

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et Informatique
Département d'Electrotechnique



Mémoire De Fin D'études



En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Option : Machines Electriques



Proposé et dirigé par :
M^r AMRANI OMAR

Etudié par :
M^{elle} HADDADI TASSADIT

Promotion 2010-2011

Remerciements

Au terme de mon travail, je remercie en premier lieu le bon Dieu de m'avoir donné la volonté, et surtout le courage de mener dans de bonnes conditions ce présent travail.

Je tiens particulièrement à remercier mon promoteur Mr AMRANI OMAR pour son entière disponibilité et son orientation durant l'élaboration de ce travail.

Je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Que Monsieur le Président et Messieurs les membres du jury trouvent ici l'expression de ma gratitude, de mon respect pour avoir examiner et juger ce travail.

Je dédie ce modeste travail à :

-Ma mère et mon père.

-Mes frères (Ramdane, Omar, Moh, Mahfoud, Ali et Ahmed).

-Mes sœurs (Ouardia, Naima et Razika).

Sommaire	1
Introduction Générale	5

Chapitre I : Machines à Courant Continu

I.1. Définition	8
I.2. Les lois fondamentales de l'Electromagnétisme	8
I.3. Constitution.....	11
I.3.1. L'inducteur (ou circuit d'excitation).....	11
I.3.2. L'induit (circuit de puissance)	11
I.3.2.1. Le bobinage de l'induit	12
I.3.2.2. Production d'une tension sinusoïdale.....	13
I.3.2.3. Production d'une énergie unidirectionnelle	15
I.3.3. Le collecteur et les balais	16
I.3.3.1. Principe de fonctionnement du collecteur	17
I.4. Principe de fonctionnement d'une machine à courant continu.....	21
I.4.1. Fonctionnement en moteur.....	21
I.4.2. Fonctionnement en génératrice (dynamo)	23
I.5. Expression de la force électromotrice	24
I.6. Expression du couple électromagnétique	26
I.7. La réaction d'induit et la commutation	26
I.7.1. La réaction d'induit	27
I.7.1.1. Réaction transversale	27
I.7.1.1.1. champ de l'induit seul	27

I.7.1.2.Réaction longitudinale.....	28
I.7.2.La commutation.....	29
I.7.2.1.présentation du phénomène.....	29
I.7.2.2.Etude théorique.....	30
I.7.2.2.1. Diagramme de commutation.....	30
I.7.2.2.2. Equation générale de la commutation	32
I.7.2.2.3. Diminution de la tension de réactance	33
I.7.2.2.4. Pôles de commutation.....	34
I.8.Conclusion.....	35

Chapitre II : Machines Synchrones et Machines Synchrones Autopilotées

II.1.Introduction	36
II.2.Définition	36
II. 3.Constitution	37
II.3.1. Rotor	37
II.3.2. Stator.....	37
II.4.Les différents rotor de la machine synchrone	38
II .4.1.Rotor à pôles saillants.....	38
II.4.2.Rotor à pôles lisses ou Turboalternateur.....	38
II.5.Principe de la machine synchrone	39
II.6.La machine synchrone alimentée à fréquence variable	41
II.7.Alimentation en tension	42
II.8.Alimentation en courant	44
II.9.Alimentation de la machine synchrone par un pont triphasé à thyristor.....	45
II.10.Moteur Synchrone Autopiloté	46

II.11.Démarrage du moteur brushless	46
II.12.Schéma de principe	47
II.13.Réalisation d'autopilotage	47
II.13.1.Commande en tension	48
II.13.2.Commande en courant	49
II.14.Contrôle de la vitesse	49
II.14.1.Contrôle de la vitesse à l'aide d'un onduleur MLI (Modulation de Longueurs d'Impulsions).....	49
II.14.2.Fonctionnement de l'onduleur MLI.....	52
• Association onduleur MLI / moteur Brushless	52
• Schéma de principe	53
II.15. Contrôle de la vitesse à l'aide d'un commutateur de courant autopiloté.....	53
II.15.1.Séquences de conduction des interrupteurs et positions du flux statorique.....	54
II.15.2.Les capteurs	55
II.15.2.1. Fonctionnement à vitesse constante	55
II.15.2.2.Fonctionnement à couple constant	56
II.15.3.Résolver	56
II.16.Conclusion	56

Chapitre III : Etude comparative entre la machine à courant continu et la machine synchrone autopilotée

III.1.Comparaison des structures	57
III.2.Comparaison des caractéristiques	57
III.3.Aspect économique et domaine d'utilisation	59
III.4.Les performances	60

III.5.Conclusion61

Conclusion Générale62

Bibliographie64

Introduction Générale

Le but de notre travail c'est de démontrer que la machine synchrone peut avoir un fonctionnement identique à celui de la machine à courant continu lorsqu'on l'alimente avec un onduleur de courant moyennant un autopilotage.

L'histoire du développement des machines électriques est commencée par la découverte de l'induction électromagnétique (1810) par Faraday. Jusqu'ici le moteur à courant continu à collecteur a constitué le moteur idéal, surtout, dans les applications nécessitant une variation de vitesse. Son collecteur qui est à l'origine de son succès, constituait tout de même un magnifique talon d'Achille. Dans le domaine des grandes puissances, le moteur à courant continu à collecteur a atteint les limites de ses possibilités. De plus, pour assurer un comportement correct du collecteur, il est indispensable de ne pas dépasser des valeurs bien déterminées de la tension entre les lames du collecteur et de la vitesse périphérique d'induit. La longueur du fer de la machine se trouve ainsi obligatoirement limitée. Pour un encombrement donné, donc une masse donnée, les performances du moteur à collecteur (puissance, coefficient de souplesse) ne peuvent être accrues. En outre, malgré toutes les améliorations dont il a été l'objet, le collecteur est un organe qui nécessite une surveillance attentive et les balais exigent une maintenance régulière et onéreuse, il faut donc, s'attendre à la disparition progressive des entraînements utilisant les moteurs à courant continu.

Pour ces raisons, l'utilisation de moteurs sans collecteur présente un intérêt indéniable. Ainsi, pour une même masse et un même encombrement, un moteur sans collecteur procure, par rapport à un moteur à collecteur, un gain de puissance d'environ 50%.

Les progrès réalisés dans les performances des semi-conducteurs de puissances permettent de concevoir diverses structures de convertisseurs statiques permettant de disposer des sources d'alimentation à fréquence variable. Ainsi, les moteurs synchrones associés à des convertisseurs statiques viennent concurrencer avantageusement les moteurs à courant continu dans les entraînements à vitesse variable.

L'autopilotage du moteur synchrone avec une commande du couple à vitesse variable nous permet d'obtenir des fonctionnements analogues à ceux du moteur à courant continu avec tous ses avantages spécifiques. Les diverses fonctions assurées par le collecteur de ce dernier, sont assurées dans son équivalent par un organe statique qui est le collecteur électronique.

Le moteur synchrone autopiloté alimenté par un commutateur de courant utilisant la commutation assistée est le premier entraînement à fréquence variable à avoir effectivement connu un développement industriel. Il permet de couvrir le domaine des très fortes puissances et à vitesses élevées (plusieurs mégawatts et plusieurs milliers de tours par second) inaccessibles aux autres en traînements. On le trouve dans nombreuses applications telles que le démarrage des turbines à gaz, l'entraînement des soufflantes des hauts fourneaux ou de groupes d'alimentation des chaudières et la traction ferroviaire (TGV Atlantique).

Pour bien mener notre travail, nous l'avons subdivisé, mis à par l'introduction et la conclusion générale, en trois chapitres.

Dans le premier chapitre nous avons étudié la machine à courant continu, son principe de fonctionnement, les deux phénomènes : la réaction d'induit et la commutation qui réagissent sur elle ainsi le fonctionnement de son collecteur.

Dans le deuxième chapitre on a décrit la machine synchrone, son principe de fonctionnement et on a introduit l'autopilotage de cette dernière ainsi que les différents types d'alimentation. Après on a parlé du contrôle de la vitesse à l'aide d'un commutateur de courant et un onduleur MLI.

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

Machine à courant continu

I.1. Définition : [4]

Les machines à courant continu sont des machines tournantes qui sont réversibles, c'est-à-dire qu'elles peuvent fonctionner indifféremment : soit comme réceptrices (moteur), soit comme génératrices (dynamo).

La machine à courant continu comporte deux circuits électriques indépendants :

L'un alimente les bobines magnétiques, l'autre alimente les brins actifs de l'armature, c'est le circuit induit.

On peut brancher ces deux circuits l'un par rapport à l'autre de différentes façons, nous étudierons la machine à excitation indépendante c'est-à-dire le circuit inducteur n'a aucun point commun avec le circuit induit.

I.2. Les lois fondamentales de l'électromagnétisme : [6]

Considérant en premier lieu, un fil conducteur **MN** capable de glisser sur deux rails parallèles également conducteurs tandis qu'il règne dans tout l'espace un champ d'induction uniforme dont la composante normale au conducteur mobile est **B_n** (Fig.I.1).

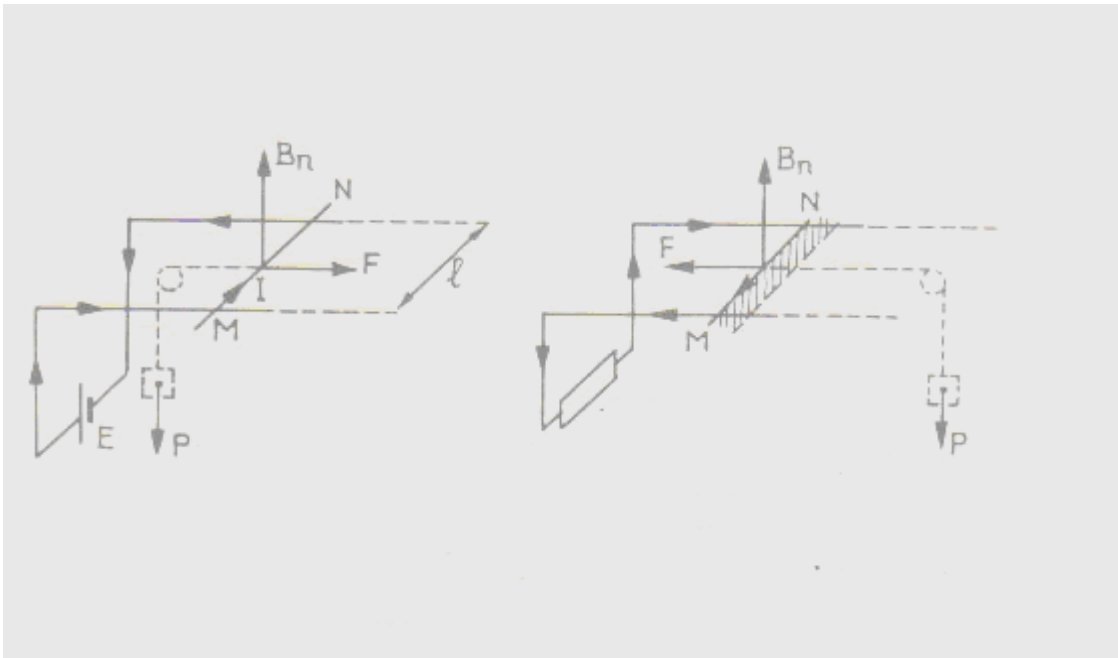


Fig. I.1. Schéma représentatif d'un fil conducteur MN qui glisse sur deux rails également conducteurs

Si l'on fait circuler un courant I dans ce conducteur par l'intermédiaire d'une batterie, celui-ci est soumis à une force électromagnétique F dont l'intensité est donnée par la loi de Laplace :

$$F = I \cdot l \cdot B_n \quad (I-1)$$

Le sens de cette force qui est perpendiculaire au conducteur et, à l'induction B_n est donné par différentes règles dont l'une des plus classiques est la règle des trois doigts de la main droite : champ chemin-courant. Les trois expressions qui se succèdent dans l'ordre alphabétique correspondent respectivement : le champ au pouce, le chemin à l'index et le courant au majeur. Il est à noter que pour éviter de placer sa main dans une situation inconfortable, on a toujours la possibilité d'inverser l'un de ces trois paramètres, le résultat obtenu étant lui-même inverse.

Cette force électromagnétique peut alors accomplir un certain travail (soulever un poids par exemple comme sur la figure en pointillé). On peut alors évaluer le travail accompli pour un déplacement d on a :

$$W = F \cdot d = I \cdot l \cdot B_n = I \cdot \Phi \cdot s \quad (I-2)$$

Φ représentant le flux balayé par le conducteur lors de son déplacement. L'appareil ainsi réalisé fonctionne en moteur (ou récepteur). Supposons maintenant que l'on remplace la batterie d'alimentation par une résistance. On peut à nouveau provoquer le déplacement du conducteur MN dans le même sens que précédemment à condition de solliciter ce dernier par un dispositif mécanique. Dans ces conditions, un courant est induit dans le conducteur mobile. D'après la loi de Lenz, ce courant par ses effets s'oppose à la cause qui l'engendre ainsi va-t-il produire une force électromagnétique de sens opposé au déplacement. L'appareil fonctionne alors en générateur et afin de tenir compte du changement de sens de la force électromagnétique, on utilisera la règle des trois doigts de la main gauche (g comme générateur) champ – chemin – courant.

