
Moteur asynchrone

1 Pôles et glissement d'un moteur asynchrone

Un moteur asynchrone alimenté en 50 Hz tourne à 720 min^{-1} . Calculer le nombre de pôles et son glissement (en % de la vitesse synchrone).

Quelle est la fréquence des courants induits dans son rotor ?

➤ **Réponse**

Il faut d'abord chercher quelle vitesse synchrone est légèrement au-dessus de la vitesse 720 min^{-1} . Il s'agit de la vitesse synchrone d'un moteur à 4 paires de pôles, qui est de 750 min^{-1} . Ce ne peut pas être un moteur à 3 paires de pôles, car sa vitesse synchrone de $1'000 \text{ min}^{-1}$ serait beaucoup trop grande (on sait que le glissement est de quelques pour cent, mais en aucun cas 33%).

Le glissement s est de 30 min^{-1} , soit 4,0%.

Les courants induits au rotor ont une fréquence égale à la différence de vitesse entre le champ tournant et le rotor, soit 4% de la fréquence d'alimentation. Elle vaut donc 2 Hz.

2 Couple et vitesse d'un moteur asynchrone

Soit un moteur asynchrone de 22 kW, dont la vitesse nominale est de $1'420 \text{ min}^{-1}$. Son rendement est de 91%, et son facteur de puissance de 0,85. On l'alimente en triphasé 400 V – 50 Hz.

- Quel est son glissement à charge nominale ?
- Quel est son courant nominal ?

➤ **Réponse - a**

Ce moteur a certainement 2 paires de pôles. Sa vitesse synchrone est de $1'500 \text{ min}^{-1}$. Le glissement à régime nominal

vaut :

$$s_{nom} = \frac{N_s - N_{nom}}{N_s} = \frac{1'500 - 1'420}{1'500} = 5,33\%$$

Nous pouvons aussi exprimer ce glissement en tr/min :

$$s_{nom} = N_s - N_{nom} = 1'500 - 1'420 = 80 \text{ tr/min}$$

➤ **Réponse - b**

La puissance nominale de 22 kW est la puissance disponible à l'arbre. La puissance électrique nominale vaut :

$$P_{\text{elec-nom}} = \frac{P_{\text{nom}}}{\eta} = \frac{22'000}{0,91} = 24'176 \text{ W}$$

Son courant de phase vaut donc :

$$I_{\text{nom}} = \frac{P_{\text{elec-nom}}}{\sqrt{3} \cdot U_c \cdot \cos(\varphi_{\text{nom}})} = \frac{24'176}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,85} = 41,05 \text{ A}_{\text{rms}}$$

3 Moteur asynchrone utilisé à charge réduite

Le moteur de l'exercice 2, alimenté par le réseau triphasé 400 V – 50 Hz, entraîne une charge à vitesse constante en lui transmettant un couple de 55 Nm.

- A quelle vitesse tourne-t-il ?
- En admettant que son rendement est le même à charge réduite qu'à pleine charge (91%), déterminer la puissance active qu'il consomme.
- En admettant que la puissance réactive est la même à charge réduite qu'à pleine charge (exercice ci-dessus), déterminer son courant de phase et son facteur de puissance.

➤ **Réponse - a**

Dans la zone de fonctionnement du moteur asynchrone (vitesse proche de la vitesse synchrone), le glissement est proportionnel au couple fourni. Il faut donc déterminer le rapport entre le couple fourni (55 Nm) et le couple nominal.

$$T_{\text{nom}} = \frac{P_{\text{nom}}}{\omega_{\text{nom}}} = \frac{22'000}{1'420 \cdot \frac{\pi}{30}} = 147,9 \text{ Nm}$$

On en tire le glissement, exprimé en [tr/min] :

$$s = s_{\text{nom}} \cdot \frac{T}{T_{\text{nom}}} = 80 \cdot \frac{55}{147,9} = 29,7 \text{ tr/min}$$

$$N = N_s - s = 1'470,3 \text{ tr/min}$$

 **Réponse - b**

A cette vitesse, la puissance mécanique délivrée vaut :

$$P = T_{\text{nom}} \cdot \omega_{\text{nom}} = 55 \cdot 1'420 \cdot \frac{\pi}{30} = 8'468 \text{ W}$$

