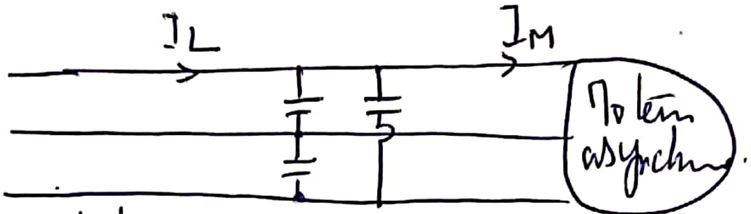
Université EL chahid Hamma Lakhdar EL OUED
Faculté de Technologie.
Département d'Electrotechnique.

TD N°=1, N°2. Module: Modélisation et optimisation du réseau Electrique.
M1

Exo 1:



Ligne d'alimentation sous tension alternatives sinusoïdales triphasées équilibrées 230/400V 50HZ

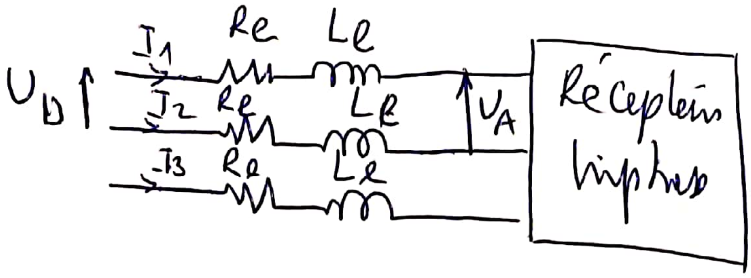
Trois condensateurs montés en triangle chaque condensateur a une valeur de 23 μF

Moteur triphasé équilibré absorbe une puissance active de +6kW et une puissance réactive de +3,5 kVAR

a) Calculer la puissance apparente S_M et le courant $I_{M\,eff}$ du moteur
b) Calculer le facteur de puissance de la ligne qui alimente l'ensemble moteur + condensateurs, ainsi que la valeur $I_{L\,eff}$.
c) Tracer le diagramme vectoriel.

Exo2 chute de tension dans une ligne de transport d'énergie.

Une ligne triphasée moyenne tension alimente un récepteur triphasé équilibré qui consomme une puissance active de 4,20 MW et qui impose un facteur de puissance de 0,938. Chaque fil de ligne a pour résistance $R_\ell = 2,43\,\Omega$ et pour inductance $L_\ell = 11,2\,mH$
La tension efficace entre phase à l'arrivée de la ligne est $V_A = 20kV$. La fréquence de la tension est 50HZ.



1) Calculer l'intensité I du courant dans un fil de ligne.

2) Pour la ligne, calculer :
   - la puissance active consommée.
   - la puissance réactive consommée.

3) Pour l'ensemble (ligne + récepteur) calculer :
   - la puissance active consommée.
   - la puissance réactive consommée.
   - la puissance apparente consommée.

4) Calculer la chute de tension ΔV due à la ligne. Donner la valeur de la tension efficace entre phases U_D au départ de la ligne

5) Tracer le diagramme vectoriel.

Ex03 : Alternateur couplé au réseau

On considère un alternateur de production de 1000 kVA raccordé à un réseau triphasé en moyenne tension de tension composée $U = 20kV$. L'alternateur est supposé accroché sur le réseau et on considère que les tensions aux bornes de ses trois phases sont fixes et ne dépendent pas du courant qui circule dans la machine. On donne par ailleurs la réactance synchrone de la machine $X_s = 25\,\Omega$ et la relation supposée linéaire reliant le courant d'excitation à la force électromotrice interne $E = 75 . I_e$

1) Représenter le schéma monophasé équivalent.

2) Ecrire la relation de maille reliant la force électromotrice $\underline{E}$, la tension du réseau $\underline{V}$, la réactance synchrone X_s et le courant $\underline{I}$.

3) Pour une puissance fournie au réseau $P = 800 kW$ et une puissance réactive fournie $Q = +600$ kVAR calculer la valeur efficace du courant de ligne : I

4) Calculer également le déphasage entre le courant de ligne et la tension simple du schéma monophasé.

