
Cours d'Electricité 2 — Électrotechnique

Le moteur asynchrone triphasé

I.U.T Mesures Physiques — Université Montpellier 2

Année universitaire 2008-2009

Table des matières

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Définition et description | 2 |
| 2 | Principe de fonctionnement | 2 |
| 3 | Technologie du moteur asynchrone | 3 |
| 3.1 | Les circuits électriques | 3 |
| 3.1.1 | Le stator est l'inducteur | 3 |
| 3.1.2 | Le rotor est l'induit | 4 |
| 3.2 | Symboles électriques | 4 |
| 4 | Fonctionnement du moteur asynchrone | 4 |
| 4.1 | Glissement | 4 |
| 4.2 | Fonctionnement à vide | 5 |
| 4.3 | Fonctionnement en charge | 5 |
| 4.3.1 | Caractéristiques mécaniques | 6 |
| 4.4 | Bilan des puissances et des pertes | 7 |
| 4.4.1 | La puissance absorbée | 7 |
| 4.4.2 | Les pertes par effet Joule au stator P_{JS} | 8 |
| 4.4.3 | Les pertes fer | 8 |
| 4.4.4 | La puissance transmise dans l'entrefer P_{tr} | 8 |
| 4.4.5 | Pertes Joule au rotor P_{JR} | 9 |
| 4.4.6 | Puissance électromagnétique P_{em} et moment du couple électromagnétique T_{em} | 9 |
| 4.4.7 | Pertes mécaniques rotationnelles | 9 |
| 4.4.8 | Puissance mécanique et couple utiles P_u et T_u | 9 |
| 4.4.9 | Rendement | 9 |
| 4.5 | Détermination des pertes constantes | 10 |

Document disponible à l'adresse <http://web-mp.iutmontp.univ-montp2.fr>, rubrique "Le DUT", enseignement "Electricité, Electronique, Electrotechnique et Automatique".

Adresse e-mail : Christophe.Palermo@univ-montp2.fr

1 Définition et description

Le **moteur asynchrone** est une machine tournante aussi appelée **moteur à induction** : il fonctionne avec du courant alternatif. Sa particularité est de fonctionner avec un induit en **court-circuit**, sur lequel il n'y a pas donc pas besoin de connexion électrique. Ceci permet de s'affranchir des problèmes liés aux collecteurs et aux balais, rencontrés dans le moteur à courant continu par exemple.

Ce moteur peut, selon sa construction, être relié par son circuit inducteur à un réseau électrique alternatif monophasé ou polyphasé. Nous étudierons pour notre part le cas où le moteur est alimenté par un réseau **triphasé**. En effet, les moteurs triphasés présentent pour une même puissance des performances jusqu'à 50 % supérieures à leurs homologues monophasés.

Le moteur asynchrone offre le meilleur rapport-qualité prix parce qu'il est facile à construire et parce qu'il est performant. Qui plus est, l'entretien est plus simple que dans le cas d'un moteur à courant continu, justement parce qu'il n'y a ni collecteur, ni balais.

2 Principe de fonctionnement

Nous avons vu dans le cas d'un alternateur synchrone qu'un champ magnétique tournant sur des bobines décalées de 120 degrés crée un système triphasé équilibré de forces électromotrices. Le moteur asynchrone utilise le phénomène inverse, c'est à dire l'injection d'un courant triphasé pour créer un champ tournant.

Nous avons reporté sur la Fig. 1 le schéma de principe du fonctionnement du moteur asynchrone. Des courants sinusoïdaux de pulsation ω sont injectés dans des bobines décalées de 120 degrés dans l'espace, c'est à dire de $2\pi/3$ rad, avec un déphasage φ de $2\pi/3$. Ceci permet de créer trois composantes élémentaires du champ magnétique qui sont elles-mêmes sinusoïdales et de pulsation ω . La variation alternative de ces trois composantes crée au sein des bobines **un champ magnétique tournant**. La vitesse de rotation de ce champ magnétique s'appelle la **vitesse de synchronisme**. Elle est fonction de ω ainsi que du nombre de paires de bobines utilisées pour créer le champ.

