

MOTEUR ASYNCHRONE

Rappel: trois bobines, dont les axes font entre eux des angles de 120° et alimentées par un réseau triphasé équilibré, crée dans l'entrefer un champ magnétique radial, tournant à la fréquence de synchronisme n_s .

Un rotor placé au centre de ces 3 bobines est traversé par les courants de Foucault (de manière à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance: *loi de Lenz*).

La fréquence de rotation du rotor est légèrement inférieure à celle du champ tournant; d'où l'appellation de moteur asynchrone.

I. CONSTITUTION ET PRINCIPE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE.

1.1. Stator ou inducteur

Il est analogue à celui d'une machine synchrone. Il comporte trois enroulements placés dans les encoches d'une carcasse ferromagnétique.

Le stator constitue l'inducteur du moteur et a pour rôle de créer un champ tournant dans l'entrefer de la machine.

Alimenté par un réseau triphasé de fréquence f , le stator crée $2p$ pôles inducteurs et le champ magnétique tournant à la fréquence de synchronisme n_s telle que:

$$n_s = 60 \frac{f}{p} \quad \text{ou encore} \quad \Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

n_s : vitesse de rotation en tr.min⁻¹

f : fréquence du réseau

p : nombre de paire de pôles

$\omega = 2\pi f$: pulsation en rad.s⁻¹

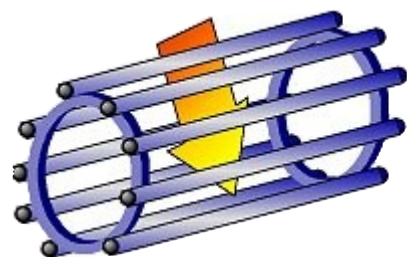
1.2. Rotor ou induit

Il existe deux types de rotor:

- ✓ rotor en cage d'écureuil;
- ✓ rotor bobiné.

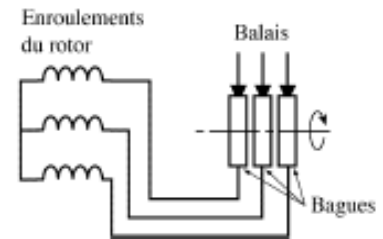
a) Rotor en cage d'écureuil

Des barres métalliques parallèles sont reliées par deux couronnes de faible résistance. Ce rotor, facile à construire, présente un faible coût.



b) Rotor bobiné

Les conducteurs logés dans les encoches du rotor forment un enroulement triphasé, dont le nombre de pôles est le même que celui du stator. Les extrémités de ces enroulements sont soudées à trois bagues solidaires de l'arbre de rotation. Des balais frottant sur ces bagues permettent d'accéder au rotor.

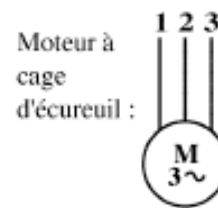
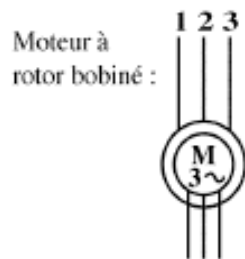


Remarques:

- Quelque soit son type, en marche normal, le rotor en court-circuit n'est traversé que par les courants de Foucault induits par la rotation du champ magnétique.
- Seul le rotor étant alimenté, le moteur asynchrone constitue un récepteur triphasé équilibré.

1.3. Symboles.

Deux symboles sont utilisés suivant le type de rotor:

**1.4. Couplage des enroulements.**

Les indications 230/400 V signifient que ce moteur peut être alimenté par un réseau 230 V ou par un réseau 400 V. La tension nominale aux bornes d'un enroulement du stator est la plus petite de ces deux valeurs (230 V).

Avec un réseau 230 V, il faut donc coupler les enroulements du moteur en triangle. L'intensité du courant I du réseau et l'intensité J dans un enroulement couplé en triangle sont liées par la relation:

$$J = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Avec un réseau 400 V, il faut coupler les enroulements en étoile afin que chacun d'entre eux soit alimenté sous une tension simple. L'intensité dans un enroulement J est égale à celui fournit par le réseau :

$$I = J$$

1.5. Glissement.

Le champ tournant à la fréquence de synchronisme n_s (en tr.min^{-1}) (où à la vitesse $\Omega_s = \frac{\pi n_s}{30}$) et le rotor à la fréquence n (en tr.min^{-1}) (où à la vitesse $\Omega = \frac{\pi n}{30}$), on définit le glissement g par la relation:

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

On exprime généralement g en pourcentage.

La fréquence de rotation n' se mesure à l'aide d'un tachymètre. La valeur de $n_s = 60 \frac{f}{p}$ est imposée pour le moteur par la fréquence f du réseau.

