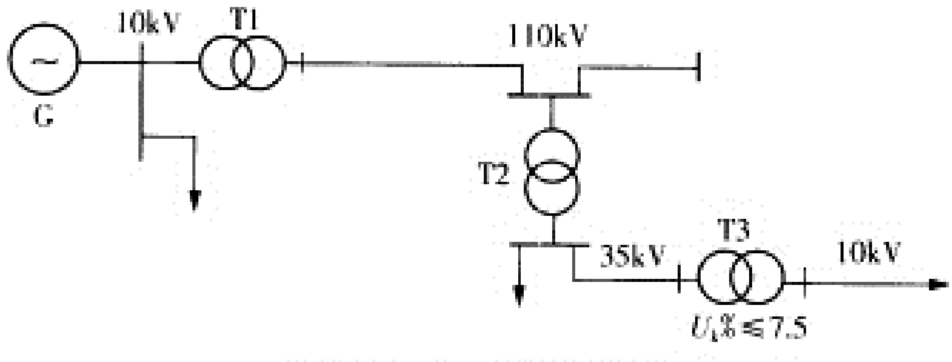
第一章作业

1.1 电力系统接线如题图所示，电网各级电压示于图中。试求：

(1)发电机 G 和变压器 T1、T2、T3 高低压侧绕组的额定电压；

(2)设变压器 T1 工作于+2.5%抽头，T2 工作于主抽头，T3 工作于-5%抽头，求各变压器的实际变比。



解：(1) 注意：区分高压侧、低压侧与一次侧、二次侧的概念。

发电机 G：10.5kV；

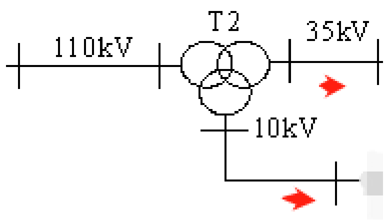
变压器 T1：10.5/121kV；

变压器 T2：110/38.5kV；

变压器 T3 ：35/10.5kV；

注意：三角符号，不要看成负荷；三绕组变压器相同的原理

- 变压器额定电压的特殊情况：
  - 当变压器直接和发电机相联时，一次侧额定电压 $U_{TN-1}=105\%U_N$
  - 当变压器漏抗较小（短路电压百分数<7%）或变压器二次侧直接与负荷相联或电压等级特别高时，二次侧额定电压 $U_{TN-2}=105\%U_N$。



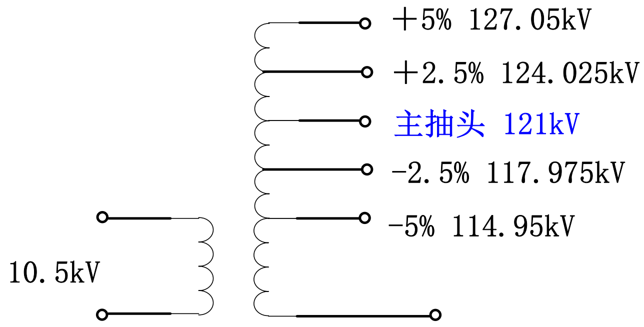
110/38.5/11kV

(2)注意：变压器抽头设置于高压侧，高压侧的实际电压取决于抽头位置。

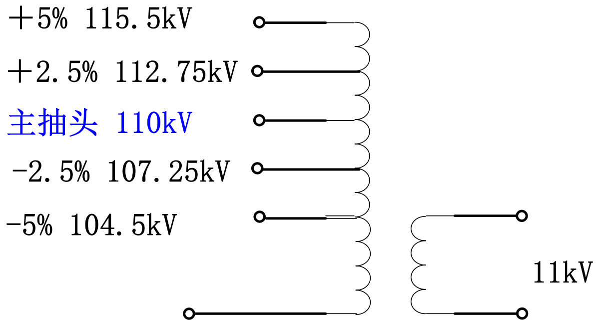
变压器 T1：10.5/124.02kV（T1 工作于+2.5%抽头：高压侧实际电压为 U_N*102.5%）；

变压器 T2：110/38.5kV（T2 工作于主抽头：高压侧实际电压为 U_N）；

变压器 T3：33.25/11kV（T3 工作于-5%抽头：高压侧实际电压为 U_N*95%）；



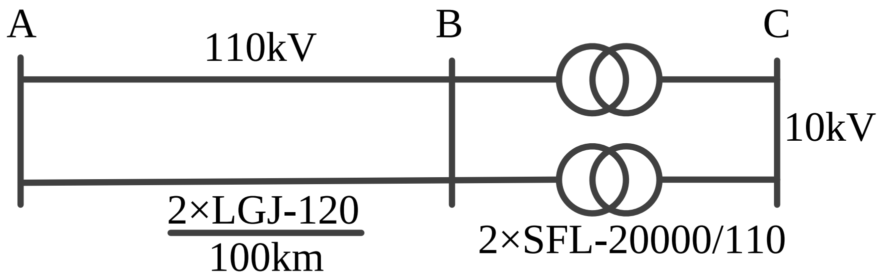
升压变 $121 \pm 2 \times 2.5\%/10.5$



降压变 $110 \pm 2 \times 2.5\%/11$

第二章作业

2.1 部分电力网络的结构如图所示，导线的排列方式也示于图中，LGJ-120 每公里参数：温度 20° 时每公里电阻：r_{20}=0.27Ω/km，导线水平排列，相间距离 3.5m，导线直径 15.2mm。SFL-20000/110 型变压器的特性数据：空载损耗 P_0=22kW；空载电流百分数 I_0%=0.8；短路损耗 P_k=135kW；短路电压百分数 U_k%=10.5。



试求：(a)40℃时每公里线路的参数。(b)变压器的参数。(c)并列运行时的等值参数和等值电路。

解：(a)40℃时每公里线路的参数

查表可得 LGJ-120 每公里参数如下：

温度 20° 时每公里电阻：r_{20}=0.27Ω/km；

得温度 40° 时每公里电阻：$r_1=r_{40}=r_{20}[1+\alpha(t\text{-}20)]$=0.289Ω/km；

每公里电抗：

$x1 = 0.1445\lg(Dm/r) + 0.0157 = 0.1445\lg\left(\sqrt[3]{3500*3500*3500*2}/7.6\right) + 0.0157 = 0.415$ Ω/km；

每公里电纳：$b1 = 7.58/\lg(Dm/r)\times 10^{-6}$=2.74*$10^{-6}$ S/km；

每公里电导：g_1=0 S/km；

(b)变压器的参数（归算至 110kV 侧，以便形成网络等值电路）

参数备注：S-三相；F-自然循环吹风冷却；L-铝芯绕组；1-设计序号，代表性能参数，现在一般是 9 型的；20000-代表变压器容量为 20000kVA；110 代表高压侧为 110kV 电压等级的。

$$R_T = \frac{P_k}{1000}\frac{U_N^2}{S_N^2} = \frac{135}{1000}\frac{110^2}{20^2}\Omega = 4.08\Omega$$

$$X_T = \frac{U_k\%}{100}\frac{U_N^2}{S_N} = \frac{10.5}{100} * \frac{110^2}{20}\Omega = 63.5\Omega$$

$$G_T = \frac{P_0}{1000U_N^2} = \frac{22}{1000}\frac{1}{110^2}S = 1.82 * 10^{-6}S$$

$$B_T = \frac{I_0\%}{100}\frac{S_N}{U_N^2} = \frac{0.8}{100} * \frac{20}{110^2}S = 13.2 * 10^{-6}S$$

注意：容量的单位为 MVA。

(c)并列运行时的等值参数和等值电路（并联时阻抗减半，导纳加倍）

线路长度 l=100km，则双回并联运行的阻抗和电纳分别为：

$$Z = \frac{1}{2}(r_1 + jx_1)l = \frac{1}{2}(0.289 + j0.415) * 100\Omega = 14.45 + j20.15\ \Omega$$

