

电力系统分析习题

第六章

例1：如图所示，有两台容量均为100MW，耗量特性分别为

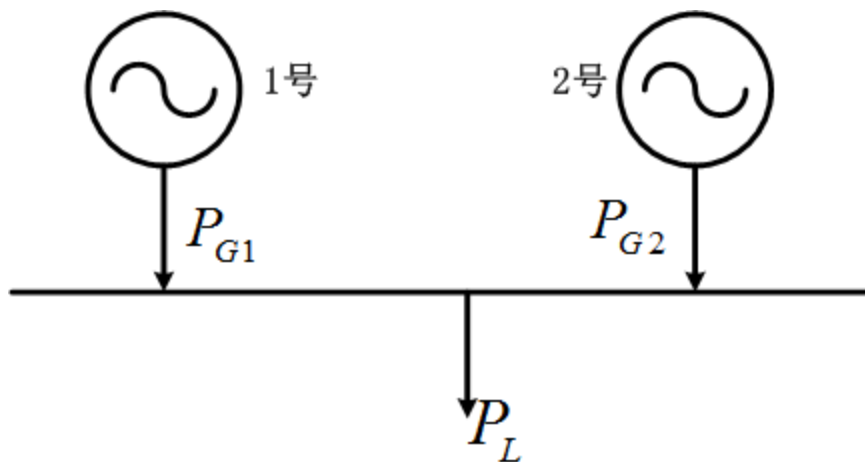
$$F_1 = 1 + 0.2P_{G1} + 0.002P_{G1}^2 (t/h)$$

$$F_2 = 3 + 0.1P_{G2} + 0.002P_{G2}^2 (t/h)$$

两台发电机同时供一个负荷 P_L ，试求：

(1) 当系统负荷为65MW，按1号机发20MW，2号机发45MW分配负荷时，是不是最优分配方案？

(2) 当系统负荷为160MW时，此两台发电机间的最优分配方案是什么？



解：

$$\begin{cases} \lambda_1 = 0.2 + 0.004P_{G1} \\ \lambda_2 = 0.1 + 0.004P_{G2} \end{cases}$$

(1) 当 $P_{G1}=20\text{MW}$, $P_{G2}=45\text{MW}$ 时, 代入上式得

$$\begin{cases} \lambda_1 = 0.2 + 0.004 \times 20 = 0.28 \\ \lambda_2 = 0.1 + 0.004 \times 45 = 0.28 \end{cases}$$

可见 $\lambda_1 = \lambda_2$, 所以是最优分配。

(2) 当 $P_L=160\text{MW}$ 时

$$\begin{cases} \lambda_1 = 0.2 + 0.004P_{G1} = 0.1 + 0.004P_{G2} = \lambda_2 \\ P_{G1} + P_{G2} = 160 \end{cases}$$

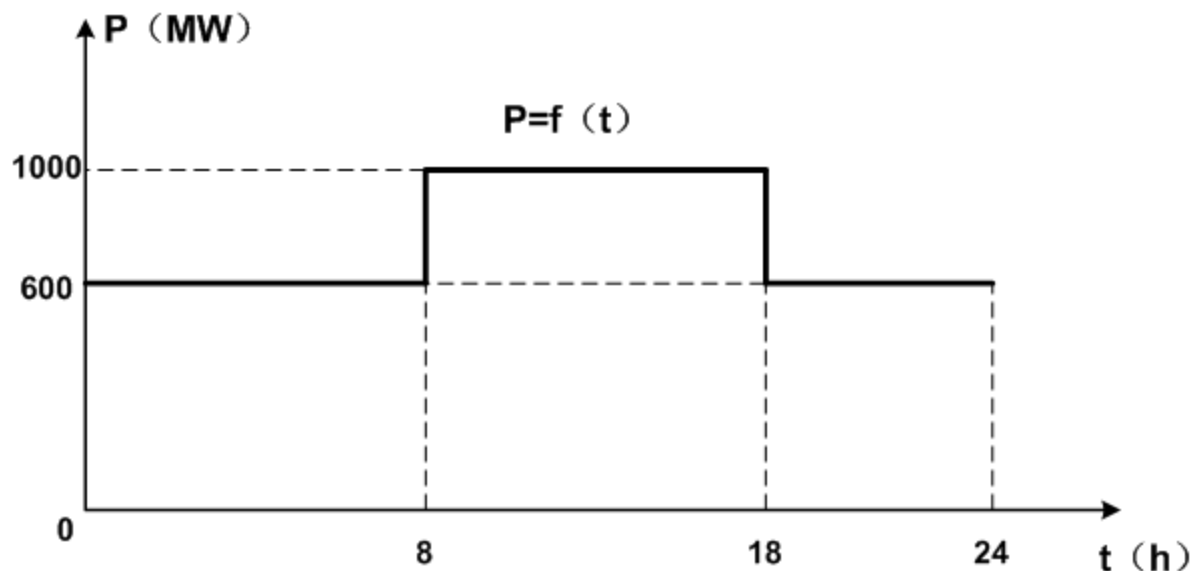
解得 $P_{G1}=67.5\text{MW}$, $P_{G2}=92.5\text{MW}$

例2：电力系统中只有一个水电厂、一个火电厂，火、水电厂的耗量特性分别为

$$F = 3 + 0.3P_G + 0.0015P_G^2 (t/h)$$

$$W = 5 + P_{GH} + 0.002P_{GH}^2 (m^3/s)$$

水电厂的日用水量恒定为 $K = 1.5 \times 10^7 m^3$ ，系统的日负荷曲线如图所示，火电厂容量900MW，水电厂容量400MW。求在给定的日用水量条件下，水、火电厂的有功功率经济分配方案。