Tenant compte du rendement, la puissance électrique active consommée vaut :

$$P_{\text{elec}} = \frac{P}{\eta} = \frac{8'468}{0,91} = 9'306 \text{ W}$$

➤ **Réponse - c**

A régime nominal (22 kW à l'arbre), la puissance apparente peut être déterminée à partir de la puissance active (exercice précédent). Nous avons :

$$S_{nom} = \frac{P_{elec-nom}}{\cos(\varphi_{nom})} = \frac{24'176}{0,85} = 28'842 \text{ VA}$$

Nous en tirons la puissance réactive consommée à régime nominal :

$$Q_{nom} = \sqrt{S_{nom}^2 - P_{elec-nom}^2} = \sqrt{28'842^2 - 24'176^2} = 14'983 \text{ var}$$

A la puissance réduite indiquée, le moteur consomme :

$$P_{act} = P_{elec} = 9'306 \text{ W}$$

$$Q = Q_{nom} = 14'983 \text{ var}$$

Nous en déduisons la puissance apparente :

$$S = \sqrt{P_{act}^2 + Q^2} = \sqrt{9'306^2 + 14'983^2} = 17'637 \text{ VA}$$

Nous en tirons le courant de phase et le facteur de puissance à charge réduite :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_c} = \frac{17'637}{\sqrt{3} \cdot 400} = 25,5 \text{ A}_{rms}$$

$$\cos\varphi = \frac{P_{act}}{S} = \frac{9'306}{17'637} = 0,527$$

Nous remarquons que le facteur de puissance s'est fortement dégradé, et que le courant de phase a diminué dans une proportion bien moindre que la réduction de charge.

4 Moteur asynchrone en régime de freinage

Le moteur de l'exercice 2 est utilisé pour un ascenseur. Quelle sera sa vitesse à la descente ?

➤ **Réponse**

Dans l'exercice 2, le moteur est utilisé à charge nominale, et convertit de l'énergie électrique en énergie mécanique. A la descente, le moteur fonctionne dans l'autre sens, mais en frein (générateur). Il tournera donc à une vitesse légèrement supérieure à sa vitesse synchrone. Comme le poids déplacé est supposé inchangé, le glissement est identique, mais change de signe.

La vitesse du moteur vaut donc :

$$N_G = N_s \cdot (1 + s) = 1'580 \text{ tr/min}$$

5 Moteur asynchrone à 50 Hz et à 60 Hz

La machine utilisant le moteur de l'exercice 2 doit être exportée aux USA, et fonctionner sous 480 V / 60 Hz.

Comment fonctionnerait le moteur dans ces conditions ? Que faire ?

➤ **Réponse**

La plupart des moteurs calculés pour 400 V_{AC} / 50 Hz supportent également 480 V_{AC} / 60 Hz. Il faut cependant s'en assurer, et surtout vérifier que les spécifications écrites du fournisseur le garantissent (homologation).

Si le moteur est connecté directement à l'alimentation (application tout ou rien), l'augmentation de fréquence provoquera une augmentation de la vitesse synchrone à :

$$N_{S(USA)} = N_{S(EU)} \cdot \frac{f_{(USA)}}{f_{(EU)}} = 1'800 \text{ tr/min}$$

Le glissement restant à peu près inchangé (80 tr/min), sa vitesse avec le même couple serait donc de 1'720 tr/min. Même un transformateur 480 / 400 V_{AC} ne changerait rien.

Le couple du moteur ne doit pas dépasser sa valeur nominale à 50 Hz. S'il entraîne par exemple un ventilateur, il faudra compenser l'augmentation de la vitesse en modifiant le pas de l'hélice, de manière à ce que le flux d'air reste le même. Si le moteur entraîne sa charge par un réducteur, il faudra modifier le rapport de réduction pour que la vitesse de la charge n'augmente pas.

Si ces modifications mécaniques ne sont pas possibles, il faudra ajouter un variateur de fréquence pour limiter la vitesse du moteur à 1'420 tr/min.

