



UNIVERSITY BATNA 2

جامعة باتنة 2 الشهيد مصطفى بن بولعيد

COMMANDE DES ENTRAINEMENTS ELECTROMECHANIQUES

*Destiné aux étudiants de la Licence L3 :
Electromécanique & Electrotechnique*

Par

Prof CHAOUCH.S

Contenu :

- Chapitre 1. Généralités sur les entraînements électriques**
- Chapitre 2. Variation de vitesse de la machine à courant continu**
- Chapitre 3. Variation de vitesse de la machine asynchrone**

Chapitre 1. Généralités sur les entraînements électriques

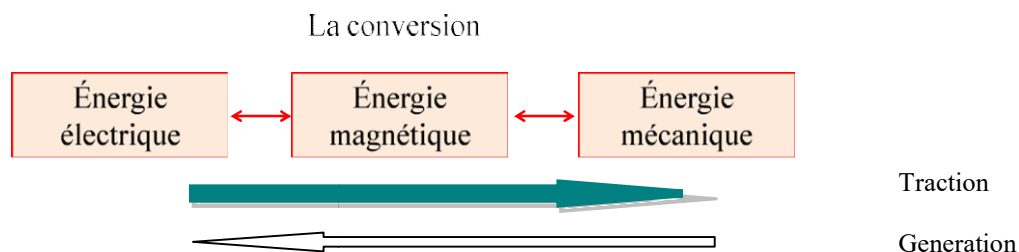
1.1 Entraînements électriques à vitesse variables

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.

1.2 Définition d'un système d'entraînement électrique

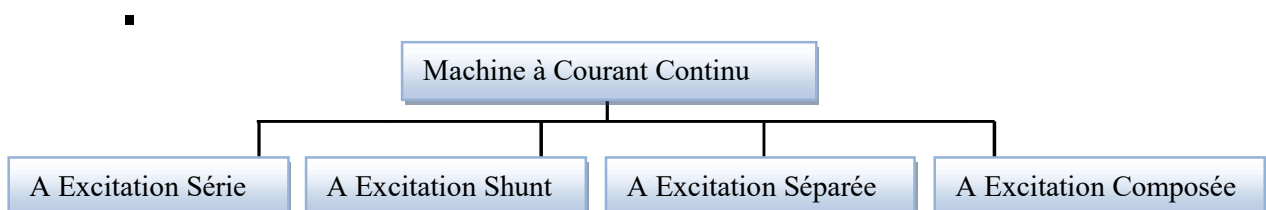
Un système d'entraînement électrique est un dispositif électromécanique fondé sur l'électromagnétisme permettant la conversion d'énergie électrique par exemple en travail ou énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité. Un moteur électrique entraînant une charge et vice-versa une turbine entraînant un alternateur. Cette transformation d'énergie est contrôlée généralement par un convertisseur électronique (redresseur, gradateur, onduleur ou hacheur selon l'entraînement ou l'application).



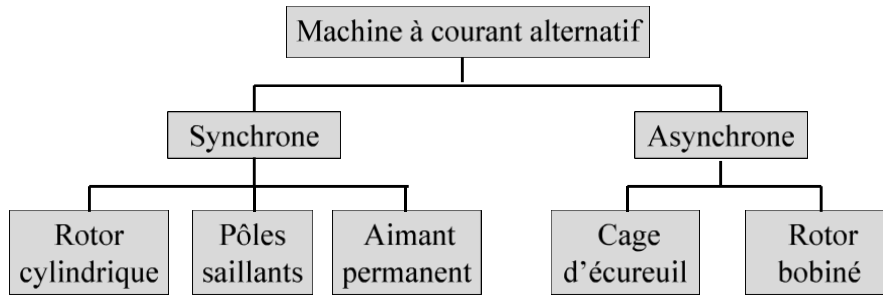
1.2.1 Classification des machines électriques

Ils existent deux différentes classes de machines électriques ; les machines à courant continu et les machines à courant alternatifs.

A. Machine à Courant Continu : Elles sont classées selon leurs excitations.



B. Machines à courant alternatif



1.3 Commande d'une machine électrique

La réalisation de la commande d'une machine électrique est décrite par le diagramme structurel suivant :

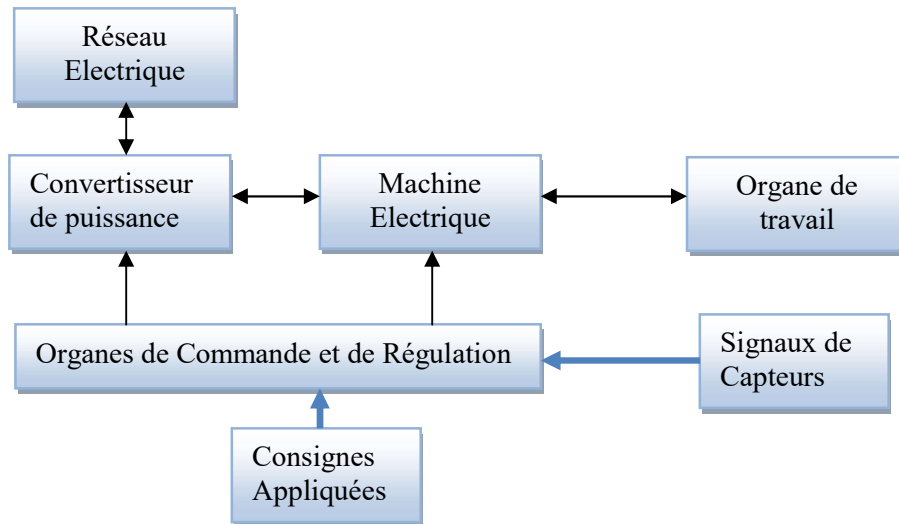


Fig.1.1 Diagramme de Commande

En effet, la commande d'une machine électrique permet :

- De régler de façon précise et optimale les procédés de production.
- D'assurer des démarrages et des freinages fréquents d'équipements de précision.

D'un autre côté, plusieurs exigences sont imposées aux machines électriques commandées, parmi lesquels on distingue :

1. Caractéristiques recherchées :

- La puissance
- La vitesse maximale et la plage de réglage de vitesse ;
- Le couple résistant en fonction de la vitesse.
- La limitation du courant.

2. Exemples des conditions d'utilisation :

- Les conditions de démarrage
- Les conditions de freinage et de réversibilité
- Les conditions imposées par le réseau
- L'encombrement
- Le cout d'investissement et d'exploitation

1.4 Constitution d'un système d'entraînement électrique

Moteur électrique : C'est la partie essentielle pour la conversion de l'énergie (machine entraînée). Cette partie qui peut être un moteur à courant continu ou un moteur asynchrone, développe un couple qui doit être supérieur au couple résistant au démarrage afin de pouvoir vaincre la charge. Une fois le moteur tourne, la vitesse prend de la valeur (Accélération), ainsi que la force électromotrice ou la tension induite, ce qui provoque la diminution du courant absorbé et le couple développé par le moteur jusqu'à où le couple devient égale au couple résistant. Par conséquent, la vitesse se stabilise et elle devient constante. Enfin, l'accélération, la décélération et le réglage de la vitesse du moteur sont commandés par l'ensemble convertisseur et commande.

Convertisseur électronique : c'est un dispositif qui convertit l'énergie électrique en énergie électrique sous plusieurs formes pour l'alimentation du moteur électrique. Ce convertisseur peut être un redresseur, un gradateur, un onduleur ou un hacheur.

Organes de commande et de régulation : C'est une partie informatique qui est à la base de l'électronique numérique. Elle sert à comparer les signaux de sorties qui proviennent de la partie mécanique et électrique avec les signaux d'entrées (signaux de références) afin de commander le convertisseur électronique pour l'alimentation du moteur électrique. En outre, cette partie s'occupe de la surveillance, de la régulation de la protection et de la mesure....

Charge mécanique : appelée aussi les machine de production (machine entraînée), on peut citer les pompes, ventilateurs, monte-charges, grues, scies, les pompes centrifuges, mélangeurs, Broyeurs, Séparateurs, concasseurs...etc., Ces machines de productions sont entraînées par des moteurs électriques et qui exercent sur ces moteurs un couple résistant qui peut être constant ou variable en fonction de la variation des la vitesse.

1.5 Asservissement des machines électriques

La réalisation de l'asservissement des machines électriques peut se faire :

En boucle ouverte sans vérification des résultats obtenus

En boucle fermée avec vérification et ajustement continu du résultat en fonction des perturbations internes ou externes au système.

1.4.1 Asservissement en boucle ouverte:

Cet asservissement peut se faire simplement en ajustant la variable de commande de son alimentation. Malgré sa simplicité, ses inconvénients sont multiples; Le point de fonctionnement de la machine est en effet affecté par les perturbations internes (échauffements des résistances, saturation des inductances....) ou bien des perturbations externes à la machine (variations de charge, variations de température...)

1.4.2 Asservissement en boucle fermée:

Les inconvénients d'un asservissement en boucle ouverte peuvent être en grande partie éliminés par l'emploi de la rétroaction. Il en résulte l'asservissement en boucle fermée.

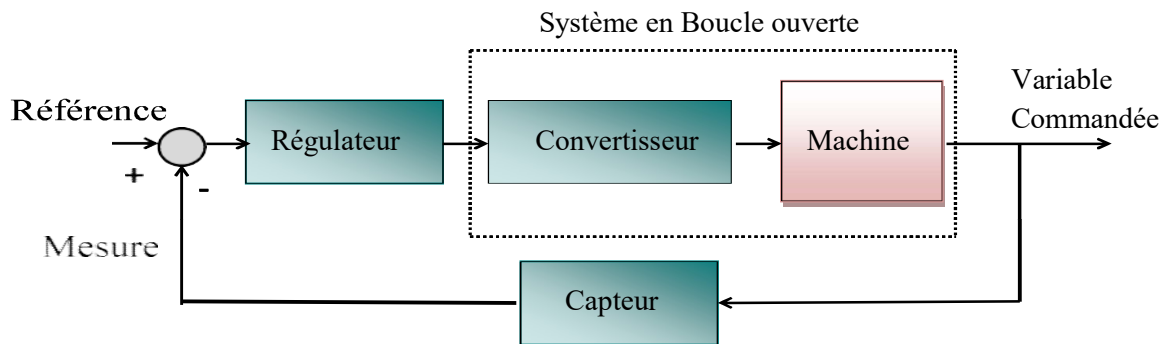


Fig.1.2 Asservissement en Boucle fermée

Chapitre 2. Variation de vitesse de la machine à courant continu

2.1 Rappels sur les machines à courant continu

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les deux cas un champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un convertisseur électromécanique.