Quand le sens de la f.é.m. est ainsi parfaitement défini on peut alors se contenter de calculer sa valeur absolue par l'une ou l'autre des deux relations :

$$|e| = d\phi/dt \quad \text{ou} \quad |e| = B_n l v \quad (I-3)$$

En effet, comme $d\phi$ représente le flux coupé par le conducteur MN, pendant le temps dt , il est facile de passer de l'une à l'autre de ces deux relations, on a :

$$d\phi = B_n l dx \text{ avec } v = dx/dt \quad (\text{I-4})$$

I.3.Constitution : [3]

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

I.3.1.L'inducteur (ou circuit d'excitation) : [5]

Il est situé sur la partie fixe de la machine (le stator).

Il sert à créer un champ magnétique, (Champ "inducteur") dans le rotor.



Fig. I.2.Circuit d'excitation

I.3.2.L'induit (circuit de puissance) : [3]

L'induit est situé au rotor (partie tournante de la machine ; C'est un bobinage parcouru par un courant continu I (courant d'induit).

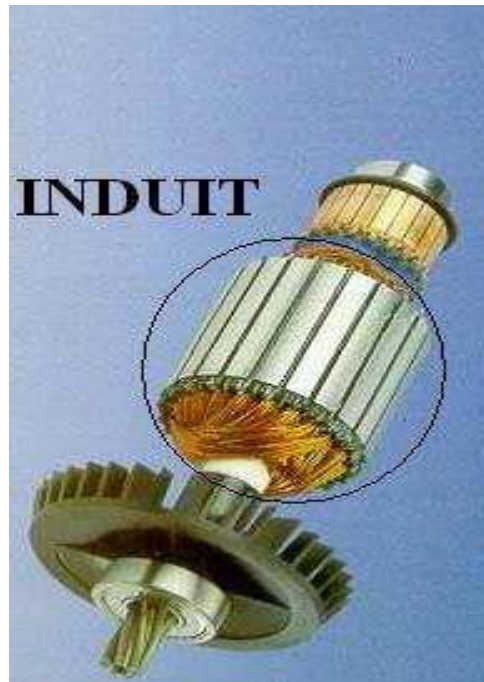


Fig. I.3.L'induit

I.3.2.1. Le bobinage de l'induit : [5]

Il est formé de **sections**, une section est un groupe de spires isolées entre elles d'où ne sort que le début de la première spire et la fin de la dernière spire.

L'écart entre deux côtés de sections autour de l'induit doit être d'une distance polaire (pour une machine bipolaire l'écart est de 180°). On réunit les sections entre elles en série et on termine le bobinage en réunissant la fin de la dernière section au début de la première. Chaque soudure d'une section avec la suivante est reliée à une lame du collecteur. Dans l'exemple de la (fig. I.4), on a un enroulement dit **imbriqué** pour lequel le courant a deux voies pour passer d'un balai à l'autre, en passant toujours dans le même sens sous le même pôle ($I/2$ dans chaque voie).

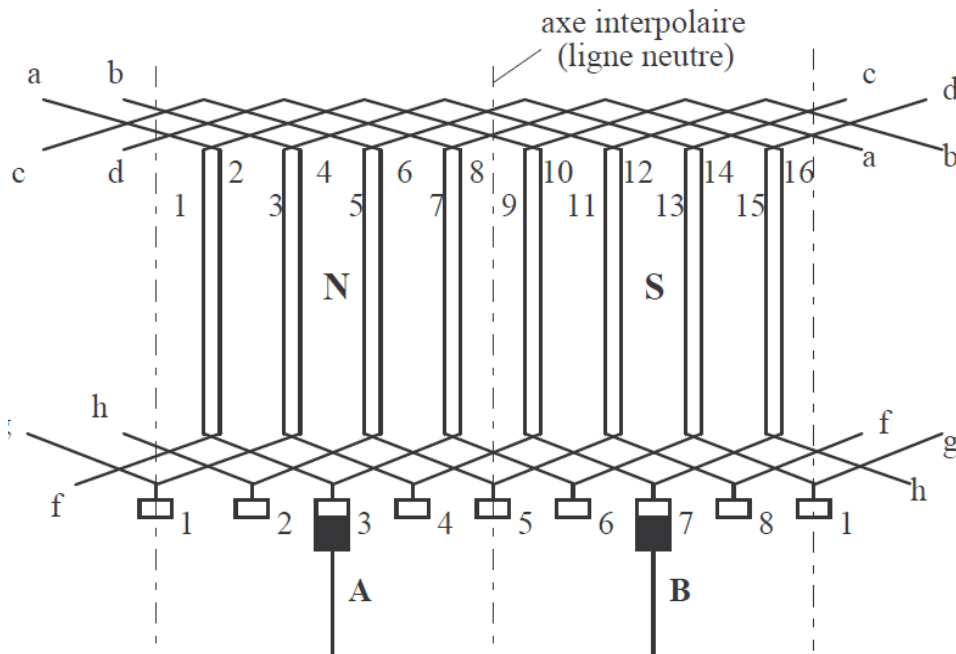


Fig.I.4.Schéma développé d'un enroulement d'induit.

I.3.2.2. Production d'une tension sinusoïdale : [6]

Sa réalisation est simple car il suffit de faire tourner dans un champ uniforme, un cadre dont les extrémités sont reliées à deux bagues isolées (fig. I.5).

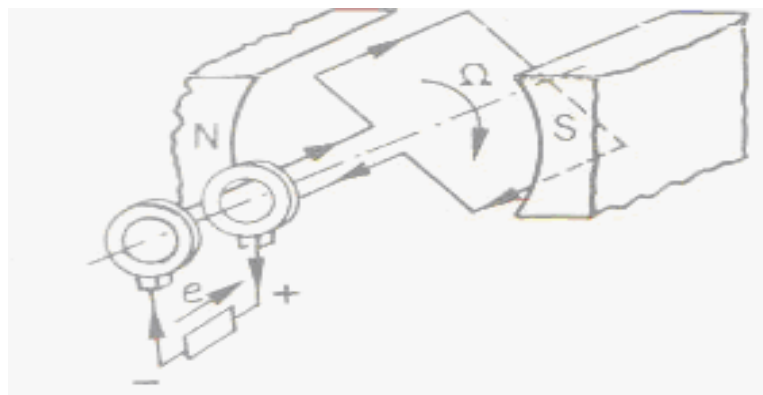


Fig. I.5.schéma représente la production d'une tension sinusoïdale.

Pour une position donnée à ce cadre, on détermine le sens des courants induits dans deux des brins latéraux que l'on appelle brins actifs (Car ils sont soumis à l'action du champ magnétique) par application de la règle des trois doigts de la main gauche.

Si θ désigne l'angle que fait la direction du champ magnétique avec le plan du cadre, alors on peut calculer la f.é.m. Induite dans ce cadre.

Pour un brin actif, il vient :

$$e_1 = b \cdot l \cdot v = B \cdot l \cdot v \cos\theta \quad (\text{I-5}) \quad \text{avec} \quad \theta = \Omega t.$$

Si b désigne la composante radiale de l'induction, c'est-à-dire la composante du champ qui est normal à la vitesse linéaire du brin actif.

Pour n brin actifs, on a :

$$e = n \cdot B \cdot l \cdot v \cos\Omega t = E_M \cos \Omega t. \quad (\text{I-6})$$

Il est alors intéressant de représenter les graphes de l'induction radiale et la f.é.m induite car ces deux graphes sont identiques (fig. I.6).

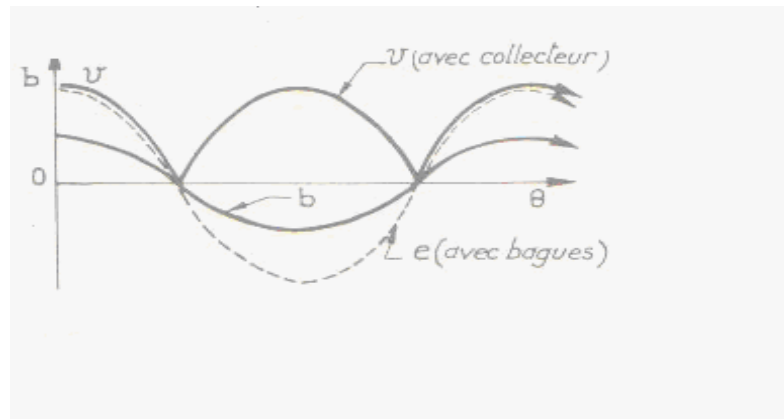


Fig.I.6. Forme de la force électromotrice.

I.3.2.3. Production d'une énergie unidirectionnelle : [6]

On peut réaliser une tension redressée qui a toujours le même sens en remplaçant les deux bagues isolées par deux demi-cylindres parfaitement isolés, cylindre sur lequel frottent deux balais (fig. I.7).

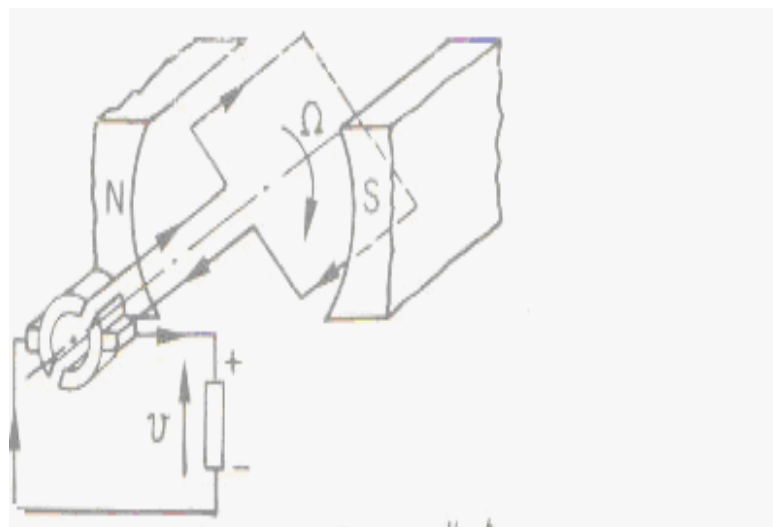


Fig.I.7. Schéma représentatif de production d'énergie unidirectionnelle

Les balais doivent être soigneusement calés car cet organe appelé collecteur a pour mission d'inverser le courant dans la résistance de charge aux époques où la f.é.m induite dans le cadre est nulle, les

époques ont lieu lors du passage du cadre dans la zone où le champ radial est nul, cette zone étant appelée la ligne neutre.

I.3.3.Le collecteur et les balais : [3]

- Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit. Le collecteur destiné à redresser le courant induit.

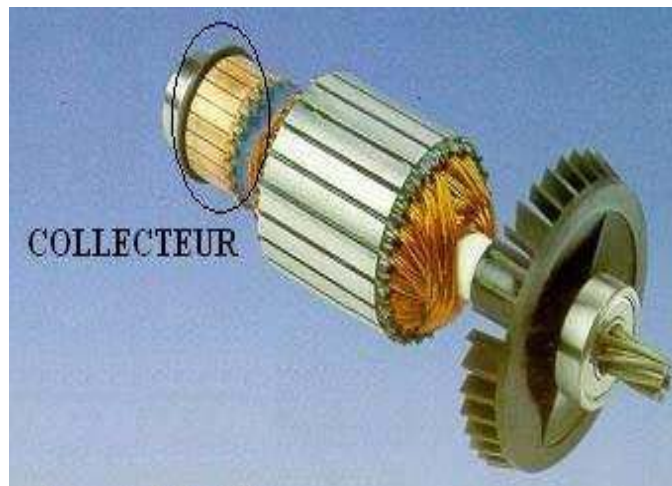


Fig. I.8.Le collecteur

- Les balais (en charbon) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation.



Fig. I.9.Les balais

Le dispositif collecteur balais a un double rôle :

- * Il transforme le courant continu d'alimentation en un courant de fréquence variable de façon à maintenir l'égalité des fréquences de rotation mécanique et des courants dans l'induit.

- * Il assure l'asservissement entre les fréquences du champ de l'induit et du champ de l'inducteur.

I.3.3.1. Principe de fonctionnement du collecteur : [4]

Pour étudier le principe de la commutation dans une machine à courant continu, nous examinons d'abord, le fonctionnement d'un modèle simplifié de la machine constituée de deux pôles inducteurs fixes dans l'espace qui créent un flux magnétique constant, dont les lignes sont dirigées du pôle Nord N vers le pôle sud S. Dans l'espace compris entre ces pôles se trouve un induit à la surface, duquel est placée dans le plan diamétral une spire abcd (Fig.I.10).

Si on fait tourner l'induit à une vitesse constante dans un sens donné, la spire abcd sera traversée par un flux qui est successivement maximal (spire horizontale) ou nulle (spire verticale).

