



Université ABBES LAGHROUR Khenchela  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Industriel  
جامعة عباس لغرور خنشلة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الصناعية



N° Série : .....

## Mémoire de fin d'étude

*Présenté pour l'obtention du diplôme de Master*

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Commande électriques**

### THEME

**Modélisation d'un système photovoltaïque,  
Application sur la machine asynchrone**

*Réalisé par :*

*Merah Saliha*

*ET*

*Houam Mostafa*

*Devant Le Jury :*

BEN HEDDA Nabil	à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela	Président
BOUDIAF Yassine	à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela	Encadrant
SAIDI Abdelkader	à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela	Examinateur

Promotion 2021/2022

# *Remerciements*

*Premièrement mon remerciement à dieu*

*C'est le tout de m'avoir donné le courage*

*Et la patience pour réaliser ce travail*

*Malgré toutes les difficultés*

*J'adresse aussi un grand merci*

*À notre encadreur messieurs le docteur*

*Boudiaf Yassine*

*Pour les conseils concernant la base de données*

*Ils ont grandement facilité ce mémoire*

*Finalement merci aussi à*

*Tous mes amis et collègues de notre spécialité*

*Master 2 commande électrique*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce présent mémoire avant tout à*

*Mer cher partants père mère*

*A ma petite sœur et ma seule tante*

*A mon professeur messieurs le docteur Boudiaf Yassine*

*De m'avoir encadré pour sa patience*

*Qui m'a encouragé orienté aidé conseillé*

*Suivi répondu à mes questions et faire avancer mes recherches*

*Pendant la durée de ce mémoire*

*A tous mes collègues grands et petits de notre*

*Spécialité master 2 commande électrique*

*Merah Salih*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*Avec l'expression de mon profond*

*Amour aux personnes les plus chères du monde*

*Mes parents Mama papa*

*A mon conjoint et mon enfant Réda Abderrahmane*

*Que dieu la bénisse et lui pardonne inchalah*

*Pour leur encouragement et leurs soutiens inconditionnel*

*A mes frères et mes sœurs et à ma grande famille*

*Je dédie aussi ce travail, à mes amis proches*

*A tous mes amis tous mes collègues d'étude, et*

*De travaille, tous ceux qui m'aiment*

*Et Ceux qui j'aime*

*Houam Mostafa*

# Sommaire

# Sommaire

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

## **Chapitre I: Généralité sur les systèmes photovoltaïques**

I.1. Introduction .....	1
I.2. Energie solaire photovoltaïque PV .....	1
I.2.1 Cellules photovoltaïques .....	2
I.2.2 Cellules monocristallins .....	2
I.2.3. Cellules poly cristallins .....	2
I.2.4 Cellules amorphes .....	2
I.2: Modélisation du générateur photovoltaïque.....	3
I.2.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque.....	3
I.3. Modèle mathématique d'un Module PV .....	6
I.4 Caractéristiques électriques d'un module PV .....	7
I.5 Caractéristiques du GPV pour différente structures.....	8
I.5.a. Raccordement des panneaux en séries.....	9
I.5.b. Raccordement des strings en parallèle.....	9
I.5.1. Description du système PV/Batterie autonome .....	11
I.5.2 Conclusion : .....	13

## **Chapitre II: Commande MPPT ordinaire**

II.1 INTRODUCTION .....	15
II.2 Techniques de recherche du point de puissance maximale .....	15

II.2.1 Principe de la commande MPPT .....	15
II.3. Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée. ....	16
II.4. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche.....	17
II.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage) .....	18
II.4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Cure) : .....	19
II.4.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturba And Observe). ....	21
II.4.4 Conductance Incrémentale (Inchon, Incrémental Conductance.....	25
II.5. Étage d'Adaptation de Type BOOST. ....	28
II.5.1. Modèle mathématique équivalent. ....	28
II.6.Modèle approximé du convertisseur Booste.....	29
II.3 : Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT).....	30
II.4 Conclusion .....	30
II.5.2. Résultats de Simulation.....	31

## **Chapitre III: Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone**

III.1. INTRODUCTION .....	37
III.2.Modélisation de l'onduleur.....	37
III.1.2. Générateur de MLI.....	40
III. Commande vectorielle de la MAS triphasée .....	40
III.2.1 Commande vectorielle par orientation du flux rétorque .....	41
III.2.2 Commande vectorielle indirect IFOC.....	43
III.2.2.1 Découplage.....	45
III.2.3. Commande IRFO à MLI basée sur les tensions de commande.....	45
III.3. Description .....	46
III.3.1. Détermination des Boucles de commande.....	48
III.3.2. Commande IRFO par Hystérésis .....	52

III.3.3 : Résultats de simulation .....	54
III.4 : Conclusion générale .....	57
Conclusion générale .....	60
Bibliographies.....	62

## Liste des figures

### Tableau des figures

Titre de figures	Figures
Figure I.1 : Construction de base d'un générateur PV	2
Figure I.2 : Schéma équivalent d'une cellule PV idéale	3
Figure I.3 : Circuit équivalent d'une cellule PV avec prise en compte de la perte en tension et courant de fuite.	4
Figure I.4 : Circuit électrique et schéma bloc d'un module PV	5
Figure I.5 : Caractéristique courant –Tension pour différents éclairements.	6
Figure I.6 : Caractéristique courant –Tension pour différentes Températures	7
Figure I.7 : Caractéristique Puissance–Tension pour différents éclairements	7
Figure I.8 : Caractéristique Puissance–Tension pour différentes Températures	8
Figure I.9 : Architecture générale d'un GPV	8
Figure I.10 : Architecture générale d'un GPV	9
Figure I.11 : Impact du nombre de string sur les caractéristiques d'un GPV	9
Figure I.12 : Impact du nombre de module en parallèle sur les caractéristiques d'un GPV	10
Figure I.13 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique d'un GPV pour la température 25° C	10
Figure I.14 : Influence de la température sur les caractéristiques d'un GPV pour l'éclairement 1000W/m <sup>2</sup> .	10
Figure I.15 : Composants de base d'un système PV autonome	11
Figure(I.16) : Schéma Bloc du Panneau Photovoltaïque	12
Figure(I.17) : Caractéristique de la tension $U_{pv} = f(I_{pv})$ .	12
Figure(I.18) : Caractéristique de la tension $P_{pv} = f(U_{pv})$ .	12
Figure (I.19) : Caractéristique de la tension $U_{pv} = f(I_{pv})$ . Pour différentes températures	13