解：由负荷曲线可知，0~8h及18~24h负荷为600MW，8~18h负荷为1000MW。各厂的微增率为

$$\lambda_T = \frac{dF}{dP_G} = 0.3 + 0.003P_G \quad \lambda_H = \frac{dF}{dP_{GH}} = 1 + 0.004P_{GH}$$

根据等微增率准则，有 $0.3 + 0.003P_G = \gamma_H (1 + 0.004P_{GH})$

由于 γ_H 未知，首先设定 $\gamma_H = 1$ 代入求解。

在0~8h，有

$$\begin{cases} 0.3 + 0.003P_G = 1 + 0.004P_{GH} \\ P_G + P_{GH} = 600 \end{cases}$$

解得 $P_{GH} = 157.1\text{MW}$ $P_G = 442.9\text{MW}$

在8~18h，有

$$\begin{cases} 0.3 + 0.003P_G = 1 + 0.004P_{GH} \\ P_G + P_{GH} = 1000 \end{cases}$$

解得 $P_{GH} = 328.57MW$ $P_G = 671.43MW$

将上述计算结果代回到水电厂耗量特性验算用水量。

在0~8h及18~24h, 用水量

$$W' = 5 + P_{GH} + 0.002P_{GH}^2 = 5 + 157.1 + 0.002 \times 157.1^2 = 211.46(m^3 / s)$$

$$K' = W't = 211.46 \times 14 \times 3600 = 10657584(m^3)$$

在8~18h, 用水量

$$W'' = 5 + 328.57 + 0.002 \times 328.57^2 = 549.5(m^3 / s)$$

$$K'' = W''t = 549.5 \times 10 \times 3600 = 19782000(m^3)$$

全天总用水量

$$K = K' + K'' = 30439584(m^3)$$

因 $K > 1.5 \times 10^7 m^3$, 需增加 γ_H 的值重新计算, 多次计算结果列于下表中。

γ_H	0~8h及18~24h		8~18h		$K(m^3)$
	$P_G(MW)$	$P_{GH}(MW)$	$P_G(MW)$	$P_{GH}(MW)$	
1.4	518.6	81.39	739.1	220.9	16667359
1.45	526.1364	73.8636	789.77	210.23	15454980
1.47	529.054	70.946	793.92	206.08	14990904
1.4696	528.99622	71.00378	793.8368	206.1632	15000892
1.469635	529.002	70.998	793.884	206.156	15000092

最后分配方案为 $\gamma_H = 1.47$

$$\left. \begin{array}{l} P_{GH} = 70.998MW \\ P_G = 529.002MW \end{array} \right\} 0\sim 8h \text{ 及 } 18\sim 24h$$

$$\left. \begin{array}{l} P_{GH} = 206.116MW \\ P_G = 793.844MW \end{array} \right\} 8\sim 18h$$

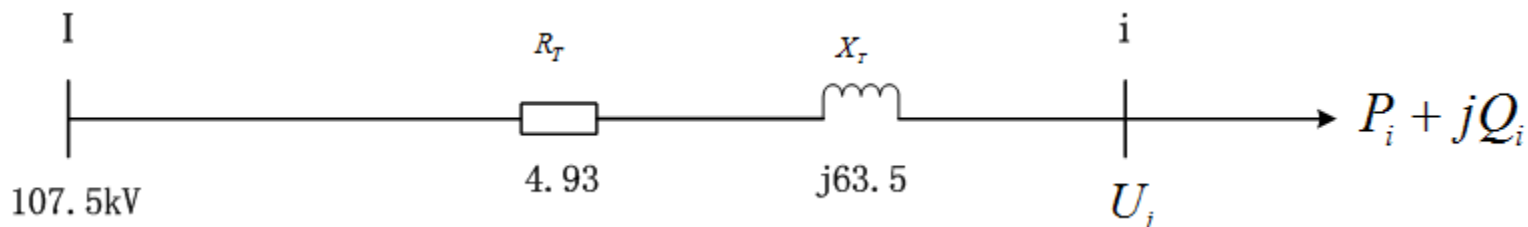
例3：如图所示，某降压变电所装设一台容量为20MVA、电压为110/11kV的变压器，要求变压器低压侧的偏移在大、小负荷时分别不超过额定值的2.5%和7.5%，最大负荷为18MVA，最小负荷为7MVA， $\cos \varphi = 0.8$ ，变压器高压侧的电压在任何运行情况下均维持107.5kV，变压器参数为 $U_k \% = 10.5$ ， $P_k = 163kW$ ，励磁影响不计。试选择变压器的分接头。



解：变压器参数为

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N} = \frac{163 \times 110^2}{1000 \times 20^2} = 4.93(\Omega)$$

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



末端负荷为

$$\begin{cases} \dot{S}_{\max} = 18 \cos \varphi + j18 \sin \varphi = 18 \times 0.8 + j18 \times 0.6 = 14.4 + j10.8(MVA) \\ \dot{S}_{\min} = 7 \cos \varphi + j7 \sin \varphi = 7 \times 0.8 + j7 \times 0.6 = 5.6 + j4.2(MVA) \end{cases}$$

按调压要求，变压器低压侧要求的实际电压应为

$$\begin{cases} U'_{i\max} = 10 \times (1 + 2.5\%) = 10.25(kV) \\ U'_{i\min} = 10 \times (1 + 7.5\%) = 10.75(kV) \end{cases}$$

