

第三章 三相变压器

3-1 概述

3-2 三相变压器的磁路系统

3-3 变压器的联结组标号

3-5 变压器的并联运行

小 结

★基本要求:

- 1.掌握三相变压器组和三铁心式变压器磁路的特点
- 2.掌握三相变压器的联结组标号，能利用电动势相量图判定联结组标号
- 3.掌握变压器理想并联运行的条件
- 4.掌握变压器并联运行时负载分配的计算方法

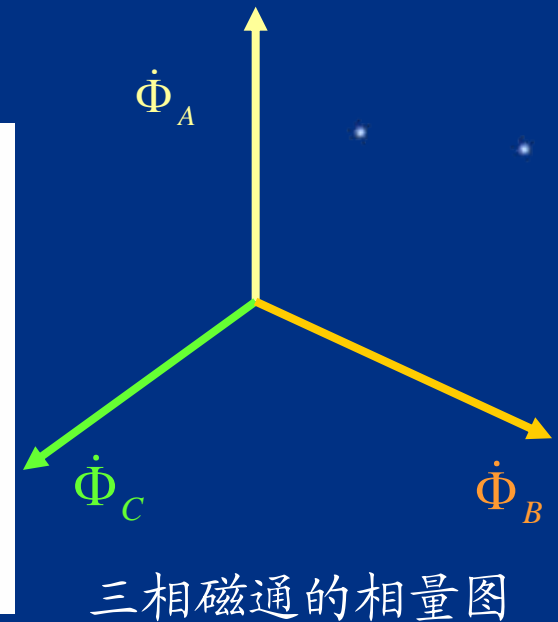
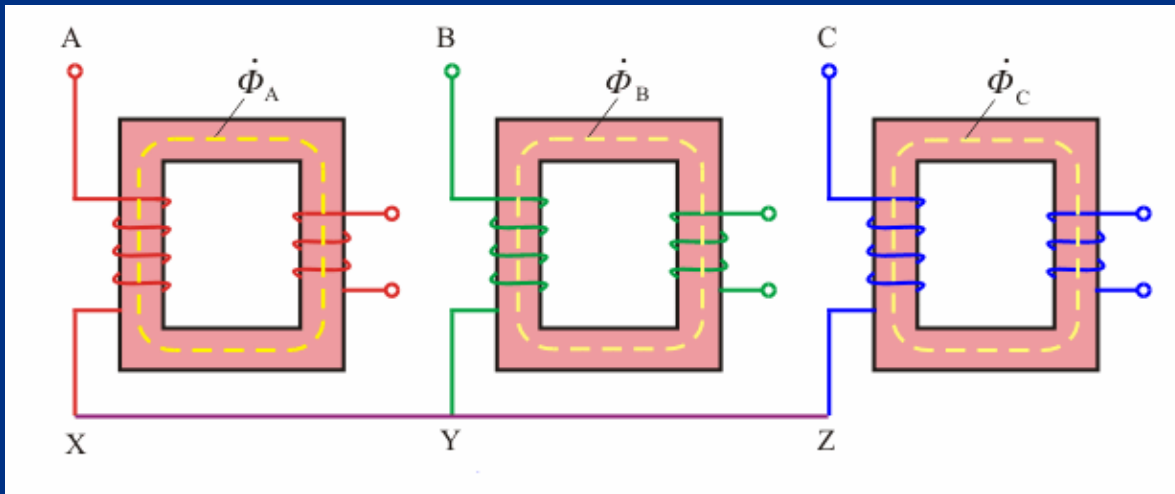
3-1 概述

三相变压器对称运行时，其各相的电压、电流大小相等，相位相差 120° ，因此在运行原理的分析与计算时，可以任取三相中一相来研究，即三相问题可以转化为单相问题。这样，基本方程式、相量图、等效电路、参数测定等可直接运用于三相的任一相，求出一相的量，其他两相根据对称关系直接写出。

本章仅对三相变压器的特殊问题进行研究：（1）三相变压器的磁路系统；（2）绕组联结组。

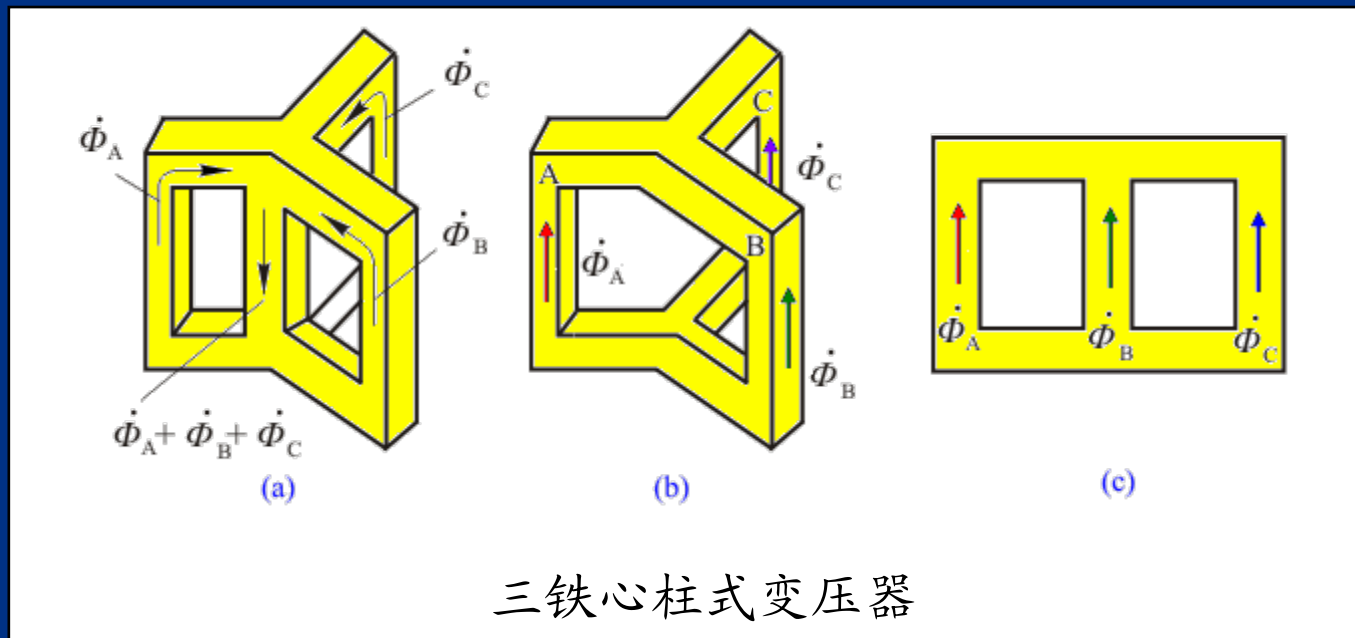
3-2 三相变压器的磁路系统

1.三相变压器组（组式变压器）



- 特点：**
- (1) 三相磁路各自独立，彼此无关；
 - (2) 三相磁路对称，所以当三相电压对称时，三相磁通和励磁电流也对称。

2.三铁心柱式变压器（心式变压器）



把三台单相变压器的铁心拼成星形磁路，当三相绕组外施三相对称电压时，有

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

- 特点：**
- (1) 三相磁路不独立，彼此相关；
 - (2) 三相磁路长度不等，三相励磁电流不对称。

3.三相变压器组和三铁心柱式变压器的比较

- (1) 三相变压器组：运输方便、备用容量少
- (2) 三铁心柱式变压器：结构简单、节省材料、占地少、成本低、运行维护方便

3-3 变压器的联结组标号

根据变压器高、低压侧绕组的联结方式，以及变压器高、低压绕组对应（线）电势之间的相位关系，把变压器绕组的联结分成不同的组合，称为**绕组的联结组**。

1. 高低压绕组电势的相位关系
2. 单相变压器的联结组
3. 三相变压器绕组的联结
4. 三相变压器的联结组

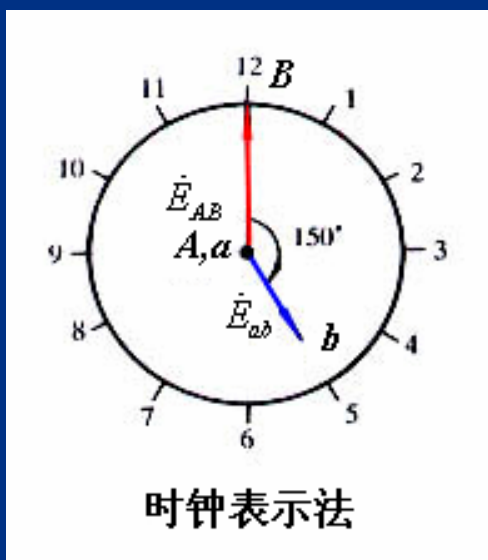
1. 高低压绕组电势的相位关系

1) 变压器绕组的标记方式

绕组名称	单相变压器		三相变压器		中性点
	首端	尾端	首端	尾端	
高压绕组	A	X	$A、B、C$	$X、Y、Z$	N
低压绕组	a	x	$a、b、c$	$x、y、z$	n

