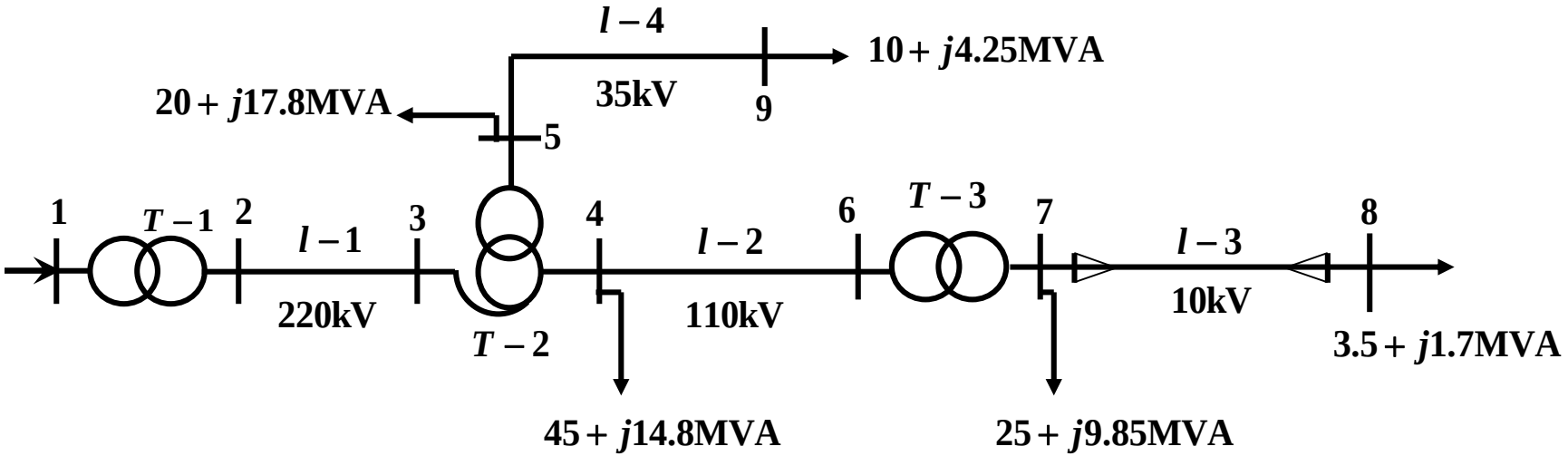
电力系统分析

—第4章— 电力系统元件数学模型
——电力网

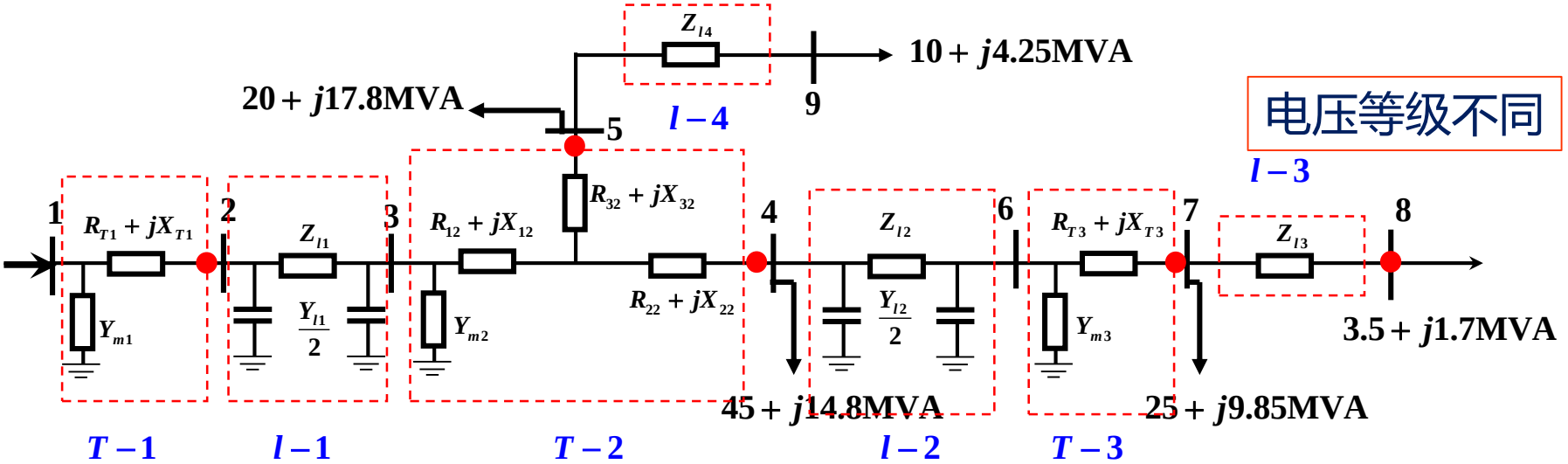
主讲教师：符玲

西南交通大学　　电气工程学院

➢引例：


l – 4
35kV
10 + j4.25MVA
20 + j17.8MVA
9
5
1
T – 1
2
l – 1
220kV
3
4
T – 2
6
T – 3
7
l – 2
110kV
l – 3
10kV
8
3.5 + j1.7MVA
45 + j14.8MVA
25 + j9.85MVA

电力网等值电路


Z_{l4}
10 + j4.25MVA
20 + j17.8MVA
9
5
l – 4
电压等级不同
l – 3
1
$R_{T1} + jX_{T1}$
2
Z_{l1}
3
$R_{12} + jX_{12}$
$R_{32} + jX_{32}$
4
Z_{l2}
6
$R_{T3} + jX_{T3}$
7
Z_{l3}
8
Y_{m1}
$\frac{Y_{l1}}{2}$
Y_{m2}
$R_{22} + jX_{22}$
$\frac{Y_{l2}}{2}$
Y_{m3}
3.5 + j1.7MVA
45 + j14.8MVA
25 + j9.85MVA
T – 1
l – 1
T – 2
l – 2
T – 3

西南交通大学
Southwest Jiaotong University

-第4章- 电力系统元件数学模型——电力网

-第4.1节- 多电压等级电力网等值电路

-第4.2节- 有名制

-第4.3节- 标幺制

-第4.4节- 具有非标准变比变压器的等值电路

-第4.1节- 多电压等级电力网等值电路

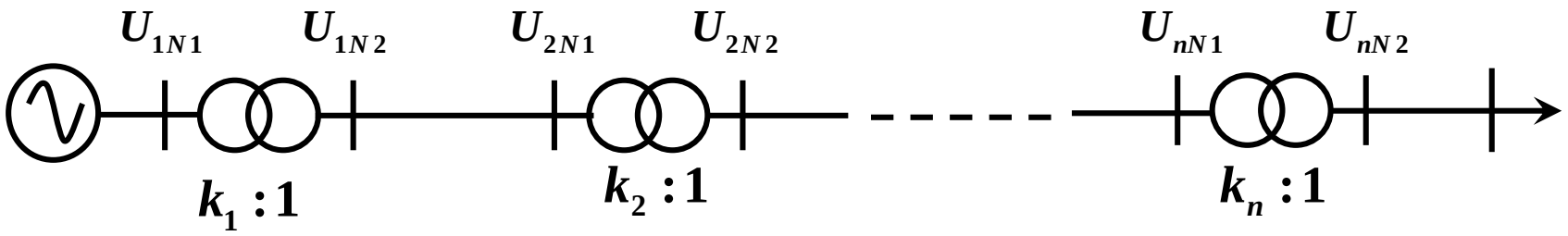
西南交通大学 Southwest Jiaotong University

- **电力网等值电路**：
  - 电力系统稳态分析时，同步发电机、调相机和无功补偿器作为向电网提供有功和无功的电源处理；
  - 负荷均用有功和无功功率表示，电力网用单相等值电路描述；
  - 根据电气接线图，将各元件用相应的等值电路表示，即可得该电力网等值电路；
  - 因计算内容和要求的不同，元件的某些参数可以略去，例如，35kV及以下电压等级线路的等值电路就只用一个串联阻抗等值。

所有参数和变量均归算到某统一的电压等级

-第4.1节- 多电压等级电力网等值电路

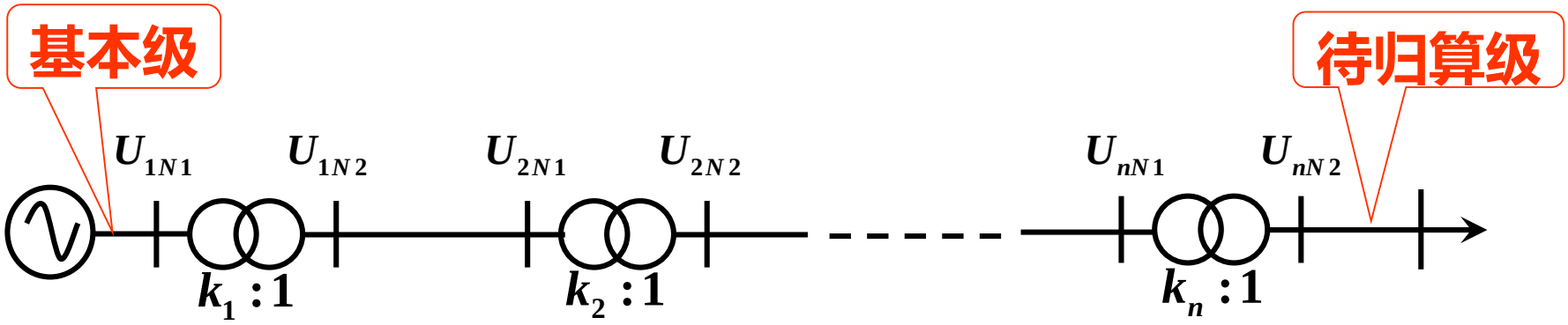
➢参数和变量的归算



- 多电压等级电力系统的等值电路中，各元件电气参数(阻抗、导纳等)和变量(功率、电压、电流等)必须归算到某给定的电压级，即**基本级**(或基准级)，其它电压级为待归算级。
- 变压器参数可归算到它的任一侧，而归算到不同侧用到的变压器额定电压是不相同的。
- 经过归算，得到网络各元件之间只有电的联系、没有磁联系的等值网络。

-第4.1节- 多电压等级电力网等值电路

➢用有名制表示的等值网络



- 设某待归算级与基本级之间有 ***n*** 台变压器，其**实际变比**为:

$$k_1, k_2, \cdots, k_n$$

$$k_n = U_{nN1}/U_{nN2} = \frac{\text{靠近基本级侧额定电压}}{\text{靠近待归算级侧额定电压}}$$

-第4.1节- 多电压等级电力网等值电路

- 设待归算级的阻抗、导纳、电压、电流分别为Z、Y、U、I，归算到基本级后的参数表示为Z'、Y'、U'、I'，则二者的关系为：

$$U' = U\left(k_1 k_2 \cdots k_n\right) \qquad I' = I\Big/\left(k_1 k_2 \cdots k_n\right)$$

$$Z' = Z\left(k_1 k_2 \cdots k_n\right)^2 \qquad Y' = Y\Big/\left(k_1 k_2 \cdots k_n\right)^2$$

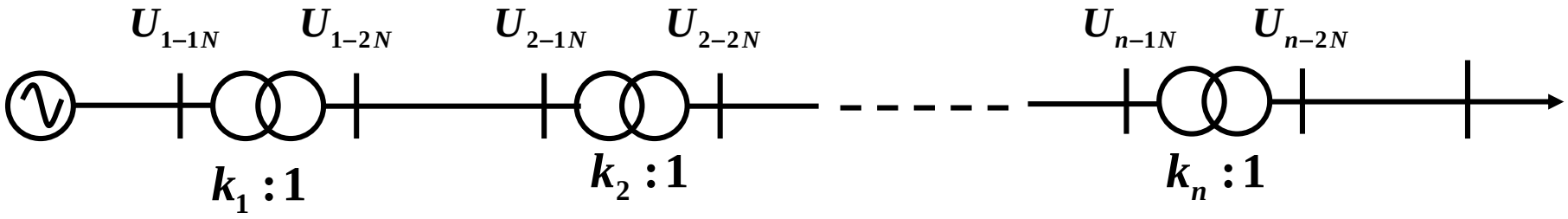
- 因为$\sqrt{3}\dot{U}\dot{I}^* = \sqrt{3}\dot{U}'\dot{I}'^*$，所以功率(S、P、Q)归算值不变。

- 归算中各变压器变比要用实际变比。因此，当变压器的高压侧切换到某分接头运行时，要用该分接头的空载电压计算变比。

- 当某些变压器的分接头改变时，等值电路中与该变比相关的一批参数/变量都要重新归算。

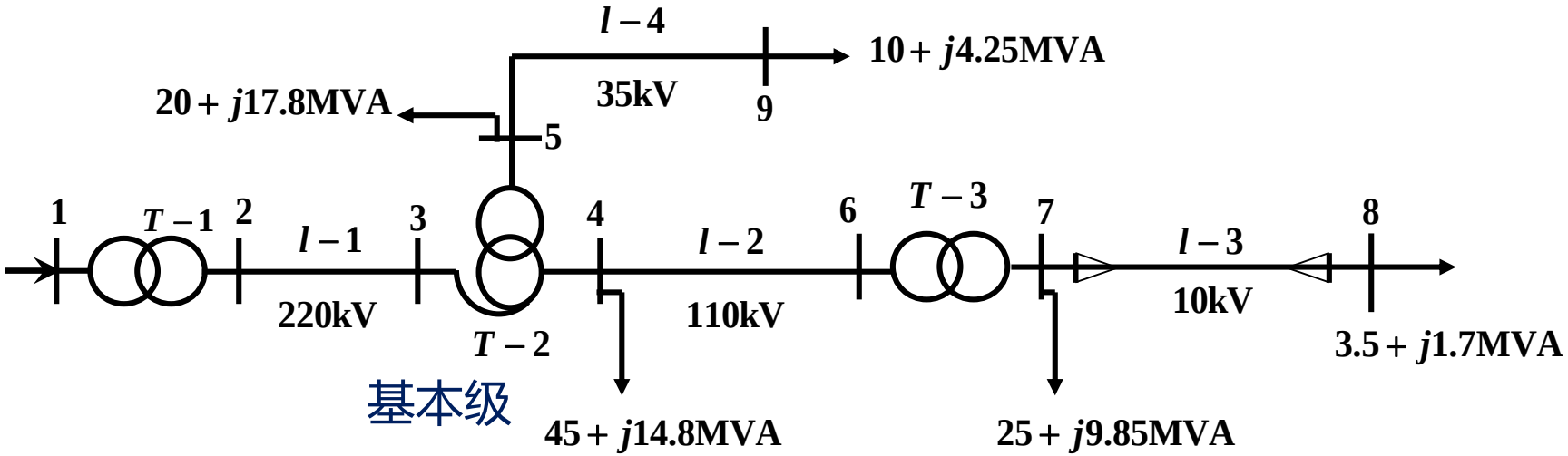
-第4.2节- 有名制

- 电力网不同量纲的物理量：**功率、电压、电流、阻抗和导纳。**
- **有名制：**系统所有参数和变量都以有名单位表示。
- **标幺制**：系统中所有的电气**参数**(阻抗、导纳等)和**变量**(功率、电压、电流等)都用与它们**同名基准值相对的比值**表示，因此没有单位。

