

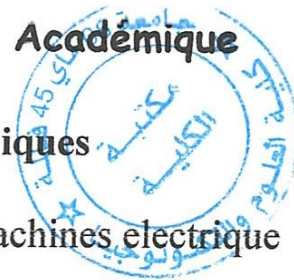
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

701



**Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Electrique
Spécialité : commande des machines électrique



**Modélisation et simulation de l'association convertisseur
statique machine à courant continu**

Présenté par : Djoudi khalid

Sous la direction de : Mr . Feraga .chams-eddine

JUIN 2011

11/29/07



REMERCIEMENTS

Avant tout on tient nos remerciements à notre dieu tout puissant de nous avoir donné la foi, la force et le courage.

A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre promoteur

« Mr. JTRGA chamess-eddine » pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition, pour ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aïssances qu'il nous a apportées durant notre étude et réalisation de ce projet.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.

Sans omettre bien sur de remercier profondément à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

Siondi khalid

DEDICACE

*Je remercie « ALLAH » le tout puissant qui m'a donné
la foi et la force de mener ce travail à son terme.*

*Je remercie notre encadreur « Feraga ,C » pour son
aide, ses encouragements.*

*A ma mère qui a sacrifié toute sa vie pour nous et a
mon père pour son soutien.*

A mes grands-parents que dieu les garde.

A mes oncles et mes matent à qui je dois ma réussite.

*Et a tous mes frères qui ont contribué à la force qui
m'a amené jusqu'à ici.*

*A tous mes amis tous ceux qui m'ont aidé de près ou de
loin. Même qu'il soit un mot d'encouragement et de
gentillesse.*



Thème :

Modélisation et simulation de l'association convertisseur statique –machine à courant continu.

Résumé :

Dans ce mémoire, on a présenté l'étude de la machine à courant continu, puis on a traité les différents modes de variation de vitesse de la machine à courant continu à excitation séparée à savoir ; variation de vitesse par groupe générateur moteur (G-M) et par convertisseurs statiques. On a choisi le convertisseur statique car il donne des meilleures performances.

Enfin, on a procédé à la simulation numérique de l'association convertisseur statique machine à courant continu.

Mots Clés:

Moteur à courant continu,

Convertisseur mécanique (Groupe *Ward léonard*)

Convertisseur statique.

Redresseur.

Hacheur.

Modélisation.

Simulation.



SOMMAIRE

Introduction générale	3
<u>Chapitre I : Machine à courant continu</u>	
Introduction	5
I.1. CONSTITUTION DU MOTEUR A COURANT CONTINU (MCC) :	5
I.1.1. Pôles principaux :	6
I.1.2. Pôles auxiliaires :	7
I.1.3. Carcasse :	7
I.1.4. Induit :	8
I.1.5. Enroulement d'induit :	8
I.1.6. Collecteur :	9
I.1.7. Balais :	9
I.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :	10
I.2.1. Force électromotrice :	10
I.2.2. Couple électromagnétique :	10
I.2.3. Puissance électromagnétique :	11
I.2.4. Différentes pertes :	11
I.2.5. Rendement :	12
I.3. MODES D'EXCITATION :	12
I.3.1. Excitation série :	13
I.3.2. Excitation séparée :	14
I.3.3. Excitation shunt :	15
I.3.4. Excitation composée :	16

CONCLUSION :	17
<u>Chapitre II : Variation de la vitesse d'une machine à courant continu</u>	
INTRODUCTION :	18
II.1. Démarrage (Moteur shunt) :	18
II.1.1. problème du démarrage :	18
II.2. Variation de la vitesse :	18
II.2.1. Réglage rhéostatique	18
II.2.2. Réglage par flux	19
II.2.3. Réglage de tension	20
II.3. Freinage :	21
II.3.1. Freinage rhéostatique	21
II.3.2. Freinage à contre-courant	21
II.3.3. Freinage par récupération :	22
II.4. Inversion du la sens du marche :	23
II.5. Choix du moteur à courant continu :	23
II.5.1. Critères indépendants du convertisseur :	23
II.5.2. Critères dépendants du convertisseur :	23
II.6. Les modes des convertisseurs :	23
II.6.1. Convertisseur rotatif (convertisseur électrique) :	24
II.6.1.1 Le Fonctionnement	24
II.6.1.2. Les avantage et les inconvénients du système rotatif :	27
II.6.1.2.1 .Les avantages :	27
II.6.1.2.2. Les inconvénients :	27
II.6.2. CONVERTISSEUR STATIQUE :	27
II.6.2.1. Différents montages d'une variation statique réversible :	27
II.6.2.1.1. Montage à inversion du courant d'induit :	27
II.6.2.1.1.a. UN pont complètement commandé avec un pont à contact :	28

II.6.2.1.1.b. Un convertisseur de courant bidirectionnel réalisé à base de deux ponts complètement commandés :	29
II.6.2.1.2. Montages à inversion du courant inducteur :	30
II.6.2.2. Les avantages et les inconvénients du système statique :	31
II.6.2.2.1. Les avantage :	31
II.6.2.2.2. Les inconvénients :	32
CONCLUSION	32

Chapitre III : Les convertisseurs utilisés pour la commande des machines à courant continu

Introduction :	34
III.1. Les redresseurs :	34
III.1.1. Modèle statique d'un redresseur en conduction continu :	34
III.1.2. Perturbation des réseaux par les redresseurs :	37
III.2. Les hacheurs :	39
III.2.1. Modèle statique d'un hacheur en conduction continu :	39
III.2.2. Réversibilité de l'ensemble hacheur machine à courant continu :	41
Conclusion :	42

Chapitre IV : Simulation de l'association convertisseur–machine à courant continu

INTRODUCTION :	44
IV.1. Simulation du convertisseur statique :	44
IV.2. Simulation de la machine a courant continu :	49
IV.3. Simulation de l'ensemble hacheur machine à courant continu :	51
Conclusion :	52
CONCLUSION GENERALE	53

Bibliographie

INTRODUCTION GENERALE

Plus de précision, grand plage de variation de vitesse, facilité de commande avec le moindre coût possible, c'est ce qui est exigé par le marché de l'industrie de ce temps.

Les machines à courant alternatif, synchrone ou asynchrone, utilisées de façon conventionnelle, se prêtent bien à des applications où la vitesse est à peu près constante. La machine à courant continu est plus facile à régler lorsque la vitesse doit varier sur une grande plage. En effet, la machine à courant alternatif requiert une commande beaucoup plus complexe pour réaliser un entraînement à vitesse variable et le convertisseur doit fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence variable. Ces inconvénients réduisent donc son attrait dans les applications à vitesse variable, malgré les avantages qu'elle possède sur la machine à courant continu : robustesse et coût moindre, grâce à l'absence de collecteur, poids réduit. La représentation du mémoire est structurée en une introduction, quatre chapitres et une conclusion, suivie d'annexe, et répartie comme suit :

Le premier chapitre, donne un rappelle sur le principe de fonctionnement de la MCC, ainsi qu'une vue sur la construction et les différents modes d'excitation d'un MCC.

Dans le deuxième chapitre, on étudiera les différents types de démarrage, freinage et variation de vitesse de la MCC. On étudiera deux systèmes pour varier la vitesse du moteur à courant continu dans les quatre quadrants, groupe *Ward léonard*, et convertisseur statique réversible.

Dans Le troisième chapitre, on présentera l'alimentation statique qui fournissent des tensions continues variables, à savoir les redresseurs qui convertissent l'énergie électrique délivrée par une source de tensions sinusoïdales.

Et les hacheurs qui convertissent l'énergie électrique délivrée par une source continue.

Dans le dernier chapitre on présentera les résultats de simulation du système étudié.

Chapitre I

Machine à courant continu

Introduction

Les moteurs à courant continu sont des appareils qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. La construction des moteurs est identique à celle des génératrices, de sorte qu'une machine à courant continu peut servir indifféremment comme moteur ou comme génératrice [1]

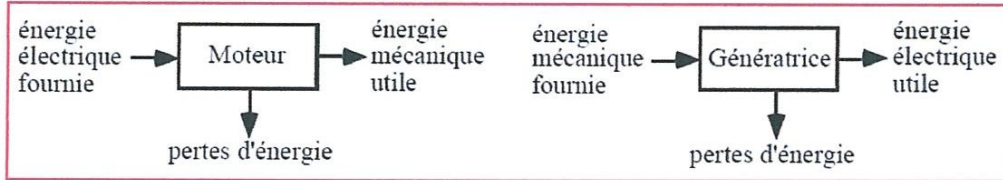


Fig. (I.1) : Schéma synoptique de la machine à courant continu.

Beaucoup d'applications nécessitent un couple de démarrage élevé. Or, le moteur à courant continu, par nature, possède une caractéristique couple/vitesse de pente importante, ce qui permet de vaincre un couple résistant élevé, et d'absorber facilement les coups de charge ; la vitesse du moteur s'adapte à sa charge. D'autre part, la miniaturisation recherchée par les concepteurs trouve dans le moteur à courant continu une solution idéale, puisque présentant un rendement élevé, en comparaison aux autres technologies.

Le choix d'un moteur à courant continu s'est donc imposé comme la meilleure solution pour le réglage de la vitesse et du couple mécanique [2].

I.1. CONSTITUTION DU MOTEUR A COURANT CONTINU (MCC)

Le moteur comprend :

- ❖ un circuit magnétique : comporte une partie fixe, le stator, une partie tournante, le rotor et l'espace entre les deux parties, l'entrefer [3].

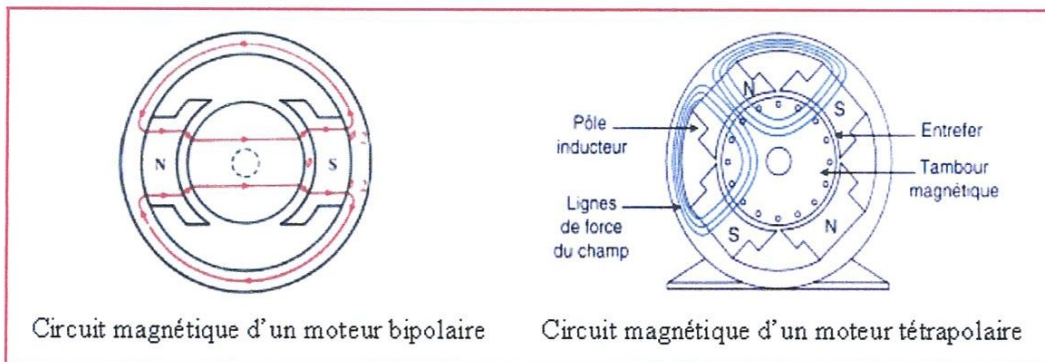


Fig. (I.2) : Circuit magnétique d'un MCC.

- ❖ Une source de champ magnétique nommée l'inducteur (le stator) créé par un bobinage ou des aimants permanents.
- ❖ Un circuit électrique induit (le rotor) subit les effets de ce champ magnétique.
- ❖ Le collecteur et les balais permettent d'accéder au circuit électrique rotorique.

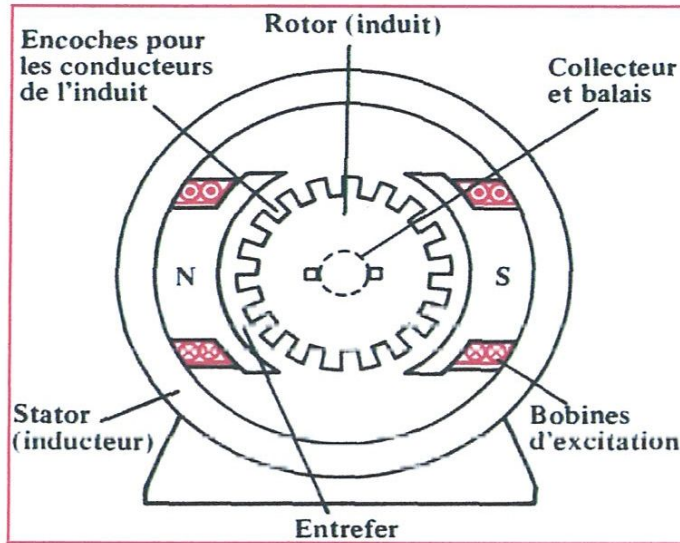


Fig. (I.3) : Constitution du MCC.

I.1.1. Pôles principaux :

Le pôle principal (fig.1.4) comprend un noyau **1** en tôles d'acier électromagnétique de 1mm d'épaisseur. Du côté dirigé vers l'induit le noyau a un épanouissement polaire **2** servant à faciliter le passage du flux magnétique par l'entrefer. On place sur le noyau du pôle une bobine de l'enroulement d'excitation **3** par laquelle passe un courant continu. La bobine enroulée sur un fourreau **4** fabriqué soit en tôle d'acier de 1 ou

2mm d'épaisseur sur laquelle est collé une couche de 2 ou 3mm d'épaisseur, soit en matière

plastique ou en papier bakélinisé [2].

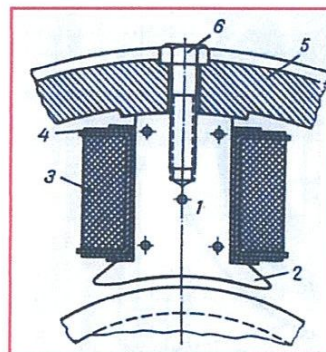


Fig. (I.4) : Pôle principal.

Afin de réduire l'hygroscopicité et d'augmenter la conduction de la chaleur, les bobines sont imprégnées à plusieurs reprises de vernis chauds et sont ensuite séchées au four. Pour un meilleur refroidissement on divise souvent la bobine en deux ou plusieurs parties en hauteur entre lesquelles on laisse des canaux de ventilation de largeur suffisante. Les pôles sont fixés à la carcasse 5 à l'aide de boulons spéciaux 6.

I.1.2. Pôles auxiliaires :

Le pôle auxiliaire comme le pôle principal comprend un noyau 1 qui s'achève par un épanouissement polaire de telle ou autre forme et une bobine 2 enroulée sur le noyau.

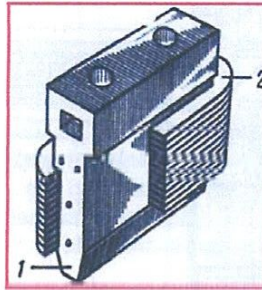


Fig. (I.5) : Pôle auxiliaire.

Les pôles auxiliaires sont installés exactement au milieu de la distance qui sépare les pôles principaux et sont fixés à la carcasse par des boulons [2].

