

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

BENDJEDDIA M.abdesslam

BEDJERA abdelbasset

Thème:

Étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu

Soutenu publiquement

Le : 13/06/2022

Devant le jury :

M^r BELKEBIR amel

MA (A) Président

UKM Ouargla

M^r LOUAZENE Mohamed
Lakhdar

MC (B) Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^r BOUALI khadidja

MA (A) Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2021/2022

Remerciement

Avant tout :

*Nous remercions Allah tout puissant de nous
avoir donné le courage et la patience pour
terminer ce travail*

*Ce présent, n'aurait pu avoir le jour sans la
contribution de nombreuses personnes dont nous
faisons aujourd'hui un plaisir et un devoir de les
remercier, et de leur témoigner notre profonde
gratitude*

*Nous remercions notre encadreur "louazene
lakhdar" pour l'intérêt qu'il apporté à ce travail,
qu'il nous a accordé tout au long de ce travail. A
tous les enseignants de la faculté génie électrique*

*Nous n'oublions pas nos parents de leur soutien
moral et matériel*

*Qu'ils sont de même pour tous nos ami(e) dont le
soutien indéfectible et leur fidélité en amitié
.merci*

*Nous présentons également nos remerciements aux membres
de jury qui daigneront, évaluer et juger notre travail
Enfin, nos remerciement à toutes les personnes qui nous ont
aidé de près ou de loin durant notre formation.*

Dédicace

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

« Ma très chère mère.

Mon très cher père.

Mes sœurs et mes frères

*toutes mes familles **ben***

djeddia

Mon binôme

Tous mes amis.

Toute la promotion 2021/2022

benddia mohammed abdessalam

Dédicace

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

« Ma très chère mère.

Mon très cher père.

Mes sœurs et mes frères

toutes mes familles Bedjera

Mon binôme

Tous mes amis.

Toute la promotion 2021/2022

Bedjera abdelbasset

Dédicace

Sommaire

Introduction générale	01
-----------------------	----

Chapitre I : Machines à Courant Continu

I.1 Introduction	02
I.2 Définition	02
I.3 Constitution	03
I.3.1. L'inducteur	03
I.3.2 Le rotor (l'induit)	03
I.3.3 Le collecteur et les balais	03
I.4 Principe de fonctionnement en moteur.	06
I.5 Force contre électromotrice.	08
I.6. Différents types de moteurs selon l'inducteur	08
I.6.1 Moteurs à inducteur à aimant permanent.	08
I.6.2 Moteurs à inducteur bobiné	09
I.6.2.1 Différents modes d'excitation d'un moteur à courant continu.	09
I.7 Variation de vitesse	16
I.8 Les avantages et les inconvénients	16
I.9 Bilan de la puissance	17
I.10 Le rendement	17
I.11 Utilisation de la machine à courant continu	18
I.12 Conclusion	18

Chapitre II : Convertisseurs statiques

II.1 Introduction	21
II.2 Définition	21
II.3 Les redresseurs	21
II.3.1 redresseur commande	22
II.3.2 redresseur non commande	24
II.4 Les onduleurs	27
II.5. Les gradateurs	27
II.6 Les hacheurs	27
. II.6.1 Principe de fonctionnement	28
.	
. II.6.2 Le rapport cyclique α	28
II.7-Différents type d'hacheurs	28
II.7.1-Hacheur série.	29
II.7.2-Hacheur parallèle	32
II.7.3-Hacheur série-parallèle.	33
II.8-Hacheur réversible.	34
II.8.1-Hacheur réversible en courant.	34
II.8.2-Hacheur réversible en tension	34
II.9-hacheur à quatre quadrants	35
II.10. Technique de commande MLI	37
II.11.Les montages d'électronique de puissance	39

·		
·	<u>II.11.1 Circuit de commande</u>	40
·	<u>II.11.2 Circuit de puissance</u>	40
·	<u>II.11.3 Circuit d'amplification</u>	40
·	<u>II.11.4 Circuit de protection</u>	40
	<u>II.12 Conclusion</u>	40

Chapitre III : Simulation d'un variateur de vitesse

	<u>III.1 Introduction</u>	41
	<u>III.2 Partie de simulation</u>	41
·	<u>III.2.1 Simulation d'un hacheur à un seul quadrant commande un moteur à courant continu excitation séparée</u>	41
·	<u>III.2.1.1 Schéma bloc de la simulation</u>	42
·	<u>III.2.1.2 Paramètre du moteur à courant continu</u>	43
·	<u>III.2.1.3 Les courbes et résultats de simulation</u>	43
	<u>III.2.2 Simulation d'un hacheur quatre quadrants commande un moteur à courant continu à excitation séparée</u>	47
·	<u>III.2.2.1 Schéma bloc de la simulation</u>	47
·	<u>III.2.2.2 Les courbes et résultats de simulation</u>	48
	<u>III.2.3 Analyse des résultats obtenus</u>	51
	<u>III.3 Conclusion</u>	52
	Conclusion Générale	53
	Références bibliographiques	55

Liste des figures

Figure (I.1) :	machine à courant continu	02
Figure (I.2) :	Description de la machine à courant continu	03
Figure (I.3) :	l'inducteur de la machine à courant continu	04
Figure (I.4) :	L'induit de la machine à courant continu	04
Figure (I.5) :	collecteur	05
Figure (I.6) :	balais	06
Figure (I.7) :	Loi de Laplace.	07
Figure (I.8) :	Moteur à aimant permanent	09
Figure (I.9) :	Différents modes d'excitations	10
Figure (I.10) :	Caractéristique de vitesse d'un moteur série	11
Figure (I.11) :	Caractéristique de couple d'un moteur série	11
Figure (I.12) :	Schéma de MCC à excitation shunt	12
Figure (I.13) :	Schéma de MCC à excitation composée	13
Figure (I.14) :	Caractéristiques d'un moteur à excitation séparée	14
		15
Figure (I.15) :	Le couple en fonction de courant d'alimentation	
Figure (I.16) :	Bilan de la puissance	17
Figure (II.1) :	Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance	21
Figure (II.2) :	Redresseur commandé pont mixte symétrique	22
Figure (II.3) :	La tension aux bornes de la charge avec un redresseur commande	23
Figure (II.4) :	a) forme de tension d'alimentation b) tension redressée	24
Figure (II.5) :	filtrage de la tension par une condensateur	25
Figure (II.6) :	tension redressé et filtré	25
Figure (II.7) :	Tension entre les armatures d'induit	28
Figure (II.8) :	Schéma d'un hacheur série.	29
Figure (II.9) :	La tension aux bornes de la charge avec un hacheur série	30
Figure (II.10) :	Schéma hacheur série commande un moteur à courant continu	30
Figure (II.11) :	Schéma d'un hacheur parallèle	32
Figure (II.12) :	Schéma d'un hacheur série-parallèle	33
Figure (II.13) :	Schéma hacheur réversible en courant	34
Figure (II.14) :	Schéma Hacheur réversible en tension	35
Figure (II.15) :	Schéma hacheur à quatre quadrants	35
Figure (II.16) :	La tension et courant aux bornes de la charge avec un hacheur quatre quadrants	36
Figure (II.17) :	Principe du fonctionnement d'un hacheur quatre quadrants.	37
Figure (II.18) :	Le schéma de technique MLI	38

Figure (II.19) :	La comparaison entre le signal modulant et la porteuse	39
Figure (II.20) :	Signal MLI de sortie	39
Figure (III.1) :	Hacheur série commande un moteur à courant continu	42
Figure (III.2) :	Fenêtre de réglage des paramètres du moteur à courant continu	43
Figure (III.3) :	La tension d'entrée d'hacheur	44
Figure (III.4) :	La tension de sortie avec un rapport cyclique de 40 %	44
Figure (III.5) :	La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 40 %	44
Figure (III.6) :	Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 40 %	45
Figure (III.7) :	La tension de sortie avec un rapport cyclique de 80 %	45
Figure (III.8) :	La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 80 %	46
Figure (III.9) :	Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 80 %	46
Figure (III.10) :	Hacheur quatre quadrants commande un moteur à courant continu	47
Figure (III.11) :	La tension de sortie avec un rapport cyclique de 60%	48
Figure (III.12) :	La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 60 %	48
Figure (III.13) :	Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 60 %	49
Figure (III.14) :	La tension de sortie d'un hacheur quatre quadrants avec un rapport cyclique de 40 %	49
Figure (III.15) :	La vitesse de moteur commandé par un hacheur quatre quadrants avec un rapport cyclique de 40 %	50
Figure (III.16) :	Le courant de moteur commandé par un hacheur quatre quadrants avec un rapport cyclique de 40 %	50

Liste des tableaux

Chapitre I Moteur à courant continu

Tableau (I.01) : Domaine d'application et caractéristiques du MCC à excitation série	12
Tableau (I.02) : Domaine d'application du MCC à excitation shunt.	13
Tableau (I.03) : Domaine d'application du MCC à excitation compound.	13
Tableau (I.04) : Domaine d'application du MCC à excitation séparée	16

Introduction générale

Les progrès significatifs des semi-conducteurs (transistors, thyristors, etc.) ont permis de faire de grands progrès dans les variateurs de vitesse en électronique industrielle (constituée principalement d'électronique de puissance et de contrôle et de régulation également).

Au sens large, l'industrie, et en particulier le transport, nécessite de plus en plus des systèmes en constante évolution, apportant flexibilité et précision à de multiples domaines d'application.

En robotique, une grande flexibilité et une parfaite adaptation de la commande machine sont requises ; en motorisation basse tension dans les équipements automobiles ; en traction électrique, on y ait compris la plupart des cas de source continue, en effet batteries, caténares, panneaux de batteries solaires, etc. Du fait de l'inversion du courant de la source lors du fonctionnement du générateur, les moteurs à courant continu sont parfaitement compatibles avec ces sources en termes de réversibilité énergétique.

Le couple est indépendant de la vitesse en mode fractionné, ce qui aide à contrôler l'ensemble moteur-transmission.

L'excellent rapport coût sur performances de ces solutions, aller à des schémas éclectiques simples, confirment l'intérêt du moteur à courant continu dans ces domaines.

Aujourd'hui et pour longtemps, les moteurs à courant continu, qui sont par nature des machines à vitesse variable, sont les plus utilisés.

L'objectif de ce travail est une étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu.

Ce mémoire comportera par la suite : une introduction, trois chapitres, une conclusion générale, et on terminera par une bibliographie.

Le premier chapitre est consacré à l'étude des composants et du fonctionnement de la machine à courant continu. Après une brève introduction des constitutions de la machine et leurs principes de fonctionnement. Nous présentons les différents types du moteur à courant continu, nous terminons ce chapitre par l'utilisation de cette machine.

Le deuxième chapitre est une étude des convertisseurs statiques. Nous présentons les Technique de commande MLI et leur principe, nous terminons ce chapitre par description générale du montage d'électronique de puissance.

Le troisième chapitre est consacré à une partie de simulation de notre modèle sur le Logiciel de simulation « MATLAB » .

Les moteur à courant continu

I.1 Introduction :

Les moteurs à courant continu sont largement utilisés dans les systèmes automatisés qui nécessitent des changements précis de vitesse de rotation.

Dans ce chapitre, nous présentons la composition d'un moteur à courant continu et son fonctionnement. Ainsi que les différents type des moteurs à courant continu. Ensuite, nous donnerons les avantages et les inconvénients. Vient enfin le domaine d'utilisation.

I.2 Définition :

Les moteurs à courant continu sont des convertisseurs d'énergie électromécaniques qui convertissent l'énergie électrique qu'ils absorbent en énergie mécanique lorsqu'ils peuvent fournir suffisamment de puissance mécanique pour démarrer et entraîner une charge en mouvement. Ensuite, nous disons qu'ils fonctionnent comme des moteurs électriques. Lorsqu'ils sont soumis à une charge entraînant, ils convertissent soit l'énergie mécanique reçue en énergie électrique. Ensuite, nous disons qu'ils fonctionnent comme des générateurs [01].

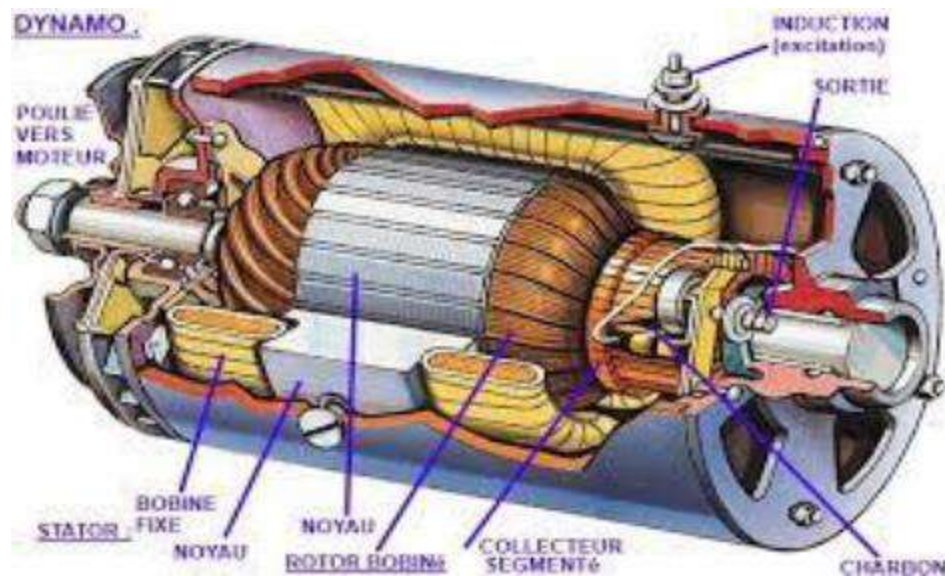


Figure (I.1) : moteur à courant continu

I.3 Constitution :

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

- L'inducteur
- L'induit
- Le collecteur et les balais

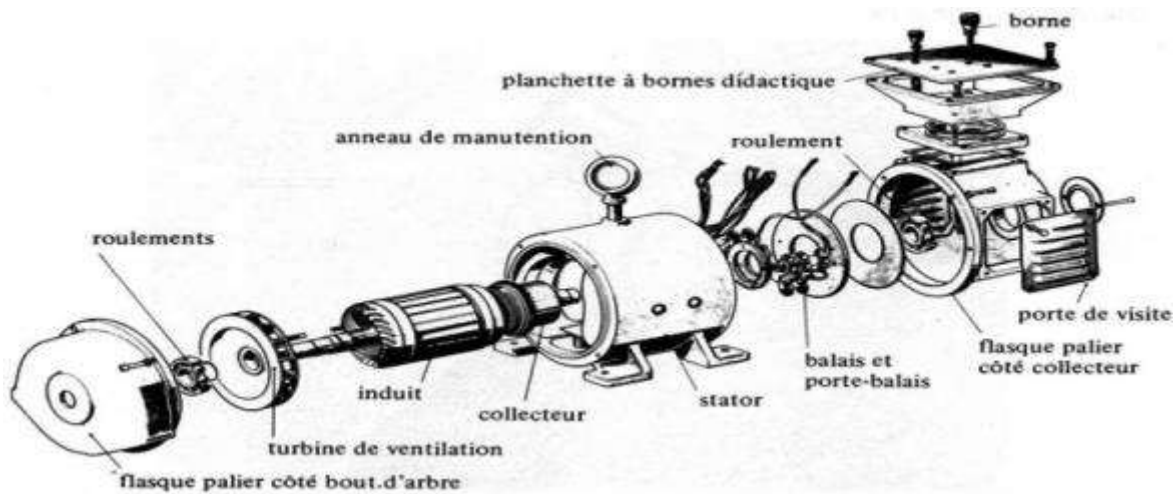


Figure (I.2) : Description de la machine à courant continu

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

L'inducteur est la partie fixe du moteur, il est constitué

- **Pôles principaux**

Destinés à créer le flux magnétique principal, qui peuvent être constitués d'aimants permanents ou de pièces polaires associées des enroulements inducteurs par un courant continu [3].

- **Pôles auxiliaires**

Ils sont placés entre les pôles principaux selon les axes inter polaires dits axes neutres, le flux qu'ils produisent améliore la commutation. Ils réduisent les étincelles aux balais, ces étincelles étant produites par le renversement du sens de courant dans les sections court circuits par les balais.

L'enroulement de ces pôles est en série avec l'enroulement d'induit [4].



Figure (I.3) : l'inducteur de la machine à courant continu

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

C'est la partie mobile. il est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu. Elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer. Espace séparant la partie fixe et la partie mobile.



Figure (I.4) : L'induit de la machine à courant continu

I.3.3 Le collecteur et les balais:

◆ Collecteur:

Le collecteur est le constituant critique des machines à courant continu. C'est un ensemble de lames de cuivre, isolées latéralement les unes des autres et disposées suivant un cylindre, en bout de rotor. Ces

lames sont réunies aux conducteurs de l'induit. Le collecteur a pour fonction d'assurer la commutation du courant d'alimentation dans les conducteurs de l'induit [5].



