

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement  
Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mohamed BOUDIAF-M'sila



جامعة محمد بوضياف - المسيلة  
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

## Cours

Spécialité : Master

Commandes Electriques, Commande des machines tournantes, Réseaux  
électrique, Energie renouvelable

# Machines Asynchrones

Préparé par :

Dr. Brahim LADGHEM CHIKOUCHE

M'sila 2020

# SOMMAIRE

1. Introduction	1
2. Symbole	2
3. Constitution d'une machine asynchrone triphasée	2
4. Principe de fonctionnement	3
5. Principe de fonctionnement et Glissement	4
6. Modélisation en régime permanent	6
6.1. Equations des grandeurs complexes	6
6.2. Schéma équivalent avec inductance de fuite partielle	8
6.3. Puissance et Couple des machines asynchrones	9
6.4. Caractéristique mécanique	9
6.5. Bilan de puissance des machines asynchrones	11
7. Démarrage des moteurs asynchrones	11
7.1. Démarrage par rhéostat secondaire	11
7.2. Démarrage par réduction de la tension au primaire	12
7.3. Démarrage à l'aide d'une résistance statorique	12
7.4. Démarrage électronique	12
8. Freinage des moteurs asynchrones	13
8.1. Freinage par inversion du sens de flux (contre-courant)	13
8.2. Freinage hypersynchrone	13
8.3. Freinage par injection de courant continu	13
9. Moteur monophasé	13
9.1. Moteurs asynchrones à phase auxiliaire	15
9.2. Interrupteur centrifuge des moteurs asynchrones à phase auxiliaire	15
9.3. Sens de rotation du moteur asynchrone à phase auxiliaire	16
9.4. Transformation d'un moteur asynchrone triphasé en monophasé	17
9.5. Les inconvénients du couplage par condensateur et les solutions pour y remédier	17
9.6. Transformations possibles	18
10. Exemples pratique des machines asynchrones triphasées	19
Exercice	19
Bibliographie	

# *Machines Asynchrones*

---

## **1. Introduction**

Le concept de machine asynchrone d'induction a environ 120 ans. Depuis, cette machine s'est imposée dans l'industrie. C'est le moteur le plus répandu.

Relié au réseau électrique à fréquence fixe, il permet la réalisation de la majorité des entraînements à vitesse constante, cela dans une très large gamme de puissance. On devrait plutôt dire à vitesse quasi constante, car ce moteur présente le gros intérêt, lorsqu'on lui demande un effort supplémentaire, de le fournir, mais en « glissant » c-à-d en diminuant légèrement sa vitesse (fonctionnement asynchrone).

La mise en œuvre de ce moteur est aisée. Sur le réseau alternatif monophasé, il a fallu cependant trouver quelques astuces de démarrage, le moteur asynchrone d'induction a ainsi trouvé sa place pour certaines applications domestiques (pompe, compresseurs...) où il se fait oublier par sa discrétion et sa robustesse.

C'est un moteur facile à construire, économique... on a donc pensé à lui pour la vitesse variable. Il y a quelques dizaines d'années, les solutions techniques de l'époque permirent d'obtenir une variation de vitesse en faisant davantage glisser le moteur. Actuellement, ce sont des alimentations électroniques de puissance à fréquence variable qui sont amplement utilisées pour obtenir cette variation de vitesse, certes au prix d'une certaine complexité des alimentations et des commandes associées.

Le moteur asynchrone constitue la grande majorité des moteurs industriels, mais la machine asynchrone sert également de générateur dans quelques applications particulières.

## 2. Symbole

Elle est peut-être représentée par son symbole normalisé général qui précise si elle fonctionne en moteur ou générateur.

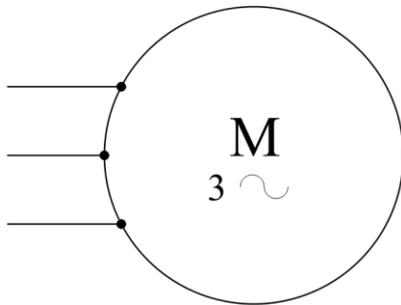


Figure 1. Symbole générale d'un moteur asynchrone triphasé

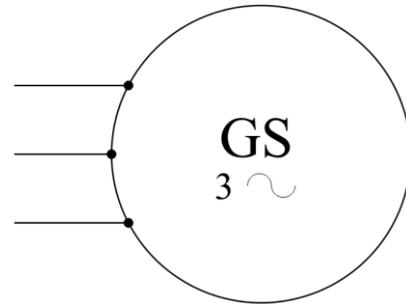


Figure 2. Symbole générale d'un générateur asynchrone triphasé

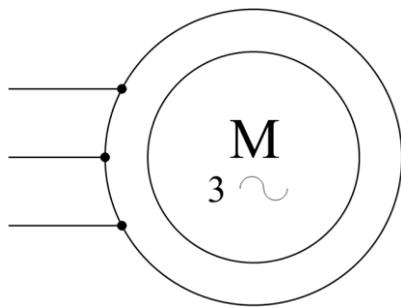


Figure 3. Symbole d'un moteur asynchrone triphasé à cage

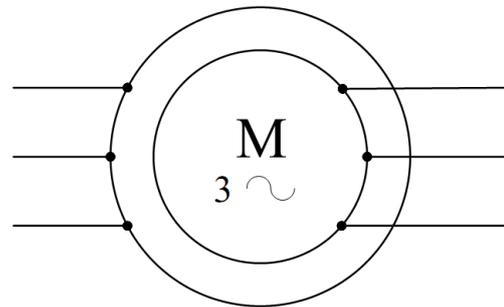


Figure 4. Symbole d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné

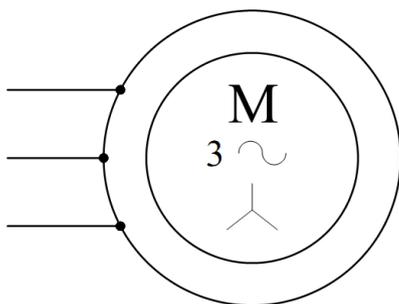


Figure 5. Symbole d'un moteur asynchrone triphasé couplé en étoile

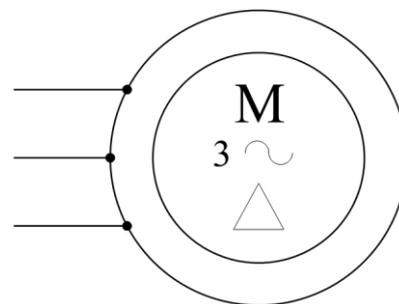


Figure 6. Symbole d'un moteur asynchrone triphasé couplé en triangle

## 3. Constitution d'une machine asynchrone triphasée

**Stator** : le stator comporte une carcasse en fente ou en tôle d'acier dans laquelle est inséré un circuit magnétique formé d'un empilage de tôles. Le stator porte un enroulement triphasé réparti dans des encoches du circuit magnétique. Il est généralement couplé en étoile.

**Rotor** : deux grandes catégories de machines asynchrones apparaissent suivant la structure de leur rotor qui peut être bobiné ou à cage. Pour ces deux variantes, le circuit magnétique du rotor est un assemblage de tôles ferromagnétiques muni d'encoches.