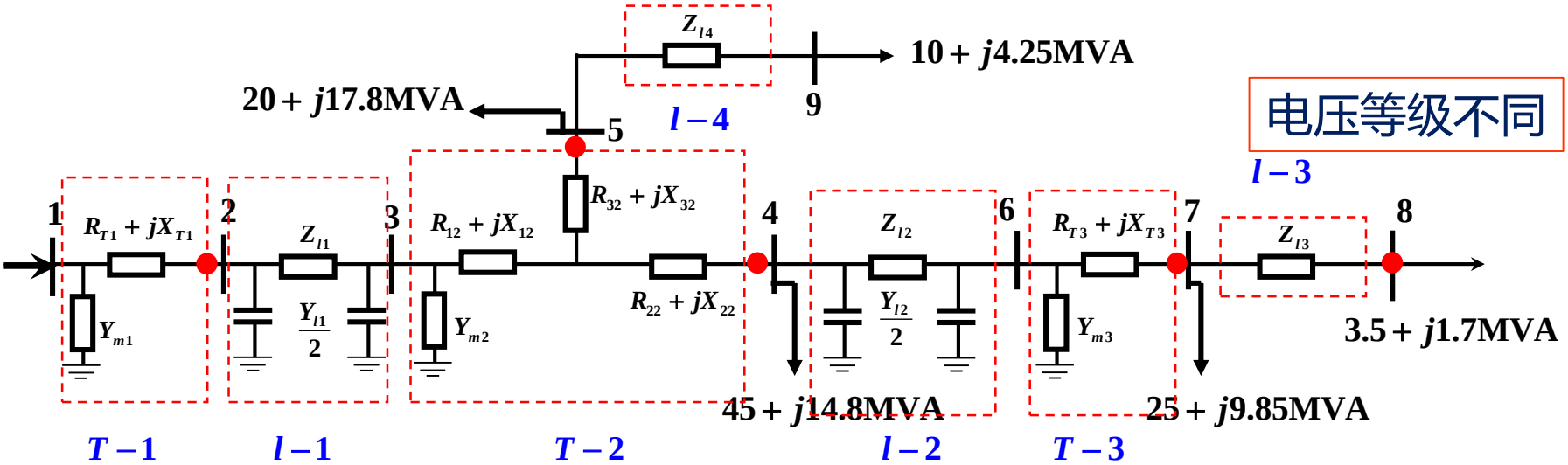


由于变压器的存在，在求多电压级电力系统的等值电路时，各元件参数、各节点电压、各支路电流均要归算到某一电压级，即基本级或基准级。

-第4.2节- 有名制



电力网等值电路



-第4.2节- 有名制

西南交通大学 Southwest Jiaotong University

- 电力线路技术参数

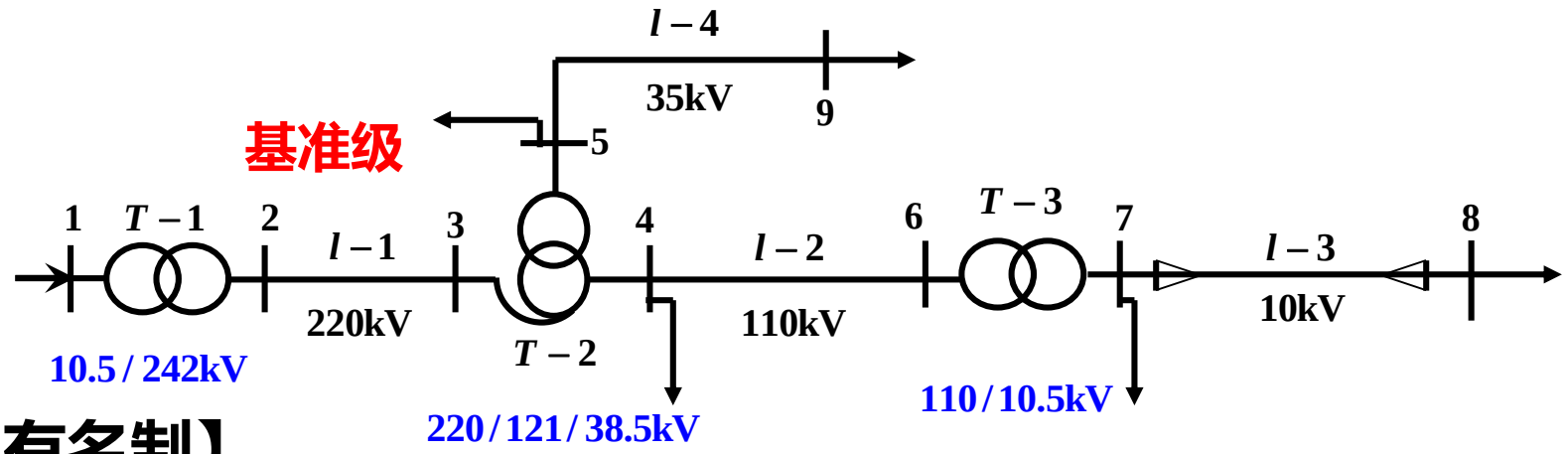
	额定电压(kV)	电阻(Ω/km)	电抗(Ω/km)	电纳(S/km)	长度(km)
L1	220	0.080	0.406	2.81×10^{-6}	150
L2	110	0.105	0.383	2.98×10^{-6}	60
L3	10	0.45	0.080	----	2.5
L4	35	0.17	0.38	----	13

- 变压器技术参数

	额定容量(MVA)	额定电压(kV)	$U_k\%$	P_k(kW)	$I_0\%$	P_0(kW)
T1	180	13.8/242	13	893	0.5	175
T3	63	110/10.5	10.5	280	0.61	60
T2	120	220/121/38.5	9.6(高-中) 35 (高-低) 23 (中-低) 已归算	448 (高-中) 1652 (高-低) 1512 (中-低) 已归算	0.35	89

- **注：T2高压侧接在-2.5%分接头运行**

-第4.2节- 有名制



【有名制】

基准级220kV侧

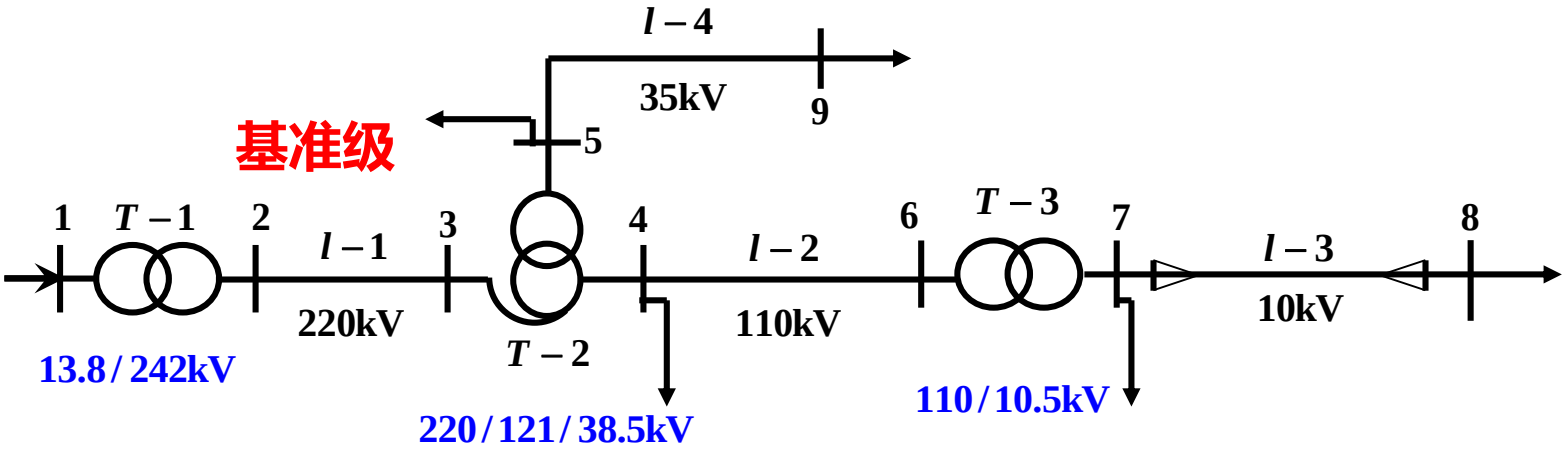
T1: $R_{T1}=\frac{P_k}{1000}\frac{U_{1N}^2}{S_N^2}=\frac{893}{1000}\frac{242^2}{180^2}=1.614\Omega$

$$X_{T1}=\frac{U_k\%}{100}\frac{U_{1N}^2}{S_N}=\frac{13}{100}\frac{242^2}{180^2}=42.3\Omega$$

$$Y_{m1}=\frac{P_0}{1000U_{1N}^2}-j\frac{I_0\%}{100}\frac{S_N}{U_{1N}^2}=\frac{175}{1000\times242^2}-j\frac{0.5}{100}\frac{180}{242^2}$$

$$=(2.99-j15.37)\times10^{-6}\,S$$

-第4.2节- 有名制



L1: $Z_{l1} = (r_1 + jx_1)l = (0.08 + j0.406) \times 150 = 12 + j60.9\Omega$

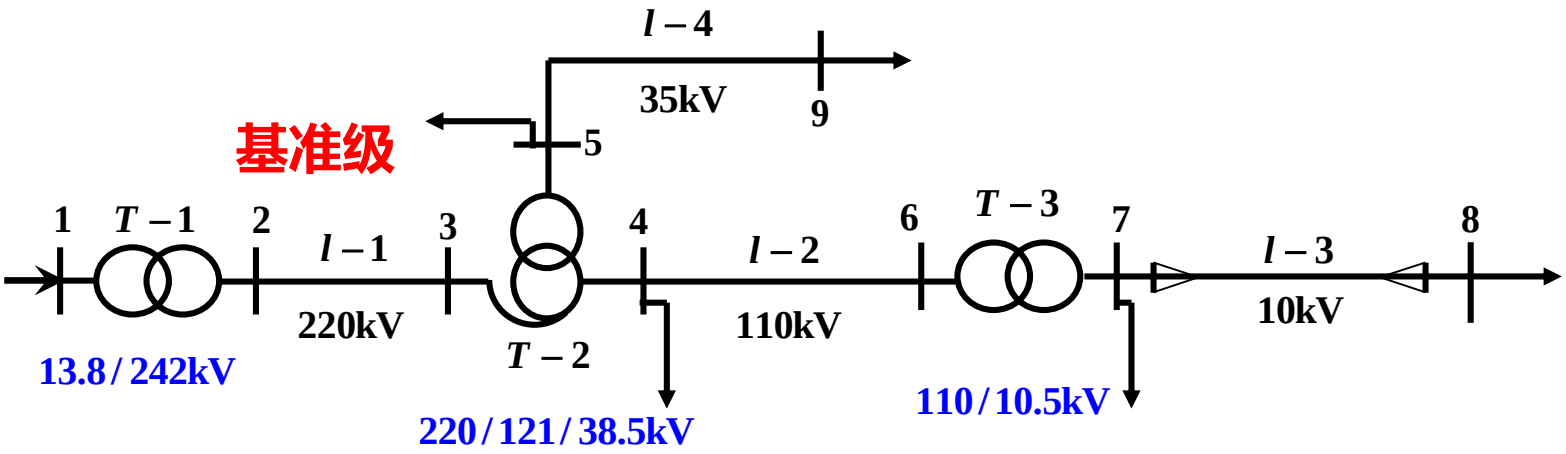
$Y_{l1}/2 = jb_1 l/2 = j2.81 \times 10^{-6} \times 150/2 = j2.11 \times 10^{-4} S$

T2:

$$P_{k1} = 0.5(P_{k1-2} + P_{k1-3} - P_{k2-3}) = 0.5(448 + 1625 - 1512) = 294\text{kW}$$
$$P_{k2} = 0.5(P_{k1-2} + P_{k2-3} - P_{k1-3}) = 0.5(448 + 1512 - 1625) = 154\text{kW}$$
$$P_{k3} = 0.5(P_{k1-3} + P_{k2-3} - P_{k1-2}) = 0.5(1625 + 1512 - 448) = 1358\text{kW}$$

$$U_{k1}\% = 0.5(U_{k1-2}\% + U_{k1-3}\% - U_{k2-3}\%) = 0.5(9.6 + 35 - 23) = 10.8$$
$$U_{k2}\% = 0.5(U_{k1-2}\% + U_{k2-3}\% - U_{k1-3}\%) = 0.5(9.6 + 23 - 35) = -1.2$$
$$U_{k3}\% = 0.5(U_{k1-3}\% + U_{k2-3}\% - U_{k1-2}\%) = 0.5(35 + 23 - 9.6) = 24.2$$

