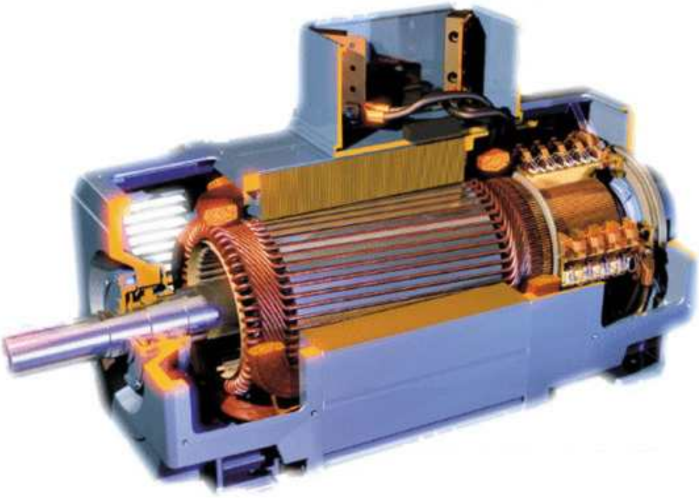
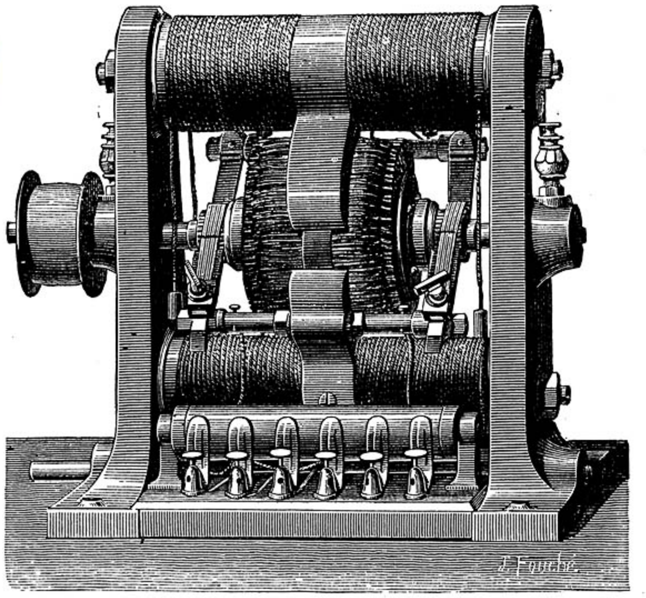
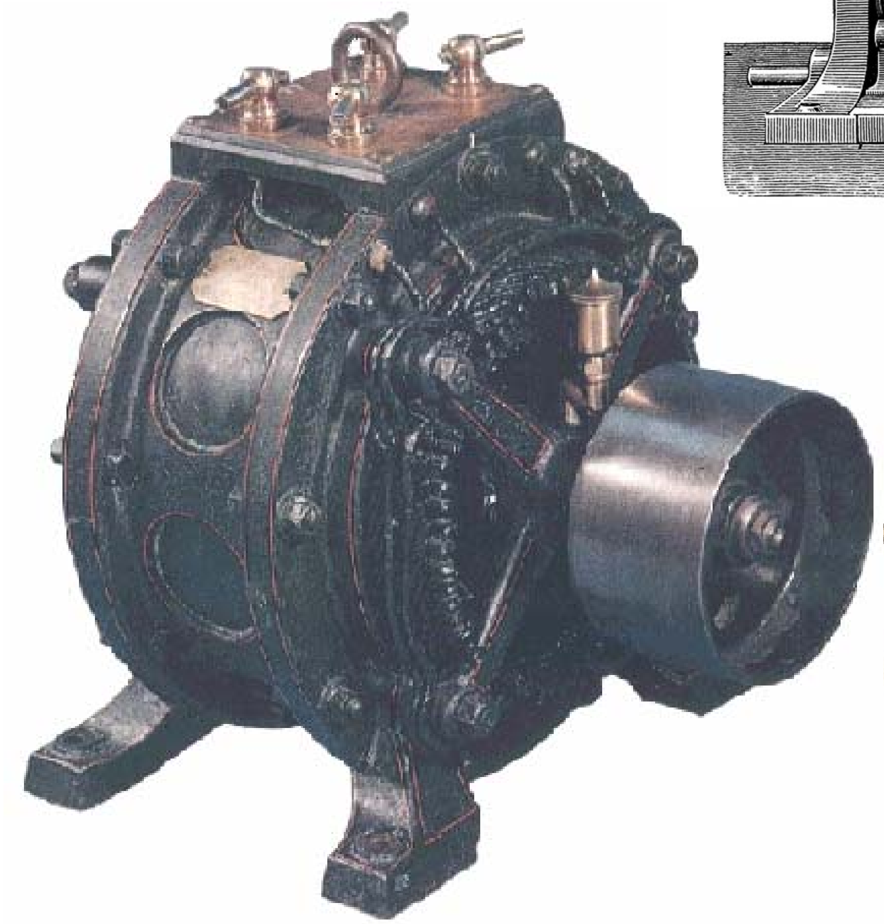
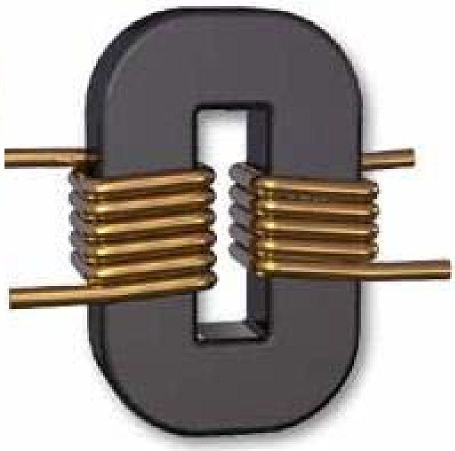
exercices d'électrotechnique









Claude Chevassu

Transformateurs :

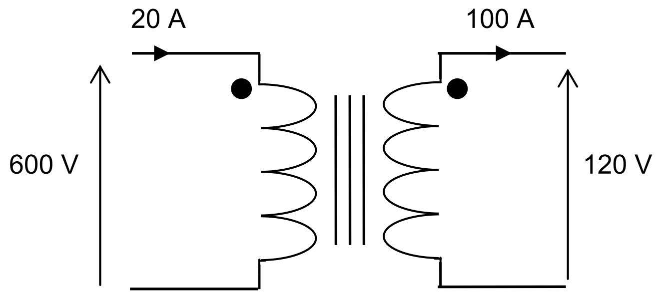
Transformateur parfait :

1) On désire alimenter sous une tension de 220 V un récepteur monophasé absorbant 50 A avec un facteur de puissance de 0,6 arrière (inductif). Ce récepteur est situé à l'extrémité d'une ligne bifilaire de 40 km de longueur dont chaque conducteur en cuivre de résistivité 1,6.10^{-8} $\Omega.\mathrm{m}$, possède une section de $1\ \mathrm{cm}^2$**.** On utilise deux transformateurs parfaits identiques T1 et T2; T1 est utilisé en élévateur de tension et T2 en abaisseur. Le rapport des nombres de spires est de 25.
Sous quel tension faut-il alimenter le transformateur T1?
Quelle serait cette tension si on n'utilisait pas de transformateurs ?

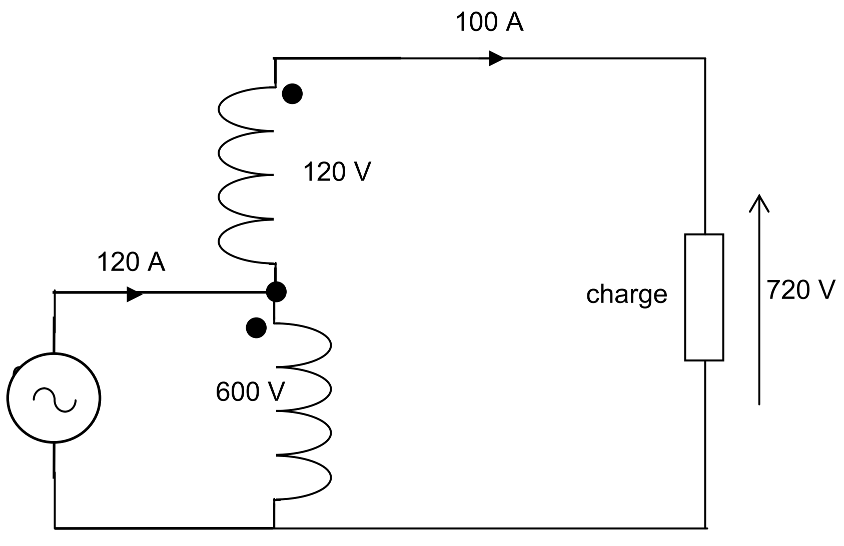
Solution : U_{11}=220,6 V (tenir compte du déphasage du courant et donc du déphasage de U = RI lors de l'addition des tensions primaire du transfo abaisseur et d.d.p. aux bornes de la résistance de la ligne).
Sans transfos, U = 736 V !!!

2) Autotransformateur :
Soit un transformateur monophasé (à deux enroulements) 60 Hz, 12 kVA, 600V/120 V que l'on peut considérer comme parfait. On utilise les deux enroulements de ce transformateur pour câbler un transformateur de rapport 600V / 720V.
Donner le schéma de câblage et la capacité (en kVA) de l'autotransformateur.

Solution : Dans les conditions nominales de fonctionnement, le transformateur monophasé à 2 enroulements fonctionne de la manière suivante :



Le schéma de câblage de l'autotransformateur de rapport 600V / 720V est le suivant :



La puissance apparente de l'autotransformateur est dès lors égale à :
720 Vx 100 A = 72000 VA (si l'on observe les choses du côté récepteur) ou 600 V x 120 A = 72000 VA (si l'on observe les choses du côté alimentation), évidemment les deux valeurs sont identiques

3) On veut réaliser un transformateur monophasé 5000/200 volts, 50 Hz et on désire que la section du circuit magnétique soit de 1 dm^2.
D'autre part, l'induction maximale dans le circuit magnétique ne doit pas dépasser 1,5 tesla.
• Quels doivent être les nombres de spires au primaire et au secondaire?
• Que deviendrait ce résultat si la fréquence d'utilisation était de 60 Hz au lieu de 50?

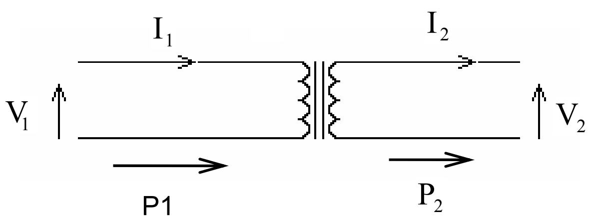
Solution : N_1=1500 spires, N_2=60 spires en 50 Hz; en 60 Hz, N_1=1250 spires.

Transformateur réel :

4) Un transformateur monophasé a été soumis a un essai à vide :

$\mathrm{I}_2 = 0\ \mathrm{A},\ \mathrm{V}_1 = 220\ \mathrm{V},\ \mathrm{V}_2 = 110\ \mathrm{V},\ \mathrm{I}_1 = 0{,}3\ \mathrm{A},\ \mathrm{P}_1 = 10\ \mathrm{W}$, f = 50 Hz

L'enroulement primaire présente une résistance $\mathrm{R}_1 = 8\ \Omega$ et le secondaire, une résistance $\mathrm{R}_2 = 2\ \Omega$. On néglige les fuites magnétiques.
a) Déterminer le facteur de puissance à vide, le courant magnétisant I_{10} , le courant I_F , la résistance R_F et l'inductance L_1**.**
b) Le courant appelé par le secondaire étant I_2=2 A, en phase avec la tension V_2**,** calculer:
• la tension V_2 obtenue, le primaire restant alimenté sous 220V.
• le rendement du transformateur.



5) On considère un transformateur monophasé dont le rapport de transformation est $\mathrm{n}_1 / \mathrm{n}_2$=23.
L'impédance totale du transformateur ramenée au secondaire a un module de $1{,}33\ \Omega$ et un argument de 70°30'. Pour le fonctionnement considéré, les pertes fer doivent être de l'ordre de 70 watts.
Supposons que le secondaire débite 3 kVA sous une tension de 200 V avec un facteur de puissance égal à 0,8 (récepteur inductif).
• Calculer la tension au primaire.
• Déterminer le rendement du transformateur.

6) Lors de l'essai en court-circuit d'un transformateur, on a relevé les valeurs suivantes :

$$I_1 = 0,65 \text{ A, } \mathrm{I}_2 = 15 \text{ A, } \mathrm{P}_1 = 100 \text{ W, } \mathrm{V}_1 = 460 \text{ V}$$

Quelles sont les valeurs de $\mathrm{n}_1 / \mathrm{n}_2$ et de $\underline{Z_S}$? On sait que $R_2 = 0,225\ \Omega$; quelle est la valeur de R_1 ?

Solution :
Ici, il faut penser à utiliser le rapport des intensités afin de déterminer le rapport de transformation : $\dfrac{N_2}{N_1} = \dfrac{I_{1CC}}{I_{2CC}} = \dfrac{0,65}{15} \simeq 43,3 \cdot 10^{-3}$.

Au secondaire, la loi d'Ohm généralisée donne : $\dfrac{N_2}{N_1} \cdot \underline{V_1} = \underline{Z_S} \times \underline{I_{2CC}}$

On en tire : $Z_S = \dfrac{\frac{N_2}{N_1} \cdot V_1}{I_{2CC}} = \dfrac{43,3 \cdot 10^{-3} \times 460}{15} = 1,32\ \Omega$

L'argument de Z_S s'obtient avec la formule :

$$P = VI \cos\varphi \Rightarrow \cos\varphi = \frac{100}{43,3 \cdot 10^{-3} \times 460 \times 15} = 0,334 \Rightarrow \varphi = 70,5°$$

Donc : $\underline{Z_S} = 1,32\angle 70,5°$ (c'est bien **+** 70,5°, l'impédance étant inductive).

$$R_S = Z_S \times \cos\varphi = 1,32 \times 0,334 = 0,444\ \Omega$$

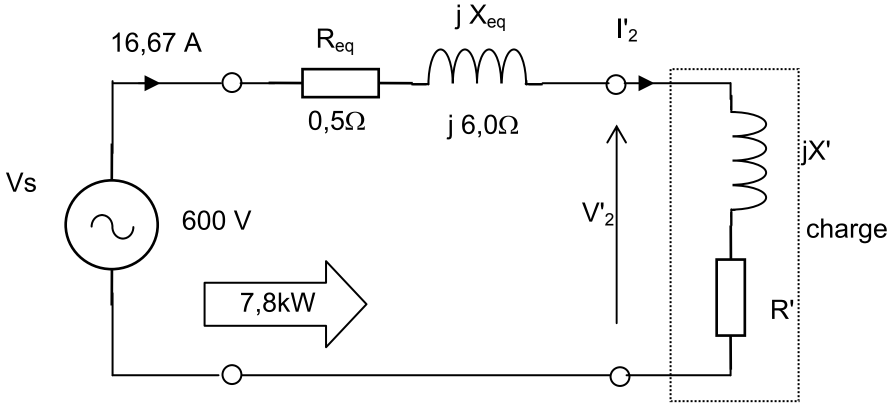
$$R_S = R_2 + R_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \Rightarrow R_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \times \left(R_S - R_2\right) = \left(\frac{1}{43,3 \cdot 10^{-3}}\right)^2 \times \left(0,444 - 0,225\right) \simeq 113\ \Omega$$

Cela peut paraître élevé, mais les pertes Joule au primaire sont modérées. En effet, en considérant un transformateur 5000/220 V de 3 kVA, comme au n° 5, l'intensité nominale primaire est de :

$$I_{1n} = \frac{3000}{5000} = 0,6 \text{ A} \Rightarrow \mathrm{R}_1 \times I_{1n}^2 \simeq 41 \text{ W}$$

7) Soit un transformateur monophasé de caractéristiques :
10 kVA, 60 Hz, 600 V / 120 V dont l'impédance équivalente ramenée au primaire est égale à (R_{eq}+j X_{eq}) = (0,5+j 6,0)Ω. Une charge inductive est connectée au secondaire. On mesure alors au primaire : tension primaire V_1 = 600 V, courant primaire I_1=16,67 A, puissance active absorbée par le primaire P_1=7,8 kW.
Déterminer la tension V_2 au secondaire et le facteur de puissance de la charge.

Solution : Le circuit équivalent ramené au niveau du primaire est :



La puissance apparente absorbée par le primaire est égal à :
$S_1 = V_1 x I_1 = 600 \text{ x } 16{,}67 = 10002$ VA

La puissance active absorbée par le primaire du transfo est égale à : $P_1 = (R_{eq} + R')I_1^2$

On en déduit : $R' = \frac{P_1}{I_1^2} - R_{eq} = \frac{7800}{(16{,}67)^2} - 0{,}5 = 27{,}57\ \Omega$

La puissance réactive au primaire est égale à :

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = \sqrt{(10002)^2 - (7800)^2} = 6261\,\text{VA}$$

On a $Q_1 = (X_{eq} + X')I_1^2$, on en déduit :

$$X' = \frac{Q_1}{I_1^2} - X_{eq} = \frac{6261}{(16{,}67)^2} - 6 = 16{,}53\,\Omega$$

Le facteur de puissance au primaire est : $\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{7800}{10002} = 0{,}78 \Rightarrow \varphi_1 = 38°{,}7$

La tension V'_2 est égale à :

$$V'_2 = V_1 - (R_{eq} + j\,X_{eq})I_{eq} = 600 - (0{,}5 + j6)\cdot(16{,}67\angle -38°{,}7) = 535{,}9\angle -7{,}°8\ \text{V}$$

La tension aux bornes du secondaire du transfo est :

$$V_2 = \frac{V'_2}{(600/120)} = \frac{535{,}9\angle -7°{,}8}{5} = 108\angle -7°{,}8\ \text{V}$$

La valeur efficace de la tension secondaire est donc 108 V.

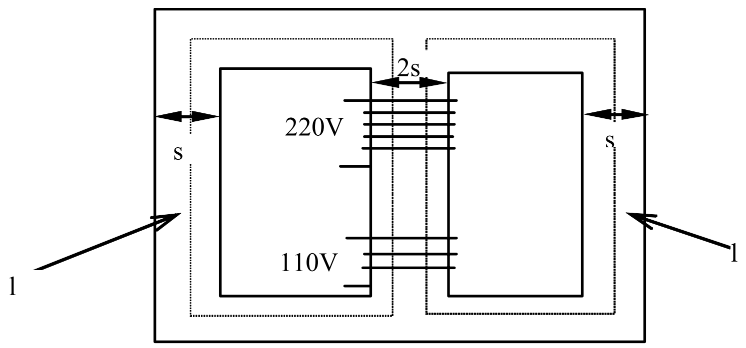
Le facteur de puissance de la charge est : $\cos\varphi_2 = \cos\left[a\tan\left(\frac{X'}{R'}\right)\right] = \cos(30°{,}94) = 0{,}858$

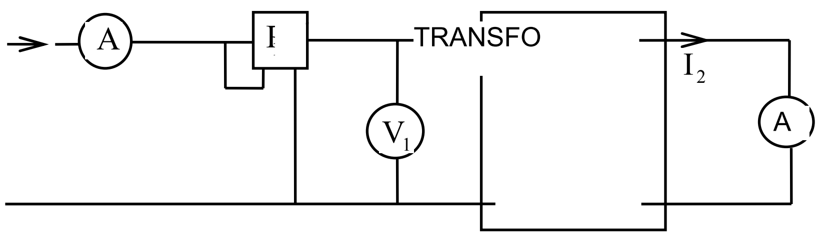
8) On étudie un transformateur monophasé 220/110 V de puissance apparente 1100 VA. Ce transformateur est alimenté au primaire en 220 V, 50 Hz.
8.1. Pour réaliser ce transformateur, on utilise le circuit magnétique représenté ci-dessous. On admet que la section du tube d'induction est : s=17,5 cm^2 et que la longueur de la ligne d'induction moyenne est : l=36 cm.

Les tôles magnétiques utilisées, non saturées, ont les caractéristiques suivantes: perméabilité relative : $\mu_r = 3000$ $\mu_0 = \frac{1}{8.10^5}$, masse volumique : $7 kg/dm^3$, pertes fer à 50Hz : 2,5 W par kilogramme pour une induction **maximale** de 1 tesla.

a) Déterminer le nombre n_1 de spires du primaire pour que, dans le fer, l'induction **maximale** atteinte soit de un tesla.
b) Calculer la valeur efficace du courant magnétisant I_{10} absorbé au primaire.
c) Calculer les pertes fer et en déduire la valeur de la composante I_{1F} du courant à vide, en phase avec la tension d'alimentation.
d) Déterminer le courant I_{1V}, absorbé à vide par le primaire, ainsi que le facteur de puissance à vide.
8.2. Le transformateur ayant été réalisé, on a procédé aux essais expérimentaux qui ont donné les valeurs suivantes:
- essai à vide: V_1=220 V , $V_2 = 110$ V , $P_V = 25$ W,
- essai en court-circuit: $I_2 = 10$ A , $V_1 = 6{,}22$ V , $R_1 = 0{,}40\ \Omega$, $R_2 = 0{,}12\ \Omega$

a) Déterminer la réactance de fuite ramenée au secondaire $l_s\omega$.
b) Déterminer la tension V_2 obtenue lorsque V_1=220 V et que le transformateur fournit au secondaire I_2=10 A, $\cos \varphi_2$=0,8 arrière ; $\Delta V \approx R_s I \cos\varphi + l_s\omega I \sin\varphi$





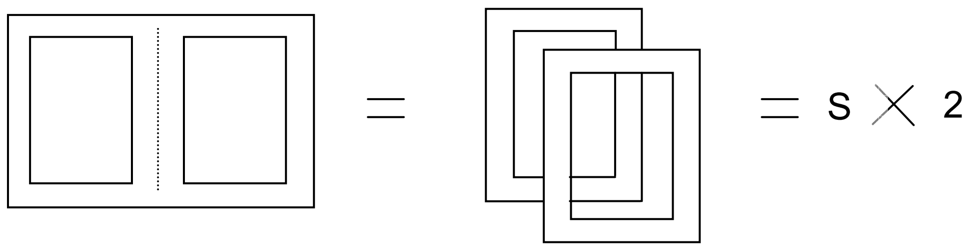
8.1.a

$$e = \frac{\partial \phi}{\partial t} \Rightarrow \underline{V} = j n_1 \omega \underline{\phi} \Rightarrow \hat{V} = n_1 2\pi f \hat{B} S \Rightarrow n_1 = \frac{\hat{V}}{2\pi f \hat{B} S} = \frac{220.\sqrt{2}}{2.\pi.50.1.0{,}0035} = 283 \text{ spires}$$

8.1.b les équations du transformateurs donnent (poly page 39 en haut) :

$$\begin{cases} n_1\,\underline{I_1} - n_2\,\underline{I_2} = R\,\underline{\phi} \\ \underline{\phi} = \dfrac{\underline{V_1}}{j\omega n_1} \end{cases} \Rightarrow I_{10} = \frac{R\,V_1}{n_1^2\,\omega}$$

Nous connaissons V_1 , nous venons de déterminer n_1 ,il nous faut déterminer la réluctance R. Le circuit magnétique est constitué par deux circuits identiques **en parallèle.**



Or $R = \dfrac{1}{\mu_0.\mu_r}.\dfrac{l}{s} \Rightarrow R = \dfrac{8.10^5.0,36}{3000\times 0,0035} = 27468\,\text{unités S.I. ou}\,\dfrac{A}{Wb}$

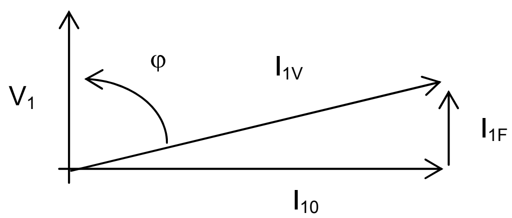
$$I_{10} = \frac{27468.220}{283^2.314} \approx 240\,mA$$

8.1.c volume du circuit magnétique : V = 2× $s \times l$

pertes fer $P_f = \rho.V.2,5 = 22,05\,W$, or on a $P_f = V_1.I_{1F}.\cos\varphi_{1F} \Rightarrow I_{1F} = \dfrac{P_f}{V_1} \approx 0,1\,A$,

car cos φ_{1v} = 1 (I_{1F} est en phase avec V_1).

