



第二章 电力系统稳态模型

§1 电力线路模型

§2 电力变压器和负荷模型

§3 电力系统等值电路与标么制



第二章 电力系统稳态模型

§1 电力线路模型

§2 电力变压器和负荷模型

§3 电力系统等值电路与标么制



问 题

- 1、电力系统稳态分析如何建模？
 - 2、物理线路的基本结构如何？
 - 3、输电线有哪些电磁现象？
 - 4、用哪些参数描述输电线电磁现象？
 - 5、各个参数受哪些因素影响？
 - 6、如何用等值电路表示输电线路？
-



§1 稳态建模总体思路

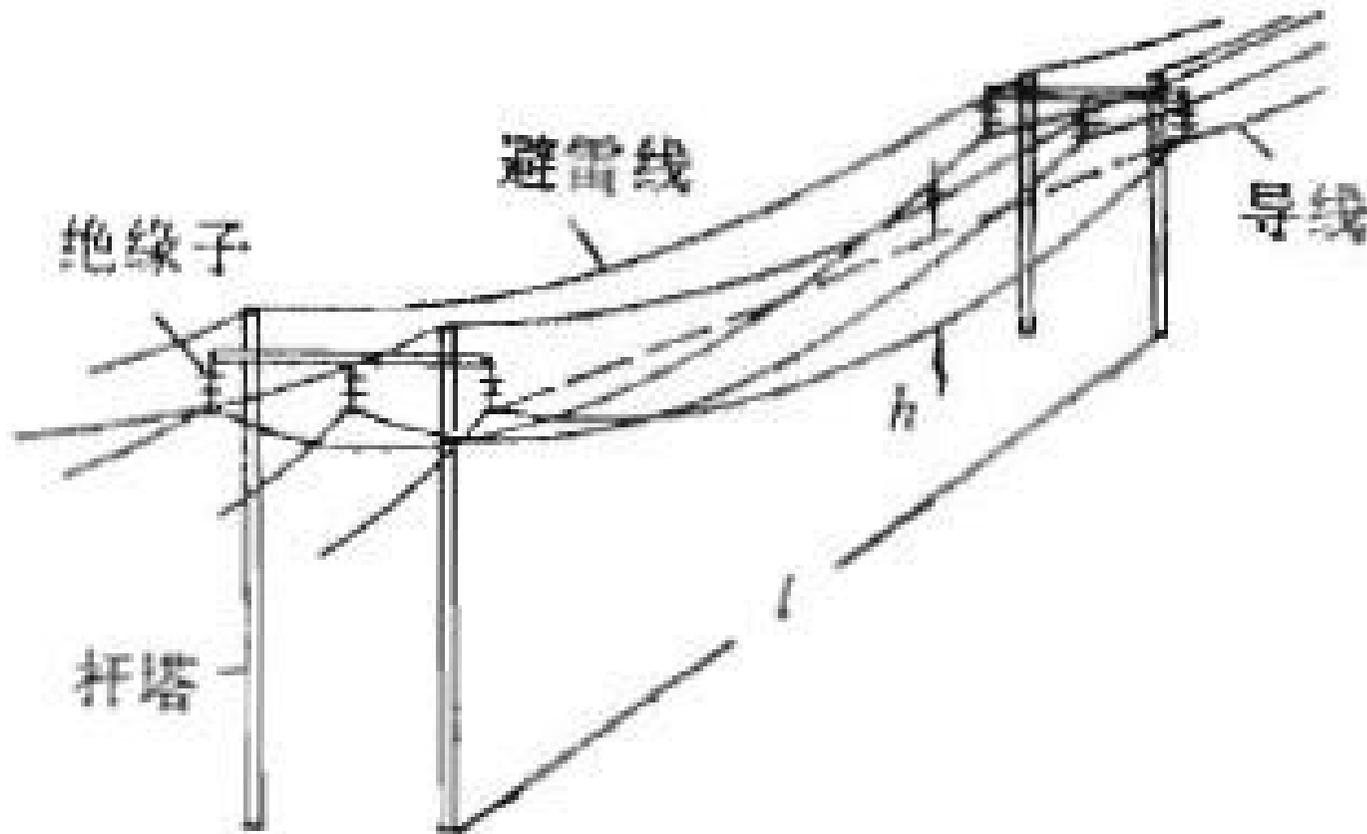
- 观察和分析电气元件稳态的物理现象
- 元件建模：等值电路（线/变/荷/发）
- 系统建模：全网等值电路、网络方程
- 各种解法



§2 电力线路结构和电磁现象

一、架空线

组成和作用？





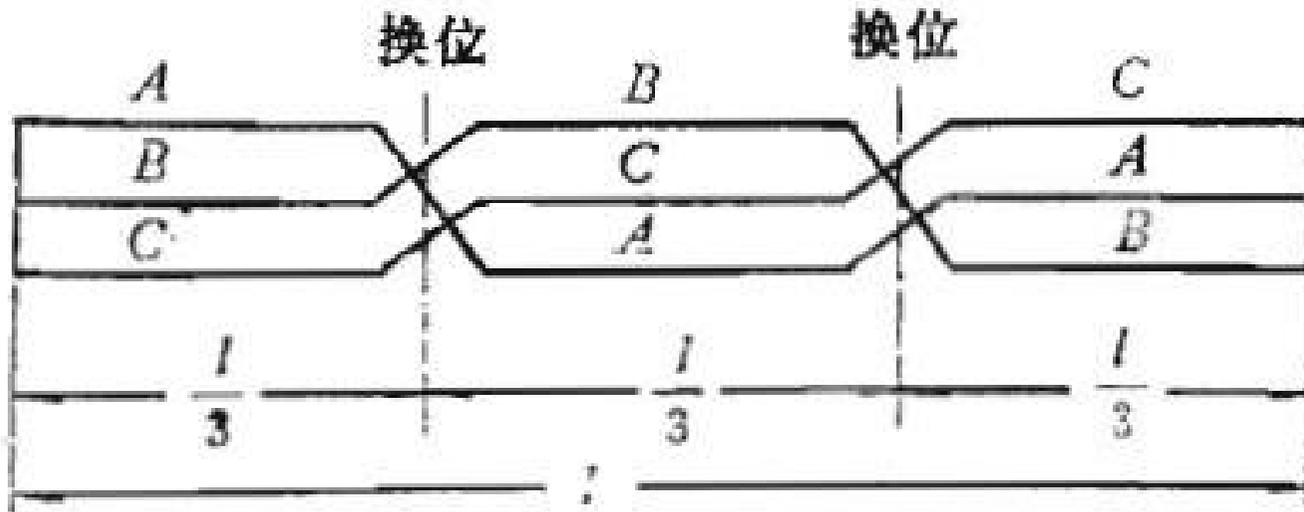
导线构造和型号

- 导线构造3种主要形式：
 - **单股线**（单根实心金属线：铜和铝）（很少采用）
 - **多股绞线（同材料）**，多单股线扭绞，标号：TJ（铜绞）、LJ（铝绞）、GJ（钢绞）
 - **多股绞线（两种材料）**：主要是钢芯铝绞线，“好导电性能+高机械强度”，普遍采用。标号：LGJ（普通型）、LGJQ（**轻型**）、LGJJ（**加强型**）
- 型号：标号+数字（导线主要载流额定截面积 mm^2 ） 例LGJ-150:铝线额定截面积 150mm^2



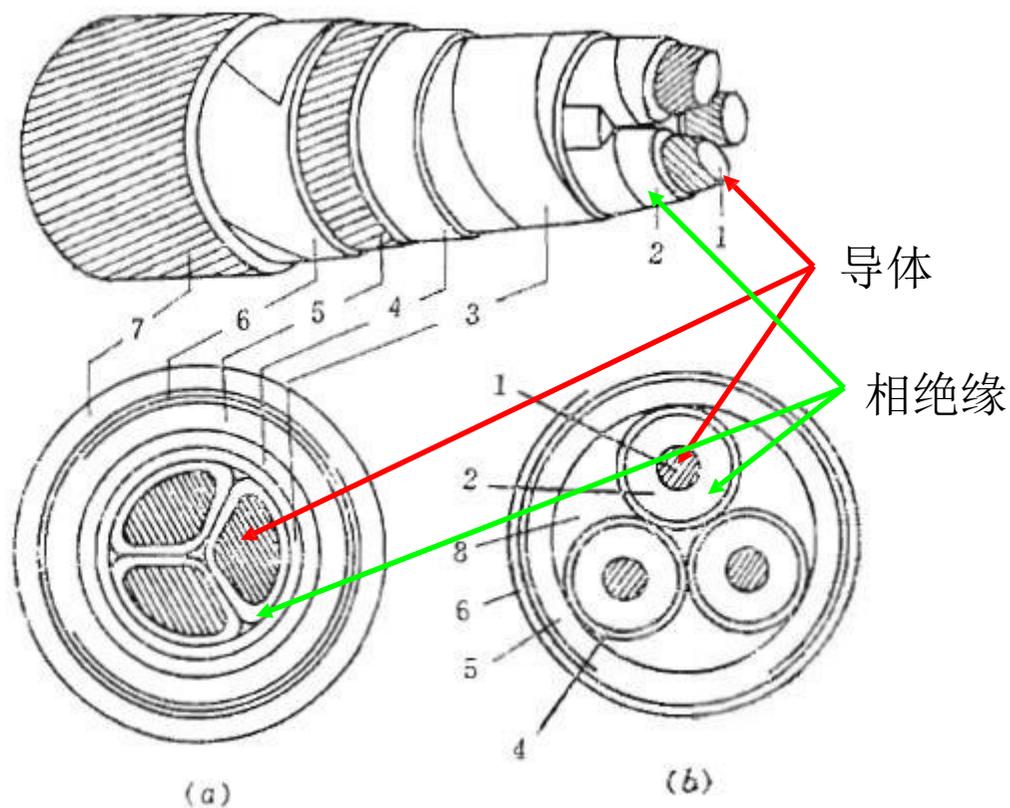
架空线中的特殊问题

- 排列不对称（参数不平衡）：**三相循环换位**



- 减少线路电抗和电晕损耗：**分裂导线**

二、电缆



- 1: 导体; 2: 相绝缘; 3: 带绝缘; 4: 铅 (铝) 包;
5: 麻被; 6: 钢带铠装; 7: 麻被; 8: 填麻



如果我们是先辈们，会抽象成什么样的
数学模型？

电路？分布式还是集中式？



四、线路的电磁现象和参数

■ 线路通交流**电流**:

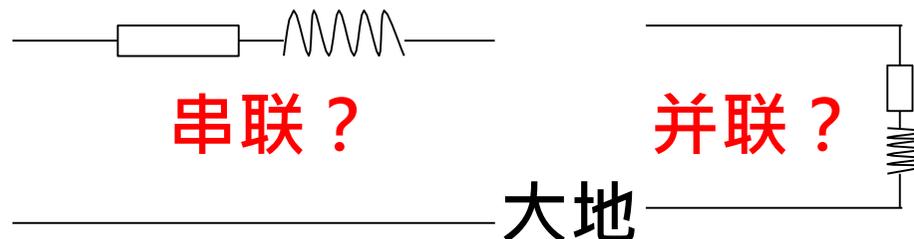
◆ 发热，消耗有功功率

→ **R**

◆ 交流电流 → 交变磁场 → 感应电势(自感、互感)
抵抗电流

→ **X**

◆ 电流效应:





