Chapitre 4 : Machines Electriques

1. Objectifs

- Posséder des connaissances générales sur les convertisseurs électromécaniques (machines tournantes).

- Connaître les propriétés élémentaires des trois types de moteurs (continu, alternatif et pas à pas).

- Savoir quelle grandeur électrique (U, I ou f) agit sur quelle grandeur mécanique (T ou Ω).

- Etudier le raccordement, démarrage et inversion du sens de rotation d'une machine électrique, ainsi le couplage d'une machine à sa charge (point de fonctionnement).

2. Introduction

Un convertisseur électromagnétique ou "machine tournante" effectue une transformation entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique. Deux régimes de fonctionnement peuvent alors exister :

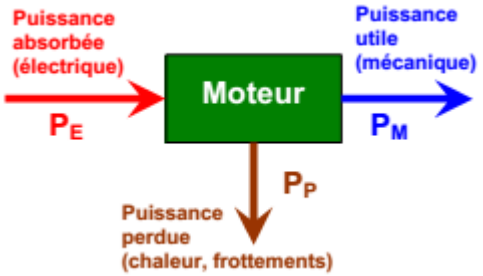
Une seule et même machine : conversion dans les deux sens

Fonctionnement "moteur"

L'énergie électrique est transformée en énergie mécanique (schéma ci-dessous):

On peut définir le rendement

$$\eta = \frac{Pm}{Pe} = \frac{Pm}{Pm+Pp}$$

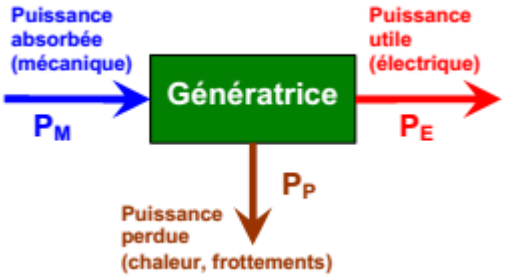


Fonctionnement "génératrice"

L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (schéma suivant):

On peut définir le rendement

$$\eta = \frac{Pe}{Pm} = \frac{Pe}{Pe+Pp}$$



Les machines électriques tournantes sont réversibles, la même machine peut fonctionner en moteur ou en génératrice (exemples ci-dessous avec trois familles de moteurs).

- *La machine à courant continu:*

Une action mécanique sur le rotor produit une tension continue au stator, c'est la génératrice à courant continu (dynamo).

- *La machine à courant alternatif:*

- Le moteur synchrone utilisé en génératrice va produire une tension de fréquence directement proportionnelle à la vitesse de rotation c'est la génératrice synchrone (alternateurs des centrales électriques).
- Le moteur asynchrone utilisé en génératrice va produire une tension de fréquence légèrement inférieure au cas de la génératrice synchrone c'est la génératrice asynchrone (centrales éoliennes).
- Le moteur pas à pas: Une action mécanique sur un moteur pas à pas va produire une tension alternative à chaque enroulement du stator. Le moteur pas à pas est lui aussi réversible mais n'est, en principe, pas utilisé en génératrice.

3. Constitution des machines électriques tournantes

Le stator

Le stator est la partie fixe de la machine. Dans le cas d'un moteur, le stator est alimenté en électricité et produit un champ magnétique inducteur. Dans le cas d'une génératrice, le stator produit une tension induite par le champ magnétique variable produit par le rotor en rotation.

Le rotor

Le rotor est la partie tournante de la machine, les courants rotoriques produisent un champ magnétique (champ induit) qui réagit mécaniquement avec le champ inducteur (stator) et produit un couple de rotation.

4. Machine à courant continu

4.1 Généralités

La machine à courant continu est réversible : elle peut fonctionner en moteur ou en génératrice. Pour inverser le sens de rotation d'un moteur à C.C, on change le sens du courant soit dans l'induit, soit dans l'inducteur seulement. La vitesse d'un moteur varie en sens inverse du flux inducteur.

- Lorsque la résistance du Rhex augmente, la vitesse croit
- Lorsque la résistance du Rhex dimunie , le moteur ralenti

Au démarrage, E=0V, d'où Id=U/r très élevée. Emploi d'un rhéostat de démarrage pour limiter le courant Id=U/(Rd+r) : la pointe de courant est la même à vide qu'en charge.

4.2 Principe de fonctionnement

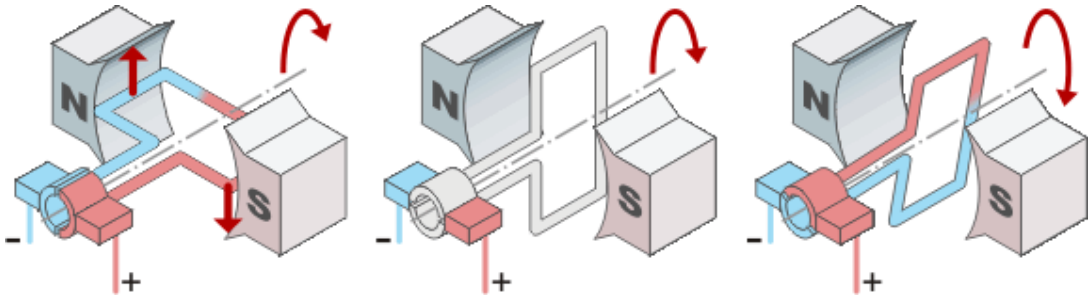
Le moteur à courant continu se compose :

- de l'inducteur ou du stator,
- de l'induit ou du rotor,
- du collecteur et des balais.