-第4.2节- 有名制



T2：高压侧接在-2.5%分接头运行 $220(1-0.025)=214.5$

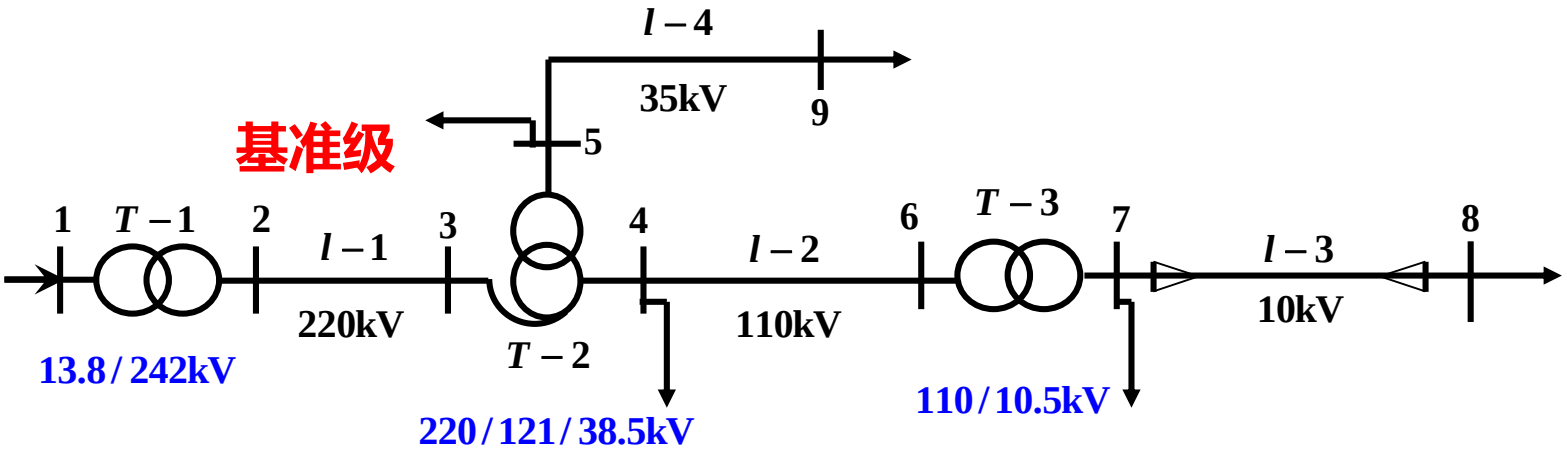
$$R_{21}=\frac{P_{k1}}{1000}\frac{U_{1N}^2}{S_N^2}=\frac{294}{1000}\frac{214.5^2}{120^2}=0.988\Omega \qquad X_{21}=\frac{U_{k1}\%}{100}\times\frac{U_{1N}^2}{S_N}=\frac{10.8}{100}\frac{214.5^2}{120}=43.6\Omega$$

$$R_{22}=\frac{P_{k2}}{1000}\frac{U_{1N}^2}{S_N^2}=\frac{154}{1000}\frac{214.5^2}{120^2}=0.517\Omega \qquad X_{22}=\frac{U_{k2}\%}{100}\times\frac{U_{1N}^2}{S_N}=\frac{-1.2}{100}\frac{214.5^2}{120}=-4.84\Omega$$

$$R_{23}=\frac{P_{k3}}{1000}\frac{U_{1N}^2}{S_N^2}=\frac{1358}{1000}\frac{214.5^2}{120^2}=4.56\Omega \qquad X_{23}=\frac{U_{k3}\%}{100}\times\frac{U_{1N}^2}{S_N}=\frac{24.2}{100}\frac{214.5^2}{120}=97.6\Omega$$

$$Y_{m2}=\frac{P_0}{1000U_{1N}^2}-j\frac{I_0\%}{100}\frac{S_N}{U_{1N}^2}=\frac{89}{1000\times214.5^2}-j\frac{0.35}{100}\frac{120}{214.5^2}=(1.84-j8.68)\times10^{-6}\,S$$

-第4.2节- 有名制



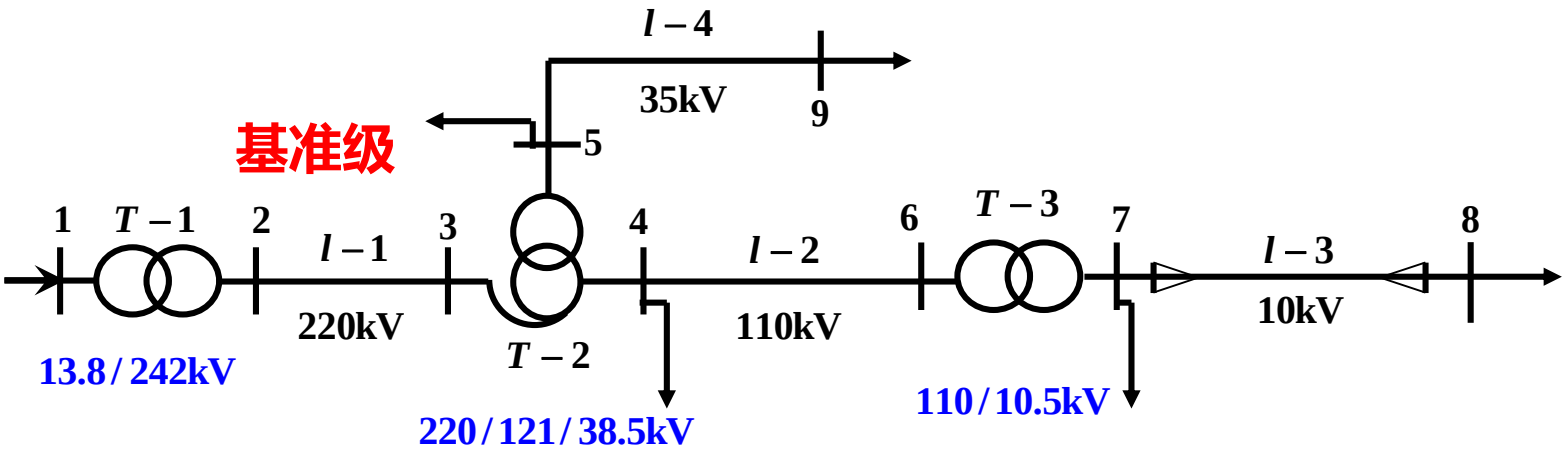
T2高压侧接在-2.5%分接头运行

实际变比： $k_{12}=\dfrac{220(1-0.025)}{121}=\dfrac{214.5}{121}, k_{13}=\dfrac{214.5}{38.5}$

l2： $Z_{l2}=(0.105+j0.383)\times 60\times\left(\dfrac{214.5}{121}\right)^2=19.8+j72.2\Omega$

$$Y_{l2}/2=j2.98\times10^{-6}\times\frac{60}{2}\Big/\left(\frac{214.5}{121}\right)^2=j2.84\times10^{-4}S$$

-第4.2节- 有名制

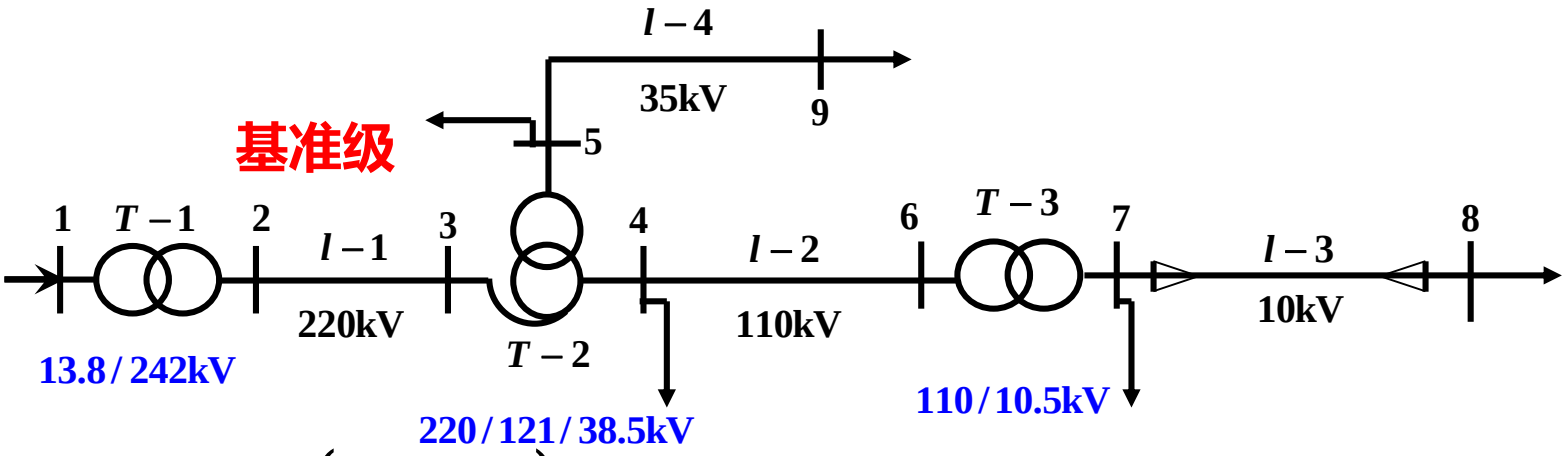


T2高压侧接在-2.5%分接头运行

实际变比： $k_{12}=\dfrac{220(1-0.025)}{121}=\dfrac{214.5}{121}, k_{13}=\dfrac{214.5}{38.5}$

$l4$： $Z_{l4}=(0.17+j0.38)\times 13\times\left(\dfrac{214.5}{38.5}\right)^2=68.6+j153.3\Omega$

-第4.2节- 有名制



T2 $$k_{12}=\frac{220\left(1-0.025\right)}{121}=\frac{214.5}{121}$$

T3: $$R_{T3}=\frac{280}{1000}\frac{110^2}{63^2}\left(\frac{214.5}{121}\right)^2=2.68\Omega$$

$$X_{T3}=\frac{10.5}{100}\frac{110^2}{63^2}\left(\frac{214.5}{121}\right)^2=63.4\Omega$$

$$Y_{m3}=\left(\frac{60}{1000\times110^2}-j\frac{0.61}{100}\frac{63}{110^2}\right)\left(\frac{121}{214.5}\right)^2=\left(1.58-j10.1\right)\times10^{-6}S$$

***l*3:** $$Z_{l3}=\left(0.45+j0.08\right)\times2.5\times\left(\frac{214.5}{121}\times\frac{110}{10.5}\right)^2=388+j69\Omega$$

-第4.3节- 标幺制

- **标幺值**：系统中所有的电气**参数**(阻抗、导纳等)和**变量**(功率、电压、电流等)都用与它们**同名基准值相对的比值**表示，即：

$$\text{标幺值} = \frac{\text{实际有名值(任意单位)}}{\text{基准值(与有名值单位相同)}}$$

  - 注：基准值一般为实数

- 标幺值没有单位，如电压U = 200kV，若电压的基准值取U_B=220kV，则标幺值为：

$$U_* = \frac{U}{U_B} = \frac{200kV}{220kV} = 0.909$$

-第4.3节- 标幺制

➢单相电路

- 单相电路中不同量纲的物理量有 **5** 种，即**单相功率**、**相电压**、**电流**、**阻抗**、**导纳**。所以要指定5个基准值，即$S_{\varphi B}$、$U_{\varphi B}$、I_B、Z_B、Y_B。
- 有名值满足方程

$$\begin{aligned} S_\varphi &= U_\varphi I \\ U_\varphi &= IZ \\ Y &= 1/Z \end{aligned}$$

基准值是有名值，应满足有名值方程

$$\begin{aligned} S_{\varphi B} &= U_{\varphi B} I_B \\ U_{\varphi B} &= I_B Z_B \\ Y_B &= 1/Z_B \end{aligned}$$

- 为使基准值满足有名值方程，单相电路的5个基准值只有2个可任意指定，其余由 3 个由约束方程确定。习惯上指定：单相功率基准值$S_{\varphi B}$和相电压基准值$U_{\varphi B}$。

-第4.3节- 标幺制

- **单相电路基准值**之间的约束关系，用$S_{\varphi B}$和$U_{\varphi B}$表示I_B、Z_B和Y_B，则可得：

$$I_B = \frac{S_{\varphi B}}{U_{\varphi B}}$$

$$Z_B = \frac{U_{\varphi B}}{I_B} = \frac{U_{\varphi B}^2}{S_{\varphi B}}$$

$$Y_B = \frac{1}{Z_B} = \frac{S_{\varphi B}}{U_{\varphi B}^2}$$

-第4.3节- 标幺制

- **单相电路**的标幺值表示：

$$S_\varphi = U_\varphi I$$
$$U_\varphi = IZ$$
$$Y = 1/Z$$

$$S_{\varphi B} = U_{\varphi B} I_B$$
$$U_{\varphi B} = I_B Z_B$$
$$Y_B = 1/Z_B$$

$$\frac{S_\varphi}{S_{\varphi B}} = \frac{U_\varphi}{U_{\varphi B}} \cdot \frac{I}{I_B}$$
$$\frac{U_\varphi}{U_{\varphi B}} = \frac{I}{I_B} \cdot \frac{Z}{Z_B}$$
$$\frac{Y}{Y_B} = \frac{Z_B}{Z}$$

$$S_{\varphi *} = U_{\varphi *} I_*$$
$$U_{\varphi *} = I_* Z_*$$
$$Y_* = 1/Z_*$$

-第4.3节- 标幺制

- 单相电路中各物理量的标幺值计算方法：

$$\tilde{S}_{\varphi *}=\frac{\tilde{S}_{\varphi}}{S_{\varphi B}}=\frac{P_{\varphi}+jQ_{\varphi}}{S_{\varphi B}}=P_{\varphi *}+\mathrm{j}Q_{\varphi *}$$

$$\dot{U}_{\varphi *}=\frac{\dot{U}_{\varphi}}{U_{\varphi B}}=\frac{U_{\varphi}\angle\alpha}{U_{\varphi B}}=U_{\varphi *}\angle\alpha$$

$$\dot{I}_{*}=\frac{\dot{I}}{I_{B}}=\frac{U_{\varphi B}\dot{I}}{S_{\varphi B}}$$

$$Z_{*}=\frac{Z}{Z_{B}}=\frac{R+jX}{Z_{B}}=\left(R+jX\right)\frac{S_{\varphi B}}{U_{\varphi B}^{2}}=R_{*}+\mathrm{j}X_{*}$$

$$Y_{*}=\frac{Y}{Y_{B}}=\frac{G+jB}{Y_{B}}=\left(G+jB\right)\frac{U_{\varphi B}^{2}}{S_{\varphi B}}=G_{*}+jB_{*}$$

