Série d'exercices supplémentaires

Réglage de la tension

Exercice. 1

Une ligne de transport dont le modèle monophasé est donnée sur la Figure. 1 avec $X_s = 100\ \Omega$, $X_p = 3125\ \Omega$ et $E = 240$ kV.

1. Montre que lorsque $V = E$
$$Q_s = -Q_r = \frac{E^2}{X_s}(1 - \cos(\delta))$$
Où δ représente l'angle de charge, Q_s et Q_r respectivement, les puissances réactives à l'entrée et à la sortie de la ligne.

La ligne est à vide ;

2. Calculer la tension V. Que peut on remarquer ?
3. Calculer les puissances réactives à l'entrée et à la sortie de la ligne pour que $V = E$.
4. Déduire les réactances (capacitives ou inductives) qu'il faut installer alors à l'entrée et à la sortie d la ligne.

La ligne alimente maintenant une charge de 100 MW avec un facteur de puissance de 0.92 AR.

5. Calculer à nouveau la tension V. Que peut on remarquer ?
6. Calculer alors les puissances réactive à l'entrée et à la sortie de la ligne pour que $V = E$.
7. Déduire les réactances (capacitives ou inductives) qu'il faut installer à l'entrée et la sortie de la ligne.

La ligne alimente toujours la même charge. On compense maintenant 40% de la réactance série.

8. Refaire les questions 5, 6 et 7.

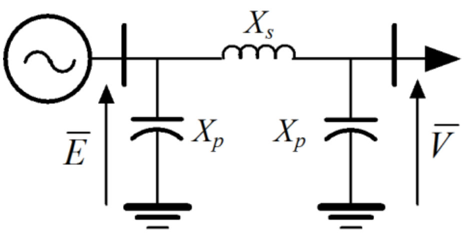


Figure 1

Solution

En utilisant le diviseur de tension
$$V = \frac{X_p}{X_p - X_s}E = 247.93 \text{ kV}$$
Effet Ferranti $V > E$.

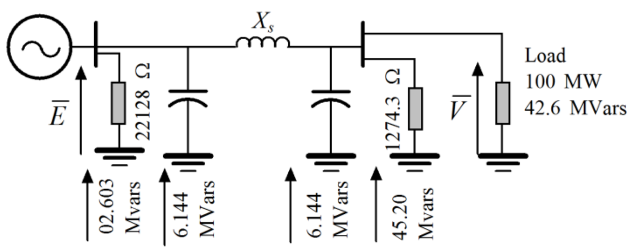
Les puissances réactives à l'entrée et à la sortie de la ligne sont données par (voir cours)
$$Q_s = \frac{E^2}{X_s} - \frac{EV}{X_s}\cos(\delta)\,, \qquad Q_s = \frac{E^2}{X_s} - \frac{EV}{X_s}\cos(\delta)$$
On voit donc que si $V = E$
$$Q_s = -Q_r = \frac{E^2}{X_s}(1 - \cos(\delta))$$
A vide l'angle de charge $\delta = 0$ donc, il faut que
$$Q_s = Q_r = 0$$
Ceci sera réalisé par l'installation de réactances *inductives* à l'entrée et à la sortie de la ligne de sorte à créer une résonnance parallèle avec les réactances capacitive X_p d'où
$$X_{com} = X_p = 3125\ \Omega \text{ (inductive)}$$
A l'entrée et à la sortie de la ligne.

Lorsque la ligne est chargée, la tension de charge peut être aussi calculée en utilisant de diviseur de tension
$$V = \frac{\bar{Z}_{eq}}{\bar{Z}_{eq} + jX_s}E$$
Avec
$$\bar{Z}_{eq} = \frac{\bar{Z}_L(-jX_p)}{\bar{Z}_L - jX_p} = 544.21 + j131.52\ \Omega$$
où l'impédance de charge
$$\bar{Z}_L = \left(\frac{V_n^2}{S_L}\right)^{\angle\phi_L} = \left(\frac{240^2}{100/0.92}\right)^{\angle 23°} = 487.53 + j207.69$$
On déduit alors $V = 227.2^{\angle -9.45°}$ kV

On remarque que la tension a chuté.

Pour $V = E$, l'angle de charge peut être est déduit à partir de la relation
$$P = \frac{EV}{X_s}\sin(\delta) \qquad (*)$$
Donc pour $P = 100$ MW on trouve 10°

Maintenant pour que $V = E$, il faut toujours
$$Q_s = -Q_r = 8.747 \text{ MVar}$$
Sachant qu'à la sortie de la ligne la puissance réactive
$$Q_r = Q_L + Q_{Xp} + Q_C$$
Avec Q_L : puissance réactive de la charge, Q_{Xp} puissance réactive générée par la ligne à sa sortie et X_{Cr} puissance réactive qu'il faut compenser à la sortie. Or
$$Q_L = P\tan(\varphi_L) = 42.6 \text{ MVar}$$
$$Q_{Xp} = -\frac{V^2}{X_p} = -6.144 \text{ MVar}$$
On déduit alors la puissance du compensateur à la sortie de la ligne comme
$$Q_{Cr} = -8.747 - 42.6 + 6.144 = -45.2030 \text{ MVar}$$
A l'entrée de la ligne la puissance réactive est
$$Q_s = Q_{Xp} + Q_{Cs}$$
On déduit
$$Q_{Cs} = Q_s - Q_{Xp} = 8.747 - 6.144 = 2.603 \text{ MVar}$$
Les réactances *capacitives* qu'il faut pour générer les puissances Q_{Cr} et Q_{Cs} sont alors déduite ($V = E = 240$ kV)
$$X_{Cr} = \frac{V^2}{|Q_{Cr}|} = 1274.3\ \Omega, \qquad X_{Cs} = \frac{E^2}{|Q_{Cs}|} = 22128\ \Omega$$