线路的电磁现象和参数

■ 线路加交流电压:

◆ 绝缘漏电, 一定电压下发光、放电 (电晕)

→ $R'(G)$

◆ 电场 → 线/线、线/大地电容 → 交变电压产生 电容电流

→ $X'(B)$

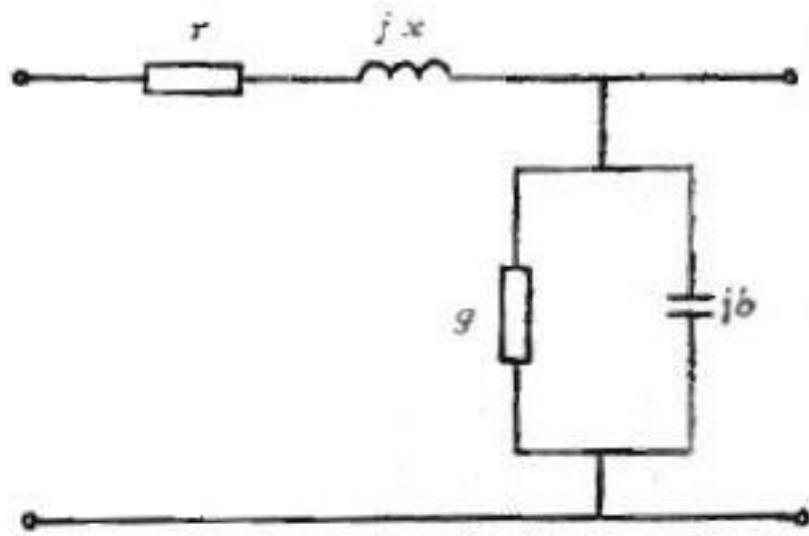
◆ 电压效应:





五、单位长线路等值电路和参数

分布式参数：用单位长 (/km) 参数 r 、 x 、 g 、 b 表示



电缆尺寸标准化，外界影响小，一般不变（不研究）

架空线受气候、地理、架设的影响， r 、 x 、 g 、 b 要变



§3 架空线的参数计算

§3.1 电阻r计算

■ $r = \rho/nS$ (欧/公里)

- ρ : 计算用电阻率, 欧·毫米²/公里, 铜18.8, 铝31.5(20°C), 温度修正。
- S : 额定导电截面积、毫米²
- n : 每相导线的根数 (分裂数)
- ρ : 略大于直流电阻率, 原因: 集肤效应、绞线、 $S >$ 实际截面

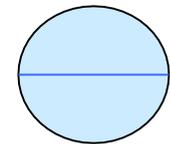
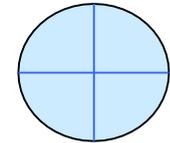


§3.2 电抗 x 计算

一、公式推导思路（电磁学）

1、分析长直圆导线周围的**磁场分布**：

据安培环路定律： $I \rightarrow H$ （磁场强度）



2、分析导线所交的**磁链**：

磁感应强度： $B = \mu$ （导磁率） $\cdot H$

磁通： $\Phi = A \cdot B$

磁链： $\psi = W \cdot \Phi$

自磁链 + 互磁链

3、得到电感 L 和**电抗 x** ： $L = \psi/I$, $X = \omega \cdot L$



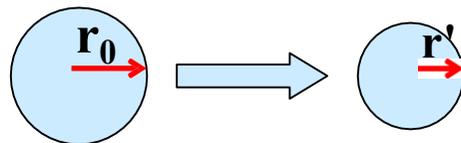
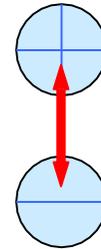
二、结论：单相输电线电感

(两根平行长直圆导线组成回路)

■ $L_1 = L_2 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{12}}{r'} \text{ (亨/米)}$

◆ D_{12} : 两导线间距离, 米。

◆ $r' = e^{-\frac{1}{4}} r_0 = 0.779 r_0$, 计及内磁链等值半径



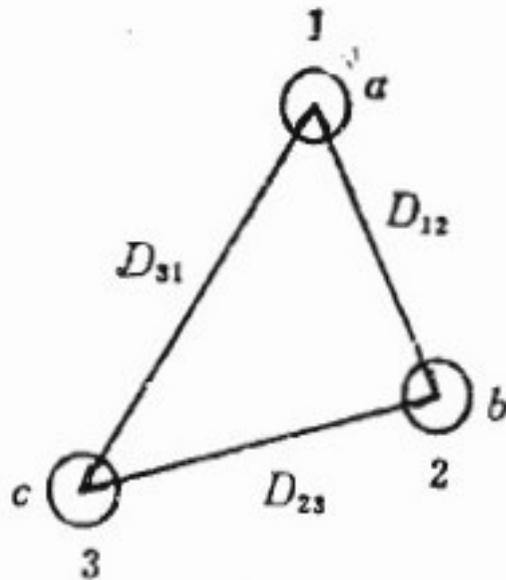
◆ 另一导线电流对其的互感起去磁作用

■ 如何理解参量



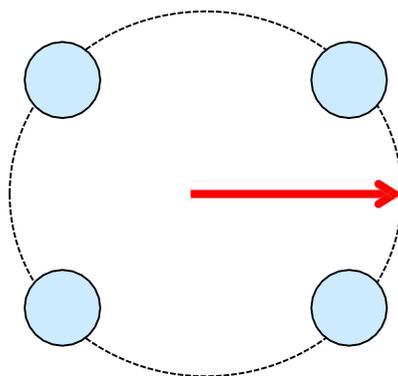
三、结论：三相输电线电感

- 对称排列： $L_A = L_B = L_C = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{r'} \text{ 亨/米}$
 - ◆ D_{eq} ：导线间距离，米
- 不对称排列（经换位）：公式同上
 - ◆ $D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}$ ：导线间几何均距
 - ◆ D_{12} 、 D_{23} 、 D_{31} ：三相导线两两间距离





三相输电线电感：导线分裂情形

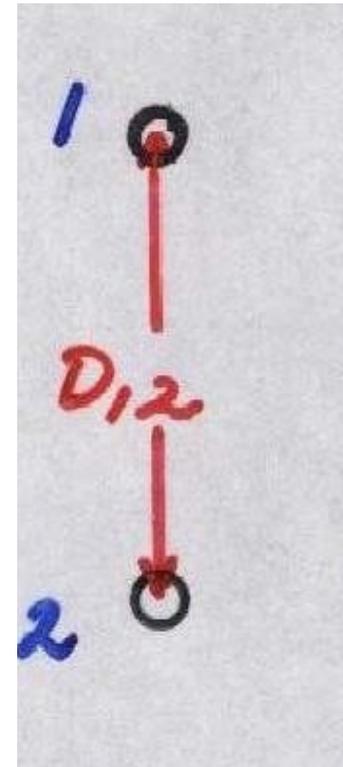
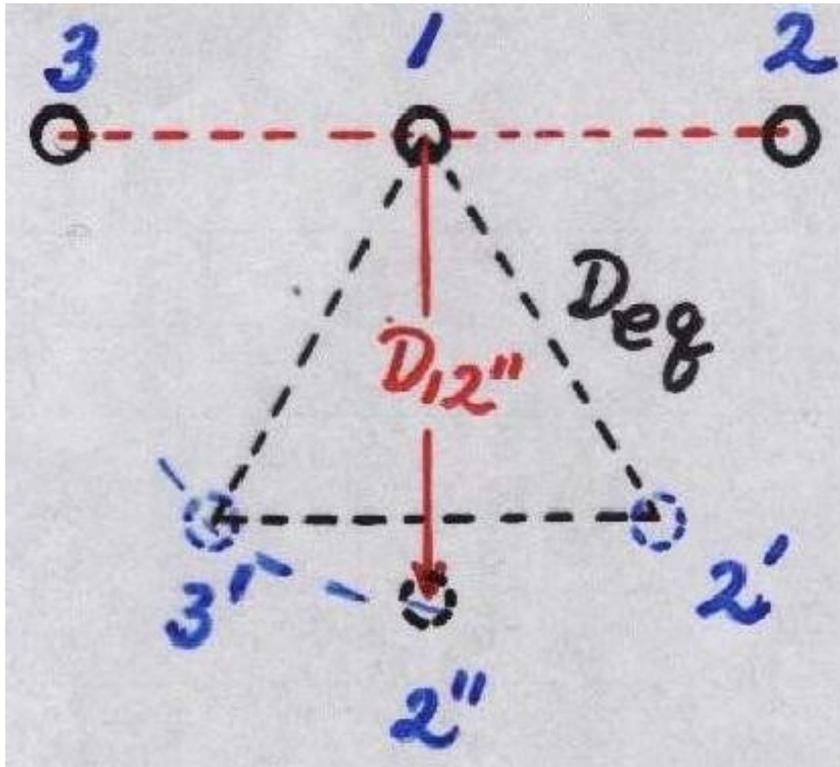


$n = 4$: 分裂数

- **对称排列**： $L_A = L_B = L_C = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D'_s}$ 亨/米
 - ◆ $D'_s = \sqrt[n]{nR^{n-1}r'}$ 米, 几何平均等值半径
 - ◆ R : 分裂导线中心所在圆周的半径
 - ◆ $n = 1$: 结论统一性



结论的统一性 (由单相到三相的推导)



$$L_A = L_B = L_C = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D'_s} \quad \longleftarrow \quad L_1 = L_2 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{12}}{r'}$$



四、最终结论：导线电抗

$$x = \omega L_A \times 1000 \text{ 欧/公里}$$

$$x = 0.1445 \lg \frac{D_{eq}}{D'_s} \text{ 欧/公里 (三相分裂换位)}$$

$$r' = 0.779r_0, D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}, D'_s = \sqrt[n]{nR^{n-1}r'}$$

- 不分裂？
- 三相对称？
- 单相？
- 理解参量？降低x的技术措施？



计算注意点

- D_{eq}, D'_s, r' 单位一致
- $r' = 0.779r_0$ 适用于单股线；多股绞线 $< 0.779r_0$ ；
钢芯绞线 $r' > 0.779r_0$ (实际算题)
- **经验数据**：不分裂110/220kV, $x = 0.4 \Omega/\text{km}$
- **L 客观存在**，取决于 D_{eq}, D'_s (或 r')，是等值电感，**与 i 大小无关**，但与三相电流 i_a, i_b, i_c 间的关系有关，须满足 $i_a + i_b + i_c = 0$ ，如不满足，则 L 要变化。



§3.3 电导g计算

- 主要由电晕引起，实测
- 计算：
$$g = \frac{\Delta P_g}{U^2} \times 10^{-3} \text{ 西门/公里}$$
 - ◆ U: kV(线电压)
 - ◆ ΔP_g : 电晕损耗有功功率kW/km(三相)
- U_{cr} : 临界电压、能发生电晕的最低电压，因素：材料表面光滑程度，天气，空气密度，材料半径，三相排列位置，分裂情况有关。
- 设计时考虑晴天不发生电晕，一般情况 g忽略



