

# 第一篇 变压器

## 第三章 三相变压器

### 第三章 三相变压器

#### 本章主要内容

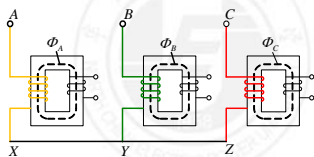
- 三相变压器的磁路系统
- 三相变压器的联结组
- 三相变压器的电动势、空载电流及磁通

### 第三章 三相变压器

#### § 3.1 三相变压器的磁路系统

##### 一、三相变压器组

结构：三台相同的单相变压器经电路三相连接而成



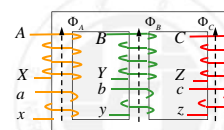
超大型变压器为运输方便，一般采用此种结构

- 特点：
- 1) 三相磁路彼此无关
  - 2) 三相磁通对称，大小相等，相位互差 $120^\circ$
  - 3) 三相激磁电流也对称，大小相等，相位互差 $120^\circ$

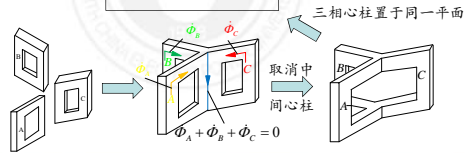
### 第三章 三相变压器

##### 二、三相心式变压器

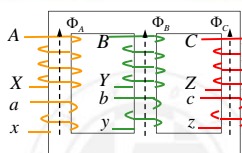
结构：三台相同的单相变压器经磁路、电路三相连接而成



演变：



### 第三章 三相变压器



- 特点：
- 1) 三相磁路彼此相关
  - 2) 三相磁通的代数和等于0
  - 3) 三相磁阻不相等，当外施三相对称电压时，三相空载电流不相等，B相最小，A、C两相大些

三相心式变压器得到广泛应用，它具有消耗材料少、价格便宜、占地面积小、维护简单等优点

### 第三章 三相变压器

#### § 3.2 三相变压器的电路系统—绕组的联结和联结组

**联接组：**根据变压器原、副边【线电动势】的相位关系，把变压器绕组的不同①联结和②标号分成不同的组合。

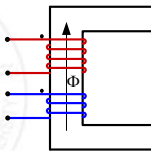
**研究联接组的必要性：**变压器的联结方式、绕组的标记影响原、副边线电动势的相位，这将决定多台变压器是否能够并联运行。

### 第三章 三相变压器

#### 一、单相变压器的联结组

##### (1) 同名端

**定义：**交变磁通在绕组中感应电势，当一个绕组某一端的电位为正时，另一绕组必有一个端点的电位也为正，这两个对应的端点称为同极性端或同名端。



**同名端确定方法：**当电流都从同名端流入时，它们产生的磁通方向一致。

**同名端表示方法：**在对应的两端点旁加一黑点。



-7-

电力工程系

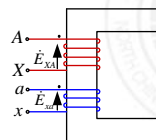
### 第三章 三相变压器

##### (2) 首末端

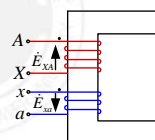
A、a代表高、低压绕组首端，X、x代表末端。

两种不同的标法：

① 同名端为首端



② 异名端为首端



(3) 电动势的规定正方向：由末端指向首端。



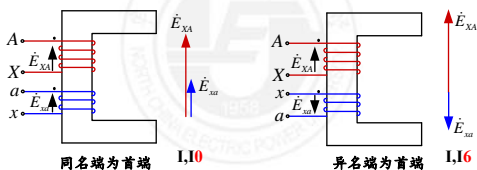
-8-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

##### (4) 联结组表示方法

**时钟表示法：**把高压绕组的相电动势相量看成时钟的长针，低压绕组的相电动势相量看成短针，把长针指到0点不动，短针所指的时数作为联结组的标号。



**结论：**单相变压器同名端标为首端的为I, I0，异名端标为首端的为I, I6。

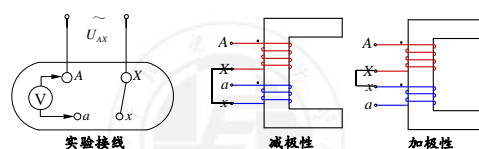


-9-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

##### (5) 单相变压器的极性测定



**方法：**联结Xx，在AX端加一低电压，测量 $U_{Aa}$ 、 $U_{AX}$ 和 $U_{ax}$

- 1)  $U_{Aa} = U_{AX} - U_{ax}$ ，则为I, I0，称为**减极性**；
- 2)  $U_{Aa} = U_{AX} + U_{ax}$ ，则为I, I6，称为**加极性**。

**注意：**只要改变副边标号即可改变变压器的加减极性。



-10-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

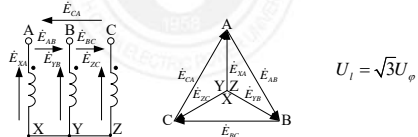
#### 二、三相变压器的联结组

##### (1) 三相变压器绕组首、末端标志

A、B、C代表高压绕组首端，X、Y、Z代表高压绕组末端；  
a、b、c代表低压绕组首端，x、y、z代表低压绕组末端。

##### (2) 三相绕组的联结

###### 1) 星形联结



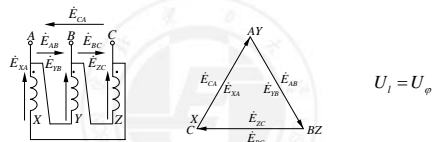
-11-

电力工程系

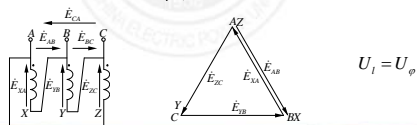
### 第三章 三相变压器

##### 2) 三角形联结

###### ① 按A-Y、B-Z、C-X顺序联结



###### ② 按A-Z、B-X、C-Y逆序联结



-12-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

#### (3) 星形、三角形联结的表示方法

**星形联结：**高压绕组用符号Y表示，低压绕组用符号y表示，如果把中线引出来则分别用YN或yn表示；

**三角形联结：**高压绕组用符号D表示，低压绕组用符号d表示。

#### (4) 联结组表示方法

**线电动势三角形重心重合法：**①将低压边三相线电动势位形图平移到高压边三相线电动势位形图内，并使两个三角形中心重合；②然后以重心O到顶点A的线段OA作为时钟长针，并指向0点；③线段oa所指时钟序数即为联结组的标号。

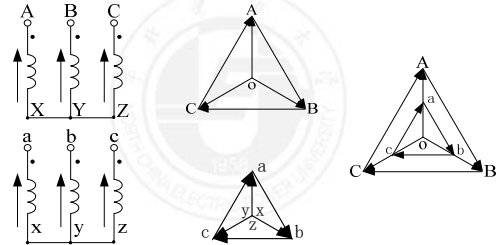


-13-

电力工程

### 第三章 三相变压器

#### (a) Yy0

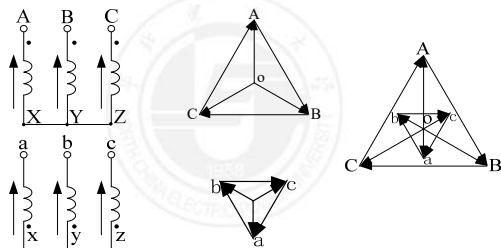


-14-

电力工程

### 第三章 三相变压器

#### (b) Yy6

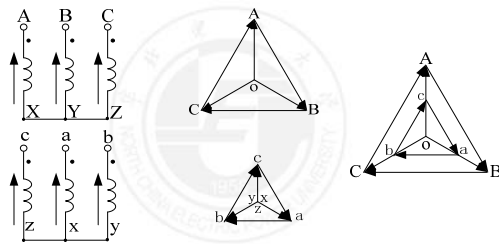


-15-

电力工程

### 第三章 三相变压器

#### (c) Yy4



Y,y联结方式可得0、2、4、6、8、10偶数组号的六种联结组

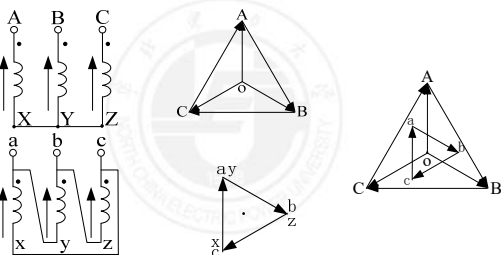


-16-

电力工程

### 第三章 三相变压器

#### (d) Y,d11

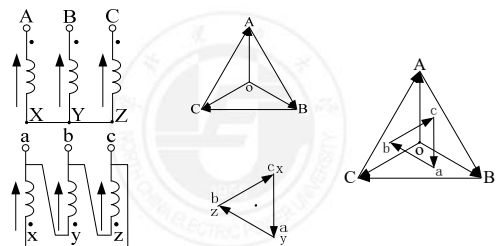


-17-

电力工程

### 第三章 三相变压器

#### (e) Y,d5



Y,d联结方式可得1、3、5、7、9、11奇数组号的六种联结组



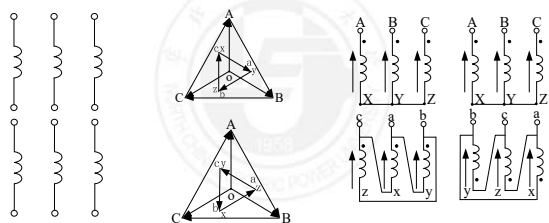
-18-

电力工程

### 第三章 三相变压器

已知联结组别作出三相绕组的联结图：

例：试画出Y,d3的绕组联结图



作出Y,d3的位形图

画出Y,d3的绕组联结

-19-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

几点说明：

- 1) 联结组的数目很多，为了制造和并联运行方便，我国国家标准规定只生产  $Y_{yn0}$ ； $Y_{d11}$ ； $YN,d11$ ； $YN,y0$ ； $Y,y0$ 等五种，其中前三种最常用；
- 2)  $Y_{yn0}$ 联结组副边可以引出中线成为**三相四线制**，用作配电变压器时可兼带照明负载和动力负载；
- 3)  $Y_{d11}$ 联结组用在副边电压超过400伏的线路中，变压器一边接成三角形，对运行有利(详见下节)；
- 4)  $YN,d11$ 联结组主要用于高压输电线路中，使电力系统的高压边有可能接地。

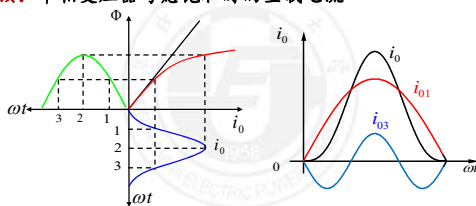
-20-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

#### §3.3 三相变压器空载运行时的电动势波形

回顾：单相变压器考虑饱和时的空载电流



三相变压器绕组的联结方式、磁路系统影响空载电流、主磁通与相电动势的波形。

-21-

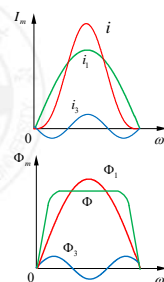
电力工程系

### 第三章 三相变压器

#### 一、基本概念

##### (1) 主磁通与激磁电流的波形问题

- 若主磁通为正弦波，则激磁电流为尖顶波(除基波电流外，还有较大的三次谐波电流)
- 若激磁电流为正弦波，则主磁通为平顶波(除基波磁通外，还有较大的三次谐波磁通)



