



# 三相变压器





# 目录

CONTENTS

01 三相变压器概述

02 变压器的并联运行

03 变压器的不对称运行

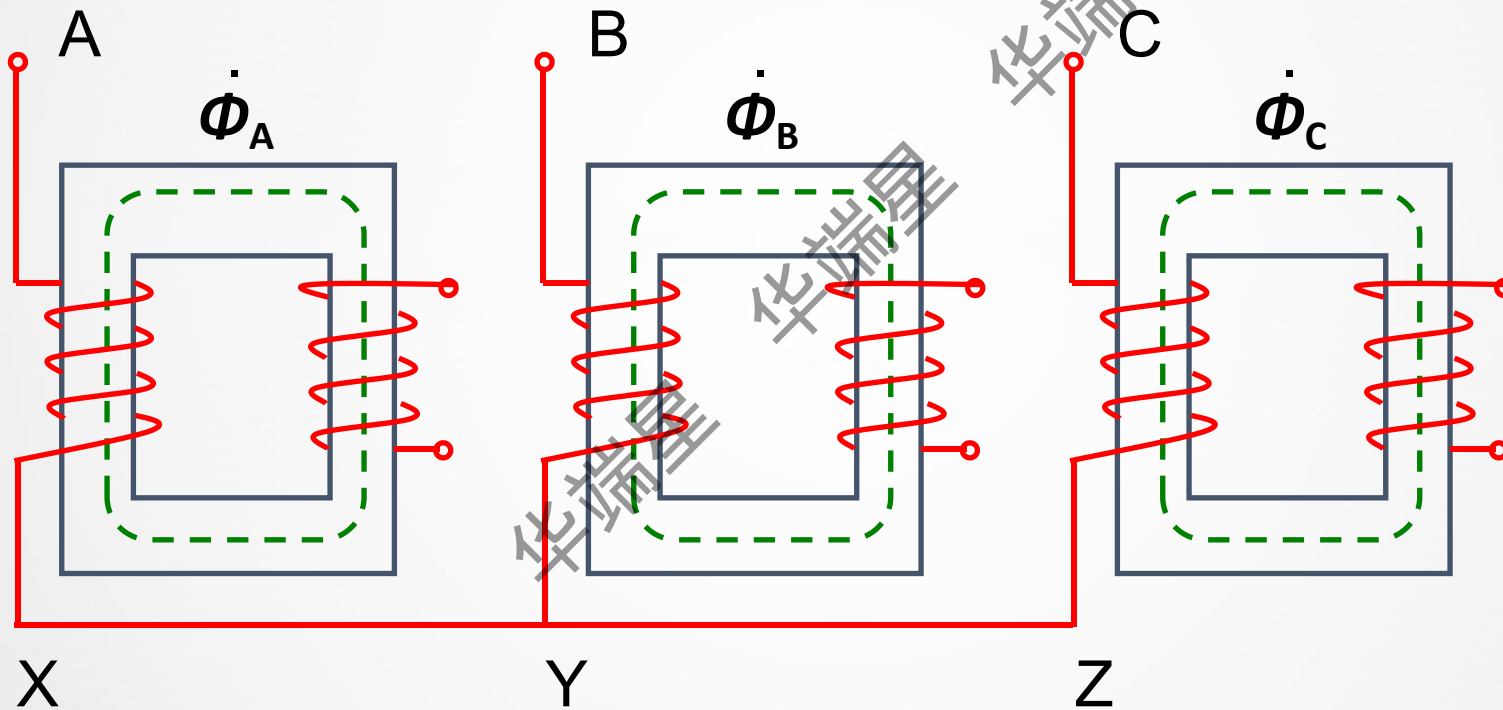
01

# 三相变压器概述

---

# 一、三相变压器概述

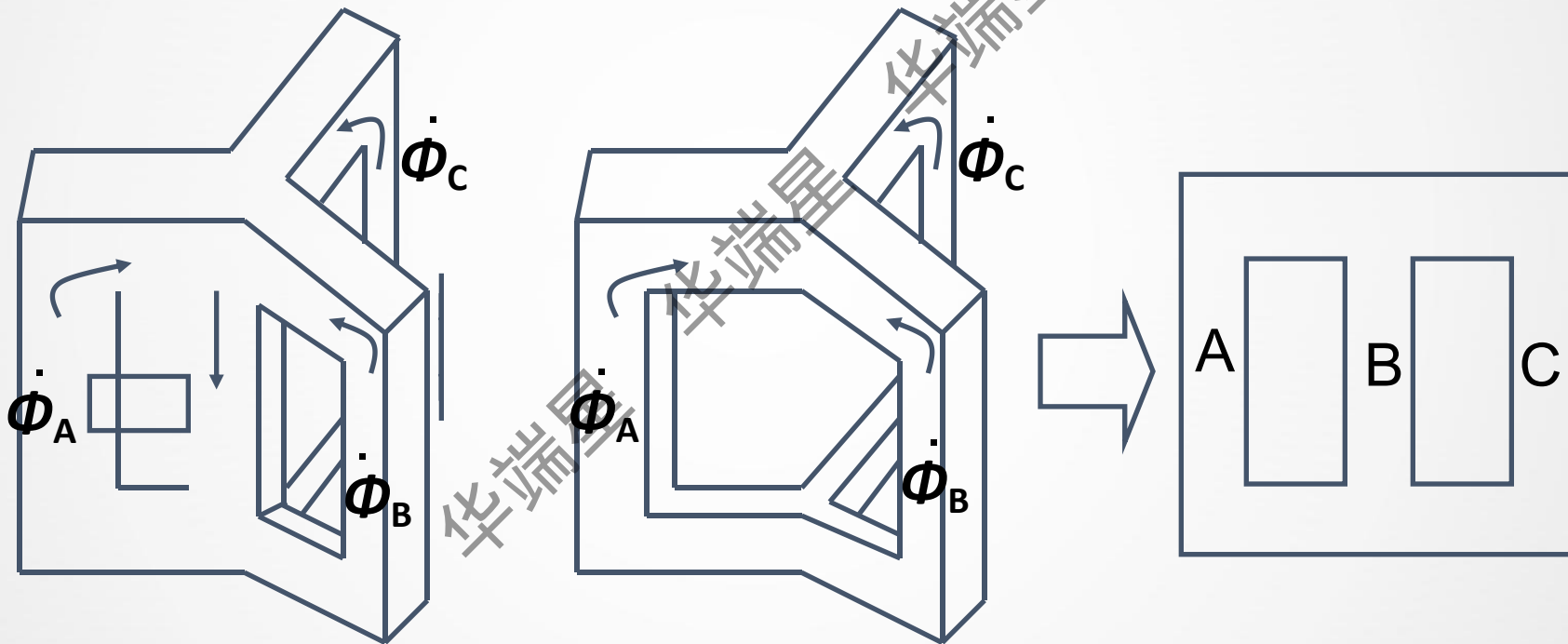
三个相分别是三个单相变压器，仅仅在电路上互相联接，三相磁路互相完全独立。各相主磁通有各自的铁芯磁路，互不影响。



