) 的分类**
 - 按电路采用的开关器件的类型不同, 可分为**不可控**、**半控**、**全控**三种
 - 按电路结构可分为**桥式**电路和**半波 (零式)** 电路
 - 按交流输入相数分为**单相**电路和**多相**电路。
- **例如: 单相桥式不可控整流电路**



3.1 可控整流电路

3.2 变压器漏感对整流电路的影响 (研究性实验)

3.3 整流电路的谐波和功率因数

3.4 大功率可控整流电路

3.5 整流电路的有源逆变工作状态

3.6 整流电路相位控制的实现



3.1 可控整流电路

回顾：单相桥式不可控整流电路工作原理

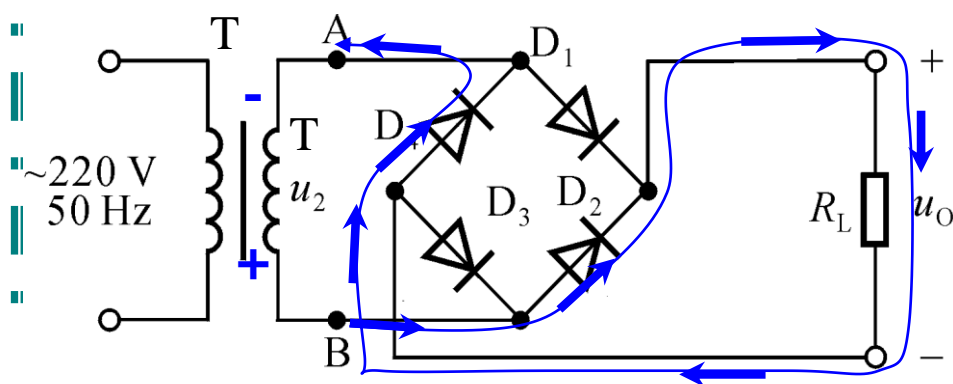
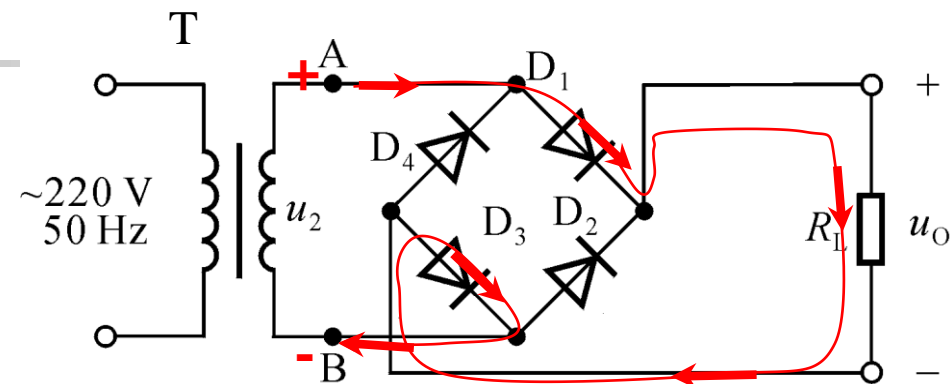
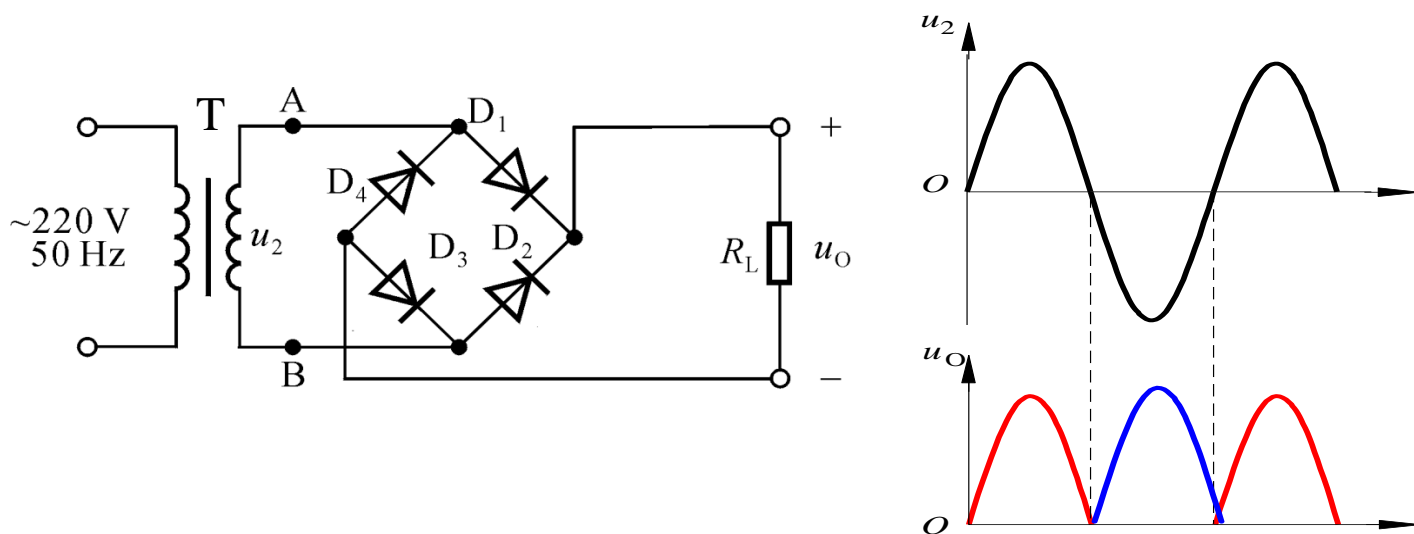
电路结构：T：整流变压器； D_1 - D_4 ：二极管桥路

