



Entraînements à vitesse variable des machines électriques

I- Généralités :

La commande des machines électriques est l'une des applications des convertisseurs statiques. Cette commande nécessite l'association d'une machine (courant continu, synchrones, asynchrones ou autres) dont le fonctionnement est à une vitesse variable en lui conservant un couple optimum, à un convertisseur statique (redresseur, hacheur, gradateur, onduleur).

En fait, le choix du moteur d'entraînement dépend du travail demandé, du lieu de travail et de la puissance à fournir. De même, la source d'énergie dont on dispose, les contraintes sur les paramètres que l'on doit fournir et le prix de revient de l'ensemble déterminent le type du convertisseur à associer au moteur.

Alors, on ambitionne d'étudier et d'analyser les possibilités d'association de convertisseur en vue de la commande. L'apport des convertisseurs statiques tel que la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants des axes couple vitesse, la solution des problèmes de démarrage et la possibilité de régulation et de contrôle à distance.

II- Avantages d'un entraînement :

Dans un entraînement de ce type, on ne fait pas varier la vitesse du moteur et de la machine entraînée par action sur les pertes d'énergie dans le circuit électrique d'alimentation, dans le moteur ou dans la charge mais on convertit l'énergie électrique fournie au moteur pour que celui-ci fournisse avec le minimum de pertes les caractéristiques mécaniques demandées par le processus. Outre les économies d'énergie, cette technique offre des avantages supplémentaires qui peuvent être déterminants dans le dimensionnement d'une installation.

☞ Pour ce qui concerne le réseau d'alimentation, nous pouvons citer :

- La suppression des fortes surintensités du courant appelé par le moteur alternatif au démarrage.
- La diminution de la puissance du système d'alimentation.

☞ Pour ce qui concerne le moteur, la technique d'entraînement à vitesse variable permet d'allonger sa durée de vie grâce à la diminution des contraintes qui lui sont appliquées.

☞ Pour ce qui concerne la charge entraînée, nous pouvons citer la possibilité de régler le couple et la vitesse en tout point du plan effort-vitesse. Cet avantage provient des qualités de souplesse, de flexibilité, de précision et de rapidité attachées aux régulations du système.

III- Éléments d'un entraînement :

Dans un variateur de vitesse on trouve :

- Une machine électrique : moteur à courant continu, moteur asynchrone, moteur synchrone...
- Alimentation électronique (convertisseur statique) à partir d'une source d'alimentation : Redresseur, hacheur, onduleur, gradateur.
- Des capteurs : de vitesse, de position, de niveau...
- Une régulation

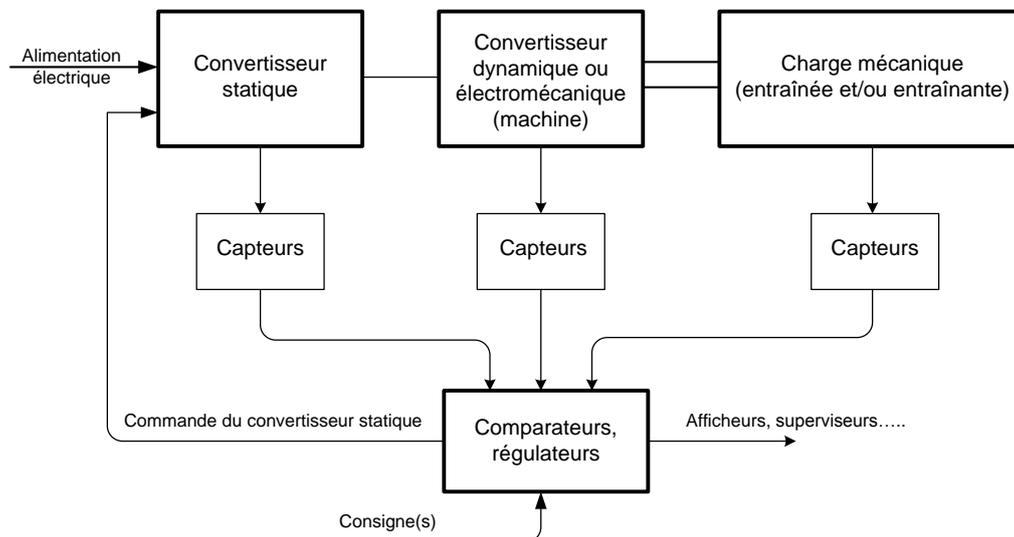


Figure 1 : Synoptique de la commande d'une machine électrique

IV- Plan couple vitesse :

1- Description :

Les caractéristiques des entraînements sont décrites dans le plan couple-vitesse $\Gamma = f(\Omega)$, c'est-à-dire on porte sur un digramme le couple électromagnétique Γ_{em} de la machine en fonction de la vitesse de rotation Ω .

Vue que ces grandeurs (couples et vitesse) sont algébriques, on choisit un sens positif de manière que le produit du couple électromagnétique par la vitesse (la puissance fournie par la machine) donne un fonctionnement en moteur dans le quadrant I et donc aussi dans le quadrant III. Lors que les quadrants II et IV correspondent à une puissance reçue par la

machine. Elle fonctionne alors en frein pour la charge (exp : machine asynchrone tournant en sens inverse du champ tournant). Elle peut aussi renvoyer l'énergie au réseau.

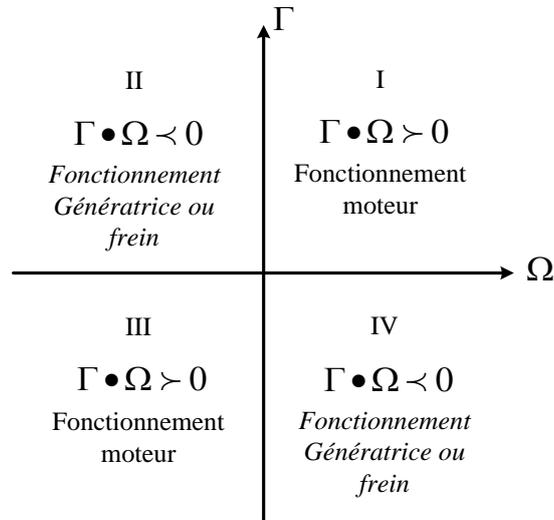


Figure 2 : caractéristiques $\Gamma = f(\Omega)$

2- Utilisation et point de fonctionnement:

Dans le diagramme couple vitesse, on trace :

- Les lieux de fonctionnement de la machine sous certaines conditions.
- La caractéristique électromécanique de la charge.
- Les limites de fonctionnement.

Le point d'intersection de la caractéristique de la charge donne le point de fonctionnement en régime établi puisque le 1^{er} principe de la dynamique en rotation :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \sum \Gamma = \Gamma_{em} - \Gamma_r .$$

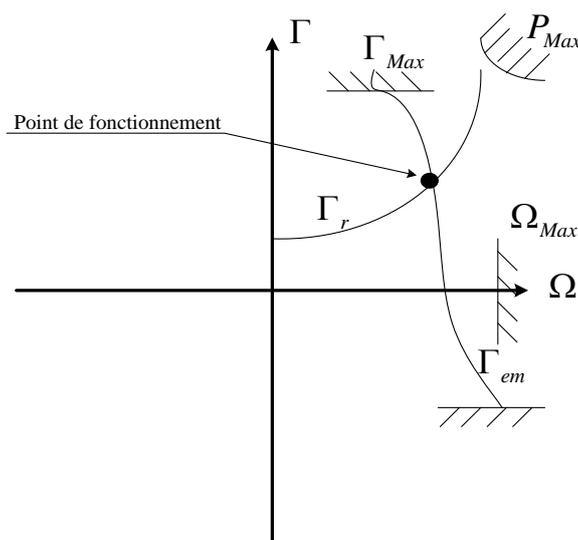


Figure 3 : point et limites de fonctionnement

☞ Faire de la variation de vitesse, c'est modifier le point de fonctionnement, donc à courbe de couple résistant donné Γ_r , c'est agir sur la courbe $\Gamma_{em} = f(\Omega)$ de la machine électrique.

3- Stabilité du point de fonctionnement :

L'étape le plus essentiel c'est de déterminer est-ce que le point de fonctionnement trouvé est stable ou instable, on parle alors d'équilibres stable et instable.

Alors que, pour que le point de fonctionnement soit stable, il faut et il suffit que :

La pente du couple résistant par rapport à la vitesse soit plus grande que la pente du couple moteur par rapport à la vitesse. A une augmentation de la vitesse correspondra alors $J \frac{d\Omega}{dt} < 0$, donc une diminution de la vitesse de rotation et un retour à l'équilibre.

V- Mode de fonctionnement :

Le diagramme du couple électromagnétique Γ_{em} de la machine en fonction de la vitesse de rotation Ω , montre l'existence de quatre quadrants. Alors ce sont les convertisseurs d'alimentation qui limitent le nombre de quadrants utilisables par la machine selon la nature de l'entraînement. Soient les fonctionnements 1,2 ou 4 quadrants.

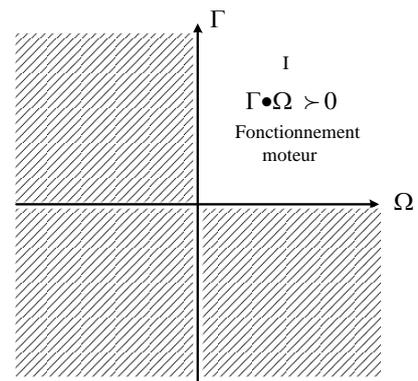
1- Modes de fonctionnement 1 quadrant (non réversible)

a- Modes de fonctionnement 1 quadrant moteur

Dans ce mode de fonctionnement, on peut contrôler l'accélération mais non le ralentissement, qui ne peut être lieu que par dissipation de l'énergie cinétique de rotation dans la charge.

Ce type de variateur utilise un convertisseur non réversible.

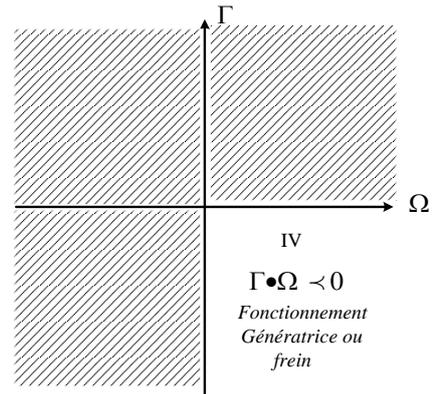
Application : perceuse électrique à variateur, aspirateur, pompage....



b- Modes de fonctionnement 1 quadrant générateur

Seul le fonctionnement en génératrice est possible. La machine ne peut démarrer de manière électrique, elle doit être entraînée par le côté mécanique depuis la vitesse nulle.

Application : Eolienne (si génératrice utilisée en vitesse variable : machine asynchrone à double alimentation ou alternateur)....

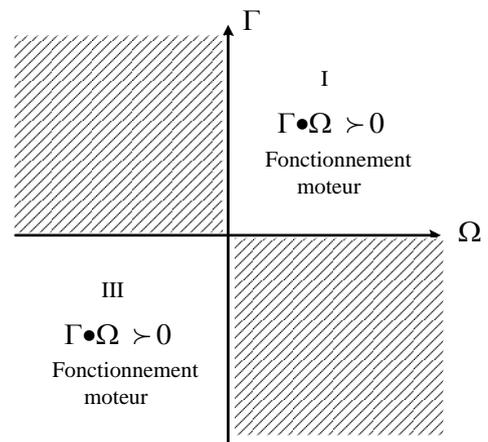


2- Modes de fonctionnement 2 quadrants

a- Mode de fonctionnement 2 quadrants I+III (non réversible)

Ce type de variateur utilise un convertisseur non réversible, sachant qu'il garantit une inversion du couple et de la vitesse tout en passant par l'état d'arrêt.

Application : visseuse-dévisseuse, lève-vitre électrique et réglage de rétroviseur d'automobile...

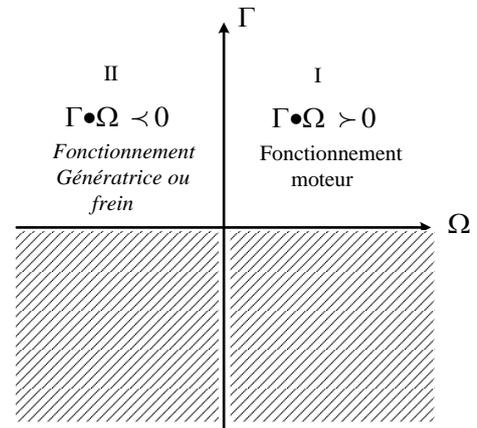


b- Mode de fonctionnement 2 quadrants I+II (réversible, type treuil ou lavage)

Ce type de variateur utilise un convertisseur réversible 2 quadrants.

A l'arrêt, le couple résistant peut ne pas être nul (exp : machine à courant continu alimentée à flux et courant unidirectionnel mais avec inversion de tension d'induit).