Lorsqu'on compense 40% de la réactance X_s, la réactance de la ligne devient $X = 100 - 40 = 60\ \Omega$, ainsi
$$\bar{V} = \frac{\bar{Z}_{eq}}{\bar{Z}_{eq} + j60}E = 232.91^{\angle -5.8°} \text{ kV}$$

On Remarque que la tension est améliorée mais reste inférieure à 240 kV.

Pour 100 MW et $V = E$ le nouvel angle de charge devient 06° (toujours à partir de (*) mais $X = 60\ \Omega$). On trouve alors

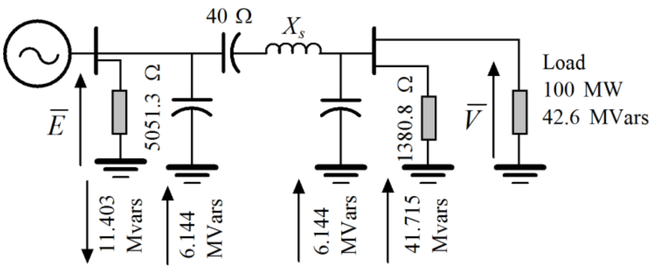
$$Q_s = -Q_r = 5.259\ \text{MVar}$$

On déduit alors

$$Q_{Cr} = -5.259 - 42.6 + 6.144 = -41.715\ \text{MVar}$$
$$Q_{Cs} = 5.259 - 6.144 = -11.4030\ \text{MVar}$$

On remarque qu'à la sortie de la ligne la puissance de compensation est négative, c'est-à-dire on génère la puissance réactive donc, il s'agit d'une réactance capacitive. A l'entrée de la ligne cette puissance est négative donc on consomme le réactif donc c'est une réactance inductive.

$$X_{Cr} = \frac{V^2}{|Q_{Cr}|} = 1380.8\ \Omega, \qquad X_{Cs} = \frac{E^2}{|Q_{Cs}|} = 5051.3\ \Omega$$



*Exercice 1**

Refaire l'exercice 6 pour une puissance de charge 200 MW avec un facteur de puissance 0.95 AR.

Exercice. 2

Soit le réseau de la Figure. 2. On donne $E = 14\ \text{kV}$, $Xs = 1.2\ \Omega$, $R = 0.5\ \Omega$, $X = 0.9\ \Omega$.

1. Calculer l'impédance équivalente de la charge.
2. Calculer sans les régulations des tensions V_1 et V_2 sans les calculer (utiliser diviseur de tension)
3. Déduire la tension V_1 pour que la tension V_2 soit égale à V_n
4. Calculer alors la puissance réactive qu'il faut injecter au jeu de barres et déduire la capacité du condensateur.

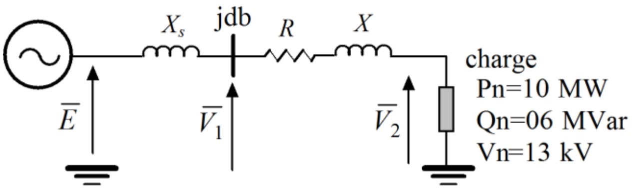


Figure 2

Réponses :

L'impédance équivalente de la charge est donnée par

$$\bar{Z}_L = \left(\frac{V_n^2}{S_L}\right)^{\angle\phi_L} = 12.4265 + j7.4559\ \Omega$$

Diviseur de tension

$$V_1 = \left|\frac{\bar{Z}_L + 0.5 + j0.9}{\bar{Z}_L + 0.5 + j0.9 + j1.2}\right| E = 0.9575E$$
$$V_2 = \left|\frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_L + 0.5 + j0.9 + j1.2}\right| E = 0.9015E$$

D'où

$$R_{V1} = \frac{1 - 0.9575}{0.9575} = 4.44\%$$
$$R_{V2} = \frac{1 - 0.9015}{0.9015} = 10.93\%$$

On a

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{0.9575}{0.9015} = 1.0621$$

Donc si $V_2 = V_n = 13\ \text{kV}$ il faut que $V_1 = 13.8\ \text{kV}$

La puissance du condensateur nécessaire est donnée par

$$Q_C = S_{sc}\left(-v^2 + \sqrt{v^2 - p^2}\right) - Q$$

Avec $v = 13.8/14 = 0.9857$ pu, $S_{sc} = 14^2/1.2 = 163.333\ \text{MVA}$

$P = P_n + 0.5I^2$, avec $I = 10^3 \times \frac{\sqrt{10^2+6^2}}{13} = 897.1\ \text{A}$

D'où $P = 10.4\ \text{MW}$ donc $p = 10.4/163.333 = 0.0637$ pu

$Q = 6 + 0.9I^2 = 6.724\ \text{MVar}$

Attention : La puissance ici n'est pas seulement celle absorbée par la charge, car il faut prendre aussi en compte les pertes dans la ligne en aval du jeu de barres, c'est-à-dire la charge vue par le jeu de barres.