三相组式铁芯变压器

# 一、三相变压器概述

三相的电路有联接，三相磁路也有联接。心式三铁心柱结构，从三个单相变压器演变而来。



三相心式铁芯的形成

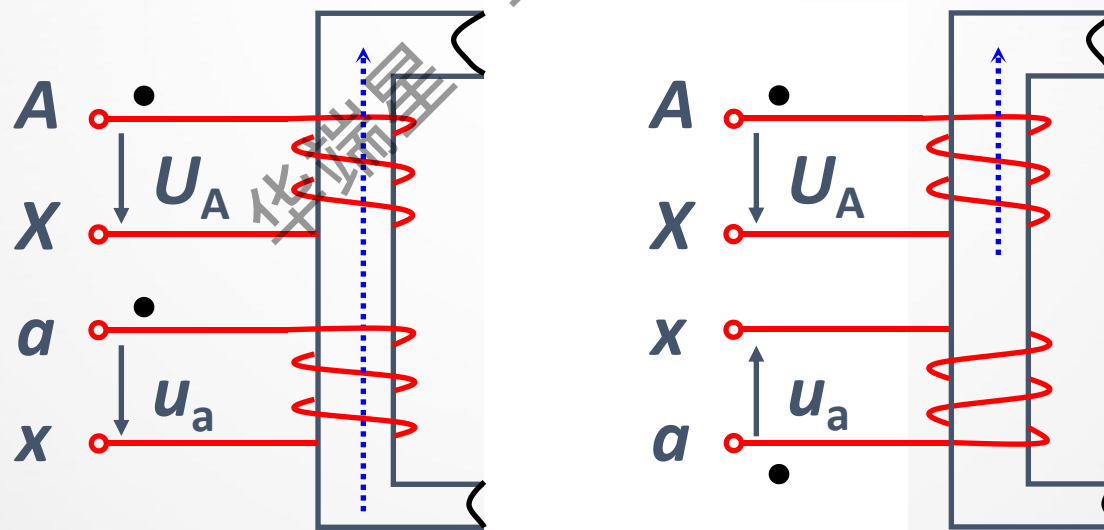
## (二)、单相变压器的极性和绕组标志

### ◆同极性端的确定

### ◆三相变压器的Y和D连接

为确定相电压的相位关系，高压、低压绕组相电压相量的正方向规定为：从绕组的首端指向尾端。

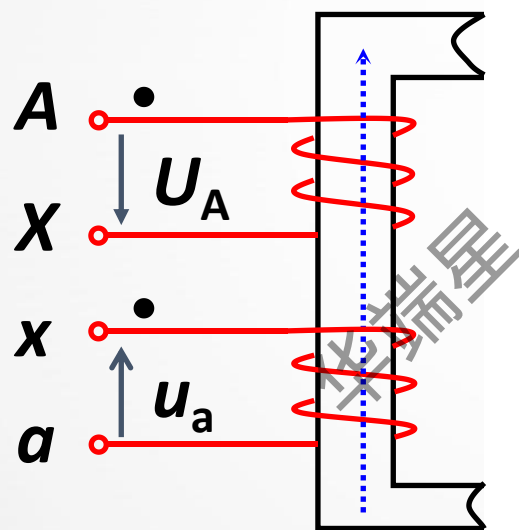
相电压的相位关系，取决于绕组的同名端是否同在尾端或首端。



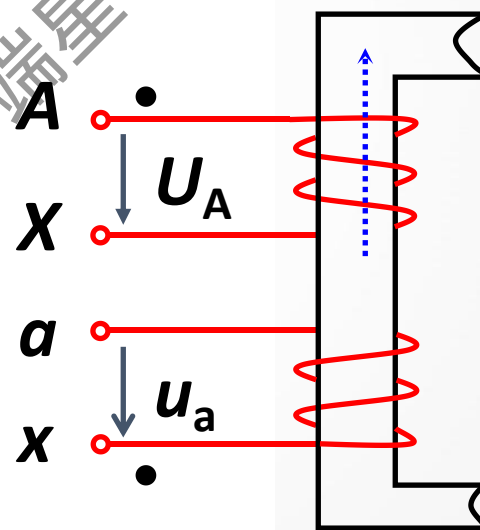
# 一、三相变压器概述

相电压相量的正方向规定为：从绕组的首端指向尾端。

相电压的相位关系，取决于绕组同名端是否同在尾端或首端。同在首端或尾端，电压相位相同；否则，电压相位相反。



$U_A$ 与 $u_a$ 反相



$U_A$ 与 $u_a$ 反相

## (三)、绕组连接方式和连接组别

{ 星形接法 (Y) , 或者带中性点 (YN)  
三角形接法 (D)

国家标准规定五种连接组别:

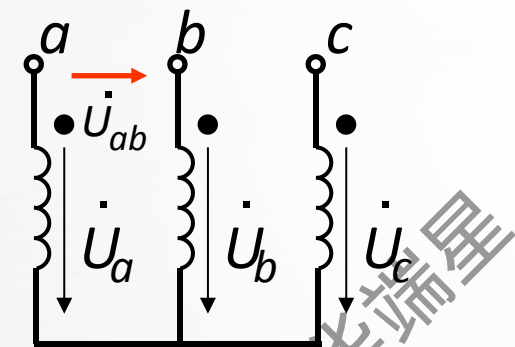
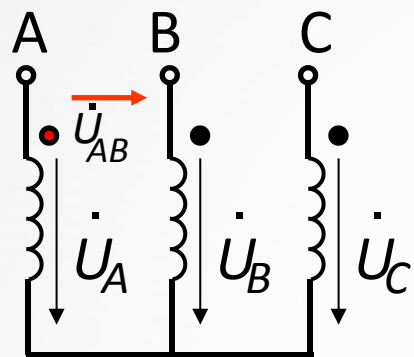
Y, Yn12 ; YN, y12 ; Y, y12 ;

