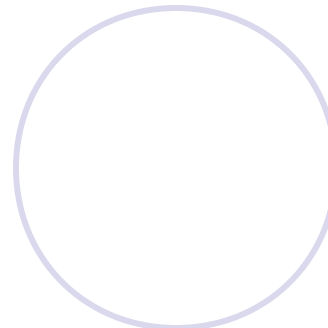
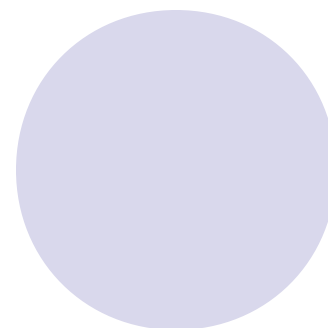
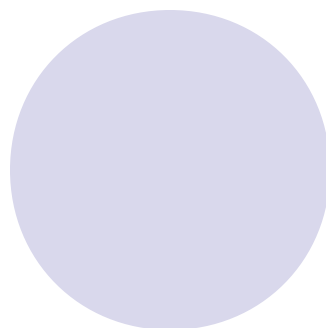
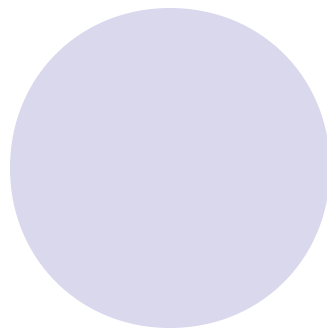
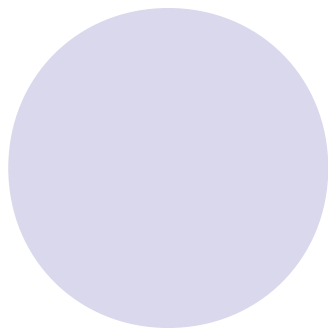


高级维修电工考证培训 之电力电子知识

实训中心主讲

第一章

电力电子器件简介



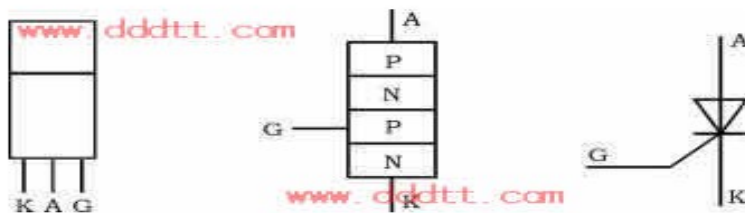
分类




- 不可控器件：电力二极管
- 半控型器件：晶闸管
- 全控型器件：电力晶体管，门极可关断晶闸管，电力场效应管，绝缘栅双极晶体管

一. 晶闸管

- 晶闸管（**Thyristor**）是晶体闸流管的简称，又可称做可控硅整流器，以前被简称为可控硅，晶闸管是 **PNPN** 四层半导体结构，它有三个极：阳极，阴极和门极；晶闸管工作条件为：加正向电压且门极有触发电流，它是一种大功率开关型半导体器件，在电路中用文字符号为“**V**”、“**V****T**”表示



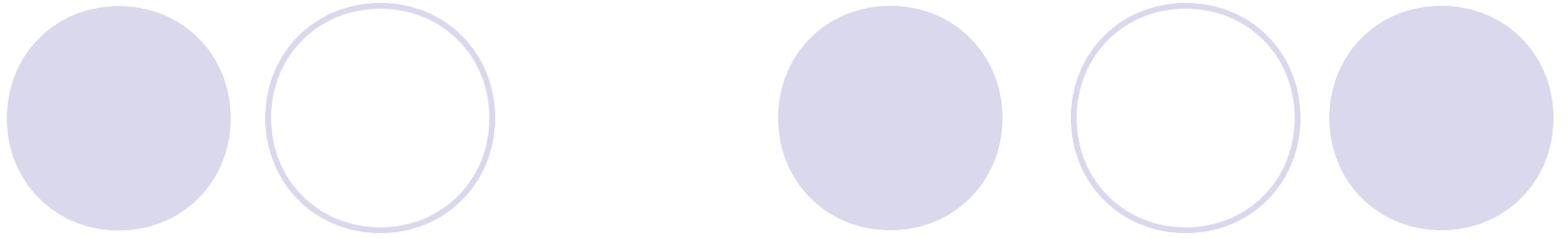
- 
- （旧标准中用字母“**SCR**”表示）。晶闸管具有硅整流器件的特性，能在高电压、大电流条件下工作，且其工作过程可以控制、被广泛应用于可控整流、交流调压、无触点电子开关、逆变及变频等电子电路中。



晶闸管的工作原理

晶闸管的工作条件：

1. 晶闸管承受反向阳极电压时，不管门极承受何种电压，晶闸管都处于关断状态。
2. 晶闸管承受正向阳极电压时，仅在门极承受正向电压的情况下晶闸管才导通。



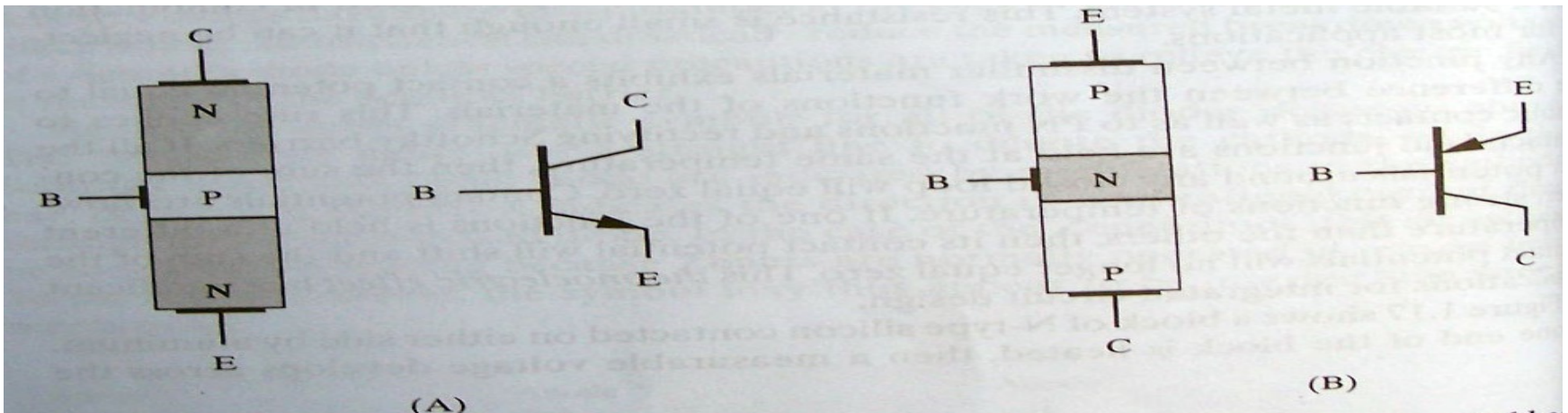
3. 晶闸管在导通情况下，只要有一定的正向阳极电压，不论门极电压如何，晶闸管保持导通，即晶闸管导通后，门极失去作用。
4. 晶闸管在导通情况下，当主回路电压（或电流）减小到接近于零时，晶闸管关断。

二. 电力晶体管

- 其特性有：耐压高，电流大，开关特性好，但驱动电路复杂，驱动功率大；**GTR**和普通双极结型晶体管的工作原理是一样的。**GTR**是一种电流控制的双极双结大功率、高反压电力电子器件，具有自关断能力。

它既具备晶体管饱和压降低、开关时间短和安全工作区宽等固有特性，又增大了功率容量，因此，由它所组成的电路灵活、成熟、开关损耗小、开关时间短，在电源、电机控制、通用逆变器中等容量、中等频率的电路中应用广泛。GTR 的缺点是驱动电流较大、耐浪涌电流能力差、易受二次击穿而损坏。在开关电源和不间断电源（UPS）内，GTR 正逐步被功率 MOSFET 和 IGBT 所代替。

GTR 结构和工作原理都和小功率晶体管非常相似。**GTR** 由三层半导体、两个 PN 结组成。和小功率三极管一样，有 PNP 和 NPN 两种类型，**GTR** 通常多用 NPN 结构。



电力晶体管工作原理

- 在电力电子技术中，**GTR** 主要工作在开关状态。**GTR** 通常工作在正偏 ($I_b > 0$) 时大电流导通；反偏 ($I_b < 0$) 时处于截止状态。因此，给 **GTR** 的基极施加幅度足够大的脉冲驱动信号，它将工作于导通和截止的开关状态。

● 电力晶体管的主要参数

● 二次击穿和安全工作区

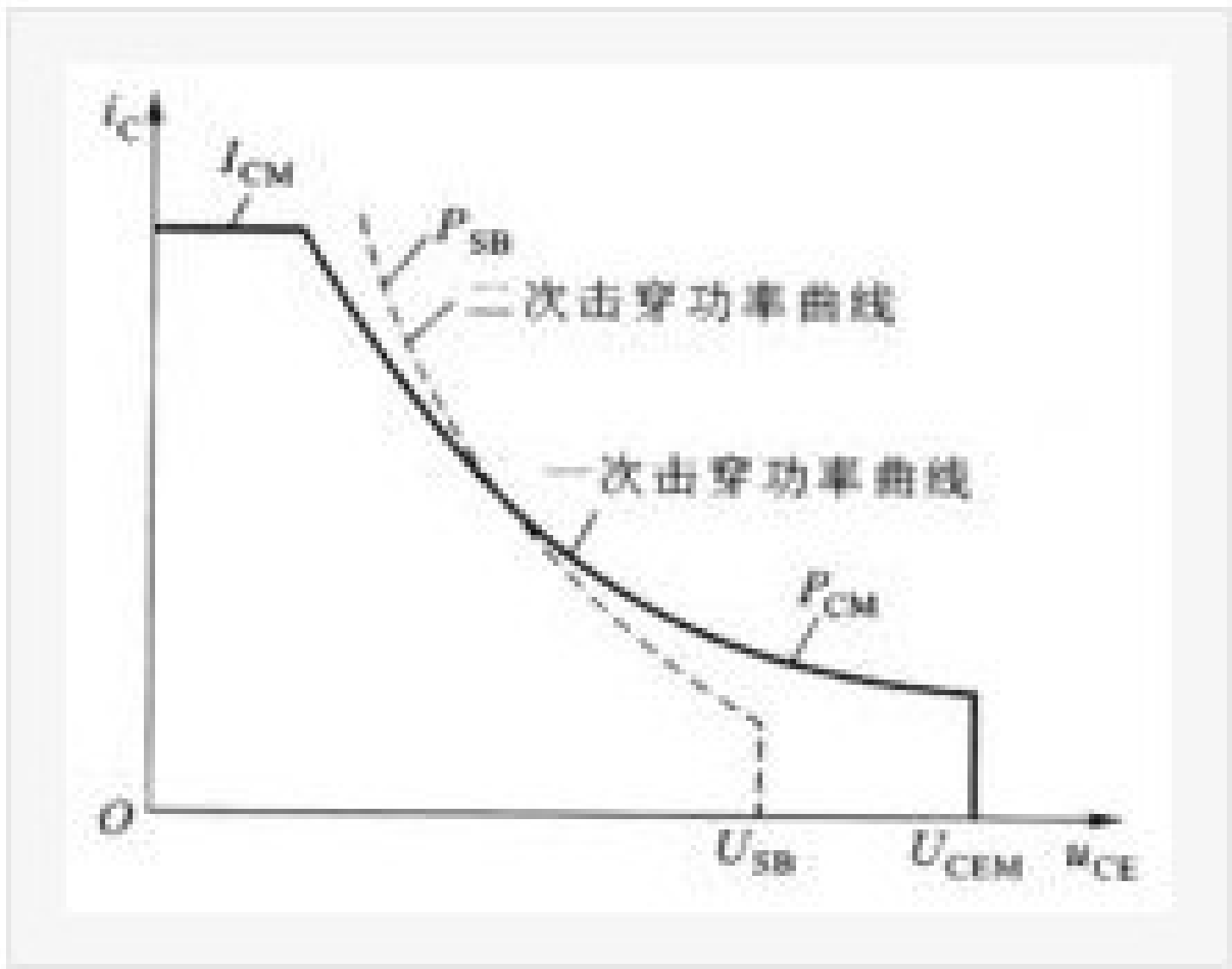
● (1) 二次击穿

- 二次击穿是影响 **GTR** 安全可靠工作的一个重要因素。二次击穿是由于集电极电压升高到一定值（未达到极限值）时，发生雪崩效应造成的。防止二次击穿的办法是：① 应使实际使用的工作电压比反向击穿电压低得多。② 必须有电压电流缓冲保护措施。

。

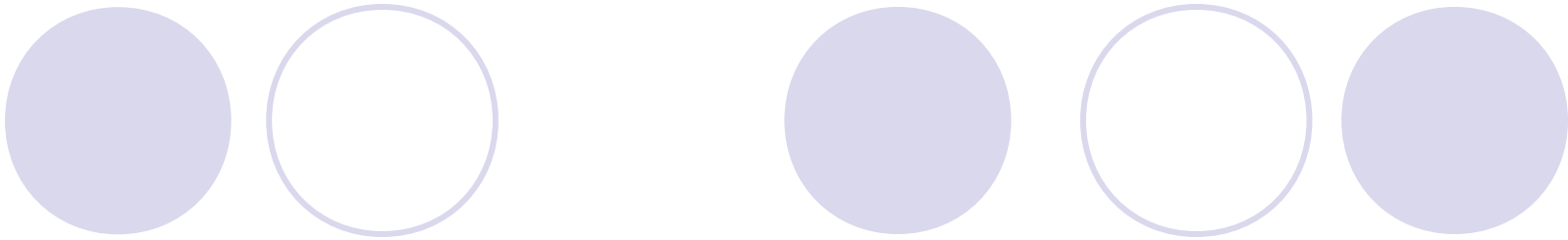
(2) 安全工作区

以直流极限参数 **ICM**、**PCM**、**UCEM** 构成的工作区为一次击穿工作区，以 **USB** (二次击穿电压) 与 **ISB** (二次击穿电流) 组成的 **PSB** (二次击穿功率) 是一个不等功率曲线。为了防止二次击穿，要选用足够大功率的 **GTR**，实际使用的最高电压通常比 **GTR** 的极限电压低很多。



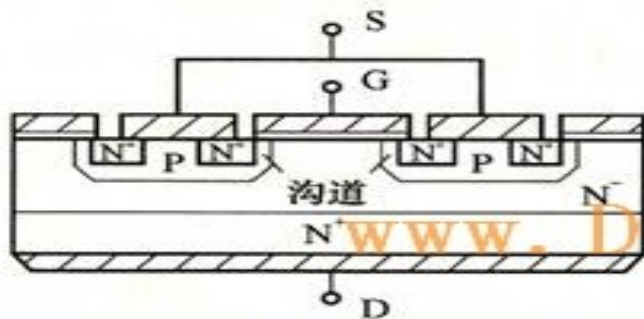
三. 门极可关断晶闸管

- **GTO**（**Gate Turn-Off Thyristor**）亦称门控晶闸管。其主要特点为：当门极加负向触发信号时晶闸管能自行关断。
- 普通晶闸管（**SCR**）靠门极正信号触发之后，撤掉信号亦能维持通态。欲使之关断，必须切断电源，使正向电流低于维持电流 I_H ，或施以反向电压强近关断。

- 
- 这就需要增加换向电路，可关断晶闸管克服了上述缺陷，它既保留了普通晶闸管耐压高、电流大等优点，并具有自关断能力，使用方便，是理想的高压、大电流开关器件。 **GTO** 的容量及使用寿命均超过巨型晶体管（ **GTR** ）。

四. 电力场效应管 (电力 MOSFET)

- 特点——用栅极电压来控制漏极电流，驱动电路简单，需要的驱动功率小。开关速度快，工作频率高。热稳定性优于 **GTR**。但电流容量小，耐压低，一般只适用于功率不超过 **10kW** 的电力电子装置。



(a) 内部结构剖面示意图



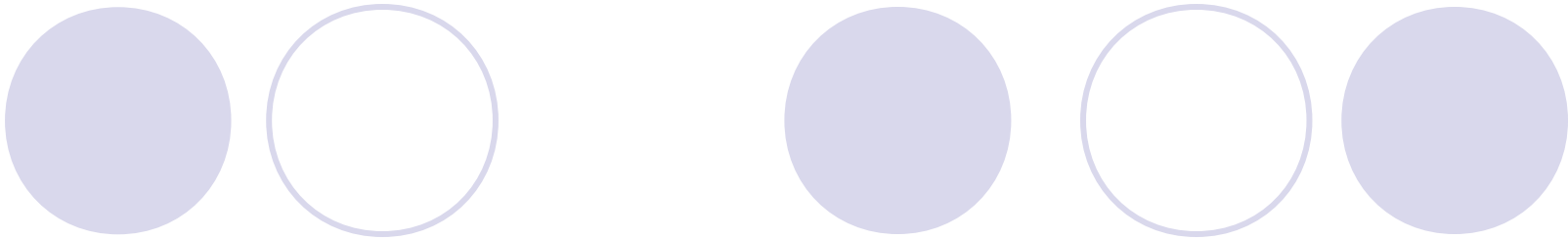
(b) 电气符号

● 电力 MOSFET 的开关速度


- 电力 MOSFET 的开关速度和 C 充放电有很大关系。可降低驱动电路内阻 R_s 减小时间常数，加快开关速度。不存在少子储存效应，关断过程非常迅速。开关时间在 $10 \sim 100\text{ns}$ 之间，工作频率可达 100kHz 以上，是主要电力电子器件中最高的。场控器件，静态时几乎不需输入电流。一般来说，电力 MOSFET 不存在二次击穿问题。