On trouve alors

$Q_C = -4.7583\ \text{MVar}$, $C = 79.57\ \mu\text{F}$

Exercice. 3

Soit le réseau de la Figure. 3. On donne $E = 63\ \text{kV}$, $X_s = 12.5\Omega$,

Charge 1 : $V_n = 60\ \text{kV}, P_n = 60\ \text{MW},\ PF = 0.95$ AR

Charge 2 : $V_n = 60\ \text{kV}, P_n = 80\ \text{MW},\ PF = 0.9$ AR

1. Calculer les impédances équivalentes des deux charges.

Les charges tolèrent une chute de tension de $\pm 5\%$ de la tension nominale.

2. Calculer alors la tension V qu'il faut imposer au jeu de barres pour respecter cette limite.
3. Calculer alors la capacité du condensateur à installer en parallèle à ce jeu de barres

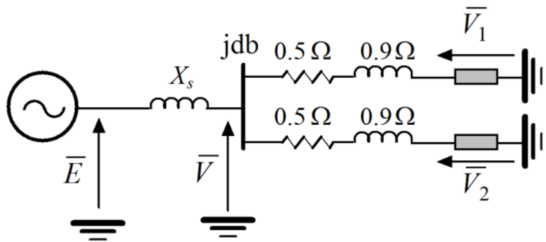


Figure 3

Réponses :

Les impédances équivalentes sont données par

$$\bar{Z}_L = \left(\frac{V_n^2}{S_L}\right)^{\angle\phi_L}$$

On trouve alors

$$\bar{Z}_{L1} = 57 + j18.735\ \Omega, \qquad \bar{Z}_{L2} = 40.5 + j19.615\ \Omega$$

Diviseur de tension

$$V_1 = \left|\frac{\bar{Z}_{L1}}{\bar{Z}_{L1} + 0.5 + j0.9}\right| \times V = 0.9875 \times V$$

$$V_2 = \left|\frac{\bar{Z}_{L2}}{\bar{Z}_{L2} + 0.5 + j0.9}\right| \times V = 0.9815 \times V$$

$$57\ \text{kV} \le V_1 \le 63\ \text{kV}, \qquad 57\ \text{kV} \le V_2 \le 63\ \text{kV}$$

Remplaçant V_1 par $0.9875 \times V$ et V_2 par $0.9815 \times V$ on trouve

$$58.07\ \text{kV} \le V \le 63.79\ \text{kV}$$

On prend alors la moyenne $V = 60.93$ kV
La capacité du condensateur à installée est déduite de

$$Q_C = S_{sc}\left(-v^2 + \sqrt{v^2 - p^2}\right) - Q$$

Avec $S_{sc} = 63^2/12.5 = 317.52$ MVA

Pour calculer p, il faut calculer P qui est la somme des puissances absorbées par les charges et les pertes dans les deux lignes.
Puisque $V = 60.93$ kV alors les courants absorbés par les deux charges sont

$$I_1 = \left|\frac{60.93 \times 10^3}{\bar{Z}_{L1} + 0.5 + j0.9}\right| = 1002.8\ \text{A}$$

$$I_2 = \left|\frac{60.93 \times 10^3}{\bar{Z}_{L2} + 0.5 + j0.9}\right| = 1329\ \text{A}$$

Donc

$$P = 57 \times I_1^2 + 0.5 \times I_1^2 + 40.5 \times I_2^2 + 0.5 \times I_2^2 = 130.24\ \text{MW}$$

$$Q = 18.735 \times I_1^2 + 0.9 \times I_1^2 + 19.615 \times I_2^2 + 0.9 \times I_2^2 = 55.98\ \text{MVar}$$

D'où $p = 130.24/317.52 = 0.4102$ pu, $v = V/E = 0.9671$ pu

NB. Dans ce cas aussi les puissances calculées doivent prendre en compte les pertes en aval du jeu de barres.

$$Q_C = 317.52\left(-0.9671^2 + \sqrt{0.9671^2 - 0.4102^2}\right) - 55.98 = -74.8682\ \text{MVar}$$

On déduit $C = 64.22$ µF

Exercice. 4

Soit le réseau de la Figure. 4. $E = 33$ kV, $X_s = 12.5\ \Omega$. La charge de tension nominale 33 kV est représentée par une résistance $R_L = 54.45\ \Omega$ en parallèle avec une réactance $X_L = 165.66\ \Omega$.

1. Calculer la régulation de la tension.

On veut améliorer la tension aux bornes de la charge, pour cela on installe un compensateur de réactance X_C.

2. Calculer la réactance de ce compensateur nécessaire pour compenser toute la puissance réactive demandée par la charge. Déduire la nouvelle régulation de la tension. Que peut-on remarquer ?
3. Calculer la réactance du compensateur qui permet de régler la tension V à sa valeur nominale.