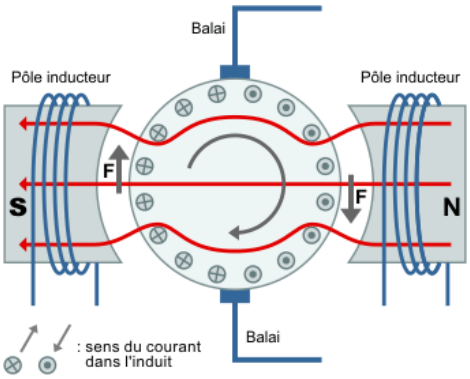
Lorsque le bobinage d'un inducteur de moteur est alimenté par un courant continu, sur le même principe qu'un moteur à aimant permanent (comme la figure ci-dessous), il crée un champ magnétique (flux d'excitation) de direction Nord-Sud.

Une spire capable de tourner sur un axe de rotation est placée dans le champ magnétique. De plus, les deux conducteurs formant la spire sont chacun raccordés électriquement à un demi collecteur et alimentés en courant continu via deux balais frotteur.

D'après la loi de Laplace (tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force), les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre) sont soumis à des forces F égales mais de sens opposé en créant un couple moteur : l'induit se met à tourner !



Si le système balais-collecteurs n'était pas présent (simple spire alimentée en courant continu), la spire s'arrêterait de tourner en position verticale sur un axe appelé communément "ligne neutre". Le système balais-collecteurs a pour rôle de faire commuter le sens du courant dans les deux conducteurs au passage de la ligne neutre. Le courant étant inversé, les forces motrices sur les conducteurs le sont aussi permettant ainsi de poursuivre la rotation de la spire.



Dans la pratique, la spire est remplacée par un induit (rotor) de conception très complexe sur lequel sont montés des enroulements (composés d'un grand nombre de spires) raccordés à un collecteur "calé" en bout d'arbre. Dans cette configuration, l'induit peut être considéré comme un seul et même enroulement semblable à une spire unique.

4.3 Caractéristiques

Les avantages et inconvénients du moteur à courant continu sont repris ci-dessous :

- accompagné d'un variateur de vitesse électronique, il possède une large plage de variation (1 à 100 % de la plage),
- régulation précise du couple,
- son indépendance par rapport à la fréquence du réseau fait de lui un moteur à large champ d'application,
- peu robuste par rapport à la machine asynchrone,
- investissement important et maintenance coûteuse (entretien du collecteur et des balais,

4.4 Machine réversible

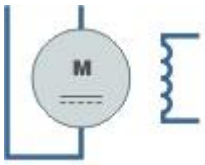
Dans le régime de fonctionnement des ascenseurs à traction, le treuil à courant continu peut :

- Tantôt fonctionner en moteur lorsque le système cabine et contre-poids s'oppose au mouvement de rotation (charge dite "résistante"); le moteur prend de l'énergie au réseau.
- Tantôt travailler en générateur lorsque le même système tend à favoriser la rotation (charge dite "entrainante"); le générateur renvoie de l'énergie au réseau.

4.5 Type de moteur à courant continu

Suivant l'application, les bobinages du l'inducteur et de l'induit peuvent être connectés de manière différente. On retrouve en général :

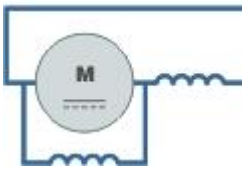
Des moteurs à excitation indépendante.



Des moteurs à excitation parallèle.

Des moteurs à excitation série.

Des moteurs à excitation composée.



La plupart des machines d'ascenseur sont configurées en excitation parallèle ou indépendante. L'inversion du sens de rotation du moteur s'obtient en inversant soit les connections de l'inducteur soit de l'induit.

4.6 L'inducteur

L'inducteur d'un moteur à courant continu est la partie statique du moteur. Il se compose principalement :

- de la carcasse,
- des paliers,
- des flasques de palier,
- des portes balais.

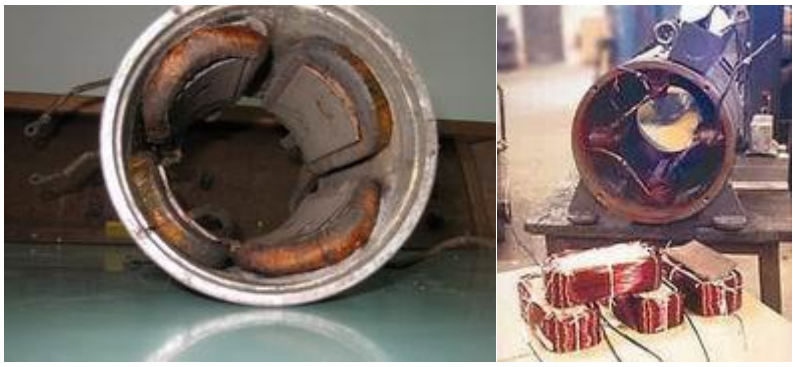


Fig 4.1 Inducteur.

Le cœur même du moteur comprend essentiellement :

- Un ensemble de paires de pôles constitué d'un empilement de tôles ferro-magnétiques.
- Les enroulements (ou bobinage en cuivre) destinés à créer le champ ou les champs magnétiques suivant le nombre de paires de pôles.

Pour des moteurs d'une certaine puissance, le nombre de paires de pôles est multiplié afin de mieux utiliser la matière, de diminuer les dimensions d'encombrement et d'optimaliser la pénétration du flux magnétique dans l'induit.

4.7 L'induit

L'induit du moteur à courant continu est composé d'un arbre sur lequel est empilé un ensemble de disques ferro-magnétiques. Des encoches sont axialement pratiquées à la périphérie du cylindre formé par les disques empilés. Dans ces encoches les enroulements (bobines de l'induit) sont "bobinés" selon un schéma très précis et complexe qui nécessite une main d'œuvre particulière (coûts importants). Pour cette raison, on préfère, en général, s'orienter vers des moteurs à courant alternatif plus robuste et simple dans leur conception.

