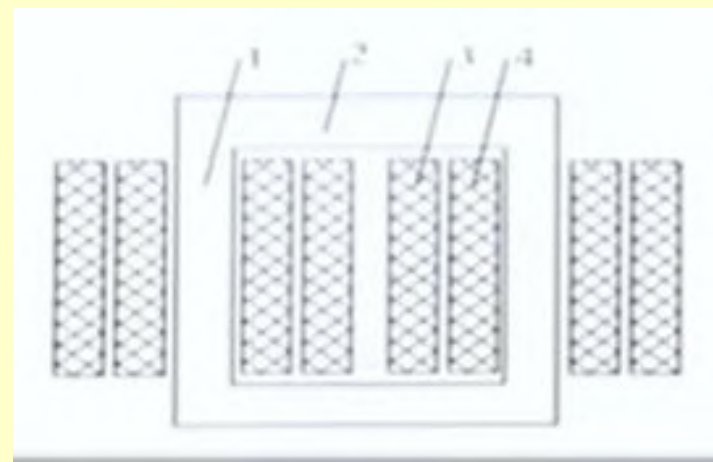
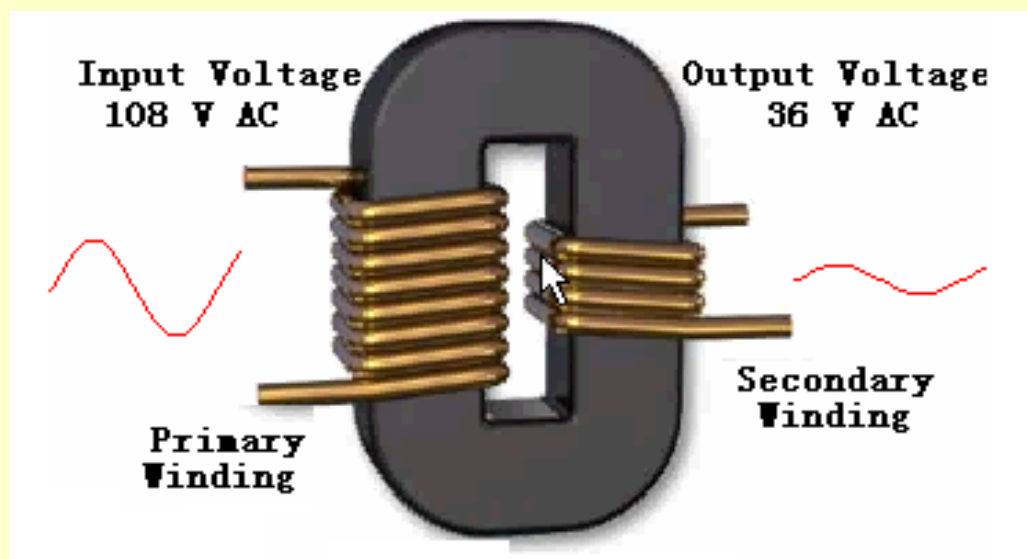


22-PSP

1. 变压器运行原理



- 将一种等级的交流电 (U 、 I) 变换为另一种等级的同频交流电。
- 变压器原、副绕组间虽然没有导线连接，但当原绕组接交流电、副绕组接负载后，副绕组便有电流和电功率输出；
- 根据能量守恒定律，变压器接负载后，原绕组比空载时会相应增加一定的功率输入，增加的部分等于副绕组输出的电功率；
- 因而，变压器能够改变电压、传递电功率。



1.1 变压器概述

变压器的结构

一、铁心

铁心构成主磁路，^{铁心的作用}增加磁密和磁通。硅钢片叠压而成
(减少涡流)。铁心必须闭合。^{片间要有一定程度的绝缘}

二、绕组

绕组是变压器的电路部分，一般为绝缘扁铜线或绝缘圆铜线在绕线模上绕制而成。

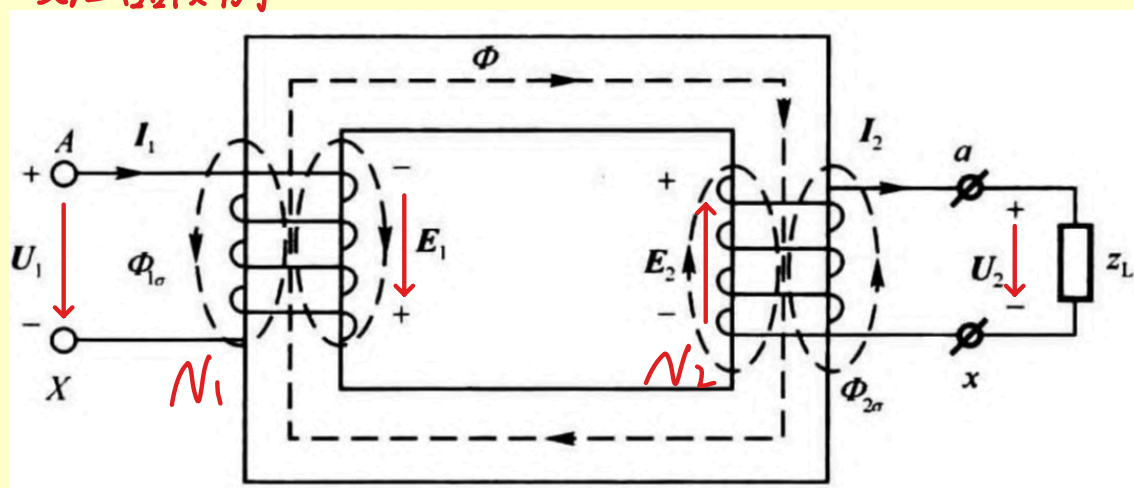


变压器的基本组成部分是一个铁心和绕在铁心上的没有导线相连的原、副绕组，如图 2-2 所示。AX 为原绕组，ax 为副绕组。以后用符号右下角注“1”者表示原绕组的量，注“2”者表示副绕组的量。变压器工作原理的基础是电磁感应定律。当原绕组 AX 加上频率为 f 的正弦波交流电压 u_1 时，绕组内就有电流通过。此电流在原绕组内产生一定的磁势 F_1 ，这磁势在铁心中产生交变磁通。由于磁通随时间而变，并与副绕组交链，使副绕组产生感应电势 e_2 。如果副绕组是开路的，没有接负载(称为变压器空载状态)， e_2 就等于开路电压 u_2 。如果在副绕组两端接上负载，则负载上就有电流 i_2 通过。



电磁关系

变压器惯例

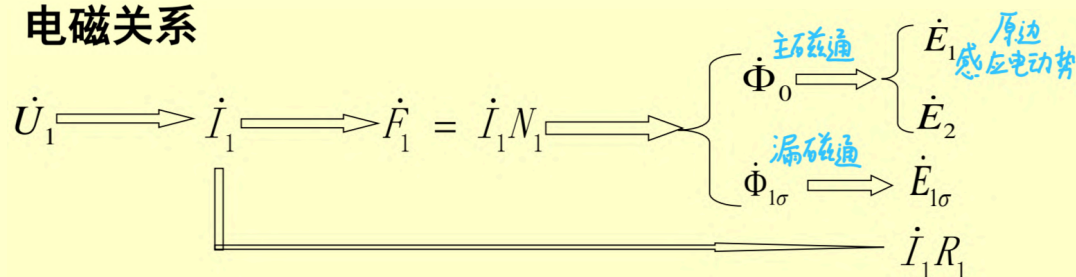


$$u_1 \approx e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt};$$

$$u_2 \approx e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

因果关系

电磁关系



变压器原、副边电势之比及电压之比等于原、副边匝数之比。

磁通不能为常数，因此需要交流电。



1.2 单相变压器的空载运行

主磁通与漏磁通的区别

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

主磁通和电流非线性关系

(介质是**铁芯**)

漏磁通和电流线性关系

(介质是**空气**) $\mu = \mu_0$

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

e_1 : 主磁通 Φ_0 在原绕组内感应电动势的瞬时值;

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

e_2 : 主磁通 Φ_0 在副绕组内感应电动势的瞬时值;

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

$e_{1\sigma}$: 漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 在原绕组内感应电动势的瞬时值;

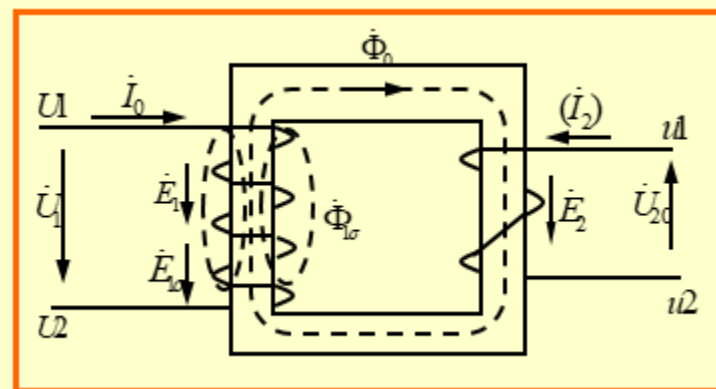
- 1) 性质上: Φ_0 与 I_1 成非线性关系(饱和); I_1 与 $\Phi_{1\sigma}$ 成线性关系;
- 2) 数量上: Φ_0 占80%以上, $\Phi_{1\sigma}$ 仅占20%以下;
- 3) 作用上: Φ_0 起传递能量的作用, $\Phi_{1\sigma}$ 起**漏抗**压降作用(坏作用)。
能量损失



1.2 单相变压器的空载运行

➤ 所有的电势:

$$\begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \\ e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\phi_{1\sigma}}{dt} \end{cases}$$



1、主磁通感应的电动势——主电动势

设 $\Phi_0 = \Phi_m \sin \omega t$

则 $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = 2\pi f_1 N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$

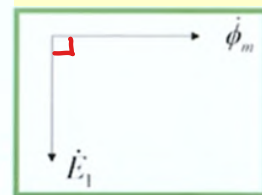
有效值 $E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_m$

相量 $\dot{E}_1 = -j4.44 f_1 N_1 \dot{\Phi}_m$
 ↑有效值 ↑最大值

注意: 有个负号!

主磁通是峰值!

方向: 滞后于主磁通90度



$$\Phi_m \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1}$$

主电动势: 当主磁通按正弦规律变化时, 原边主电动势也按正弦变化, 时间相位滞后90度。主电动势的大小与电源频率、绕组匝数及主磁通的最大值成正比。

主磁通: 取决于电网电压、频率与匝数, 与负载大小基本无关, 是“恒磁通”。



1.2 单相变压器的空载运行

同理，二次主电动势也有同样的结论。

副边绕组链接同一磁链，副边电动势幅值：

$$E_{2_m} = N_2 \omega \phi_m$$

有效值:

$$E_2 = E_{2m} / \sqrt{2} = 4.44 f_1 N_2 \phi_m$$

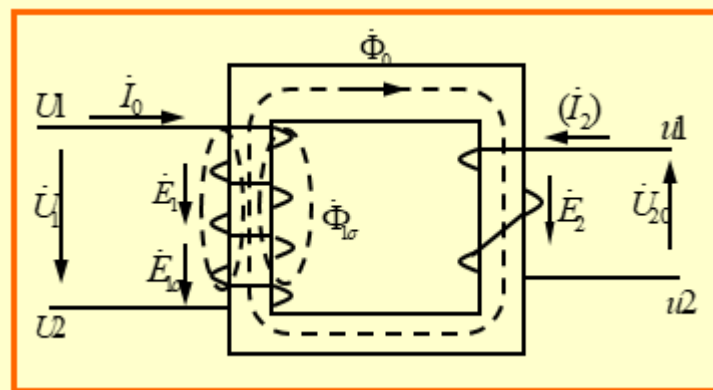
相量表示:

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f_1 N_2 \dot{\phi}_m \quad f_1 = f_2, \dot{\phi}_{m1} = \dot{\phi}_{m2}$$

注意：有个负号！

主磁通是峰值！

方向: 滞后于主磁通90度



1.2 单相变压器的空载运行

感应电动势分析

2、漏磁通感应的电动势——漏电动势

根据主电动势的分析方法，同样有

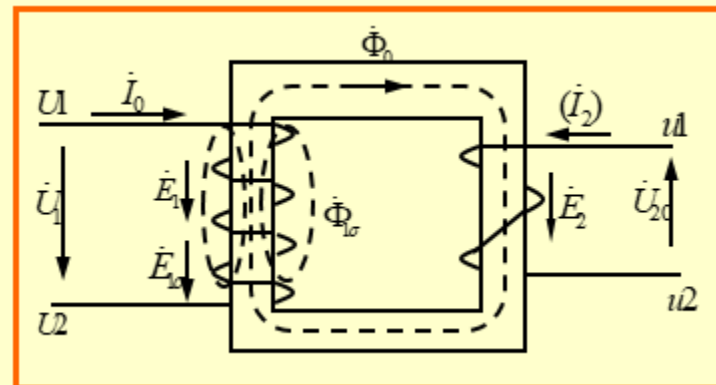
$$E_{1\sigma} = 4.44 f N_1 \Phi_{1\sigma m}$$

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

漏电动势也可以用漏抗压降来表示，即

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j \omega L_{1\sigma} \dot{I}_0 = -j \dot{I}_0 X_{1\sigma}, \quad X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma} \quad \text{漏电抗}$$

由于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，所以漏电抗 $X_{1\sigma}$ 很小且为常数，它不随电源电压负载情况而变。



重要结论1:

- 原方绕组的漏电抗表征的是漏磁通对电流的关系，与匝数和几何尺寸有关，对一个做好了的变压器，是定值，不变的！



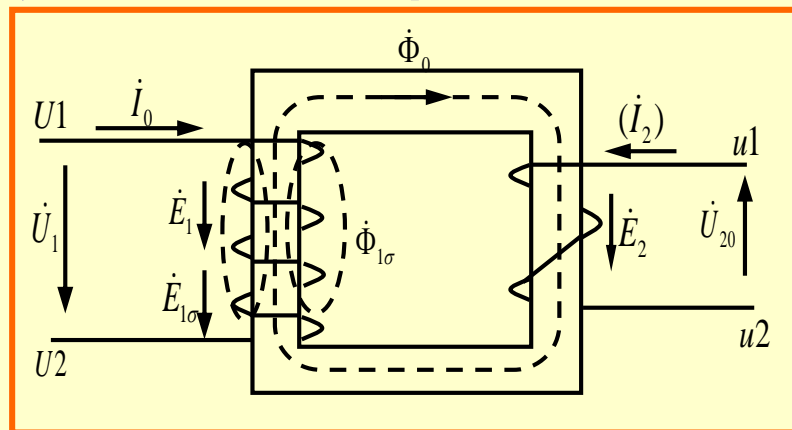
1.2 单相变压器的空载运行

空载时的电动势方程、等效电路和相量图

一、电动势平衡方程和变比

1、电动势平衡方程

(1) 一次侧电动势平衡方程



其中 $Z_1 = r_1 + jx_1$ 原端绕组漏阻抗
 r_1 : 原端绕组电阻
 x_1 : 原端绕组漏电抗

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

稳态以后表示为相量:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 r_1$$

主电动势

漏抗电势

空载电流

忽略很小的漏阻抗压降，并写成有效值形式，有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad \Phi_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1} \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1}$$

(2) 二次侧电动势平衡方程

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$

由于空载，
没有电流

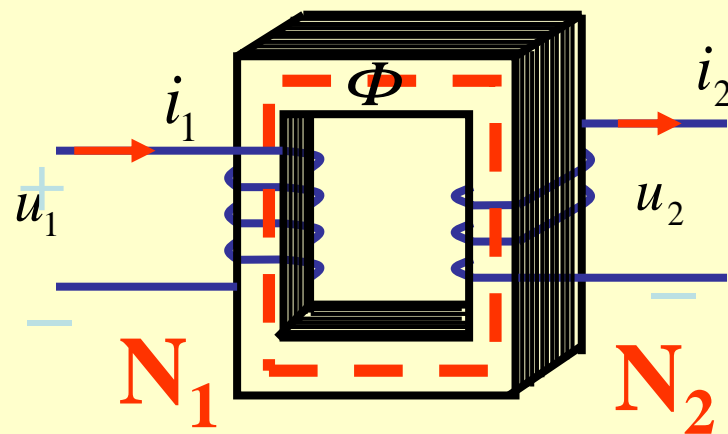


1.2 单相变压器的空载运行

2、变比

$$\begin{aligned}U_{1N} &\approx E_1 \\U_{2N} &= E_2 \\ \frac{U_{1N}}{U_{2N}} &\approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 N_1 f_1 \phi_m}{4.44 N_2 f_1 \phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = k\end{aligned}$$

-k: 变比, 匝数之比



重要结论2:

- 只要两边匝数不同, 对应的电压就不同, 就能变压!

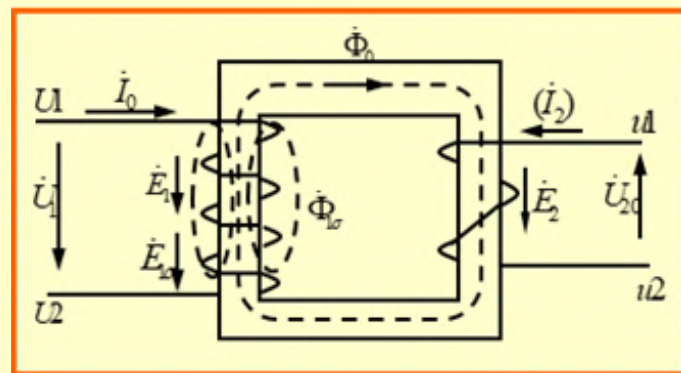


1.2 单相变压器的空载运行

空载电流 I_0

空载运行时原边绕组中流过的电流

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_{1\sigma} = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_0\end{aligned}$$



大小

- $I_0 = (2 \sim 10\%) I_N$
空载不太费电

相位

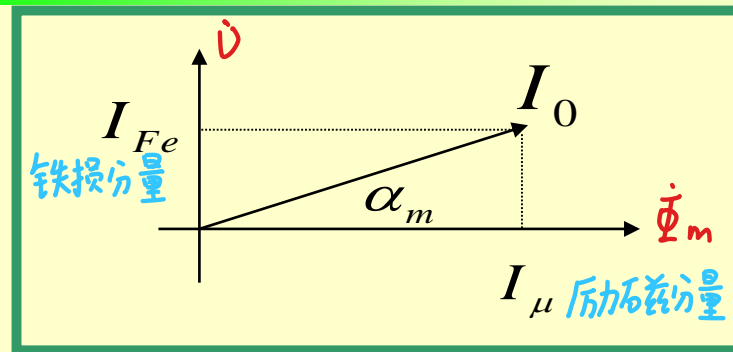
- 近似与主磁通同相，超前一个 α 角
- “铁损角”

1.2 单相变压器的空载运行

空载电流

空载运行时原边绕组中流过的电流

1、作用与组成



空载电流 i_0 包含两个分量，一个是励磁分量，作用是建立磁场，产生主磁通——分量 i_μ ；另一个是铁损耗分量，作用是供变压器铁心损耗——分量 i_{Fe} 。

2、性质和大小

性质： 由于空载电流的 i_μ 分量远大于 i_{Fe} 分量，所以空载电流主要是感性性质——也称励磁电流；

大小： 与电源电压和频率、线圈匝数、磁路材质及几何尺寸有关



1.2 单相变压器的空载运行

空载电流

3、波形

由于磁路饱和，空载电流 i_0 与由它产生的主磁通 Φ_0 呈非线性关系。

- 当磁通 ^{Φ} 按正弦规律变化时，空载电流 ^{i_0} 呈尖顶波形。
- 当空载电流 ^{i_0} 按正弦规律变化时，主磁通呈平顶波形。

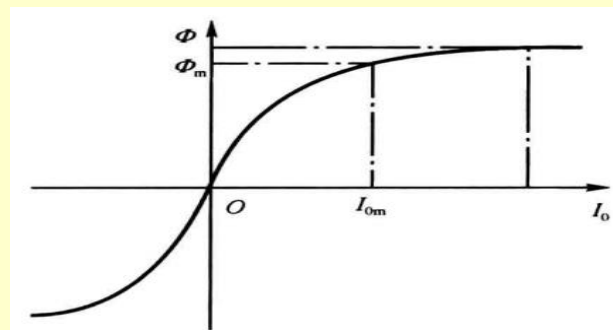
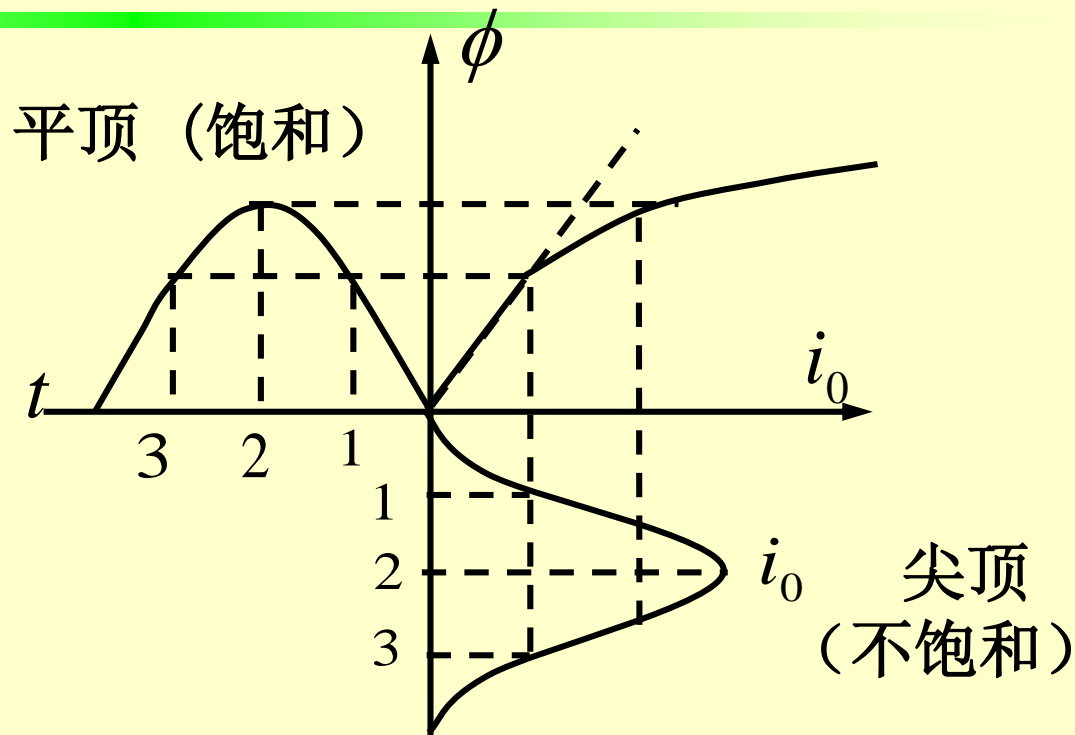


图 2-3 变压器的磁化曲线

1.2 单相变压器的空载运行

二、空载时的等效电路和相量图

1、等效电路

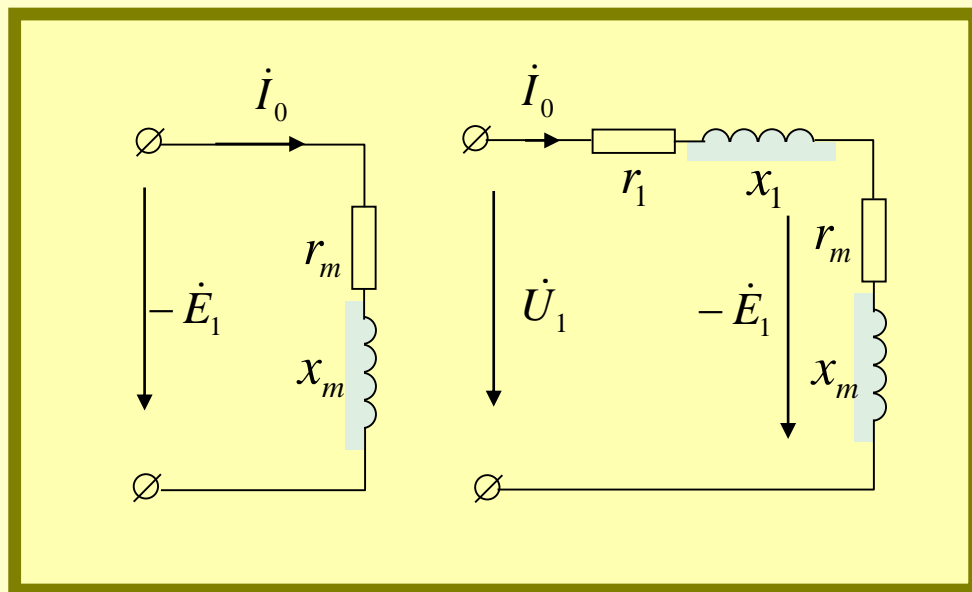
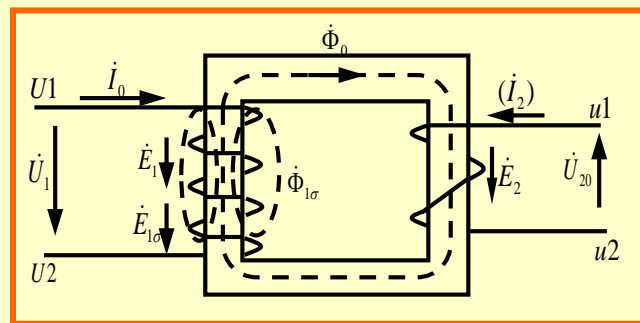
主磁通 $\dot{\Phi}$ 感应的 \dot{E}_1 用电抗压降表示，
由于 $\dot{\Phi}$ 在铁心中引起电抗 X_m 与电阻 R_m ，
铁心阻抗为 $R_m + jX_m$ ，可等效为：

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0(R_m + jX_m) = -\dot{I}_0 Z_m$$

一次侧的电动势平衡方程为

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \\ &= (R_m + jX_m)\dot{I}_0 + (R_1 + jX_1)\dot{I}_0\end{aligned}$$

空载时等效电路为

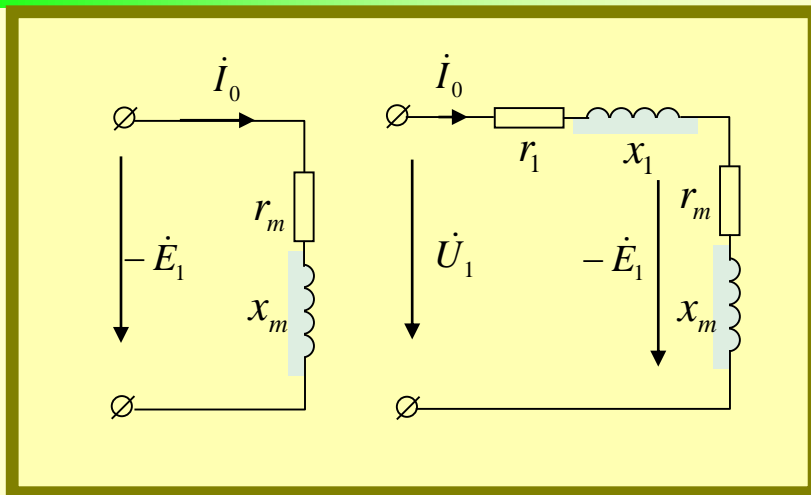


1.2 单相变压器的空载运行

二、空载时的等效电路和相量图

1、等效电路

一点说明



R_m, X_m, Z_m - 励磁电阻、励磁电抗、励磁阻抗。由于磁路具有饱和特性，所以 $Z_m = R_m + jX_m$ 不是常数，随磁路饱和程度增大而减小。

由于 $R_m \gg R_1, X_m \gg X_1$ ，所以有时忽略漏阻抗，空载等效电路只是一个 Z_m 元件的电路。在 U_1 一定的情况下， I_0 大小取决于 Z_m 的大小。从运行角度讲，希望 I_0 越小越好，所以变压器常采用高导磁材料，增大 Z_m ，减小 I_0 ，提高运行效率和功率因数。



1.2 单相变压器的空载运行

二、空载时的等效电路和相量图

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_1)\dot{I}_0$$

2、相量图

根据前面所学的方程，可作出变压器空载时的相量图：

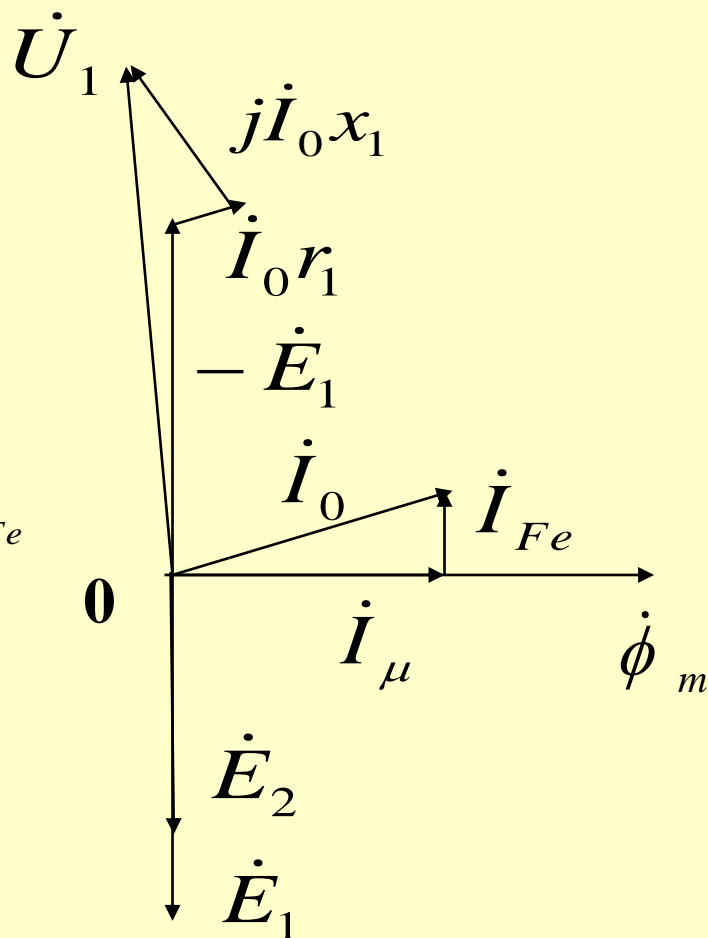
(1) 以 $\dot{\Phi}_m$ 为参考相量

(2) \dot{I}_μ 与 $\dot{\Phi}_m$ 同相, \dot{I}_{Fe} 滞后 90° , $\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$

(3) \dot{E}_1, \dot{E}_2 滞后 $\dot{\Phi}_m$ 90° , $-\dot{E}_1$;

(4) $R_1 \dot{I}_0, j\dot{I}_0 X_1$

(5) \dot{U}_1



1.2 单相变压器的空载运行

小结

(1) 一次侧主电动势与漏阻抗压降总是与外施电压平衡, 若忽略漏阻抗压降, 则一次主电势的大小由外施电压决定.
$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

(2) 主磁通大小由电源电压、电源频率和一次线圈匝数决定, 与磁路所用的材质及几何尺寸基本无关。

(3) 空载电流大小与主磁通、线圈匝数及磁路的磁阻有关, 铁心所用材料的导磁性能越好, 空载电流越小。

(4) 电抗是交变磁通所感应的电动势与产生该磁通的电流的比值, 线性磁路中, 电抗为常数。



1.4 变压器的等效电路

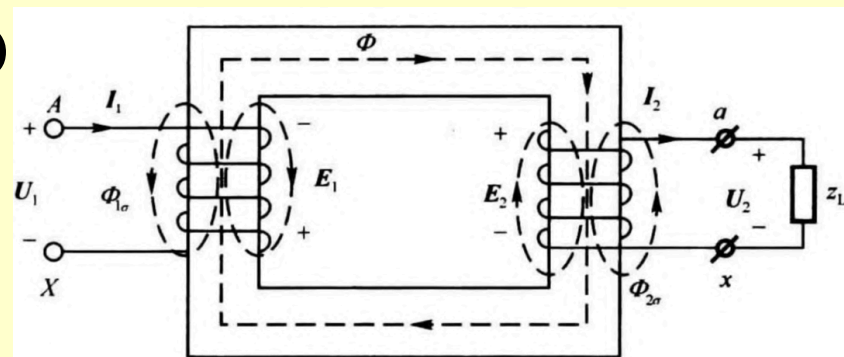
变压器的基本方程（有载时）

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_{2\sigma} + \dot{U}_2$$

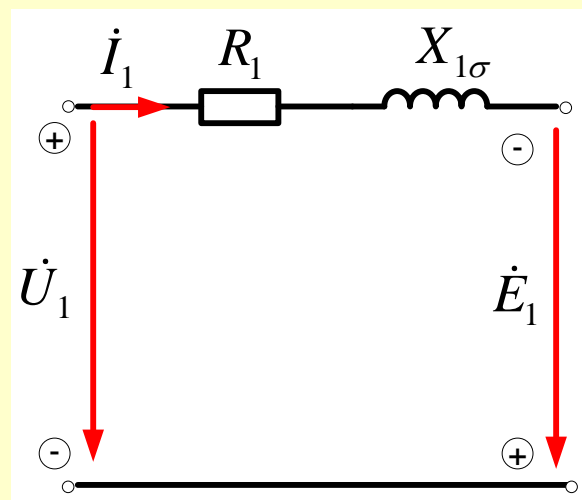
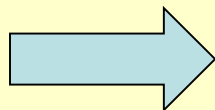
$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = k$$

$$N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_m$$



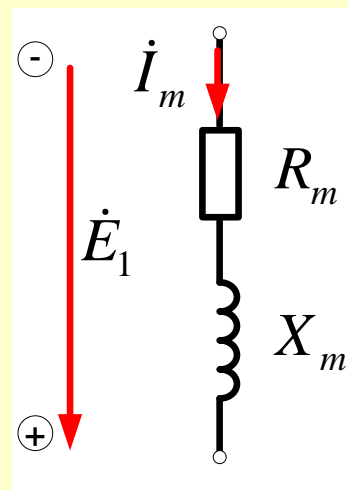
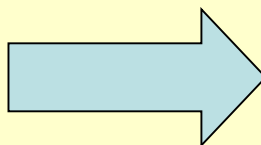
1.4 变压器的等效电路