工作原理

□ u_2 的正半周：电流路径 $A \rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_3 \rightarrow B$ ； $u_O \approx u_2$

□ u_2 的负半周：电流路径 $B \rightarrow D_2 \rightarrow R_L \rightarrow D_4 \rightarrow A$ ； $u_O \approx -u_2$

■ 关键：二极管的单向导电性→自然形成电流路径。

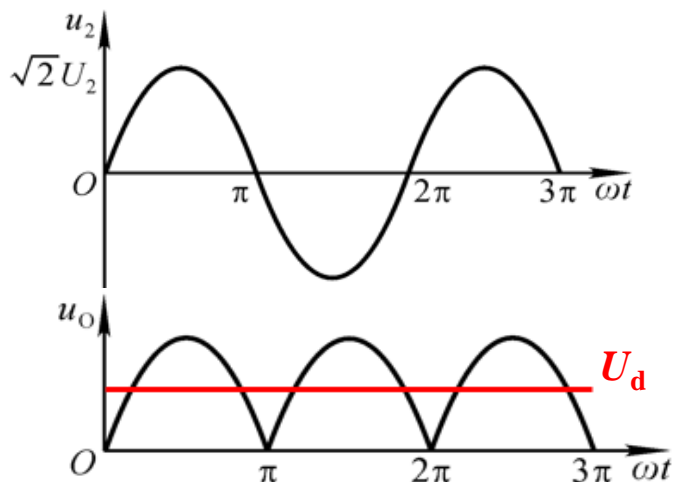




3.1 可控整流电路

“可控”问题的提出

当 U_2 幅值恒定时，不可控整流电路输出整流电压平均值也是恒定的



$$U_d = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.9U_2$$

- 在电气系统中，直流用电设备往往要求供电电压平均值的大小应该有一定的调节范围
- **不可控的原因：**开关器件通、断状态的“不可控”（二极管的“自然”导通与关断）
- **解决“不可控”的思路：**通过“重构/改造”输出电压波形来改变平均值
- **解决方案之一：**二极管→晶闸管（“开通”可控）——不可控整流→可控整流。



3.1 可控整流电路

■ 学习内容

- 3.1.1 单相半波可控整流电路
- 3.1.2 单相桥式全控整流电路
- 3.1.3 单相全波可控整流电路
- 3.1.4 单相桥式半控整流电路
- 3.1.5 三相半波可控整流电路
- 3.1.6 三相桥式全控整流电路