Figure (I.05) : Collecteur

◆ Balai:

Fixés sur la carcasse par le biais de portes balais, ils sont en carbone ou en graphite permettent l'alimentation de l'induit (partie en rotation) grâce à un contact glissant entre les lames du collecteur reliées aux conducteurs de l'induit et le circuit électrique extérieur. Ils sont constitués de petits cubes ayant une surface de contact de quelques mm² à quelques cm², en graphite pur ou en alliage, qui doivent résister à des conditions d'utilisation sévères (courants élevés, températures élevées, frottements, arc, atmosphères chargées ou très sèches).

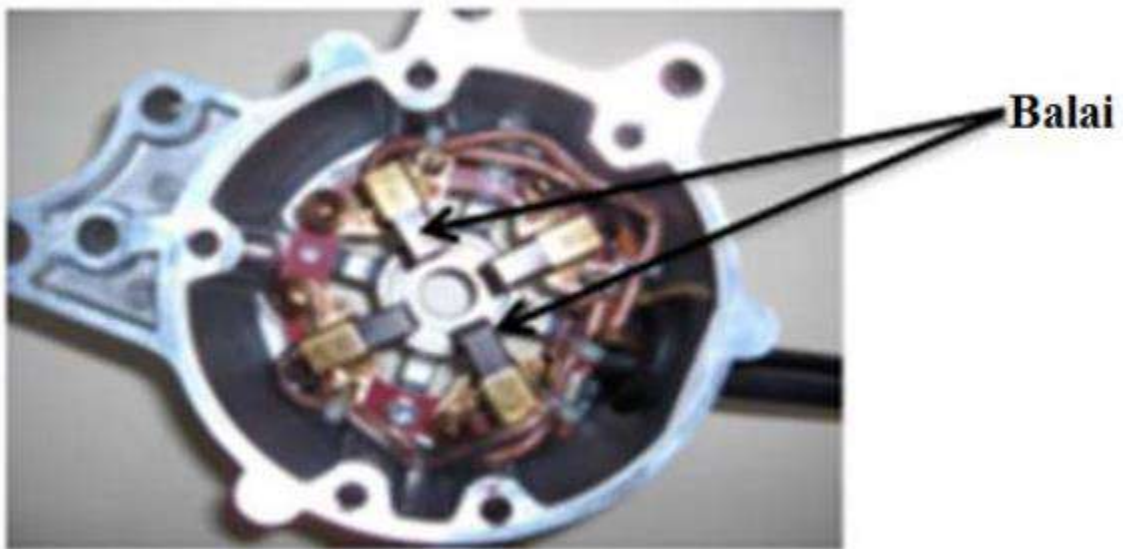


Figure (I.06) : Balai

I.4 Principe de fonctionnement en moteur:

Le fonctionnement du moteur à courant continu est basé sur le principe des forces de Laplace
Un conducteur de longueur (L), placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant, est soumis à une force électromagnétique.

Le champ créé par l'inducteur agit sur les conducteurs de l'induit : Chacun des (N) conducteurs de longueurs (L) placé dans le champ (B) et parcouru par un courant (I) est le siège d'une force électromagnétique perpendiculaire au conducteur :

$$F = B.I.L. \sin \alpha \quad (I.01)$$

Ces forces de Laplace exercent un couple proportionnel à l'intensité (I) et au flux (G) sur le rotor. Le moteur se met à tourner à une vitesse proportionnelle à la tension d'alimentation (V) et, inversement proportionnelle au flux (G).

Au passage de tout conducteur de l'induit sur la ligne neutre, le courant qui le traverse change de sens grâce au collecteur. Le moteur conserve le même sens de rotation.

Pour inverser le sens de rotation du moteur, il convient d'inverser le sens du champ produit par l'inducteur par rapport au sens du courant circulant dans l'induit :

- Soit on inverse la polarité de la tension d'alimentation de l'induit.
- Soit on inverse la polarité d'alimentation du circuit d'excitation.[02]

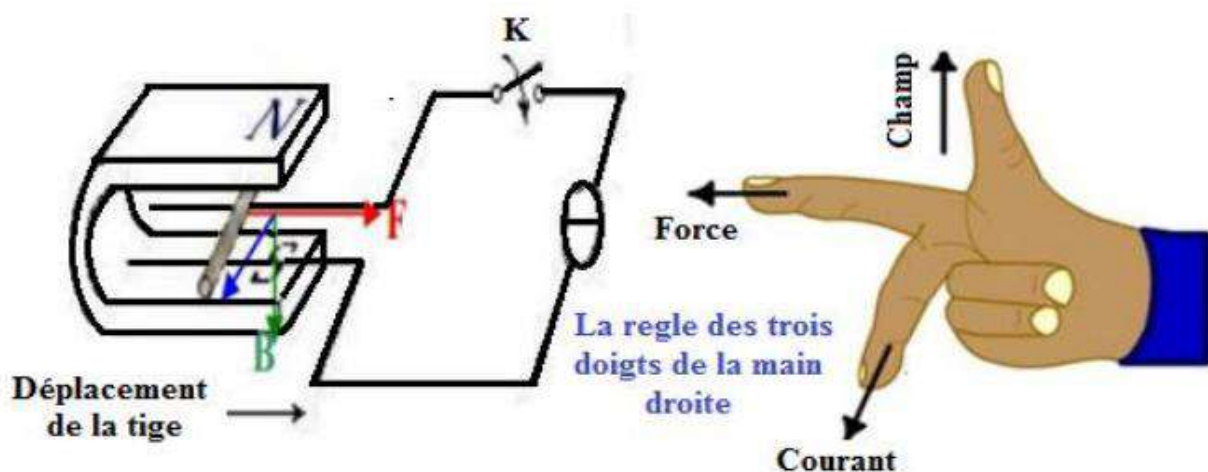


Figure (I.07) :Loi de Laplace.

I.5 Force contre électromotrice:

La force contre électromotrice f.c.e.m (E) est la tension produite par le rotor (l'induit) lors de sa rotation dans le flux magnétique produit par la partie fixe (l'inducteur). Elle dépend des éléments de construction de la machine.

$$E = \frac{P}{\alpha} N \cdot n \cdot \Phi \quad (\text{I.02})$$

P : nombre de pair de pôles de la machine.

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

N : nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit

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

Φ : flux sous un pôle de la machine en Webers.

Finalement :

$$E = k \cdot \omega \cdot \Phi \quad (\text{I.03})$$

Avec :

$$k = \frac{P}{2\pi \cdot \alpha} \cdot N \quad (\text{I.04})$$

I.6 Différents types de moteurs selon l'inducteur :

On distingue deux types de moteurs à courant continu

I.6.1 Moteurs à inducteur à aimant permanent:

Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent.

Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micro-moteurs sont des moteurs à aimant permanent.

Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples à l'utilisation[03]

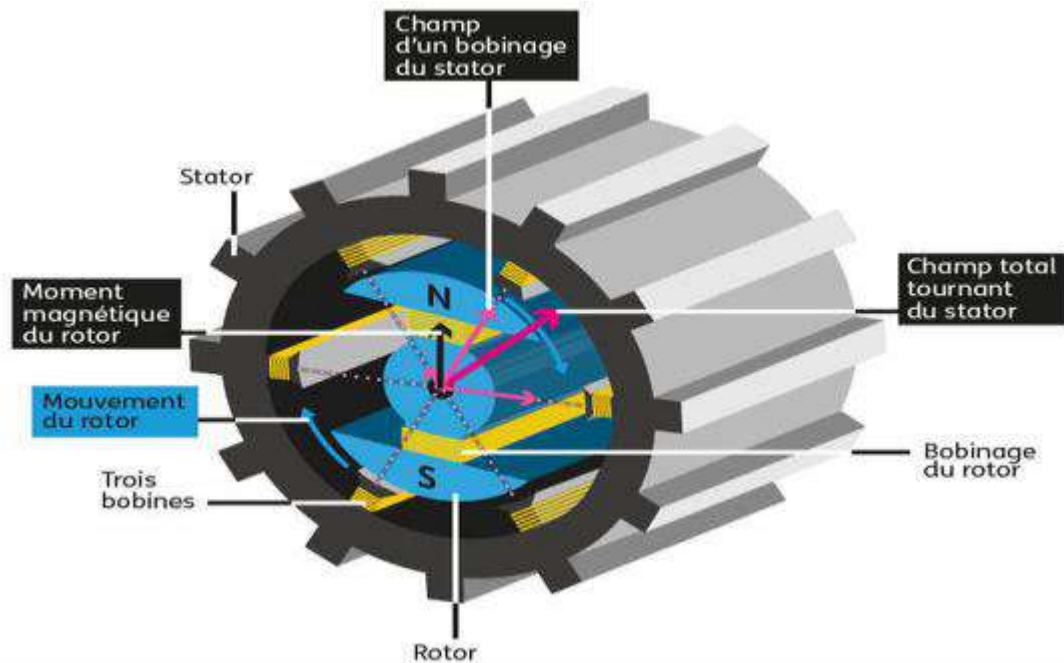


Figure (I.8) : Moteur à aimant permanent

I.6.2 Moteurs à inducteur bobiné

I.6.2.1 Différents modes d'excitation d'un moteur à courant continu

L'inducteur d'un moteur à courant continu peut être branché de diverses façons. La machine est à excitation séparée (ou indépendante) quand l'inducteur et l'induit sont reliés à des sources différentes. La machine est à excitation liée, lorsque l'inducteur et l'induit sont alimentés à partir de la même source. Quatre possibilités existent alors [06] :

- L'excitation parallèle (ou shunt).
- L'excitation série.
- L'excitation composée.
- L'excitation séparée.

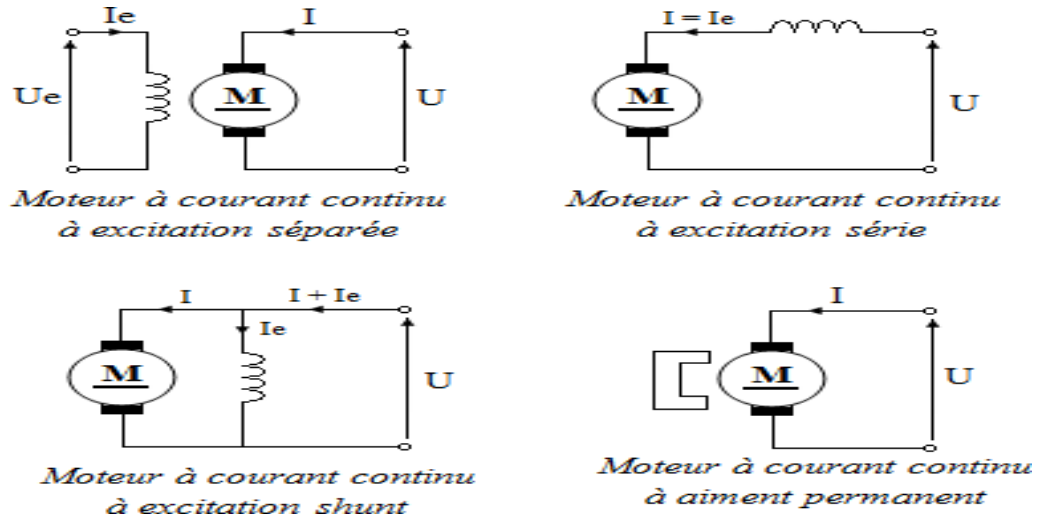


Figure (I.9): Différents modes d'excitations

➤ Moteur à excitation série:

Dans un moteur à excitation série ou moteur série, le circuit d'excitation est en série avec le circuit d'induit.

Le flux n'est plus constant mais proportionnelle à (I).

Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) dépend de la fréquence (n) de rotation et de l'intensité du courant (I).

Donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension (V) et au courant (I) d'alimentation du moteur.

Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes), la puissance électrique absorbée est :

$$P_a = V \cdot I \quad (\text{I.05})$$

Et la puissance mécanique fournie est :

$$P_u = T_u \cdot \Omega = T_u \cdot 2\pi \cdot n \quad (\text{I.06})$$

Si (n) est proportionnelle à (V) et à (I) cela signifie que (T_u) est proportionnel au carré de l'intensité (I^2).

Donc le couple (T_u) est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation du moteur.

Pour un moteur à excitation série, le flux (Φ) n'est pas constant mais proportionnel à (I) donc la tension d'alimentation (V) est proportionnelle à la fréquence de rotation n et à l'intensité

(I) [1]:

$$E = k.n.N.\Phi = K.\Omega.I \quad (\text{I.07})$$

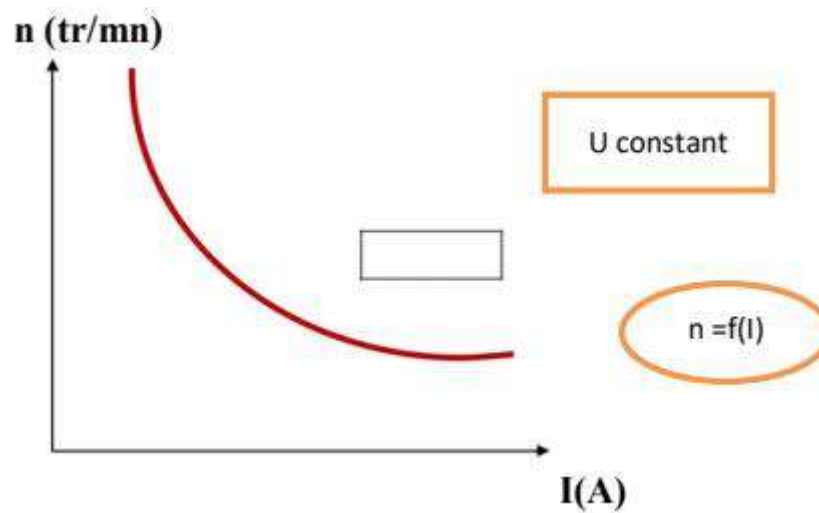


Figure (I.10) : Caractéristique de vitesse d'un moteur série [1].

Et le couple (T) est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation (I).

$$T = E.I/\Omega = K.I^2 \quad (\text{I.08})$$

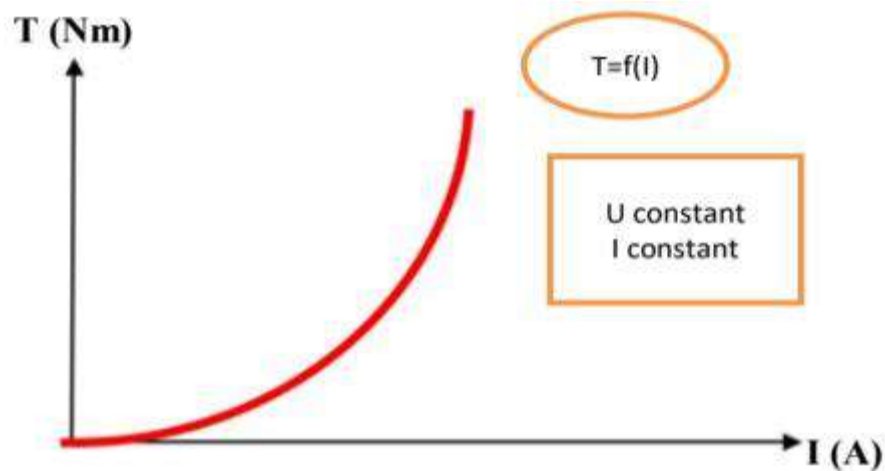


Figure (I.11) : Caractéristique de couple d'un moteur série [1].

Remarque:

Le moteur à excitation série ne doit jamais fonctionner à vide car si

$$I \rightarrow 0, \omega \rightarrow \infty \quad (\text{I.09})$$

La machine risque l'emballement.

● **Domaine d'application et Caractéristiques:**

Caractéristiques	Domaine d'application
<ul style="list-style-type: none"> -L'inducteur connecté en série avec l'induit. - Le moteur série est un autorégulateurs de puissance. - possède un fort couple de démarrage mais risque l'emballement à vide. - Le couple du moteur série ne dépend pas de la tension d'alimentation. -Le couple résistant croit rapidement avec la vitesse. - La vitesse décroît quand la charge augmente. -Supporte bien les surcharges. 	<ul style="list-style-type: none"> -engins de levage (grues, palans, ponts roulants). -ventilateurs. - pompes centrifuges. - traction.

