



# 牵引变电所及其自动化

孙继星 副教授

牵引供电研究所

Email: [jxsun@bjtu.edu.cn](mailto:jxsun@bjtu.edu.cn)

办公室：电气楼808

办公电话：010-51685212-602



## ◆ 教材：

- 《轨道交通牵引供电技术》，贺威俊、高仕斌等，2015
- 《高速铁路牵引变电所技术》，中国铁路总公司，2014
- 《交流电气化铁道牵引供电系统》，谭秀炳，西南交通大学出版社，2007

◆ 考核形式和成绩评定：笔试占成绩 60%。上课出勤占成绩 40%(抽查点名缺课一次扣5分)。

◆ QQ学习交流群：614152328



## 第四章 牵引变压器

我国电气化铁路采用单相工频交流制式，取电于电力系统。牵引变电所作为电力系统和电气化铁路牵引网的联结，向电力机车输送合格的电能。我国现行的牵引变电所供电方式绝大多数为三相-两相制式，即其原边取自电力系统的110kV或220kV三相电压，次边向两个单相供电臂供电，其母线额定电压为27.5 kV。牵引负荷是单相、剧烈变化的负荷，牵引变压器的选择除了应满足容量、能耗和过负荷能力等要求外，还应遵循有利于改善牵引变电所高压侧的负序、提高牵引变压器的容量利用率和降低牵引变压器电压损失的原则。

牵引变压器按接线形式分类有：**单相接线变压器**(纯单相、Vv接线变压器)、**三相YNdll接线变压器**、**斯科特接线(Scolt)变压器**、**阻抗匹配平衡接线变压器**等。国外，主要在日本，还有**伍德桥接线变压器**和**改进伍德桥接线变压器**。



对于三相YNd11或Vv接线的牵引变电所，次边两相电压的相别是原边三个相电压或线电压相别三中取二的某种组合；而对于平衡变压器，经变压器的变换，次边形成大小相等而相位相互垂直的两相电压。

从广义的角度上讲，牵引变压器原、次边之间除了有电压的变换外，还有电流和阻抗变换，可称为系统变换，如A、B、C- $\alpha$ 、 $\beta$ 、0。通过这种变换，可以获得变换到一次侧的牵引变压器、牵引负荷的等值电路模型，或变换到二次侧的电力系统、牵引变压器等值电路模型。这两个等值电路模型对于牵引供电系统的电气分析十分方便、有用，如用于电压损失、故障分析、电能计量、负序及谐波水平等计算。



我国电气化铁路采用单相工频交流制式，取电于电力系统。牵引变电所作为电力系统和电气化铁路牵引网的联结，向电力机车输送合格的电能。我国现行的牵引变电所供电方式绝大多数为三相-两相制式，即其原边取自电力系统的110kV或220kV三相电压，次边向两个单相供电臂供电，其母线额定电压为27.5 kV。

对于三相YNd11或Vv接线的牵引变电所，次边两相电压的相别是原边三个相电压或线电压相别三中取二的某种组合；而对于平衡变压器，经变压器的变换，次边形成大小相等而相位相互垂直的两相电压。

从广义的角度上讲，牵引变压器原、次边之间除了有电压的变换外，还有电流和阻抗变换，可称为系统变换，如A、B、C- $\alpha$ 、 $\beta$ 、0。通过这种变换，可以获得变换到一次侧的牵引变压器、牵引负荷的等值电路模型，或变换到二次侧的电力系统、牵引变压器等值电路模型。这两个等值电路模型对于牵引供电系统的电气分析十分方便、有用，如用于电压损失、故障分析、电能计量、负序及谐波水平等计算。



# 一. 单相接线变压器

## 1. 纯单相变压器

每个牵引变电所设置1-2台单相变压器。其一次侧绕组跨接于110 kV(或220 kV)的三相高压输电线的两线上，取用线电压。二次侧绕组则一端连至牵引变电所的牵引母线上，另一端连至钢轨。当经过三个变电所的相位轮换连接后，三相输电线的电源侧可达到三相负荷近似对称。

如图3-1所示牵引变压器原边绕组端子接人系统电压AB相，原边三相电流与次边牵引侧负荷的关系为式：

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \frac{1}{K_T} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_B = -\dot{I}_A = -\frac{1}{K_T} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_C = 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

考虑到其他相别组合方式，可得到以下通式(3-2)：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K_T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_{bc} \\ \dot{I}_{ca} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

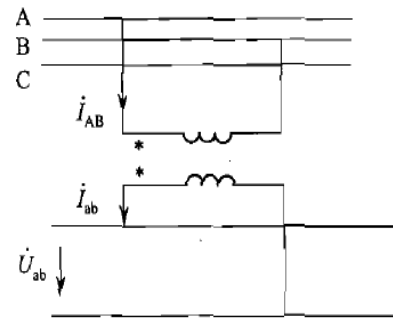
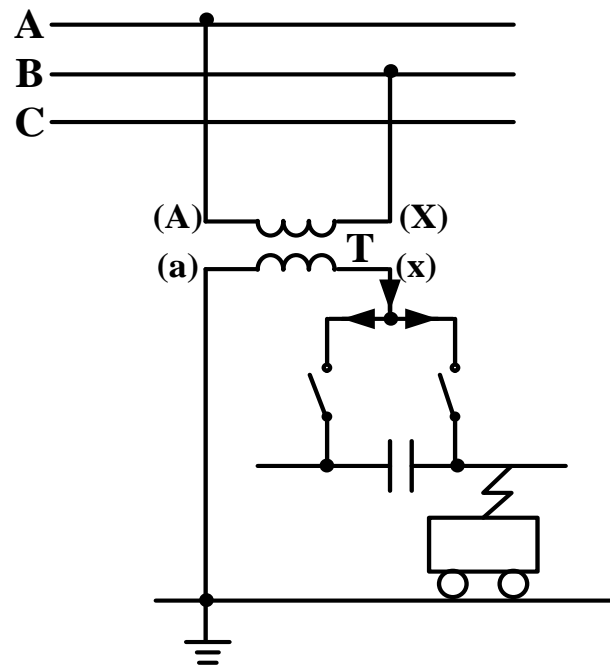
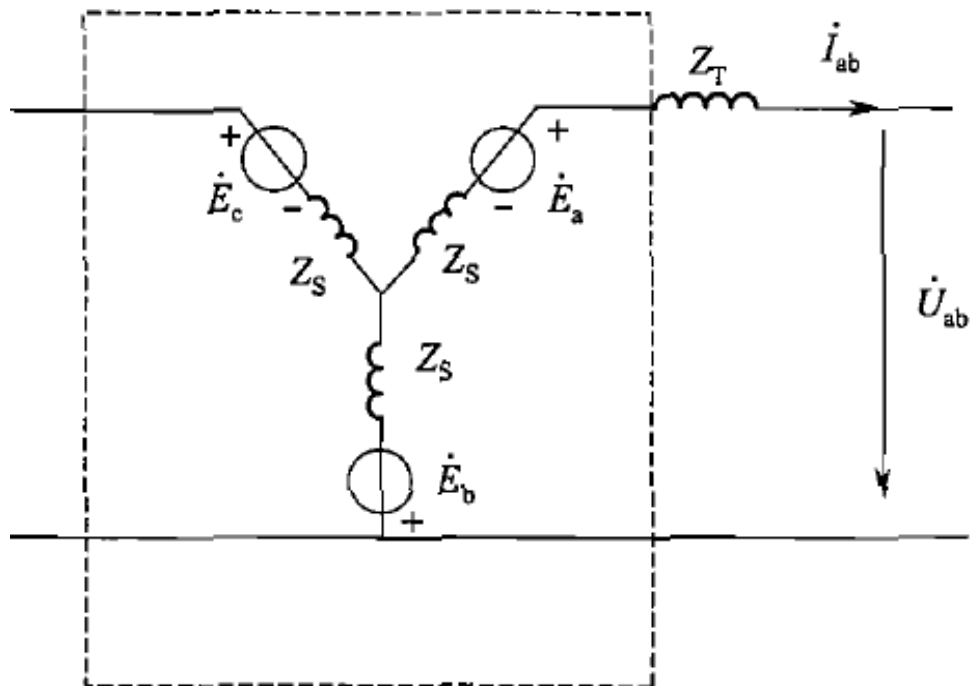


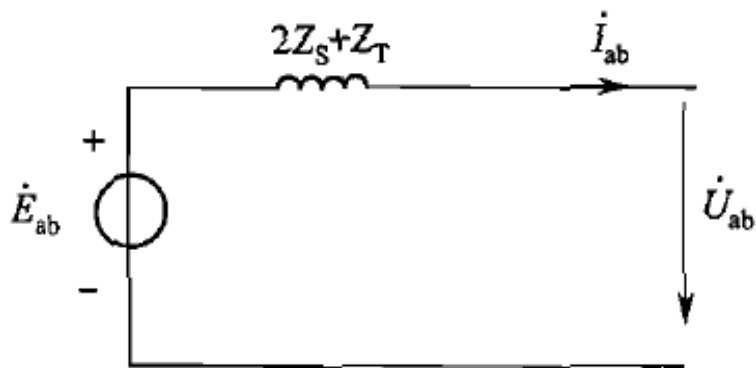
图 3-1 单相牵引变压器接线原理图



归算到牵引侧负荷端口的牵引变电所等值电路如图3-2所示



(a) 归算到牵引侧的单相牵引变压器等值电路



(b) 化简后的单相牵引变压器等值电路

图 3-2 单相牵引变压器等值电路



$$Z_s \approx jX_s = j \frac{U_{2N}^2}{S_k} \quad (\Omega)$$

$$Z_T \approx jX_T = j \frac{U_k \%}{100} \times \frac{U_{2N}^2}{S_T} \quad (\Omega)$$

式中  $S_k$ ——电力系统(原边)短路容量(MV·A);

$U_{2N}$ ——牵引变压器牵引侧额定电压(kV);

$S_T$ ——牵引变压器额定容量(MV·A);

$U_k \%$ ——短路电压百分比。

### 优缺点:

- ① 单相牵引变电所内设备和布置均较简单,运营维修比较方便,造价和运营费用也比较低廉。
- ② 牵引变压器的二次侧不能提供三相电源,必须另设劈相设备,或由地方引入三相电源,不利于变电所内三相自用电及地区三相电力的供应。
- ③ 对电力系统的不平衡影响较三相变压器及Vv接线严重,其不对称度为1。
- ④ 这种变压器仅适用于电力系统比较发达的地方,综上所述,纯单相结线主要适合于电力系统容量较大,地方电网较发达的地区。我国的哈(尔滨)大(连)线全部采用纯单相结线,牵引变电所接于容量较大的220 kV电网。在德、法和日本的电气化铁路中应用较多。

## 2. Vv接线变压器

Vv接线，即用两台单相变压器连接成开口三角形，其原理电路如图3.2所示。在图3.2中，T1和T2为单相牵引变压器。T1和T2的高压侧分别接入A、C相与B、C相。低压侧各取一端接到27.5 kV的a、b相母线上，另一端接到接地网和钢轨。a相母线对地电压 $U_{ac}$ ，供应左侧牵引负荷 $I'$ ；b相母线对地电压 $U_{bc}$ ，供应右侧牵引负荷 $I''$ 。

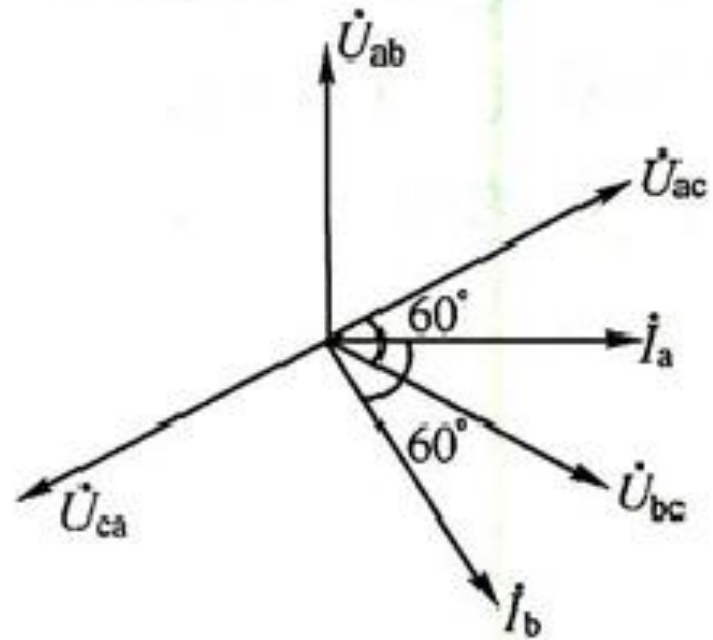
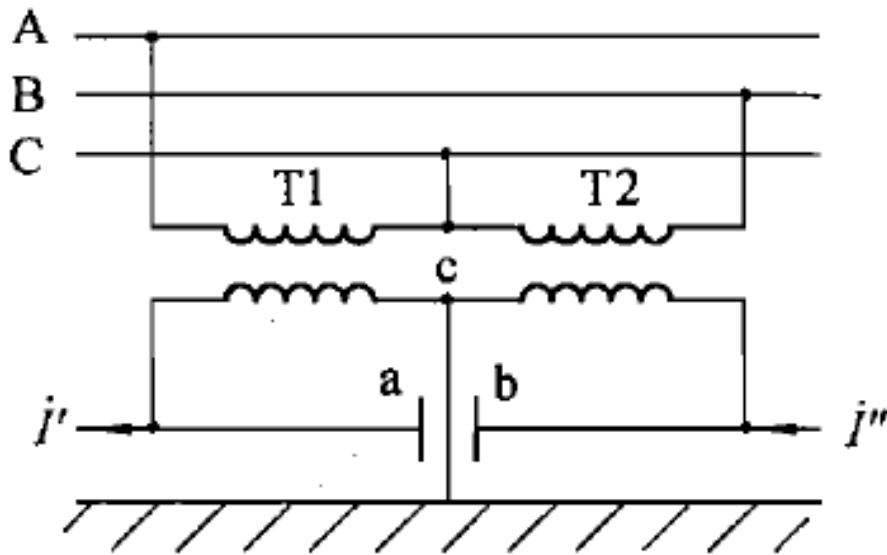


图 3.2 Vv 接线原理

如图3-3所示变压器两绕组端子分别接入系统线电压AB和BC相，原边三相电流与次边牵引侧负荷端口的关系为式(3-5)：

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \frac{1}{K_T} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_B = \frac{1}{K_T} (-\dot{I}_{ab} + \dot{I}_{bc}) \\ \dot{I}_C = -\frac{1}{K_T} \dot{I}_{bc} \end{cases}$$

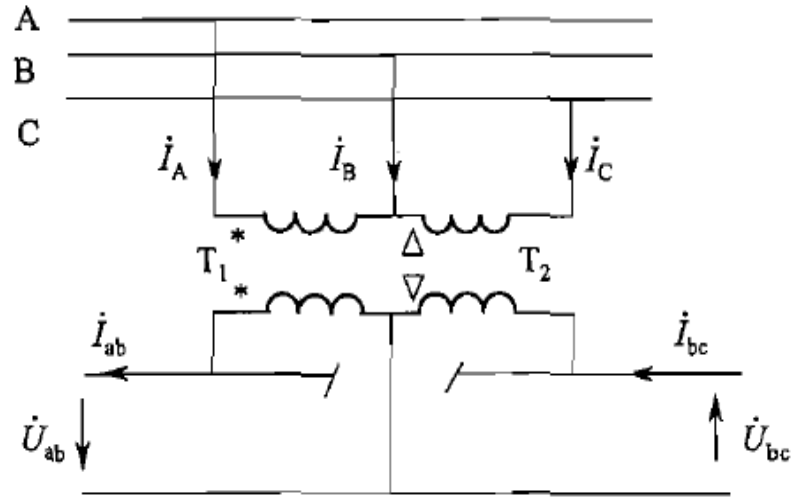


图 3-3 Vv 牵引变压器接线原理图

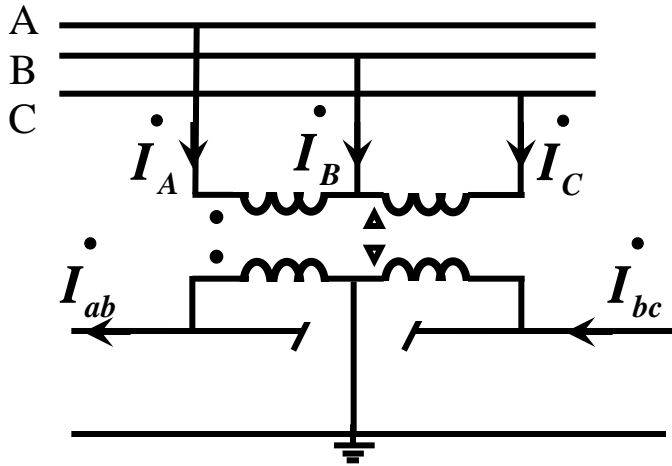
再考虑其他两种接线情况,可得到以下通式

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K_T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_{bc} \\ \dot{I}_{ca} \end{bmatrix}$$

对于每一牵引变电所，只可能出现两个端口负荷，在实际应用中，只需将不存在的端口负荷置0即可

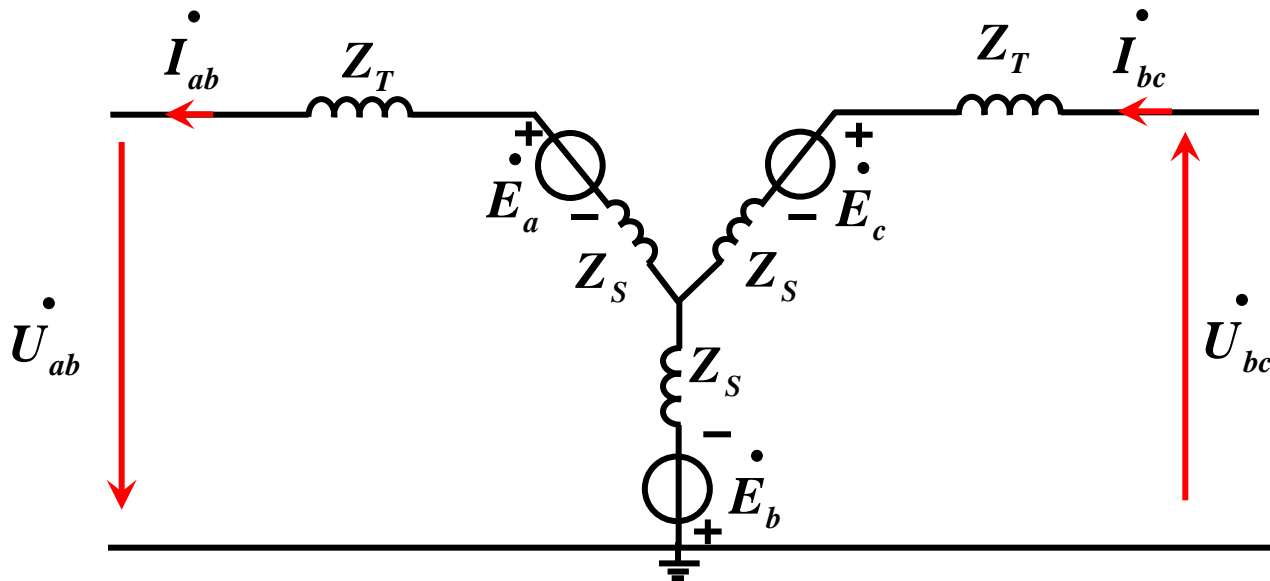


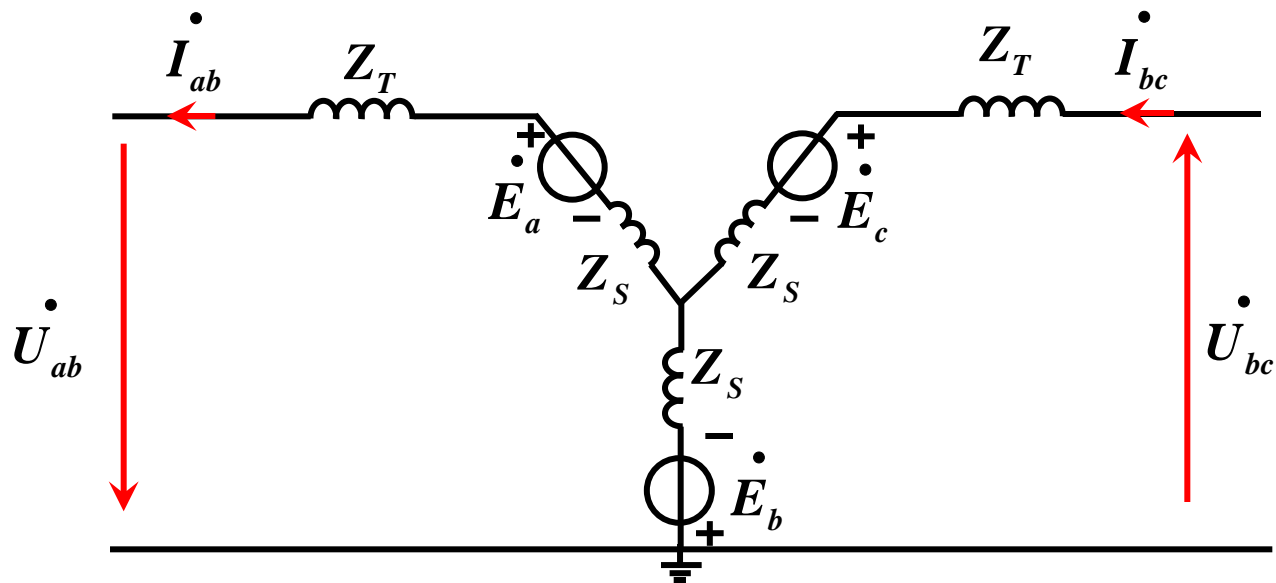
归算到牵引侧负荷端口的变电所等值电路如图所示。



$$Z_s = jX_s = j \frac{27.5^2}{S_d}$$

$$Z_T = jX_b = j \frac{U_d \%}{100} \times \frac{27.5^2}{S_T}$$





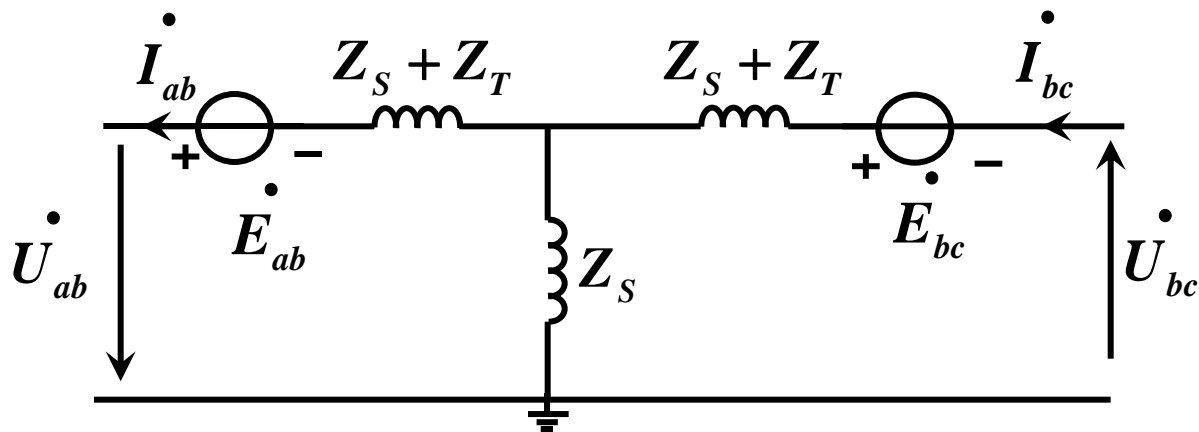
端口  
电压  
方程式

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{ab} &= -(2Z_S + Z_T) \dot{I}_{ab} + Z_S \dot{I}_{bc} + \dot{E}_a - \dot{E}_b \\
 &= \dot{E}_{ab} - (2Z_S + Z_T) \dot{I}_{ab} + Z_S \dot{I}_{bc} \\
 \dot{U}_{bc} &= -(2Z_S + Z_T) \dot{I}_{bc} + Z_S \dot{I}_{ab} + \dot{E}_b - \dot{E}_c \\
 &= \dot{E}_{bc} - (2Z_S + Z_T) \dot{I}_{bc} + Z_S \dot{I}_{ab}
 \end{aligned}$$



