

第二章 电力系统稳态模型

(Power System Steady State Models)

(第二讲 电力变压器和负荷模型)

问题

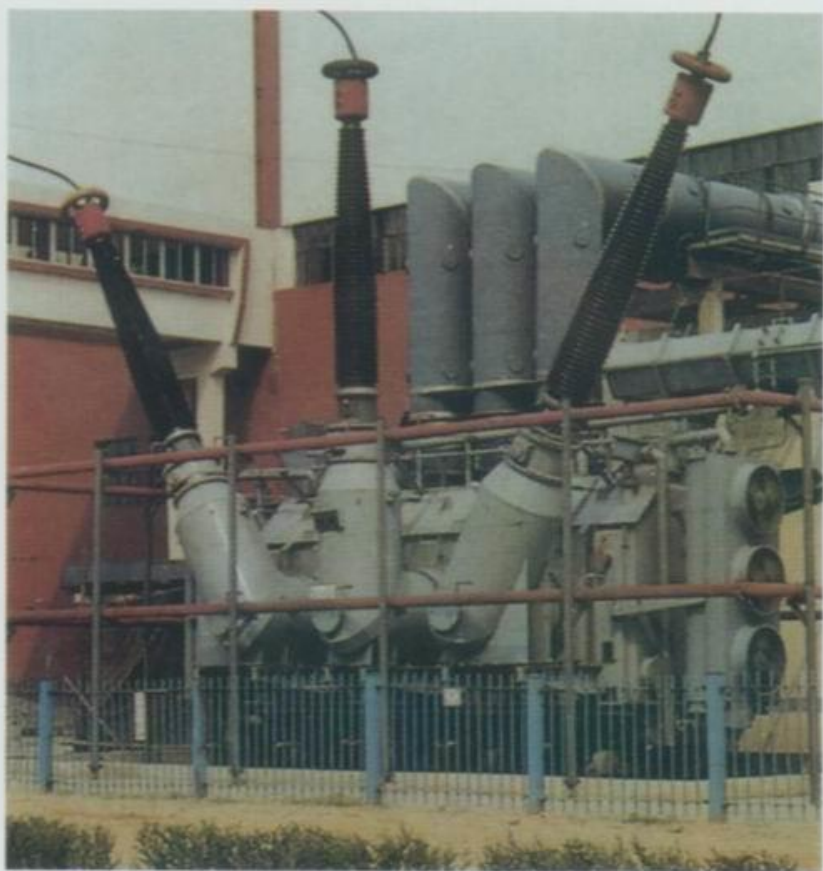
- 1、在稳态分析中，**变压器**如何建模？
- 2、变压器**等值参数**如何求取？
- 3、如何将变压器**磁联系**消去，变成纯电路？
- 4、在稳态分析中，**负荷**如何建模？

§1 变压器及其等值电路

各种电压等级的输配电变压器

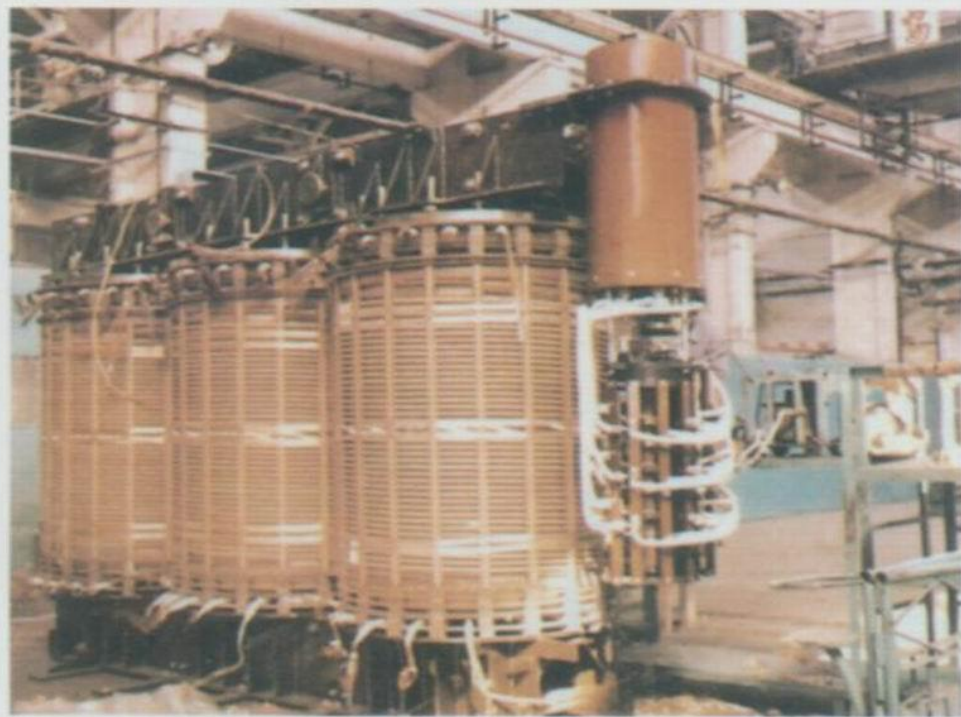


§1 变压器及其等值电路



50. 运行在铁岭电厂的 370MVA、500kV 三相发电机变压器

电力变压器

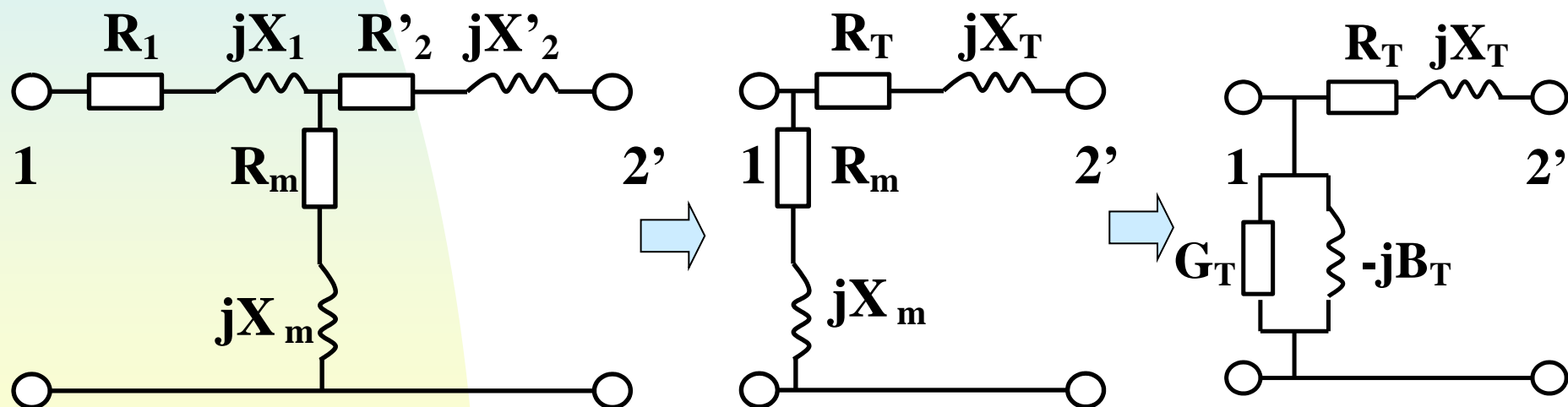


变压器绕组

§1 变压器及其等值电路

运用**折合**的概念得出等值电路 (why **2'** ? 《电机学》)

稳态不考虑变压器原副边电量的相位关系, **仅考虑数量关系**, 等值Y/Y

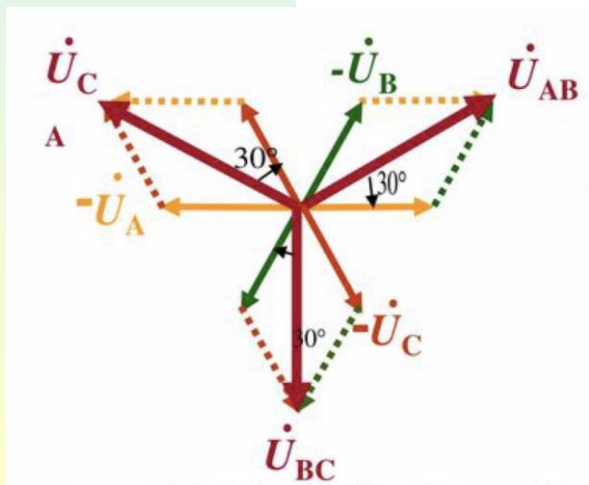


双绕组变压器等值电路

小贴士

电力系统稳态分析中的惯例

线电压、线电流、三相总功率、Y/Y接法
设备参数则是每相参数



$$U_L = \sqrt{3}U_P$$

$$I_L = I_P$$

$$S_3 = 3U_P I_P = \sqrt{3}U_L I_L$$

§2 变压器等值参数

场分析困难，工程上怎么办？

§2.1 两个试验（四个铭牌数据）

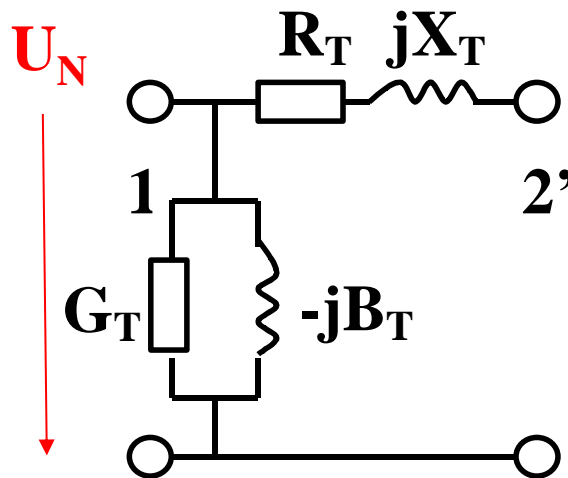
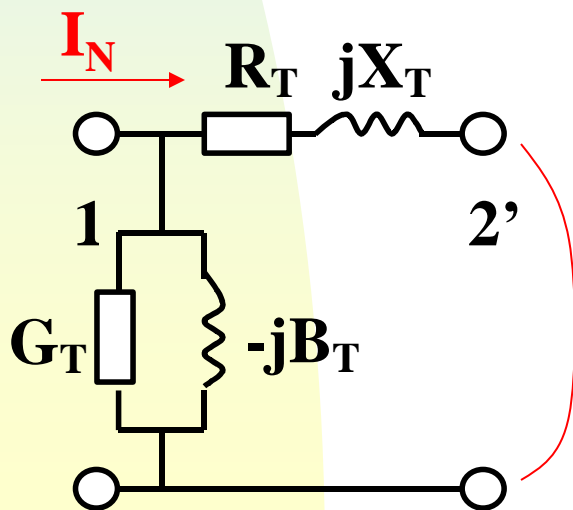
什么试验？怎么做？

