



石家莊鐵道大學
SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY

在线开放课程

电力系统分析

电力网络的数学模型

主讲：田行军

CH2. 电力系统各元件的数学模型



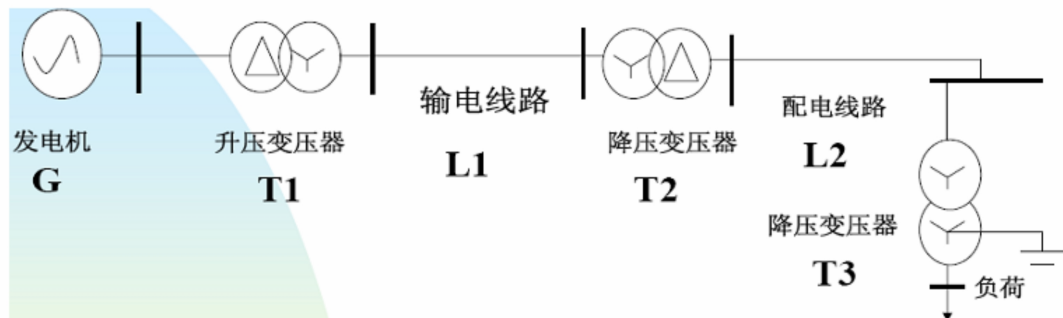
在线开放课程

- 1、电力线路的参数和数学模型
- 2、变压器的参数和数学模型
- 3、发电机的数学模型
- 4、电抗器和负荷的数学模型
- 5、电力网络的数学模型

2.5 电力网络的数学模型

从元件到系统：电力系统的等值电路？

- 发电机：恒定电势源
- 线路、变压器： π 型等值电路、 Γ 型等值电路
- 负荷：恒功率
- 系统模型：根据单线图，连接元件等值电路，得到电力系统等值图



2.5 电力网络的数学模型

一、多电压等级网络中参数和变量的归算（有名值）

电力线、变压器等值电路级联成电力网等值电路

注意：多级电压网存在一个不同电压级之间的归算问题

- 1) 变压器的参数与 U_N 有关，归算到哪一侧，值不同
- 2) 变压器的负载阻抗归算到某一侧时，和变比平方有关
- 3) 要级联等值电路，须将不同电压级下的阻抗、导纳、电压、电流归算到同一级——基本级（取电网最高电压）

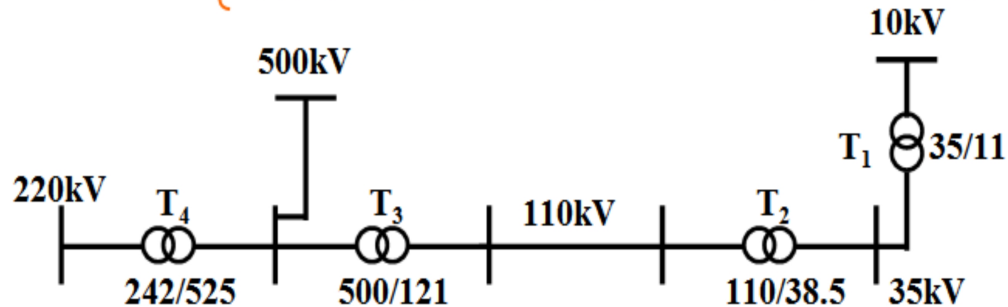
$$Z = Z' (k_1 k_2 \cdots k_n)^2 \quad Y = Y' \left(\frac{1}{k_1 k_2 \cdots k_n} \right)^2$$

4) 归算 $U = U' (k_1 k_2 \cdots k_n) \quad I = I' \left(\frac{1}{k_1 k_2 \cdots k_n} \right)$

2.5 电力网络的数学模型

5) k 的取值 { 分子是向着基本级一侧的电压
分母是向着待归算一侧的电压

6) k 的计算 { 手算—实际变比
计算机—先取线路额定电压比值, 然而再修正



如需将10kV侧的参数和变量归算至500kV侧, 则变压器
 T_1 、 T_2 、 T_3 的变比 k_1 、 k_2 、 k_3 应分别取35/11、110/38.5、
500/121