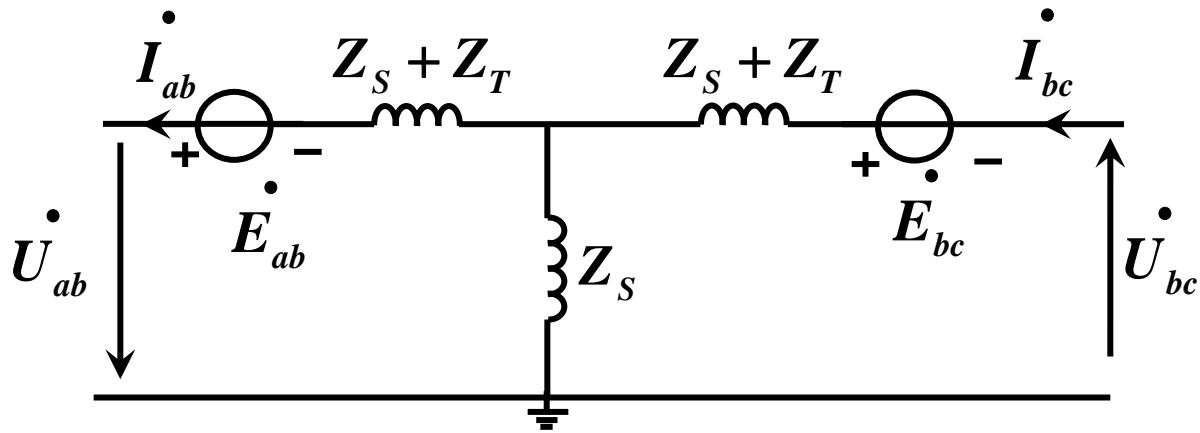
$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= -(2Z_S + Z_T) \dot{I}_{ab} + Z_S \dot{I}_{bc} + \dot{E}_a - \dot{E}_b \\ &= \dot{E}_{ab} - (2Z_S + Z_T) \dot{I}_{ab} + Z_S \dot{I}_{bc} \\ \dot{U}_{bc} &= -(2Z_S + Z_T) \dot{I}_{bc} + Z_S \dot{I}_{ab} + \dot{E}_b - \dot{E}_c \\ &= \dot{E}_{bc} - (2Z_S + Z_T) \dot{I}_{bc} + Z_S \dot{I}_{ab} \end{aligned}$$

归算到两个负荷端口的变电所等值电路





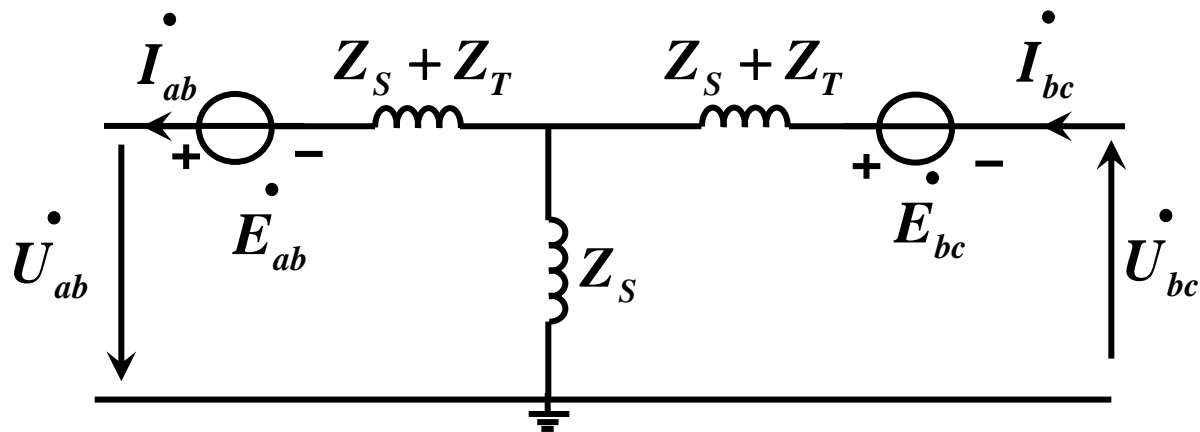
## V/V变压器次边短路计算



设牵引端口电压为27.5kV，忽略电阻部分

1、一相母线对轨地短路(另一相开路)

$$I_d = \frac{27.5}{2X_S + X_T} \text{ kA}$$



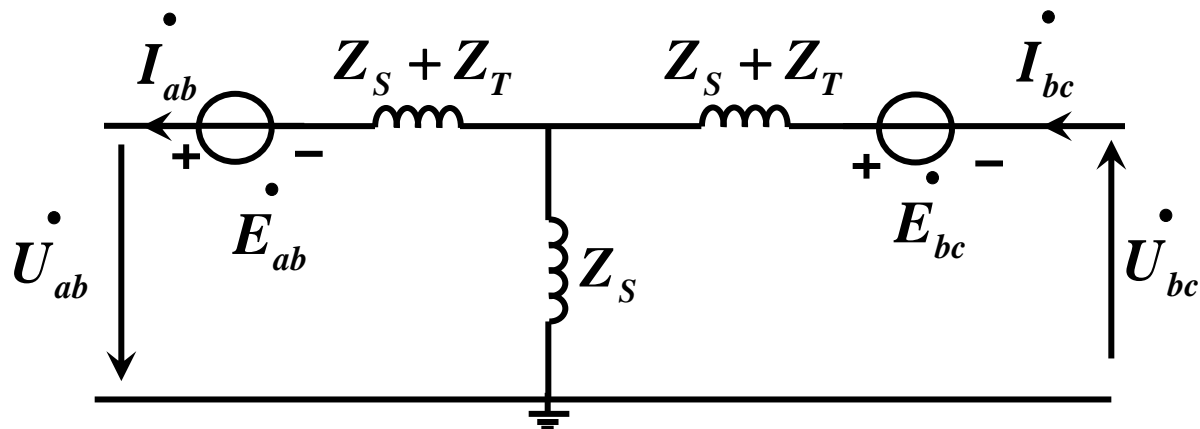
## 2、异相牵引母线短路

$$I_d = \frac{27.5}{2(X_S + X_T)} \text{ kA}$$

## 3、两相母线对地短路，可导出短路电流为

$$\dot{E}_{ab} = j(2X_S + X_T) \dot{I}_{ab} - jX_S \dot{I}_{bc}$$

$$\dot{E}_{bc} = -jX_S \dot{I}_{ab} + j(2X_S + X_T) \dot{I}_{bc}$$



$$\dot{E}_{ab} = j(2X_S + X_T) \dot{I}_{ab} - jX_S \dot{I}_{bc}$$

$$\dot{E}_{bc} = -jX_S \dot{I}_{ab} + j(2X_S + X_T) \dot{I}_{bc}$$



$$I_{ab} = I_{bc} = \frac{\sqrt{X_T^2 + 3X_S^2 + 3X_T X_S}}{X_T^2 + 3X_S^2 + 4X_T X_S} \times 27.5$$

## 优缺点：

- ① Vv接线变电所设备较三相牵引变电所简单，变压器绕组中的电流与纯单相变压器相同，都等于馈线电流，容量利用率可达到100%。
- ② 当两供电臂负荷相同时，Vv接线的不对称度为1/2。
- ③ Vv接线在正常运行情况下，能提供三相电源，如图3.2所示，此时T1与T2并不是并联运行。当T2因故解列时，为保证继续供应右侧牵引负荷，则T1必须跨相供电，即把T2的负荷转移到T1上去，此时就会有转移负荷的倒闸过程。在转移负荷的过程中，次边三相电源中断。变电所内三相自用电中断后，改由劈相机或单相一三相变压器供电。

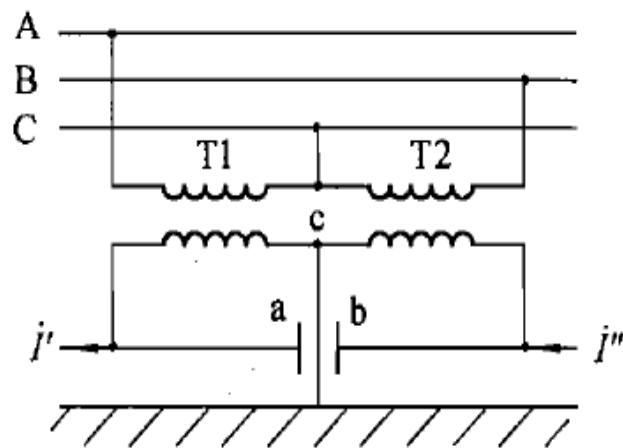
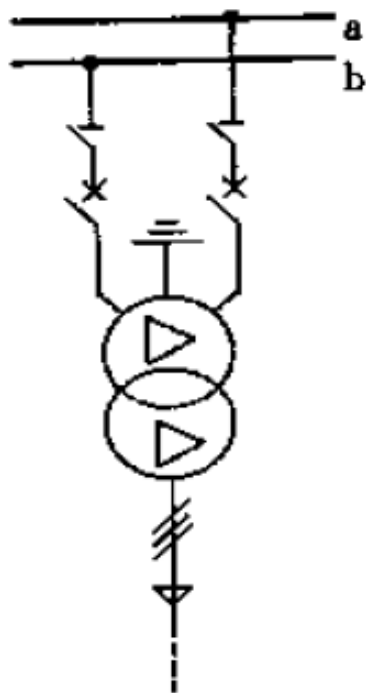


图 3.2 Vv 接线原理

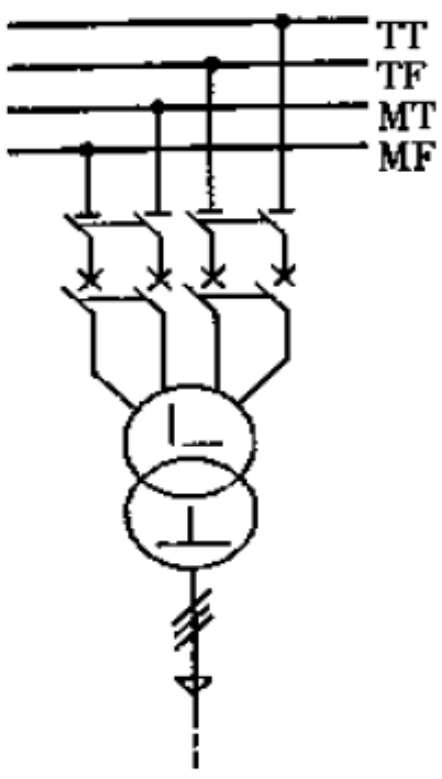
**我国某些高速铁路供电系统和日本电气化铁路对Vv接线变压器应用较多。**



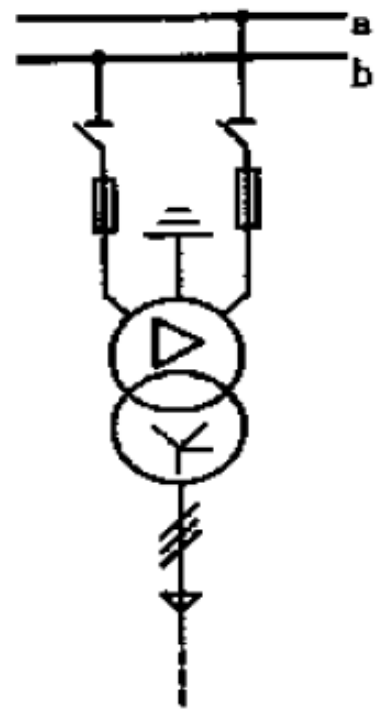
## Vv接线牵引变电所 动力变压器取电方式



(a) D,dl2 接线



(b) 逆斯科特接线



(a) D,yn 接线

图 6—3—17 动力变压器主接线

图 6—3—18



## 二. 三相YNd11接线牵引变压器

三相牵引变电所的接线方式，就是指牵引变压器的接线形式。为了减小电气化铁道对电力系统产生的负序电流，不但应对牵引变压器选取合理的连接组别，而且应对各牵引变电所的进线进行相序轮换。目前我国已投入运营的三相牵引变压器，其连接组别为YNd11，高压侧为Y形接线，接到电压为110kV的电力网上；而牵引变电所二次侧母线的额定电压为27.5 kV，它比接触网的额定电压25 kV高10%。

图3.3中牵引变压器的高压侧接电力网，低压侧端子(c)接到接地母线和钢轨；其他端子(a)与(b)分别接到27.5 kV的牵引侧母线上，并由此分别馈入牵引变电所两侧的牵引网。由于两侧牵引网电压相位不同，因此在接触网上必须互相绝缘，通常由分相绝缘器来实现。I<sub>a</sub>、I<sub>b</sub>分别为左、右两侧牵引负荷。

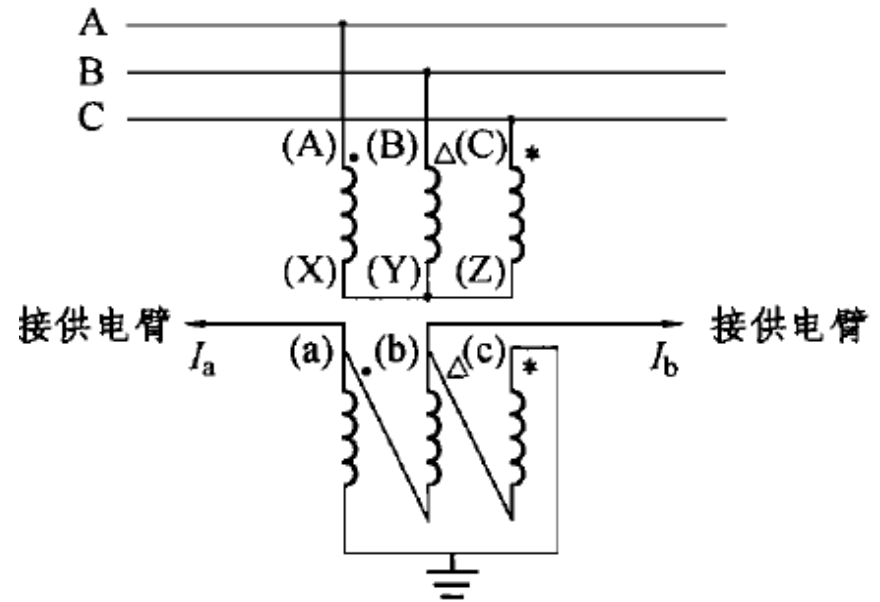
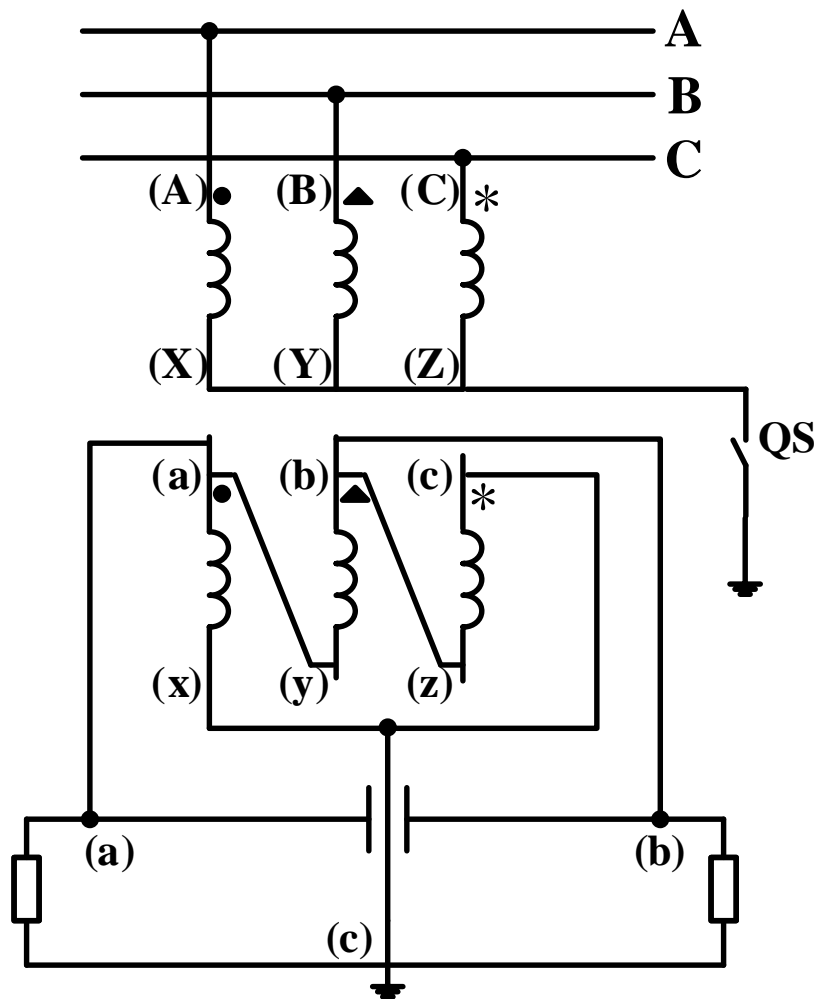


图 3.3 YNd11 牵引变压器原理电路图



## 1. YN,d11接线原理电路图及展开图

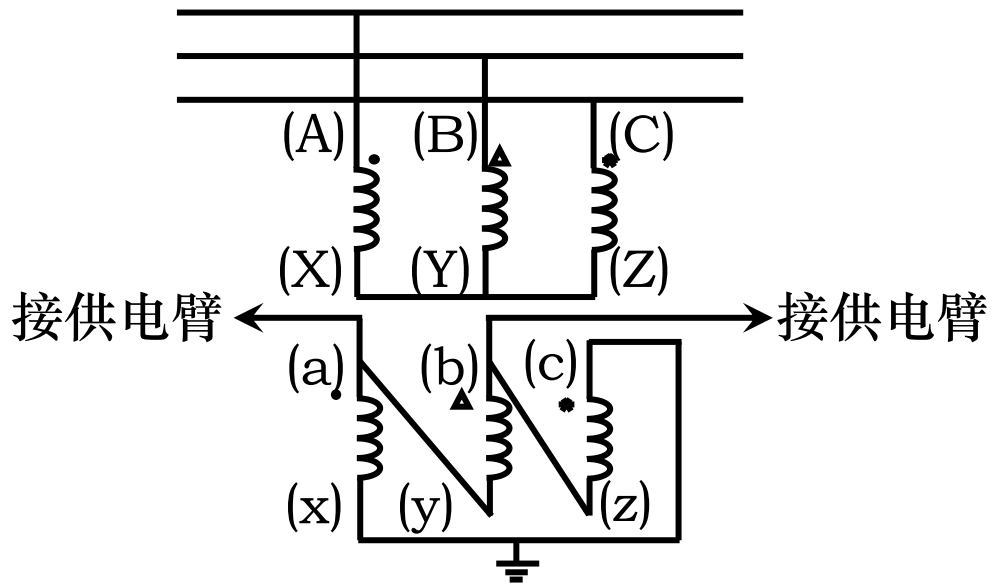


注：绕组(ax)，(cz)为负荷相绕组；绕组(by)则被称为自由相绕组，（）内符号为端子号，大写为原边，小写为次边。

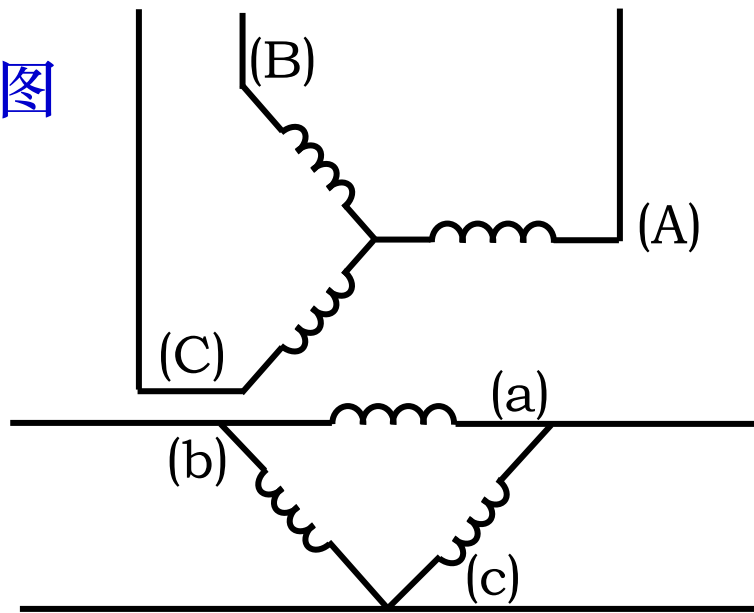
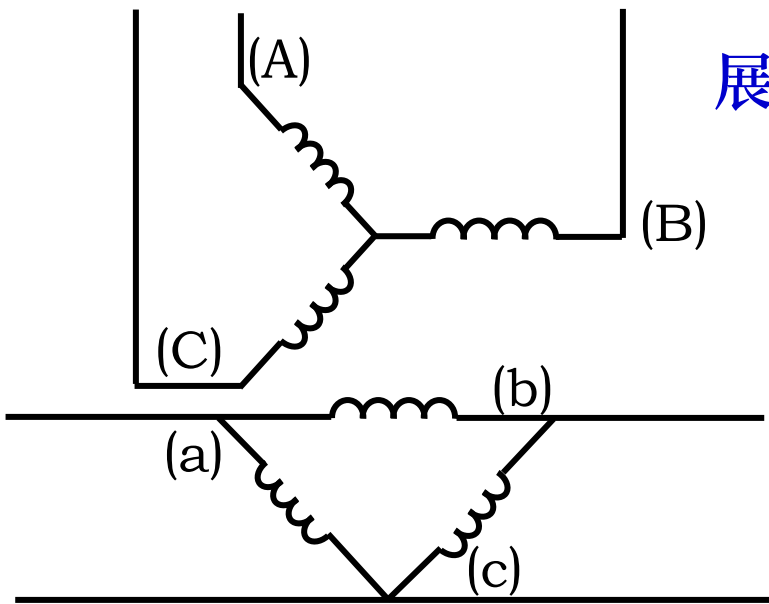


为分析的直观与方便，更常见使用YNd11接线牵引变压器的展开图。画展开图有如下约定：

- ◆ 为施工和运行安全起见，统一规定次边绕组的(c)端子接钢轨和地；
- ◆ 原、次边对应绕组在图中相互平行；
- ◆ 原、次边每套（相）绕组的同名端放在同一侧；