2) 时钟表示法

高压绕组的（线）电势相量作时钟的长针，固定指向时钟的12点。而低压绕组相应的（线）电势相量作时钟的短针，短针指向的数字称为变压器联结组的标号。



例：Yd5

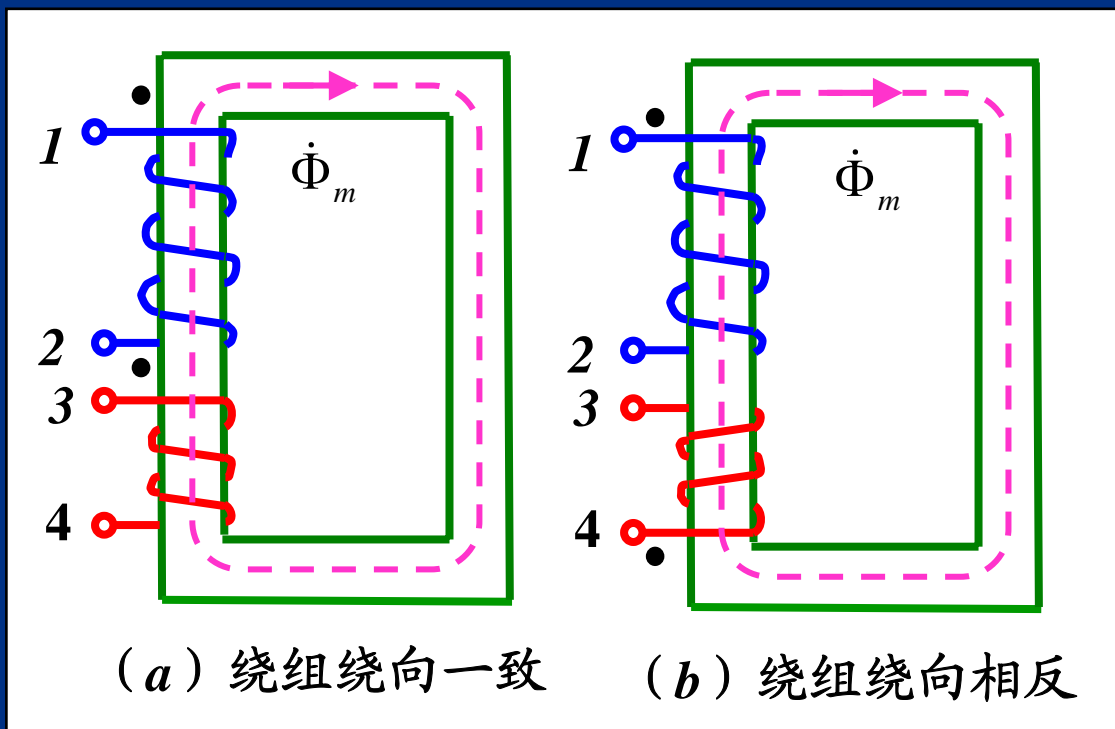
\dot{E}_{ab} 滞后 \dot{E}_{AB} $30^\circ \times 5 = 150^\circ$

联结组标号:5

绕组相电势规定正方向：由绕组首端指向绕组尾端。

3) 同极性端

指交链同一磁通的两个绕组瞬时极性相同的端子，用符号“●”或“*”标出。

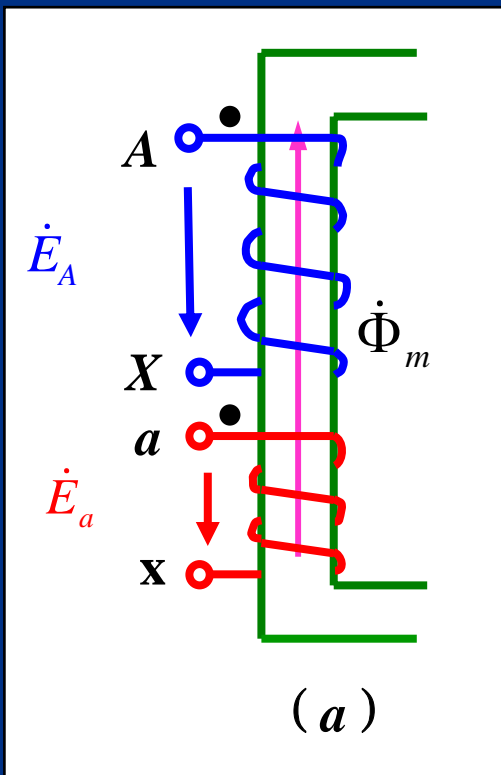


绕组绕向一致时，同极性端在同一端；

绕组绕向相反时，同极性端在不同端。

2.单相变压器的联结组

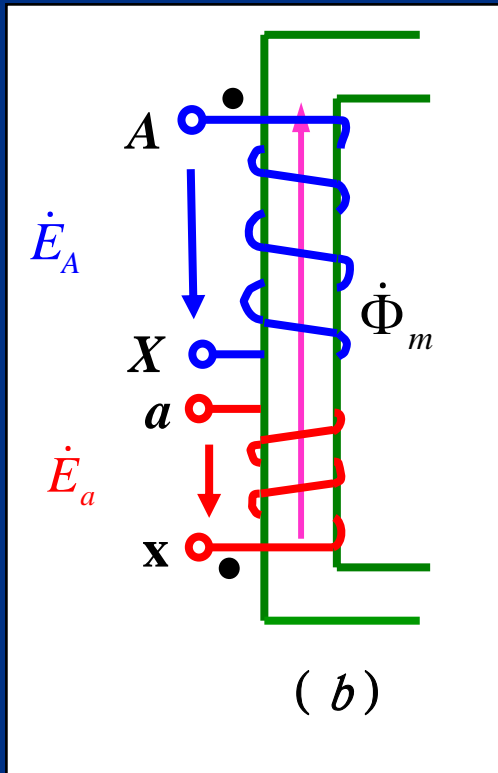
1) 把同极性端标记为首端



I I0 (I,I0)

高、低压边电势均由同极性端指向非同极性端，电势相位相同。

2) 把不同极性端标记为首端



II6

高压边电势由同极性端指向非同极性端、低压边电势由非同极性端指向同极性端，电势相位相反。

3.三相变压器绕组的联结

1) 星形联结 (Y联结)

代表符号:

高压绕组—Y或YN(有中性点引出)

低压绕组——y或yn(有中性点引出)

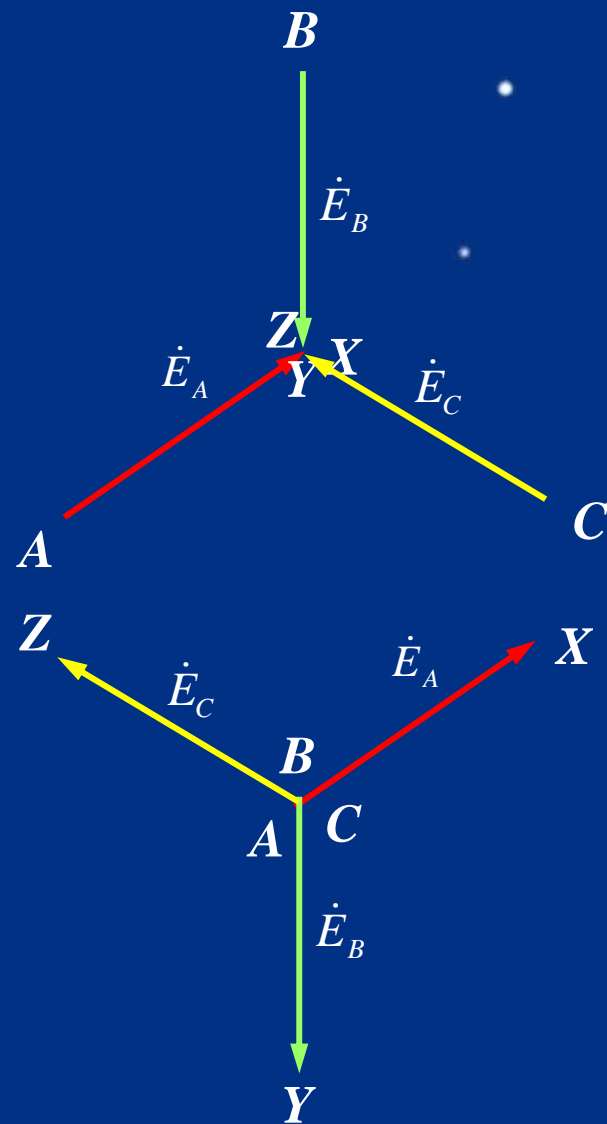
• 电动势相量图

相电势为:

$$\dot{E}_A = E \angle 0^\circ$$

$$\dot{E}_B = \dot{E}_A \angle -120^\circ$$

$$\dot{E}_C = \dot{E}_A \angle -240^\circ = \dot{E}_A \angle 120^\circ$$



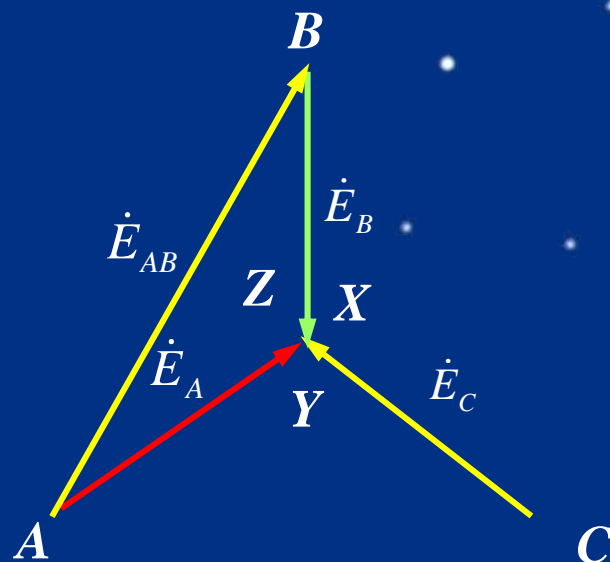
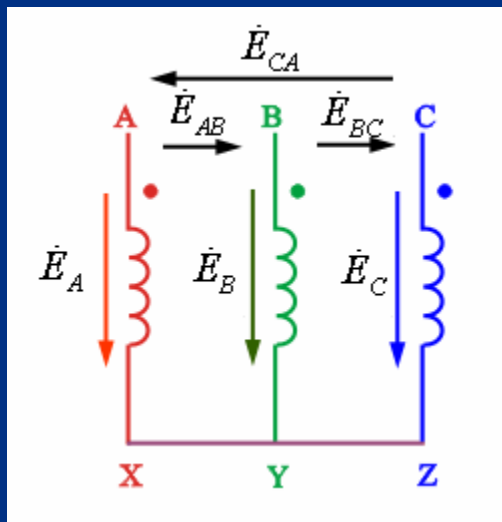
• 电动势(位形)相量图