I.1.3. Carcasse :

On appelle carcasse la partie de la machine à laquelle sont fixés les pôles principaux et auxiliaires et à l'aide de laquelle la machine est réunie à la fondation, une partie de la carcasse qui sert au passage du flux produit par les pôles principaux et auxiliaires est appelée culasse. La carcasse et les pôles (principal et auxiliaire) forment ce qu'on appelle inducteur (stator), comme on peut trouver des inducteurs à aimant permanent [1].



a) bobiné



b) à aimant permanent.

Fig. (I.6) : Inducteur. (a et b). [3]

I.1.4. Induit :

La partie tournante qui porte l'enroulement active le circuit magnétique, car c'est par elle que se ferment les lignes d'inductions issues des pièces polaires.

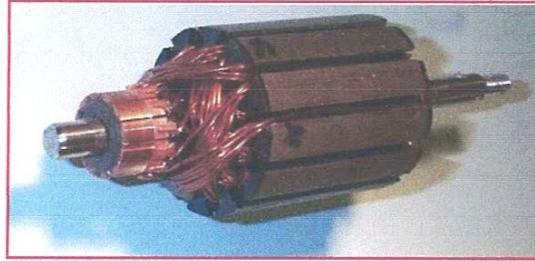


Fig. (I.7) : Induit. [3]

C'est un cylindre centré sur l'axe de la machine, de même longueur axiale que les pièces polaires, mais d'un diamètre légèrement inférieur à celui de leur alésage.

Il est fait de tôles d'acier magnétique de 0.5mm d'épaisseur. Pour réduire les pertes par courants de Foucault et par hystérésis on les isole au vernis ou au papier de 0.03mm à 0.05mm d'épaisseur. [4]

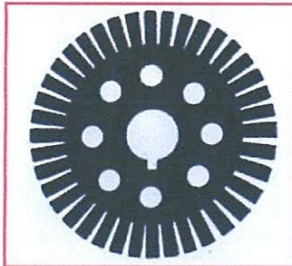


Fig. (I.8) : Tôle d'acier d'un induit en tambour à ventilation axiale. [1]

I.1.5. Enroulement d'induit :

L'enroulement d'induit d'une machine à courant continu a également évolué. Les enroulements d'un induit en tambour utilisés actuellement, se composent de sections (**fig.I.9**) fabriquées le plus souvent sur des gabarits spéciaux et placés dans les rainures de l'armature d'induit (**fig. I.10**).

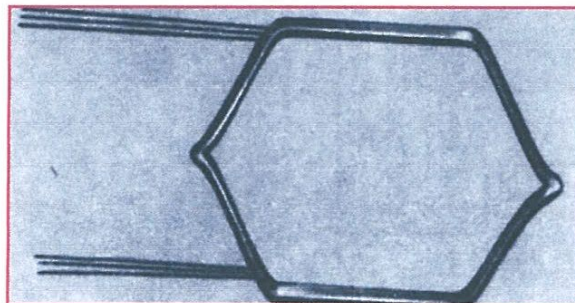


Fig. (I.9) : Section d'enroulement. [1]

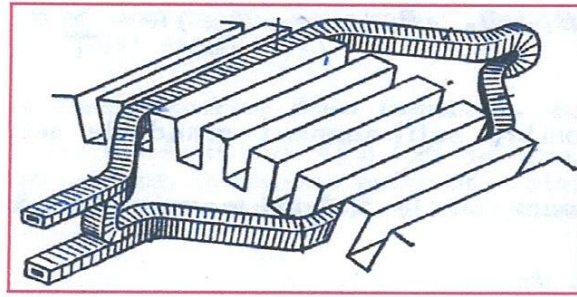


Fig. (I.10) : Disposition d'une section de l'enroulement d'un induit. [1]

I.1.6. Collecteur :

C'est un cylindre centré sur l'axe de la machine et placé devant l'une des faces de l'armature.

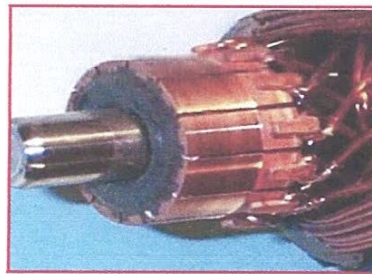


Fig. (I.11) : Collecteur. [3]

Il est fait de lames de cuivre en forme de coin, isolées les une des autres par des feuilles de mica. Chacune des lames porte une ailette sur laquelle sont soudées l'entrée d'une section et la sortie de la suivante.

Dans le moteur à courant continu c'est le collecteur qui remplit la fonction capitale (Alimenté par les balais, il distribue successivement le courant aux différentes bobines de l'induit).

I.1.7. Balais :

Sur la surface cylindrique du collecteur frottent les balais, qui sont connectés aux bornes de l'induit placées sur la plaque à bornes.

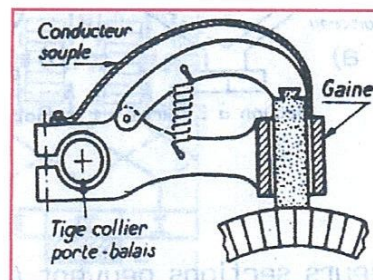


Fig. (I.12) : Balais montés sur collecteur. [3] ; [1].

Les balais sont faits de graphite, leur pression doit être soigneusement réglée par un ressort pour obtenir un bon fonctionnement en charge.

I.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

I.2.1. Force électromotrice

L'inducteur (ou stator) crée un champ magnétique fixe B. Ce stator peut être à aimants permanents ou constitué (fig. I.6).

L'induit (ou rotor) porte des conducteurs parcourus par un courant continu (alimentation du moteur) ; ces spires, soumises à des forces (forces dites « de Laplace »), entraînent la rotation du rotor. Il en résulte une variation du flux du champ magnétique à travers chaque spire ; elle engendre une f.é.m. qui est redressée par l'ensemble {collecteur + balais}. [2]

La valeur moyenne E de cette f.é.m. est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation du rotor, au flux maximal du champ magnétique créé par l'inducteur à travers une spire ($\phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$) et à une constante K qui dépend des caractéristiques de la conception du moteur (nombre de conducteurs, surface de chaque spire, nombre de paires de pôles,..)

$$(K = p \cdot N / 2 \cdot \pi \cdot a)$$

Avec:

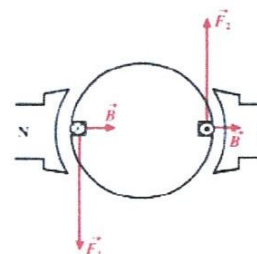
- ✓ p : le nombre de paires de pôles
- ✓ a : le nombre de paires de voies d'enroulement
- ✓ N : le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires)
- ✓ ϕ : flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb)
- ✓ Ω : vitesse de rotation (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$E = K \cdot \Omega \cdot \phi \quad [\text{V}] \dots\dots\dots (I.1)$$

I.2.2. Couple électromagnétique

Pour une spire : les deux brins d'une spire placés dans le champ magnétique B, subissent des forces de Laplace F_1 et F_2 formant un couple de force ($F_1 = - F_2 = I \cdot l \wedge B$?). Pour une spire :

$$\Gamma = 2rF = 2rlBI = SBI = \Phi I$$



Donc le couple électromagnétique total développé est :

$$C_{em} = K \cdot \Phi \cdot I \quad [\text{N.m}] \dots\dots\dots (\text{I.2})$$

I.2.3. Puissance électromagnétique

Si l'induit présente une f.é.m. E et s'il est parcouru par le courant I , il reçoit une puissance électromagnétique ($P_{em} = E \cdot I$)

D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique. [2].

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega = E \cdot I \quad [\text{Watts}] \dots\dots\dots (\text{I.3})$$

I.2. 4. Différentes pertes

Les différentes pertes sont groupées dans le tableau ci dessous :

Pertes	Pertes magnétiques P_{fer}	Pertes joules P_J	Pertes mécaniques $P_{méca}$
Causes	Elles sont dues à l'hystérésis (champ rémanent) et aux courants de Foucault (courant induit dans le fer) et dépendent de B et de Ω .	Pertes dans l'induit et l'inducteur dues aux résistances des bobinages.	Elles sont dues aux Frottements des diverses pièces en mouvement.
Parades	Utilisation de matériaux à cycles étroits, comme le fer au silicium et le feuilletage de l'induit.	Il faut surtout éviter l'échauffement par ventilation.	Utilisation de roulements et de lubrifiants.

Tableau I.1 : Pertes du MCC.

Remarque : La somme des pertes mécaniques et fer est appelée perles constantes P_c , Comme elles dépendent de la vitesse de rotation et de l'état magnétique de la machine, on peut déterminer T_p appelé couple de pertes avec :

$$C_p = P_c / \Omega \quad [\text{N.m}] \dots\dots\dots (\text{I.4})$$

La figure suivante résume les différents types de puissance et l'emplacement de leur production.

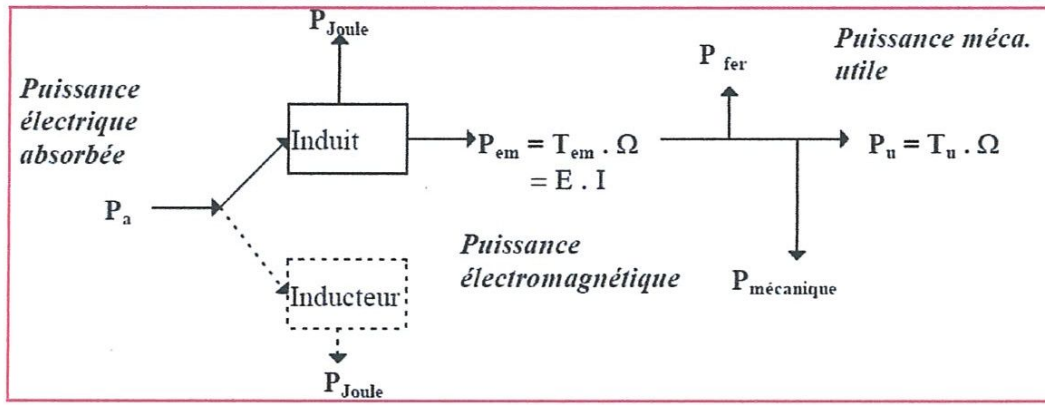


Fig. (I.13) : Diagramme de puissance.

I.2.5. Rendement

Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu varie entre 80 et 95 %.

I.3. MODES D'EXCITATION

On peut donner un modèle électrique équivalent de l'induit (fig. I.14), **E** représente la force électromotrice; **L** représente la self équivalente de l'enroulement d'induit; **R** représente la résistance équivalente de l'induit (résistance des fils du bobinage et résistance de contact au niveau des balais).

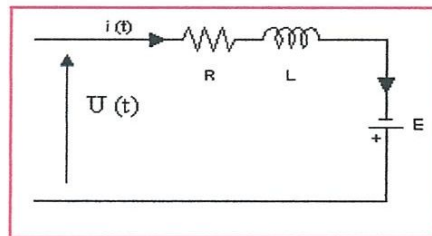


Fig. (I.14) : Modèle électrique équivalent du rotor du MCC.

Le schéma électrique équivalent de l'inducteur est donné sur la figure suivante :

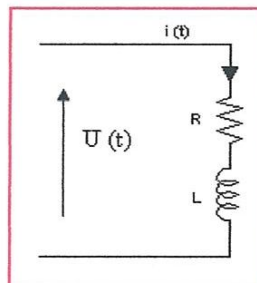


Fig. (I.15) : Modèle électrique équivalent du stator du MCC.

D'où L représente la self équivalente de l'enroulement inducteur; R représente la résistance équivalente de l'inducteur (résistance des fils du bobinage).

I.3.1. Excitation série

L'inducteur de ce moteur est en série avec l'induit : le courant d'induit est également le courant d'excitation comme le montre la figure suivante :

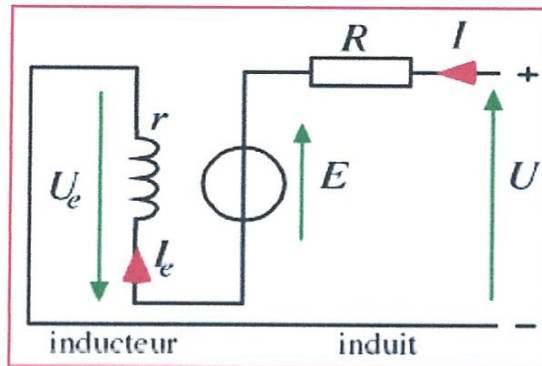


Fig. (I.16) : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation série.

Le bobinage inducteur comporte dans ce cas peu de spires, mais il est réalisé avec du fil de gros diamètre. Cette conception lui procure une très bonne robustesse face aux vibrations et lui a valu un succès inégalé en traction ferroviaire.

⚡ Equations caractérisant le MCC à excitation série

La loi d'Ohm appliquée à la maille définie par l'induit et l'inducteur permet d'écrire :

$E = K. \Phi. \Omega$	[V]	(I.5)
$U = E + (R + r). I$	[V].....	(I.6)
$C_e = K. \Phi. I$	[N. m]	(I.7)

Où « r » est la résistance de l'inducteur, et « R » la résistance de l'induit.

⚡ Caractéristiques

- ✓ Démarrage fréquent avec couple élevé; couple diminuant avec la vitesse.
- ✓ Ne jamais faire fonctionner le moteur série à vide car si « $I = 0 [A]$ », alors « Ω » tend vers l'infini.

- ✓ Toujours mettre le moteur en charge mécanique car si le couple est faible, alors Ω tend vers l'infini.

✚ **Domaines d'emploi**

- ✓ Engins de levage (grues, palans, ponts roulants) ventilateurs, pompes, centrifuges; traction.

I.3.2. Excitation séparée

Dans un moteur à excitation séparée, l'inducteur et l'induit sont alimentés par deux sources distinctes. Les cas fréquents où la tension d'excitation est constante sont équivalents à ceux des moteurs à aimants permanents, dont le flux est constant.

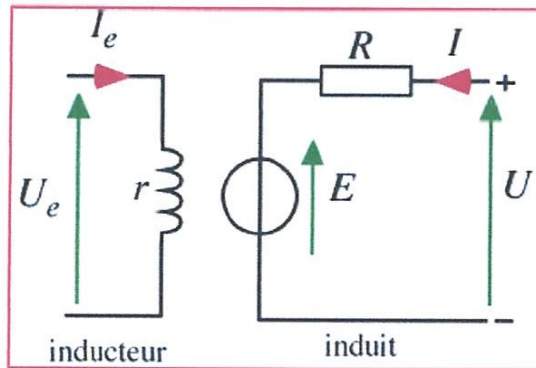


Fig. (I.17) : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation séparée.