Si l'on place au milieu des bobines un conducteur, celui-ci sera soumis à des variations de flux ϕ de champ magnétique, étant donné qu'il voit passer un champ tournant, donc variable. Sous l'effet de la loi de Faraday, une force électromotrice induite apparaît alors, créant ainsi des courants induits. Remarquons que cette force électromotrice ne peut exister qu'à condition que :

$$\frac{d\phi}{dt} \neq 0 \quad (1)$$

Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple de forces de Laplace qui

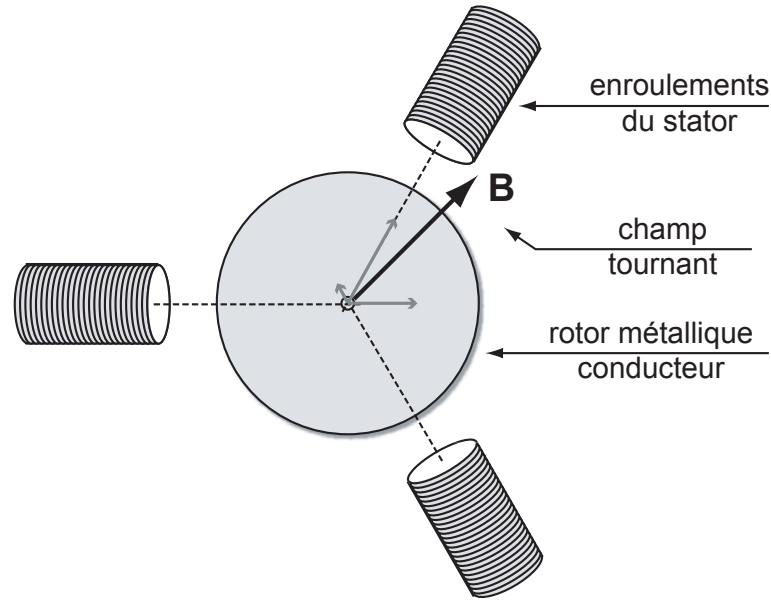


FIG. 1 : Schéma de principe du fonctionnement du moteur asynchrone.

tend à mettre le conducteur en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux, selon la loi de Lenz : celui-ci se met alors à tourner pour tenter de suivre le champ magnétique.

3 Technologie du moteur asynchrone

3.1 Les circuits électriques

3.1.1 Le stator est l'inducteur

Le stator constitue l'**inducteur** du moteur asynchrone : c'est dans le stator que se situent les bobines inductrices décrites précédemment et que le champ magnétique va prendre naissance. Il est relié au réseau électrique triphasé. Notons qu'un stator de moteur asynchrone est fabriqué **exactement de la même manière** qu'un stator d'alternateur synchrone. Aussi, dans le cas triphasé, le stator est constitué de trois phases parcourues par des courants alternatifs triphasés, chaque phase pouvant mettre en jeu plusieurs paires de pôles.

Les courants du stator créent le champ magnétique tournant à la vitesse angulaire Ω_s , appelée vitesse de synchronisme, et donnée par :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (2)$$

où ω est la pulsation des courants alternatifs et où p est le nombre de **paires** de pôles. La vitesse angulaire de synchronisme Ω_s peut être exprimée en nombre de tours par unité de

temps. Sa valeur n_s est alors donnée par la relation :

$$n_s = \frac{\Omega_s}{2\pi} = \frac{f}{p} \quad (3)$$

où f est la fréquence du courant alternatif.



Dans la pratique, n_s sera donnée en tr/min, mais l'unité du système international est le tr/s (ou la s^{-1}).

3.1.2 Le rotor est l'induit

Le **rotor** du moteur asynchrone n'est fixé à **aucune alimentation électrique**. Il est constitué de conducteurs en court-circuit qui sont parcourus par des courants induits : les courants rotoriques. Ces conducteurs peuvent être constitués par un ensemble de bobinages (rotor bobiné) ou bien une cage d'écureuil (voir Fig. 2). Le rotor à cage d'écureuil tient

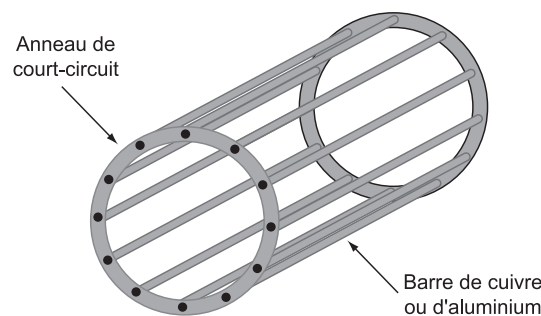


FIG. 2 : Rotor en cage d'écureuil

son nom de sa forme. Il est constitué de barres conductrices très souvent en aluminium. Les extrémités de ces barres sont réunies par deux anneaux également conducteur. Nous étudierons, en travaux pratiques, le cas d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil. C'est le rotor le plus utilisé dans les moteurs asynchrones.

3.2 Symboles électriques

Les symboles électriques du moteur asynchrone dans le cas d'un rotor bobiné et dans celui d'un rotor à cage d'écureuil sont reportés sur la Fig. 3.

