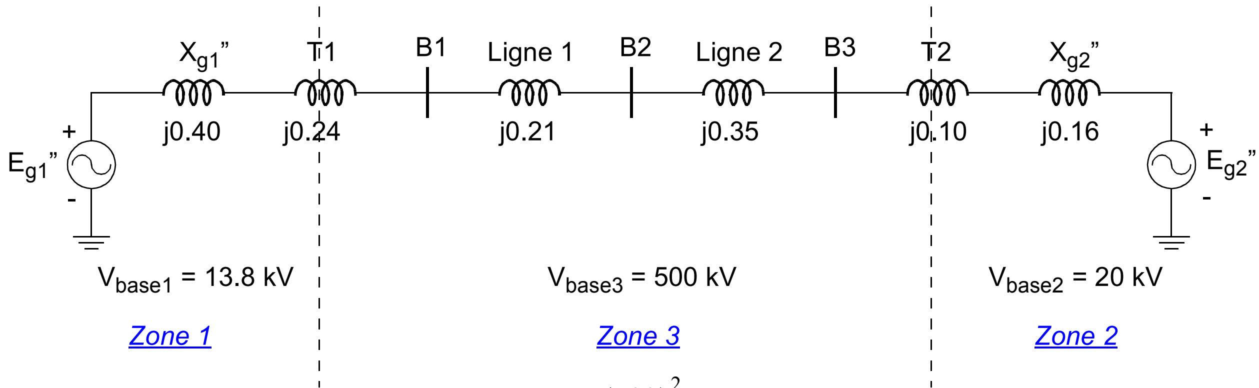
CORRIGÉ DE L'EXAMEN FINAL 2013

Problème no. 1 (25 points)

a)



$$Z_{base3} = \frac{(500)^2}{1000} = 250\Omega$$

Les valeurs de base (S et V) utilisées sont celles de la zone du générateur G_2:

$S_{base} = S_{base2} = 1000$ MVA $\qquad V_{base2} = 20$ kV

On divise le réseau en 3 zones différentes avec les valeurs de base différentes.

$$X_{g1}'' = 0.2 \times \left(\frac{13.8}{13.8}\right)^2 \times \frac{1000}{500} = 0.40 \text{ pu} \qquad X_{g2}'' = 0.16 \text{ pu}$$

$$X_{T1} = 0.12 \times \frac{1000}{500} = 0.24 \text{ pu} \qquad X_{T2} = 0.10 \text{ pu}$$

$$Z_{base3} = \frac{(V_{base3})^2}{S_{base}} = \frac{(500)^2}{1000} = 250\Omega$$

$$X_{ligne1} = \frac{52.5}{250} = 0.21 \text{ pu} \qquad X_{ligne2} = \frac{87.5}{250} = 0.35 \text{ pu}$$

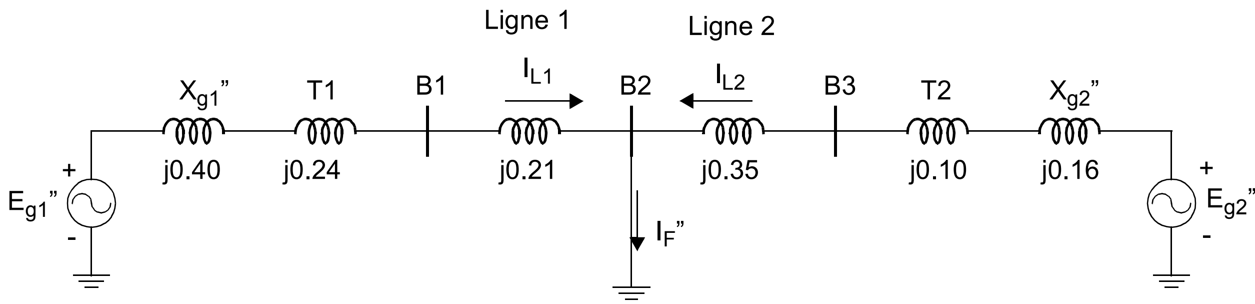
b) Équivalent Thévenin à la barre B2:

$$X_{th} = (0.40 + 0.24 + 0.21) \parallel (0.35 + 0.10 + 0.16) = 0.3551 \text{ pu}$$

$$V_F = \frac{525}{500}\angle 0° = 1.05\angle 0° \text{ pu}$$

Courant de défaut: $\qquad I_F'' = \dfrac{V_F}{Z_{th}} = \dfrac{1.05\angle 0°}{j0.3551} = -j2.9569 \text{ pu}$

c)



