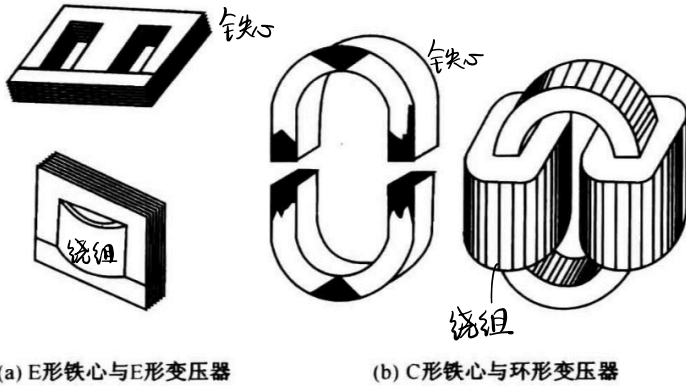


1. 变压器的结构

须结合磁路公式复习, 分清励磁阻抗与磁阻.

2023.10.6 Q1.1



采用铁心是为了增加磁密和磁通.

一般用硅钢片或铁氧体(高频)

用合金钢片叠成, 彼此绝缘, 减少涡流损耗.

2. 参考方向的确定 (变压器惯例)

结合原理理解

原边:

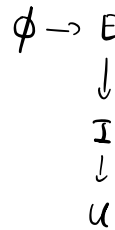
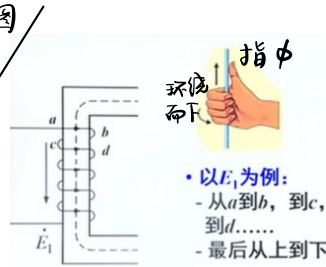
- ① 人为规定原绕组电压  $U_1$  的正方向
- ②  $I_1$  从  $U_1$  正端流进线圈  
→ 四指握住电流, 拇指指向磁通
- ③ 用右手定则根据电流方向确定磁通方向 → 该磁通通过铁心走到副边
- ④ 再由磁通方向, 用右手定则确定感应电动势方向  
(其实就是E的“-” → “+”与电流流向一致)



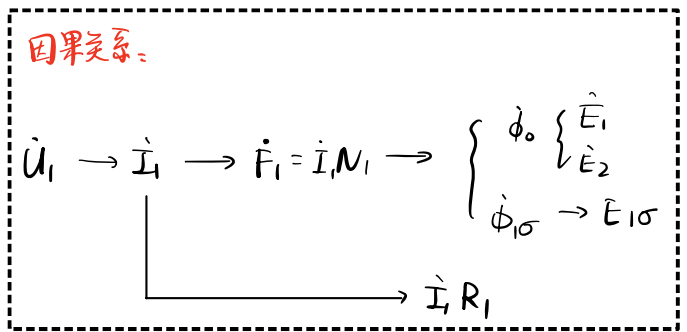
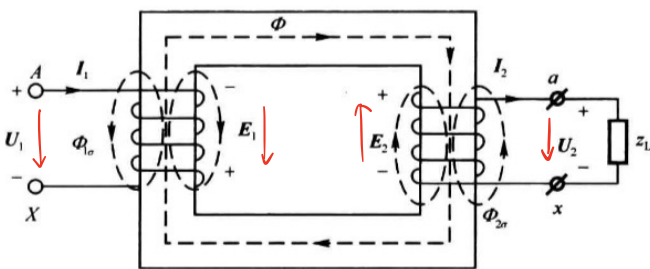
发电机惯例

副边:

- ① 由磁通方向, 用右手定则确定感应电动势方向
- ② 用右手定则根据磁通方向确定电流方向
- ③  $I_2$  与  $U_2$  取关联参考方向



电动机惯例



3. 单相变压器的空载运行

① 磁通与感应电动势

$N_1$  为原边匝数,

$N_2$  为副边匝数,

$$\begin{cases} e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \\ e_{10} = -\frac{d\psi_{10}}{dt} = -N_1 \frac{d\phi_{10}}{dt} \end{cases}$$

主磁通  $\phi$  产生原边主电动势  $e_1$

主磁通  $\phi$  产生副边主电动势  $e_2$

漏磁通  $\phi_{10}$  产生原边漏电动势  $e_{10}$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

$k$  称为变比

主电动势的分析: 设  $\phi_0 = \phi_m \sin \omega t \Rightarrow$  相量表示:  $\phi_m$  (最大值相量)

