

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Etude du moteur à courant continu

Introduction	2
I.1.Constitution.....	3
I.2.Principe de fonctionnement.....	4
I.3. Equations du moteur à courant continu	5
I.4. La réaction magnétique d'induit	7
I.5. Commutation :.....	7
I.6. Les caractéristiques et les différents types d'excitation de moteurs à courant continu.....	8
I.6.1. Moteur à excitation série.....	8
I.6.2. Moteur à excitation shunt	12
I.6.3. Moteur à excitation indépendante	15
I.6.4. Moteur à excitation constante	16
I.6.5. Moteur à excitation compound ou composée	17
I.7. Régulation de vitesse de moteur à courant continu	18
I.7.1. Procédés de variation de la vitesse pour les moteurs à courant continu	18
I.7.2. Les différentes boucles de la régulation de vitesse d'une machine à courant continu	20
I.7.2.1. Schéma de principe de système de régulation de vitesse du moteur à courant continue	20
I.8. Modes de démarrage.....	27
I.8.1. Démarrage directe	27
I.8.2. Démarrage avec rhéostat.....	27
I.9. Modes de freinage	28

Chapitre II Autopilotage du moteur synchrone

II.1. Généralités sur le moteur synchrone	30
II.1.1. Présentation de la machine synchrone	30
II.1.2. Principe de fonctionnement	33
II.2. L'autopilotage du moteur synchrone	43
II.2.1. L'idée de l'autopilotage	43
II.2.2. Principe de l'autopilotage	45
II.2.3. Réalisation pratique	45
II.3.2.a. Autopilotage par commutateur de courant	46
Conclusion.....	52
II.3.2.b. Autopilotage par onduleur de tension:.....	52
Conclusion	58

Chapitre III: Etude comparative

III.1. Comparaison des structures	59
III.2 .Comparaison des performances :	59
III.3.Aspect économique et domaine d'utilisassions	62

Conclusion générale	63
----------------------------------	-----------

Introduction générale

Les machines électriques équipent la majeure partie des systèmes d'entraînement industriels à vitesse variable. Les applications vont de la robotique (servomoteurs) jusqu'à l'entraînement des laminoirs en sidérurgie en passant par le domaine des transports. La machine à courant continu est restée longtemps l'actionneur le plus utilisé pour réaliser ces systèmes. Convenablement compensée, cette machine présente l'avantage d'être simple à commander, le couple étant directement proportionnel au courant d'induit. Néanmoins, elle présente des inconvénients liés à sa structure. La présence du système balais-collecteur nécessite un entretien constant, limite la vitesse de rotation, interdit son utilisation en atmosphère explosive.

Le développement des semi-conducteurs de puissance a permis de réaliser des onduleurs de tension ou de courant, ouvrant la voie de la vitesse variable aux machines alternatives (synchrone et asynchrone). Ces machines possèdent de nombreux avantages par rapport à la machine à courant continu. L'absence du collecteur permet d'accroître la fiabilité et permet d'obtenir des machines ayant un coût de fabrication et d'entretien moins important.

Les avancées technologiques de la micro-électronique ont permis le développement de commandes très performantes pour les machines alternatives (contrôle vectoriel et contrôle direct en couple). De nombreux constructeurs proposent aujourd'hui des variateurs utilisant ces principes de commande.

La machine à courant alternatif la plus utilisée dans l'industrie pour les applications du type servomoteur (robotique, machines outils...) est la machine synchrone. Elle présente un couple massique important et un bon rendement par rapport aux autres types de machines. Son mode de contrôle est simple car le repère de commande est directement lié au rotor.

Notre travail consiste justement à comparer les moteurs à courant continu et synchrone autopiloté. Cette étude se compose de trois parties principales.

Dans le premier chapitre, nous donnons une description des différentes structures du moteur à courant continu. Nous rappelons ensuite les différents modes d'excitation notamment l'excitation shunt et série. Et en dernier un aperçu sur les différentes méthodes de réglage de vitesse.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le moteur synchrone, en mettant particulièrement en relief l'expression du couple développé par le moteur. En suite nous avons présenté le principe et les modes d'autopilotage du moteur.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude comparative entre les deux moteurs.

Chapitre I

Etude du moteur à courant continu

Introduction [1]

Les machines électriques tournantes sont des convertisseurs d'énergie. Lorsqu'elles transforment de l'énergie électrique en énergie mécanique, on dit qu'elles fonctionnent en moteur. En revanche, si elles transforment l'énergie mécanique apportée par une autre machine en énergie électrique, on dit qu'elles fonctionnent en génératrice. La machine à courant continu est une machine électrique tournante qui fonctionne, comme son nom l'indique, à partir de tension et de courant continu. Dans le cas des petits moteurs, il est donc adapté à des sources d'énergie électrotechniques. Pour les fortes puissances, on la trouve dans les lignes de métro-RER ou elle fonctionne en moteur (traction) ou en génératrice (freinage)

I.1. Constitution [2]

La machine est représentée par la figure.I.1

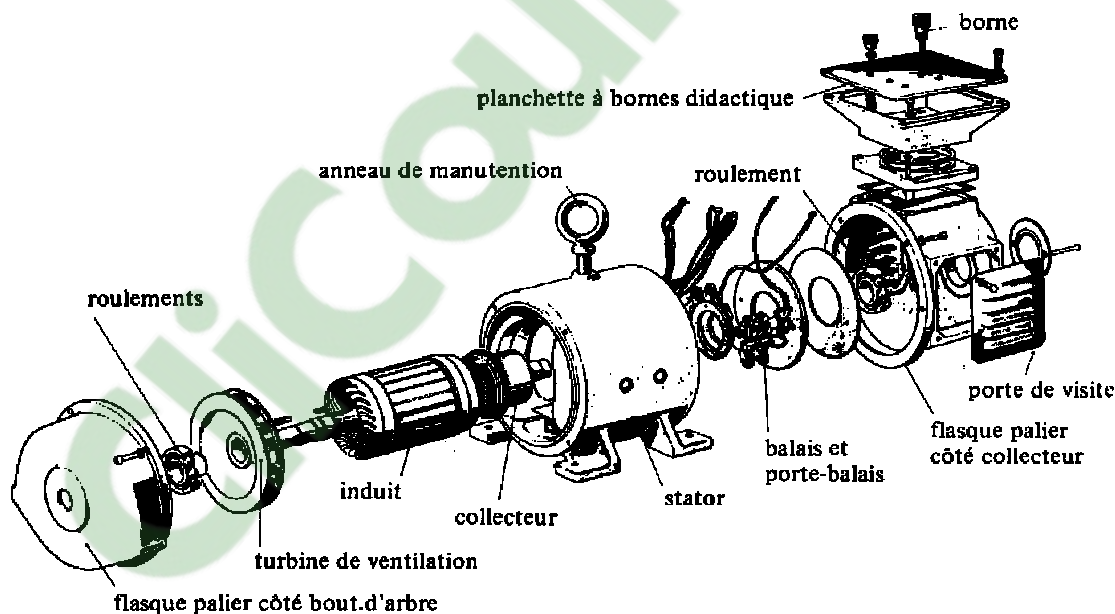


Fig.I.1. Constitution de la machine à courant continu

La machine à courant continu est essentiellement constituée de trois parties principales :

➤ **L'inducteur**

L'inducteur (parfois appelé «circuit de champ») produit le flux magnétique dans la machine. Il est constitué d'un électro-aimant qui engendre la force magnétomotrice(FMM) nécessaire à la production du flux. Dans les machines bipolaires (à deux pôles), deux bobines excitatrices sont portées par deux pièces polaires montées à l'intérieur d'une culasse. La culasse est généralement en fonte d'acier, tandis que les pièces polaires sont formées de tôles d'acier doux.

Les bobines excitatrices sont alimentées en courant continu, et le courant qui les traverse porte le nom de courant d'excitation. Elles sont composées de plusieurs centaines de spires et portent un courant relativement faible. Les bobines sont bien isolées des pièces polaires afin de réduire les risques de court-circuit à la terre. Dans certaines génératrices spéciales, les bobines et pièces polaires sont remplacées par des aimants permanents.

➤ **L'induit**

L'induit est composé d'un ensemble de bobines identiques réparties uniformément autour d'un noyau cylindrique. Il est monté sur un arbre et tourne entre les pôles de l'inducteur. L'induit constitue donc un ensemble de conducteurs qui coupent le flux magnétique. Les bobines sont source de flux provenant d'un pôle nord et d'un pôle sud de l'inducteur. Le noyau est formé d'un assemblage de tôles en fer doux. Ces tôles sont isolées les unes des autres et portent des encoches destinées à recevoir les bobines.

Les conducteurs de l'induit sont parcourus par le courant débité par la machine. Ils sont isolés du noyau par des couches de papier ou d'autres feuilles isolantes. Pour résister aux forces centrifuges, ils sont maintenus solidement en place dans les encoches au moyen de cales en fibre. Si le courant est plutôt faible, on emploie des conducteurs ronds, mais s'il dépasse une cinquantaine d'ampères, on se sert de conducteurs rectangulaires qui permettent une meilleure utilisation du volume de l'encoche. Disposées de telle façon que leurs deux côtés coupent respectivement le flux engendré par les pôles.

➤ Le collecteur

Est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre de la machine, mais isolé de celui-ci.

La confection du collecteur demande un soin considérable, car il arrivait qu'une des lames dépasse les autres d'une fraction de millimètre seulement, des étincelles seraient produites par le rebondissement des balais quand la machine serait en charge. De telles étincelles rongeraient et détérioreraient les balais, tout en surchauffant et en carbonisant le collecteur.

Sur le collecteur frottent des balais qui sont fixes par rapport au stator.

Le collecteur et balais constituent un redresseur mécanique dont le rôle est de relier électriquement les balais aux points de l'induit entre lesquels la force électromotrice est la plus grande.

I.2. Principe de fonctionnement [3]

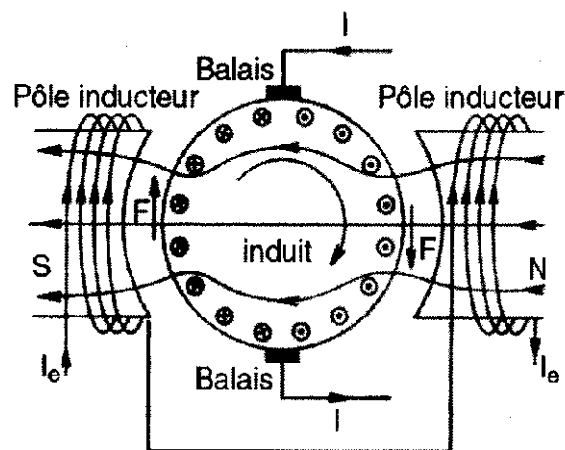


Fig.I.2. Principe de fonctionnement d'une machine à courant continu

Lorsque le bobinage d'un inducteur du moteur est alimenté par un courant continu, sur le même principe qu'un moteur à aimant permanent, il crée un champ magnétique (flux

d'excitation) de direction Nord-Sud. Une spire capable de tourner sur un axe de rotation est placée dans le champ magnétique.

De plus, les deux conducteurs formant la spire sont chacun raccordé électriquement à un demi collecteur et alimenté en courant continu via deux balais frotteurs.

D'après la loi de LAPLACE $df = IdL.B$ (tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force), les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe des balais (lignes neutres) sont soumis à des forces F égales mais de sens opposé en créant un couple moteur ; l'induit se met à tourner.

I.3. Equations du moteur à courant continu

➤ Force électromotrice

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 :

$$E = \frac{p}{2.\pi.a}.n.\Phi.\Omega \quad [I.1]$$

Avec:

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⁻¹)

Finalement:

$$E = K.\Phi.\Omega \quad [I.2]$$

Avec :

$$K = \frac{p}{2.\pi.a}.n \quad [I.3]$$

➤ Couple électromagnétique

Exemple pour une spire

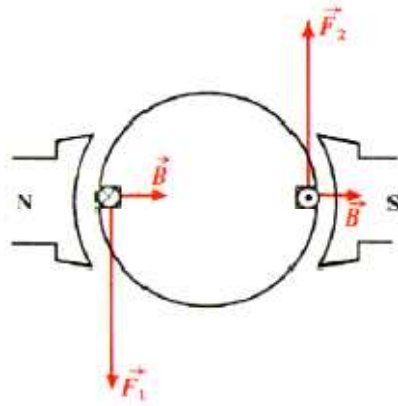


Fig.I.3. Représentation de la force de Laplace dans une spire

Les deux brins d'une spire placée dans le champ magnétique B , subissent des forces de Laplace : $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ formant un couple de force :

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 = I \cdot \vec{l} \wedge \vec{B} \quad [\text{I.4}]$$

Pour une spire :

$$C = 2.r.F = 2.r.B.I = S.B.I = \Phi.I \quad [\text{I.5}]$$

En fin le couple électromagnétique à l'expression suivante:

$$C_{em} = K.\Phi.I \quad [\text{I.6}]$$

K est la même constante que dans la formule de la f.é.m.

I.4. La réaction magnétique d'induit :

Lorsque l'induit d'un moteur à courant continu est alimenté, le courant I , qui y circule crée un flux magnétique dans l'entrefer de la machine, les linges de champ constituant ce flux traversent les pièces polaires de l'inducteur perpendiculairement à leurs axes. On dit que cette réaction d'induit est transversale. Ce flux d'induit, en saturant une partie des pièces polaires, diminue un peu le flux inducteur.

En plus, cette réaction d'induit, en créant le flux dans les zones où se trouvent les cotes des sections en commutation, rend plus difficile celle-ci.

Pour éviter ces inconvénients, on munit les moteurs à courant continu, d'enroulements supplémentaires pour compenser la réaction magnétique d'induit ; qu'on appelle enroulement de compensation. Cet enroulement est logé dans des encoches pratiquées dans les pièces polaires des pôles principaux. Leur bobinage est parcouru par le même courant que l'induit et crée une FEM égale et opposée à celle créée par l'induit face aux pièces polaires.

I.5. Commutation

La commutation est le changement du sens du courant dans une bobine au moment où cette bobine passe sous le balai. Supposons que l'on fait tourner les balais plutôt que les bobines comme le montre la figure.I.4.

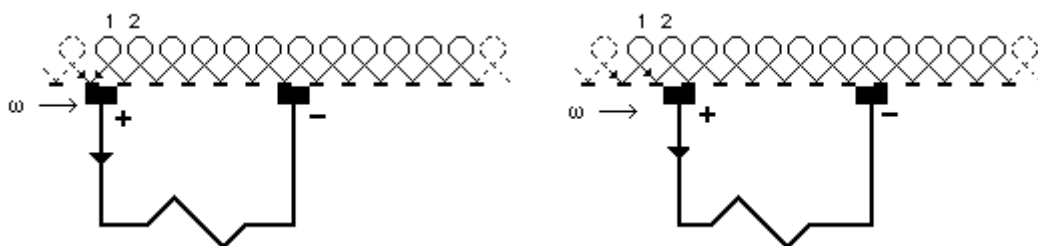


Fig.I.4. Balais en court circuit avec les bobines

La bobine 1 doit changer le sens de son courant pendant qu'elle est en court-circuit sous le balai comme indique la figure.I.5

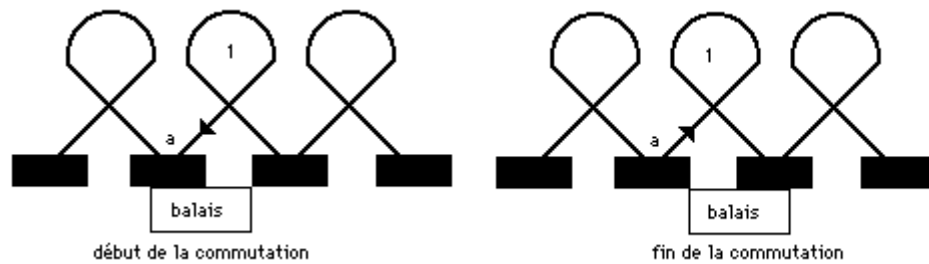


Fig.I.5. Changement de sens de courant dans les bobines

La bobine en commutation possède une résistance et une inductance. L'inductance est présente, le courant est retardé et lorsque le balai quitte le commutateur "a" il existe un di/dt qui produit un arc. Par un dimensionnement adéquat des pôles de commutation, on s'efforce de réaliser une commutation sans étincelles dans toute la plage de fonctionnement de la machine.

I.6. Les caractéristiques et les différents types d'excitation des moteurs à courant continu [4]

Il existe plusieurs types des machines à courant continu :

- Machine à excitation série ;
- Machine à excitation shunt ;
- Machine à excitation indépendante ;
- Machine à excitation compound ou composée ;
- Machine à excitation constante.

On s'intéresse au deux moteurs : série et shunt

I.6.1. Moteur à excitation série [4]

Ce type de moteur est caractérisé par le fait que le stator (inducteur) est raccordé en série avec le rotor (induit).

