

东南大学

电力电子技术

第 24 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



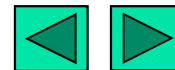


交流—直流 (AC-DC) 变换 (三)





有源逆变电路



n 逆变的概念

整流： 交流到直流

逆变： 直流到交流

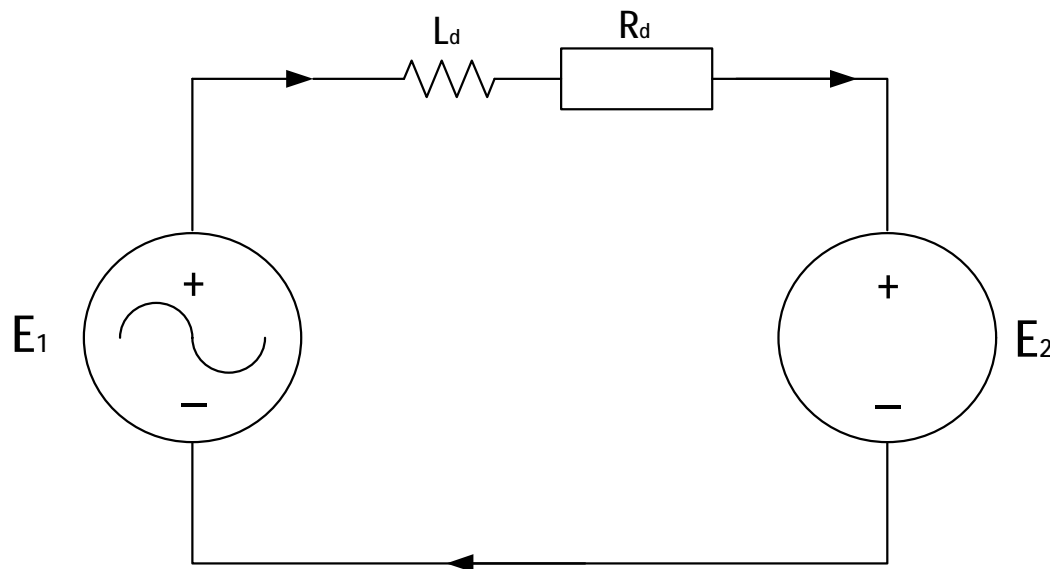
有源逆变与无源逆变区别

有源逆变中的源指的是什么？

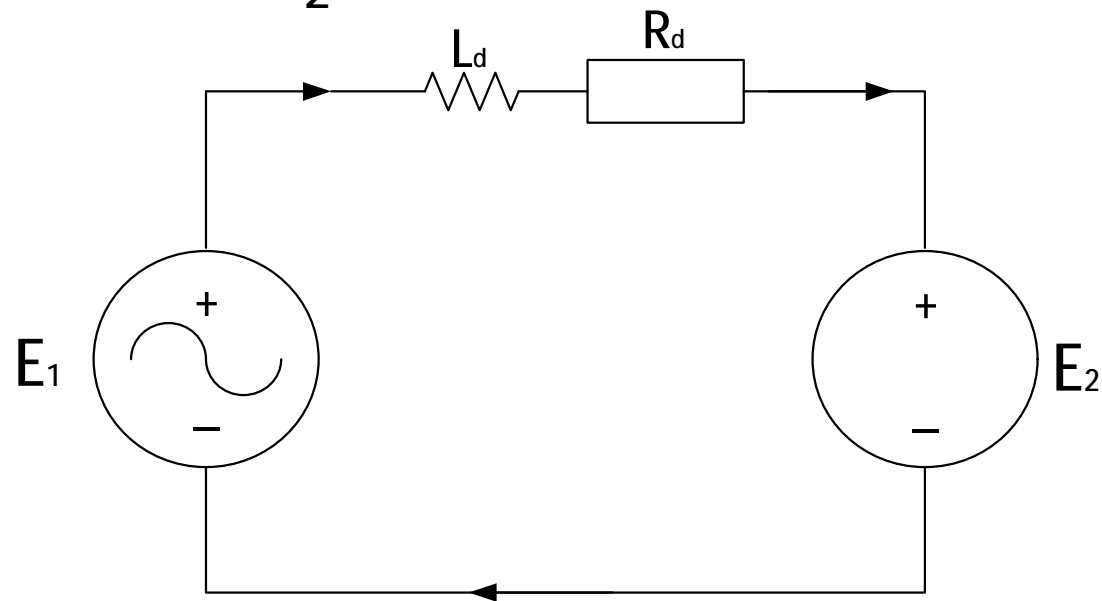
有源逆变的实际意义，可再生制动，电梯，电动汽车，
电力机车，动车。能量的流向问题。