则  $e_1 = -N_1 \frac{d\phi_0}{dt} = 2\pi f_1 N_1 \phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$

最大值相量:  $\dot{E}_m = -N_1 j \omega \phi_m = 2\pi f_1 N_1 \phi_m \angle -90^\circ$

有效值相量:  $\dot{E} = \sqrt{2} \pi f_1 N_1 \phi_m \angle -90^\circ = -j 4.44 f_1 N_1 \phi_m$

$\Rightarrow E = \sqrt{2} \pi f_1 N_1 \phi_m = 4.44 f_1 N_1 \phi_m$

对副边, 类似地有:  $E_2 = 4.44 f_1 N_2 \phi_m$

$\dot{E}_2 = -j 4.44 f_1 N_2 \dot{\phi}_m$

**注意:**  
 1. 4.44公式中, 磁通是用最大值, 感后电动势是用有效值!  
 2. 感后电动势滞后于磁通  $90^\circ$ .  
 3. 主磁通取决于电网电压、频率与匝数, 与负载大小基本无关, 即为“恒磁通”。

漏电动势的分析:

① 同上表示  $E_{1\sigma} = 4.44 f_1 N_1 \phi_{1\sigma m} \quad \dot{E}_{1\sigma} = -j 4.44 f_1 N_1 \dot{\phi}_{1\sigma m}$

② 漏抗压降表示:  $\dot{E}_{1\sigma} = -j \omega L_{1\sigma} \dot{I}_0 = -j \dot{I}_0 X_{1\sigma} (X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma})$

**注意** | 漏磁通主要经过非铁磁路径, 磁路不饱和, 故磁阻很大且为常数, 则漏电抗很小且为常数, 不随负载情况而变。

② 电压平衡方程

一次侧电动势平衡方程

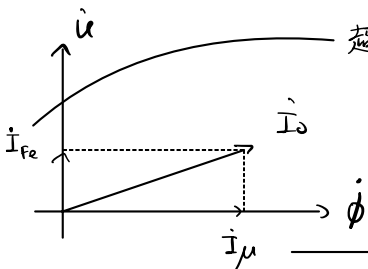
空载电流记为  $\dot{I}_0$ , 则  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 + j \dot{I}_0 X_{1\sigma}$   
 与主磁通、线圈匝数及磁阻有关

若忽略漏抗压降  $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1 = 4.44 f_1 N_1 \dot{\phi}_m$  忽略漏抗压降时  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j \dot{I}_0 X_{1\sigma}$

二次侧电动势平衡方程

$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$  (没有电流)  $= -j 4.44 f_1 N_2 \dot{\phi}_m$

$\dot{I}_0$  可分解为两个分量



超前  $\phi 90^\circ$  的铁损分量 (与  $\dot{U}$  同相, 产生平均功率, 线圈吸收的平均功率就等于铁心中的铁损) 故也称为有功分量

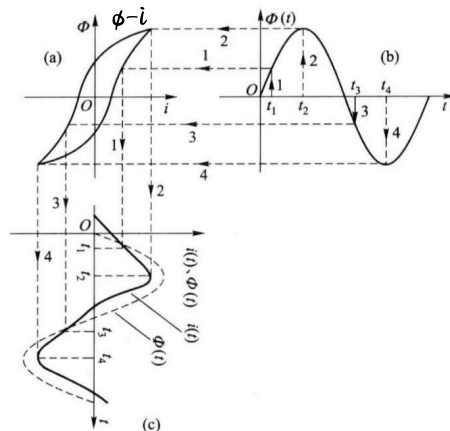
与  $\phi$  同相的磁化电流 “纯” 励磁电流 (不计磁滞和涡流影响时产生磁通  $\phi_m$  所需的电流)

$I_\mu$  远大于  $I_{fe}$ , 故空载电流主要是感性性质 (滞后于电压),

也称为励磁电流。

$\dot{I}_0$  与  $\phi$  的波形: 由磁滞回线画出  $\phi-i$  曲线

由  $\phi-t$  根据  $\phi-i$  曲线对应得到  $i-t$  曲线



### ③ 空载等效电路 磁 → 电!

主磁通  $\phi$  感应的  $E_1$  用电抗压降表示,  $\phi$  在铁心中引起电抗  $X_m$  与电阻  $R_m$ , 则铁心阻抗为  $R_m + jX_m$