在变压器上的电压损耗为 $\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$

$$\begin{cases} U_{i\max} = U_{I\max} - \Delta U_{\max} = 107.5 - \frac{14.4 \times 4.93 + 10.8 \times 63.5}{U_{i\max}} \\ U_{i\min} = U_{I\min} - \Delta U_{\min} = 107.5 - \frac{5.6 \times 4.93 + 4.2 \times 63.5}{U_{i\min}} \end{cases}$$

解得 $U_{i\max} = 99.9kV$ $U_{i\min} = 104.6kV$

然而

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{TI \max} = U_{i \max} \frac{U_{iN}}{U'_{i \max}} = 99.9 \times \frac{11}{10.25} = 107.2(kV) \\ U_{TI \min} = U_{i \min} \frac{U_{iN}}{U'_{i \min}} = 104.6 \times \frac{11}{10.75} = 107(kV) \end{array} \right.$$

$$U_{TI} = \frac{U_{TI \max} + U_{TI \min}}{2} = 107.1(kV)$$

故分接头电压为 $110 \times (1-2.5\%) = 107.25kV$ 的分接头。

校验：

最大负荷时

$$U'_{i \max} = U_{i \max} \frac{U_{iN}}{U_{TI}} = 99.9 \times \frac{11}{107.25} = 10.25(kV)$$

最小负荷时

$$U'_{i \min} = U_{i \min} \frac{U_{iN}}{U_{TI}} = 104.6 \times \frac{11}{107.25} = 10.73(kV)$$

偏移：

最大负荷时

$$\Delta U_{\max} \% = \frac{10.25 - 10}{10} \times 100\% = 2.5\%$$

最小负荷时

$$\Delta U_{\min} \% = \frac{10.73 - 10}{10} \times 100\% = 7.3\% \leq 7.5\%$$

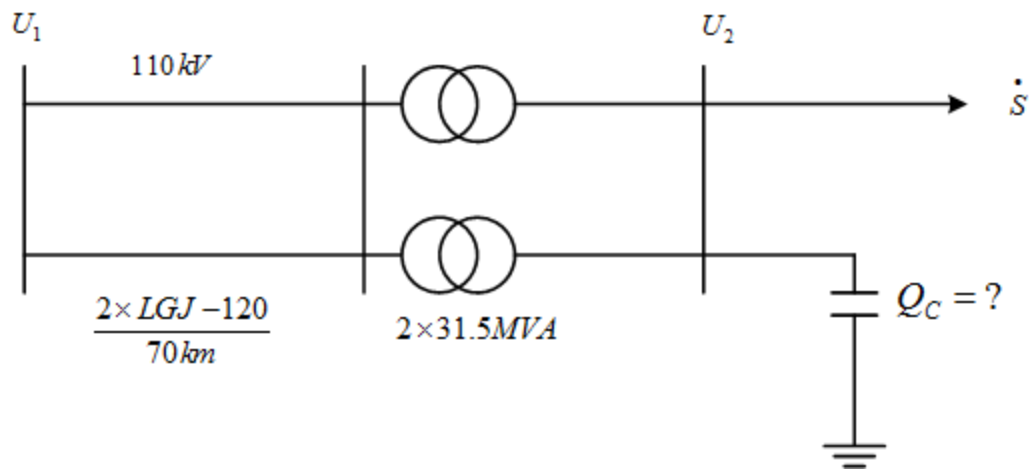
所以选择的分接头满足要求。

例4：如图所示，一个地区变电所，由双回110kV输电线供电，变电所装两台容量均为31.5MVA的分接头为 $110\pm4\times 2.5\%/11kV$ 的变压器，已知双母线电抗 $X_l=14.6\Omega$ ，两台主变压器的电抗 $X_T=20.2\Omega$ （已折算至110kV侧），变电所低压侧母线上的电压折算至高压侧时，在最大负荷时 $U_{2\max}=100.5kV$ ，最小负荷时为 $U_{2\min}=107.5kV$ 。试求：

(1) 并联电容时，容量和变比的选择怎样配合？并联调相机时，容量和变比怎样配合？

(2) 当变电所低压侧母线要求最大负荷时 $U'_{2\max}=10.5kV$ ，最小负荷时 $U'_{2\min}=10kV$ ，求为保证调压要求所需的最小同步调相机容量 Q_c 。

(3) 为达到同样的调压目的，选静止电容器容量为多少？



解：（1）对于并联电容器，只能发出感性无功。按最大负荷时补偿装置全部投入，最小负荷时全部退出来选择变压器变比和补偿容量。

对于同步调相机，因其过激运行可发出满额无功，欠激时可吸收50%额定容量的无功。按最大负荷时过激满额运行，最小负荷时欠激满额运行来选择变压器电压变比和补偿容量。

（2）选择调相机容量：

首先按最大、最小负荷两种方式确定变比为

$$k = \frac{U'_{2\max} U_{2\max} + 2U'_{2\min} U_{2\min}}{U_{2\max}'^2 + 2U_{2\min}'^2}$$
$$= \frac{10.5 \times 100.5 + 2 \times 10 \times 107.5}{10.5^2 + 2 \times 10^2} = 10.33$$

则 $U_{Tj} = kU_{N2} = 10.33 \times 11 = 113.64 \text{ kV}$ ，对应 $110(1 + 2.5\%) = 112.75 \text{ kV}$ 的分接头，所以 $k = 112.75/11$ 。