Si le moteur est utilisé avec un variateur de fréquence, il faudra vérifier que cet appareil est capable de fonctionner sous 480 V_{AC} (ce n'est pas toujours le cas). Sinon, il faudra le remplacer par un variateur qui supporte cette tension, ou ajouter un transformateur 480 / 400 V_{AC}. Le moteur ne verra aucune différence.

S'il y a plusieurs moteurs dans le même cas, on pourrait alimenter la machine par l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence 60 / 50 Hz, qui adapterait également la tension. Cet appareil est assez coûteux, mais au moins, il n'y aurait pas d'autres frais d'adaptation ni d'effets de surprise.

6 Microcentrale hydraulique

Dans une microcentrale électro-hydraulique, un moteur asynchrone est entraîné directement par la turbine pour produire de l'énergie électrique. Avec un débit d'eau constant, la vitesse de turbine est de 392 tr/min. Le moteur est connecté au réseau industriel 400 V à 50 Hz, triphasé.

- Le champ tournant est-il plus grand, égal, ou plus petit que la vitesse de la turbine ?
- Quel nombre de pôles est le plus favorable à votre avis ?
- Quel est alors le glissement du moteur ?
- Quelle est la puissance électrique fournie, sachant que l'on mesure un courant de phase $I_{rms} = 12,5$ A, et que le moteur est caractérisé par un facteur de puissance $\cos\varphi = 0,86$?
- Quelle est le couple mécanique fourni par la turbine au moteur, sachant que le rendement du moteur est de 94%, et que la turbine tourne exactement à 392 rpm ?

➤ Réponse - a

Le moteur tourne à la même vitesse que la turbine. Comme il fonctionne en générateur, il doit tourner plus rapidement que le champ tournant. Donc, le champ tournant doit tourner plus lentement.

➤ Réponse - b

392 tr/min correspond à 6,53 tr/s. S'il n'y avait pas de glissement, le nombre de paires de pôles idéal vaudrait :

$$p_{idéal} = \frac{50}{6,53} = 7,65$$

Comme il y a du glissement, et surtout comme le nombre de paires de pôles doit être un nombre entier, nous avons le choix entre 7 et 8. Comme le champ tournant doit être plus lent que le rotor, nous devons choisir $p = 8$. Ainsi, la vitesse du champ tournant vaut :

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p} = 375 \text{ tr/min}$$

➤ Réponse - c

Le glissement vaut :

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} = -4,53\%$$

➤ Réponse - d

$$P_{élec} = \sqrt{3} \cdot U_{comp} \cdot I \cdot \cos\varphi = 7'448 \text{ W}$$

➤ **Réponse - e**

$$P_{méc} = \frac{P_{élec}}{\eta_{mot}} = 7'923 \text{ W}$$

$$T = \frac{P_{méc}}{N \cdot \frac{\pi}{30}} = 193 \text{ Nm}$$

7 Moteur asynchrone entraînant une pompe

Un château d'eau est alimenté depuis une nappe phréatique. La différence de niveau est de 67 m. Le débit doit pouvoir atteindre au minimum 55 m³ par heure.

Pour fournir ce débit, la pompe doit être entraînée à une vitesse de 690 tours par minute. Elle peut tourner plus vite, mais sans dépasser 900 tours par minute. Son rendement est de 81%.

La pompe est entraînée directement, donc **sans réducteur**, par un moteur asynchrone, lui-même alimenté directement par le réseau 400 V / 50 Hz / triphasé. Il est caractérisé comme suit :

- Puissance et nombre de pôles : à déterminer
- Rendement – identique pour tous les modèles : 92%
- Facteur de puissance ($\cos\varphi$) – identique pour tous les modèles : 0,84
- Glissement à couple nominal – identique pour tous les modèles : 4,5%

a) Quel nombre de paires de pôles convient le mieux, et pourquoi ?

Valeurs possibles : 1, 2, 3 ou 4.

b) Suite à ce choix, quel est le débit de la pompe ?