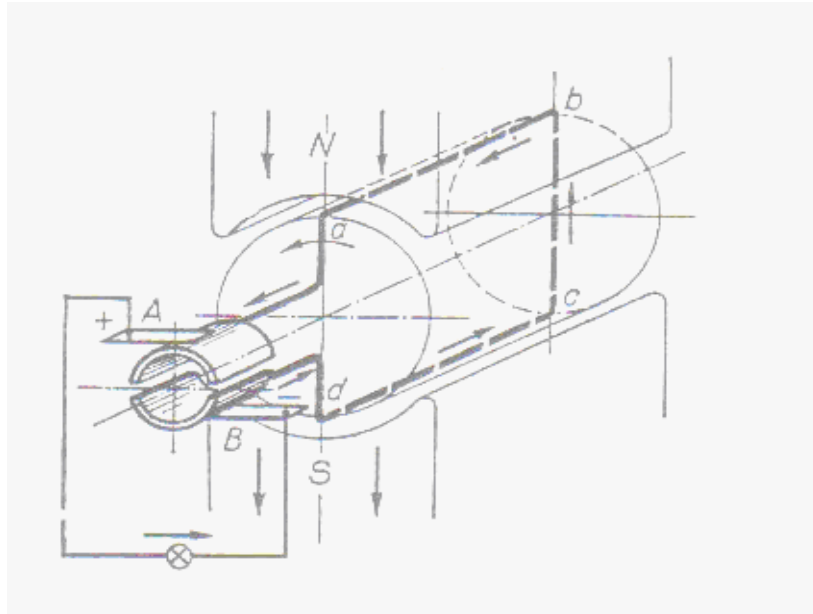


Fig.I.10.Principe de fonctionnement d'un collecteur.

La f.é.m. induite dans la spire d'après la loi de Faraday $e = -d\Phi/dt$ prend une allure sinusoïdale avec une forme adéquate des épanouissements polaires (fig.I.11), c'est-à-dire elle change de signe deux fois pendant un tour complet de l'induit donc la fréquence de rotation n [tr/s] est :

$$f = n \quad (I-7)$$

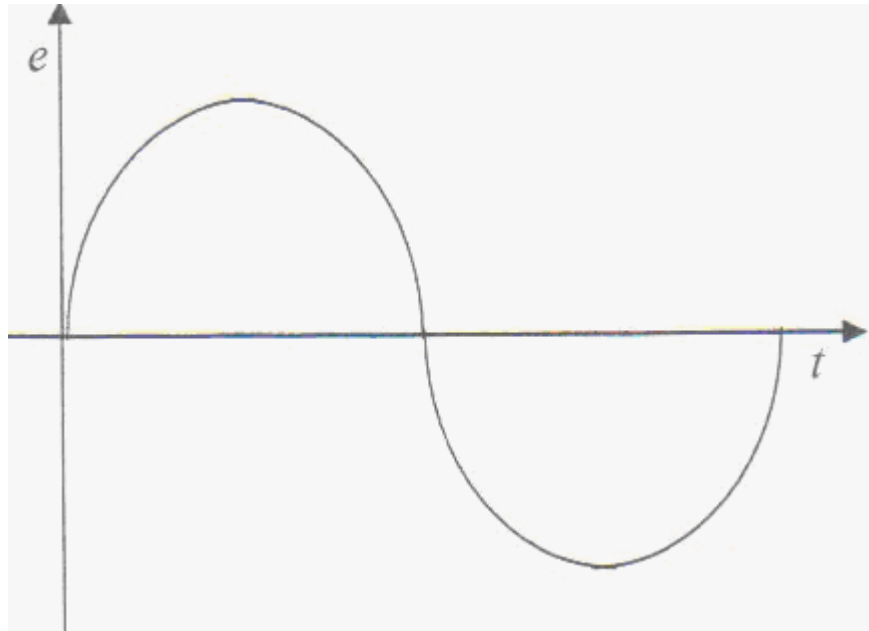


Fig.I.11. Forme de la f.é.m sans collecteur.

Dans une machine à p paires de pôles la fréquence de la f.é.m. augmente proportionnellement à p :

$$f = p \cdot n \quad (\text{I-8})$$

Si nous disposons maintenant d'un collecteur composé de deux lames qui sont connectées l'une à l'extrémité a et l'autre à l'extrémité d de la spire et faisons frotter ces lames à deux balais A et B : on voit la f.é.m. entre A et B redressée et aura l'allure de la (fig.I.12) :

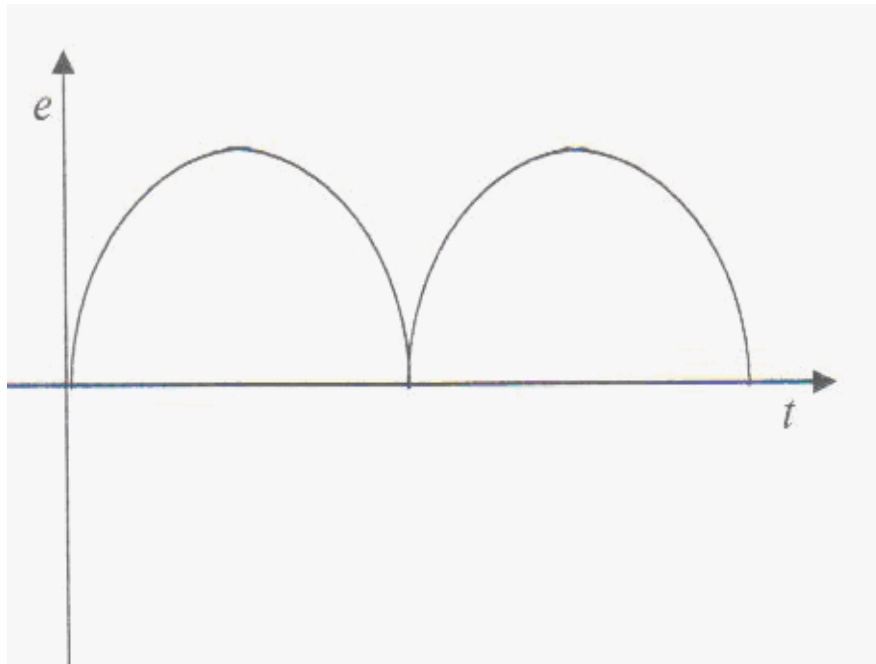


Fig.I.12. forme de la f.é.m. aux bornes des balais qui n'est pas une sinusoïde.

Dans une machine réelle ce procédé de commutation est utilisé un grand nombre de fois pendant un tour de l'induit en utilisant plusieurs lames et donc plusieurs spires au collecteur.

Remarque :

Cette description utilise des spires ouvertes ; dans la machine réelle on utilise un grand nombre de spires reliées à deux lames on obtient une section .Toutes les sections sont mises en série par l'intermédiaire des lames du collecteur et constituent un enroulement fermé. Le positionnement des balais sur le collecteur détermine les voies d'enroulement, il y a autant de voies d'enroulement que de balais sur le collecteur.

L'ensemble collecteur balais joue le rôle d'un redresseur mécanique.

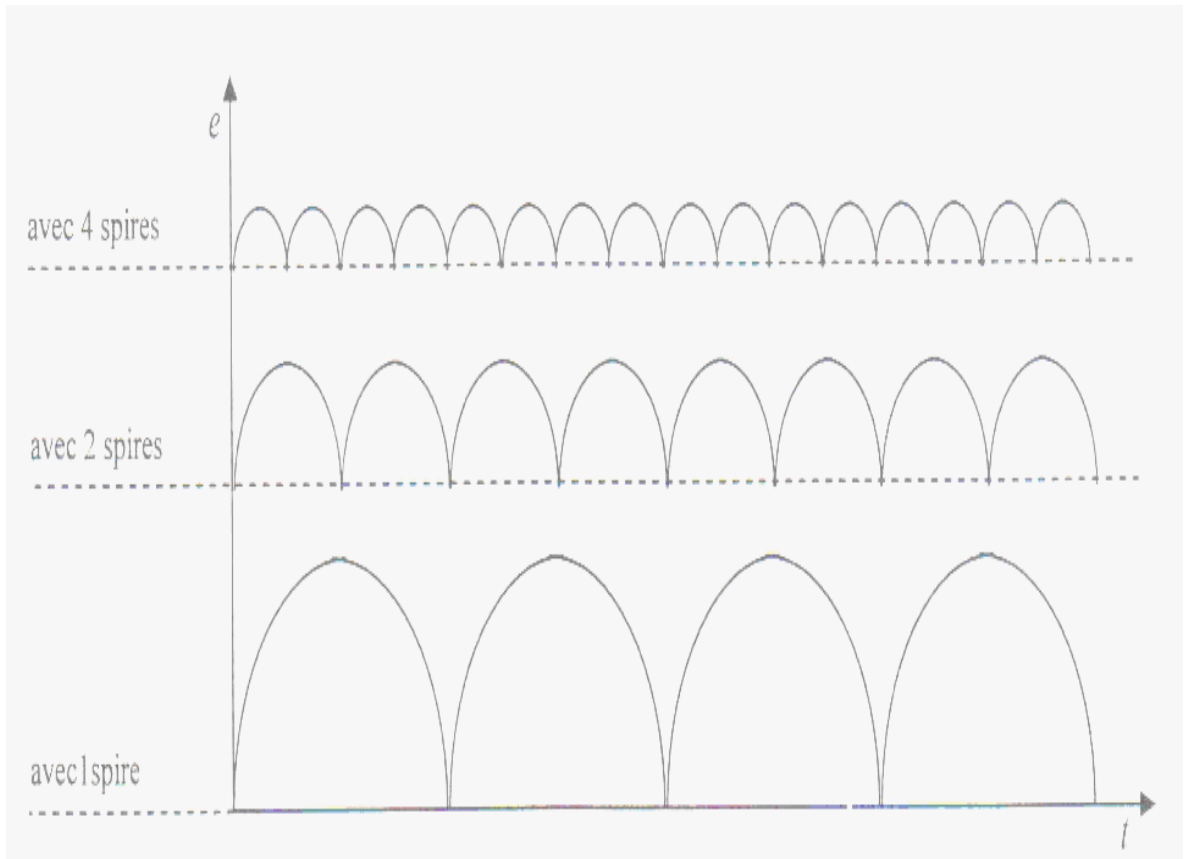


Fig. I.13.f.é.m induite avec plusieurs spires.

I.4.Principe de fonctionnement d'une machine à courant continu : [4]

I.4.1. Fonctionnement en moteur :

Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique.

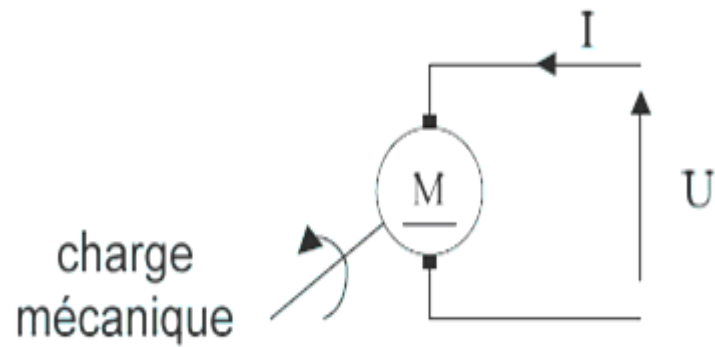


Fig .I.14.Schéma explicatif du fonctionnement d'une machine à courant continu en moteur

Soit une spire du bobinage d'induit :

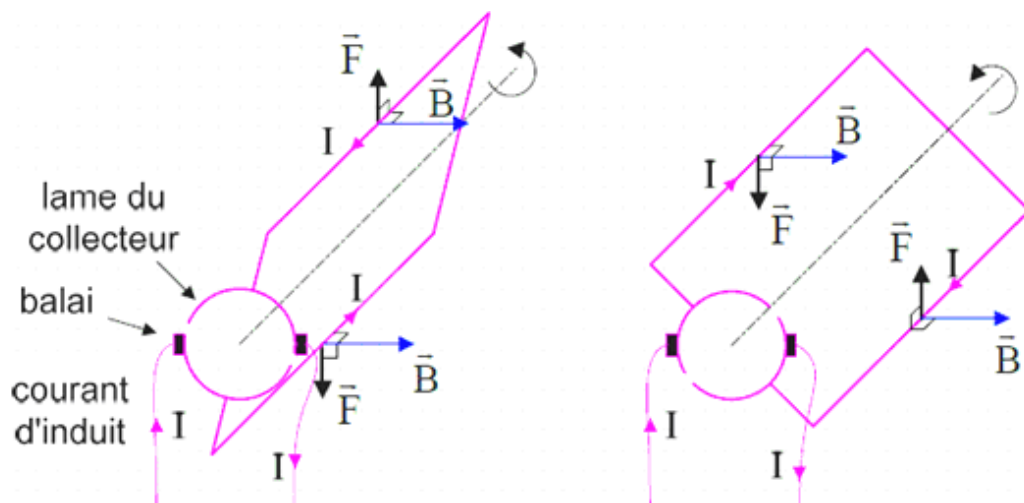


Fig. I.15.Principe de fonctionnement en moteur

Champ magnétique inducteur B + courant d'induit $I \Rightarrow$ forces électromagnétiques (forces de Laplace) \Rightarrow couple électromagnétique \Rightarrow rotation du rotor.