4 Fonctionnement du moteur asynchrone

4.1 Glissement

Le moteur est dit **asynchrone** car il est impossible au rotor d'atteindre la même vitesse que le champ statorique : le rotor a toujours un temps de retard sur les courants statoriques. Cela peut se comprendre de façon intuitive puisque le champ tournant doit

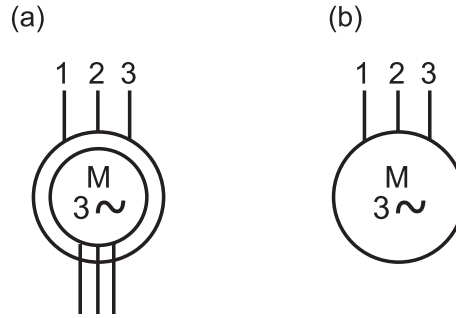


FIG. 3 : Symboles électriques du moteur asynchrone à rotor bobiné (a) et à cage d'écureuil (b).

d'abord donner naissance aux courants rotoriques avant d'interagir avec eux. Or, si le rotor arrivait à tourner à la même vitesse que le champ magnétique tournant, l'ensemble des conducteurs constituant le rotor seraient plongés dans un flux magnétique qui, pour eux, deviendrait constant : la relation de Faraday (1) ne serait plus vérifiée. De fait, les courants rotoriques ne seraient pas induits et ne pourraient pas produire de couple : le rotor du moteur ne serait alors plus entraîné.

La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée **le glissement**, nous le noterons g . Le glissement dépend de la charge mécanique du moteur : plus le moteur doit délivrer un couple important, plus le rotor glisse. En effet, on peut imaginer qu'un rotor ayant une charge plus importante ait plus de difficulté à suivre le champ magnétique. Le glissement est défini par les vitesses de synchronisme et du rotor selon la relation :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4)$$

4.2 Fonctionnement à vide

À vide, le rotor n'entraîne pas de charge. Par conséquent, le glissement est pratiquement nul et le rotor tourne quasiment à la vitesse de synchronisme : on supposera que, **à vide**, $g = 0$ et $n = n_s$.

Le facteur de puissance $\cos \varphi$ à vide est très faible (il est inférieur à 0,2), en conséquence de quoi le courant absorbé est élevé : si la puissance active absorbée P est faible en l'absence de charge, la **puissance réactive** Q consommée est **élevée**. Le courant absorbé, essentiellement réactif, est un **courant de magnétisation** : il sert à créer le champ magnétique tournant.

4.3 Fonctionnement en charge

Lorsque l'on charge le moteur, c'est à dire lorsqu'on lui demande de fournir un effort mécanique, la consommation de puissance active augmente et le stator absorbe un courant actif.

De plus, comme nous pourrions le montrer au prochain paragraphe, le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge.

4.3.1 Caractéristiques mécaniques

Nous avons reporté sur la Fig. 4 l'allure de la caractéristique du couple utile d'un moteur asynchrone en fonction de la vitesse de rotation et du glissement.

$$T_u = f(n) \quad (5)$$

où T_u est le couple utile. Nous avons repéré la zone de fonctionnement du moteur asyn-

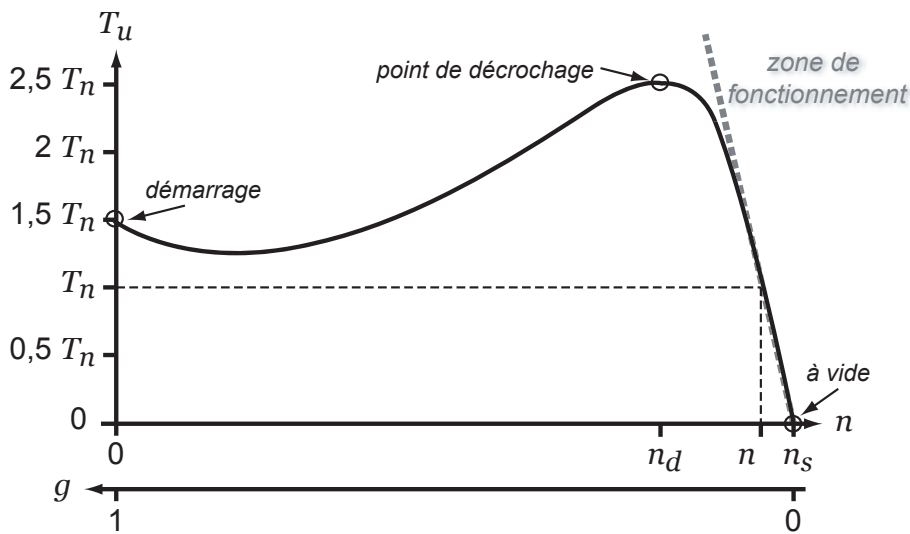


FIG. 4 : Allure du couple utile T_u d'un moteur asynchrone en fonction de la vitesse de rotation du rotor n et du glissement g . La valeur T_n est celle du couple nominal.

