

INDUSTRIELLE

Durée : 4 heures

Coefficient 3

Le problème étudie l'entraînement d'un ventilateur contrôlant le tirage d'une chaudière de forte puissance équipant une usine de pâte à papier. La régulation de température de la chaudière se faisant en partie par action sur le tirage, le moteur du ventilateur doit être entraîné à vitesse variable.

La solution retenue est celle d'un moteur asynchrone triphasé.

La puissance utile nominale du moteur est égale à 160 kW.

Dans tout le problème, le fonctionnement envisagé fait que le **facteur de puissance** du moteur est **constant** ; on a $\cos\varphi = 0,84$.

La caractéristique mécanique moment du couple - vitesse du ventilateur obéit à la relation :

$$T_r = 0,00115 \cdot n^2 \quad (T_r \text{ en N.m et } n \text{ en tr.min}^{-1}).$$

I - Commande du moment du couple du moteur asynchrone :

(Étude en régime sinusoïdal).

Le convertisseur statique alimentant le moteur se comporte comme un ensemble de 3 sources de courant constituant un système triphasé équilibré.

L'étude porte sur les propriétés du moteur asynchrone alimenté par des courants sinusoïdaux. Pour cela on représente chaque phase par le modèle électrique équivalent simplifié de la figure 1 où les fuites globalisées sont ramenées au stator.

Notations:

v : tension simple.

i : intensité du courant par phase.

ω : pulsation de ce courant.

ℓ : inductance de fuites ramenées au stator.

L_m : inductance magnétisante par phase.

ω_r : pulsation des courants rotoriques.

R' : résistance permettant de modéliser la puissance transmise au rotor.

i_m : intensité du courant dans L_m .

i_r : intensité du courant dans R' .

e_r : tension aux bornes de R' .

p : nombre de paires de pôles du moteur : $p = 3$.

Ω : vitesse angulaire de rotation du moteur.

n : fréquence de rotation de l'ensemble tournant.

On néglige les pertes statoriques par effet Joule, les pertes dans le fer et les pertes mécaniques.

1- Étude des caractéristiques du moteur :

- 1) A partir des informations données à la page précédente, montrez que la fréquence de rotation nominale de ce moteur est $n_N \approx 1100 \text{ tr.min}^{-1}$.
- 2) Calculez le moment nominal T_N du couple moteur correspondant.
- 3) Relations générales :
 - a- Pour une pulsation ω des courants statoriques, rappelez l'expression de la vitesse angulaire de synchronisme Ω_S (le moteur a p paires de pôles).
 - b- Définissez le glissement g en fonction de Ω et Ω_S .
 - c- Donnez la relation entre ω_r , la pulsation des courants rotoriques, g et ω .
 - d- Montrez qu'il existe une relation entre ω , ω_r et n (en tr.min^{-1}), relation de la forme $\omega = kn + \omega_r$. Calculez k .
 - e- On donne $\omega_r = 2,5 \text{ rad.s}^{-1}$. Pour le point de fonctionnement nominal, calculez les valeurs ω_N de ω , n_{NS} de n (n_{NS} est la fréquence de rotation correspondant au synchronisme) et g_N de g correspondantes.
 - f- Donnez une estimation du rendement au point de fonctionnement nominal. En déduire un ordre de grandeur de la puissance électrique nominale absorbée.
 - g- La tension simple nominale étant de 300 V par phase, donnez un ordre de grandeur de l'intensité nominale I_N du courant.

2- Étude du moment du couple moteur :

On utilise le schéma équivalent, par phase, de la figure 1.

- 1) $R' = \frac{R}{g}$; R étant reliée à la résistance du rotor par phase : montrez que $R' = R \frac{\omega}{\omega_r}$.
- 2) Établir la relation entre les valeurs efficaces I_m et I_r des intensités i_m et i_r .
- 3)
 - a- Donnez l'expression de la valeur efficace I de i en fonction de I_m et I_r .
 - b- A partir des résultats précédents, montrez que I_r s'exprime en fonction de I par la relation :

$$I_r = \frac{L_m \omega_r}{\sqrt{R^2 + L_m^2 \omega_r^2}} I.$$

- 4) A l'aide du schéma équivalent (figure 1), exprimez la puissance transmise au rotor.
- 5) Exploitez le résultat précédent pour montrer que le moment du couple moteur T_m s'exprime, en fonction de I , par :

$$T_m = \frac{a}{\frac{b}{\omega_r} + c} I^2 \text{ avec } T_m \text{ en N.m et } I \text{ en ampères.}$$

A quelle condition le moment du couple moteur est-il imposé par la valeur efficace I de l'intensité i du courant statorique ?