§3.4 电纳b计算

一、公式推导思路（电磁学）

- 研究b，需研究电容C，须先找**电位差 u_{12}** 与**电荷q**的关系，即先要分析导线周围**电场分布**

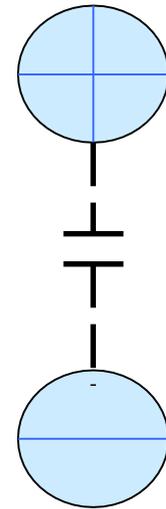
由**高斯定理**： $q \rightarrow D$ (电力线密度)

电场强度： $E = D / \varepsilon$ (介电常数)

由 $E \rightarrow U_{12}$

$$C = q / U_{12}$$

$$B = \omega \times C$$





二、结论：单相输电线电容

(两根平行长直圆导线组成回路)

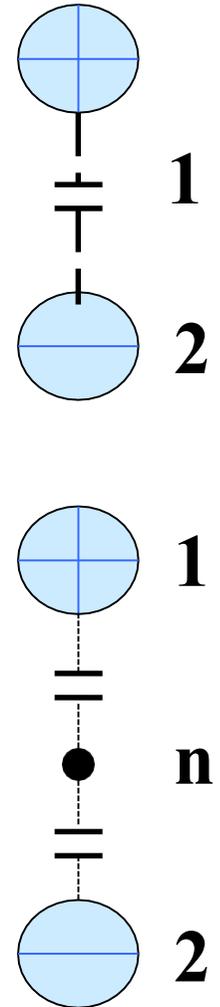
■ **线/线**: $C_{12} = \frac{0.012}{\lg \frac{D_{12}}{r_0}} \times 10^{-6}$ 法/公里

■ **线/地** (中性点、零电位点)

$$C_{1n} = C_{2n} = 2C_{12} = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{12}}{r_0}} \times 10^{-6}$$

■ 注意: r_0 区别于电抗中 r' , **原因?**

■ 如何理解参量?



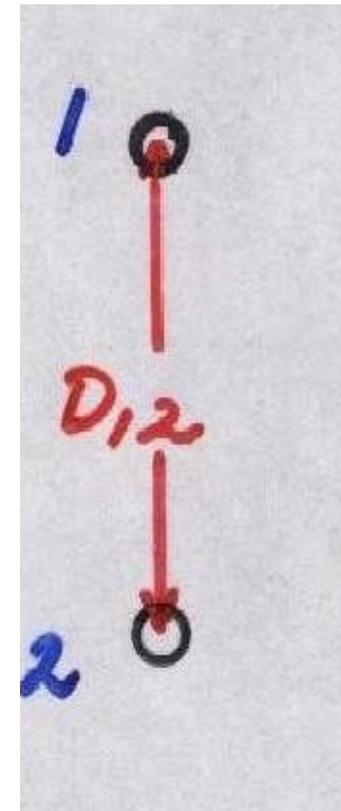
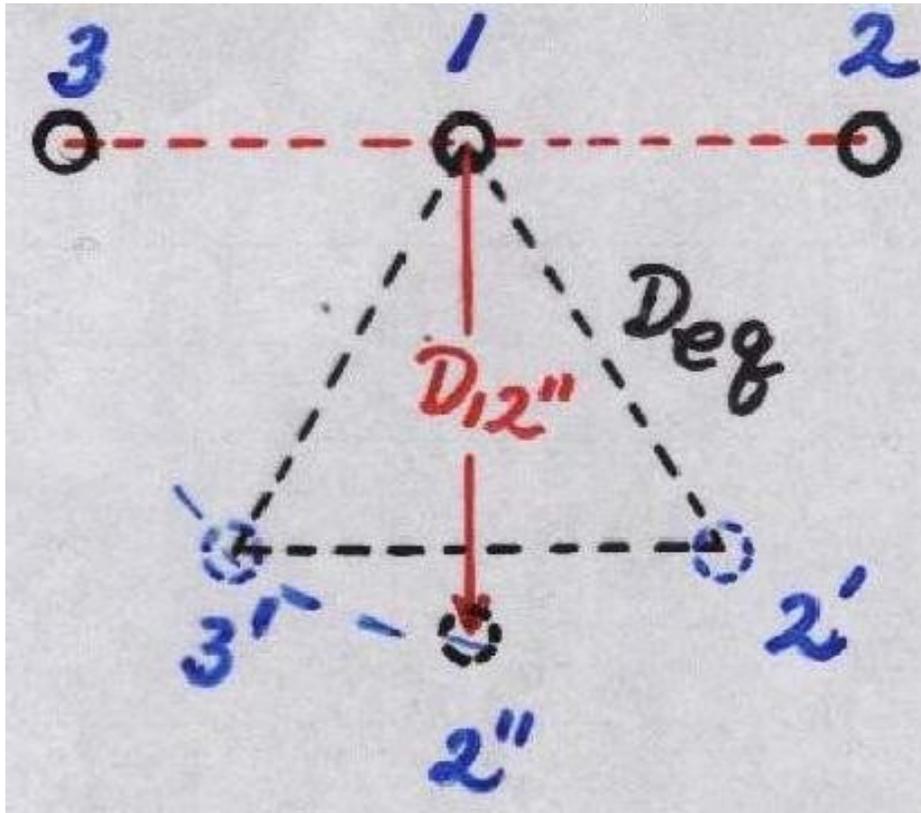


三、结论：三相输电线电容（线/地）

- 对称排列： $C_A = C_B = C_C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{r_0}} \times 10^{-6}$ 法/公里
- 分裂导线（换位）： $C_A = C_B = C_C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{D_s}} \times 10^{-6}$
- $D_s = \sqrt[n]{nR^{n-1}r_0}$ 米，几何平均等值半径
- $n = 1$ ：结论统一性



结论的统一性 (由单相到三相的推导)



$$C_A = C_B = C_C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{D_s}} \times 10^{-6} \quad \longleftarrow \quad C_{1n} = C_{2n} = 2C_{12} = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{12}}{r_0}} \times 10^{-6}$$



四、最终结论：导线电纳

$$b = \omega C = 314 \times \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{D_s}} \times 10^{-6}$$

- $b = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{eq}}{D_s}} \times 10^{-6}$ 西门/公里(三相分裂换位)
- $D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}, D'_s = \sqrt[n]{nR^{n-1}r_0}$
- 不分裂?
- 对称排?
- 单相 (线/地)?
- 理解参量?



计算注意点

- D_{eq} 、 D_S 、 r_0 **单位一致**，区别电抗中 D'_s 、 r'
- **经验数据**：不分裂 $b = 2.6 \sim 2.85 \times 10^{-6}$ 西门/公里
- **C客观存在**，取决于 D_{eq} 、 $D_S(r_0)$ ，是等值电容，**与U大小无关**，但与三相电压 u_a 、 u_b 、 u_c 间关系有关，须满足 $u_a + u_b + u_c = 0$ ($q_a + q_b + q_c = 0$)，如不满足，则C要变化。



§4.1 架空线分布参数汇总

- $r = \rho/ns$ 欧/公里
- $x = 0.1445 \frac{D_{eq}}{D'_s}$ 欧/公里
- $g = 0$
- $b = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{eq}}{D_s}} \times 10^{-6}$ 西门/公里

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}, D'_s = \sqrt[n]{nR^{n-1}r'}, D'_s = \sqrt[n]{nR^{n-1}r_0}$$

$$r' = 0.779r_0$$

- 实用中不方便



§4.2 集中参数等值电路

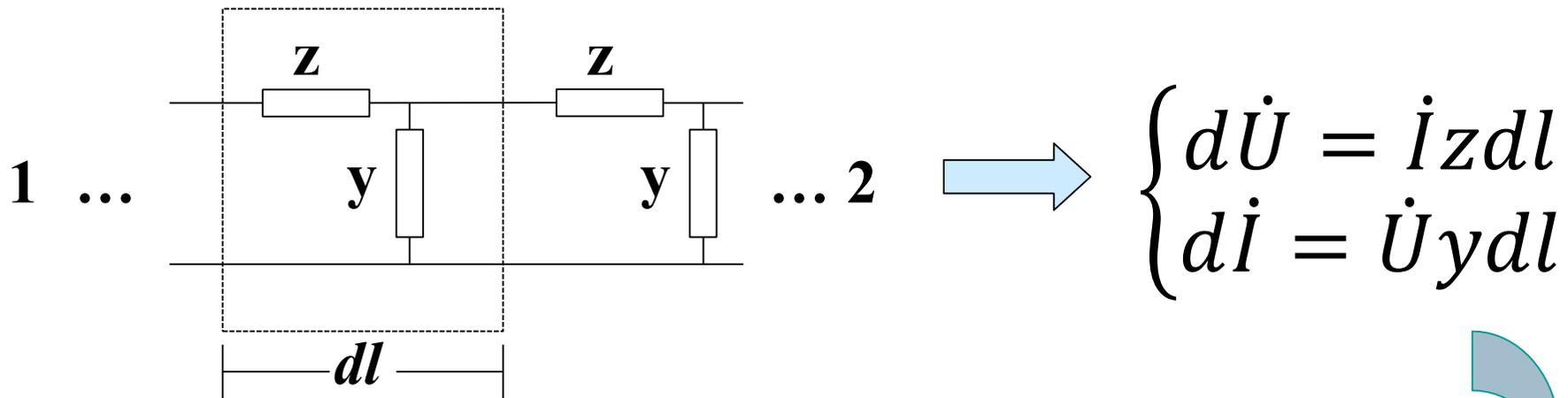
一、推导思路



- 关心线路1、2两端电量关系（非沿线分布）：
分布式参数→全长集中参数
- 推导思路：
 - 1、建立分布参数电路：1、2端构成二端口网络
 - 2、建立分布参数表示的网络方程：微分方程
 - 3、解出两端口电压和电流关系→用集中参数表示的二端口等值网络（电路原理）



推导思路 (I) : 导出二端口网络方程



- 给定边界条件，解出线路任意点电压和电流
- 给定 $\dot{U}_2 \dot{i}_2 \Rightarrow \dot{U}_1 \dot{i}_1$ (即：二端口网络方程)