En France $f = 50$ Hz

$$p = 1 \quad n_s = 60 \cdot \frac{50}{1} = 3000 \text{tr.min}^{-1}$$

$$p = 2 \quad n_s = 60 \cdot \frac{50}{2} = 1500 \text{tr.min}^{-1}$$

$$p = 3 \quad n_s = 60 \cdot \frac{50}{3} = 1000 \text{tr.min}^{-1}$$

A partir de la plaque signalétique, on définit aussi bien n_s que p .

II. ETUDE À VIDE ET EN CHARGE

2.1. Etude à vide

A vide, le moteur n'entraîne pas de charge. Dans ce fonctionnement, le rotor tourne pratiquement au synchronisme $g_v \approx 0$ (0,7 %).

L'intensité du courant en ligne est importante (20% du courant nominal) et le facteur de puissance est faible: il s'agit essentiellement d'un courant réactif, ou magnétisant, qui crée le champ magnétique.

2.2. Etude en charge

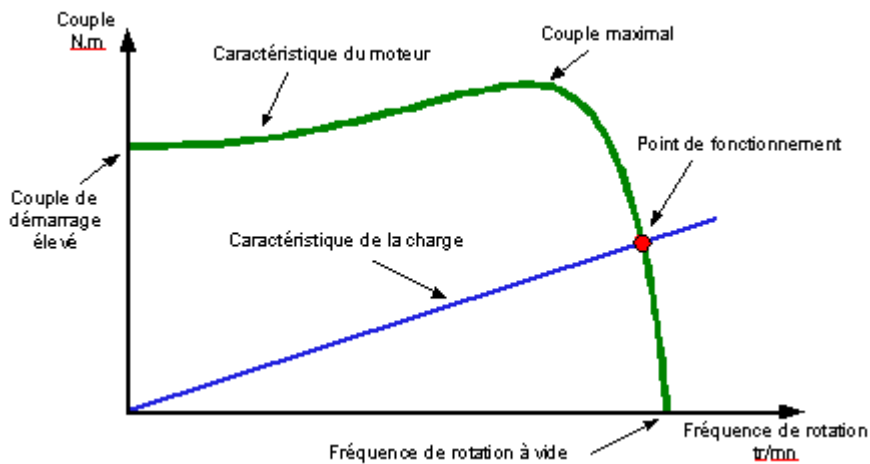
Le stator étant toujours alimenté par le réseau, augmentons progressivement la charge entraînée par le moteur jusqu'au fonctionnement nominal. Nous constatons que:

- ✓ l'intensité du courant absorbé croit.
- ✓ Le facteur de puissance augmente (0,1 à 0,8)
- ✓ la fréquence de rotation diminue

Le facteur de puissance augmente: le moteur fournissant maintenant de la puissance, le stator appelle un courant actif.

III. CARACTÉRISTIQUES

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



La caractéristique montre que le moment du couple utile:

- ✓ est important au démarrage;
- ✓ présente un maximum;
- ✓ varie de façon presque linéaire au voisinage de la fréquence de rotation nominale. Cette zone correspondant au fonctionnement normal du moteur, nous y établissons l'équation de la caractéristique: $T_u = a.n + b$

$$\begin{array}{l} \text{A vide :} \quad T_u = 0 \quad n_s = n_v \Rightarrow 0 = a.n_s + b \Rightarrow b = -a.n_s \\ \text{au point nominal:} \quad T_{uN} \quad n = n_N \quad T_{uN} = a.n_N + b = a.n_N - a.n_s = a.(n_N - n_s) \end{array}$$

$$\text{or } g = \frac{n_s - n_N}{n_s} \Rightarrow g.n_s = n_s - n_N \Rightarrow n_s - g.n_s = n_N$$

$$n_N = n_s(1 - g) \quad T_{uN} = a.(n_N - n_s) = a.[n_s(1 - g) - n_s] = -a.n_s.g = k.g$$

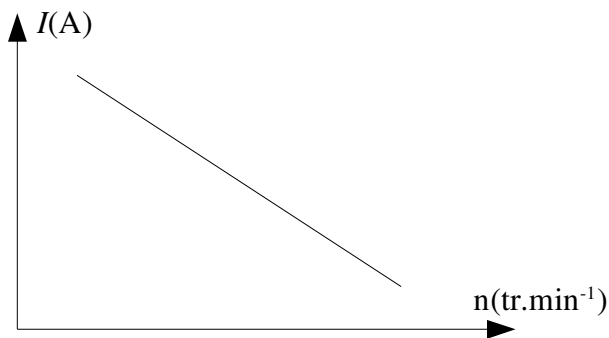
$$\text{avec } k = -a.n_s$$

$$a < 0 \text{ (pente décroissante) } k > 0$$

$$\boxed{T_u = k.g}$$

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

3.2. Caractéristique électromécanique $I = f(n)$



Pour tracer cette caractéristique à U et f constants, on charge progressivement le moteur asynchrone grâce à un frein à poudre ou à une dynamo balance. Au fur et à mesure que l'on charge le moteur, ce dernier appelle un courant donc une puissance électrique plus importante.

