



3.5 整流电路的有源逆变工作状态

- “有源逆变”：问题的提出
- “逆变”与节约能源
- 电力电子技术设计与电能的循环利用什么是逆变？为什么要逆变？
 - ◆ 逆变(inversion)：把直流电转变成交流电的过程。
 - ◆ 逆变电路：把直流电逆变成交流电的电路。
 - ☞ 当交流侧和电网连结时，为有源逆变电路。
 - ☞ 变流电路的交流侧不与电网联接，而直接接到负载，即把直流电逆变为某一频率或可调频率的交流电供给负载，称为无源逆变。
 - ◆ 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。



3.5.1 逆变的概念

什么是逆变？为什么要逆变？

◆ **逆变(inversion)**：把直流电转变成交流电的过程

◆ **逆变电路**：把直流电逆变成交流电的电路

☞ 当交流侧和电网连结时，为**有源逆变**电路

☞ 变流电路的交流侧不与电网联接，而直接接到负载，即把直流电逆变为某一频率或可调频率的交流电供给负载，称为**无源逆变**

◆ 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**。



3.5.1 逆变的概念

直流发电机—电动机系统：电能的流转

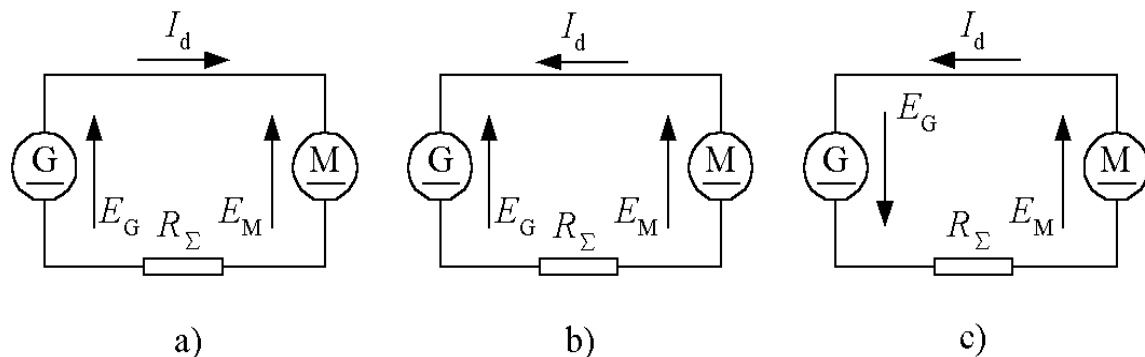


图3-46 直流发电机—电动机之间电能的流转

- 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

◆ M作**电动运转**， $E_G > E_M$ ，电流 I_d 从G流向M，电能由G流向M，转变为**M轴上输出的机械能**

◆ **回馈制动**状态中，M作发电运转， $E_M > E_G$ ，电流反向，从M流向G，**M轴上输入的机械能转变为电能反送给G**