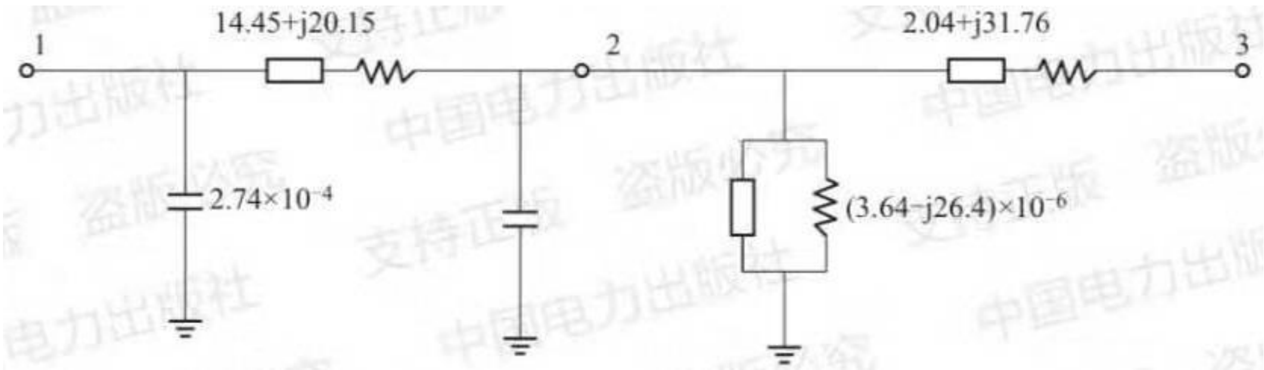
$$\frac{1}{2}B = \frac{1}{2} * 2(b_1 l)\Omega = \frac{1}{2}(2 * 2.74 * 10^{-6} * 100) = 2.74 * 10^{-4}\ S$$

并联变压器参数

$$Z_T = \frac{1}{2}(R_T + jX_T) = \frac{1}{2} * (4.08 + j63.5)\Omega = 2.04 + j31.76\ \Omega$$

$$Y_T = 2(G_T - jB_T) = 2 * (1.82 - j13.2) * 10^{-6}\Omega = (3.64 - j26.4) * 10^{-6}S$$

等值电路图如下（参数要带上单位）：



2.2 题

某降压变电所中装有一台 SSPSL-31500/110 型三相三绕组变压器，铭牌上数据为：容量比 31500/31500/31500kVA、电压比 110/38.5/11kV、P_0=46.8kW、I_0%=0.9，短路电压和短路损耗见下表。

试求：

（1）变压器绕组的阻抗和导纳（归算到高压侧）；

（2）作变压器的等值电路。

绕组	高压-中压	高压-低压	中压-低压
短路电压 U_k%	17	10.5	6
短路损耗 P_k(kW)	217	200.7	158.6

解：

（1）变压器绕组的阻抗和导纳（归算到高压侧：即使不给出变比，由型号也可以看出高压侧电压）；

①各绕组的等值电阻

$$P_{k1}=\frac{1}{2}\left(P_{k(1-2)}+P_{k(1-3)}-P_{k(2-3)}\right)=\frac{1}{2}(217+200.7-158.6)kW=129.55kW$$

$$P_{k2}=\frac{1}{2}\left(P_{k(1-2)}+P_{k(2-3)}-P_{k(1-3)}\right)=\frac{1}{2}(217+158.6-200.7)kW=87.45kW$$

$$P_{k3}=\frac{1}{2}\left(P_{k(1-3)}+P_{k(2-3)}-P_{k(1-2)}\right)=\frac{1}{2}(200.7+158.6-217)kW=71.15kW$$

$$R_{T1}=\frac{P_{k1}U_N^2}{1000S_N^2}=\frac{129.55*110^2}{1000*31.5^2}\Omega=1.58\Omega$$

$$R_{T2}=\frac{P_{k2}U_N^2}{1000S_N^2}=\frac{87.45*110^2}{1000*31.5^2}\Omega=1.07\Omega$$

$$R_{T3}=\frac{P_{k3}U_N^2}{1000S_N^2}=\frac{71.15*110^2}{1000*31.5^2}\Omega=0.87\Omega$$

或

$$R_{T2}=R_{T1}\frac{P_{k2}}{P_{k1}}=1.58*\frac{87.45}{129.55}\Omega=1.07\Omega$$

$$R_{T3}=R_{T1}\frac{P_{k3}}{P_{k1}}=1.58*\frac{71.15}{129.55}\Omega=0.87\Omega$$

②各绕组的等值电抗

$$U_{k1}\%=\frac{1}{2}\left(U_{k(1-2)}\%+U_{k(1-3)}\%-U_{k(2-3)}\%\right)=\frac{1}{2}(17+10.5-6)=10.75$$

$$U_{k2}\%=\frac{1}{2}\left(U_{k(1-2)}\%+U_{k(2-3)}\%-U_{k(1-3)}\%\right)=\frac{1}{2}(17+6-10.5)=6.25$$

$$U_{k3}\%=\frac{1}{2}\left(U_{k(1-3)}\%+U_{k(2-3)}\%-U_{k(1-2)}\%\right)=\frac{1}{2}(10.5+6-17)=-0.25\approx 0$$

$$X_{T1}=\frac{U_{k1}\%}{100}*\frac{U_N^2}{S_N}=\frac{10.75}{100}*\frac{110^2}{31.5}\Omega=41.29\Omega$$

$$X_{T2}=24.01\Omega$$

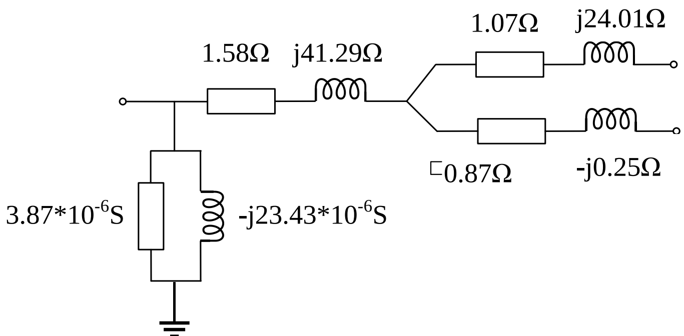
$$X_{T3}\approx 0\Omega$$

③变压器的导纳

$$G_T=\frac{P_0}{1000U_N^2}=\frac{46.8}{1000*110^2}S=3.87*10^{-6}S$$

$$B_T=\frac{I_0\%}{100}*\frac{S_N}{U_N^2}=\frac{0.9}{100}*\frac{31.5}{110^2}S=23.43*10^{-6}S$$

（2）等值电路如下（最好能写成各参数的数值及单位）：

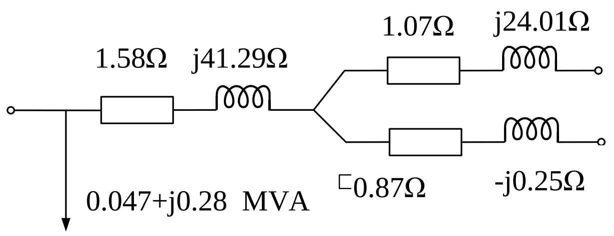


（注意：B_T 前符号为负）

补充：额定电压下变压器并联支路（即激磁支路）的空载损耗；

$$\Delta\tilde{S}_{YT}=U_N^2Y_T^*=110^2\times(3.87+j23.43)\times10^{-6}=0.047+j0.28MVA$$