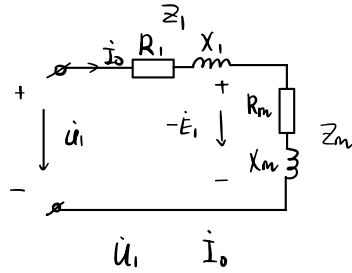
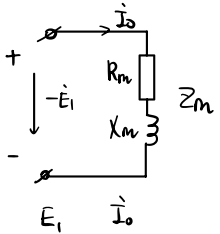
$$E_1 = -I_0 (R_m + jX_m) = -I_0 Z_m$$

后励磁电阻
后励磁电抗
后励磁阻抗

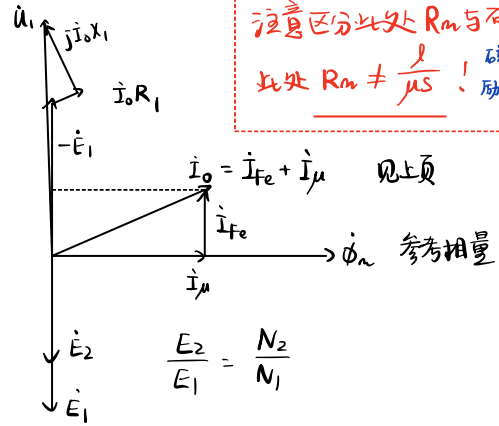
注意:  $Z_m$  随磁路饱和程度增大而减小, 为减小  $I_0$ , 常希望增大  $Z_m$ .  
(减小空载损耗) (高导磁材料)

一次侧的电动势平衡方程

$$U_1 = -E_1 + I_0 Z_1 = (R_m + jX_m) I_0 + (R_1 + jX_1) I_0$$

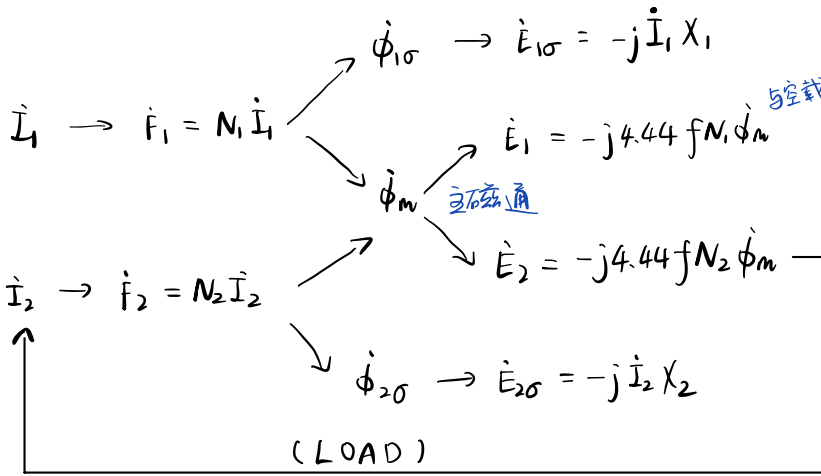


相量图:



注意区分此处  $R_m$  与磁阻!  
此处  $R_m \neq \frac{l}{\mu S}$ !  
磁阻大时励磁电阻小。

### 4. 单相变压器的负载运行



与空载时(磁)一样

副端参考有变化! 我们关心的问题:

1.  $i_2 = ?$
2.  $u_2 = ?$
3.  $P_2 = ?$  如何传递?

#### ① $I_2$ ? → 磁势平衡方程式

由  $E_1 \approx U_1 = \text{常数} \Rightarrow \phi_m = \text{常数}$  (忽略漏磁压降时, 主磁通可视为常数, 即“恒磁通”)

由  $\sum \phi_m R_m = \sum F \Rightarrow \sum F = \text{常数}$  则负载情形下  $\sum F$  等于空载情况下  $\sum F$

$$\Rightarrow F_1 + F_2 = F_0 \Rightarrow I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_0 N_1 \Rightarrow I_1 + \frac{1}{k} I_2 = I_0 \rightarrow \text{磁势平衡方程式}$$

若令  $I_L = -I_2/k$ , 则  $I_1 = I_0 + I_L$  且有  $N_1 I_L = -N_2 I_2$

↳ 在负载时, 原边电流可以认为是由两部分组成

$I_0$  用于在变压器铁心中产生主磁通  $\phi$   
+  
 $I_L$  用于抵消副边电流产生的磁势

#### ② $U_2$ ? → 电压平衡方程式

原边  $U_1 = -E_1 - E_{1\sigma} + I_1 R_1 = -E_1 + I_1 R_1 + j I_1 X_{1\sigma} = -E_1 + I_1 Z_1$

副边  $U_2 = E_2 + E_{2\sigma} - I_2 R_2 = E_2 - I_2 R_2 - j I_2 X_{2\sigma} = E_2 - I_2 Z_2$

$U_2 = I_2 Z_L$

副边绕组漏阻抗  
也是固有参数, 与负载情况无关

→ 本身性质 } 配合  
→ 外电路

负载之后, 原边电流上升很多!

