

# 电机与拖动基础

南开大学

人工智能学院

自动化与智能科学系

段 峰

教授 博导



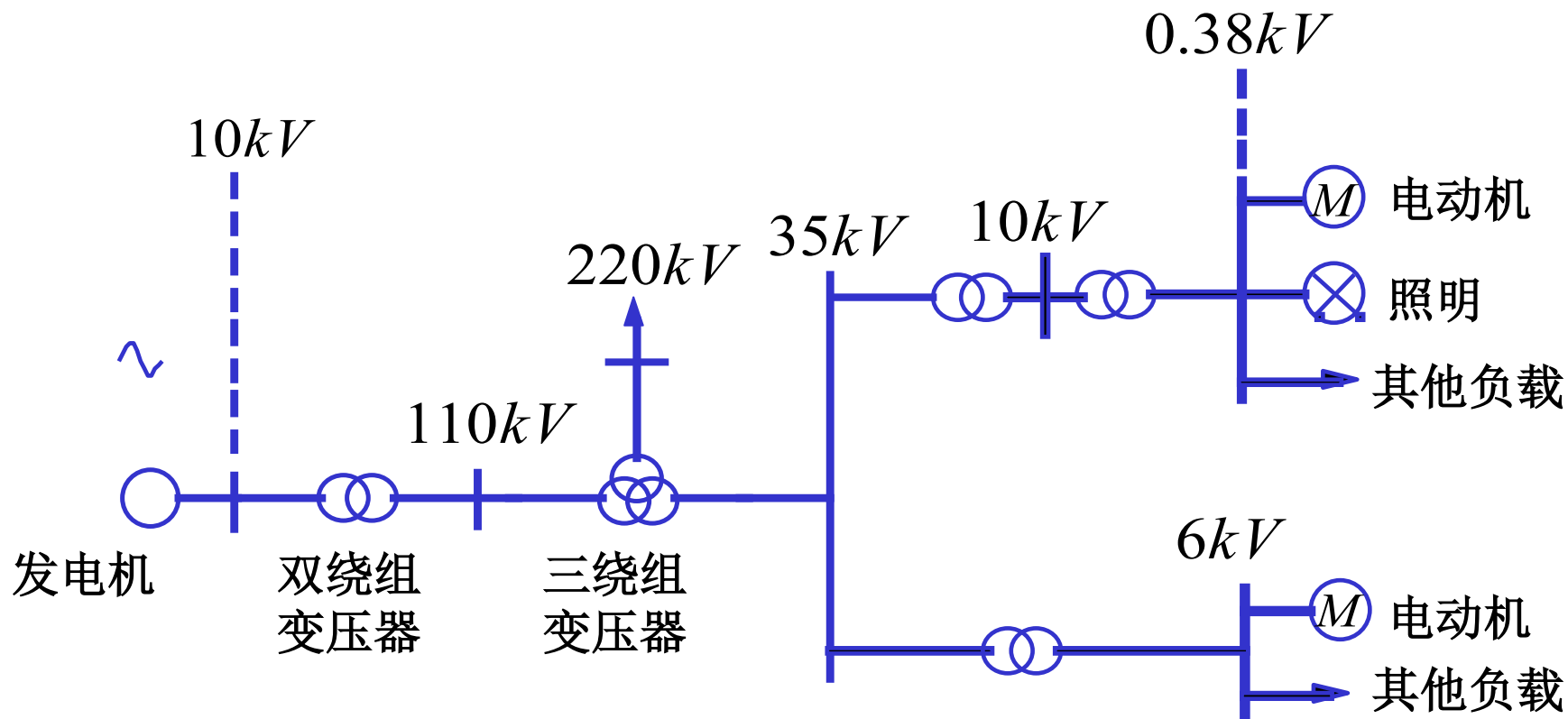
# 第五章 变压器

- 变压器的结构和工作原理
- 变压器的空载运行
  - （惯例、平衡方程、向量图、等值电路等）
- 变压器的负载运行
  - （惯例、平衡方程、向量图、折算、等值电路等）
- 变压器的参数测定（空载试验、短路试验）
- 标么值
- 三相变压器的联接组别
- 变压器的并联运行

# 第一节 概述

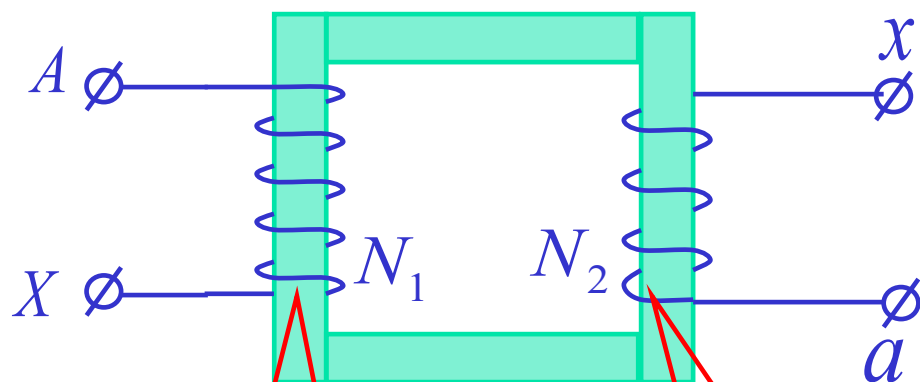
## 一、变压器的用途

**变压器：**是输送交流电时使用的、通过磁路的耦合作用，实现电能传输及变电压、变电流功能的设备。



# 第一节 概述

## 二、单相双绕组变压器



### 接电源端:

- 原绕组
- 原边线圈
- 初级线圈
- 一次线圈

### 接负载端:

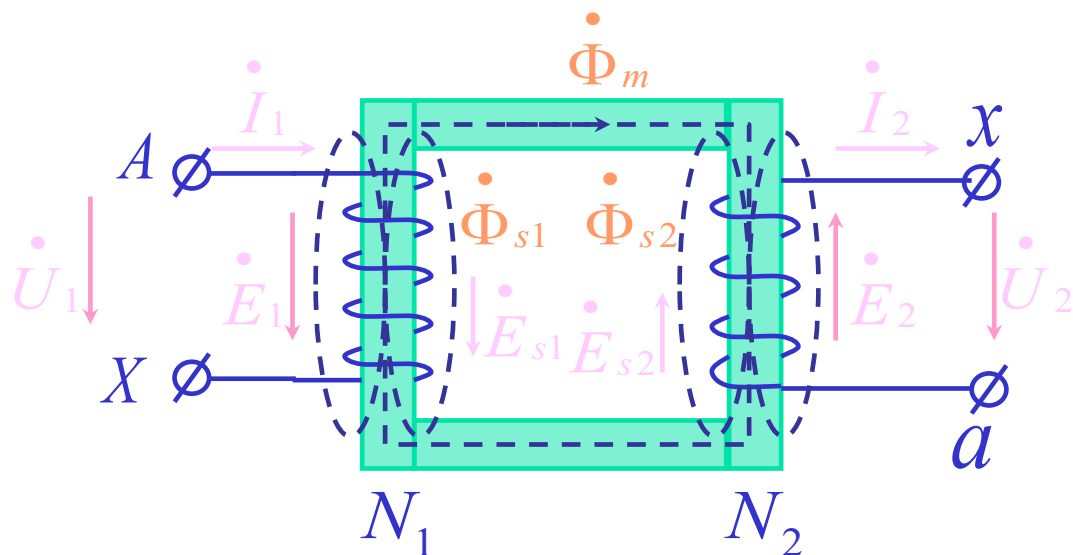
- 副绕组
- 副边线圈
- 次级线圈
- 二次线圈

## 1、主要结构

- 1) 铁心: 硅钢片
- 2) 绕组: 铜、铝线
- 3) 外部附件:  
油箱、分接开关等

# 第一节 概述

## 2、变压器惯例



## 3、铭牌数据

$S_N$  —— 额定容量      输出端视在功率      单位:  $kVA$  或  $VA$

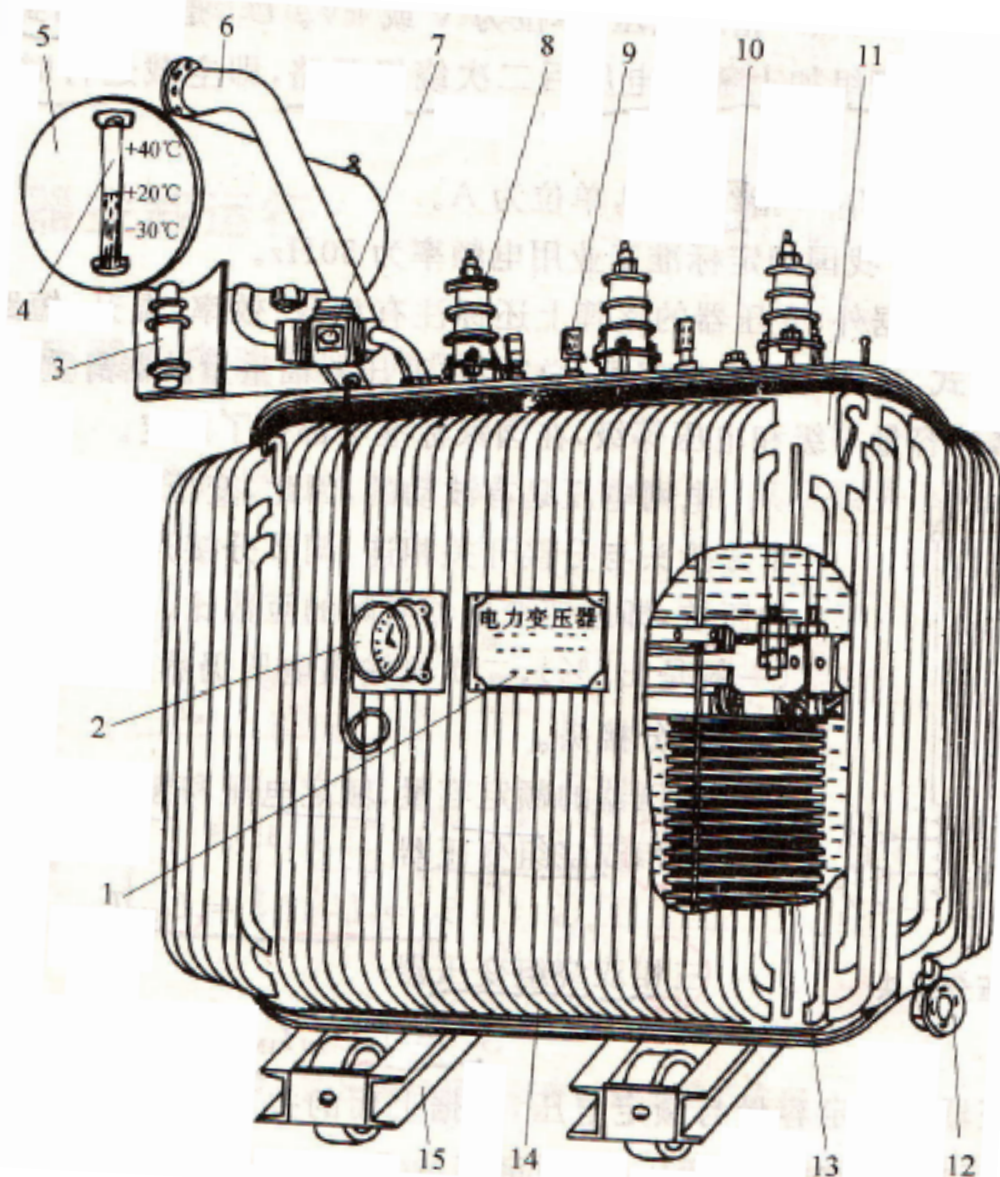
$U_{1N}/U_{2N}$  —— 额定电压      线电压      单位:  $V$  或  $kV$