Figure (I.20) : Caractéristique de la tension $P_{pv} = f(U_{pv})$ pour différentes températures	13
Figure (II.1) Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge	16
Figure : ( II.2) Classification Des Commandes MPPT	17
Figure (II.3.) Algorithme de la Tension Constante.	20
Figure (II.4) Algorithme de constant courant	21
Figure (II.5) Recherche de PPM par la méthode (P&O)	22
Figure (II.6) Algorithme de P&O Classique	23
Figure (II. 7) Divergence de la méthode P&O	25
Figure (II.8) Algorithme du poids d'un Troisième point	25
Figure (II.9) Caractéristique de Tension – puissance du panneau	26
Figure (II.10) Algorithme Inchon Classique	28
Figure (II.11) Exemple de Convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge	29
Figure (II.12) Allure des variables dynamiques $I_L$	30
Figure (II.13) : Schéma Bloc de Simulation de la commande MPPT.	32
Figure (II.14) :Caractéristique des courants d'entrée et sortie	33
Figure (II.15) Caractéristique des puissances d'entrée et sortie (Booste)	33
Figure :(II.16) Caractéristique des tensions d'entrée et sortie (Booste)	33
Figure :(II.17) Caractéristique du rapport cyclique	34
Figure : (II.18) Caractéristique de courant	34
Figure : (II.19) Caractéristique de puissance	35
Figure : (II.20) Caractéristique de tension	35
Figure : (II.21) Caractéristique de rapport cyclique	36
Figure (III .1) : Schéma de l'association onduleur –machine asynchrone	38
Figure (III .2) : Schéma de principe d'onduleur –machine asynchrone	39
Figure(III.3) : Générateur de la PWM a Comparateur à deux seuils.	41

Figure (III.4) : Générateur de la PWM a Comparateur à deux seuils.	41
Figure. (III .5)Modèle de la machine asynchroneramenté au stator .	42
Figure. (III.6) : Représentation de l'orientation de repère (d, q).	42
Figure. (III.7) : Organisation fonctionnelle de la commande IFOC.	47
Figure. (III .8) : Organisation fonctionnelle de la commande IFOC avec Dé fluxage.	49
Figure. (III.9) : Schéma bloc de la régulation de vitesse.	49
Figure. (III.10) : Schéma bloc de la boucle de régulation du courant $i_{sd}$ .	51
Figure. (III.11) : Schéma du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur.	53
Figure. (III.12) : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte par hystérésis.	54
Figure. (III.13) : Schéma Bloc de simulation	55
Figure : (III.14) : Caractéristique de la vitesse.	55
Figure : (III.15) : Erreur de poursuite (rad/sec).	56
Figure : (III.16) : Caractéristique du couple.	56
Figure : (III.17) . Caractéristique des courants absorbés $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$ .	57
Figure : (III.18) .Tension délivrée par le Panneau photovoltaïque.	57

## Notation et symbole

<b>PV</b>	<b>Photovoltaïque</b>
<b>GPV</b>	<b>générateur photovoltaïque</b>
<b>PPM</b>	<b>Point de Puissance Maximale</b>
<b>MPPT</b>	<b>Régulateur</b>
<b>DC</b>	<b>courant continu (Direct current)</b>
<b>AC</b>	<b>courant alternatif (Alternating current)</b>
<b>P&amp;O</b>	<b>Perturb and Observe</b>
$I_{pv}$	<b>Le courant fourni par le panneau PV</b>
$V_{pv}$	<b>La tension fournie par le panneau PV</b>
$I_{cc}$	<b>Le courant de court-circuit du panneau PV d'dépendant de l'éclairement et la température.</b>
$R_p$	<b>La résistance parallèle caractérisant les courants de fuite de la jonction</b>
$R_s$	<b>La résistance série représentant les diverses résistances des courants et de connexions.</b>
$N_s$	<b>Nombre de cellules connectées en série.</b>
<b>K</b>	<b>La constante de Boltzmann <math>N_p</math>.</b>
<b>D</b>	<b>Rapport cyclique.</b>
<b>T</b>	<b>Temps (sec)</b>
<b>I</b>	<b>Courant(A)</b>
<b>U</b>	<b>Tension(V)</b>
<b>P</b>	<b>Puissance(Watt)</b>
<b>V</b>	<b>La vitesse (rad /sec)</b>

# **Chapitre I:**

## **Généralité sur les**

### **systemes**

#### **photovoltaïques**

**I.1. Introduction**

L'amélioration de la qualité de vie et l'avancement de l'industrie dans de nombreux pays entraînent une augmentation significative de la demande énergétique. Cette demande croissante a augmenté l'écart entre l'énergie produite et celle demandée. En plus, Le réchauffement climatique et la pollution de l'environnement sont exclusivement le résultat de l'utilisation des ressources énergétiques conventionnelles des combustibles fossiles tels que ; le pétrole, le gaz naturel et le charbon qui sont les principales sources d'émissions de gaz à effet de serre. Pour remédier à ce problème, la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables est apparue comme solution idéale. La conversion d'énergie à partir de sources renouvelables (ER), en particulier par panneaux photovoltaïques (PV) avec un stockage d'énergie approprié, peut jouer un rôle important dans le développement et l'exploitation de systèmes PV dans divers domaines d'application notamment: les systèmes de pompage, l'alimentation domestique des habitations isolées, l'alimentation des systèmes de télécommunication, les centrales électriques hybrides et l'injection dans les réseaux de distribution d'électricité.

Dans ce premier chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque à travers leur modélisation. En effet, les caractéristiques électriques (courant tension et puissance-tension) du générateur photovoltaïque seront étudiées et validées par des simulations sous MATLAB/Sim Power Systèmes pour différentes conditions météorologiques (température et ensoleillement). [1]

**I.2. Energie solaire photovoltaïque PV**

L'énergie solaire est considérée comme une source d'énergie renouvelable et respectueuse de l'environnement. De plus, la technologie photovoltaïque (PV) est la technologie la plus répandue qui utilise directement l'énergie solaire et le convertit en électricité à courant continu. Les cellules PV sont interconnectées pour former un module PV, généralement jusqu'à 50 à 250Wc. Cependant, à l'heure actuelle, le coût élevé du matériel photovoltaïque et les convertisseurs statique (hacheur, onduleur) d'interconnexion au réseau ont limité son développement. Pour cette raison, un grand défi est lancé, en l'occurrence l'amélioration des technologies PV ainsi que la clarification des exigences d'interconnexion au réseau, afin de rendre l'énergie photovoltaïque la principale source d'énergie dans un futur proche.

## I.2.1 Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs semi-conducteurs ; ils sont généralement constitués de silicium sous ses diverses formes. Ils ne mettent en œuvre aucun fluide et ne contiennent pas de substances corrosives et aucune pièce mobile. [1]

Elles produisent de l'électricité tant qu'ils sont exposés au rayonnement solaire. [2]

Elles ne nécessitent pratiquement aucun entretien ; Elles ne polluent pas et ne produisent aucun bruit. Les cellules photovoltaïques sont ainsi les plus sûres et les plus écologiques pour produire de l'énergie. [1]

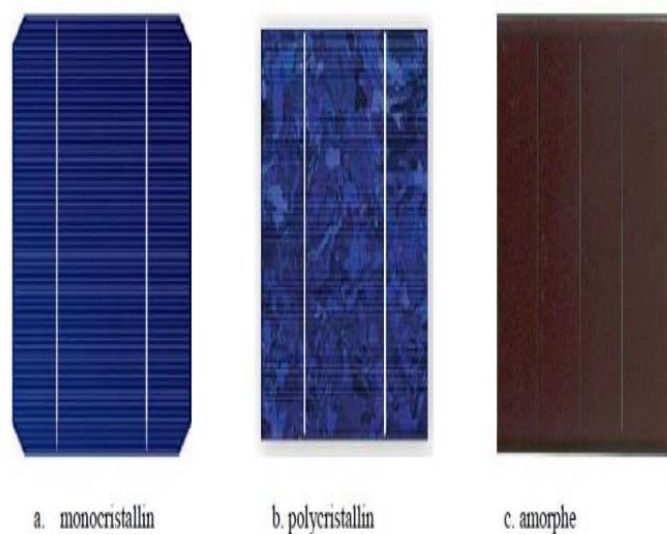
Ils existent plusieurs types des technologies des cellules photovoltaïques (figure I.1) à savoir :

## I.2.2 Cellules monocristallins

(Figure I.1a) : Rendement électrique des panneaux : 17%, gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m<sup>2</sup>, usage : tous usages extérieurs de forte et moyenne puissance.