YN, d11 ; Y, d11

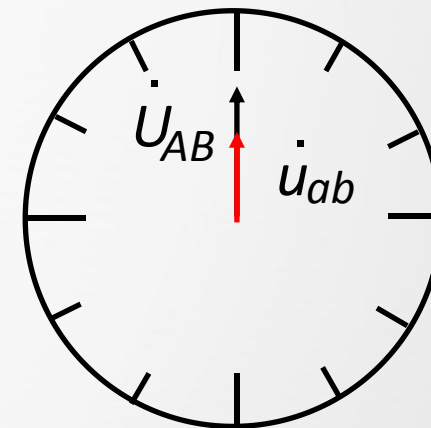
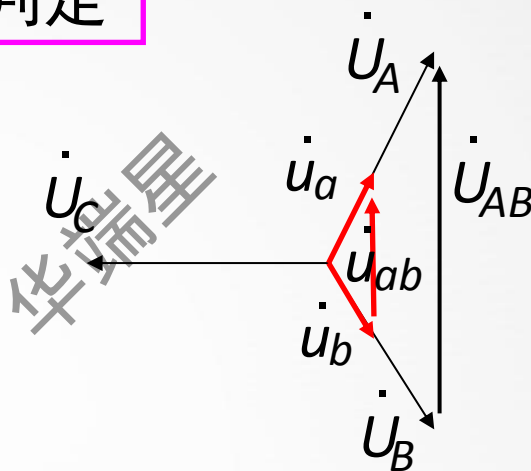
三相绕组原边、副边采用不同的连接方式时, 高压侧线电压与低压侧线电压之间可以形成不同的相位。为表明这种高低压线电压之间的关系, 采用“时钟表示法”。



## 时钟法组别判定

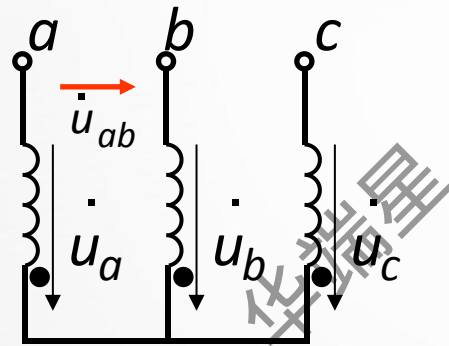
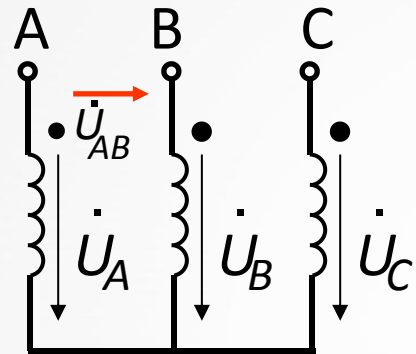


Y, y12连接组

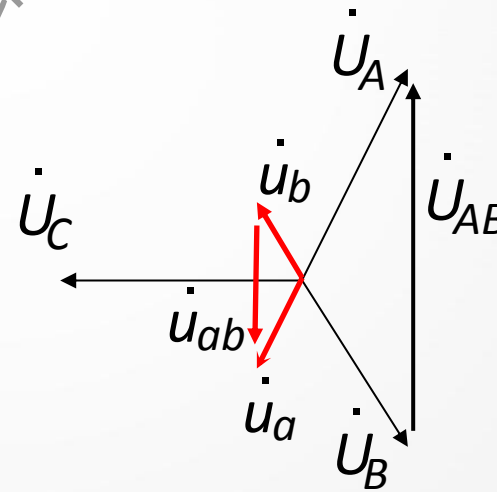
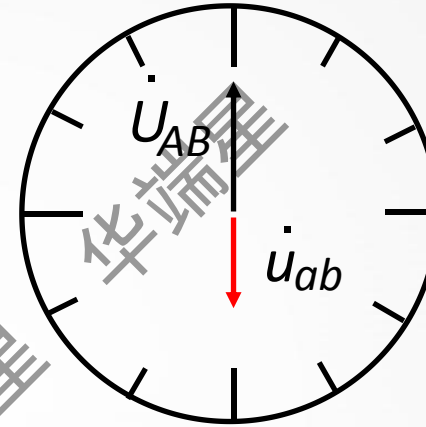


$U_{AB}$ 相量作为时针指向12点，固定不动； $u_{ab}$ 相量作为分针，其指向的点数即为连接组号。

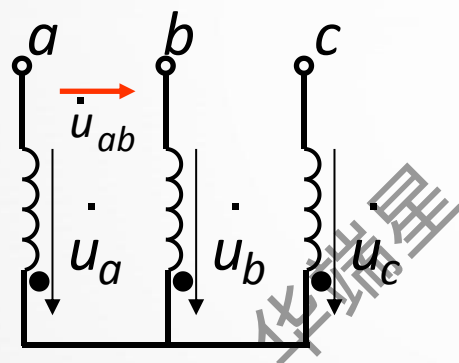
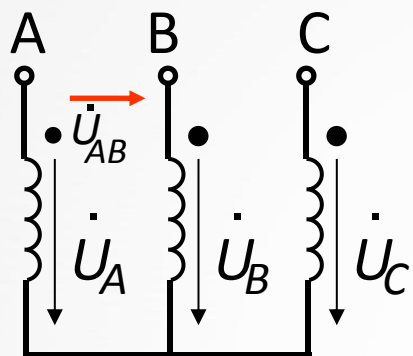
# 一、三相变压器概述



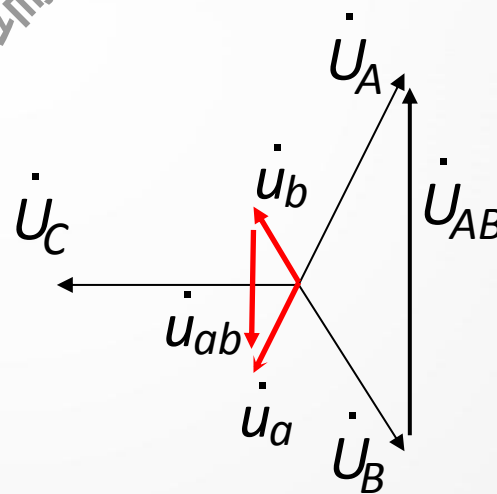
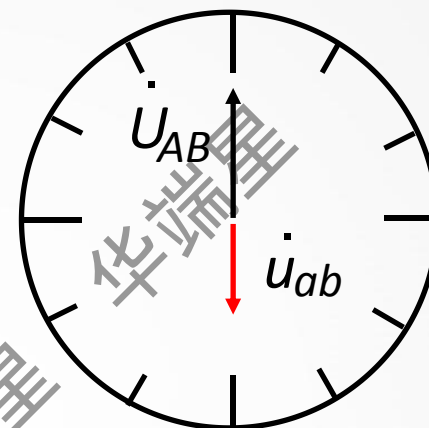
Y,y6连接组



