

LE MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ

I Généralités :

Le moteur asynchrone triphasé est constitué d'un stator (inducteur) et d'un rotor (induit).

I.1 Le stator :

Le stator est composé de 3p bobines alimentées par un système de tension triphasées de fréquence f. Ces 3p bobines créent un champ magnétique tournant à la pulsation de synchronisme Ω_s qui se répartit sinusoidalement dans l'entrefer (espace entre le rotor et le stator) de la machine.

$$\Omega_s \text{ est donnée par la relation : } \Omega_s = \frac{\omega}{p} \text{ avec } \begin{cases} \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \text{ en [rad/s]} \\ p: \text{ nbre de paires de pôles} \\ \Omega_s: \text{ vitesse angulaire en [rad/s]} \end{cases}$$

La vitesse de rotation synchrone n_s du champ magnétique tournant est :

$$n_s = \frac{f}{p} \text{ avec } \begin{cases} f \text{ en [Hz]} \\ p: \text{ nbre de paires de pôles} \\ n_s: \text{ en [tr/s]} \end{cases} \text{ et } n_s = \frac{\Omega_s}{2 \cdot \pi}$$

Si la fréquence f = 50 Hz, les vitesses synchrones possibles sont :

p	n_s [tr/s]	n_s [tr/min]
1	50	3000
2	25	1500
3	16,67	1000
4	12,5	750

I.2 Le rotor :

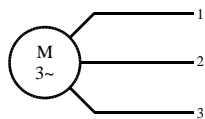
Le rotor du moteur asynchrone triphasé peut-être « à cage d'écuriel » ou bobiné. Le rotor ne possède aucune liaison électrique avec le stator. Le rotor constitue un circuit électrique fermé où se crée des courants induits qui entraînent le mise en rotation du rotor. Le rotor tourne à la vitesse de rotation n qui est inférieure à la vitesse synchrone.

On dit que le rotor glisse par rapport au champ magnétique tournant; on parle alors de glissement qui dépend de la charge.

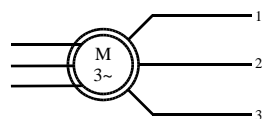
$$\text{On définit le glissement par } g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \text{ (sans unité ou en \%).$$

I.3 Symbole :

Moteur à cage d'écuriel:



Moteur à rotor bobiné :



II Plaque signalétique et couplage d'un moteur asynchrone triphasé :

II.1 La plaque signalétique :

4 pôles ; 4,4 kW
230V / 400 V ; 16,3 A / 9,4 A
50 Hz ; 1420 tr/min ; cos ϕ = 0,85

Ces indications correspondent aux grandeurs nominales du moteur. La puissance indiquée représente la puissance mécanique utile P_U . La vitesse de rotation est $n = 1420$ tr/min. La vitesse synchrone n_s est la vitesse immédiatement supérieure (voir tableau page précédente) soit $n_s = 1500$ tr/min. On retrouve $p = 2$ soit 4 pôles magnétiques.

II.2 Couplage du stator :

Sur la plaque signalétique, la tension la plus faible représente la tension nominale aux bornes d'un enroulement du stator. Le couplage du moteur dépend du réseau triphasé dont on dispose.

Sur le réseau triphasé V/U (V : tension simple ; U tension composée), ce moteur sera couplé :

- en étoile (Y) si la tension aux bornes d'un enroulement correspond à la tension V.
- en triangle (D ou Δ) si la tension aux bornes d'un enroulement correspond à la tension U.

Pour notre exemple, sur le réseau 130 V / 230 V : le stator sera couplé en **triangle**.
sur le réseau 230 V / 400 V : le stator sera couplé en **étoile**.

Les intensités 16,3 A / 9,4 A correspondent à l'intensité I en ligne suivant le couplage choisit.