-第4.3节- 标幺制

- **举例：**
  - 若有名值方程为：

$$\dot{E}_{\varphi} = \dot{U}_{\varphi} + \dot{I}_1\left(r + jx\right) - \dot{I}_2 Z$$

有名值方程和标幺值方程**形式相同**

  - 则标幺值方程为：

$$\dot{E}_{\varphi *} = \frac{\dot{E}_{\varphi}}{U_{\varphi B}} = \frac{\dot{U}_{\varphi}}{U_{\varphi B}} + \frac{\dot{I}_1}{I_B}\left(\frac{r}{Z_B} + j\frac{x}{Z_B}\right) - \frac{\dot{I}_2}{I_B}\frac{Z}{Z_B}$$

$$\dot{E}_{\varphi *} = \dot{U}_{\varphi *} + \dot{I}_{1*}\left(r_* + jx_*\right) - \dot{I}_{2*} Z_*$$

- 可以证明，在**5个基准值**满足上述约束条件的情况下，单相电路的其它方程**标幺值形式**与**有名值形式**完全相同。

-第4.3节- 标幺制

➢三相电路

- 三相电路中不同量纲的物理量还是 5 种，但常用的物理量有 7 个，即**三相功率**、**单相功率**、**线电压**、**相电压**、**电流**、**阻抗**、**导纳**。所以要指定7个基准值，即S_B、$S_{\varphi B}$、U_B、$U_{\varphi B}$、I_B、Z_B、Y_B。
- 三相功率、线电压、线电流、阻抗、导纳有名值满足方程：

$$S = 3S_\varphi = 3U_\varphi I = \sqrt{3}UI$$

$$U = \sqrt{3}U_\varphi = \sqrt{3}IZ$$

$$Y = 1/Z$$

$$S = \sqrt{3}UI$$

$$U = \sqrt{3}IZ$$

$$Y = 1/Z$$

-第4.3节- 标幺制

- 基准值也满足相应的有名值方程：

$$S_B = 3S_{\varphi B} = 3U_{\varphi B} I_B = \sqrt{3} U_B I_B$$
$$U_B = \sqrt{3} U_{\varphi B} = \sqrt{3} I_B Z_B$$
$$Y_B = 1/Z_B$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\begin{aligned} S_B &= \sqrt{3} U_B I_B \\ U_B &= \sqrt{3} I_B Z_B \\ Y_B &= 1/Z_B \end{aligned}}$$

- **三相电路基准值**之间的约束关系：

$$\boxed{\begin{aligned} S_B &= 3S_{\varphi B}, \quad & S_{\varphi B} &= U_{\varphi B} I_B \\ U_B &= \sqrt{3} U_{\varphi B}, \quad & U_{\varphi B} &= I_B Z_B \\ Y_B &= 1/Z_B \end{aligned}}$$

-第4.3节- 标幺制

- 三相电路的7个基准值只有2个可任意指定，其余5个由约束方程确定。习惯上指定：三相功率基准值S_B和线电压基准值U_B。

S_B通常取： S_B=100MVA或S_B=1000MVA

U_B通常取电力网的额定电压： $U_B = U_N$或 $U_B = 1.05U_N$(取整)

- 用S_B和U_B表示$S_{\varphi B}$、$U_{\varphi B}$、I_B、Z_B和Y_B，则可得：

$$S_{\varphi B} = \frac{S_B}{3}, \qquad U_{\varphi B} = \frac{U_B}{\sqrt{3}}$$

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B}$$

$$Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3}I_B} = \frac{U_B^2}{S_B}, \qquad Y_B = \frac{1}{Z_B} = \frac{S_B}{U_B^2}$$

-第4.3节- 标幺制

- 三相系统的标幺值：

$$U_* = \frac{U}{U_B} = \frac{\sqrt{3}U_\varphi}{\sqrt{3}U_{\varphi B}} = \frac{U_\varphi}{U_{\varphi B}} = U_{\varphi *} = I_* Z_*$$

- 结论1

线电压标幺值和相电压标幺值相等

$$S_* = \frac{\sqrt{3}UI}{\sqrt{3}U_B I_B} = \frac{U}{U_B} \cdot \frac{I}{I_B} = U_* I_* = U_{\varphi *} I_* = S_{\varphi *}$$

- 结论2

三相功率标幺值与单相功率标幺值相等

$$Y_* = \frac{Y}{Y_B} = \frac{1/Z}{1/Z_B} = \frac{1}{Z/Z_B} = 1/Z_*$$

- 注意：不同基准的标幺值必须归算到统一的基准值下，先还原为有名值，再计算新基准值下的标幺值。因为各电力元件一般都是以自身容量和额定电压为基准给出标幺值，而建立等值电路时各电力元件参数均应有统一的基准值。

-第4.3节- 标幺制

- 三相电路中各物理量的标幺值计算方法如下：

$$\tilde{S}_* = \frac{\tilde{S}}{S_B} = \frac{P + jQ}{S_B} = P_* + \mathrm{j}Q_*$$

$$\tilde{S}_{\varphi *} = \frac{\tilde{S}_\varphi}{S_{\varphi B}} = \frac{P_\varphi + jQ_\varphi}{S_{\varphi B}} = P_{\varphi *} + \mathrm{j}Q_{\varphi *}$$

$$= \frac{3P_\varphi + j3Q_\varphi}{S_B} = \frac{P + jQ}{S_B} = P_* + \mathrm{j}Q_* \equiv \tilde{S}_*$$

$$\dot{U}_* = \frac{\dot{U}}{U_B}, \quad \dot{U}_{\varphi *} = \frac{\sqrt{3}\dot{U}_\varphi}{U_B} = \frac{\dot{U}}{U_B} \equiv \dot{U}_*, \quad \dot{I}_* = \frac{\dot{I}}{I_B} = \frac{\sqrt{3}U_B\dot{I}}{S_B}$$

$$Z_* = \frac{Z}{Z_B} = \frac{R + jX}{Z_B} = (R + jX)\frac{S_B}{U_B^2} = R_* + \mathrm{j}X_*$$

$$Y_* = \frac{Y}{Y_B} = \frac{G + jB}{Y_B} = (G + jB)\frac{U_B^2}{S_B} = G_* + jB_*$$

-第4.3节- 标幺制

➢电力网等值电路的标幺值计算

➢ 方法1：

(1) 将各电压级的参数、变量有名值归算到基本级

(2) 用基本级的基准值计算各参数、变量的标幺值

- 设从基本级到某待归算级之间串联有n 台变比为k_1、k_2、…、k_n的变压器，该电压级的 $\dot{U}$、$\dot{I}$、Z、Y，有名值归算到基本级为 $\dot{U}'$、$\dot{I}'$、Z'、Y'，则其标幺值：

$$\begin{cases} \dot{U}_* = \dfrac{\dot{U}'}{U_B} = \dfrac{\dot{U}(k_1k_2k_3\cdots k_n)}{U_B}, \quad \dot{I}_* = \dfrac{\dot{I}'}{I_B} = \dfrac{\dot{I}/(k_1k_2k_3\cdots k_n)}{I_B} \\ Z_* = \dfrac{Z'}{Z_B} = \dfrac{Z(k_1k_2k_3\cdots k_n)^2}{Z_B}, \quad Y_* = \dfrac{Y'}{Y_B} = \dfrac{Y/(k_1k_2k_3\cdots k_n)^2}{Y_B} \end{cases}$$

- 所有参数、变量都按上述方法归算。

-第4.3节- 标幺制

➢ **方法2**:

(1) 将基本级基准值归算到待归算级

(2) 用归算到待归算级的基准值，用该待归算级中各未归算的有名值计算标幺值(就地标幺)

- 令 $U'_B = U_B / (k_1 k_2 k_3 \cdots k_n)$，则:

$$\begin{cases} I'_B = I_B (k_1 k_2 k_3 \cdots k_n) \\ Z'_B = Z_B / (k_1 k_2 k_3 \cdots k_n)^2 \\ Y'_B = Y_B (k_1 k_2 k_3 \cdots k_n)^2 \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} I'_B = \dfrac{S_B}{\sqrt{3} U_B} (k_1 k_2 k_3 \cdots k_n) = \dfrac{S_B}{\sqrt{3} U'_B} \\ Z'_B = \dfrac{U_B^2}{S_B} \dfrac{1}{(k_1 k_2 k_3 \cdots k_n)^2} = \dfrac{U_B'^2}{S_B} \\ Y'_B = \dfrac{(k_1 k_2 k_3 \cdots k_n)^2}{Z_B} = \dfrac{1}{Z'_B} = \dfrac{S_B}{U_B'^2} \end{cases}$$

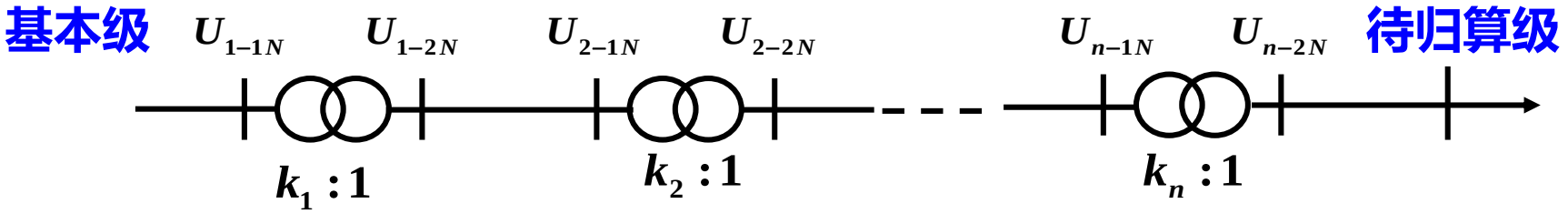
- 这称为基本级基准值归算到待归算级的基准值。

-第4.3节- 标幺制

- 按照“**方法2**”计算标幺值的公式可写为：

$$\begin{cases} \dot{U}_* = \dfrac{\dot{U}}{U'_B} = \dfrac{\dot{U}'}{U_B}, \quad \dot{I}_* = \dfrac{\dot{I}}{I'_B} = \dfrac{\dot{I}'}{I_B} \\ Z_* = \dfrac{Z}{Z'_B} = \dfrac{Z'}{Z_B}, \quad Y_* = \dfrac{Y}{Y'_B} = \dfrac{Y'}{Y_B} \end{cases}$$

-第4.3节- 标幺制



U_B, S_B 各侧基准值 $U_{B(L)}, S_{B(L)}$

$$U' = U\left(k_1 k_2 \cdots k_n\right) \qquad I' = I\Big/\left(k_1 k_2 \cdots k_n\right)$$

$$U_B = U_{B(L)}\left(k_1 k_2 \cdots k_n\right) \qquad I_B = I_{B(L)}\Big/\left(k_1 k_2 \cdots k_n\right)$$

$$S_B = S_{B(L)} \Leftarrow \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} = \left(\frac{S_{B(L)}}{\sqrt{3}U_{B(L)}}\right)\Big/\left(k_1 k_2 \cdots k_n\right)$$