③  $P_2$ ? 如何传递的?

$$P_2 = U_2 I_2^* = E_2 I_2^* = E_2 (-k I_1^*) = (-E_1) (I_1^*) \approx U_1 I_1^* \xrightarrow{(I_1 = I_0 + I_2)} U_1 I_1^* - U_1 I_0^*$$

→ 副边绕组的能量是原边绕组从电网吸收再传递过去的, 由互磁通传递!

④ 综合: 基本方程式组和等效电路

$$\begin{cases} U_1 = -E_1 + I_1 Z_1 & \rightarrow \text{电压平衡方程式, } E_1, E_2 \text{ 另可由4.44公式与磁量建立关系} \\ U_2 = E_2 - I_2 Z_2 & \rightarrow \text{与空载时无异, 因为都是由4.44公式得来} \\ E_1 = k E_2 & \rightarrow \text{磁势平衡方程式, 注意 } I_0 \text{ 用 } I_m \text{ 表示 (本质是励磁电流)} \\ I_1 + \frac{1}{k} I_2 = I_m & \rightarrow \text{与空载时无异} \\ -E_1 = I_m Z_m & \rightarrow \text{负载特性} \\ U_2 = I_2 Z_L & \rightarrow \text{负载特性} \end{cases}$$

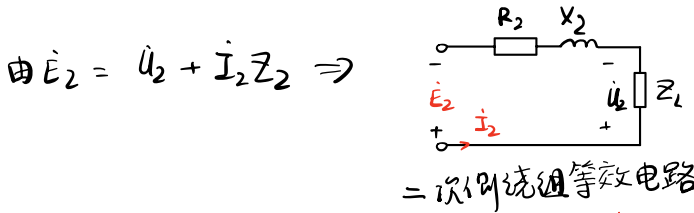
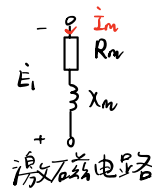
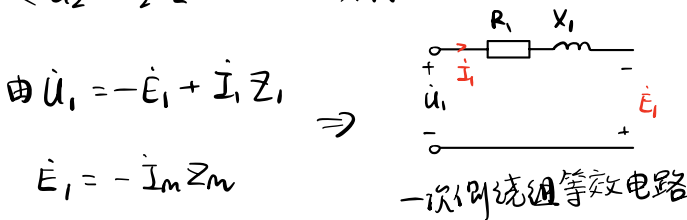
已知:

$U_L, Z_1, Z_2, k, Z_m, Z_L$

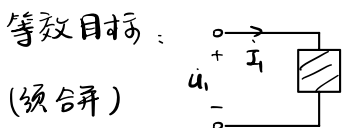
要求:

$I_1, I_2, E_1, E_2, I_m, U_2$

可得!



没法合并



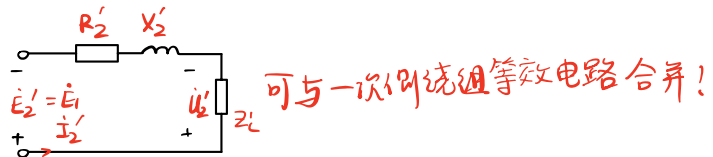
用一个新的一次绕组代替原一次绕组  
使新的一次绕组的电势等于一次绕组的电势  
(绕组归算)

但一次和二次绕组  
原有电磁关系不变  
{ 磁动势不变  
功率与能量不变

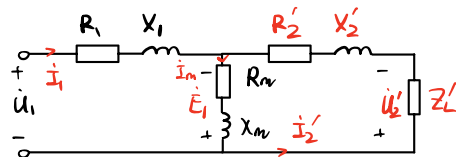
令  $E_1 = E_2'$ , 则  $E_2' = k E_2$ . 由二次线圈磁动势不变, 有  $N_1 I_2' = N_2 I_2 \Rightarrow I_2' = \frac{1}{k} I_2$