线电势为:

$$\dot{E}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B$$

$$\dot{E}_{BC} = \dot{E}_B - \dot{E}_C$$

$$\dot{E}_{CA} = \dot{E}_C - \dot{E}_A$$



注意: 外施电压为正相序时, A、B、C三个顶点按顺时针方向排列。

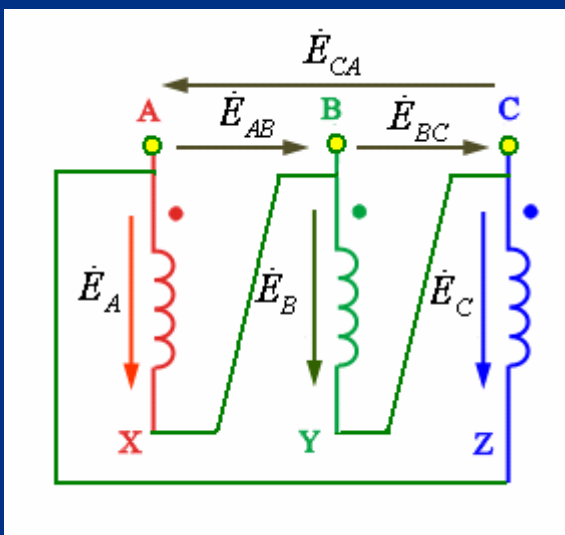
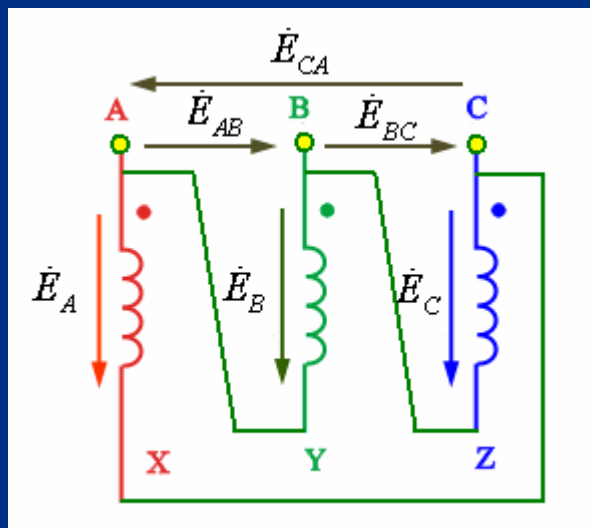
2) 三角形联结 (D联结)

• 联结顺序: $AX \rightarrow CZ \rightarrow BY \rightarrow AX$;

$AX \rightarrow BY \rightarrow CZ \rightarrow AX$

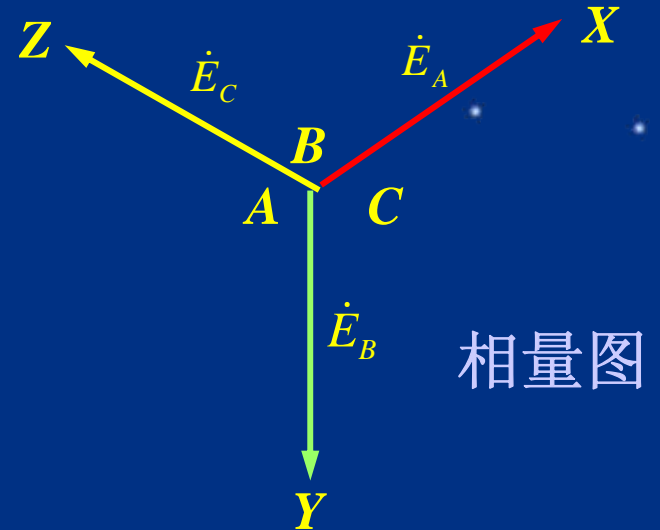
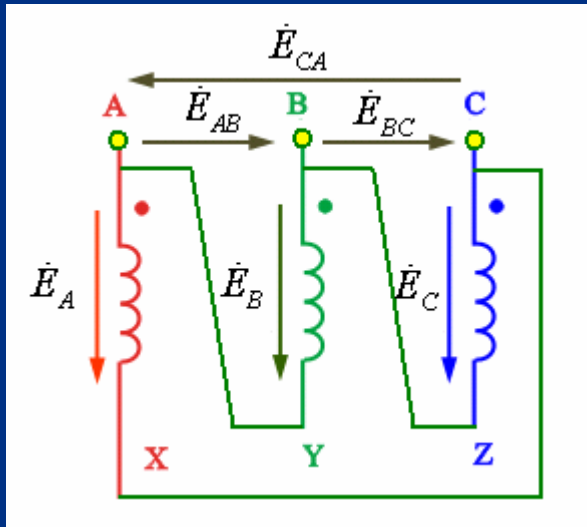
• 代表符号: 高压绕组—— D

低压绕组—— d



• 电动势相量图

① 联结顺序: $AX \rightarrow CZ \rightarrow BY \rightarrow AX$

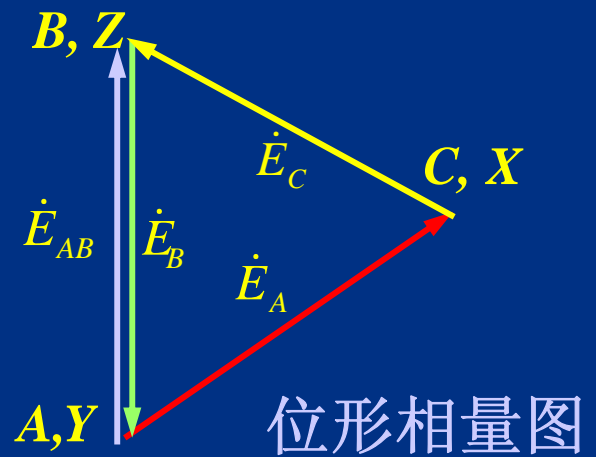


线电势:

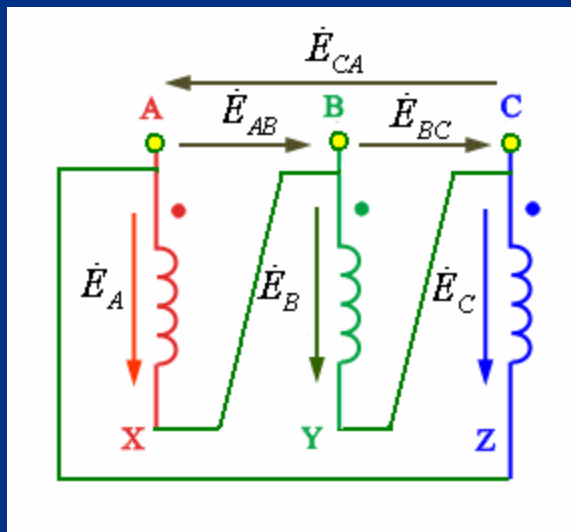
$$\dot{E}_{AB} = -\dot{E}_B$$

$$\dot{E}_{BC} = -\dot{E}_C$$

$$\dot{E}_{CA} = -\dot{E}_A$$



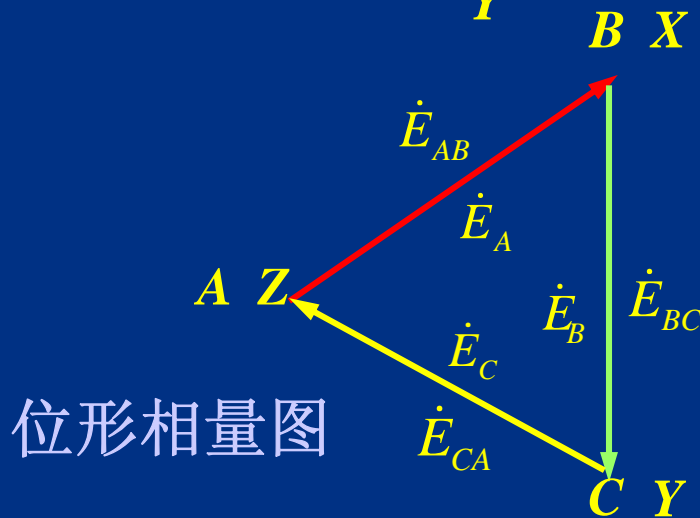
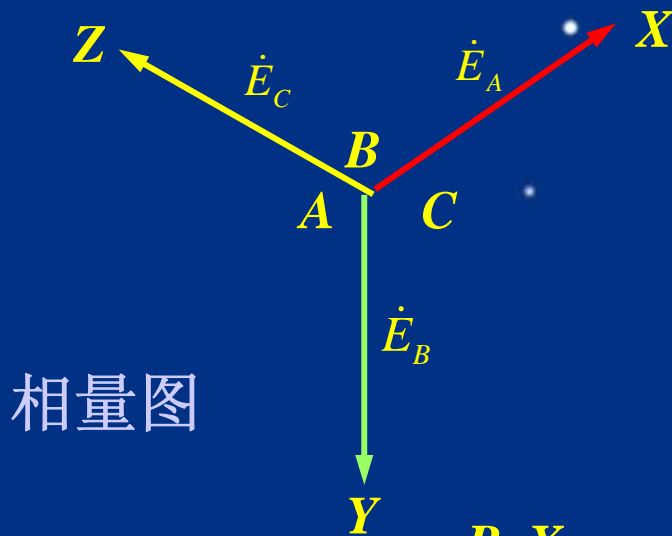
②联结顺序: $AX \rightarrow BY \rightarrow CZ \rightarrow AX$