按最大负荷时选 Q_C 为

$$Q_C = \frac{U'_{2\max}}{X_{ij}} \left(U'_{2\max} - \frac{U_{2\max}}{k} \right) k^2$$
$$= \frac{10.5}{14.6 + 20.2} \left(10.5 - \frac{100.5}{\frac{112.75}{11}} \right) \left(\frac{112.75}{11} \right)^2 = 22.19 (\text{M var})$$

(3) 选电容器的容量：

变比按最小负荷时的电容器全部切除确定

$$U_{Tj\min} = U_{2\min} \frac{U_{Nj}}{U'_{j\min}} = 107.5 \times \frac{11}{10} = 118.25 (\text{kV})$$

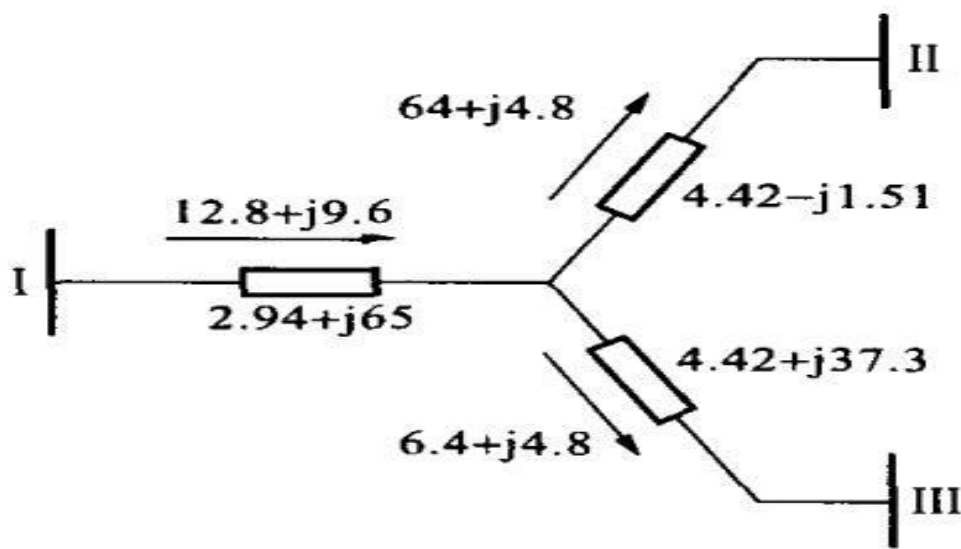
$$k = \frac{U_{Tj\min}}{U_N} = \frac{118.25}{11} = 10.75$$

所以选110 (1+7.5%) =118.25kV的分接头。

电容器容量按最大负荷时电容器投入确定

$$Q_C = \frac{U'_{jC\max}}{X_{ij}} \left(U'_{jC\max} - \frac{U_{j\max}}{k} \right) k^2 = \frac{10.5}{14.6 + 20.2} \left(10.5 - \frac{100.5}{10.75} \right) 10.75^2$$
$$= 40.14(M \text{ var})$$

例5（书例6-5）：如图所示，三绕组变压器的额定电压为110/38.5/6.6kV，等值电路图如图所示。各绕组最大负荷时流通的功率已示于图中，最小负荷为最大负荷的二分之一。设与该变压器相联的高压母线电压最大、最小负荷时分别为112、115kV；中、低压母线电压偏移最大、最小负荷时分别允许为0、+7.5%，试选择该变压器高、中压绕组的分接头。



三绕组变压器等值电路

解：按给定条件求得的各绕组中电压损耗如表1所示，归算至高压侧的各母线电压如表2所示。

表1 **各绕组电压损耗** (kV)

负荷水平	高压绕组	中压绕组	低压绕组
最大负荷	5.91	0.197	1.980
最小负荷	2.88	0.093	0.935

表2 **各母线电压** (kV)