展开图





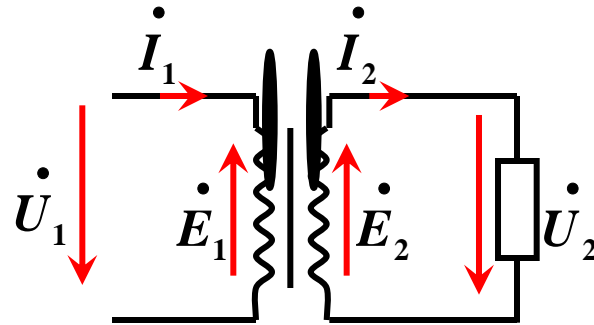
## 2. 电压、电流相量的规格化定向

在牵引供电系统分析中，对所有牵引变压器均都采用规格化定向（又称为减极性定向，即在这种定向下，原次边绕组磁势相互抵消）。

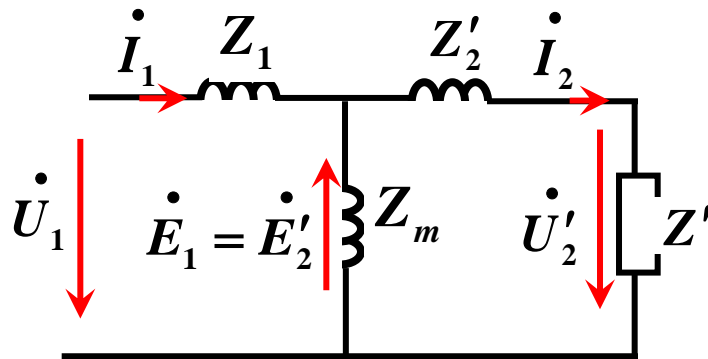
- (1) 原边绕组电压、电流采用电动机惯例定向，即牵引变压器从电力系统吸收电能；
- (2) 次边绕组电压、电流采用发电机惯例定向，即牵引变压器是次边负荷的电源；
- (3) 负荷吸收正功率。



## 单相变压器规格化定向



## 等值电路



对于理想变压器，  
 $\dot{U}_1$  与  $\dot{U}_2$  同相

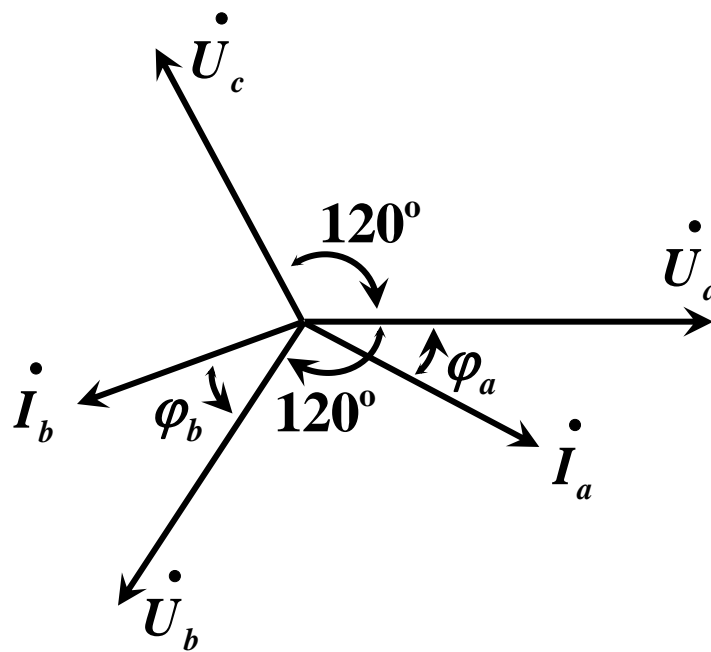
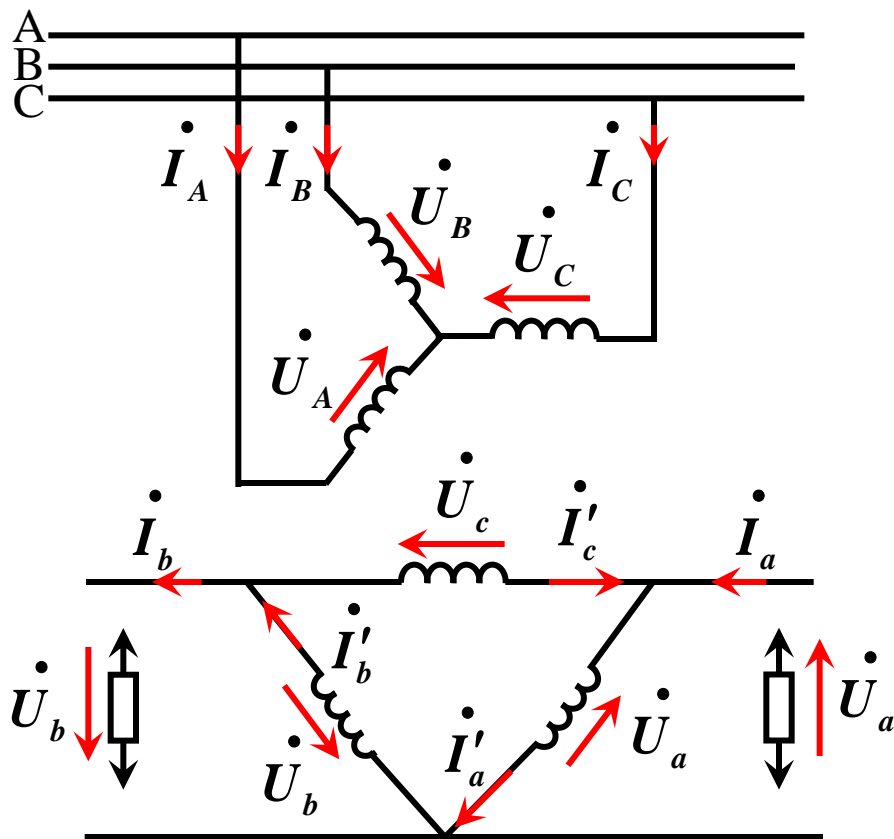


## YNd11规格化定向还应注意：

- (1) 原边绕组电压与实际进线电压相别一致；次边绕组按同名端与原边绕组电压一致；
- (2) 原边电流、电压按电动机惯例，次边按发电机惯例，原、次边绕组电流为减极性。通常，完成电压定向后（先原边，后次边，或者根据需要而相反），先标原边电流（负荷），再标原边。



# YNd11牵引变压器的规格化定向举例

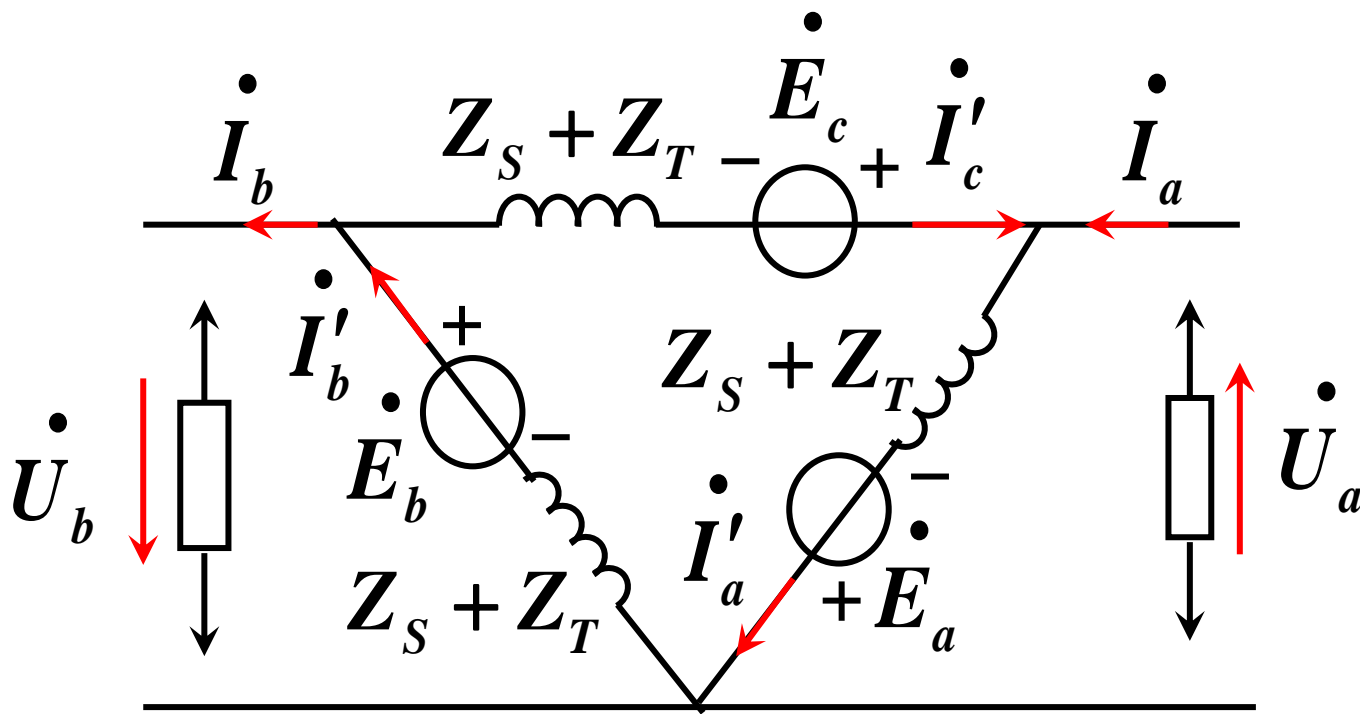


次边电压、电流相量图



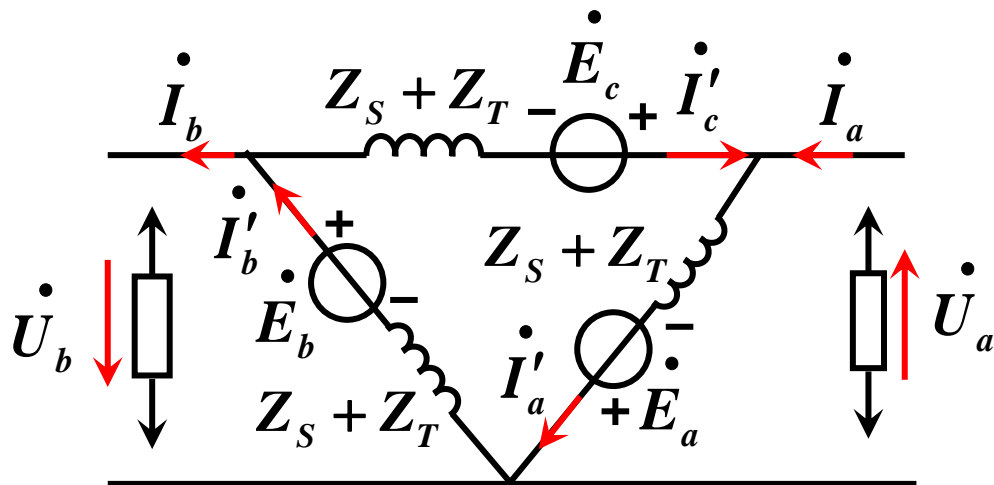
### 3. 绕组电流与负荷端口电流的关系

电力系统的电源电压和短路阻抗、牵引变压器的绕组漏抗归算到次边的等值电路(假设电力系统三相电压正序对称，阻抗平衡)

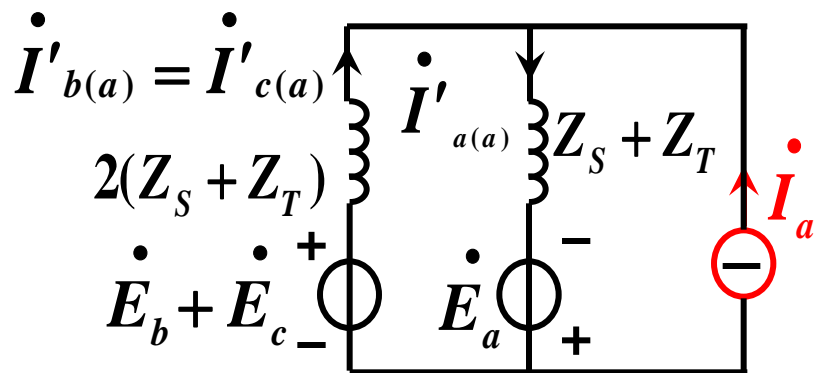




## 目标:求解绕组电流, 应用叠加原理

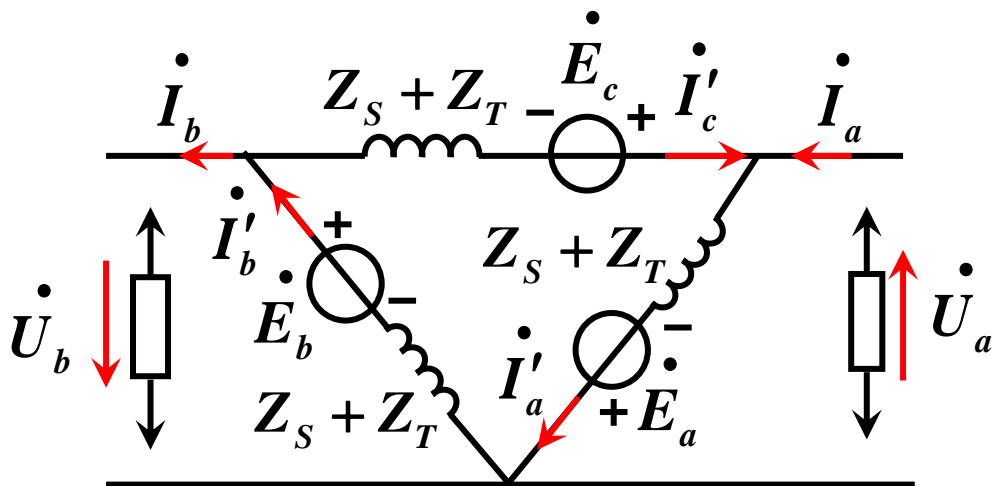


$\dot{I}_a$  单独作用时

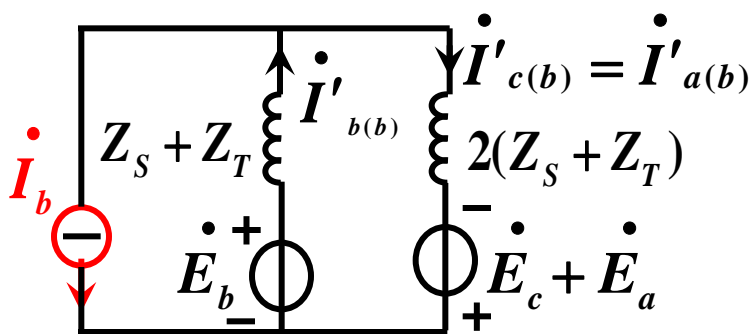


$$\dot{I}'_{a(a)} = \frac{2}{3} \dot{I}_a$$

$$\dot{I}'_{b(a)} = \dot{I}'_{c(a)} = -\frac{1}{3} \dot{I}_a$$

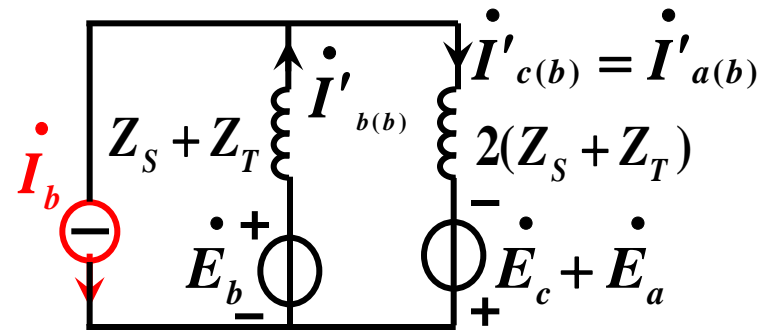
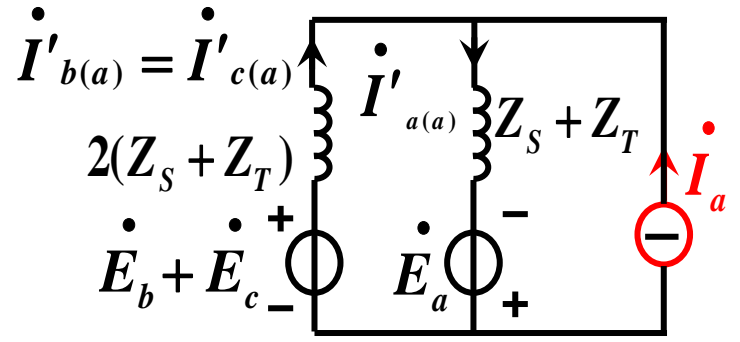
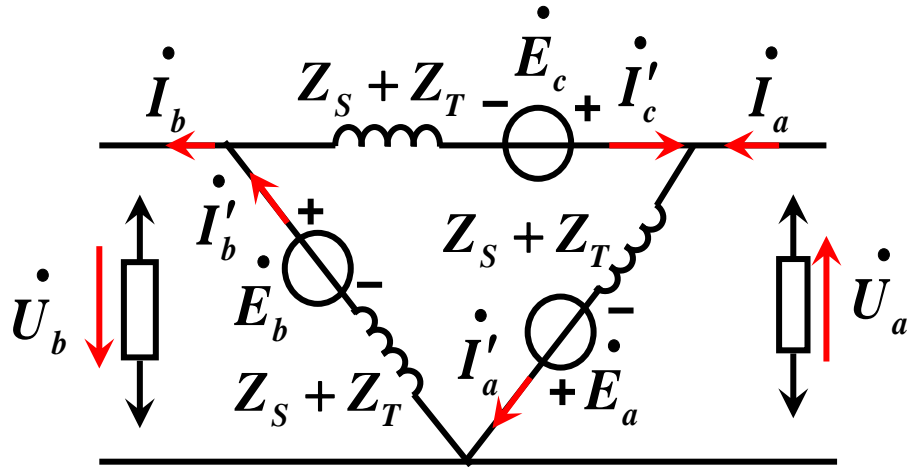


$\dot{I}_b$  单独作用时



$$\dot{I}'_{b(b)} = \frac{2}{3} \dot{I}_b$$

$$\dot{I}'_{c(b)} = \dot{I}'_{a(b)} = -\frac{1}{3} \dot{I}_b$$



$$\dot{I}'_a = \dot{I}'_{a(a)} + \dot{I}'_{a(b)} = \frac{1}{3}(2\dot{I}_a - \dot{I}_b)$$

$$\dot{I}'_b = \dot{I}'_{b(a)} + \dot{I}'_{b(b)} = \frac{1}{3}(-\dot{I}_a + 2\dot{I}_b)$$

$$\dot{I}'_c = \dot{I}'_{c(a)} + \dot{I}'_{c(b)} = \frac{1}{3}(-\dot{I}_a - \dot{I}_b)$$



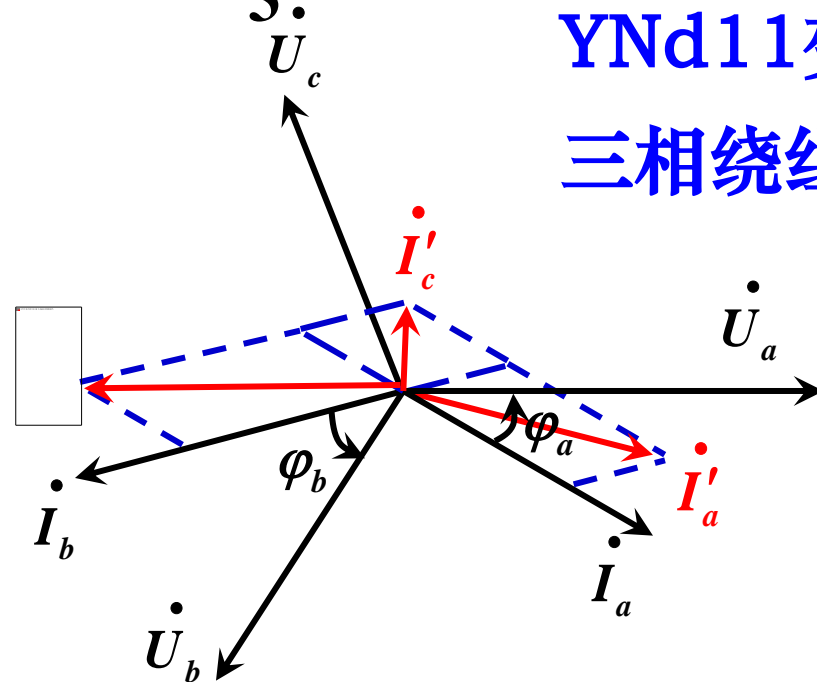
$$\dot{I}'_a = \dot{I}'_{a(a)} + \dot{I}'_{a(b)} = \frac{1}{3}(2\dot{I}_a - \dot{I}_b)$$

$$\dot{I}'_b = \dot{I}'_{b(a)} + \dot{I}'_{b(b)} = \frac{1}{3}(-\dot{I}_a + 2\dot{I}_b)$$

$$\dot{I}'_c = \dot{I}'_{c(a)} + \dot{I}'_{c(b)} = \frac{1}{3}(-\dot{I}_a - \dot{I}_b)$$

YNd11变压器次边

三相绕组电流相量图





$$\dot{I}'_a = \dot{I}'_{a(a)} + \dot{I}'_{a(b)} = \frac{1}{3}(2\dot{I}_a - \dot{I}_b)$$

$$\dot{I}'_b = \dot{I}'_{b(a)} + \dot{I}'_{b(b)} = \frac{1}{3}(-\dot{I}_a + 2\dot{I}_b)$$

$$\dot{I}'_c = \dot{I}'_{c(a)} + \dot{I}'_{c(b)} = \frac{1}{3}(-\dot{I}_a - \dot{I}_b)$$

推广到a、b、c三相都带负荷的情形

$$\begin{bmatrix} \dot{I}'_a \\ \dot{I}'_b \\ \dot{I}'_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$



根据定向和变比关系，由上式获得原边三相电流

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{K_T} \begin{bmatrix} \dot{I}'_a \\ \dot{I}'_b \\ \dot{I}'_c \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{3K_T} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

