

Moteur asynchrone triphasé

1. Constitution et principe de fonctionnement

1.1. Stator = inducteur

Il est constitué de trois enroulements (bobines) parcourus par des courants alternatifs triphasés et possède p paires de pôles.

Champ tournant

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique \vec{B}_1 tournant à la pulsation de synchronisme :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

Ω_s : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en rad.s^{-1} .

ω : pulsation des courants alternatifs en rad.s^{-1} . $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

p : nombre de paires de pôles.

1.2. Rotor = induit

Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Il tourne à la vitesse de rotation Ω .

Rotor à cage d'écureuil

Il est constitué de barres conductrices très souvent en aluminium. Les extrémités de ces barres sont réunies par deux couronnes également conductrices. On dit que **le rotor est en court-circuit**. Sa résistance électrique est très faible.

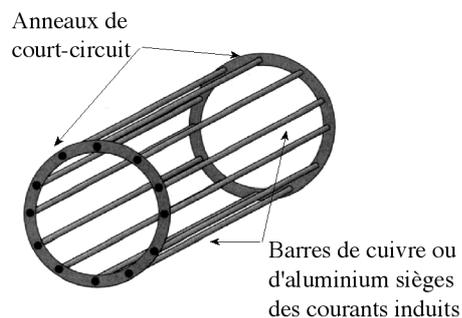


Schéma de principe d'une cage d'écureuil

1.3. Entrefer

L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor.

1.4. Glissement

Le rotor tourne à la vitesse Ω plus petite que la vitesse de synchronisme Ω_s .

On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant.

Ce glissement g va dépendre de la charge.

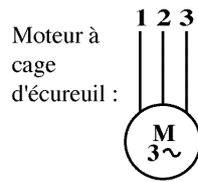
$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

n_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr.s^{-1}).

n : vitesse de rotation du rotor (tr.s^{-1}).

$\Omega_s = 2\pi n_s$ (rad.s^{-1}) et $\Omega = 2\pi n$ (rad.s^{-1})

2. Symboles



3. Caractéristiques

3.1. Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

Conséquence : le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

A vide : $g = 0$ et donc $n_0 = n_s$

Autres observations :

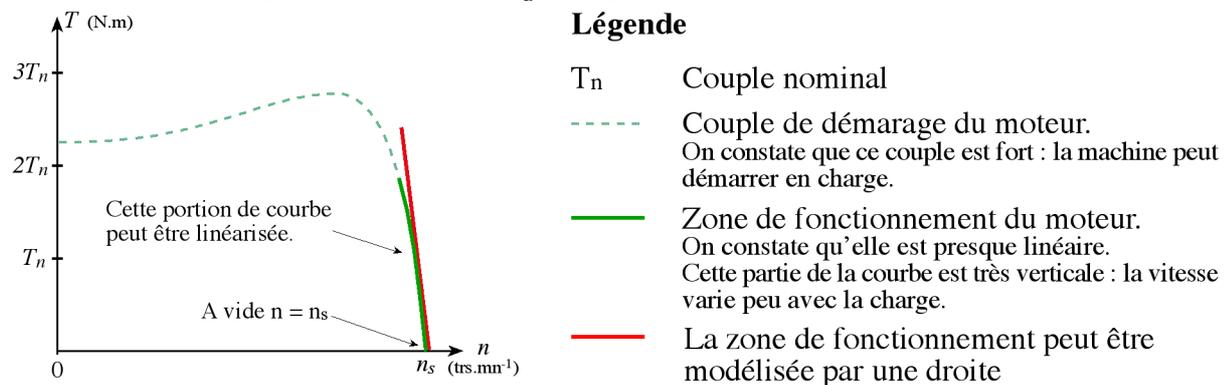
- le facteur de puissance à vide est très faible ($< 0,2$) et le courant absorbé reste fort (P est petit et Q est grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (ils servent à créer le champ magnétique).

3.2. Fonctionnement en charge

Le moteur fournit maintenant de la puissance active, le stator appelle un **courant actif**.

Remarque : le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge.

3.3. Caractéristique mécanique $T_u = f(n)$



3.4. Modélisation de la partie utile de la courbe

On veut déterminer l'équation de la droite qui modélise la partie utile de la caractéristique mécanique.

