

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'imposent en effet dans la plupart des applications par son prix de revient avantageux ses qualités de robustesse et sa simplicité d'entretien.

IL nous paraît donc indispensable de rappeler les principes de construction et de fonctionnement de ces moteurs, puis de décrire et de comparer les principales dispositifs de démarrage qui leur sont associés, [1].

I -2- Historique Sur Les Machines Asynchrones

Historiquement le dix-neuvième siècle fût l'époque des grandes découvertes en Electrotechnique dont les bases fondamentales ont été établies (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 ouvrage fameux;"Treatise on Eelectricity 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 yougoslave TESLA et de l'italien FERRARIS complétèrent les systèmes a courants alternatifs polyphasés par la conception et la construction des machines d'induction ou asynchrones en (1888). [2]

Les machines asynchrones couvent actuellement l'essentiel de besoins de la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, A titre d'exemple, elle sont utilisées pour la quasi-totalité des fonction auxiliaires d'une centrale de production électrique ; il sont généralement de même dans les procédés industrielles. L'étude de ces machines acquit donc une grande importance, [2].

I-3- Constitution des machines asynchrone

Les moteurs asynchrones, appelés moteur à induction, sont pratiquement tous des moteurs triphasés. Ils sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant, [3].

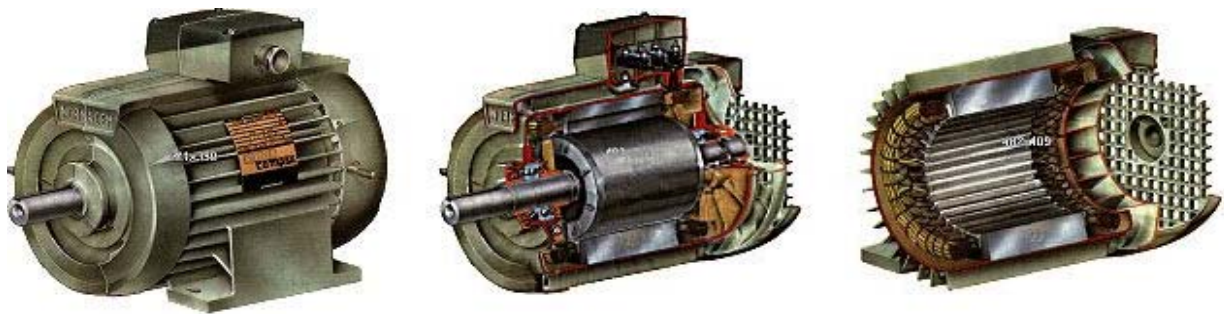


Figure I -1- : machine asynchrone

Les moteurs asynchrone triphasé sont des convertisseurs électro-magnétique qui transforment l'énergie électrique fournie par le réseau en énergie mécanique dans la vitesse de rotation N pour une fréquence donnée 'F' dépend de la charge et dans laquelle $F \neq P N$, [4].

Les moteurs asynchrones comportant deux armatures coaxiales à champ tournant, l'une est fixe (c'est le stator) et l'autre mobile (c'est le rotor), [3].

I-3-1- Le stator

Il est appelé inducteur ou primaire, il est fixé au bâti et forme d'une carcasse ayant l'aspect général d'un cylindre creux, à l'intérieur duquel se trouve le circuit magnétique composé d'un empilage de tôles ayant la forme de couronnes circulaires à leur périphérie interne, ces tôles comportent un certain nombre d'encoches régulièrement réparties qui, par suite de l'empilage créent des rainures, ou sont logés des faisceaux du bobinage.

La figure (I-2) représente un stator comporte un bobinage triphasé, dont chaque phase ne comporte qu'une bobine occupant deux encoches diamétralement opposées, les trois phases sont identiques mais décalées entre elle de $2\pi/3$.

Cet enroulement (bobines), est alimenté en triphasé par l'intermédiaire de la plaque aborne ce qui permet de l'alimenter en étoile ou en triangle, et possède p paires de pôles,[4].

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique B 1 tournant à la pulsation de synchronisme : [11].

$$\Omega_s = \frac{w}{p}$$

Ω_s : vitesse synchrone de rotation du champ tournant en rad.s^{-1} .
 W : pulsation des courants alternatifs en rad.s^{-1} . $w = 2.p.f$
 P : nombre de paires de pôles

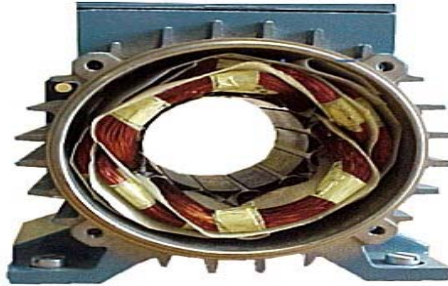


Figure I -2- : stator d'une machine asynchrone

I-3-2- Le Rotor

Le rotor n'est lié électriquement à aucune source d'énergie. (ni continue, ni alternative) ce qui simplifie beaucoup sa construction on distingue deux type de rotor,[3].

I-3-2-1 Rotor à bagues

Ce rotor à pôle lisse comporte dans ces rainures un enroulement identique à celui du stator, les trois phases sont branchées en étoile ce qui permet d'insérer un rhéostat dans leur circuit, ce rhéostat qui est mise en marche normale et permet d'assurer des meilleures conditions de démarrage.

