

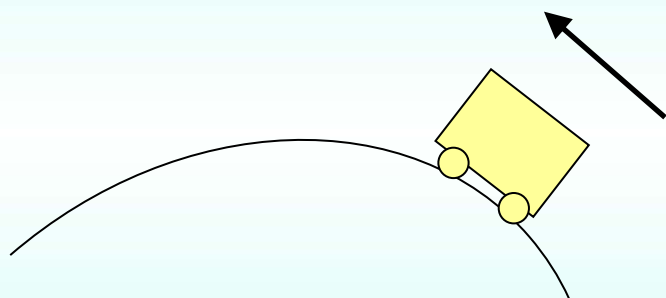
第4章 有源逆变电路与PWM整流电路



□ 电力机车

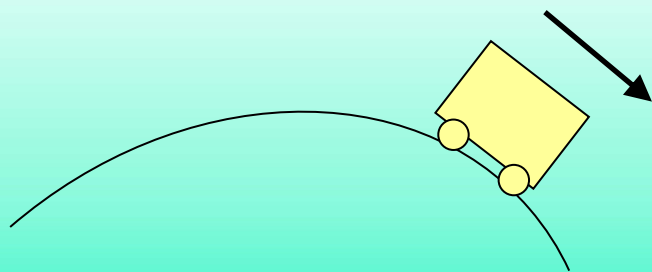
• 上坡

电能 $\xrightarrow{\text{电动机}}$ 位能



• 下坡

位能 $\xrightarrow{\text{发电机}}$ 电能 \longrightarrow 电网



4.1 有源逆变电路

- 将交流电变换为直流电供给负载的晶闸管可控整流电路，在实际应用中，常常有与整流过程相反的要求，即需要利用晶闸管整流电路将直流电变换为交流电。
- 这种把直流电转变成交流电的过程，称为**逆变**，把直流电变换成交流电的电路称为**逆变电路**。
- 同一套晶闸管变流电路，既可工作在整流状态，也可工作在逆变状态。

4.1 有源逆变电路

- 直流电通过逆向变换所得到的交流电不是反馈回交流电网，而是直接供给负载，即其输出的交流侧没有交流电源，直流电逆变为某一频率或可调频率的交流电供给负载，这种逆变称为**无源逆变**。
- 如果逆变出的交流电反馈回电网则成为**有源逆变**。