5) Calculer alors la valeur de la force électromotrice interne de l'alternateur. En déduire la valeur du courant d'excitation nécessaire

Ex 04 : Transport de l'énergie électrique :

On considère une ligne triphasé de 300 km de longueur telle que $r = g = 0$ et que les constantes linéiques par phase soient : $l = 14 \times 10^{-4}\ H/km$ $C = 10 \times 10^{-9}\ F/km$
Cette ligne fonctionne à la fréquence de 50 HZ.
On veut qu'elle fournisse une puissance apparente totale de 75 MVA avec un facteur de puissance égal à 0.8 (AR) sous une tension de 100 kV par phase
On demande quelles sont alors, pour le générateur, les valeurs du courant et de la tension. On précisera le déphasage de cette tension par rapport à le courant ainsi que le déphasage de la tension aux bornes du générateur par rapport à la tension aux bornes du récepteur

Ex 05 : Transformateur monophasé.

La puissance apparente d'un transformateur monophasé 5 kV / 230 V, 50 HZ est $S = 21\ kVA$. La section du circuit magnétique est $S = 60\ cm^2$ et la valeur maximale du champ magnétique $B = 1{,}1\ T$
L'essai à vide a donné les résultats suivants :

$U_1 = 5000\ V$, $V_{20} = 230\ V$, $I_{10} = 0{,}5\ A$ et $P_{10} = 250\ W$.

L'essai en court circuit avec $I_{2cc} = I_{2n}$ a donné les résultats suivants :

$P_{1cc} = 300\ W$ $U_{1cc} = 200\ V$

1) Calculer le nombre de spires N_1 au primaire

2) Calculer le rapport de transformation m et le nombre N_2 de spires au secondaire.

3) Quel est le facteur de puissance à vide de ce transformateur ?

4) Quel est l'intensité efficace du courant secondaire I_{2n} ?

5) Déterminer les éléments R_s, Z_s, X_s de ce transformateur ?

6) Calculer le rendement de ce transformateur lorsqu'il débite un courant d'intensité nominale dans une charge inductive de facteur de puissance 0,83.

Ex°1 : Solution.

$S_M = \sqrt{P_M^2 + Q_M^2} = \sqrt{6^2 + 3{,}5^2} = 6{,}946\ kVA.$

$S_M = \sqrt{3}\, V_M\, I_{Meff} \Rightarrow I_{meff} = \frac{S_M}{\sqrt{3}\, V_n} = \frac{6946}{\sqrt{3} \times 400} = 10A.$

$Q_C = -3V_{eff}^2 . C\omega.$

$Q_C = \cancel{\sqrt{3}\, V_{eff} . I_{ceff} = \sqrt{3}\, V_{eff} . \frac{V}{\frac{1}{C\omega}}}$

$Q_c : 3\, V_{eff}\, J_{ceff} = 3\, V_{eff}\, \cancel{\frac{I_{ceff}}{\sqrt{3}}} = \cancel{\sqrt{3}}\, V_{eff}.$

$Q_c = -3\, V_{eff} . J_{ceff} = -3\, V_{eff} . \frac{V_{eff}}{Z_c} = -\frac{3V_{eff}^2}{Z_c} = -\frac{3V_{eff}^2}{1/C\omega} =$

$Q_c = -3\, V_{eff}^2\, C\omega . = -3 \times 400^2 \times 23 \times 10^{-6} \times 100\pi$

$Q_c = -3466{,}56\ VAR . \simeq 3467\ VAR$

On utilise le théorème de Boucherot :

	Puissance active	Puissance réactive
Moteur	$P_M = +6000$	$Q_M = +3500\ VAR$
Condensateurs	$P_{3C} = 0$	$Q_{3c} = -3467\ VAR$
Total/ligne	$P_L = +6000$	$Q_L = 33\ VAR.$

$S_L(\text{ligne}) = \sqrt{P_L^2 + Q_L^2} = \sqrt{6000^2 + 33^2} = 6000{,}09\ VA$