副边方程式  $E_2 = I_2 Z_2 + U_2$

$$\begin{aligned} \Rightarrow k E_2 &= k I_2 (R_2 + j X_2) + k U_2 \\ &= \frac{I_2}{k} (k^2 R_2 + j k^2 X_2) + k U_2 \\ \Rightarrow E_2' &= I_2' (R_2' + j X_2') + U_2' \end{aligned}$$



得T型等效电路:



归算后  
基本方程  
(k消失)

$$\begin{cases} U_1 = -E_1 + I_1 Z_1 \\ U_2' = E_2' - I_2' Z_2' \\ E_1 = E_2' \\ I_1 + I_2' = I_m \\ -E_1 = I_m Z_m \\ U_2' = I_2' Z_L \end{cases}$$

其中, 各折算值为

$$\begin{aligned} I_2' &= \frac{1}{k} I_2 \\ E_2' &= k E_2 = E_1 \\ X_2' &= k^2 X_2 \\ Z_2' &= R_2' + j X_2' = k^2 Z_2 \\ U_2' &= k U_2 \\ Z_L &= U_2' / I_2' = k^2 Z_L \end{aligned}$$

应用T型等效电路时, 注意副边为折算值!

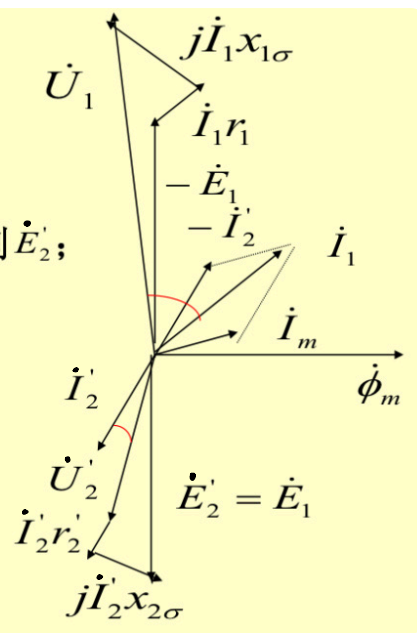
# 负载下相量图: (从基本方程出发)

$Z_L = k^2 Z_L$  这点反映出:  
变压器可作阻抗变换器!

## 负载下相量图的画法

假定给定  $U_2$ 、 $I_2$ 、 $\cos\phi_2$  及各个参数

- (1) 画出  $\dot{U}'_2, \dot{i}'_2$  ;
- (2) 在  $\dot{U}'_2$  相量上加上  $\dot{i}'_2 r'_2 + j\dot{i}'_2 x'_2$  得到  $\dot{E}'_2$ ;
- (3)  $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$
- (4) 画出领先  $\dot{E}_1$   $90^\circ$  的主磁通  $\dot{\phi}_m$  ;
- (5) 根据  $\dot{i}_m = -\dot{E}_1 / Z_m$  画出  $\dot{i}_m$ ,  
领先  $\dot{\phi}_m$  一个铁耗角 ;
- (6) 画出  $-\dot{i}'_2$  与  $\dot{i}_m$  的相量和  $\dot{i}_1$  ;
- (7) 画出  $-\dot{E}_1$ , 加  $\dot{i}_1 r_1 + j\dot{i}_1 x_{1\sigma}$  得到  $\dot{U}_1$



图中电阻 r 用小写表示是为了与磁阻区分。  
与之配合, 又用了小写。

## 变压器基本方法总结: 基本方程式、等值电路和相量图

↓ 定量计算      ↓ 定性讨论相位关系

变压器的运行与功率问题: 见课件、注意额定容量为视在功率  $UI$ , 不用乘功率因数角  
(有功与无功共同占用设备容量)

## 附: 磁路公式

$$B = \mu H \quad (\mu = \mu_0 \mu_r) \quad \phi = BS \quad (\vec{B} \cdot \vec{A}) \quad F_m = Ni \quad (\text{磁动势}) \quad U_m = Hl \quad (\text{磁压}) = \frac{Bl}{\mu} = \frac{\phi l}{\mu S}$$

$\sum_i \phi_i = 0$  (基尔霍夫磁通定律, 类比 KCL)

$\sum_i N_i = \sum_i H_i l_i = \sum_i U_{mi} = \sum_i R_{mi} \phi_i$  (基尔霍夫磁位差定律, 类比 KVL)

$e = -\frac{d\phi}{dt} = Blv$  (单匝)      此处为磁阻!!

具有相同单位 =  $\phi R_m$  ( $R_m = \frac{l}{\mu S}$ )  
↓      ↓  
此处为磁阻!!