4.1 有源逆变电路

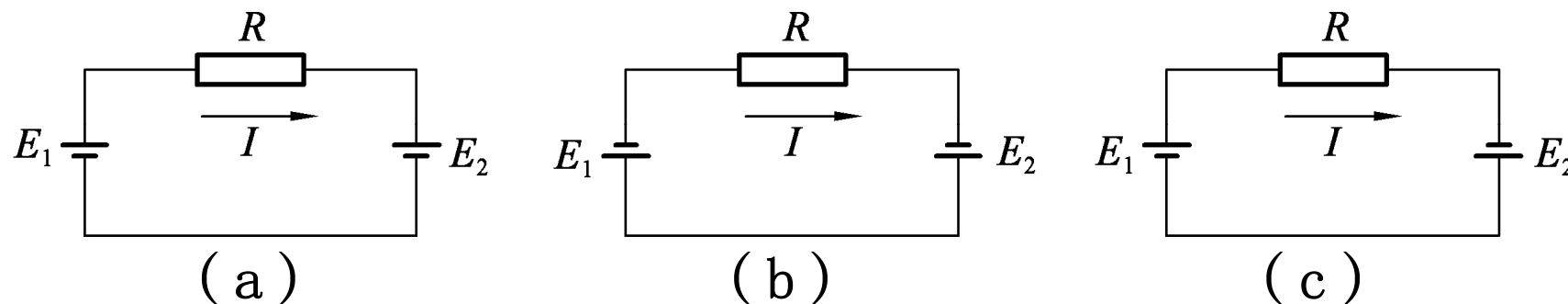


图4.1 两个电源能量的转换

图 4.1 (a) 中，直流电源 E_1 与 E_2 同极性连接，且 $E_1 > E_2$ ，回路中电流为

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R} > 0$$

电源 E_1 输出电能，电阻 R 消耗电能，电源 E_2 吸收电能。

4.1 有源逆变电路

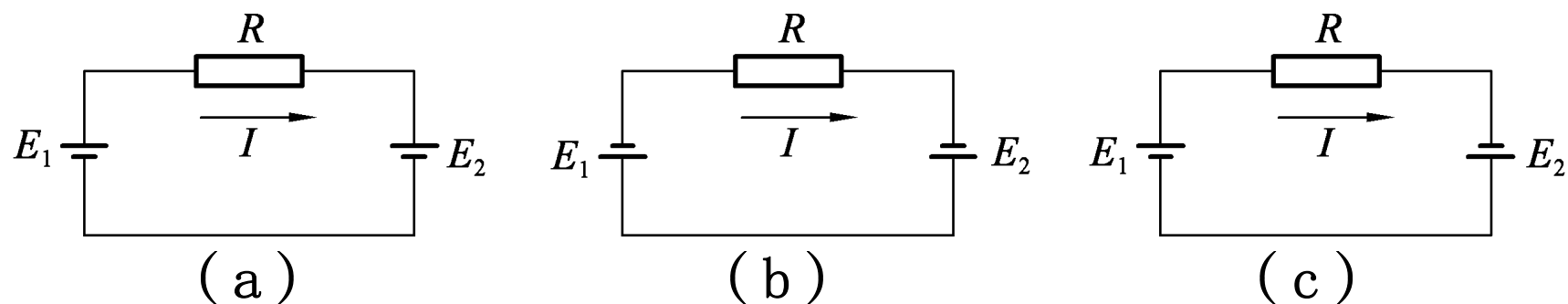


图4.1 两个电源能量的转换

□ 图4.1 (b) 中，直流电源 E_1 与 E_2 仍为同极性连接，但 $E_2 > E_1$ ，则回路中电流方向不变，其值为

$$I = \frac{E_2 - E_1}{R} > 0$$

□ 此时，电源 E_2 输出电能，而 E_1 吸收电能。

4.1 有源逆变电路

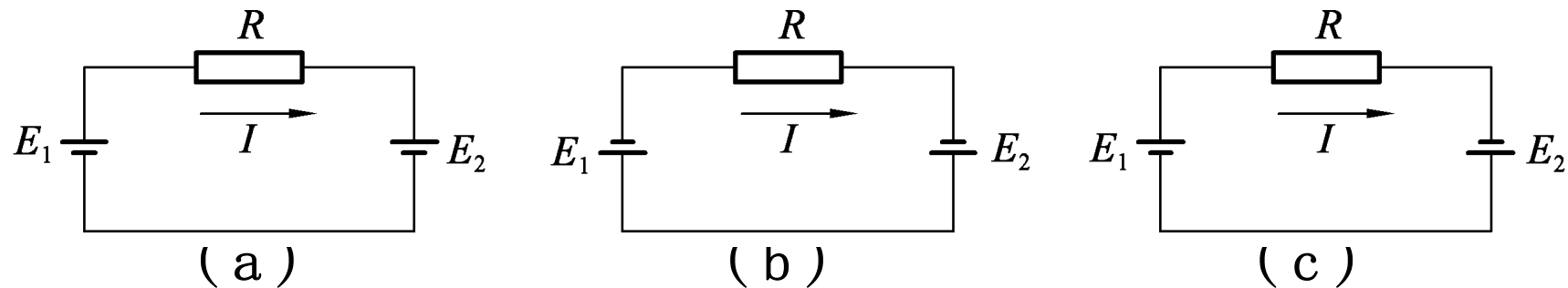


图4.1 两个电源能量的转换

□ 图4.1 (c) 中, E_1 、 E_2 反极性连接, 电路中电流为

$$I = (E_1 + E_2) / R$$

□ 此时, E_1 、 E_2 均输出电能, 全部消耗在电阻 R 上, 但由于电源内阻很小, 导致电路中电流很大, 相当于两个电源短路, 所以实际运用中决不允许出现这种情况。

4.1 有源逆变电路

结论

- ① 两个电源同极性连接时，电流从高电势电源流向低电势电源，电流的大小取决于两电源电势之差和回路总电阻。
- ② 电流从电源的正极流出者，该电源输出电能；而电流从电源的正极流入者，该电源吸收电能，其输出或吸收的功率由电势与电流的乘积决定，若电势或电流方向改变，电能的传递方向也将改变。
- ③ 两个电源反极性连接时，若电路总电阻很小，则形成电源间短路，应予以避免。