**I.2.3. Cellules poly cristallins** (figure I.1b) : Rendement électrique des panneaux : 12 à 14%, gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m<sup>2</sup>, usage : même usage que le silicium monocristallin.

**I.2.4 Cellules amorphes** (figure I.1) : Rendement électrique des panneaux : 5 à 7 % (jusqu'à 9 % pour les multi-jonctions), gamme d'éclairement : de 20 lux à 1000 W/m<sup>2</sup>, Peu sensible aux températures élevées.



**Figure : I.1. Cellules photovoltaïques**

## I.2: Modélisation du générateur photovoltaïque

Un champ photovoltaïque est composé de certain nombre de modules raccordés en série (string) et en parallèle. Les composants de base du module sont des cellules photovoltaïques.

Le type de raccordement (série/parallèle) dépend de la tension et du courant selon la puissance désirée. La figure I.2 représente la construction de base d'un générateur PV.



**Figure I.2 : Construction de base d'un générateur PV**

### I.2.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque

L'énergie solaire est directement convertie en électricité par l'effet photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque peut être décrite comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. [3]

Si l'on connecte une charge aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant  $I$  et le reste, le courant  $I_D$ , dans la diode. On a alors la relation : Dans la littérature, deux types de schéma équivalent sont utilisés tel que le schéma équivalent de la cellule est représenté. Deux cas sont distingués dans l'étude de la cellule PV, cas idéal et cas réel.

#### - A. Cellule PV idéale

De point de vu modélisation mathématiques, le comportement d'une cellule photovoltaïque peut être représentée comme une source idéale de courant connecté en parallèle avec une diode (figure I.2)

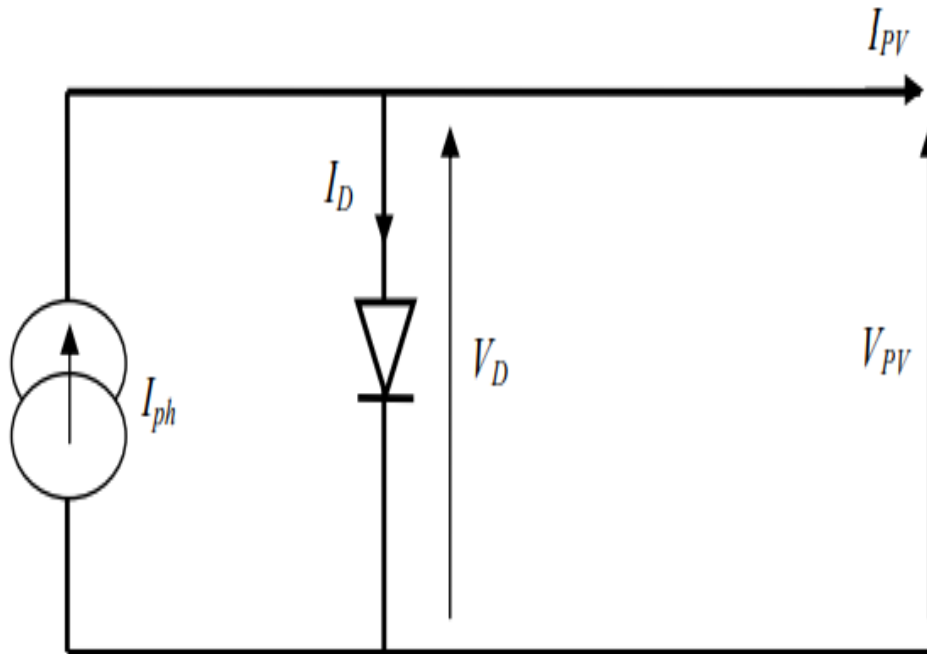


Figure : I. 3 Schéma équivalent d'une cellule PV idéale

Selon le schéma électrique (figure), On peut écrire la relation entre les trois courants :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D$$

Avec

$I_{pv}$ : Le courant délivré par le panneau,  $I_{ph}$  le courant de l'éclairement,  $I_D$  : le courant dans la diode.

La caractéristique I-V du modèle non linéaire d'une diode est donnée par l'expression. [4] :

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right]$$

Avec

$I_s$ : Courant de saturation inverse de la diode [A].

$V_T = nKT/q$ : Potentiel thermique.

$n$  : Facteur d'idéalité de la jonction,

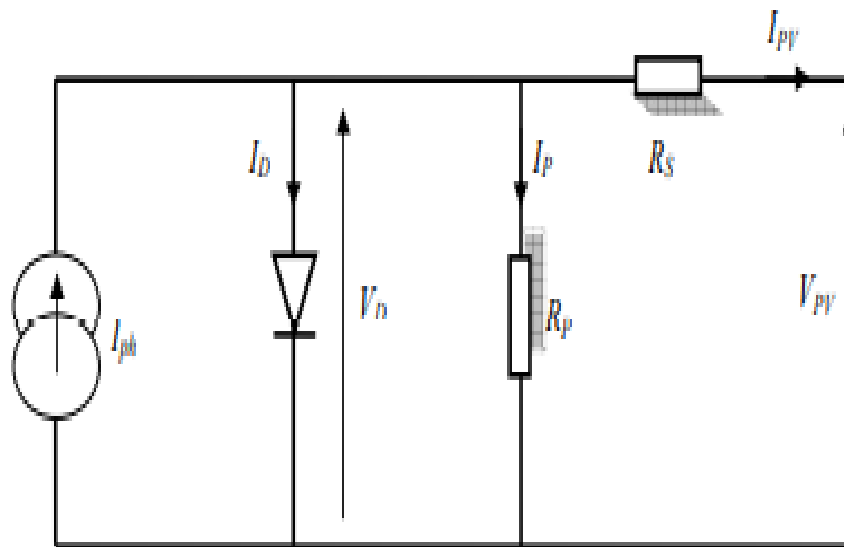
$T$  : La température de la jonction [K]

$K$  : Constante de Boltzmann  $K=1.38e-23$  [J/K],

$q$  : La charge de l'électron  $1.6 \times 10^{-19}$  [eV].

**-B. Cellule PV réelle [4]**

En réalité, lors de la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique, il existe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuites qui sont représentés par deux résistances : la première est suffisamment grande en parallèle (l'ordre du méga ohm) et la deuxième très petite en série. Dans ce cas, le schéma équivalent de la cellule est celui de la figure I.4. Par conséquent le courant de sortie de la cellule peut être exprimé sous la forme (I.3). [5] :



**Figure I.4 : Circuit équivalent d'une cellule PV avec prise en compte de perte en tension et courant de fuite.**

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_p = I_{ph} - I_o \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p}$$

$I_{pv}$ : Le courant fourni par le panneau PV,

$V_{pv}$ : La tension fournie par le panneau PV,

$I_{cc}$ : Le courant de court-circuit du panneau PV dépendant de l'éclairement et la température

$R_p$  : La résistance parallèle caractérisant les courants de fuite de la jonction,

$R_s$  : La résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions,

$N_s$ : Nombre de cellules connectées en série,

$N_p$  : Nombre de cellules connectées en parallèle.