Le schéma électrique du moteur série est représenté sur la figure I.6.

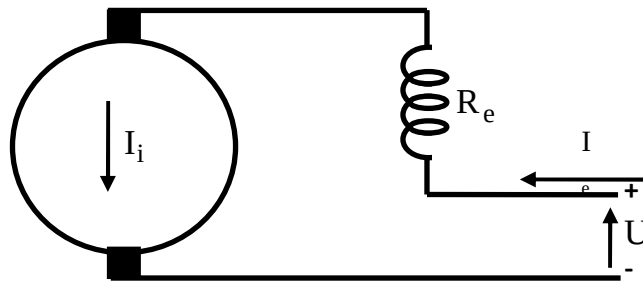


Fig.I.6. Moteur à excitation série

Dans le moteur série, le circuit inducteur est connecté en série avec le circuit d'induit comme indiqué sur la figure précédente. Le courant d'excitation I_e est donc égal au courant d'induit I_i et au courant I absorbé par la machine.

$$I_e = I_i = I \quad [I.7]$$

➤ Caractéristiques

On a : $I = I_i = I$

Si on suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, le flux utile est proportionnel au courant d'excitation :

$$\Phi = \alpha \cdot I \quad [I.8]$$

D'où :

$$C_m = K \cdot \Phi \cdot I_i \approx K' \cdot I^2 \quad [I.9]$$

$$\text{Avec : } K' = K \cdot \alpha \quad [I.10]$$

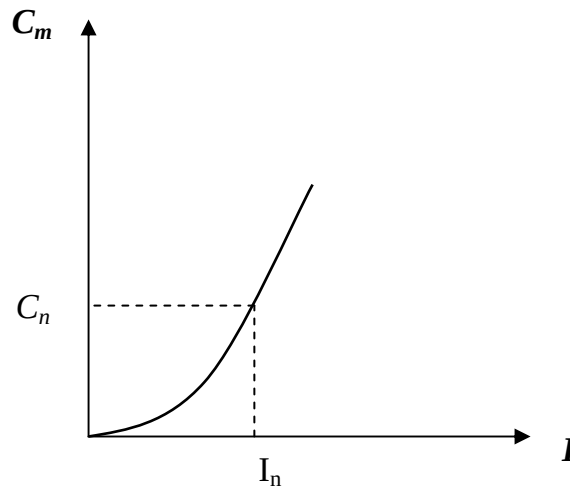


Fig.I.7. Caractéristique électromécanique du moteur série

La caractéristique électromécanique $C_m=f(I)$ est sensiblement une parabole qui passe par l'origine.

Si on tient compte de la résistance de l'induit on aura :

$$U - (R_i + R_f)I = E' = \frac{p}{a} . n . N . \Phi = \lambda . N . I \quad [\text{I.11}]$$

$$\text{D'où :} \quad N = \frac{U - (R_i + R_f) . I}{\lambda . I} = \lambda' . \frac{U - (R_i + R_f) . I}{I} \quad [\text{I.12}]$$

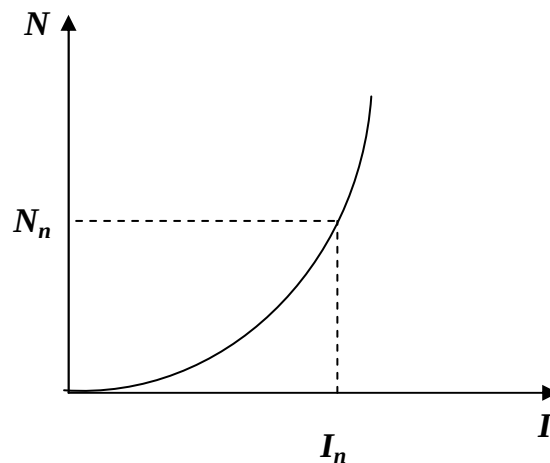


Fig.I.8. Caractéristique de vitesse en fonction de courant

La caractéristique $N=f(I)$ est croissante d'une hyperbole.

A partir de ces deux caractéristiques on peut déduire la caractéristique mécanique suivante :

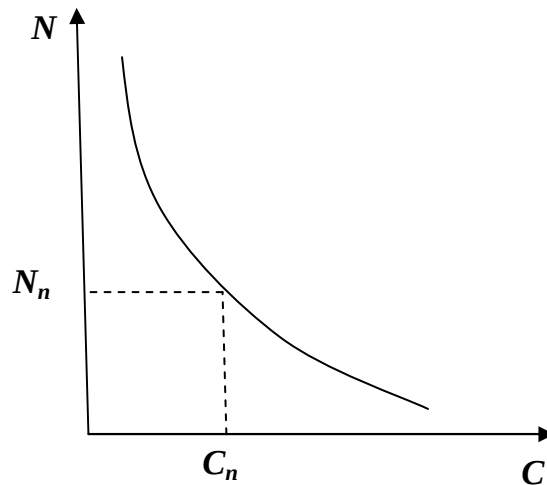


Fig.I.9. Caractéristique mécanique du moteur à courant continu

Les caractéristique ci-dessus permettent de montrer que les moteurs à excitation série peuvent développer un très fort couple en particulier à basse vitesse, celui-ci étant proportionnel au carré du courant. C'est pourquoi ils ont été utilisés pour réaliser des moteurs de traction de locomotives.

Ce type de machine présente toutefois, du fait de ses caractéristiques, un risque de survitesse et d'emballement à vide. Sa vitesse décroît très rapidement quand le couple augmente d'où l'option de changement de vitesse automatique.

I_e : Courant d'excitation.

I_i : Courant d'induit.

I : Le courant absorbé par la machine.

U : Tension d'alimentation.

E : Force électromotrice.

R_i : La résistance aux bornes de l'induit.

R_e : La résistance aux bornes de l'inducteur.

C_n : Couple nominale.

N : Vitesse angulaire nominale.

I.6.2. Moteur à excitation shunt [4]

Le schéma électrique du moteur shunt est représenté par la figure.I.10 :

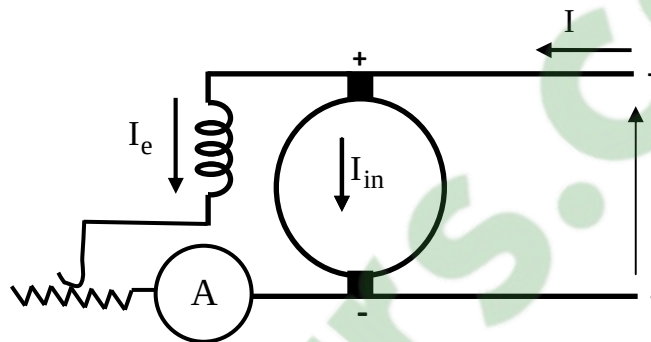


Fig.I.10. Moteur shunt

Dans le moteur shunt, le stator est monté en parallèle avec le rotor, donc la tension aux bornes du rotor est la même que celle aux bornes du stator.

$$U_i = U_e = U \quad [I.13]$$

➤ Caractéristiques

On à :

$$I = I_i + I_e$$

Comme la résistance de l'inducteur étant élevée, donc on peut négliger le courant inducteur par rapport au courant induit d'où :

$$I = I_i \quad [I.14]$$

On néglige la réaction d'induit, alors le flux d'excitation est constant d'où :

$$C_m = K \cdot I_i \cdot \Phi \approx K' \cdot I \quad [I.15]$$

Avec :

$$K' = K.\Phi = \frac{p.n.\Phi}{2.\pi.a} \quad [I.16]$$

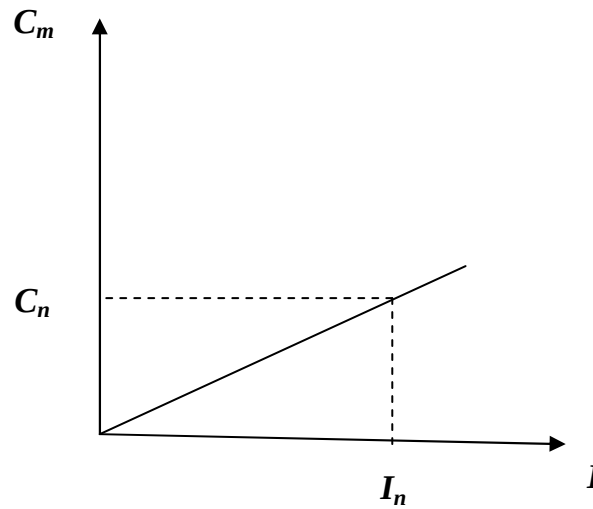


Fig.I.11. La caractéristique électromagnétique du moteur shunt.

La caractéristique électromécanique $C_m = K(I)$ est sensiblement une droite qui passe par l'origine.

On a aussi la relation :

$$U = R_i.I_i + E' = \frac{p}{a}.n.N.\Phi = \lambda.N.\Phi \quad [I.17]$$

Avec :

$$\lambda = \frac{p.n}{a} \quad [I.18]$$

D'où :

$$N = \frac{U - R_i.I}{\lambda.\Phi} = \lambda'.(U - R_i.I) \quad [I.19]$$

Avec :

$$\lambda' = \frac{1}{\lambda.\Phi} \quad [I.20]$$

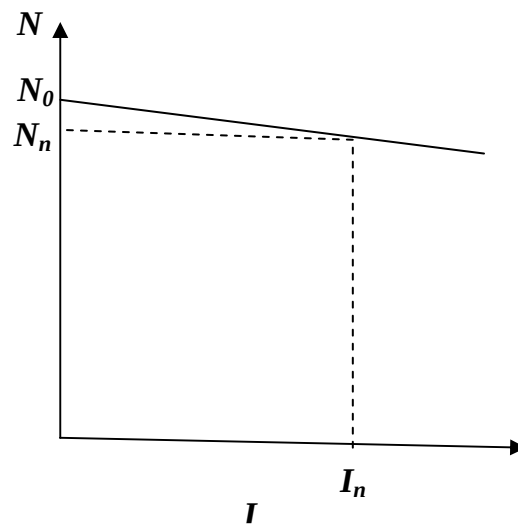


Fig.I.12. La caractéristique de vitesse en fonction de courant du moteur shunt

La caractéristique $N = f(I)$ est une droite descendante de pente très faible.

D'après ces deux caractéristiques on peut déduire la caractéristique mécanique

$$\text{On à :} \quad I = \frac{U - N.\mathcal{K}'}{R_i} \quad [\text{I.21}]$$

$$\text{Et :} \quad C_m = K' . I \quad [\text{I.22}]$$

$$\text{D'où :} \quad C_m = \alpha . U - \beta . N \quad [\text{I.23}]$$

$$\text{Avec :} \quad \alpha = \frac{K'}{R_i} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{K'}{R_i . \mathcal{K}'} \quad [\text{I.24}]$$

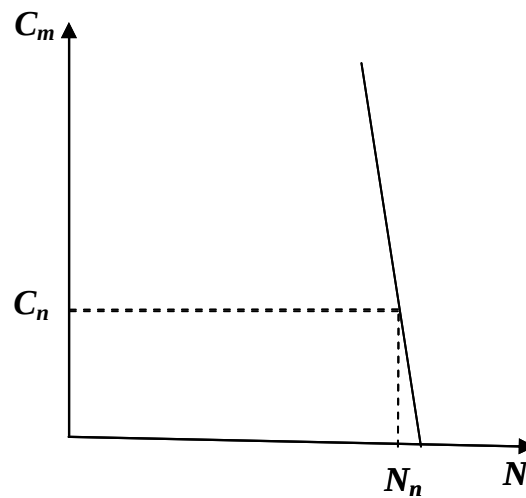


Fig.I.13. La caractéristique mécanique du moteur shunt

La caractéristique mécanique $C_m = f(N)$ est une droite descendante, sensiblement parallèle à l'axe des couples.

I.6.3. Moteur à excitation indépendante [4]

Le schéma électrique d'un moteur à excitation indépendante est représenté par la figure suivante :

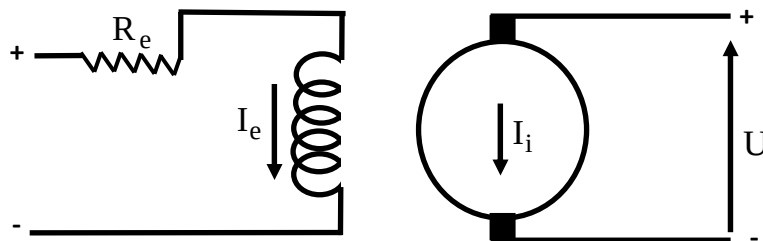


Fig.I.14. Machine à excitation indépendante

Dans ce type de la machine l'alimentation du stator est indépendante de celle du rotor.

Les équations de la machine deviennent :

$$U = E + R_i I_i \quad [I.25]$$

$$E_r = K_e \Phi_n \Omega_n \quad [I.26]$$

$$C_n = K_m \Phi_n I_i \quad [I.27]$$

I.6.4. Moteur à excitation constante [4]

C'est le cas le plus fréquent : B_s est constant car il est créé par des aimants permanents ou bien encore parce que I_e est constant.

$$B_s = K_e I_e \quad [I.28]$$

Avec :

B_s : Induction magnétique [T] ;

Les équations de la machine deviennent :

$$U = E + R_i I_i \quad [I.29]$$

$$E = K_e \Phi_n \Omega_n \quad [I.30]$$

$$C_n = K_m \Phi_n I_i \quad [I.31]$$

La relation entre k_e et K_m est la suivante :

$$\frac{K_m}{K_e} = \frac{PN}{2\pi a} \cdot \frac{60a}{PN} = \frac{30}{\pi} \quad [I.32]$$

$$K_m = 9.55 K_e \quad [I.33]$$

Avec :

P : Nombre de paire de pôles ;

a : Nombre de voies en parallèle ;

N : Nombre de conducteurs de l'induit ;

I.6.5. Moteur à excitation compound ou composée [4]

Le schéma électrique du moteur à excitation compound est représenté par la figure suivante :

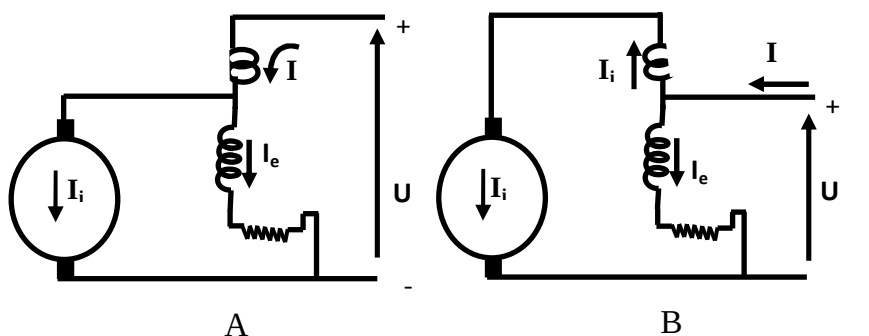


Fig.I.15. Machine à excitation compound

Dans le moteur compound une partie du stator est raccordé en série avec le rotor et un autre est de type parallèle ou shunt. Ce moteur réunit les avantages des deux types de moteur : le fort couple à basse vitesse du moteur série et l'absence d'emballement (survitesse) du moteur shunt.

I.7. Régulation de vitesse de moteur à courant continu

I.7.1. Procédés de variation de la vitesse pour les moteurs à courant continu [5]

Le moteur à courant continu possède par rapport aux moteurs à courant alternatif, l'avantage d'être très souple car on dispose de plusieurs procédés pour faire varier sa vitesse.

A partir de l'expression de la vitesse :

$$\Omega = (V_a - R_a I_a) / K\Phi. \quad [I.34]$$

On constate qu'il y a trois paramètres (V_a , Φ , R_a) que l'on peut régler, ce qui donne les trois possibilités suivantes :

➤ **Réglage par action sur la résistance R_a d'induit [6]**

Pour ce mode de réglage de la vitesse, en fixant la tension d'induit et le flux d'excitation à leurs valeurs nominales, on peut faire varier la vitesse, en agissant sur la résistance d'induit à l'aide d'un rhéostat monté en série avec l'enroulement d'induit.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle engendre des pertes par effet joule, ainsi que l'échauffement de la machine.

➤ **Réglage par action sur le flux d'excitation [5]**

Ce réglage s'obtient par la variation de la résistance qui, est mise en parallèle avec l'enroulement d'excitation. Lorsque la tension d'induit étant fixée à sa valeur nominale, la variation du flux d'excitation s'effectue entre une valeur nominale (généralement $1/3$ de Φ_n) et une valeur maximale qui est celle du régime nominal. Ce procédé de réglage est utilisé pour des fonctionnements à puissance constante figure.I.12. Avec : $\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3$

Avant d'utiliser ce mode de réglage, on devra s'assurer que le moteur est en mesure de supporter mécaniquement la vitesse maximale obtenue et que la température de son induit ne risque pas de dépasser la valeur admissible.