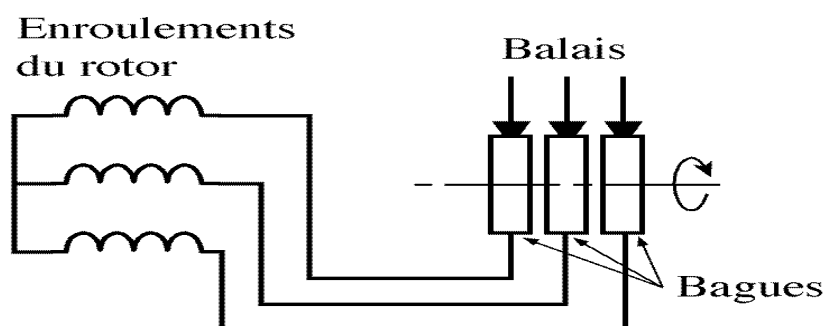


Figure I -3- : principe d'une rotor bobiné

Signalons que, si le nombre des pôles du rotor est obligatoirement le même, que celui de stator, le nombre de phases peut être différent. Cependant, il n'est pas intéressant pour un moteur à bague d'augmenter le nombre des phases du rotor car il faudrait augmenter le nombre des bagues et des balais, [3].

I-3-2-2 Rotor à cage

L'enroulement est remplacé par des barres de cuivre ou d'aluminium logées dans des encoches, et réunie à leurs extrémités par deux couronnes de cuivre ou d'aluminium. Ces cages comportant généralement des barreaux décalés afin de réduire les harmoniques d'encoches, il en résulte une légère diminution de la *F.E.M* induite par le champ tournant statorique dans ces barreaux. Un tel rotor est très robuste, de plus sa construction est particulièrement économique.

La cage étant généralement réalisée avec l'aluminium que l'on coule dans les encoches préparées à l'avance. En effet il n'est pas nécessaire d'isoler les barres et la masse du rotor, car les courants induits s'établissent surtout dans les barres, et leur étude théorique est identique à celle des moteurs à bagues.

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

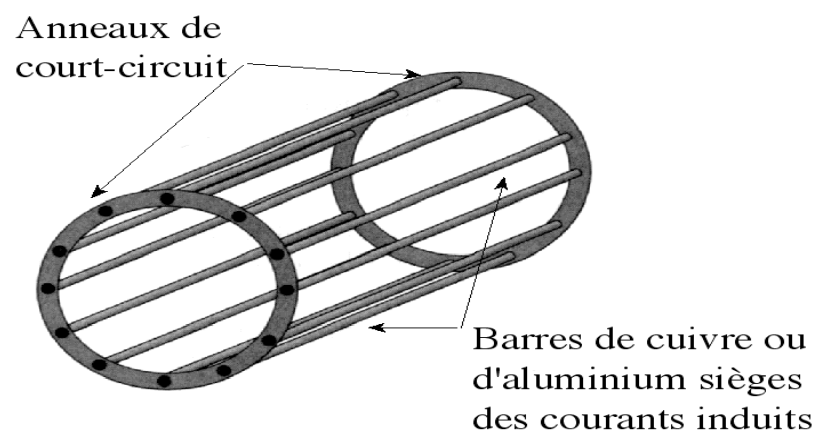


Figure I -4- : principe d'une cage d'écureuil

Par comparaison avec les moteurs à bagues, les moteurs à cage ont l'avantage d'être robustes et du coût plus faible. Il n'est pas possible de faire varier la résistance de leur rotor. Ce qui rend défavorable les conditions de démarrage quand on l'alimente à tension et à fréquence constantes. On remédie cet inconvénient en utilisant soit des rotors à double cages, soit des rotors à une seule cage, mais à barre en la cause de leur profil, soit des moteur à encoches très profondes : barres « lames de sabre », [3].

I-3-3- Entrefer :

L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor, [12].

I-4 Symboles:



Figure I-5- : symboles d'une machine asynchrone

I-5 Principe de fonctionnement du moteur à induction:

Le principe de fonctionnement des moteurs asynchrones est basé sur la production d'un champ tournant. Telle que on considère un aimant tournant produit un champ électromagnétique Φ qui traverse un cylindre métallique.

Les génératrices du cylindre placées dans le champ se comportent comme des brins actifs (AB et CD).

Elles sont parcourues par un courant Φ proportionnel à F et engendrent des forces perpendiculaires qui constituent le couple.

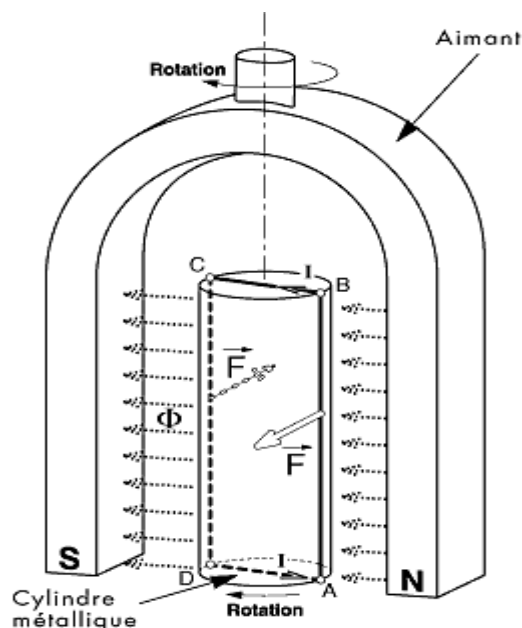


Figure I-6- : principe de base d'un moteur

On constate que le cylindre suit la rotation de l'aimant avec un léger décalage appelé glissement.

