



电机与拖动**课件**之四

# 变 压 器

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



# 章节目录

3.1 变压器的基本工作原理和结构

**3.2 单相变压器的空载运行**

3.3 单相变压器的负载运行

3.4 变压器的参数测定

3.5 标么值

3.6 变压器的运行特性

3.7 三相变压器

3.8 变压器的并联特性

3.9 特种变压器

The diagram illustrates a transformer with a rectangular magnetic core. The primary winding is on the left vertical leg, and the secondary winding is on the right vertical leg. The magnetic flux  $\dot{\Phi}_0$  circulates in the core, while the leakage flux  $\dot{\Phi}_{1\sigma}$  is shown as a dashed loop around the primary winding. The primary circuit is connected to a voltage source  $U_1$  and has a resistance  $R_1$ . The secondary circuit is connected to a load  $u_1$  and  $u_2$ . The induced EMFs are  $\dot{E}_1$  and  $\dot{E}_2$ , and the induced EMF due to leakage is  $\dot{E}_{1\sigma}$ . The primary current is  $\dot{I}_0$  and the secondary current is  $\dot{I}_2$ . The induced EMF due to the primary current is  $\dot{E}_{1\sigma}$ . The induced EMF due to the secondary current is  $\dot{E}_2$ . The induced EMF due to the primary current is  $\dot{E}_{1\sigma}$ . The induced EMF due to the secondary current is  $\dot{E}_2$ . The induced EMF due to the primary current is  $\dot{E}_{1\sigma}$ . The induced EMF due to the secondary current is  $\dot{E}_2$ .

Handwritten notes in Chinese include: "主磁通" (main magnetic flux) pointing to  $\dot{\Phi}_0$ , "漏磁通" (leakage magnetic flux) pointing to  $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ , and "磁动力" (magnetic force) pointing to the primary winding.

At the bottom, a power flow diagram shows the relationship between the induced EMF  $\dot{E}_1$ , the primary current  $\dot{I}_0$ , the induced EMF  $\dot{E}_2$ , the secondary current  $\dot{I}_2$ , and the induced EMF  $\dot{E}_{1\sigma}$ . The diagram shows that the induced EMF  $\dot{E}_1$  is equal to the induced EMF  $\dot{E}_2$  plus the induced EMF  $\dot{E}_{1\sigma}$ . The induced EMF  $\dot{E}_1$  is equal to the induced EMF  $\dot{E}_2$  plus the induced EMF  $\dot{E}_{1\sigma}$ . The induced EMF  $\dot{E}_1$  is equal to the induced EMF  $\dot{E}_2$  plus the induced EMF  $\dot{E}_{1\sigma}$ . The induced EMF  $\dot{E}_1$  is equal to the induced EMF  $\dot{E}_2$  plus the induced EMF  $\dot{E}_{1\sigma}$ .



## 一、物理情况

### 主磁通与漏磁通的区别

- 1) 性质上:  $\Phi_0$  与  $I_0$  成非线性关系;  $\Phi_{1\sigma}$  与  $I_0$  成线性关系;
- 2) 数量上:  $\Phi_0$  占99%以上,  $\Phi_{1\sigma}$  仅占1%以下;
- 3) 作用上:  $\Phi_0$  起传递能量的作用,  $\Phi_{1\sigma}$  起漏抗压降作用。