即各侧的基准容量都相等而无需归算

-第4.3节- 标幺制

➢小结

- 通常选定三相功率和线电压作为基准值，其它基准值由这两个基准值计算出。
- **标幺制的特点**：

① 易于比较各元件的特性与参数

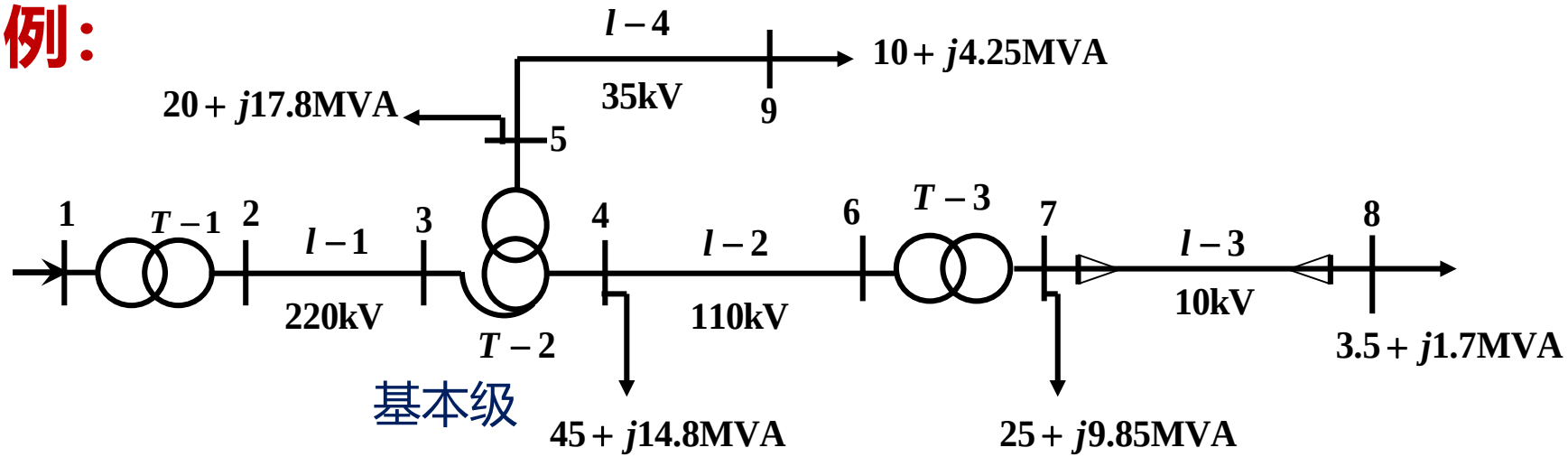
② 方便评估电压质量，判断计算的正确性

③ 能够简化计算公式，比如电压的标幺值一般在1.0左右

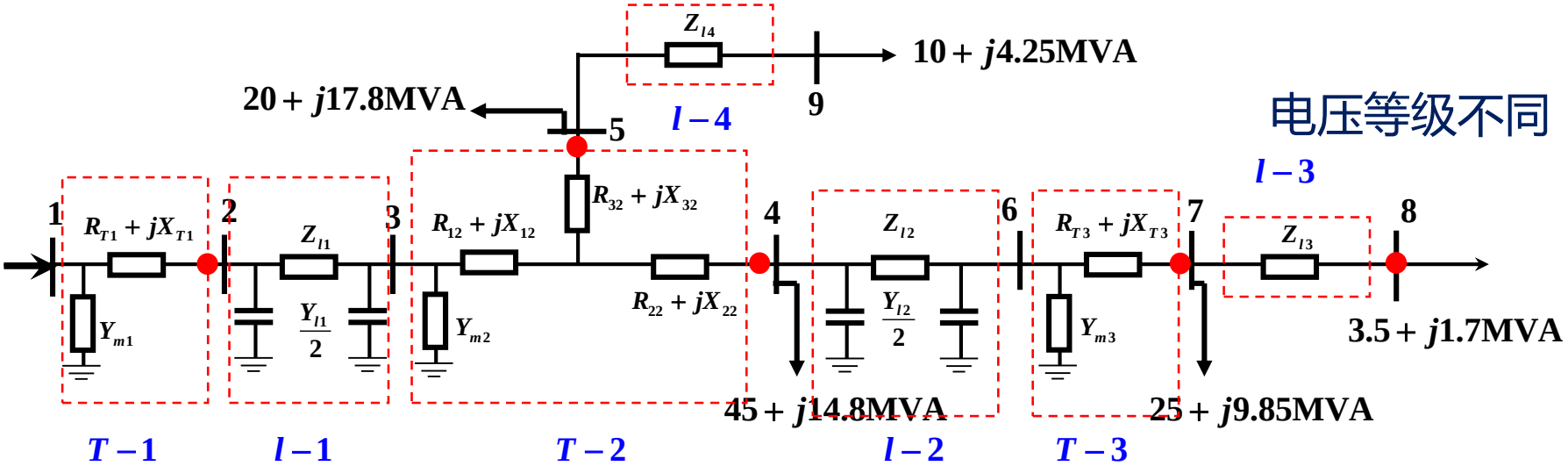
④ 没有量纲

-第4.3节- 标幺制

➢例：



电力网等值电路



-第4.3节- 标幺制

西南交通大学 Southwest Jiaotong University

- 电力线路技术参数

	额定电压(kV)	电阻(Ω/km)	电抗(Ω/km)	电纳(S/km)	长度(km)
L1	220	0.080	0.406	2.81×10^{-6}	150
L2	110	0.105	0.383	2.98×10^{-6}	60
L3	10	0.45	0.080	----	2.5
L4	35	0.17	0.38	----	13

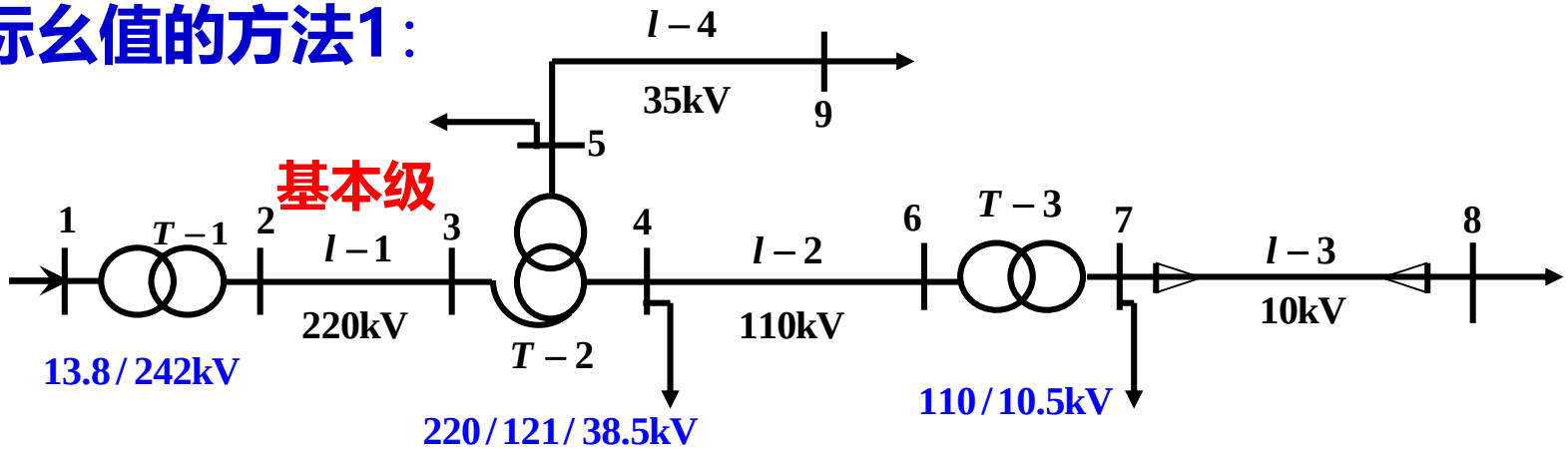
- 变压器技术参数

	额定容量(MVA)	额定电压(kV)	$U_k\%$	P_k(kW)	$I_0\%$	P_0(kW)
T1	180	13.8/242	13	893	0.5	175
T3	63	110/10.5	10.5	280	0.61	60
T2	120	220/121/38.5	9.6(高-中) 35 (高-低) 23 (中-低) 已归算	448 (高-中) 1652 (高-低) 1512 (中-低) 已归算	0.35	89

- **注：T2高压侧接在-2.5%分接头运行**

-第4.3节- 标幺制

➢ 求标幺值的方法1：



- 基本级的电压、容量基准值为：$U_B = 220\text{kV}$，$S_B = 100\text{MVA}$

T1:

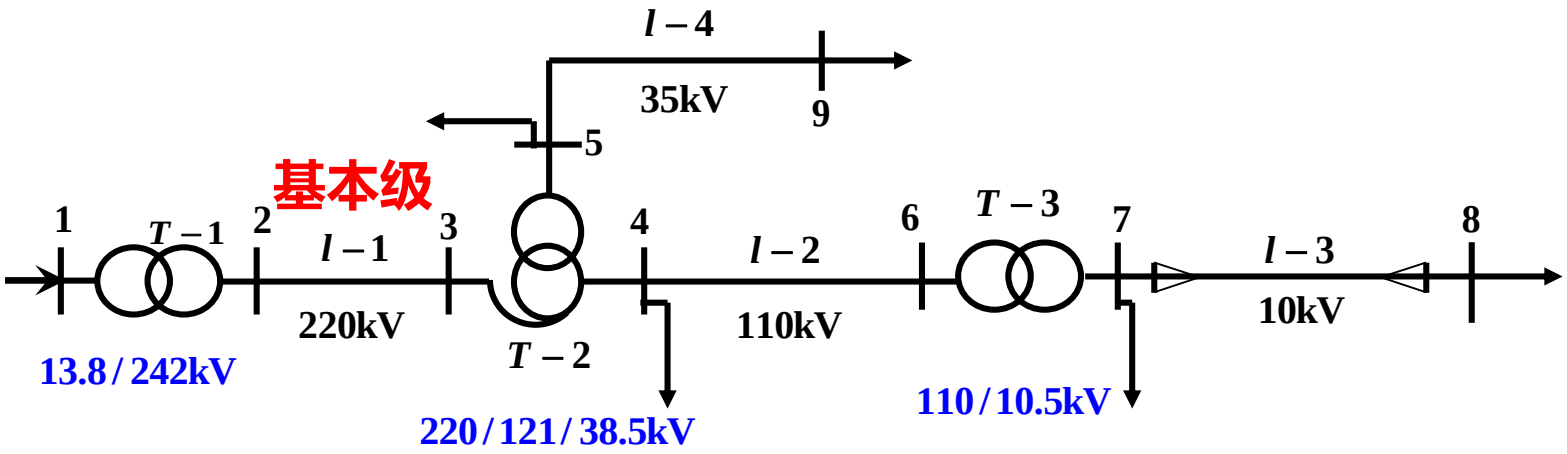
$$R_{T1*} = \frac{P_k U_{1N}^2}{1000 S_N^2} \times \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{893}{1000}\frac{242^2}{180^2} \times \frac{100}{220^2} = 0.00333$$

$$X_{T1*} = \frac{U_k\%}{100}\frac{U_{1N}^2}{S_N} \times \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{13}{100}\frac{242^2}{180} \times \frac{100}{220^2} = 0.0874$$

$$Y_{m1*} = \left(\frac{P_0}{1000 U_{1N}^2} - j\frac{I_0\%}{100}\frac{S_N}{U_{1N}^2}\right) \times \frac{U_B^2}{S_B} = \left(\frac{175}{1000 \times 242^2} - j\frac{0.5}{100}\frac{180}{242^2}\right) \times \frac{220^2}{100}$$

$$= (1.45 - j7.44) \times 10^{-3}$$

-第4.3节- 标幺制



L1:

$$Z_{l1^*} = (r_1 + jx_1)l \times \frac{S_B}{U_B^2} = (0.08 + j0.406) \times 150 \times \frac{100}{220^2}$$

$$= 0.0248 + j0.1258$$

$$Y_{l1^*}/2 = j\frac{b_1 l}{2} \times \frac{U_B^2}{S_B} = j2.81 \times 10^{-6} \times \frac{150}{2} \times \frac{220^2}{100} = j0.102$$

-第4.3节- 标幺制

T2:

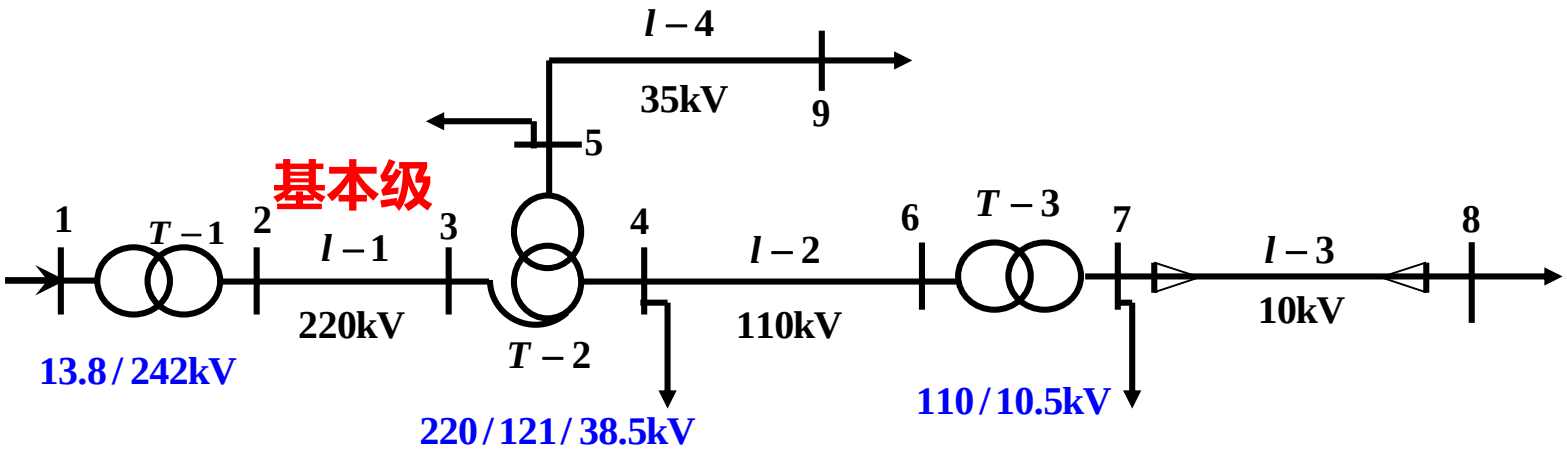
$$\begin{cases} R_{21*}=\dfrac{P_{k1}U_{1N}^2}{1000S_N^2}\times\dfrac{S_B}{U_B^2}=\dfrac{294}{1000}\dfrac{220^2}{120^2}\times\dfrac{100}{220^2}=0.00204 \\ R_{22*}=\dfrac{P_{k2}U_{1N}^2}{1000S_N^2}\times\dfrac{S_B}{U_B^2}=\dfrac{154}{1000}\dfrac{220^2}{120^2}\times\dfrac{100}{220^2}=0.00107 \\ R_{23*}=\dfrac{P_{k3}U_{1N}^2}{1000S_N^2}\times\dfrac{S_B}{U_B^2}=\dfrac{1358}{1000}\dfrac{220^2}{120^2}\times\dfrac{100}{220^2}=0.00943 \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_{21*}=\dfrac{U_{k1}\%}{100}\times\dfrac{U_{1N}^2}{S_N}\times\dfrac{S_B}{U_B^2}=\dfrac{10.8}{100}\dfrac{220^2}{120}\times\dfrac{100}{220^2}=0.09 \\ X_{22*}=\dfrac{U_{k2}\%}{100}\times\dfrac{U_{1N}^2}{S_N}\times\dfrac{S_B}{U_B^2}=\dfrac{-1.2}{100}\dfrac{220^2}{120}\times\dfrac{100}{220^2}=-0.01 \\ X_{23*}=\dfrac{U_{k3}\%}{100}\times\dfrac{U_{1N}^2}{S_N}\times\dfrac{S_B}{U_B^2}=\dfrac{24.2}{100}\dfrac{220^2}{120}\times\dfrac{100}{220^2}=0.202 \end{cases}$$

$$Y_{m2*}=\left(\frac{P_0}{1000U_{1N}^2}-j\frac{I_0\%}{100}\frac{S_N}{U_{1N}^2}\right)\times\frac{U_B^2}{S_B}$$

$$=\left(\frac{89}{1000\times220^2}-j\frac{0.35}{100}\frac{120}{220^2}\right)\times\frac{220^2}{100}=\left(0.89-j4.2\right)\times10^{-3}$$