■ 重要知识点

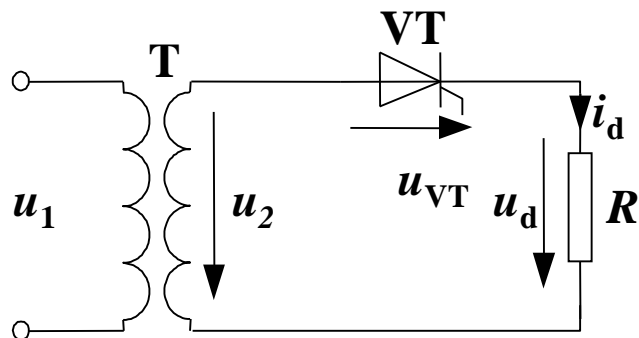
1. 电路结构
2. 相位控制的概念
3. 开关器件的开关控制策略:电流的方向和路径、路径持续时间
4. 负载对整流过程的影响
5. 输出电压/电流波形分析
6. 开关器件的电压/电流波形分析
7. 控制特性——整流输出电压/电流与移相角（控制角）之间的关系。



3.1.1 单相半波可控整流电路

可控整流：将交流电变换成平均值可调节的直流电供给负载

■ 主电路结构



单相半波可控整流电路：

用晶闸管取代单相半波不可控整流电路中的二极管！

- **串联：**单相交流电源+开关器件（晶闸管）+负载
- **晶闸管与二极管相比：**增加了控制端（三端器件：阳极、阴极和门极）；开通可控；关断条件与二极管相同（反向阳极电压）→半控型器件
- **整流变压器T**
 - ✓ 一次侧和二次侧电压瞬时值分别用 u_1 和 u_2 表示，有效值用 U_1 和 U_2 表示
 - ✓ 作用1：电气隔离与高频干扰隔离
 - ✓ 作用2：电压匹配—— U_2 的大小根据需要的直流输出电压平均值 U_d 范围来确定

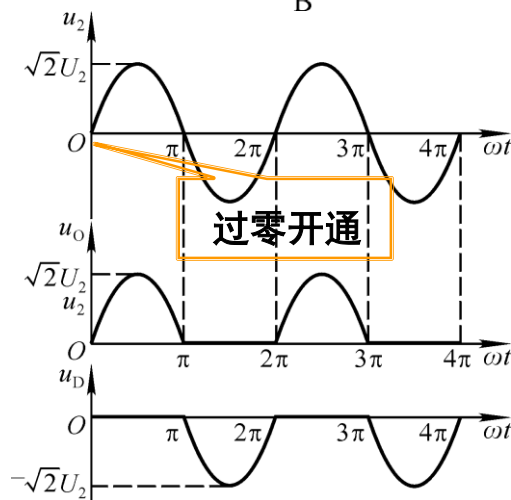
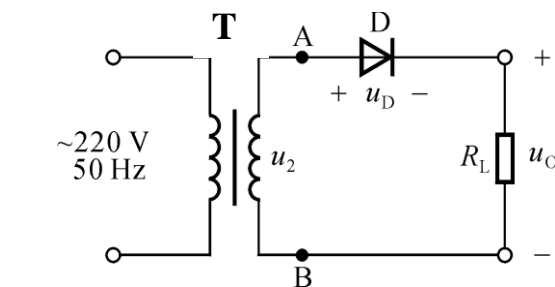
■ 重点掌握：整流电路是如何把交流电变成直流电的。