✚ **Equations caractérisant le MCC à excitation séparée**

La loi d'Ohm appliquée à la maille définie par l'induit et l'inducteur permet d'écrire :

$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega$	[V].....	(I.8)
$U = E + R \cdot I$	[V].....	(I.9)
$C_e = K \cdot \Phi \cdot I$	[N. m].....	(I.10)

✚ **Caractéristiques**

- ✓ L'inducteur est alimenté par une source indépendante.
- ✓ Grande souplesse de commande.
- ✓ Large gamme de vitesse.

- ✓ Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement.
- ✓ Fourni un couple important à faible vitesse.

✚ **Domaines d'emploi**

- ✓ Machines outils : moteur de (broche, d'axe). Machines spéciales.

I.3.3. Excitation shunt

Dans un moteur à excitation shunt, l'inducteur et l'induit sont connectés en parallèle et alimentés par une seule source de tension continue. Le modèle câblé de ce moteur est présenté sur la figure suivante :

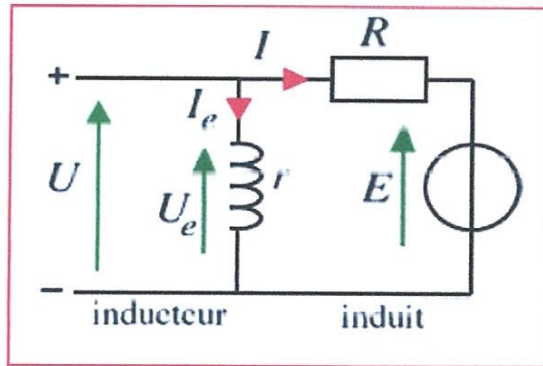


Fig. (I.18) : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation shunte.

✚ **Equations caractérisant le MCC à excitation shunt**

La loi d'Ohm appliquée à la maille définie par l'induit et l'inducteur permet d'écrire :

$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega$	[V].....	(I.11)
$\begin{cases} U=U_e \\ U = E + R \cdot I \\ U_e = R_e \cdot I_e \end{cases}$	[V].....	
$C_e = K \cdot \Phi \cdot (I+I_e)$	[N.m].....	(I.13)

Remarque : On remarque qu'il n'y a aucune différence entre le mode d'excitation shunte et l'excitation séparée, en vue des équations mathématiques malgré la grande différence au niveau du câblage (raccordement physique).

⚡ Caractéristiques

- ✓ couple constant quelque soit la charge.

⚡ Domaines d'emploi

- ✓ Machines outils, appareil de levage (ascenseur).

I.3.4. Excitation composée

Dans le mode composé, l'inducteur est divisé en deux parties, l'une connectée en série et l'autre en parallèle.

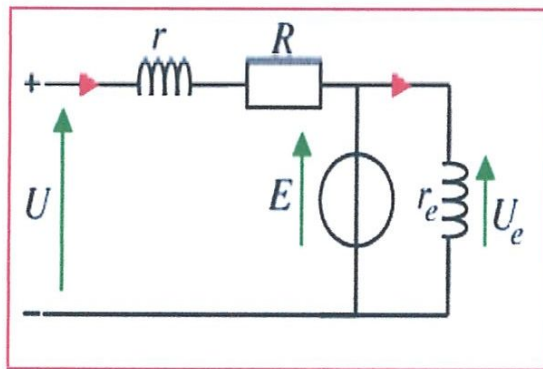


Fig. (I.19) : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation composée.

⚡ Caractéristiques

- ✓ Le MCC à excitation composée réunit les avantages du série et du shunt tout en éliminant le phénomène d'emballement du série.
- ✓ Entraînements de grande inertie.
- ✓ Couple très variable avec la vitesse.

⚡ Domaines d'emploi

- ✓ Petit moteur à démarrage direct, ventilateur, pompes, machines de laminoirs, volants d'inertie.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie sur la machine à courant continu (moteur), sa constitution physique élémentaire, son fonctionnement et ses différents modes d'excitations.

La machine à courant continu a été durant de nombreuses années l'actionneur utilisé principalement dans les applications à vitesse variable. En effet, comme cela a été mis en évidence, le contrôle de la vitesse de rotation peut être aisément réalisé par action sur la f.é.m d'induit de la machine (en grandeur « permanente », donc moyenne). Sur un autre plan, on peut agir sur le flux inducteur qui est réglé par le courant dans l'inducteur (appelé aussi courant d'excitation).

Chapitre II

*Variation de la vitesse d'une machine à
courant continu*

Introduction

Nous avons montré, qu'en raison même de l'allure de caractéristique d'un (moteur allure shunt ou série), celui-ci était en mesure d'adapter sa vitesse à l'effort demandé en dehors de cette adaptation automatique, qui est bonne ou mauvaise suivant les applications, on peut souhaiter modifier volontairement la vitesse du moteur. C'est ainsi que la vitesse de la broche d'un tour doit être fixée en fonction du diamètre de la pièce que l'on veut usiner.

Enfin dans d'autres cas comme les laminoirs, c'est l'inversion rapide du sens de marche qui est prépondérante.

C'est pour avoir les éléments de choix d'un moteur pour une application donnée que l'on étudie ses performances dans les domaines suivant : démarrage, variation de la vitesse, freinage et inversion du sens de marche.

II.1. Démarrage (Moteur shunt). [5]

II.1.1. problème du démarrage

Pour assuré le démarrage d'un moteur, on doit se poser les deux questions suivantes :

- ☞ le couple moteur est-il suffisant pour vaincre le couple résistant ?
- ☞ l'intensité appelée au moment du démarrage n'est-elle pas trop élevée ?

Le problème du couple suffisant au démarrage est toujours résolu avec le moteur shunt, aussi est-on simplement amené à limiter la valeur du courant appelé.

Si l'on ne prend pas de précaution spéciale en appliquant la tension nominale au moteur au repos, l'appel de courant I_d est forcément très élevé, car le moteur étant arrêté, sa f.c.é.m. est nulle.

Si l'on admet que la chute de tension en charge est de deux pour cent, on a :

$$R_a I_n \cong \frac{U}{50} \quad \text{Et} \quad R_a I_0 = U \quad , \quad \text{soit} : I_0 / I_n \cong 50$$

Pour la limiter, on pourrait réduire la tension d'alimentation, cette solution ; qui est utilisée dans le groupe léonard, n'est pas possible si la tension d'alimentation est fixe, aussi utilisait-on un rhéostat de démarrage.

II.2. Variation de la vitesse. [5]

L'expression générale de la vitesse, on a :

$$N = \frac{U - RI}{\lambda \phi} \quad \text{Avec} : R = R_a + R_h \quad (\text{II-1})$$

Dans ces condition, on constate qu'il y a trois paramètre (R_h, ϕ, U) que l'on peut régler, ce qui donne les trois possibilité suivant :

II.2.1. Réglage rhéostatique.

Comme le flux ϕ est constant, car on a toujours intérêt à faire fonctionner le moteur avec le flux maximal qu'il peut délivrer, on a :

$$N = \frac{U - RI}{\lambda \phi} = \lambda' (U - RI) \quad C = KI\phi = K'I \quad (\text{II-2})$$

Ainsi le faisceau de caractéristique $N(I)$ représente-t-il à une échelle convenable le faisceau $N(C)$. Il est facile de l'obtenir à niveau figure (II-1) en représentant les intersections avec les axes de coordonnées, soit :

Pour $C=0, I=0, N=\lambda'U$, pour $N=0, I=U/R, C=K'U/R$

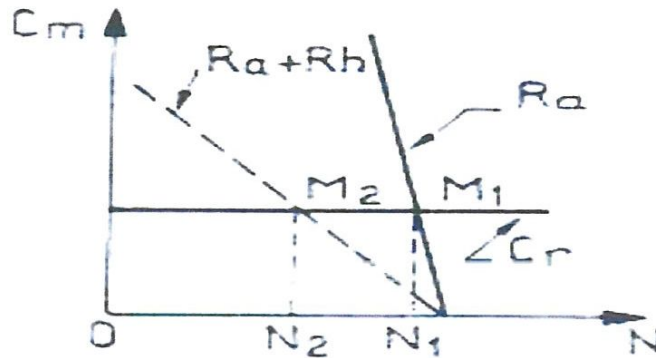


Fig. (II-1): réglage par rhéostatique

Ce type de réglage a l'avantage d'être simple à réaliser, mais il présente de graves inconvénients aussi bien sur le plan technique que sur le plan économique. En effet, du point de vue technique, on constate que les caractéristiques sont de plus en plus tombantes. On traduit ce résultat en disant que la caractéristique qui était shunt, prend alors une allure série. Un bon réglage de vitesse doit provoquer le déplacement des caractéristiques parallèlement à la caractéristique d'origine. Ce réglage est également mauvais sur le plan économique car la consommation d'énergie dans le rhéostat est d'autant plus importante que la chute de vitesse réclamée est plus élevée.

En conséquence, ce réglage n'est pas utilisé dans la pratique pour le fonctionnement en régime permanent, toutefois il demeure intéressant pour les régimes transitoires comme le démarrage et freinage.

II.2.2. Réglage par le flux.

Que le démarrage d'un moteur shunt doit toujours être assuré avec le flux maximale (ou flux nominal), la vitesse nominale du moteur étant atteint quand la tension normale est appliquée aux bornes de l'induit. Dans cette condition, on n'a pas la possibilité d'augmenter le flux, on peut seulement le réduire en diminuant le courant j d'excitation par l'intermédiaire d'un rhéostat de champ.

On constate que la diminution du flux a pour effet d'augmenter la vitesse figure (II-2).

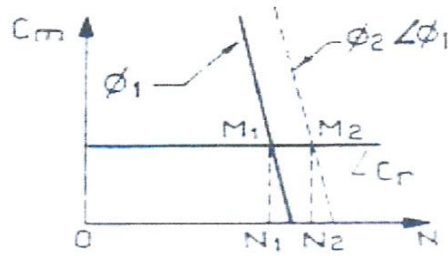


Fig. (II-2) : réglage par flux

C'est pourquoi le réglage du flux aura toujours lieu avec le rhéostat d'induit en court-circuit. Comme la chute de tension dans l'induit est faible, soit quelques pour cent de la tension d'induit, on a :

$$N \cong U \lambda \phi$$

Ce mode de réglage est donc très satisfaisant du point de vue technique. Il est également bon du point de vue économique car la puissance dissipée dans l'inducteur étant très faible par rapport à la puissance absorbée.

Il y a lieu de noter les deux inconvénients suivant :

- on peut qu'augmenter la vitesse du moteur par rapport à sa vitesse nominale.
- si le couple résistant est constant ($C_m = KI \phi = cte$), l'intensité augmentera quand on diminuera le flux et le moteur risquera de chauffer.

II.2.3. Réglage de tension

On règle le flux à sa valeur maximale en mettant en court-circuit le rhéostat de champ afin que le courant absorbé par l'induit soit minimal. La caractéristique à tension nominale représente en trait gras figure (II-3).

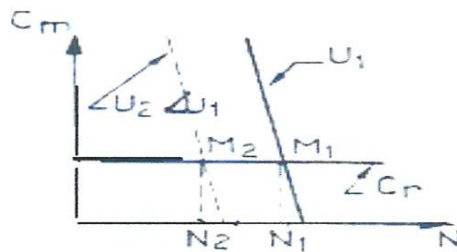


Fig. (II-3) : réglage par tension

Ce mode réglage qui permet de réduire à volonté la vitesse d'un groupe, est excelle d'une part du 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 élevée à toute les vitesses.

II.3. Freinage. [5]

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 (patins...) s'usent rapidement.

La façon dont on utilise l'énergie électrique de freinage, on distingue les trois types de freinage suivants :

II.3.1. Freinage rhéostatique

L'énergie est alors dissipée dans un rhéostat figure (II-4)

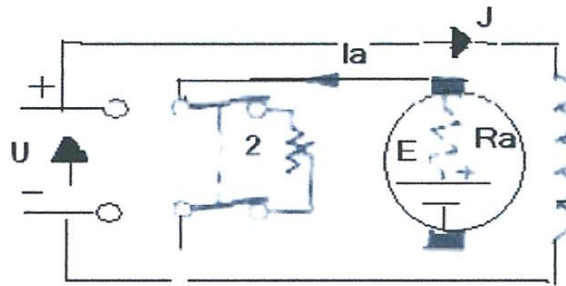


Fig. (II-4) : freinage rhéostatique

L'inducteur restant branché sur la ligne, on débranche l'induit et on le fait débiter dans un rhéostat en mettant dans la position 2. le courant débiter est donné par la loi d'ohm, $I = \frac{E}{R_a + R_h}$ en désignant par R_h la résistance de rhéostat d'absorption. Le couple de freinage est proportionnel, à l'intensité ($C = K I_a \Phi = K' I_a$) puisque le flux est constant, mais la f.é.m. de la dynamo diminue au fur et à mesure que la vitesse décroît. Aussi pour maintenir un couple de freinage suffisant, doit on diminuer progressivement la résistance du rhéostat.

II.3.2. Freinage à contre-courant

Le freinage rhéostatique a l'inconvénient de ne pas être assez efficace pour les applications (engins de levage...) qui nécessitent parfois un arrêt brutal du déplacement de la charge. Dans ce cas, on lui préfère le freinage à contre-courant figure (II-5):

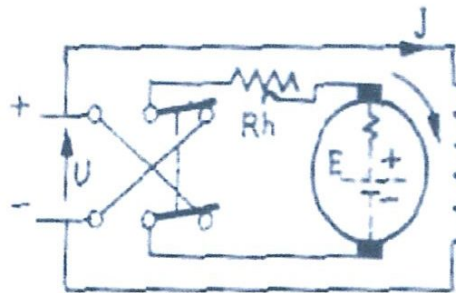


Fig. (II-5) : Freinage par contre-courant

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. Comme la f.é.m. de la génératrice

ajoute son effet à la tension du réseau, l'énergie globale fournie étant dissipée dans le rhéostat, on a :

$$I = \frac{U+E}{R_a+R_h}, \text{ avec : } C = K I \Phi \quad (\text{II.3})$$

Doit s'assurer que l'alimentation est coupée dès que le moteur s'arrête car, sans cette précaution, celle-ci se remettrait en marche dans le sens inverse.

