

*Moteur
Asynchrone à Cage*

Introduction

Le moteur asynchrone à cage, à cause de sa robustesse, est très répandu dans le milieu industriel. Son utilisation classique est avant tout l'entraînement des systèmes à vitesse fixe ou variable. Aujourd'hui, avec le contrôle électronique du moteur, cela ouvre un large champ d'utilisation. La MAS à cage n'est plus limitée à des applications à vitesse constante.

Les moteurs asynchrones à cage fonctionnent selon le principe du champ tournant; ils sont très simples et, surtout pour les petites puissances, de construction facile. Ils sont - donc très courants et assez économiques.

Définition du moteur asynchrone à cage:

On appelle machine asynchrone (MAS à cage d'Ecueille), une machine électrique de vitesse variable, à courant alternatif, qui à deux enroulements dont un seul (statorique) est alimenté par un réseau électrique de pulsation ω_s ; alors que le deuxième (rotorique) est fermé sur lui-même (ou à cage d'Ecueille), généralement ce type de machines est plus utilisée en moteur asynchrone (en triphasé). Les figure 1 et 2 présente les Eléments constituant une MAS à cage d'écureuil.

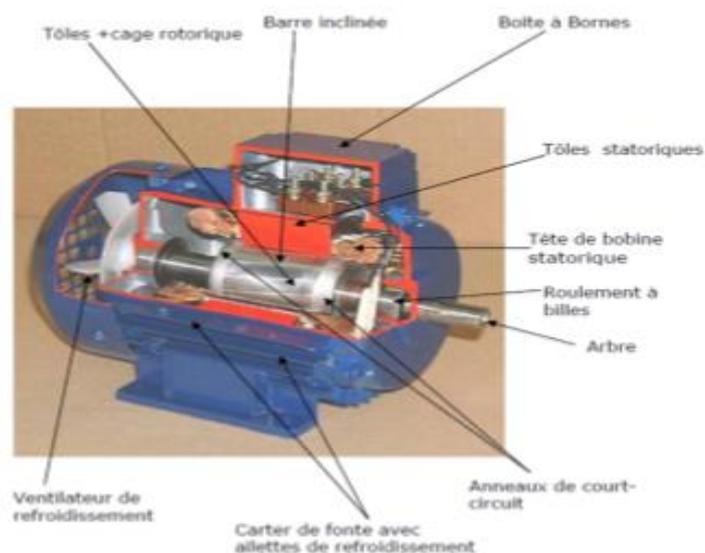


Fig. 1. Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil.

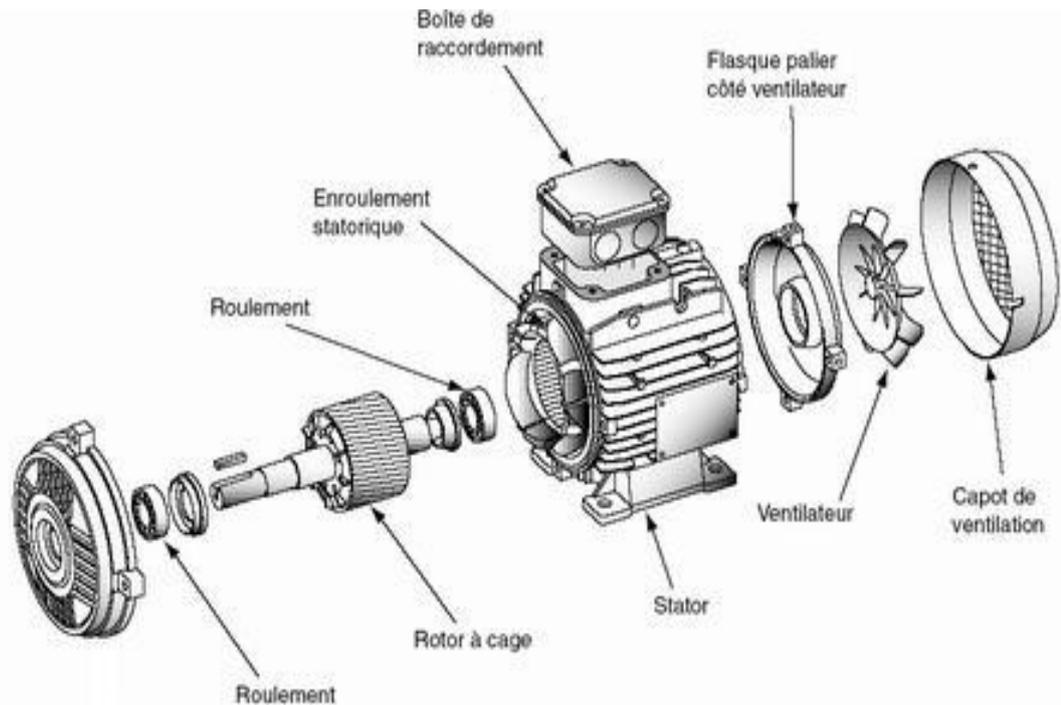


Fig. 2. Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil.