-第4.3节- 标幺制



实际变比： $k_{12}=\dfrac{220(1-0.025)}{121}=\dfrac{214.5}{121}$，$k_{13}=\dfrac{214.5}{38.5}$

L2:

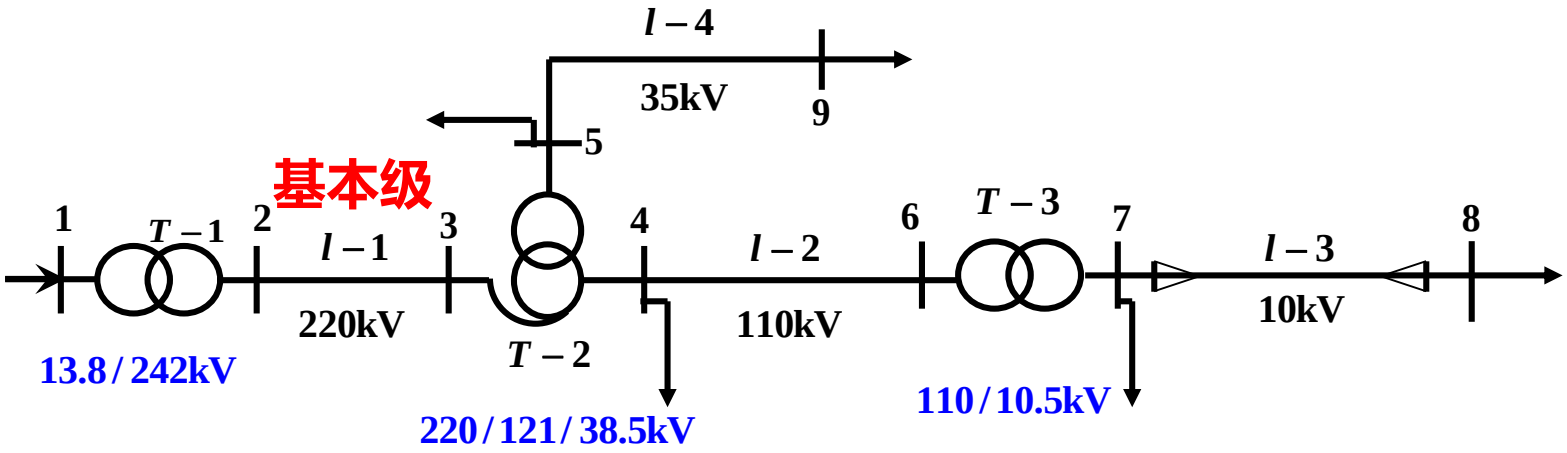
$$Z_{l2*}=(0.105+j0.383)\times 60\times(k_{12})^2\times\frac{100}{220^2}=0.0409+j0.1492$$

$$Y_{l2*}/2=j2.98\times10^{-6}\times\frac{60}{2}\times\left(\frac{1}{k_{12}}\right)^2\times\frac{220^2}{100}=j0.01377$$

L4:

$$Z_{l4*}=(0.17+j0.38)\times 13\times(k_{13})^2\times\frac{100}{220^2}=0.1416+j0.317$$

-第4.3节- 标幺制



T3:

$$R_{T3*}=\frac{280}{1000}\frac{110^2}{63^2}\times\left(k_{12}\right)^2\times\frac{100}{220^2}=0.00554$$

$$X_{T3*}=\frac{10.5}{100}\frac{110^2}{63}\times\left(k_{12}\right)^2\times\frac{100}{220^2}=0.1309$$

$$Y_{m3*}=\left(\frac{60}{1000\times110^2}-j\frac{0.61}{100}\frac{63}{110^2}\right)\times\left(\frac{1}{k_{12}}\right)^2\times\frac{220^2}{100}$$

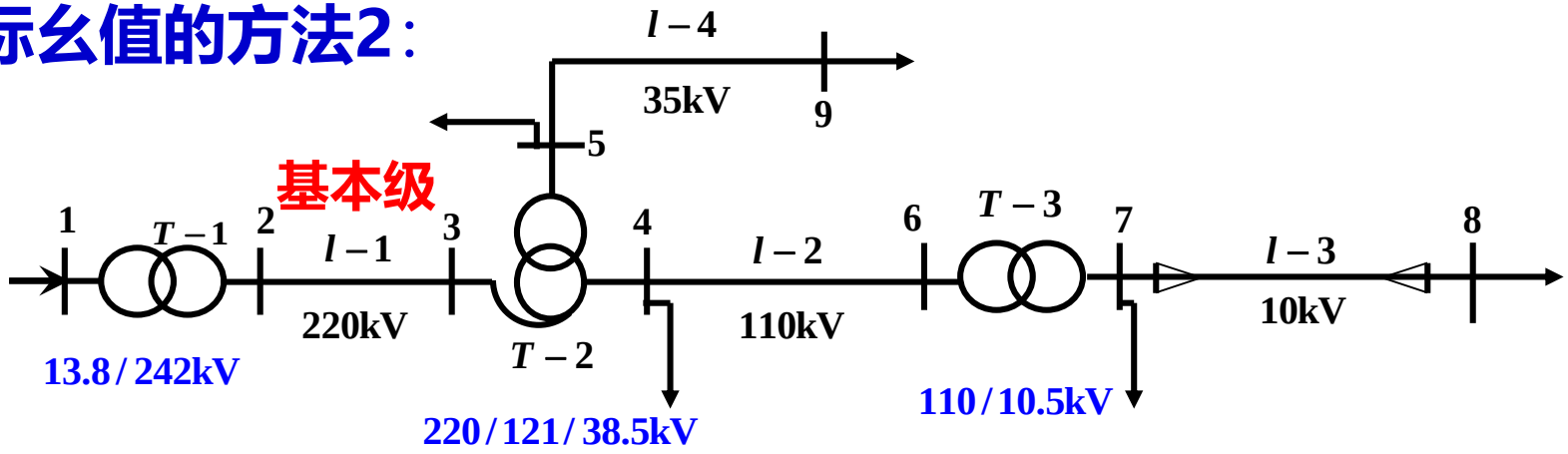
$$=\left(0.765-j4.89\right)\times10^{-3}$$

L3:

$$Z_{l3*}=\left(0.45+j0.08\right)\times2.5\times\left(k_{12}k_3\right)^2\times\frac{100}{220^2}=0.801+j0.1424$$

-第4.3节- 标幺制

➢ **求标幺值的方法2：**



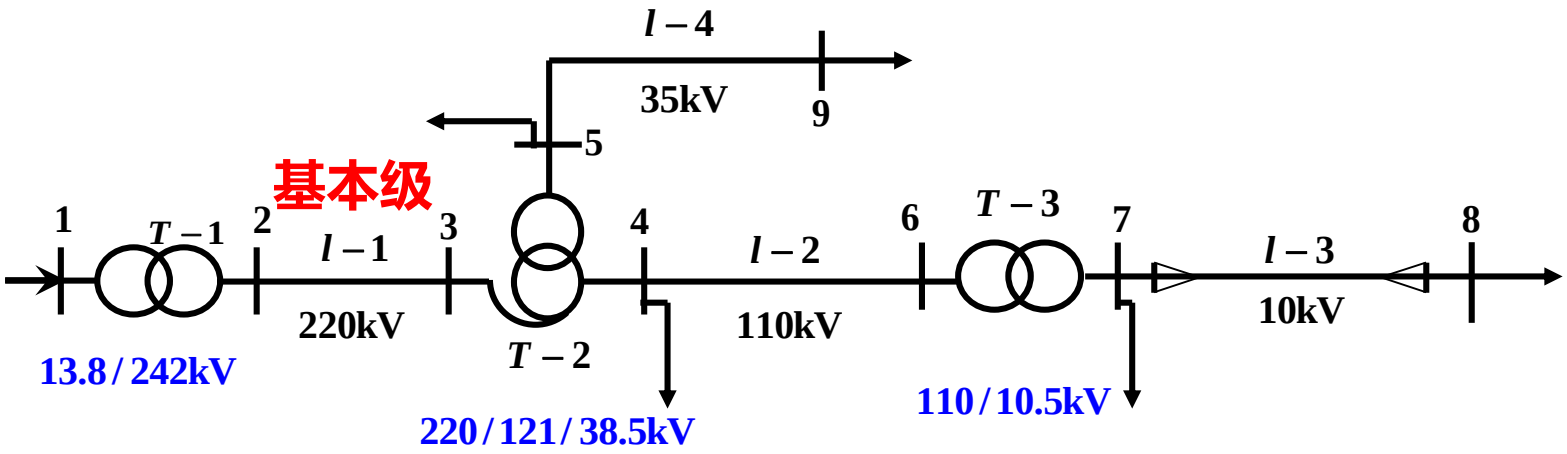
- 基本级电压为U_B = 220kV，S_B = 100MVA
- 先归算各电压等级的电压基准值

110kV级: $$U_{B(110)} = \frac{U_B}{k_{12(T2)}} = 220 \times \frac{121}{220(1-0.025)} = 124.1\text{kV}$$

35kV级: $$U_{B(35)} = \frac{U_B}{k_{13(T2)}} = 220 \times \frac{38.5}{220(1-0.025)} = 39.5\text{kV}$$

10kV级: $$U_{B(10)} = \frac{U_B}{k_{12(T2)}k_{T3}} = 220 \times \frac{121}{220(1-0.025)} \times \frac{10.5}{110} = 11.85\text{kV}$$

-第4.3节- 标幺制



T1:

$$R_{T1*}=\frac{P_k U_{1N}^2}{1000 S_N^2}\times\frac{S_B}{U_B^2}=\frac{893}{1000}\frac{242^2}{180^2}\times\frac{100}{220^2}=0.00333$$

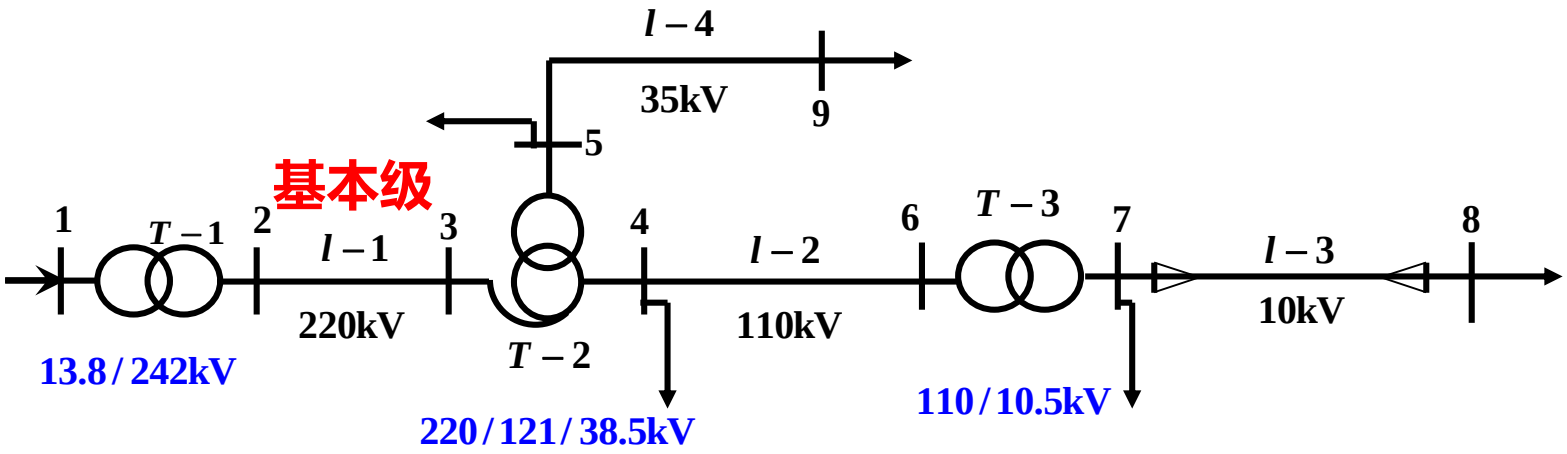
$$X_{T1*}=\frac{U_k\%}{100}\frac{U_{1N}^2}{S_N}\times\frac{S_B}{U_B^2}=\frac{13}{100}\frac{242^2}{180}\times\frac{100}{220^2}=0.0874$$

$$Y_{m1*}=\left(\frac{P_0}{1000U_{1N}^2}-j\frac{I_0\%}{100}\frac{S_N}{U_{1N}^2}\right)\times\frac{U_B^2}{S_B}=\left(\frac{175}{1000\times242^2}-j\frac{0.5}{100}\frac{180}{242^2}\right)\times\frac{220^2}{100}$$

$$=\left(1.45-j7.44\right)\times10^{-3}$$

和前面相同

-第4.3节- 标幺制



L1:

$$Z_{l1*} = (r_1 + jx_1)l \times \frac{S_B}{U_B^2} = (0.08 + j0.406) \times 150 \times \frac{100}{220^2}$$

$$= 0.0248 + j0.1258$$

$$Y_{l1*}/2 = j\frac{b_1 l}{2} \times \frac{U_B^2}{S_B} = j2.81 \times 10^{-6} \times \frac{150}{2} \times \frac{220^2}{100} = j0.102$$