II.3.3. Freinage par récupération

Ce procédé, qui est très séduisant, n'est pas simple à réaliser. En effet, si l'on considéré l'équivalent d'une réceptrice figure (II-6).

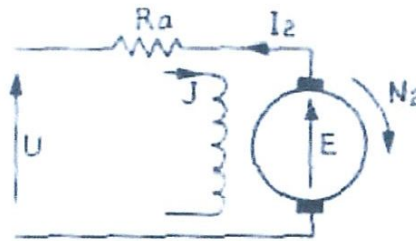


Fig. (II-6) : freinage par récupération

Le courant dans la machine change de sens, ce qui a pour effet de change le sens du couple électromagnétique et le sens de rotation n'a pas changé. Le couple ainsi exercé a pour effet de la freiner. Pour obtenir ce résultat on a les deux possibilités suivantes :

-fonctionnement à tension constante.

La condition $E > U$ ne peut être réalisée que si la vitesse du groupe augmente légèrement (fig.). Ce procédé appelé freinage en survitesses est utilisé en traction électrique de montage dans les descentes.

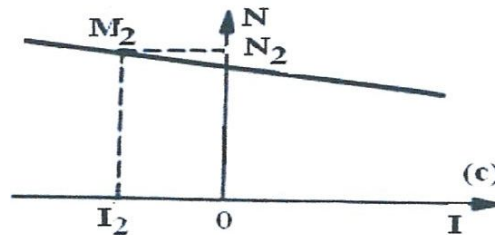


Fig. (II-7) : freinage en survitesses

-fonctionnement à tension réglable.

En effet, en réduisant cette tension au fur et à mesure que le groupe ralentit, on pourra maintenir la condition $U < E$ même aux plus basses vitesses.

II.4. Inversion du la sens du marche. [5]

Pour inverser le sens de rotation, il faut inverser le courant soit dans l'inducteur, soit dans l'induit c'est-à-dire modifier les connexions entre l'inducteur et l'induit. la meilleure solution consiste à utiliser un groupe convertisseur mécanique ou électronique.

II.5. Choix du moteur à courant continu. [6]**II.5.1. Critères indépendants du convertisseur.**

Les caractéristiques du moteur doivent convenir à celle de la charge c'est -à-dire que les points de fonctionnement doivent être accessibles et stables. Il faut tenir compte du couple à transmettre et du couple d'accélération (dépend du moment d'inertie total ramené au rotor).

- Le courant nominal est défini par l'échauffement du moteur.
- Le courant de surcharge est défini par la capacité de commutation.
- La tension de base dépend de la puissance mais se trouve limitée technologiquement par l'isolement et la tenue de collecteur.
- La vitesse de sortie doit être adaptée à la charge.

II.5.2. Critères dépendants du convertisseur.

Les ondes de courant et de tension délivrées par le convertisseur ne sont pas parfaitement lisses :

Il existe des harmoniques qui augmentent le courant efficace à puissance nominale constante. Il faut surdimensionner le moteur.

La machine doit supporter des gradients d'intensité (di/dt) surtout avec les dispositifs de régulation qui réagissent rapidement pour améliorer les performances.

II.6. Les modes des convertisseurs

Il y'a deux types des convertisseurs pour assurer la réversibilité de la machine à courant continu :

- Convertisseur rotatif (Convertisseur mécanique)
- Convertisseur statique (Convertisseur électronique)

La commande idéal d'un moteur doit pouvoir s'effectuer dans les quatre quadrants, comme nous allons expliquer avec le convertisseur mécanique que l'on appelle encore groupe " *Ward Leonard* " [7], et le convertisseur électronique.

II.6.1. Convertisseur rotatif (électrique)

Pour un moteur à courant continu à excitation séparée, il est important de disposer d'une tension d'alimentation réglable. Cette tension réglable peut être réalisée par le convertisseur électrique que l'on appelle encore groupe " *Ward Leonard* " (groupe générateur-moteur).

Cet équipement qui fonctionne habituellement avec un réseau triphasé comporte trois machines principales sensiblement de même puissance [8].

Un moteur asynchrone " MA " pour assurer la transformation de l'énergie électrique alternatif en énergie mécanique continu et une génératrice à courant continu " G " pour transformer l'énergie mécanique, en énergie électrique ; les deux machines étant calées sur le même arbre d'une part. D'autre part nous avons un moteur " M " à courant continu transformant l'énergie électrique en énergie mécanique, est alimenté avec une tension continue délivrée par la génératrice.

Une petite génératrice à courant continu calée sur l'arbre du groupe convertisseur ; Celle-ci fournit les courants d'excitation au moteur et à la génératrice [7] (voir **Figure (II-8)**).

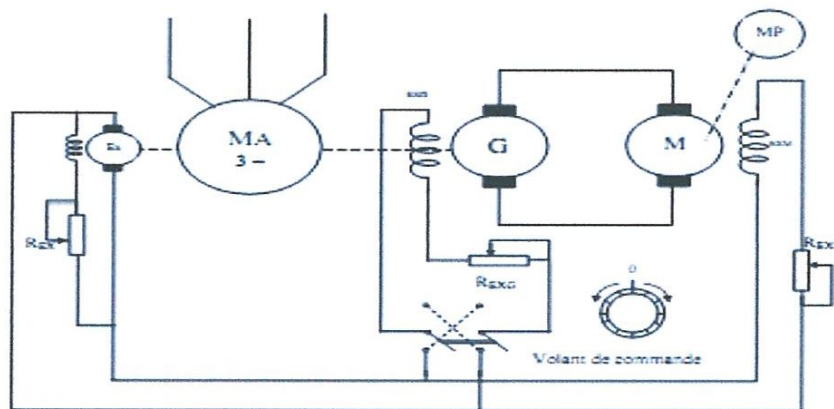


Fig.

(II-8): schéma de principe de groupe *WARD LEANARD*

I.2.2 - Le Fonctionnement

On suppose que le moteur entraîne une machine dont le couple résistant est constant.

Si E' et E désignent respectivement la f.é.m. de la génératrice et la f.c.é.m. du moteur, quand le groupe fonctionne, le moteur à courant continu est traversé par un courant I_d , soit :

$$E' = \frac{p}{a} N n. \phi = k \phi \quad \text{Puisque } N_g = \text{cte (génératrice)}$$

Et $E = \frac{p}{a} N n. \phi = k' N \quad \text{puisque } \phi m = \text{cte (moteur)}$

$$I_d = \frac{E' - E}{R_a' + R_a} \tag{II-4}$$

Pour simplifier notre étude on néglige la chute de tension dans l'induit de la génératrice. Dans cette condition, la tension U_d aux bornes du moteur à courant continu a pour expression [8]:

$$U_d = E' - R_a' I_d = E' = E + R_a I_d \quad (\text{II-5})$$

Quand le repère du volant est au zéro, le courant d'excitation de la génératrice est nul, si l'on tourne le volant vers la droite (on s'arrange habituellement pour que le sens de rotation du volant et du moteur soient les mêmes). Le courant d'excitation de la génératrice augmente ; la tension augmente dans celle-ci ; la tension d'induit U_d pour le moteur à courant continu augmente et le moteur tourne plus vite. Le point de fonctionnement M_n correspond habituellement au fonctionnement nominal du moteur (**Figure (II-9)**). Ces différents régimes ont lieu dans le premier quadrant qui correspond au fonctionnement en moteur.

Pour arrêter le moteur, il suffit de réduire le courant d'excitation en ramenant progressivement le volant à la position zéro. En effet, quand le courant d'excitation passe brusquement d'une valeur supérieure (par exemple $j_0 = 10$ A) à une valeur inférieure (par exemple $j_1 = 7$ A), la vitesse du moteur ne change pas instantanément en raison de l'inertie des masses entraînées, aussi le fonctionnement passe-t-il instantanément de M_n à M_n' . Dans ces conditions le courant I_d change de sens, alors que la tension U_d n'a pas changé. La puissance $U_d I_d$ délivrée au moteur change le signe de telle sorte que la génératrice à courant continu se comporte comme un moteur. Elle entraîne à son tour la machine asynchrone qui se transforme en génératrice renvoyant dans le réseau de l'énergie triphasée. Ces régimes qui a lieu dans le deuxième quadrant correspondent au fonctionnement en générateur (freinage).

On peut vouloir faire tourner le moteur avec sa charge dans le sens inverse (on tourne le volant vers le sens inverse), ce fonctionnement qui a lieu dans le troisième quadrant correspond au fonctionnement en moteur dans le sens inverse.

Enfin, quand on souhaite obtenir l'arrêt du moteur dans le sens inverse, on est amené à fonctionner dans le quatrième quadrant ce qui correspond au fonctionnement en générateur (freinage) [8]. (**Figure (II-10)**).

Des que le courant d'excitation de la génératrice atteint sa valeur de saturation, la vitesse n'augmente plus (on passe alors au fonctionnement en moteur alimenté sous tension constante à réglage de la vitesse par le courant d'excitation j) [9], il est alors possible de réduire le courant d'excitation du moteur à l'aide d'une résistance additionnelle. Cet affaiblissement du champ provoque une nouvelle augmentation de la vitesse du moteur. (**Figure (II-9)**)

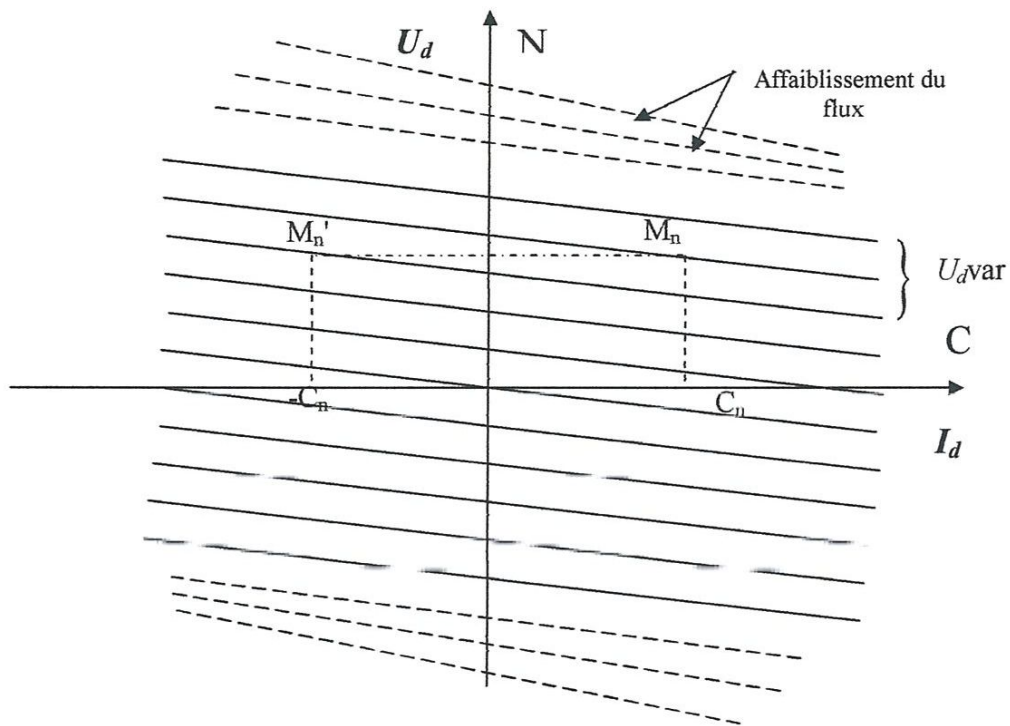


Figure (I-2) : Les caractéristiques mécaniques

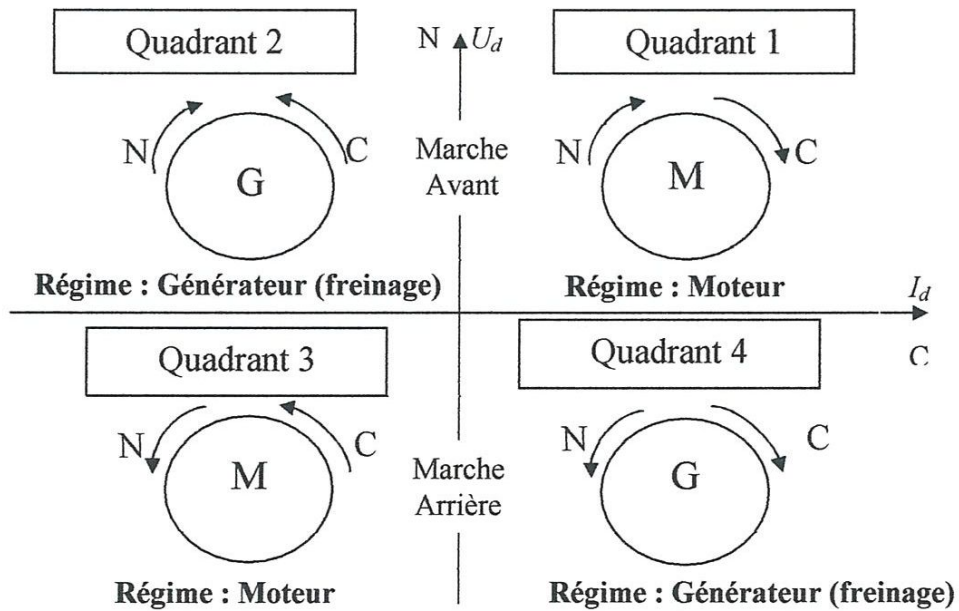


Figure (I-3) : Fonctionnement dans les quatre quadrants

II.6.1.2. Les avantages et les inconvénients du système rotatif

II.6.1.2.1 .Les avantages

- Absence de la pause de temps dans la courbe du courant lors du passage du régime moteur en régime de freinage.
- La caractéristique électromécanique du moteur linéaire à cause de l'absence de discontinuité de courant.
- Simplicité et souplesse de réglage dans de larges limites.
- Grande capacité de surcharge.

II.6.1.2.2. Les inconvénients

- Un faible rendement à cause des pertes d'énergie.
- Le Processus transitoire est très long à cause de la constante de temps du circuit d'excitation.
- L'encombrement et le bruit dûs aux dimensions des machines qui le constituent.
- La nécessité d'une grande maintenance.
- Le prix de l'équipement est très élevé.