Constitution du moteur à asynchrone à cage

Ce type de machine est constitué de deux armatures coaxiales l'une est fixe appelée Stator et l'autre est mobile appelée Rotor; entre les 2 armatures il y a un entrefer.

1. Le Stator:

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques (Figure 3). Ces tôles sont pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique. Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone. Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique



Fig. 3. Photo du stator d'un moteur asynchrone à cage

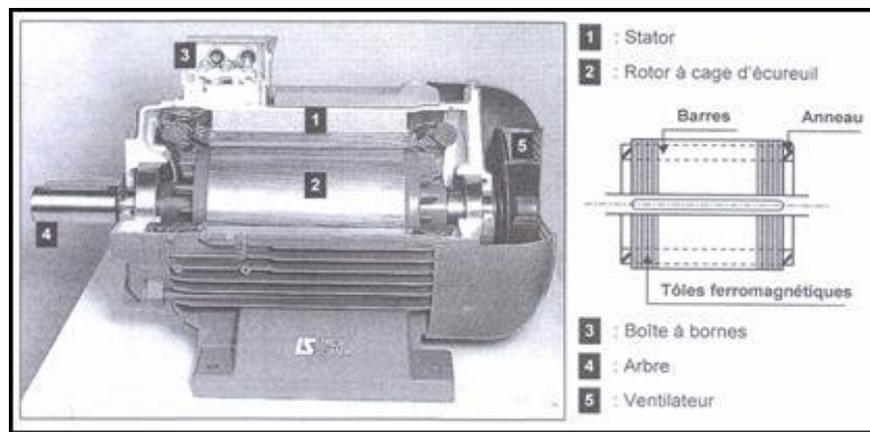


Fig. 4. Les éléments du MAS à cage

2. Rotor à cage :

L'enroulement est remplacé par des barres de cuivre ou d'aluminium logées dans des encoches, et réunie à leurs extrémités par deux couronnes de cuivre ou d'aluminium. Ces cages comportant généralement des barres décalées afin de réduire les harmoniques d'encoches, il en résulte une légère diminution de la F.E.M induite par le champ tournant statorique dans ces barreaux. Un tel rotor comme présenté sur la figure 11.5 est très robuste, de plus sa construction est particulièrement économique. La cage étant généralement réalisée avec l'aluminium que l'on coule dans les Encoches préparées à l'avance. En effet il n'est pas nécessaire d'isoler les barres et la masse du rotor, car les courants induits s'établissent surtout dans les barres, et leur étude théorique est identique à celle des moteurs à bagues.

Si N désigne le nombre des barres d'une cage, les extrémités des barres, étant en court-circuit par les flasques. Un rotor à cage est assimilable à un rotor à bagues qui aurait $q=N$ phases si la cage tourne dans un champ bipolaire alors qu'il a $q= N / p$ phases si la cage tourne à un champ $2p$ pôles.

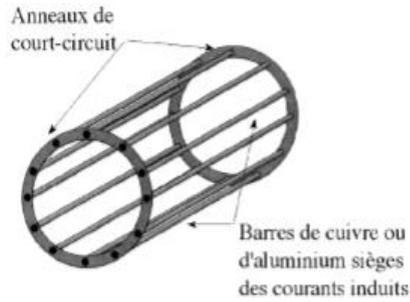


Fig. 5. Rotor à cage d'écureuil

Par comparaison avec les moteurs à bagues, les moteurs à cage ont l'avantage d'être robustes et du coût plus faible. Il n'est pas possible de faire varier la résistance de leur rotor. Ce qui rend défavorable les conditions de démarrage quand on l'alimente à tension et à fréquence constantes. On remédie cet inconvénient en utilisant soit des rotors à double cages.