$S_L = \sqrt{3}\, V_{eff} . I_L \Rightarrow I_L = \frac{S_L}{\sqrt{3}\, V_{eff}} = \frac{6000}{\sqrt{3} \times 400}$

$I_L = 8{,}66A.$

Facteur de puissance :

$$\cos\varphi_L = \frac{P_L}{S_L} \simeq \frac{6000}{6000} = 1 \Rightarrow \varphi_L = 0$$

$$\cos\varphi_{charge} = \frac{P_{ch}}{S_m} = \frac{6000}{6946} \Rightarrow \varphi_{chg} = 30,25 .$$

$$\cos\varphi_{chg} = 0.864$$

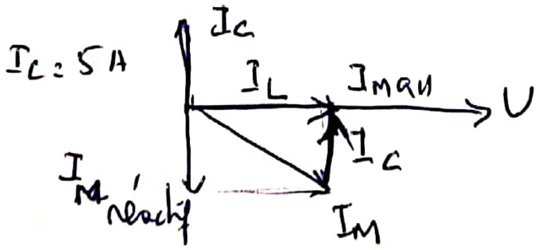
Diagramme :

$$I_{M\,actif} = I_M \cos\varphi_{chg} = 10 \times 0.864 = 8,64A .$$

$$I_{M\,réact} = I_M \sin\varphi_{chg} = 10 \times 0.5 = 5A .$$

$$I_C = \sqrt{3}\, J_C = \sqrt{3} \cdot \frac{V_{eff}}{1/C\omega} = \sqrt{3}\, C\omega V_{eff} = \sqrt{3} \times 23 \times 10^{-6} \times 100\pi \times 400$$

$$I_C = 4,9971 \simeq 5A .$$



Exo 2 : Solution. **Exo 2** (3)

1) Intensité efficace I du courant dans un fil de ligne.

$$P = \sqrt{3}\, V I \cos\varphi \Rightarrow I = \frac{P}{\sqrt{3}\, V \cos\varphi}$$

$$I = \frac{4,2\times10^6}{\sqrt{3}\times 20\times10^3\times 0.938} = \frac{4200}{\sqrt{3}\times20\times0.938} = \frac{4200}{32,45} = 129,43\,A.$$

2) Pour la ligne, on calcule :

$$P_{ligne} = \Delta P = 3RI^2 = 3\times2,43\times129,43^2 = 122,12\,kW.$$

$$Q_{ligne} = \Delta Q = 3L\omega I^2 = 3\times11,2\times10^{-3}\times100\pi\times129,43^2 = 176,74\,kVAR$$

3) Pour l'ensemble (ligne + récepteur) on calcule :

$$P_T = P_{ligne} + P = 122,12 + 4200 = 4322,12\,kW.$$

$$Q_T = Q_{lig} + Q = 176,74 + \sqrt{3}\times20\times129,43\times\sqrt{1-0.938^2}$$

$$Q_T = 176,74 + \sqrt{3}\times20\times129,43\times0.346 = 176,74 + 1549,5 = 1726,22\,kVAR$$

La puissance apparente :

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{4322,12^2 + 1726,22^2} = 4654\,kVA. = 4,65\,MVA.$$

$$S_T = \sqrt{3}\, V_D\, I \Rightarrow V_D = \frac{4654^{kVA}}{\sqrt{3}\times129,43} = \frac{4654}{223,91} = 20,78\,kV \;*$$

$$* \quad \Delta V = V_D - V_A = 20,78 - 20 = 0.78\,kV = 780\,V.$$

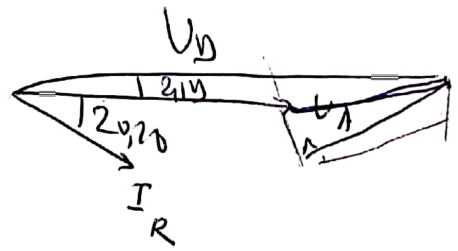
$$\Delta V = \sqrt{3} Z I = \sqrt{3} (R + jX) I = \sqrt{3} \times 2{,}43 \times 129{,}43 + j\sqrt{3} \times 11{,}2 \times 10^{-3} \times 100\pi \times 129{,}43$$