4.1.1 有源逆变产生的条件

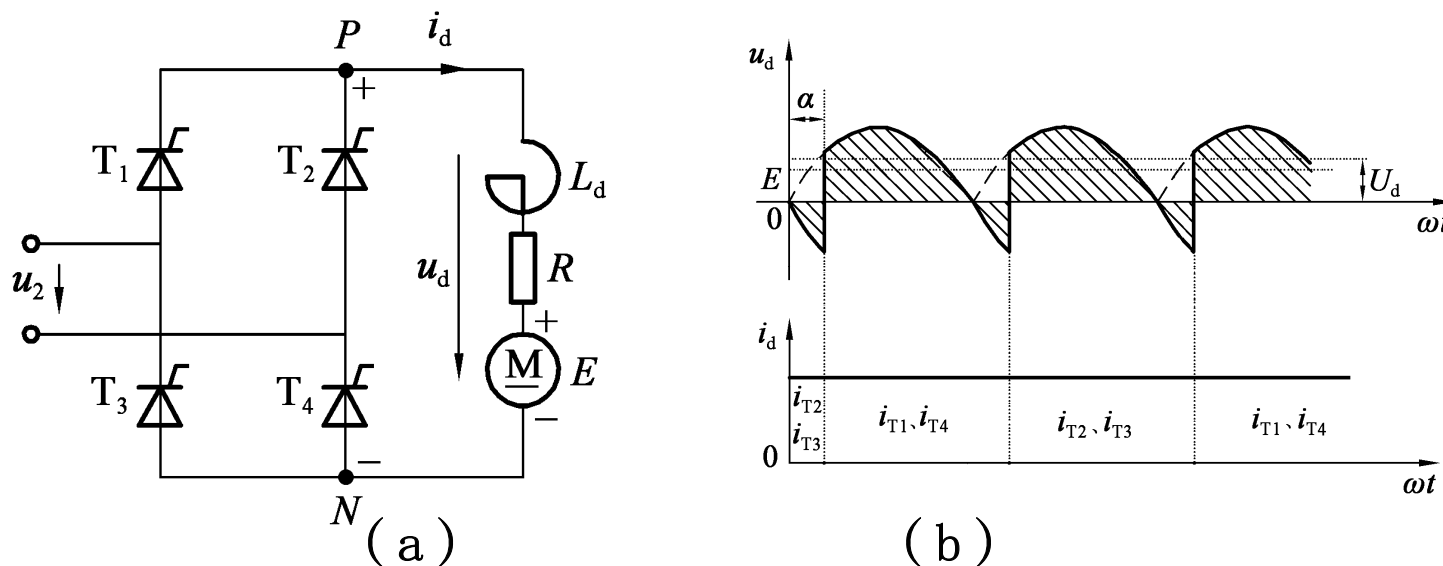


图4.2 晶闸管-直流电动机系统的两种工作状态

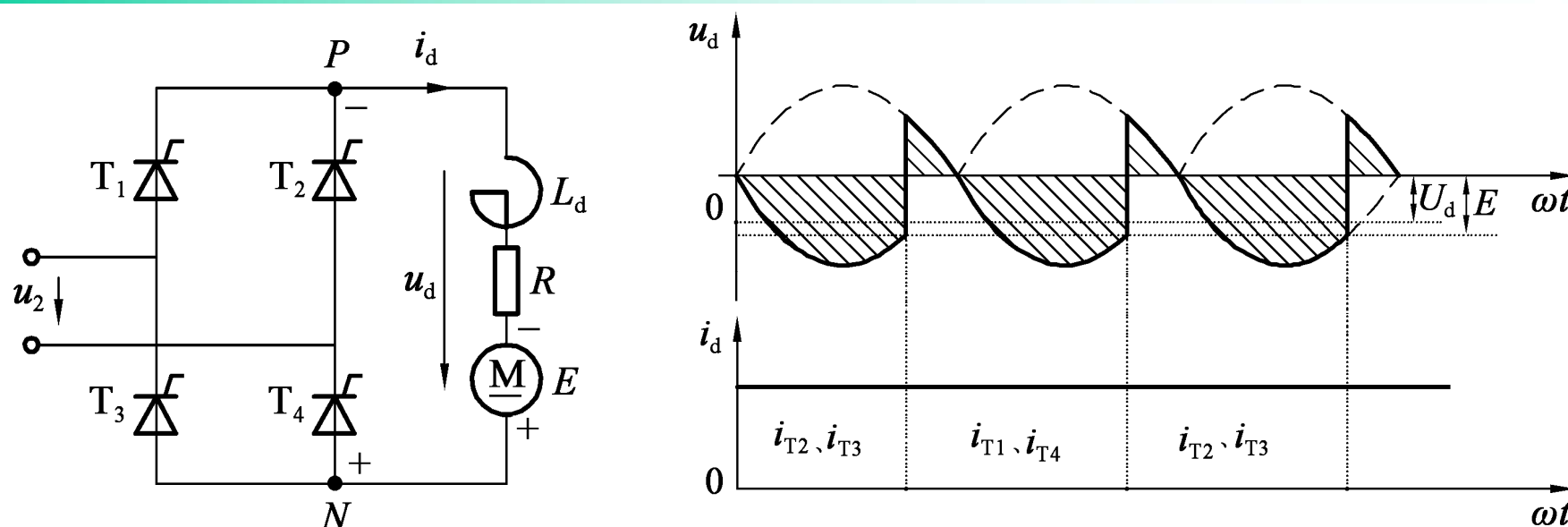
□ 图 4.2 (a) 中, 电路工作于整流状态, $0 < \alpha < (\pi/2)$

□ 电枢回路电流

$$I_d = \frac{U_d - E}{R} > 0$$

□ 整流电路输出电能供给直流电动机, 电能流向是由交流电网流向直流电动机。

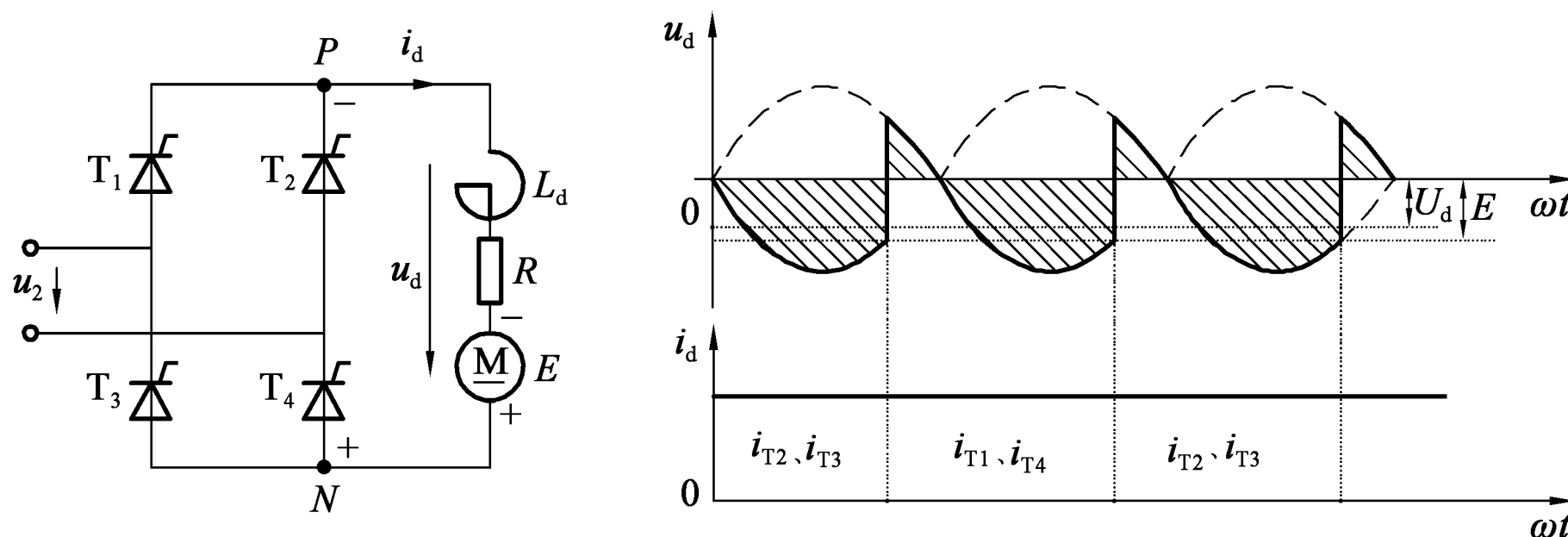
4.1.1 有源逆变产生的条件



□ 图 4.2 (b) 中, 电路工作于逆变状态, $(\pi/2) < \alpha < \pi$

□ 在晶闸管—电动机系统中, 由于晶闸管的单向导电性, 电路中电流流向不能改变, 要改变电能传送方向, 只有改变电动机输出电压极性

4.1.1 有源逆变产生的条件



- 图 4.2 (b) 中电动机反电势 E 的极性为下正上负。
- 整流电路直流侧输出电压平均值也必须反极性，且电动机电势 E 必须大于 U_d ，此时电流方向不变。
- 电路中电能流向与整流状态时相反，电动机输出功率，为发电工作状态，电网侧吸收电功率，实现了有源逆变。