Soit Des rotors à une seule cage, mais à barre en la cause de leur profil, soit des moteur à encoches très profondes: barres « lames de sabre »,

5. Principe de fonctionnement du MAS à cage:

Le principe des moteurs à courants alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives.

La circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique B . Ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et son intensité sont fonction du courant I . C'est une grandeur vectorielle.

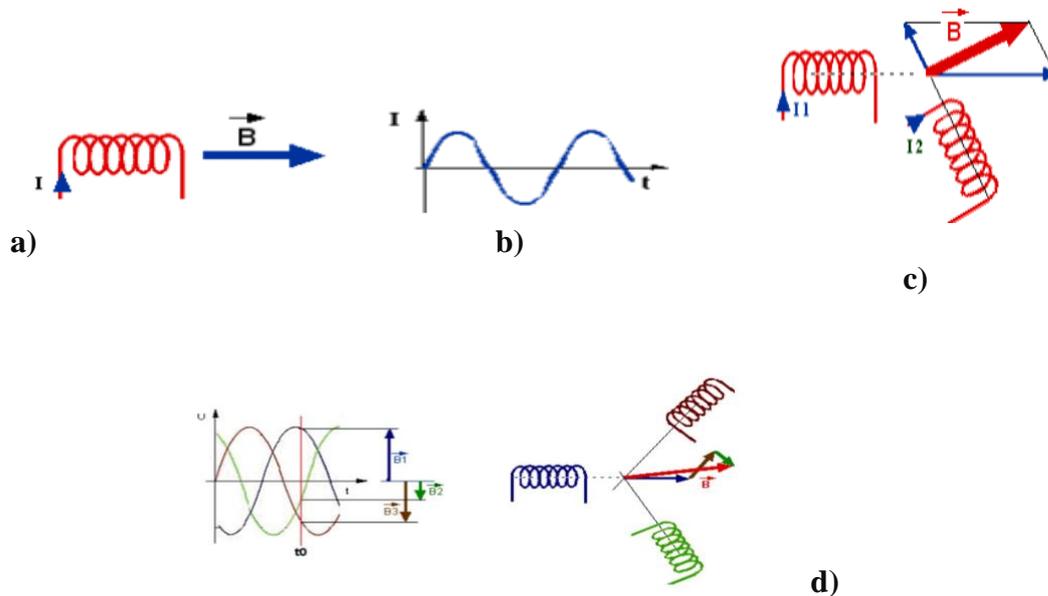


Fig. 6. Schémas reflétant le fonctionnement de la MAS (a, b, c, et d)

Si le courant est alternatif, le champ magnétique varie en sens et en direction à la même fréquence que le courant.

Si deux bobines sont placées à proximité l'une de l'autre, le champ magnétique résultant est la somme vectorielle des deux autres. Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à 120° les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés.

Compte-tenu de la nature du courant sur le réseau triphasé, les trois champs sont déphasés (chacun à son tour passe par un maximum). Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant soit $50 \text{ tr/s} = 50 \text{ Tr/s} = 3000 \text{ tr/mn}$.

Les 3 enroulements statoriques créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Si on place une boussole au centre, elle va tourner à cette vitesse de synchronisme. Le rotor est constitué de barres d'aluminium noyées dans un circuit magnétique. Ces barres sont reliées à leur extrémité par deux anneaux conducteurs et constituent une "cage d'écureuil". Cette cage est en fait un bobinage à grosse section et très faible résistance.

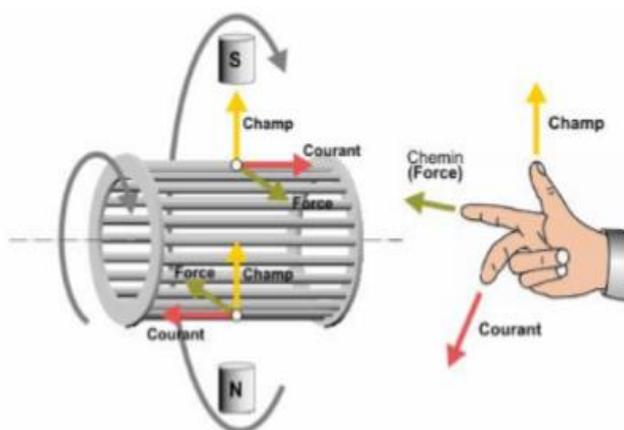


Fig.7. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage.

Cette cage est balayée par le champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors traversés par des courants de Foucault induits. Des courants circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor. D'après la loi de Lenz les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ mais avec une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme de ce dernier. Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, sinon la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom de moteur asynchrone.