Pour la suite on prendra $a = 17,0 \cdot 10^{-6}$ (S.I.) ; $b = 81,0 \cdot 10^{-6}$ (S.I.) ; $c = 210 \cdot 10^{-6}$ (S.I.)

6) Pour $\omega_r = 2,5 \text{ rad.s}^{-1}$, quelle est la relation numérique liant T_m à I^2 . Calculez la valeur I_N de l'intensité nominale du courant; comparez avec l'estimation faite dans le 1-3)g.

3- Autopilotage :

L'autopilotage impose à la pulsation ω_r d'être constante : la valeur choisie dans le problème est $\omega_r = 2,5 \text{ rad.s}^{-1}$.

- La commande du pont redresseur est liée au moment du couple moteur que l'on désire obtenir en régime permanent ; cette commande définit donc la valeur, en régime permanent, de l'intensité I du courant dans le moteur et par conséquent celle de l'intensité I_0 circulant entre les deux ponts de la figure 2.
- La commande de l'onduleur engendre, à partir de la mesure de Ω , la pulsation ω telle que, à chaque instant :

$$\omega = \omega_r + p \Omega$$

1) On veut que la fréquence de rotation du ventilateur soit de 1000 tr.min^{-1} . Quel doit être, en régime établi, le moment du couple T_m pour avoir cette vitesse ?

2) Quelle sera, en régime établi, la pulsation des courants statoriques imposée par l'autopilotage.

3) En déduire la valeur efficace I de i , intensité du courant dans la phase considérée sur la figure 1, lorsque le moteur fournit ce couple.

4) On donne $\ell = 1,33 \text{ mH}$; $L_m = 14,5 \text{ mH}$; $R = 9,00 \text{ m}\Omega$.

a- Mettez en place sur la feuille de réponse 1, les vecteurs de Fresnel associés aux intensités i_r , i_m , i .

b- Écrire la relation entre les tensions e_r , v_t et v . Mettez en place sur la feuille réponse 1, les vecteurs associés à e_r , v_t et v .

c- Déterminez la valeur efficace V de la tension v , pour le point de fonctionnement envisagé.

d- Que vaut la puissance absorbée par le moteur en ce point (on rappelle que le facteur de puissance est constant et vaut 0,84) ? Que vaut le rendement ?

5) On se propose d'établir la relation qui lie la fréquence de rotation n de l'ensemble à la tension V par phase.

- a-** Montrez, simplement, que $V = K \omega I$. A l'aide des résultats trouvés précédemment, calculez K .
- b-** Compte tenu de la relation définissant la caractéristique mécanique du ventilateur (voir présentation de l'épreuve), montrez que, en régime permanent $I = k' n$.
- c-** Dédurre du résultat des deux questions précédentes et de celui de la question 1-3-d, la relation qui, en régime permanent, avec $\omega_r = 2,5 \text{ rad.s}^{-1}$, lie la tension V à la fréquence de rotation n de l'ensemble tournant.
- d-** En négligeant ω_r dans cette relation, montrez que lorsque la tension V d'alimentation d'une phase du moteur vaut 300V on retrouve bien la fréquence de rotation nominale n_N de l'ensemble.

II - Convertisseurs statiques

(figure 2)

1- Onduleur de courant :

Les courants délivrés par le convertisseur ne sont pas sinusoïdaux. Le courant d'entrée est supposé parfaitement lissé ; son intensité a pour valeur I_0 , réglable par le pont redresseur situé côté réseau.

1) Compte tenu des intervalles de conduction des interrupteurs, représentez sur la feuille réponse 2, les formes d'onde des courants d'intensités respectives i_R , i_S et i_T .

