

# 电力系统分析

## —第3章— 电力系统元件数学模型 ——变压器

主讲教师：符玲

西南交通大学 电气工程学院





# -第3章- 电力系统元件数学模型——变压器



**-第3.1节- 变压器基本概念**

**-第3.2节- 三相双绕组变压器**

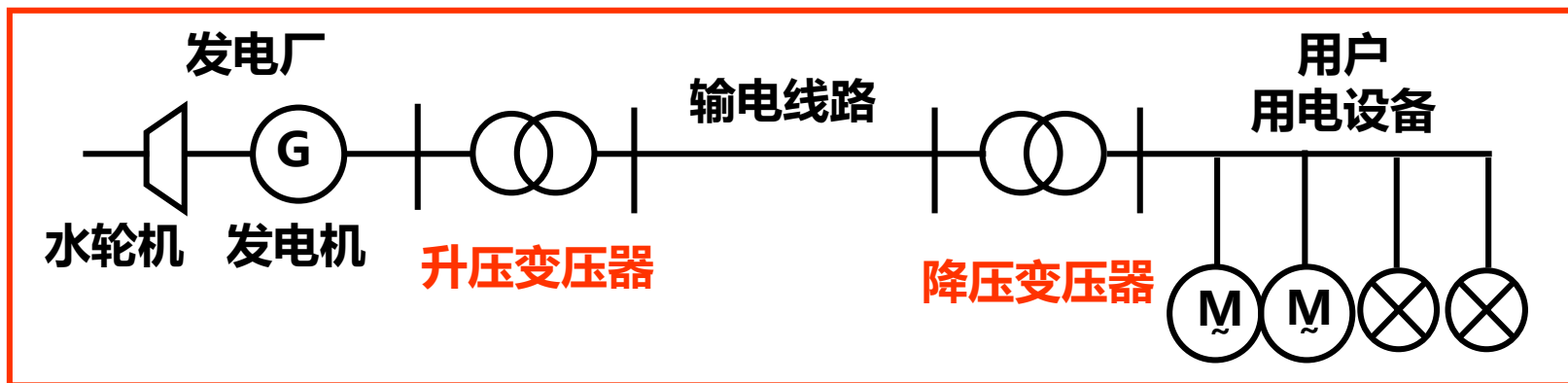
**-第3.3节- 三相三绕组变压器**

**\*-第3.4节- 自耦变压器**

# -第3.1节- 变压器基本概念

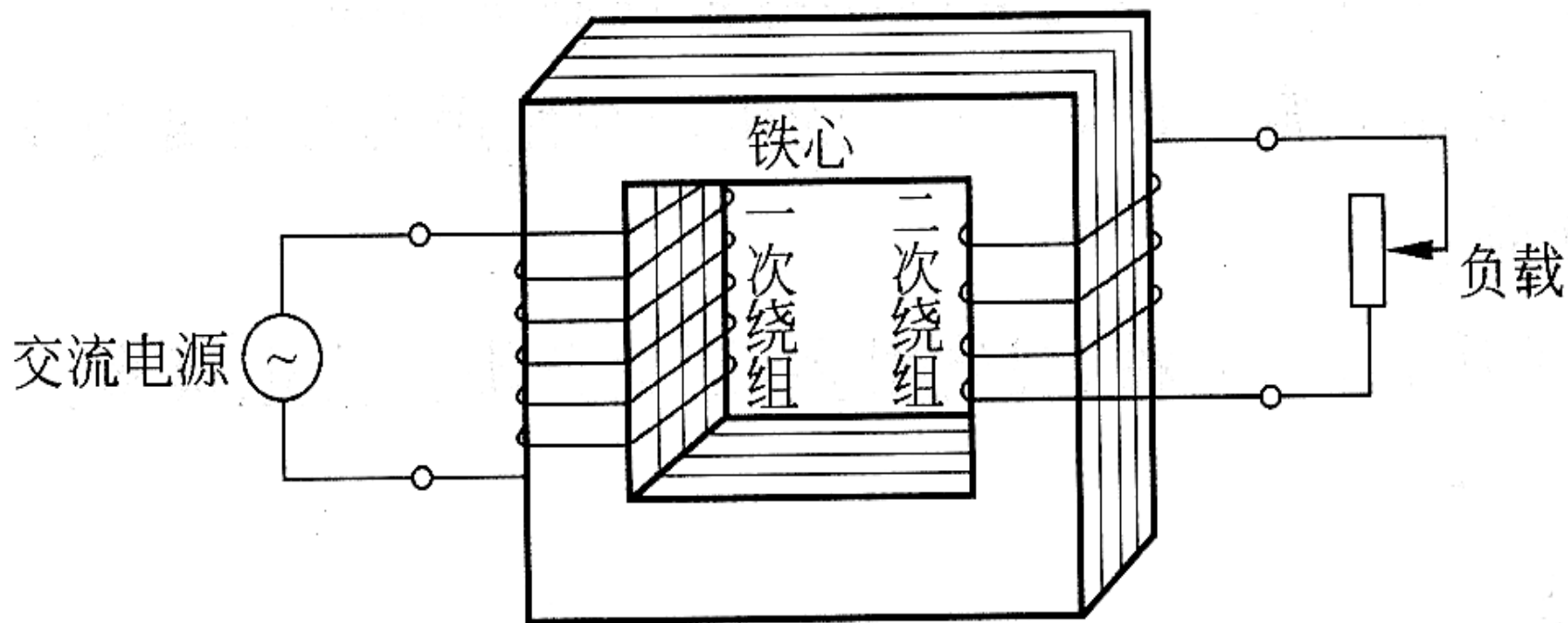
## ➤ 1. 变压器定义及结构

- **变压器**：是一种静止的电能转换器，利用电磁感应原理，将一种电压等级的交流电能转换为另一种电压等级的交流电能。



- **升压变压器**：为将发电机发出的大功率电能经济地输送给远距离的用户，要采用高压输电，以减小线路的损耗和电压降，需要将发电机的电压升高到110~500kV。
- **降压变压器**：用电设备的电压一般在10kV以下，故需用不同规格的变压器将电压逐步降低到不同等级，以满足用户需要。