II.6.2. CONVERTISSEUR STATIQUE

* Un moyen très moderne qui s'est largement développé. Il est basé sur le phénomène électronique et permet d'employer l'énergie fournie par un réseau de courant alternatif [10]. Ce convertisseur utilise des dispositifs totalement statiques (semi-conducteur (diode, thyristor)) fournissent pratiquement une tension continue.

* Les convertisseurs statiques réversibles, sont utilisés pour la commande des moteurs à courant continu par l'induit devant opérer des inversions de marches rapides ou des freinages contrôlés, dans les deux cas il y a inversion du courant dans l'induit. On peut aussi utiliser des réversibles sur l'inducteur, cette solution n'est utilisable que lorsqu'on accepte un temps mort d'inversion du couple à cause de la constante de temps de l'inducteur.

II.6.2.1. Différents montages d'une variation statique réversible

Deux solutions sont utilisées pour faire une variation statique réversible :

- Emploi d'un montage à inversion du courant d'induit.
- Emploi d'un montage à inversion du courant d'inducteur.

II.6.2.1.1. Montage à inversion du courant d'induit

Le changement de la polarité aux bornes de l'induit peut être obtenu par :

Un pont complètement commandé avec un pont à contact.

○ Un convertisseur de courant bidirectionnel réalisé à base de deux ponts Complètement commandé.

II.6.2.1.1.a. Un pont complètement commandé avec un pont à contact

L'induit est alimenté par un seul montage redresseur tout thyristors (pont à quatre thyristors en monophasé ; pont à six thyristors en triphasé). L'inversion du couple s'obtient par inversion du courant I_d à l'aide d'un contacteur bipolaire. (Figure (II-11))

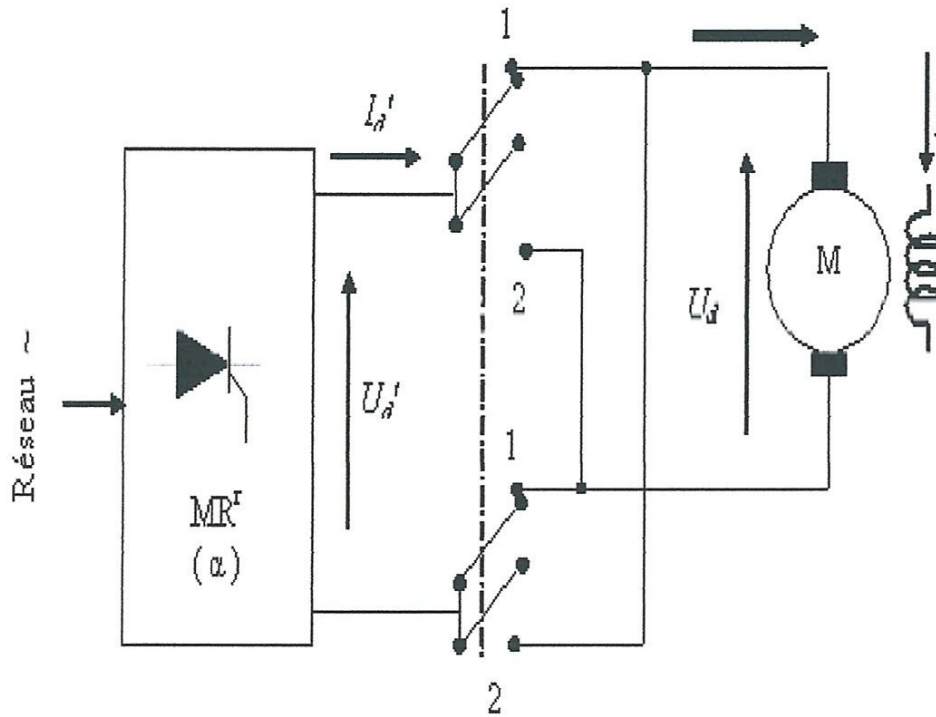


Fig. (II-11) : Pont complètement commandé avec un pont à contact

La position (1) du contacteur correspond à un courant I_d égale à I_d' donc positif et au

Fonctionnement dans les quadrants 1 et 4. La position (2) donne I_d égale à $(-I_d')$ et assure la marche dans les quadrants 2 et 3.

L'inversion du contacteur ne doit s'opérer qu'à courant nul. Le temps mort d'inversion du couple correspond au temps de détection du courant nul augmente le temps de réponse du système mécanique ; il varie entre 0.1et 0.3 s. [5]

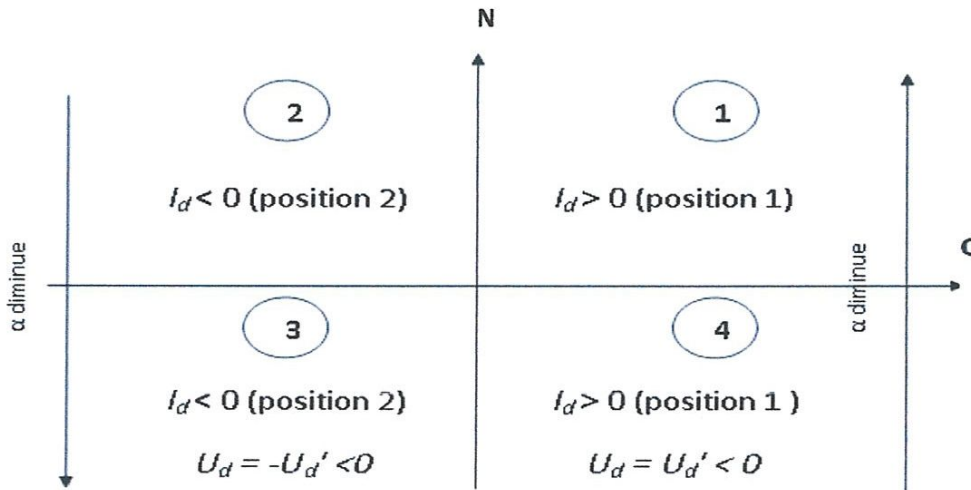


Fig. (II-12) : Fonctionnement dans les quatre quadrants d'un convertisseur de courant bidirectionnel

II.6.2.1.1.b. Un convertisseur de courant bidirectionnel réalisé à base de deux ponts complètement commandés

Pour assurer des inversions très rapides (5 à 20 ms). On doit utiliser deux redresseurs principaux tous thyristors. Ils sont montés en tête bêche aux bornes de l'induit: [11]

Les tensions et les courants peuvent s'inverser avec les convertisseurs indiqués sur la figure (II-13).

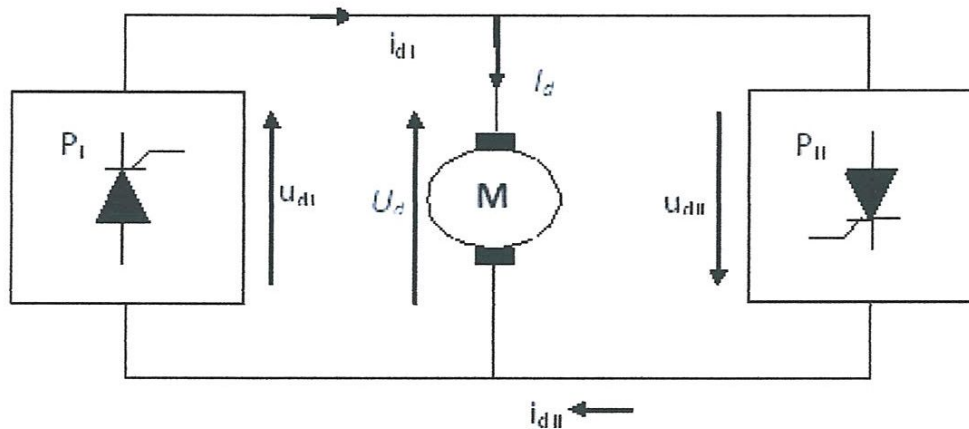


Fig. (II-13) : Convertisseur de courant bidirectionnel à base de deux ponts complètement commandés

- Dans les quadrants 1 et 3, le groupe qui débite fonctionne en redresseur proprement dit ($U_d I_d > 0$).
- Dans les quadrants 2 et 4, le redresseur qui débite fonctionne en onduleur ($U_d I_d < 0$).

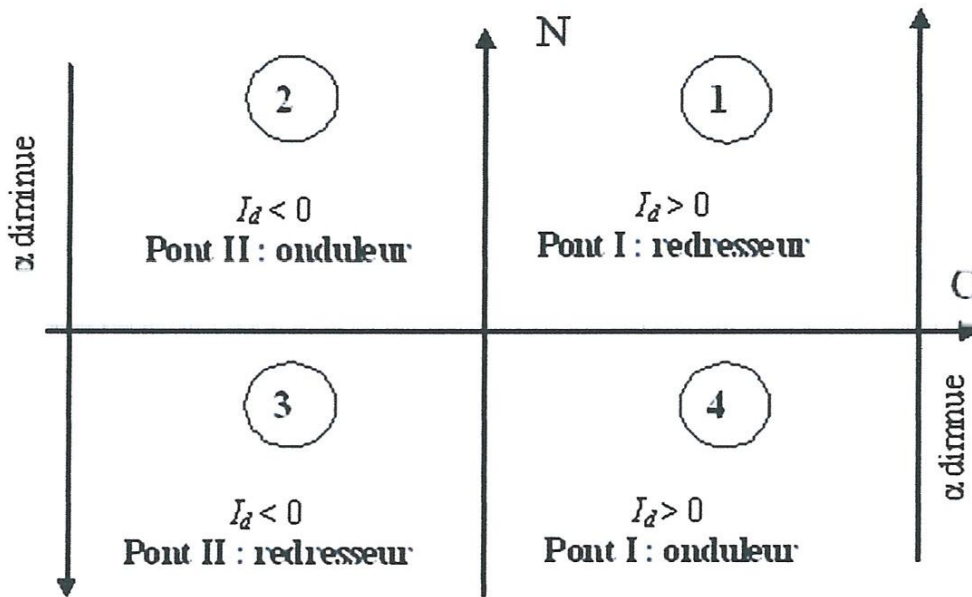


Fig. (II-14) : Fonctionnement dans les quatre quadrants d'un convertisseur de courant bidirectionnel

II.6.2.1.2. Montages à inversion du courant inducteur

L'induit est toujours alimenté par le même montage tout thyristors ; l'inversion du couple est réalisée par l'inversion du courant inducteur (j) :

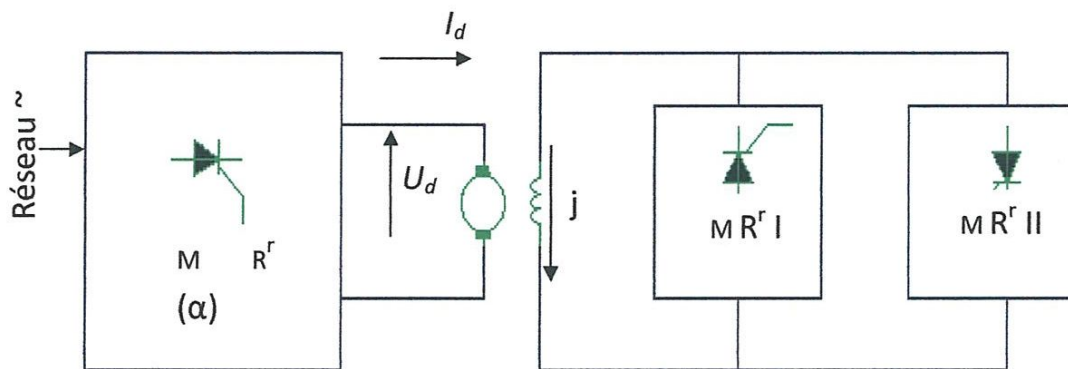


Fig. (II-15) : Montage à inversion du courant inducteur

Avec un sens du flux, on assure le fonctionnement dans les quadrants 1 et 4, avec l'autre dans les quadrants 2 et 3 (**Figure (II-16)**). L'inversion du courant d'excitation j doit être opérée à courant I_d dans l'induit nul, Elle est d'ordinaire réalisée par deux petits montages redresseurs montés en tête bêche alimentant l'inducteur dans un sens ou dans l'autre.

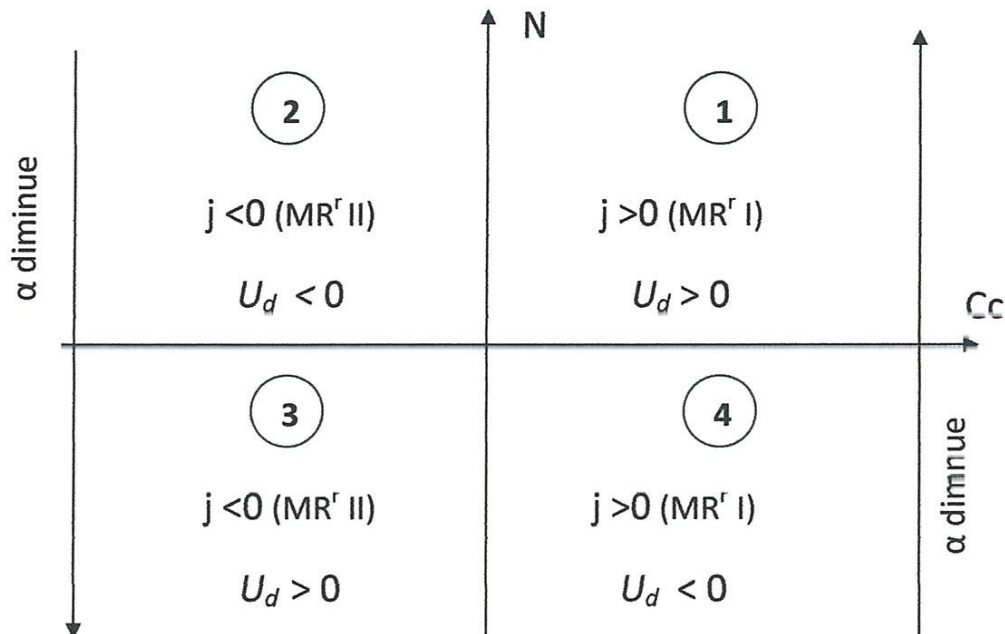


Fig. (II-16): Fonctionnement dans les quatre quadrants d'une inversion de courant inducteur

Cette solution simple et économique n'est utilisable que lorsqu'on accepte un temps mort d'inversion du couple assez élevé (0.5 seconde à quelques secondes), à cause de la constante de temps de l'inducteur, l'inversion de j ne peut être très rapide [11].