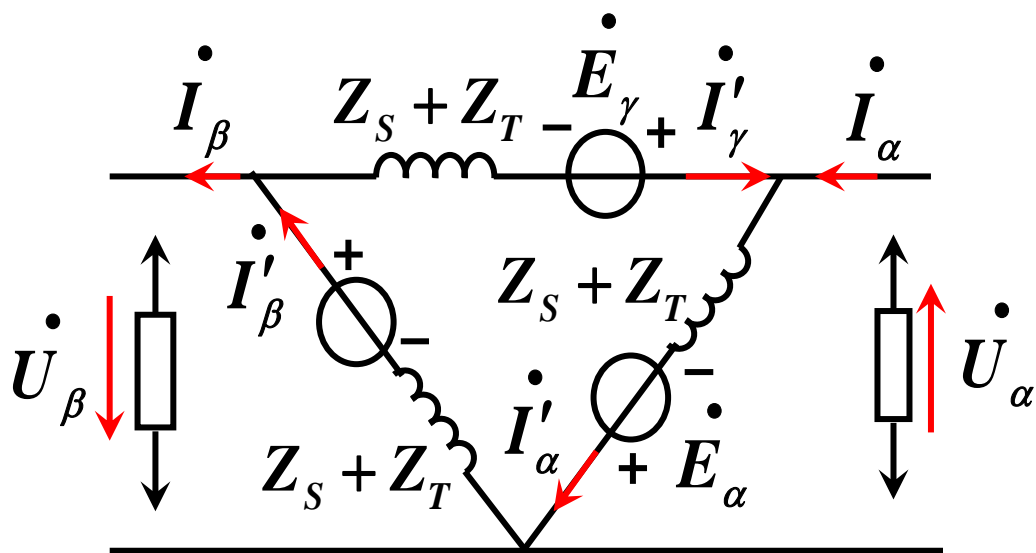
对于110kV/27.5kV牵引变电所

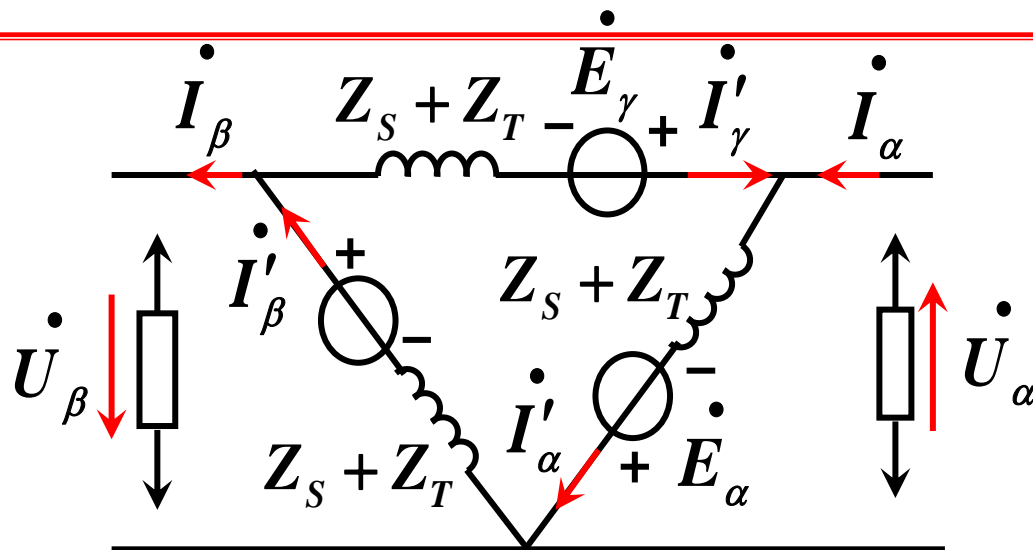
$$K_T = 110/27.5 = 4$$



## 4. YNd11归算到负荷端口的等值电路模型

考虑一般情况： $\alpha, \beta$ 为两个负荷端口， $\gamma$ 为自由相





端口  
电压  
方程  
式

$$\dot{U}_\alpha = \dot{E}_\alpha - \dot{I}'_\alpha (Z_S + Z_T) = \dot{E}_\alpha - \frac{1}{3} (2\dot{I}_\alpha - \dot{I}_\beta) (Z_S + Z_T)$$

$$= \dot{E}_\alpha - \frac{1}{3} (Z_S + Z_T) \dot{I}_\alpha - \frac{1}{3} (Z_S + Z_T) (\dot{I}_\alpha - \dot{I}_\beta)$$

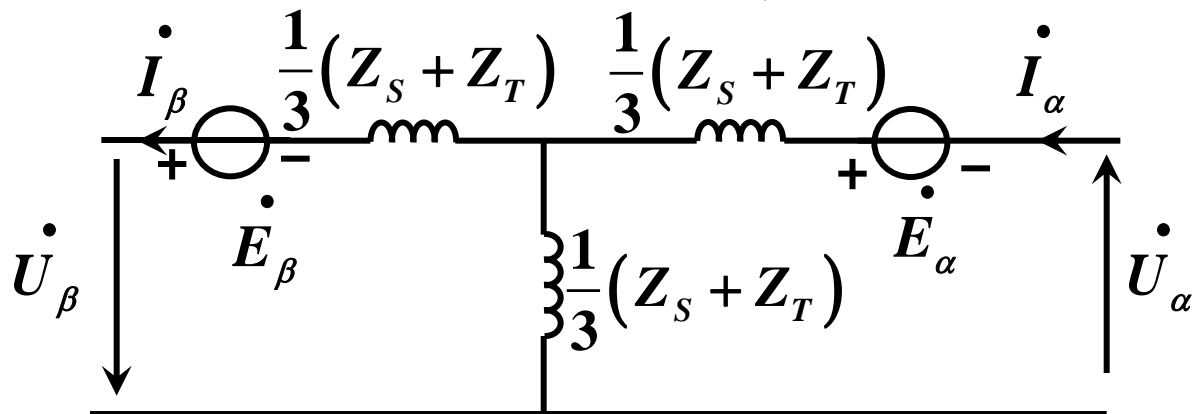
$$\dot{U}_\beta = \dot{E}_\beta - \dot{I}'_\beta (Z_S + Z_T) = \dot{E}_\beta - \frac{1}{3} (-\dot{I}_\alpha + 2\dot{I}_\beta) (Z_S + Z_T)$$

$$= \dot{E}_\beta - \frac{1}{3} (Z_S + Z_T) \dot{I}_\beta - \frac{1}{3} (Z_S + Z_T) (\dot{I}_\beta - \dot{I}_\alpha)$$



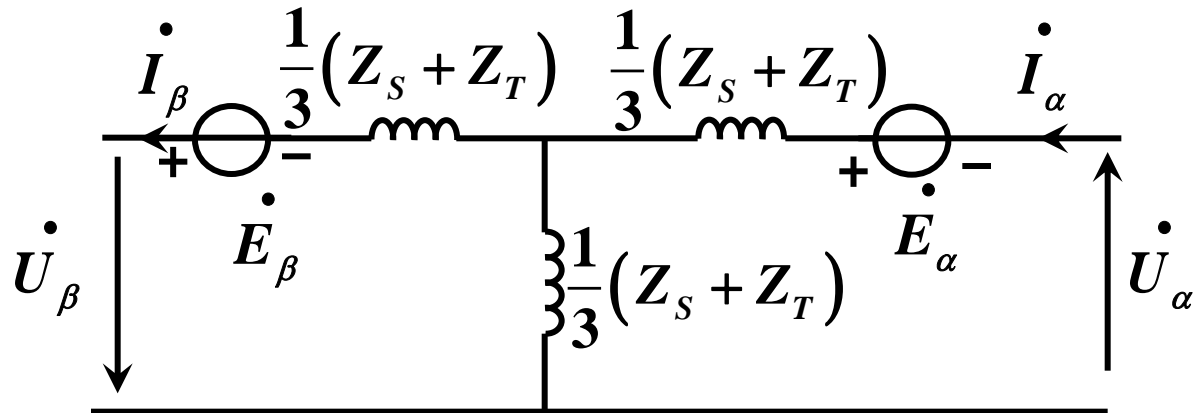
$$\left\{ \begin{aligned} \dot{U}_\alpha &= \dot{E}_\alpha - \dot{I}'_\alpha (Z_S + Z_T) = \dot{E}_\alpha - \frac{1}{3} (2\dot{I}_\alpha - \dot{I}_\beta) (Z_S + Z_T) \\ &= \dot{E}_\alpha - \frac{1}{3} (Z_S + Z_T) \dot{I}_\alpha - \frac{1}{3} (Z_S + Z_T) (\dot{I}_\alpha - \dot{I}_\beta) \\ \dot{U}_\beta &= \dot{E}_\beta - \dot{I}'_\beta (Z_S + Z_T) = \dot{E}_\beta - \frac{1}{3} (-\dot{I}_\alpha + 2\dot{I}_\beta) (Z_S + Z_T) \\ &= \dot{E}_\beta - \frac{1}{3} (Z_S + Z_T) \dot{I}_\beta - \frac{1}{3} (Z_S + Z_T) (\dot{I}_\beta - \dot{I}_\alpha) \end{aligned} \right.$$

归算到两个负荷端口的变电所等值电路





## 归算到两个负荷端口的变电所等值电路



$$|Z_S| = X_S = \frac{3 \times 27.5^2}{S_d} \quad (\Omega) \quad |Z_T| = X_T = \frac{U_d \%}{100} \frac{3 \times 27.5^2}{S_T} \quad (\Omega)$$

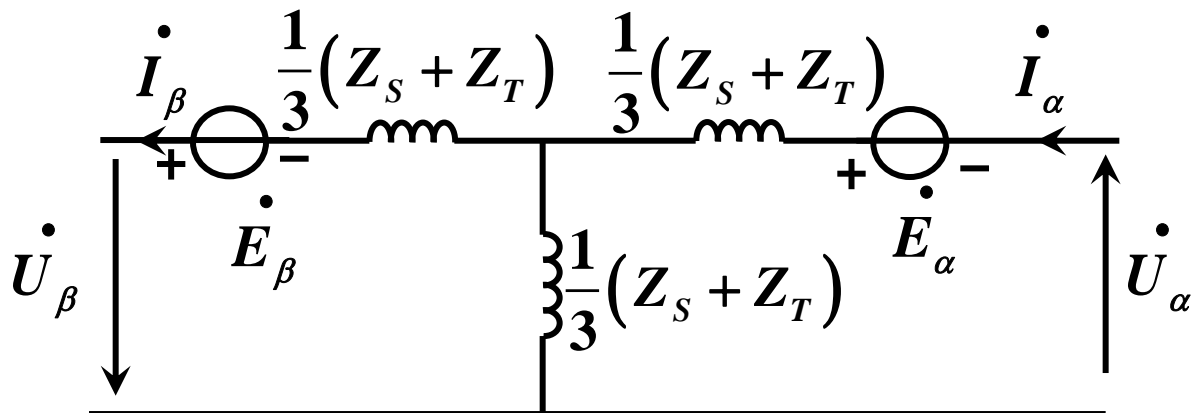
$S_d$ : 电力系统（原边）短路容量（MVA）

$S_T$ : 牵引变压器容量（MVA）

$U_d\%$ : 短路电压（一般为10.5%）



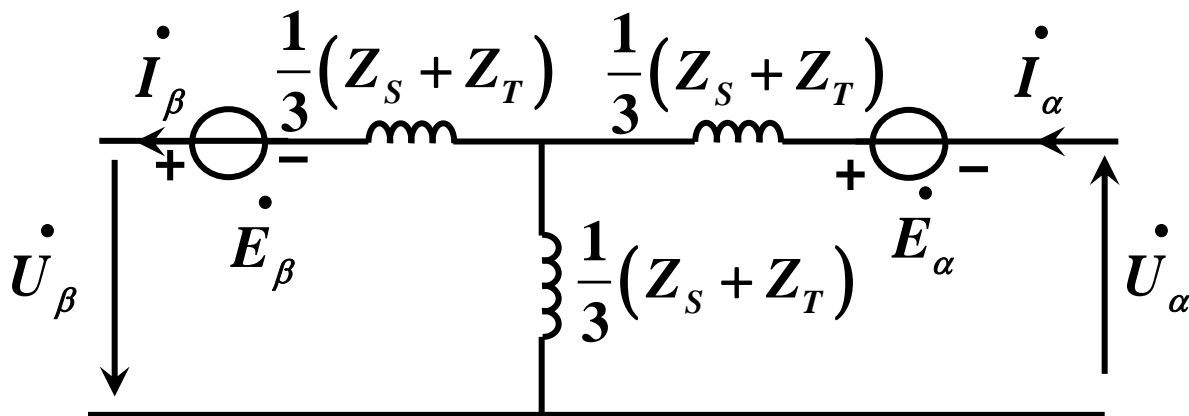
## 5. 三相牵引变压器次边各种短路计算



设牵引端口电压为27.5kV，忽略电阻部分

1、一相母线对轨地短路

$$I_d = \frac{27.5}{\frac{2}{3}(X_S + X_T)} = \frac{3 \times 27.5}{2(X_S + X_T)} \quad (\text{kA})$$



2、异相牵引母线短路,即 $\alpha$ 、 $\beta$ 端口母线间短路

$$I_d = \frac{27.5}{\frac{2}{3}(X_S + X_T)} = \frac{3 \times 27.5}{2(X_S + X_T)} \quad (\text{kA})$$

3、两相母线对地短路,可导出短路电流为

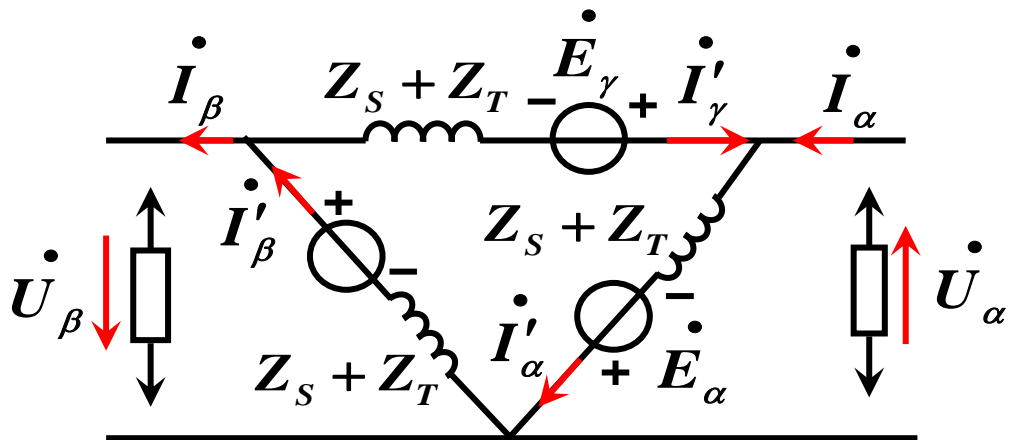
$$I_d = \frac{\sqrt{3} \times 27.5}{X_S + X_T} = \frac{\sqrt{3} \times 27.5}{X_S + X_T} \quad (\text{kA})$$



## 6. YN,d11变压器额定利用率

变压器额定容量利用率K

$K = (\text{额定输出容量} / \text{额定容量}) \times 100\%$

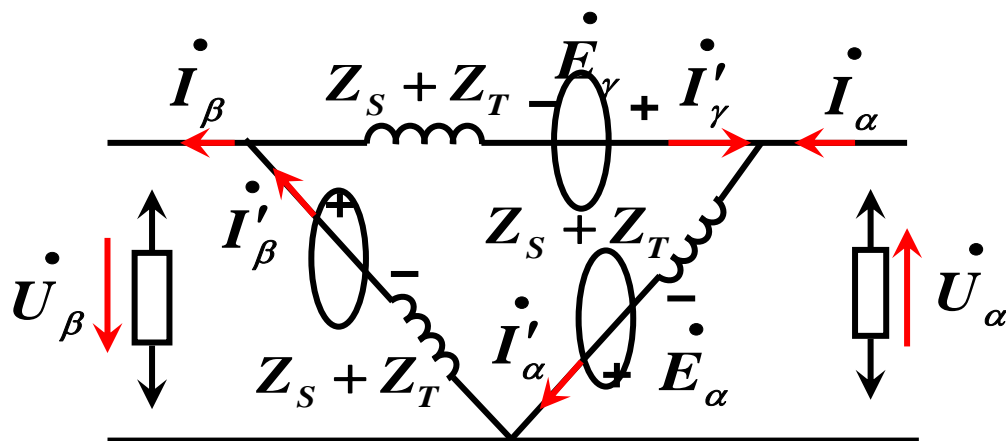


$$K = \frac{I_\alpha \cdot U_e + I_\beta \cdot U_e}{3U_e I_e} \times 100\%$$



设  $\dot{U}_\alpha$  超前  $\dot{U}_\beta$

以  $\dot{I}_\alpha$  为基准, 有



$$\dot{I}_\alpha = I \angle 0^\circ \quad \dot{I}_\beta = I \angle -120^\circ$$

达到额定输出时有  $I_\alpha = I_\beta = I$

则绕组电流为 
$$\dot{I}'_\alpha = \frac{1}{3}(2\dot{I}_\alpha - \dot{I}_\beta) = \frac{2.645}{3} I \angle 19.1^\circ$$

$$\dot{I}'_\beta = \frac{1}{3}(2\dot{I}_\beta - \dot{I}_\alpha) = \frac{2.645}{3} I \angle -139.1^\circ$$



$$\dot{I}'_{\alpha} = \frac{1}{3}(2\dot{I}_{\alpha} - \dot{I}_{\beta}) = \frac{2.645}{3} I \angle 19.1^{\circ}$$

$$\dot{I}'_{\beta} = \frac{1}{3}(2\dot{I}_{\beta} - \dot{I}_{\alpha}) = \frac{2.645}{3} I \angle -139.1^{\circ}$$

当  $I'_{\alpha}$ 、 $I'_{\beta}$  达到额定值  $I_e$  时，则

$$I_{\alpha} = I_{\beta} = I = \frac{3}{2.645} I_e$$

Ynd11牵引变压器的额定容量利用率为

$$K = \frac{(3/2.645) I_e \cdot 2U_e}{3U_e I_e} \times 100\% = 75.6\%$$



## 四. 三相-两相平衡变压器

### 1. 概述

电气化铁道牵引负荷通过特定接线的牵引变压器不会在电力系统中产生零序分量，但通常造成负序分量。

三相对称：三相电气相量大小相等，相位互差 $120^\circ$

两相对称：两相电气相量大小相等，相位互差 $90^\circ$

平衡变压器通常是指那种具有变压和换相功能的三相-两相变压器，目的是消除或削弱负序。数学上是三相对称系统与两相对称系统之间的变换。

即： $A \ B \ C \Leftrightarrow 0 \ \alpha \ \beta$

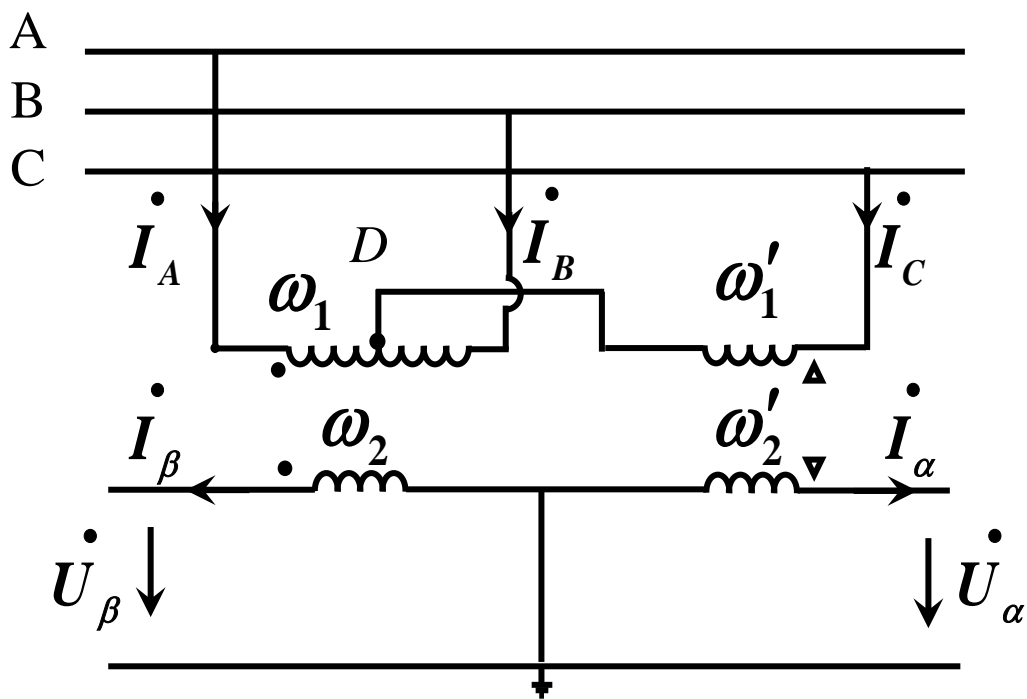


接线方式	缩写	接线简图	适用供电方式
<b>Scott</b>	<b>SCT</b>		直接供电, BT
<b>LeBlanc</b>	<b>LBL</b>		铁路少用
<b>Modified LeBlanc</b>	<b>MLB</b>		直接供电, BT
<b>k übler</b>	<b>KBL</b>		直接供电, BT
<b>Wood-Bridge</b>	<b>WBR</b>		铁路少用
<b>Modified Wood-Bridge</b>	<b>MWB</b>		AT
<b>Auto Wood Bridge</b>	<b>AWB</b>		AT



## 2. Scott变压器

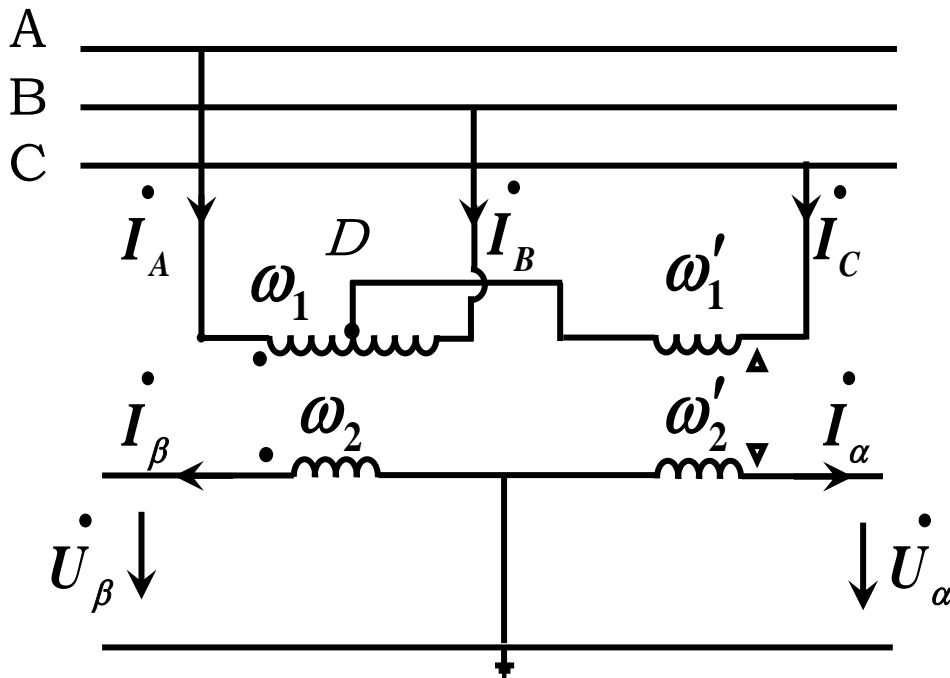
### (1) Scott接线





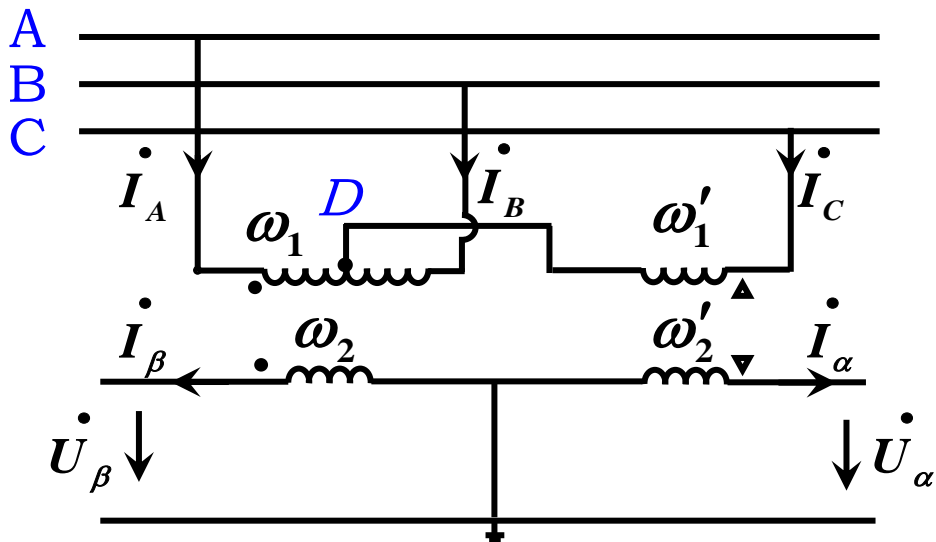
## (2) 变比关系

Scott接线变压器底 (M) 座绕组原边接入电力系统 AB 相 (线电压)，高 (T) 座绕组原边一端接底绕组的中点 D，另一端接入 C 相。



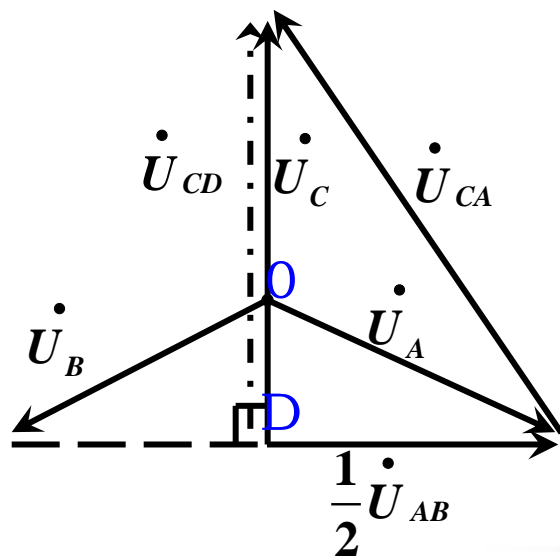
底座原、次边绕组匝  
数分别为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$