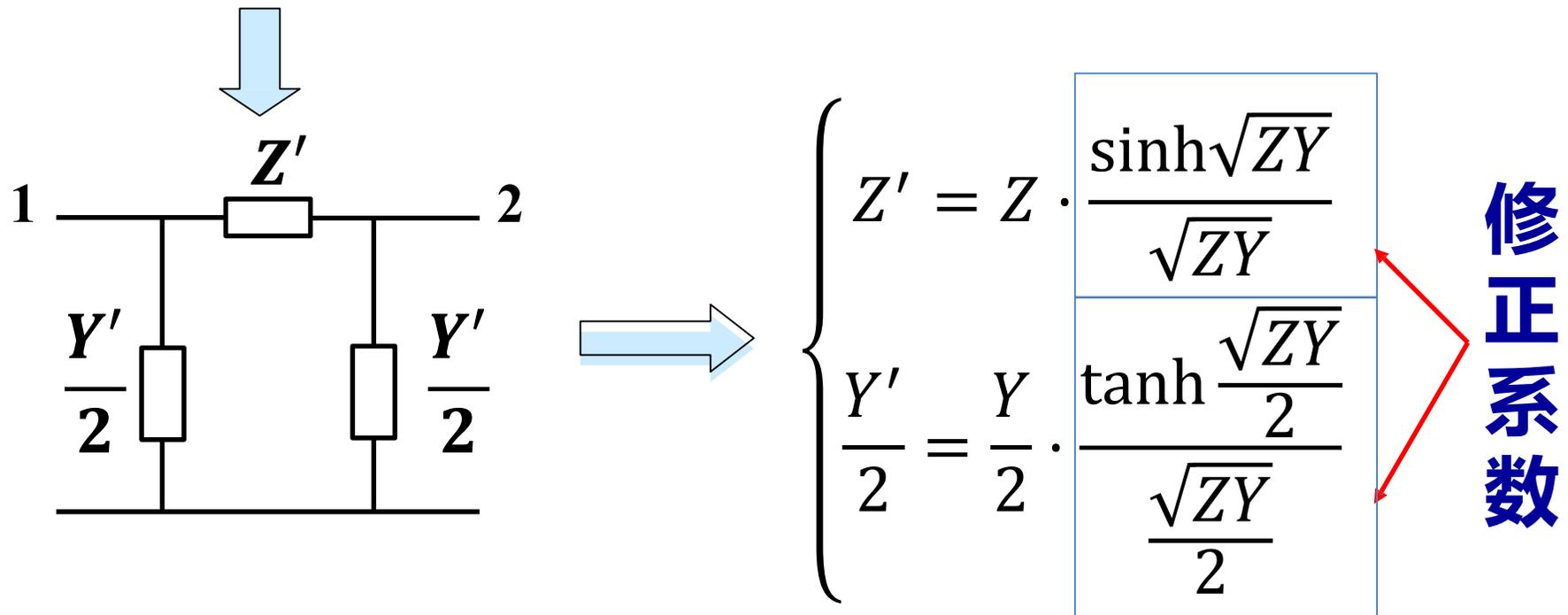
$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{i}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\sqrt{ZY} & \sqrt{ZY}\sinh\sqrt{ZY} \\ \sqrt{Y/Z}\sinh\sqrt{ZY} & \cosh\sqrt{ZY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{i}_2 \end{bmatrix}$$

$Z = zL$ 相总串联阻抗, $Y = yL$ 相总并联导纳, L 线路长度



推导思路 (II) : 导出 π 型等值电路

二端口网路方程



- $L > 750\text{km}$ 长线: 用该公式精确计算



推导思路 (III) : 近似计算

- $750 \geq L \geq 300\text{km}$: 取级数前2项

$$\begin{cases} Z' = Z \cdot \left(1 + \frac{ZY}{6}\right) \\ \frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \cdot \left(1 - \frac{ZY}{12}\right) \end{cases}$$

- $L \leq 300\text{km}$: 取级数前1项 (不考虑分布参数影响, 常用, 理解?)

$$\begin{cases} Z' = Z \\ \frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \end{cases}$$

- $L \leq 100\text{km}$, 电压等级 $\leq 35\text{kV}$: 忽略并联导纳

$$\begin{cases} Z' = Z \\ \frac{Y'}{2} = 0 \end{cases}$$



第二章 电力系统稳态模型

§1 电力线路模型

§2 电力变压器和负荷模型

§3 电力系统等值电路与标么制



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

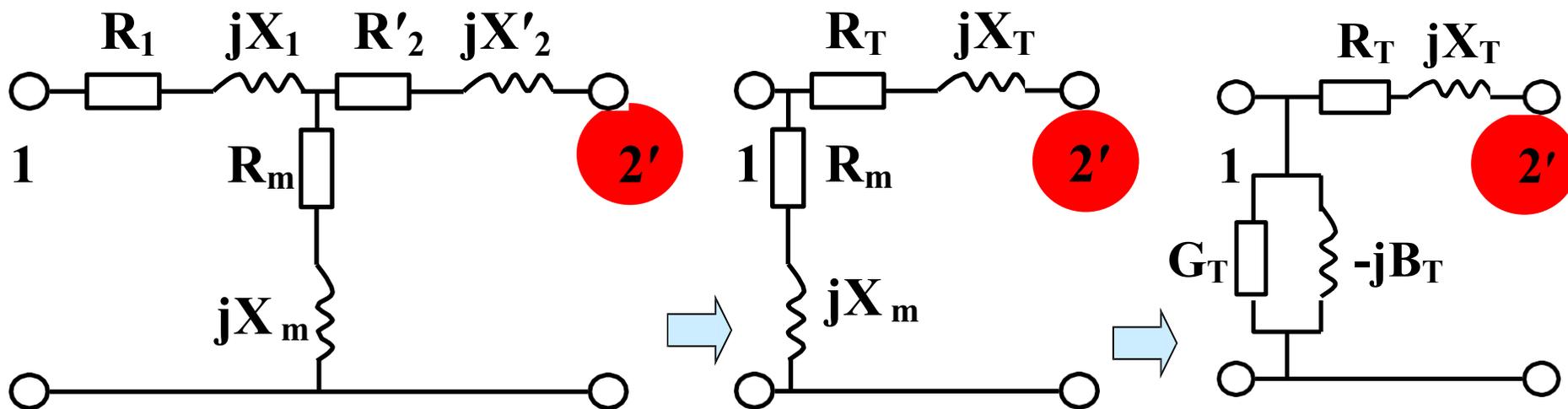


电力变压器



变压器绕组

- 运用**折合**的概念得出等值电路（《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



§2 变压器等值参数

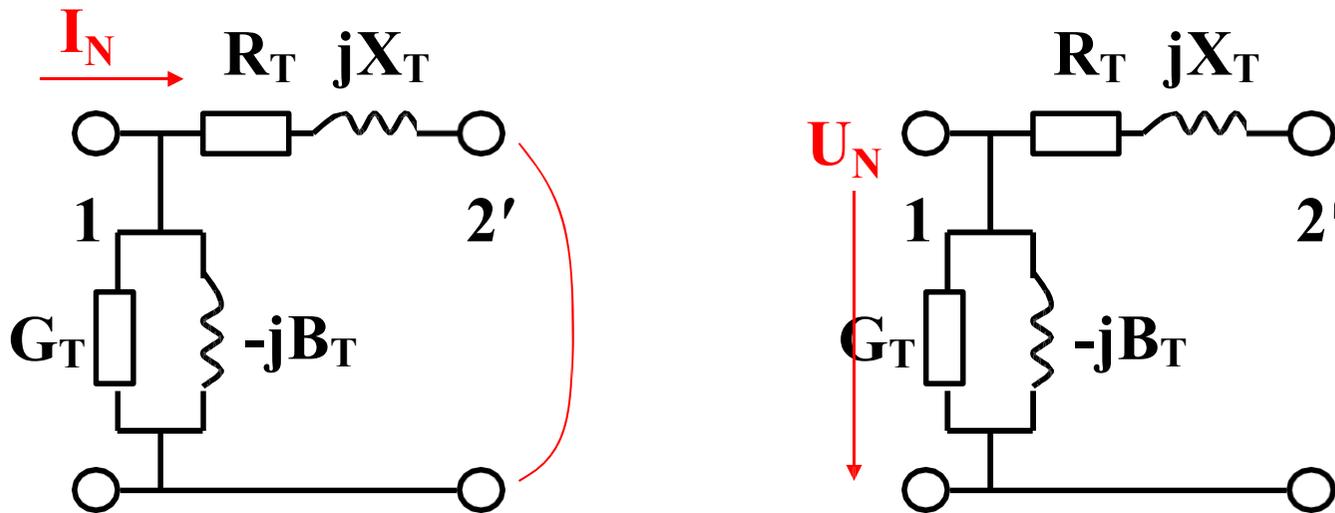
场分析困难，如果我们前辈们，
会怎么办？



§2.1 两个试验 (四个铭牌数据)

■ 什么试验? 怎么做?

- ◆ **短路试验:** $\left\{ \begin{array}{l} \text{短路损耗 } \Delta P_S \\ \text{短路电压(百分值) } U_S\% \end{array} \right.$
- ◆ **开路试验:** $\left\{ \begin{array}{l} \text{空载损耗 } \Delta P_0 \\ \text{空载电流(百分值) } I_0\% \end{array} \right.$



数据与等值参数如何一一对应?



§2.2 双绕组变压器的参数

一、短路试验求串联阻抗

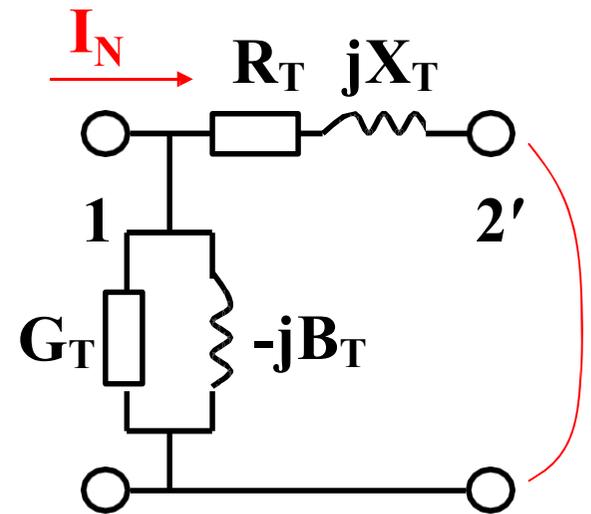
$$\Delta P_S = \Delta P_{cu} + \Delta P_{Fe}, \quad \Delta P_{Fe} \approx 0$$