8.1.d



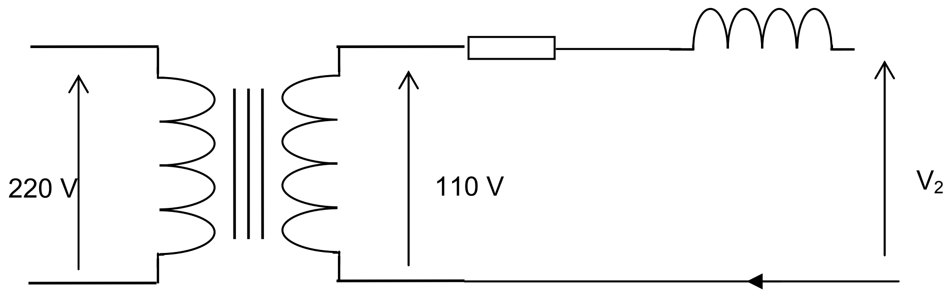
$$I_V = \sqrt{I_0^2 + I_F^2} = 0,26\,mA$$

$$\cos\varphi_V = \frac{I_F}{I_V} = \frac{0,1}{0,26} = 0,38$$

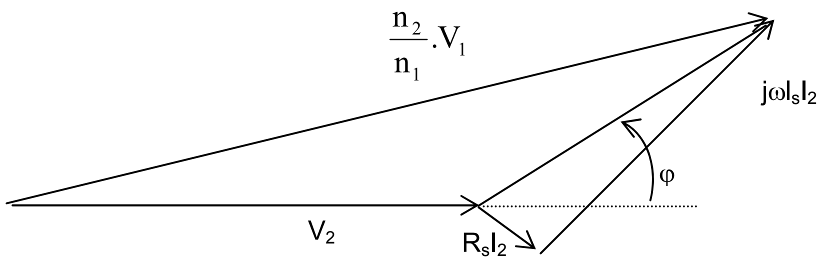
8.2.a L'essai en court-circuit permet de déterminer l'inductance de fuite (poly page 46 en haut) :

$$\omega l_s = \frac{\sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1} V_{1cc}\right)^2 - (R_s I_{2cc})^2}}{I_{2cc}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{110}{220}.6{,}22\right)^2 - \left(\left(0{,}12 + \left(\frac{110}{220}\right)^2 .0{,}40\right).10\right)^2}}{10} \approx 0{,}22\ \Omega$$

8.2.b



D'où le diagramme de Kapp :



$$V_2 = \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}.V_1\right)^2 - \left(\sqrt{\left(R^2{}_s I_2^2 + \omega^2 l_s^2 I_2^2\right)}\sin\varphi\right)^2} - \sqrt{\left(R^2{}_s I_2^2 + \omega^2 l_s^2 I_2^2\right)}\cos\varphi = 108{,}2\,\mathrm{V},$$

il s'agit du calcul exact.

Sinon par la formule approchée :

$$V_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}.V_1\right) - \left(R_s\, I_2 \cos\varphi + \omega l_s\, I_2 \sin\varphi\right) \approx 107\,\mathrm{V}$$

9) Une série de mesures sur un transformateur monophasé a permis d'établir les caractéristiques suivantes :

• Tensions à vide: U_{1n} (tension primaire nominale) = 21 kV, U_{20} (tension secondaire nominale) = 380 V.
•Impédances: primaire: $R_1 = 61\Omega$, $l_1\omega = 141\Omega$
secondaire: $R_2 = 2.10^{-2}\,\Omega$, $l_2\omega = 4.10^{-2}\,\Omega$.

D'autre part, la puissance nominale, indiquée sur la plaque signalétique est :
$S_n = U_{20}.I_{2n}$=76 kVA.

Sauf indications contraire, dans tout le problème le transformateur sera alimenté par un réseau de tension 21 kV/50 Hz.

a) Donner le schéma équivalent ramené au secondaire en précisant les valeurs:
• du rapport de transformation k=$\dfrac{n_2}{n_1}$,
• de la résistance totale du secondaire R_s,
• de l'inductance de fuite totale au secondaire l_s.

b) Le secondaire du transformateur débite sur une charge absorbant un courant $I_2 = I_{2n}$, de facteur de puissance cos φ=0,8 (selfique).

Calculer, en utilisant une relation algébrique simplifiée, la chute de tension ΔU_2.
En déduire la tension au secondaire du transformateur.

c) Le primaire étant toujours alimenté sous une tension de 21000 V, les bornes de sortie du secondaire sont mises en court-circuit franc, calculer le courant de court-circuit I_s.

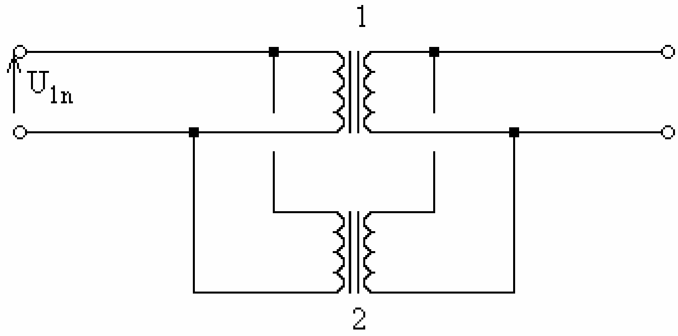
d) A quelle valeur U_{1CC} faut-il réduire la tension primaire pour limiter en court-circuit, le courant circulant au secondaire à la valeur $I_{CC} = I_{2n}$. On exprimera ensuite la valeur de $\varepsilon = \dfrac{U_{1CC}}{U_{1n}}$ en %.
Calculer enfin la puissance absorbée P_{CC} dans l'essai en court-circuit sous tension réduite U_{1CC}.

e) Un essai supplémentaire, à vide, a donné la puissance absorbée au primaire:
P_0= 400 W pour cos φ_0= 0,1
En effectuant un bilan des puissances mises en jeu, calculer le rendement du transformateur lorsqu'il débite $I_2 = I_{2n}$ avec cos φ_2 = 0,8.

f) Dans les mêmes conditions d'exploitation (I_{2n} ,$\cos\varphi_2$=0,8) on demande de calculer :
• la puissance P_1 absorbée au primaire,
• la puissance réactive Q_1 absorbée au primaire,
• le facteur de puissance du primaire, cos φ_1,
• le courant I_1 circulant au primaire.

g) Calculer le courant débité I'_2 donnant lieu au rendement maximum. Calculer ce rendement pour cosφ_2 =1.

h) On considère à présent un deuxième transformateur, rigoureusement identique au premier. Son rapport de transformation vaut néanmoins: k'= 1,01.k
Les primaires sont connectés en parallèle sur le réseau 21 kV. Les secondaires sont connectés en parallèle.



L'ensemble étant à vide (pas de débit sur charge extérieure) calculer le courant de circulation I_V dans les secondaires.

i) On débranche le primaire de (2) du réseau; les secondaires de (1) et (2) restent cependant connectés en parallèle.
En faisant les approximations nécessaires, calculer:
- le courant au secondaire de (1),
- le courant au primaire de (1).

9.a $m = \frac{n_2}{n_1} = \frac{380}{210000} = 0,01809$

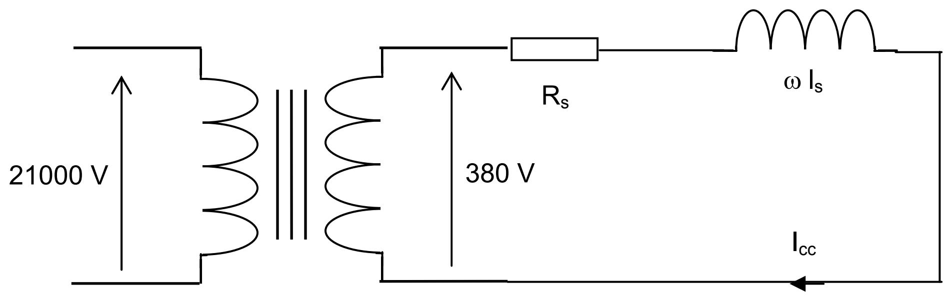
$$R_s = R_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 .R_1 = 0,040\,\Omega$$

$$\omega l_s = \omega l_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 .\omega l_1 \Rightarrow \omega l_s = 0,086\,\Omega$$

9.b $\Delta U \approx \left(R_s\, I_2 \cos\varphi + \omega l_s\, I_2 \sin\varphi\right) = 16,7\,V$,

avec $I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} = 200\,A \Rightarrow V_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}.V_1\right) - \Delta U = 380 - 16,7 = 363,3\,V$

9.c



$$I_{cc} = \frac{\left(\frac{n_2}{n_1}.V_1\right)}{\sqrt{R_s^2 + (\omega l_s)^2}} \approx 4006\,A$$

9.d I_{2n}=200 A$\Rightarrow \left(\frac{n_2}{n_1}.V_1\right) = I_{2n}.\sqrt{R_s^2 + (\omega l_s)^2}.\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \Rightarrow U_{1cc} = 1048\,V$

$$P_{cc} = R_s.I^2{}_{2cc} = 0.04 \times 200^2 = 1600\text{ W}$$

9.e $\eta = \dfrac{V_2\, I_2 \cos\varphi}{V_2\, I_2 \cos\varphi + \text{Pertes fer} + \text{Pertes cuivre}} = 0{,}966$

9.f La puissance absorbée au primaire est égale au dénominateur de l'expression du rendement ci-dessus, elle vaut donc 60,128 kW.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \Rightarrow Q = \sqrt{S^2 - P^2} \Rightarrow Q = 46{,}482\,\text{kVAR}$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{P}{S} = \frac{60{,}128.10^3}{76.10^3} = 0{,}791$$

$$I_1 = \frac{P_1}{V_1.\cos\varphi_1} = \frac{60128}{21000 \times 0{,}791} = 3{,}61\,\text{A}$$

9.g Le courant donnant lieu au rendement maximum est celui qui produit des pertes cuivre (pertes par effet Joule) égales aux pertes fer.

En effet, $\eta = \dfrac{U_2\, I_2 \cos\varphi}{U_2\, I_2 \cos\varphi + P_{fer} + R_s\, I_2^2}$, divisons numérateur et dénominateur par I_2 :

$$\eta = \frac{U_2 \cos\varphi}{U_2\, \cos\varphi + \dfrac{P_{fer}}{I_2} + R_s\, I_2}$$

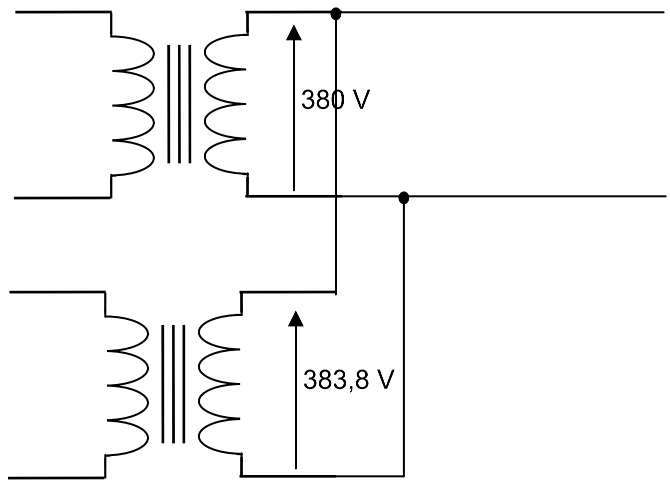
η est maximal lorsque l'expression $\dfrac{P_{fer}}{I_2} + R_s\, I_2$ est minimale, c'est à dire lorsque la dérivée de cette expression par rapport à I_2 est nulle.

Or $\dfrac{\partial\left(\dfrac{P_{fer}}{I_2} + R_s\, I_2\right)}{\partial I_2} = -\dfrac{P_{fer}}{I_2^2} + R_s = 0 \Rightarrow P_{fer} = R_s.I_2^2$

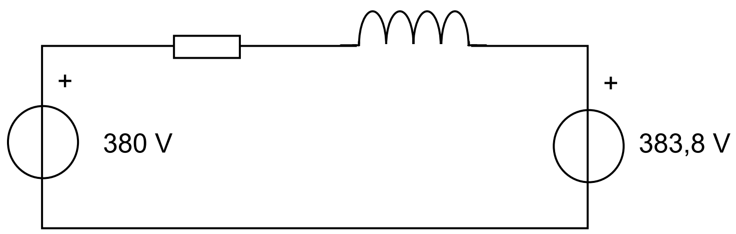
Il faut donc que $I_2 = \sqrt{\dfrac{400}{0.04}} = 100\,\text{A}$

Alors $\eta = \dfrac{100 \times (380 - 0.04 \times 100)}{100 \times 376 + 2 \times \left(0{,}04 \times 100^2\right)} = 0{,}979$

9.h



Équivalent à



$$I_V = \frac{383{,}8 - 380}{\sqrt{0{,}04^2 + 0{,}086^2}} = 40\,A$$

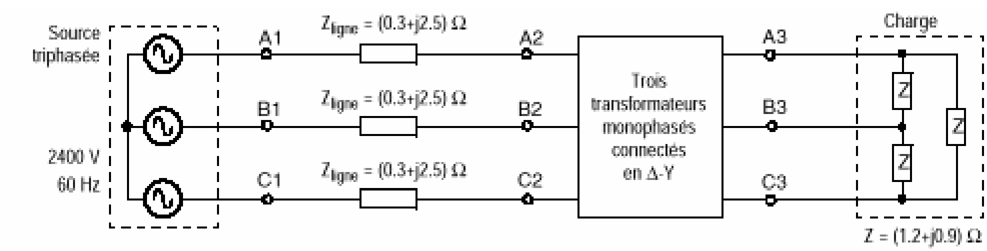
Transformateurs triphasés :

10) Un transformateur Dy, avec neutre au secondaire, possède un rapport de nombres de spires $m_v = 0{,}044$. La tension primaire est de 5000 V.
a) Quelles sont les tensions disponibles au secondaire?
b) Quand le débit secondaire est de 100 A, quelle est l'intensité du courant primaire:
• Dans un fil de ligne?
• Dans un enroulement?

11) Un transformateur triphasé a été soumis à deux essais au cours desquels la puissance a été mesurée par la méthode des deux wattmètres:
• A vide: P_A = 500 W, P_B= -200 W.
• En court-circuit pour I_2 nominal: P_A =250 W, P_B =100 W.
Calculer:
a) Les pertes fer et le facteur de puissance à vide.
b) Les pertes cuivre et le facteur de puissance en court-circuit.

12) Un transformateur triphasé dont le primaire est en étoile, est alimenté sous une tension de 20000 V. Les nombres de spires par noyau sont N_1 = 4000 au primaire et N_2 = 76 au secondaire.
a) Calculer les tensions disponibles au secondaire (entre phases et éventuellement entre neutre et phase) pour les couplages suivants:
• étoile avec neutre;
• triangle;
• zig-zag avec neutre.
b) La puissance apparente du transformateur étant S= 140 kVA, calculer au secondaire pour chacun des trois couplages :
• l'intensité du courant dans la ligne;
• l'intensité du courant dans un enroulement.

13) Trois transformateurs monophasés identiques 60 Hz, 50 kVA, 2400V/120V sont connectés en D-Y pour former un transformateur triphasé.
Les paramètres (ramenés au primaire) d'un transformateur monophasé sont :
R eq = 3.0 Ω, X eq = 4.8 Ω, L_1 = 50000 Ω (inductance absorbant l'intensité nécessaire à la circulation du flux), R_F = 18000 Ω (résistance siege des pertes fer).
a) Le primaire du transformateur triphasé est relié à une source triphasée de 2400 V (ligne-ligne) par une ligne de transport dont l'impédance par phase est (0.3 +j2.5) W. Le secondaire alimente une charge équilibrée composée de trois impédances identiques connectées en D.

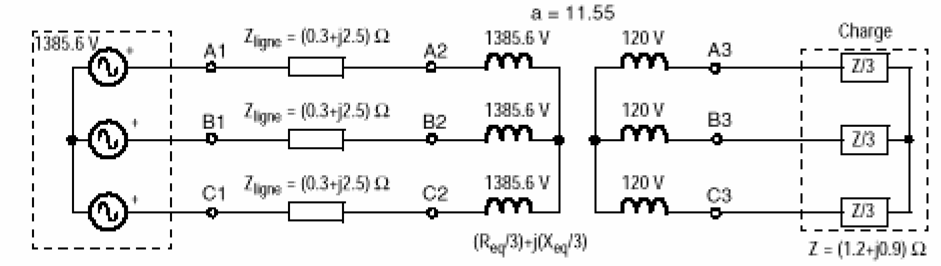


Calculer:
- le courant de ligne au primaire (valeur efficace)
- la tension composée au secondaire (valeur efficace)

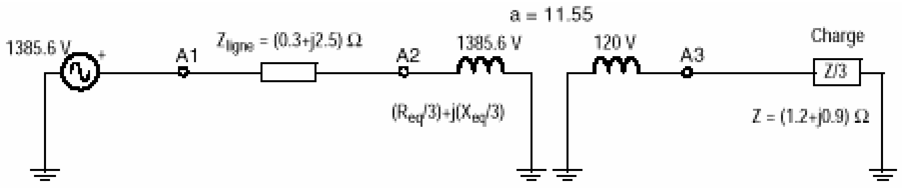
b) Calculer le rendement du transformateur triphasé dans ces conditions de fonctionnement.

Solution :

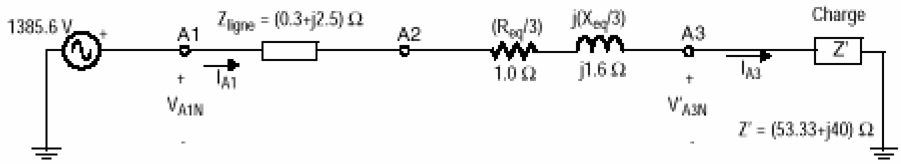
a) Le circuit équivalent Y-Y du système:



Circuit monophasé équivalent :



Circuit monophasé équivalent réfléchi au primaire :



Courant de ligne au primaire :

$$I_{A1} = \frac{V_{A1N}}{Z_{ligne} + \left(\frac{R_{eq}}{3} + \frac{jX_{eq}}{3}\right) + Z'} = \frac{1385{,}6\angle 0°}{(0{,}3 + j2{,}5) + (1 + j1{,}6) + (53{,}33 + j40)} = 19{,}736\angle -38{,}9° \text{ A}$$

La valeur efficace du courant de ligne au primaire est donc 19,736 A.

La tension simple ligne-neutre secondaire réfléchie au primaire :

$$V_{A3N} = Z' \times I_{A1} = (53{,}33 + j40) \cdot (19{,}736\angle -38{,}9°) = 1315{,}6\angle -2° \text{ V}$$

La valeur efficace de la tension composée ligne-ligne au secondaire est :

$$|V_{A3B3}| = \sqrt{3} \times \frac{|V'_{A3N}|}{11{,}55} = 197{,}3\text{V}$$

b) Le rendement du transformateur dans ces conditions de fonctionnement est :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{CU} + P_{FE}} = \frac{53{,}33 \times 19{,}736^2}{53{,}33 \times 19{,}736^2 + 1 \times 19{,}736^2 + \dfrac{1385{,}6^2}{18000/3}} = 0{,}967$$

Etude d'un transformateur triphasé (d'après le CAPES de sciences physiques (concours interne), section : physique et électricité appliquée, session de 1996, composition d'électricité appliquée, première partie)

On applique au primaire du transformateur représenté sur la Figure 1 un système triphasé équilibré de tensions sinusoïdales u_{AB} , u_{BC} et u_{CA} de valeur efficace U_1 .
Les valeurs efficaces des intensités des courants en ligne au primaire et au secondaire sont notées respectivement I_1 et I_2 .

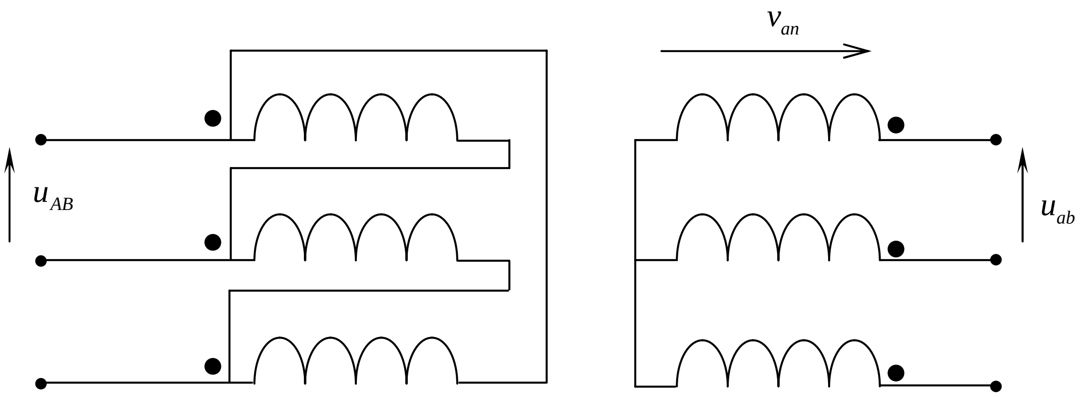


Figure 1

Les caractéristiques nominales du transformateur, constitué de trois noyaux ayant chacun une section s = 5,0 dm2, sont les suivantes :
$S_N = 250$ kVA ; $U_{1N} = 5{,}20$ kV ; $f = 50$ Hz.
On néglige ses pertes de puissance dans le fer.

Deux essais ont été réalisés :

essai à vide sous tension primaire nominale U_{1N} : la tension secondaire entre phases est alors $U_{20} = 400$ V ;
essai en court-circuit sous la tension primaire $U_1 = 600$ V ; le courant secondaire en ligne a pour intensité $I_{2cc} = 350$ A et la puissance absorbée au primaire est $P_{1cc} = 7{,}35$ kW .