Il faut deux points : - 1^{er} point évident : $A_1 \begin{pmatrix} n_s \\ 0 \end{pmatrix}$

- 2^e point : il faut un essai de la machine $A_2 \begin{pmatrix} n_2 \\ T_2 \end{pmatrix}$

Equation d'une droite : $y = a.x + b$ soit $T_u = a.n + b$

Coefficient directeur (pente) : $a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ soit $a = \frac{T_2 - 0}{n_2 - n_s}$

$|a|$ est grand (droite presque verticale) et a est négatif.

Ordonnée à l'origine : point A_1 $0 = a.n_s + b$ soit $b = -a.n_s$

Remarque : le point A_2 peut aussi être fourni par les informations figurant sur la plaque signalétique de la machine (couple nominal T_n et vitesse nominale n_n).

3.5. Caractéristique mécanique en fonction du glissement

3.5.1. Changement d'axe

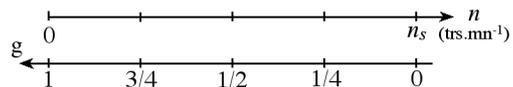
L'axe des abscisses de la caractéristique mécanique peut être représenté par le glissement

En effet : $n = n_s \Rightarrow g = \frac{n_s - n}{n_s} = 0$

$n = n_s / 2 \Rightarrow g = 0,5$

$n = 0 \Rightarrow g = 1$

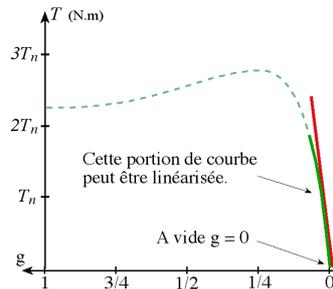
L'axe en n et l'axe en g sont inversés.



D'où la même caractéristique avec l'axe en g .

Cette fois ci le modèle est une droite passant par l'origine, donc d'équation :

$y = k.x$ soit $T_u = k.g$



Finalemment :

Au voisinage du point de fonctionnement nominal, le couple utile est proportionnel au glissement.

$\boxed{T_u = k.g}$ k est une constante de proportionnalité (coefficient directeur) en N.m.

3.5.2. Relation entre a et k

Au paragraphe 3.4, nous avons vu que : $T_u = a.n + b$ avec $b = -a.n_s$

Ce qui donne : $T_u = a.n - a.n_s = -a(n_s - n)$

En remarquant que : $g = \frac{n_s - n}{n_s}$ soit $n_s - n = n_s.g$

On obtient : $T_u = -a.n_s.g = k.g$ avec $\underline{k = -a.n_s}$

3.6. Résumé des caractéristiques

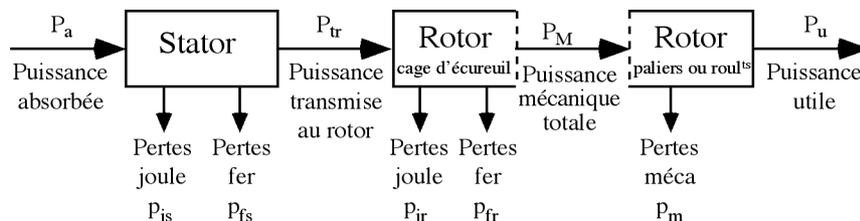
- A vide, le courant est non négligeable, mais la puissance absorbée est surtout réactive (Q) ;
- le couple et le courant de démarrage sont importants ;

- l'intensité du courant absorbée augmente avec le glissement ;
- la machine asynchrone peut démarrer en charge.

On retiendra que :

- la vitesse du champ tournant est : $n_s = \frac{f}{p}$ (f la fréquence du courant et p le nombre de paires de pôles) ;
- le glissement est le rapport entre la vitesse du champ et celle du rotor : $g = \frac{n_s - n}{n_s}$;
- à vide $g = 0$ et $n_0 = n_s$;
- quelle que soit la charge la vitesse de rotation varie très peu ($n \approx n_s$) ;
- en fonctionnement nominal le moment du couple utile est proportionnel au glissement $T_u = k.g$

4. Bilan des puissances



4.1. Puissance électrique absorbée : P_a

$$P_a = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

U : tension entre deux bornes du moteur
 I : courant en ligne

4.2. Pertes par effet joule au stator : p_{js}

$$p_{js} = \frac{3}{2} RI^2$$

R : résistance entre deux bornes du stator

4.3. Pertes fer au stator : p_{fs}

Elles ne dépendent que de la tension U et de la fréquence f et sont donc constantes si le moteur est couplé au réseau.