五. 绝缘栅双极晶体管

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)，绝缘栅双极型晶体管，是由 **BJT(双极型三极管)**和 **MOS(绝缘栅型场效应管)**组成的复合全控型电压驱动式功率半导体器件，兼有 **MOSFET** 的高输入阻抗和 **GTR** 的低导通压降两方面的优点。 **GTR** 饱和压降低，载流密度大，但驱动电流较大；

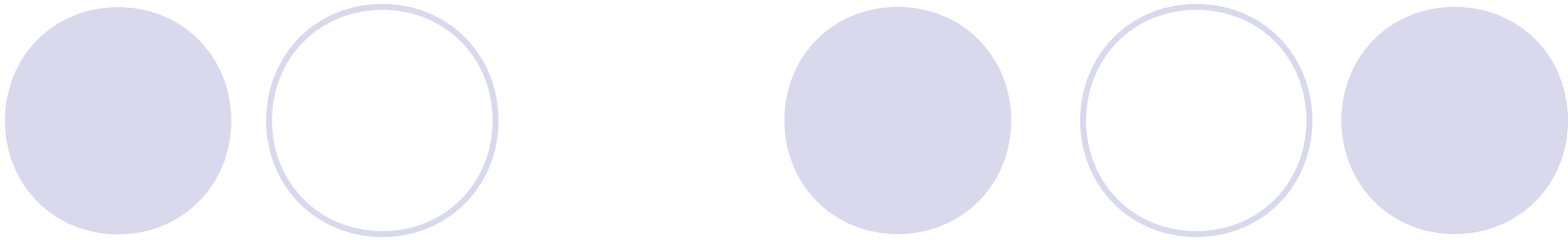


MOSFET 驱动功率很小，开关速度快，但导通压降大，载流密度小。**IGBT** 综合了以上两种器件的优点，驱动功率小而饱和压降低。非常适合应用于直流电压为 **600V** 及以上的变流系统如**交流电机**、**变频器**、**开关电源**、照明电路、牵引传动等领域。

- 
- **IGBT** 中双极性 **PNP** 晶体管的存在，虽然带来了电导调制效应的好处，但也引入了少子储存现象。因此 **IGBT** 的开关速度低于 **MOSFET**，但明显高于 **GTR**。**IGBT** 在关断时不需要负栅压来减少关断时间，但关断时间随栅极和发射极并联电阻的增加而增加。**IGBT** 的开启电压约 $3 \sim 4V$ ，和 **MOSFET** 相当。

六. 电力电子器件的驱动

- 可控型电力电子器件（包括全控和半控）多为三端器件，其中有两个电极接主电路，如晶闸管的阳极和阴极、**GTR** 的集电极和发射极。工作时可承受很高的电压和通过很大的电流。另一个电极起控制作用，如晶闸管的门极，**MOSFET** 的栅极，在其上面施加一定的电压或通以适当的电流可以控制器件的通断。

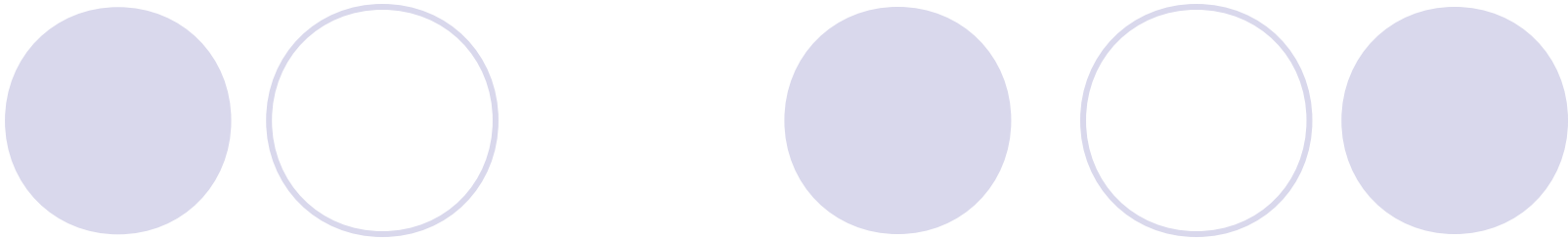
- 
- 较之主电路的电压或电流，这个起控制作用的电压或电流都很小，这种“以弱控强”的作用称之为驱动，与之相关的电路叫做驱动电路。电力电子器件的结构和性能各不相同，对驱动信号的要求也不一样，这使得各种器件的驱动电路存在着很大的差异。

- 按照驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端的信号的性质，将电力电子器件分为电流驱动型和电压驱动型两类。晶闸管虽然是电流驱动器件，但是它是半控型器件，驱动电路常称为触发电路。对典型的全控器件 **GTO, GTR** 属于电流驱动型，电力 **MOSFET** 和 **IGBT** 属于电压驱动型。主要介绍晶闸管的驱动电路。

● 晶闸管驱动电路（触发电路）

晶闸管触发电路应满足下列要求：

- 1) 触发脉冲的宽度应保证晶闸管可靠导通。采用宽脉冲或双窄脉冲。
- 2) 脉冲应有足够的幅度。对户外寒冷场合，脉冲电流的幅度增大为器件最大触发电流的 3~5 倍，脉冲前沿的陡坡也需增加，一般需大 $1\sim 2\text{A}/\mu\text{s}$ 。

- 
- 3) 所提供的触发脉冲应不超过晶闸管门极的电压、电流和功率定额。且在门极伏安特性的可靠触发区域之内。
 - 4) 应有良好的抗干扰能、温度稳定性及主电路的电气隔离。

● GTO 的驱动


GTO 一般应用于大容量的场合，驱动电路通常包括三部分：开通驱动电路、关断驱动电路和门极反偏电路三部分。可分为脉冲变压器耦合式和直接耦合式两种类型。直接耦合式驱动电路可以避免电路内部相互干扰和寄生振荡，可得到较陡的脉冲前沿，目前应用比较广泛，但功耗大，效率较低。



- **GTR 的驱动**

GTR 也是一种电流控制型器件，但 **GTR** 有线性放大区。在电力电子电路中 **GTR** 多工作在开关状态，应回避其进入线性放大区。

- **电压控制型器件驱动**



以电力 **MOSFET** 驱动为例，由于栅极和源极之间是绝缘的，所以在器件导通和关断的稳定状态都不可能出现栅极电流，需要的仅是一个栅极电压。但是器件的各电极之间都存在着电容，因此驱动电压的变化将产生电容充放电电流，充放电时间常数决定栅极电压变化的速率，进而影响器件的开关速度。为了减小时间常数，要求驱动回路的电阻尽可能小。

练习（牛刀小试）

- 1. 电力场效应管 MOSFET(反反) 现象。
A、有二次击穿 B、无二次击穿 C、防止二次击穿 D、无静电击穿
- 2. 逆变电路输出频率较高时，电路中的开关元件应采用(反反)。
A、晶闸管 B、电力晶体管 C、可关断晶闸管 D、电力场效应管
- 3. 电力晶体管是(反反)控制型器件。
A、电流 B、电压 C、功率 D、频率

练习

- 4. 逆变器输出频率较高时，电路中的开关元件应采用电力晶体管。（ ）
- 5. 绝缘栅双极晶体管内部为四层结构。（ ）
- 6. 电力场效应管 **MOSFET** 是理想的（ ）控制器件。
A、电压 B、电流 C、电阻 D、功率

练习

- 7. 电力晶体管的缺点是 (反反)。
A、功率容量小 B、必须具备专门的强迫换流电路 C、具有线性放大特性 D、易受二次击穿而损坏
- 8. 在电力电子装置中，电力晶体管一般工作在 (反D反) 状态。
A、放大 B、截止 C、饱和 D、开关
- 9. 电力晶体管 GTR 有 () 个 PN 结。
A、1 B、2 C、3 D、4

第2章 整流电路 · 引言

● 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**和**零式电路**。

⊕ 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**单拍电路**和**双拍电路**。

2.1 单相可控整流电路

2.1.1 单相半波可控整流电路

2.1.2 单相桥式全控整流电路

2.1.3 单相全波可控整流电路

2.1.4 单相桥式半控整流电路

2.1.1 单相半波可控整流电路

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。

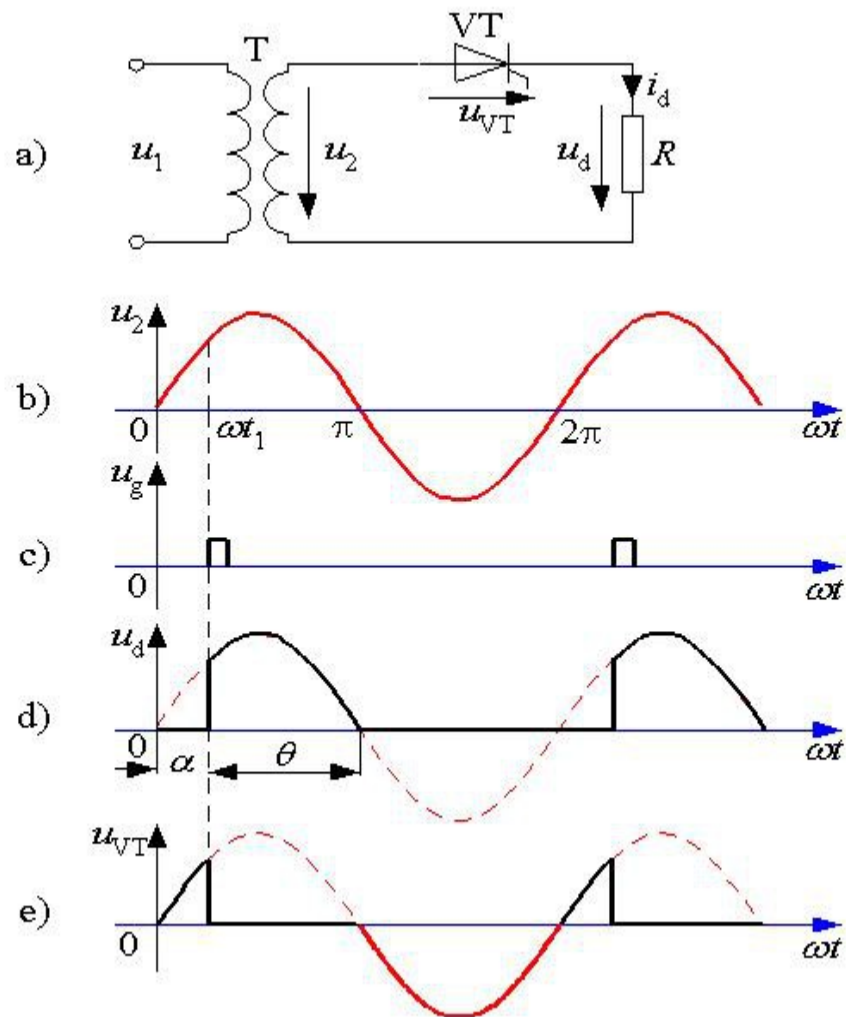


图 2-1 单相半波可控整流电路及波形

2.1.1 单相半波可控整流电路

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

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

2.1.1 单相半波可控整流电路

2) 带阻感负载的工作情况

● **阻感负载的特点**：电感

对电流变化有抗拒作用

，使得流过电感的电流

不发生突变。

● 讨论负载阻抗角 φ 、触发

角 α 、晶闸管导通角 θ

的关系。

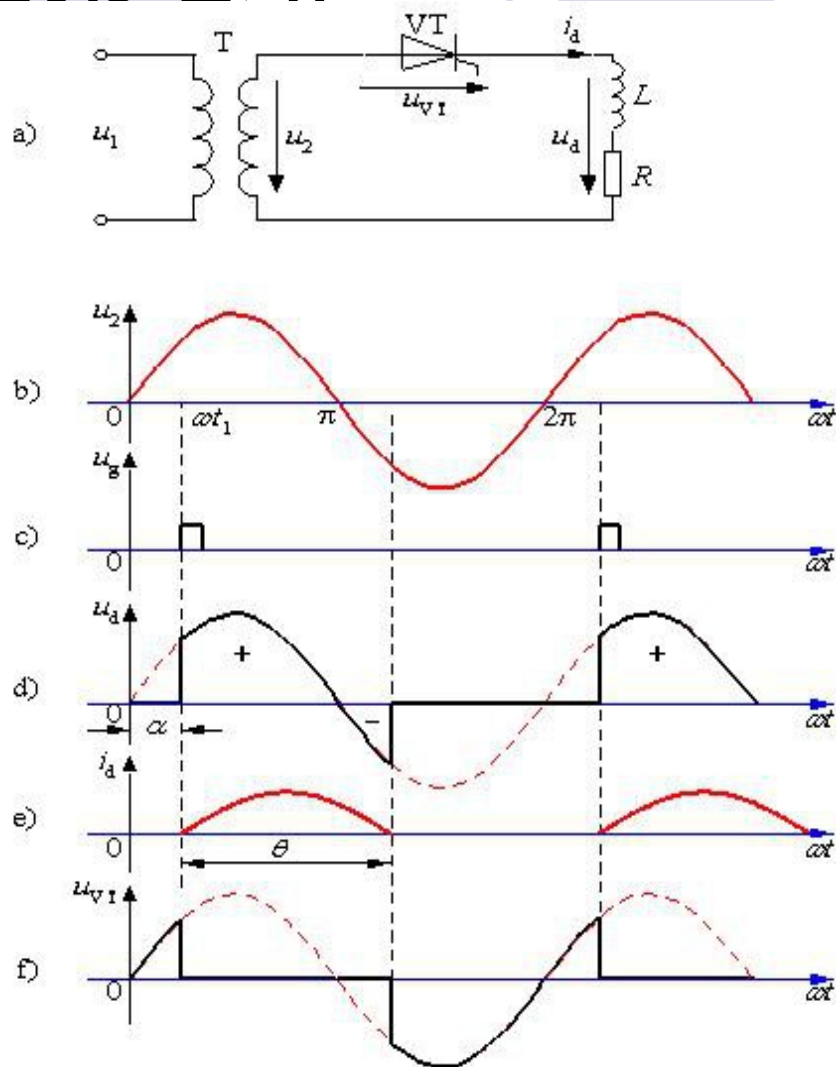


图 2-2 带阻感负载的单相半波电路及其波形

2.1.1 单相半波可控整流电路

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。

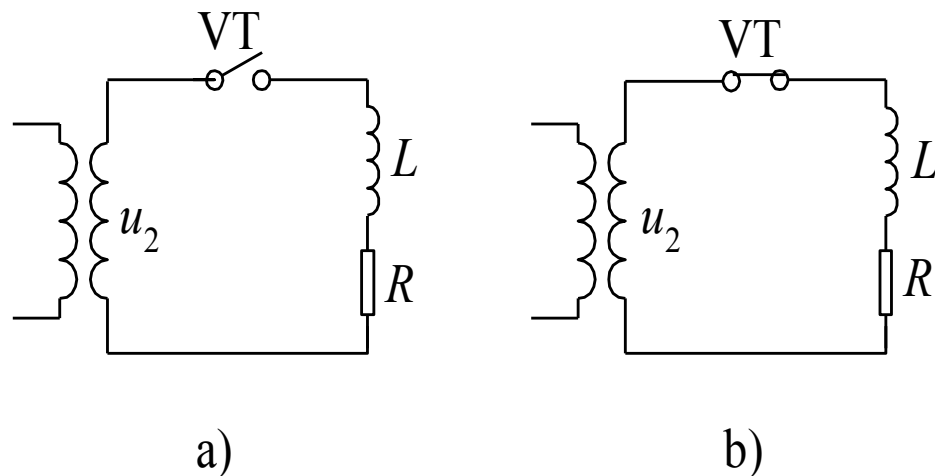
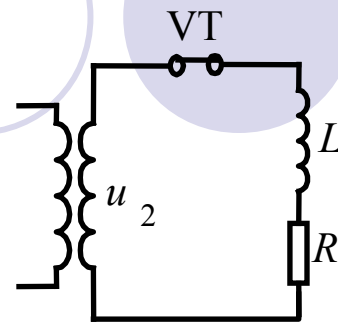