Sur les moteurs asynchrones triphasé .le champ tournant est produit par trois bobinages fixes géométriquement décalés de 120° , et parcourus par des courants alternatifs présentant le même décalage électrique. Les trois champs alternatifs qu'ils produisent se composent pour former un champ tournant d'amplitude constante comme il a présenté dans cette figure. [10]

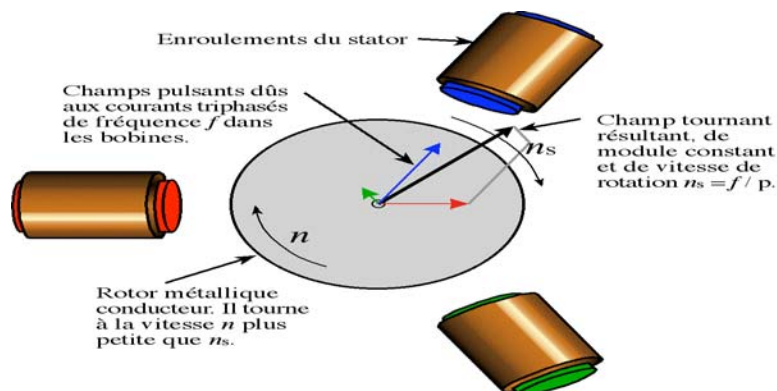


Figure I -7- : principe de fonctionnement d'un moteur à induction

I -5-1 Définition du glissement :

Par définition, le glissement est l'écart des vitesses angulaires synchrone Ω_s et réelle Ω_r , rapporté à la vitesse du champ tournant.

$$g = (\Omega_s - \Omega_r) / \Omega_s = (n_s - n_r) / n_s \quad (I-2)$$

n_s : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr.s^{-1}).

n_r : vitesse de rotation du rotor (tr.s^{-1}).

$$\Omega_s = 2 \pi n_s \text{ (rad.s}^{-1}\text{)} \quad \Omega = 2 \pi n \text{ (rad.s}^{-1}\text{)}$$

Examinons les différents cas possibles :

- $g = 0$ pour $n_r = n_s$ il n'y a pas de couple.
- $g < 0$ pour $n_r > n_s$ la machine fonctionne en génératrice.
- $g > 0$ pour $n_r < n_s$ la machine fonctionne en moteur.
- $g = 1$ pour $n_r = 0$ la machine est à l'arrêt ou à l'instant du début du démarrage.
- $g > 1$ pour $n_r < 0$ la vitesse de rotation est l'inverse de celle du champ tournant le moteur fonction en mode de freinage,[4]

I -5-2 Bilan des puissances du moteur :

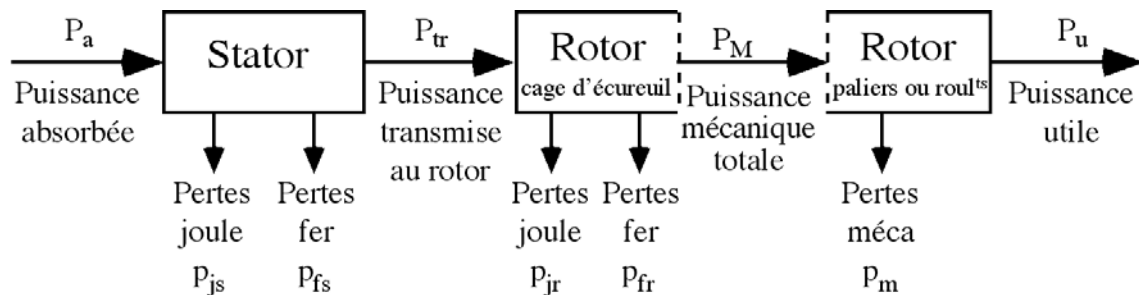


Figure I -8- : bilan des puissance du moteur

Le moteur absorbe au réseau la puissance :

$$P_a = 3V I \cos \alpha = \sqrt{3} U I \cos \alpha \quad (\text{I-3})$$

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 :

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} - P_{fs}) \quad (\text{I-4})$$

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,[3].

I -5-3 Rendement :

Le rendement d'un moteur asynchrone est la puissance de sortie sur la puissance d'entrée alors est le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée.[3]

$$\eta = P_u / P_a$$

(I-5)

I -6 Caractéristique du moteur asynchrone :

I -6-1 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 donc

$$n_0 = n_s$$

Autres observations :

- le facteur de puissance à vide est très faible ($<0,2$) et le courant absorbé reste fort (P est petit et Q est grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (ils servent à créer le champ magnétique).

I-6-2 Fonctionnement en charge :

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

Remarque : le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge, [10]

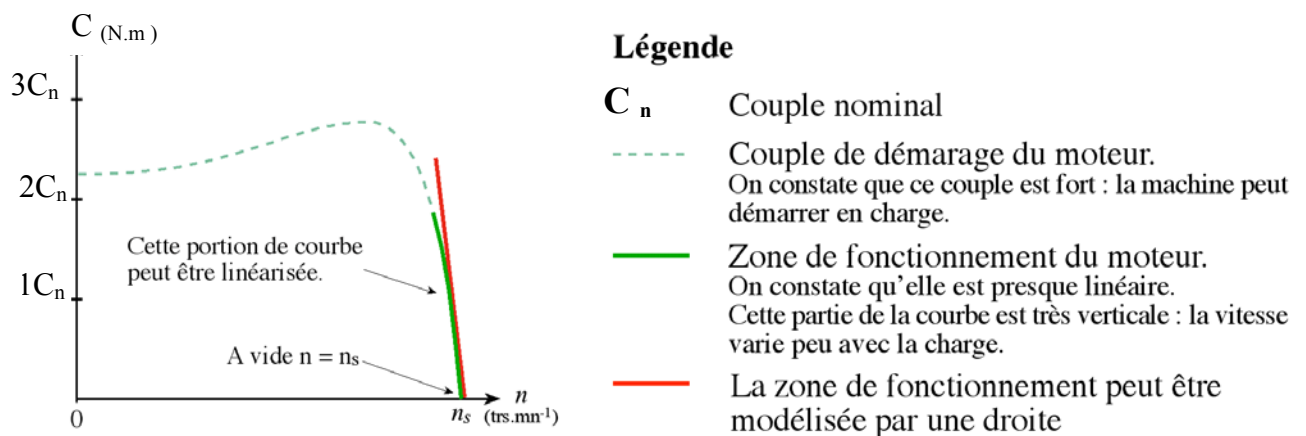
I-6-3 Caractéristique mécanique $C_u = f(n)$:

Figure I-9- : caractéristique du moteur asynchrone

I-6-4 Point de fonctionnement du moteur en charge :

Le couple varie avec la fréquence de rotation pour le moteur et pour la charge entraînée. Les caractéristiques du moteur et de la charge se croisent au point de fonctionnement pour lequel les couples moteur et résistant sont identiques.

La courbe du couple résistant dépend de la charge. [12]

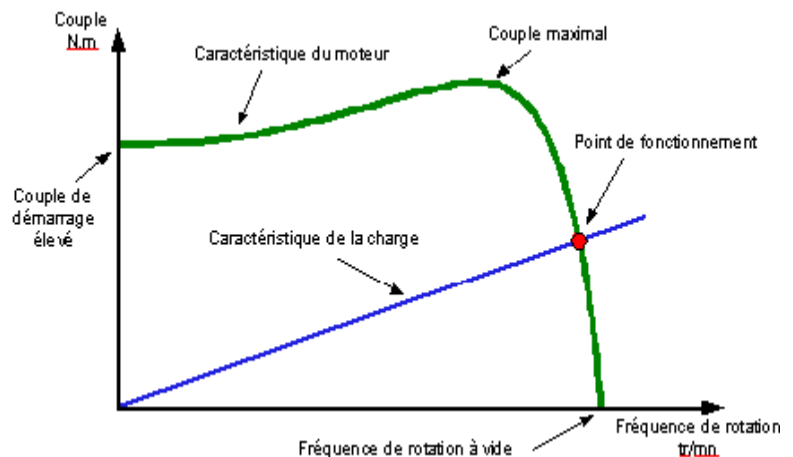
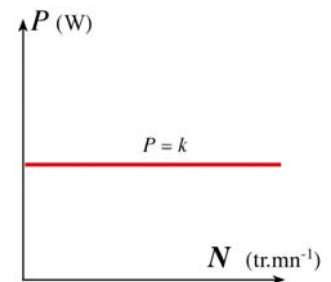
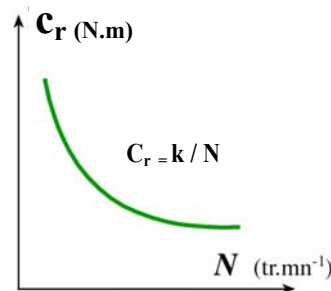


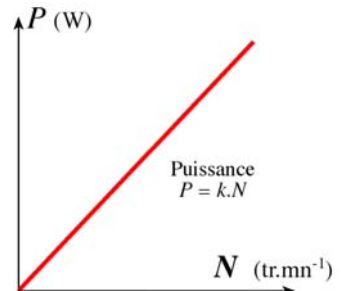
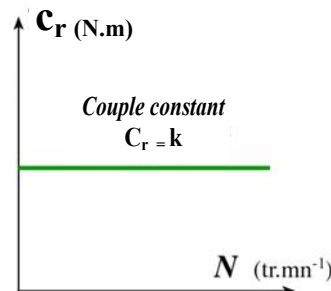
Figure I-10- : Point de fonctionnement du moteur

I -6-5 Caractéristiques $C=f(n)$ de quelques charges : [11]

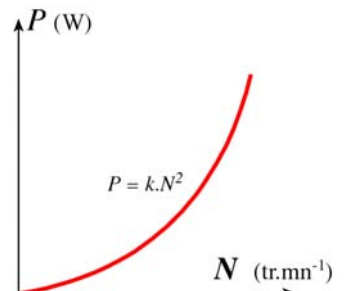
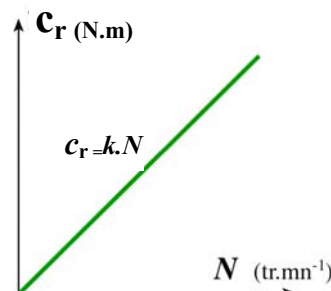
Machine à puissance constante (enrouleuse, compresseur, essoreuse)



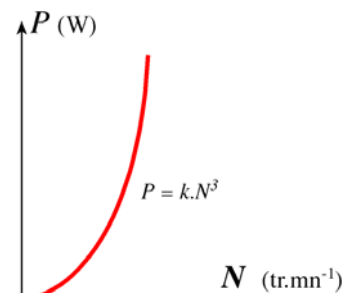
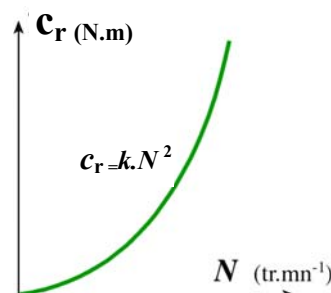
Machine à couple constant (levage, pompe)



Machine à couple proportionnel à la vitesse (pompe volumétrique, mélangeur)



Machine à couple Proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur)



I -6-6 Résumé des caractéristiques :

- A vide, le courant est non négligeable, mais la puissance absorbée est surtout réactive (Q).
- le couple et le courant de démarrage sont importants.
- La machine asynchrone peut démarrer en charge.
- La vitesse du champ tournant est : $n_s = f/p$ (f la fréquence du courant et p le nombre de paires de pôles).
- Le glissement est le rapport entre la vitesse du champ et celle du rotor : $g = (n_s - n)/n_s$

- À vide $g = 0$ et $n_0 = n_s$.
- Quelle que soit la charge la vitesse de rotation varie très peu ($n \approx n_s$), [12]

I-7 Couplage de la plaque à bornes :

Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à borne située sur le dessus de moteur. On dispose ainsi de 6 connexions, un pour chacune des extrémités des trois bobines. Les bornes sont reliées aux bobines selon la figure ci-contre, [10]

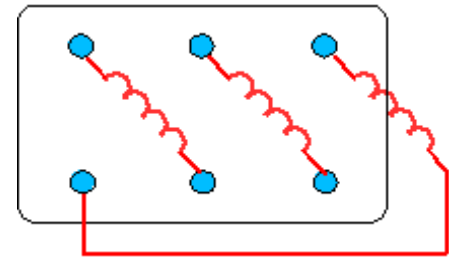


Figure I -11- : la plaque à bornes

I-8 Branchement du moteur sur le réseau triphasé:

Il n'est pas toujours possible de brancher un moteur asynchrone en étoile ou en triangle. Avec le branchement étoile, la tension au borne de chacune des bobines est 220 V. Dans le montage en triangle, chacune des bobines est alimentée en tension nominale de réseau (380 V), [12]

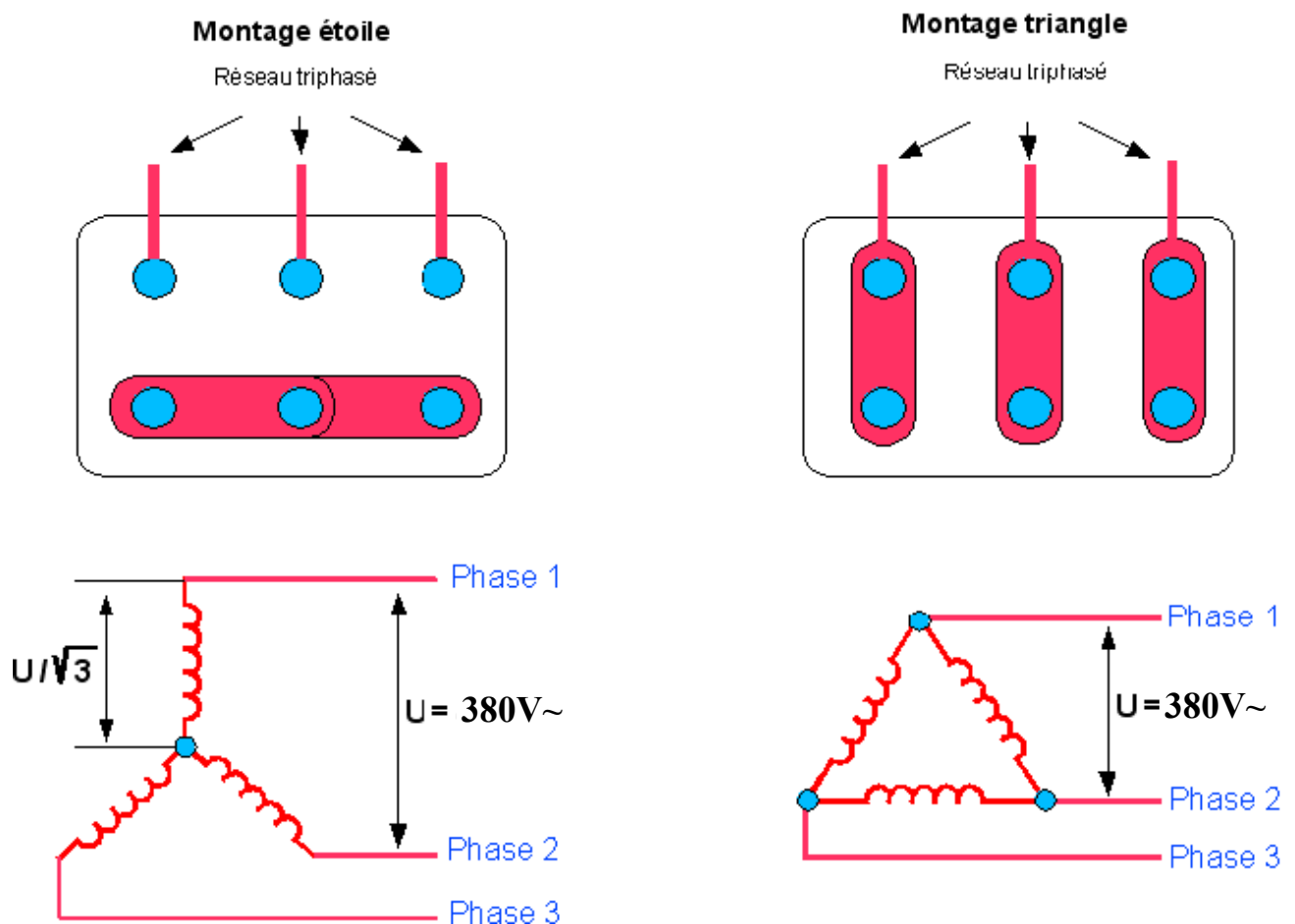
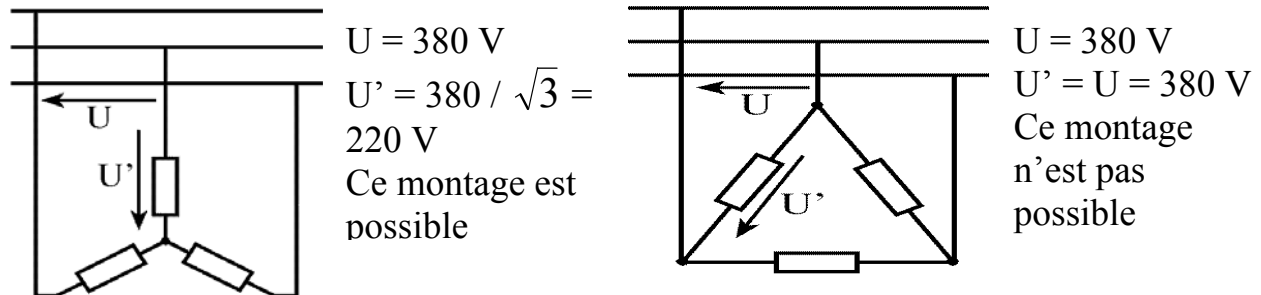


Figure I -12- : Couplage des moteurs

Exemple :

- sur une plaque signalétique d'un moteur on lit : **380 Y / Δ 220**
- le réseau est en **220 / 380 V**

De la plaque signalétique on déduit que la tension nominale d'une phase du moteur est de **220 V**. Si on branche ce moteur en triangle, la tension au borne d'une phase sera de **380 V** ce qui est trop élevé.



Conclusion : ce moteur peut être brancher uniquement en étoile sur le réseau **220 / 380 V**.

Remarque : il s'agit en fait d'un vieux moteur. Actuellement tous les moteurs supportent **380 V** Par phase. Ils supportent même souvent **400 V** et **415 V**, car le réseau **EDF** évolue progressivement vers ces tensions.[10]

I-9 Plaque signalétique :

Exemple d'une plaque signalétique [11]

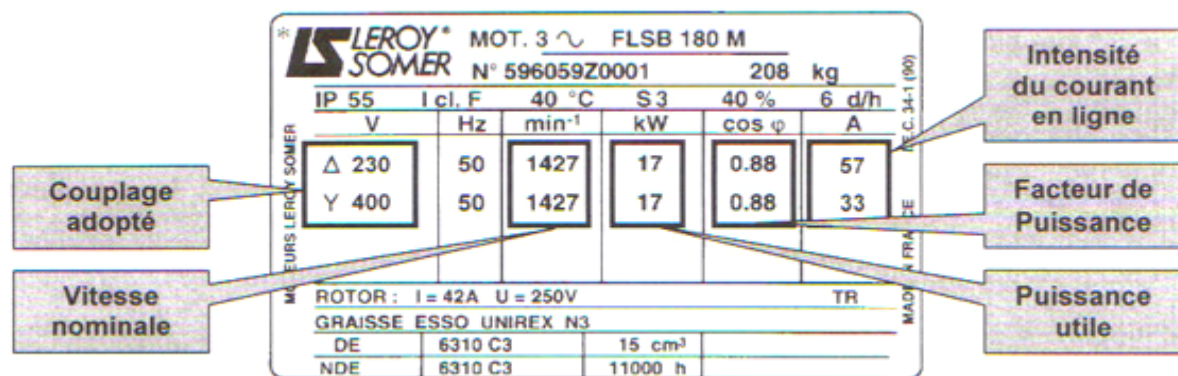


Figure I -13- : plaque signalétique

I-10 Réversibilité :

Toutes les machines tournantes sont réversibles. Dans le cas de la machine asynchrone, étant donné que son rotor n'est pas excité, elle ne peut être autonome. Mais elle est réversible dans le sens où elle peut fournir de la puissance au réseau en fonctionnant en charge,[12].

I-11 Conséquences d'une variation de la tension ou de fréquence sur un moteur asynchrone :

I -11-1 - Augmentation ou la diminution de la tension :

a- Vitesse :

Lors des variations de tension la vitesse au synchronisme n'est pas modifiée. Mais sur un moteur en charge une augmentation de la tension entraîne une diminution du glissement et par la même l'accélération du moteur. Ce phénomène est limité par la saturation de la machine par contre si la tension d'alimentation décroît le moteur tourne plus lentement.

b- Couple :

Le couple étant proportionnel au carré de la tension, il augmente lorsque la tension est plus élevée. Inversement, il diminue considérablement lorsque la tension est plus élevée. Si le moteur a été calculé trop juste, il peut ne pas démarrer, ou même caler et il risque d'être détérioré en cas de chute de tension persistante.

c- Courant de démarrage :

Il varie proportionnellement à la tension d'alimentation donc, si celle-ci est plus élevée, le courant absorbé au moment du démarrage augmente, par contre, si la tension diminue, le courant de démarrage diminue également. Le courant en régime établi varie d'ailleurs de façon analogue.

I -11-2- Augmentation ou diminution de la fréquence :

a- Vitesse :

Sur un moteur asynchrone, nous l'avons vu précédemment, la vitesse de synchronisme est proportionnelle à la fréquence. Cette propriété est souvent utilisée pour faire fonctionner à très grande vitesse des moteurs spécialement conçus pour une alimentation par exemple en **400 Hz** (rectifieuses, appareils de laboratoire ou chirurgicaux, etc....).

Il est possible également d'obtenir une vitesse variable par réglage de puissance par exemple de **6 à 50Hz** (rouleaux transporteurs, appareils de levage, etc....).

b- Couple :

A tension constante, le courant de démarrage est inversement proportionnelle au carré de la fréquence. Si celle-ci augmente, le couple développé par le moteur diminue considérablement. Inversement, si la fréquence décroît, le couple croît.

c- Courant de démarrage :

A tension constante, le courant de démarrage varie en sens inverse de la fréquence. De ce fait, il augmente, si la fréquence diminue en inversement. Il en est de même du courant en régime établi. Ce variation de couple et de courant sont le plus souvent gênantes.

En pratique, pour les éviter, il est conseillé de varier la tension d'alimentation proportionnellement à la fréquence, [1].

I-12 Démarrage des moteurs à induction :

Dans tout moteur électrique, deux paramètre ont montrés leurs importance lors de démarrage, à savoir le courant de démarrage et le couple de démarrage, un fort appel de courant au démarrage (qui peut valoir 4 à 6 fois le courant nominal), peut provoquer une chute de tension excessive dans le réseau, de même un faible couple au démarrage augmenterait les pertes mécaniques, et donnerait un démarrage très long, mais vue que certaines machines sont obligées de démarrer directement en charge, à cause de cela il est nécessaire que le couple de démarrage soit au moins égal au couple nominal,[5].

I-13 Commande des moteurs :***Généralités :***

Les appareils insérés dans les circuits d'alimentation d'un moteur assurent diverses fonctions prévus par les règles d'installations : **NFC 15- 100**.

- **Commande** pour démarrage et arrêt des moteurs
- **Protection** contre les surcharges et les courts –circuits du moteur et de circuit d'alimentation.
- **Sectionnement** pour l'isolement du circuit amont
- **Coupure de sécurité** ou « arrêt - d'urgence » du circuit ,[5]