I.4.2. Fonctionnement en génératrice (dynamo) :

Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique :

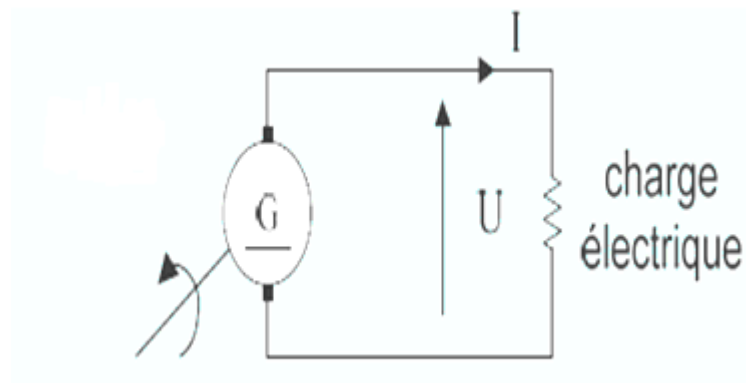


Fig. I.16. Schéma explicatif du fonctionnement d'une machine à courant continu en génératrice

Le principe physique utilisé est le phénomène d'induction électromagnétique (loi de Faraday : $e = -dF/dt$) :

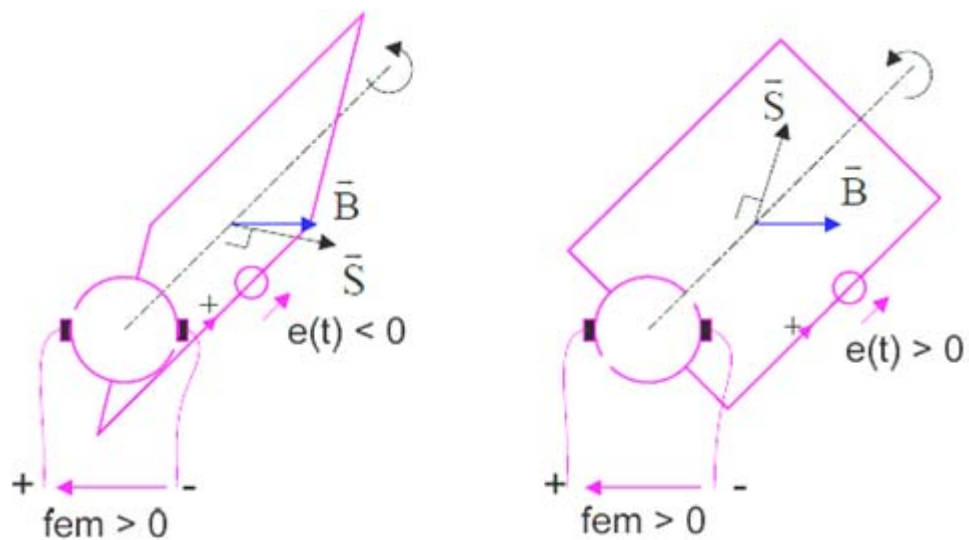


Fig. I.17. Principe de fonctionnement en génératrice

Champ inducteur + rotation de la spire \Rightarrow Variation du flux magnétique

\Rightarrow Création d'une f.é.m. induite (e) alternative.

Le collecteur permet d'obtenir une f.é.m de forme continue.

$$F = B \times S \quad (I-9)$$

I.5.Expression de la force électromotrice : [5]

On appelle N le nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit.

f : la fréquence de rotation de l'induit (en tr /s).

Φ : le flux sous un pôle de la machine (en Wb).

P : le nombre de paires de pôles de la machine.

a : le nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais.

(Pour une machine bipolaire, p=1 et a=1).

Dans un enroulement comportant 2a voies pour aller d'un balais à l'autre, il y a (N/2a) conducteurs dans chaque voie. La force électromotrice équivalente est donc :

$$E = Ne / 2a\phi \quad (I-10)$$

e : étant la f.é.m moyenne apparaissant dans chaque conducteur.

L'expression de cette f.é.m. moyenne e lorsque l'induit effectue 1/2p tour pour balayer le flux sous un pôle de l'inducteur est égale à :

$$e = \Delta\Phi / \Delta t \quad (I-11)$$

Où $\Delta\Phi$ est le flux balayé par le conducteur et Δt le temps nécessaire. Or le flux sous un pôle : $\Delta\Phi = \Phi$. et le temps nécessaire Δt est égale à :

$$\Delta t = 1/2np. \quad (I-12)$$

D'où la force électromotrice totale :

$$E = Ne/2a = N (\Delta\Phi/\Delta t)/2a = N (\Phi / (1/2pn))/2a = N\Phi 2pn/2a = N\Phi 2np/2a = (P/aNn\Phi) \quad (I-13)$$

Autre expression de la force électromotrice :

$$E = (p/2\Pi a) N\Phi\Omega \quad (I-14)$$

Ou encore :

$$E = k.\Phi.\Omega \quad (I-15)$$

$$\text{Avec } k = Np/2\Pi a.$$

E : f.é.m. induite (tension continue en volt).

Φ : flux magnétique crée sous un pôle par l'inducteur.

N : vitesse de rotation (en rad/s).

K : constante qui dépend de la machine considérée

I.6.Expression du couple électromagnétique : [5]

La puissance électromagnétique P , c'est-à-dire la partie de puissance absorbée qui est transformée est égale à :

$$P = E I = T \Omega \quad (\text{I-16})$$

Le moment du couple électromagnétique T est donc égal à :

$$T = EI/\Omega = k\Phi\Omega I/\Omega = k \Phi I \quad (\text{I-17})$$

$$T = EI/2\pi n = k\Phi I \quad (\text{I-18})$$

$$\text{Avec } k = NP/2\pi a$$

T : en N. m.

E : en v, I : en A, n : en tr/ s, Φ : Wb.

T peut s'écrire également, en remplaçant k par sa valeur.

I.7.La réaction d'induit et la commutation : [6]

Quand on fait débiter une dynamo, on constate deux phénomènes nouveaux :

-la chute de tension aux bornes de la machine est légèrement supérieure à la chute ohmique normale due à la résistance de l'enroulement induit.

-L'interprétation de ce premier phénomène conduit à l'étude de la réaction d'induit.

-Des étincelles apparaissent aux balais si l'on ne prend pas certaines précautions. L'interprétation de ce deuxième phénomène conduit à l'étude de la commutation.

I.7.1.La réaction d'induit : [6]

Le phénomène de réaction d'induit est dû au champ que crée l'induit quand il est traversé par un courant, champ qui vient perturber le champ créé par l'inducteur. C'est pour cette raison que ce phénomène est appelé : réaction d'induit.

Pour l'étudier on fait une distinction entre la réaction transversale et la réaction longitudinale. La première est la plus importante car elle intervient sur toutes les machines tandis que la deuxième n'a lieu que pour les machines dont on peut décaler les balais par rapport à la ligne neutre.

I.7.1.1.Réaction transversale : [6]

- **Méthode générale :**

Les balais étant calés sur la ligne neutre, nous allons en premier lieu déterminer le champ d'induction B_a créé par l'induit seul en un point donné de l'entrefer. Comme par ailleurs nous connaissons le champ B_i créé par l'inducteur seul nous pourrions déterminer le champ résultant puis en tirer les conséquences sur le comportement de la machine en charge.

I.7.1.1.1.champ de l'induit seul : [6]

Considérons une machine bipolaire dont l'induit est représenté par ses brins actifs.

Quand la machine tourne, le courant I débité par l'un des balais se répartit à l'intérieur de la machine en deux nappes d'égale intensité $I/2$. Il est important de constater qu'à un point de l'entrefer, un brin actif est à chaque instant remplacé par un autre brin actif qui est traversé par le même courant ainsi peut-on conclure :

Le champ produit par l'induit, quand il tourne, est le même que si cet induit était fixe et traversé par le même courant.

I.7.1.2. Réaction longitudinale : [6]

Ce deuxième type de réaction intervient quand on décale les balais d'un angle α par rapport au sens de la marche. En effet, si l'on considère les brins actifs contenus dans l'angle 2α ceux-ci constituent un solénoïde qui produit un champ longitudinal B_{al} de sens opposé au champ inducteur B_i . Ce champ est démagnétisant, il tend à réduire la f.é.m. induite aux bornes des balais. Ce résultat est en parfait accord avec le calcul de la f.é.m. avec décalage des balais, soit :

$$E = E_i \cos \alpha_e \quad (I-19)$$

$$\text{Avec : } E_i = P/a N n \Phi$$

Par ailleurs les autres brins actifs contenus dans l'angle $\Pi - 2\alpha$ constituent également un solénoïde qui produit le champ transversal B_{at} .

L'étude de ce phénomène possède un intérêt théorique très important. En effet par le simple décalage des balais, il est possible de disposer d'une tension continue réglable ($E=E_i \cos \alpha_e$).

Malgré ces inconvénients comme la diminution du flux utile et le flash au collecteur, le phénomène de réaction d'induit intervient dans toutes les machines car c'est une condition nécessaire pour qu'il y ait couple.

I.7.2.La commutation : [6]

I.7.2.1.présentation du phénomène :

Pour obtenir un bon fonctionnement mécanique des balais on prend toutes les précautions (réglage de leur pression sur le collecteur, nettoyage parfait du collecteur, vérification que le collecteur ne présente pas de faux ronds...), il arrive que l'on constate des étincelles jaillissant entre le collecteur et les balais. Ces étincelles qui détériorent le collecteur ont une cause électrique dont l'origine et les remèdes constituent l'étude de la commutation.

Pour simplifier cette étude, nous supposons qu'un balai couvre exactement une lame du collecteur .cette hypothèse est théorique car dans la pratique un balai couvre toujours plusieurs lames du collecteur.

Si l'on désigne par T le temps de commutation, c'est-à-dire le temps mis par une lame pour se substituer à la précédente sous un balai, nous pouvons représenter une même section à différentes époques (fig.I.18).

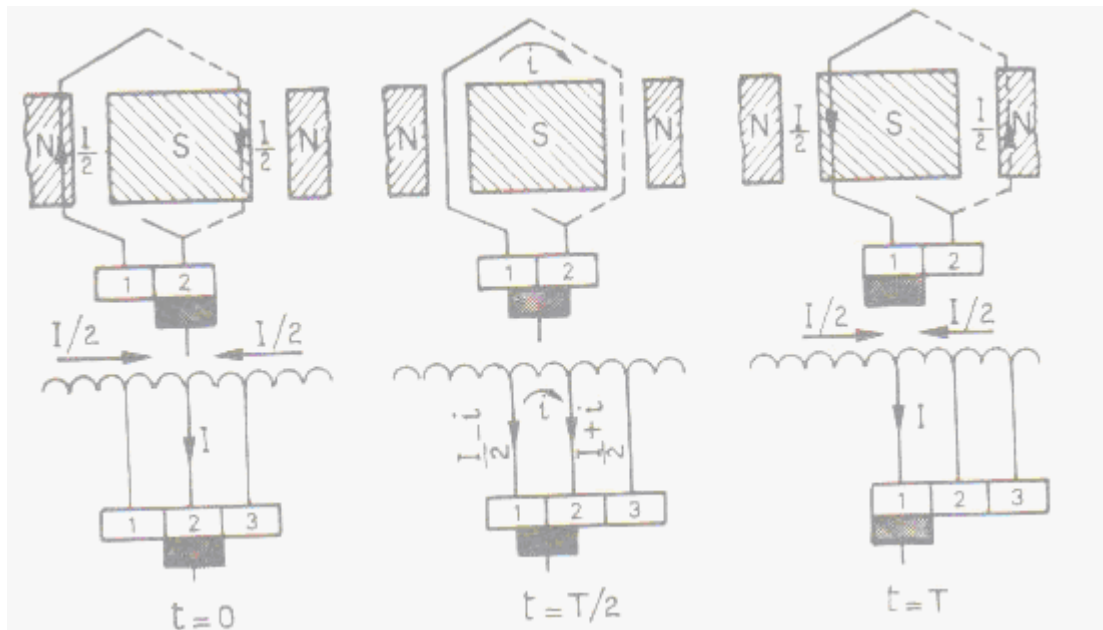


Fig. I.18. Représentation d'une même section à différentes époques

On constate que le courant qui traverse une section S doit s'inverser pendant la durée où celle-ci est mise en court circuit par un balai. Sur le plan mécanique tout se passe comme si on avait affaire à un volant animé d'une certaine énergie cinétique dû à sa vitesse, volant que l'on devrait brusquement arrêter afin de le faire repartir en sens inverse. Il est normale de penser que cette rapide inversion du courant (ou de la vitesse) ne se fait pas sans à coups.

I.7.2.2. Etude théorique : [6]

I.7.2.2.1. Diagramme de commutation :

On représente la variation du courant i dans une section en cours de commutation par un diagramme de commutation (Fig. I.19). A cette effet, on porte en abscisses, les temps écoulés depuis l'origine du court-circuit de la section, c'est-à-dire depuis l'instant où la lame vient en contact avec le balai tandis que l'axe des ordonnées représente la valeur du courant i dans la section. Dans le cas d'une machine à deux pôles qui

débite un courant I , le courant dans la section est parfaitement défini avant la commutation $t < 0$ car il a pour valeur $i = I/2$. Il est également parfaitement défini après la commutation ($t > T$) car il a pour valeur $i = -I/2$.