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

- 由短路损耗确定 R_T

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

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



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



短路试验求串联电抗

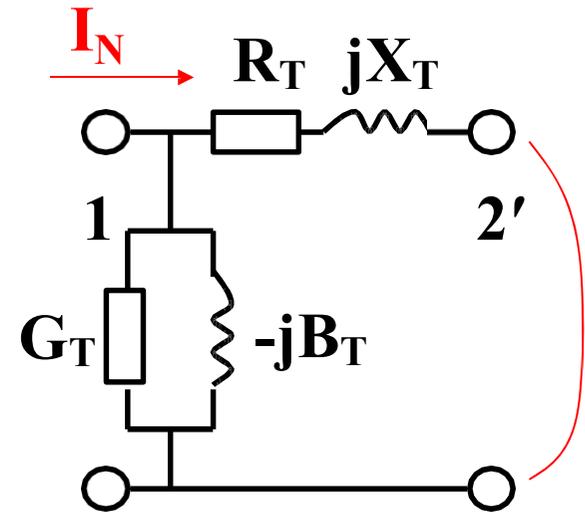
- X_T : 由 $U_S\%$ 决定

$$U_S\% = \frac{U_S}{U_N} \times 100$$

$$\approx \frac{\sqrt{3}I_N X_T}{U_N} \times 100$$

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

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

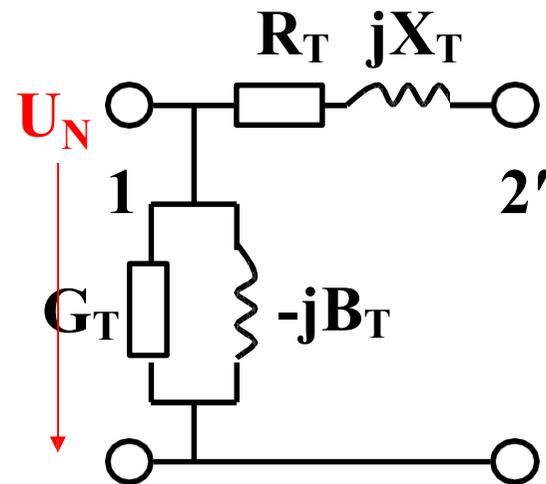




二、开路试验求励磁导纳

- G_T : 由 ΔP_0 (kW) 确定:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{cu} + \Delta P_{Fe} \quad \Delta P_{cu} \approx 0$$



$$\Rightarrow \Delta P_0 = U_N^2 G_T$$

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



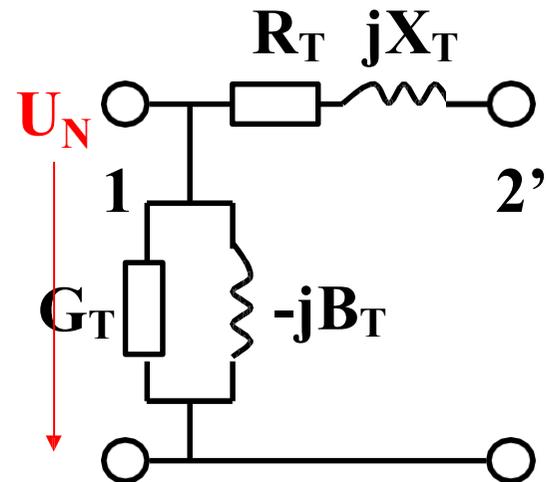
二、开路试验求励磁导纳

- B_T : 由 $I_0\%$ 决定

$$I_0\% = \frac{I_0}{I_N} \times 100$$
$$= \frac{U_N B_T}{\sqrt{3} I_N} \times 100$$

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

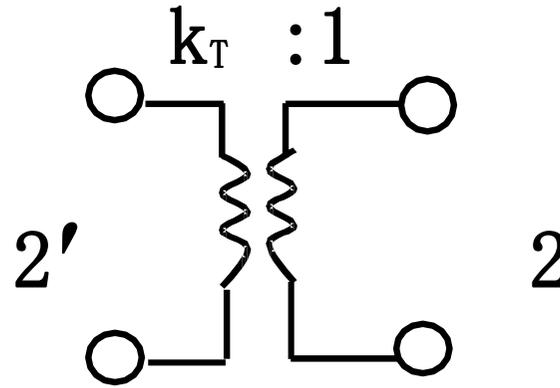
$$\Rightarrow B_T = \frac{I_0\% S_N}{U_N^2} \times 10^{-5} \quad \text{西门}$$





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！怎么办？**



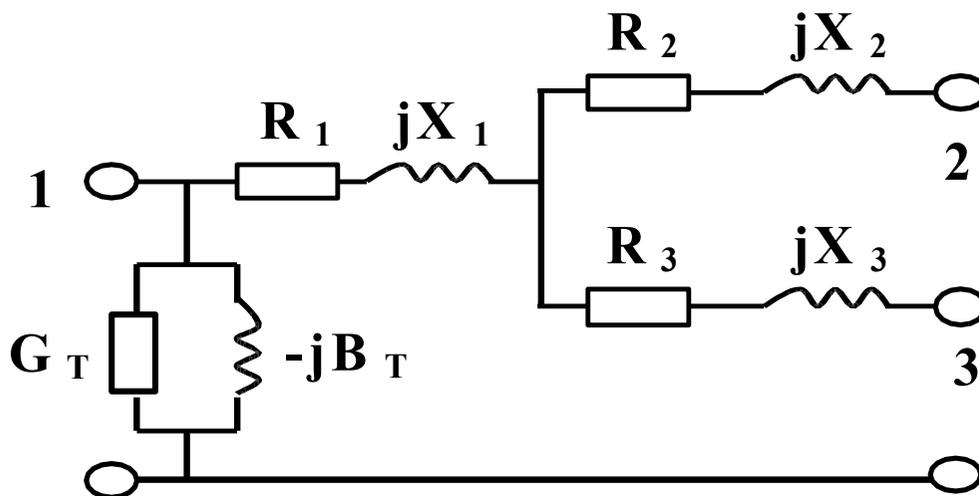
四、公式注意点

- 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 $Y/2 = jB_L/2$ 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, $\Delta Q_0 = \frac{I_0\%}{100} S_N$ ($kvar$) (?)
- 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



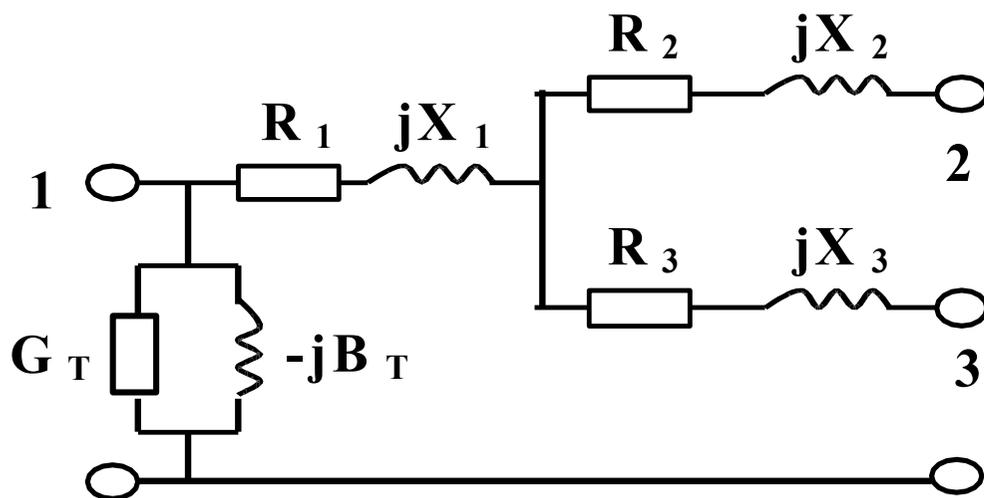
如何做短路和开路试验？

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)

- 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。



二、求电阻R1、R2、R3 (绕组容量100/100/100)

- 思路：如何求各绕组对应短路损耗？

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

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



二、求电阻R1、R2、R3 (绕组容量100/100/100)

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

$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{\Delta P_{S1} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \\ R_2 = \frac{\Delta P_{S2} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \text{ 欧} \\ R_3 = \frac{\Delta P_{S3} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \end{array} \right.$



三、求电阻R1、R2、R3 (绕组容量 $S_{N1}/S_{N2}/S_{N3}$)

- 上式中 ΔP_{S1} 、 ΔP_{S2} 、 ΔP_{S3} 是指绕组流过与**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R1、 R2、 R3 (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

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

→

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



四、求电抗 X_1 、 X_2 、 X_3

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短路电压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



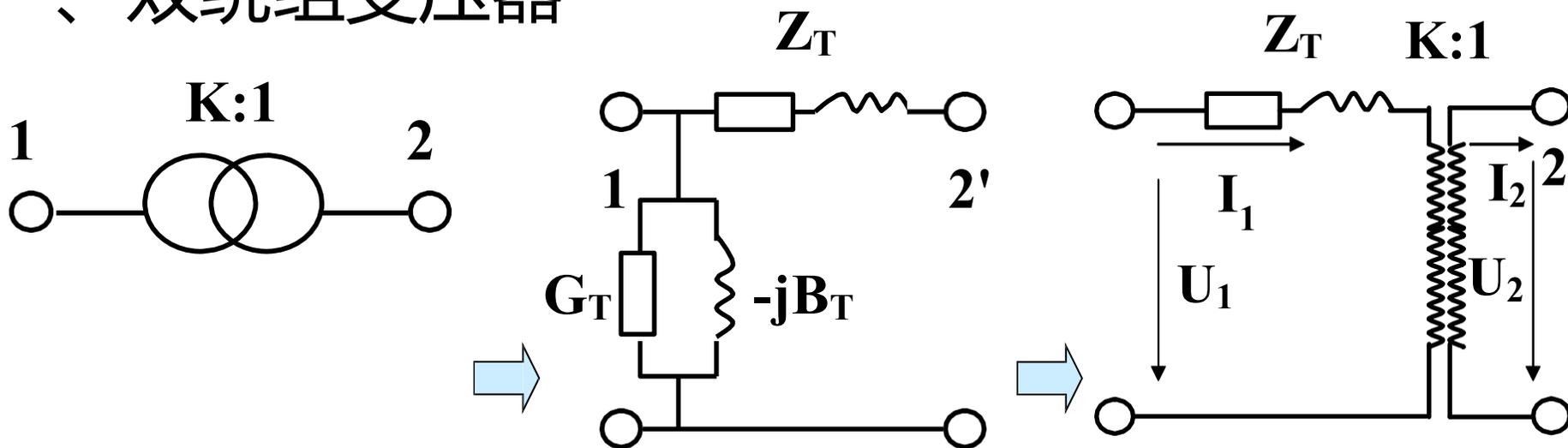
六、公式注意点

- 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？

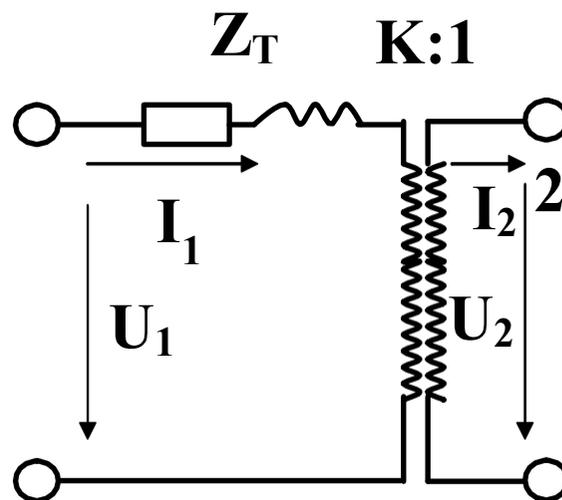


-
- 如何去掉磁耦合，变成纯电路？
 - 有什么思路？
-



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)

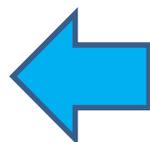
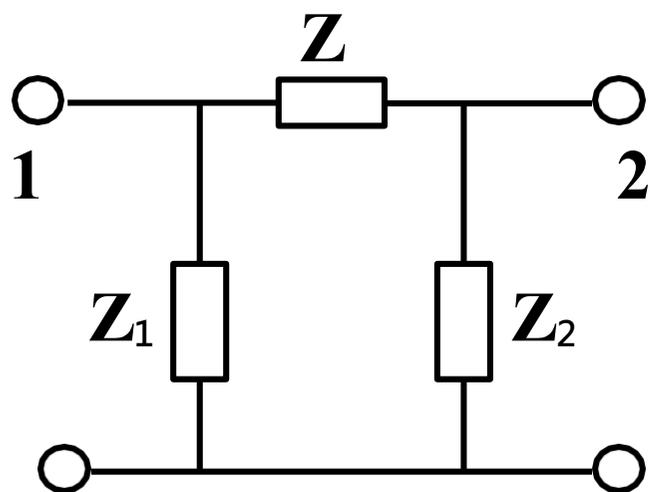


■ 二端口网络方程
$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{i}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & Z_T/K \\ 0 & 1/K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{i}_2 \end{bmatrix}$$



双绕组变压器 π 型纯电路

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



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

- $Z=Z_T/K, Z_1=Z_T/(1-K), Z_2=Z_T/(K(K-1))$
- 若参数归算到2侧?