Fig 4.2 Induit.

Chaque enroulement est composé d'une série de sections, elles même composées de spires; une spire étant une boucle ouverte dont l'aller est placé dans une encoche de l'induit et le retour dans l'encoche diamétralement opposée. Pour que l'enroulement soit parcouru par un courant, ses conducteurs de départ et de retour sont connectés aux lames du collecteur (cylindre calé sur l'arbre et composé en périphérie d'une succession de lames de cuivre espacée par un isolant).

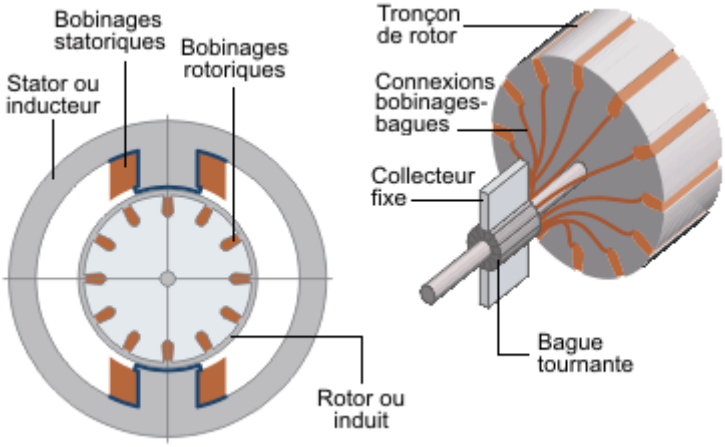


Fig 4.3 Composition de l'induit.

L'interface entre l'alimentation à courant continu et le collecteur de l'induit est assuré par les balais et les porte-balais.

4.8 Les balais

Les balais assurent le passage du courant électrique entre l'alimentation et les bobinages de l'induit sous forme d'un contact par frottement. Les balais sont en graphite et constituent, en quelques sortes, la pièce d'usure. Le graphite en s'usant libère une poussière qui rend le moteur à courant continu sensible à un entretien correct et donc coûteux.

Fig 4.4 L'ensemble balais, porte-balais et collecteur.

Le point de contact entre les balais et le collecteur constitue le point faible du moteur à courant continu. En effet, c'est à cet endroit, qu'outre le problème d'usure du graphite, la commutation (inversion du sens du courant dans l'enroulement) s'opère en créant des micros-arcs (étincelles) entre les lamelles du collecteur; un des grands risques de dégradation des collecteurs étant leur mise en court-circuit par usure.

4.9 Relation Vitesse et force contre-électromotrice à flux constant

Lorsque l'induit est alimenté sous une tension continue ou redressée U, il se produit une force contre-électromotrice E.

On a :

$E = U - R \times I$ [volts]

Où,

- R = la résistance de l'induit [ohm].
- I = le courant dans l'induit [ampère].

La force contre-électromotrice est liée à la vitesse et à l'excitation du moteur.

On a :

$E = k \times \omega \times \Phi$[volt]

Où,

- k = constante propre au moteur (dépendant du nombre de conducteurs de l'induit).
- ω = la vitesse angulaire de l'induit [rad/s].
- Φ= le flux de l'inducteur [weber].

En analysant la relation ci-dessus, on voit, qu'à excitation constante Φ, la force contre-électromotrice E est proportionnelle à la vitesse de rotation.

4.10 Relation Couple et flux

Quant au couple moteur, il est lié au flux inducteur et au courant de l'induit par la relation suivante.

On a :

$C = k \times \Phi \times I$ [N.m]

Où,

- k = constante propre au moteur (dépendant du nombre de conducteurs de l'induit).
- Φ= le flux de l'inducteur [weber].
- I = le courant dans l'induit [ampère].

En analysant la relation ci-dessus, on voit qu'en réduisant le flux, le couple diminue.

4.11 Variation de la vitesse

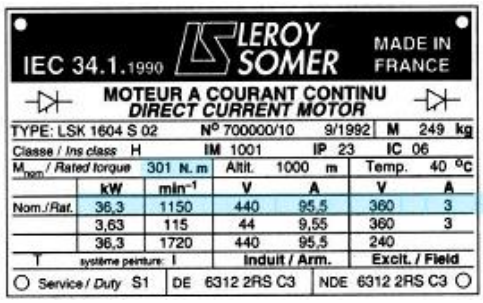
Au vu des relations existant entre la vitesse, le flux et la force contre-électromotrice, il est possible de faire varier la vitesse du moteur de deux manières différentes. On peut :

- Augmenter la force contre-électromotrice E en augmentant la tension au borne de l'induit tout en maintenant le flux de l'inducteur constant. On a un fonctionnement dit à "couple constant". Ce type de fonctionnement est intéressant au niveau de la conduite d'ascenseur.

- Diminuer le flux de l'inducteur (flux d'excitation) par une réduction du courant d'excitation en maintenant la tension d'alimentation de l'induit constante. Ce type de fonctionnement impose une réduction du couple lorsque la vitesse augmente.

4.12 Lecture d'une plaque signalétique

Les caractéristiques électriques et mécaniques nominales sont inscrites sur une plaque lisible sur le moteur (exemple ci-dessous):



En fonctionnement normal (nominal), ce moteur a les caractéristiques suivantes :

- Puissance mécanique : 36,3kW (1150tr/min et 301N.m).
- Alimentation rotor : 440V et 95,5A (soit 42kW).
- Alimentation stator : 360V et 3A (soit 1,08kW).