图 2-3 单相半波可控整流电路的分段线性等效电路
a)VT 处于关断状态
b)VT 处于导通状态

2.1.1 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

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

b) VT 处于导通状态

2.1.1 单相半波可控整流电路

● 续流二极管

● 数量关系 (i_d 近似恒为 I_d)

$$I_{dVT} = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d$$

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

$$I_{dVDR} = \frac{\pi + \alpha}{2\pi} I_d$$

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

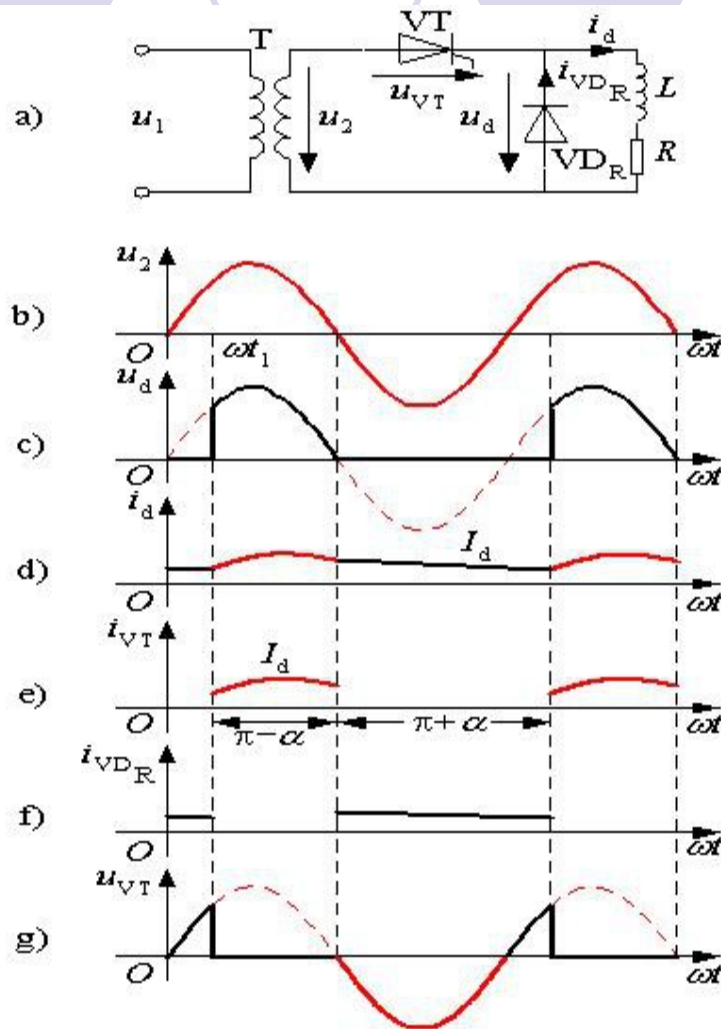


图 2-4 单相半波带阻感负载有续流二极管的电路及波形

2.1.1 单相半波可控整流电路

■ 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。

2.1.2 单相桥式全控整流电路

1) 带电阻负载的工作情况

● 电路结构

● 工作原理及波形分析

- ✦ VT_1 和 VT_4 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。
- ✦ VT_2 和 VT_3 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。

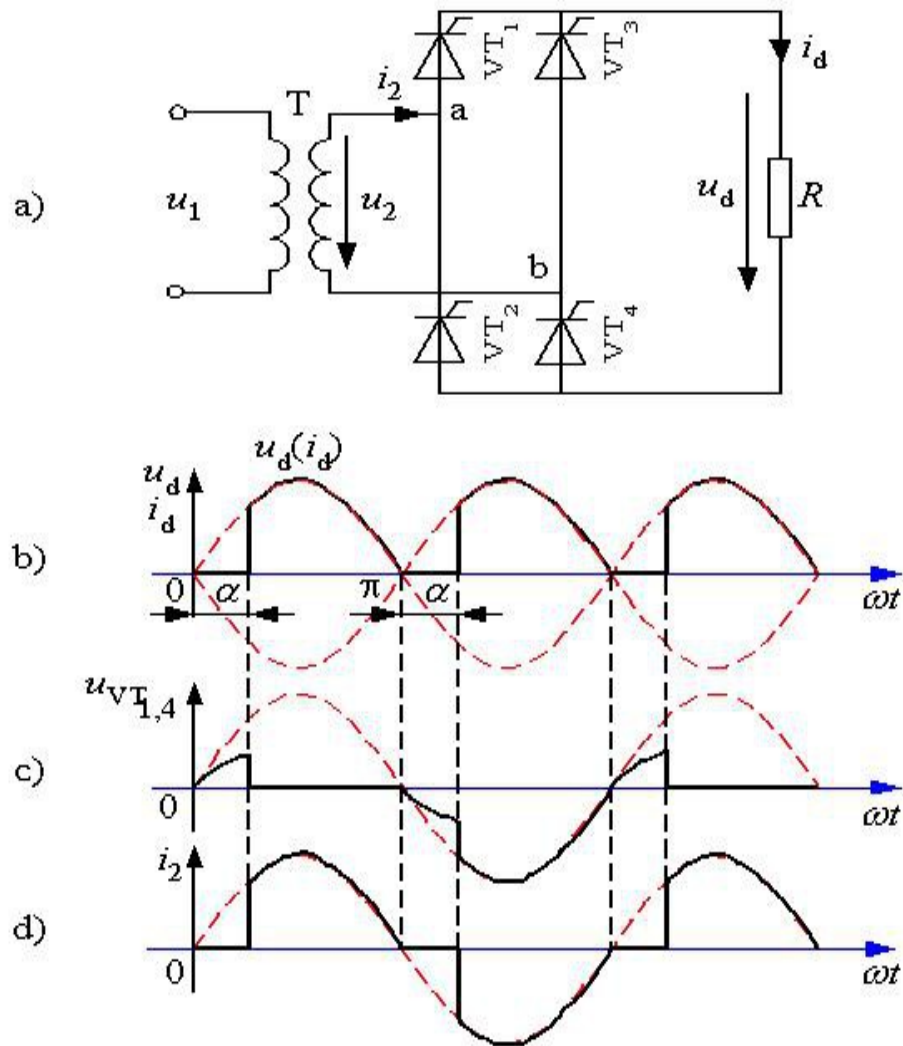


图 2-5 单相全控桥式带电阻负载时的电路及波形

2.1.2 单相桥式全控整流电路

数量关系

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

α 角的移相范围为 180° 。

向负载输出的平均电流值为：

$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi R} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0.9 \frac{U_2}{R} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

流过晶闸管的电流平均值只有输出直流平均值的一半，即

：

$$I_{dVT} = \frac{1}{2} I_d = 0.45 \frac{U_2}{R} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

2.1.2 单相桥式全控整流电路

◆ 流过晶闸管的电流有效值：

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

◆ 变压器二次测电流有效值 I_2 与输出直流电流 I 有效值相等：

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

◆ 由上两式得：
$$I_{VT} = \frac{1}{\sqrt{2}} I$$

● 不考虑变压器的损耗时，要求变压器的容量 $S = U_2 I_2$

2.1.2 单相桥式全控整流电路

2) 带阻感负载的工作情况

- 假设电路已工作于稳态, i_d 的平均值不变。
- 假设负载电感很大, 负载电流 i_d 连续且波形近似为一水平线。
- u_2 过零变负时, 晶闸管 VT_1 和 VT_4 并不关断。
- 至 $\omega t = \pi + \alpha$ 时刻, 晶闸管 VT_1 和 VT_4 关断, VT_2 和 VT_3 两管导通。
- VT_2 和 VT_3 导通后, VT_1 和 VT_4 承受反压关断, 流过 VT_1 和 VT_4 的电流迅速转移到 VT_2 和 VT_3 上。

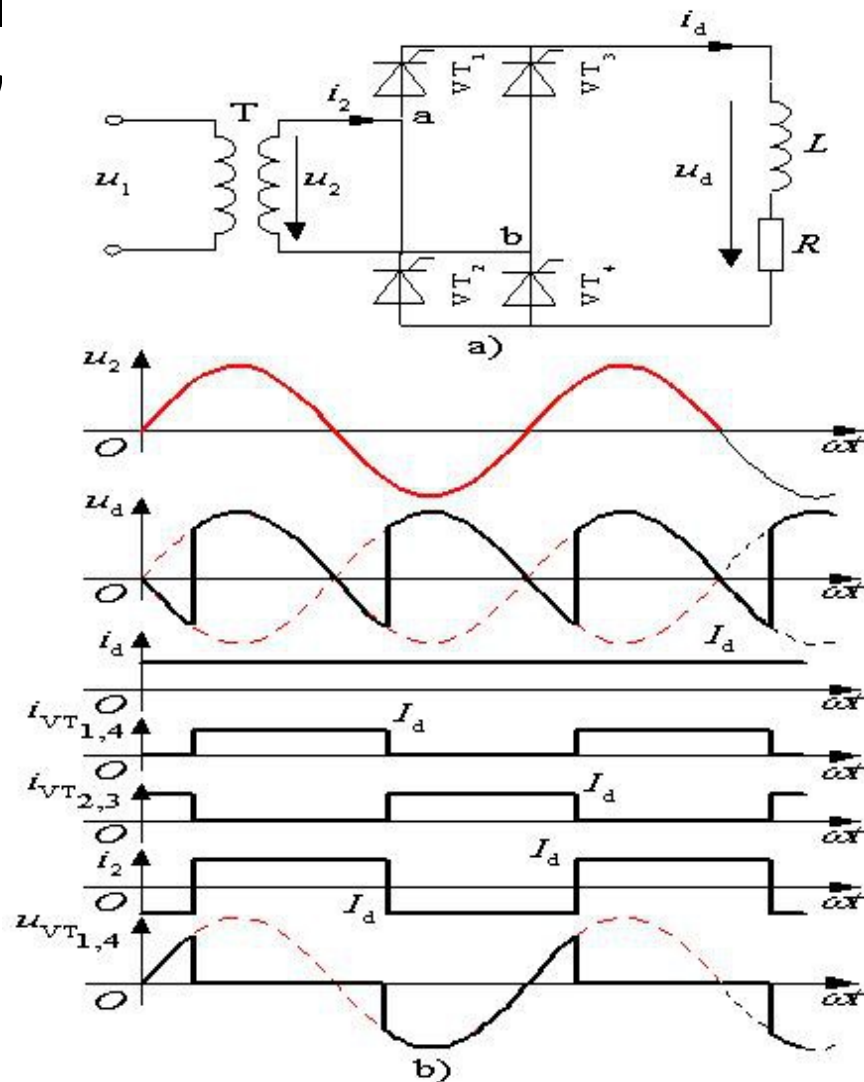


图 2-6 单相全控桥带阻感负载时的电路及波形

2.1.2 单相桥式全控整流电路

数量关系

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

◆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 $I_2 = I_d$ 。

2.1.2 单相桥式全控整流电路

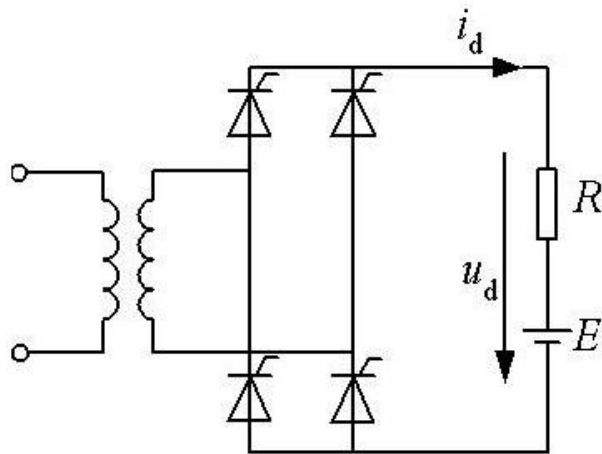
3) 带反电动势负载时的工作情况

在 $|u_2| > E$ 时，才有晶闸管承受正电压，有导通的可能。

导通之后， $u_d = u_2$ ， $i_d = \frac{u_d - E}{R}$ ，直至 $|u_2| = E$ ， i_d 即降至 0 使得晶闸管关断，此后 $u_d = E$ 。

与电阻负载时相比，晶闸管提前了电角度 δ 停止导电， δ 称为停止导电角， $\delta = \sin^{-1} \frac{E}{\sqrt{2}U_2}$

在 α 角相同时，整流输出电压比电阻负载时大。



a)

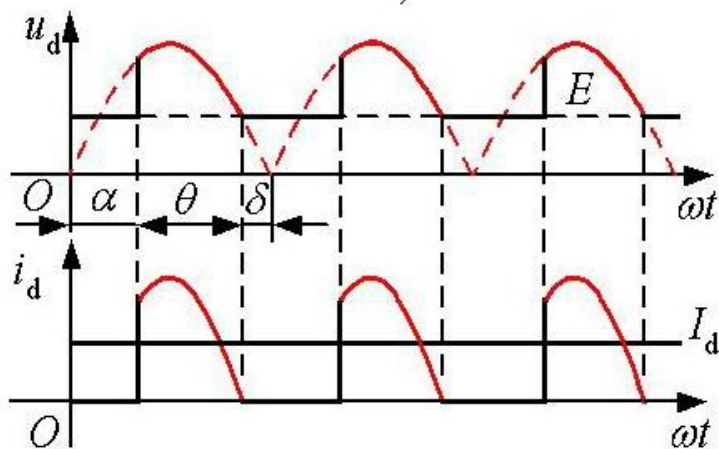


图 2-7 单相桥式全控整流电路接反电动势—电阻负载时的电路及波形

2.1.2 单相桥式全控整流电路

如图 2-7b 所示 i_d 波形所示：

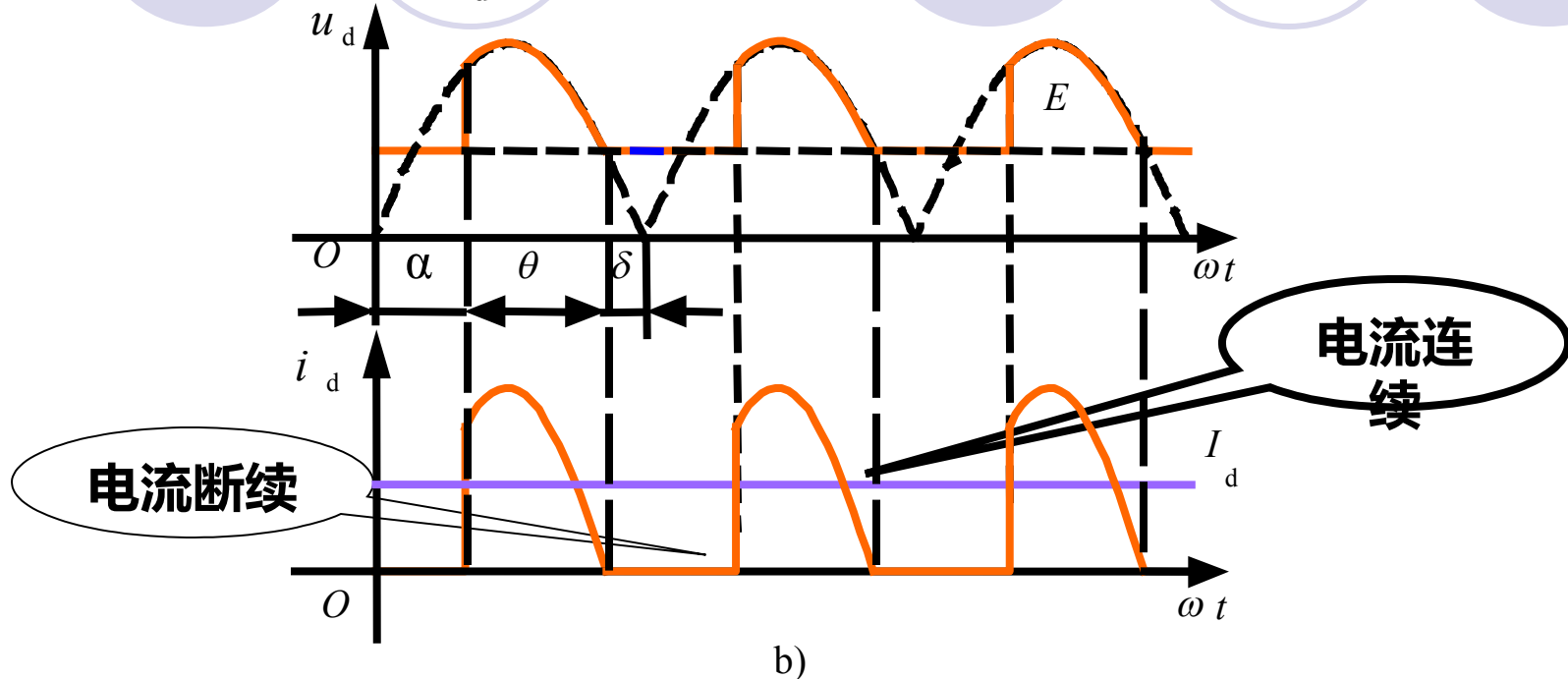


图 2-7b 单相桥式全控整流电路接反电动势—电阻负载时的波形

- 当 $\alpha < \delta$ 时，触发脉冲到来时，晶闸管承受负电压，不可能导通
- 触发脉冲有足够的宽度，保证当 $\omega t = \delta$ 时刻有晶闸管开始承受正电压时，触发脉冲仍然存在。这样，相当于触发角被推迟为 δ 。