2) Calculez la valeur efficace I_R de i_R en fonction de I_0 .

3) La valeur efficace I_{RF} du fondamental de i_R vaut $I_{RF} = 0,78I_0$.

Tracez en superposition à i_R , l'allure de son fondamental i_{RF} .

4) Indiquez sur la feuille réponse 2, les intervalles de conduction des interrupteurs pour inverser le sens de rotation du moteur.

5) On donne sur la feuille réponse 3, les formes d'onde des tensions v_R , v_S , v_T supposées sinusoïdales et celle de i_R .

a- Tracez les allures de l'intensité i_{KR} et de la tension u_{KR} .

b- Pour quelle(s) raison(s) les interrupteurs du convertisseur ne peuvent-ils pas être des thyristors en commutation naturelle ?

2- Redresseur :

Ses composants sont supposés parfaits et l'intensité I_0 est parfaitement lissée.

Il est alimenté sous les tensions v_a , v_b et v_c formant un système triphasé équilibré.

Représentez sur la feuille réponse 4, en la justifiant, la forme d'onde de la tension u_C pour un angle de retard à l'amorçage $\alpha = 60^\circ$.

III - Association transformateur - redresseur - onduleur - machine

1- Transformateur d'alimentation :

Ce transformateur a ses enroulements connectés comme indiqué sur la figure 3. Il est alimenté par un système de tensions triphasé équilibré direct. Les valeurs efficaces des tensions composées valent respectivement 10,0 kV au primaire et 450V au secondaire. On note N_1 le nombre de spires d'un enroulement primaire et N_2 celui d'un enroulement secondaire. Ce transformateur est supposé parfait.

Calculez le rapport des nombres de spires $\frac{N_2}{N_1}$.

2- Réglage de l'angle α de commande du redresseur :

La valeur moyenne U_C de la tension redressée en fonction de la valeur efficace V_a de la tension simple v_a et de l'angle de retard à l'amorçage α est donnée par :

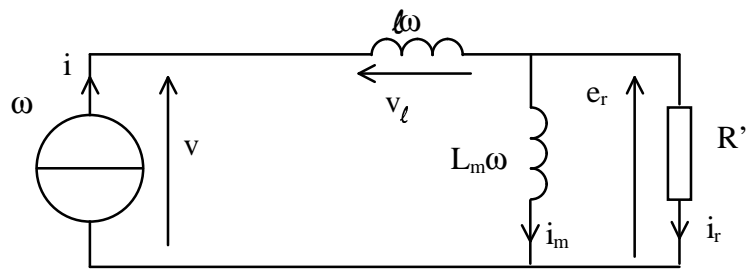
$$U_C = 2,34 V_a \cos \alpha$$

- 1) En écrivant que la puissance fournie par le redresseur est égale à celle reçue par la machine asynchrone (puissance véhiculée par le fondamental du courant) et compte tenu de la relation liant I_{RF} à I_0 , établir la relation existant entre V_a , α , V et φ (V : valeur efficace de la tension simple appliquée au moteur et φ : déphasage (i_{RF}, v_R) pour le moteur).
- 2) Calculez numériquement α dans le cas où $n = n_N$ soit 1100 tr.min^{-1} et pour $n = 1000 \text{ tr.min}^{-1}$.

3- Fonctionnement particulier :

Le moteur étant en rotation, on donne à α une valeur comprise entre $\frac{\pi}{2}$ et π .

- 1) Comment fonctionne maintenant le convertisseur ainsi commandé ? Dans quelle plage de valeur se situe alors l'angle φ ?
- 2) Dans ces conditions, comment fonctionne la machine asynchrone ?
- 3) Que peut-on dire alors du moment du couple de moment T_m ? Conclusion.



Une phase de la machine qui en comporte 3.