电能的流转方向

- 两个直流电源 E_1 和 E_2 相连的电路如下图所示。现分析其电能如何流转。

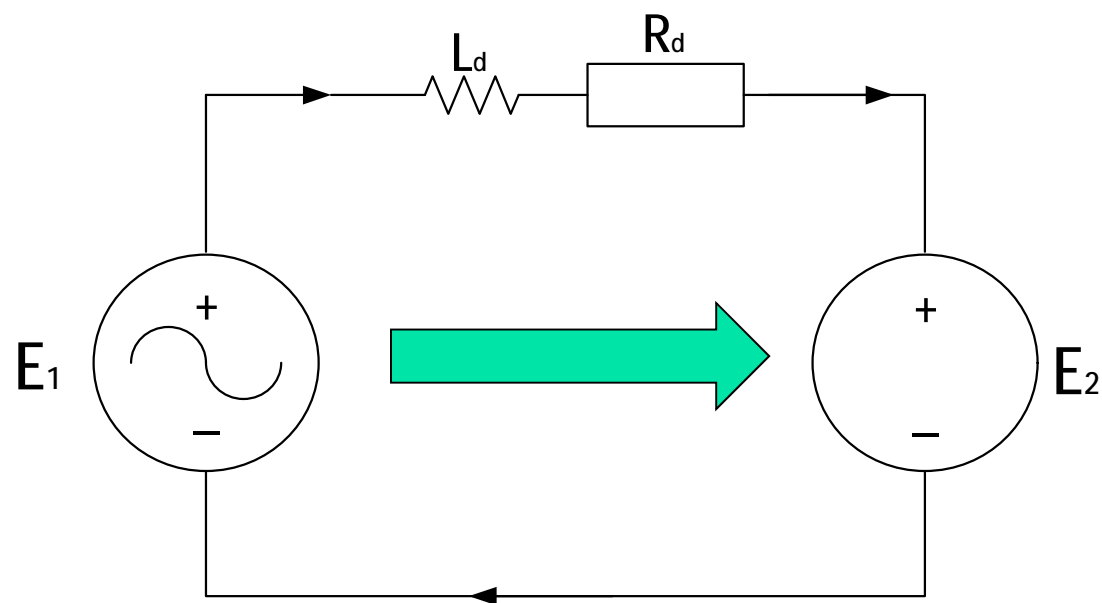


直流电源 E_1 和 E_2 相连，注意图中 E_1 与 E_2 的符号表示。
 E_1 表示什么， E_2 表示什么。图中电流的流向不能变。



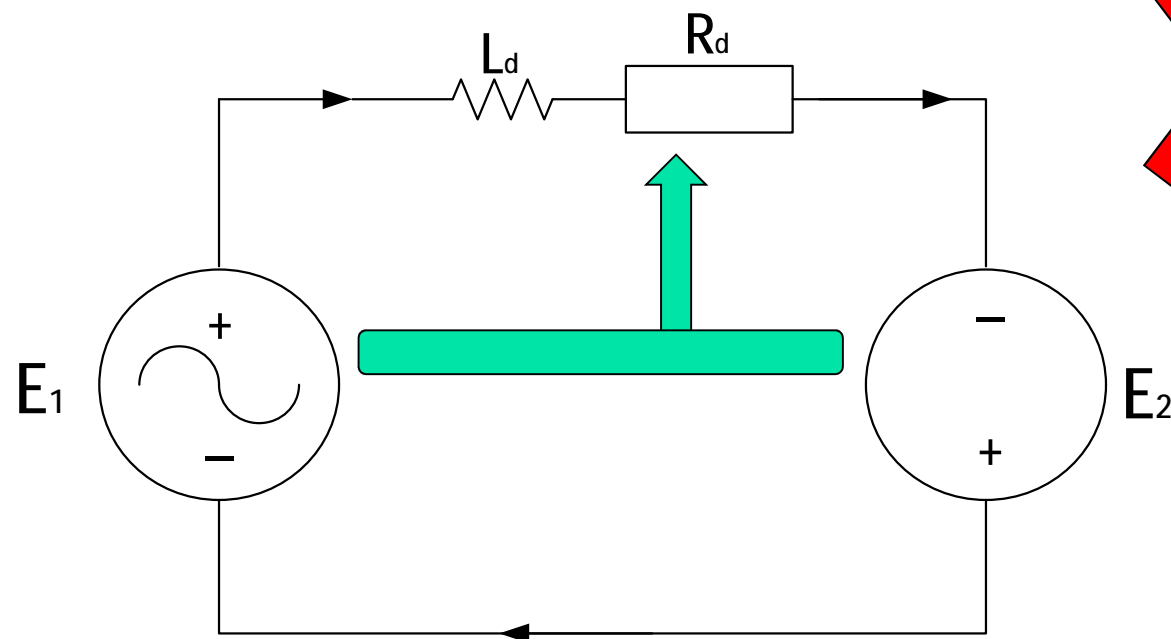
根据直流电源 E_1 和 E_2 的相位关系，有四种组合的可能。
定义两个电源上+下-为正，上-下+为负。