2.1.2 单相桥式全控整流电路

- 负载为直流电动机时，如果出现电流断续，则电动机的机械特性将很软。
- 为了克服此缺点，一般在主电路中直流输出侧串联一个平波电抗器。

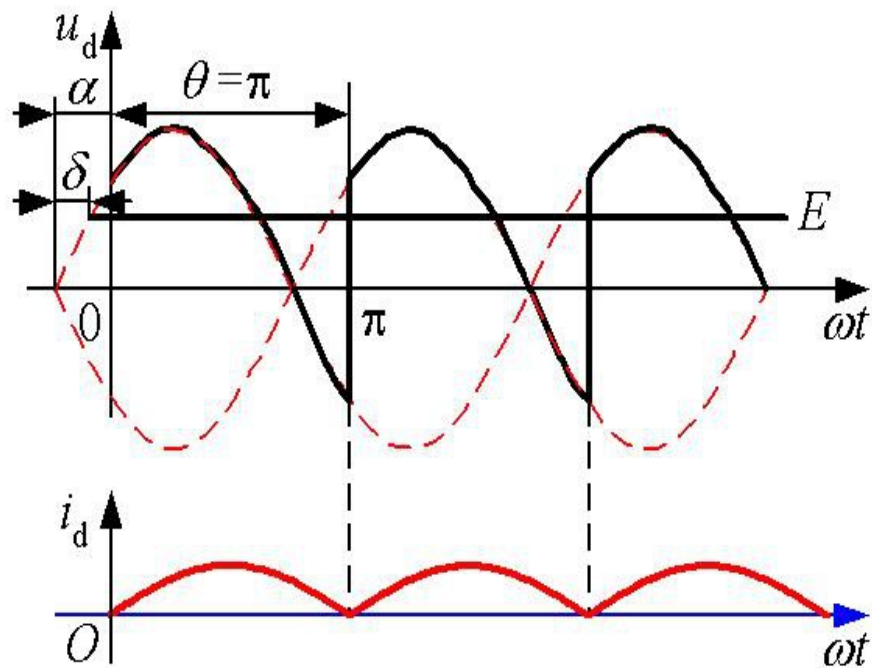


图 2-8 单相桥式全控整流电路带反电动势负载串平波电抗器，电流连续的临界情况

2.1.3 单相全波可控整流电路

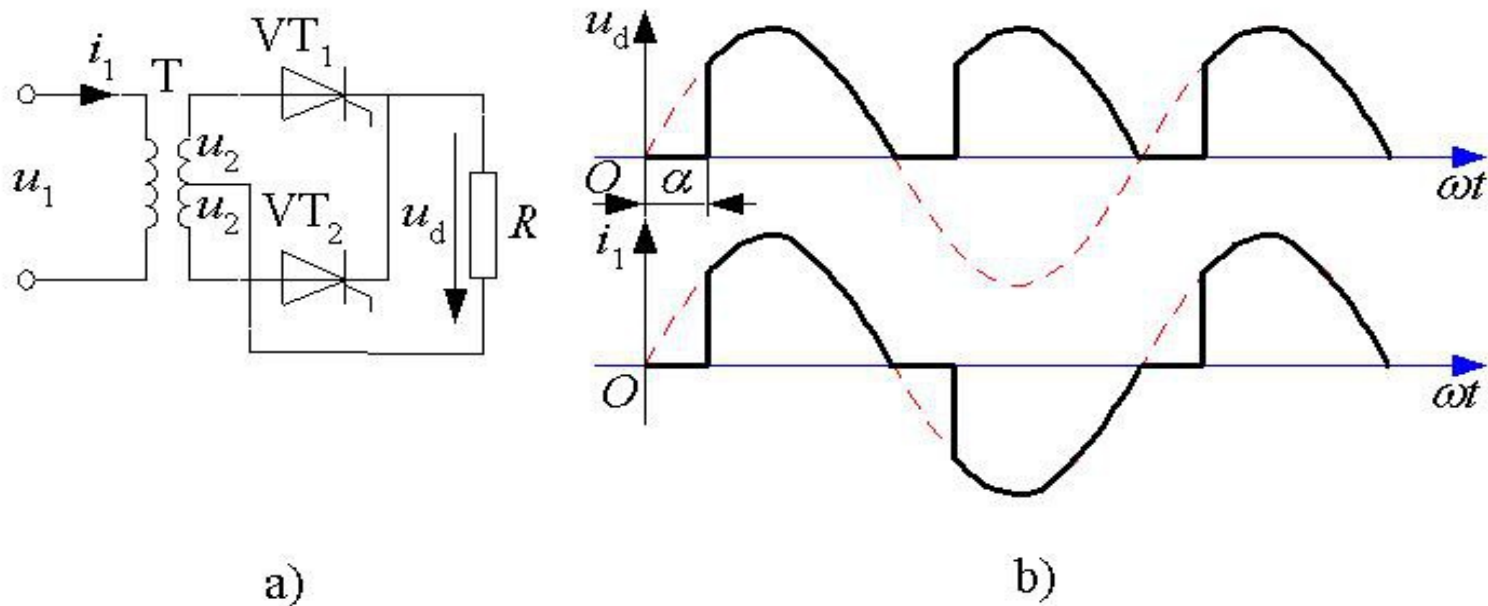


图 2-9 单相全波可控整流电路及波形

- 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。

2.1.3 单相全波可控整流电路

- 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

三相可控整流电路

2.2.1 三相半波可控整流电路

2.2.2 三相桥式全控整流电路

2.2 三相可控整流电路 · 引言

- 交流测由三相电源供电。
- 负载容量较大，或要求直流电压脉动较小、容易滤波。
- 基本的是三相半波可控整流电路，三相桥式全控整流电路应用最广。

2.2.1 三相半波可控整流电路

1) 电阻负载

● 电路的特点：

- ⊕ 变压器二次侧接成星形得到零线，而一次侧接成三角形避免3次谐波流入电网。
- ⊕ 三个晶闸管分别接入 a、b、c 三相电源，其阴极连接在一起——共阴极接法。

● 自然换相点：

- ⊕ 二极管换相时刻为**自然换相点**，是各相晶闸管能触发导通的最早时刻，将其作为计算各晶闸管触发角 α 的起点，即 $\alpha = 0^\circ$ 。

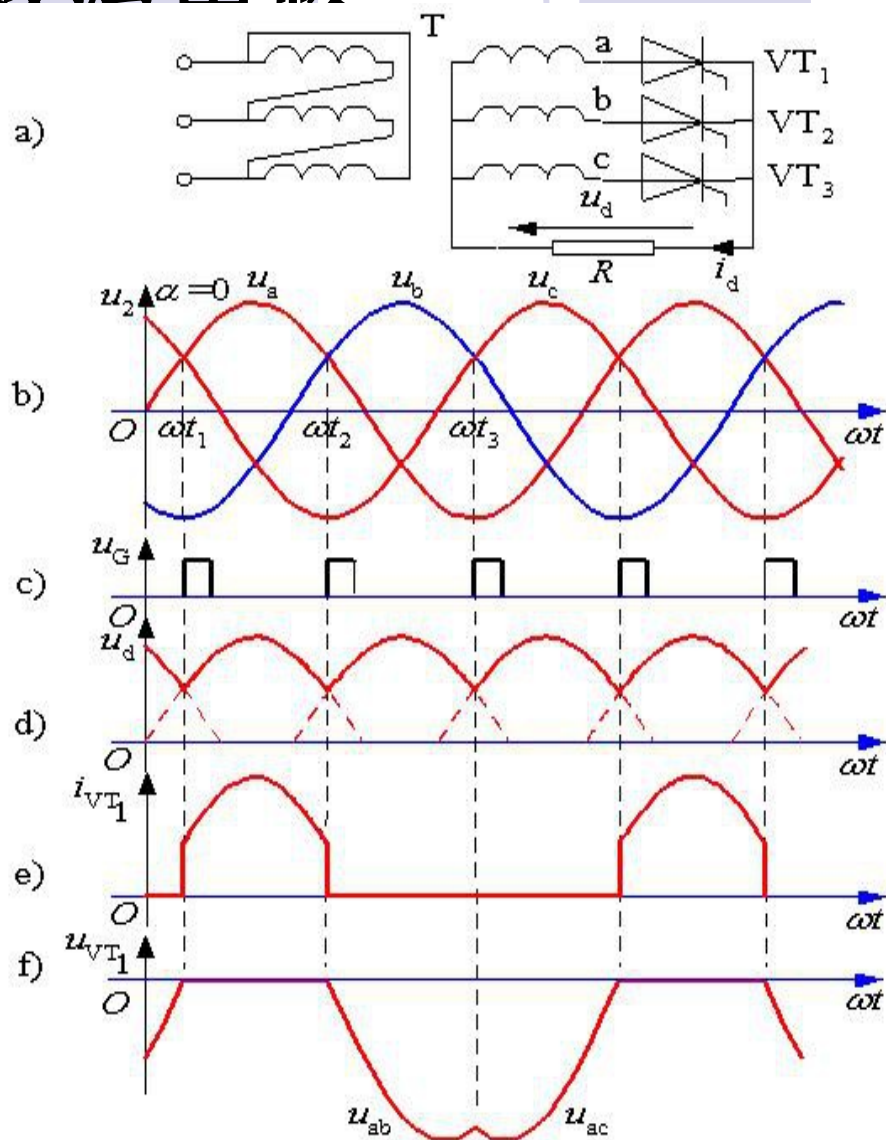


图 2-12 三相半波可控整流电路共阴极接法电阻负载时的电路及 $\alpha = 0^\circ$ 时的波形

2.2.1 三相半波可控整流电路

● $\alpha = 0^\circ$ 时的工作原理分析

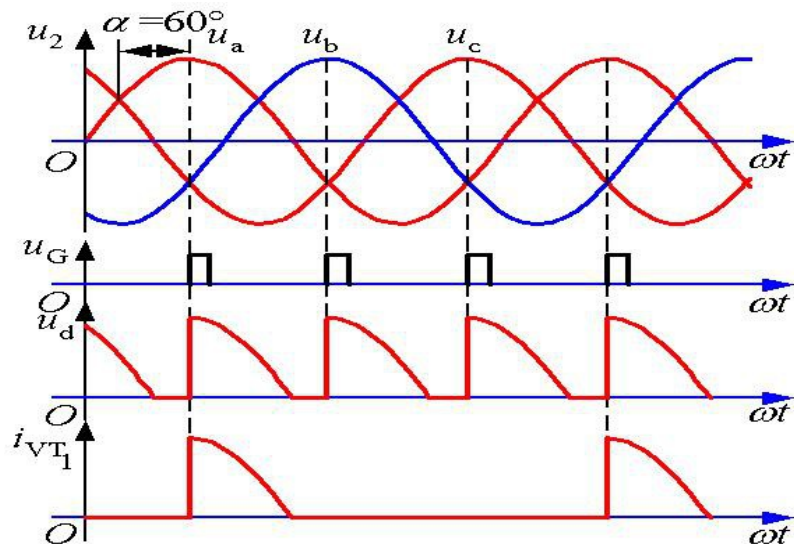
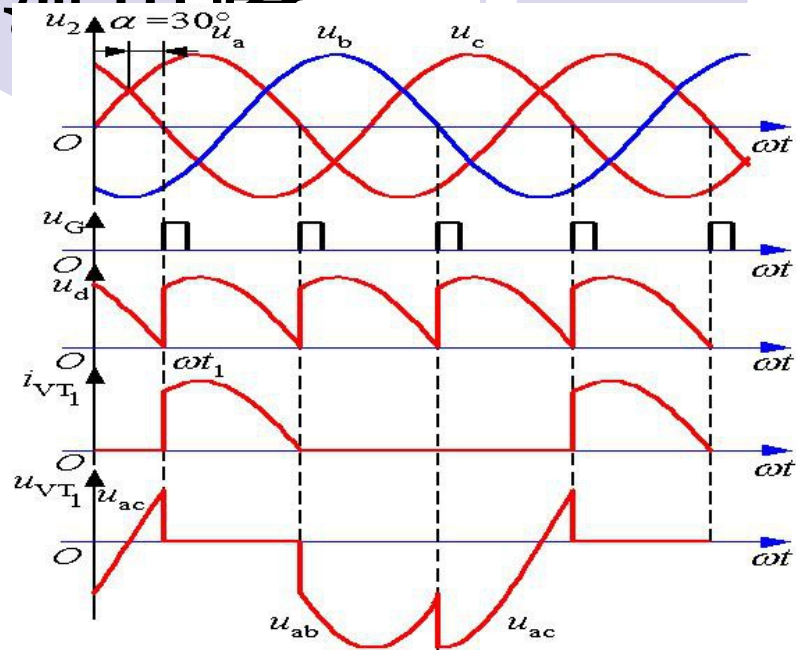
- ⊕ 变压器二次侧 a 相绕组和晶闸管 VT_1 的电流波形，变压器二次绕组电流有直流分量。
- ⊕ 晶闸管的电压波形，由 3 段组成。

● $\alpha = 30^\circ$ 的波形

特点：负载电流处于连续和断续之间的临界状态。

● $\alpha > 30^\circ$ 的情况

特点：负载电流断续，晶闸管导通角小于 120° 。



2.2.1 三相半波可控整流电路

● 整流电压平均值的计算

✦ $\alpha \leq 30^\circ$ 时，负载电流连续，有：

$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 \cos \alpha = 1.17U_2 \cos \alpha$$

当 $\alpha=0$ 时， U_d 最大，为 $U_d = U_{d0} = 1.17U_2$

○
✦ $\alpha > 30^\circ$ 时，负载电流断续，晶闸管导通角减小，
此时有：

$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_2 \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right] = 0.675 \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right]$$

2.2.1 三相半波可控整流电路

- U_d/U_2 随 a 变化的规律如图 2-15 中的曲线 1 所示

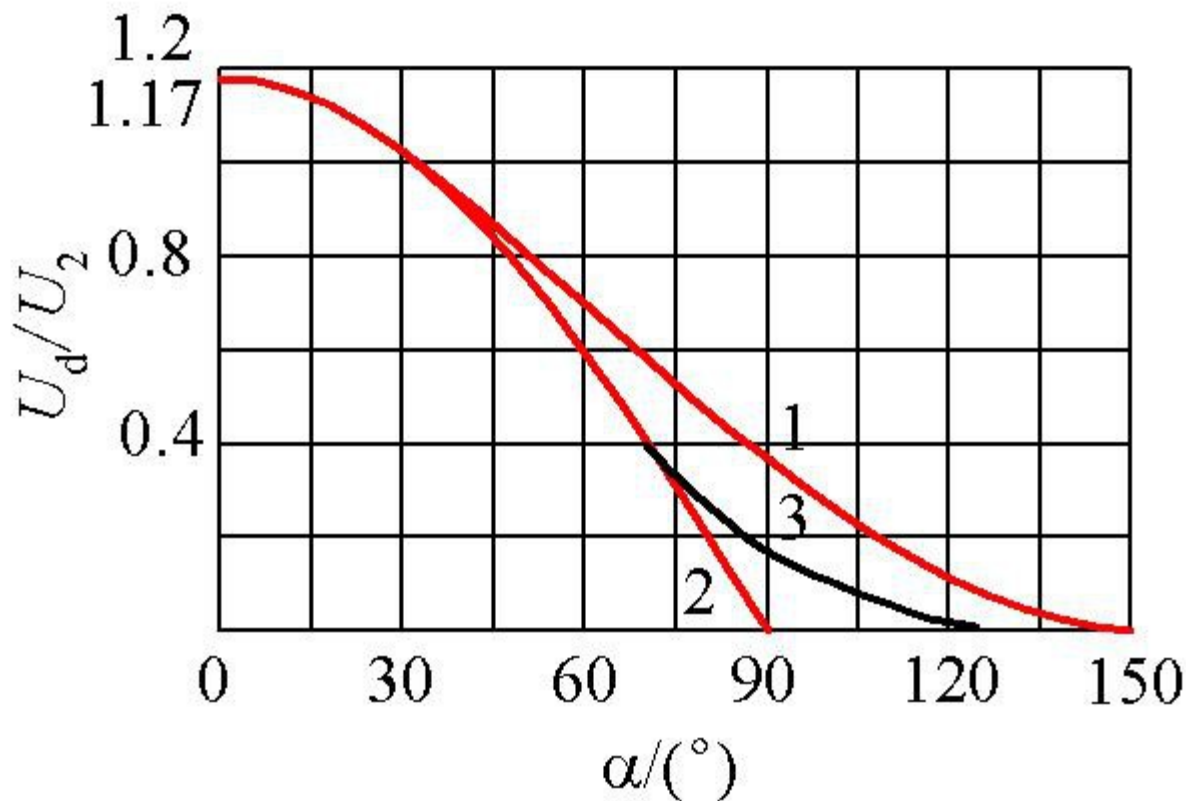


图 2-15 三相半波可控整流电路 U_d/U_2 随 a 变化的关系
1 - 电阻负载 2 - 电感负载 3 - 电阻电感负载

2.2.1 三相半波可控整流电路

- 负载电流平均值为

$$I_d = \frac{U_d}{R}$$

- 晶闸管承受的最大反向电压，为变压器二次线电压峰值，即

$$U_{RM} = \sqrt{2} \times \sqrt{3}U_2 = \sqrt{6}U_2 = 2.45U_2$$

- 晶闸管阳极与阴极间的最大正向电压等于变压器二次相电压的峰值，即

$$U_{FM} = \sqrt{2}U_2$$

2.2.1 三相半波可控整流电路

阻感负载

- 特点：阻感负载， L 值很大， i_d 波形基本平直。
- $\alpha \leq 30^\circ$ 时：整流电压波形与电阻负载时相同。
- $\alpha > 30^\circ$ 时（如 $\alpha = 60^\circ$ 时的波形如图 2-16 所示）。
 - ⊕ u_2 过零时， VT_1 不关断，直到 VT_2 的脉冲到来，才换流，—— u_d 波形中出现负的部分。
 - ⊕ i_d 波形有一定的脉动，但为简化分析及定量计算，可将 i_d 近似为一条水平线。
- 阻感负载时的移相范围为 90° 。