等值电路特点

- 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 会变)
- 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

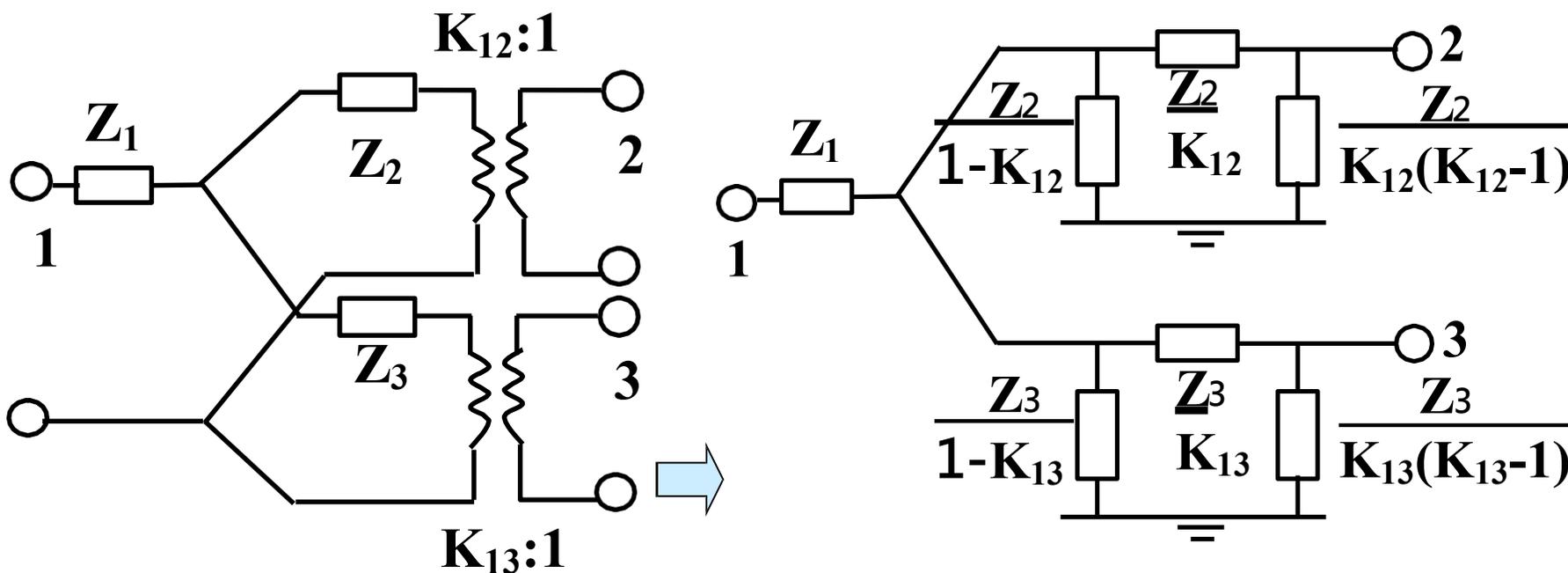


三、三绕组变压器π型等值电路？

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

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

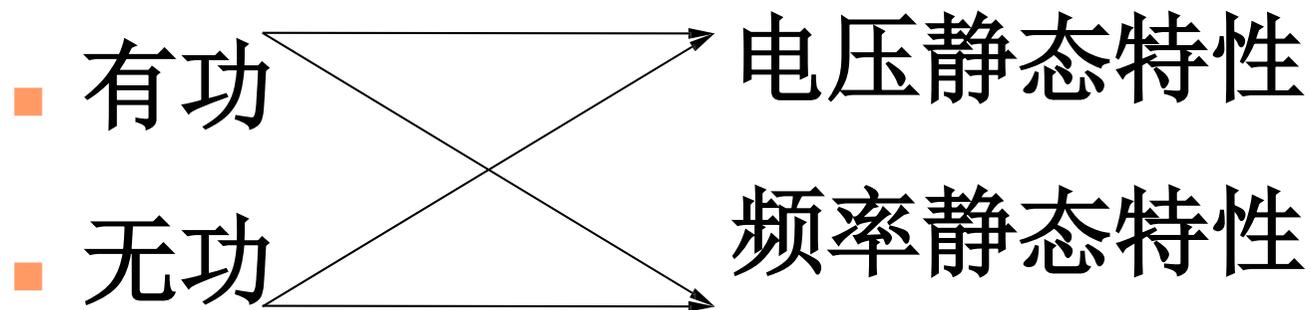
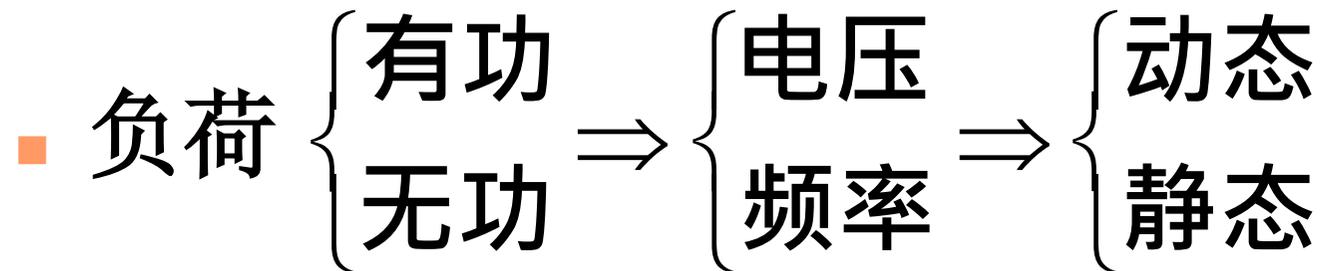
- 采用**2组**双绕组变的 π 型等值电路





§4 负荷模型

一、负荷静态（稳态）特性

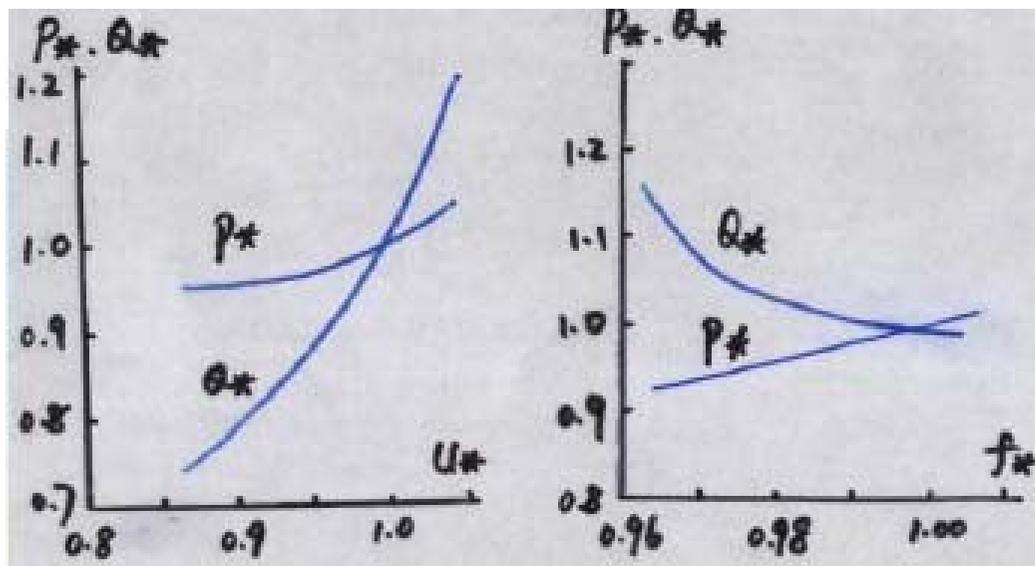


- 用电设备组成不同而变，一般通过实测



§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 $K_{PV} = \frac{dP}{dU}$

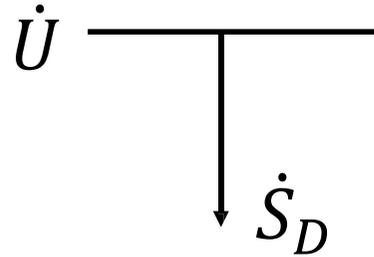
- ◆ 无功负荷电压调节效应系数 $K_{QV} = \frac{dQ}{dU}$

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



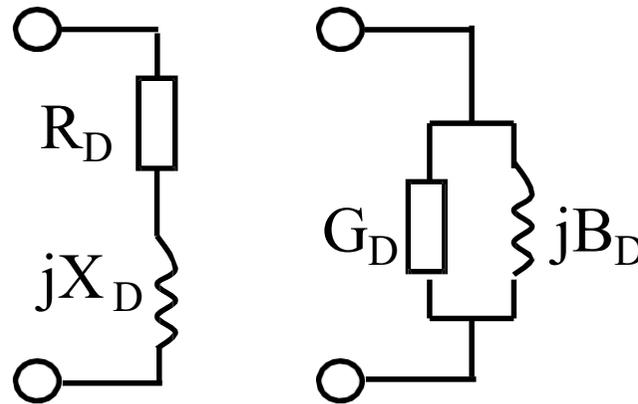
二、负荷模型

- 恒定功率:



- $\dot{S}_D = P_{DN} + jQ_{DN}$: 额定电压频率下的功率

- 恒定阻抗:



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



二、负荷模型

■ 函数关系表示 (频率关系类似)

◆ 线性表示

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

(二部分?)

	恒阻抗	恒电流	恒功率
◆ 二次表示	$\begin{cases} P_D = P_{DN}[a_P(U/U_N)^2 + b_P(U/U_N) + c_P] \\ Q_D = Q_{DN}[a_Q(U/U_N)^2 + b_Q(U/U_N) + c_Q] \end{cases}$		

(三部分?)

