

特性分析

1. 空载时输出功率为零, 所以 $\eta=0$.
2. 负载较小时, 损耗相对较大, 功率 η 较低.
3. 负载增加, 效率 η 亦随之增加. 超过某一负载时, 因铜耗与成正比增大, 效率 η 反而降低, 最大效率 η 出现在 $\frac{d\eta}{d\beta}=0$ 的地方. 因此, 取 η 对 β 的导数, 并令其等于零, 即可求出最高效率 η_{\max} 时的负载系数 β_m

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}}$$

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{2 p_0}{\beta_m S_N \cos \varphi_2 + 2 p_0} \times 100\%$$

即当不变损耗（铁耗）等于可变损耗（铜耗）时效率最大。

由于变压器总是在额定电压下运行，但不可能长期满负载。为了提高运行的经济性，通常设计成 $\beta_m = 0.5 \sim 0.6$ ，这样，

$$\frac{P_0}{P_{kN}} = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$$

使铁耗较小

三相变压器

现代电力系统都采用三相制，故三相变压器使用最广泛。但三相变压器也有其特殊的问题需要研究，例如三相变压器的磁路系统、三相变压器绕组的连接方法和联结组、三相变压器空载电动势的波形和三相变压器的不对称运行等。此外，变压器的并联运行也放在本章讨论。

电力系统普遍采用三相供电制，电力系统用的最多的是三相变压器。

当三相变压器的原边和副边绕组均以一定的接法现接，带上三相**对称**负载，原边加上**对称**的三相电压时，因为三相对称电压本身大小相等、相位互差 120° ，因此求得一相的电压、电流，其它两相按对称关系求出。

特殊问题：

- (1) 三相绕组的联接，即电路问题；
- (2) 三相变压器的磁路系统；
- (3) 不同磁路下的感应电势的波形；

三相变压器磁路系统

三相变压器的磁路系统

可分为各相磁路独立和各相磁路相关两大类

各相磁路独立

三相变压器组或组式三相变压器,如图所示

三相变压器磁路系统

由三个容量与结构完全相同的单相变压器组成的三相变压器。特点是每相都有自己独立的磁路，互不相关，各相的励磁电流在数值上完全相等。这种结构的变压器称为三相组式变压器，其优点是：对特大容量的变压器制造容易，备用量小。但其铁心用料多，占地面积大，只适用于超高压、特大容量的场合。

磁路系统磁路系统

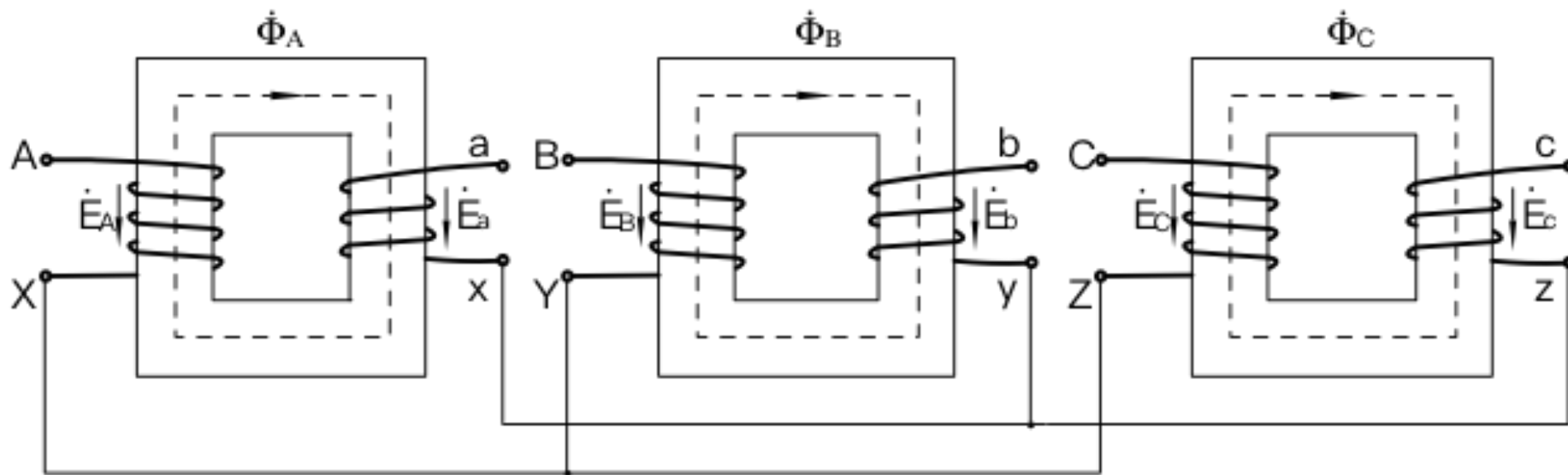


图4-20 三相组式变压器磁路系统

由三个相分别是独立的单相变压器，仅仅在电路上互相连接，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。

特点：

- 1.显然各相磁路相互独立彼此无关**
- 2.当原方接三相对称电源时，各相主磁通和励磁电源也是对称的。**

各相磁路相关

三相变压器磁路系统

三相心式变压器特点是三相磁路相互关联，磁路长度不等，当外加三相对称电压时，三相励磁电流不对称，但因励磁电流很小，可忽略对负载运行的影响。其优点是：节省材料，体积小，效率高，维护方便。故目前大、中、小容量的变压器广泛采用心式变压器。

三相变压器磁路系统

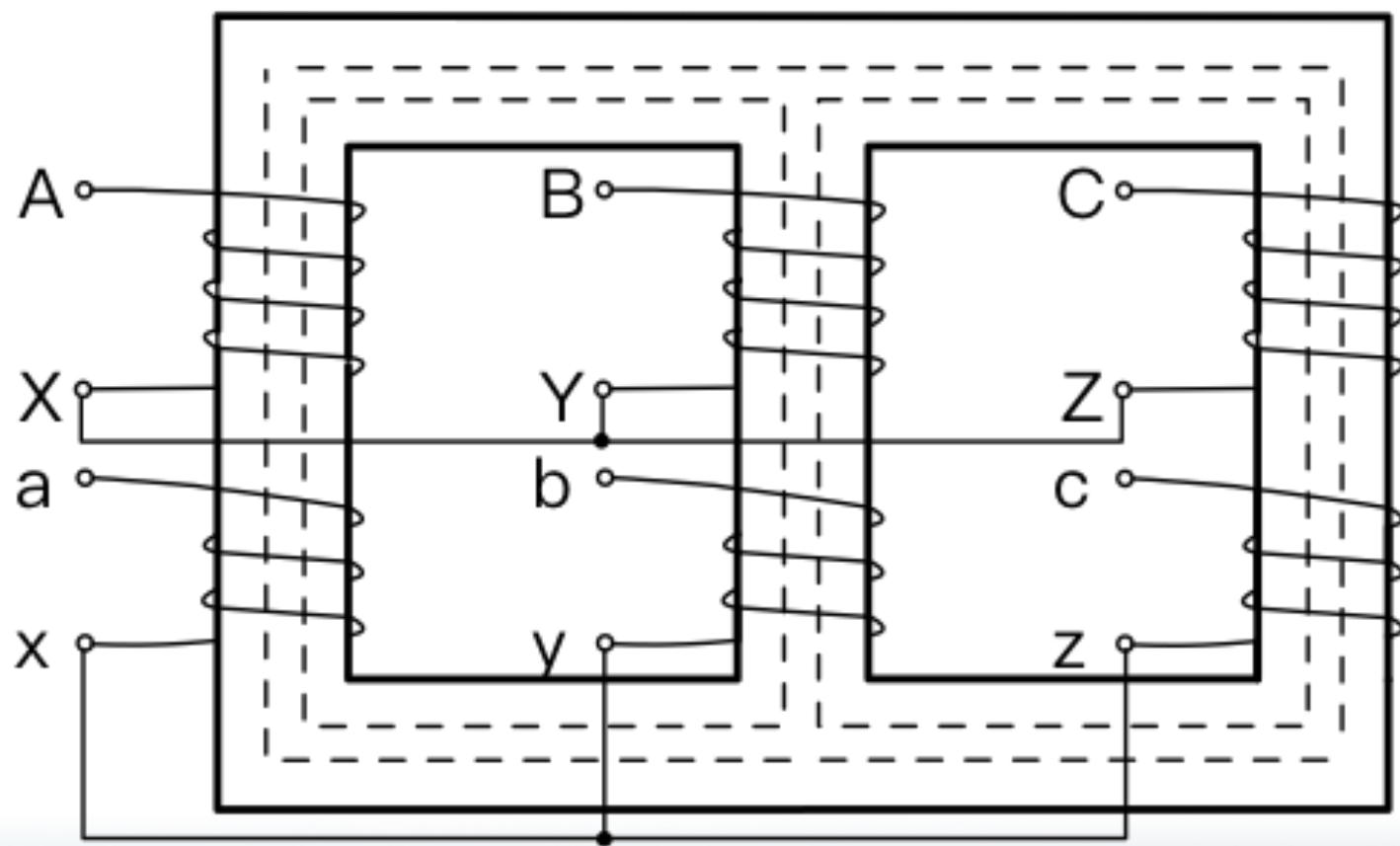
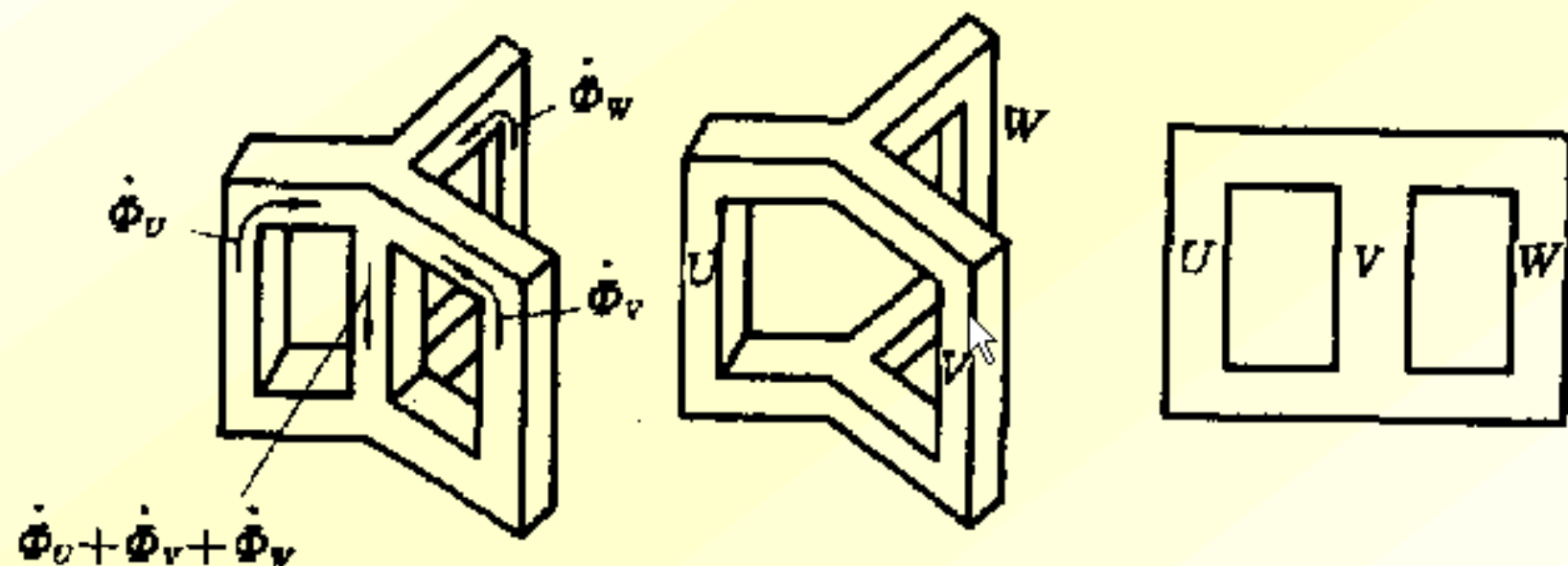


图4-21 三相心式变压器磁路系统



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



$$\dot{\phi}_U + \dot{\phi}_V + \dot{\phi}_W = 0$$

每一铁心柱的主磁通
为三相主磁通的总和。

磁路长短不一，励磁电流
占很小比例，影响不大。



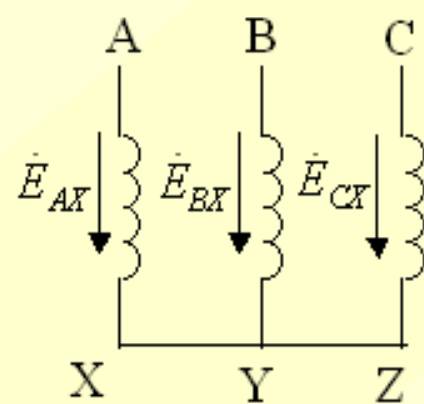
§ 9-2 三相变压器绕组的联接法和联接组

1、三相变压器连接法

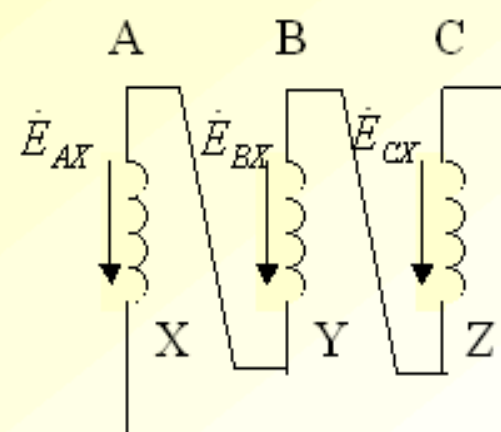
高压绕组首端由A、B、C表示，末端由X、Y、Z表示；

低压绕组首端由a、b、c表示，末端由x、y、z表示。

- 末端连在一起，首端引出，为星形连接“Y”，中点引出 Y_0 ；
- 一相绕组末端与另一相绕组首端相连，依次得到一闭合回路，为三角形连接“ Δ ”，有顺、逆之分。



星形连接



三角形连接

绕组名

单相变压器

三相变压器

首端

末端

首端

末端

中点

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

中压绕组

A_m

X_m

$A_m B_m C_m$

$X_m Y_m Z_m$

Nm

同极性(名)端：由于变压器高、低压绕组交链着同一主磁通，当某一瞬间高压绕组的某一端为正电位时，在低压绕组上必有一个端点的电位也为正，则这两个对应的端点称为同极性端，并在对应的端点上用符号“.”标出。

注意：绕组的极性只决定于绕组的绕向，与绕组首、尾端的标志无关。规定绕组电动势的正方向为从首端指向末端。当同一铁心柱上高、低压绕组首端的极性相同时，其电动势相位相同，如图所示。当首端极性不同时，高、低压绕组电动势相位相反，如图：

绕组联接组别

三相变压器联结组别图

2. 三相变压器联结组别

确定三相变压器联结组别的步骤是：

- ①根据三相变压器绕组联结方式（Y或y、D或d）画出高、低压绕组接线图（绕组按A、B、C相序自左向右排列）；
- ②在接线图上标出相电动势和线电动势的假定正方向；

绕组联接组别

- ③画出高压绕组电动势相量图，根据单相变压器判断同一相的相电势方法，将A、a重合，再画出低压绕组的电动势相量图（画相量图时应注意三相量按顺相序画）；
- ④根据高、低压绕组线电动势相位差，确定联结组别的标号。

绕组联接组别

(1) Yy联结组别

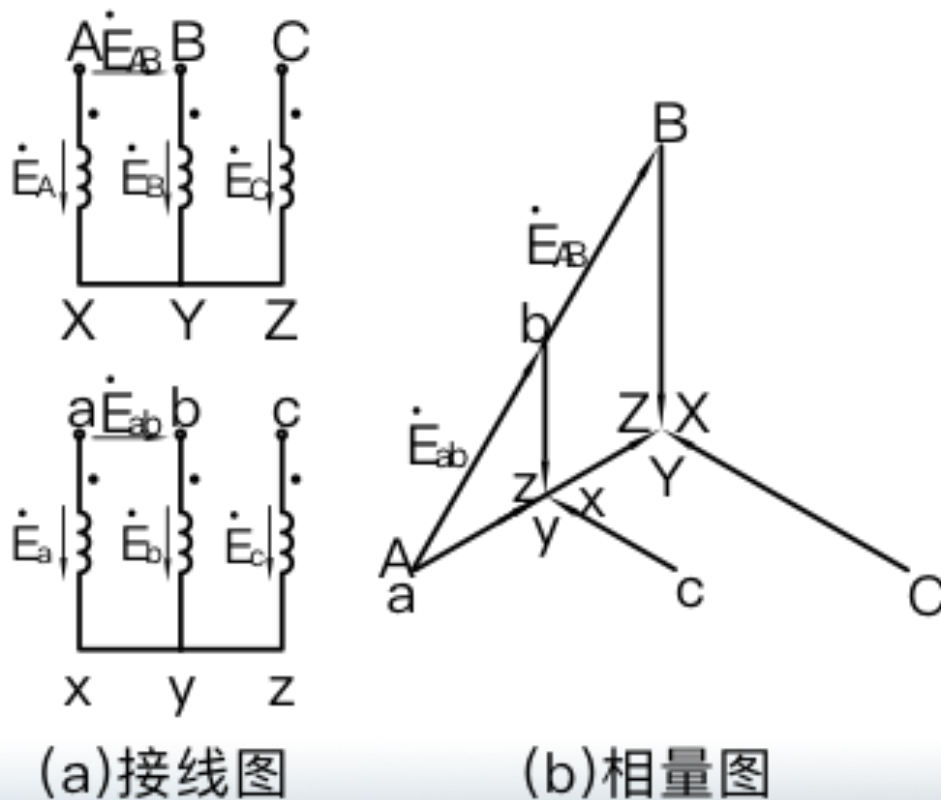


图4-25 Yy0联结组别的接线图和相量图

绕组联接组别

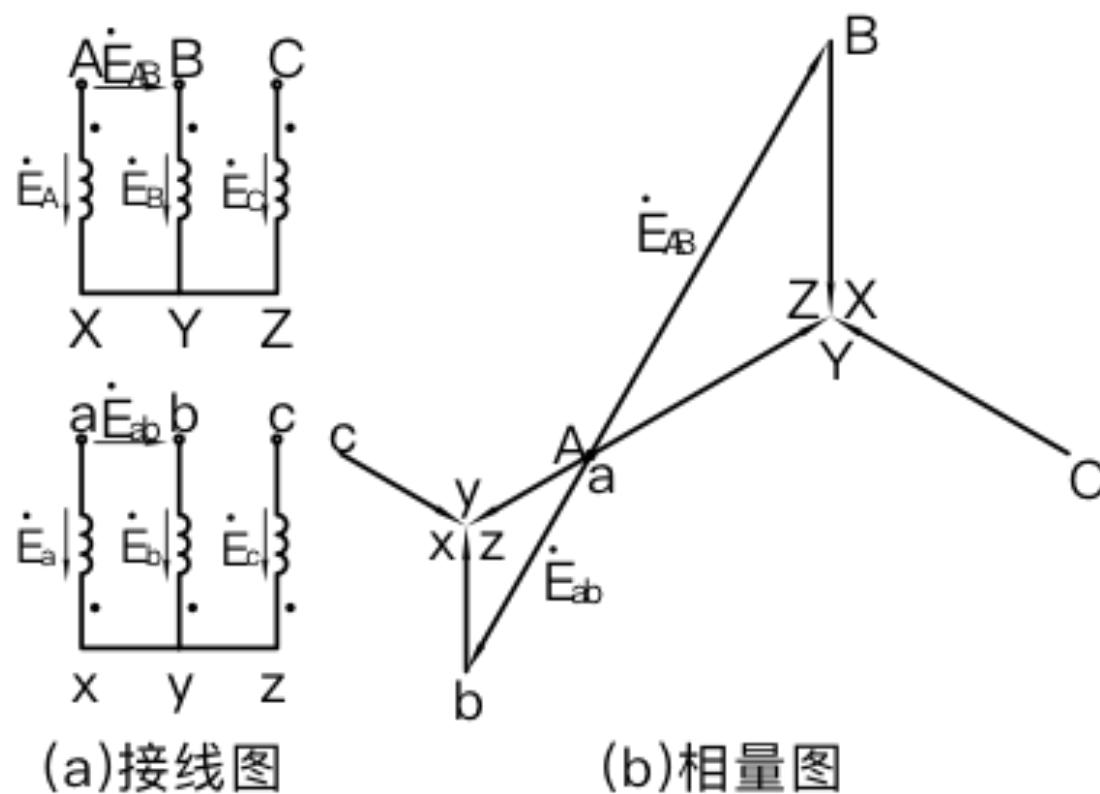


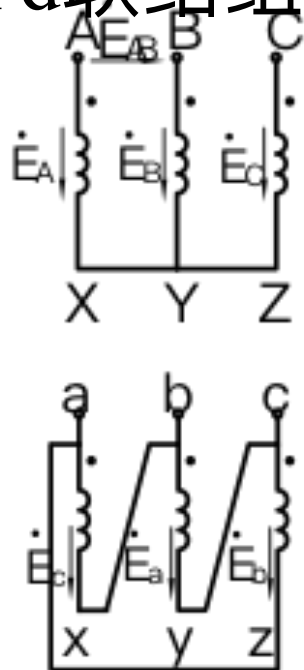
图4-26 Yy6联结组别的接线图和相量图

绕组联接组别

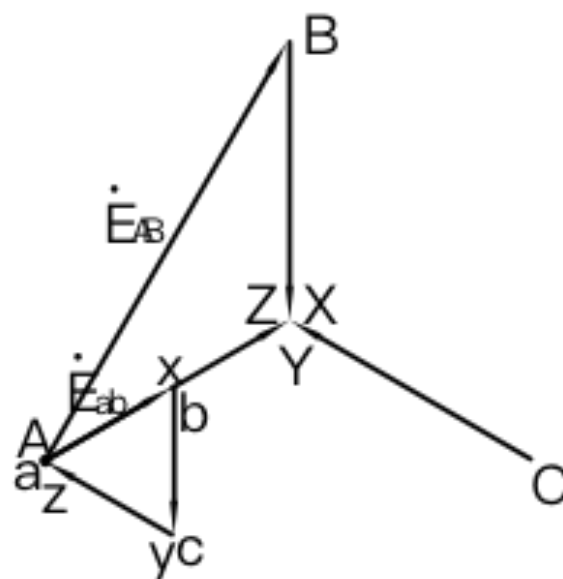
Yy联结的三相变压器，共有Yy0、Yy4、Yy8、Yy6、Yy10、Yy2六种联结组别，标号为偶数。

绕组联接组别

(2) Yd联结组别



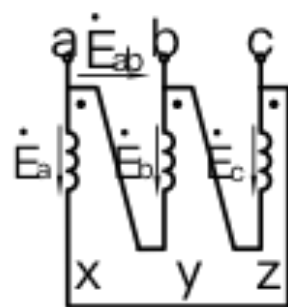
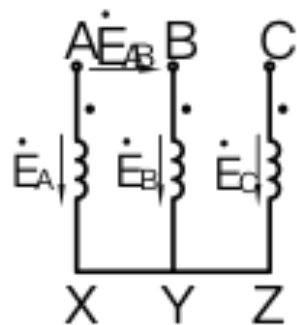
(a) 接线图



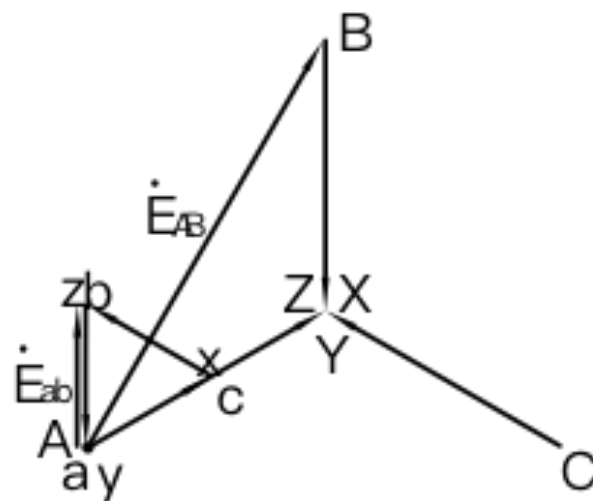
(b) 相量图

图4-28 Yd1联结组别的接线图和相量图

绕组联接组别



(a) 接线图



(b) 相量图

图4-29 Yd11联结组别的接线图和相量图

绕组联接组别

Yd联结的三相变压器，共有Yd1、Yd5、Yd9、Yd7、Yd11、Yd3六种联结组别，标号为奇数。

绕组联接组别

(3) 标准联结组别

理论上，变压器可以有很多联结组别。但实际上，为了避免制造和使用上的混乱，国家标准规定对单相双绕组电力变压器只有I I0联结组别一种。对三相双绕组电力变压器规定只有Yyn0、Yd11、YNd11、YNy0和Yy0五种。

标准联接组别

Yyn0组别的三相电力变压器用于三相四线制配电系统中，供电给动力和照明的混合负载；Yd11组别的三相电力变压器用于低压高于0.4kV的线路中；YNd11组别的三相电力变压器用于110kV以上的中性点需接地的高压线路中；YNy0组别的三相电力变压器用于原边需接地的系统中；Yy0组别的三相电力变压器用于供电给三相动力负载的线路中。

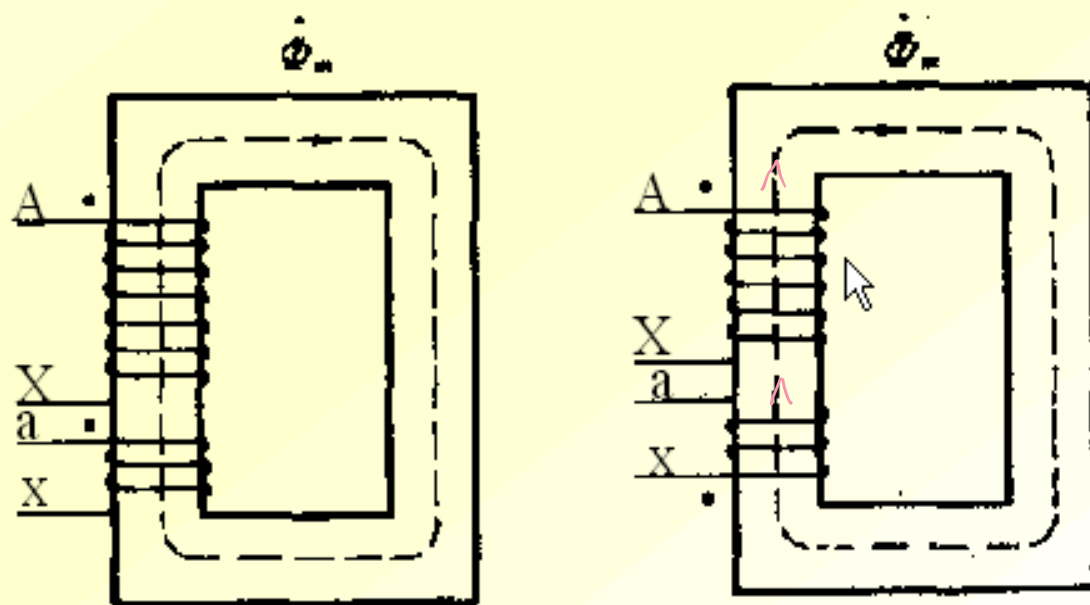


2、连接组

(1) 高、低压绕组中电动势相位关系（单相绕组）

- 单相变压器中，**高压绕组**首端为“A”、末端为“X”；**低压绕组**首端为“a”、末端为“x”。

- 原、副绕组被同一主磁通 ϕ 交链，感应电动势在任一瞬间原边绕组一端点为高电位，副边绕组也有一端点为高电位。这两个端点为**“同名端”**





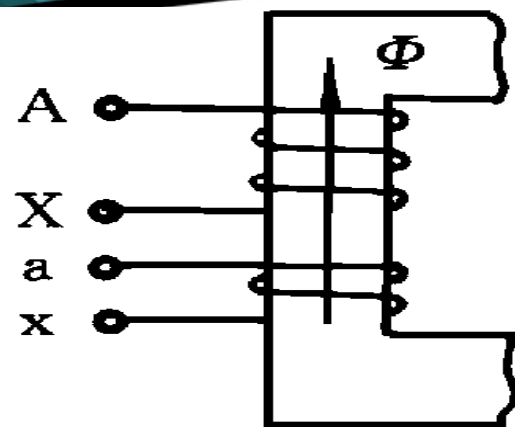
时钟表示法

对于任意标定的a、x，感应电势 \dot{E}_{AX} 和 \dot{E}_{ax} 的相位关系有两种结果，即 \dot{E}_{AX} 与 \dot{E}_{ax} 同相或反相。

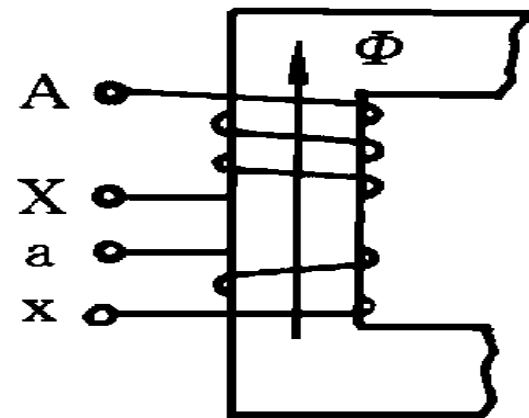
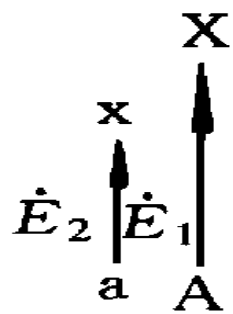
时钟表示法：标志变压器高、低压绕组的相位关系。

时钟表示法：高压绕组电势 \dot{E}_{AX} 从A到X，记为 \dot{E}_A ，作为时钟的**长针**，指向12点；低压绕组电势 \dot{E}_a 从a到x，记为 \dot{E}_{ax} ，作为时钟的**短针**，根据相位关系，指向针面上哪个数字，改数字为变压器的联接组别的标号。

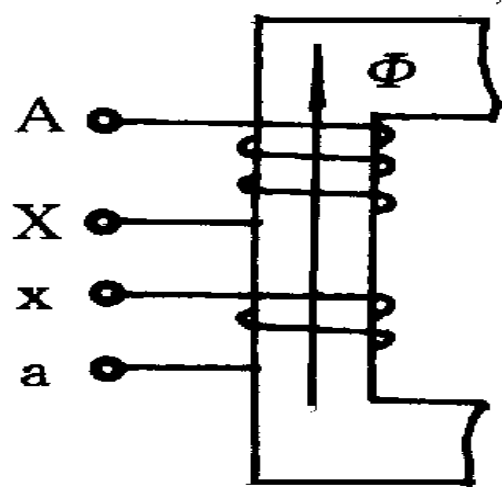
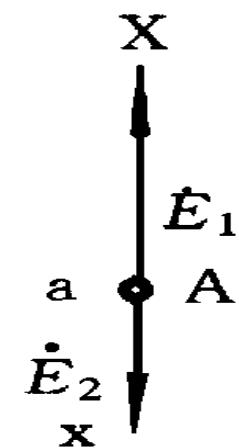
单相变压器：I/I—12； I/I—6；



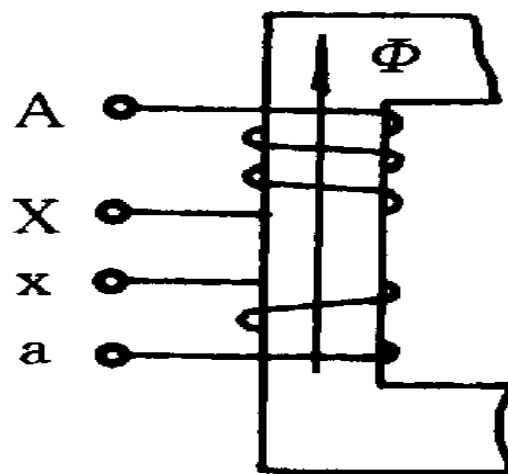
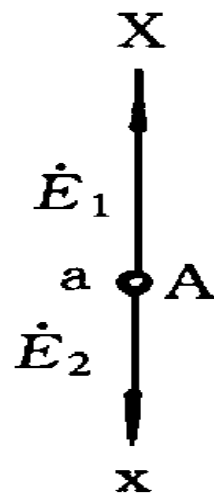
(a)



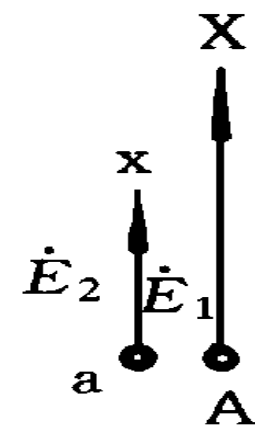
(b)



(c)



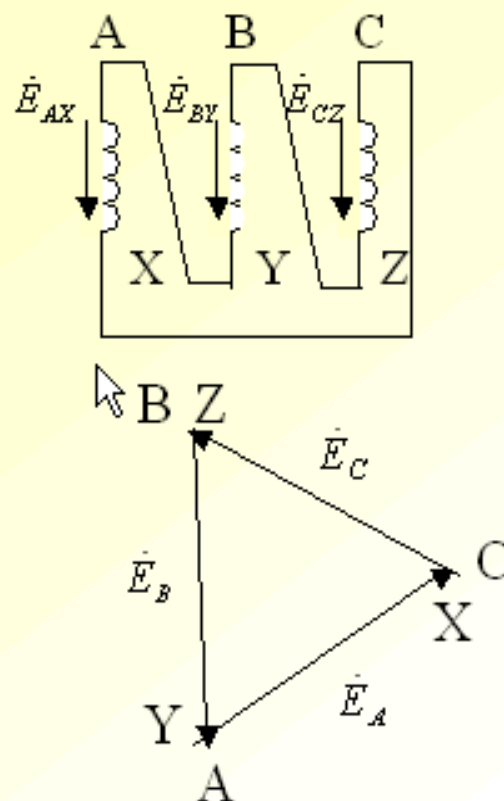
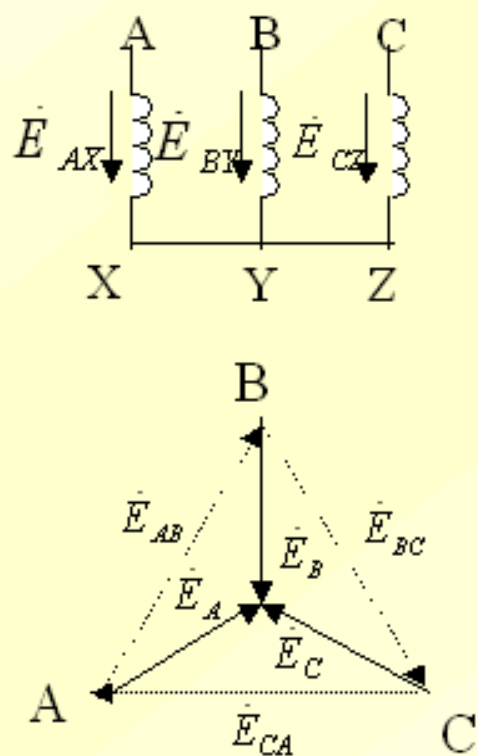
(d)