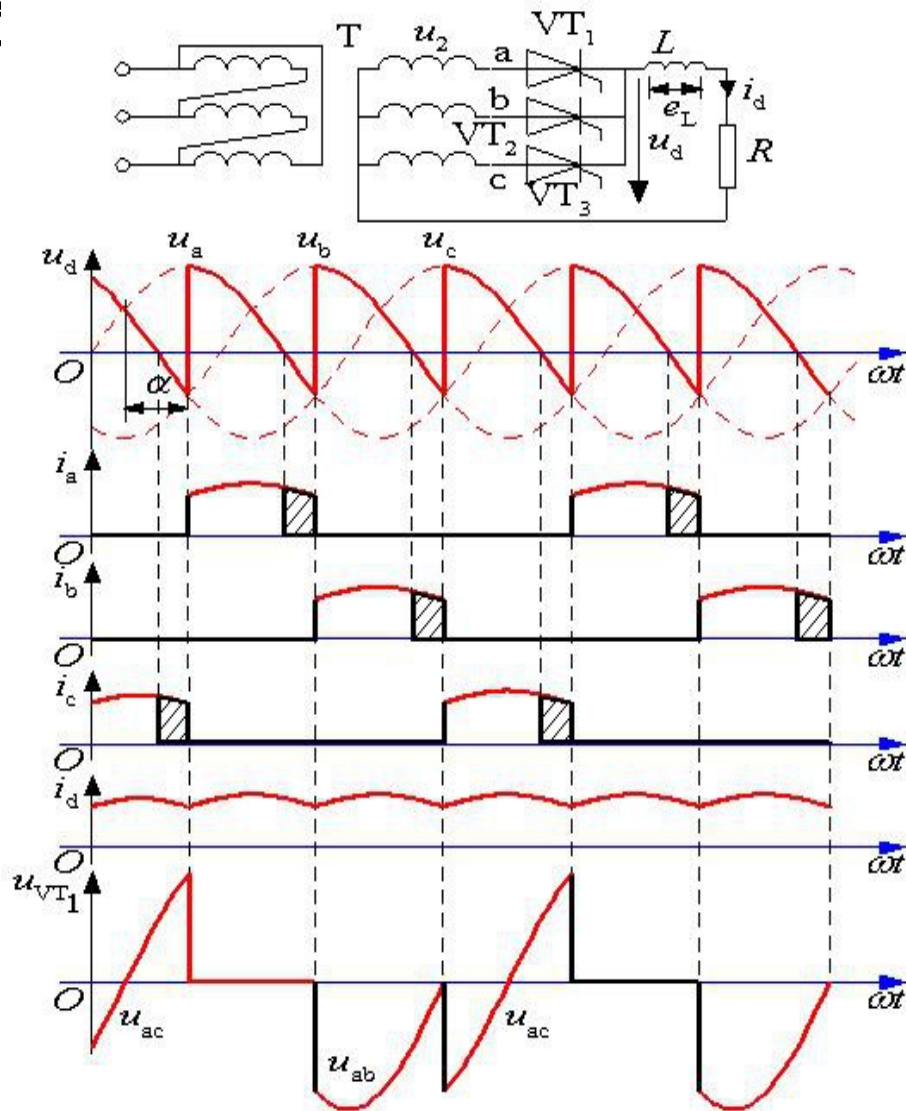


图 2-16 三相半波可控整流电路，阻感负载时的电路及 $\alpha = 60^\circ$ 时的波形

2.2.1 三相半波可控整流电路

数量关系

由于负载电流连续， U_d 可由式（2-18）求出，即

$$U_d = U_{d0} = 1.17U_2$$

U_d/U_2 与 α 成余弦关系，如图2-15中的曲线2所示。如果负载中的电感量不是很大， U_d/U_2 与 α 的关系将介于曲线1和2之间，曲线3给出了这种情况的一个例子。

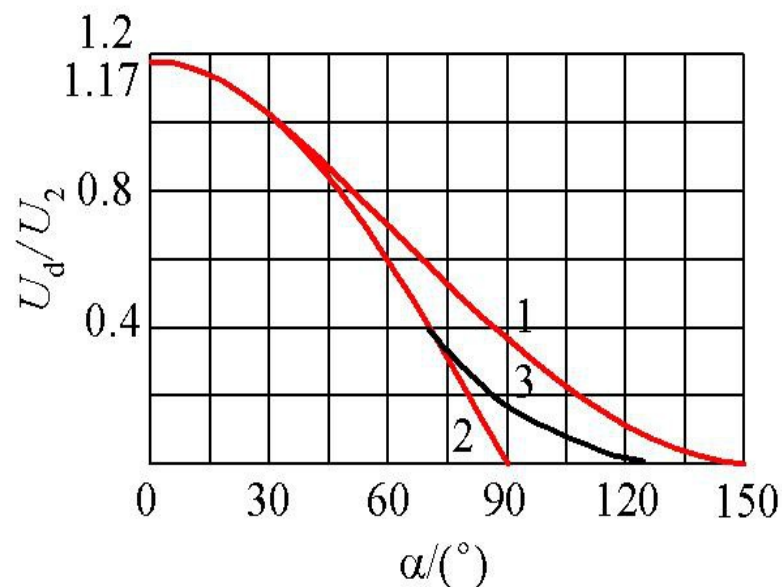


图2-15 三相半波可控整流电路 U_d/U_2 随 α 变化的关系

- 1 - 电阻负载
- 2 - 电感负载
- 3 - 电阻电感负载

2.2.1 三相半波可控整流电路

- ✦ 变压器二次电流即晶闸管电流的有效值为

$$I_2 = I_{VT} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d = 0.577I_d$$

- ✦ 晶闸管的额定电流为

$$I_{VT(AV)} = \frac{I_{VT}}{1.57} = 0.368I_d$$

- ✦ 晶闸管最大正、反向电压峰值均为变压器二次线电压峰值

$$U_{FM} = U_{RM} = 2.45U_2$$

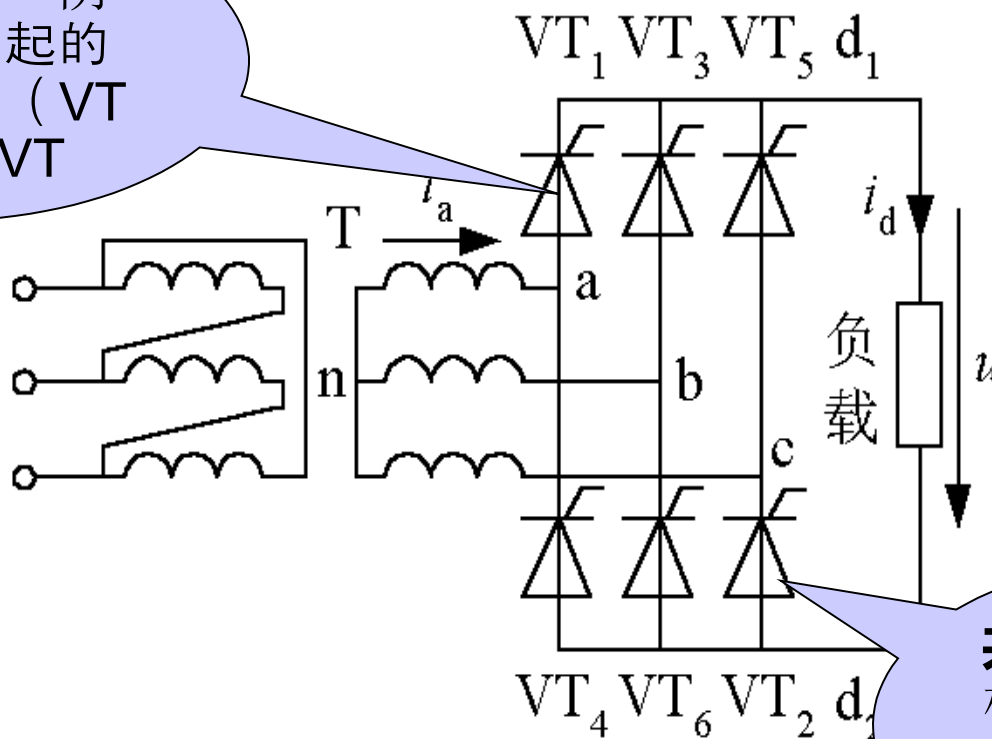
- ✦ 三相半波的主要缺点在于其变压器二次电流中含有直流分量，为此其应用较少。

2.2.2 三相桥式全控整流电路

- 三相桥是应用最为广泛的整流电路

共阴极组——阴极连接在一起的3个晶闸管 (VT₁, VT₃, VT₅)

1, 3, 5)



导通顺序：

VT₁ - VT₂
- VT₃ - VT₄
- VT₅ - VT₆

共阳极组——阳极连接在一起的3个晶闸管 (VT₄, VT₆, VT₂)

2)

图 2-17 三相桥式全控整流电路原理图

2.2.2 三相桥式全控整流电路

1) 带电阻负载时的工作情况

- 当 $\alpha \leq 60^\circ$ 时, u_d 波形均连续, 对于电阻负载, i_d 波形与 u_d 波形形状一样, 也连续

波形图: $\alpha = 0$ (图2-18)

$\alpha = 30^\circ$ (图2-19)

$\alpha = 60^\circ$ (图2-20)

- 当 $\alpha > 60^\circ$ 时, u_d 波形每 60° 中有一段为零, u_d 波形不能出现负值

波形图: $\alpha = 90^\circ$ (图2-21)

- 带电阻负载时三相桥式全控整流电路 α 角的移相范围是 120°

2.2.2 三相桥式全控整流电路

- 晶闸管及输出整流电压的情况如表 2 - 1 所示

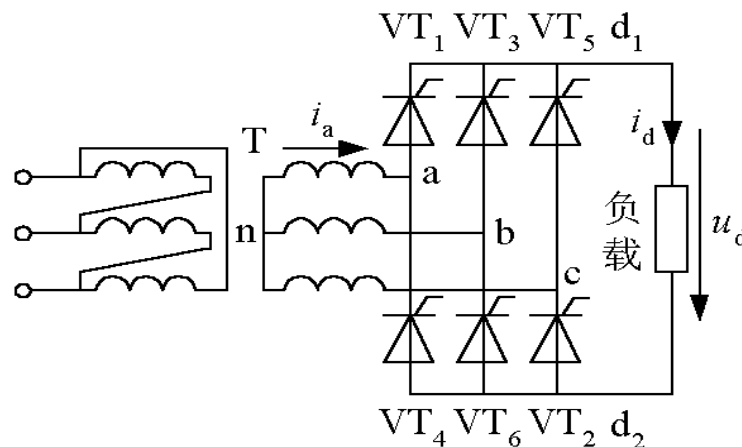
时 段	I	II	III	IV	V	VI
共阴极组中导通的晶闸管	VT ₁	VT ₁	VT ₃	VT ₃	VT ₅	VT ₅
共阳极组中导通的晶闸管	VT ₆	VT ₂	VT ₂	VT ₄	VT ₄	VT ₆
整流输出电压 u_d	$u_a - u_b$ $=u_{ab}$	$u_a - u_c$ $=u_{ac}$	$u_b - u_c$ $=u_{bc}$	$u_b - u_a$ $=u_{ba}$	$u_c - u_a$ $=u_{ca}$	$u_c - u_b$ $=u_{cb}$

- 请参照图 2 - 18

2.2.2 三相桥式全控整流电路

三相桥式全控整流电路的特点

(1) 2 管同时通形成供电回路，其中共阴极组和共阳极组各 1，且不能为同 1 相器件。



(2) 对触发脉冲的要求:

- 按 $VT_1-VT_2-VT_3-VT_4-VT_5-VT_6$ 的顺序，相位依次差 60° 。
- 共阴极组 VT_1 、 VT_3 、 VT_5 的脉冲依次差 120° ，共阳极组 VT_4 、 VT_6 、 VT_2 也依次差 120° 。
- 同一相的上下两个桥臂，即 VT_1 与 VT_4 ， VT_3 与 VT_6