短路试验： $\begin{cases} \text{短路损耗 } \Delta P_s \\ \text{短路电压(百分值)} U_s \% \end{cases}$

开路试验： $\begin{cases} \text{空载损耗 } \Delta P_0 \\ \text{空载电流(百分值)} I_0 \% \end{cases}$



实验数据与
等值参数如何——对应



§2.2 双绕组变压器的参数

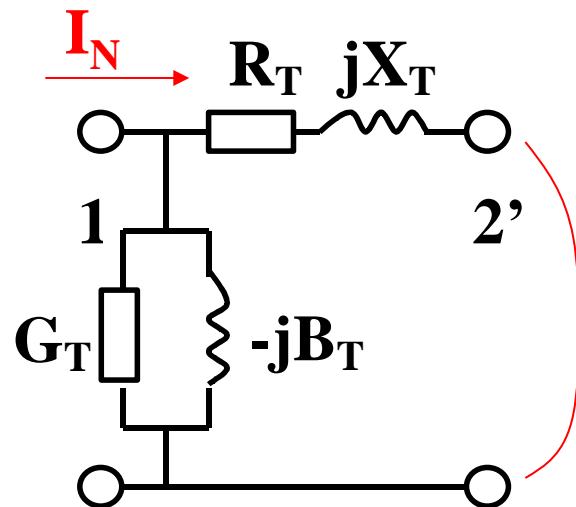
一、短路试验求串联阻抗

$$\Delta P_S = \Delta P_{cu} + \Delta P_{Fe} \quad , \quad \Delta P_{Fe} \approx 0$$

由短路损耗确定 R_T

$$\Delta P_S = 3I_N^2 R_T = 3 \left(\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \right)^2 R_T$$

$$\Rightarrow R_T = \frac{\Delta P_S U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \quad \text{欧}$$



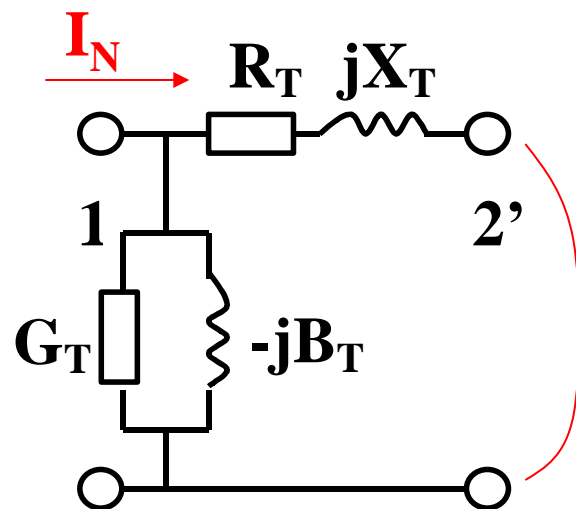
$$\begin{cases} \Delta P_S : kW \\ S_N : kVA \\ U_N : kV \end{cases}$$

短路试验求串联电抗

求 X_T ：短路试验的 $U_s\%$ 决定

$$\begin{aligned}U_s \% &= \frac{U_s}{U_N} \times 100 \\&\approx \frac{\sqrt{3}I_N X_T}{U_N} \times 100 \\&= \frac{S_N X_T}{U_N^2} \times 100\end{aligned}$$

$$\Rightarrow X_T = \frac{U_s \% U_N^2}{S_N} \times 10 \quad \text{欧}$$



二、开路试验求励磁导纳

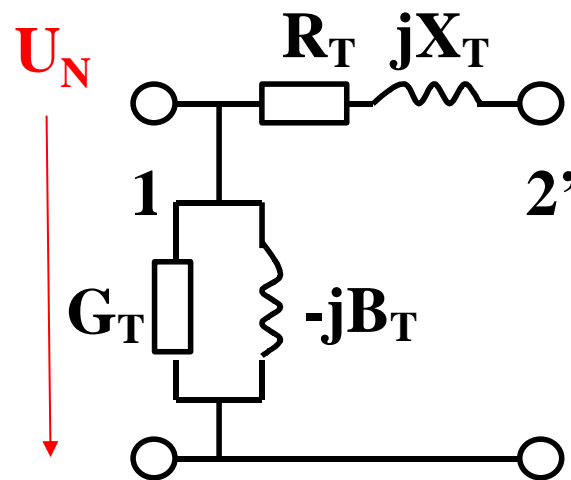
求 G_T ：由开路试验的 ΔP_0 (kW)确定：

$$\Delta P_0 = \Delta P_{cu} + \Delta P_{Fe}$$

$$\Delta P_{cu} \approx 0$$

$$\Rightarrow \Delta P_0 = 3 \left(\frac{U_N}{\sqrt{3}} \right)^2 G_T = U_N^2 G_T$$

$$\Rightarrow G_T = \frac{\Delta P_0}{U_N^2} \times 10^{-3} \quad \text{西门}$$



开路试验求励磁导纳

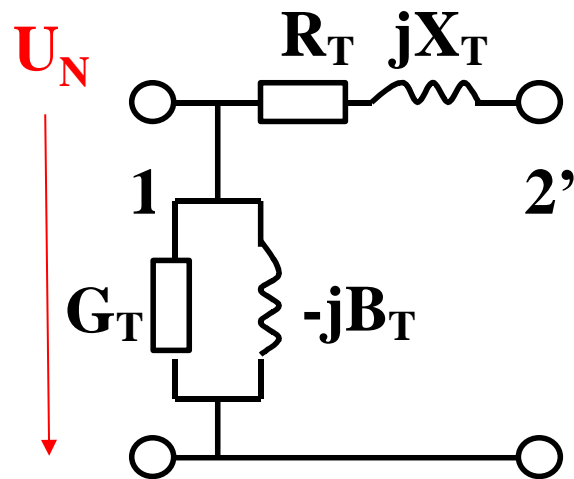
求 B_T ：由开路试验的 $I_0\%$ 决定

$$I_0\% = \frac{I_0}{I_N} \times 100$$

$$= \frac{U_N B_T}{\sqrt{3} I_N} \times 100$$

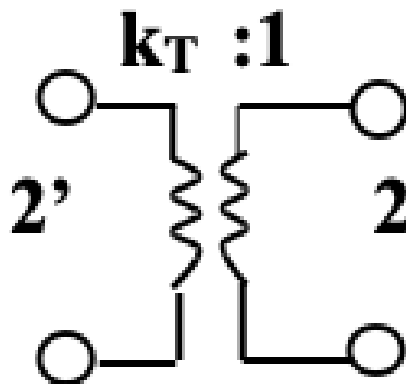
$$= \frac{U_N^2}{S_N} B_T \times 100$$

$$\Rightarrow B_T = \frac{I_0\% S_N}{U_N^2} \times 10^{-5} \quad \text{西门}$$



三、别忘了重要参数：变比 k_T

$$k_T = U_{N1}/U_{N2}$$



两侧绕组空载线电压比值

求得2'电量后，还要利用 k_T ，折合到2侧，得到实际电压等级下的电量数值。

多电压等级：**麻烦!**

四、公式注意点

各量单位: **kV**、**kW**、**kVA**

U_N 选哪侧:则参数、等值电路折合到该侧(?)

变压器不论接法, 求出参数都是等值成**Y/Y**接法中的**单相**参数

线路等值电路中 $Y/2 = j \frac{B_L}{2}$ 为正(**容性**);

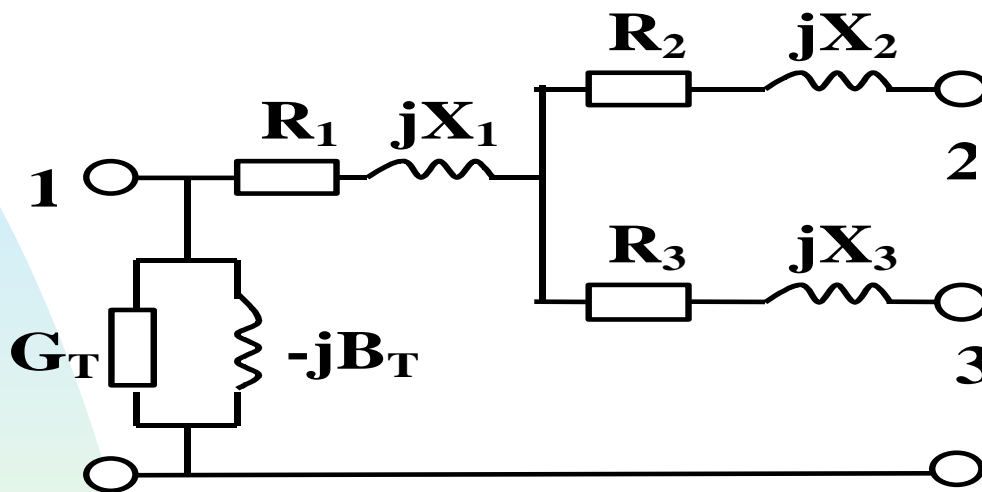
变压器等值电路中, $Y_T = G_T - jB_T$ 虚部为负(**感性**)。