### I.3. Modèle mathématique d'un Module PV

Comme une cellule PV génère faible puissance, les cellules sont raccordées sous forme série/parallèle constituant un module afin de produire la puissance suffisante. Généralement, un module PV est évalué par la puissance DC générée maximale sous les conditions standards STC (standard test conditions) qui sont spécifiés par éclairage de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température ambiante de 25°C

La figure (I.4) montre le circuit équivalent d'un module PV.

La caractéristique courant-tension non linéaire du module est modélisée par l'équation suivante où toutes les cellules sont identiques. [6] :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_o \left[ \exp \left( \frac{N_s V_{pv} + \frac{N_s R_s I_{pv}}{N_p}}{N_s n V_T} \right) - 1 \right] - \frac{N_s V_{pv} + \frac{N_s R_s I_{pv}}{N_p}}{\frac{N_s R_p}{N_p}}$$

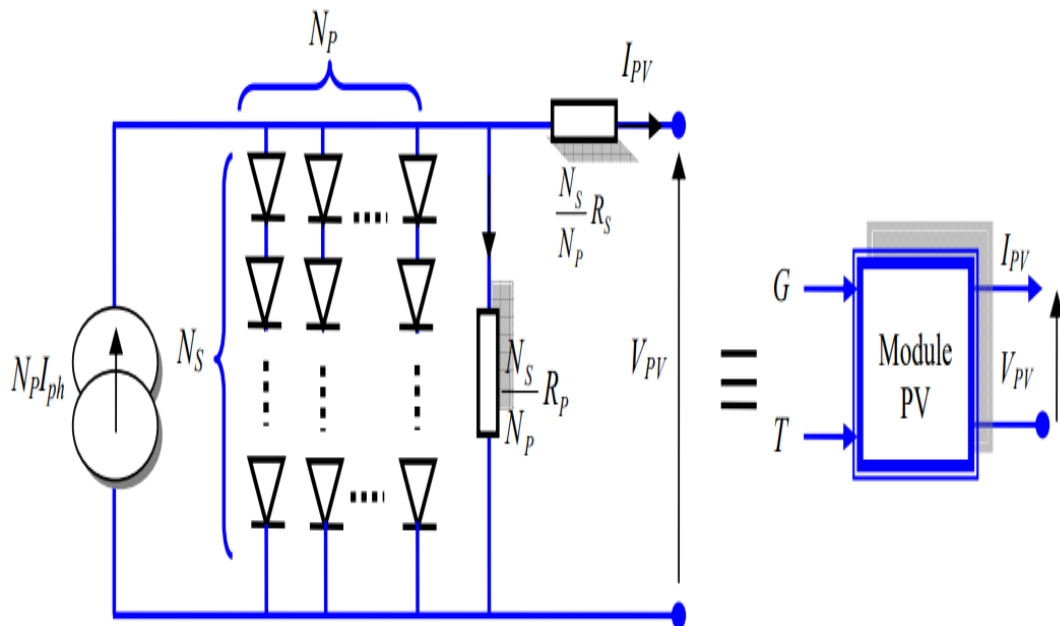


Figure I.5 : Circuit électrique et schéma bloc d'un module PV

Le schéma électrique équivalent du GPV peut être représenté par un schéma bloc (Figure I.5), où les deux variables d'entrées sont :

$G$  ; Éclairement dans le plan des panneaux (W/m<sup>2</sup>) : et

$T$  ; Température ambiante (°C). Par ailleurs, les deux variables de sortie sont :

$I_{pv}$  ; Le courant fourni par le GPV, et

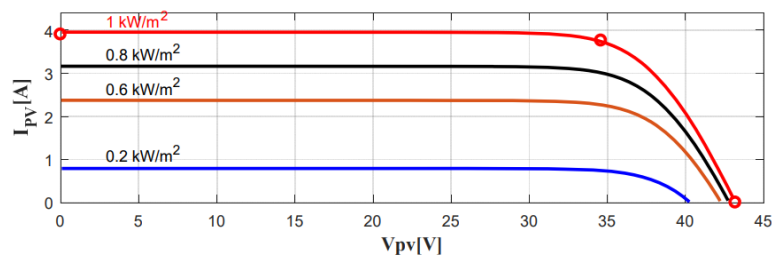
$V_{pv}$ : La tension aux bornes du GPV.

Trois points d'opération, sur la courbe  $I(V)$ , sont importants en définissant les performances d'un module PV, telles que :

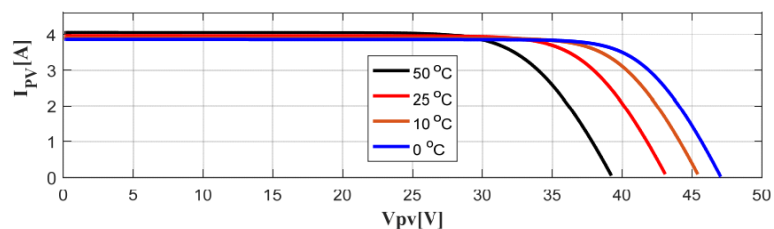
- Le point de puissance maximale,
- Le courant court-circuit,
- La tension de circuit ouvert.

## I.4 Caractéristiques électriques d'un module PV

Les caractéristiques électriques du GPV sont généralement représentées par la courbe de courant par rapport à la tension  $I(V)$  et la puissance par rapport à la tension  $P(V)$  pour différentes conditions de site. D'après les Figures I.6, I.7 et I.8, on peut remarquer que les caractéristiques du module PV sont non linéaires, telles que la tension est fortement sensible aux changements de température ambiante d'une part, et le courant PV varie l'irradiation solaire d'autre part.



**Figure I.6 : Caractéristique courant –Tension pour différents éclairagements.**



**Figure I.7 : Caractéristique courant –Tension pour différents Températures.**

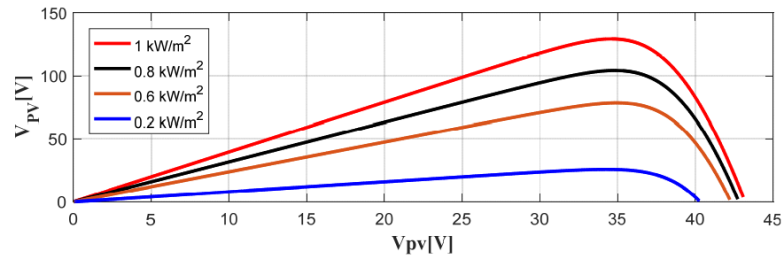


Figure I.8 : Caractéristique Puissance–Tension pour différents éclairagements.

