

# 第二章 变压器

- 2.1 变压器的结构和额定值
- 2.2 变压器空载运行
- 2.3 变压器的负载运行
- 2.4 变压器的基本方程和等效电路
- 2.5 等效电路参数的测定
- 2.6 三相变压器
- 2.7 标幺值
- 2.8 变压器运行性能



## 2.1 变压器的基本结构和额定值

### 一、变压器的基本结构

变压器的基本结构

铁心

绕组

其他部件



# 心式变压器

**结构** 心柱被绕组所包围

**特点** 心式结构的绕组和绝缘装配比较容易，所以电力变压器常常采用这种结构。

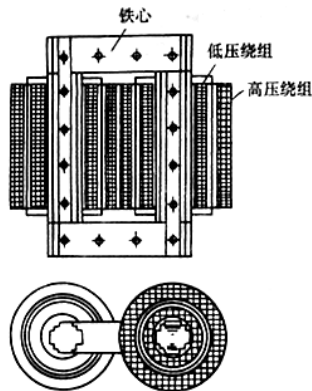


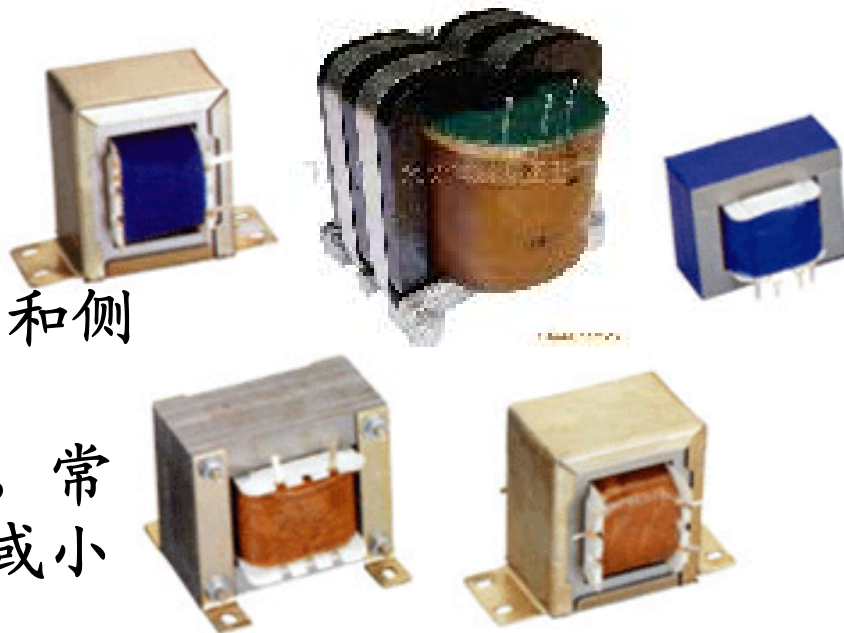
图 2-1 单相心式变压器



# 壳式变压器

**特点** 铁心包围绕组的顶面、底面和侧面

**结构** 壳式变压器的机械强度较好，常用于低压、大电流的变压器或小容量电讯变压器。





**S9系列10kV配电变压器**









**SG(H)B10型H级绝缘干式变压器**

# 绕组

## 定义

变压器的电路部分，用纸包或纱包的绝缘扁线或圆线绕成。

## 一次绕组

输入电能的绕组

## 二次绕组

输出电能的绕组

## 同异点

一次和二次绕组具有不同的匝数、电压和电流，其中电压较高的绕组称为高压绕组，电压较低的称为低压绕组。

强调一次和二次绕组的划分并不是根据电压等级



# 同心式

**结构** 同心式绕组的高、低压绕组同心地套装在心柱上

**特点** 同心式绕组结构简单、制造方便，国产电力变压器均采用这种结构。


# 交迭式

**结构** 交迭式绕组的高、低压绕组沿心柱高度方向互相交迭地放置,交迭式绕组用于特种变压器中。

交迭式可以有效的减少漏磁。

# 其他部件

典型的油浸  
电力变压器



- 器身
- 油箱
- 变压器油
- 散热器
- 绝缘套管
- 分接开关
- 继电保护装置等部件

## 二、额定值

- 额定容量 在铭牌规定的额定状态下变压器输出视在功率的保证值
- 额定电压 铭牌规定的各个绕组在空载、指定分接开关位置下的端电压。
- 额定电流 根据额定容量和额定电压算出的电流称为额定电流。
- 额定频率 我国的标准工频规定为**50赫(Hz)**。

强调 额定电压是空载电压

## 2.2 变压器的空载运行

- 定义：变压器一次绕组接交流电源，二次绕组开路，负载电流为**0**时的运行。
- 正方向的规定

# 正方向的规定

- 在变压器和交流电机中，电压、电流、电动势和磁通等物理量之间的大小及方位都随时间改变，为了正确地表达它们之间的数量和相位的关系，必须首先规定正方向。
- 正方向原则上可以任意规定，正方向规定的不同，并不影响各物理量之间的性质。
- 正方向规定不同，列出的方程和向量图不同。
- 通常采用习惯的方式规定正方向，称为惯例。

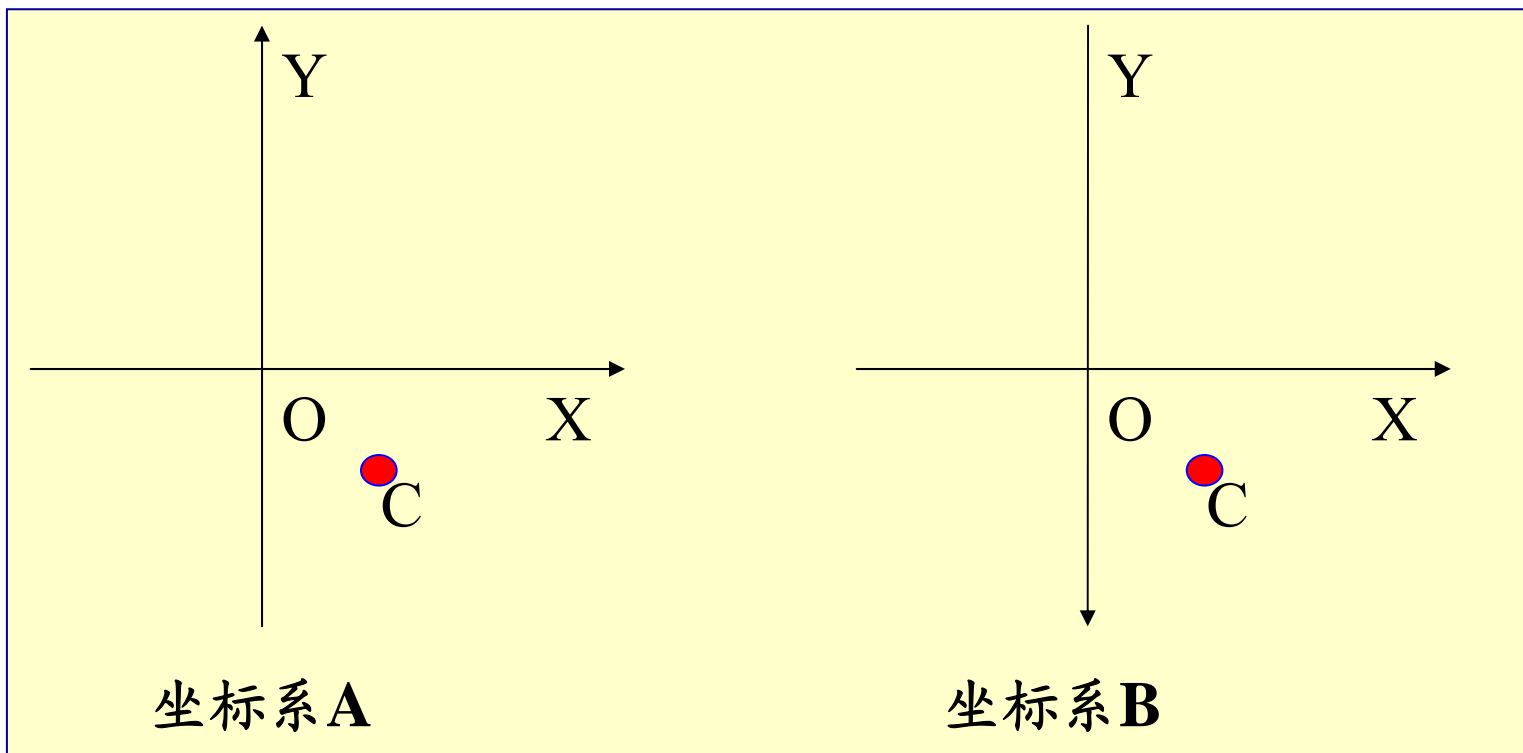
# 正方向的规定原则

- 在负载支路电流的正方向和电压降的正方向一致，而在电源支路，电流的正方向与电源电动势的正方向一致
- 磁通的正方向和产生它的电流的正方向符合右手螺旋法则，就是说正电流产生正磁通。
- 在电磁感应中，磁通的正方向和由它感应的电动势的正方向符合右手螺旋法则。



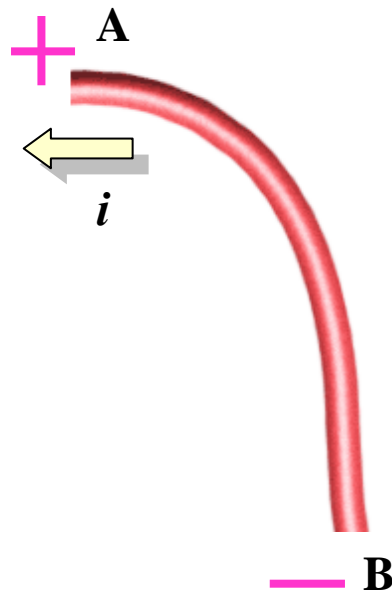
# 特别强调

- 电压降  $u_1, u_2$  的正方向表示电位由高到低
- 电动势  $e_1, e_2$  的正方向表示电位由低到高
- 因此  $-e_1$  就表示电压降的含义



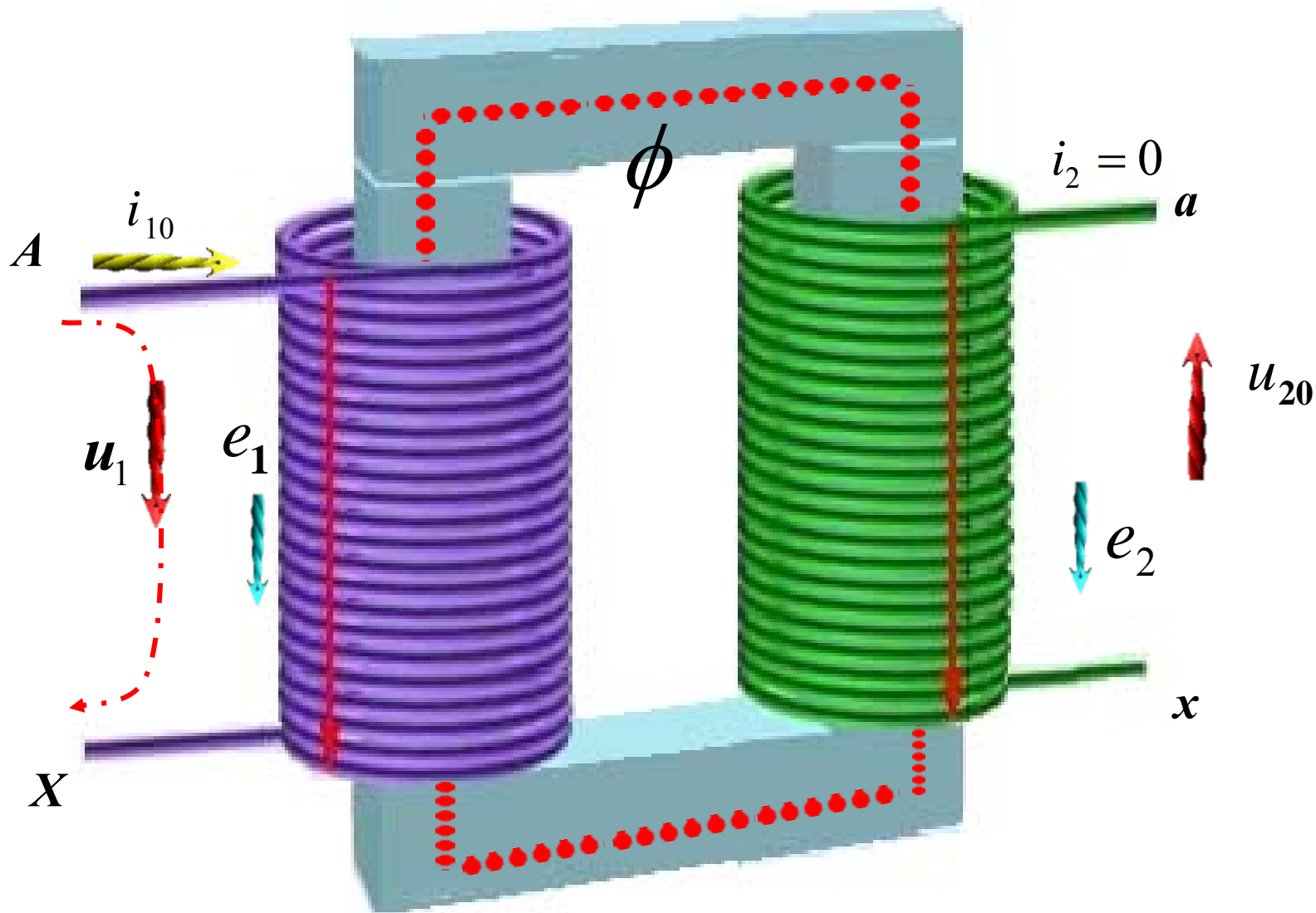
规定电压的正方向A到B 规定电流的正方向是B到A  
那么正方向是表明电流从B到A为正，而不是指电流从B到A还是电流从A到B

如果加上直流电压  
 $U_{AB}=10V$ , 电阻为 $1\Omega$   
则此时的电流是 $-10A$ 。  
表明此时电流是从A到B



## 2.2 变压器的空载运行

单相变压器空载运行的示意图



## 2.2 变压器的空载运行

### 1. 物理情况

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

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

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

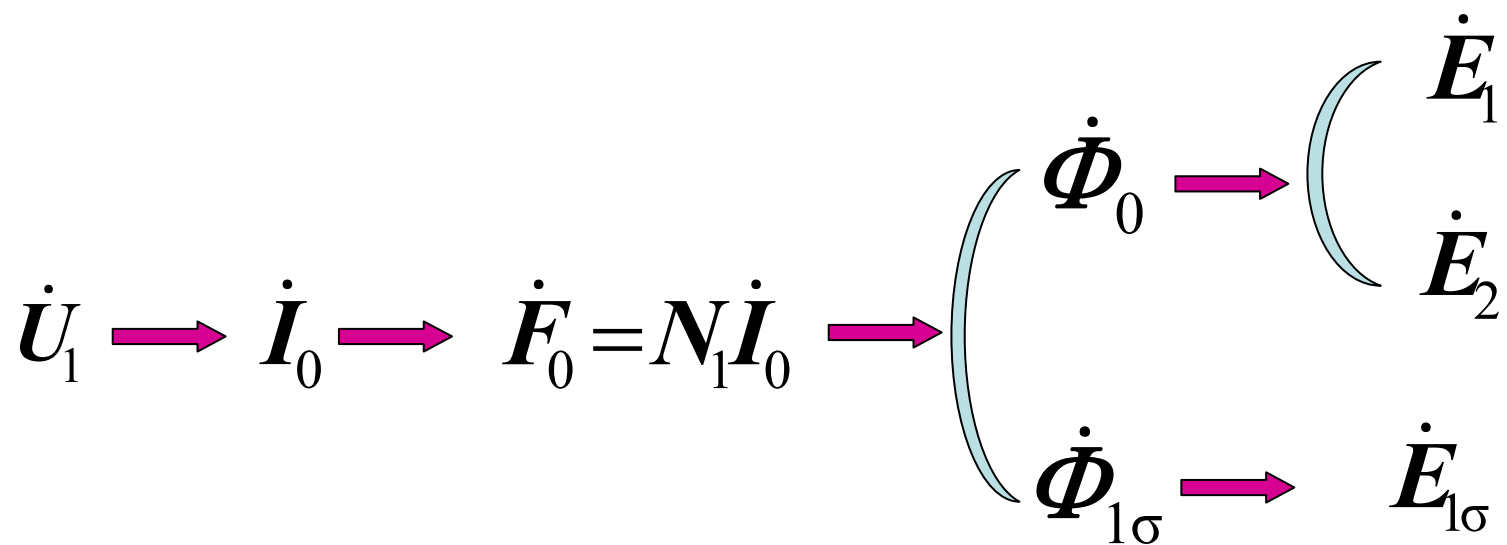
### 2. 电压方程

$$u_1 = i_{10} R_1 + (-e_1) = i_{10} R_1 + N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$u_{20} = e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

忽略了漏磁!

### 3. 各量之间的电磁关系:



考虑漏磁



## 4. 变压器的电压比及变压原理

$$\left| \frac{u_1}{u_{20}} \right| \approx \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

变压原理： $k$  就称为变压器的电压比。空载运行时，变压器一次绕组与二次绕组的电压比就等于一次、二次绕组的匝数比。因此要使一次和二次绕组具有不同的电压，只要使它们具有不同的匝数即可。

## 二、主磁通和激磁电流

### 1. 主磁通

通过铁心并与一次、二次绕组相交链的磁通

$$\text{设：}\phi = \Phi_m \sin \omega t$$

$$\text{则：}e = -N \frac{d\phi}{dt} = 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$= E_m \sin(\omega t - 90^\circ) = \sqrt{2} E \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$E = \frac{2\pi f N}{\sqrt{2}} \Phi_m = 4.44 f N \Phi_m$$

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

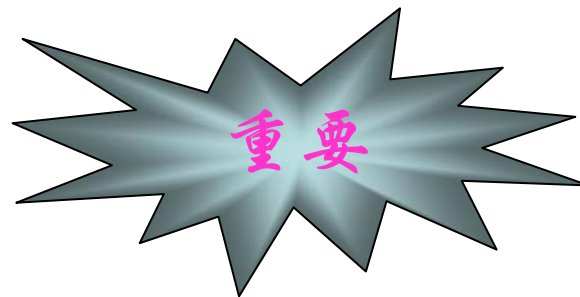
磁通与感应电势之间的幅值和相位关系！

## 二、主磁通和激磁电流

### 1. 主磁通

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

(2-8)



问题：1台50Hz的变压器接到60Hz的电源上空载运行时，若额定电压不变，问激磁电流、铁耗会怎么变化

## 2. 激磁电流

产生主磁通所需要的电流

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_m$$

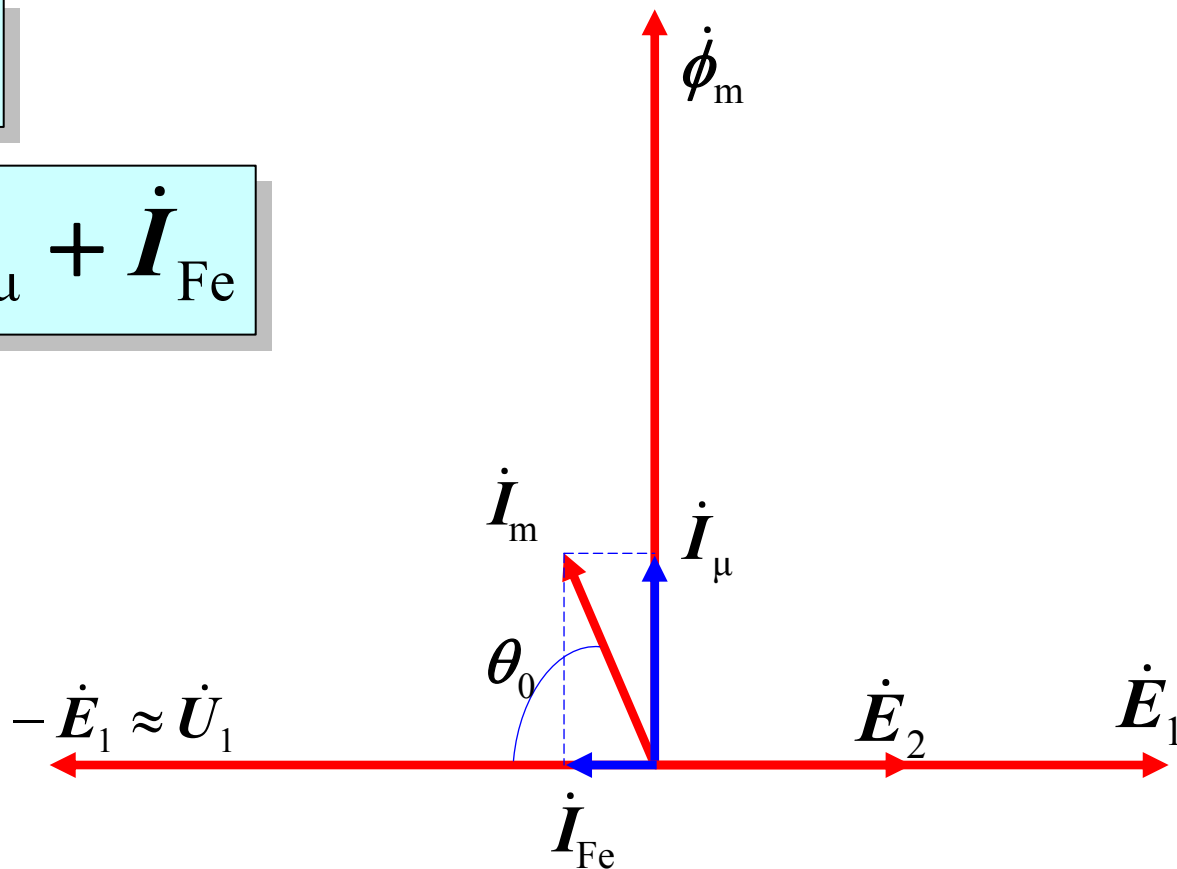
$$\dot{I}_m = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$$

