

## **I.1. Introduction:**

L'entraînement des machines est assuré en très grande majorité par des moteurs asynchrones, alimentés en courant alternatif triphasé et quelque fois en monophasé. Ce type de moteur s'impose en effet dans la plupart des applications par son prix de revient avantageux, ces qualités de robustesse et sa simplicité d'entretien.

IL nous paraît donc indispensable de rappeler dans ce chapitre les principes de fonctionnement et de construction de ces moteurs.

## **I.2. Historique Sur Les Machines Asynchrones:**

Historiquement le dix-neuvième siècle fût l'époque des grandes découvertes en électrotechnique dont les bases fondamentales ont été établies entre 1820-1830, par des hommes de science parmi lesquels on peut citer, OERSTED, AMPERE, BIOT, SAVART, LAPLACE, OHM, FARADAY; Plus tard en (1873) MAXWELL formalisa les lois de l'électromagnétisme moderne dans son fameux ouvrage : "Treatise on Electricity and Magnétisme".

Mais ce n'est qu'à partir de 1870 que l'électrotechnique industrielle s'affirma notamment grâce a la production d'énergie électrique par les génératrices a courant continu (dynamos) de gramme et de siemens. Ensuite, dans les années 1880, furent conçus les alternateurs et les transformateurs polyphasés. Les premiers devaient concurrencer et détrôner les dynamos pour la production de l'électricité, enfin les travaux du Y. TESLA et de l'italien FERRARIS complétèrent les systèmes à courants alternatifs polyphasés par la conception et la construction des machines d'induction ou asynchrones en 1888 [9].

Les machines asynchrones couvent actuellement l'essentiel de besoins de la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique. A titre d'exemple, elles sont utilisées pour la quasi-totalité des fonctions auxiliaires d'une centrale de production électrique; ils sont généralement aussi utilisés dans les procédés industriels. L'étude de ces machines acquit donc une grande importance.

### I.3. Définition :

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales. Le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique.

La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor ou inversement se fait par induction électromagnétique.

La machines asynchrone a pour rôle de TRANSFORMER l'énergie électrique apportée par le courant alternatif en énergie mécanique de rotation.

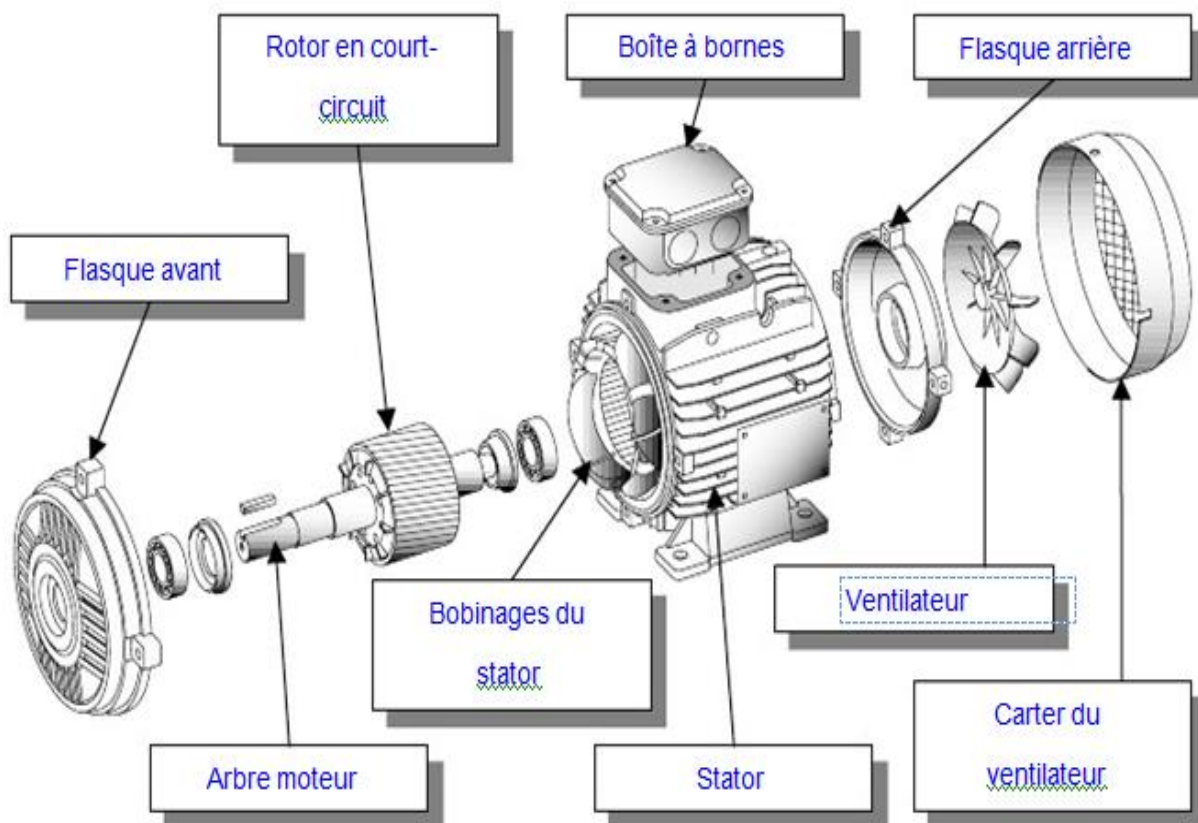
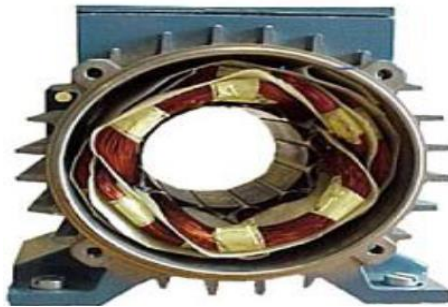


Figure I.1: Machine asynchrone

### I.4. Constitution

- **Le stator** : c'est la partie magnétique fixe du MAS. Elle comporte des enroulements qui, alimentés en énergie électrique, vont produire un champ magnétique tournant.

Le stator est fixé sur la carcasse [2].



**Figure I.2:** Stator d'un moteur asynchrone Triphasé

- **Le rotor** : partie libre en rotation comportant des conducteurs qui seront soumis au champ tournant. Ces conducteurs peuvent être soit des bobines (technologie en voie de disparition) soit des barres de cuivres ; on parle alors de rotor en court-circuit (ou à cage à d'écureuil<sup>1</sup>). La rotation possible grâce aux paliers supportés par la carcasse [10].



**Figure I.3:** Type de rotor

- **Les flasques** : ils ferment le carter moteur aux deux extrémités et sont réalisés en fonte grise ou en aluminium injecté. Les flasques sont centrés sur le carter et réunis entre eux par des tirants ou tiges d'assemblage [10].

- **La plaque à bornes** : fixée sur la carcasse, elle comporte un ensemble de 6 bornes permettant de connecter les bobines statoriques à l'alimentation électrique en effectuant le couplage [10].

- **L'arbre du rotor** : le rotor est monté sur un arbre en acier. A une de ses extrémité est monté le ventilateur et éventuellement le frein, à l'autre on trouve l'arbre de sortie avec une rainure de clavetage pour le montage du pignon d'entraînement [10].

- **Le ventilateur** : placé à l'arrière du moteur, il permet le refroidissement du moteur. Le capot oriente le flux d'air vers les ailettes du carter [10].

- **Les roulements** : sur le moteur proposé, le guidage en rotation de l'arbre se fait par deux roulements à billes montés dans les flasques (d'autres combinaisons sont possibles) [10].

### I.5. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone

Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'induction des courants dans le bobinage du rotor par un champ tournant dans l'entrefer dû à la circulation des courants polyphasés dans le stator. Ce champ tournant va créer un couple moteur qui s'exerce sur les conducteurs des courants induits, Il provoque ainsi le démarrage et la rotation du rotor dans le même sens que le champ tournant [11].

En fonctionnement normal, le rotor de la machine asynchrone tourne à la vitesse  $\Omega$  exprimée en radians par seconde, et la force magnétomotrice produite par les courants statoriques tourne à la vitesse de synchronisme  $\Omega_s$  exprimée en radians par seconde, mais la vitesse  $\Omega$  est généralement inférieure à  $\Omega_s$  où :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P} = \frac{2\pi f_s}{P} \quad \text{[rad/s]} \quad \text{(I. 1)}$$

Avec :

$\omega_s$  : Pulsation statorique, liée à la fréquence du stator.

$P$  : Nombre de paire de pôle de la force magnétomotrice résultante.

$f_s$  : Fréquence de la vitesse statorique.

Symboles :



Figure I.4: Symboles d'une machine asynchrone

### I.5.1. Glissement :

Il existe donc toujours une différence de vitesses de rotation entre le stator ( $\Omega_s$ ) et le rotor ( $\Omega$ ).

Cette différence s'appelle le glissement, Ce glissement « g » va dépendre de la charge [12].

Le glissement (g) est défini comme un rapport et n'a pas d'unité :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (\text{I. 2})$$

C'est à cause du glissement que le moteur est appelé "asynchrone".

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

$n$  : vitesse de rotation du rotor (tr/min).

$\Omega_s$  : vitesse de rotation mécanique du champ tournant (rad/s).

$\Omega$  : vitesse de rotation mécanique du rotor (rad/s).

### I.5.2. Fréquences – Vitesses

#### I.5.2.1. Fréquence (Vitesse) de synchronisme = fréquence du champ tournant

$$n_s = \frac{f_s}{P} \quad \text{Avec : } \begin{cases} n_s: \text{vitesse desynchronisme} & (\text{tr/min}) \\ f_s: \text{fréquence du courant d'alimentation} & (\text{HZ}) \\ P: \text{nombre de paires de poles} \end{cases}$$

#### I.5.2.2. Fréquence (Vitesse) de rotation du moteur = fréquence de rotation du rotor

$$n = n_s(1 - g) \quad \text{Avec : } \begin{cases} n_s: \text{vitesse desynchronisme} & (\text{tr/min}) \\ n: \text{vitesse de rotation du rotor} & (\text{tr/min}) \\ g: \text{glissement sans unité} \end{cases}$$

### I.5.3. Le Couple Du Moteur Asynchrone :

Le couple développé par le moteur est donné par :