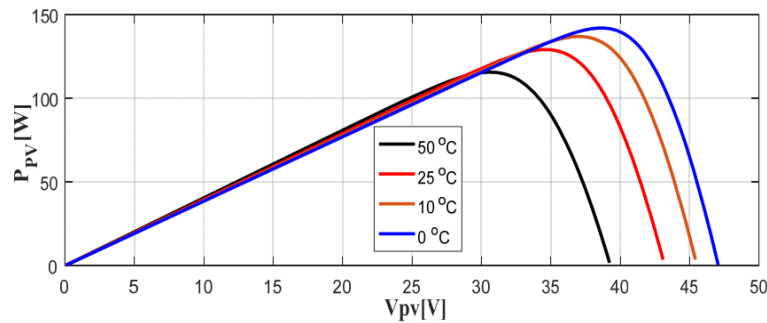


Figure I.9 : Caractéristique Puissance–Tension pour différents Températures.

Il est également clair que la caractéristique de puissance du GPV a un seul point de puissance maximale (MPP) sous différentes conditions atmosphériques. D’après les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  illustrées dans la Figure. (I.8) sous différent niveaux d’éclairement et une température fixe ( $25^{\circ}\text{C}$ ). On peut remarquer que le courant de court-circuit augmente quasi-linéairement avec l’éclairement et que la tension  $V_{co}$  augmente légèrement.

Les caractéristiques du module, pour éclairement fixe ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) sous différentes températures, sont représentées par la figure (I.9). On peut remarquer que la tension de circuit ouvert diminue avec l’augmentation de la température, par contre, son influence sur le courant de court-circuit est pratiquement négligeable.

### I.5 Caractéristiques du GPV pour différente structures

Selon le courant, la tension et la puissance nominaux d’onduleur à utiliser le générateur PV sera construit. Dans cet exemple, on exposera l’influence de nombre de module en série et en parallèle sur les performances de puissance produite, ensuit un GPV de 16 modules ( $4 * 4$ ) est considéré pour représenter l’impact des conditions climatiques sur la puissance générée.

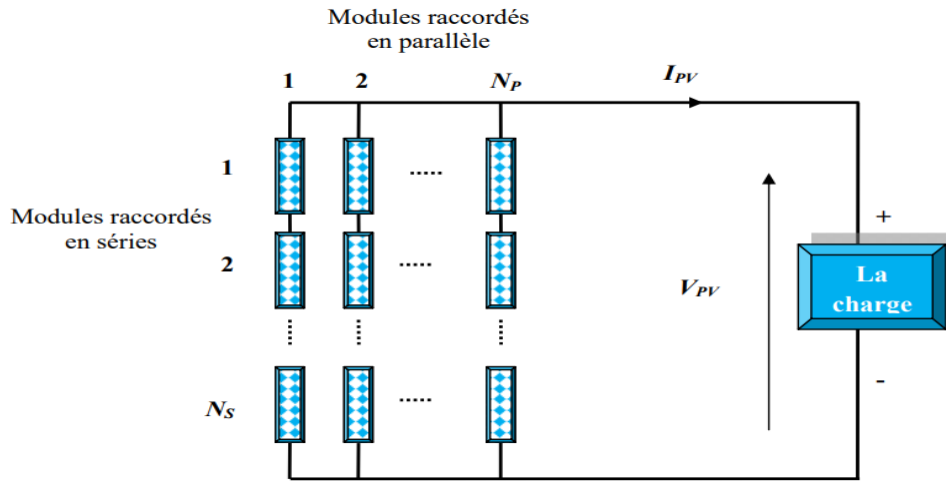


Figure I.10 : Architecture générale d'un GPV

**I.5.a. Raccordement des panneaux en séries**

Le raccordement de plusieurs modules en série permet d'augmenter la tension, la tension totale aux bornes du générateur est égale la somme des tensions délivrées par chaque module, par contre le courant à la sortie des panneaux est le même d'un seul module. La figure I.11 montre les caractéristiques obtenues par l'association en série des 4 modules identiques.

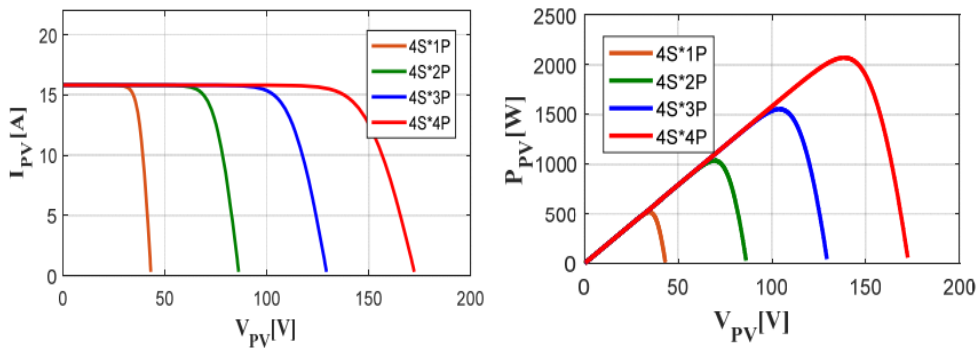


Figure I.11 : Impact du nombre de string sur les caractéristiques d'un GPV

**I.5.b. Raccordement des strings en parallèle**

L'association de plusieurs modules en parallèle permet d'augmenter le courant, le courant total du générateur est égale la somme des courants délivrées par chaque module, par contre la tension au bornes des panneaux est le même d'un seul module. La figure I.13 illustre les caractéristiques obtenues par l'association en parallèle de 4 strings de 4 modules de chacun.

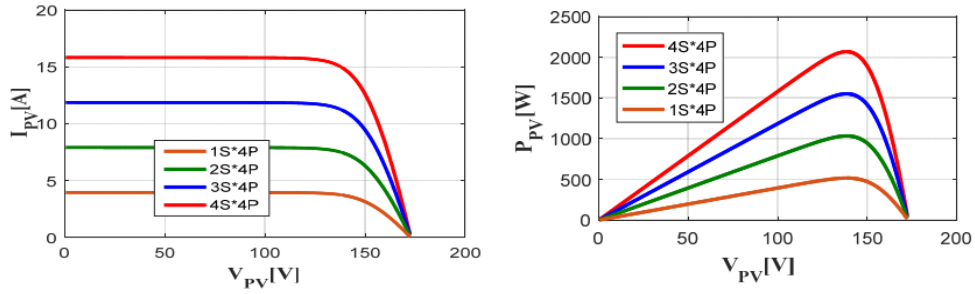


Figure I.12 : Impact du nombre de module en parallèle sur les caractéristiques d'un GPV

Si l'on considère un GPV de 16 modules de structure 4\*4, sous le caractère variable des conditions météorologiques (éclairage, température), qui agissent directement sur le comportement des modules, Les figures I.14 et I.15 montrent les caractéristiques électriques externes (courant, tension, puissance) obtenus.