## -第3.1节- 变压器基本概念



■ 双绕组变压器原理示意图

## -第3.1节- 变压器基本概念



■ 单相双绕组变压器实物图

## -第3.1节- 变压器基本概念



■ 三相双绕组变压器实物图

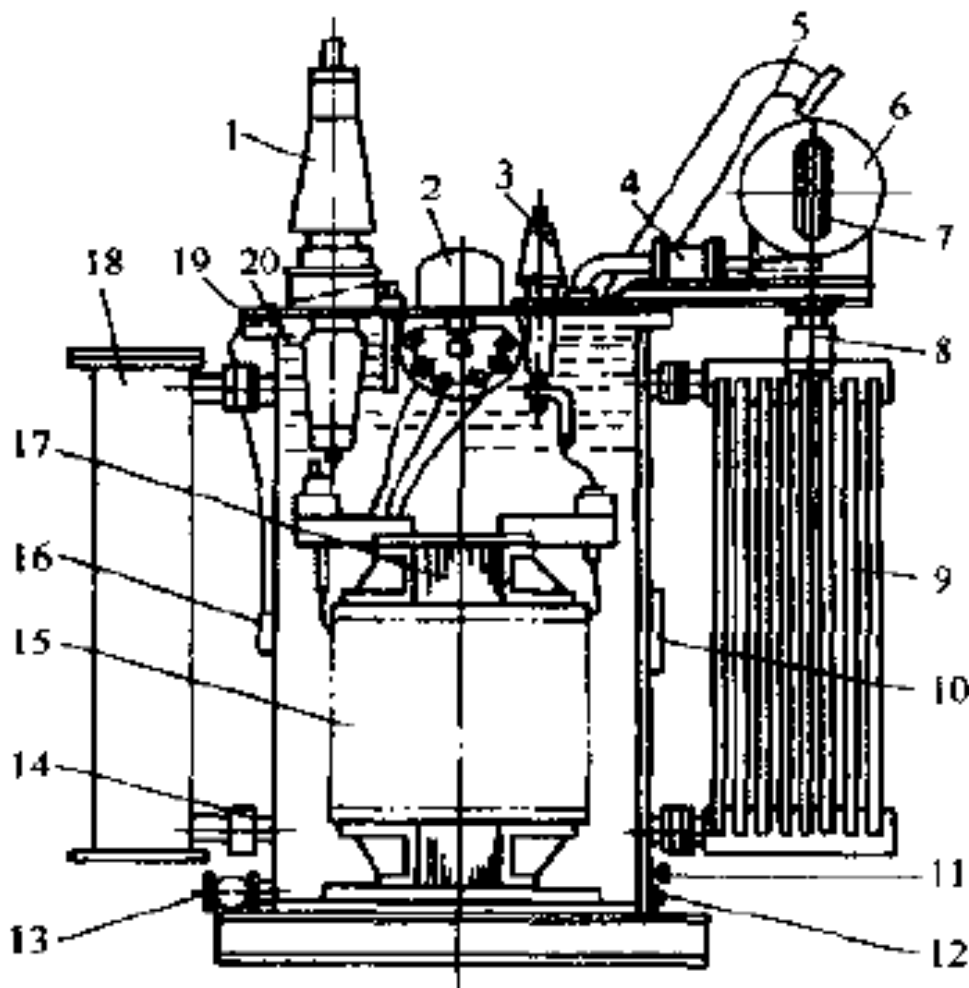


# -第3.1节- 变压器基本概念



■ 三相双绕组变压器实物图

# \*-第3.1节- 变压器基本概念



- 1.高压套管
- 2.分接开关
- 3.低压套管
- 4.瓦斯继电器
- 5.防爆管
- 6.油枕
- 7.油位表
- 8.吸湿器
- 9.散热器
- 10.铭牌
- 11.接地螺栓
- 12.油样活门
- 13.放油阀门
- 14.活门
- 15.绕组
- 16.温度计
- 17.铁芯
- 18.净油器
- 19.油箱
- 20.变压器油

■ 油浸式电力变压器的结构



# \*-第3.1节- 变压器基本概念

## ➤2. 三相变压器的分类

- 电力变压器：电力系统中的升压和降压设备，总容量约为系统总发电量的6~8倍，有升压变、降压变、配电变、联络变等多种。
  - 容量为**R10**系列，即  $\sqrt[10]{10} = 1.259$ 倍的关系。
  - 630kVA以下为**小型变**
  - 800~6300kVA为**中型变**
  - 8000~63000kVA为**大型变**
  - 90000kVA以上为**特大变**。
- **分类方法：**
  - ①按**相数**分：单相、三相；
  - ②按**每相线圈数**分：双绕组变压器、三绕组变压器；
  - ③按**线圈排列**方式分：同心式、交叠式；
  - ④按**冷却方式**分：油浸自冷、油浸风冷、油浸水冷、强迫油循环风冷、强迫油循环水冷。

# \*-第3.1节- 变压器基本概念

- 1) 按**磁路系统**分：
  - ①**单相变压器组**：磁路完全分开，通常组成特大型变压器；
  - ②**三相心式变压器**：磁路互相关联，不对称运行时，三相磁势相量之和不等于零，漏磁通会发生变化。
- 2) 按**三相绕组的连接方式**分：
  - $Y_0/\Delta-11$ 、 $Y/\Delta-11$ 、 $Y_0/Y_0-12$ 、 $\Delta/Y_0-11$   
或表示为  $YNd11$ 、 $Yd11$ 、 $YNyn0$ 、 $Dyn11$
- 3) 按**电磁耦合方式**分：
  - ①**普通变压器**：高低压绕组之间只有磁耦合关系；
  - ②**自耦变压器**：高低压绕组之间不但有磁耦合，还有电的直接联系。

# \*-第3.1节- 变压器基本概念

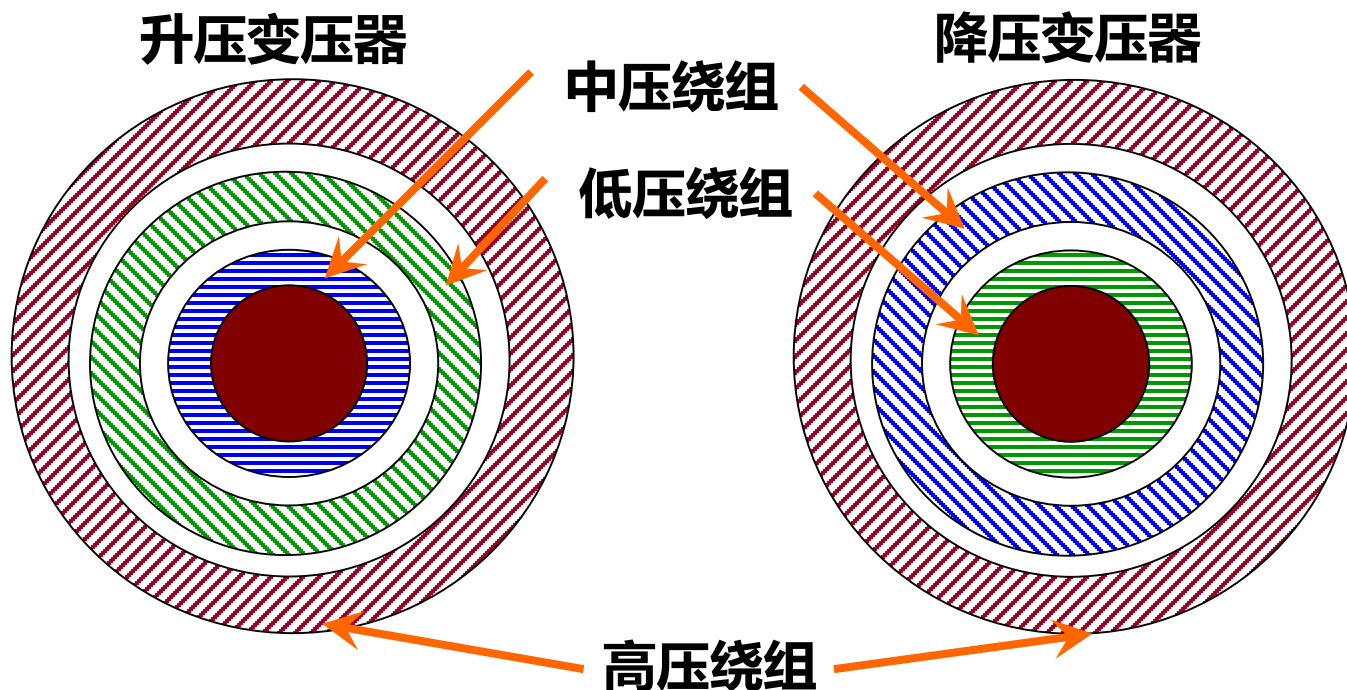
## • 4) 按调压方式分:

- ①**普通变压器**: 不能带负荷调压, 但高压侧有多个分接头, 如630kVA以下有  $U_N \pm 5\%$  两个分接头, 大容量变压器  $U_N \pm 2 \times 2.5\%$  四个分接头, 还有其它的方案;
- ②**有载调压器**: 高压绕组的分接头切换开关可以在运行时切换, 能够随时调压, 适用于电压变化范围较大的场合, 一般有**6**或**8**个分接头, 即
$$U_N \pm 3 \times 2.5\% \text{ 和 } U_N \pm 4 \times 2\%$$
- ③**移相变压器**: 不但能调节输出电压的大小, 还能调节电压的相位控制有功功率。