Ce système est utilisé dans les mécanismes n'exigeant pas une rapidité tel que les laminoirs.

II.6.2.2. Les avantages et les inconvénients du système statique :

II.6.2.2.1. Les avantage :

- ✓ Une réduction dans les pertes (rendement élevé).
- ✓ La rapidité de la conversion est très élevée.
- ✓ Réduction des frais des fondations dûs à l'absence des machines tournantes et réduction du poids totale, et la surface nécessaire pour l'installation.
- ✓ Réduction des frais d'entretien.
- ✓ Une haute fiabilité, une fine sensibilité et un service simple.
- ✓ Réalisation simple et facile.
- ✓ Un prix de revient bas.

II.6.2.2.2. Les inconvénients :

- ✓ la présence du temps de pause dans la courbe (temps mort).
- ✓ échauffement des thyristors.
- ✓ la rupture de la caractéristique électromécanique du moteur lorsque $I_d=0$.

CONCLUSION

D'après l'étude présentée dans ce chapitre, on constate que le convertisseur statique - moteur présente par rapport au groupe *Ward léonard* un avantage dans la rentabilité et dans les gains économiques ce ne veut pas dire que le groupe *Ward léonard* est abandonné mais tout simplement qu'il présente sur le bilan les meilleures performances qu'il faudra s'efforcer d'atteindre par des procédés électroniques.

Chapitre III

*Les convertisseurs utilisés pour la
commande des machines à courant continu*

Introduction

Il n'existe que deux types d'alimentation statique qui fournissent des tensions continues variables. D'une part les redresseurs qui convertissent l'énergie électrique délivrée par une source de tensions sinusoïdales. Ce sont des systèmes à thyristors à commutation naturelle assistée par la source, constituée le plus souvent par le réseau. D'autre part les hacheurs qui convertissent l'énergie électrique délivrée par une source continue. Ce sont les convertisseurs à commutation forcée à thyristors pour les fortes puissances ou à transistors pour les faibles et moyennes puissances. La source est constituée le plus souvent d'une batterie pour les systèmes autonomes ou du réseau redressé par un redresseur à diodes.

III.1. Les redresseurs.

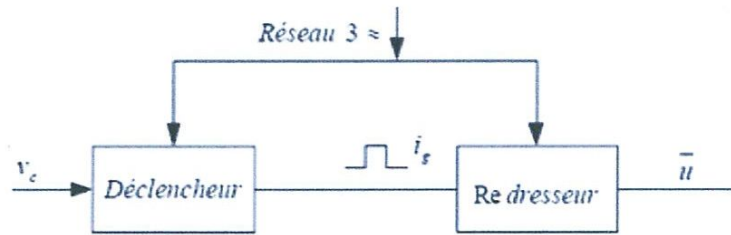
III.1.1. Modèle statique d'un redresseur en conduction continu.

La structure de principe d'un redresseur est représentée sur la figure (III.1). On reconnaît en le bloc de puissance constituant le secteur fournissant la tension continue moyenne en conduction continue.

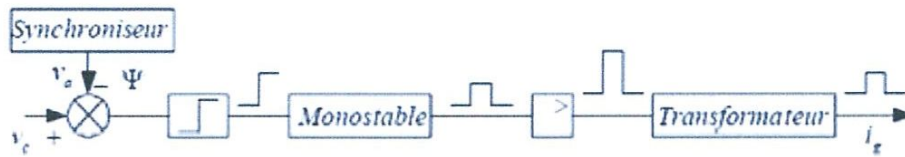
$$\bar{u} = u_0 \cos \psi \quad (\text{III-1})$$

Le bloc de commande est un générateur d'impulsions, de commande des thyristors, synchronisé sur le réseau à partir d'une tension continue de commande v_c issue du régulateur précédent.

La figure (III-1-b) donne le schéma synoptique détaillé du déclencheur des thyristors d'une phase d'un système triphasé qui compare la tension de commande v_c à celle du déclencheur v_a synchronisé sur cette phase avec un déphasage symétrique de 30° par rapport à la phase correspondante. Cet angle correspond à l'angle de commutation naturelle $\Psi - \theta$ à u maximale.[6]



Fig(III - 1-a)



Fig(III - 1-b)

Fig. (III-1) : Schéma de principe d'un redresseur et de sa commande.

Un comparateur à seuil fournit une impulsion de durée fixée par un monostable et d'amplitude fixée par un amplificateur. Un transformateur d'impulsion assure l'isolement galvanique entre la commande bas niveau et la puissance.[6]

Le comparateur détecte à l'instant $t_1 = \frac{\psi}{\omega}$ où les tensions v_a et v_c sont égales pour générer

l'impulsion. Le déclencheur est choisi de façon à fournir :

Soit une tension en dents de scie :

$$v_a = A(\delta - \omega t) \quad (III-2)$$

Avec $\delta = \frac{\pi}{2}$ pour une tension symétrique et un système réversible, on dit alors que la commande est linéaire.

Soit une tension sinusoïdale.

$$v_a = A' \cos \omega t \quad (III-3)$$

On dit alors que l'on a une commande cosinus. La figure (III-2) représente les deux cas :

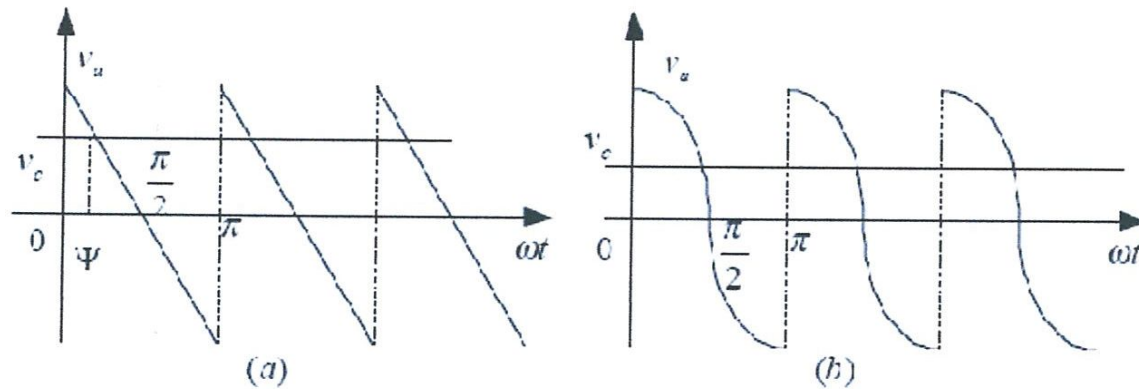


Fig. (III-2) : Commande linéaire (a) et cosinus (b) d'un redresseur

En régime permanent et conduction continue la tension moyenne de sortie du redresseur est :

$$\bar{u} = u_0 \cos \psi \quad (III-4)$$

Cette tension s'exprime en fonction de v_c :

- Pour une commande linéaire par :

$$\bar{u} = u_0 \cos \left(\frac{V_c}{A} - \delta \right) \quad (III-5)$$

La fonction de transfert du redresseur correspond à un gain statique G_0 défini par :

$$\frac{\bar{u}}{V_c} = u_0 \frac{\cos \left(\frac{V_c}{A} - \delta \right)}{V_c} = \frac{u_0}{A} \frac{\sin \left(\frac{V_c}{A} \right)}{\frac{V_c}{A}} = G_0 \quad (III-6)$$

Pour les petites valeurs de v_c , la gain statique se réduit à :

$$G_0 = \frac{u_0}{A} \quad (III-7)$$

- Pour une commande cosinus par :

$$\bar{u} = u_0 \frac{V_c}{A} = u_0 \frac{V_c}{V_{a \max}} \quad (III-8)$$

Ce qui correspond à un gain statique G_0 constant quelque soit v_c

$$G_0 = \frac{E}{V_{a\max}} \quad (\text{III-9})$$

III.1.2. Perturbation des réseaux par les redresseurs.

Le facteur de puissance d'une installation à redresseur diminue lorsque le retard à l'amorçage Ψ (Ψ indiqué par α dans le chapitre II) tend vers 90° . Le fondamental du courant appelé en ligne sur le réseau alternatif est déphasé d'un angle Ψ par rapport à la tension. La figure (III-3) illustre la tension redressée u_c et le courant de ligne i_a d'un redresseur en pont tous thyristors.[6]

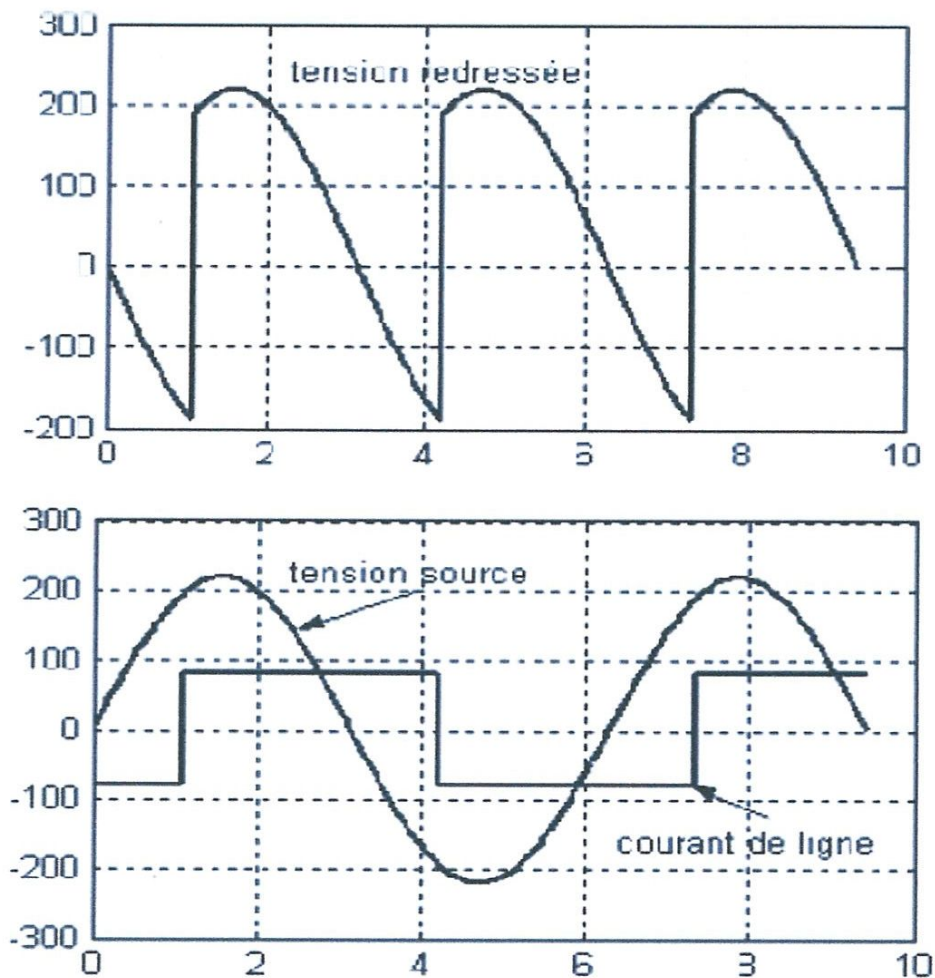


Fig. (III-4) : Redresseur classique

Les redresseurs de forte puissance fonctionnent à tension redressée faible pénalisant fortement l'utilisateur. C'est pour cela qu'on est amené à réaliser des associations tel que :

La commande successive de deux ponts en série ; chacun fournit $\frac{U_0}{2} \cos \Psi_1$ et $\frac{U_0}{2} \cos \Psi_2$.

Les convertisseurs à facteur de puissance unitaire ; la structure est celle d'un pont redresseur tout thyristor, figure (III-4) dans lequel les thyristors $1N$ et $2N$ fonctionnent normalement :

$1N$ est commandé avec un angle de retard à l'amorçage Ψ et $2N$ avec un angle $\pi + \Psi$.

. Par contre, $1F$ et $2F$ sont à circuit auxiliaire de commutation forcée : $1F$ est amorcé avec un angle de retard Ψ de puis bloqué à $\pi - \Psi$ et $2F$ est amorcé avec un angle de retard $\pi + \Psi$ de puis bloqué à $2\pi - \Psi$.

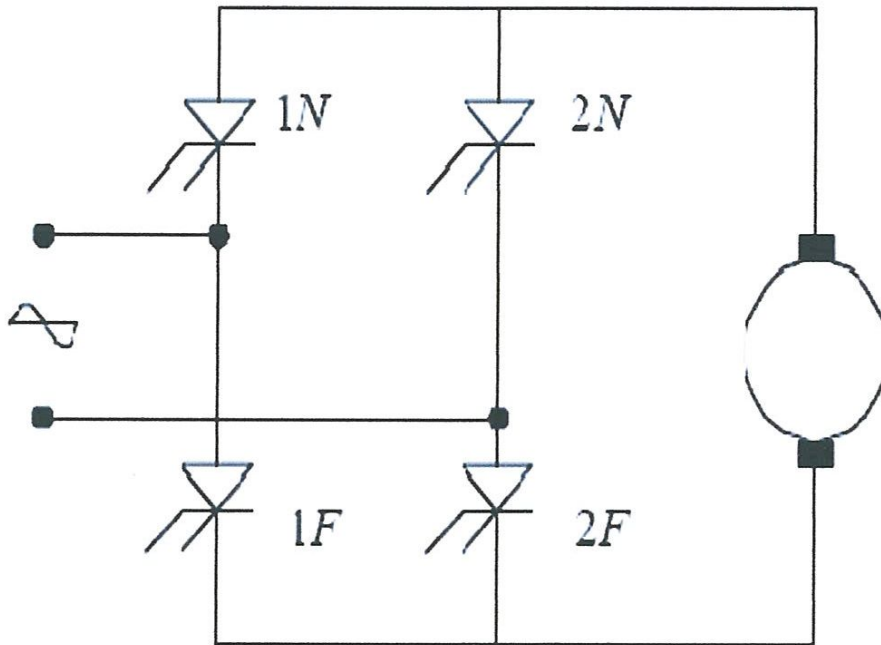


Fig. (III-4) : Structure d'un convertisseur à facteur de puissance unitaire

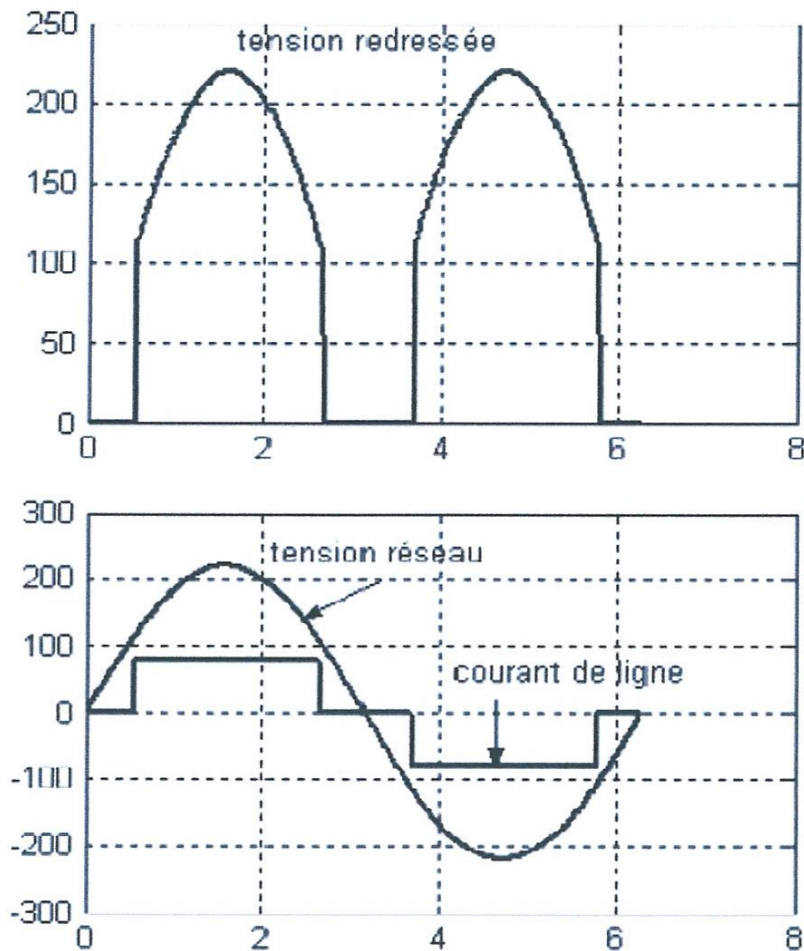


Fig. (III-5) : Oscillogramme de la tension redressée et du courant de ligne.