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



第二章 电力系统稳态模型

§1 电力线路模型

§2 电力变压器和负荷模型

§3 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**？
-

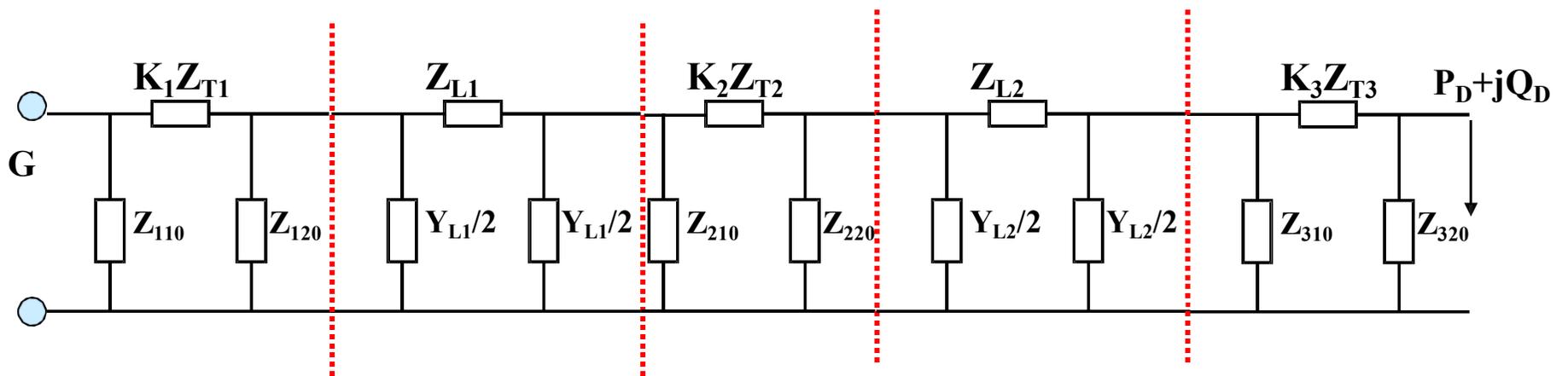
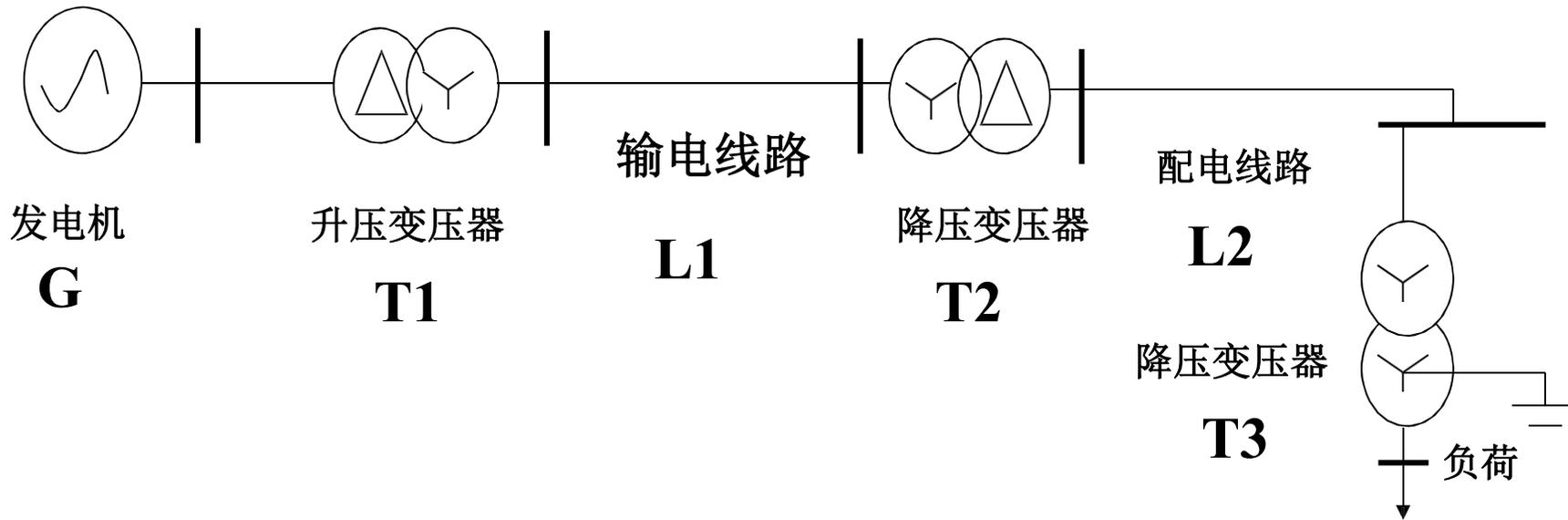


§1 电力系统等值电路（稳态范畴）

- **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**，连接元件等值电路，得**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**！
-



§2 电力系统标么(么)制

一、定义

- **有名值**: 有具体物理单位的量值
- **标么值**: 无具体物理单位的**相对值**
有名值(单位)/选定**基值**(同单位)
- **标么值特点**:
 - **无量纲**
 - **不唯一**: 随基值变化而变化, 须指明基值
 - **常见电量**:

$$U_* = \frac{U}{U_B}, I_* = \frac{I}{I_B}$$



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

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

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



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
- 有2个约束条件：4个基值中自由度为2
- 一般先选： S_{PB} 、 U_{PB} ，则：

$$I_{PB} = \frac{S_{PB}}{U_{PB}}, Z_B = \frac{U_{PB}^2}{S_{PB}}$$

- 复阻抗 $\dot{Z} = Z \angle \varphi = R + jX$
- 令 $R_B = X_B = Z_B$ ，则：

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



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：

$$\dot{S}_{P*} \triangleq \frac{\dot{S}_P}{S_{PB}} = P_{P*} + jQ_{P*}$$

(与有名值一致)



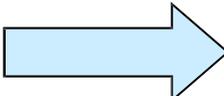
三、对称三相基值选取规律(Y接法)

- 四个模量: U_L, I_L, S_3, Z
- 相应四个基值: $U_{LB}, I_{LB}, S_{3B}, Z_B$

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

如选:
$$\begin{cases} U_{LB} = \sqrt{3}I_{LB}Z_B = \sqrt{3}U_{PB} \\ S_{3B} = \sqrt{3}U_{LB}I_{LB} = 3U_{PB}I_{PB} = 3S_{PB} \end{cases}$$

(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)
- 有2个约束条件：4个基值中**自由度为2**
- 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 $S_{3B} = Q_{3B} = Q_{3B}$

→
$$\dot{S}_{3*} \triangleq \frac{\dot{S}_3}{S_{PB}} = P_{P*} + jQ_{P*}$$

$$\dot{S}_{3*} = \dot{S}_{P*} = \dot{U}_{P*} I_{P*}^*$$

- 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)

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



四、变压器铭牌数据与标么值的关系

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

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



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

- 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：

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

- 若新基值 $U_B=U_N$ ，则：

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

- 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：

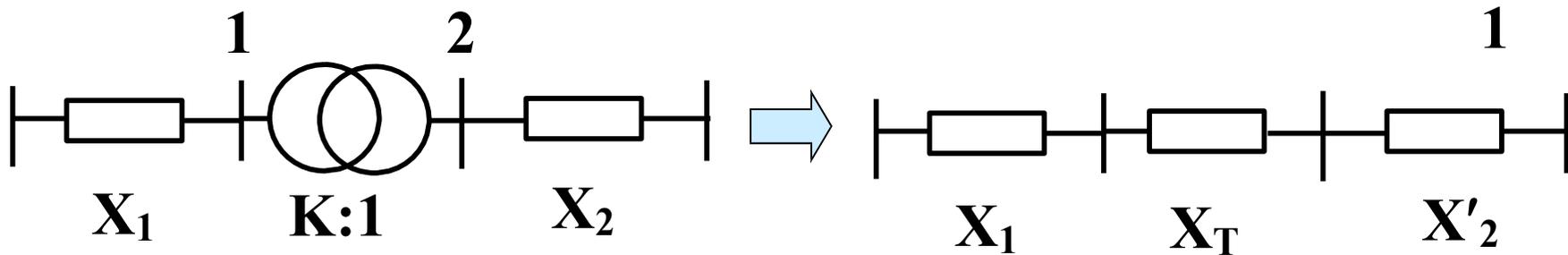
- ◆ 各元件以其额定值为基值，与系统不一致？
- ◆ 由于变压器存在，两侧元件电压基值选取？

■ 有3种做法（2种精确、1种近似）



1、逐级归算法（精确）

步1:按变比将阻抗折合至同一电压等级



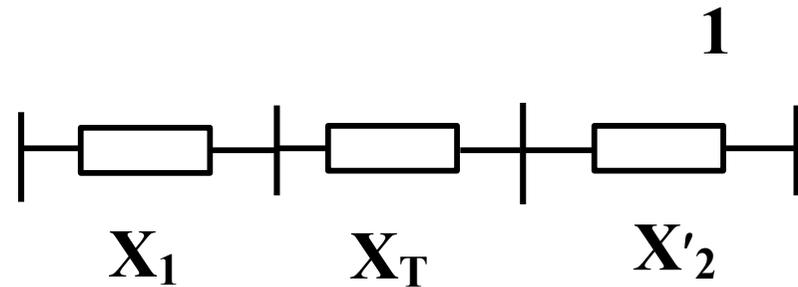
$$K = \frac{U_{t1}}{U_{t2}}$$

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

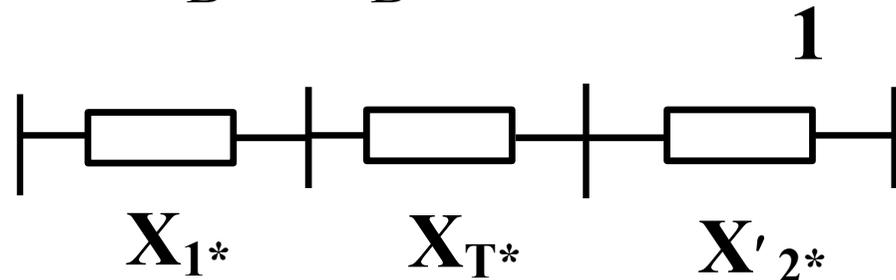
- X_T : 折合至1侧的变压器电抗



1、逐级归算法（精确）



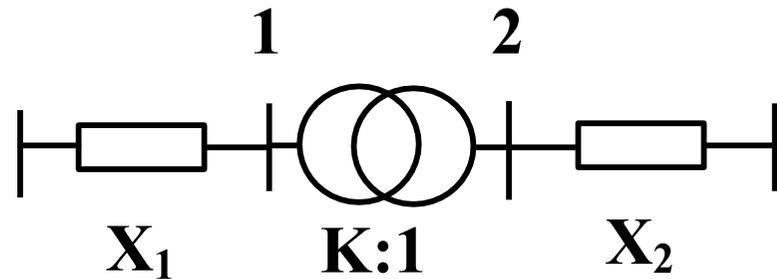
- 步2:选择统一的 S_B 、 U_B , 计算 X_{1*} 、 X_{T*} 、 X_{2*}



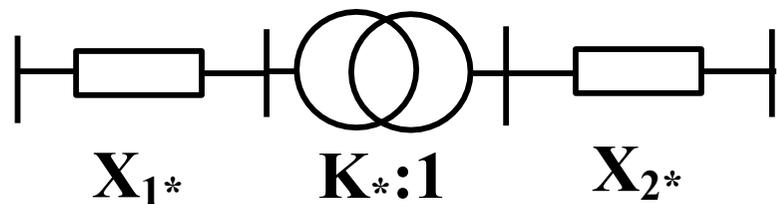
- 步3:分析标么电路
- 步4:返算有名值, 2侧的计算结果折合回去
- 电压等级多: **很麻烦!** 一般不这么做。



2、各选电压法 (精确, 常用)



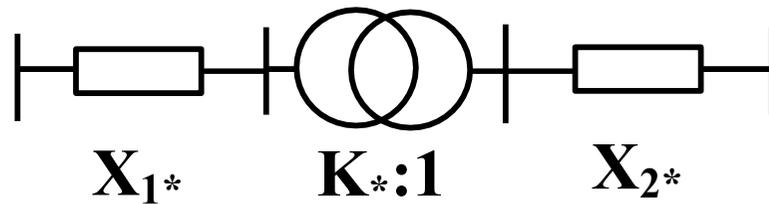
- 步1: 将 X_T 归算到1侧: X_1 、 X_2 各为1、2侧总电
- 步2: 容量基值统一为 S_B , 两侧各选电压基值 U_{B1} 、 U_{B2} , 两侧分别归算标么值



($K*?$)



2、各选电压法 (精确, 常用)



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

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

- 步3: 消去磁耦合?