- a) **Rotor bobiné** : dans ce cas, les encoches présentes à la périphérie du rotor contiennent un enroulement similaire à celui du stator. Le bobinage rotorique est toujours couplé en étoile et il est accessible de l'extérieur grâce à un système de bagues et de balais, ce qui permet soit le court-circuiter, soit de le relier à un circuit permettant d'agir sur les caractéristiques de la machine dans certains fonctionnements.
- b) **Rotor à cage** : dans ce cas, les encoches contiennent des barres reliées aux extrémités des anneaux de court-circuit. L'ensemble forme une cage d'écureuil. Les bagues sont en alliage d'aluminium pour les machines de petite et moyenne puissance, et en cuivre pour les machines de forte puissance. L'enroulement ainsi obtenu n'est pas accessible de l'extérieur. La cage rotorique forme un enroulement dont le nombre de phases et le nombre de pôles ne sont pas fixés par construction.
- c) **Rotor à coupleur centrifuge** : le rotor est bobiné. A mesure que la vitesse augmente, le coupleur diminue la résistance rotorique. Ce dispositif est intéressant pour donner le couple maximal au démarrage tout en rendant le courant absorbé admissible.
- d) **Rotor à effet de peau** : le champ stator pénètre d'autant moins en profondeur dans le rotor que sa vitesse de rotation est grande par rapport au rotor. Ces rotors permettent un démarrage au couple maximal avec un appel de courant admissible. Leur utilisation est surtout intéressante pour des cycles de démarrage répétitifs, lents et pour des fonctionnements à surcharge prolongée.
- e) **Rotor à double cage d'écureuil** : la cage extérieure est de grande résistance et de faible inductance de fuite. La cage interne est de résistance faible et de grande inductance de fuite.
- f) **Rotor à encoches profondes** : la résistance de la barre située dans les encoches diminue avec la vitesse tandis que l'inductance de fuite augmente.

#### 4. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des moteurs asynchrones est différent bien qu'il exploite le même champ tournant que les moteurs synchrones. Le rotor ne tourne pas en synchronisme avec le champ magnétique, il tourne moins vite, on dit qu'il est asynchrone.

Les moteurs asynchrones triphasés cumulent de multiples avantages : ils sont simples, robustes et faciles d'entretien. Toutes ces raisons expliquent leur popularité en milieu industriel. Leur puissance varie d'une fraction de kW à plusieurs centaines de MW.

La figure 7 montre une vue d'un moteur asynchrone triphasé et identifie ses principaux composants.

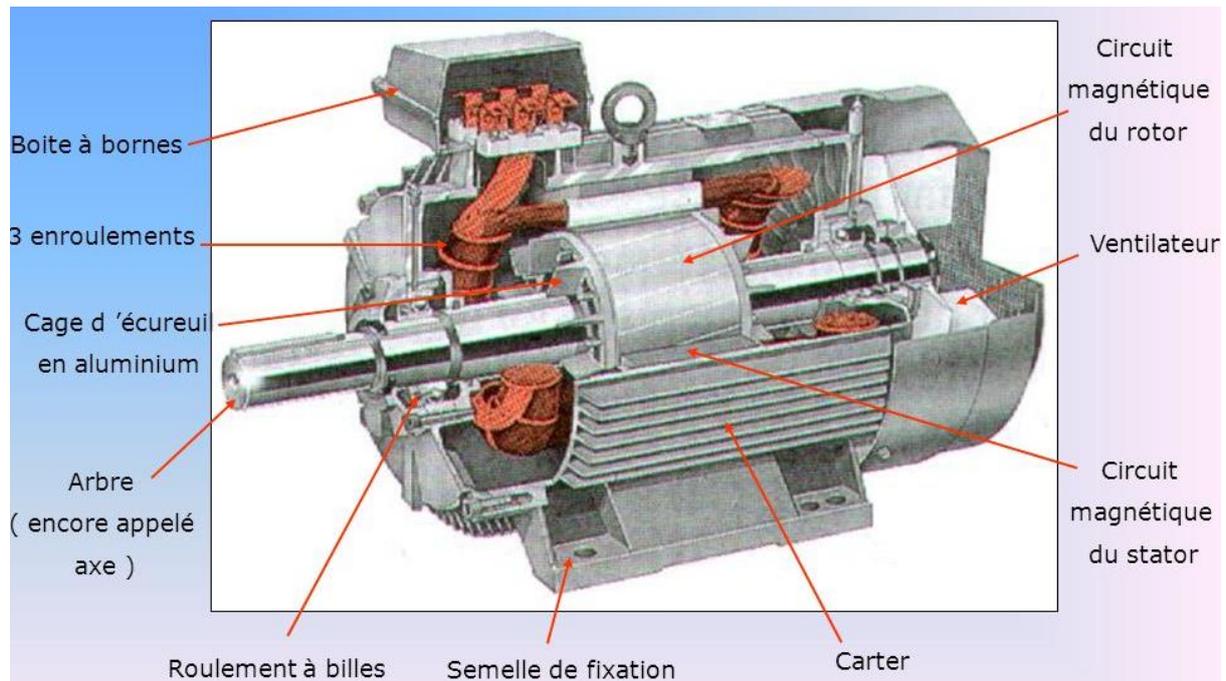


Figure 7. Machine asynchrone triphasé

Leurs applications sont nombreuses. On les retrouve, par exemple dans :

- Traction électrique (TGV).
- Propulsion des navires.
- Propulsion électrique automobile : Peugeot 3008, Citroën DS5, Opel Grandland, Ford Kuga, Toyota Prius, Hyundai Ioniq, Kia Optima, Audi Q5, BMW X1 ...
- Machines-outils : Tour, fraiseuse, plieuse.
- Ascenseurs
- Treuils et Chariots élévateurs
- Pompes : rotative axiale, rotative centrifuge.
- Électroménager (Climatiseur, Lave-linge, Lave-vaisselle, Ventilateur-turbine de four)

## 5. Principe de fonctionnement et Glissement

Considérons un disque conducteur en matériau non magnétique (qui n'est pas attiré par un champ magnétique), en cuivre par exemple, placé dans un champ magnétique tournant à la place de l'aiguille aimantée, on constate qu'il se met à tourner également.

On peut considérer le disque comme équivalent à une infinité de conducteurs en court-circuit. Comme nous avons un déplacement relatif du champ tournant par rapport au disque, les conducteurs vont être le siège de courants induits. D'après la loi de Lenz, ces courants sont tels qu'ils s'opposent à la cause qui les a produits.

Ces courants sont à l'origine d'un champ magnétique secondaire qui est entraîné par le champ tournant, provoquant ainsi la rotation du disque. Mais ce dernier ne pourra jamais tourner au synchronisme, c'est-à-dire à la même vitesse que le champ tournant.

En effet, plus le disque accélère, plus sa vitesse relative avec le champ tournant devient petite. S'ils tournent tous les deux à la même vitesse, il y a immobilité relative du disque par rapport au champ, donc plus de courants induits, plus de champ secondaire et plus d'entraînement.

On aura donc toujours une différence entre la vitesse du champ tournant et celle du disque. Dans un moteur asynchrone, le disque est remplacé par un rotor cage ou bobiné constitué de conducteurs placés dans des encoches.

Si le moteur tournait à la même vitesse que le champ magnétique tournant (vitesse synchrone), le flux magnétique ne couperait pas les conducteurs : la tension et le courant induits dans les conducteurs du rotor seraient nuls. Soumis à de telles conditions, le moteur ne pourrait pas tourner.

Pour produire un couple moteur, il est donc essentiel que la vitesse du rotor soit légèrement inférieure à la vitesse synchrone du champ tournant.

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \%$$

Lorsque le glissement est petit, la vitesse de rotation du rotor approche celle du champ magnétique produit par le stator et les différences de tension induites dans le circuit du rotor (et donc le couple électromagnétique produit) tendent vers zéro. Lorsque qu'une charge mécanique est appliquée au rotor, la vitesse de celui-ci diminuera (le glissement augmentera) ce qui augmentera les différences de tension induites au rotor et créera un couple pour résister à la charge. Dans ce cas-ci, la machine est en fonctionnement moteur. Si la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse de synchronisme (dû à un couple mécanique extérieur appliqué au rotor), les pôles des différences de tension au rotor sont inversés et le couple produit sera en direction opposé au mouvement du rotor. La machine fonctionne donc en génératrice.