Hypothèses simplificatrices :

- Le débit de la pompe est proportionnel à sa vitesse.
- On admet que le glissement du moteur est égal à son glissement nominal, même si le couple qu'il fournit n'est pas exactement égal à son couple nominal.

c) Quel doit être la puissance nominale du moteur ?

Valeurs possibles (normalisées) : 7,5 kW, 15 kW, 22 kW ou 37 kW

d) Dans ces conditions de fonctionnement, quel est le courant de phase du moteur ?

➤ **Réponse - a**

Valeur min. :

$$N_{M=\frac{60 \cdot f \cdot (1-s)}{p}} > 690 \Rightarrow p < \frac{60 \cdot 50 \cdot (1-0,045)}{690} = 4,15$$

Valeur max. :

$$N_{M=\frac{60 \cdot f \cdot (1-s)}{p}} < 900 \Rightarrow p > \frac{60 \cdot 50 \cdot (1-0,045)}{900} = 3,18$$

On choisit la valeur entière $p = 4$.

➤ **Réponse - b**

Le débit de la pompe est proportionnel à sa vitesse, donc à la vitesse du moteur, qui est fixé par la fréquence de son alimentation. Nous avons donc :

$$N_M = \frac{60 \cdot f \cdot (1-s)}{p} = \frac{60 \cdot 50 \cdot (1-0,045)}{4} = 716 \text{ rpm}$$

$$D = \frac{55 \cdot 716}{690} = 57,1 \text{ m}^3/\text{h}$$

➤ **Réponse - c**

Puissance utile (fournie par la pompe) :

$$P_{\text{utile}} = D \cdot g \cdot h = \frac{57,1 \cdot 1'000}{3'600} \cdot 9,81 \cdot 67 = 10'424 \text{ W}$$

Puissance fournie par le moteur à la pompe :

$$P_{\text{arbre}} = \frac{P_{\text{utile}}}{\eta_{\text{pompe}}} = 12'869 \text{ W} < P_{\text{nom}}$$

On choisit :

$$P_{\text{nom}} = 15 \text{ kW}$$

➤ **Réponse - d**

Puissance électrique consommée :

$$P_{\text{électrique}} = \frac{P_{\text{arbre}}}{\eta_{\text{moteur}}} = 13'988 \text{ W} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{comp}} \cdot I \cdot \cos\varphi$$

On en tire :

$$I = \frac{P_{\text{électrique}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{comp}} \cdot \cos\varphi} = \frac{13'988}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,84} = 24,0 \text{ A}$$

8 Système de bobinage

Une machine enroule du papier qui défile à la vitesse constante de 480 m/min. Le support vide du rouleau a un diamètre de 30 cm. Le rouleau plein a un diamètre de 1,1 m.

Le rouleau est entraîné par un moteur et un réducteur. La vitesse du moteur est réglée en permanence pour garantir la vitesse constante du papier, tout en tirant celui-ci avec une force de 400 N.

Le moteur est de type asynchrone à 2 paires de pôles. Le catalogue du fournisseur indique que les puissances nominales (à l'arbre) suivantes sont disponibles, en [kW] : 1,1 – 2,2 – 4,0 – 7,5 – 15 – 22 – 37.

La vitesse nominale de tous ces moteurs est de 1'450 tr/min. Grâce au variateur de fréquence, il peut fonctionner jusqu'à 4 fois la vitesse nominale, avec une caractéristique « puissance constante » au-delà de sa vitesse nominale.

Informations complémentaires :

- Le couple nominal du moteur, calculé en fonction de sa puissance et de sa vitesse nominales, ne doit en aucun cas être dépassé.
- On suppose que le rendement du réducteur est de 90% et qu'il n'y a pas d'autres pertes par frottements.

Questions :

- a) Quel est le plus petit des moteurs proposés qui permet d'entraîner ce cylindre sans dépasser ses caractéristiques nominales ?
- b) Quel rapport de réduction proposez-vous ?
(Il y a plusieurs possibilités. Choisissez-en une et expliquez votre choix !)
- c) Faut-il tenir du couple nécessaire pour décélérer le rouleau lorsqu'il se remplit ?