2.1.1 Principe de fonctionnement

La machine à courant continu comprend :

- Un **circuit magnétique** comportant une partie fixe, le stator, une partie tournant, le rotor et l'entrefer l'espace entre les deux parties.
- Une source de champ magnétique nommée **l'inducteur** (le stator) crée par un bobinage ou des aimants permanents.
- Un circuit électrique **induit** (le rotor) subit les effets de ce champ magnétiques.
- le **collecteur** et les **balais** permettent d'accéder au circuit électrique rotorique

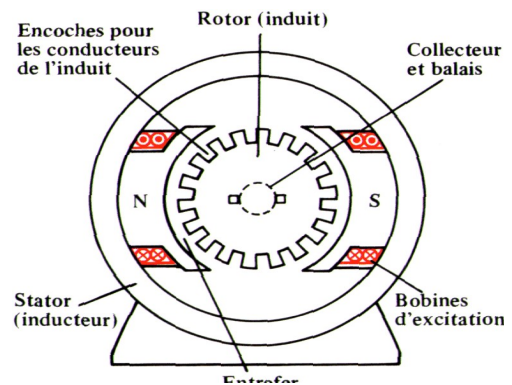


Fig. 2.1 Machine à CC

2.1.2 Equations et Schéma électrique équivalent

➤ Equations Caractéristiques

Nous savons qu'une bobine en mouvement dans un champ magnétique voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (f.é.m.) donnée par la loi de Faraday, Sur ce principe, la machine à courant continu est le siège d'une f.é.m. E :

$$E = \frac{p}{2\pi a} N \phi \Omega \quad (1)$$

p le nombre de paires de pôles
 a le nombre de paires de voies d'enroulement
 N le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires)
 ϕ flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb)
 Ω vitesse de rotation (en rad/s)

Si l'induit présente une f.é.m. E et s'il est parcouru par le courant I_a , il reçoit une puissance électromagnétique. Dans l'induit se produit une transformation d'énergie de la forme électrique à la forme mécanique (Cas d'un Moteur) ou de la forme mécanique à la forme électrique (Cas d'une génératrice). D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance électromagnétique est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique.

$$P_e = E \times I_a = C_e \times \Omega \quad [\text{Watt}] \quad (2)$$

Il en résulte que le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{EI_a}{\Omega} = \frac{k\phi\Omega I_a}{\Omega} = k\phi I_a \quad [\text{N.m}] \quad (3) \quad \left| \quad k = \frac{p}{2\pi a} N \right.$$

➤ Schéma électrique équivalent

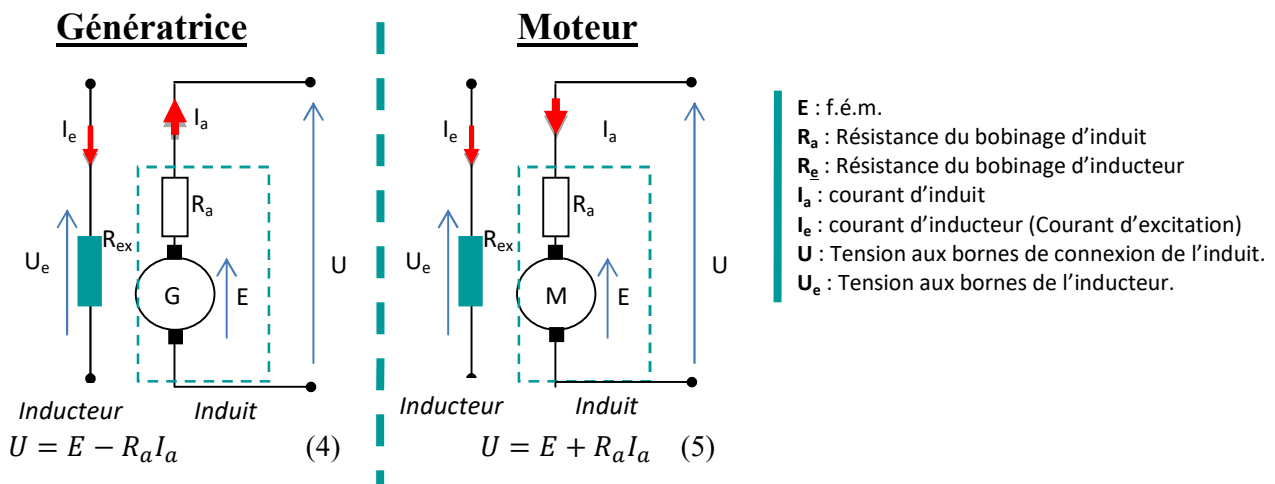


Fig. 2.2 Machine à CC : Fonctionnement Moteur & Fonctionnement Génératrice)

2.1.3 Différents types de machines à courant continu

Il existe différents types d'excitation (manière d'alimenter l'induit et l'inducteur):

<p>Machine excitation séparée ou indépendante</p>	<p>Machine à excitation shunt</p>
<p>Machine à excitation série</p>	<p>Machine à excitation composée</p>

Fig. 2.3 Différentes Excitations de la machine à CC

2.1.4 Caractéristiques électromécaniques

On s'intéresse aux caractéristiques suivantes :

1. Caractéristique électromécanique de vitesse $\Omega = f(I_a)$ (Fig. 2.4.a)
 Des équations (1) et (5) et à flux ϕ constant (courant d'excitation i_e constant ou aimants permanents)
 la vitesse devient :
$$\Omega = \frac{U - R_a I_a}{k\phi} \quad (6)$$
2. Caractéristique électromécanique du couple $C_e = f(I_a)$ (Fig. 2.4.b)

3. Caractéristique mécanique

$C_e = f(\Omega)$ (Fig. 2.4.c)

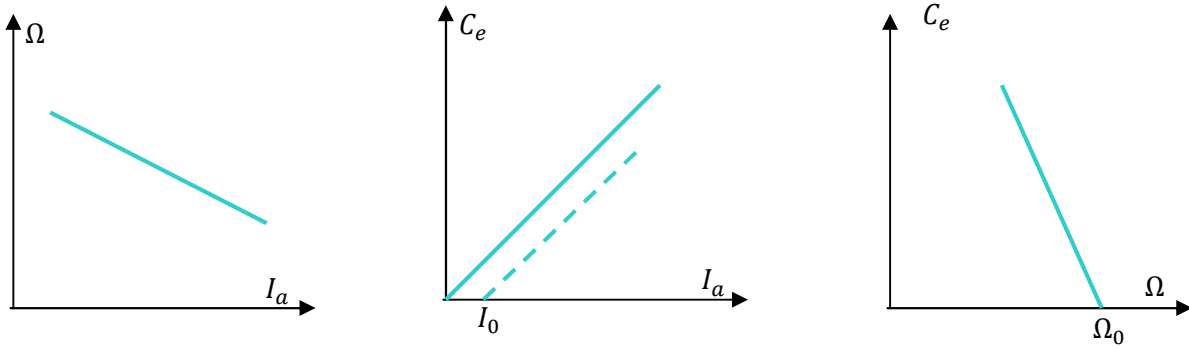


Fig. 2.4 Caractéristiques électromécaniques et mécanique

2.2 Techniques de variation de vitesse de la machine à courant continu à excitation séparée

La vitesse est donnée par la relation $\Omega = \frac{U - R_a I_a}{k\varphi}$ ce qui montre qu'il y'a trois possibilités de réglage de la vitesse :

- Action sur R_a (Réglage Rhéostatique)
- Action sur φ (Réglage par le flux)
- Action sur U (Réglage par la tension)

Variation de Vitesse	Réglage Rhéostatique	Réglage par le flux	Réglage par la tension
Solution	Rhéostat (Rh) branché en série avec l'induit	Rhéostat de champ (Rch) branché en série avec le circuit d'excitation	On réduit la tension d'alimentation
Equations	$C_e = k\varphi \times I_a$ $\Omega = \frac{U}{k\varphi} - \frac{(R_a + (R_h))}{k\varphi} I_a$	$C_e = k\varphi \times I_a$ $\Omega = \frac{U}{k\varphi} - \frac{R_a}{k\varphi} I_a$	$C_e = k\varphi \times I_a$ $\Omega = \frac{U}{k\varphi} - \frac{R_a}{k\varphi} I_a$
Conditions Initiales	$C_e = 0, I_a = 0, \Omega_0 = \frac{U}{k\varphi}$ Ω_0 est indépendant de R_h	$C_e = 0, I_a = 0, \Omega_0 = \frac{U}{k\varphi}$ Si $\varphi \searrow$ la vitesse $\Omega_0 \nearrow$	$C_e = 0, I_a = 0, \Omega_0 = \frac{U}{k\varphi}$ Si $U \searrow$ la vitesse $\Omega_0 \searrow$
	<p>Fig. 2.5 Réglage Rhéostatique</p>	<p>Fig. 2.6 Réglage par le flux</p>	<p>Fig. 2.7 Réglage par la tension</p>
Résultats	Droites concourantes	Droites concourantes	Droites parallèles
Conséquences	Mauvais du point de vue Technique et économique	Mauvais du point de vue Technique	Excellent du point de vue Technique

Le réglage par variation de la tension est excellent du point de vue technique (droites parallèles) et du point de vue économique car aucune énergie n'est gaspillée et le rendement reste élevé. Cependant cette solution nécessite l'emploi d'un variateur de vitesse. En effet, l'alimentation de l'induit par l'intermédiaire d'un pont redresseur commandé ou d'un hacheur permet donc de faire varier continument la vitesse de 0 jusqu'à Ω_n

2.3 Variateur de Vitesse de la Machine à courant continu

Un variateur de vitesse est un dispositif permettant de réaliser l'alimentation et la commande d'un moteur. Son schéma de principe pour une machine à courant continu est donné par la Fig.2.8

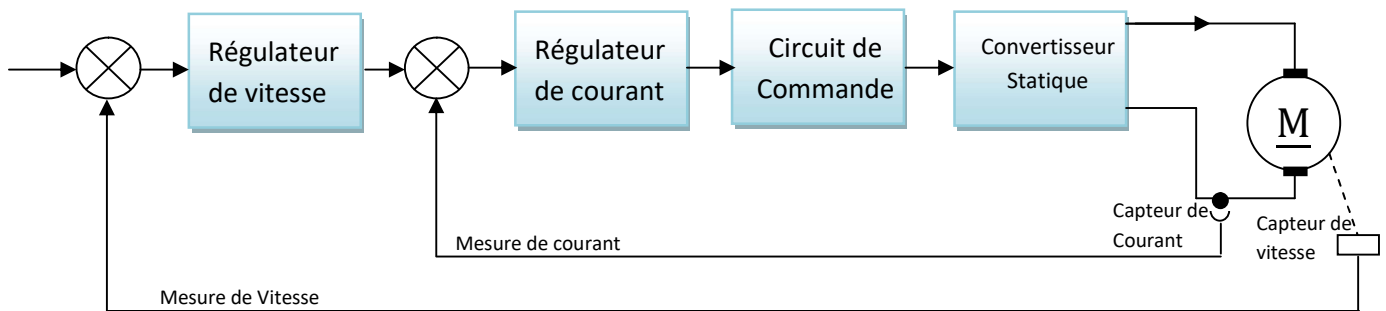


Fig. 2.8 Schéma synoptique de la régulation d'un moteur à courant continu

La figure 2.8 donne la structure d'un variateur de vitesse à deux boucles en cascade. On y distingue les deux organes de puissance le moteur et le convertisseur statique, les deux capteurs (courant et vitesse) et les deux régulateurs de vitesse et de courant. La tension de sortie du régulateur de vitesse sert de référence au régulateur de courant. C'est l'image du courant donc du couple désiré. Le convertisseur d'électronique de puissance permet de réaliser une tension d'induit variable. Les convertisseurs utilisés peuvent être classés comme suit :