Le principe de fonctionnement des machines asynchrones peut être résumé comme suit :

- Le stator, alimenté par un réseau de fréquence  $f$ , crée une induction tournante  $B_s$  de vitesse  $\Omega_s$ , telle que  $\Omega_s = 60f/p$ .
- Supposons le rotor immobile : il est balayé par cette induction et des forces électromotrices sont engendrées dans les conducteurs (loi de Faraday  $e = -d\Phi/dt$ ).
- Comme les circuits rotoriques sont fermés, des courants rotoriques prennent naissance. Il apparaît des forces électromotrices dues à l'action de l'induction statorique sur les courants rotoriques. En vertu de la loi de Lenz, ces forces tendent à entraîner le rotor dans le sens des inductions tournantes. Il existe un couple de démarrage, le rotor se met à tourner si le couple est suffisant.

- Pour qu'il y ait couple, il faut donc que les circuits rotoriques soient fermés, sinon les courants rotoriques sont nuls et que la vitesse  $\Omega_r$  prise par le rotor soit différente de la vitesse  $\Omega_s$  de l'induction. Si  $\Omega_r = \Omega_s$ , les conducteurs tournent à la vitesse de l'induction statorique, aucune FEM n'est induite, et par conséquent aucun courant ne circule dans le rotor : il ne peut y avoir de couple.

On obtient donc un résultat très différent de celui de la machine synchrone pour laquelle il n'y avait de couple qu'au synchronisme.

La fréquence des courants circulants au rotor peut être facilement calculée à partir du glissement. Cette fréquence est

$$f_r = g \cdot f_s$$

$$\omega_r = g \cdot \omega_s$$

Souvent, on néglige les pertes fer dans le rotor à cause de la fréquence qui est trop faible dans des conditions normales.

## 6. Modélisation en régime permanent

Compte tenu de l'usage de la machine synchrone en moteur, nous présentons les équations uniquement avec la convention. Récepteur. La modélisation correspond à un moteur à rotor bobiné dont l'enroulement est court-circuité, mais nous monterons ensuite qu'elle s'applique également à un moteur à cage.

### 6.1. Equations des grandeurs complexes

La mise en équation de la machine asynchrone pose un problème : les grandeurs rotoriques n'ont pas la même pulsation que les grandeurs statoriques. Il n'est donc pas possible d'utiliser la méthode des grandeurs complexes ou celle de Fresnel pour décrire le fonctionnement du moteur asynchrone, celle-ci ne s'applique que pour des systèmes où toutes les grandeurs sinusoïdales sont de même fréquence. Un diagramme de Fresnel tracé pour le stator et un autre pour le rotor ne tournant pas à la même vitesse, ils ne peuvent être associés. Néanmoins, la commodité de ces outils va nous amener à contourner la difficulté en imaginant un dispositif fictif identique au moteur asynchrone étudié, mais dans lequel le rotor est immobile. Le champ tournant créé par ce rotor fictif est identique à celui créé par le rotor réel en mouvement si l'enroulement qu'il porte est parcouru par des courants triphasés équilibrés de même valeur efficace de pulsation  $\omega_s$ . Dans ce cas les deux dispositifs sont équivalents, vus du stator, ce qui nous permet de tracer un schéma monophasé équivalent ramener au stator qui représente rigoureusement le comportement des grandeurs correspondantes. Il faut cependant bien noter que le rotor réel n'est pas présent dans ce schéma. Avec cet artifice, toutes les fonctions du temps sont maintenant sinusoïdales de pulsation  $\omega_s$ . Nous pouvons donc utiliser la méthode des grandeurs complexes ou tracer un diagramme de Fresnel. Les équations du moteur lient des grandeurs complexes  $V_s, I_s$  et  $I_r$  associées respectivement à la tension statorique au courant statorique et au courant rotorique, avec comme

paramètres la résistance  $R_s$  et l'inductance cyclique  $L_s$  du stator, la résistance  $R_r$  et l'inductance cyclique  $L_r$  du rotor, l'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor  $M$ , la pulsation  $\omega_s$  et le glissement  $g$  :

$$V_s = R_s I_s + jL_s \omega_s I_s + jM \omega_s I_r$$

$$0 = \frac{R_r}{g} I_r + jL_r \omega_s I_r + jM \omega_s I_s$$

Cette dernière machine a un rotor fixe puisque la pulsation rotorique est la même que la pulsation statorique. C'est donc un transformateur statique.

Ce transformateur statique, à un champ tournant au stator comme au rotor, aurait par phase au secondaire une résistance  $R_r/g$  ayant une valeur particulière pour chaque vitesse de rotation de la machine réelle  $\omega = \omega_s(1 - g)$ .

Les équations complexes représentent le fonctionnement d'une phase du stator de la machine en régime permanent en tenant compte de la présence du rotor. En éliminant  $I_r$  entre les deux équations, on peut écrire :

$$V_s = I_s \left( R_s + jL_s \omega_s + \frac{M^2 \omega_s^2}{\frac{R_r}{g} + jL_r \omega_s} \right) = I_s Z(g)$$

Vu du primaire, le moteur se comporte comme une impédance  $Z$  fonction d'un paramètre  $g$ , image de la vitesse. On peut écrire :

$$Z(g) = R_s + jL_s \omega_s \frac{\frac{R_r}{g} + j \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \omega_s}{\frac{R_r}{g} + jL_r \omega_s} = R_s + jL_s \omega_s \frac{\frac{R_r}{g} + jL_{ft} \omega_s}{\frac{R_r}{g} + jL_{ft} \omega_s + j \frac{M^2}{L_s} \omega_s}$$

En introduisant l'inductance de fuites totales ramenées au secondaire  $L_{ft} = L_r - M^2/L_s$  et en multipliant numérateur et dénominateur par  $(L_s/M)^2$ , il vient :

$$Z(g) = R_s + \frac{jL_s \omega_s \left( \frac{L_s}{M} \right)^2 \left( \frac{R_r}{g} + jL_{ft} \omega_s \right)}{\left( \frac{L_s}{M} \right)^2 \left( \frac{R_r}{g} + jL_{ft} \omega_s \right) + jL_s \omega_s} = R_s + \frac{\text{produit}}{\text{somme}}$$

$$Z(g) = R_s + \frac{1}{\frac{1}{jL_s \omega_s} + \frac{1}{\left( \frac{L_s}{M} \right)^2 \left( \frac{R_r}{g} + jL_{ft} \omega_s \right)}}$$

L'impédance  $Z(g)$  est composée d'une résistance en série  $R_s$  avec une inductance  $L_s$  montée en parallèle avec une inductance  $L_{ft}(L_s/M)^2$  elle-même en série avec une résistance  $(R_r/g)(L_s/M)^2$ .

## 6.2. Schéma équivalent avec inductance de fuite partielle

Nous pouvons donner un résumé combinant les équations décrites ci-dessus avec les gradeurs de fuite comme suit :

$$\begin{cases} l_s \omega_s = L_s \omega_s - mM \omega_s \\ l_r \omega_s = L_r \omega_s - \frac{mM}{\omega_s} \\ X_u = mM \omega_s \\ r_r' = m^2 R_r \\ l_r' = m^2 l_r = m^2 L_r - mM \omega_s \\ I_r' = -\frac{I_r}{m} \text{ courant} \end{cases}$$

On a aussi

$$V_s = R_s I_s + jL_s \omega_s I_s + jM \omega_s I_r$$

$$0 = \frac{R_r}{g} I_r + jL_r \omega_s I_r + jM \omega_s I_s$$

Donc,

$$V_s = R_s I_s + j l_s \omega_s I_s + j X_u I_u$$

$$j X_u I_u = \left( \frac{r_r'}{g} + j l_r' \omega_s \right) I_r'$$

Avec

$$I_u = I_s - I_r'$$

$I_u$  est le courant magnétisant.

Le courant primaire  $I_s$  est donnée par  $I_s = V_s / Z_s$  où  $Z_s$  est l'impédance d'entrée du moteur.

$$Z_s = R_s + j l_s \omega_s + \frac{j X_u \left( \frac{r_r'}{g} + j l_r' \omega_s \right)}{j X_u + \frac{r_r'}{g} + j l_r' \omega_s}$$

Pour  $g = 0$

$$Z_{su} = R_s + j l_s \omega_s + j X_u = R_s + j L_s \omega_s$$

$R_s \ll L_s \omega_s$

$$Z_{su} = L_s \omega_s$$

$$I_u = \frac{V_s}{L_s \omega_s}$$

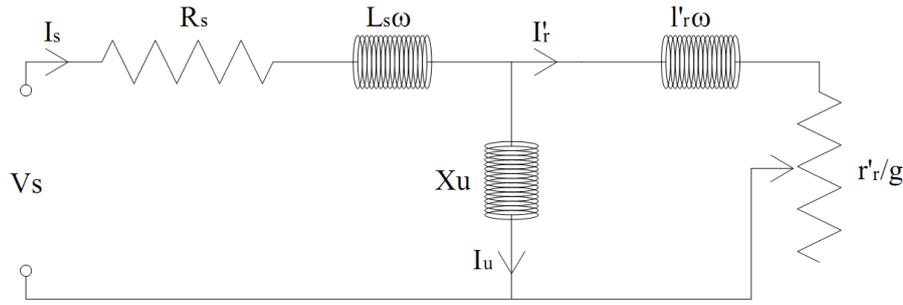


Figure 8. Schéma simplifié d'un moteur asynchrone

### 6.3. Puissance et Couple des machines asynchrones

Dans cette partie, nous donnons les formules pratiques permettant de calculer les différents couples.

$$P_{abs} = 3V_s I_s \cos \varphi = 3R_s I_s^2$$

La puissance transmise au rotor est :

$$P_{ém} = P_{abs} - (\Delta P_{js} + \Delta P_{fs})$$

$$P_{ém} = P_{abs} - (\Delta P_{js} + \Delta P_{fs})$$

$$P_m = P_{ém} - \Delta P_{jr} = (1 - g)P_{ém}$$

$$\Delta P_{jr} = gP_{ém}$$

$$P_u = P_m - \Delta P_m$$

Le rendement est donné comme suit :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} 100\%$$

Le couple mécanique est :

$$C_{méc} = \frac{P_{méc}}{\Omega_r} = \frac{P_{méc}}{(1 - g)\Omega_s}$$

$$P_{méc} = (1 - g)P_{ém}$$

$$C_{méc} = \frac{P_{ém}}{\Omega_s}$$

Ce dernier couple est appelé *synchrone* parce qu'il est égal au quotient de la puissance transmise du stator au rotor par la vitesse synchrone quelle que soit la vitesse réelle.

### 6.4. Caractéristique mécanique

Le calcul du couple en fonction du glissement n'est aisé que si on ramène l'impédance r

$$C_{méc} = \frac{P_{ém}}{\Omega_s} = \frac{3r_r' I_r^2}{g\Omega_s} = \frac{3r_r'}{g\Omega_s} \frac{V_s^2}{(gR_s + r_r')^2 + N_{sr}^2 g^2 \omega_s^2}$$

Où

$$N_{sr} = l_s + l_r'$$

Le couple de maximum peut être calculé en cherchant la valeur de  $g$  annulant :

$$\frac{dC_{méc}}{dg} = \frac{(gR_s + r_r')^2 + N_{sr}^2 g^2 \omega_s^2 - 2gR_s(gR_s + r_r') - 2N_{sr}^2 g^2 \omega_s^2}{((gR_s + r_r')^2 + N_{sr}^2 g^2 \omega_s^2)^2} = 0$$

$$\frac{dC_{méc}}{dg} = 0 \text{ si } r_r'^2 - R_s^2 g^2 = N_{sr}^2 g^2 \omega_s^2$$

D'où, le couple maximum est de :

$$C_{max} = \frac{r_r'}{\sqrt{R_s^2 + N_{sr}^2 \omega_s^2}}$$

Puisque  $R_s^2 g^2 + N_{sr}^2 g^2 \omega_s^2 = r_r'^2$

$$C_{max} = \frac{3}{2\Omega_s} \frac{V_s^2}{R_s + \sqrt{R_s^2 + N_{sr}^2 \omega_s^2}}$$

Nous remarquons que le couple maximum ne dépend pas de la résistance rotorique.

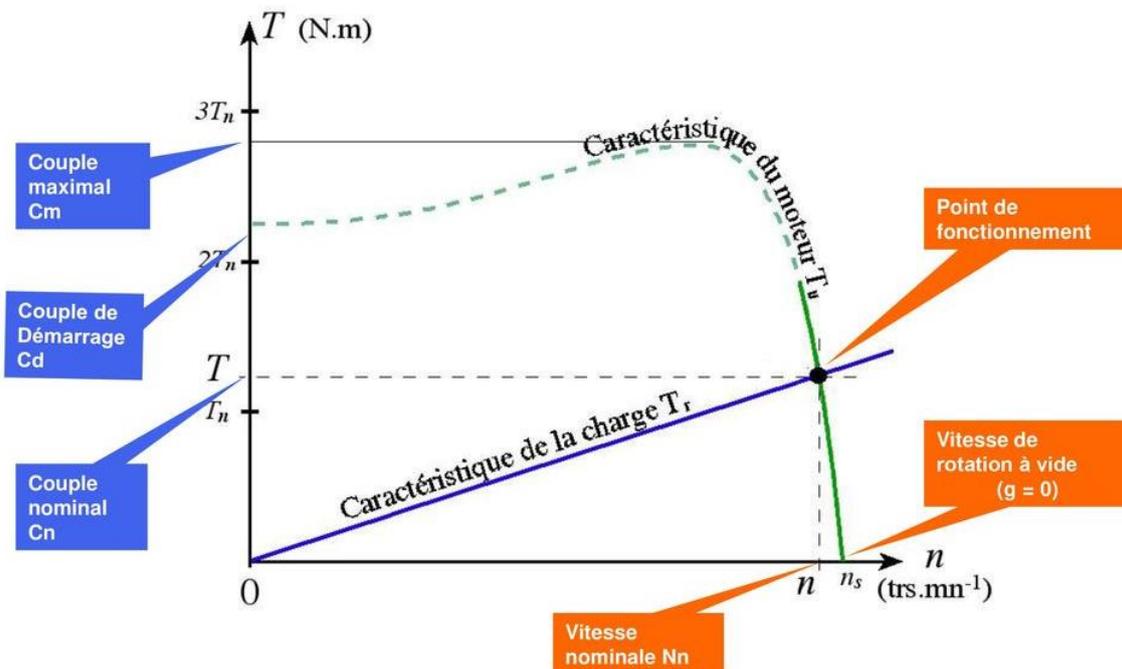


Figure 9. Caractéristique couple/vitesse d'un moteur asynchrone

### 6.5. Bilan de puissance des machines asynchrones

Le bilan met en évidence le fait que la puissance absorbée est obligatoirement la puissance la plus importante, elle ne cesse de diminuer en progressant vers la puissance utile qui est évidemment la plus faible.

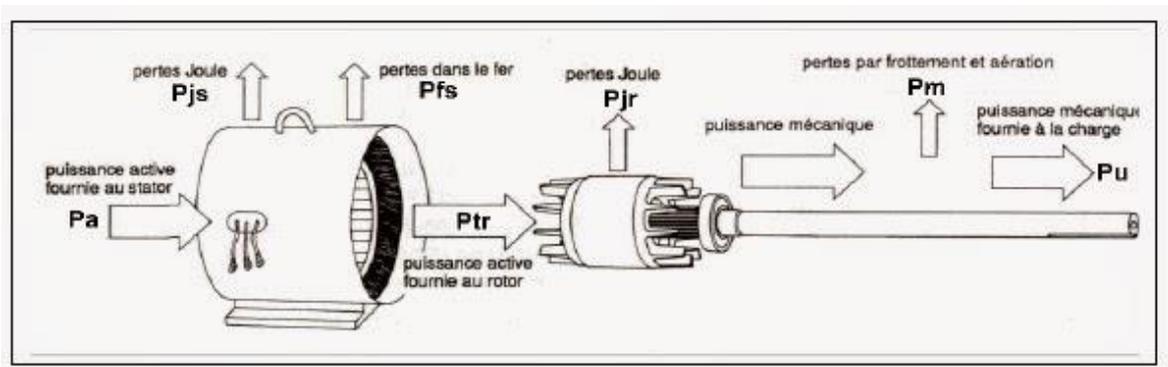
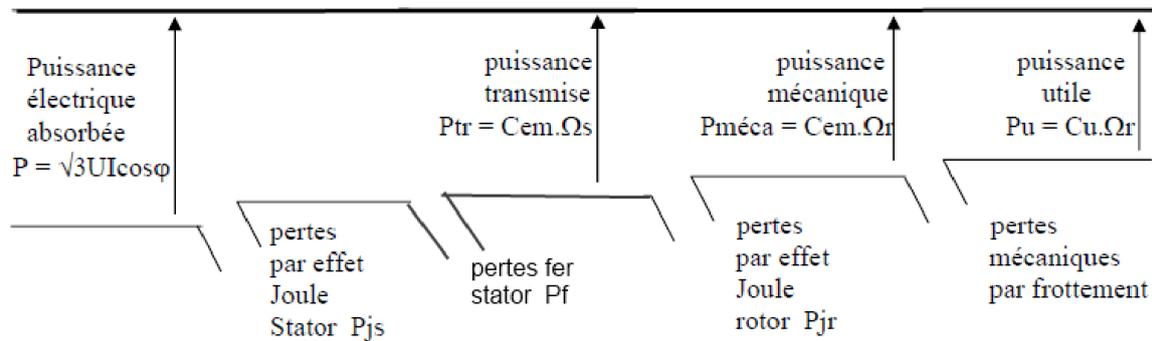


Figure 10. Représentation du bilan de puissances du moteur asynchrone

## 7. Démarrage des moteurs asynchrones

L'appel du courant au démarrage d'un moteur asynchrone peut provoquer une chute de tension excessive surtout en cas des moteurs puissants. Les différentes techniques de démarrage ont pour objectif fondamental de limiter l'intensité du courant de démarrage tout en maintenant les performances mécaniques de l'ensemble "moteur-charge" conformes au cahier des charges.

### 7.1. Démarrage par rhéostat secondaire

Pour les moteurs à rotor bobiné, le rhéostat secondaire permet de réduire le courant absorbé au démarrage tout en ayant un couple de démarrage très élevé. Sans le rhéostat, le courant est très fort et le couple est faible.

## 7.2. Démarrage par réduction de la tension au primaire

Il existe différentes méthodes pour réduire l'appel du courant au démarrage des moteurs à cage dont le circuit rotorique n'est pas accessible. Deux méthodes sont utilisées en pratique.

- Insertion d'une résistance entre la source d'alimentation et le stator du moteur.
- Démarrage en étoile-triangle des moteurs destinés à travailler en triangle.
- Utilisation d'un autotransformateur.

## 7.3. Démarrage à l'aide d'une résistance statorique

On insère donc une résistance triphasée entre le réseau et le moteur. Si on désigne par " $R_s$ " et " $X_s$ ", la résistance et la réactance par phase du moteur à l'arrêt vues de l'entrée. A pleine tension " $V_s$ ", le moteur absorbe au démarrage un courant " $I_d$ " et développe un couple " $C_d$ ".

$$I_d = \frac{V_s}{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}}$$

Après la mise en série d'une résistance " $R_h$ " par phase ;

$$I_d' = \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + R_h)^2 + X_s^2}}$$

La tension simple appliquée au moteur se réduit et devient :

$$V_s' = \frac{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}}{\sqrt{(R_s + R_h)^2 + X_s^2}} V_s$$

Le couple de démarrage se réduit aussi et devient :

$$C_d' = \left(\frac{V_s'}{V_s}\right)^2 C_d = \left(\frac{I_d'}{I_d}\right)^2 C_d$$

Cette méthode n'est pas performante, car si on réussit à réduire le courant par un certain rapport, le couple de démarrage se réduit automatiquement d'un rapport égal au carré de celui de réduction du courant.

## 7.4. Démarrage électronique

Un gradateur à thyristors ou à triacs si la taille du moteur le permet de faire varier progressivement la tension en réglant l'angle de retard à l'amorçage.

Le résultat est similaire à celui obtenu avec un autotransformateur avec un encombrement moindre et cout plus avantageux. Néanmoins, la tension obtenue n'est pas sinusoïdale et la présence des harmoniques est néfaste pour le comportement du moteur.

## 8. Freinage des moteurs asynchrones

Il y a différents modes de freinage du moteur asynchrone. On s'intéresse ici beaucoup plus en deux types à savoir le freinage par inversion du sens de flux et le freinage par fonctionnement en génératrice asynchrone.

### 8.1. Freinage par inversion du sens de flux (contre-courant)

En inversant le sens du champ tournant alors que le moteur tourne, celui-ci est freiné jusqu'à s'arrêter puis il repart dans le sens de rotation inverse. Ceci est réalisé en permutant l'alimentation de deux phases. Le glissement passe alors de sa valeur " $g$ " à " $g=1$ " puis à " $2-g$ ".

En ce mode de freinage, le courant absorbé est plus important que le courant de démarrage sans rhéostat et le couple de freinage est plus faible que le couple de démarrage sans rhéostat. Afin d'améliorer le courant et le couple de freinage, on introduit un rhéostat rotorique de sorte que le point de fonctionnement " $M$ " devienne dans la zone située entre le point de fonctionnement nominal et le point de fonctionnement à couple maximum. Au fur et à mesure que le moteur ralentit, on réduit le rhéostat rotorique comme pour le démarrage. Ce freinage est dit freinage à contre-courant ou bien freinage rhéostatique.

### 8.2. Freinage hypersynchrone

Dans le domaine du levage ou des ascenseurs, la charge en descente entraîne le moteur et tend à lui imposer une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme. Dans ce cas, le moteur asynchrone freine spontanément. En effet, si un moteur asynchrone est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme, le glissement et le moment du couple électromagnétique deviennent négatifs : la machine fonctionne en générateur asynchrone. C'est alors la charge qui produit un couple moteur et la machine asynchrone qui oppose un couple résistant.

Ce freinage se produit pour une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme, il est qualifié d'hypersynchrone.

### 8.3. Freinage par injection de courant continu

L'alimentation triphasée du stator est débranchée et une source de tension continue est connectée entre deux bornes. Il en résulte un champ magnétique fixe qui produit un couple résistant freinant le moteur. L'énergie cinétique de rotation est transformée en effet de Joule dans le rotor.

## 9. Moteur monophasé

Le principe de fonctionnement des moteurs synchrones monophasés, tout comme les moteurs asynchrones monophasés, d'ailleurs, repose comme celui des moteurs triphasés de même type, sur l'existence d'un champ magnétique tournant dans le stator.

En triphasé, c'est le déphasage de  $120^\circ$  entre les trois tensions qui alimentent trois bobinages également disposés à  $120^\circ$  qui est à l'origine du champ tournant dans l'espace ainsi créé.

En monophasé nous ne disposons que d'une seule tension et nous devons user d'artifices pour créer et utiliser un champ tournant.

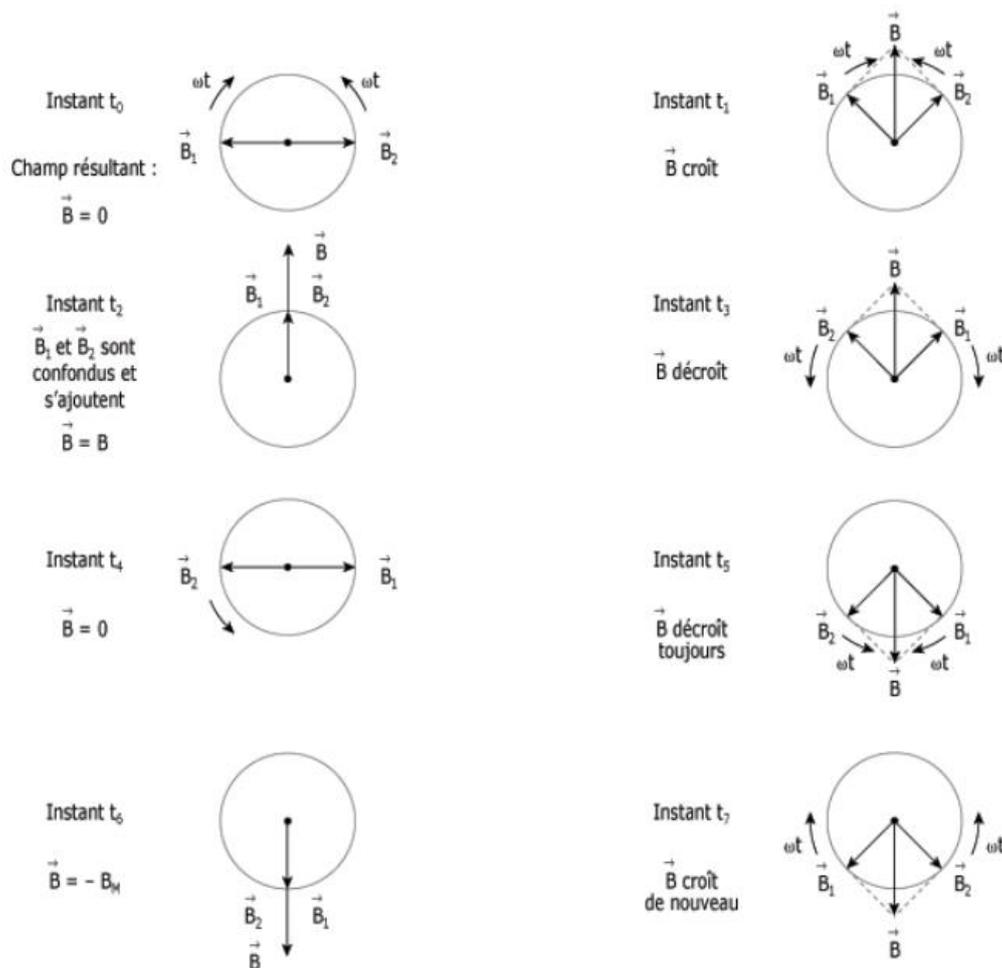


Figure 11. Champ tournant monophasé

En alimentant un bobinage par un courant alternatif sinusoïdal monophasé un champ magnétique alternatif est créé. Ce champ passera d'une valeur maximale à une valeur minimale (de signe opposé) en passant par la valeur nulle et selon une variation sinusoïdale tout comme le courant qui en est à l'origine.

Nous pouvons considérer que ce champ magnétique  $\vec{B}$  est le champ résultant de deux champs tournants de même amplitude  $B_m/2$  tournants en sens inverses à la même fréquence de rotation.

Vous pouvez voir sur la figure suivante la composition des deux champs tournants ( $\vec{B}_1$  et  $\vec{B}_2$ ) pour obtenir le champ résultant  $\vec{B}$  à différents instants  $t_0$  à  $t_7$ . Nous obtenons

donc bien à partir du monophasé deux champs tournants en sens inverses. Cette propriété est appelée théorème de *LEBLANC*.

Si nous disposons une aiguille aimantée au centre du champ ainsi créé, l'aiguille vibre, mais ne tourne pas, mais il suffit de lui donner une petite impulsion dans un sens ou dans l'autre pour qu'elle se mette à tourner à la vitesse de synchronisme, elle s'accroche au champ  $\vec{B1}$  ou  $\vec{B2}$ , celui qui tourne dans le sens où elle a été lancée.

Il suffit donc de favoriser un champ ou l'autre ( $\vec{B1}$  ou  $\vec{B2}$ ) pour qu'un moteur utilisant ce principe puisse démarrer. Il en sera de même si l'on dispose un disque conducteur à la place de l'aiguille aimantée, tout comme en triphasé (les moteurs triphasés).

Ce sont les différentes techniques utilisées pour créer ce déséquilibre entre les champs qui constituent les différentes familles de moteur asynchrones monophasés. La constitution de ces moteurs monophasés et triphasés étant très semblable en dehors de l'artifice de démarrage, on retrouvera le stator, bobiné, et le rotor qui est en général à cage d'écureuil.

### 9.1. Moteurs asynchrones à phase auxiliaire

Les moteurs à phase auxiliaire sont fabriqués dans une gamme de puissances variant d'une fraction de kW à quelques kW. Ils se composent essentiellement d'un rotor et d'un stator. Comme leur nom l'indique, la particularité des moteurs à phase auxiliaire consiste en la présence d'un enroulement auxiliaire, servant au démarrage.

Parmi la constitution de ce moteur, on trouve un enroulement de marche et un enroulement de démarrage. Ces deux enroulements sont disposés dans les encoches du stator. L'enroulement de marche est fixé au fond des encoches ; l'enroulement de démarrage est placé sur l'enroulement de marche et décalé par rapport à celui-ci. Cette disposition permet de produire le champ magnétique tournant nécessaire au démarrage du moteur.

Le nombre d'enroulements de marche et d'enroulements de démarrage est toujours égal. Ce nombre détermine le nombre de pôles du moteur.

### 9.2. Interrupteur centrifuge des moteurs asynchrones à phase auxiliaire

L'interrupteur centrifuge est un dispositif servant à débrancher l'enroulement de démarrage du circuit lorsque le moteur atteint de 75 à 80 % de sa vitesse nominale.

Si l'enroulement de démarrage n'était pas débranché, il risquerait de griller. En effet, il n'est pas suffisamment puissant pour porter le courant auquel il serait alors soumis.

La figure 12 montre une vue en coupe d'un moteur à phase auxiliaire et identifie ses principales composantes.

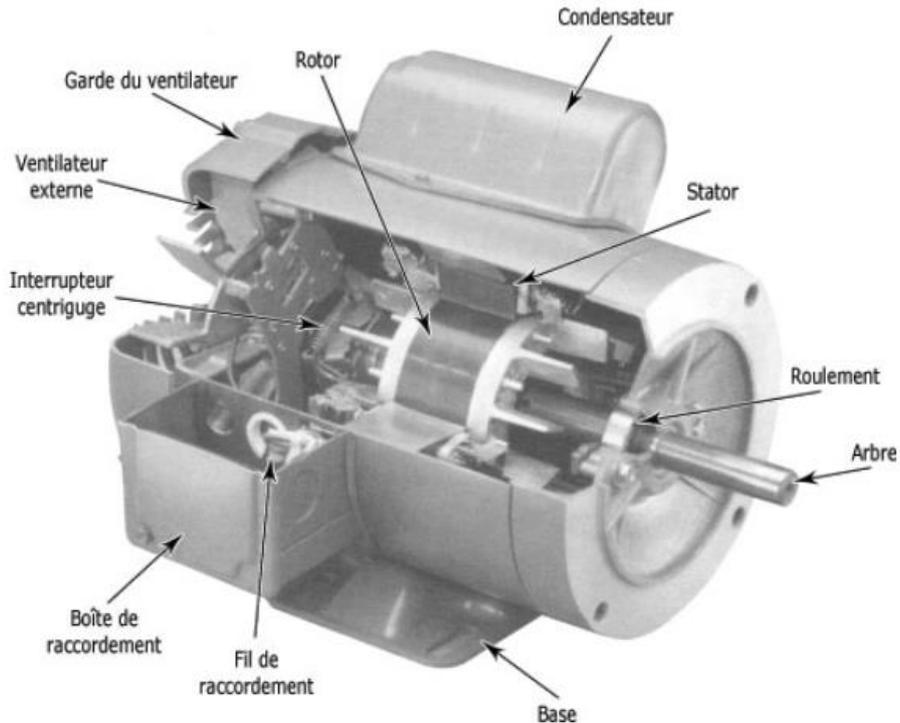


Figure 12. Interrupteur centrifuge des moteurs asynchrones à phase auxiliaire

### 9.3. Sens de rotation du moteur asynchrone à phase auxiliaire

La connexion des enroulements s'effectue souvent sur un bornier contenu dans le moteur.

Pour inverser le sens de rotation des moteurs à phase auxiliaire, il suffit d'inverser le courant dans l'un ou l'autre des enroulements.

En effet, l'inversion des fils d'alimentation provoquerait l'inversion du courant dans les deux enroulements, ce qui maintiendrait le sens de rotation du moteur.

La figure 13 illustre les schémas électriques d'un moteur à phase auxiliaire pour qu'il fonctionne dans l'un et dans l'autre sens de rotation. Sur ces schémas, remarquez que le courant a été inversé dans l'enroulement de démarrage seulement.

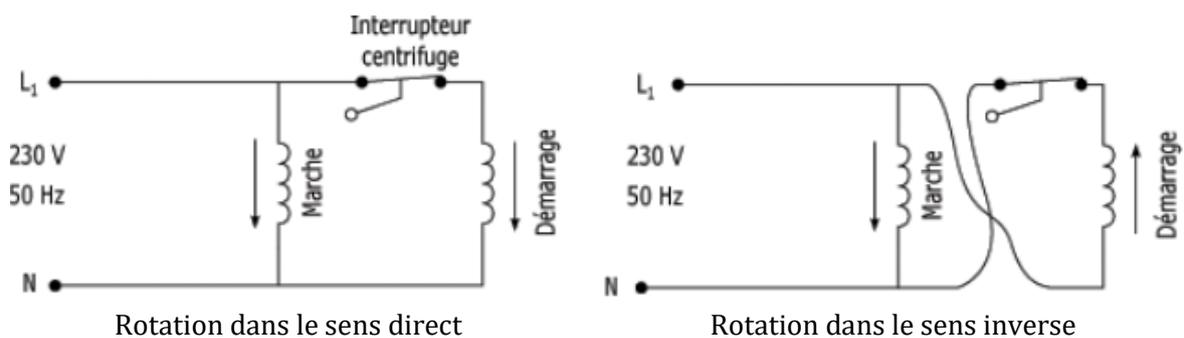


Figure 13. Sens de rotation du moteur asynchrone

#### 9.4. Transformation d'un moteur asynchrone triphasé en monophasé

La transformation d'un moteur triphasé en monophasé et de voltages différents est réalisable par bricolage. Toutefois, la puissance originale du moteur ne sera plus atteinte et la transformation n'est efficace que sur des moteurs de faible puissance. Lors de l'achat d'un moteur électrique à usage familial, il faut le choisir avec une alimentation qui convient à la source électrique, en principe 230V monophasé, pour éviter toute modification.

Un moteur de 380V alimenté par un courant alternatif de 230V ne tournera pas normalement. Le nombre de tours par seconde est faible et sa puissance de charge mécanique diminue énormément pour être capable de faire tourner une machine à coudre. Il faut donc adapter le moteur au débit de votre source électrique en 230V. Vous avez le choix entre deux méthodes : soit vous utilisez une machine dite d'équilibrage des phases ou moteur-pilote, soit vous utilisez un condensateur pour faire chuter le système d'alimentation du moteur. La première méthode est assez complexe car elle nécessite un ou plusieurs moteurs supplémentaires. La seconde méthode est facile à réaliser et peu onéreuse.

Concernant le couplage par un condensateur, on change d'abord la position du branchement en étoile du moteur triphasé, constitué de 3 bornes (phase, neutre, terre) et d'une barrette horizontale en dessous, en branchement en triangle. Dans ce câblage, les 3 barrettes sont disposées dans le sens de la hauteur (en colonne). La première barrette est câblée à la phase du courant, la seconde barrette au neutre. On place un condensateur électrochimique, en plastique et non polarisé, entre la seconde et la troisième barrette. La capacité du condensateur ne doit pas être inférieure à 230V et sa valeur, en microfarads, dépend de la puissance du moteur. Pour la calculer, on multiplie la puissance exprimée en CV par la fréquence du courant, 50Hz. Si la puissance est en watts, il faut les convertir en chevaux :  $1CV = 736W$ . Un moteur de 500W (ou 0,50kW) équivaut à 0,68CV ( $500/736$ ). La valeur du condensateur à brancher sera de 34 microfarads ( $0,68 \times 50$ ) au minimum. Il est donc nécessaire de faire plusieurs essais sur des condensateurs à capacité supérieure pour trouver un meilleur rendement du moteur. Et pour inverser le moteur, on croise les 2 fils (neutre et phase).

#### 9.5. Les inconvénients du couplage par condensateur et les solutions pour y remédier

Lorsqu'on utilise un condensateur dont la valeur est en dessous de 34 microfarads, le moteur risque de ne pas fonctionner. Cette méthode réduit de 30% la puissance du moteur et son démarrage est souvent difficile. C'est pourquoi, il est déconseillé d'utiliser cette méthode au-delà d'une puissance de 1kW, car le montage devient très aléatoire. Toutefois, pour pallier à cette défaillance du démarrage, on peut placer un condensateur (électrochimique) de démarrage branché en parallèle au premier condensateur. Sa capacité utilisable varie entre 30 et 200 microfarads à 250V. Ce condensateur est uniquement utilisé pour faire démarrer le moteur. Un mécanisme de contact temporaire

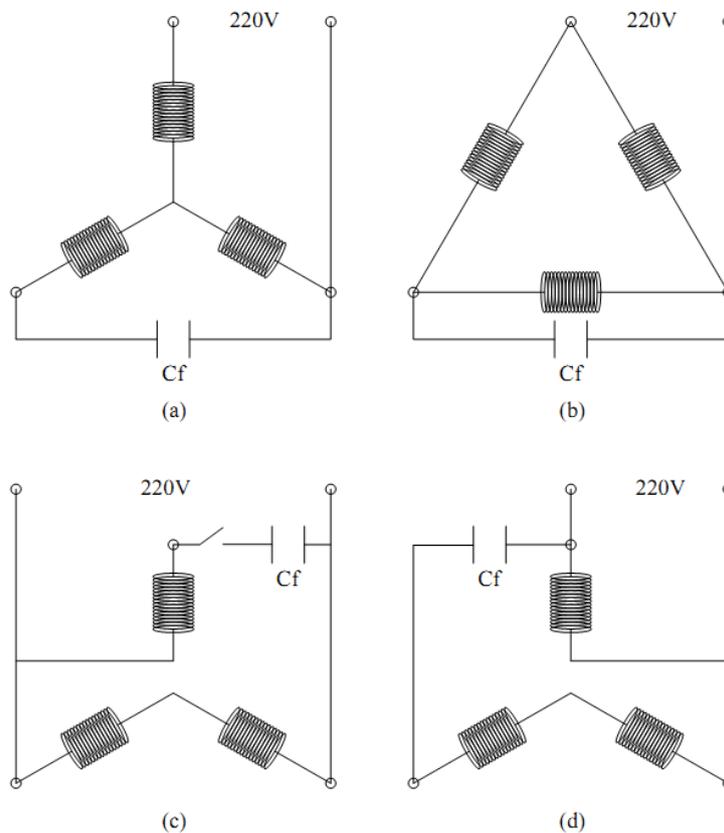
doit être prévu : poussoir, relai. Pour éviter le claquage (ou détérioration) de ce condensateur de démarrage, on peut y adjoindre une résistance de décharge de l'ordre de 220k/1W, branchée en parallèle et avec le même mécanisme.