$$\Delta V = 544{,}11 + j\,787{,}46 = 957{,}11 \angle 55{,}35^\circ$$

$$U_D = V_A + \Delta V = 20000 + 544{,}11 + j\,787{,}46$$
$$= 20544{,}11 + j\,787{,}46 = 20559{,}19 \angle \cancel{6{,}68}\ 2{,}19^\circ$$

$$\text{tg}\,\theta = \frac{787{,}46}{20544{,}11} = 0{,}0388 \qquad \theta = 2{,}19^\circ.$$

$$\cos\varphi_{Reglin} = \cos\varphi_R = 0{,}938 \Rightarrow \varphi_{Reg} = 20{,}28$$



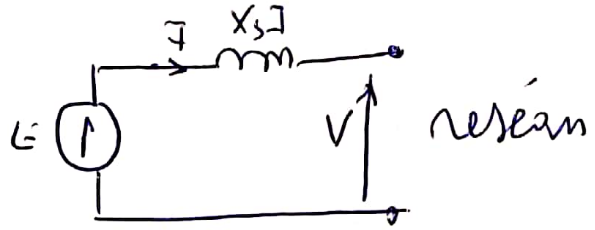
$$\Delta V = \sqrt{3}(R I \cos\varphi + X I \sin\varphi) = \sqrt{3} \times 2{,}43 \times 129{,}43 \times 0{,}938 + \sqrt{3} \times 11{,}2 \times 10^{-3} \times 100\pi \times 129{,}43 \times 0{,}346$$

$$\Delta V = 510{,}37 + 272{,}46 = 782{,}83$$

$$U_D = V_A + \sqrt{3} Z I = V_A + \sqrt{3} (R + jX)|I|(\cos\varphi - j\sin\varphi)$$
$$= V_A + \sqrt{3}\left[R I \cos\varphi + X I \sin\varphi\right] + \sqrt{3}\left[X I \cos\varphi - R I \sin\varphi\right]$$

Exo 3

1)



2) La relation $\underline{E} = \underline{V} + jX_s\underline{I}$

3) $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$; $I = \frac{S}{\sqrt{3}\,U} = \frac{\sqrt{P^2+Q^2}}{\sqrt{3}\,V} = \frac{\sqrt{800^2+600^2}}{\sqrt{3}\times 20}$

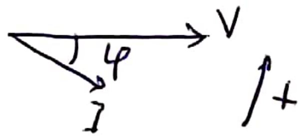
$I = \frac{1000}{\sqrt{3}\times 20} = \frac{50}{\sqrt{3}} = 28,86 \simeq 28,9\,A.$

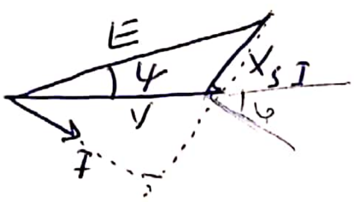
4°) Le déphasage se déduit directement, en valeur et en signe de la puissance réactive consommée par le réseau

$Q = +600 = \sqrt{3}\,V I \sin\varphi \Rightarrow \sin\varphi = \frac{+600}{\sqrt{3}\times 20\times 28,9} =$

$\sin\varphi = \frac{+600}{999,94} \simeq \frac{600}{1000} = \frac{Q}{S} = 0,6 \Rightarrow$

$\varphi = +36,86°$





$E\cos\psi = V + X_s I \sin\varphi$

$E\sin\psi = X_s I \cos\varphi.$

$\operatorname{tg}\psi = \frac{X_s I\cos\varphi}{V + X_s I\sin\varphi} = \frac{25\times 28,9\times 0.8}{10^3\times\frac{20}{\sqrt{3}} + 25\times 28,9\times 0.6} = \frac{578}{11560,7 + 433,5}$

$= \frac{578}{11994,2} = 0.048$

$\psi = 27°$.

$E \cos\psi = V + X_s I \sin\varphi$.