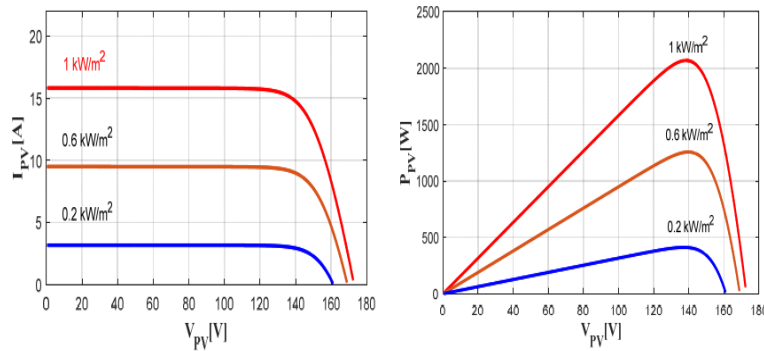


Figure I.13 : Influence de l'éclairement sur les caractéristique d'un GPV pour la température 25 C

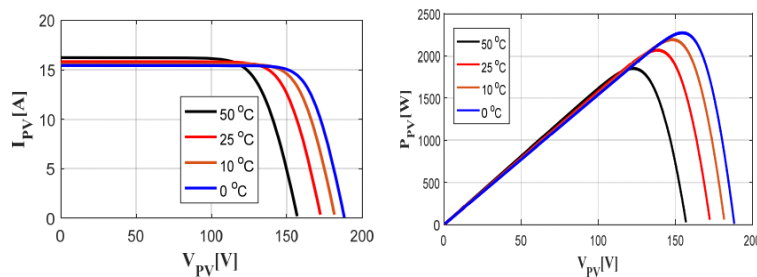


Figure I.14 : Influence de la température sur les caractéristiques d'un GPV pour l'éclairement 1000W/m2.

### I.5.1. Description du système PV/Batterie autonome

Les effets des nuages intermittents et des changements de température provoquent une sortie aléatoirement fluctuante d'un système photovoltaïque (PV). Pour atténuer les impacts du système PV sur la charge, le système de stockage d'énergie par batterie (BES) est un moyen efficace afin d'atténuer les fluctuations de puissance produite.

Un système PV autonome (n'a pas de connexion avec un réseau de distribution) typique se compose d'un générateur PV, d'une batterie de stockage, d'un convertisseur DC/DC, d'un contrôleur de charge, d'un onduleur, de charges AC et/ou DC et d'une charge d'amortissement, comme illustré à la figure (I.15). Un générateur photovoltaïque est constitué d'un champ photovoltaïque composé de nombreux modules, tandis que chaque module est composé de nombreuses cellules solaires. La batterie stocke l'énergie lorsque la puissance produite par le générateur PV dépasse la demande de charge requise et l'introduit lorsque la production PV est insuffisante. [7].

La demande de charge pour un système PV autonome peut être de plusieurs types, charge DC et/ou AC. L'unité de conditionnement d'énergie fonctionne comme une interface entre tous les composants du système PV, assure le contrôle et la protection du système. En général, les composants fréquemment utilisés dans l'unité de conditionnement d'énergie sont le convertisseur DC/DC, le contrôleur de charge et l'onduleur. [8].

En outre, la charge d'amortissement est nécessaire pour amortir l'excès d'énergie qui est produit dans le cas où l'énergie générée par le générateur PV est supérieure à la demande de charge et les batteries de stockage sont complètement chargées

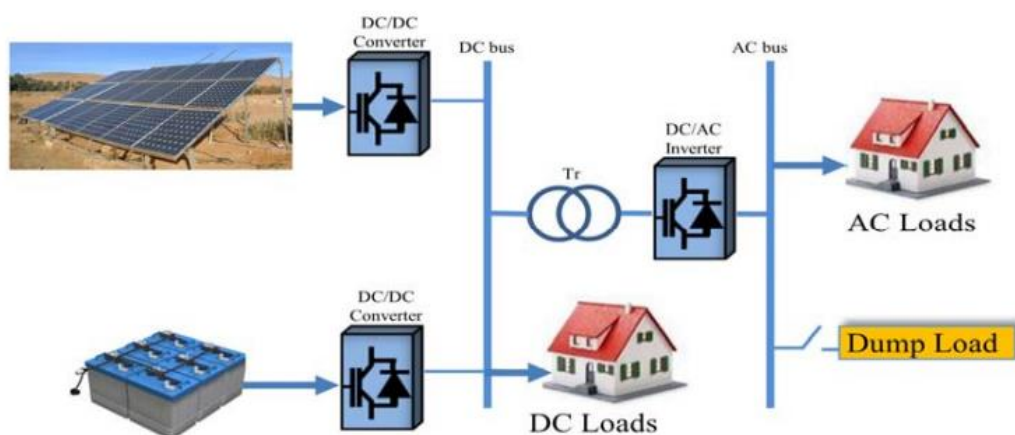
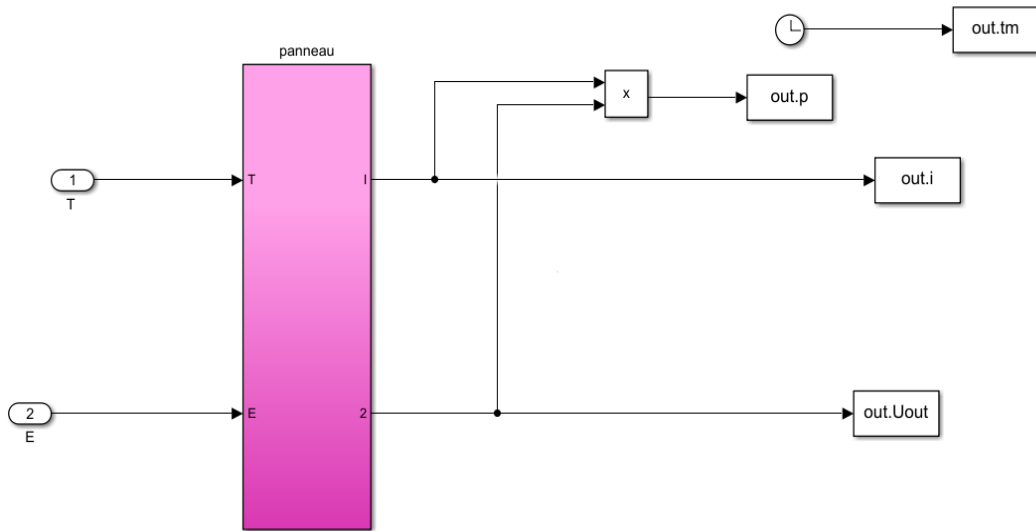


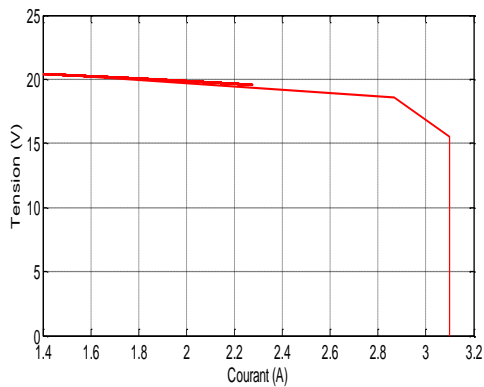
Figure I.15 : Composants de base d'un système PV autonome

I.5.2. Résultats de simulation

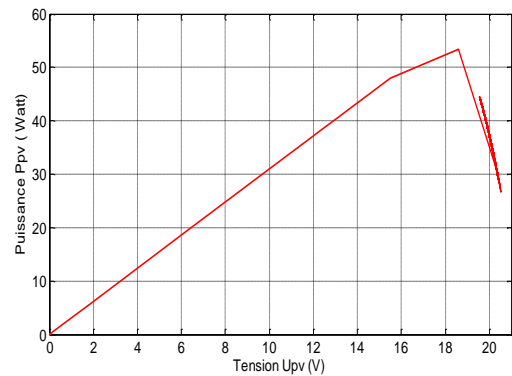
La figure (I.16) illustre le schéma bloc du panneau photovoltaïque sous Matlab /Simulink.