Tableau (I.01) : Domaine d'application et caractéristiques du MCC à excitation série[5]

➤ **Moteur à excitation shunt:**

L'enroulement d'excitation shunt est connecté en parallèle sur l'alimentation du moteur, il possède les mêmes propriétés que le moteur à excitation séparée du fait que, dans les deux cas l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit. Le circuit électrique est représenté par la Figure (I.12).[06]

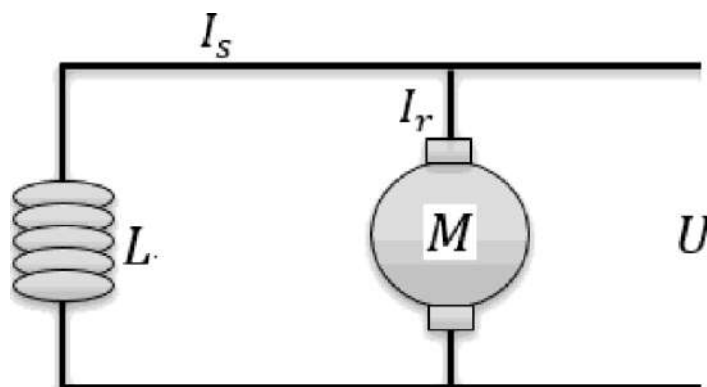


Figure (I.12) : Schéma de MCC à excitation shunt

● **Domaine d'application et Caractéristiques :**

Caractéristiques	Domaine d'application
-L'inducteur et l'induit sont branchés en parallèle. -Vitesse constante quel que soit la charge. - Le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse.	Machines-outils, appareil de levage (ascenseur).

Tableau (I.02) : Domaine d'application du MCC à excitation shunt

➤ **Moteur à excitation Composée:**

Le moteur à excitation composé, est à raccordé à avec deux excitations, excitation série et excitation shunt en même temps [06] .

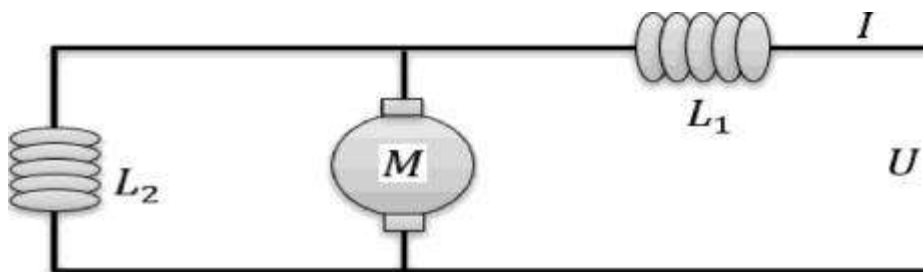


Figure (I.13) : Schéma de MCC à excitation composée.

● **Domaine d'application et Caractéristiques[05]:**

Caractéristiques	Domaine d'application
-L'inducteur est divisé en deux parties, l'une	-petit moteur à démarrage direct.
-connectée en série et l'autre en parallèle.	-ventilateur.
- Entraînements de grande inertie.	-pompes.
- Couple très variable avec la vitesse.	-machines de laminoirs.
	-Volants d'inertie.

Tableau (I.03) : Domaine d'application du MCC à excitation composée.

➤ **Moteur à excitation séparée[15]:**

Dans un moteur à excitation séparée ou indépendante, le circuit d'excitation est séparé du circuit d'induit. Si l'inducteur est un aimant permanent, le flux (Φ) est constant. Si l'inducteur est un électroaimant alimenté par une source de tension continue réglable, le flux (Φ) ne dépend que du courant dans l'inducteur appelé courant d'excitation (I_e).

Le courant crée un champ et une quantité de champ à travers une spire donne un flux. Si la tension (V_e) est constante, le courant d'excitation (I_e) est constant et le flux (Φ) est constant.

Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) ne dépend que de la fréquence (n) de rotation.

Donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension (V) d'alimentation du moteur. Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes), la puissance électrique absorbée est :

$$P_a = V.I \quad (\text{I.10})$$

Et la puissance mécanique fournie est :

$$P_u = T_u.\Omega = T_u.2\pi.n \quad (\text{I.11})$$

Si (V) est proportionnelle à (n) cela signifie que (T_u) est proportionnel à (I).

Donc le couple utile (T_u) est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation du moteur.

Pour un moteur à excitation séparée, le flux (Φ) est constant donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension d'alimentation (V) :

$$n = E/K\Phi = V - R.I/K\Phi = K.V \quad (\text{I.12})$$

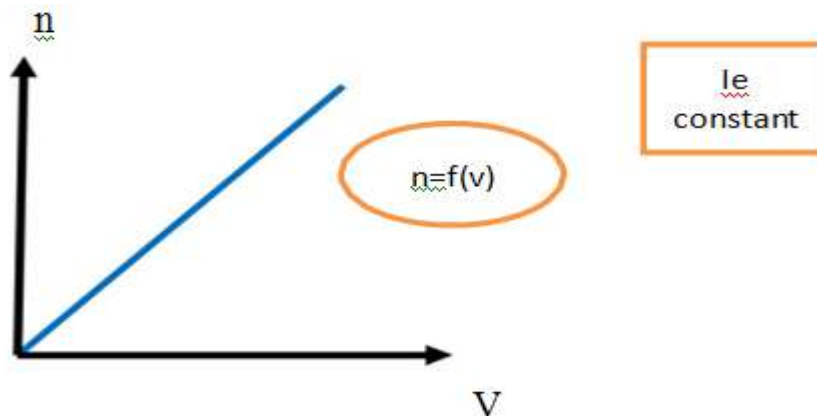


Figure (1.14): Caractéristiques d'un moteur à excitation séparée [1].

Et le couple (T_u) est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation (I) :

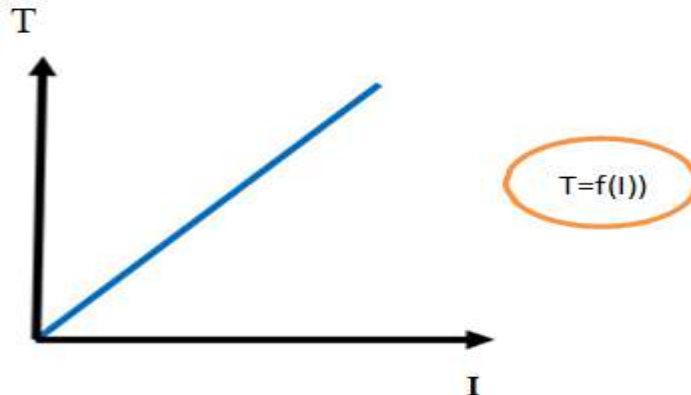


Figure (1.15): Le couple en fonction de courant d'alimentation [1].

◆ Régime transitoire (pour l'induit)

- L'équation électrique :

$$U_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{I.13})$$

$$e(t) = K_e \cdot \omega(t) \quad (\text{I.14})$$

◆ Régime permanent (pour l'induit)

- Équation électrique à l'induit :

$$U = e + R \cdot I_a \quad (\text{I.15})$$

- Équation électrique à l'inducteur :

$$U_e = r \cdot i_e \quad (\text{I.16})$$

- L'équation mécanique :

$$J \frac{dn}{dt} = C_m(t) - C_f(t) - C_r(t) \quad (\text{I.17})$$

$$C_m(t) = K_c I(t) \quad (\text{I.18})$$

$$C_f(t) = a \cdot \omega(t) \quad (\text{I.19})$$

Avec les notations suivantes:

U : tension aux bornes de l'induit en V

e : tension aux bornes de l'inducteur en V

I : courant dans l'induit en A

R : resistance aux bornes de l'induit en Ω

r : resistance aux bornes de l'inducteur en Ω

E : force électro-motrice en V

J : moment d'inertie en kg.m²

Cf: couple de frottement en N.m

a : coefficient de frottement visqueux en m.N.rad⁻¹.s

Cm : couple moteur en N.m Cr : couple résistant en N.m

Ke : constante de f.e.m en V/rad/s Kc : constante de couple en N.m/A

m: pulsation de rotation du moteur en rad. s⁻¹

● **Domaine d'application et Caractéristiques[05]:**

Caractéristiques	Domaine d'application
-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.	-Machines-outils. -moteur de broche, d'axe. -Machines spéciales.

Tableau (I.04) : Domaine d'application du MCC à excitation séparée

I.7 Variation de vitesse :

Pour modifier la vitesse d'un moteur à courant continu, on peut appliquer une tension aux bornes de l'induit. La tension d'induit est proportionnelle à la vitesse de rotation. La puissance change mais le couple reste le même. On dit alors que l'on effectue une variation de vitesse à couple constant.

I.8 Les avantages et les inconvénients :

- **Les avantages:**
 - Alimentation aisée dans les systèmes transportant leur réserve d'énergie

(autonome) : pile ou batterie.

- La variation de fréquence de rotation est simple à réaliser.

• **Les inconvénients :**

- Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou charbons et le collecteur rotatif.
- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus les balais doivent appuyer fort pour rester en contact et plus le frottement est important.
- Aux vitesses élevées les charbons doivent être remplacés très régulièrement.
- Le contact électrique imparfait cause des arcs électriques, usant rapidement le commutateur et générant des parasites dans le circuit d'alimentation.
- Pour des fonctionnements en moteur de petite puissance, ce problème peut être résolu grâce à la technologie du moteur à courant continu sans balai communément appelé moteur brushless. Un dispositif d'électronique de puissance remplace l'ensemble balai collecteur. La position du rotor est détectée par des capteurs à effet Hall et le courant est commuté par des transistors à effet de champ [04].

I.9 Bilan de la puissance :

On peut représenter le bilan des puissances mises en jeu dans un moteur à courant continu en fonctionnement nominal par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que la puissance diminue[07].

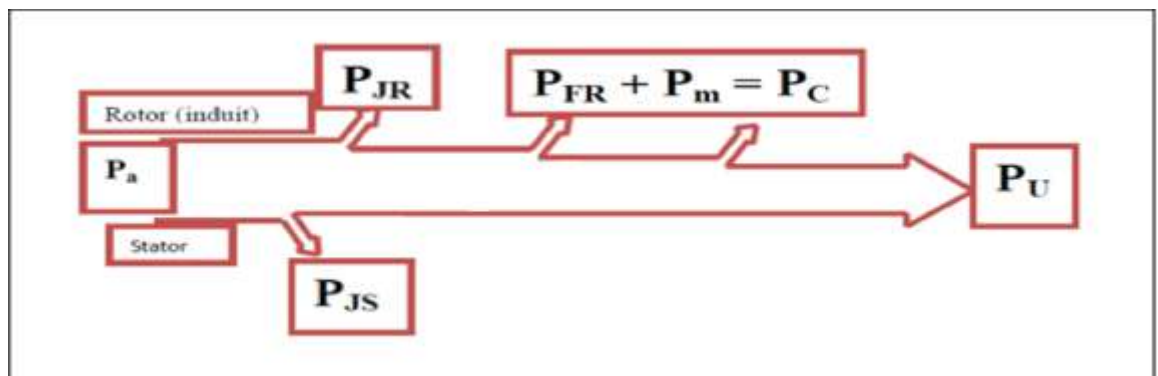


Figure (I.16) : Bilan de la puissance

P_a : Puissance absorbée.

P_u : Puissance utile.

P_{JS} : Pertes par effet joule dans l'inducteur.

P_{JR} : Pertes par effet joule dans l'induit.

P_C : Pertes fer + pertes mécaniques.

I.10 Le rendement :

Les moteurs à courant continu consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement. L'énergie mécanique fournie sera toujours plus petite que l'énergie électrique absorbée. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I.20})$$

P_u : Puissance utile.

P_a : Puissance absorbée.

I.11 Utilisation de la machine à courant continu:

Le moteur série est intéressant quand la charge impose d'avoir un gros couple, au démarrage et à faible vitesse de rotation.

Le moteur sépare est particulièrement adapté aux entraînements de machines nécessitant des vitesses réglables (action sur la tension) et présentant un couple important en basse vitesse (machines outils).

- ✓ démarreur (automobile ...).
- ✓ moteur de traction (locomotive, métro ...).
- ✓ appareils de levage.
- ✓ Ventilateurs, pompes centrifuges, compresseurs, pompes à piston.
- ✓ Machines-outils à couple variable ou a mouvement alternatif (étaux-limeurs, raboteuses).

I.12 Conclusion:

Ce chapitre vous permet de rappeler les différents éléments qui composent une machine à courant continu et son fonctionnement. Après des recherches, nous avons constaté que les moteurs à excitation séparée et à aimants permanent sont les plus adaptés à la variation de vitesse. Dans le chapitre suivant, nous étudierons les convertisseurs statiques.

II.1 Introduction :

L'utilisation des convertisseurs de puissance pour des différentes applications devient de plus en plus importante.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents hacheurs qui sont utilisés dans les processus de variation de vitesse du moteur à CC. Ensuite, nous donnerons une description détaillée de la stratégie d'obtention d'une onde MLI utilisée pour la commande d'ouverture et de fermeture des interrupteurs électroniques installés au niveau du hacheur.

II.2 Définition :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter une source d'énergie électrique à un récepteur donné. Il existe plusieurs familles de convertisseurs statiques selon le type de machine à commander et la nature de l'alimentation (monophasée ou triphasée).[08]

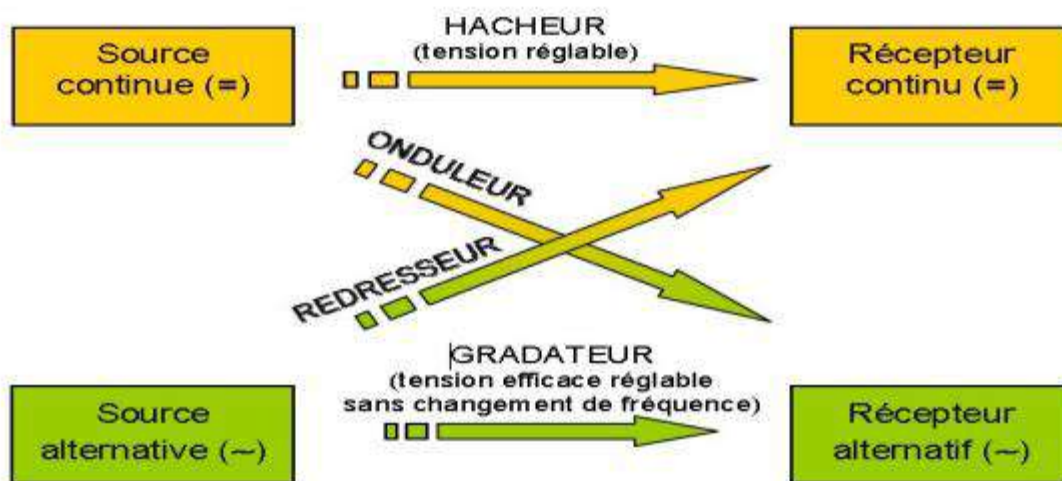
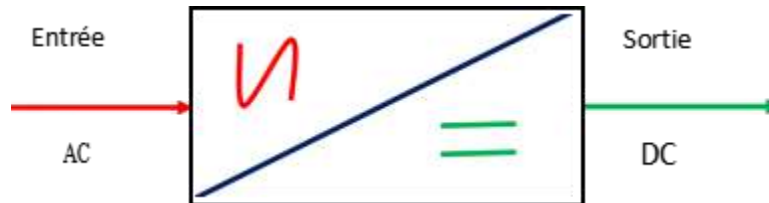


Figure (II.1) : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance

II.3 Les redresseurs :

Ce sont des convertisseurs alternatif-continu qui permettent de convertir une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle, si ils sont commandés la valeur moyenne de la tension obtenue est alors réglable [09] .



Dans ce type de convertisseur, on peut les classer en deux classes : les redresseurs commande et les redresseurs noncommande .

II.3.1 Le redresseur commande :

Dans les redresseurs commandés, les diodes sont remplacées par des thyristors pour commander la puissance voulue aux bornes du récepteur.

■ Principe de fonctionnement :

Comme pour le hacheur, le redresseur permet de faire varier la tension moyenne du moteur. On fait varier la tension de moteur en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors. L'avantage du redresseur est qu'il transforme directement la tension alternative en tension continue variable ce qui représente un cout moins important par rapport au hacheur.