-22-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

##### (2) 三次谐波特性及其在三相系统中流通的可能性

- 在三相对称系统中各相三次谐波大小相等，相位相同。

$$\begin{cases} i_{A03} = \sqrt{2}I_{03} \sin 3\omega t \\ i_{B03} = \sqrt{2}I_{03} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{2}I_{03} \sin 3\omega t \\ i_{C03} = \sqrt{2}I_{03} \sin 3(\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2}I_{03} \sin 3\omega t \end{cases}$$

- 三次谐波电流在**无中线星型联结**电路中无法流通
- 三次谐波电流在**有中线星型或三角形联结**电路内部可流通
- 三次谐波磁通在**三心式变压器**彼此相关的铁心中无法流通
- 三次谐波磁通在**三相变压器组**彼此无关的各相铁心中可流通

-23-

电力工程系

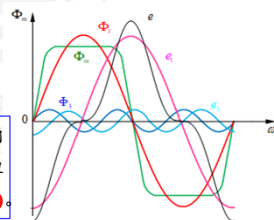
### 第三章 三相变压器

##### (3) 主磁通与感应电动势间的关系

- 若主磁通正弦，则**相电动势正弦，线电动势也正弦**
- 若主磁通为平顶波，则**相电动势畸变**，畸变程度取决于三次谐波分量的大小

$$\Phi_m \begin{cases} \Phi_1 \Rightarrow e_1 \\ \Phi_3 \Rightarrow e_3 \end{cases} \quad e_1 + e_3$$

当考虑三次谐波影响时，相电动势虽然会发生畸变，但**线电动势仍为正弦波(见下文)**。



-24-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

#### (4) 相电动势含三次谐波时的线电动势分析

##### ■ 星形接线

$$\dot{E}_{AB} - \dot{E}_{B1} - \dot{E}_{B3} + \dot{E}_{A1} + \dot{E}_{A3} = 0$$

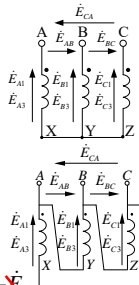
$$\dot{E}_{AB} = \dot{E}_{B1} - \dot{E}_{A1} \quad \text{仅含基波分量}$$

##### ■ 三角形接线

三次谐波电动势在三角形回路中产生**三次谐波环流** $I_3$ ，三次谐波环流在三次谐波阻抗上产生**三次谐波压降**。

$$\dot{E}_{AB} - \dot{E}_{B1} - \dot{E}_{B3} = -\dot{I}_3 z_3 = -\frac{3\dot{E}_{B3}}{3z_3} z_3 = -\dot{E}_{B3}$$

$$\dot{E}_{AB} = \dot{E}_{B1} \quad \text{仅含基波分量}$$



-25-

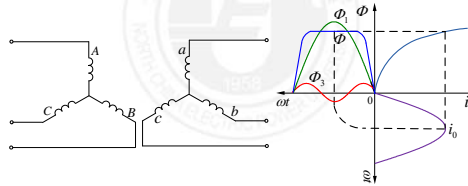
电力工程系

### 第三章 三相变压器

#### 二、空载电动势波形分析

##### (1) Y,y联结的三相变压器

- 三次谐波电流在原边三相绕组无法流通，**激磁电流为正弦波**，导致主磁通为**平顶波**，含三次谐波分量。



-26-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

#### (a) 对于三相变压器组

- **磁路**：三相变压器组的三相磁路彼此无关，**三次谐波磁通**和基波磁通均可沿同一磁路在铁心中**流通**，由于磁路的磁阻小，故三次谐波磁通较大其数值较大。
- **相电动势**：三次谐波磁通感应的三次谐波相电动势可达基波幅值的45~60%，甚至更大，**相电动势**波形畸变为**尖顶波**，最大值升高很多，可能将线圈绝缘击穿。
- **线电动势**：三次谐波电动势相互抵消，因此**线电动势**的波形仍为**正弦波**。