4.4. Puissance transmise : P_{tr}

$$P_{tr} = P_a - p_{js} - p_{fs}$$

C' est la puissance que reçoit le rotor.

4.5. Moment du couple électromagnétique : T_{em}

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse Ω_s : elles *glissent* sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse Ω . L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant de moment T_{em} .

$$T_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$$

T_{em} (N.m)
 P_{tr} (W)
 Ω_s (rad.s⁻¹)

4.6. Puissance mécanique totale : P_M

Le couple électromagnétique de moment T_{em} entraîne le rotor à la vitesse Ω . Il lui communique donc la puissance mécanique totale P_M .

$$P_M = T_{em} \Omega \quad \text{soit} \quad P_M = T_{em} \Omega = P_{tr} \frac{\Omega}{\Omega_s} = P_{tr}(1 - g)$$

$$\boxed{P_M = P_{tr}(1 - g)}$$

Cette puissance comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.

4.7. Pertes par effet joule et pertes dans le fer au rotor : p_{jr} et p_{fr}

Ces pertes représentent la différence entre P_{tr} et P_M . On les calcule d'après le bilan des puissances.

Donc : $p_{jr} + p_{fr} = P_{tr} - P_M = P_{tr} - P_{tr}(1 - g) = gP_{tr}$

$$\boxed{p_{jr} \approx gP_{tr}}$$

Les pertes fer du rotor sont négligeables.

4.8. Pertes mécaniques : p_m

$$p_m = P_u - P_M$$

La vitesse de rotation variant peu en marche normale, ces pertes sont pratiquement constantes.

4.9. Pertes « collectives » : p_c

Ces pertes ne dépendent que de U, f et n. Comme ces grandeurs sont généralement constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques le sont aussi.

$$p_c = p_{fs} + p_m$$

On définit le couple de perte :

$$\boxed{T_p = \frac{p_c}{\Omega_s}}$$

Le couple de perte est une grandeur constante quelle que soit la vitesse et la charge de la machine

4.10. Puissance utile : P_u

Puissance utile : $P_u = P_M - p_m$

Couple utile : $T_u = \frac{P_u}{\Omega}$

Rendement : $\eta = \frac{P_u}{P_a}$

4.11. Bilan des puissances à vide

Le bilan total, quelque soit la situation, est : $P_a = P_u + p_{js} + p_{jr} + p_c$

A vide : $T_u = 0 \Rightarrow P_u = 0$

$$g = 0 \Rightarrow p_{jr} = 0 \quad (\text{voir } \S 3.7)$$

$$P_{a0} = \sqrt{3}UI_0 \cos\phi_0$$

$$p_{js0} = \frac{3}{2}RI_0^2$$

$$p_c \text{ à vide} \approx p_c \text{ en charge}$$

Bilan à vide : $P_{a0} = p_{js0} + p_c$

En simplifiant : $P_{a0} \approx p_c$ (les pertes joules à vide sont négligeables)

Un essai à vide permettra de déterminer les pertes collectives.

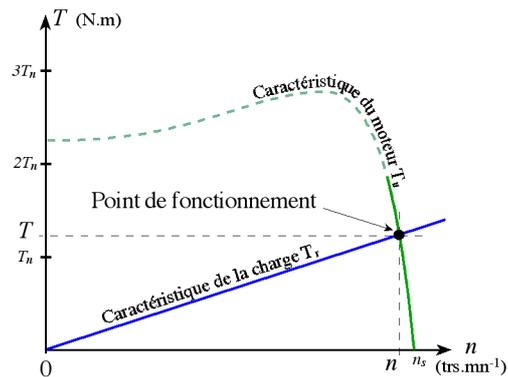
5. Point de fonctionnement du moteur en charge

C'est le point d'intersection des caractéristiques $T = f(n)$ du moteur et de la charge.

T_u : couple utile du moteur

T_r : couple résistant

La courbe du couple résistant dépend de la charge.



5.1 Méthode de résolution graphique

Tracer à l'échelle sur du papier millimétré les deux caractéristiques et relever les coordonnées du point d'intersection.