负荷水平	高压母线	中压母线	低压母线
最大负荷	112	105.9	104.1
最小负荷	115	112.0	111.1

按表2，根据低压母线对调压的要求，选择高压绕组的分接头。最大负荷时，低压母线电压要求为6kV

$$U_{tmax} = 104.1 \times \frac{6.6}{6} = 114.5\text{kV}$$

最小负荷时，低压母线电压要求不高于 $1.075 \times 6 = 6.45\text{kV}$

$$U_{tmin} = 111.1 \times \frac{6.6}{6.45} = 113.7\text{kV}$$

取它们的平均值 $(114.5 + 113.7) \div 2 = 114.1$ ，可选用110+5%，即115.5kV的分接头。

这时，低压母线电压

$$\text{最大负荷时, } 104.1 \times \frac{6.6}{115.5} = 5.95\text{kV},$$

$$\text{最小负荷时, } 111.1 \times \frac{6.6}{115.5} = 6.35\text{kV}$$

低压母线电压偏移

$$\text{最大负荷时, } \frac{5.95-6}{6} \times 100 = -0.833,$$

$$\text{最小负荷时, } \frac{6.35-6}{6} \times 100 = +5.83$$

虽然最大负荷时的电压较要求低0.833%，但由于分接头之间的电压差为2.5%，求得的电压偏移距要求不超过1.25%是允许的。

选定高压绕组的分接头后即可选择中压绕组的分接头。最大负荷时，中压母线电压要求为35kV，从而有

$$U'_{t\max} = 35 \times \frac{115.5}{105.9} = 38.2\text{kV}$$

最小负荷时，中压母线电压要求不高于 $1.075 \times 35 = 37.6\text{kV}$ ，从而有

$$U'_{tmin} = 37.6 \times \frac{115.5}{112} = 38.8\text{kV}$$

取它们的平均值 $(38.2 + 38.8) \div 2 = 38.5$ ，可选用38.5kV的主接头。

这时，

中压母线电压最大负荷时， $105.9 \times \frac{38.5}{115.5} = 35.3\text{kV}$ ；

最小负荷时， $112 \times \frac{38.5}{115.5} = 37.3\text{kV}$

中压母线电压偏移

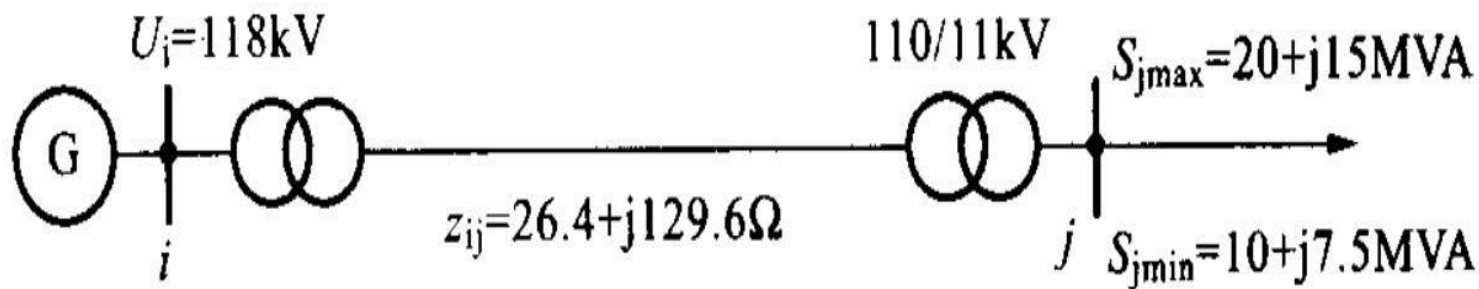
最大负荷时， $\frac{35.3-35}{35} \times 100 = 0.86$ ，

最小负荷时， $\frac{37.3-35}{35} \times 100 = 6.57$ ，可见都能满足要求。

于是，该变压器应选的分接头电压或变比为115.5/38.5/6.6kV。

例6（书例6-6）：简单系统结线如图所示。降压变电所低压侧母线要求常调压，保持10.5kV。试确定采用下列无功功率补偿设备时的设备容量

（1）补偿设备采用电容器；（2）补偿设备采用调相机。



简单系统结线图

设置补偿设备前，最大负荷时变电所低压侧归算至高压侧的电压为

$$U_{j\max} = U_i - \frac{P_{j\max}r_{ij} + Q_{j\max}x_{ij}}{U_i} = 118 - \frac{20 \times 26.4 + 15 \times 129.6}{118} \\ = 97.1\text{kV}$$

最小负荷时为

$$U_{j\min} = U_i - \frac{P_{j\min}r_{ij} + Q_{j\min}x_{ij}}{U_i} = 118 - \frac{10 \times 26.4 + 7.5 \times 129.6}{118} \\ = 107.5\text{kV}$$

(1) 补偿设备采用电容器时

按常调压要求确定最小负荷时补偿设备全部退出运行条件下应选用的分接头电压

$$U_{tj\min} = U_{j\min} \frac{U_{Nj}}{U'_{j\min}} = 107.5 \times \frac{11}{10.5} = 112.6\text{kV}$$

选用110+2.5%即112.75kV的分接头，以此代入，按最大负荷要求时的高压要求确定 Q_c

$$\begin{aligned}
 Q_c &= \frac{U'_{jcmax}}{x_{ij}} \left(U'_{jcmax} - U_{jmax} \frac{U_{Nj}}{U_{tj}} \right) \frac{U_{tj}^2}{U_{Nj}^2} \\
 &= \frac{10.5}{129.6} \times \left(10.5 - 97.1 \times \frac{11}{112.75} \right) \times \frac{112.75^2}{11^2} = 8.74 \text{ Mvar}
 \end{aligned}$$

验算电压偏移：最大负荷时补偿设备全部投入

$$U_{jcmax} = 118 - \frac{20 \times 26.4 + (15 - 8.74) \times 129.6}{118} = 106.65 \text{ kV}$$

低压母线的实际电压为

$$U'_{jcmax} = 106.65 \times \frac{11}{112.75} = 10.4 \text{ kV}$$

最小负荷时补偿设备全部退出，已知 $U_{jmin} = 107.5 \text{ kV}$ ，可得低压母线实

际电压为 $U'_{jmin} = 107.5 \times \frac{11}{112.75} = 10.49 \text{ kV}$

最大负荷时的电压偏移为

$$\frac{10.5 - 10.4}{10.5} \times 100 = 0.95$$

最小负荷时的电压偏移为

$$\frac{10.5 - 10.49}{10.5} \times 100 = 0.12$$

可见选择的电容器容量能满足常调压的要求。

(2) 补偿设备采用调相机时

首先确定应选用的变比

$$-2U'_{j\text{cmin}}(kU'_{j\text{cmin}} - U_{j\text{min}}) = U'_{j\text{cmax}}(kU'_{j\text{cmax}} - U_{j\text{max}})$$

$$-2 \times 10.5(k \times 10.5 - 107.5) = 10.5(k \times 10.5 - 97.1)$$

解得 $k = 9.91$, $U_{tj} = 9.91 \times 11 = 108.99\text{kV}$ 。

选用主接头110kV, 并按最大负荷时的调压要求确定 Q_c 。

$$\begin{aligned} Q_c &= \frac{U'_{j\text{cmax}}}{x_{ij}} \left(U'_{j\text{cmax}} - U_{j\text{max}} \frac{U_{Nj}}{U_{tj}} \right) \frac{U_{tj}^2}{U_{Nj}^2} \\ &= \frac{10.5}{129.6} \times \left(10.5 - 97.1 \times \frac{11}{110} \right) \times \frac{110^2}{11^2} = 6.40\text{MVA} \end{aligned}$$