➤ **Réponse - a**

Dans ce genre de problème, il est judicieux de commencer par des considérations d'énergie et de puissance. La puissance utile peut être calculée au niveau du papier, en tenant compte de la vitesse en [m/s] :

$$P_{\text{utile}} = F \cdot v = 400 \cdot \frac{480}{60} = 3'200 \text{ W}$$

Tenant compte du rendement du réducteur, la puissance que doit fournir le moteur vaut :

$$P_{\text{moteur}} = \frac{P_{\text{utile}}}{\eta} = \frac{3'200 \text{ W}}{0,9} = 3'556 \text{ W}$$

Remarque : Quel que soit le rapport de réduction i , il est facile de montrer que cette puissance est indépendante de l'état de la bobine (plein ou vide). On le verra en résolvant la partie « b » de ce problème.

Donc : Un moteur asynchrone devrait particulièrement bien convenir vu sa capacité à fonctionner selon une caractéristique de puissance constante au-delà de sa vitesse nominale. Sa puissance nominale devra être de 4 kW au moins. Une puissance nominale plus élevée pourrait aussi être choisie, par exemple pour satisfaire des contraintes logistiques (type de moteur déjà utilisé sur une autre machine).

➤ **Réponse - b**

Calculons d'abord la vitesse du rouleau et son couple d'entraînement lorsqu'il est vide :

$$N_{R\text{-vide}} = \frac{v}{\pi \cdot D_{\text{vide}}} = \frac{480}{\pi \cdot 0,30} = 509,3 \text{ tr/min}$$

$$T_{R\text{-vide}} = F \cdot \frac{D_{\text{vide}}}{2} = 400 \cdot \frac{0,30}{2} = 60,0 \text{ Nm}$$

Vérification :

$$P_{R\text{-vide}} = T_{R\text{-vide}} \cdot \omega_{R\text{-vide}} = T_{R\text{-vide}} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot N_{R\text{-vide}} = 3'200 \text{ W}$$

Calculons maintenant la vitesse du rouleau et son couple d'entraînement lorsqu'il est plein :

$$N_{R-plein} = \frac{v}{\pi \cdot D_{plein}} = \frac{480}{\pi \cdot 1,1} = 138,9 \text{ tr/min}$$

$$T_{R-plein} = F \cdot \frac{D_{plein}}{2} = 400 \cdot \frac{1,10}{2} = 220,0 \text{ Nm}$$

Vérification :

$$P_{R-plein} = T_{R-plein} \cdot \omega_{R-plein} = T_{R-plein} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot N_{R-plein} = 3'200 \text{ W}$$

Remarque : Le couple ainsi calculé est celui que doit fournir le réducteur au rouleau. Le rendement du réducteur n'intervient donc pas encore à ce stade.

Cette application de bobinage ne nécessite pas d'entraînement à haute dynamique, car les accélérations et décélérations sont faibles (plusieurs minutes nécessaires pour remplir une bobine). Pour cette raison, il ne sert à rien de déterminer le rapport de réduction optimal. Par contre, considérant l'évolution de la vitesse et du couple d'entraînement du rouleau depuis le début du processus où il est vide jusqu'au moment où il est plein, le rapport de réduction doit être choisi en tenant compte de 2 critères :

1^{er} critère : Le couple que doit fournir le moteur ne doit jamais dépasser son couple nominal, en tenant compte du rendement du réducteur.

$$T_{M \text{ nom}} = \frac{P_{M \text{ nom}}}{\omega_{M \text{ nom}}} = \frac{P_{M \text{ nom}}}{\frac{2\pi}{60} \cdot N_{M \text{ nom}}} = \frac{4'000}{\frac{\pi}{30} \cdot 1'450} = 26,34 \text{ Nm}$$

$$T_{M \text{ disponible}} = T_{M \text{ nom}} \cdot \rho_{\text{réd}} = 26,34 \cdot 0,9 = 23,71 \text{ Nm}$$

$$i_{\text{min}} = \frac{T_{R-plein}}{T_{M \text{ disponible}}} = \frac{220}{23,71} = 9,28$$

2^{ème} critère : La vitesse du moteur doit être inférieure à sa vitesse max.

