

## Machines asynchrones :

### Moteur asynchrone triphasé

#### 1. Constitution et principe de fonctionnement

##### Stator

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 tournant à la vitesse de synchronisme :

$$n_s = \frac{f}{p}$$

$n_s$  : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en  $\text{trs.s}^{-1}$ .

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

$p$  : nombre de paires de pôles.

##### Rotor

Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Il est constitué d'une masse métallique dont de l'aluminium pour l'alléger. On parle souvent de rotor à cage d'écureuil. On dit aussi qu'il est en court-circuit.

Il tourne à la vitesse de rotation  $n < n_s$

##### Entrefer

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

##### Glissement

Le rotor tourne à la vitesse  $n$  plus petite que la vitesse de synchronisme  $n_s$ .

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

Ce glissement  $g$  va dépendre de la charge.

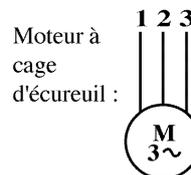
$$g = \frac{n_s - n}{n_s}$$

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

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

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

##### Symboles



## 2. Caractéristiques

### 2.1. 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.

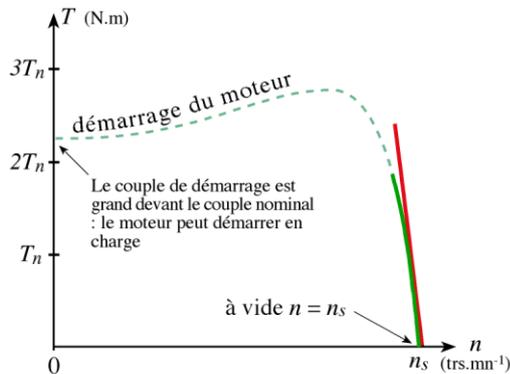
A vide :  $g = 0$  et donc  $n_0 = n_s$

### 2.2. 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.

### 2.3. Caractéristique mécanique $T_u = f(n)$



#### Légende

- $T_n$  Couple nominal
- Couple de démarrage du moteur.  
On constate que ce couple est fort : la machine peut démarrer en charge.
- Zone de fonctionnement du moteur.  
On constate qu'elle est presque linéaire.  
Cette partie de la courbe est très verticale : la vitesse varie peu avec la charge.
- La zone de fonctionnement peut être modélisée par une droite

### 2.4. 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<sup>er</sup> point évident :  $A_1(n_s; 0)$

- 2<sup>e</sup> point : il faut un essai de la machine  $A_2(n_2; T_2)$

Equation d'une droite :

$$y = a.x + b \quad \text{soit} \quad T_u = a.n + b$$

Coefficient directeur (pente) :

$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \text{soit} \quad a = \frac{T_2 - 0}{n_2 - n_s}$$

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

Ordonnée à l'origine : point  $A_1$

$$0 = a.n_s + b \quad \text{soit} \quad b = -a.n_s$$

On peut écrire :

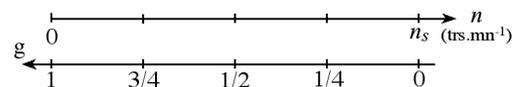
$$T_u = a(n - n_s)$$

**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  $n_n$ ).

### 2.5. Caractéristique mécanique en fonction du glissement

Changement d'axe

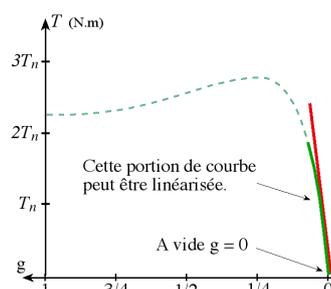
L'axe en  $n$  et l'axe en  $g$  sont inversés.



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 :

$$y = k.x \quad \text{soit} \quad T_u = k.g$$



### Finalemment :

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

$$T_u = k.g$$

k est une constante de proportionnalité (coefficient directeur) en N.m.

### 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  $k = -a.n_s$

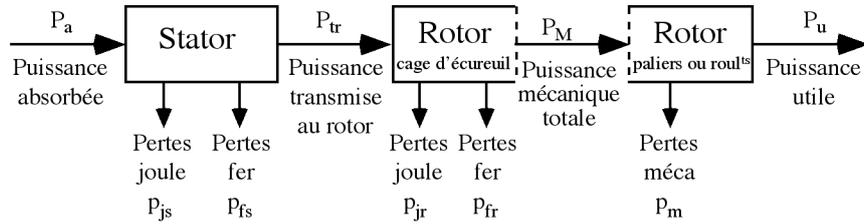
## 2.6. Résumé des caractéristiques

- 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 représente la différence de vitesse entre le champ et le 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  
 $T_u = k.g$

### 3. Bilan des puissances



**Puissance électrique absorbée**

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

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

**Pertes par effet joule au stator**

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

R : résistance entre deux bornes du stator

**Puissance transmise :  $P_{tr}$**

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

C'est la puissance que reçoit le rotor.

**Moment du couple électromagnétique :  $T_{em}$**

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse  $\Omega_s$  : elles **glissent** sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse  $\Omega$ . 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) ;  $\Omega_s$  (rad.s<sup>-1</sup>)

**Puissance mécanique totale :  $P_M$**

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

$$P_M = T_{em} \Omega$$

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

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

Cette puissance comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.