选用容量为7.5MVA的调相机。

验算电压偏移：最大负荷时调相机过激满载运行，输出7.5Mvar感性无功功率

$$U_{jcmax} = 118 - \frac{20 \times 26.4 + (15 - 7.5) \times 129.6}{118} = 105.3kV$$

低压母线的实际电压为

$$U'_{jcmax} = 105.3 \times \frac{11}{110} = 10.53 kV$$

最小负荷时，调相机欠激满载运行，吸收3.75Mvar感性无功功率

$$U_{jcmin} = 118 - \frac{10 \times 26.4 + (7.5 + 3.75) \times 129.6}{118} = 103.4kV$$

低压母线实际电压为

$$U'_{jcmin} = 103.4 \times \frac{11}{110} = 10.34 kV$$

最大负荷时的电压偏移为

$$\frac{10.53 - 10.5}{10.5} \times 100 = 0.3$$

最小负荷时的电压偏移为

$$\frac{10.34 - 10.5}{10.5} \times 100 = -1.52$$

可见选用的调相机容量是恰当的。最小负荷时适当减小吸收的感性无功功率就可使低压母线电压达到10.5kV。换言之，选用的调相机容量还有一定裕度。

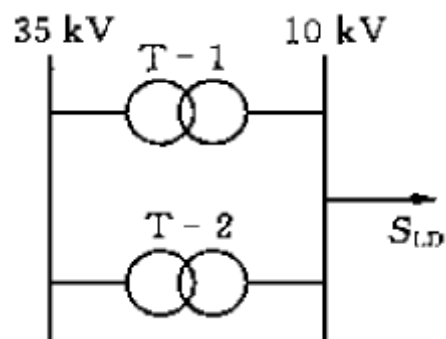
例7：两台容量不同的降压变压器并联运行，如下图所示。变压器的额定容量及归算到35kV侧的阻抗分别为：

$$S_{TN1} = 10\text{MVA}, Z_{T1} = (0.8 + j9)\Omega;$$

$$S_{TN2} = 20\text{MVA}, Z_{T2} = (0.4 + j6)\Omega.$$

负荷 $S_{LD} = (22.4 + j16.8)\text{MVA}$ 。不计变压器损耗。

- 1) 试求两变压器变比相同且为额定变比 $k_{TN} = 35/11$ 时各台变压器输出的视在功率；
- 2) 两台变压器均有 $\pm 4 \times 2.5\%$ 的分接头，如何调整分接头才能使变压器间的功率分配合理；
- 3) 分析两变压器分接头不同对有功功率和无功功率分布的影响。



解: $S_{LD} = 22.4 + j16.8 = 28\angle 36.8699^\circ \text{MVA}$

$$Z_{T1} = 0.8 + j9 = 9.0355\angle 84.92^\circ \Omega$$

$$Z_{T2} = 0.4 + j6 = 6.0133\angle 86.1859^\circ \Omega$$

$$Z_{\Sigma} = Z_{T1} + Z_{T2} = 1.2 + j15 = 15.0479\angle 85.426^\circ \Omega$$

1) 两台变压器变比相同且为额定变比时, 变压器的负荷与阻抗成反比分配。

$$S_{T1} = S_{LD} \frac{Z_{T2}}{Z_{\Sigma}} = 11.1891\angle 37.6298^\circ \text{MVA}$$

$$S_{T2} = S_{LD} - S_{T1} = 16.812\angle 36.36^\circ \text{MVA}$$

显然, 变压器T-1已过负荷, 过负荷倍数为 $11.1891/10 = 1.12$ 倍。

2) 为解决变压器T-1过负荷问题，要利用变压器变比不同来产生循环功率。由此，应使循环功率方向由变压器T-2低压侧流向变压器T-1低压侧。为此，可以用降低变压器T-2高压侧分接头或提高变压器T-1高压侧分接头的办法。考虑到保证低压侧的电压质量，应采用降低变压器T-2高压侧抽头的方法。

现让变压器T-2的高压侧工作在-2.5%的抽头上，则循环功率为

$$S_{\text{cir}} = \frac{V_N \times 0.025 \times V_N}{Z_{\Sigma}} = \frac{35 \times 0.025 \times 35}{15.0479 \angle 85.426^{\circ}} = 2.0352 \angle 85.426^{\circ} \text{MVA}$$