可用三相**励磁功率**代表励磁支路, 其中 ΔP_0 (kW) 由铭牌给出, $\Delta Q_0 = \frac{I_0\%}{100} S_N$ (kvar) (**自学**)

励磁支路放在功率输入侧(电源侧、一次侧)

§2.3 三绕组变压器的参数

一、等值电路和两类试验

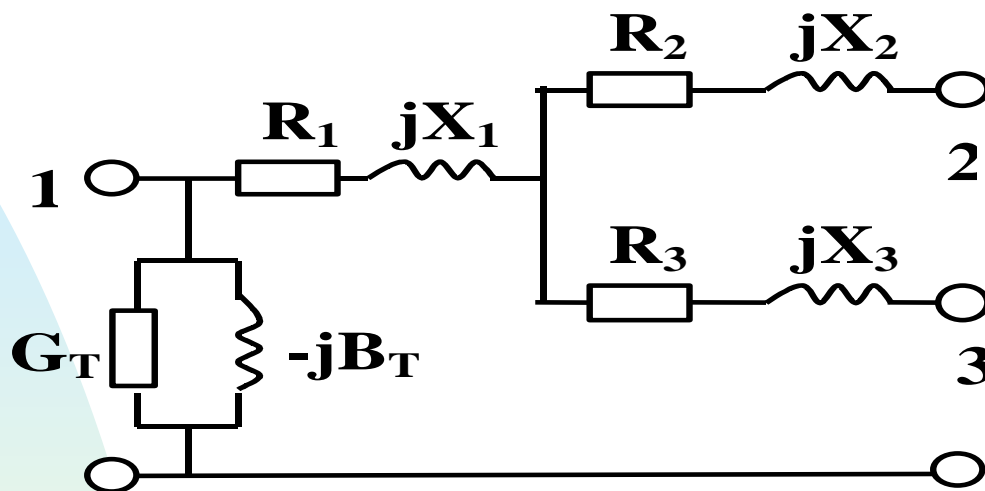


如何做短路和开路试验？

做几个试验？

如何求参数？

等值电路和两类试验



开路试验：1侧加 U_N ，另两侧开路，得： ΔP_0 (kW)， $I_0\%$

G_T 、 B_T 的求法与双绕组相同

短路试验：一侧加 I_N ，一侧短路、一侧开路：

$$\begin{cases} \Delta P_{S(1-2)}、\Delta P_{S(2-3)}、\Delta P_{S(3-1)} \\ U_{S(1-2)}\%、U_{S(2-3)}\%、U_{S(3-1)}\% \end{cases}$$

求参数？

二、求电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 (绕组容量100/100/100)

思路：如何求各绕组对应短路损耗？

$$\Delta P_{S1}、\Delta P_{S2}、\Delta P_{S3}$$

$$\begin{cases} \Delta P_{S(1-2)} = \Delta P_{S1} + \Delta P_{S2} \\ \Delta P_{S(2-3)} = \Delta P_{S2} + \Delta P_{S3} \\ \Delta P_{S(3-1)} = \Delta P_{S3} + \Delta P_{S1} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta P_{S1} = \frac{1}{2} [\Delta P_{S(1-2)} + \Delta P_{S(3-1)} - \Delta P_{S(2-3)}] \\ \Delta P_{S2} = \frac{1}{2} [\Delta P_{S(2-3)} + \Delta P_{S(1-2)} - \Delta P_{S(3-1)}] \\ \Delta P_{S3} = \frac{1}{2} [\Delta P_{S(3-1)} + \Delta P_{S(2-3)} - \Delta P_{S(1-2)}] \end{cases}$$

求电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 (绕组容量100/100/100)

双绕组: $R_T = \frac{\Delta P_S U_N^2}{S_N^2} \times 10^3$

$\Rightarrow \begin{cases} R_1 = \frac{\Delta P_{S1} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \\ R_2 = \frac{\Delta P_{S2} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \\ R_3 = \frac{\Delta P_{S3} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \end{cases}$ 欧

二、求电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 (绕组容量100/100/100)

变压器容量 S_N 与绕组容量($S_{N1}/S_{N2}/S_{N3}$)不一定相等! (有什么问题?)

若变压器容量为100 (%), 绕组额定容量比有100/100/100、100/100/50、100/50/100等。

三、求电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 （绕组容量 $S_{N1}/S_{N2}/S_{N3}$ ）

上式中 $\Delta P_{S1}, \Delta P_{S2}, \Delta P_{S3}$ 是指绕组流与**变压器额定容量 S_N** 对应的**额定电流 I_N** 时所产生的有功损耗。

小容量绕组额定电流受限，**有什么问题？**

需要做**假想实验**（假想短路试验流过额定电流 I_N ）：

$$\Delta P_{S(a-b)} = \left(\frac{S_N}{\min\{S_{Na}, S_{Nb}\}} \right)^2 \Delta P'_{S(a-b)}$$

实测值

放大系数

有功损耗与**电流平方**成正比

额定电压下，额定电流与**额定容量**成正比

实例：求电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 (绕组容量100/50/100)
1 2 3

$$\Delta P_{S(1-2)} = \Delta P'_{S(1-2)} \left(\frac{I_N}{I_{N/2}} \right)^2 = 4\Delta P'_{S(1-2)} \text{ (实测量)}$$

$$\Delta P_{S(2-3)} = \Delta P'_{S(2-3)} \left(\frac{I_N}{I_{N/2}} \right)^2 = 4\Delta P'_{S(2-3)} \text{ (实测量)}$$

$$\Delta P_{S(3-1)} \text{ (实测量)}$$

四、求电抗 X_1 、 X_2 、 X_3

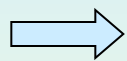
$U_{S1}\%$ 、 $U_{S2}\%$ 、 $U_{S3}\%$ 为各绕组对应的短路电压

$$\begin{cases} U_{S(1-2)}\% = U_{S1}\% + U_{S2}\% \\ U_{S(2-3)}\% = U_{S2}\% + U_{S3}\% \\ U_{S(3-1)}\% = U_{S3}\% + U_{S1}\% \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{S1}\% = \frac{1}{2}[U_{S(1-2)}\% + U_{S(3-1)}\% - U_{S(2-3)}\%] \\ U_{S2}\% = \frac{1}{2}[U_{S(2-3)}\% + U_{S(1-2)}\% - U_{S(3-1)}\%] \\ U_{S3}\% = \frac{1}{2}[U_{S(3-1)}\% + U_{S(2-3)}\% - U_{S(1-2)}\%] \end{cases}$$

求电抗X1、X2、X3

双绕组： $X_T = \frac{U_s \% U_N^2}{S_N} \times 10$



$$\begin{cases} X_1 = \frac{U_{s1} \% U_N^2}{S_N} \times 10 \text{欧} \\ X_2 = \frac{U_{s2} \% U_N^2}{S_N} \times 10 \text{欧} \\ X_3 = \frac{U_{s3} \% U_N^2}{S_N} \times 10 \text{欧} \end{cases}$$

国家标准规定：普通三绕组变压器给出的短路电压是对应于变压器额定容量，所以一般不归算短路电压**。**

如果要归算，放大系数？

五、自耦变压器（特殊）电抗 X_1 、 X_2 、 X_3

一般第3绕组容量小于变压器容量。有时短路电压**未经归算**，则需要归算电压。

$$U_{S(a-b)}\% = \left(\frac{S_N}{\min\{S_{Na}, S_{Nb}\}} \right) U'_{S(a-b)}\%$$

实测值

放大系数

压降与电流成正比

额定电压下，额定电流与额定容量成正比

六、公式注意点

R_1 、 R_2 、 R_3 是折合后的各绕组的等值电阻。

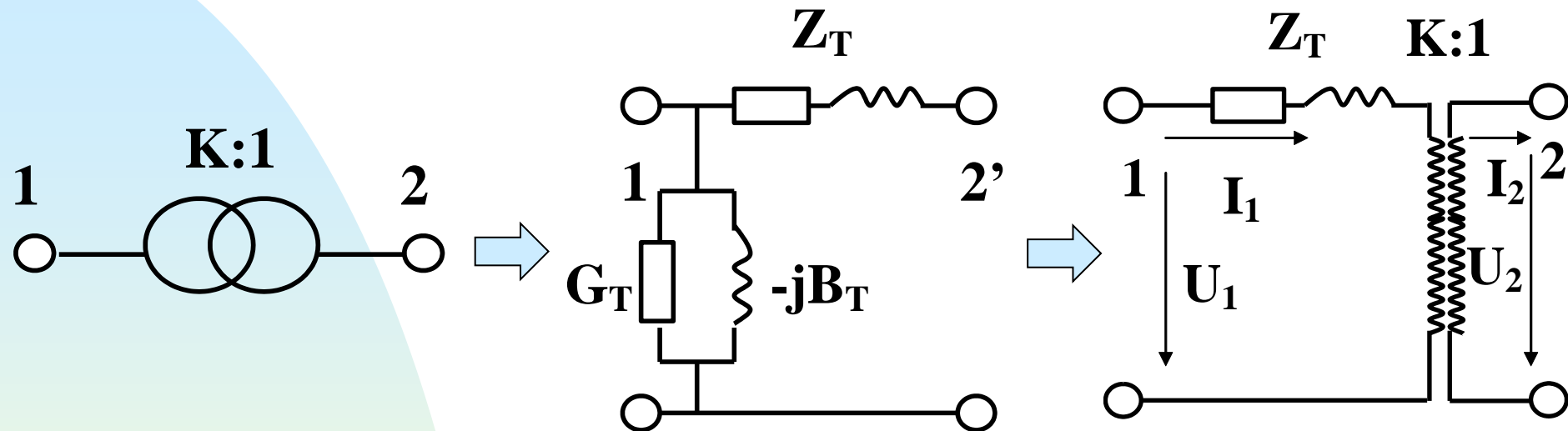
X_1 、 X_2 、 X_3 是折合后的各绕组的等值电抗，不是漏抗，是自感、互感作用的等值。其值 <0 并不代表绕组电抗为容性。