2.2.2 三相桥式全控整流电路

三相桥式全控整流电路的特点

(3) u_d 一周期脉动 6 次，每次脉动的波形都一样，

故该电路为 6 脉波整流电路。

(4) 需保证同时导通的 2 个晶闸管均有脉冲

✦ 可采用两种方法：一种是宽脉冲触发

一种是双脉冲触发（常用）

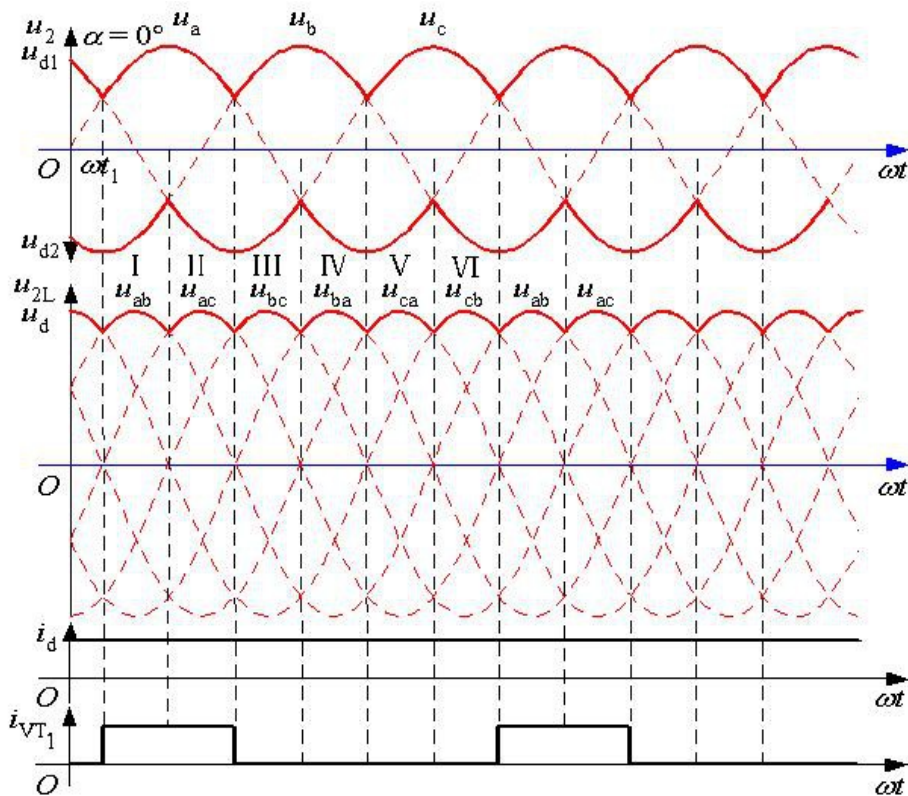
(5) 晶闸管承受的电压波形与三相半波时相同，晶

闸管承受最大正、反向电压的关系也相同。

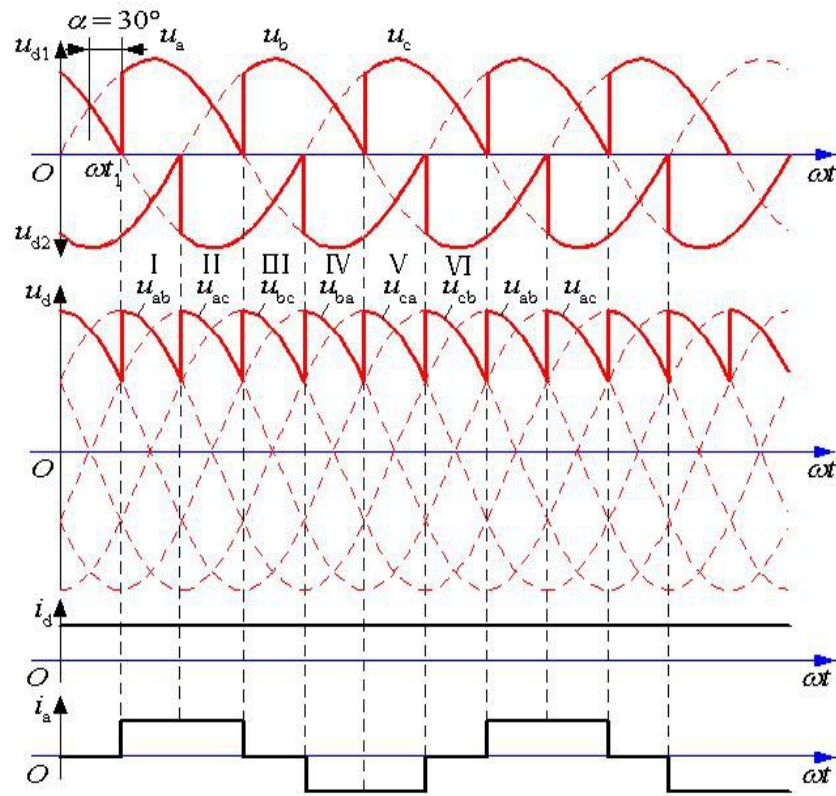
2.2.2 三相桥式全控整流电路

2) 阻感负载时的工作情况

■ $\alpha \leq 60^\circ$ 时 当电感足够大的时候, i_d 的波形可近似为一条水平线



$\alpha = 0^\circ$



$\alpha = 30^\circ$

2.2.2 三相桥式全控整流电路

2) 阻感负载时的工作情况

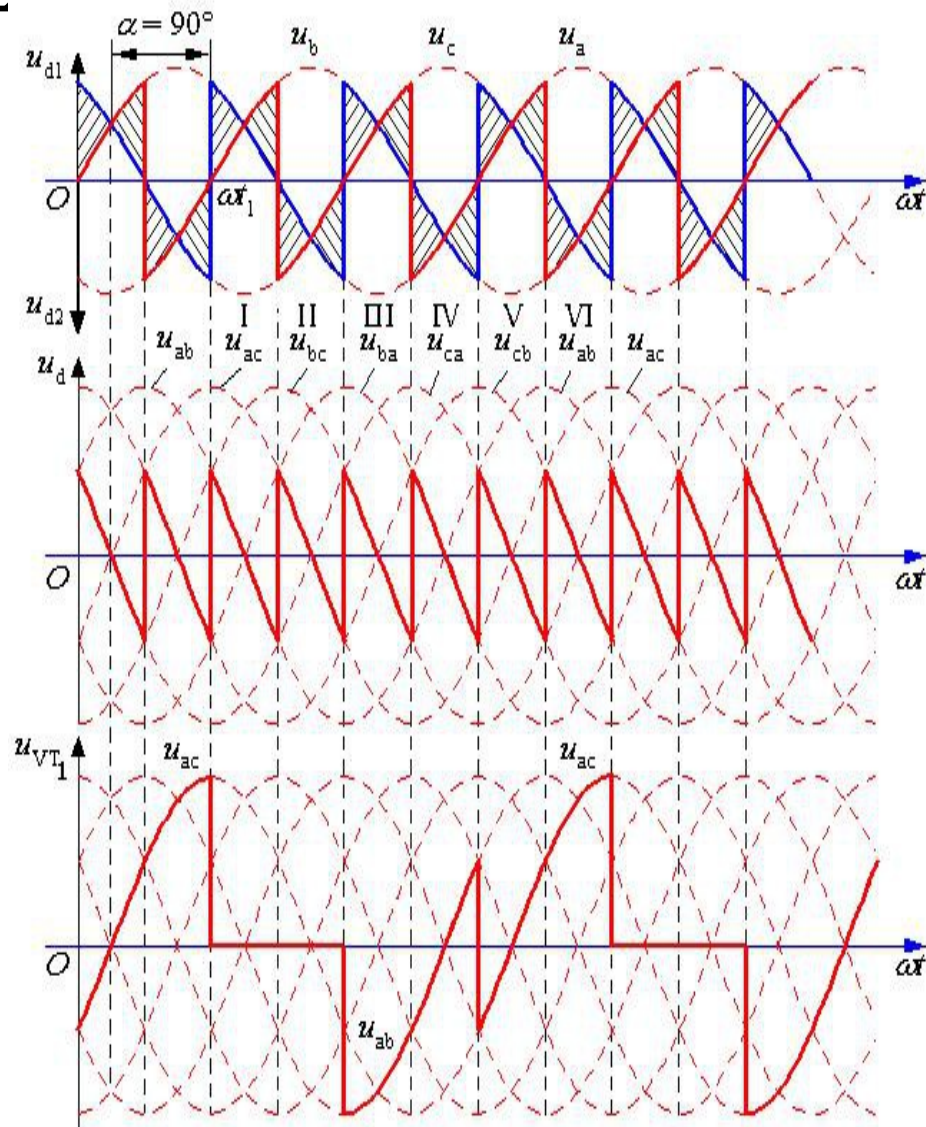
● $\alpha > 60^\circ$ 时 ($\alpha = 90^\circ$)

⊕ 阻感负载时的工作情况与电阻负载时不同。

电阻负载时, u_d 波形不会出现负的部分。

阻感负载时, u_d 波形会出现负的部分。

● 带阻感负载时, 三相桥式全控整流电路的 α 角移相范围为 90° 。



2.2.2 三相桥式全控整流电路

3) 定量分析

- 当整流输出电压连续时（即带阻感负载时，或带电阻负载 $\alpha \leq 60^\circ$ 时）的平均值为：

$$U_d = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34U_2 \cos \alpha$$

- 带电阻负载且 $\alpha > 60^\circ$ 时，整流电压平均值为：

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\pi} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34U_2 \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right]$$

输出电流平均值为： $I_d = U_d / R$

2.2.2 三相桥式全控整流电路

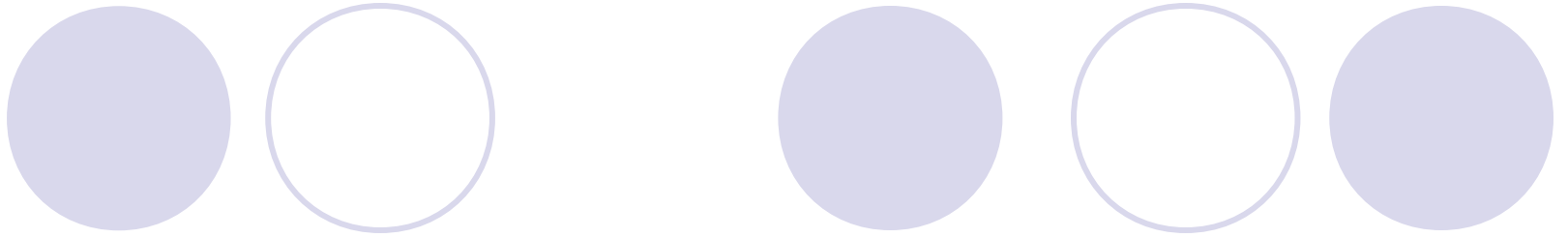
- 当整流变压器为图 2-17 中所示采用星形接法，带阻感负载时，变压器二次侧电流波形如图 2-23 中所示，其有效值为：

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(I_d^2 \times \frac{2}{3} \pi + (-I_d)^2 \times \frac{2}{3} \pi \right)} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0.816 I_d$$

- 晶闸管电压、电流等的定量分析与三相半波时一致。
- 接反电势阻感负载时，在负载电流连续的情况下，电路工作情况与电感性负载时相似，电路中各处电压、电流波形均相同。
- 仅在计算 I_d 时有所不同，接反电势阻感负载时的 I_d 为：

$$I_d = \frac{U_d - E}{R}$$

式中 R 和 E 分别为负载中的电阻值和反电动势的值。



2.4 电容滤波的不可控整流电路

2.4.1 电容滤波的单相不可控整流电路

2.4.2 电容滤波的三相不可控整流电路

2.4 电容滤波的不可控整流电路

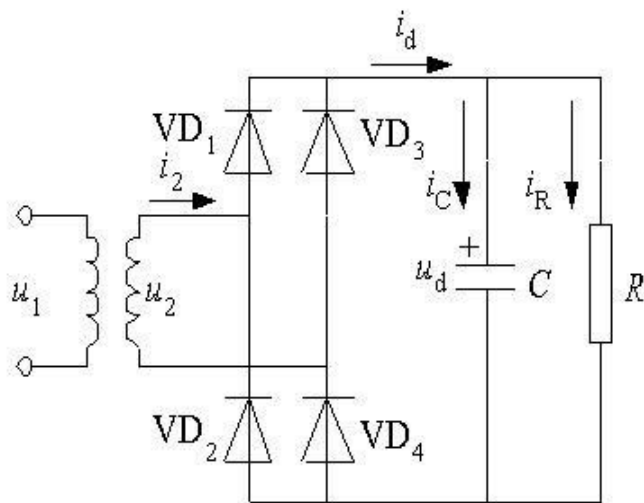
- 在交—直—交变频器、不间断电源、开关电源等应用场合中，大量应用。
- 最常用的是单相桥和三相桥两种接法。
- 由于电路中的电力电子器件采用整流二极管，故也称这类电路为二极管整流电路。

2.4.1 电容滤波的单相不可控整流电路

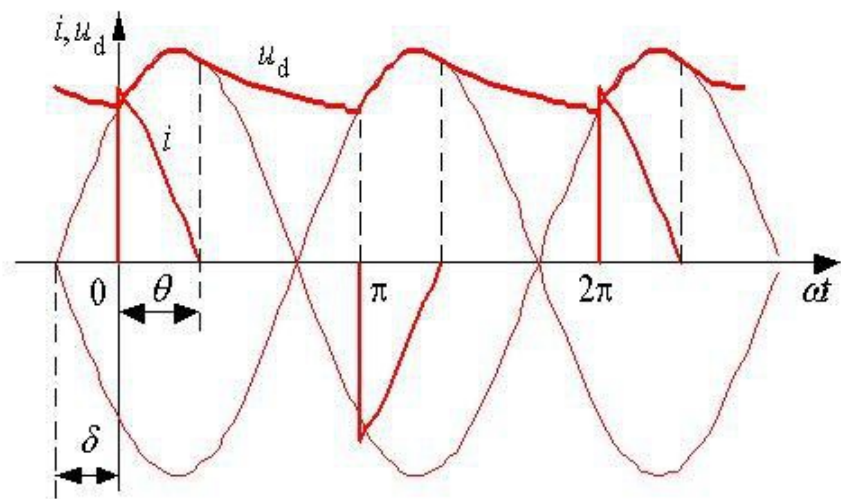
1) 工作原理及波形分析

●基本工作过程：

- ⊕ 在 u_2 正半周过零点至 $\omega t=0$ 期间，因 $u_2 < u_d$ ，故二极管均不导通，电容 C 向 R 放电，提供负载所需电流。
- ⊕ 至 $\omega t=0$ 之后， u_2 将要超过 u_d ，使得 VD_1 和 VD_4 开通， $u_d = u_2$ ，交流电源向电容充电，同时向负载 R 供电。



a) 电路



b) 波形

图 2-26 电容滤波的单相桥式不可控整流电路及其工作波形

2.4.1 电容滤波的单相不可控整流电路

2) 主要的数量关系

● 输出电压平均值

✦ 空载时, $U_d = \sqrt{2}U_2$

✦ 重载时, U_d 逐渐趋近于 $0.9U_2$, 即趋近于接近电阻负载时的特性。
 $RC \geq (3 \sim 5)T / 2$

✦ 在设计时根据负载的情况选择电容 **C** 值, 使
此时输出电压为: $U_d \approx 1.2 U_2$ 。

● 电流平均值

✦ 输出电流平均值 I_R 为: $I_R = U_d / R$

✦ 二极管电流 i_D 平均值为: $I_d = I_R$
 $I_D = I_d / 2 = I_R / 2$

● 二极管承受的电压

2.4.1 电容滤波的单相不可控整流电路

感容滤波的二极管整流电路

- 实际应用中，分析复杂。
- u_d 波形更平直，电流 i_2 的上升段平缓了许多，这对于电路的工作是有利的。

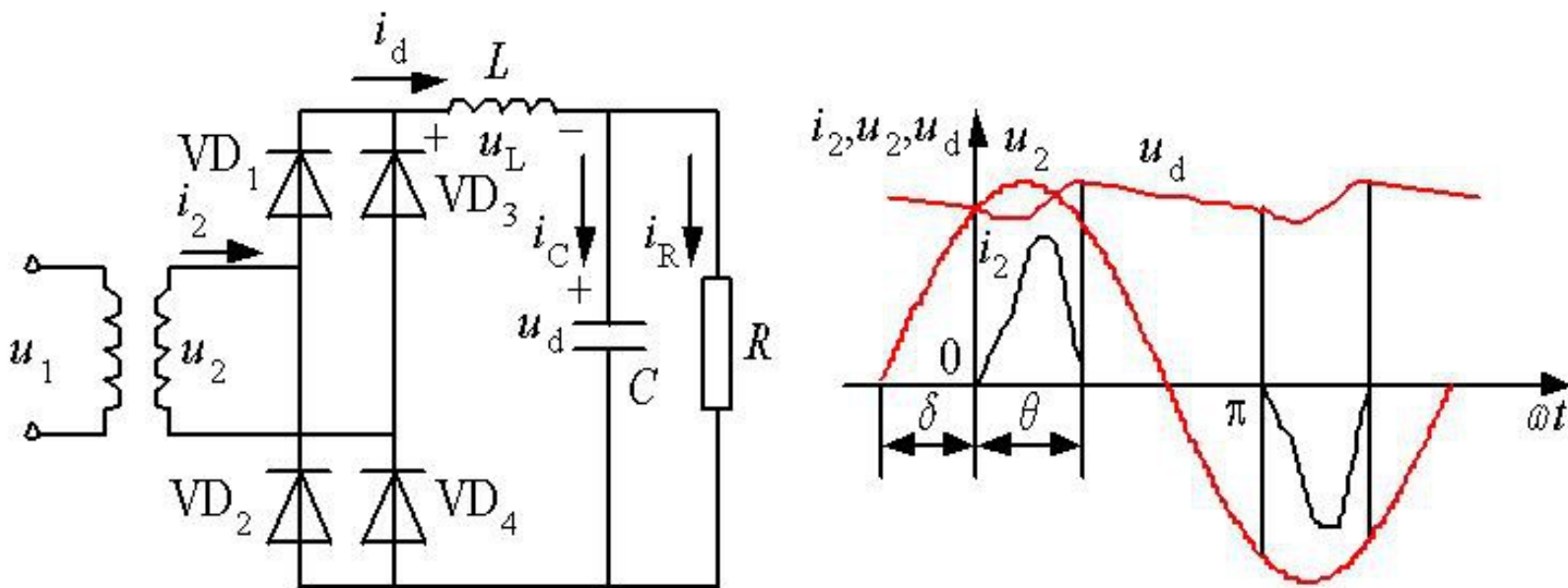


图 2-29 感容滤波的单相桥式不可控整流电路及其工作波形

a) 电路图

b) 波形

2.4.2 电容滤波的三相不可控整流电路

1) 基本原理

- 某一对二极管导通时，输出电压等于交流侧线电压中最大的一个，该线电压既向电容供电，也向负载供电。
- 当没有二极管导通时，由电容向负载放电， u_d 按指数规律下降。

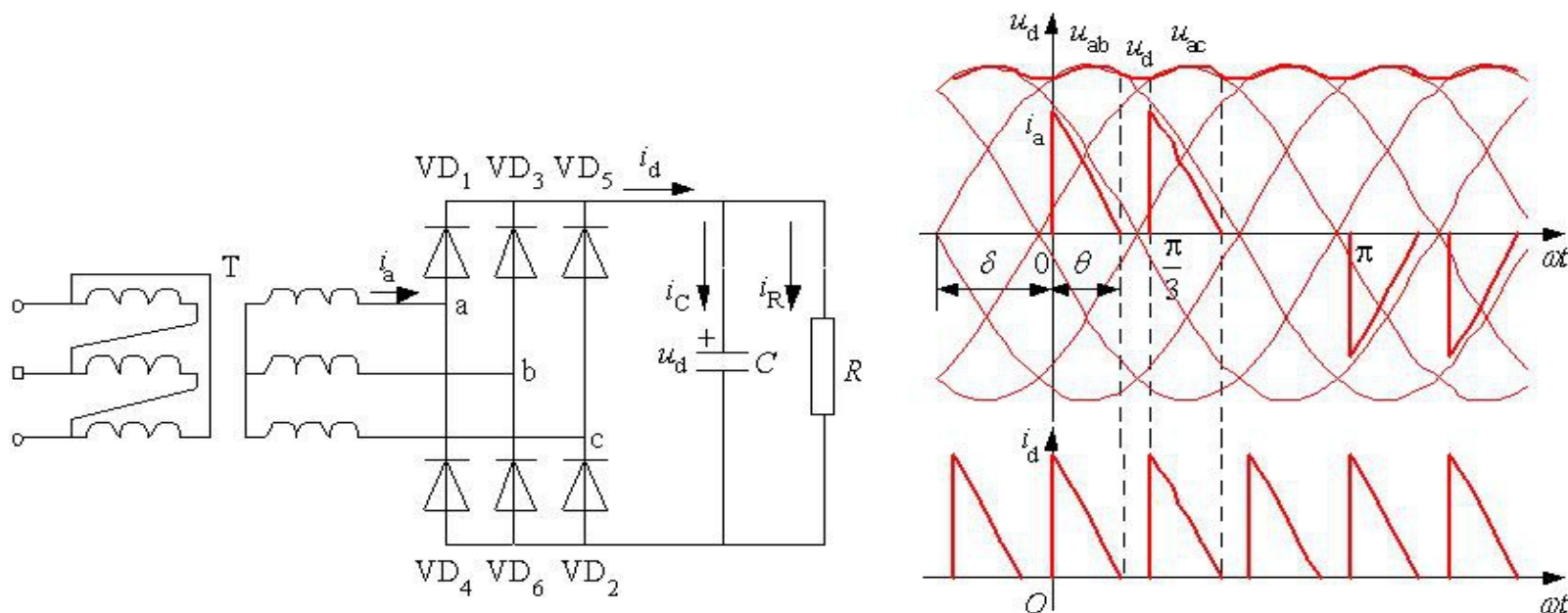


图 2-30 电容滤波的三相桥式不可控整流电路及其波形



2.6 大功率可控整流电路

2.6.1

带平衡电抗器的双反星形可控整流电

2.6.2 多重化整流电路

2.6 大功率可控整流电路 · 引言

- 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路的特点：
 - ✦ 适用于低电压、大电流的场合。
- 多重化整流电路的特点：
 - ✦ 在采用相同器件时可达到更大的功率。
 - ✦ 可减少交流侧输入电流的谐波或提高功率因数，从而减小对供电电网的干扰。