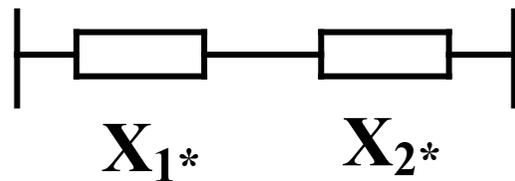


各选电压法

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**

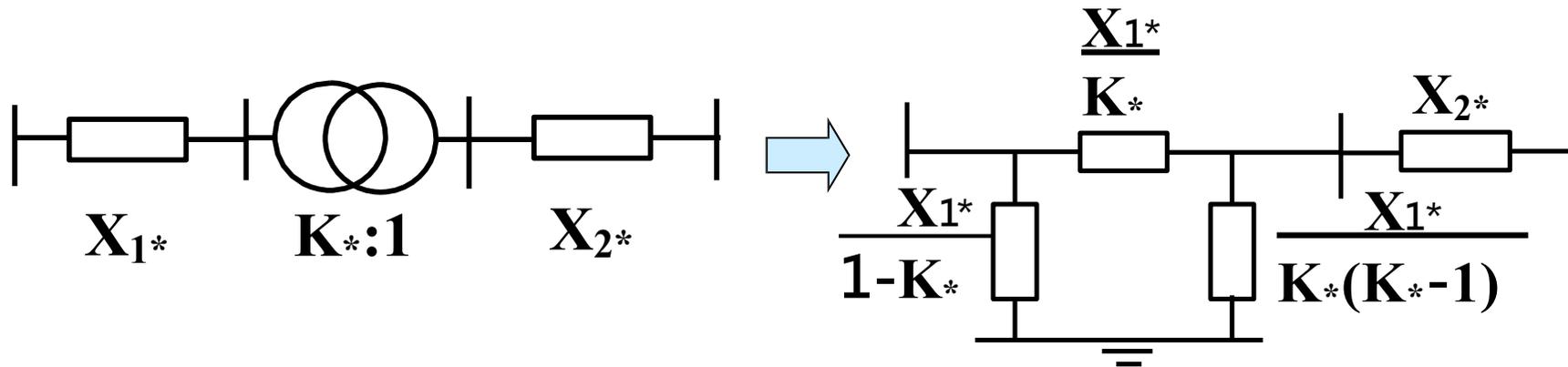


b) 若 $K_* \neq 1$ ，则 U_{t1} 和 U_{t2} 中至少有一个不等于 U_{B1} 或 U_{B2} ，称为**非标准变比**，对应变压器为**非标准变比变压器**。

■ **如何将标么制下的非标准变比去掉???**



2、各选电压法（精确，常用）



- 三绕组变压器时，可类似处理：

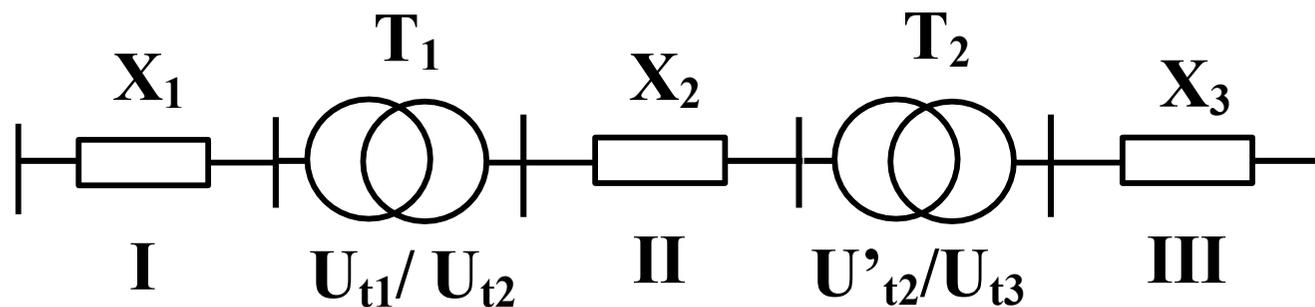
$$K_{12*} = \frac{U_{t1} / U_{t2}}{U_{B1} / U_{B2}}$$

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

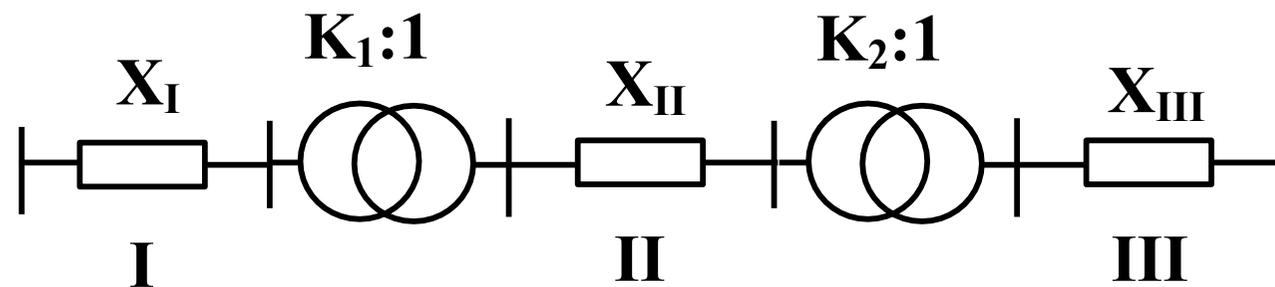
- 步4: 分析标么电路，返算有名值。



推广到多电压等级



步1: X_{T1} 归算到I侧, X_{T2} 归算到II侧

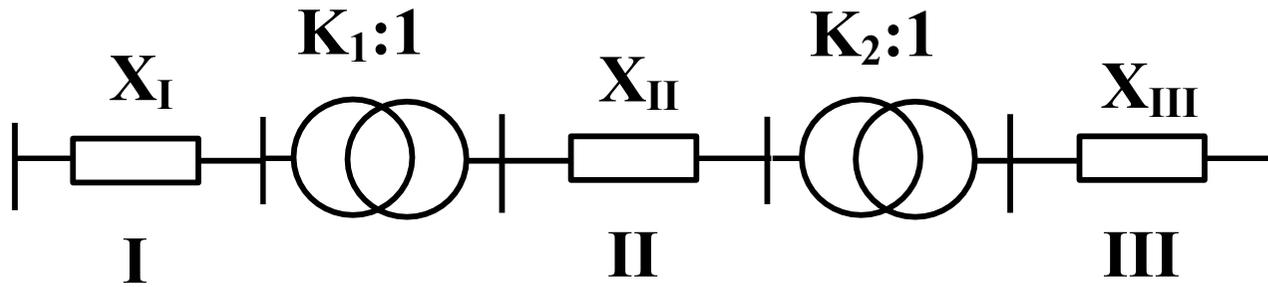


$$X_I = X_1 + X_{T1}, \quad X_{II} = X_2 + X_{T2}, \quad X_{III} = X_3$$

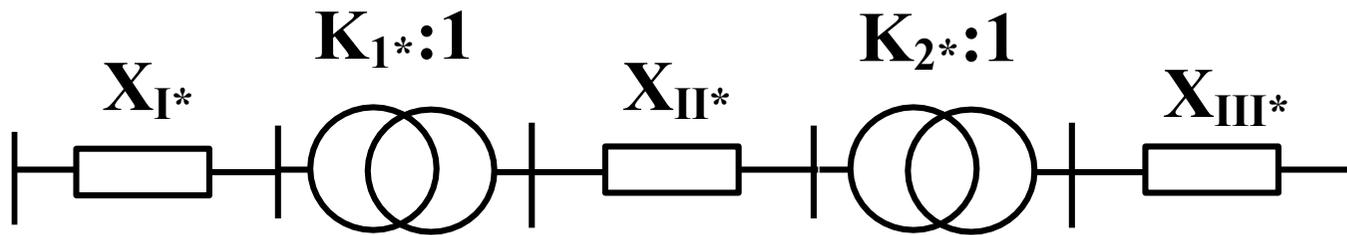
$$K_1 = \frac{U_{t1}}{U_{t2}} \quad K_2 = \frac{U'_{t2}}{U_{t3}}$$



推广到多电压等级



步2: 选基值 S_B 、 U_{BI} 、 U_{BII} 、 U_{BIII}



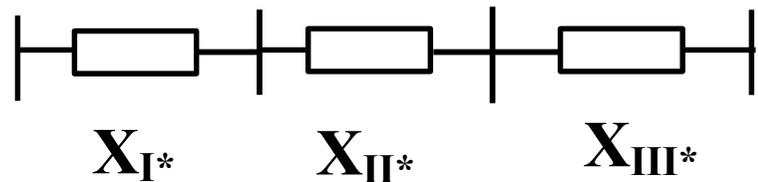
$$X_{I*} = X_I \cdot \frac{S_B}{U_{BI}^2}, \quad X_{II*} = X_{II} \cdot \frac{S_B}{U_{BII}^2}, \quad X_{III*} = X_{III} \cdot \frac{S_B}{U_{BIII}^2}$$

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



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

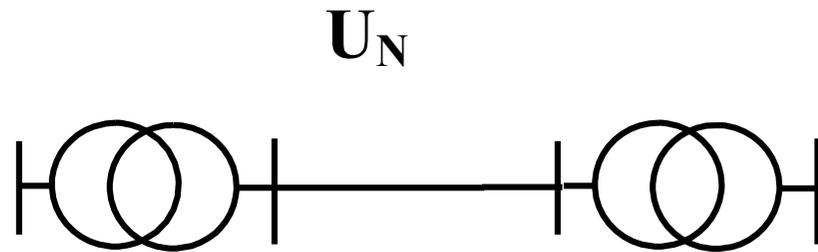
■ 说明:

- ◆ **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**, 做不到去掉变比
 - ◆ **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

- 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	$(242+220)/2=230$
110	$(121+110)/2=115$
10	$(11+10)/2=10.5$

- 返算有名值时，按各级相应的 U_{av} 返算。



3、近似算法

- 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：
$$X_{*a} = X_{*N} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} / \frac{U_{av}^2}{S_B} = X_{*N} \cdot \frac{S_B}{S_N}$$

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

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



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
- ◆ 对称三相电路的计算与单相计算一致
- ◆ 多电压级网，基准电压选择恰当可消除变压器

■ 缺点：无量纲、物理概念不如有名值清楚。