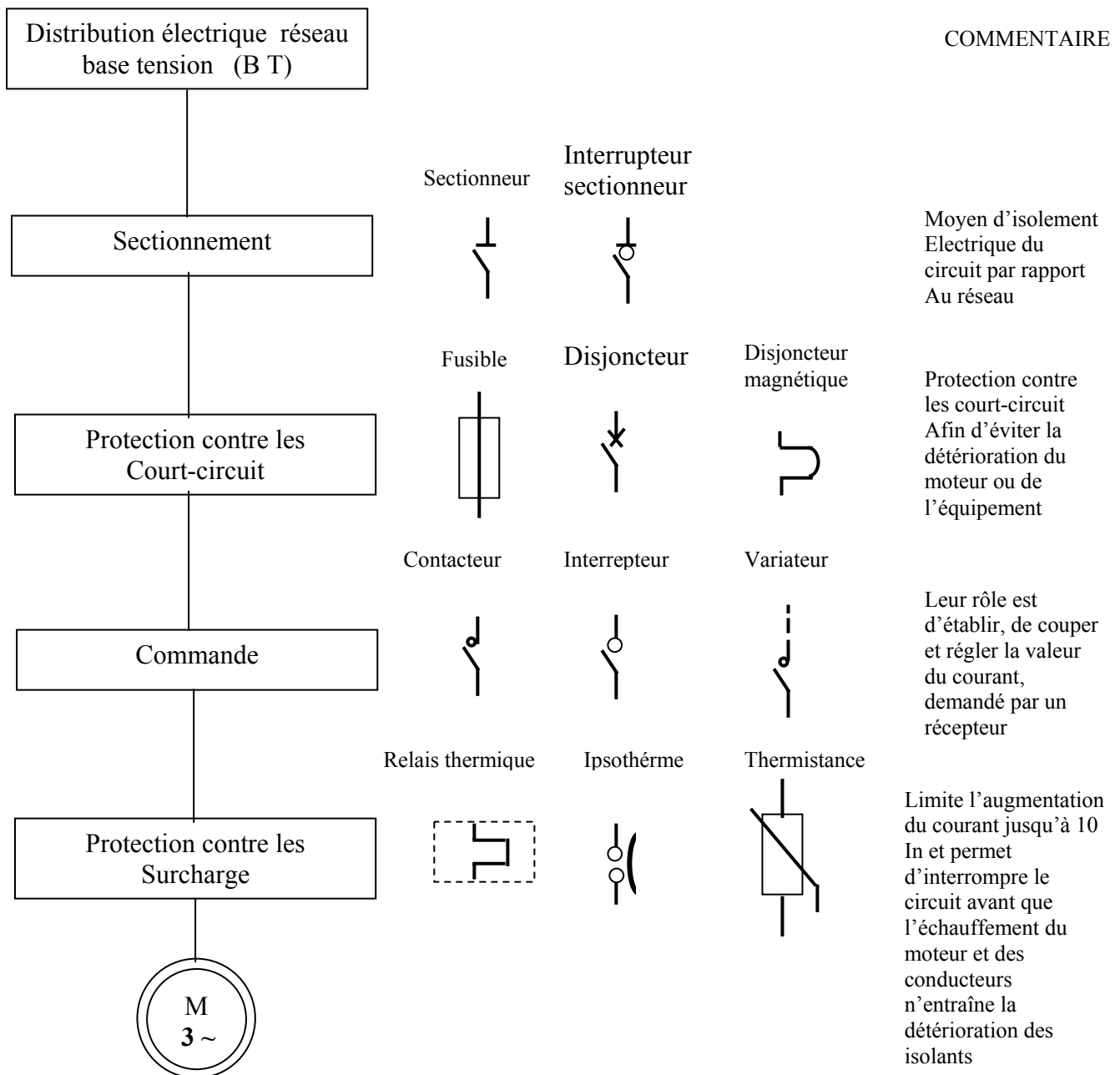


Figure I -14- : commande des moteurs

I-14 Utilisation du moteur asynchrone :

Comme on l'a expliqué, les performances d'un moteur concernent les domaines suivants : démarrage, variation de la vitesse, freinage et inversion de sens de marche.

Comme la vitesse N reste très proche de la vitesse N_s de synchronisme, pour varier la vitesse du Moteur il faut en fait varier la fréquence f_s à l'aide d'un onduleur.

Mais pour faire varier la vitesse sans modifier le couple utile il faut garder le rapport V_s / f_s constant (V_s est la tension d'alimentation d'un enroulement). Si on augmente la vitesse, il faut augmenter la Fréquence et la tension d'alimentation dans les limites du bon fonctionnement de la machine.

Le moteur asynchrone triphasé, d'une puissance de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus utilisé de tous les moteurs électriques. Son rapport coût/puissance est le plus faible. Associés à des onduleurs de tension, les moteurs asynchrones de forte puissance peuvent fonctionner à vitesse variable dans un large domaine (les derniers TGV, le Tram de Strasbourg, ...). Toutefois l'emploi de ce type de moteur est évité en très forte puissance ($P > 10 \text{ MW}$) car la consommation de puissance réactive est alors un handicap.

Remarques :

En électroménager (exemple : lave-linge) la vitesse des moteurs asynchrones n'est pas réglée par un onduleur, mais ces moteurs possèdent plusieurs bobinages. Il est alors possible de changer le nombre de paires de pôles et donc la vitesse,[10].

I-15- Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone :

Si l'on compare le moteur asynchrone au moteur shunt à courant continu, on constate que les caractéristiques dans leurs parties stables, sont identiques, ce qui conduit aux mêmes applications industrielles. En ce qui concerne le choix d'un moteur pour une application donnée, il est intéressant de signaler les avantages et les inconvénients de ces deux moteurs.

I-15-1 Les avantages du moteur asynchrone :

Comparé au moteur shunt, le moteur asynchrone a l'avantage d'être alimenté directement par le réseau triphasé. Son prix d'achat est moins élevé, il est beaucoup plus robuste car il ne nécessite pratiquement pas d'entretien.

Ses deux qualités fondamentales (prix et solidité) résulte du fait qu'il n'a pas de collecteur. En effet, le collecteur est un organe coûteux et fragile qui nécessite un entretien fréquent : changement des balais.

I -15-2 Les inconvénients du moteur asynchrone :

A l'exception du démarrage et de l'inversion du sens de marche que l'on peut résoudre de façon satisfaisante, le moteur asynchrone a des performances très médiocres par rapport à celles du moteur shunt. En effet jusqu'à ces dernières années, l'entraînement idéal était réalisé par le léonard formé un moteur shunt alimenté par un convertisseur de tension, [3].

I-16 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, caractéristique), plus on a donné utilisation de ce type de moteur, et ses avantages et ses inconvénients.

Dans le chapitre suivant on donne une étude sur les moteurs asynchrone triphasé à cage et les différents procédés de démarrage utilisés pour ce type de moteur.