S_N 是变压器容量，不是绕组容量

U_N 为同一个，选哪侧的 U_N ，则参数归算到该侧！

§3 变压器的 π 型等值电路

一、双绕组变压器



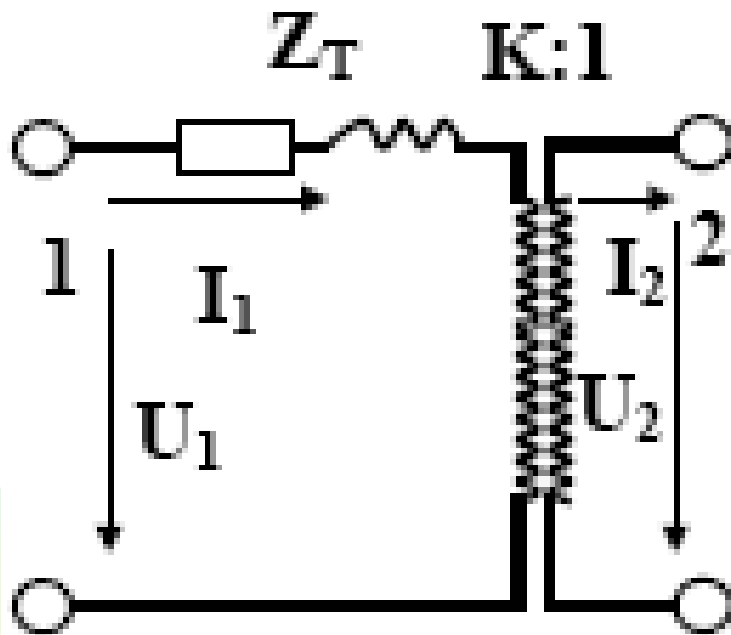
若参数是折合到1侧的，则求2侧实际电压、电流时，应按变比 $K = \frac{U_{t1}}{U_{t2}}$ 再折算回去，**理想变压器**

原副边有相位移，则变比为复数，在稳态中，只考虑实数变比（数量关系）

有磁耦合？

如何去掉磁耦合，变成纯电路？
有什么思路？

二、双绕组变压器 π 型纯电路 (推导) (与线路 π 型等值电路推导类似)



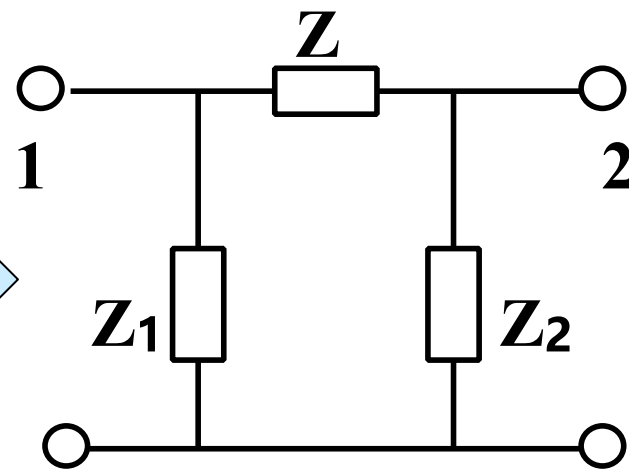
二端口网络方程
$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & Z_T / K \\ 0 & 1/K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

双绕组变压器 π 型纯电路

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & Z_T / K \\ 0 & 1/K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{1-K}{Z_T} \dot{U}_1 + \frac{K}{Z_T} (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \\ \dot{I}_2 = \frac{K}{Z_T} (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) - \frac{K(K-1)}{Z_T} \dot{U}_2 \end{cases}$$

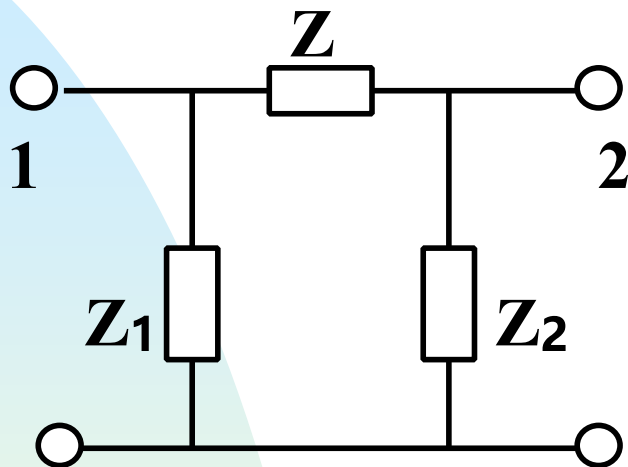
猜（构造）一个等价的电路？



$$Z = Z_T / K, Z_1 = Z_T / (1 - K), Z_2 = Z_T / (K(K - 1))$$

若参数 Z_T 是归算到2侧（ Z'_T ）？

等值电路特点



$$Z = Z_T / K$$

$$Z_1 = Z_T / (1 - K)$$

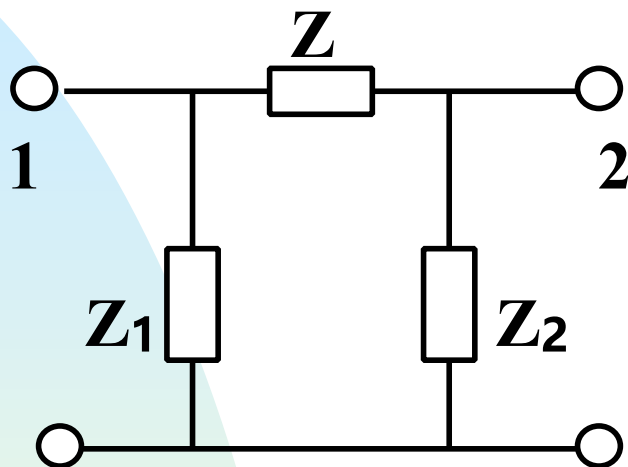
$$Z_2 = Z_T / (K(K - 1))$$

去掉了磁耦合，适合计算机计算：由此求出2侧电量即是2侧电压等级下的数值，无须再归算。

三阻抗(导纳)是**数学等值**，无物理含义。

三阻抗(导纳)均与**变比K**有关 (**$K=1$ 时？ K 变化时？**)

等值电路特点 – 续



$$Z = Z_T / K$$

$$Z_1 = Z_T / (1 - K)$$

$$Z_2 = Z_T / (K(K - 1))$$

两并联阻抗**符号相反**，负号出现在电压等级**高侧**

一端空载，从另一端看其等值阻抗为 ∞ (等效导纳为0) (**怎么理解?**)

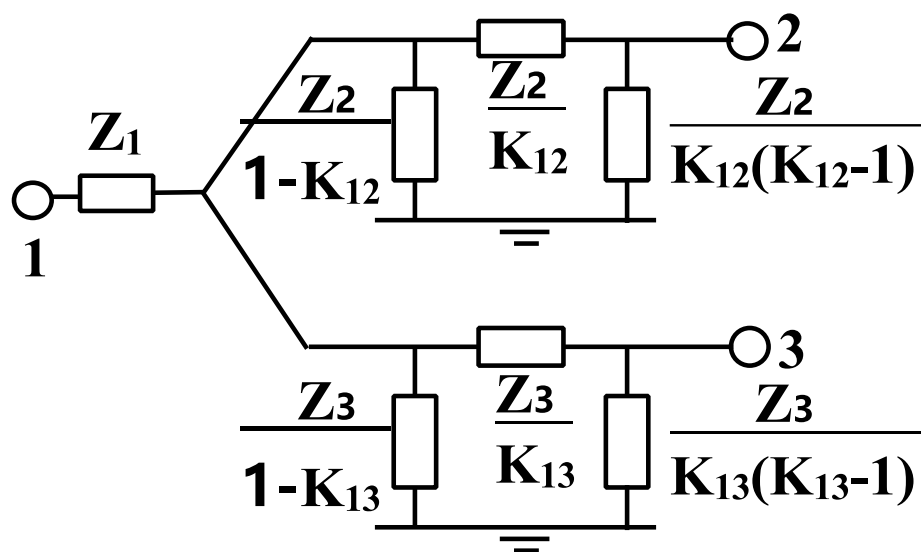
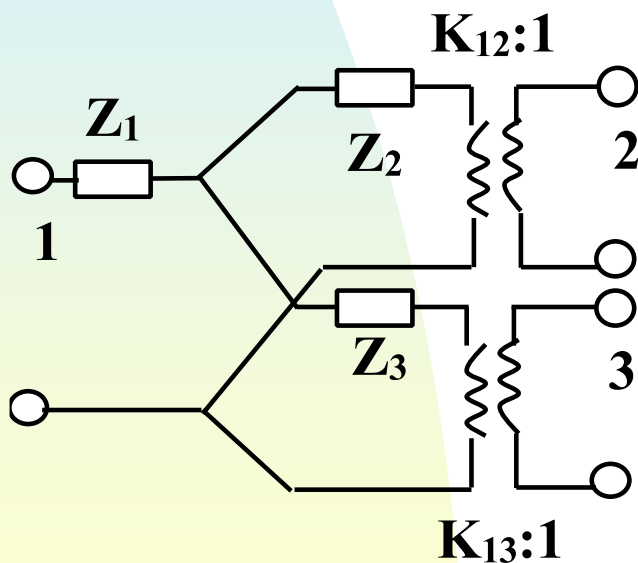
若为复变比 \dot{K} ，二端口网络方程仍适用，但无法转化为 π 型等值电路 (为什么?)