Durant la commutation, alors que la section est court-circuitée par le balai, ce courant doit varier de A à B mais la courbe de variation est alors très imprécise. On démontre que le graphe idéal serait une variation linéaire représentée par la droite AB . En effet, dans ce cas le courant dans chaque lame varie proportionnellement à la surface de contact ainsi la densité de courant au contact est-elle constante. Une telle commutation est évidemment excellente car le courant s'annule spontanément dans la lame à l'instant où celle-ci va quitter le balai. Il n'y a donc pas coupure de courant et par suite aucune étincelle au collecteur.

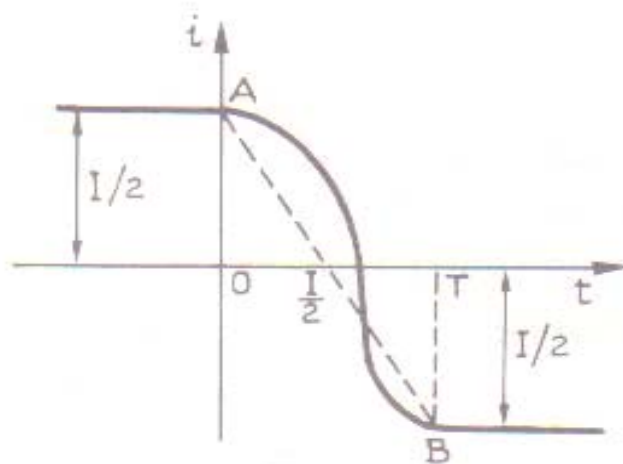


Fig. I.19. Diagramme de commutation.

Malheureusement l'inductance de la section en court-circuit a un double effet : elle s'oppose à la disparition du courant $I/2$, puis elle s'oppose à l'apparition du courant $- I/2$. Ces deux effets se traduisent par un graphe qui a l'allure de la courbe en pointillé.

I.7.2.2.2. Equation générale de la commutation : [6]

L'application de la loi d'Ohm ($e=ri$) à la section en court-circuit de résistance R et d'inductance L donne la relation suivante :

$$e + e_r = R_i + \Delta u \quad (\text{I-20})$$

Si on pose :

$$e = -d\phi/dt \quad (\text{I-21})$$

e : désignant la f.é.m. induite dans la section par les champs extérieurs. Cette f.é.m. peut être considérée comme nulle si les balais ne sont pas calés sur une ligne neutre et si la machine est dépourvue de pôles auxiliaires.

$$e_r = -L di / dt \quad (\text{I-22})$$

e_r : désignant la f.é.m. de self due à la variation du courant dans la bobine.

On l'appelle également tension de réactance Δu ; est la chute de tension aux balais.

Pour une commutation linéaire, $\Delta u = 0$.

I.7.2.2.3. Diminution de la tension de réactance : [6]

La tension de réactance a un effet néfaste sur la commutation, aussi a-t-on intérêt à la réduire. A cet effet il est intéressant de calculer sa valeur approchée.

On a :

$$e_r = -L di/dt = -L \Delta i / \Delta t \quad (\text{I-23})$$

Avec $\Delta i = I$ pour $\Delta t = T$, soit :

$$e_r = -LI/T \quad (\text{I-24})$$

Il est alors intéressant de rechercher l'influence du nombre de lames du collecteur sur cette tension.

S_1 désigne le nombre de spires par section, on sait que l'inductance d'une bobine est proportionnelle au carré du nombre des spires, soit :

$L \sim S_1^2$ par ailleurs, le nombre de lames du collecteur diminue quand le nombre des spires par section augmente, soit : $m \sim 1/S_1$.

En conséquence on a :

$$L \sim 1/m^2 \quad (\text{I-25})$$

Enfin la durée T de commutation, diminue si le nombre des lames augmente, soit $T \sim 1/m$

En définitive, on a :

$$e_r \sim 1/m \quad (\text{I-26})$$

En conséquence, pour diminuer la tension de réactance, on a intérêt à augmenter le nombre des lames du collecteur. Cependant comme on peut s'y attendre, on est limité par des problèmes de construction.

Dans la pratique pour des raisons mécaniques un balai couvre plusieurs lames du collecteur. Dans ce cas l'étude théorique est plus compliquée. En effet si le balai couvre deux lames du collecteur, il faut ajouter au terme $-Ldi/dt$ correspondant à la f.é.m. de self un terme $-Mdi/dt$ dû au phénomène d'induction mutuelle entre les deux sections.

Dans ces conditions tout ce passe comme si l'inductance de la section avait augmenté, celle-ci étant remplacée par une inductance apparente de valeur :

$$F=L+M \quad (I-27)$$

Cette augmentation de l'inductance apparente ne favorise pas la commutation.

I.7.2.2.4. Pôles de commutation : [6]

L'étude théorique de la commutation est complexe. Toutefois les moyens qui permettent d'assurer une bonne commutation, (sans étincelles) sont parfaitement au point.

A cet effet, comme il n'est pas possible de supprimer la tension de réactance qui est responsable de la mauvaise commutation, on s'arrange pour induire dans la spire en court-circuit une f.é.m. e_r qui neutralise à chaque instant cette tension de réactance réalisant ainsi la condition :

$$e+e_r=0 \quad (I-28)$$

Un premier procédé qui a été utilisé consiste à décaler les balais au-delà de la ligne neutre. Qui est déjà décalé en avant par la réaction transversale

de l'induit .Ce procédé est évidemment abandonné en raison des inconvénients comme la variation avec la charge, sens inverse pour le moteur.

C'est pourquoi le procédé moderne consiste à créer un champ magnétique sur la ligne neutre géométrique grâce à des pôles auxiliaires encore appelés : Pôles de commutation (fig. I .20).

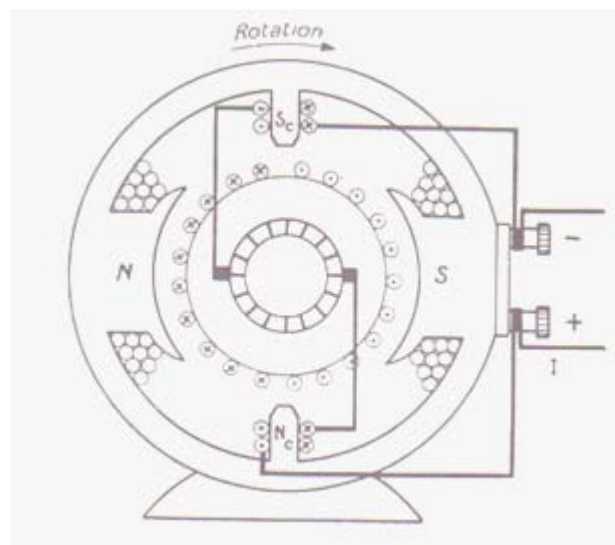


Fig. I .20. Pôles de commutation

I.8.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié la machine à courant continu, son principe de fonctionnement, ainsi que le principe de fonctionnement du collecteur et les deux phénomènes : la réaction d'induit et la commutation qui réagissent sur elle.

Machines Synchrones et Machines Synchrones Autopilotées

II.1.Introduction :

La machine synchrone est de loin la plus facile à piloter car le flux magnétique du rotor est créé uniquement soit par le moment magnétique de l'aimant permanent du rotor, soit par le courant inducteur continu envoyé dans le bobinage rotorique.

En particulier, il ne dépend pas de courants induits en provenance du stator, et donc de la variation du flux statorique; ce dernier sera utilisé uniquement pour effectuer un contrôle simple du couple électromagnétique.

Les mécanismes de base du pilotage de la machine synchrone pourront ensuite être transposés pour être utilisés dans le pilotage de la machine asynchrone pour laquelle le flux rotorique est intimement lié au flux statorique; ceci provient du fait que le moment magnétique créé au rotor par les courants induits sont dûs à la variation du flux statorique vue du rotor.

II.2.Définition : [8]

Une machine synchrone est une machine à champ tournant qui se caractérise par le fait que la vitesse de rotation est un sous- multiple entier de la fréquence des courants alternatifs polyphasés parcourant l'enroulement de l'une des armatures, si cet enroulement est conçu de façon à former **p** pair de pôles, et si ω (en rad/s) est la pulsation des courants qui le parcourent, la vitesse angulaire de rotation Ω (en rd/s) est liée à ω et **p** par la relation :

$$\Omega = \omega / p \quad (\text{II-1})$$

II. 3.Constitution : [9]

Les moteurs synchrones sont généralement constitués de :

II.3.1. Rotor :

Dans le rotor, nous avons l'inducteur (ou circuit d'excitation) ;
C'est un électroaimant alimenté en courant continu par l'intermédiaire de balais.
L'inducteur crée un champ tournant.

II.3.2. Stator :

Dans le stator, nous avons l'induit (circuit de puissance) ;
C'est un bobinage triphasé, généralement couplé en étoile :

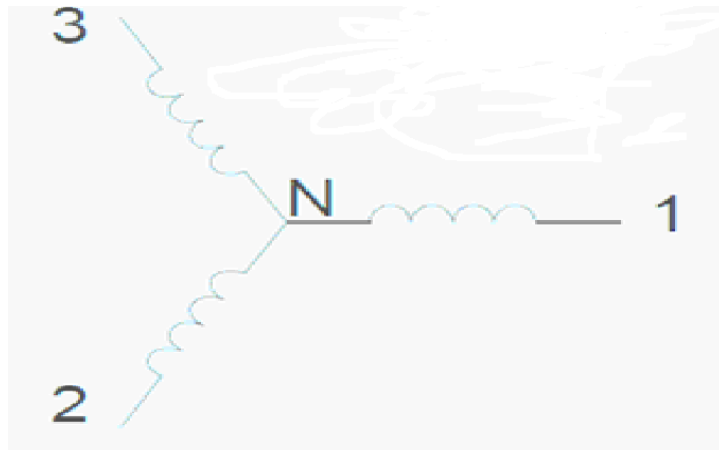


Fig.II.1. Représentation symbolique de l'induit.

II.4. Les différents rotor de la machine synchrone : [9]

II .4.1. Rotor à pôles saillants :

C'est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine.

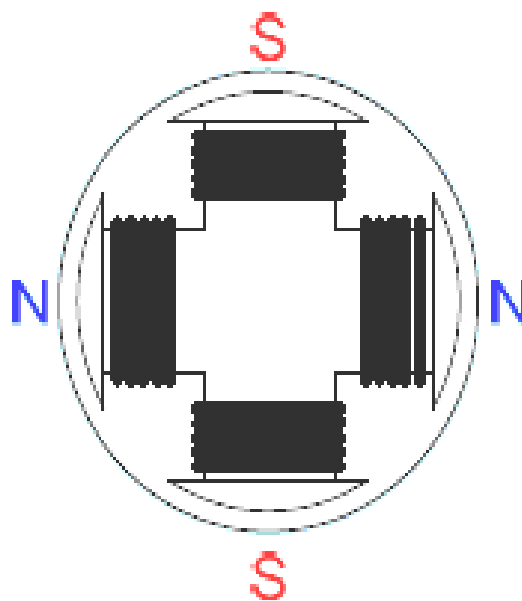


Fig. II.2. schéma du rotor à pôle saillant.

II.4.2. Rotor à pôles lisses ou Turboalternateur :

Le rotor à pôles lisses est un cylindre plein dans lequel on a usiné des encoches. Il possède le plus souvent deux pôles (Fig.II.3) :

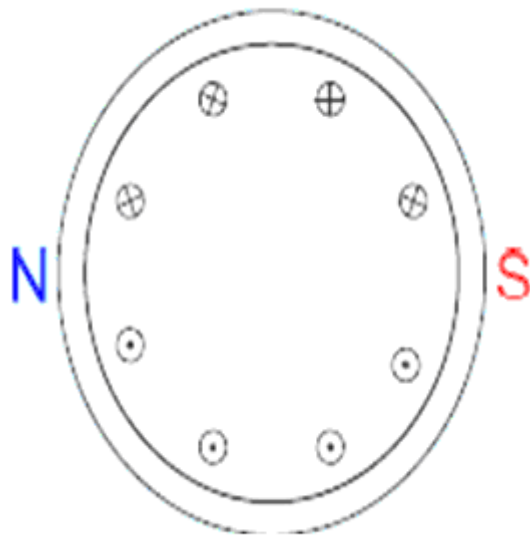


Fig. II.3.Schéma du rotor à pôles lisses.

II.5.Principe de la machine synchrone : [1]

Cas de la machine bipolaire : Les deux bobinages du stator créent

Un champ résultant qui vaut :

$$B(\theta) = B_1 \cos(\theta) + B_2 \sin(\theta) \quad (\text{II-2})$$

En alimentant avec des courants :

$$I_1 = I \cos(\omega t) \quad (\text{II-3})$$

$$I_2 = I \sin(\omega t) \quad (\text{II-4})$$

Alors: $B_1 = B \cos (\omega t)$ (II-5)

$B_2 = B \sin (\omega t)$ (II-6)

On obtient un champ tournant :

$B(\theta) = B \cos (\omega t) \cos(\theta) + B \sin (\omega t) \sin(\theta)$ (II-7)

$B(\theta) = B \cos (\omega t - \theta)$ (II-8)

Le rotor a un moment magnétique M il fait un angle α par rapport à Ox.