4.1.1 有源逆变产生的条件

整流电路工作于有源逆变状态的条件如下：

- ① 整流电路直流侧有直流电动势，其极性必须与晶闸管导通方向一致。
- ② 整流电路输出的直流平均电压 U_d 必须为负值，即晶闸管触发角 $\alpha > (\pi/2)$ ，且 $|U_d| < |E|$ 。

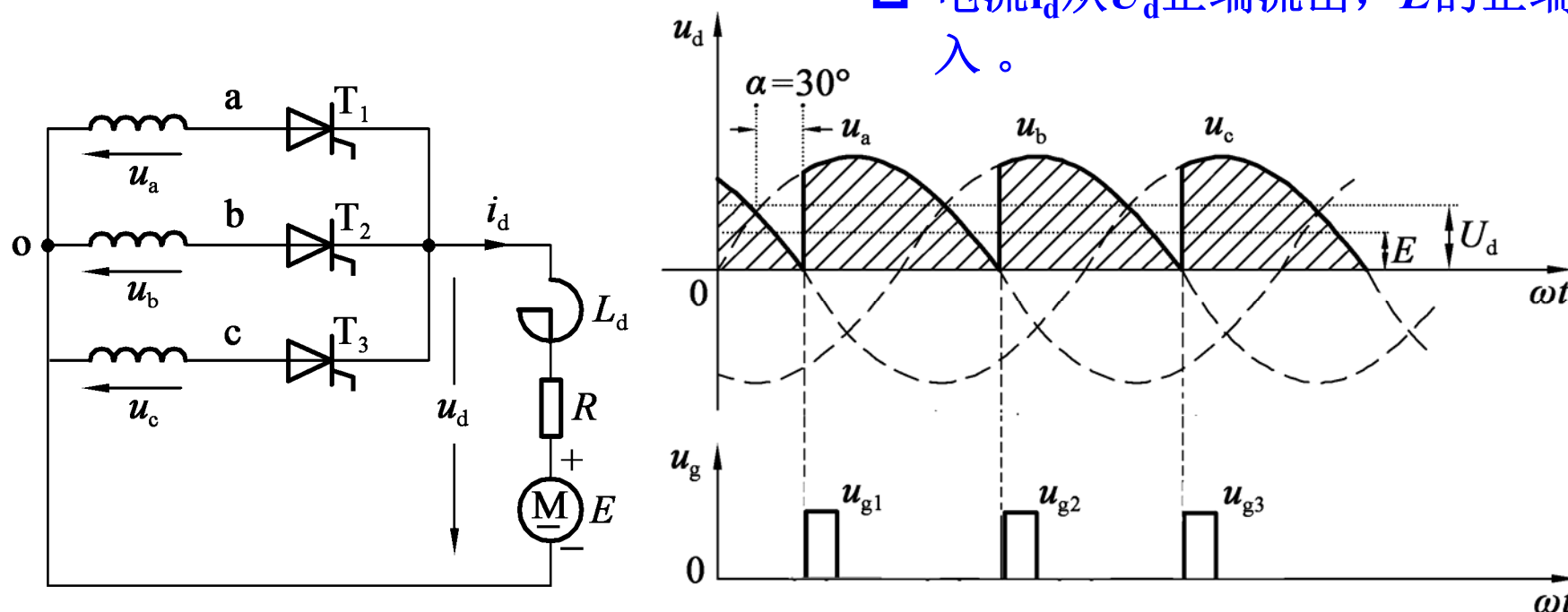
以上两条必须同时满足，整流电路才能工作在逆变状态。

4.1.2 三相有源逆变电路

1. 三相半波有源逆变电路

□ 依次触发 T_1 、 T_2 、 T_3 ;

□ 电流 i_d 从 U_d 正端流出, E 的正端流入。

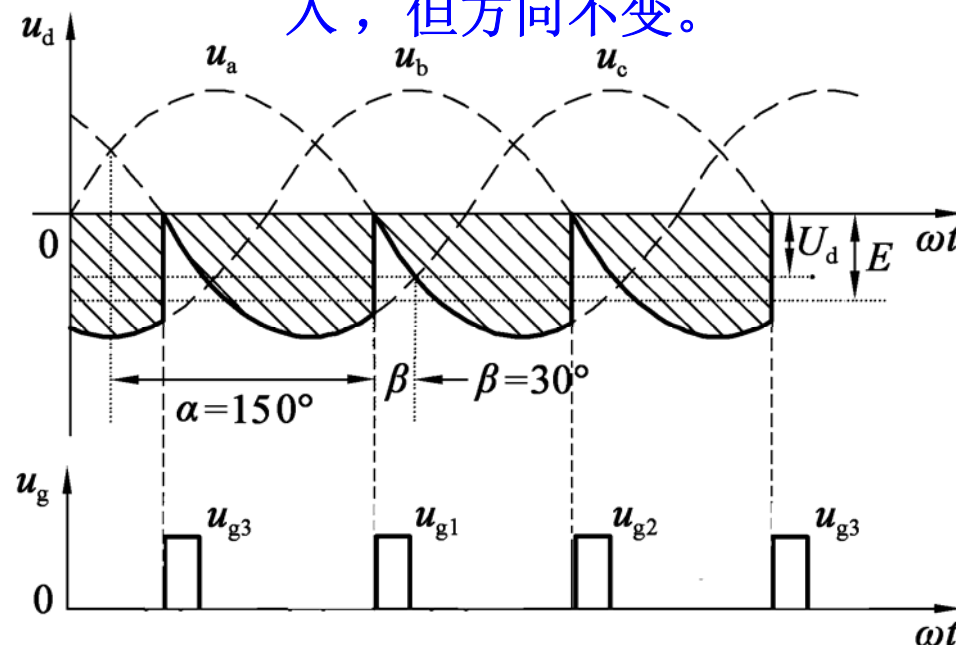
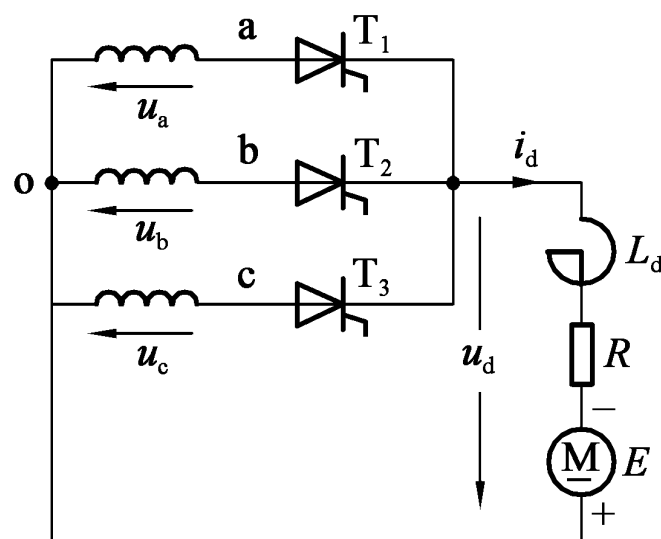