三、三绕组变压器π型等值电路

采用2组双绕组变的π型等值电路

$$K_{12} = \frac{U_{t1}}{U_{t2}}$$

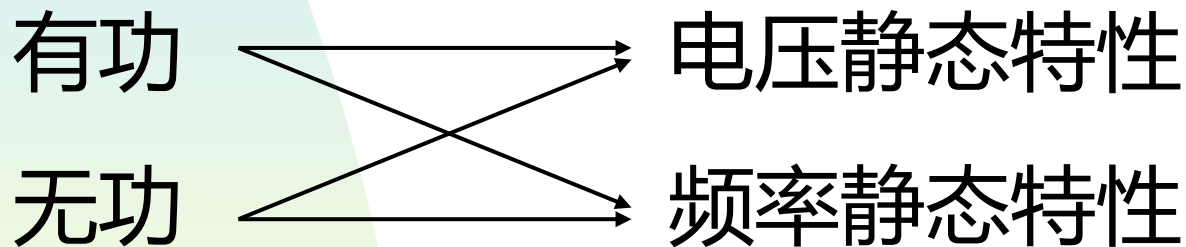
$$K_{13} = \frac{U_{t1}}{U_{t3}}$$



§4 负荷模型

一、负荷静态（稳态）特性

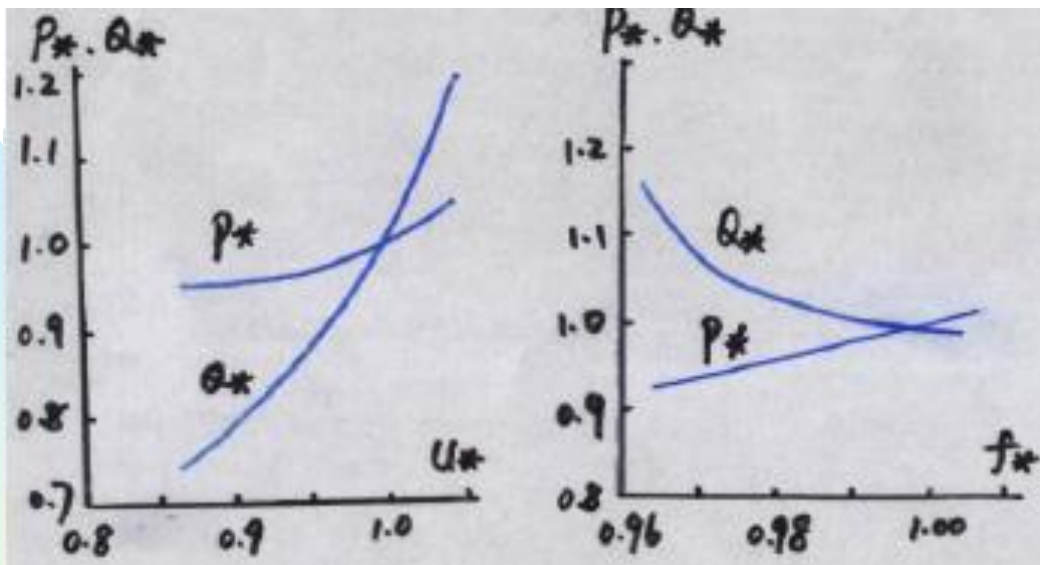
负荷 $\begin{cases} \text{有功} \\ \text{无功} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{电压} \\ \text{频率} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{动态} \\ \text{静态} \end{cases}$



用电设备组成是时变的，一般通过实测

§4 负荷模型

一、负荷静态（稳态）特性



电压静态特性

有功负荷电压调节效应系数

$$K_{PV} = \frac{dP}{dU}$$

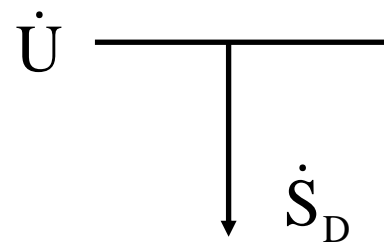
无功负荷电压调节效应系数

$$K_{QV} = \frac{dQ}{dU}$$

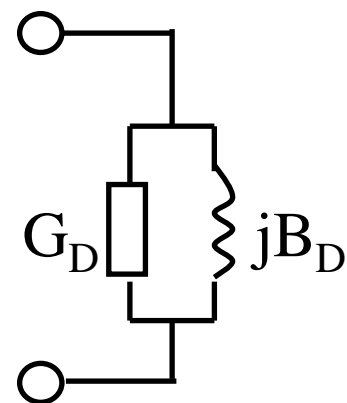
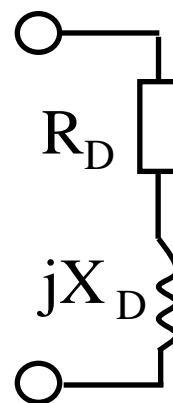
频率静态特性，有功负荷频率调节效应系数 $K_{Pf} = \frac{dP}{df}$

二、负荷模型

恒定功率 $\dot{S}_D = P_D + jQ_D$ 额定电压频率



恒定阻抗 $Z_D = R_D + jX_D = \frac{U_N^2}{P_{DN} - jQ_{DN}}$



负荷模型

函数关系表示 (频率关系类似)

线性表示
(二部分)

$$\begin{cases} P_D = P_{DN} + (U - U_N)K_{PV} \\ Q_D = Q_{DN} + (U - U_N)K_{QV} \end{cases}$$

二次表示
(三部分)

$$\begin{cases} P_D = P_{DN} [a_P (U / U_N)^2 + b_P (U / U_N) + c_P] \\ Q_D = Q_{DN} [a_Q (U / U_N)^2 + b_Q (U / U_N) + c_Q] \end{cases}$$

Z(Y)

I

P

$$\begin{cases} a_P + b_P + c_P = 1 \\ a_Q + b_Q + c_Q = 1 \end{cases} \quad (?)$$

作业

见网络学堂

特高压变压器运输过程

https://www.bilibili.com/video/BV1cx411H7kL/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click&vd_source=a964b05230c39fca7023aac827a263fe

第二章 电力系统稳态模型

(Power System Steady State Models)

(第三讲 电力系统等值电路与标么制)

问题

- 1、从**元件**到**系统**：电力系统的等值电路？
- 2、为何要引入**标么(么)制**？
- 3、如何正确使用标么制？（应遵循的**规律**）
- 4、**多电压等级**时，标么值如何计算？
- 5、如何形成**标么等值电路**？

§1 电力系统等值电路（稳态范畴）

元件模型（等值Y接，单相等值）

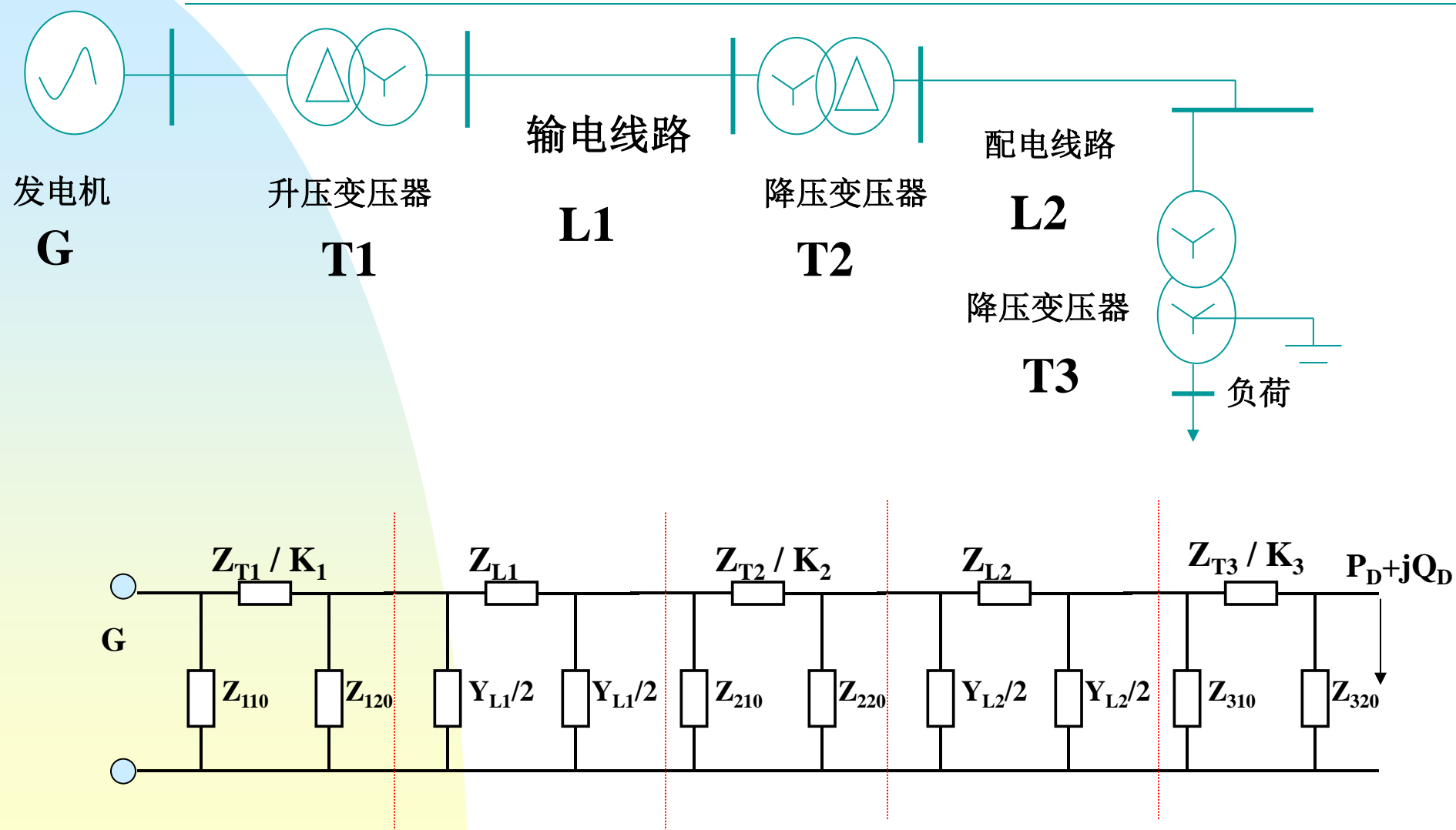
发电机：恒定电源

线路、变压器： π 型等值电路

负荷：恒功率、恒电流、恒阻抗或三者组合

系统模型：根据**单线图**（表达了元件之间的关联关系），将元件等值电路连接在一起，得到**电力系统等值电路**

简单电力系统等值电路（实例）



电力系统实际计算存在的问题

三相：麻烦！

可比性差：压级不同、容量不同，设备参数差异大，如：电压

我们该怎么办？

数学变换！（归一化）

§2 电力系统标幺制

一、定义

有名值：有具体物理单位的量值

标幺值：无具体物理单位的相对值

有名值(单位)/选定**基值**(同单位)