$$C_{em} = \frac{P_m}{\omega} \quad [\text{N.m}] \quad (\text{I. 3})$$

### I.6. Quadrants de fonctionnement

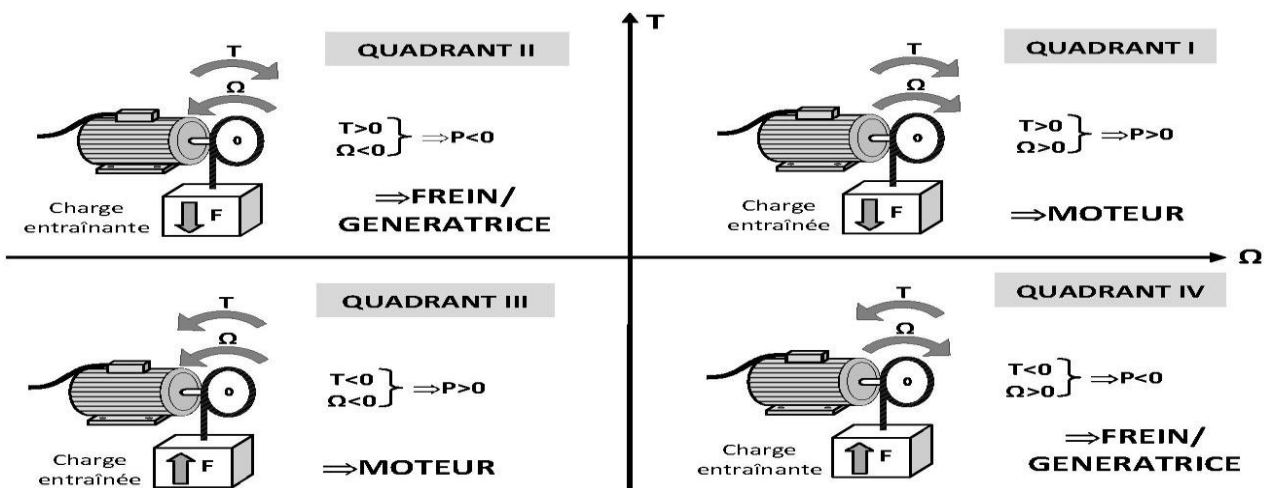


Figure I.5: Quadrants de fonctionnement d'une MAS

### I.7. Techniques de variation de vitesse de la MAS

L'organigramme suivant présente les techniques classiques permettant d'agir sur la vitesse de rotation [13].

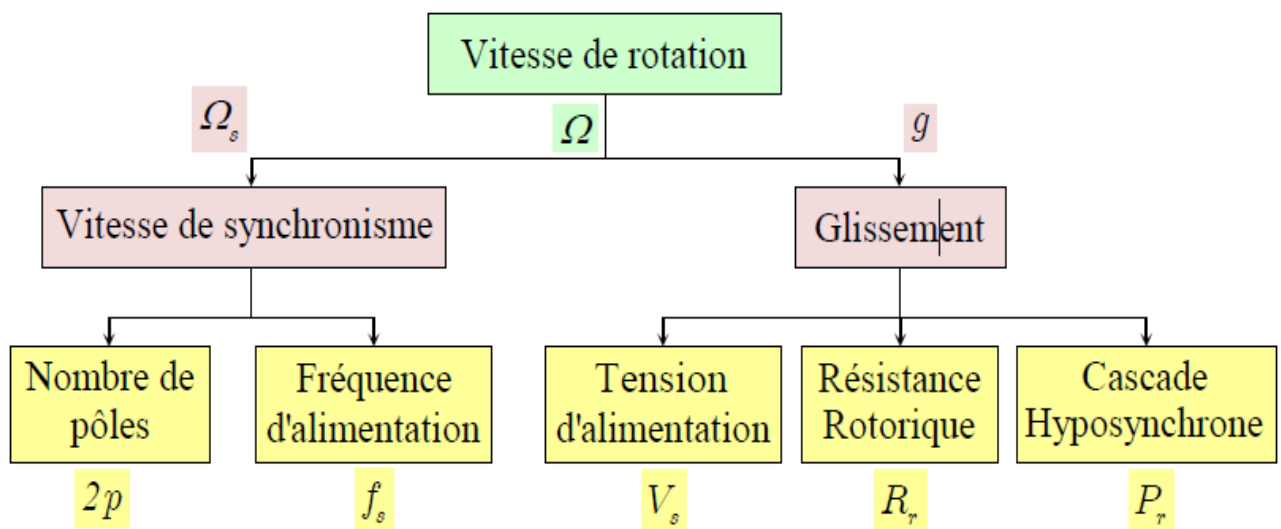


Figure I.6: Technique classique de variation la vitesse d'une MAS

### I.7.1. Variation de la résistance rotorique

La façon la plus simple pour faire varier le glissement (vitesse) d'un moteur à rotor bobiné est d'utiliser un rhéostat secondaire (rotorique) comme l'indique la figure (I-7) [13].

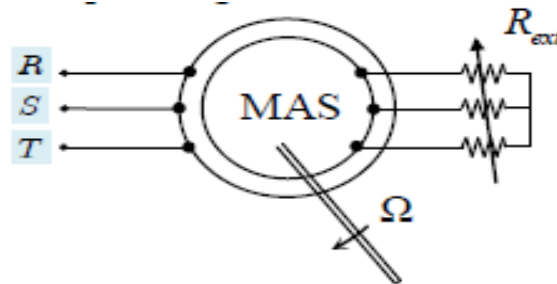


Figure I.7: Schéma de la variation de la résistance rotorique de la MAS

L'influence de la variation de la résistance rotorique  $R_{req} = R_r + R_{r_{ext}}$  sur la caractéristique  $C_{em} = f(g)$  est représentée sur la figure (I-8)

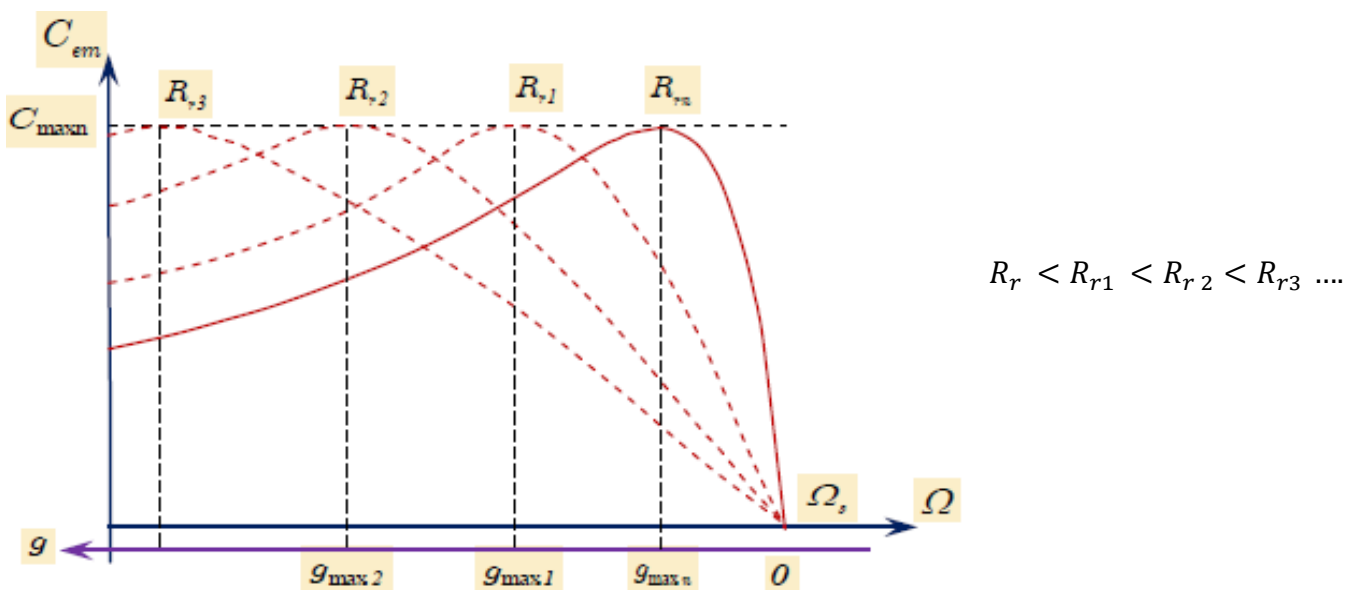


Figure I.8: Caractéristiques électromagnétique de la MAS pour différentes valeurs de  $R_r$ .

### I.7.2. Récupération de l'énergie du rotor (Cascade hypo synchrone)

Dans le montage précédent (la technique précédente), le réglage de vitesse se fait par dissipation de la puissance prélevée entre bagues du rotor. Cette énergie peut être récupérée soit :

- En renvoyant l'énergie sur l'arbre de la MAS par l'intermédiaire d'un MCC alimenté par l'énergie du glissement récupérée.
- En renvoyant cette énergie sur le réseau à travers un convertisseur statique de fréquence (la puissance relevée du rotor est de fréquence variable). Le montage associé à cette dernière solution est appelé 'cascade hypo synchrone' comme l'indique la figure (I-9)[13].

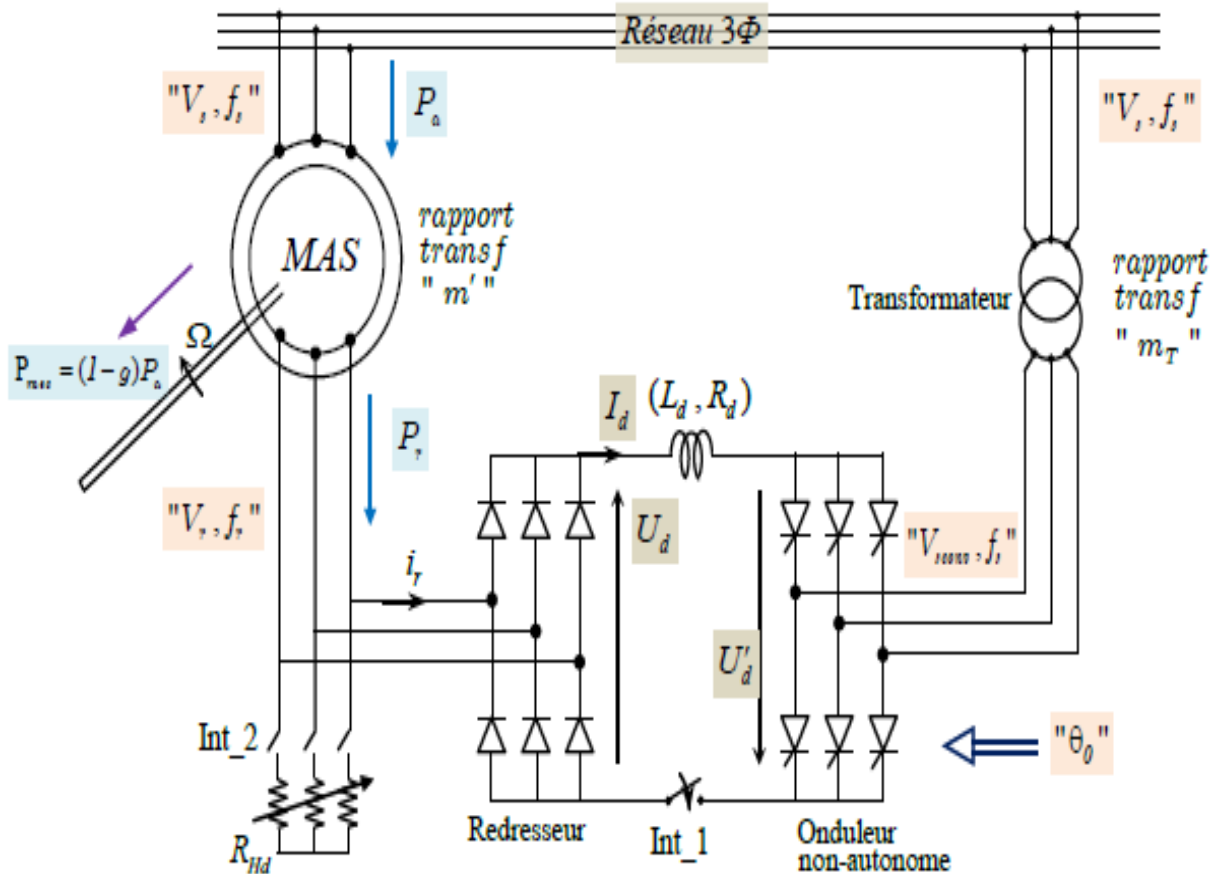


Figure I.9: Structure générale d'une cascade hypo synchrone

D'après le schéma de la figure ci-contre, si on néglige les pertes dans la machine et dans le transformateur, on a :  $P_{me} = P_a + P_r \Rightarrow P_{me} = (1 - g)P_a \Rightarrow P_r = g.P_a$