$I_{1N}/I_{2N}$  —— 额定电流      线电流计算值      单位:  $A$

$f_N$  —— 额定频率      电源正弦电频率      单位:  $Hz$

$$S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$$

# 三、三相双绕组变压器

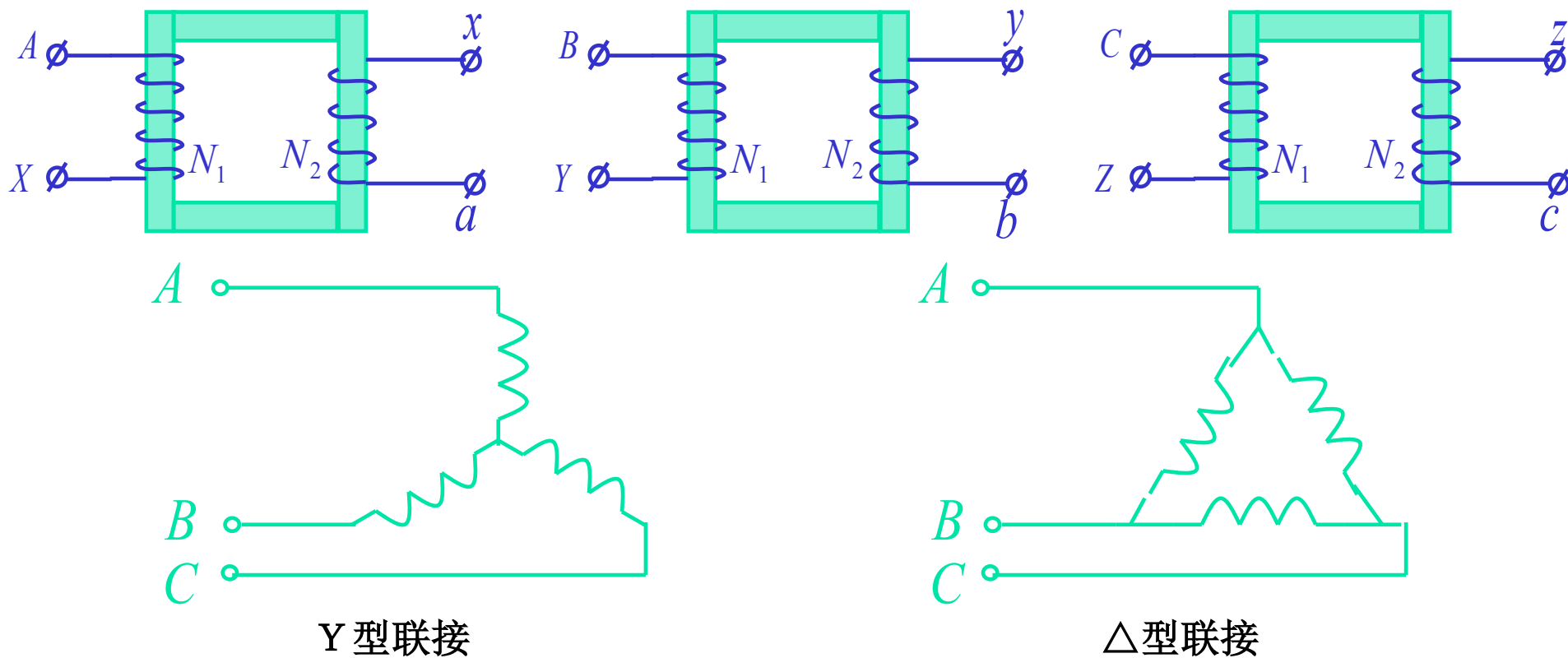


## 油浸式电力变压器

1. 铭牌
2. 信号式温度计
3. 吸湿器
4. 油表
5. 储油柜
6. 安全气道
7. 气体继电器
8. 高压套管
9. 低压套管
10. 分接开关
11. 油箱
12. 放油阀门
13. 器身
14. 接地板
15. 小车

# 三、三相双绕组变压器

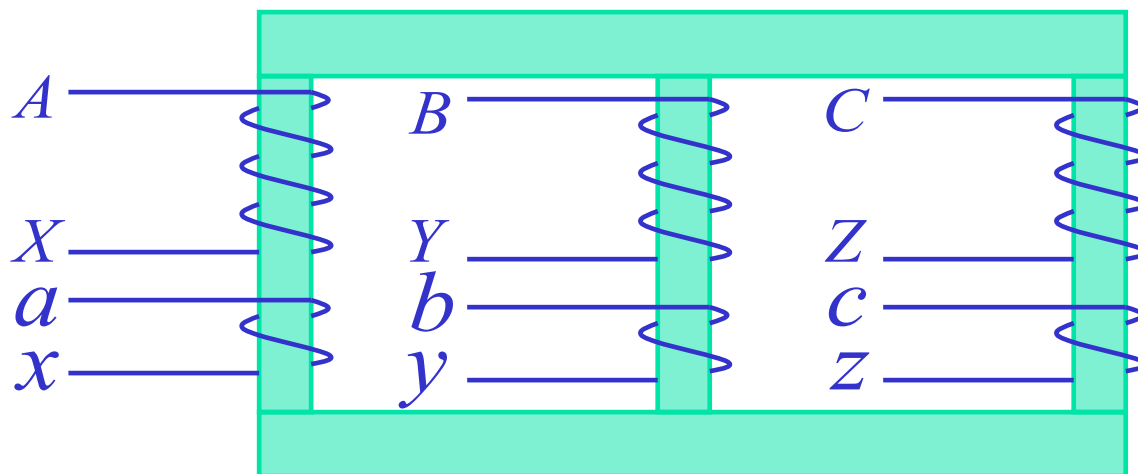
## 1、由三个单相双绕组变压器组成变压器组



Y / Y联接、Y / △联接、△ / △联接、 △ / Y联接

# 三、三相双绕组变压器

## 2、三铁心柱式三相变压器

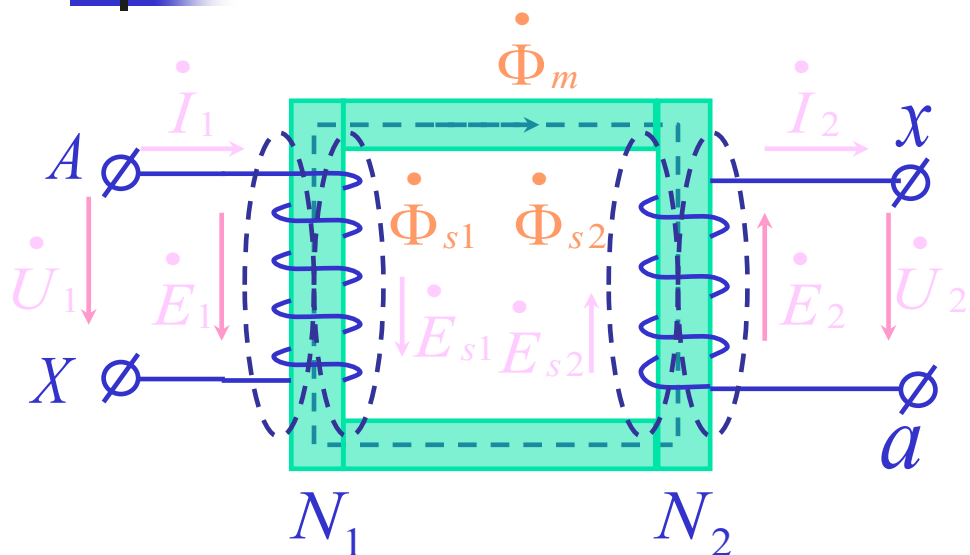


三相对称、对称运行：大小相等，相位互差 $120^\circ$

$$S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N}$$



# 四、单相双绕组变压器的基本工作原理



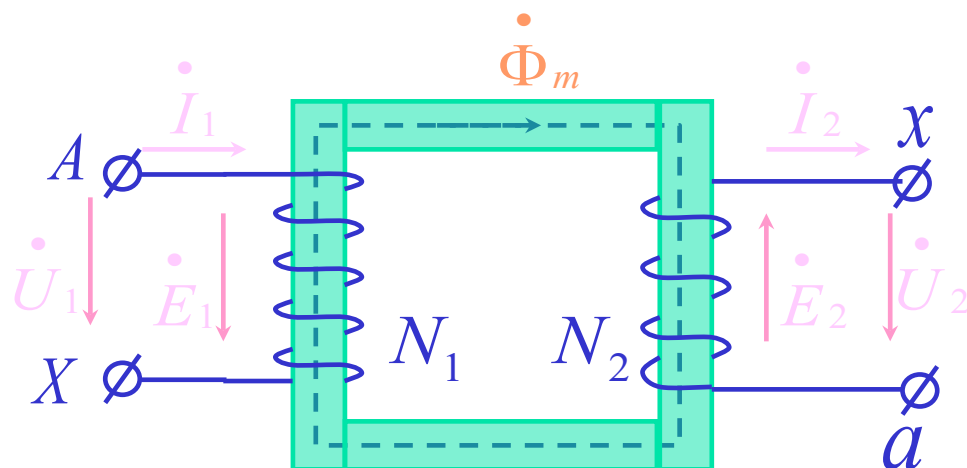
变压器惯例

## 1、两边电压关系

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1, \dot{U}_2 = \dot{E}_2, u_1 = -e_1, u_2 = e_2$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}, e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

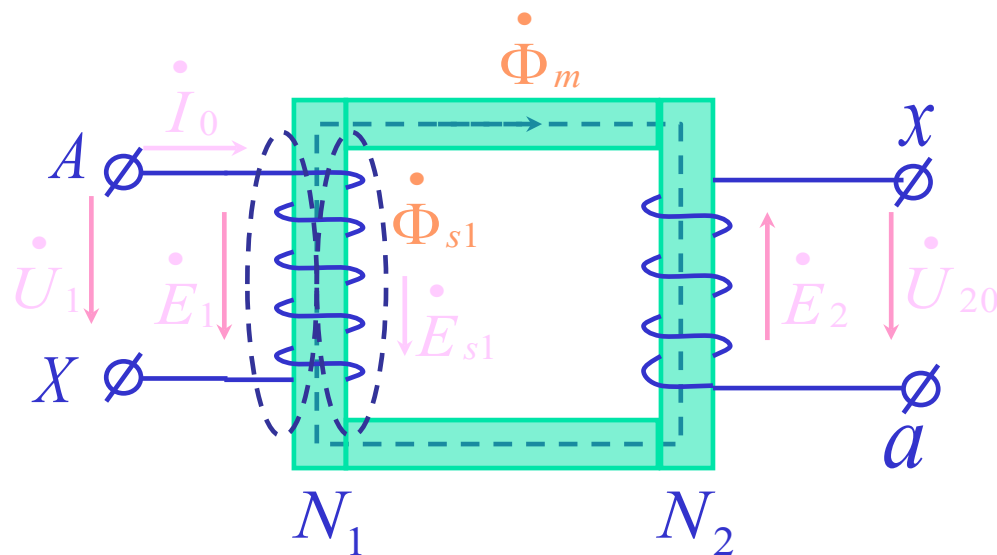


理想变压器

## 2、两边电流、功率关系

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = U_1 I_1 \\ P_2 = U_2 I_2 \\ P_1 = P_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{k}$$

## 第二节 变压器的空载运行



变压器惯例

空载运行：

原边接电源，副边开路

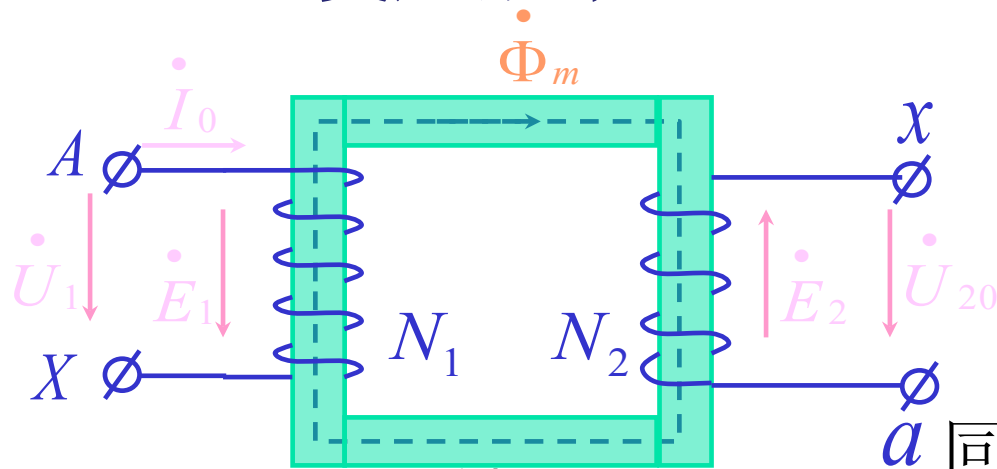
$\dot{I}_0$  —— 空载电流

（也叫励磁电流）

产生励磁磁势  $\dot{I}_0 N_1$

# 一、空载运行时的电磁关系

## 1、理想变压器时



$$\begin{aligned} \text{则: } e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ &= -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t \\ &= \omega N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{即: } \dot{E}_1 &= -j \frac{\omega N_1}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_m = -j \frac{2\pi f N_1}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_m = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_2 &= -j 4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \end{aligned}$$

即：忽略  $R_1$ 、 $\dot{\Phi}_{s1}$

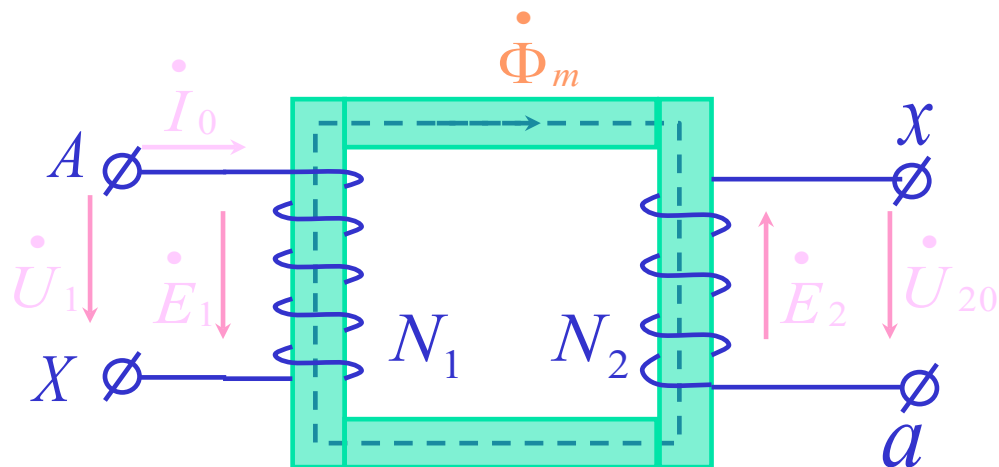
$$(1) \dot{E}_1、\dot{E}_2$$

设：  $\phi = \Phi_m \sin \omega t$

$$\begin{aligned} \text{同理: } e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} \\ &= -N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t \\ &= \omega N_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

记忆，有效值

# 一、空载运行时的电磁关系

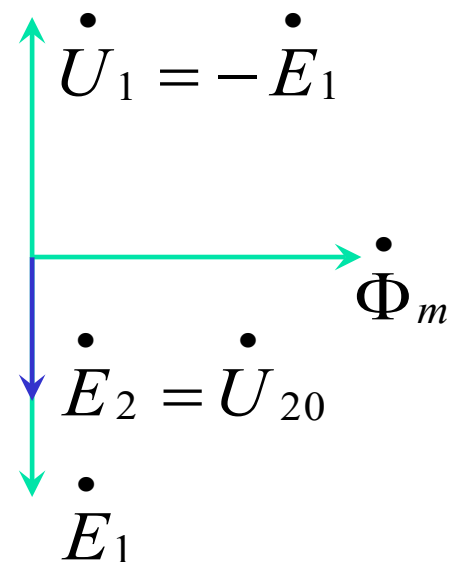


(2)  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_{20}$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1, \dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$

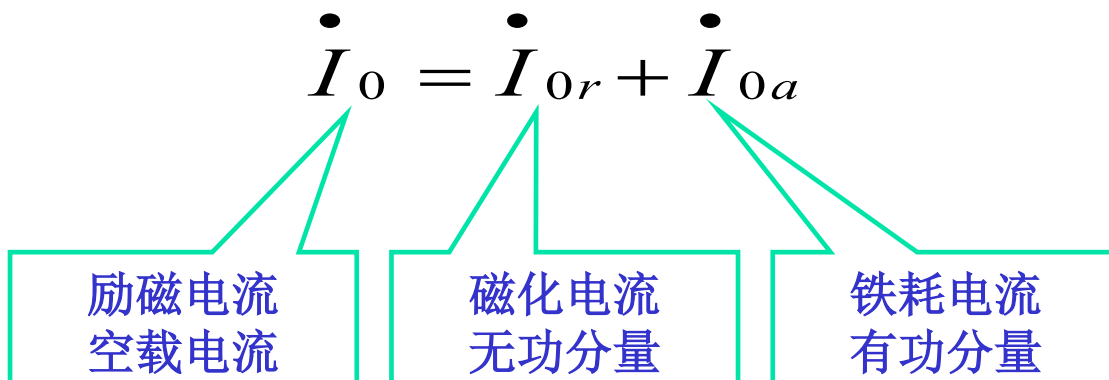
$$\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