标幺值特点：

无量纲

不唯一：随基值变化而变化,须指明基值

常见电量： $U_* = \frac{U}{U_B}, \quad I_* = \frac{I}{I_B}$

二、标么基值(基准值)选取规律 (单相电路)

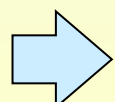
理论上可以任选，但为简化计算，须遵循规律。

单相电路：

四个模量： U_P 、 I_P 、 S_P 、 Z

相应四个基值： U_{PB} 、 I_{PB} 、 S_{PB} 、 Z_B

$$\therefore \begin{cases} U_P = I_P Z \\ S_P = I_P U_P \end{cases} \quad \text{应选：} \begin{cases} U_{PB} = I_{PB} Z_B \\ S_{PB} = I_{PB} U_{PB} \end{cases} \quad (\text{约束条件})$$


$$\begin{cases} U_{P*} = I_{P*} Z_* \\ S_{P*} = I_{P*} U_{P*} \end{cases} \quad (\text{与有名值一致})$$

结论：基值选取规律

基值满足约束条件：标么值公式与有名值相同

4个基值中自由度为2：有2个约束条件

一般先选： S_{PB} 、 U_{PB} ，则：

$$I_{PB} = \frac{S_{PB}}{U_{PB}} \quad Z_{PB} = \frac{U_{PB}^2}{S_{PB}}$$

复阻抗 $\dot{Z} = Z \angle \varphi = R + jX$

令 $R_B = X_B = Z_B$ ，则：

$$\dot{Z}_* \stackrel{\Delta}{=} \frac{Z \angle \varphi}{Z_B} = Z_* \angle \varphi = R_* + jX_* \quad (\text{与有名值一致})$$

结论：基值选取规律

复功率 $\dot{S}_P = P_P + jQ_P$,

令 $P_{PB} = Q_{PB} = S_{PB}$ 则:

$$\dot{S}_{P^*} \overset{\Delta}{=} \frac{\dot{S}_P}{S_{PB}} = P_{p^*} + jQ_{p^*} \quad (\text{与有名值一致})$$

(在标么值下，复功率的计算公式没有变化)

三、对称三相基值选取规律 (Y接法)

四个模量: U_L, I_L, S_3, Z

相应四个基值: $U_{LB}, I_{LB}, S_{3B}, Z_B$

如选:
$$\begin{cases} U_L = \sqrt{3} I_L Z = \sqrt{3} U_P \\ S_3 = \sqrt{3} U_L I_L = 3 U_P I_P = 3 S_P \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{LB} = \sqrt{3} I_{LB} Z_B = \sqrt{3} U_{PB} \\ S_{3B} = \sqrt{3} U_{LB} I_{LB} = 3 U_{PB} I_{PB} = 3 S_{PB} \end{cases}$$
 (约束条件)

$$\begin{cases} U_{L*} = I_{L*} Z_* = U_{P*} \\ S_{3*} = U_{L*} I_{L*} = U_{P*} I_{P*} = S_{P*} \end{cases}$$
 (与单相一致)

结论：基值选取规律

基值满足约束条件：三相公式与单相一致

线电压标么值= 相电压标么值(无 $\sqrt{3}$)

三相功率标么值= 单相功率标么值(无3)

4个基值中自由度为2：有2个约束条件

一般先选 S_{3B} , U_{LB}

$$I_{LB} = \frac{S_{3B}}{\sqrt{3}U_{LB}}, Z_B = \frac{U_{LB}}{\sqrt{3}I_{LB}} = \frac{U_{LB}^2}{S_{3B}}$$

结论：基值选取规律

对称三相电路中，每相阻抗仍为 $Z_* = R_* + jX_*$

三相复功率 $\dot{S}_3 = P_3 + jQ_3$ ，如令： $S_{3B} = P_{3B} = Q_{3B}$

$$\Rightarrow \dot{S}_{3*} \triangleq \frac{\dot{S}_3}{S_{3B}} = P_{3*} + jQ_{3*}$$

$$\dot{S}_{3*} = \dot{S}_{P*} = \dot{U}_{P*} \hat{I}_{P*}$$

用相电压、相电流标么值算得的功率标么值，既代表单相，也代表三相。

多元件组成的电路：**基值要统一**

四、变压器铭牌数据与标么值的关系 (以变压器额定值 S_N 、 U_N 为基准)

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{S^*} = \Delta P_S / S_N \\ R_{T^*} = \frac{\Delta P_S U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 / \left(\frac{U_N^2}{S_N} \times 10^3 \right) = \frac{\Delta P_S}{S_N} = \Delta P_{S^*} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{S^*} = U_S / U_N = \frac{U_S \%}{100} \\ X_{T^*} = \frac{U_S \% U_N^2}{100 S_N} \times 10^3 / \left(\frac{U_N^2}{S_N} \times 10^3 \right) = \frac{U_S \%}{100} = U_{S^*} \end{array} \right.$$

变压器铭牌参数与标么值的关系

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{0*} = \Delta P_0 / S_N \\ G_{T*} = \frac{\Delta P_0}{U_N^2} \times 10^{-3} \bigg/ \left(\frac{S_N}{U_N^2} \times 10^{-3} \right) = \frac{\Delta P_0}{S_N} = \Delta P_{0*} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{0*} = I_0 / I_N = \frac{I_0 \%}{100} \\ B_{T*} = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_N^2} \times 10^{-3} \bigg/ \left(\frac{S_N}{U_N^2} \times 10^{-3} \right) = \frac{I_0 \%}{100} = I_{0*} \end{array} \right.$$

五、基值变化对标么值的影响

同一电路中，基值应统一

设备已知标么值：以**各自额定值**为基值，不统一！

基值变化时，标么值换算原则：**有名值不变原则**

例：已知原基值为 S_{BI} ， U_{BI} ，相应阻抗标么值 Z_{*I} ，
新基值为 S_{BII} ， U_{BII} ，求：新阻抗标么值 Z_{*II}

$$Z_{*II} \frac{U_{BII}^2}{S_{BII}} = Z_{*I} \frac{U_{BI}^2}{S_{BI}}$$

几种常见的换算（自学）

原标么值以额定值为基值，那 $S_{BI}=S_N$ 、 $U_{BI}=U_N$ ，相应阻抗标么值为 Z_{*N} ，则对于新基值 S_B 、 U_B 的标么值：

$$Z_{*B} = Z_{*N} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \cdot \frac{S_B}{U_B^2}$$

若新基值 $U_B=U_N$ ，则：

$$Z_{*B} = Z_{*N} \cdot \frac{S_B}{S_N}$$

对于电抗器，常给出额定电流 I_N 、额定电压 U_N (线电压)下的标么值 Z_{*N} ，则新基值 U_B 、 S_B 下的标么值：

$$Z_{*B} = Z_{*N} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \frac{S_B}{U_B^2} = Z_{*N} \cdot \frac{U_N}{U_B} \frac{I_B}{I_N}$$