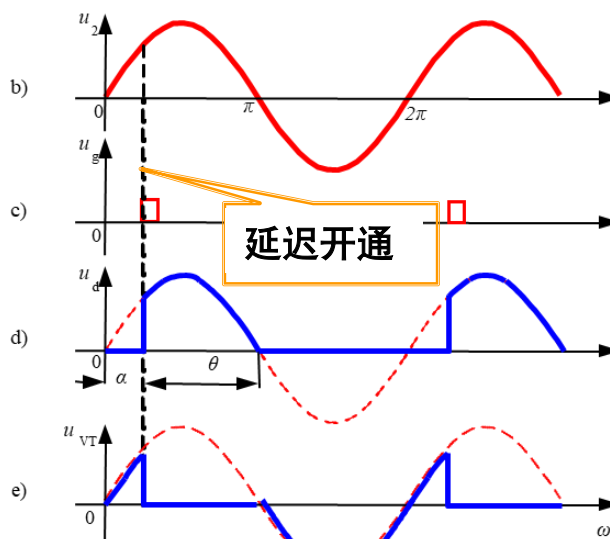
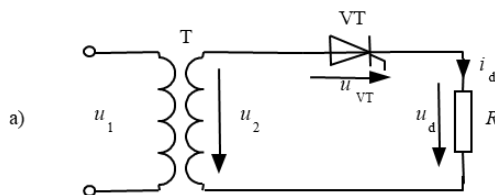
3.1.1 单相半波可控整流电路

“不可控整流→可控整流”的思路：改变开关器件开通时刻以调节“波形面积”

比较：“单相半波不可控整流”与“单相半波可控整流”