空载电流

激磁电流 = 空载电流

磁化电流

铁耗电流



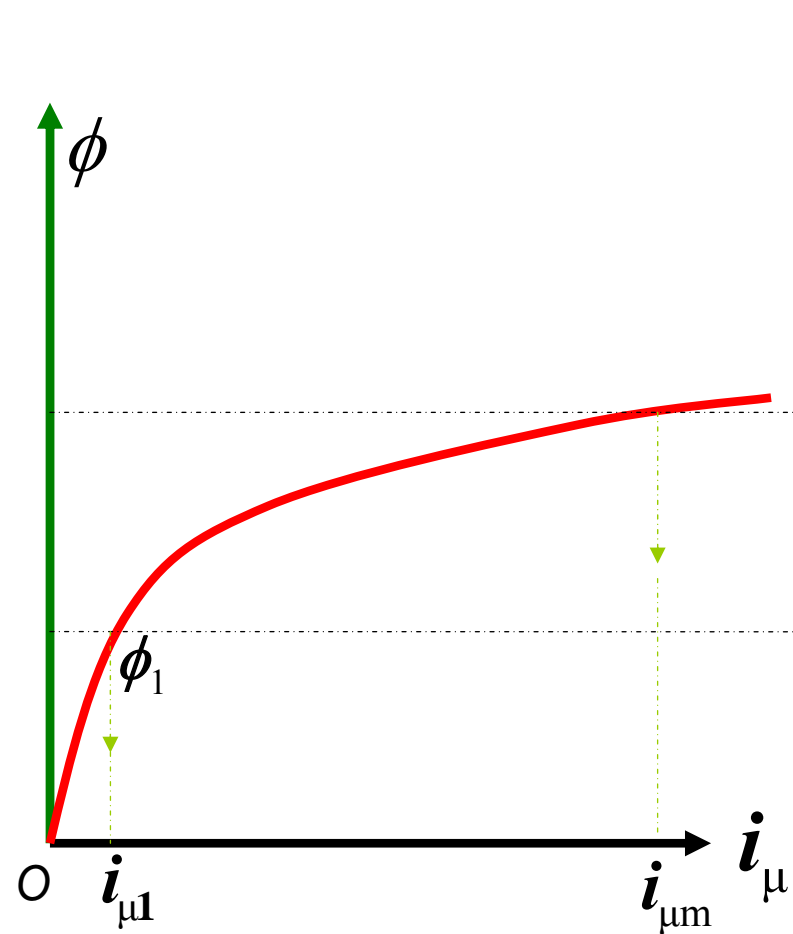
变压器的空载相量图

## 2. 激磁电流

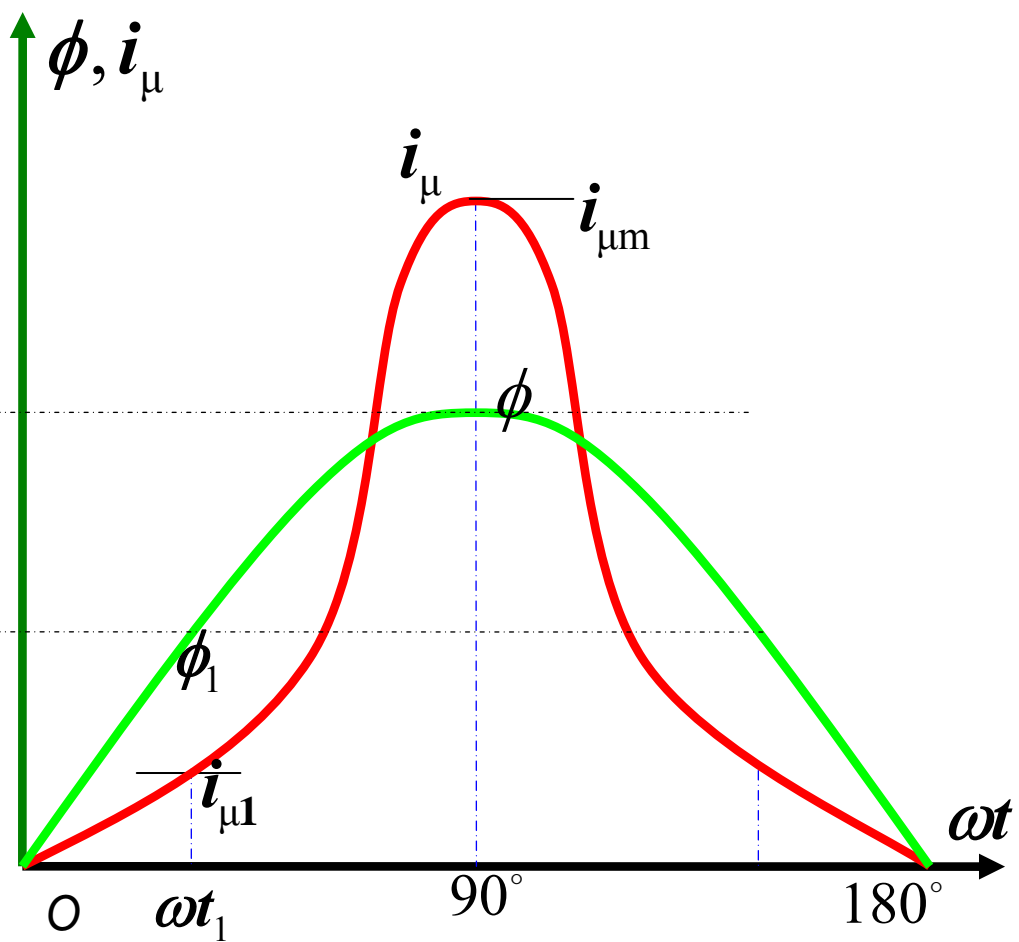
当磁通为正弦波，激磁电流的波形

(1) 磁路不饱和，磁化曲线处于膝点以下，磁化曲线是直线段

(2) 磁路饱和

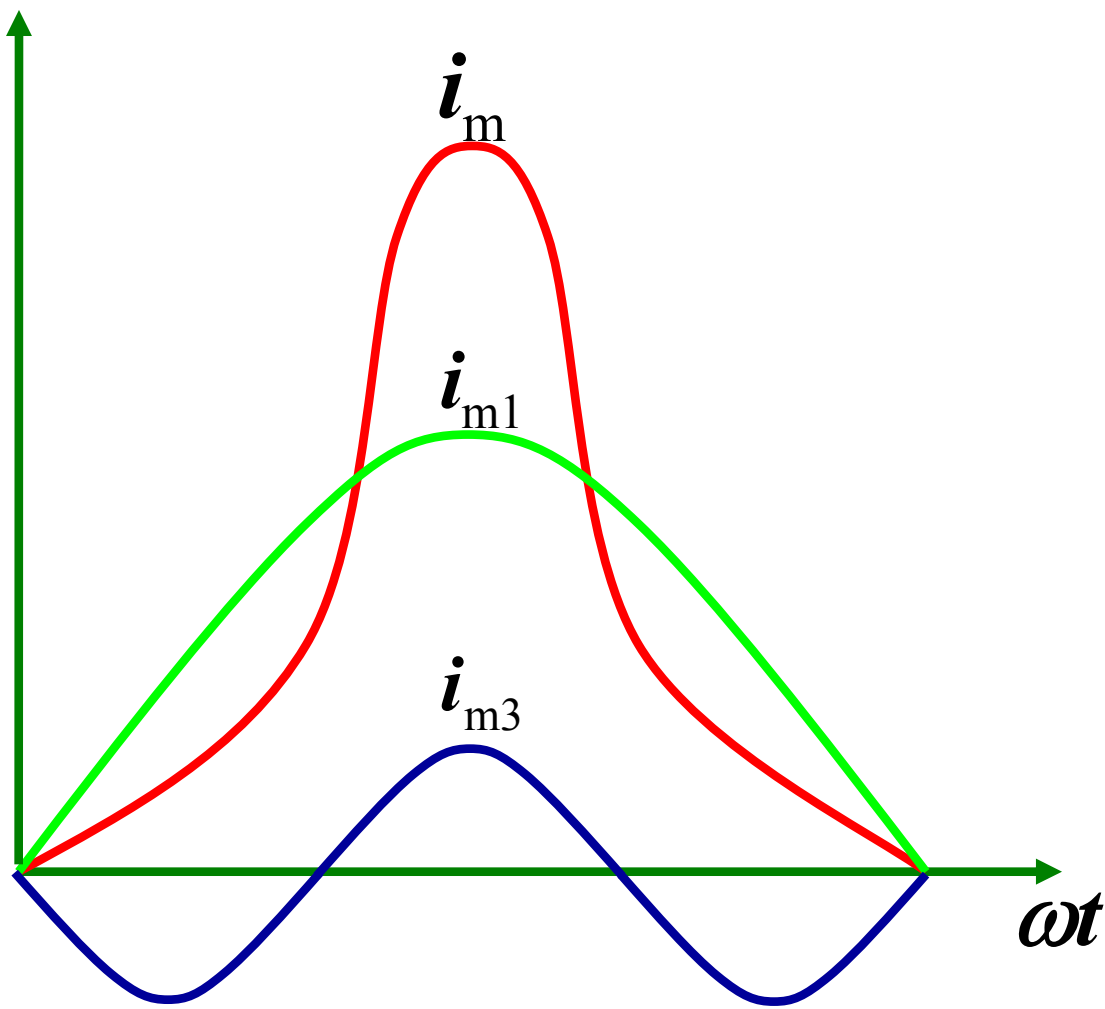


铁心的磁化曲线



磁路饱和时当磁通为正弦波时  
磁化电流成为尖顶波





采用傅氏级数分解，将励磁电流的尖顶波分解成基波及3、5、7等次谐波，除基波外，以3次谐波的幅值最大，也就是说为了建立正弦波的主磁通，由于导磁材料磁化曲线的非线性关系，空载电流中必然含有3次谐波成分。

### 三、激磁阻抗

$$\begin{aligned}\phi &= N_1 \dot{i}_\mu \cdot \Lambda_m \\ e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \frac{d(N_1 \dot{i}_\mu \cdot \Lambda_m)}{dt} \\ &= -N_1^2 \Lambda_m \frac{d\dot{i}_\mu}{dt} = -L_{1\mu} \frac{d\dot{i}_\mu}{dt}\end{aligned}$$

$$\dot{E}_1 = -j\omega L_{1\mu} \dot{I}_\mu = -j\dot{I}_\mu X_\mu$$

$$\dot{I}_\mu = -\frac{\dot{E}_1}{jX_\mu}$$

$$X_\mu = \omega L_{1\mu} = \omega N_1^2 \Lambda_m$$

电抗正比于频率、  
匝数的平方和磁导

分析饱和程度增加  
磁化电抗的变化

称为变压器的磁化电抗，它是表征铁心磁化性能的一个参数

### 三、激磁阻抗

另外铁耗电流  $\dot{I}_{\text{Fe}}$  它是一个有功电流，与 电动势  $-\dot{E}_1$  同相

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_{\text{Fe}} R_{\text{Fe}}$$

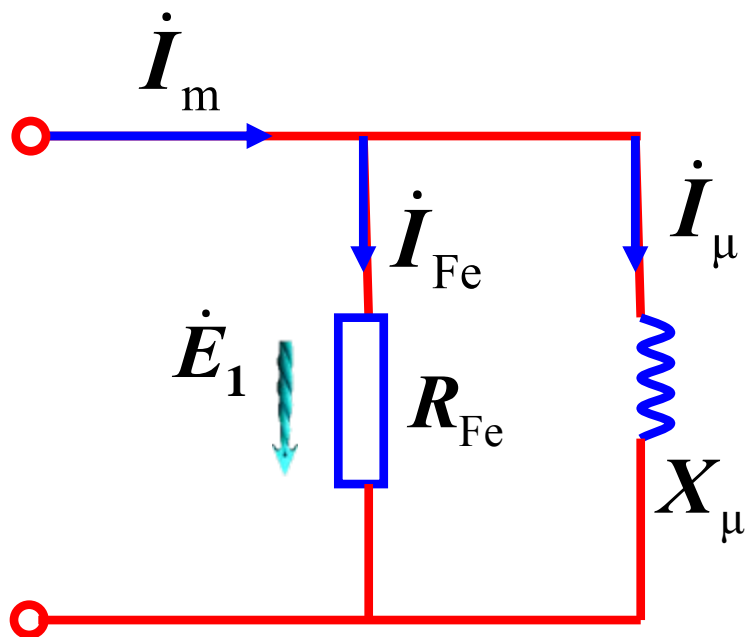
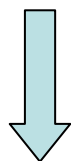
$$\dot{I}_{\text{Fe}} = -\frac{\dot{E}_1}{R_{\text{Fe}}}$$

$R_{\text{Fe}}$  称为铁耗电阻，它是表 征铁心损耗的一个参数

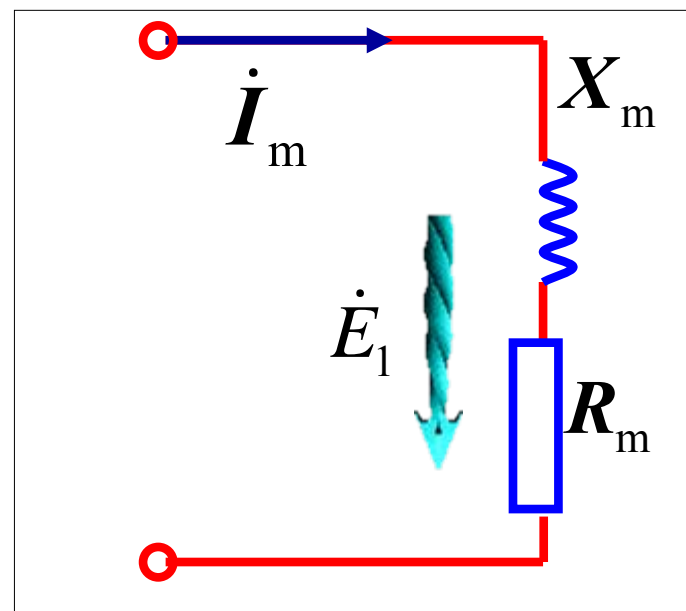
$$\dot{I}_m = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$$

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_{Fe} R_{Fe}$$

$$\dot{E}_1 = -j\dot{I}_\mu X_\mu$$



铁心线圈的并联等效电路



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

式中， $Z_m = R_m + jX_m$  称为变压器的激磁阻抗，它是表征铁心磁化性能和铁心损耗的一个综合参数；

强调  $Z_m$  不是常数，而是随着工作点的饱和程度的增加而减小

# 变压器的空载运行-总结

## 空载电流:

### 1) 作用和组成

一方面：用来励磁，建立磁场-----无功分量

二方面：供变压器空载损耗-----有功分量

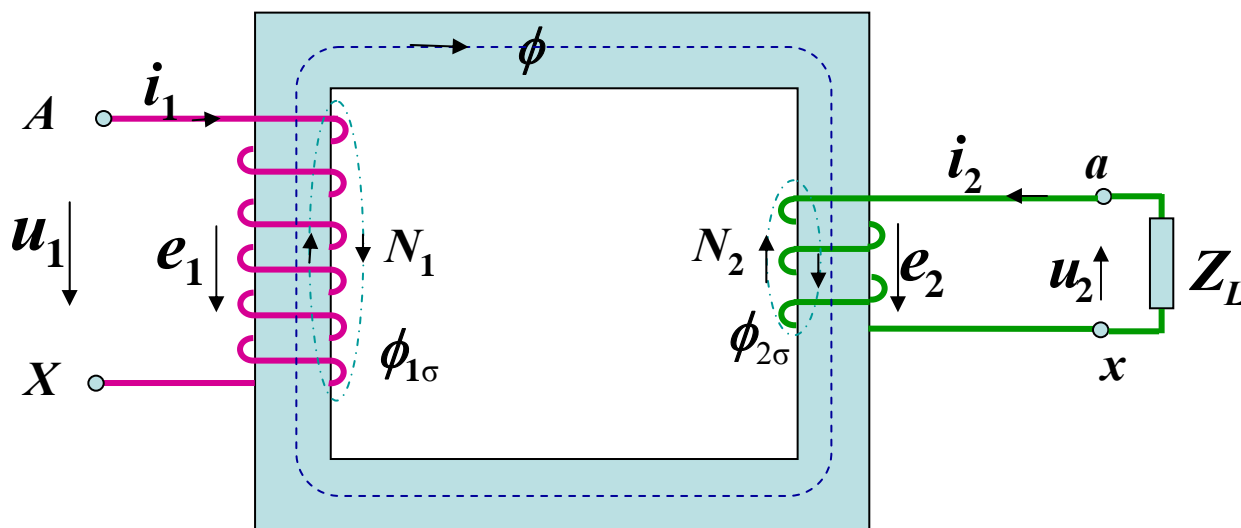
### 2) 性质和大小

性质：主要是感性无功性质-----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。

## 2.3 变压器的负载运行

变压器的一次绕组接到交流电源，二次绕组接到负载阻抗时，二次绕组中便有电流流过，这种情况称为变压器的负载运行。

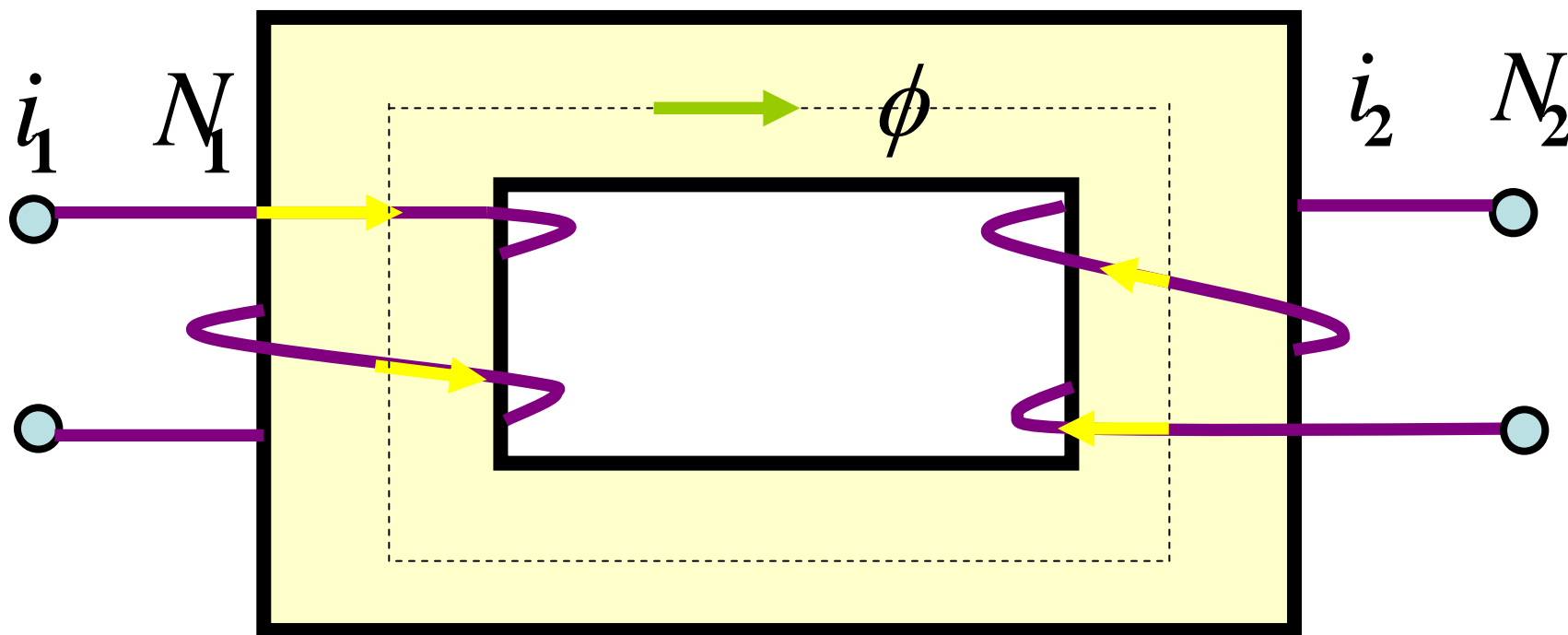


- (1) 空载时电磁关系;
- (2) 从空载到负载的变化;
- (3) 前后磁通的变化。



# 讨论

$i_1=10\text{A}$ ,  $i_2=0$ ,  $N_1=10$ 匝,  $N_2$ 为5匝时磁路中的磁通为 $10\text{WB}$ 。当 $i_2=-5\text{A}$ 的时候, 要保持磁通不变,  $i_1$ 应为多少安培?