高座原、次边匝数分别  
为  $\omega_1'$ 、 $\omega_2'$

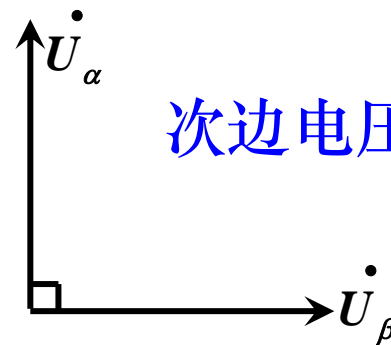


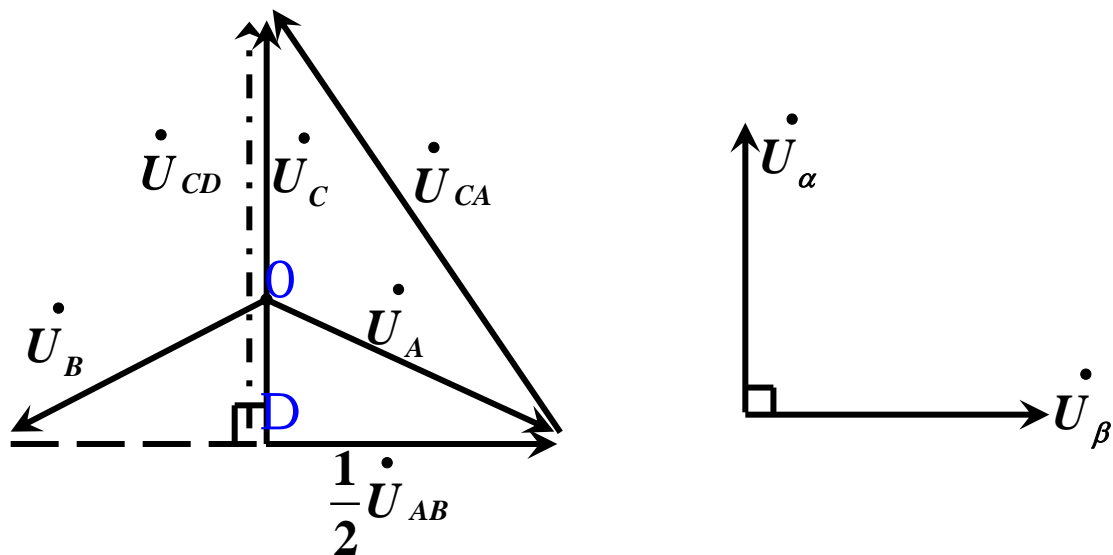
Scott接线电压相量图

原边电压



次边电压

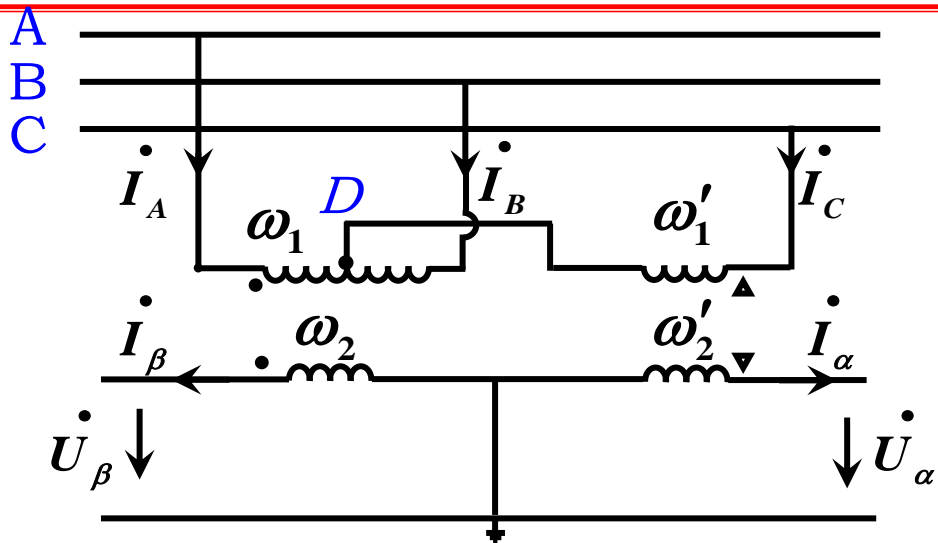




以原边相电压  $\dot{U}_A$  为参考

则底 (M) 座电压  $\dot{U}_{AB} = \sqrt{3}U_A \angle 30^\circ$

高 (T) 座原边电压  $\dot{U}_{CD} = \frac{3}{2}U_A \angle 120^\circ$

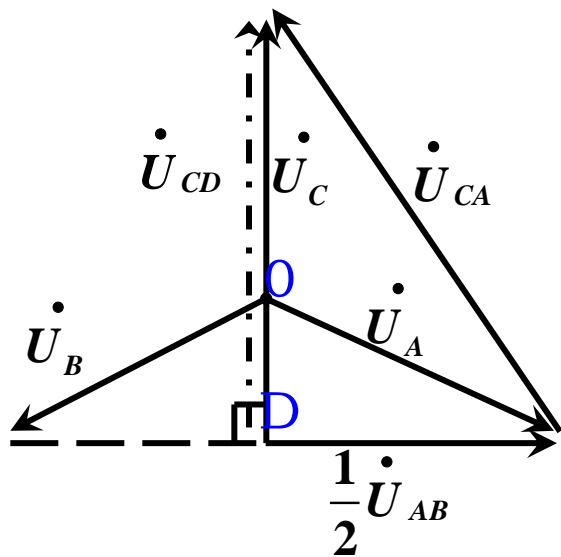


底座绕组的变比

$$K_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_{AB}}{U_\beta} = \frac{\sqrt{3}U_A}{U_\beta}$$

高座绕组的变比

$$K_2 = \frac{\omega'_1}{\omega'_2} = \frac{U_{DC}}{U_\alpha} = \frac{3/2U_A}{U_\alpha} = \frac{\sqrt{3}}{2} K_1$$

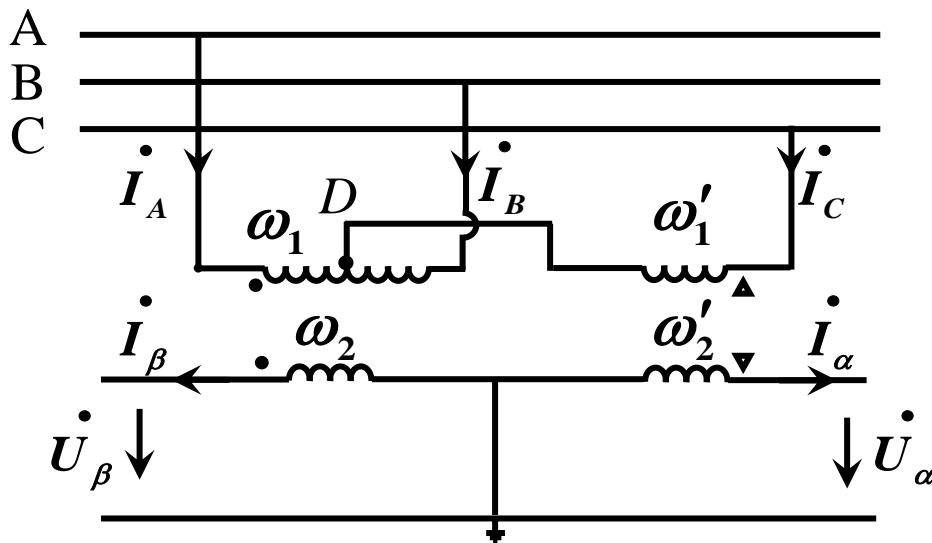


当原边线电压为110kV次  
边为27.5kV时

$$K_1 = 4 \quad K_2 = 2\sqrt{3}$$



### (3) 电流变换关系及变换阵



电流平衡  
和  
磁势平衡关系式

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \\ \omega_1' \dot{I}_C = \omega_2' \dot{I}_\alpha \\ \frac{\omega_1}{2} \dot{I}_A - \frac{\omega_1}{2} \dot{I}_B = \omega_2 \dot{I}_\beta \end{array} \right.$$



$$\begin{cases} \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 & K_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} \\ \omega_1' \dot{I}_C = \omega_2' \dot{I}_\alpha \\ \frac{\omega_1}{2} \dot{I}_A - \frac{\omega_1}{2} \dot{I}_B = \omega_2 \dot{I}_\beta \end{cases} \quad \begin{matrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{matrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \\ 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix}$$

引入零序电流  $\dot{I}_0$  和常系数  $K$

简记为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} K & -1 & \sqrt{3} \\ K & -1 & -\sqrt{3} \\ K & 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ABC} \end{bmatrix} = [A_I]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix}$$

$[A_I]$  为电流变换阵

$K$  为待定常系数

(理论上可取任意值)

$$\left( \dot{I}_0 \equiv 0 \right)$$



$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} K & -1 & \sqrt{3} \\ K & -1 & -\sqrt{3} \\ K & 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix}$$

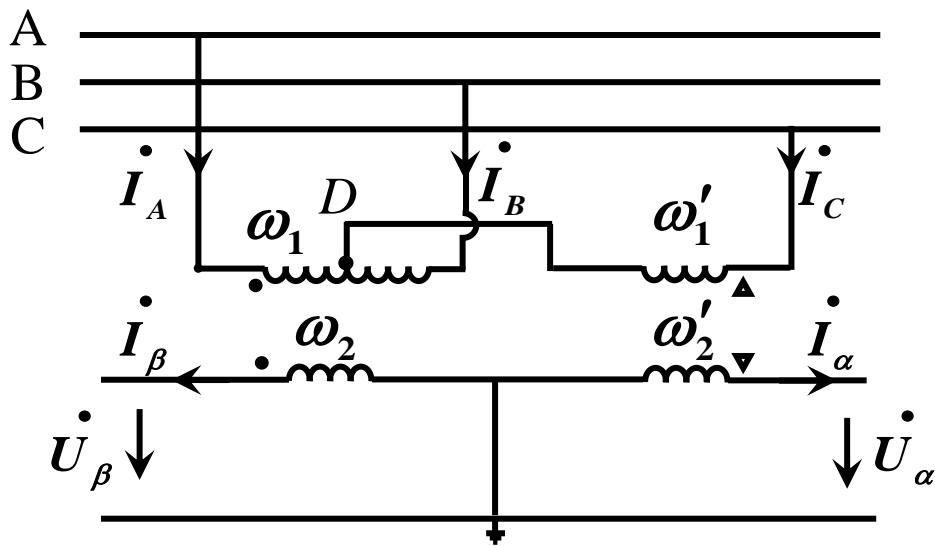
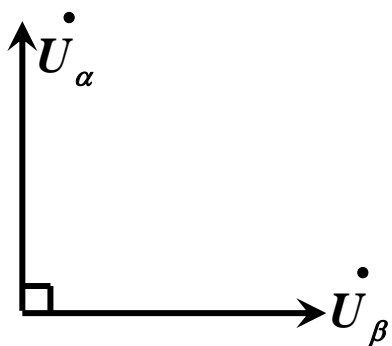
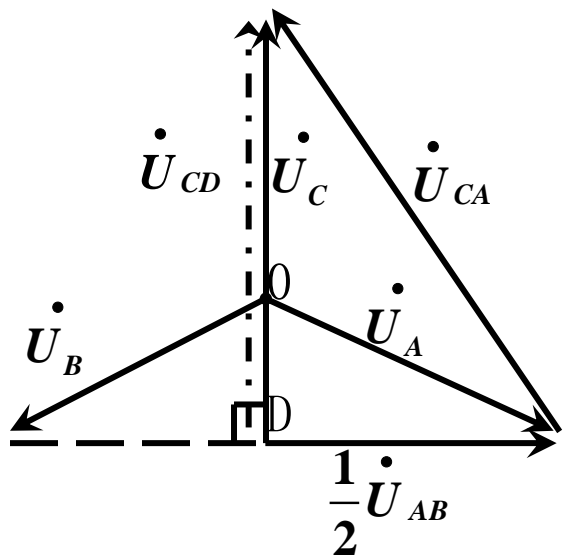
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ABC} \end{bmatrix} = [A_I]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix}$$

只要  $K \neq 0$ ，则  $[A_I]$  为非奇异矩阵  
故有电流的逆变换关系

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix} = [A_I] \begin{bmatrix} \dot{I}_{ABC} \end{bmatrix}$$



### (4) 电压变换关系及变换阵



$$\begin{cases} \dot{U}_\alpha = \frac{\omega'_2}{\omega'_1} \times \frac{3}{2} \dot{U}_C = \frac{\omega_2}{\omega_1} \sqrt{3} \dot{U}_C \\ \dot{U}_\beta = \frac{\omega_2}{\omega_1} \dot{U}_{AB} = \frac{\omega_2}{\omega_1} (\dot{U}_A - \dot{U}_B) \end{cases}$$



$$\begin{cases} \dot{U}_\alpha = \frac{\omega'_2}{\omega'_1} \times \frac{3}{2} \dot{U}_C = \frac{\omega_2}{\omega_1} \sqrt{3} \dot{U}_C \\ \dot{U}_\beta = \frac{\omega_2}{\omega_1} \dot{U}_{AB} = \frac{\omega_2}{\omega_1} (\dot{U}_A - \dot{U}_B) \end{cases}$$


$$K_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad \downarrow \quad \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$$

引入零序电压  $\dot{U}_0 \left( \dot{U}_0 \equiv 0 \right)$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} K' & K' & K' \\ 0 & 0 & 3 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} K' & K' & K' \\ 0 & 0 & 3 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}$$


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

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} K' & K' & K' \\ -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}$$

$K'$  为待定常系数（在理论上也可以取任意值）



$$\begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} K' & K' & K' \\ -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}$$

简记为  $\begin{bmatrix} \dot{U}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix} = [A_U] \begin{bmatrix} \dot{U}_{ABC} \end{bmatrix}$

$[A_U]$  为电压变换阵

若 $[A_U]$ 为非奇异矩阵, 则有:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ABC} \end{bmatrix} = [A_U]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix}$$



## (5) 待定系数K、K' 的确定

Scott变压器为理想变压器

根据功率平衡原理

$$\begin{aligned} \left[ \dot{U}_{ABC} \right]^T \left[ \dot{I}_{ABC} \right]^* &= \left[ \dot{U}_{0\alpha\beta} \right]^T \left[ \dot{I}_{0\alpha\beta} \right]^* \\ &= \left( \left[ A_U \right] \left[ \dot{U}_{ABC} \right] \right)^T \left( \left[ A_I \right] \left[ \dot{I}_{ABC} \right] \right)^* \\ &= \left[ \dot{U}_{ABC} \right]^T \left[ A_U \right]^T \left[ A_I \right]^* \left[ \dot{I}_{ABC} \right]^* \end{aligned}$$

$\square$  为实数矩阵

$$\left[ A_U \right]^T \left[ A_I \right]^* = \left[ A_U \right]^T \left[ A_I \right] = \left[ \mathbf{1} \right]$$



$$[A_U]^T [A_I]^* = [A_U]^T [A_I] = [1]$$

$$[A_U]^T = [A_I]^{-1}$$

$$[A_I]^{-1} = \begin{bmatrix} K & -1 & \sqrt{3} \\ K & -1 & -\sqrt{3} \\ K & 2 & 0 \end{bmatrix} \quad [A_U] = \begin{bmatrix} K' & K' & K' \\ -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix}$$

$$K = K'$$

为了获得形式简便的阻抗变换阵，可以选取

$$K = \sqrt{2}$$



$$[A_U] = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[A_U]^{-1} = \frac{K_1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & -1 & \sqrt{3} \\ \sqrt{2} & -1 & -\sqrt{3} \\ \sqrt{2} & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[A_I]^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & -1 & \sqrt{3} \\ \sqrt{2} & -1 & -\sqrt{3} \\ \sqrt{2} & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[A_I] = \frac{K_1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix} = [A_U] \begin{bmatrix} \dot{U}_{ABC} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix} = [A_I] \begin{bmatrix} \dot{I}_{ABC} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ABC} \end{bmatrix} = [A_U]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ABC} \end{bmatrix} = [A_I]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{I}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix}$$



$C \rightarrow \alpha$

$$[A_U] = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix}$$

$A \rightarrow \alpha$

$$[A_U] = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

$B \rightarrow \alpha$

$$[A_U] = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -1 & 2 & -1 \\ -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix}$$

$AB \rightarrow \beta$

$$[A_I] = \frac{K_1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix}$$

$BC \rightarrow \beta$

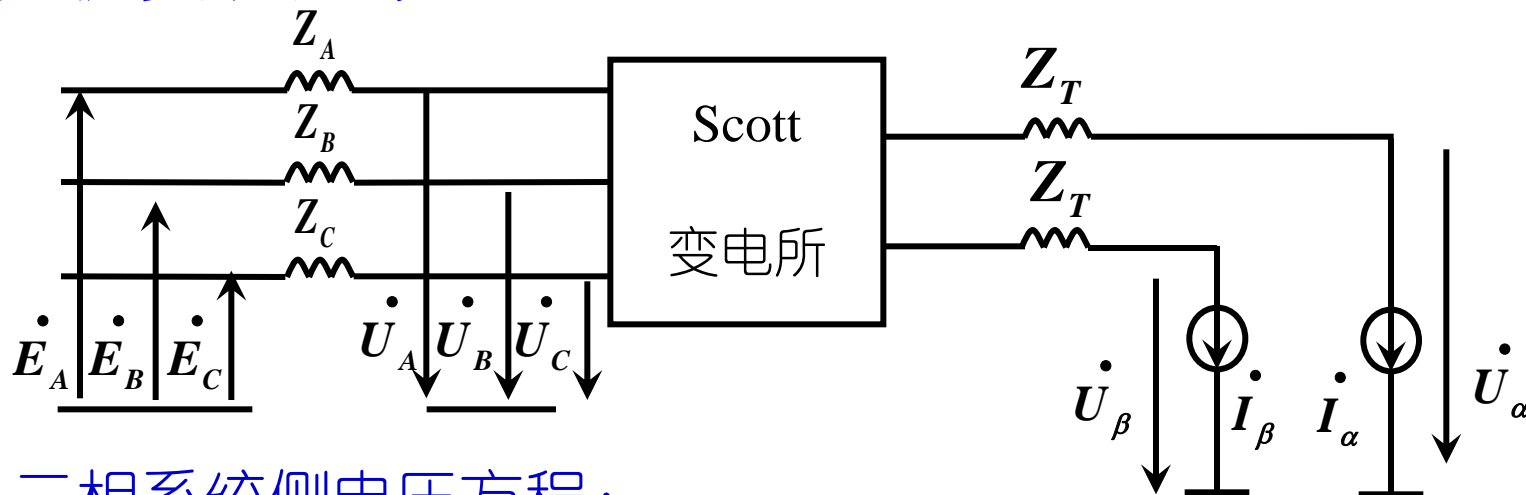
$$[A_I] = \frac{K_1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

$CA \rightarrow \beta$

$$[A_I] = \frac{K_1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -1 & 2 & -1 \\ -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix}$$



## (6) 阻抗变换关系



三相系统侧电压方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{ABC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{ABC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ABC} \end{bmatrix}$$

两边左乘  $[A_U]$

$$\begin{bmatrix} A_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{ABC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{ABC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_I^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ABC} \end{bmatrix}$$



$$[A_U] \begin{bmatrix} \dot{E}_{ABC} \end{bmatrix} = [A_U] \begin{bmatrix} \dot{U}_{ABC} \end{bmatrix} + [A_U] [Z_{ABC}] [A_I^{-1}] [A_I] \begin{bmatrix} \dot{I}_{ABC} \end{bmatrix}$$

$$\text{即} \quad \begin{bmatrix} \dot{E}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix} + [A_U] [Z_{ABC}] [A_I^{-1}] \begin{bmatrix} \dot{I}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix}$$

A, B, C三相变换到0,  $\alpha$ ,  $\beta$ 系统的等值阻抗

$$[Z_{0\alpha\beta}] = [A_U] [Z_{ABC}] [A_I^{-1}]$$

$$[Z_{0\alpha\beta}] = [A_U] [Z_{ABC}] [A_I^{-1}]$$

$$= \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} K & K & K \\ -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_A & & \\ & Z_B & \\ & & Z_C \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} K & -1 & \sqrt{3} \\ K & -1 & -\sqrt{3} \\ K & 2 & 0 \end{bmatrix}$$



$$\begin{aligned}
 [Z_{0\alpha\beta}] &= [A_U][Z_{ABC}][A_I^{-1}] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} K & K & K \\ -1 & -1 & 2 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} K & -1 & \sqrt{3} \\ K & -1 & -\sqrt{3} \\ K & 2 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