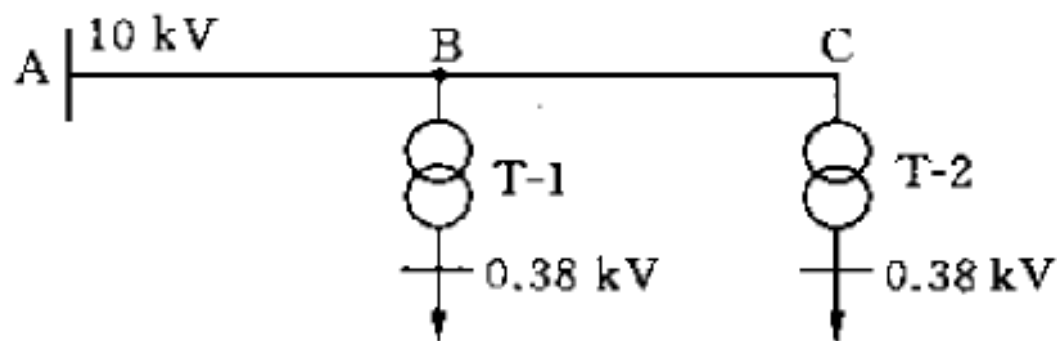
此时

$$S'_{T1} = S_{T1} - S_{\text{cir}} = 9.937 \angle 28.9^{\circ} \text{MVA}$$

$$S'_{T2} = S_{\text{LD}} - S'_{T1} = 18.211 \angle 41.21^{\circ} \text{MVA}$$

3) 分接头不相等时，主要影响电压的纵向分量，因此，循环功率也是以无功功率为主。

例8: 10kV电力网如下图所示, 已知网络各元件的最大电压损耗为: $\Delta V_{AB}\% = 2$, $\Delta V_{BC}\% = 6$, $\Delta V_{T1}\% = 3$, $\Delta V_{T2}\% = 3$ 。若最小负荷为最大负荷的50%, 各变电所大小负荷均同时出现, 变电所0.38kV母线的允许电压偏移范围为+2.5%~+7.5%, 试配合变压器分接头的选择决定对A点10kV母线的调压要求。



解：先选T-2的抽头满足变电站C的调压要求，然后再确定点B的电压要求，再选T-1的分接头以满足变电站B低压侧调压要求，最后确定电源点A的调压要求。 $V_{2N} = 400/380 = 1.05263$ 。

选 $V_{tT2} = 0.95V_{NT} = 0.95 \times 10 = 9.5\text{kV}$ ，为使变电站C低压侧电压不超出容许变化范围 $(1.025 \sim 1.075)V_N$ ，B点的电压要求为

$$\begin{aligned} V_{B\max} &= 1.025 \times \frac{V_{tT2}}{V_{2N}} + \Delta V_{T2\max} + \Delta V_{BC\max} \\ &= 1.025 \times \frac{0.95}{1.05263} + 0.03 + 0.06 \\ &= 1.01506 \end{aligned}$$

$$V_{B\max} = 1.075 \times \frac{0.95}{1.05263} + 0.015 + 0.03 = 1.01518$$

按此要求选T-1的抽头，即

$$\begin{aligned} V_{t1\max} &= (V_{B\max} - \Delta V_{T1}) \times \frac{V_{2N}}{1.025} \\ &= (1.01506 - 0.03) \times \frac{1.05263}{1.025} \\ &= 1.0116 \end{aligned}$$

$$V_{t1\min} = (1.01518 - 0.015) \times \frac{1.05263}{1.075} = 0.97937$$

$$V_{t1av} = \frac{1.0116 + 0.97937}{2} = 0.99548$$

选额定抽头 $V_{tT1} = V_{NT} = 10\text{kV}$ (或 $V_{tT1} = 1.0$)

校验： $V_{t1\min} < V_{tT1} < V_{t1\max}$ ，故满足变电站B的调压要求。

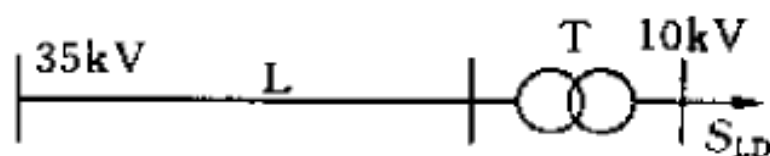
对于A点，10kV母线的调压要求

$$V_{A\max} = V_{B\max} + \Delta V_{AB\max} = 10 \times (1.01506 + 0.02) = 10.351\text{kV}$$

$$V_{A\min} = V_{B\min} + \Delta V_{AB\min} = 10 \times (1.01518 + 0.01) = 10.252\text{kV}$$

例9：35kV电力网如下图所示，线路和变压器归算到35kV侧的阻抗分别为 $Z_L = (9.9 + j12)\Omega$ 和 $Z_T = (1.3 + j10)\Omega$ ，负荷功率 $S_{LD} = (8 + j6)\text{MVA}$ 。线路首端电压保持为37kV，降压变电所低压母线的调压要求为10.25kV。若变压器工作在主抽头不调，

- 1) 分别计算采用串联和并联电容补偿调压所需的最小容量；
- 2) 若使用YY6.3-12-1型电容器（每个 $V_{NT} = 6.3\text{kV}$ ， 12kvar ），分别确定采用串联和并联补偿所需电容器的实际个数和容量。



解: $Z_{\Sigma} = Z_L + Z_T = (11.2 + j22)\Omega$

$k_T = 35/11 = 3.182$, $V_1 = 37\text{kV}$

$V'_{2C} = V_{2C}k_T = 10.25 \times 3.182 = 32.614\text{kV}$

$S_{LD} = (8 + j6) = P_{LD} + jQ_{LD}$

1) 计算并联和串联电容补偿所需最小容量

a. 并联补偿所需容量算法一

由

$$V_1 = V'_{2C} + \frac{P_{LD}R_{\Sigma} + (Q_{LD} - Q_{C(P)})X_{\Sigma}}{V'_{2C}}$$