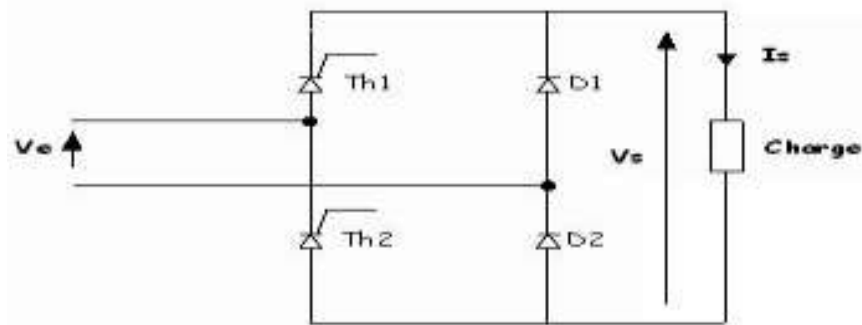
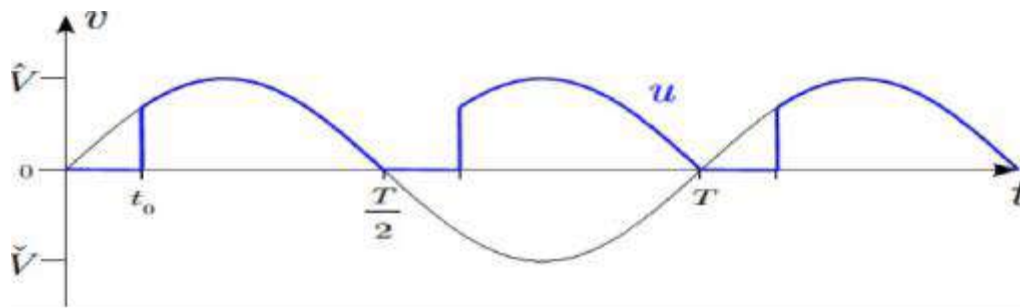


Figure (II.2) : Redresseur commandé pont mixte symétrique



Figure(II.3) : La tension aux bornes de la charge avec un redresseur commande

➤ **Valeur moyenne de la tension redressée:**

$$U_{cmoy} = \frac{U}{\pi} (1 + \cos \delta) \quad (\text{II.01})$$

δ : L'angle d'amorçage

Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu. Le pont mixte alimente un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante, sa fém s'exprime en fonction de la vitesse de rotation par la relation :

$$E = K \cdot n \quad (\text{II.02})$$

n : vitesse de rotation (en tr/s).

➤ **La tension:**

en fonction des éléments de la charge par la relation :

$$E = U_c - R \cdot i - L \frac{di}{dt} \quad (\text{II.03})$$

En valeur moyenne :

$$E = \langle U_c \rangle - R \cdot \langle i \rangle = K \cdot n \tag{II.04}$$

La vitesse de rotation du moteur s'exprime en fonction de l'angle δ :

$$n = \frac{1}{K} \left[\frac{u}{\pi} (1 + \csc \delta) - R \cdot \langle i \rangle \right] \tag{II.05}$$

II.3.2 Redressement non commandé :

Le redressement permet d'obtenir un courant unidirectionnel à partir d'une source alternative, principalement monophasée ou triphasée. Les redresseurs sont du type simple alternance ou double alternance. En général, le lissage du courant par inductance est utilisé pour les fortes puissances, et le lissage de la tension par condensateur pour les faibles puissances [5].

■ **Redressement double alternance :**

Pour obtenir le redressement double alternance on utilise le pont de Graëtz qui est constitué de quatre diodes montées en parallèle deux par deux . Les diodes D1et D2 son à cathodes commune et les diode D3 ,D4 son à anodes communes (voire figure II.1) .

Le pont est alimenté par une tension alternative sinusoïdale telle que :

$$v'e(t) = V \sin(\omega t) \tag{II.06}$$

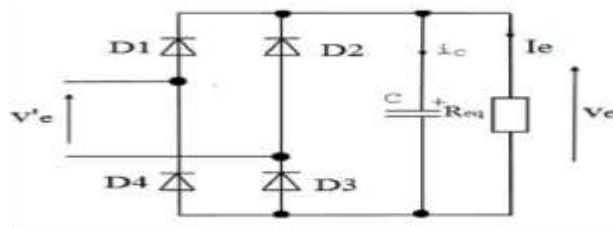
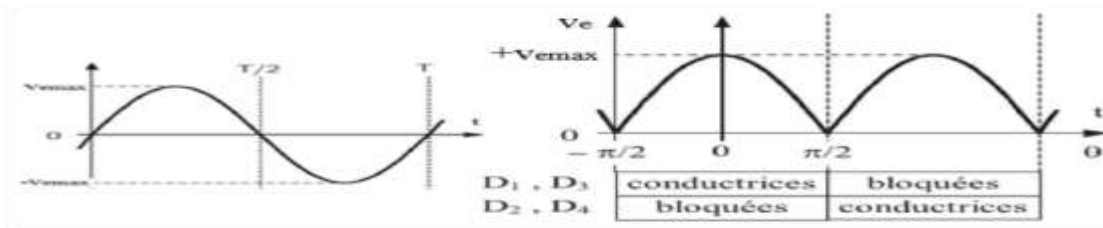


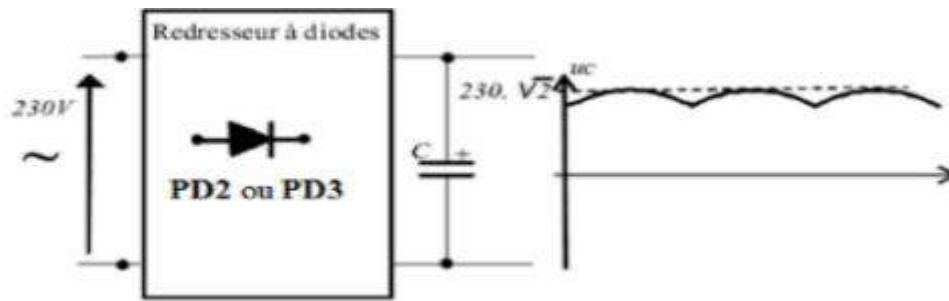
Fig II 1 : pont de Graëtz



Figure(II.4) : a) forme de tension d' alimentation b) tension redressée [5]

▪ **Filtrage de la tension redressée par une condensateur :**

Le filtrage de la tension par un condensateur en parallèle sur les borne de sortie du pont devrait être utilisé : le redresseur relie alors directement *deux dipôle de tension* , réseaux et condensateur (Figure II.5).

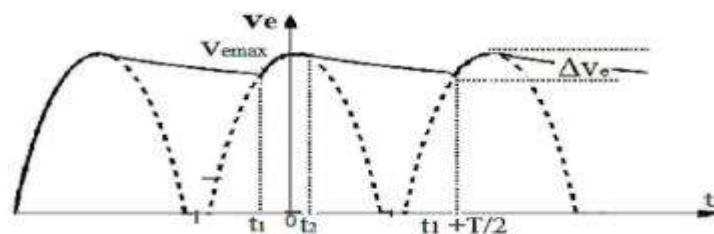


Figure(II.5): filtrage de la tension par une condensateur

L'association *pont de diode + condensateur* constitue le dispositif d'alimentation d'une multitude d'appareil, aussi bien dans le domaine de la domotique (téléviseur , four à micro- onde...) que l'électronique (alimentation des carte, matériels informatique) ou de l'électrotechnique (étage d'entrée des variateur de vitesse).

◆ **Tension redressée :**

L'Allur de la tension redressée est donnée dans la figure II.4 , entre les instant t_1 et t_2 la tension $V_e(t)$. est égale à la tension du réseau, en suite le condensateur se décharge dans la charge R_{eq} jusqu'à ce que la tension a se borne redevienne égale a la tension du réseau , à l'instant $t_1 = \frac{T}{2}$



Figure(II.6) : tension redressé et filtré

Si la constante de temps du circuit de sortie est telle que : $\tau = R_{eq}C_e \gg T/2$

L'intervalle de conduction des diodes du pont est très réduite et la décharge du condensateur s'effectue selon une loi quasiment linéaire, avec une faible décroissance de $v_e(t)$ dans ces conductions - qui sont généralement réalisées- nous pouvons admettre que la tension redressée et le courant dans la charge sont pratiquement constant :

$$v_e \approx v_{emax} \approx v_e(t) \quad (\text{II.07})$$

$$i_e(t) = I_e = \frac{v_s}{R_{eq}} \quad (\text{II.08})$$

On parle alors de redresseur de crête .

Il est possible de donner une valeur approchée de l'ondulation crête à crête de $v_e(t)$.

En confondant T2 avec 0, l'expression de la tension redressée pendant la décharge du condensateur est :

$$v_e = v_{emax} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{II.09})$$

L'ondulation de la tension de sortie vaut :

$$\Delta V_e = v_e(0) - v_e(t_1 + \frac{T}{2}) \quad (\text{II.10})$$

En confondant $t_1 + \frac{T}{2}$ avec :

$$\Delta v_e = v_{emax} (1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}) \quad (\text{II.11})$$

Puisque la constante de temps τ est grande devant la période T/2 de la tension redressé :

$$\Delta V_e = \frac{V_{emax} \cdot T}{2\tau} \quad (\text{II.12})$$

Avec $\tau = R_{eq} \cdot C_e$, $T = 1/f$ et $V_{emax} = V_e = R_{eq} \times I_e$: après simplification:

$$\Delta v_e \approx \frac{I_e}{2fC_e} \rightarrow C_e = \frac{I_e}{2f \cdot \Delta v_e} \quad (\text{II.13})$$

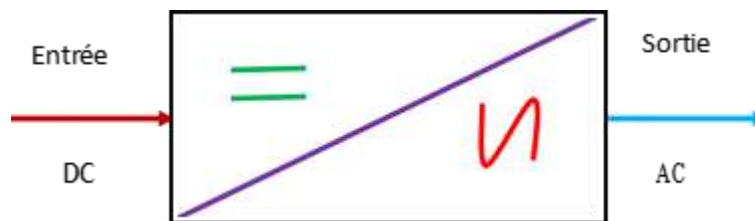
Cette relation donne des résultats satisfaisants à condition que $\Delta V_e \ll V_e$ [7].

R_{eq} : résistance équivalente de convertisseur BUCK pendant

C_e : condensateur d'entrée

II.4 Les onduleurs :

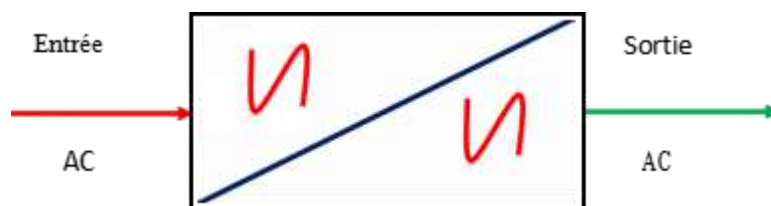
Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue



On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW) [08] .

II.5 Les gradateurs :

Le gradateur est un appareil qui permet de convertir une tension alternative sinusoïdale à fréquence fixe et de valeur efficace constante en une tension alternative de valeur efficace réglable.

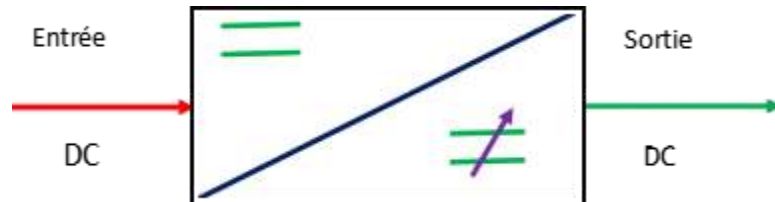


Dans ce type de convertisseur on distingue deux types de commande :

- ✓ Gradateur à angle de phase
- ✓ Gradateur à train d'onde

II.6 Les hacheurs :

L'hacheur est un dispositif permettant d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue fixe (batterie d'accumulateurs ou bien pont redresseur alimenté par le réseau de distribution).



Un hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteurs électroniques commandables à la fermeture et à l'ouverture telle que les transistors bipolaires ou IGBT ou les thyristors GTO.

II.6.1-Principe de fonctionnement :

Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison (source-charge) à l'aide d'un interrupteur électronique. [10]

II.6.2-Le rapport cyclique :

Le rapport cyclique est défini comme le temps (t_f) pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de coupage du montage (T).

$$\alpha = \frac{t_F}{T} \quad (\text{II.14})$$

La valeur de rapport cyclique : $0 \leq \alpha \leq 1$.

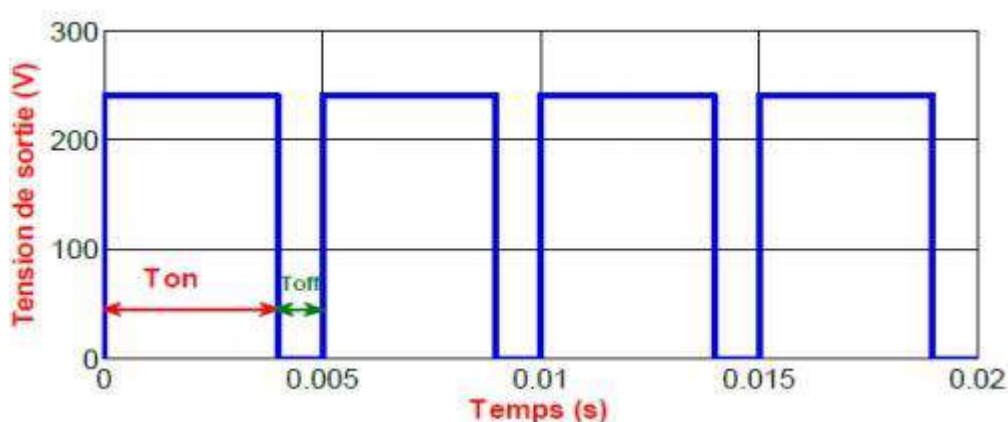


Figure (II.7) : Tension entre les armatures d'induit

II.7 Différents type d'hacheurs

Selon la position du commandeur et du hacheur, différent de types de convertisseurs de tension peuvent être réalisée :

- ✓ Hacheur abaisseur de tension (série).
- ✓ Hacheur élévateur de tension (parallèle).
- ✓ Hacheur dévolteur- survolteur (série-parallèle).

II.7.1-Hacheur série :

Hacheur abaisseur, hacheur dévolteur, hacheur série, hacheur de type Buck.

Le hacheur série est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continu et la charge de sortie continu de type source de courant. L'interrupteur peut être remplacé par transistor les courant est toujours positif et les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

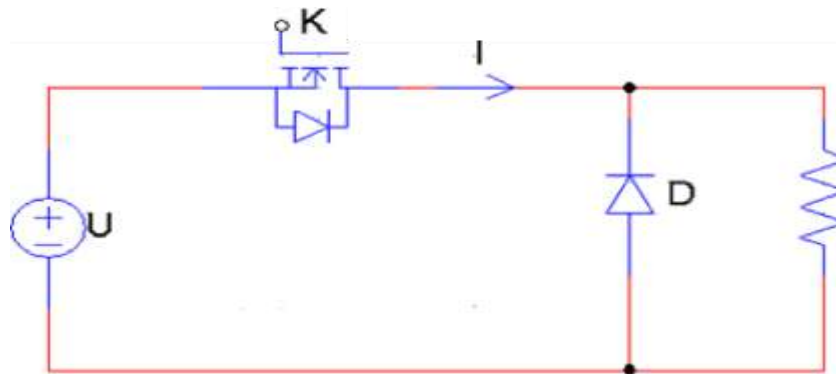


Figure (II.8) : Schéma d'un hacheur série.

❖ Principe de fonctionnement :

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage ($T = \frac{1}{f}$), comporte deux étapes. Lors de la première étape, on rend le transistor passant et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de $(0 \leq t \leq \alpha t)$. Lors de la seconde étape on bloque le transistor, la diode devient passante, cette phase dure de $(\alpha t \leq \alpha \leq t)$.

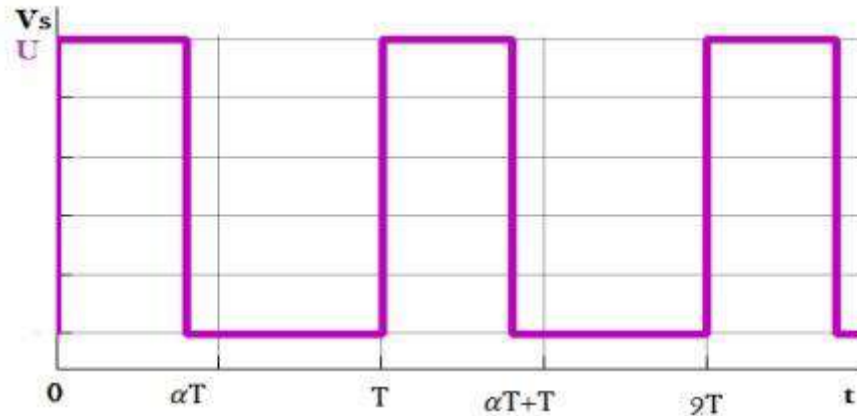


Figure (II.9) : La tension aux bornes de la charge avec un hacheur série
Valeur moyenne de la tension :

$$v_{smoy} = \frac{1}{T} \int_0^t v_s(t) \cdot d(t) = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha t} u \cdot d(t) = \frac{1}{T} \int_{\alpha t}^t 0 \cdot d(t) \quad (II.15)$$

$$v_{smoy} = \frac{U}{T} (\alpha t - 0) = \alpha U \quad (II.16)$$

La valeur moyenne de la tension (v_{smoy}) peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique α quand on fait varier de 0 à 1, (v_{smoy}) varie linéairement de 0 à U.