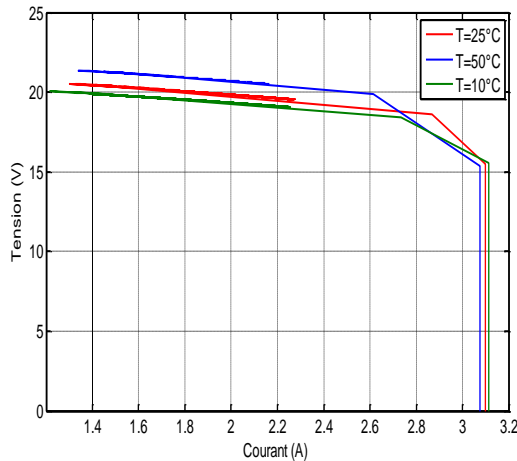
Figure(I.16) : Schéma Bloc du Panneau Photovoltaïque.



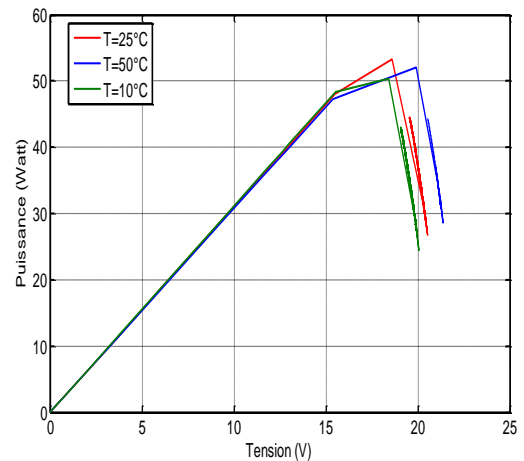
Figure(I.17) : Caractéristique de la tension  $U_{pv} = f(I_{pv})$ .



Figure(I.18) : Caractéristique de la tension  $P_{pv} = f(U_{pv})$ .



**Figure(I.19) :** Caractéristique de la tension  $U_{pv} = f(I_{pv})$ . Pour différentes températures.



**Figure(I.20) :** Caractéristique de la tension  $P_{pv} = f(U_{pv})$  pour différentes températures.

### I.5.2 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude théorique sur le générateur PV qui représente une source principale d'énergie électrique de la chaîne de conversion photovoltaïque. En premier lieu, une modélisation et simulation de la cellule PV, élément de base du GPV, est effectuée afin de montrer l'impact des conditions climatiques sur son fonctionnement. Ensuite, les caractéristiques du GPV pour différentes conditions, on a conclu que la température a un effet important sur le comportement du panneau photovoltaïque. En effet, on remarque que l'augmentation de la température répercute directement par une diminution de la puissance maximale disponible. Dans le but de remédier à ce problème, les chercheurs ont proposé tant de solutions, comme l'utilisation des convertisseurs dont le but du deuxième chapitre dont on a proposé d'utiliser un convertisseur Boost avec régulation MPPT.

# **Chapitre II:**

## **Commande MPPT ordinaire**

## II.1 INTRODUCTION

L'énergie électrique produite par un générateur PV dépend des variations des conditions météorologiques ou de la charge. Dans le but d'assurer l'exploitation optimale d'énergie solaire PV, l'étage d'adaptation doit être muni d'une commande MPPT. Dans ce chapitre et dans le but d'atteindre cet objectif, une commande MPPT est utilisée. Une étude théorique assez exhaustive sera présentée au début du chapitre, par la suite on présentera les résultats obtenus par des simulations sous MATLAB/Simulink d'un système photovoltaïque.

## II.2 Techniques de recherche du point de puissance maximale

La commande MPPT est utilisée pour assurer le fonctionnement optimal du générateur PV, qui dépend des conditions météorologiques et des variations de charge. [1].

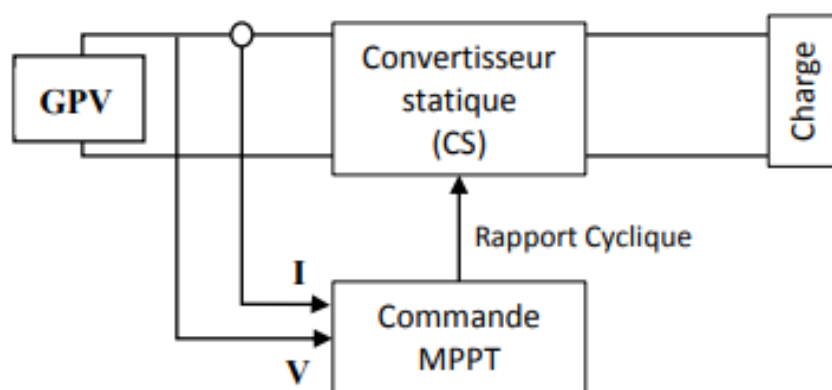
Différentes méthodes sont développées afin de maximiser la puissance PV fournie.

### II.2.1 Principe de la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM).

La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. [28].

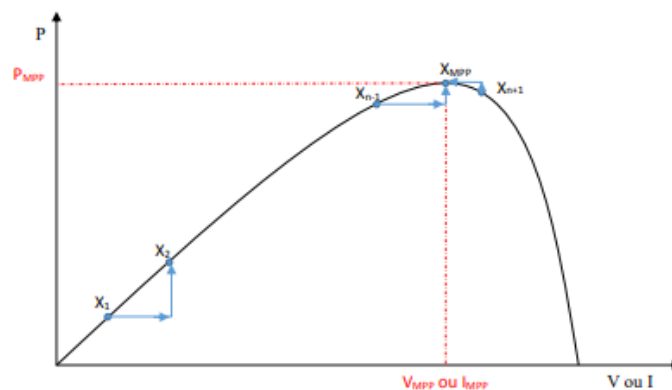
Il peut être représenté par le schéma de la Figure



**Figure (II.1) Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge**

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour exploiter le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. [21].



**Figure : II.2. Classification Des Commandes MPPT**

Les commandes MPPT sont classées selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée. [29].

### II.3. Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée.

#### A- Commandes MPPT Fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturba et Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (VOPT et IOPT) et les paramètres caractéristiques du module PV (VOC et ICC). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives.

Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction. [29].

### **B : Commandes MPPT Fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur**

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie. Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de Pax est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable.

Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial. [29].

## **II.4. Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche**

### **A : MPPT Indirect :**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (IC ou Voce), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP.

Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable.

Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser.

Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. [2-29].

### **B : MPPT Direct :**

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système.

Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers.

Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée.

Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP.