□ (a) 整流工作状态: 电动机吸收电能; 交流电源输出电能
 $0 < \alpha < \pi/2$

4.1.2 三相有源逆变电路

1. 三相半波有源逆变电路

- 依次触发 T_1 、 T_2 、 T_3 ;
- 电流 i_d 从 E 正端流出, U_d 的正端流入, 但方向不变。



(b) 逆变工作状态: 电能从直流侧送至交流电源侧

$$\pi/2 < \alpha < \pi$$

4.1.2 三相有源逆变电路

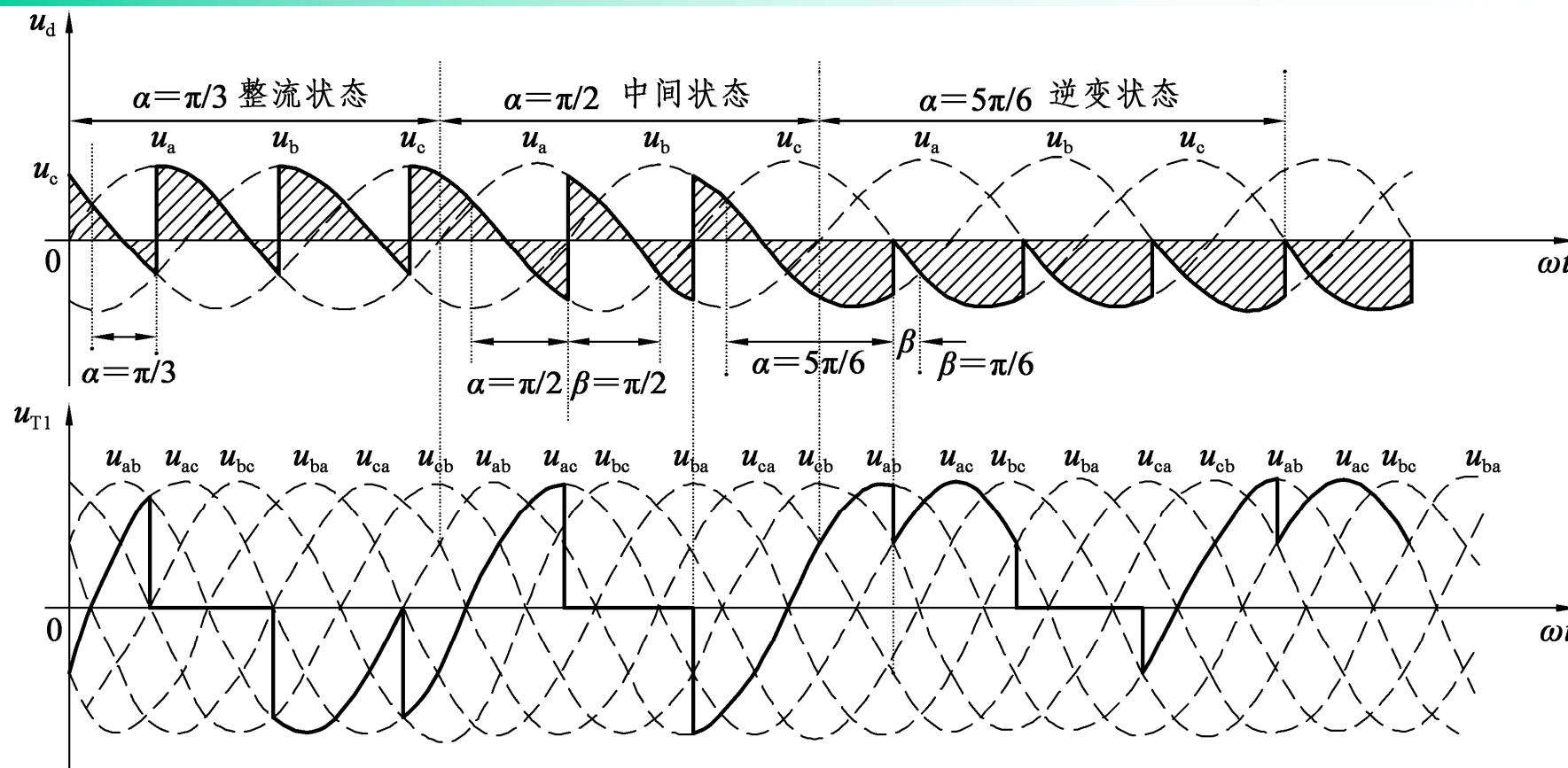


图 4.4 三相半波可控整流电路的输出电压 u_d 及晶闸管 T_1 两端电压 u_{T1} 的波形

4.1.2 三相有源逆变电路

三相有源逆变状态波形分析：

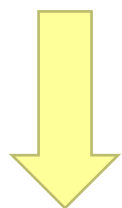
- 上半桥三只管的 α 角从各相的**正半周自然换相点**向右算起，而逆变角 β 从对应相的**负半周自然换相点**向左算起。下半桥的波形分析反之。
- 与三相全控桥整流的情况一样，每组三相半波电路的三只管依次轮换导通 120° ，并且每触通一只晶闸管则将迫使前已导通的一只关断。