4.13 Utilisation des moteurs à courant-continu

Du début du 20° siècle et jusque vers les années 1975, le moteur à courant continu était la seule solution pour obtenir des vitesses variables(avec inversion possible du sens) et un couple nominal à n'importe quelle vitesse.

L'utilisation industrielle, de ces moteurs présente les limitations suivantes:

- vitesse maximum de ≈ 3000tr/min pour des puissances moyennes (>1kW);
- tension d'alimentation < 1500V (isolation entre les lames);
- puissance maximum inférieure à 1MW;
- entretien régulier (usure des balais et du collecteur);
- impossibilité d'emploi en atmosphère explosive (arcs électriques au collecteur).

Pour ces raisons, on remplace de plus en plus les moteurs à courant continu par des moteurs à courant alternatif alimentés par des convertisseurs électroniques (progrès de l'électronique de puissance).

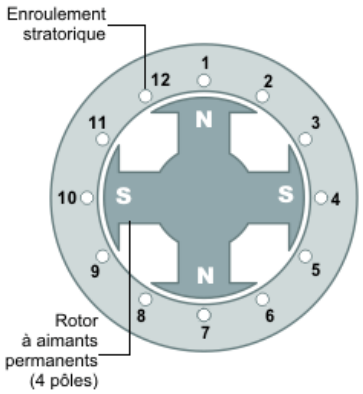
5. Moteur synchrone

5.1 Généralité

Le moteur synchrone est aussi un moteur utilisé pour la motorisation des ascenseurs. Ces dernières années ont vu ce type de moteur revenir en force parallèlement au développement des variateurs de vitesse.

5.2 Principe de fonctionnement

Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor. La figure ci-dessous montre un rotor à pôles saillants constitués d'aimants permanents ou d'électro-aimants alimentés en courant continu.



Après le démarrage, le moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant. A vide les axes des pôles du champ tournant et du rotor sont confondus. En charge, les axes sont légèrement décalés. La vitesse du moteur synchrone est constante quelle que soit la charge. On notera aussi que :

- La charge (le système d'ascenseur) ne doit pas dépasser l'effort de démarrage entre le rotor et le champ tournant.
- Le couple moteur est proportionnel à la tension à ses bornes.

5.3 Caractéristiques

Les avantages et inconvénients du moteur synchrone sont repris ci-dessous :

- il peut travailler avec un facteur de puissance proche de 1 (cos φ~ 1). Il contribue donc à redresser le cos φ global de l'installation électrique.
- la vitesse du moteur est constante quelle que soit la charge (intéressant dans le cas des ascenseurs).
- Il peut supporter des chutes de tension important sans décrocher.
- S'il n'est pas associé à un variateur de vitesse, il a des difficultés à démarrer.
- il peut décrocher en cas de forte charge (pas intéressant au niveau des ascenseurs nécessitant un couple important).

5.4 Le stator

Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur synchrone. Il s'apparente fort au stator des moteurs asynchrone. Il se compose principalement :

- de la carcasse,
- des paliers,
- des flasques de palier,
- du ventilateur refroidissant le moteur,
- le capot protégeant le ventilateur.

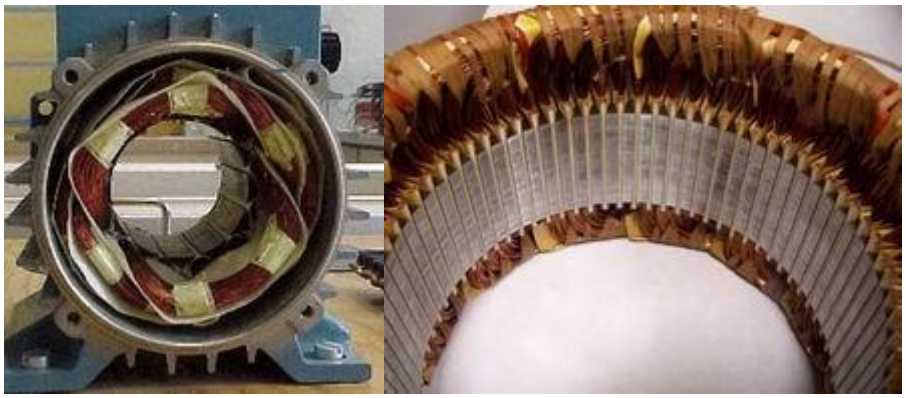


Fig 4.5 Stator.

L'intérieur du stator comprend essentiellement :

- un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique,
- les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau.

Dans un moteur triphasé les enroulements sont au nombre minimum de trois décalés l'un de l'autre de 120° comme le montre le schéma ci-dessous.

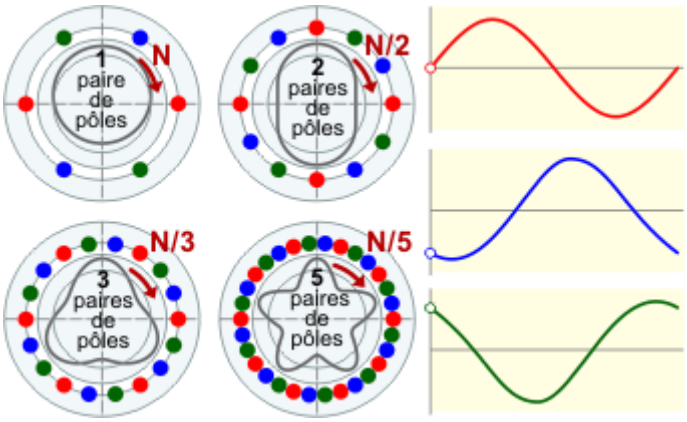


Fig 4.6 Variation de la vitesse en fonction du nombre de paires de pôles.