La contribution de la ligne 1:

$$I_{L1} = \frac{E_{g1}''}{j(0.40 + 0.24 + 0.21)} = \frac{V_F}{j0.85} = \frac{1.05\angle 0°}{j0.85} = -j1.2353$$

La contribution de la ligne 2:

$$I_{L2} = \frac{E_{g2}''}{j(0.35 + 0.10 + 0.16)} = \frac{V_F}{j0.61} = \frac{1.05\angle 0°}{j0.61} = -j1.7213$$

Problème no. 2 (25 points)

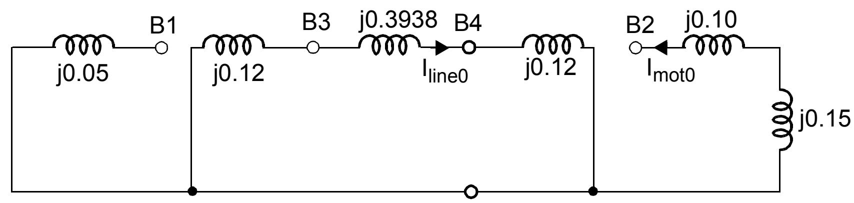
a) On utilise comme valeurs de base S_{base} = 100 MVA et V_{base} = 13.8 kV (pour la zone du générateur G).

Impédance de base dans la zone de la ligne: $$Z_{base} = \frac{(138)^2}{100} = 190.44\Omega$$

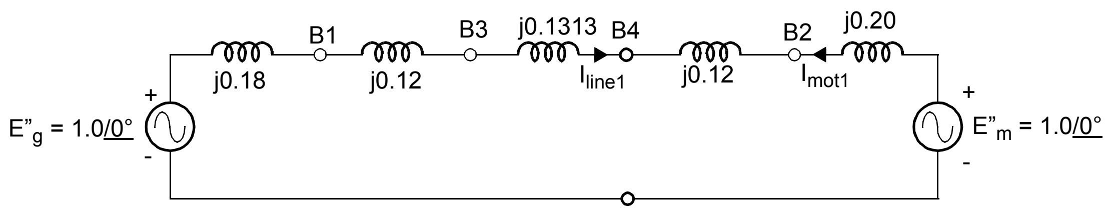
Les réactances de la ligne: $$X_1 = X_2 = \frac{25\Omega}{190.44\Omega} = 0.1313\text{ pu} \qquad X_0 = \frac{75\Omega}{190.44\Omega} = 0.3938\text{ pu}$$

Les réseaux de séquence:

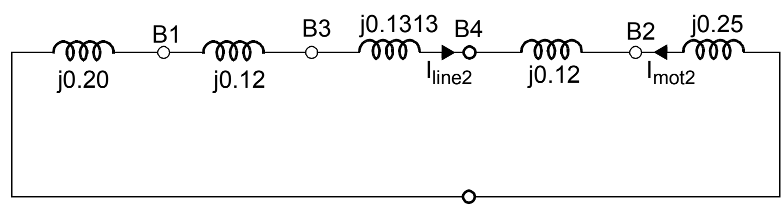
Séquence 0



Séquence directe

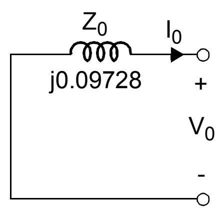


Séquence inverse



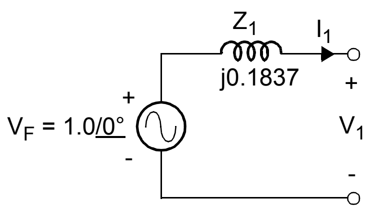
b) Les équivalents Thévenin des réseaux de séquence vus à la barre B4 sont:

Séquence 0



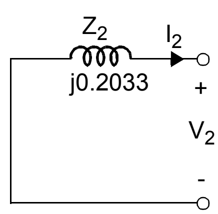
$$Z_0 = (j0.12 + j0.3938) \parallel j0.12 = j0.09728$$

Séquence directe



$$Z_1 = (j0.18 + j0.12 + j0.1313) \parallel (j0.12 + j0.2)$$
$$Z_1 = j0.1837$$

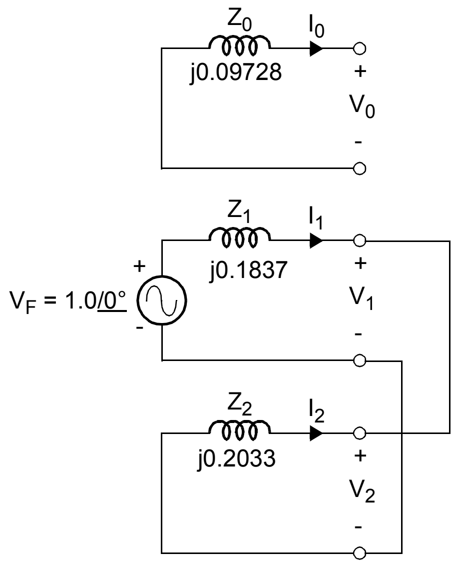
Séquence inverse



$$Z_2 = (j0.20 + j0.12 + j0.1313) \parallel (j0.12 + j0.25)$$
$$Z_2 = j0.2033$$

c) Les deux phases b et c de la barre B4 sont en court-circuit franc.

Les réseaux de séquence sont reliés au point du défaut comme montré dans la figure suivante.



Les courants de court-circuit de séquence sont:

$$I_0 = 0$$

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_F}{Z_1 + Z_2} = \frac{1.0\angle 0°}{j0.1837 + j0.2033} = -j2.5840 \text{ pu}$$

En transformant I_0, I_1, I_2 en domaine de phase, on obtient: $$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ (-j\sqrt{3})I_1 \\ (j\sqrt{3})I_1 \end{bmatrix}$$

Le courant de défaut (phase b) subtransitoire est égal à:

$$I_b'' = (-j\sqrt{3})I_1 = (-j\sqrt{3})(-j2.5840) = -4.4756 \text{ pu}$$

Le courant de base à la barre B4 est égal à: $I_{base} = \dfrac{100}{\sqrt{3} \times 138} = 0.4184 \text{ kA}.$

La valeur réelle du courant de défaut I_b” est: $I_b'' = -4.4756 \times 0.4184 = -1.8726 \text{ kA}$

Les tensions de séquence à la barre B4 sont:

$$V_0 = 0 \qquad V_1 = V_2 = \frac{0.2033}{0.1837 + 0.2033} \times 1\angle 0° = 0.5253\angle 0°$$

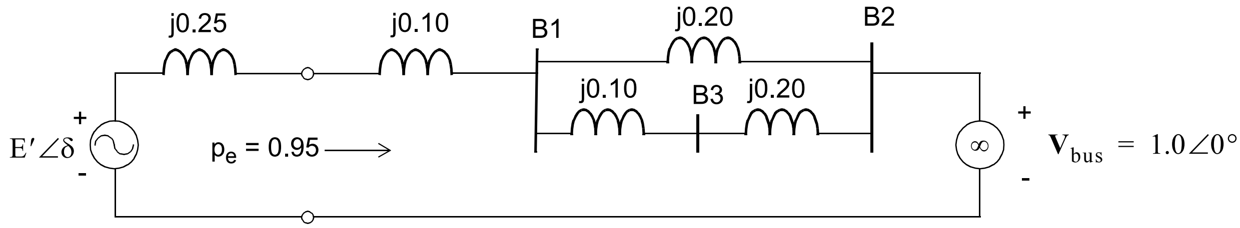
On obtient les tensions ligne-neutre à la barre B4 en transformant les tensions de séquence:

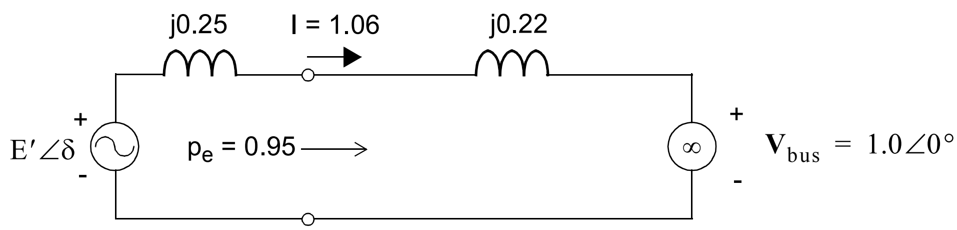
$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5253 \\ 0.5253 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0506 \\ -0.5253 \\ -0.5253 \end{bmatrix} \text{ pu}$$

On peut remarquer que le court-circuit entre b et c fait augmenter la tension V_{ag} de 5%.

Problème no. 3 (25 points)

a) Circuit équivalent du réseau:





Facteur de puissance à la barre infinie: $\quad fp = \cos\phi = \dfrac{0.95}{1 \times 1.06} = 0.89623$

On déduit: $\quad \phi = \mathrm{acos}(0.89623) = 0.45961$ (ou 26.33º)

Le courant I est égale à: $\quad I = 1.06\angle{-0.45961}$ pu

La tension interne E’ de la machine est égale à:

$$E' = V_{bus} + j0.47 \times I = 1\angle 0 + j0.47 \times 1.06\angle{-0.45961} = 1.3\angle 0.3506$$

Alors: $\quad$ E’ = 1.3 pu $\quad$ et $\quad \delta = 0.3506$ rad ou 20.1º

b) Le système est en régime permanent lorsqu’un court-circuit triphasé survient au point F.

L’équation de mouvement du générateur est: $\quad \dfrac{2H}{\omega_{syn}}\omega_{pu}\dfrac{d^2\delta}{dt^2} = p_{mpu} - p_{epu}$

Après le court-circuit, p_e tombe à 0. On suppose que p_m demeure constante (0.95 pu) et ω_{pu} =1.0.

L’équation de mouvement du générateur devient: $\quad \dfrac{2H}{\omega_{syn}}\dfrac{d^2\delta}{dt^2} = p_{mpu}$

Ou bien: $\quad \dfrac{2 \times 3}{377} \times \dfrac{d^2\delta}{dt^2} = 0.95$

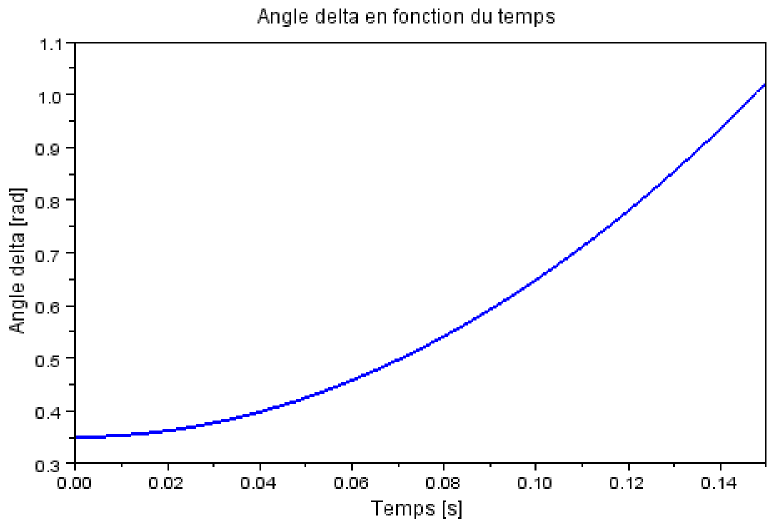
$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = 59.692$$

Conditions initiales: $\quad \delta(0) = 0.3506\ \mathrm{rad}$ $\quad$ et $\quad \left.\dfrac{d\delta}{dt}\right|_{t=0} = 0$