Intérêt d'utiliser un hacheur série :

Le hacheur série permet de faire varier la vitesse de rotation des moteurs à courant continu. On rappelle que la vitesse d'un tel moteur est proportionnelle à la tension d'alimentation.

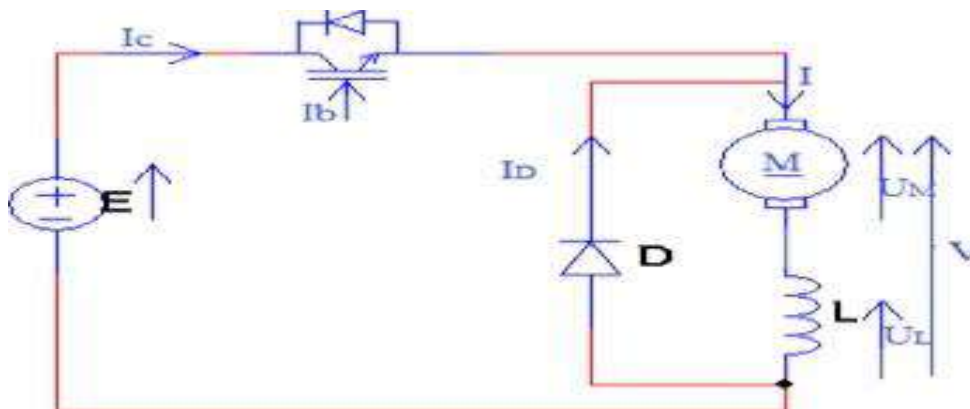


Figure (II.10) : Schéma hacheur série commande un moteur à courant continu

Pour un bon fonctionnement du moteur, il est préférable que le courant soit le plus régulier possible, d'où la présence d'une bobine de lissage. Si son inductance est suffisamment grande, on pourra considérer le courant comme constant ($I = I_0$). [11]

Loi des mailles:

$$V_S = U_M + U_L \quad (\text{II.17})$$

On passe aux valeurs moyennes:

$$V_{S\text{moy}} = U_{M\text{moy}} + U_{L\text{moy}} \quad (\text{II.18})$$

Et comme pour un signal périodique

$$U_{L\text{moy}} = 0 \quad (\text{II.19})$$

Nous obtenons pour le moteur

$$V_{S\text{moy}} = U_{M\text{moy}} = E \quad (\text{II.20})$$

Avec:

$$K' = K \cdot \Phi$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \omega = \alpha U \quad (\text{II.21})$$

$$K' = K \cdot \Phi \quad (\text{II.22})$$

Finalement la f.é.m du moteur peuvent être régler grâce eau rapport cyclique par la rotation:

$$E = K' \cdot \Omega = \alpha U \quad (\text{II.23})$$

Avec:
$$K'' = \frac{U}{K'} \quad (\text{II.24})$$

$$\Omega = K'' \cdot \alpha \quad (\text{II.25})$$

On voit ici la vitesse varie linéairement avec le rapport cyclique α , lequel est proportionnel à la tension de commande.

II.7.2 Hacheur parallèle :

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur de type Boost.

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu et la charge sortie est de type tension continu l'intemipteur peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage)[08]

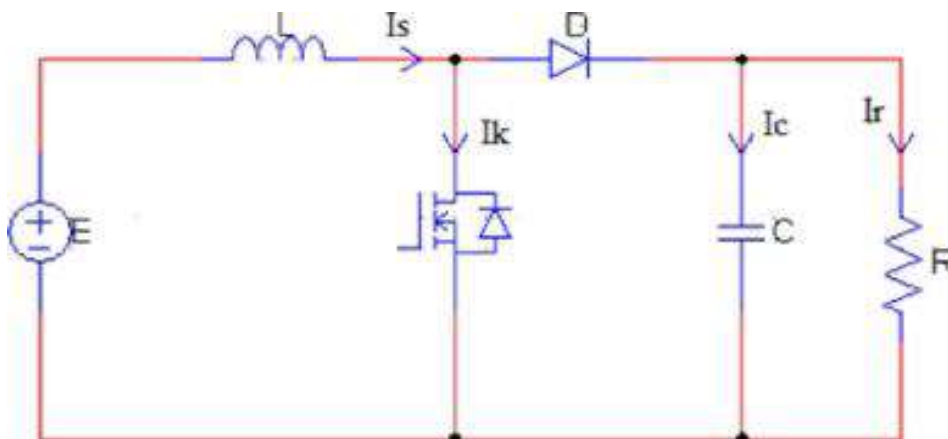


Figure (II.11): Schéma d'un hacheur parallèle

❖ **Principe de fonctionnement :**

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de (0 à α), l'interrupteur commandé est fermé (passant). Cette fois, la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée. Lors de la seconde partie du cycle, de (α à T), on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. C'est alors que la source et la charge sont reliées.

❖ **Valeur moyenne de la tension :**

$$v_{smoy} = \frac{U}{(1-\alpha)} \quad (\text{II.26})$$

II.7.3 Hacheur série-parallel :

Hacheur inverseur, dévolteur- survolteur, hacheur de type buck-boost. Le hacheur inverseur est un convertisseur indirect DC—DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée.[11]

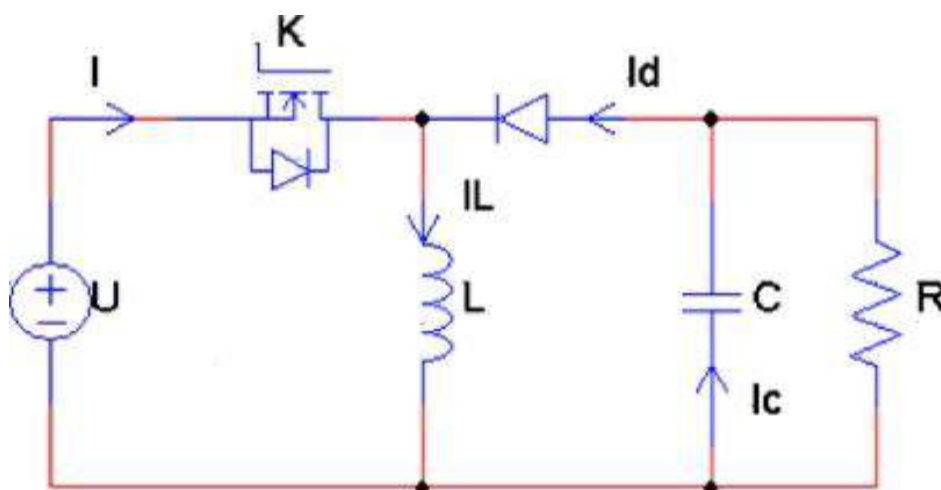


Figure (II.12) : Schéma d'un hacheur série-parallel

II.8 Hacheur réversible:

Les structures que nous avons vu précédents (Hacheur série ou Parallèle) ne sont pas réversibles, ni en tension, ni en courant. L'énergie va donc toujours de la source vers la charge. Il est possible de modifier ces dispositifs pour inverser le sens de parcours de l'énergie. Ainsi, une source peut devenir une charge et inversement. Ce type de comportement se rencontre usuellement dans les systèmes électriques. Ainsi, un moteur en sortie d'un hacheur représente une charge. Cependant, si on veut réaliser un freinage, le moteur va devenir génératrice, ce qui va entraîner un renvoi d'énergie à la source[12].

II.8.1 Hacheur réversible en courant :

Soit le transfert de l'énergie s'effectue de la source vers la charge alors la machine à courant continu fonctionne en moteur.

Soit le transfert de l'énergie s'effectue de la charge vers la source alors la machine à courant continu fonctionne en génératrice. Il s'agit d'une phase de freinage de la machine à courant continu.[12]

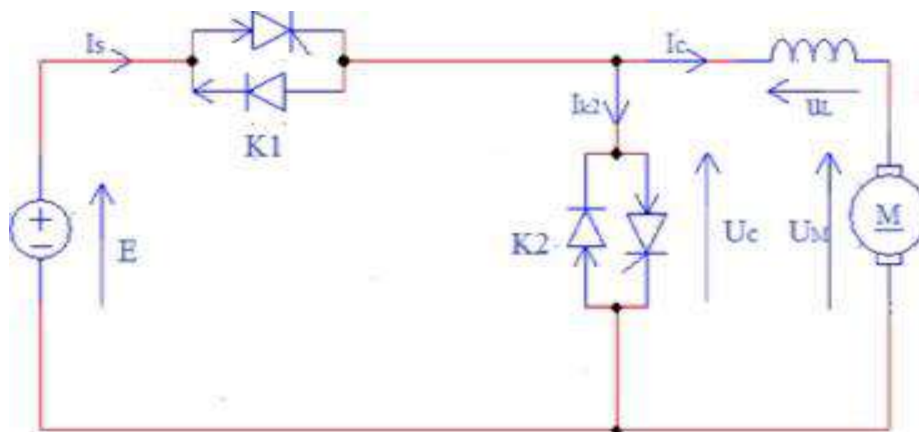


Figure (II.13) : Schéma hacheur réversible en courant

II.8.2 Hacheur réversible en tension:

Lors de la première phase de fonctionnement, dans l'intervalle de temps $[0, \alpha T]$: T1 et T2 sont fermés D1 et D2 ouvertes. $U_c = +E$.

Lors de la seconde phase de fonctionnement, sur l'intervalle de temps $[\alpha T, T]$, T1 et T2 sont ouvertes et D1, D2 sont fermés. $U_c = -E$. [12]

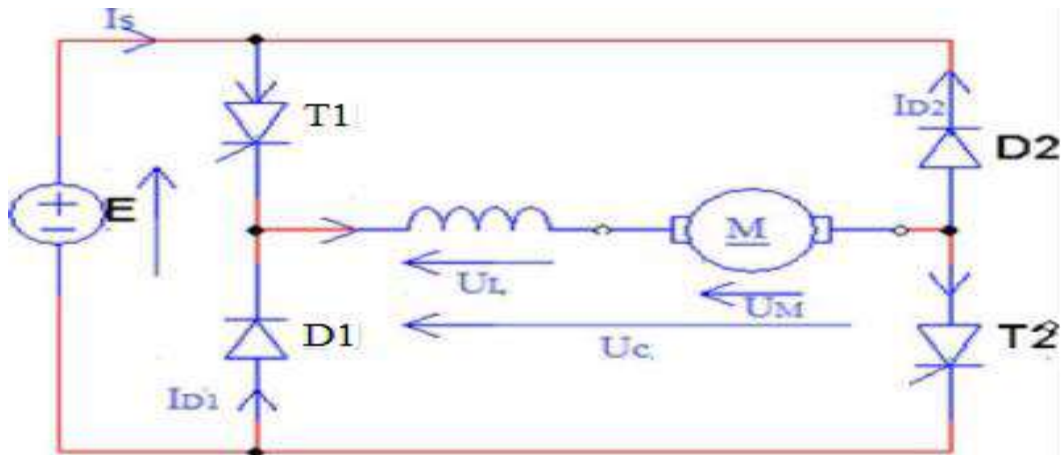


Figure (II.14) : Schéma Hacheur réversible en tension

II.9-hacheur à quatre quadrants :

Pour obtenir une réversibilité quatre quadrants, il suffit d'associer tété bêche deux hacheurs réversibles deux quadrants (K1, K2, D1, D2) et (K3, K4, D3, D4). La tension peut être négative ou positive, le courant aussi.

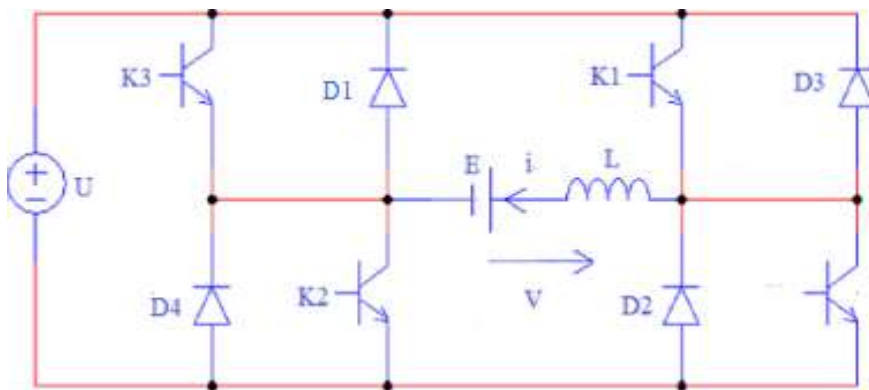


Figure (II.15) : Schéma hacheur à quatre quadrants

On procédé ainsi A chaque période T

On commande la fermeture de K1 et K2 pendant ($0 < t < \alpha T$).

On commande la fermeture de K3 et K4 pendant($\alpha T < t < T$).

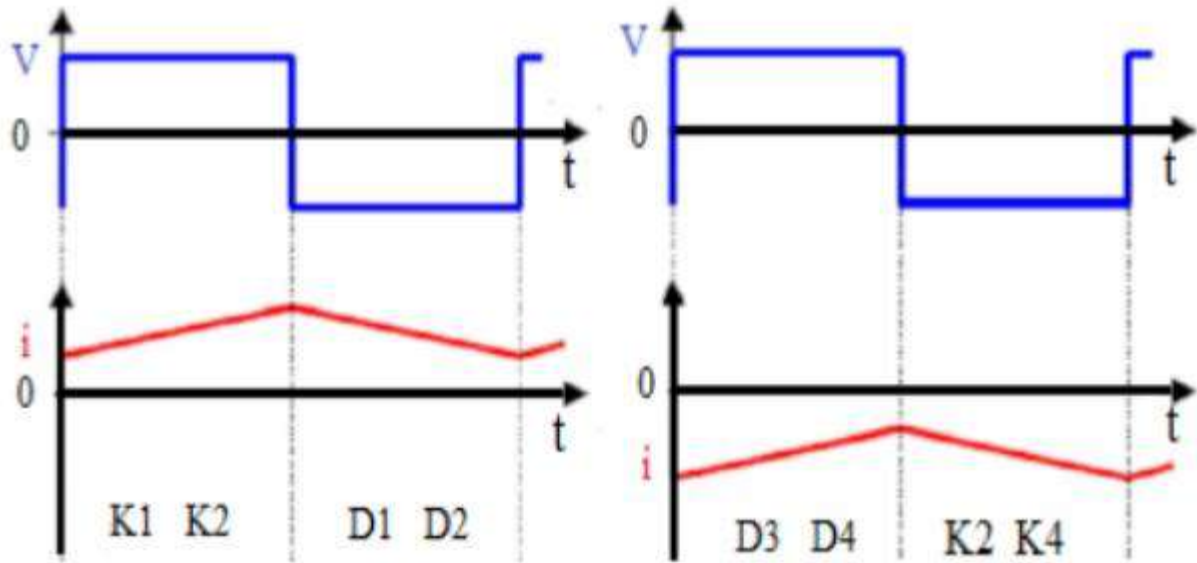


Figure (II.16) : La tension et courant aux bornes de la charge avec un hacheur quatre quadrants

■ **Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :**

$$V_{\text{smoy}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_S(t) \cdot d(t) = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U_d(t) + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -U_d(t) \quad (\text{II.27})$$

$$V_{\text{smoy}} = U \cdot (2\alpha - 1) \quad (\text{II.28})$$

Maintenant on peut avoir ($V_{\text{smoy}} < 0$) (formule), le courant pouvant également être négatif donc on peut avoir un sens de rotation négatif. Quand α varie de (0 à 1), la tension moyenne varie de (-U à +U).

On dispose de quatre quadrants modes de fonctionnement : $E > 0$ et $I > 0$, rotation dans le premier sens.

$E > 0$ et $I < 0$, phase de freinage (récupération de l'énergie). $E < 0$ et $I < 0$, rotation dans le deuxième sens.

$E < 0$ et $I > 0$, phase de freinage (récupération de l'énergie).

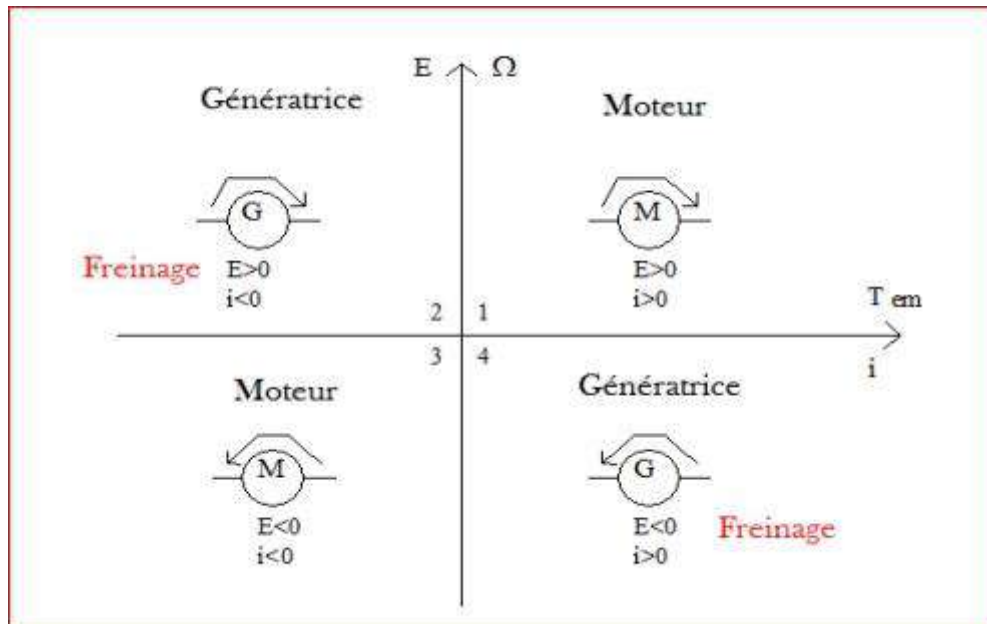


Figure (II.17) : Principe du fonctionnement d'un hacheur quatre quadrants.