L'intensité du courant, non négligeable à vide, augmente avec le glissement et donc avec le moment du couple résistant.

Si l'on prolonge la courbe vers $n = 0$, on obtient au démarrage un courant d'intensité très important.

3.3. Conclusion

Le moteur asynchrone triphasé étant alimenté par un réseau fournissant des tensions de valeur efficace U et de fréquence f constantes, doit normalement fonctionner en charge au voisinage de son point nominal:

- ✓ sa fréquence de rotation varie peu ($n \approx n_N$);
- ✓ le moment du couple utile est proportionnel au glissement $T_u = k.g$
- ✓ l'intensité du courant absorbé par le stator est fonction du glissement: I augmente avec g .

IV. BILAN DES PUISSANCES

4.1. Puissance reçue

Un moteur asynchrone triphasé constitue un récepteur triphasé équilibré et la puissance qu'il reçoit est, quel que soit le couplage:

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

Pour mesurer cette puissance, on utilise la méthode des deux wattmètres (ou un wattmètre triphasé).

4.2. Puissance transmise au rotor: P_{tr}

Il existe deux types de pertes au rotor.

1. Les pertes par effet Joule: $P_{js} = \frac{3}{2} RI^2$

avec R : résistance entre deux bornes du stator couplé

2. Les pertes magnétiques ou fer P_{fs} qui, ne dépendant que de U et f , sont ici constantes. Le rotor ne reçoit donc que:

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

Cette puissance est transmise du stator au rotor par le champ magnétique sous la forme d'un couple électromagnétique de moment T qui tourne à la vitesse de synchronisme Ω_s

$$P_{tr} = T \cdot \Omega_s$$

4.3. Puissance totale au rotor: P_r

Le rotor reçoit le couple électromagnétique de moment T et tourne à la vitesse Ω . Sa puissance totale est:

$$P_r = T \cdot \Omega$$

$$T = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} = \frac{P_r}{\Omega} \Rightarrow P_r = \frac{\Omega}{\Omega_s} P_{tr} \quad \text{sachant que} \quad g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_s} \Rightarrow \frac{\Omega}{\Omega_s} = 1 - g$$

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

$P_r < P_{tr}$ à cause des pertes rotoriques.

4.4. Pertes rotoriques

4.4.1. Pertes magnétiques ou fer

Le champ magnétique tourne à la vitesse $\Omega_s = \frac{2\pi n'_s}{60}$ (avec n'_s en tr.min⁻¹) et le rotor à la vitesse

$$\Omega = \frac{2\pi n'}{60} \quad (\text{avec } n' \text{ en tr.min}^{-1})$$

Pour un référentiel lié au rotor, le champ magnétique tourne à la vitesse :

$$\Omega_r = \Omega_s - \Omega = \frac{2\pi(n'_s - n')}{60}$$

Les courants de Foucault induits au rotor ont pour fréquence:

$$f_r = 60 \cdot p (n_s - n) = 60 \cdot \frac{p(n_s - n) \cdot n_s}{n_s} = 60 p \cdot g \cdot n_s = g \cdot f$$

On pourra négliger les pertes magnétiques au rotor, car en marche normale g , donc f_r est faible.

$$P_{fr} \approx 0$$

4.4.2. Pertes par effet Joule

Elles ne sont pas mesurables car le rotor est court-circuité. On calcule:

$$P_{jr} = P_{tr} - P_r = P_{tr} - (1 - g) P_{tr} = \boxed{g \cdot P_{tr} = P_{jr}}$$

4.5. Pertes mécaniques

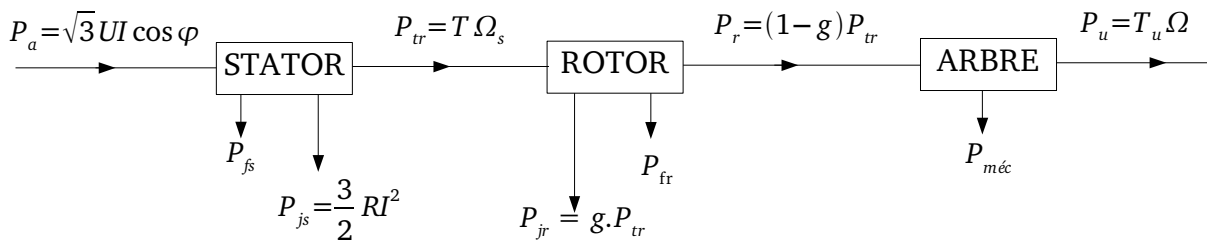
La vitesse de rotation varie peu en marche normale, ces pertes $P_{méc}$ sont pratiquement constantes.