4.1.2 三相有源逆变电路

在 $\pi/2 < \alpha < \pi$ 期间, $\beta = \pi - \alpha$

$$\begin{aligned} U_d &= U_{d0} \cos \alpha = U_{d0} \cos(\pi - \beta) \\ &= -U_{d0} \cos \beta = -1.17 U_2 \cos \beta \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \beta = \pi/2, U_d = 0$$



若考虑变压器漏抗

?

4.1.2 三相有源逆变电路

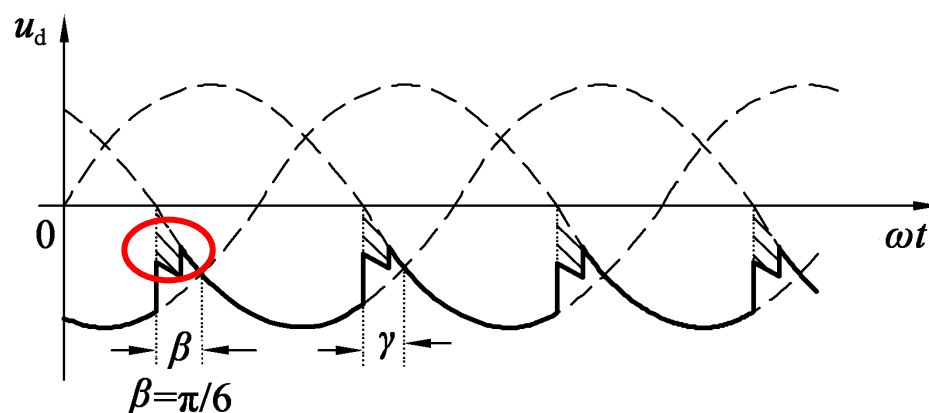
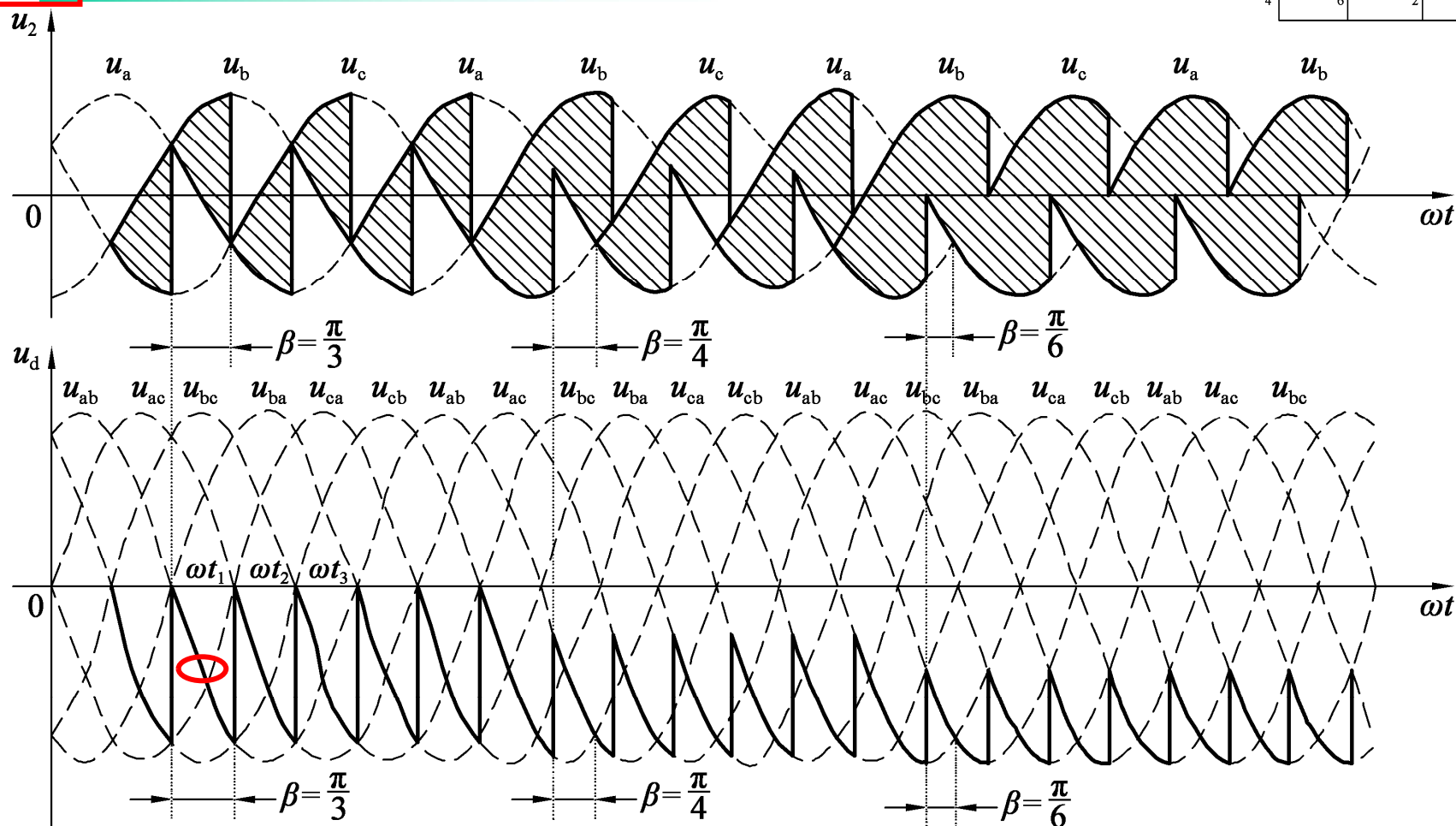
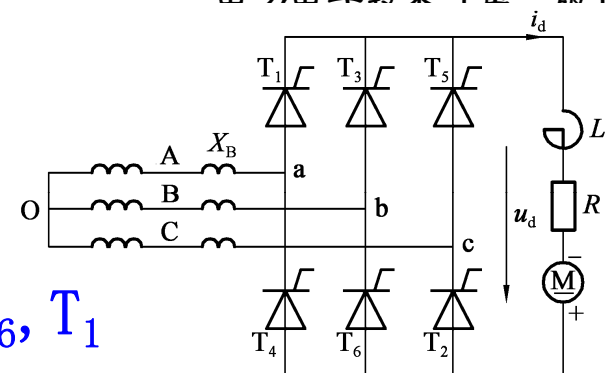