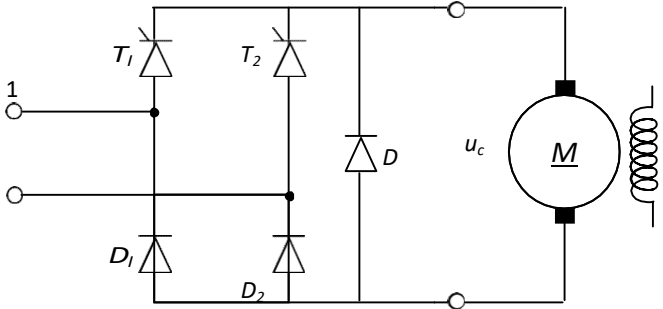
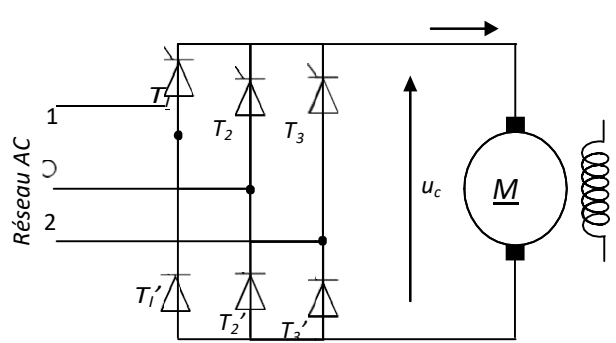
Alimentation Continue		Alimentation Alternative	
Convertisseur Continu-Continu		Convertisseur Alternatif-Continu	
Hacheurs		Redresseurs	
Non réversibles	Réversibles	Non réversibles	Réversibles

2.3.1 Association Redresseur /MCC,

Les redresseurs sont les convertisseurs les plus utilisés dans les applications industrielles puisqu'ils partent directement de la tension du réseau. Ils sont monophasés ou triphasés selon la puissance du moteur

A. Montages non réversibles

Les montages non réversibles sont utilisés lorsque la machine à courant continu ne doit tourner que dans un sens et que l'entraînement ne nécessite pas un freinage rapide. Cela permet la marche de la machine en moteur dans le quadrant I du plan (*Couple, Vitesse*).

Montages Non Réversibles alimentés en monophasé	Montages Non Réversibles alimentés en Triphasé
Pont mixte à deux thyristors et deux diodes.	Pont mixte à trois thyristors et trois diodes
 <p>Fig. 2.9 Schéma synoptique de la régulation d'un moteur à courant continu</p>	 <p>Fig. 2.10 Schéma synoptique de la régulation d'un moteur à courant continu</p>

Montages réversibles

Les montages réversibles permettent un entrainement avec une inversion rapide du sens de rotation tout en assurant le fonctionnement dans les quatre quadrants.

- **Quadrant 1** : Marche en **moteur** dans le **sens direct**. $\Omega > 0, UI > 0$ (7)
- **Quadrant 2** : Marche en **Génératrice** dans le **sens direct**. $\Omega > 0, UI < 0$ (8)
- **Quadrant 3** : Marche en **moteur** dans le **sens inverse**. $\Omega < 0, UI > 0$ (9)
- **Quadrant 14** : Marche en **Génératrice** dans le **sens inverse**. $\Omega < 0, UI < 0$ (10)

La figure suivante montre les quatre quadrants de fonctionnement d'une machine à courant continu.

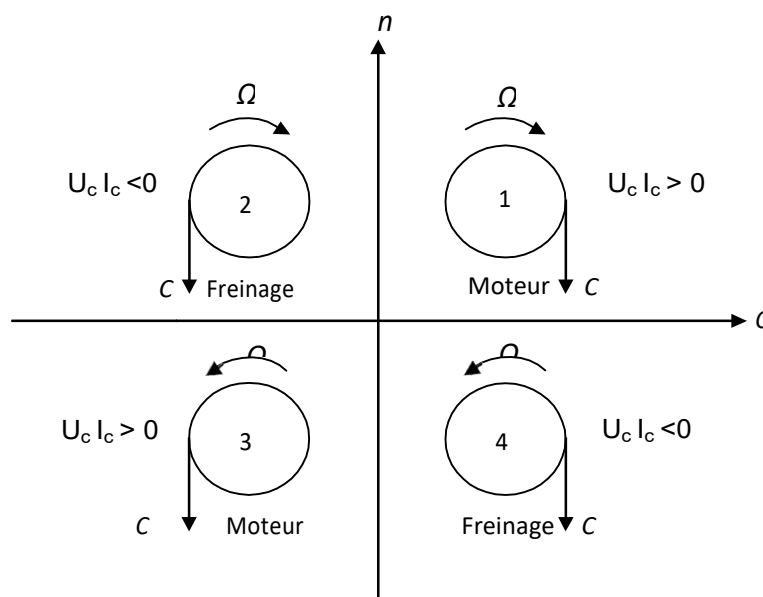


Fig. 2.11 Fonctionnement dans les quatre quadrants de la Mcc

Pour assurer des inversions très rapides (5 à 20 ms) avec un équipement totalement statique, on doit utiliser deux montages redresseurs principaux tous thyristors montés en tête-bêche aux bornes de l'induit ; l'un fournit au moteur le courant I_d positif, l'autre le courant I_d négatif.

Le pont 1 assure le fonctionnement dans les quadrants 1 et 4, le pont 2 dans les quadrants 2 et 3 suivant le mode de commande des redresseurs des deux ponts, on distingue les variateurs avec courant de circulation et sans courant de circulation. Le courant passe instantanément du pont 1 au pont 2.

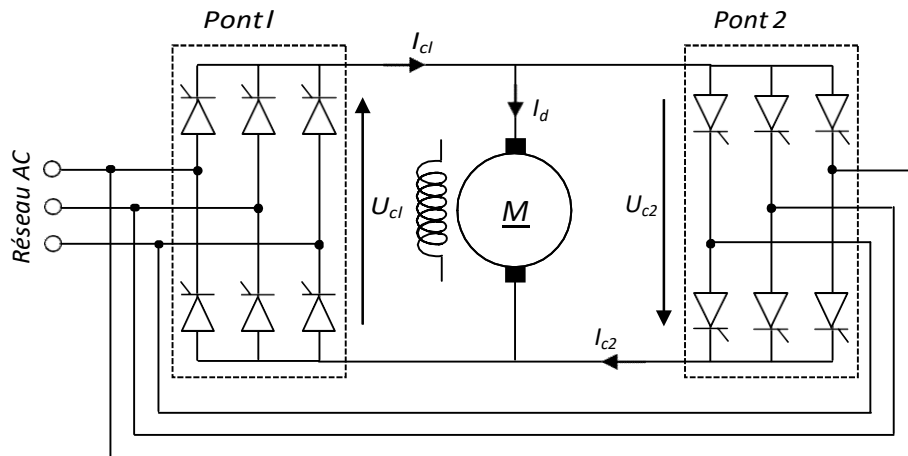


Fig. 2.12 Montage Réversible tête-bêche

Variateurs à hacheurs

Lorsque l'équipement est alimenté en courant continu, comme c'est le cas avec une batterie d'accumulateurs à courant continu en traction électrique, l'obtention de la tension continue variable appliquée à l'induit U_d est réalisée au moyen d'un hacheur.

Hacheur série	Hacheur réversible en courant	Hacheur en pont
Fonctionnement : Quadrant 1	Fonctionnement : Quadrants 1 et 2	Fonctionnement : Quadrants 1, 2 et 3
Fig. 2.13 Association hacheur série-MCC	Fig. 2.14 Association hacheur réversible en courant-MCC	Fig. 2.15 Association hacheur en pont (quatre quadrants)-MCC

2.3.2 Modélisation de la Machine à Courant Continu

Une machine à courant continu est un dispositif électromécanique qui convertit une énergie électrique d'entrée en énergie mécanique. La Fig. 2.16 montre le schéma équivalent d'une machine à courant continu à flux constant.

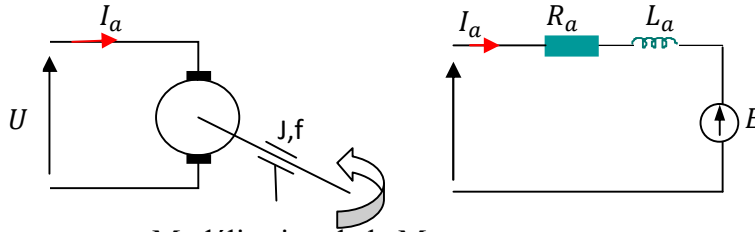


Fig. 2.16 Modélisation de la Mcc

Les équations du modèle dynamique de la MCC sont comme suit :

- Tension aux bornes de l'induit

$$U(t) = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \quad (10)$$

E : f.é.m.
 Ra : Résistance du bobinage d'induit
 La : Inductance du bobinage d'induit
 Ia : courant d'induit

- Force Electromotrice à flux constant

$$E = k_\varphi \Omega \quad (11)$$

$k_\varphi = k \times \varphi$: Coefficient de flux.

- Couple Electromagnétique

$$C_e = k_\varphi I_a \quad (12)$$

- Equation mécanique

$$C_e = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega + C_r \quad (13)$$

J : Moment d'inertie
 f : Coefficient de frottement
 Cr : Couple résistant

En appliquant la transformée de Laplace aux équations (10-13), on obtient :

$$U(s) - E(s) = R_a I_a(s) + L_a \cdot s I_a(s) \quad \text{ce qui donne} \quad I_a(s) = \frac{U(s) - E(s)}{R_a + sL_a} \quad (14)$$

$$C_e(s) = k_\varphi I_a(s) \quad (15)$$

$$C_e(s) - C_r = Js\Omega(s) + f \cdot \Omega(s) \quad \text{ce qui donne} \quad \Omega(s) = \frac{C_e(s) - C_r}{f + Js} \quad (16)$$

$$E(s) = k_\varphi \Omega(s) \quad (17)$$

A partir des équations précédentes, on abouti au schéma fonctionnel suivant :

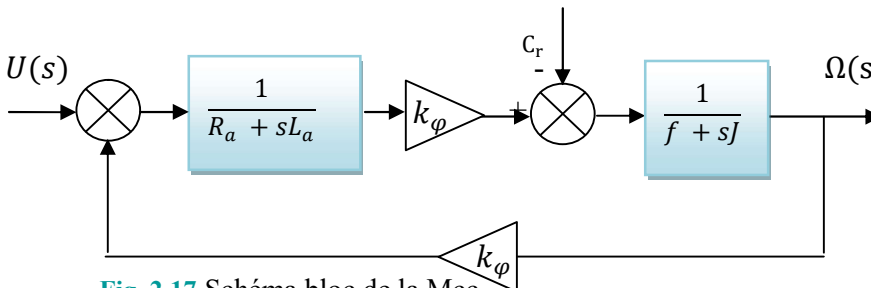


Fig. 2.17 Schéma bloc de la Mcc

2.4 Régulation et asservissement de la Machine à Courant Continu

2.4.1 Modèles pour l'asservissement de vitesse de la Mcc

En supposant le couple résistant $C_r = 0$, on aura :

$$[U(s) - k_\varphi \Omega(s)] \times \frac{1}{R_a + sL_a} \times k_\varphi = C_e(s) \quad (18)$$

$$C_e(s) = k_\varphi I_a(s) = f\Omega(s) + Js\Omega(s) \quad (19)$$

Ce qui donne :

$$U(s) = k_\varphi \Omega(s) + \frac{R_a}{k_\varphi} (f\Omega(s) + Js\Omega(s)) + \frac{L_a}{k_\varphi} (fs\Omega(s) + Js^2\Omega(s)) \quad (20)$$