Ce procédé est actuellement peu utilisé en raison de la complexité entraînée par les systèmes de commutation forcée mais on peut espérer un développement important si la technologie des thyristors rapides progresse.

III.2. Les hacheurs.

III.2.1. Modèle statique d'un hacheur en conduction continu

Quelque soit le type du hacheur, qui comprend toujours un bloc de puissance et un bloc de commande,

la tension de commande v_a , du ou des interrupteurs, est synchronisée avec une horloge externe qui fixe la fréquence de commande.[6]

$$f_c = \frac{1}{t_c} \quad (III-10)$$

La durée de conduction de l'interrupteur principal vaut aTc si a est le rapport cyclique. Elle est généralement imposée par la variation de a pour une période Tc constante.

En conduction continue et en régime permanent, la tension moyenne de sortie du hacheur série par exemple vaut :

$$\bar{u} = \alpha E \quad (III-11)$$

Si E est la tension de la source d'alimentation. La tension de commande v_a est en dent de scie sur une période Tc et elle est de la forme :

$$v_a = v_{amax} \frac{t}{T_c} \quad (III-12)$$

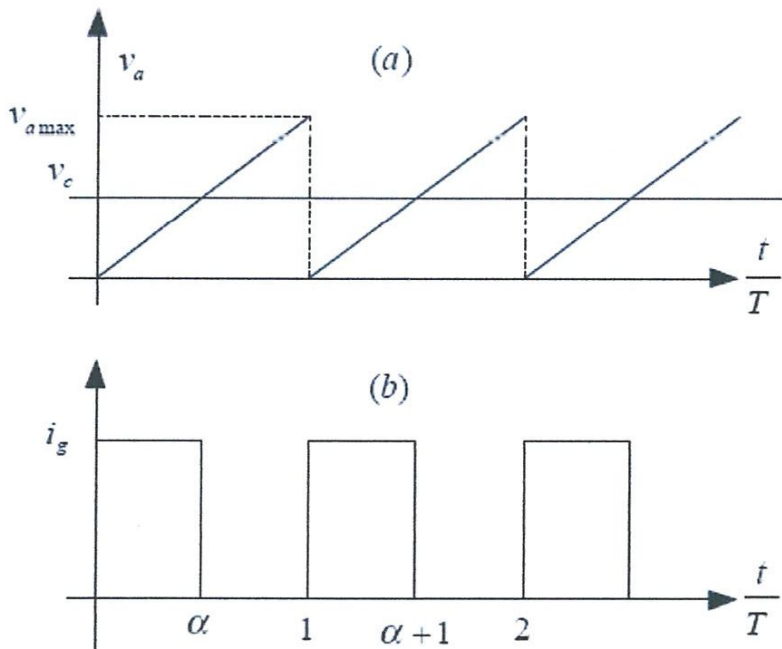


Fig. (III-6): Tension de commande d'un hacheur et impulsion de l'interrupteur principal

Lorsqu'il y a égalité de v_a avec la tension de réglage v_c alors $v_c = v_{amax}\alpha$ fixe le rapport α et la fin de conduction.

$$\bar{u} = \alpha E = \frac{E}{v_{amax}} v_c \quad (III-13)$$

Le hacheur série est ainsi modélisé par un gain $G0$ constant.

$$\bar{u} = \alpha E = \frac{E}{v_{amax}} v_c \quad (III-14)$$

III.2.2. Réversibilité de l'ensemble hacheur machine à courant continu.

L'association d'un hacheur série (abaisseur de tension) ou parallèle (élevateur de tension) permet le fonctionnement dans deux quadrants, figure (III-7), c'est-à-dire :

- Tension de signe constant,
- Courant bidirectionnel dans la machine.

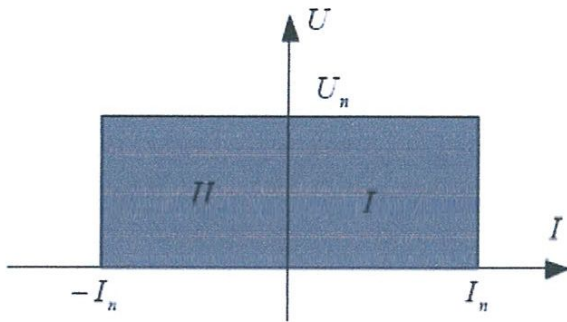


Fig. (III-7) : Hacheur deux quadrants

L'inversion du sens de rotation avec possibilité de récupération se fait en inversant la polarité de la tension sur le moteur ; ce qui mène au convertisseur de la figure (III-8) fonctionnant dans les quatre quadrants.[6]

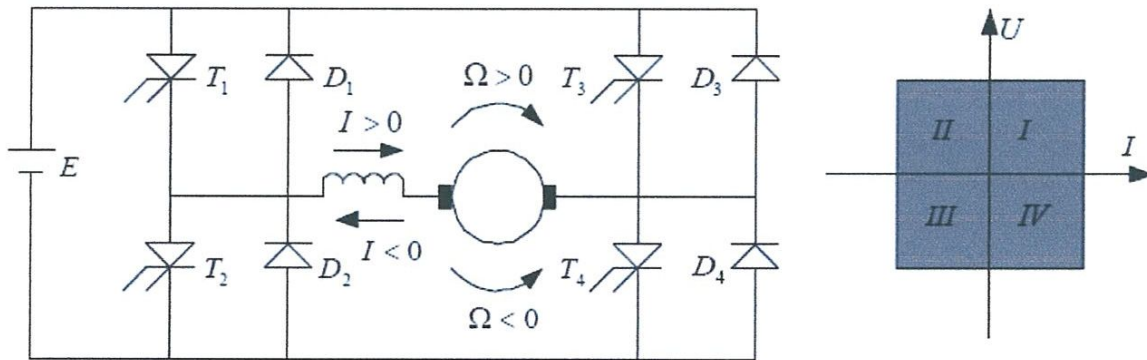


Fig. (III-8) : Hacheur quatre quadrants

Le tableau (1-1) résume le fonctionnement de l'ensemble machine à courant continu hacheur. Cela suppose que la source de tension E est capable de recevoir de l'énergie.

Quadrant	Mode de fonctionnement	Sens du courant	Sens de rotation	Élément conducteur	Élément fonctionnant en hacheur et diode associée	
I	Moteur	>0	>0	T_4	T_1	D_2
II	Moteur	>0	<0	T_2	T_3	D_4
III	Freinage	<0	>0	T_4	T_2	D_1
IV	Freinage	<0	<0	T_2	T_4	D_3

Tableau (1-1) : Fonctionnement d'un ensemble convertisseur/machine

Conclusion :

dans ce chapitre, on a présenté les modèles des convertisseurs utilisés pour l'alimentation des machines à courant continu à savoir ; les redresseurs et les hacheurs.

Dans le quatrième chapitre on a abordé la simulation numérique de l'ensemble convertisseur statique – machine.

Chapitre IV

*Simulation de l'association
convertisseur-machine à courant continu*

Introduction :

Le but de simulation représentée dans ce chapitre et d'une part, de déterminer les performants ces globales du système et d'autre part de confirmer les résultats théoriques obtenus aux chapitres précédents.

Dans une première étape, on traite par simulation numérique le convertisseur statique suivi par la simulation de la machine à courant continu et de l'association convertisseur statique machine à courant continu à excitation séparée.

IV.1.Simulation du convertisseur statique :

Le convertisseur que nous avons proposé dans notre étude est le hacheur série (dévolteur).

❖ La figure (IV-1) représente la forme d'onde de tension pour $\alpha = 0$

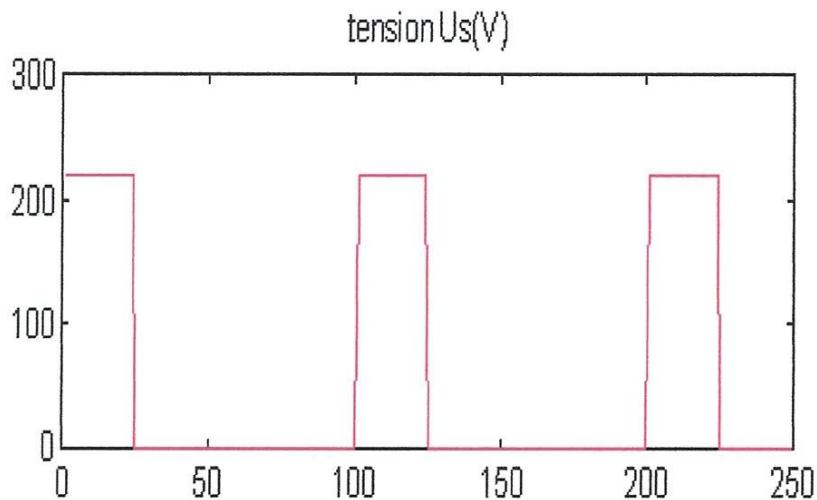


Fig. (IV-1) : résultats de simulation du hacheur dévolteur

$\alpha = 0.25$ $F=100\text{HZ}$

❖ La figure (IV-2) représente la forme d'onde de tension pour $\alpha = 0.5$.

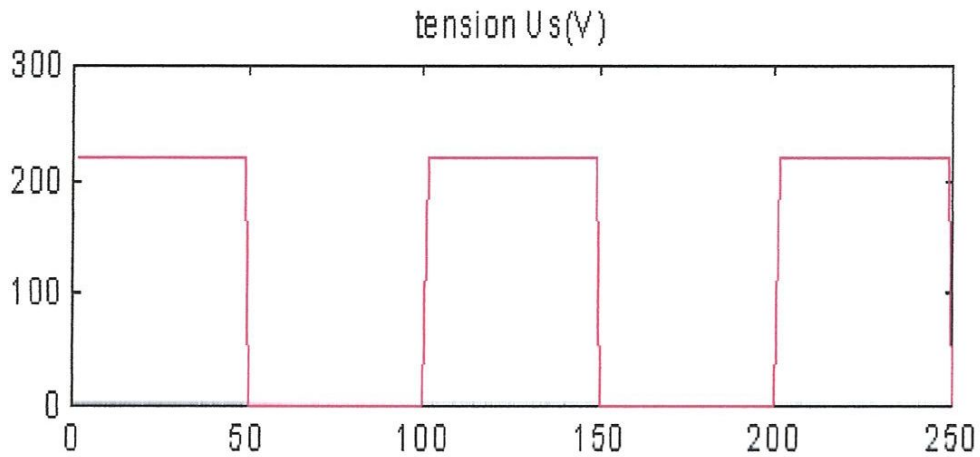


Fig. (IV-2) : résultats de simulation du hacheur dévolteur

$$\alpha = 0.5 \quad F=100\text{HZ}$$

❖ La figure (IV-3) représente la forme d'onde de tension pour $\alpha = 0.75$.