Pour ces deux raisons, la plage de réglage possible est assez limitée (soit de un à trois fois la vitesse nominale).

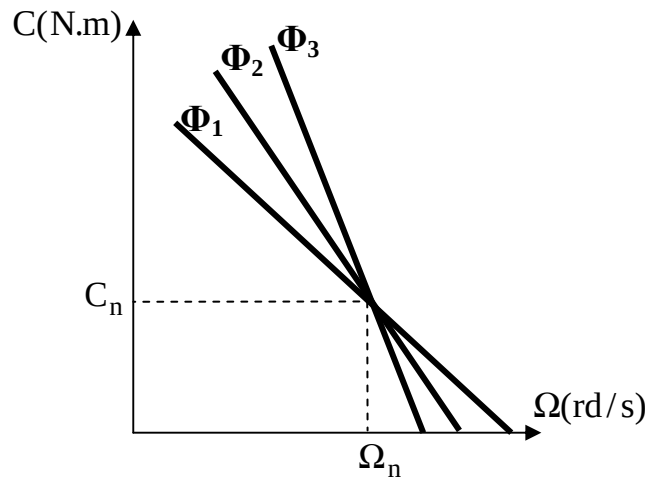


Fig.I.14. Variation de la vitesse d'un moteur à courant continu avec flux d'excitation.

➤ **Réglage par action sur la tension d'induit [5]**

On règle le flux à sa valeur maximale, si l'on applique à l'induit des tensions de plus faible $U_1 > U_2 > U_3$, on obtient une famille de caractéristiques parallèles voir figure.15.

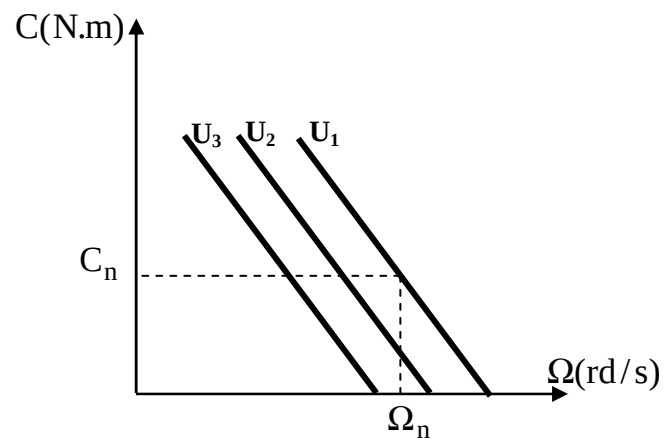


Fig.I.15. Variation de la vitesse d'un moteur à courant continu par la tension d'induit.

Ce mode de réglage, qui permet de réduire à volonté la vitesse d'un groupe (moteur et machine entraînée), est excellent d'une part de point de vue technique car les caractéristiques ne sont pas déformées, d'autre part, du point de vue économique car aucune énergie n'étant gaspillée dans des rhéostats, le rendement demeure élevé à toutes les vitesses.

Le seul inconvénient de ce procédé idéal est la nécessité d'une tension continue réglable. Pour produire cette tension, on utilise soit un convertisseur mécanique, soit un convertisseur électronique.

I.7.2. Les différentes boucles de la régulation de vitesse d'une machine à courant continu

Dans cette partie, nous donnerons un aperçu sur la régulation de vitesse en donnant le schéma de principe et les éléments constitutifs d'une boucle de régulation du moteur à courant continu.

I.7.2.1. Schéma de principe de système de régulation de vitesse du moteur à courant continu [4]

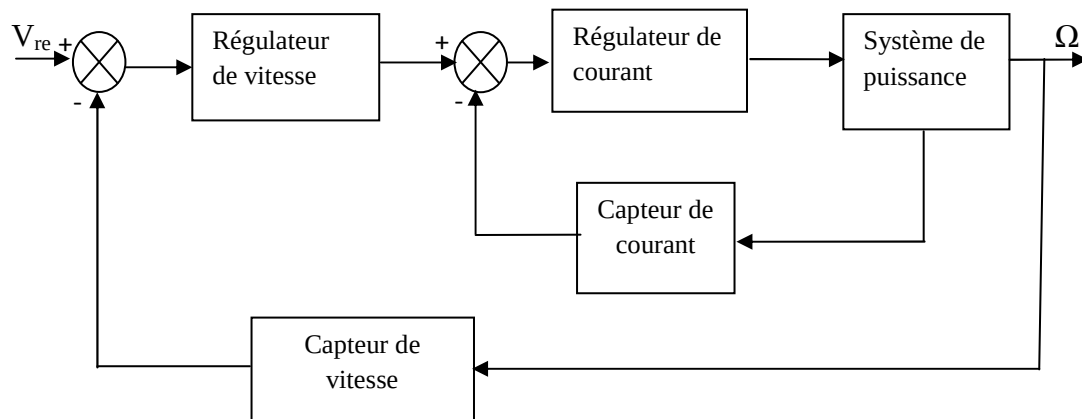


Fig.I.16. Schéma fonctionnel de réglage de vitesse.

En analysant le schéma de principe, on distingue deux blocs essentiels, l'un de puissance, l'autre de commande.

A. Bloc de puissance [4]

Il est constitué par :

- Une machine à courant continu
- Un convertisseur

Il est possible d'utiliser, lors de la commande, deux types de convertisseur.

▪ Le Hacheur [4]

Le Hacheur est un convertisseur de type continu-continu. Son principe de fonctionnement est basé sur l'ouverture et la fermeture régulière d'un interrupteur statistique, permettant ainsi, le contrôle de transfert de l'énergie de la source vers la charge en la connectant puis la déconnectant périodiquement, la commande de l'interrupteur permet la variation de la tension moyen aux bornes de la charge.

Si au cours de la période le courant dans la charge ne s'annule pas la conduction est dite continue. Dans le cas contraire, elle est discontinue et le hacheur s'éteint de lui même.

La structure de commande de la variation de la vitesse par un hacheur rend possible d'utiliser plusieurs structures de hacheur tels que hacheur série, réversible et quatre quadrants.

Exemple : hacheur série.

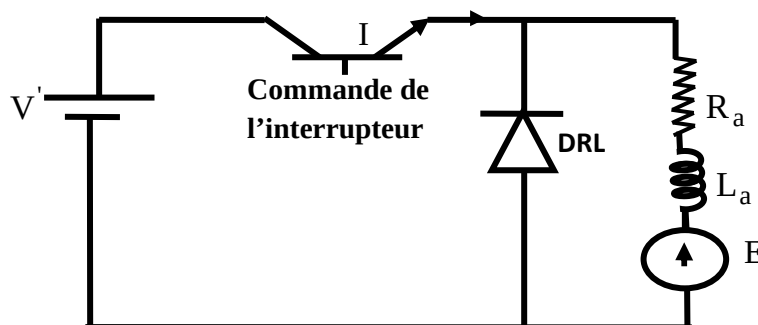


Fig.I.17. Schéma de la commande en vitesse d'un moteur à CC par un hacheur série

▪ Pont redresseur tout thyristors (pont de GRAETZ) [4]

L'alimentation de l'induit du moteur à courant continu nécessite une tension continue. Ce qui impose, dans le cas de l'alimentation à partir de réseau, l'utilisation d'un redresseur commandé afin d'assurer la variation de la tension d'induit et de redresser le courant du réseau.

Les thyristors sont des semi-conducteurs qui ont la particularité de ne conduire que lorsque la tension entre ses bornes est positive. Afin d'avoir un courant délivré par le redresseur tout thyristors complètement lisse, on utilise une inductance de lissage de résistance r et d'inductance l assez élevée, avec

$$\zeta = \frac{l}{r} \text{ Satisfaisant la condition } \zeta \gg T$$

ζ : Constante de temps.

T : période du courant redressé.

B. Bloc de commande

Il est constitué de :

▪ Capteur de courant [4]

Il s'agit d'une boucle a pour tâche de convertir le courant d'induit en une tension proportionnelle au courant. En considérant les pertes joule dans le shunt négligeables, le capteur induit donc un gain pur dont l'expression est :

$$K_i = \frac{V_i}{I} \quad [\text{V/A}] \quad [\text{I.35}]$$

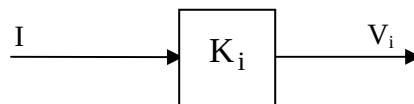


Fig.I.18. Schéma fonctionnel du capteur de courant

V_i : Tension de sortie du capteur de courant [V] ;

I : Courant traversant le circuit d'induit [A] ;

K_i : Gain du capteur de courant.

▪ Capteur de vitesse [4]

Le capteur de vitesse utilisé est une génératrice tachymétrique montée sur l'arbre du moteur à courant continu qui débite une tension d'induit proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur. Si on suppose négligeables les perturbations qui peuvent survenir dans le collecteur (dissipation d'énergie par les courants d'induits, pertes par effet Joule dans le bobinage, le capteur introduit un gain pur :

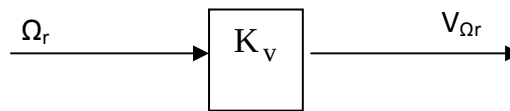


Fig.I.19. Schéma fonctionnel du capteur de vitesse.

$$K_v = \frac{V_{\Omega_r}}{\Omega_r} \quad [V / (rd/s)] \quad [I.36]$$

Avec :

K_v : Gain de capteur de vitesse;

V_{Ω_r} : Tension de sortie de la génératrice tachymétrique.

• La régulation [5]

Le but de régulation est de maintenir une grandeur de sortie (vitesse), exactement asservie à une grandeur de référence ou de consigne ; même en présence de perturbations externes (variation de couple de charge). Elle doit aussi réaliser une fonction secondaire qui consiste à protéger le moteur contre les surintensités en limitant le courant dans son induit.

Le problème consiste alors à choisir le type de régulation et à définir les réglages du régulateur choisi pour obtenir les performances demandées.

Dans le domaine des réglages industriels les régulateurs utilisés sont de type PI (proportionnel intégral) ou PID (proportionnel intégral dérivé). Le premier régulateur est le plus couramment

utilisé, car les régulateurs PID sont très sensibles aux signaux parasites superposés aux signaux de consigne et de mesure. Il y a essentiellement trois concepts de système d'asservissement qui permettent de contrôler la variable principale qui est la vitesse et de limiter la variable secondaire qui est le courant.

- Régulation en boucles convergentes ;
- Régulation en boucles multiples ou en cascades ;
- Régulation en boucles parallèles.

▪ Régulation en boucles convergentes [5]

C'est un système qui comporte un seul régulateur pour les deux variables (vitesse et courant), le signal de la variable secondaire (courant) est comparé à un seuil et reste bloqué tant que la valeur de limitation n'est pas atteinte. Le signal de retour de vitesse tend à limiter le courant d'induit. C'est une solution peu coûteuse car elle n'exige qu'un petit nombre de composants afin de contrôler une variable et d'en limiter une autre. Son schéma de principe est représenté sur la figure suivante :

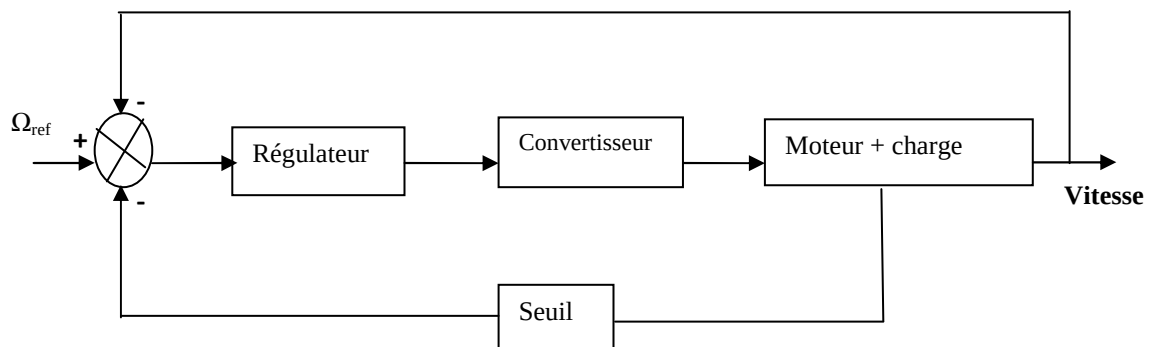


Fig.I.20. Régulation en boucles convergentes

▪ Régulation en boucles parallèles [5]



Le système de régulation parallèle comporte un régulateur individuel pour chacune des variables contrôlées. Les sorties de ces régulateurs peuvent être connectées grâce à un dispositif de commutation à une sortie commune qui est l'entrée du système à asservir voir figure.I.21.

Tant que le courant n'atteint pas sa valeur de limitation, seul le régulateur de vitesse reste en fonctionnement. Dès que le courant atteint cette valeur limite, le régulateur de vitesse est hors circuit et le régulateur de courant travaille en régulateur limiteur.

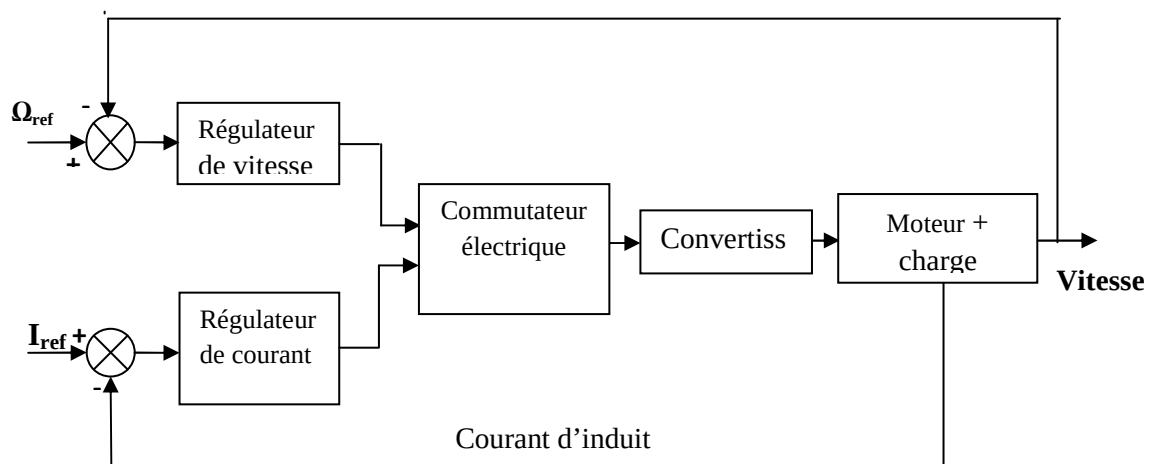


Fig.I.21. Régulation en boucles parallèles

▪ Régulateur en boucles multiples [5]

Elle comporte un régulateur individuel pour chacune des variables contrôlées. La variable principale est réglée par la boucle extérieure (boucle de vitesse), la sortie du régulateur correspondant sert de référence au régulateur la boucle interne (boucle de courant).

En limitant la sortie du régulateur externe de vitesse, on limite la référence du régulateur de courant et on obtient la caractéristique de limitation voir figure.I.22.

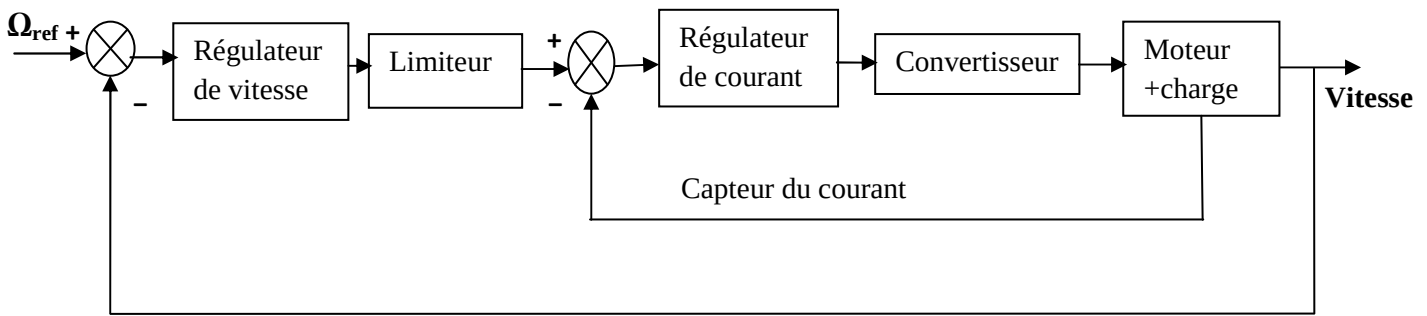


Fig.I.22. Régulation en boucle multiple

I.8. Modes de démarrages

Le démarrage d'un moteur initialement à l'arrêt pose divers problèmes parmi les quels le plus immédiat est celui du courant de pointe absorbé à la mise sous tension de l'induit. Si aucune précaution n'est prise lors du démarrage, le courant de pointe (I_p) absorbé à l'instant de fermeture d'alimentation est donné par la formule suivante :

$$I_p = U/R \gg I_n \quad [I.37]$$

Il faut donc réduire ce courant de tel sorte à avoir $I_p < I_n$.