1.1. Calculer le rapport de transformation m du transformateur ainsi que le rapport de transformation par colonne $m_c = n_2/n_1$.

1.2. Le champ magnétique maximal dans le circuit magnétique est $B_{max} = 1{,}2$ T : calculer le nombre de spires n_1 de chaque enroulement primaire. En déduire le nombre de spires n_2 de chaque enroulement secondaire.

1.3. En supposant linéaire le fonctionnement du transformateur, en donner le schéma équivalent par phase vu du secondaire (modèle de Thévenin).

1.4. Calculer la résistance par phase ramenée au secondaire, R_s, et la réactance de fuites par phase ramenée au secondaire, X_s.

1.5. Que signifient les points mis aux extrémités de chaque bobine ?

Pour le fonctionnement à vide du transformateur alimenté sous la tension nominale U_{1N}, représenter sur le même diagramme vectoriel triphasé direct de tensions (u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}), et le système de tensions simples (v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}) de valeur efficace V_2 (sans respecter l'échelle en ce qui concerne le rapport entre U_1 et V_2).

1.6. Transformateur en charge alimenté sous tension primaire nominale.

Une charge triphasée équilibrée représentée sur la Figure 2 est connectée au secondaire.

$\mathrm{R} = 554\ \mathrm{m\Omega}\ ;\ \mathrm{L} = 3{,}05\ \mathrm{mH}$.

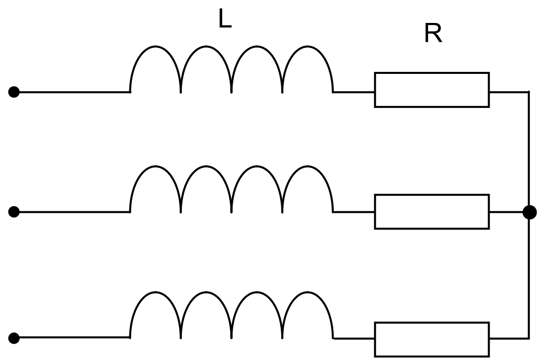


Figure 2

1.6.1. Calculer le facteur de puissance de cette charge.

1.6.2. Tracer le diagramme vectoriel des tensions correspondant au schéma équivalent par phase. En déduire l'intensité I2 du courant en ligne ainsi que la tension U2. Si l'on utilise des approximations, on les justifiera brièvement.

1.6.3. Calculer la puissance fournie à la charge ; en déduire son rendement.

1.6.4. La charge réellement utilisée est constituée d'une charge résistive équilibrée associée à une charge inductive équilibrée montée en parallèle selon la Figure 3. On admet que L' est une inductance pure. Calculer R' et L' pour que cette charge soit équivalente à la précédente.

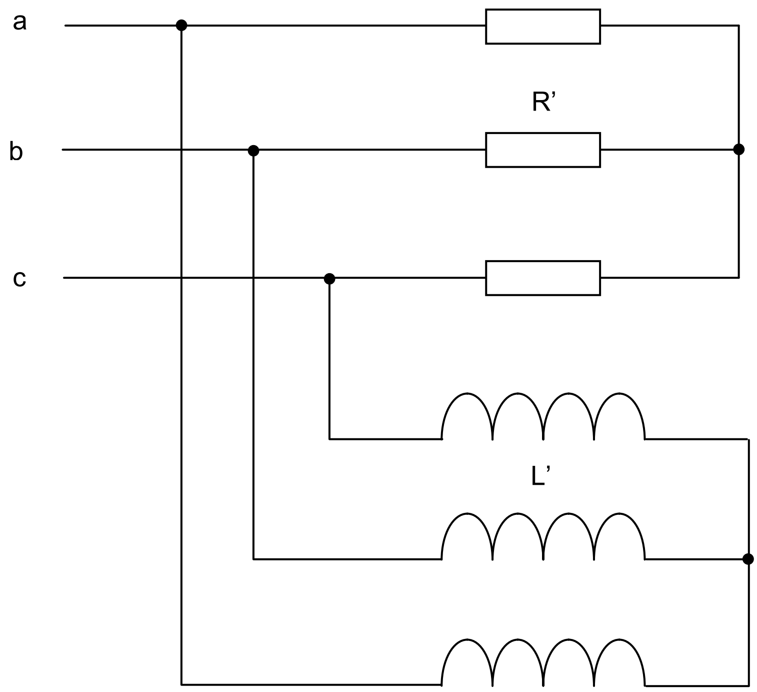


Figure 3

Corrigé

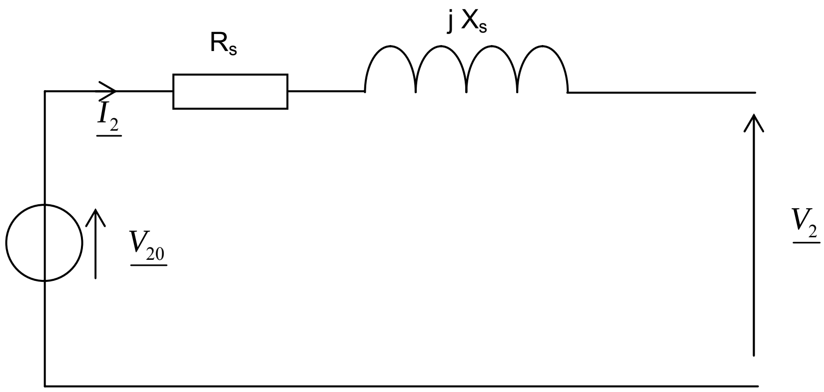
1.1. $m = 7,7 \cdot 10^{-2}$

$$m_c = \frac{m}{\sqrt{3}} = 4,4 \cdot 10^{-2}$$

1.2. $E_1 = U_{1N} = 4,44 \cdot n_1 \cdot f \cdot B_{\max} \cdot S \Rightarrow n_1 = 391 \text{ spires}$

$$m_c = \frac{m}{\sqrt{3}} = 4,4 \cdot 10^{-2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_2 = 18 \text{ spires}$$

1.3.

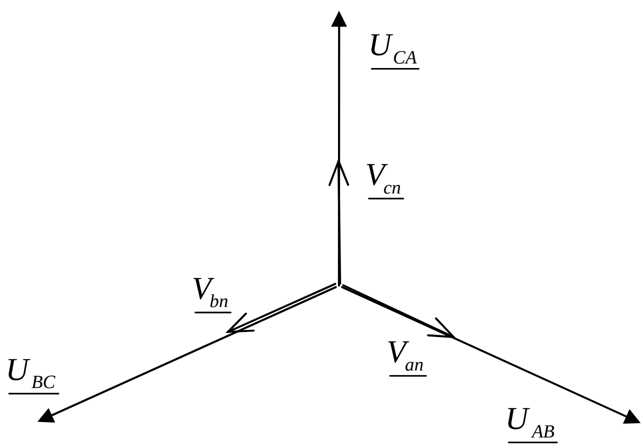


$\underline{V}_2 = \underline{V}_{20} - R_s \cdot \underline{I}_2 - j \cdot X_s \cdot \underline{I}_2$

1.4. $R_s = \dfrac{P_{1cc}}{3 \cdot I_{2cc}^2}$, $X_s = \sqrt{\left(\dfrac{m_c \cdot U_1}{I_{2cc}}\right)^2 - R_s^2}$

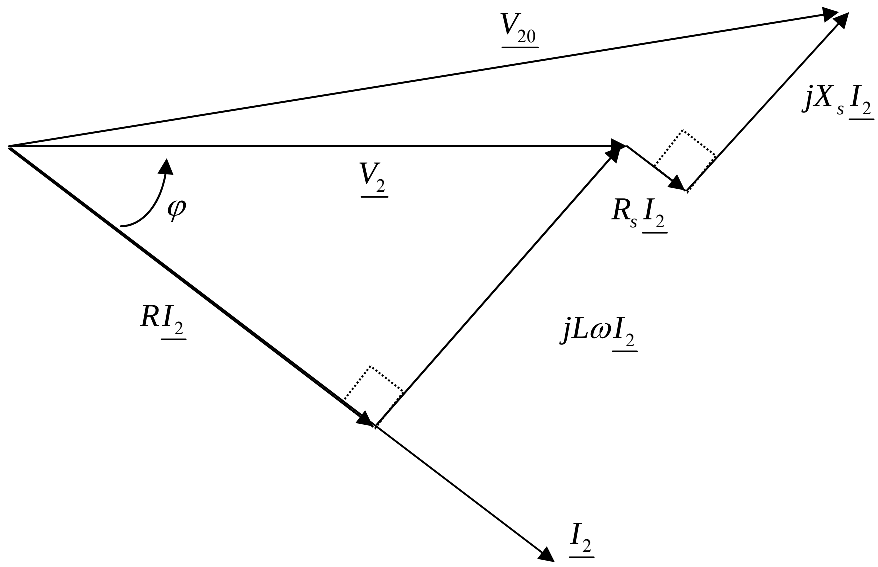
$R_s = 9{,}0\ \mathrm{m}\Omega$; $X_s = 73{,}5\ \mathrm{m}\Omega$.

1.5. Des courants pénétrants dans les bobines marquées d'un point ont des effets magnétisants additifs, il en résulte que dans un fonctionnement à vide : u_{AB} et v_{an} sont en phase, u_{BC} et v_{bn} sont en phase et u_{CA} et v_{cn} le sont également.



1.6.1. Le facteur de puissance est : $\cos\varphi = 0,50$

1.6.2.



Approximation de Kapp ($\underline{V_{20}}$ est pratiquement en phase avec $\underline{V_2}$, l'égalité suivante est donc à peu près justifiée) :

$$V_{20} = V_2 + R_s \cdot I_2 \cdot \cos\varphi + X_s \cdot I_s \cdot \sin\varphi$$

$U_2 = \sqrt{3} \cdot V_2 = 375 \text{ V}$ et $I_2 = 196 \text{ A}$

1.6.3. $P_u = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi = 63,5 \text{ kW}$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + 3 \cdot R_s \cdot I_2^2} = 96,5 \text{ \%}$$

1.6.4. $R' = 3\dfrac{V_2^2}{P_u} = 2,21\ \Omega$

$$Q = 3L\omega I_2^2 = 3\frac{V_2^2}{L'\omega} \Rightarrow L' = 4,06 \text{ mH}$$

Choix et caractérisation d'un transformateur triphasé MT/BT utilisé pour alimenter une usine.

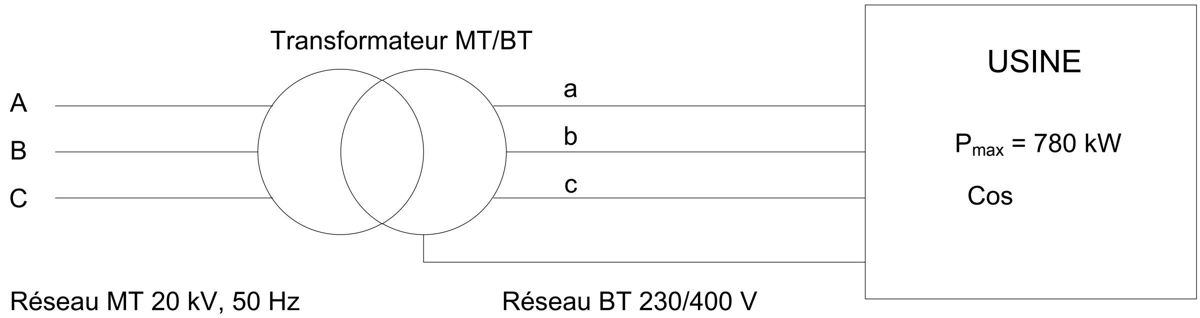


Figure 1

L'ensemble des récepteurs électriques de l'usine consomme théoriquement, à plein régime, une puissance de 780 kW avec un facteur de puissance toujours supérieur à 0,8. On supposera dans tout le problème que la charge est équilibrée.
L'objet de ce problème est de faire le choix du transformateur parmi la liste donnée en annexe (transfo Trihal de Merlin Gerin Figure 4) et d'en caractériser les défauts pour faire éventuellement évoluer l'alimentation du site ultérieurement.

Choix du transformateur et aspects pratiques

1.1. A partir de la valeur de la puissance maximale susceptible d'être consommée, choisir le modèle du transformateur dans la documentation fournie en annexe.
1.2. Justifier les indications "triphasé trois fils" et "triphasé quatre fils" indiqué sur la figure ci-dessus.
1.3. Représenter sur un schéma le couplage des phases primaires et secondaires du transformateur triphasé. Justifier le choix de ce couplage.
1.4. Représenter sur un diagramme vectoriel sans échelle les tensions simples (réelles ou fictives) du primaire et du secondaire. Noter alors le déphasage qui existe entre deux tensions analogues et justifier l'appellation Dyn11 lue dans la documentation.
1.5. Pourquoi est-il important de noter ces déphasages ?
1.6. Que représente le régime nominal du transformateur ? Quelles sont les seules données nominales directement exploitables précisées dans la documentation ?

Utilisation des données de la documentation et caractérisation des défauts

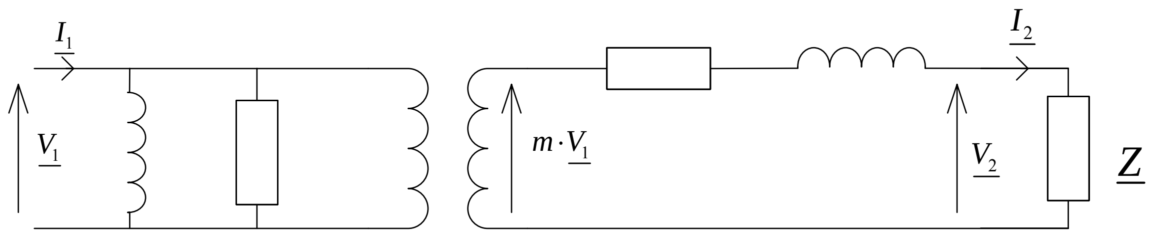


Figure 2

2.1. Quelles sont les valeurs des tensions nominales primaires et secondaires pour cos φ = 1 ?
On notera ces grandeurs V_{1n} et V_{2n}. Calculer alors dans ces conditions la valeur des courants nominaux primaires et secondaires : I_{1n} et I_{2n} .
2.2. Comment calcule-t-on la valeur des éléments donnés en pourcentage dans la documentation ?
2.3. Justifier brièvement la présence des divers éléments du schéma équivalent.
2.4. A partir de la valeur de la tension secondaire à vide relevée dans la documentation, calculer la valeur du rapport de transformation : m.
2.5. Quelle est la valeur du courant à vide ? Quelle est, sur le schéma équivalent, la valeur du courant à vide correspondant (qu'on notera I_{10}) ?

2.6. Quelle est la valeur de la puissance consommée à vide ? Calculer alors les valeurs de R_f et L_1.
2.7. La tension de court-circuit correspond à la tension à appliquer au primaire lorsque le secondaire est court-circuité pour débiter le courant nominal. Utiliser cette donnée pour trouver une relation reliant R_s et l_s.
2.8. En considérant le cas d'une charge présentant un facteur de puissance unitaire, représenter toutes les grandeurs du transformateur sur un diagramme de Fresnel sans échelle.
2.9. En utilisant la donnée de la chute de tension en charge, calculer alors les valeurs de R_s et l_s.
2.10. Y-a-t-il un moyen plus simple de résoudre la question précédente ? Si oui, vérifier la concordance des résultats (on considérera le cas à 120°C).
2.11. Pour valider le schéma équivalent, calculer la chute de tension théorique correspondant à une charge de facteur de puissance 0,8 AR(on négligera la résistance R_s). Comparer le résultat avec la documentation.
2.12. Calculer également le rendement théorique à 100% de charge pour cos φ = 1. Comparer avec la documentation et conclure.
2.13. Calculer pour finir le facteur de puissance total de l'installation pour une charge de facteur de puissance égal à 0,8. Conclure.

Mise en parallèle de deux transformateurs identiques

On veut pouvoir doubler le parc de machines de l'usine et donc pratiquement doubler la consommation électrique. On se propose d'acheter un deuxième transformateur (identique à celui de la question 1.1.) et de connecter en parallèle au précédent. Deux stratégies sont à étudier :

1. Mettre les deux secondaires en parallèle et faire débiter les deux transformateurs sur l'ensemble des charges.
2. Connecter les nouvelles charges uniquement sur le deuxième transformateur après avoir assuré la pleine charge du premier.

3.1. Calculer le rendement d'un des transformateurs à 50% de sa charge, pour une charge de cos φ = 0,8 AR.
3.2. Représenter le schéma global de la stratégie n°1.
3.3. Quel serait le rendement global de la stratégie n°1 pour une charge totale correspondant à 1,5 fois la charge maximale d'un des deux transformateurs, toujours pour une charge de cos φ = 0,8 AR.
3.4. Représenter le schéma global de la stratégie n°2.
3.5. Quel serait le rendement global de la stratégie n°2 pour une charge totale correspondant à 1,5 fois la charge maximale d'un des deux transformateurs, toujours pour une charge de cos φ = 0,8 AR.
3.6. Quels seraient les problèmes supplémentaires posés par la stratégie n°2 ? N'y-a-t-il pas une autre stratégie possible ?
3.7. A partir du schéma correspondant à la stratégie n°1, déduire le schéma équivalent de l'installation (analogue à celui de la figure 2).
3.8. Quel serait le rendement correspondant à l'utilisation d'un transformateur de 2000 kVA pour la même charge que dans les questions précédentes ?
3.9. Conclure sur la stratégie à adopter.

transformateurs de distribution HTA/BT

transformateurs secs enrobés TRIHAL de 160 à 2500 kVA
isolement ⩽ 24 kV - tension secondaire 410 V - 50 Hz
classe thermique F - ambiante ⩽ 40° C, altitude ⩽ 1000 m

normes

Ces transformateurs sont conformes aux normes :

- NFC 52 100 (1990), harmonisée avec les documents d'harmonisation CENELEC HD 398-1 à 398-5 ;
- norme NF C 52115 (1994) harmonisée avec le document HD 538 S1 du CENELEC ;
- norme NF C 52726 (1993) harmonisée avec le document HD 464 S1 du CENELEC ;
- IEC 76-1 à 76-5 (1993) ;
- IEC 726 (édition 1982) ;
- IEC 905.

caractéristiques électriques

isolement 17,5 kV et 24 kV - tension secondaire 410 V

puissance assignée (kVA) (1)(*)			160	250	400	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
tension primaire assignée (1)			15 kV, 20 kV et doubles tensions 15/20 kV (puissance conservée)									
niveau d'isolement assigné (2)			17,5 kV pour 15 kV - 24 kV pour 20 kV									
tension secondaire à vide (1)			410 V entre phases, 237 V entre phase et neutre									
réglage (hors tension) (1)			± 2,5 % (1)									
couplage			Dyn 11 (triangle, étoile neutre sorti)									
pertes (W)		à vide	650	880	1200	1650	2000	2300	2800	3100	4000	5000
	dues à la charge	à 75°C	2350	3300	4800	6800	8200	9600	11400	14000	17400	20000
		à 120°C	2700	3800	5500	7800	9400	11000	13100	16000	20000	23000
tension de court-circuit (%)			6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
courant à vide (%)			2,3	2	1,5	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1
courant d'enclenchement		Ie/In valeur crête	10,5	10,5	10	10	10	10	10	10	9,5	9,5
		constante de temps	0,13	0,18	0,25	0,26	0,30	0,30	0,35	0,40	0,40	0,5
chute de tension à pleine charge (%)	cos φ = 1	à 120°C	1,85	1,69	1,55	1,41	1,35	1,27	1,22	1,18	1,18	1,10
	cos φ = 0,8	à 120°C	4,87	4,77	4,68	4,59	4,55	4,50	4,47	4,44	4,44	4,38
rendement (%)												
charge 100 %	cos φ = 1	à 120°C	97,95	98,16	98,35	98,52	98,60	98,69	98,74	98,82	98,81	98,89
	cos φ = 0,8	à 120°C	97,45	97,71	97,95	98,16	98,25	98,36	98,43	98,53	98,52	98,62
charge 75%	cos φ = 1	à 120°C	98,22	98,42	98,59	98,74	98,80	98,88	98,93	99,00	98,99	99,05
	cos φ = 0,8	à 120°C	97,79	98,03	98,24	98,43	98,50	98,61	98,66	98,76	98,75	98,82
bruit (3)		puissance acoustique L_{WA}	62	65	68	70	72	73	75	76	78	81
dB(A)		pression acoustique L_{PA} à 1 m	50	53	56	57	59	60	61	62	63	66
décharges partielles (4)			⩽10 pC à 1,1 Um									

(*) La puissance assignée est définie en refroidissement naturel dans l'air (AN). Pour des contraintes particulières, elle peut être augmentée de 40 % par adjonction de ventilation forcée (AF). Nous consulter.
(1) Autres possibilités sur demande, nous consulter.
(2) Rappel sur les niveaux d'isolement :

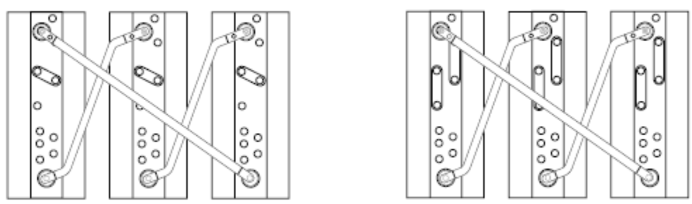
niveau d'isolement assigné (kV)	7,2	12	17,5	24
kV eff, 50 Hz - 1 mn	20	28	38	50
kV choc, 1,2/50 µs	60	75	95	125

(3) Mesures selon CEI 551.
(4) Mesures selon CEI 270.

Merlin Gerin
Modicon
Square D
Telemecanique

changement de tension par barrettes de couplage manœuvrables hors tension.

bitension primaire 15/20 kV



20 kV **15 kV**

Figure 4

Machines à courant continu :

1) L'énergie d'un treuil est fournie par un moteur à courant continu à excitation indépendante dont l'induit et l'inducteur sont alimentés sous une tension U = 230 V.
En charge, le treuil soulevant verticalement une charge à la vitesse de 4 m/s, le moteur tourne à une vitesse de 1200 tr/min et son induit absorbe une puissance électrique de 17,25 kW. La résistance de l'induit est de 0,1 Ω; celle de l'inducteur de 46 Ω; les pertes dites constantes ont pour valeur 1 kW; l'accélération de la pesanteur sera prise égale à g = 10 m/s^2; le rendement du treuil est de 0,75.
Calculer:
a. les courants absorbés par l'induit et l'inducteur;
b. la force électromotrice du moteur;
c. la puissance utile du moteur;
d. le couple utile du moteur;
e. le rendement du moteur;
f. le rendement global de l'équipement;
g. la masse soulevée par le treuil.

2) Un moteur shunt est alimenté sous une tension constante de 200 V.
Il absorbe un courant I = 22 A. La résistance de l'inducteur est R = 100 Ω, celle de l'induit $R_a = 0{,}5\,\Omega$. Les pertes constantes sont de 200 W.
2.1. Calculer:
a. les courants d'excitation et d'induit;
b. la force contre-électromotrice;
c. les pertes par effet Joule dans l'inducteur et dans l'induit;
d. la puissance absorbée, la puissance utile et le rendement global.
2.2. On veut limiter à 30 A l'intensité dans l'induit au démarrage. Quelle doit être la valeur de la résistance du rhéostat de démarrage?
2.3. On équipe le moteur d'un rhéostat de champ. Indiquer son rôle. Dans quelle position doit se trouver le rhéostat de champ au démarrage? Justifier votre réponse.