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$$



一次侧
绕组等
效电路

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m$$

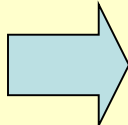


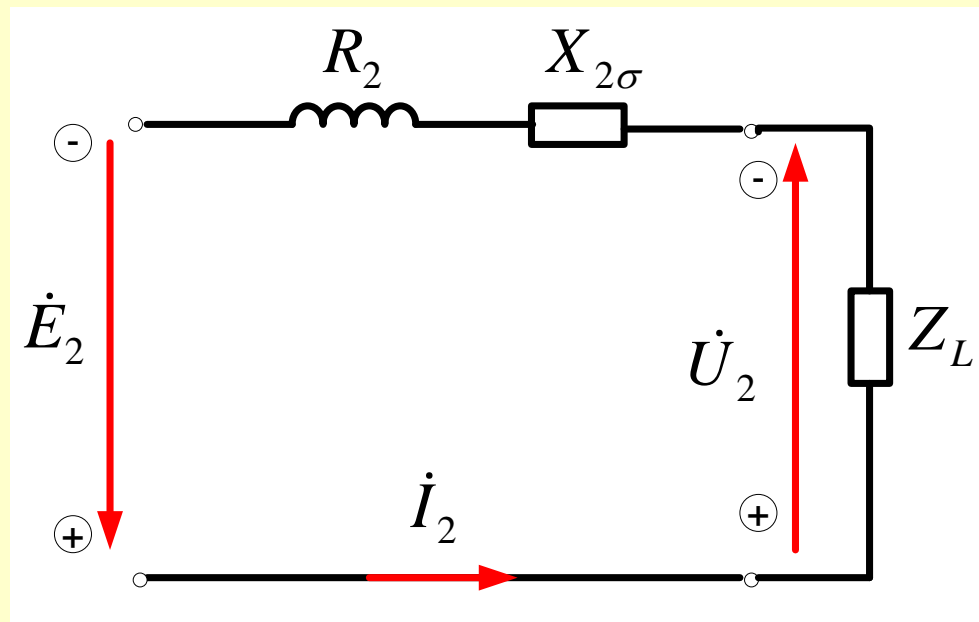
激磁电路



1.4 变压器的等效电路

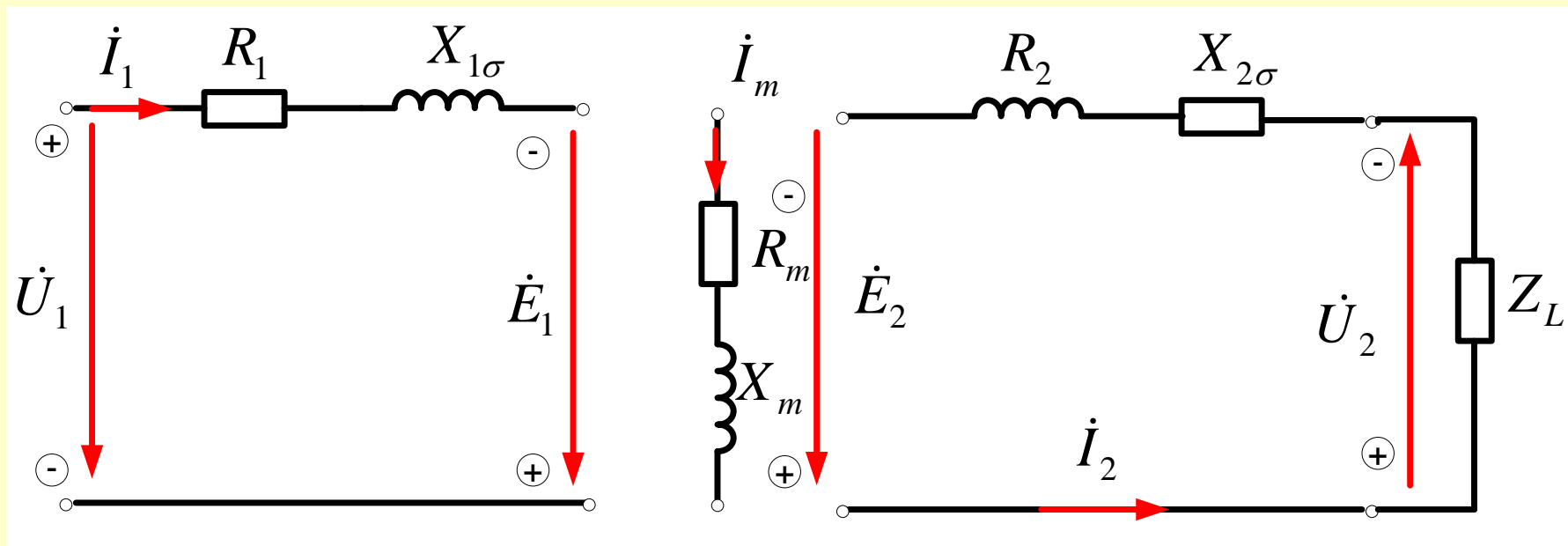
二次侧绕组等效电路

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_{2\sigma} + \dot{U}_2$$




1.4 变压器的等效电路

三、绕组归算



一次侧绕组等效电路

激磁电路

二次侧绕组等效电路

使新的二次绕组的电势等于一次绕组的电势，即

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$



1.4 变压器的等效电路

什么是绕组归算？

假设一个新的二次绕组替代原二次绕组，新的二次绕组的匝数等于一次绕组的匝数，同时一次和二次绕组的原有电磁关系不变。这叫做“归算”。

具体反映在两个“不变”的原则上：

- 归算后二次绕组的磁动势保持不变。
- 归算后功率、能量不变。



1.4 变压器的等效电路

由于主磁通不变，因而：

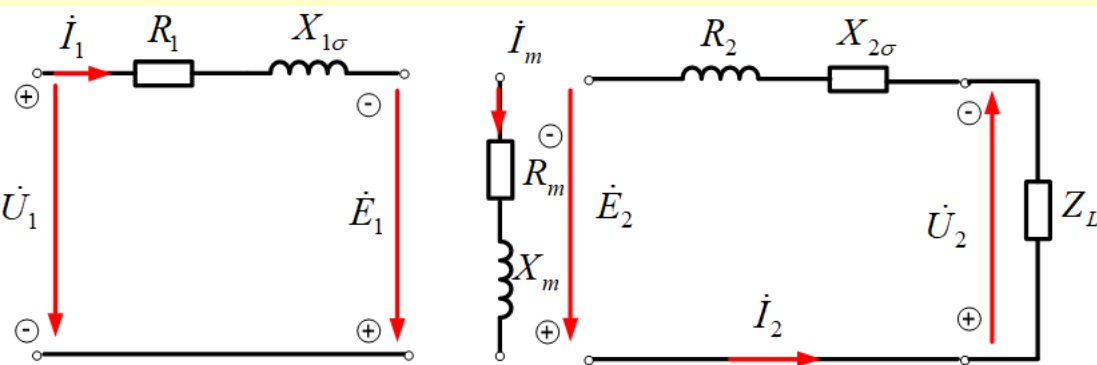
$$\text{令 } \dot{E}_1 = \dot{E}_2' \quad \frac{\dot{E}_2'}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

$$\dot{E}_2' = k\dot{E}_2$$

由磁动势不变可以得到：

$$N_1 \dot{I}_2' = N_2 \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_2' = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \frac{1}{k} \dot{I}_2$$



1.4 变压器的等效电路

现在看（副边）方程式的变化：

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_{2\sigma} + \dot{U}_2$$

$$k\dot{E}_2 = k(\dot{I}_2 Z_{2\sigma} + \dot{U}_2) = k\dot{I}_2(R_2 + jX_{2\sigma}) + k\dot{U}_2$$

$$= \frac{\dot{I}_2}{k} (k^2 R_2 + jk^2 X_{2\sigma}) + k\dot{U}_2$$

$$= \dot{I}_2' (R_2' + jX_{2\sigma}') + \dot{U}_2'$$

$$R_2' = k^2 R_2$$

$$X_{2\sigma}' = k^2 X_{2\sigma}$$

$$\dot{U}_2' = k\dot{U}_2$$

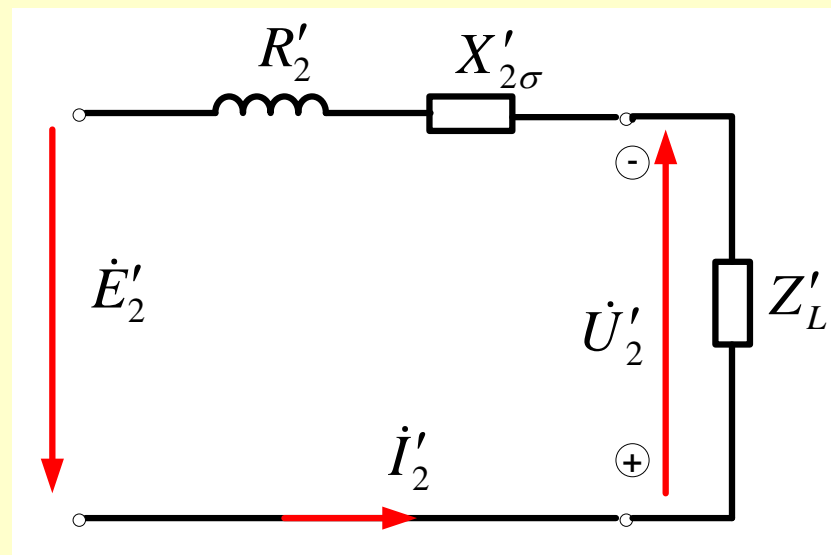
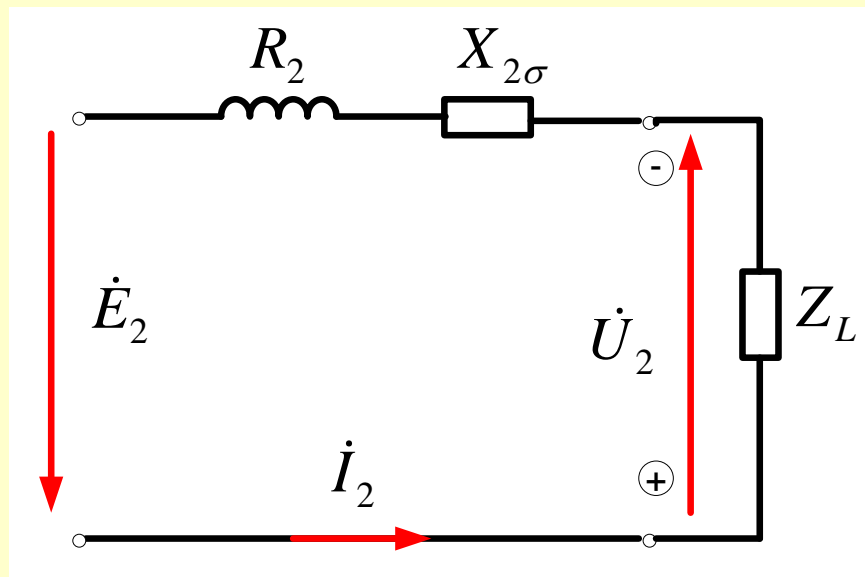
$$\dot{I}_2' = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \frac{1}{k} \dot{I}_2$$



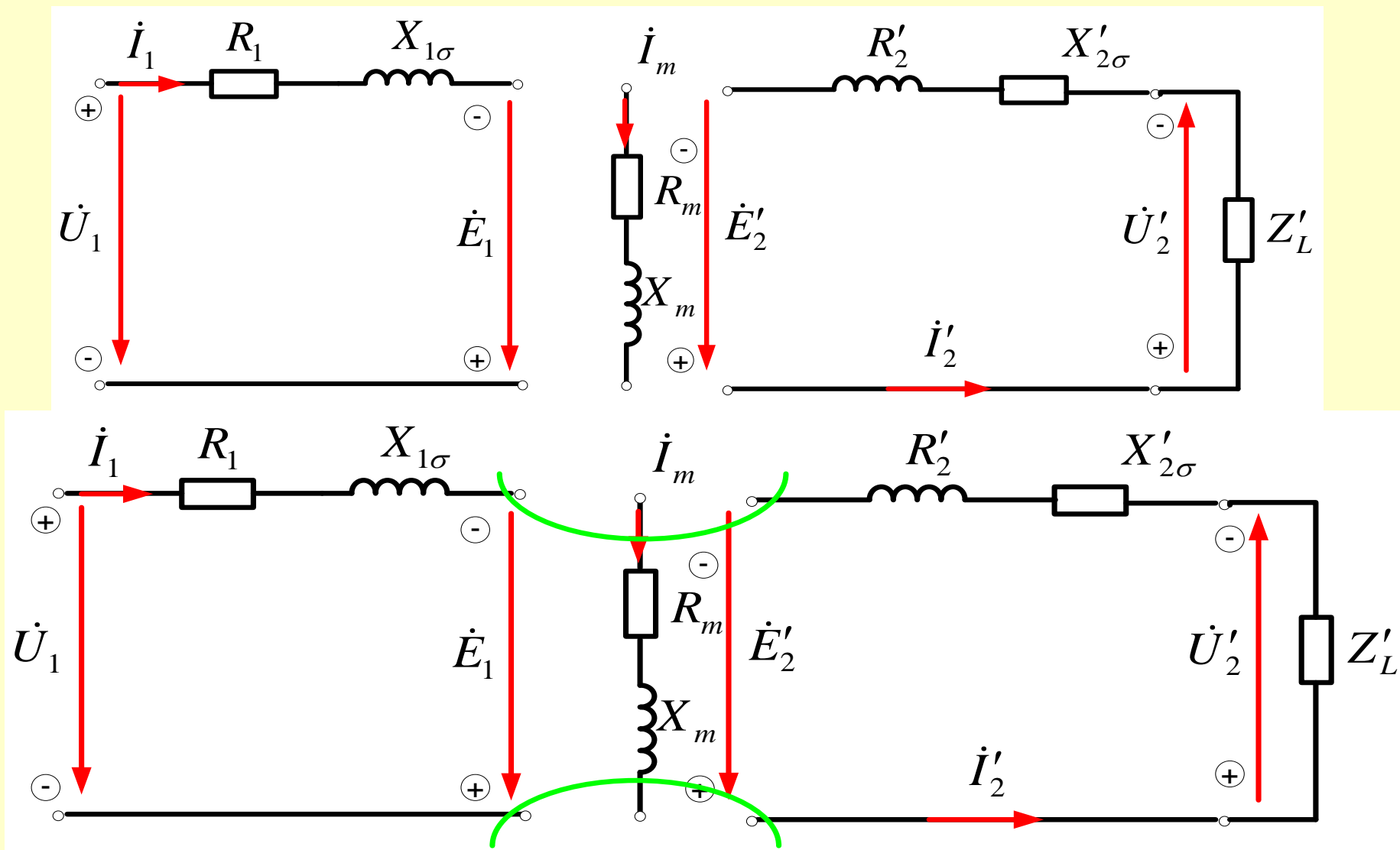
1.4 变压器的等效电路

得到：

$$E'_2 = k\dot{E}_2 = \dot{I}'_2(R'_2 + jX'_{2\sigma}) + \dot{U}'_2 = E_1$$



1.4 变压器的等效电路



1.4 变压器的等效电路

四、归算后，变压器的基本方程为：

副边绕组
经折算后，
原来的
基本方程
成为：

(无变比k)

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_m$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_L$$

1. 副边电流的折算值

$$\dot{I}'_2 = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \frac{1}{k} \dot{I}_2$$

2. 副边电动势的折算值

$$\dot{E}'_2 = k \dot{E}_2 = \dot{E}_1$$

3. 副边漏电抗的折算值

$$x'_{2\sigma} = k^2 x_{2\sigma}$$

4. 副边电阻的折算值

$$r'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 r_2 = k^2 r_2$$

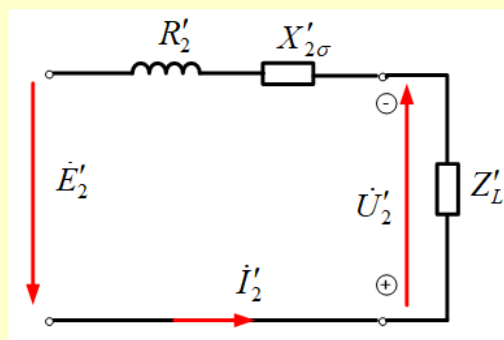
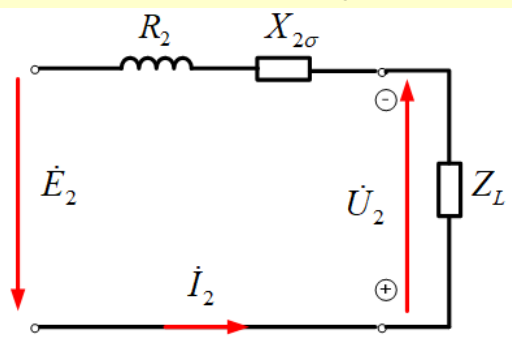
$$Z'_{2\sigma} = r'_2 + jx'_{2\sigma} = k^2 Z_{2\sigma}$$

5. 副边电压的折算值

$$\dot{U}'_2 = k \dot{U}_2$$

6. 副边阻抗的折算值

$$Z'_L = k^2 Z_L$$



$U_1 \approx E_1 = 444 f_1 N_1 \Phi_m$
 $\Phi_m = \frac{\sqrt{2} N_1 I_0}{R_m}$

R_m 为变压器磁路磁阻

1.4 变压器的等效电路

★ 归算后，T型等效电路

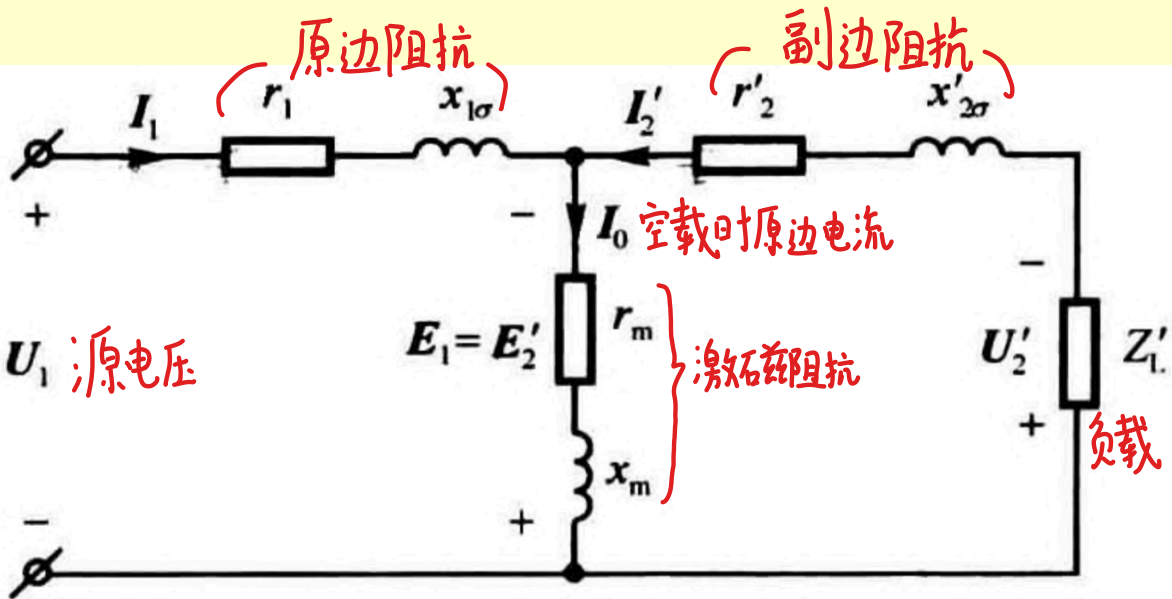
- (1) 电路中全部的量 and 参数都是每一相的值。
原边为实际值，副边为折算值。
- (2) 等效的是稳态对称运行状态。

$$R'_2 = k^2 R_2$$

$$X'_{2\sigma} = k^2 X_{2\sigma}$$

$$\dot{U}'_2 = k \dot{U}_2$$

变比 $k = \frac{N_1}{N_2}$



折算法只是一种分析的方法。
 凡是单位为伏的物理量（电动势、电压）的折算值等于原来数值乘k；单位为欧的物理量（电阻、电抗、阻抗）的折算值等于原来数值乘k²；电流的折算值等于原来的数值乘以1/k。



1.4 变压器的等效电路

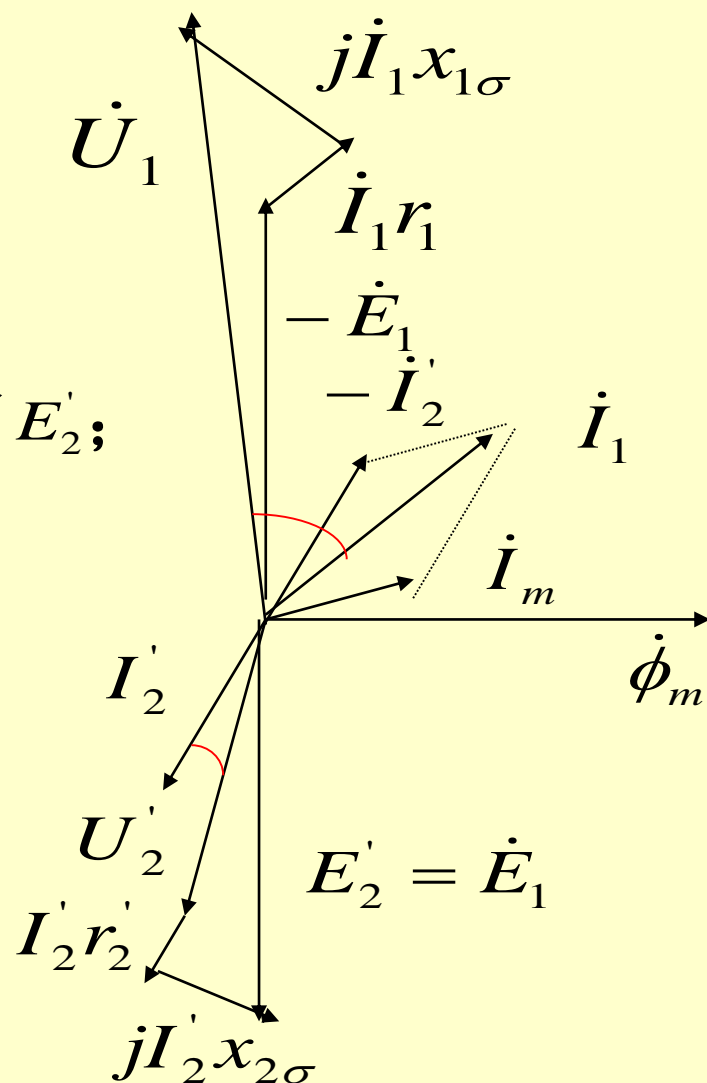
负载下相量图的画法

假定给定 U_2 、 I_2 、 $\cos\varphi_2$ 及各个参数

- (1) 画出 U_2' 、 I_2' ；
- (2) 在 U_2' 相量上加上 $I_2'r_2' + jI_2'x_2'$ 得到 E_2' ；
- (3) $E_2' = \dot{E}_1$
- (4) 画出领先 \dot{E}_1 90° 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 $\dot{\phi}_m$ 一个铁耗角了；

- (6) 画出 $-\dot{I}_2'$ 与 \dot{I}_m 的相量和 \dot{I}_1 ；
- (7) 画出 $-\dot{E}_1$ ，加 $\dot{I}_1r_1 + j\dot{I}_1x_{1\sigma}$ 得到 \dot{U}_1



1.4 变压器的等效电路

功率因数

变压器原边电压 U_1 与电流 I_1 的夹角为 φ_1 ，称为变压器负载运行的功率因数角， $\cos \varphi_1$ 称为变压器的功率因数。

对于运行的变压器，负载的性质和大小直接影响了变压器功率因数的性质。