D'après la relation précédente on peut réduire I_p de deux façons, soit par réduction de la tension U soit par augmentation de la résistance R .

Un autre problème qui se pose lors du démarrage d'un moteur à courant continu est celui de la mise en vitesse. C'est un problème mécanique.

On à :

$$C_m - C_r = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad [I.38]$$

Pour avoir une accélération suffisante il est nécessaire d'avoir $C_m > C_r$

Or :

$$C_m = K \cdot \Phi \cdot I \quad [I.39]$$

Pour résoudre ces problèmes de démarrage il faut prévoir des dispositifs de démarrage qui assurent la protection de moteur et la condition relative au flux.

I.8.1. Démarrage directe [7]

Ce mode de démarrage consiste à brancher directement le moteur sur le réseau. Il est le plus simple au de vue appareillage mais dans ce cas apparaît un fort appel de courant durant la période initiale du démarrage.

I.8.2. Démarrage avec rhéostat [7]

Pour réduire l'appel de courant au démarrage, on insère dans le circuit de l'induit du moteur un rhéostat de démarrage suivant la densité de courant et les conditions de fonctionnement. Dans ce type de démarrage on utilise des rhéostats à refroidissement par air au par huile, à deux au trois bornes, simple, combinés, à commande manuelle, automatique au semi automatique.

I.9. Modes de freinages

Dans de nombreuses applications (tractions engins de levage...) le problème du freinage est important. Certes, on peut toujours faire appel à des systèmes mécaniques, mais ceux-ci sont généralement complexes et les organes de freinage s'usent rapidement. C'est pourquoi on préfère utiliser une solution électrique qui consiste à transformer en énergie électrique, l'énergie cinétique du moteur. Le moteur étant alors transformé en génératrice, le couple électromagnétique de la machine est un couple résistant de freinage. Suivant la façon dont on utilise l'énergie électrique de freinage, on distingue trois types de freinage :

I.9.1. Freinage rhéostatique [7]

L'énergie est alors dissipée dans un rhéostat. A cet effet, l'inducteur restant branché sur la ligne, on débranche l'induit et on le fait débiter sur un rhéostat.

Le courant débité I est donné par la loi d'ohm :

$$I = E / (R_a + R_h) \quad [I.40]$$

Le couple de freinage est proportionnel à l'intensité de courant :

$$C = K \cdot I_a \cdot \Phi = K' \cdot I_a \quad [\text{I.41}]$$

Pour maintenir un couple de freinage suffisant doit-on diminuer progressivement la résistance du rhéostat. Ce procédé est très simple, mais il ne peut être suffisant à arrêter la machine. En effet, comme la résistance du circuit ne peut descendre en dessous de la résistance R_a , l'intensité de courant et le couple deviennent presque nuls quand la vitesse est faible. C'est pour quoi on doit toujours ajouter à ce système un dispositif de blocage mécanique.

I.9.2. Freinage à contre courant [7]

Il consiste à renverser le courant dans l'induit en croisant les deux bornes de son alimentation tout en maintenant le sens du courant dans l'inducteur. Dans ces conditions, la force électromotrice (f.é.m.) de la génératrice ajoute son effet à la tension du réseau, l'énergie globale ainsi fournie étant disposée dans le rhéostat R_h .

On a :

$$I = \frac{U + E}{R_a + R_h} \quad [\text{I.42}]$$

$$C = K \cdot I \cdot \Phi \quad [\text{I.43}]$$

On peut régler le couple de freinage en modifiant l'intensité du courant I par l'intermédiaire du rhéostat. Dans ce cas non seulement l'énergie de freinage n'est pas récupérée mais le réseau continue à fournir de l'énergie, durant le freinage. De plus, on doit s'assurer que l'alimentation est coupée dès que le moteur s'arrête, si non celui-ci se remet en marche dans le sens inverse.

I.9.3. Freinage par récupération [7]

Les deux modes de freinage qu'en vient d'étudier sont simples à réaliser mais ils ont l'inconvénient de perdre beaucoup d'énergie par effet joule. C'est pour cet inconvénient que l'on cherche des solutions permettant de renvoyer dans le réseau l'énergie de freinage.

Pour qu'une f.c.é.m. se transforme en f.é.m., il faut que celle-ci soit supérieure à la tension d'alimentation. Le courant dans la machine change de sens ce qui a pour effet de changer le

sens du couple électromagnétique. Comme le sens de rotation de la machine ne change pas, le couple exercé a pour effet de la freiner.

Pour obtenir ces résultats on a les deux possibilités suivantes :

- Fonctionnement à tension constante :

La condition $E > U$ est réalisée que si la vitesse augmente légèrement, c'est le freinage en survitesse.

- Fonctionnement à tension réglable :

Le fonctionnement à tension constante a des applications très limitées car il n'est pas possible d'obtenir l'arrêt du groupe moteur machine entraînée par ce procédé. Par contre si on dispose d'une tension variable ou peut réduire cette tension au fur et à mesure que le groupe ralentit, on pourra maintenir la condition $U < E$ même aux plus basses vitesses. Mais malheureusement ce procédé nécessite un groupe convertisseur mécanique ou électronique.

Conclusion

Dans cette partie nous avons étudié le moteur à courant continu, dont son fonctionnement, les différents modes d'excitation ainsi que leurs caractéristiques et les modes de variation de vitesse.

Chapitre II

Autopilotage des moteurs synchrones

II.1. Généralités sur le moteur synchrone

II.1.1. Présentation de la machine synchrone [8]

Le terme machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

II.1.2. Constitution de la machine synchrone

Comme toute machine tournante, la machine synchrone comporte un stator et un rotor, c'est le rotor qui est l'inducteur, et le stator qui est l'induit.

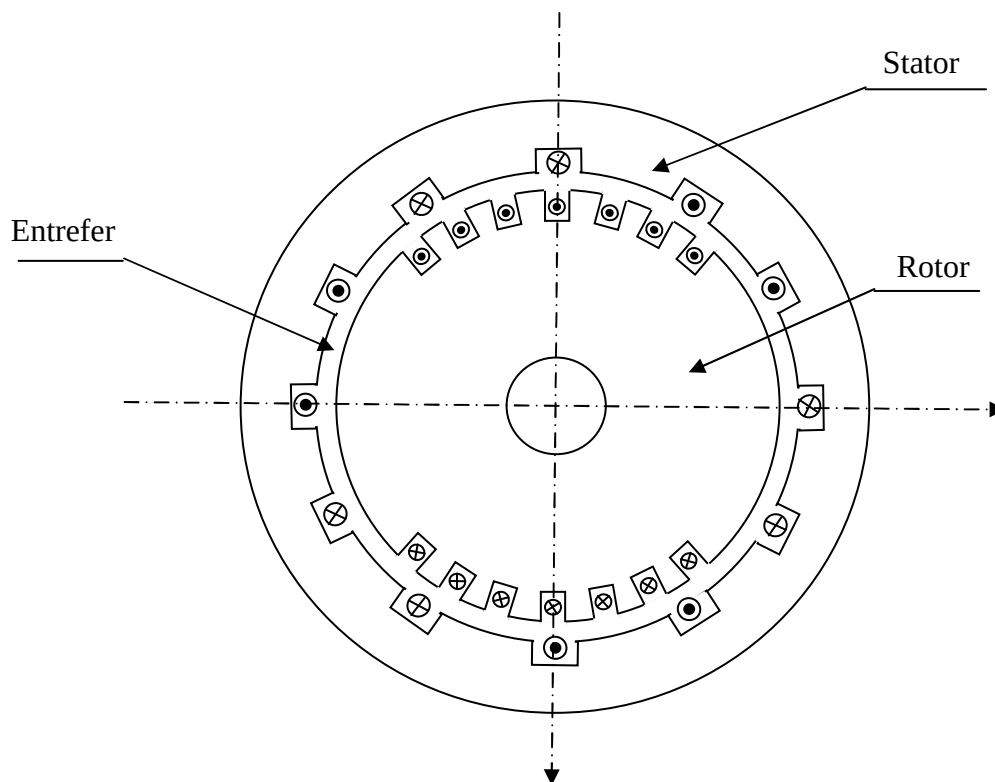


Fig.II.1. Constitution de la machine synchrone

➤ Le stator

Le stator de la machine synchrone est une armature fixe qui comporte trois enroulements identiques décalés de 120° dans l'espace. Ces enroulements sont logés dans les encoches d'un circuit magnétique feuilleté.

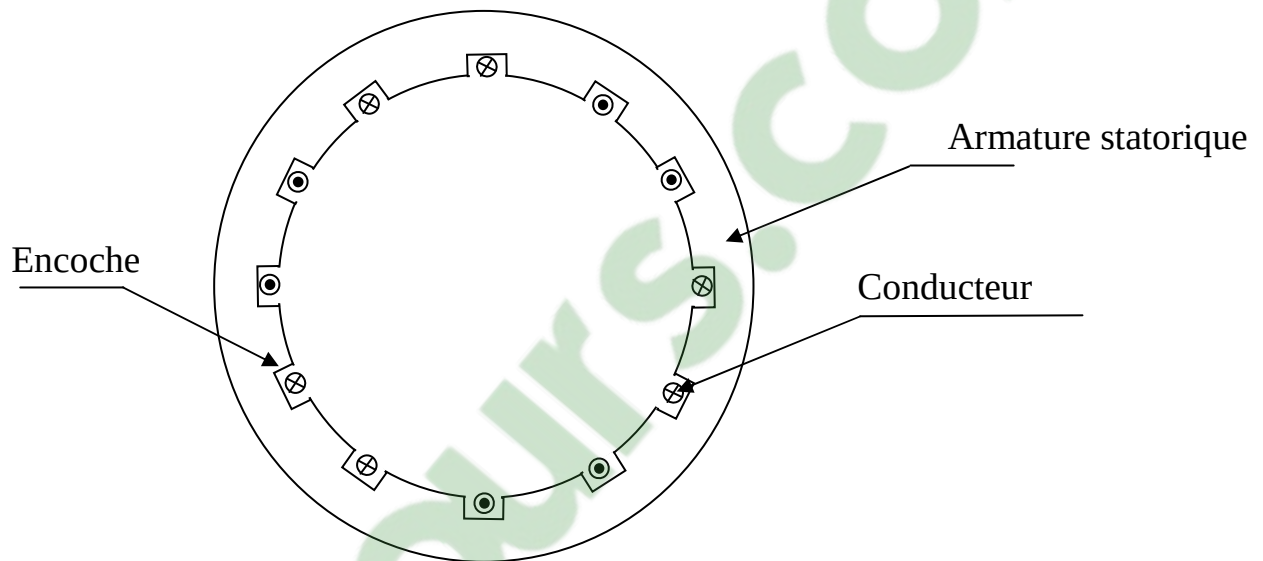


Fig.II.2. Schéma du stator

➤ Le rotor

C'est la partie mobile de la machine synchrone, il peut prendre deux formes.

- Le rotor à pôles lisses

C'est un cylindre en acier ferromagnétique dans lequel ont été fraisées les encoches qui abritent le bobinage.

Ce type de construction, caractérisé par un entrefer fixe, est utilisé pour des machines de fortes puissances destinées à tourner à grande vitesse.

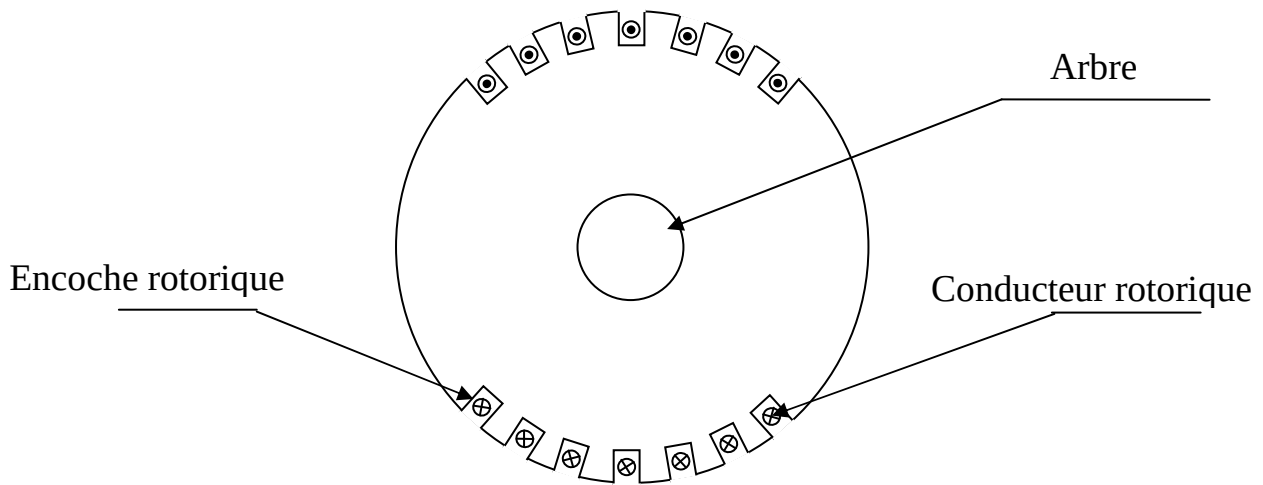


Fig.II.3. Schéma du rotor à pôles lisses

- Le rotor à pôles saillants

Dans ces machines, l'entrefer n'est pas constant. Il est bien adapté aux machines multipolaires destinées à des vitesses de rotation basses ou moyennes.

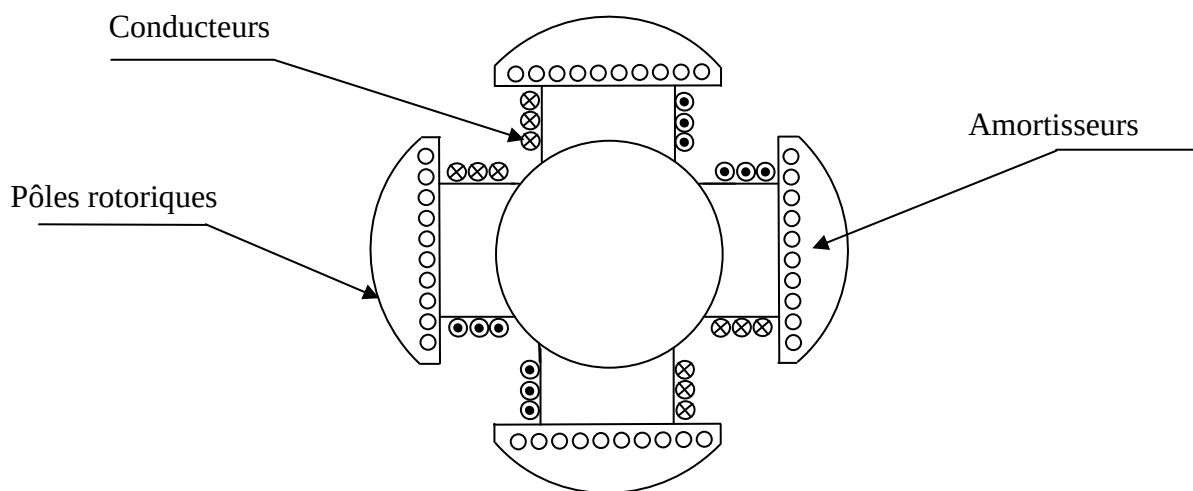


Fig.II.4. Schéma du rotor à pôles saillants

II.1.2. Principe de fonctionnement

A. Etude physique

L'enroulement statorique alimenté sous tension sinusoïdale triphasé crée un champ tournant B_s dans l'entrefer qu'on peut représenter par un aimant permanent tournant à la vitesse de synchronisme :

$$\Omega_s = \frac{2\omega}{p}. \quad [\text{II.1}]$$

L'enroulement rotorique alimenté par un courant continu crée un champ rotorique constant B_r tournant avec le rotor qu'on peut représenter par un autre aimant permanent, déphasé par rapport au premier d'un angle θ , comme montre la figure suivante.