二极管不可控整流



晶闸管可控整流

□ **二极管：**自然开通与关断→不可控

□ **用半控型的晶闸管替代不可控的二极管！**

□ **晶闸管：**开通时刻可控；脉冲驱动型

□ **“平均值”的概念与几何意义**

□ **可控整流的实现：**改变晶闸管开通时刻，输出电压波形随之改变→“波形面积”改变→ U_d 大小（即整流电压平均值）可控

■ **输出电压平均值的调节手段：**改变开通时刻“相位角”——移相。



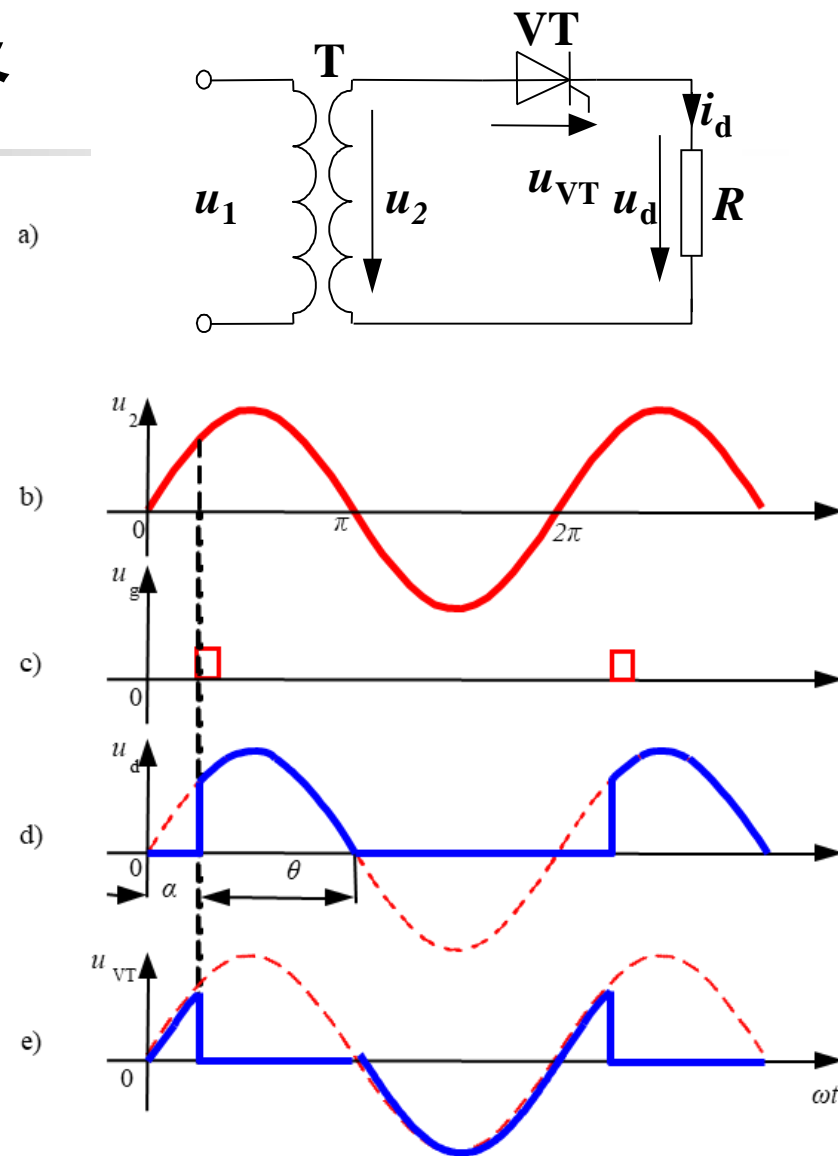
3.1.1 单相半波可控整流电路

■ 假设

- 晶闸管为理想的开关器件：通态管压降=0，断态漏电流=0
- 开通与关断过程瞬时完成

■ 负载为电阻时，电路原理与波形分析：

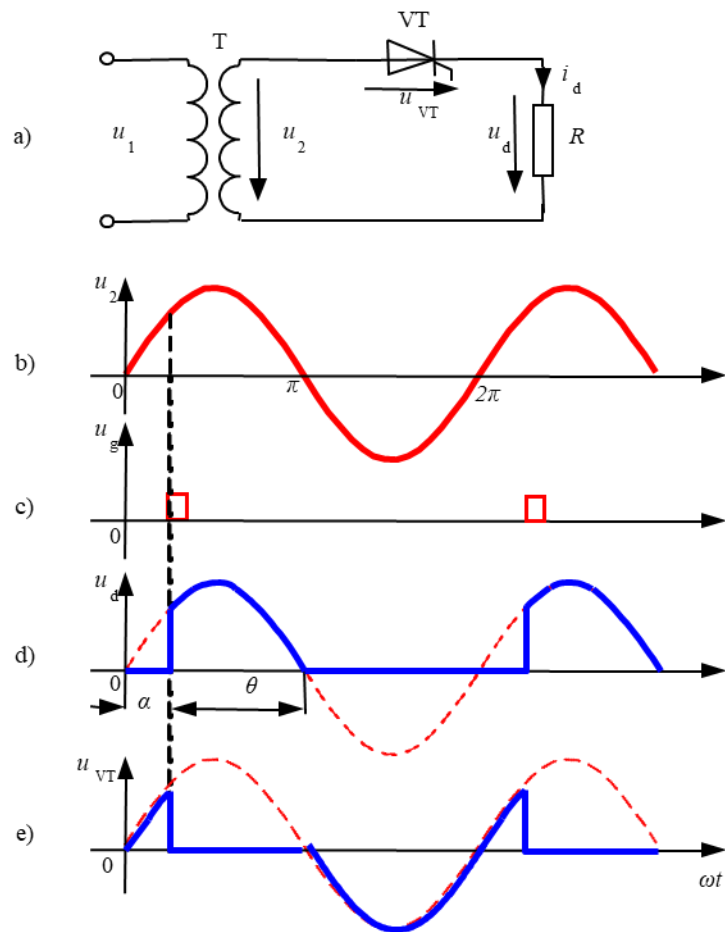
- 与不可控电路区别——二极管自然开通；晶闸管触发开通
- α ：触发相位角，也称触发角或控制角
- θ ：导通角晶闸管处于通态的电角度
- 改变 α ， u_d 和 i_d 波形出现时刻随之改变，波形随之改变→实现了可控
- 当 U_d 为某一固定数值时，为使直流波形脉动一致，应保持每个周期的触发相位角都相同
- 整流电压波形为单向脉动“不完整正弦半波”，脉动频率同电源频率。



单相半波可控整流电路及波形



3.1.1 单相半波可控整流电路



单相半波可控整流电路及波形

■ **控制特性分析：**整流电压平均值 U_d 与触发相位角 α 的关系

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

■ α 可变化的范围： $0^\circ \sim 180^\circ \rightarrow$ **移相范围** 为 180° 。

■ 通过控制触发脉冲与晶闸管阳极电压（交流电源电压）的**相位差**来控制直流输出电压大小的方式称为**相位控制**方式

■ **讨论：负载性质的影响问题**

□ 电阻负载——直流电压 u_d 与直流电流 i_d 波形形状相同

□ 如果负载性质变为阻感负载，电路工作状态是否受影响？



3.1.1 单相半波可控整流电路

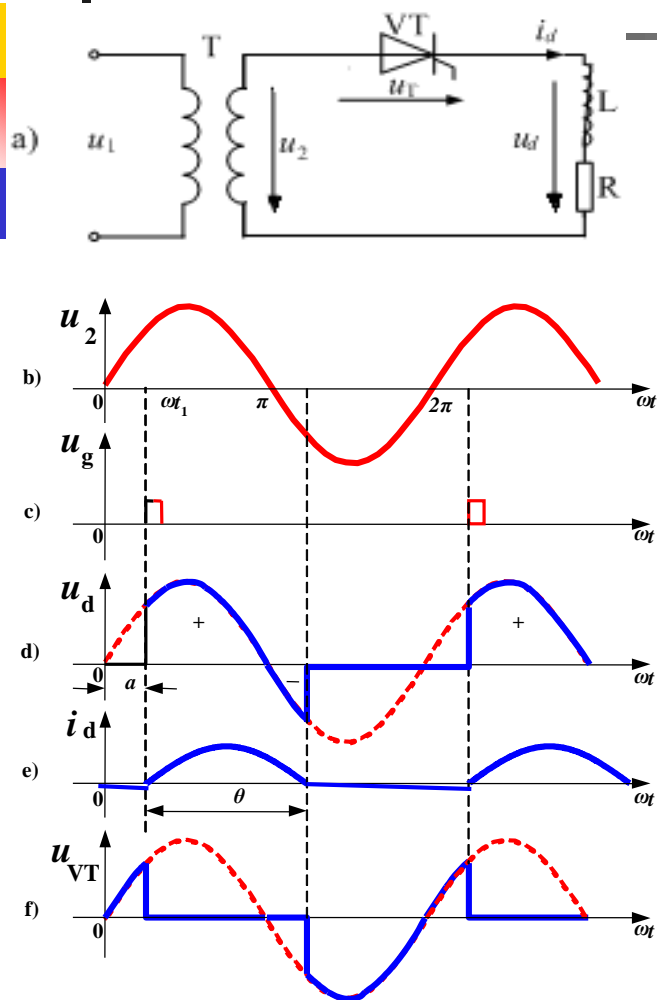


图3-2 带阻感负载的单相半波可控整流电路及其波形

■ 带阻感负载的工作情况

- 阻感负载的特点及影响：楞次定律（Lenz's Law）
- 电感自感电势
- 抑制电流变化
- 与纯电阻负载相比，晶闸管的工作状态有否改变？

■ 原理分析

🔌 $\omega t=0$, VT处于断态, $i_d=0$, $u_{VT}=u_2$, $u_d=0$ 。

🔌 在 ωt_1 时刻, 即触发角 α 处, 触发晶闸管, $u_d=u_2$ 。

🔌 L的存在使 i_d 不能突变, i_d 从0开始按指数规律增加。

🔌 从 u_2 由正变负的过零点处开始, i_d 逐渐减小, L的自感电势使得晶闸管 VT承受一段时间的正向阳极电压而仍然处于通态: $u_d=u_2$ 。在这段时间里, 已经处于负半周, $u_d=u_2<0$ 。

🔌 ωt_2 时刻, 电感能量释放完毕, 晶闸管 VT关断。 u_d 和 i_d 变为零。

- **问题：** 负载中电感的存在, 延迟了VT的关断时刻, 使 u_d 波形出现一段负半波, 与带电阻负载时相比, U_d 有所减小。 **如何解决“减小”问题？**