如果  $Z_A = Z_B = Z_C = Z_S$

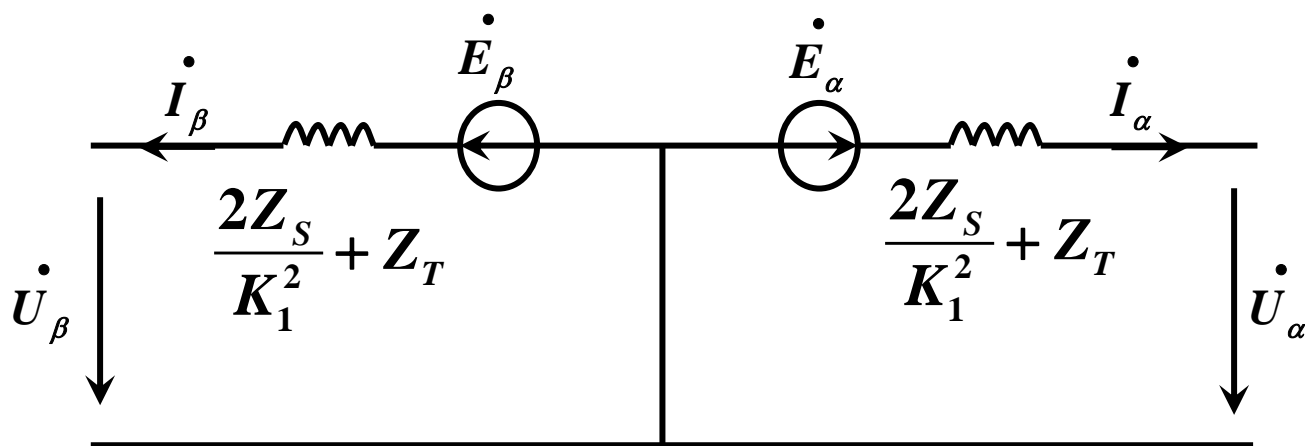
$$[Z_{0\alpha\beta}] = \frac{Z_S}{3K_1^2} \begin{bmatrix} 3K^2 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} \dot{E}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix} + [A_U][Z_{ABC}][A_I^{-1}]\begin{bmatrix} \dot{I}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix}$$

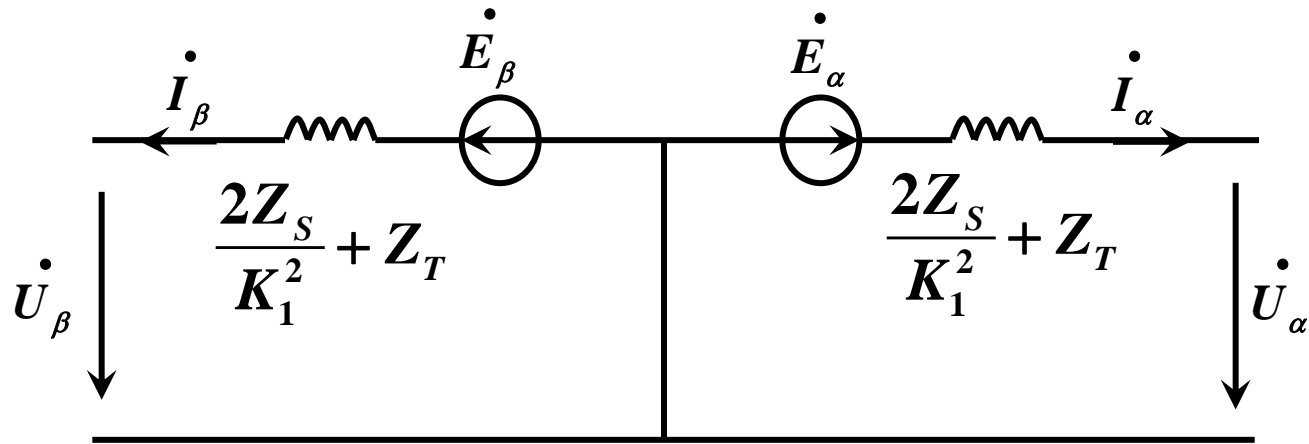
$$\begin{bmatrix} Z_{0\alpha\beta} \end{bmatrix} = \frac{Z_S}{3K_1^2} \begin{bmatrix} 3K^2 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \end{bmatrix} \xrightarrow{K = \sqrt{2}} \begin{bmatrix} Z_{0\alpha\beta} \end{bmatrix} = \frac{2Z_S}{K_1^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Scott变电所端口等值电路





## Scott 变电所端口等值电路



忽略电阻

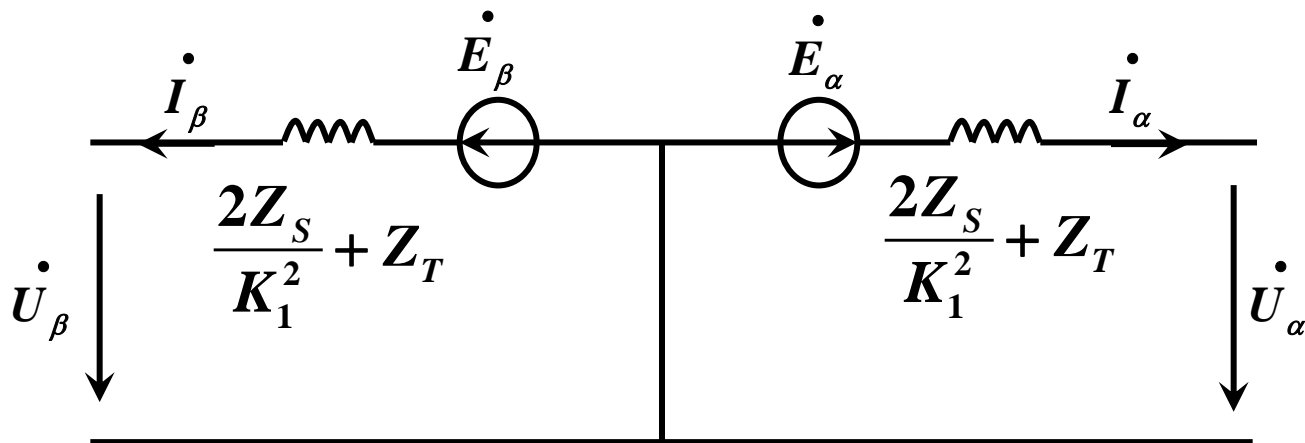
$$X_S = \frac{110^2 \text{ (kV)}^2}{S_d \text{ (MVA)}} \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$X_T = \frac{U_d \%}{1000} \cdot \frac{27.5^2}{\left(\frac{S_T}{2}\right)} \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$K_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} = 4$$



## (7) Scott变压器二次侧短路计算

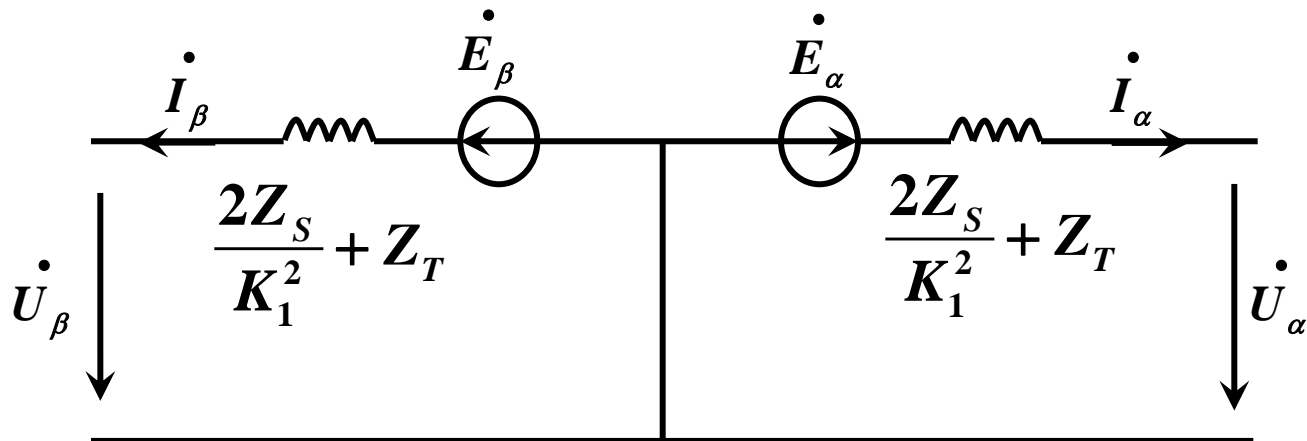


只考虑阻抗的电抗部分，且有

$$\dot{E}_\beta = -j \dot{E}_\alpha \quad E_\alpha = E_\beta = 27.5 \text{ kV}$$

(1) 一相母线对轨地短路

$$I_d = \frac{27.5}{\frac{2X_S}{K_1^2} + X_T} \text{ kA}$$



(2) 异相牵引母线短路

$$I_d = \frac{\sqrt{2} \times 27.5}{\left( \frac{2X_S}{K_1^2} + X_T \right) \times 2} \text{ kA}$$

(3) 两相母线对地短路，导出短路电流为

$$I_d = \frac{27.5}{\frac{2X_S}{K_1^2} + X_T} \text{ kA}$$



## (8) Scott变压器容量利用率

额定输出时，即  $I_\alpha = I_\beta = I_e$

由 
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \\ 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix}$$

得 
$$I_A = I_B = I_C = \frac{1}{2\sqrt{3}} I_e$$

变压器额定输出容量  $S_e = 2 \times 27.5 I_e$



变压器额定输出容量

$$S_e = 2 \times 27.5 I_e$$

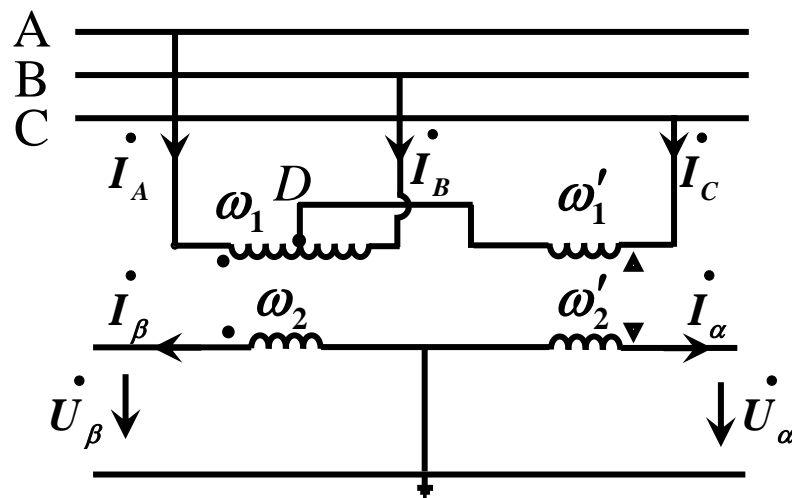
变压器设计容量

$$S_b = U_{CD} I_C + \frac{1}{2} U_{AB} I_A + \frac{1}{2} U_{AB} I_B$$

$$= \left[ \left( \frac{3}{2} \times \frac{110}{\sqrt{3}} \right) + \frac{110}{2} + \frac{110}{2} \right] \frac{1}{2\sqrt{3}} I_e = \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \right) \frac{110}{2\sqrt{3}} I_e$$

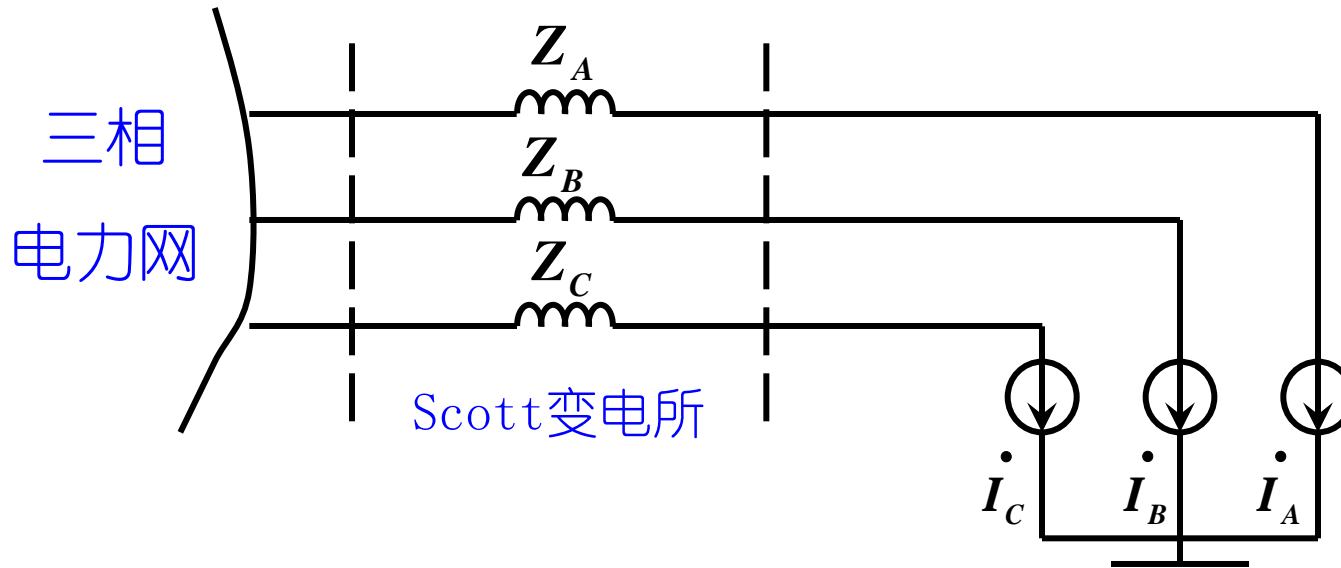
则变压器额定容量利用率

$$K = \frac{S_e}{S_b} \times 100\% = 92.8\%$$





## (9) Scott牵引变电所变换到三相系统的等值电路



$$Z_A = Z_B = Z_C = \frac{K_1^2}{2} Z_T$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{0\alpha\beta} \end{bmatrix}$$



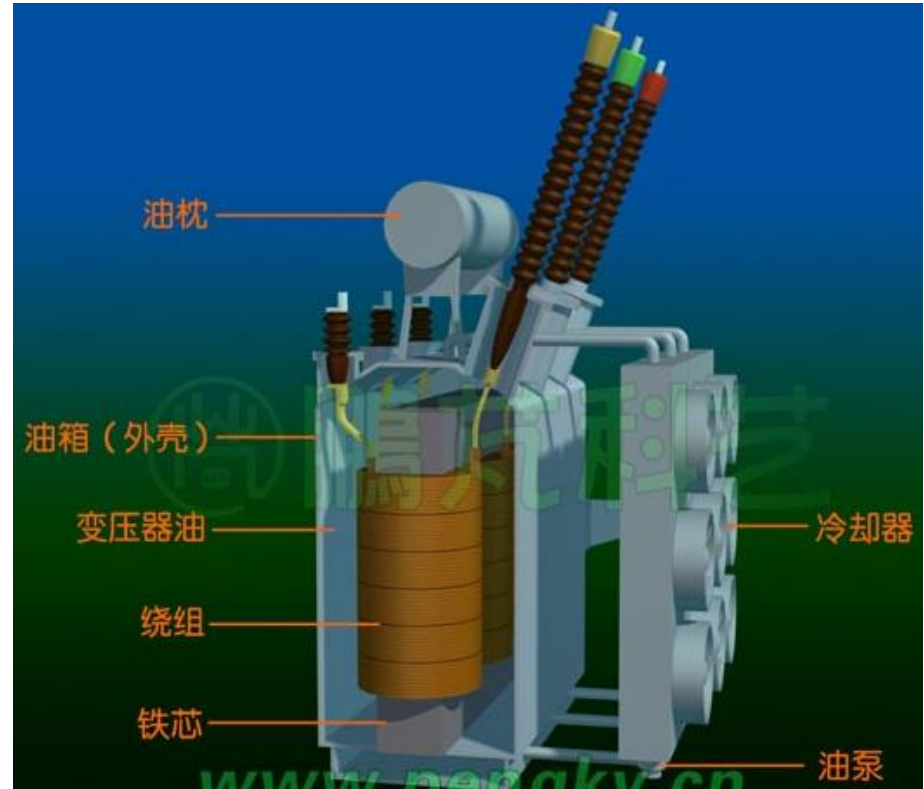
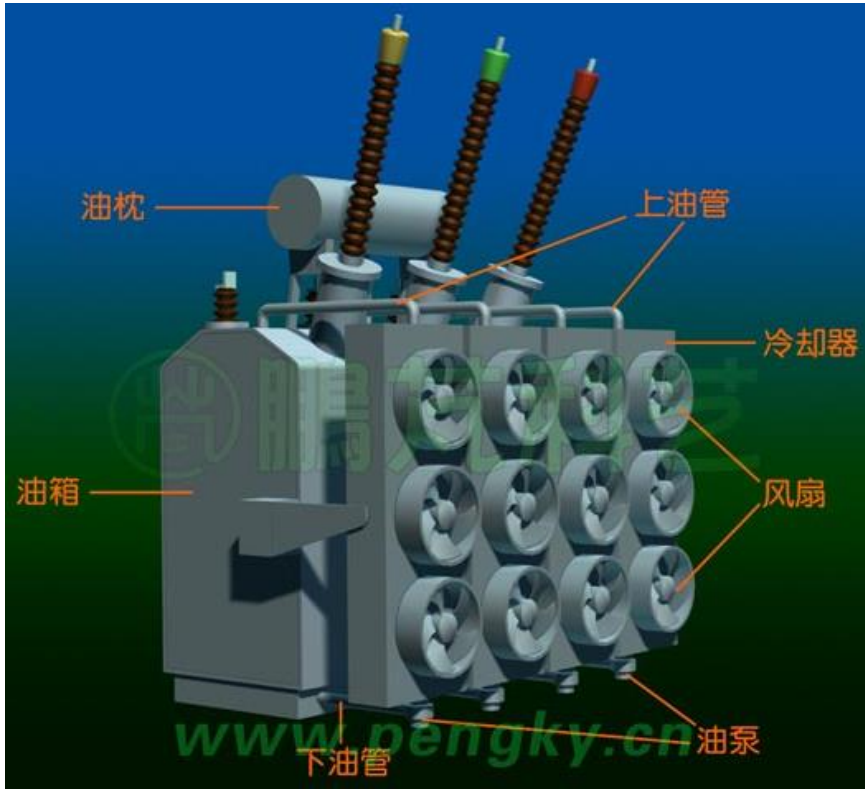
## 油浸式变压器