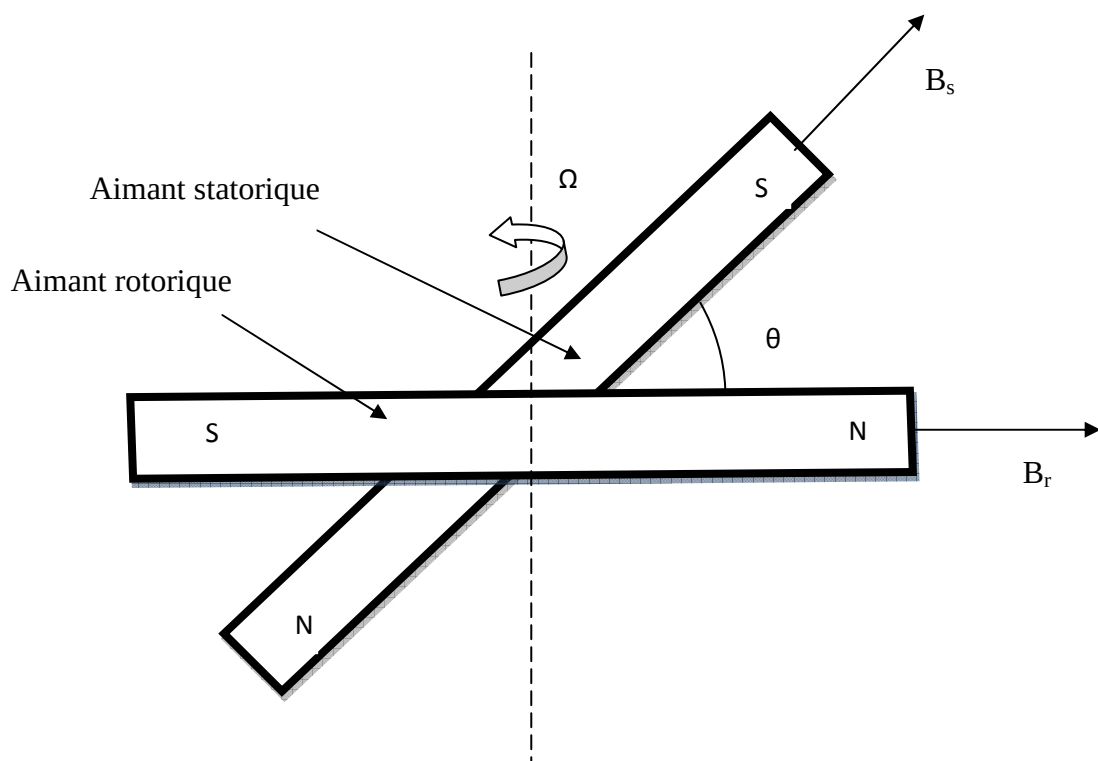


Fig.II.5. Schéma représentatif d'un moteur

Le couple instantané entre le champ statorique et l'aimant rotorique s'écrit :

$$\vec{C} = \vec{B}_s \wedge \vec{M}_r = B_s . M_r . \sin \theta \text{ Sin} \theta$$

[II.2]

$$\text{Avec :} \quad \vec{M}_r = \chi . \vec{H} . V \quad [\text{II.3}]$$

M_r : moment magnétique.

χ : la susceptibilité de matériau.

A la position $\theta=0$, les pôles S de l'aimant statorique sont en regard des pôles N de l'aimant rotorique, une force d'attraction s'établit entre eux et agit d'une manière à maintenir ces pôles l'un vis-à-vis de l'autre. Mais comme le champ statorique tourne à une vitesse élevée, l'aimant rotorique ne suit pas à la même vitesse à cause de son inertie (il ne s'accroche pas), ce qui entraîne une variation de l'angle θ , donc la variation de couple instantané.

Du fait de la variation de θ entre 0 et 2π , la valeur moyenne de $\sin\theta$ est nulle, alors le couple moyen agissant sur le rotor est nul (le rotor ne tourne pas), et la force agissant entre les deux aimants oscille entre l'attraction et la répulsion. Si l'on veut obtenir un couple moyen, il faut que le couple instantané soit constant alors la valeur moyenne de $\sin\theta$ est non nulle (on maintient l'angle $\theta = \theta_0 = \text{constante}$), en faisant tourner l'aimant rotorique à la même vitesse du champ statorique (accrochage du moteur) par un moyen extérieur.

En charge l'angle θ_0 séparant les deux champs augmente avec le couple résistant, et dès que le champ statorique sera en avance de plus de $\frac{\pi}{2}$ le système devient instable, car le couple diminue alors que la charge augmente, d'où le décrochage de l'aimant rotorique tournant et l'arrêt du système.

▪ Modes de démarrage

Comme nous l'avons vu le moteur synchrone ne peut démarrer seul, c'est pour quoi on utilise des techniques de démarrage comme le démarrage par moteurs auxiliaires et le démarrage en asynchrone.

➤ Démarrage par un moteur auxiliaire [9]

On utilise des moteurs auxiliaires (généralement des moteurs à courant continu) destinés à amener le moteur synchrone à la vitesse de synchronisme.

➤ Démarrage en asynchronisme [9]

Ce type de démarrage nécessite des amortisseurs sur le rotor du moteur (une cage d'écureuil d'une résistance élevée) pour qu'il puisse démarrer en moteur asynchrone. En appliquant la pleine tension triphasée sur le stator, on crée un champ tournant qui amène rapidement le moteur à la vitesse synchrone.

Pendant ce démarrage, l'inducteur :

- Ne doit pas être alimenté, si non les pôles rotoriques seraient tantôt attirés, tantôt repoussés par les pôles statoriques tournant à la vitesse synchrone, d'où de très fortes vibrations.
- Ne doit pas être ouvert car la tension alternative induite dans ce bobinage serait très élevée d'où risque d'amorçage.

Alors l'inducteur doit fermer sur une résistance.

▪ Freinage du moteur

Comme toutes les machines de grande puissance les moteurs synchrones prennent du temps à s'arrêter lorsqu'on les débranche du réseau. Pour diminuer ce temps d'arrêt, on peut employer le freinage par inversion de courant ou le freinage dynamique. Dans le premier cas, on doit court-circuiter le champ avant d'intervenir les fils de ligne, et dans le deuxième cas, on débranche le stator du réseau et on le connecte à un groupe de résistances triphasé, tout en maintenant le courant d'excitation. Le moteur ralentit rapidement, car il fonctionne en alternateur. L'énergie cinétique du rotor est rapidement dissipée dans la résistance des enroulements et les résistances extérieures.

B. Etude mathématique

On représente le moteur synchrone bipolaire à pôles lisse par :

- Trois bobines fixes et décalées dans l'espace d'un angle de $\frac{2\pi}{3}$.
- Une bobine représentant le rotor tournant alimentée par un courant continu noté I_f , repérée par un angle θ_e par rapport à l'axe de la phase a.

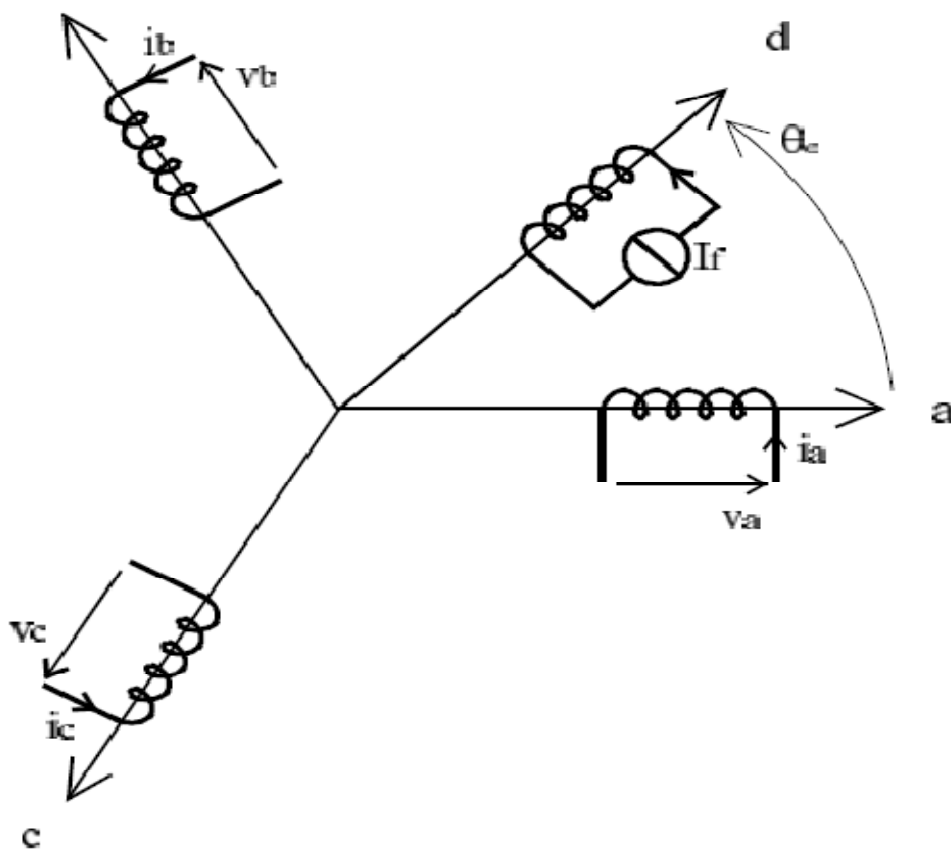


Fig.II.6. Représentation symbolique du moteur

➤ **Expression des tensions sur les enroulements statoriques**

$$v_a = R_a \cdot i_a + \frac{d\Phi_a}{dt} \quad [\text{II.4}]$$

$$v_b = R_b \cdot i_b + \frac{d\Phi_b}{dt} \quad [\text{II.5}]$$

$$v_c = R_c \cdot i_c + \frac{d\Phi_c}{dt} \quad [\text{II.6}]$$

➤ **Expression des flux induits sur les enroulements statoriques**

Pour la phase aa', le flux totalisé Φ_a représente la somme de quatre termes:

Flux propre de a sur a : $\Phi_{aa} = L_s \cdot i_a$.

Flux mutuel de b sur a : $\Phi_{ba} = M_s \cdot i_b$.

Flux mutuel de c sur a : $\Phi_{ca} = M_s \cdot i_c$.

Flux mutuel de l'inducteur sur a : Φ_{fa}

$$\Phi_a = \Phi_{aa} + \Phi_{ba} + \Phi_{ca} + \Phi_{fa} = L_s \cdot i_a + M_s (i_b + i_c) + \Phi_{fa} \quad [\text{II.7}]$$

En supposant le neutre non relié. ($i_b + i_c = -i_a$). Cette dernière relation s'écrit:

$$\Phi_a = (L_s - M_s) \cdot i_a + \Phi_{fa} = L_c \cdot i_a + \Phi_{fa} \quad [\text{II.8}]$$

L_c : Inductance cyclique d'un enroulement statorique. $L_c = L_s - M_s$. [II.9]

Remarque:

Le terme $L_c.i_a$ représente le flux induit dans la phase a par le champ tournant créé par les trois courants i_a , i_b et i_c .

De même pour les phases B et C :

$$\Phi_b = (L_s - M_s).i_b + \Phi_{fb} = L_c.i_b + \Phi_{fb} \quad [II.10]$$

$$\Phi_c = (L_s - M_s).i_c + \Phi_{fc} = L_c.i_c + \Phi_{fc} \quad [II.11]$$

On replace les flux dans les expressions des tensions on aura :

$$v_a = R.i_a + L_s.\frac{di_a}{dt} + M_s.\frac{di_b}{dt} + M_s.\frac{di_c}{dt} + \frac{d\Phi_{fa}}{dt} \quad [II.12]$$

Comme le neutre est non relié, l'équation précédente devient:

$$v_a = R.i_a + L_c.\frac{di_a}{dt} + \frac{d\Phi_{fa}}{dt} \quad [II.13]$$

Avec :

$$e_a = v_a (i_a = 0) = \frac{d\Phi_{fa}}{dt} = \frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} \cdot \frac{d\theta_e}{dt} = p.\Omega.\frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} \quad [II.14]$$

Alors la tension sur la phase a s'écrit:

$$v_a = R_a.i_a + L_c.\frac{di_a}{dt} + p.\Omega.\frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} = R.i_a + L_c.\frac{di_a}{dt} + e_a \quad [II.15]$$

De même pour les phases b et c :

$$v_b = R_b i_b + L_c \frac{di_b}{dt} + p \Omega \frac{d\Phi_{fb}}{d\theta_e} = R_b i_b + L_c \frac{di_b}{dt} + e_b \quad [\text{II.16}]$$

$$v_c = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + p \Omega \frac{d\Phi_{fc}}{d\theta_e} = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + e_c \quad [\text{II.17}]$$

➤ Expression du couple

La puissance électromagnétique instantanée s'écrit:

$$p_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad [\text{II.18}]$$

D'où le couple électromagnétique

$$c_e = \frac{p_e}{\Omega} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\Omega} \quad [\text{II.19}]$$

En remplaçant les fém. par leurs expressions en fonction des flux, on obtient:

$$c_e = p \left[i_a \frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} + i_b \frac{d\Phi_{fb}}{d\theta_e} + i_c \frac{d\Phi_{fc}}{d\theta_e} \right] \quad [\text{II.20}]$$

➤ Equation mécanique

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = c_e - c_r = J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{J}{p} \frac{d^2\theta_e}{dt^2} \quad [\text{II.21}]$$

- **Diagramme bipolaire de moteur synchrone [10]**

On représente le diagramme bipolaire de moteur synchrone alimenté à tension fixe sur la figure.II.7.

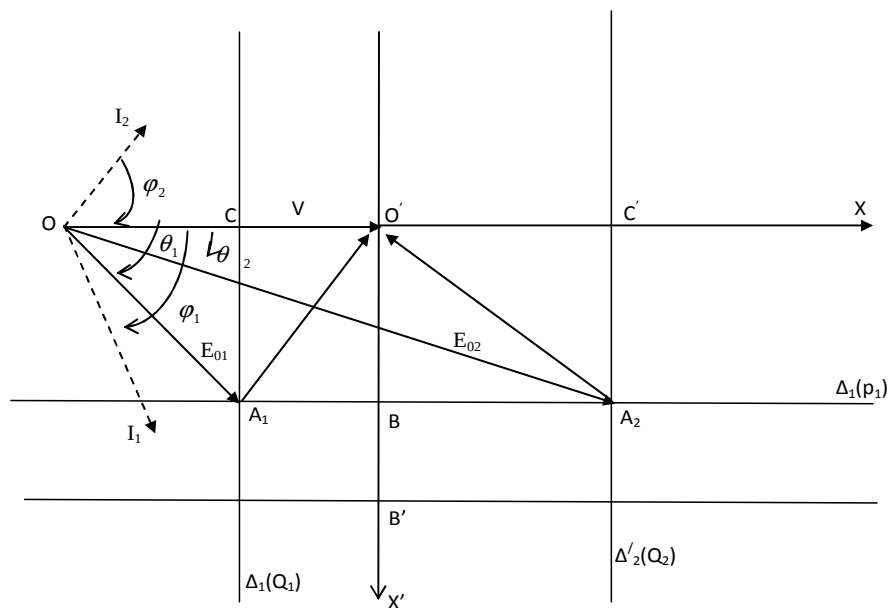


Fig.II.7. Diagramme bipolaire du moteur synchrone

On remarque que $\partial B = LwI_1 \cos(\phi_1) = \frac{Lw}{3V} Q_1 \cos(\phi_1) = \frac{Lw}{3V} Q_1$ [II.22]

Si on note P_1 la puissance électrique active absorbée par le moteur dans le fonctionnement associé au point A_1 . On remarque que la droite $\Delta_1(p)$ représente le lieu de fonctionnement équipissance et equicouple. Le fonctionnement correspondant à des vecteurs E_0 d'extrémité située sur la droite $\Delta_1(p)$, sont de même puissance active absorbée

De même façon on montre : $0' C = LwI_1 \sin(\phi_1) = \frac{Lw}{3V} Q_1$ [II.23]

Si on note que $Q_1 = 3VI_1 \sin(\phi_1)$ la puissance réactive absorbée par la machine. La droite $\Delta'_1(p)$ est le lieu des équipuissance réactive absorbée associé à Q_1 .

On pourrait graduer l'axe $O'X'$ en puissance active, et l'axe $O'X$ en puissance réactive.

On remarque bien que lorsque le point C situé entre O et O', le courant est en avance par rapport à la tension (moteur sous excité), donc le moteur absorbe de la puissance réactive (fonctionnement inductif). Et lorsque le point C est situé entre O' et X, le courant est en retard par rapport à la tension (moteur sur excité), donc le moteur fournit de l'énergie réactive au réseau (Zone de fonctionnement du moteur synchrone en compensateur synchrone).

▪ Les courbes en V. [9]

Pour mettre en évidence la particularité de ce moteur, qui est de pouvoir faire varier le courant "I" et la puissance réactive "Q" par le courant d'excitation "J" on trace ou on relève souvent les courbes en V de Mordely de figure II-8 qui représentent Les caractéristiques $I(J)$, à tension V et puissance utile " P_u " constante.