## 2.3 变压器的负载运行

### 一、磁动势平衡和能量传递

#### 1. 磁动势平衡关系

$$i_{10} = i_m \quad i_1 = i_m + i_{1L}$$

前后磁通不变

$$N_1 i_{1L} + N_2 i_2 = 0$$

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

$$i_{1L} = -\frac{N_2}{N_1} i_2$$

## 2. 能量传递

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

$$i_{1L} = -\frac{N_2}{N_1} i_2$$



表示二次绕组向负载输出的电功率

$$-e_1 i_{1L} = e_2 i_2 \quad (2-17)$$

表示从电网吸收的电功率

上式说明，通过一次、二次绕组的**磁动势平衡**和**电磁感应关系**，一次绕组从电源吸收的电功率，通过耦合磁场为媒介，就传递到二次绕组，并输出给负载。这就是变压器进行能量传递的原理。

## 2. 能量传递

表示二次绕组向负载输出的电功率

$$-e_1 i_{1L} = e_2 i_2$$

(2-17)

表示从电网吸收的电功率

变压器负载运行，通过电磁感应关系，一次、二次绕组电流紧密的联系在一起。 $i_2$ 的增加或减小，必然同时引起 $i_1$ 的增加或减小。相应地，二次侧向负载输出的功率增加或者减小时，一次侧从电网吸收的功率必然同时增加或者减小。

## 二、磁动势方程

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 i_m$$

(2-18)

正常负载时， $i_1$ 和 $i_2$ 都随时间正弦变化，此时磁动势方程可用复数表示为：

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

(2-19)

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m$$

### 三、漏磁通和漏磁电抗

#### 漏磁通

在实际变压器中，除了通过铁心、并与一次和二次绕组相交链的主磁通  $\phi$  之外，还有少量仅与一个绕组交链且主要通过空气或油而闭合的漏磁通。

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\phi_{1\sigma}}{dt} = -L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt}$$

$$e_{2\sigma} = -N_2 \frac{d\phi_{2\sigma}}{dt} = -L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt}$$

( 2-20 )

## 漏磁电感

$$L_{1\sigma} = \frac{N_1 \phi_{1\sigma}}{i_1} = \frac{N_1 (N_1 i_1 \cdot \Lambda_{1\sigma})}{i_1} = N_1^2 \Lambda_{1\sigma}$$

(2-21)

$$L_{2\sigma} = \frac{N_2 \phi_{2\sigma}}{i_2} = \frac{N_2 (N_2 i_2 \cdot \Lambda_{2\sigma})}{i_2} = N_2^2 \Lambda_{2\sigma}$$

## 漏磁电抗

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\omega L_{1\sigma} \dot{I}_1 = -jX_{1\sigma} \dot{I}_1$$

$$\dot{E}_{2\sigma} = -j\omega L_{2\sigma} \dot{I}_2 = -jX_{2\sigma} \dot{I}_2$$

(2-22)

$X_{1\sigma}$ 和  $X_{2\sigma}$  分别称为一次和二次绕组的漏磁电抗

$X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}$ ,  $X_{2\sigma} = \omega L_{2\sigma}$  漏抗是表征绕组漏磁效应的一个参数

问题：一次侧漏感与磁化电感数值上如何比较？

# 主磁通和漏磁通比较

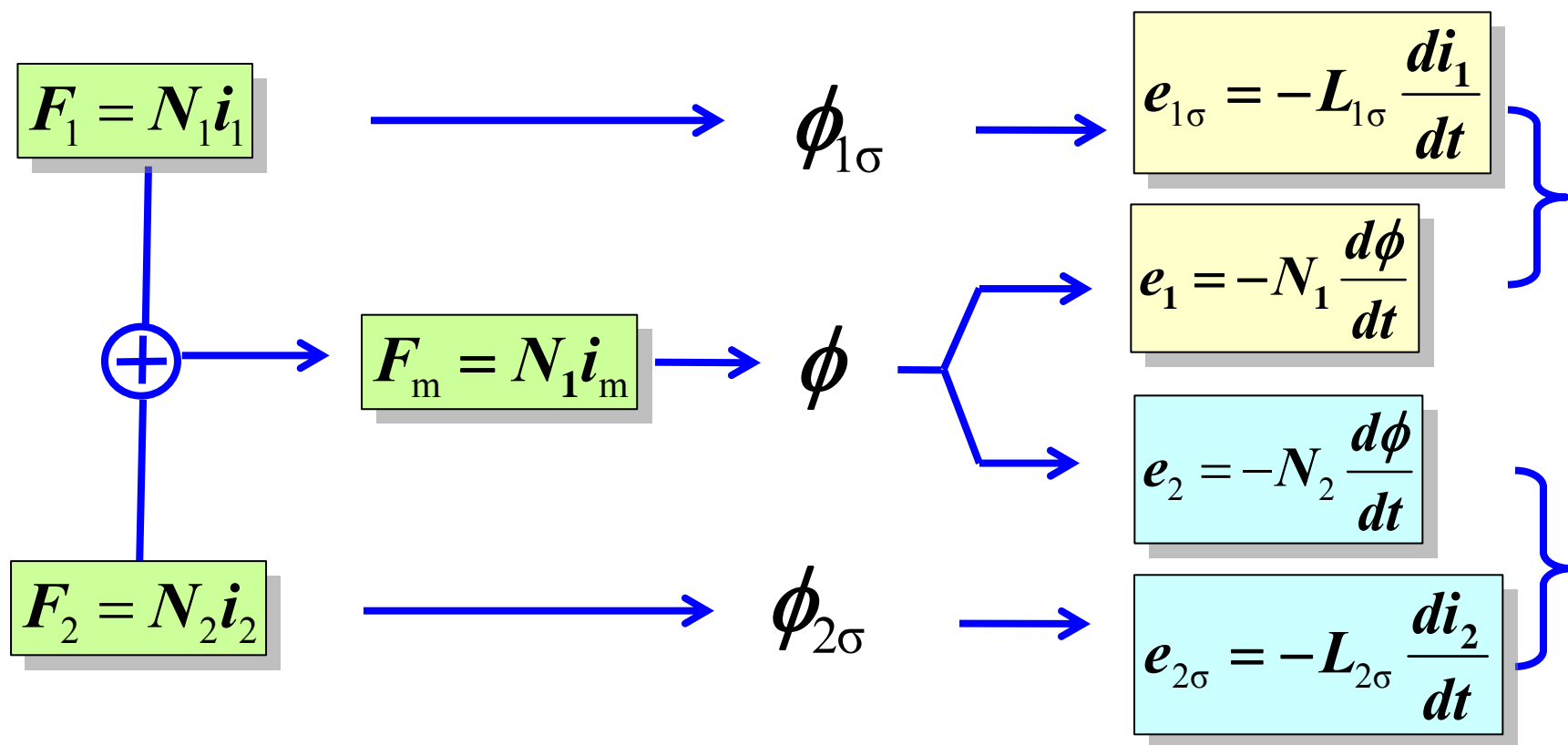
项目	主磁通	漏磁通
路径	经过铁心闭合，同时交链一次和二次绕组	只交链一侧绕组，经一侧绕组周围的空间闭合
数量	99.8%	0.1-0.2%
性质	非线性	线性
作用	起着传递能量的作用	起电压降的作用，不传递能量
铁耗	产生铁耗	主要是非导磁材料构成磁路，近似认为不产生铁耗

按照磁路性质的不同，把磁通分成主磁通和漏磁通两部分，这是分析变压器和旋转电机的重要方法之一



## 2.4 变压器的基本方程和等效电路

### 一、变压器的基本方程



根据基尔霍夫第二定律，即可写出一次和二次侧的瞬时值电压方程为

$$u_1 = i_1 R_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} - e_1$$

(2-23)

$$e_2 = i_2 R_2 + L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} + u_2$$

相应的相量形式

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 (R_1 + jX_{1\sigma}) - \dot{E}_1 = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

(2-24)

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

变压器的基本方程为：

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

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

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

(2-25)

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

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

## 二、变压器的等效电路

### 变压器参数的归算（折算）

由于一次和二次绕组的匝数不等，则一次、二次绕组的感应电动势和电流幅值相差很大，这就给分析变压器工作特性增加了困难。

为了克服这些困难，常用一假设的绕组来代替其中一个绕组，使之成为变比为1的变压器，这样就可以把一次、二次绕组联成一个等效电路，从而大大简化变压器的分析计算。。

## (A) 方法

通常是把二次绕组归算到一次绕组，也就是假想把二次绕组的匝数变换成一次绕组的匝数，而不改变一次和二次绕组原有的电磁关系。

二次绕组原匝数:

$$N_2$$



二次绕组归算匝数:

$$N_1$$

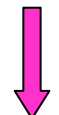
## (B) 原则

归算前后二次绕组的磁动势保持不变，则一次绕组将从电网吸收同样大小的功率和电流，并有同样大小的功率传递给二次绕组。

$\dot{I}'_2$   表示归算后的二次侧电流

(1) 电流的归算： 磁动势不变

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

归算后磁动势  归算前磁动势

$$\dot{I}'_2 = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \frac{1}{k} \dot{I}_2 \quad (2-26)$$

从全电流定律来看，在归算后二次绕组的磁动势和归算前完全相同，则变压器的主磁通和漏磁通和归算之前是一样的，因此就不会改变变压器中的电磁本质。

$\dot{E}'_2$   表示归算后的二次侧电动势

(2) 电势的归算: 磁通不变

$$\dot{E}'_2 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = \dot{E}_1 = k\dot{E}_2$$

(2-27)

↓  
二次绕组归算后匝数

### (3) 阻抗折算，前后功率不变

$$I_2'^2 R_2' = I_2^2 R_2$$



$$R_2' = \left( \frac{I_2}{I_2/k} \right)^2 R_2 = k^2 R_2$$

$$I_2'^2 X_{2\sigma}' = I_2^2 X_{2\sigma}$$



$$X_{2\sigma}' = \left( \frac{I_2}{I_2/k} \right)^2 X_{2\sigma} = k^2 X_{2\sigma}$$

将二次侧的各个物理量折算到一次侧时的方法：

电流除以 $k$ 倍；电压（电势）乘以 $k$ 倍；电阻、电抗、阻抗乘以 $k^2$ 倍。



归算前

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

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

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

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

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

归算后

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

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_{2\sigma} + \dot{U}'_2$$

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

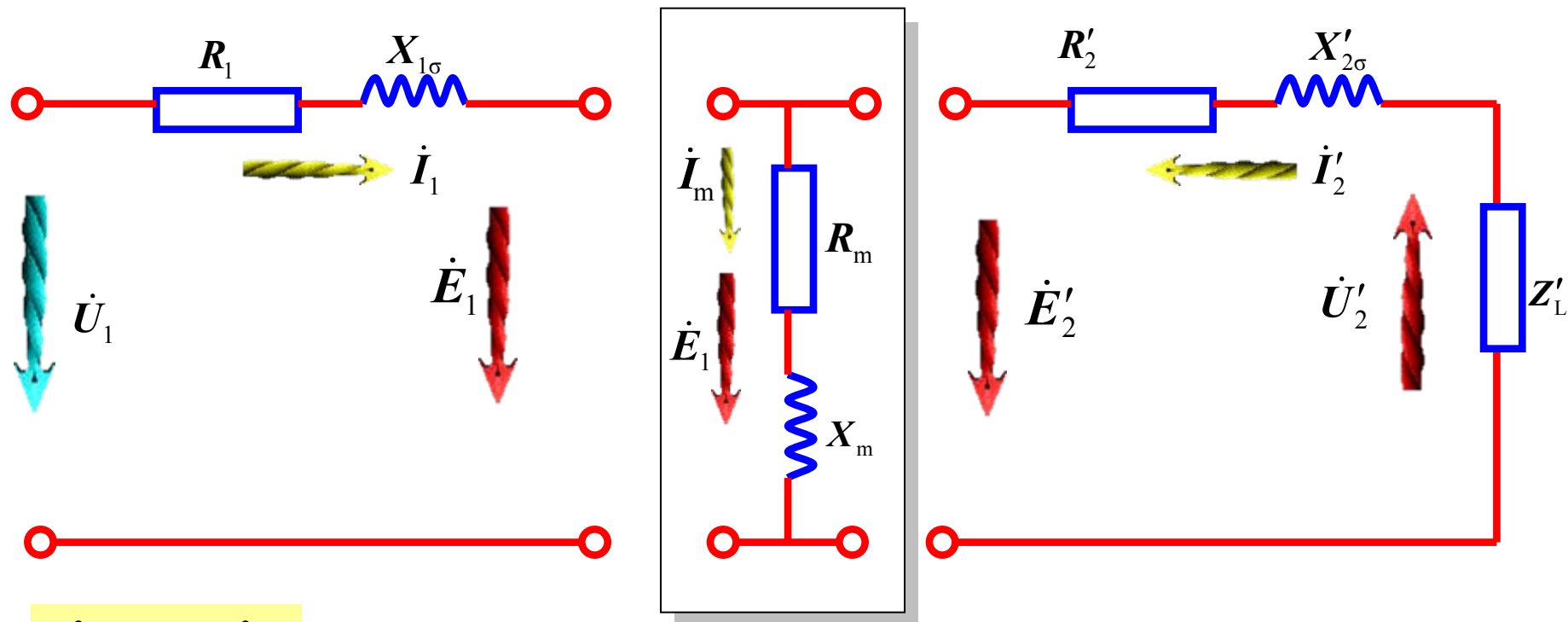
(2-32)

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = -\dot{I}_m Z_m$$

## 二、变压器的等效电路

在研究变压器的运行问题时，希望有一个既能正确反映变压器内部电磁关系，又便于工程计算的等效电路，来代替具有电路、磁路，并通过电磁感应联系的实际变压器。

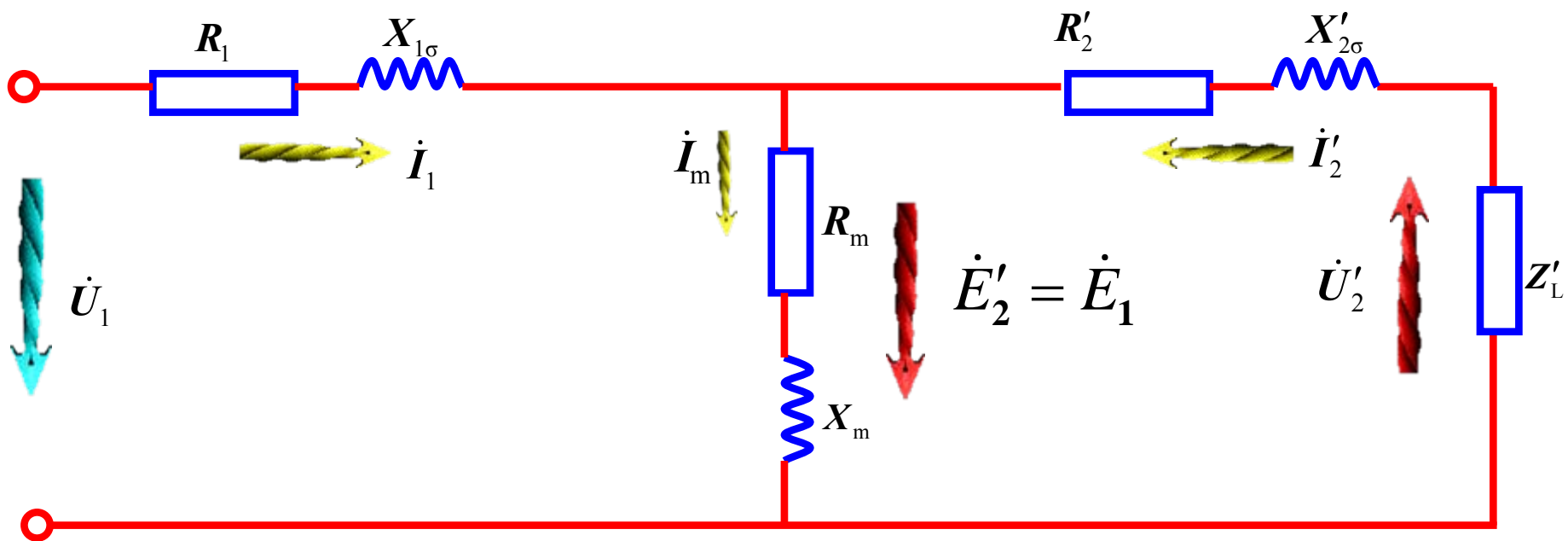
根据第一式和第二式可画出一一次和二次绕组的等效电路；根据第四式可画出激磁部分的等效电路



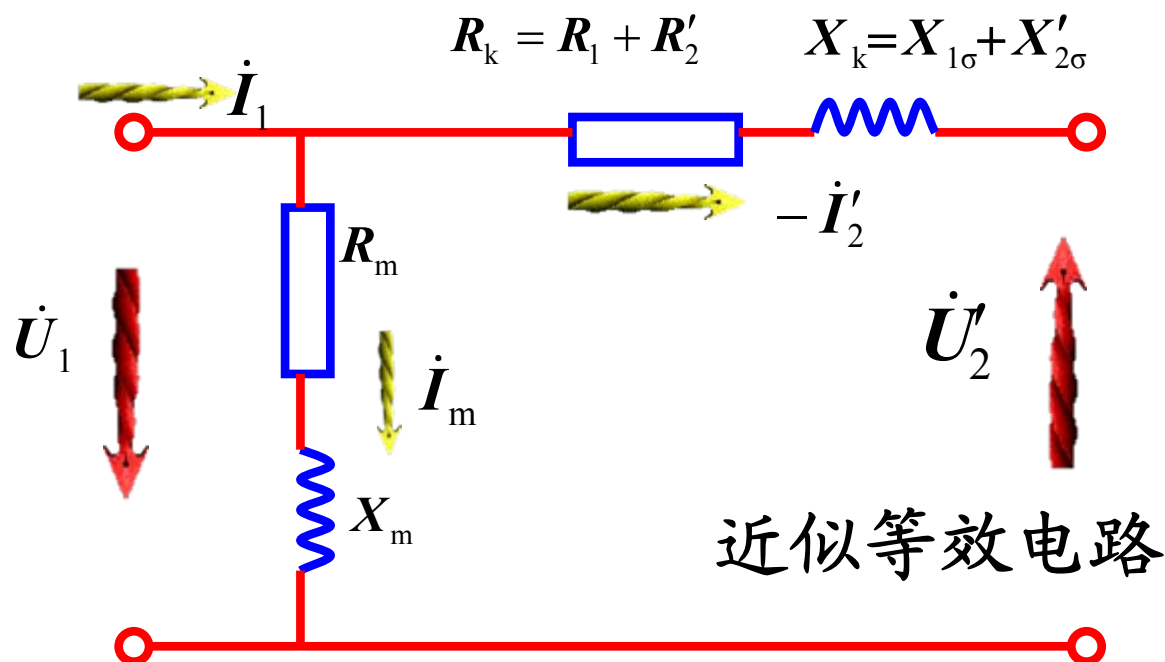
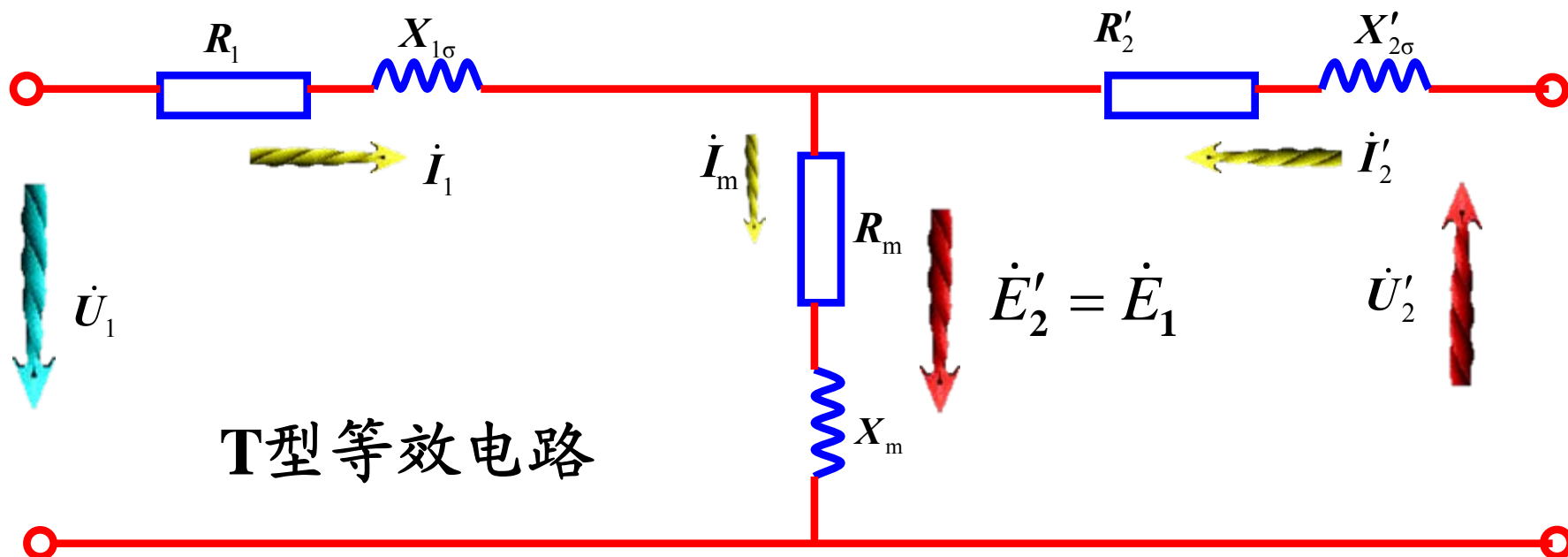
$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