Certains inconvénients doivent être pris en compte :

- Puissance du moteur réduite de 30%.
- Couple de démarrage réduit de 50% à 100% suivant marque, modèle, puissance et vitesse.
- Au-dessus de 1KW montage très aléatoire, au-dessus de 1,5KW peu conseillé, au-dessus de 1,8KW déconseillé.

### 9.6. Transformations possibles

On peut modifier le fonctionnement d'un moteur triphasé en moteur monophasé à l'aide d'un condensateur relié en parallèle avec une ou deux phases. Un tel moteur peut fournir de 70% à 85% de sa puissance en triphasé suivant la connexion des bornes du moteur. On peut utiliser l'un des schémas suivants :



La valeur de la capacité peut être calculée suivant la relation suivante :

$$Cf \cong \frac{K \cdot I}{U} [\mu F]$$

Pour le schéma (a) : $K = 2800$	Pour le schéma (b) : $K = 4800$
Pour le schéma (c) : $K = 2800$	Pour le schéma (d) : $K = 1600$

## 10. Exemples pratique des machines asynchrones triphasées

Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
ABB 110 kW	400	352	194	2982	1474,4	704	1056	50	0,86
ABB 110 kW High Output	400	352,73	185	2978	1461,5	846,552	1058,19	50	0,9
ABB 110 kW M3BP 315 SMA	400	352	336	2980	2452,8	704	1056	50	0,86
ABB 11 kW M3BP 160 MA	400	39	20	2930	126	74,1	97,5	50	0,88

Nom du moteur	Tension nominale (V phase-phase, RMS)	Couple nominal (N m)	Courant nominal (A)	Vitesse nominale (tours/min)	Courant au démarrage (A)	Couple au démarrage (N m)	Couple maximal (N m)	Fréquence nominale (Hz)	Facteur de puissance nominal
LEROY SOMER 75Kw LS 280 SC	400	485	137	1478	986,4	1358	1406,5	50	0,84
LEROY SOMER 7.5Kw LS 132 M	400	49,4	15,2	1451	106,4	118,56	143,26	50	0,82
LEROY SOMER 0.9Kw LS 80 L	400	6	2,44	1425	14,152	18	18	50	0,73
LEROY SOMER 90Kw LS 280 MD	400	582	164	1478	1246,4	1746	1746	50	0,84

### Exercice 1

Un moteur asynchrone triphasé a les caractéristiques suivantes :

- Tension d'alimentation : 115/200 V. Rotor à cage.
- Fréquence : 400 Hz.
- Vitesse nominale : 11 500 tr/min.
- Puissance absorbée en charge nominale : 4 200 W,  $\cos\phi = 0,6$ .
- Résistance de chaque enroulement du stator :  $R_s = 0,16 \Omega$ .

Le moteur est alimenté par un réseau triphasé 200 V, 400 Hz. Il entraîne sa charge nominale.

- 1) Quel est le couplage à adopter ?
- 2) Quel est le glissement ?
- 3) Quelle est l'intensité du courant absorbé en ligne ?
- 4) Quelles sont les pertes joule au stator ?

5) Déterminer le rendement sachant que les pertes fer au stator sont de 350 W et que l'on néglige les pertes fer au rotor ainsi que les pertes mécaniques ?

6) Quel est le couple utile ?

### Exercice 2

Un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage d'écureuil est alimenté par un réseau triphasé 50 Hz, 220/380 V. Pour le stator et pour le rotor, le couplage des enroulements est fait en étoile. Chaque enroulement du stator a une résistance  $R_s = 0,285$  W.

On réalise un essai à vide : le moteur tourne pratiquement à la vitesse de synchronisme ( $N=3000$  tr/min). La puissance absorbée à vide est  $P_0 = 3$  kW et le courant de ligne est  $I_0 = 25$  A.

1) Calculer le nombre de pôles du stator et le facteur de puissance à vide.

2) On supposera les pertes mécaniques constantes et égale à 1233 W dans la suite du problème. Que peut-on dire des pertes joules au rotor ( $P_{jr}$ ) ?

3) Calculer les pertes joules stator ( $P_{js}$ ) et les pertes fer stator ( $P_{fs}$ ) lors de cet essai à vide.

On réalise un essai en charge, les résultats sont les suivants :

- Glissement : 7%,
- Puissance absorbée : 24645 W,
- Courant en ligne : 45 A.

4) Calculer le facteur de puissance, la vitesse de rotation du rotor, la fréquence des courants rotoriques lors de cet essai.

5) Faire un bilan de puissance. Calculer  $P_{js}$  et la puissance transmise au rotor  $P_{tr}$ . En déduire  $P_{jr}$  lors de cet essai en charge.

6) Calculer la puissance utile  $P_u$ , le rendement du moteur, le couple utile  $T_u$ , le couple électromagnétique  $T$ .

Le moteur entraîne une machine dont la caractéristique mécanique est une droite d'équation :  $T_r = 2/100 \Omega_r + 40$ .

7) Calculer la vitesse du groupe (moteur + machine d'entraînement) sachant que la caractéristique mécanique du moteur est une droite en fonctionnement normal (donc valable pour l'essai en charge effectué précédemment).

## *Bibliographie*

---

1. G. Séguier, F. Notelet, "Electrotechnique industrielle", Téch et Doc, 1987.
2. M. Kostenko et L. Piotrovski, "Machines Electriques : Machines à Courant Alternatif " Tome II, 3ème édition, Édition MIR, 1979.
3. A. Ivanov-Smolensky, "Electrical Machines", Édition MIR, 1982.
4. J.L. Dalmaso, "Cours d'électrotechnique 1 : Machines tournantes à courants alternatifs", Éditions Belin, 1985.
5. A. Fouillé, "Electrotechnique à l'usage des ingénieurs : Machines électriques", Tome II, Édition Dunod, 1957.
6. L. Lagron, "les Moteurs à Courants Alternatifs", Éditions Dunod, 1949.
7. J. Châtelain, "Machines Electriques", Traité d'Electricité, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Éditions Georgi, 1983.
8. R. ABDESSEMED. V. ABDESSEMED, "Les enroulements des machines électriques",
9. M. LIWSCHITZ " Calcul des machines électriques", Edition SPES Lausanne 1967.
10. [Zhu93] Zhu Z.Q., Howe D., Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors, IEEE Trans. On magnetics, Vol.29, No 1, Jan 1993, ppl36-158
11. [Mah92] Mahfoudhi R., Étude et conception d'un moteur synchrone à aimants permanents et commutation électronique pour un équipement de traction électrique, Université Laval, Québec, thèse de Doctorat (PhD), 1992
12. [Har93] Harmim S., Étude analytique de machines synchrones à aimants permanents. Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, Grenoble, thèse de Doctorat (PhD), 1993
13. [Fig06] Figueroa J., Radaorozandry L., Cros J., Viarouge P., Comparative analysis of surface mount PM motors structures for a traction application, ICEM'2006, Chania, Crète Island, Greece, 2-5 sept. 2006.
14. [Seb87] Sébastien T. Slemon G., Transient torque and short circuit capabilities of variable speed permanent magnet motors, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. MAG-23, No. 5, September 1987, pp. 3619-3621.
15. [Seb86] Sébastien T. Slemon G, Rahman M.A., Modelling of permanent magnet synchronous motors, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. MAG-22, No. 5, September 1986, pp. 1069-1072.
16. [Mic97] R. Michaux, P. Letellier, « Les Machines Discoïdes à Champ Axial dans les Systèmes de Propulsion Électriques », REE N°3/1997, pp 37-42.
17. [Let95] P. Lettelier, "Electrical Propulsion Motors", Electric Propulsion; The Effective Solution, IMarest Conference Proceedings, 5-6 October 1995. pp. 7.1-7.8.
18. [Ols05] M. Olszewski, « Fractional-Slot Surface Mounted PM Motors with Concentrated Windings for HEV Traction Drives », Oak Ridge National Laboratory, report ONRL/TM-2005, pp 1-30.