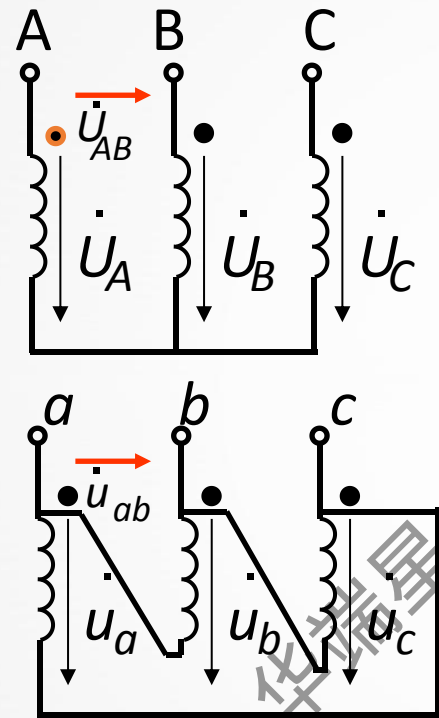
# 一、三相变压器概述



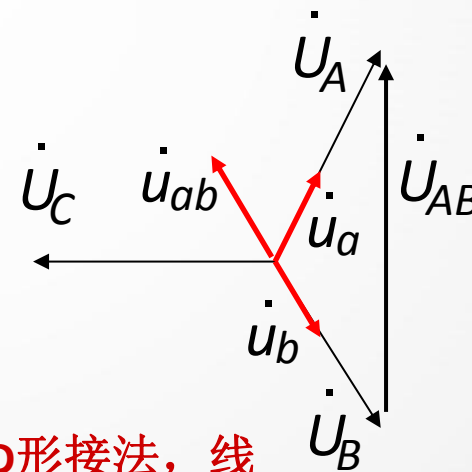
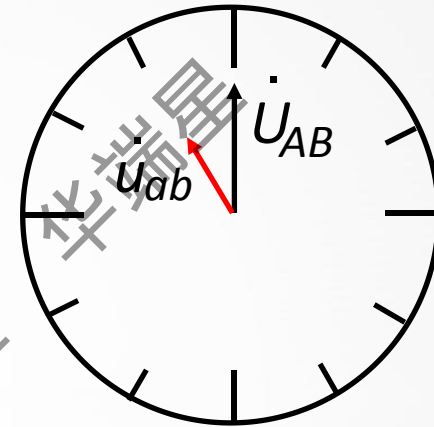
Y,y6连接组



# 一、三相变压器概述



Y,d11连接组



注意：对D形接法，线电压等于相电压

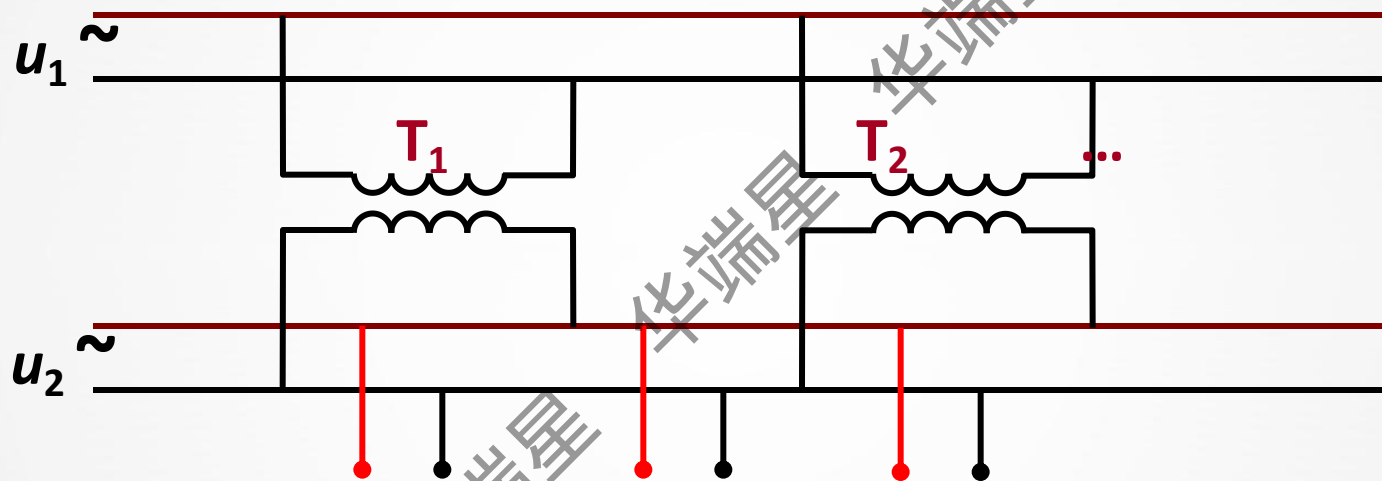
02

## 变压器的并联运行

---

## 二、变压器的并联运行

变压器并联运行是指：一次绕组和二次绕组分别并联到一次侧和二次侧的公共母线上的运行方式。



- 负荷容量很大，一台变压器不能满足要求。
- 负荷变化较大，用多台变压器并联运行可以随时调节投入变压器的台数。
- 可以减少变压器的储备容量。

## 二、变压器的并联运行

### 1. 理想并联运行的状态

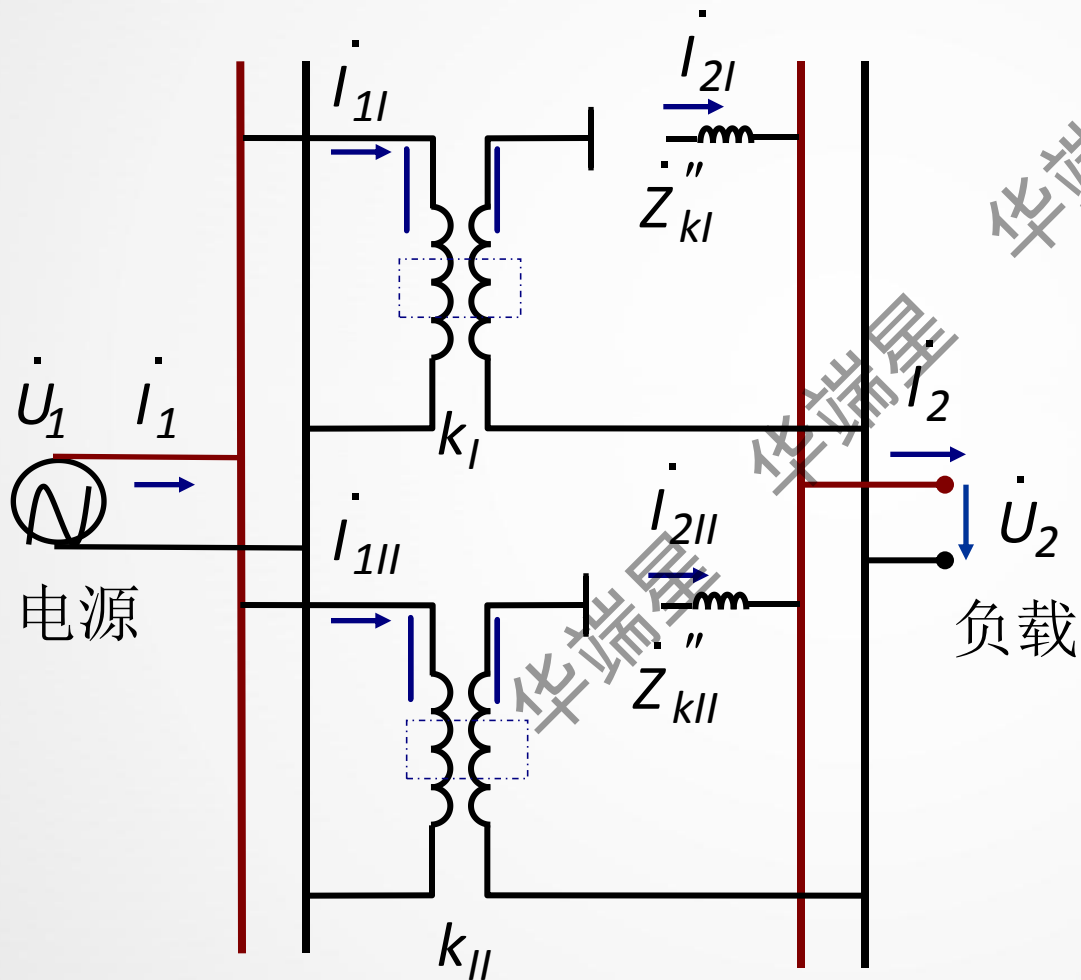
- (1) 空载时各台变压器的  $I_2 = 0$ ，即各台变压器之间无环流。
- (2) 负载运行时，各台变压器分担的负载与它们的容量成正比。
- (3) 各台变压器同一相上输出的电流同相位，使得总输出电流： $I_2 = \sum I_i$ 。

### 2. 并联运行的变压器应满足要求

- (1) 电压比相等，以保证二次侧的空载电压相等。  
**规定：**电压比之差 $\leq 0.5\%$ (平均电压比)
- (2) 联结组相同，以保证二次侧空载电压相位相同。
- (3) 短路阻抗标么值相等，阻抗角要相同。

## 二、变压器的并联运行

两台变压器并联运行的等效电路图，虚线部分为理想变压器，电流、阻抗已归算到二次侧。



$$\frac{U_1}{k_I} = U_2 + I_{2I} Z_{kI}''$$

$$\left\{ \frac{U_1}{k_{II}} = U_2 + I_{2II} Z_{kII}'' \right.$$

$$I_2 = I_{2I} + I_{2II}$$





## 二、变压器的并联运行

求解方程得到：

$$\begin{cases} I_{2I} = I_2 \frac{Z_{kII}''}{Z_{kI}'' + Z_{kII}''} + \frac{U_1 \left( \frac{1}{k_I} - \frac{1}{k_{II}} \right)}{Z_{kI}'' + Z_{kII}''} = I_{LI} + I_c \\ I_{2II} = I_2 \frac{Z_{kI}''}{Z_{kI}'' + Z_{kII}''} - \frac{U_1 \left( \frac{1}{k_I} - \frac{1}{k_{II}} \right)}{Z_{kI}'' + Z_{kII}''} = I_{LII} - I_c \end{cases}$$
$$I_{LI} = I_2 \frac{Z_{kII}''}{Z_{kI}'' + Z_{kII}''} \quad I_{LII} = I_2 \frac{Z_{kI}''}{Z_{kI}'' + Z_{kII}''} \quad I_c = \frac{U_1 \left( \frac{1}{k_I} - \frac{1}{k_{II}} \right)}{Z_{kI}'' + Z_{kII}''}$$

变压器I的负载电流分量

变压器II的负载电流分量

变压器间的环流

## 二、变压器的并联运行

### 3.电压比不同时，引起变压器间的环流

$$I_c = \frac{U_1 \left( \frac{1}{k_I} - \frac{1}{k_{II}} \right)}{Z_{kI}'' + Z_{kII}''}$$

- ✓ 电压比不同时，引起变压器间的环流
- ✓ 环流与负载大小无关
- ✓ 变压器漏阻抗很小，电压比很小的差别就会引起较大的环流
- ✓ 理想并联运行时，需保证各变压器的电压比相等，对于三相变压器，联结组号必须相同。

## 二、变压器的并联运行

### 4. 电压比相同，等效漏阻抗不同时的负载分配

$$I_{LI} = I_2 \frac{Z_{kII}''}{Z_{kI}'' + Z_{kII}''} \quad I_{LII} = I_2 \frac{Z_{kI}''}{Z_{kI}'' + Z_{kII}''}$$

$$\frac{I_{LI}}{I_{LII}} = \frac{Z_{kII}''}{Z_{kI}''} \quad \text{负载电流按其等效漏阻抗成反比例分配!}$$

上式两端均乘以  $I_{NII}/I_{NI}$ ，考虑两台变压器具有相同的额定电压，则标么值表示的负载分配关系为：

$$\frac{I_{LI}}{I_{LII}} \frac{I_{NII}}{I_{NI}} = \frac{Z_{kII}''}{Z_{kI}''} \frac{I_{NII}}{I_{NI}} = \frac{Z_{kII}''}{Z_{kI}''} \frac{I_{NII}/U_N}{I_{NI}/U_N} \Rightarrow \frac{I_{LI}^*}{I_{LII}^*} = \frac{Z_{kII}^*}{Z_{kI}^*}$$

## 二、变压器的并联运行

- ① 各台变压器承担的负载电流标么值与其短路阻抗标么值成反比。

希望  $\frac{I_{LI}}{I_{LII}} = \frac{I_{NI}}{I_{NII}}$  —— 负载与容量成正比

即  $\frac{I_{LI}}{I_{NI}} = \frac{I_{LII}}{I_{NII}} \Rightarrow I_{LI}^* = I_{LII}^* \Rightarrow |Z_{kII}^*| = |Z_{kI}^*|$

- ② 当 $z_k$ 模的标么值（或 $U_k$ 的标么值）相等时，各台变压器承担的负载与其容量成正比。

## 二、变压器的并联运行

- ③ 当各台变压器的  $z_k$  的阻抗角相等时，  
各台变压器的输出电流同相位。

即当

$$\varphi_{kI} = \varphi_{kII}$$

有

$$I_L = I_{LI} + I_{LII}$$

$$S = S_I + S_{II}$$

如果：  $\varphi_{kI} - \varphi_{kII} < 20^\circ$ ，则可以不考虑相位。

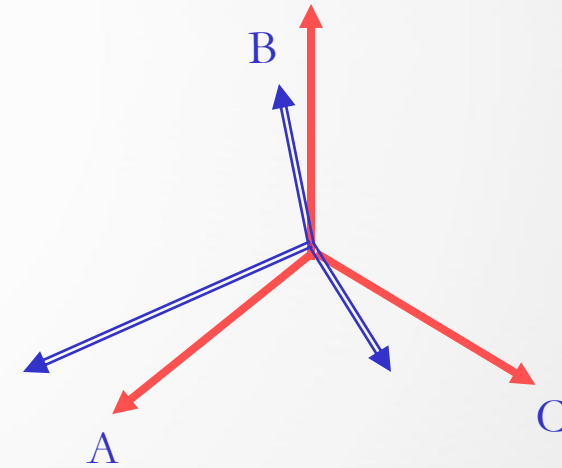
03

## 变压器不对称运行

---

不对称——各相电流(或电压, 电势)大小有可能不同, 相位也不依次差 $120^\circ$

- 对称分量法 对称分量法
- 各序等效电路, 叠加原理 三相
- 中点浮动问题 三相



### 基本概念

不对称运行状态的主要原因：

- ①**外施电压不对称**。三相电流也不对称。
- ②**各相负载阻抗不对称**。当初级外施电压对称，三相电流不对称。不对称的三相电流流经变压器，导致各相阻抗压降不相等，从而次级电压也不对称。
- ③**外施电压和负载阻抗均不对称**。



### 着重分析

- 不对称运行的分析方法
- 正序阻抗、负序阻抗及零序阻抗的物理概念及测量方法
- 危害性——三相变压器在Y, yn连接时相电压中点浮动的原因及其危害

### 三、变压器不对称运行

- 对称的三相系统：三相中的电压 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 对称，只有一个独立变量。如三相相序为a、b、c，由 $U_a$ 得出其余两相电压

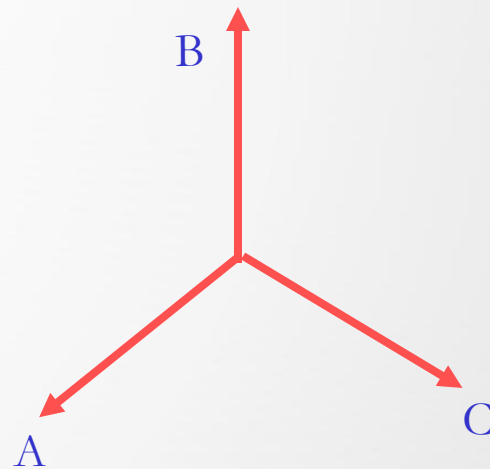
$$U_b = \alpha^2 U_a, \quad U_c = \alpha U_a$$

- 复数算子  $\alpha = e^{j120^\circ} = e^{-j240^\circ}$

$$\alpha = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ$$

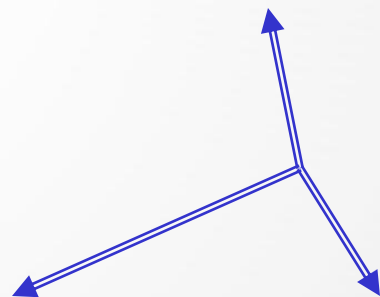
$$\alpha^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ}$$

$$\alpha^3 = e^{j360^\circ} = e^{j0} = 1$$



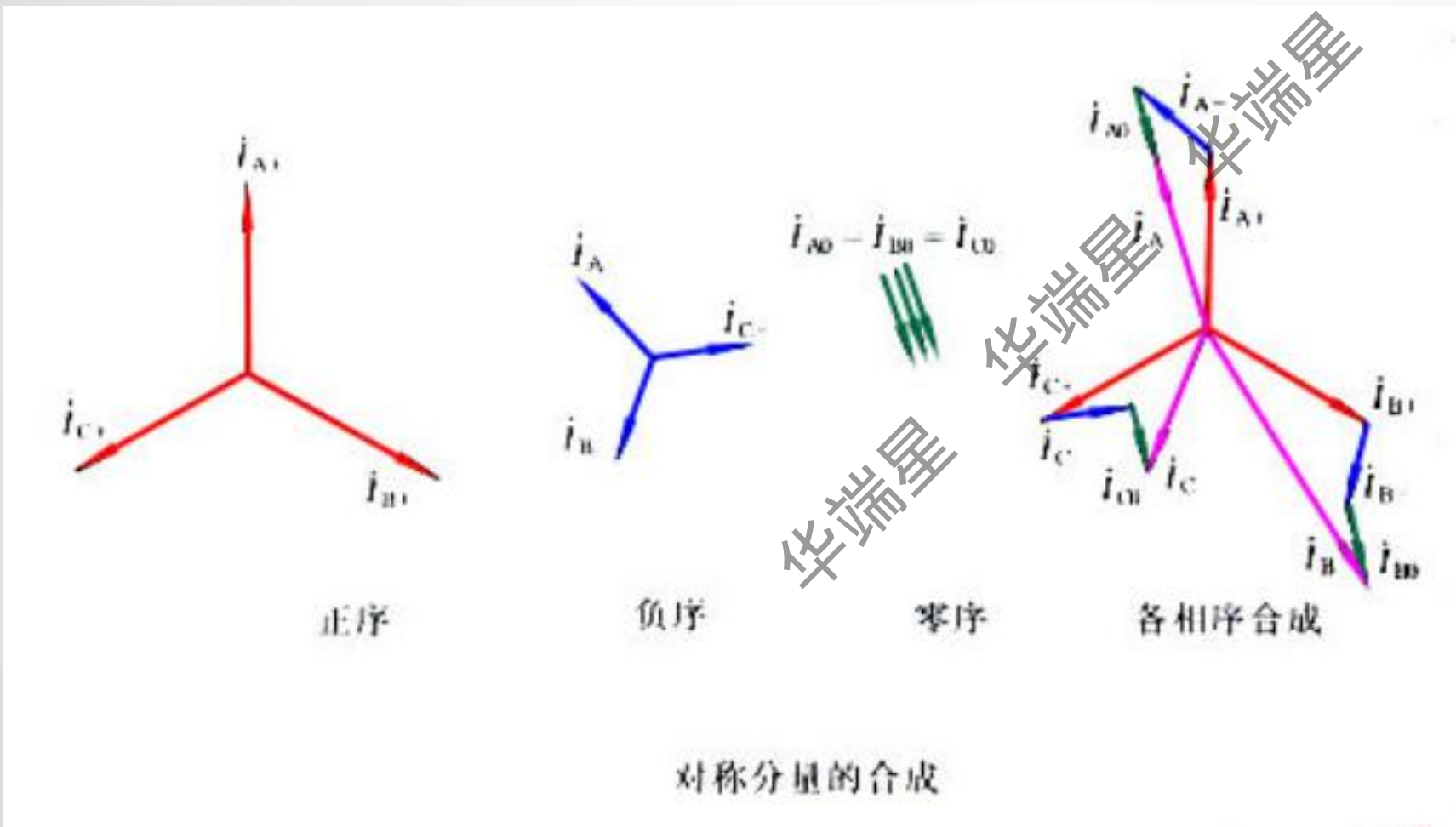
### 三、变压器不对称运行

- **三相不对称系统：三相中的电压 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 互不相关**——大小不一定相等，相位关系不固定
- $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 为三个独立变量



### 三、变压器不对称运行

#### 对称分量法



- 把不对称的三相系统分解为三个独立的对称系统，即正序系统、负序系统和零序系统

### 三、变压器不对称运行

- $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 为不对称三相电压

不对称电压	正序	负序	零序
$\dot{U}_a$	$= \dot{U}_{a+}$	$+ \dot{U}_{a-}$	$+ \dot{U}_{a0}$
$\dot{U}_b$	$= \dot{U}_{b+}$	$+ \dot{U}_{b-}$	$+ \dot{U}_{b0}$
$\dot{U}_c$	$= \dot{U}_{c+}$	$+ \dot{U}_{c-}$	$+ \dot{U}_{c0}$

- 下标“+”、“-”、“0”分别表示正序、负序和零序

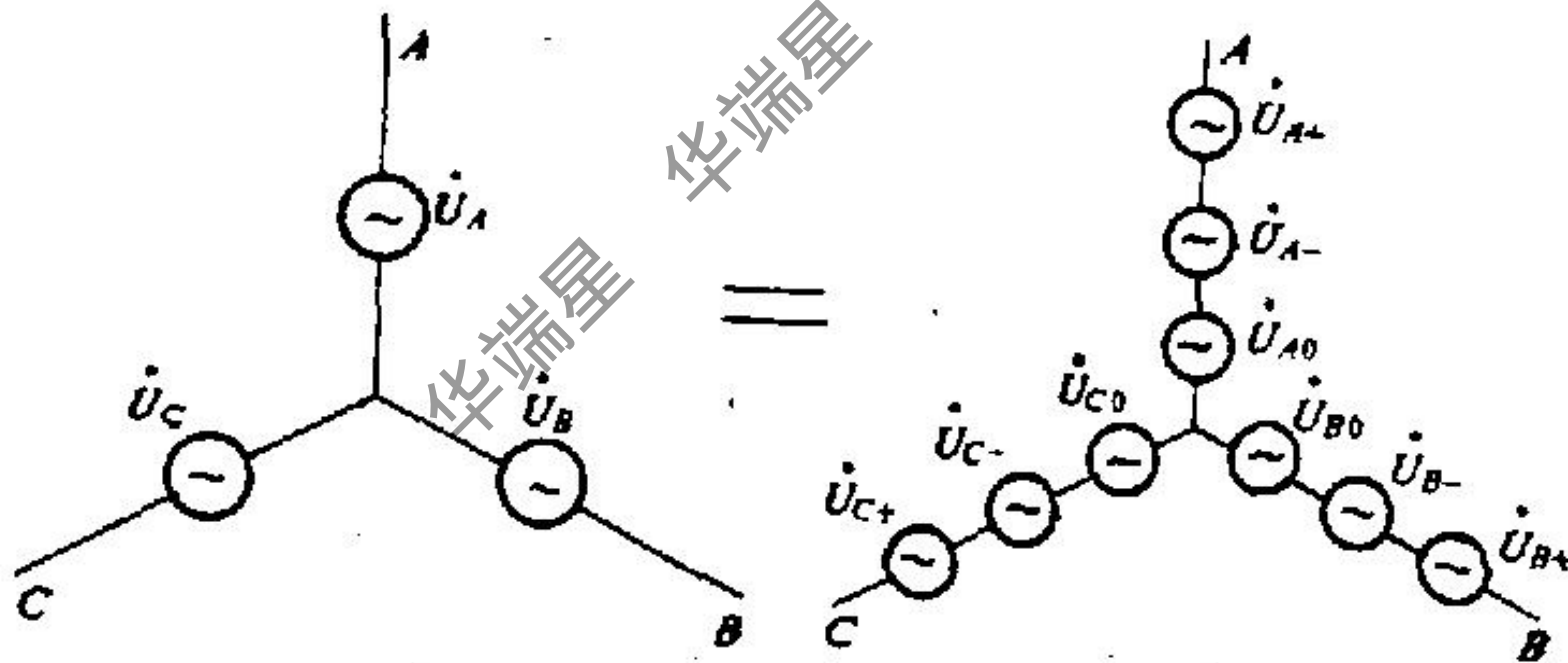
### 三、变压器不对称运行

不对称电压    正序    负序    零序

$$\dot{U}_a = \dot{U}_{a+} + \dot{U}_{a-} + \dot{U}_{a0}$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_{b+} + \dot{U}_{b-} + \dot{U}_{b0}$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_{c+} + \dot{U}_{c-} + \dot{U}_{c0}$$



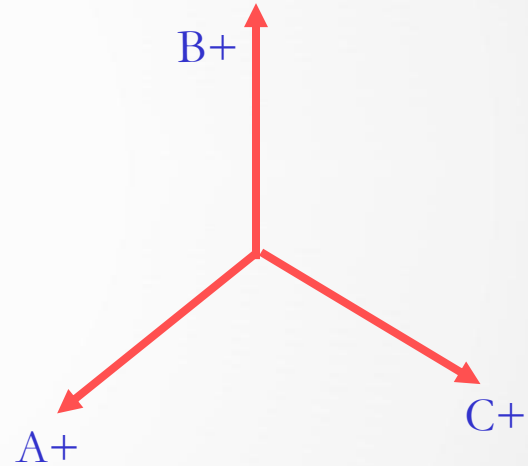
图

把不对称三相电压分解为三相对称电压

正序电压 $U_{a+}$ 、 $U_{b+}$ 、 $U_{c+}$ 组成正序系统

约束条件

$$U_{b+} = \alpha^2 U_{a+}, \quad U_{c+} = \alpha U_{a+}$$



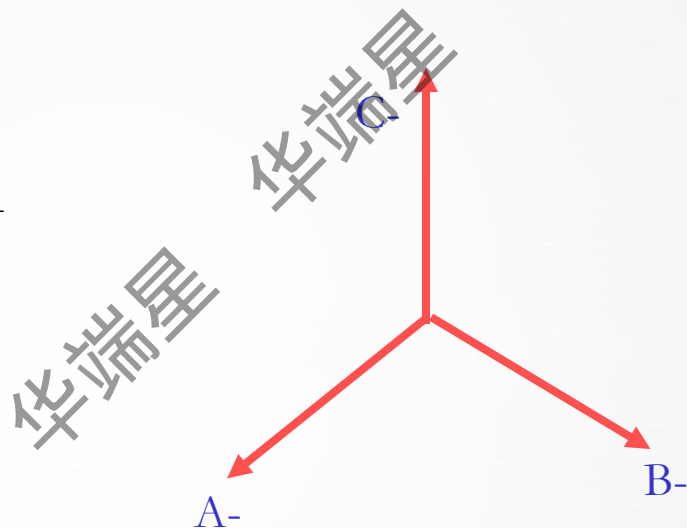
- 性质：每相大小相等，彼此相位差 $120^\circ$ ，相序为**a→b→c**。

### 三、变压器不对称运行

各相负序电压 $U_{a-}$ 、 $U_{b-}$ 、 $U_{c-}$ 组成负序系统

- 约束条件

$$U_{b-} = \alpha U_{a-}, \quad U_{c-} = \alpha^2 U_{a-}$$



- 性质：每相大小相等，彼此相位差120，相序为 $a \rightarrow c \rightarrow b$ 。

逆时针



各相零序电压 $U_{a0}$ 、 $U_{b0}$ 、 $U_{c0}$ 组成零序系统

- 约束条件

$$U_{b0}=U_{a0}, \quad U_{c0}=U_{a0}$$

- 性质：每相大小相等且同相位。

- 共同性质：三相大小相等，彼此之间相位差相等



### 三、变压器不对称运行

不对称电压 正序 负序 零序

$$\dot{U}_a = \dot{U}_{a+} + \dot{U}_{a-} + \dot{U}_{a0}$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_{b+} + \dot{U}_{b-} + \dot{U}_{b0}$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_{c+} + \dot{U}_{c-} + \dot{U}_{c0}$$

$$\dot{U}_{a+} = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + \alpha \dot{U}_b + \alpha^2 \dot{U}_c)$$

$$\dot{U}_{a-} = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + \alpha^2 \dot{U}_b + \alpha \dot{U}_c)$$

$$\dot{U}_{a0} = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c)$$

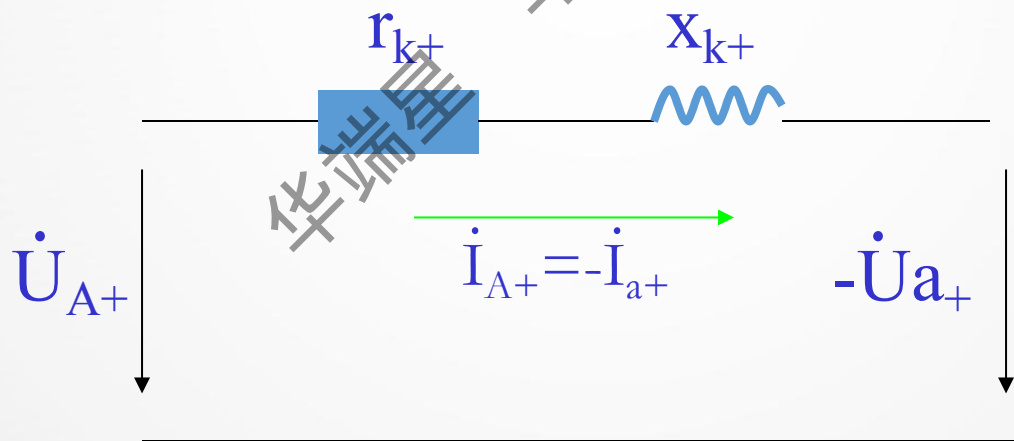
## 结论

- (1) 正序、负序和零序系统都是对称系统。当求得各个对称分量后，再把各相的三个分量叠加便得到不对称运行情形。
- (2) 不同相序具有不同阻抗参数，电流流经电机和变压器具有不同物理性质。
- (3) 对称分量法根据叠加原理，只适用于线性参数的电路中。

### 三、变压器不对称运行

#### 三相变压器的正序阻抗 正序电流所遇到的阻抗

$$Z_{+} = r_{k+} + jx_{k+} = r_k + jx_k = Z_k$$

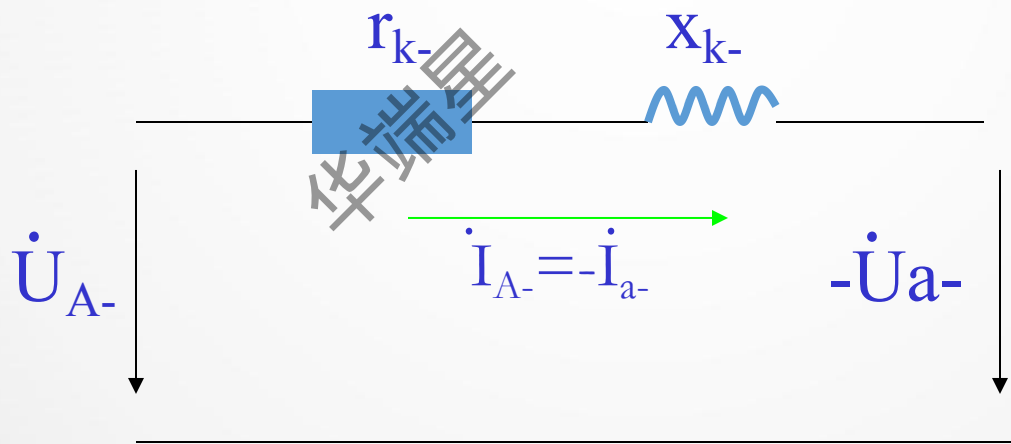


### 三、变压器不对称运行

三相变压器的负序阻抗 具有与正序一样的性质

- 负序电流所遇到的阻抗

$$Z_- = r_{k-} + jx_{k-} = r_k + jx_k = Z_k$$



## 三、变压器不对称运行

### 三相变压器的零序阻抗

#### 零序电流所遇到的阻抗

1. 零序电流在变压器绕组中的流通情况
2. 零序等效电路
3. 零序磁通在变压器铁芯中流通路径
4. 零序激磁阻抗测量方法

### 三、变压器不对称运行

#### 1. 零序电流在变压器绕组中的流通

- 零序电流能否流通与三相绕组的连接方式有关。

Y接法中无法流通

YN接法可以流通

D接法线电流不能流通零序电流，但其闭合回路能为零序电流提供通路，如果另一方有零序电流，通过感应也会在D接法绕组中产生零序电流。

Y, y; Y, d; D, y; D, d——无零序电流

YN, d和D, yn接法——如YN、yn中有零序电流，d、D中也感应零序电流。

YN, y和Y, yn接法——当YN、yn中有零序电流，y、Y中也不会有零序电流。



谢谢!