可解出

$$\begin{aligned} Q_{C(P)} &= \frac{V_{2C}'^2 - V_1 V_{2C}' + P_{LD}R_{\Sigma} + Q_{LD}X_{\Sigma}}{X_{\Sigma}} \\ &= \frac{32.614^2 - 37 \times 32.614 + 8 \times 11.2 + 6 \times 22}{22} \\ &= 3.571\text{Mvar} \end{aligned}$$

b. 并联补偿所需容量算法二。

未装补偿前由

$$V_1 = V_2' + \frac{P_{LD}R_{\Sigma} + Q_{LD}X_{\Sigma}}{V_2'}$$

可得 $V_2'^2 - V_1V_2' + P_{LD}R_{\Sigma} + Q_{LD}X_{\Sigma} = 0$

即 $V_2'^2 - 37V_2' + (8 \times 11.2 + 6 \times 22) = 0$

求得

$$V_2' = 29.4841\text{kV}$$

$$V_{2C}' = V_2'k_T = 10.25 \times \frac{35}{11} = 32.6136\text{kV}$$

于是补偿容量有

$$Q_{C(P)} = \frac{V'_{2C}}{X_{\Sigma}} \left[(V'_{2C} - V'_2) + \left(\frac{P_{LD}R_{\Sigma} + Q_{LD}X_{\Sigma}}{V'_{2C}} - \frac{P_{LD}R_{\Sigma} + Q_{LD}X_{\Sigma}}{V'_2} \right) \right]$$
$$= 3.57 \text{Mvar}$$

若采用简化公式，有

$$Q'_{C(P)} = \frac{k_T^2 V_{2N}}{X_{\Sigma}} \left(V_{2C} - \frac{V'_2}{X_{\Sigma}} \right) = 4.6424 \text{Mvar}$$

可见在某些特定情况下，简化公式的误差较大。

c. 串联补偿所需电容器容量
由

$$V_1 = V'_{2C} + \frac{P_{LD}R_{\Sigma} + (Q_{LD} - Q_{C(P)})X_{\Sigma}}{V'_{2C}}$$

可解出

$$\begin{aligned} X_{C(S)} &= \frac{V'^2_{2C} - V_1 V'_{2C} + P_{LD}R_{\Sigma} + Q_{LD}X_{\Sigma}}{Q_{LD}} \\ &= \frac{32.614^2 - 37 \times 32.614 + 8 \times 11.2 + 6 \times 22}{6} \\ &= 13.095\Omega \end{aligned}$$

$$Q_{C(S)} = \frac{P_{LD}^2 + Q_{LD}^2}{V'^2_{2C}} \times X_{C(S)} \times 3 = 3.693\text{Mvar}$$

2) 求电容器个数和实际额定容量

a. 并联补偿

当接成三角形时，每相容量为 $3.571/3 = 1.19\text{Mvar}$ 。根据电压要求，要用两个电容器串联，即 $2 \times 6.3 = 12.6\text{kV} > 10\text{kV}$ ，两个串联后的容量为

$$Q_{C1} = 2 \times 0.012 \times \left(\frac{10}{2 \times 6.3}\right)^2 = 0.015117\text{Mvar}$$

每相并联支路数

$$n = \frac{1.19}{0.015117} = 78.72$$

取79支路，则总共需要的电容器个数为 $N = 79 \times 2 \times 3 = 474$ 个。
所需电容器的额定容量 $Q_{CN(P)} = 474 \times 0.012 = 5.688\text{Mvar}$ 。

当接成中性点不接地的星形，相电压为 $V_{\phi} = 10/\sqrt{3} = 5.774\text{kV}$ 。
由于电容器的额定电压有 $V_{\text{NC}} = 6.3\text{kV} > 5.774\text{kV}$ ，故不用再串联。
每个电容器的有效容量为

$$Q_{\text{C1}} = 0.012 \times \left(\frac{5.774}{6.3}\right)^2 = 0.0100798\text{Mvar}$$

每相并联支路数

$$n = \frac{1.19}{0.0100798} = 118.058$$

取119条支路，则共需要电容器的个数为 $N = 119 \times 3 = 357$ 个，所需电容器的额定容量 $Q_{\text{CN(P)}} = 375 \times 0.012 = 4.248\text{Mvar}$ 。

b. 串联补偿

串联补偿安装在35kV线路上，要求补偿的电抗为 $X_C = 13.0925\Omega$ 。
每个电容器的容抗

$$X_{C1} = \frac{V_{NC}^2}{S_{NC}} = \frac{6.3^2}{0.012} = 3307.5\Omega$$

串联电容上最大负荷时的电压降落

$$\Delta V_{\max C} = I_{\max} \cdot X_C = \sqrt{\frac{P_{LD}^2 + Q_{LD}^2}{V_{2C}'^2}} \times X_C = 4.0144\text{kV}$$

故可采用一个电容器 $V_{NC} = 6.3\text{kV} > 4.0144\text{kV}$ 。

每相并联支路数

$$n = \frac{X_{C1}}{X_C} = \frac{3307.5}{13.0925} = 252.63 \text{ 个}$$

取个数为253个，则总电容器个数为 $N = 253 \times 3 = 759$ 个

$$Q_{CN(S)} = 759 \times 0.012 = 9.108\text{Mvar}$$

由此可见，采用串联补偿所需电容器远大于并联补偿之所需。