6 Différentes caractéristiques du moteur asynchrone à cage

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique B_1 tournant à la pulsation de synchronisme :

$$\Omega_s = \omega_s / P \quad (1)$$

Ω_s : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en rad/s.

ω_s : Pulsation des courants alternatifs en rad/s.

$$\omega_s = 2\pi f$$

p : nombre de paires de pôles

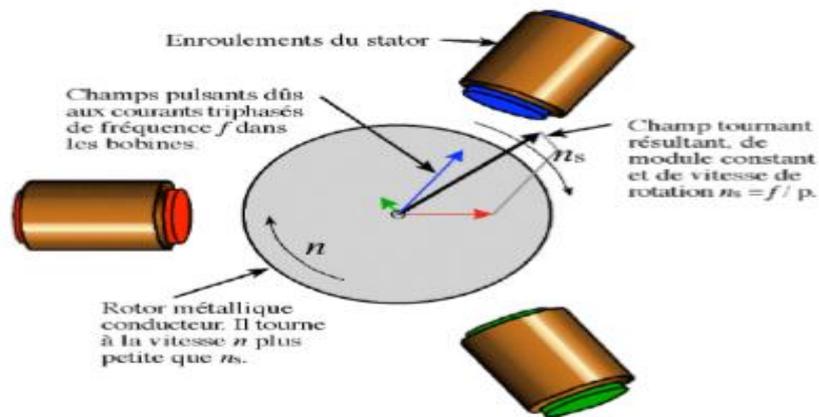


Fig. II.8. Interaction rotor stator

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

-Des courants induits circulent dans le rotor.

-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

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (2)$$

n_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr/s).

n : vitesse de rotation du rotor (tr /s)

$$\Omega_s = 2\pi n_s \quad (3)$$

et

$$\Omega = 2\pi n \quad (4)$$

6.1 Notion de glissement:

Le couple moteur ne peut exister que si un courant induit circule dans la spire. Ce couple est déterminé par le courant qui circule dans la spire et qui ne peut être que s'il existe une variation de flux dans cette spire. Il faut donc qu'il y ait une différence de vitesse entre la spire et le champ tournant. C'est la raison pour laquelle un moteur

électrique fonctionnant suivant le principe que nous venons de décrire est appelé "moteur asynchrone".

La différence entre la vitesse de synchronisme (N_s) et celle de la spire (N) est appelée "glissement" (g) et s'exprime en % de la vitesse de synchronisme.

$$g = [(N_s - N) / N_s] \times 100$$

En fonctionnement, la fréquence du courant rotorique s'obtient en multipliant la fréquence d'alimentation par le glissement. Au démarrage, la fréquence du courant rotorique est donc maximale et égale à celle du courant statorique. La fréquence du courant statorique diminue progressivement au cours de la mise en vitesse du moteur. Le glissement en régime établi est variable suivant la charge du moteur et selon le niveau de la tension d'alimentation qui lui est appliqué. Il est d'autant plus faible que le moteur est peu chargé et il augmente si le moteur est alimenté en dessous de la tension nominale correspondant à la fréquence d'alimentation.

Les caractéristiques de fonctionnement d'une machine asynchrone sont étroitement liées à la différence de vitesse entre champ tournant et rotor.

Le champ statorique tournant à la vitesse Ω_s et le rotor à la vitesse Ω , on appelle glissement la différence relative de vitesse de rotation.

Le glissement est de l'ordre de + 0,01 à + 0,15 en marche normale en moteur.

On remarque que :

$$g = 1 \text{ au démarrage } (\Omega = 0)$$

$$g = 0 \text{ au synchronisme } (\Omega_s = \Omega)$$

7. Démarrage des moteur MAS à cage:

Le courant I_{dd} en démarrage direct varie entre 3 et 8 fois le courant nominal. Le couple C_{dd} en démarrage direct est toujours au moins égal au couple nominal ; le couple maximal est approximativement le double du couple nominal. Les procédés de démarrage des moteurs se rangent en trois catégories

*Par action sur le circuit primaire (applicable à tout moteur) ,

*Par action sur le circuit secondaire (applicable aux moteurs à bagues ou à rotor bobiné).

*Par des procédés automatiques (démarreur électronique ou variateur de vitesse).

a) caractéristiques de démarrage direct :

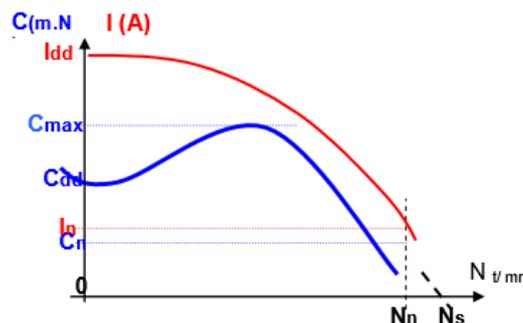


Fig. 9. courbe du couple et courant en fonction de la vitesse

b) Mesure du couple de démarrage direct:

La mesure du couple de décollage C_{dd} se fait en bloquant le rotor par un frein, le moteur étant alimenté sous la tension nominale. L'intensité de démarrage étant très élevée (4 à 8 In) cela risquerait de détériorer l'enroulement du stator. Pour ménager le moteur, on peut réduire la tension d'alimentation pendant la mesure et admettre que le couple est proportionnel au carré de la tension :

$$C_{dd} = C_d (U'/U_n)^2 \quad (5)$$

Le rapport des intensités est à peu près égal à celui des tensions. Puisque les intensités sont proportionnelles aux tensions, les couples produits sont proportionnels aux carrés des tensions.

Au démarrage $g=1$ et quelque soit le procédé de démarrage on a la relation suivante :

$$C_d / C_{dd} = (I_d/I_{dd})^2 = (U_d/U_n)^2 \quad (6)$$

* C_d et I_d : couple et intensité de démarrage quelque soit le procédé utilisé

* C_{dd} et I_{dd} : Couple et intensité de démarrage direct

* U_d : tension de démarrage quelque soit le procédé utilisé

* U_n ; g_n : tension nominale et glissement en fonctionnement normal

Le procédé de démarrage sera d'autant meilleur, que comparés aux valeurs nominales, I_d sera plus petit et C_d plus grand.

c) Temps de démarrage

Elle peut être déterminée par calcul ou par des abaques Equation fondamentale : Couple d'accélération :

$$C = C_m - C_r = J d\omega/dt \quad (7)$$

Le temps mis pour passer du démarrage à la vitesse de régime

$$t_d = J\omega / (C_m - C_r) \quad (8)$$

$J = J_m + J_r = MR^2 = MD^2/4$ (Kg.m²): somme des moments d'inertie du moteur et récepteur

$\omega = 2\pi N_o/60$: Vitesse de régime ou finale

C_m ; C_r : Couples moyens moteur et résistant ;

M_1 ; M_2 : masses;

D_1 ; D_2 : diamètres de giration du moteur et de la machine

MD^2 : Moment de giration total ;

$M_a = (C_m - C_r)$: Couple accélérateur en m.kg (1kg.m = 9,81 Nm)

$$t_d = 2,67 \cdot 10^{-3} \frac{MD^2 N}{M_a} \quad (II.9)$$

d) Constante de temps d'inertie d'une machine:

Temps nécessaire pour faire passer le moteur asynchrone à cage de l'arrêt à sa vitesse normale ω_n avec son couple normal C_n

$$T = J \omega_n / C_n = J \omega_n^2 / P_n \quad (10)$$

7.2 Procédés de démarrages

Rhéostat statorique :

A cause des pertes joules dans le rhéostat, ce procédé n'est pas économique et ne peut être envisagé que pour les petits moteurs. Si au démarrage la tension appliquée au moteur est $U/2$, le courant est sensiblement $I_{dd}/2$ et l'on a :

$$C_d / C_{dd} = (I_d / I_{dd})^2 = 1/4$$

Le courant a été divisé par 2 et le couple par 4. On ne pourra donc pas envisager de démarrer à pleine charge.



Fig.10.La somme vectorielle de tension

g) Démarrage par insertion de résistances rotoriques

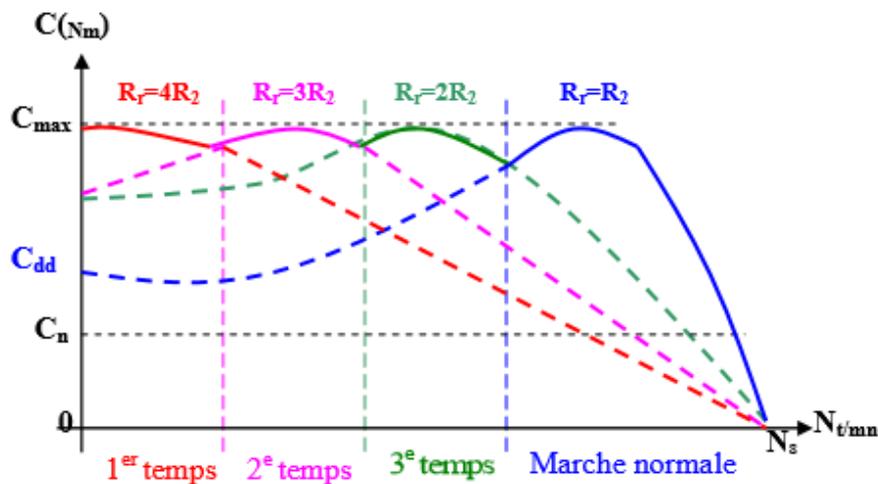


Fig. 11.courbe du couple en fonction de la vitesse

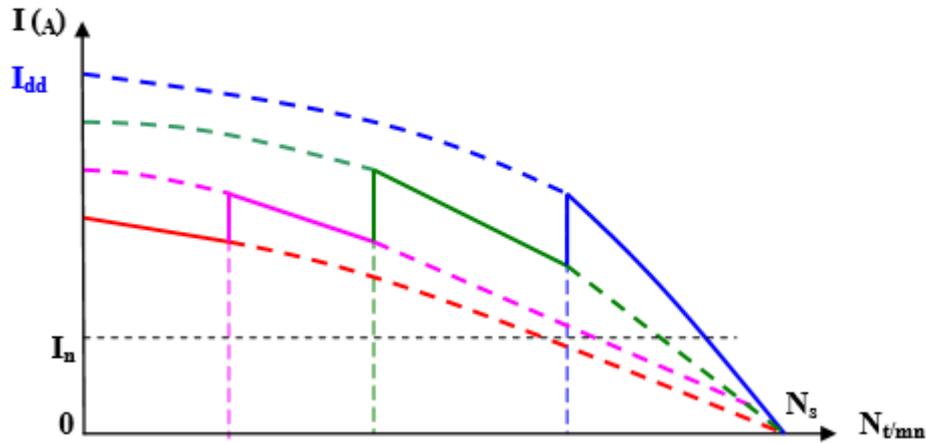


Fig. 12. courbe du courant en fonction de la vitesse

h). Démarrage par Autotransformateur:

le rapport de transformation est $m=1/2$, la tension aux bornes du moteur est $U' = U/2$ et le courant est $I_d = I_{dd}/2$ dans le moteur, mais le courant appelé au réseau n'est que $I_d/2 = I_{dd}/4$ (propriétés des transformateur. Le rapport des couples est :

$$C_d/C_{dd} = (I_d/I_{dd})^2 = 1/4 \quad (12)$$

Le couple est encore divisé par 4 mais le courant fourni par le réseau l'est également. Ce procédé est supérieur au précédent (dans lequel le courant n'était divisé que par 2).

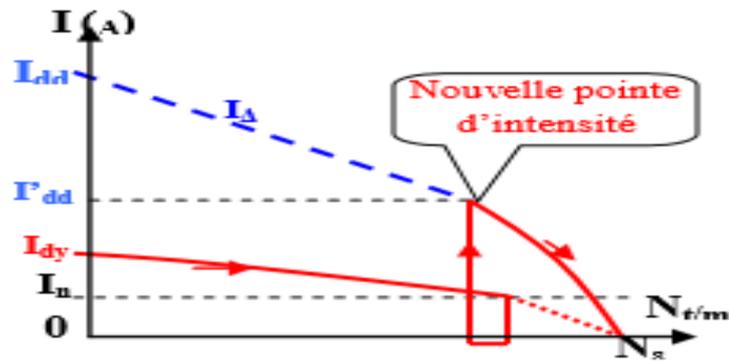
i) Démarrage étoile-triangle:

Les enroulements du stator sont couplés en étoile au démarrage puis en triangle pour le fonctionnement en charge. Pour un démarrage en triangle, la tension appliquée à un enroulement est U (tension entre phase) et le courant dans cet enroulement est J_{dd} , mais le courant fourni par le réseau est $I_{dd} = J_{dd} \sqrt{3}$ (propriétés du triphasé. Pour un démarrage en étoile, la tension appliquée à un enroulement est $U/\sqrt{3}$ et le courant, identique pour un enroulement et le réseau, est $I_d = J_{dd}/\sqrt{3}$.

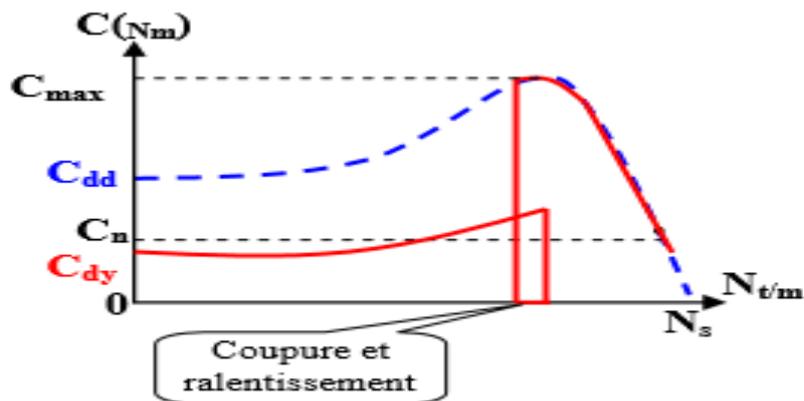
$$C_d/C_{dd} = (J_d/J_{dd})^2 = (I/\sqrt{3})^2 = 1/3$$

Le rapport des courants fournis par le réseau est :

$$J_d/I_{dd} = (J_{dd}/\sqrt{3})/J_{dd}\sqrt{3} = 1/3$$



Ce procédé a donc la même valeur que le précédent, puisque couple et courant sont divisés par le même nombre. Bien entendu, lors du passage de l'étoile au triangle il y aura une nouvelle pointe de courant. Le démarrage à pleine charge est impossible puisque si $C_{dd} = 1,5C_n$ on aura $C_d = 0,5C_n$



Ce procédé ne peut être utilisé que si le moteur est prévu pour le couplage triangle avec le réseau dont on dispose. Les moteurs offrant cette possibilité portent sur leur plaque l'indication de deux tensions, par exemple 220/380 V, et possèdent 6 bornes. On ne pourra leur appliquer que 220V en triangle, le réseau doit donc être 127/220 V. Remarque que le moteur peut fonctionner sur le réseau 220/380 V mais seulement en étoile.

8. Réglage de la vitesse du moteur asynchrone à cage :

Le point de fonctionnement (C, Ω) dans le quadrant I en régime établi de l'ensemble machine plus charge se situe à l'intersection des caractéristiques $C_e = f(\Omega)$ du moteur et $C_r = f(\Omega)$ de la charge. Le réglage de la vitesse du moteur asynchrone est donc obtenu en agissant sur le couple qu'elle produit, soit, si l'on se réfère à son expression ci-dessus : le nombre de paires de pôles, la tension d'alimentation de la machine, le glissement ou la fréquence d'alimentation de la machine.

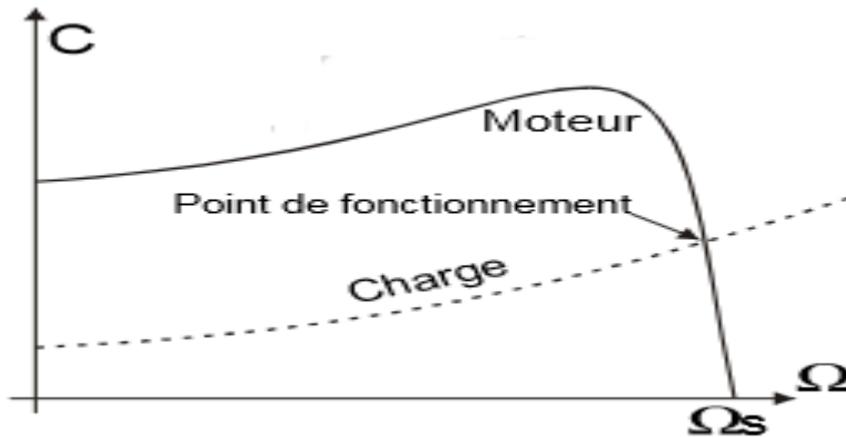


Fig.13. Caractéristique couple-vitesse et point de fonctionnement

8.1. Réglage par variation du nombre de paires de pôles:

Ceci donnant une variation non continue de la vitesse ce mode n'est donc pas envisagé pour un réglage fin du point de fonctionnement désiré.