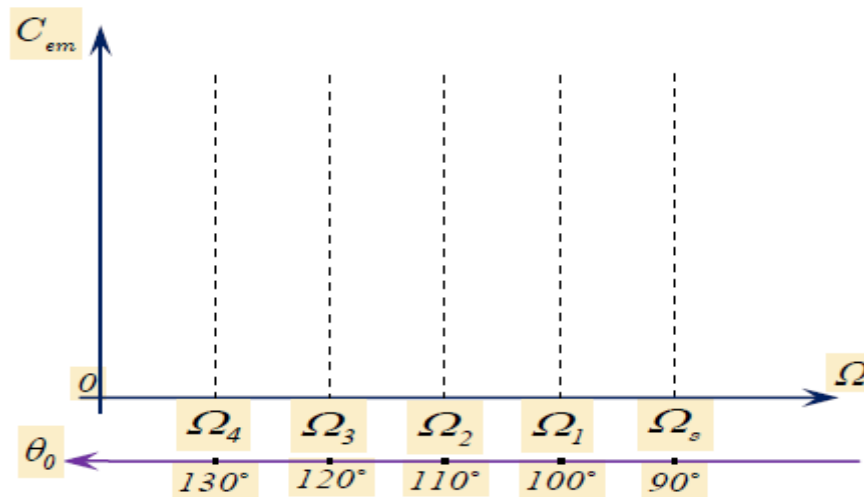
**Analyse du fonctionnement :**

- ❖ Pour des raisons de simplification, on suppose que les pertes dans la machine et dans les convertisseurs sont négligeables.



A l'équilibre (à vide  $I_d = 0$ ), l'onduleur restituera au réseau l'énergie empruntée du rotor, lorsque

$$U_d + U'_d = 0 \quad \Rightarrow \quad g = -\frac{m_T}{m'} \cos \theta_0 \quad \Rightarrow \quad C_{em} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \frac{P}{\omega_s} m' V_s I_d$$



**Figure I.10:** Caractéristiques électromagnétiques de la cascade hypo-synchrone avec variation de l'angle d'amorçage et supposition des pertes négligeables

❖ pour les pertes non-négligeables

Les chutes de tension dans le rotor, les diodes, dans le circuit continu rapportées au circuit continu sont approximativement égales à une chute résistive équivalente  $R \cdot I_d$ . Ou 'R' représente la résistance totale équivalente à tout les circuits lié au rotor (rotor, redresseur, inductance, onduleur, transformateur) ramenée au côté continu [13].

Donc :

$$I_d = \frac{U_d + U'_d}{R} \Rightarrow C_{em} = \frac{K_1}{R} \frac{P}{\omega_s} (g K_1 + K \cos \theta_0)$$

Avec :

$$K_1 = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot m' \cdot V_s \quad \text{et} \quad K = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot m_T \cdot V_s$$

D'après cette expression et pour des valeurs de ' $\theta_0$ ', constantes :  $C_{em} \propto g$ .

Les caractéristiques  $C_{em} = f(g)$  pour des valeurs différentes de  $\theta'_0$  peuvent être représentées par droites sensiblement parallèles (Figure I-11).

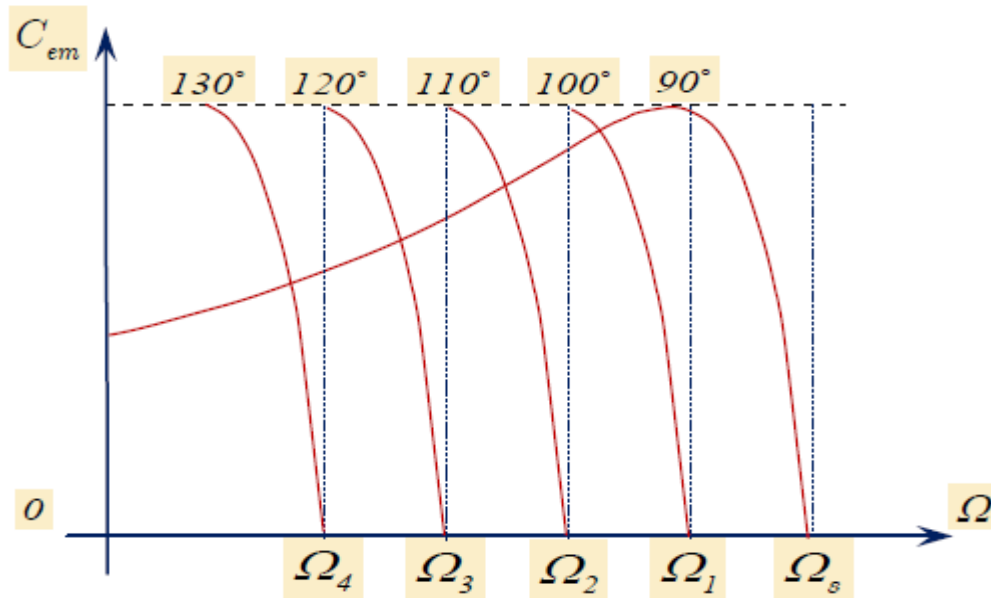


Figure I.11: Caractéristiques électromagnétiques de la cascade hyposynchrone avec variation de l'angle d'amorçage et supposition des pertes non négligeables

### I.7.3. Variation de la tension d'alimentation

La seule façon d'augmenter le glissement d'un moteur à cage alimenté à fréquence constante est de diminuer la valeur de la tension statorique au-dessous de la tension nominale ( $V_s \leq V_{s,n}$ )

La figure (I-12) présente la caractéristique  $C_{em} = f(g)$  pour différentes valeurs de la tension statorique [12].

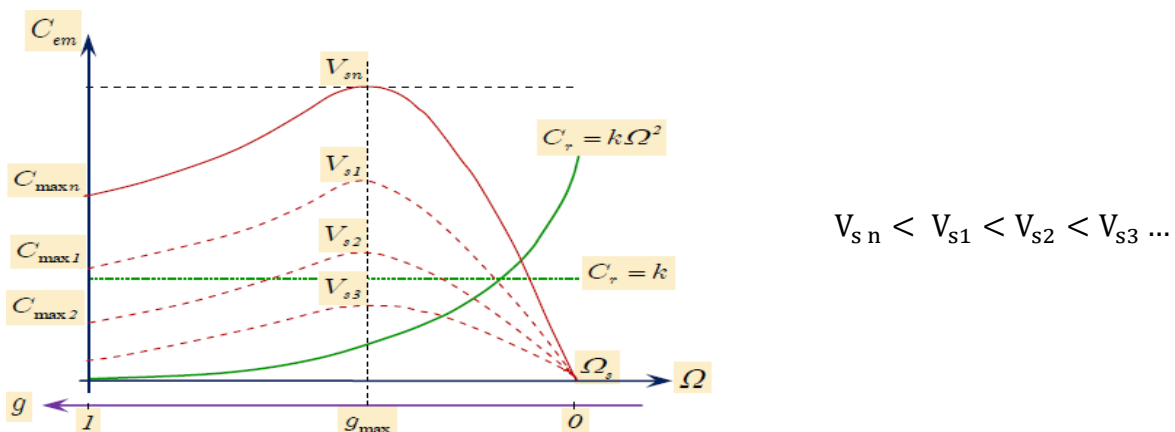


Figure I.12: Caractéristiques électromagnétique de la MAS pour différentes valeurs de  $V_s$

I.7.4. Variation de la fréquence d'alimentation

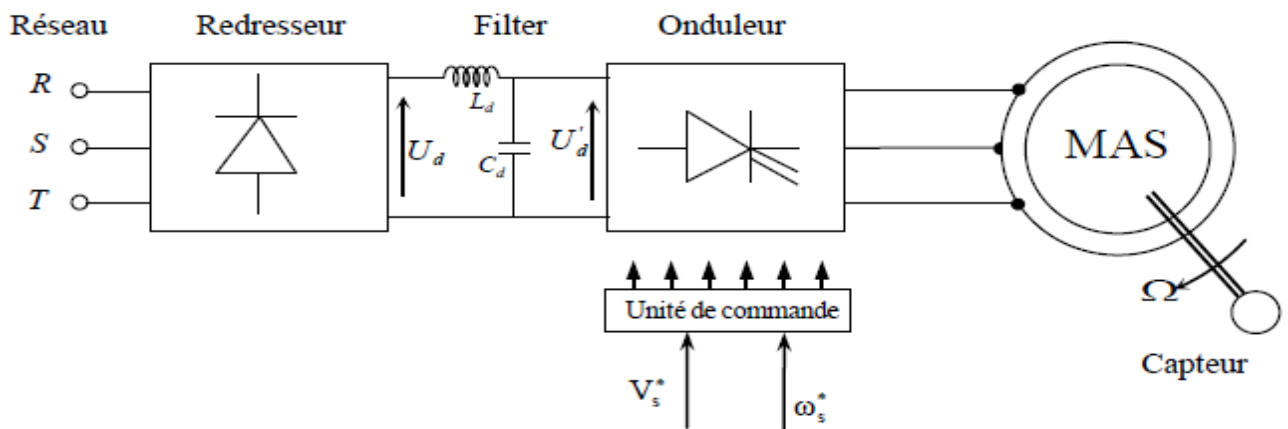


Figure I.13: Structure d'un convertisseur de fréquence indirect

A tension d'alimentation  $V_s = V_{s n}$  et fréquence variable, les caractéristiques  $C_{em} = f(g)$  sont représentées sur la figure (I-14) suivante : [13].

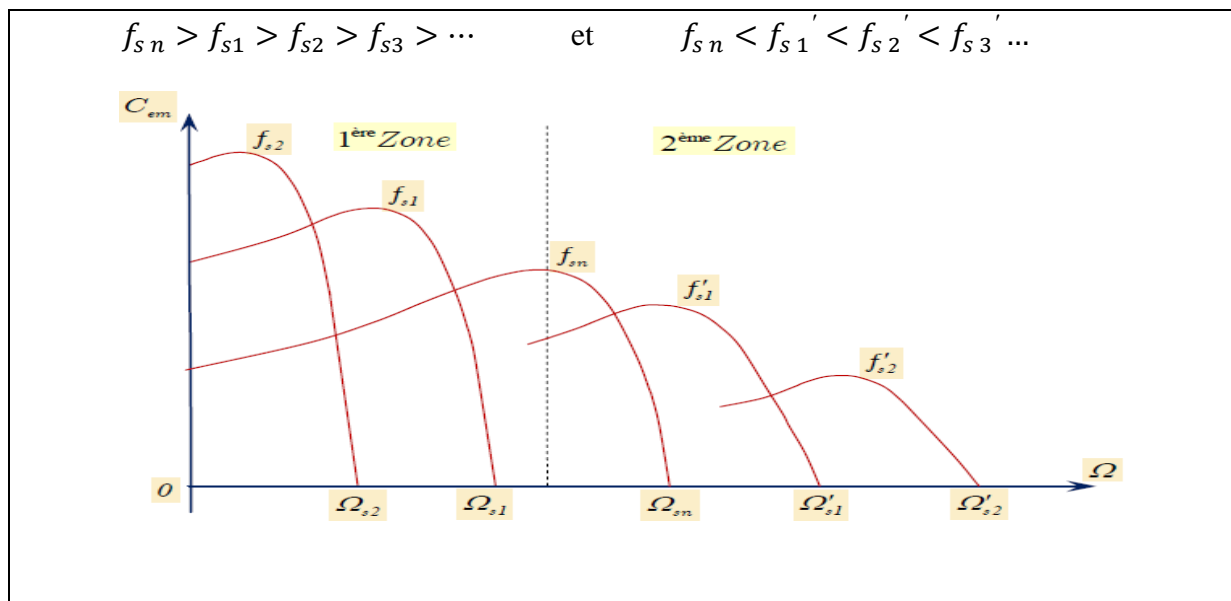


Figure I.14: Caractéristiques électromagnétiques de la MAS avec variation de la fréquence d'alimentation à tension constante

On peut distinguer deux zones de fonctionnement :

1<sup>ère</sup> Zone

Si la fréquence  $f_s \downarrow (f_s < f_{s n}) \Rightarrow V_s = V_{s n}$  donc  $\varphi_s$  augmente :  $\varphi_s > \varphi_s \approx \frac{V_{s n}}{f_{s n}}$

Donc c'est fonctionnement indésirable

2<sup>ème</sup> Zone

Si la fréquence  $f_s \uparrow (f_s > f_{sn}) \Rightarrow V_s = V_{sn}$  donc  $\varphi_s$  **diminue** :  $\varphi_s < \varphi_s \approx \frac{V_{sn}}{f_{sn}}$

Donc le fonctionnement en dé fluxé (en sous-excitation).

## I.8. Les avantages et les inconvénients :

### I.8.1. Avantage:

Ilya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone comme :

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- Il peut être varie la vitesse de rotation.
- Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse.

### I.8.2. Inconvénients :

Permis les inconvénients de la machine asynchrone :

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).
- La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage.

### I.9. Bilant de puissance

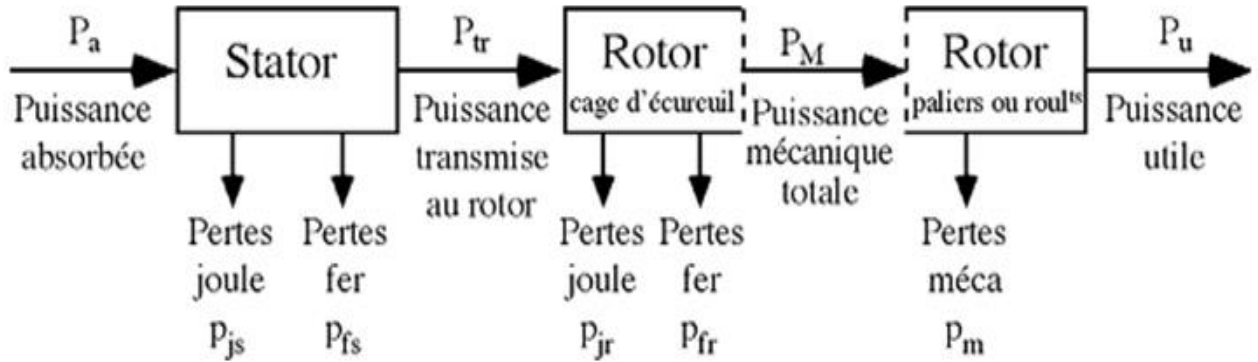


Figure I.15: Bilant de puissance d'une machine asynchrone

Le moteur absorbe au réseau la puissance :

$$P_a = 3VJ \cos \theta = \sqrt{3}VI \cos \theta$$

$V$ : Tension simple.

$U$ : Tension composé.

$I$  : Courant

$\theta$ : Coefficient caractéristique du matériau

Une partie de cette puissance (1 à 2 %) est perdue dans le stator sous forme de pertes dans le fer ( $P_{fs}$ ) et de pertes dans le cuivre dues à l'effet joule ( $P_{js}$ )

La puissance restante est, alors transmise au rotor par le champ tournant sous la forme de Puissance électromagnétique:

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} - P_{fs}) \tag{I. 4}$$

Le rotor utilise cette puissance à deux fins : une partie est gaspillée par l'effet joule dans les enroulements du rotor (résistance propre rhéostat extérieur si celui-ci n'est pas en court-circuit), l'autre partie se trouve en puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre de moteur [12].

## I.10. Rendement du moteur

Le rendement est le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance électrique absorbée par, d'où : [12].

$$\eta = \frac{P_u}{P} \quad (\text{I. 5})$$

$\eta$  : Rendement du moteur [sans unités]

$P_u$  : La puissance utile en watts [W]

$P$  : La puissance absorbée en watts [W]

## I.11. Le démarrage et farinage

### I.11.1. Le démarrage

Les procédés de démarrage des moteurs à cage résultent d'un compromis entre la réduction de l'intensité du courant appelé au réseau et l'obtention d'un couple accélérateur suffisant ; dans tous les cas l'appareillage utilisé, visant à ramener l'intensité entre deux et trois fois sa valeur nominale agit par diminution de la tension statorique [14].