3) Sur la plaque signalétique d'un moteur à courant continu à excitation séparée, on relève pour le régime normal les indications suivantes:

INDUCTEUR: U = 220 V	INDUIT : à n = 1400 tr/min $U_n = 220$ V, $I_n = 16$ A
Résistance inducteur R = 180 Ω	Résistance interne entre balais : r = 0,8Ω

On considère qu'en régime normal les pertes constantes sont de 120 W. On néglige la réaction magnétique d'induit.
Calculer:
a. la F.C.E.M. E' du moteur;
b. la puissance utile P_u;
c. la puissance absorbée P_a;
d. le rendement η;
e. le moment du couple utile M_u.

4) Un moteur, à excitation séparée constante, est alimenté sous la tension U = 220 V. La résistance de l'induit est de 0,1 Ω. Ce moteur fonctionne à couple utile constant C_u = 200 Nm. Le courant dans l'induit est alors de 33 A et il tourne à 300 tr/min.
4.1 Quelles sont :
a. la puissance électrique absorbée par l'induit;
b. la puissance fournie à la charge;
c. les pertes joules dans l'induit du moteur;
d. les pertes constantes du moteur?
4.2 Quelle est la valeur du couple électromagnétique?
4.3 Quelle sera la vitesse stabilisée du moteur si la tension d'alimentation de l'induit est de 200 V?

5) Un générateur à courant continu de force électromotrice 220 V et de résistance interne 0,2 Ω débite un courant de 50 A lorsqu'il alimente un réseau composé d'une résistance R connectée en parallèle avec un moteur.
Le moteur, de résistance interne 0,2 Ω, absorbe une puissance électrique de 8400 W.
Calculer:
a. La puissance électrique fournie par le générateur au circuit extérieur;
b. la tension commune entre les bornes du générateur, de la résistance R et du moteur;
c. l'intensité du courant dans le moteur;
d. la force contre-électromotrice du moteur;
e. l'intensité du courant dans la résistance R;
f. la valeur de la résistance R.

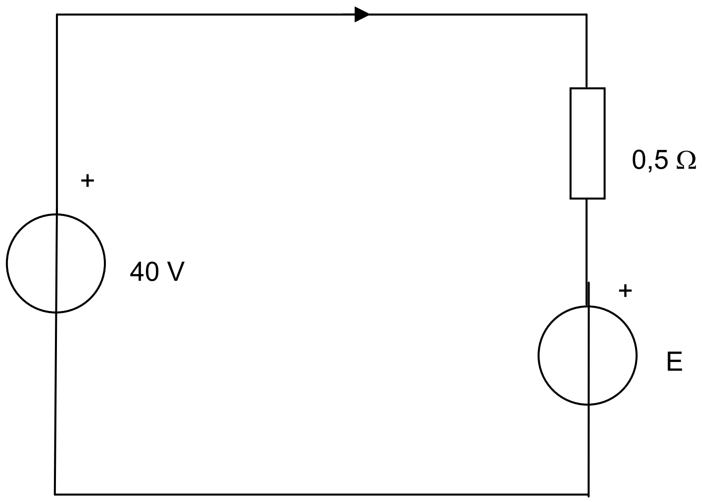
6) Un moteur à courant continu à excitation indépendante entraîne un treuil soulevant verticalement une charge de masse M kg suspendue à l'extrémité d'un filin enroulé sur le tambour du treuil, de rayon supposé constant égal à 0,1 m. La vitesse de rotation du tambour est égale au vingtième de la vitesse de rotation du moteur.
L'induit du moteur de résistance intérieure 0,5 Ω est connecté aux bornes d'une source d'énergie fournissant une tension réglable de U = 0 à U_n =240 V = tension nominale du moteur.
6.1. Le courant inducteur est réglé à sa valeur maximum admissible i_e = 5 A. On constate alors que le treuil hisse la charge $M = \dfrac{4800}{\pi}$ kg à la vitesse $V = \dfrac{11.\pi}{60}$ m/s alors que la puissance absorbée par l'induit est de 9,6 kW et que la tension appliquée à l'induit est égale à la tension nominale.
Calculer :
6.1.1. l'intensité du courant absorbé par l'induit du moteur;
6.1.2. la force contre-électromotrice du moteur;
6.1.3. la puissance utile du treuil;
6.1.4. le couple utile du moteur;
6.1.5. la vitesse de rotation du moteur.

6.2 La charge Met le courant d'excitation gardant les valeurs définies au 6.1., on demande:
6.2.1. Quelle est l'intensité absorbée par l'induit lorsque, alimenté sous la tension U_c, celui-ci développe un couple moteur permettant de maintenir la charge M décollée et immobile ?
6.2.2 La valeur de la tension U_c précédente.
6.2.3. La valeur de la tension U_d de démarrage que l'on peut appliquer brusquement à l'induit pour décoller la charge M et lui communiquer une vitesse constante sans que la pointe de courant dans l'induit dépasse 60 A.
6.2.4. La vitesse stabilisée du moteur à la fin de la première phase du démarrage définie en 6.2.3..
6.2.5. La valeur de la résistance de démarrage qu'il serait nécessaire de monter en série avec l'induit du moteur pour limiter à 60 A la pointe de courant dans l'induit lorsque la tension fournie par la source n'est plus réglable mais garde la valeur maximum de 240 V.
6.3 La charge hissée n'étant plus que les 4/5 de celle du 6.1, à quelles valeurs faut-il régler simultanément la tension appliquée à l'induit, sans résistance de démarrage d'une part, et le courant inducteur d'autre part, de telle façon que la vitesse de hissage soit la plus élevée possible sans qu'en régime établi l'intensité du courant dans l'induit excède 40 A? Calculer cette vitesse.

On donne: g = 10 N/kg; $\pi = 3{,}14$; hypothèse simplificatrice: rendement du treuil = 1. Négliger toutes les pertes du moteur sauf celle par effet Joule dans l'induit ou dans la résistance de démarrage du 6.2.e. Négliger la réaction d'induit et la saturation des circuits magnétiques.

Corrigé :

6.1.1.



$$I_a = \frac{P}{U} = \frac{9600}{240} = 40 \text{ A}$$

6.1.2. $E = U - R_a I_a = 240 - 0{,}5 \times 40 = 220 \text{ V}$

6.1.3. Nous emploierons la formule P = FxV utilisée pour les systèmes où il y a des translations rectilignes, formule analogue à P = C x Ω pour des systèmes en rotation.

$P_u = F \times V = Mg \times V = \dfrac{4800}{\pi} \times 10 \times \dfrac{11.\pi}{60} = 8800 \text{ W}$. Étant donné que le rendement du treuil est de 1, cette puissance utile est la puissance en sortie du moteur et celle à la sortie du treuil.

6.1.4. $P_u = C_u \times \Omega \Rightarrow C_u = \dfrac{P_u}{\Omega}$

Afin de déterminer la vitesse de rotation du moteur, déterminons d'abord la vitesse de rotation du tambour du treuil. Lorsque la charge monte de V mètre en 1 seconde, le tambour du treuil tourne d'un nombre de tour égal à V divisé par la circonférence du tambour :

$nb \text{ tr/s } = \dfrac{V}{2\pi R} = \dfrac{11.\pi/60}{2\pi \times 0{,}1} = 0{,}9166 \text{ tr/s}$.

Le moteur tourne 20 fois plus vite (le treuil est un réducteur de vitesse qui permet d'augmenter le couple, c'est l'analogue d'un transformateur abaisseur de tension avec la tension grandeur analogue de la vitesse et l'intensité grandeur analogue du couple).

Donc, le moteur tourne à 18,33 tr/s = 1100 tr/min.

6.2.

6.2.1. Afin de maintenir la même charge qu'au 6.1. immobile et décollée, il faut que le moteur fournisse le même couple moteur (la masse est la même, la gravité n'a pas changé, le rayon du tambour du treuil non plus). Le moteur appelle donc la même intensité de 40 A.

On peut néanmoins effectuer le calcul du couple à l'aide de la formule :

$$C_{mot} \simeq C_e = \frac{k\Phi}{2\pi} \cdot I_a$$

La question 6.1. nous permet de déterminer kΦ :

$$E = k\Phi N \Rightarrow k\Phi = \frac{E}{N} = \frac{220}{1100/60} = 12 \text{ SI}$$

Ainsi : $C_e = \frac{k\Phi}{2\pi} \cdot I_a = \frac{12}{2\pi} \cdot I_a \Rightarrow I_a = \frac{2\pi C}{12} = \frac{2\pi}{12} \cdot \left(\frac{\frac{4800}{\pi} \cdot 10 \cdot 0,1}{20} \right) = 40 \text{ A}$

6.2.2. Le moteur ne tournant pas, E = 0 V.
Donc, $U = R_a \times I_a = 0,5 \times 40 = 20 \text{ V}$.

6.2.3. On limite l'intensité de démarrage à 60 A. Il faut donc que la f.é.m U devienne égale à $U = R_a \times I_a = 0,5 \times 60 = 30 \text{ V}$.
6.2.4. Le couple moteur va augmenter, devenir supérieur au couple résistant. Ainsi, d'après la relation fondamentale de la dynamique pour les systèmes en rotation :

$$C_{\text{moteur}} - C_{\text{résistant}} = \Sigma\, J \times \frac{d\Omega}{dt}$$

L'accélération angulaire passe de 0 à une valeur positive, le moteur se met à tourner. Ce faisant, la f.é.m. E croît ce qui entraîne une diminution de l'intensité dans l'induit.
Lorsque l'intensité a baissé de 60 à 40 A, le moteur est à nouveau à vitesse constante. Cette nouvelle vitesse dépend de la f.é.m. U appliquée aux bornes de l'induit. On a :

$$\frac{E_1}{N_1} = k\Phi = \frac{E_2}{N_2} \Rightarrow N_2 = N_1 \times \frac{E_2}{E_1} = 1100 \times \frac{(30 - 40 \times 0,5)}{220} = 50 \text{ tr/min}$$

6.2.5. $(R_h + R_a) = \frac{U}{I_a} \Rightarrow R_h = \frac{240}{60} - 0,5 = 3,5\ \Omega$

La puissance dissipée par effet Joule au moment du démarrage dans ce rhéostat est de $3,5 \times 60^2 = 12600 \text{ W}$! Le rhéostat doit être d'une taille appréciable.

6.3.
Afin d'obtenir une vitesse maximum, il faut que la tension d'alimentation de l'induit soit maximum ($E = k\Phi N \Rightarrow N = \frac{E}{k\Phi}$). On choisira donc U = 240 V.
La masse étant réduite de 4/5, le couple que doit fournir le moteur en régime permanent (vitesse constante) est lui aussi réduit de 4/5.
Or $C_e = \frac{k\Phi}{2\pi} \cdot I_a$. Si l'on désire imposer I_a = 40 A, il faut que Φ soit réduit de 4/5 afin que le couple soit lui-même réduit de 4/5.
On supposera que l'inducteur fonctionne dans la zone linéaire (le flux est proportionnel au courant inducteur). Donc : $\Phi = k' \times I_e$. Pour réduire le flux de 4/5 par rapport au flux créé précédemment (question 6.1. et 6.2.) où le flux était créé par un courant inducteur de 5 A, il faut un nouveau courant inducteur de $\frac{4}{5} \times 5 = 4 \text{ A}$.

La nouvelle constante kΦ' de la machine devient donc $k\Phi' = \frac{4}{5} k\Phi = \frac{4}{5} \times 12 = 9,6 \text{ SI}$.

La nouvelle vitesse de rotation est donc :

$$N' = \frac{E}{k\Phi'} = \frac{240 - 0,5 \times 40}{9,6} = 22,9167 \text{ tr/s} = 1375 \text{ tr/min}$$

7) On considère un moteur à courant continu, son excitation possède une valeur telle qu'à 350 tr/min la force électromotrice est égale à 250V. La résistance totale de l'induit est 0,005 Ω et le courant maximum admissible est 2000 A.
On met brusquement ce moteur sous tension à l'aide d'un réseau dont la tension est 250 V.
Le démarrage se produit sans couple résistant sur l'arbre et l'on néglige les frottements. Le moment d'inertie est J = 230 kg.m^2.
7.1. Quel rhéostat de démarrage faut-il prévoir pour que le courant ne dépasse pas la valeur admissible ?
7.2. Ce rhéostat étant en place, quelle est la loi de variation en fonction du temps de la vitesse de rotation N? Au bout de combien de temps le moteur aura-t-il atteint à 5% près sa vitesse à vide?
7.3. Au bout de combien de temps le courant est-il réduit à 1000 A?

Corrigé :

7.1. $U = \left(R_h + R_a\right) \times I_{a\ \max} \Rightarrow R_h = \dfrac{U}{I_{a\ \max}} - R_a = \dfrac{250}{2000} - 0{,}005 = 0{,}12\ \Omega$

Il est a noter que les pertes par effet Joule dans ce rhéostat lors du démarrage sont de $0{,}12 \times 2000^2 = 480\ \mathrm{kW}$!!!

7.2. $\left.\begin{array}{l} U = R \times I_a + E \\ E = k\Phi \times N \end{array}\right\} \Rightarrow I_a = \dfrac{U}{R} - \dfrac{k\Phi}{R} \cdot N$

$C_e = \dfrac{k\Phi}{2\pi} \cdot I_a \Rightarrow C_e = \dfrac{k\Phi}{2\pi} \times \dfrac{U}{R} - \left(\dfrac{k\Phi}{2\pi}\right)^2 \times \dfrac{\Omega}{R}$ (avec R = R_a + R_h) (c'est la caractéristique mécanique d'une machine à courant continu à excitation séparée ou dérivée).
La relation fondamentale de la dynamique pour des systèmes en rotation donne :
$C_{\text{moteur}} - C_{\text{résistant}} = \Sigma\ J \times \dfrac{d\Omega}{dt}$, ici, comme on néglige les frottements, cela se résume à : $C_{\text{moteur}} \simeq C_e = \Sigma\ J \times \dfrac{d\Omega}{dt}$

d'où : $\Sigma\ J \times \dfrac{d\Omega}{dt} = \dfrac{k\Phi}{2\pi} \times \dfrac{U}{R} - \left(\dfrac{k\Phi}{2\pi}\right)^2 \times \dfrac{\Omega}{R}$

Soit en passant en transformée de Laplace :
$\Omega(p)\left[1 + \dfrac{R \cdot J \cdot 2\pi}{k\Phi} \cdot p\right] = \dfrac{2\pi}{k\Phi} \cdot U(p)$ soit : $\dfrac{\Omega(p)}{U(p)} = \dfrac{2\pi / k\Phi}{1 + \dfrac{R \cdot J \cdot 2\pi}{k\Phi} \cdot p} \sim \dfrac{k}{1 + \tau p}$

avec $\tau = \dfrac{R \cdot J \cdot 2\pi}{k\Phi} \simeq 4{,}2\ \mathrm{s}$.
On reconnaît un **système du premier ordre**, le temps de réponse à 5% est 3τ = 12,6 s.
Il faudra donc au moteur 12,6 s pour passer de 0 à 350 – 0,05 x 350 = 332,5 tr/min.

La loi de variation de N ou de Ω est : $\Omega(t) = \Omega_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$

ou $\Omega_0 = \dfrac{350}{60} \times 2\pi = 36{,}65\ \mathrm{rad/s}$

7.3. Les frottements étant négligés, le courant absorbé à vide par la machine en régime permanent (Ω constante) est voisin de 0 A. Le système étant du premier ordre, on peut écrire pour la loi de variation de l'intensité absorbée par l'induit en fonction du temps : $i_a(t) = I_{a0} \times e^{-\frac{t}{\tau}}$ avec $I_{a0} = 2000\ \mathrm{A}$. On cherche donc le temps au bout duquel :

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{1}{2} \Rightarrow \ln\left(e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \ln\left(\frac{1}{2}\right) \Rightarrow -\frac{t}{\tau} = \ln\left(\frac{1}{2}\right) \Rightarrow \frac{t}{\tau} = \ln\left(\frac{2}{1}\right) = \ln 2 \Rightarrow t = \tau \times \ln 2 = 2{,}92\ \mathrm{s}$$

8) Un moteur à excitation indépendante actionne un monte-charge. Il soulève une masse de deux tonnes à la vitesse d'un mètre par seconde. Le moteur est alimenté sous 1500 V, sa résistance d'induit est de 1,6 Ω. Le rendement de l'ensemble du système est de 70 %.
8.1. Calculer la puissance absorbée par le moteur et le courant appelé lors de la montée.
8.2. Dans la phase de descente on veut limiter la vitesse à 1 m/s. Calculer le courant débité par la machine et la résistance X dans laquelle elle doit débiter.
8.3. Quelle serait la vitesse de descente si on limitait le courant débité à 20 A ? Quelle valeur de X faudrait-il utiliser ?
8.4. On court-circuite l'induit. Quelle est la vitesse de descente de la masse de deux tonnes ? Quelle est la valeur de E et la valeur du courant circulant dans l'induit ? Quelle est la puissance dégagée dans le rotor ?
On considérera que le moteur est parfaitement compensé et que le courant d'excitation est constant.
On prendra g = 9,8 $\mathrm{ms^{-2}}$.

Solution :

8.1. Puissance utile fournie par le moteur : P = Mgv
$\mathrm{P_u} = 2 \cdot 10^3 \times 9{,}8 \times 1 = 19600\,\mathrm{W}$.
Puissance absorbée par le moteur $\mathrm{P} = \frac{\mathrm{P_u}}{0{,}7} = 28000\,\mathrm{W}$

P = UI$\Rightarrow \mathrm{I} = \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{U}} = \frac{28000}{1500} = 18{,}7\,\mathrm{A}$.

8.2. La charge fournit une puissance $\mathrm{P_u} = 2 \cdot 10^3 \times 9{,}8 \times 1 = 19600\,\mathrm{W}$.
La puissance électrique fournie par la machine est 0,7 $\mathrm{P_u}$ (on considère que le rendement est identique à la montée et à la descente).
$\mathrm{P_e} = 19600 \times 0{,}7 = 13720\,\mathrm{W}$.
Cette puissance est dissipée dans la résistance X, $\mathrm{P_e} = \mathrm{XI^2} = \mathrm{UI}$,
U = E-RI (fonctionnement en génératrice),
E = k'NΦ
La f.é.m. est proportionnelle à la vitesse car Φ est constant. E = kN. Le moteur tourne à la même vitesse qu'au 1.
$\mathrm{E} = 1500 - 1{,}6 \times 18{,}7 = 1470\,\mathrm{V}$

$\mathrm{P_e} = \mathrm{UI} = \mathrm{EI} - \mathrm{RI^2} \Rightarrow 13720 = 1470\mathrm{I} - 1{,}6\mathrm{I^2}$
Cette équation du second degré admet deux racines : $\mathrm{I_1} = 909\,\mathrm{A}$, $\mathrm{I_2} = 9{,}43\,\mathrm{A}$.

Lorsque l'on rencontre une équation du second degré dans un problème de physique, nombreux sont les cas où une des deux solutions est à rejeter car elle correspond à une aberration vis-à-vis des lois de la physique.

C'est le cas de la solution $\mathrm{I_1}$: on aurait $X = \frac{1470 - 1{,}6 \times 909}{909} = 17{,}16 \cdot 10^{-3}\ \Omega$. C'est possible, cela reviendrait en gros à court-circuiter l'induit. MAIS, cela entraînerait des pertes Joule au niveau de l'induit égales à : $1{,}6 \times 909^2 = 1{,}32\ \mathrm{MW}$!!!

Or, la masse de deux tonnes ne fournit que 13720 W. On ne peut donc pas recueillir plus d'un mégawatt. De plus, même si cette solution était physiquement possible, nous serions conduits à la rejeter. En effet, si le freinage durait, ne serait-ce que quelques brefs instants, l'énergie dissipée au niveau du rotor porterait celui-ci à une température destructrice pour l'isolant recouvrant les conducteurs et pourrait même entraîner la fusion du cuivre et du fer du rotor.

Cas de la solution I_2 :

La f.é.m. E débite dans X et R en série : $\mathrm{X}+\mathrm{R}=\dfrac{1470}{9{,}43}=155{,}9\ \Omega \Rightarrow \mathrm{X}=154{,}3\quad \Omega.$

Les pertes Joule dans l'induit sont égales à : $1{,}6\times 9{,}43^2=142\ \mathrm{W}$, il n'y a aucun problèmes particulier de refroidissement pour la machine. Par contre, il se dissipe $154{,}3\times 9{,}43^2=13{,}7\ \mathrm{kW}$ dans la résistance de freinage. Il faut penser à ventiler celle-ci afin d'assurer un refroidissement correct et d'éviter une éventuelle fusion des conducteurs de cette résistance.

8.3. La f.é.m. est proportionnelle à N, donc à la vitesse de descente (le rapport d'engrenage est inchangé).
E = Kv, pour v = 1 m/s, E = 1470 V, K = 1470 $\mathrm{V.m^{-1}.s}$.
U = E-RI,

$$P=UI=0{,}7\times Mgv=E\cdot I-R\cdot I^2\Rightarrow 1470\times I\times v-RI^2=0{,}7\times Mgv$$

$$\Rightarrow v\cdot\left(1470\cdot I-0{,}7\times Mg\right)=R\cdot I^2$$

$$\Rightarrow v=0{,}041\ m/s$$

$$X+R=\frac{E}{I}=\frac{60}{20}=3\ \Omega,\ \mathrm{X}=1{,}4\ \Omega$$

La vitesse est considérablement diminuée dans ce cas.

8.4. La puissance fournie par lors de la descente de la masse de deux tonnes est transformée en chaleur par effet Joule dans la résistance de l'induit :

$$Mgv\times 0{,}7=1{,}6\times I^2$$

Or, $I=\dfrac{E}{R_a}=\dfrac{K\cdot v}{R_a}$.

On a donc l'équation : $Mgv\times 0{,}7=R_a\times\left(\dfrac{K\cdot v}{R_a}\right)^2\Rightarrow v=\dfrac{\sqrt{R_a\times Mgv\times 0{,}7}}{K}=100{,}8\cdot 10^{-3}\ \mathrm{m.s^{-1}}$.