# \*-第3.1节- 变压器基本概念

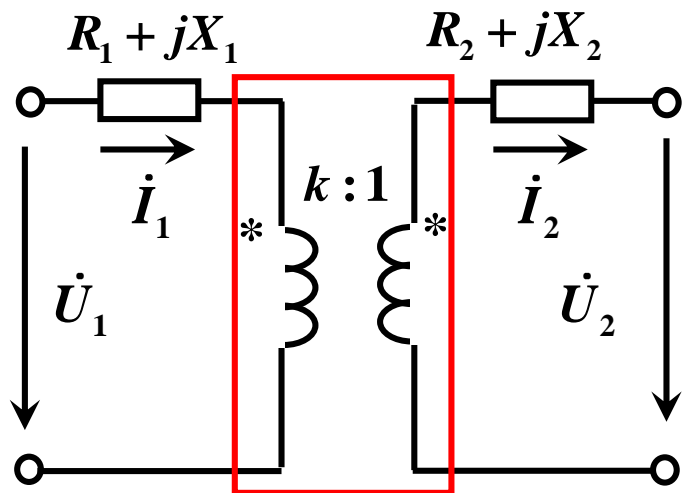
## ➤ 3. 三相变压器的高中低3个绕组的排列方式

- 升压变压器
  - 高压绕组在外，低压绕组在中间，中压绕组在最里边
- 降压变压器
  - 高压绕组在外，中压绕组在中间，低压绕组在最里边



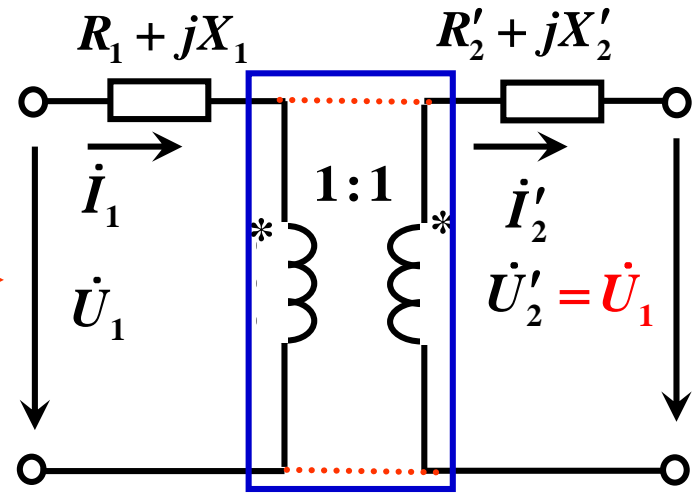
## -第3.2节- 三相双绕组变压器

### ➤ 1. 二次侧绕组归算



2侧绕组归算前的耦合等值电路

电压归算



2侧绕组归算后的耦合等值电路

- 其中变比

$$k = U_{1N} / U_{2N}$$

- 归算后的2侧参数

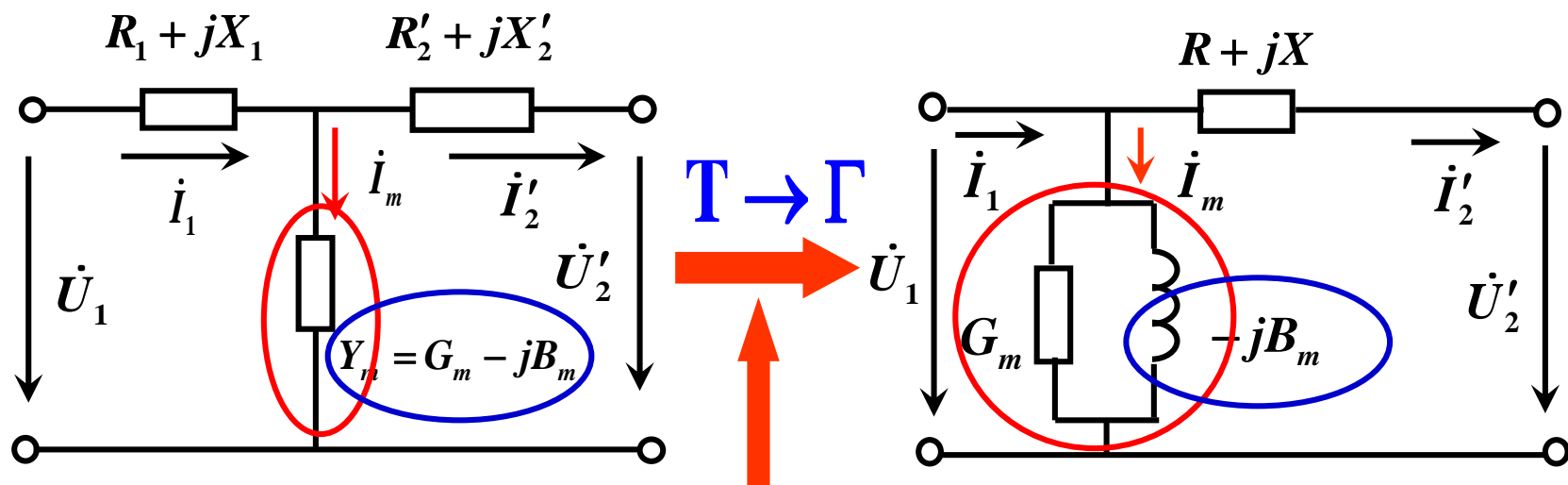
$$I'_2 = I_2 / k, \quad \dot{U}'_2 = k \dot{U}_2 = \dot{U}_1$$

$$R'_2 = k^2 R_2, \quad X'_2 = k^2 X_2$$

等值原则：去掉磁路换电路，变量(电压电流)一致算参数



## -第3.2节- 三相双绕组变压器



$\dot{I}_m$  很小, 为额定电流的0.5%~2%

- 绕组电阻  $R = R_1 + R'_2 = R_1 + k^2 R_2$
- 变压器漏抗  $X = X_1 + X'_2 = X_1 + k^2 X_2$
- 励磁导纳  $Y_m = G_m - jB_m$

$R$  —— 电阻

$X$  —— 电抗

$G_m$  —— 电导

$B_m$  —— 电纳

$k$  —— 变比

## -第3.2节- 三相双绕组变压器



### ➤ 2. 变压器的铭牌数据 (厂家给出)

- 1) 额定容量  $S_N$  (MVA)
  - 2) 额定电压  $U_{1N}/U_{2N}$  (kV)
  - 3) 额定电流  $I_N$  (A)
- }  $S_N = \sqrt{3}U_N I_N$

- 4) 短路试验参数

- 短路损耗(kW):  $P_k$
- 阻抗电压(%):  $U_k \%$



绕组电阻  $R$   
线圈漏电抗  $X$

- 5) 空载试验参数

- 空载损耗(kW):  $P_0$
- 空载电流(%):  $I_0 \%$



励磁电导  $G_m$   
励磁电纳  $B_m$

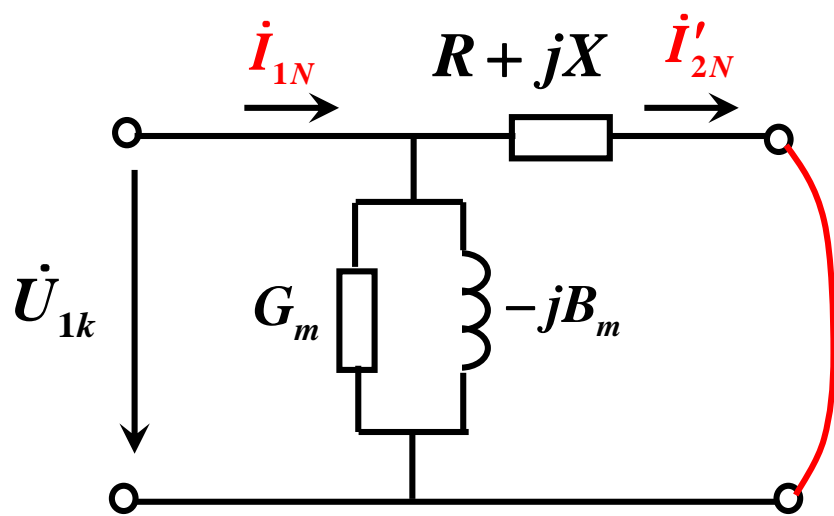
- 其它参数还有连接组别、允许温升等。

**二次短路和空载, 两种试验搞清楚**

## -第3.2节- 三相双绕组变压器

### ➤ 3. 短路试验——确定 $R$ 参数

- **短路试验**：低压侧(如**2**侧)三相短路，高压侧(如**1**侧)加可调节的且逐渐增大的三相对称电压，当电流达到额定电流  $I_{1N}$ 。测得变压器消耗的有功功率  $P_k$ (短路损耗)；测得1侧线电压  $U_{1k}$ 。



- 因为：  $U_{1k} \ll U_{1N}$
- 所以：励磁电流和相应的铁芯损耗可忽略，短路损耗即为额定电流时高低压三相绕组的总铜耗。

$$R = \frac{P_k U_{1N}^2}{1000 S_N^2} (\Omega)$$

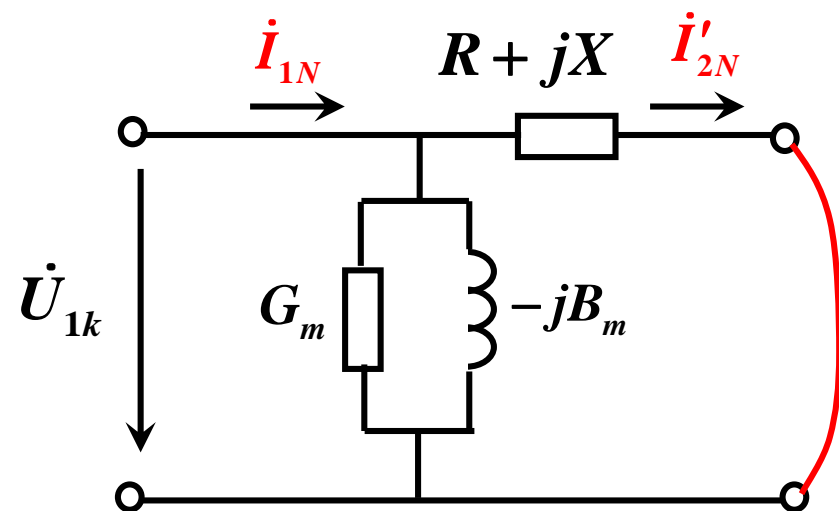
• 故：  $P_k = 3 I_{1N}^2 R = 3 \left( \frac{S_N}{\frac{3}{U_{1N} \sqrt{3}}} \right)^2 R = \frac{S_N^2}{U_{1N}^2} R \Rightarrow R = \frac{P_k U_{1N}^2}{S_N^2} (\Omega)$