2.6.1 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路

● 电路结构的特点

- ⊕ 二次侧为两组匝数相同极性相反的绕组，分别接成两组三相半波电路。
- ⊕ 二次侧两绕组的极性相反可消除铁芯的直流磁化。
- ⊕ 平衡电抗器是为保证两组三相半波整流电路能同时导电。
- ⊕ 与三相桥式电路相比，双反星形电路的输出电流可大一倍。

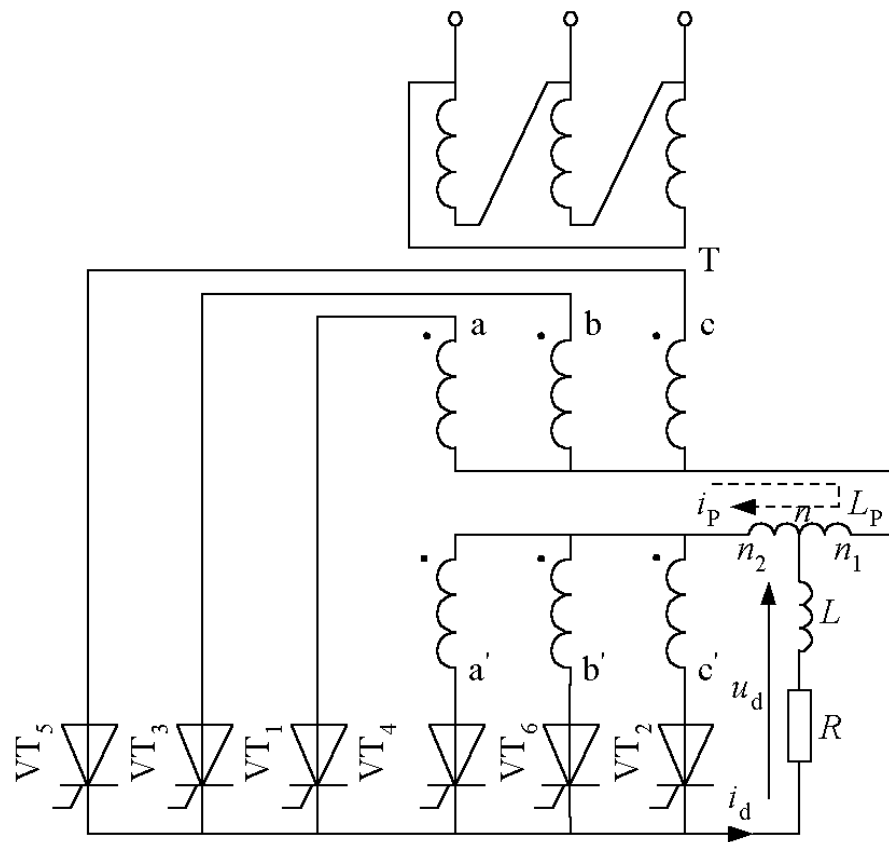


图 2-35 带平衡电抗器的
双反星形可控整流电路

2.6.1 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路

绕组的极性相反的目的：**消除直流磁通势**

- 如图可知，虽然两组相电流的瞬时值不同，但是平均电流相等而绕组的极性相反，所以直流安匝互相抵消。

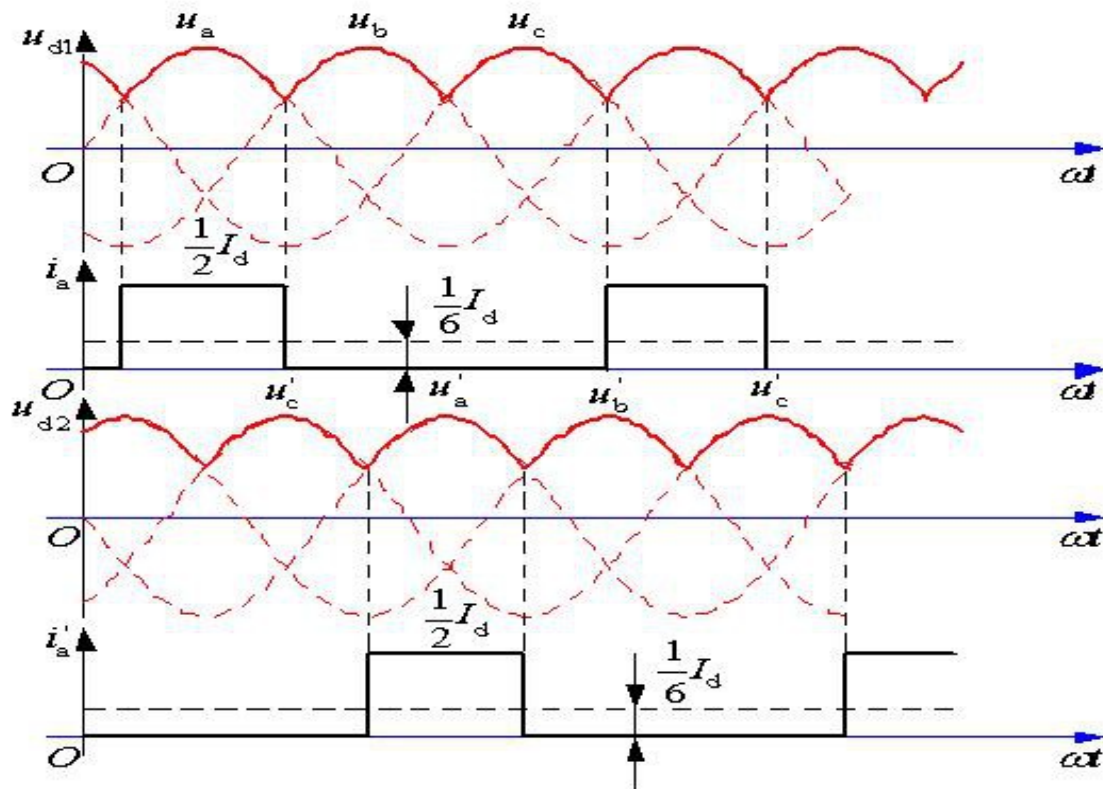


图 2-36 双反星形电路， $\alpha = 0^\circ$ 时两组整流电压、电流波形

2.6.1 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路

- 双反星形电路中如不接平衡电抗器，即成为六相半波整流电路：
- **平衡电抗器的作用：**
 - ⊕ 使得两组三相半波整流电路同时导电。
- 对平衡电抗器作用的理解是掌握双反星形电路原理的关键。

2.6.1 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路

原理分析 (续):

✦ 虽然 $u_{d1} < u_{d2}$ ，但由于 L_p 的平衡作用，使得晶闸管 VT_6 和 VT_1 同时导通。

✦ 时间推迟至 u_b' 与 u_a 的交点时，
 $u_b' = u_a$ ， $u_p = 0$ 。

✦ 之后 $u_b' < u_a$ ，则流经 u_b' 相的电流要减小，但 L_p 有阻止此电流减小的作用， u_p 的极性反向， L_p 仍起平衡的作用，使 VT_6 继续导电。

✦ 直到 $u_c' > u_b'$ ，电流才从 VT_6 换至 VT_2 。此时 VT_1 、 VT_2 同时导电。

✦ 每一组中的每一个晶闸管仍按三相

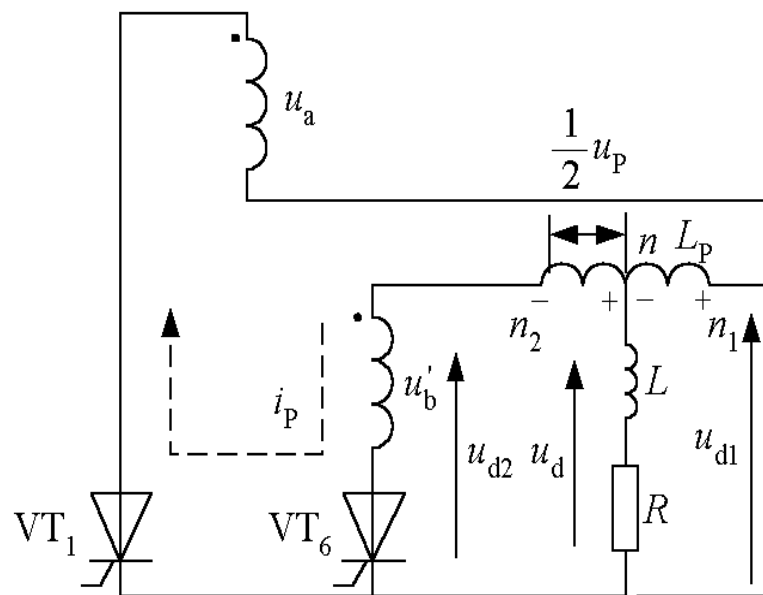


图 2-38 平衡电抗器作用下两个晶闸管同时导电的情况



2.7 整流电路的有源逆变工作状态

2.7.1 逆变的概念

2.7.2 三相桥整流电路的有源逆变工作状态

2.7.3 逆变失败与最小逆变角的限制

2.7.1 逆变的概念

1) 什么是逆变？为什么要逆变？

- 逆变（Invertion）——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，将在后面介绍。

- 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**。

2.7.1 逆变的概念

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。

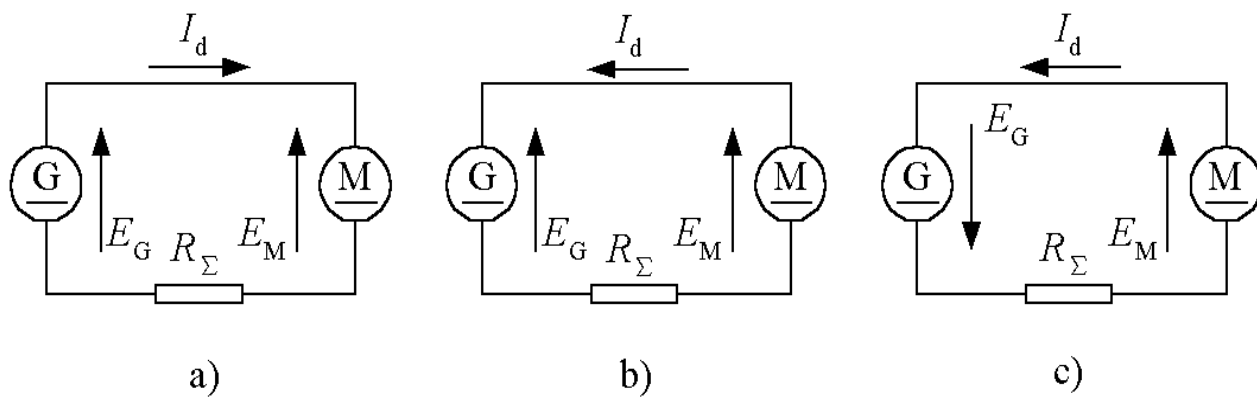


图 2-44 直流发电机—电动机之间电能的流转

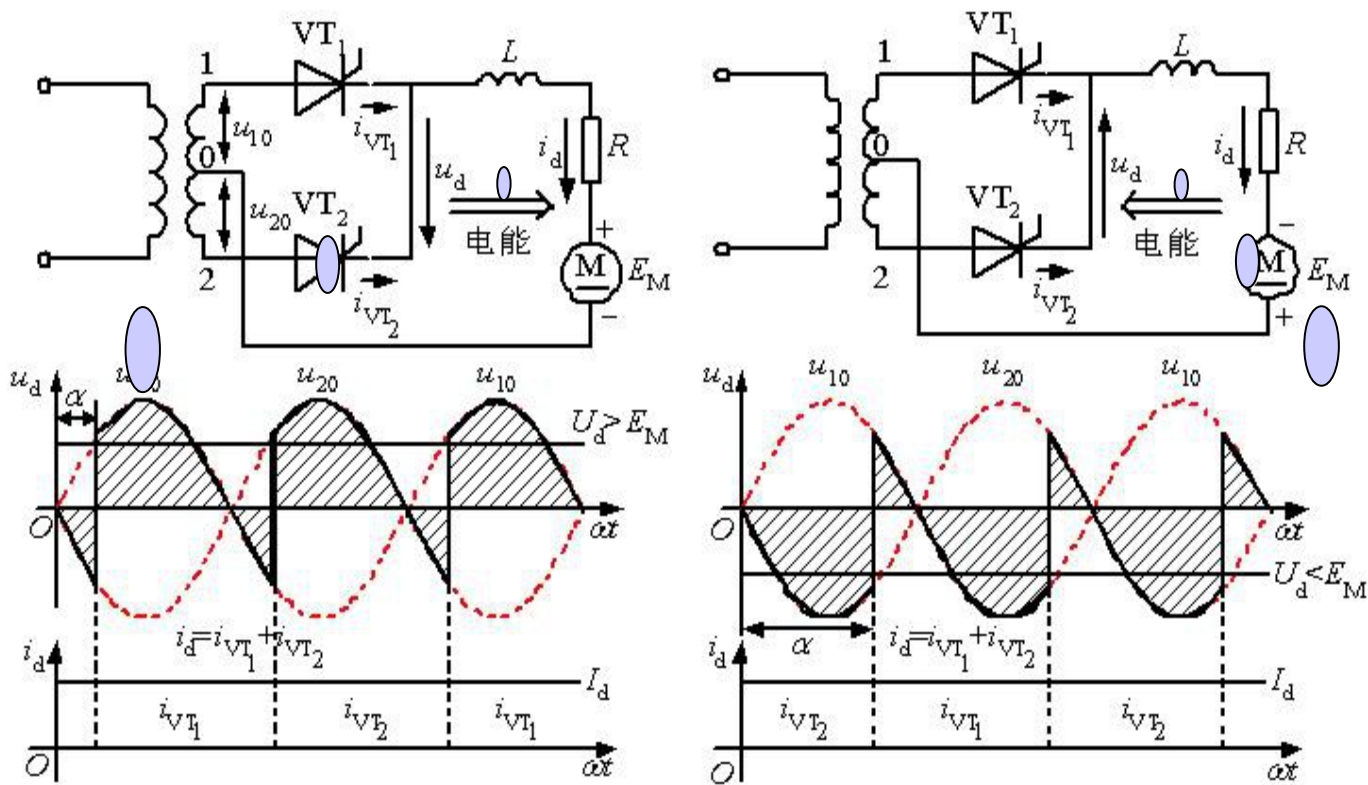
a) 两电动势同极性 $E_G > E_M$

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

2.7.1 逆变的概念

3) 逆变产生的条件

- 单相全波电路代替上述发电机



交流电网输出功率

电动机输出功率

图 2-45 单相全波电路的整流和逆变

2.7.1 逆变的概念

- 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。

2.7.2 三相桥整流电路的有源 逆变工作状态

- 逆变和整流的区别：控制角 α 不同
 - ⊕ $0 < \alpha < \pi/2$ 时，电路工作在整流状态。
 - ⊕ $\pi/2 < \alpha < \pi$ 时，电路工作在逆变状态。
- 可沿用整流的办法来处理逆变时有关波形与参数计算等各项问题。
 - ⊕ 把 $\alpha > \pi/2$ 时的控制角用 $\pi - \alpha = \beta$ 表示， β 称为**逆变角**。
 - ⊕ 逆变角 β 和控制角 α 的计量方向相反，其大小自 $\beta = 0$ 的起始点**向左方**计量。

2.7.3 逆变失败与最小逆变角的限制

● 逆变失败（逆变颠覆）

逆变时，一旦换相失败，外接直流电源就会通过晶闸管电路**短路**，或使变流器的输出平均电压和直流电动势变成**顺向串联**，形成很大**短路电流**。

1) 逆变失败的原因

- 触发电路工作不可靠，不能适时、准确地给各晶闸管分配脉冲，如脉冲丢失、脉冲延时等，致使晶闸管不能正常换相。
- 晶闸管发生故障，该断时不断，或该通时不通。
- 交流电源缺相或突然消失。
- 换相的裕量角不足，引起换相失败。

本章小结

- 1) 可控整流电路，重点掌握：电力电子电路作为分段线性电路进行分析的基本思想、单相全控桥式整流电路和三相全控桥式整流电路的原理分析与计算、各种负载对整流电路工作情况的影响；
- 2) 电容滤波的不可控整流电路的工作情况，重点了解其工作特点；
- 3) 与整流电路相关的一些问题，包括：
 - (1) 变压器漏抗对整流电路的影响，重点建立换相压降、重叠角等概念，并掌握相关的计算，熟悉漏抗对整流电路工作情况的影响。
 - (2) 整流电路的谐波和功率因数分析，重点掌握谐波的概念、各种整流电路产生谐波情况的定性分析，功率因数分析的特点、各种整流电路的功率因数分析。