线电势: $\dot{E}_{AB} = \dot{E}_A$

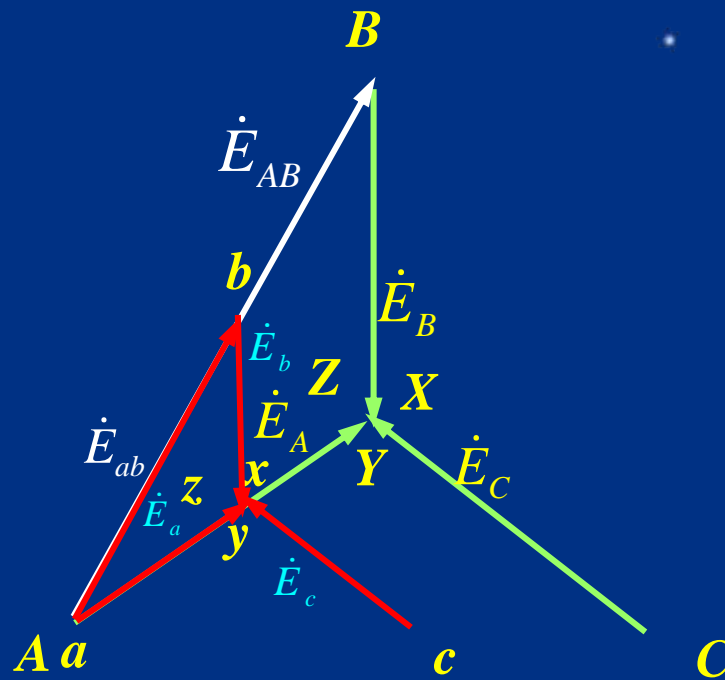
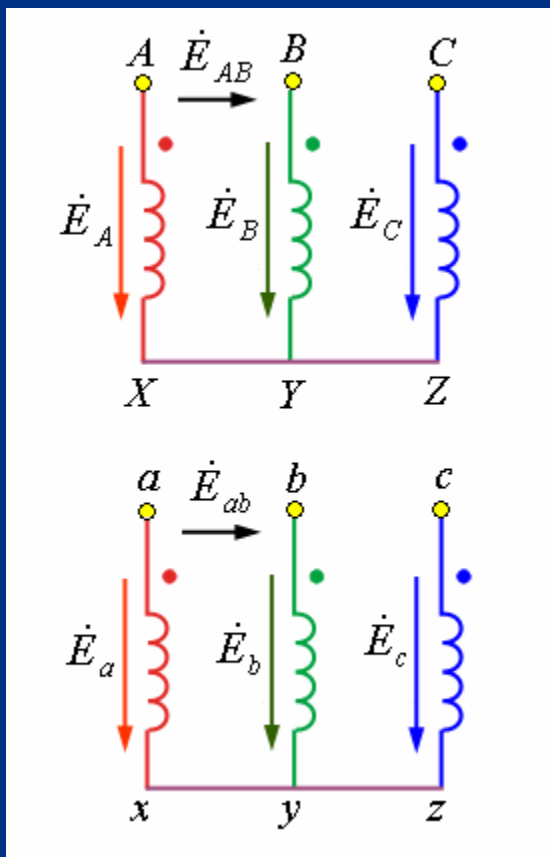
$\dot{E}_{BC} = \dot{E}_B$

$\dot{E}_{CA} = \dot{E}_C$



4. 三相变压器的联结组

1) Yy联结



联结组标号: Yy0

★根据绕组联结图确定联结组标号的步骤:

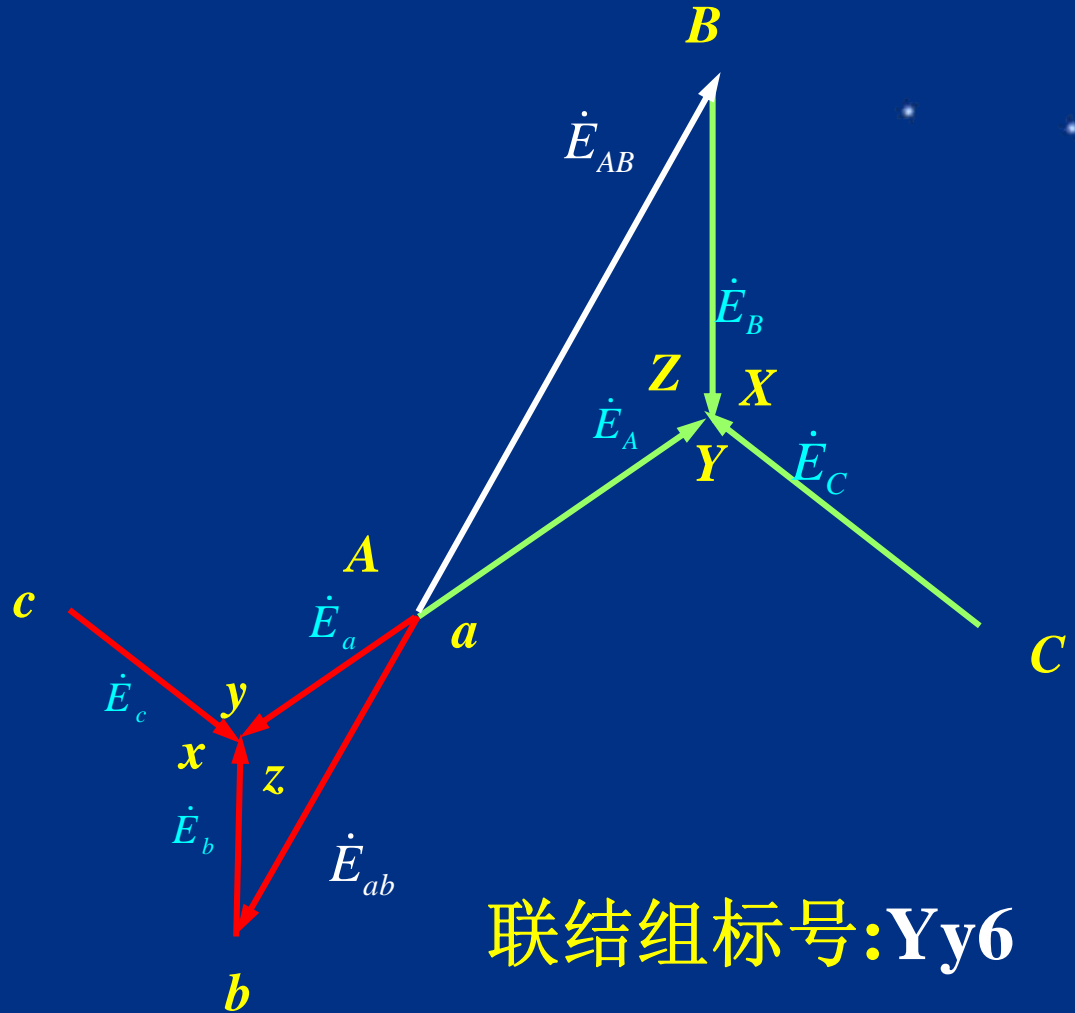
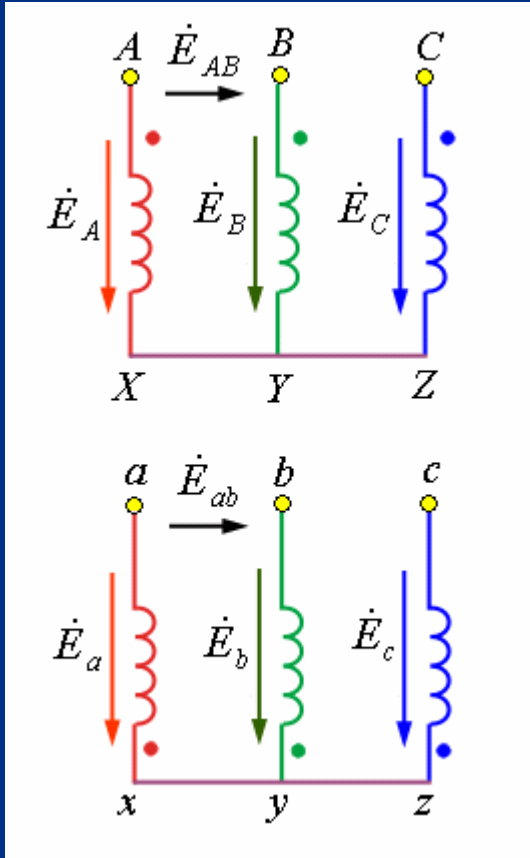
①在绕组联结图上标出相电势，相电势正方向均由首端指向尾端；