Si le stator est couplé en triangle, chaque enroulement est traversé par l'intensité $J = \frac{I}{\sqrt{3}} = \frac{16,3}{\sqrt{3}} = 9,4$ A

Si le stator est couplé en étoile, chaque enroulement est traversé par l'intensité en ligne $I = 9,4$ A

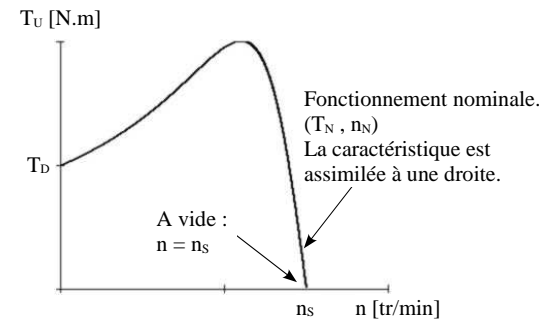
III Fonctionnement du moteur :

III.1 Fonctionnement à vide :

Lorsque le moteur fonctionne à vide (pas de charge couplée au moteur), sa vitesse de rotation n_0 est proche de la vitesse de synchronisme n_s . On considère que $g=0$ et $n_0 = n_s$

Le facteur de puissance à vide ($\cos \phi_0 < 0,2$) est faible mais pas l'intensité à vide I_0 . Ce courant sert à créer le champ magnétique tournant, on parle alors de courant de magnétisant.

III.2 Fonctionnement en charge :



Au voisinage du point de fonctionnement, on assimile la caractéristique $T_U(n)$ à une droite telle que : $T_U = a \cdot n + b$.

Les coefficients a et b se trouvent en utilisant deux points de la caractéristique.

Le premier est le fonctionnement à vide

$$\begin{cases} T_U = 0 \\ n = n_s \end{cases}$$

Le deuxième est le fonctionnement nominale

$$\begin{cases} T_U = T_N \\ n = n_N \end{cases} \text{ par exemple.}$$

On montra aussi que dans la partie linéaire, le moment du couple utile est proportionnel au glissement g.

$$T_U = k \cdot g \quad \text{avec} \quad \begin{cases} T_U : \text{moment du couple en [N.m]} \\ g : \text{glissement} \\ k : \text{coefficient de proportionnalité en [N.m]} \end{cases}$$

III.3 Démarrage du moteur :

Lors du démarrage d'un moteur asynchrone triphasé, le courant de démarrage est très important (4 à 8 fois l'intensité nominale). Pour ne pas détériorer le moteur, on réduit le courant de démarrage en effectuant :

une tension réduite puis sous tension nominale : démarrage étoile triangle.

une tension réduite puis progressivement la tension nominale : utilisation d'un autotransformateur.

Pour les moteur à rotor bobiné, on peut ajouter des résistance en série avec le rotor pour diminuer les intensités des courants rotoriques ou encore utiliser un onduleur.

IV Bilan des puissances :

IV.1 Puissance absorbée P_A:

Le moteur reçoit la puissance électrique $P_A = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi$ quelque-soit le couplage. Cette puissance est transmise au stator de la machine qui est le siège de deux types de pertes.

IV.2 Pertes par effet Joule au stator P_{JS}:

Les deux types de pertes au stator sont :

Les pertes par effet Joule P_{JS} : Si on appelle r la résistance d'un enroulement et I l'intensité en ligne,

si le moteur est couplé en étoile, $P_{JS} = 3 \cdot r \cdot I^2$

si le moteur est couplé en triangle, $P_{JS} = r \cdot I^2$

Si on appelle R, la résistance mesurée entre deux bornes du stator, quelque soit le couplage du stator, les

perdes par effet Joules sont : $P_{JS} = \frac{3}{2} R \cdot I^2$

IV.3 Les pertes fer au stator P_{FS} :

Ces pertes ne dépendent que de la tension U et de la fréquence f, elles sont considérées comme constantes si le moteur est branché sur le réseau triphasé.

IV.4 Puissance transmise au rotor P_{TR} :

La puissance transmise au rotor est : $P_{TR} = P_A - P_{JS} - P_{FS}$

Cette puissance P_{TR} crée le couple électromagnétique $T_{EM} = \frac{P_{TR}}{\Omega_S}$ avec $\begin{cases} P_{TR} : \text{en [W]} \\ \Omega_S : \text{en [rad/s]} \\ T_{EM} : \text{en [N.m]} \end{cases}$

Cette puissance est transmise du stator au rotor. Le rotor est lui aussi soumis au couple T_{EM} mais tourne à la vitesse Ω.

IV.5 Pertes par effet Joule P_{JR} et pertes fer P_{FR} au rotor :

Les pertes fer au rotor sont souvent négligeables : $P_{FR} \approx 0$.

On montre alors que les pertes par effet Joule au rotor sont $P_{JR} = g \cdot P_{TR}$.

On ne peut que calculer ces pertes, elles ne sont pas mesurables car le rotor est court-circuité.

IV.6 Puissance disponible au rotor P_R :

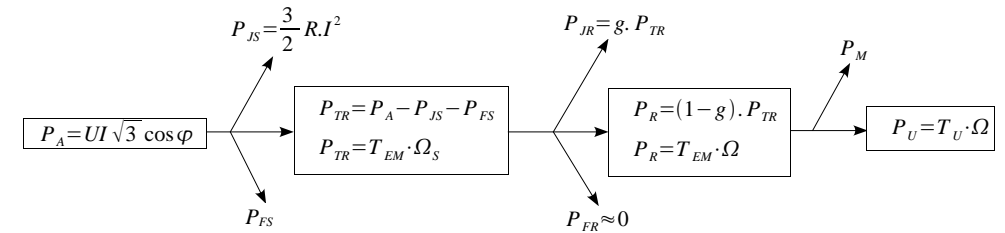
$$P_R = T_{EM} \cdot \Omega \quad \text{et} \quad T_{EM} = \frac{P_{TR}}{\Omega_S} \quad \text{d'où} \quad P_R = \frac{P_{TR} \cdot \Omega}{\Omega_S} \quad \text{soit} \quad P_R = (1-g) \cdot P_{TR}$$

Le rotor étant constitué de conducteurs qui possèdent une résistance, ils sont le siège de pertes par effet Joule ainsi que de pertes magnétiques.

IV.7 Pertes mécanique P_M et puissance utile P_U.

Le rotor est fixé à l'arbre du moteur par l'intermédiaire de roulements, il y a donc des pertes mécanique P_M et $P_U = P_R - P_M$.

IV.8 Rendement η du moteur asynchrone :



Le rendement du moteur asynchrone est : $\eta = \frac{P_U}{P_A}$.

IV.9 Pertes collectives P_C :

Lors d'un essai à vide,

le moteur absorbe la puissance $P_{A0} = U I_0 \sqrt{3} \cos \varphi_0 = P_{JS} + P_{FS} + P_{JR} + P_{FR} + P_M + P_U$.

Or, à vide : $g \approx 0 \Rightarrow P_{JR} = 0$

$P_U = 0$ et $P_{FR} \approx 0$

$$P_{JR} = \frac{3}{2} R \cdot I_0^2$$

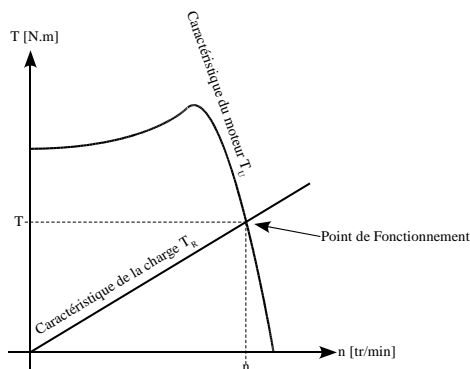
Le bilan des puissances à vide s'écrit : $P_{A0} = \frac{3}{2} R \cdot I_0^2 + P_{FS} + P_M$.

On appelle pertes collectives $P_C = P_{FS} + P_M$ et on définit le couple de perte $T_P = \frac{P_C}{\Omega}$.

Ce couple de perte est considéré comme constante quelque soit la vitesse et la charge du moteur.

Lors de l'essai à vide, les pertes par effet Joule au stator $P_{JR} = \frac{3}{2} R \cdot I_0^2$ sont négligeables.

V Point de fonctionnement :



Les coordonnées du point de fonctionnement se déterminent soit par une méthode graphique ou une méthode analytique.

Pour la méthode analytique :

La charge à pour couple résistant $T_R = k \cdot n$.

Le moteur à pour couple utile :

$$T_U = a \cdot n + b$$

Les coordonnées du point de fonctionnement

sont trouvés en résolvant $T_U = T_R$.

Les caractéristiques des quelques charges :

Machine à puissance constante (compresseur, essoreuse) : $T_R = \frac{k}{n}$.

Machine à couple constant (levage, pompe) : $T_R = k$

Machine à couple proportionnel à la vitesse (pompe) : $T_R = k \cdot n$.

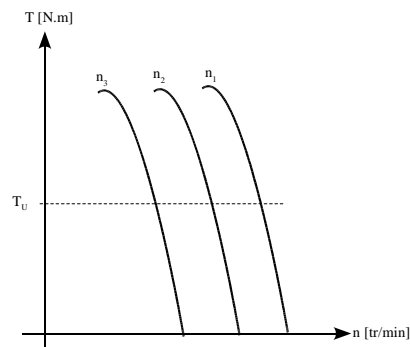
Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur) $T_R = k \cdot n^2$

VI Réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone :

La vitesse de synchronisme n_s dépend de la fréquence f des courants statoriques. Pour faire varier la vitesse du moteur, il faut faire varier la fréquence des courants statoriques.

On arrive à modifier la fréquence f des courants statoriques en utilisant un onduleur triphasé ou un gradateur triphasé.

Souvent, on fait varier la vitesse en maintenant le rapport $\frac{V}{f}$ constant de manière à garder le moment du couple utile constant (V : tension aux bornes d'un enroulement du stator, f: fréquence de la tension d'alimentation).



VII Exercice d'application :

Un moteur asynchrone triphasé hexapolaire est alimenté par un réseau triphasé 230 V / 400 V ; 50 Hz. La résistance R mesurée entre deux bornes du stator est $R = 0,8 \Omega$. En fonctionnement nominal, le glissement $g = 6\%$, la puissance absorbée P_A par la méthode des 2 wattmètres est $P_1 = 8700 \text{ W}$ et $P_2 = 3600 \text{ W}$. Les pertes collectives $P_C = P_{FS} + P_M = 1100 \text{ W}$ et $P_{FS} = P_M$.

1- Déterminer la puissance active P_A .

2- Déterminer la puissance réactive Q_A .

3- Calculer la valeur de l'intensité I lors du fonctionnement nominal et le facteur de puissance $\cos \phi$.

4- En déduire les pertes par effet Joule au stator P_{JS} .

5- Déterminer la vitesse de rotation du rotor.

6- Déterminer les pertes par effet Joule dans le rotor.

7- En déduire la puissance utile P_U de ce moteur ainsi que le couple utile T_U .

Ce moteur entraîne une charge mécanique dont sa caractéristique $T_R(n)$ peut-être assimilée à une droite passant par les points (960 tr/min ; 60 N.m) et (1000 tr/min ; 40 N.m).

8- Déterminer les coordonnées du point de fonctionnement.

1- $P_A = P_1 + P_2 = 8700 + 3600 = 12,3 \text{ kW}$

2- $Q_A = \sqrt{3} (P_1 - P_2) = 8,83 \text{ kvar}$

3- $S = U \cdot I \sqrt{3} \Rightarrow I = \frac{S}{U \sqrt{3}} = \frac{\sqrt{P_A^2 + Q_A^2}}{U \sqrt{3}} = 21,9 \text{ A}$ et $\cos \phi = \frac{P}{S} = 0,81$

4- $P_{JS} = \frac{3}{2} R \cdot I^2 = 573 \text{ W}$

5- $g = \frac{n_s - n}{n_s} \Rightarrow n = n_s \cdot (1 - g)$ et $n_s = \frac{f}{p} = \frac{50}{3} = 16,7 \text{ tr/s} = 1000 \text{ tr/min}$ d'où $n = 940 \text{ tr/min}$

6- Calcul de P_{TR} :

$$P_{TR} = P_A - P_{JS} - P_{FS} = 11,2 \text{ kW}$$

et $P_{JR} = g \cdot P_{TR} = 670 \text{ W}$

7- $P_U = P_A - P_{JS} - P_{JR} - P_C = 9,95 \text{ kW}$ et $\eta = \frac{P_U}{P_A} = 80,9$ ($T_U = \frac{P_U}{\Omega} = 101 \text{ N.m}$)

8- Équation de la caractéristique $T_U(n)$ du moteur :

la droite passe par les points $\left| \begin{matrix} n=1000 \\ T_U=0 \end{matrix} \right.$ et $\left| \begin{matrix} n=940 \\ T_U=101 \end{matrix} \right.$ et a pour équation $T_U = 1683 - 1,68 \cdot n$

La caractéristique de la charge $T_R(n)$ est :

la droite passe par les points $\left| \begin{matrix} n=960 \\ T_R=60 \end{matrix} \right.$ et $\left| \begin{matrix} n=1000 \\ T_R=40 \end{matrix} \right.$ et a pour équation $T_R = 540 - 0,5 \cdot n$

$T_R = T_U$: $540 - 0,5 \cdot n = 1683 - 1,68 \cdot n \Rightarrow n = 968 \text{ tr/min}$ et $T = 55,6 \text{ N.m}$ et $P_U = 5,6 \text{ kW}$