和前面相同

-第4.3节- 标幺制

T2:

$$R_{21*}=\frac{P_{k1}U_{1N}^2}{1000S_N^2}\times\frac{S_B}{U_B^2}=\frac{294}{1000}\frac{220^2}{120^2}\times\frac{100}{220^2}=0.00204$$

$$R_{22*}=\frac{P_{k2}U_{1N}^2}{1000S_N^2}\times\frac{S_B}{U_B^2}=\frac{154}{1000}\frac{220^2}{120^2}\times\frac{100}{220^2}=0.00107$$

$$R_{23*}=\frac{P_{k3}U_{1N}^2}{1000S_N^2}\times\frac{S_B}{U_B^2}=\frac{1358}{1000}\frac{220^2}{120^2}\times\frac{100}{220^2}=0.00943$$

$$X_{21*}=\frac{U_{k1}\%}{100}\times\frac{U_{1N}^2}{S_N}\times\frac{S_B}{U_B^2}=\frac{10.8}{100}\frac{220^2}{120}\times\frac{100}{220^2}=0.09$$

$$X_{22*}=\frac{U_{k2}\%}{100}\times\frac{U_{1N}^2}{S_N}\times\frac{S_B}{U_B^2}=\frac{-1.2}{100}\frac{220^2}{120}\times\frac{100}{220^2}=-0.01$$

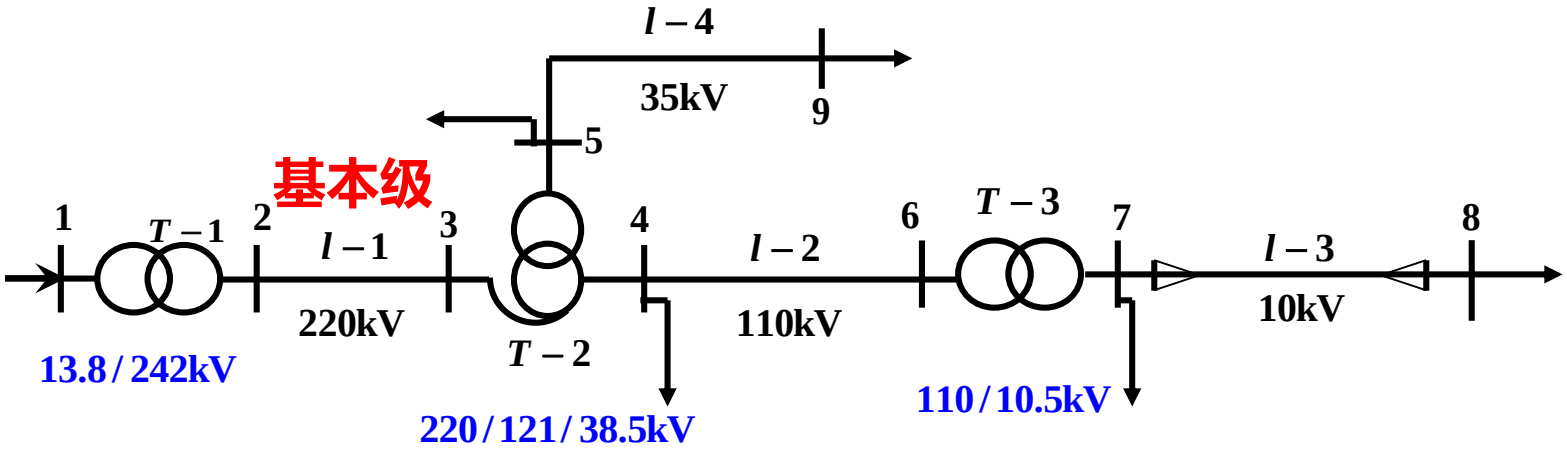
$$X_{23*}=\frac{U_{k3}\%}{100}\times\frac{U_{1N}^2}{S_N}\times\frac{S_B}{U_B^2}=\frac{24.2}{100}\frac{220^2}{120}\times\frac{100}{220^2}=0.202$$

和前面相同

$$Y_{m2*}=\left(\frac{P_0}{1000U_{1N}^2}-j\frac{I_0\%}{100}\frac{S_N}{U_{1N}^2}\right)\times\frac{U_B^2}{S_B}$$

$$=\left(\frac{89}{1000\times220^2}-j\frac{0.35}{100}\frac{120}{220^2}\right)\times\frac{220^2}{100}=\left(0.89-j4.2\right)\times10^{-3}$$

-第4.3节- 标幺制



L2:

$$Z_{l2*} = (r_1 + jx_1)l \times \frac{S_B}{U_{B(110)}^2} = (0.105 + j0.383) \times 60 \times \frac{100}{124.1^2}$$

$$= 0.0409 + j0.1492$$

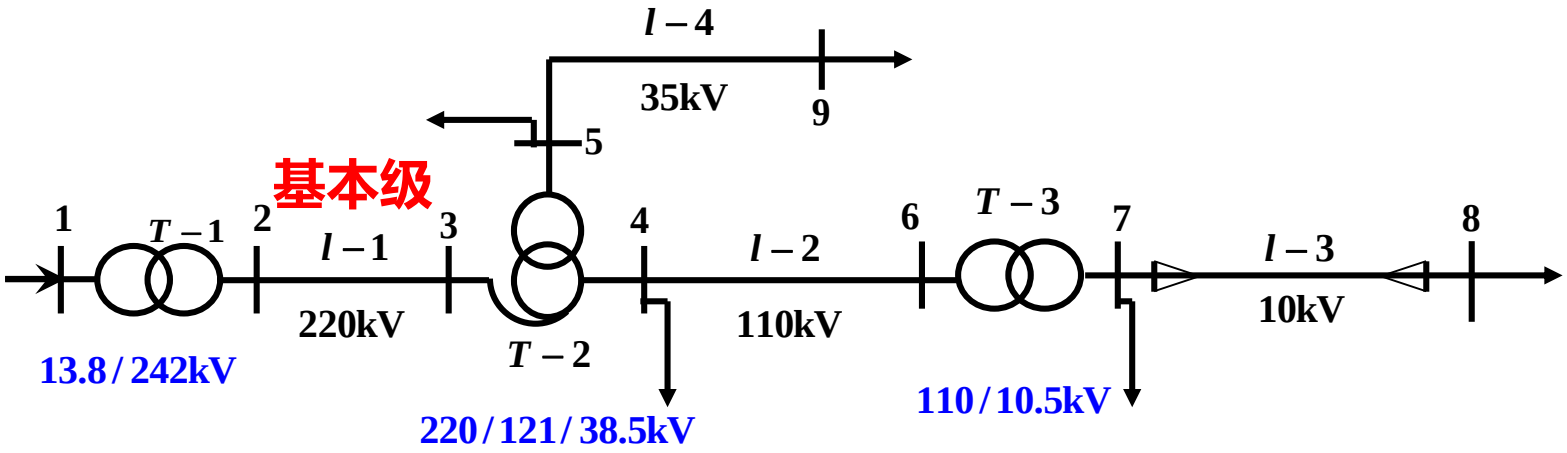
$$Y_{l2*}/2 = j\frac{b_1 l}{2} \times \frac{U_{B(110)}^2}{S_B} = j2.98 \times 10^{-6} \times \frac{60}{2} \times \frac{124.1^2}{100} = j0.01377$$

L4:

$$Z_{l4*} = (r_1 + jx_1)l \frac{S_B}{U_{B(35)}^2} = (0.17 + j0.38) \times 13 \times \frac{100}{39.5^2}$$

$$= 0.1416 + j0.317$$

-第4.3节- 标幺制



T3:

$$R_{T3*}=\frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2}\times\frac{S_B}{U_{B(110)}^2}=\frac{280}{1000}\frac{110^2}{63^2}\times\frac{100}{124.1^2}=0.00554$$

$$X_{T3*}=\frac{U_k\%}{100}\times\frac{U_N^2}{S_N}\times\frac{S_B}{U_{B(110)}^2}=\frac{10.5}{100}\frac{110^2}{63}\times\frac{100}{124.1^2}=0.1309$$

$$Y_{m3*}=\left(\frac{60}{1000\times110^2}-j\frac{0.61}{100}\frac{63}{110^2}\right)\times\frac{124.1^2}{100}=(0.765-j4.89)\times10^{-3}$$

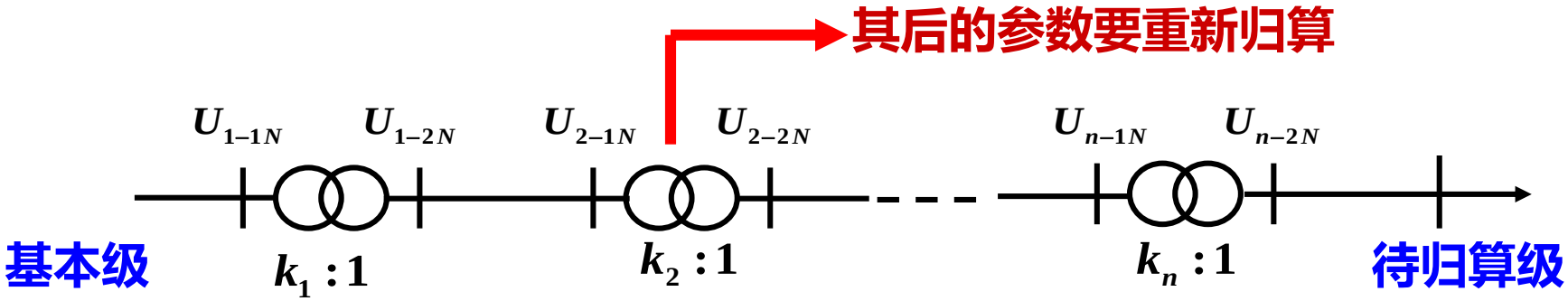
L3:

$$Z_{l3*}=(r_1+jx_1)l\times\frac{S_B}{U_{B(10)}^2}=(0.45+j0.08)\times2.5\times\frac{100}{11.85^2}$$

$$=0.801+j0.1424$$

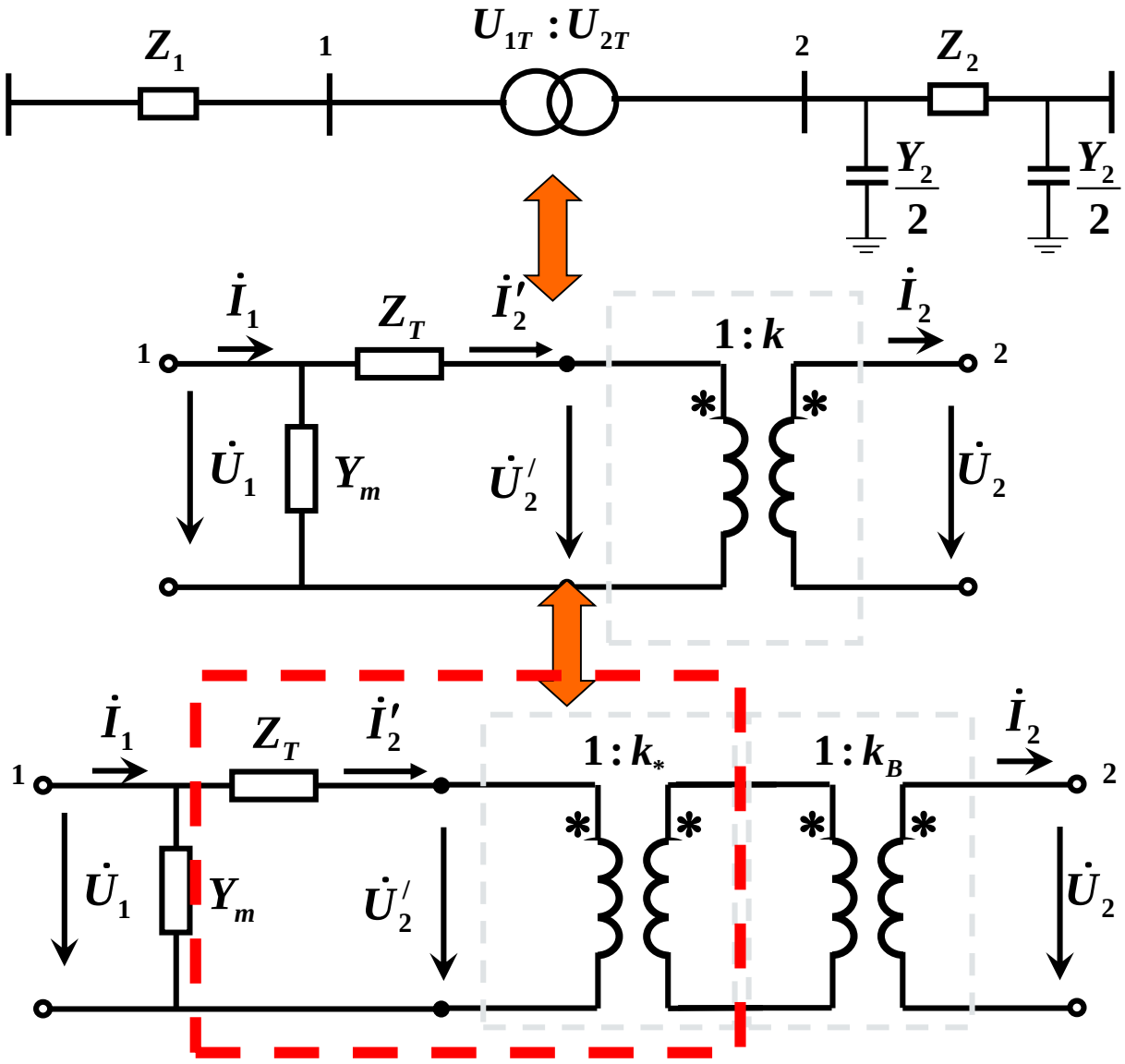
-第4.4节- 具有非标准变比变压器的等值电路

- 电力系统正常运行状态下，经常需要改变某些变压器的分接头位置以调节母线电压。
- 如果按照前面的计算方法，则变压器分接头改变时，电网中电压、电流和阻抗等的有名值或标幺值要重新计算。如变压器2的变比发生变化