(3) 向量图



# 一、空载运行时的电磁关系

## 2、励磁电流分析



### (1) 磁化电流分析

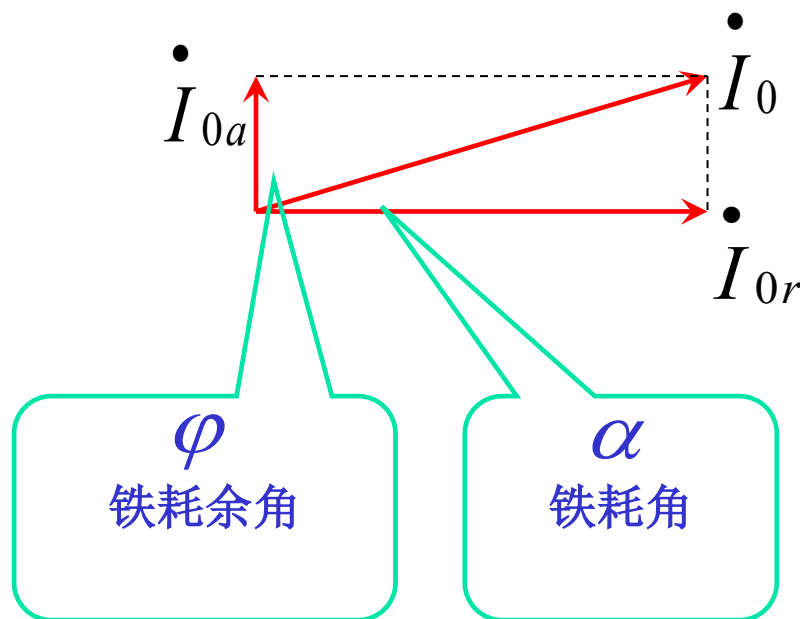
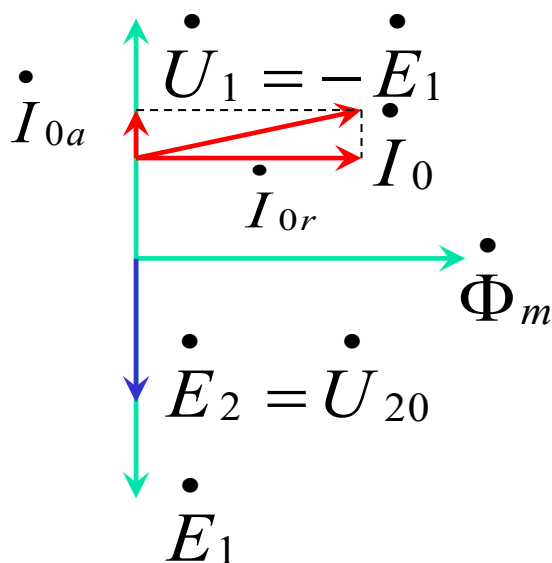
- 建立磁场，送入无功功率
- 与  $\dot{\Phi}_m$  同相位  $\dot{I}_{0r} \perp \dot{U}_1$
- 可以认为是正弦量

# 一、空载运行时的电磁关系

## (2) 铁耗电流分析

- 为铁耗提供有功功率
- 与  $\dot{U}_1$  同相位
- 应尽量减小该电流

## (3) 向量图



# 一、空载运行时的电磁关系

3、考虑  $R_1$ ,  $\Phi_{s1}$

(1)  $\dot{\Phi}_{s1}$  的作用

$$\text{仿 } \dot{E}_1 = -j \frac{\omega N_1}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_m$$

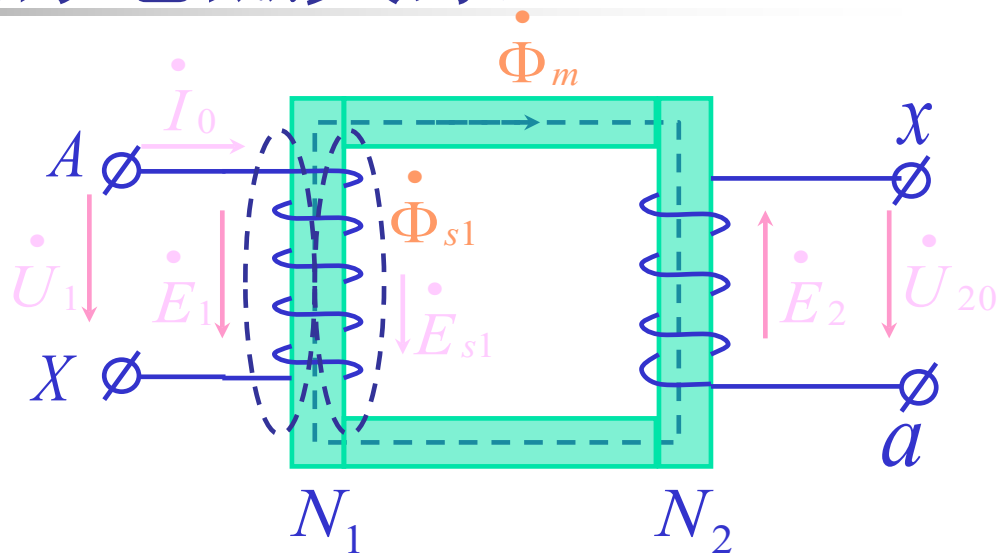
$$\dot{E}_{s1} = -j \frac{\omega N_1}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_{s1}$$

设:  $L_{s1} = \frac{N_1 \dot{\Phi}_{s1}}{\sqrt{2} I_0}$  一次绕组漏自感

$$\Rightarrow \dot{E}_{s1} = -j \omega L_{s1} \dot{I}_0 = -j \dot{I}_0 X_1 \text{ 一次绕组漏电抗}$$

(2)  $R_1$  的作用

$$\dot{I}_0 R_1$$



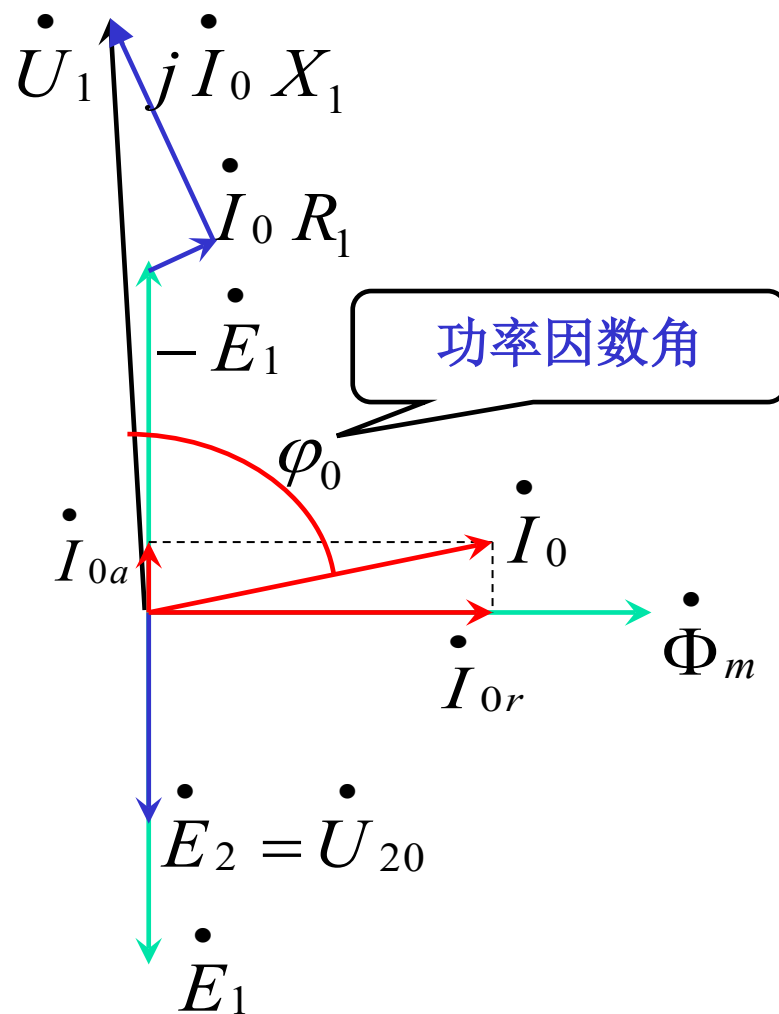
变压器惯例

(3) 原边电压方程

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_0 R_1 - \dot{E}_{s1} - \dot{E}_1 \\ &= \dot{I}_0 (R_1 + jX_1) - \dot{E}_1 \\ &= \dot{I}_0 Z_1 - \dot{E}_1 \end{aligned}$$