$P_k$ 、 $U_{1N}$ 、 $S_N$ 单位分别为kW、kV、MVA

## -第3.2节- 三相双绕组变压器



### ➤ 3. 短路试验——确定X参数



- 短路电压百分比  $U_k \% = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} \times 100$
- 因为  $R \ll X$   $R$  引入的电压降可忽略

$$\begin{aligned} \text{故 } U_{1k} &= \sqrt{3} \sqrt{(I_{1N} R)^2 + (I_{1N} X)^2} \\ &= \sqrt{3} I_{1N} \sqrt{R^2 + X^2} \approx \sqrt{3} I_{1N} X \end{aligned}$$

$$\bullet \text{ 所以 } U_k \% = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} \times 100 \approx \frac{\sqrt{3} I_{1N} X}{U_{1N}} \times 100 = \frac{\sqrt{3} \left( \frac{S_N}{3} / \frac{U_N}{\sqrt{3}} \right) X}{U_{1N}} \times 100 = \frac{S_N}{U_{1N}^2} X \times 100$$

$$\Rightarrow X = \frac{U_k \% U_{1N}^2}{S_N} (\Omega)$$

$$X = \frac{U_k \%}{100} \frac{U_{1N}^2}{S_N} (\Omega)$$

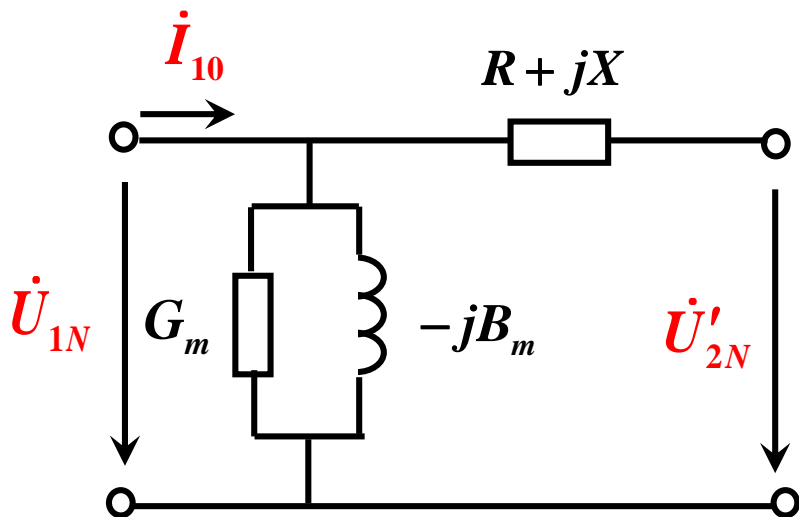
$U_{1N}$ 、 $S_N$  单位分别为kV、MVA

## -第3.2节- 三相双绕组变压器



### ➤ 4. 空载试验——确定 $G_m$ 和 $B_m$ 参数

- 空载试验：** 高压侧(如**2**侧)三相开路，低压侧(如**1**侧)加额定三相对称线电压  $U_{1N}$ 。测得变压器消耗的有功功率  $P_0$ (空载损耗)，测得**1**侧电流  $I_{10}$ (励磁电流  $I_m$ )。



- 由于二次侧开路，全部的一次电流都是励磁电流，**励磁电流比负荷电流小得多**，因此可忽略一次侧绕组的铜耗  $I_{10}^2 R_1$ ，损耗主要是额定电压时的铁芯损耗。

$$P_0 = 3G_m \left( \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} \right)^2 = G_m U_{1N}^2$$

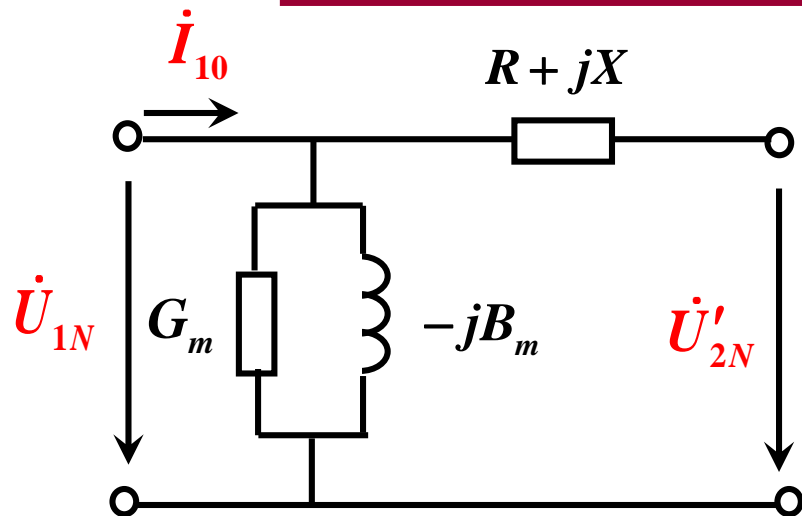
$$G_m = \frac{P_0}{U_{1N}^2} \text{ (S)}$$

$$G_m = \frac{P_0}{1000 U_{1N}^2} \text{ (S)}$$

$P_0$ 、 $U_{1N}$  单位分别为 kW、kV



## -第3.2节- 三相双绕组变压器



- 空载电流百分比

$$I_0 \% = \frac{I_{10}}{I_{1N}} \times 100$$

- 因为  $G_m \ll B_m$ ,  $G_m$  上的分流忽略不计

$$I_m = \sqrt{\left[ G_m (U_{1N} / \sqrt{3}) \right]^2 + \left[ B_m (U_{1N} / \sqrt{3}) \right]^2} \\ \approx B_m (U_{1N} / \sqrt{3}) = B_m U_{1N} / \sqrt{3}$$

- 所以  $I_0 \% = \frac{I_0}{I_{1N}} \times 100 \approx \frac{U_{1N} B_m}{\sqrt{3} I_{1N}} \times 100 = \frac{U_{1N}^2}{S_N} B_m \times 100$

$$\Rightarrow B_m = \frac{I_0 \% S_N}{U_{1N}^2} \quad (S)$$

$$B_m = \frac{I_0 \%}{100} \frac{S_N}{U_{1N}^2} \quad (S)$$

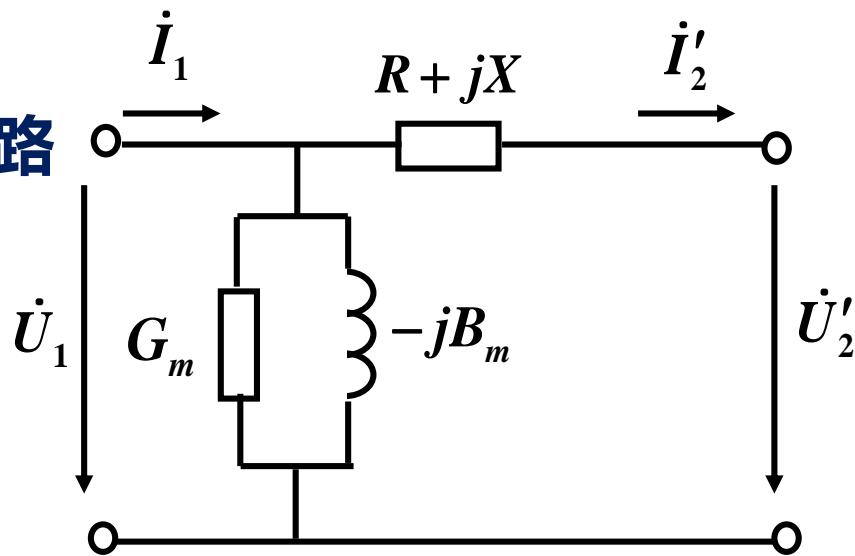
$U_{1N}$ 、 $S_N$  单位分别为 kW、MVA

## -第3.2节- 三相双绕组变压器



### ➤ 5. 变压器参数总结

#### • 等值电路



#### • 电力系统常用单位

#### • SI单位制

$$R = P_k \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} (\Omega),$$

$$X = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} (\Omega)$$

$$G_m = \frac{P_0}{U_{1N}^2} (S)$$

$$B_m = \frac{I_0 \%}{100} \times \frac{S_N}{U_{1N}^2} (S)$$

$$R = \frac{P_k}{1000} \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} (\Omega), \quad X = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} (\Omega)$$

$$G_m = \frac{P_0}{U_{1N}^2} \times 10^{-3} (S), \quad B_m = \frac{I_0 \%}{100} \times \frac{S_N}{U_{1N}^2} (S)$$