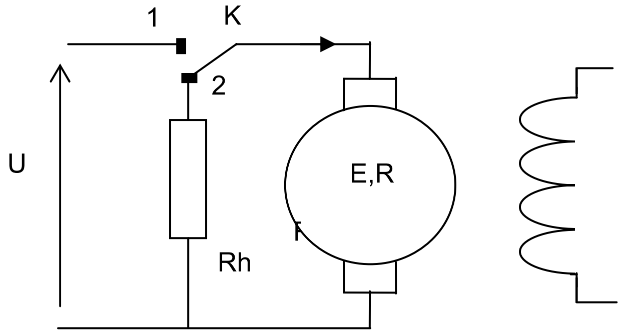
$$E=K\cdot v=148{,}2\ \mathrm{V}$$

$$I=\frac{E}{R_a}=92{,}6\ \mathrm{A}\Rightarrow \mathrm{P_{Joule\ ROTOR}}=R_a\times I^2=13{,}7\ \mathrm{kW}$$

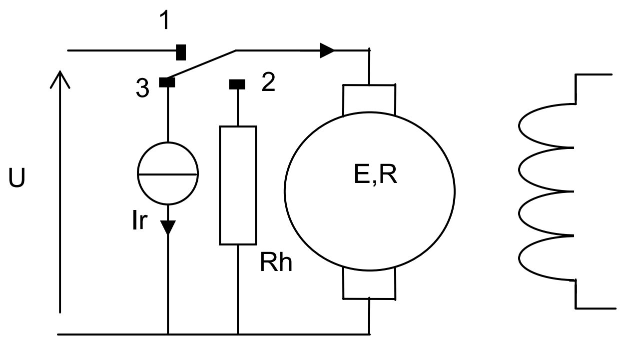
10) étude du ralentissement et de la mise en vitesse d'une mcc

Les caractéristiques d'une MCC à excitation séparée accouplée à une charge mécanique sont les suivantes :
Flux constant k = 0.764 V×s ; résistance d'induit R = 0.5 Ω; couple de pertes collectives Tp = 1 mN (constant quelque soit la vitesse $\dot{\theta}$) ; la charge mécanique accouplée oppose un couple résistant Tr de 10 mN à 157.08 rad/s ; le moment d'inertie du groupe J = 0.05 kg.m2.

1. Ralentissement :
à t = 0 l'ensemble tourne à $\dot{\theta}$ = 157.08 radian par seconde
1.1 À t = 0 on ouvre K, Tr = 10 mN constant quelque soit la vitesse, déterminer
$\dot{\theta}$ = f(t) et ta temps d'arrêt.
1.2 à t = 0 on ouvre K, Tr = aΩ avec a = 0.06366 déterminer $\dot{\theta}$ = f(t) et le temps d'arrêt.
1.2 à t = 0 on bascule K de 1 vers 2, Tr = 10 mN constant quelque soit la vitesse,
Rh = 9.5 Ω, déterminer $\dot{\theta}$ = f(t) et le temps d'arrêt.



1.4 à t = 0 on bascule K de 1 vers 3, Tr = 10 mN constant quelque soit la vitesse,
Ir = 12 A (maintenu constant à l'aide d'un asservissement de courant), déterminer $\dot{\theta}$ = f(t) et le temps d'arrêt.



2. Démarrage :

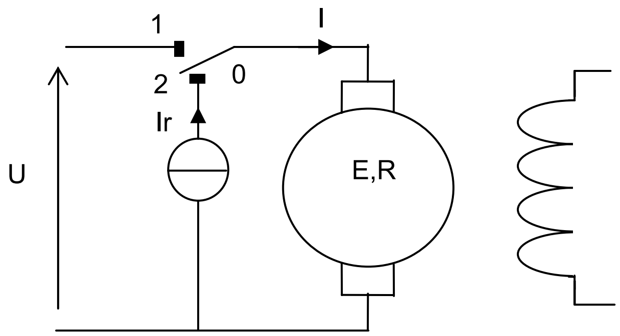
à t = 0 l'ensemble est à l'arrêt, Tr = 10 mN constant quelque soit la vitesse, la vitesse finale est $\dot{\theta}f$ = 157.08 rad/s, démontrer que la tension d'alimentation est U=127.2 V

2.1 on bascule K de 0 vers 1 déterminer $\dot{\theta}$ = f(t) et le temps nécessaire pour atteindre la vitesse finale $\dot{\theta}f$.

2.2 déterminer dans ce cas **I** = f(t). Qu'en pensez vous ?

2.3 La machine étant arrêtée, on bascule K de 0 vers 2, Ir étant une source asservie en courant, pour quelle valeur minimale de Ir le groupe peut -il démarrer ?

2.4 Ir = 20 A, déterminer $\dot{\theta}$ = f(t) et le temps nécessaire pour atteindre la vitesse finale $\dot{\theta}f$.



Machines synchrones :

1) Un alternateur monophasé tétrapolaire comporte 100 conducteurs. Le flux par pôle vaut 25 mWb et la fréquence est de 50 Hz. On mesure aux bornes de l'induit une tension de valeur efficace E = 267 V.
1.1 Déterminer le coefficient de Kapp de l'enroulement.
1.2 Déterminer la vitesse de rotation du rotor de l'alternateur.

Solution : N = 25 tr/s, K = 2,14.

2) Le rotor d'un alternateur triphasé, 50 Hz, tourne à la vitesse de 750 tr/min . Son stator comporte 120 encoches régulièrement réparties, chacune d'elles contient 4 conducteurs. Toutes les encoches sont utilisées, les trois enroulements sont couplés en étoile et leur résistance est négligée; le coefficient de Kapp est 2,14. On donne le flux par pôle en fonction de l'excitation :

i(A)	8	10	11,8	15,4	17	20	26	34
Φ(mWb)	50	61	70	85	90	97	105	108

L'alternateur débite 150 A purement inductifs sous la tension de 962 V entre fils de ligne avec une excitation de 15,4 A.
2.1 Quelle est le nombre de pôles de l'alternateur ?
2.2 Quelle est la tension à vide pour i = 15,4 A ?
2.3 Calculer la réactance synchrone par phase pour cette excitation.

Solution : 1) nb pôles = 8. 2) E = 1455 V. 3) Lω = 6 Ω.

3) Un alternateur possède un stator monté en étoile. Son rotor tourne à la vitesse de 1500 tr/min. La fréquence est de 50 Hz. La résistance d'une phase est R = 0,8 Ω. On a relevé la caractéristique à vide :

I_e(A)	0	0,25	0,4	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	3
E(V)	10	86	131	156	192	213	226	240	252	262	305

Un essai en court-circuit a donné I_e = 0,5 A et I_{cc} = 48 A.
3.1 Calculer la réactance synchrone d'induit Lω.
3.2 L'alternateur débite dans un récepteur inductif dont le facteur de puissance est 0,8 , un courant de 30 A en ligne sous une tension de 380 V entre phases. Quelle est l'intensité du courant d'excitation ?
3.3 Donner la valeur de la tension simple à la sortie de l'alternateur dans le fonctionnement suivant : I = 17,65 A $\cos\varphi = 0,6$ (φ avant) I_e = 1 A.
3.4 On monte une charge résistive triangle à la sortie de l'alternateur. On ne modifie pas le courant d'excitation. Déterminer la valeur R_{max} d'une des trois résistances pour que la puissance active fournie par l'alternateur soit maximale.

Solution : 1) Lω = 3,15 Ω. 2) $I_e \approx 3A$. 3) E = 213 V, V = 239,3 V. 4) $R_{max} = 2,4\,\Omega$.

4) Un alternateur triphasé dont le stator est câblé en étoile, fournit entre phases une tension constante U = 2400 V, 50 Hz. Le relevé des caractéristiques à vide et en court-circuit est résumé ci-dessous :

i(A)	0	0,5	1	1,5	3	4	5	6	7	8	9	10
E(V)	0	200	400	600	1200	1500	1660	1720	1760	1780	1790	1800
I_{cc}(A)	0	400	800	1200								

Dans ce tableau, i représente l'intensité d'excitation, E la f.é.m. entre phase et neutre, I_{cc} l'intensité de court-circuit dans les enroulements statoriques. La résistance entre phase et neutre, mesurée à chaud, est $0{,}08\,\Omega$.
4.1 Tracer la caractéristique à vide (10 mm pour 100 V, 15 mm pour 1 A).
4.2 Le rotor tourne à 150 tr/min. Quel est le nombre de pôles ?
4.3 Calculer l'impédance d'un enroulement du stator (réactance synchrone supposée constante).
4.4 L'alternateur débite 1000 A dans un circuit inductif de facteur de puissance 0,8.
a) Déterminer graphiquement la f.é.m. E de l'alternateur entre phase et neutre.
b) En déduire la valeur à donner au courant d'excitation.
c) Calculer les pertes par effet Joule dans le stator.
d) L'alternateur essayé à vide, sous l'excitation normale (déterminée en b)) absorbe 100 kW y compris la puissance nécessaire à l'excitation.
Quel est le rendement de l'alternateur dans les condition normales d'emploi (1000 A, $\cos\varphi = 0{,}8$).
Solution : 2) 40 pôles. 3) $L\omega \approx 0{,}49\,\Omega$. 4)a) E_s = 1780 V. b) i = 8 A. c) $P_J\, 0{,}24 \times 10^6\,W$. d) η = 90,8 %.

5) On a relevé la caractéristique à vide de l'alternateur, à vitesse constante, nominale :

I_e(A)	0	20	35	50	75	100
E_s(V)	0	1550	2500	3100	3500	3750

Entre 0 et 1550 V, cette courbe est sensiblement une droite.
Essai en court-circuit : on a relevé I = 775 A et I_e = 20 A.
5.1 Déterminer la réactance synchrone de Behn-Eschenburg.
5.2 On désire un fonctionnement à tension constante U = 2500 V, à 50 Hz.
Déterminer la valeur du courant d'excitation I_e à établir, en tenant compte d'un facteur de puissance de 0,800 (charge inductive) pour des courants I valant 250, 500, 750, 1000 A. On négligera la chute ohmique.
5.3 La résistance apparente entre bornes, au stator, est $R_{stat} = 0{,}04\,\Omega$ et celle de l'inducteur, r = 2 Ω; les pertes constantes valent 200 kW. Calculer le rendement pour ces quatre valeurs de I. (Toutes les tensions sont composées).

Solution : 1) $X_s = 2\Omega$.

6) Une machine synchrone triphasée à 6 pôles, fonctionne en moteur synchrone. La résistance de l'induit est négligeable et la réactance constante est égale à 8 Ω. On applique aux bornes du moteur une tension de 200 V, fréquence 50 Hz. On règle l'excitation du moteur pour que son facteur de puissance soit égal à 1. Le moteur développe une puissance de 5 kW.

6.1 On demande :
6.1.1 la vitesse du moteur en tours par minute;
6.1.2 le courant fourni par le réseau;
6.1.3 le couple moteur;
6.1.4 la force contre-électromotrice du moteur.

6.2 On augmente l'excitation du moteur jusqu'à ce que le facteur de puissance devienne égal à 0,8 , la puissance développée par le moteur reste la même.
Déterminer :
6.2.1 le déphasage du courant sur la tension et le sens de ce déphasage;
6.2.2 le courant absorbé par le moteur;
6.2.3 la force contre-électromotrice du moteur.

6.3 Déterminer graphiquement quelques points du graphe I = f(E) qui donne le courant fourni par le réseau en fonction de la force contre-électromotrice du moteur quand celui-ci développe une puissance de 4 kW. Ces points seront choisis de façon à donner une idée générale de l'allure du graphe. Échelle : 1 mm pour 2 V.
On admettra que la puissance fournie par le réseau est intégralement transmise à la roue polaire.

6.4 Le moteur développant la puissance de 5 kW avec l'excitation correspondant à un facteur de puissance égal à 0,8 (déphasage avant), quelles sont les valeurs prises par le courant absorbé et le facteur de puissance :
6.4.1 lorsque la tension varie de $\pm$ 20 %;
6.4.2 lorsque la fréquence varie de $\pm$ 10 %.
On admettra d'une part que le couple résistant de l'appareil entraîné par le moteur est proportionnel au carré de la vitesse et que d'autre part les variations susmentionnées se produisent assez lentement pour ne pas provoquer le décrochage du moteur.

Solution : 6.1.1 N = 1000 tr/min.; 6.1.2 I = 14,4 A; 6.1.3 C = 47,6 N.m; 6.1.4 E = 282 V
6.2.1 φ = 37°; 6.2.2 I' = 31,25 A; 6.2.3 E' = 402 V;
6.3 exemples :

E volts	178	256	320	410
I A	25	20	22,2	30

7) Compensateur synchrone :
Les compteurs d'énergie active et réactive installés sur le tableau d'alimentation d'une usine indiquent respectivement 13750 kWh et 16500 kVARh pour une journée.
7.1 Quel est le facteur de puissance moyen de cette usine ?
7.2 On veut relever jusqu'à 0,85 le facteur de puissance moyen par l'emploi d'une machine synchrone surexcitée (compensateur synchrone) fonctionnant à vide.
Si on néglige en première approximation la puissance active absorbée par cette machine, quelle devra être la puissance apparente ?
7.3 En supposant que la machine considérée absorbe une puissance active égale à 6,5 % de sa puissance réactive, quelle est exactement la puissance apparente du compensateur synchrone à installer ?
Montrer qu'en négligeant la puissance active absorbée par la machine synchrone, on introduit dans les calculs un coefficient de sécurité, et que celui-ci est d'autant plus faible que le facteur de puissance à atteindre est plus élevé.
7.4 On veut, par la suite, utiliser la machine synchrone en moteur. Quelle puissance active devra-t-elle absorber si on veut relever au maximum le facteur de puissance ?
7.5 Quel est, à ce moment, le gain réalisé sur la puissance apparente de l'installation ?

Solution :
7 .1 Facteur de puissance moyen :

$$tg\varphi = \frac{\int \sqrt{3}UI \sin\varphi \ dt}{\int \sqrt{3}UI \cos\varphi \ dt} = \frac{16500}{13750} = 1,2 \Rightarrow \cos\varphi = 0,64$$

l'intégrale étant étendue à toute une journée.

7.2 Énergie réactive à fournir : Appliquons la méthode de Boucherot :

Énergie active (kWh)	Énergie réactive (kVarh)
avant : 13750	avant : 16500
après : 13750	après : $13750 \times tg\left(Arc\cos 0,85\right) = 8500$

Il faudra donc fournir une énergie réactive égale à : 16500-8500 = 8000 kvarh.
La puissance réactive du compensateur synchrone, fonctionnant pendant toute la journée sera donc : $\frac{8000}{24} = 333,333 \ k\,\mathrm{var}$
et puisque nous négligeons la puissance active absorbée, sa puissance apparente devra être : S = 333,333 kVA.

7.3 Calcul de la puissance active absorbée par la machine synchrone :
P' = 0,065 $\times$ 333333 = 21667 W.

Appliquons à nouveau la méthode de Boucherot :

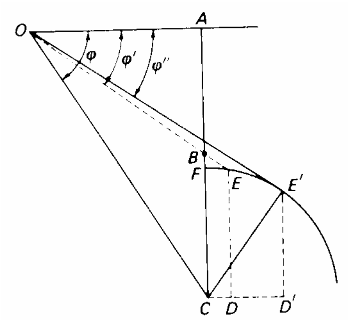
Énergie active (kWh)	Énergie réactive (kVarh)
avant : 13750	avant :16500
après : $24 \times 0{,}065$ Q + 13750	après : 16500 - 24 Q= $tg\left(Arc\cos 0{,}85\right) \times P$

D'où l'équation : $16500 - 24Q = 0{,}62 \times \left(24 \times 0{,}065Q + 13750\right) \Rightarrow Q = 319{,}42\ k\,\mathrm{var}$

$\Rightarrow P = 0{,}065 \times Q = 20{,}76\ kW$

$\Rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(20{,}76)^2 + (319{,}42)^2} = 320\ kVA$

Représentons graphiquement en :
–OA la puissance moyenne active de l'usine 13750/24 = 573 kW ;
–AC la puissance moyenne réactive de l'usine 16500/24 = 687 kvar ;
–CD la puissance active absorbée par la machine synchrone 20,76 kW
–



Lorsque nous avons négligé la puissance active absorbée par la compensateur synchrone, la puissance réactive et apparente de cette machine était représentée par le vecteur CB.
Lorsque nous avons tenu compte de la puissance active, la puissance apparente du compensateur synchrone était représentée par CE ; on voit que CE est inférieur à CB.
La marge de sécurité que nous donnait la calcul approximatif (négligeant la puissance active du compensateur) était CB - CE, soit à peu prés BF. On voit que BF est d'autant plus petit que la droite OE est moins inclinée sur OA, donc la marge de sécurité est d'autant plus résulte que la facteur de puissance à atteindre est plus élevé.

7.4 La puissance apparente 320 kVA de la machine ne peut être dépassée. Traçons la circonférence de centre C et de rayon CE = 320 kVA. Puis, du point O menons la tangente à cette circonférence. Soit E' le point de tangence. La droite OE' forme avec OA l'angle φ''correspondant à cos φ'' = 0,87 (maximum de facteur de puissance). La puissance active absorbée par la machine est, dans ces conditions, mesurée par CD'. Nous lisons CD' = 153 kW.

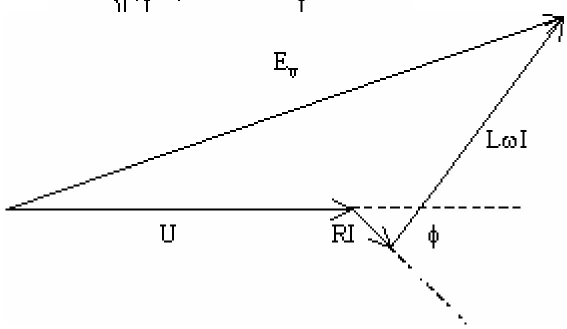
7 .5 La puissance apparente est, à ce moment, mesurée par OE'. Le gain réalisé sur la puissance apparente sera :
OC - OE' = 900 - 835 = 65 kVA.

8) On considère un alternateur monophasé (circuit magnétique non saturé), ayant les caractéristiques suivantes :
- Tension d'induit U = 380 V;
- Fréquence f = 60 Hz;
- Vitesse de rotation N = 900 tr/min;
- Résistance d'induit r = 0,02 Ω

Lorsque le courant d'excitation vaut 9 A, la tension à vide est égale à 420 V. De plus, pour un courant d'excitation de 5 A, l'alternateur débite un courant de court-circuit de 307 A.
1) Nombre de pôles de l'alternateur.
2) Détermination de la réactance synchrone par le diagramme de Behn-Eshenburg.
3) Le facteur de puissance de l'installation étant de 0,9, trouver la f.é.m. à avoir pour U = 380 V et I = 120 A.
4) En déduire le courant d'excitation correspondant (on considère que la courbe E(i) est linéaire entre 380 et 450 V).
Le rotor consomme un courant de i = 5 A sous une tension de 17 V, et les pertes constantes sont égales à 700 W.
5) Calculer pour les conditions des questions 3/ et 4/, la puissance utile ainsi que son rendement.
1) Nombre de pôles de l'alternateur
Le nombre de paires de pôles de l'alternateur est donné par la relation:
p = f / N (f en Hz et N en tr/s) p = 4 soit 8 pôles
2) Réactance synchrone
En supposant que la courbe $I_{cc}(i)$ du courant de court circuit à l'induit en fonction du courant d'excitation est linéaire on obtient
I_{cc} (i = 9A) = (9/5) I_{cc} (i = 5A) = 553 A. La réactance synchrone est alors donnée par la relation:

3) f.é.m. pour U = 380 et I = 120 A

$$L\omega = \sqrt{\left(\frac{E_v}{I}\right)^2 - R^2} \approx \frac{E_v}{I} = 76\,\Omega$$



En se plaçant dans l'hypothèse de Behn-Eshenburg

En projetant sur un axe horizontal Ox et un axe vertical Oy, on obtient
E_{vx} = U + Ricos ϕ + LωIsin ϕ = 421 V
E_{vy} = - Risin ϕ + LωIcos ϕ = 81 V
$E_v^2 = E_{vx}^2 + E_{vx}^2$ E_v = 429 V

4) Courant d'excitation
La caractéristique interne étant considérée comme linéaire on en déduit le courant d'excitation : i (E_v = 429 V) = i (E_v = 420 V) (429 / 420) = 9,2 A
3) Puissance utile et rendement
La puissance utile est la puissance active fournie à l'induit par l'alternateur:
P_u =UI cos φ = 41,04 kW
Pour déterminer le rendement nous devons évaluer les différentes pertes:
pertes Joule à l'induit: $P_{js} = rI^2$ = 288 W
pertes Joule à l'inducteur: $P_{jr} = Ri^2 = (17 / 5)i^2$ = 287,8 W
pertes constantes: P_c = 700 W.

La puissance absorbée est donc
$P_{abs} = P_u + P_{js} + P_{jr} + P_c = 42{,}31$ kW
et le rendement η = Pu / Pabs = 0,97

9) Un alternateur triphasé étoile a une tension (entre phases) U = 660 V et débite un courant de 500 A sous un cos φ = 0,8 (inductif) à la fréquence f = 50 Hz.
1) Calculer les puissances apparente, active et réactive.
2) Sachant que l'induit comporte 372 conducteurs et que le flux sous un pôle est de 0,027 Wb.
Calculer le coefficient de Kapp en admettant que E = U.

10) Un alternateur monophasé fournit un courant de 50 A sous une tension de 240 V et avec un facteur de puissance de 0,8 (charge inductive). Le rotor consomme 8 A sous une tension de 35 V, les pertes constantes sont de 450 W et la résistance de l'enroulement du stator est R=0,2 Ω.
1) Calculer la puissance utile de l'alternateur et son rendement.
2) Pour la même excitation on a relevé : E_v = 280 V et I_{cc} = 40 A.
3) Calculer l'impédance et la réactance interne de l'alternateur et déterminer la f.é.m. (E_V) par le graphique de Behn-Eschenburg.

11) Un alternateur triphasé étoile fournit un courant de 400 A sous une tension composée de 420 V et avec un facteur de puissance de 0,9 (charge inductive). La résistance mesurée entre phases du stator est R = 0,03 □ et l'ensemble des pertes constantes et par effet Joule au rotor est P = 6 kW.

1) Calculer la puissance utile de l'alternateur et son rendement
2) Pour la même excitation on a relevé : $E_{v\text{entre phases}}$ = 510 V et I_{cc} = 300A.
3) Calculer la réactance interne (R est ici négligée) et déterminer la f.é.m. (E_V) entre phases qui correspond à un débit de 400 A sous 420 V de tension composée.

12) Un alternateur triphasé connecté en étoile fonctionne à tension constante (entre phases) U=5000 V, 50 Hz. On connaît sa caractéristique à vide (rectiligne entre 0 et 3 100 V).

i (A)	0	40	70	100	150	200
E_V (V)	0	3 100	5 000	6 200	7 000	7 500

i : courant d'excitation
E_V : tension à vide entre phases
D'autre part, un essai en court-circuit a donné I = 1550 A pour i = 40 A.
1) Déterminer par la méthode de Behn-Eschenburg, et en négligeant la chute ohmique, la valeur à donner au courant d'excitation pour obtenir une tension de 5000 V avec un cos φ de 0,85 (charge inductive) pour chacun des courants: 500; 1000; 1500 A.

2) La résistance entre deux phases du stator étant R = 0,04 Ω et celle de l'inducteur r' = 2 Ω , calculer le rendement correspondant à chaque débit en tenant compte de 200 kW de pertes constantes.