本章小结

- 4) 大功率可控整流电路的接线形式及特点，熟悉双反星形可控整流电路的工作情况，建立整流电路多重化的概念。
- 5) 可控整流电路的有源逆变工作状态，重点掌握产生有源逆变的条件、三相可控整流电路有源逆变工作状态的分析计算、逆变失败及最小逆变角的限制等。
- 6) 晶闸管直流电动机系统的工作情况，重点掌握各种状态时系统的特性，包括变流器的特性和电机的机械特性等，了解可逆电力拖动系统的工作情况，建立环流的概念。
- 7) 用于晶闸管的触发电路。重点熟悉锯齿波移相的触发电路的原理，了解集成触发芯片及其组成的三相桥式全控整流电路的触发电路，建立同步的概念，掌握同步电压信号的选取方法。

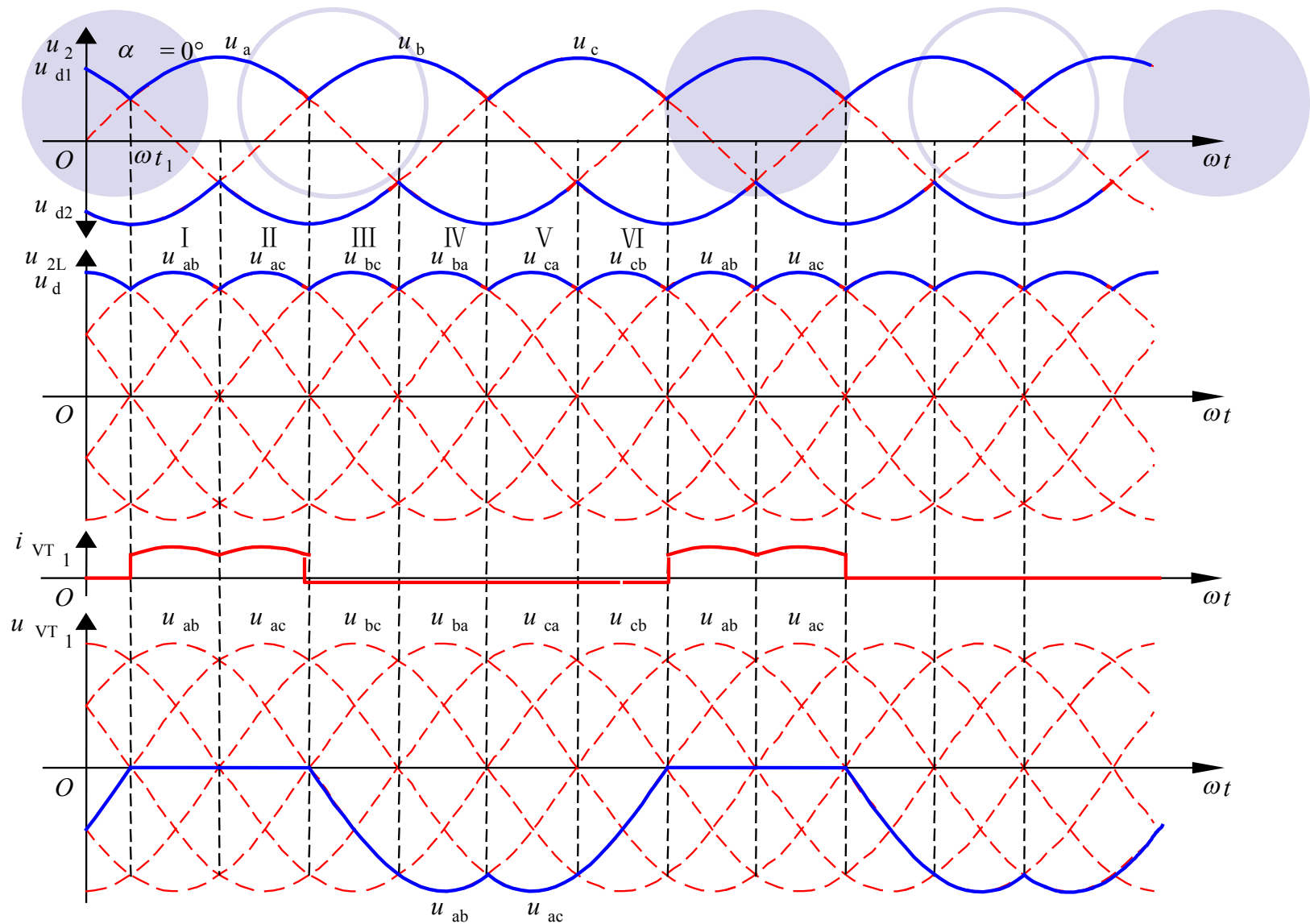


图 2-18 三相桥式全控整流电路带电阻负载 $\alpha=0^\circ$ 时的波形

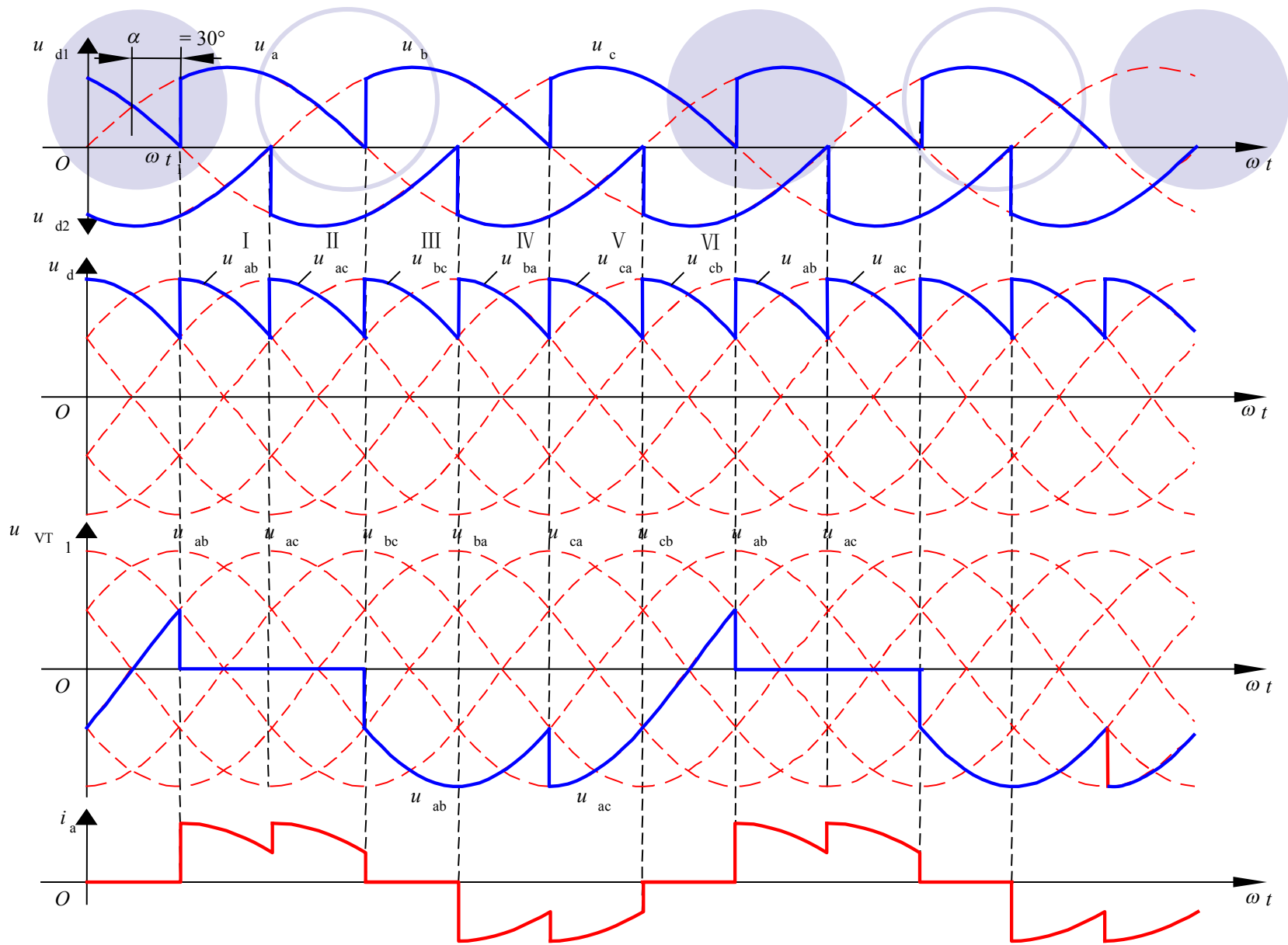


图 2-19 三相桥式全控整流电路带电阻负载 $\alpha = 30^\circ$ 时的波形

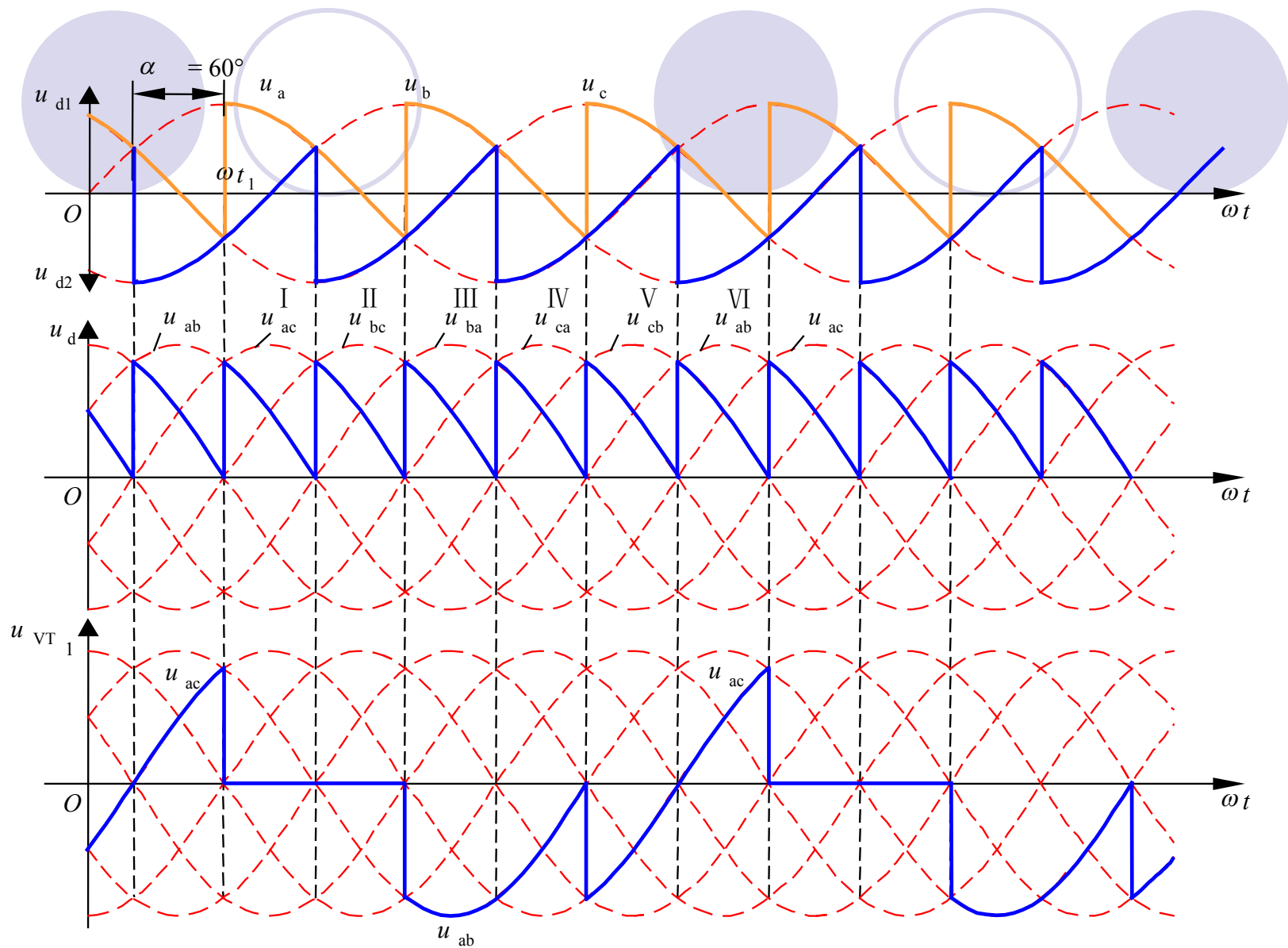


图 2-20 三相桥式全控整流电路带电阻负载 $\alpha = 60^\circ$ 时的波形

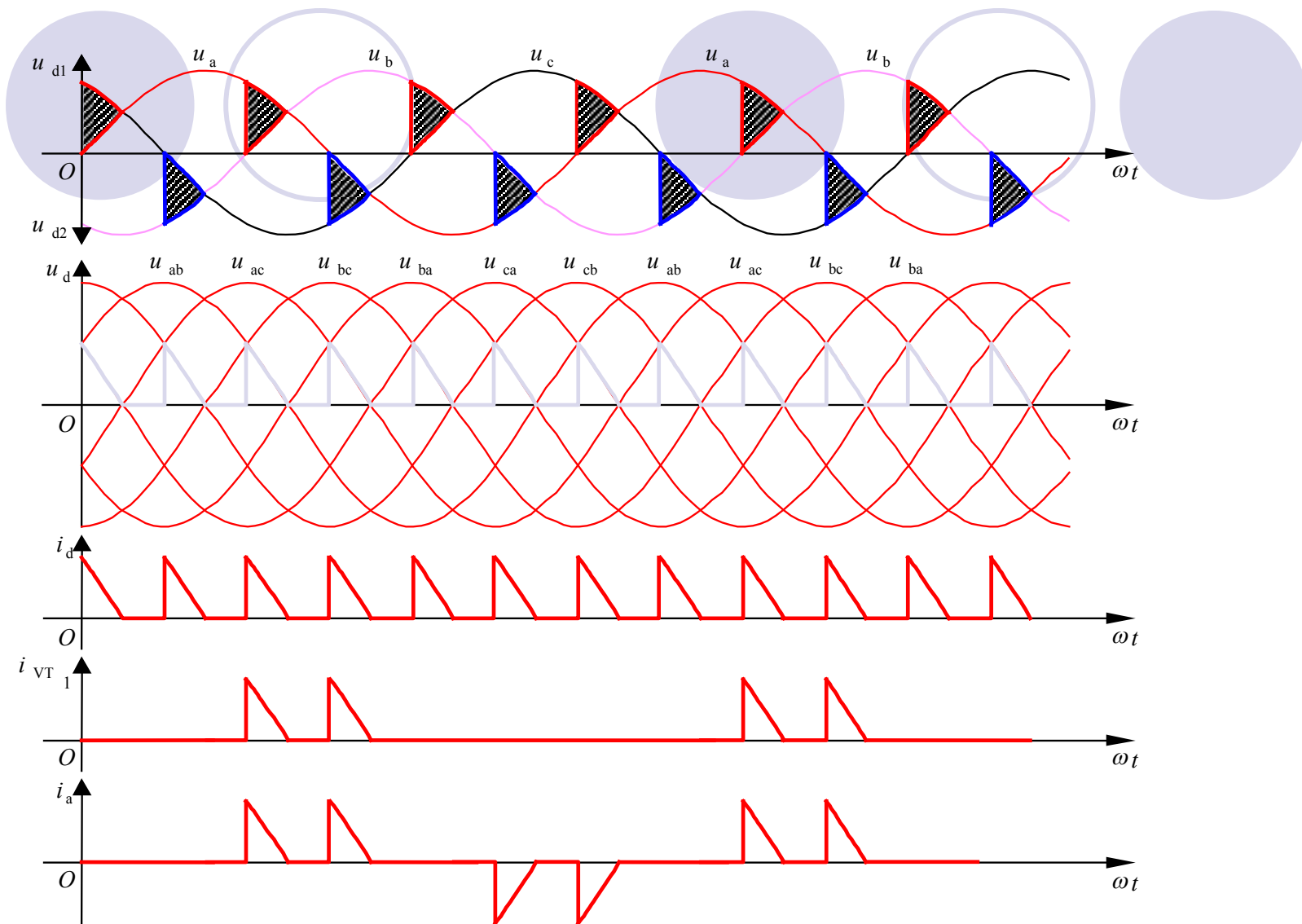
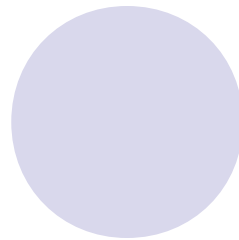
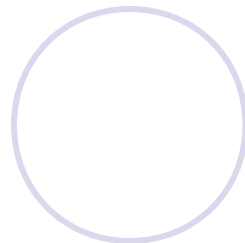
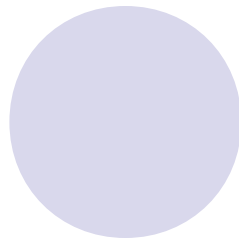
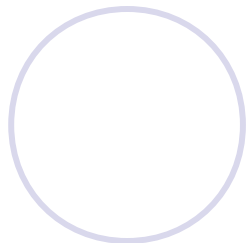
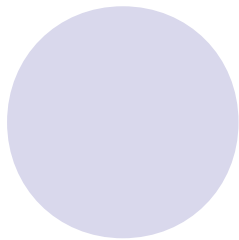


图 2-21 三相桥式全控整流电路带电阻负载 $\alpha = 90^\circ$ 时的波形



再见