**注：单位统一**

$S_N$  —— MVA

$U_{1N}$  —— kV

$P_k$  —— kW

## -第3.2节- 三相双绕组变压器

- SI单位制与电力系统常用单位制的转化

$$R = (P_k \times 10^3) \times \frac{(U_{1N} \times 10^3)^2}{(S_N \times 10^6)^2} = P_k \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} \times 10^{-3} = \frac{P_k}{1000} \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} \quad \Omega$$

$$X = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{(U_{1N} \times 10^3)^2}{S_N \times 10^6} = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} \quad \Omega$$

$$B_m = \frac{I_0 \%}{100} \times \frac{S_N \times 10^6}{(U_{1N} \times 10^3)^2} = \frac{I_0 \%}{100} \times \frac{S_N}{U_{1N}^2} \quad S$$

$$G_m = \frac{P_0 \times 10^3}{(U_{1N} \times 10^3)^2} = \frac{P_0}{U_{1N}^2} \times 10^{-3} \quad S$$

## -第3.2节- 三相双绕组变压器



- 关于变压器参数计算公式的记忆

$U_{1N}^2 / S_N$  相当于一个阻抗，其倒数相当于一个导纳

$$Z_B = \frac{U_{1N}^2}{S_N} \quad Y_B = \frac{S_N}{U_{1N}^2} \quad (\text{基准值})$$

$\frac{U_k \%}{100}$  相当于表示电抗大小的一个“指标”

$\frac{I_0 \%}{100}$  相当于表示电纳大小的一个“指标”

(标么值)

$$X = \frac{U_k \%}{100} \times Z_B = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} \quad \Omega$$

$$B_m = \frac{I_0 \%}{100} \times Y_B = \frac{I_0 \%}{100} \times \frac{S_N}{U_{1N}^2} \quad S$$

## -第3.2节- 三相双绕组变压器



$$R = \frac{P_k}{1000} \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} = \left( \frac{P_k / 1000}{S_N} \right) \cdot \frac{U_{1N}^2}{S_N} \Omega$$

$\frac{P_k / 1000}{S_N}$  为短路损耗与变压器额定容量的比值，  
相当于表示电阻大小的一个“指标”

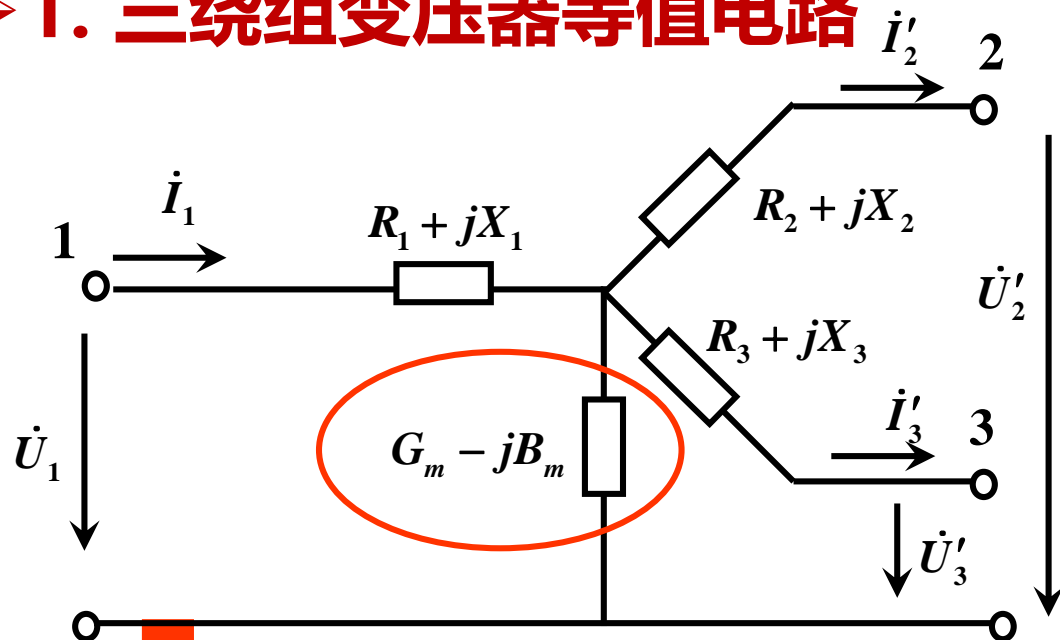
$$G_m = \frac{P_0}{U_{1N}^2} \times 10^{-3} = \left( \frac{P_0 \times 10^{-3}}{S_N} \right) \cdot \frac{S_N}{U_{1N}^2} \text{ S}$$

$\frac{P_0 \times 10^{-3}}{S_N}$  为空载损耗与变压器额定容量的比值，  
相当于表示电导大小的一个“指标”

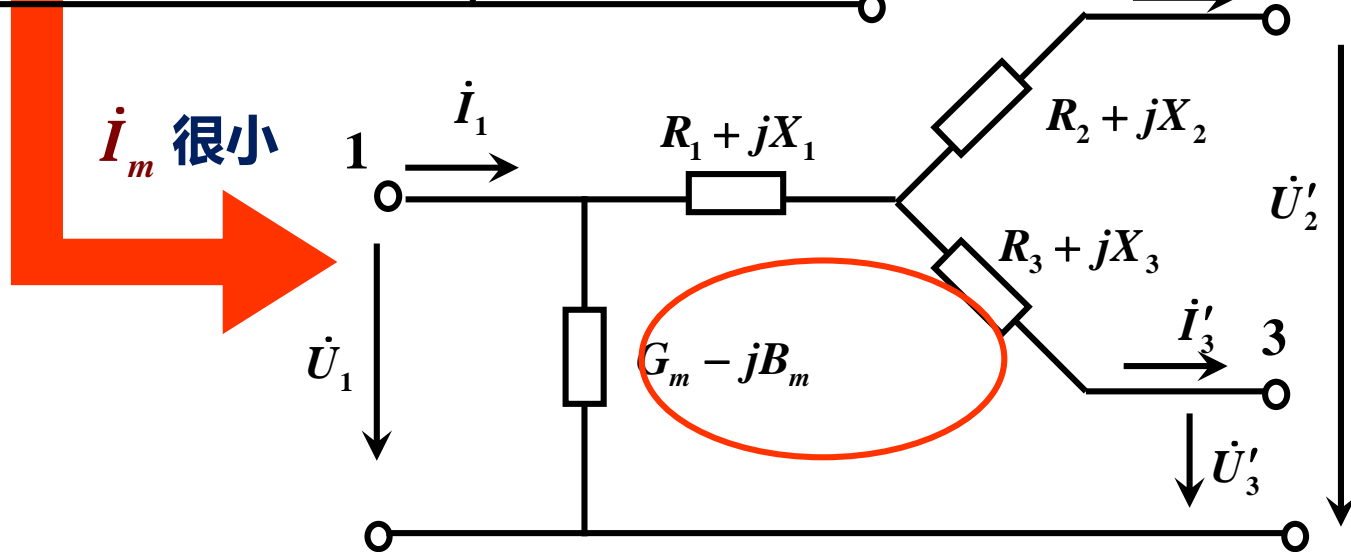


## -第3.3节- 三相三绕组变压器

### ➤ 1. 三绕组变压器等值电路

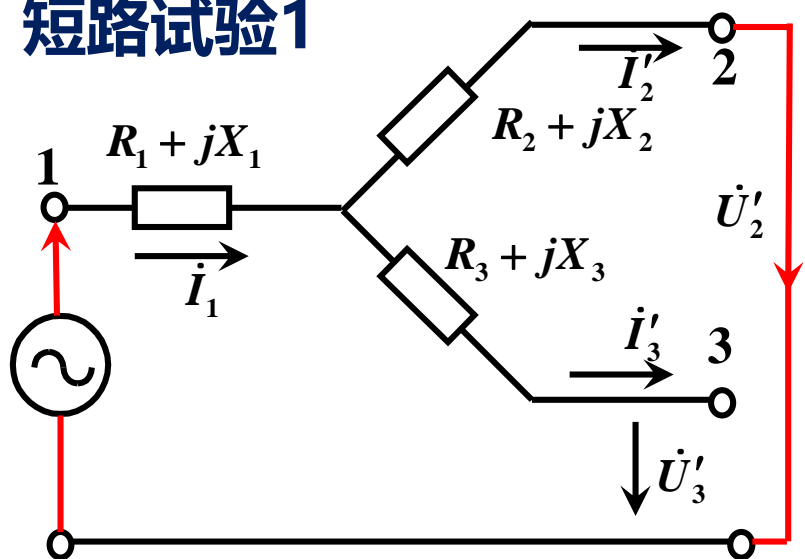


- $\Gamma$ -Y等值电路
- 三个短路试验求三个绕组的电阻和等值漏抗;
- 空载试验的空载损耗和空载电流求励磁支路的导纳。

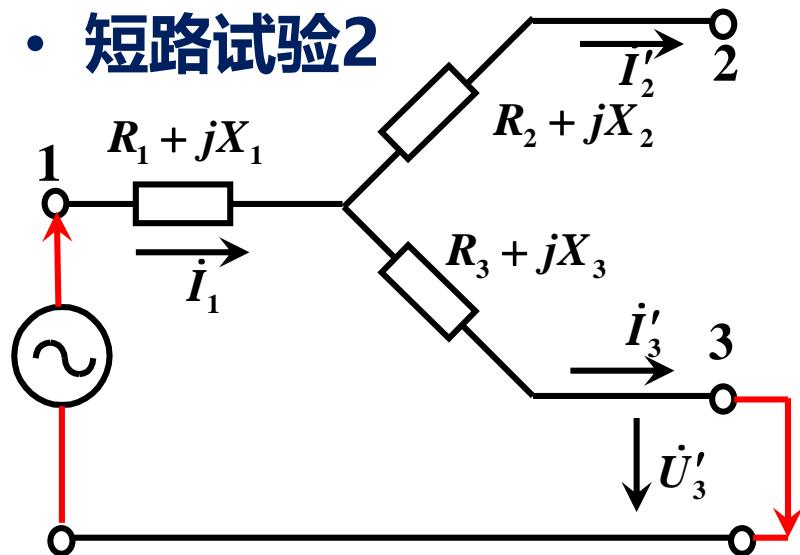


## -第3.3节- 三相三绕组变压器

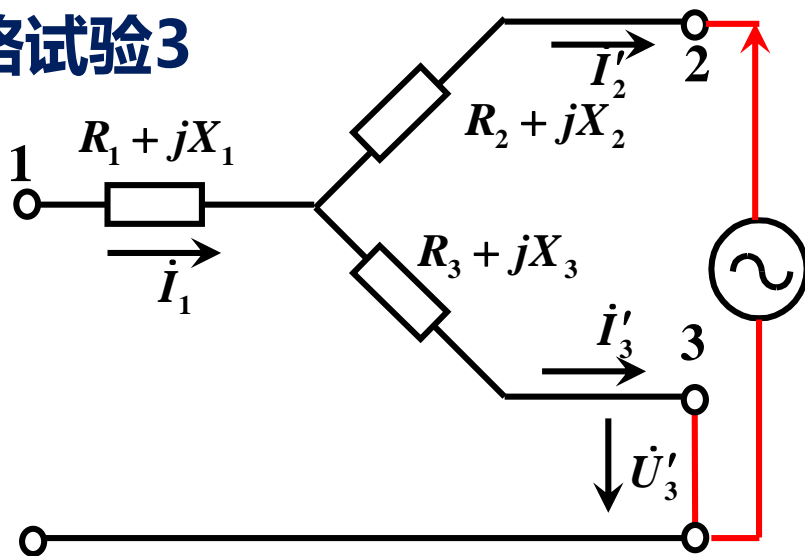
### • 短路试验1



### • 短路试验2



### • 短路试验3



✓三个短路试验求三个绕组的电阻和等值漏抗

✓空载试验的空载损耗和空载电流求励磁支路的导纳

## -第3.3节- 三相三绕组变压器



### ➤ 2. 三绕组变压器额定容量

- 1) I类额定容量比：100/100/100（升压变压器）

- 高/中/低压绕组的额定容量均等于变压器容量

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

- 2) II类额定容量比：100/100/50（升或降压变压器）

- 低压绕组的额定容量等于变压器额定容量的50%
  - 低压绕组导线截面减小一半，额定电流减小一半

- 3) III类额定容量比：100/50/100（升或降压变压器）

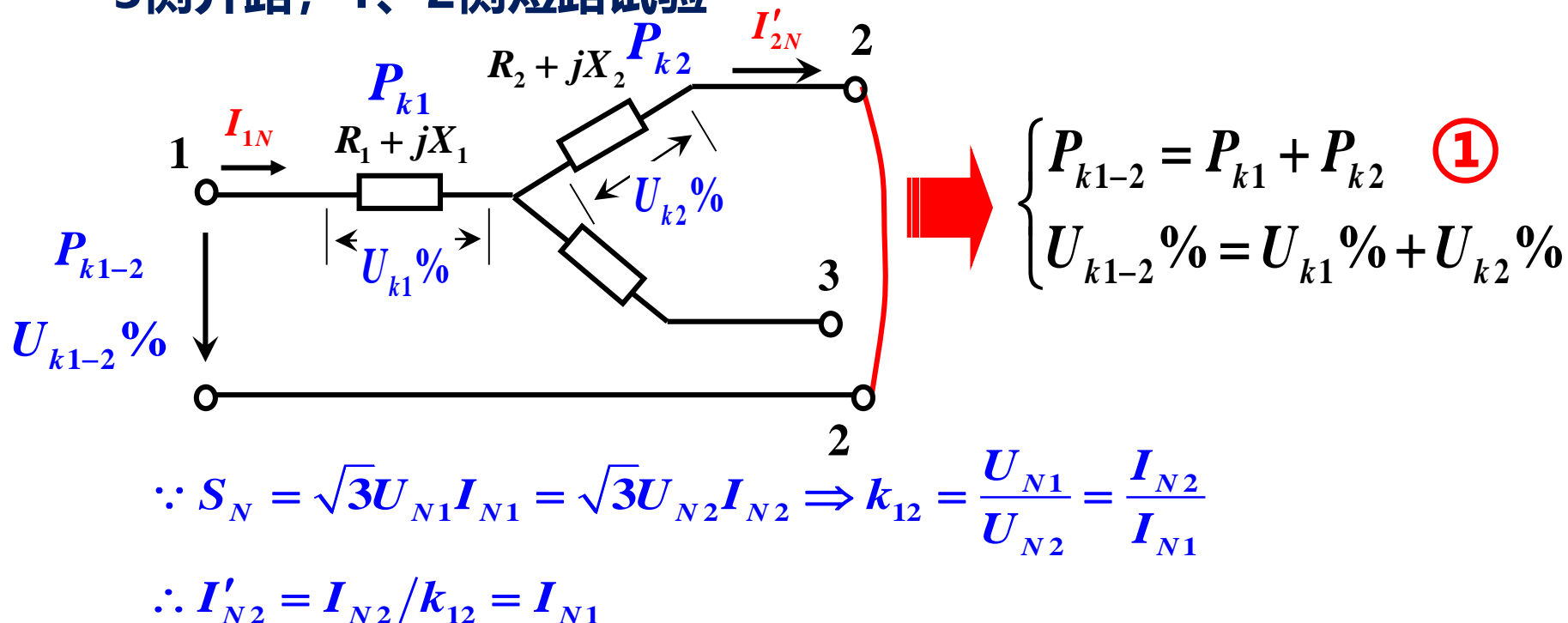
- 中压绕组的额定容量等于变压器额定容量的50%

## -第3.3节- 三相三绕组变压器

### ➤ 3. I类容量比变压器的参数归算

#### ➤ I类容量比变压器的短路试验

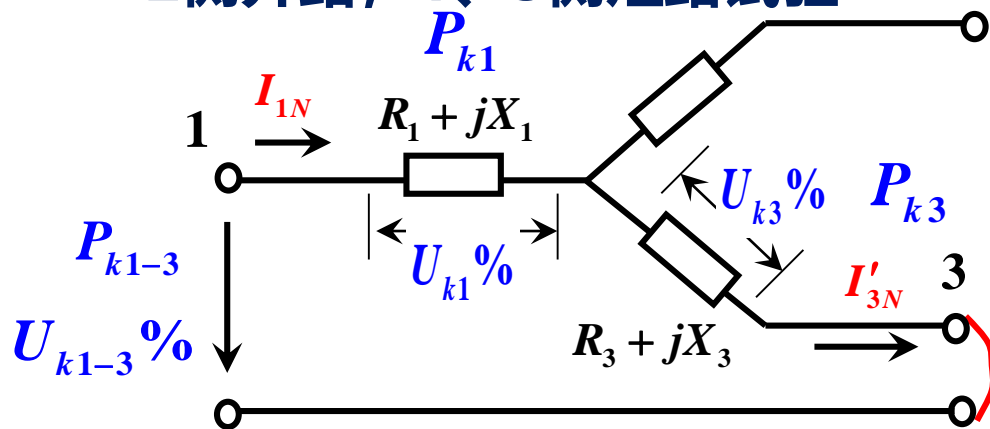
- 3侧开路，1、2侧短路试验



若绕组容量相等，额定电流折算到同一侧后也相等。1、2绕组的额定电流折算到1侧后相等。在1绕组升压时，1、2绕组同时达到额定电流。

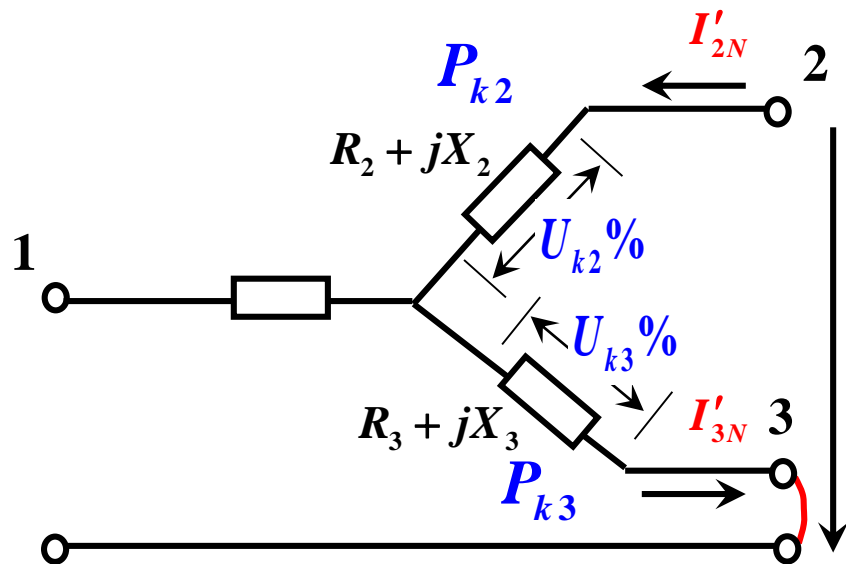
# -第3.3节- 三相三绕组变压器

## • 2侧开路, 1、3侧短路试验



$$\begin{cases} P_{k1-3} = P_{k1} + P_{k3} \quad \textcircled{2} \\ U_{k1-3}\% = U_{k1}\% + U_{k3}\% \end{cases}$$

## • 1侧开路, 2、3侧短路试验



$$\begin{cases} P_{k2-3} = P_{k2} + P_{k3} \quad \textcircled{3} \\ U_{k2-3}\% = U_{k2}\% + U_{k3}\% \end{cases}$$



## -第3.3节- 三相三绕组变压器



- 分别联立①②③方程组，得

$$\begin{cases} P_{k1-2} = P_{k1} + P_{k2} \\ P_{k1-3} = P_{k1} + P_{k3} \\ P_{k2-3} = P_{k2} + P_{k3} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{k1} = 0.5(P_{k1-2} + P_{k1-3} - P_{k2-3}) \\ P_{k2} = 0.5(P_{k1-2} + P_{k2-3} - P_{k1-3}) \\ P_{k3} = 0.5(P_{k1-3} + P_{k2-3} - P_{k1-2}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{k1-2} \% = U_{k1} \% + U_{k2} \% \\ U_{k1-3} \% = U_{k1} \% + U_{k3} \% \\ U_{k2-3} \% = U_{k2} \% + U_{k3} \% \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_{k1} \% = 0.5(U_{k1-2} \% + U_{k1-3} \% - U_{k2-3} \%) \\ U_{k2} \% = 0.5(U_{k1-2} \% + U_{k2-3} \% - U_{k1-3} \%) \\ U_{k3} \% = 0.5(U_{k1-3} \% + U_{k2-3} \% - U_{k1-2} \%) \end{cases}$$

## -第3.3节- 三相三绕组变压器



### ➤ I类容量比变压器的短路试验

- 求出三个绕组的电阻和等值电抗如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{P_{k1}}{1000} \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} \quad (\Omega) \\ R_2 = \frac{P_{k2}}{1000} \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} \quad (\Omega) \\ R_3 = \frac{P_{k3}}{1000} \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} \quad (\Omega) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} X_1 = \frac{U_{k1} \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} \quad (\Omega) \\ X_2 = \frac{U_{k2} \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} \quad (\Omega) \\ X_3 = \frac{U_{k3} \%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} \quad (\Omega) \end{array} \right.$$

## -第3.3节- 三相三绕组变压器



### ➤ 4. II类容量比变压器的参数归算

#### ➤ II类容量比变压器的短路试验

- 1、2绕组的额定容量  $S_{1N} = S_{2N} = S_N$

- 3绕组的额定容量  $S_{3N} = 0.5S_N$

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

$$0.5S_N = \sqrt{3}U_{3N}I_{3N}$$

- 1-2、1-3、2-3绕组分别进行短路实验的短路电流不同。

- 1-2侧短路试验可按额定电流测得  $P_{k1-2}, U_{k1-2} \%$

- 2-3侧短路试验按0.5倍额定电流测得  $P'_{k2-3}, U'_{k2-3} \%$

- 1-3侧短路试验按0.5倍额定电流测得  $P'_{k1-3}, U'_{k1-3} \%$

## -第3.3节- 三相三绕组变压器



- 因为：短路损耗与**电流平方**成正比，短路电压与**电流**成正比
- 所以：将测试数据归算到额定条件下（原因是：1-2绕组测试数据是在额定电流下进行的，1-3和2-3是在0.5倍额定电流下进行的），可得以下折算值

$$\begin{cases} P'_{k1-3} = \left(\frac{1}{2} I_{1N}\right)^2 (R_1 + R_3) = \frac{1}{4} I_{1N}^2 (R_1 + R_3) = \frac{1}{4} P_{k1-3} \\ P'_{k2-3} = \left(\frac{1}{2} I_{1N}\right)^2 (R_2 + R_3) = \frac{1}{4} I_{1N}^2 (R_2 + R_3) = \frac{1}{4} P_{k2-3} \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{k1-3} = 4P'_{k1-3} \\ P_{k2-3} = 4P'_{k2-3} \end{cases}$$

## -第3.3节- 三相三绕组变压器



- 因为：短路电压百分数与**电流**成正比

$$\begin{cases} U'_{k1-3} = \left(\frac{1}{2} I_{1N}\right)(X_1 + X_3) = \frac{1}{2} U_{k1-3} \\ U'_{k2-3} = \left(\frac{1}{2} I_{1N}\right)(X_2 + X_3) = \frac{1}{2} U_{k2-3} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{k1-3} \% = 2U'_{k1-3} \% \\ U_{k2-3} \% = 2U'_{k2-3} \% \end{cases}$$

## -第3.3节- 三相三绕组变压器



### ➤ 5. III类容量比变压器的参数归算

#### ➤ III类容量比变压器的短路试验

- II类容量比变压器参数归算到额定条件下：

$$\begin{cases} P_{k1-3} = 4P'_{k1-3} \\ P_{k2-3} = 4P'_{k2-3} \end{cases} \quad \begin{cases} U_{k1-3} \% = 2U'_{k1-3} \% \\ U_{k2-3} \% = 2U'_{k2-3} \% \end{cases}$$

- 同理可得，III类容量比变压器参数归算到额定条件下：

$$\begin{cases} P_{k1-2} = 4P'_{k1-2} \\ P_{k2-3} = 4P'_{k2-3} \end{cases} \quad \begin{cases} U_{k1-2} \% = 2U'_{k1-2} \% \\ U_{k2-3} \% = 2U'_{k2-3} \% \end{cases}$$

## -第3.3节- 三相三绕组变压器



### ➤ 6. 变压器参数归算小结

- 1、我国变压器制造厂提供的短路损耗有的已经归算，有的未归算；**短路电压大多已归算**。是否归算看上标。
- 2、若制造厂提供的数据未经归算，则：
  - 当3侧绕组的额定容量为变压器额定容量的0.5时，1-3和2-3的短路参数要归算；
  - 当2侧绕组的额定容量为变压器额定容量的0.5时，1-2和2-3的短路参数要归算。
- 3、无论三绕组变压器的三个绕组容量大小，**励磁导纳的计算不需要归算**。

## -第3.3节- 三相三绕组变压器



### ➤ 6. 变压器参数归算小结

- 4、公式中额定电压的确定
  - ✓ 要将参数归算到哪一侧，就代入哪一侧的额定电压。  
(代入哪一侧的额定电压，计算出的参数就是归算到该侧的参数)
  - ✓ 切忌各个公式代入不同的额定电压。原因是等值电路必然是归算到同一侧的。

**容量相等仅折算(各绕组的)，容量减半先归算(电压有功)再折算**



## -第3.3节- 三相三绕组变压器

**例：**变压器SFSL1-15000/110,容量比为100/100/50, 实验数据为 $P_{k1-2}\%=120\text{kW}$ ,  $P'_{k1-3}\%=30\text{kW}$ ,  $P'_{k2-3}\%=24\text{kW}$ ,  $U_{k1-2}\%=10$ ,  $U_{k2-3}\%=6$ ,  $U_{k1-3}\%=18$ , 求变压器参数。

**解：**  $P_{k1-3} = 4P'_{k1-3} = 4 \times 30 = 120\text{kW}$

$$P_{k2-3} = 4P'_{k2-3} = 4 \times 24 = 96\text{kW}$$

$$P_{k1} = 0.5(P_{k1-2} + P_{k1-3} - P_{k2-3}) = 0.5(120 + 120 - 96) = 72\text{kW}$$

$$P_{k2} = 0.5(P_{k1-2} + P_{k2-3} - P_{k1-3}) = 0.5(120 + 96 - 120) = 48\text{kW}$$

$$P_{k3} = 0.5(P_{k1-3} + P_{k2-3} - P_{k1-2}) = 0.5(120 + 96 - 120) = 48\text{kW}$$

## -第3.3节- 三相三绕组变压器

$$R_1 = \frac{P_{k1}}{1000} \cdot \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} = \frac{72}{1000} \cdot \frac{110^2}{15^2} = 3.87\Omega$$

$$R_2 = \frac{P_{k2}}{1000} \cdot \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} = \frac{48}{1000} \cdot \frac{110^2}{15^2} = 2.58\Omega$$

$$R_3 = \frac{P_{k3}}{1000} \cdot \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} = \frac{48}{1000} \cdot \frac{110^2}{15^2} = 2.58\Omega$$

因代入的额定电压都是  
110kV，所以所有参数都是  
归算到110kV侧的。

$$U_{k1} \% = 0.5 \times (U_{k1-2} \% + U_{k1-3} \% - U_{k2-3} \%) = 11$$

$$U_{k2} \% = 0.5 \times (U_{k1-2} \% + U_{k2-3} \% - U_{k1-3} \%) = -1$$

$$U_{k3} \% = 0.5 \times (U_{k1-3} \% + U_{k2-3} \% - U_{k1-2} \%) = 7$$

## -第3.3节- 三相三绕组变压器

$$X_1 = \frac{U_{k1} \%}{100} \cdot \frac{U_{1N}^2}{S_N} = \frac{11}{100} \cdot \frac{110^2}{15} = 88.73\Omega$$

$$X_2 = \frac{U_{k1} \%}{100} \cdot \frac{U_{1N}^2}{S_N} = \frac{-1}{100} \cdot \frac{110^2}{15} = -8.07\Omega$$

$$X_3 = \frac{U_{k1} \%}{100} \cdot \frac{U_{1N}^2}{S_N} = \frac{7}{100} \cdot \frac{110^2}{15} = 56.47\Omega$$

其中的一个电抗值为负是由三绕组变压器的结构造成的。而且，必然是居于中间的绕组所对应的电抗值为负。

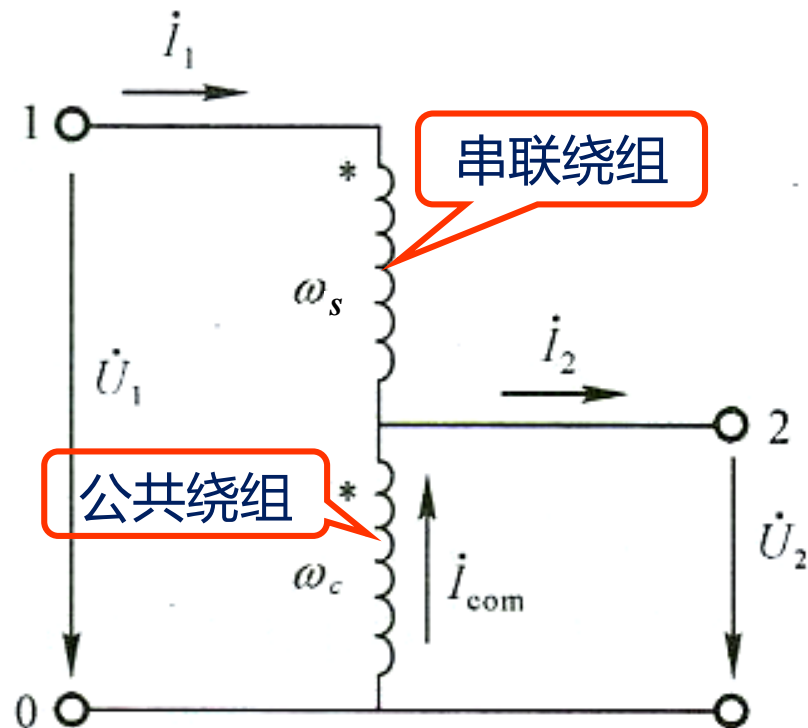
## \* -第3.4节- 自耦变压器

- 自耦变压器的高低压绕组之间不但有**磁耦合**，还有**电的直接联系**。
- 自耦变压器**只能采用Y<sub>0</sub>/Y<sub>0</sub>-12接法**。

- 变比:  $k_{12} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{\omega_s + \omega_c}{\omega_c}$
- 效益系数:  $K_b = \frac{\omega_s}{\omega_s + \omega_c} = 1 - \frac{1}{k_{12}}$

- 绕组电流关系:  $\dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}_{com}$

- 磁势平衡关系:  $\omega_s \dot{I}_1 = \omega_c \dot{I}_{com}$



■ 自耦变压器的单相接线图

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{com} = (k_{12} - 1) I_1 \\ I_{com} = K_b I_2 \\ I_2 = k_{12} I_1 \end{cases}$$

## \* -第3.4节- 自耦变压器

- 端口2的复功率

传导分量

磁耦合分量

$$\tilde{S}_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2^* = \dot{U}_2 (\dot{I}_1^* + \dot{I}_{com}^*) = \dot{U}_2 \dot{I}_1^* + \dot{U}_2 \dot{I}_{com}^*$$

$$\tilde{S}_{st} = \dot{U}_2 \dot{I}_{com}^* = K_b \dot{U}_2 \dot{I}_2^* = K_b \tilde{S}_N$$

- 自耦变压器的额定容量:  $S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N}$
- 磁耦合容量  $S_{st}$  又称为标准容量、设计容量, 仅为总容量的  $K_b$  倍。
- 自耦变压器绕组的用铜量为同容量双绕组变压器的  $K_b$  倍。
- 自耦变压器的铁芯材料用量为同容量双绕组变压器的  $K_b$  倍。

## \* -第3.4节- 自耦变压器

- 自耦变压器的短路电压百分数为同容量双绕组变压器的  $K_b$  倍。
- 自耦变压器的短路损耗为同容量双绕组变压器的  $K_b$  倍。
- 自耦变压器的等值电路完全等同于普通变压器，参数的计算方法也相同，只是计算时要采用额定容量。
- 自耦变压器若存在第三绕组(与其它两个绕组只有磁耦合，没有电的联系)，通常接为三角形，以削弱谐波。
- 自耦变压器第三绕组的容量一般为额定容量的  $K_b$  倍。归算方法与普通三绕组变压器相同。



End  
谢谢