Figure 1

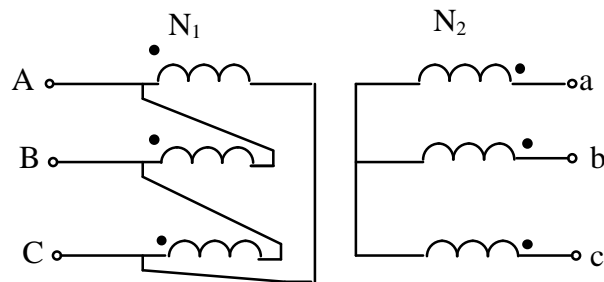
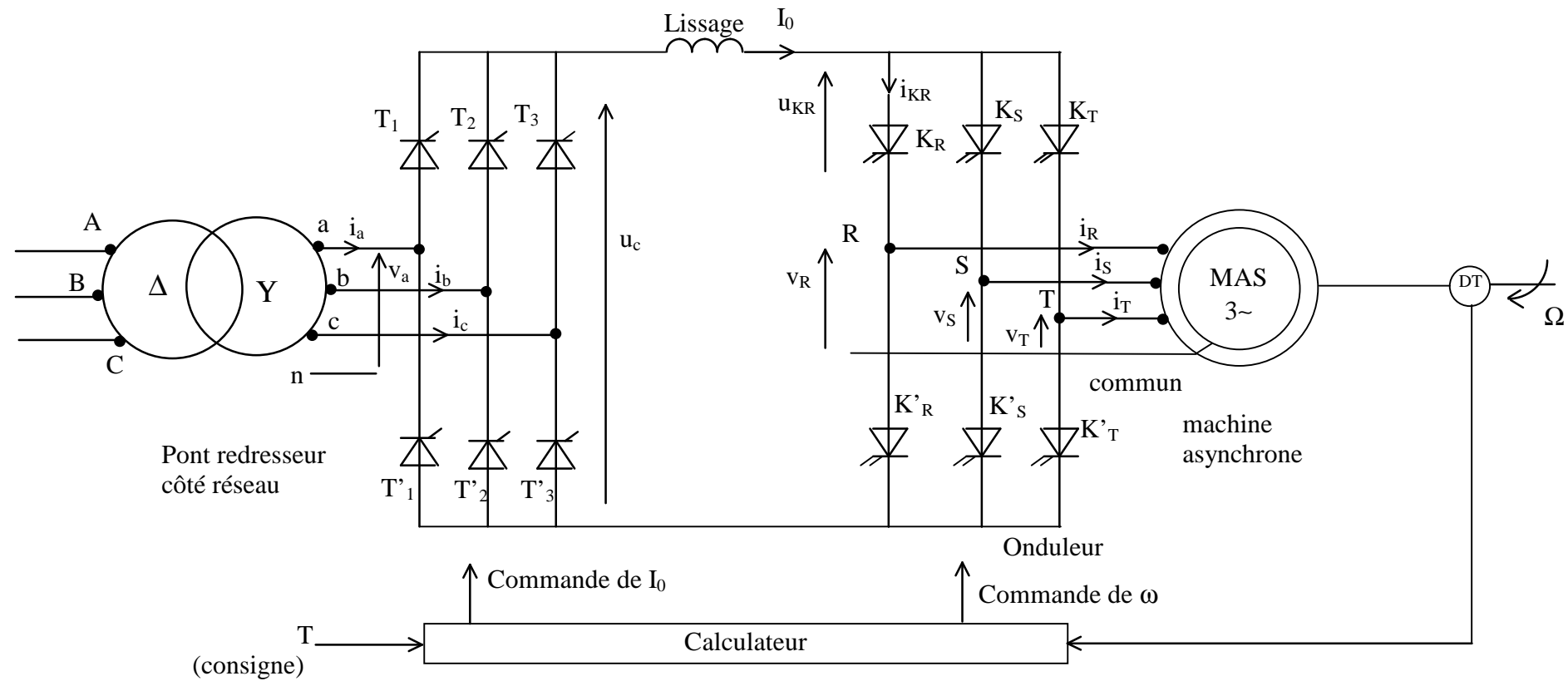


Figure 3

Feuille-Réponse N°1

ÉPREUVE DE : N° MATRICULE :

Feuillet à compléter et à remettre avec la copie par le candidat.



$K_R, K_S, K_T, K'_R, K'_S, K'_T$ sont des interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture

Figure 2

Feuille-Réponse N°2

ÉPREUVE DE : N° MATRICULE :

Feuillet à compléter et à remettre avec la copie par le candidat.

Onduleur de courant