$E \sin\psi = X_s I \cos\varphi \Rightarrow E = \dfrac{X_s I \cos\varphi}{\sin\psi}$

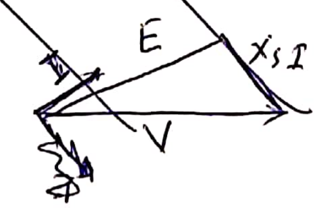
$$E = \frac{25 \times 28{,}9 \times 0{,}8}{0.047} = \frac{578}{0.047} = 12297$$

$$E = \frac{V + X_s I \sin\varphi}{\cos\psi} = \frac{\frac{20000}{\sqrt{3}} + 25 \times 28{,}9 \times 0.6}{0.998} = 11994\,V.$$

$$E = 75\, I_e \Rightarrow I_e = \frac{E}{75} = \frac{11994}{75} = 159{,}92 \simeq 160\,A.$$

6) Si on diminue I_e de moitié, alors $E = \dfrac{11994}{2} = 5997\,V$

$\simeq 6000\,V$.



Scanned with CamScanner

$\pi \to 180 \to 3,14$

$\cdot 0,35 \cdot$

Exo 4 : Solution (1)

Exo 4

Les constantes caractéristiques de la ligne sont telles que :

$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{z y}$

$z = r + jlw = jlw$.

$y = g + jCw = jCw \Rightarrow \gamma = \sqrt{jlw \cdot jCw} = jw\sqrt{lc}$

$\beta = w\sqrt{lc} = 2\pi f\sqrt{lc} = 2\pi \times 50 \times \sqrt{14\times10^{-4} \times 10\times10^{-9}}$

$\beta = 314\sqrt{14\times10^{-12}} = 314 \times \sqrt{14} \times 10^{-6} = 11,74\times10^{-4}$ rad/km

$\beta l = 11,74\times10^{-4} \times 300 = 3522\times10^{-4} = 0,35$ rad $= 20°$.

$180° = \pi \to 3,14$ rad

$x \leftarrow 0,35$ rad $\quad x = \frac{180 \times 0,35}{3,14} =$

La longueur d'onde

$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\cancel{2\pi}}{0,35} = \frac{2\pi}{11,74\times10^{-4}} = \frac{2\pi\times10^{4}}{11,74} = 5349 \simeq 5350$ km.

$l \leq \lambda \qquad 300 < 5350$ km.

$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{14\times10^{-4}}{10\times10^{-9}}} = \sqrt{\frac{14\times10^{-4}}{10^{-8}}} = \sqrt{14\times10^{4}} = \sqrt{14}\times10^{2} =$
$374\ \Omega$.

$V(l) = V_s = \left(\frac{V_R + Z_c I_R}{2}\right)e^{\gamma l} + \left(\frac{V_R - Z_c I_R}{2}\right)e^{-\gamma l}$.

$I_s = \frac{1}{Z_c}\left[\left(\frac{V_R + Z_c I_R}{2}\right)e^{\gamma l} - \left(\frac{V_R - Z_c I_R}{2}\right)e^{-\gamma l}\right]$

$$V_s = (\cosh \gamma l) V_R + (Z_c \sinh \gamma l) I_R$$

$$I_s = \left(\frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l\right) V_R + (\cosh \gamma l) I_R .$$

$$\gamma = j\beta \qquad (\alpha = 0).$$

$$V_s = (\cosh j\beta l) V_R + Z_c (\sinh j\beta l) I_R$$

$$I_s = \left(\frac{1}{Z_c} \sinh j\beta l\right) V_R + (\cosh j\beta l) I_R$$

$$\cosh j\beta l = \cos\beta l .$$

$$\sinh j\beta l = j \sin\beta l .$$

$$V_s = (\cos\beta l) V_R + (j Z_c \sin\beta l) I_R$$

$$I_s = \frac{1}{Z_c} j \sin\beta l + (\cos\beta l) I_R .$$

$$I_R = \frac{S_R}{3 V_R} = \frac{75}{3 \times 100} = \frac{25 \times 10^6}{100 \cdot 10^3} = 250\,A .$$

$$\cos\varphi = 0.8 . \quad \varphi = 36{,}8^\circ$$

$$\cos\beta l = \cos 20^\circ = 0.939$$

$$\sin\beta l = \sin 20^\circ = 0.342 .$$

$$V_s = 0.939 \times 100 + j\,374 \times 0.342 \times 250 (0.8 - j0.6)$$

$$V_s = 93.9 \times 10^3 + j25581 + 19186$$

$$V_s = 93900 + 19186 + j25581 = 113086 + j25581$$

$$|V_s| = 115{,}94\,kV \angle 12{,}74^\circ$$

③

$$I_s = \frac{1}{Z_c}(\sinh j\beta l)V_R + (\cosh j\beta l)\, I_R$$

$$I_s = \frac{1}{374}(j \sin \beta l)\, V_R + (\cos \beta l)\, I_R$$

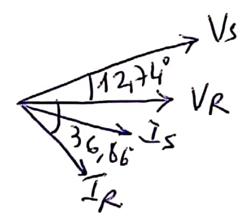
$$I_s = \frac{1}{374}(j \sin 20^\circ)\, V_R + (\cos 20^\circ)\, I_R.$$

$$I_s = \frac{1}{374} j\,(0{,}342)\, V_R + (0{,}939)\, I_R$$

$$I_s = \frac{1}{374} j\, 0{,}342 \times 100 \times 10^3 + (0{,}939).\,250\,(0{,}8 - j\,0{,}6)$$

$$I_s = 91{,}44 j + 187{,}6 - j\,140{,}86$$

$$I_s = 187{,}8 - j\,49{,}42 = 194{,}19 \angle -14{,}74^\circ.$$



$$S_s = 3 V_s I_s^* = 3 \times 100 \times 250 \angle -36{,}86^{\circ *}$$

$$S_R = \underbrace{300 \times 250}\angle 36{,}86^\circ = 75 \angle 36{,}86 = 75\,(0{,}8 + j\,0{,}6)$$

$$S_s = (60 + j\,45)\ \text{MVA}.$$

$$S_s = 3 V_s I_s^* = 3 \times 115{,}94 \times 194{,}19 \angle 12{,}74 + 14{,}74^\circ$$

$$S_s = 3 \times 115{,}94 \times 194{,}19 \angle 27{,}48^\circ$$

$$= 67{,}55\ \text{MVA} \angle 27{,}48^\circ = 59{,}93 + j\,31{,}16^\circ.$$

$$\approx 60 + j\,31{,}16.$$

$A = \cosh \gamma l$ $\qquad$ $B = Z_c \sinh \gamma l = Z_\pi$ $\qquad$ (4)

$$1 + \frac{Z_\pi Y_\pi}{2} = \cosh \gamma l.$$

$$B = Z_\pi = Z_c \sinh \gamma l$$

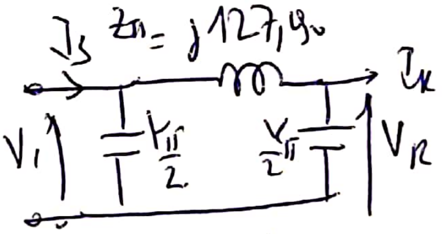
$$\cancel{Y_\pi = \frac{1}{2} + \frac{Z_\pi Y_\pi}{2} = \cosh \gamma l.}$$

$$1 + Z_\pi \frac{Y_\pi}{2} = \cosh \gamma l - 1 \qquad \boxed{\frac{Y_\pi}{2} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{Z_\pi}}$$

$$\boxed{\frac{Y_\pi}{2} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{Z_c \sinh \gamma l}}$$

$$Z_\pi = j Z_c \sin \beta l = j374 \sin 20^\circ = j374 \times 0.342 = $$
$$= j127{,}9\,\Omega.$$

$$\frac{Y_\pi}{2} = \frac{\cos j\beta l - 1}{Z_\pi} = \frac{0.939 - 1}{j127{,}9\,\Omega} = \frac{-0{,}061}{j127{,}9\,\Omega} = +j4{,}76 \times 10^{-4}$$