3.1.1 单相半波可控整流电路

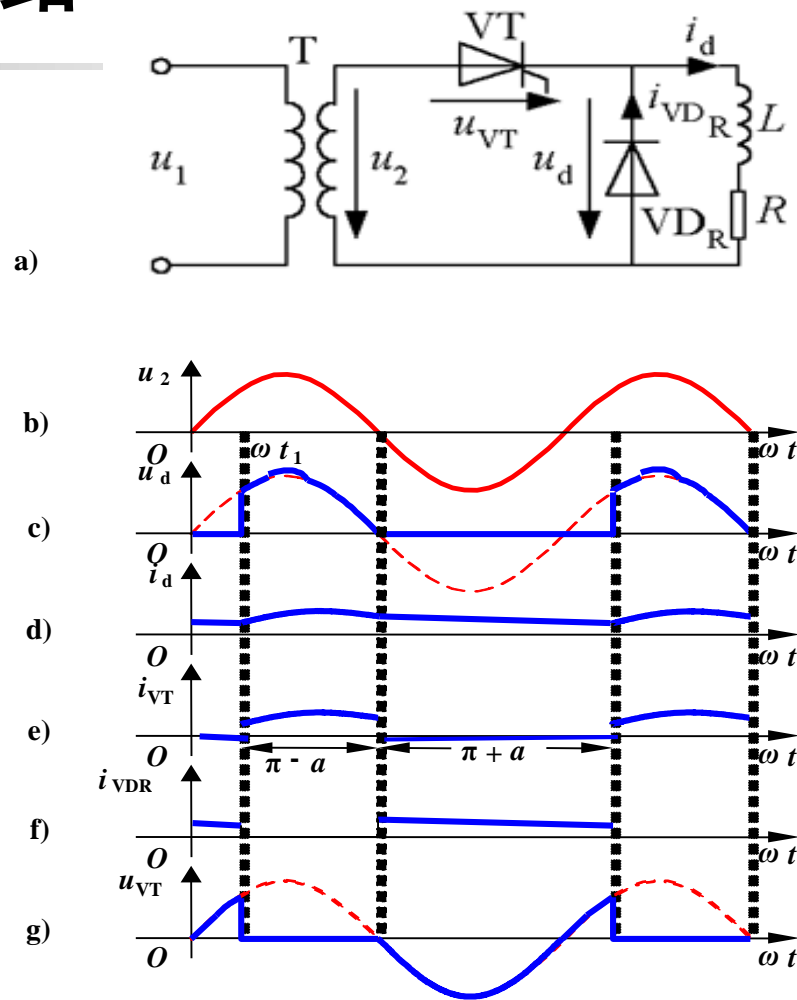
■ 增加“续流”通路：与负载反并联续流二极管—— VD_R

□ 电路工作原理分析

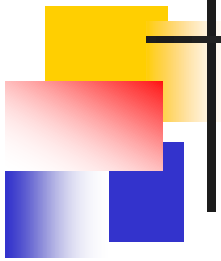
- 从 u_2 过零变负开始， i_d 开始减小， L 自感电势使得 VD_R 导通 $\rightarrow u_d \approx 0$ ；
- 电流 i_d 在 $L-R-VD_R$ 回路中流通 (续流)
- 若 L 足够大， i_d 波形连续，形状近似为一条直线
- u_2 进入负半周后 VD_R 开始续流，晶闸管 VT 被关断，避免了电源负半周波形的输出， u_d 波形和 U_d 数值与电阻负载的相同，没有“减小”。

■ 作业（下次课点名提交）：

- 1 续流通路为“ $L-R-T-VT-L$ ”的可能性分析（作业1）
- 2 比较分析：三种情况下的整流电压和整流电流——波形及平均值（作业2）
- 3 关注“开关”的电气工作环境——三种情况下晶闸管两端电压和电流波形比较分析（作业3）。



单相半波带阻感负载
有续流二极管的电路及波形



The End