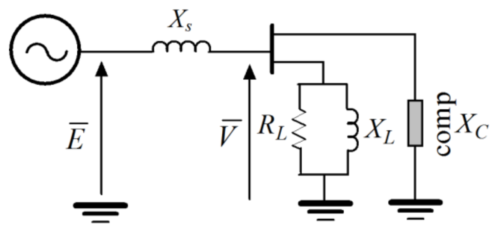


Figure 4

Réponses :

L'impédance de la charge

$$Z_L = 49.1411\ + j16.1520\ \Omega$$

On peut déduire la tension V en utilisant le diviseur de tension ; On trouve V=30 kV. D'où R_V=10%.
La puissance réactive demandée par la charge est

$$Q_L = V_n^2/X_L = 6.5737\ \text{MVar}$$

Pour compenser toute cette puissance il faut que $Q_C = -6.5737$ MVar. Si c'est le cas, alors la tension V sera donnée par

$$V = \left|\frac{R_L}{R_L + jX_s}\right| E = 32.1634\ \text{kV}$$

D'où RV=02.6%.
On remarque que la tension reste inférieure à la valeur nominale, car on compensé uniquement le facteur de puissance $Q_C = Q_L$.

Pour $V = E$, la puissance absorbée par la charge est

$$P = V^2/R_L = 20\ \text{MW}$$

Sachant
$S_{sc} = 33^2/X_s = 87.12$ MVA alors $p = 20/87.12 = 0.2296$ pu
Pour que $V = E$ (i.e., $v = 1$), il faut alors une puissance

$$Q_C = S_{sc}\left(-1 + \sqrt{1 - 0.2296^2}\right) - 6.5737 = -8.8949\ \text{MVar}$$

On déduit $C = 26$ µF

Exercice. 5

Soit une ligne électrique qu'on suppose sans pertes et de réactance X alimentée à son entrée par une source de tension fixe E (Figure. 5). La ligne débite sur une charge qui absorbe des puissances active P et réactive Q sous tension $\bar{V}$.

On rappelle la condition de stabilité du système

$$P^2 + QS_{sc} \le \left(\frac{S_{sc}}{2}\right)^2$$

A. Analyser à partir de cette équation l'effet de la nature de la charge sur la capacité de transmission (transport) de la ligne.
B. La charge en question peut être représentée par son admittance donnée par $\bar{G}_L = G + jG\tan(\varphi_L)$ où φ_L représente le facteur de puissance de la charge.
   1. Montrer que la tension de charge peut être écrite comme
$$\bar{V} = \frac{\bar{E}}{1 + XG\tan(\varphi_L) + jXG}$$
   2. On suppose que la tension $E = 1$ pu (tension base) et $X = 1$ pu (impédance de base). Montrer que la tension relative de charge v peut être écrite comme
$$v = \frac{1}{\sqrt{g^2 + (1 + g\tan(\varphi_L))^2}}$$

Pour les facteurs de puissance suivants 1, 0.9 AR, 0.9 AV
   3. Calculer la tension critique et déduire la puissance critique

Rappel : *la tension critique est la tension à laquelle la puissance commence à s'effondrer. Sur la courbe pv c'est le point le plus à droite de la courbe.*
Idée : *Calculer la dérivée de p par rapport à g sachant* $= gv^2$ *. Résoudre pour* g*, calculer* v *et déduire* p*.*

4. Pour une tension limite de 0.95 pu. Calculer la puissance transmise.

Pour les facteurs de puissance 1 et 0.9 AR. On propose d'augmenter la tension de source E de 20%.

5. Refaire les questions 3 et 4. Que peut-on remarquer ?
6. La même question si maintenant on compense 20% de la réactance de ligne. (Noter que dans ce cas l'admittance g dans l'équation devient $g(1 - 0.2)$).

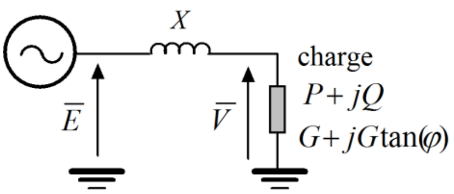


Figure 5

Réponses :

A. Voir le cours.
B.

L'impédance équivalente de la charge qui sera déduite de son admittance comme
$$\bar{Z}_L = \frac{1}{G(1 - j\tan(\varphi_L))}$$
Maintenant, en utilisant le diviseur de tension, on peut écrire la tension de charge
$$\bar{V} = \frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_L + jX}E = \frac{E}{1 + XG\tan(\varphi_L) + jXG}$$
Si la réactance X est prise comme base (X=1 pu) alors l'admittance relative de la charge sera est donnée par $g = XG$, on déduit alors
$$\bar{v} = \frac{1}{1 + g\tan(\varphi_L) + jg}$$
$$\text{d'où } v = \frac{1}{\sqrt{g^2 + (1 + g\tan(\varphi_L))^2}} \quad (1)$$
Pour des facteurs de puissance 1, 0.9 AR et 0.9 AV la tension v sera donnée respectivement par
$$v = \frac{1}{\sqrt{g^2 + 1}}$$
$$v = \frac{1}{\sqrt{g^2 + (1 + 0.4843g)^2}}$$
$$v = \frac{1}{\sqrt{g^2 + (1 - 0.4843g)^2}}$$
Pour trouver la tension critique, on calcul la dérivée de la puissance p par rapport à g.
$$p = gv^2 = \frac{g}{g^2 + (1 + g\tan(\varphi_L))^2}$$
$$p = \frac{g}{g^2 + 1} \quad \text{(PF=1)}$$
$$p = \frac{g}{g^2 + (1 + 0.4843g)^2} \quad \text{(PF=0.9 AR)}$$
$$p = \frac{g}{g^2 + (1 - 0.4843g)^2} \quad \text{(PF=0.9 AV)}$$