六、多电压等级电力系统的标么制

1、背景

两个问题：

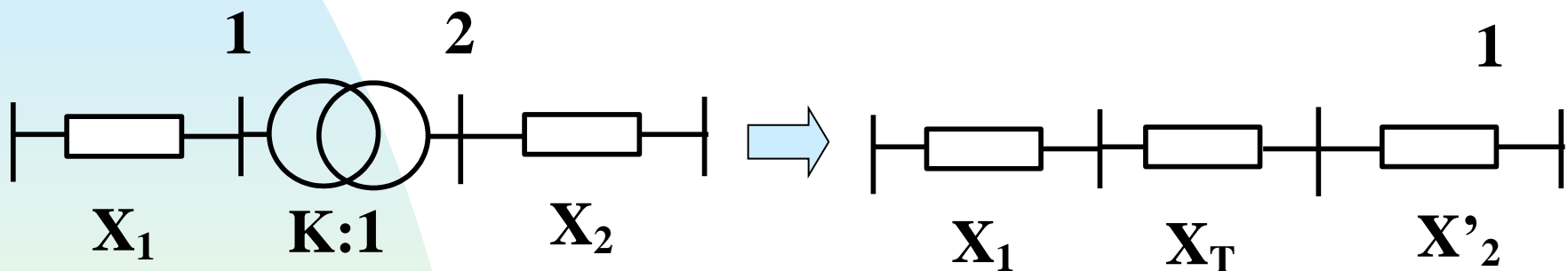
各元件以其额定值为基值，与系统**不一致**？

由于**变压器存在**，两侧元件电压基值如何选取？

有3种做法（2种精确、1种近似）

1、逐级归算法（精确）

1) 按变比将阻抗折合至同一电压等级

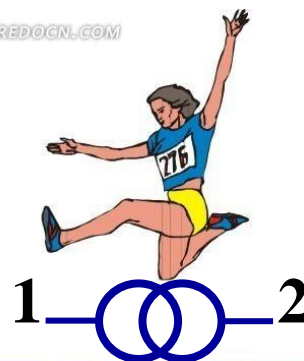


$$K = \frac{U_{t1}}{U_{t2}}$$

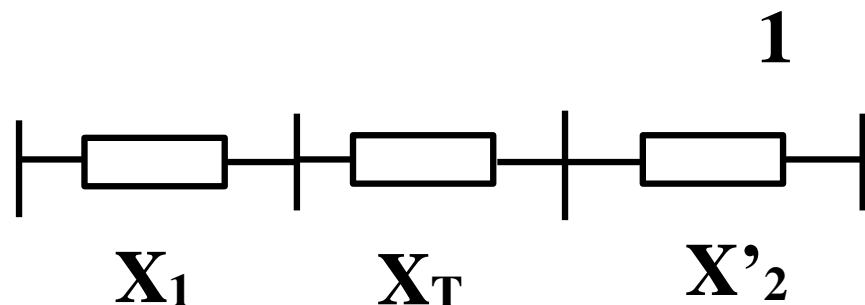
$$X'_2 = K^2 X_2$$

X_T : 折合至1侧的变压器电抗

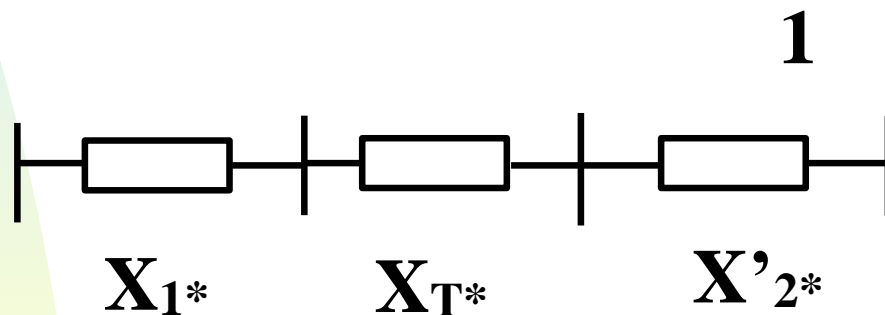
红动中国WWW.REDOCN.COM



逐级归算法（精确）



2) 选择统一的 S_B 、 U_B ，计算 X_{1*} 、 X_{T*} 、 X'_{2*}

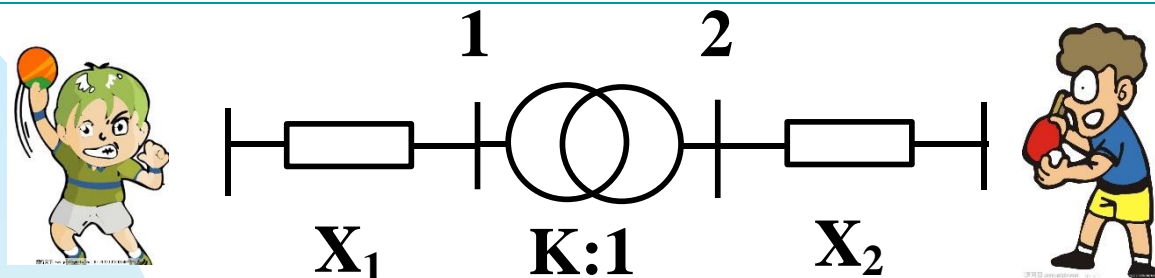


3) 分析标么电路

4) 返算有名值，2侧的计算结果折合回去

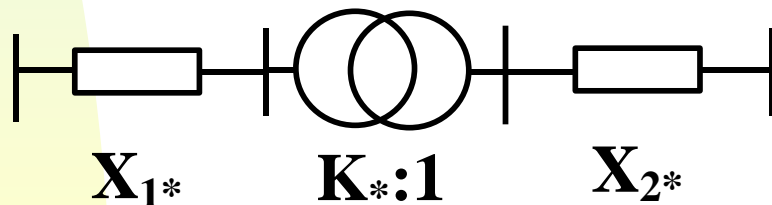
电压等级多：**很麻烦**！一般不这么做。

2、各选电压法（精确，常用）



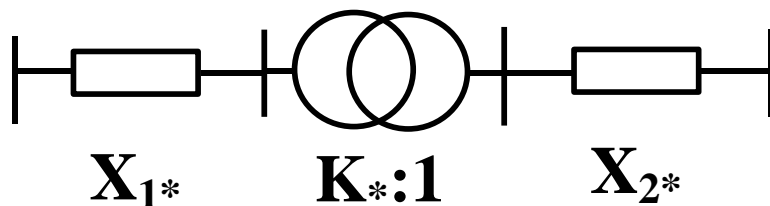
步1：将 X_T 归算到1侧： X_1 、 X_2 各为1、2侧总电抗

步2：容量基值统一为 S_B ，两侧各选电压基值 U_{B1} 、 U_{B2} ，
两侧分别归算标么值（思考：为什么两边基值不同了，
还能放在一起计算？）



($K^*?$)

2、各选电压法（精确，常用）



$$X_{1*} = X_1 \cdot \frac{S_B}{U_{B1}^2}, \quad X_{2*} = X_2 \cdot \frac{S_B}{U_{B2}^2}$$

$$U_{t1*} = \frac{U_{t1}}{U_{B1}}, \quad U_{t2*} = \frac{U_{t2}}{U_{B2}}$$

$$K_* = \frac{U_{t1*}}{U_{t2*}} = \frac{U_{t1} / U_{B1}}{U_{t2} / U_{B2}} = \frac{K}{K_B}$$

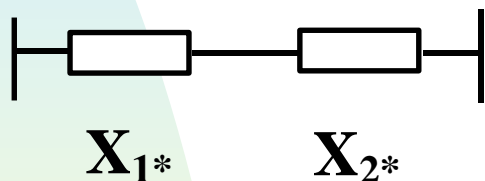
步3、如何消去磁耦合？（两种情况）

各选电压法

a) 按实际变比电压选基准值，则：

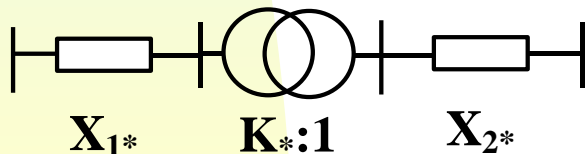
$$U_{B1} = U_{t1}, \quad U_{B2} = U_{t2}, \quad K_* = 1$$

称为**标准变比**，对应变压器称为**标准变比变压器**



变压作用在哪？

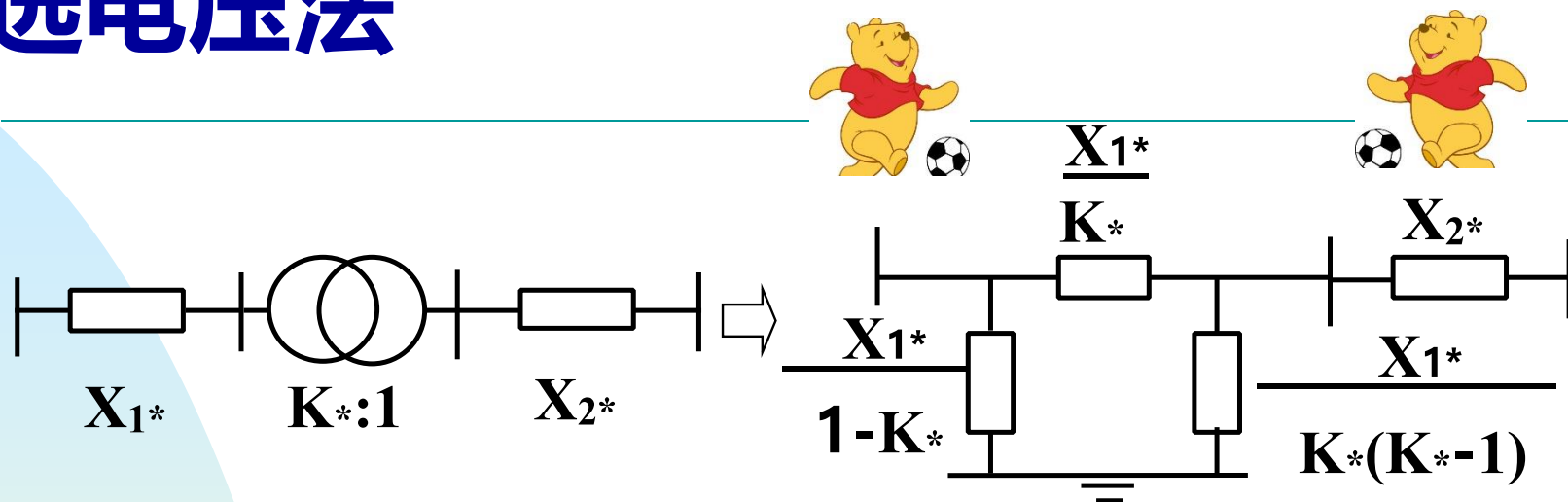
b) 若 $K_* \neq 1$ ，则 U_{t1} 和 U_{t2} 中至少有一个不等于 U_{B1} 或 U_{B2} ，称为**非标准变比**，对应变压器为**非标准变比变压器**。