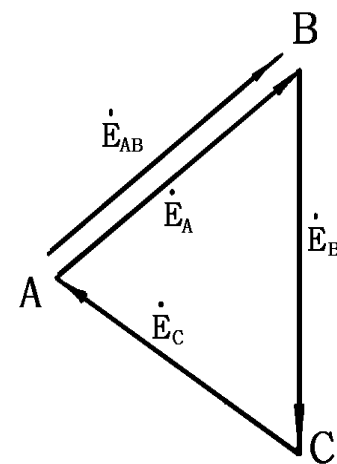
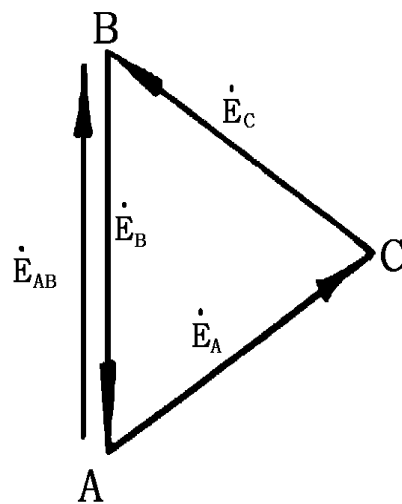
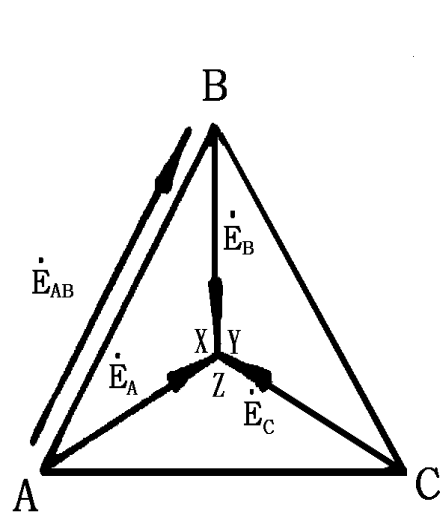
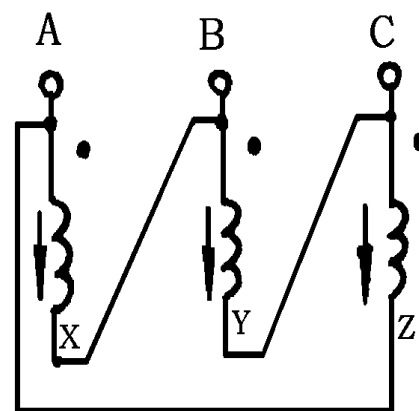
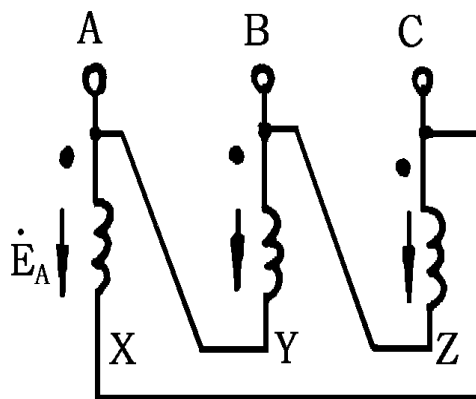
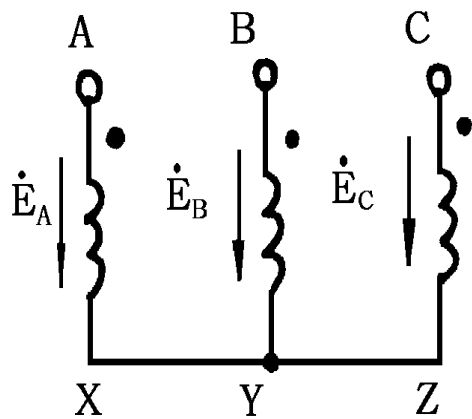




(2) 三相变压器绕组的联接组

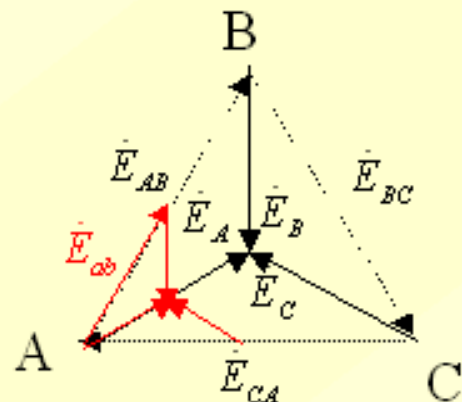
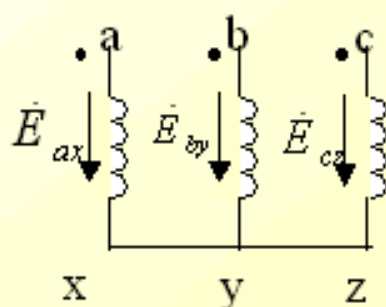
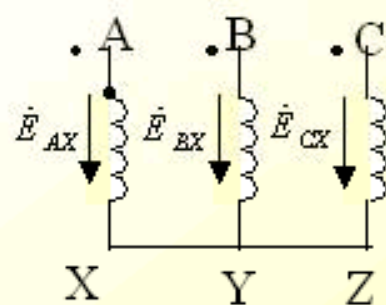
- 三相变压器的联接组是用副边线电动势与原边线电动势的相位差来决定。
- 与原、边三相绕组的联接方法、绕组的绕向和绕组的首末端的标法有关；
- 确定三相变压器的联接组号需通过画相量位形图来判别。







以Y/Y联机的三相变压器为例说明联接组的判别



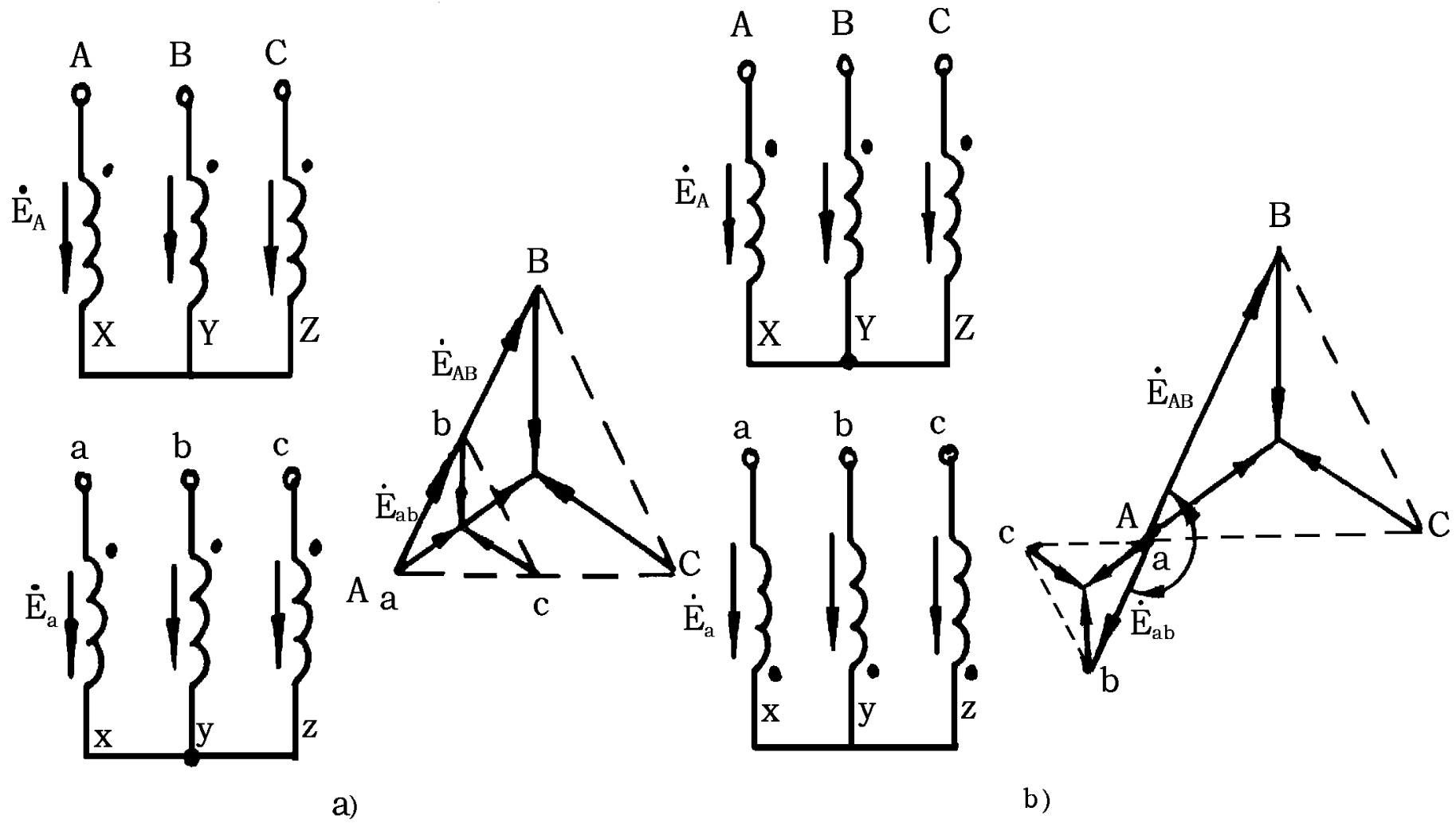
(1) 在接线图上标出各相电动势相量;