②画出高压绕组的电势位形相量图；

③画出低压绕组的电势位形相量图，三相变压器中同一铁心柱上低压绕组相电势与高压绕组相电势方向相同或相反，均由同极性端指向非同极性端，方向相同，否则相反；

④根据高、低压绕组线电势 \dot{E}_{AB} 和 \dot{E}_{ab} 的相位差确定联结组标号。

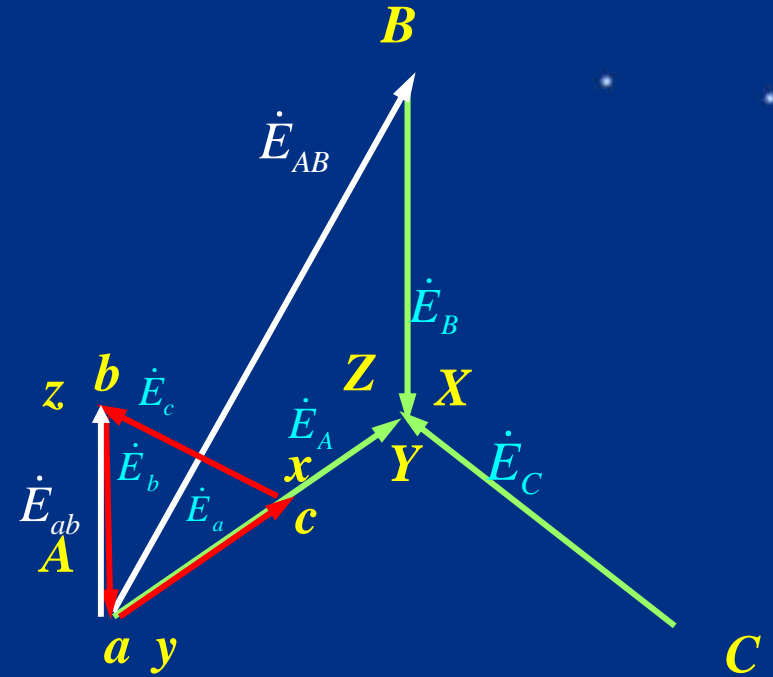
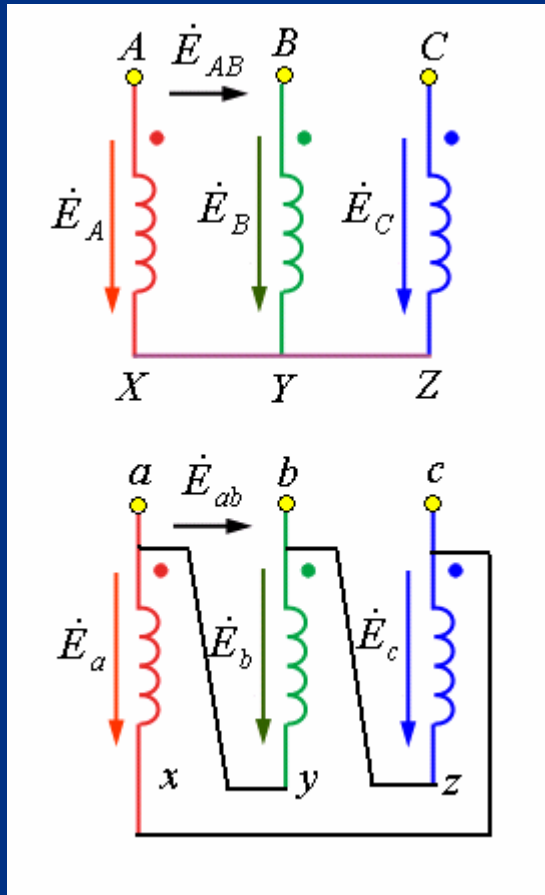
1) Yy联结



联结组标号: Yy6

2) Yd联结

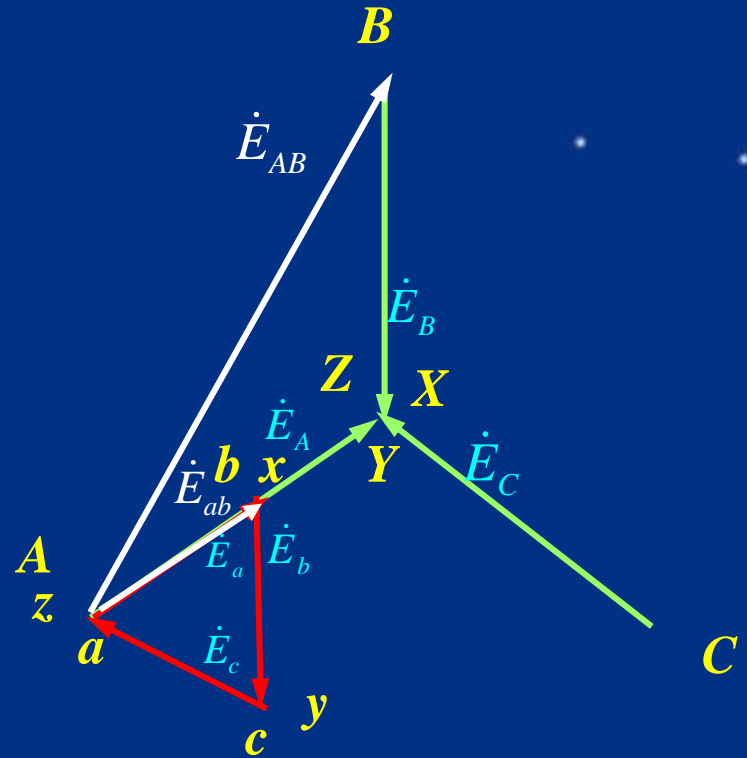
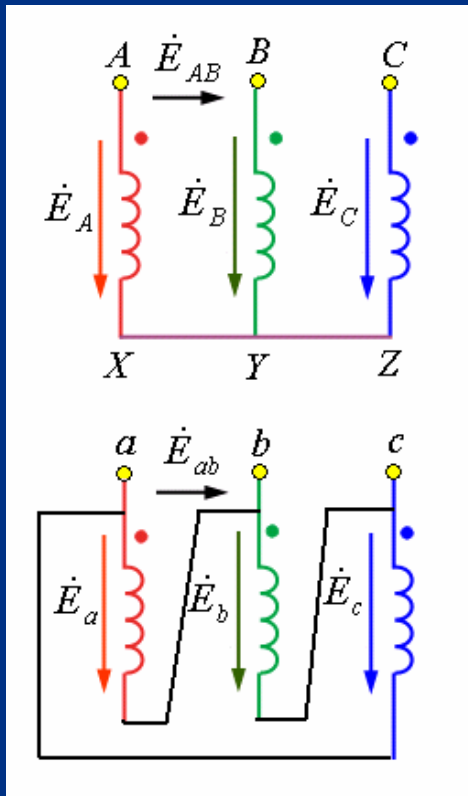
低压绕组的联结顺序： $ax \rightarrow cz \rightarrow by \rightarrow ax$



联结组标号：Yd11

2) Yd联结

低压绕组的联结顺序： $ax \rightarrow by \rightarrow cz \rightarrow ax$



联结组标号：Yd11

3) 标准联结组

Yy联结: 0,2,4,6,8,10 } 偶数
Dd联结: 0,2,4,6,8,10 }

Yd联结: 1,3,5,7,9,11 } 奇数
Dy联结: 1,3,5,7,9,11 }

三相双绕组电力变压器的标准联结组标号:

①Yyn0; ②Yd11; ③YNd11; ④YNy0; ⑤Yy0。

4) 根据联结组标号画绕组联结图

作图步骤:

①画出高压绕组的联结图;

②画出高压绕组的电势位形相量图;

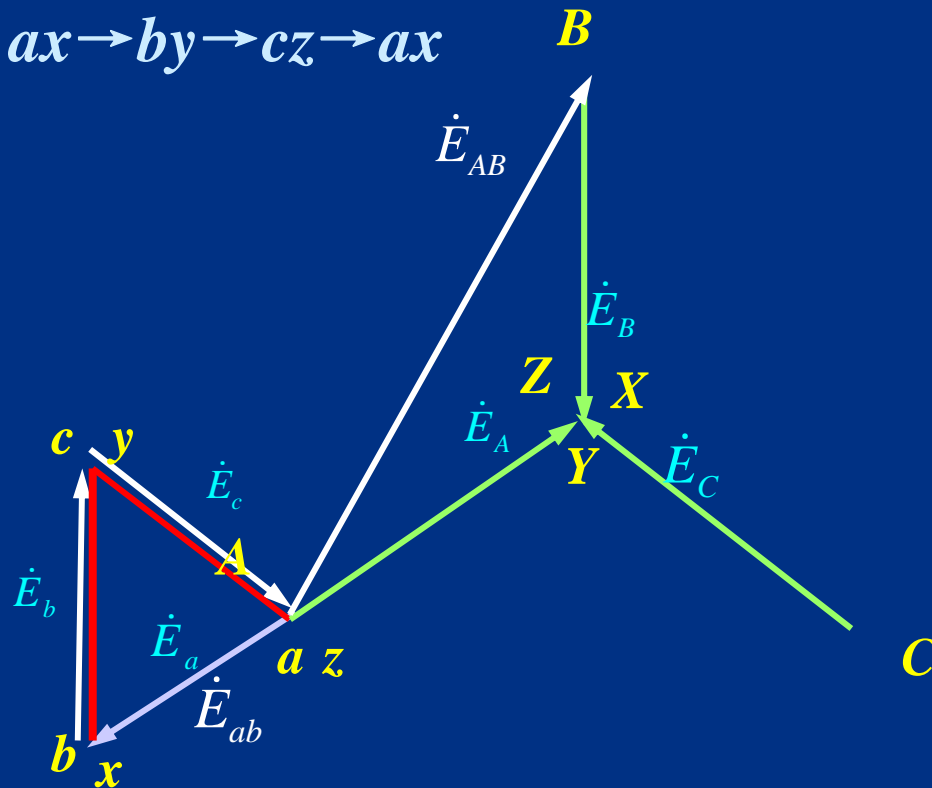
③根据联结组标号, 确定 a 、 b 、 c 和 x 、 y 、 z , 画出低压绕组的电势位形相量图;