II.10 Technique de command MLI:

La qualité de la tension de sortie d'un hacheur dépend largement de la technique de commande utilisée pour commander les interrupteurs de ce hacheur. Il existe plusieurs techniques de commande et le choix d'une technique parmi toutes les possibilités dépend essentiellement du type d'application auquel l'appareil est désigné. La technique la plus utilisée dans les variateurs de vitesse pour machine à courant continu est la commande par modulation de la largeur d'impulsion MLI.

Les techniques de modulation de largeur d'impulsions sont multiples. Cependant, 04 catégories de MLI ont été développées :

Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence à une porteuse, en général, triangulaire.

Les modulations pré-calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre.

Les modulations post-calculées encore appelées MLI régulières symétriques ou MLI vectorielles les angles de commutation sont calculés en ligne.

Les modulations stochastiques pour lesquelles l'objectif fixé est le blanchiment du spectre (bruit constant et minimal sur l'ensemble du spectre). Les largeurs des impulsions sont réparties suivent une densité de probabilité représentant la loi de commande.

Le développement considérable de la technique de modulation en largeur d'impulsion ouvre une large étendue d'application dans les systèmes de commande et beaucoup d'autre fonctions.

Elle permet une réalisation souple et rentable des circuits de commande des hacheurs.

Principe de la commande MLI :

Le principe de base de la modulation de la largeur d'impulsion MLI est fondé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi, la tension de sortie est formée par une succession de créneau d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la production d'un signal MLI est de comparer entre deux signaux.

Le premier, appelé signal de référence, est un signal continue qui varie entre deux seuils définis en fonction de notre application.

Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commande des interrupteur statique du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs. [14]

titre d'exemple nous donnons une simulation par le logiciel (power Sim) d'un signal modulant constant comparé à une porteuse triangulaire.

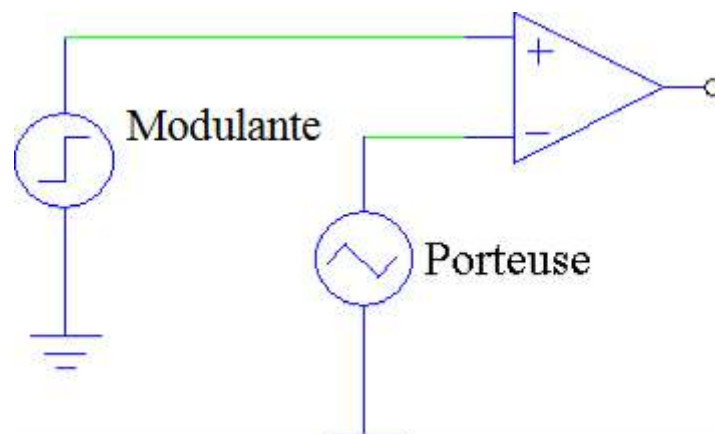


Figure (II.18) : Le schéma de technique MLI

La Fréquence de la porteuse 1KHzLe signal modulant de profondeur 0.6

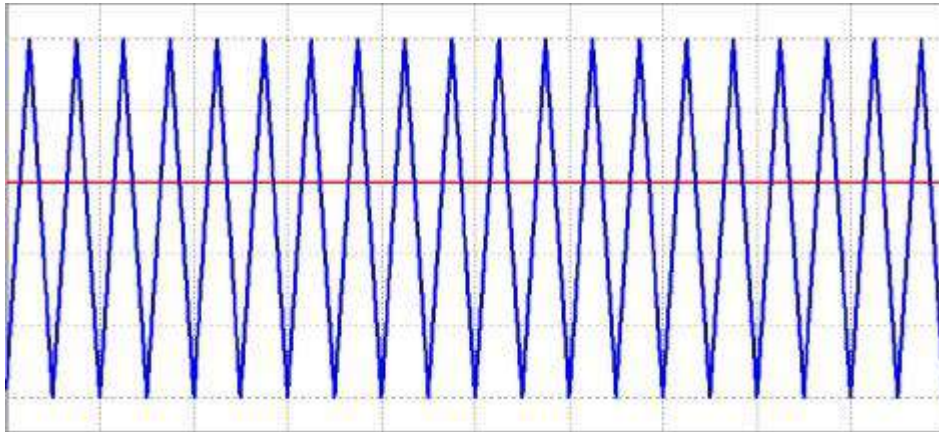


Figure (II.19) : La comparaison entre le signal modulant et la porteuse

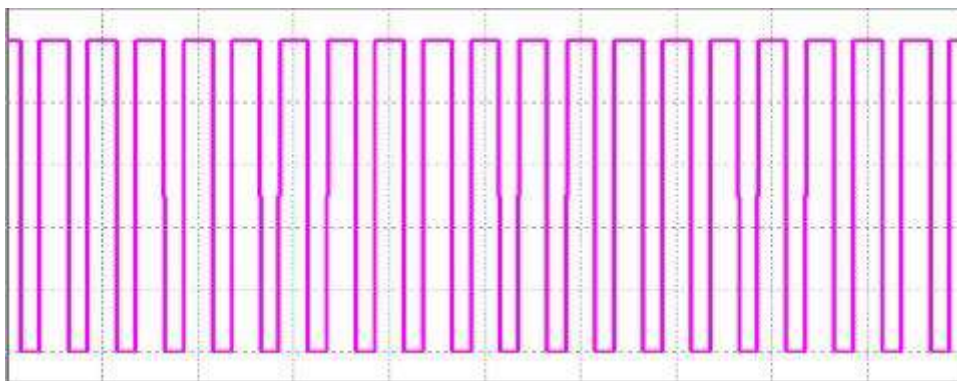


Figure (II.20) : Signal MLI de sortie

Le principe se fait par comparaison entre les deux signaux utilisant un amplificateur opérationnel. L'intersection de la référence avec la porteuse, si la référence plus grande que la porteuse provoque un état 1 (fermeture de l'interrupteur). Si la référence est inférieure à la porteuse provoque un état 0 (l'ouverture de l'interrupteur).

II.12 Les montages d'électronique de puissance:

Le montage est constitué de quatre circuits de base, suivante :

II.12.1 Circuit de commande :

Il comporte l'appareillage nécessaire à la commande des circuits de puissance. On trouve: La source d'alimentation de faible puissance. Un appareil d'isolement (sectionneur).

- ✓ Une protection du circuit.
- ✓ Un appareil de commande ou de contrôle (bouton poussoir, détecteur de grandeur physique).
- ✓ Organes de commande (bobine du contacteur).

II.12.2 Circuit de puissance :

Il comporte l'appareillage nécessaire au fonctionnement des récepteurs de puissance Suivant un automatisme bien défini [13].

On trouve:

- ✓ Une source de puissance (généralement réseau triphasé).
- ✓ Un appareil d'isolement (sectionneur).
- ✓ Un appareil de protection (fusible, relais thermique)
- ✓ les contacts de puissance.
- ✓ Des récepteurs de puissance (moteurs).

II.12.3 Circuit d'amplification :

Ce bloc est utilisé pour le but d'amplifier le signal généré par le bloc de commande transmise vers la base ou la gâchette des intemipteurs électroniques.

III.12.4 Circuit de protection :

Assure l'isolation galvanique (optocoupleur-transformateur d'impulsion) entre la partie puissance et la partie commande (faible puissance).

II.13 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu les stratégies de contrôle MCC utilisant des convertisseurs DC-DC. Différentes méthodes et hacheurs ont été développés pour contrôler la vitesse d'un moteur à courant continu (MCC). Parmi ces méthodes, nous choisissons le réglage de la tension pour plus de commodité, tandis que le hacheur série contrôle le flux de la source de tension pour contrôler la charge actuelle. Dans notre projet, cette charge représente un moteur à courant continu.

III.1 Introduction :

Pour modifier la vitesse d'un moteur à courant continu, la tension d'alimentation à ses bornes change. Pour cela, on utilise un hacheur, qui contrôle la variation de la tension moyenne aux bornes du moteur, suivie de la variation de la vitesse de rotation. C'est ce qu'on appelle la modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Dans ce chapitre, nous allons simuler des circuits hacheurs à un seul quadrant et quatre quadrants pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu.

III.2 Partie de simulation:

Le logiciel MATLAB/SIMULINK, est un bon moyen d'étude du fonctionnement des machines à courant continu et d'autres types de machines également dans les conditions de fonctionnement voulues. Il nous permet d'observer de manière réaliste des phénomènes électriques et physiques (couple, vitesse, courant).

III.2.1 Simulation d'un hacheur à un seul quadrant commande un moteur à courant continu à excitation séparée :

Un hacheur est un dispositif électrique permettant de faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu en faisant varier la tension moyenne d'alimentation du moteur.

III.2.1.1 Schéma bloc de la simulation :

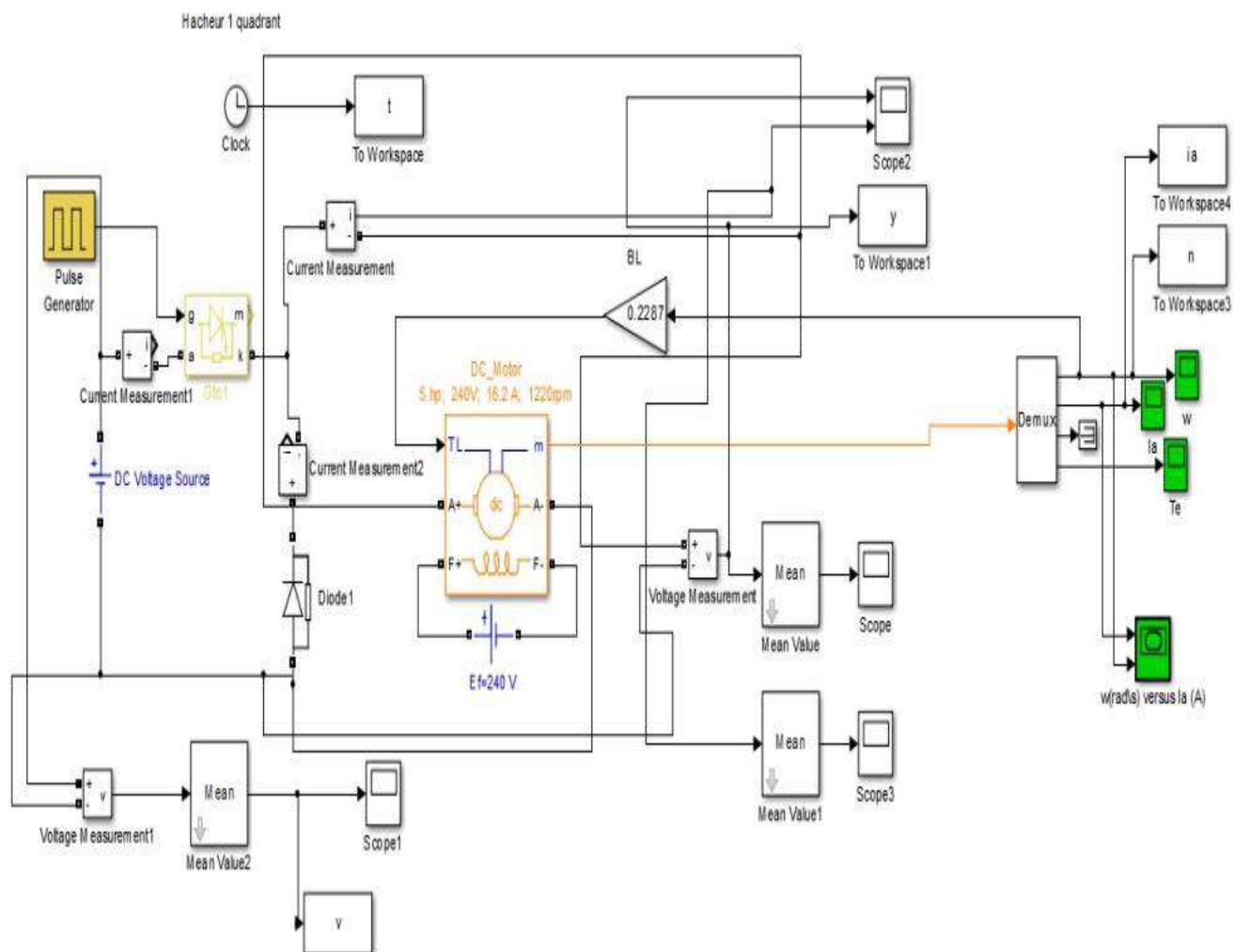


Figure (III.1) : Hacheur série commande un moteur à courant continu

III.2.1.2 Paramètre du moteur à courant continu :

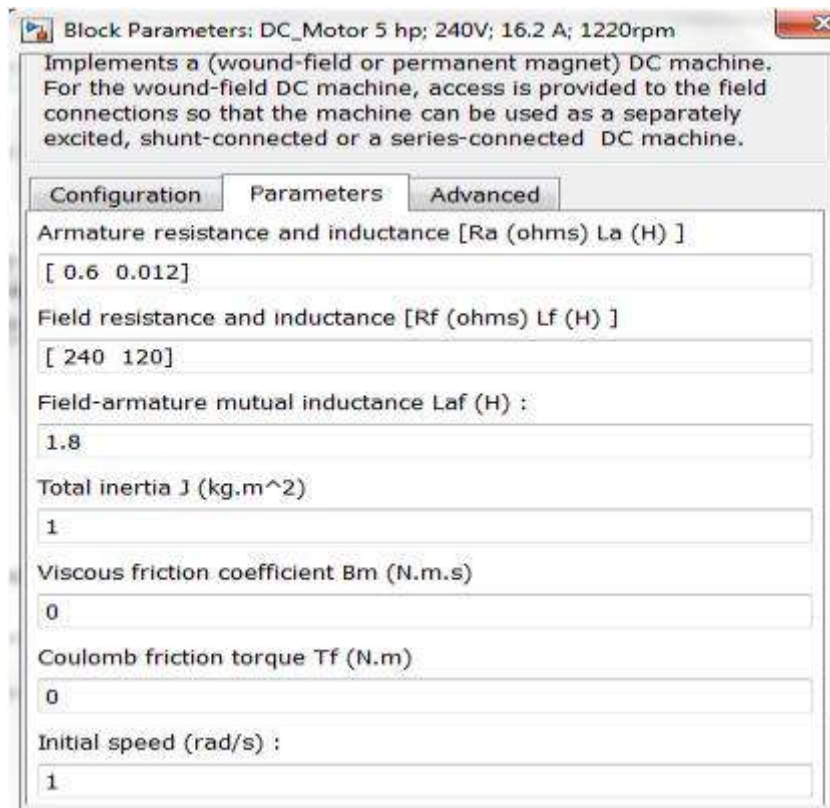


Figure (III.2) : Fenêtre de réglage des paramètres du moteur à courant continu

III.2.1.3 Les courbes et résultats de simulation :

Pour montre l'importance de la variation de rapport cyclique sur la variation de la vitesse on prend deux rapport différents.

