

仅内部使用 郭小舟

电力电子技术

Power Electronics

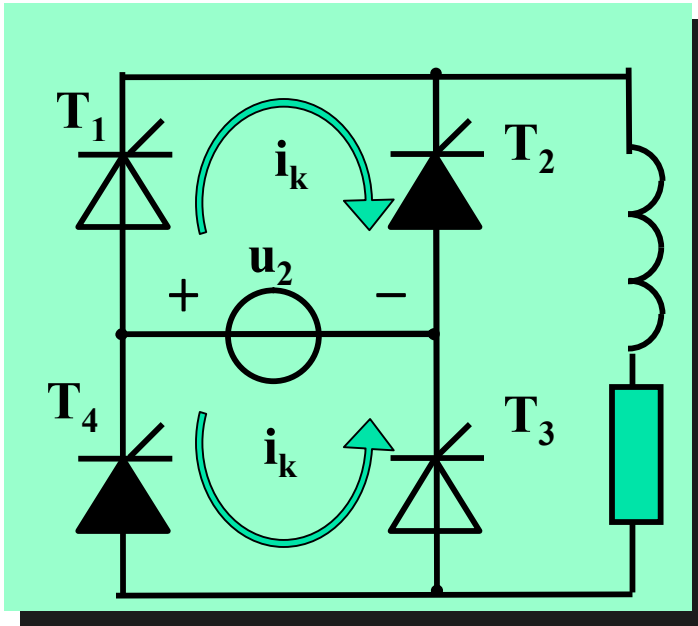
西南交通大学



§ 2-8 变压器漏抗对整流电路的影响

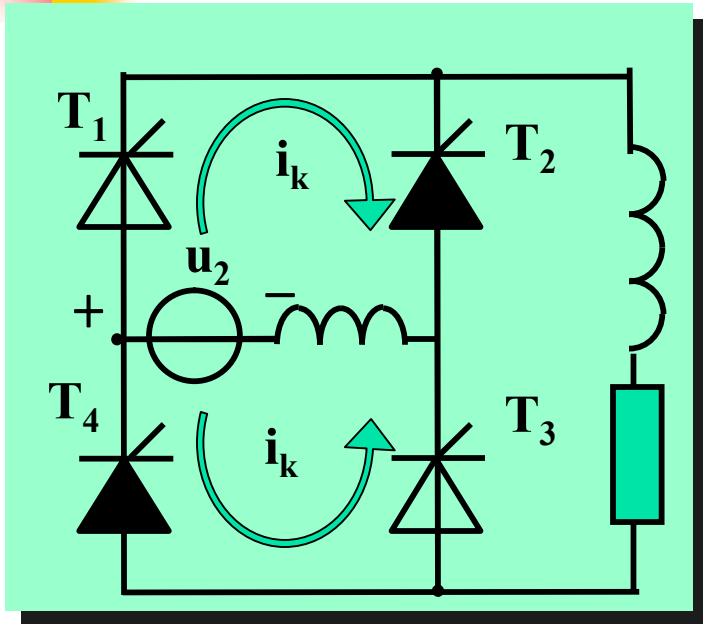
1. 变压器漏抗为零时整流电路换流分析

设电感很大, 换流时直流电流保持不变。初始时 T_2T_4 导通。在 $\omega t=\alpha$ 处触发 T_1T_3 。



设在一段时间内, $T_1T_3T_2T_4$ 均导通, 于是形成了两个短路环。环流使 T_1T_3 的电流增大、 T_2T_4 的电流减小。当 $i_{T_1T_3}$ 的电流等于 I_d 或 $i_{T_2T_4}$ 的电流为零, 换流完成。由于电压源的电流可以跳变, 换流所需时间为零。

2. 当变压器漏抗不为零时, 交流电源等效为一个理想电压源与一个电感的串联(忽略电阻)。



同样，在 α 处触发 T_1T_3 。 $T_1T_3T_2T_4$ 均导通，形成了两个短路环并产生环流如图。于是有：

$$u_2 = 2L \frac{di_k}{dt} = 2\omega L \frac{di_k}{d\omega t} = 2X_B \frac{di_k}{d\omega t}$$

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$$

$$i_k = \int \frac{\sqrt{2}U_2}{2X_B} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_2}{2X_B} (-\cos \omega t) + C$$

边界条件： $\omega t = \alpha$ ， $i_k = 0$ ，代入上式求 C ，再回代得

$$i_k = \frac{\sqrt{2}U_2}{2X_B} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad \alpha \leq \omega t \leq \alpha + \gamma$$

这表明 X_B 不为零时，换流不能跳变完成。设换流所需时间对应的角度为 γ ，当 $\omega t = \alpha + \gamma$ ， $i_k = I_d$ 换流完成：

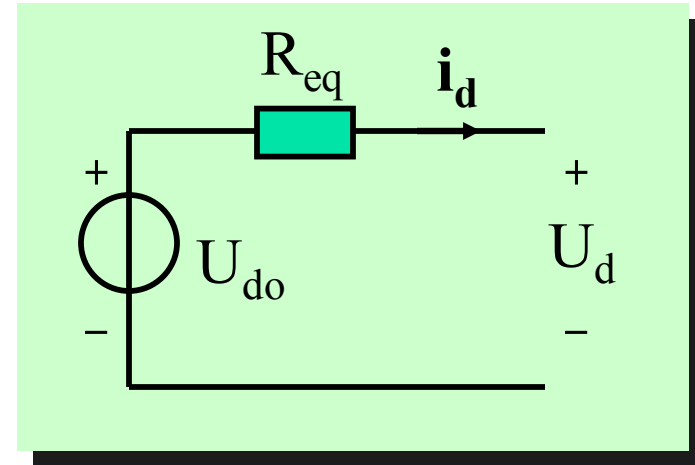
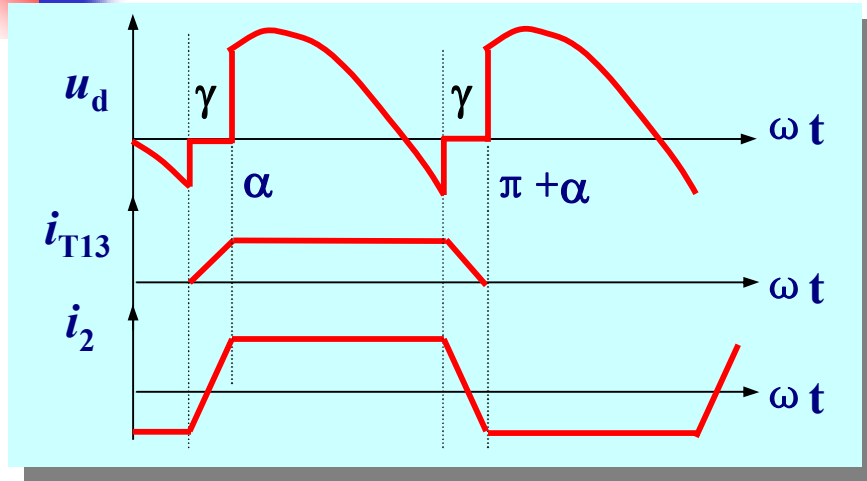
代入得
$$I_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{2X_B} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]$$