**Pertes fer au rotor :  $p_{fr}$**

Ces pertes sont négligeables

**Pertes joules au rotor**

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

$$p_{jr} \approx g \cdot P_{tr}$$

Les pertes fer du rotor sont négligeables.

**Pertes collectives :  $p_c$**

$$P_c = p_{js} + P_m$$

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.

**Couple de perte :**

$$T_p = \frac{P_c}{\Omega_s}$$

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

**Autres :**

$$P_u = P_M - P_m \quad ; \quad T_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad ; \quad \eta = \frac{P_u}{P_a}$$

**Bilan complet :**

$$P_a = P_u + p_{js} + p_{jr} + P_c$$

### Bilan des puissances à vide

A vide :  $T_u = 0 \Rightarrow P_u = 0$  et  $g = 0 \Rightarrow p_{jr} = 0$   
 $P_{a0} = \sqrt{3}UI_0 \cos \varphi_0$  et  $p_{js0} = \frac{3}{2}RI_0^2 \approx 0$  (car  $I_0$  est faible)  
 $p_c$  à vide  $\approx p_c$  en charge

**Bilan à vide :**  $P_{a0} \approx p_c$

Un essai à vide permettra de déterminer les pertes collectives.

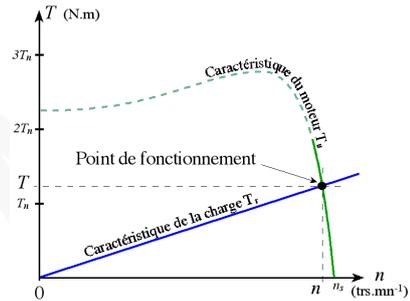
### 4. Point de fonctionnement du moteur en charge

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 de la charge

La courbe du couple résistant dépend de la charge.



### Méthode de résolution graphique

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

### Méthode de résolution par le calcul

Il faut résoudre :  $T_u = T_r$

**Exemple :** cas d'une charge ayant un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse :  $T_r = c.n^2$

Le couple utile du moteur est :  $T_u = a.n + b$

$$T_u = T_r \Rightarrow a.n + b = c.n^2 \Rightarrow c.n^2 - a.n - b = 0$$

Finalement, il faut résoudre une équation du second degré. Une solution sur les deux trouvées sera la bonne (une des solutions n'aura pas de signification physique).

### 5. Plaque signalétique

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

La puissance de 3kW est la puissance utile nominale.

Ce moteur est prévu pour être brancher en triangle sur un réseau de 380V à 415V.

DM 1502		MOT. 3 ~ LS 100 L		22 kg	
IP 55		I cl. F	40°C	S1	%
Δ 380		50	1415	3	0,83
Δ 400		50	1420	3	0,78
Δ 415		50	1430	3	0,74
		Hz	min <sup>-1</sup>	kW	cos φ
					A
					7,1
					7,2
					7,3
MADE IN FRANCE		MOTEURS LEROY-SOMER			
DE		h			
NDE		h			

## 6. Autres informations

### Réglage de la vitesse :

$$\frac{V}{f} = \text{constante}$$

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 tension / fréquence constant.

$V$  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.

### Intérêts et utilisation :

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.

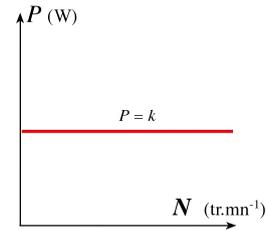
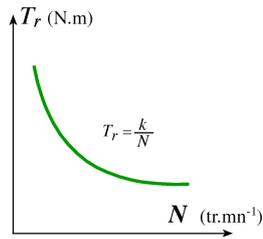
**Remarques :** en électroménager (lave-linge) la vitesse des moteurs asynchrones n'est pas réglée par un onduleur, mais ces moteurs possèdent plusieurs bobinages. Il est alors possible de changer le nombre de paires de pôles et donc la vitesse.

### Réversibilité :

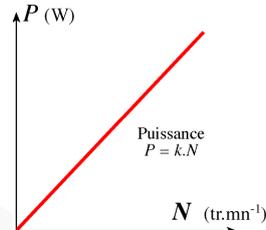
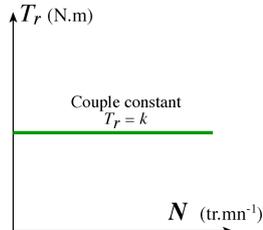
Toutes les machines électriques tournantes sont réversibles.

## 7. Complément : caractéristiques $T_r=f(n)$ de quelques charges

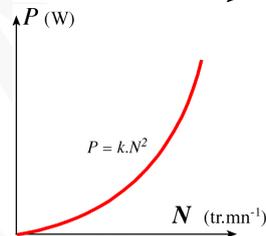
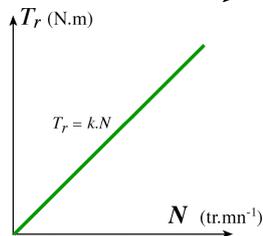
Machine à puissance constante (enrouleuse, compresseur, essoreuse)



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)