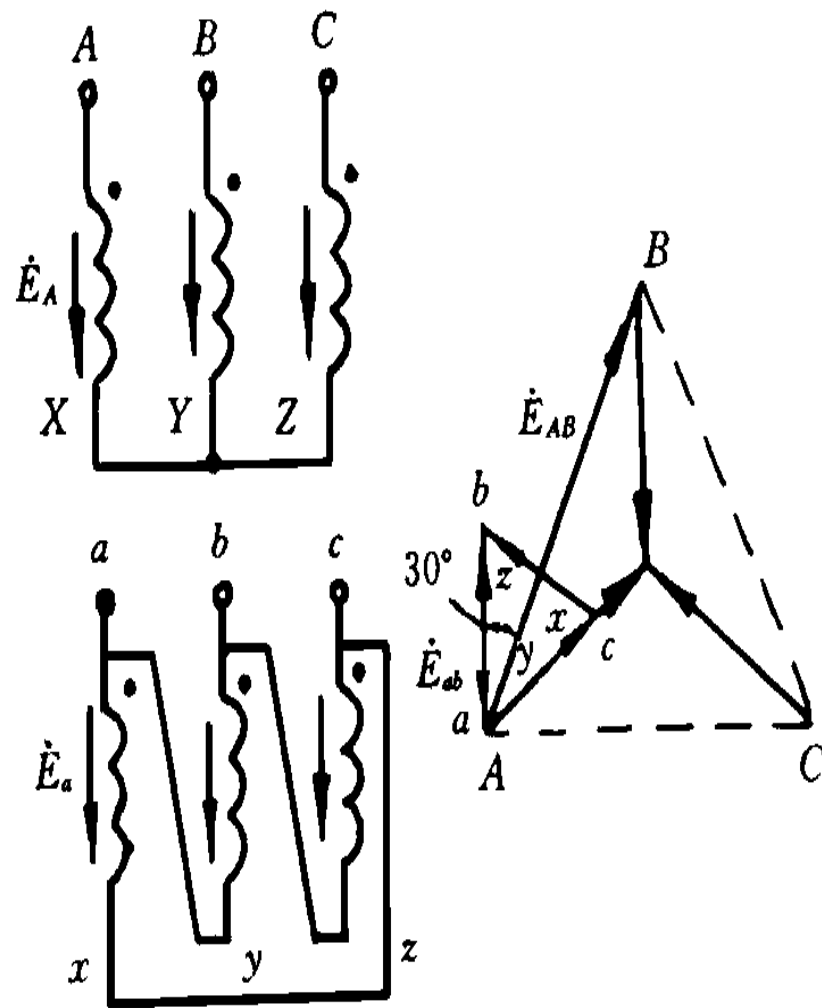
(2) 画出原绕组电动势相量位形图;

(3) 根据同一铁心柱上原、副绕组感应电动势的相位关系, 画出副边绕组电动势位形图。将“a”点与“A”点重合, 使相位关系更直观。

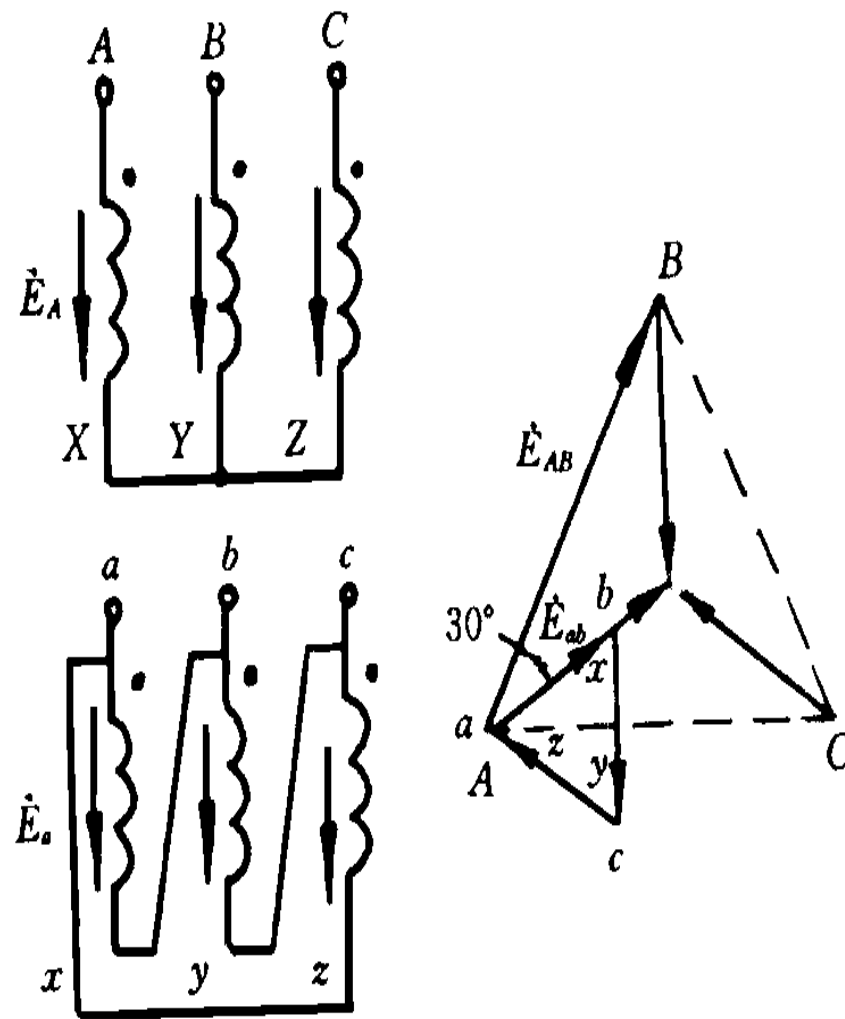
(4) 比较原、副绕组线电动势 \dot{E}_{AB} 与 \dot{E}_{ab} 的相位关系。根据钟点法确定联接组别。

可以判断得到, 该联接组为Y/Y-12





a)Y,d11



b)Y,d1

在用相量图判断变压器的联结组

时应注意以下几点

- 1) 绕组的极性只表示绕组的绕法，与绕组首末端的标志无关；
- 2) 高、低压绕组的相电动势均从首端指向末端，线电动势从A指向B；
- 3) 同一铁心柱上的绕组（在连接图中为上下对应的绕组），首端为同极性时相电动势相位相同，首端为异极性时相电动势相位相反；
- 4) 相量图中A、B、C与a、b、c的排列顺序必须同

对于Y,y连接而言,可得0,2,4,6,8,10六个偶数的联结组号 相对于Y,d而言,就
可得1,3,5,7,9,11六个奇数的联结组号.