Alors

$$U(s) = \left(\frac{fR_a + k_\varphi^2}{k_\varphi} \right) \Omega(s) + \left(\frac{JR_a + fL_a}{k_\varphi} \right) s\Omega(s) + \frac{JL_a}{k_\varphi} s^2\Omega(s) \quad (21)$$

Modèle d'ordre un

On néglige l'influence de l'inductance d'induit. L'équation (21) se simplifie en :

$$U(s) = \frac{fR_a + k_\varphi^2}{k_\varphi} \Omega(s) + \frac{R_a J}{k_\varphi} s\Omega(s) \quad (22)$$

$$\text{Ce qui donne : } \frac{k_\varphi}{R_a + k_\varphi^2} U(s) = \Omega(s) + \frac{R_a J}{fR_a + k_\varphi^2} s\Omega(s) \quad (23)$$

Soit La fonction de transfert reliant la commande en tension de la Mcc $U(s)$ et sa vitesse $\Omega(s)$ est :

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{E(s)} = \frac{K}{1 + \tau_{em}s} \quad (24) \quad \left| \quad \begin{array}{l} K = \frac{k_\varphi}{fR_a + k_\varphi^2} \text{ le gain statique} \\ \tau_{em} = \frac{R_a J}{fR_a + k_\varphi^2} \text{ Constante de temps électromagnétique} \end{array} \right.$$

Le système ainsi modélisé est donc d'ordre un. Il possède un pôle stable $s = \frac{1}{-\tau_{em}}$

Modèle d'ordre deux

On lève maintenant l'hypothèse du paragraphe précédent pour obtenir un modèle plus fin de la Mcc . Deux expressions intéressantes de la fonction de transfert sont alors possibles :

1^{ère} Forme :

De l'équation 21, on aura :

$$\frac{k_\varphi}{JL_a} U(s) = \left(\frac{fR_a + k_\varphi^2}{JL_a} \right) \Omega(s) + \left(\frac{JR_a + fL_a}{JL_a} \right) s\Omega(s) + s^2\Omega(s) \quad (25)$$

La fonction de transfert sera sous la forme :

$$G(s) = \frac{\frac{k_\varphi}{JL_a}}{s^2 + \left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{f}{J} \right) s + \frac{fR_a + k_\varphi^2}{JL_a}} \quad (26)$$

$$\text{La fonction de transfert sous la forme canonique : } G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (27)$$

2^{eme} Forme :

$$\left(\frac{k_{\varphi}}{fR_a+k_{\varphi}^2}\right)U(s) = \Omega(s) + \left(\frac{JR_a+fL_a}{fR_a+k_{\varphi}^2}\right)s\Omega(s) + \frac{JL_a}{fR_a+k_{\varphi}^2}s^2\Omega(s) \quad (28)$$

La fonction de transfert sera sous la forme : $G(s) = \frac{K}{1+(\tau_{em}+\mu\tau_{el})s+\tau_{em}\tau_{el}s^2}$ (29)

Si l'on définit la constante de temps électrique du système :

$$\tau_{el} = \frac{L_a}{R_a} \text{ et } \tau_{em} = \frac{JR_a}{fR_a+k_{\varphi}^2}$$

On note encore que : $\mu = \frac{fR_a}{fR_a+k_{\varphi}^2}$ avec $\tau_{el} \ll \tau_{em}$

Enfin, comme on peut supposer que : $\tau_{em} + \mu\tau_{el} \approx \tau_{em} \approx \tau_{em} + \tau_{el}$

Cela permet d'écrire finalement la fonction de transfert sous la forme :

$$G(s) = \frac{K}{(1+\tau_{em}s)(1+\tau_{el}s)} \quad (30)$$

Dont les pôles du système sont : $s_1 = -\frac{1}{\tau_{em}}$ et : $s_2 = -\frac{1}{\tau_{el}}$

2.4.2 Modèle du convertisseur :

Le convertisseur réalise une amplification du signal de commande d'entrée (gain G_0). Sa dynamique est modélisée par un temps de retard T_r . Sa fonction de transfert est donnée par :

$$G_c = \frac{U_s}{U_e} = G_0 e^{-sT_r}$$

T_r étant très petit; on peut assimiler la fonction de transfert du convertisseur à un élément du premier ordre :

$$G_c = \frac{G_0}{1 + sT_r}$$

Avec G_0 gain statique

T_r : constante de temps du convertisseur ;

2.4.3 Etude de la boucle en courant : (Régulation du Courant)

D'après le modèle dynamique du moteur, on peut étudier la réponse du système en boucle ouverte. Si l'on impose un échelon de tension de consigne au moteur, le courant présentera un dépassement qui peut atteindre des valeurs très importantes lors des transitoires. Ceci s'explique par la présence d'un zéro dans la fonction de transfert.

$$G_I(s) = \frac{I(s)}{U(s)} \quad (31)$$

A partir de Schéma de principe d'un moteur à courant continu la fonction de transfert est :

$$G_I(s) = \frac{\frac{1}{JL_a}(Js +)}{s^2 + (\frac{R_a}{L_a} + \frac{f}{j})s + \frac{fR_a + k_\phi^2}{JL_a}} \quad (32)$$

Les dépassements de courant constituent un véritable problème, tant pour le convertisseur statique que pour le moteur. Si le système (Convertisseur + Moteur) a été dimensionné pour une utilisation nominale, les transitoires de courant risquent de détruire les composants de puissance du convertisseur statique.

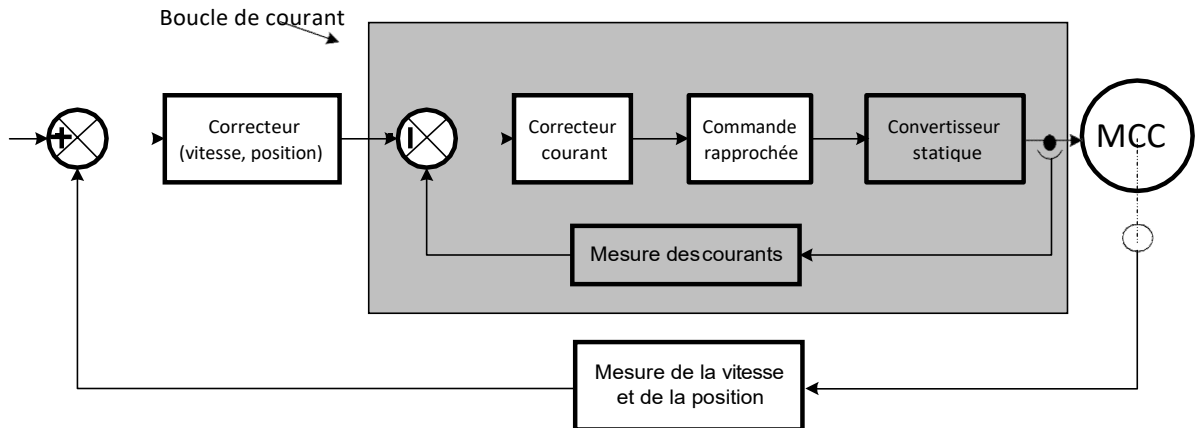


Fig 2.18 Asservissement de vitesse avec boucle de courant

Pour ces raisons il convient donc :

1. d'asservir le courant pour avoir la maîtrise des dépassements ;
2. de limiter le courant maximum pour protéger le moteur dans tous les cas

L'étude de l'asservissement de courant de la Mcc peut se faire sous deux angles. Soit on fait une synthèse en utilisant la fonction de transfert complète $G_I(s)$. Soit on fait le raisonnement approché suivant : La force électromotrice étant une grandeur proportionnelle à la vitesse de rotation, ses variations sont lentes devant celles du courant d'induit. On peut donc la considérer comme une perturbation dans le transfert tension-courant

L'équation (32) se résume à : $G_I(s) = \frac{1}{R_a + L_a s} = \frac{1}{R_a} \times \frac{1}{1 + \tau_e s}$ (33)

La fonction de transfert étant celle d'un premier ordre.

Une simple correction PI de fonction de transfert : $C_I(s) = K_p(1 + \frac{1}{\tau_i s})$ (34)

Conduit à : $C_I(s)G_I(s) = \frac{K_p}{R_a} \times \frac{1 + \tau_i s}{\tau_i s(1 + \tau_e s)}$ (35)

Le choix le plus simple consiste alors à compenser le pôle électrique en choisissant $\tau_i = \tau_e$, ce qui conduit à un système en boucle fermée d'ordre un de fonction de transfert :

$$G_{IBF}(s) = \frac{1}{k_i} \times \frac{1}{(1 + \frac{R_a \tau_i}{k_p k_i} s)} \quad (36)$$

Où k_i est le gain du capteur assurant la mesure de courant. Le temps de réponse de la boucle de courant se règle alors aisément en choisissant K_p

2.4.4 Asservissement de vitesse

L'asservissement de vitesse de la Mcc est réalisé une fois réglée la boucle de courant. On a donc un asservissement avec boucles imbriquées ou asservissement cascade, Pour réaliser l'asservissement de la vitesse du rotor d'une Mcc, la tension image de la vitesse mesurée est comparée à une tension de référence U_{ref} , image de la vitesse désirée Ω_r . La vitesse du rotor est mesurée par l'un des capteurs possibles (génératrice tachymétrique, codeur) et la tension image est directement obtenue en sortie du procédé dans le cas des capteurs analogiques. Le schéma-bloc de l'asservissement de vitesse est représenté à la figure suivante :

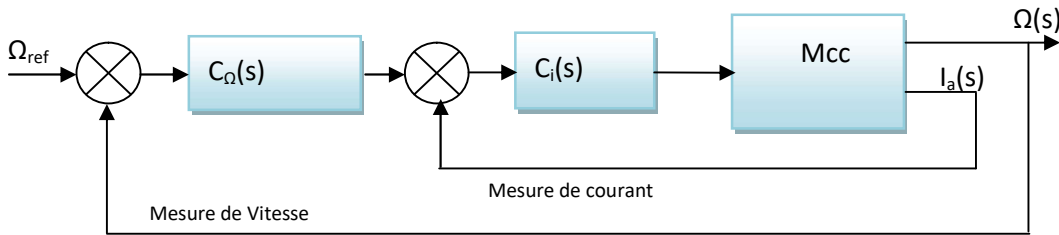


Fig. 2.18 Asservissement de vitesse avec boucle de courant

La boucle de courant est réglée avec une fonction de transfert du premier ordre et il est facile de régler la boucle de vitesse. En toute rigueur, il faudrait réécrire les équations dynamiques de la CC asservi en courant. Dans ce cas, la constante de temps de la boucle de courant étant très petite devant la constante de temps électromécanique du système, on obtient un modèle d'ordre deux, très proche d'un système du premier ordre. On peut donc à nouveau effectuer une correction PI.

Matière : Commande des entraînements électromagnétiques
Fac Techno/ Dept ELT/ Licence L3-ELM

TDN° 1

Variation de vitesse de la Machine à Courant Continu

Exercice 1

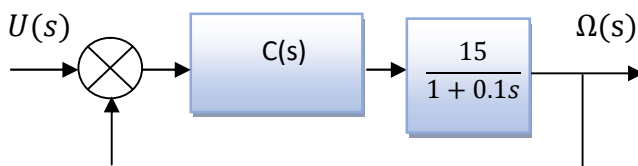
Un moteur à courant continu à flux constant ayant la plaque signalétique nominale suivante : **250V** ; **1440 tr/mn** ; **5A**. La résistance d'induit **Ra= 10Ω**.

1. Déterminer le coefficient de flux k_{ϕ} en web ;
2. Déterminer le couple et la puissance électromagnétique nominale.
3. Donner la caractéristique mécanique couple-vitesse $C=f(\Omega)$ à tension donnée U
4. A charge donnée Cr, donner la caractéristique vitesse-tension $\Omega=f(U)$.

Exercice 2

Un asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu peut être représenté par le schéma bloc de la figure 1. L'entrée est une tension (exprimée en volt) et la sortie est une vitesse (exprimée en radian/s).

A partir des équations simplifiées de la Mcc, on aboutit au schéma fonctionnel suivant :



1. On suppose que le correcteur est un simple amplificateur c.à.d $C(s) = k$
 - 1.1 Calculer la FTBF du système corrigé. En déduire les expressions de la constante de temps τ et du gain du système K .
 - 1.2 On impose pour cette boucle une constante de temps de **0.01sec**; en déduire le réglage correspondant de k et le gain du système K .
 - 1.3 La consigne est un échelon d'amplitude **100V**. Calculer la sortie S_1 en régime permanent (S est la vitesse de la Mcc exprimée en radian/s). que devient cette vitesse pour une tension de **200V** ?
2. On considère maintenant un correcteur PI, $C(s) = k \frac{(1+T_i s)}{T_i s}$
 - 2.1 On choisit de compenser la constante de temps du système à corriger en fixant $T_i=0.1sec$.
Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée du système.
 - 2.2 Déterminer les expressions de la constante de temps du système corrigé ainsi que son gain.
 - 2.3 On impose pour cette boucle une constante de temps de **0.01sec**. Déduire le réglage correspondant de k et la fonction de transfert du régulateur C(s).
 - 2.4 Reprendre la question 1.3 dans ces conditions.

Exercice Supplémentaire (Voir Cours)

Le fonctionnement de la machine à courant continu à excitation indépendante est régi par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} U = R_a \cdot i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e(t) \\ C_e = K_\varphi \cdot i_a(t) \\ C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \\ e(t) = K_\varphi \cdot \Omega(t) \end{cases}$$

a) Etablir le schéma fonctionnel de la machine.

b) Déterminer la fonction de transfert $\frac{\Omega(s)}{U(s)}$ pour $C_r = 0$ et $L_a = 0$ et la mettre sous forme $\frac{K_{em}}{(1 + \tau_{em}s)}$

c) Dans le cas où $L_a \neq 0$ Déterminer la fonction de transfert $\frac{\Omega(s)}{U(s)}$ et la fonction de transfert $\frac{I_a(s)}{U(s)}$

d) Donner l'allure de la courbe de vitesse-en fonction du temps; Démarrage à vide et application de charge mécanique :

AN : à $t=0s$ $C_r=0Nm$ et à $t=1s$ $C_r=10Nm$.

Chapitre 3. Variation de vitesse de la machine asynchrone

3.1 Rappels sur la machine asynchrone

Définition : c'est une machine électrique tournante réalisant la transformation de la puissance électrique reçue sous forme de courant alternatif en puissance mécanique. Ayant $2p$ pôles et étant reliée à un réseau de fréquence f , cette machine tourne à une fréquence légèrement inférieure à la fréquence synchrone n_s . Cela veut dire qu'il y'a deux vitesses.

Constitution :

Stator : Constitué de trois enroulements (bobines) parcourus par des courants alternatifs triphasés et possède p paires de pôles.

Champ tournant : Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme Ω_s

Rotor : n'est relié à aucune alimentation. Il est constitué d'une masse métallique dont de l'aluminium pour l'alléger. On parle souvent de rotor à cage d'écureuil. On dit aussi qu'il est en court-circuit. Il tourne à la vitesse de rotation $n < n_s$

Rotor à cage .

Il est constitué de barres métalliques parallèles réunies par 2 couronnes conductrices (court-circuit)

Rotor bobiné.

Les conducteurs constituent un enroulement triphasé (le plus souvent couplé en étoile). Il est accessible grâce aux bagues et balais. Il est fermé sur lui même ou sur un rhéostat pour modifier la résistance (notamment au démarrage)

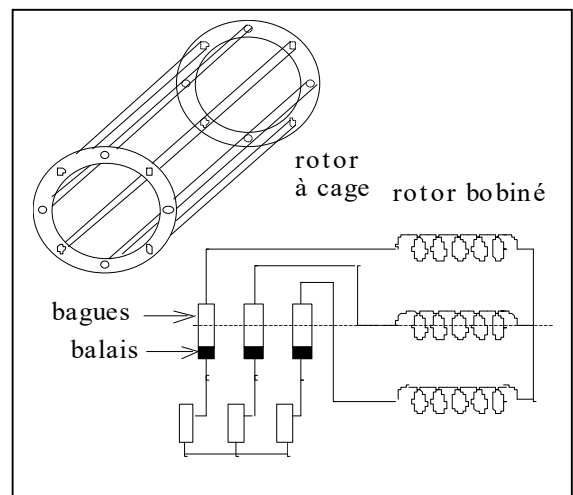


Fig. 3.1 Types de rotors d'une MAS

3.2 Principe de fonctionnement

1. Alimentation triphasée de l'enroulement statorique d'où la création d'un champ tournant à la vitesse de synchronisme $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ [rd/s]
 $n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p}$ [tr/mn].
2. Le champ tournant induit des F.e.m dans l'enroulement rotorique (F.e.m induites). Le bobinage rotorique va être le siège d'un courant induit d'où l'appellation de la machine d'induction.

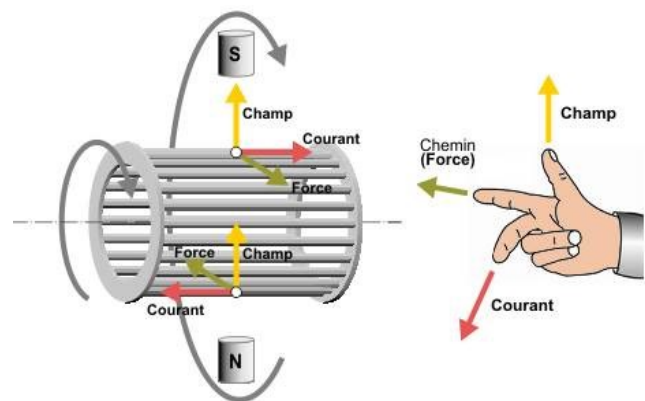


Fig. 3.2 Principe de fonctionnement d'une MAS

Résultat 1 l'interaction de ce courant avec le champ tournant engendre des forces \implies Mouvement du rotor.

La force (couple) va entrainer le rotor dans le sens du champ tournant du stator. Ce couple tend du fait de la loi de Lenz à réduire la cause qui a donné naissance aux courants induits c.à.d la rotation relative du champ magnétique par rapport au rotor/

Résultat 2 Le rotor tourne alors à une (vitesse entraînée) $\Omega < \Omega_s$ vitesse du champ tournant au stator (vitesse entraînant) d'où l'appellation "Machine Asynchrone".

Remarque : Si le rotor tournait à la vitesse synchrone Ω_s , donc aussi vite que le flux, le flux à travers chacune des bobines rotoriques serait constant. Au rotor, il n'ya plus de f.e.m. induites, donc plus de courant et plus de couple. Le rotor tourne nécessairement à une vitesse Ω inférieure à la vitesse Ω_s du champ.

- ✓ Puisque Ω diffère de Ω_s , c'est un moteur asynchrone.
- ✓ $(\Omega_s - \Omega)$ est la vitesse de glissement.

Définition du glissement : Le rotor tourne à la vitesse Ω plus petite que la vitesse de synchronisme Ω_s . On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant.

Ce glissement g va dépendre de la charge. En réalité le glissement 'g' est faible pour un fonctionnement en charge nominale

$$g = \frac{\Delta\Omega}{\Omega_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (1)$$

Ω_s [rd/s], N_s [tr/mn] : vitesses de rotation de synchronisme du champ tournant
 Ω [rd/s], N [tr/mn]: vitesses de rotation du rotor.
 g : glissement sans unité.

Avec $g \in]0,1]$

Si $g=0 \rightarrow \Omega \approx \Omega_s$ Fonctionnement à vide

Si $g=1 \rightarrow \Omega = 0$ Fonctionnement à rotor bloqué

3.3 Modes de variation de vitesse d'une MAS

D'après l'équation (1) la vitesse du rotor est donné par :

$$\Omega = \Omega_s(1 - g) \quad (2)$$

Sachant que : $\omega_s = 2\pi f_s = p\Omega_s$ (3)

$$\omega_R = 2\pi f_R = p(\Omega_s - \Omega) \quad (4)$$

Alors :

$$\Omega = \frac{2\pi f_s}{p} (1 - g) \text{ [rd/s]} \quad \text{et} \quad N = \frac{60f_s}{p} (1 - g) \text{ [tr/mn]} \quad (5)$$

ω_s [rd/s]: Pulsation des courants statoriques.
 f_s [Hz]: Fréquence des courants statoriques.
 $\omega_R = g\omega_s$ [rd/s]: Pulsation des courants rotoriques.
 $f_R = gf_s$ [Hz]: Fréquence des courants rotoriques.
 P : Nombre de paire de pôles.

En examinant cette formule, on peut distinguer trois modes de variation de vitesse :

- Action sur le nombre de pair de pole p .
- Action sur le glissement g .
- Action sur la fréquence du stator f_s

Action sur le nombre de pôles

Deux types de moteurs permettent une action sur le nombre de pôles :

- les moteurs à enroulements séparés : plusieurs bobinages sont insérés au stator et le nombre p de paires de pôles est différent pour chaque bobinage. A chaque bobinage alimenté, on obtient une vitesse de synchronisme différente, et, au glissement près, une vitesse du rotor différente.
- Les moteurs à couplage de pôles (Dalhander). 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.

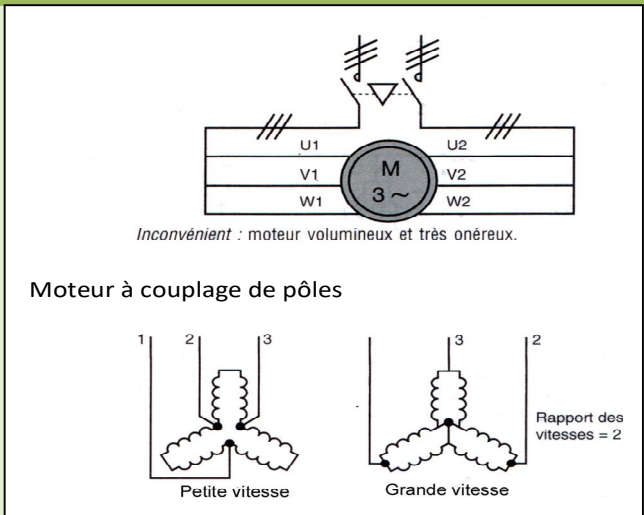


Fig. 3.3 Variation de vitesse par action sur le nombre de pole

Action sur le glissement

Deux techniques existent :

- La première utilise un moteur à rotor bobiné. En insérant des résistances en série avec les enroulements rotoriques, le glissement varie. Ce procédé entraîne des pertes par effet joule importantes au rotor, le rendement est loin d'être optimal.
- La seconde méthode consiste à récupérer l'énergie perdue dans la première méthode pour la renvoyer sur le réseau. Ce système nécessite l'utilisation d'une cascade hyposynchrone qui permet de relier deux réseaux de fréquence différente (le rotor et le stator).

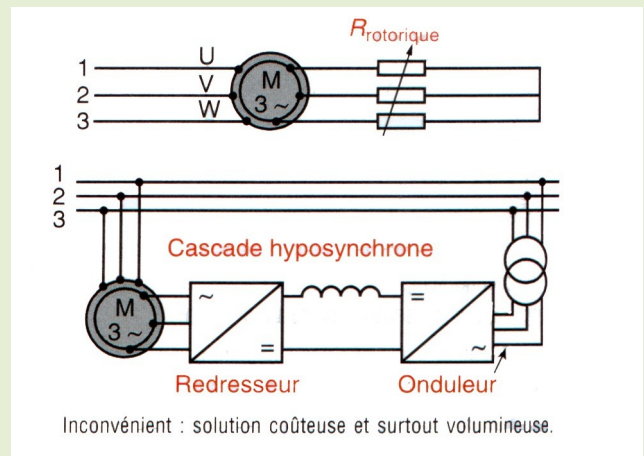


Fig. 3.4 Variation de vitesse par action sur le glissement

Action sur la fréquence

Comme le montre ce schéma, cette technique nécessite l'insertion d'un convertisseur de fréquence entre le réseau et le stator du moteur. Cette solution est actuellement la plus répandue. Elle permet une grande souplesse de réglage de la vitesse du moteur asynchrone triphasé à cage. Pour conserver les performances du moteur (couple maximal disponible en permanence quelle que soit la vitesse), nous verrons dans la suite qu'une commande en « U/f » est nécessaire.

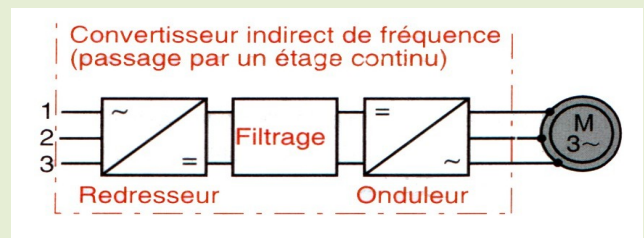


Fig. 3.5 Variation de vitesse par action sur la fréquence

3.4 Variateurs de vitesse du moteur asynchrone

Un variateur de vitesse fournit, à partir d'un réseau alternatif une tension alternative de valeur efficace et de fréquence variables.

Le variateur de vitesse utilise la technique de variation de la fréquence des grandeurs électriques statoriques (de la tension d'alimentation). Pour faire varier cette fréquence, la technique de modulation par largeur d'impulsion est utilisée. Même si la tension d'alimentation du moteur n'est plus sinusoïdale (voir figure ci-dessous), le stator, composé d'enroulements (inductances et résistances), filtre les hautes fréquences du signal.

Redresseur : Permet de convertir la tension alternative du réseau en une tension continue

Filtre : Permet de réduire l'ondulation de la tension redressée.

Onduleur : Permet d'élaborer, à partir de la tension continue, une tension alternative de fréquence variable.

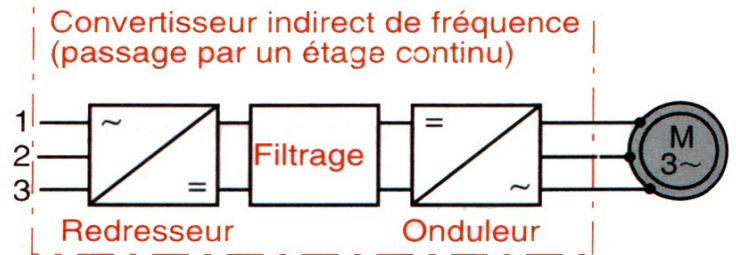


Fig. 3.6 Variateurs de vitesse d'une MAS

3.5 Modélisation de la machine asynchrone en régime permanent

Le schéma fonctionnel de la machine utilisé, représente le fonctionnement en régime permanent sinusoïdal de la MAS. Une phase d'un moteur asynchrone peut être vue comme un transformateur, dont le secondaire serait court-circuité. En ramenant les impédances du secondaire au primaire, on aboutit alors au schéma ci-contre

Avec :

- R_s : Résistance de la phase du stator
- R_f : Résistance représentant les pertes fer
- X_μ : Réactance de Magnétisation
- X'_r : Réactance de fuites du rotor rapportés au stator
- $\frac{R'_r}{g}$: Résistance représentant la puissance électromagnétique

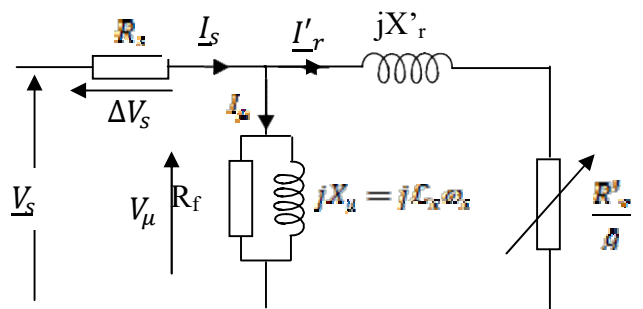


Fig. 3.7 Modèle de la MAS

Si $\Delta V_s = R_s I_s \ll V_s$, valables dans la plupart des fonctionnements proches du nominal alors $V_s \approx V_\mu$
 En supposant les pertes fer nulles on aura le modèle de la figure 3.8.

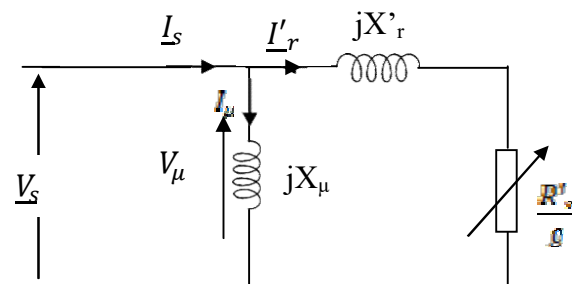


Fig. 3.8 Modèle simplifié de la MAS

V_s et I_s représentent la tension simple et le courant pour une des phases de la machine. Le courant I_μ est le courant magnétisant, il représente le flux du stator. Le courant I_r' est un courant « fictif » dont la pulsation est ω_s . L'amplitude de ce courant est proportionnelle aux courants rotoriques réels et de pulsation ω_r . Il est important de noter que toutes les grandeurs tensions et courants de ce schéma équivalent sont à la pulsation ω_s .

Le flux est créé par le courant circulant dans l'inductance magnétisante L_μ . Afin d'optimiser les performances de la machine, il faut que le flux et donc le courant magnétisant I_μ soit maintenu sensiblement constant sur toute la plage de variation de vitesse.

Equation du stator

$$\text{Tension statorique : } \underline{V}_s = \underline{I}_s \times \underline{Z}_{in} = \underline{I}_s \times \frac{jX_\mu(jX_r' + \frac{R_r'}{g})}{jX_\mu + jX_r' + \frac{R_r'}{g}} \quad (6)$$

$$\text{Courant statorique : } I_{seff} = \frac{V_{seff}}{|Z_{in}|} \quad (7)$$

$$\text{Puissance absorbée : } P_{abs} = 3V_{seff}I_{seff} \cos \varphi_s \quad (8)$$

$$\cos \varphi_s = \text{Arg}(Z_{in}) \quad (9)$$

$$\text{Pertes joules statoriques : } P_{js} = 3R_s I_{seff}^2 \quad (10)$$

$$\text{Flux statorique : } V_\mu = j\omega_s \varphi_\mu = j\omega_s \varphi_s = V_s \quad \text{Alors } \varphi_s = \frac{V_s}{2\pi f_s} \quad (11)$$

Equation du rotor

La puissance électromagnétique est la puissance électrique transmise au rotor et dissipée dans la résistance fictive $\frac{R_r'}{g}$.

$$P_{elm} = 3 \frac{R_r'}{g} I_r'^2 \quad (12)$$

$$\text{avec } I_r'^2 = \frac{V_s^2}{X_r'^2 + (\frac{R_r'}{g})^2} \quad (13)$$

Le couple électromagnétique :

$$C_{elm} = \frac{P_{elm}}{\Omega_s} = \frac{3}{\Omega_s} \frac{R_r'}{g} \times \frac{V_s^2}{X_r'^2 + (\frac{R_r'}{g})^2} \quad (14)$$

$$\text{Ce qui donne : } C_{elm} = 3 \frac{V_s^2}{\Omega_s} \times \frac{\frac{R_r'}{g}}{X_r'^2 + (\frac{R_r'}{g})^2} \quad (15)$$

Tout calcul fait, on obtient le couple en fonction du glissement ou l'équation de Kloss :

$$C_{elm} = \frac{2C_{max}}{\frac{g_{max}}{g} + \frac{g}{g_{max}}} \quad (16)$$

avec

$$\begin{cases} C_{max} = \frac{3}{2} \frac{V_s^2}{\Omega_s X_r'} \\ g_{max} = \frac{R_r'}{X_r'} \end{cases} \quad (17)$$

L'allure du couple en fonction du glissement est représentée par la figure suivante :

- La courbe $C_{elm}(g)$ présente deux branches; l'une stable comprise entre le fonctionnement à vide ($g = 0$) et le point à couple max, l'autre instable comprise entre ce point et l'arrêt ($g = 1$).
- Il y'a donc deux raisons pour que le glissement nominal d'un moteur asynchrone soit petit devant 1 (il est de l'ordre de 2% à 5%) :
 - ✓ L'exigence d'un bon rendement ;
 - ✓ La bonne stabilité en vitesse.

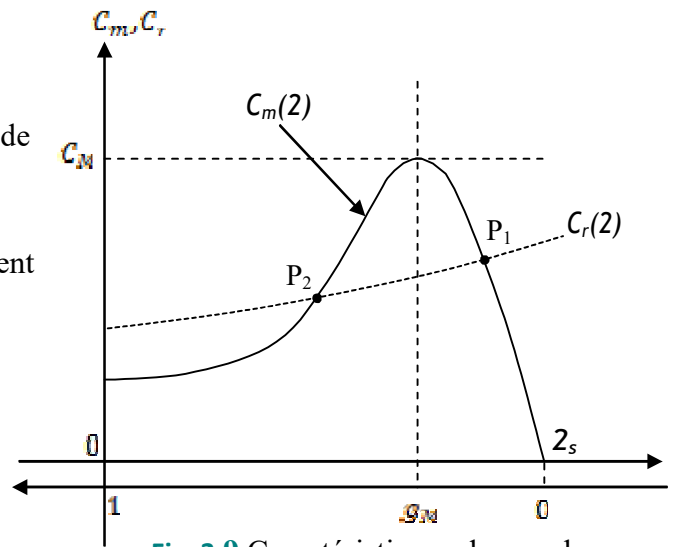


Fig. 3.9 Caractéristiques du couple

- Le rapport entre le couple max et le couple nominal ne doit pas être trop élevé sinon le moteur serait surdimensionné, il ne doit pas être trop faible sinon le moteur risque de décrocher (s'arrêter) en cas de baisse de la tension. Ce rapport est généralement de l'ordre de 2 si bien que le glissement g_{max} est également faible (de l'ordre de 10% à 20%). D'où il résulte fatalement que le couple de démarrage ($g = 1$) est petit devant le couple nominal.
- Cependant, ces caractéristiques sont limitées lorsque la valeur du glissement est faible, de plus à fréquences ou tensions sont faibles, il n'est plus possible de négliger la résistance statorique (R_s). Le couple délivré par la machine est alors déterminé par la caractéristique de la charge mécanique entraînée. Forts de cette modélisation de la MAS et de son mode d'alimentation, des lois de commande sont envisagées pour agir sur le couple et donc la vitesse.
- A partir de la connaissance de la loi Couple, différentes stratégies de commande des machines asynchrones ont été élaborées. Parmi lesquelles la loi dite **loi tension/fréquence (V/F)** appelée aussi commande scalaire.

3.6 Commande Scalaire : Contrôle V/F

La commande scalaire est, la plus ancienne et la plus simple des lois de commande d'une machine asynchrone. Elle est utilisée essentiellement pour des applications ne nécessitant que des performances statiques ou dynamiques moyennes. Grâce aux avancées de l'électronique de puissance, de nombreux variateurs utilisent ce mode de commande. On en retrouve essentiellement pour des applications industrielles de pompage, climatisation, ventilation.

Le principe de cette méthode consiste à imposer aux bornes de l'induit de la machine, le module de la tension ainsi que la pulsation.

Plusieurs commandes scalaires existent selon que l'on agit sur le courant ou sur la tension. Elles dépendent surtout de la topologie de l'actionneur utilisé (Onduleur de tension ou de courant). Dans l'alimentation en tension, les onduleurs fournissent des tensions dont la forme et l'amplitude peuvent être considérées indépendantes de la charge. Par contre dans l'alimentation en courant, les courants fournis ont des formes et des amplitudes influencées par la nature de la charge.

La variation de la vitesse est obtenue par la variation de la pulsation statorique qui est générée directement par le régulateur. Cette méthode de commande est basée sur le modèle de la machine en régime permanent. On peut alors assimiler une phase du stator et la phase correspondante du rotor à un transformateur monophasé parfait.

Soit Le couple maximal :

$$C_{max} = \frac{3}{2} \frac{V_s^2}{\Omega_s X_r'} = \frac{3}{2} \frac{V_s^2}{\omega_s \times \omega_s L_r'} = \frac{3p}{2(2\pi)^2 L_r'} \left(\frac{V_s^2}{f_s^2} \right) \quad (18)$$

- D'après cette expression, on voit bien que si la fréquence f_s augmente et que le reste est constant, le couple disponible (et en particulier le couple maximum) diminue.
- Pour augmenter la vitesse du moteur tout en gardant un couple disponible constant, il suffit de garder le rapport V_s/f_s fixe.

Ainsi, lorsque f_s varie (et donc V_s également puisque V/f est constant), la caractéristique de couple du moteur se translate. On obtient alors le réseau suivant :

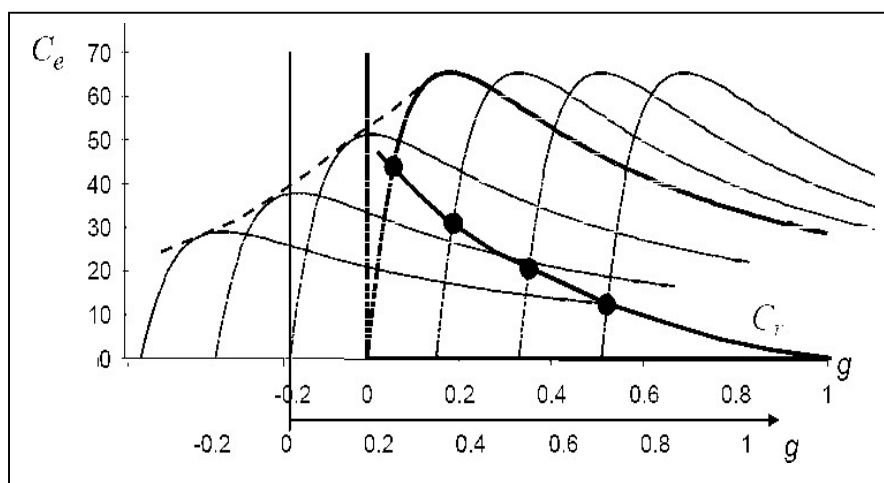


Fig. 3.10 Caractéristiques du couple en fonction du glissement

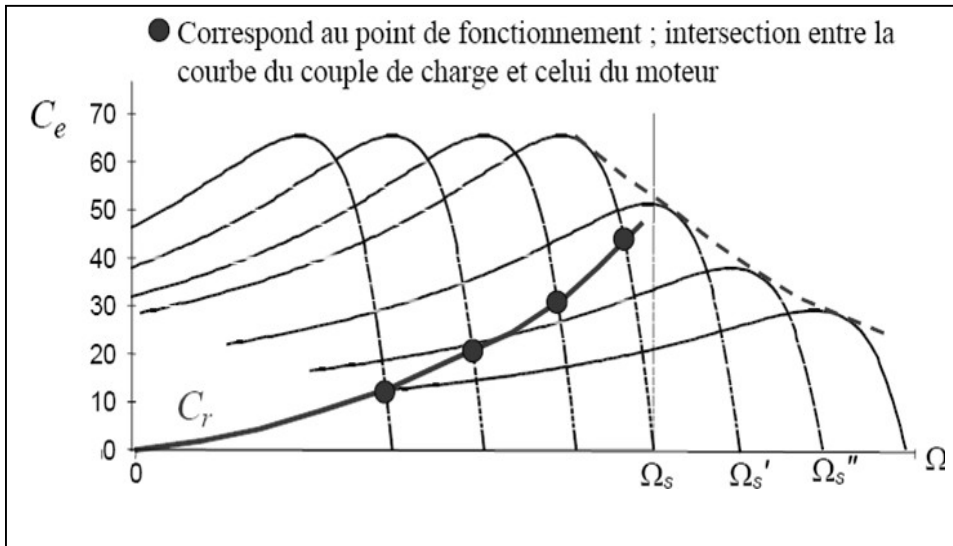


Fig. 3.11 Caractéristiques du couple en fonction de la vitesse

Remarque :

- Le rapport V/f ne peut pas rester fixe sur toute la plage de fonctionnement. En effet, si f_s augmente au-delà de 50 Hz (fréquence réseau), garder V/f constant signifie qu'on dispose d'une tension supérieure à la tension du réseau (ce qui n'est pas le cas). Donc au-delà de 50 Hz, V/f n'est plus fixe.
- En fait, garder le rapport constant revient à garder le flux constant. Quand la tension atteint sa valeur maximale, on commence alors à décroître ce rapport ce qui provoque une diminution du couple que peut produire la machine. On est en régime de "Défluxage". Ce régime permet de dépasser la vitesse nominale de la machine, on l'appelle donc aussi régime de survitesse (partie $\Omega > \Omega_s$ de la Figure 3.11).
- 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. Les composantes fondamentales des tensions statoriques forment un système triphasé équilibré. Leur valeur efficace V_s doit être réglée de façon à maintenir le flux statorique constant pour ne pas déclasser en couple la machine.

Principe :

Si $R_s = 0$, alors $V_s = j\omega_s \phi_s$ (19)

d'où la définition de la loi V/f avec $\omega_s = 2\pi f_s$

$\frac{V_s}{f_s} = 2\pi \phi_s = Constante$ (20)

Pour une tension de 220v et une fréquence de 50Hz, alors $\frac{V_s}{f_s} = 4,4$

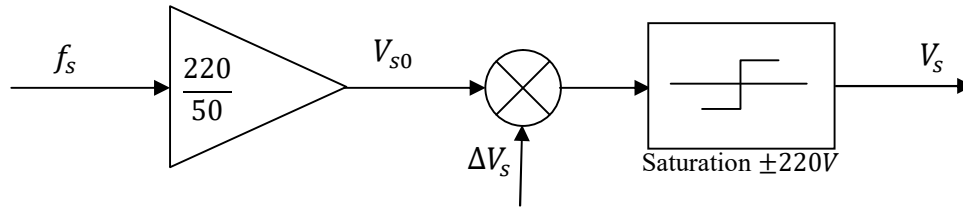


Fig. 3.12 Schéma d’implantation de la loi $V/f=Cste$.

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 :

Afin d'asservir la vitesse de rotation, on rajoute une boucle externe qui, à partir de l'erreur de vitesse, permet d'augmenter la fréquence des tensions statoriques de façon à éliminer l'erreur de vitesse due au glissement.

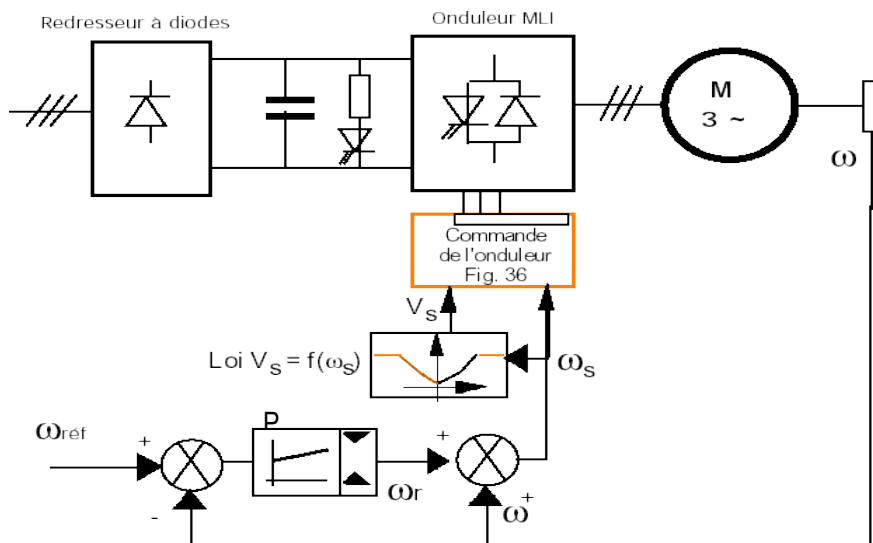


Fig. 3.13 Asservissement de vitesse

Le correcteur, généralement de type PI, permet d'estimer la pulsation rotorique. 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**. Cette relation est nécessaire à l'existence d'un couple électromagnétique à valeur moyenne non nulle. La sortie du correcteur PI est munie d'un dispositif écrêté de façon à limiter la valeur de ω_r . Ainsi l'amplitude des courants statoriques est indirectement limitée.

Matière : Commande des entrainements électromagnétiques

Fac Techno/ Dept ELT/ Licence L3-ELM

TDN° 2

Variation de vitesse de la Machine Asynchrone

Exercice 1

Sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone couplé en étoile sont fournies les indications suivantes :

Tension nominale aux bornes d'un enroulement statorique	$V_s = 220 \text{ V}$	$f_s = 50 \text{ Hz}$
Courant nominal parcourant chaque phase du moteur :	$I_n = 106 \text{ A.}$	
Facteur de puissance nominal :	$\cos\varphi_n = 0,86.$	
Vitesse de rotation nominale :	$n_s = 1460 \text{ tr/mn}$	
Puissance utile nominale :	$P_{u_n} = 55 \text{ kW}$	
Nombre de pôles :	4	
$R'_r = 66 \text{ m}\Omega$	$L'_r = 1 \text{ mH}$	

1. Fonctionnement au régime nominal de la machine

On demande de calculer:

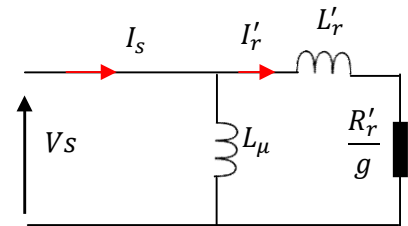
- Le glissement, - Le couple utile, -La puissance absorbée, - Le rendement.

2. Étude du couple électromagnétique C_{em}

Le schéma équivalent de la machine est donné par :

2.1 Montrer à l'aide du modèle équivalent que le moment du couple électromagnétique peut se mettre sous la forme :

$$C_{em} = \frac{3p}{2\pi} \cdot \left(\frac{V_s}{f_s}\right)^2 \cdot \frac{R'_r f_r}{R_r'^2 + 4\pi^2 L_r'^2 f_r^2}$$



2.2 Montrer que pour des grandes vitesses on peut écrire : $C_{em} = A \cdot \left(\frac{V_s}{f_s}\right)^2 f_r$. Déduire A.

3. Fonctionnement à vitesse de synchronisme variable.

Le moteur est alimenté par un convertisseur de fréquence qui permet de maintenir aux bornes d'un enroulement statorique le rapport $\left(\frac{V_s}{f_s}\right)$ constant.

3.1 Donner la nouvelle expression de C_{em} en fonction de n_s et n ;

3.2 On souhaite faire démarrer la machine à couple nominal. Trouver l'expression de la fréquence minimale que doit alors délivrer l'onduleur.

Exercice 2

On donne une machine asynchrone MAS, tel que $V_s = 220 \text{ V}$ $f_s = 50 \text{ Hz}$

$R'_r = 10\Omega$ $L'_r = 0.2 \text{ H}$, $p = 1$. (Les pertes magnétiques sont négligeables)

Le couple résistant $C_r = 0.9 \text{ N.m}$

1. Calculer le courant de démarrage et le couple de démarrage.
2. Calculer le couple électromagnétique maximal et le glissement correspondant.
3. Tracer la courbe du couple électromagnétique et celle du couple résistant.
4. Calculer le nombre des points d'équilibres.
5. Calculer le glissement et la vitesse du rotor pour le couple de charge C_r .

Solution

Exercice 1:

1. Fonctionnement au régime nominal de la machine

Le glissement : $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$ avec $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = \frac{2\pi f_s}{p} = \frac{2\pi \times 50}{2} = 157 \text{ rd/s}$ alors $n_s = \frac{60\Omega_s}{2\pi} = 1500 \text{ tr/mn}$

$$g = \frac{1500 - 1460}{1500} = 0.027 = 2.7\%$$

Le couple utile : $C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{55000}{1460 \cdot \frac{2\pi}{60}} = 360 \text{ N.m}$

La puissance absorbée : $P_a = 3VI \cos\varphi = 3 \times 220 \times 106 \times 0.86 = 60165.6 \text{ W}$

Le rendement : $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{55000}{60165.6} = 0.914 = 91.4\%$

2. Étude du couple électromagnétique C_{em}

1. Montrons que le couple électromagnétique peut se mettre sous la forme: $C_{em} = \frac{3p}{2\pi} \cdot \left(\frac{V_s}{f_s}\right)^2 \cdot \frac{R'_r f_r}{R_r'^2 + 4\pi L_r'^2 f_r^2}$

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = \frac{3}{\Omega_s} \cdot \frac{R'_r}{g} (I'_r)^2 = \frac{3}{\Omega_s} \cdot \frac{R'_r}{g} \frac{V_s^2}{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + L_r'^2 \omega_s^2}$$

$$C_{em} = \frac{3pR'_r}{2\pi f_s} \cdot g \frac{V_s^2}{R_r'^2 + L_r'^2 (g^2 \omega_s^2)} = \frac{3pR'_r}{2\pi f_s} \cdot \frac{f_r}{f_s} \frac{V_s^2}{R_r'^2 + L_r'^2 \omega_r^2}$$

$$C_{em} = \frac{3p}{2\pi} \cdot \left(\frac{V_s}{f_s}\right)^2 \frac{R'_r f_r}{R_r'^2 + 4\pi^2 L_r'^2 f_r^2}$$

2. Montrons que pour des grandes vitesses on peut avoir $C_{em} = A \cdot \left(\frac{V_s}{f_s}\right)^2 f_r$

A grande vitesse $g=0$ on a : $f_r = g f_s \approx 0$ alors $R_r'^2 + 4\pi^2 L_r'^2 f_r^2 \approx R_r'^2$

Alors $C_{em} = \frac{3p}{2\pi} \cdot \left(\frac{V_s}{f_s}\right)^2 \frac{R'_r f_r}{R_r'^2 + 0} = \frac{3p}{2\pi R_r'} \cdot \left(\frac{V_s}{f_s}\right)^2 f_r = A \cdot \left(\frac{V_s}{f_s}\right)^2 f_r$ avec $A = \frac{3p}{2\pi R_r'}$

3. Fonctionnement à vitesse de synchronisme variable.

Le moteur fonctionne avec le rapport $\left(\frac{V_s}{f_s}\right)$ constant.

1. Nouvelle expression de C_{em} en fonction de n_s et n .

On pose $\left(\frac{V_s}{f_s}\right) = K$ (constante) Alors le couple devient $C_{em} = A \cdot \left(\frac{V_s}{f_s}\right)^2 f_r = A \cdot K^2 f_r = A' f_r$

Or $f_r = g \times f_s = \frac{(n_s - n)}{n_s} \times f_s = \frac{p(n_s - n)}{60}$ Alors $C_{em} = A' f_r = \frac{pA'}{60} (n_s - n) = A'' (n_s - n)$

Avec $A'' = \frac{pA'}{60}$

2. Démarrage à couple nominal. Trouvons l'expression de la fréquence minimale.

Au démarrage $g = \frac{(n_s - n)}{n_s} = 1$ alors $n=0$, le couple devient

$$C_{em} = A'' (n_s - n) = A'' n_s = A'' \frac{f_s \cdot 60}{p} = C_n$$

Donc la fréquence doit être $f_s \geq \frac{pC_n}{60A''}$

Exercice 2:

Machine asynchrone : $V_s = 220 \text{ V}$, $f_s = 50 \text{ Hz}$. $R'_r = 10 \Omega$ $L'_r = 0.2 \text{ H}$, $p = 1$.

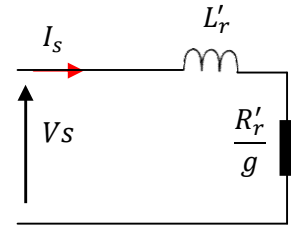
Couple résistant $C_r = 0.9 \text{ N.m}$

1. Courant de démarrage :

En négligeant les pertes magnétiques le modèle équivalent d'une phase statorique est :

Au démarrage $g = 1$

$$\text{Alors } I_{sd} = \frac{V_s}{\sqrt{X_r'^2 + (R_r')^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0.2 \times 314)^2 + 10^2}} = 3.46 \text{ A}$$



Couple de démarrage : l'expression du couple pour $g = 1$ est :

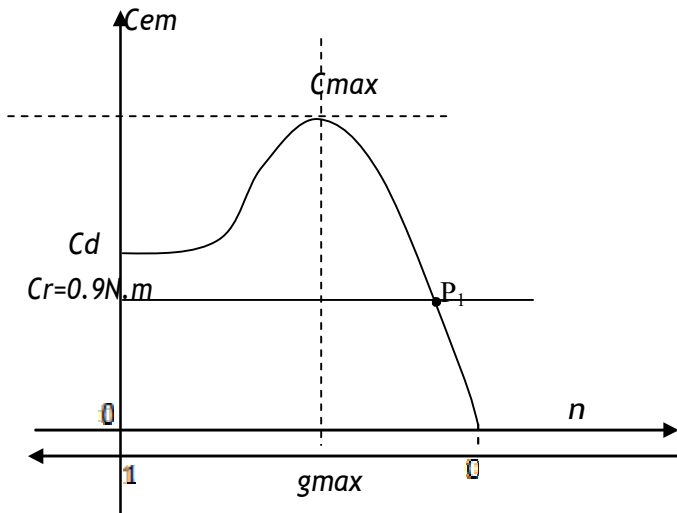
$$C_d = 3 \frac{V_s^2}{\Omega_s} \times \frac{R_r'}{X_r'^2 + R_r'^2} = 3 \frac{220^2}{314} \times \frac{10}{(0.2 \times 314)^2 + 10^2} = 1.14 \text{ N.m}$$

2. Couple électromagnétique maximal :

$$C_{max} = \frac{3 V_s^2}{2 \Omega_s X_r'} = \frac{3}{2} \times \frac{220^2}{314 \times (0.2 \times 314)} = 3.68 \text{ N.m}$$

Glissement maximal : $g_{max} = \frac{R_r'}{X_r'} = \frac{10}{0.2 \times 314} = 0.16 = 16\%$

3. Courbe du couple électromagnétique et celle du couple résistant.



4. Calcul du nombre des points d'équilibres.

Le couple résistant est inférieur au couple de démarrage donc il y'a un seul point d'équilibre dans la zone linéaire.

5. Calcul du glissement et de la vitesse du rotor et pour le couple de charge C_r .

$C_{elm} = C_r$ alors le glissement est proche de zéro donc on néglige X_r' devant $\frac{R_r'}{g}$

$$C_{elm} = 3 \frac{V_s^2}{\Omega_s} \times \frac{R_r'}{X_r'^2 + (\frac{R_r'}{g})^2} = 3 \frac{V_s^2}{\Omega_s} \times \frac{g}{R_r'} \quad \text{alors } g = R_r' \frac{\Omega_s}{3V_s^2} \times C_r = 10 \times \frac{314}{3 \times 220^2} \times 0.9 = 1.94\%$$

$$\text{La vitesse est : } \Omega = \frac{\omega_s}{p} (1 - g) = \frac{314}{1} (1 - 0.0194) = 308 \text{ rd/s}$$