chrone, c'est à dire les conditions de vitesse, de glissement et de couple dans lesquelles le moteur va travailler après avoir démarré. Celle-ci se trouve dans la zone des valeurs élevées de n , c'est à dire pour les faibles valeurs du glissement g . Nous pouvons remarquer que, dans ce régime, la vitesse varie peu en fonction de la charge, et que l'on peut approcher la caractéristique $T_u(n)$ par une droite, de sorte que :

$$T_u = an + b \quad (6)$$

où a et b sont des constantes.

D'autre part, nous pouvons observer que, toujours dans la zone de fonctionnement, le couple utile est proportionnel au glissement, et, de fait :

$$T_u = kg \quad (7)$$

où k est une constante.

Nous avons aussi reporté sur la Fig. 4 la vitesse de décrochage n_d : lorsque le moteur est en fonctionnement, si la charge amène la vitesse de rotation du moteur à descendre en dessous de n_d alors celui-ci cale. Typiquement, $n_d \simeq 0,8 \cdot n_s$.

4.4 Bilan des puissances et des pertes

Le bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone est reporté sur la Fig. 5. Le moteur asynchrone absorbe sur le réseau une puissance électrique active triphasée P_a .

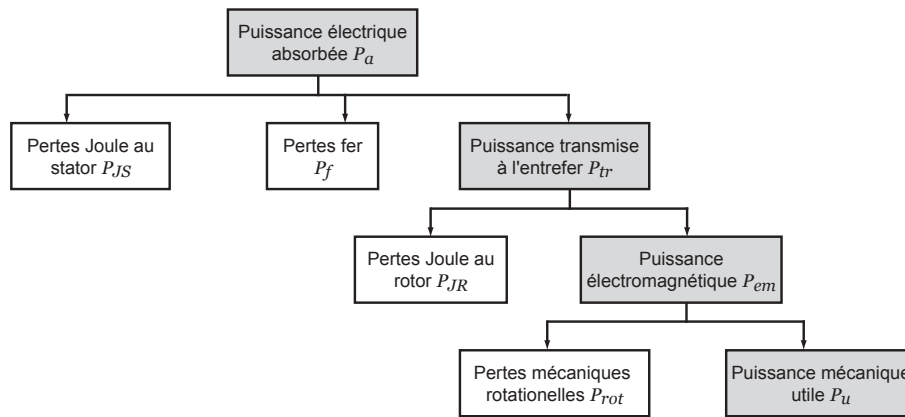


FIG. 5 : Bilan des puissances dans un moteur asynchrone.

Une partie P_{JS} de cette puissance est dissipée par effet Joule dans les enroulements du stator. Par la suite, le champ magnétique inducteur entraîne des pertes dans le fer P_f , par hystérésis et par courant de Foucault. Le reste de la puissance P_{tr} est transmis au rotor à travers l'entrefer. La majeure partie de cette puissance est alors utilisée pour produire une puissance électromagnétique P_{em} , tandis que la présence d'un courant induit dans le rotor provoque des pertes par effet Joule P_{JR} .

La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile P_u qui sera par la suite transmise à la charge par le biais d'un arbre de transmission ou d'une courroie de distribution. Toutefois, dans le mouvement du rotor, une partie de la puissance est perdue par divers mécanismes de frottements, c'est ce que l'on appelle les pertes rotationnelles P_{rot} .

Nous donnons par la suite les différentes relations permettant de calculer les pertes et les puissances impliquées dans le moteur asynchrone, lorsqu'elles sont calculables.

4.4.1 La puissance absorbée

La puissance absorbée par un moteur asynchrone est une **puissance active électrique**. Lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé, P_a vérifie la relation :

$$P_a = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad (8)$$

où U est la tension composée aux bornes du moteur, I le courant de ligne, et $\cos \varphi$ le facteur de puissance du moteur. Remarquons que U et I sont accessibles **directement sur la ligne** et peuvent par conséquent être mesurés de la même manière quelque soit le couplage du moteur avec le réseau électrique. En TP, nous utiliserons la méthode des deux wattmètres pour faire la mesure de la puissance absorbée.