2.5 电力网络的数学模型

例题：电力网接线如图所示，图中各元件的技术数据见表1、表2，试作出归算到110kV侧和6kV侧的电网等值电路

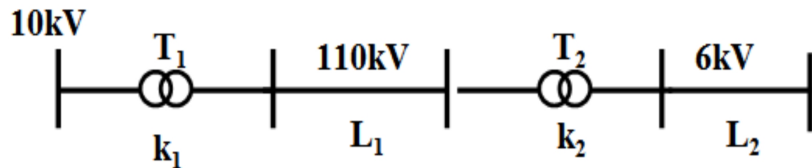


表1:

符号	额定容量 (MVA)	额定电压 (kV)	$U_k\%$	P_k (kW)	$I_0\%$	P_0 (kW)
T_1	31.5	10.5/121	10.5	190	3	32
T_2	20	110/6.6	10.5	135	2.8	22

表2:

符号	导线 型号	长度 (km)	电压 (kV)	电阻 (Ω /km)	电抗 (Ω /km)	电纳 (S/km)
L_1	LGJ-185	100	110	0.17	0.38	3.15×10^{-6}
L_2	LGJ-300	5	6	0.105	0.383	

2.5 电力网络的数学模型

解：变压器的电阻、导纳，线路的电导都略去不计

1) 归算到110kV侧

$$\text{变压器 } T_1 \text{ 的电抗: } X_{T1} = \frac{U_{k1}\%U_N^2}{100S_N} = \frac{10.5 \times 121^2}{100 \times 31.5} = 48.8(\Omega)$$

$$\text{变压器 } T_2 \text{ 的电抗: } X_{T2} = \frac{U_{k2}\%U_N^2}{100S_N} = \frac{10.5 \times 110^2}{100 \times 20} = 63.5(\Omega)$$

线路 L_1 的电阻、电抗和电纳为：

$$R_{l_1} = r_1 l_1 = 0.17 \times 100 = 17(\Omega)$$

$$X_{l_1} = x_1 l_1 = 0.38 \times 100 = 38(\Omega)$$

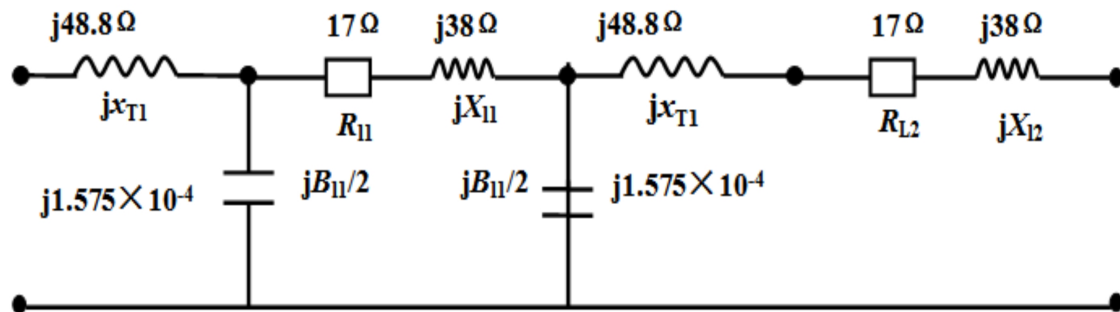
$$\frac{1}{2} B_{l_1} = \frac{1}{2} b_1 l_1 = \frac{1}{2} \times 3.15 \times 10^{-6} \times 100 = 1.575 \times 10^{-4} (S)$$

2.5 电力网络的数学模型

线路 L_2 的电阻、电抗为:

$$R_{L_2} = r_2 l_2 = 0.105 \times 5 \times \left(\frac{110}{6.6} \right)^2 = 145.8(\Omega)$$

$$X_{L_2} = x_2 l_2 = 0.383 \times 5 \times \left(\frac{110}{6.6} \right)^2 = 531.8(\Omega)$$