13) Les essais à vide et en court-circuit d'un alternateur triphasé étoile à 24 pôles ont donné les résultats suivants :

i(A)	0	40	70	100	150	180
E_v(V)	0	1800	2900	3500	4000	4100

E est la valeur efficace de la force électromotrice à vide entre deux bornes de phase, i est l'intensité du courant d'excitation.
Pour i = 150 A, l'intensité du courant d'induit de court-circuit est I_{cc} =2650 A. La résistance d'induit est négligeable.
1) Calculer la fréquence de rotation du rotor (f = 50 Hz).
2) Calculer l'impédance interne de l'enroulement d'une phase.
3) Pour un courant d'excitation i = 150 A, et une charge inductive équilibrée de facteur de puissance cos φ = 0,87, déterminer graphiquement la tension U entre deux bornes de phase pour les intensités suivantes du courant : 2000 A, 1500 A, 1000 A, 500 A. Tracer la caractéristique externe de l'alternateur.

14) Un alternateur à 12 pôles dont les enroulements sont couplés en étoile a une résistance d'inducteur de r = 3 Ω et une résistance d'induit de R=0,1Ω
On a relevé, à vide, à 1000 tr/min, la tension entre phases suivante :

i (A)	0,5	0,75	1	1,3	1,5	1,8	2	2,3	2,5	3
E_V (V)	6,2	10,2	11	13,7	15,1	17,2	18,2	18,8	19,3	20

i étant le courant d'excitation. Au cours d'un essai en court-circuit, à 1000 tr/min, on a relevé: I_{cc} = 16 A pour i = 1 A.
I- Fonctionnement au ralenti à 1000 tr/min, avec I = 20 A et cos φ = 1 :
1) Calculer la fréquence de la tension ainsi que la réactance synchrone par phase. En déduire l'inductance synchrone par phase, supposée constante (alternateur non saturé).
2) Calculer le courant d'excitation pour que la tension entre phases soit de 10,4 V.
3) Calculer le rendement si l'on sait que pour cette excitation et à cette vitesse, les pertes mécaniques sont égales à 15 W et les pertes fer à 30 W.
II- Fonctionnement au régime nominal à 9000 tr/min avec I = 20 A et cos φ = 1 :
1) Calculer la nouvelle fréquence de la tension et le nouveau courant d'excitation pour que la tension entre phases soit de 10,4 V.

2) Quelle serait, à cette vitesse, la tension entre phases de l'alternateur, si on fonctionnait avec l'excitation trouvée en **I**- 2).

15) Un alternateur tétrapolaire triphasé a ses enroulements d'induit couplés en étoile. On néglige la résistance de ces enroulements d'induit ainsi que toutes les pertes de la machine. Dans la suite du problème, nous ne considérerons que les tensions simples. La machine est supposée non saturée de sorte que la f.é.m. E entre phase et neutre de pulsation ω , pour un courant d'excitation i, peut s'écrire $E = Ki\omega$, K étant une constante. La tension nominale de la machine est :
$V_n = 220$ V et son courant d'induit nominal $I_n = 10$ A.
1) Calculer la vitesse de rotation de la machine N en tr/min en fonction de la pulsation ω et du nombre de pôles p. Pour quelle valeur de N la fréquence fournie par la machine est égale à 50Hz ?
2) Pour N=1500 tr/min et un courant d'excitation i = 1 A, la f.é.m. à vide est E = 200 V.
Pour N = 1500 tr/min et i = 1,5 A le courant d'induit est $I_{cc} = 10$ A lorsque l'induit est en court-circuit.
a) Déterminer la valeur de la réactance de Behn-Eschenburg $L\omega$.
b) Pour i restant égal à 1,5 A, quelle serait la valeur du courant de court-circuit I_{cc} pour une vitesse de rotation de N = 750 tr/min ?
L'induit de l'alternateur est connecté à 3 résistances identiques R montées en étoile. La machine va servir de charge (alternateur-frein) à un moteur tournant à la vitesse constante de 1500 tr/min.
3) On désire que l'alternateur fournisse sa tension nominale en débitant son courant nominal. Quelles doivent être la valeur de R et du courant d'excitation i ? Quelle est alors la puissance fournie par l'alternateur ?
4) On désire maintenant choisir R de telle façon que l'alternateur fournisse sa puissance maximale. Le courant d'excitation i est maintenu constant à la valeur du 3)
a) Calculer la puissance active P par phase en fonction de E, R et $L\omega$.
b) Exprimer la valeur littérale de R pour laquelle P est maximale(on pourra calculer la dérivée de la puissance par rapport à R, étudier son signe et en déduire que la fonction présente un maximum pour une valeur de R que l'on déterminera).
c) Calculer les nouvelles valeurs numériques de R, du courant I, de la tension V et de la puissance par phase.

16) Un alternateur triphasé dont les enroulements sont couplés en étoile fournit, en charge normale, un courant d'intensité **I** = 186,8 A, lorsque la charge est inductive (cos=0,6). La résistance d'un enroulement du stator est r = 0,2 Ω. La fréquence de rotation est de 250 tr/min et la fréquence du courant est de 50 Hz. L'ensemble des pertes dites constantes et par effet Joule dans le rotor est de 30 130 W. Lors d'un essai à vide, on relève le tableau de mesures suivant :

E_v(V)	0	510	1020	1530	2040	2550	3060	3570	4080	4590
i(A)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90

E_v est la valeur efficace de la f.é.m. par phase, i est l'intensité du courant d'excitation.
Un essai en court-circuit a donné : I_{cc} = 2000 A pour i = 40 A
1) Quel est le nombre de pôles du rotor ?

2) Calculer la réactance synchrone d'un enroulement du stator (elle sera supposée constante dans le reste du problème).
3) Le flux maximal sous un pôle étant de 19,9 mWb, le nombre de conducteurs actifs par phase étant de 1620, et i = 60 A, calculer le coefficient de KAPP.
4) En utilisant le diagramme de Behn-Eschenburg, trouver la tension entre deux phases qui est appliquée au récepteur pour i = 60 A.
5) Calculer la puissance utile de l'alternateur, la puissance réactive ainsi que la puissance apparente.
6) Calculer les pertes et en déduire le rendement.

---

17) Soit une machine synchrone triphasée à 4 pôles, supposée parfaitement linéaire (on considère que le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé). La résistance interne sur une phase est négligeable. Essai à vide :
N = 1500 tr/min i = 50 A E_v = 3000 V (tension composée)
Essai en court-circuit : i_{cc} = 25 A I_{cc} = 1000 A. La machine est couplée sur un réseau 3000 V (entre deux phases)
1) Déterminer la réactance synchrone X d'une branche étoile équivalente.
2) Déterminer le courant d'excitation à prévoir pour qu'elle débite 1200 A sous un $\cos\varphi$ = 0,8 :
a) avec une charge inductive.
b)avec une charge capacitive.

---

18) Un alternateur synchrone monophasé est branché sur une charge d'impédance complexe **Z** = R + **j**S. On désigne par z = r + jlω son impédance interne, et par E_v sa fem. à vide. On note V la tension aux bornes de la charge, et **I** le courant circulant dans la charge.
1) Montrer que la caractéristique externe de l'alternateur V = f(I) est elliptique, paramétrée par le déphasage ϕ entre **I** et V.
2. On donne : Z = 2,08 + j1,2 et z = 0,3 + j2,5. Calculer la f.é.m. E_v de l'alternateur de sorte que V = 120 V.

19) Un alternateur triphasé dont les enroulements du stator sont couplés en étoile fournit, en charge nominale, un courant d'intensité **I** = 200 A sous une tension efficace entre phases U = 5000 V lorsque la charge est inductive (cos φ = 0,87). La résistance d'un enroulement du stator est r = 0,02 Ω . La fréquence du courant est 50 Hz, la fréquence de rotation 250 tr/min. L'ensemble des pertes dites "constantes" et par effet Joule dans le rotor est 220 kW.

i (A)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
E_V (V)	0	1050	21	3150	4200	5200	5950	6550	7000	7300	7500

Ev est la valeur efficace de la f.é.m. entre phases et i est l'intensité du courant d'excitation.
Un essai à vide en court-circuit a donné, pour un courant d'excitation d'intensité i = 40 A, un courant dans les enroulements du stator d'intensité **I** = 2500 A.

1) Quel est le nombre de pôles du rotor ?
2) Calculer la réactance synchrone d'un enroulement du stator (elle sera supposée constante dans le reste du problème).
3) Le flux maximum sous un pôle étant de 0,025 Wb, le coefficient de Kapp valant 2,08 et le nombre de conducteurs actifs par phase 1620, calculer la f.é.m. entre phases.
4) En utilisant le diagramme de Behn-Eschenburg, retrouver cette f.é.m. entre phases. Quelle est alors l'intensité du courant d'excitation ?
5) Calculer la puissance nominale de l'alternateur et le rendement.

20) Un alternateur monophasé tétrapolaire comporte 100 conducteurs. Le flux par pôle vaut 25mWb et la fréquence est de 50Hz. On mesure aux bornes de l'induit une tension de valeur efficace E = 267 V.

1) Déterminer le coefficient de Kapp de l'enroulement.
2) Déterminer la vitesse de rotation du stator de l'alternateur.

21) Un alternateur triphasé 50Hz, tourne à la vitesse de 750 tours par minutes. Son stator comporte 120 encoches régulièrement réparties, chacune d'elles contient 4 conducteurs. Toutes les encoches sont utilisées, les trois enroulements sont couplés en étoile et leur résistance est négligée. Le coefficient de Kapp est de 2,14. On donne le flux par pôle en fonction de l'excitation.

i(A)	8	10	11.8	15.4	17	20	26	34
φ(mWb)	50	61	70	85	90	97	105	108

L'alternateur débite 150A purement inductifs sous la tension de 962V entre fils de ligne avec une excitation de 15,4A.

1) Quel est le nombre de pôles de l'alternateur?
2) Quelle est la tension minimale à vide pour i=15,4A.
3) Calculer la réactance synchrone par enroulement pour cette excitation.

22) Un alternateur dont le stator est monté en étoile tourne à la vitesse de 1500 tours par minute. La fréquence est de 50Hz. La résistance d'une phase est R=0,8. On a relevé la caractéristique à vide et par phase :

i(A)	0	0.25	0.4	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	3
E(V)	10	86	131	156	192	213	226	240	252	262	305

Un essai en court circuit a donné i = 0,5A et I_{cc}= 48A.
1) Calculer la réactance synchrone d'induit $L\omega$.
2) L'alternateur débite dans un récepteur inductif dont le facteur de puissance est 0,8, un courant de 30A en ligne sous une tension de 380V entre phases. Quelle est l'intensité du courant d'excitation?
3) Donner la valeur de la tension simple à la sortie de l'alternateur dans le fonctionnement suivant :
I = 17,65A cos φ = 0,6 (avant) i = 1A.
4) On monte une charge résistive triangle à la sortie de l'alternateur. On ne modifie pas le courant excitation. Déterminer la valeur R_m d'une des trois résistances pour que la puissance active fournie par l'alternateur soit maximale.

23) Etude d'une machine synchrone triphasée tétrapolaire couplage étoile, de fréquence nominale 50Hz.

Essai à vide réalisé à 1500 tr/mn :

Ev par Phase	540 V	1040 V	1440 V	1730 V	1900 V	2030 V	2120 V	2200 V
Ie	2 A	4 A	6 A	8 A	10 A	12 A	14 A	16 A

Essai en court circuit réalisé à 1500 tr/mn : pour Icc = 225 A, on relève Ie = 6 A.
1) Montrer que la caractéristique en court circuit est une droite indépendante de la vitesse.
2) Dans l'hypothèse de B.E, calculer $L\omega$ en fonction de Ie et tracer cette courbe, qu'en concluez vous sur la validité de cette hypothèse ?
3) On associe l'alternateur à une charge triphasée équilibrée purement inductive (cos φ = 0), on relève I = 150 A, V = 1800 V et Ie = 15 A, en déduire $L\omega$, cette valeur sera conservée par la suite.
4) Cet alternateur est couplé sur un réseau triphasé 3300 V, 50 Hz et fournit 860 Kw à cos φ = 1, $L\omega$ =2,4 Ω pour une phase, la résistance entre bornes est de 0,4 Ω, calculer I et Ie. On pourra négliger la résistance devant $L\omega$ en le justifiant.
5) On conserve la même puissance active transférée, quelle est la valeur de Ie pour un cos φ de 0,8 AV.
6) Rendement : on entraîne l'alternateur non excité à une vitesse de 1500 tr/mn en fournissant 1800 w; puis on le lance à 1600 tr/mn et on l'abandonne à lui-même, il ralentit et passe à 1500 tr/mn avec une accélération angulaire de - 0,191 rad/s 2 , en déduire J ; on recommence en l'excitant avec la valeur de Ie calculée à la question 4) lancement à 1600 tr/mn, puis on l'abandonne, il passe alors à la vitesse de 1500 tr/mn avec une accélération de-1,27 rad/s 2 , en déduire les pertes fer.
Ie étant fournie par une source extérieure, calculer le couple mécanique de l'entraînement dans les conditions de la question 4).
7) On couple cette machine synchrone sur le réseau 3300 V, 50 Hz en fonctionnement moteur, le couple utile est de 3000 Nm, le couple de pertes fer et mécaniques étant de 76,2 Nm, r étant négligée.
7.1) Calculer la puissance électromagnétique.
7.2) Calculer Ie qui rend I minimale.
8) La machine synchrone étant couplée sur le même réseau, en fonctionnement moteur à puissance constante (différente de la valeur précédente) :
8.1) I = 150 A, cos φ = 0,8 AV, calculer Ie.
8.2) I = 150 A, cos φ =0,8 AR, calculer Ie.
8.3) Calculer Ie qui provoque le décrochage.

9) Même réseau, même fonction, même couple de pertes fer et mécaniques, même couple utile qu'à la question 7) et cos φ = 1, U passe à 3630 V et f à 55 Hz, calculer Ω, P, Ev, I, Ie ?

24) Une machine synchrone tétrapolaire s =10 kVA, 127/220 V, 50 hZ, est couplée sur un réseau triphasé 220 V, 50
hZ. Sa caractéristique à vide Ev = f(Ie) relevée entre phases à la vitesse de synchronisme :

Ie	3.5	5	8.5	10	15	20
Ev	113	150	220	242	296	330

Un essai en court circuit donne Icc = 20 A pour Ie = 5.8 A. Les pertes sont considérées comme négligeables.

Fonctionnement en alternateur :
1. Quel est le couplage du stator ?
2. Quel est le courant nominal d'induit de cette machine ?
3. Quelle est sa fréquence de synchronisme et sa vitesse nominale ?
4. Calculer sa réactance synchrone cyclique par phase pour Ie = 15 A ? On conservera cette valeur pour la suite
du problème.
5. La machine étant à vide, quelle est la valeur de Ie_o pour un courant d'induit de 0A.
6. La machine étant à vide (P = 0), calculer I pour Ie = 5 A et pour Ie = 20 A, calculer pour chaque cas la valeur de Q échangée avec le réseau et son signe.
7. L'alternateur fournissant P = 5 kW au réseau, déterminer I, φ , θ , T et Q pour trois valeurs de Ie = 3.5 A, 9.3 A, 20 A . Préciser les valeurs de I et de Ie pour θ =/2.

Fonctionnement en moteur synchrone :
On adopte une réactance synchrone par phase de 3.3 ..
1. On exerce sur l'arbre un couple résistant de 31.83 mN, calculer I, φ , θ , T et Q pour trois valeurs de Ie = 3.5 A, 9.3 A, 20 A. Préciser la valeur de Ie qui provoque le décrochage de la machine.
2. Fonctionnement en compensateur synchrone : le moteur à vide est couplé sur le réseau EDF avec Ie = 20 A, calculer la puissance réactive qu'il fournit ?
Il est destiné à relever le cos φ d'une installation comprenant un four de 3 kW et un moteur asynchrone triphasé fournissant une puissance de 6 kW, de rendement 0.818, de cos φ = 0.707, calculer le cos φ global de l'installation ainsi que le courant en ligne que doit fournir l'EDF. Calculer la batterie de condensateurs (donner la valeur du condensateur d'une phase dans le cas d'un couplage étoile et triangle) que remplace ce moteur synchrone.
3. Ce moteur synchrone est couplé sur un réseau triphasé 110 V/ 25 hZ , il fournit un couple moteur de 31.83 mN, calculer I, cos φ , P et la vitesse pour un courant Ie de 20 A.

25)

1reQUESTION

Le rotor d'un alternateur triphasé, 50 Hz, tourne à la vitesse de 750 tr/min ; son stator comporte 120 encoches régulièrement réparties, chacune d'elles contient 4 conducteurs. Toutes les encoches sont utilisées, les 3 phases sont couplées en étoile et leur résistance est négligée dans le problème. Le coefficient de Kapp est 2,14. On donne le flux par pôle en fonction de l'excitation :

Ie(A)	8	10	11,8	15,4	17	20	26	34
Φ(Wb)	0,050	0,061	0,070	0,085	0,090	0,097	0,105	0,108

1. L'alternateur débite 150 A purement inductifs sous la tension de 962 V entre fils de ligne avec une excitation de 15,4 A.

1.1. Quel est le nombre de pôles de l'alternateur ?

1.2. Quelle est la tension nominale à vide pour ie = 15,4 A ?

1.3. Calculer la réactance synchrone par enroulement pour cette excitation, représenter le diagramme de Behn-Eschenburg.

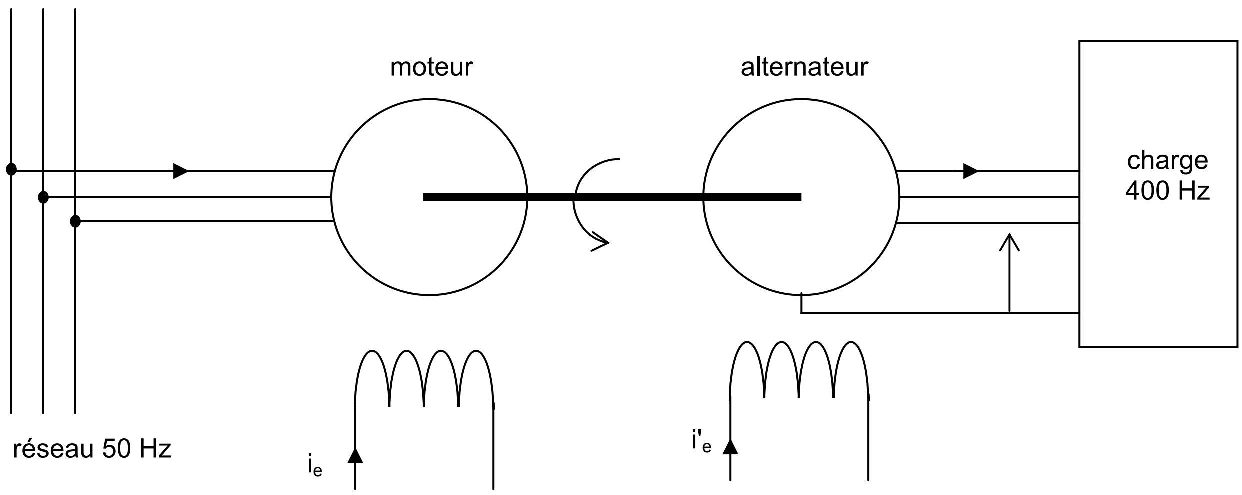
1.4. L'alternateur débite 80 A avec un facteur de puissance cos φ = 0,8 AV (I en avance sur U). Déterminer graphiquement par le diagramme de Behn-Eschenburg la tension simple en sortie de l'alternateur sachant que le courant d'excitation reste égale à ie = 15,4 A. Calculer alors la puissance utile fournie à la charge. Prendre pour échelle : 1cm = 100 V.

1.5. Mêmes question que 2.1. avec cos φ = 0,8 AR (I en retard sur U), même échelle.

1.6. On souhaite obtenir une tension simple de 1270 V en sortie de l'alternateur en débitant 80 A avec un cos φ = 0,8 AR. Déterminer graphiquement la f.é.m. à vide nécessaire, même échelle qu'en 2.1. .

2^{e}QUESTION

On étudie un groupe convertisseur tournant 50 Hz - 400 Hz. Un alternateur 400 Hz est entraîné par un moteur synchrone 50 Hz alimenté par un réseau triphasé 380 V entre phase. Les notations sont indiquées sur la figure ci-dessous :



Les deux machines sont montées en étoile et elles ont pour caractéristiques par phase :

- moteur : f.é.m. E (ie); réactance synchrone : X = 2 Ω
- alternateur : f.é.m. E' (i'e); réactance synchrone : X' = 0,75 Ω

On néglige les pertes des deux machines ainsi que les résistances des phases.
La charge triphasée 400 Hz absorbe I'= 30 A avec un cosφ = 0,6 AR sous une tension V' = 115 V.

2.1. Le moteur comporte une paire de pôles par phase (p = 1). Quelle est la vitesse de rotation du groupe ? Quel doit être le nombre de pôles de l'alternateur ?

2.2. Quelle doit être la valeur de la f.é.m. E' pour que la charge soit alimentée sous V' = 115 V ? Quelle puissance et quel couple sont fournis par le moteur d'entraînement ?

2.3. La f.é.m. du moteur est réglée pour que son facteur de puissance soit égal à 1 lorsque la charge 400 Hz est alimentée.

2.3.1. Quelle est la valeur du courant absorbé ? Quelle est la valeur de E ?

2.3.2. On débranche la charge (I' = 0) sans modifier E. Quel courant est absorbé par le moteur et quel est, en grandeur et en signe, son déphasage par rapport à V ?

2.4. Pourquoi a-t-on choisi un moteur synchrone pour entraîner le groupe convertisseur ?

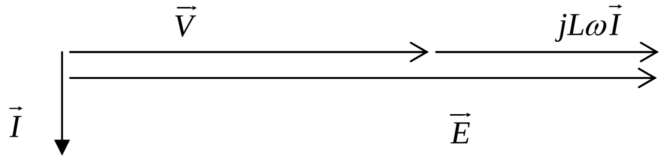
Solution :

1[re]QUESTION

1.1. $N_S = N_R = \dfrac{f}{p} \Rightarrow p = \dfrac{f}{N_S} = \dfrac{50}{(750/60)} = 4$; il y a donc 8 pôles.

