



浙江大学电气工程学院

电机与拖动

主讲：卢琴芬

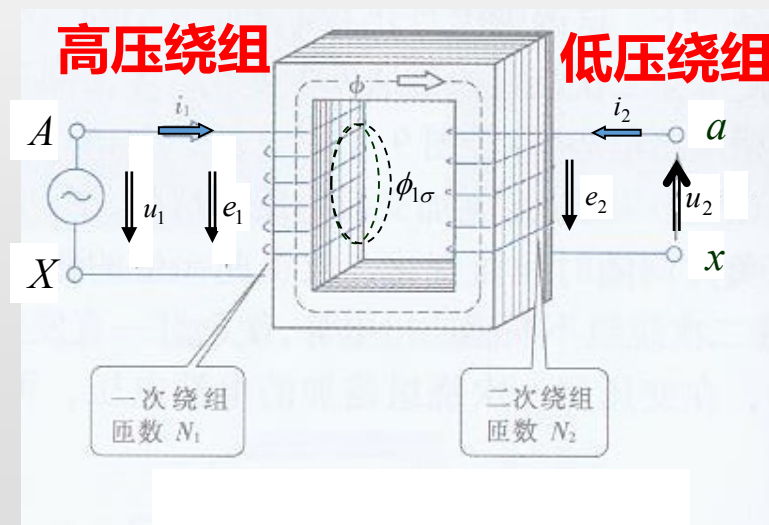
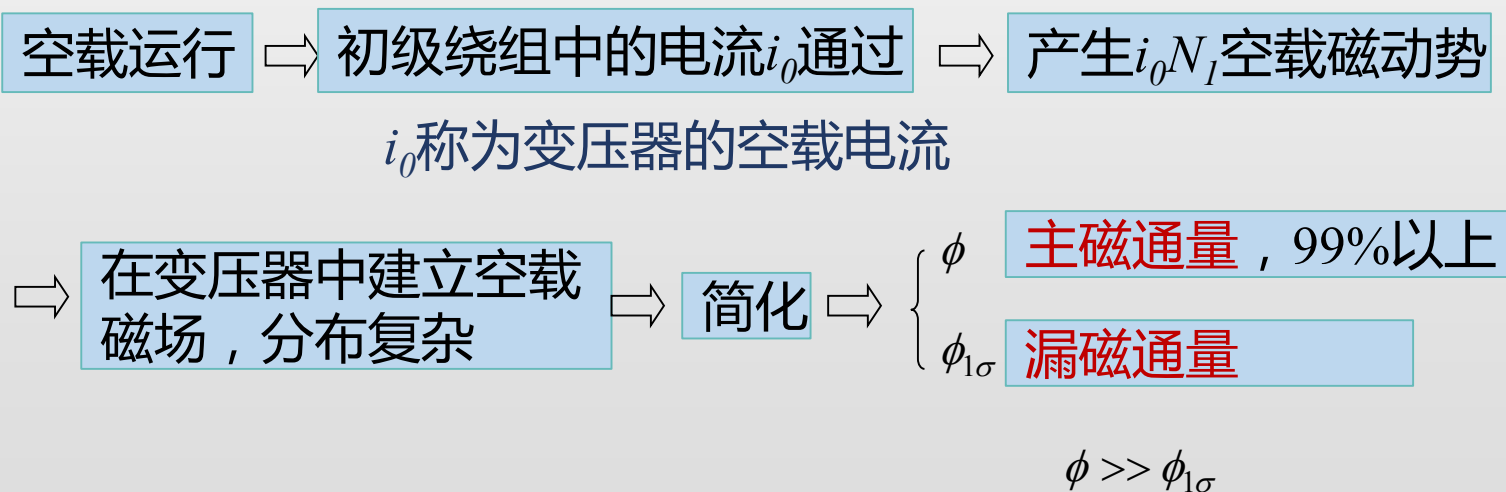
2