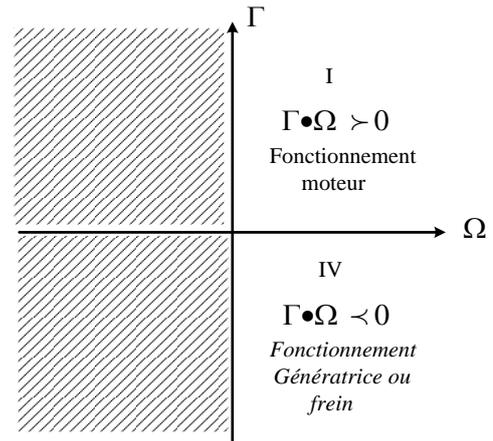
Application : treuil, levage...



c- Mode de fonctionnement 2 quadrants I+IV (réversible, type laminoir)

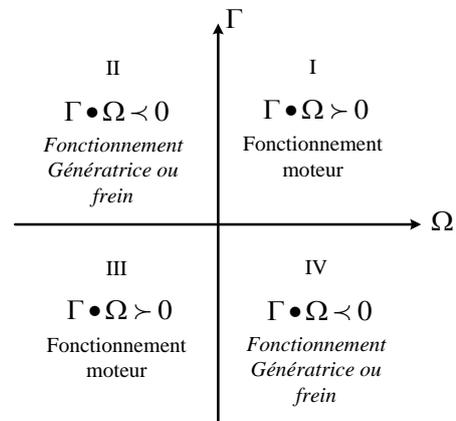
Ce type de fonctionnement correspond par exemple à l'entraînement d'un véhicule. Il faut pouvoir accélérer le véhicule puis le freiner électriquement. (ex : machine à courant continu alimentée à flux à tension unidirectionnel, le courant d'induit s'inversant comme le couple)

Applications : scooter électrique laminoir...



3- Modes de fonctionnement 4 quadrants (réversible)

Le variateur sait gérer des accélérations et décélérations, ainsi que des freinages dans toutes les situations disponibles.





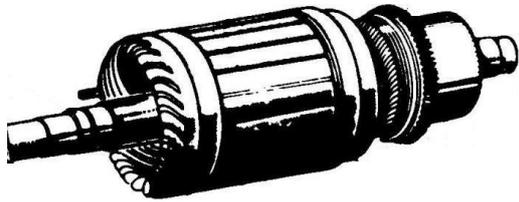
Variation de vitesse des machines à courant continu

I- Présentation de la machine à courant continu

1- Vue d'ensemble (d'après LEROY SOMMER)

La machine comporte deux parties principales :

- une partie fixe : le STATOR qui porte l'inducteur
- une partie mobile : le ROTOR qui porte l'induit



Rotor



Stator

La machine à courant continu est totalement réversible : elle peut fonctionner indifféremment en moteur ou en génératrice.

2- Les différents types de moteurs à courant continu

☞ Moteur à excitation séparée : l'induit et l'inducteur sont alimentés par des sources séparées

☞ Moteur à excitation série : l'induit et l'inducteur sont alimentés par la même source de tension. Ce type de moteur présente un très fort couple au démarrage, il reste encore utilisé dans certaines applications de traction électrique.

3- Equations de fonctionnement du moteur à courant continu (rappel)

$$U = E' + R.I$$

$$E' = K.\Omega.\phi$$

$$\Omega = \frac{U - R.I}{K.\phi}$$

$$T = K.\phi.I$$

Avec : E' : force contre-électromotrice (V)

U : tension d'alimentation de l'induit (V)

R : résistance de l'induit (Ω)

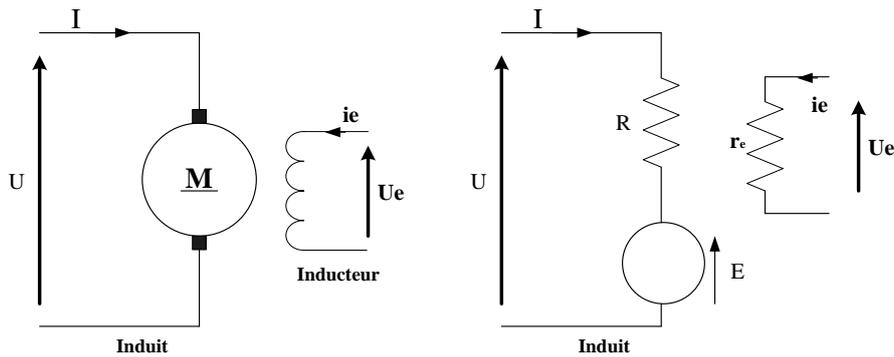
I : courant absorbé par l'induit (A)

ϕ : flux créé par l'inducteur (Weber)

T : couple moteur (Nm)

K est une constante de fabrication du moteur

4- Modélisation (moteur à excitation séparée)



Remarque :

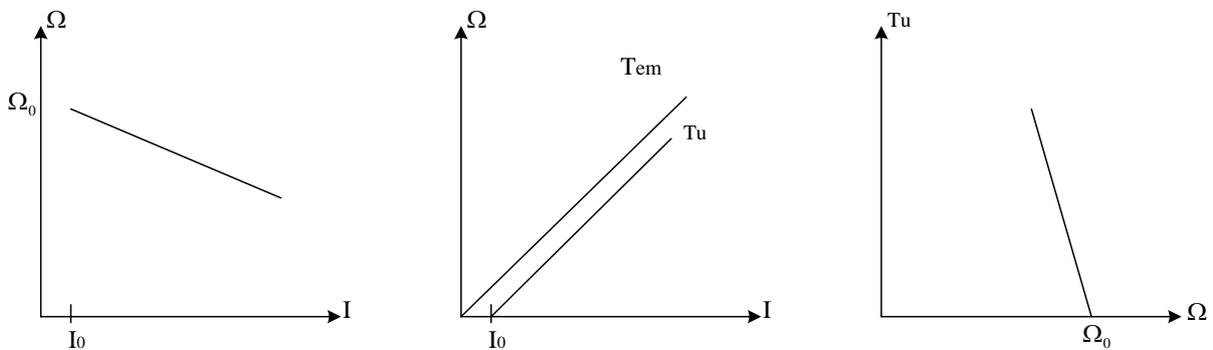
U et I sont de même signe en fonctionnement moteur et en convention récepteur.

II- Caractéristiques électromécaniques

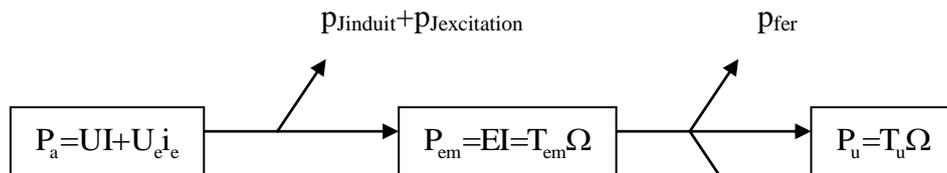
$$T_{em} = K\phi I$$

Des relations $E = K\phi\Omega$ et $U = E + RI$ on tire $\Omega = \frac{U - RI}{K\phi}$

A flux ϕ constant (courant d'excitation i_e constant ou aimants permanents) on obtient :



III- Rendement



$p_{Jinduit}$ = pertes Joules de l'induit = RI^2

$p_{Jexcitation}$ = pertes Joules du circuit d'excitation = $U_e i_e = r_e i_e^2$

p_{fer} =pertes fer (hystérésis et courants de Foucault) surtout localisées au rotor. Les pertes fer dépendent de la fréquence de rotation et de l'amplitude du flux.

$p_{méca}$ =pertes mécaniques (frottements fluides et solides). Les pertes mécaniques dépendent de la vitesse de rotation du moteur.

Le couple de pertes T_p est associé aux pertes fer et mécaniques : $T_p = \frac{P_{fer} + P_{méca}}{\Omega} = T_{em} - T_u$

$$\eta_{moteur} = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - \sum \text{pertes}}{P_a}$$

Mesure du rendement :

☞ Directe : on mesure P_a (facile) et P_u (capteur de couple et de vitesse)

☞ Indirecte :

Essai à vide : on mesure au niveau de l'induit $P_{a0} = P_{J0} + p_{fer} + p_{méca} = RI_0^2 + p_{fer} + p_{méca} \rightarrow$

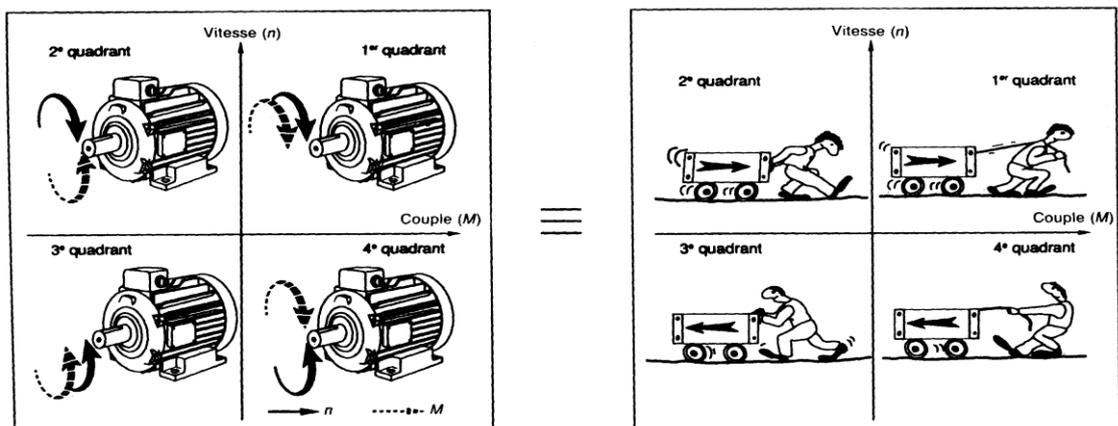
$$p_{fer} + p_{méca} = P_{a0} - P_{J0}$$

Si l'essai à vide est réalisé à vitesse nominale et sous excitation nominale, les pertes fer et les pertes mécaniques déduites de cet essai seront identiques lors du fonctionnement nominal. Une condition suffisante à ces critères est l'égalité de la f.e.m à vide avec la f.e.m en charge, ce qui nécessite une tension d'alimentation à vide U_0 telle que $U_0 - RI_0 = U - RI$.

La mesure de R (induit) est réalisée lors d'un essai à rotor bloqué par la méthode voltampèremétrique.

IV-Quadrants de fonctionnement

La machine à courant continu est complètement réversible. Les relations $E = K_1 \phi \Omega$ et $T_{em} = K_2 \phi I$ sont des relations algébriques. A flux constant et en convention récepteur, on obtient :



V- Variation de vitesse

1- Par action sur le courant d'excitation

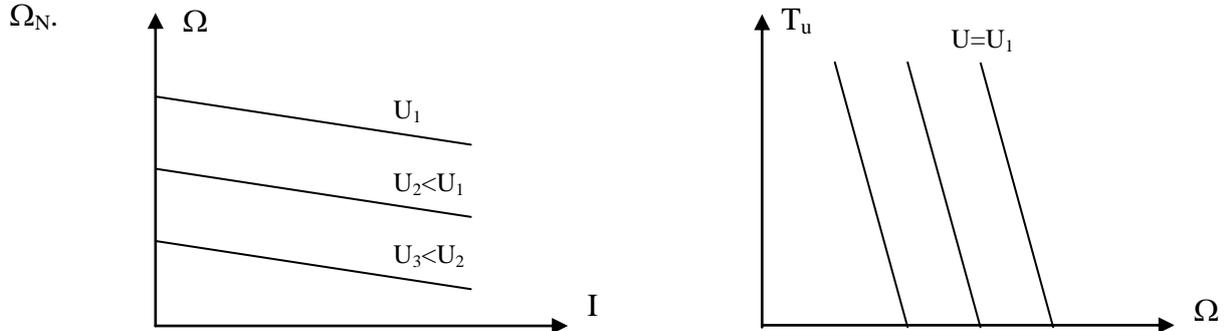
A tension U constante, la vitesse du moteur est inversement proportionnelle au flux et donc au courant d'excitation (i_e). L'action sur le courant d'excitation permet donc essentiellement d'accroître la vitesse à partir du point de fonctionnement nominal jusqu'à la vitesse maximale supportable par le moteur.

2- Par action sur la tension d'alimentation

A flux constant, la vitesse du moteur est quasiment proportionnelle à U :

$$\Omega = \frac{U - RI}{K\phi} \approx \frac{U}{K\phi}$$

L'alimentation de l'induit par l'intermédiaire d'un pont redresseur commandé ou d'un hacheur permet donc de faire varier continuellement la vitesse de 0 jusqu'à Ω_N .

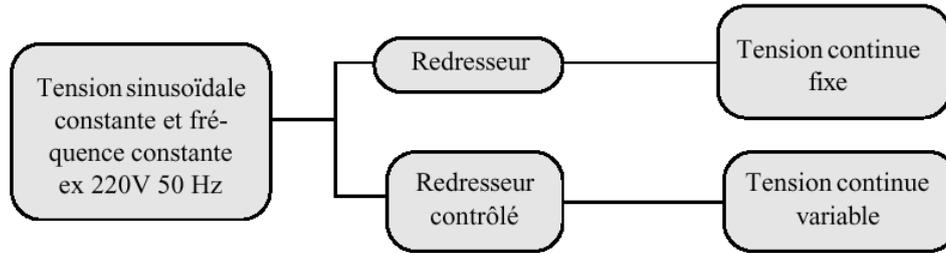


VI- Les dispositifs électroniques utilisés pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu

Pour obtenir une tension continue variable, il existe 2 possibilités :

- Partir d'une tension continue fixe et utiliser un hacheur
- Partir d'une tension alternative sinusoïdale et utiliser un redresseur

Redresseur contrôlé à tension variable		Fournit à partir d'un réseau alternatif monophasé ou triphasé, une tension redressée de valeur moyenne variable
Hacheur		Fournit à partir d'une source de tension continue fixe, une source de tension « continue » dont on contrôle la valeur moyenne.

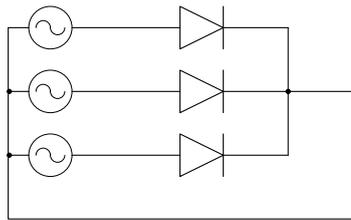


1- La conversion Alternatif – Continu

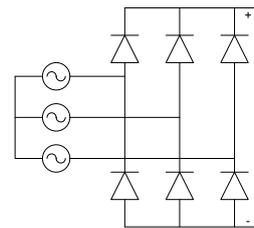
1.1. Les différents redresseurs

1.1.1. Les redresseurs non commandés :

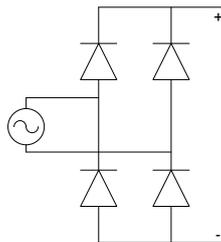
Ces ponts ne délivrent qu'une tension de sortie fixe, et ne seront donc pas utilisés pour faire la variation de vitesse pour les MCC. Ces redresseurs ne sont composés que de diodes.



Le pont simple triphasé PS3



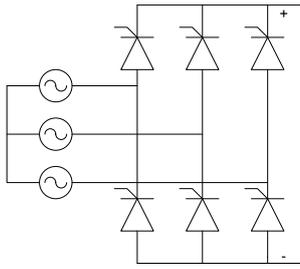
Le pont double triphasé PD3



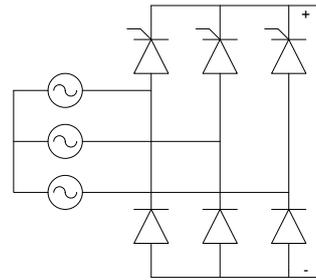
Le pont double monophasé PD2

1.1.2. Les redresseurs commandés

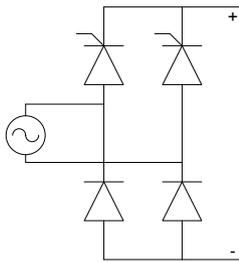
Ces redresseurs permettent de faire varier la tension efficace avec, soit des diodes et des thyristors, soit seulement des thyristors.



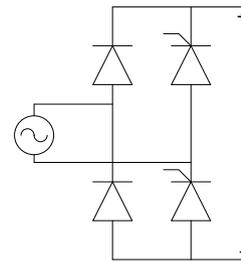
Le pont tout thyristor triphasé PT3



Le pont mixte triphasé PM3



Le pont mixte symétrique monophasé



Le pont mixte asymétrique monophasé

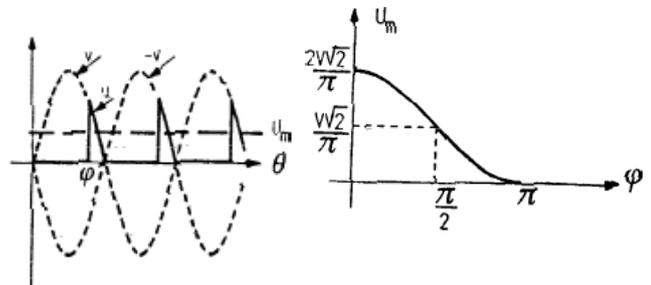
1.2. La variation de tension sur un pont mixte monophasé asymétrique

Les deux diodes assurent la diode de roue libre. La tension aux bornes du moteur est nulle quand elles entrent en conduction.

Valeur moyenne de la tension :

Si φ augmente U_m diminue donc n diminue

$$U_m = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \varphi).$$



1.3. Les ponts tout thyristor

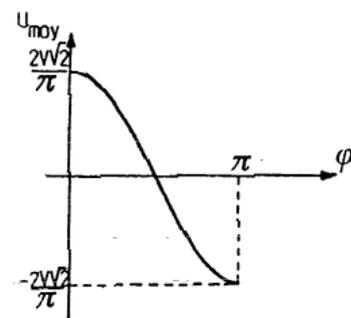
Il n'y a plus de diode de roue libre. La conduction des thyristors se poursuit tant que le courant ne s'annule pas, bien que la tension de sortie soit négative.

Si φ augmente U_m diminue donc n diminue

Si φ diminue U_m augmente donc n augmente

Si on augmente l'angle de retard à l'amorçage au-delà de 90° , le signe de la tension redressée s'inverse et l'on passe d'un montage redresseur à un onduleur assisté.

- $\varphi < 90^\circ$ fonctionnement en moteur



- $\varphi = 90$ le moteur est arrêté mais il peut fournir un couple (maintient d'une charge)
- $\varphi > 90^\circ$ Fonctionnement en générateur

Un onduleur est un système qui permet de transformer un courant continu en courant alternatif. On le dit assisté lorsqu'il a besoin de la présence de la tension du réseau pour fonctionner. Il fournit de l'énergie active au réseau, mais il absorbe de l'énergie réactive.

1.4. Les ponts unidirectionnels – bidirectionnels

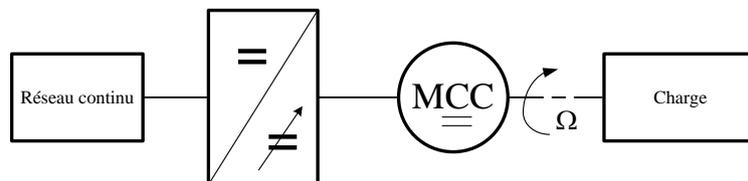
Avec tous les ponts que l'on a vus précédemment, on a changé la tension, le signe de la tension (changement de la vitesse et inversion du sens de la rotation du moteur). Par contre, le courant, donc le couple est toujours du même signe, de ce fait, on n'a pas modifié le signe du couple.

2- La conversion Continu – Continu

Si le réseau disponible est un réseau continu, alors le convertisseur statique qu'on associe à la machine à courant continu ne peut être qu'un hacheur. Cette commande est réalisable soit par action sur la tension d'induit soit par action sur le flux.

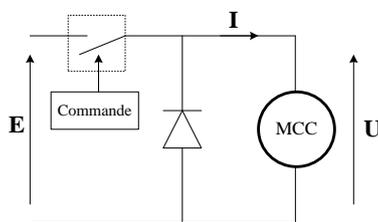
Sachant que le réseau continu provient soit :

- Soit de batteries.
- Soit d'un redresseur à diode.

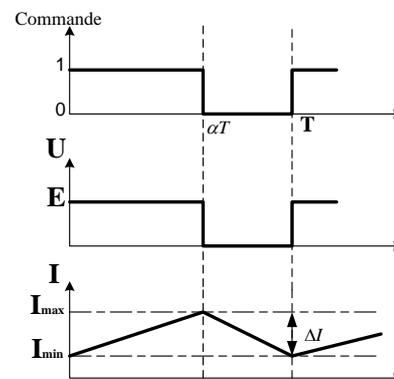


Synoptique d'un moto variateur à hacheur (en B.O)

☞ Principe du hacheur



La figure ci-dessus présente le schéma de principe d'un hacheur. Il comporte un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (transistor bipolaire, IGBT,...) et un interrupteur à amorçage naturel (diode).



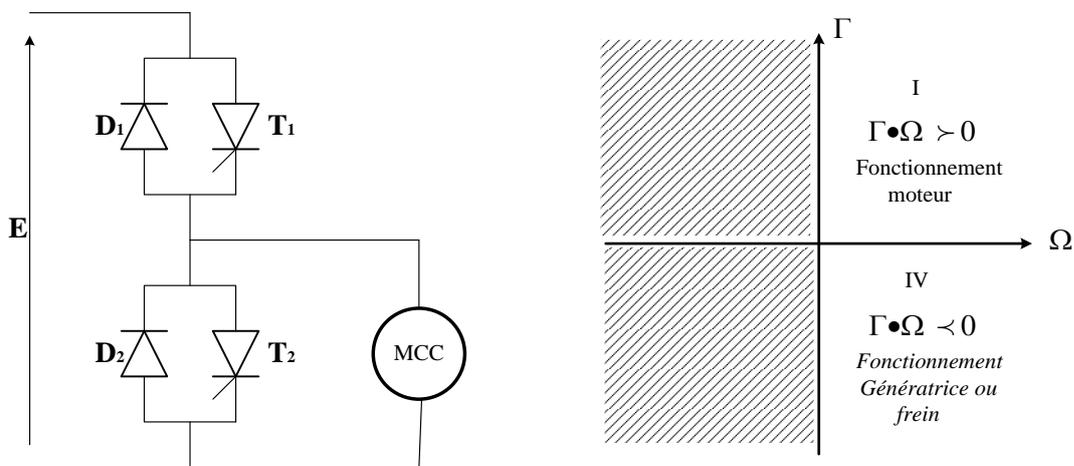
La tension moyenne de sortie est peut être inférieure ou supérieure à la tension d'entrée.

Avec ce type de hacheur on peut travailler dans un quadrant (1) ou 2 quadrants (1 et 4) suivant la réversibilité en courant de l'interrupteur statique et de la source.

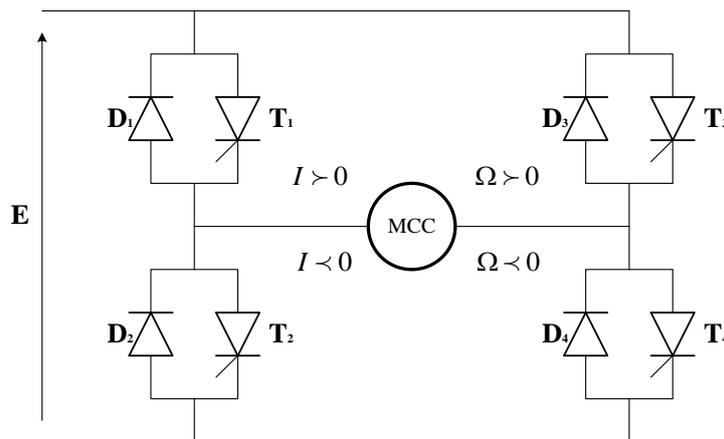
☞ **Réversibilité**

L'association d'un hacheur série et d'un autre parallèle permet le fonctionnement dans deux cadrons :

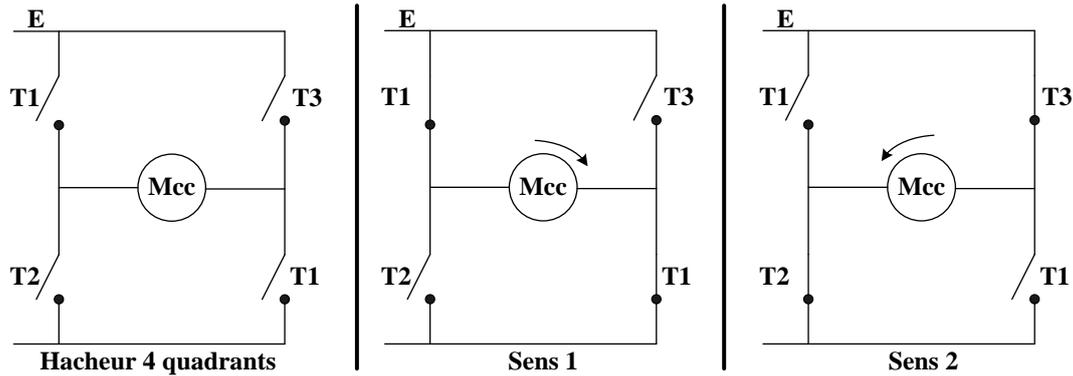
- Tension constante
- Courant bidirectionnel dans la machine



Dans de nombreux systèmes, il est nécessaire de pouvoir commander le sens de rotation ainsi que la vitesse d'un moteur à courant continu



Principe :



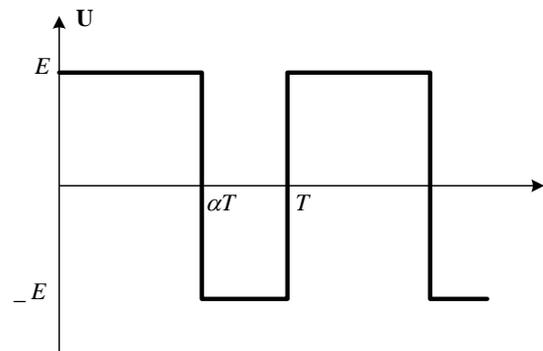
Changement du sens de rotation : principe général :

4 thyristor, symbolisés ici par des interrupteurs T1, T2, T3 et T4, sont montés en pont et permettent de commander le sens de rotation du moteur : Lorsque T1 et T4 sont fermés (saturés), le moteur tourne dans un sens (sens 1) . Lorsque T2 et T3 sont fermés, le moteur va tourner dans l'autre sens (sens 2).

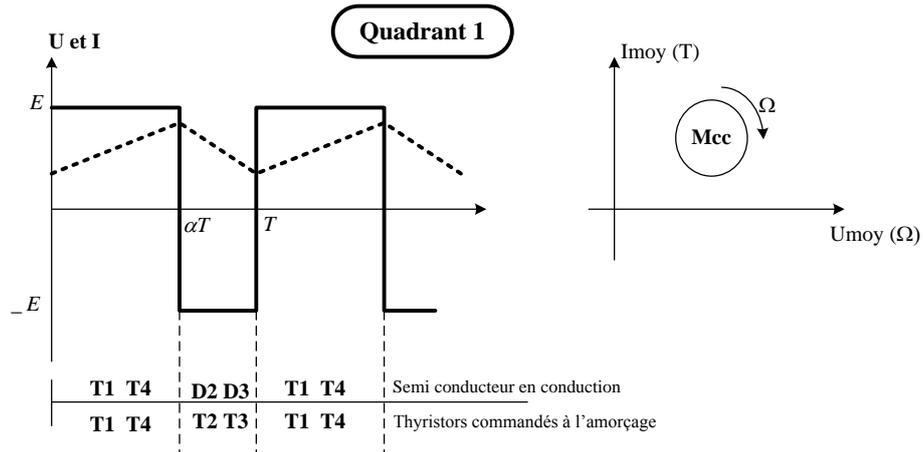
Principe de la variation de vitesse et fonctionnement dans les 4 quadrants :

En jouant sur la fréquence de commutation des thyristors, il est possible de faire varier la vitesse de rotation du moteur en limitant plus où moins la puissance fournie au moteur.