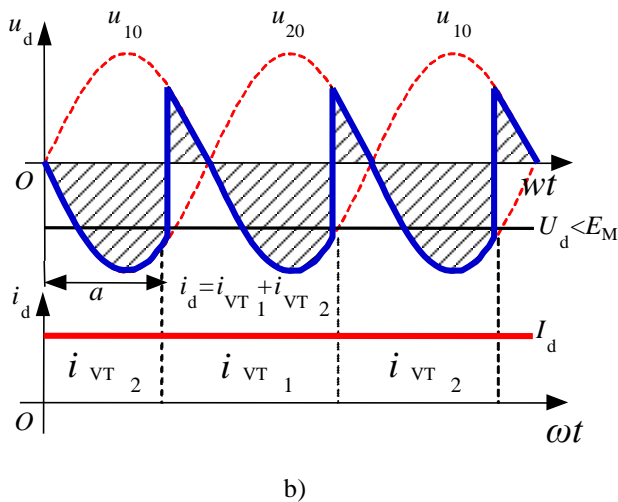
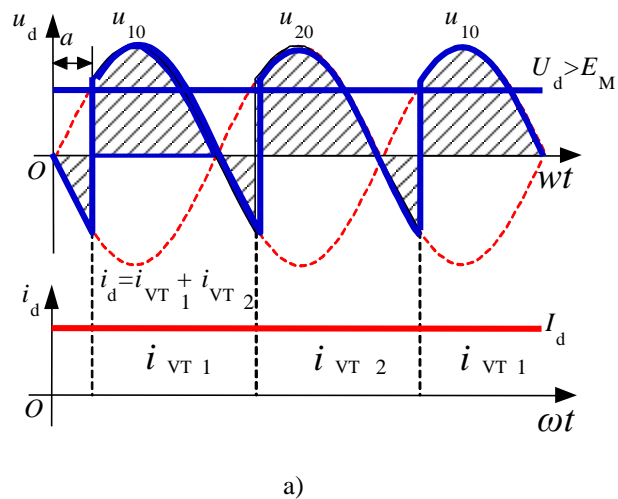
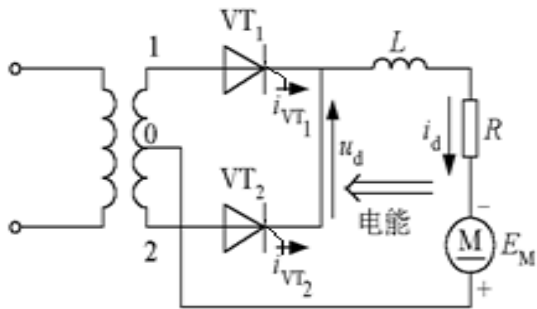
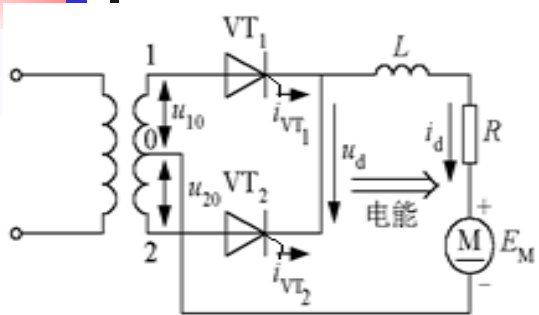
◆ 两电动势**顺向串联**，向电阻 R 供电，G和M均输出功率，由于 R 一般都很小，实际上形成短路，在工作中必须严防这类事故发生

◆ 两个电动势**同极性相接**时，电流总是从电动势高的流向电动势低的，由于回路电阻很小，即使很小的电动势差值也能产生大的电流，使两个电动势之间交换很大的功率，这对分析有源逆变电路是十分有用的。



3.5.1 逆变的概念

■ 逆变产生的条件——以单相全波电路代替上述发电机来分析



- 电动机M作电动机运行，全波电路应工作在整流状态， α 的范围在 $0 \sim \pi/2$ 间，直流侧输出 U_d 为正值，并且 $U_d > E_M$ ，交流电网输出电功率，电动机则输入电功率。
- 电动机M作发电回馈制动运行，由于晶闸管器件的单向导电性，电路内 I_d 的方向依然不变，而M轴上输入的机械能转变为电能反送给G，只能改变 E_M 的极性，为了避免两电动势顺向串联， U_d 的极性也必须反过来，故 α 的范围在 $\pi/2 \sim \pi$ ，且 $|E_M| > |U_d|$ 。

图3-47 单相全波电路的整流和逆变



3.5.1 逆变的概念

◆产生逆变的条件

- 👉要有直流电动势，其极性须和晶闸管的导通方向一致，其值应大于变流器直流侧的平均电压
- 👉要求晶闸管的控制角 $\alpha > \pi/2$ ，使 U_d 为负值
- 👉两者必须同时具备才能实现有源逆变