(1) ++连接方式



为维持电流的流向不变, $E_1 > E_2$, 能量从 E_1 流向 E_2 。
也即从电网流向负载。为整流工作状态。

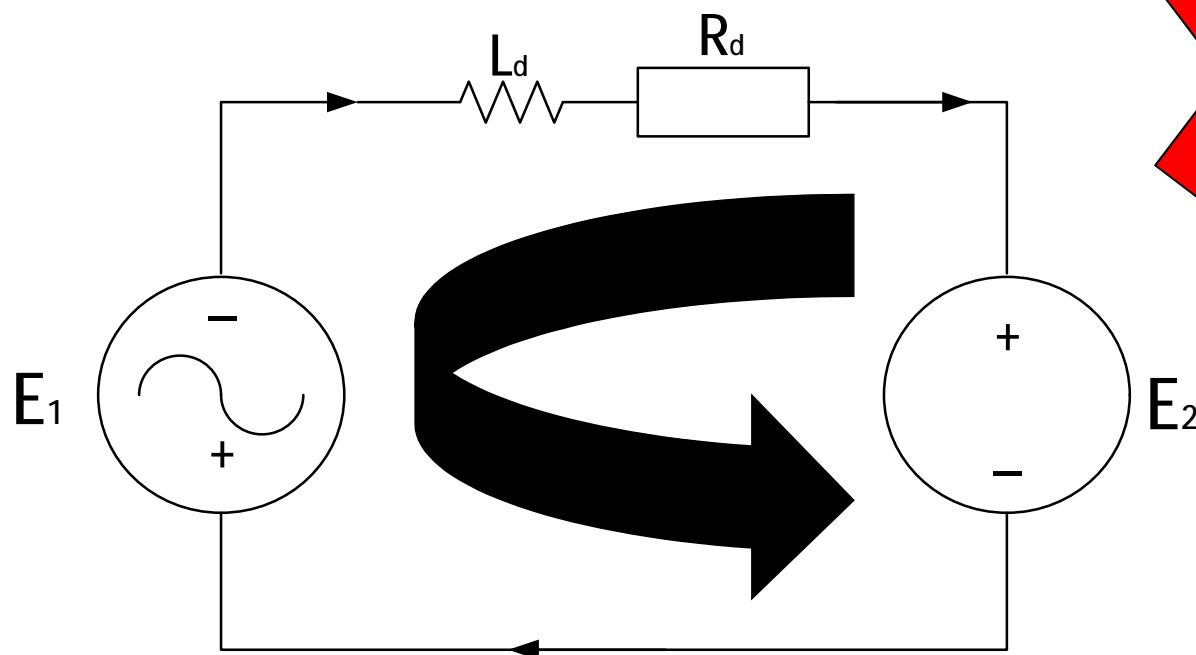
(2) + - 连接方式



两个电源同极性串接，由于回路电阻不大，这时回路中电流很大，处于短路状态。应避免出现这种情况。

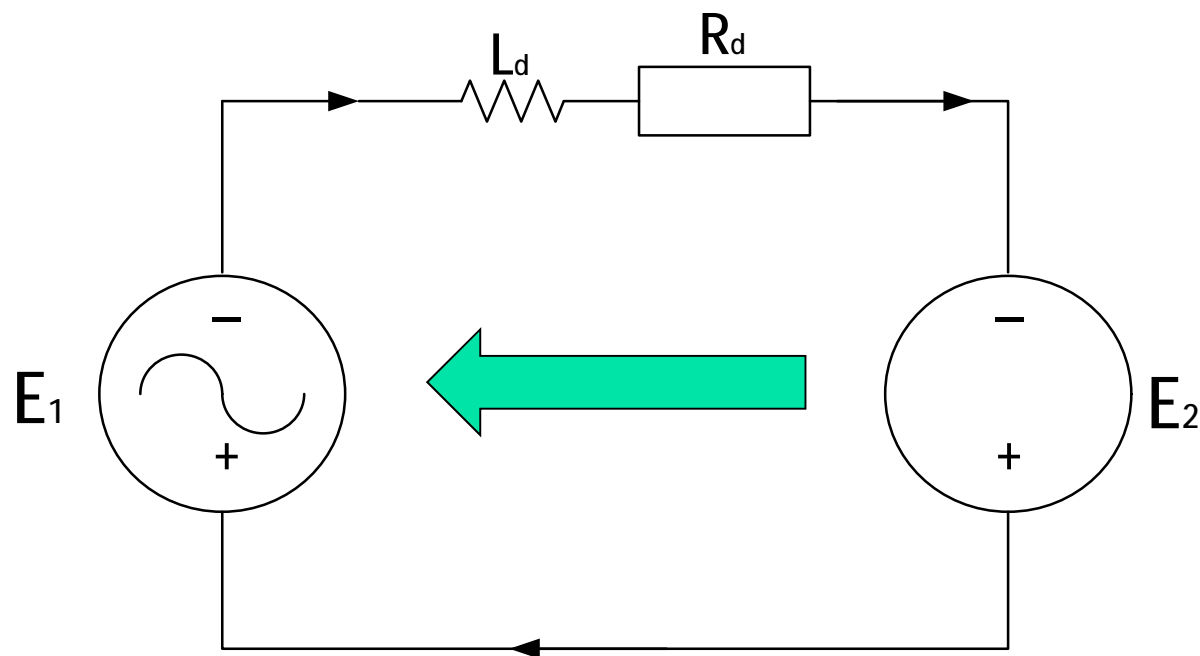
两个电源的能量都流向负载电阻 R_d 。为**逆变颠覆**。

(3) -+ 连接方式



两个电源同极性反向串接，产生的电流的方向为逆时针方向，不符合要求，因此这种情况**实际中不存在**。

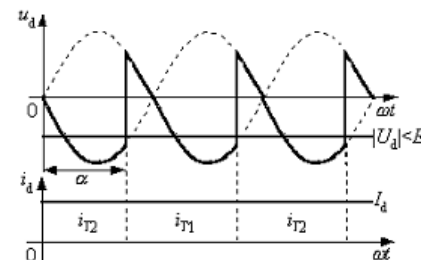
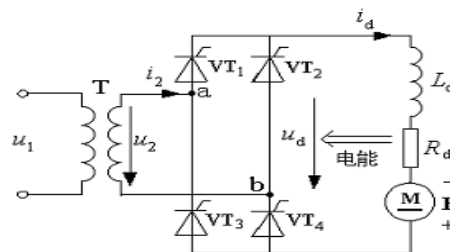
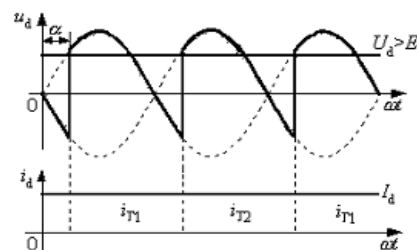
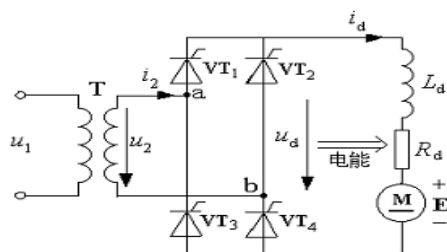
(4) --连接方式



为维持电流的流向不变, $E_2 > E_1$, 能量从 E_2 流向 E_1 。
也即从负载流向电网。这种情况就是有源逆变。

三、有源逆变电路

1、有源逆变的工作原理



2、逆变产生的条件（内因与外因）

- (1) 有一个能使电能倒流的直流电势，电势的极性和晶闸管元件的单向导电方向一致，电势的大小稍大于变流电路直流平均电压；

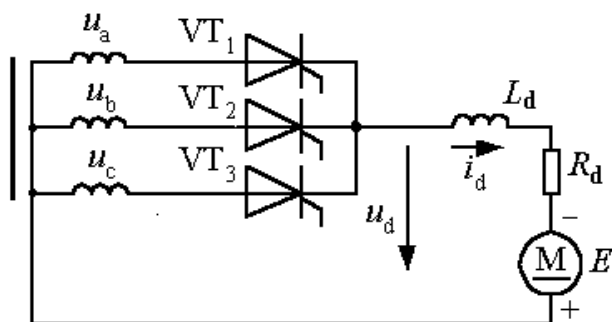
外因： $|E_d| > |U_d|$

- (2) 变流电路直流侧应能产生负值的直流平均电压。（内因， $\alpha > 90^\circ$ ）



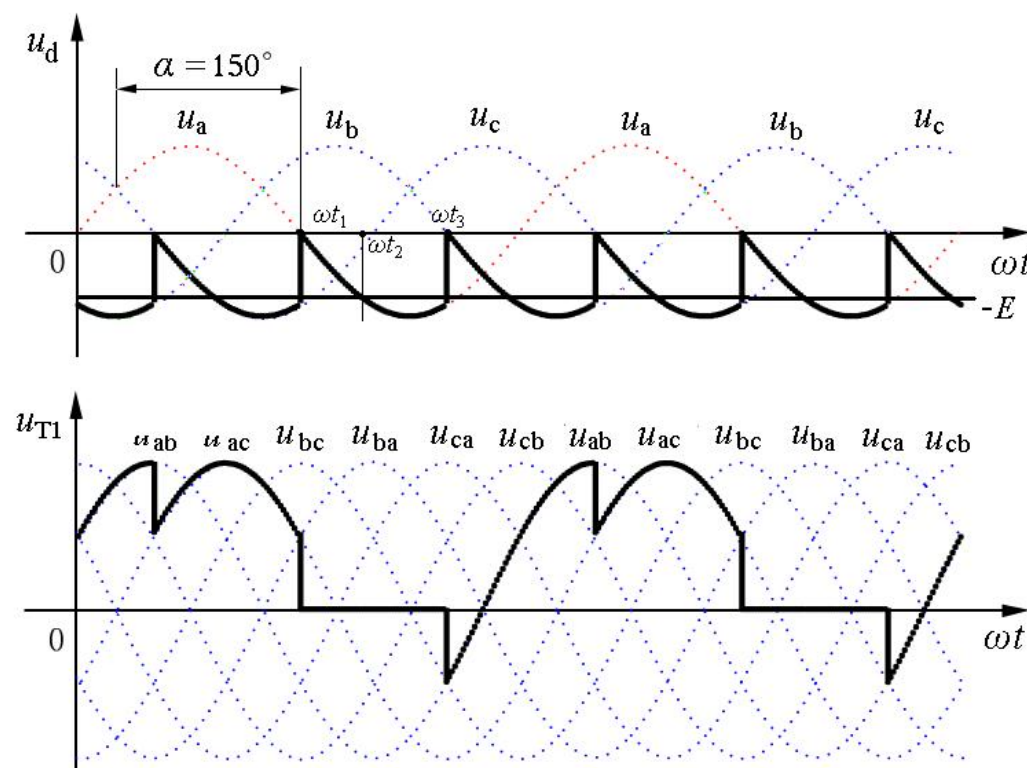
3、三相半波逆变电路

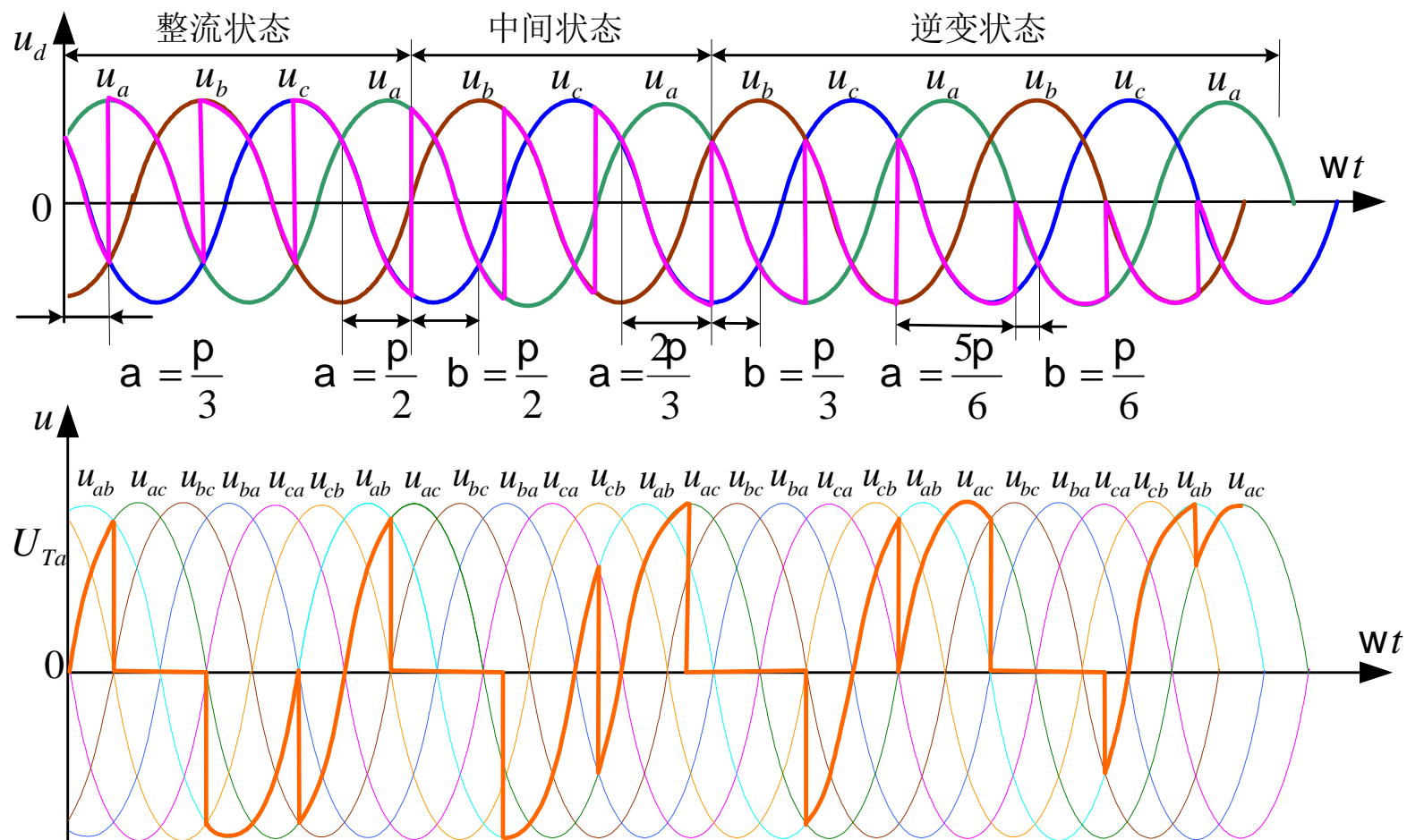
工作原理



分析：导通过程

u_{T1} 波形





三相半波电路工作波形

基本数量关系

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

$$U_d = -1.17 U_2 \cos \beta$$

逆变角 β 的定义: $\beta = \pi - \alpha$

整流: α 整流滞后角 $0 < \alpha < 90^\circ, 90^\circ < \beta < 180^\circ$

逆变: β 逆变超前角 $0 < \beta < 90^\circ, 90^\circ < \alpha < 180^\circ$

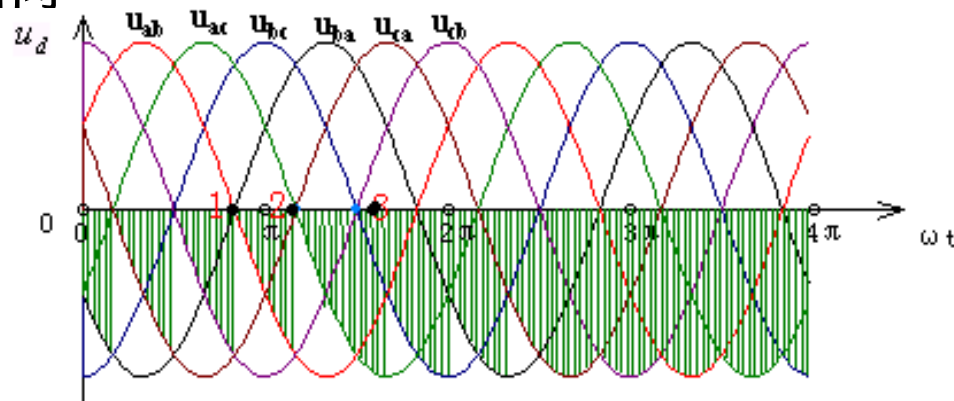
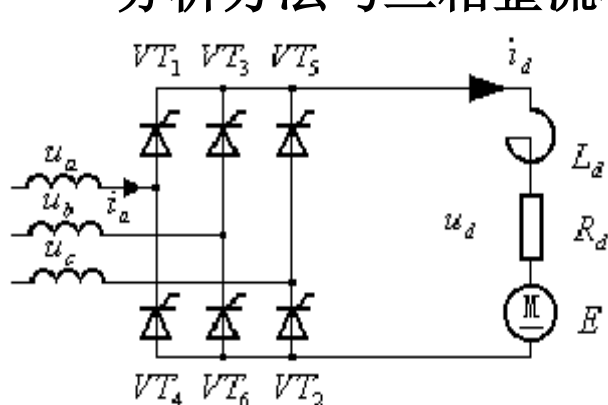
在实际运行中为防止逆变颠覆, 必须 $\beta > 0$



4、三相桥式逆变电路

(1) 工作原理

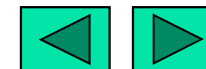
分析方法与三相整流桥相同



元件成对导通， $\theta=120^\circ$ ，隔 60° 换流， VT_1 - VT_2 - VT_3 - VT_4 - VT_5 - VT_6

“1”点：触发 VT_6 、 VT_1 ， $u_{ab}=0$ ，此后 $u_{ab}<0$ ；由于 $(E+u_{ab})>0$ ，仍通， $u_d=u_{ab}$
 “2”点：触发 VT_2 ， $u_{ac}>u_{ab}$ ，但 $u_{ac}<0$ ，而 $(E+u_{ac})>0$ ， VT_6 换流 VT_2 ， VT_1 、 VT_2 通，
 $u_d=u_{ac}$

“3”点： VT_1 向 VT_3 换流

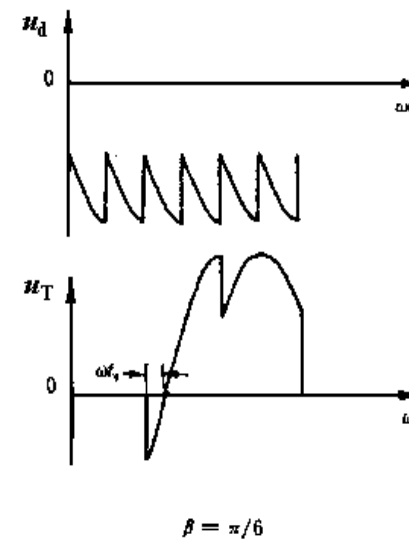
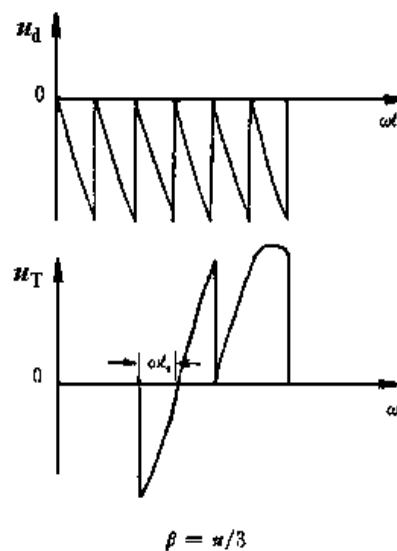


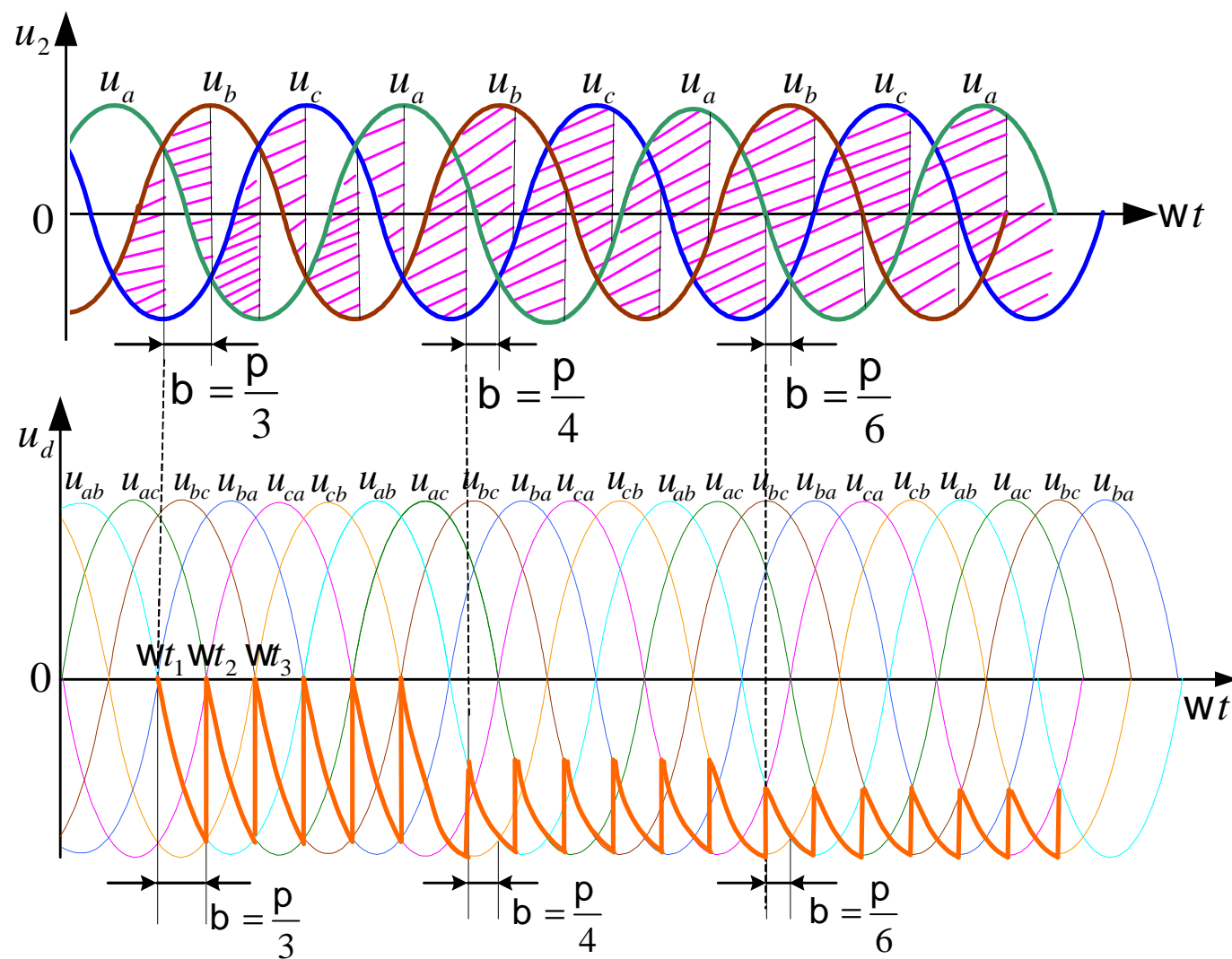
$$\begin{aligned}
 &0 \quad \text{VT}_1 \text{通} \\
 u_{T1} = &u_{ab} \quad \text{VT}_3 \text{通} \\
 &u_{ac} \quad \text{VT}_5 \text{通}
 \end{aligned}$$

反压时间：
在 ωt_q 期间，元件受反压，
可使元件关断。

$$\beta \downarrow \rightarrow \omega t_q \downarrow$$

$\beta=0, \omega t_q=0$ ，无关断时间
故应限定最小逆变角 β_{\min}





三相桥式逆变电路及工作波形



(2) 基本数量关系

直流平均电压 U_d

$$U_d = -2.34U_2 \cos b$$

晶闸管电流

$$I_{dT} = \frac{1}{3} I_d$$

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d^2 d\omega t} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d$$

变压器副边电流

$$I = \sqrt{2} I_T = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$$



东南大学

电力电子技术

第 25 讲

主讲教师：王念春

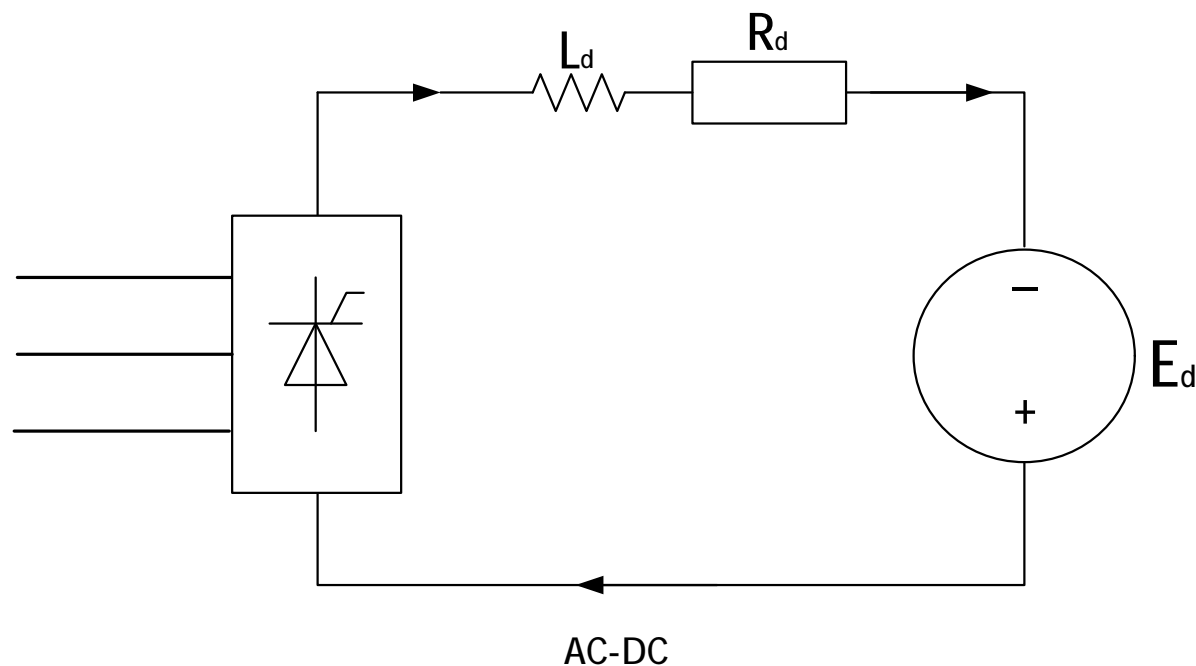
380419124@qq.com



例：

三相桥式电路中， $R_d=0.8\Omega$ ， $L_d=50\text{mH}$ ， $U_{2l}=230\text{V}$ ， $E_d=-290\text{V}$ ， $\beta=30^\circ$ ，试判断电路能否工作于逆变状态？并计算：

- (1) 负载电流平均值与有效值；
- (2) 晶闸管电流的平均值与有效值；
- (3) 交流电源端功率因数。



答：

能否工作于有源逆变状态，要分析内因与外因。

(a) 由于 $\beta=30^\circ$ ，即 $\alpha=150^\circ > 90^\circ$ ，满足内因；

(b) $E_d=-290\text{V}$ ， $U_d=1.35U_{2l}\cos\alpha$ ，代入计算得到
 $U_d=-268.90\text{ (V)}$ ，满足 $|E_d| > |U_d|$ 外因。

结论：电路能工作于有源逆变状态。



答：

(1) 负载电流平均值与有效值

$\omega L_d = 314 * 50 * 10^{-3} = 15.7 \Omega$ ，远大于 R_d 的 0.8Ω ，因此，负载可以看成是大电感负载，负载电流平直近似为一条直线。

负载电流平均值

$$I_d = \frac{|E_d| - |U_d|}{R_d} = \frac{290 - 268.9}{0.8} = 26.38(\text{A})$$

负载电流有效值（电流平直近似一条直线）

$$I_{d\text{有效值}} = \frac{|E_d| - |U_d|}{R_d} = \frac{290 - 268.9}{0.8} = 26.38(\text{A})$$





答：

(2) 晶闸管电流的平均值与有效值

与整流状态一样，三相桥式有源逆变电路，一个周期有六个波头，每个波头宽度为 60° ，晶闸管连续导通两个波头，一个周期中晶闸管导通角度为 120° ，不难得到晶闸管电流平均值与有效值。

晶闸管电流平均值

$$I_{dT} = \frac{120^\circ}{360^\circ} I_d = \frac{1}{3} I_d = 8.79(\text{A})$$

晶闸管电流有效值

$$I_{dT\text{有效值}} = \sqrt{\frac{120^\circ}{360^\circ}} I_d = \sqrt{\frac{1}{3}} I_d = 15.23(\text{A})$$



答：

(3) 交流电源端功率因数

功率因数的定义：有功功率/视在功率，因此要分别求出电路的视在功率与有功功率的大小。

视在功率：（注意推导过程）

$$S = 3' U_2' I_2 = 3' \frac{U_{2l}}{\sqrt{3}} I_2 = 3' \frac{U_{2l}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = \sqrt{2} U_{2l} I_d$$

$$S = \sqrt{2} U_{2l} I_d = \sqrt{2} \cdot 230 \cdot 26.38 = 8580.6 (\text{VA})$$

有功功率： $P = R_d I_d^2 + E_D I_d$

$$P = R_d I_d^2 + E_D I_d = 0.8 \cdot 26.38^2 + (-290.0) \cdot 26.38 = 556.72 - 7650.2 = -7093.48 (\text{W})$$