$$V_s I_c = V_s \cdot \frac{Y_\pi}{2} V_r = V_s^2 \frac{Y_\pi}{2} = 115{,}64^2 \times 4{,}76 \times 10^{-4} = 3{,}20\,MVAR$$
$$6{,}4\,MVAR$$

$$V_R I_C = V_R \cdot V_R \cdot \frac{Y_\pi}{2} = V_R^2 \frac{Y_\pi}{2} = 110^2 \times 4{,}76 \times 10^{-4} = 4{,}76\,MVAR$$

$$Q_C = 6{,}4 + 4{,}76 = 11{,}16\,MVAR.$$

$$Q_{C\,total} = 3 \times 11{,}16 = 33{,}46\,MVA.$$

Solut Transfo mono

Exo 5

1) En utilisant le théorème de Boucherot :

$$V_1 = \cancel{N} \, 4{,}44 \, N_1 \, f \, S \, B_{max}$$

$$N_1 = \frac{V_1}{4{,}44 f \times S \times B_m} = \frac{5000}{4{,}44 \times 50 \times 60 \times (10^{-2})^2 \times 1{,}1}$$

$$N_1 = \frac{5000}{1{,}465} = 3413 \text{ spires.}$$

2) $m = \frac{V_{20}}{V_1} = \frac{230}{5000} = 0{,}046$

$$m = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow N_2 = m N_1 = 0{,}046 \times 3413 = 157 \text{ spires.}$$

3) $P_{10} = V_1 I_{10} \cos\varphi_{10} \Rightarrow \cos\varphi_{10} = \frac{P_{10}}{V_1 I_{10}} = \frac{250}{5000 \times 0{,}5} = \frac{250}{2500} = 0{,}1$

$$\varphi_{10} = 84{,}26^\circ.$$

$$I_{10a} = I_{10} \cos\varphi_{10} = 0{,}5 \times 0{,}1 = 0{,}05\,A.$$

$$I_{10r} = I_{10} \sin\varphi_{10} = 0{,}5 \times 0{,}995 = 0{,}497\,A.$$

4) $S_n = V_{1n} I_{1n} = V_{2n} I_{2n} \Rightarrow I_{2n} = \frac{S_n}{V_{2n}} = \frac{21 \times 10^3}{230} = 91{,}3\,A.$

5) $R_S = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2} = \frac{P_{1cc}}{I_{2n}^2} = \frac{300}{91{,}3^2} = \frac{300}{8335{,}7} = 0{,}036\,\Omega = 36\,m\Omega.$

$$Z_S = \frac{m V_{1cc}}{I_{2cc}} = \frac{0{,}046 \times 200}{91{,}3} = \frac{9{,}3}{91{,}3} = 0{,}1\,\Omega.$$

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_S^2} = \sqrt{0{,}1^2 - (0{,}036)^2} = \sqrt{0{,}01 - 0{,}0013} = 0{,}093\,\Omega$$

$$V_{20} = V_2 + R_S I_2 \cos\varphi_2 + X_S I_2 \sin\varphi_2.$$

$$\Delta V = V_{20} - V_2 = R_S I_2 \cos\varphi_2 + X_S I_2 \sin\varphi_2$$

$\varphi_2 = 33{,}9^\circ$

$\Delta V = 0.036 \times 91{,}3 \times 0.83 + 0.093 \times 91{,}3 \times 0{,}558$

$\Delta V = 2{,}72 + 4{,}74 = 7{,}46\,V.$

$U_2 = V_{20} - \Delta V = 230 - 7{,}46 = 222{,}54\,V$

$P_2 = V_2 I_2 \cos\varphi_1 = 222{,}54 \times 91{,}3 \times 0{,}83 = 16863{,}86 = 16{,}86\,kW.$

$P_1 = P_2 + P_F + P_C$

$P_F = P_{10} = \cancel{300W} \cdot 250\,W$

$P_C = R_s I_{2n}^2 = 0.036 \times 91{,}3^2 = 300\,W.$

$P_1 = 16860 + 300 + 250 = 17410\,W.$

$\eta = \dfrac{P_2}{P_1} = \dfrac{16860}{17410} = 0.968 = 96{,}8\%$