◆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。



3.5.2 三相桥整流电路的有源逆变工作状态

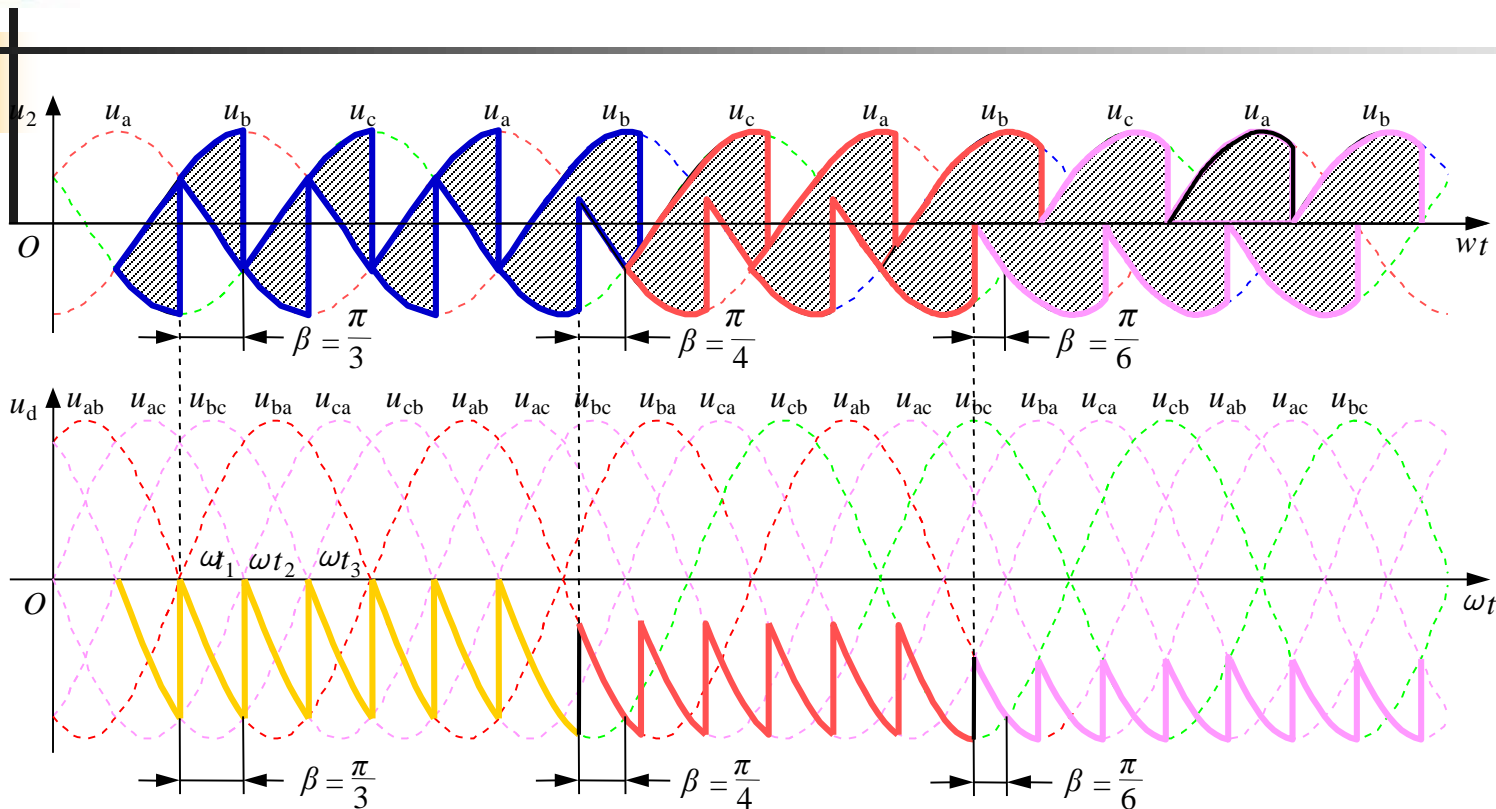


图3-48 三相桥式整流电路工作于有源逆变状态时的电压波形

■ 逆变角

- ◆ 通常把 $\alpha > \pi/2$ 时的控制角用 $\pi - \alpha = \beta$ 表示, β 称为**逆变角**
- ◆ β 的大小自 $\beta=0$ 的起始点向**左方**计量
- ◆ 三相桥式电路工作于有源逆变状态, 不同逆变角时的输出电压波形及晶闸管两端电压波形如图3-48所示。



3.5.2 三相桥整流电路的有源逆变工作状态

■ 基本的数量关系

□ 三相桥式电路的输出电压 $U_d = -3.34U_2 \cos\beta = -1.35U_2 L \cos\beta$

□ 输出直流电流的平均值 $I_d = \frac{U_d - E_M}{R_\Sigma}$

□ 流过晶闸管的电流有效值 $I_{VT} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} = 0.577 I_d$