相应的等值电路图



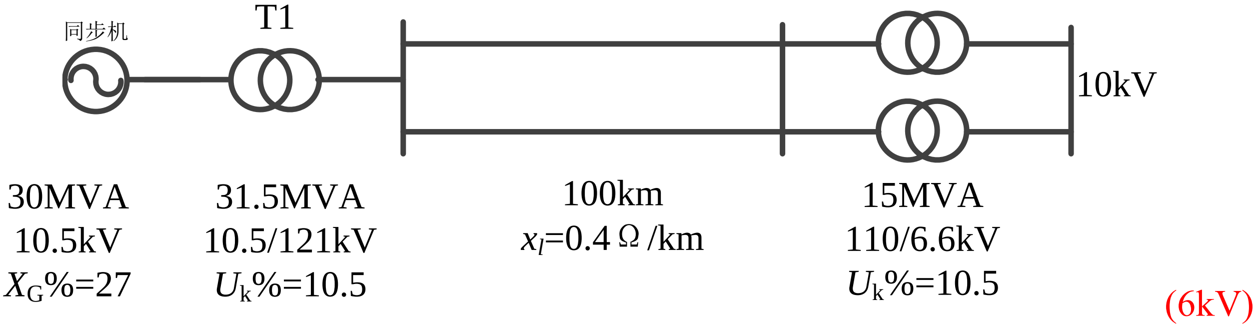
2.4 题

试作图中电力系统以标幺值表示的电抗图：

（a）取 S_B=100MVA，U_B=100kV 时的电抗图；

（b）取 S_B=100MVA，U_B=U_{av} 时的电抗图；

注：发电机电抗的求法$\boldsymbol{X_G}=\frac{\boldsymbol{X_G\%}}{\mathbf{100}}\frac{\boldsymbol{U_N^2}}{\boldsymbol{S_N}}$



解： 电抗的有名值计算：

$$\boldsymbol{X'_G}=\frac{\boldsymbol{X_G\%}}{\mathbf{100}}\frac{\boldsymbol{U_N^2}}{\boldsymbol{S_N}}=\frac{27}{100}\frac{10.5^2}{30}=0.99\,\Omega$$

$$\boldsymbol{X_{T1}}=\frac{\boldsymbol{U_{k1}\%}}{\mathbf{100}}\frac{\boldsymbol{U_N^2}}{\boldsymbol{S_N}}=\frac{10.5}{100}\frac{121^2}{31.5}=48.8\,\Omega$$

$$\boldsymbol{X_l}=\boldsymbol{x_l}\times\boldsymbol{l}=0.4*100=40.0\,\Omega$$

$$\boldsymbol{X_{T2}}=\boldsymbol{X_{T3}}=\frac{\boldsymbol{U_{k2}\%}}{\mathbf{100}}\frac{\boldsymbol{U_N^2}}{\boldsymbol{S_N}}=\frac{10.5}{100}\frac{110^2}{15}=84.7\,\Omega$$

（a）S_B=100MVA，U_B=100kV 时的电抗图；

题目分析——参数归算法：先将各级的有名值参数都归算到基本级，再除以基本级的基准值，折算为标幺值

①确定基本级及基准值：

选取 110kV 作为基本级，基本级基准电压为 **U_B=100kV，取全网基准功率 S_B=100MVA。**

基本级的阻抗基准值$Z_B=\frac{U_B^2}{S_B}=\frac{100^2}{100}=100$

②将各级有名值参数都归算到基本级：除X'_G外，归算后有名值均不变。

$$X_G=X'_G*k^2=X'_G(\frac{121}{10.5})^2=0.99*\left(\frac{121}{10.5}\right)^2=131.47\,\Omega$$

③将归算后的有名值除以基本级的基准值，折算为标幺值（无单位）：

$$X_{G*}=\frac{X_G}{Z_B}=\frac{131.47}{100}=1.315$$

$$\boldsymbol{X_{T1*}}=\frac{\boldsymbol{X_{T1}}}{Z_B}=\frac{48.8}{100}=0.488$$

$$\boldsymbol{X_{l*}}=\frac{\boldsymbol{X_l}}{Z_B}=\frac{40}{100}=0.4$$

$$\boldsymbol{X_{T2*}}=\frac{\boldsymbol{X_{T2}}}{Z_B}=\frac{84.7}{100}=0.847$$

阻抗图：

题目分析——基准值归算法：先将基本级的基准值归算到各电压等级，再将各级未经归算的有名值除以各级的基准值，折算为标幺值。

①确定基本级及基准值：

选取 110kV 作为基本级，基本级基准电压为 **U_B=100kV，取全网基准功率 S_B=100MVA。**

基本级的阻抗基准值$Z_B=\frac{U_B^2}{S_B}=\frac{100^2}{100}=100$

②将基本级的阻抗和导纳基准值（Z_B、Y_B）归算到各电压等级（因为 S_B 不变，也相当于将基准级电压归算至其他各级电压）。

主要是从 110kV 侧归算到 10kV 侧

$$U'_{B(10)}=\frac{U_B}{\boldsymbol{k}}=\frac{U_B}{\frac{\mathbf{121}}{\mathbf{10.5}}}=\frac{100}{121}*10.5=8.68\text{（kV）}$$

③参数标幺化：将各级未经归算的有名值除以本级的基准值，折算为标幺值。（无单位）：

$$X_{G*}=\frac{X'_G}{Z'_{B(10)}}=X'_G*\frac{S_B}{\boldsymbol{U'}^{\mathbf{2}}_{B(10)}}=\frac{0.99*100}{8.68*8.68}=1.314$$

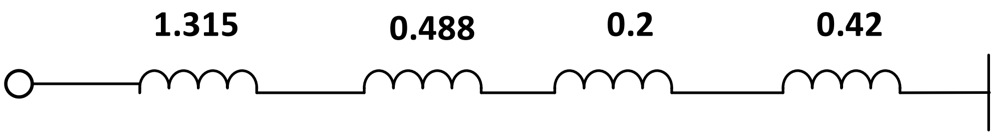
解释 $X_{G*}=\frac{X'_G}{Z'_{B(10)}}=X'_G*\frac{S_B}{U'^2_{B(10)}}=X'_G*\frac{S_B}{\frac{U_B^2}{k^2}}=X'_G*k^2*\frac{S_B}{U_B^2}=\frac{X_G}{Z_B}$

$$\boldsymbol{X_{T1*}}=\frac{\boldsymbol{X_{T1}}}{Z_B}=\frac{48.8}{100}=0.488$$

$$\boldsymbol{X_{l*}}=\frac{\boldsymbol{X_l}}{Z_B}=\frac{40}{100}=0.4$$

$$\boldsymbol{X_{T2*}}=\frac{\boldsymbol{X_{T2}}}{Z_B}=\frac{84.7}{100}=0.847$$

（b）S_B=100MVA，U_B=U_{av}=U_N 时的电抗图；



(b)概念：线路平均额定电压 U_{av}：约定为比线路额定电压高 5%的电压系列，例如 230，115，10.5，6.3。

题目分析：将线路平均额定电压 Uav 选为电压为基准电压，将有名值参数归算至线路平均额定电压（用线路平均额定电压计算变压器有名值参数）。$\boldsymbol{Z_B}=\frac{\boldsymbol{U_B^2}}{\boldsymbol{S_B}}=\frac{\boldsymbol{U_{av}^2}}{\boldsymbol{S_B}}$