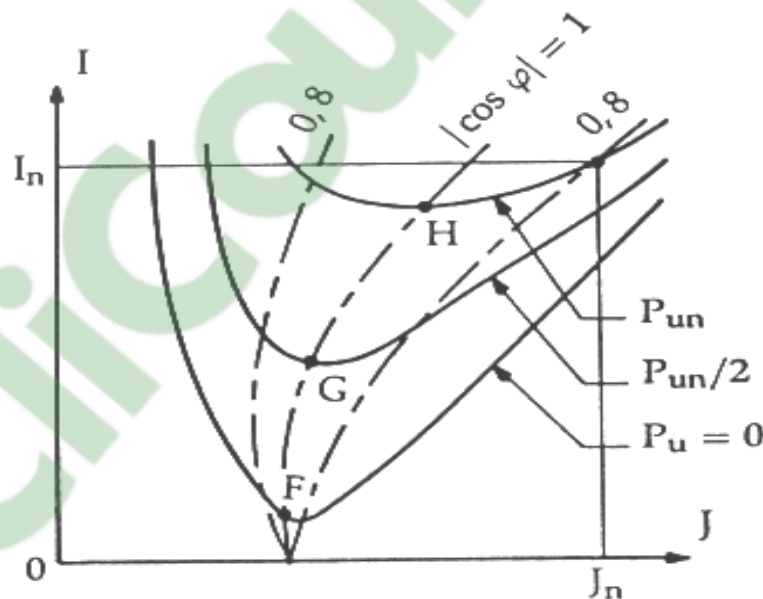


Fig.II.8. Caractéristique de I en fonction J

Le lieu des minima (courbe passante par FGH correspond à $\cos\phi$ égale à 1. A droite, le moteur surexcité et crée du réactif, à gauche, il est sous excité et en absorbe.

Pour mieux approcher l'allure de ces caractéristiques, il faut incliner les axes AP et AQ, pour tenir compte de la résistance de l'induit, et remplacer les droites d'égale puissance P par des cercles (figure. II.9).

La puissance P_u du moteur est en effet égale à la puissance transformée P' diminuée des pertes mécaniques et dans le fer.

II.2. L'autopilotage du moteur synchrone

• Introduction

Comme nous l'avons vu, le moteur synchrone pose deux problèmes majeurs, l'accrochage et le décrochage. Pour le remédier, il faut :

- Assurer un fonctionnement à fréquence variable de moteur en l'alimentant par des convertisseurs statiques de fréquence.
- Avoir à tout instant la pulsation des grandeurs statorique (ω_s) égales $P\Omega$ telle que : Ω et la vitesse angulaire de rotor et P le nombre de paires de pôles du moteur.

C'est l'autopilotage de moteur synchrone

II.2.1. L'idée de l'autopilotage

L'expression du couple électromagnétique instantané suivante :

$$C_e = p \left[i_a \cdot \frac{d\Phi_{fa}}{d\theta_e} + i_b \cdot \frac{d\Phi_{fb}}{d\theta_e} + i_c \cdot \frac{d\Phi_{fc}}{d\theta_e} \right] = \frac{i_a \cdot e_a + i_b \cdot e_b + i_c \cdot e_c}{\Omega} \quad [\text{II.24}]$$

Sachant que le flux dans l'entrefer, donc les FEM induites; peut être :

- sinusoïdales
- Trapézoïdales

On peut se poser la question : quelle forme faut-il donner aux courants pour avoir un couple moyenne non nul au bout d'une période.

On s'intéresse au moteur à fem sinusoïdales

Si le champ magnétique est à répartition sinusoïdale dans l'entrefer ; alors le flux correspondant est lui aussi sinusoïdale puisque :

$$\phi_{f\alpha 1} = \int \vec{B}_f \cdot d\vec{S} \quad [\text{II.25}]$$

Par conséquent les fem créées aux bornes des trois enroulements triphasés sont elles-mêmes sinusoïdales. Elles seront de la forme suivante :

$$e_a = E_{\max} \cdot \cos(\theta_e + \frac{\pi}{2}) ; \quad e_b = E_{\max} \cdot \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}) ; \quad e_c = E_{\max} \cdot \cos(\theta_e - \frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{2}) \quad [\text{II.25}]$$

Avec : $E_{\max} = p \cdot \Omega \cdot \Phi_{\max}$

A vitesse constante: $\theta_e = p \cdot \Omega \cdot t + \text{constante} = \omega \cdot t$ (en choisissant une origine des temps telle que : $\theta_e = 0$ à $t = 0$), les fém. sont des fonctions sinusoïdales du temps.

❖ Détermination de la forme des courants.

On peut vérifier à partir de l'expression suivante

$$c_e = p \cdot \Phi_{\max} \cdot \left[i_a \cdot \cos(\theta_e + \frac{\pi}{2}) + i_b \cdot \cos(\theta_e + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cdot \cos(\theta_e + \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}) \right] \quad [\text{II.26}]$$

qu'en injectant des courants de la forme suivante:

$$i_a = I_{\max} \cdot \cos(\theta_e + \frac{\pi}{2} - \psi) \quad i_b = I_{\max} \cdot \cos(\theta_e + \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3} - \psi) \quad i_c = I_{\max} \cdot \cos(\theta_e + \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3} - \psi)$$

On obtient un couple instantané donné par l'expression:

$$c_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_{\max} \cdot I_{\max} \cdot \cos(\psi) \quad [\text{II.27}]$$

L'expression de couple est fonction de l'angle ψ (déphasage entre le courant statorique et la fem de moteur), c'est la raison pour laquelle on a intérêt d'expliciter le sens physique de ce dernier.

A partir des équations des tensions précédentes on peut déduire le schéma équivalent d'une phase.



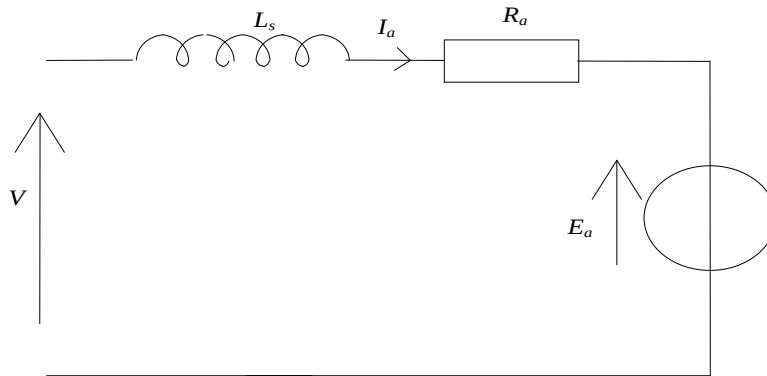


Fig.II.9. Le schéma électrique d'une phase de moteur synchrone

On trace le diagramme de Fresnel correspondant à l'équation de tension d'une phase de la machine : $V = E + j.X_s.I_a + R_a \cdot I_a$ [II.28]

On fait apparaître sur ce diagramme les images des champs statorique et rotorique.

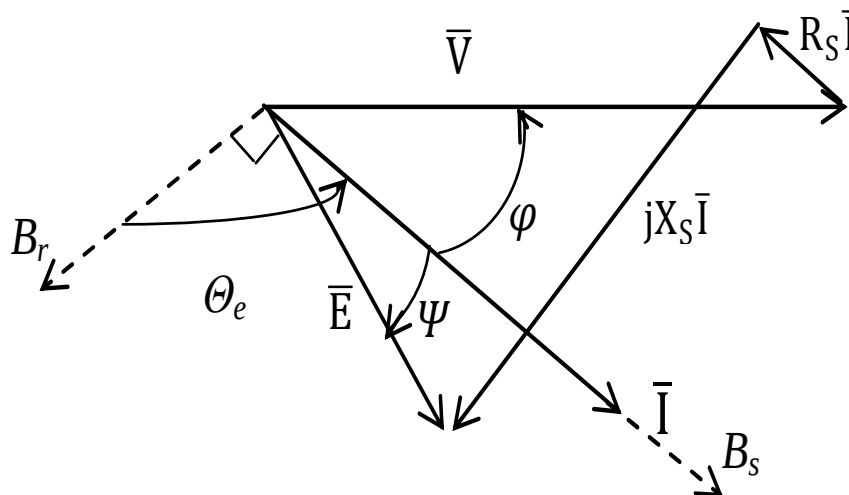


Fig. II.10. Diagramme vectoriel d'une phase du moteur synchrone

Avec :

θ_e : angle entre le champ rotorique et le champ statorique.

A partir de ce diagramme on constate que :

$$\theta_e = \frac{\pi}{2} + \Psi \quad [\text{II.29}]$$

Cette relation indique que le réglage de l'angle entre le courant statorique et la fem de moteur revient à régler la position de rotor par rapport au stator. Alors on peut écrire l'expression de couple comme suite :

$$c_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_{\max} \cdot I_{\max} \cdot \sin \theta_e \quad [\text{II.30}]$$

Le pilotage du moteur et donc fixé le déphasage de courant par rapport à la fem du moteur, donc de garder la position du rotor par rapport au stator à tout instant

A partir des deux expressions de couple, on déduit les grandeurs de réglage possible :

- Le flux inducteur.
- L'amplitude des courants injectés.
- L'angle ψ représentant le déphasage entre la f.é.m. et le courant en régime permanent, donc la position de rotor par rapport au stator.

L'élaboration des courants instantanés demande la connaissance de la position angulaire stator rotor (autopilotage).

II.2.2. Principe de l'autopilotage

Le principe de l'autopilotage est de lier la vitesse du rotor à la fréquence des courants statorique, donc de maintenir le déphasage entre les deux champs statorique et rotorique, constant. Ce ci impose une alimentation du moteur à fréquence variable.

II.2.3. Réalisation pratique

L'alimentation à fréquence variable de la machine se fait à l'aide d'un convertisseur statique de fréquence.

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 statoriques ou l'amplitude des courants statoriques et la fréquence f_s est proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

Suivant la source d'alimentation de moteur on peut distinguer deux façons de réaliser l'autopilotage.

II.3.2.a. Autopilotage par commutateur de courant

➤ Schéma de l'alimentation de moteur [11]

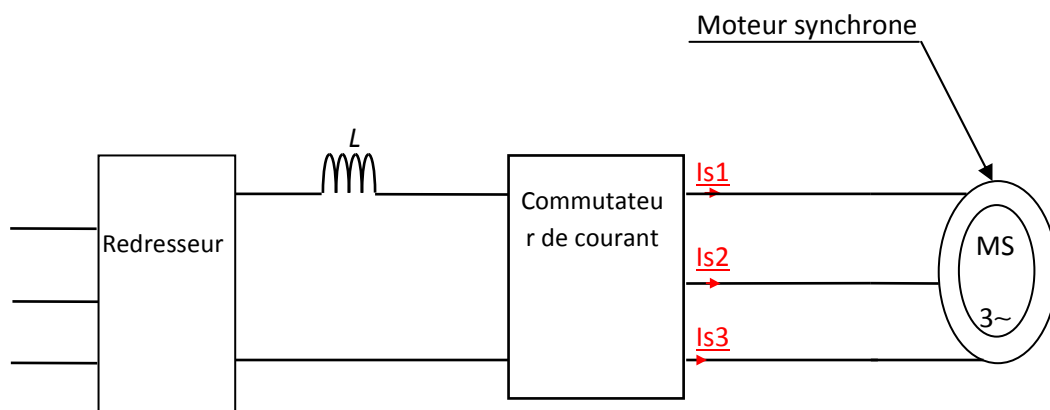


Fig.II.11. alimentation de Moteur synchrone par commutateur de courant

Le commutateur est alimenté par une source de courant, généralement réalisée au moyen d'un convertisseur statique contrôlé en courant (redresseur à thyristors, ...), associé à une inductance de lissage. Les interrupteurs du commutateur aiguillent le courant délivré par la source de courant dans les enroulements du moteur, qui est définie à partir de la détection de la position du rotor. L'amplitude des courants dans les enroulements du moteur et leur déphasage par rapport aux fem sont donc imposés et on réalise bien l'alimentation à courant I_s imposé.

➤ Les modes de commutation [12]

Deux modes de commutation peuvent être utilisés:

- **Commutation naturelle**

Dans le cas d'un commutateur à commutation naturelle, on utilise les tensions de la machine pour assurer la commutation des interrupteurs du commutateur. Le commutateur employé est alors un simple pont de Graëtz à thyristors. Néanmoins, la commutation naturelle n'est possible que si le courant est en avance sur la tension. Cela limite les possibilités de stratégie de réglage du couple. Dans ce cas, on adopte une stratégie qui consiste à maintenir le facteur de puissance le plus proche possible de l'unité tout en remplissant les conditions nécessaires à la commutation, c'est-à-dire un déphasage avant, juste suffisant pour assurer la commutation du courant et la polarisation en inverse des thyristors (assure le blocage des thyristors).

- **Commutation forcée**

Les possibilités de commutation dépendent des tensions développées par la machine, qui sont essentiellement variables sur toute la plage de fonctionnement. En particulier, à la vitesse nulle et aux très basses vitesses, les tensions développées par la machine ne sont pas suffisantes pour assurer la commutation Naturelle. Il est alors nécessaire d'utiliser un dispositif de commutation forcée du courant dans les enroulements de la machine. Ce mode de commutation présente, en outre, des analogies avec le collecteur mécanique, notamment en ce qui concerne l'indispensable déphasage courant-tension, que l'on peut assimiler au décalage des balais pour obtenir la tension de commutation. Lorsque la condition de déphasage avant du courant par rapport à la tension n'est pas tolérable et que l'on veut privilégier la stratégie de commande à couple maximal, il faut introduire une tension auxiliaire de commutation à l'aide des circuits spécial. Diverses structures de commutateurs à commutation forcée sont alors disponibles pour assurer la commutation.

➤ Commande des thyristors [11]

On utilise un pont de Graëtz à thyristor de la figure. II.12. qui permet la façon du commutation naturelle des thyristors.

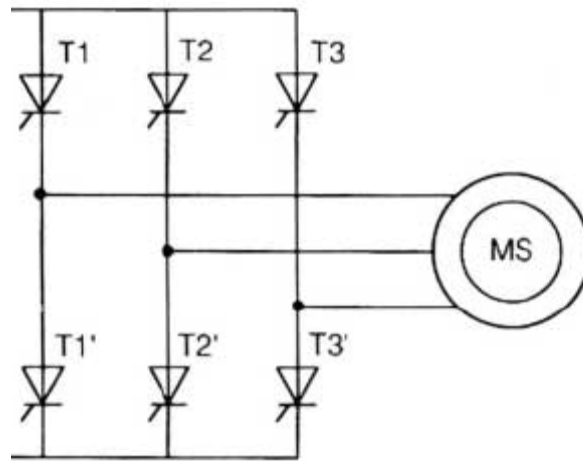


Fig.II.12. Alimentation de moteur par un pont de Graëtz

Les interrupteurs T_1 , T_2 , T_3 d'une part, T_1' , T_2' , T_3' d'autre part doivent être complémentaires, pour que la source du courant I ne soit jamais en circuit ouvert. En plus le courant doit être en avance par rapport à la tension d'alimentation. Ce ci est obtenu en surexcitant le moteur.

La commande des thyristors se fait à l'aide des signaux envoyés par le capteur de position placés sur le rotor comme le montre la figure suivante (Fig.II.13.)

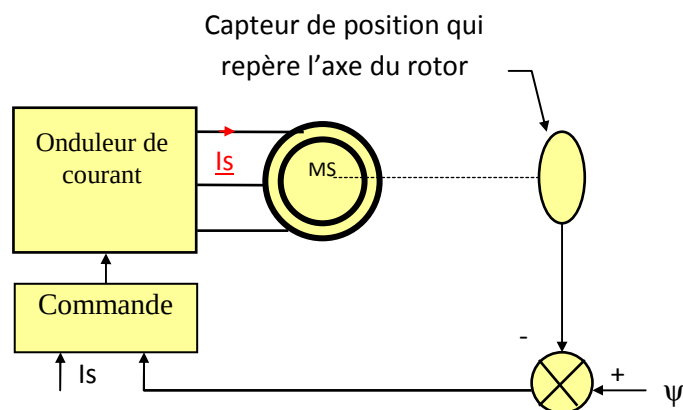


Fig.II.13. position de capteur de position

Le déplacement du rotor permet de générer les commandes des thyristors. Le capteur de position du rotor peut être très rudimentaire puisqu'il faut générer l'ordre d'amorçage des thyristors lorsque le rotor effectue un tour complet.

La figure. II.14. illustre le principe de fonctionnement d'un capteur de position dans le cas d'une machine bipolaire ($p = 1$).

Le capteur de position est constitué d'un disque solide du rotor et d'un dispositif opto-électronique lié au stator. Le dispositif opto-électronique comprend six ensembles diodes électroluminescentes - phototransistors disposés conformément à la figure. II.14.

Lorsque qu'une diode éclaire un photo-transistor, le thyristor correspondant est amorcé. Le disque lié au rotor possède une encoche de 120° afin de générer les ordres de commande des thyristors au fur et à mesure du déplacement du rotor.