图 4.5 重叠角对电路输出电压的影响

$$U_d = -U_{d0} \cos \beta - \Delta U_d = -U_{d0} \cos \beta - \frac{3X_B}{2\pi} I_d$$

2. 三相桥式有源逆变电路

$T_1, T_6 \rightarrow T_1, T_2 \rightarrow T_2, T_3 \rightarrow T_3, T_4 \rightarrow T_4, T_5 \rightarrow T_5, T_6 \rightarrow T_6, T_1$



4.1.3 逆变失败的原因及最小逆变角的限制

□ 晶闸管变流电路在逆变工作状态下，一旦发生换相失败，外接的直流电源就会通过晶闸管电路形成短路，或电路的输出平均电压和直流电动势顺向串联，由于逆变电路内阻很小，将产生很大的短路电流，这种情况称之为**逆变失败**，或叫**逆变颠覆**。

4.1.3 逆变失败的原因及最小逆变角的限制

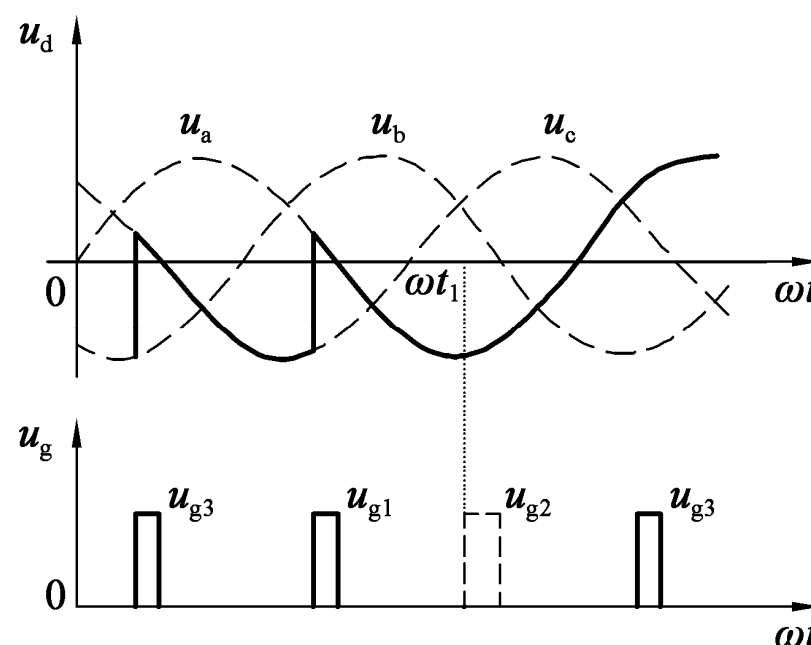
1. 逆变失败产生的原因

(1) 触发电路工作不可靠

□ 如脉冲丢失

□ 当 a 相晶闸管 T_1 导通至 ωt_1 时刻，正常情况时应触发 T_2 管，电流由 a 相换至 b 相。

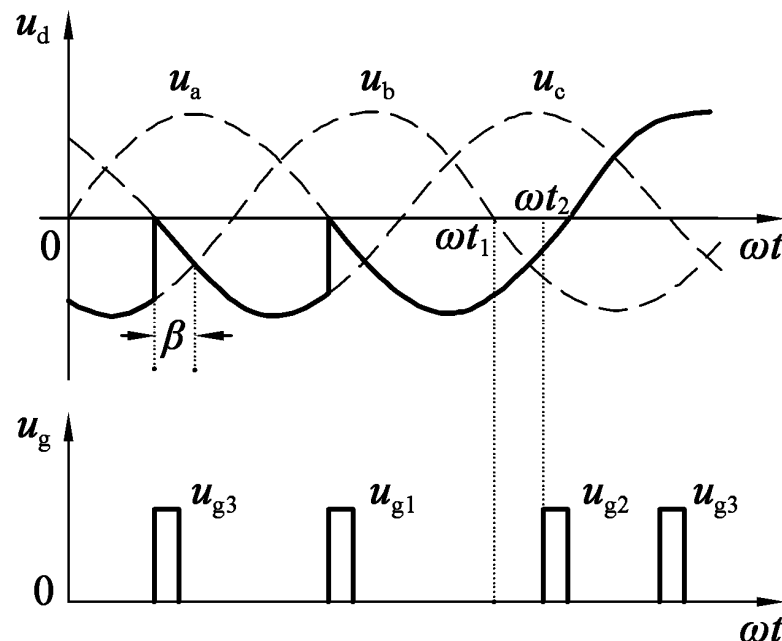
● 如果在 ωt_1 时刻 T_2 的触发脉冲 u_{g2} 丢失，则 T_1 管因一直承受正向电压而不会关断，将一直导通到正半周，使电源瞬时电压与直流电动势顺向串联，造成短路。