原绕组漏阻抗

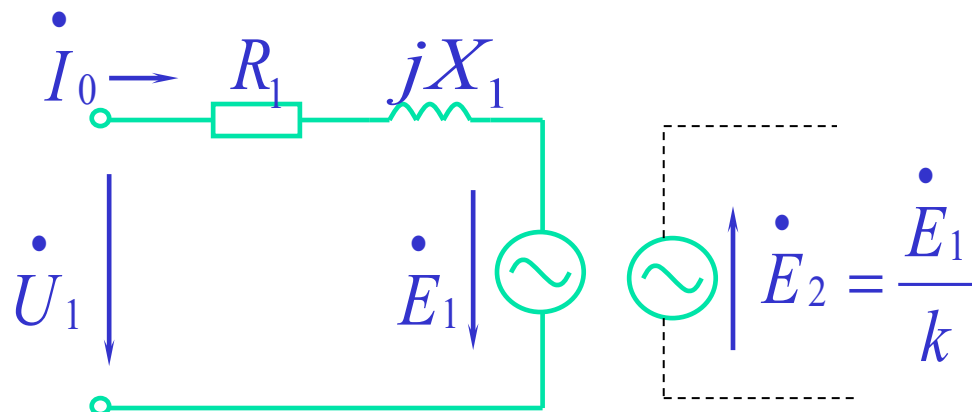
## 二、空载运行时的向量图





### 三、空载运行时的等值电路（串联等值电路）

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



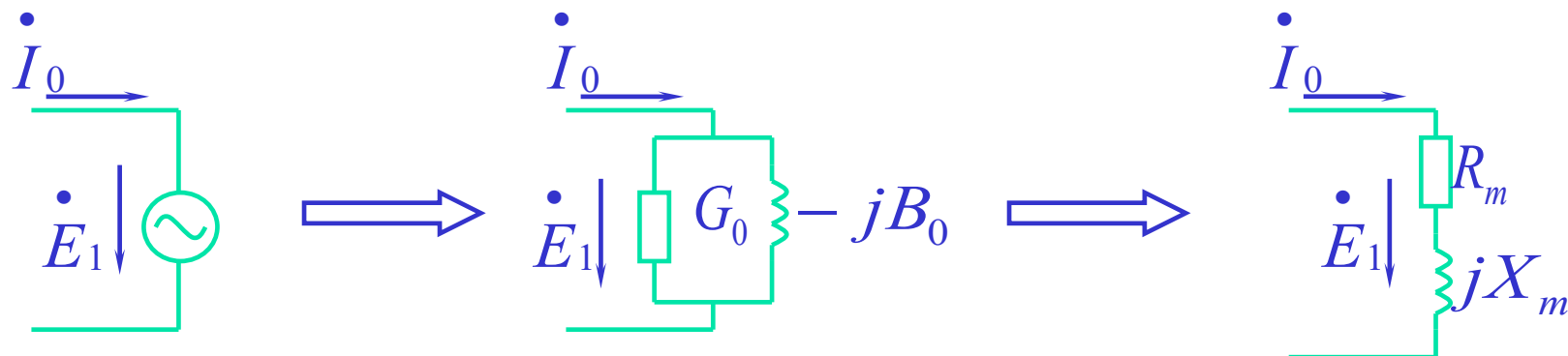
$$\left. \begin{aligned} -\dot{E}_1 &= \dot{I}_{0a} \cdot \frac{1}{G_0} \\ -\dot{E}_1 &= j\dot{I}_{0r} \cdot \frac{1}{B_0} \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0r} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0r} = \left( -\dot{E}_1 \right) (G_0 - jB_0)$$

$G_0$ 是电导（电阻的倒数）， $B_0$ 是电纳（电抗的倒数）

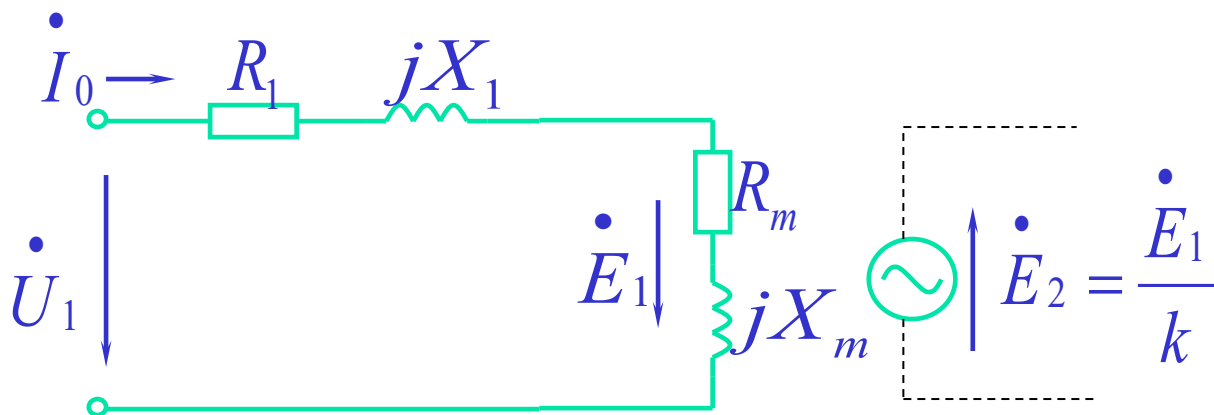
$$\Rightarrow -\dot{E}_1 = \frac{\dot{I}_0}{(G_0 - jB_0)} = \dot{I}_0 \left( \frac{G_0}{G_0^2 + B_0^2} \right) + \dot{I}_0 \left( \frac{jB_0}{G_0^2 + B_0^2} \right) = \dot{I}_0 (R_m + jX_m) = \dot{I}_0 Z_m$$

### 三、空载运行时的等值电路（串联等值电路）

由： $\dot{I}_0 = \left( -\dot{E}_1 \right) (G_0 + jB_0)$  和  $-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 (R_m + jX_m)$



$R_m$  —— 励磁电阻  
 $jX_m$  —— 励磁电抗
  $\left. \vphantom{\begin{matrix} R_m \\ jX_m \end{matrix}} \right\} \Rightarrow Z_m = R_m + jX_m$  —— 励磁阻抗



## 例题5-1

一台三相电力变压器，Y/Y接法，额定容量 $S_N=100kVA$ ，额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=6000/400V$ ，额定电流 $I_{1N}/I_{2N}=9.62/144.3A$ ，每相参数：原绕组漏阻抗 $Z_1=R_1+jX_1=(4.2+j9)\Omega$ ，励磁阻抗 $Z_m=R_m+jX_m=(514+j5526)\Omega$ 。计算：

- (1) 励磁电流及其与额定电流的比值；
- (2) 空载运行时的额定功率；
- (3) 原边相电压、相电动势及漏阻抗压降。

解： (1) 励磁电流及其与额定电流的比值

$$Z_1 + Z_m = 4.2 + j9 + 514 + j5526 = 5559.2 \angle 84.65^\circ \Omega$$

$$I_0 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3} \times (Z_1 + Z_m)} = \frac{6000}{\sqrt{3} \times 5559.2} = 0.623(A)$$

$$\frac{I_0}{I_{1N}} = \frac{0.623}{9.62} = 6.48\%$$

## 例题5-1

### (2) 空载运行时的额定功率

$$\text{视在功率: } S_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_0 = \sqrt{3} \times 6000 \times 0.623 = 6474VA$$

$$\text{功率因数角: } \varphi_0 = 84.65^\circ$$

$$\text{有功功率: } P_1 = S_1 \cos \varphi_0 = 604W$$

$$\text{无功功率: } Q_1 = S_1 \sin \varphi_0 = 6446VA$$

### (3) 原边相电压、相电动势及漏阻抗压降

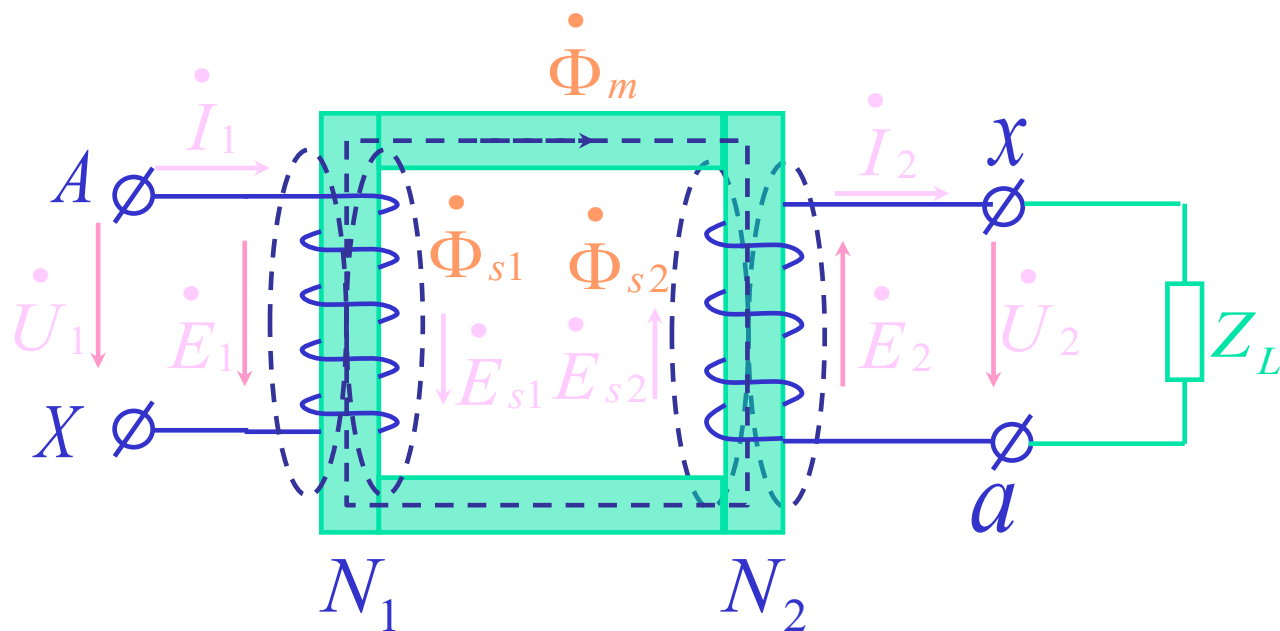
$$\text{相电压: } U_1 = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464V$$

$$\text{相电动势: } E_1 = I_0 Z_m = 0.623 \times \sqrt{514^2 + 5526^2} = 3458V$$

$$\text{相漏阻抗压降: } I_0 Z_1 = 0.623 \times \sqrt{4.2^2 + 9^2} = 6.2V$$

# 第三节 变压器的负载运行

## 一、负载运行时的惯例



$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1$$

$$S_1 = U_1 I_1$$

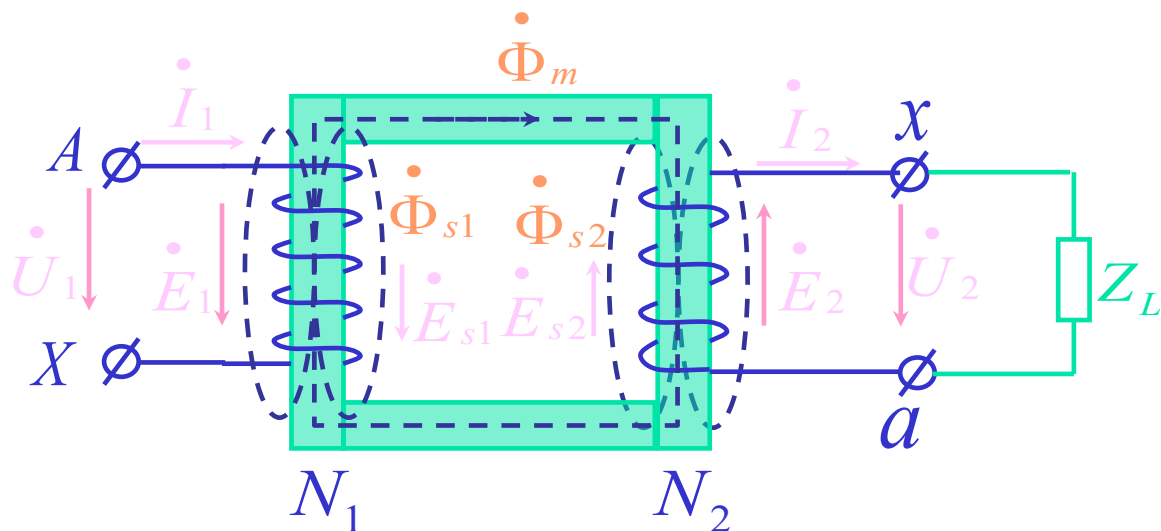
$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$Q_2 = U_2 I_2 \sin \varphi_2$$