## 二、各电磁量参考方向的规定

一次侧采用电动机惯例, 认为变压器对电源是个负载, 是无源的  
二次侧采用发电机惯例, 认为变压器对负载是个电源, 是有源的

磁通与产生它的电流之间符合右手螺旋定则; 电动势与感应它的磁通之间符合右手螺旋定则。



## 二、各电磁量参考方向的规定

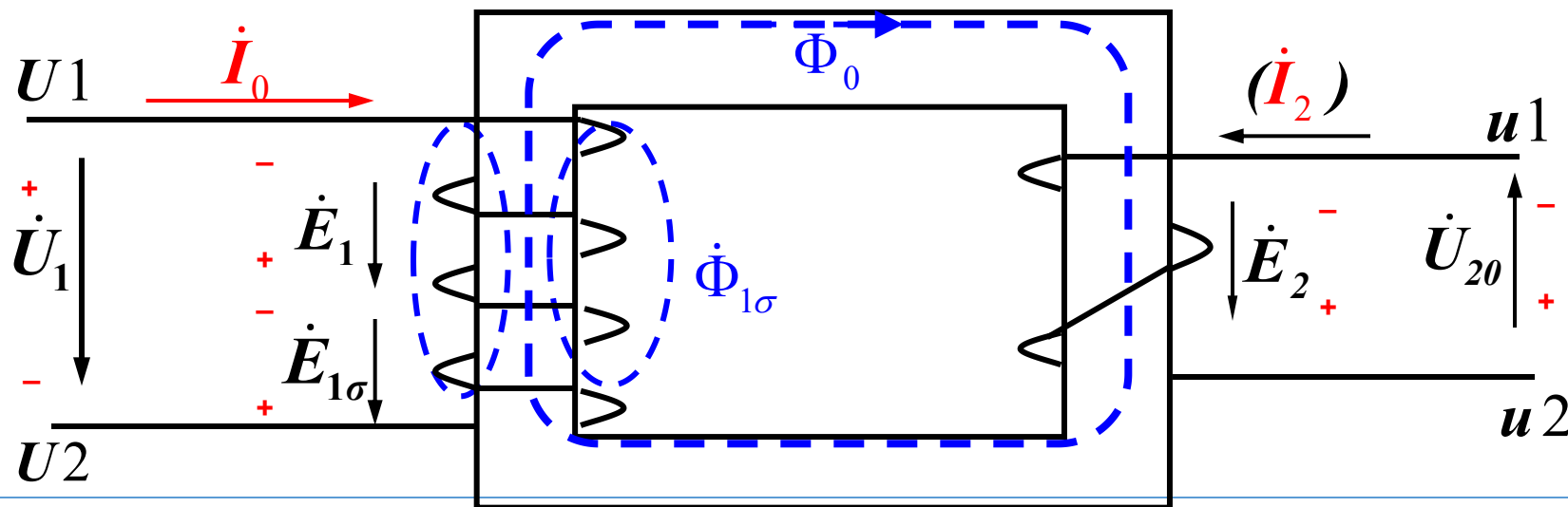
➤ 主要原则：

- (1) 电压方向→电流方向（高电位→低电位）
- (2) 电流方向→磁通方向（右手螺旋定则）
- (3) 磁通方向→电势方向（右手螺旋定则）

**关键：在电流→磁通→电势的前提下，电流的方向就是电势的方向**

- (1) 楞次定律指出变化的磁通产生的感应电势是反电势，一定是和电压的方向相反的。对电源而言，一次绕组是负载。

- (2) 对负载而言，二次绕组是电源。一、二次侧不是同一个标准。



### 三、感应电动势分析

#### 1. 主磁通感应的电动势——主电动势

设  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

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

有效值  $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$   $\sqrt{2}E_1$

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

$\hookrightarrow$  有效值相量

➤ 可见，当主磁通按正弦规律变化时，所产生的一次主电动势也按正弦规律变化，时间相位上滞后主磁通  $90^\circ$ 。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。

同理，二次主电动势也有同样的结论。



### 三、感应电动势分析

#### 2. 漏磁通感应的电动势——漏电动势

→ 漏磁通主要走空气

根据主电动势的分析方法，同样有

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

漏电动势也可以用漏抗压降来表示，即

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m} = -j \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \frac{N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m}}{I_0} I_0 = -j 2\pi f L_{1\sigma} \dot{I}_0 = -j \omega L_{1\sigma} \dot{I}_0 = -j \dot{I}_0 X_1$$

➤ 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  $X_1$  很小且为常数，它不随电源电压负载情况而变。



## 一、空载电流

### 1. 作用与组成

→ 交变电流

➤ 空载电流  $\dot{I}_0$  包含两个分量，一个是励磁分量  $\dot{I}_{0r}$ ，作用是建立磁场，另一个是铁损耗分量  $\dot{I}_{0a}$ ，主要作用是供铁损耗。