功率因数： $\cos \varphi = \frac{P}{S} = -\frac{7093.48}{8580.6} = -0.8267$



答：

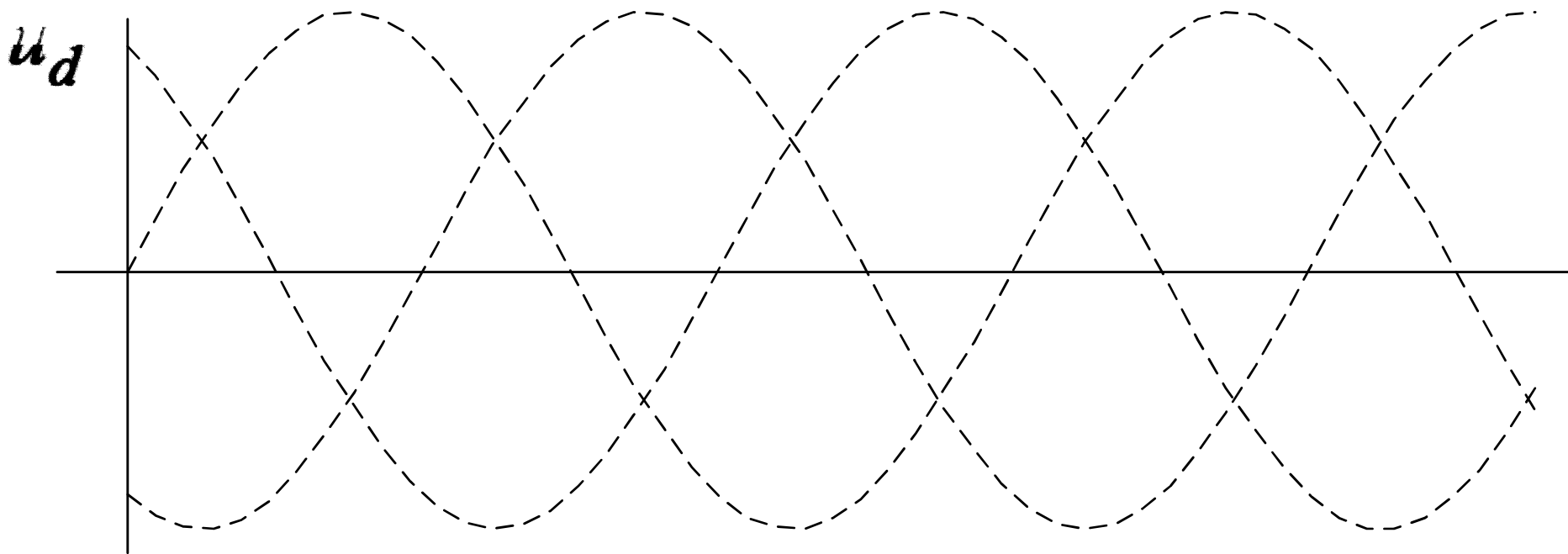
(3) 交流电源端功率因数

电路的功率因数为负值， -0.8267 ，负的意义表达电路处于有源逆变状态，能量的流向为从负载流向电源。



例：P143页第25题

三相半波有源逆变电路中， $\beta=30^\circ$ ，画出当晶闸管 VT_2 的触发脉冲丢失一次时输出电压 u_d 的波形。



东南大学

电力电子技术

第 26 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



5、逆变颠覆及其防止

换流出现问题时

整流：对电路无大影响

逆变：可能出现顺串、大环流

原因：

(1) 触发电路工作不正常

1) 脉冲丢失

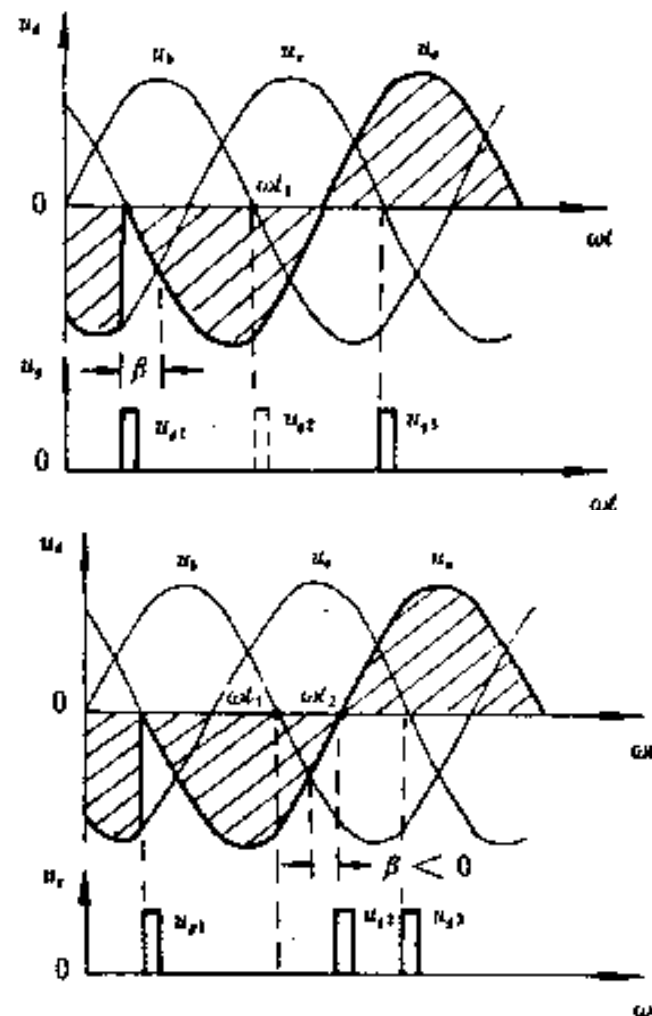
无 u_{g2} ， VT_1 无法向 VT_2 换流

$u_2 > 0$ 时， $u_d > 0$ 与E顺串

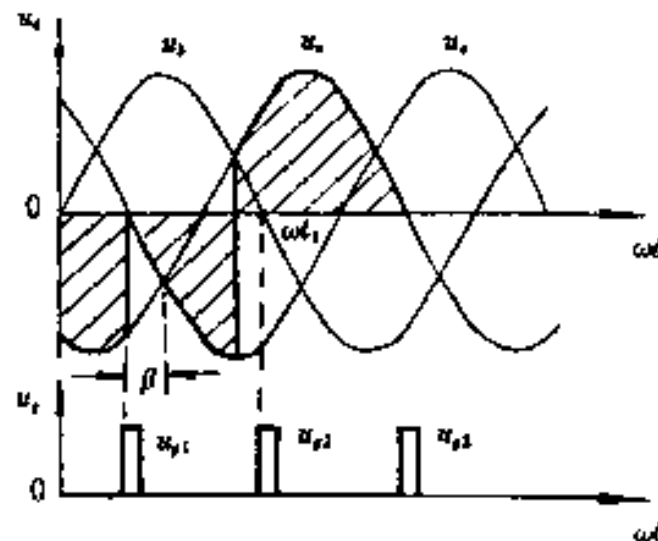
2) 脉冲延时

u_{g2} 延迟， u_{g2} 出现时，

$u_a > u_b$ ，无法换流



(2) 触发脉冲正常，晶闸管故障
 ωt_0 时， VT_3 受正压
 $(E + u_c) > 0$ ， β 较小时，数值较高
 如超过断态重复峰值电压，
 则 VT_3 误导通。



(3) 交流电源故障

缺相、突然消失，但反电势 E 仍存在，导通元件仍能继续导通，
 $I_d = E/R_d$ 很大

(4) β 较小, μ 较大

当逆变角较小时, 由于换流重叠角的影响, 造成晶闸管因承受反压时间不够而关不断, 导致逆变颠覆。

逆变的换流重叠现象与整流时一样,

$$\text{整流: } U_d' = U_d - \Delta U_d$$

$$\text{逆变: } U_d' = U_d + \Delta U_d$$

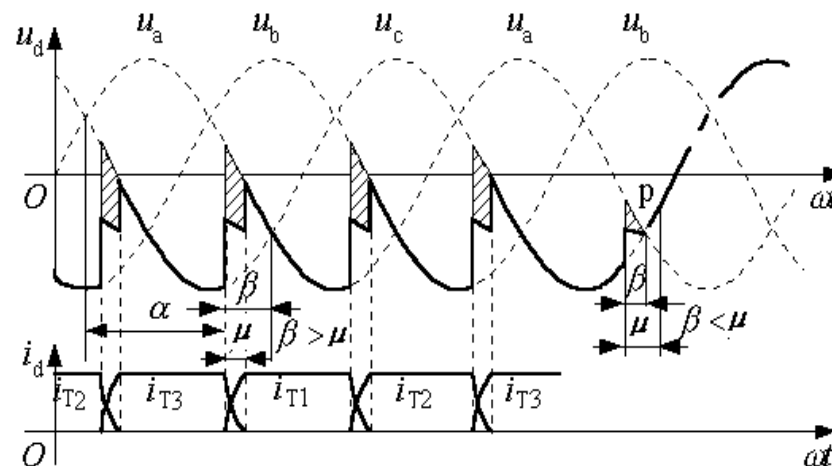
如 $\beta < \mu$, $VT_3 \rightarrow VT_1$ 换流

过P点后, 换流仍未结束, 此后

$u_c > u_a$, 无法换流, VT_3 继续导通,

VT_1 反压无法通。

$u_d = u_c$, 顺串短路



6、最小逆变角的确定

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

δ : t_q 对应的角度, $t_q = 200 \sim 300 \mu s$, $\delta = 4^\circ \sim 5^\circ$

μ : 换流重叠角, $\mu = 15^\circ \sim 20^\circ$

θ' : 安全裕量角, 防止脉冲不对称引起相位差(可达 5°),

取 $\theta' = 10^\circ$

故 $\beta_{\min} = \delta + \mu + \theta' = 30^\circ \sim 35^\circ$

逆变时应保证 $\beta \geq \beta_{\min}$



P144页第33题

三相桥式全控变流装置，反电势—电阻—电感负载， $U_2=220V$ ， $R_d=1\Omega$ ， L_d 数值很大，换流电感 $L_B=1mH$ 。当 $E=400V$ ， $\beta=60^\circ$ 求直流平均电压 U_d ，电流 I_d 及换流重叠角 μ 。

答：

$$X_B = 2\pi f L_B = 0.314(W)$$

$$\mathbf{V}U_d = \frac{mX_B}{2\pi} I_d = \frac{6' 0.314}{2' 3.14} I_d = 0.3I_d$$

写出回路的基尔霍夫电压方程：

$$E - U_d - \mathbf{V}U_d - R_d I_d = 0$$



P144页第33题

三相桥式全控变流装置，反电势—电阻—电感负载， $U_2=220\text{V}$ ， $R_d=1\Omega$ ， L_d 数值很大，换流电感 $L_B=1\text{mH}$ 。当 $E=400\text{V}$ ， $\beta=60^\circ$ 求直流平均电压 U_d ，电流 I_d 及换流重叠角 μ 。