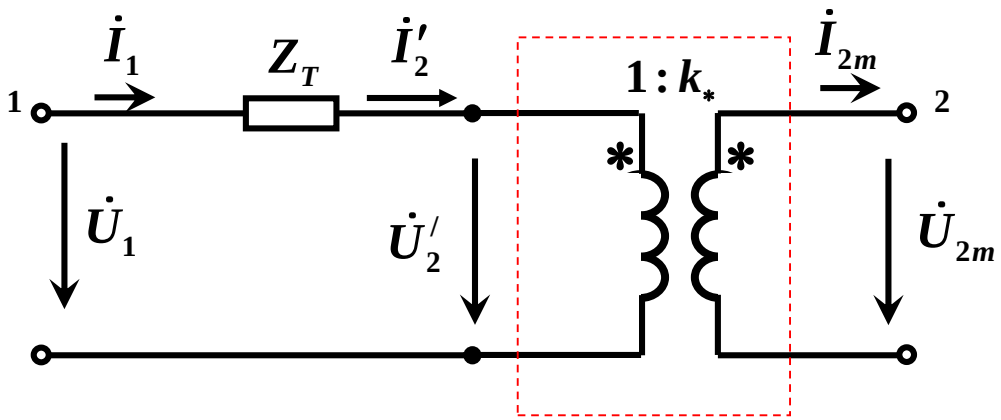
✓另一种方法：非标准变比变压器等值电路法

-第4.4节- 具有非标准变比变压器的等值电路



$$k = k_* k_B$$

-第4.4节- 具有非标准变比变压器的等值电路



$$\dot{U}_{2m} = k_* \dot{U}'_2$$

$$\dot{I}_{2m} = \dot{I}'_2 / k_*$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_{2m} / k_*$$

$$\dot{I}'_2 = k_* \dot{I}_{2m}$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 Z_T$$

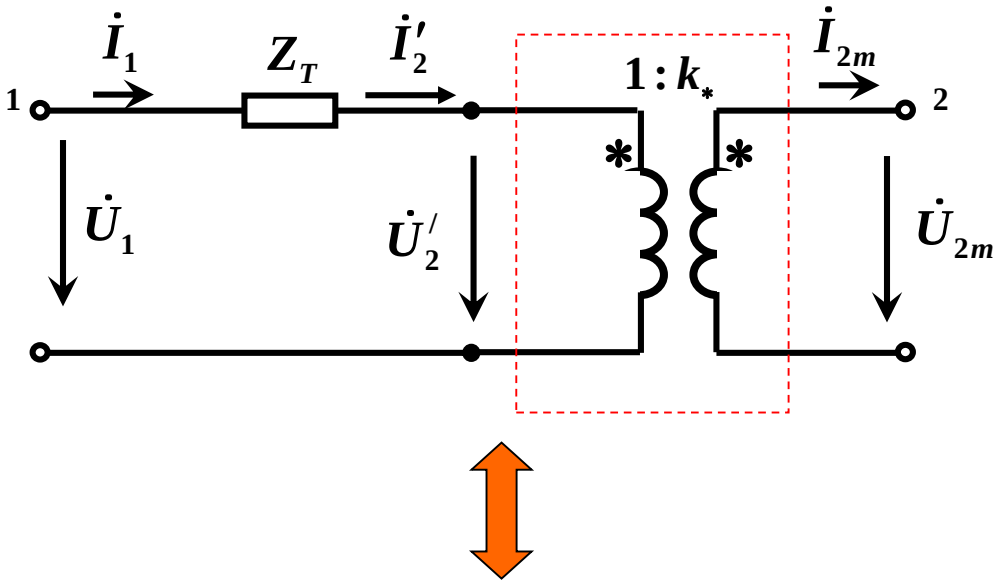
$$= \dot{U}_{2m} / k_* + k_* \dot{I}_{2m} Z_T$$

$$= \frac{1}{k_*} \dot{U}_{2m} + k_* Z_T \dot{I}_{2m}$$

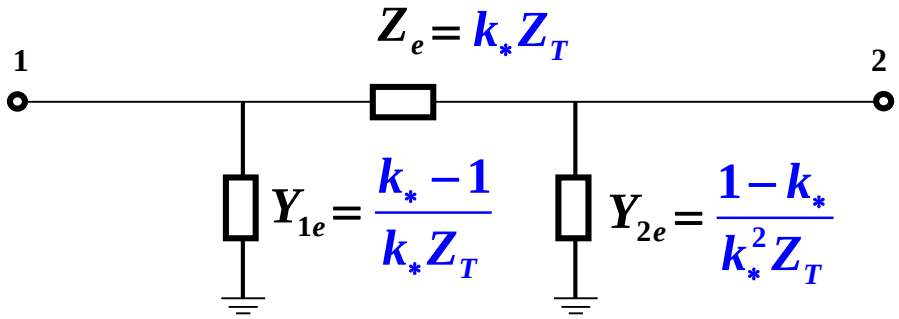
$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 = k_* \dot{I}_{2m}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_*} & k_* Z_T \\ 0 & k_* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{2m} \\ \dot{I}_{2m} \end{bmatrix}$$

-第4.4节- 具有非标准变比变压器的等值电路



$$\begin{bmatrix}\dot{U}_1\\ \dot{I}_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{k_*} & k_*Z_T\\ 0 & k_*\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{U}_{2m}\\ \dot{I}_{2m}\end{bmatrix}$$

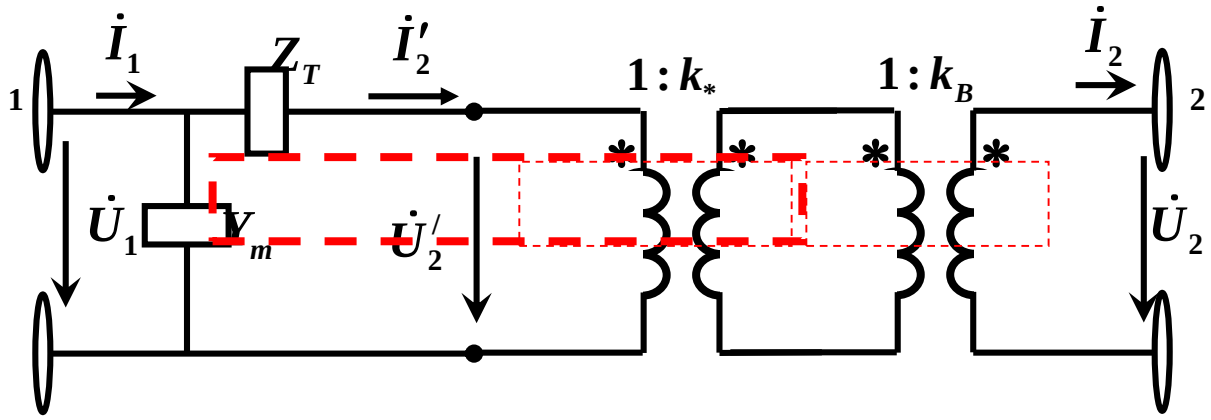


$$Z_e=B=kZ_T$$

$$Y_{1e}=\frac{D-1}{B}=\frac{k-1}{kZ_T}$$

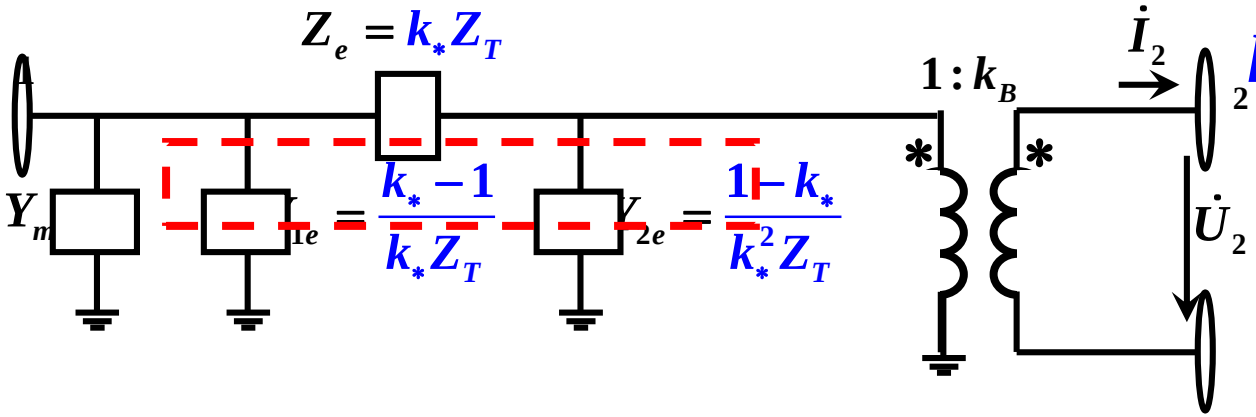
$$Y_{2e}=\frac{A-1}{B}=\frac{1/k-1}{kZ_T}=\frac{1-k}{k^2Z_T}$$

-第4.4节- 具有非标准变比变压器的等值电路



$$k_B = U_{B2}/U_{B1}$$

通常取变压器两侧电力网额定电压之比(标准变比)



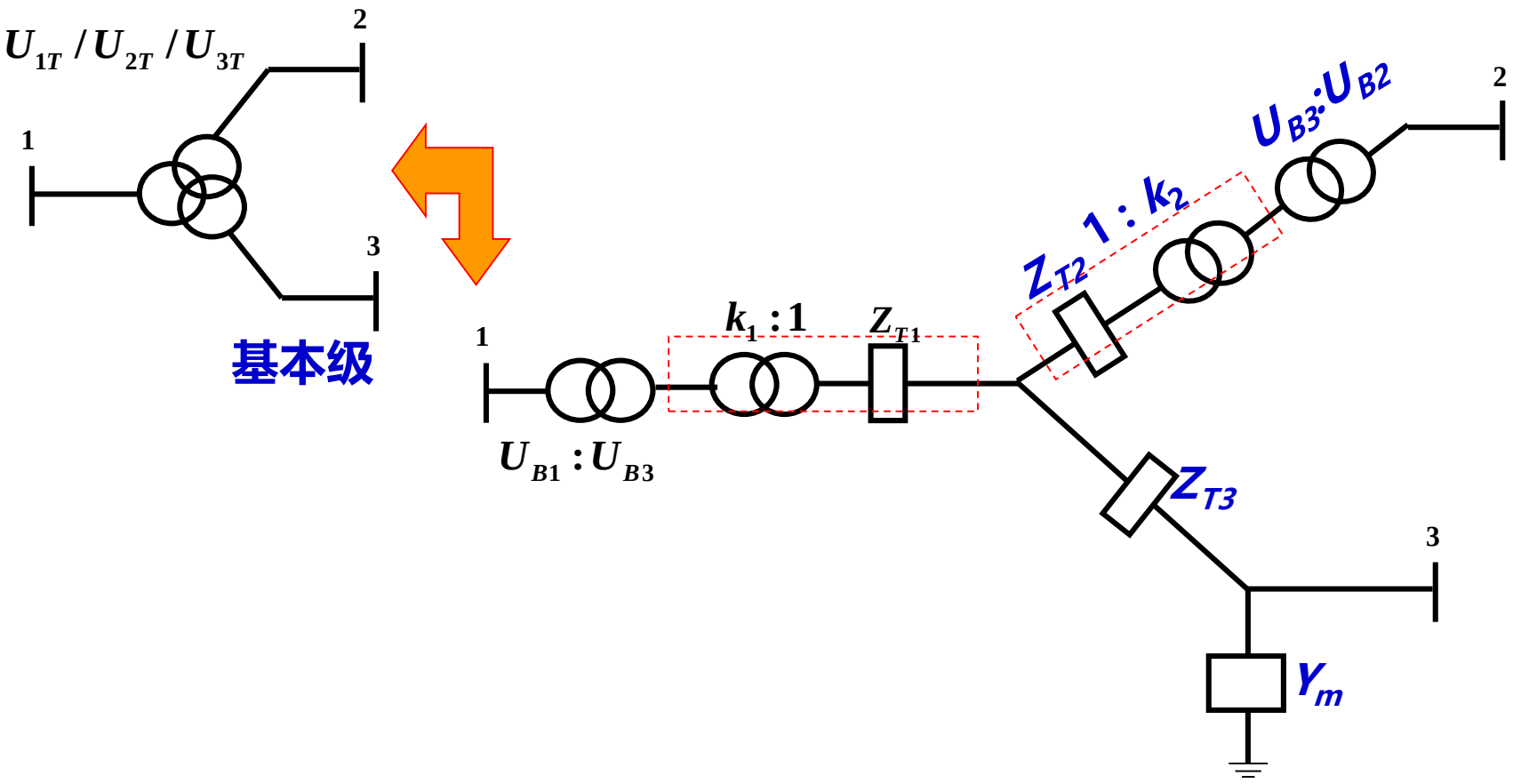
$$k = k_* k_B \Rightarrow k_* = k/k_B$$

非标准变比或变比的标幺值，实际变比改变时随之改变

-第4.4节- 具有非标准变比变压器的等值电路

西南交通大学 Southwest Jiaotong University

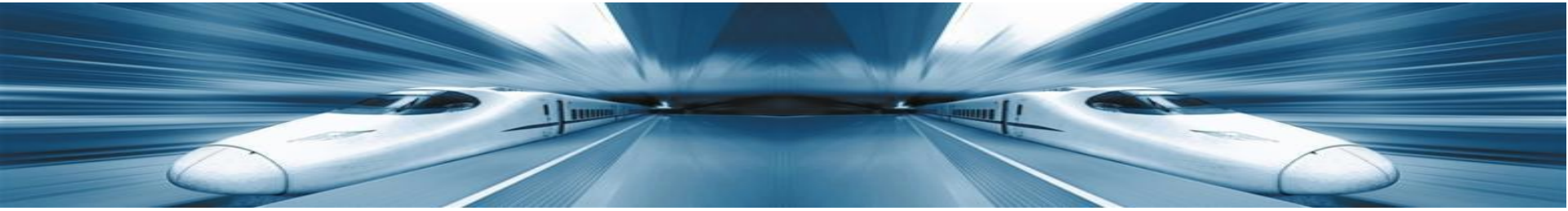
➢三绕组变压器



西南交通大学 Southwest Jiaotong University

➢ 总结：

- ①非标准变比变压器当变压器改变分接头时，只有这个Π型等值电路的参数需要改变。
- ②标幺值计算时，可选择电网额定电压作为基准电压，确定标准变比为基准电压之比。这样就可省去电压基准值的计算，或者说不用明确指定基本级，大大简化计算。



End

谢谢