Lorsque les enroulements du stator sont parcourus par un courant triphasé, ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme. La vitesse de synchronisme est fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Europe) et du nombre de paire de pôles. Vu que la fréquence est fixe, la vitesse du moteur peut varier en fonction du nombre de paires de pôles.

Paires de pôles	**1**	**2**	**3**	**4**	**6**
Nombre de pôles	2	4	6	8	12
n_0 [tr/min]	3 000	1 500	1 000	750	500

5.5 Le rotor

Le rotor est la partie mobile du moteur synchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement d'une succession de pôles Nord et Sud intercalés sous forme d'aimants permanents ou de bobines d'excitation parcourues par un courant continu. On distingue donc deux types de moteurs :

- à aimants permanents,
- à rotor bobinés.

a. Rotor à aimant permanent

Ce sont des moteurs qui peuvent accepter des courants de surcharge importants pour démarrer rapidement. Associés à des variateurs de vitesse électronique, ils trouvent leur place dans certaines applications de motorisation d'ascenseurs lorsque l'on cherche une certaine compacité et une accélération rapide (immeuble de grande hauteur par exemple).

b. Rotor bobiné

Ce type de machines est réversible car elles peuvent fonctionner en régime moteur comme en régime alternateur. Pour les moyennes et grosses puissances, les moteurs synchrones à rotor bobiné, associé avec un variateur de vitesse, sont des machines performantes.

Comme le montre la figure ci-dessous, le rotor est composé d'un empilement de disques ferromagnétiques. Comme dans le stator du moteur, des enroulements sont logés dans des encoches pratiquées sur le rotor et reliés électriquement aux bagues de bout d'arbre. L'alimentation en courant continu s'effectue via l'ensemble bagues-balais.

Fig 4.7 Le pilotage de la vitesse de rotation

Le pilotage de la vitesse de rotation du moteur synchrone est essentiel pour beaucoup d'applications.

La relation suivante permet de cerner quels sont les paramètres qui peuvent influencer la vitesse de rotation.

On a :

$$n_0 = n$$

Avec,

- n_0 = vitesse du champ tournant [tr/min].
- n = la vitesse de rotation de l'arbre du moteur [tr/min].

Ou :

$$n = f / p$$

Avec,

- f = fréquence du réseau [Hz].
- p = le nombre de paires de pôles du stator.

On peut donc piloter la vitesse de rotation en intervenant sur :

- le nombre de paires de pôles (moteur à nombre de pôles variable),
- la fréquence du réseau.

5.6 Régulation de fréquence

À l'heure actuelle, le pilotage de la vitesse des moteurs synchrones se fait électroniquement grâce à des variateurs de vitesse. Pour cette raison, on ne parlera ici que du contrôle de la fréquence qui de loin la plus courante. Vu la nécessite pour un moteur synchrone d'être démarré avec un système auxiliaire (le rotor ne peut pas "accrocher" un champ tournant statorique trop rapide de 3 000 [tr/min]), le variateur de fréquence associé au moteur synchrone permet de le démarrer avec une fréquence statorique faible voire nulle.

Sans perte de puissance, on peut piloter la vitesse de rotation du moteur en faisant varier la fréquence et la tension car la vitesse de rotation du champ tournant au niveau du stator change.

A remarquer que le couple d'un moteur synchrone ne change pas en fonction de la vitesse puisqu'il n'y a pas de glissement.

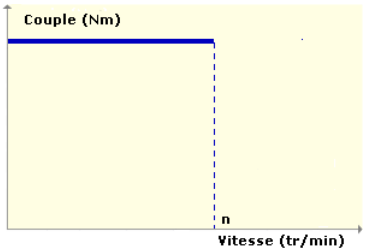


Fig 4.8 Variation de la vitesse à couple constant (moteur synchrone).

Le pilotage du moteur synchrone par un variateur de fréquence montre des intérêts certains; à savoir principalement :

- La limitation du courant de démarrage (de l'ordre de 1,5 fois le courant nominal),
- Un couple constant quelle que soit la vitesse du moteur.

5.7 Lecture de la plaque signalétique d'une machine synchrone

La lecture de la plaque donne les informations suivantes :

- Alimentation rotor : 60V continu (0,3A).
- Nombre de paires de pôles ; p=f/n=50/1500.60=2
- Rendement en moteur : $\eta = \frac{Pm}{Pe} = \frac{420}{\sqrt{2}x400x0.75x0.86x60x0.3} = 90\%$
- Consommation en courant (réseau 230/400V) : 1,3A en étoile et 0,75A en triangle.

5.8 Utilisations des moteurs synchrones

a. Avantages :

La machine synchrone est plus facile à réaliser et plus robuste que le moteur à courant continu. Son rendement est proche de 99%.

b. Inconvénients :

Un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire.

Il faut une excitation (alimentation du rotor), c'est-à-dire une deuxième source d'énergie.

Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.

c. Utilisations :

Ils sont utilisés en forte puissance (1 à 10 MW - compresseur de pompe, concasseur); toutefois pour faire varier la vitesse, il faut faire varier la fréquence des courants statoriques.

Dans le domaine des faibles puissances, les rotors sont à aimants permanents. L'intérêt de ces moteurs réside dans la régularité de la vitesse de rotation (tourne-disque, appareil enregistreur, programmateur, servomoteur).

6. Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone couplé à un variateur de fréquence est de loin le type de moteur le plus utilisé pour les applications où il est nécessaire de contrôler la vitesse et le déplacement d'une charge. Le système moteur-variateur convient bien pour des applications tels que les ascenseurs car on recherche une excellente précision à fois au niveau de la vitesse (confort des utilisateurs) et de la précision de la position de la cabine par rapport aux paliers.

