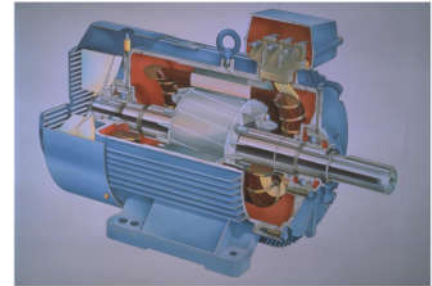


# Variateurs des moteurs asynchrones et synchrones

## 3.1. Le moteur asynchrone

### 3.1.1. Généralités et utilisations

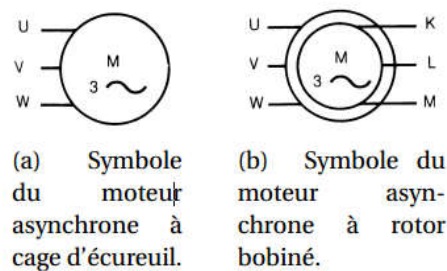
Le moteur asynchrone, appelé aussi « moteur à induction », a été inventé par Nikola Tesla vers 1890, aux USA. Le Moteur asynchrone (MAS) est un actionneur électrique très utilisé dans l'industrie. D'une puissance allant de moins d'un kilo Watt, à plusieurs dizaines de MW, les MAS équipent plusieurs mécanismes entre autres : **machines-outils, monte-charges, tapis-roulants, compresseurs de réfrigérateurs et congélateurs, machines à laver**. Branchés directement sur le réseau électrique triphasé, ils sont appréciés pour leur rendement élevé, pour leur fiabilité (pas de contact glissant), pour leur sécurité de fonctionnement (pas d'étincelles) et leur faible coût.



**Figure 3.1.** Symboles du moteur asynchrone.

### 3.1.2. Symboles

La machine asynchrone est généralement représentée par les symboles suivants



**Figure 3.2.** Symboles du moteur asynchrone.

### 3.1.3. Rappels sur le réseau triphasé

Le réseau triphasé est formé par 3 phases, d'un neutre et d'une terre. La tension entre une des phases et le neutre est appelée tension simple alors que la tension entre deux phases est appelée tension composée. Les 3 tensions sinusoïdales de fréquence 60 Hz sont déphasées de  $120^\circ$   $2\pi/3$  les unes par rapport aux autres.

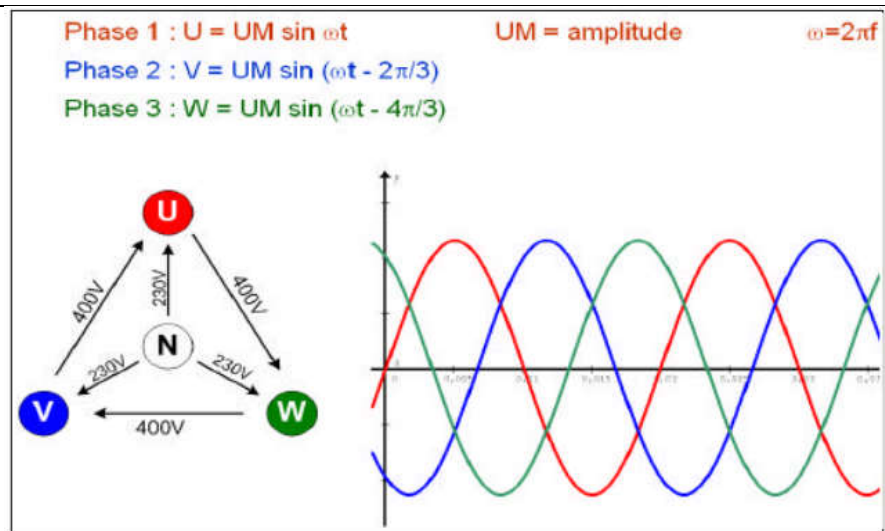


Figure 3.3. Réseau triphasé.

La relation entre valeur maximale  $U_m$  (amplitude) et la valeur efficace  $U_{eff}$  est  $U_m = U_{eff} \times \sqrt{2}$

La relation entre la tension simple  $U_{comp} = U_{sim} \times \sqrt{3}$

### Les courants de foucault

Si un disque fixé sur un axe et se trouve sous l'effet d'un champ magnétique  $B$  variable, un courant induit appelé courant de Foucault apparaît dans le disque.

Le courant induit provoque la mise en rotation du disque (principe du moteur). Si le disque est entraîné, ce courant freine la rotation du disque (principe des freins des véhicules lourds).

Le fonctionnement du moteur asynchrone repose sur l'utilisation du courant de Foucault.

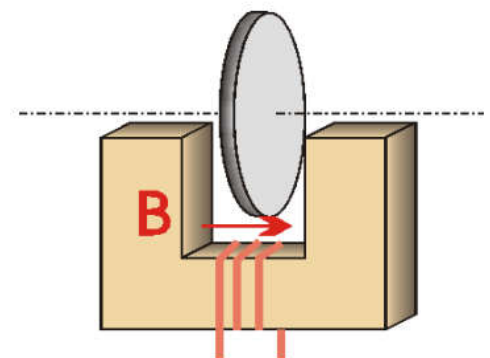
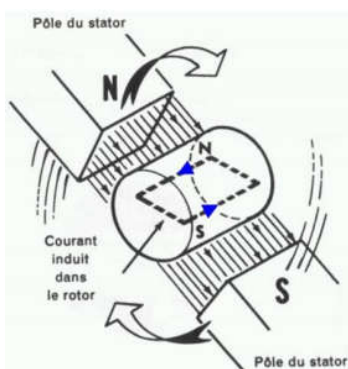


Figure 3.4. Illustration des courants de Foucault.

### Champ magnétique

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

Le courant qui parcourt une bobine crée un champ magnétique  $B$ . Ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et son intensité dépendent du courant  $I$  qui circule dans la bobine. C'est une grandeur vectorielle.

Pour le cas **d'un courant alternatif**, le champ magnétique varie **en sens et en direction** à la **même fréquence** que le courant.

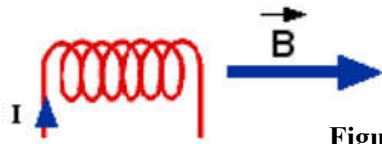
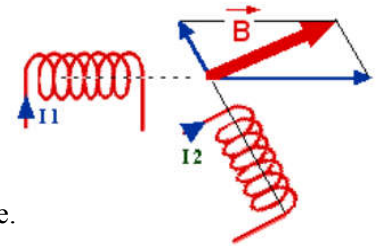


Figure 3.5. Création d'un champ magnétique.



Si nous plaçons deux bobines l'une à proximité 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  $120^\circ$  les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés et le champ magnétique résultant est la somme des trois champs magnétiques.

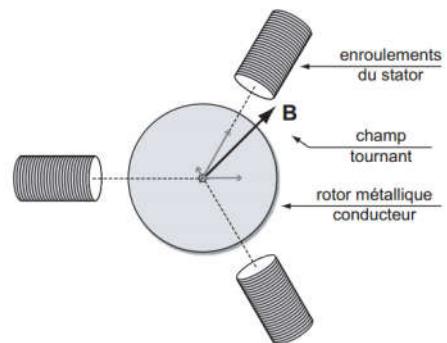
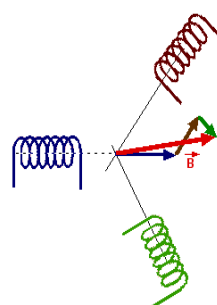
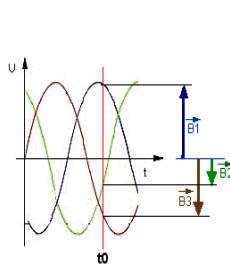


Figure 3.6. Création d'un champ magnétique tournant par trois bobines.

### 3.1.4. Principe de fonctionnement :

Les 3 bobines du stator alimentés en triphasé produisent chacune un champ magnétique variable et sinusoïdale. L'ensemble des 3 champs crée un champ magnétique tournant. Ce champ induit dans le rotor des courants de Foucault qui s'opposent à la cause qui les a engendrés c'est à dire la variation du champ magnétique tournant et résultant des 3 bobines.

Les enroulements du rotor du moteur asynchrone **sont court circuités** (en étoile ou triangle) et ils sont le siège de courants induits. Ces courants donnent naissance à un champ magnétique dans le rotor qui tend à s'aligner avec celui du stator (tournant à la vitesse dite de synchronisme).

**Notons que si le rotor tournait à la même vitesse que le champ tournant généré par le stator, le rotor ne verrait pas de variation de champ magnétique et les courants induits disparaîtraient.** C'est la raison pour laquelle le rotor tourne forcément à **une vitesse différente du champ tournant** d'où le nom de moteur asynchrone (asynchrone : **différence de vitesse**).

Le coefficient de glissement  $g$  représente cette différence de vitesse.

$g$  = glissement

$n_s$  = vitesse de synchronisme

$n$  = vitesse réelle

$f$  = fréquence du courant

$p$  = nombre de paire de pôle du stator

$$E_n \% \quad g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad t / s \quad n_s = \frac{f}{p} \quad \text{Hz}$$

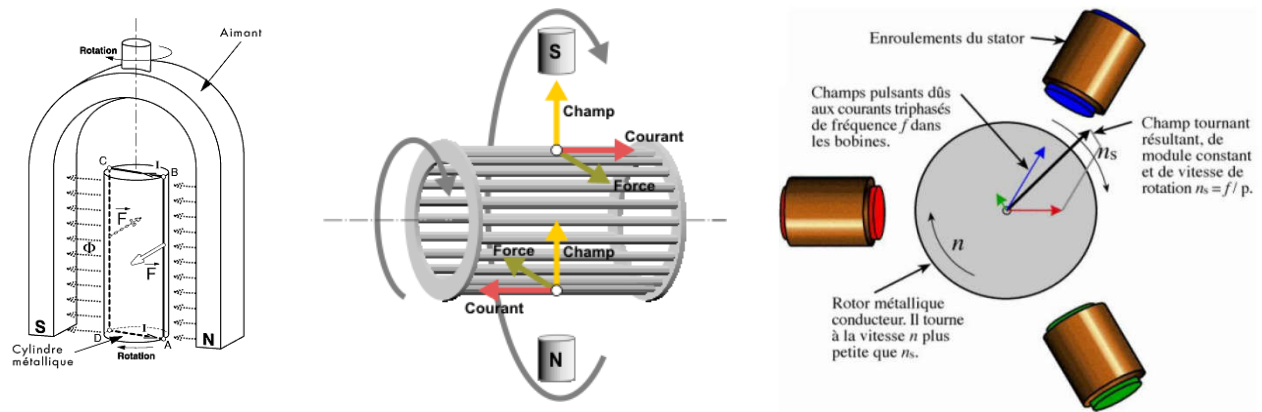


Figure 3.7. Principe du fonctionnement du moteur asynchrone.

### 3.1.5. Constitution du moteur asynchrone triphasé

#### A. Stator

Il est constitué de trois enroulements alimentés par un réseau triphasé de fréquence  $f$ . C'est l'inducteur de la machine et son rôle est de générer un champ tournant dans le rotor.

Chaque enroulement contient  $p$  bobines en série pour faire apparaître  $2p$  pôles.

Le champ magnétique tourne à  $n_s = f/p$ .

$n_s$  : vitesse de synchronisme (en tr/s), elle est la vitesse de rotation du champ tournant ;

$f$  : fréquence du réseau (courants inducteurs) ;

$p$  : nombre de paires de pôles.

Pour limiter et diminuer les pertes magnétiques le circuit magnétique du stator est feuilleté.



Figure 3.8. Stator d'un moteur asynchrone.

#### B. Le rotor

Il est l'induit de la machine et il n'est relié à aucune source de tension extérieure (en fonctionnement normal, il est court-circuité).

Comme il doit être parcouru par des courants de Foucault: il doit donc être en matériau conducteur.

Parmi les types les plus usités on distingue:

##### - Rotor bobiné

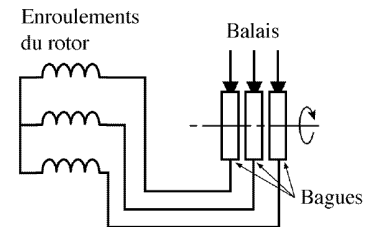
Le rotor bobiné contient un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, logé dans les encoches. Il est constitué de trois enroulements raccordés en étoile ; l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournant avec l'arbre. On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues et trois balais. Ce dispositif permet de changer les propriétés électromécaniques du moteur. En fonctionnement normal, les trois balais sont court-circuités.

**Avantage:** Possibilité de changer la résistance des enroulements rotoriques, donc la caractéristique mécanique.

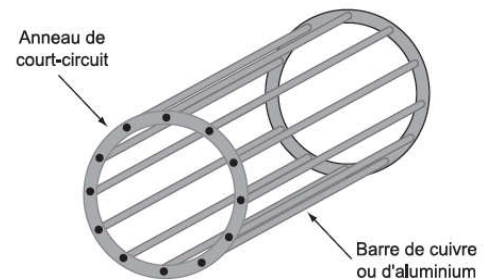
**Inconvénient:** fragilité des contacts glissants (balais frottant sur des bagues); coût élevé.

### - Rotor à cage d'écureuil

Le rotor est constitué de barreaux de cuivre (ou d'aluminium) nues introduites dans les encoches; ces barres sont soudées ou rivées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à **une cage d'écureuil** d'où le nom de rotor à cage d'écureuil. Sa résistance électrique est très faible.



**Figure 3.9.** Rotor bobiné d'un moteur asynchrone.



**Figure 3.10.** Rotor à cage d'écureuil d'un moteur asynchrone.

**Avantage :** robuste et peu coûteux

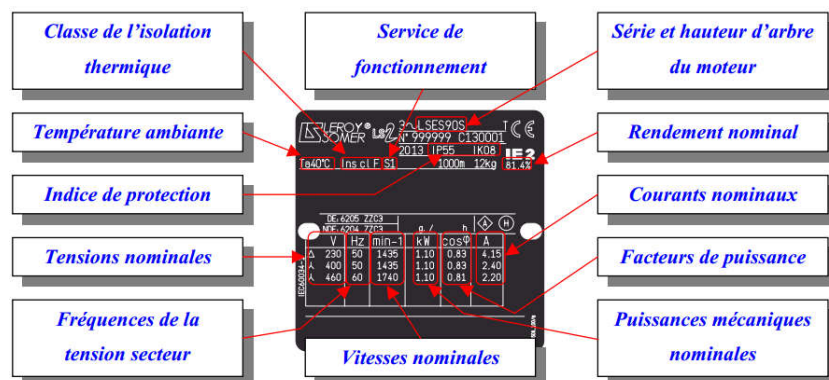
**Inconvénient :** pas de possibilité d'agir sur la caractéristique mécanique.

## C. Entrefer

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

### 3.1.6. Plaque signalétique

Les moteurs asynchrones disposent d'une plaque signalétique qui constitue une sorte de carte d'identité du moteur



**Figure 3.11.** Plaque signalétique.

### 3.1.7. Caractéristiques

#### A. 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 par conséquent  $n_0 = n_s$

#### B. Fonctionnement en charge

Le moteur fournit maintenant de la puissance active, le stator appelle un **courant actif**.

**Remarque** : le moteur asynchrone peut démarrer en charge.

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

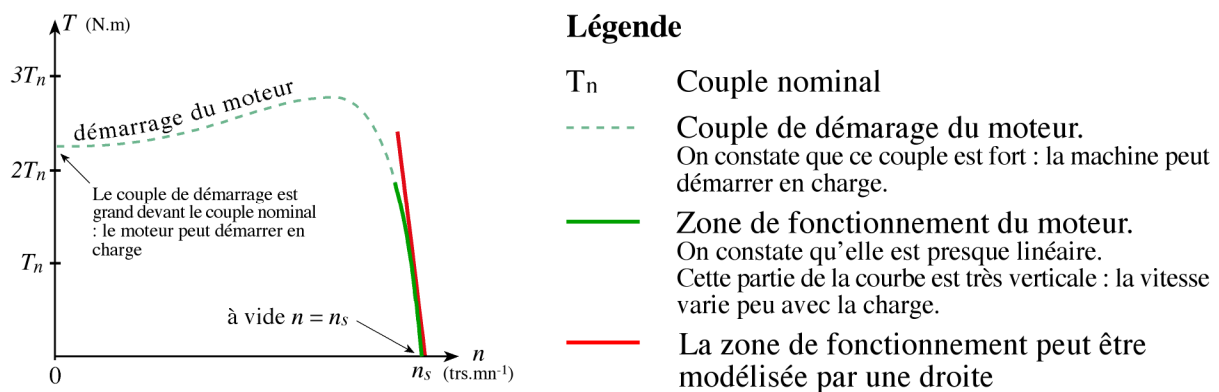


Figure 3.12. Caractéristique mécanique  $T_u = f(n)$ .

#### 3.1.8. Bilan des puissances pour un moteur asynchrone

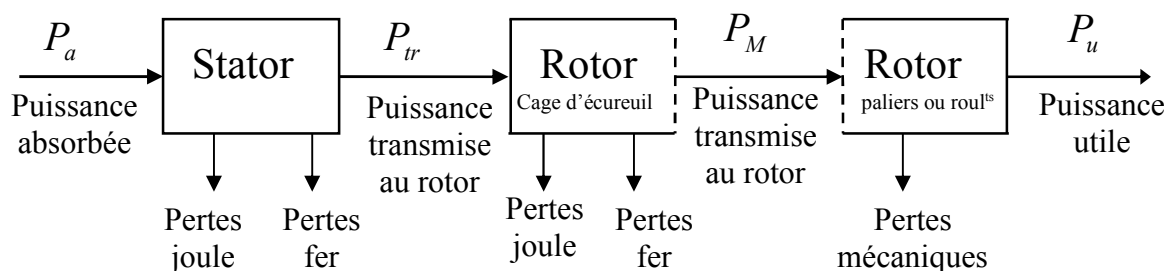


Figure 3.13. Bilan des puissances.

**Puissance électrique absorbée**

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

U : tension entre deux bornes du moteur

I : courant en ligne

$\varphi$  : déphasage entre courant et tension

**Pertes par effet joule au stator**

$$p_{js} = \frac{3}{2} R I^2$$

R : résistance entre deux bornes du stator

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

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

Elle représente 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 transmet donc la puissance mécanique totale  $P_M$ .

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

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

La puissance mécanique comprend la puissance utile et les pertes mécaniques.

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

Ce type de pertes est négligeable

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

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

Les pertes fer du rotor sont négligeables.

**Pertes collectives :  $p_c$**

$$p_c = p_{fs} + p_m$$

Les pertes collectives ne dépendent que de U, f et n. Comme ces grandeurs sont souvent 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 constant 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  $g = 0 \Rightarrow p_{jr} = 0$

$$P_{a0} = \sqrt{3} U I_0 \cos \varphi_0 \quad \text{et} \quad p_{js0} = \frac{3}{2} R I_0^2 \approx 0 \quad (\text{puisque } I_0 \text{ est faible})$$

$p_c$  à vide  $\approx p_c$  en charge

**Bilan à vide :**

$$P_{a0} \approx p_c$$

Il est possible de déterminer les pertes collectives par un essai à vide.



## 3.2. Le moteur synchrone

### 3.2.1. Définition

Ce moteur est caractérisé par **une vitesse de rotation constante** et indépendante de la charge entraînée, mais liée à la fréquence du réseau d'alimentation.

Ce type de moteur conserve sa vitesse de rotation jusqu'à ce qu'il soit en surcharge. Quand 'il est surchargé, le moteur décroche ; c'est-à-dire, qu'il s'arrête et se retrouve dans un mouvement oscillatoire (vibration).

Le moteur synchrone est robuste et facile à réaliser par rapport au moteur à courant continu. Son rendement est proche de 99%.

### 3.2.2. Domaines d'emploi

Parmi les applications des moteurs synchrones nous pouvons citer

#### Petites puissances, (de 1 W à 100 W environ)

- Entraînement de programmateurs horaires, ventilateurs sur micro-ordinateurs, enregistrement et reproduction audio-vidéo, modélisme (auto, trains et engins volants).
- Instrumentation médicale, micro mécanismes automobile, modélisme, mini drone...

#### Moyennes puissances, (de 100 W à 100 kW environ)

- Machines d'usinage numérique (UGV), commande de mécanismes (aéronautique et espace...).
- Motorisation de véhicules électriques ou hybrides (vélo à assistance électrique, scooter, Prius Toyota...).

#### Fortes puissances, (de 100 kW à 1,5 GW environ)

- Motorisation ferroviaire, entraînement d'hélices de bateaux de croisières
- Industrie : compresseur, centrifugeuse, mélangeuse.

### 3.2.3. Constitution

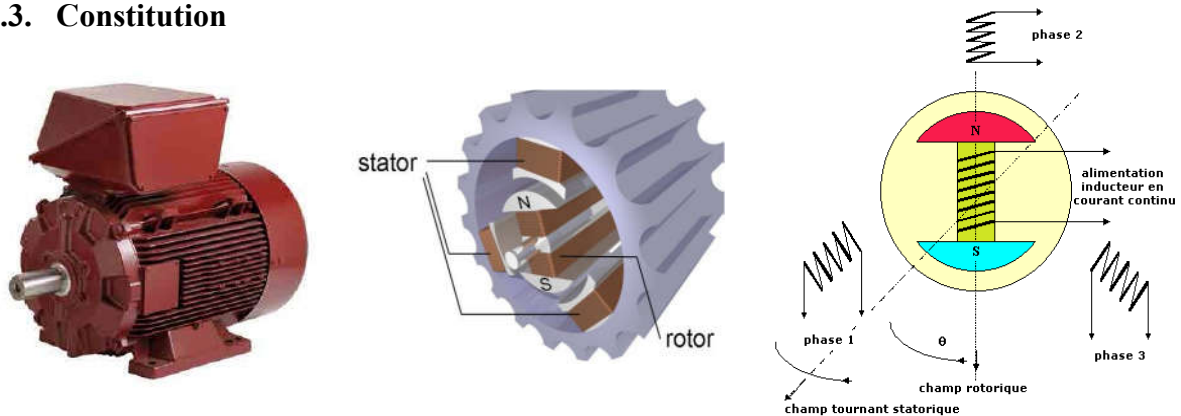


Figure 3.14. Structure d'un moteur synchrone.

#### A. Stator = induit

Le stator porte l'enroulement induit. Il est formé d'un, deux ou trois enroulements (machine monophasée, biphasée ou triphasée) parcourus par des courants alternatifs.

#### B. Rotor = inducteur

L'inducteur est porté par le rotor. On le désigne aussi « roue polaire ». Il est constitué soit, d'électroaimants parcourus par un courant continu ou d'aimants permanents.

Le rotor produit un champ magnétique **fixe** par rapport à lui-même.



### 3.2.4. Principe de fonctionnement

Les courants alternatifs de fréquence  $f$  dans l'induit (stator) créent dans l'entrefer du moteur synchrone, un champ magnétique tournant à la vitesse  $n_s$ .

Le rotor, siège d'un champ magnétique constant, **suit le champ tournant à la même vitesse  $n_s$** .

La vitesse de synchronisme  $n_s$  est donnée par la relation suivante

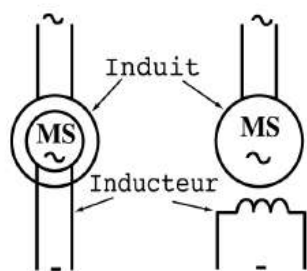
$$n_s = \frac{f}{p}$$

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

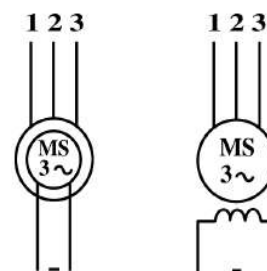
$f$  : fréquence des courants alternatifs en Hz ;

$p$  : nombre de paires de pôles.

### 3.2.5. Symbole



Machine monophasée



Machine triphasée

Figure 3.15. Symbole d'une machine synchrone.

### 3.2.6. Lecture de la plaque signalétique d'une machine synchrone

À partir de la plaque signalétique nous pouvons tirer les informations suivantes :

- Alimentation rotor : 60V continu (0,3A).
- Nombre de paires de pôles :  $p = \frac{f}{n} = \frac{50}{1500/60} = 2$
- Rendement en moteur :

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} = \frac{420}{\sqrt{3} \times 400 \times 0.75 \times 0.86 + 60 \times 0.3} \approx 90\%$$

- Consommation en courant (réseau 230/400V) : 1,3A en étoile et 0,75A en triangle.

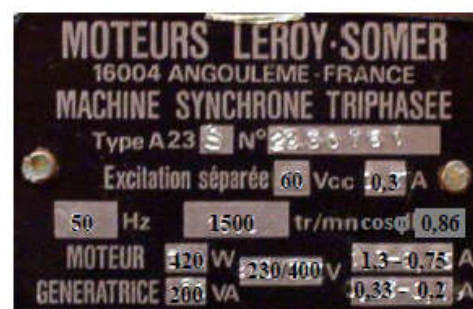
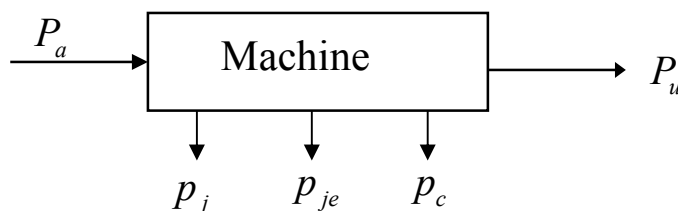
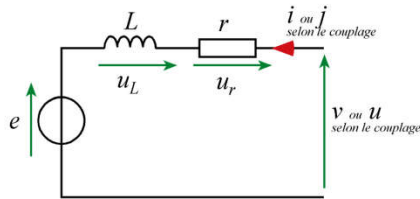


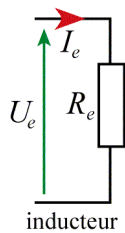
Figure 3.16. Exemple d'une plaque signalétique d'un moteur synchrone.

### 3.2.7. Bilan des puissances



Modèle d'un enroulement de l'induit (**stator**) $e$  : f.e.m. à vide (V) $v$  : tension aux bornes d'un enroulement du moteur (V) $r$  : résistance de l'enroulement ( $\Omega$ ) $X = L \cdot \omega$  : réactance synchrone ( $\Omega$ ) $\varphi$  : déphasage entre courant et tension

Modèle de l'enroulement de l'inducteur (rotor)

 $I_e$  : courant d'excitation (A) $U_e$  : tension d'excitation (V) $R_e$  : résistance de l'enroulement ( $\Omega$ )

L'inducteur est équivalent à une résistance. Toute l'énergie absorbée à l'inducteur est perdue par effet joule :

	Monophasé	Triphasé
<b>Moteur</b>		
Puissance absorbée	$P_a = VI \cos \varphi + U_e I_e$	$P_a = \sqrt{3} UI \cos \varphi + U_e I_e$
Puissance utile	$P_u = \Omega_s T_u$	
<b>Pertes pour le moteur</b>		
Pertes joules	$p_j = r I^2 + R_e I_e^2$	$p_j = \frac{3}{2} R P + R_e I_e^2$
Pertes collectives	$P_c = P_{fer} + P_{méca}$	
	Les pertes collectives peuvent s'estimer par un essai à vide	

### 3.3. Variateurs des moteurs asynchrones

Les variateurs de vitesse électronique permettent de faire varier continuellement la vitesse de rotation des moteurs asynchrones dans leur plage de fonctionnement. Ils permettent également un démarrage qui limite fortement l'appel de courant tout en conservant un couple  $C_d$  (de démarrage) important (voir égal à  $C_m$ )

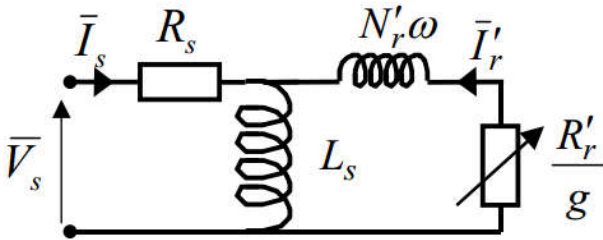
Pour bien choisir un système d'entraînement à vitesse variable il est absolument nécessaire de connaître les contraintes imposées par la charge à l'ensemble réseau/convertisseur/machine.

- Caractéristique couple vitesse de la machine entraînée
- Inertie de la machine entraînée
- Performances statiques et dynamiques attendues
- Régime et service dans tous les cas d'exploitation

### 3.3.1. Position du problème

#### Schéma équivalent et expression du couple

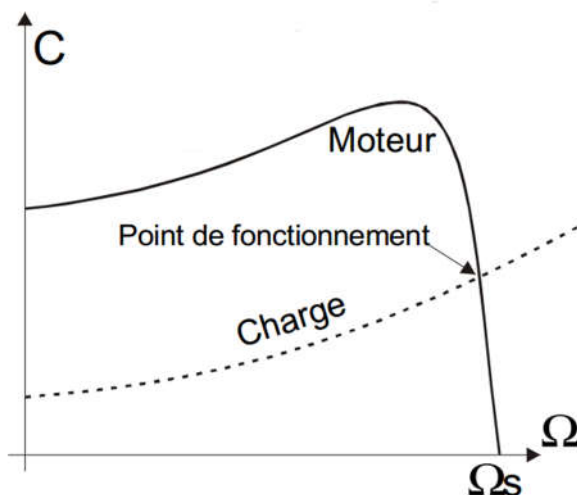
Le schéma équivalent d'une phase en régime sinusoïdal équilibré est le suivant :



C'est à partir de ce schéma que nous allons donner l'expression du couple électromagnétique produit par la machine. Exprimons la puissance transmise au rotor.  $P = 3 \cdot R / g \cdot (I_r')^2 = C_e \cdot \Omega_s$

Qui après quelques manipulations peut s'écrire.

$$C_e = \frac{3p}{w_s} V_s^2 \frac{R_r' / g}{\left( \frac{R_r'}{g} \right)^2 + (N_r' w_s)^2}$$



Le point de fonctionnement ( $C, \Omega$ ) 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 de la machine 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.**

#### A. Réglage par variation du nombre de paires de pôles

Ce mode réalise **une variation non continue** de la vitesse et il ne permet pas de faire fonctionner l'ensemble moteur/charge dans un point de fonctionnement bien défini.

#### B. Réglage par variation de tension

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone 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 ( $C_r = k \cdot \Omega^2$ ).

---

### C. 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 : c'est **la cascade hyposynchrone** réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné.

### D. Réglage par variation de fréquence

La vitesse de rotation de la machine asynchrone est proportionnelle à la fréquence d'alimentation des enroulements statoriques, on essaiera de créer pour ces enroulements un réseau à fréquence variable à base **des Onduleurs de tension**. On peut aussi chercher à injecter des courants dans les enroulements pour imposer le couple de la machine avec **des 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.

### 3.3.2. Réglage par variation du nombre de paires de pôles

Une action sur le nombre de paire de pôles d'un moteur asynchrone triphasé permet d'obtenir des fréquences de rotation différentes mais fixes et la plage de vitesse n'est pas variée. (Moteurs à enroulements indépendants et Moteurs à couplage de pôles DAHLANDER). De manière que :

- Si le nombre de paire de pôles augmente, la fréquence de rotation d'un moteur diminue.
- Si le nombre de paire de pôles diminue, la fréquence de rotation d'un moteur augmente.

#### A. Moteurs à enroulements indépendants

Ces moteurs ont plusieurs stators pour un seul rotor (le nombre de paire de pôle est différent pour chaque stator). Plusieurs bobinages sont insérés au stator et le nombre  $p$  de paires de pôles est différent pour chaque bobinage. À chaque bobinage alimenté, on obtient une vitesse de synchronisme différente et une vitesse du rotor différente.

#### B. Moteurs à couplage de pôles DAHLANDER

Le stator est constitué de 6 bobinages et selon leur mode de connexion, on obtient  $p_1$  ou  $p_2$  paires de pôles par phase. Ces deux possibilités de couplage des pôles et permet ainsi 2 vitesses mais uniquement dans un rapport de 1 à 2. Par exemple 3000/1500 tr/min ou 1500/750 tr/min.

- Triangle série pour la petite vitesse
- Etoile parallèle pour la grande

La difficulté de maîtriser le couple de la machine et les faibles plages de variation de la vitesse du moteur font que cette possibilité n'est pratiquement plus utilisée.

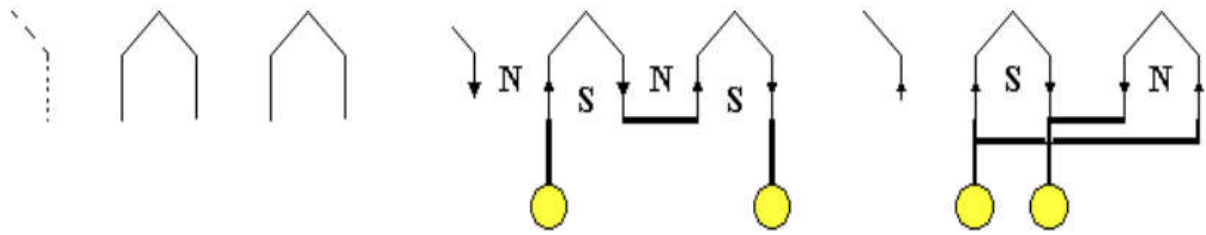


Figure 3.17. Couplage des enroulements

Tensions et couplage	Schéma des connexions internes	Schéma de principe	Branchements plaques à bornes
Dahlander "couple constant" ou "usage courant"  6 bornes couplage $\Delta$ intérieur des 6 enroulements		<p>Vitesse inférieure (PV) Triangle série</p> <p>Vitesse supérieure (GV) Etoile parallèle</p>	 
Ce type de moteur ne permet que des rapports de vitesse de 1 à 2			

### 3.3.3. Réglage par action sur le glissement

- Action sur la tension d'alimentation statorique (autotransformateur, gradateur)
- Rhéostat de glissement au rotor
- Cascade de récupération (cascade hyposynchrone)

#### A. L'action se fait sur la tension statorique

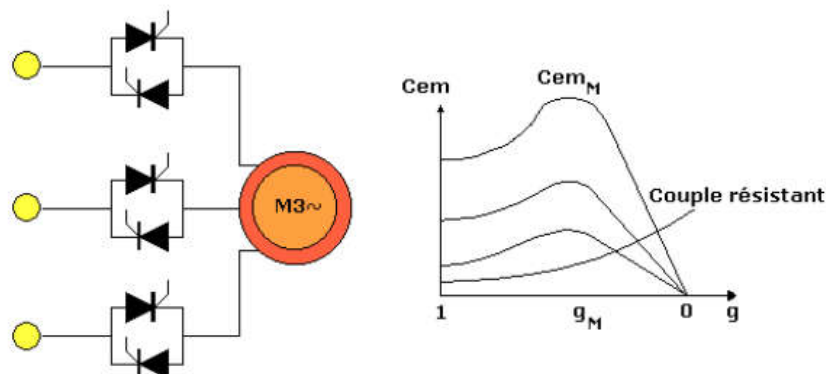
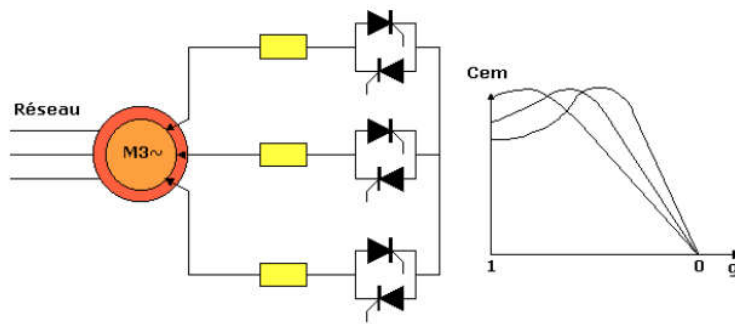


Figure 3.18. Variation de vitesse par action sur la tension statorique

Du fait de sa faible plage de variation de vitesse sur moteur à cage standard, le gradateur statorique est surtout utilisé comme procédé de démarrage sur des machines dont le couple résistant est de type parabolique.

### B. Rhéostat de glissement au rotor

Cette technique est utilisée sur moteur à rotor bobiné.



**Figure 3.19.** Variation de vitesse par action sur les enroulements rotoriques

L'utilisation de résistance rotorique permet un réglage de la vitesse au dessous de la vitesse nominale mais avec un très mal rendement.

Un choix judicieux de la valeur des jeux de résistances insérées au rotor, permet de régler la vitesse de ce type de moteur dans une plage intéressante. L'insertion permanente d'une résistance aux bornes du rotor abaisse la vitesse et ce, d'autant plus, que la valeur de la résistance est élevée. Ce procédé est intéressant pour démarrer très progressivement des charges d'inertie élevée. Par contre, s'il s'agit de régler réellement la vitesse, ce procédé cumule 3 inconvénients :

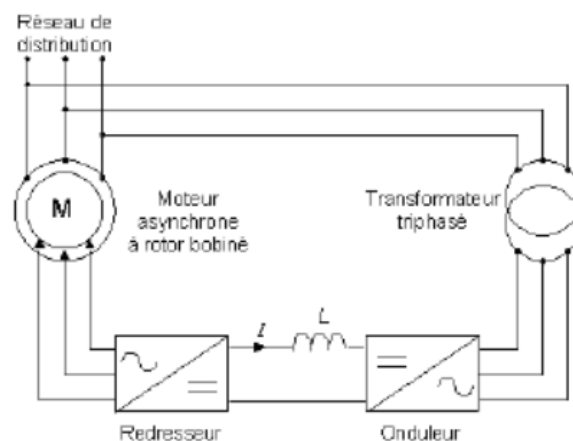
- instabilité à de faibles vitesses (<40%)
- pertes actives importantes dans les résistances
- instabilité de la vitesse lorsque la charge varie ; cette variation de vitesse peut se visualiser sur le graphe en dessinant une horizontale  $C_{charge} = 0,85 \text{ CN}$  par exemple.

### C. Cascade de récupération (cascade hyposynchrone)

Pour récupérer l'énergie transmise au rotor (deuxième inconvénient) : c'est la cascade hyposynchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné. Cette technique est utilisée sur moteur à rotor bobiné.

Le transformateur est choisi avec un rapport de transformation permettant le glissement maximal souhaité. La récupération de l'énergie rotorique assure un excellent rendement, voisin de celui du moteur seul. Le facteur de puissance de la cascade est plus faible que celui du moteur seul et il y a

nécessité de le relever avec une batterie de condensateurs. La cascade ne peut démarrer seule : il est nécessaire de prévoir un dispositif annexe de démarrage par résistances rotoriques.



**Figure 3.20.** : Synoptique d'une cascade hyposynchrone.

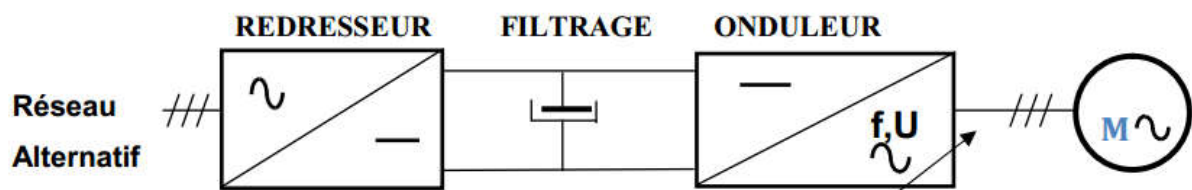


Ce résultat montre qu'il est possible d'obtenir le couple maximal, pour différentes vitesses de rotation, à condition que le rapport tension d'alimentation / fréquence de la tension soit constant ( $U/f$  constant).

### 3.3.4. Réglage par variation de fréquence

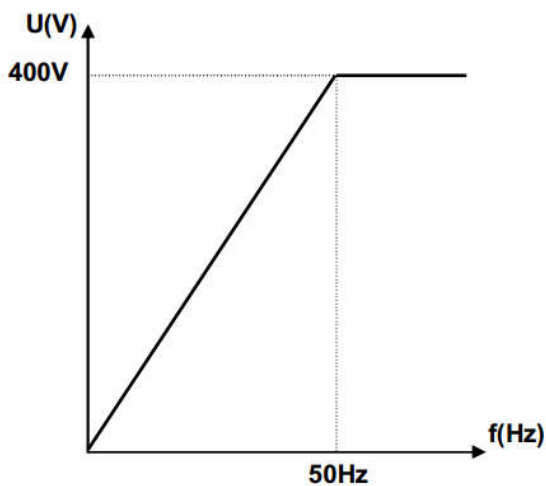
La variation de vitesse s'obtient en faisant varier la fréquence à l'aide d'un onduleur. Généralement, la tension continue est obtenue en utilisant un pont redresseur associé à un condensateur de filtrage. Afin d'obtenir un **couple constant** le convertisseur de fréquence (ensemble **redresseur** + **onduleur**) fonctionne à  $U/f = \text{cte}$

Schéma fonctionnel complet :

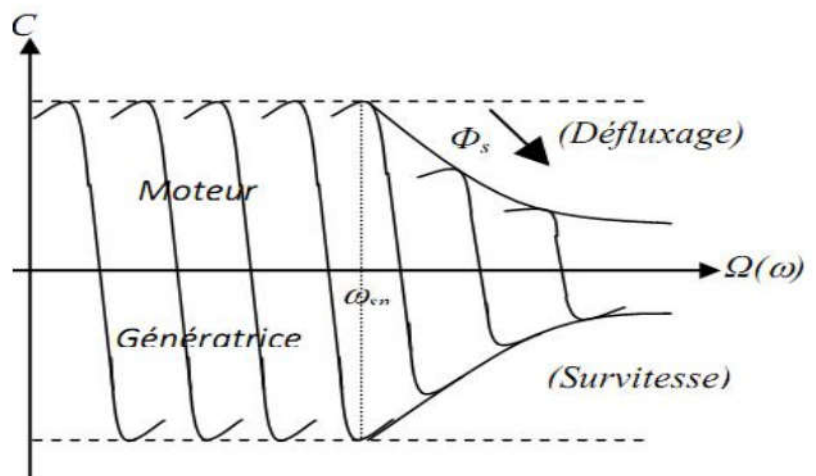


**Figure. 3.21.** Synoptique d'un convertisseur continu-alternatif

Pour différentes vitesses de synchronismes, la partie linéaire des caractéristique couple/vitesse se déplacent parallèlement.



**Figure. 3.23.** Loi tension / fréquence



**Figure. 3.22.** Caractéristiques de réglage par variation de la fréquence d'alimentation d'une machine asynchrone

Le convertisseur de fréquence utilise le principe de la modulation de largeur d'impulsion (MLI). Quelle que soit la fréquence le découpage MLI permet à la forme du courant d'être proche d'une sinusoïde. Le découpage de la tension permet l'élimination des certaines harmoniques de rangs faibles. Le courant obtenu est plus proche d'une sinusoïde et le couple plus régulier à basse vitesse. L'échauffement du moteur est moindre.

### 3.4. Variateurs des moteurs synchrones

Pour faire varier la vitesse d'un moteur synchrone il faut faire varier **la fréquence de son réseau d'alimentation**.

Pour un moteur synchrone le couple électromagnétique est donné par

$$C_e = \frac{3VI}{\Omega_s} \cos\varphi = \frac{3V}{\Omega_s X_s} I \sin\delta = \frac{3VE}{\Omega_s} \cos\psi.$$

On remarque **que le couple est proportionnel au courant d'induit**. Avec un onduleur autonome, on pourra donc faire varier la vitesse de la machine en faisant varier la fréquence. L'ensemble onduleur, machine synchrone, capteur de position est vu donc comme un moteur à courant continu, on l'appelle machine synchrone autopilotée ou encore machine à courant continu sans balais (brushless motor). L'ensemble peut être commandé ensuite classiquement par un hacheur ou un onduleur. On utilisera un onduleur de courant dans le cas de charge de forte inertie, et un onduleur de tension avec commande MLI (de façon à diminuer les harmoniques de couple) pour les charges de faible inertie.

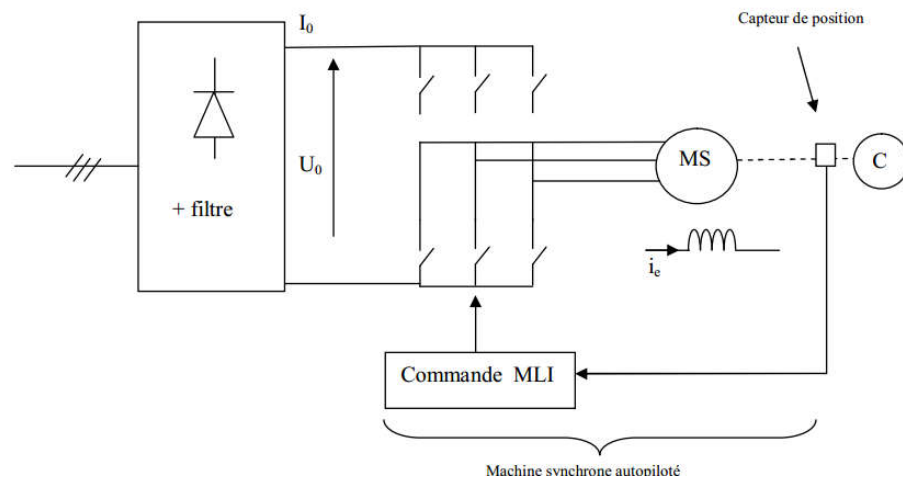


Figure. 3.24. Machine synchrone autopilotée

### 3.5. Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone

Le modèle de la machine asynchrone présenté traditionnellement en cours est un modèle "régime permanent". C'est à dire que la machine est supposée fonctionner en régime établi, qu'elle est alimentée avec sous un système triphasé de valeur efficace constante et qu'elle tourne à une vitesse constante. Les grandeurs sont alors sinusoïdales et l'approche dans l'espace complexe est valable (vecteurs de Fresnel). Ce modèle n'est plus valable si la machine est alimentée par un onduleur triphasé commandé suivant un schéma de contrôle. Le contrôle de vitesse le plus simple, dit en "*V sur f*", permet de varier la vitesse de la machine sur une large plage. C'est un *contrôle scalaire*. Les équations de la machine qui permettent de calculer le couple et de prévoir les points de fonctionnement sont basées sur le modèle "régime permanent" de la machine. Il existe un schéma de contrôle basé sur le modèle "transitoire" ou "dynamique" de la machine qui est le *contrôle vectoriel* de la machine. Ce type de contrôle permet d'avoir une dynamique de réponse plus rapide et une meilleure précision du contrôle du couple. Il est cependant

plus difficile à implanter puisqu'il requiert plus de puissance de calcul en temps réel de la part de l'organe de commande (microcontrôleur, DSP *Digital Signal Processor*) du variateur.

## Modèle transitoire de la machine asynchrone

Il nous faut un modèle de la machine asynchrone qui permet de simuler son fonctionnement en régime transitoire et qui permet de déboucher sur une commande suivant un schéma de contrôle vectoriel indirect par orientation du flux rotorique. La modélisation complète étant hors de portée de ce cours, nous expliquerons les grandes étapes et les résultats de la modélisation.

## Hypothèses de travail

Pour cette mise en équation, nous supposons que le bobinage est réparti de manière à donner une f.m.m. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux. Nous supposons également que nous travaillons en régime non saturé. Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau. Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié. Ces choix signifient entre autres que : les flux sont additifs, les inductances propres sont constantes, il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

## Les équations de la machine asynchrone en régime quelconque

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué en (Figure 3.25). Les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles mêmes.

$\theta$  est l'angle électrique entre l'axe de la phase  $a$  statorique et la phase  $a$  rotorique.

$$v = Ri + \frac{d\varphi}{dt}$$

La loi de Faraday permet d'écrire :

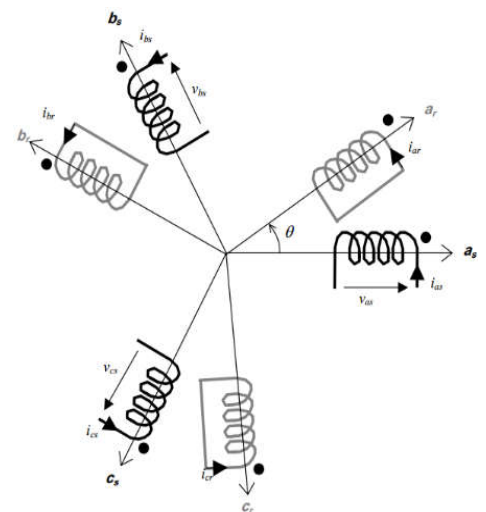
Pour les 3 phases statoriques on résume cette écriture par l'écriture matricielle condensée :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{Cette notation est l'écriture condensée de :}$$

La résistance statorique étant la même pour les 3 phases, il n'y pas lieu d'écrire une matrice de résistances. De même pour le rotor

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.}$$

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux / inductance propre). Exemple de la phase  $a$  statorique :



**Figure. 3.25.** Représentation des enroulements statoriques et rotoriques