标准联结组:

总的来说, Y, y接法和D, d接法可以有0、2、4、6、8、10等6个偶数联结组别, Y, d接法和D, d接法可以有1、3、5、7、9、11等6个奇数组别, 因此三相变压器共有12个不同的联结组别。为了使用和制造上的方便,

我国国家标准规定只生产下列5种标准联结组别的
电 力 变 压 器 ,
即Y, yn0; Y, d11; YN, d11; YN, y0; Y, y0

试验确定绕组极性

先标出原、副绕组的假定同极性的出线标号A、a和X、x，把X和x用导线连接，在原边加一较低的便于测量的交流电压，分别测量

$$U_{AX}、U_{Aa}$$

和 U_{ax} ，如果 $U_{Aa}=U_{AX}-U_{ax}$ ，则说明假定标号

A、

a是同极性，即为同名端；如果

$$U_{Aa}=U_{AX}+U_{ax},$$

则说明假定标号A、a是异名端，假定标号不正

确，将原绕组或副绕组的出线端标号互换即

可。

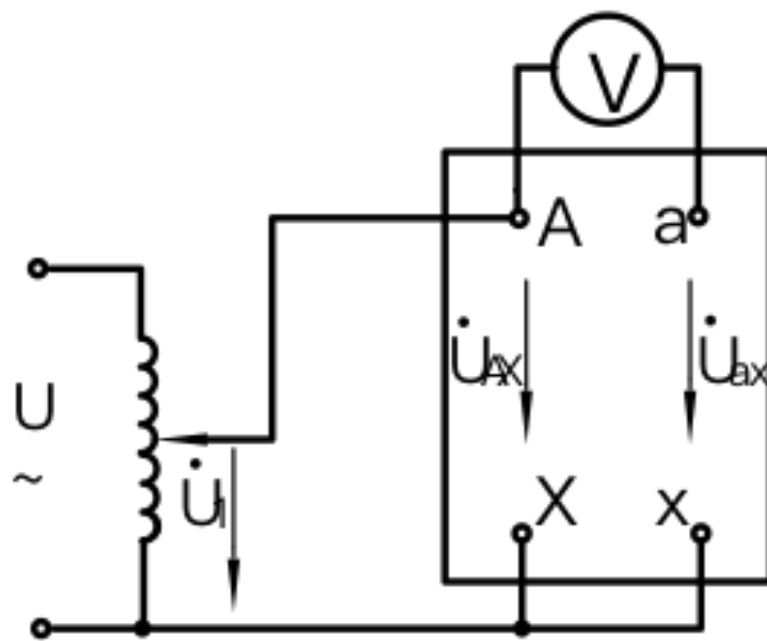


图4-30 变压器相性的测定

试验确定绕组极性

对于三相变压器的每一相原、副绕组之间的极性，与上述单相变压器的测法相同。而三相心式变压器原边各相绕组之间的极性，也可用交流法试验测定。

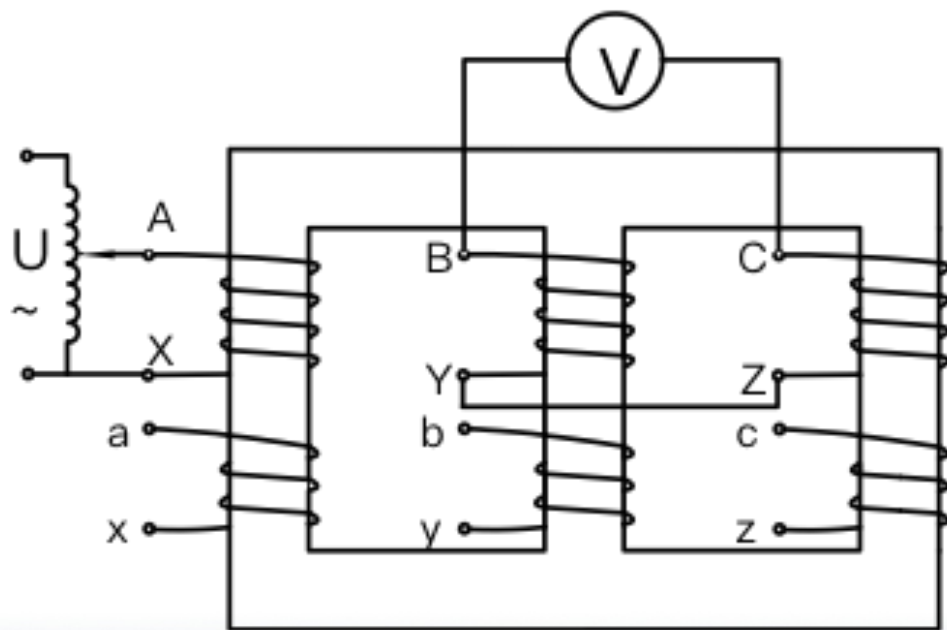


图4-31 三相心式变压器原边各相间极性的测定

试验确定三变压器联结组别

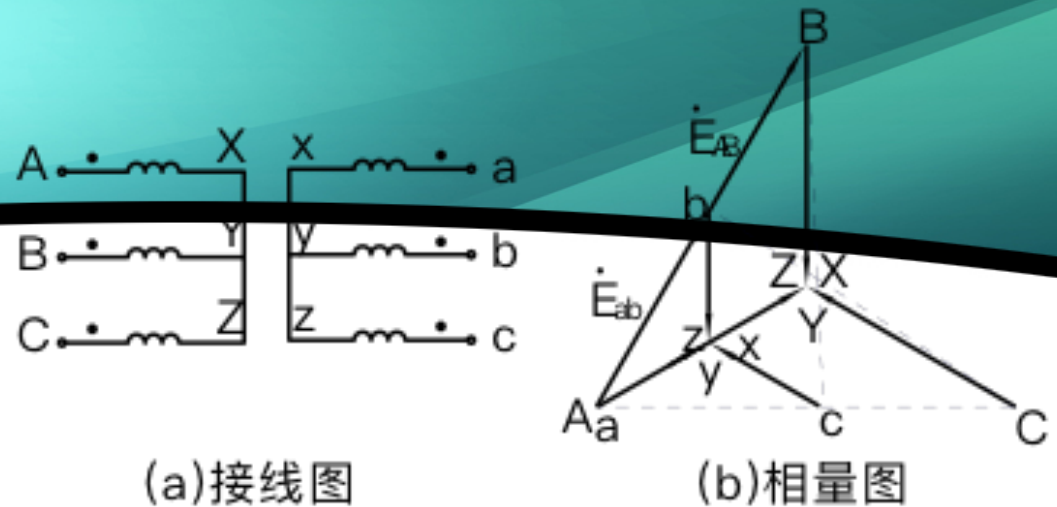


图4-32 Yy0试验接线图和相量图

根据相量图上的几何图形可推导出以下公式：

$$U_{Bb} = U_{AB} - U_{ab} = KU_{ab} - U_{ab} = U_{ab}(K - 1)$$

$$U_{Bc} = U_{Cb} = \sqrt{U_{AB}^2 + U_{ab}^2 - 2U_{AB}U_{ab}\cos 60^\circ} = U_{ab}\sqrt{K^2 + 1 - K}$$

式中 $K=U_{AB}/U_{ab}$ 为变压器的线电压之比。

由上两公式计算所得的电压值与试验测得的电压值比较，相符，则说明是Yy0联结组别。