4.6. Puissance utile

Le moteur développe un couple utile de moment T_u en tournant à la vitesse Ω (celle du rotor)

$$\boxed{P_u = T_u \cdot \Omega = P_r - P_{méc}}$$

4.7. Bilan et rendement



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

4.8. Détermination des pertes constantes

On appelle ainsi la somme des pertes magnétiques du stator et des pertes mécaniques pratiquement constantes dans le mode de fonctionnement envisagé.

$$P_c = P_{fs} + P_{méc}$$

On détermine cette somme P_c par un essai à vide au cours duquel on mesure, sous la tension (U_v, f) , la puissance P_{av} et le courant I_v absorbés.

On calcule les pertes par effet Joule du stator $P_{jsv} = \frac{3}{2} R I_v^2$

Comme $g \approx 0$ $P_{trv} \approx 0$ et $P_{jrv} \approx 0$ donc $P_{av} = P_{js} + P_{fs} + P_{méc} \approx P_{jsv} + P_c$

On pose souvent : $P_{fs} \approx P_{méc} \approx \frac{P_{av} - P_{jsv}}{2}$

V. ALIMENTATION DU MOTEUR

5.1. Alimentation à fréquence constante et tension variable

A fréquence f constante, le moment du couple est proportionnel à V^2

$$T = K \cdot V^2$$

En diminuant la tension d'alimentation, on diminue en même temps le champ et le flux magnétique créés. Le moment du couple varie dans le même sens que le flux.

Au moment du démarrage, le moteur accouplé à sa charge et alimenté sous sa tension nominale, absorbe pendant la mise en vitesse un courant important (5 à 10 fois l'intensité nominale) pendant une durée qui dépend de la charge entraînée.

Pour éviter la détérioration des enroulements dû à un échauffement excessif, il convient de limiter la surintensité pendant le démarrage, tout en conservant un couple de moment suffisant pour que la charge puisse être entraînée. Deux procédés sont mis en oeuvre:

- ✓ démarrage étoile – triangle;
- ✓ utilisation d'un rhéostat.

5.2. Alimentation du moteur sous fréquence variable

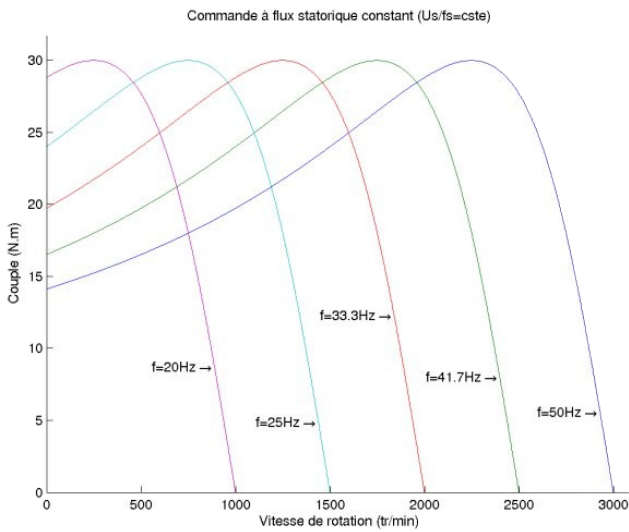
On peut assimiler une phase du stator et la phase correspondante du rotor à un transformateur monophasé parfait dont le secondaire est court-circuité.

Au stator (ou primaire) comportant N spires par phase, la relation de Boucherot donne:

$$V = 4,44 N \cdot f \hat{\phi} \text{ soit } \hat{\phi} = \frac{V}{f} \cdot \frac{1}{4,44 \cdot N} = a \cdot \frac{V}{f}$$

Pour que le flux conserve la même valeur lorsque la fréquence f varie, il faudra que le rapport $\frac{V}{f}$ reste constant.

En maintenant le rapport $\frac{V}{f}$ constant par l'intermédiaire d'un onduleur autonome, on relève la caractéristique mécanique suivantes (seules les parties utiles, linéaires).



Lorsque la fréquence f diminue (U aussi), les caractéristiques se déplacent parallèlement à elles-mêmes et donc, pour une valeur constante du moment du couple, la différence $\Delta n = n_s - n$ reste la même.

En alimentant un moteur asynchrone à $\frac{V}{f}$ constant, on impose un flux et un couple maximal constants, pour toute valeur de la fréquence. Le moteur asynchrone fonctionne comme un moteur à courant continu sous tension réglable, sans présenter les inconvénients dûs aux balais et au collecteur.