答： 注意回路方程

$$E - U_d - V U_d - R_d I_d = 0$$

$$400 - 2.34 U_2 \cos 60^\circ - 0.3 I_d - 1' I_d = 0$$

$$I_d = 109.7(\text{A})$$

$$U_d = - 2.34 U_2 \cos 60^\circ - 0.3 I_d = - 290.31(\text{V})$$



P144页第33题

三相桥式全控变流装置，反电势—电阻—电感负载，
 $U_2=220\text{V}$ ， $R_d=1\Omega$ ， L_d 数值很大，换流电感 $L_B=1\text{mH}$ 。
 当 $E=400\text{V}$ ， $\beta=60^\circ$ 求直流平均电压 U_d ，电流 I_d 及
 换流重叠角 μ 。

$$\cos a - \cos(a + m) = \frac{X_B I_d}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{p}{m}} = \frac{X_B I_d}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} U_2 \sin \frac{p}{6}} = \frac{2 I_d X_B}{\sqrt{6} U_2}$$

$$b = 60^\circ \text{ ® } a = 120^\circ$$

$$\cos 120^\circ - \cos(120^\circ + m) = \frac{2 I_d X_B}{\sqrt{6} U_2} = \frac{2 \cdot 109.7 \cdot 10^{-3} \cdot 314}{\sqrt{6} \cdot 220} = 0.12784$$

$$\cos(120^\circ + m) = -0.5 - 0.12784 = -0.62784 \text{ ® } m = 8.89^\circ$$



东南大学

电力电子技术

第 27 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com



整流电路的谐波与功率因数 P130页

相控整流电路中，随着控制角 α 的变化，负载的功率因数也会发生变化，对单相半波可控整流电路纯电阻负载情况下的分析，可以看出：波形的缺失会导致功率因数下降。

相控整流电路的电压与电流波形呈现周期性的变化规律，这些非正弦的电压与电流波形，可以通过傅里叶级数展开，得到直流分量与各次谐波分量。

整流电路的谐波与功率因数 P130页

$$u(\omega t) = a_{u0} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_{un} \cos(n\omega t) + b_{un} \sin(n\omega t) \right]$$

$$i(\omega t) = a_{i0} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_{in} \cos(n\omega t) + b_{in} \sin(n\omega t) \right]$$

整流电路的谐波与功率因数 P130页

功率因数

晶闸管变流装置的功率因数是指：装置交流侧有功功率与视在功率之比。因为波形非正弦，已按非正弦电路的方法进行计算。

$$U = \sqrt{U_d^2 + \sum_{k=1}^n \dot{a} U_{dk}^2}$$
$$I = \sqrt{I_d^2 + \sum_{k=1}^n \dot{a} I_{dk}^2}$$

注意直流分量与谐波分量。

整流电路的谐波与功率因数 P130页

$$S = UI$$

$$P = U_d I_d + \sum_{k=1}^n U_{dk} I_{dk} \cos \phi_k$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

S 为视在功率， P 为有功功率， Q 为无功功率。 ϕ_k 为 k 次谐波电压与电流之间的相位差。

整流电路的谐波与功率因数 P130页

电网可视为一个无穷大的电压源，电压波形畸变不大，因此在实际计算中，可将电压近似为正弦波，只考虑电流为非正弦波。设正弦波电压有效值为 U ，非正弦电流有效值为 I ，基波电流有效值及与电压的相位差分别为 I_1 与 ϕ_1 ，得到有功功率与功率因数的表达式：

$$P = UI_1 \cos \phi_1$$

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos \phi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos \phi_1$$

整流电路的谐波与功率因数 P130页

$$P = UI_1 \cos \phi_1$$
$$\cos \phi_1 = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos \phi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos \phi_1$$

式中， I_1/I 为电流波形中含有高次谐波的程度，称“电流畸变系数”； $\cos \phi_1$ 称为“位移因数”为基波有功功率与视在功率之比。

整流电路的谐波与功率因数 P130页

交流输入侧的谐波及功率因数

教材P132页给出了单相桥式全控整流电路大电感负载功率因数表达式：

$$\cos \varphi = 0.9 \cos \alpha$$

整流电路的谐波与功率因数 P130页

交流输入侧的谐波及功率因数

下面给出三相桥式全控整流电路大电感负载功率因数表达式的推导：

变压器二次侧电流有效值表达式：

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0.816 I_d$$

以A相为例，1号晶闸管正向导通120度，4号晶闸管反向导通120度。

整流电路的谐波与功率因数 P130页

交流输入侧的谐波及功率因数

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0.816 I_d$$

利用傅立叶级数展开，有：

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{2\sqrt{3}}{\rho} I_d (\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \mathbf{L} + \frac{1}{n} \sin n\omega t) \\ &= I_{21m} \sin \omega t - I_{25m} \sin 5\omega t - I_{27m} \sin 7\omega t + \mathbf{L} + I_{2nm} \sin n\omega t \end{aligned}$$

式中基波电流幅值与有效值为：

$$I_{21m} = \frac{2\sqrt{3}}{\rho} I_d \quad I_{21} = \frac{I_{21m}}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{2\sqrt{3}}{\rho} I_d}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\rho} I_d = 0.78 I_d$$

整流电路的谐波与功率因数 P130页

得出“电流畸变系数”为：

$$\frac{I_1}{I} = \frac{I_{21}}{I_2} = \frac{\frac{\sqrt{6}}{p} I_d}{\sqrt{\frac{2}{3}} I_d} = \frac{3}{p} = 0.955$$

得出三相桥式可控整流电路大电感负载下功率因数表达式：

$$\cos j = 0.955' \cos \alpha$$

整流电路的谐波与功率因数 P133页

整流输出侧谐波分析 及 整流电路的评价指标

m相整流电路概念:

- (1) 一个周期内有m个波头;
- (2) 每个波头的宽度为 $2p / m$ 。

大电感负载情况下，可以得出通用的输出电压计算公式:

$$U_d = \frac{\sqrt{2}U_s}{p} m \sin \frac{p}{m} \cos \alpha$$

m分别为2，3，6，对应单相桥式，三相半波，三相桥式。 U_s 对三相桥式电路为线电压，其它为相电压。

整流电路的评价指标 P134页

纹波因数 γ_u ：各次谐波分量总有效值与直流分量之比。

直流分量： U_d 直流电压表测量

总交流分量有效值： U 交流电压表测量

各次谐波分量有效值： $U_H = \sqrt{U^2 - U_d^2}$

$$\gamma_u = \frac{U_H}{U_d} = \frac{\sqrt{U^2 - U_d^2}}{U_d}$$

特点：便于测量。

整流电路的评价指标 P134页

电压脉动系数 S_u ：最低次频率的谐波分量幅值与直流分量之比。

控制角 $\alpha=0^\circ$ 时，有：

$$\begin{aligned} S_u &= \frac{\sqrt{2}U_2 \frac{m}{p} \sin \frac{p}{m} \cdot \frac{2}{m^2 - 1}}{\sqrt{2}U_2 \frac{m}{p} \sin \frac{p}{m}} \\ &= \frac{2}{m^2 - 1} \end{aligned}$$

特点：便于计算，注意单相半波可控整流电路 m 不为1。

作业：

P.143 习题 26、28、32