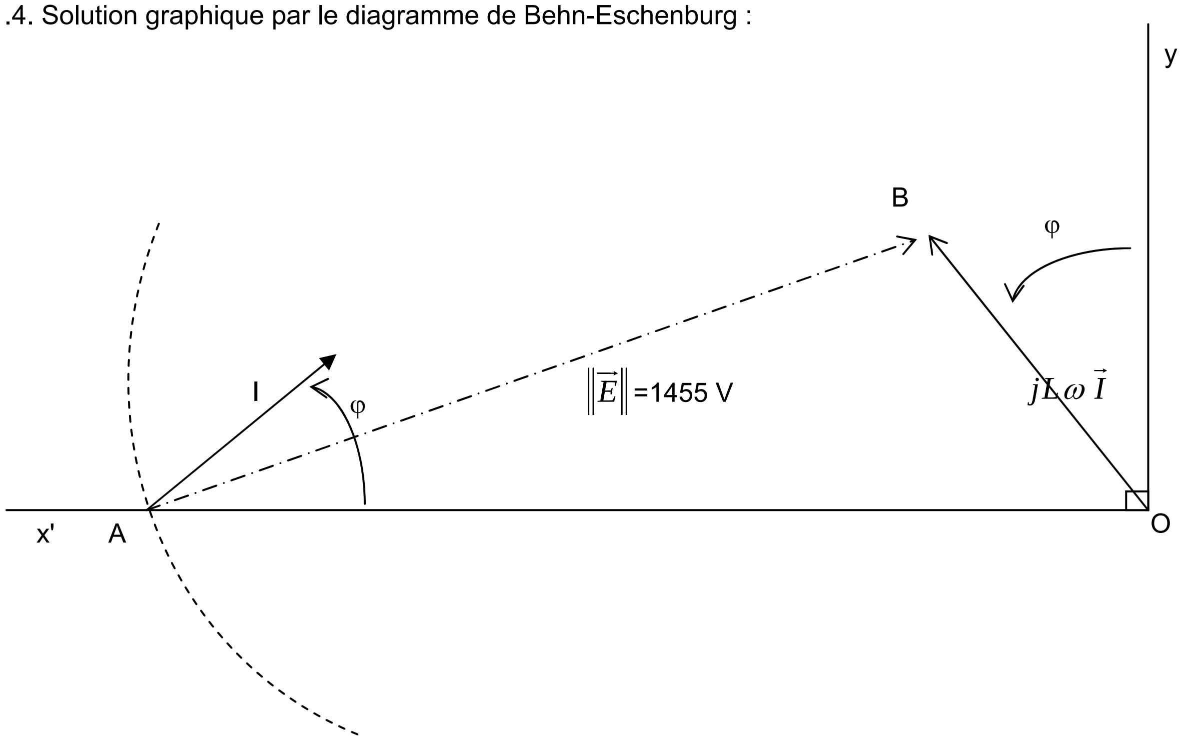
1.2. $E = Kapp \times \widehat{\Phi} \times N \times f = 2{,}14 \times 0{,}085 \times \dfrac{120 \times 4}{3} \times 50 = 1455 \text{ V}$

1.3.



$$E = V + L\omega I \Rightarrow L\omega = \frac{E - V}{I} = \frac{1455 - 962/\sqrt{3}}{150} = 6\ \Omega$$

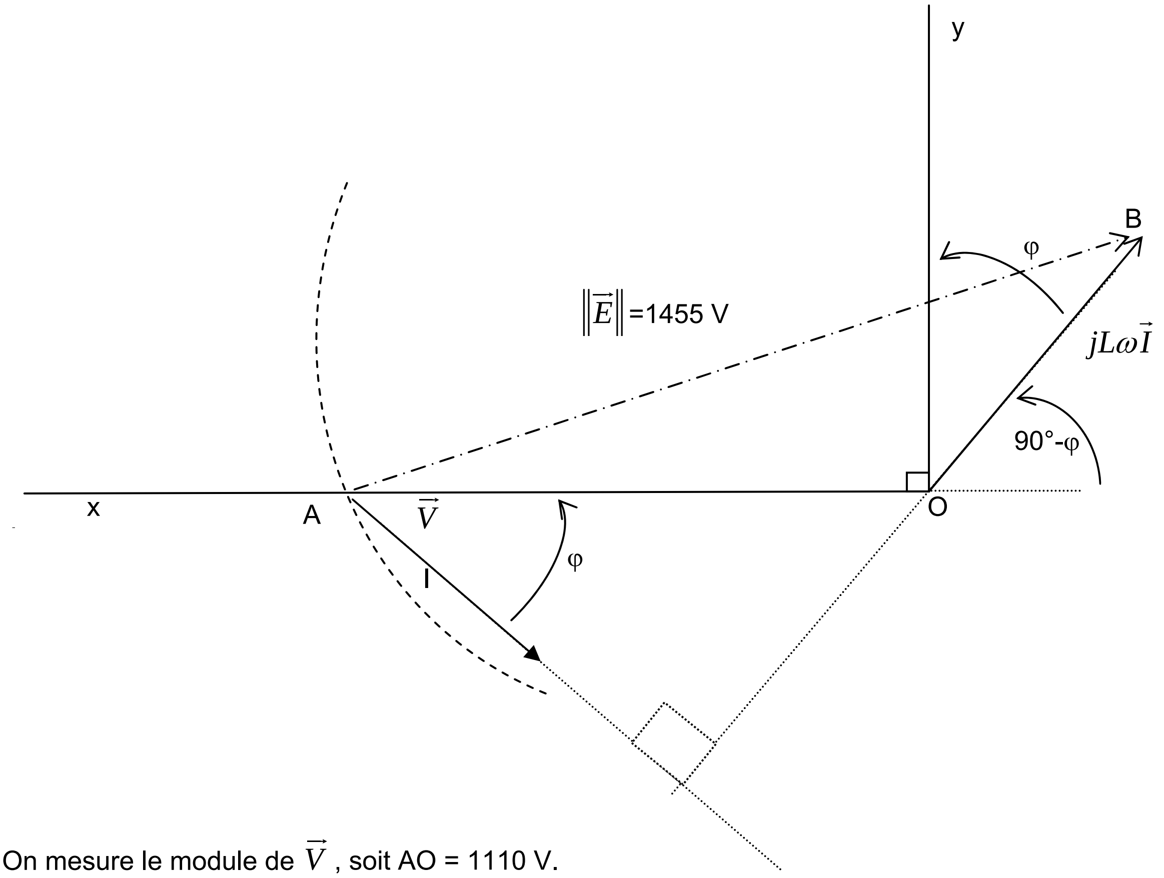
1.4. Solution graphique par le diagramme de Behn-Eschenburg :



On part de O, on trace OB = $jL\omega\vec{I}$ (module de $jL\omega\vec{I}$ = 6x80 = 480 V, placé à $\arccos 0{,}8 = 36{,}86°$ de Oy); puis de B, on trace un cercle de centre B et de rayon E = 1455 V. L'intersection du cercle avec Ox', support de $\vec{V}$, donne l'origine du vecteur $\vec{V}$: le point A, son extrémité est en B. La mesure du segment AO donne le module de $\vec{V}$: 1690 V.
La solution par le calcul fait appel à la formule des triangles quelconques. On obtient l'équation suivante : $E^2 = V^2 + (L\omega I)^2 - 2V(L\omega I)\cos(90° - \arccos 0{,}8) \Rightarrow V = 1691{,}4 \text{ V}$.

Puissance fournie à la charge : $P = \sqrt{3} \times \left(\sqrt{3} \times 1690\right) \times 80 \times 0{,}8 = 324{,}5 \text{ kW}$

1.5. Solution graphique par le diagramme de Behn-Eschenburg :
On procède comme ci-dessus :

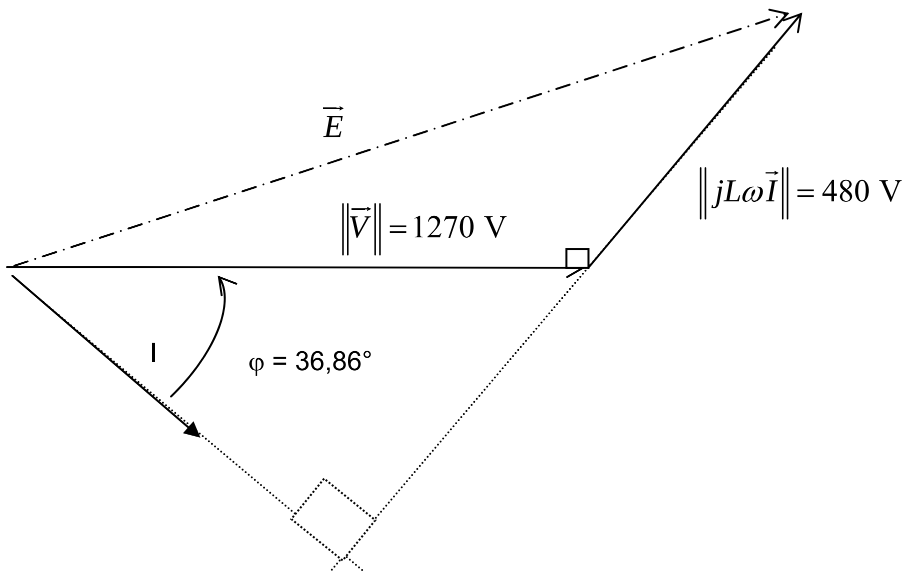


On mesure le module de $\vec{V}$, soit AO = 1110 V.
La formule des triangles quelconques donne l'équation :

$$E^2 = V^2 + (L\omega I)^2 - 2V(L\omega I)\cos(180° - \arccos 0,8) \Rightarrow V = 1115,4\text{ V}$$

$$P = \sqrt{3} \times \left(\sqrt{3} \times 1115,4\right) \times 80 \times 0,8 \simeq 214\text{ kW}.$$

1.6.



On place le vecteur $\vec{V}$ horizontalement (12,7 cm), puis le vecteur $jL\omega\vec{I}$ dont le module est 480 V. Le vecteur $\vec{E}$ se trouve entre l'origine de $\vec{V}$ et l'extrémité de $jL\omega\vec{I}$.
On mesure1600 V.

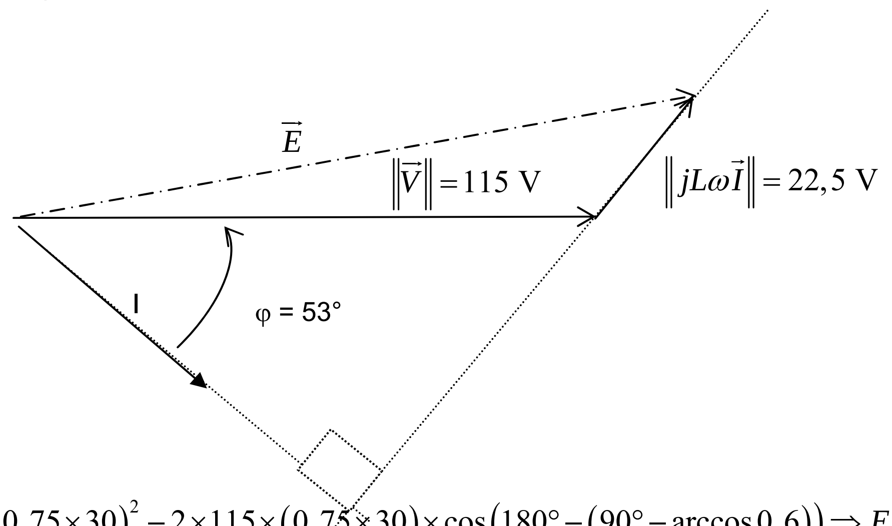
Le calcul donne :

$$E^2 = (1270)^2 + (6\times 80)^2 - 2\times 1270\times (6\times 80)\times \cos(90° - \arccos 0,8) \Rightarrow E = 1604 \text{ V}.$$

2eQUESTION

2.1. Le moteur (p = 1) tourne à $N = \dfrac{f}{p} = 50 \text{ tr/s=3000 tr/min}$. L'alternateur produit du 400 Hz en tournant à 50 tr/s. Pour cela, il faut qu'il possède $p = \dfrac{f}{N} = \dfrac{400}{50} = 8$ paires de pôles. L'alternateur possède donc 16 pôles.

2.2.



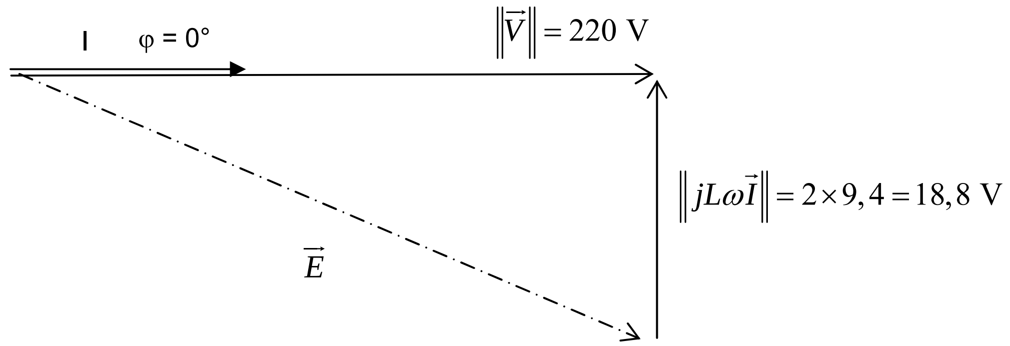
$$E^2 = 115^2 + (0,75\times 30)^2 - 2\times 115\times (0,75\times 30)\times \cos(180° - (90° - \arccos 0,6)) \Rightarrow E \simeq 133,7 \text{ V}$$

$$P = 3V'I'\cos\varphi = 6210 \text{ W}$$

$$P = C\times\Omega \Rightarrow C = \frac{6210}{2\pi\times 50} \simeq 19,8 \text{ N.m}$$

2.3.1. $\cos\varphi = 1 \Rightarrow P = 3VI \Rightarrow I = \frac{P}{3V} = \frac{6210}{3\times 220} \simeq 9,4\ \text{A}$.

Diagramme de Behn-Eschenburg du moteur :

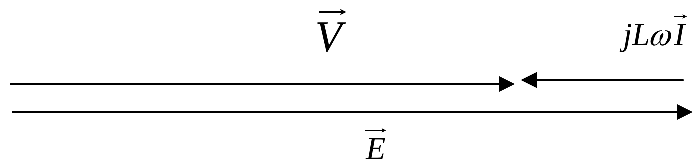


$E^2 = 220^2 + \left(2\times 9,44\right)^2 \Rightarrow E = 220,8\ \text{V}$

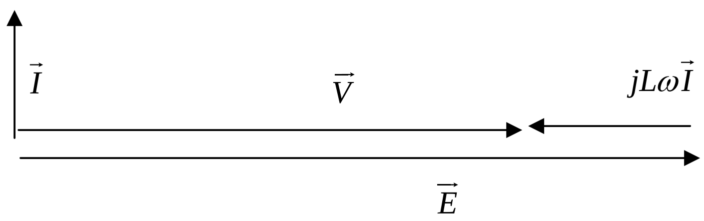
2.3.2. I' = 0 et E = 220,8 V

$P = 3VI\cos\varphi = 0 \Rightarrow \cos\varphi = 0 \Rightarrow \varphi = \pm 90°$, I ne peut pas être nul car $jL\omega\vec{I} = \vec{E} - \vec{V} \neq 0$

Représentons le diagramme de Behn-Eschenburg :



Le sens de $jL\omega\vec{I}$ implique que $\vec{I}$ est un vecteur vertical dans le sens "du bas vers le haut".



$L\omega I = E - V = 220,8 - 220 = 0,8 \Rightarrow I = \frac{0,8}{2} = 0,4\ \text{A}$ (fonctionnement en compensateur synchrone).

2.4. Le moteur synchrone possède une vitesse de rotation rigoureusement constante et indépendante de la charge.

Machines asynchrones :

1) Sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé à cage, on lit les indications suivantes : 220/380 V; 50 Hz; 70/40 A; $\cos\Phi$ = 0,86; N = 725 tr/min.
Sachant que la résistance d'un enroulement du stator est de 0,15 Ω, que les pertes fer sont de 500 W et que la tension du réseau est de 380 V entre phases, déterminer :
- le mode d'association des enroulements du stator;
- la vitesse de synchronisme et le nombre de paires de pôles par phase;
- les pertes par effet Joule dans le stator;
- le glissement;
- les pertes par effet Joule dans le rotor;
- le rendement du moteur.

On néglige les pertes mécaniques.

2) Un moteur asynchrone triphasé tétrapolaire est alimenté par un réseau 380 V-50 Hz. La résistance du stator mesurée entre deux fils de phase est de 0,9 Ω.
En fonctionnement à vide, le moteur absorbe un courant de 9,1 A et une puissance de 420 W.
2.1) Déterminer les pertes fer du stator et les pertes mécaniques en les supposant égales.
En charge nominale, la puissance utile sur l'arbre du rotor est de 4 kW, le facteur de puissance de 0,85 et le rendement de 0,87.
2.2) Déterminer :
- l'intensité du courant absorbé;
- les pertes Joule au stator;
- les pertes Joule au rotor;
- le glissement et la vitesse du rotor exprimée en nombre de tours par minute;
- le couple utile.

3) Un moteur asynchrone tétrapolaire, stator monté en triangle, fonctionne dans les conditions suivantes : tension entre phases = U = 380 V; fréquence = f = 60 Hz; puissance utile = 5 kW; vitesse de rotation = n = 1710 tr/min.; $\cos\varphi$ = 0,9; intensité en ligne = **I** = 10 A.
La résistance, mesurée pour ce régime de marche, entre deux bornes du stator est R = 0,8 Ω.
On admettra, pour ce fonctionnement, que les pertes dans le fer sont égales aux pertes par effet Joule dans le stator. Pour ce régime de marche, calculer :
1. le glissement;
2. le couple utile;
3. l'intensité du courant dans chaque phase du stator;
4. les pertes du stator;
5. la puissance absorbée par le moteur;
6. les pertes Joule du rotor;
7. l'ensemble des autres pertes du rotor;
8. le rendement global du moteur.

4) (C1NM2 1993) A l'aide d'un schéma, présenter le bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone.
Un moteur asynchrone triphasé, à rotor en court-circuit, possède des enroulements statoriques hexapolaires branchés en étoile. Sa plaque signalétique porte les indications suivantes:
- tension d'alimentation : 440 V, 60 Hz;
- puissance utile : 3,7 kW;
- vitesse : 1140 tr/min;
- $\cos\varphi$: 0,8.

A la charge nominale le moteur absorbe un courant en ligne d'intensité 6,9 A. La résistance, mesurée à chaud, entre deux bornes du stator est de 0,9 Ω. Au démarrage, le moteur développe un couple utile de 85 N.m.

On considérera la caractéristique mécanique T = f(n) comme une droite dans sa partie utile et on négligera les pertes fer rotor ainsi que les pertes mécaniques et par ventilation (le couple utile sera donc égal au couple électromagnétique).
Déterminer pour le moteur :
• la vitesse de synchronisme, le glissement, la puissance absorbée au régime nominal et le couple utile nominal développé;
• les pertes fer au stator et les pertes Joule au rotor;
• entre quelles valeurs varie le couple utile au démarrage lorsque la tension d'alimentation varie de $\pm$ 5 V;
• la vitesse de rotation lorsque, le couple résistant restant constant et égal au couple nominal, la tension d'alimentation chute de 5 V.

5) **Diagramme du cercle** :
Un moteur asynchrone triphasé possède les caractéristiques suivantes :
500 V; 70 kW; 50 Hz; 8 pôles; marche continue.
Essai à vide : 500 V; 29 A; 2100 W.
Essai en court-circuit : 160 V; 115 A; 7500 W.
La température du stator en service normal est 90°C, la résistance entre deux bornes du stator est 0,166 Ω à cette température.
5.1. Quel est le courant absorbé quand la puissance utile est 70 kW ?
5.2. Quel est alors le facteur de puissance ?
5.3. Quel est alors le couple utile, le glissement, le rendement ?

6) Un moteur asynchrone triphasé 220/380 V à 4 pôles est alimenté sous la tension U = 220 V du réseau 50 Hz. On néglige les pertes fer ainsi que les résistances et inductances de fuite du stator.
Au régime nominal, à 1462,5 tr/min, le moteur absorbe une puissance mesurée par la méthode des deux wattmètres : P_1 = + 9,5 kW, P_2 = + 3,7 kW.
6.1. Quel est le type de couplage adopté ?
6.2. Quelle est l'intensité du courant nominal dans une phase statorique ?
6.3. Déterminer, pour ce fonctionnement, le $\cos\varphi$ du moteur.
6.4. Quelle est la puissance dissipée par effet Joule dans le rotor ?
6.5. Que vaut le couple électromagnétique C_e ?

7) La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé porte les indications suivantes :
• puissance mécanique utile nominale : 11 kW;
• vitesse nominale : N_n = 2850 tr/min;
• tension nominale entre phases : U = 380 V; 50 Hz;
• courant de ligne nominal : I_n = 21,44 A;
• rendement pour le fonctionnement nominal : η_n = 0,90;
• stator en étoile;
• rotor bobiné en étoile, résistance d'une phase : r = 0,05 Ω.
Les pertes mécaniques ainsi que les pertes joule du stator sont négligées. On admet que le courant absorbé est donné, en fonction du glissement g , de la tension entre phase et neutre V, du courant à vide I_v par la relation : $\underline{I} = \underline{I_v} + k \cdot \frac{g}{r} \cdot \underline{V}$ (1) , k étant un facteur constant.

7.1. Déterminer pour le régime nominal défini ci-dessus : (rotor en court-circuit) :

- la puissance absorbée P_{an};
- le facteur de puissance $\cos\varphi_n$ ainsi que le déphasage φ_n;
- la puissance réactive absorbée Q_{an};
- le couple électromagnétique C_{en};
- le glissement g_n;
- les pertes Joule dans le rotor
- le courant dans une phase du rotor.

7.2. Calculer les pertes fer du stator ainsi que la composante du courant absorbé correspondante : I_f.
Calculer le courant magnétisant : I_0.
En déduire le courant absorbé à vide ainsi que le facteur de puissance du moteur à vide : $\cos\varphi_v$.
7.3. Le moteur entraîne une charge dont le couple résistant est donné par la relation :
C_r = 12 + 0,24.N ; avec N en tr/s et C_r en N.m.
7.3.1. Le rotor est en court-circuit, déterminer la vitesse de rotation du moteur ainsi que le courant de ligne absorbé. Que vaut le rendement ?
7.3.2. Le rotor est refermé sur un rhéostat triphasé en étoile dont chaque branche présente une résistance égale à 0,05 Ω. Que devienne la vitesse, le courant, ainsi que le rendement ?
7.4. Au démarrage, le moteur absorbe un courant de ligne I_d = 110 A et présente un facteur de puissance $\cos\varphi_d$ = 0,3. La relation (1) n'est plus vérifiée mais les puissances restent proportionnelles aux composantes de courant en phase avec lé tension.
7.4.1. Calculer le couple au démarrage C_d.
7.4.2. Chaque phase du stator du moteur est équivalente à une impédance $\underline{Z_d}$. Déterminer cette impédance (module; résistance R_d; réactance X_d).
7.4.3. Afin de réduire le courant de ligne à 55 A au démarrage, on insère en série sur chaque fil de ligne une résistance R. Déterminer cette résistance. Quel est la nouvelle valeur du couple au démarrage ?

Solution : 7.1. P_{an} = 12,22 kW; $\cos\varphi_n$ = 0,848; Q_{an} = 7,13 kVAR; g_n = 0,05;
C_{en} = 36,87 N.m; $P_{J\,rot}$ = 579 W; $I_{phase\,rot}$ = 62,13 A.
7.2. $P_{f\ stat}$ = 643 W; I_f = 0,97 A; I_0 = 10,8 A; $\cos\varphi_v$ = 0,0895.
7.3. N = 2904 tr/min; I = 16,32 A; η = 89,1%.
7.4. C_d = 67,3 N.m; R_d = 0,6 Ω; $X_d = 1{,}91\,\Omega$; $Z_d = 2\,\Omega$; R = 2,91 Ω; $C_e = 16{,}8$ N.m.