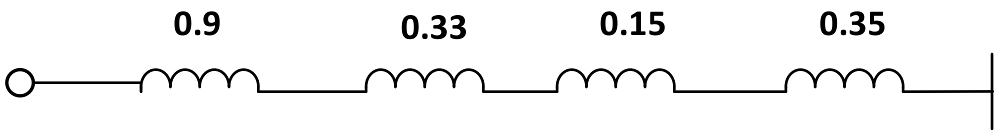
$$X_{G*}=\frac{\boldsymbol{X_G\%}}{\mathbf{100}}\frac{\boldsymbol{U_{av}^2}}{\boldsymbol{S_N}}\frac{1}{Z_B}=\frac{\boldsymbol{X_G\%}}{\mathbf{100}}\frac{\boldsymbol{U_{av}^2}}{\boldsymbol{S_N}}\frac{\boldsymbol{S_B}}{\boldsymbol{U_{av}^2}}=\frac{\boldsymbol{X_G\%}}{\mathbf{100}}\frac{\boldsymbol{S_B}}{\boldsymbol{S_N}}=\frac{27}{100}\frac{100}{30}=0.9$$

$$\boldsymbol{X_{T1*}}=\frac{\boldsymbol{U_{k1}\%}}{\mathbf{100}}\frac{\boldsymbol{U_{av}^2}}{\boldsymbol{S_N}}\frac{\mathbf{1}}{Z_B}=\frac{\boldsymbol{U_{k1}\%}}{\mathbf{100}}\frac{\boldsymbol{U_{av}^2}}{\boldsymbol{S_N}}\frac{\boldsymbol{S_B}}{\boldsymbol{U_{av}^2}}=\frac{\boldsymbol{U_{k1}\%}}{\mathbf{100}}\frac{\boldsymbol{S_B}}{\boldsymbol{S_N}}=\frac{10.5}{100}\frac{100}{31.5}=0.33$$

$$X_{l*} = X_l \frac{1}{Z_B} = X_l \frac{S_B}{U_{av}^2} = 40 \times \frac{100}{115^2} = 0.30$$

$$X_{T2*} = \frac{U_{k2}\%}{100} \frac{S_B}{S_N} = \frac{10.5}{100} \frac{100}{15} = 0.70$$

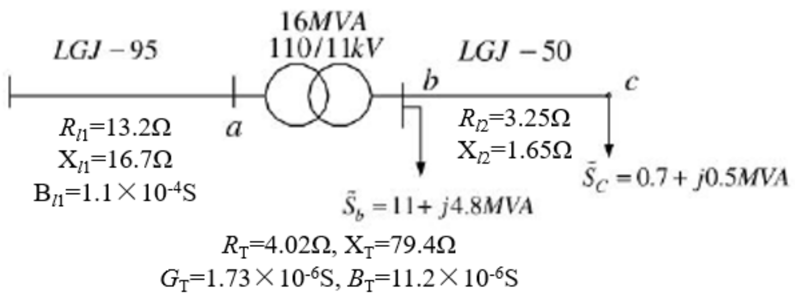
阻抗图：



第三章作业

3.1 题

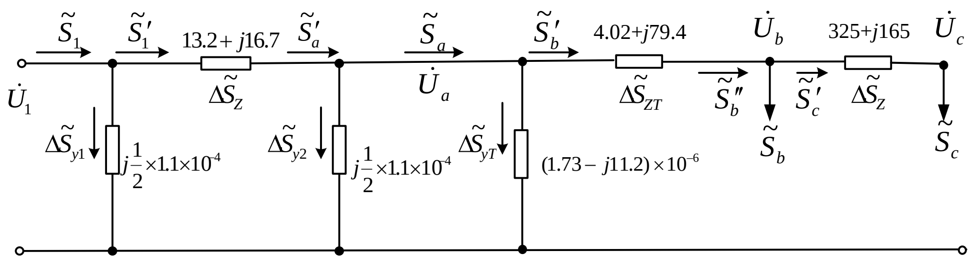
1、电力网络如图所示。已知始端电压 117kV，c 点负荷为 0.7+j0.5MVA，b 点负荷为 11+j4.8MVA，计算电网始端功率和末端电压。



解：第一种方法：简化解法

（1）选取 110kV 作为电压的基本级，计算网络参数，并画出等值电路。

其中 LGJ-50 线路参数要归算到 110kV 侧，则应当乘上 k^2=100。（备注：能给出等值电路，并标注出各功率符号，方便下一步计算）



电力网络的等值电路

（2）计算潮流分布

根据画出的电力网络等值电路可见：已知 c 点负荷 $\tilde{S}_c=0.7+j0.5MVA$，b 点负荷 $\tilde{S}_b=11+j4.8MVA$，已知始端电压 U_1=117 kV。本网为辐射形电网，并且已知末端功率和始端电压，求潮流分布，因此采用逐步渐近法进行计算。

① 先求功率分布： $\tilde{S}_1$ $\xleftarrow{\text{设电压为 } U_N}$ $\tilde{S}_c$

$\tilde{S}_c=0.7+j0.5MVA$

$$\Delta\tilde{S}_Z=\frac{P_c^2+Q_c^2}{U_N^2}(R+jX)=\frac{0.7^2+0.5^2}{110^2}\times(325+j165)=0.02+j0.01MVA$$

$$\tilde{S}_c'=\tilde{S}_c+\Delta\tilde{S}_Z=0.7+j0.5+0.02+j0.01=0.72+j0.51MVA$$

$$\tilde{S}_b''=\tilde{S}_c'+\tilde{S}_b=0.72+j0.51+11+j4.8=11.72+j5.31MVA$$

$$\Delta\tilde{S}_{ZT}=\frac{P_b''^2+Q_b''^2}{U_N^2}(R_T+jX_T)=\frac{11.72^2+5.31^2}{110^2}\times(4.02+j79.4)=0.055+j1.09MVA$$

$$\tilde{S}_b'=\tilde{S}_b''+\Delta\tilde{S}_{ZT}=11.77+j6.4MVA$$

$$\Delta\tilde{S}_{YT}=U_N^2Y^*=U_N^2(G_T+jB_T)=110^2\times(1.73+j11.2)\times10^{-6}=0.021+j0.136MVA$$

$$\Delta\tilde{S}_{Y2}=-j\frac{B}{2}U_N^2=-j\frac{1}{2}\times1.1\times10^{-4}\times110^2=-j0.665MVAR$$

$$\tilde{S}_a'=\tilde{S}_b'+\Delta\tilde{S}_{YT}+\Delta\tilde{S}_{Y2}=11.8+j5.87MVA$$

$$\Delta\tilde{S}_Z=\frac{P_a'^2+Q_a'^2}{U_N^2}(R+jX)=\frac{11.8^2+5.87^2}{110^2}\times(13.2+j16.7)=0.19+j0.24MVA$$

$$\tilde{S}_1'=\tilde{S}_a'+\Delta\tilde{S}_Z=11.99+j6.11MVA$$

$$\Delta\tilde{S}_{Y1}=-j\frac{B}{2}U_1^2=-j\frac{1}{2}\times1.1\times10^{-4}\times117^2=-j0.75MVAR$$

$$\tilde{S}_1=\tilde{S}_1'+\Delta\tilde{S}_{Y1}=11.99+j5.36MVA$$

②再求电压分布: $U_1 \longrightarrow U_c$

$LGJ-95$线路上的电压损耗

$$\Delta U_1=\frac{P_1'R+Q_1'X}{U_1}=\frac{11.99\times13.2+6.11\times16.7}{117}=2.22kV$$

$$\delta U_1=\frac{P_1'X-Q_1'R}{U_1}=\frac{11.99\times16.7-6.11\times13.2}{117}=1.02kV$$

则$U_a=\sqrt{(U_1-\Delta U_1)^2+(\delta U_1)^2}=114.78kV$

$$\delta_a=\arctan\frac{-1.02}{117-2.22}=-0.51^\circ$$

$$\dot{U}_a=114.78\angle-0.51^\circ$$

变压器上电压损耗

$$\Delta U_T=\frac{P_b'R_T+Q_b'X_T}{U_a}=\frac{11.77\times4.02+6.4\times79.4}{114.78}=4.84kV$$

$$\delta U_T=\frac{P_b'X-Q_b'R}{U_a}=\frac{11.77\times79.4-6.4\times4.02}{114.78}=7.92kV$$

则$U_b=\sqrt{(U_a-\Delta U_T)^2+(\delta U_T)^2}=110.22kV$

$$\delta_b=\arctan\frac{-7.92}{114.78-4.84}=-4.12°$$

$\dot{U}_b=110.22\angle-4.12°-0.51°=110.22\angle-4.63°$

$LGJ-50$线路上的电压损耗

$$\Delta U_2=\frac{P_C'R+Q_C'X}{U_b}=\frac{0.72\times325+0.51\times165}{110.22}=2.89kV$$

$$\delta U_2=\frac{P_C'X-Q_C'R}{U_b}=\frac{0.72\times165-0.51\times325}{110.22}=-0.43kV$$

$$U_C=\sqrt{(U_b-\Delta U_2)^2+(\delta U_2)^2}=107.33kV$$

$$\delta_C=\arctan\frac{0.43}{110.22-2.89}=0.23°$$

$\dot{U}_a=107.33\angle0.23°-4.63°=107.33\angle-4.4°$

如果忽略电压降落的横分量，计算结果如下：

$LGJ-95$线路上的电压损耗

$$\Delta U_1=\frac{P_1'R+Q_1'X}{U_1}=\frac{11.99\times13.2+6.11\times16.7}{117}=2.22kV$$

a点电压　　$U_a=U_1-\Delta U_1=117-2.22=114.78kV$

变压器上电压损耗　　$\Delta U_T=\frac{P_b'R_T+Q_b'X_T}{U_a}=\frac{11.77\times4.02+6.4\times79.4}{114.78}=4.84kV$

b 点电压　　$U_b=U_a-\Delta U_T=114.78-4.84=109.94kV$

$LGJ-50$线路上的电压损耗

$$\Delta U_2=\frac{P_C'R+Q_C'X}{U_b}=\frac{0.72\times325+0.51\times165}{109.94}=2.89kV$$

c点电压　　$U_c=U_b-\Delta U_2=109.94-2.89=107.05kV$

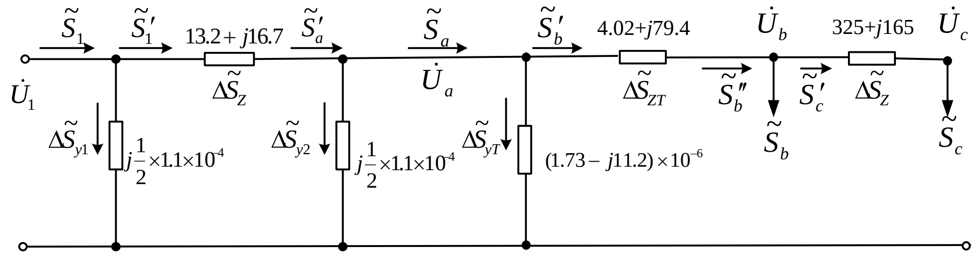
b 点实际电压:　　$U_b'=109.94\times\frac{11}{110}=10.994kV$

c 点实际电压:　　$U_c'=107.05\times\frac{11}{110}=10.705kV$

第二种方法：迭代解法（只迭代一次）

（1）选取 110kV 作为电压的基本级，计算网络参数，并画出等值电路。

跟第一步方法一致



电力网络的等值电路

（2）计算潮流分布

假设母线 c 归算到 110kV 侧的电压是$\dot{U}_c = 110\angle 0°$

①先由末端向始端求潮流分布（同时求电压和功率）

$\tilde{S}_c = 0.7 + j0.5MVA$

LGJ-50 线路中的电压降落:

$$\Delta U_2 = \frac{P_c R + Q_c X}{U_c} = \frac{0.7\times325 + 0.5\times165}{110} = 2.82kV$$

则 b 点电压　　$U_b = U_c + \Delta U_2 = 110 + 0.95 = 112.82kV$

LGJ-50 线路的功率损耗:

$$\Delta\tilde{S}_Z = \frac{P_c^2 + Q_c^2}{U_c^2}(R + jX) = \frac{0.7^2 + 0.5^2}{110^2}\times(325 + j165) = 0.02 + j0.01MVA$$

LGJ-50 线路首端功率:

$$\tilde{S}_c' = \tilde{S}_c + \Delta\tilde{S}_Z = 0.7 + j0.5 + 0.02 + j0.01 = 0.72 + j0.51MVA$$

变压器末端功率

$$\tilde{S}_b'' = \tilde{S}_c' + \tilde{S}_b = 0.72 + j0.51 + 11 + j4.8 = 11.72 + j5.31MVA$$

变压器阻抗支路的功率损耗

$$\Delta\tilde{S}_{ZT} = \frac{P_b''^2 + Q_b''^2}{U_b^2}(R_T + jX_T) = \frac{11.72^2 + 5.31^2}{112.82^2}\times(4.02 + j79.4) = 0.053 + j1.033MVA$$

变压器首端功率

$$\tilde{S}_b' = \tilde{S}_b'' + \Delta\tilde{S}_{ZT} = 11.72 + j5.31 + 0.053 + j1.033 = 11.773 + j6.343MVA$$

变压器上的电压降落:

$$\Delta U_T=\frac{P_b''R_T+Q_b''X_T}{U_b}=\frac{11.72\times4.02+5.31\times79.4}{112.82}=4.15kV$$

则 a 点电压 $U_a=U_b+\Delta U_T=112.82+4.15=116.97kV$

变压器并联支路和 LGJ-95 线路末端并联支路功率损耗

$$\Delta\tilde{S}_{YT}=U_a^2Y^*=U_a^2\left(G_T+jB_T\right)=116.97^2\times\left(1.73+j11.2\right)\times10^{-6}=0.024+j0.153MVA$$

$$\Delta\tilde{S}_{Y2}=-j\frac{B}{2}U_a^2=-j\frac{1}{2}\times1.1\times10^{-4}\times116.97^2=-j0.75MVA$$

$$\tilde{S}_a'=\tilde{S}_b'+\Delta\tilde{S}_{YT}+\Delta\tilde{S}_{Y2}=11.773+j6.343+0.024+j0.153-j0.75=11.797+j5.746MVA$$

线路 LGJ-95 上的功率损耗:

$$\Delta\tilde{S}_Z=\frac{P_a'^2+Q_a'^2}{U_a^2}\left(R+jX\right)=\frac{11.797^2+5.746^2}{116.97^2}\times\left(13.2+j16.7\right)=0.166+j0.21MVA$$

线路阻抗首端功率

$$\tilde{S}_1'=\tilde{S}_a'+\Delta\tilde{S}_Z=11.797+j5.746+0.166+j0.21=11.963+j5.956MVA$$

线路 LGJ-95 上的电压降落:

$$\Delta U_1=\frac{P_a'R+Q_a'X}{U_a}=\frac{11.797\times13.2+5.746\times16.7}{116.97}=2.15kV$$

则首端电压

$$U_1=U_a+\Delta U_1=116.97+2.15=119.12kV$$

电压误差

$$\left|119.12\text{-}117\right|=2.12kV$$

线路 LGJ-95 首端支路的功率损耗:

$$\Delta\tilde{S}_{Y1}=-j\frac{B}{2}U_1^2=-j\frac{1}{2}\times1.1\times10^{-4}\times119.12^2=-j0.78MVA$$

线路 LGJ-95 首端的功率:

$$\tilde{S}_1=\tilde{S}_1'+\Delta\tilde{S}_{Y1}=11.963+j5.956-j0.78=11.963-j5.176MVA$$

②再由已知首端电压 117kV 和第一步求得的功率从首端向末端求潮流分布（同时求电压和功率）

线路 LGJ-95 上的电压降落

$$\Delta U_1=\frac{P_1'R+Q_1'X}{U_1}=\frac{11.963\times13.2+5.956\times16.7}{117}=2.2kV$$

母线 a 的电压

$$U_a=U_1-\Delta U_1=117-2.2=114.8kV$$

线路 LGJ-95 阻抗的功率损耗

$$\Delta\tilde{S}_Z=\frac{P_1'^2+Q_1'^2}{U_1^2}\left(R+jX\right)=\frac{11.963^2+5.956^2}{117^2}\times\left(13.2+j16.7\right)=0.172+j0.218MVA$$

线路 LGJ-95 末端导纳支路的功率损耗

$$\Delta\tilde{S}_{Y2} = -j\frac{B}{2}U_a^2 = -j\frac{1}{2}\times1.1\times10^{-4}\times114.8^2 = -j0.725MVA$$

变压器导纳支路功率损耗

$$\Delta\tilde{S}_{YT} = U_a^2 Y^* = U_a^2\left(G_T + jB_T\right) = 114.8^2\times\left(1.73 + j11.2\right)\times10^{-6} = 0.023 + j0.148MVA$$

变压器阻抗支路首端功率

$$\begin{aligned}\tilde{S}_b' = \tilde{S}_1' - \Delta\tilde{S}_Z - \Delta\tilde{S}_{Y2} - \Delta\tilde{S}_{YT} &= 11.963 + j5.956 - 0.172 - j0.218 + j0.725 - 0.023 - j0.148 \\ &= 11.768 + j6.315MVA\end{aligned}$$

变压器中的电压跌落

$$\Delta U_T = \frac{P_b' R_T + Q_b' X_T}{U_a} = \frac{11.768\times4.02 + 6.315\times79.4}{114.8} = 4.78kV$$

母线 b 的电压是

$$U_b = U_a - \Delta U_T = 114.8 - 4.78 = 110.02kV$$

变压器阻抗支路中的功率损耗

$$\Delta\tilde{S}_{ZT} = \frac{P_b'^2 + Q_b'^2}{U_a^2}\left(R_T + jX_T\right) = \frac{11.768^2 + 6.315^2}{114.8^2}\times\left(4.02 + j79.4\right) = 0.054 + j1.07MVA$$

LGJ-50 线路阻抗首端功率

$$\tilde{S}_c' = \tilde{S}_b' - \Delta\tilde{S}_{ZT} - \tilde{S}_b = 11.768 + j6.315 - 0.054 - j1.07 - 11 - j4.8 = 0.714 + j0.445MVA$$

LGJ-50 线路阻抗支路功率损耗:

$$\Delta\tilde{S}_Z = \frac{P_c'^2 + Q_c'^2}{U_b^2}\left(R + jX\right) = \frac{0.714^2 + 0.445^2}{110.02^2}\times\left(325 + j165\right) = 0.019 + j0.01MVA$$

LGJ-50 线路末端功率:

$$\tilde{S}_c = \tilde{S}_c' - \Delta\tilde{S}_Z = 0.714 + j0.445 - 0.019 - j0.01 = 0.695 + j0.435MVA$$

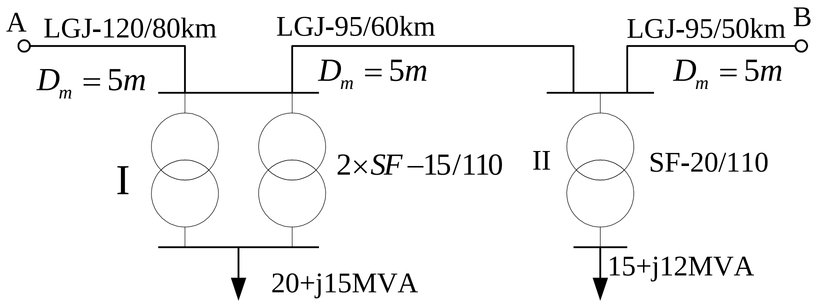
LGJ-50 线路的电压跌落

$$\Delta U_2 = \frac{P_c' R + Q_c' X}{U_b} = \frac{0.714\times325 + 0.445\times165}{110.02} = 2.78kV$$

母线 c'的电压

$$U_c' = U_b - \Delta U_2 = 110.02 - 2.78 = 107.24kV$$

3-2：两端供电网络如图所示。已知电源 A 点电压 117KV，电源端 B 点电压 112KV，计算网络功率分布和电压分布。



$SF-15/110$:额定变比$110/11kv, p_k=128kw, p_0=40.5kw, U_k\%=10.5, I_0\%=3.5$

$SF-20/110$:额定变比$110/11kv, p_k=157kw, p_0=48.6kw, U_k\%=10.5, I_0\%=2.3$

解:

一、选取 110kV 作为电压的基本级，计算网络参数，并画出等值电路

线路$L_1: LGJ-120/80\text{km}$，$D_m=5m$

查表：$r_0=0.27\Omega/km$，$x_0=0.423\Omega/km$，$b_0=2.69\times10^{-6}s/km$

$R_{L1}=0.27\times80=21.6\Omega$，$X_{L1}=33.84\Omega$，$B_{L1}=2.15\times10^{-4}s$

线路导纳上的功率损耗

$$\Delta\overline{S}_{YL1}=-j\frac{B_{L1}}{2}U_N^2=-j\frac{1}{2}\times2.15\times10^{-4}\times110^2=-j1.3MVar$$

线路$L_2: LGJ-95/60\text{km}$，$D_m=5m$

查表：$r_0=0.33\Omega/km$，$x_0=0.429\Omega/km$，$b_0=2.65\times10^{-6}s/km$

$R_{L2}=0.33\times60=19.8\Omega$，$X_{L2}=25.74\Omega$，$B_{L2}=1.59\times10^{-4}s$

线路导纳上的功率损耗

$$\Delta\overline{S}_{YL2}=-j\frac{B_{L2}}{2}U_N^2=-j\frac{1}{2}\times1.59\times10^{-4}\times110^2=-j0.96MVar$$

线路$L_3: LGJ-95/50\text{km}$，$D_m=5m$

查表：$r_0=0.33\Omega/km$，$x_0=0.429\Omega/km$，$b_0=2.65\times10^{-6}s/km$

$R_{L3}=0.33\times50=16.5\Omega$，$X_{L3}=21.45\Omega$，$B_{L3}=1.33\times10^{-4}s$

线路导纳上的功率损耗

$$\Delta\overline{S}_{YL3}=-j\frac{B_{L3}}{2}U_N^2=-j\frac{1}{2}\times1.33\times10^{-4}\times110^2=-j0.81MVar$$

变压器 $T_1: SF-15/110$

$$R_T=\frac{P_KU_{N1}^2}{1000S_N^2}=\frac{128\times110^2}{1000\times15^2}=6.88\Omega;$$

$$X_T=\frac{U_K\%U_{N1}^2}{100S_N}=\frac{10.5\times110^2}{100\times15}=84.7\Omega$$

$$G_T = -\frac{P_0}{1000U_{N1}^2} = \frac{40.5}{1000\times110^2} = 3.35\times10^{-6}S$$

$$B_T = \frac{I_0\%S_N}{100U_{N1}^2} = \frac{3.5\times15}{100\times110^2} = 43.4\times10^{-6}S$$

并联参数: $Z_T = \frac{1}{2}(R_T + jX_T) = 3.44 + j42.35\Omega$

$$Y_T = 2(G_T - jB_T) = (6.7 - j86.4)\times10^{-6}S$$

变压器导纳支路的功率损耗

$$\Delta\tilde{S}_{YT1} = 2\times(G_T + jB_T)U_2^2 = 2\times(3.35 + j43.4)\times10^{-6}\times110^2 = 0.081 + j1.05MVA$$

变压器$T_2: SF - 20/110$

$$R_T = \frac{P_K U_{N1}^2}{1000S_N^2} = \frac{157\times110^2}{1000\times20^2} = 4.75\Omega;$$

$$X_T = \frac{U_K\%U_{N1}^2}{100S_N} = \frac{10.5\times110^2}{100\times15} = 63.53\Omega$$

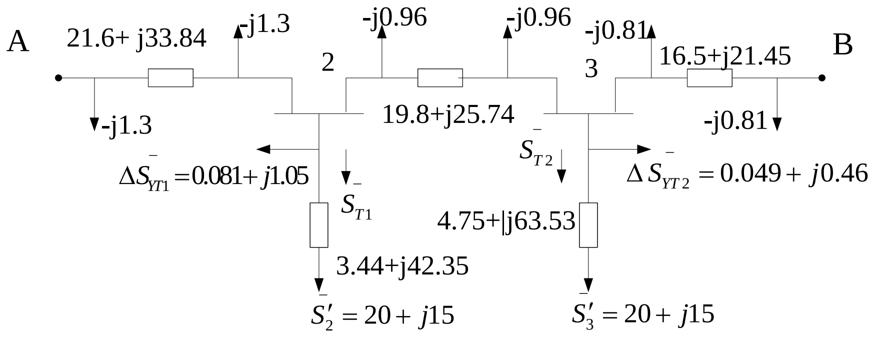
$$G_T = -\frac{P_0}{1000U_{N1}^2} = \frac{48.6}{1000\times110^2} = 4.02\times10^{-6}S$$

$$B_T = \frac{I_0\%S_N}{100U_{N1}^2} = \frac{2.3\times15}{100\times110^2} = 38\times10^{-6}S$$

变压器导纳支路的功率损耗

$$\Delta\tilde{S}_{YT2} = (G_T + jB_T)U_2^2 = (4.02 + j38)\times10^{-6}\times110^2 = 0.049 + j0.46MVA$$

电力网络的等值电路为:



二，计算运算负荷

升压变电站的运算功率=发电机的电源功率-变压器损耗-输电电路导纳支路功率的一半（即充电功率的一半）。

降压变电站的运算负荷=变压器所连的实际用电负荷+变压器损耗+输电电路导纳支路功率的一半（即充电功率的一半）。

（1）计算 2 点的运算负荷

$$\Delta\tilde{S}_{ZT1}=\frac{P_2'^2+Q_2'^2}{U_N^2}\left(R_{T1}+jX_{T1}\right)=\frac{20^2+15^2}{110^2}\times\left(3.44+j42.35\right)=0.18+j2.2MVA$$

$$\tilde{S}_{T1}=\tilde{S}_2'+\Delta\tilde{S}_{ZT1}=20+j15+0.18+j2.2=20.18+j17.2MVA$$

$$\tilde{S}_2=\tilde{S}_2'+\Delta\tilde{S}_{ZT1}+\Delta\tilde{S}_{YT1}+\Delta\tilde{S}_{YL1}+\Delta\tilde{S}_{YL2}=20+j15+0.18+j2.2+0.081+j1.05$$
$$-j1.3-j0.96=20.26+j15.99MVA$$

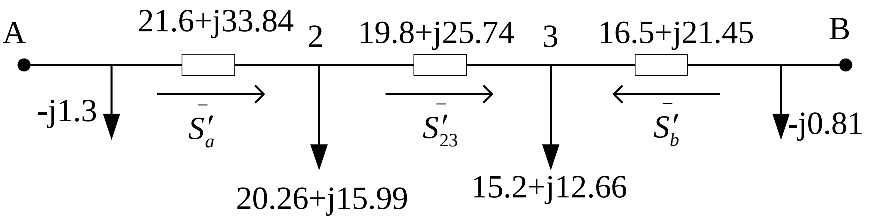
（2）计算 3 点的运算负荷

$$\Delta\tilde{S}_{ZT2}=\frac{P_3'^2+Q_3'^2}{U_N^2}\left(R_{T2}+jX_{T2}\right)=\frac{15^2+12^2}{110^2}\times\left(4.75+j63.53\right)=0.15+j1.97MVA$$

$$\tilde{S}_{T2}=\tilde{S}_3'+\Delta\tilde{S}_{ZT3}=15+j15+0.15+j1.97=15.15+j13.97MVA$$

$$\tilde{S}_3=\tilde{S}_3'+\Delta\tilde{S}_{ZT2}+\Delta\tilde{S}_{YT2}+\Delta\tilde{S}_{YL2}+\Delta\tilde{S}_{YL3}=15+j12+0.15+j1.97+0.049+j0.46$$
$$-j0.96-j0.81=15.2+j12.66MVA$$

电力网络的简化等值电路如图:



三，计算近似功率分布

$$\tilde{S}_a=\frac{\tilde{S}_2\left(\overset{*}{Z}_{23}+\overset{*}{Z}_{3B}\right)+\tilde{S}_3\overset{*}{Z}_{2B}}{\overset{*}{Z}_{A2}+\overset{*}{Z}_{23}+\overset{*}{Z}_{3B}}$$
$$=\frac{\left(20.26+j15.99\right)\left(36.3-j47.2\right)+\left(15.2+j12.66\right)\left(16.5-j21.45\right)}{57.9-j81}$$
$$=15.79+j13.57MVA$$

$$\tilde{S}_b=\frac{\tilde{S}_2\overset{*}{Z}_{A2}+\tilde{S}_3\left(\overset{*}{Z}_{A2}+\overset{*}{Z}_{23}\right)}{\overset{*}{Z}_{A2}+\overset{*}{Z}_{23}+\overset{*}{Z}_{3B}}$$
$$=\frac{\left(20.26+j15.99\right)\left(21.6-j33.84\right)+\left(15.2+j12.66\right)\left(41.4-j59.58\right)}{57.9-j81}$$
$$=19.67+j15.08MVA$$

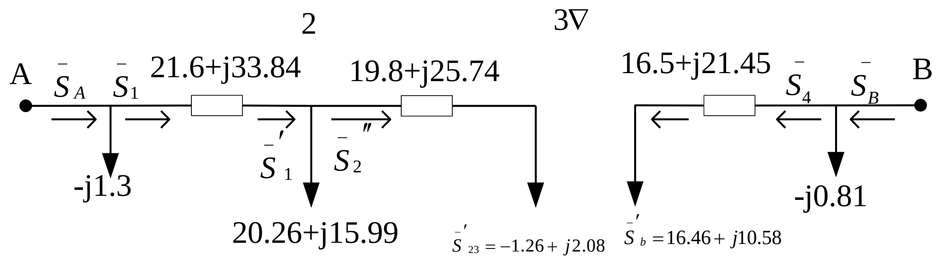
$\dot{U}_A \neq \dot{U}_B$　　∴存在循环功率 $\bar{S}_C = \dfrac{U_N d\overset{*}{U}}{\overset{*}{Z}_\Sigma} = \dfrac{110\times(117-112)}{59.7-j81} = 3.21+j4.5MVA$

$\bar{S}_a' = \bar{S}_a + \bar{S}_c = 15.79 + j13.57 + 3.21 + j4.5 = 19 + j18.07MVA$

$\tilde{S}_b' = \tilde{S}_b - \tilde{S}_c = 19.67 + j15.08 - 3.21 - j4.5 = 16.46 + j10.58MVA$

$\tilde{S}_{23}' = \tilde{S}_a' - \tilde{S}_2 = 19 + j18.07 - 20.26 - j15.99 = -1.26 + j2.08MVA$

由近似功率分布计算可见：$P_{23} = -1.26MW < 0$ 有功功率从节点 3 流向节点 2，所以有功功率的分布为 2 节点；$Q_{23} = 2.08MVar > 0$ 无功功率从节点 2 流向节点 3，因此在电压最低点将电网拆分为两个：



四，计算功率分布和电压分布

1，　左侧电网 $A \to 2 \to 3$　　已知：首端电压 $U_A = 117kv$，　末端功率 $\bar{S}_{23}' = -1.26 + j2.08MVA$

（1）计算功率分布

$$\tilde{S}'' = \tilde{S}_{23}' + \frac{P_{23}'^2 + Q'^2}{U_N^2}(R_{23} + jX_{23})$$

$$= -1.26 + j2.08 + \frac{1.26^2 + 2.08^2}{110^2}(19.8 + j25.74) = -1.25 + j2.09MVA$$

$$\bar{S}_1' = \bar{S}_2'' + \bar{S}_2 = -1.25 + j2.09 + 20.26 + j15.99 = 19 + j18.08MVA$$

$$\tilde{S}_1 = \tilde{S}_1' + \frac{P_1'^2 + Q_1'^2}{U_N^2}(R_{A2} + jX_{A2})$$

$$= 19 = j18.08 + \frac{19^2 + 18.08^2}{110^2}(21.6 + j33.84) = 20.23 + j20MVA$$

$$\bar{S}_A = \bar{S}_1 + (-j1.3) = 20.23 + j20 - j1.3 = 20.23 + j18.7MVA$$

（2）计算电压分布

$$U_2 = U_A - \frac{P_1 R_{A2} + Q_1 X_{A2}}{U_A} = 117 - \frac{20.23\times 21.6 + 20\times 33.84}{117} = 107.49kv$$

$$U_3 = U_2 - \frac{P_2''R_{A2} + Q_2''X_{23}}{U_2} = 107.49 - \frac{-1.25\times 19.8 + 2.09\times 25.74}{107.49} = 107.22kv$$

2， 右侧电网 $B \to 3$　已知：始端电压 $U_B = 112kv$，末端功率 $\bar{S}_b' = 16.46 + j10.58MVA$

（1）计算功率分布

$$\tilde{S}_4 = \tilde{S}_b' + \frac{P_b'^2 + Q_b'^2}{U_N^2}(R_{3B} + jX_{3B})$$

$$= 16.46 + \mathrm{j}10.58 + \frac{16.46^2 + 10.58^2}{110^2}(16.5 + j21.45) + 16.98 + j11.26MVA$$

$$\bar{S}_B = \bar{S}_4 + (-j0.81) = 16.98 + j11.26 - j0.81 = 16.98 + j10.45MVA$$

（2）计算电压分布

$$U_3 = U_B - \frac{P_4R_{3B} + Q_4X_{3B}}{U_B} = 112 - \frac{16.98\times 16.5 + 11.26\times 21.45}{112} = 107.34kv$$

五，计算变电所低压母线电压（根据电力网络的等值电路图）

变电所 I

$$U_2' = U_2 - \frac{P_{T1}R_{T1} + Q_{T1}X_{T1}}{U_2}$$

$$= 107.49 - \frac{20.18\times 3.44 + 17.2\times 42.35}{107.49} = 100.07kv$$

实际电压为：$\frac{U_2'}{K_{T1}} = \frac{100.07}{110/11} = 10kv$

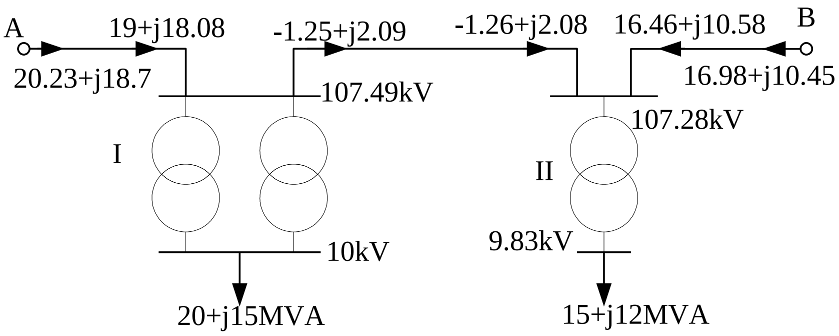
变电所 II

$$U_3 = \frac{107.22 + 107.34}{2} = 107.28kv$$

$$U_3' = U_3 - \frac{P_{T2}R_{T2} + Q_{T2}X_{T2}}{U_3} = 107.28 - \frac{15.15\times 4.75 + 13.97\times 63.53}{107.28} = 98.34kv$$

实际电压为：$\frac{U_3'}{K_{T2}} = \frac{98.34}{110/11} = 9.83kv$

电力网络的潮流分布图



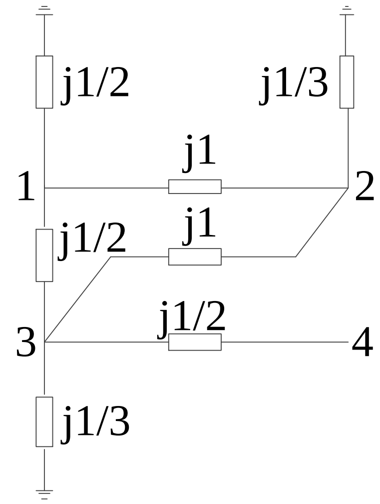
第四章作业

4.1 题

如下图所示网络（图中参数均标注为阻抗标幺值），要求：

（1）写出网络的节点导纳矩阵。

（2）如果切除支路 1-3，节点导纳矩阵如何修改？



解：

（1）原网络的节点导纳矩阵

支路自导纳和支路互导纳计算：

$$y_{10}=\frac{1}{j1/2}=-j2$$

$$y_{20}=y_{30}=\frac{1}{j1/3}=-j3$$

$$y_{12}=\frac{1}{Z_{12}}=\frac{1}{j1}=-j1$$

$$y_{13}=\frac{1}{Z_{13}}=\frac{1}{j1/2}=-j2$$

$$y_{23}=\frac{1}{Z_{23}}=\frac{1}{j1}=-j1$$

$$y_{34}=\frac{1}{Z_{34}}=\frac{1}{j1/2}=-j2$$

节点导纳元素计算：

$Y_{11}=y_{10}+y_{12}+y_{13}=-j5,\qquad Y_{12}=-y_{12}=j1,\qquad Y_{13}==-y_{13}=j2,\qquad Y_{14}=0$

$Y_{22}=y_{20}+y_{12}+y_{23}=-j5,\qquad Y_{23}=-y_{23}=j1,\qquad Y_{24}=0,$

$Y_{33}=y_{30}+y_{13}+y_{23}+y_{34}=-j8,\qquad Y_{34}=-y_{34}=j2$

$Y_{44}=y_{34}=-j2$

得出：原节点导纳矩阵 $\mathbf{Y_B}=\begin{bmatrix}Y_{11}&Y_{12}&Y_{13}&Y_{14}\\Y_{21}&Y_{22}&Y_{23}&Y_{24}\\Y_{31}&Y_{32}&Y_{33}&Y_{34}\\Y_{41}&Y_{42}&Y_{43}&Y_{44}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-j5&j1&j2&0\\j1&-j5&j1&0\\j2&j1&-j8&j2\\0&0&j2&-j2\end{bmatrix}$

（2）切除支路 1-3，相当于在支路 1-3 之间增加一条导纳为$-y_{13}=j2$的支路

则原导纳矩阵与节点Y_{11}、Y_{33}、Y_{13}、Y_{31}元素均要改变，变为：

$$\boldsymbol{Y'_B}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{-j3}&\boldsymbol{j1}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}\\\boldsymbol{j1}&\boldsymbol{-j5}&\boldsymbol{j1}&\boldsymbol{0}\\\boldsymbol{0}&\boldsymbol{j1}&\boldsymbol{-j6}&\boldsymbol{j2}\\\boldsymbol{0}&\boldsymbol{0}&\boldsymbol{j2}&\boldsymbol{-j2}\end{bmatrix}$$

第五章作业

5.1 题 分析造成电力系统频率波动的原因。

答：发电机功率和负荷功率不平衡 或有功功率的改变

5.2 题 阐述频率调整的必要性。

当系统中出现有功功率不平衡时，如有功电源不足或负荷增长时，将会引起系统频率下降，反之，将造成频率升高。

频率变动对用电设备、发电厂和电力系统本身都会产生不利影响。

由于电力负荷的不确定性和多变性，为了保证频率质量（限制频率偏移在允许范围之内），必须不断调节有功功率电源的输出功率。这就是频率调整的内容。

5.3 题 电力系统设置备用容量的目的是什么？按备用的形式分备用容量有哪几种类型？旋转备用投入速度快，有利于保证电能质量，是否电力系统中旋转备用容量设置的越多越好？为什么？

5.4 题 阐述频率一次调整、二次调整和三次调整（有功负荷的最优分配）的含义。

第六章作业

6.1 题 电力系统电压波动的原因是什么？

6.2 题 什么叫电力系统的电压中枢点？在系统规划设计时，中枢点电压调整方式有哪几类，有什么特点？

6.3 题 简述常用的调压措施及优缺点？