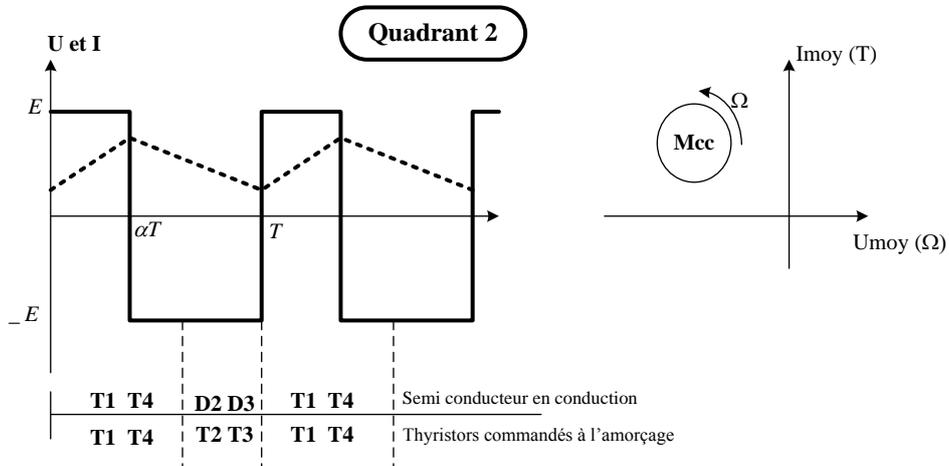
La commande des interrupteurs est du type complémentaire : Les thyristors T1, T4 d'une part et T2, T3 d'autre part reçoivent des signaux de commande identiques : au cours d'une période de fonctionnement, lorsque T1 et T4 sont commandés à l'amorçage, T2 et T4 sont commandés au blocage et inversement.



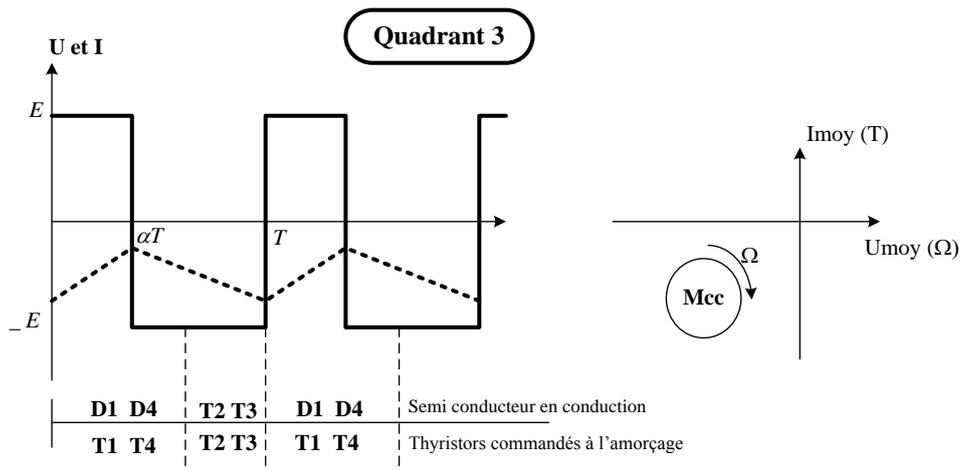
Sur le schéma ci-dessus, T1 et T4 sont commandés pendant le temps αT et les transistors T2, T3 sont commandés pendant le temps $(T - \alpha T)$ [$0 \leq \alpha \leq 1$]. On constate naturellement que la tension U aux bornes du moteur s'inverse :



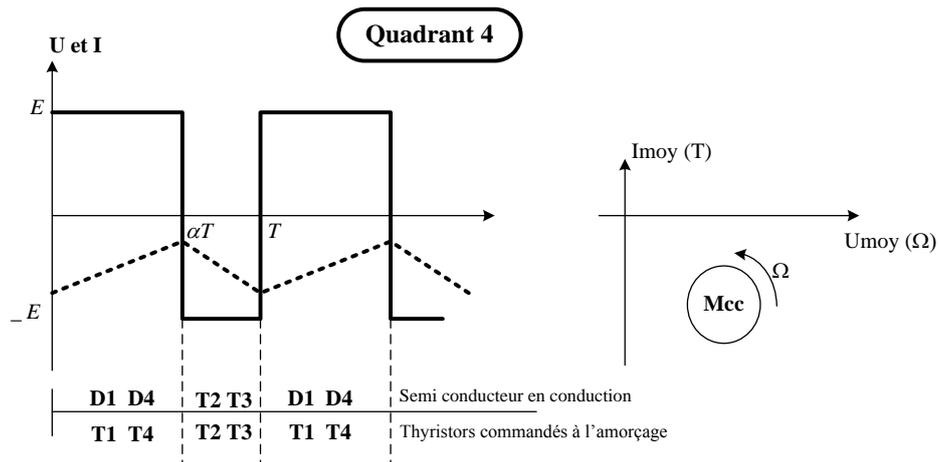
$Umoy > 0$ et $Imoy < 0 \Rightarrow P > 0$ d'où fonctionnement moteur



$Umoy < 0$ et $Imoy > 0 \Rightarrow P < 0$ d'où fonctionnement Générateur



$Umoy < 0$ et $Imoy < 0 \Rightarrow P > 0$ d'où fonctionnement moteur



$Umoy > 0$ et $Imoy < 0 \Rightarrow P < 0$ d'où fonctionnement Générateur

Remarque :

Composant de base du hacheur :

- Transistor bipolaire,
- Transistor MOS,
- Transistor IGBT,
- Thyristor.



Régulation de la vitesse des machines a courant continu

I. Introduction :

L'association du convertisseur à la machine à courant continu permet le réglage de la vitesse ou la position. Mais cette commande est élaborée sans l'aide de la connaissance des grandeurs de sortie. Au niveau des inconvénients, il n'y a aucun moyen de contrôler, à plus forte raison de compenser les erreurs, les dérives, les accidents qui peuvent intervenir à l'intérieur de la boucle, autrement dit, il n'y a pas de précision ni surtout de fidélité qui dépendent de la qualité intrinsèque des composants. Enfin, ce type de commande ne compense pas les signaux de perturbation. C'est pour cela on dit qu'il s'agit d'un système en boucle ouverte. Le schéma bloc de système en boucle ouverte est donné par la **figure 1** :

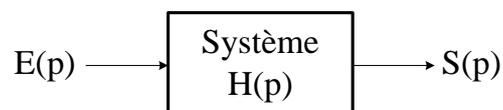


Figure. 1 : Schéma bloc d'un système en boucle ouverte

E : grandeur réglant (consigne)

S : grandeur réglée

$$H(p) = \frac{S(p)}{E(p)}$$

Alors que la commande en boucle fermée (contre réaction) est capable de stabiliser un système instable en boucle ouverte. Dans une régulation en boucle fermée, une bonne partie des facteurs perturbateurs externes sont automatiquement compensés par la contre-réaction à travers le procédé.

L'utilisation du retour d'information est le principe fondamental en automatique. La commande appliquée au système est élaborée en fonction de la consigne et de la sortie. La **figure 2** représente le principe de retour unitaire.

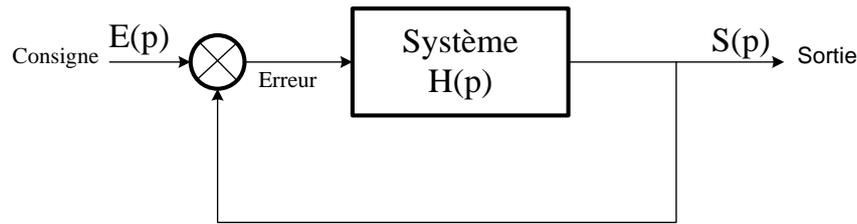


Figure. 2 : Schéma bloc d'un système en boucle fermée avec un retour unitaire

D'après la figure ci-dessus et selon Black, le comportement du processus est décrit par la

$$\text{relation : } G(p) = \frac{H(p)}{1 + H(p)}$$

E : grandeur réglante (consigne)

S : grandeur réglée

ε : erreur = E (p) – S (p)

II. Régulation de vitesse de moteur à courant continu.

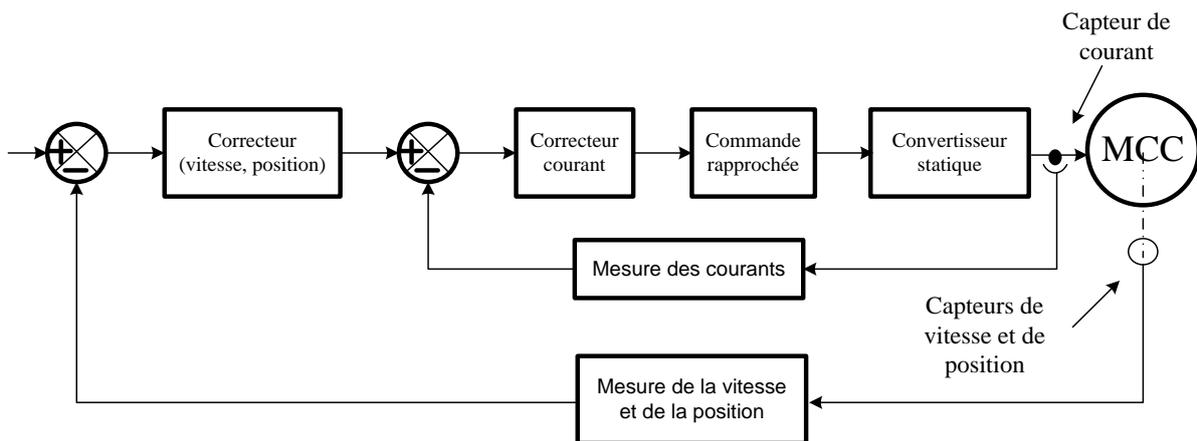


Figure. 3 : Schéma synoptique de la régulation d'un moteur à courant continu

La figure 3 donne la structure générale la plus fréquente. C'est celle d'un variateur de vitesse à deux boucles en cascade. On y distingue les deux organes de puissance (le moteur et le convertisseur statique avec son électronique de commande), les deux capteurs (courant et vitesse) et les deux régulateurs (de courant et de vitesse).

Dans cette structure, la tension de sortie du régulateur de vitesse (correcteur vitesse et position) sert de référence au régulateur de courant. C'est l'image du courant (donc du couple) désiré.

1. Modélisation d'un moteur à courant continu : (schéma fonctionnel)

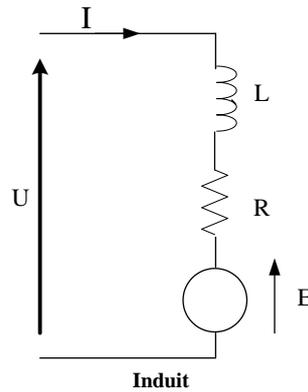


Figure. 3 : Schéma équivalent d'un moteur à courant continu

On note :

R : La résistance interne de l'induit du moteur à courant continu.

L : L'inductance interne de l'induit du moteur à courant continu,

E : La f.c.e.m. du moteur

J : Le moment d'inertie ramené à l'arbre du moteur.

f : Le coefficient de frottement visqueux (Le couple de frottement est proportionnel à Ω).

T_m : Le couple moteur.

T_r : Le couple résistant

D'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, On peut écrire les équations différentielles de premiers ordres suivantes :

$$U = E + RI_a + L \frac{dI_a}{dt} \quad (1)$$

Avec : $E = K\phi\Omega$

On passe en Laplace on obtient :

$$U - E = (R + Lp) I_a(p) \quad (2)$$

D'après le principe fondamental de la dynamique on a :

$$T_m - T_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f.\Omega \quad (3)$$

Avec : $T_m = K\phi I_a$

On passe en Laplace on obtient :

$$(T_m - T_r) = (Jp + f)\Omega(p) \quad (4)$$

☞ Pour $T_r = 0$, obtient on a :

$$U(p) = K\phi\Omega(p) + (P + Lp) \frac{T_m}{K\phi} \quad (5)$$

Sachant que : $T_m = (Jp + f)\Omega(p)$

$$D'où : U(p) = \Omega(p) \left[K\phi + \left(\frac{R + Lp}{K\phi} \right) (Jp + f) \right] \quad (6)$$

Soit T(p) la fonction de transfert : $T(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{1}{K\phi + \left(\frac{R + Lp}{K\phi} \right) (Jp + f)}$

$$T(p) = \frac{K\phi}{(K\phi)^2 + (R + Lp)(Jp + f)}$$

$$T(p) = \frac{K\phi}{JLp^2 + (RJ + Lf)p + Rf + (K\phi)^2} \quad (7)$$

La tension de sortie du redresseur est :

$$U = U_{co} \cos \psi \quad (8)$$

$$\cos \psi = \frac{U}{U_{co}} \quad (9)$$

La tension u_c est l'image de la vitesse souhaitée, soit alors :

$$u_c = k \cos \psi \quad (10)$$

$$\cos \psi = \frac{u_c}{k} \quad (11)$$

Des expressions (9) et (11) :

$$U = U_{co} \frac{u_c}{k} = K' u_c \quad (12)$$

D'où :

$$\frac{\Omega(p)}{u_c} = \frac{K' K\phi}{JLp^2 + (RJ + Lf)p + Rf + (K\phi)^2} \quad (13)$$

Soit alors :

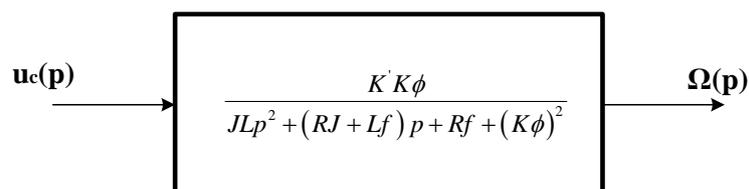


Figure. 5 : Schéma bloc de la fonction de transfert (moteur+ redresseur)

Alors le réglage de la vitesse de rotation Ω se fait par variation de la tension aux bornes de l'induit

D'où le schéma fonctionnel de la commande en boucle ouvert d'une machine à courant continu :

$$I_a(p) = \frac{U - E}{Lp + R} ; \quad T_m = K\phi I_a(p) ; \quad E = K\phi\Omega(p) \quad \text{et} \quad \Omega(p) = \frac{T_m - T_r}{Jp + f}$$

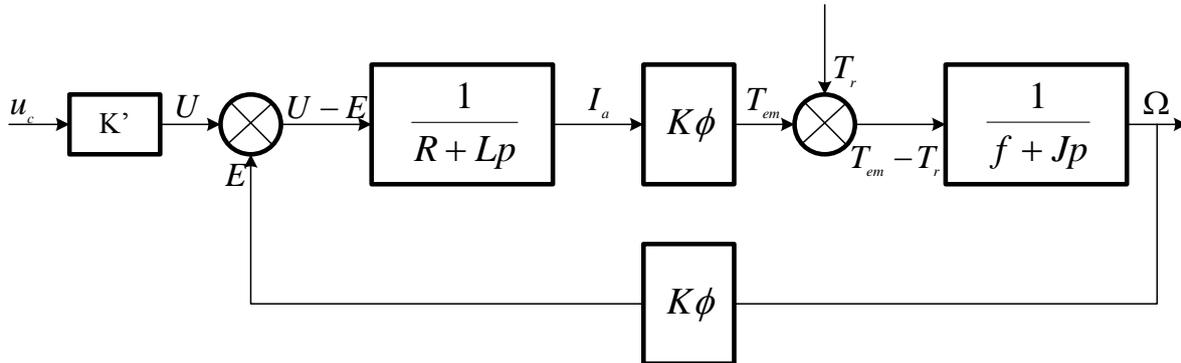


Figure. 6 : Schéma fonctionnel d'un convertisseur statique et d'un moteur à courant continu

2. Etude de la boucle en courant : (régulation du courant)

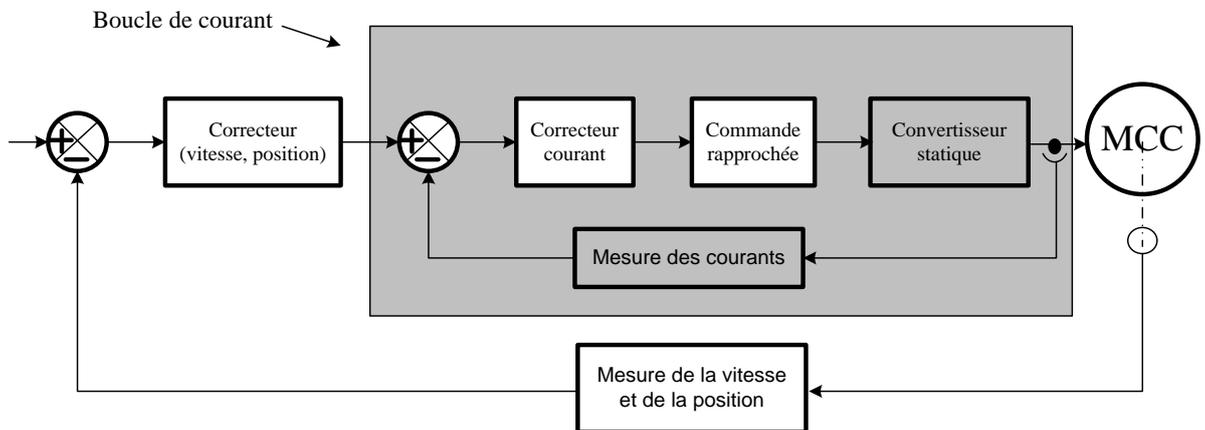


Figure. 7 : Identification de la boucle en courant

On utilise dans la chaîne de régulation des amplificateurs à courant continu et à grand gain.

Pour la boucle de courant, le schéma synoptique est le suivant :

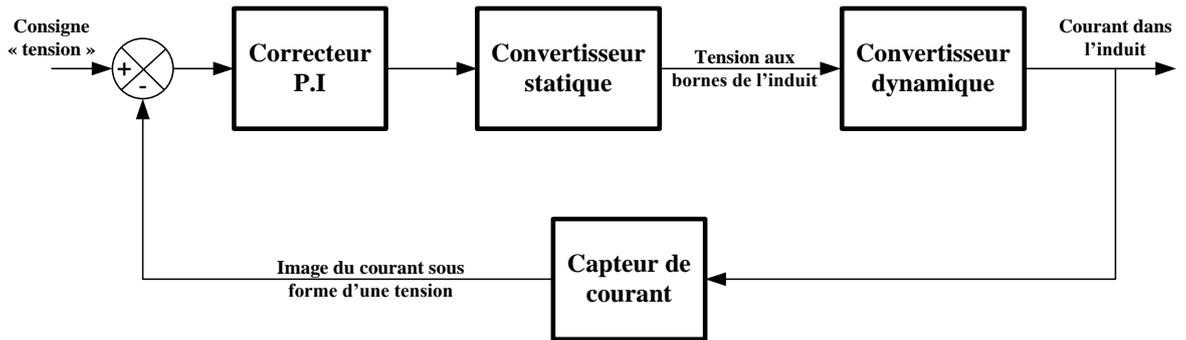


Figure. 8 : Synoptique de la boucle du courant

☞ Convertisseur dynamique :

$$\text{On a : } U = E + RI_a + L \frac{dI_a}{dt} \text{ et } E = K\phi\Omega \text{ d'où : } U = K\phi\Omega + RI_a + L \frac{dI_a}{dt}$$

D'autre part, la relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$T_m - T_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega$$

On néglige f et on suppose que $T_r = 0$

$$\text{D'où : } T_m = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Sachant que : $T_m = K\phi I_a$

$$\text{Alors : } K\phi I_a = J \frac{d\Omega}{dt} \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = \frac{K\phi}{J} I_a \text{ Le passage par la transformée de Laplace}$$

$$\text{donne : } p\Omega(p) = \frac{K\phi}{J} I_a(p) \Rightarrow \Omega(p) = \frac{K\phi}{J \cdot p} I_a(p)$$

$$\text{Or } U(p) = K\phi\Omega(p) + RI_a(p) + Lp \cdot I_a(p)$$

$$\text{D'où : } U(p) = K\phi \frac{K\phi}{J \cdot p} I_a(p) + RI_a(p) + Lp \cdot I_a(p) \quad \Rightarrow$$

$$U(p) = \left(\frac{(K\phi)^2}{J \cdot p} + R + Lp \right) I_a(p)$$

$$\text{Soit : } T_m = \frac{RJ}{(K\phi)^2} \text{ d'où : } U(p) = \left(\frac{R}{T_m \cdot p} + R + Lp \right) I_a(p) \quad \Rightarrow$$

$$U(p) = R \left(\frac{1}{T_m \cdot p} + 1 + \frac{L}{R} p \right) I_a(p) \quad \text{Soit} \quad T_e = \frac{L}{R}$$

$$\text{D'où : } \frac{I_a(p)}{U(p)} = \frac{T_m \cdot p}{R(T_m T_e p^2 + T_m p + 1)}$$

Sachant que : $T_m \ll T_e$ alors $T_m + T_e \approx T_m$

Soit alors :

$$(1 + T_e \cdot p)(1 + T_m \cdot p) = 1 + (T_e + T_m) p + T_m T_e \cdot p^2 \approx 1 + T_m \cdot p + T_m T_e \cdot p^2$$

On peut utiliser cette condition pour simplifier la boucle de courant, on obtient :

$$\frac{I_a(p)}{U(p)} = \frac{T_m \cdot p}{R(1 + T_e)(1 + T_m)}$$

☞ Convertisseur statique :

$$U = U_{co} \frac{u_c}{k} = K' u_c$$

☞ Correcteur P.I :

Le correcteur PI « proportionnel-intégrale » améliore la précision de la boucle (erreur statique nulle).

$$C(p) = g_p + \frac{g_i}{p} = g_0 \frac{1 + T \cdot p}{T \cdot p}$$

☞ Capteur de courant : Soit un shunt soit un transformateur. Dans les deux cas l'image du courant est obtenue sous forme d'une tension, soit alors : $U_{image} = m \cdot I_a$

D'où le schéma fonctionnel :

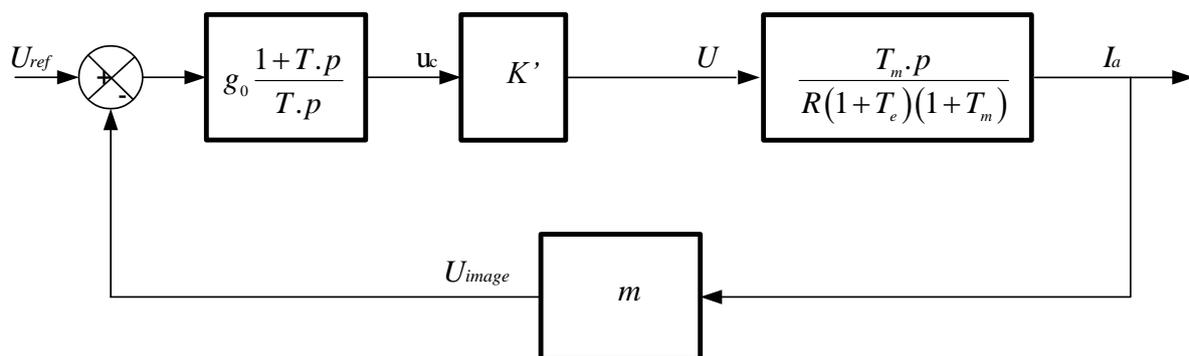


Figure. 9 : Schéma fonctionnel de la boucle du courant

Soit en faisant un schéma avec retour unitaire :

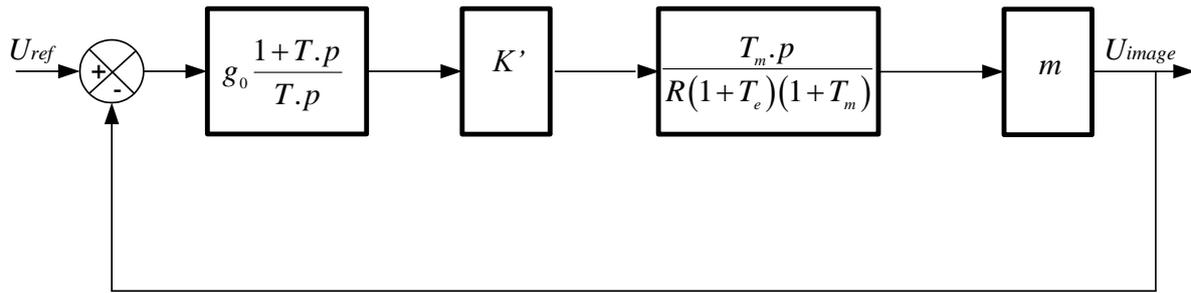


Figure. 10 : Schéma fonctionnel à retour unitaire

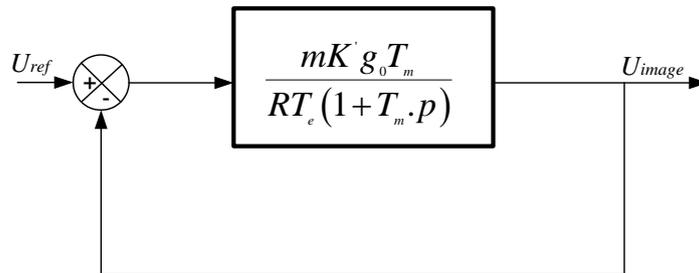
✎ Fonction de transfert en boucle ouverte :

Choisissant $T = T_e$ d'où $C(p) = g_0 \frac{1 + T_e \cdot p}{T_e \cdot p}$

Soit $F_{TBO}(p)$ la fonction de transfert en boucle ouverte :

$$F_{TBO}(p) = \left(g_0 \frac{1 + T_e \cdot p}{T_e \cdot p} \right) K' \frac{T_m \cdot p}{R(1 + T_e \cdot p)(1 + T_m \cdot p)} \cdot m = \frac{mK' g_0 T_m}{RT_e (1 + T_m \cdot p)}$$

Ainsi :



✎ Fonction de transfert en boucle fermée :

Soit $R_0 = g_0 m K'$

$$F_{TBF}(p) = \frac{F_{TBO}(p)}{1 + F_{TBO}(p)} = \frac{\frac{R_0 T_m}{RT_e (1 + T_m \cdot p)}}{1 + \frac{mK' g_0 T_m}{RT_e (1 + T_m \cdot p)}} = \frac{R_0 T_m}{RT_e (1 + T_m \cdot p) + R_0 T_m}$$

Et comme $T_m \ll T_e$ alors $\frac{RT_e}{R_0 T_m} \gg 0$ alors la fonction de transfert en boucle fermée est

un système de la forme : $F_{TBF}(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \Rightarrow$ système de 1^{er} ordre avec $\tau = \frac{RT_e}{R_0}$

✎ Réalisation pratique du correcteur P.I

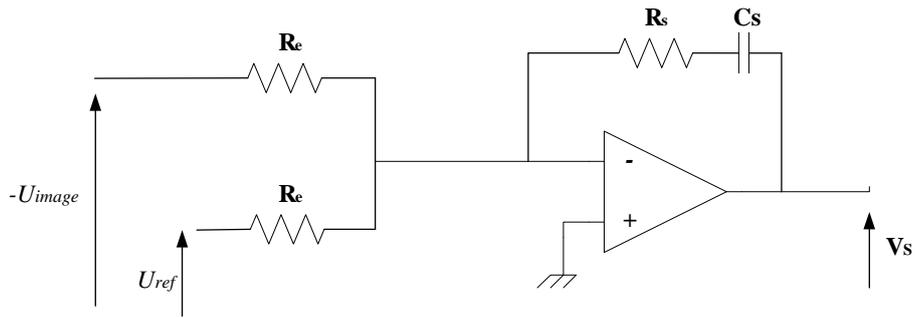


Figure. 11 : Correcteur P.I

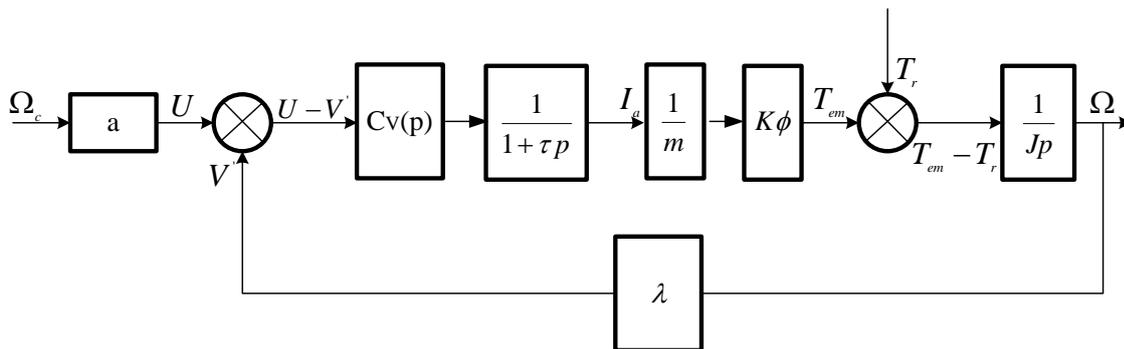
$$\tau = \frac{R_s}{R_e}$$

$$T = R_s C_s$$

$$V_s(p) = \left(g_0 + \frac{g_0}{p} \right) [U_{ref}(p) - U_{image}(p)]$$

3. Etude de la boucle en vitesse : (régulation de vitesse)

Tenant compte la boucle en courant, le schéma fonctionnel complet de la boucle de vitesse est le suivant :





Commande des machines asynchrones par convertisseurs statiques

I. Introduction :

Le réglage de la vitesse d'une machine à induction n'est pas simple que celui d'un moteur à courant continu. Les onduleurs à fréquence de sortie variable sont la principale application des dispositifs de puissance à semi-conducteurs pour la commande de moteur à courant alternatif. Pour obtenir des caractéristiques de commande comparables à celle d'un moteur à courant continu, il faut utiliser un équipement de commande et de puissance plus compliqué.

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

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

II. Variation de vitesse des machines asynchrone :

1. Quadrants de fonctionnement

Les machines à courant alternatif (synchrone et asynchrone) et à courant continu sont naturellement réversibles. Pour bénéficier de cette propriété, il faut que le convertisseur statique et la source soient également réversibles. Si la source ne l'est pas on ne peut pas récupérer l'énergie lors d'une phase de freinage de la machine mais on peut le dissiper dans des rhéostats (réversibilité dissipatrice).

Comme pour une machine à courant continu le choix d'une structure convertisseur /machine asynchrone 1, 2 ou 4 quadrants repose exclusivement sur le cahier des charges.

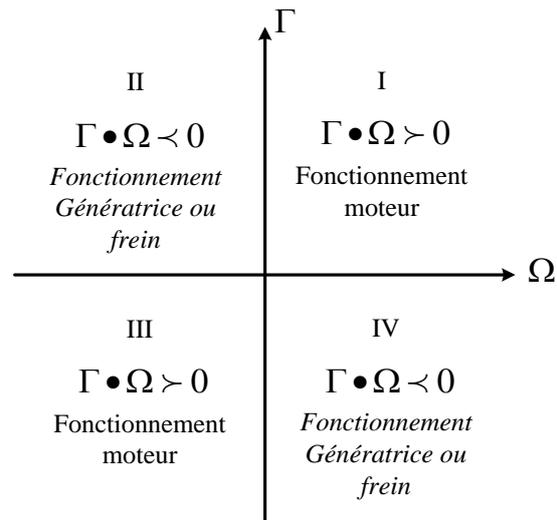


Figure 1

- ☞ Quadrant I seul : Accélérations contrôlées et décélération non contrôlées, et la machine tourne dans un seul sens.
- ☞ Deux quadrants I et II : La machine tourne dans les deux sens avec accélérations contrôlées et décélération non contrôlées
- ☞ Deux quadrants I et IV: La machine tourne dans un seul sens avec accélérations et décélération contrôlées
- ☞ Quatre quadrants (I à IV): La machine tourne dans les deux sens avec accélérations et décélération contrôlées.

2. Schéma équivalent et expression du couple électromagnétique :

On suppose que l'impédance de fuite d'un enroulement statorique est négligeable. Le schéma équivalent devient celui de la figure ci-dessous :

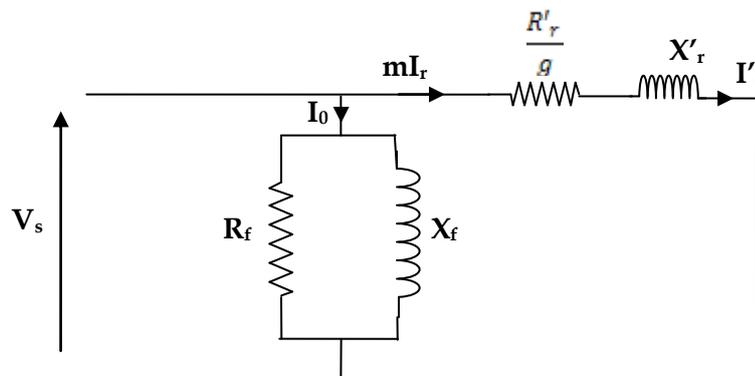


Figure 2. Schéma équivalent

$$\text{On a : } T_{em} = \left(\frac{P_{tr}}{\Omega_s} \right) \text{ avec } P_{tr} = 3 \cdot \left(\frac{R_r'}{g} \right) \cdot I_r'^2 \text{ et } I_r' = \frac{V_s}{\sqrt{\left(\frac{R_r'}{g} \right)^2 + X_r'^2}}$$

$$\text{D'où : } T_{em} = \frac{3}{\Omega_s} \cdot \frac{R_r'}{g} \cdot \frac{V_s^2}{\left(\frac{R_r'}{g} \right)^2 + (X_r')^2} \quad \text{Or } \Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$$

$$\text{Donc : } T_{em} = 3 \cdot p \cdot \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 \cdot \omega_s \cdot \frac{\frac{R_r'}{g}}{\left(\frac{R_r'}{g} \right)^2 + (L_r' \cdot \omega_s)}$$

3. Variation de vitesse d'une machine asynchrone :

☞ Au démarrage :

$$\Omega = 0 \Rightarrow g = 1$$

Soit T_d : Le couple de démarrage

$$\text{D'où : } T_d = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{R_r'^2 + X_r'^2}$$

☞ A vide :

$$\Omega = \Omega_s \Rightarrow g = 0 \text{ D'où : } T_{em} = 0$$

$$\text{☞ On a : } T_{em} = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \cdot \frac{V_s^2}{\frac{R_r'^2}{g} + gX_r'^2} = F = \frac{a}{x+y} \quad \text{avec } a = C^{te}, x \text{ et } y \in \mathbb{R}$$

Si $x \cdot y = C^{te} \Rightarrow F$ est maximale si et seulement si $x = y$

On note alors g_m le glissement tel que le couple est maximal :

$$\text{Alors : } g_m \cdot (X_r')^2 = \frac{(R_r')^2}{g_m} \Rightarrow g_m^2 = \left(\frac{R_r'}{X_r'} \right)^2 \text{ soit alors : } g_m = \frac{R_r'}{X_r'}$$

Donc pour chercher le couple maximal il suffit de remplacer l'expression de g_m dans l'expression du couple électromagnétique T_{em} .

$$\text{Donc : } T_{em} = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{\frac{R_r'}{g_m} + \frac{R_r'}{X_r'} X_r'^2} = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{2R_r' X_r'}$$

$$\text{D'où : } T_{em} = \frac{3p}{2\omega_s} \frac{V_s^2}{2X_r'}$$

- Pour $g \ll g_m$ alors $g(X_r')^2 \ll \frac{(R_r')^2}{g} \Rightarrow T_{em} = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{\frac{R_r'^2}{g}} = \frac{3p}{\omega_s} \frac{V_s^2}{R_r'} g$

On remarque bien que : $T_{em} = k.g$ avec $k = \frac{3p}{\omega} \frac{V_s^2}{R_r'} = C^{te}$

Alors on peut conclure que pour $g \in [0, g_m], T_{em} = f(g)$ est une droite linéaire.

- Pour $g \gg g_m$ alors $g(X_r')^2 \gg \frac{(R_r')^2}{g} \Rightarrow T_{em} = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{g(X_r')^2}$

On remarque bien que : $T_{em} = \frac{a}{g}$ avec $a = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{(X_r')^2} = C^{te}$

Alors on peut conclure que pour $g \in [g_m, 1], T_{em} = f(g)$ est une hyperbole.

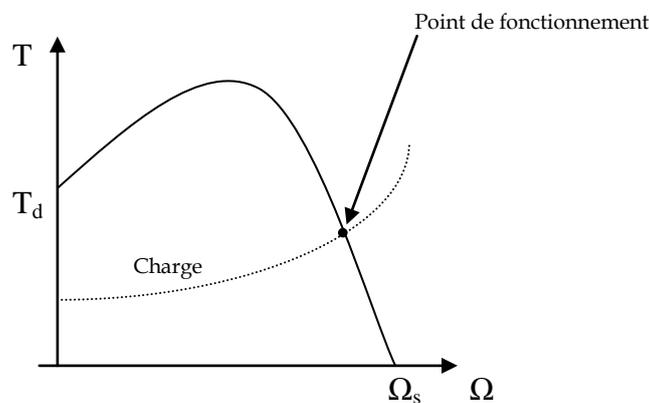


Figure 3. Caractéristique couple-vitesse

Le point de fonctionnement (T, Ω) dans le quadrant I en régime établi de l'ensemble machine plus charge se situe à l'intersection des caractéristiques $T_{em}=f(\Omega)$ du moteur et $T_r=f(\Omega)$ de la charge. Le réglage de la vitesse de la machine asynchrone est donc obtenu en agissant sur le couple qu'elle produit, soit, si l'on se réfère à son expression ci-dessus : le

nombre de paires de pôles de la machine, la tension d'alimentation, le glissement ou la fréquence d'alimentation de la machine.

II.3.1. Réglage par variation du nombre de paires de pôles :

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

De manière que :

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

II.3.1.1. Moteurs à enroulements indépendants ou à couplage de pôles

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

II.3.1.2. Moteurs à couplage de pôles DAHLANDER

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

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

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

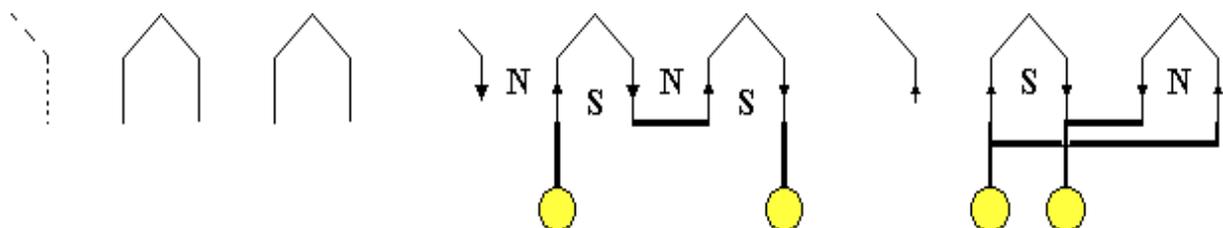
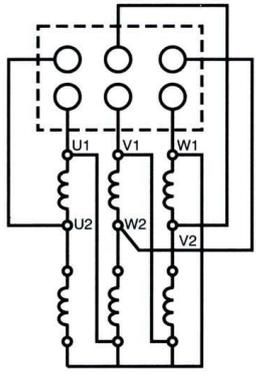
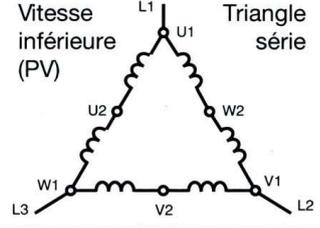
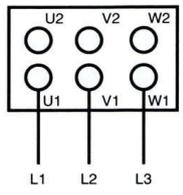
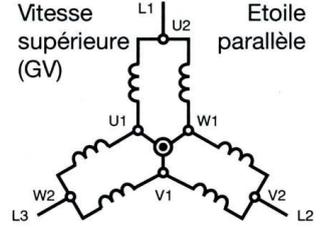
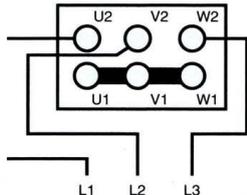
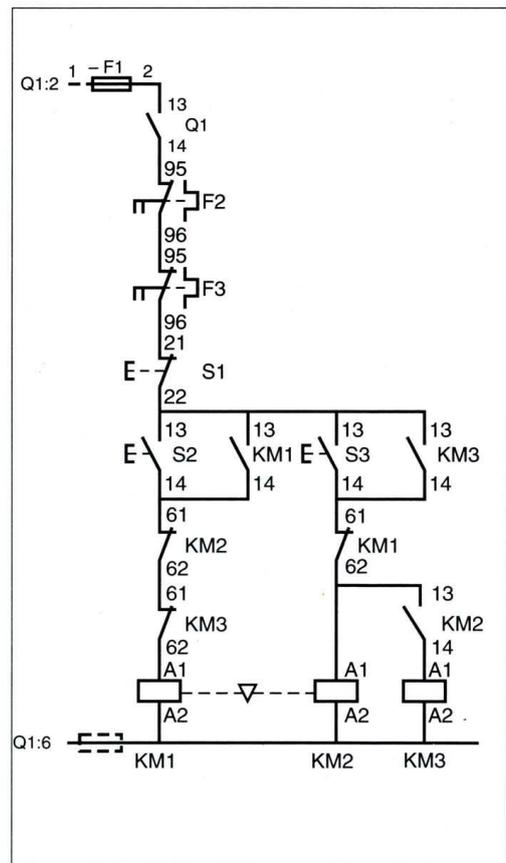
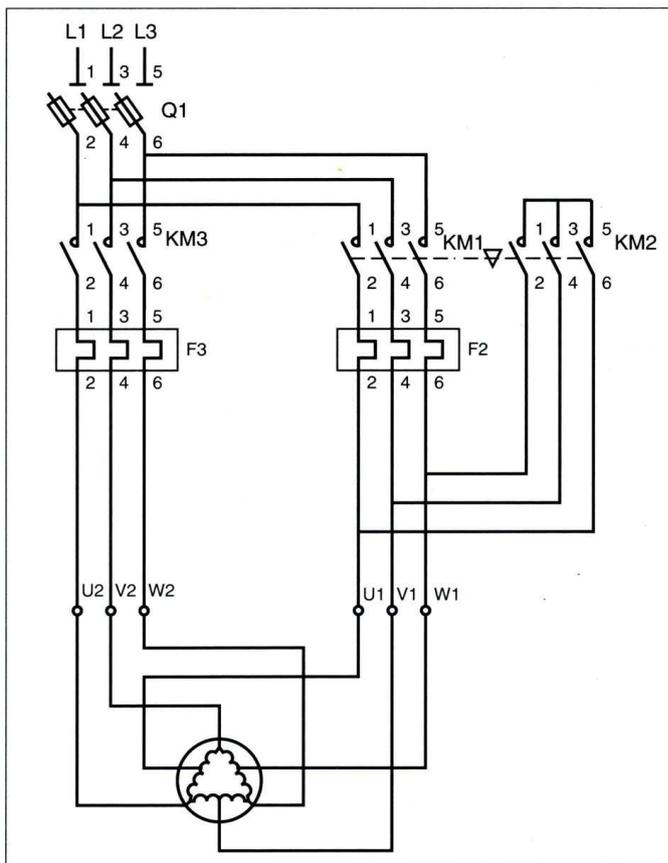


Figure 4 : Couplage des enroulements

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

• Schémas du circuit de puissance et du circuit de commande

Télé mécanique



II.3.2. Réglage par action sur le glissement

☞ Action sur la tension d'alimentation statorique (autotransformateur, gradateur)

- ☞ Rhéostat de glissement au rotor
- ☞ Cascade de récupération (cascade hyposynchrone)

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

II.3.2.1. L'action se fait sur la tension statorique

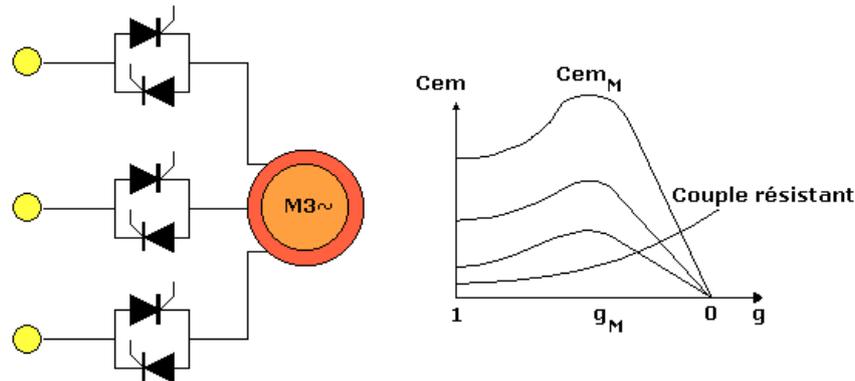


Figure 5 : Variation de vitesse par action sur la tension statorique

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

II.3.2.2. Rhéostat de glissement au rotor

Cette technique est utilisée sur moteur à rotor bobiné.

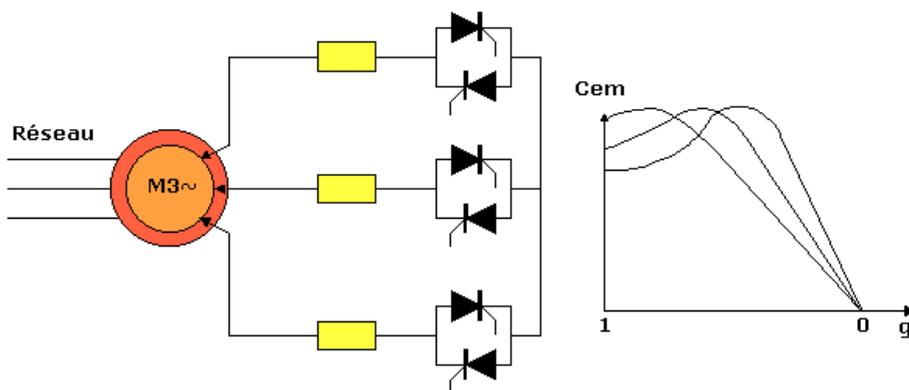


Figure 6 : Variation de vitesse par action sur les enroulements rotoriques

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

Un choix judicieux de la valeur des jeux de résistances insérées au rotor, permet de régler la vitesse de ce type de moteur dans une plage intéressante.

L'insertion permanente d'une résistance aux bornes du rotor abaisse la vitesse et ce, d'autant plus, que la valeur de la résistance est élevée. Ce procédé est intéressant pour démarrer très progressivement des charges d'inertie élevée.

Par contre, s'il s'agit de régler réellement la vitesse, ce procédé cumule 3 inconvénients :

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

II.3.2.3. Cascade de récupération (cascade hyposynchrone)

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

Cette technique est utilisée sur moteur à rotor bobiné.

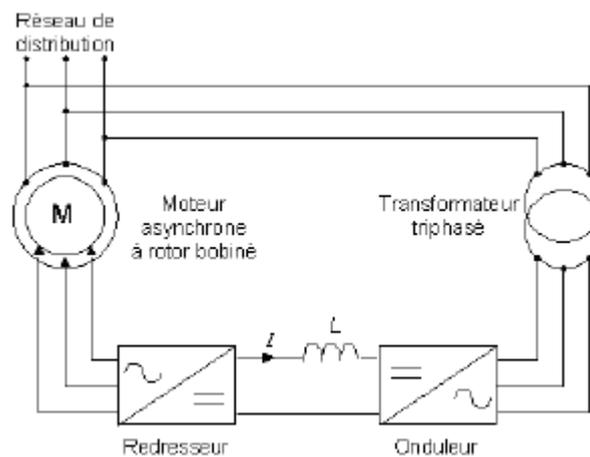


Figure 7 : Synoptique d'une cascade hyposynchrone

Le transformateur est choisi avec un rapport de transformation permettant le glissement maximal souhaité.

La récupération de l'énergie rotorique assure un excellent rendement, voisin de celui du moteur seul.

Le facteur de puissance de la cascade est plus faible que celui du moteur seul et il y a nécessité de le relever avec une batterie de condensateurs.

La cascade ne peut démarrer seule : il est nécessaire de prévoir un dispositif annexe de démarrage par résistances rotoriques.

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

II.3.3. Réglage par variation de fréquence

L'alimentation à fréquence variable des machines asynchrones se fait à l'aide d'un convertisseur statique généralement continu-alternatif (Fig. 8). La source d'entrée peut être du type source de courant ou du type source de tension. En sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions ou des courants statoriques ainsi que leur fréquence f_s .

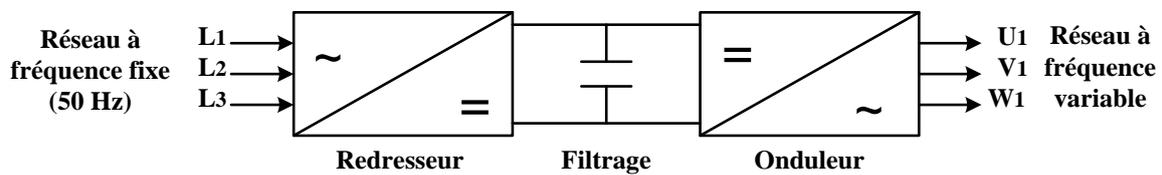


Figure 8 : Synoptique d'un convertisseur continu-alternatif

La tension et le flux statorique sont liés par la relation : $V_s = j\omega\phi_s$

Ainsi le couple électromagnétique peut s'exprimer par : $T_{em} = 3.p.\phi_s^2 \frac{R_r'\omega_r}{R_r'^2 + (L_r'\omega_r)^2}$ avec

$$\omega_r = \omega_s - \omega = g\omega_s$$

Pour contrôler le couple électromagnétique de la machine asynchrone, nous voyons d'après la relation précédente qu'il faut contrôler le flux statorique Φ_s et la pulsation des courants rotoriques ω_r (grandeur qui n'est pas directement accessible).

II.3.3.1. Machine asynchrone - onduleur MLI

Le terme M.L.I. signifie : Modulation de Largeur d'Impulsion. Son principe est le suivant : La tension continue d'entrée de l'onduleur est hachée de façon à créer une succession de créneaux d'amplitude égale à celle-ci, mais de largeur variable.

La commande en M.L.I. est utilisée pour l'onduleur car elle permet d'obtenir un courant dont la forme est très proche d'une sinusoïde.

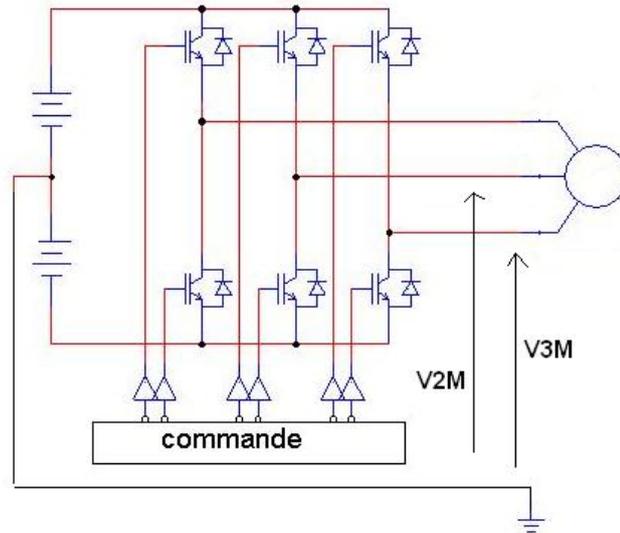


Figure 9 : Schéma structurel d'un onduleur M.L.I. triphasé

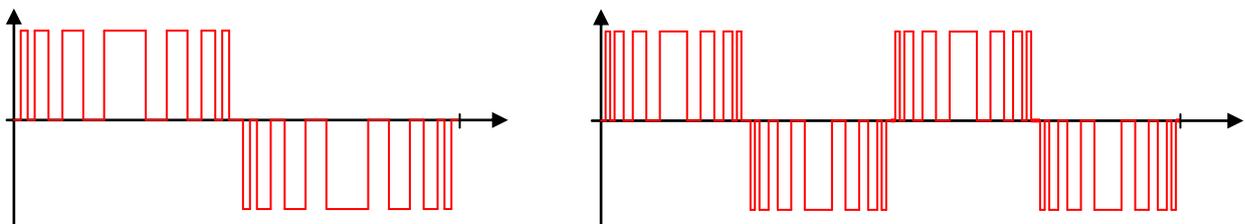


Figure 10 : Forme de la tension de sortie pour $f = 25 \text{ Hz}$ et $f = 50 \text{ Hz}$

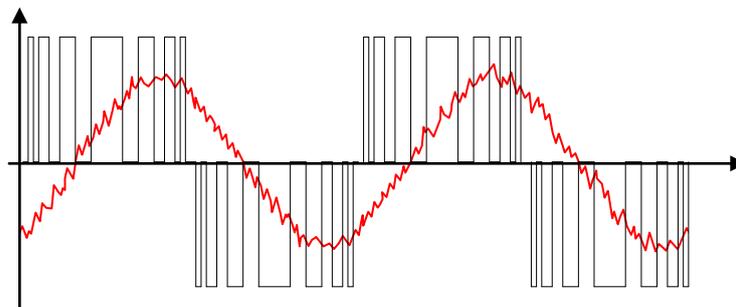


Figure 11 : forme du courant de sortie pour $f = 50 \text{ Hz}$

II.3.3.2. Contrôle des tensions statoriques

☞ Principe de la commande en boucle ouverte.

A flux constant, le couple électromagnétique de la machine asynchrone ne dépend que de la pulsation ω_r . Ainsi, pour différentes valeurs de la pulsation des grandeurs statoriques ω_s obtient-on une famille de caractéristiques Couple-Vitesse, $CEM = f(\omega)$ (Fig. 12)

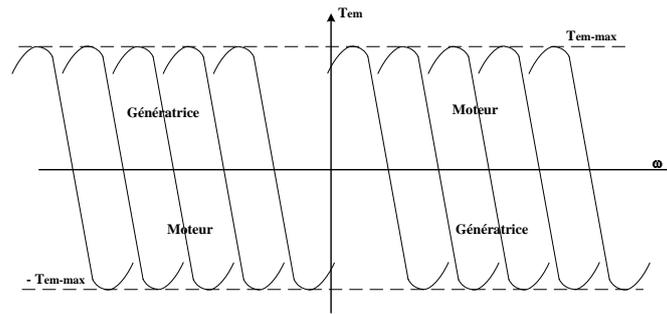


Figure 12 : Caractéristiques Couple-Vitesse

Dans la zone linéaire (faibles glissements), cette famille de caractéristiques Couple-Vitesse est tout à fait analogue à celle d'une machine à courant continu où la tension d'induit constitue le paramètre de réglage de la vitesse. Ainsi pour faire varier en boucle ouverte la vitesse d'une machine asynchrone doit-on faire varier la fréquence d'alimentation au stator tout en maintenant le flux constant. Les réglages de tension et de fréquence au stator de la machine sont obtenus grâce à un onduleur de tension MLI.

Ainsi, pour maintenir le flux Φ_s constant, il faut que la tension efficace V_s soit

$$\text{proportionnelle à la fréquence d'alimentation statorique : } \phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}.$$

Toutefois, cette relation n'est pas valable pour des faibles valeurs de la pulsation ω_s car la chute de tension due à la résistance des enroulements du stator n'est plus négligeable (voir cours machine asynchrone modèle de SteinMetz). Aussi envisage-t-on sur la plupart des variateurs une compensation de cette chute de tension en augmentant l'amplitude des tensions statoriques pour les faibles valeurs de ω_s de façon à maintenir Φ_s constant. D'autre part, si un fonctionnement en survitesse de la machine asynchrone est envisagé, il n'est pas possible de dépasser la tension statorique nominale (claquage des isolants). Le flux Φ_s est alors diminué de même que le couple électromagnétique maximum (fig 13).

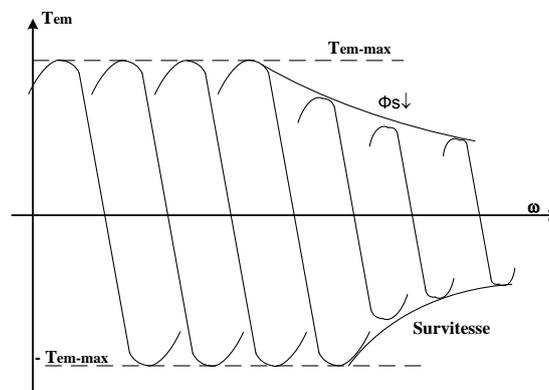


Figure 13 : Effet d'un fonctionnement en survitesse sur le flux et le couple

La commande en boucle ouverte ne permet pas de contrôler parfaitement la vitesse de rotation de la machine puisque à pulsation ω_s constante, la vitesse de rotation dépend du couple résistant de la charge entraînée (glissement).

☞ Réalisation de l'asservissement de vitesse

Pour assurer l'asservissement de vitesse de rotation, on rajoute une boucle externe sous forme d'un correcteur, généralement de type PI, qui permet d'estimer la pulsation rotorique. L'erreur de vitesse, permet d'augmenter la fréquence des tensions statoriques (fig 14).

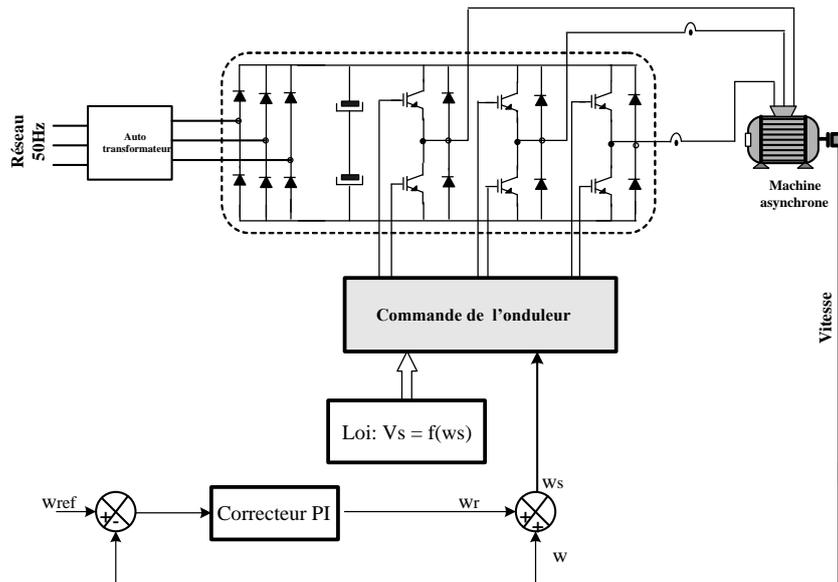


Figure 14 : Synoptique de la commande avec asservissement de vitesse

La tension de sortie du correcteur notée ω_r est additionnée à la tension image de la vitesse de rotation ω et ceci de façon à obtenir la valeur adéquat pour la pulsation statorique. La pulsation statorique est calculée par la relation : $\omega_s = \omega_r + \omega$. C'est l'autopilotage fréquentiel.

Dans cette stratégie de commande le contrôle de l'amplitude des courants statoriques est assuré uniquement en régime permanent. Lors des régimes transitoires, les valeurs instantanées des courants ne sont pas contrôlées. Par suite, il est préférable d'asservir les courants de sortie de l'onduleur MLI de façon à contrôler parfaitement les valeurs instantanées des courants statoriques de la machine asynchrone.

II.3.3.3. Contrôle des courants statoriques

Une boucle de courant est nécessaire pour assurer le contrôler le courant en sortie de chaque bras de l'onduleur MLI.

Il faut maintenir le flux statorique constant et contrôler la pulsation ω_r , pour que le couple électromagnétique de la machine asynchrone soit contrôlé. Etant donné que la machine

est ici alimentée en courant et non en tension, alors la loi de variation $I_s = f(\omega_r)$ permet de maintenir le flux ϕ_s constant.

☞ Réalisation de l'asservissement de vitesse

Le schéma synoptique de la figure 15 décrit le principe de l'asservissement de vitesse de la machine asynchrone.

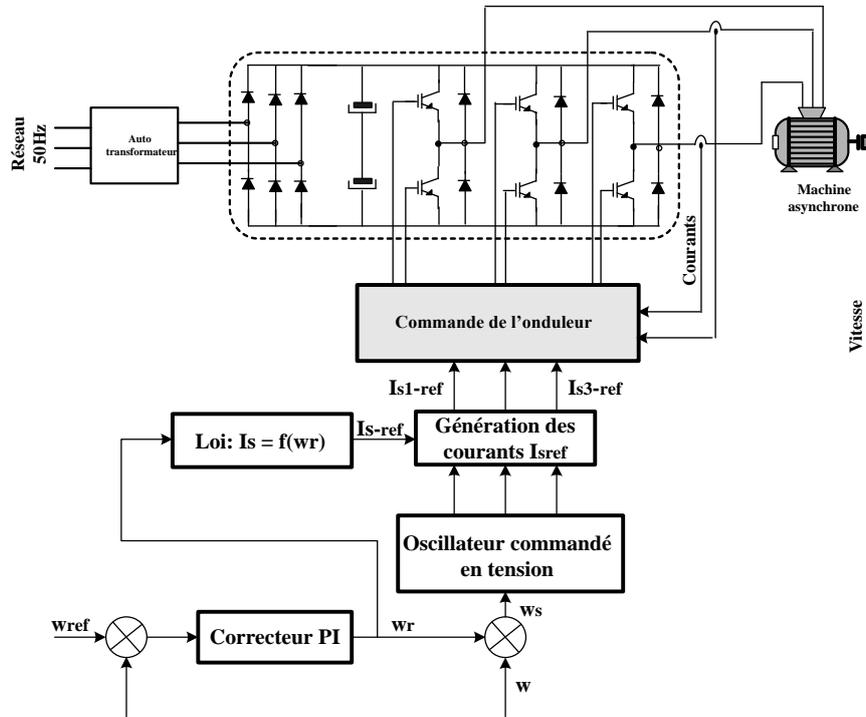


Figure 15 : Synoptique de l'asservissement de vitesse de la MAS

La pulsation rotorique ω_r est estimée grâce au correcteur PI. Pour déterminer la pulsation des courants statoriques, il faut additionner l'image de la vitesse de rotation et l'image de la pulsation rotorique. Ceci permet de vérifier l'équation $\omega_s = \omega_r + \omega$ et de réaliser l'autopilotage fréquentiel. Etant donné que $\omega_r \ll \omega_s$, le capteur de vitesse utilisé doit être numérique (codeur incrémental) afin d'avoir une grande précision sur la mesure de ω .

L'amplitude des courants de références i_{s1ref} , i_{s2ref} , i_{s3ref} qui sont générés par un oscillateur commandé en tension est fixé par la loi $I_s = f(\omega_r)$. La commande de la figure 15 est complexe et est généralement réalisée en faisant appel aux techniques numériques.

III. variateur de vitesse altivar

Le variateur de vitesse ALTIVAR est un convertisseur de fréquence destiné à l'alimentation des moteurs asynchrones triphasés à cage. Ils fonctionnent suivant le principe MLI. Cette technique assure une rotation des moteurs régulière et sans à coup à basse vitesse.

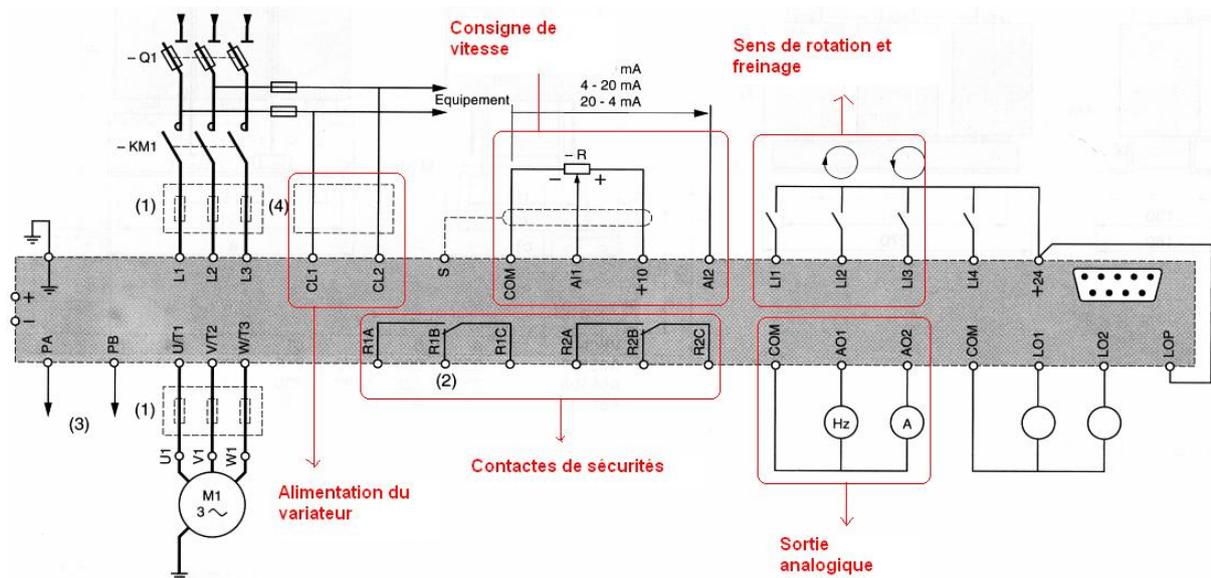


Figure 16 : Branchement d'un variateur de vitesse ALTIVAR 66

☞ Caractéristiques des ALTIVAR 66

Référence	ATV 66 M2	ATV 66 N4
Alimentation du redresseur	Monophasé	Triphasé
Réseau d'alimentation	220-240 V 50 : 60 Hz	380-415 V 50 : 60 Hz
Pont de puissance		
Forme de la tension et du courant		
Gamme de fréquence	1 à 67 Hz	1 à 110 Hz
Sens de marche	2	2
Quadrant de fonctionnement		
Freinage d'arrêt	/////	Par injection de courant continu
Freinage de ralentissement	Rhéostatique avec module option	Rhéostatique avec module option
Tension moteur	220-240 V	380-415 V
Gamme de puissance	0.75 à 37 kW	0.75 à 250 kW

Les variateurs de vitesse peuvent être équipés en option des éléments suivant :

- Résistance externe pour le freinage
- Inductances de lignes pour la réduction des courants harmoniques.