5.2 Méthode de résolution par le calcul

Il faut résoudre : $T_u = T_r$ soit : $a.n + b = T_r$

Exemple : cas d'une charge ayant un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse.

$$T_r = c.n^2$$

$$T_u = T_r \Rightarrow a.n + b = c.n^2$$

Finalement, il faut résoudre une équation du second degré :

$$c.n^2 - a.n - b = 0$$

Une solution sur les deux trouvées sera la bonne.

6. Plaque signalétique

Exemple d'une plaque signalétique d'un moteur asynchrone :

La puissance de 3kW est la puissance utile nominale

IP 55		I cl. F	40°C	S1	%	c/h
	Hz	min ⁻¹	kW	cos φ	A	
Δ	380	50	1415	3	0,83	7,1
Δ	400	50	1420	3	0,78	7,2
Δ	415	50	1430	3	0,74	7,3

7. Utilisation du moteur asynchrone

Comme la vitesse n reste très proche de la vitesse n_s de synchronisme, pour varier la vitesse du moteur il faut en fait varier la fréquence f_s à l'aide d'un onduleur .

Mais pour faire varier la vitesse sans modifier le couple utile il faut garder le rapport V_s / f_s constant (V_s est la tension d'alimentation d'un enroulement). Si on augmente la vitesse, il faut augmenter la fréquence et la tension d'alimentation dans les limites du bon fonctionnement de la machine.

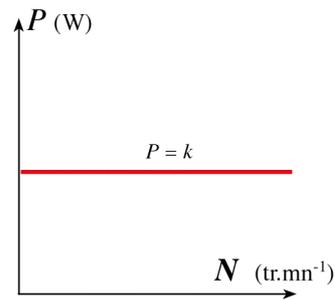
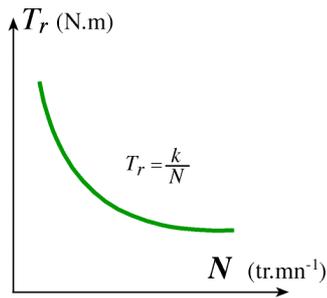
Le moteur asynchrone triphasé, d'une puissance de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus utilisé de tous les moteurs électriques. Son rapport coût/puissance est le plus faible. Associés à des onduleurs de tension, les moteurs asynchrones de forte puissance peuvent fonctionner à vitesse variable dans un large domaine (les derniers TGV, le Tram de Strasbourg, ...). Toutefois l'emploi de ce type de moteur est évité en très forte puissance ($P > 10$ MW) car la consommation de puissance réactive est alors un handicap.

Remarques : en électroménager (exemple : lave-linge) la vitesse des moteurs asynchrones n'est pas réglée par un onduleur, mais ces moteurs possèdent plusieurs bobinages. Il est alors possible de changer le nombre de paires de pôles et donc la vitesse.

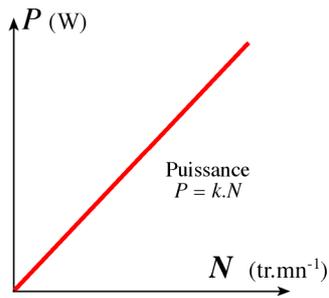
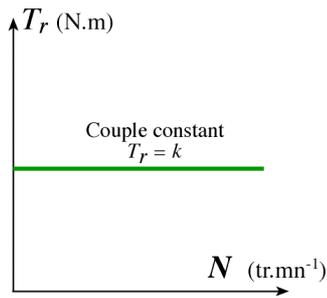
Toutes les machines électriques tournantes sont réversibles.

8. Complément : caractéristiques $T=f(n)$ de quelques charges

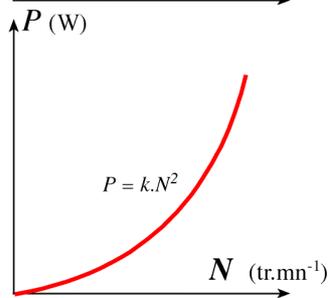
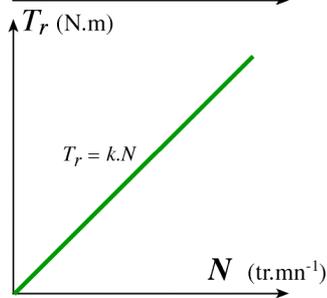
Machine à puissance constante (enrouleuse, compresseur, essoreuse)



Machine à couple constant (levage, pompe)



Machine à couple proportionnel à la vitesse (pompe volumétrique, mélangeur)



Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur)