□ 从交流电源送到直流侧负载的有功功率为 $P_d = R_\Sigma I_d^2 + E_M I_d$

□ 当逆变工作时，由于 E_M 为负值，故 P_d 一般为负值，表示功率由直流电源输送到交流电源

□ 变压器二次侧线电流的有效值 $I_2 = \sqrt{2} I_{VT} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0.816 I_d$



相位控制： u_d 波形的变化过程

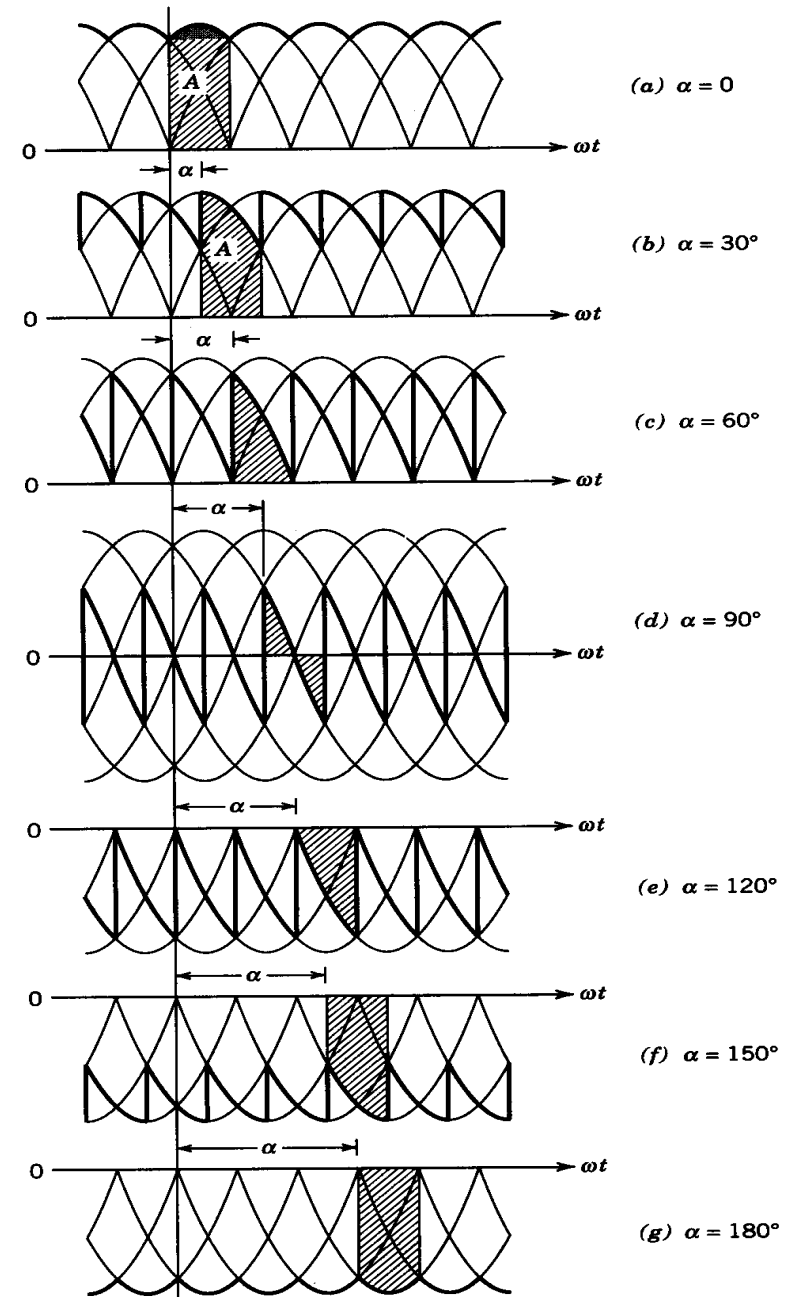


Figure 6-21 The dc-side voltage waveforms as a function of α where $V_{d\alpha} = A/(\pi/3)$. (From ref. 2 with permission.)