6.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose :

D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil ci-dessous constituant le rotor du moteur. L'induction du courant ne peut se faire

que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux). D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite.

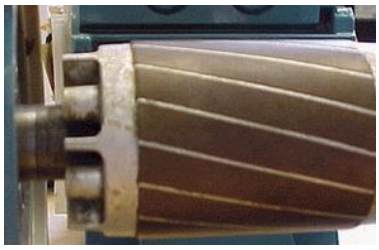
Pour entretenir la rotation du moteur, il est nécessaire de faire varier soit le courant dans les conducteurs de la cage, soit le champ magnétique. Dans un moteur asynchrone, c'est le champ magnétique qui varie sous forme de champ tournant créé dans le stator.

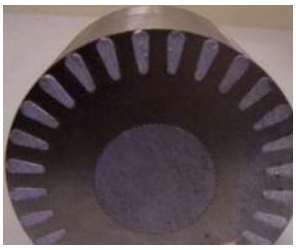
Au démarrage le champ tournant balaye les conducteurs de son flux à la vitesse angulaire de synchronisme. Le rotor mis en rotation tend à rattraper le champ tournant. Pour qu'il y ait un couple entretenu au niveau des conducteurs, la variation de flux doit être présente en permanence; ce qui signifie que si les conducteurs tournent à la vitesse de synchronisme comme le champ tournant, la variation de flux sur les conducteurs devient nulle et le couple moteur disparaît. Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme (50 Hz). Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant est de 3 000 [tr/min]) la vitesse de rotation du rotor peut être de 2 950 [tr/min] par exemple; intervient ici la notion de glissement.

6.2 Le rotor

Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement :

- D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique.
- D'une cage d'écureuil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices.





6.3 Glissement, couple et vitesse de rotation

a. Glissement

Comme on l'a vu au niveau du principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone, la vitesse de rotation de l'arbre du moteur est différente de la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant). Le glissement (g) représente la différence de vitesse de rotation entre l'arbre du moteur et le champ tournant du stator; il s'exprime par la relation suivante :

$$g=n_0 - n_n$$

Avec,

- n_0 = vitesse du champ tournant.
- n_n = vitesse de rotation de l'arbre.

Le glissement est généralement exprimé en pourcentage de la vitesse de synchronisme n_0.

$$g = (n_0 - n_n) / n_0 \ [\%]$$

La vitesse de synchronisme, quant à elle, est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$n_0 = (f \times 60) / p$$

Avec,

- n_0 = vitesse du champ tournant.
- f = la fréquence du réseau (en général 50 Hz).
- p = le nombre de paires de pôles.

b. Couple

Le couple C d'un moteur asynchrone est fonction de la puissance P et de la vitesse de rotation n du moteur. Il s'exprime par la relation suivante :

$$C = (P \times 9\,550) / n$$

Avec,

- P = Puissance du moteur [W].
- n = la vitesse de rotation du moteur [tr/min].

Un moteur asynchrone classique a les caractéristiques suivantes :

- Le courant de démarrage est de l'ordre de 6 à 7 fois le courant nominal. Il est impératif de prévoir des systèmes de limitation de courant au démarrage (étoile/triangle, variateur de fréquence, ...).
- Le couple de démarrage est important (de l'ordre de 2,5 fois le couple nominal).
- Le couple est maximum pour un glissement de l'ordre de 30 %.

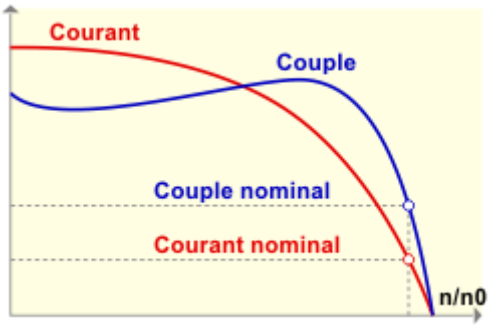


Fig 4.9 Caractéristiques d'un moteur asynchrone classique.

Une des caractéristiques importante du moteur asynchrone, est qu'il peut, dans certaines conditions, se transformer en générateur asynchrone. Lorsqu'une cabine d'ascenseur redescend en charge maximum, le moteur renvoie de l'énergie au réseau.

Les courbes suivantes montrent ce phénomène :

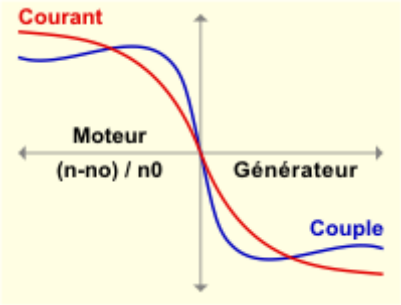


Fig 4.10 Fonction en moteur ou en générateur suivant le couple résistant.

c. La vitesse de rotation

Le pilotage de la vitesse de rotation du moteur asynchrone est essentiel pour beaucoup d'applications. La relation suivante permet de cerner quels sont les paramètres qui peuvent influencer la vitesse de rotation.

On a :

$$g = (n0 - n) / n0$$

Avec,

- g = glissement [%].
- n0 = vitesse du champ tournant [tr/min].
- n = la vitesse de rotation de l'arbre du moteur [tr/min].

Ou :

$$n = ((1 - g) \times (f \times 60)) / p$$

Avec,

- f x 60 = fréquence du réseau [Hz] multipliée par le nombre de secondes par minute.
- p = le nombre de paire de pôle.

On peut donc piloter la vitesse de rotation en intervenant sur :

- le nombre de paire de pôle (moteur à deux vitesses par exemple),
- le glissement du moteur (moteur à bague),
- la fréquence du réseau.