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

根据第三式把这三个电路连接在一起，即可得到变压器的T形等效电路



变压器的T形等效电路



若进一步忽略激磁电流(即把激磁分支断开). 则等效电路将简化成一串联电路, 此电路就称为**简化等效电路**. 在简化等效电路中, 变压器的等效阻抗表现为一串联阻抗.

$$R_k = R_1 + R'_2$$

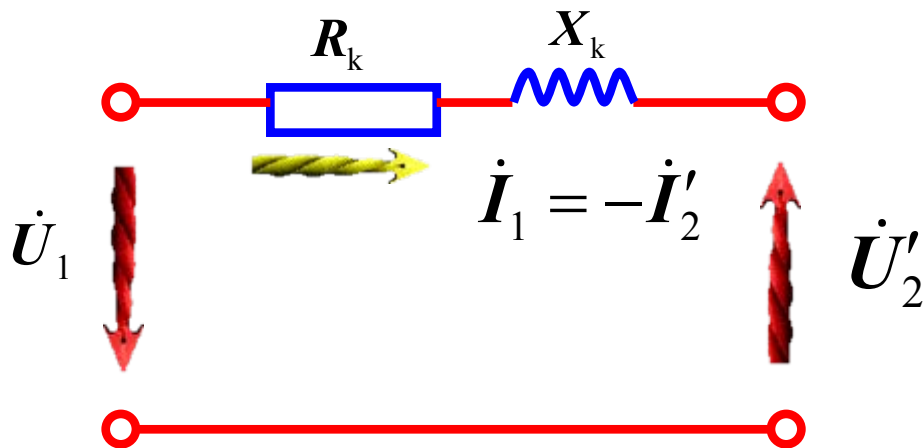
短路电阻

$$X_k = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$$

短路电抗

$$Z_k = Z_{1\sigma} + Z'_{2\sigma} = R_k + jX_k$$

短路阻抗



变压器的简化等效电路

(1) 这种等效电路把变压器基本方程式组所表示的电磁关系，用纯电路的方式表示出来，即把“磁场化路”。磁场化路是电机理论基本方法之一。

(2) 从变压器一次侧所接的电网来看，变压器只不过是整个电力系统中的一个元件，有了等效电路，就很容易用一个等效阻抗挂接在电网上来代替整个变压器及其负载，这对于研究和计算电力系统的运行情况带来了方便。

(3) 变压器的等效电路就是变压器的数学模型，在后面主要采用该模型进行分析。

(4) T型等效电路是准确的等效电路

已知:  $U_2$ 、 $I_2$ 、 $\varphi_2$ 求变压器等效电路的相量图

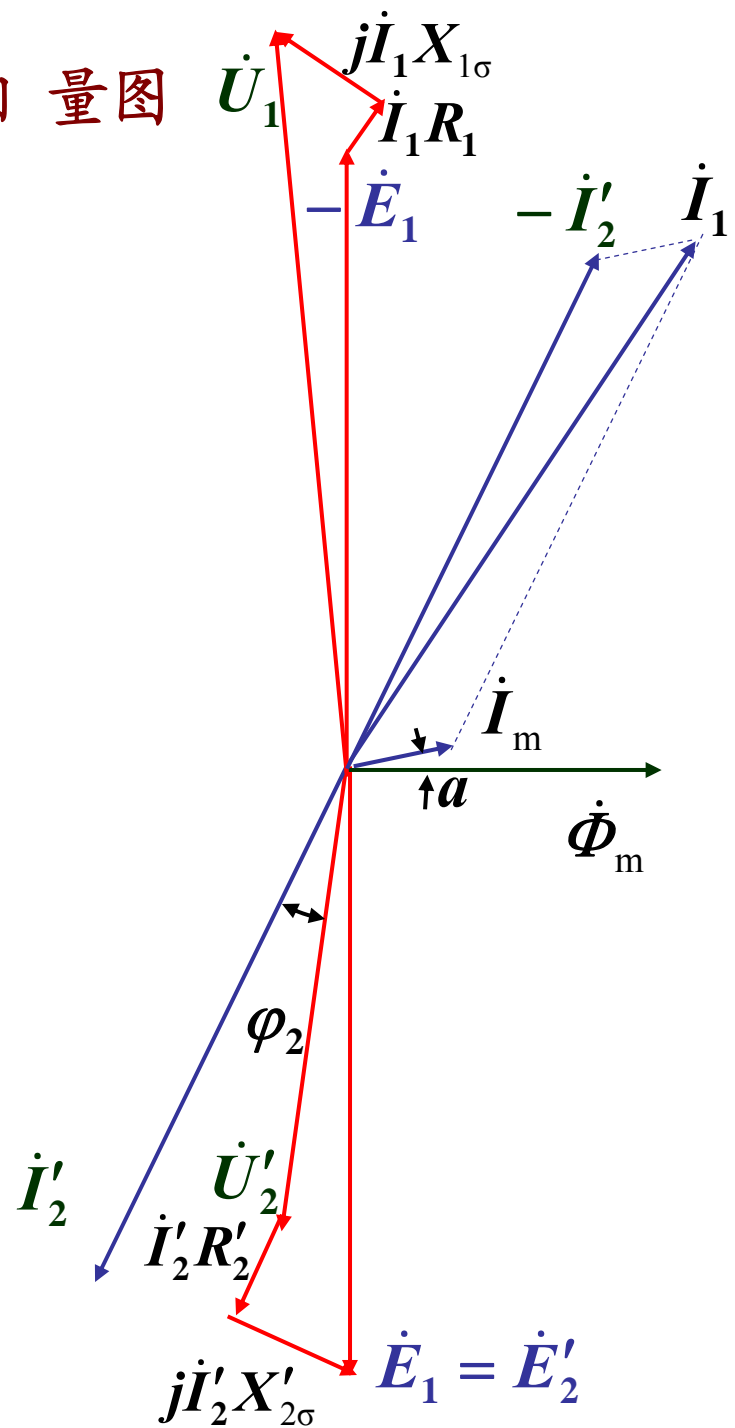
(1)首先选定一个参考相量 ( $\dot{U}'_2$ ),根据负载功率因数角  $\varphi_2$ , 由此画出  $\dot{I}'_2$

(2)根据  $\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2(R'_2 + jX'_{2\sigma})$  得出  $\dot{E}'_2$ 。由于  $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$ , 得出  $\dot{E}_1$

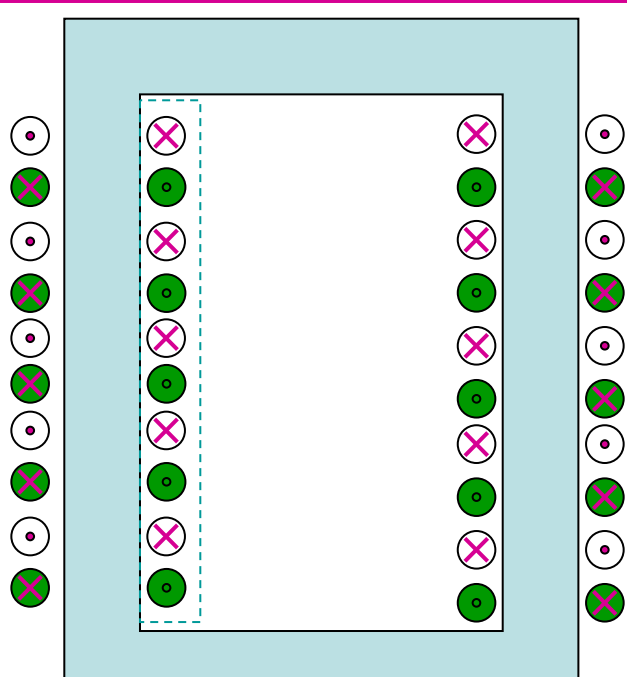
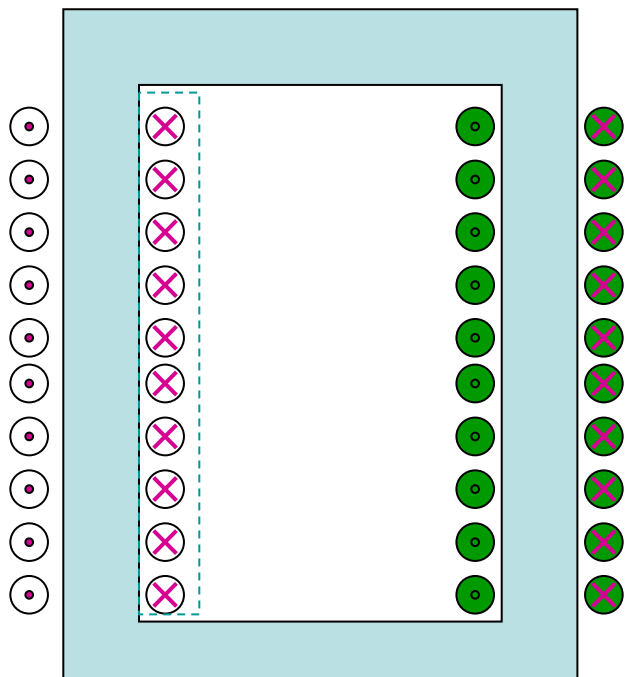
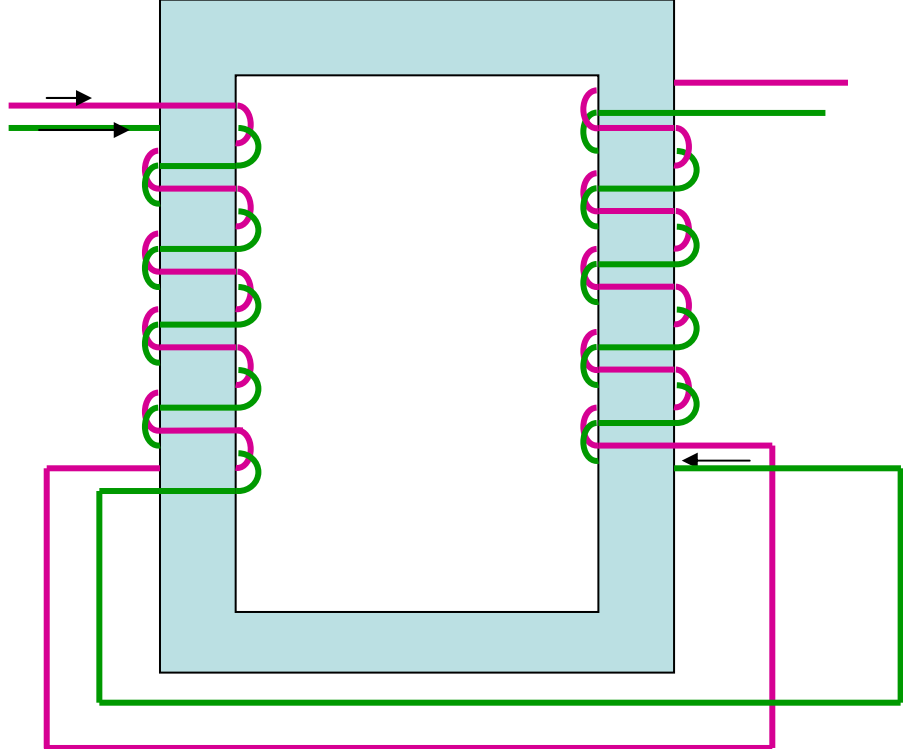
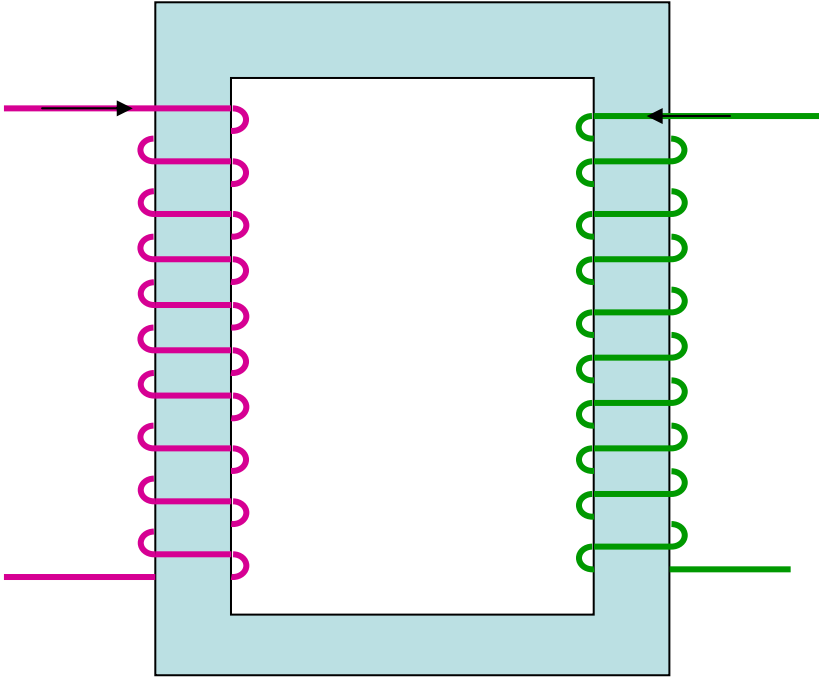
(3) $\dot{\Phi}_m$ 超前  $\dot{E}_1$   $90^\circ$ , 激磁电流  $\dot{I}_m$ 又超前  $\dot{\Phi}_m$ 一铁耗角  $\alpha = \arctan \frac{R_m}{X_m}$ , 于是可画出  $\dot{\Phi}_m$ 和  $\dot{I}_m$

(4) $\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}'_2)$

(5) $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_{1\sigma})$







## 2.5 等效电路参数的测定

### 一、开路试验

开路试验亦称空载试验。试验时，二次绕组开路，一次绕组加以额定电压，测量此时的输入功率、电压和电流，由此即可算出激磁阻抗。

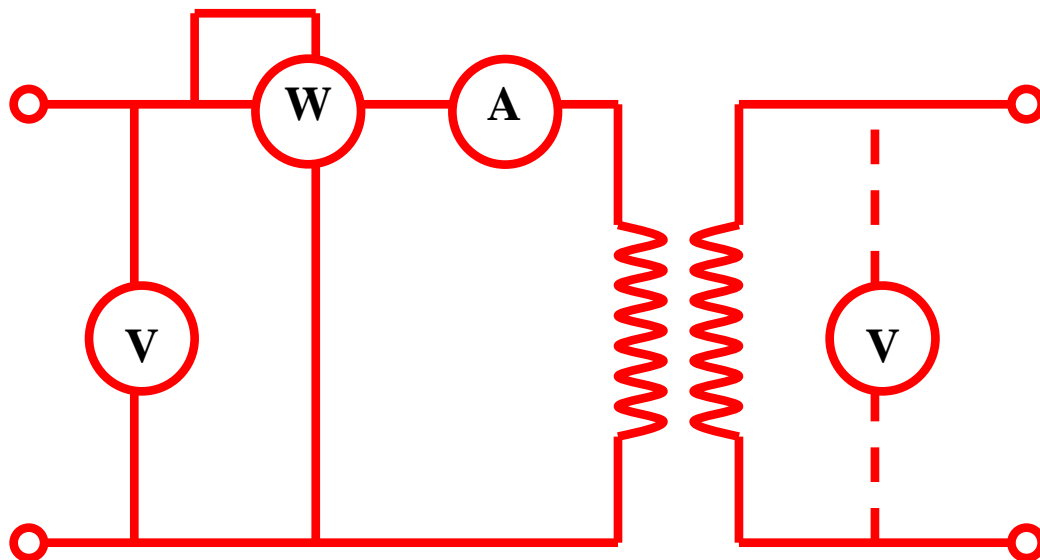


图2-13 开路试验的接线图

# 空载试验内容

- 测量变比
- 测量磁化曲线
- 测量激磁参数

## 空载试验注意事项

- 由于 $X_m$ 与磁路的饱和程度有关，故在不同电压下测量后计算出的值不同，应该在额定电压下测量来计算激磁阻抗。
- 空载试验通常是在低压侧进行，如果一次绕组是高压侧的时候，需要进行归算。

## 二、短路试验

短路试验亦称为负载试验。试验时，把二次绕组短路，一次绕组上加一可调的低电压。调节外加的低电压，使短路电流达到额定电流，测量此时的一次电压输入功率和电流，由此即可确定等效漏阻抗。

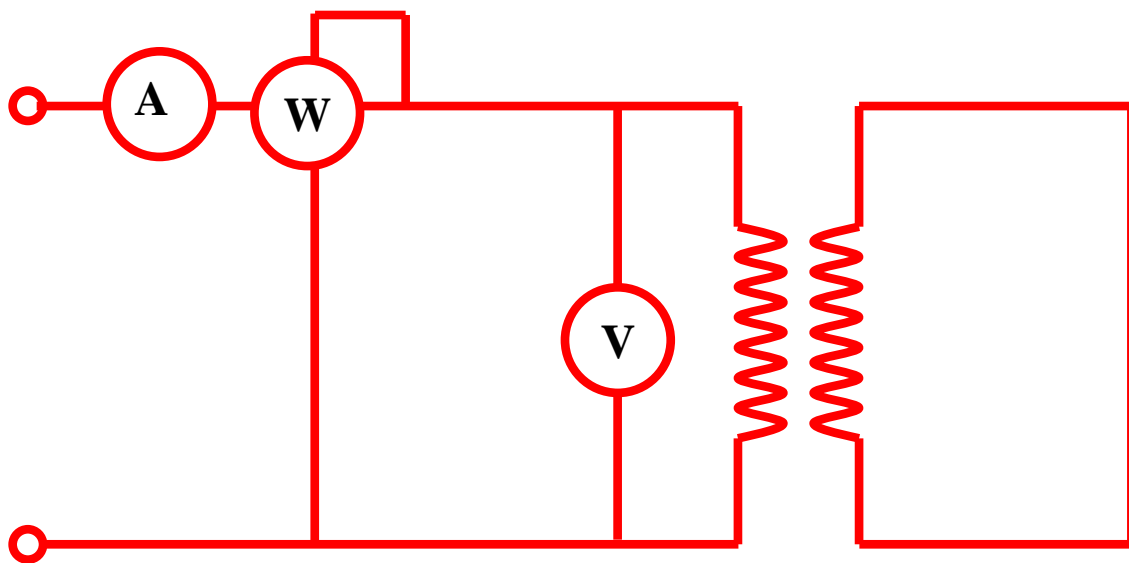


图2-14 短路试验的接线图

阻抗电压用额定电压的百分值表示时有

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{I_{1N} |Z_k|}{U_{1N}} \times 100\% \quad (2-41)$$

↓

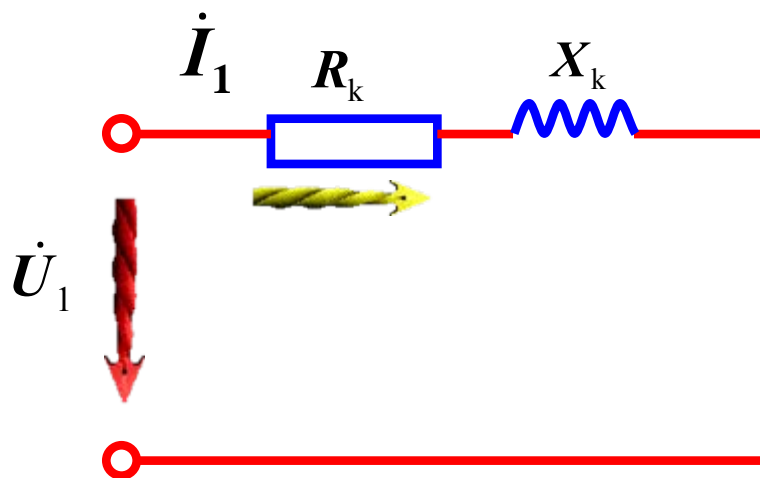
专用符号

阻抗电压的意义:

- (1) 反映变压器在额定负载运行时，漏阻抗压降的大小；
- (2) 从运行角度希望阻抗压降小些，使变压器输出电压随负载变化的波动小些；
- (3) 从安全角度，阻抗电压太小，变压器一旦短路时电流太大，可能损坏变压器

# 漏抗的划分

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_k}{2}$$



## 例题2.1

(1) 绕组电阻与激磁电阻之比

$$\frac{R_1}{R_m} = \frac{3.9}{3028} = 0.128\% \quad \frac{R'_2}{R_m} = \frac{2.55}{3028} = 0.084\%$$

(2) 漏电抗与激磁电抗之比

$$\frac{X_{1\sigma}}{X_m} = \frac{X'_{2\sigma}}{X_m} = \frac{29.25}{32257} = 0.091\%$$



$$\begin{array}{l} |Z_{1\sigma}| \ll |Z_m| \\ |Z'_{2\sigma}| \ll |Z_m| \end{array}$$

(3) 激磁电流和额定电流之比

$$\frac{I_m}{I_{1N}} = \frac{45.5 / 11.55}{157.7} = 2.5\%$$



激磁电流远小于额定电流

## 2.6 三相变压器

磁路系统

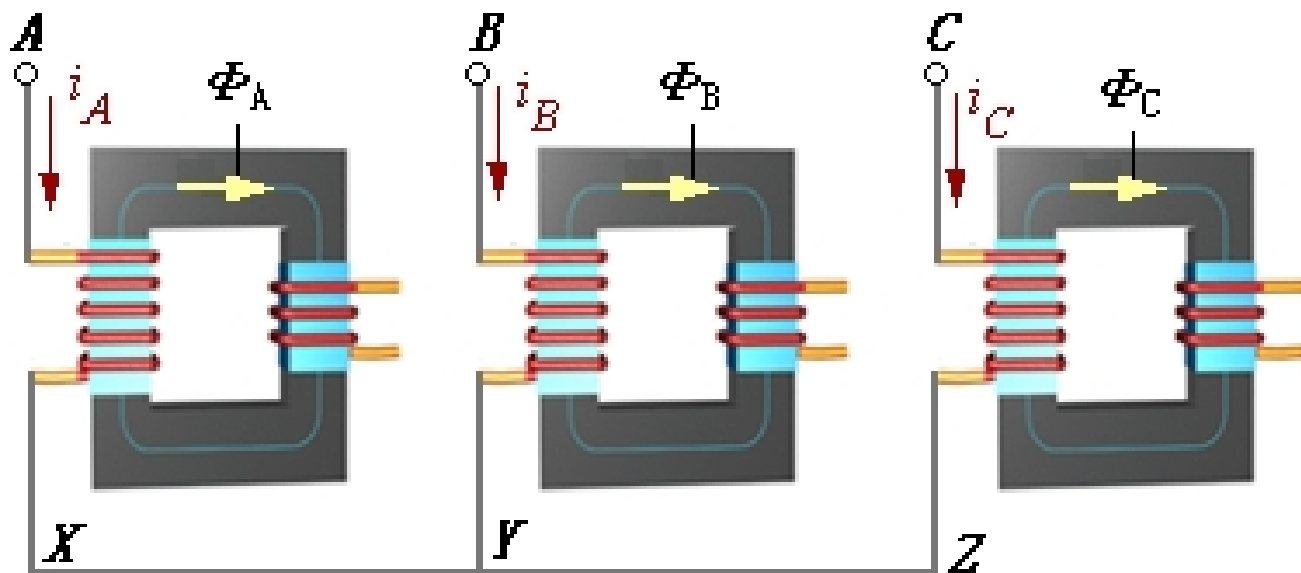
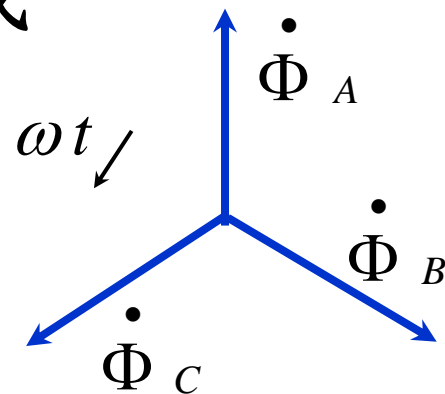
电路系统（重点）

电压波形（难点）



# 三相变压器的磁路系统：组式

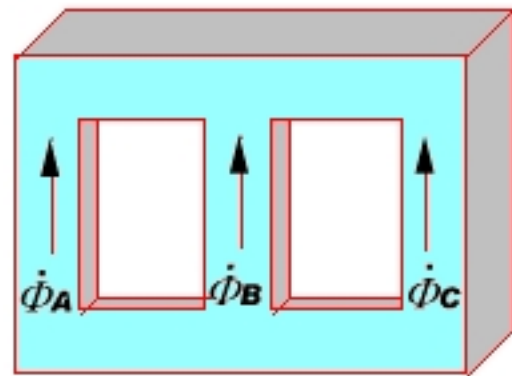
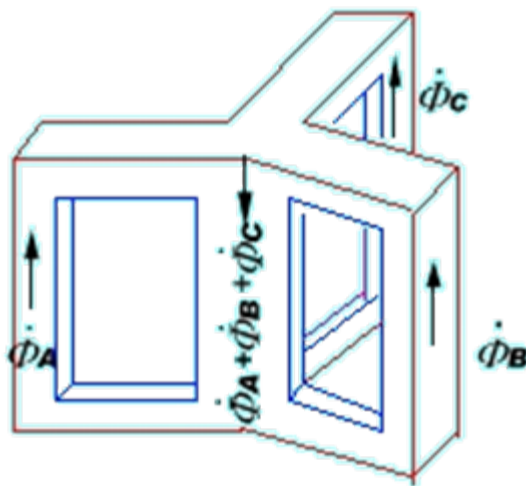
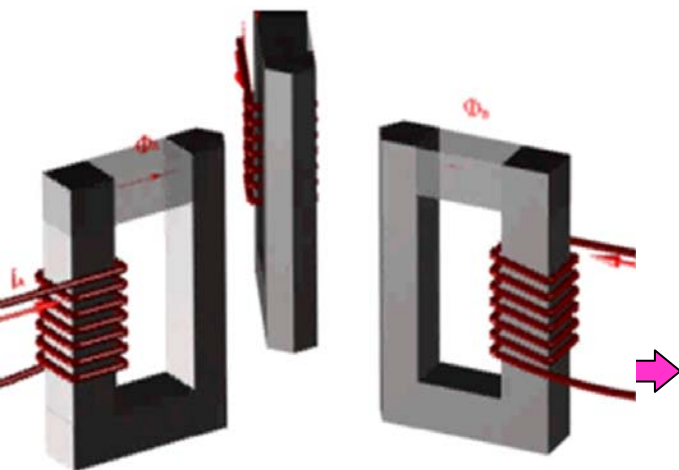
- 结构：由三台单相变压器组成
- 特点：
  - 三相磁路彼此独立
  - 三相磁通、电流对称
  - 便于运输



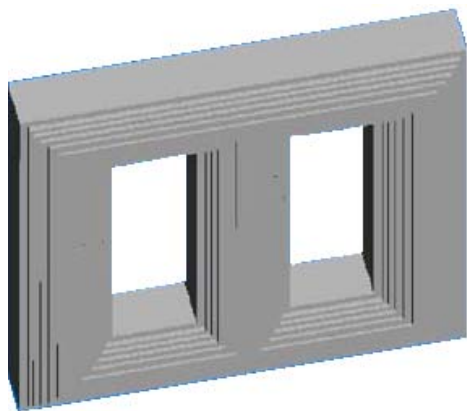
# 三相变压器的磁路系统：心式

- 三相磁路彼此关联
- 三相磁路长度不等
- 三相空载电流略不相同
- 省材料、效率高、占地少、成本低、运行维护简单

$$\dot{\Phi}_0 = \dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0$$



# 三相变压器的磁路系统：心式



三相铁心

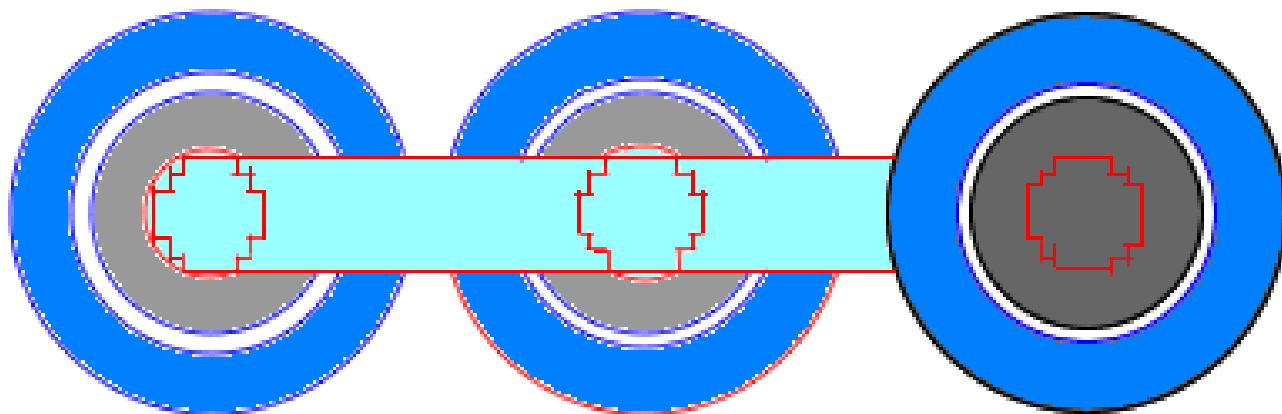
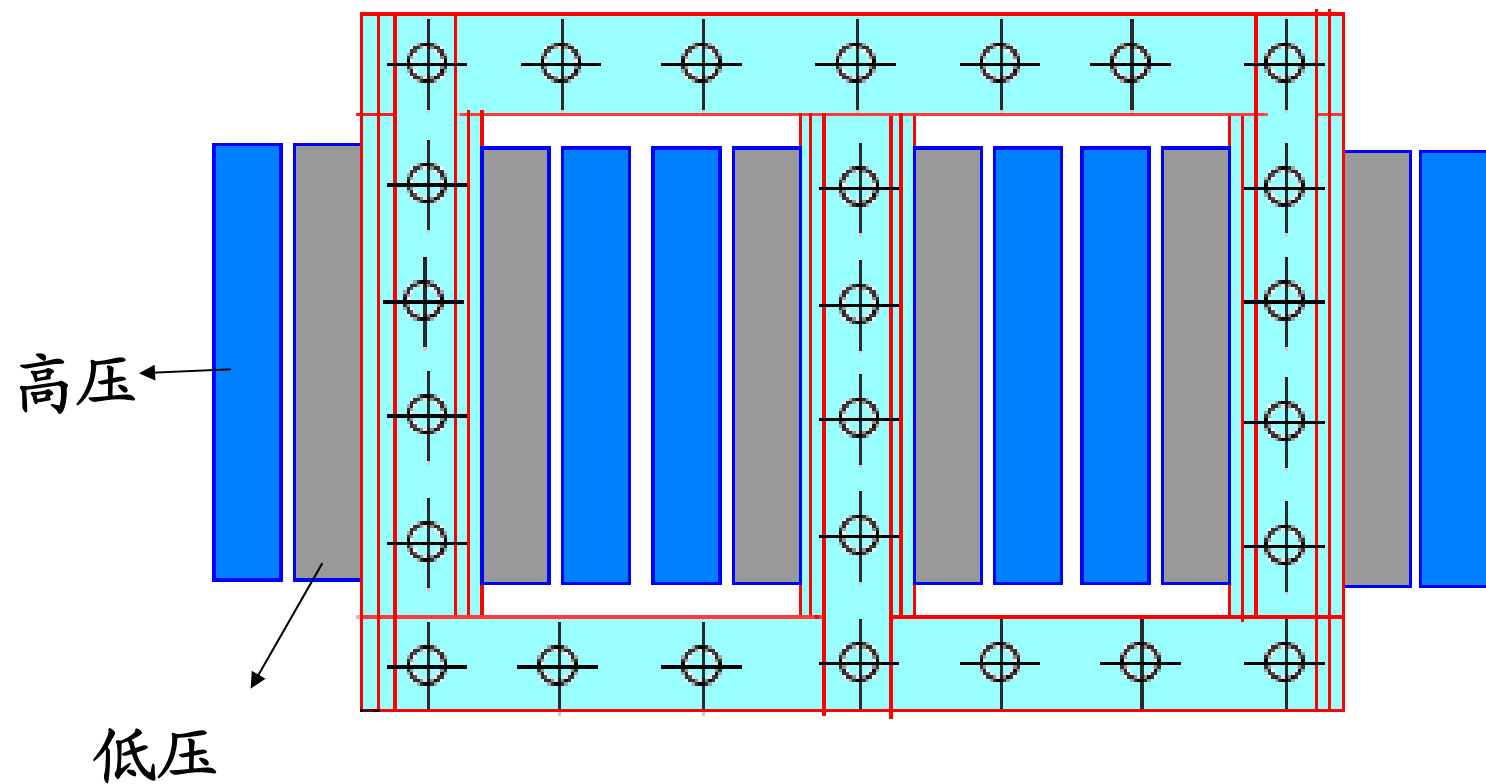


套装绕组

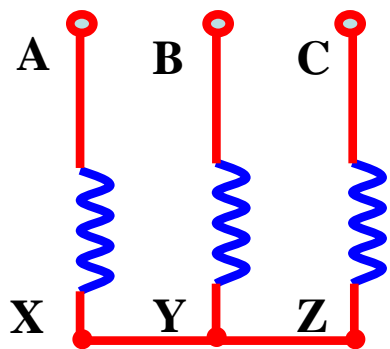


成型变压器

# 三相变压器的电路系统



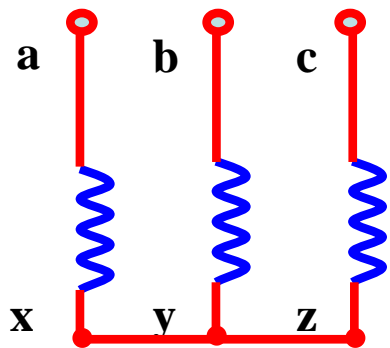
# 三相变压器的电路系统



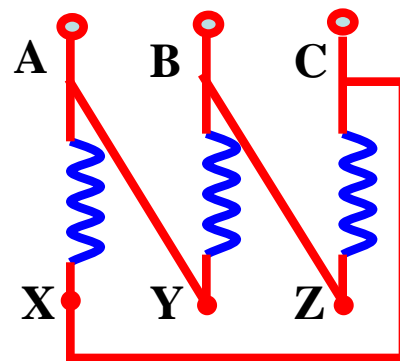
Y星形联结

线电压 =  $\sqrt{3}$  相电压

线电流 = 相电流



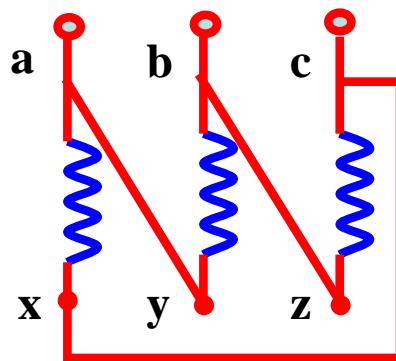
y星形联结



D三角形联结

线电压 = 相电压

线电流 =  $\sqrt{3}$  相电流



d三角形联结

# 三相变压器绕组

国产电力变压器常用：

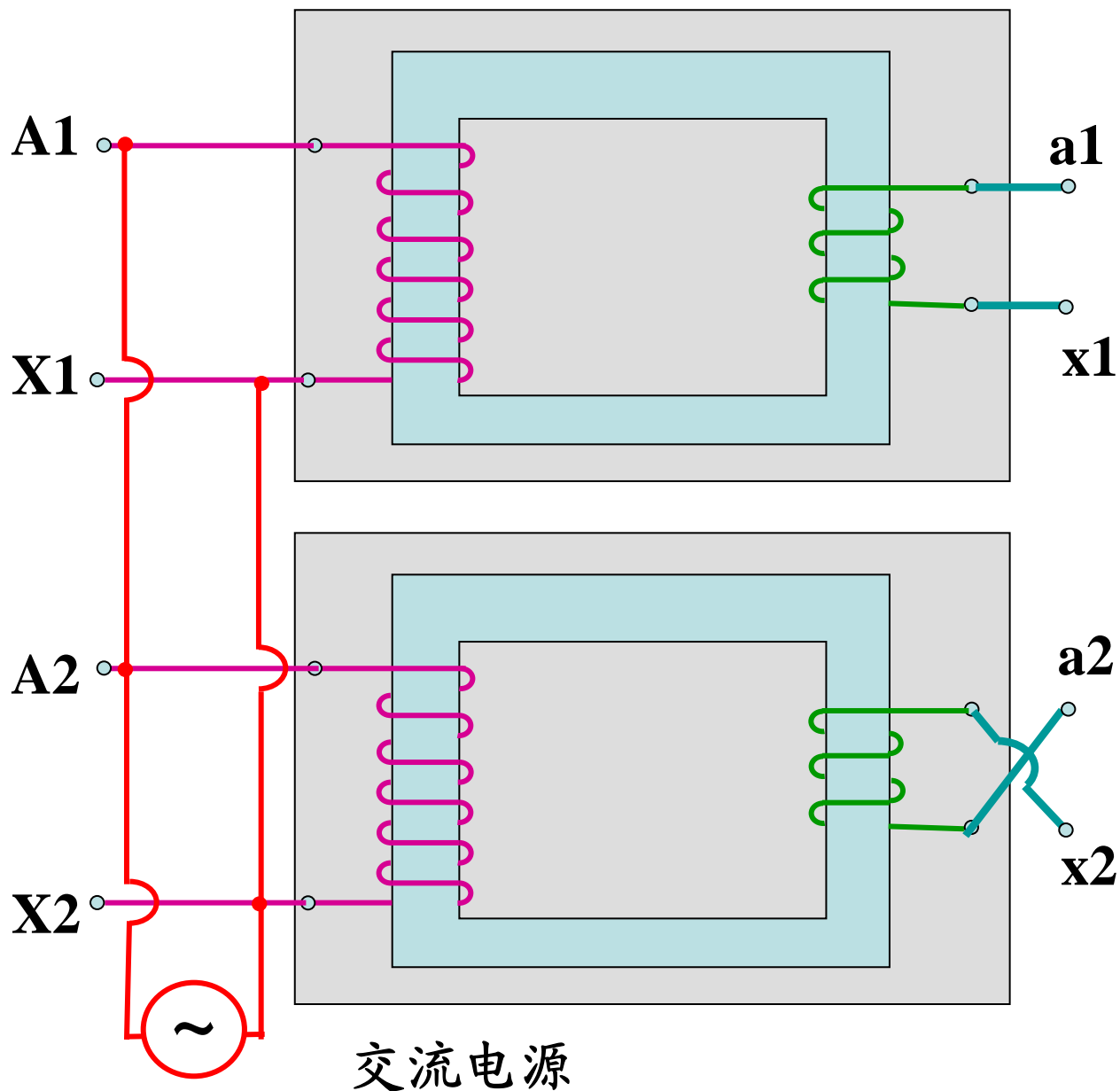
**Yyn**

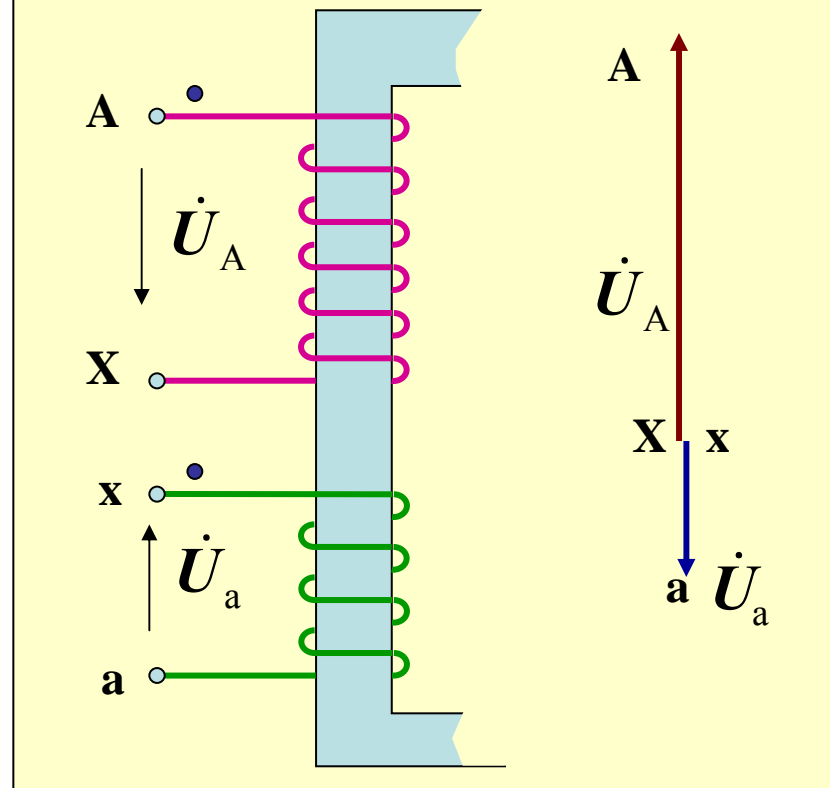
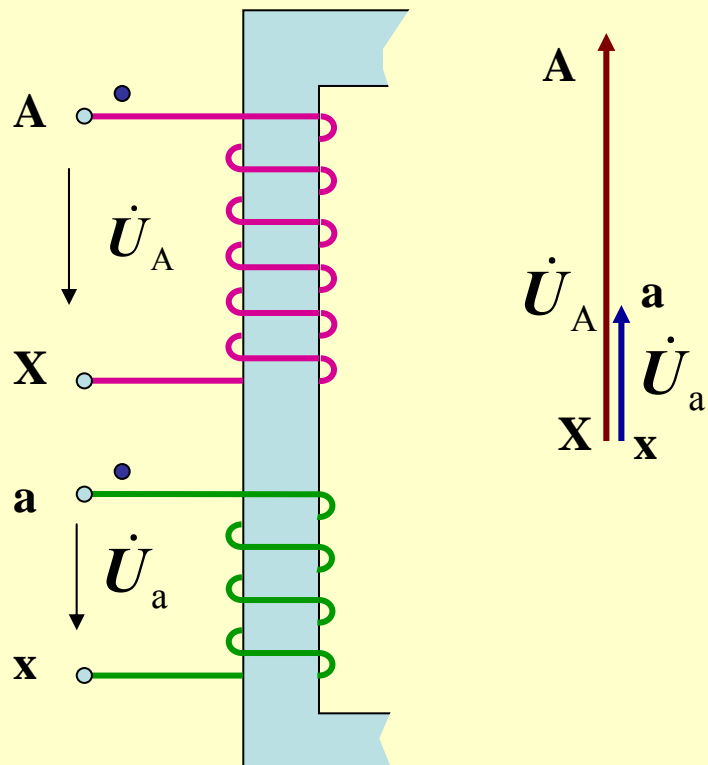
**Yd**

**YNd**

N(或n)表示有中点引出的情况

# 两台单相变压器的并联运行





(1)同名端取决于绕组的绕制方向

左图两个上端（或下端）是同名端

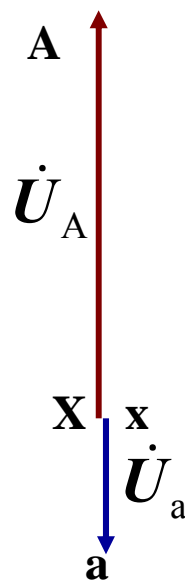
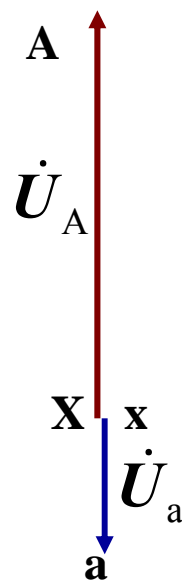
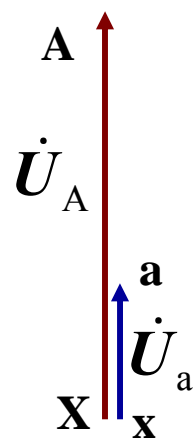
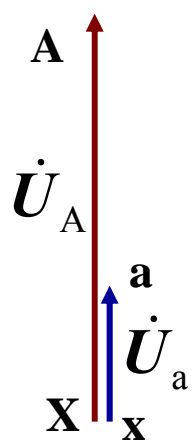
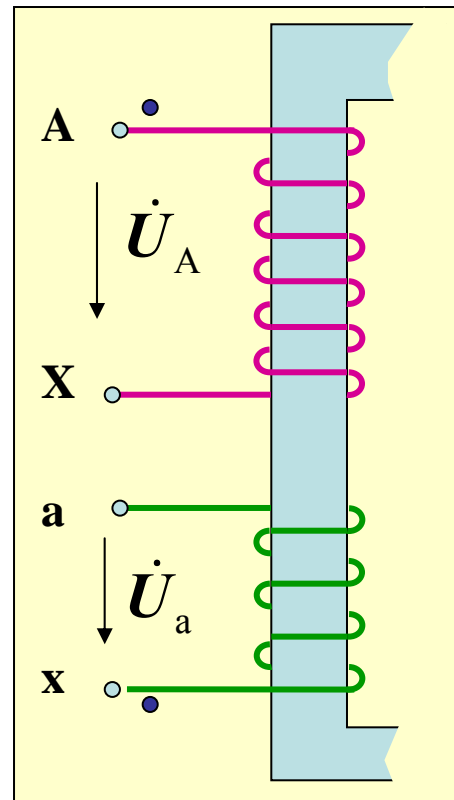
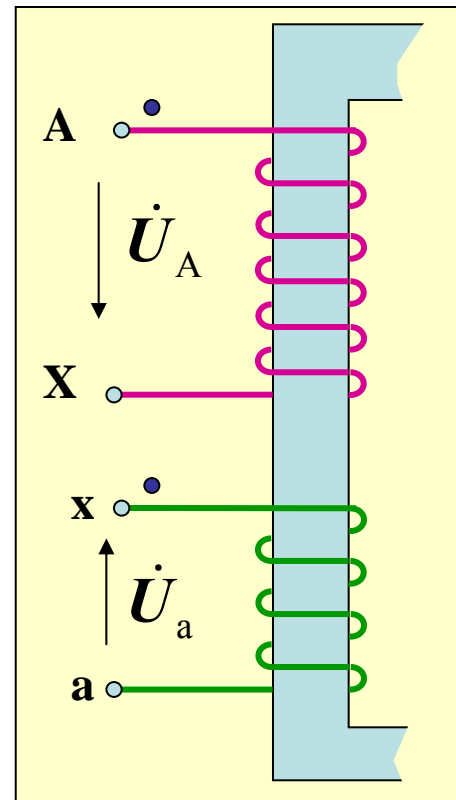
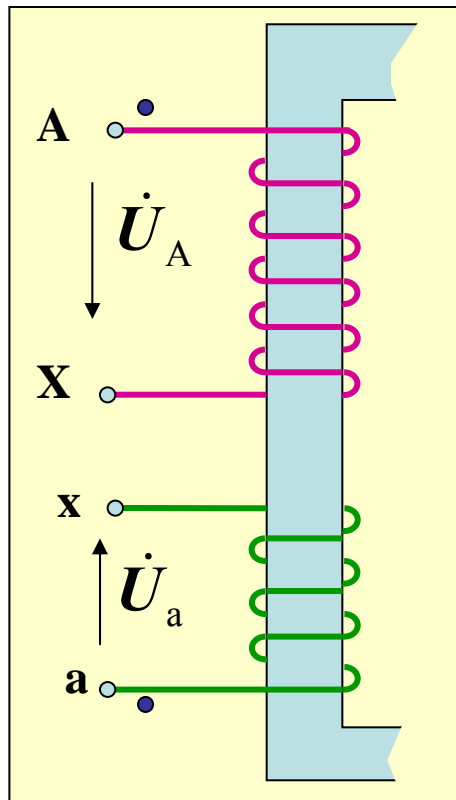
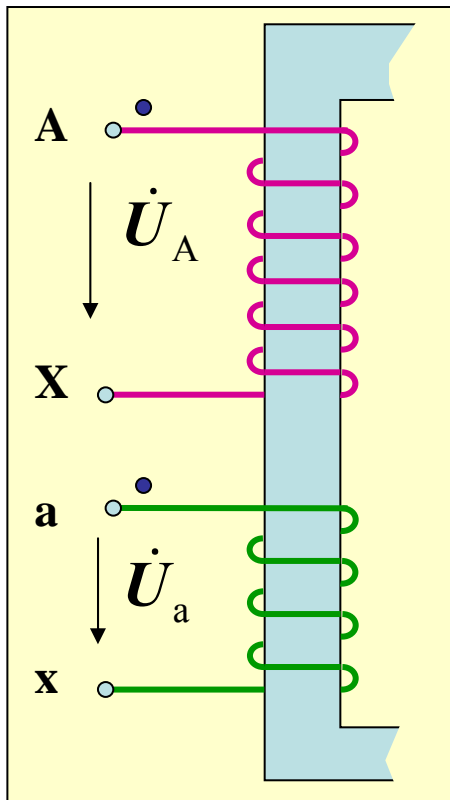
(2)正方向统一规定为从绕组的首端指向尾端

首端和尾端是可以任意命名的

向量 $\dot{U}_A$ 在向量图中是X指向A

关键词：  
绕制方向  
同极性  
同名端





# 高、低压绕组线电压的相位关系

三相绕组采用不同的联结时，高压侧的线电压与低压侧对应的线电压之间可以形成不同的相位。

相位差不仅与绕组的绕法和首、尾端的标法有关，还与三相绕组的连接法有关。

# 高、低压绕组线电压的相位关系

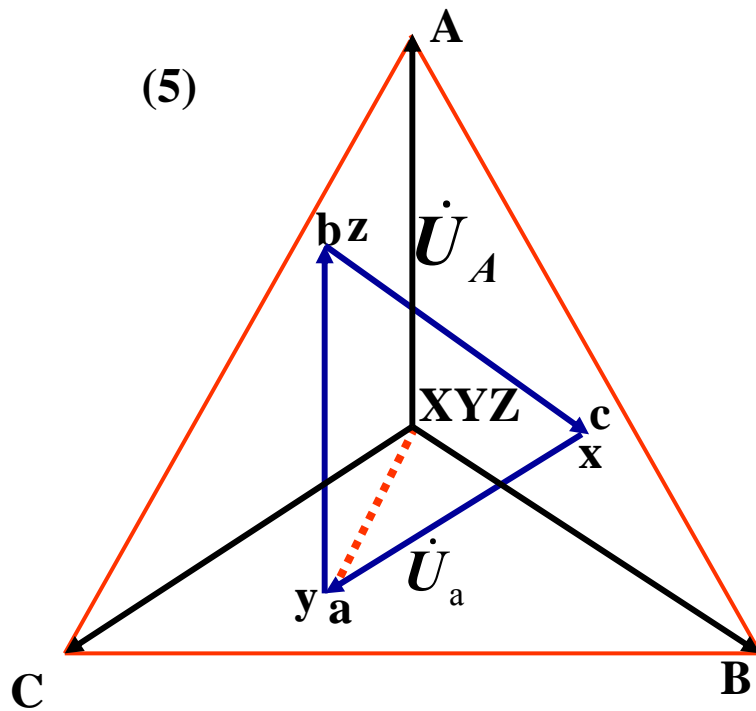
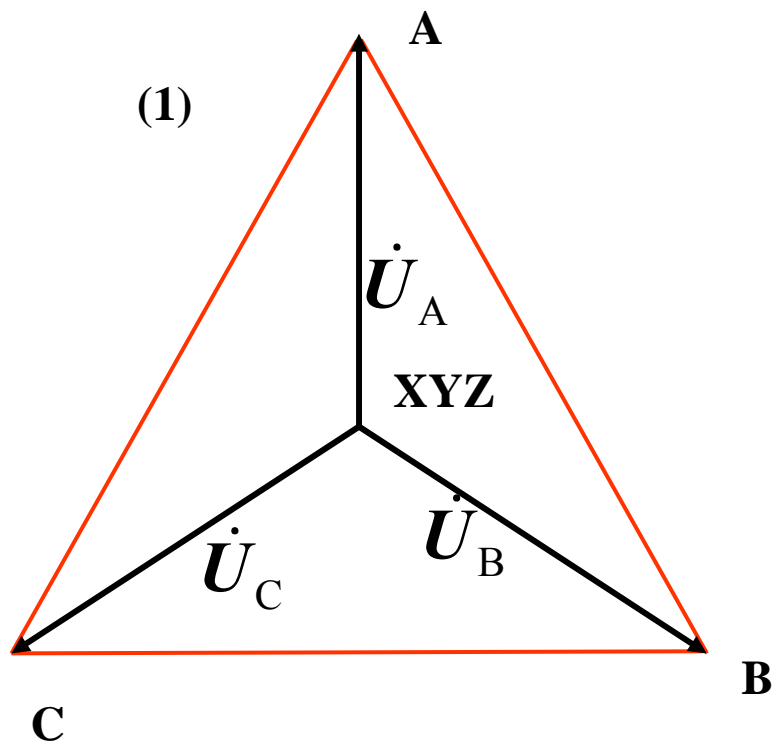
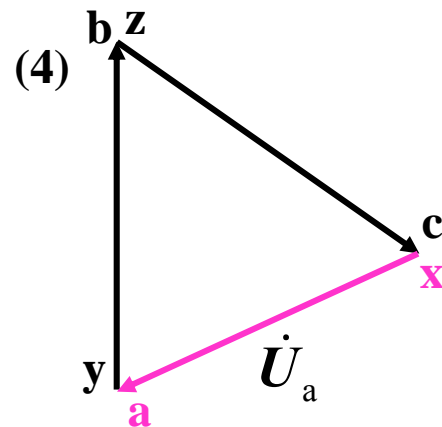
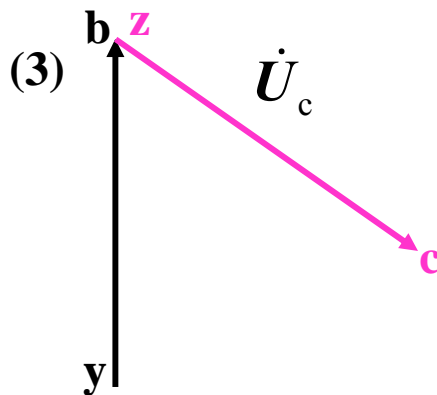
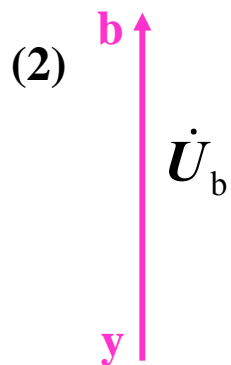
为了表明高、低压线电压之间的相位关系，通常采用“**时钟表示法**”，即把高、低压绕组**两个线电压三角形**的重心重合，把高压侧线电压三角形的一条**中线**作为时钟的长针，指向钟面的12，再把低压侧线电压三角形中对应的中线作为短针。它所指的钟点就是该**联结组的组号**。

# 联结组绘制过程

- 首先绘制高压绕组的电压三角形
- 低压绕组的三角形是参照高压绕组绘制的：同一铁心柱上的绕组（在连接图上为上下对应的绕组），首端为同极性时，相电压相位相同，首端为异极性时，相电压相位相反；等电位点必须重合。

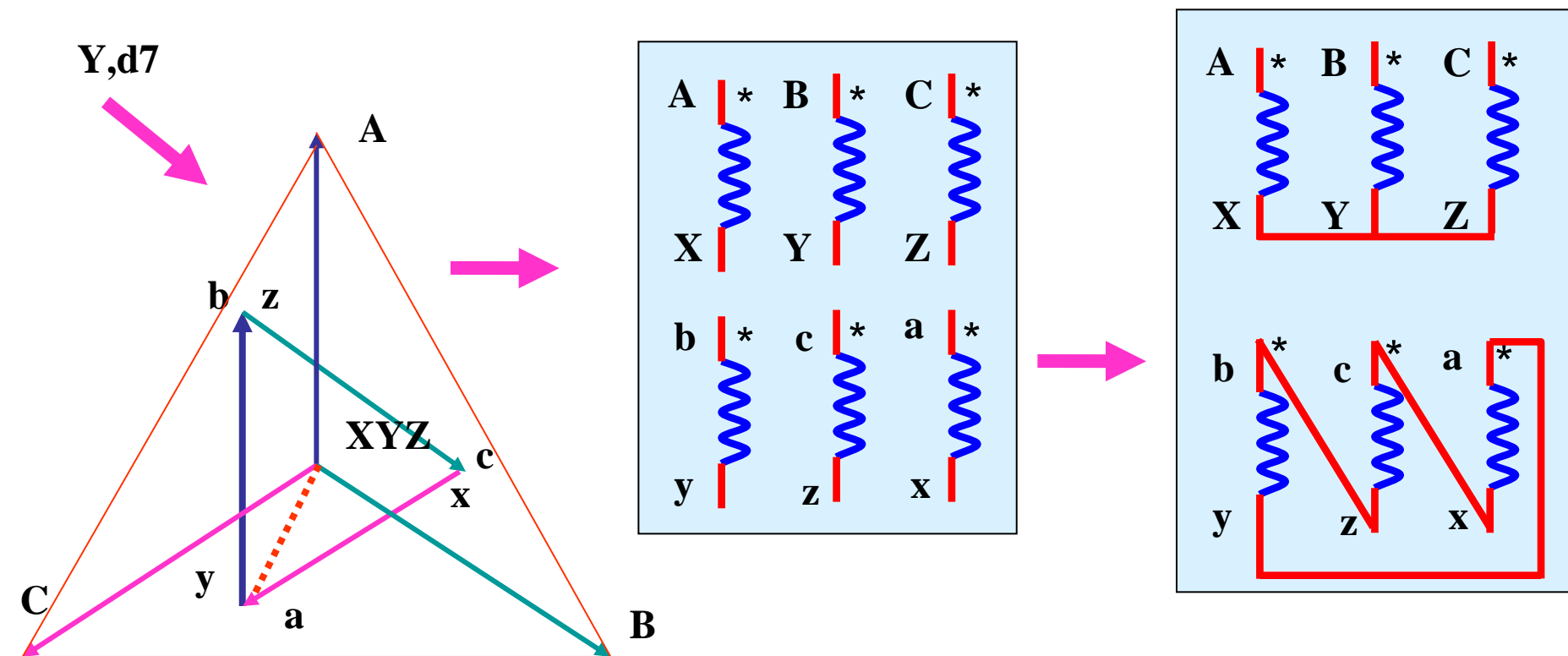
若  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  按顺时针排列，则  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  也按顺时针的顺序排列，反之亦然。因为一次、二次绕组的相序是一致的。

# 习题:2-17(a)



## 第二种问题，已知联结组别，绘制绕组接线图

- (1)根据联结组别绘制向量图
- (2)根据相电压的向量平行关系来确定是否在同一个铁心柱上
- (3)各个铁心柱：根据相位关系，如果同相位同名端都标在上端，反之则高压标在上端低压标在下端。
- (4)根据绕组的联接，星形连接末端相连，三角形连接把等位点相连



# 联结组的小结

- 联结组不同，高压绕组和低压绕组的相位差不同；
  - Yy联结其组号是偶数，Yd连接其组号是奇数；
- ( 高低压绕组的连接法不同时，其联结组号为奇数；  
高低压绕组的连接法相同时，其联结组号为偶数)

## 2.7 标么值 Per-Unit Value

内容提要:

1. 标么值的定义
2. 基值的选取
3. 标么值的优点
4. 标么值的缺点
5. 基值之间的关系



# 基本概念

相对值

定义:

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基值}}$$

基值的选取：取各物理量的额定值。

基值选取注意：

- 一次侧的量，选择一次侧的额定作为基值，二次侧的量选择二次侧的额定作为基值；
- 对于三相系统，相值选择相的额定作为基值，线值选择线的额定作为基值。

# 基值的选取

基值	一次侧	二次侧
电压	$U_{1b} = U_{1N}$	$U_{2b} = U_{2N}$
电流	$I_{1b} = I_{1N}$	$I_{2b} = I_{2N}$

$$U_1^* = \frac{U_1}{U_{1N}}, I_1^* = \frac{I_1}{I_{1N}}$$
$$U_2^* = \frac{U_2}{U_{2N}}, I_2^* = \frac{I_2}{I_{2N}}$$

# 阻抗的基值

$$\text{一次侧: } Z_{1b} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}}$$

$$\text{二次侧: } Z_{2b} = \frac{U_{2N}}{I_{2N}}$$

$$Z_1^* = \frac{Z_1}{Z_{1b}} = \frac{Z_1 I_{1N}}{U_{1N}}$$

$$Z_2^* = \frac{Z_2}{Z_{2b}} = \frac{Z_2 I_{2N}}{U_{2N}}$$

$$R_1^* = \frac{R_1}{Z_{1b}} = \frac{R_1 I_{1N}}{U_{1N}}$$

$$R_2^* = \frac{R_2}{Z_{2b}} = \frac{R_2 I_{2N}}{U_{2N}}$$

$$X_{1\sigma}^* = \frac{X_{1\sigma}}{Z_{1b}} = \frac{X_{1\sigma} I_{1N}}{U_{1N}}$$

$$X_{2\sigma}^* = \frac{X_{2\sigma}}{Z_{2b}} = \frac{X_{2\sigma} I_{2N}}{U_{2N}}$$

都是相值

功率的基值

$$S_b = S_N$$

$$S_1^* = \frac{S_1}{S_N}, P_1^* = \frac{P_1}{S_N}, Q_1^* = \frac{Q_1}{S_N}$$

$$S_2^* = \frac{S_2}{S_N}, P_2^* = \frac{P_2}{S_N}, Q_2^* = \frac{Q_2}{S_N}$$

$$S_1^* = \sqrt{P_1^{*2} + Q_1^{*2}}, S_2^* = \sqrt{P_2^{*2} + Q_2^{*2}}$$

# 标么值的优点1

便于分析与比较

$$Z_k^* \approx 0.03 \sim 0.1$$

$$I_0^* \approx 0.02 \sim 0.05$$

用标么值表示时，各个参数和典型的性能数据通常在一定的范围之内，与变压器容量大小无关，便于比较分析。

$$I_{1N}^* = U_{1N}^* = I_{2N}^* = U_{2N}^* = 1$$

各物理量额定值的标么值为1

## 标么值的优点2

简化计算

$$P_N^* = \frac{P_N}{S_N} = \frac{S_N \cos \varphi}{S_N} = \cos \varphi$$

$$Q_N^* = \frac{Q_N}{S_N} = \frac{S_N \sin \varphi}{S_N} = \sin \varphi$$

$$Z_k^* = \frac{Z_k}{Z_{1b}} = \frac{(I_{1N} Z_k)}{U_{1N}} = u_k$$

见46页式(2-41)

短路实验时,

如果加额定电流:

$$I_k^* = I_{1N}^* = 1$$

$$|Z_k^*| = \frac{U_k^*}{I_k^*} = U_k^*$$

$$R_k^* = \frac{P_k^*}{I_k^{2*}} = P_k^*$$

## 标么值的优点3 无需归算

例1:  $U'_2 \neq U_2$

$$U_2'^* = \frac{U'_2}{U_{1b}} = \frac{kU_2}{U_{1N}} = \frac{U_2}{U_{1N}/k} = \frac{U_2}{U_{2N}} = \frac{U_2}{U_{2b}} = U_2^*$$

例2:  $R'_2 \neq R_2$

$$R_2'^* = \frac{R'_2}{Z_{1b}} = k^2 R_2 \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = R_2 \frac{U_{1N} I_{1N}}{(U_{1N}/k)^2}$$

$$= R_2 \frac{U_{2N} I_{2N}}{U_{2N}^2} = R_2 \frac{I_{2N}}{U_{2N}} = \frac{R_2}{Z_{2b}} = R_2^*$$

同一物理量，归算前后标么值相等。

## 标么值的优点4 三相系统的线、相标么值相等

例1: Y接,  $U_l \neq U_\phi$

$$U_l^* = \frac{U_l}{U_N} = \frac{\sqrt{3}U_\phi}{\sqrt{3}U_{N\phi}} = \frac{U_\phi}{U_{1N\phi}} = U_\phi^*$$

例2:  $\Delta$ 接,  $I_l \neq I_\phi$

$$I_l^* = \frac{I_l}{I_N} = \frac{\sqrt{3}I_\phi}{\sqrt{3}I_{N\phi}} = \frac{I_\phi}{I_{N\phi}} = I_\phi^*$$

例3: 三相对称系统,  $P = 3P_\phi$

$$P^* = \frac{P}{S_N} = \frac{3U_\phi I_\phi \cos \varphi}{3U_{N\phi} I_{N\phi}} = \frac{U_\phi I_\phi \cos \varphi}{U_{N\phi} I_{N\phi}} = \frac{P_\phi}{S_{N\phi}} = P_\phi^*$$



## 标么值的优点5 运行状态一目了然

$I_2^* = 0$ : 空载运行 (No Load)

$I_2^* = 1$ : 满载运行 (Full Load)

$I_2^* = 0.5$ : 半载运行 (Half Load)

$I_2^* = 0.7$ : 轻载运行 (Under Load)

$I_2^* = 1.2$ : 过载运行 (Over Load)

# 标么值的缺点

- 1.没有量纲，物理概念模糊；
- 2.物理意义完全不同的量，标么值可能相等。

## 2.8 变压器的运行性能

### 一、电压调整率

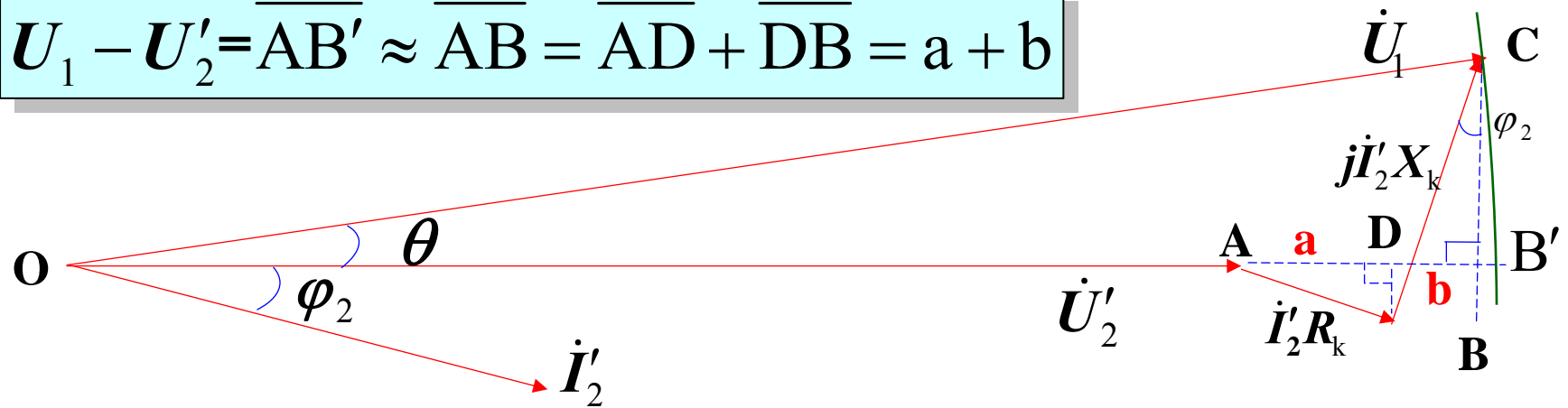
通常用电压调整来反应二次侧电压随负载变化的程度

电压调整率反应了供电电压的稳定性

定义：当一次侧电压保持额定、负载功率因数为常数，从空载到负载时二次侧电压变化的百分值。

$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2N\phi}} \times 100\% = \frac{U_{1N\phi} - U'_2}{U_{1N\phi}} \times 100\%$$

$$U_1 - U_2 = \overline{AB'} \approx \overline{AB} = \overline{AD} + \overline{DB} = a + b$$



$$a = I_2' R_k \cos \varphi_2 \qquad b = I_2' X_k \sin \varphi_2$$

$$\Delta u = \frac{U_{1N\phi} - U'_2}{U_{1N\phi}} \times 100\% \approx \frac{I'_2 R_k \cos \varphi_2 + I'_2 X_k \sin \varphi_2}{U_{1N\phi}} \times 100\%$$

$$= \frac{I_2' R_k \cos \varphi_2 + I_2' X_k \sin \varphi_2}{I_{1N\phi} (U_{1N\phi} / I_{1N\phi})} \times 100\%$$

$$\Delta u = I^* (R_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2) \times 100\%$$

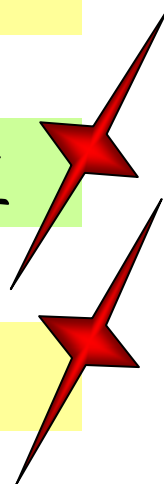
$$\Delta u = I^* (R_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2) \times 100\%$$

注意：电压调整率与负载大小和负载性质都有关

注意：电压调整率是正比于负载电流的变化

当负载为感性或者纯电阻，电压调整率恒为正值

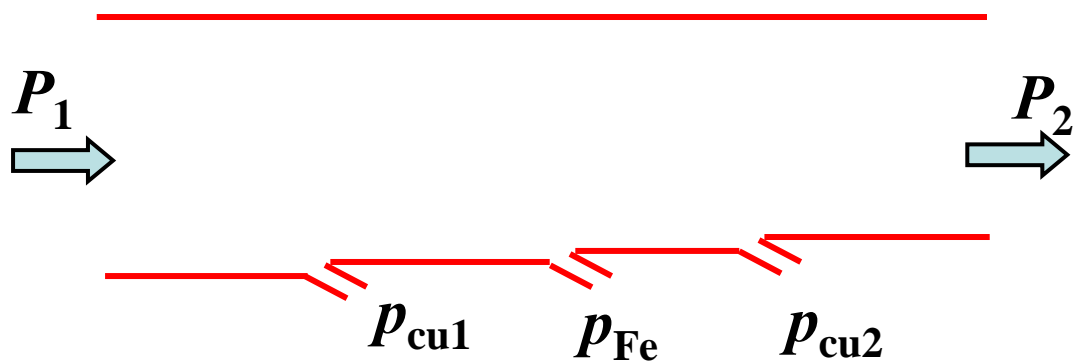
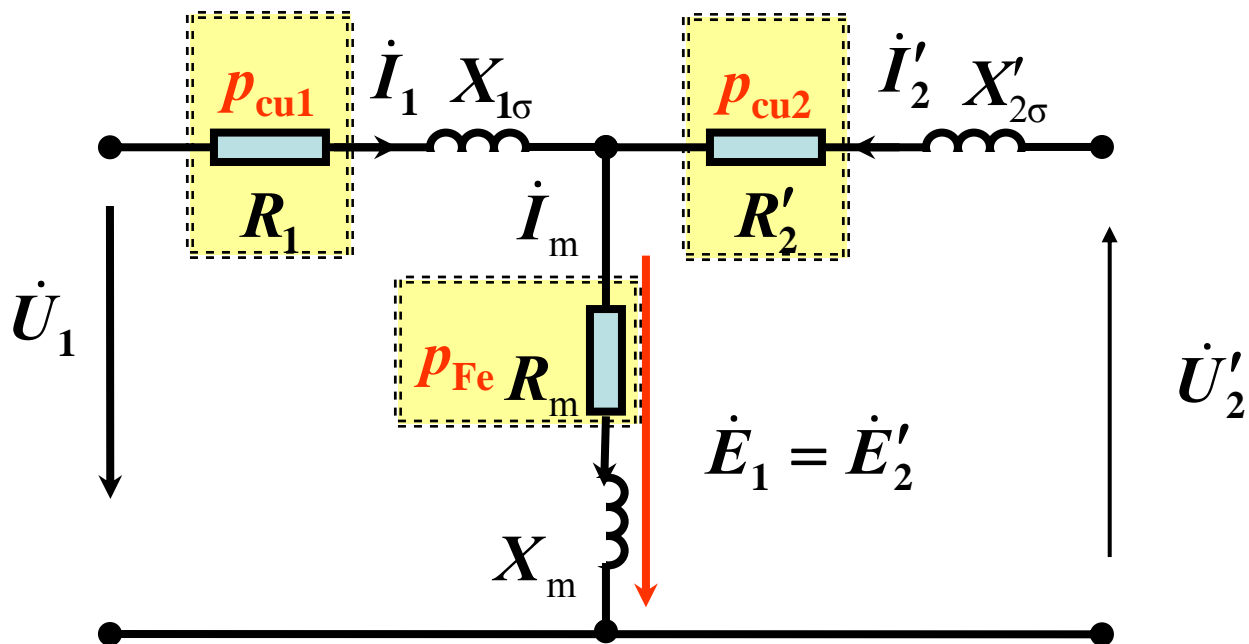
当电压调整率为负值或者为0，表明负载为容性



# 应对变压器电压调整率的措施

1. 上述分析表明，变压器负载运行时，二次侧电压将随负载变化而变化，若电压变化率太大则对用户带来不利影响。
2. 为保证二次侧电压在一定范围内变化，必须根据负载的大小进行电压调整。
3. 通常在变压器高压绕组上设抽头，通过分接开关调节高压绕组的匝数，调节变压器的匝数比实现调节二次侧电压。

# 变压器的效率



用间接法求变压器效率做以下三个假设

(1) 由于空载电流 $I_0$ 很小，可忽略变压器空载运行时的铜耗 $mI_0^2R_1$ ，用额定电压下的空载损耗 $p_0$ 来代替铁耗 $p_{Fe}$ ，即 $p_0=p_{Fe}$ ，它不随负载的性质和大小而变化，是不变损耗

(2) 由于短路试验时外加电压较低，铁心中磁通密度很小，因此可忽略短路试验时的铁耗，用额定电流时的短路损耗 $p_{kN}$ 来代替额定电流时的铜耗，其他负载电流时的铜耗可以按下式计算：

$$p_k = mI_2'^2 R_k = \left( \frac{I_2'}{I_{1N}} \right)^2 mI_{1N}^2 R_k = (I_2^*)^2 p_{kN}$$

(3) 不考虑变压器二次侧电压随负载的变化，即认为 $U_2=U_{2N}$ 。

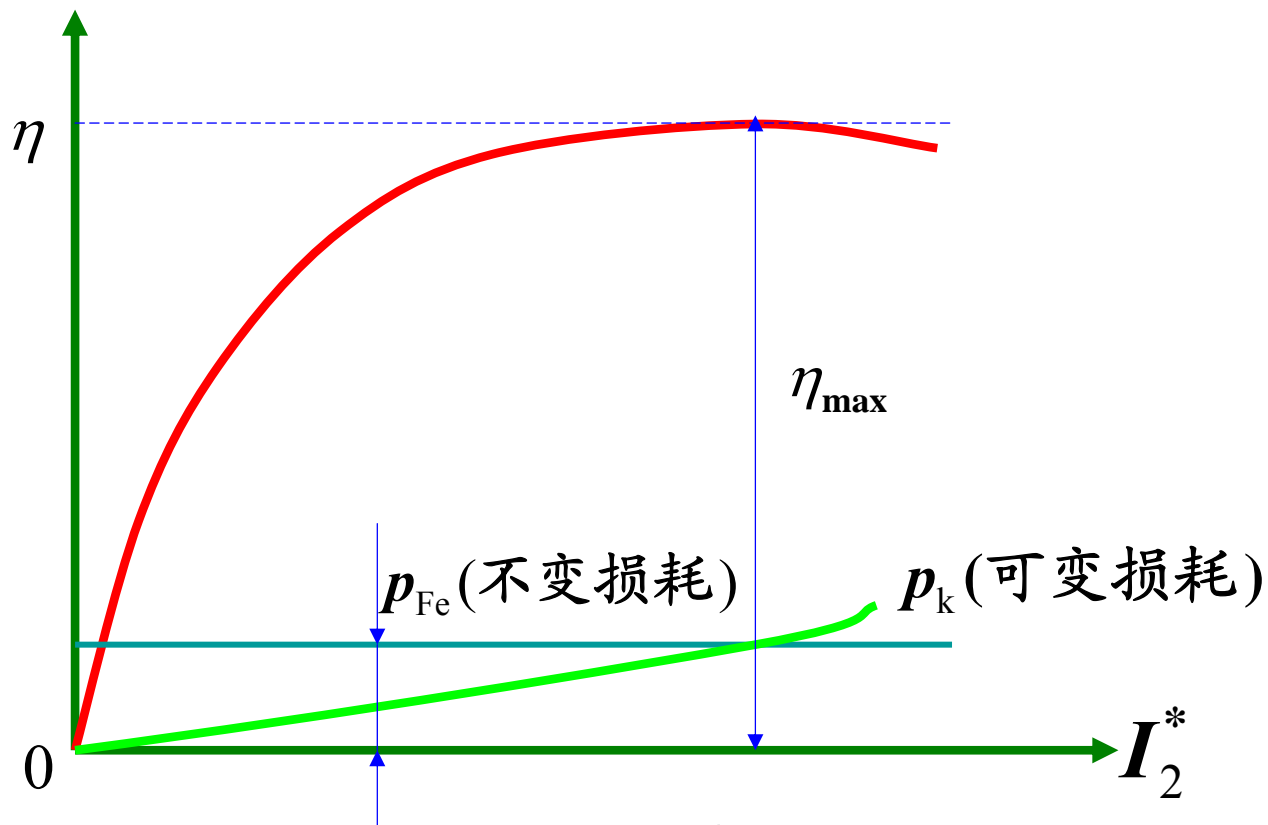
$$\begin{aligned} P_2 &= mU_2 I_2 \cos\varphi_2 \approx mU_{2N} I_2 \cos\varphi_2 \\ &= mU_{2N} I_{2N} \frac{I_2}{I_{2N}} \cos\varphi_2 = S_N I_2^* \cos\varphi_2 \end{aligned}$$



$$\eta = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p} = 1 - \frac{p_0 + p_k}{P_2 + p_0 + p_k}$$

$$\eta = 1 - \frac{p_0 + I_2^{*2} p_{kN}}{S_N I_2^* \cos \varphi_2 + p_0 + I_2^{*2} p_{kN}}$$

(2-54)



求最大效率，最大效率出现在  $\frac{d\eta}{dI_2^*} = 0$  的地方

$$\text{此时: } I_2^* = \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}} \quad p_k = I_2^{*2} p_{kN} = \left( \sqrt{\frac{p_0}{p_{kN}}} \right)^2 p_{kN} = p_0$$

即当不变损耗(铁耗)等于可变损耗(铜耗)时效率最大

# 变压器的并联运行

## 并联运行

定义：几台变压器的一次侧和二次侧分别接到各自公共母线上，共同向负载供电的运行方式。

优点： (1) 可靠性 → 并联运行时，如果某台变压器发生故障，可以把它从中间切除检修，而电网能够继续供电

(2) 经济性

↓

可以根据负载大小调整投入并联运行的台数，以提高效率。可以减少总的备用容量，并可随着用电量的增加分批增加新的变压器。

# 变压器的并联运行

## 并联运行的理想情况

- (1) 空载时并联的变压器之间没有环流;
- (2) 负载时能够按照各台变压器的容量合理地分担负载。
- (3) 各变压器的电流应为同相。

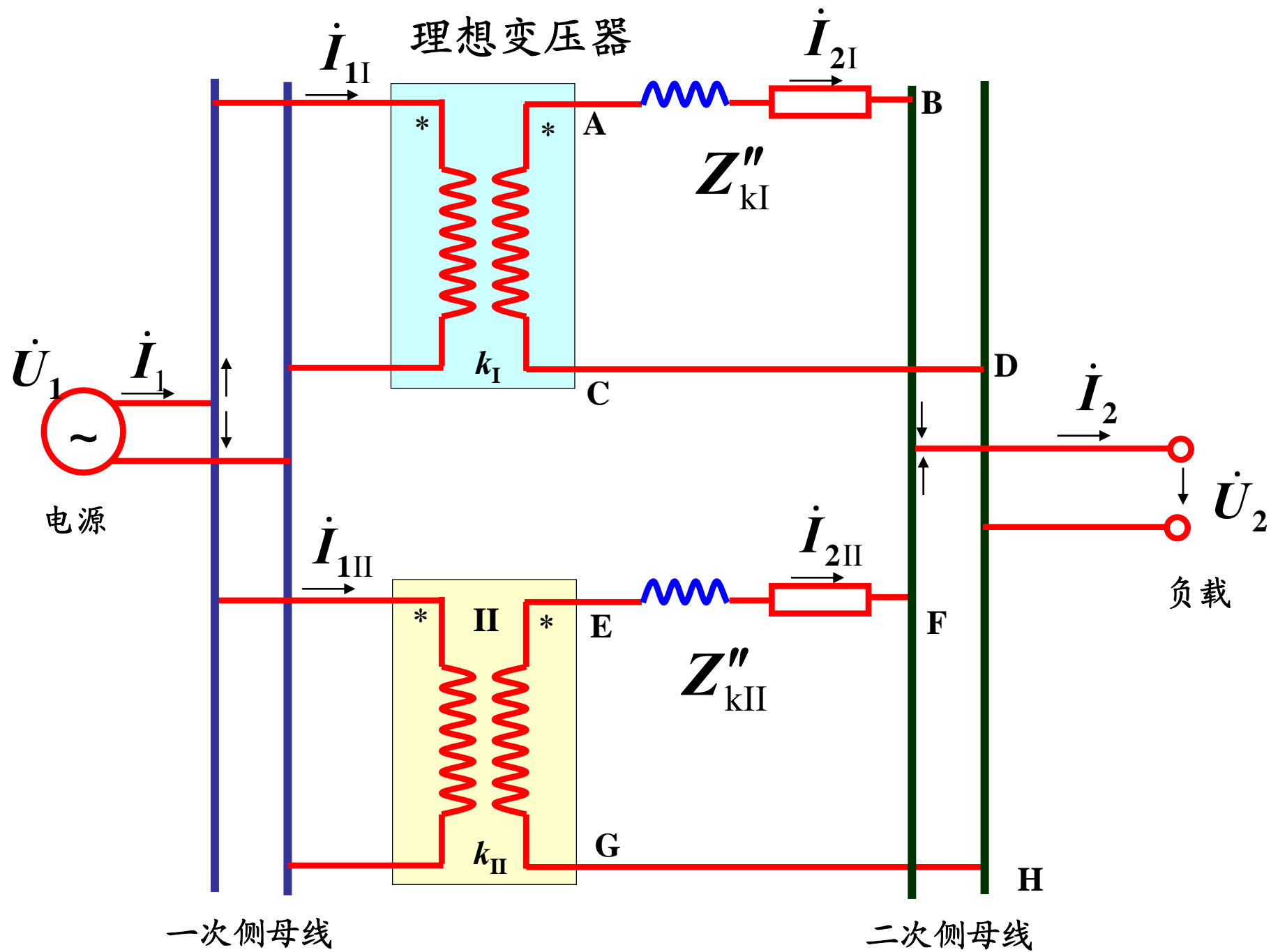
# 变压器的并联运行

## 并联运行理想条件

- (1) 各变压器的原、副边的额定电压分别相等，即变比相等；
- (2) 各变压器的联接组号相同
- (3) 各变压器的短路阻抗标么值相等，且短路阻抗角也相同。

# 变压器的并联运行



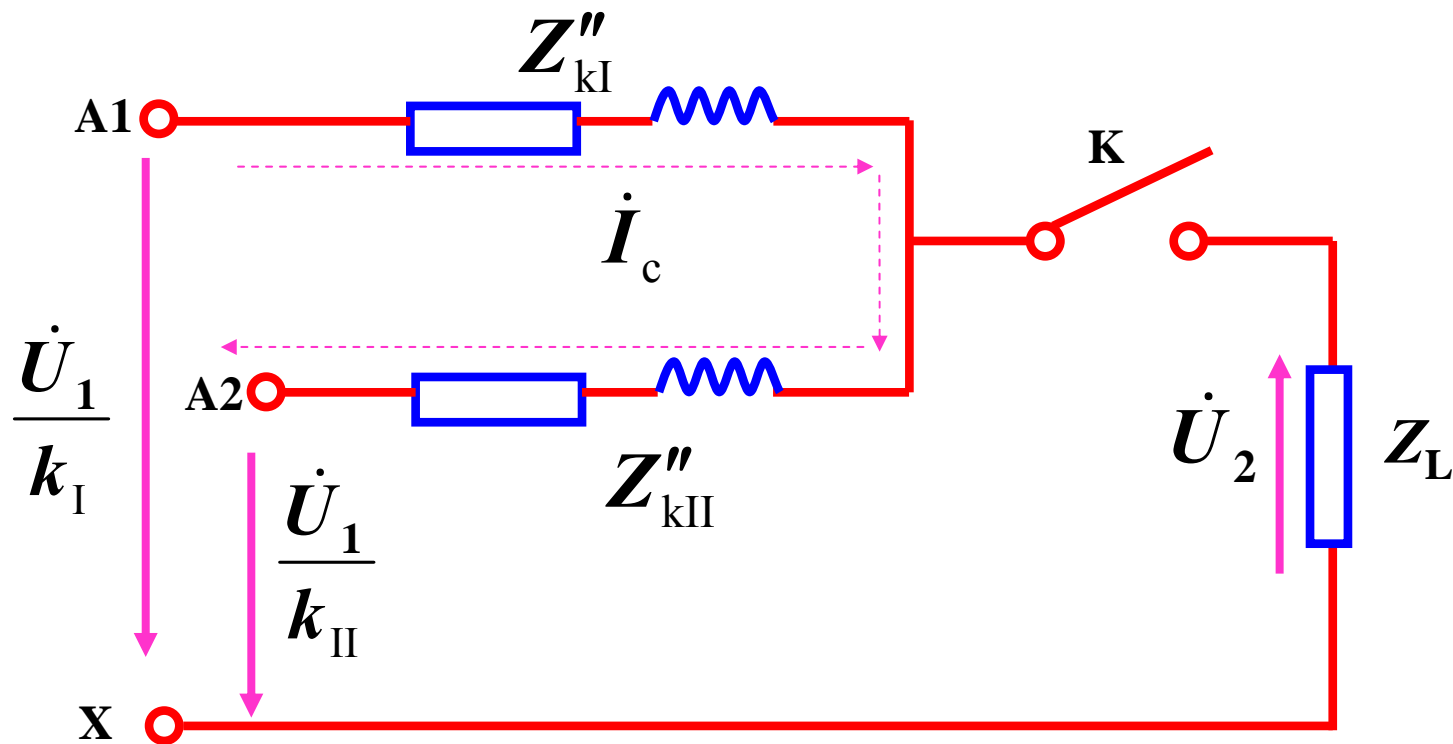


# 变压器的并联运行

## 变比不等时的并联运行

空载时有环流:

$$\dot{I}_c = \frac{\frac{\dot{U}_1}{k_I} - \frac{\dot{U}_1}{k_{II}}}{Z''_{kI} + Z''_{kII}}$$

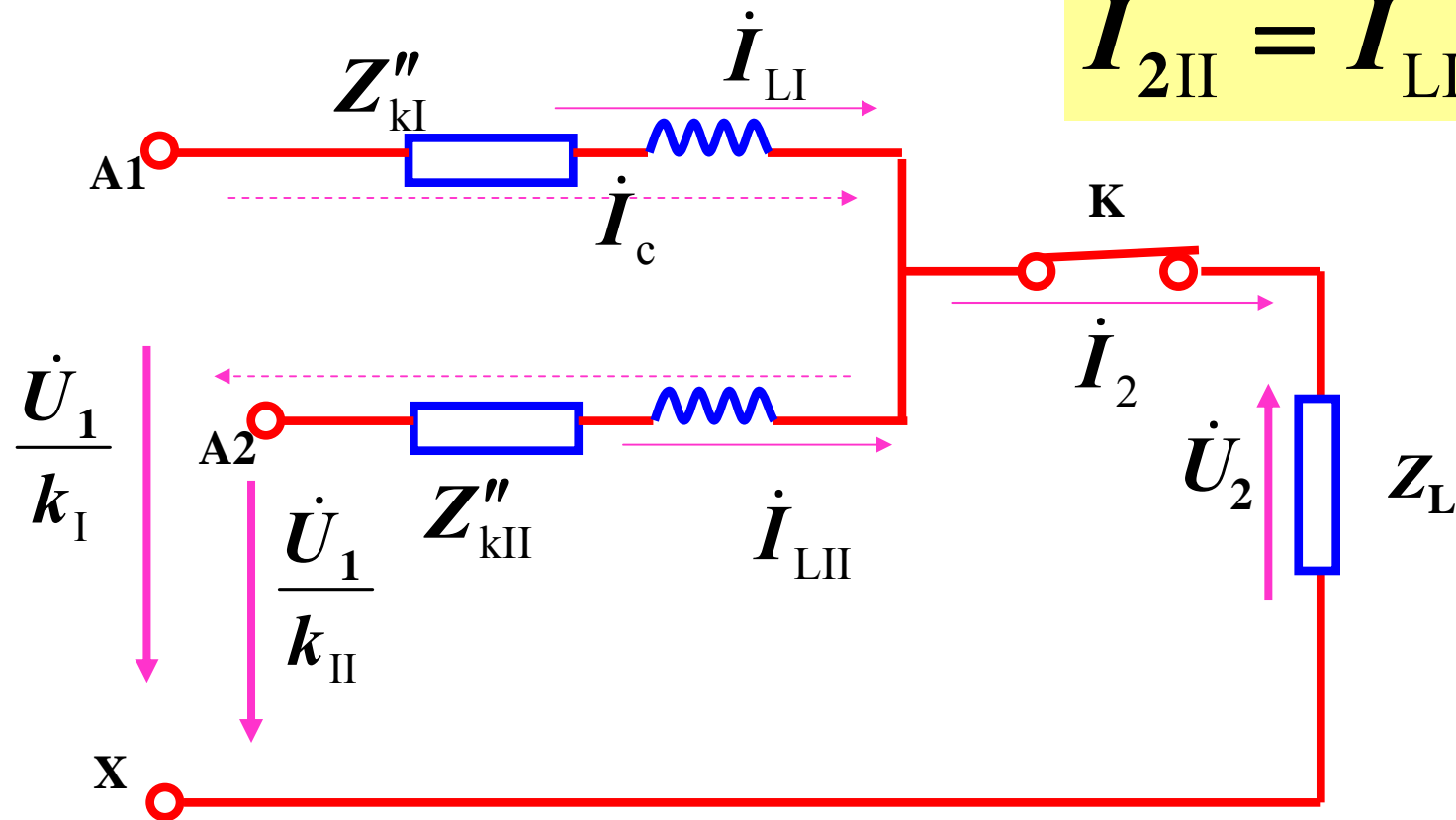


用归算到二次侧的等效电路进行分析



# 变压器的并联运行

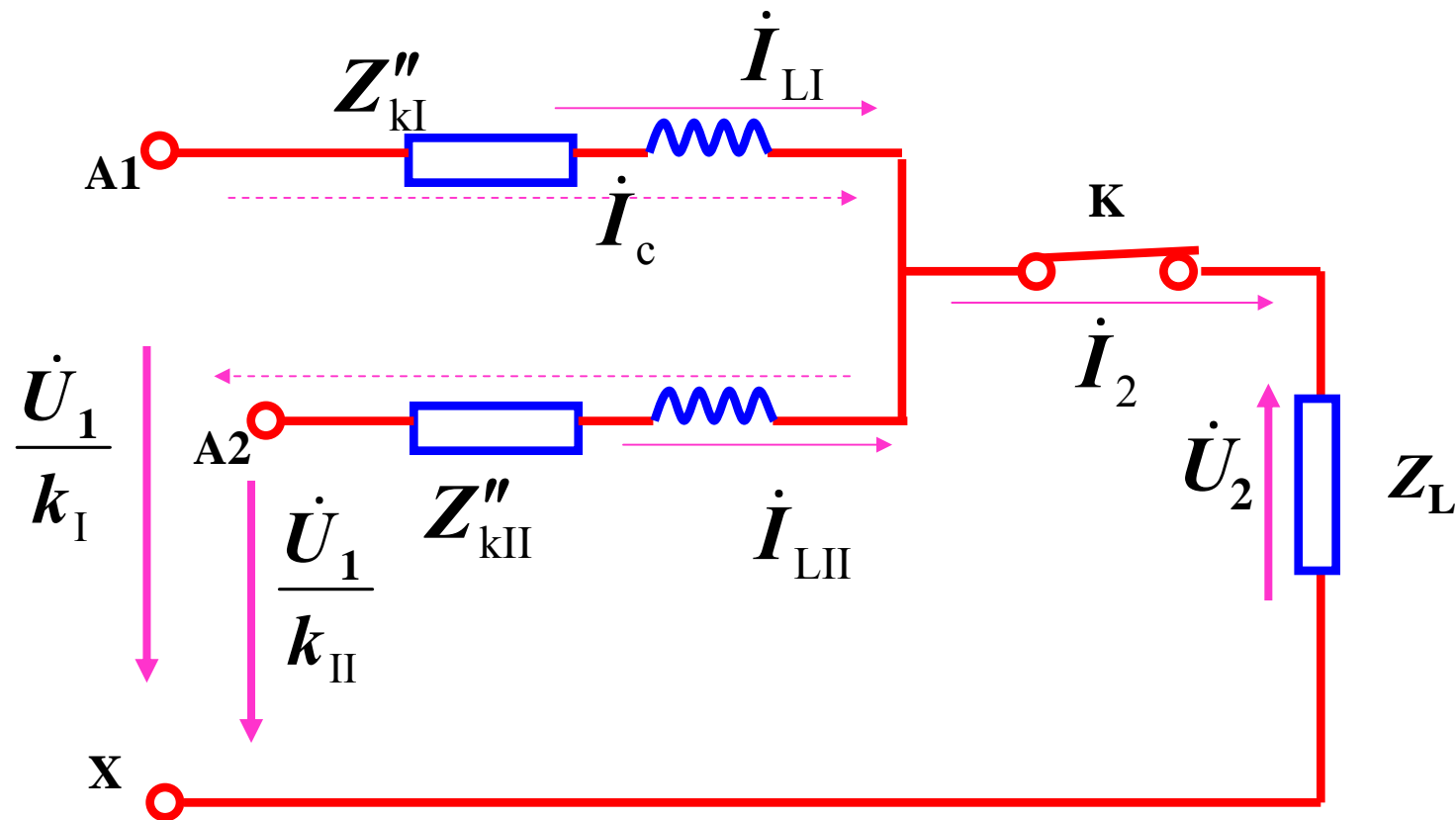
负载运行:



$$\dot{I}_{2I} = \dot{I}_{LI} + \dot{I}_c$$

$$\dot{I}_{2II} = \dot{I}_{LII} - \dot{I}_c$$

# 变压器的并联运行



$$\dot{i}_{LI} + \dot{i}_{LII} = \dot{i}_2$$

$$\dot{i}_{LI} Z''_{KI} = \dot{i}_{LII} Z''_{LII}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{\text{LI}} = \frac{Z''_{\text{kII}}}{Z''_{\text{kI}} + Z''_{\text{kII}}} \dot{I}_2 \\ \dot{I}_{\text{LII}} = \frac{Z''_{\text{kI}}}{Z''_{\text{kI}} + Z''_{\text{kII}}} \dot{I}_2 \end{cases}$$

$$\frac{\dot{I}_{\text{LI}}^*}{\dot{I}_{\text{LII}}^*} = \frac{Z_{\text{kII}}^*}{Z_{\text{kI}}^*}$$

**\*\*结论：**各变压器所分担的负载大小与其短路阻抗标么值成反比，短路阻抗标么值大的变压器分担的负载小

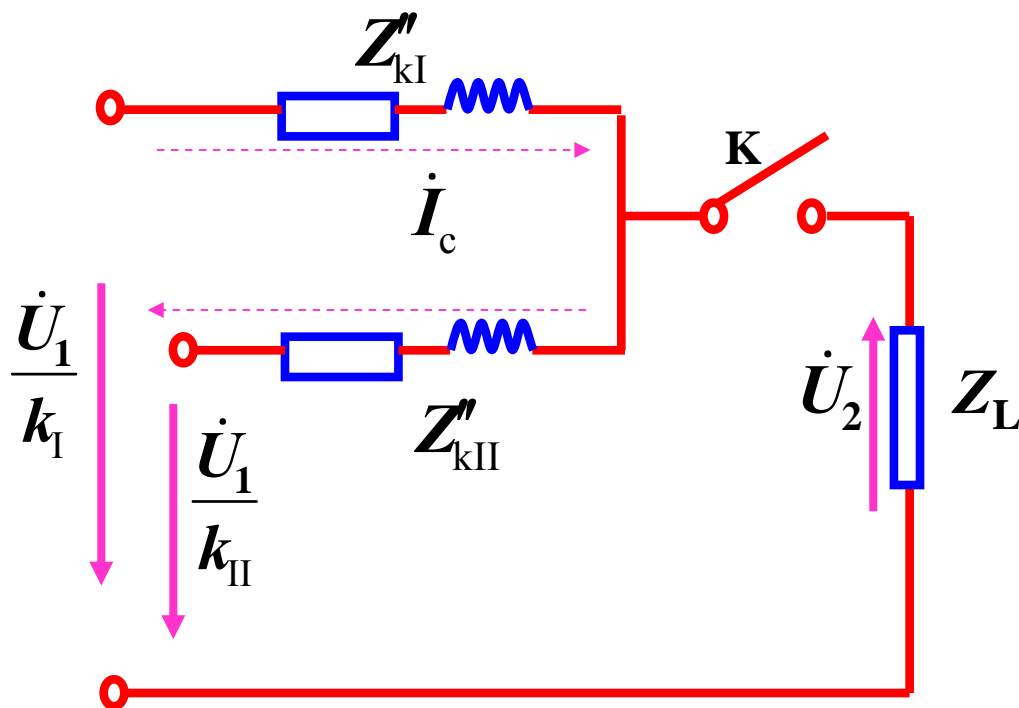
# 并联运行实际条件

- (1) 各变压器的联接组号相同
- (2) 电压比偏差要严格控制 ( $< \pm 0.5\%$ ) ;
- (3) 短路阻抗标么值不要相差太大 ( $< 10\%$ ) , 阻抗角可以有一定差别。

# 联结组别不同时并联运行

组别不同时，二次侧线电动势最少差 $30^\circ$ ，由于短路阻抗很小，产生的环流很大。

## 例题2-5(2)



**\*\*结论：**联结组别不同，绝对不允许并联。

# 并联运行的计算

例2-6和习题2-23是重点

设变压器负载运行二次侧电压保持不变，即：

单相

$$S = I_2 U_2 = I_2 U_{2N} = \frac{I_2}{I_{2N}} (I_{2N} U_{2N}) = I_2^* S_N$$

三相

$$S = \sqrt{3} I_2 U_2 = \sqrt{3} I_2 U_{2N} = \frac{I_2}{I_{2N}} (\sqrt{3} I_{2N} U_{2N}) = I_2^* S_N$$


例2-6:


$$\begin{aligned} S_{\max} &= I_{2I}^* S_{NI} + I_{2II}^* S_{NII} = 1 \times 5000 + 0.934 \times 6300 \\ &= 10884(\text{kVA}) \end{aligned}$$

# 并联运行的计算

## 习题2-23:

变比相同、联结组别相同时无环流


$$\frac{I_{2I}^*}{I_{2II}^*} = \frac{I_{LI}^*}{I_{LII}^*} = \left| \frac{Z_{kII}^*}{Z_{kI}^*} \right|$$


$$I_{2I}^* S_{NI} + I_{2II}^* S_{NII} = S_{\text{Total}}$$

# 自耦变压器



定义：变压器的一次和二次绕组中有一部分绕组是公共绕组的变压器。

注意：串联绕组是一次侧，公共绕组是二次侧。





# 自耦变压器

特点：一次和二次绕组间不仅有磁的耦合，而且还有电的直接联系。



$$k_a = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = 1 + k$$

$$S_{aN} = (U_{1N} + U_{2N})I_{1N} = S_N + \frac{S_N}{k} = S_N + \frac{S_N}{k_a - 1}$$

# 电压互感器

定义：一次绕组接高压线路，二次绕组接到电压表

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad N_1 > N_2$$

相当于变压器的空载运行，把高电压降低为低电压来测量。变压比误差的大小，电压互感器的精度可分为0.5, 1, 3

注意：在使用电压互感器时，二次侧不能短路！！！！否则将产生很大的短路电流

# 电流互感器

定义：一次绕组串联在被测线路，二次绕组接到电流表

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$N_1 < N_2$$

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$$

相当于变压器的短路运行，把大电流降低为低电流来测量。

注意：在使用电流互感器时，二次侧不能开路！！！！

如果二次侧开路，一次侧的线路电流将全部变成激磁电流，使铁心内的磁密急剧增加，二次侧出现过电压。



# 变压器小结

变压器分析的步骤:

1. 建立物理模型，说明变压器“变压”和“功率传递”的原理；
2. 建立数学模型，即变压器的基本方程；
3. 从基本方程出发，通过绕组归算，建立等效电路；
4. 利用等效电路研究各种运行问题。

作业:

**2-2**

**2-14**

**2-15(1)(2)**

**2-16 ~ 2-23**

**2-25**