$K_* \approx ?$

问题：如何将标么制下的非标准变比去掉？

各选电压法



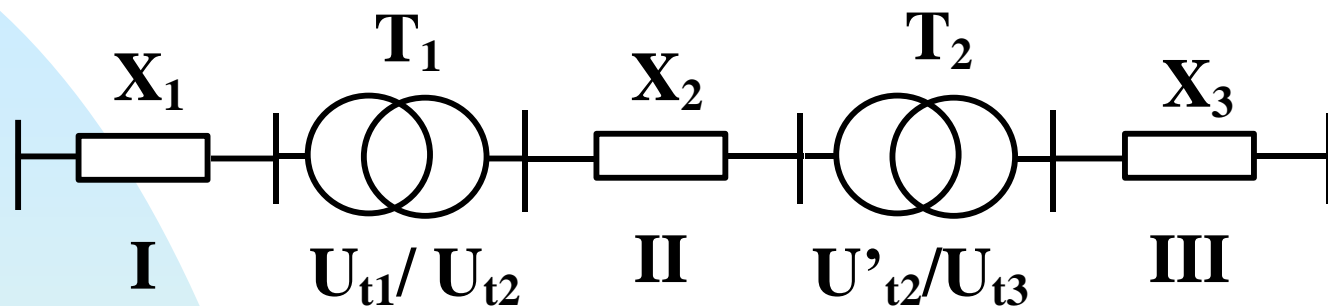
三绕组变压器时，可类似处理：

$$K_{12}^* = \frac{U_{t1} / U_{t2}}{U_{B1} / U_{B2}}$$

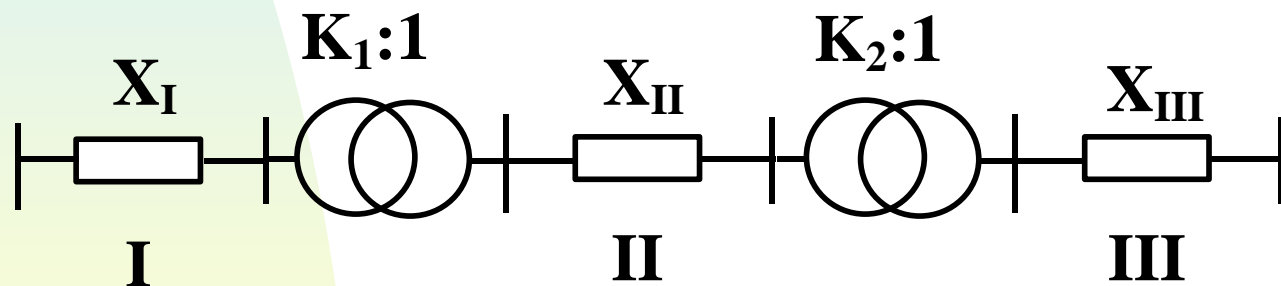
$$K_{13}^* = \frac{U_{t1} / U_{t3}}{U_{B1} / U_{B3}}$$

步4、分析标么电路，按各自基值返算有名值。

推广到多电压等级



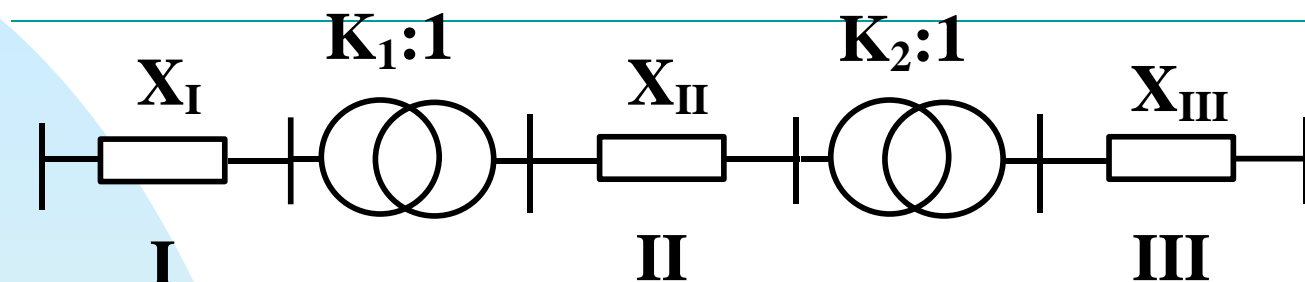
1) X_{T1} 归算到 I 侧, X_{T2} 归算到 II 侧



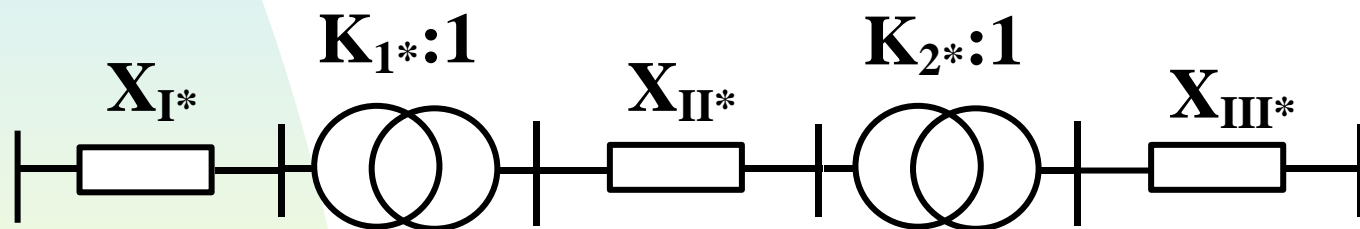
$$X_I = X_1 + X_{T1}, \quad X_{II} = X_2 + X_{T2}, \quad X_{III} = X_3$$

$$K_1 = \frac{U_{t1}}{U_{t2}}, \quad K_2 = \frac{U'_{t2}}{U_{t3}}$$

推广到多电压等级



2) 选基值 S_B 、 U_{BI} 、 U_{BII} 、 U_{BIII}

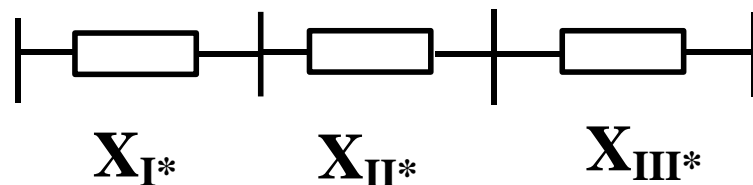


$$X_{I*} = X_I \cdot \frac{S_B}{U_{BI}^2}, \quad X_{II*} = X_{II} \cdot \frac{S_B}{U_{BII}^2}, \quad X_{III*} = X_{III} \cdot \frac{S_B}{U_{BIII}^2}$$

$$K_{1*} = \frac{K_1}{K_{B1}} = \frac{U_{t1} / U_{t2}}{U_{BI} / U_{BII}}, \quad K_{2*} = \frac{K_2}{K_{B2}} = \frac{U'_{t2} / U_{t3}}{U_{BII} / U_{BIII}}$$

推广到多电压等级

若使 $K_{1*} = K_{2*} = 1$ 则电路变为：



须满足： $\frac{U_{t1}}{U_{t2}} = \frac{U_{BI}}{U_{BII}}, \frac{U'_{t2}}{U_{t3}} = \frac{U_{BII}}{U_{BIII}}$ (约束条件)

选 $U_{BI} = U_{t1}$ 则 $U_{BII} = U_{t2}$

$$U_{BIII} = \frac{U_{t2}}{U'_{t2}} U_{t3} \neq U_{t3}$$

推广到多电压等级

说明：

三个基准电压不独立：符合上述约束条件才能去掉变压器；

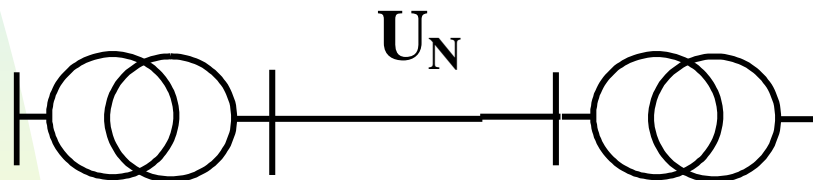
实际电压等级复杂，一般做不到完全去掉变比，那么就保留非标准变比，然后用 π 型等值电路进一步处理

返算各级电压下的**有名值**时，分别按**各级基值**返算。

实际电力系统基值选取（约定俗成）

功率基值： $S_B=100\text{MVA}$ （大多数习惯）

电压基值 U_B ：平均标称电压 U_{av} ，某级电网两侧变压器额定电压平均值：？ U_N



已知 U_N ， $U_{av}=?$

实际电力系统基值选取

电网额定电压(kV)	平均标称电压(kV)
500	$(550+500)/2 = 525$
220	$(242+220)/2 \approx 230$
110	$(121+110)/2 \approx 115$
10	$(11+10)/2 = 10.5$

每个电压等级使用 U_{av} 做基值，中间连接非标准变比变压器，使用 π 型等值电路处理。

返算有名值时，按各级相应的 U_{av} 返算。

3、近似算法（自学）

近似认为该级网络所有元件 $U_N = U_{av}$ ，而不管其实际额定电压。

此时均为**标准变比**：简化

常用元件的标么值(近似计算时)：

发电机、变压器：
$$X_{*a} = X_{*N} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \bigg/ \frac{U_{av}^2}{S_B} = X_{*N} \cdot S_B / S_N$$

线路：
$$X_{*a} = X \cdot S_B / U_{av}^2$$

电抗器：
$$X_{*a} = \frac{X_r \%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{\sqrt{3} I_N U_N} \bigg/ \frac{U_{av}^2}{\sqrt{3} I_B U_{av}} = \frac{X_r \%}{100} \cdot \frac{I_B}{I_N}$$

七、标么制的优缺点

优点：

便于比较、分析元件特性与参数；

各级电压标么值都接近于1.0；

对称三相电路的计算与单相计算一致；

标么制下，一些公式能够简化；（暂态部分）

缺点：无量纲、物理概念不如有名值清楚。

作业

参见网络学堂