变压器的空载运行（单相T）

空载时的物理状况

三相变压器对称运行时，电压电流大小相等，相位相差 120° ，三相各个物理量取为每相的值，就可采用单相变压器的结论

空载运行： AX 两端接到 f_N 的正弦波额定电压 u 的交流电源，次级开路。



ϕ 沿铁心闭合，与初、次级交链，参与能量传递

$\phi_{1\sigma}$ 沿非铁磁材料的空气和T而闭合，仅与初级交链，不参与能量传递，只在初级绕组中感应漏电动势，引起漏抗压降

$e_{1\sigma}$

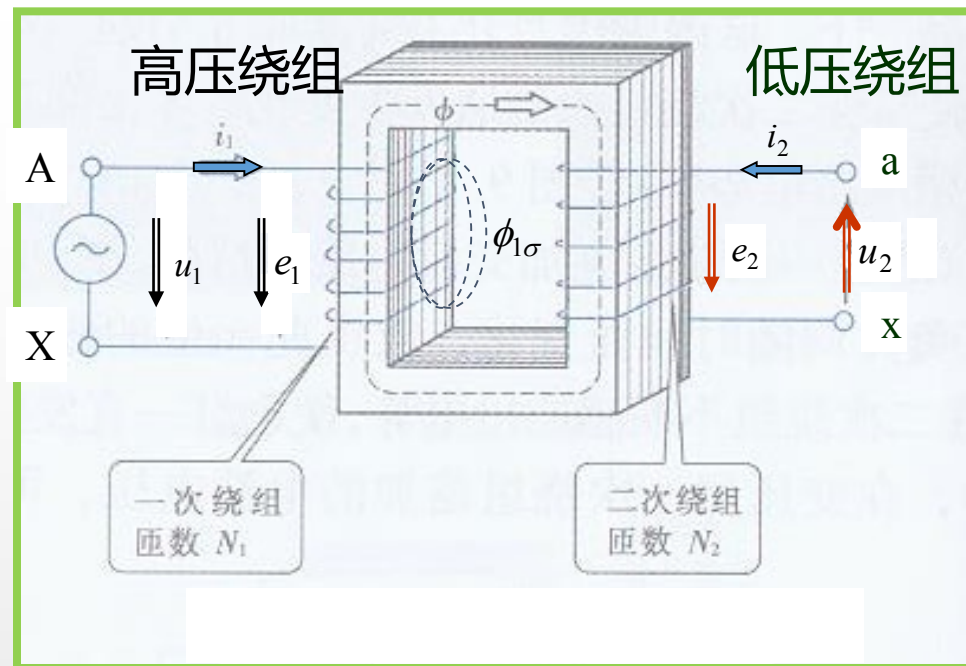
i_0 交变 $\Rightarrow \phi$ 交变 $\Rightarrow$ 初、次绕组中感应电动势 $e_1, e_2, e_{1\sigma}$

选取 $e_1, e_2, e_{1\sigma}$ 的正方向为右螺旋关系,则有

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\phi_{1\sigma}}{dt}$$

正方向人为规定，有任选性，而各电磁量的实际方向却由电磁定律所决定。
不同的正方向，代数表达式不同



空载时的物理状况

原边

$$u_1 : A \rightarrow X$$

$$i_1 : \text{正} u_1 \rightarrow \text{正} i_1$$

$$\phi : \text{右手定则, 正} i_1 \rightarrow \text{正} \phi$$

$$e_1 : \text{正} \phi \rightarrow \text{正} e_1$$

电动机规则

副边

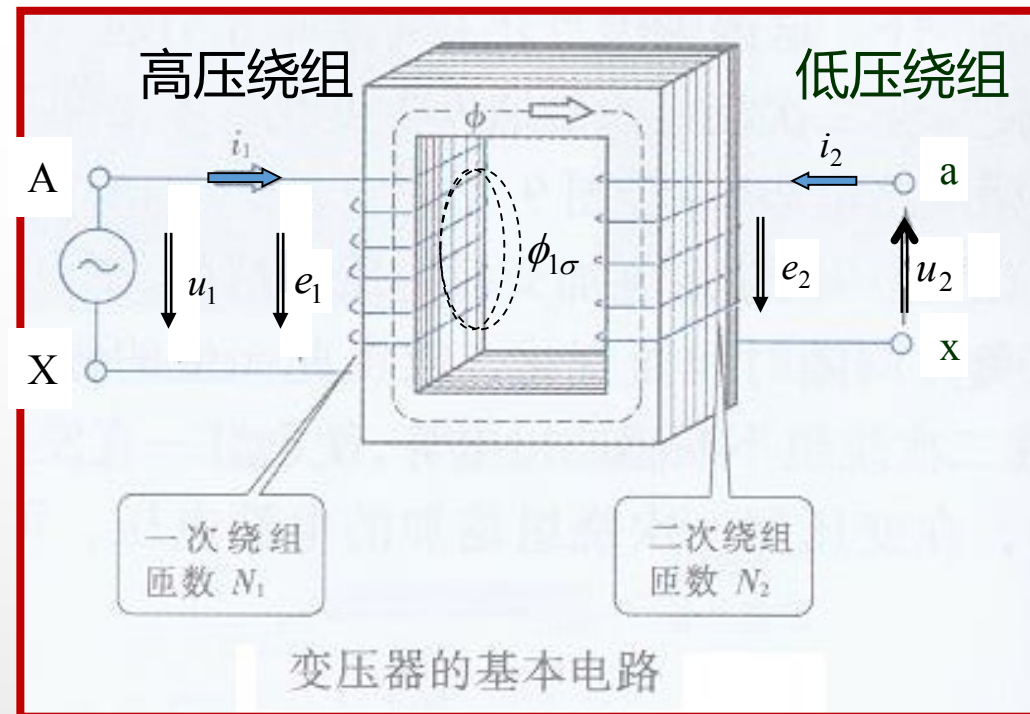
$$e_2 : \text{正} \phi \rightarrow \text{正} e$$