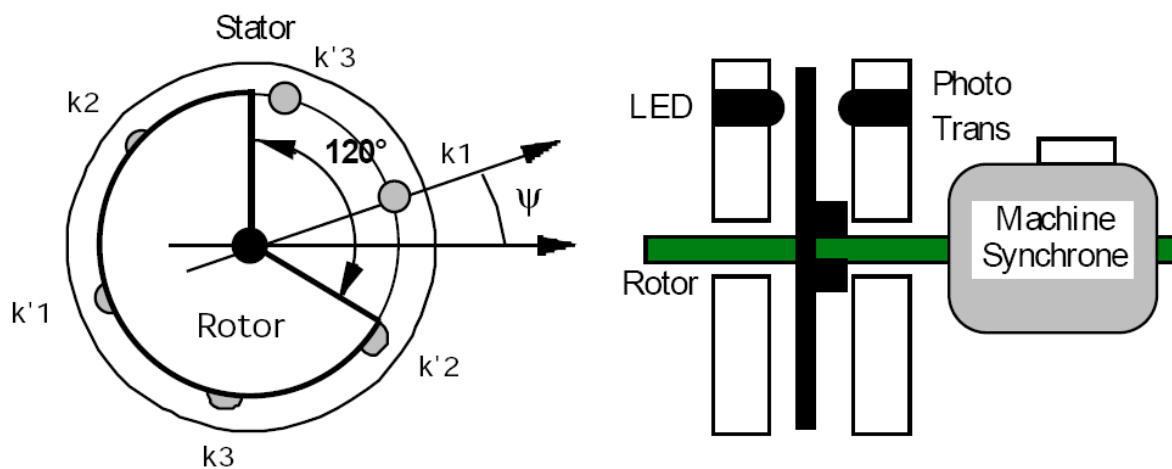


Fig.II.14. Principe de fonctionnement du capteur

Le dispositif optoélectronique lié au stator peut être décalé de façon à déphaser les ordres de commandes des thyristors par rapport à la position de la roue polaire ce qui permet de contrôler le déphasage ψ entre courant et fem sur chaque phase.

Pour assurer le fonctionnement en commutation naturelle du pont à thyristors, il faut imposer un angle ψ suffisant pour que les courants par phase soient en avance sur les tensions statoriques correspondantes.

Les commutations des courants dans les phases de la machine synchrone s'effectue conformément à la figure II-14. Chaque thyristor conduit pendant un tiers de période (120°) et l'enchaînement des séquences tient compte de la position du rotor pour éviter le "décrochage" de la machine.

t	T ₁	T ₂	T ₃	T' ₁	T' ₂	T' ₃
t ₁	1	0	1	0	1	0
t ₂	1	0	0	0	1	1
t ₃	1	1	0	0	0	1
t ₄	0	1	0	1	0	1
t ₅	0	1	1	1	0	0
t ₆	0	0	1	1	1	0

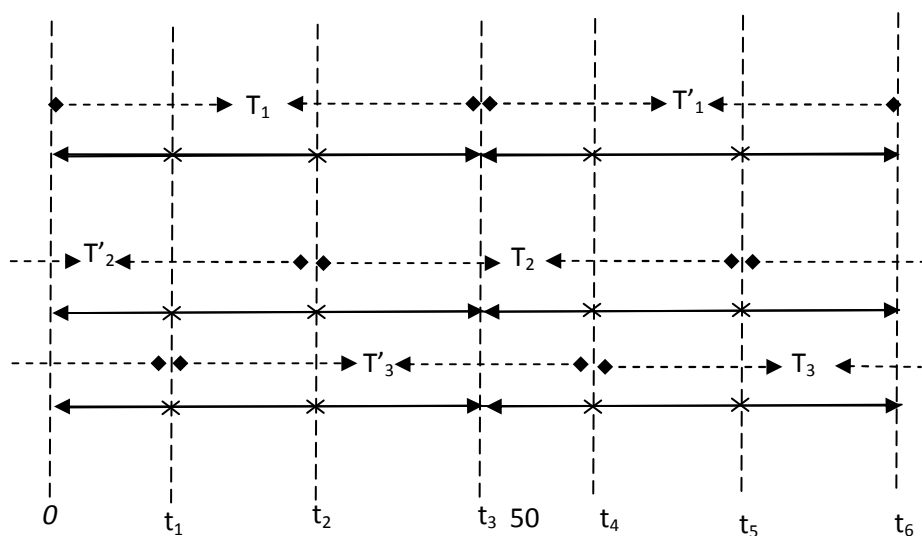


Fig.II.15. Séquences de conduction des thyristors

➤ Asservissement de vitesse [11]

Pour asservir la vitesse de rotation, on va généralement procéder comme pour une machine à courant continu en réalisant une régulation cascade :

- Une boucle de régulation "interne" permet de contrôler le couple électromagnétique. (imposer l'angle ψ)
- Une boucle de régulation "externe" permet de générer la consigne de couple de la boucle "interne" de sorte qu'à la vitesse de rotation de consigne il y ait équilibre du système ($C_{EM} = C_r$).

Comme le couple électromagnétique est fonction de I_o et ψ . Il faut donc, soit maintenir l'angle ψ constant et tolérer une diminution importante du couple électromagnétique indépendamment de l'amplitude de I_o , soit ajuster l'angle ψ en fonction de l'amplitude de I_o et optimiser ainsi le couple électromagnétique.

On peut commander la vitesse par la valeur moyenne de la tension fournie par le redresseur à l'onduleur : c'est la marche à couple constant (comme le cas de moteur à courant continu).

➤ Schéma de l'assemble moteur autopiloté, asservissement de vitesse [11]

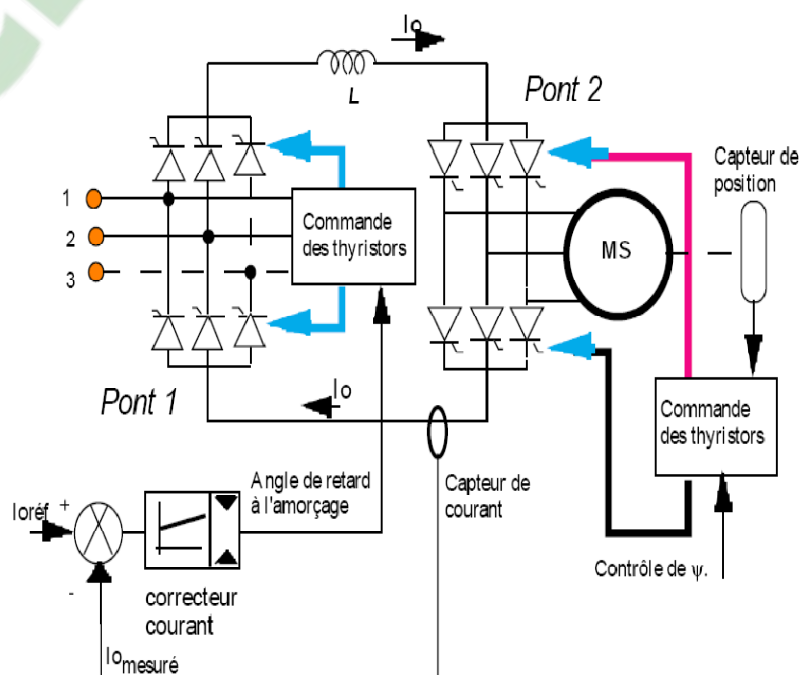


Fig. II-15 Schéma de moteur synchrone autopiloté

Remarque

L'autopilotage par commutateur de courant a l'avantage d'utiliser des thyristors qui sont des composants robustes, bon marché et qui fonctionnent ici en commutation naturelle (excepté à basse vitesse). L'utilisation des thyristors impose toutefois un déclassement de la machine vis à vis du couple nominal ($\psi \neq 0$). Les thyristors permettant de contrôler des puissances élevées (jusqu'à quelque 10 MW). Ce montage est notamment utilisé en traction électrique.

Pour des applications où la charge mécanique présente une faible inertie, une telle structure est mal adaptée puisqu'il y a une ondulation importante sur le couple électromagnétique. Afin de supprimer les ondulations de couple, il faut alimenter la machine synchrone par des courants sinusoïdaux grâce à un onduleur de tension.

II.3.2.b. Autopilotage par onduleur de tension**➤ Schéma de principe de l'alimentation [8]**

On présentera le système d'entraînement complet du moteur synchrone autopiloté où est associée à deux convertisseurs en cascade. Le convertisseur coté réseau est constitué d'un redresseur triphasé à diodes et d'un filtre, et le convertisseur coté moteur, un onduleur de tension triphasé. La Fig. II.16 illustre le schéma de principe de cette association.

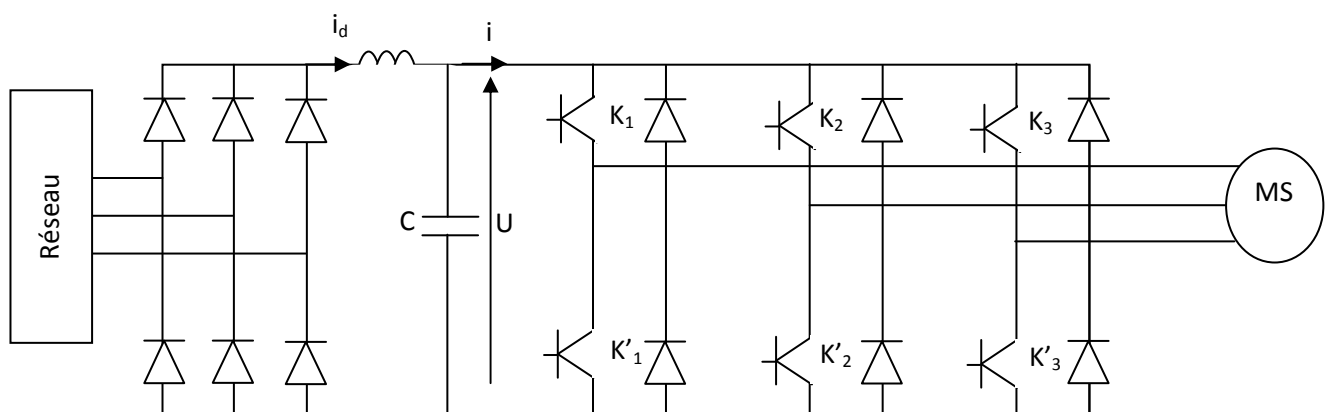


Fig.II.16. Schéma principale de l'alimentation du moteur en tension.

- **L'onduleur de tension [8]**

Les onduleurs de tension alimentent les machines à courant alternatif à partir d'une source de tension continue. Ils permettent d'imposer aux bornes de la machine des tensions d'amplitude et de fréquence réglable par la commande. Une machine triphasée sans liaison de neutre est alimentée par un onduleur de tension à trois bras comprenant chacun deux cellules de commutation. Chaque cellule est composée d'un interrupteur, commandé à l'amorçage et au blocage et d'une diode antiparallèle.

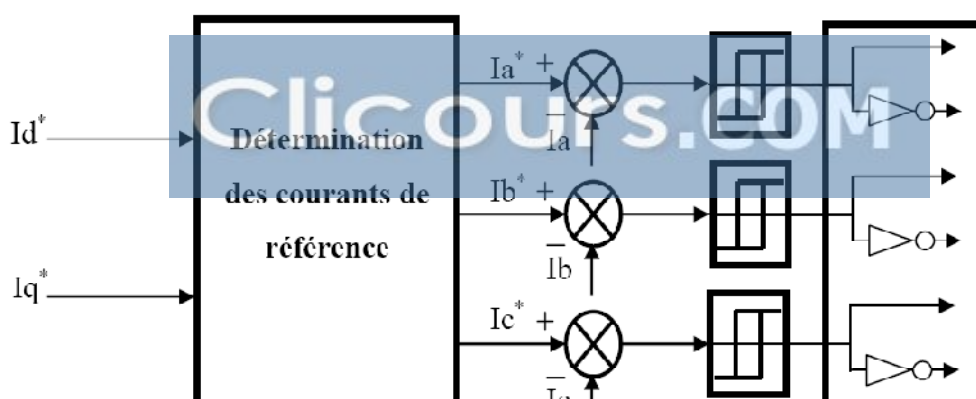
➤ **Méthode de contrôle du courant**

Le dispositif de commande a pour rôle d'assurer l'auto pilotage et la régulation des courants dans le but de maintenir les courants réels mesurés au niveau des phases de la machine aussi proche que possible de leurs références. Pour cela, deux techniques peuvent être mises en œuvre: - Contrôle des courants par hystérésis.

- Contrôle des courants par modulation de largeurs d'impulsions (M.L.I).

- **Contrôle de courant par hystérésis [8]**

Cette méthode, certainement la plus simple, a souvent été employée pour l'alimentation des machines à courant alternatif. La Figure. II.17 présente le diagramme de principe pour cette technique, où les références de courant sont sinusoïdales. Cette stratégie utilise trois régulateurs indépendants, un par phase; quand le courant instantané dans une phase s'écarte de sa référence sinusoïdale, fixée par hystérésis du régulateur, une commutation est imposée aux interrupteurs du bras d'onduleur correspondant, de façon à maintenir ces courants toujours dans une bande entourant ces références; les ondulations du courant sont fixées par la valeur de la bande d'hystérésis



- **Contrôle du courant par M.L.I [8]**

La méthode de contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) est illustrée dans la figure.II.18. A partir d'une source de tension continue, consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que le fondamental de la tension soit le plus proche de la référence de la tension sinusoïdale.

La M.L.I. est obtenue par la comparaison d'un signal triangulaire de haute fréquence (F_p) appelé "porteuse" avec un signal de référence appelé "modulatrice", de fréquence $F_m \ll F_p$ comme indique la figure.II.19. Les intersections de ces deux signaux déterminent les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur.

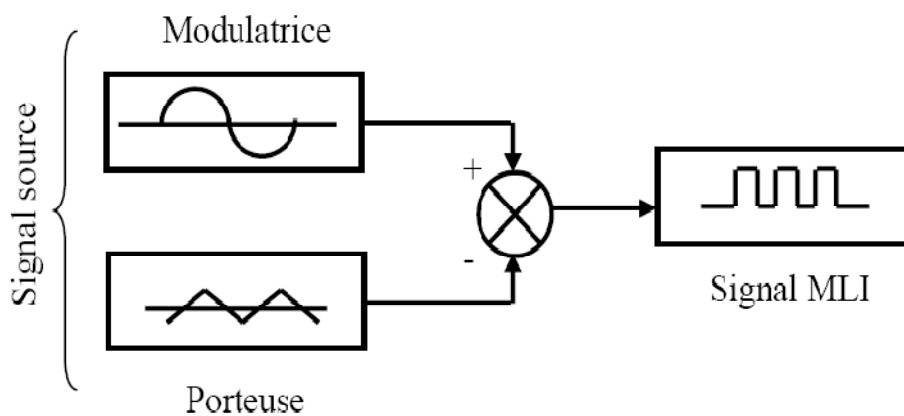
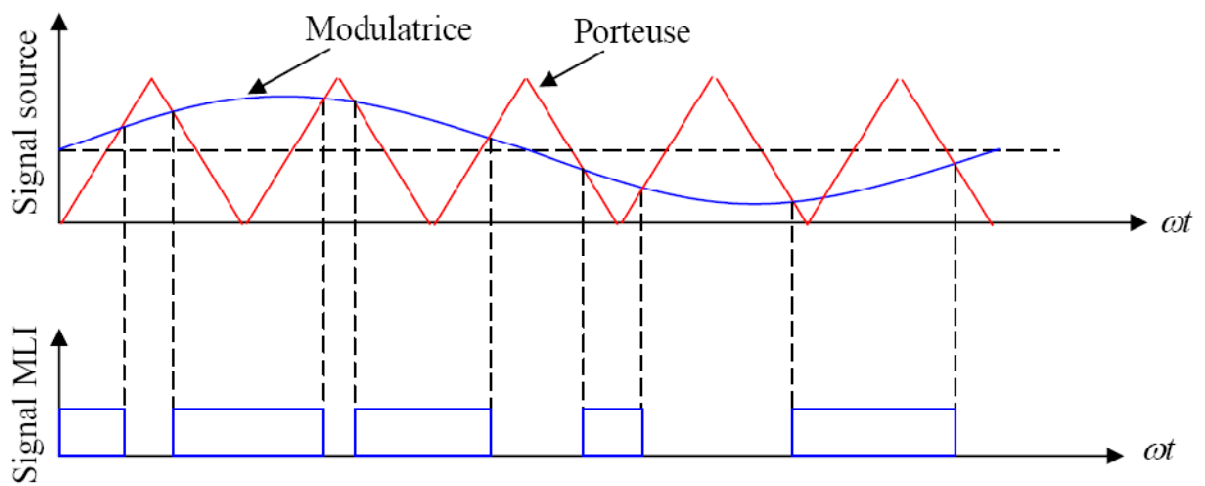


Fig.II.18. Schéma de principe d'une MLI



Les deux signaux sont définis comme étant :

- **L'onde porteuse** : qui est signal à haute fréquence (une onde triangulaire).
- **L'onde modulatrice** : qui est un signal image de l'onde de sortie recherchée. (une onde sinusoïdale).