### 2. 性质和大小

电感，电容的电流不算损耗，

**性质：**由于空载电流的无功分量远大于有功分量，所以空载电流主要是感性无功性质——也称励磁电流；

由于绕组为电感

$$I_0 = \dot{I}_{0r} + \dot{I}_{0a}$$

**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，用空载电流百分数  $I_0\%$  来表示：

$$I_0 \% = \frac{I_0}{I_N} \times 100\%$$

相位相差  $90^\circ$





## 一、空载电流

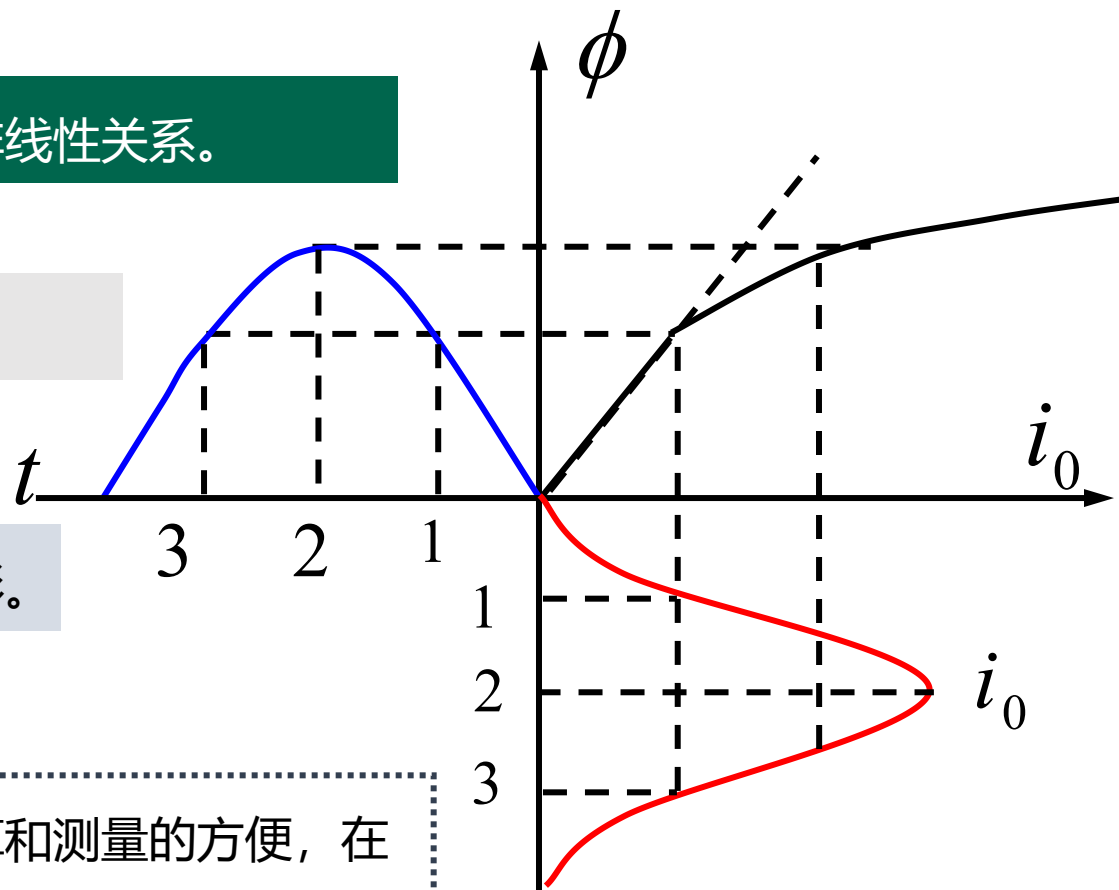
### 3、空载电流波形

由于磁路饱和，空载电流与由它产生的主磁通呈非线性关系。

当磁通按正弦规律变化时，空载电流呈尖顶波形。

当空载电流按正弦规律变化时，主磁通呈尖顶波形。

➤ 实际空载电流为非正弦波，但为了分析、计算和测量的方便，在相量图和计算式中常用正弦的电流代替实际的空载电流。



## 二、空载损耗

➤ 变压器空载时一次侧从电源吸收少量有功功率  $P_0$ ，供给铁损耗  $P_{Fe}$  和绕组铜损耗  $I_0^2 R_1$ ，由于  $I_0$  和  $R_1$  均很小，所以  $P_0 \approx P_{Fe}$ ，即空载损耗近似为铁损耗。

对于已制成变压器，铁损与磁通密度幅值的平方成正比，与电流频率的1.3次方成正比，即

$$P_{Fe} \propto B_m^2 \cdot f^{1.3}$$

➤ 空载损耗约占额定容量的0.2%~1%，而且随变压器容量的增大而下降。为减少空载损耗，改进设计结构的方向是采用优质铁磁材料：优质硅钢片、激光化硅钢片或应用非晶态合金。

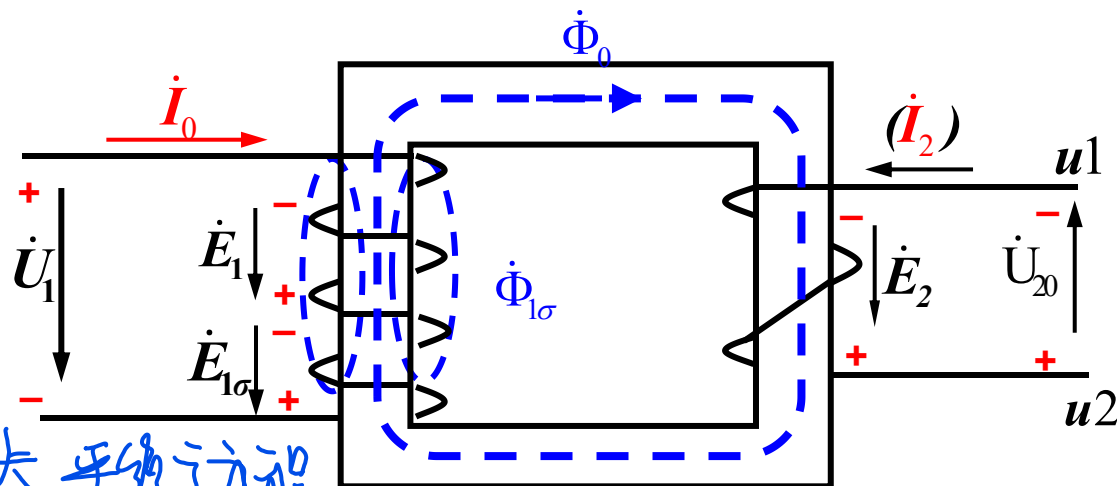


## 一、电动势平衡方程和变比

## 1、电动势平衡方程

## (1) 一次侧电动势平衡方程

基尔霍夫平衡方程



$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_1 = -\dot{E}_1 + \mathbf{Z}_1 \dot{I}_0$$

忽略很小的漏阻抗压降，并写成有效值形式，有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

则

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

重要公式

可见，影响主磁通大小的因素有电源电压和频率，以及一次线圈的匝数。



## 一、电动势平衡方程和变比

## 1、电动势平衡方程

## (2) 二次侧电动势平衡方程

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

## 2、变比

定义  $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$

对三相变压器，变比为一、二次侧的相电动势之比，近似为额定相电压之比，具体为

Y, d接线

$$k = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3} U_{2N}}$$

D, y接线

$$k = \frac{\sqrt{3} U_{1N}}{U_{2N}}$$



## 二、空载时的等效电路和相量图

## 1、等效电路

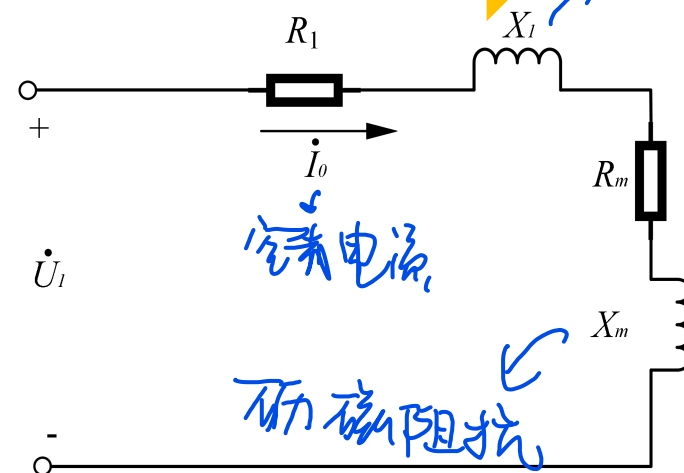
➤ 基于  $\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_0 X_1$  表示法,  $\dot{\Phi}$  感应的电动势  $\dot{E}_1$  也用电抗压降表示, 由于  $\dot{\Phi}$  在铁心中引起的铁损  $P_{Fe}$ , 所以还要引入一个电阻  $R_m$ , 用  $I_0^2 R_m$  等效  $P_{Fe}$ , 即

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

一次侧的电动势平衡方程为

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

空载时等效电路为



## 二、空载时的等效电路和相量图

### 1、等效电路

$R_m, X_m, Z_m$  — 励磁电阻、励磁电抗、励磁阻抗。由于磁路具有饱和特性，所以

$$Z_m = R_m + jX_m \quad \text{不是常数，随磁路饱和程度增大而减小。}$$

➤ 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。

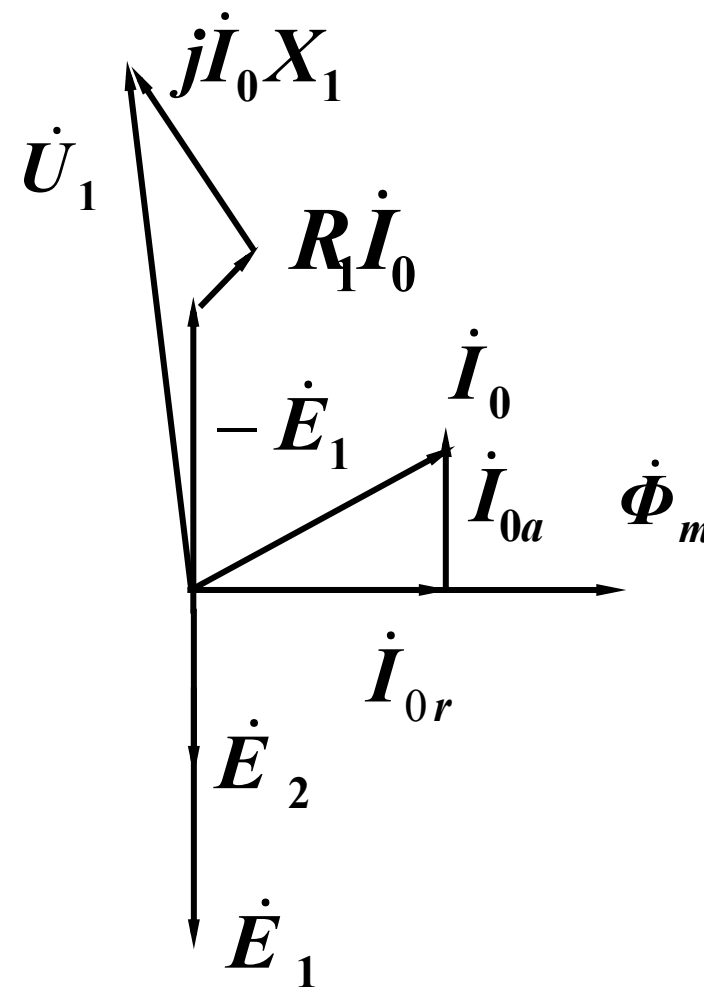


## 二、空载时的等效电路和相量图

## 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)  $\dot{I}_{0r}$  与  $\dot{\Phi}_m$  同相,  $\dot{I}_{0a}$  滞后  $90^\circ$ ,  $\dot{I}_0 = \dot{I}_{0r} + \dot{I}_{0a}$
- (3)  $\dot{E}_1, \dot{E}_2$  滞后  $\dot{\Phi}_m$   $90^\circ$ ,  $-\dot{E}_1$
- (4)  $R_1 \dot{I}_0, j\dot{I}_0 X_1$
- (5)  $\dot{U}_1$



**例 一台三相变压器，Y/Y联接：**  $S_N=100\text{kV}\cdot\text{A}$ ，  $U_{1N}/U_{2N}=6\text{kV}/0.4\text{kV}$ ，  $I_{1N}/I_{2N}=9.62/144.3\text{A}$ ，  
 $Z_1=R_1+jX_1=5+j10\Omega$ ，  $Z_m=R_m+jX_m=514+j5526$ 。 **试求** (1)  $I_0$ ； (2)  $I_0/I_{1N}$ ； (3)  $U_1$ 、 $E_1$ 、漏  
 阻抗压降 $U_{\sigma 1}$ ，并比较它们大小。

解： (1)求励磁电流：  $Z_1 + Z_m = 5 + j10 + 514 + j5526 = 5559.2 \angle 84.65^\circ \Omega$

$$I_0 = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{Z_1 + Z_m} = \frac{6 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 5559.2} \text{A} = 0.62 \text{A}$$

(2)求 $I_0$ 与 $I_{1N}$ 之比：  $\frac{I_0}{I_{1N}} = \frac{0.62}{9.62} \text{A} = 6.48\%$

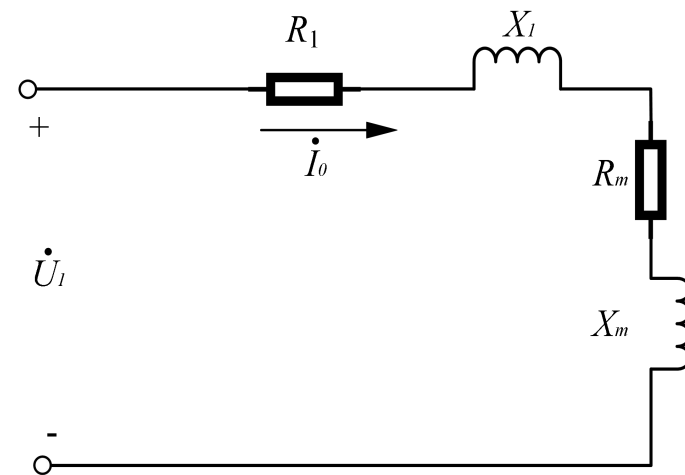
(3)求相电压：  $U_1 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{6 \times 10^3}{\sqrt{3}} \text{V} = 3464 \text{V}$

求相电动势：  $E_1 = Z_m I_0 = \sqrt{514^2 + 5526^2} \times 0.62 \text{V} = 3458 \text{V}$

求每相漏阻抗压降：  $E_{\sigma 1} = Z_1 I_0 = \sqrt{5^2 + 10^2} \times 0.62 \text{V} = 6.9 \text{V}$

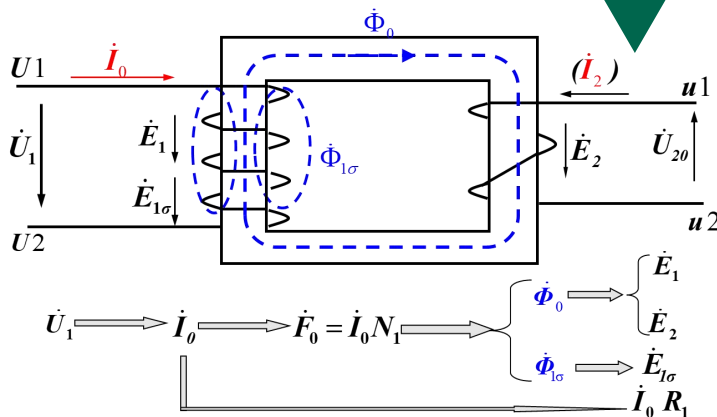
可见：  $E_{\sigma 1} \ll E_1$ ，  $E_1 \approx U_1$

$$U_p = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}}$$





# 小结



➤ 主要原则:

- (1) 电压方向→电流方向 (高电位→低电位)
- (2) 电流方向→磁通方向 (右手螺旋定则)
- (3) 磁通方向→电势方向 (右手螺旋定则)

电磁关系

空载运行

感应电动势

主感应电动势

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

漏感应电动势

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m} \quad \dot{E}_{1\sigma} = -j \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m} = -j \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \frac{N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m}}{I_0} I_0 = -j 2\pi f L_{1\sigma} I_0 = -j \omega L_{1\sigma} I_0 = -j I_0 X_1$$

电动势方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j \dot{I}_0 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{Z}_1 \dot{I}_0 \quad U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad \Phi_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1} \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1}$$

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

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

等效电路

变比

单相  $k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$

三相

**Y, d接线**  $k = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3} U_{2N}}$

**D, y接线**  $k = \frac{\sqrt{3} U_{1N}}{U_{2N}}$

等效电路图