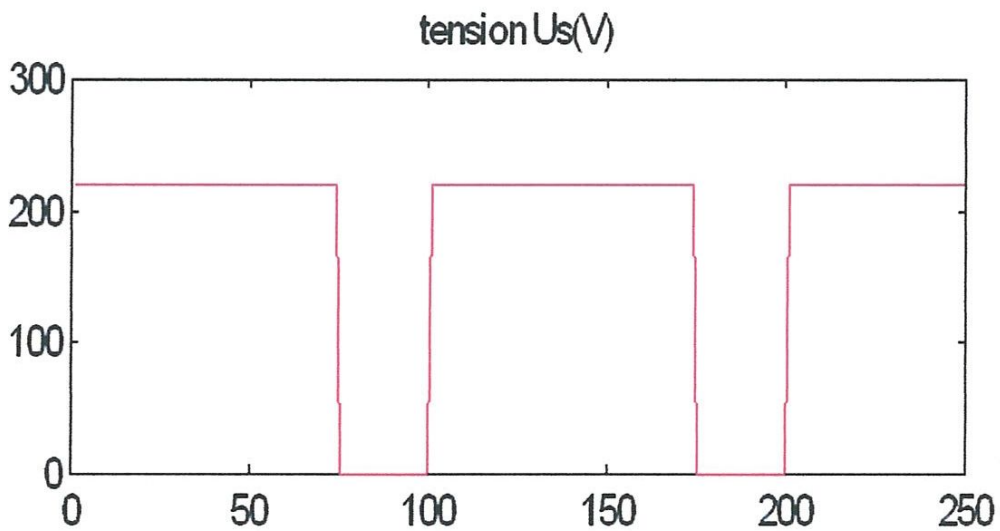
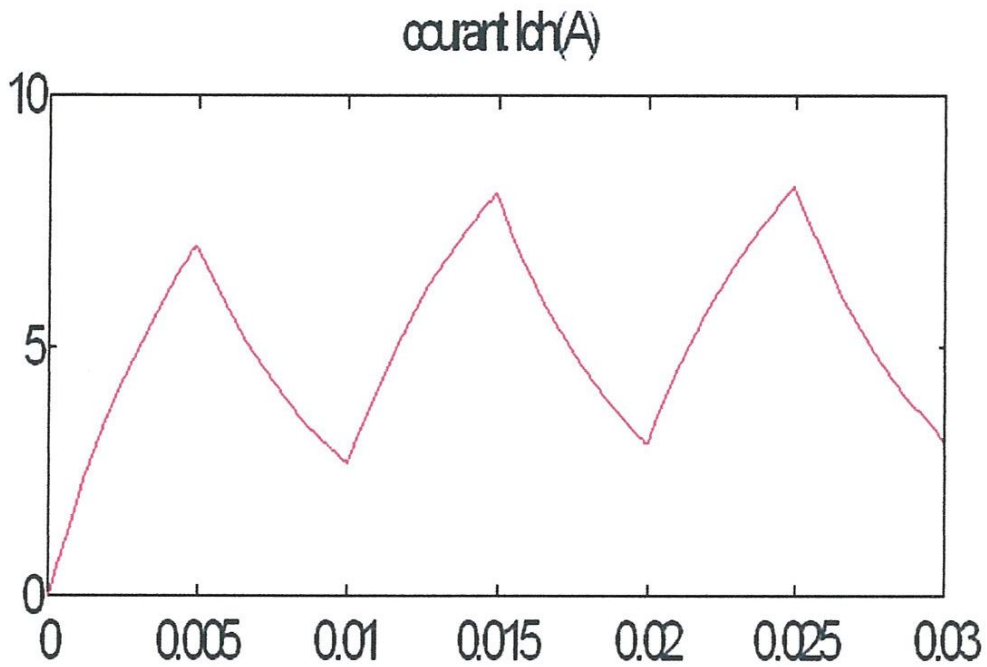


Fig.(IV-3) : résultats de simulation du hacheur dévolteur

$$\alpha = 0.75 \quad F=100\text{HZ}$$

On constate que la tension de charge dépend de la durée de fermeture du hacheur, ainsi avec l'augmentation du rapport cyclique la tension moyenne augmente.

- ❖ La figure (IV-4) représente la forme d'onde du courant pour un rapport cyclique égal à 0.5 pour une charge inductive.



$L=0.01H$ $R=2ohm$ Temps(s)

Fig. (IV-4)

Il est évident que le courant est ondulé et continu pour une inductance $L= 10\text{mH}$. Les figures (IV-5) et (IV-6) montrent que l'augmentation de la valeur de l'inductance améliore la qualité du courant dans la charge.

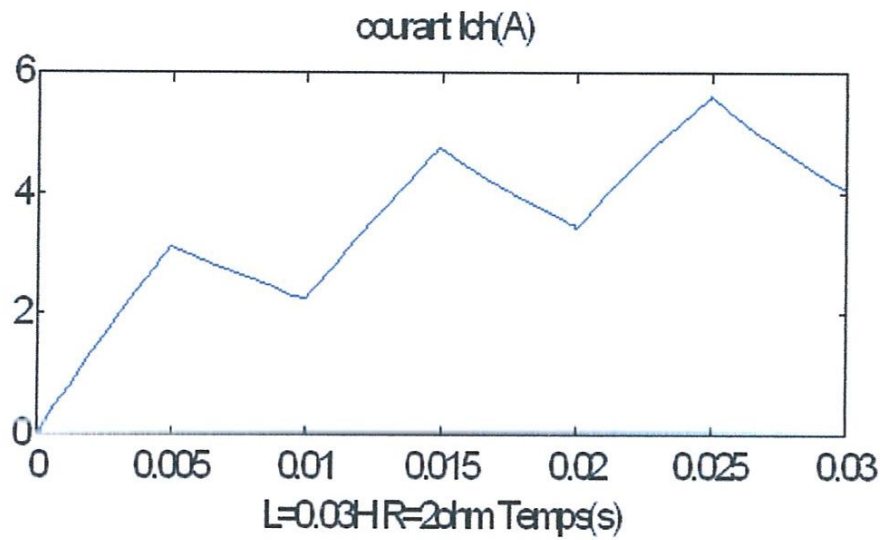


Fig. (IV-5)

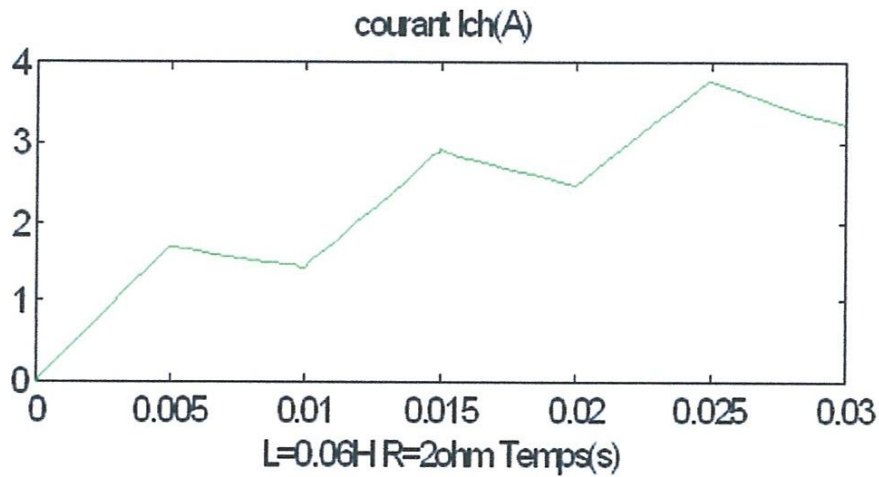


Fig. (IV-6)

Dans les figures (IV- 7, 8, 9) on observe que le régime permanente s'établit après quelques périodes caractérisent le régime transitoire, et que l'ondulation de courant diminue au fur et à mesure que l'inductance de la charge augmente

IV.2. Simulation de la machine a courant continu :

Le modèle de la machine à courant continu est représenté par l'ensemble des équations suivantes en considèrent que le courant d'induite I_a et la vitesse de rotation ω comme variable d'état.

$$\frac{dI_a}{dt} = \left[\frac{U_a - R_a I_a - E}{L_a} \right] \quad (IV-1)$$

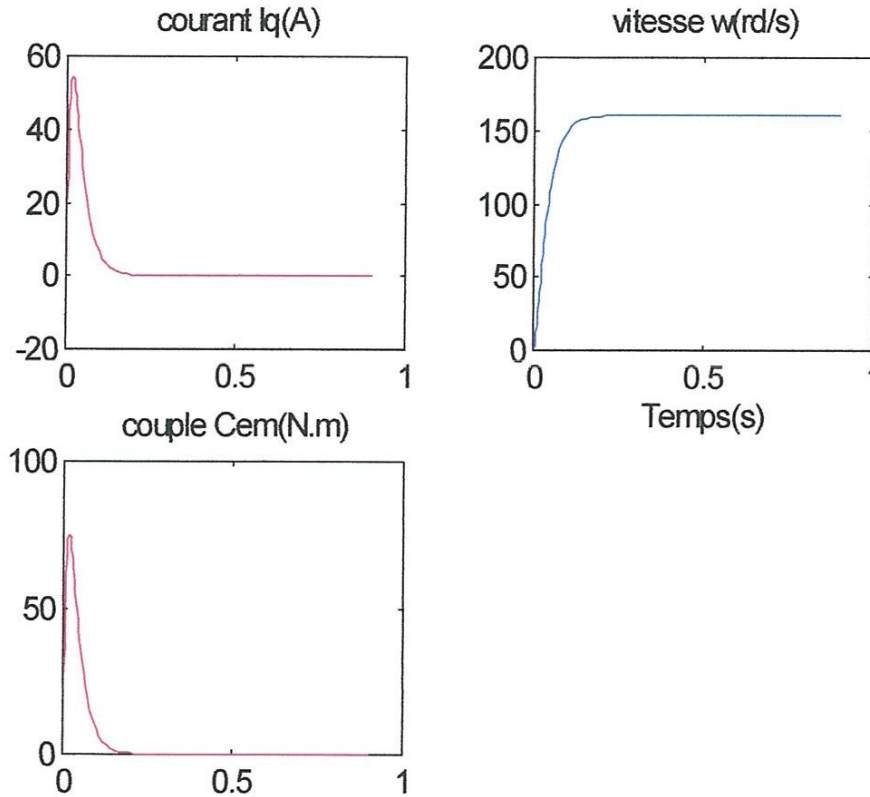
$$\frac{d\omega}{dt} = C_a - C_r - f\omega \quad (IV-2)$$

$$C_{em} = k I_a \quad (IV-3)$$

$$E = K \omega \quad (IV-4)$$

Résultat de simulation :

La figure (IV-10) représenté l'évolution du courant d'induit I_a , la vitesse de rotation ω et le couple électromagnétique C_{em}



Fig(IV-10) : résultats de simulation de la machine a courant continu
a excitation séparée.

*après un fort appelle du courant et du couple au démarrage le régime permanent s'établit à une valeur nul ce qui caractérisé la marche à vide de la machine (avec une couple résistant $C_r=0$).

* après l'écoulement du régime transitoire ($t = 0.15$) la vitesse de rotation se stabilisé à $\omega = \omega_n = 1500$ tour/min.

IV.3.Simulation de l'ensemble hacheur machine à courant continu :

De résultats de simulation de l'ensemble hacheur dévolteur moteur à courant continu à excitation séparée sont représentés à la figure (IV-11).

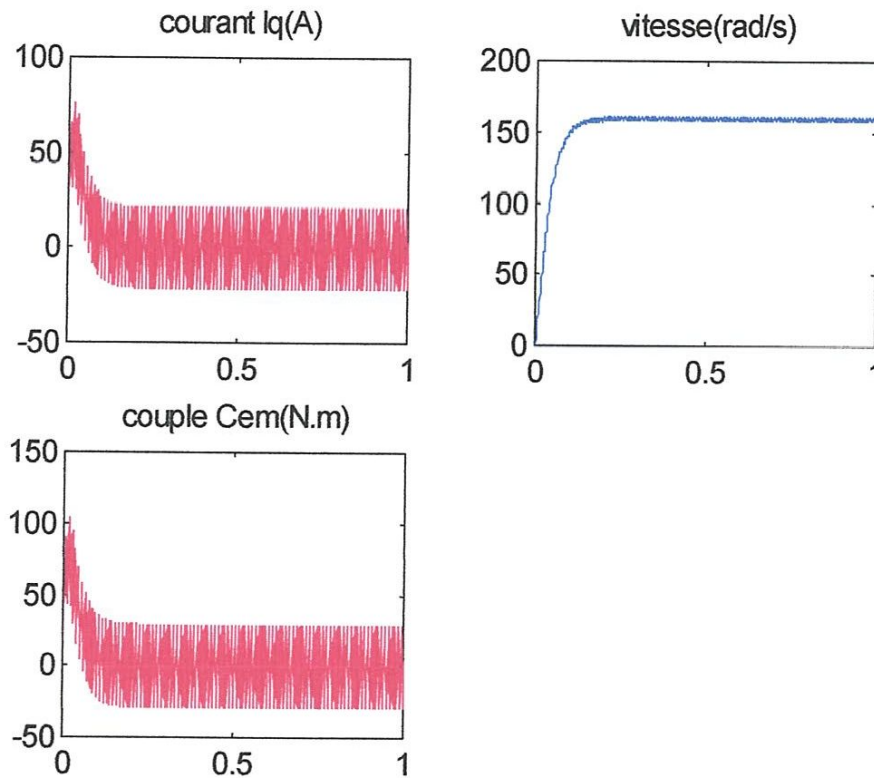


Fig. (IV-11) : résultats de simulation de l'association hacheur -machine à courant continu à excitation séparée.

La figure (IV-11) montre l'allure du courant d'induit I_a et du couple C_{em} qui sont pulsatoire, en effet ses ondulations sont dues au convertisseur statique (hacheur).

Par contre la vitesse présente une allure moins ondulée. Ses ondulations sont dues à la tension délivrée par le hacheur qui est une tension riche on harmonique.

- Paramètre de la machine à courant continu à excitation séparé.

$$\omega_n = 1500 \text{ tour/min}$$

$$U_n = 230 \text{ V}$$

$$R_a = 1.38 \Omega$$

$$L_a = 0.024 \Omega$$

$$y = 0.025 \Omega$$

$$f = 0$$

Conclusion :

De par les résultats de simulation on constate :

- le variateur de courant continu délivre une tension continu variable, avec un courant qui se rapproche d'une forme continu pour une charge inductive ce qui nous permet de réaliser un entraînement à vitesse variable par un moteur à courant continu.



BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] M. Kostenko et al : Machines électriques. Edition : Moscou, 1979.
- [2] F. Bernot : Machine a courant continu « constitution et fonctionnement ». Technique de l'ingénieur, D3556 ; D3555.
- [3] P. Abati : Circuit magnétiques des machines. Académie d'Aix Marseille France 2002.
- [4] K. Hsing-Chia et al: 'A new symbiotic evolution-based fuzzy- neural approach to fault diagnosis of marine propulsion systems.' Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.17. pp. 919-930, 2004.
- [5] Francis MILSANT, " Cours d'électrotechnique ", tome 2, Machines à courant continu,
& asservissements linéaires. Berti Edition.
- [6] R.Dhifaoui et al. "Commande des machines à courant continu". Cours de commande électriques.
- [7] Francis MILSANT, " Cours d'électronique """, tome 5 , 2^{ème} édition, EYROLLES [1985].
- [8] Francis MILSANT, " Cours d'électrotechnique ", tome 2, Machines à courant continu, EYROLLES [1981].
- [9] Guy SEGUIER, Francis NOTELET, " Electrotechnique industrielle ", 2^{ème} édition augmenté-[1982], Lavoisier.
- [10] H.FRAUDET, F.MILSANT, " Cours d'électricité ", 9^{ème} édition, EYROLLES [1987].
- [11] Guy SEGUIER, " L'électronique de puissance ", 6^{ème} édition, Dunod [1990] Paris.