On intègre deux fois l’équation $\dfrac{d^2\delta}{dt^2} = 59.692$. Avec les conditions initiales ci-dessus, on a:

$$\frac{d\delta}{dt} = 59.692t + 0$$

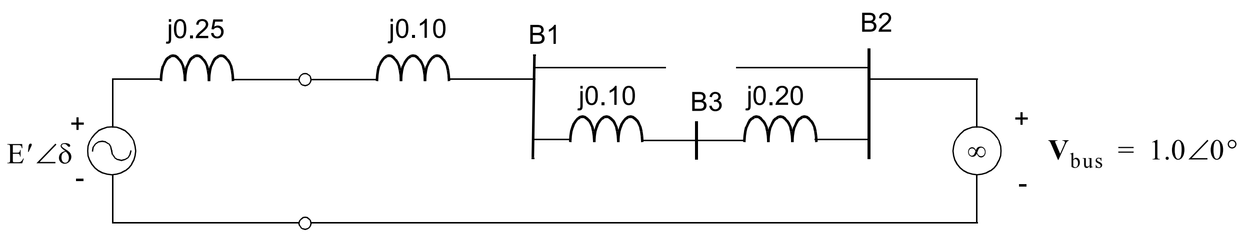
$$\delta = 29.846t^2 + 0.3506$$



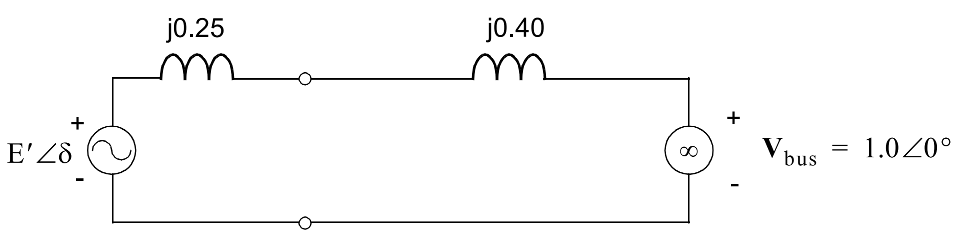
Avant le court-circuit, la puissance active p_e est:

$$p_e = \frac{EV_{bus}}{X}\sin\delta = \frac{1.3 \times 1}{0.47}\sin\delta = 2.76595\sin\delta$$

c) Un certain temps après le court-circuit, on doit ouvrir les disjoncteurs D12 et D21 pour isoler le défaut du réseau. Le réseau équivalent après l'ouverture des disjoncteurs D12 et D21 est montré dans la figure suivante.

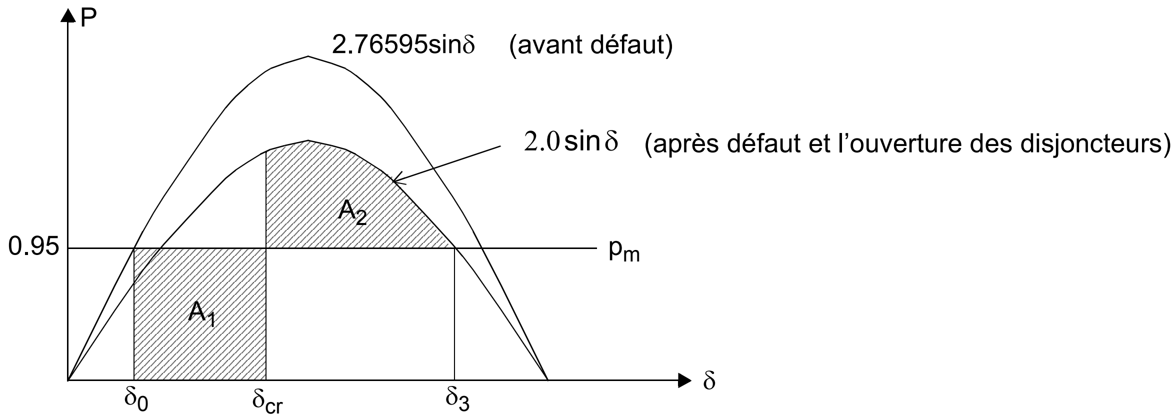


ou bien:



La puissance transportée au réseau infini est: $$p_e = \frac{EV_{bus}}{X}\sin\delta = \frac{1.3 \times 1}{0.65}\sin\delta = 2\sin\delta$$

On suppose que $p_m = 0.95$.