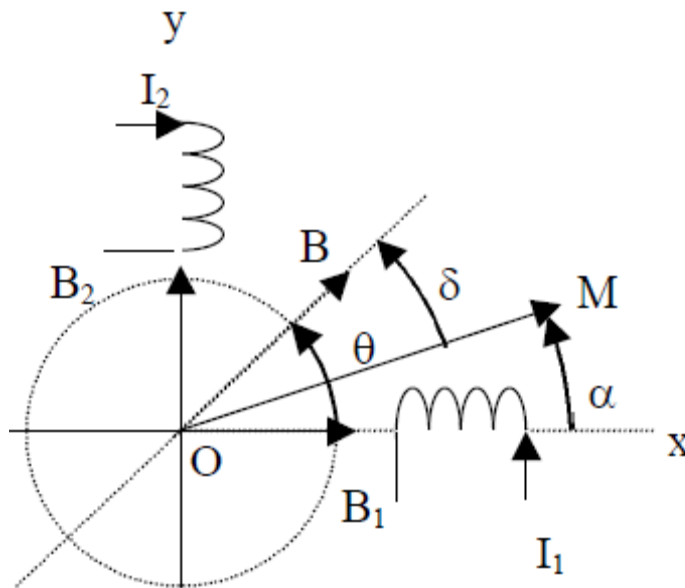


Fig. II.4.Principe de fonctionnement de la machine synchrone

Le couple qui s'exerce vaut $X = M \wedge B = | M B \sin (\theta-\alpha) |$. (II-9)

L'écart entre les angles θ et α est appelé **angle interne** du moteur : $\delta = \theta - \alpha$

Le couple est maximum lorsque les angles sont tels que $\theta - \alpha = \pi/2$: le rotor est en quadrature avec le champ inducteur B . $\delta = \pi/2$.

Si l'angle interne dépasse $\pi/2$, alors le moteur décroche.

La vitesse de rotation du moteur est égale à la vitesse de rotation tournant.

M tourne à la même vitesse que B.

II.6.La machine synchrone alimentée à fréquence variable : [2]

Pour assurer un fonctionnement à vitesse variable de la machine synchrone, il est nécessaire d'alimenter la machine à fréquence variable. Pour éviter le "décrochage" de la machine, il faut à tout instant que la pulsation des grandeurs statoriques ω_s soit telle que :

$\omega_s = p\Omega$ (p représente le nombre de paires de pôles de la machine et Ω la vitesse angulaire de rotation du rotor). L'alimentation à fréquence variable de la machine se fait à l'aide d'un convertisseur statique généralement continu-alternatif.

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 de courants statoriques et la fréquence statorique **fs** est proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

II.7. Alimentation en tension : [9]

$V_s/f_s = \text{cte}$: on fonctionne à flux constant et nominal :

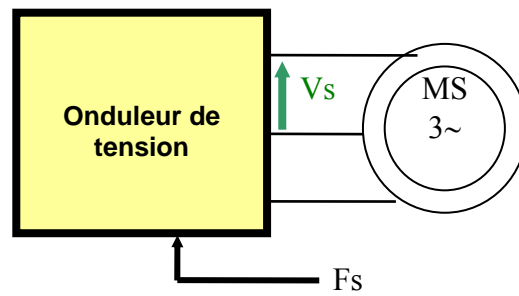
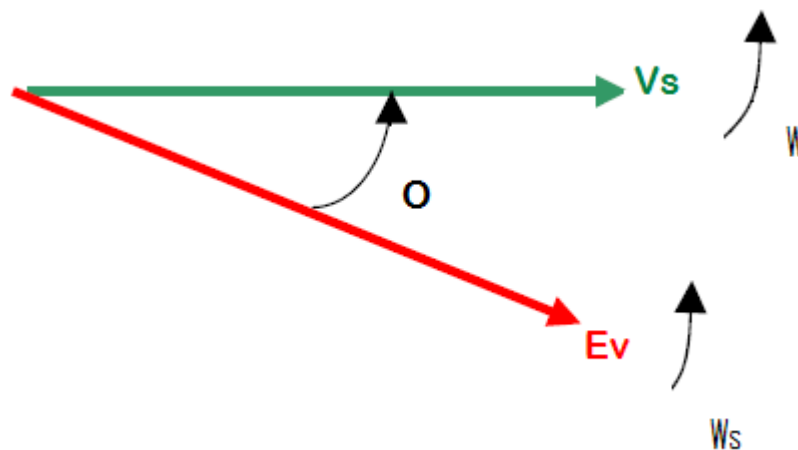


Fig. II.5. Schéma d'alimentation en tension.



$$\omega_s = 2\pi f_s$$

On augmente $\omega_s \rightarrow \omega$ ne varie pas instantanément (inertie).

1) θ augmente $\rightarrow \sin\theta$ augmente $\rightarrow C_{em} = k\sin\theta$ augmente \rightarrow si le couple moteur augmente, le synchronisme peut s'établir à nouveau.

2) Si θ dépasse $\pi/2 \rightarrow \sin\theta$ diminue $\rightarrow C_{em} = k\sin\theta$ diminue \rightarrow si le couple moteur diminue, ω diminue, il n'y a plus synchronisme des champs : on a un décrochage.

II.8. Alimentation en courant : [9]

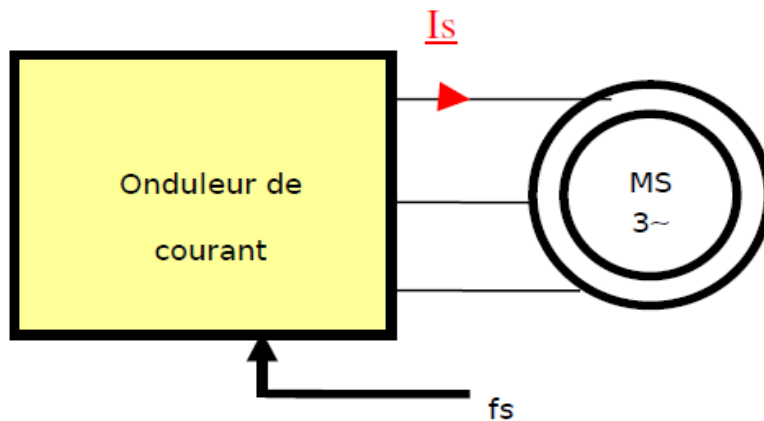
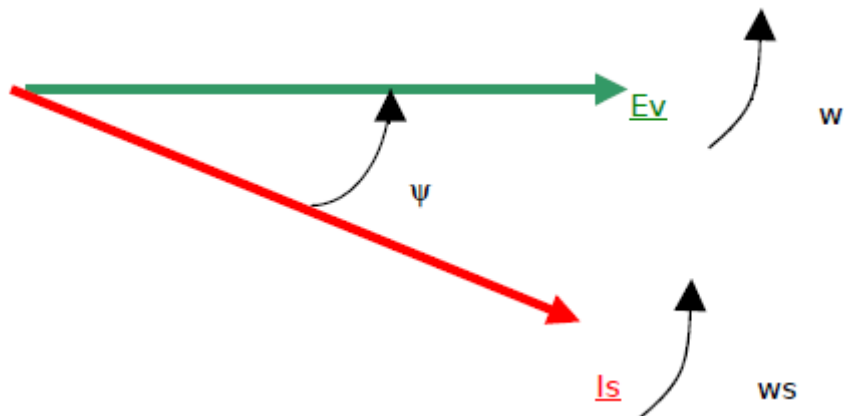
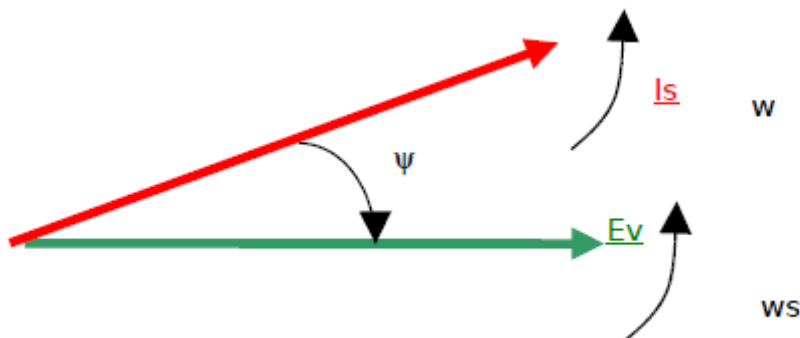


Fig. II.6. Schéma d'alimentation en courant

Is en retard sur Ev : (avec circuit d'aide à la commutation)



Is en avance sur Ev (commutation assistée par les tensions si Is en avance sur V_s).



On augmente ω_s :

ψ diminue \rightarrow C_{em} augmente ($\cos\psi$ augmente) \rightarrow accélération \rightarrow synchronisation.

ψ augmente \rightarrow C_{em} diminue ($\cos\psi$ diminue) \rightarrow décélération \rightarrow décrochage.

Conclusion : on voit que dans tous les cas, la pulsation statorique ω_s qui est une consigne indépendante entraîne une instabilité ou une stabilité très précaire.

II.9. Alimentation de la machine synchrone par un pont triphasé à thyristor : [2]

Le pont de Graëtz à thyristors permet de commuter les courants dans les phases de la machine synchrone à conditions toutefois que ces courants soient toujours en avance sur les tensions statoriques correspondantes (commutation naturelle des thyristors : la machine synchrone fournit de la puissance réactive au pont à thyristors). Le dispositif d'autopilotage, que nous décrirons plus loin, doit assurer en permanence cette condition.

Les commutations des courants dans les phases de la machine synchrone s'effectuent conformément à la fig. II. 7. Chaque thyristor conduit pendant un tiers de période (120°) et l'enchaînement des séquences tiennent compte de la position du rotor pour éviter le **décrochage** de la machine.

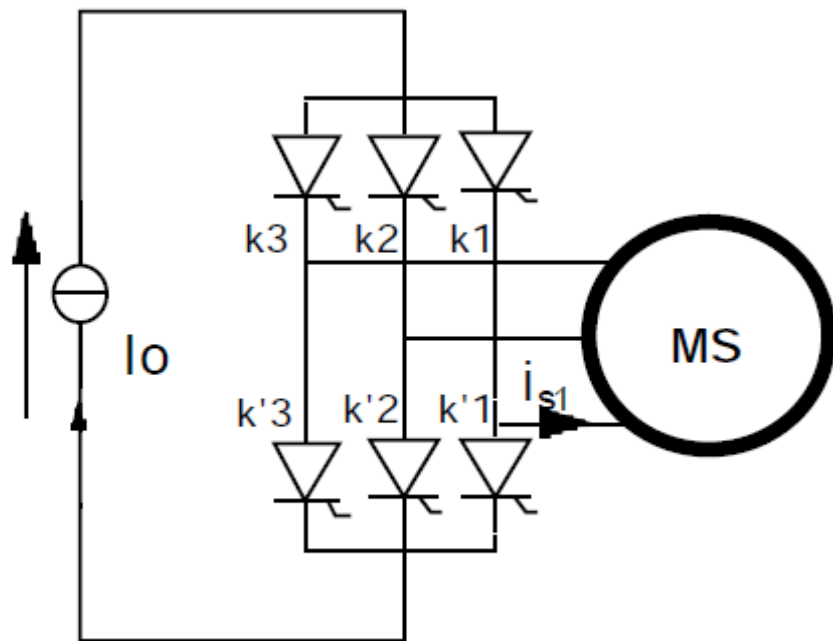


Fig. II.7. Alimentation de moteur synchrone par un pont de gréatz.

II.10. Moteur Synchrone Autopiloté : [2]

Les **moteurs synchrones autopilotés** sont aussi appelés **moteurs Brushless** ou **moteurs Auto synchrones**.

L'autopilotage c'est d'asservir la vitesse du champ statorique à celle du rotor en maintenant un angle constant entre les deux. Cet angle s'appelle angle d'autopilotage (souvent noté δ).

II.11. Démarrage du moteur brushless : [2]

Le même problème se pose pour le démarrage du moteur brushless, car le rotor ne peut pas atteindre instantanément la vitesse de rotation du champ. Le système de contrôle électronique doit donc assurer un démarrage progressif,

l'objectif étant toujours de reproduire la fonction du collecteur. La fréquence des tensions d'alimentations sera donc très basse au départ, puis augmentée progressivement en tenant compte de la réaction du moteur.

II.12.Schéma de principe : [2]

La position réelle du rotor est relevée par un capteur de position (synchro-résolveur), elle permet de calculer les courants à appliquer aux enroulements pour choisir la position du champ statorique : on choisit l'angle interne, donc le couple, en fonction du type de commande souhaité.