3.5.3 逆变失败与最小逆变角的限制

- 逆变运行时，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，或者使变流器的输出平均电压和直流电动势变成顺向串联，由于逆变电路的内阻很小，形成很大的短路电流，这种情况称为**逆变失败**，或称为**逆变颠覆**
- 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。



3.5.3 逆变失败与最小逆变角的限制

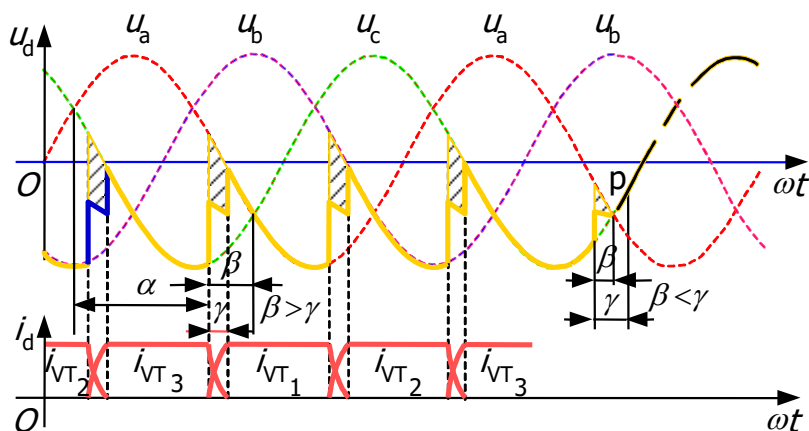
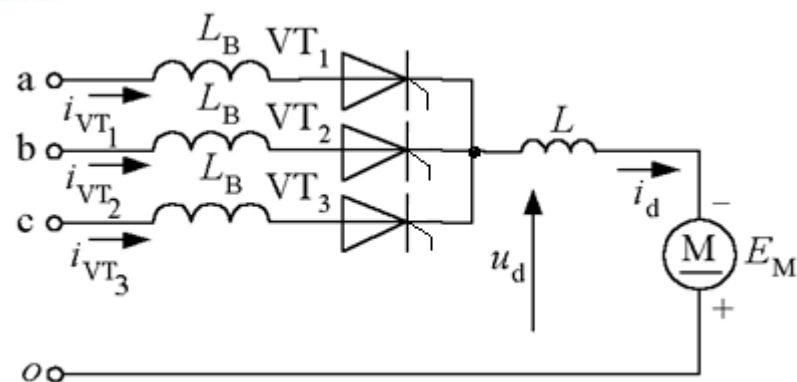


图3-49 交流侧电抗对逆变换相过程的影响

◆考虑变压器漏抗引起重叠角 γ 对逆变电路换相的影响

以 VT_3 和 VT_1 的换相过程来分析，在 $\beta > \gamma$ 时，经过换相过程后，a相电压 u_a 仍高于c相电压 u_c ，所以换相结束时，能使 VT_3 承受反压而关断

当 $\beta < \gamma$ 时，换相尚未结束，电路的工作状态到达自然换相点p点之后， u_c 将高于 u_a ，晶闸管 VT_1 承受反压而重新关断，使得应该关断的 VT_3 不能关断却继续导通，且c相电压随着时间的推迟愈来愈高，电动势顺向串联导致逆变失败

为了防止逆变失败，不仅逆变角 β 不能等于零，而且不能太小，必须限制在某一允许的最小角度内。



3.5.3 逆变失败与最小逆变角的限制

■ 确定最小逆变角 β_{min} 的依据

□ 逆变时允许采用的最小逆变角 β 应等于 $\beta_{min} = \delta + \gamma + \theta'$

☞ δ 为晶闸管的关断时间 t_q 折合的电角度, 约 $4^\circ \sim 5^\circ$

☞ γ 为换相重叠角, 可查阅相关手册, 也可根据下式计算, 即

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{I_d X_B}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}$$

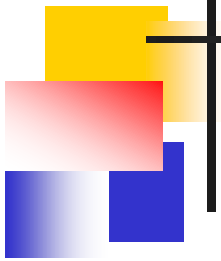
□ 根据逆变工作时 $\alpha = \pi - \beta$, 并设 $\beta = \gamma$, 上式可改写成

$$\cos\gamma = 1 - \frac{I_d X_B}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}}$$

由此计算出 γ 。

☞ θ' 为安全裕量角, 主要针对脉冲不对称程度 (一般可达 5°), 约取为 10° 。

□ 设计逆变电路时, 必须保证 $\beta \geq \beta_{min}$, 因此常在触发电路中附加一保护环节, 保证触发脉冲不进入小于 β_{min} 的区域内。



The End