## 干式变压器

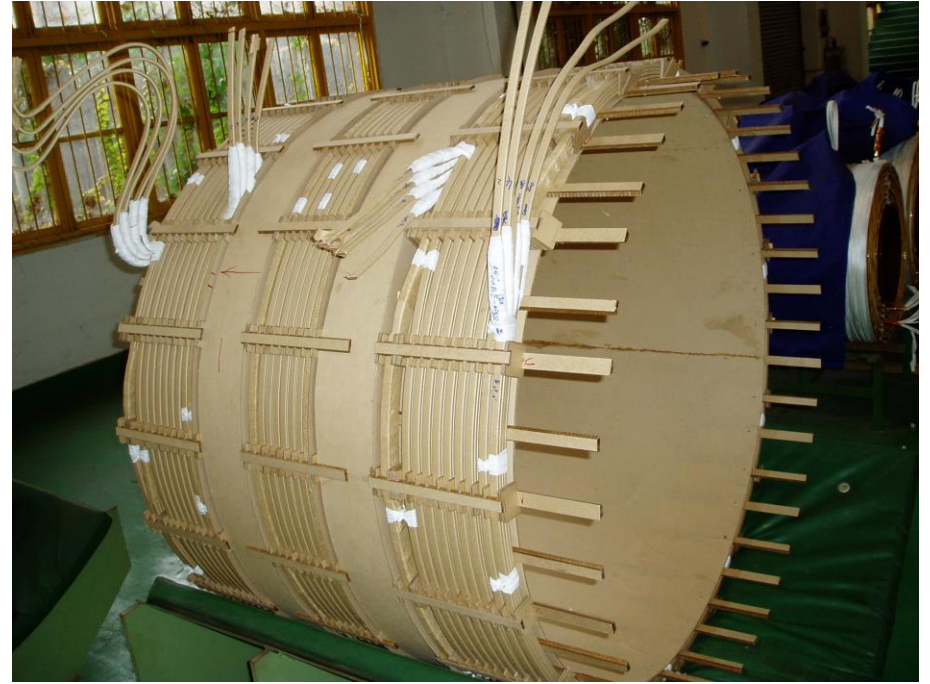


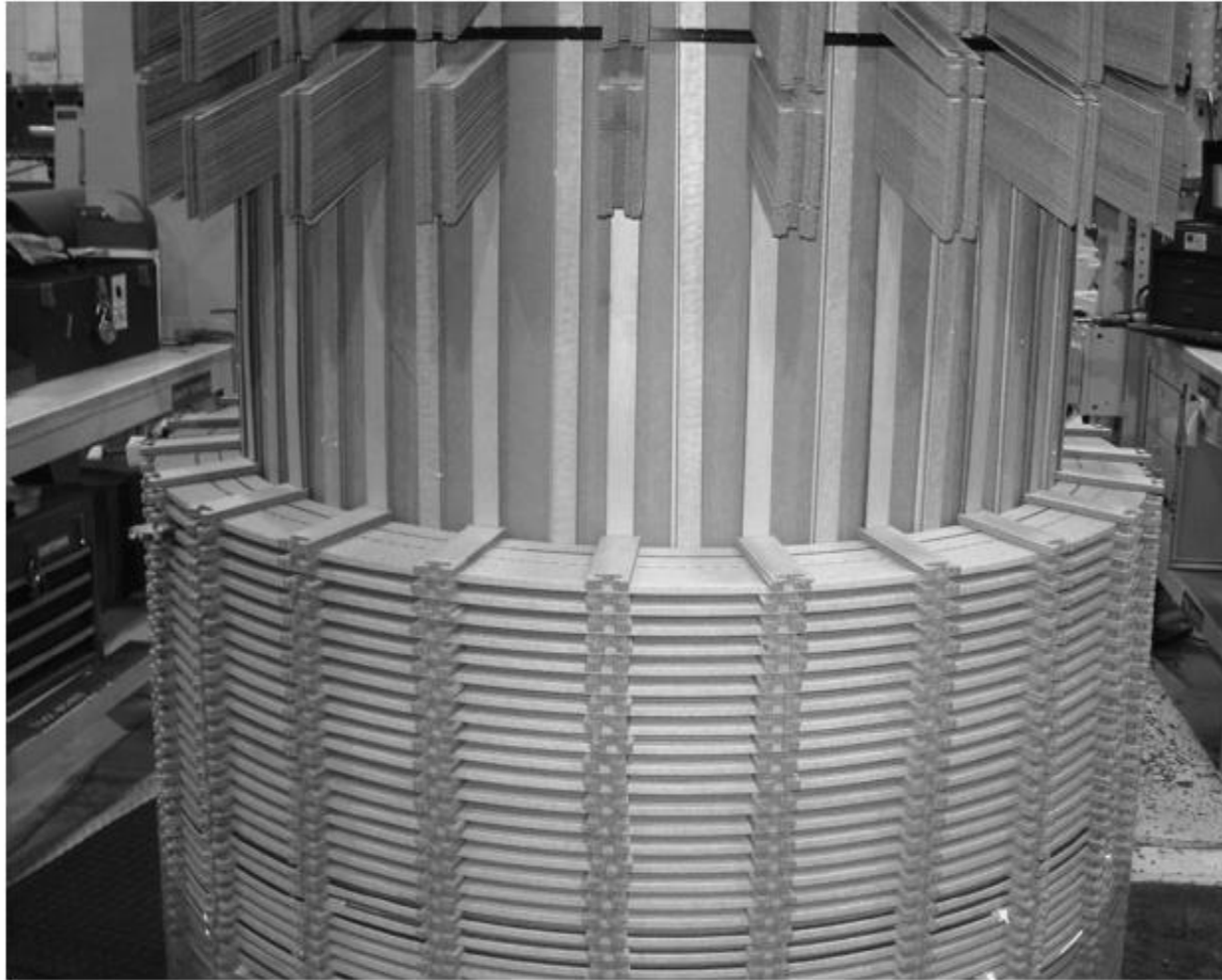
环氧树脂浇注干式变压器





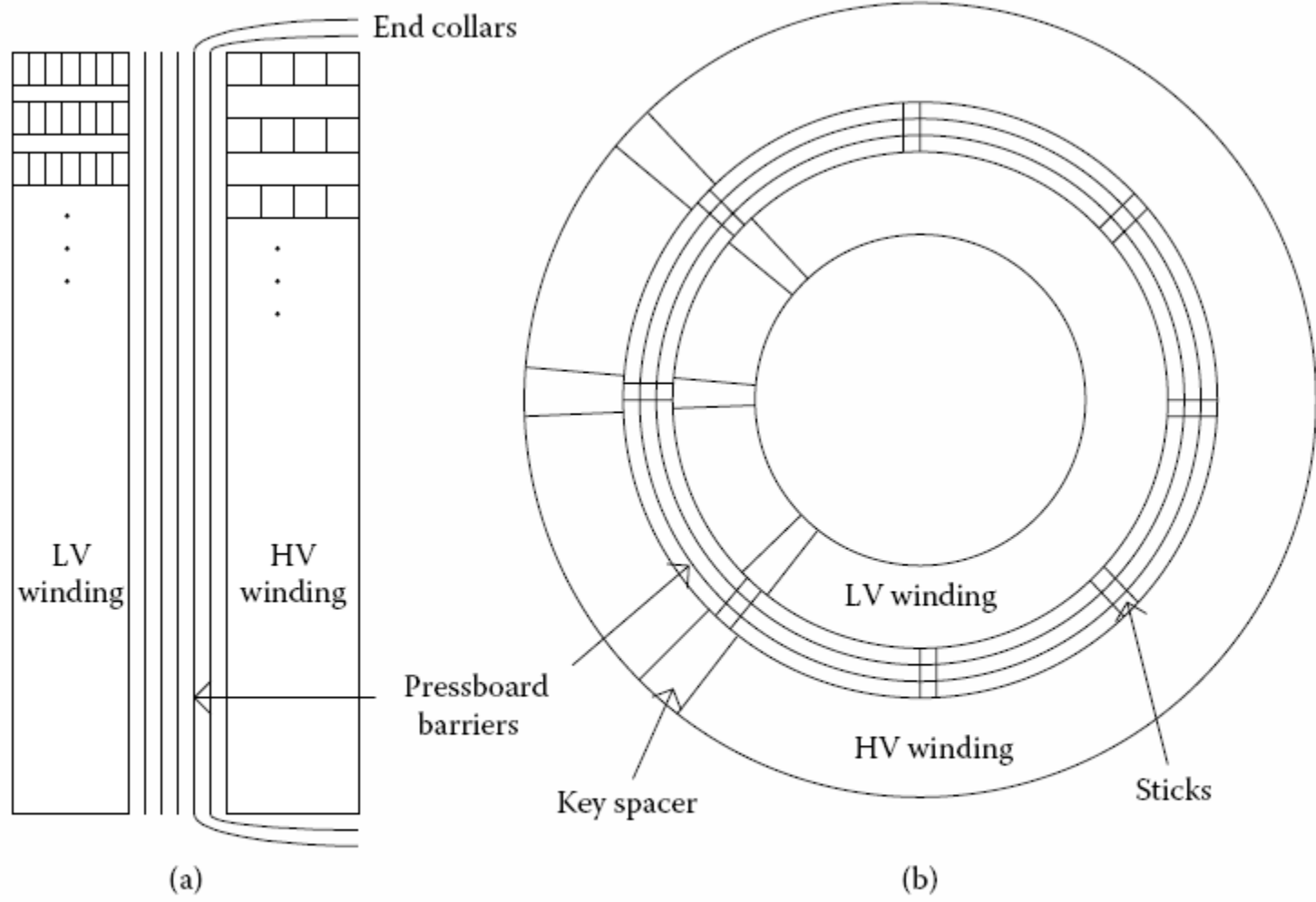






**FIGURE 1.14**

(See color insert following page 338.) A partially wound winding showing the key spacers and vertical sticks.



**FIGURE 1.13** Major insulation structure consisting of multiple barriers between windings. Not all the key spacers or sticks are shown. (a) Side view, (b) top view.

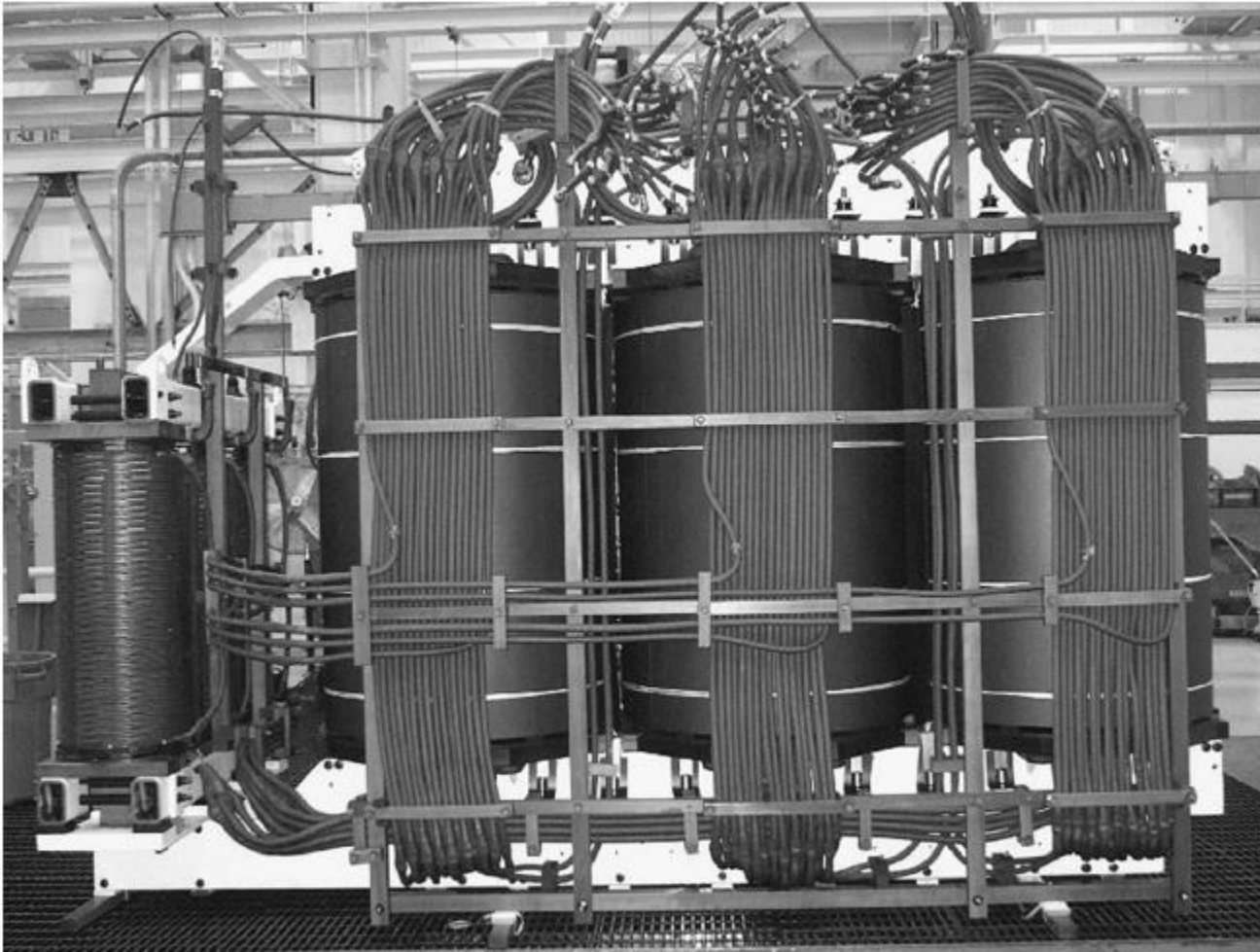
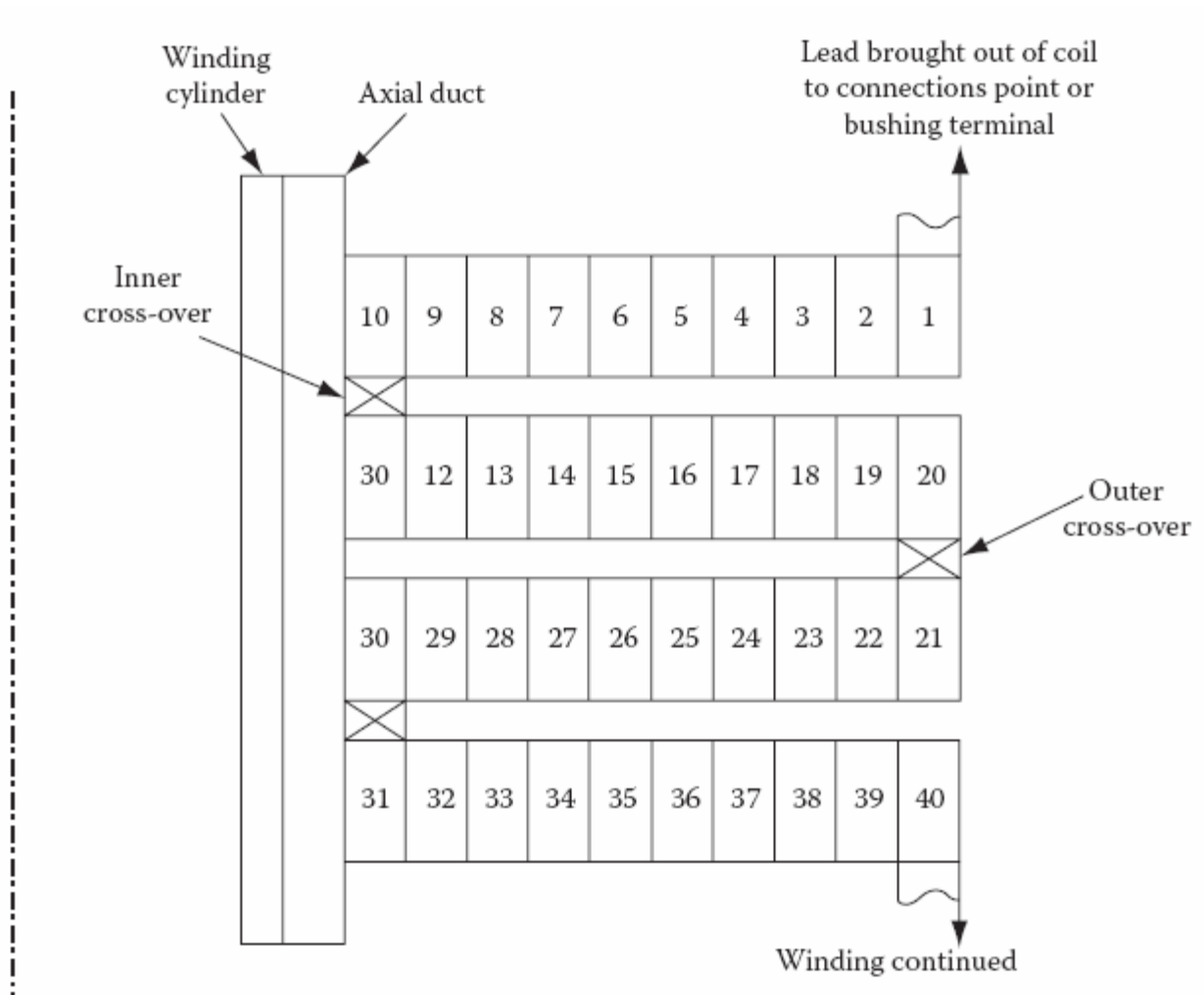


FIGURE 1.15

(See color insert following page 338.) Leads and their supporting structure emerging from the coils on one side of a three-phase transformer. (Courtesy of Waukesha Electric Systems.)



FIGURE 1.16  
(See color insert following page 338.) Top view of a clamping structure for a three-phase transformer.





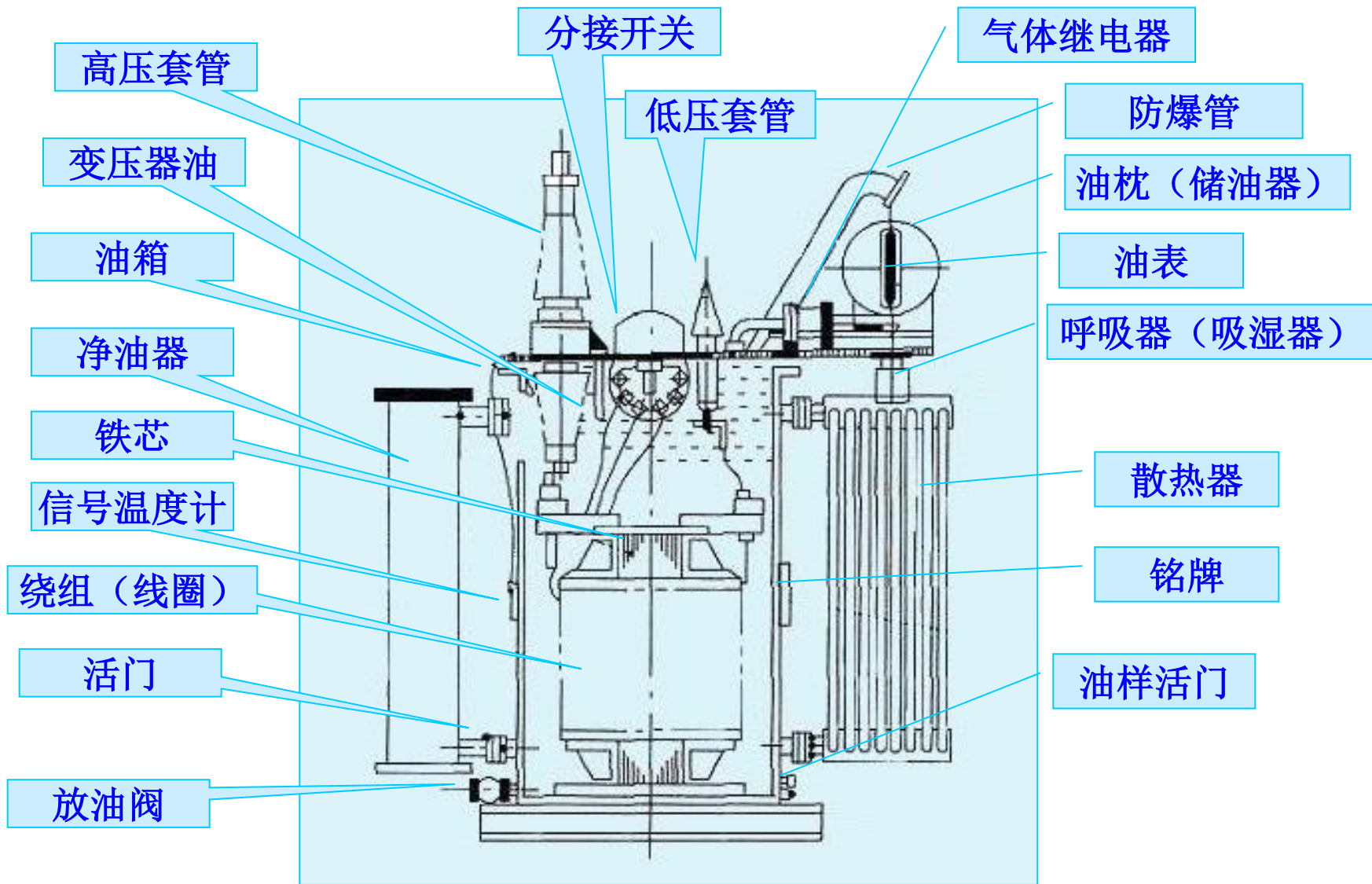






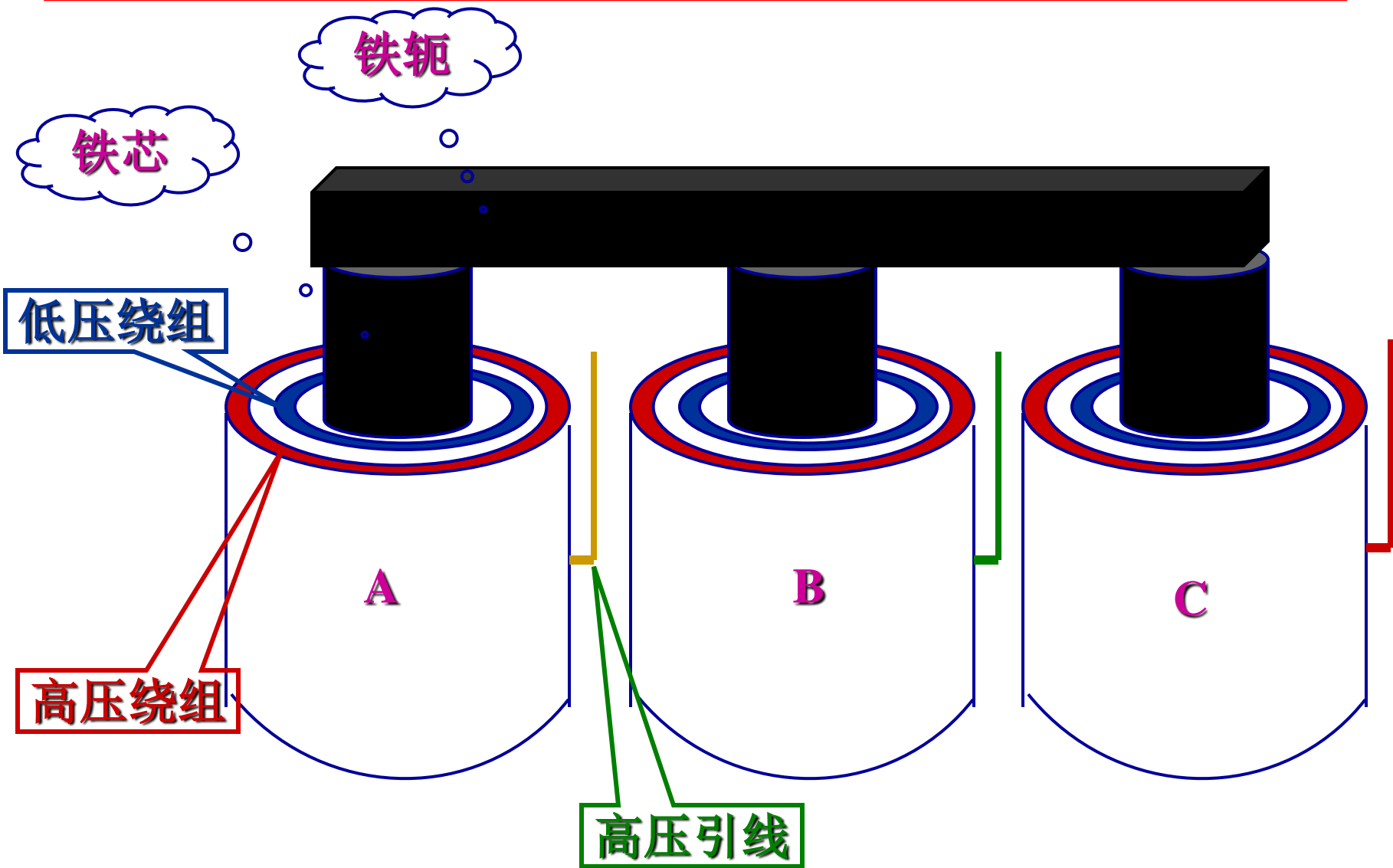


## 二、变压器的结构



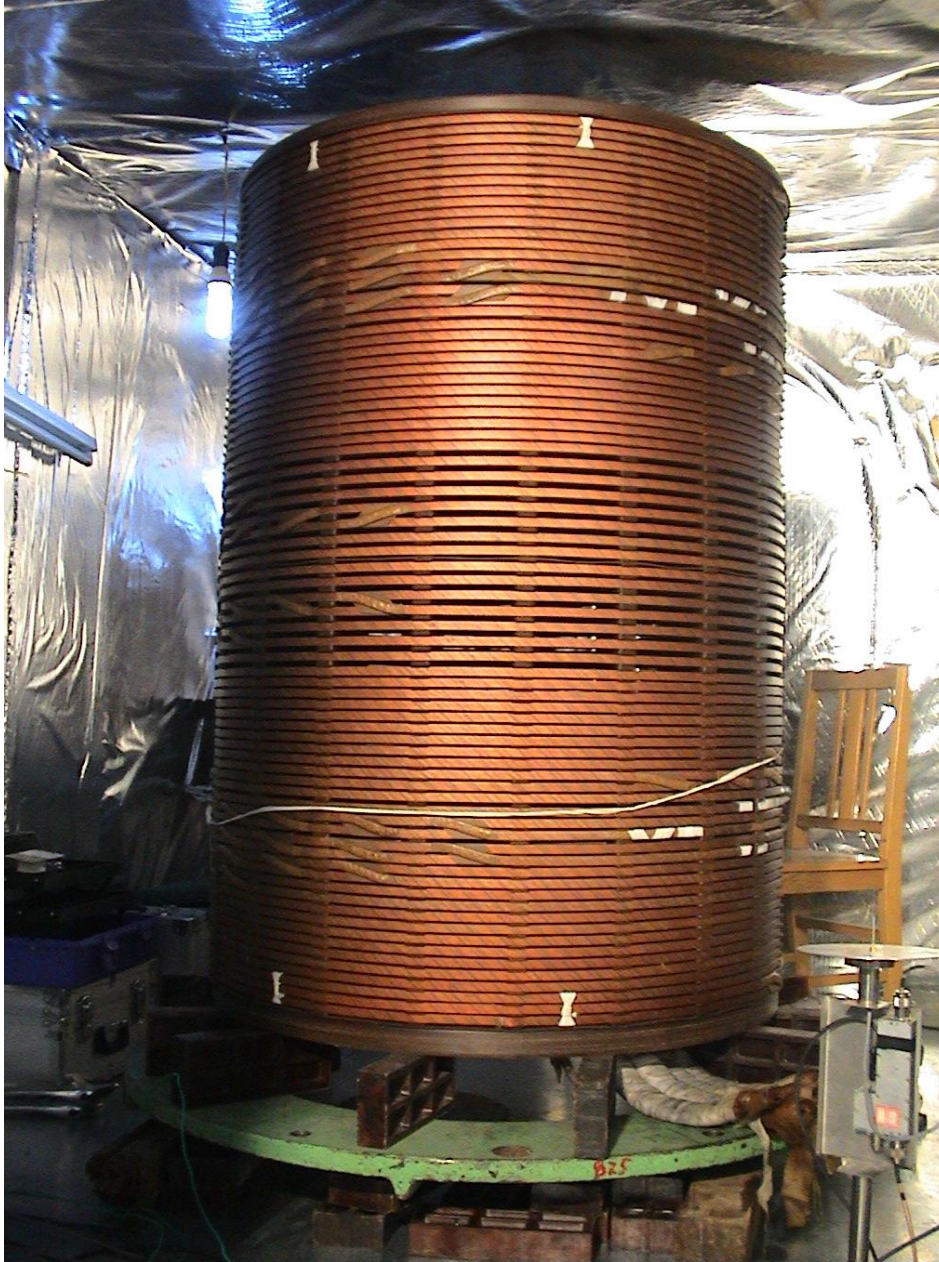


# 1 变压器结构简介

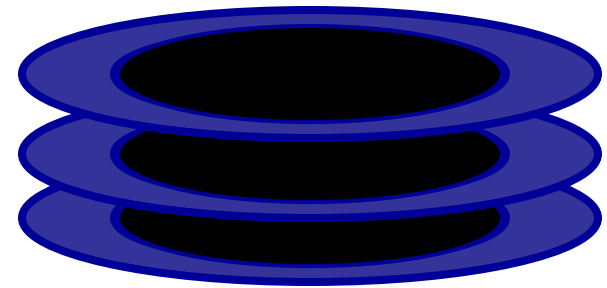
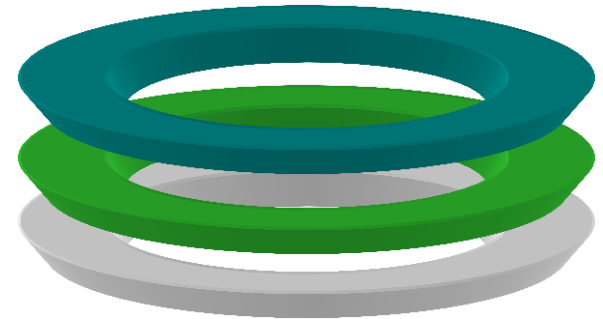