4.1.3 逆变失败的原因及最小逆变角的限制

□ 触发脉冲延迟

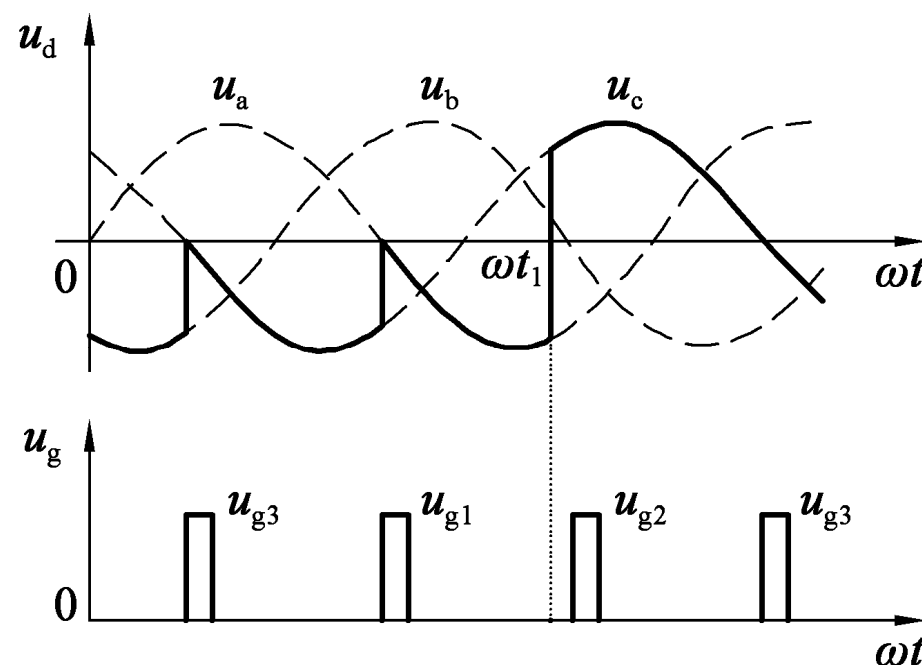
□ b 相晶闸管 T_2 触发脉冲由 c 时刻延迟到 ωt_2 时刻才出现。此时虽然 T_2 有触发脉冲，但 a 相电压 u_a 已大于 b 相电压 u_b ， T_2 承受反向电压，不可能导通， T_1 也不能关断，从而形成短路。



4.1.3 逆变失败的原因及最小逆变角的限制

(2) 晶闸管发生故障

□ 由于各种原因造成晶闸管故障，从而使晶闸管应该阻断时不能阻断，应该导通时不能导通，造成逆变失败，如图所示。



4.1.3 逆变失败的原因及最小逆变角的限制

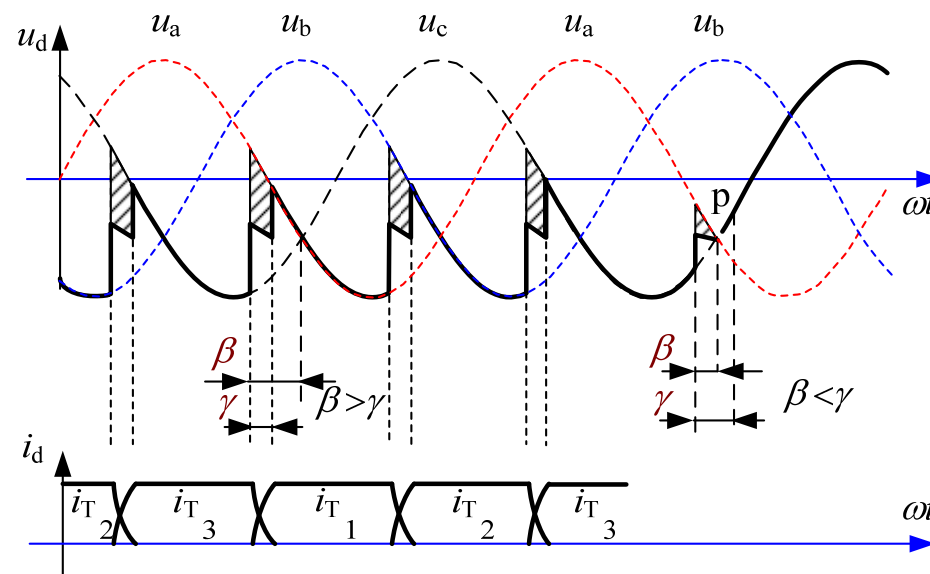
(3) 交流电源发生异常

□ 在逆变工作状态时，如果交流电源突然停电、缺相或电源电压降低，由于直流电动势 E 的存在，晶闸管仍可导通，此时电路的交流侧由于失去了同直流电动势极性相反的交流电压，因此直流电动势将通过晶闸管使电路短路。

4.1.3 逆变失败的原因及最小逆变角的限制

(4) 换相裕量不足

□ 如图所示，以晶闸管 T_3 和 T_1 的换相过程为例，如果逆变电路工作在的情况，经过换相过程后， a 相电压仍高于 c 相电压，即换相结束后 T_3 将承受反向电压而关断。



□ 如果换相的裕量角不足，在换相还未结束时， c 相电压将高于 a 相电压，所以应该导通的晶闸管 T_1 因承受反向电压重新关断，而应该关断的晶闸管 T_3 却因承受正向电压继续导通。

4.1.3 逆变失败的原因及最小逆变角的限制

2. 确定最小逆变角的依据

□ 逆变工作状态时，允许采用的最小逆变角应为

$$\beta_{\min} = \delta + \gamma + \theta'$$

式中， δ 为晶闸管的关断时间 t_q 所对应的电角度， $\delta = \omega t_q$ ，称为恢复阻断角；
 γ 为换相重叠角；
 θ' 为换相安全裕量角。

□本章习题：

4.2 4.3（题中 $U_2=220\text{V}$ ）