8.2. Réglage par variation de tension:

Le couple électromagnétique du moteur asynchrone à cage est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique avec un gradateur triphasé. Cette solution est le plus souvent utilisée pour le démarrage de charges à caractéristique de couple quadratique ($C_r = k \cdot \Omega^2$).

8.3. Réglage par action sur le glissement:

L'utilisation de résistances rotorique permet un réglage de la vitesse au dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor.

8.4. Réglage par variation de fréquence:

La fréquence de rotation du moteur étant au glissement près proportionnel à la fréquence d'alimentation des enroulements statoriques, on essaiera de créer pour ces enroulements un réseau à fréquence variable ce sont les Onduleurs de tension. On peut aussi chercher à injecter des courants dans les enroulements pour imposer le couple du moteur ce sont les Onduleurs de courant ou commutateurs de courant. On peut également convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus faible (de 0 à 1/3 de la fréquence réseau) à l'aide d'un cycloconvertisseur à commutation naturelle piloté lui aussi en fréquence en courant ou vectoriellement.

9. Freinage des moteurs asynchrones à cage:

Les méthodes de freinage étudiées ci-dessous permettent de raccourcir la phase de la mise à l'arrêt d'un moteur et de la partie opérative entraînée, elle ne constitue en aucun cas un moyen de blocage du rotor. Seul un moyen mécanique permet d'obtenir ce blocage

9.1. Freinage par injection de courant continu dans le stator:

Le principe consiste après avoir coupé le champ tournant dans le stator, de créer un champ fixe de façon à créer des courants de Foucault dans le rotor permettant de s'opposer à la rotation. Le champ fixe est réalisé par injection de courant continu dans une phase du stator. Comme aucune F.E.M n'est créée, il est nécessaire de limiter le courant (I_n)

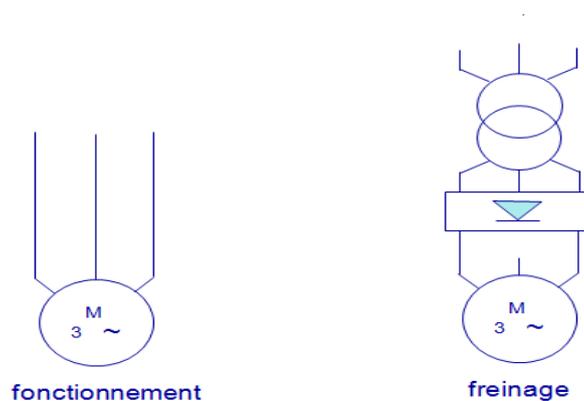


Fig.14 . Freinage par injection de courant continu d'un moteur à cage d'écureuil

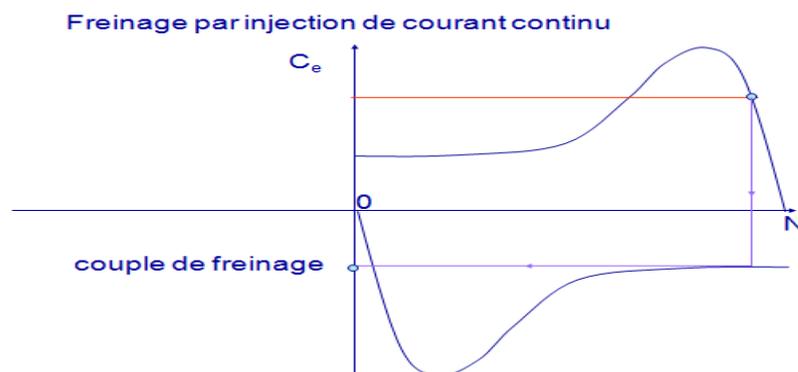


Fig.15. Freinage de par injection de courant continu du MAS à cage d'écureuil

9.2. Freinage par inversion du champ tournant:

La valeur du courant introduite au stator doit impérativement être limitée. Les solutions limitant le courant par action sur la tension statorique conduisent à une forte

réduction du couple. L'introduction des résistances dans le stator produit un freinage très peu efficace lorsque le courant est limité à une valeur raisonnable ce qui fait que cette solution est rarement envisagée. Les solutions Y/D ou auto-transformateur restent des solutions possibles si le freinage n'a pas besoin d'être très efficace.

9.3. Freinage par Electro-freins:

Un électro-aimant triphasé ou monophasé assure le freinage