## 2 变压器绕组



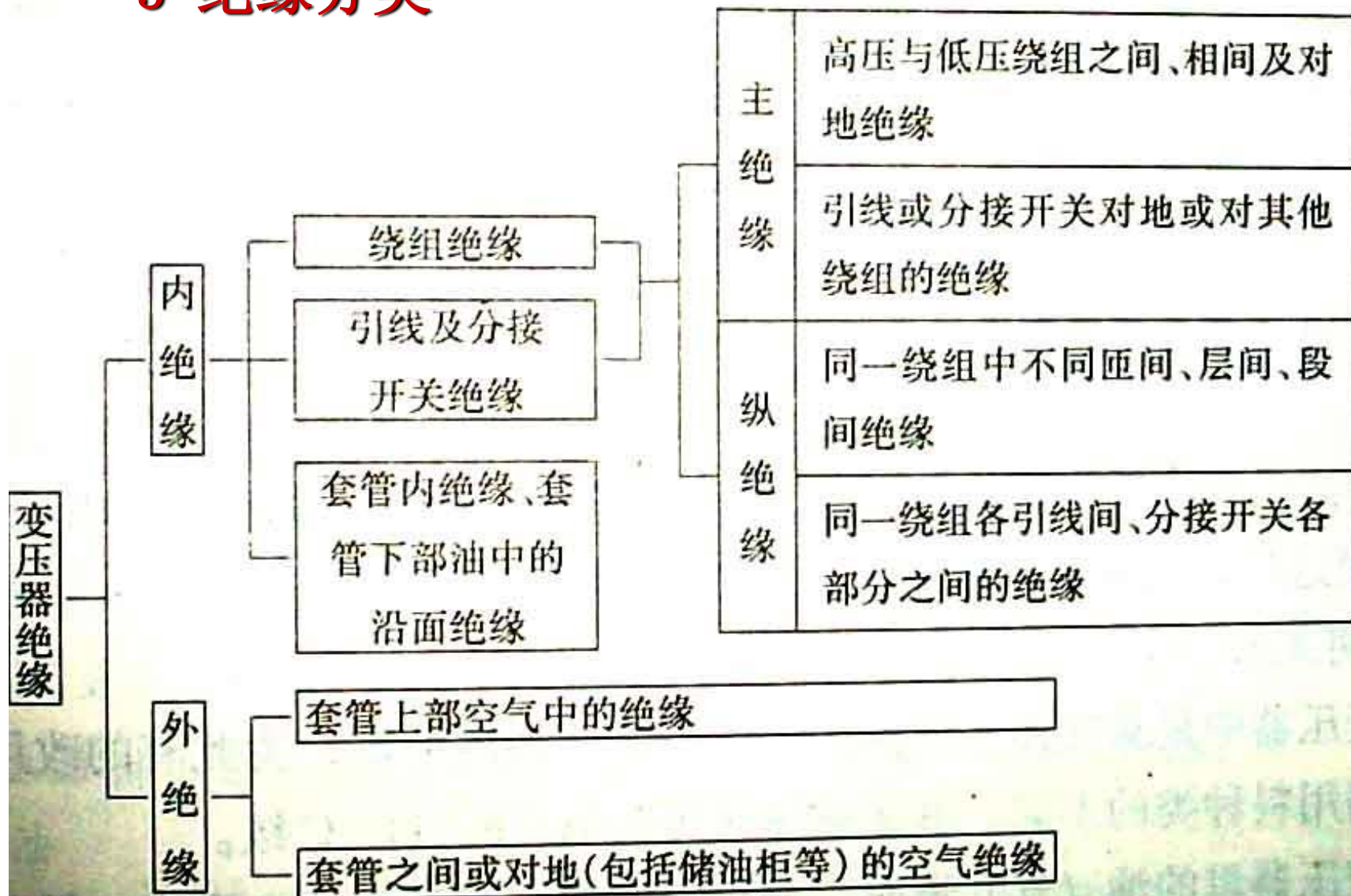
饼式结构





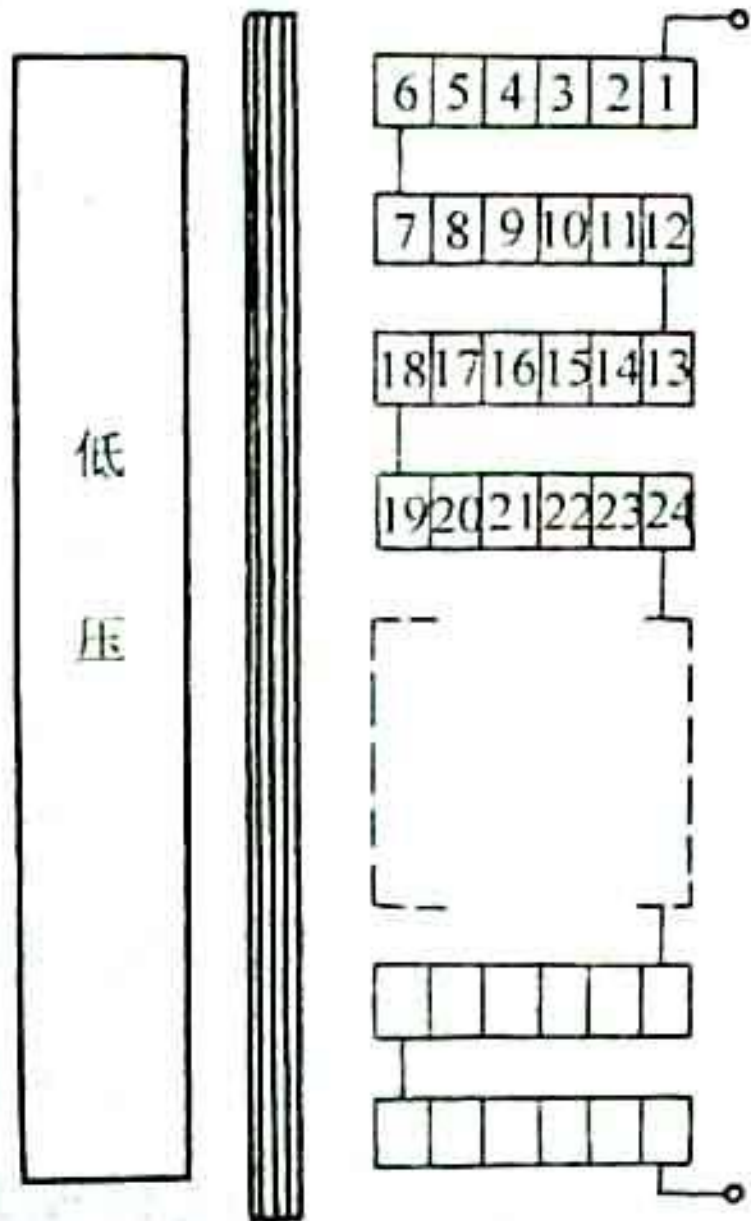
### 3 绝缘分类

#### 变压器绝缘的分类





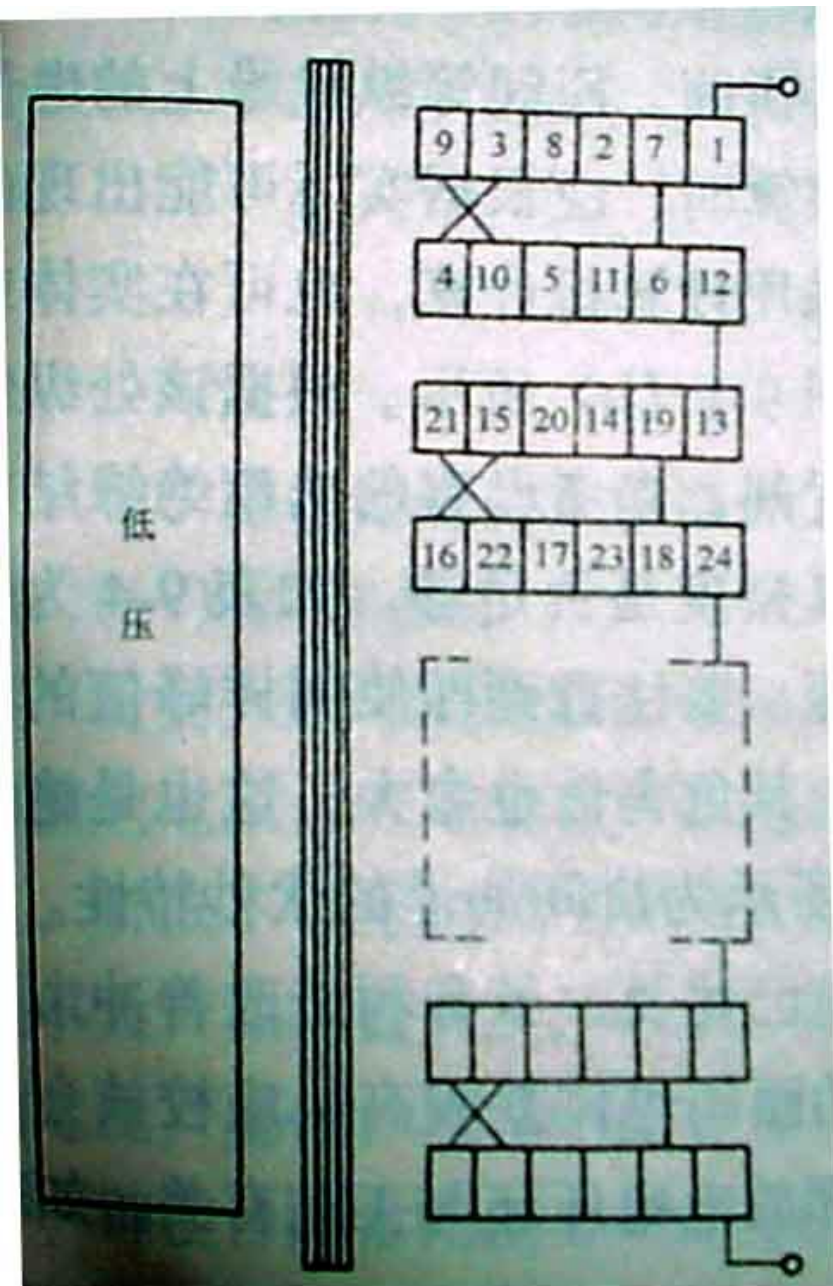
## 5 高压绕组绝缘结构基本特点



**2 饼式：1) 连续式：**  
**绕法简单**  
**纵向电容小，在雷电冲击下各线饼间电压分布很不均匀。**



## 5 高压绕组绝缘结构基本特点



**2 饼式：1) 纠结式：**  
**绕法复杂**  
**纵向电容大，有利于**  
**改善在雷电冲击下各**  
**线圈间电压分布。**  
**220kV及以上常采用**  
**纠结式**

7 主绝缘—绕组间或绕组对铁芯—结构

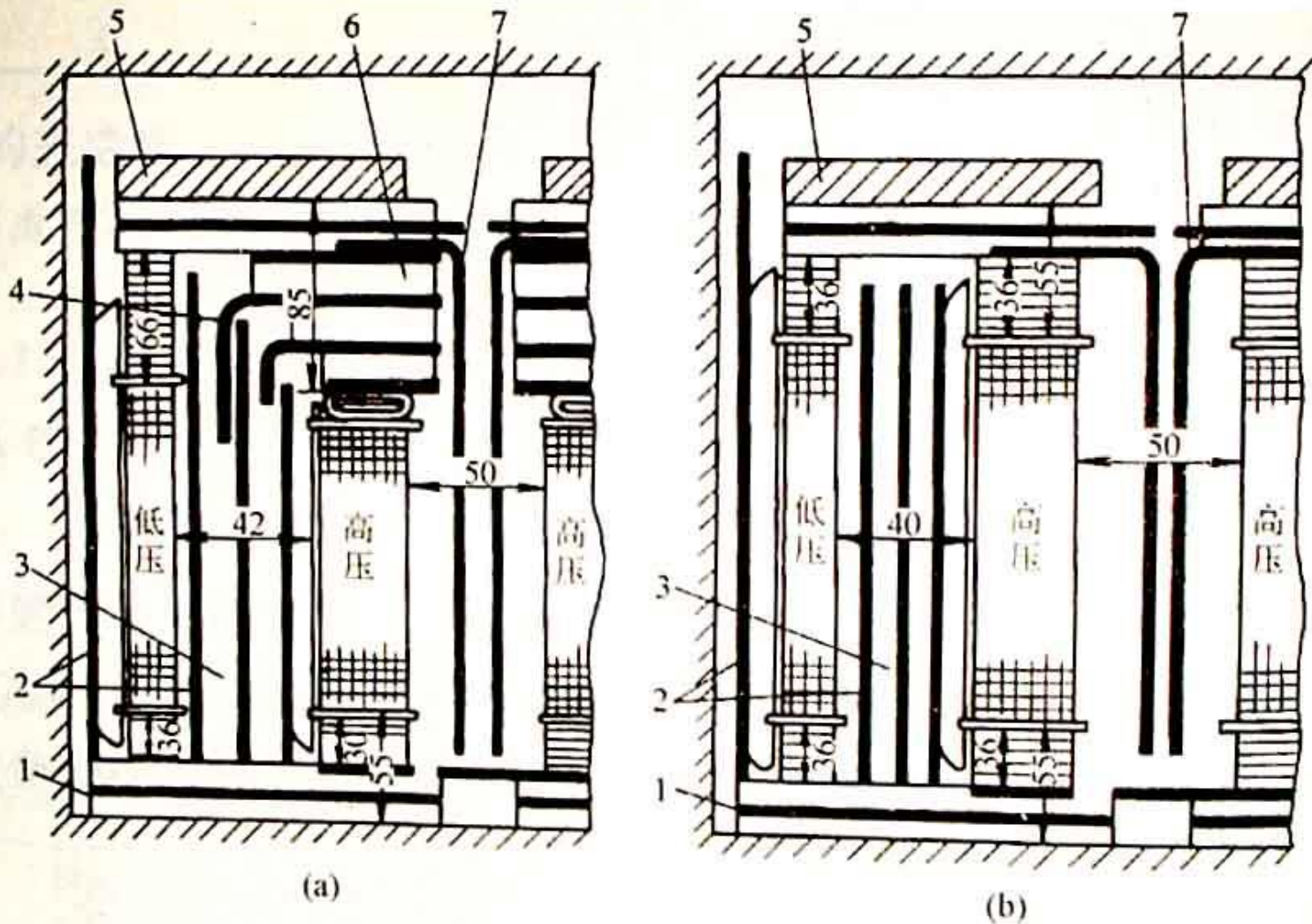


图 9-11 110kV (半绝缘) 变压器主绝缘结构

(a) 端部出线; (b) 中部出线

1—对轭绝缘; 2—绝缘筒; 3—油隙及撑条; 4—角环; 5—钢压板;  
6—绝缘端圈; 7—相间绝缘

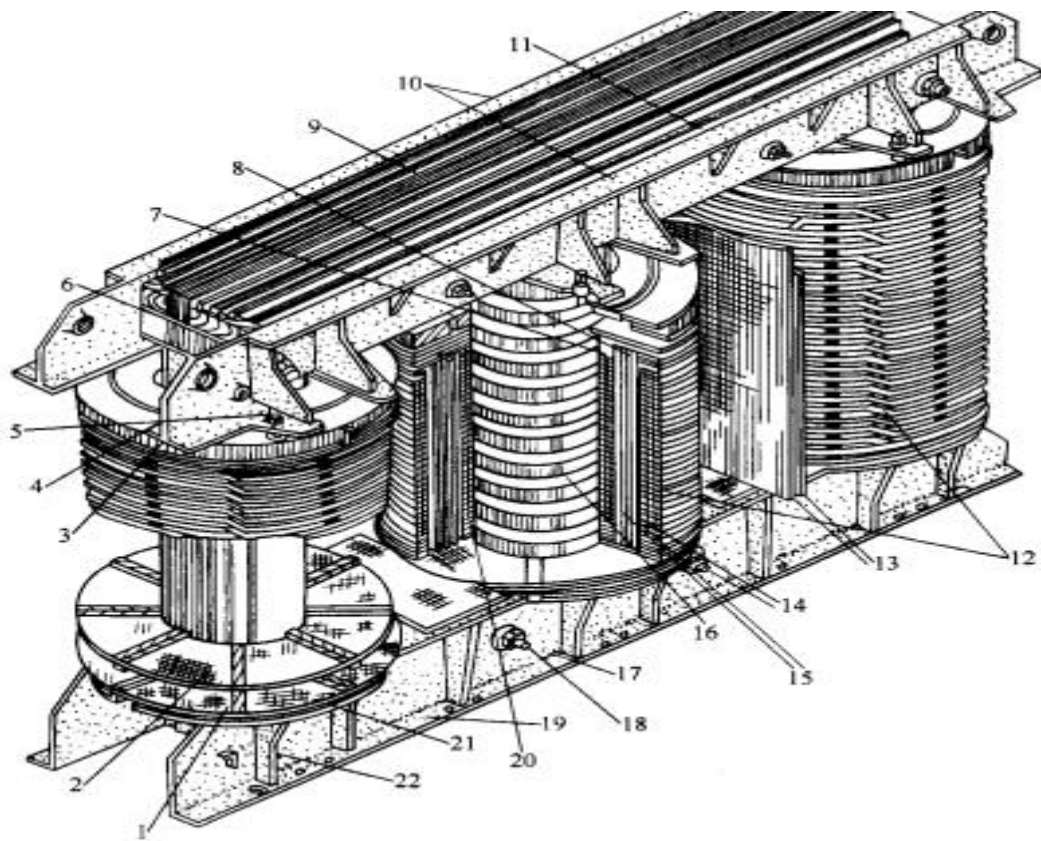


图 8-2-3 电力变压器器身构造图

- 1—平衡绝缘；2—下铁轭绝缘；3—压板；4—绝缘纸圈；5—压钉；6—方铁；7—静电环；  
8—角环；9—铁轭；10—上夹件；11—上夹件绝缘；12—高压绕组；13—相间隔板；  
14—绝缘纸筒；15—油隙撑条；16—铁心柱；17—下夹件腹板；18—铁轭螺杆；  
19—下夹件下肢板；20—低压绕组；21—下夹件上肢板；22—下夹件加强筋



- ◆ 2--三相  
VV结线  
牵引变  
压器
- ◆ (图中正  
在进行  
变压器  
相关试  
验)

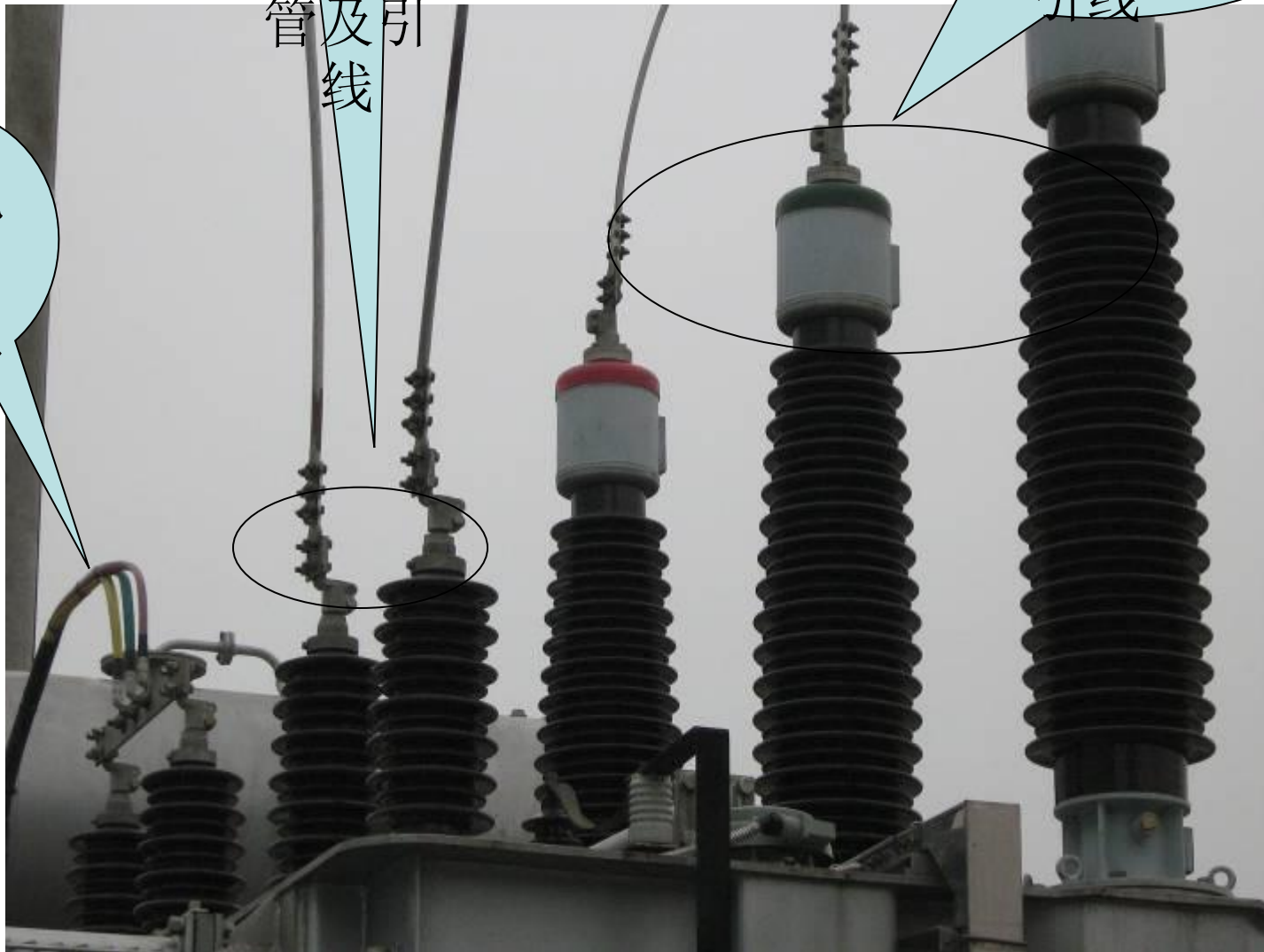


低压侧  
a,b相套管及  
引线

高压侧A, B,  
C三相套管及  
引线

接地  
相回流电  
缆

110kV  
三相  
VV结  
线变压  
器





# 第四章 牵引变压器

**结束**