



电力电子基础

Fundamental Power Electronics

5-2 负载谐振式逆变电路

东南大学电气工程学院
2019年11月

1、负载谐振式逆变电路分类

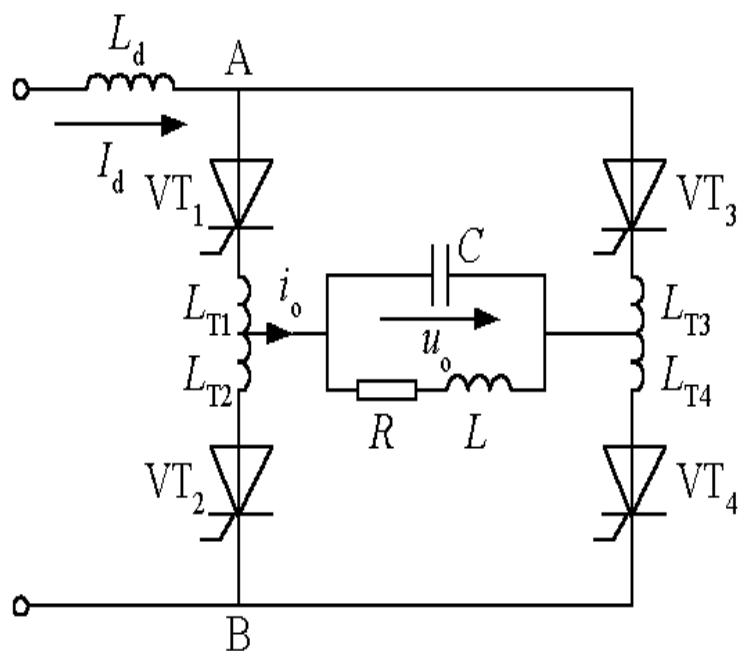
■ 并联谐振式逆变器

换流C与负载L并联，利用C与L的并联谐振特性实现自然环流的逆变电路。

■ 串联谐振式逆变器

换流C与负载L串联，利用C与L的串联谐振特性实现自然环流的逆变电路。

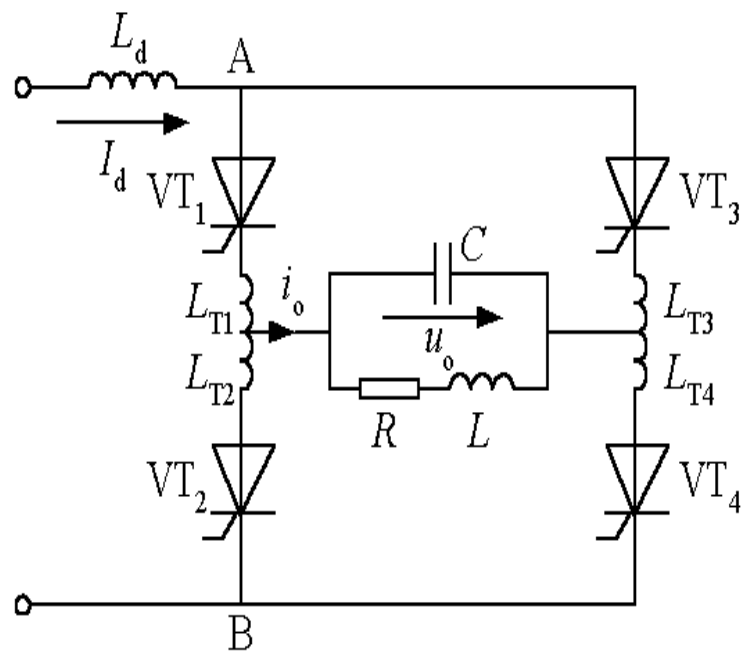
■ 并联谐振式逆变器



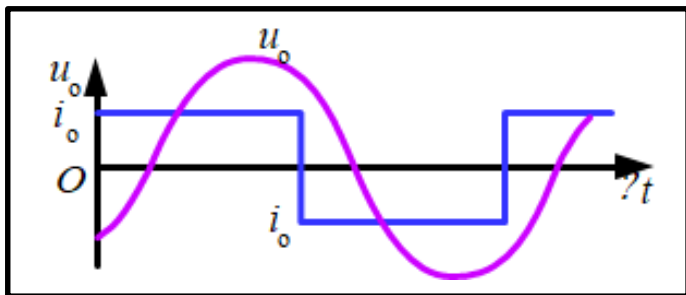
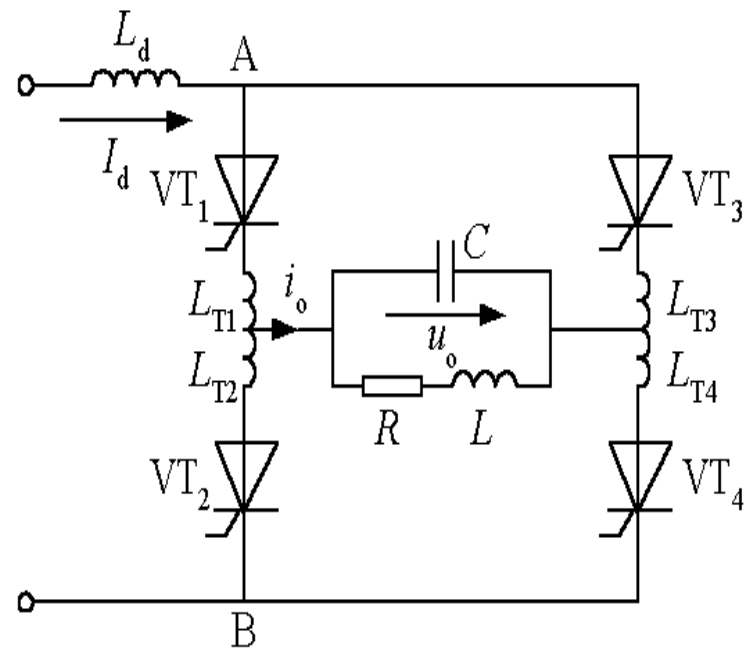
利用L与C的并联谐振特性实现换流的逆变电路

特点:

- ✓ 工作方式: **负载换相**
- ✓ 要求: **负载电流略超前于负载电压**
- ✓ 限流电抗器: 限制晶闸管开通时的 di/dt 。