Ainsi
$$\frac{dp}{dg} = \frac{-g^2(1 + \tan(\varphi_L)^2) + 1}{(g^2 + (1 + g\tan(\varphi_L))^2)^2}$$
Au point critique la variation de p par rapport à g est nulle. Ainsi
$$\frac{dp}{dg} = 0 \Rightarrow g_{\text{crit}} = 1 \;\text{(PF=1)}$$
$$\frac{dp}{dg} = 0 \Rightarrow g_{\text{crit}} = 0.8208 \;\text{(PF=0.9 AR)}$$
$$\frac{dp}{dg} = 0 \Rightarrow g_{\text{crit}} = 0.8208 \;\text{(PF=0.9 AV)}$$
En remplaçant g dans l'expression de la tension (1)
$$v_{\text{crit}} = 0.7071 \text{ (PF=1)}$$
$$v_{\text{crit}} = 0.6170 \text{ (PF=0.9 AR)}$$
$$v_{\text{crit}} = 0.9822 \text{ (PF=0.9 AV)}$$
La puissance maximale théorique (critique)
$$p_{\text{crit}} = g_{\text{crit}} \times v_{\text{crit}}^2 = 0.5 \text{ (PF=1)}$$
$$p_{\text{crit}} = g_{\text{crit}} \times v_{\text{crit}}^2 = 0.3125 \text{ (PF=0.9 AR)}$$
$$p_{\text{crit}} = g_{\text{crit}} \times v_{\text{crit}}^2 = 0.7918 \text{ (PF=0.9 AV)}$$

Maintenant pour une tension limite de 0.95 pu l'admittance limite sera donnée par la solution de l'équation (1)
$$g_{\text{lim}} = \frac{-\tan(\varphi_L) + \frac{1}{v_{\text{lim}}}\sqrt{\tan(\varphi_L)^2 + 1 - v_{\text{lim}}^2}}{\tan(\varphi_L)^2 + 1}$$
NB. *La solution négative est rejetée ! L'admittance est une grandeur réelle positive.*

Ce qui donne pour $v_{\text{lim}} = 0.95$
$$g_{\text{lim}} = 0.3287, \quad p_{\text{lim}} = g_{\text{lim}}v_{\text{lim}}^2 = 0.2966 \;\text{(PF=1)}$$
$$g_{\text{lim}} = 0.099, \quad p_{\text{lim}} = g_{\text{lim}}v_{\text{lim}}^2 = 0.0893 \;\text{(PF=0.9 AR)}$$
$$g_{\text{lim}} = 0.8836, \quad p_{\text{lim}} = g_{\text{lim}}v_{\text{lim}}^2 = 0.7974 \;\text{(PF=0.9 AV)}$$
En augmentant la tension E de 20%, la tension v sera donnée par
$$v = \frac{1.2}{\sqrt{g^2 + (1 + g\tan(\varphi_L))^2}} \qquad (2)$$
On a maintenant

$$\frac{dp}{dg} = 1.2^2 \left[\frac{-g^2(1+\tan(\varphi_L)^2)+1}{(g^2+(1+g\tan(\varphi_L))^2)^2} \right]$$

Donc

$$\frac{dp}{dg} = 0 \Rightarrow g_{\text{crit}} = 1 \ \ (\text{PF=1})$$

$$\frac{dp}{dg} = 0 \Rightarrow g_{\text{crit}} = 0.8208 \ \ (\text{PF=0.9 AR})$$

En remplaçant dans (2)

$$v_{\text{crit}} = 0.8485 \ (\text{PF=1})$$

$$v_{\text{crit}} = 0.7404 \ (\text{PF=0.9 AR})$$

La puissance maximale théorique (critique)

$$p_{\text{crit}} = g_{\text{crit}} \times v_{\text{crit}}^2 = 0.72 \ (\text{PF=1})$$

$$p_{\text{crit}} = g_{\text{crit}} \times v_{\text{crit}}^2 = 0.45 \ (\text{PF=0.9 AR})$$

La puissance maximale transmissible augmente, la tension critique augmente aussi.

Maintenant pour une tension limite de 0.95 pu l'admittance limite sera donnée par la solution de l'équation (2)

$$g_{\lim} = \frac{-\tan(\varphi_L) + \frac{1}{v_{\lim}}\sqrt{1.2^2\tan(\varphi_L)^2 + 1.2^2 - v_{\lim}^2}}{\tan(\varphi_L)^2 + 1}$$

Ce qui donne pour $v_{\lim} = 0.95$

$$g_{\lim} = 0.7717, \qquad p_{\lim} = g_{\lim} v_{\lim}^2 = 0.6965 \ \ (\text{PF=1})$$

$$g_{\lim} = 0.4054, \qquad p_{\lim} = g_{\lim} v_{\lim}^2 = 0.3659 \ \ (\text{PF=0.9 AR})$$

Lorsque on compense 20% de la réactance de ligne, l'admittance relative de la charge devient $g(1-0.2)$. Ainsi

$$v = \frac{1}{\sqrt{((1-0.2)g)^2 + (1+(1-0.2)g\tan(\varphi_L))^2}} \qquad (3)$$

On a maintenant

$$\frac{dp}{dg} = \frac{-g^2(1-0.2)^2(1+\tan(\varphi_L)^2)+1}{[((1-0.2)g)^2 + (1+(1-0.2)g\tan(\varphi_L))^2]^2}$$

Donc

$$\frac{dp}{dg} = 0 \Rightarrow g_{\text{crit}} = 1.25 \ \ (\text{PF=1})$$

$$\frac{dp}{dg} = 0 \Rightarrow g_{\text{crit}} = 1.125 \ \ (\text{PF=0.9 AR})$$

En remplaçant dans (3)

$$v_{\text{crit}} = 0.7071 \ (\text{PF=1})$$

$$v_{\text{crit}} = 0.5901 \ (\text{PF=0.9 AR})$$

La puissance maximale théorique (critique)

$$p_{\text{crit}} = g_{\text{crit}} \times v_{\text{crit}}^2 = \ 0.6250 \ (\text{PF=1})$$

$$p_{\text{crit}} = g_{\text{crit}} \times v_{\text{crit}}^2 = 0.3917 \ (\text{PF=0.9 AR})$$

Pour une tension limite de 0.95, la solution de l'équation (3) pour g donne

$$g_{\lim} = \frac{-\tan(\varphi_L) + \frac{1}{v_{\lim}}\sqrt{\tan(\varphi_L)^2 + 1 - v_{\lim}^2}}{(1-0.2)(\tan(\varphi_L)^2 + 1)}$$

Ce qui donne pour $v_{\lim} = 0.95$

$$g_{\lim} = 0.4109, \qquad p_{\lim} = g_{\lim} v_{\lim}^2 = 0.3708 \ \ (\text{PF=1})$$

$$g_{\lim} = 0.1238, \qquad p_{\lim} = g_{\lim} v_{\lim}^2 = 0.1117 \ \ (\text{PF=0.9 AR})$$

	Sans réglage de tension				
	g_{crit}	v_{crit}	p_{crit}	$g_{\lim}$	$p_{\lim}$
PF=1	1.0000	0.7071	0.5000	0.3287	0.2966
PF=0.9AR	0.8208	0.6170	0.3125	0.099	0.0893
PF=0.9AV	0.8208	0.9822	0.7918	0.8836	0.7974
	Augmentation de 20% de la tension E				
PF=1	1.0000	0.8485	0.7200	0.7717	0.6965
PF=0.9AR	0.8208	0.7404	0.4500	0.4054	0.3659
	Compensation de 20% de la réactance de ligne				
PF=1	1.2500	0.7071	0.6250	0.4109	0.3708
PF=0.9AR	1.1250	0.5901	0.3917	0.1238	0.1117

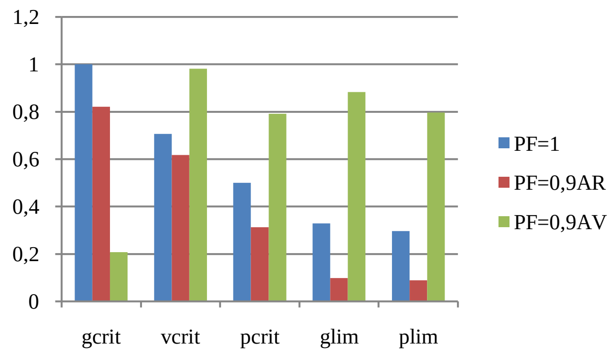


Figure 6 Sans réglage de tension.

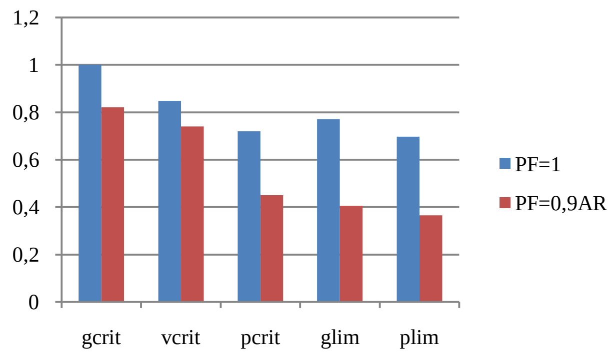


Figure 7 Augmentation de la tension E de 20%.

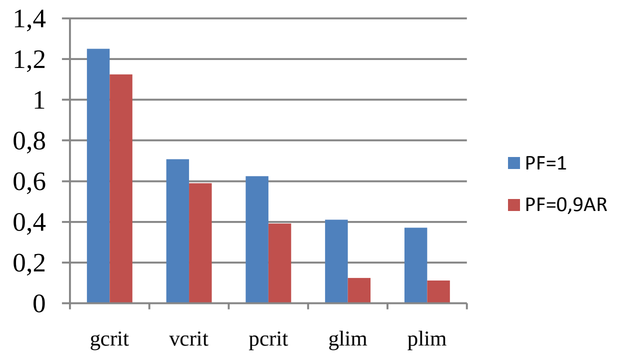


Figure 8 Compensation de 20% de la réactance de ligne.

Pour un réseau de tension $E = 63$ kV, de réactance $X = 12.5\ \Omega$, donc de puissance de court-circuit $S_{sc} = 317.52$ MVA. L'admittance, la tension et la puissance de la charge sont données par

$$G = \frac{g}{X}\ \Omega^{-1}, V = v \times E \ \text{ kV}, \qquad P = p \times S_{sc} \ \text{ MW}$$

Les résultats en unités ordinaires sont alors

	Sans réglage de tension				
	$G_{\text{crit}}(\Omega^{-1})$	$V_{\text{crit}}(\text{kV})$	$P_{\text{crit}}(\text{MW})$	$G_{\text{lim}}(\Omega^{-1})$	$P_{\text{lim}}\,(\text{MW})$
PF=1	0.0800	44.5473	158.7600	0.0263	94.1764
PF=0.9AR	0.0657	38.8710	99.2250	0.0079	28.3545
PF=0.9AV	0.0657	61.8786	251.4123	0.0707	253.1904
	Augmentation de 20% de la tension E				
PF=1	0.0800	53.4555	228.6144	0.0617	221.1527
PF=0.9AR	0.0657	46.6452	142.8840	0.0324	116.1806
	Compensation de 20% de la réactance de ligne				
PF=1	0.1000	44.5473	198.4500	0.0329	117.7364
PF=0.9AR	0.0900	37.1763	124.3726	0.0099	35.4670

Solution exercice 3* TD

Pour tracer le graphe on a

$$X_{SVC} = \frac{\pi X_C X_L}{X_C[2(\pi-\alpha)+\sin(2\alpha)]-\pi X_L}$$

Avec $X_C = 47.307\ \Omega$, $X_L = \frac{X_C}{2}$, pour α de 90° à 180° on obtient le graphe sur la Figure

Pour calculer l'angle d'amorçage correspondant à chaque régulation RV, on suit les étapes suivantes :

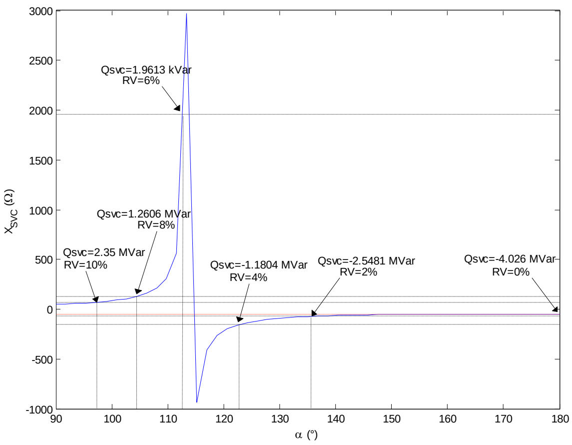
1. Calculer la tension V pour chaque régulation
$$V = \frac{E}{1+R_V/100}$$
Déduire $v = V/E$
2. Calculer les puissances P et Q_L absorbées par la charge et déduire $p = P/S_{sc}$
3. Calculer la puissance réactive du SVC par
$Q_{SVC} = S_{sc}\left(-v^2+\sqrt{v^2-p\char`^2}\right)-Q_L$
4. Déduire la réactance du SVC
$$X_{SVC} = \frac{V^2}{Q_{SVC}}$$

Une réactance positive signifie que le SVC se comporte comme une inductance et une réactance négative signifie qu'il se comporte comme un condensateur.

5. Déduire à partir du graphe l'angle d'amorçage.

Les résultats sont indiqués sur la Figure

$\alpha = 97, 105, 112, 123, 137, 180°$



Exercice 6

Soit le réseau de la Figure 9 ; Sans aucune régulation, la charge 1 absorbe 700 A avec un facteur de puissance de 0.9 AR. La charge 2 à une impédance $\bar{Z}_L = 12.55 + j7.25\ \Omega$. La réactance $X_s = 1.2\ \Omega$.

1. Monter que la tension V_1 est donnée par

$$V_1 = \left|\frac{\bar{Z}_L+0.5+j0.9}{\bar{Z}_L+0.5+j0.9+j1.2}(\bar{V}_s - j1.2\bar{I}_1)\right| = 13.08\ \text{kV}$$

2. Déduire V_2 et Calculer les régulations R_{V1}, R_{V2} des tensions V_1 et V_2 ;
3. Calculer la capacité du condensateur à placer en parallèle au jdb1 pour réguler la tension $V_1 = V_s$;
4. A la place du condensateur, en place un SVC dont la caractéristique est donnée sur le graphe (Figure.10). Quelle est la valeur de α pour régler la tension $V_1 = V_s$.

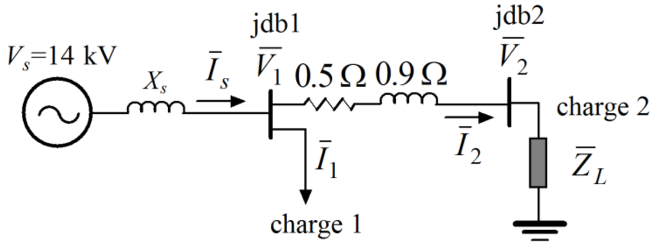


Figure 9

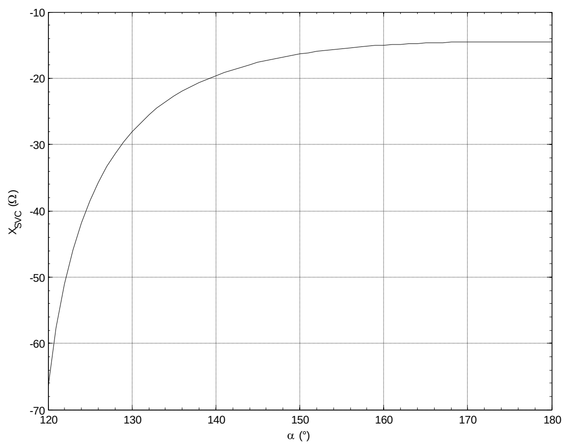


Figure 10

Réponses

On a

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_s - j1.2I_s = \bar{V}_s - j1.2(\bar{I}_1+\bar{I}_2),\ \text{avec}\ \bar{I}_2 = \frac{\bar{V}_1}{Z_L+0.5+j0.9}$$

Donc

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_s - j1.2\bar{I}_1 - j1.2\frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_L+0.5+j0.9}$$
$$\Rightarrow \bar{V}_1\left(1+\frac{j1.2}{\bar{Z}_L+0.5+j0.9}\right) = \bar{V}_s - j1.2\bar{I}_1$$

Alors

$$\bar{V}_1\left(\frac{\bar{Z}_L + 0.5 + j0.9 + j1.2}{\bar{Z}_L + 0.5 + j0.9}\right) = \bar{V}_s - j1.2\bar{I}_1$$

$$\Longrightarrow V_1 = \left|\frac{\bar{Z}_L + 0.5 + j0.9 + j1.2}{\bar{Z}_L + 0.5 + j0.9}(\bar{V}_s - j1.2\bar{I}_1)\right|$$

AN : $V_1 = 13.08$ kV

Diviseur de tension

$$V_2 = \frac{Z_L}{|\bar{Z}_L + 0.5 + j0.9|}V_1 = 12.32 \text{ kV}$$

$$R_{V1} = \frac{14 - 13.08}{13.08} \times 100 = 07.03\%$$

$$R_{V2} = \frac{14 - 12.32}{12.32} \times 100 = 13.64\%$$

La capacité du condensateur est déduite comme suit

$$Q_C = S_{sc}\left(-v^2 + \sqrt{v^2 - p^2}\right) - Q$$

Puisque $V_1 = V_s$ alors $v = 1$.

Définition des puissances P et Q

$$P = P_1 + P_2, \qquad Q = Q_1 + Q_2$$

$$P_1 = V_1 I_1 \times \cos(\varphi_L), \qquad Q_1 = V_1 I_1 \times \sin(\varphi_L)$$

Le nouveau courant absorbé par la charge 1 est

$$I_1 = \frac{14}{13.08}700 = 749.23 \text{ A}$$

$$\Longrightarrow P_1 = 9.44 \text{ MW}$$

$$\Longrightarrow Q_1 = 4.51 \text{ MVar}$$

La charge 2 absorbe un courant

$$I_2 = \frac{V_1}{|\bar{Z}_L + 0.5 + j0.9|} = \frac{14\ kV}{15.38} = 910.3 \text{ A}$$

D'où

$$P_2 = (12.55 + 0.5) \times I_2^2 = 10.81 \text{ MW},$$

$$Q_2 = (7.25 + 0.9) \times I_2^2 = 6.75 \text{ MVar}$$

NB. *Il fau prendre en compte les pertes dans la ligne.*

Donc

$$P = 20.25 \text{ MW}, \qquad Q = 11.26 \text{ MVar}$$

La puissance de court-circuit

$$S_{sc} = \frac{14^2}{1.2} = 163.333 \text{ MVA}$$

Donc $p = 20.25/163.333 = 0.124$ pu

On trouve alors

$$Q_c = -12.52 \text{ MVar}$$

Finalement

$$C = \frac{-Q_c}{V_1^2\omega} = 203.43\ \mu\text{F}$$

Pour effectuer la même régulation avec un SVC, il faut que celui-ci absorbe la même puissance que le condensateur

$$Q_{SVC} = -12.52 \text{ MVar}$$

Sachant que

$$Q_{SVC} = \frac{V_1^2}{X_{SVC}} \Longrightarrow X_{SVC} = -15.65\ \Omega$$

D'après le graphe on trouve $\alpha \approx 154$ °