6.4 Pilotage en modifiant le nombre de pôles

Des anciennes installations (ex ; d'ascenseur) fonctionnent encore avec des moteurs à deux vitesses. La plupart du temps se sont des moteurs dont le rotor est composé de deux nombres différents de paires de pôles. Les enroulements sont disposés dans les encoches du stator d'une manière particulière qui en fait tout sa complexité. Les différents couplages par paire de pôles permettent d'obtenir différentes vitesses.

Un moteur bipolaire a une vitesse de rotation de 3 000 [tr/min], tandis qu'un quadripolaire tourne à 1 500 [tr/min] ou à 3 000 [tr/min]. Donc pour autant que l'on puisse réaliser des couplages différents sur des moteurs à deux nombres différents de paires de pôles, on obtient des vitesses différentes.

6.5 Régulation de fréquence

À l'heure actuelle, le pilotage de la vitesse des moteurs asynchrones se fait électroniquement grâce à des variateurs de vitesse. Pour cette raison, on ne parlera ici que du contrôle de la fréquence qui de loin la plus courante.

Sans perte de puissance, on peut piloter la vitesse de rotation du moteur en faisant varier la fréquence car la vitesse de rotation du champ tournant au niveau du stator change. Pour conserver le couple moteur (intéressant pour les ascenseurs), il faut que la tension du moteur se modifie avec la fréquence dans un rapport constant. En effet, le couple est lié à la fréquence, la tension et le courant par la formule suivante.

On a :

$$C \simeq (U/f) \times I$$

Avec,

- C = couple moteur [Nm].
- U = tension du réseau [V].
- I = courant absorbé par le moteur.

Si le rapport entre la tension et la fréquence reste constant, le couple le reste aussi.

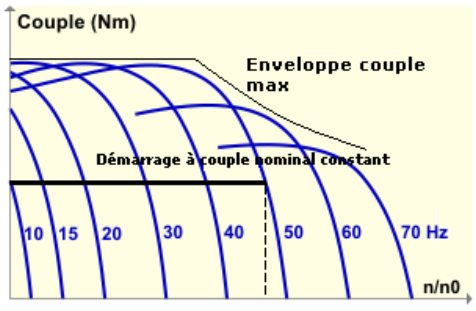


Fig 4.11 Pilotage en fréquence et en tension.

Le pilotage du moteur par un variateur de fréquence et de tension montre des intérêts certains; à savoir principalement :

- la limitation du courant de démarrage (de l'ordre de 1,5 fois le courant nominal);
- un coupe relativement constant quelle que soit la vitesse du moteur.

7. Le moteur universel

7.1 Le rotor ou induit

Il est identique à celui d'un moteur à courant continu, et est constitué d'un empilage de tôles au silicium, isolées les unes des autres par un vernis bakélisé. Le bobinage en circuit fermé est logé dans les rainures du rotor et soudé par chaque extrémité de ces sections aux lames de cuivre du collecteur.

7.2 Le stator ou inducteur

Est composé d'une carcasse en tôle d'aluminium ou en zamak, carcasse pourvue de deux épanouissements polaires en tôles empilées. Les deux bobines sont montées sur l'axe des pôles.

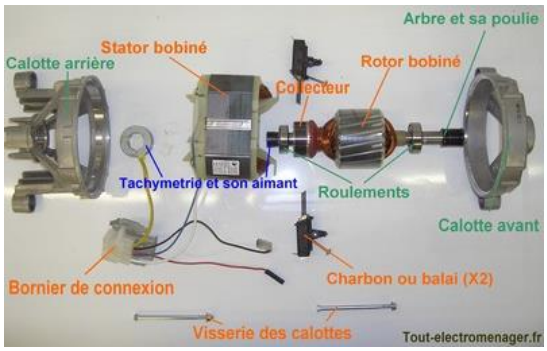


Fig4.12 Vue éclatée d'un moteur universel

7.3 Raccordement

L'inducteur et l'induit sont montés en série par l'intermédiaire des balais et du collecteur. C'est un moteur continu série.

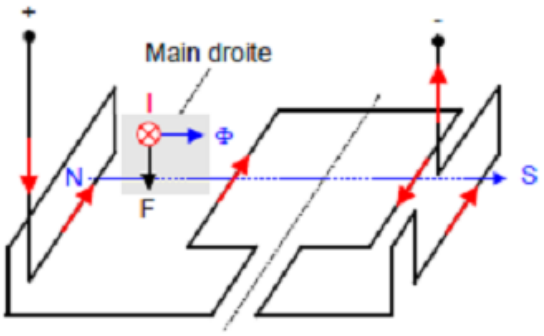
7.4 Caractéristiques

- Le démarrage est direct ;
- La vitesse est indépendante de la fréquence, elle peut atteindre 20 000 tr/min ;
- Vu la commutation et les étincelles au collecteur, la puissance est limitée ;
- Ils ont un bon couple de démarrage ;

- L'inversion de sens de marche se fait en inversant le sens du courant dans l'induit par rapport à celui de l'inducteur.

7.5 Utilisations

Ces moteurs conviennent pour entraîner des machines de petites tailles : aspirateur, moulin à café, foreuse portative, disqueuse, etc. Pour simplifier les idées, imaginons un moteur à trois spires, deux fixes pour les inducteurs et une qui peut tourner pour l'induit. Soit que l'on alimente le moteur en courant continu sur la figure ci-contre, on peut représenter le sens du courant par des croix et des points.



Par la règle du tire-bouchon on trouve le sens du champ magnétique et le sens de rotation de l'induit.

Si on inverse le sens du courant d'alimentation, le champ H et le courant I changent de sens, et le sens de rotation ne change pas.

Si on alimente le moteur en courant alternatif, le sens de rotation se maintient également, d'où le nom de moteur universel.