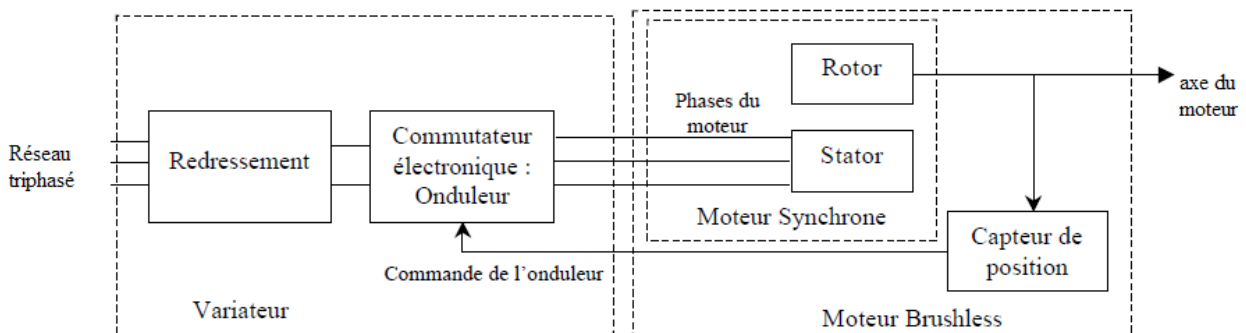


Fig. II.8.schéma de principe du moteur synchrone autopiloté.

II.13.Réalisation d'autopilotage : [2]

Pour réaliser l'autopilotage, on peut utiliser deux types de commandes :

II.13.1. Commande en tension : [2]

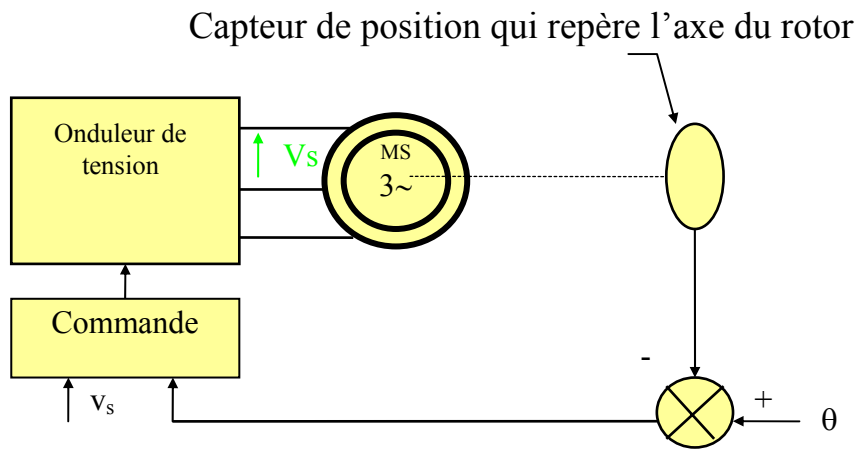


Fig. II.9. Schéma de réalisation d'autopilotage par commande en tension

$$C_{em} = k \cdot (V_s / \omega_s) \cdot \sin \theta \quad \text{(II-10)}$$

Le capteur de position règle l'instant d'amorçage et de blocage des interrupteurs de manière à avoir le θ voulu. La vitesse de rotation fixe la fréquence d'alimentation de la machine et impose le synchronisme entre \underline{V}_s et \underline{E}_v .

II.13.2. Commande en courant : [2]

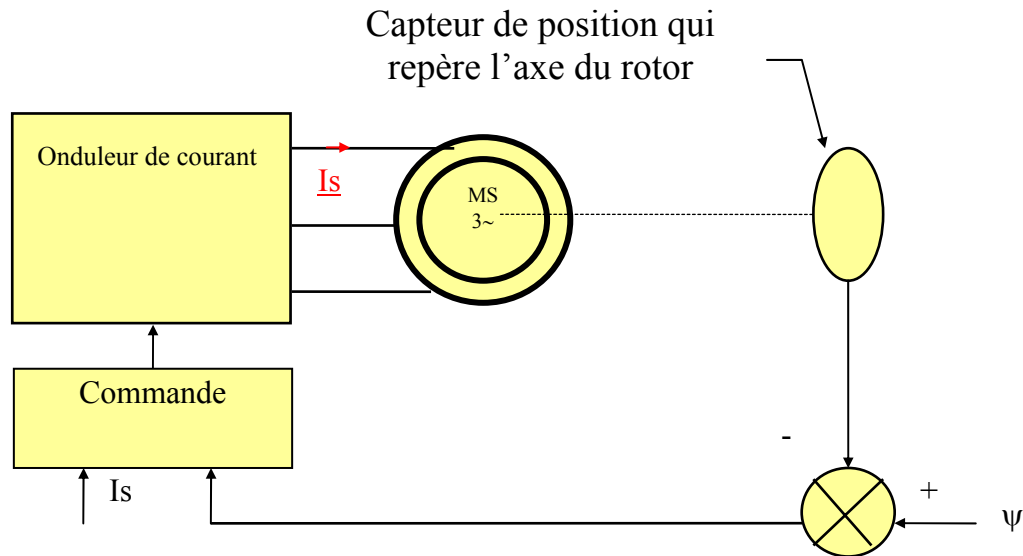


Fig. II.10. Schéma de réalisation d'autopilotage par commande en courant

$$C_{em} = K \cdot I_s \cdot \cos \psi \quad (II-11)$$

Le capteur de position fixe l'instant d'amorçage et de blocage des interrupteurs de manière à avoir le ψ désiré. La vitesse de rotation fixe la pulsation des courants statorique et assure le synchronisme de champs.

II.14. Contrôle de la vitesse : [2]

II.14.1. Contrôle de la vitesse à l'aide d'un onduleur MLI (Modulation de Largeurs d'Impulsions):

- **Onduleur de tension MLI :**

L'onduleur de tension MLI triphasé (Fig.II.11) permet l'échange d'énergie entre une source de tension continue et une charge inductive triphasée. Il est constitué

de trois bras utilisant des interrupteurs à trois segments, bidirectionnels en courant et commandés à l'amorçage et au blocage.

Les interrupteurs peuvent être réalisés, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOS ou bipolaire, des IGBT ou des GTO associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant.

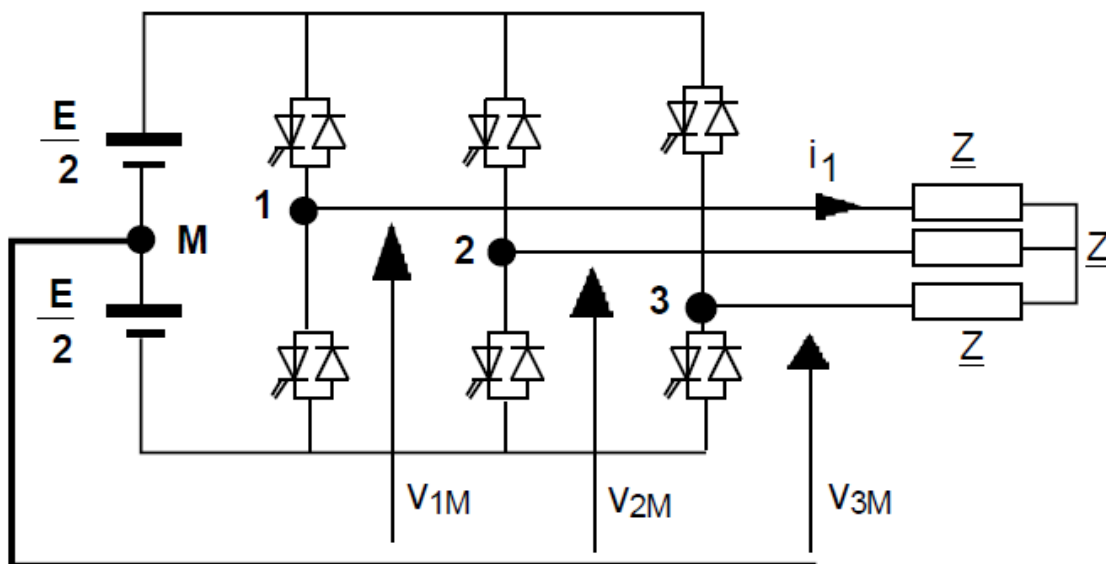


Fig. II.11. Schéma représentatif d'un onduleur MLI.

Sur chaque bras, le rapport cyclique de la commande des interrupteurs est modulé sinusoidalement à une fréquence f qui est très inférieure à la fréquence de commutation des interrupteurs f_c ($f_c > 10$ à $100 f$).

Pour la phase 1 par exemple, la valeur moyenne de la tension V_{1M} est fonction du rapport cyclique R et a pour expression :

$$V_{1M0} = E/2 (2R - 1) \quad (\text{II-12})$$

Si le rapport cyclique R est tel que :

$$R = 1/2 + m \sin \omega t \quad (\text{II-13})$$

(m : indice de modulation, inférieur à 0,5)

Alors la valeur moyenne de $V_{1M}(t)$ varie sinusoïdalement et s'exprime par :

$$V_{1M0}(t) = m E \sin \omega t \quad (\text{II-14})$$

$V_{1M0}(t)$ correspond ici au fondamental de la tension $V_{1M}(t)$ noté $V_{1f}(t)$.

En fonctionnement normal, les composantes fondamentales des tensions V_{1M} , V_{2M} , V_{3M} forment un système triphasé équilibré dont M est le point Neutre.

La commande en Modulation de Largeur d'Impulsion permet de générer en sortie de l'onduleur une tension dont l'allure (pour la phase 1) est précisée à la (fig.II.12). Si la période de commutation des interrupteurs T_c est très petite devant la période T du signal de modulation, les harmoniques de tension de rang bas sont supprimés et les courants de sortie de l'onduleur sont quasi-sinusoïdaux (la charge qui doit être inductive permet le lissage des courants).

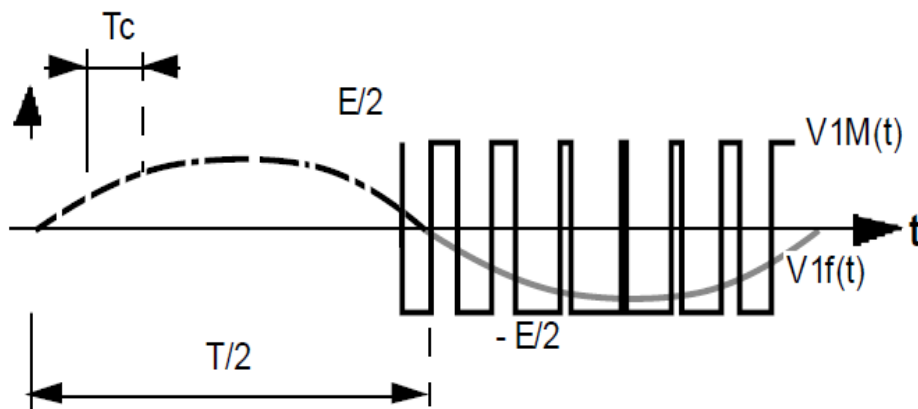


Fig. II.12. Schéma représentatif de l'allure de la tension pour la phase 1

II.14.2. Fonctionnement de l'onduleur MLI :

L'onduleur MLI alimente la MS qui entraîne un capteur de position. Le capteur de position va par l'intermédiaire d'une mémoire déclencher 3 sinusoïdes prés programmées formant un système 3~ équilibré direct. Ces sinusoïdes de référence attaquent un multiplieur. Chacune sera multipliée par I_{ref} qui est l'amplitude de référence du courant statorique. On compare ces 3 consignes aux valeurs réelles. Les signaux issus du comparateur sont régulés puis traités pour commander l'onduleur MLI.

Ex : - Augmentation de f_s en cas de 'retard' sur le rotor.
 - Diminution de V_s si I_s est trop grand

- **Association onduleur MLI / moteur Brushless :**

Moteur dont le champ est à répartition spatiale sinusoïdale

Puissance de 1 à quelques dizaines de KW

Application : robotique et machine outil.