$\alpha = 0.4$:

➤ Tension d'entré :

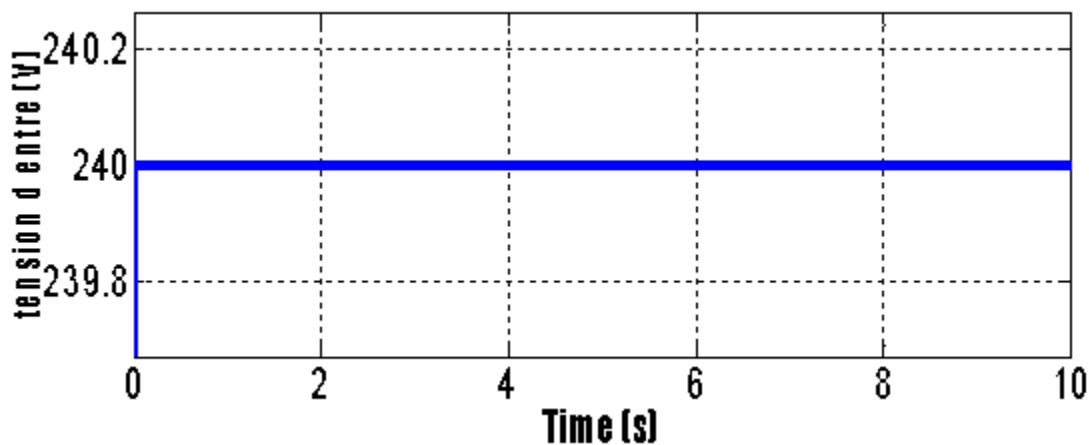


Figure (III. 3) : La tension d'entré d'hacheur

➤ Tension de sortie :

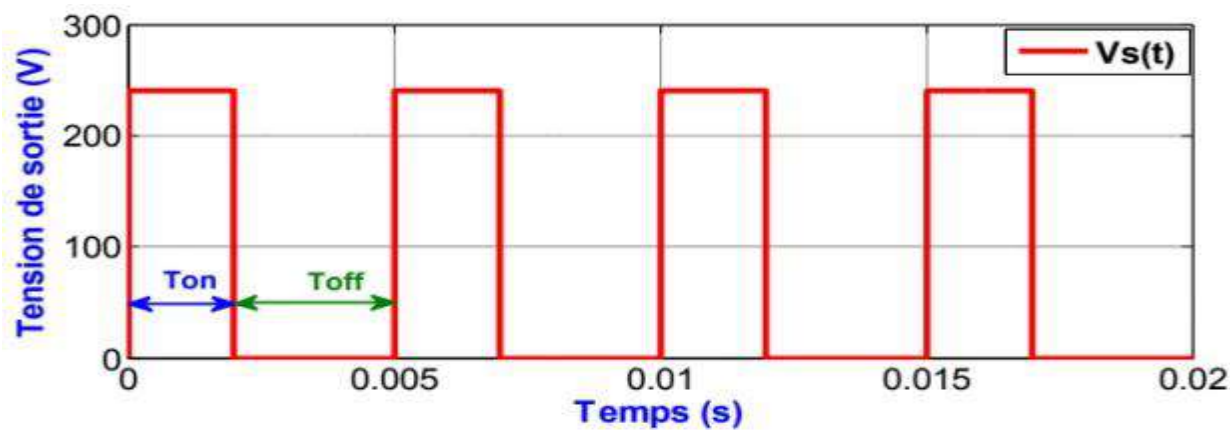


Figure (III.4) : La tension de Sortie avec un rapport cyclique de 40 %

➤ La vitesse :

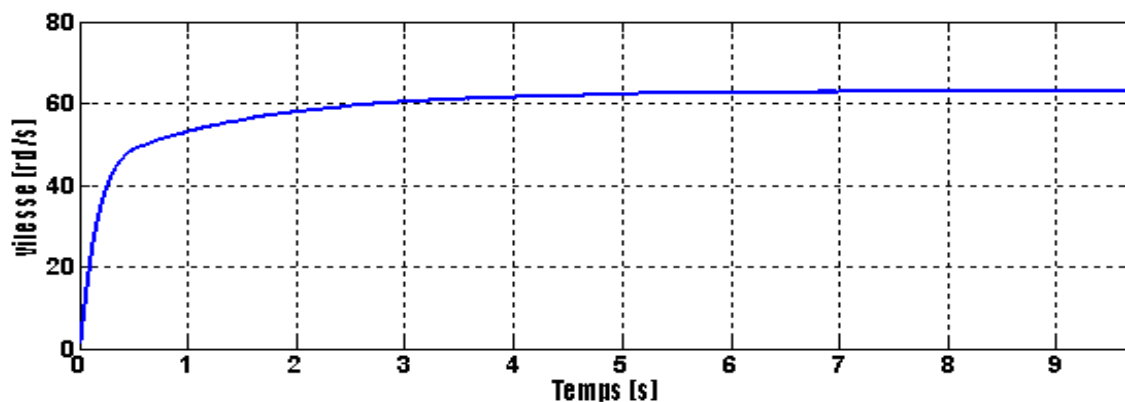


Figure (III.5) : La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 40 %

◆ Interprétation :

La Vitesse débute de zéro pour se stabiliser de 63.1 rad/s, qui est la vitesse en régime établie. La courbe à une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.

➤ Le courant :

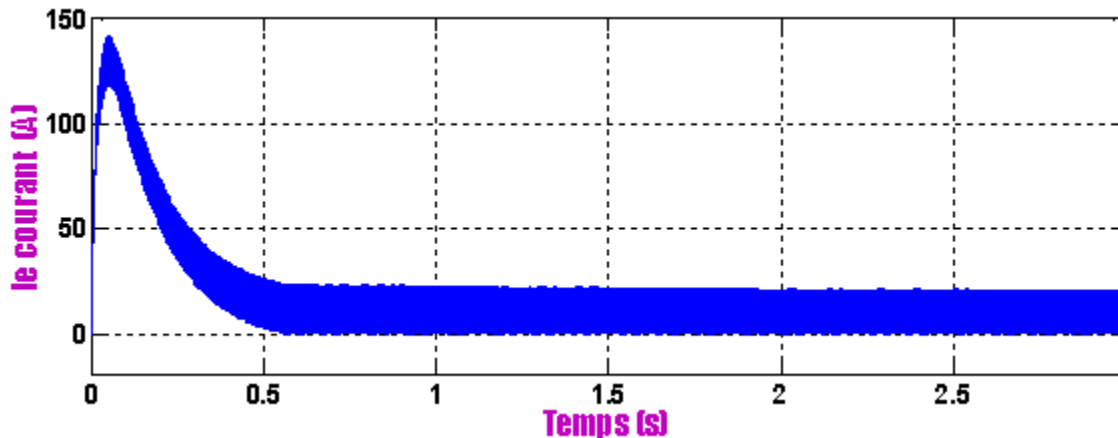


Figure (III.6) : Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 40 %

◆ Interprétation :

Le moteur démarre avec un courant de démarrage important de l'ordre 142 A, puis le courant passe du régime transitoire au régime établi pour se stabiliser autour de 0 A.

$$\alpha = 0.8 :$$

➤ Tension de sortie :

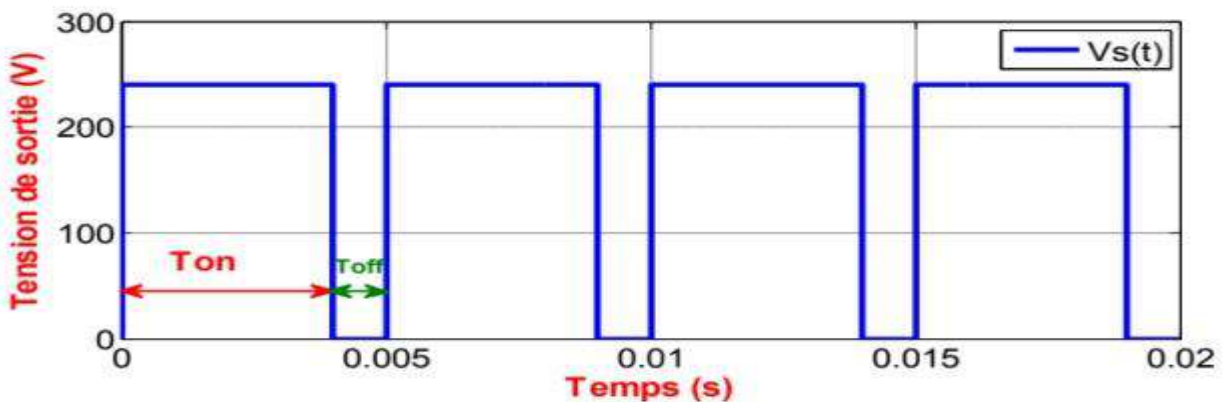


Figure (III.7) : La tension de Sortie avec un rapport cyclique de 80 %

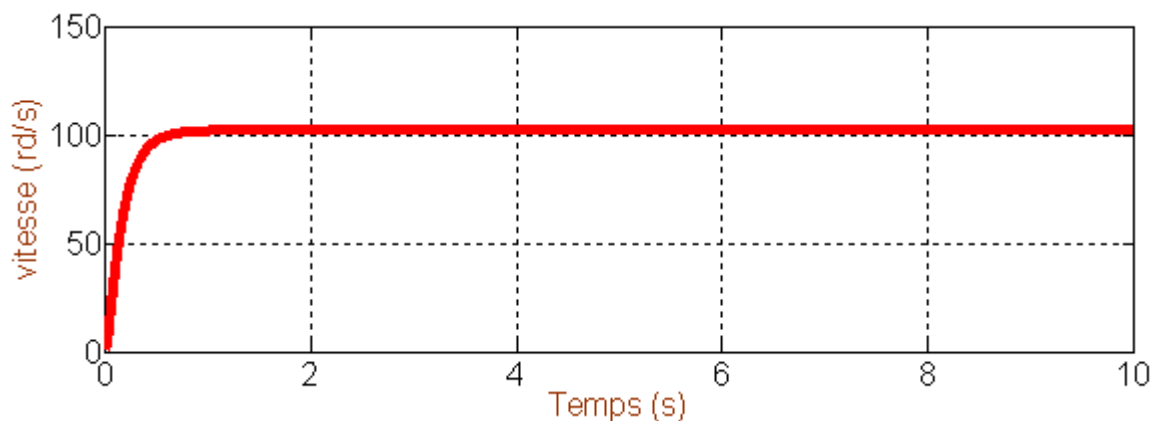
➤ **La vitesse :**

Figure (III.8) : La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 80 %

◆ **Interprétation :**

La vitesse commence de zéro pour se stabiliser de 102.3 rad/s, qui est la vitesse en régime établie. La courbe à une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.

➤ **Le courant :**◆ **Interprétation :**

Le moteur démarre avec un courant de démarrage important de l'ordre 270.9 A, puis passe du régime transitoire ou régime établi pour se stabiliser autour de 78.25 A.

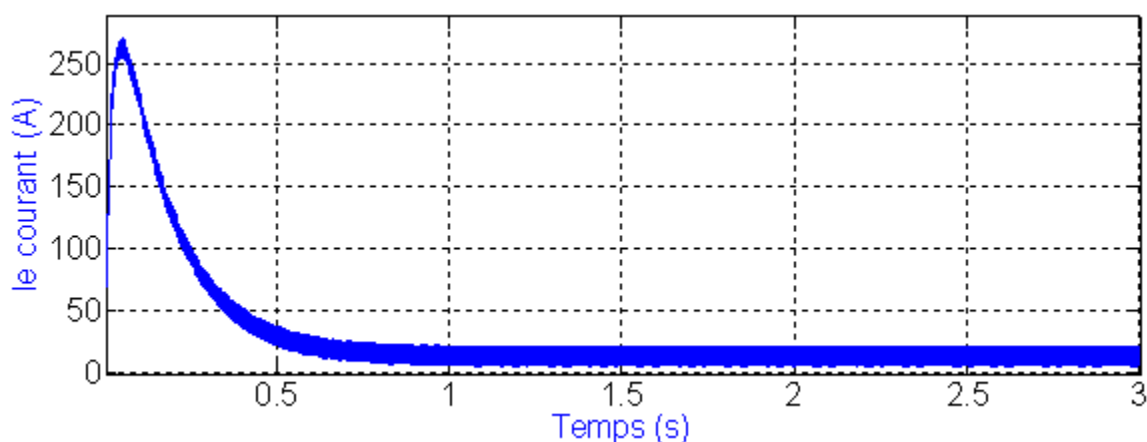


Figure (III.9) : Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 80 %

III.2.2 Simulation d'un hacheur quatre quadrants commande un moteur à courant continu à excitation séparée :

Avec l'utilisation d'un hacheur quatre quadrants, on peut inverser le sens de rotation.

III.2.2.1 Schéma bloc de la simulation :

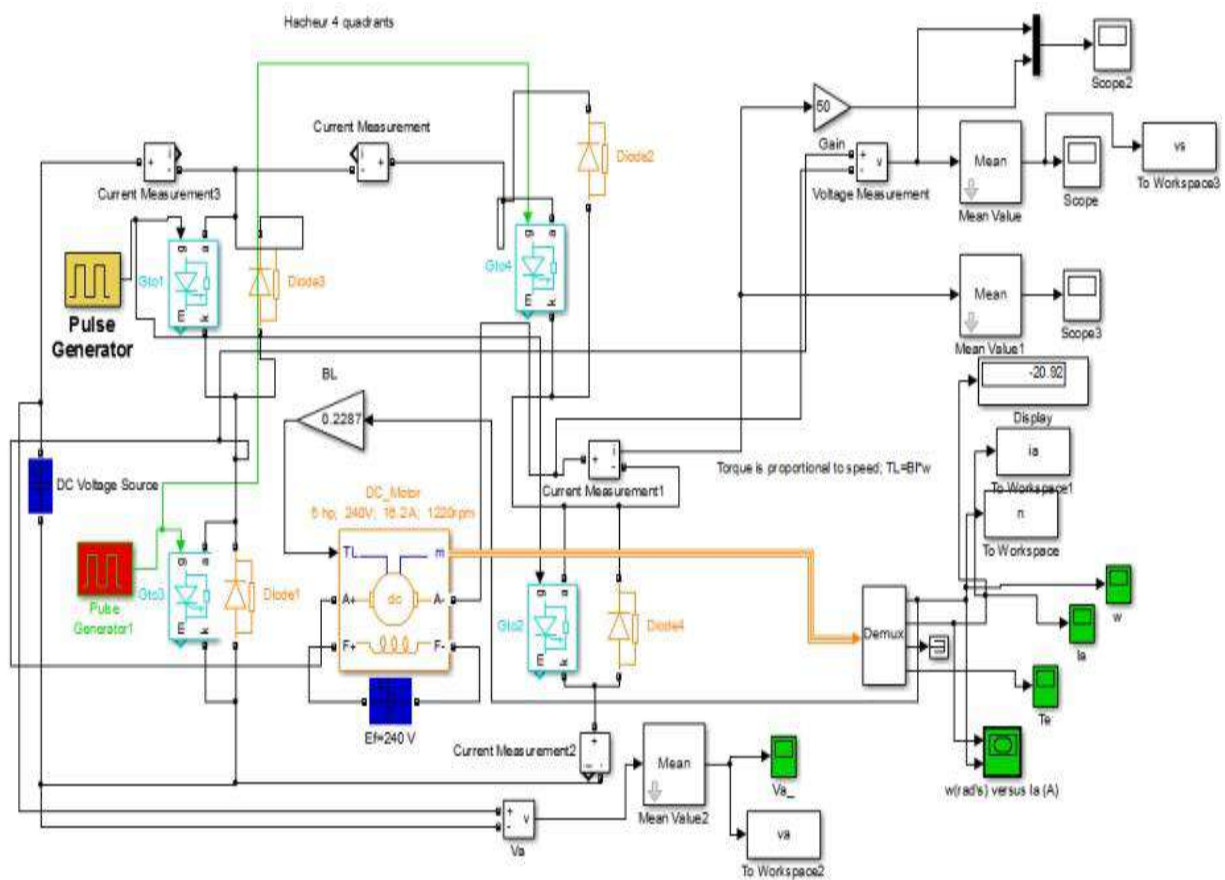


Figure (III.10) : Hacheur quatre quadrants commande un moteur à courant continu

III.2.2.2 Les courbes et résultats de simulation :

$\alpha = 0.6$:

➤ Tension de sortie :

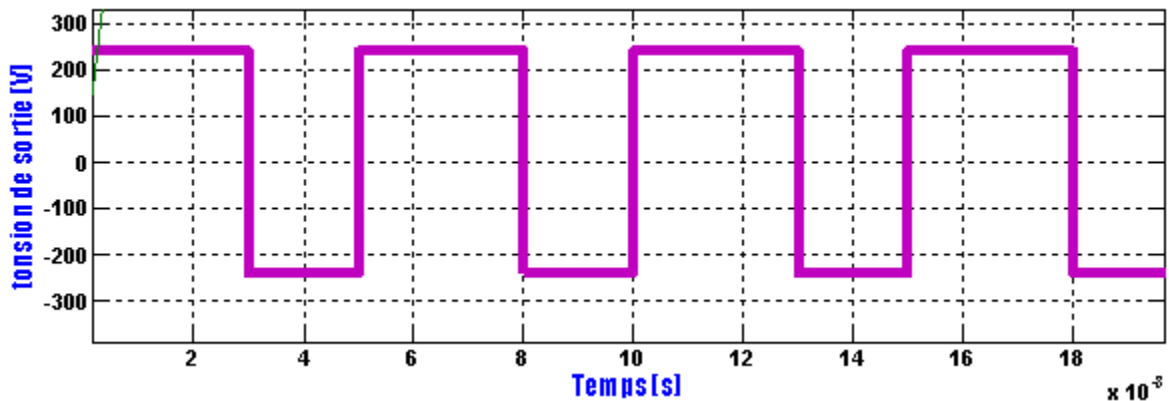


Figure (III.11) : La tension de sortie avec un rapport cyclique de 60 %

➤ La vitesse :

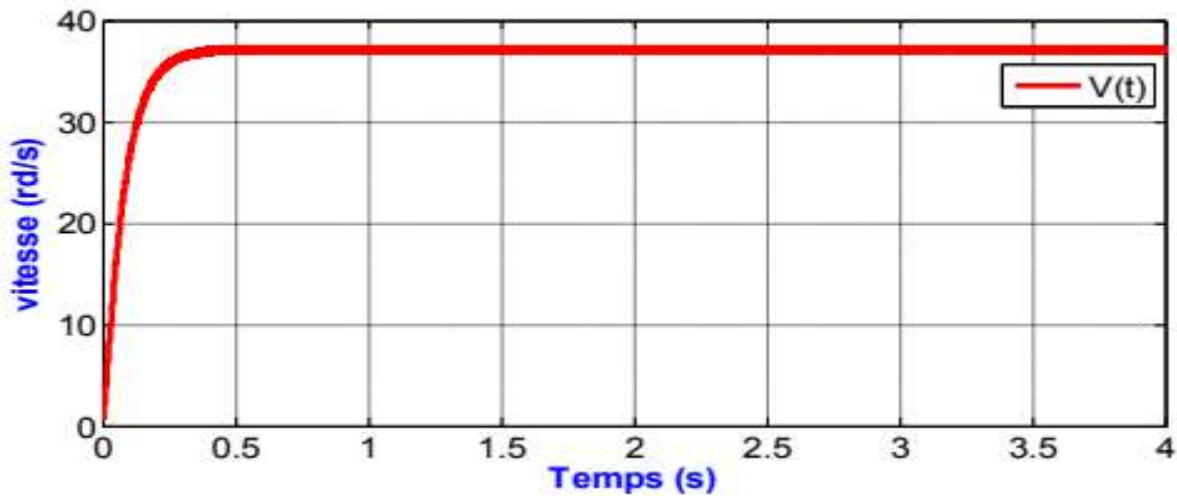


Figure (III.12) : La vitesse de moteur avec un rapport cyclique de 60 %

➤ Interprétation :

La Vitesse débute de zéro pour se stabiliser de 37.3 rad/s, qui est la vitesse en régime établie. La courbe à une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.

➤ Le courant :

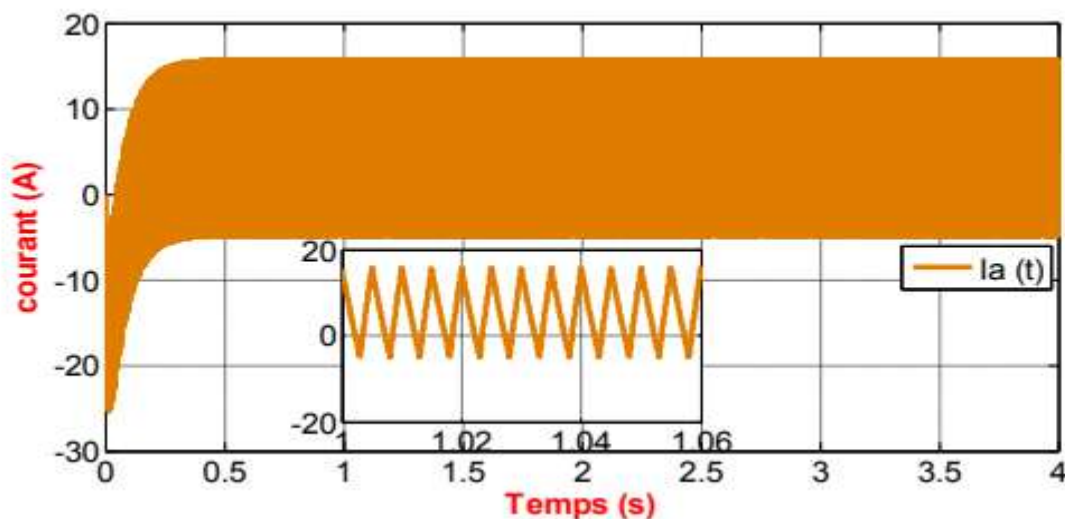


Figure (III.13) : Le courant de moteur avec un rapport cyclique de 60 %

 $\alpha = 0.4 :$

➤ Tension de sortie :

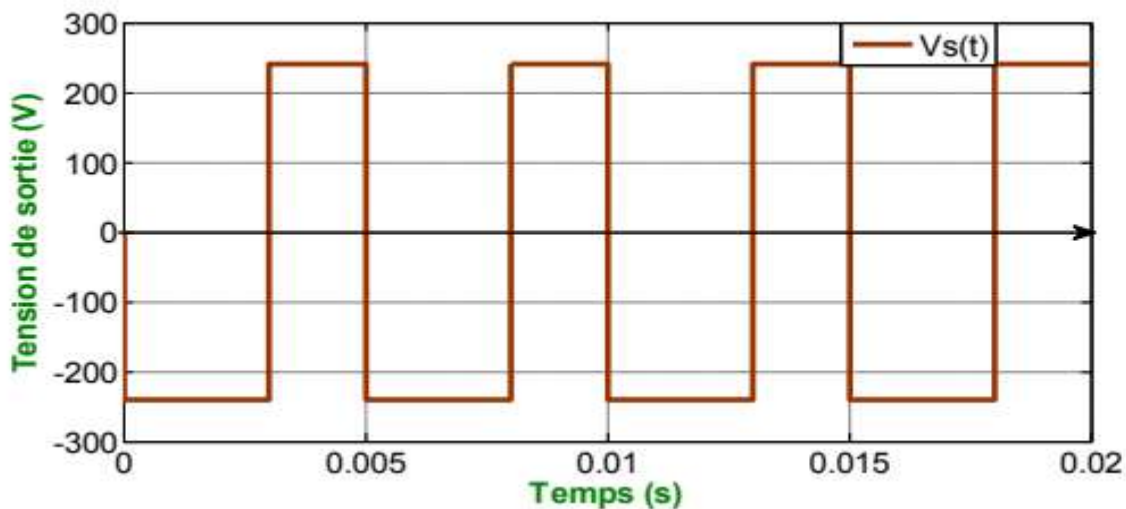


Figure (III.14) : La tension de sortie d'un hacheur quatre quadrants avec un rapport cyclique de 40 %

➤ La vitesse :

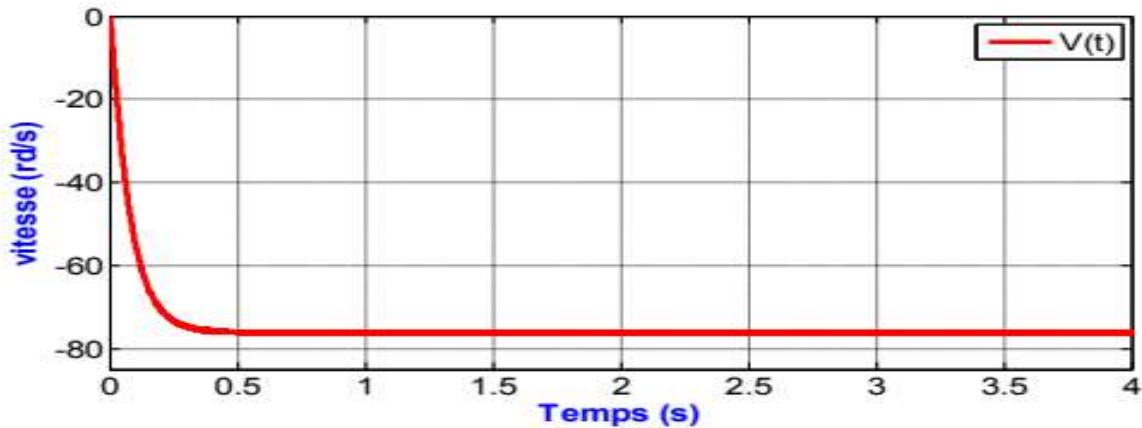


Figure (III.15) : La vitesse de moteur commande par un hacheur quatre quadrants avec un rapport cyclique de 40 %

◆ Interprétation :

La vitesse commence de zéro pour se stabiliser de -78.2 rad/s , qui est la vitesse en régime établie. La courbe à une forme exponentielle, ce qui correspond à la présence de phénomènes transitoires dans les enroulements de la machine.

◆ Interprétation :

A partir de ce courbes (figure(III.12) figure(III.15)), on peut remarque que la sens de rotation ce change pour la variation du rapport cyclique d'un hacheur quatre quadrant.

➤ Le courant :

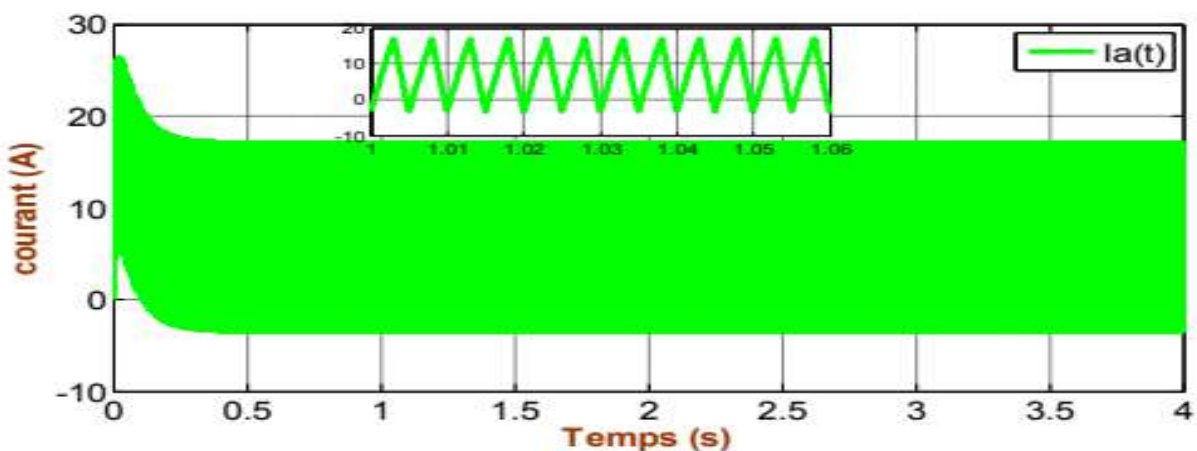


Figure (III.16) : Le courant de moteur commande par un hacheur quatre quadrants avec un rapport cyclique de 40 %

III.2.3 Analyse des résultats obtenus :

Dans ce travail, les différentes caractéristique nous montre que

- ✓ La variation de rapport cyclique varie la vitesse et le sens de rotation du moteur à courant continu
- ✓ La vitesse de rotation d'un moteur à courant continu dépend sa tension d'alimentation sur l'induit.
- ✓ On peut inverse le sens de rotation du moteur avec un hacheur en pont quatre quadrant.

III.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation avec logiciel MATLAB. Cette dernière montre que la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu dépend sa tension d'alimentation, la variation de rapport cyclique varie la tension ou borne de moteur à courant continu et on peut aussi inverse la sens de rotation du moteur avec un hacheur quatre quadrant.

Conclusion générale

Ce travail est consacré à l'étude et à la simulation de variateurs de vitesse commande des moteurs à courant continu. Malgré le développement des moteurs à vitesse variable, les moteurs à courant continu sont largement utilisés aujourd'hui, notamment dans les applications automobiles, les applications de faible puissance utilisant des batteries ou la traction électrique.

La structure et les principes de fonctionnement des moteurs à courant continu sont relativement bien connus. De plus, il y a eu peu de recherches sur de telles machines depuis plusieurs années. En fait, la plupart des recherches sur ces machines sont effectuées par les fabricants. Cette recherche porte davantage sur les matériaux utilisés pour fabriquer les collecteurs et les balais.

D'après l'étude des différents types de moteur et suivant ces caractéristiques, on a vu que le moteur à excitation indépendante c'est lui qui s'adapte pour notre projet, il est caractérisé par une vitesse réglable par tension et indépendante de la charge. En association avec un convertisseur statique (hacheur) fournissant une tension réglable, la vitesse peut varier sur une large plage. Il fournit un couple important à faible vitesse.

Dans ce travail, nous avons présentée l'étude du moteur à courant continu, puis la technique de la variation de vitesse, et enfin la simulation de notre modèle sur logiciel de simulation MATLAB.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les principaux éléments de constitution de la machine à courant continu. Puis nous avons présenté les différents types du moteur à courant continu ainsi que les avantages et les inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous avons rappelé les différents convertisseurs statiques. Puis nous avons présenté les techniques de commande MLI ainsi que les montages d'électronique de puissance.

Le troisième chapitre est consacré à une partie de simulation de notre modèle sur le Logiciel de simulation « MATLAB »

- [01] www.elec.jbd.free.fr, « Machine électromagnétique », Chapitre 13.
Denis Guérin, « Cours conversion électromécanique Machine à courant continu ».
- [02] www.elec.jbd.free.fr, « Machine électromagnétique ».
- [03] Anouar Halila, « Etude des machines à courant continu », Mémoire, Université Laval Canada, 2001.
- [04] Ililten Athmane, « Banc d'essai virtuel pour un moteur à courant continu », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2013.
- [05] Ghania Boukerche, « Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-aba, 2017.
- [06] Benzenati Siham, Rabiai Meriem, « Commande floue d'un moteur à courant continu à excitation séparée », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2013.
- [07] Fabrice DESCHAMP, « Cours BAC S SI — Convertir L'énergie — Machine à Courant Continu » Sciences de L'ingénieur, LYCEE JACQUES PREVERT.
- [08] M' ZEMOURI Azeddine, « Etudes expérimentales d'un convertisseur DC/DC contrôler par une commande robuste », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2014.
- [09] BRAHIMI Abdelkrim et GUEZOULI Housseine, « Etude et réalisation d'une carte de commande à base d'un microcontrôleur PIC 16F877 pour ponts redresseurs triphasés à thyristors », Mémoire de Master, Université Abou-BekrBelkaïd Tlemcen, 2014.
- [10] M.L.LOUAZENE, « Cours d'électroniques de puissance », université d'Ouargla, 2011.
- [11] BENSACI Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master, Université de Ouargla, 2012.
- [12] BTS Electrotechnique, Cours disponible librement à l'adresse <http://physique.vije.net/BTS>.
- [13] Adel SAID et Yassine JEMAI, « Installation industrielles », Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, 2013.

[14] Amine AYAD, « Etude et réalisation d'un commande MLI pilotant un hacheur série », Mémoire de Master, Université Abou BekrBelkaid Tlemcen, 2014.

[15] PHILIPE, Baret. « Machine électrique », théorie de mise en œuvre. Edition Dunod. Paris 2002.

Résumé

L'évolution des technologies conduit à utiliser des machines nécessitant des vitesses de rotation précises et variables pour l'entraînement de TGV par exemple. L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation ainsi que leur raccordement direct à une source d'énergie (batteries d'accumulateur, piles, etc.) Malgré leur principal problème qui se pose au niveau de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif, le moteur à courant continu continue d'exister à travers de nombreuses applications. Dans ce travail, on présente plusieurs cas que ce soit étude du moteur à courant continu, puis la technique de la variation de vitesse, et enfin la simulation de notre model sur logiciel de simulation MATLAB.

Mots clés : Machine à courant continu, les convertisseurs statiques.

Abstract

The evolution of technologies leads to use machines requiring precise and variable speeds for the TGV drive for example. The main advantage of DC machines lies in their easy adaptation to ways to adjust or vary their speed, torque and direction of rotation as well as their direct connection to a power source (accumulator, batteries, etc.) Despite their major problem at the connection between the brushes, or "coal" and the rotary collector, the DC motor continues to exist across many applications. In this work, we present several cases whether study of DC motor, then the technique of the speed variation, and finally the simulation of our model on MATLAB.

Keywords : DC machine, static converters.

ملخص

تطور التكنولوجيا يؤدي الى استخدام الآلات التي تتطلب سرعات دقيقة ومتغيرة على سبيل المثال قطار فائق السرعة.

الميزة الرئيسية لمحرك التيار المستمر تكمن في تكيفها السهل في سبيل تعديل او تغير سرعتها، وعزم دورانها واتجاه الدوران بالإضافة الى الاتصال المباشر لمصدر الطاقة (بطاريات...الخ) لايزال محرك التيار المستمر يتواجد عبر العديد من التطبيقات.

في هذا العمل، نحن نقوم بدراسة محرك التيار المستمر، ثم أساليب تغير السرعة، وأخيرا محاكاة نموذجنا على برنامج المحاكاة ما تلاب.

الكلمات المفتاحية: محركات التيار المستمر، المحولات الثابتة.