2.5 电力网络的数学模型

2) 归算到6kV侧

$$X'_{T1} = X_{T1} \left(\frac{6.6}{110} \right)^2 = 48.8 \times \left(\frac{6.6}{110} \right)^2 = 0.1757(\Omega)$$

$$R'_{l_1} = R_{l_1} \left(\frac{6.6}{110} \right)^2 = 0.0612(\Omega)$$

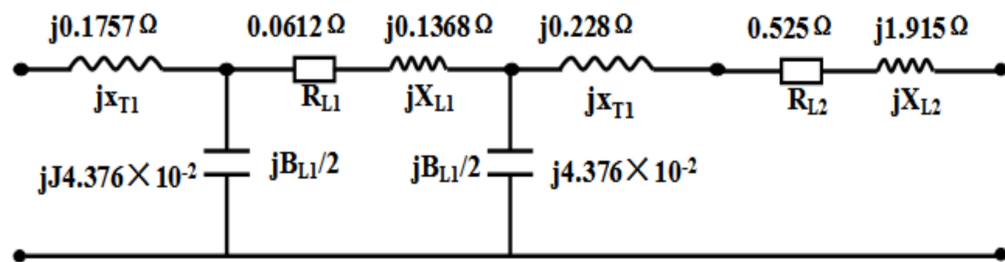
$$X'_{T2} = X_{T2} \left(\frac{6.6}{110} \right)^2 = 63.5 \times \left(\frac{6.6}{110} \right)^2 = 0.228(\Omega)$$

$$X'_{l_1} = X_{l_1} \left(\frac{6.6}{110} \right)^2 = 0.1368(\Omega)$$

$$R'_{l_2} = r_2 l_2 = 0.105 \times 5 = 0.525(\Omega)$$

$$\frac{1}{2} B'_{l_1} = \frac{1}{2} B_{l_1} \left(\frac{110}{6.6} \right)^2 = 4.376 \times 10^{-2}(S)$$

$$X'_{l_2} = x_2 l_2 = 0.383 \times 5 = 1.915(\Omega)$$



2.5 电力网络的数学模型

电力系统实际计算存在的问题

三相：计算麻烦！

可比性差：压级不同、容量不同，设备参数差异大

电压

我们该怎么办！

数学变换！！

2.5 电力网络的数学模型

标么制

- 输电线、变压器——电力网数学模型
 - 等值电路
 - 参数计算——标么值



※不同基准值的标么值的换算（直接电气连接）

※多级电力网中各元件的标么值的换算

2.5 电力网络的数学模型

二、标么值（标么值）

1、定义：标么值 = $\frac{\text{有名值（欧、西、千伏、千安、兆伏安）}}{\text{基准值（与对应有名值的量纲相同）}}$

标么值—没有单位的相对值参数

三相与单相公式一致

结果清晰

易于判断结果对否

简化计算

无量纲，概念不清

2.5 电力网络的数学模型

若选电压、电流、功率和阻抗的基准值为 U_B ,
 I_B , S_B , Z_B , 相应的标么值如下:

$$U_* = \frac{U}{U_B}$$

$$I_* = \frac{I}{I_B}$$

$$S_* = \frac{S}{S_B} = \frac{P + jQ}{S_B} = \frac{P}{S_B} + j \frac{Q}{S_B} = P_* + jQ_*$$

$$Z_* = \frac{Z}{Z_B} = \frac{R + jX}{Z_B} = \frac{R}{Z_B} + j \frac{X}{Z_B} = R_* + jX_*$$

2.5 电力网络的数学模型

2、基准值的选取

基准值的选取有一定的随意性，在电路中，物理量 U, I, S, Z 间有基本关系：

单相

$$U_p = Z_p I_p \quad S_p = U_p I_p$$

三相

$$U_p = \sqrt{3} Z_p I_p \quad S_p = \sqrt{3} U_p I_p$$

单相

$$U_{Bp} = Z_{Bp} I_{Bp} \quad S_{Bp} = U_{Bp} I_{Bp}$$

三相

$$U_{Bp} = \sqrt{3} Z_{Bp} I_{Bp} \quad S_{Bp} = \sqrt{3} U_{Bp} I_{Bp}$$

2.5 电力网络的数学模型

可得标么值表示

单相

$$U_p = I Z_p$$

$$S_p = U_p I$$

$$U_{Bp} = I_B Z_{Bp}$$

$$S_{Bp} = U_{Bp} I_B$$



$$U_* = I_* Z_*$$

$$S_* = U_* I_*$$

三相

$$U_p = \sqrt{3} I Z_p$$

$$S_p = \sqrt{3} U_p I$$

$$U_{Bp} = \sqrt{3} I_B Z_{Bp}$$

$$S_{Bp} = \sqrt{3} U_{Bp} I_B$$



$$U_* = I_* Z_*$$

$$S_* = U_* I_*$$

- ▶ 线电压和相电压标么值相等；
- ▶ 三相功率和单相功率标么值相等。

∴ 三相电路完全可以按单相电路标么值进行计算！

2.5 电力网络的数学模型

四个量中选择任意两个为基准值，一般选定电压和功率作为基准值。

S_B 选择原则：电力系统中发电厂总容量或系统总容量；发电机或变压器额定容量；较多为100MVA，1000MVA。

U_B 选择原则：基本级的额定电压或各级平均额定电压

基本级：不同电压级的参数归算到同一电压等级；一般选电力系统中最高电压级。

2.5 电力网络的数学模型

结果换算成有名值，换算公式

$$\left\{ \begin{array}{l} U = U_* U_B \\ I = I_* I_B = I_* \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} \\ S = S_* S_B \\ Z = (R_* + jX_*) \frac{U_B^2}{S_B} \end{array} \right.$$

2.5 电力网络的数学模型

3、不同基准值的标么值间的换算※

步骤:

- ① 把额定标么阻抗还原为有名值。
- ② 按统一的基准值进行归算。

(1) 发电机的标么电抗的换算

$$X_{(\text{有名值})} = X_{(\text{N})_*} \frac{U_{\text{N}}^2}{S_{\text{N}}}$$

$$\Rightarrow X_{(\text{B})_*} = X_{(\text{有名值})} \times \frac{S_{\text{B}}}{U_{\text{B}}^2} = X_{(\text{N})_*} \times \frac{U_{\text{N}}^2}{S_{\text{N}}} \times \frac{S_{\text{B}}}{U_{\text{B}}^2}$$

2.5 电力网络的数学模型

(2) 变压器的标么电抗的换算

U_k % 短路电压百分数

$$U_k \% = \frac{\sqrt{3}I_N X_T}{U_N} \times 100 = \frac{S_N}{U_N^2} X_T \times 100 = X_{T(N)}^* \times 100$$

$$\rightarrow X_{T(B)}^* = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{U_N^2}{S_N} \times \frac{S_B}{U_B^2}$$

2.5 电力网络的数学模型

(3) 限制短路电流的**电抗器**的换算公式（以**额定电压**和**额定电流**为基准值）

$$X_{R(\text{有名值})} = X_{R(N)*} \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N}$$

$$X_{R(B)*} = X_{R(\text{有名值})} \times \frac{S_B}{U_B^2} = X_{R(N)*} \times \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \times \frac{S_B}{U_B^2}$$

如果电抗给出的是电抗百分数 $X_R\%$

$$X_R\% = \frac{\sqrt{3}I_N X_R}{U_N} \times 100 = X_{R(N)*} \times 100$$

$$X_{R(B)*} = \frac{X_R\%}{100} \times \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \times \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{X_R\%}{100} \times \frac{U_N}{U_B} \times \frac{I_B}{I_N}$$

2.5 电力网络的数学模型

4. 电力线路的换算公式

- 电力线路的参数一般是给出有名值，可以直接按照公式计算标么值。

$$Z_{L(B)}^* = \frac{Z_L}{Z_B} = \frac{(r + jx)L}{Z_B} \quad Z_B = \frac{U_B^2}{S_B}$$

$$\Rightarrow Z_{L(B)}^* = \frac{Z_L}{Z_B} = (r + jx)L \frac{S_B}{U_B^2}$$

2.5 电力网络的数学模型

例：某变压器额定容量是15MVA，额定电压是110kV，短路电压百分数 $U_k\% = 10.5$ ；取 $S_B = 30\text{MVA}$ 、 $U_B = 121\text{kV}$ ，求 $X_{T(B)*}$

$$U_k\% = \frac{\sqrt{3}I_N X_T}{U_N} \times 100 = \frac{S_N}{U_N^2} X_T \times 100 = X_{T(N)*} \times 100$$

1) 变压器额定标么电抗

$$X_{T(N)*} = \frac{U_k\% U_N^2}{100 S_N}$$

2) 选取基值下的标么电抗

$$X_{T(B)*} = \frac{X_{T(N)*}}{\frac{U_B^2}{S_B}} = \frac{X_{T(N)*} \frac{U_N^2}{S_N}}{\frac{U_B^2}{S_B}} = 0.105 \times \frac{110^2}{15} \times \frac{30}{121^2} = 0.174$$

2.5 电力网络的数学模型

习题：发电机， $U_N=13.8\text{kV}$ ， $P_N=125\text{MW}$ ， $\cos\phi=0.85$ ；以发电机额定功率为基准值的电抗标么值为0.18，试求以13.8kV为基准电压，1000MVA为基准功率时，发电机电抗标么值，并计算电抗的实际值。

$$P = S \cos\phi \quad S_N = 125/0.85 = 147\text{MVA} \quad U_N = 13.8\text{kV}$$

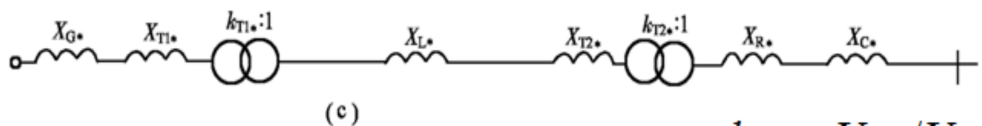
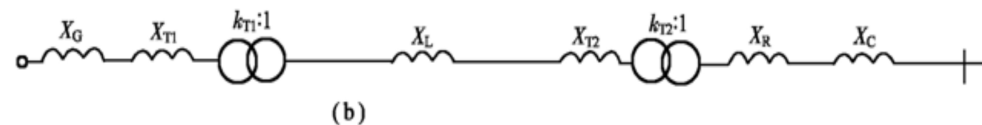
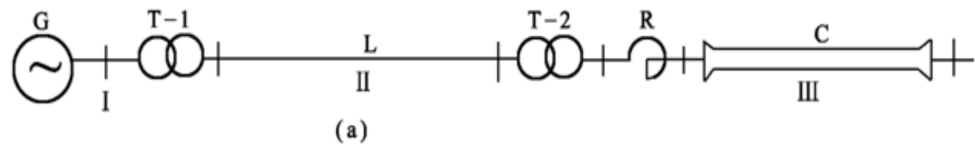
$$X_{G(N)*} = 0.18 \quad U_B = 13.8\text{kV} \quad S_B = 1000\text{MVA}$$

$$X_G = X_{G(N)*} \times X_N = 0.18 \times \frac{U_N^2}{S_N} = 0.18 \times \frac{13.8^2}{147} = 0.23$$

$$X_{G(B)*} = \frac{X_G}{X_B} = X_{G(N)*} \times \frac{U_N^2}{S_N} \times \frac{S_B}{U_B^2} = 0.18 \times \frac{13.8^2}{147} \times \frac{1000}{13.8^2} = 0.12$$

2.5 电力网络的数学模型

4、多级电压的网络中各元件参数标么值的计算 ※



$$k_{T*} = \frac{k_T}{k_{B(I-II)}} = \frac{U_{TNI}/U_{TNI}}{U_{BI}/U_{BI}}$$

(1) 精确计算方法:基本级法和**基准变比法** ※

(2) 近似计算方法

2.5 电力网络的数学模型

(2) 近似计算方法

- 将各个电压级都以其平均额定电压作为基准电压，然后在各个电压级换算成标么值。
- (即变压器的额定电压与基准电压都取为平均额定电压)

$$k_{T^*} = \frac{k_T}{k_{B(I-II)}} = \frac{U_{TNI} / U_{TNI}}{U_{BI} / U_{BI}} = \frac{U_{av1} / U_{av2}}{U_{av1} / U_{av2}} = 1$$

$$X_{G(N)^*} = \frac{x_G \%}{100} \times \frac{U_N^2}{S_N} \times \frac{S_B}{U_B^2}$$

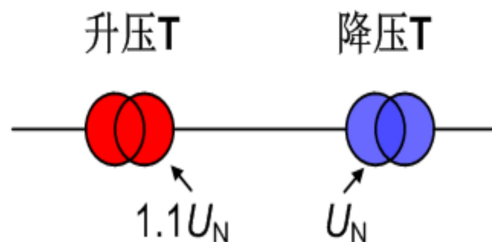
2.5 电力网络的数学模型

我国电网额定电压的平均额定电压值

平均额定电压值

单位：kV

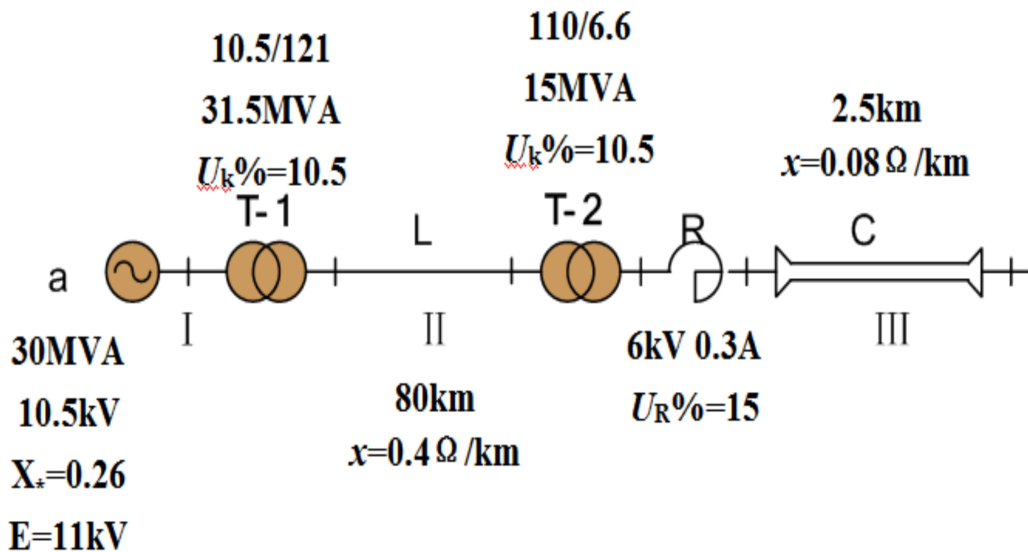
电网额定电压	3	6	10	35	110	220	330	500
平均额定电压	3.15	6.3	10.5	37	115	230	345	525



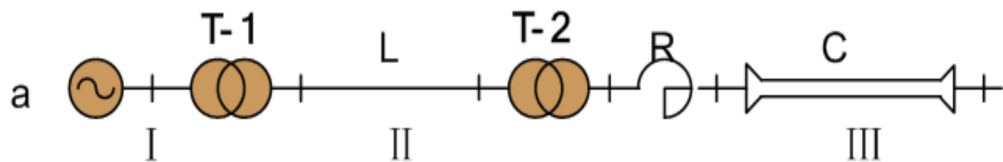
$$U_{av} = \frac{1.1U_N + U_N}{2} = 1.05U_N$$

2.5 电力网络的数学模型

例 给定基准功率 $S_B=100\text{MV}\cdot\text{A}$ ，采用精确计算的方法计算系统各元件的标么值。



2.5 电力网络的数学模型



解: $U_{B(I)} = 10.5\text{kV}$, $U_{B(II)} = 115\text{kV}$, $U_{B(III)} = 6.3\text{kV}$

$$\text{发电机电抗 } X_1 = X_{G(B)^*} = X_{G(N)^*} \times \frac{U_{G(N)}^2}{S_{G(N)}} \times \frac{S_B}{U_{B(I)}^2} = 0.26 \times \frac{10.5^2}{30} \times \frac{100}{10.5^2} = 0.87$$

变压器T-1电抗

$$X_2 = X_{T1(B)^*} = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{U_{T1(N)}^2}{S_{T1(N)}} \times \frac{S_B}{U_{B(I)}^2} = \frac{10.5}{100} \times \frac{10.5^2}{31.5} \times \frac{100}{10.5^2} = 0.33$$

架空线路电抗

$$X_3 = X_{L(B)^*} = X_L \times \frac{S_B}{U_{B(II)}^2} = 0.4 \times 80 \times \frac{100}{115^2} = 0.24$$

变压器T-2电抗

$$X_4 = X_{T2(B)^*} = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{U_{T2(N)}^2}{S_{T2(N)}} \times \frac{S_B}{U_{B(III)}^2} = \frac{10.5}{100} \times \frac{110^2}{15} \times \frac{100}{115^2} = 0.64$$

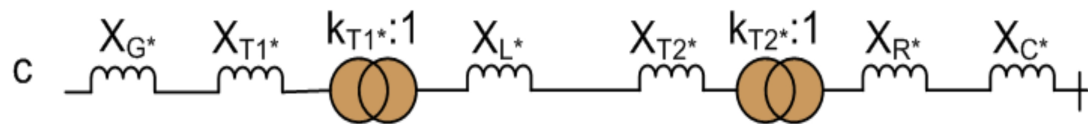
2.5 电力网络的数学模型

$$\text{电抗器电抗 } X_5 = X_{R(B)^*} = \frac{U_R \%}{100} \times \frac{U_{R(N)}}{\sqrt{3}I_{R(N)}} \times \frac{S_B}{U_{B(III)}^2} = \frac{5}{100} \times \frac{6}{\sqrt{3} \times 0.3} \times \frac{100}{6.3^2} = 1.46$$

$$\text{电缆线路电抗 } X_6 = X_{C(B)^*} = X_C \times \frac{S_B}{U_{B(III)}^2} = 0.08 \times 2.5 \times \frac{100}{6.3^2} = 0.504$$

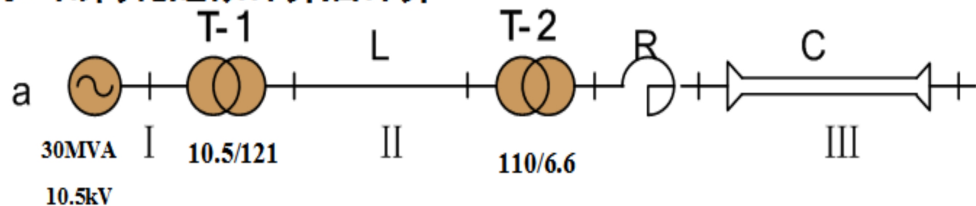
$$\text{变压器变比标么值 } k_{T2^*} = \frac{U_{T2(NI)} / V_{T2(NIII)}}{U_{B(I)} / U_{B(III)}} = \frac{110 / 6.6}{115 / 6.3} = 0.914$$

$$k_{T1^*} = \frac{U_{T1(NI)} / U_{T1(NII)}}{U_{B(I)} / U_{B(II)}} = \frac{10.5 / 121}{10.5 / 115} = 0.95$$



2.5 电力网络的数学模型

例：用简化近似算法计算



解： $U_{av(I)} = 10.5\text{kV}$, $U_{av(II)} = 115\text{kV}$, $U_{av(III)} = 6.3\text{kV}$, $S_B = 100\text{MV}\cdot\text{A}$

$$X_{G(N)^*} = \frac{x_G \%}{100} \times \frac{S_B}{S_N} = 0.26 \times \frac{100}{30} = 0.86 \quad X_{R^*} = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \times \frac{S_B}{U_{av}^2} = \frac{5}{100} \times \frac{6}{\sqrt{3} \times 0.3} \times \frac{100}{6.3^2}$$

$$= 1.46$$

$$X_{T1^*} = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{S_B}{S_N} = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{30} = 0.35$$

$$X_{L^*} = xL \times \frac{S_B}{U_{av}^2} = 0.4 \times 80 \times \frac{100}{115^2} = 0.24$$

$$X_{C^*} = xL \times \frac{S_B}{U_{av}^2} = 0.08 \times 2.5 \times \frac{100}{6.3^2} = 0.504$$

$$X_{T2^*} = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{S_B}{S_N} = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{15} = 0.7$$

小结



在线开放课程

- 👉 介绍了标幺值及其计算原理；
- 👉 介绍了电力网络数学模型的计算方法

