

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2019

Faculté: Sciences de l'Ingénierat
Département: Electronique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Intitulé :
**Variateur de vitesse d'un hacheur pour un moteur
à CC, source d'énergie photovoltaïque**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : électronique

Spécialité: instrumentation

Par :

SOUAIDI Hichem

DEVANT Le JURY

Président : F.ARBAOUI

MCA

UBM Annaba

Directeur de mémoire: K.MANSOURI

Pr

UBM Annaba

Examineurs: N.GUERSI

Pr

UBM Annaba

H.KHERFANE

MCA

UBM Annaba

Résumé

Vu l'importance des moteurs à courant continu dans la vie industrielle et qui donne des résultats très satisfaisante en matière de précision de vitesse de rotation et de couple pour l'entraînement des différent type d'installations ,en plus, l'évolution des ressources des énergies renouvelables telles que les panneaux photovoltaïque, on a choisi un travail d'étude de et de simulation du fonctionnement et de variation de vitesse d'un moteur à courant continu par un hacheur alimenté par une source photovoltaïque où on remarqué l'efficacité des panneaux photovoltaïques comme une source d'énergie propre et peut remplacer les ressources traditionnelle et que la variation de vitesse du moteur à excitation séparée par hacheur est très convenable.

ABSTRACT

Given the importance of DC motors in industrial life and which gives very satisfactory results in terms of precision of rotation speed and torque for the training of different types of installations, in addition, the evolution of resources renewable energies such as photovoltaic panels, we chose a work of study and simulation of the operation and speed variation of a DC motor by a chopper powered by a photovoltaic source , we noticed the efficiency of photovoltaic panels as a clean source of energy and can replace the traditional resources and that the speed variation of chopper excited motor is very suitable.

ملخص

بالنظر إلى أهمية محركات التيار المستمر في الحياة الصناعية والتي تعطي نتائج مرضية للغاية من حيث دقة سرعة الدوران وعزم الدوران لتدريب أنواع مختلفة من المنشآت ، بالإضافة إلى تطور الموارد الطاقات المتجددة مثل الألواح الضوئية ، لقد اخترنا عملاً للدراسة ومحاكاة للتشغيل وسرعة تباين محرك DC بواسطة مروحية مدعومة بمصدر فلتائي و لاحظنا كفاءة الألواح الضوئية كمصدر نظيف للطاقة ويمكن أن تحل محل الموارد التقليدية وأن تباين سرعة محرك متحمس المروحية هو مناسبة للغاية.

Remerciements

*Avant tout je remercie Allah pour que je vie ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail. Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadreur le professeur **MANSOURI KHALED** qui a proposé et a dirigé ce travail.*

Je remercie monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

*Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail spécialement :**BERIM Mohamed Lamine** et **RAHIM Adnane** .*

Dédicaces

*Je dédie exclusivement ce modeste travail à l'âme de notre défunt le professeur **CHAREF Chabbi** que dieu lui accorder sa sainte miséricorde et lui accueillir en son vaste paradis.*

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les machines à courant continu	
I.1. Introduction:.....	3
I.2. Définition:.....	3
I.3 Constitution d'une machine à courant continu:.....	4
I.3.1. L'inducteur :.....	4
I.3.2. Le rotor (l'induit):.....	5
I.3.3. Le collecteur et les balais :.....	5
I.4. Force contre électromotrice:.....	5
I.5 Principe de fonctionnement:.....	6
I.5.1 principe du moteur:.....	6
I.5.2. principe de la Génératrice:.....	7
I.6 Les types des moteurs à courant continu:	
I.6.1. Les moteurs à inducteur à aimant permanent:.....	7
I.6.2. Les moteurs à inducteur bobiné:.....	7
I.7 Réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu:.....	11
I.8 Quadrants de fonctionnement:.....	12
I.9 Bilan de la puissance :.....	13
I.10.Le rendement.....	13
I.11.Utilisation de la machine à courant continu :.....	14
I.12.Les avantages et Les inconvénients :.....	14
I.13.Conclusion.....	15

Chapitre II : Les Convertisseurs Statiques

II.1.Introduction.....	16
II.2.Définition:.....	16
II.3.Les redresseurs :.....	16
a. Le redresseur non commandé	16
b. Le redresseur commandé.....	16
II.4.Les onduleurs	18
II.5.Les gradateurs.....	18
II.6.Les hacheurs	19
1.Convertisseur Buck :.....	19
2. Convertisseur Boost	21
II.6.4 Hacheur à quatre quadrants	22
II.7.Technique de commande MLI.....	23
II.8.Les montages d'électronique de puissance.....	24
II.9.Conclusion	25

CHAPITRE III :GENERALITES SUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

III.1 Introduction :.....	26
III.2 L'énergie solaire	26
III.3 Rayonnement solaire	26
III.3.1 Rayonnement direct.....	27
III.3.2 Rayonnement diffus.....	27
III.3.3 Rayonnement réfléchi.....	27

III.3.4 Rayonnement global.....	27
III.4 Effet photovoltaïque.....	27
III.5 Cellules photovoltaïques.....	28
III.5.1 Historique de la cellule photovoltaïque.....	28
III.5.2 Principe de fonctionnement.....	28
III.5.3 Les différents types des cellules photovoltaïques.....	29
III.6 Générateur photovoltaïque(GPV).....	31
III.7 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	31
III.7.1 association des cellules photovoltaïques en parallèle.....	31
III.7.2 Association des cellules photovoltaïques en série.....	32
III.8 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.....	33
III.9.1 Courant de court-circuit (I_{cc}).....	34
III.9.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co}).....	34
III.9.3 Rendement énergétique.....	34
III.9.4 Facteur de forme.....	35
III.10 Module photovoltaïque.....	35
III.11 Panneau solaire.....	36
III.14 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	37
III.12 Conclusion.....	37

CHAPITRE IV :Fonctionnement et simulation du système :PV-Hacheur MC

IV.. Introduction	38
IV.2. Principe de fonctionnement du système PV-hacheur- MCC :.....	38
IV.3. Simulations et interprétations	39

IV.3. 1. Simulation du Système photovoltaïque	39
IV.3. 2.simulation du hacheur	41
IV.3. 3.hacheur quatre quadrants-MCC	44
IV.3. 4. Simulation du moteur à courant continu alimenté directement.....	46
IV.3.5 Simulation du Moteur à courant continu commandé par un hacheur en variant le rapport cyclique	49
IV.3. 6 Simulation du Moteur à courant continu commandé par un hacheur en variant le signal de référence du MLI	52
IV.4 Conclusion.....	56
conclusion générale	57

INTRODUCTION GENERALE

Depuis son existance, l'homme cherche à satisfaire ses besoins en matière des produits élémentaires de survie, mais avec les innovations et le développement technologique dans tous les domaines, d'autres nécessités ont été entrées en course tels que les besoins en agroalimentaire ,transport, aviation, travaux de construction, militaire, et autres.

La majorité de tous ces produits nécessitent un défi important en matière d'équipements de production où les actionneurs doit répondre aux exigences pour l'assurance des actions voulus en plus de ça, une partie commande qui assure la précision et la qualité de ces actions.

Pour cela plusieurs procédés de fabrication fait appel au actionneurs électromécaniques qui est le moteur qui constitue un élément fondamentale dans les procédés de production industrielle et spécialement le moteur à courant continu qui présente des qualités de performances telles que la vitesse et le couple efficaces et maitrisables.

D'autre part, l'homme cherche à remplacer les sources d'énergie fossile et traditionnelle par des sources renouvelables et propres, les panneaux solaires ou photovoltaïques sont devenus l'élément de défi largement utilisé dans le domaine de génération et l'exploitation d'énergie électrique grâce aux ses propriétés techniques et environnementales qui devenus très sévères face aux normes nationales et internationales.

Notre projet consiste à coupler et intégrer les trois notions :le moteur à courant continu ,le convertisseur continu-continu(hacheur) et la source d'énergie par un panneau photovoltaïque dans un travail de simulation intitulé : « variation de vitesse d'un moteur à courant continu par un hacheur alimenter par une source de courant photovoltaïque » ,l'étude et la simulation de cette application peut

conduire à une réalisation réelle avec des résultats très satisfaisants en matière d'efficacité, facilité de concevoir et performance.

Le travail de ce mémoire est constitué de quatre chapitres, le premier chapitre étudie la machine à courant continu, le deuxième explique les convertisseurs statiques spécialement le HACHEUR, le troisième chapitre détaille la notion photovoltaïque, le quatrième et le dernier chapitre qui est le cœur du travail, explique le fonctionnement de ces éléments : **MCC, HACHEUR, PV** placés ensemble ainsi que la simulation de chaque composant et finalement la simulation explicite du montage global en variant la vitesse du moteur par le hacheur.

Chapitre I

**Généralités sur les machines à
courant continu**

I.1. Introduction:

Les machines à courant continu sont des actionneurs électromécaniques très utilisées dans l'industrie, car elles constituent le composant le plus important des chaînes de production fréquemment automatisées et qui nécessite une variation précise de la vitesse de rotation.

Dans ce chapitre, on va présenter la constitution de la machine à courant continu et son principe de fonctionnement et on va établir les différents types des moteurs à courant continu. Ensuite on cite les avantages et les inconvénients de ce type d'actionneurs.

I.2. Définition:

Les machines à courant continu sont des actionneurs électromécaniques :

- Soit ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en moteur.
- Soit ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînant. On dit alors qu'il fonctionne en génératrice [2].

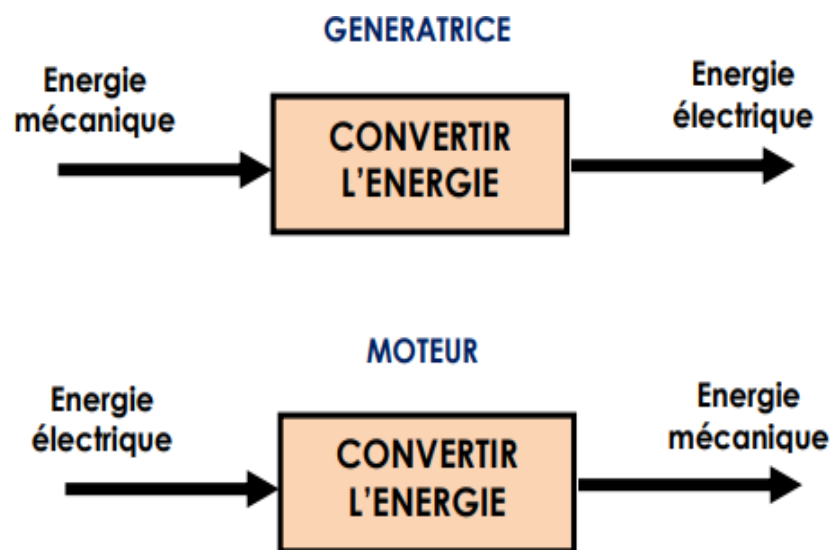


Fig (I .1) : Fonctionnement de la machine à courant continu [3]

I.3. Constitution d'une machine à courant continu:

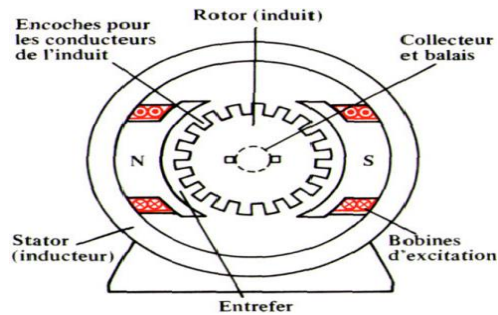


Fig (I.2) : Constitution de la machine à courant continu [2].

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

- ✓ l'inducteur.
- ✓ l'induit.
- ✓ collecteur / balais (charbon).

I.3.1 L'inducteur :

L'inducteur est la partie fixe du moteur, Son rôle est de créer le flux inducteur dans la machine. Il est constitué de:

- Une culasse en fonte ou en acier coulé : C'est la carcasse de la machine.
- Pôles principaux : ils sont soit des enroulements, ou des aimants permanents pour créer le champ magnétique inducteur.
- Enroulement de compensation de la réaction magnétique d'induit : des enroulements situés dans les encoches des pôles inducteurs parcourus par le courant d'induit, ayant pour rôle de créer un champ antagoniste au champ transversal d'induit.
- Les pôles auxiliaires ou pôles de commutation : Ce sont des pièces polaires étroites en série avec l'induit destinés à réduire les étincelles aux balais.



Fig (I.3) : L'inducteur [2]

I.3.2 Le rotor (l'induit):

Le rotor est la partie en rotation du moteur. C'est lui qui tourne. Il est constitué d'un enroulement de spires conductrices réunies en faisceaux disposés de telle manière que lorsqu'un coté est soumis au pôle nord, l'autre est le pôle sud. Les faisceaux sont tous reliés en série grâce aux lames du collecteur.

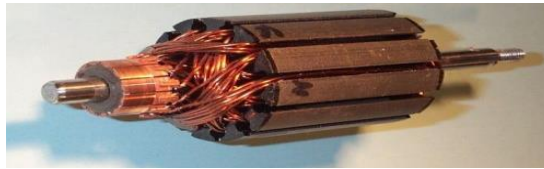


Fig (I.4) : L'induit.

I.3.3. Le collecteur et les balais :

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit. Les balais (ou charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation.

Le dispositif collecteur / balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit.



Fig (I.5) : Collecteur et balais [2].

I.4. Force contre électromotrice:

La force électromotrice (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.

$$E = \frac{P}{a} \cdot N \cdot n \cdot \Phi \quad (I.1)$$

P : nombre de pair de pôles de la machine.

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

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

n : fréquence de rotation de l'induit (en t/s).

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

Finalement:
$$E = K.\Omega.\Phi \quad (I.2)$$

Avec:
$$K = \frac{P}{2\pi a} N \quad (I.3)$$

I.5. Principe de fonctionnement:

I.5.1 principe du 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 :

$$F = B. I. L.\sin\alpha \quad (I.4)$$

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

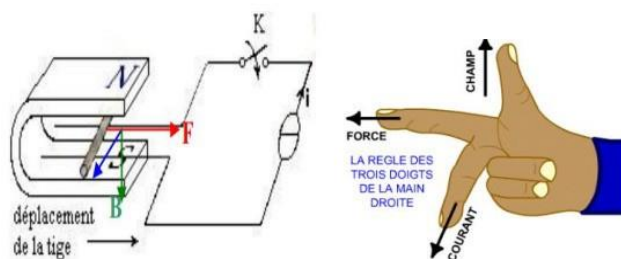


Fig (I.6) : Principe d'un moteur à courant continu [2].

I.5.2. principe de la Génératrice:

Le fonctionnement de la génératrice est basé sur le principe de Faraday ou loi de l'induction électromagnétique. Si on considère un conducteur placé sur l'induit qui tourne, ce conducteur coupe les lignes de champ, il est alors le siège d'une force électromotrice (f.è.m) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main gauche. Si l'on considère la spire formée par le conducteur et le conducteur diamétralement opposés, les deux forces électromotrices s'ajoutent, on peut fermer le circuit. On a réalisé un générateur de courant.

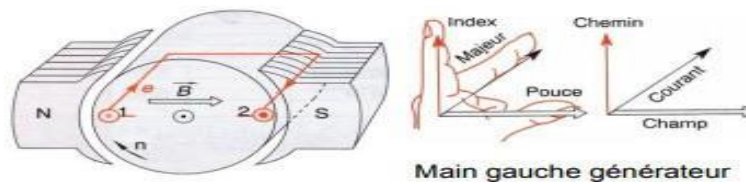


Fig (I.7) : Principe de fonctionnement d'une génératrice [3].

I.6. Les types des moteurs à courant continu:

I.6.1. Les moteurs à inducteur à aimant permanent:

Dans ce type de moteur, 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 micromoteurs sont des moteurs à aimant permanent. Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu des applications domestiques.

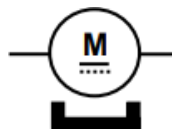


Fig (I.8): Moteur à courant continu à aimant permanent [3].

I.6.2. Les moteurs à inducteur bobiné:

Il existe 4 types différents des moteurs électriques à inducteur bobiné qui sont classés en fonction du type d'excitation:

- ✓ le moteur à excitation séparée.
- ✓ le moteur à excitation shunt.
- ✓ le moteur à excitation série.
- ✓ le moteur à excitation composée.

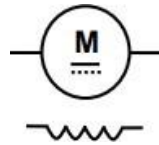


Fig (I.9): Moteur à courant continu excitation à électroaimant [3].

✓ **le moteur à excitation séparée:**

Dans un moteur à excitation séparée ou indépendante, le flux magnétique est créé indépendamment de la tension de l'induit. Il faut pour cela deux sources séparées, une pour alimenter l'inducteur et créer le flux, l'autre pour alimenter l'induit. Ce type de moteur a une souplesse de commande et une large gamme de vitesse.

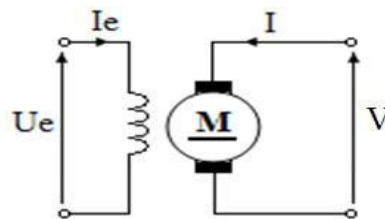


Fig (I.10) : Le moteur à excitation séparée [2].

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).

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) :

Supposons que la machine est parfaite

$$n = \frac{E}{K\Phi} = \frac{V - R \cdot I}{K\Phi} = K \cdot V \quad (\text{I.5})$$

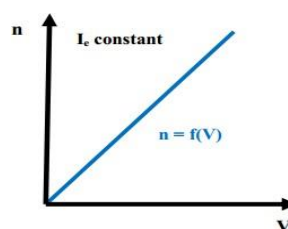


Fig (I.11) : Caractéristiques d'un moteur à excitation séparée [3]

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 (I) :

$$T_u = \frac{E \cdot I}{\Omega} = K \cdot \Phi \cdot I = K \cdot I \quad (\text{1.6})$$

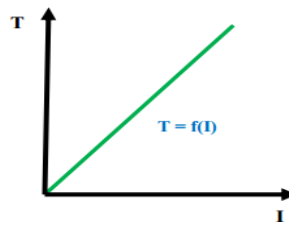


Fig (I.12) : Le couple en fonction de courant d'alimentation [3]

✓ **le 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. Ce type des moteurs à un couple élevé qui diminue avec la vitesse, on trouve ce type des moteurs dans les engins de levage et la traction électrique.

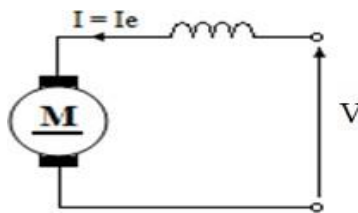


Fig (I.13) : Le moteur à excitation série [3]

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 :

$$P_a = V \cdot I \quad (I.7)$$

Et la puissance mécanique fournie est :

$$P_u = T_u \cdot \Omega \quad (I.8)$$

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).

$$\phi = M_{ea} \cdot i_e = M_{ea} \cdot i$$

$$E = K \cdot \phi \cdot n = V - R_a \cdot i - U_e \quad (I.9)$$

$$n = \frac{V - R_a \cdot i}{K \cdot M_{ea} \cdot i}$$

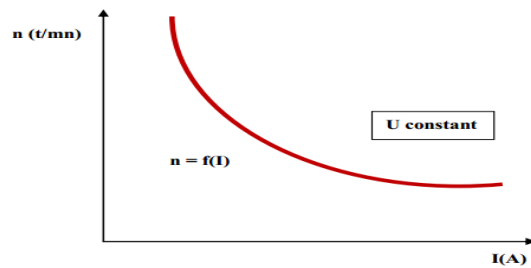


Fig (I.14) : Caractéristique de vitesse d'un moteur série [3]

Si (n) est proportionnelle à (V) et à (I) cela signifie que le couple (T_u) est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation (I^2) :

$$T = \frac{E.I}{\Omega} = \frac{E.K.I.I}{E} = K.I^2 \quad (I.10)$$

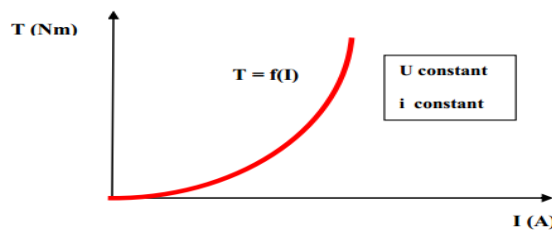


Fig (I.15) : Caractéristique de couple d'un moteur série [3].

✓ **le moteur à excitation shunt:**

Dans un moteur à excitation shunt l'inducteur et l'induit sont connectés en parallèles et alimentés par une seule source de tension continue.

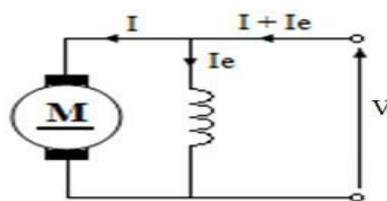


Fig (I.16) : Le moteur à excitation shunt [3].

Ce type de moteur fonctionne à une vitesse constante quel que soit la charge, c'est le type des moteurs le plus utile dans les ascenseurs et les montes charges.

✓ **le moteur à excitation composée:**

Dans le moteur compound une partie du stator est raccordé en série avec le rotor et une autre partie est de type parallèle ou shunt. Ce moteur réunit les avantages des deux types des moteurs série et shunt.

Modes de branchement :

-Courte dérivation : L'enroulement est shunté directement avec l'induit.

-Longue dérivation : L'enroulement est shunté en parallèle avec l'induit.

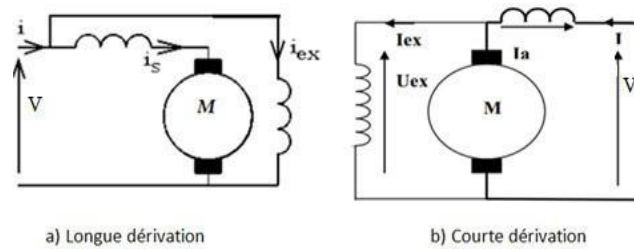


Fig (I.17) : Le moteur à excitation composée [1].

I.7. Réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu:

La vitesse d'un moteur (série, shunt ou excitation séparée) est donnée par l'équation :

$$\omega = \frac{U_i - R_i I_i}{K_m \Phi} \quad (\text{I.11})$$

Elle peut être modifiée en agissant sur les paramètres U_i , ϕ , R_i le couple moteur, donc le courant d'induit, étant considéré constant (couple résistant constant). Donc le réglage de la vitesse d'un moteur se fait en général par deux des moyens présentés:

- Variation de la tension d'alimentation de l'induit.
- Variation du flux d'excitation.

Le faible rendement et les mauvaises performances du réglage par rhéostat en font une solution qui n'est guère employée de nos jours, il est utilisé généralement au démarrage des moteurs de traction.

Les deux solutions retenues permettent de couvrir une grande gamme de vitesses :

a. Réglage par la tension de l'induit : vitesses variante de 0 à la vitesse nominale.

La machine peut fournir le couple nominal, l'excitation étant ajustée à sa valeur nominale. La puissance nominale augmente linéairement (aux pertes près) avec la vitesse, jusqu'à ce que la tension et la vitesse atteignent leur valeur nominale.

b. Réglage par le flux d'excitation : vitesse variante de la vitesse nominale à la vitesse maximale. La machine ne peut plus fournir le couple nominal, le flux étant graduellement réduit. La puissance correspondant au courant nominal reste constante sur cette plage de vitesses, la tension d'alimentation étant constante.

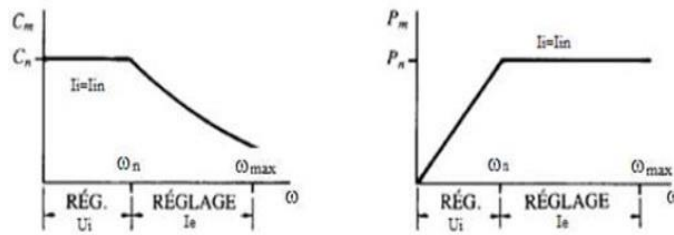


Fig (I.18) : Zones de fonctionnement d'un moteur à courant continu [1].

I.8. Quadrants de fonctionnement:

Il existe des applications industrielles où le moteur électrique doit fonctionner à des vitesses et des couples variables dans les deux sens de rotation. En plus de son action comme moteur, la machine doit fonctionner comme génératrice (**phase de freinage**) pendant des courts intervalles. Pour mieux décrire ce comportement on utilise un repère graphique dans lequel les vitesses (Ω), positives et négatives, sont affichées sur l'axe vertical, tandis que les couples (C), positifs et négatifs, sont représentés sur l'axe horizontal. Les deux axes séparent le graphique en quatre quadrants de fonctionnement identifiés respectivement quadrants I, II, III et IV.

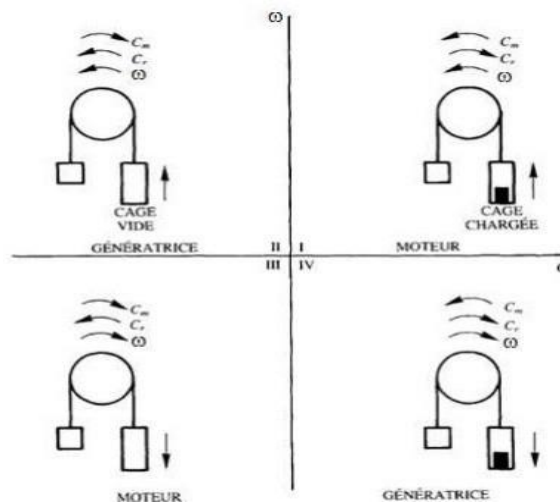


Fig (I.19) : Modes de fonctionnement d'un moteur dans le plan vitesse-couple [1].

Le quadrant I correspond à un couple $C_m > 0$ et une vitesse $\omega > 0$, il caractérise le fonctionnement en mode moteur de la machine.

Le quadrant II correspond à un couple $C_m < 0$ et une vitesse $\omega > 0$, il caractérise le fonctionnement en mode génératrice de la machine.

Le quadrant III correspond à un couple $C_m < 0$ et une vitesse $\omega < 0$, il caractérise le fonctionnement en mode moteur de la machine dans de sens négatif.

Le quadrant IV correspond à un couple $C_m > 0$ et une vitesse $\omega < 0$, la machine fonctionne en génératrice.

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.

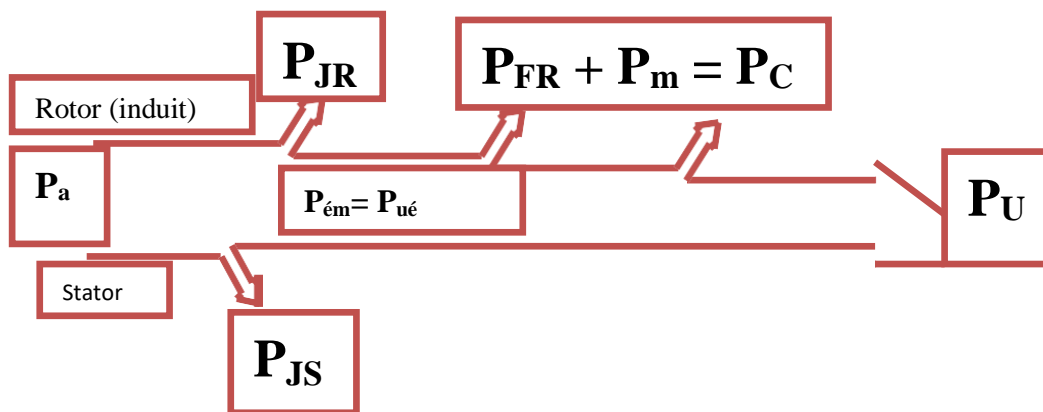


Figure (I.20) : Bilan de la puissance [4].

P_a : puissance absorbée.

P_u : Puissance utile.

$P_{ém}$: Puissance électromagnétique.

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

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

P_C : Pertes fer + pertes mécaniques : dites pertes constantes.

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 [4].

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

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 séparé 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 ...) et appareils de levage.
- Ventilateurs, pompes centrifuges, compresseurs, pompes à piston.
- Machines-outils à couple variable ou à mouvement alternatif (étaux limeurs, raboteuses).

I.12.Les avantages et Les inconvénients :

✓ **Les avantages:**

Le principal avantage d'un moteur à courant continu est son faible coût et l'alimentation aisée dans les systèmes de transport. La variation de vitesse de rotation est simple à réaliser.

✓ **Les inconvénients:**

Le 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 fréquemment 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.

I.13. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré aux rappelles des différents éléments qui constituent une machine à courant continu et son principe de fonctionnement ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

Chapitre II

Les Convertisseurs Statiques

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons montrer les différents types des convertisseurs statiques ainsi que leurs caractéristiques électriques.

II.2.Définition :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine ou charge à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques.

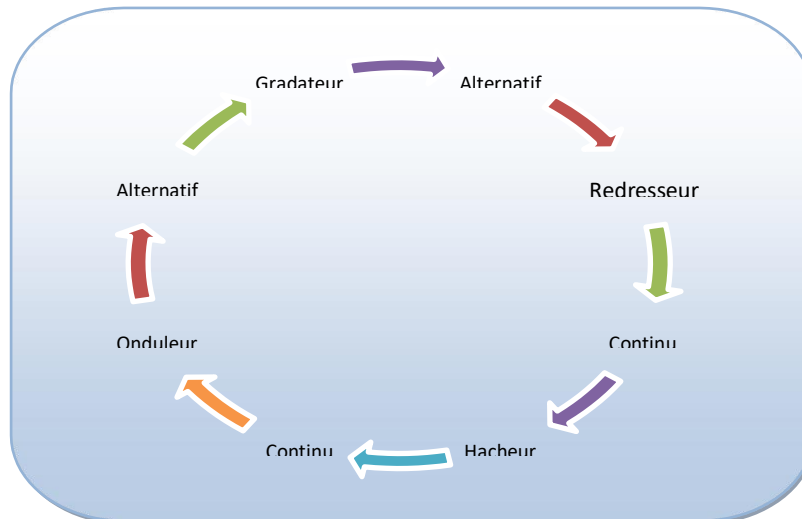


Figure (II.1) : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance [4]

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.



Ce type de convertisseur est classé en deux classes, les redresseurs non contrôlés et les redresseurs contrôlés.

a. Le redresseur non commandé:

Ce type de redresseurs utilise des diodes (interrupteur non commandé), Ces ponts ne délivrent qu'une tension de sortie fixe, et donc ils ne seront pas utilisés pour faire la variation de vitesse pour les MCC.

b. Le redresseur commandé:

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

➤ **Principe de fonctionnement:**

Dans ce type, 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.

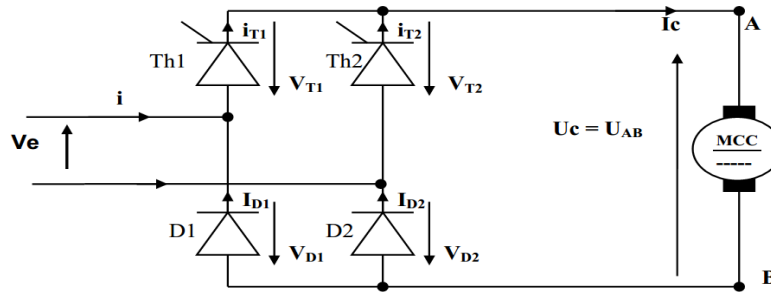


Figure (II.2) : Redresseur commandé pont mixte symétrique [4]

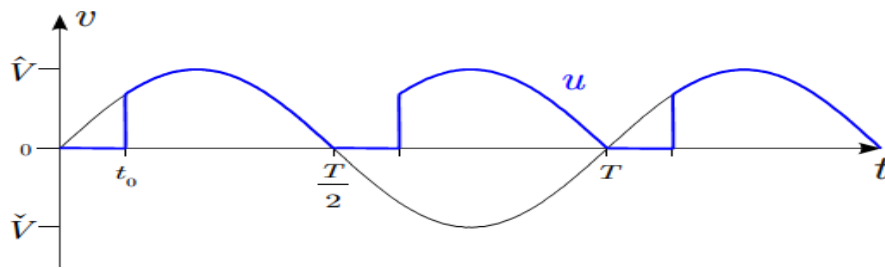


Figure (II.3) : La tension aux bornes de la charge avec un redresseur commande

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

$$U_{Cmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T U_c(t) d(t) = \frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} U \sin \theta d\theta = \frac{U}{\pi} [-\cos \theta]_{\delta}^{\pi}$$

$$U_{Cmoy} = \frac{U}{\pi} (1 + \cos \delta) \tag{II.1}$$

δ : L'angle d'amorçage.

Pour le réglage de la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu, le pont alimente le moteur à excitation indépendante et constante, sa fem s'exprime en fonction de la vitesse de rotation par la relation: $E = K.n$ (II.2)

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

La tension U_c s'exprime en fonction des éléments de la charge par la relation :

$$E = U_c - R.i - L \frac{di}{dt} \tag{II.3}$$

En valeur moyenne :

$$E = \langle U_c \rangle - R. \langle i \rangle = K.n \tag{II.4}$$

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

$$n = \frac{1}{K} \left[\frac{U}{\pi} (1 + \cos \delta) - R \cdot \langle i \rangle \right] \quad (\text{II.5})$$

II.4. Les onduleurs :

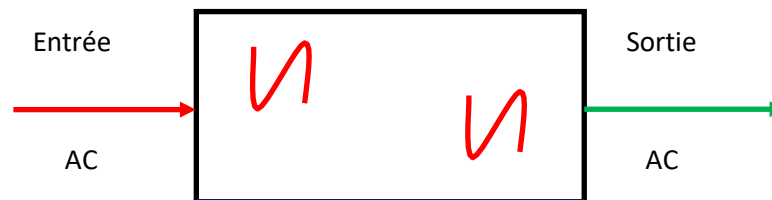
Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de générer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.



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 [4].

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 déphasé.
- ✓ 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 une source alternative).



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

II.6.2 Le rapport cyclique α :

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

$$\alpha = \frac{t_F}{T} \quad (\text{II.6})$$

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

II.6.3 Différents types d'hacheurs :

Selon la position du commutateur et du hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés :

- ✓ abaisseur de tension «Buck».
- ✓ élévateur de tension «Boost».

1. Convertisseur Buck :

Hacheur abaisseur, hacheur dévolteur, hacheur série, hacheur de type Buck. L'hacheur série est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur 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).

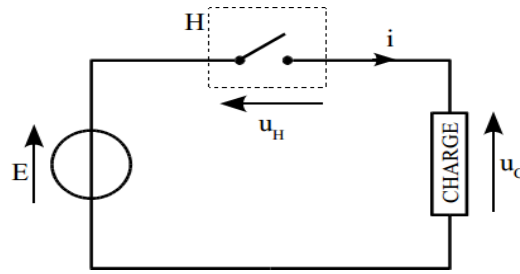


Figure (II.4) : Le fonctionnement d'un hacheur BUCK.

❖ **Principe de Fonctionnement:**

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage ($T = \frac{1}{f}$) comporte deux Etapes. 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 $(\alpha T \leq t \leq T)$.

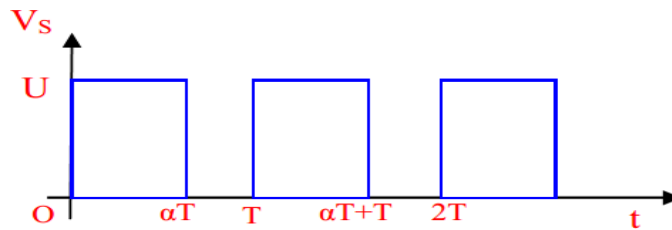


Figure (II.5) : la tension aux bornes de la charge avec un hacheur série.

❖ **Valeur moyenne de la tension:**

$$V_{Smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 dt \tag{II.7}$$

$$V_{Smoy} = \frac{U}{T} (\alpha T - 0) = \alpha U$$

La valeur moyenne de la tension V_{Smoy} peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique α . Quand on fait varier α de 0 à 1, V_{Smoy} varie linéairement de 0 à U.

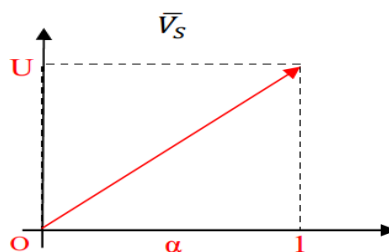


Figure (II.6) : La valeur moyenne en fonction de rapport cyclique (α).

❖ **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.

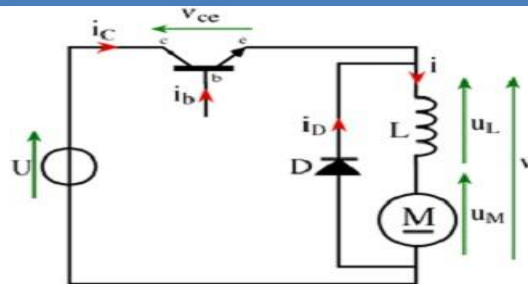


Figure (II.7) : Hacheur série commande un moteur à courant continu

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 ($\Delta i \approx 0$) [5].

Loi des mailles :

$$V_S = U_M + U_L \quad (\text{II.8})$$

On passe aux valeurs moyennes :

$$\langle V_S \rangle = \langle U_M \rangle + \langle U_L \rangle$$

Et comme pour un signal périodique: $\langle U_L \rangle = 0$

Nous obtenons pour le moteur :

$$\langle V_S \rangle = \langle U_M \rangle = E$$

$$\langle V_S \rangle = E = \alpha U \quad (\text{II.9})$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega = \alpha U \quad (\text{II.10})$$

Ω : La vitesse de rotation du moteur.

Φ : Le flux d'inducteur (égale à constant pour le moteur à excitation séparé).

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

$$E = K' \cdot \Omega = \alpha U$$

$$\Omega = K'' \cdot \alpha \quad (\text{II.11})$$

Avec: $K'' = \frac{U}{K'}$

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

2. Convertisseur Boost :

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 de sortie est de type tension continue l'interrupteur 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) [4].

II.6.4 Hacheur à quatre quadrants :

Pour obtenir une réversibilité quatre quadrants, il suffit d'associer tête 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.

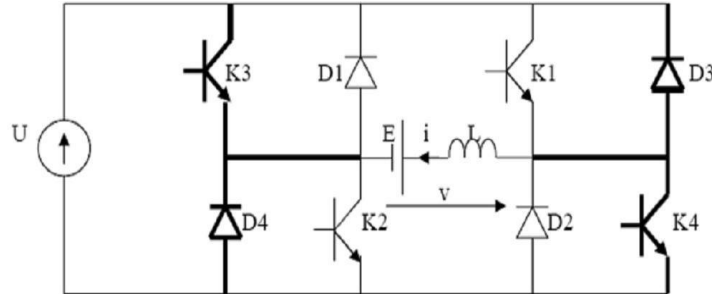


Figure (II.8) : Hacheur à quatre quadrants

à chaque période T :

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

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

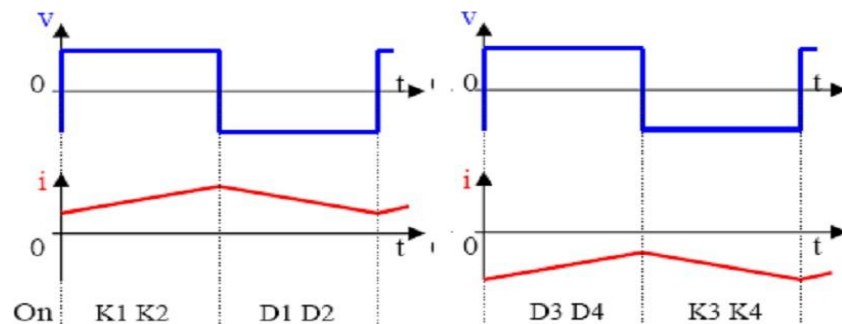


Figure (II.9) : la tension aux bornes de la charge avec un hacheur quatre quadrants

✓ Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge:

$$V_{Smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T v_s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -U dt \tag{II.12}$$

$$V_{Smoy} = U(2\alpha - 1)$$

Maintenant on peut avoir $(V_{Smoy} < 0)$ (formule), le courant pouvant également être négatif donc on peut avoir un sens de rotation négatif. Quand (α) varie de $(0 \text{ à } 1)$, la tension moyenne varie de $(-U \text{ à } +U)$. On dispose de 4 quadrants modes de fonctionnement :

$V > 0$ et $I > 0$, Rotation dans le premier sens.

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

$V < 0$ et $I < 0$, Rotation dans le deuxième sens.

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

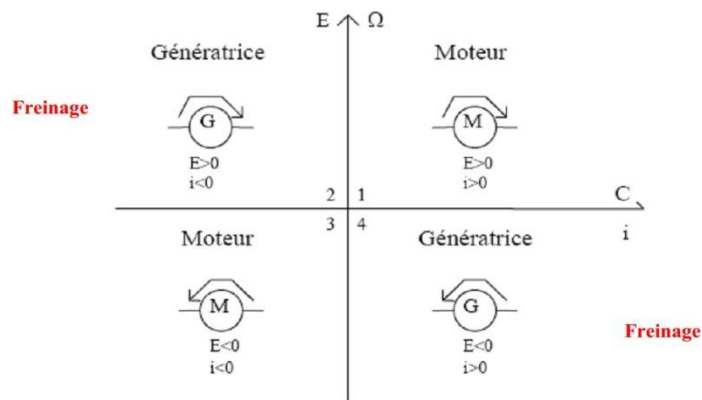


Figure (II.10) : Principe du fonctionnement d'un Hacheur quatre quadrants [4].

II.7. Technique de commande 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 MCC 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 dans lesquelles 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 suivant 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'autres 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 commutation des interrupteurs statiques 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.

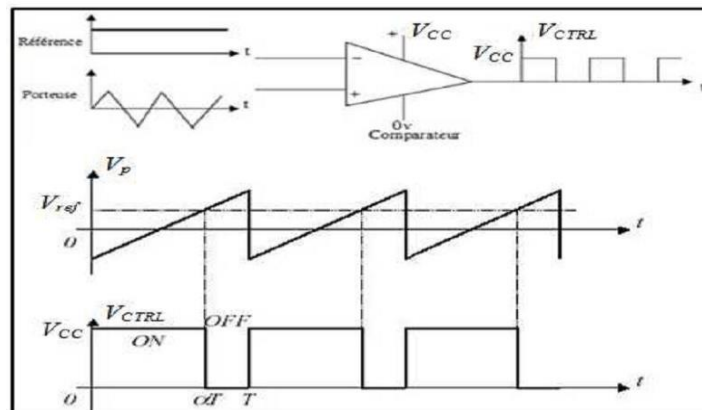


Figure (II.11) : Réalisation du signal MLI [4].

L'intersection de la référence avec la porteuse, en sens croissant, commande l'ouverture du transistor (T), son intersection avec la porteuse, en sens décroissant, commande la fermeture de (T). Le principe se fait par comparaison entre les deux signaux utilisant un amplificateur opérationnel.

II.8. Les montages d'électronique de puissance:

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

1. Circuit de commande:

Il comporte l'appareillage nécessaire qui assure 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 [4].

2. Circuit de puissance:

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

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) [4].

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 interrupteurs électroniques [4].

4. Circuit de protection:

Assure l'isolation galvanique (optocoupleur -transformateur d'impulsion) entre la partie puissance et la partie commande (faible puissance) [4].

II.9. Conclusion :

Dans ce chapitre on a détaillé les différents types des convertisseurs statiques qui peuvent être utile dans le domaine des machines de l'électronique de puissance et on s'est basé sur la commande des moteurs à courant continu par hacheur.

CHAPITRE III

GENERALITES SUR LE SYSTEME

PHOTOVOLTAÏQUE

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous visons à détailler le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (PV) où nous allons citer les différents types des cellules PV ainsi que les modes de montage ce qui conduit au module PV.

III.2 L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré

(KWc / m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- **L'énergie solaire thermique:** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque:** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources conventionnelles [11].

III.3 Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur

d'onde d'environ $0.5\mu\text{m}$, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°K [6].

III.3.1 Rayonnement direct

Le flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère [9].

III.3.2 Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère [9].

III.3.3 Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albedo(ϵ) [9].

III.3.4 Rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi.

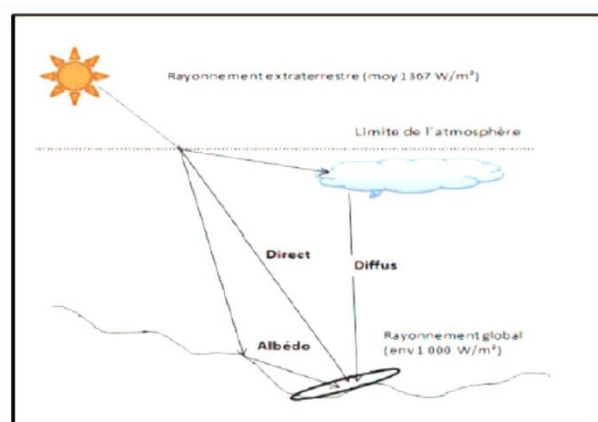


Figure (III.1) : Composantes du rayonnement solaire au sol.

III.4 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux Appelés "semi-conducteurs" exposés à la lumière, produisent de l'électricité. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans 90% des panneaux solaires produits dans le monde.

Cet effet est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous (excitation d'un électron de la bande de valence

vers la bande de conduction) créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. Ils sont appelés photodiodes, phototransistors ou des photopiles. Cet effet photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaires photovoltaïques [6].

III.5 Cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque (photopile) forme l'élément de base du générateur photovoltaïque, c'est une méthode optoélectronique de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est réalisée à base de matériaux semi-conducteurs, généralement le silicium.



Figure (III.2) : cellule photovoltaïque

III.5.1 Historique de la cellule photovoltaïque

Le mot photovoltaïque vient de mot grec "photos" qui signifie la lumière et voltaïque du physicien italien "Alessandro volta".

En 1887 « Heinrich Rudolph Hertz » présenta pour la première fois l'effet photoélectrique dans un article de la revue scientifique « Annalen der Physik ». On appelle effet photoélectrique l'émission des électrons par un matériau soumis à un éclairement ou rayonnement électromagnétique d'intensité propre aux matériaux.

En 1875 « Wiener Von Siemens » expose devant l'Académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une découverte anecdotique.

En 1954 Les chercheurs américains "Gerald Pearson", "Darry chapin" et "Calvin Fuller" travaillent pour les laboratoires Bell mettent au point une cellule PV en silicium.

En 1958 une cellule avec un rendement de 9% est développée pour les premiers satellites alimentés par des cellules solaires.

III.5.2 Principe de fonctionnement

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge) le sélénium (Se) ou les

composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales.

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit:

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph} = h\nu$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires «électron- trou». Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique [6].

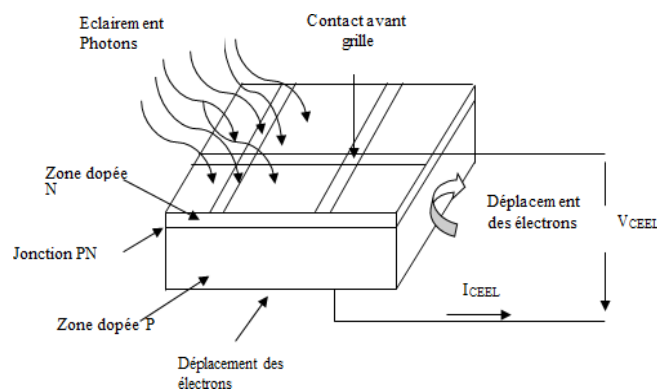


Figure (III.3) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire

Les cellules les plus répandus actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0.6 V).

III.5.3 Les différents types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel Que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules

reçoivent Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

- **Les cellules monocristallines**

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18%, jusqu'à 24.7 % en laboratoire).

Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.



Figure (III.4) : le type de cellule mono cristalline

- **Les cellules polycristallines**

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important.

Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire.

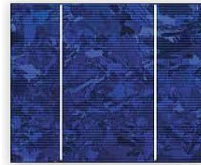


Figure (III.5) : le type de cellule poly cristalline

- **Les cellules amorphes**

Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé.

Elles sont utilisées couramment dans les petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires les montres.

L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (Même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).



Figure (III.6) : le type de cellule amorphe

III.6 Générateur photovoltaïque(GPV)

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un champ photovoltaïque. Relié au récepteur sans autres éléments, le panneau solaire fonctionne au fil du soleil, c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est en fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et est nulle la nuit.

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation). On équipe alors le système de batteries qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu.

Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes préjudiciables à sa durée de vie [6].

III.7 Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [6].

III.7.1 association des cellules photovoltaïques en parallèle

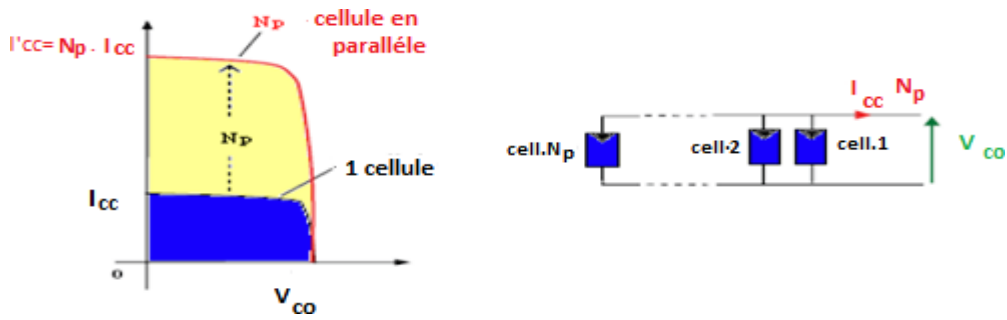
Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

L'équation (III.1) résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules. La figure (III.7) montre les caractéristiques résultantes d'un regroupement de N_p cellules en parallèle [6].

$$I_{ccg} = N_p \cdot I_{cc} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$$I_{cc} = \text{Courant de court circuit}$$



Figure(III.7):Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_p cellules en parallèle

III.7.2 Association des cellules photovoltaïques en série

D'autre part un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions élémentaires. L'équation (III.2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules. La figure (III.8) montre les caractéristiques résultantes d'un regroupement de N_p cellules en série.

$$V_{cog} = N_s \cdot V_{co} \tag{III.2}$$

Avec : V_{co} : La tension du circuit ouvert

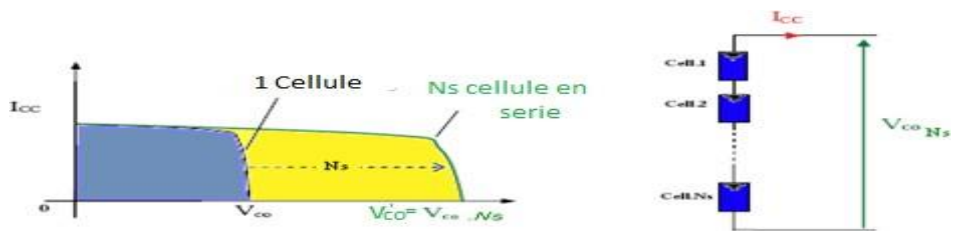


Figure (III.8):Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_s cellules en série

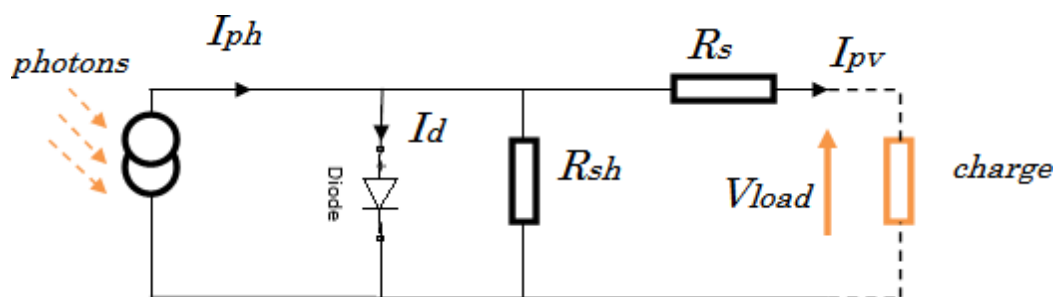
III.8 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

La figure (III.9) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule :

La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles;

La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.



Figure(III.9) : Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{pv} = \left[I_{ph} - I_s \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A K T_{mod}} \right)} - 1 \right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (III.3)$$

Où I_s est le courant de saturation, K est la constante de Boltzmann ($1,3854 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$), T est la température effective des cellules en Kelvin(K), q est la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$), A est le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$), I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court circuit), R_{sh} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_s est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexion.

III.9 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

III.9.1 Courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (III.3), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (III.4)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme :

$$I_s \left[e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right] \text{ devant } I_{ph}.$$

L'expression approchée du courant de court-circuit :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (III.5)$$

Quantitativement, la plus grande valeur du courant généré par la cellule :

$$I_{cc} = I_{ph}.$$

III.9.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque) [10]

$$0 = I_{cc} - I_s \left[e^{\frac{V_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{sh}} \quad (III.6)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_{th} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right] \quad (III.7)$$

III.9.3 Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et la puissance solaire incidente. Il est donné par [10] :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} V_{opt}}{P_{inc}} \quad (III.8)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

III.9.4 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} . Il est défini par [10] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{I_{cc}V_{co}} \quad (III.9)$$

III.10 Module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [6].



Monocrystallines

Multicristallines

Couche mince

Figure (III.10) : Module photovoltaïque

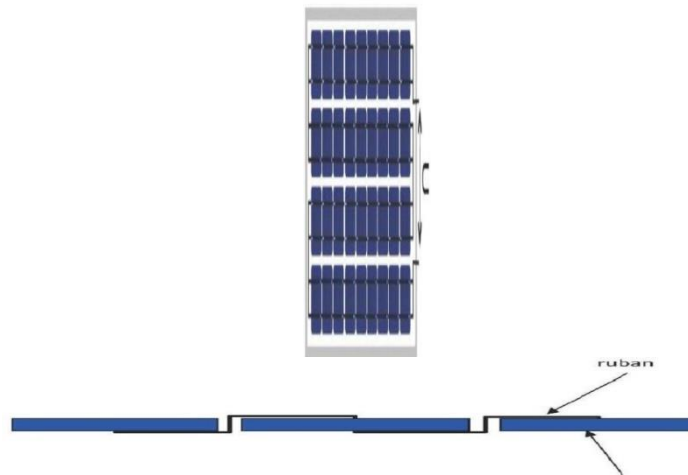


Figure (III.11) : Câblage des cellules dans un module.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

1. Protection des cellules contre les agents atmosphériques .
2. Protection mécanique et support .
3. Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [6].

III.11 Panneau solaire

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure (III.12) : panneau solaire

III.14 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

• **Avantage :**

- La production de cette électricité renouvelable est propre.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, vu la petite taille des installations et leur fonctionnement silencieux.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée directement chez l'utilisateur.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques.
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans [6].

• **Inconvénients :**

- Le coût très élevé des investissements.
- Faible rendement de conversion.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïques autonome, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé [6].

III.12 Conclusion

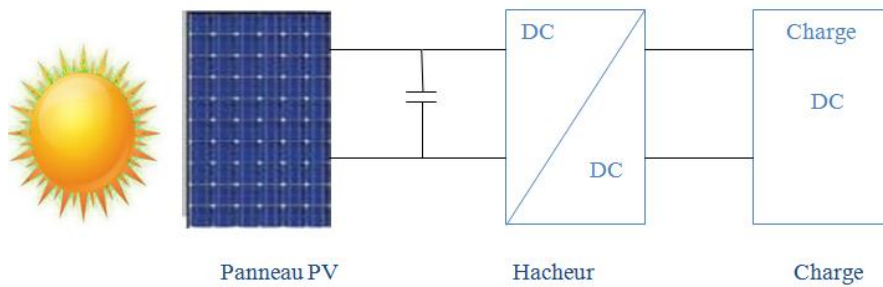
Dans ce chapitre, nous avons résumé les notions de base sur l'énergie et les rayonnements solaire, ainsi la définition et le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque. En plus nous avons étudié le fonctionnement d'une cellule et son modèle mathématique.

CHAPITRE IV

***Fonctionnement et simulation
du système :PV-Hacheur-MC***

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre capital, on va détailler et simuler le fonctionnement du système de commande d'un moteur à courant continu par un hacheur alimenté par une source photovoltaïque.



IV.2. Principe de fonctionnement du système : PV- hacheur- MCC :

1. Le panneau photovoltaïque transforme le rayonnement solaire en électricité (courant continu), permettant ainsi d'alimenter des appareils adaptés (dans notre cas c'est le moteur à courant continu).
2. Le stockage sur des batteries permet de restituer, au moment voulu, l'énergie accumulée pendant la journée.
3. un régulateur assure une gestion optimale du système ainsi que la protection du matériel.
4. les batteries qui alimentent le moteur doivent être bien choisies (puissances adaptées) [7].
5. le hacheur reçoit de l'énergie sous forme de courant continu des batteries et la transmette au moteur sous une énergie variable afin de varier sa vitesse en jouant sur le rapport cyclique ou le signal de référence du MLI .**Figure(IV.1)**

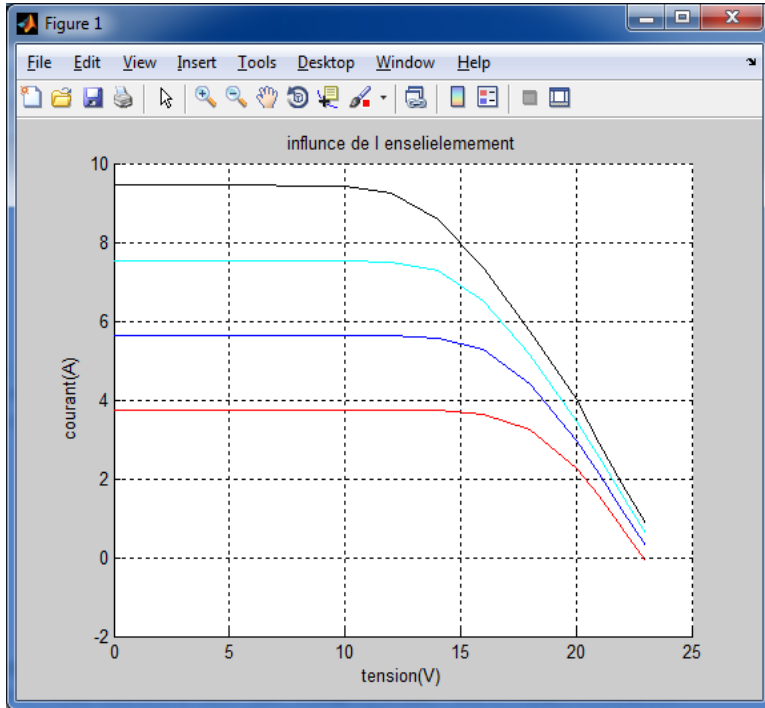


Figure(IV.1) :branchement du panneau photovoltaïque à la batterie[8]

IV.3. Simulations et interprétations :

MATLAB/simulink est un excellent outil d'étude et simulation, il nous permet de visualiser, calculer et même tracer des courbes des systèmes de l'électronique de puissance.

IV.3. 1. Simulation du Système photovoltaïque :



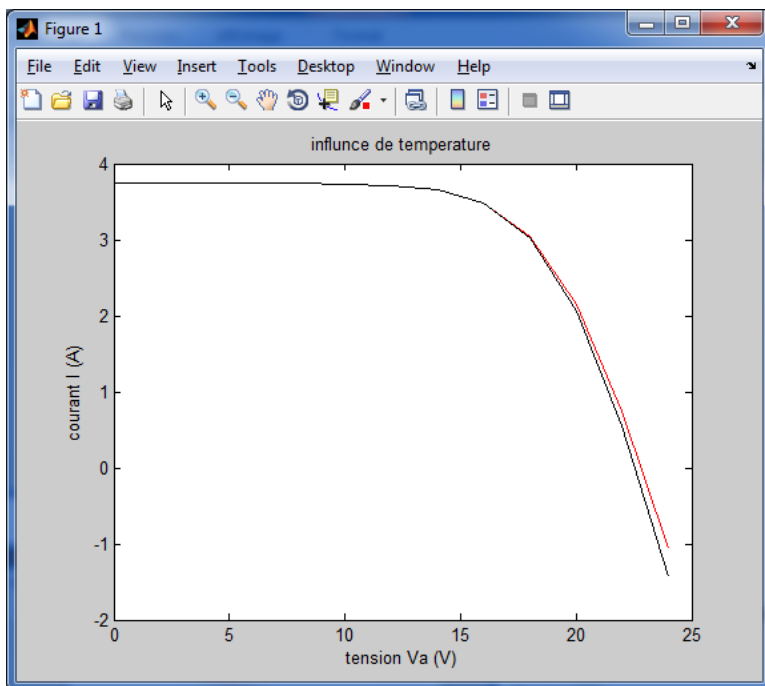
Figure(IV.2) : l'influence de l'ensoleillement .

rouge: 1000w/m²

bleu: 1500w/m²

bleu turque : 2000w/m²

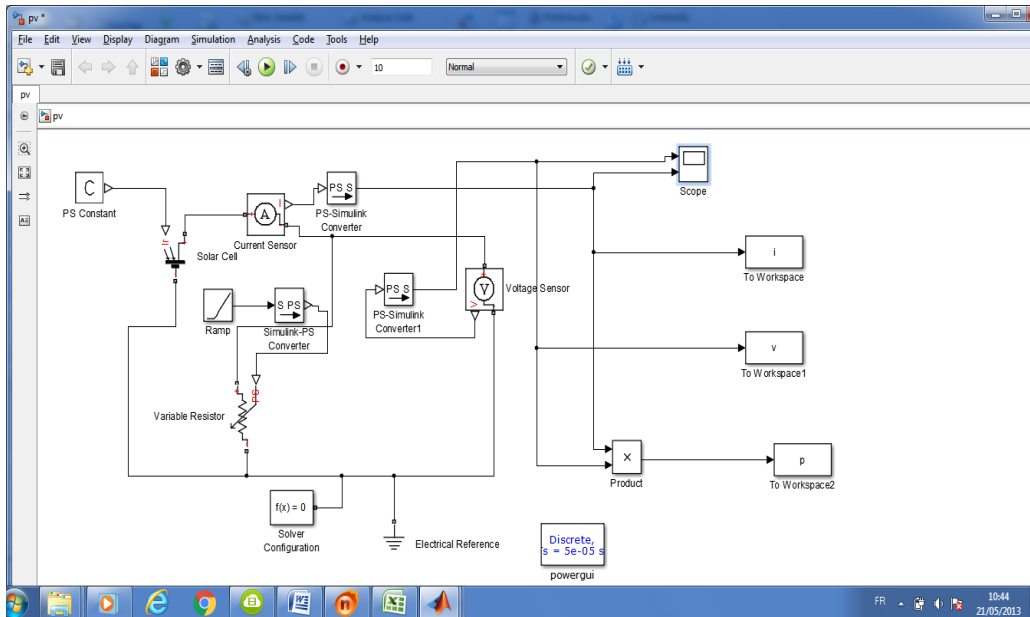
noire : 2500w/m²



Figure(IV.3) : l'influence de la température.

rouge: 25°C

noire: 75°C



Figure(IV.4) : simulation de la cellule photovoltaïque avec une charge variable

Block Parameters: Solar Cell

Solar Cell

This block models a solar cell as a parallel combination of a current source, two exponential diodes and a parallel resistor, R_p , that are connected in series with a resistance R_s . The output current I is given by

$$I = I_{ph} - I_{s1} * (e^{(V+I*R_s)/(N*V_t)} - 1) - I_{s2} * (e^{(V+I*R_s)/(N2*V_t)} - 1) - (V+I*R_s)/R_p$$

where I_{s1} and I_{s2} are the diode saturation currents, V_t is the thermal voltage, N and $N2$ are the quality factors (diode emission coefficients) and I_{ph} is the solar-generated current.

Models of reduced complexity can be specified in the mask. The quality factor varies for amorphous cells, and typically has a value in the range of 1 to 2. The physical signal input I_r is the irradiance (light intensity) in W/m^2 falling on the cell. The solar-generated current I_{ph} is given by $I_r * (I_{ph0}/I_{r0})$ where I_{ph0} is the measured solar-generated current for irradiance I_{r0} .

Parameters

Main Temperature Dependence

Parameterize by: By s/c current and o/c voltage, 5 parameter

Short-circuit current, I_{sc} : 7.34 A

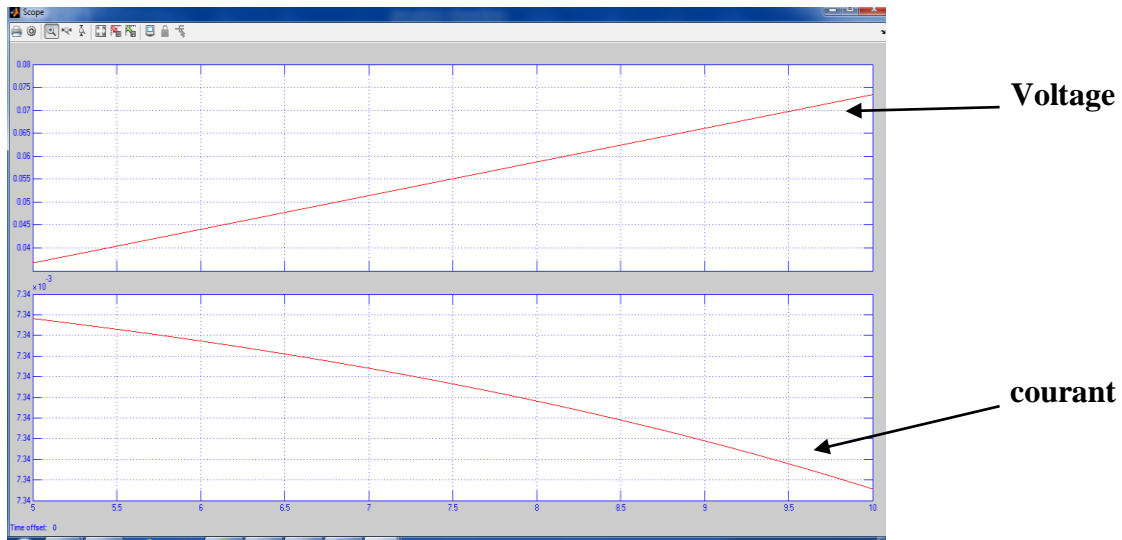
Open-circuit voltage, V_{oc} : 0.6 V

Irradiance used for measurements, I_{r0} : 1000 W/m^2

Quality factor, N : 1.5

OK
Cancel
Help
Apply

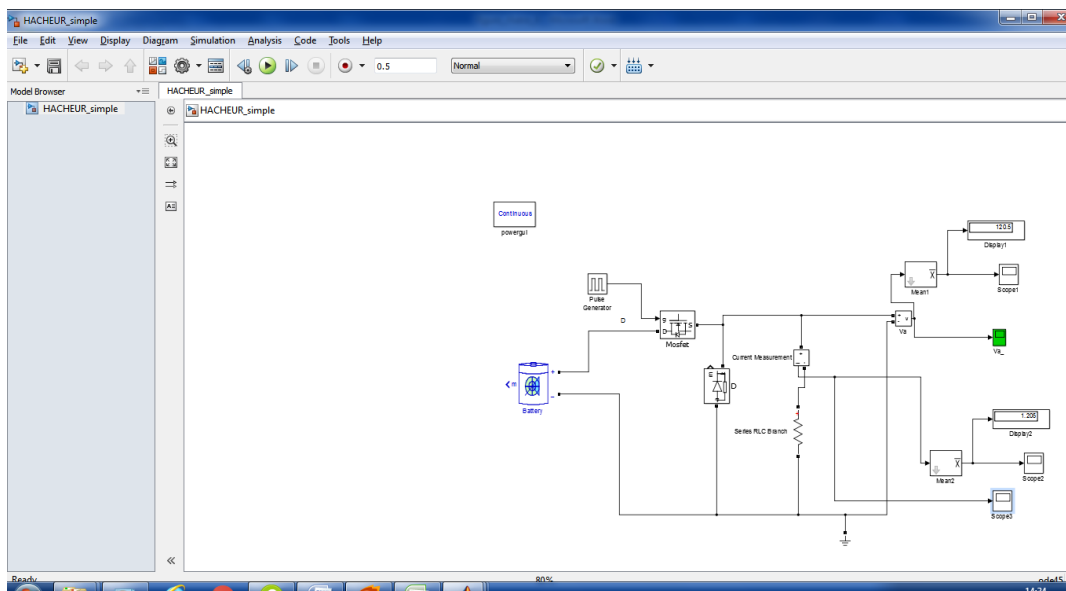
Figure(IV.5) : paramétrage de la cellule photovoltaïque



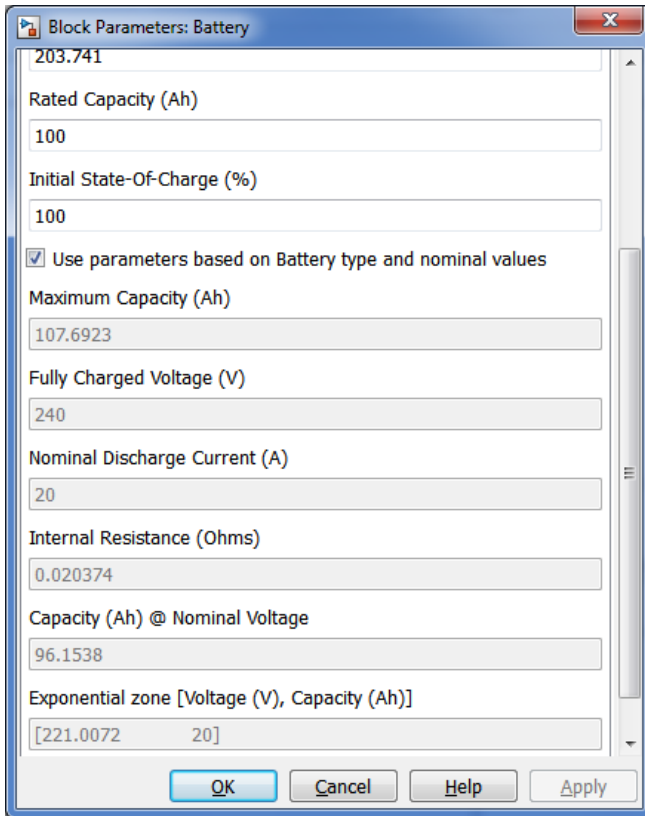
Figure(IV.6) : courbes de la simulation de la cellule photovoltaïque en fonction d'une charge variable.

D'après les graphes ci-dessus, on peut conclure que la cellule photovoltaïque est influencée par la température et l'ensoleillement de l'environnement, l'augmentation de l'ensoleillement provoque l'augmentation du courant de sortie par contre l'augmentation de la température conduit à une légère baisse du courant délivré par la cellule. la variation de la résistance en charge entraîne la variation du courant et de la tension de sortie de la cellule d'une manière opposée.

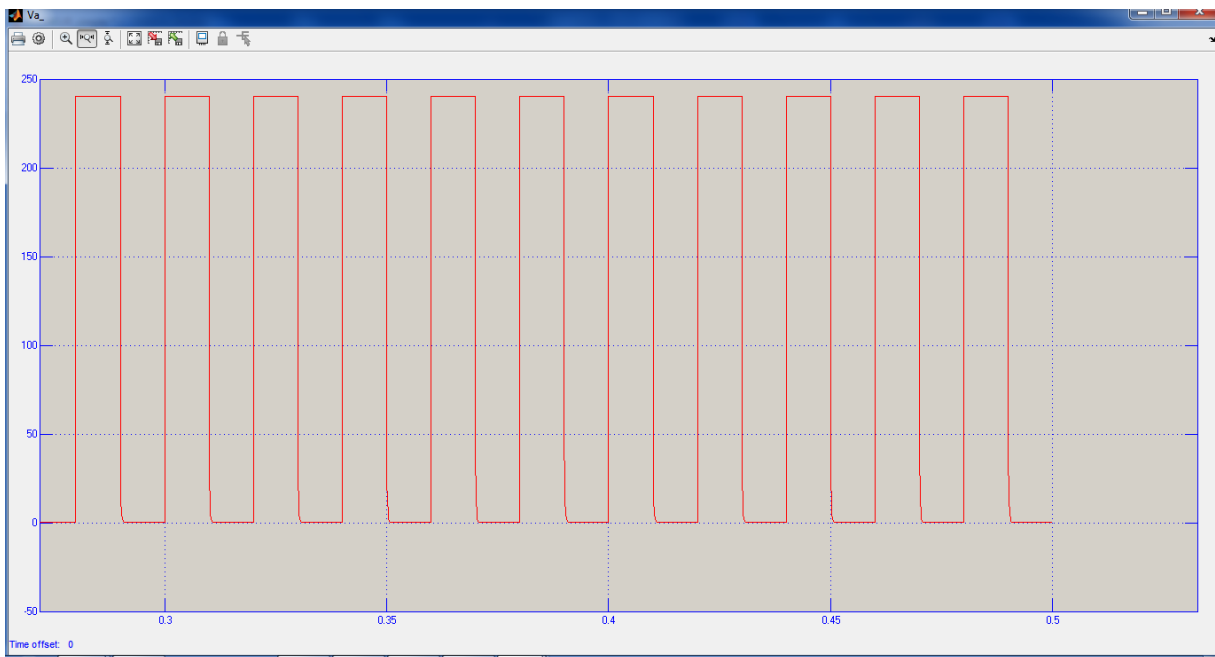
IV.3. 2.simulation du hacheur :



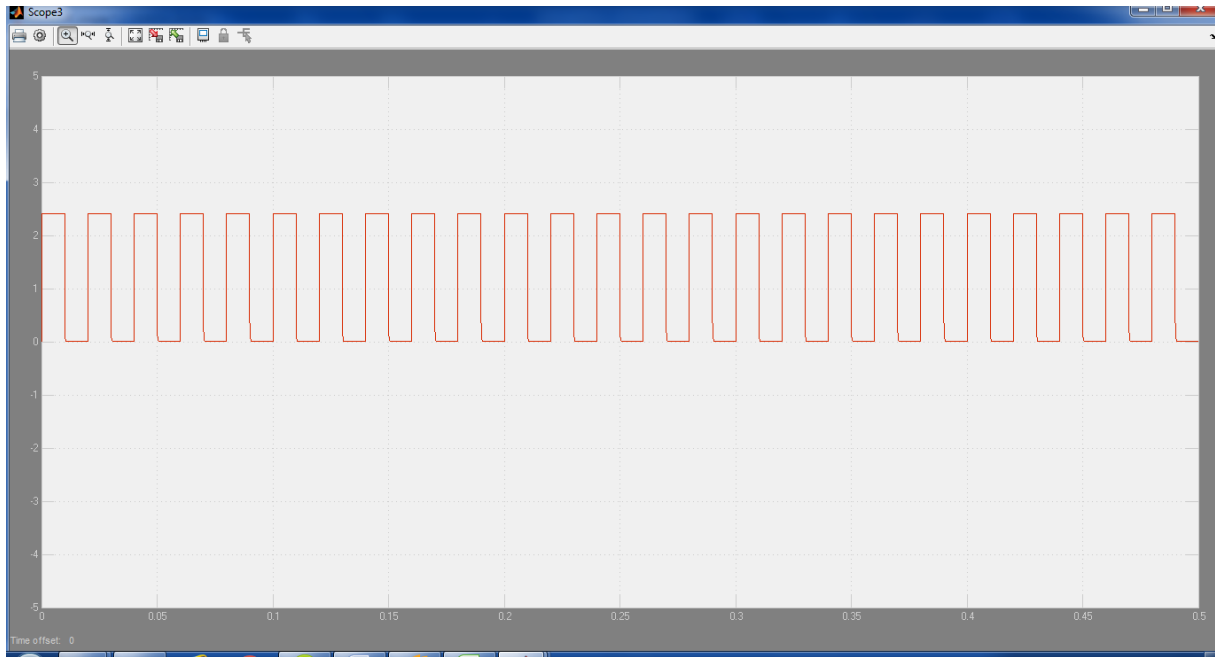
Figure(IV.7) : simulation du hacheur



Figure(IV.8) : Paramétrage de la batterie



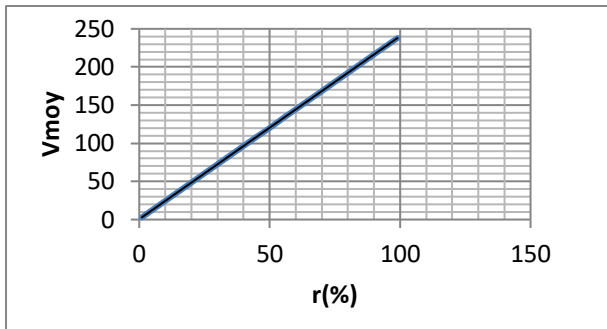
Figure(IV.9) : courbe tension de sortie du hacheur ($V=240$, $r=50\%$, $V_{moy}=120v$, $I_{moy}=1.2A$, $R=100\Omega$)



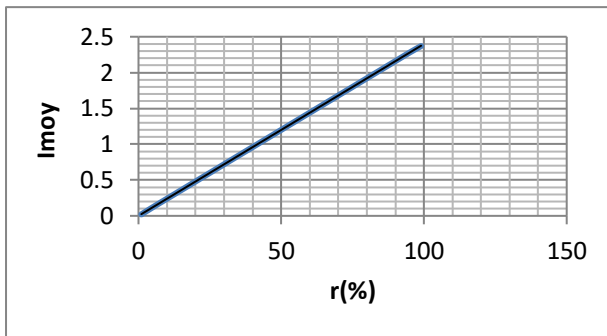
Figure(IV.10) : courbe courant de sortie du hacheur ($V=240v$, $r=50\%$, $V_{moy}=120v$, $I_{moy}=1.2A$, $R=100\Omega$)

r(%)	V_{moy}	I_{moy}
1	2,87	0,02
5	12,53	0,12
10	24,53	0,24
15	36,52	0,36
20	48,51	0,48
25	60,51	0,6
30	72,5	0,72
35	84,5	0,84
40	96,49	0,96
45	108,5	0,1
50	120	1,2
55	132,5	1,32
60	144,5	1,44
65	156,5	1,56
70	168,4	1,68
75	180,4	1,8
80	192,4	1,19
85	204,4	2,04
90	216,4	2,16
95	228,4	2,28
99	237,9	2,37

Tableau(IV.1) : variation de la valeur moyenne du courant et de tension en fonction du rapport cyclique



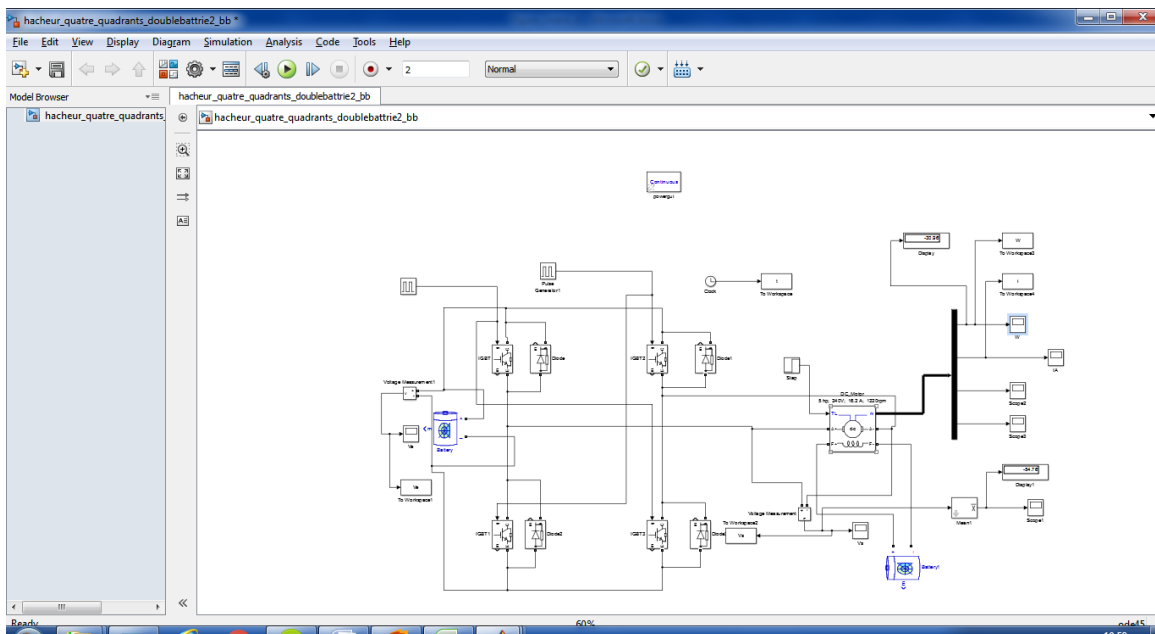
Figure(IV.11) : variation $V_{moy}=f(r)$



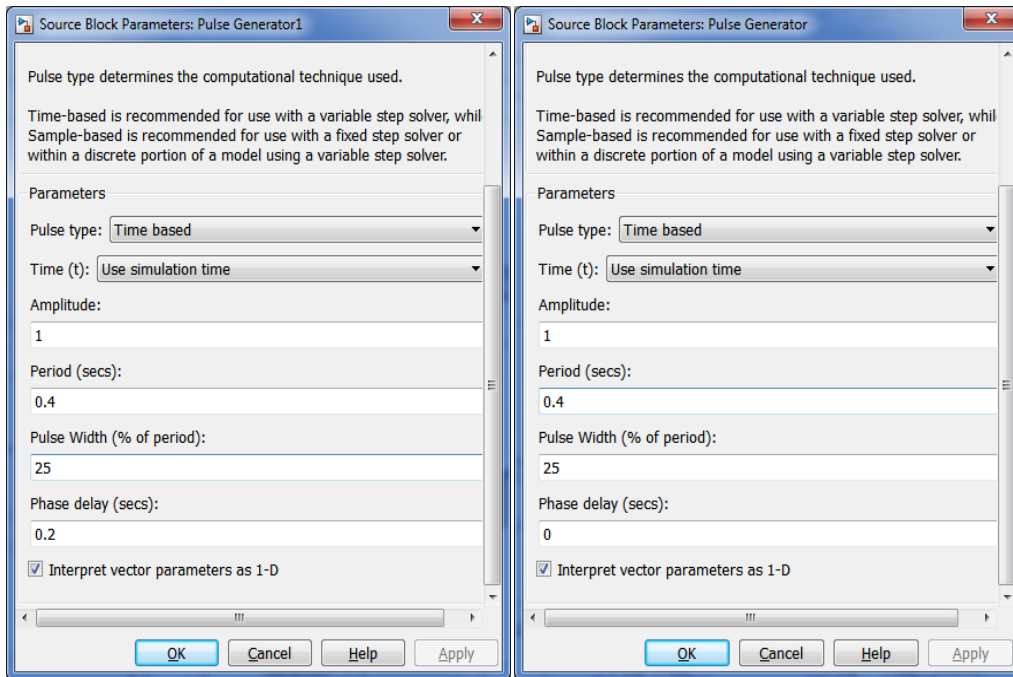
Figure(IV.12) : variation $I_{moy}=f(r)$

Les figures 11 et 12 montrent que la variation de la valeur moyenne du courant et de la tension d'un hacheur est linéaire au rapport cyclique, c'est-à-dire que l'augmentation du rapport implique l'augmentation de la valeur moyenne du courant et de la tension d'une manière linéaire et proportionnelle.

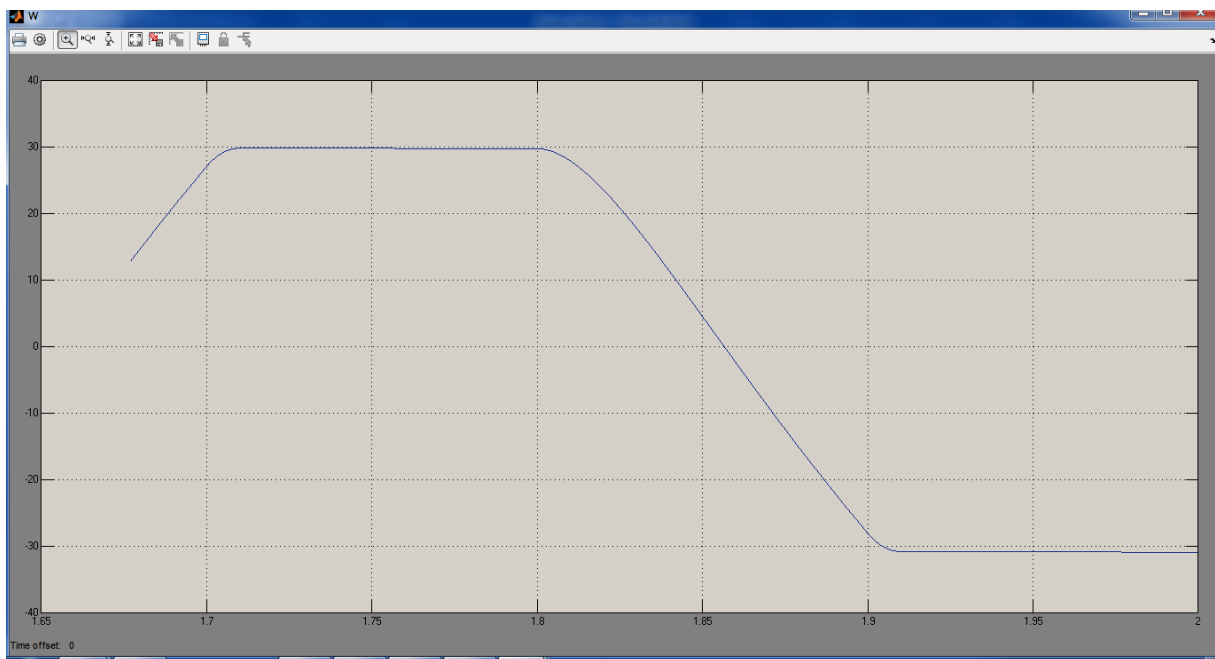
IV.3. 3.hacheur quatre quadrants-MCC :



Figure(IV.13) : hacheur quatre quadrants - MCC



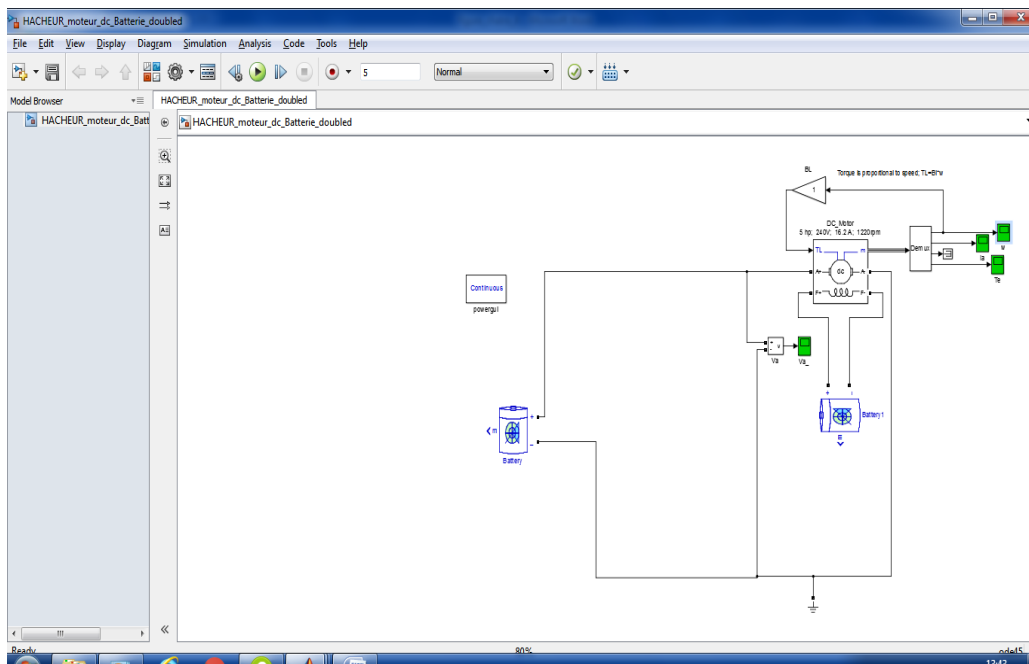
Figure(IV.14) : paramétrage des générateurs d'impulsion



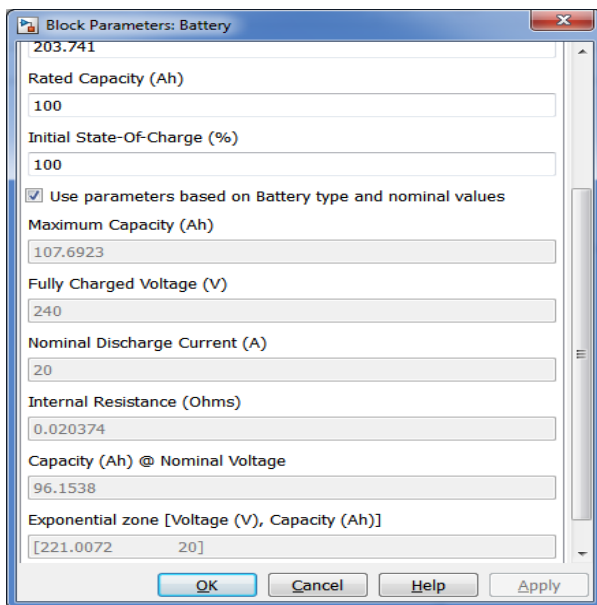
Figure(IV.15) :courbe de la simulation de l'hacheur quatre quadrants -MCC

On remarque sur la figure Figure(IV.15) que le moteur fonctionne en sens directe à $Wd=30\text{rd/s}$ puis il bascule en sens inverse à $Wi=-30\text{rd/s}$, cette technique est utilisée généralement lorsque le MCC tourne en deux sens durant un cycle de fonctionnement (exemple : aller / retour) ou bien au freinage.

IV.3. 4. Simulation du moteur à courant continu alimenté directement :

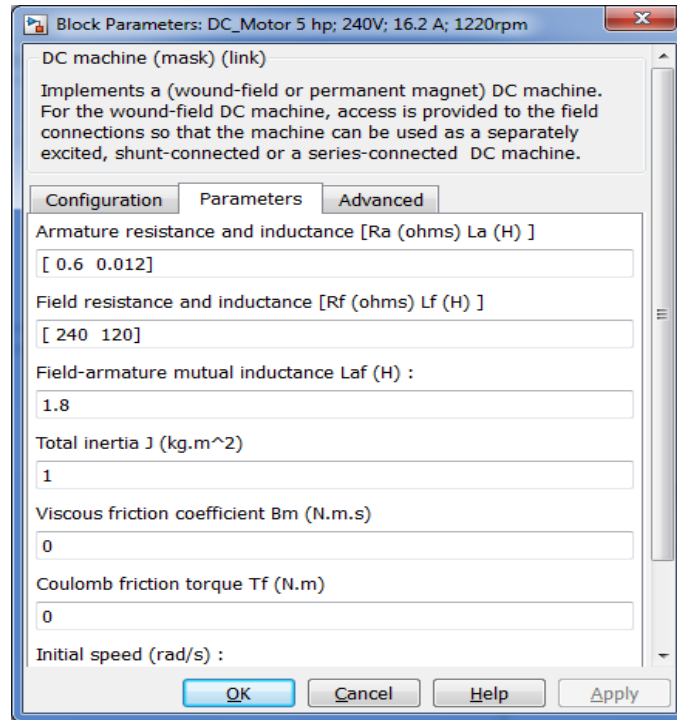


Figure(IV.16) : alimentation directe du Moteur à courant continu



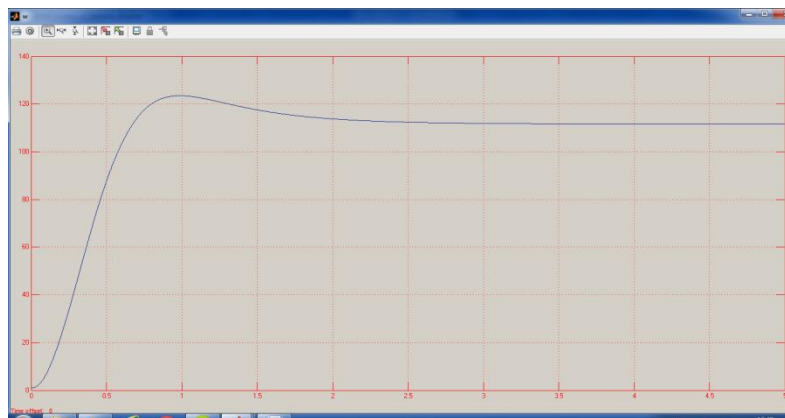
Figure(IV.17) : Paramétrage de la batterie

La batterie rechargeable assure l'alimentation du moteur en tension de 240v (induit et inducteur), elle est chargée par le courant de la source photovoltaïque.

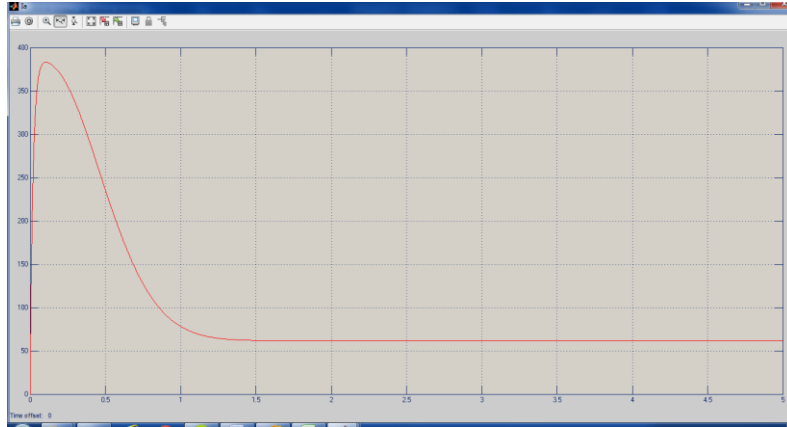


Figure(IV.18) : Paramétrage du moteur.

le moteur est à excitation séparée($V=240v$)



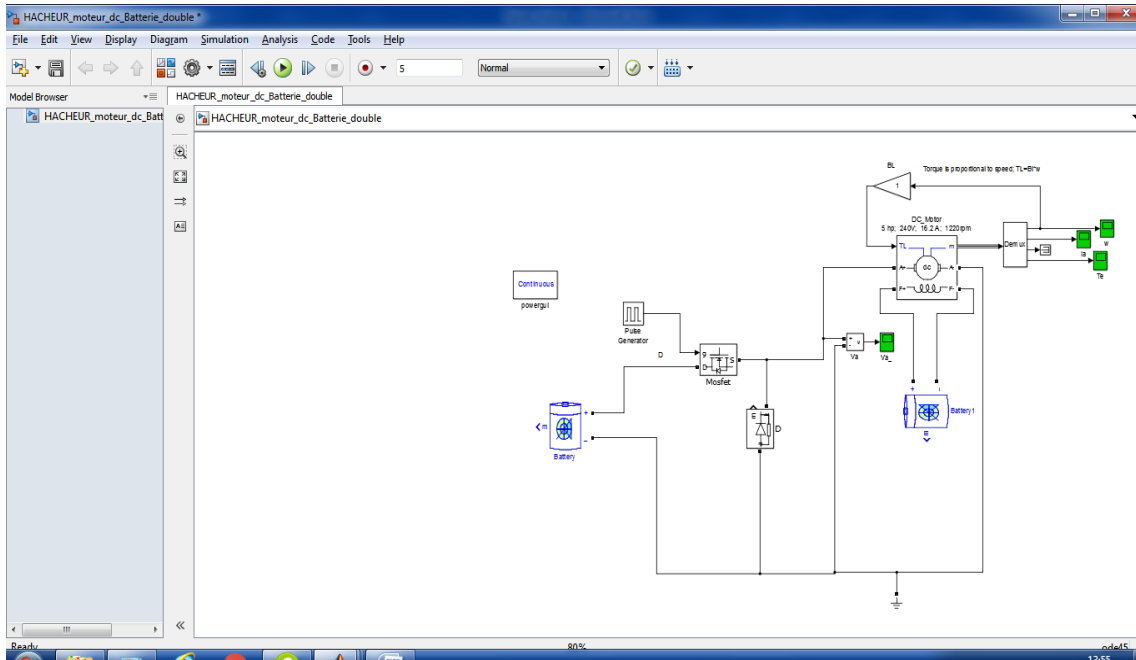
Figure(IV.19) : courbe de vitesse ($w= 111.55rd/s$)



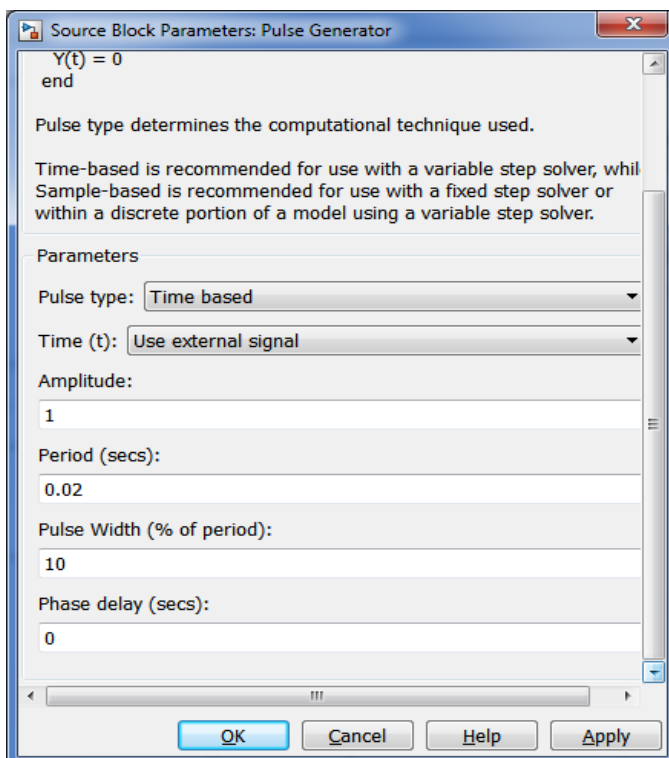
Figure(IV.20) : courbe du courant ($I_a=61.84A$)

L'alimentation directe du moteur est caractérisée par deux temps, le premier est de démarrage où le courant absorbé est fort (383.12A) et la vitesse en phase non stable, le deuxième est la période de stabilisation, le courant et la vitesse prennent des valeurs fixes. ($I_a=61.84A$) ($w= 111.55rd/s$).

IV.3.5 Simulation du Moteur à courant continu commandé par un hacheur en variant le rapport cyclique :

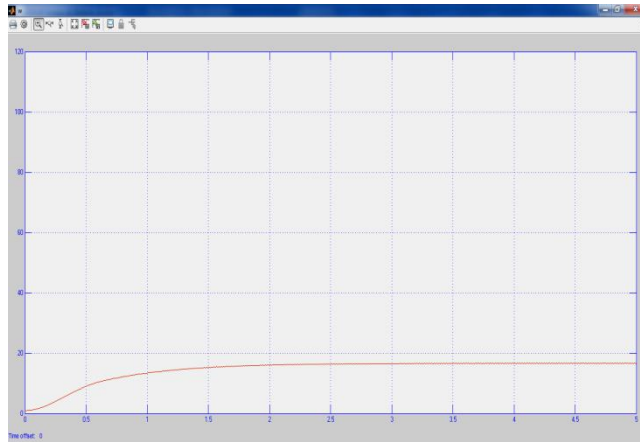


Figure(IV.21) :simulation hacheur - MCC

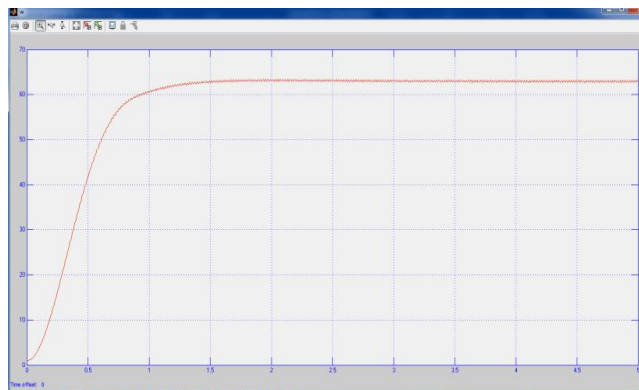


Figure(IV.22) :paramétrage du générateur d'impulsion

($T=0.02s$ / $r=10\%$)



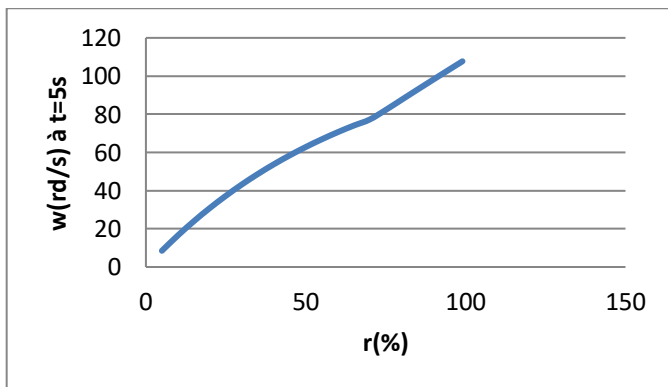
Figure(IV.23) : courbe de vitesse ($w= 16.53rd/s$, $r=10\%$)



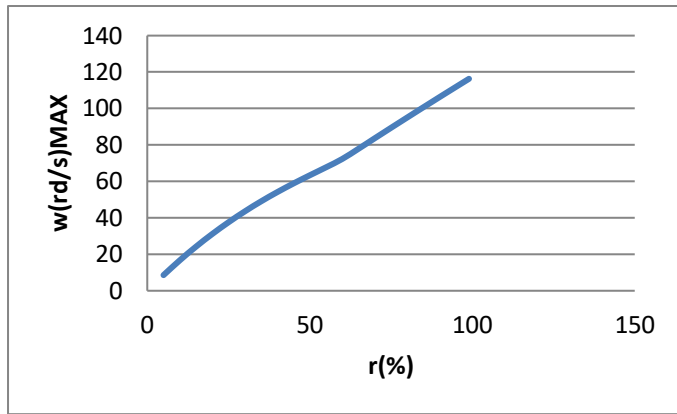
Figure(IV.24) : courbe de vitesse ($w=62.83rd/s$, $r=50\%$)

r(%)	w (rd/s) à t=5s	w(rd/s)MAX
5	8.4966	8.5853
10	16.5341	16.6964
15	23.9837	24.2052
20	30.8873	31.1544
25	37.2837	37.5837
30	43.2089	43.5303
35	48.6964	49.0311
40	53.7779	54.1264
45	58.4827	58.8738
50	62.8386	63.3603
55	66.8719	67.7294
60	70.6069	72.3191
65	74.0666	77.9098
70	77.2286	83.6717
75	82.2362	89.3942
80	87.6139	95.0785
85	92.9605	100.7262
90	98.2713	106.3295
95	103.5412	111.8857
99	107.7237	116.3004

Tableau(IV.2) : variation de la vitesse du moteur en fonction de la variation du rapport cyclique.



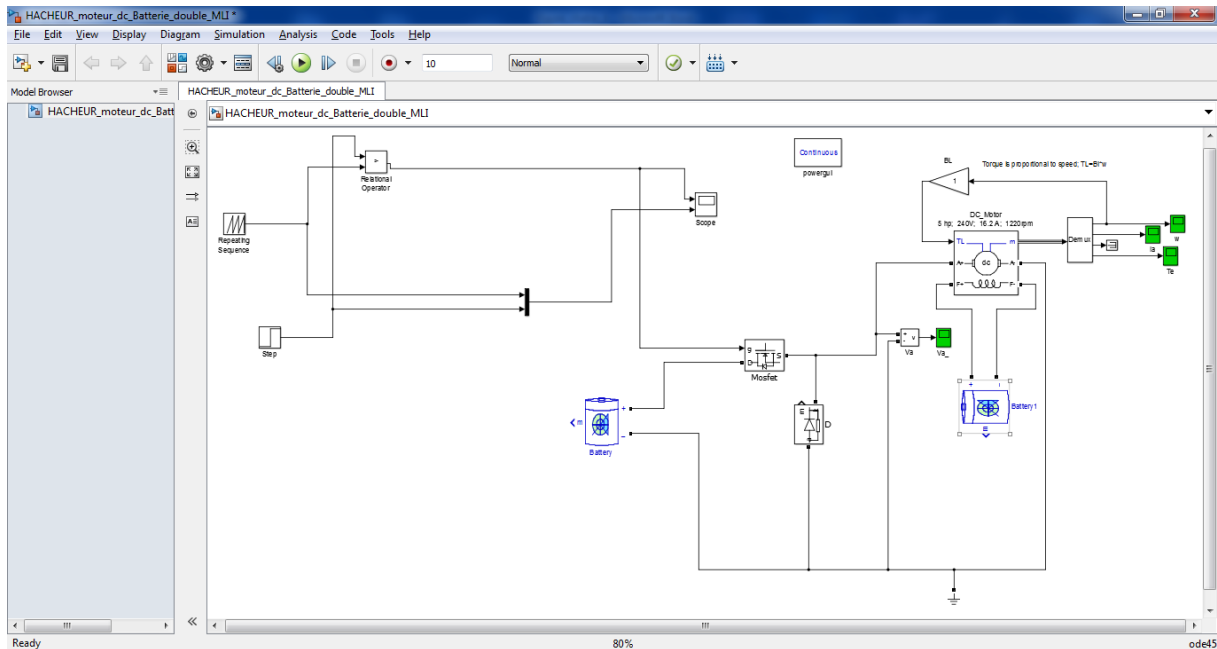
Figure(IV.25) :variation $w(t=5s)=f(r)$



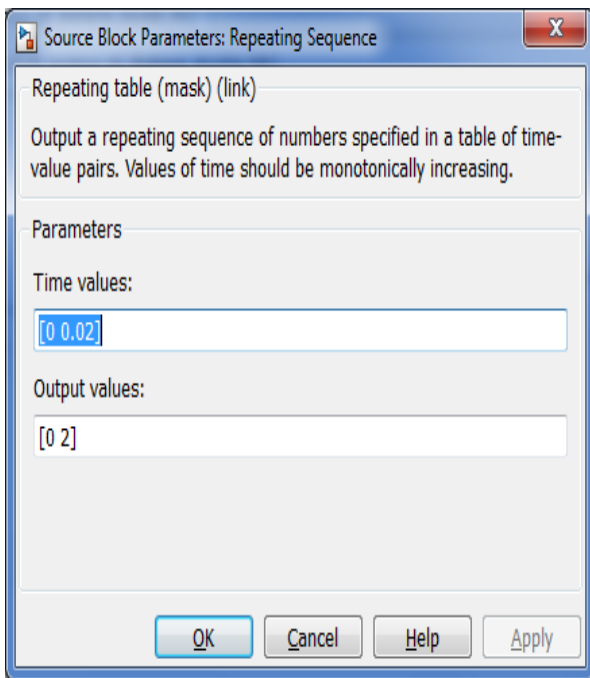
Figure(IV.26) :variation $w(\text{MAX})=f(r)$

La variation de la vitesse de rotation du moteur par variation de la tension de l'induit est presque linéaire en fonction de la variation du rapport cyclique, c'est à dire une variation du rapport cyclique donne une variation proportionnel de la vitesse de rotation, donc, un changement voulu de la vitesse à une valeur précise peut être obtenu par le choix du rapport cyclique adéquat à cette vitesse.

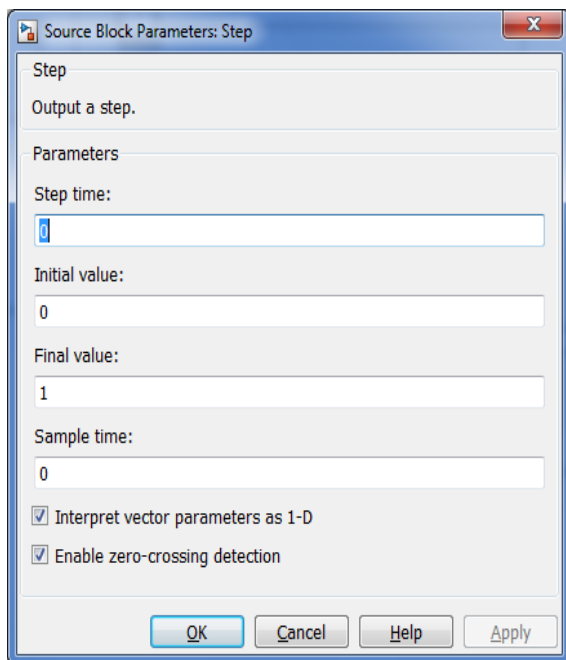
IV.3. 6 Simulation du Moteur à courant continu commandé par un hacheur en variant le signal de référence du MLI :



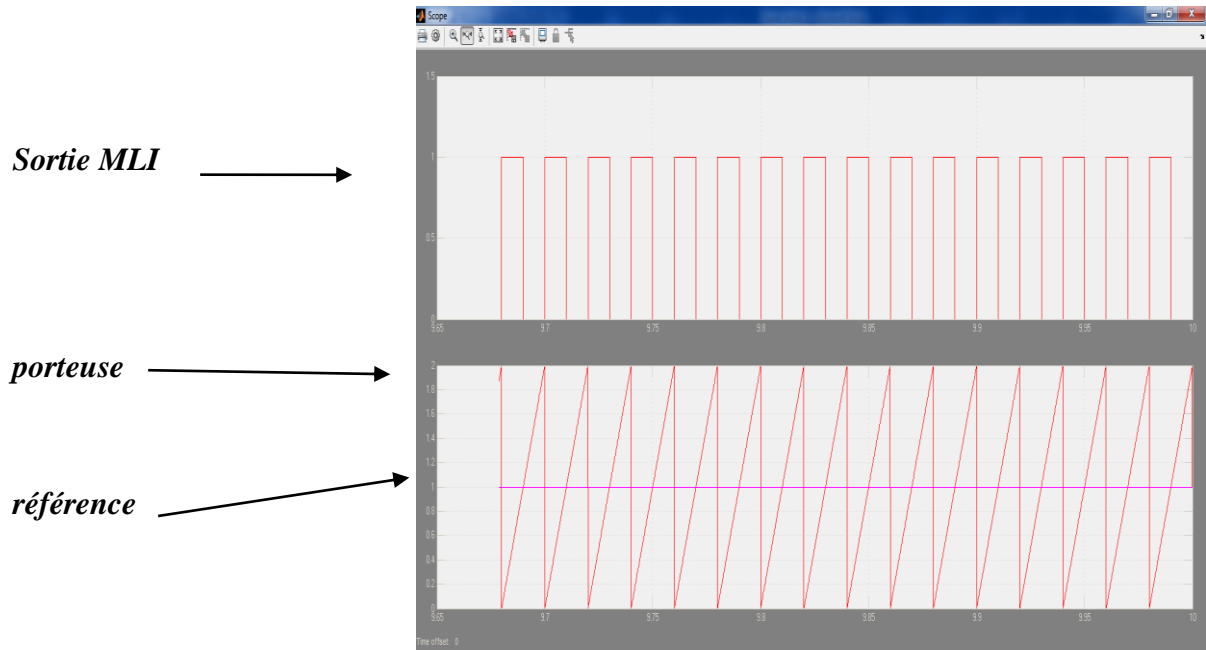
Figure(IV.27) :simulation du moteur à courant continu commandé par hacheur cadencé par un MLI.



Figure(IV.28) : Configuration de la porteuse



Figure(IV.29) : Configuration de la référence



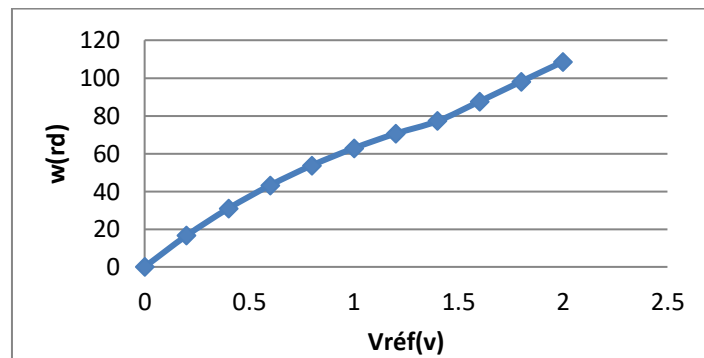
Figure(IV.30) : les signaux du MLI



Figure(IV.31) : courbe de la vitesse

V(réf)	W(rd/s)
0	0
0,2	16,5364
0,4	30,8841
0,6	43,1949
0,8	53,75
1	62,7955
1,2	70,5485
1,4	77,1556
1,6	87,5134
1,8	98,1325
2	108,5774

Tableau(IV.3) : variation de la vitesse du moteur en fonction de la variation du signal de référence.



Figure(IV.32) :courbe de variation de la vitesse en fonction du signal de référence du MLI

Dans le cas où le signal de la porteuse est en forme de dents de scie et la référence est un signal continu , la variation de la tension du signal de référence du MLI provoque directement la variation de la vitesse de rotation du MCC d'une manière proportionnel est presque linéaire

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a détaillé le fonctionnement du système : panneau PV -hacheur-MCC et on a simulé par le logiciel MATLAB SIMULINK chaque composant du système en question, après ça , on a simulé le montage global en jouant sur la variation du rapport cyclique du hacheur et sur le signal de référence du MLI afin de varier la vitesse du moteur .

On a constaté que :

- 1.les panneau PV présentent des bons caractéristiques technique de production d'électricité propre .
- 2.Le hacheur est un convertisseur très efficace au variation de vitesse des MCC.
3. la commande de la vitesse du MCC par la variation de la tension d'alimentation de l'induit est proportionnelle aux variations du rapport cyclique et au signal de référence du MLI ,ces résultats peuvent être utilisés pour une conduite précise de la vitesse par une régulation adaptée.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce projet est basé essentiellement sur la commande de la vitesse d'un moteur à courant continu par un hacheur et alimenté par une source photovoltaïque, le premier et le deuxième chapitre ont été consacré respectivement aux généralités sur les machines à courant continu et les convertisseurs statiques, le troisième chapitre a étudié les systèmes photovoltaïques, après ça, un quatrième chapitre a illustré le fonctionnement du système complet : panneau photovoltaïque, hacheur et moteur à courant continu où on a simulé le fonctionnement de chaque composant et finalement la simulation de l'ensemble de ces composants dans le but de faire varier la vitesse du moteur en agissant sur le paramètre clé de l'hacheur qui est le rapport cyclique ou le signal de référence du MLI.

De ce fait on peut conclure que:

1. le moteur à courant continu reste un actionneur très efficace et bénéfique et présente plusieurs avantages de point de vue fonctionnement et variation de vitesse.
2. Le convertisseur continu continu (hacheur) est un bon élément de variation de la valeur moyenne de la tension de sortie qui peut être utilisé au variation de vitesse des moteurs à courant continu.
3. Les systèmes photovoltaïques présentent plusieurs avantages en matière de coût, de propreté et rendement.
4. L'implantation d'un système de commande d'un moteur à courant continu alimenté par une source photovoltaïque nécessite un bon choix d'équipement et de dimensionnement.
5. La variation de vitesse par un hacheur en jouant sur le rapport cyclique ou par la variation du signal de référence du MLI s'avère très efficace car elle donne des résultats liés directement aux ces variations .
6. Cette technique rend la régulation de vitesse de tel procédé facile à réaliser.

Liste des figures

Figure (I.1) : Fonctionnement de la machine à courant continu	3
Figure (I.2) : Constitution de la machine à courant continu	4
Figure (I.3) : L'inducteur.....	4
Figure (I.4) : L'induit.....	5
Figure (I.5) : Collecteur et balais.....	5
Figure (I.6) : Principe d'un moteur à courant continu.	6
Figure (I.7) : Principe de fonctionnement d'une génératrice.....	7
Figure (I.8): Moteur à courant continu à aimant permanent.....	7
Figure (I.9): Moteur à courant continu excitation à électroaimant.....	8
Figure (I.10) : Le moteur à excitation séparée.....	8
Fig (I.11) : Caractéristiques d'un moteur à excitation séparée.....	8
Figure (I.12) : Le couple en fonction de courant d'alimentation.....	9
Figure (I.13) : Le moteur à excitation série.....	9
Figure (I.14) : Caractéristique de vitesse d'un moteur série.....	10
Figure (I.15) : Caractéristique de couple d'un moteur série.....	10
Figure (I.16) : Le moteur à excitation shunt.....	10
Figure (I.17) : Le moteur à excitation composée.....	11
Figure (I.18) : Zones de fonctionnement d'un moteur à courant continu.....	12
Figure (I.19) : Modes de fonctionnement d'un moteur dans le plan vitesse-couple.....	12
Figure (I.20) : Bilan de la puissance.....	13
Figure (II.1) : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.....	16
Figure (II.2) : Redresseur commandé pont mixte symétrique.....	17
Figure (II.3) : La tension aux bornes de la charge avec un redresseur commande.....	17
Figure (II.4) : Le fonctionnement d'un hacheur BUCK.....	20
Figure (II.5) : la tension aux bornes de la charge avec un hacheur série.....	20
Figure (II.6) : La valeur moyenne en fonction de rapport cyclique (α).....	20
Figure (II.7) : Hacheur série commande un moteur à courant continu.....	21

Figure (II.8) : Hacheur à quatre quadrants.....	22
Figure (II.9) : la tension aux bornes de la charge avec un hacheur quatre quadrants.....	22
Figure (II.10) : Principe du fonctionnement d'un Hacheur quatre quadrants.....	23
Figure (II.11) : Réalisation du signal MLI.....	24
Figure (III.1) : Composantes du rayonnement solaire au sol.....	27
Figure (III.2) : cellule photovoltaïque.....	28
Figure (III.3) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	29
Figure (III.4) : le type de cellule mono cristalline.....	30
Figure (III.5) : le type de cellule poly cristalline.....	30
Figure (III.6) : le type de cellule amorphe.....	30
Figure(III.7):Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_p cellules en parallèle.....	32
Figure (III.8):Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_s cellules en série.....	32
Figure(III.9) : Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque.....	33
Figure (III.10) : Module photovoltaïque.....	35
Figure (III.11) : Câblage des cellules dans un module.....	36
Figure (III.12) : panneau solaire.....	36
Figure(IV.1) :branchement du panneau photovoltaïque à la batterie.....	38
Figure(IV.2) : l'influence de l'ensoleillement.....	39
Figure(IV.3) : l'influence de la température.....	39
Figure(IV.4) : simulation de la cellule photovoltaïque avec une charge variable.....	40
Figure(IV.5) :paramétrage de la cellule photovoltaïque.....	40
Figure(IV.6) :courbes de la simulation de la cellule photovoltaïque en fonction d'une charge variable.....	41
Figure(IV.7) : simulation du hacheur.....	41
Figure(IV.8) : Paramétrage de la batterie.....	42
Figure(IV.9) : courbe tension de sortie du hacheur ($V=240$, $r=50\%$, $V_{moy}=120v$, $I_{moy}=1.2A$, $R=100\Omega$).....	42
Figure(IV.10) : courbe courant de sortie du hacheur ($V=240v$, $r=50\%$, $V_{moy}=120v$, $I_{moy}=1.2A$, $R=100\Omega$).....	43
Figure(IV.11) : variation $V_{moy}=f(r)$	44
Figure(IV.12) :variation $I_{moy}=f(r)$	44

Figure(IV.13) : hacheur quatre quadrants – MCC.....	44
Figure(IV.14) :paramétrage des générateurs d'impulsion.....	45
Figure(IV.15) :courbe de la simulation de l'hacheur quatre quadrants –MCC.....	45
Figure(IV.16) : alimentation directe du Moteur à courant continu.....	46
Figure(IV.17) :Paramétrage de la batterie.....	46
Figure(IV.18) :Paramétrage du moteur.....	47
Figure(IV.19) :courbe de vitesse ($w= 111.55\text{rd/s}$).....	47
Figure(IV.20) :courbe du courant ($I_a=61.84\text{A}$).....	48
Figure(IV.21) :simulation hacheur - MCC.....	49
Figure(IV.22) :paramétrage du générateur d'impulsion($T=0.02\text{s} /r=10\%$).....	49
Figure(IV.23) : courbe de vitesse ($w= 16.53\text{rd/s}$, $r=10\%$).....	50
Figure(IV.24) : courbe de vitesse ($w=62.83\text{rd/s}$, $r=50\%$).....	50
Figure(IV.25) :variation $w(t=5\text{s})=f(r)$	51
Figure(IV.26) :variation $w(\text{MAX})=f(r)$	52
Figure(IV.27) :simulation du moteur à courant continu commandé par hacheur cadencé par un MLI.....	52
Figure(IV.28) :Configuration de la porteuse.....	53
Figure(IV.29) : Configuration de la référence.....	53
Figure(IV.30) :les signaux du MLI.....	54
Figure(IV.31) :courbe de la vitesse.....	54
Figure(IV.32) :courbe de variation de la vitesse en fonction du signal de référence.....	55

Liste des tableaux

Tableau(IV.1) : variation de la valeur moyenne du courant et de tension en fonction du rapport cyclique.....	43
Tableau(IV.2) : variation de la vitesse du moteur en fonction de la variation du rapport cyclique.....	51
Tableau(IV.3) : variation de la vitesse du moteur en fonction de la variation du signal de référence.....	55

Liste des abréviations :

- P : nombre de pair de pôles de la machine.
- N : nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit.
- a : nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais.
- n : fréquence de rotation de l'induit (en t/s).
- Φ : flux sous un pôle de la machine en Webers.
- E : La force électromotrice .
- L : longueurs.
- B : champ .
- I : courant.
- V : alimentation .
- n : fréquence de rotation.
- P_a : puissance électrique absorbée.
- P_u : puissance mécanique fournie.
- T_u : le couple utile .
- P_{em} : Puissance électromagnétique.
- P_{JS} : Pertes par effet joule dans l'inducteur.
- P_{JR} : Pertes par effet joule dans l'induit.
- P_c : Pertes fer + pertes mécaniques : dites pertes constante.
- η : Le rendement.
- i_s : Courant de la source.
- V_{ch} : Tension de la charge.
- i_{ch} : Courant de la charge.
- V_s : Tension de la source.
- I_{cc} : Le courant de court-circuit .
- V_{co} : tension de circuit ouvert .
- R_{sh} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

R_s : résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexion.

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle

I_{ccg} : courant de court circuit global.

V_{cog} : tension de circuit ouvert global.

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque(A).

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule(A).

I_d : Le courant circulant dans la diode (A).

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance R_{sh} (A).

I_{os} : le courant de court-circuit de la cellule.

K : la constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$).

q : Charge électrique élémentaire ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

A : Facteur d'idéalité de la diode ($1 < A < 3$).

η : Rendement de la cellule(%).

V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule.

FF: facteur de forme .

PV: panneau photovoltaïque.

MLI : Modulation de la Largeur d'impulsion.

MCC: moteur à courant continu.

$V(\text{réf})$:tension de référence .

$r(\%)$:rapport cyclique

T :période.

I_a :courant absorbé

W :vitesse du moteur.

V_{moy} :valeur moyenne de la tension

I_{moy} :valeur moyenne du courant.

δ : angle d'amorçage.

REFERENCES

- [1] : « Commande d'une machine à courant continu » SEBAA Hamza MÉMOIRE DE MASTER, 2018, électrotechnique Université Mohamed Khider de Biskra
- [2] : www.elec.jbd.free.fr, « Machine électromagnétique », Chapitre 13.
- [3] : Fabrice DESCHAMP, « Cours BAC S SI – Convertir L'énergie – Machine à Courant continu Sciences de L'ingénieur, LYCEE JACQUES PREVERT.
- [4] : « Étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant Continu ». BEKKOUCHE Charaf Eddine et TOUGGOURTI Abdel Kader Électrotechnique, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
- [5] : M.L.LOUAZENE, « Cours d'électroniques de puissance », université d'Ouargla, 2011.
- [6] : « Etude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT » ZENAKHI Asma ; Université Abou Bekr Belkaïd –Tlemcen, juin2016.
- [7] : Support Electrique pour Installation Solaire. Inter Aide Sierra Leone – Support. Electrique pour Installation Solaire.
- [8] : myshop solaire, kit solaire 12v 50-100-135w. Guide d'installation.
- [9] : M.N.Mechalikh et CH.E.Hamada. Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. Mémoire de Master Académique, Université KASDI MERBAH OUARGLA, 2013.
- [10] : W.Bensaci. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, Mémoire de Master, Université KASDI
- [11] : S.Belakehal, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", thèse de Doctorat, université de Constantine, 2010

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons montrer les différents types des convertisseurs statiques ainsi que leurs caractéristiques électriques.

II.2.Définition :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine ou charge à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques.

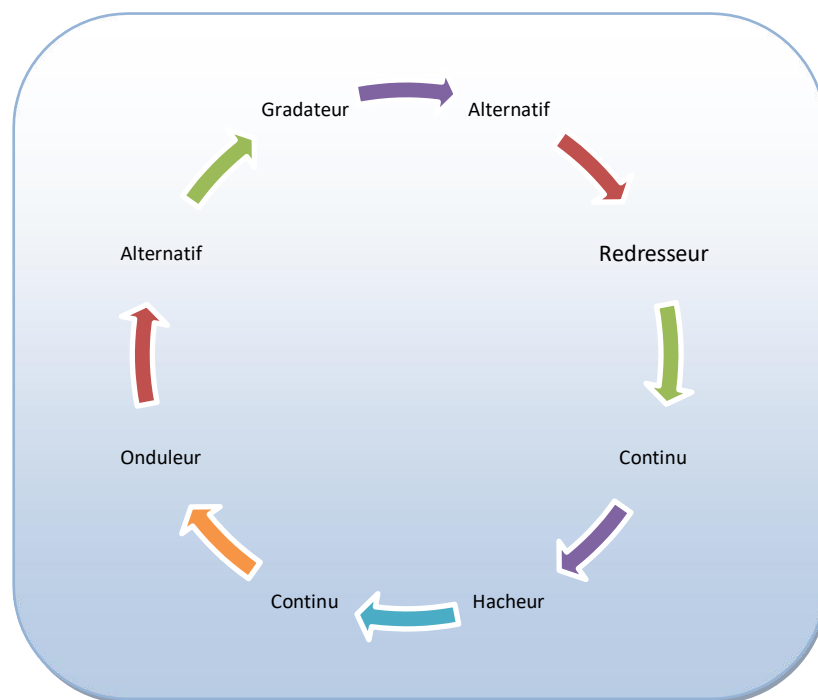
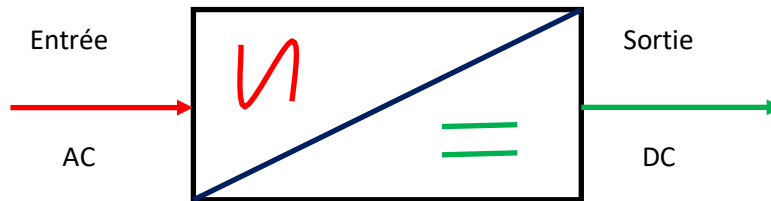


Figure (II.1) : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance

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.



Ce type de convertisseur est classé en deux classes, les redresseurs non contrôlés et les redresseurs contrôlés.

a. Le redresseur non commandé :

Ce type de redresseurs utilise des diodes (interrupteur non commandé), Ces ponts ne délivrent qu'une tension de sortie fixe, et donc ils ne seront pas utilisés pour faire la variation de vitesse pour les MCC.

b. Le redresseur commandé :

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

➤ Principe de fonctionnement :

Dans ce type, 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 coût moins important par rapport au hacheur.

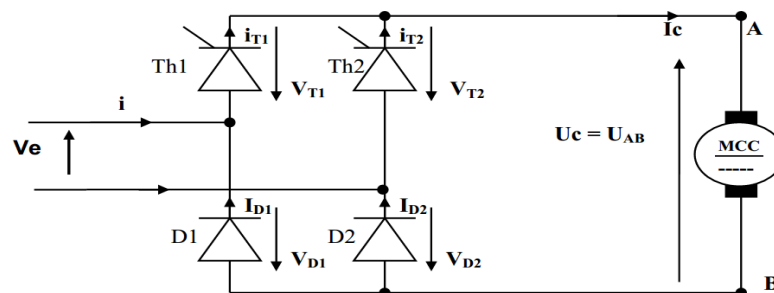


Figure (II.2) : Redresseur commandé pont mixte symétrique

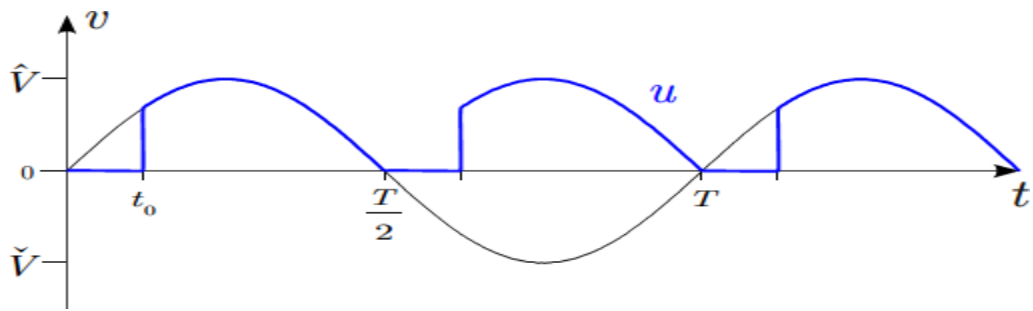


Figure (II.3) : La tension aux bornes de la charge avec un redresseur commande

➤ Valeur moyenne de la tension redressée:

$$V_{chmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) d(t) = \frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} \widehat{V}_s \cdot \sin\theta \cdot d\theta = \frac{\widehat{V}_s}{\pi} [-\cos\theta]_{\delta}^{\pi}$$

$$V_{chmoy} = \frac{\widehat{V}_s}{\pi} (1 + \cos \delta)$$

δ : L'angle d'amorçage.

Pour le réglage de la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu, Le pont alimente le moteur à excitation indépendante et constante, sa fem s'exprime en fonction de la vitesse de rotation par la relation : $E = K \cdot n$ (II. 2)

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

La tension U_c s'exprime en fonction des éléments de la charge par la relation :

$$E = U_c - R \cdot i - L \frac{di}{dt} \quad \text{II. 3}$$

En valeur moyenne :

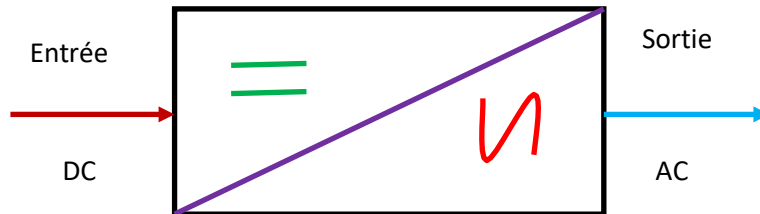
$$E = \langle U_c \rangle - R \cdot \langle i \rangle = K \cdot n \quad \text{(II. 4)}$$

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

$$n = \frac{1}{K} \left[\frac{u}{\pi} (1 + \cos \delta) - R \cdot \langle i \rangle \right] \quad (\text{II. 5})$$

II.4. Les onduleurs :

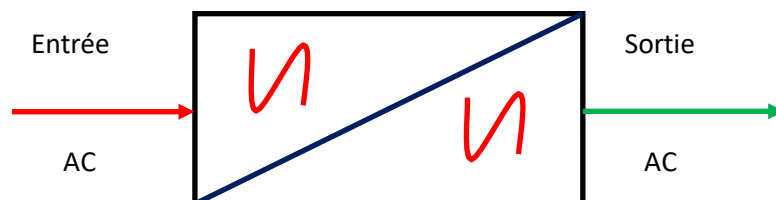
Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de générer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.



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.

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.

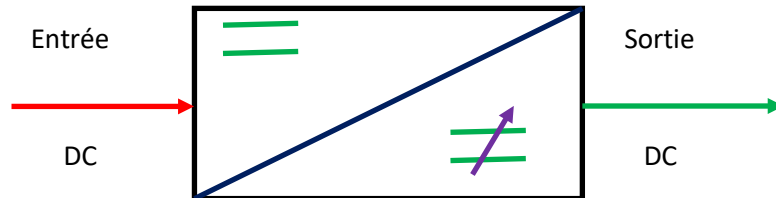


Dans ce type de convertisseur on distingue deux types de commande :

- ✓ 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 une source alternative).



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

II.6.2 Le rapport cyclique α :

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

$$\alpha = \frac{t_F}{T} \quad (\text{II. 6})$$

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

II.6.3. Différents types d'hacheurs :

Selon la position du commutateur et du hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés :

- abaisseur de tension «Buck »
- élévateur de tension «Boost»

1. Convertisseur Buck :

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

L'hacheur série est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur 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).

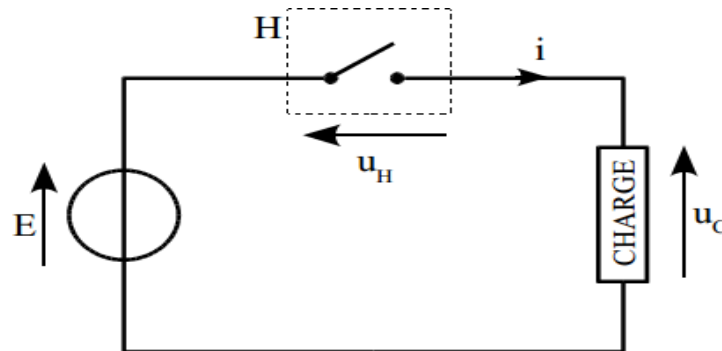


Figure (II.4) : Le fonctionnement d'un hacheur BUCK.

❖ Principe de Fonctionnement :

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage ($T = \frac{1}{f}$), comporte deux Etapes. 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 $\alpha T \leq t \leq T$.

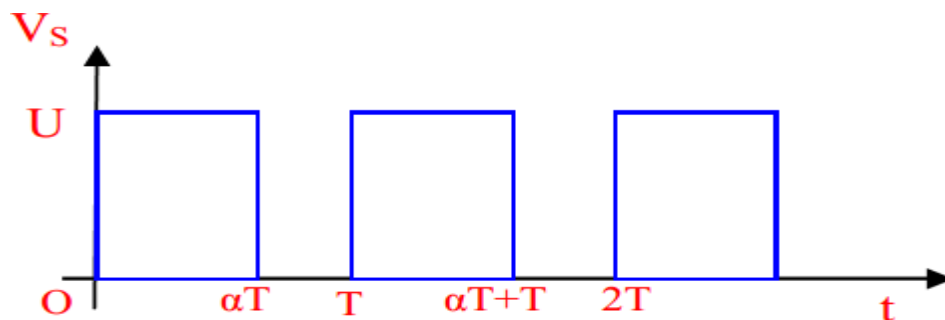


Figure (II.5) : la tension aux bornes de la charge avec un hacheur série

❖ **Valeur moyenne de la tension:**

$$V_{Smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_S(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 dt$$

$$V_{Smoy} = \frac{U}{T} (\alpha T - 0) = \alpha U$$

(II. 7)

La valeur moyenne de la tension V_{Smoy} peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique α . Quand on fait varier α de 0 à 1, V_{Smoy} varie linéairement de 0 à U .

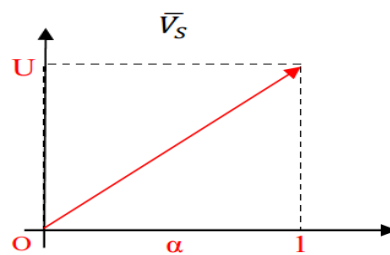


Figure (II.6) : La valeur moyenne en fonction de rapport cyclique (α)

❖ **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.

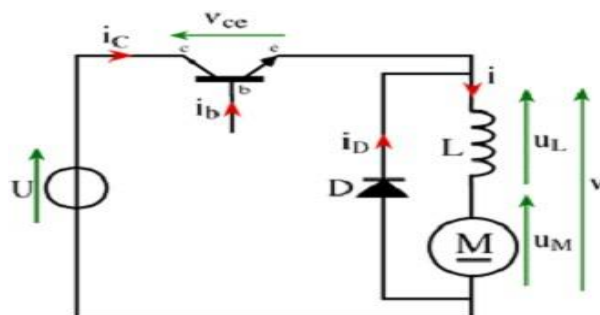


Figure (II.7) : Hacheur série commande un moteur à courant continu

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 ($\Delta i \approx 0$).

Loi des mailles :

$$V_S = U_M + U_L \quad (\text{II. 8})$$

On passe aux valeurs moyennes :

$$\langle V_S \rangle = \langle U_M \rangle + \langle U_L \rangle$$

Et comme pour un signal périodique : $\langle U_L \rangle = 0$

Nous obtenons pour le moteur :

$$\langle V_S \rangle = \langle U_M \rangle = E$$

$$\langle V_S \rangle = E = \alpha U \quad (\text{II. 9})$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega = \alpha U \quad (\text{II. 10})$$

Ω : La vitesse de rotation du moteur.

Φ : Le flux d'inducteur (égale à constant pour le moteur à excitation séparé).

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

$$E = K' \cdot \Omega = \alpha U$$

$$\Omega = K'' \cdot \alpha \quad (\text{II. 11})$$

Avec :
$$K'' = \frac{U}{K}$$

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

2. Convertisseur Boost :

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 de sortie est de type tension continue l'interrupteur 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).

II.6.4. Hacheur à quatre quadrants :

Pour obtenir une réversibilité quatre quadrants, il suffit d'associer tête 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.

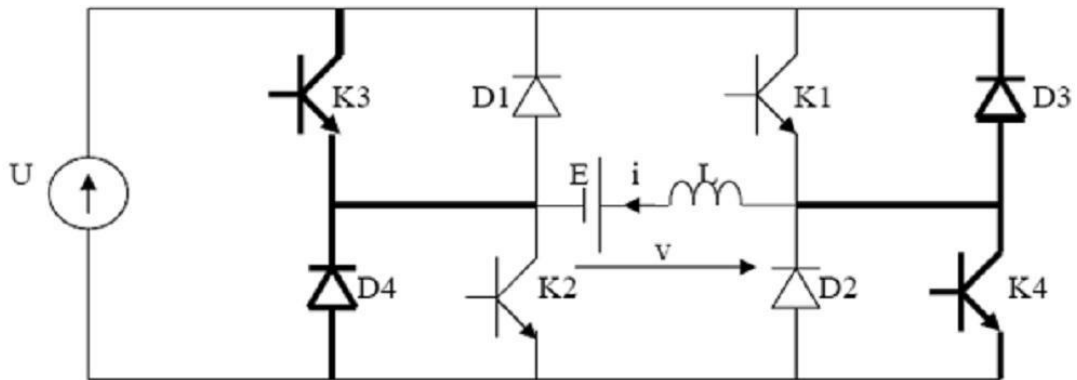


Figure (II.8) : Hacheur à quatre quadrants

On procède ainsi :

A chaque période T :

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

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

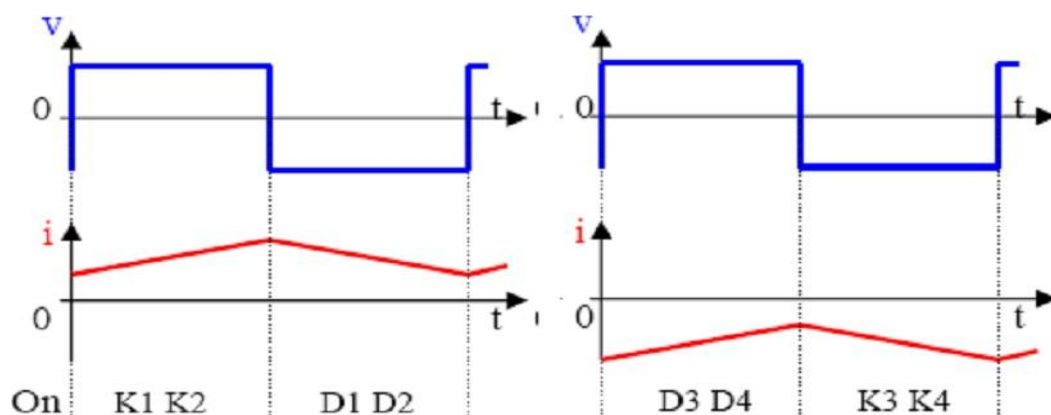


Figure (II.9) : la tension aux bornes de la charge avec un hacheur quatre quadrants

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

$$V_{Smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_S(t) d(t) = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U d(t) + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -U d(t)$$

$$V_{Smoy} = U(2\alpha - 1)$$

(II. 12)

Maintenant on peut avoir ($V_{Smoy} < 0$) (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 4 quadrants modes de fonctionnement :

$V > 0$ et $I > 0$, Rotation dans le premier sens.

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

$V < 0$ et $I < 0$, Rotation dans le deuxième sens.

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

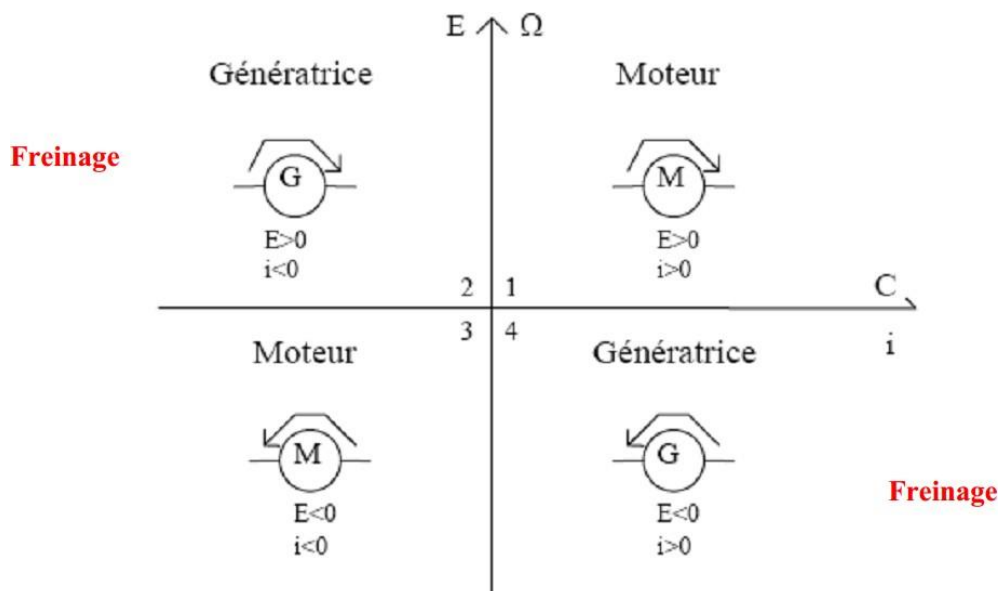


Figure (II.10) : Principe du fonctionnement d'un Hacheur quatre quadrants.

II.7. Technique de commande 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 MCC 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 dans lesquelles 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 suivant 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'autres 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 répondeuse 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 commutation des interrupteurs statiques 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.

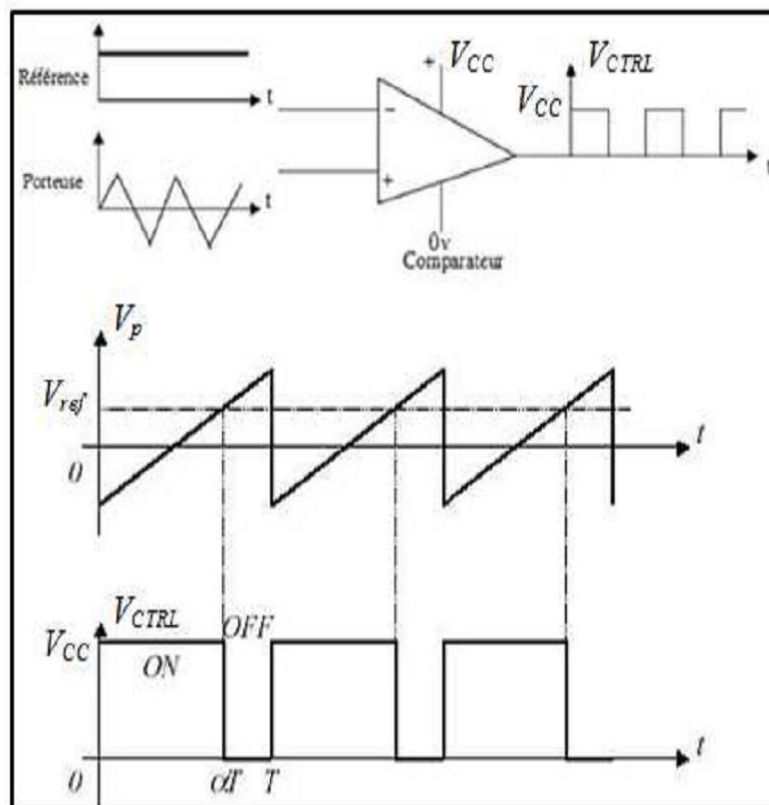


Figure (II.11) : Réalisation du signal MLI.

L'intersection de la référence avec la porteuse, en sens croissant, commande l'ouverture du transistor (T), son intersection avec la porteuse, en sens décroissant, commande la fermeture de (T). Le principe se fait par comparaison entre les deux signaux utilisant un amplificateur opérationnel.

II.8. Les montages d'électronique de puissance:

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

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).

2. Circuit de puissance :

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

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).

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 interrupteurs électroniques.

4. Circuit de protection :

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

II.9.Conclusion :

Dans ce chapitre on a détaillé les différents types des convertisseurs statiques qui peuvent être utile dans le domaine des machines de l'électronique de puissance et on s'est basé sur la commande des moteurs à courant continu par hacheur.