8) Un monte-charge est entraîné par un moteur asynchrone triphasé, 8 pôles à rotor bobiné. L'alimentation est assurée par le réseau 220/380 V, 50 Hz. On a mené les essais suivants (stator couplé en triangle) : couple de démarrage : $C_d = 100$ N.m; couple pour un glissement g = 3% : 40 N.m; résistance d'une phase rotorique à chaud : R = 0,15 Ω.
On admettra, par ailleurs, que les pertes fer et mécaniques sont négligeables. Dans tous les cas, le moteur travaille dans la région linéaire de la caractéristique de couple C = f(g). Le stator reste couplé en triangle sauf indication contraire.

8.1. Fonctionnement en montée :

Le monte-charge, de charge nominale m = 400 kg, est entraîné par un câble dévidé par un tambour de 1 m de diamètre. Le moteur attaque le tambour par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse de rapport 1/40. On prendra pour valeur de g : g = 9,81 m/s^2.

8.1.1. Démarrage par insertion de résistances dans le rotor :
Calculer la résistance à insérer, par phase rotorique, pour obtenir le démarrage du moteur avec un couple égal à 1,5 C_n (C_n étant le couple résistant nominal du monte-charge ramené sur l'arbre moteur).

8.1.2. Le démarrage précédent reste-t-il possible pour une chute de tension de 10% due à l'appel de courant ?

8.1.3. Pouvait-on adopter un démarrage direct sur le réseau (sans résistances rotoriques) ? Un démarrage étoile-triangle ?
8.1.4. Les résistances rotoriques étant éliminées, calculer la vitesse d'ascension du monte-charge à charge nominale.

8.1.5. Les résistances sont restées en service. Quelle est alors la vitesse d'ascension ? Calculer les pertes Joule dissipées dans le circuit rotorique. En déduire la puissance totale dissipée dans les résistances de démarrage.

8.2. Fonctionnement en descente :

Le monte-charge étant au point-haut, à l'arrêt, on envisage deux procédés de freinage en descente :
8.2.1. On inverse deux phases au stator. Le moteur est alors entraîné par la charge dans le sens du champ tournant et fonctionne en génératrice asynchrone (freinage hypersynchrone). Calculer la vitesse de descente de la charge (charge nominale).
8.2.2. Calculer dans ces conditions la puissance fournie au réseau.
8.2.3. Quelle serait la vitesse de descente si les résistances de démarrage étaient en service ? Conclusion ?
8.2.4. On désire à présent obtenir un freinage dit « à contre courant », le moteur est alors entraîné par la charge dans le sens inverse du champ tournant et oppose un couple résistant (freinage hyposynchrone).
Calculer la valeur de la résistance à inserrer dans chaque phase du rotor pour obtenir une vitesse de descente correspondant à 200 tr/min sur l'arbre moteur.
Quelle est la puissance dissipée dans l'ensemble des trois résistances additionnelles ?

Solution :

1. R = 2.55 Ω; C = 59,1 N.m $\rangle$ $C_{\text{résistant}} = 49$ N.m; couple obtenu pour un démarrage étoile-triangle = 33,3 N.m $\langle$ 49 N.m $\Rightarrow$ impossible; v = 0,945 m/s; P_{Jrot} = 2570 W;

1.1. Couple à fournir au démarrage : $\dfrac{1{,}5 \times m \times g \times \dfrac{d}{2}}{40} = 73{,}5\ \text{N.m}$

(voir polycop page 109) $C_e = K.V^2.\dfrac{g}{R_{2totale}} = K.V^2.\dfrac{g'}{R_2}$

Le point de fonctionnement g = 0,03, C_e = 40 N.m, R_2 = 0,15 Ω, V = 220 V fournit la constante K :

$K = \frac{C_e \times R_2}{g \times V^2} = 0{,}0041\,SI$, donc :

$$C_e = K.V^2.\frac{g}{R_{2\,totale}} \Rightarrow R_{2\,totale} = K.V^2.\frac{g}{C_e} = 0{,}0041 \times 220^2 \times \frac{1}{73{,}5} = 2{,}72\ \Omega$$

$R_{2\,totale}$ = 0,15 + $R_{insérée}$ $\Rightarrow R_{insérée} = 2{,}72 - 0{,}15 = 2{,}55\ \Omega$

$$C_e = KV^2 \frac{1}{\frac{g_0}{g} + \frac{g}{g_0}} \Rightarrow 40 = 0.0041 \times 220^2 \times \frac{1}{\frac{g_0}{0.03} + \frac{0.03}{g_0}} \Rightarrow g_0 = 0{,}142$$

$$g_0 = \frac{R_2}{\omega l_s} \Rightarrow \omega l_s = \frac{R_2}{g_0} = \frac{0{,}15}{0{,}142} = 1{,}056$$

Pour le calcul de g_g, on ne garde que la solution plausible correspondant à un glissement important compris entre 0 et 1.

1.2. V' = 0,9 x V, donc $C'_{e\ dém}$ = $(0{,}9)^2$x $C_{e\ dém}$ =59,5 N.m > $C_{résistant}$ = 49 N.m, donc le démarrage est possible.

1.3. Pour le démarrage direct, l'énoncé donne $C_{e\ dém}$ = 100 N.m, donc c'est possible.
En étoile, le couple serait trois fois plus petit, $C_{e\ dém}$ = 100/3 = 33,33 N.m < 49 N.m; le démarrage serait impossible.

1.4. La vitesse du moteur est déterminée par l'égalité : C_{moteur} = $C_{résistant}$

$$K.V^2.\frac{g}{R_2} = C_{résts\tan t} \Rightarrow g = \frac{C_{résis\tan t}.R_2}{K.V^2} = 0{,}037$$

Or, $g = \frac{N_S - N_R}{N_S} \Rightarrow N_R = N_S.(1-g) = \frac{f}{p} \times 60 \times (1-g) = 722\ \text{tr/min}$

Donc, v = $\frac{722{,}25}{60} \times \frac{1}{40} \times 2 \times \pi \times \frac{d}{2} = 0{,}945\ \text{m/s}$

1.5. Le raisonnement est identique :

$$K.V^2.\frac{g}{R_2 + R_{insérée}} = C_{résts\tan t} \Rightarrow g = \frac{C_{résis\tan t}.(R_2 + R_{insérée})}{K.V^2} = 66\%$$

2.1. Le point de fonctionnement sera le symétrique du point de fonctionnement obtenu à la question 1.4. par rapport au point N = N_S et C = 0.

L'écart de vitesse entre N_S et la nouvelle valeur de la vitesse sera identique, la vitesse de descente en tours par minute sera donc 750 + (750 – 722) = 778 tr/min.

Soit une vitesse linéaire de $v = \frac{778}{60} \times \frac{1}{40} \times 2 \times \pi \times \frac{d}{2} \simeq 1\ \text{m/s}$.

2.2. La puissance mécanique fournie par la charge est $P = M \times g \times v \simeq 3924 \text{ W}$.
Les pertes mécaniques et les pertes fer étant négligeables, il ne reste que les pertes Joule rotoriques :

$$P_e = g \times P_e + P_u \Rightarrow P_e \times (1-g) = P_u \Rightarrow P_e = \frac{P_u}{1-g}.$$

Ici, le glissement est négatif : g = - 0,037 et $P_{réseau} = P_e \simeq 3784 \text{ W}$.

2.3. Si les résistances sont restées en service, le point de fonctionnement en descente est le symétriques du point de fonctionnement en montée dans le 1.5. avec g=0,66, soit N_R = 245,75 tr/min.
Le même raisonnement que ci-dessus donne :
750 + (750 – 245,75) = 1254 tr/min soit une vitesse de descente de 1,64 m/s.
Il vaut donc mieux ne pas insérer de résistances lors d'un freinage hypersynchrone.

2.4. Lors du freinage à contre-courant, la vitesse du champ tournant est inversée. Le glissement correspondant à une vitesse du rotor de 200 tr/min, est :

$$g = \frac{N_S + N_R}{N_S} = \frac{750+200}{750} = 1,26$$

Lorsque la vitesse de descente est stabilisée, le couple résistant opposé par la machine asynchrone et égal au couple moteur de la charge qui entraîne le rotor en rotation, soit 49 N.m .

$$C_e = KV^2 \frac{1}{\frac{g_0}{g} + \frac{g}{g_0}} \Rightarrow 49 = 0.0041 \times 220^2 \times \frac{1}{\frac{g_0}{1,26} + \frac{1,26}{g_0}} \Rightarrow g_0 = 0,332$$

$$g_0 = \frac{R_2}{\omega l_s} \Rightarrow R_2 = \frac{\omega l_s}{g_0} = \frac{1,056}{0,332} = 3,18$$

Pour le calcul de g_g, on ne garde que la solution plausible correspondant à un glissement important compris entre 0 et 1.
La résistance a insérer par phase rotorique est donc $3,18 - 0,15 \simeq 3 \ \Omega$.

9) Un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné et à bagues est alimenté par un réseau triphasé 50 Hz dont la tension entre phases est U = 380 V. Les enroulements du stator et du rotor sont en étoile.
La résistance mesurée à chaud entre deux bornes de phases du stator est R_s = 0,2 Ω , celle mesurée à chaud entre deux bagues du rotor est : R = 0,08 Ω .

A vide, le moteur tourne pratiquement à 1500 tr/min et la méthode des deux wattmètres donne :
P_A = 900W et P_B = - 410 W.

1) Calculer le nombre de pôles du stator, le facteur de puissance et l'intensité en ligne à vide.

2) Les pertes mécaniques sont constantes et égales à 100W. Calculer les pertes dans le fer du stator. Ces pertes seront considérées comme constantes.

3) Lors d'un essai en charge, on obtient:
I = 11 A ; N' = 1440 tr/min ; P_1 = 4500W ; P_2 = 2000 W
Calculer le glissement, le facteur de puissance, le rendement et le moment du couple utile.
Le moteur entraîne une machine dont la caractéristique mécanique est une droite d'équation:
T_r = 20 + (N'/100) (N' s'exprime en tr/min et T_r en Nm).

4) Calculer la fréquence de rotation du groupe et la puissance utile du moteur sachant que sa caractéristique mécanique est une droite en fonctionnement normal.

5) Quelle résistance doit-on mettre en série avec chacun des enroulements du rotor pour que la fréquence du groupe précédent devienne 1410 tr/min.

10) Un moteur asynchrone triphasé, dont le stator est monté en étoile, est alimenté par un réseau 380 V entre phase 50 Hz. Chaque enroulement du stator a une résistance R = 0,4 Ω. Lors d'un essai à vide, le moteur tournant pratiquement à 1500 tr/min, la puissance absorbée est de P_V = 1150 W, le courant par fil de ligne est I_V = 11,2 A.
Un essai avec la charge nominale sous la même tension de 380 V, 50 Hz, a donné les résultats suivants:

- glissement= 4%,
- puissance absorbée : 18,1kW,
- courant en ligne : 32 A.
-

1) Essai à vide :
a) Calculer les pertes par effet Joule dans le stator lors de l'essai à vide. Que peut-on dire des pertes par effet Joule dans le rotor lors de cet essai?
b) En déduire les pertes dans le fer sachant que les pertes mécaniques valent 510 W.

2) Essai en charge :
a) Calculer le facteur de puissance nominal et la fréquence nominale de rotation.
b) Calculer la fréquence des courants rotoriques pour un glissement de 4%. Que peut-on en déduire pour les pertes dans le fer du rotor ?

3) Calculer les pertes par effet Joule dans le stator et dans le rotor en charge nominale.

4) Calculer la puissance utile et le rendement du moteur en charge nominale.

5)·Calculer le moment du couple utile nominale.

11) Un moteur asynchrone tétrapolaire à rotor bobiné dont le stator et le rotor sont couplés en étoile, est alimenté par un réseau triphasé 380 V, 50 Hz.
R_a = 0,2 Ω (résistance entre de phases du stator). R'_a = 0,46 Ω (résistance entre de phases du rotor).
On a relevé:
- à vide : P_{13} = 1 465 W ; P_{23} = - 675 W ; f_{rotor} = 0,2Hz;
- en charge : P_{13} = 15 500 W ; P_{23} = 7 500 W ; f_{rotor} = 2,5 Hz.
On donne: $P_{fer\ stator}$ = 380 W.

1) Calculer le facteur de puissance, le courant absorbé, la vitesse du rotor, le couple utile et le rendement du moteur en charge, après avoir calculé les pertes mécaniques à vide.
Ce moteur entraîne une machine dont le couple résistant (en Nm) est donné en fonction de la vitesse par la relation : $T_R = 4.10^{-05}N'^2$ (vitesse en tr/min).

2) Calculer la vitesse et la puissance utile du moteur, ainsi que le courant dans une phase du rotor. On supposera que le couple moteur est proportionnel au glissement.

3) Calculer la résistance à mettre en série avec chaque phase du rotor pour que le moteur démarre avec le couple maximal égal à 150 Nm.

12) Un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage d'écureuil est alimenté par un réseau triphasé 50 Hz, 220/380 V. Pour le stator et pour le rotor, le couplage des enroulements est fait en étoile. Chaque enroulement du stator a une résistance
$R_s = 0,285\ \Omega$.
On réalise un essai à vide : le moteur tourne pratiquement à la vitesse de synchronisme (N=3000tr/min). La puissance absorbée à vide est P = 3kW et le courant de ligne est I=25A.
1) Calculer le nombre de pôles du stator et le facteur de puissance à vide.

2) On supposera les pertes mécaniques constantes et égales à 1233 W dans la suite du problème. Que peut-on dire des pertes joules au rotor (P_{jr}) ?

3) Calculer les pertes joules stator (P_{js}) et les pertes fer stator (P_{fs}) lors de cet essai à vide.
On réalise un essai en charge, les résultats sont les suivants:

- glissement : 7%,
- puissance absorbée: 24645 W,
- courant en ligne : 45 A.
-

5) Calculer le facteur de puissance, la vitesse de rotation du rotor, la fréquence des courants rotoriques lors de cet essai.

6) Faire un bilan de puissance. Calculer P_{js} et la puissance transmise au rotor P_{tr}. En déduire P_{jr} lors de cet essai en charge.

7) Calculer la puissance utile P_u, le rendement du moteur, le couple utile T_u, le couple électromagnétique T.
Le moteur entraîne une machine dont la caractéristique mécanique est une droite d'équation :
T_r = 2/100 N'+40 (N' en tr/min).

8) Calculer la vitesse du groupe (moteur+ machine d'entraînement) sachant que la caractéristique mécanique du moteur est une droite en fonctionnement normal (donc valable pour l'essai en charge effectué précédemment).

13) Un moteur asynchrone à rotor bobiné et à bagues est alimenté par un réseau triphasé 50Hz, 220V/380V. Le couplage de l'enroulement stator est en triangle, celui du rotor est en étoile. En mesurant à chaud la résistance entre 2 bornes on trouve au stator $R_s = 0,267\ \Omega$ et au rotor $R_r = 0,1\ \Omega$ Un essai à vide a été effectué sur cette machine. Le moteur tourne pratiquement à la vitesse de synchronisme (N = 1500 tr/min).

La méthode des 2 wattmètres indique :
P_1 = 2200 W P_2 = -700 W I (courant de ligne) = 20 A.

Un essai en charge est effectué à l'aide d'une charge triphasé équilibrée. On a les résultats suivants:
N' = 1450 tr/min P_1 = 14481 P_2 = 5519 W I = 38,5 A.

Sachant que les pertes mécaniques sont constantes et égales à 700 W :

1) Calculer les pertes Joule au stator lors de cet essai à vide de 2 façons différentes. En déduire les pertes fer au stator Pfs (que l'on supposera constante dans la suite du problème).

2) Calculer les puissances active et réactive totales absorbées par le moteur. En déduire le facteur de puissance lorsqu'on charge le moteur.
3) Calculer la fréquence des courants rotoriques. Que peut-on dire sur les pertes fer au rotor (P_{fr})?

4) Faire un bilan de puissance et calculer P_{js} et P_{tr}. En déduire les pertes Joule rotor P_{jr}. Calculer la valeur efficace des courants rotoriques de 2 façons différentes.

5) Calculer la puissance utile P_u et le rendement du moteur lors de cet essai.

6) Calculer le couple utile T_u et le couple électromagnétique T.

14) La plaque signalétique d'un moteur asynchrone à bagues porte comme indications : P_u = 37 kW ; 220/380 V ; f = 50 Hz ; N' = 1440 tr/min ; η = 0.91 ; cos φ = 0,85. Essayé sous 380 V, à rotor ouvert (à vide), la tension entre bagues est 240 V. A la température de régime normal, les mesures entre bornes des résistances du stator et du rotor ont donné respectivement : r_1 = 0,1 Ω et r_2 = 0,08 Ω .
1) Quel doit être le montage des enroulements pour fonctionner sur ce réseau ? Expliquer.
2) Quelle est la vitesse de synchronisme et combien de pôles a la machine?
3) Calculer, pour son fonctionnement nominal, le courant statorique, le glissement, le couple utile et la fréquence des courants rotoriques. Que peut-on en déduire sur les pertes fer rotoriques ?
4) Montrer que $P_{transmise} = P_u / (1 - g)$ en admettant que les pertes mécaniques sont très faibles.
5) Faire le bilan des puissances en admettant que les pertes mécaniques sont très faibles. Déterminer la valeur du courant rotorique.

15) Un moteur asynchrone triphasé à cage, 220/380 V est alimenté par un réseau 127/220 V, 50 Hz.
La résistance R_s mesurée entre deux phases du stator est 3,5 Ω **.** On réalise un essai à vide : le moteur a une fréquence de rotation N_s pratiquement égale à 3000 tr/min et la méthode des deux wattmètres donne les indications suivantes : P_1 = 460 W, P_2 = -260 W.
L'intensité du courant en ligne est égale à 3,32 A.
1) Quel est le couplage à adopter dans ce cas ?
2) Quel est le nombre de pôles du stator ?
3) Calculer :
- la puissance absorbée P_{abs} ;
- le facteur de puissance ;
- les pertes par effet joule au stator ;
- les pertes fer au stator sachant que les pertes mécaniques valent 20 W.

16) Un moteur asynchrone triphasé a les caractéristiques suivantes :
- tension d'alimentation : 115/200 V. Rotor à cage.
- fréquence : 400 Hz.
- vitesse nominale : 11 500 tr/min.
- puissance absorbée en charge nominale : 4200 W, cos φ = 0,6.
- résistance de chaque enroulement du stator : R_s = 0,16 Ω .

Le moteur est alimenté par un réseau triphasé 200 V, 400 Hz. Il entraîne sa charge nominale.
1) Quel est le couplage à adopter ?
2) Quel est le glissement?
3) Quelle est l'intensité du courant absorbé en ligne ?
4) Quelles sont les pertes joule au stator ?
5) Déterminer le rendement sachant que les pertes fer au stator sont de 350 W et que l'on néglige les pertes fer au rotor ainsi que les pertes mécaniques ?
6) Quel est le couple utile ?

17) L'étude d'un point de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné, alimenté par le réseau 220/380 V, 50 Hz, a donné les valeurs suivantes :
- vitesse : N = 1440 tr/min;
-moment du couple utile : T_u = 40 Nm ;
- W_1 = 4500 W, W_2 = 1900 W par la méthode des deux wattmètres.
1) Quel est le nombre de pôles de ce moteur ?
2) Quel est son glissement ?
3) Calculer son rendement, son facteur de puissance et l'intensité du courant en ligne.
La caractéristique électromécanique de couple de ce moteur, rotor court-circuité, est considérée rectiligne dans sa partie utile. Ce moteur entraîne une machine dont le moment du couple résistant s'exprime par la relation :
T_R = 10 + N/100 où T_R est en Nm et N en tr/min.
4) Quelles seront la vitesse du groupe et la puissance utile du moteur ?
5) On démontre qu'un moteur asynchrone, à résistance rotorique variable, possède la propriété suivante : pour deux fonctionnements différents, mais à couple constant, le rapport R/g est lui-même constant, R étant la résistance totale de chaque phase du rotor, sa résistance propre étant R_0 = 0,1 Ω .On demande d'utiliser cette propriété pour trouver la valeur du rhéostat à introduire dans chaque phase du rotor pour que l'ensemble moteur-machine tourne à 1200 tr/min seulement.

18) Un moteur asynchrone triphasé tétrapolaire 220/380 V à rotor bobiné et à bagues est alimenté par un réseau 220 V/ 50 Hz. Un essai à vide à une fréquence de rotation très proche du synchronisme a donné:- puissance absorbée mesurée par la méthode des deux wattmètres : W_1 = 1160 W W_2 = - 660 W .
Un essai en charge a donné :
- courant absorbé : I = 12,2 A ,
- glissement : g = 6 % ,
- puissance absorbée mesurée par la méthode des deux wattmètres :
W_1=2500 W W_2= - 740 W .
La résistance d'un enroulement statorique est R = 1 Ω .
1) Quelle est, des deux tensions indiquées sur la plaque signalétique, celle que peut supporter un enroulement du stator ? En déduire le couplage du stator sur un réseau 220 V.
2) Dans le fonctionnement à vide, supposé équilibré, calculer :
- la fréquence de rotation (égale à la fréquence de synchronisme) ;
- la puissance réactive Q_0 absorbée ;
- l'intensité du courant en ligne I_0 ;
- le facteur de puissance à vide cos φ_0 ;
- les pertes constantes. En déduire les pertes fer dans le stator supposées égales aux pertes mécaniques.
3) Dans le fonctionnement en charge, calculer :
- la fréquence de rotation ;
- la puissance transmise au rotor ;
- la puissance utile, le rendement ;
- le moment du couple utile sur l'arbre T_u;
- le facteur de puissance.
4) Calculer la capacité des condensateurs qui, montés en triangle, relèveraient à 0,86 AR le facteur de puissance du moteur en charge.
5) Quelle serait alors la nouvelle intensité en ligne ?
6) Ce moteur entraîne une machine dont le moment du couple résistant T_R en Nm est donné en fonction de la fréquence de rotation N en tr/min par la relation :
T_R = 8.10-6 N²
La partie utile de la caractéristique T_u (N) du moteur est une droite.
7) Déterminer la fréquence de rotation du groupe et calculer la puissance utile du moteur.
6) Les enroulements du rotor sont couplés en étoile et la résistance mesurée entre deux bagues est 1,2 Ω . Quelle résistance doit-on mettre en série avec chacun des enroulements du rotor pour que la fréquence de rotation du groupe devienne 1300 tr/min ?

19) La plaque signalétique d'un moteur asynchrone porte :
380 V/660 V 20 kW 8 pôles 3 phases 50Hz, rotor à bagues stator en triangle rotor en étoile.
On néglige les pertes Joule au stator. La résistance apparente entre deux phases au rotor est 0,174 Ω.
1) Calculer la résistance d'une phase rotorique et la vitesse de synchronisme.
2) Exprimer les pertes Joules rotoriques en fonction du couple et des vitesses réelles et synchronisme.
3) Le couple est maximum pour g = 20 % . Calculer la réactance X_2 .
4) Sous 380 V, la puissance mécanique est nominale pour 727,5 tr/min. Calculer la tension induite secondaire et le rapport de transformation.
5) Calculer le couple maximum.
6) Calculer le couple pour un glissement de 1%.

Edition à jour du : jeudi, 18 octobre 2007