• Schéma de principe :

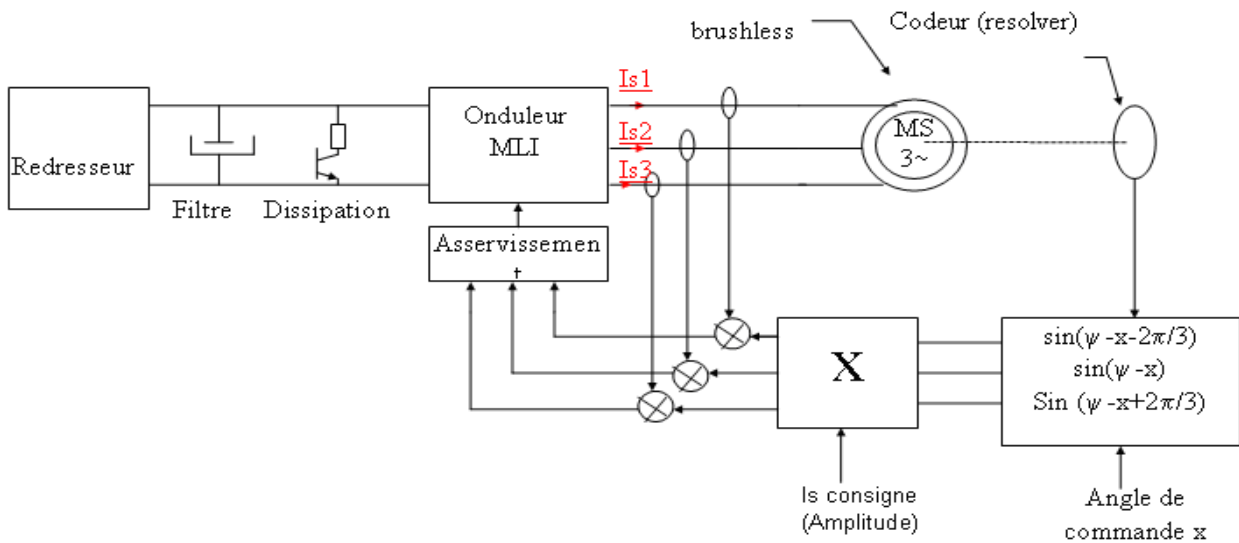


Fig. II.13. Schéma de principe de l'association onduleur MLI / moteur Brushless

II.15. Contrôle de la vitesse à l'aide d'un commutateur de courant autopiloté : [1]

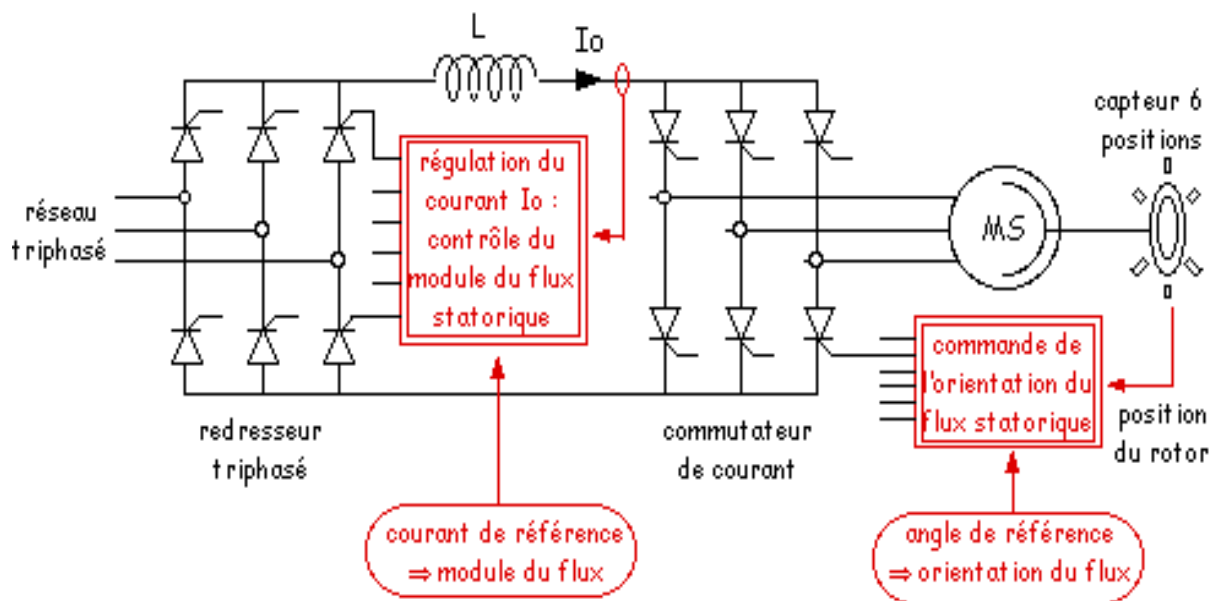


Fig. II.14. Dispositif de Contrôle de la vitesse à l'aide d'un commutateur de courant autopiloté

On remarque que ce dispositif élémentaire d'autopilotage réalise bien un contrôle vectoriel du flux statorique puisqu'il permet de caractériser à tout instant le vecteur flux statorique par son module (de la forme $L \cdot I_0$) et son orientation déterminée par les séquences de conduction des 6 interrupteurs du commutateur.

On notera également que les 6 séquences de conceptions des interrupteurs déterminent dans les 3 bobinages du stator 6 orientations du flux statorique.

II.15.1. Séquences de conduction des interrupteurs et positions du flux statorique :

La commutation des courants statoriques est assurée par un capteur de position monté sur l'arbre indiquant le passage du rotor par des positions angulaires précises.

On remarque donc que la fréquence des courants au stator est asservie à la rotation du rotor de manière à maintenir le synchronisme entre le champ créé par les courants du stator et le moment magnétique du rotor. Il en découle que le champ statorique "tourne" à la vitesse du rotor; en particulier, à l'arrêt du rotor, le champ statorique est immobile; c'est le principe de l'auto-pilotage.

On en déduit que le vecteur flux statorique n'est pas un vecteur tournant au sens classique, mais un vecteur "sautant" occupant 6 positions distinctes dans l'espace.

De ce fait l'écart angulaire entre le flux statorique et le flux rotorique, qui tourne à vitesse pseudo-constante du fait de l'inertie du rotor, subit une variation d'environ 60° ce qui entraîne une ondulation importante du couple autour de sa valeur moyenne.

L'animation ci-contre montre que le flux statorique avance par sauts lorsque le rotor passe devant les capteurs déclenchant une commutation des interrupteurs électroniques; de ce fait le couple subit une augmentation brutale puis diminue progressivement lorsque le vecteur flux rotorique tend à rattraper le vecteur flux statorique.

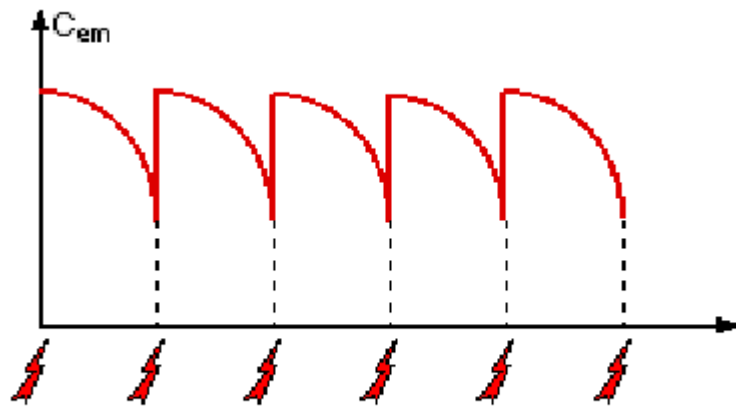


Fig. II.15. Ondulations du couple électromagnétique

II.15.2. Les capteurs :

Un capteur (codeur ou résolveur) détecte la position exacte du rotor et permet au convertisseur de fréquence, de maintenir un angle θ de 90° entre le champ tournant statorique H_s et le champ rotorique H_r , de façon à ce que le couple moteur puisse toujours être maximal. H_s , modulé en amplitude, fixe la valeur du couple. Il n'y a plus possibilité de décrochage. Le capteur donne également l'information " vitesse ".

II.15.2.1. Fonctionnement à vitesse constante:

Si la charge diminue, pour que la vitesse reste constante, il faut diminuer le couple moteur. Le variateur réduit donc l'amplitude du champ tournant statorique H_s , sans changer sa fréquence.

II.15.2.2.Fonctionnement à couple constant:

Si la consigne de vitesse diminue, le couple moteur reste constant si l'amplitude du champ tournant statorique reste constante. Le variateur réduit la fréquence de H_s , en conservant son amplitude.

Un capteur est un système qui permet d'obtenir une image sous forme en général électrique, d'une grandeur physique.

II.15.3.Résolver :

Le resolver est un capteur de position angulaire sans contact. Il est utilisé dans les applications d'autopilotage des machines synchrones. Le principe est d'avoir deux enroulements statorique à angle droit et deux rotoriques également à angle droit. En alimentant un des enroulements rotoriques en alternatif et en court-circuitant l'autre, les enroulements statoriques sont le siège de fém. modulée par des fonctions de $\sin(\theta)$ et $\cos(\theta)$. On récupère ces informations pour élaborer la position du rotor.

II.16.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques rappels sur la machine synchrone, après on a étudié la machine synchrone autopilotée, son fonctionnement ainsi les stratégies de commande.

Etude Comparative entre la Machine à Courant Continu et la Machine Synchrone Autopilotée

III.1.Comparaison des structures : [8]

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 quant 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 ou commandé par le capteur de position se trouvant sur le rotor.

III.2.Comparaison des caractéristiques : [8]

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 champ sont créés par deux sources différentes).Ce couple a pour expression, comme nous l'avons montré :

- Dans le cas du moteur à courant continu :

$$C=k.\Phi.I \qquad \text{(III-1)}$$

- Dans le cas du moteur synchrone alimenté par un onduleur de tension :

$$C_{em} = K \sin \theta \quad (III-2)$$

- Dans le cas du moteur synchrone alimenté par un onduleur du courant :

$$C_{em} = K \cos \theta \quad (III-3)$$

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 :

$$C = k' \cdot \Phi \cdot I \quad (III-4)$$

- Dans le cas du moteur synchrone autopiloté alimenté par un onduleur de tension :

$$C_{em} = k \cdot (V_s / \omega_s) \cdot \sin \theta \quad (III-5)$$

- Dans le cas de la machine synchrone autopilotée alimenté par du courant :

$$C_{em} = K \cdot I_s \cdot \cos \psi \quad (III-6)$$

III.3.Aspect économique et domaine d'utilisation : [8]

Le moteur synchrone autopiloté est entré dans la traction électrique par la grande porte. Il tend à remplacer complètement le moteur à courant continu dans le domaine des grandes vitesses à cause de la limite de vitesse imposé par l'induit et son collecteur tournant. 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 couteuse qu'une machine à courant continu.

Le domaine d'utilisation des moteurs synchrones autopilotés va des entrainements de très faibles puissances quelques watt (entrainement de bondes, de disques...) aux entrainements de grandes puissances de quelques MW à des dizaines de MW (entrainements 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. Se sont le souvent des moteurs à aimant permanent.

L'usure en cas d'usage intensif (traction ferroviaire, production industrielle.), des balais et des collecteurs, 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.

III.4. Les performances : [8]

Proposons – nous de comparer les performances du moteur autopiloté à celles d'un moteur à courant continu à excitation séparée.

Un moteur à courant continu, non saturé, à pour f.é.m. à vide :

$$E = pNn\Phi/a = KJ\Omega. \quad (\text{III-7})$$

Si on néglige la résistance de l'induit, on a :

$$U = E = KJ \Omega, \text{ soit : } \Omega = aU, \text{ avec : } a = 1/(KJ) \quad (\text{III-8})$$

De même :

$$C = P_e / \Omega = E I / \Omega, \text{ soit : } C = B I, \text{ avec: } B = K J \quad (\text{III-9})$$

Ainsi peut –on conclure:

Les performances du moteur autopiloté sont les mêmes que celles du moteur à excitation séparée à courant continu.

III.5.Conclusion :

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

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de la machine synchrone autopilotée alimentée par un commutateur de courant et des onduleurs soit de la tension ou du courant.

Au préalable nous avons montré qu'en alimentant la machine synchrone autopilotée par des convertisseurs statiques cette dernière a un fonctionnement proche ou analogue à celui de la machine à courant continu.

Nous avons expliqué que le moteur synchrone se comporte exactement comme un moteur à courant continu, c'est le déplacement du rotor qui commande les changements des courants statoriques. L'ensemble capteur de position- commutateur de courant joue le rôle de l'ensemble balais - collecteur.

Nous pouvons conclure que la machine synchrone autopilotée alimentée par un commutateur de courant ou des onduleurs, sont des machines synchrones du point de vue construction, mais de point de vue fonctionnement, elle doit être considérée comme une machine à courant continu qui aura un collecteur électronique.

Nous avons présenté l'intérêt de l'utilisation des capteurs de positions et l'onduleur MLI et les onduleurs de tension et du courant pour l'alimentation des machines synchrones et les machines synchrones

autopilotées utilisées dans des fonctionnements nécessitant une variation de vitesse.

A travers la comparaison faite précédemment nous voyons que les deux moteurs présentent les mêmes caractéristiques et offrent les mêmes modes de variations de vitesses. 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.

Bibliographie

- [1] **Moteur Synchrone** : Ecole national de Plasturgie (France).
- [2] **Philippe Ladoux** : Variation de vitesses des machines à courant alternatif (Réseau national de ressources en électrotechnique, France).
- [3] **Fabrice Sincère** : Qualité Logistique Industrielle et Organisation, QLIO, Version 3.0.5.
- [4] **Farhi.M, Zabchi.I** : Thèse ingénieur électrotechnique : Etude de la machine synchrone autopilotée (2002).
- [5] **G.Pinson** : Cours de physique appliquée : Moteur à courant continu.
- [6] **Francis Milsant** : Machine à courant continu : Cours d'électrotechnique, tome 2.
- [7] **Francis Milsant** : Machines électriques, machines synchrones et asynchrones ; commande électronique (école d'ingénieurs).Edition ellipse – France.
- [8] **Mansoura.A, Ait Kheldoun.O** : Thèse ingénieur électrotechnique : Etude comparative entre le moteur à courant continu et le moteur synchrone autopiloté.
- [9] **Fabrice Sincère** : Machine synchrone triphasée : Version 3.0.4, QLIO.