- ✓ 若 VT1、4 和 VT2、3 以 1000~2500Hz 的轮流导通, 可得中频交流电, 需采用快速晶闸管。
- ✓ L_d : 使直流电流平直, 而且可限制中频电流进入直流。

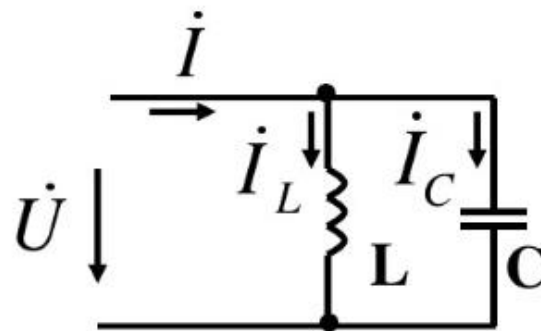


- ✓ 输出电流 i_o ：接近矩形波，含基波和各奇次谐波，且谐波幅值远小于基波。
- ✓ C和L、R构成并联谐振电路。
- ✓ 基波频率接近负载电路谐振频率，故负载对基波呈高阻抗，对谐波呈低阻抗，谐波在负载上产生的压降很小，因此负载电压波形接近正弦。

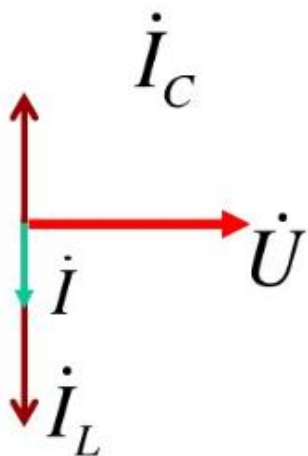


2、并联谐振电路

理想情况：纯电感和纯电容
并联。



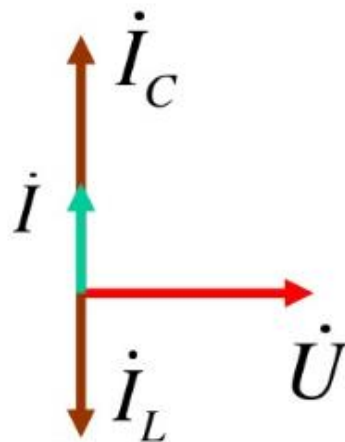
$$\begin{cases} I_L = U \cdot \frac{1}{\omega L} \\ I_C = U \cdot \omega C \end{cases}$$



当 $I_L > I_C$ 时
 i 落后于 \dot{U} (感性)

(显感性)

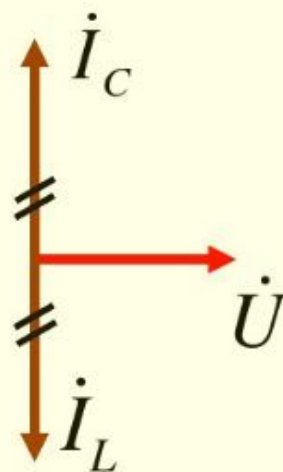
$$\omega L < 1/(\omega C)$$



当 $I_L < I_C$ 时
 i 领先于 \dot{U} (容性)

(显容性)

$$\omega L > 1/(\omega C)$$

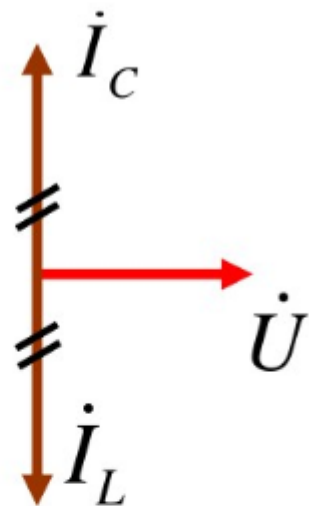
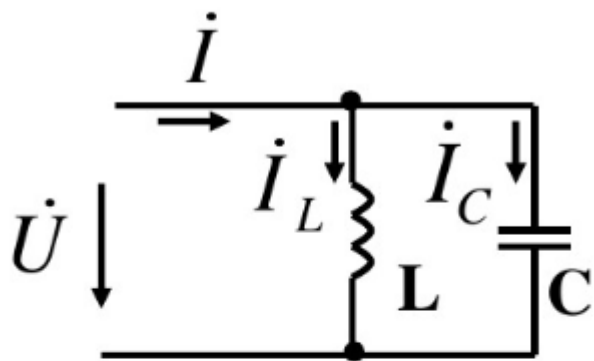


当 $I_L = I_C$ 时
 $i = 0$ **谐振**

(显高阻)

$$\omega L = 1/(\omega C)$$

理想情况下并联谐振条件

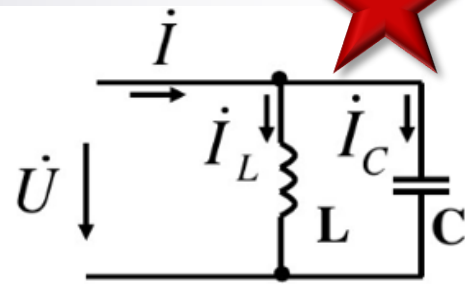
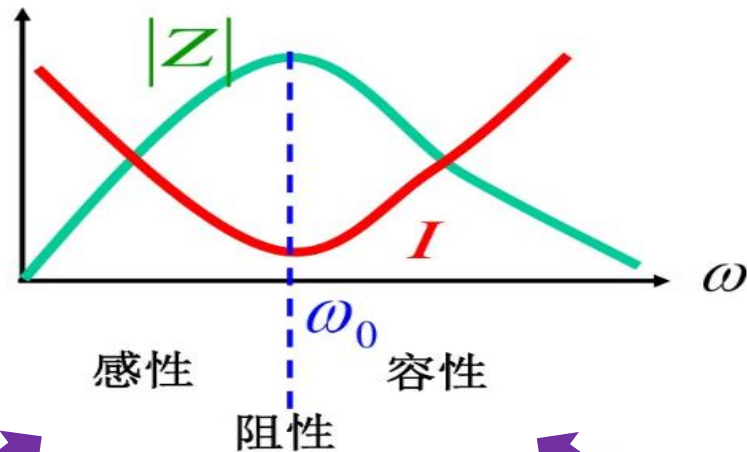


$$I_L = I_C \rightarrow \frac{U}{X_L} = \frac{U}{X_C} \rightarrow \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

$$\rightarrow \boxed{\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}} \quad \text{或}$$

$$\boxed{f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$$

■ 并联谐振特性曲线

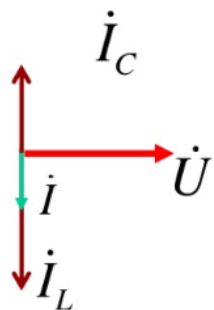


$$\begin{cases} I_L = U \cdot \frac{1}{\omega L} \\ I_C = U \cdot \omega C \end{cases}$$

$$Z = j \frac{1}{\frac{1}{\omega L} - \omega C}$$

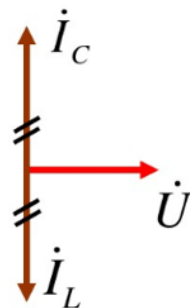
$$\omega L < 1/(\omega C)$$

$$I_L > I_C$$



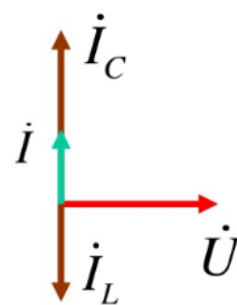
$$\omega L = 1/(\omega C)$$

$$I_L = I_C$$



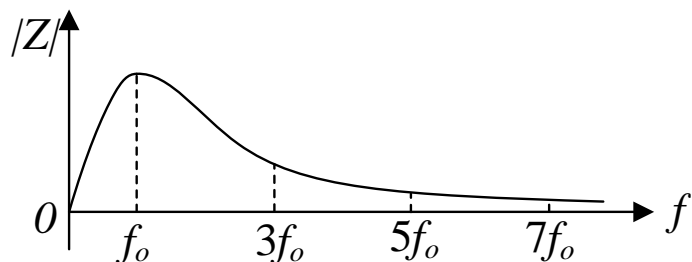
$$\omega L > 1/(\omega C)$$

$$I_L < I_C$$

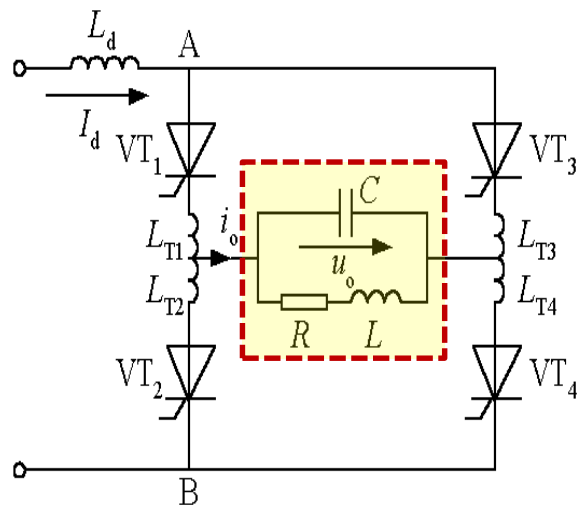
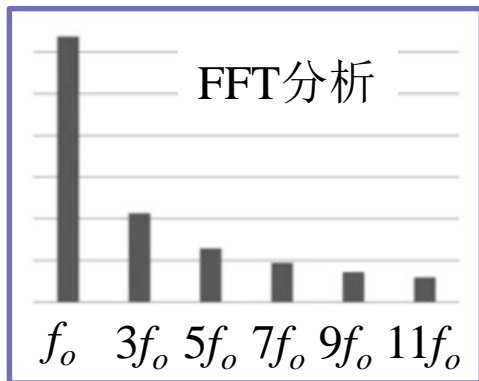
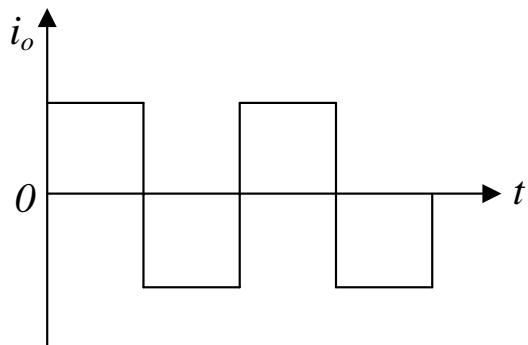


■ 输出电压特性

(1) 阻抗特性



(2) 电流特性



(3) 电压特性

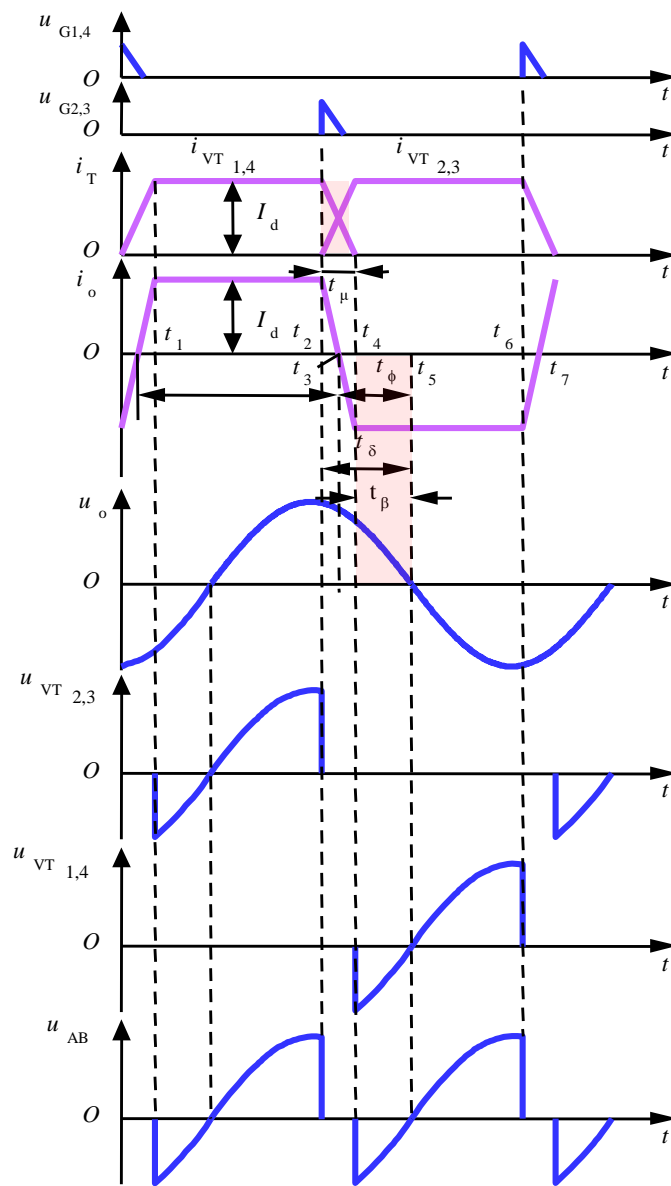
$$u_o = i_o \cdot Z$$

- 主要含基波成分，谐波成分较小。
- 谐波在负载上产生的压降很小，因此负载电压波形接近正弦。

■换流阶段:

保证晶闸管的可靠关断

- ✓ 换流时间: t_μ
- ✓ 换流重叠角: $\mu = \omega t_\mu$
- ✓ 关断时间: 晶闸管需一段时间才能恢复正向阻断能力。换流结束（电流下降至零）后还要使 VT_1 、 VT_4 承受一段反压时间 t_β 。
 （ $t_\beta = t_5 - t_4$ 应 $>$ 晶闸管的关断时间 t_q 。） 否则会逆变失败。



可靠换流条件:

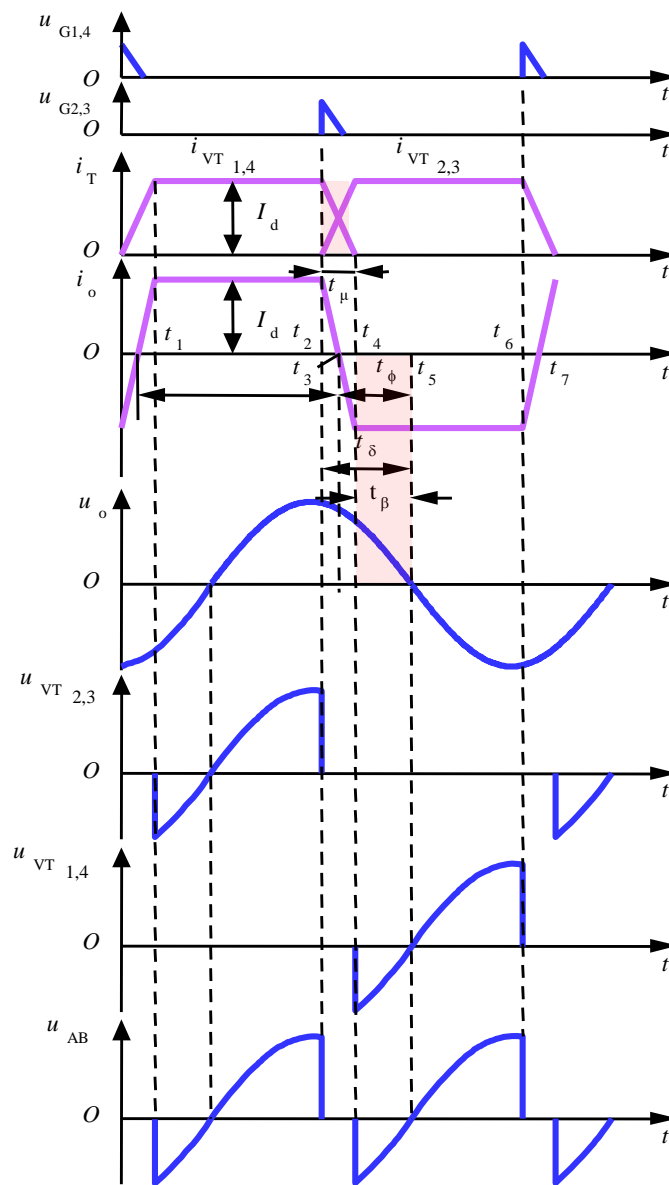
应在 u_o 过零前大于 $t_\delta = t_5 - t_2 = t_\mu + t_\beta$ 时刻触发VT2、VT3。

✓ t_δ 为触发引前时间 $t_\delta = t_\mu + t_\beta$

✓ i_o 基波分量超前于 u_o 的时间

$$t_\phi = t_\gamma / 2 + t_\beta$$

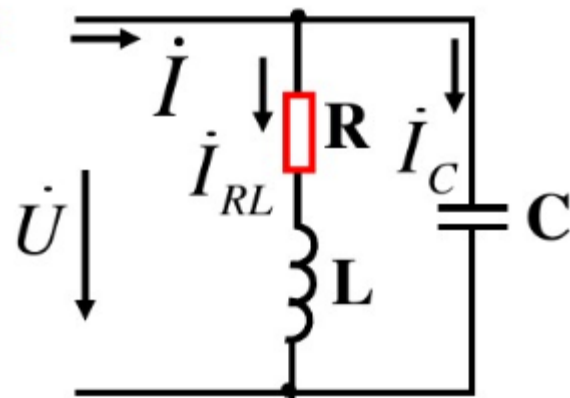
(相应电角度 $\varphi = \omega t_\phi$)



■ 并联谐振电路可靠换流条件：

并联谐振电路复阻抗：

$$Z = \frac{(R + j\omega L) \left(-j\frac{1}{\omega C}\right)}{R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}} = \frac{\frac{L}{C} \left(1 + \frac{R}{j\omega L}\right)}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$



由于 R 很小

$$Z \approx \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{L}{C} \cdot \frac{R - j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

负载呈容性条件：

$$\omega L > 1/(\omega C)$$

可靠换流充
要条件：

$$\text{atan} \left[\frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R} \right] > \varphi$$

参数分析:

- 忽略换流过程, i_o 可近似成矩形波, 展开成傅里叶级数

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

- 基波电流有效值

$$I_{o1} = \frac{4I_d}{\sqrt{2}\pi} = 0.9 I_d$$

- 值 U_o 和直流电压 E 的关系（忽略 L_d 的损耗，忽略晶闸管压降）

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{1}{\pi} \int_{-\beta}^{\pi-\delta} u_{AB} d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_{-\beta}^{\pi-(\mu+\beta)} \sqrt{2}U_o \sin\omega t d\omega t \\
 &= \frac{\sqrt{2}U_o}{\pi} [\cos(\mu+\beta) + \cos\beta] \\
 &= \frac{2\sqrt{2}U_o}{\pi} \cos\left(\beta + \frac{\mu}{2}\right) \cdot \cos\frac{\mu}{2}
 \end{aligned}$$

考虑到换流重叠角 u 小, $\cos(\mu/2) \approx 1$ 及 $\phi = \mu/2 + \beta$

$$\Rightarrow U_o = \frac{\pi E}{2\sqrt{2} \cos \phi} = 1.11 \frac{E}{\cos \phi}$$

Thanks !