④根据高、低压绕组相电势之间的相位关系并考虑同极性端位置, 联结低压绕组。

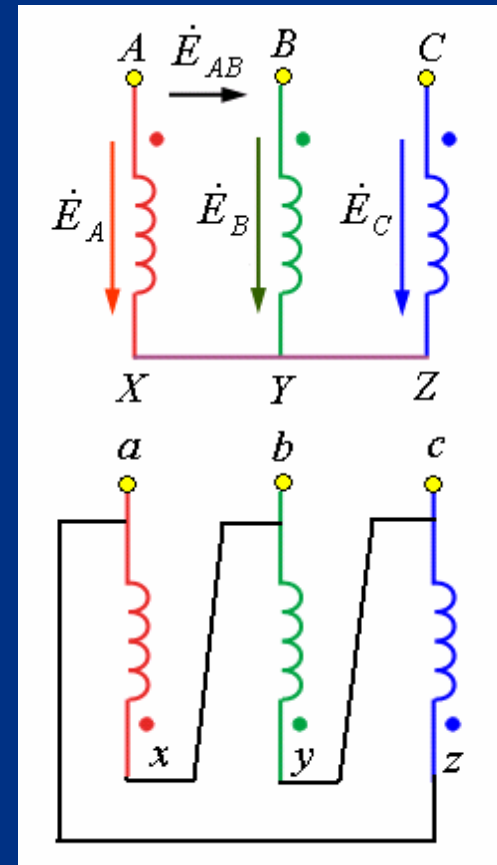
例：一台三相变压器联结组标号为Yd7，试画出其绕组联结图。

低压绕组的联结顺序：

$ax \rightarrow by \rightarrow cz \rightarrow ax$

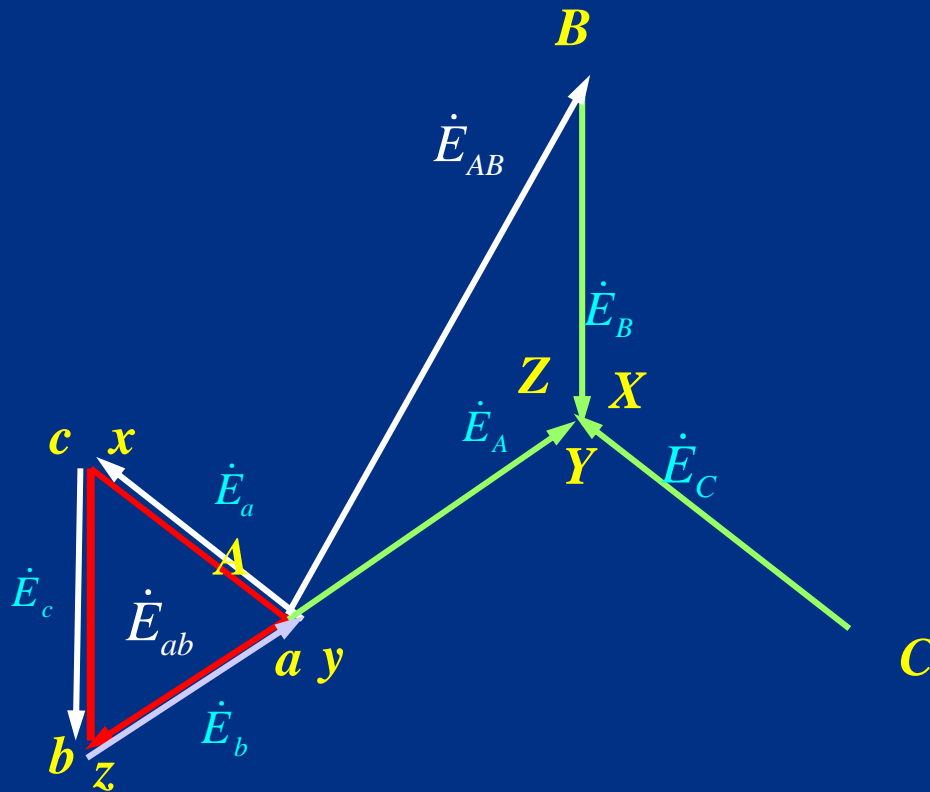


第一种联结图

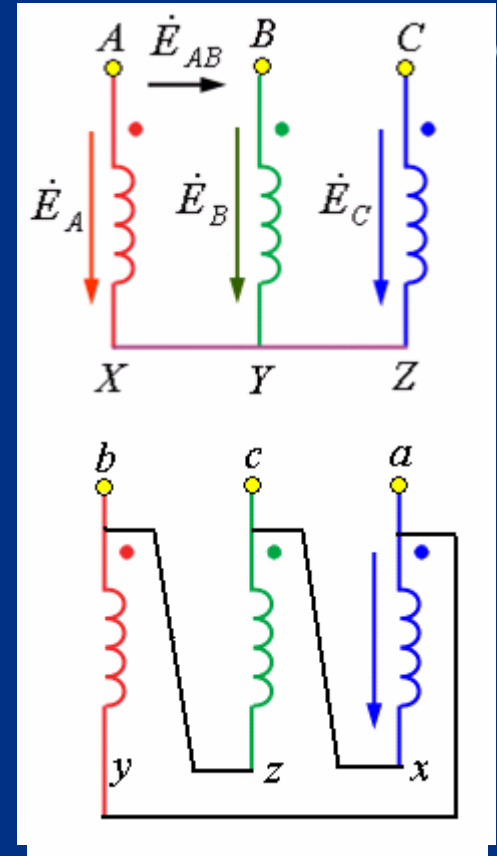


低压绕组的联结顺序:

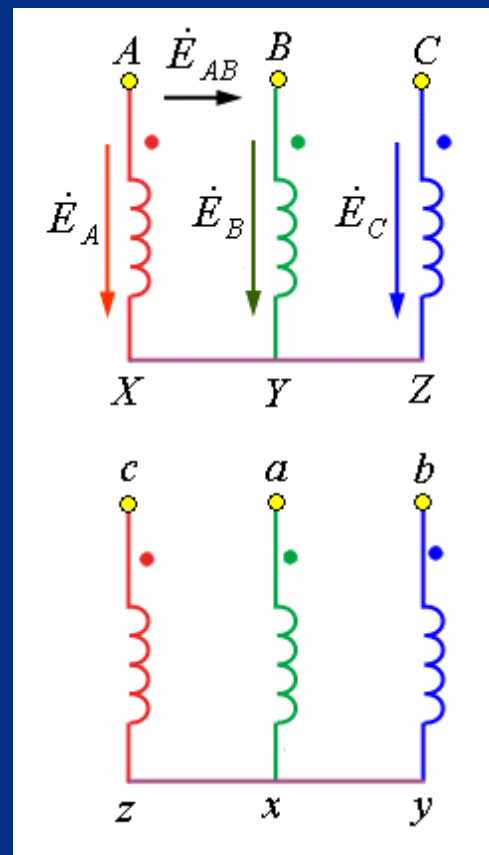
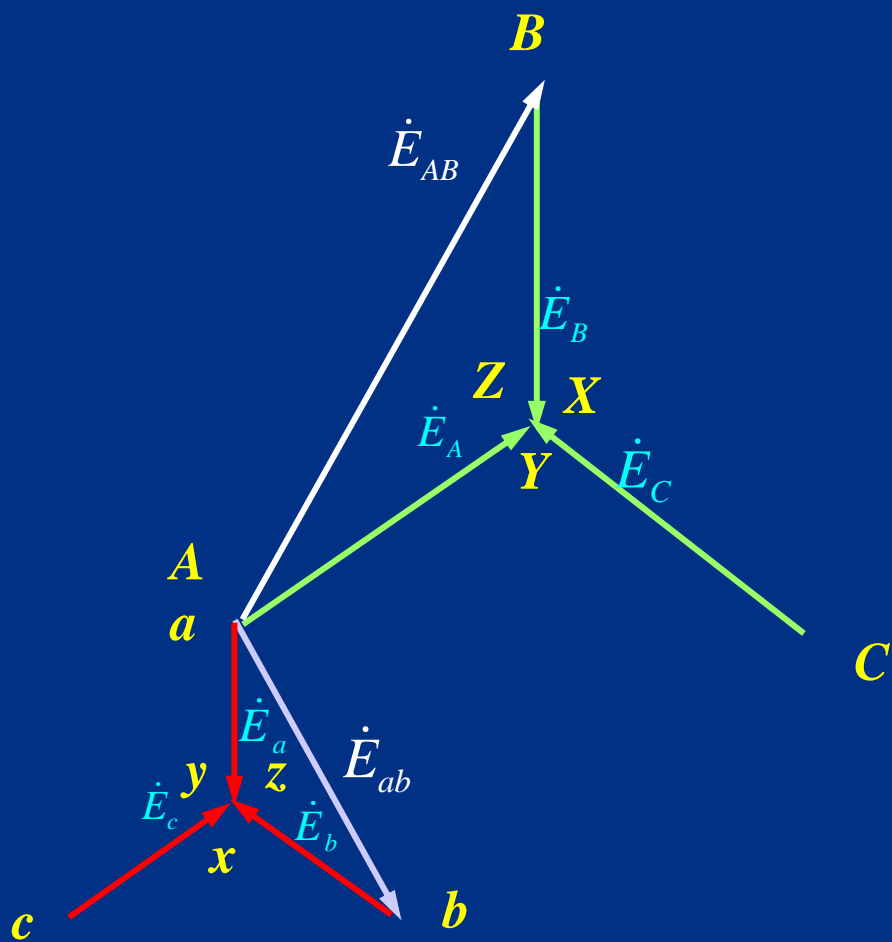
$ax \rightarrow cz \rightarrow by \rightarrow ax$