7.6 Réglage de la vitesse des moteurs universels

La vitesse d'un moteur universel comme celle d'un moteur à courant continu dépend de :

- De la tension d'alimentation,
- Du flux.

$$\eta = \frac{U - RI}{\phi}$$

7.7 Diagnostic de panne sur des machines équipées d'un moteur universel

A la mise sous tension, les fusibles fondent :

- Court-circuit du condensateur de déparasitage,
- Court-circuit des inducteurs,
- Court-circuit de l'induit.

Le moteur ne démarre pas :

- Rupture du cordon d'alimentation,
- Rupture des inducteurs,
- Rupture de l'induit,
- Balais usés.

Les balais crachent fortement ; un arc fait quelque fois le tour du collecteur.

- Rupture de l'induit (une ou plusieurs spires) ;
- Balais de mauvaise qualité ou bien cassés ou ayant trop de jeu dans le porte-balais.

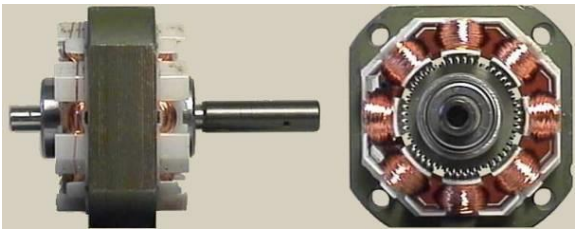
8. Moteur pas à pas

8.1 Généralités

Un moteur pas à pas est une machine tournante dont le rotor se déplace d'un angle élémentaire, α_p appelé pas, lors de chaque commutation du circuit de commande. La commande de moteur peut se faire en boucle ouverte car la position du rotor est connue à tous moments.

On peut définir la résolution ou le nombre de pas par tour Np

Résolution $\boxed{N_p = \frac{360}{\alpha_p}}$ Pas en degré



Les moteurs pas à pas comprennent un stator portant des bobines commutées en courant par une électronique de commande. Par contre, il existe trois technologies pour le rotor ce qui donne trois familles de moteur :

8.2 Moteur à aimant permanent;

Le rotor est à aimant permanent (ferrite à champ coercitif élevé) et s'aligne sur le champ magnétique créé par les bobines du stator.

8.3 Moteur à réluctance variable;

Le rotor ne comporte pas d'aimant, mais un noyau enfer doux et denté qui possède la propriété de canaliser les lignes de champ. La propriété physique utilisée est la force d'attraction entre un aimant et un métal ferreux.

8.4 Moteur hybride ;

Le moteur hybride est une combinaison des deux types de moteurs précédents. Le rotor est constitué d'aimants dentés ce qui donne un fort couple et un nombre de pas par tour élevé.

L'alimentation des bobines peut se faire soit avec une tension unique soit avec deux tensions symétriques :

- moteur unipolaire (bobines à point milieu, une seule tension);
- moteur bipolaire (pas de point milieu donc deux tensions symétriques).

9. Branchement des moteurs triphasés

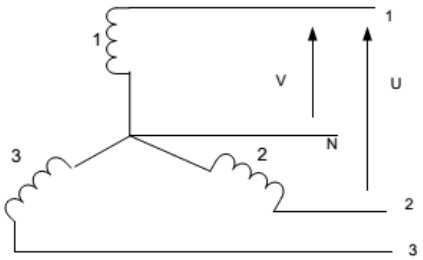
Afin d'adopter électriquement un moteur (et éviter de le griller !!) par rapport à l'alimentation électrique distribuée sur le réseau, il est *IMPERATIF* de coupler les enroulements du moteur.

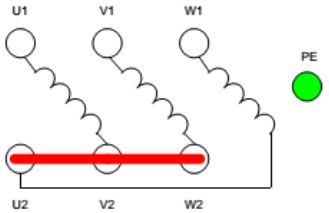
9.1 Groupement des enroulements

Les enroulements sont groupés de 2 façons différentes

a. Le couplage étoile

Il permet d'avoir nos trois phases + le neutre donc :
Les trois tensions simples et les trois tensions composées

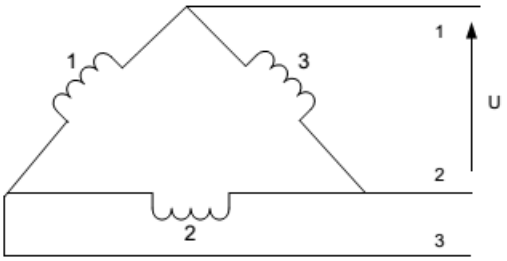


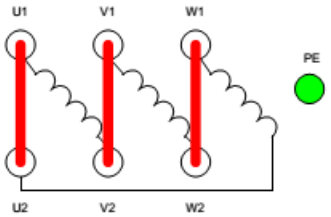


Le couplage étoile sera réalisé lorsque la tension 3~ du réseau sera identique à celle supportée par 2 enrouements

b. Le couplage triangle

Le montage comporte les trois tensions composées





Le couplage triangle sera réalisé lorsque la tension 3~ du réseau sera identique à celle supportée par un enrouement

On fait le couplage des moteurs asynchrones en fonction des caractéristiques du réseau et du moteur.

- Plaque signalétique → Moteur 230/400V (Δ/Y)
  → Tension supportée par enroulement

  Par exemple le réseau 230/400V ; tension supportée par enroulement est 230V, donc couplage Y.
  Si le réseau est 127/230V ;
  → Insuffisante ⟹ Couplage Δ

- Moteur 380/660v
  Réseau 220/380V
  Tension simple ← Tension composée

- Si la tension supporter par enroulement représente la tension simple du réseau, le couplage étoile Y,
- Si elle représente la tension composée, le couplage triangle Δ