**三相变压器组不能采用Y,y联结**



-27-

电力工程系

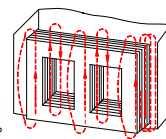
### 第三章 三相变压器

#### (b) 对于三相心式变压器

- **磁路**：三相心式变压器磁路互相联系，三相**三次谐波磁通**同大小同相位，**不能沿铁心闭合**，只能借油、油箱壁等形成回路，磁阻很大，故三次谐波磁通很小。
- **相、线电动势**：三次谐波磁通感应的三次谐波相电动势很小，**相电动势**基本为**正弦波**，**线电动势**也为**正弦波**。
- 三次谐波磁通沿油箱壁闭合引起附加涡流损耗。

**小型心式变压器可以采用Y,y联结，大容量、高电压的**

**三相心式变压器也不宜采用Y,y联结。**



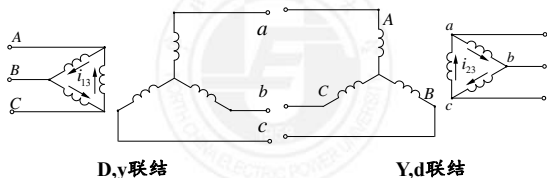
-28-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

#### (2) D,y和Y,d联结的三相变压器

- 三次谐波电流在三角形联结的三相绕组可以流通。



D,y联结

Y,d联结

**三角形内产生三次谐波电流**



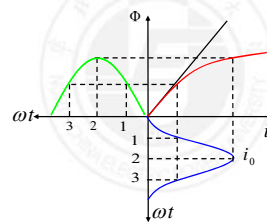
-29-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

#### (a) D,y联结

$i_0$  尖顶波  $\rightarrow \Phi$  正弦波  $\rightarrow$  心式和组式  $e$  均为正弦波



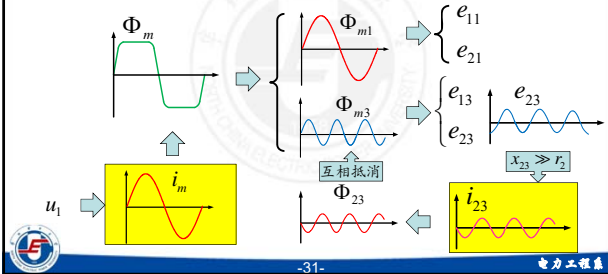
-30-

电力工程系

### 第三章 三相变压器

#### (b) Y,d联结

$i_0$  正弦波  $\rightarrow \Phi$  平顶波  $\rightarrow e_3$  在副边三角形回路中产生  $i'_{03} \rightarrow \Phi$  正弦波  $\rightarrow e$  正弦波



-31-

电力工程

### 第三章 三相变压器

不同磁路结构（组式、心式）和不同绕组联结形式（Y,y、D,y、Y,d）的空载电流、主磁通、相电动势和线电动势：

联结方式	磁路	空载电流	主磁通	相电动势	线电动势
Y,y	组式	正弦波	平顶波	尖顶波	正弦波
Y,y	心式	正弦波	正弦波	正弦波	正弦波
D,y	组式/心式	尖顶波	正弦波	正弦波	正弦波
Y,d	组式/心式	正弦波	正弦波	正弦波	正弦波



-32-

电力工程

### 第三章 三相变压器

#### 三、结论

- 1) 三相变压器组不能采用Y, y联结。
- 2) 三相心式变压器可以采用Y, y联结。容量大、电压较高的三相心式变压器也不宜采用Y, y联结。
- 3) 三相变压器中，希望原、副绕组中有一边接成三角形，以保证相电动势接近于正弦形。
- 4) 大容量电力变压器，当需要在原、副边都接成星形接法时，可以在铁心柱上再加上一个接成三角形的绕组。这个三角形联结的第三绕组不带负载，主要目的是为了提供三次谐波电流的通路，以保证主磁通接近于正弦形，改善电动势波形。



-33-

电力工程