4.4.2 Les pertes par effet Joule au stator P_{JS}

Le stator peut être câblé en étoile ou en triangle. Puisque le moteur constitue un récepteur triphasé équilibré, alors¹ :

$$P_{JS} = \frac{3}{2}RI^2 \quad (9)$$

où R est la **résistance entre deux bornes**.

Dans le montage étoile, la résistance entre deux bornes R est reliée à la résistance de chaque enroulement r par la relation :

$$R = 2r \quad (10)$$

Dans le montage triangle, cette relation devient :

$$R = \frac{2}{3}r \quad (11)$$

4.4.3 Les pertes fer

Les pertes fer sont fonctions du flux magnétique. Elles ne dépendent donc que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statoriques. Or, en régime de fonctionnement, ces grandeurs ne varient pas et, par conséquent, les pertes fer peuvent être considérées comme **constantes quelle que soit la charge** du moteur.

Dans la pratique, les pertes fer sont mesurées lors d'un **essai à vide**, en même temps que les pertes rotationnelles.

4.4.4 La puissance transmise dans l'entrefer P_{tr}

La puissance transmise au rotor à travers l'entrefer P_{tr} est la partie de puissance absorbée qui n'est pas perdue dans les enroulements du stator et dans le fer. Aussi :

$$P_{tr} = P_a - (P_{JS} + P_f) \quad (12)$$

¹Les pertes par effet Joule dans les récepteurs triphasés sont décrites dans les notes de cours d'“*Électricité 2 – Électrotechnique*” sur les “*Systèmes triphasés équilibrés*”

4.4.5 Pertes Joule au rotor P_{JR}

Les pertes Joule au rotor sont fonctions de la puissance transmise à celui-ci. On peut par ailleurs montrer qu'elles sont aussi fonctions du glissement. En effet, les grandeurs P_{JR} et P_{tr} sont liées par la relation :

$$P_{JR} = g \cdot P_{tr} \quad (13)$$

4.4.6 Puissance électromagnétique P_{em} et moment du couple électromagnétique T_{em}

La puissance électromagnétique P_{em} transmise au rotor est égale à :

$$P_{em} = P_{tr} - P_{JR} = (1 - g) \cdot P_{tr} \quad (14)$$

Le rotor, tournant à la vitesse Ω , est soumis à un couple électromagnétique T_{em} et reçoit par conséquent une puissance électromagnétique égale à :

$$P_{em} = T_{em} \cdot \Omega \quad (15)$$

En injectant l'équation (14) dans (15), on peut montrer que :

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} \quad (16)$$

4.4.7 Pertes mécaniques rotationnelles

Les pertes rotationnelles dépendent uniquement de la vitesse de rotation du moteur. Or, nous l'avons vu précédemment, la vitesse du moteur ne varie que relativement peu avec la charge, la vitesse de décrochage étant relativement proche de la vitesse de synchronisme. Dans un moteur asynchrone, les pertes rotationnelles seront par conséquent considérées comme **constantes**, et déterminées à l'aide d'un **essai à vide**.

4.4.8 Puissance mécanique et couple utiles P_u et T_u

Le rotor déploie un couple utile T_u à la vitesse Ω . Il délivre alors la puissance utile P_u telle que

$$P_u = T_u \cdot \Omega \quad (17)$$

4.4.9 Rendement

Le rendement η du moteur asynchrone est le rapport entre la puissance utile mécanique qu'il fournit et la puissance électrique qu'il absorbe, de sorte que :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (18)$$

À l'aide de la chaîne des pertes, on peut aussi écrire :

$$\eta = \frac{P_a - \text{pertes}}{P_a} = \frac{P_a - P_{JS} - P_f - P_{JR} - P_{rot}}{P_a} \quad (19)$$

4.5 Détermination des pertes constantes

Les pertes constantes P_c , aussi appelées pertes collectives, regroupent les pertes fer et les pertes rotationnelles. Pour les déterminer, on réalise un essai à vide. En effet, si l'on regarde le bilan des pertes et des puissances de la Fig. 5, on voit que :

$$P_{u0} = P_{a0} - P_{JS0} - P_c - P_{JR0} \quad (20)$$

Or, à vide, le glissement est nul : $g_0 = 0$ et donc $P_{JR0} = 0$. De plus, toujours à vide, le moteur ne délivre pas de puissance utile et donc $P_{u0} = 0$. En remplaçant ces valeurs dans l'équation (20), il vient que :

$$P_c = P_{a0} - P_{JS0} \quad (21)$$

Pour mesurer les pertes constantes dans un moteur asynchrone, il suffit de mesurer la puissance absorbée (à l'aide d'un wattmètre par exemple) et de retrancher les pertes Joule au stator (calculées après une mesure à l'ampèremètre).