$$S_2 = U_2 I_2$$

## 二、负载运行时的电磁关系

### 2、原、副边电流关系



#### 1、主磁通

(1) 负载运行时的励磁磁通势  $\dot{F}_0$   
原绕组、副绕组磁势的合成

$$(2) \quad \dot{\Phi}_m = \dot{E}_1 / -j4.44fN_1$$

(3)  $\dot{\Phi}_m$  可以看成仍是  $\dot{I}_0$  形成的

(1) 磁势平衡式

$$\begin{cases} \dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \\ \dot{I}_0 N_1 = \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 \end{cases}$$

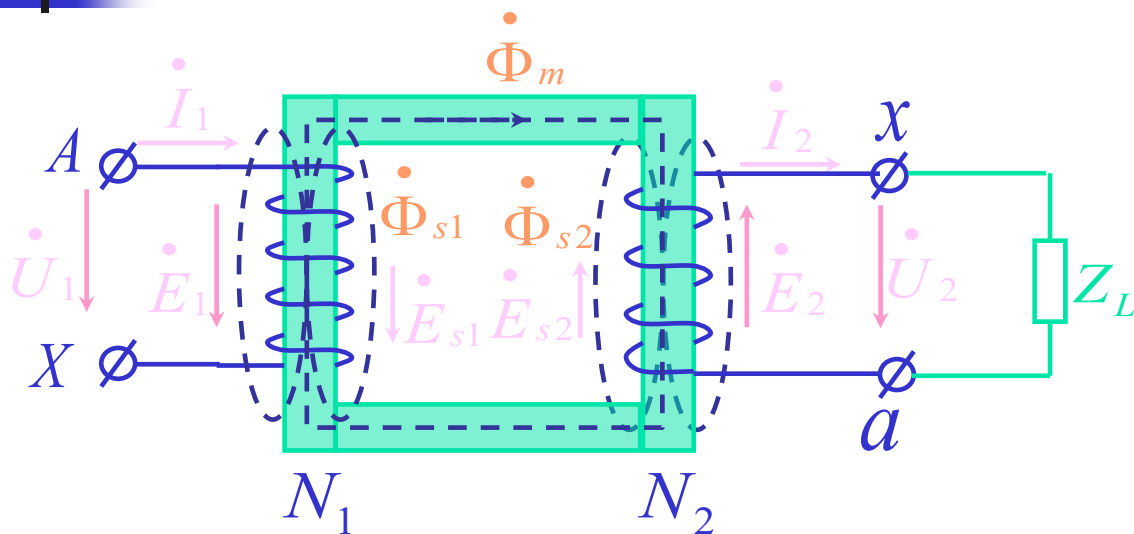
(2) 磁势平衡式含义

$$\begin{cases} \dot{F}_1 = \dot{F}_0 + (-\dot{F}_2) \\ \dot{I}_1 N_1 = \dot{I}_0 N_1 + (-\dot{I}_2 N_2) \end{cases}$$

励磁分量

负载分量

## 二、负载运行时的电磁关系



( 3 ) 电流平衡式

$$\dot{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 + \dot{I}_0$$

( 4 ) 电流关系

$$\dot{I}_1 \approx -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = -\frac{1}{k} \dot{I}_2$$

### 3、副边电压、电势平衡方程式

与分析原绕组一样  $\dot{I}_2 \rightarrow \dot{F}_2 \rightarrow \dot{\Phi}_{s2} \rightarrow \dot{E}_{s2}$

$$\dot{E}_{s2} = -j\omega L_{s2} \dot{I}_2 = -jX_2 \dot{I}_2$$

则:  $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 + \dot{E}_{s2}$

$$= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad \dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$$

## 4、小结：稳态时变压器基本方程式

(1) 原边电压、电势平衡式

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 - \dot{E}_{s1} \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_1) \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1\end{aligned}$$

(3) 磁势平衡式

$$\begin{cases} \dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \\ \dot{I}_0 N_1 = \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 \end{cases}$$

(5) 电流平衡式

$$\dot{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 + \dot{I}_0$$

(2) 副边电压、电势平衡式

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 + \dot{E}_{s2} \\ &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) \\ &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2\end{aligned}$$

(4) 变压器变比

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

(6) 负载式

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L$$

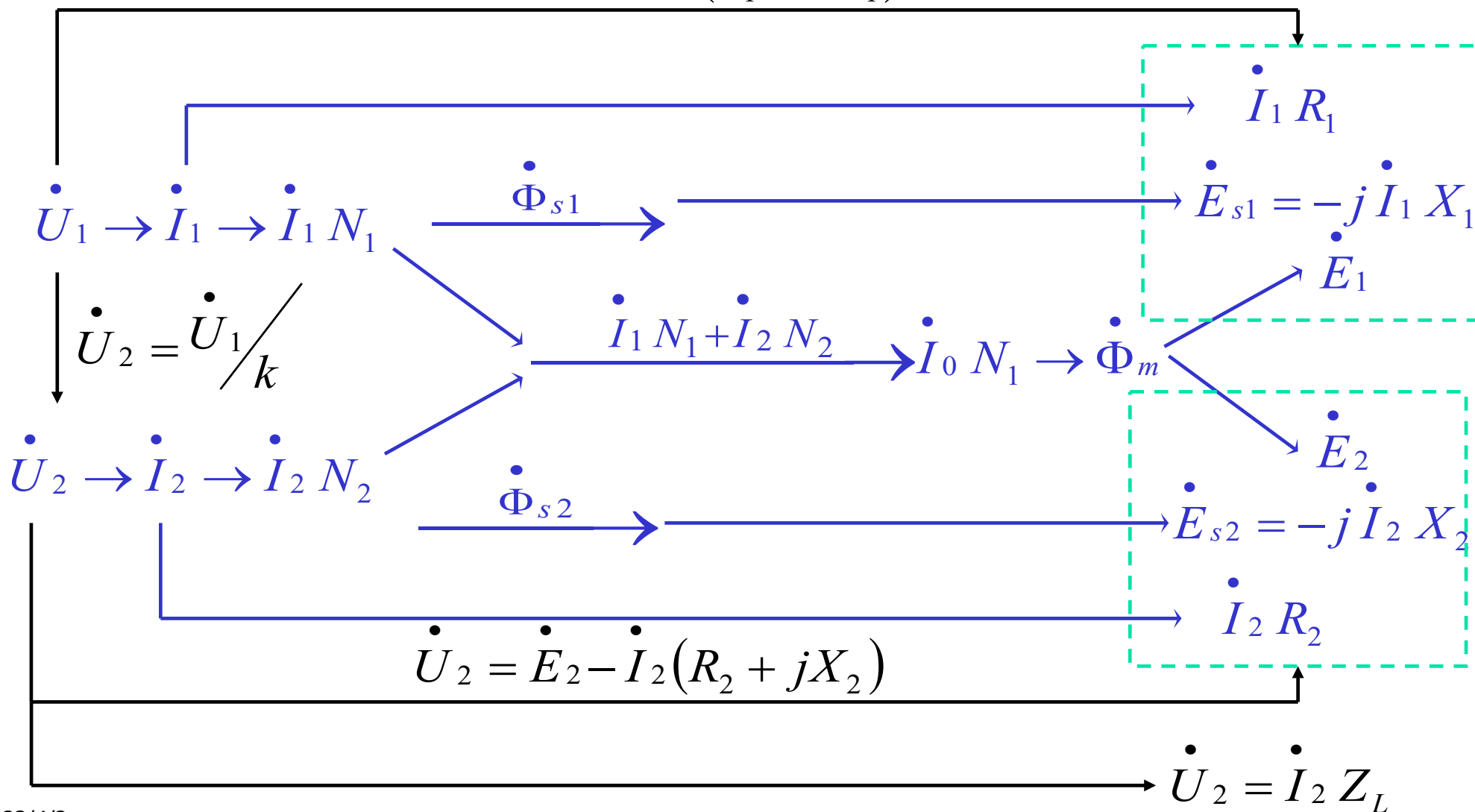
(7) 励磁电流式

$$\dot{I}_0 = -\frac{\dot{E}_1}{Z_m}$$



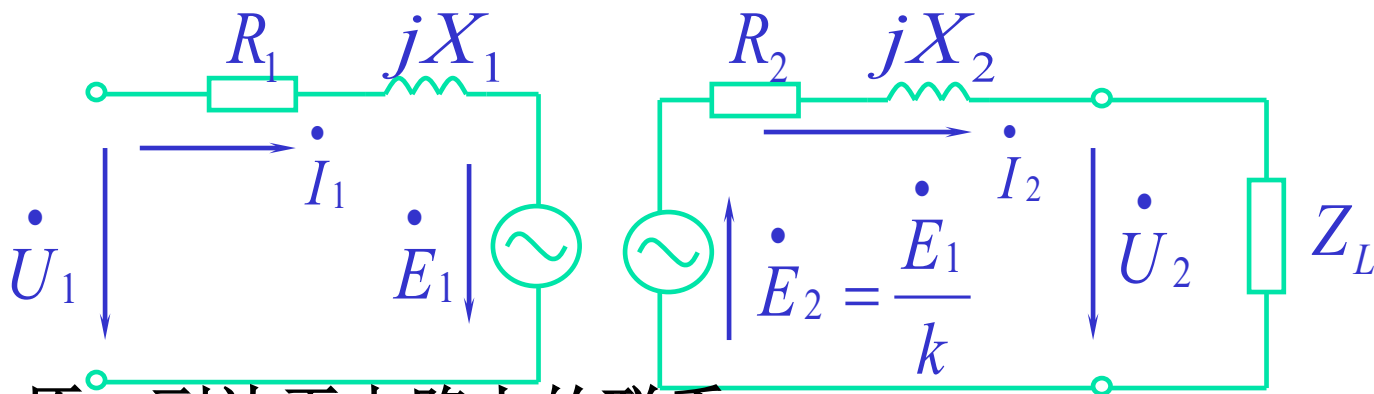

$$\left( \text{已知量: } \dot{U}_1, \quad Z_L, \quad Z_m, \quad Z_1, \quad Z_2, \quad k \right)$$

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



# 三、折算与等值电路

1、折算的原则 由平衡方程式得到的等值电路如下：



可见：原、副边无电路上的联系

副边负载通过  $\dot{F}_2$  与原边电源联系

$\dot{F}_2$  不变就不影响原边

折算的原则：1) 保持副边磁势不变

2) 保持功率传递关系不变

折算的思路：假设副边绕组的匝数也为  $N_1$ ，电流为  $\dot{I}_2'$

$$\text{且：}\dot{I}_2' N_1 = \dot{I}_2 N_2 = \dot{F}_2$$

## 2、各物理量的折算

(1) 电流( $I_2 \rightarrow I_2'$ ):  $\dot{I}_2' = \frac{\dot{I}_2}{k}$

(2) 电势 ( $\dot{E}_2 \rightarrow \dot{E}_2'$ ):  $\left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_2' = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \end{array} \right\} \Rightarrow \dot{E}_2' = k \dot{E}_2$

(3) 阻抗( $Z_L \rightarrow Z_L', Z_2 \rightarrow Z_2'$ ):

$$Z_L' + Z_2' = \frac{\dot{E}_2'}{\dot{I}_2'} = \frac{k\dot{E}_2}{\dot{I}_2/k} = k^2 \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2} = k^2 (Z_L + Z_2)$$

即:  $\begin{cases} R_2' = k^2 R_2 & X_2' = k^2 X_2 \\ R_L' = k^2 R_L & X_L' = k^2 X_L \end{cases}$

(4) 电压( $\dot{U}_2 \rightarrow \dot{U}_2'$ ):

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' = k\dot{E}_2 - \frac{1}{k} \dot{I}_2 \cdot k^2 Z_2 = k\dot{U}_2$$

## 三、折算与等值电路

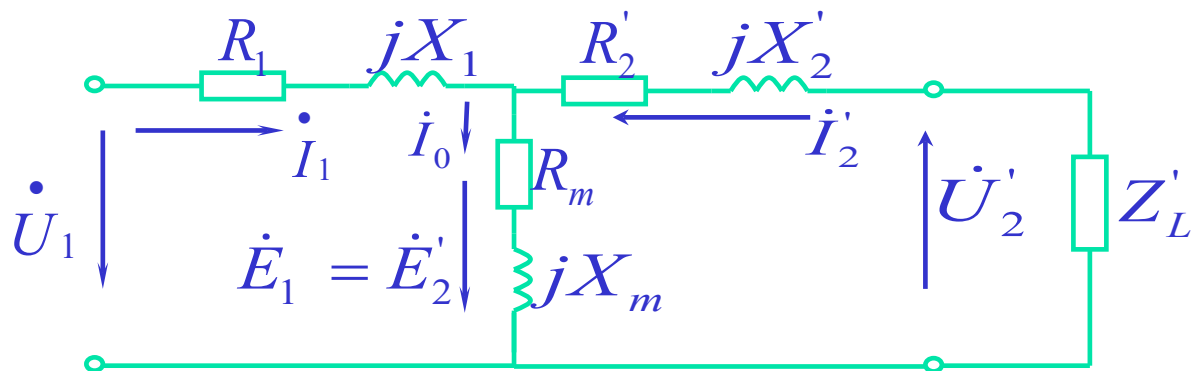
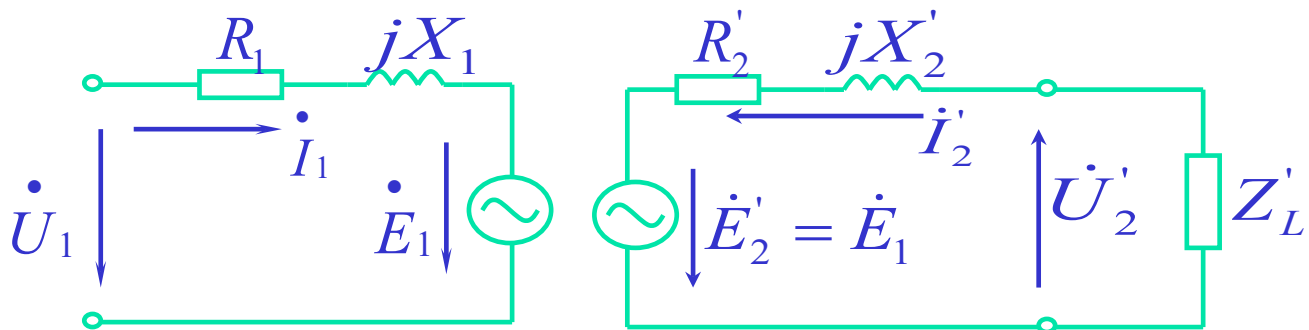
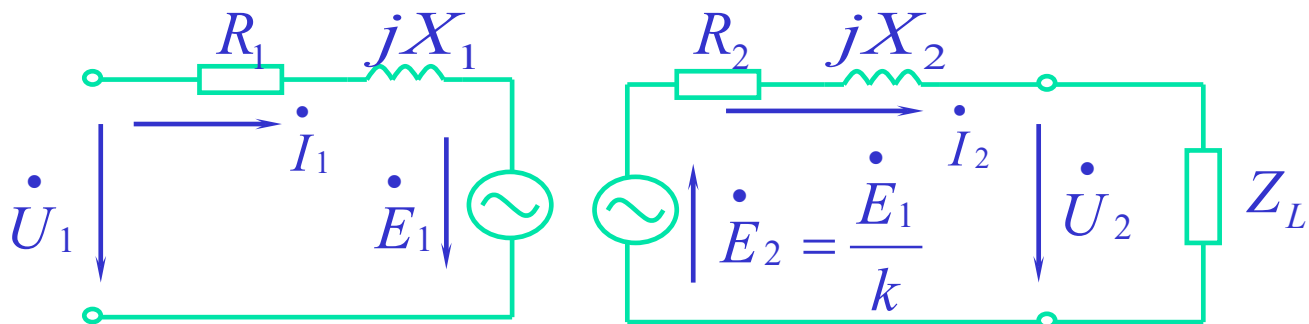
### 3、折算的特点

- 阻抗角不变
- 电压、电流、电动势的相位不变
- 功率传递关系不变

### 4、折算后的基本方程式

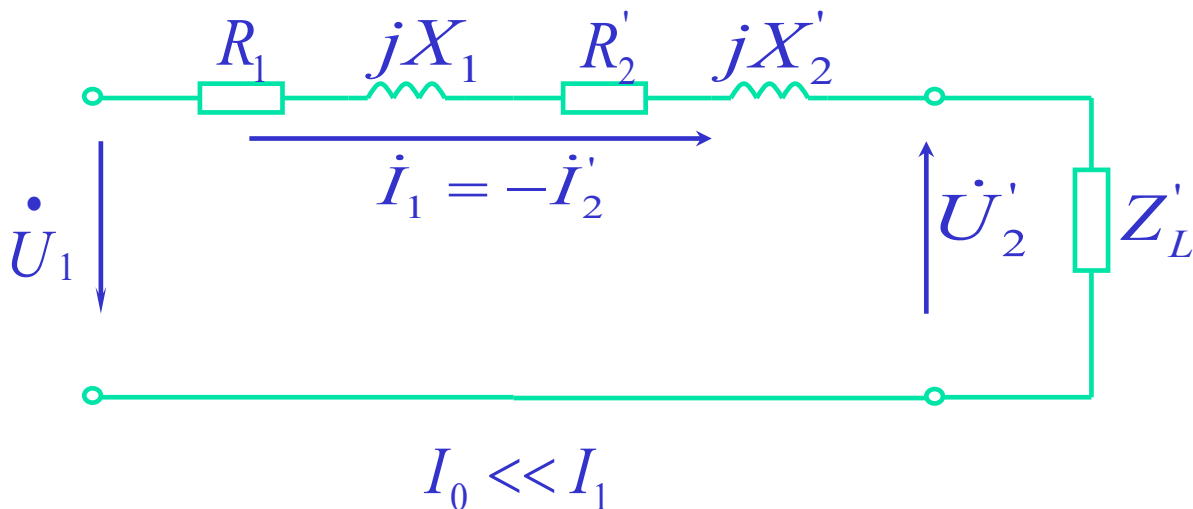
$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 & \dot{I}_1 + \dot{I}_2' &= \dot{I}_0 \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' & \dot{I}_0 &= -\dot{E}_1 / Z_m \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}_2' & \dot{U}_2' &= \dot{I}_2' Z_L'\end{aligned}$$

# 5、T型等值电路

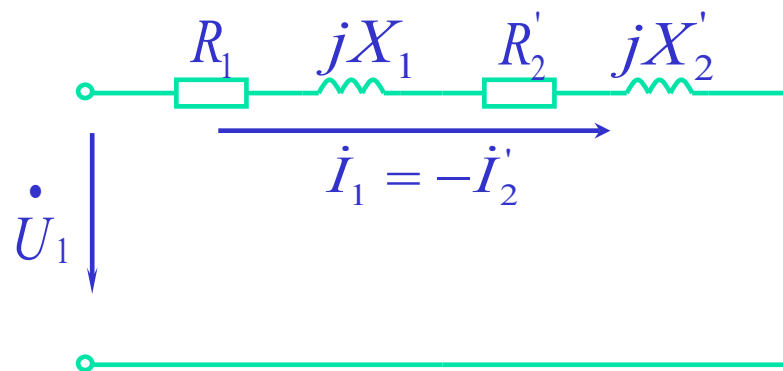
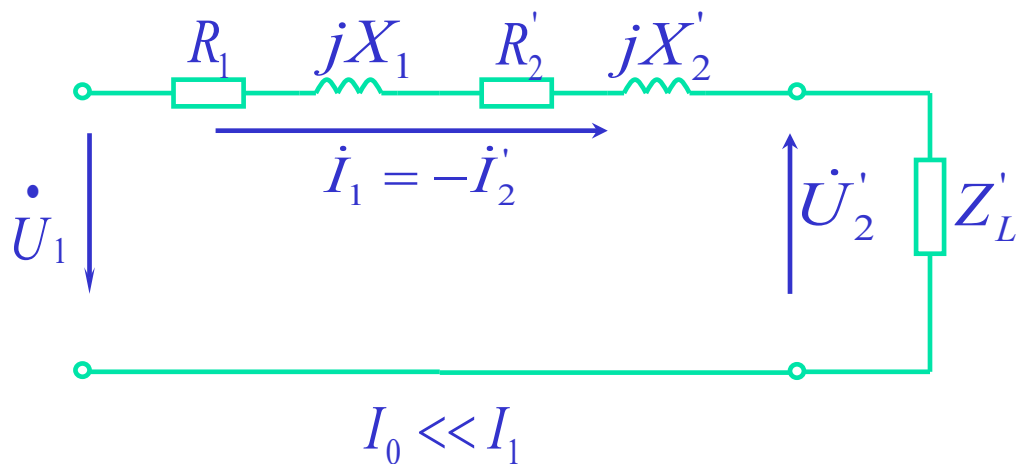


## 6、应用T型等值电路的注意事项

- 按等值电路计算出的是折算值，实际值需由折算值反折算获得
- 折算值均为一相的相值，单相变压器可直接计算，三相变压器需根据接法求出相值再折算
- T型等值电路可进一步简化， 简化等值电路如下：



# 简化等值电路的使用



(1) 变压器空载运行时不能使用简化等值电路，

(2) 虽有误差，工程上已足够准确，计算简单。

令：

$$\begin{cases} Z_k = Z_1 + Z'_2 = R_k + jX_k & \text{短路阻抗} \\ R_k = R_1 + R'_2 = R_1 + k^2 R_2 & \text{短路电阻} \\ X_k = X_1 + X'_2 = X_1 + k^2 X_2 & \text{短路电抗} \end{cases}$$

## 例题5-2

一台三相电力变压器，Y/Y接法，额定容量 $S_N=750kVA$ ，额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=10000/400V$ ，已知每相短路阻抗 $Z_k=R_k+jX_k=(1.40+j6.48)\Omega$ ，变压器原边接额定电压，副边接三相对称负载运行，负载Y接，每相负载阻抗为 $Z_L=(0.20+j0.07)\Omega$ 。

计算：

- (1) 原、副边电流；
- (2) 副边电压；
- (3) 输入、输出的有功功率和无功功率；
- (4) 效率。



## 例题5-2

解： (1) 原、副边电流（均指线值）

$$k = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{U_{2N}/\sqrt{3}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{10000}{400} = 25$$

$$Z_L' = k^2 Z_L = 125 + j43.75 \Omega$$

采用简化等值电路，从原边看每相总阻抗

$$Z = Z_k + Z_L' = 136.01 \angle 21.67^\circ \Omega$$

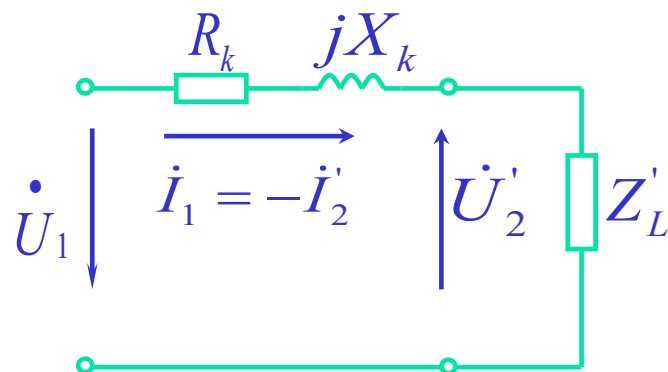
$$\text{原边电流: } I_1 = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{Z} = 42.45 A$$

$$\text{副边电流: } I_2 = k I_1 = 1061.25 A$$

(2) 副边电压（指线值）

$$Z_L = 0.20 + j0.07 = 0.212 \angle 19.29^\circ \Omega$$

$$U_2 = \sqrt{3} I_2 Z_L = 389.7 V$$



## 例题5-2

### (3) 输入输出功率

原边功率因数角：  $\varphi_1 = 21.67^\circ$

输入有功功率：  $P_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_1 \cos \varphi_1 = 683.8kW$

输入无功功率：  $Q_1 = \sqrt{3}U_{1N}I_1 \sin \varphi_1 = 271.5kVA$

副边功率因数角：  $\varphi_2 = 19.29^\circ$

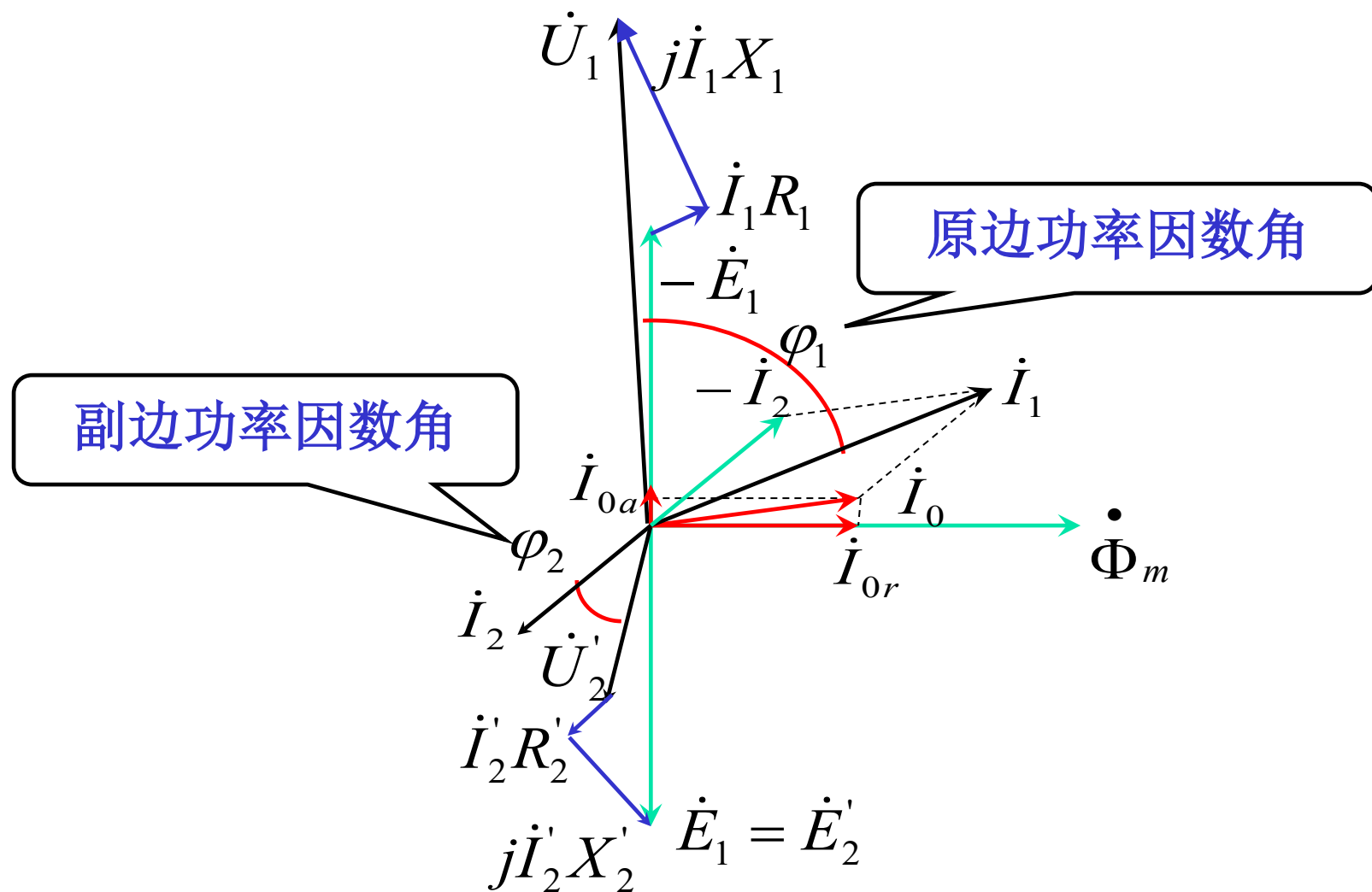
输出有功功率：  $P_2 = \sqrt{3}U_2I_2 \cos \varphi_2 = 673.3kW$

输出无功功率：  $Q_2 = \sqrt{3}U_2I_2 \sin \varphi_2 = 236.6kVA$

### (4) 效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 98.46\%$$

## 四、负载运行时的向量图（感性负载）



## 四、负载运行时的向量图（容性负载）