On a: $\delta_0 = 0.3506$ et $\delta_3 = \pi - \arcsin\left(\frac{0.95}{2}\right) = 2.6466$

La surface A_1 est égale à: $A_1 = \int_{0.3887}^{\delta_{cr}} (0.95)d\delta = 0.95(\delta_{cr} - 0.3506)$

La surface A_2 est égale à A_1:

$$A_2 = A_1 = 0.95(\delta_{cr} - 0.3506) = \int_{\delta_{cr}}^{2.6466} (2\sin\delta - 0.95)d\delta = 2\cos\delta_{cr} + 0.95\delta_{cr} - 0.75433$$

On déduit: $2\cos\delta_{cr} = 0.42126$

Alors: $\delta_{cr} = 1.3586$ rad (ou 77.8°)

Le temps critique est donné par la relation suivante: $1.3586 = 29.846t_{cr}^2 + 0.3506$

Alors: $t_{cr} = 0.1838$ s

ce qui correspond à 11.03 cycles.

Problème no. 4 (25 points)

a) La résistance d'un faisceau est: $R_{faisceau} = 12.5\Omega$

La résistance totale de la ligne CC est égale à: $R_{ligneCC} = 2 \times R_{faisceau} = 25\Omega$

La tension au poste redresseur est $V_{dr} = 450$ kV.

La tension au poste onduleur est égale à:

$$V_{do} = V_{dr} - (R_{ligneCC} \times I_{dr}) = 450 - (25 \times 1.8) = 405\,\text{kV}$$

Puissance active côté redresseur: $P_1 = V_{dr} \times I_d = 450 \times 1.8 = 810\,\text{MW}$

Puissance active côté onduleur: $P_2 = V_{do} \times I_d = 405 \times 1.8 = 729\,\text{MW}$

La puissance active transportée est la puissance active côté onduleur:

$$P_{transportee} = P_2 = 729\,\text{MW}$$

Les pertes Joule sur la ligne CC sont:

$$P_{Joule} = R_{ligneCC} \times I_d^2 = 25 \times 1.8^2 = 81\,\text{MW}.$$

b) Calcul des courants de ligne aux primaires des transformateurs

Côté redresseur:

Facteur de puissance:

$$FP_1 = \cos\phi_1 = \frac{1}{2}[\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_1 + \mu_1)] = \frac{1}{2}[0.9336 + 0.8746] = 0.9041$$

Puissance apparente:

$$S_1 = \frac{P_{red}}{\cos\phi_1} = \frac{810}{0.9041} = 895.919\,\text{MVA}$$

Courant de ligne au primaire du transformateur:

$$I_{ap1} = \frac{S_1}{\sqrt{3} \times V_{LLp}} = \frac{895.919}{\sqrt{3} \times 230} = 2.249\ \text{kA}$$

Côté onduleur:

Facteur de puissance:

$$FP_2 = \cos\phi_2 = \frac{1}{2}[\cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_2 + \mu_2)] = \frac{1}{2}[0.848 + 0.8988] = 0.8734$$

Puissance apparente:

$$S_2 = \frac{P_2}{\cos\phi_2} = \frac{729}{0.8734} = 834.669\,\text{MVA}$$

Courant de ligne au primaire du transformateur:

$$I_{ap2} = \frac{S_2}{\sqrt{3} \times V_{LLp}} = \frac{834.669}{\sqrt{3} \times 230} = 2.095\ \text{kA}$$

c) Calcul des puissances réactives absorbées par le redresseur et par l'onduleur

Puissance réactive absorbée par le redresseur:

$$Q_1 = \sqrt{{S_1}^2 - {P_1}^2} = \sqrt{895.919^2 - 810^2} = 382.846\,\text{Mvar}$$

Puissance réactive absorbée par l'onduleur:

$$Q_2 = \sqrt{{S_2}^2 - {P_2}^2} = \sqrt{834.669^2 - 729^2} = 406.487\,\text{Mvar}$$