Deux principaux paramètres caractérisant la MLI, sont :

- **L'indice de modulation M_L** : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de

$$\text{l'onde modulatrice à celle de l'onde porteuse : } M_L = \frac{V_m}{V_p} \quad [\text{II.31}]$$

- **Le rapport de modulation M_r** : qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de

$$\text{l'onde porteuse à celle de l'onde modulatrice : } M_r = \frac{F_p}{F_m} \quad [\text{II.32}]$$

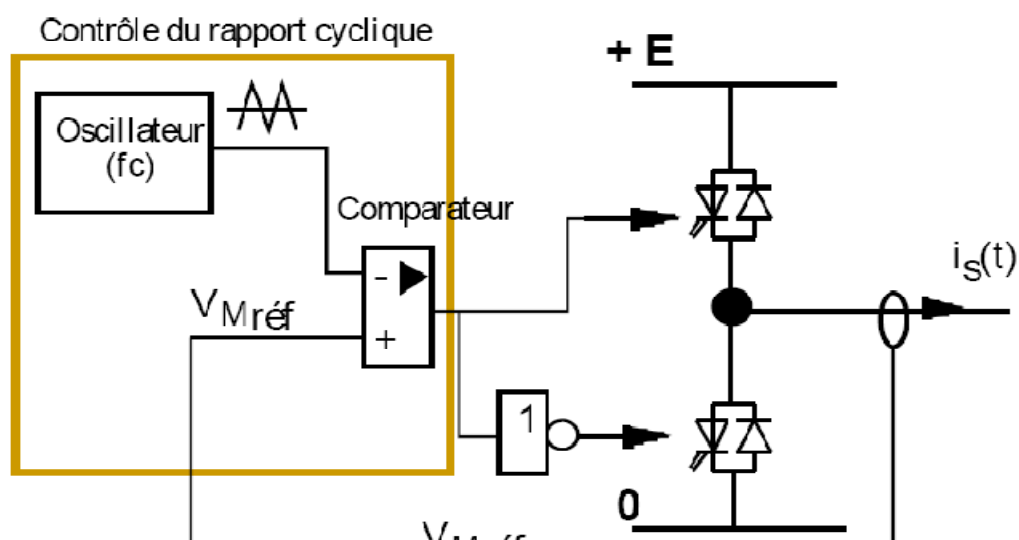
On se limite dans notre travail à l'autopilotage du moteur par l'onduleur de tension MLI.

➤ Autopilotage par onduleur MLI [11]

L'onduleur de tension MLI permet d'obtenir des courants statoriques quasi sinusoïdaux et ceci quel que soit le déphasage tension – courant, Il est donc possible de fonctionner avec $\psi = 0$ ($\cos \psi = 1$), pour avoir le maximum de couple électromagnétique :

$$C_{EM} = 3/2 p \Phi_v I_s. \quad [\text{II.33}]$$

Afin de contrôler les courants dans chaque phase de la machine, il est nécessaire d'asservir le rapport cyclique de la commande de chaque bras de l'onduleur conformément à la figure. II.20.



Un oscillateur délivrant un signal triangulaire alternatif fixe la fréquence de commutation des interrupteurs. Ce signal triangulaire d'amplitude crête V_o est comparé à une tension $V_{Mréf}$ de sorte que le rapport cyclique de commande des interrupteurs soit tel que :

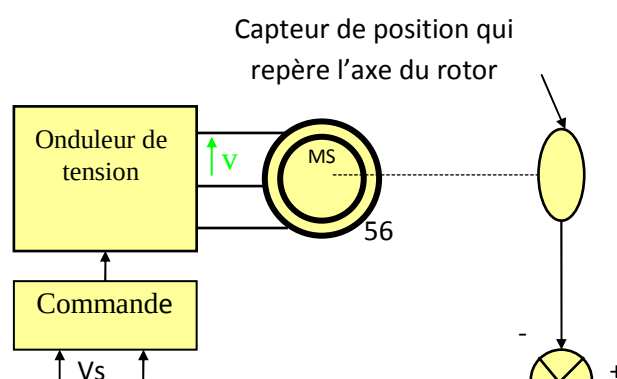
$$R = 1/2 + V_{Mréf}/V_o \quad [II.33]$$

Le correcteur proportionnel intégral élabore la tension $V_{Mréf}$ de sorte que le courant $i_s(t)$ soit l'image de la consigne $i_{oréf}$. Pour obtenir un courant de sortie sinusoïdal, il faut donc que la consigne de courant $I_{sréf}$ soit sinusoïdale. Le dispositif d'autopilotage doit générer, en tenant compte de la position du rotor, les trois consignes de courant par phase de la machine synchrone.

Le capteur fournit une image de la position du rotor. Cette image de la position du rotor permet alors d'adresser des saigneux sur l'onduleur de façon à déphaser les courants $i_{s1réf}$, $i_{s2réf}$ et $i_{s3réf}$ par rapport aux FEM de la machine (Contrôle de ψ). Mais puisque l'onduleur de tension MLI le permet, il est préférable de fonctionner avec $\psi = 0$ et d'obtenir le maximum de couple de la machine

➤ contrôle de la position de rotor [11]

Le capteur de position de la figure II.21 permet de régler l'instant d'amorçage et de blocage des interrupteurs de manière à avoir la position voulu de rotor. La vitesse de rotation fixe la fréquence d'alimentation de la machine et impose le synchronisme entre V_s et E_v .



➤ **Asservissement de vitesse [10]**

L'asservissement de vitesse du moteur synchrone autopiloté est réalisé par une régulation cascade ; c'est à dire en rajoutant une boucle "extérieure" de vitesse qui génère la consigne de courant $I_{stréf}$.

➤ **Schéma de l'ensemble moteur autopiloté-asservissement de vitesse [10]**

La figure II.21 représente l'ensemble de moteur synchrone autopiloté par onduleur de tension

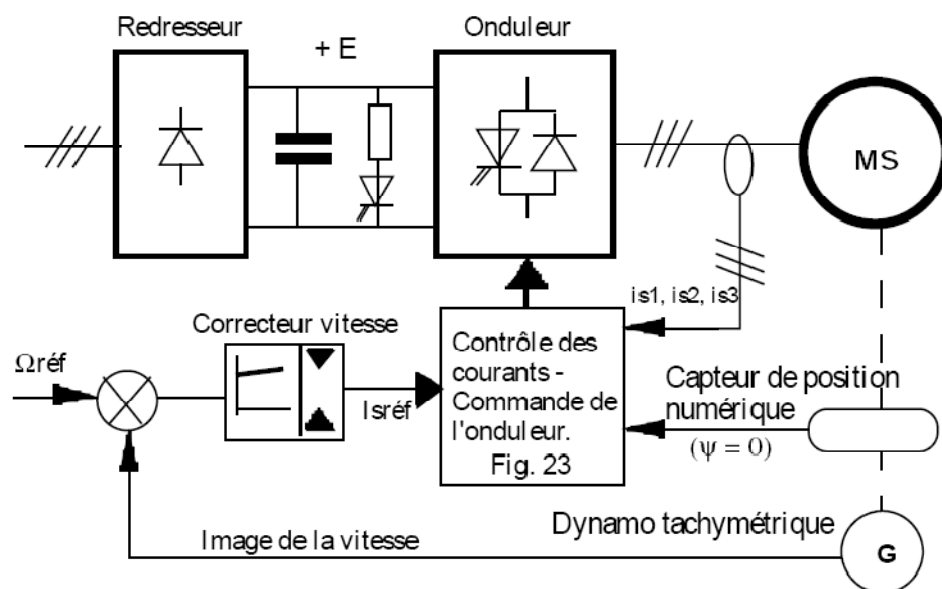


Fig.II.21 Schéma de moteur synchrone autopiloté par onduleur de tension

Remarque :

Les interrupteurs de l'onduleur de tension MLI sont commandés à l'amorçage et au blocage et il n'y a donc pas de problèmes de commutation à basse vitesse comme dans le montage à

thyristors. Les courants statoriques sont ici quasi-sinusoïdaux, ce qui permet de créer un champ tournant statorique circulaire. Ainsi, il n'y a pas d'ondulation sur le couple électromagnétique contrairement au montage utilisant des thyristors. Le fait de pouvoir travailler avec un angle ψ nul, permet d'obtenir le couple maximum de la machine. L'emploi de cette structure en forte puissance est limité par les performances des interrupteurs de l'onduleur MLI. Aujourd'hui les GTO permettent toutefois de contrôler des puissances de l'ordre du MW avec une fréquence de découpage de quelques centaines d'Hertz.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné quelques rappels sur le moteur synchrone. En suite nous avons vu les différentes manières de son alimentation à fréquence variable et la manière de contrôler son couple moteur.

Dans le chapitre suivant nous comparons le moteur synchrone autopiloté avec le moteur à courant continu

Chapitre III

Etude comparative

III. L'étude comparative entre le moteur à courant continu et le moteur synchrone autopiloté

III.1 .Comparaison des structures

Les structures des deux moteurs sont pratiquement équivalentes :

Les deux moteurs comportent tous les deux un induit et un inducteur ; La différence réside dans le fait que dans le cas de moteur à courant continu, l'induit est tournant (il est au rotor) et dans le cas du moteur synchrone ; l'induit est fixe et l'inducteur est mobile, c'est le rotor.

Dans le moteur à courant continu, le collecteur assure la commutation des courants dans l'induit. Il inverse le sens des courants dans les conducteurs quand ces derniers passent d'un pôle à un autre pour maintenir le couple moteur dans le même sens. Il joue le rôle d'un commutateur de courant. Dans le moteur synchrone autopiloté, ce rôle est rempli justement par l'onduleur de tension ou le commutateur de courant alimentant le stator du moteur et piloté au commandé par le capteur de position se trouvant sur le rotor.

III.2 .Comparaison des caractéristiques :

- Le couple moteur dans les deux cas : moteur à courant continu et moteur synchrone, résulte de l'interaction entre les deux champs (statorique et rotorique) créés indépendamment l'un de l'autre (ces champs sont créés par deux sources différentes). Ce couple a pour expression, comme nous l'avons montré ;

- Dans le cas du moteur à courant continu : $C = K.\phi.I$

- Dans le cas du moteur synchrone tournant à la vitesse $\Omega = P.\omega$ $C = K.\phi_v.\cos\psi$

Avec : K : constante

ϕ_v : Flux à vide créé par l'inducteur

I : Courant statorique

ψ : Déphasage entre le courant et la fem du moteur.

Dans le cas d'un moteur synchrone autopiloté on maintient $\cos \psi$ fixe, généralement égale à 1 pour avoir la valeur du couple maximale. Il prend alors la même expression que le couple du moteur à courant continu, c à d

$$C = K' \cdot \phi \cdot I$$

- Tout comme dans le cas du moteur à courant continu, ou la variation de vitesse se fait de deux manières: à flux constant et à flux variable, puisque

$$\Omega = k \cdot \frac{V}{\phi}$$

La variation de vitesse d'un moteur synchrone peut se faire aussi à flux constant ou à flux variable.

- Dans le cas d'un moteur alimenté par onduleur de tension, l'expression du couple est :

$$C = \frac{3}{2} \cdot \frac{\phi_j}{L_s} \cdot \frac{V_s}{\omega} \cdot \sin \theta$$

Si on maintient ϕ constant alors :

$$C = k_1 \cdot \frac{V_s}{\omega}$$

En faisant varier la vitesse par variation de ω ; on peut avoir deux cas possible :

✓ Variation de ω et de V_s telles que le rapport $\frac{V_s}{\omega}$ reste constant. Dans ce cas le moteur développe un couple constant à toutes les vitesses.

✓ Variation de ω en maintenant V constant dans ce cas le couple diminue et la vitesse augmente comme dans le cas d'un moteur série

- Dans le cas d'un moteur alimenté par commutateur de courant, l'expression du flux est :

$$C = \frac{3}{2} \phi \cdot I \cdot \cos \psi$$

✓ Si on maintient le flux ϕ et $\cos\psi$ la tension à l'entrée de l'onduleur constants, alors on se retrouve dans le cas du MCC à excitation séparée. Le moteur peut développer un couple constant Independent de la vitesse.

✓ Si on veut dépasser la vitesse nominale, il suffit de diminuer le flux exactement comme le cas du moteur à courant continu.

III.3. Aspect économique et domaine d'utilisation

- Tout comme l'a fait le moteur à courant continu il y a déjà très longtemps, le moteur synchrone autopiloté est entré dans le domaine de la traction électrique par la grande porte .il tend remplacer complètement le moteur à courant continu dans le domaine des grandes vitesses à cause de la limite de vitesse imposée par l'induit et son collecteur tournants la puissance massique du moteur synchrone autopiloté est beaucoup plus grande que celle du moteur à courant continu pour une même vitesse. Ainsi une machine synchrone, à puissance égale est plus petite et moins chère qu'une machine à courant continu.

Le domaine d'utilisation des moteurs synchrone autopiloté va des entraînements de très faible puissances quelque WATT (entraînements de bondes, de disques ...) aux entraînements de grandes puissances de quelques MW à des dizaines de MW (entraînements de : pompe ; propulsion de bateaux ; générateurs à vitesse variable ; traction.....)

Pour l'alimentation des moteurs de grande puissance, on utilise les montages à thyristors. Ce sont eux qui sont susceptibles de supporter de très grands courants. Ces montages sont à excitation par courant continu.

Les moteurs à faible et à moyenne puissance sont alimentés en générale par onduleurs de tensions réalisés à l'aide des transistors. Ce sont le souvent des moteurs à aimant permanent.

- L'usure en cas d'usage intensif (traction ferroviaire, production industrielle.), des balais et du collecteur, impose une maintenance régulière des moteurs à courant continu.

L'utilisation du moteur à courant continu en milieu explosif présente un danger à cause des étincelles produites au niveau du collecteur.

Pour toutes ces raisons ; le moteur synchrone autopiloté est entrain de remplacer le moteur à courant continu dans tous domaines d'utilisation.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une comparaison entre le moteur à courant continu et le moteur synchrone. On a constaté que le moteur synchrone autopiloté peut remplacer le moteur à courant continu dans ces domaines d'utilisation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Après avoir fait un rappel théorique sur le moteur à courant continu et le moteur synchrone autopiloté ; nous avons étudié l'autopilotage du moteur synchrone en régime permanent.

Nous avons en suite essayé de comparer les deux types de moteur. A travers cette comparaison nous voyons que les deux moteurs présentent les mêmes caractéristiques et offrent les mêmes modes de variation de vitesse. Etant donné que le prix de revient du moteur à courant continu est plus élevé que celui du moteur synchrone autopiloté, tout porte à croire que le moteur synchrone va remplacer le moteur à courant continu.

Cependant pour être vraiment complète l'étude comparative doit se faire aussi en régime dynamique pour comparer leur performance.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] NEKKAR Yuba, LAMALI Kamel, MEGDOUD Mohamed
« Amélioration du taux d'harmoniques du couple d'un moteur asynchrone triphasé alimenté par un onduleur de tension commande par la MLI », Mémoire d'ingénieur, UMMTO, 2003.

- [2] GUY SEGUIER et Francis Notlet.
Electronique de puissance industrielle ; TEC DOC 1987.

- [3] FOIN FABRICE, Capet Génie Electrique 2001.
www.geea.org/IMG/doc/LE_DEMARRAGE_Des_MOTEUR_ASYNCHRONNE.

- [4] ROBERT BONNEFILLE.
Encyclopédie du génie électrique ; technique de l'ingénieur, 1999.

- [5] A. KEBBAS, A. ABBAS.
« Différents types de commande par MLI des machine électriques alimentées en tension », mémoire d'ingénieur, UMMTO, 1996.

- [6] DJOUDI Hakim, SADOUN Hakima.
« Etude d'un régulateur à modèle interne (IMC) : application à la commande d'une machine asynchrone triphasée », mémoire d'ingénieur, UMMTO, 2006.

- [7] T.HANS et P.GUYENOT.
Régulation et asservissement ; édition EYROLLES, 1992.

[8] MERZOUG Med salah.

«Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une Machine synchrone a aimants permanents », Thèse Magister, université de Batna 2006.

[9] ENDRE Genon, WILLY Legros.

« Machine », éditions Dunode, Paris, 2005,

[10] Jean-Louis Dalmasso.

«Cours d'électrotechnique. 1. Machines tournantes à courant alternatifs», éditions Belin, 1985.

[11] Philippe Ladoux.

«Variation de vitesse des machines à courant alternatif », éditions Dunode, Paris, 1991.

[12] Michel LAGOIE-MAZENC et Philippe VIAROUGE.

«Alimentation des machines synchrones », Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique.