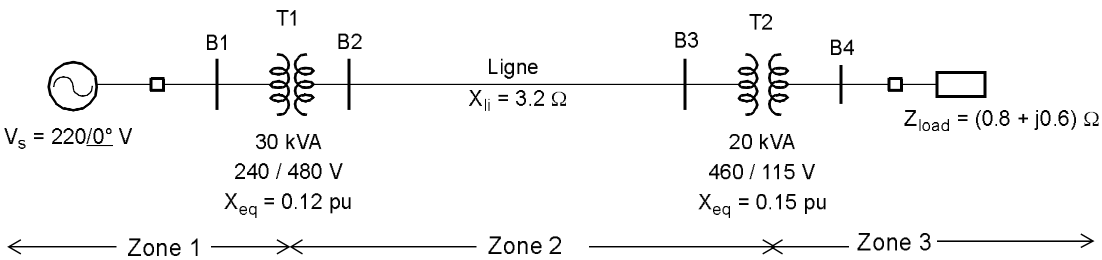
SOLUTION DES EXERCICES DE L'EXAMEN PARTIEL A2004

Problème no. 1

a)



On a:

S_{base} = 30 kVA pour tout le réseau
V_{base1} = 240 V pour la zone 1

Les tensions de base des autres zones sont calculées:

$$V_{base2} = \left(\frac{480}{240}\right) \times 240 = 480V \qquad V_{base3} = \left(\frac{115}{460}\right) \times 480 = 120V$$

Les courants de base des trois zones sont calculés:

$$I_{base1} = \frac{30000}{240} = 125A \qquad I_{base2} = \frac{30000}{480} = 62.5A \qquad I_{base3} = \frac{30000}{120} = 250A$$

Les impédances de base des trois zones sont calculées:

$$Z_{base1} = \frac{240}{125} = 1.92\Omega \qquad Z_{base2} = \frac{480}{62.5} = 7.68\Omega \qquad Z_{base3} = \frac{120}{250} = 0.48\Omega$$

Les impédances en pu des transformateurs sont calculées:

$$X_{T1pu} = 0.12 \qquad \text{(mêmes valeurs de base choisies)}$$

$$X_{T2pu} = 0.15 \times \left(\frac{460}{480}\right)^2 \times \left(\frac{30000}{20000}\right) = 0.2066 \qquad \text{(V =460 V et S = 20 kVA)}$$

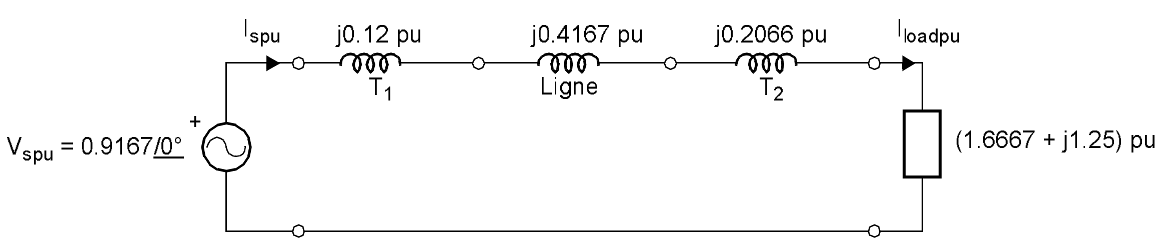
L'impédance en pu de la ligne est:

$$X_{linepu} = \frac{3.2\Omega}{7.68\Omega} = 0.4167$$

L'impédance en pu de la charge est:

$$Z_{loadpu} = \frac{(0.8 + j0.6)\Omega}{0.48\Omega} = 1.6667 + j1.25$$

Le circuit équivalent en pu du réseau est montré dans la figure suivante.



Le courant dans la charge est égal à:

$$I_{loadpu} = I_{spu} = \frac{0.9167\angle 0°}{j0.12 + j0.4167 + j0.2066 + (1.6667 + j1.25)} = 0.3446\angle{-51.2°}$$

Le courant réel dans la charge est:

$$I_{load} = (0.3446\angle{-51.2°}) \times 250\text{A} = 86.15\angle{-51.2°}\,\text{A}$$

b) La matrice des impédances de phase: $Z_p = \begin{bmatrix} j10 & j5 & j5 \\ j5 & j10 & j5 \\ j5 & j5 & j10 \end{bmatrix} \Omega$

La matrice des impédances de séquence est calculée:

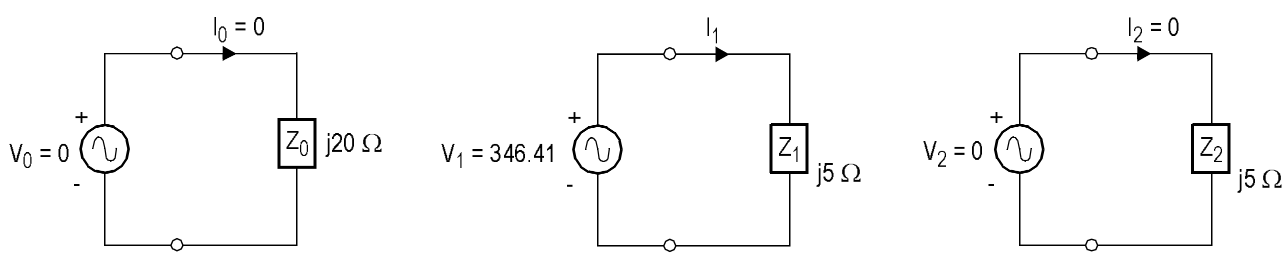
$$\mathbf{Z}_s = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Z}_p\mathbf{A} = \mathbf{A}^{-1} \times \begin{bmatrix} j10 & j5 & j5 \\ j5 & j10 & j5 \\ j5 & j5 & j10 \end{bmatrix} \times \mathbf{A} = \begin{bmatrix} j20 & 0 & 0 \\ 0 & j5 & 0 \\ 0 & 0 & j5 \end{bmatrix} \Omega$$

Le vecteur des tensions ligne-neutre: $V_p = \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 346.41 \\ 346.41\angle{-120°} \\ 346.41\angle 120° \end{bmatrix}$

Les composantes de séquence des tensions ligne-neutre:

$$V_s = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = A^{-1} \times \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = A^{-1} \times \begin{bmatrix} 346.41 \\ 346.41\angle{-120°} \\ 346.41\angle 120° \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 346.41 \\ 0 \end{bmatrix} \text{V}$$

Les réseaux de séquence sont:



Réseau de séquence 0 — Réseau de séquence directe — Réseau de séquence inverse

Les courants de séquence sont:

$$\mathbf{I}_s = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{346.41}{j5} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 69.282\angle{-90°} \\ 0 \end{bmatrix} \text{A}$$

Les courants de ligne sont:

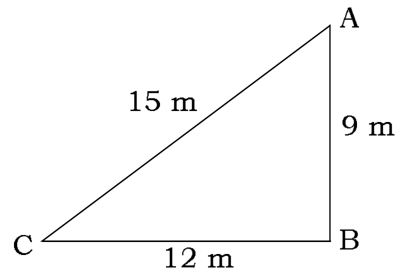
$$\mathbf{I}_p = \mathbf{A}\mathbf{I}_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 69.282\angle{-90°} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 69.282\angle{-90°} \\ 69.282\angle 150° \\ 69.282\angle 30° \end{bmatrix} \text{A}$$

Problème no. 2

a) Conducteur ACSR Joree 76/19, r = 2.3876 cm, GMR = 1.8928 cm, R (50°C) = 0.0281 Ω/km

Le rayon moyen géométrique des faisceaux:

$$GMR_{faisceau} = \sqrt{GMR_{cond} \times d} = \sqrt{1.8928 \times 46} = 9.3311\,\text{cm}$$



La ligne est transposée.

La distance moyenne géométrique des conducteurs est:

$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab} \times D_{bc} \times D_{ac}} = \sqrt[3]{9 \times 12 \times 15} = 11.745\text{m}$$

L'inductance série (séquence directe) par km:

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{GMD}{GMR_{faisceau}}\right) = 2\times10^{-7} \times \ln\left(\frac{1174.5}{9.3311}\right) \times 10^3 = 9.6704\times10^{-4}\,\text{H/km}$$

La réactance série (séquence directe) par km:

$$X_1 = \omega L_1 = 120\pi \times 9.6704\times10^{-4} = 0.3646\,\Omega/\text{km}$$

Chaque faisceau contient 2 conducteurs dont la résistance à 50°C est 0.0281 Ω/km. La résistance série R_1 de la ligne est donc:

$$R_1 = \frac{0.0281}{2} = 0.0141\ \Omega/\text{km}$$

b) Conducteur ACSR Joree 76/19, r = 2.3876 cm, GMR = 1.8928 cm

Le rayon moyen géométrique des faisceaux (pour le calcul des capacités):

$$GMR_{faisceau \cdot cap} = \sqrt{r \times d} = \sqrt{2.3876 \times 46} = 10.48\,\text{cm}$$

La distance moyenne géométrique des conducteurs est:

$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab} \times D_{bc} \times D_{ac}} = \sqrt[3]{9 \times 12 \times 15} = 11.745\,\text{m}$$

La capacité shunt (séquence directe) par km:

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{GMD}{GMR_{faisceau \cdot cap}}\right)} \times 1000 = \frac{2\pi \times 8.854\times10^{-12}}{\ln\left(\frac{1174.5}{10.48}\right)} \times 1000 = 1.1788\times10^{-8}\,\text{F/km}$$

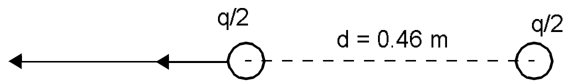
L'admittance shunt (séquence directe) par km:

$$Y_1 = \omega C_1 = 120\pi \times 1.1788\times10^{-8} = 4.4441\times10^{-6}\,\text{S/km.}$$

c) Avec V_1 = (500/1.732) kV = 288.68 kV, la charge électrique (par m) sur un faisceau est:

$$q = \frac{C_1 V_1}{1000} = \frac{(1.1788\times10^{-8})(288.68\times10^{3})}{1000} = 3.4030\times10^{-6}\ \text{C/m}$$

Le faisceau contient 2 conducteurs. La charge sur un conducteur sera $\frac{q}{2} = 1.7015\times10^{-6}$ C/m.



Le champ électrique à la surface d'un conducteur est la somme vectorielle des champs électriques créés par les deux conducteurs du faisceau:

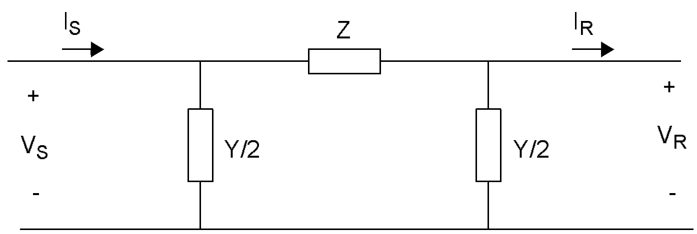
$$E_{rmax} = \frac{(q/2)}{2\pi\varepsilon_0 r}\left[1+\frac{r}{d}\right]$$

$$E_{rmax} = \frac{1.7015\times10^{-6}}{2\pi(8.854\times10^{-12})2.3876}\left[1+\frac{2.3876}{46}\right] = 13475\ \text{V/cm}$$

$$E_{rmax} = 13.475\ \text{kV/cm}$$

Problème no. 3

a) On calcule les paramètres du circuit équivalent en pi nominal (modèle ligne moyenne) de la ligne.



$Z = z\ell$

$Y = y\ell$

On a:

$$Z = zl = (0.03+j0.35)\times300 = 9+j105 = 105.385\angle85.1°\Omega$$

$$Y = yl = (j4.4\times10^{-6})\times300 = j1.32\times10^{-3}\,\text{S}$$

La compensation shunt est de 70%. L'admittance de la réactance de compensation doit être égale à 70% de l'admittance shunt totale de la ligne:

$$\frac{1}{jX_{comp}} = -0.7\times Y = -0.7\times j1.32\times10^{-3} = -j9.24\times10^{-4}\,\text{S}$$

Alors, la réactance de compensation est égale à:

$$X_{comp} = \frac{1}{9.24\times10^{-4}} = 757.6\Omega$$

b) On calcule les paramètres A et B de <u>la ligne non-compensée</u>:

$$A = 1+\frac{ZY}{2} = 1+\frac{(9+j105)(j1.32\times10^{-3})}{2} = 0.9307+j0.0059 = 0.9307\angle0.4°$$

$$B = Z = 105.385\angle85.1°\Omega$$

On prend la tension V_R comme référence de phase: $V_R = \frac{480}{\sqrt{3}}\angle0° = 277.128\angle0°\,\text{kV}$

Le courant dans la charge (fp = 1.0) est:

$$I_R = \frac{(1000/3)}{V_R} = \frac{(1000/3)}{277.128} = 1.2028\angle0°\,\text{kA}$$

La tension V_S est donnée par:

$$V_S = AV_R + BI_R = (0.9307\angle 0.4°)(277.128) + (105.385\angle 85.1°)(1.2028)$$

$$V_S = 297.649\angle 25.5°\,\text{kV}$$

La tension à vide au bout de la charge dans ce cas (ligne SANS compensation) est:

$$|V_{RNL}| = \frac{|V_S|}{|A|} = \frac{297.649}{0.9307} = 319.812\,\text{kV}$$

Le facteur de régulation de tension de la ligne SANS compensation est:

$$VR = \frac{|V_{RNL}| - |V_{RFL}|}{|V_{RFL}|} = \frac{319.812 - 277.128}{277.128} = 0.154 \text{ ou } 15.4\%$$

Avec 70% de compensation shunt, l'admittance shunt totale équivalente devient:

$$Y_{eq} = 0.3Y = 0.3 \times (j1.32\times 10^{-3}) = j3.96\times 10^{-4}\,\text{S}$$

Il n'y a de compensation série. Donc

$$Z_{eq} = Z = 105.385\angle 85.1°\ \Omega$$

Le paramètre A équivalent de <u>la ligne AVEC compensation</u> est:

$$A_{eq} = 1 + \frac{Y_{eq}Z_{eq}}{2} = 1 + \frac{(j3.96\times 10^{-4})(105.385\angle 85.1°)}{2} = 0.9792\angle 0.1°$$

La tension à vide au bout de la charge dans ce cas (ligne AVEC compensation) est:

$$|V_{RNL}| = \frac{|V_S|}{|A_{eq}|} = \frac{297.649}{0.9792} = 303.971\,\text{kV}$$

Le facteur de régulation de tension de la ligne AVEC compensation est:

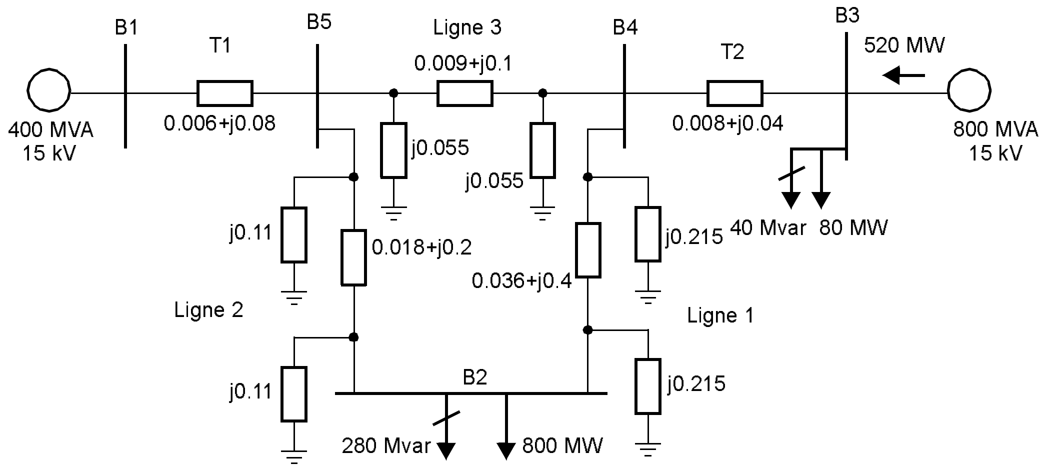
$$VR = \frac{|V_{RNL}| - |V_{RFL}|}{|V_{RFL}|} = \frac{303.971 - 277.128}{277.128} = 0.097 \text{ ou } 9.7\%$$

Problème no. 4

a)

Barre	Nature	Connues	Inconnues
B1	Barre de référence	V_1 = 1.0 pu et δ_1 = 0°	P_1 et Q_1
B2	Barre de charge	P_2 = -2.0 pu et Q_2 = -0.7 pu	V_2 et δ_2
B3	Barre de génération	V_3 = 1.05 pu et P_3 = 1.1 pu	δ_3 et Q_3
B4	Barre de charge	P_4 = 0 pu et Q_4 = 0 pu	V_4 et δ_4
B5	Barre de charge	P_5 = 0 pu et Q_5 = 0 pu	V_5 et δ_5

b) Réseau équivalent:



La matrice Y_{bus}:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y_{11}} & 0 & 0 & 0 & Y_{15} \\ 0 & \mathbf{Y_{22}} & 0 & Y_{24} & Y_{25} \\ 0 & 0 & \mathbf{Y_{33}} & Y_{34} & 0 \\ 0 & Y_{24} & Y_{34} & \mathbf{Y_{44}} & Y_{45} \\ Y_{15} & Y_{25} & 0 & Y_{45} & \mathbf{Y_{55}} \end{bmatrix}$$

Les éléments non-nuls sont donnés:

$$Y_{11} = \frac{1}{0.006 + j0.08} \qquad Y_{15} = Y_{51} = \frac{-1}{0.006 + j0.08}$$

$$Y_{22} = \frac{1}{0.018 + j0.2} + \frac{1}{0.036 + j0.4} + j0.11 + j0.215$$

$$Y_{24} = Y_{42} = \frac{-1}{0.036 + j0.4} \qquad Y_{25} = Y_{52} = \frac{-1}{0.018 + j0.2}$$

$$Y_{33} = \frac{1}{0.008 + j0.04} \qquad Y_{34} = Y_{43} = \frac{-1}{0.008 + j0.04}$$

$$Y_{44} = \frac{1}{0.009 + j0.1} + \frac{1}{0.008 + j0.04} + j0.055 + j0.215$$

$$Y_{45} = Y_{54} = \frac{-1}{0.009 + j0.1}$$

$$Y_{55} = \frac{1}{0.006 + j0.08} + \frac{1}{0.009 + j0.1} + \frac{1}{0.018 + j0.2} + j0.055 + j0.11$$

c) <u>Commentaires sur les résultats de calcul de logiciel «PowerWorld»:</u>

- <u>Les tensions aux barres</u> sont dans les limites acceptables (0.95, 1.05) excepté la barre B2 où la tension est de 0.83 pu.
- <u>Les transformateurs</u> fonctionnent dans les limites permises.
- <u>Les lignes</u> fonctionnent dans les limites permises.

  La ligne no. 1 est sous utilisée (elle transport 27.1% de sa capacité)

  La ligne no. 2 est sous utilisée (elle transport 49.2% de sa capacité)

La ligne no. 3 est sous utilisée (elle transport 18.2% de sa capacité)

Les pertes dans les équipements:

Transformateur T1 : 2.62 MW

Transformateur T2 : 5 MW

Ligne 1 : 11.88 MW

Ligne 2 : 17.73 MW

Ligne 3 : 0.97MW

Les problèmes et solutions proposées

La tension à la barre B2 (0.83 pu) est inférieure à la valeur acceptable 0.95. On peut connecter à cette barre un banc de condensateurs pour augmenter la tension.