第二种联结图



例：一台三相变压器联结组标号为Yy4，试画出其绕组联结图。



3-5 变压器的并联运行

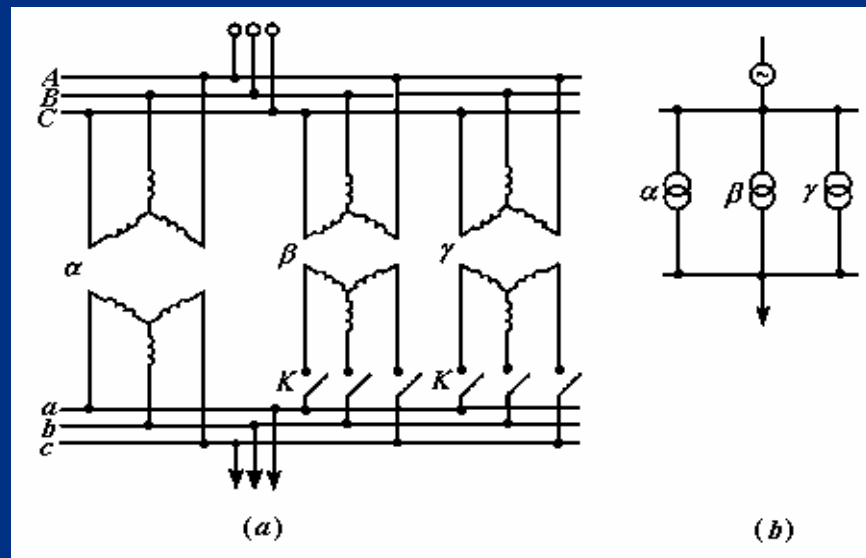
1.概述

1) 变压器并联运行

并联运行，就是将两台或多台变压器的一、二次绕组分别接在各自的公共母线上，共同向负载供电的运行方式。

2) 变压器并联运行的意义

- 适应用电量的增加；
- 提高系统的运行效率；
- 提高供电的可靠性。



变压器并联运行

(a) 联结图； (b) 简化图

3) 变压器并联运行的理想情况

- 空载运行时，各变压器二次侧之间没有环流。
- 负载运行时，各变压器所分担的负载电流与它们的容量成正比。
- 负载运行时，各变压器对应相的电流同相位。

4) 变压器理想并联运行的条件

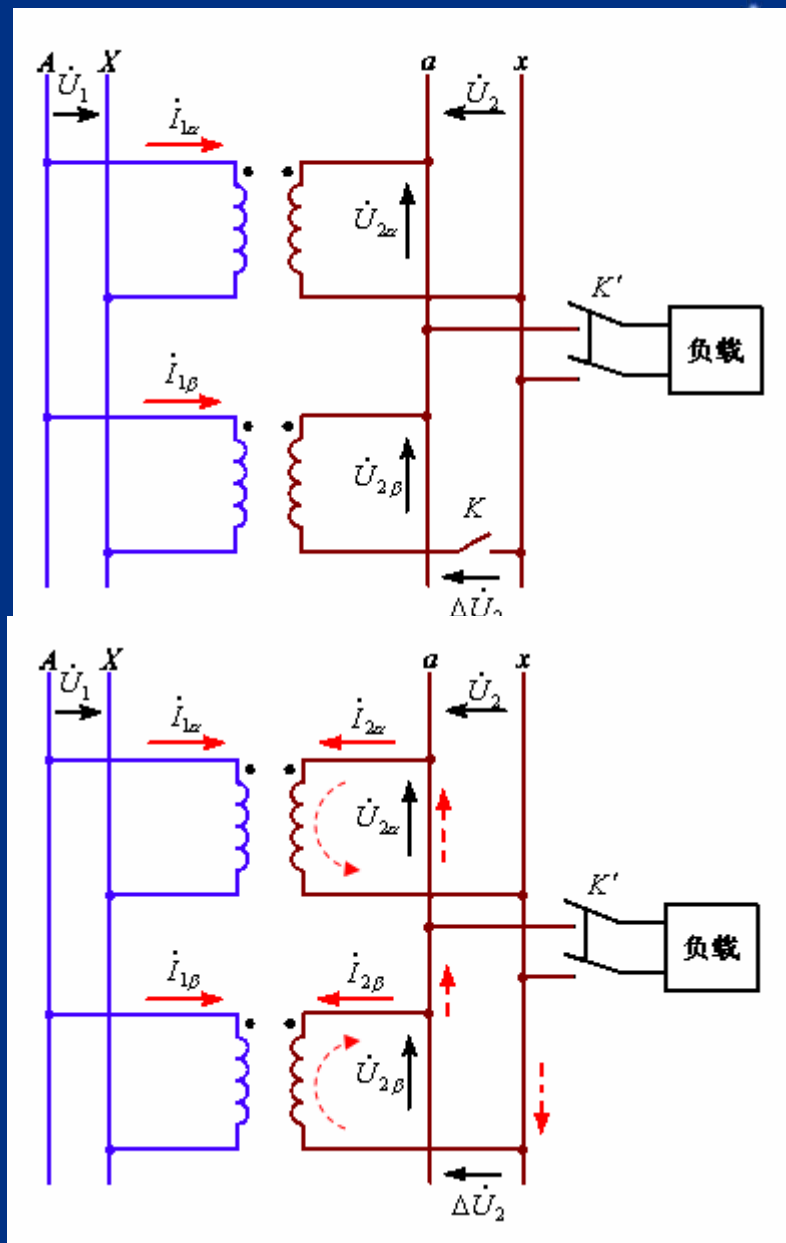
- ①各变压器一、二次侧的额定电压分别相等；（变压比相等）
- ②各变压器二次侧线电压对一次侧线电压的相位移相同；（即各变压器的联结组标号相同）
- ③各变压器的短路阻抗标幺值相等，且短路阻抗角相等。

实际运行中，条件②必须严格满足。

2. 变压器变压比不等时的并联运行

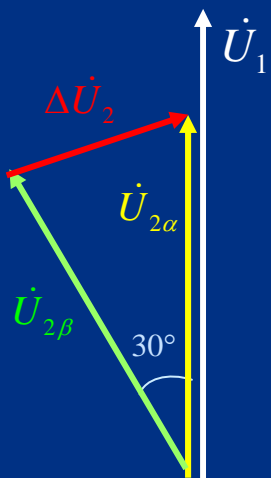
若两变压器联结组标号相同，但是变压比不相等，则二次侧电压不相等，开关K两边的电压为

$$\Delta\dot{U}_2 = \dot{U}_{20\alpha} - \dot{U}_{20\beta} = \frac{-\dot{U}_1}{k_\alpha} - \frac{-\dot{U}_1}{k_\beta} = \dot{U}_{1\beta} - \dot{U}_{1\alpha}$$



3. 变压器联结组标号对并联运行的影响

α 和 β 两台变压器的一、二次额定电压分别相等，联结组标号分别为Yy0和Yd11，分析这两台变压器并联运行时的情况。



$$\Delta U_2 = 2U_2 \sin \frac{30^\circ}{2} = 0.518U_2$$

如果, $|Z_{k\alpha}| = |Z_{k\beta}| = 0.05$, 则

$$\frac{I_c}{I} = \frac{\Delta U_2}{|Z'_{k\alpha} + Z'_{k\beta}|} = 5.18$$

注意： 联结组标号不同的变压器绝对不能并联运行。

4. 并联运行变压器的负载分配

设三台变压器一次、二次额定电压分别相等，联接组标号也相同，则并联运行时的简化等效电路如下图所示。

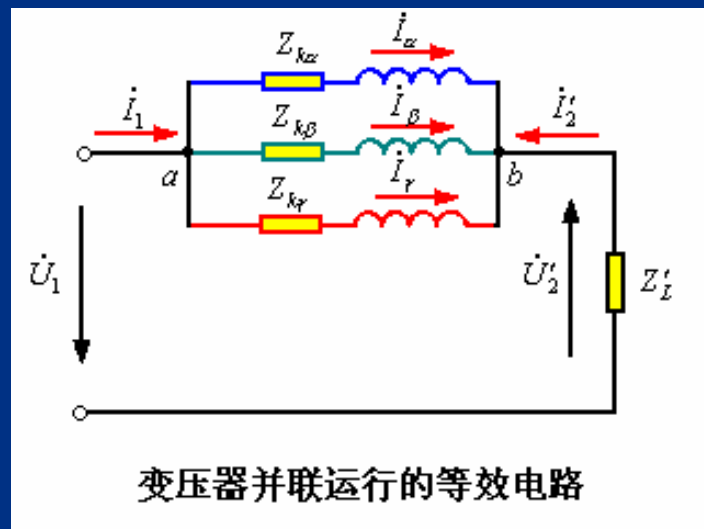
$$\dot{U}_{ab} = \dot{I}_{\alpha} Z_{k\alpha} = \dot{I}_{\beta} Z_{k\beta} = \dot{I}_{\gamma} Z_{k\gamma}$$

$$\rightarrow \dot{I}_{\alpha} : \dot{I}_{\beta} : \dot{I}_{\gamma} = \frac{1}{Z_{k\alpha}} : \frac{1}{Z_{k\beta}} : \frac{1}{Z_{k\gamma}}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{\alpha} + \dot{I}_{\beta} + \dot{I}_{\gamma}$$

$$\varphi_k = \operatorname{tg}^{-1} \frac{X_k}{R_k}$$

$$I_1 = \left| \dot{I}_{\alpha} + \dot{I}_{\beta} + \dot{I}_{\gamma} \right|$$

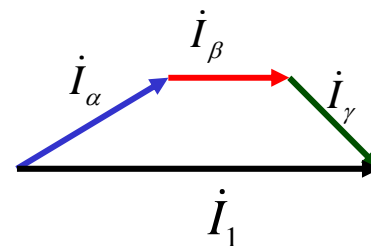


$$\dot{I}_1 = \dot{I}_\alpha + \dot{I}_\beta + \dot{I}_\gamma \quad I_1 = \left| \dot{I}_\alpha + \dot{I}_\beta + \dot{I}_\gamma \right|$$

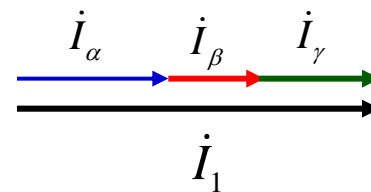
各变压器的负载电流应同相位, 即要求各变压器的短路阻抗角相等。

容量相差不太大的两台变压器, 其短路阻抗角差异不大, 可以忽略。

$$I_1 = I_\alpha + I_\beta + I_\gamma$$



(a) 不同相时



(b) 同相时

变压器并联运行时输出电流间的相位关系

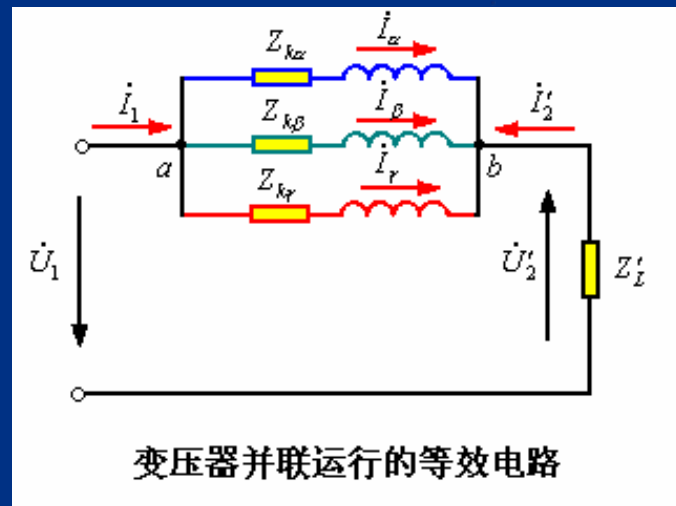
$$\dot{U}_{ab} = \dot{I}_{\alpha} Z_{k\alpha} = \dot{I}_{\beta} Z_{k\beta} = \dot{I}_{\gamma} Z_{k\gamma}$$

$$\rightarrow U_{ab} = I_{\alpha} |Z_{k\alpha}| = I_{\beta} |Z_{k\beta}| = I_{\gamma} |Z_{k\gamma}|$$

用标么值表示为

$$\underline{U}_{ab} = \underline{I}_{\alpha} \underline{|Z_{k\alpha}|} = \underline{I}_{\beta} \underline{|Z_{k\beta}|} = \underline{I}_{\gamma} \underline{|Z_{k\gamma}|}$$

$$\rightarrow \beta_{\alpha} : \beta_{\beta} : \beta_{\gamma} = \frac{1}{\underline{|Z_{k\alpha}|}} : \frac{1}{\underline{|Z_{k\beta}|}} : \frac{1}{\underline{|Z_{k\gamma}|}}$$



★结论:

- 并联运行的变压器，各变压器的负载系数与短路阻抗标么值成反比；
- 当各变压器的短路阻抗标么值相等时，各变压器同时达到满载，这时设备容量的利用率最高；
- 短路阻抗标么值小的变压器先达到满载；
- 为了使并联运行变压器担负的最大负载尽可能大，当短路阻抗标么值不等时，应使短路阻抗标么值最小者额定容量最大，短路阻抗标么值最大者，额定容量最小。

1) 各变压器电流与总负载电流的关系

$$I_{\alpha} : I_{\beta} : I_{\gamma} = \frac{S_{N\alpha}}{|Z_{k\alpha}|} : \frac{S_{N\beta}}{|Z_{k\beta}|} : \frac{S_{N\gamma}}{|Z_{k\gamma}|} \left. \vphantom{\frac{S_{N\alpha}}{|Z_{k\alpha}|}} \right\} \rightarrow I_{\alpha}, I_{\beta}, I_{\gamma}$$
$$I_1 = I_{\alpha} + I_{\beta} + I_{\gamma}$$

2) 各变压器负载与总负载的关系

▪方法1

$$\beta_{\alpha} : \beta_{\beta} : \beta_{\gamma} = \frac{1}{|Z_{k\alpha}|} : \frac{1}{|Z_{k\beta}|} : \frac{1}{|Z_{k\gamma}|}$$

$$\rightarrow S_{\alpha} : S_{\beta} : S_{\gamma} = I_{\alpha} : I_{\beta} : I_{\gamma} = \frac{S_{N\alpha}}{|Z_{k\alpha}|} : \frac{S_{N\beta}}{|Z_{k\beta}|} : \frac{S_{N\gamma}}{|Z_{k\gamma}|}$$

$$S_\alpha : S_\beta : S_\gamma = I_\alpha : I_\beta : I_\gamma = \frac{S_{N\alpha}}{Z_{k\alpha}} : \frac{S_{N\beta}}{Z_{k\beta}} : \frac{S_{N\gamma}}{Z_{k\gamma}} \left. \vphantom{\frac{S_{N\alpha}}{Z_{k\alpha}} : \frac{S_{N\beta}}{Z_{k\beta}} : \frac{S_{N\gamma}}{Z_{k\gamma}}} \right\} \rightarrow S_\alpha, S_\beta, S_\gamma$$

$$S_L = S_\alpha + S_\beta + S_\gamma$$

▪方法2

$$\beta_\alpha : \beta_\beta : \beta_\gamma = \frac{1}{Z_{k\alpha}} : \frac{1}{Z_{k\beta}} : \frac{1}{Z_{k\gamma}} \left. \vphantom{\frac{1}{Z_{k\alpha}} : \frac{1}{Z_{k\beta}} : \frac{1}{Z_{k\gamma}}} \right\} \begin{array}{l} \rightarrow \beta_\alpha, \beta_\beta, \beta_\gamma \\ \rightarrow S_\alpha, S_\beta, S_\gamma \end{array}$$

$$S_L = \beta_\alpha S_{N\alpha} + \beta_\beta S_{N\beta} + \beta_\gamma S_{N\gamma}$$

例3-1

有两台联结组标号均为Yd11的三相变压器并联运行,其参数如下:

变压器 α : $S_{N\alpha} = 1800\text{kVA}$, $\left|Z_{k\alpha}\right| = 0.0825$, $U_{1N} / U_{2N} = 35 / 10\text{kV}$;

变压器 β : $S_{N\beta} = 1000\text{kVA}$, $\left|Z_{k\beta}\right| = 0.0625$, $U_{1N} / U_{2N} = 35 / 10\text{kV}$;

总负载为2800kVA。试求:

- (1) 每台变压器分配的负载是多少?
- (2) 在不许任何一台变压器过载的情况下, 能承担的最大总负载是多少? 并联组的利用率是多少?

解:(1) $\beta_\alpha : \beta_\beta = \frac{1}{|Z_{k\alpha}|} : \frac{1}{|Z_{k\beta}|} = \frac{1}{0.0825} : \frac{1}{0.0675} = 9 : 11$

$$\beta_\alpha S_{N\alpha} + \beta_\beta S_{N\beta} = 2800$$

联立求解以上两式，可得

$$\beta_\alpha = 0.926, \beta_\beta = 1.132$$

每台变压器分配的负载为

$$S_\alpha = \beta_\alpha S_{N\alpha} = 0.926 \times 1800 = 1667(\text{kVA})$$

$$S_\beta = \beta_\beta S_{N\beta} = 1.132 \times 1000 = 1132(\text{kVA})$$

因短路阻抗标么值小的变压器容易过载，所以，令 $\beta_\beta = 1$ 时，并联运行的两台变压器均不会过载，此时

$$\beta_\alpha = \beta_\beta \frac{|Z_{k\beta}|}{|Z_{k\alpha}|} = 1 \times \frac{0.0675}{0.0825} = 0.818$$

最大总负载

$$\begin{aligned} S_{\max} &= \beta_\alpha S_{N\alpha} + \beta_\beta S_{N\beta} \\ &= 0.818 \times 1800 + 1 \times 1000 = 2472(\text{kVA}) \end{aligned}$$

并联组的利用率为

$$\frac{S_{\max}}{S_{N\alpha} + S_{N\beta}} = \frac{2472}{1800 + 1000} = 88.3\%$$

小 结

1. 三相变压器在对称情况下运行时，各相的电流、电压都是对称的，可以用单相变压器的基本方程式、等效电路和相量图对三相变压器的任一相进行分析，然后加以合成即可。
2. 三相变压器的磁路系统分为两种：独立磁路系统（三相变压器组）和相关磁路系统（三铁心柱式变压器）。
3. 三相变压器的电路系统按高、低压绕组线电势之间的相位关系用联结组标号来表示。它与绕组的绕向、首尾端的标号及三相绕组的联结方式有关。

4.在现代变电站中，通常采用几台变压器并联运行。并联运行的理想情况是空载时不产生环流，负载时负载的分配与容量成正比。为了达到理想的并联情况，必须满足三个条件：
①各变压器的变压比相等；②联结组标号相同；③短路阻抗的标么值相等。

5. 变压器短路阻抗标么值相等能使负载按变压器额定容量成正比例分配，当短路阻抗标么值不相等时，各变压器的负载比例系数与短路阻抗的标么值成反比。