#### I.11.1.1. Le démarrage direct

C'est le plus simple qui ne peut être exécuté qu'avec le moteur asynchrone à rotor à cage. Les enroulements du stator sont couplés directement sur le réseau, C'est le mode de démarrage le plus simple et Le moteur démarre sur ses caractéristiques naturelles. [14].

Le courant de démarrage

$$I_d = 5 \text{ à } 8 I_n$$

Le couple de démarrage est en moyenne :

$$C_d = 0.5 \text{ à } 1.5 C_n$$

**I.11.1.2. Démarrage sous tension réduite**

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur ce qui est un moyen de limiter l'intensité du courant de démarrage [14].

**I.11.1.3. Démarrage étoile-triangle**

Ce procédé ne peut s'appliquer qu'aux moteurs dont toutes les extrémités d'enroulement sont sorties sur la plaque à bornes, et dont le couplage triangle correspond à la tension du réseau.

Le démarrage s'effectue en 2 temps.

- 1 temps : mise sous tension et couplage étoile des enroulements.  
Le moteur démarre à tension réduite  $n$
- 2 temps : Suppression du couplage étoile, et mise en couplage triangle Le moteur est alimenté sous pleine tension [8].

Le courant de démarrage :

$$I_d = 1.5 \text{ à } 2.6 I_n$$

Le couple de démarrage :

$$C_d = 0.2 \text{ à } 0.5 C_n$$

**I.11.1.4. Démarrage par autotransformateur**

Dans le démarrage par autotransformateur, on effectue le même type que le démarrage étoile triangle (on a en plus le choix du rapport des tensions en choisissant le rapport de transformation) mais les phénomènes transitoires du démarrage étoile triangle (pointe de courant au passage triangle, ne vont plus exister car le courant n'est jamais coupé).

Dans un premier temps, on démarre le moteur sur un autotransformateur couplé en étoile. De ce fait, le moteur est alimenté sous une tension réduite réglable. Avant de passer en pleine tension, on ouvre le couplage étoile de l'autotransformateur, ce qui met en place des inductances sur chaque ligne limitant un peu la pointe et presque aussitôt, on court – circuit ces inductances pour coupler le moteur directement au réseau

Ce mode de démarrage est surtout utilisé pour les fortes puissances (> 100 kW) et conduit à coût de l'installation relativement élevé, surtout pour la conception de l'autotransformateur [14].

Le courant de démarrage :

$$I_d = 1.7 \text{ à } 4 I_n$$

Le couple de démarrage :

$$C_d = 0.5 \text{ à } 0.85 C_n$$

#### **I.11.1.5. Le démarrage statorique**

Le principe consiste à démarrer le moteur sous tension réduite en insérant des résistances en série avec les enroulements.

Lorsque la vitesse se stabilise, les résistances sont éliminées et le moteur est couplé directement sur le réseau. Cette opération est généralement commandée par un temporisateur.

Dans ce mode de démarrage, le couplage des enroulements du moteur n'est pas modifié. Il n'est donc pas nécessaire que les deux extrémités de chaque enroulement soient sorties sur la plaque à bornes [14].

En général, les valeurs de courant et de couple de démarrage sont :

$$\begin{aligned} I_d &= 4.5 I_n \\ C_d &= 0.75 C_n \end{aligned}$$

#### **I.11.1.6. Le démarrage rotorique :**

Dans tous les démarreurs précédents, nous n'avons utilisé que des moteurs à cage d'écureuil. Pour ce démarreur, nous avons besoin d'avoir accès au conducteur rotorique. Le fait de rajouter des résistances au rotor provoque une limitation de la pointe de courant au démarrage. En plus, il a l'avantage, si les résistances sont bien choisies, de démarrer avec le couple maximal du moteur [14].

### **I.11.2. Freinage**

Il existe plusieurs procédés de freinage pour moteurs asynchrones; il faut distinguer :



Le freinage avec arrêt immédiat obtenu à l'aide de moteurs spéciaux (moteur frein), Le freinage par ralentissement applicable à tous les types de moteurs asynchrones [14].

#### **I.11.2.1. Utilisation d'un moteur Frein (Action sur le rotor)**

Ce sont des moteurs comportant un dispositif de freinage mécanique (mâchoires, disques, etc.) commandé par un électro-aimant. Il en existe deux types :

- **A appel de courant** : nécessite une alimentation électrique indépendante de celle du moteur.
- **A manque de courant** : le frein est actionné mécaniquement (système de ressorts au repos), il est souvent utilisé pour des raisons de sécurité : lorsque le moteur n'est pas alimenté (arrêt normal ou arrêt d'urgence) le freinage est réalisé. [14]

L'électroaimant est alimenté en triphasé, branché en parallèle sur les enroulements statoriques.

#### **I.11.2.2. Freinage par contrecourant (Action sur le stator)**

C'est un mode de freinage très efficace. Le ralentissement est violent après avoir coupé l'alimentation, pour arrêter plus rapidement le rotor, on inverse 2 phases pour l'inversion du champ tournant donc ralentissement du rotor [14].

#### **I.11.2.3. Freinage par injection de courant continu**

On déconnecte les enroulements du stator, puis on les alimente avec une source de tension Redressé Le champ tournant est remplacé ainsi par un champ fixe (créé par la source de tension redressée) qui provoque le ralentissement du rotor [14].

### **I.12. Conclusion :**

Dans ce chapitre on a donné un historique sur les machines asynchrone et nous avons exposé une étude générale sur les moteurs asynchrones triphasés (constitution, Principe de fonctionnement ...), plus on a donné utilisation de ce type de moteur, et ses avantages et ses inconvénients.

Finalement on déduit que le moteur asynchrone est le plus utilisé dans le domaine des entraînements réglés à vitesse de rotation variable, Il est souvent employé dans l'industrie.