$$N_{M \text{ max}} = 4 \cdot N_{M \text{ nom}} = 4 \cdot 1'450 = 5'800 \text{ tr/min}$$

Nous en tirons :

$$i_{\text{max}} = \frac{N_{M \text{ max}}}{N_{R-vide} \cdot i} = \frac{5'800}{509,3} = 11,39$$

Nous pouvons choisir librement la valeur de i entre ces 2 valeurs limites. Ce choix peut aussi tenir compte de préférences. Par exemple :

- On peut choisir sans trop réfléchir une valeur moyenne, comme $i = 134:13 = 10,31$.
- On peut choisir une valeur élevée, comme $i = 148:13 = 11,38$. Dans ce cas, le couple max. que devra fournir le moteur est plus faible (19,32 Nm). Cela laisse une marge de sécurité de 22% sur le couple, qui donnerait la possibilité de plus remplir les bobines, ou de tirer plus fort sur le papier.
- On peut choisir une valeur faible, comme $i = 121:13 = 9,31$. Dans ce cas, la vitesse max. du moteur est plus faible (4'740 tr/min). Cela laisse une marge de sécurité de 22% sur la vitesse, qui donnerait la possibilité d'augmenter la productivité (vitesse du papier plus élevée).

➤ Réponse - c

Nous ne disposons que de très peu de données pour évaluer le couple nécessaire pour ralentir le rouleau lorsqu'il se remplit. Toutefois, nous pouvons en faire une évaluation approximative.

Si nous admettons que le papier a une largeur de 1 mètre, nous pouvons évaluer l'inertie du rouleau lorsqu'il est plein :

$$J_{\text{rouleau plein}} = \frac{m \cdot R^2}{2} = \frac{\rho \cdot L \cdot \pi \cdot R^4}{2} = \sim \frac{1'000 \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,55^4}{2} = 144 \text{ kgm}^2$$

Comme l'inertie dépend du rayon à la puissance 4, nous pouvons considérer que le couple de décélération sera maximum lorsque le rouleau est plein. Nous devons donc évaluer encore la décélération lors du remplissage de la dernière couche.

La dernière couche a une longueur de $1,1 \cdot \pi = 3,45$ m. A la vitesse de 480 m/min, soit 8 m/s, il faut 0,43 s pour la remplir.

Pendant ce laps de temps, la vitesse varie comme suit :

$$\Delta N = \frac{v}{\pi * D_{\text{dernière couche}}} - \frac{v}{\pi * D_{\text{plein}}} = \frac{v}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{D_{\text{dernière couche}}} - \frac{1}{D_{\text{plein}}} \right)$$

$$\Delta N = \frac{480}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{1,0999} - \frac{1}{1,1000} \right) = 0,0126 \text{ m/min}$$

Nous pouvons ainsi évaluer la décélération lors du remplissage de la dernière couche :

$$\alpha_{\text{dernière couche}} = \frac{\Delta N \cdot \frac{\pi}{30}}{\Delta t} = \frac{-0,0126 \cdot \frac{\pi}{30}}{0,43} = -0,00307 \text{ rad/s}^2$$

Le couple nécessaire pour décélérer le rouleau est maximum lorsque le rouleau est plein. Sa valeur max. vaut ainsi, en valeur absolue :

$$T_{\text{décél}} = J_{\text{rouleau plein}} \cdot \alpha_{\text{dernière couche}} = 144 \cdot 0,00307 = 0,44 \text{ Nm}$$

Cette valeur est nettement inférieure aux couples d'entraînement du rouleau, calculés précédemment en fonction de la tension sur le papier. Nous en concluons qu'il n'est pas nécessaire de tenir compte de l'effet d'inertie du rouleau. Son couple de décélération peut être négligé.

Une raison supplémentaire réside aussi dans le signe de ce couple de décélération. En effet, comme le rouleau doit ralentir, son couple de décélération peut être déduit du couple nécessaire à l'entraînement du papier. Le fait de ne pas en tenir compte pour le dimensionnement du moteur fournit ainsi une (très petite) marge de sécurité.