$$i_2 : \text{正} e_2 \rightarrow \text{正} i_2$$

$$u_2 : \text{正} i_2 \rightarrow \text{正} u_2$$

$$\phi : \text{正} i_2 \rightarrow \text{正} \phi$$

发电机规则

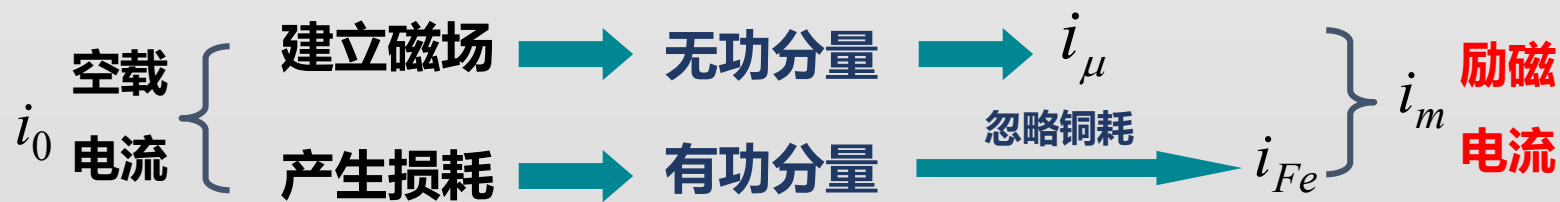


$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$\sum u = \sum e \Rightarrow u_1 - i_0 R_1 = -e_1 - e_{1\sigma}$$

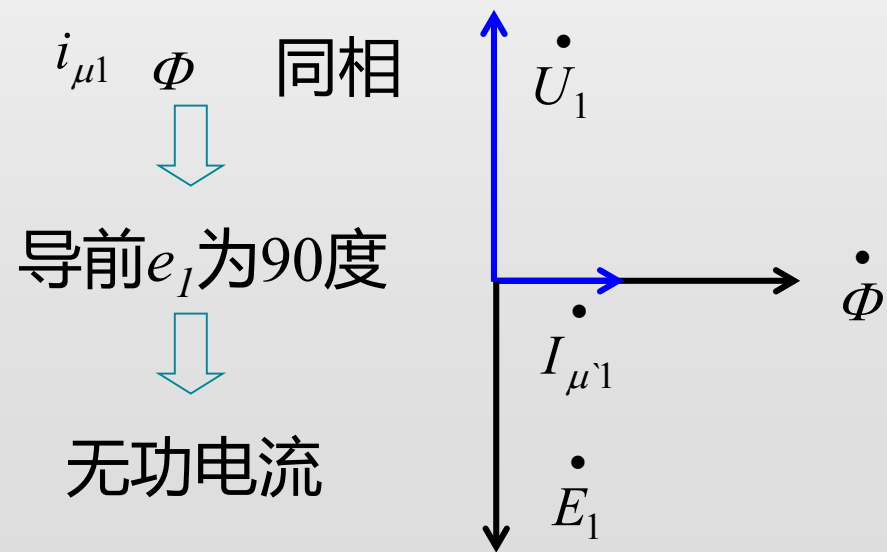
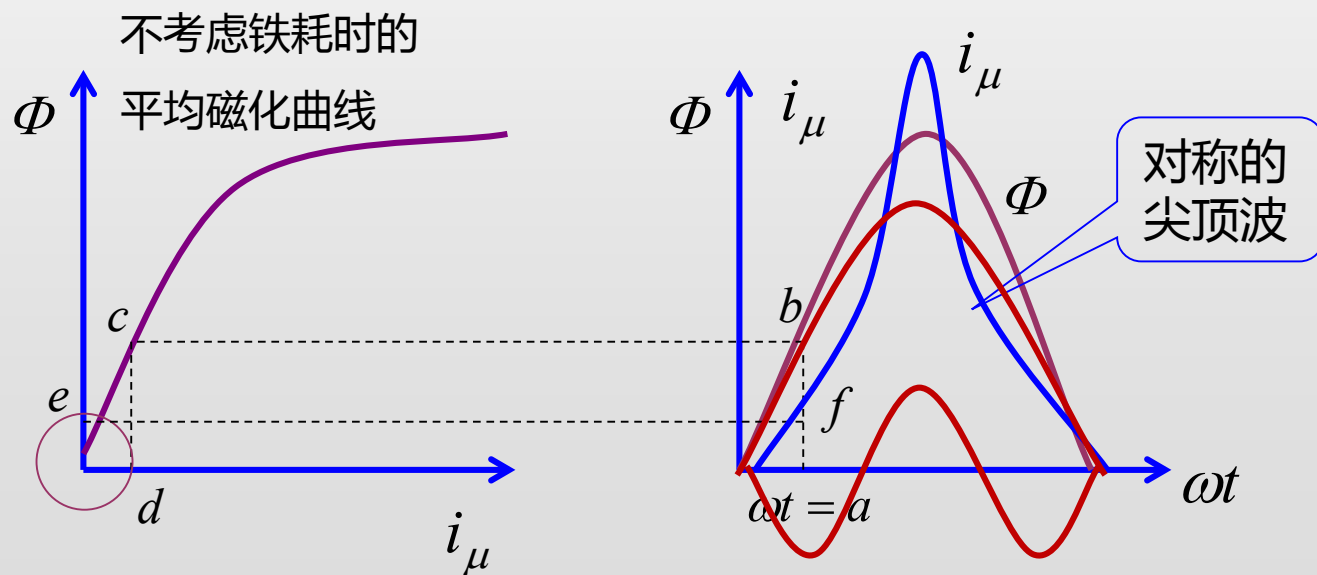
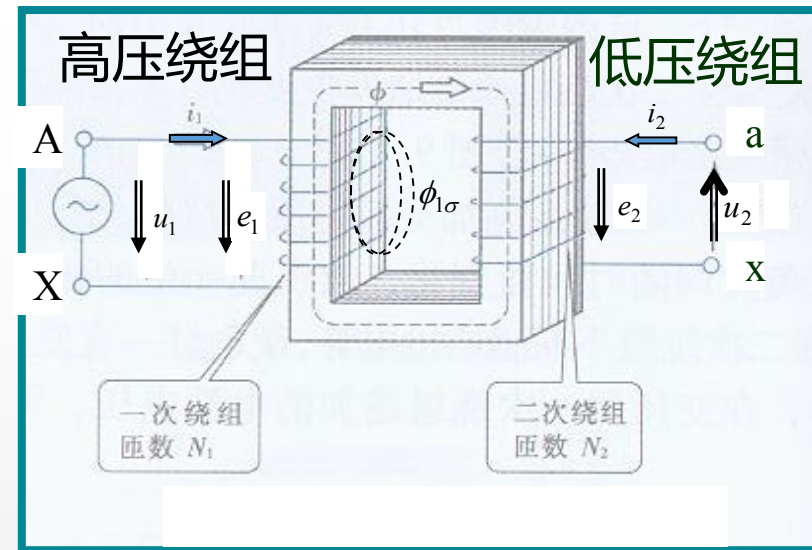
$$\Rightarrow u_1 = -e_1 - e_{1\sigma} + i_0 R_1$$



1 忽略空载损耗时的 i_0

$i_0 = i_\mu$ 建立磁场的磁化电流 $\xrightarrow{\text{大小与波形}}$ 铁芯的饱和程度，即 B_m 的大小

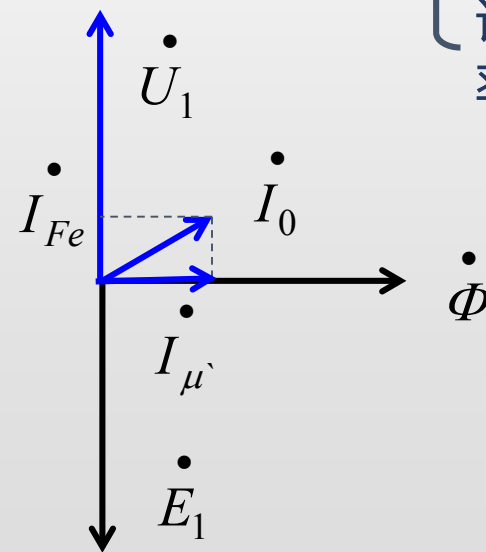
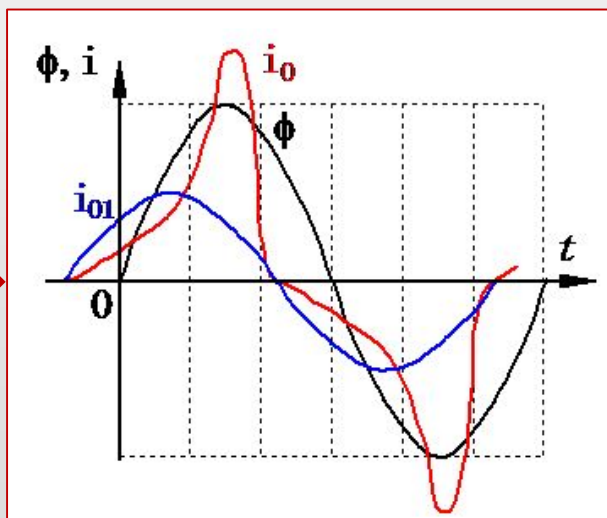
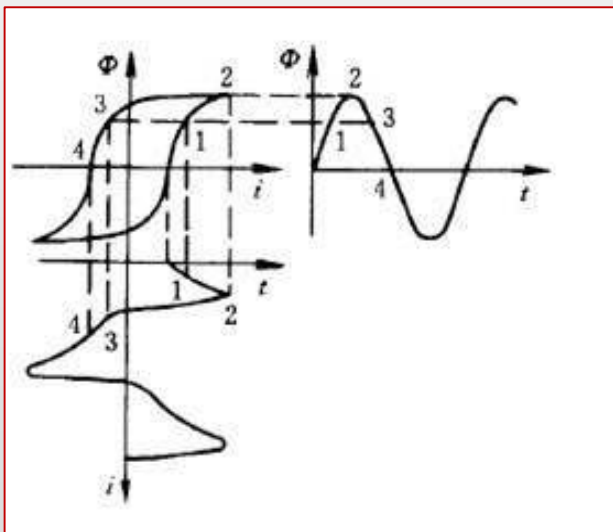
$U \ E \ \Phi$ 正弦波 $\longrightarrow i_\mu$ 尖顶波 磁路越饱和，畸变越严重



$\Phi = f(i_\mu)$ 磁通增加时，电流从上分支取
 一条磁滞回线 磁通减少时，电流从下分支取
 i_0 为不对称的尖顶波

→ 导前 Φ 一个磁滞角 α_m → $\left\{ \begin{array}{l} i_h \Rightarrow i_{Fe} = i_h + i_w \\ i_\mu \end{array} \right\}$

→ $i_0 = i_\mu + i_{Fe}$



$$\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$$

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{Fe}^2}$$

i_0, i_μ 都不是正弦波，
不能用相量表示

用等效正弦波替代尖顶波
条件

频率相等
有效值相等
等效电流的相位，保证从电源吸收有功功率等于铁耗

感应电动势与变压器变比

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t$$



Φ_m 主磁通幅值, Wb

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \\ = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$E_{1m} = \omega N_1 \Phi_m$, E_1 为 e_1 的有效值

$$E_1 = E_{1m} / \sqrt{2} = \omega N_1 \Phi_m / \sqrt{2} = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

相量表示 $\dot{E}_1 = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$

相量概念

随时间正弦变化的量用时间的正弦函数表示

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \varphi_i) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

$$\text{相量 } \dot{I} = I \angle \varphi_i$$

同理漏抗

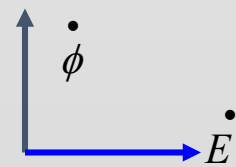
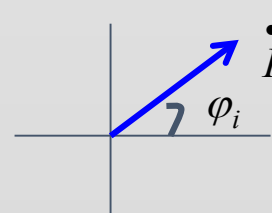
$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\phi_{1\sigma}}{dt} = \omega N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

相量

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m}$$

通常认为 漏磁链 $\psi_{1\sigma}$ 与 i_0 成线性关系

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\phi_{1\sigma}}{dt} = -\frac{d\psi_{1\sigma}}{dt} = -L_{1\sigma} \frac{di_0}{dt}$$



主讲：浙江大学卢琴芬

若 $i_0 = \sqrt{2}I_0 \sin \omega t$

则 $e_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma} \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t - 90^\circ)$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j \dot{I}_0 \omega L_{1\sigma} = -j \dot{I}_0 X_{1\sigma}$$

或 $-\dot{E}_{1\sigma} = j \dot{I}_0 X_{1\sigma}$

漏感系数，简称漏感，
是一个常数

$\dot{E}_{1\sigma}$ 与 $\dot{I}_0$ 同频率，在相位上滞后 $\dot{I}_0$ 90° ，数值上 $E_{1\sigma} = I_0 X_{1\sigma}$
 $e_2 = \sqrt{2}E_2 \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ)$ $E_{2m} = \omega N_2 \Phi_m$

$$\begin{aligned} E_2 &= 4.44 f N_2 \Phi_m \\ E_1 &= 4.44 f N_1 \Phi_m \end{aligned}$$



$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

**变压器的
重要参数**

空载运行时

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_{1N}}{U_{20}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$$

变压器的变比，若未
注明哪一个绕组是初
级绕组时，习惯上 k
为高压绕组电动势与
低压绕组电动势之比

例： $U_{1N}/U_{2N} = 220/110\text{V}$, 设在高压边加上220V, 空载电流 I_0 , 主磁通为 Φ_m

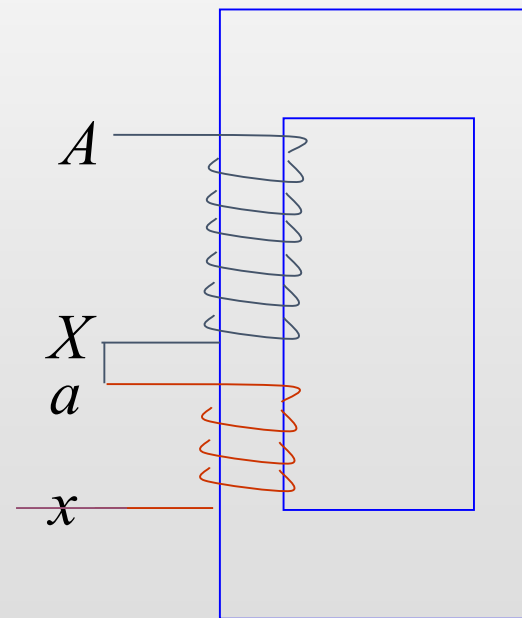
(a) 若X与a联在一起, Ax 加330V电压, 此时励磁电流与主磁通各多大?

$$\dot{U}_{Ax} = \dot{U}_{AX} + \dot{U}_{ax} = -\dot{E}_1 - \dot{E}_2 = -\dot{E}_1 - 0.5\dot{E}_1 = 330$$

$$\therefore -\dot{E}_1 = 220 \rightarrow \Phi_m \text{ 不变} \rightarrow F = NI = c$$

$$\rightarrow N_1 I'_0 + N_2 I'_0 = N_1 I_0$$

$$\rightarrow N_1 I'_0 + 0.5 N_1 I'_0 = N_1 I_0 \Rightarrow I'_0 = \frac{2}{3} I_0$$

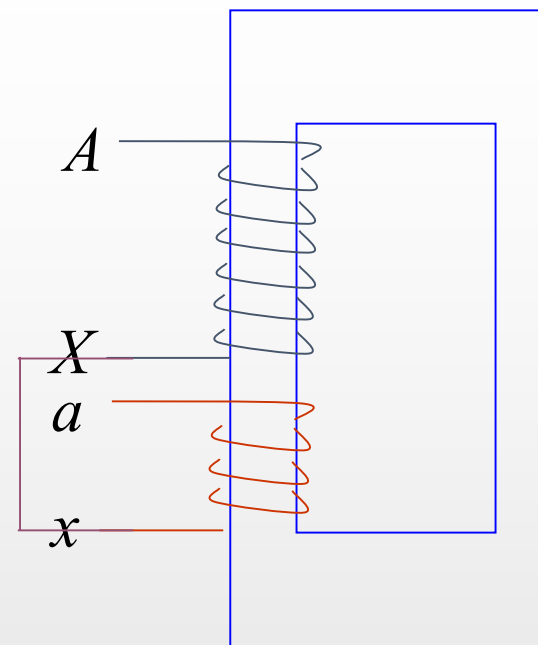


(b)若 X 与 x 联在一起， Aa 加110V电压，此时励磁电流与主磁通各多大？

$$\begin{aligned}\dot{U}_{Aa} &= \dot{U}_{AX} + \dot{U}_{xa} = \dot{U}_{AX} + (-\dot{U}_{ax}) \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{E}_2 = -\dot{E}_1 + 0.5\dot{E}_1 = 110\end{aligned}$$

$$\therefore -\dot{E}_1 = 220 \longrightarrow \Phi_m \text{ 不变 } \longrightarrow F = NI = c$$

$$\longrightarrow N_1 I_0'' - N_2 I_0'' = N_1 I_0 \longrightarrow N_1 I_0'' - 0.5 N_1 I_0'' = N_1 I_0 \Rightarrow I_0'' = 2 I_0$$



空载运行时的电动势平衡方程式

原边 $u_1 = -e_1 - e_{1\sigma} + i_0 R_1$

相量 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + j I_0 \dot{X}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1$
 $= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$

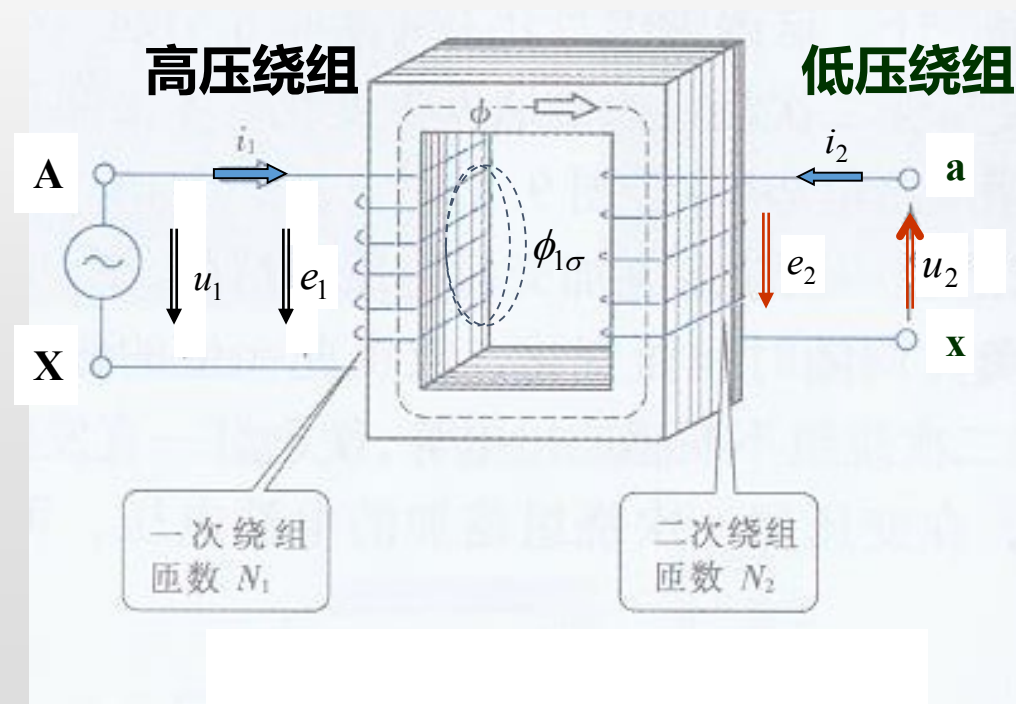
$I_0 = (2 \sim 8)\% I_N \Rightarrow I_0 Z_1$ 小

$\Rightarrow \dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j 4.44 f N_1 \Phi_m$

$\Rightarrow \begin{cases} \phi = f(f, u_1, N_1) \\ \text{与T的铁芯和尺寸无关} \end{cases}$

影响励磁电流与铁耗

副边 $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$



空载运行时的等效电路

既有电、又有磁，尤其是饱和时分析很困难

将T中的电磁耦合关系用一个模拟电路的形式来等效

分析和计算简化

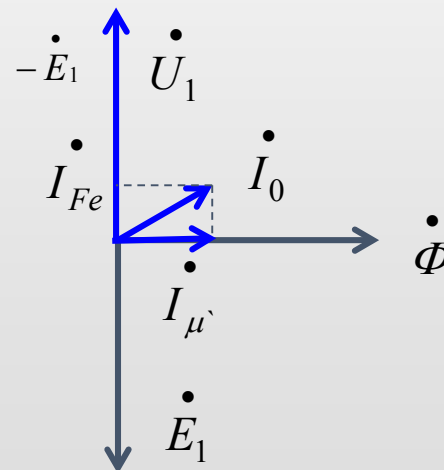
等效电路

$$-\dot{E}_{1\sigma} = j\dot{I}_0 X_{1\sigma} \Rightarrow \dot{E}_1 \text{ 可用类似的方法处理}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{Fe} \text{ 与 } -\dot{E}_1 \text{ 同相位} \Rightarrow -\dot{E}_1 \text{ 可以用 } \dot{I}_{Fe} \text{ 流过一个电阻元件的电压来表示} \\ \dot{I}_{\mu} \text{ 滞后 } -\dot{E}_1 90^\circ \Rightarrow -\dot{E}_1 \text{ 也可用 } \dot{I}_{\mu} \text{ 流过一个电感元件的电压来表示} \end{cases}$$

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_{Fe} R \Rightarrow \dot{I}_{Fe} = -\dot{E}_1 / R$$

$$-\dot{E}_1 = j\dot{I}_{\mu} X \Rightarrow \dot{I}_{\mu} = -\dot{E}_1 / jX$$

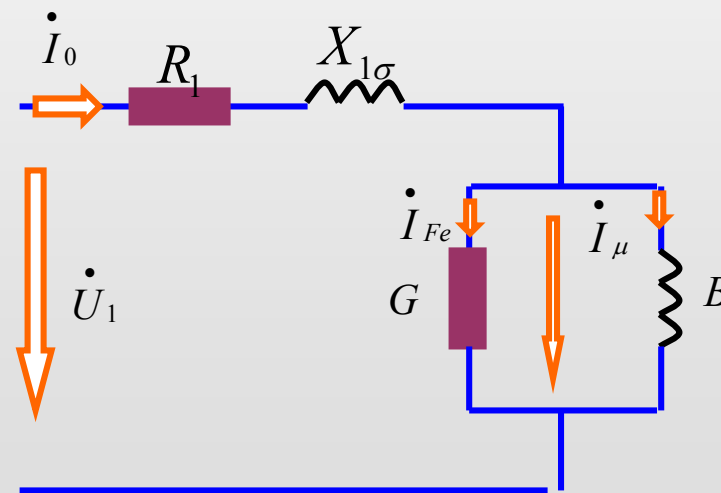
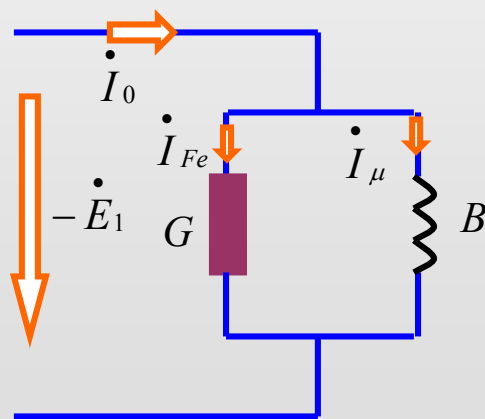


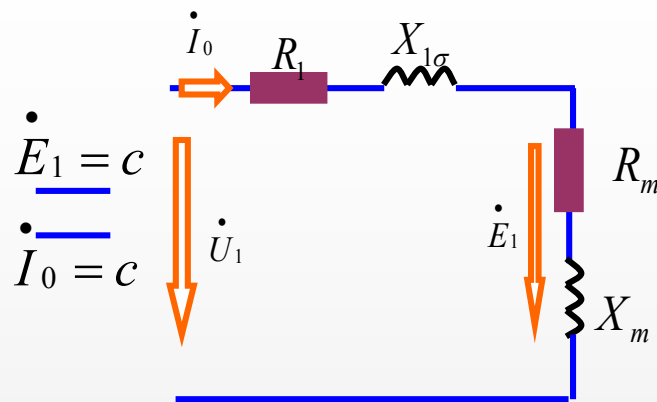
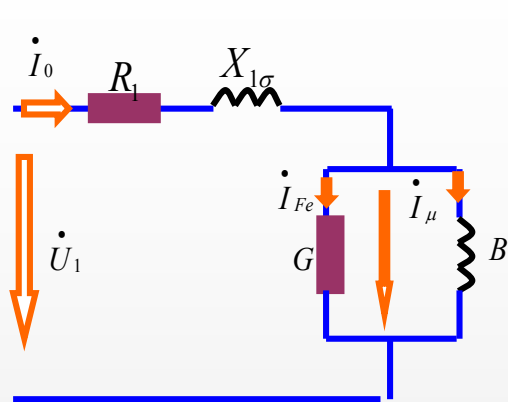
$$\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe} = \frac{-\dot{E}_1}{R} + \frac{-\dot{E}_1}{jX} = -\dot{E}_1 \left(\frac{1}{R} - j \frac{1}{X} \right)$$

$$= -\dot{E}_1 (G - jB) = -\dot{E}_1 Y$$

电导
电纳
导纳

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 / Y + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 / (G - jB) + \dot{I}_0 (R_1 + jX_{1\sigma})$$





串联
等效
电路

$$\Rightarrow Z_m = \frac{1}{Y} = R_m + jX_m = \frac{1}{G - jB} = \frac{G}{G^2 + B^2} + j \frac{B}{G^2 + B^2}$$

$$\Rightarrow R_m = \frac{G}{G^2 + B^2}$$

铁耗电阻

$$X_m = \frac{B}{G^2 + B^2}$$

激磁电抗，与铁芯的饱和程度有关，不是常数

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

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0(R_1 + jX_{1\sigma}) + \dot{I}_0(R_m + jX_m)$$



浙江大学电气工程学院

T H A N K S

主讲：浙江大学卢琴芬