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

在换流期间，两组晶闸管同时导通（时间上重叠），所以 γ 称换流重叠角。由于在 γ 期间四个开关都导通 $u_d = 0$ ，与无 X_B 的情况相比产生了“换相电压损失” ΔU_d ：

$$\begin{aligned} \Delta U_d &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] = \frac{2X_B}{\pi} I_d \end{aligned}$$



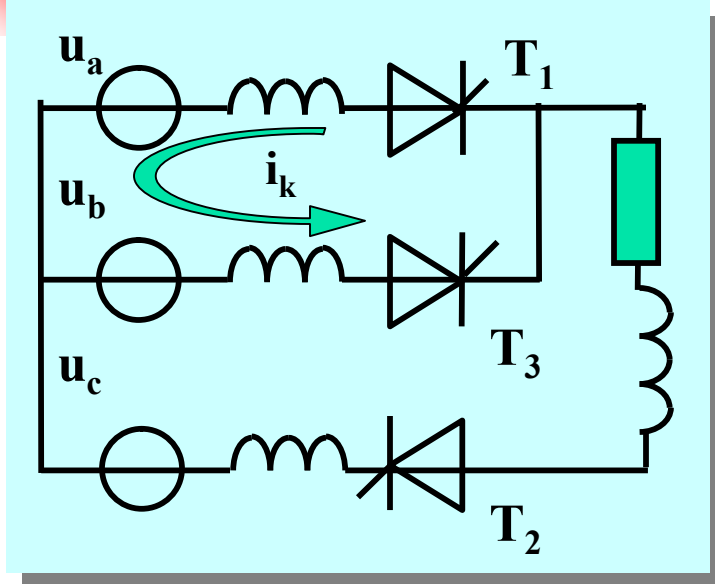


$$U_d = 0.9U_2 \cos \alpha - \frac{2X_B}{\pi} I_d = U_{d0} - R_{eq} I_d$$

有、无 X_B 时电路的主要波形和代维南等效电路如图。

3. 当 X_B 不为零时整流电路分析方法 (以三相桥为例)

a. 作出换流等效电路。 例如换相前 T_1T_2 ，换相完成后为 T_2T_3 ，则在换相中 T_{123} 均导通。换相前后 T_2 状态不变。电路是 T_1 与 T_3 交换。等效电路是：



b. 根据换流等效电路写、解方程
设环流为 i_k 方向如图。

$$u_b - u_a = 2X_B \frac{di_k}{d\omega t}$$

$$u_b - u_a = u_{ba} = \sqrt{6}U_2 \sin \omega t$$

边界条件: $\omega t = \alpha, i_k = 0$

$$i_k = \frac{\sqrt{6}U_2}{2X_B} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad \alpha \leq \omega t \leq \alpha + \gamma$$

设换流所需时间为 γ , 当 $\omega t = \alpha + \gamma, i_k = I_d$ 换流完成:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2X_B}{\sqrt{6}U_2} I_d$$

c. 计算换相电压损失

换相前输出电压: $u_d = u_{ac}$

换相后输出电压: $u_d = u_{bc}$

换相中输出电压

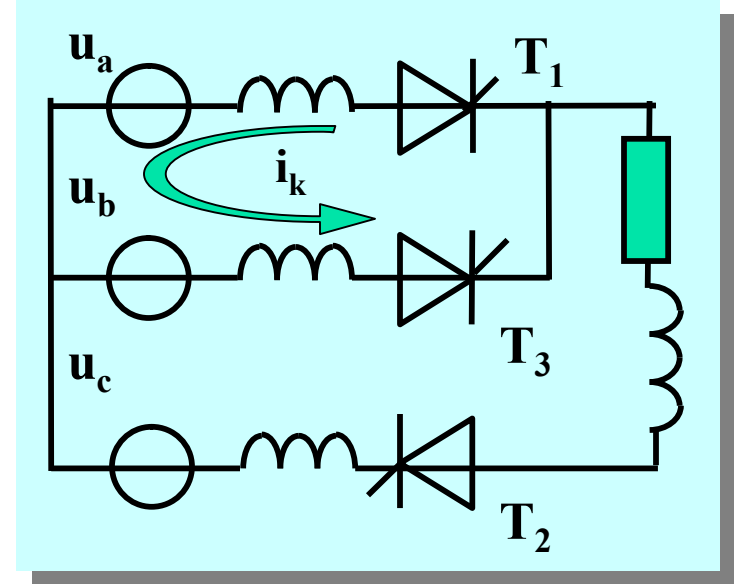
从a相看: $u_d = u_a + X_B \frac{di_k}{d\omega t} - u_c$

从b相看: $u_d = u_b - X_B \frac{di_k}{d\omega t} - u_c$

两式相加: $u_d = (u_{ac} + u_{bc}) / 2$

$u_d = (\text{进入} + \text{退出}) / 2$

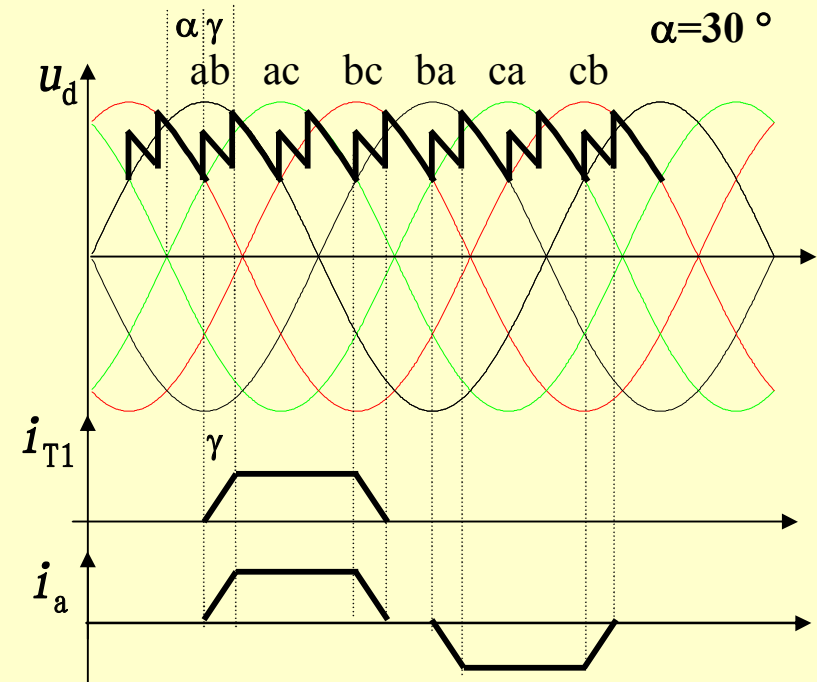
$$\begin{aligned} \Delta U_d &= \frac{1}{\pi/3} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} u_{bc} - (u_{ac} + u_{bc}) / 2 d(\omega t) = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} u_{ba} d(\omega t) \\ &= \frac{3\sqrt{6}U_2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3X_B}{\pi} I_d \end{aligned}$$



输出电压
$$U_d = 2.34U_2 \cos \alpha - \frac{3X_B}{\pi} I_d = U_{d0} - R_{eq} I_d$$

d. 主要波形图

当变压器漏抗不为零时，
电路换相不能瞬时完成；
晶闸管的导通时间延长；
产生换相电压损失；使电
流基波相位滞后并影响电
流的波形。并使变压器副
边电压畸变



关于等效电阻

在整流器的代维南等效电路中有 R_{eq} 等效电阻。它只对
电压计算等效。只能用来计算直流电压和电流。

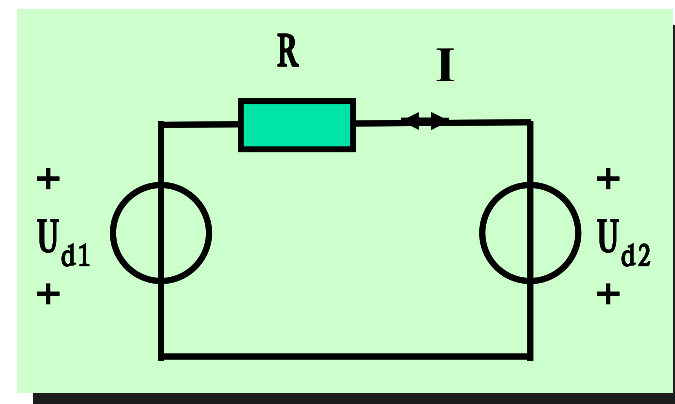
§ 2-9 整流电路的有源逆变运行

1. 有源逆变的概念

逆变是整流的相反过程，即直流到交流的变换。这里源指电网。即电路依靠电网换相，将交流电网当作电路的负载，或者说将能量返回交流电网。

2. 电路中能量的流向

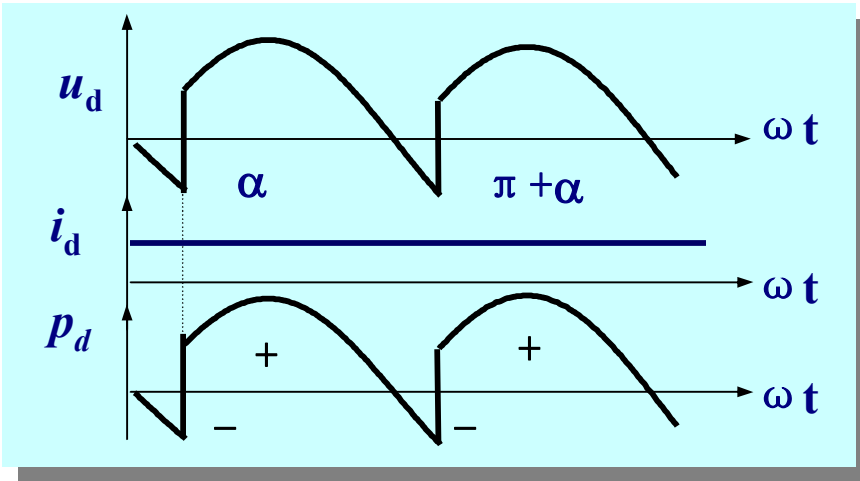
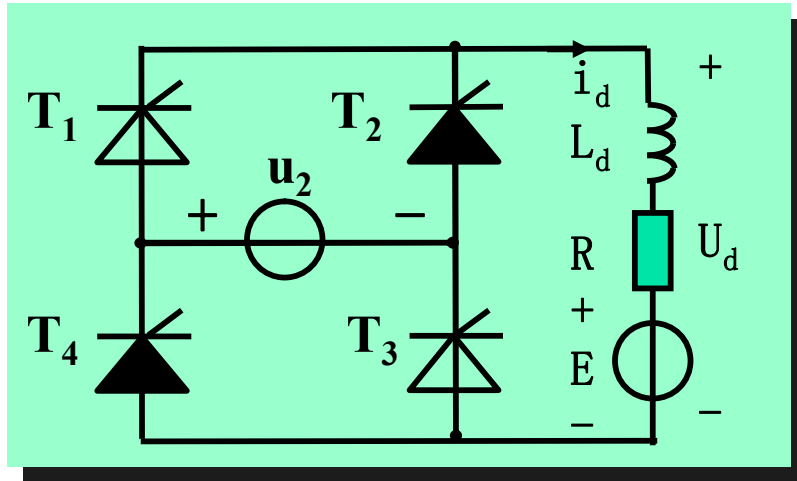
考察两个直流电源构成的回路。若 U_{d1} 大于 U_{d2} ，则电能由 U_{d1} 发出， U_{d2} 接收。标志是 I 由 $U_{d1}+$ 流出从 $U_{d2}-$ 流入。



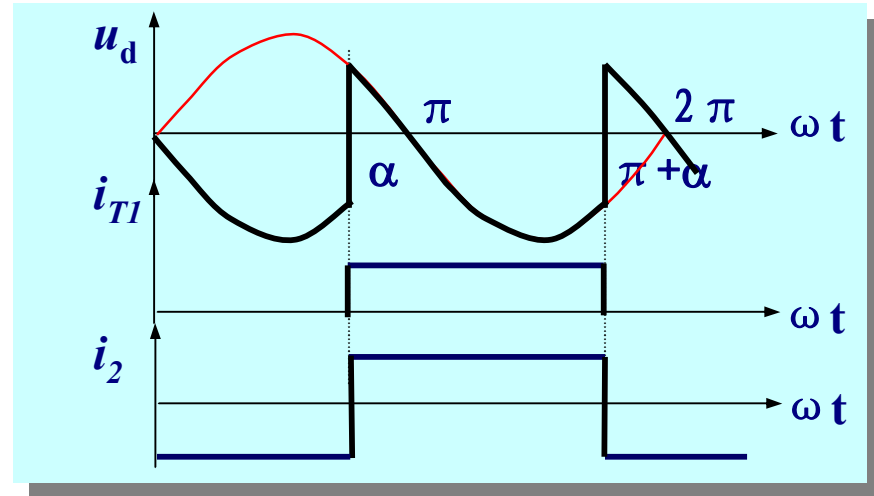
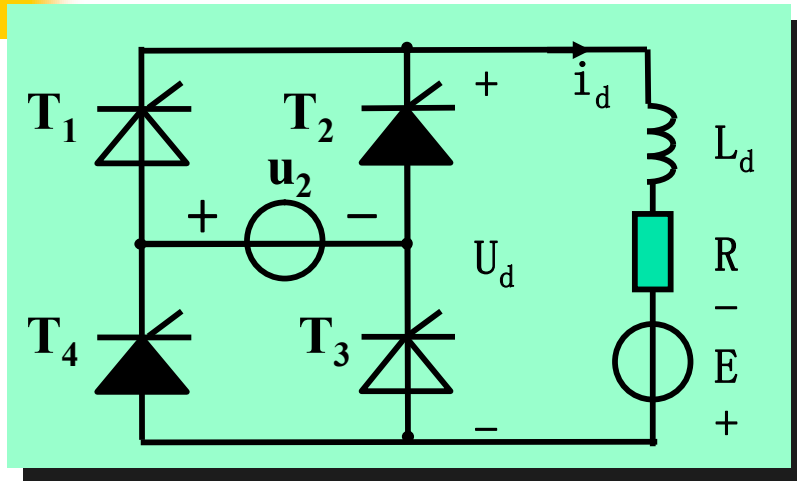
反之若 I 由 $U_{d2}+$ 流出从 $U_{d1}-$ 流入则电能由 U_{d2} 发出 U_{d1} 接收。如果电流方向不能改变，例如整流器，要让电能从 U_{d2} 流入 U_{d1} 则必须同时改变两个电源的极性。

3. 有源逆变的实现条件

考查图示可控整流电路。若 i_d 为**单位值**，则 u_d 也表示了功率值。 P_d 为**正表示负载从电网吸收能量；负表示能量从负载流向电网**。在这种情况下直流电源E吸收电能。电能主要由电网流向负载。



为使电源E发出电功，应当将其方向倒置，使它与 i_d 方向一致；要让等效的整流电源接收电能，必须使 U_d 的极性颠倒，并使 $E > U_d$ 。如何实现 U_d 变号？令 $\alpha > \pi/2$ 。



在正半周 $\omega t = \alpha$ 使 $T_1 T_3$ 导通，起初 u_2 与 E 正向串联，二者均发出电功，电阻与电感吸收电功。当 u_2 过零变负时， u_2 与 E 反向串联， u_2 开始接收电功。在 $|E| > |u_2|$ 时 E 驱动 i_d 流动，电感储能。当 $|u_2| > |E|$ 后， i_d 有减小的趋势，电感产生电感电势。在 E 和电感电势的共同驱动下， i_d 继续流动，直到 $\omega t = \pi + \alpha$ ， $T_2 T_4$ 导通 $T_1 T_3$ 关断。

电路在负半周的工作情况与正半周类似。

从电路中知电流从E的正流出表示E发出电功； U_d 的平均值为负表示 U_d 吸收了电功，而交流电流 i_2 滞后 u_2 的相角大于90度，表明电网吸收电功。从上分析知

有源逆变的实现条件

- 1) 必须有外部直流电源其极性与电流一致
- 2) 保证 U_d 为负或 $\alpha > \pi/2$ 。且 $|E| > |U_d|$ 。

4.可以实现有源逆变的相控整流电路

全控电路，没有续流路径的可控整流电路

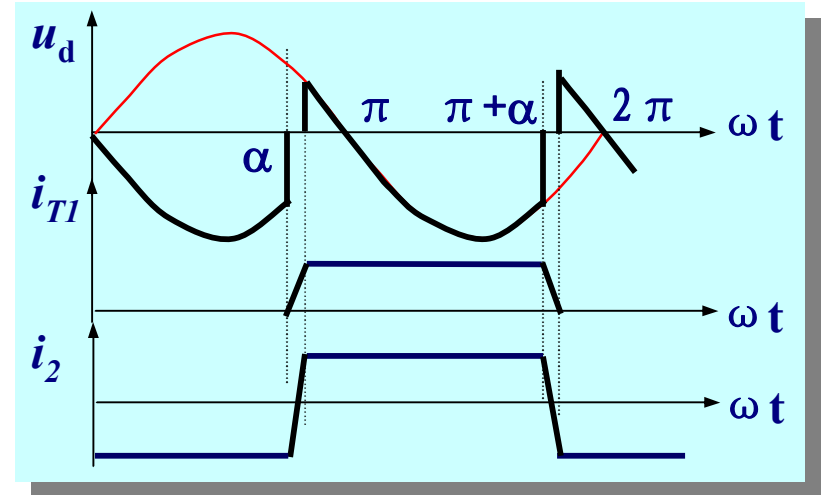
有源逆变电路是某些相控整流电路的另一种运行方式。只要满足条件，它们就用与整流完全相同的过程实现能量的逆转。所以不必将电路分为整流与有源逆变。它们是同一电路，遵循同一规则，有相同的计算式。



5. 有源逆变电路分析

以下分析是要说明**整流与有源逆变是同一电路，遵循同一规则。只要满足条件就能实现能量的逆转。**

1)单相桥：工作过程已经在上面作为例子说明。



从波形图知电路的计算式与整流完全相同波形。例如

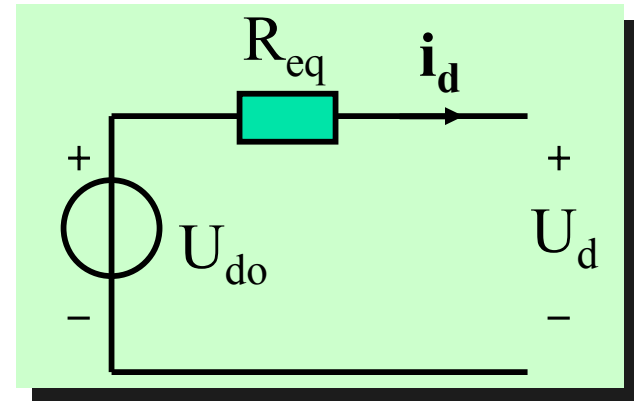
$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \cos \alpha = 0.9U_2 \cos \alpha$$

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

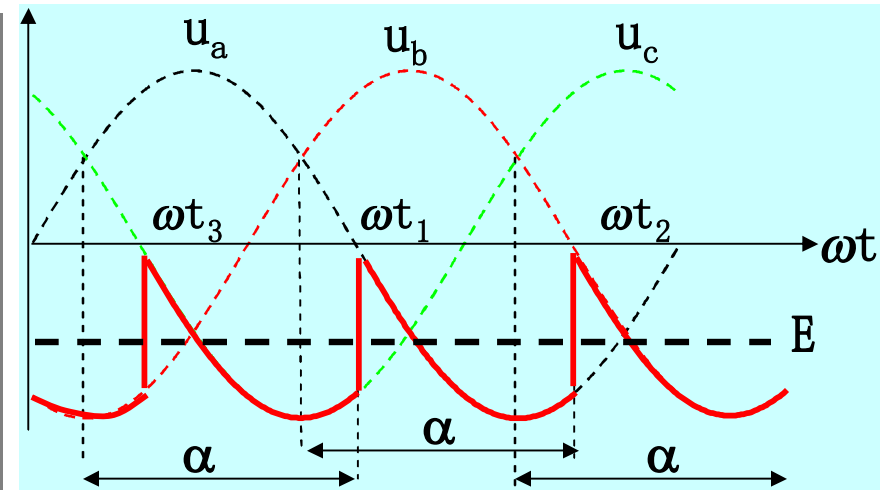
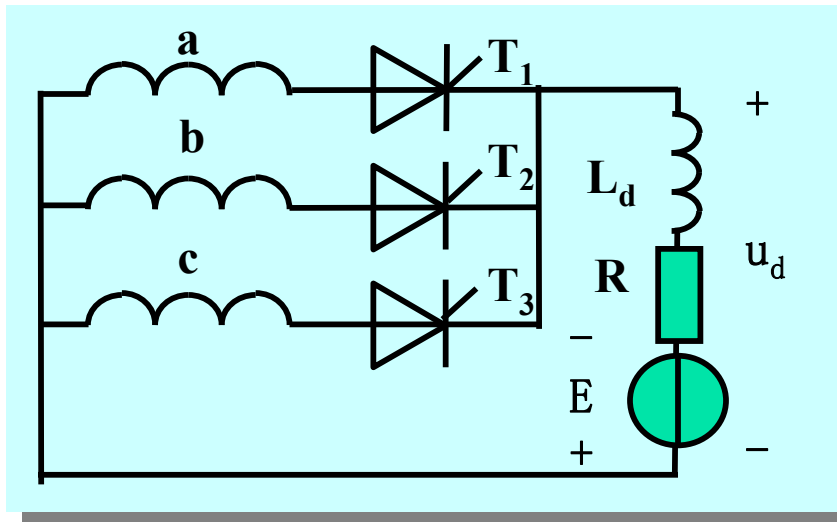
当 X_B 不等于零时它也有换流重叠角 γ 。在 γ 期间，输出电压为零。也要产生换相电压损失。

$$U_d = 0.9U_2 \cos \alpha - \frac{2}{\pi} X_B I_d$$

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



2)三相半波：设电路已经满足逆变条件。控制角 $\alpha > \pi/2$ 直流电感很大，电流连续平直。



当 $\alpha=150^\circ$ ，在 ωt_1 处触发 T_1 ，虽然此时 u_a 为零，但 T_1 承受正向电压而能导通。（或 $u_{AK1}=u_{ac}>0$ ）

在 $|E| > |u_a|$ 期间， E 克服 u_a 驱动电流流动，同时电感储能。当 $|E| < |u_a|$ 时，电流有衰减趋势，电感产生感生电势，或释放储能，它与 E 一道驱动电流流动。直到在 ωt_2 处 T_2 触发， T_1 被反压关断。（或 $u_{AK1} = u_{ab} < 0$ ）其它两相工作过程相同。

输出电压波形如图。当 α 在 $\pi/2$ 到 π 范围内变化时输出电压总是负面积多于正面积，即平均值为负。

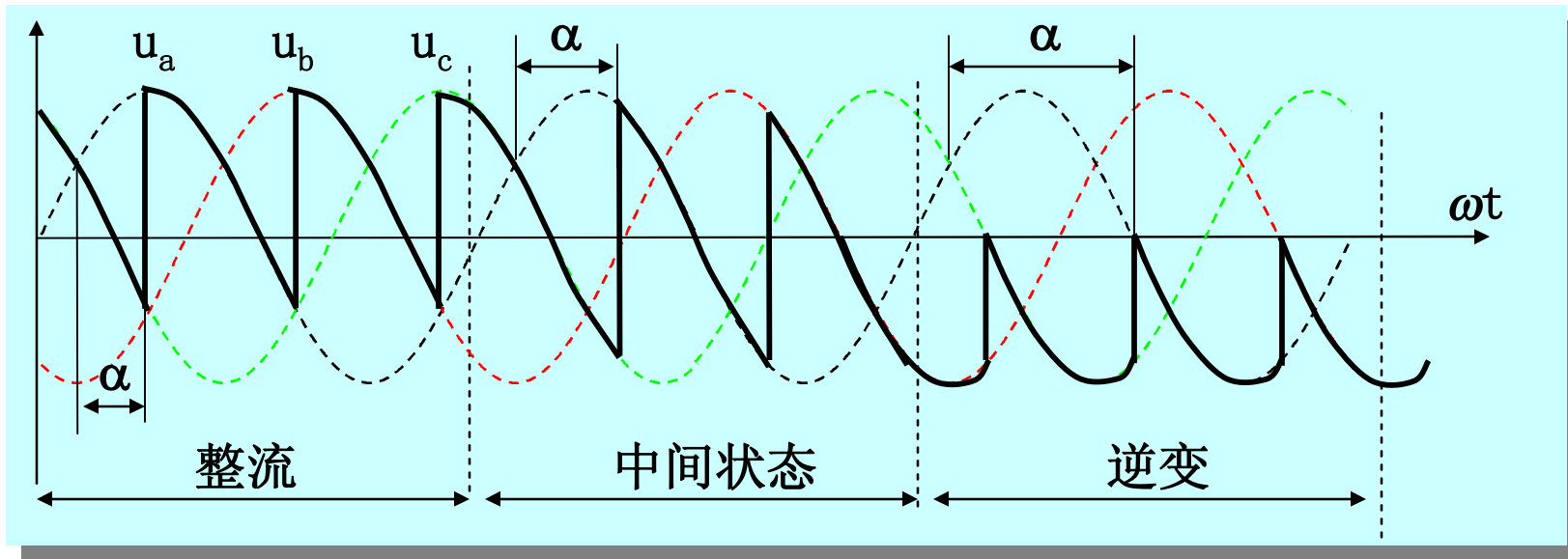
从变压器副边电流波形看，电流主要在电压波形的负半周，表示交流电源吸收了电能。

三个晶闸管轮流依次工作 $1/3$ 周期，与整流时相同。
电路的输出：根据波形图可得

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

$$I_d = \frac{|E| - |U_d|}{R} \quad I_T = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d \quad I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d$$

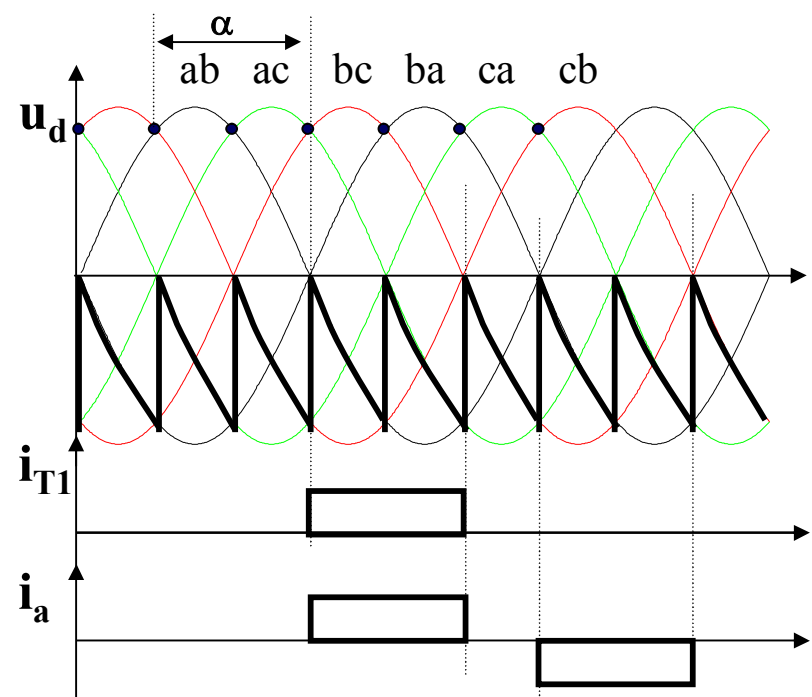
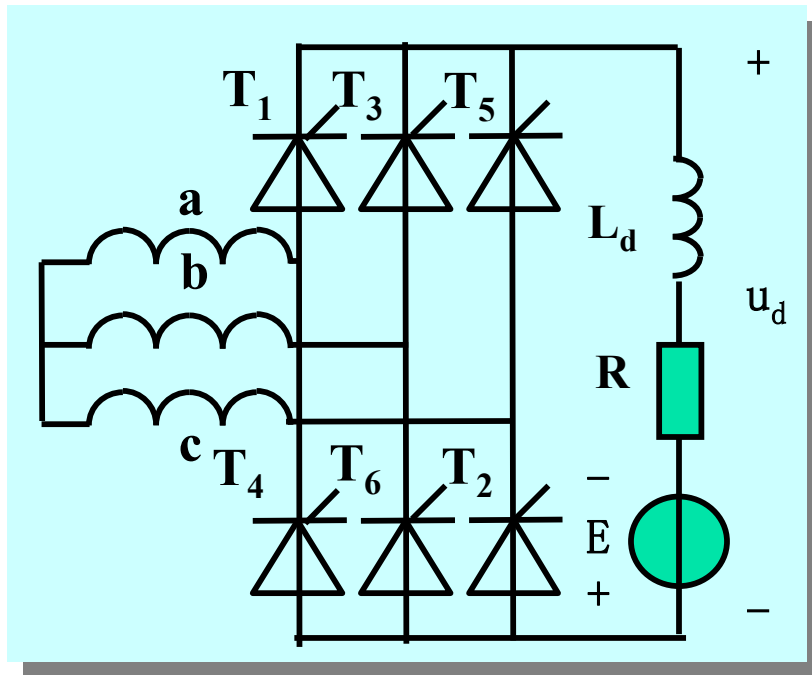
计算式与整流时完全相同。同样当 X_B 不为零时也存在换流重叠角，规则也与整流时完全一样。**有源逆变是整流电路的另一种运行方式，不是一种特殊的电路。**

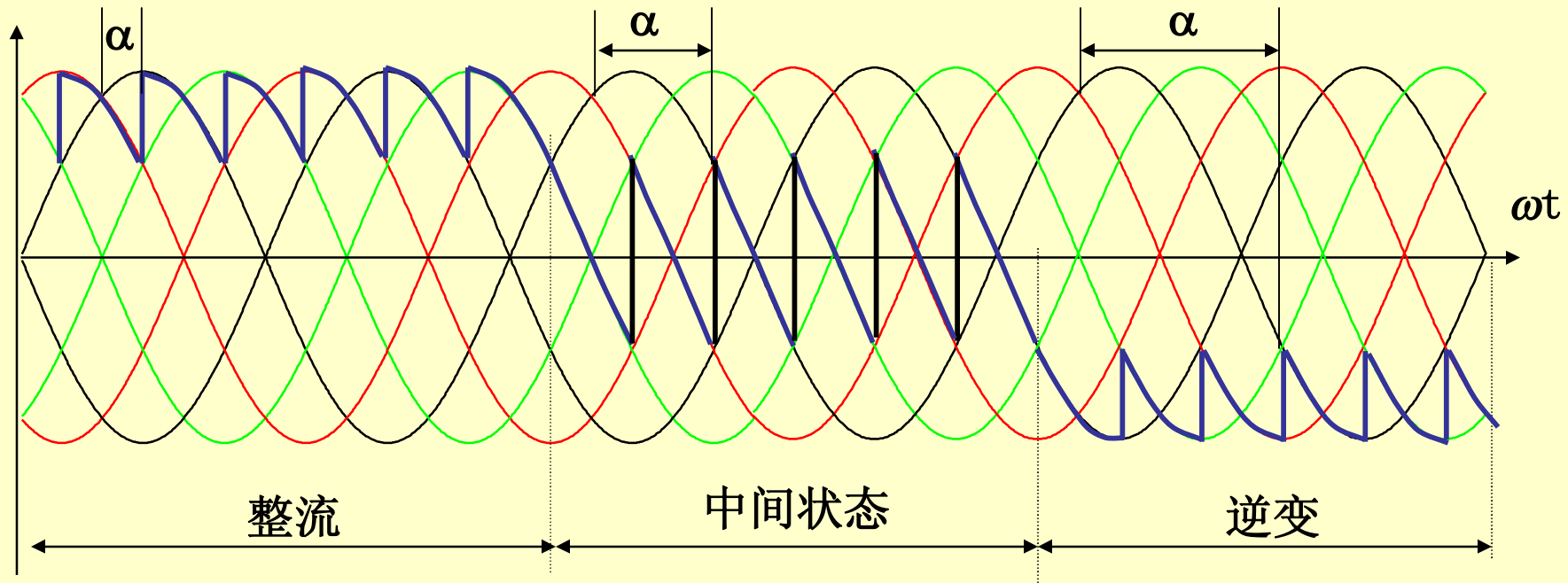


在三相半波电路中当 $\alpha < \pi/2$ 时为整流状态； $\alpha = \pi/2$ 时为中间状态； $\alpha > \pi/2$ 时为逆变状态(满足逆变条件)。

3) 三相桥式电路：设电路已经满足逆变条件。控制角 $\alpha > \pi/2$ 。直流电感很大，电流连续平直。根据整流电路的知识，很容易得到电路的工作波形。图为 $\alpha = 150^\circ$ 时的电路输出。

当 X_B 不为零时，存在换流重叠角，此时输出电压为进入线电压与退出线电压之和的一半。计算同整流。





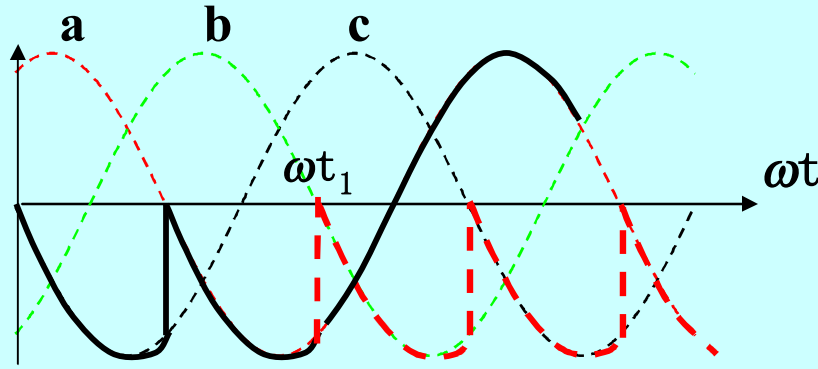
在三相桥中当 $\alpha < \pi/2$ 时为整流状态； $\alpha = \pi/2$ 时为中间状态； $\alpha > \pi/2$ 时为逆变状态(满足逆变条件)。

6. 有源逆变的失败与控制角的限制

在正常情况下，直流电势 E 与整流电压 U_d 平衡，直流电流 I_d 为限定值。但若因某些原因造成 E 与 U_d 顺向串联或 E 短路，产生巨大电流，称逆变失败或逆变颠覆。

导致逆变失败或逆变颠覆的原因有：

1) 晶闸管故障，该通的不通导致该断的不断。

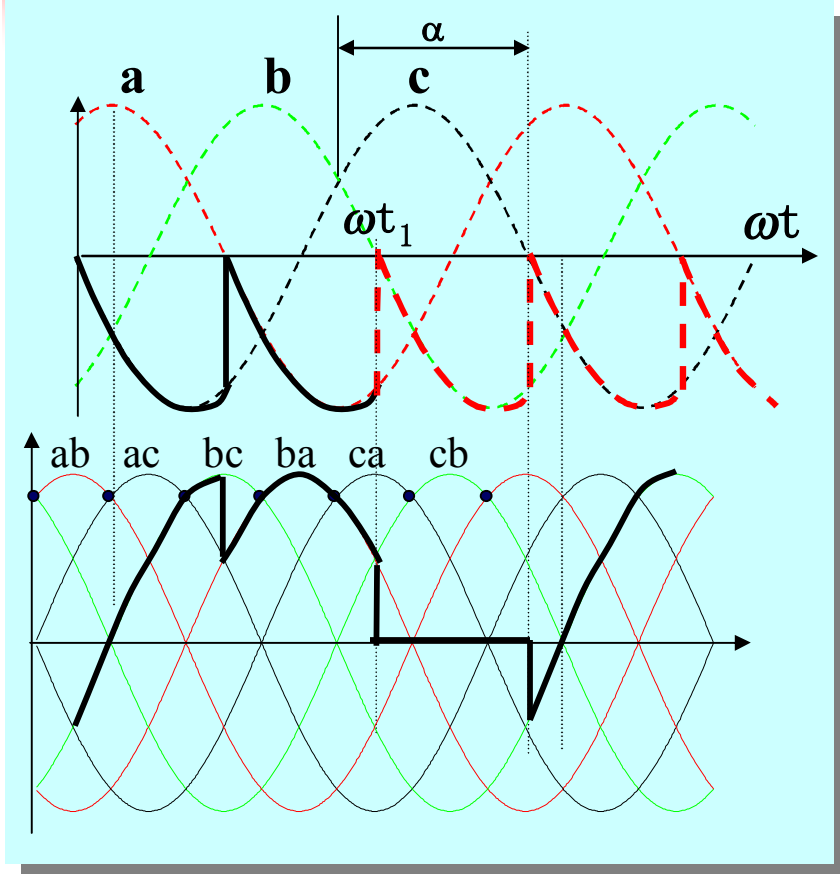


如图本该在 ωt_1 使 T_2 导通 T_1 关断。但 T_2 不通则 T_1 不断。于是电路不能输出 U_d ，引起逆变失败。

2) 控制系统错误导致触发信号丢失或延迟。前者与1)类似，后者使晶闸管不能正常换相。

3) 交流电源异常，如缺相，瞬间断电等。有源逆变依靠交流电网实现晶闸管的导通与关断。没有交流电压是不能工作的。

4) 控制角不适当使晶闸管不能关断。其中最后一个原因是设计问题。作重点讨论。



仍以三相半波电路为例。研究晶闸管两端的电压波形可看出，它的关断是因它承受了反压。 α 增大反压时间缩短。由于晶闸管关断需要一段时间。反压时间太短不能使晶闸管关断或可靠关断。

当有 X_B 时，会产生换相重叠角 γ 。必须在 γ 后使晶闸管承受足

够长的反压。否则不能使晶闸管关断。而 γ 与负载电流有关。设计时应考虑最大电流时的 γ 。此外，电网电压的波动也会影响 γ 。

综上所述，为保证电路正常工作，不能使 α 过大。

一般 α 由下式给出: $\alpha < \pi - (\gamma + \delta + \theta')$

δ 为晶闸管关断时间对应的角度, θ' 为裕量角。

7. 有源逆变的应用(自学)

- 1) 直流可逆传动
- 2) 超高压直流输电
- 3) 串级调速
- 4) 能量回收系统或特殊大功率负载。

§ 2-10 整流电路的功率因数与提高(简介)

1. 整流电路的功率因数 λ

$$\lambda = \text{有功功率} / \text{视在功率}$$

设电源的原边电压为正弦波, 电流为非正弦, 它可以分解为与电网同频率的基波与不同频的高次谐波。



当基波电流与正弦电压不同相时，产生有功与无功；
而谐波电流与电源电压作用只产生无功。

对正弦交流电路：

功率因数=基波有功功率/基波视在功率

对非正弦的整流电路：

λ =有功功率/视在功率

视在功率=电压有效值*总电流有效值

有功功率=电压有效值*基波电流有效值* $\cos\phi$

ϕ 是电压与电流相量间的夹角，称功率因数角。所以

$\lambda=(\text{基波电流有效值}/\text{总电流有效值})*\cos\phi=v \cos\phi$

$v=I_{(1)}/I$ 称为畸变因数。

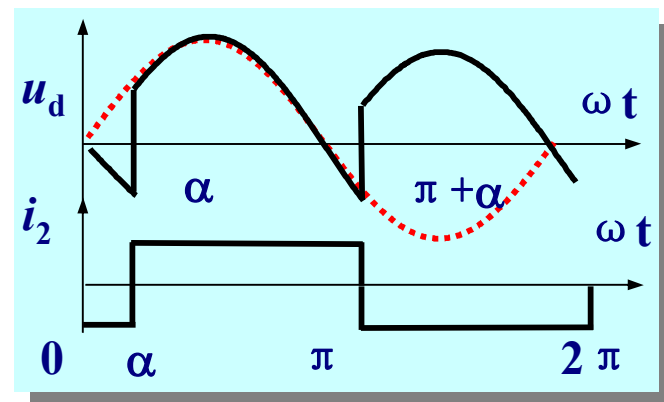
即：功率因数=畸变因数*位移因数(基波功率因数)

非正弦交流电路的功率因数由畸变因数和位移因数二者的积来决定。

2. 整流电路的功率因数 λ 的计算

1) 单相全控桥

为简单和突出重点, 假设 $X_B=0$, 电路是大电感负载。将变压器副边电流进行付氏级数展开:



$$i_2 = \frac{4}{\pi} I_d \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$$

$$I_{2(1)} = \frac{4}{\sqrt{2}\pi} I_d \quad I_2 = I_d \quad v = \frac{4}{\sqrt{2}\pi} = 0.9$$

基波功率因数 $\cos \phi = \cos \alpha$

功率因数 $\lambda = v \cos \phi = 0.9 \cos \alpha$

表明功率因数只与 α 有关。 α 越大功率因数越小。其畸变因数是常数。

2) 单相半控桥

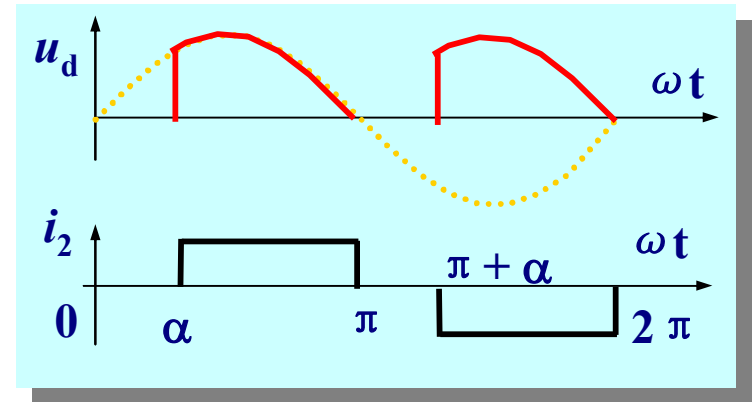
$$I_{2(1)} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \quad I_2 = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} I_d$$

$$v = \frac{I_{2(1)}}{I_2} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi(\pi - \alpha)}} \cos \frac{\alpha}{2}$$

基波功率因数 $\cos \phi = \cos \frac{\alpha}{2}$

功率因数 $\lambda = v \cos \phi = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi(\pi - \alpha)}} \cos^2 \frac{\alpha}{2}$

表明在 α 小于60度时单相半控桥的功率因数比全控桥高。这就是很多场合都采用它的原因之一。



3) 三相全控桥

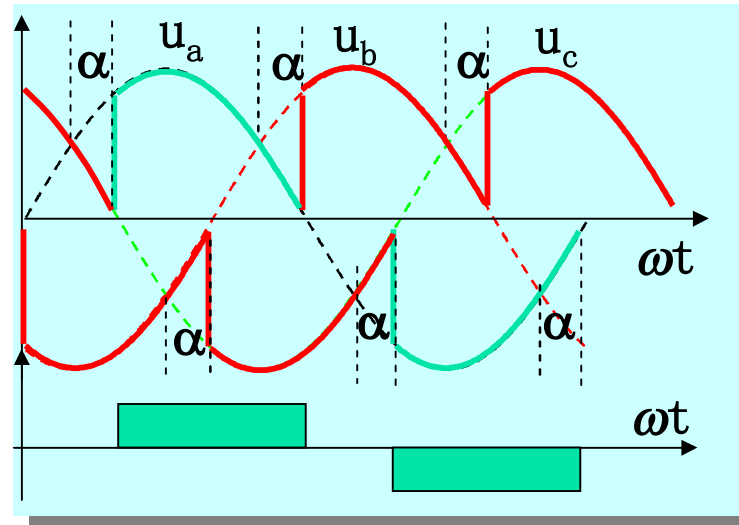
$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d$$

$$I_{2(1)} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$$

$$v = \frac{I_{2(1)}}{I_2} = \frac{3}{\pi}$$

基波功率因数 $\cos \phi = \cos \alpha$

功率因数 $\lambda = v \cos \phi = \frac{3}{\pi} \cos \alpha$



3. 提高整流电路功率因数的措施(自学)

从整流电路功率因数的概念知，要提高功率因数应当从改善波形因数和相位移因数两方面着手。

1) 由于(在 α 小于60度时)半控桥的功率因数高于全控桥，所以可以用半控桥的运行方式控制全控桥。

2) 采用扇形控制以消除相位移，提高功率因数。

3) 采用SPWM控制技术，在以后的章节中要学到。



作业: 2.16 2.17 2.21 2.22



例10. 图中 $R=1\Omega$, $L_B=0.5\text{mH}$,
 $U_2=100\text{V}$, L_d 极大, $\alpha=60^\circ$, $E=40\text{V}$, 求
 I_d 和 U_{d0}

$$R_{eq} = \frac{2X_B}{\pi} = 0.1(\Omega)$$

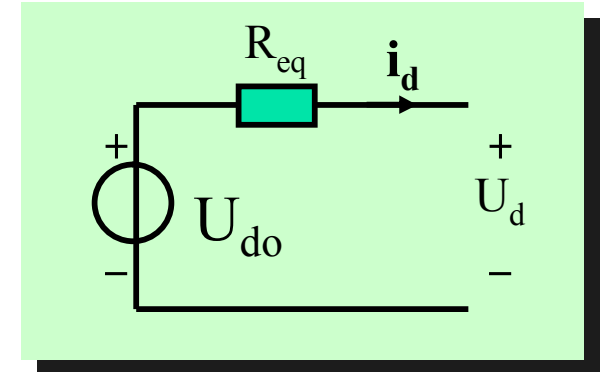
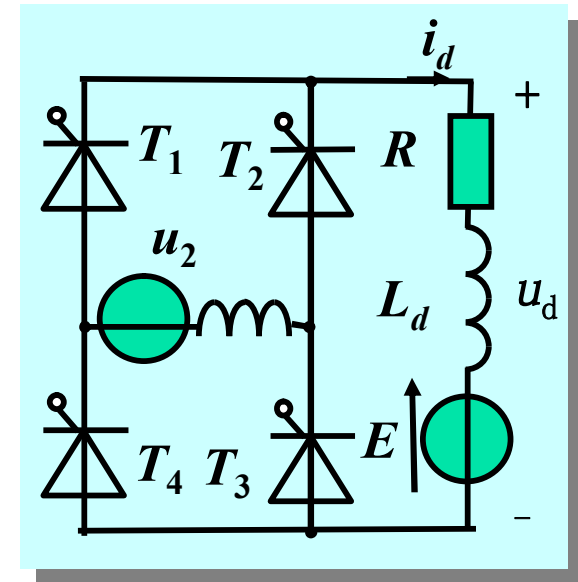
$$I_d = \frac{U_{d0} - E}{R + R_{eq}} = 4.55(A)$$

$$U_d = 0.9U_2 \cos \alpha - \frac{2X_B}{\pi} I_d$$

$$= U_{d0} - R_{eq} I_d = 44.5(V)$$

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2X_B}{\sqrt{2}U_2} I_d = 0.01$$

$$\gamma = 60.00 - 60 = 0.66^\circ$$



例11. 三相半波电机负载。 $R=0.3\Omega$ ， L_d 极大，
 $I_d=20A$ ， $U_d=220V$ ， $U_2=230V$ 。若电机再生制动， 电流
40A。 求控制角 α 的值。

解 当电机作电动机运行时， 电机的反电势
E:

$$E = U_d - I_d R = 214(V)$$

当电机作发电机运行时， 直流电压是:

$$U_d = E - I_d R = -202(V)$$

控制角 α 为: $U_d = 1.17U_2 \cos \alpha$

$$\alpha = 138.6^\circ$$



例12. 三相全控桥逆变运行。 $U_2=220V$ 、 $R=10\Omega$ ， L_d 极大， $L_B=1mH$ ， $E=-400V$ ， $\alpha=120^\circ$ ，求 U_d 、 I_d 、 γ 和 逆变功率。

解 $U_{d0} = 2.34U_2 \cos \alpha = -257.4(V)$

$$R_{eq} = \frac{3X_B}{\pi} = 0.3(\Omega) \quad I_d = \frac{E - U_{d0}}{R + R_{eq}} = 13.84(A)$$

$$U_d = U_{d0} - \frac{3X_B}{\pi} I_d = -261.55(V)$$

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2X_B}{\sqrt{6}U_2} I_d \quad \gamma = 1.07^\circ$$

$$P = U_d I_d = 3619.9(W)$$



例13. 三相全控桥逆变运行。 $U_2=220V$ 、 $X_B=0.1\Omega$ ， L_d 极大， $\delta=5^\circ$ ， $\beta=30^\circ$ 。求 $I_{d\max}$ 。

解 $\gamma_{\max} = \beta - \delta = 25^\circ$
 $\alpha = \pi - \beta = 150^\circ$

由 $\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2X_B}{\sqrt{6}U_2} I_d$

$$I_{d\max} = \frac{\sqrt{6}U_2}{2X_B} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] = 305.73(A)$$

例13. 单相半控桥电阻电感负载。设电源电压为 U_2 ， L_d 极大，控制角为 α 。为使功率因数为1，应该加多大的电容？



解：只考虑基波

基波有效值

$$I_{2(1)} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$$

基波无功分量有效值

$$I_{2(1)q} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d \cdot \sin \alpha$$

设并联的电容是C，则电容电流的有效值：

$$I_C = \omega C U_2 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d \cdot \sin \alpha$$

$$C = \frac{\sqrt{2}}{\pi \omega U_2} I_d \cdot \sin \alpha$$