L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction. [29]

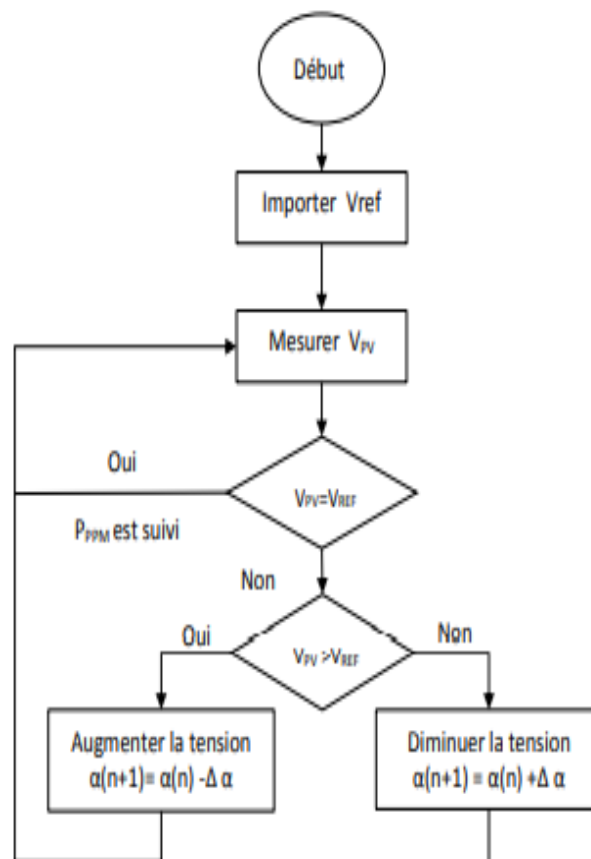
#### **II.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)**

La méthode de tension constante également appelée la méthode de circuit ouvert (open circuit voltage) est basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert VOC et la relation linéaire approximative (II-1) liant cette tension avec la tension de point maximal VMPP du GPV. [30-31].

$$V_{MPP} = K_1 * V_{OC} \quad (II-1)$$

Est une constante de proportionnalité, il est généralement compris entre 0.71 et 0.86. Une fois que  $k_1$  est déterminé, le VMPP peut être calculé à l'aide de l'expression précédant (II-1) avec VOC mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert).

La tension VMPP est alors prise comme tension de référence. Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle VPV et la tension de référence Réf (VMPP). Le signal d'erreur est traité pour  
Rendre  $V = \text{Réf}$ . (Figure (II.3.)



**Figure (II.3.) Algorithme de la Tension Constante.**

Cette méthode présente deux avantages : la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations (même infimes) en état stationnaire. [30].

Cependant, ces points forts ne peuvent cacher leurs défauts, à cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année Aussi, le MPP n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension  $V_{oc}$  et ne oublier pas la perte de la puissance disponible lors de la déconnection de la charge du GPV [32].

#### **II.4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Cure) :**

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit  $I_C$  (short-circuit current) et la relation linéaire approximative (II-2) liant cette courant avec le courant de point maximal  $I_{MPP}$  du GPV. [31] :

$$I_{MPP} = K_2 * I_{SC} \quad (II -2)$$

Avec  $k_2$  constante de proportionnalité. Comme pour la méthode CV,  $k_2$  est déterminée pour le GPV utilisé. La constante  $k_2$  est généralement comprise entre 0.78 et 0.92. [33].

La mesure du courant  $I_{SC}$  durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant  $I_{SC}$  à l'aide d'un capteur de courant. Pour cette valeur constante du courant, la puissance est calculée pour des tensions différentes.

Si la différence entre la puissance calculée et la puissance de crête est supérieure à la valeur de tolérance, alors la valeur de la tension est soit incrémenté ou décrémenté en fonction de la puissance obtenue. Pour que la tension et le courant MPP ( $I_{MPP}$ ) correspondant, ce procédé est répété jusqu'à ce que la différence se situe dans la plage de tolérance. [30].

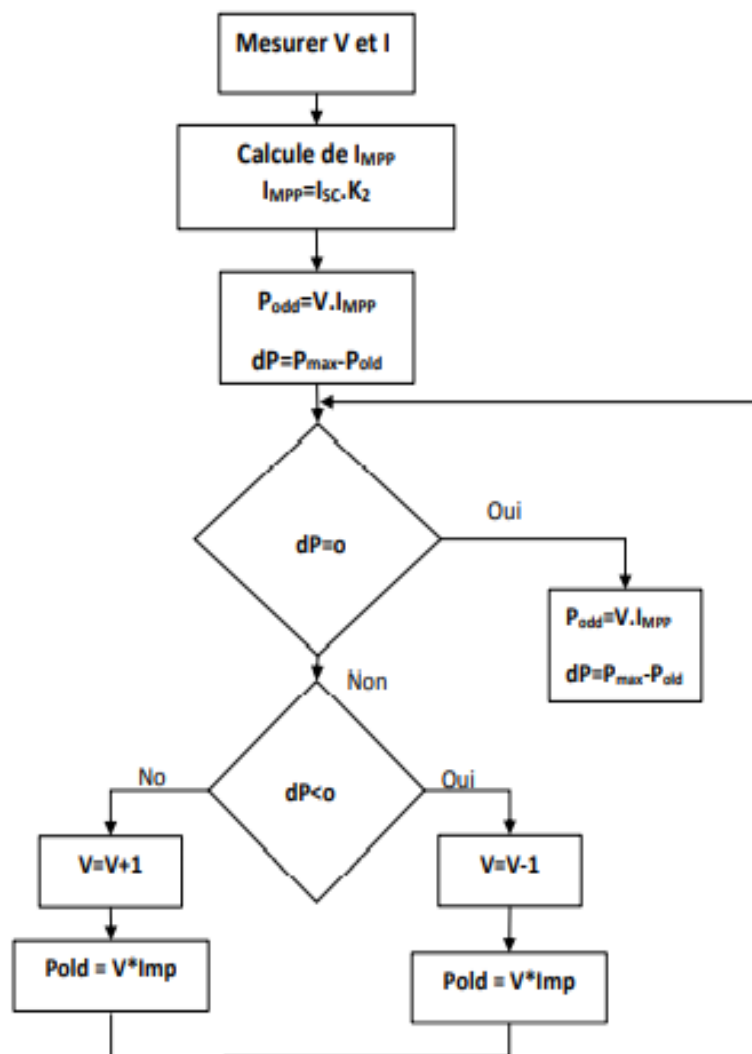


Figure (11.4) Algorithme de constant courant

II.4.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturba And Observe).

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension Réf, ou du courant Ire, et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ( $P=VI$ ). [34].

Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV.

Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV. [35].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension VPV, ce qui engendre une variation de la puissance. [36].

Figure (II.5) montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension PV engendre un accroissement de la puissance Pp,

Cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P(V), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié

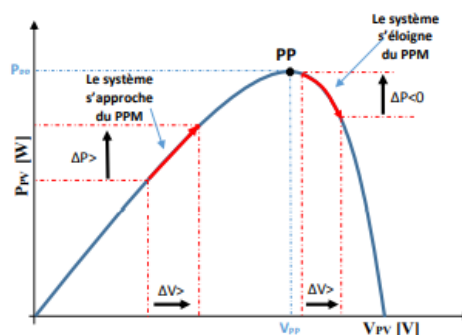


Figure (11.5) Recherche de PPM par la méthode (P&O)

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $p(v)$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés. [33].

La Figure II.6 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Non-Mesurer

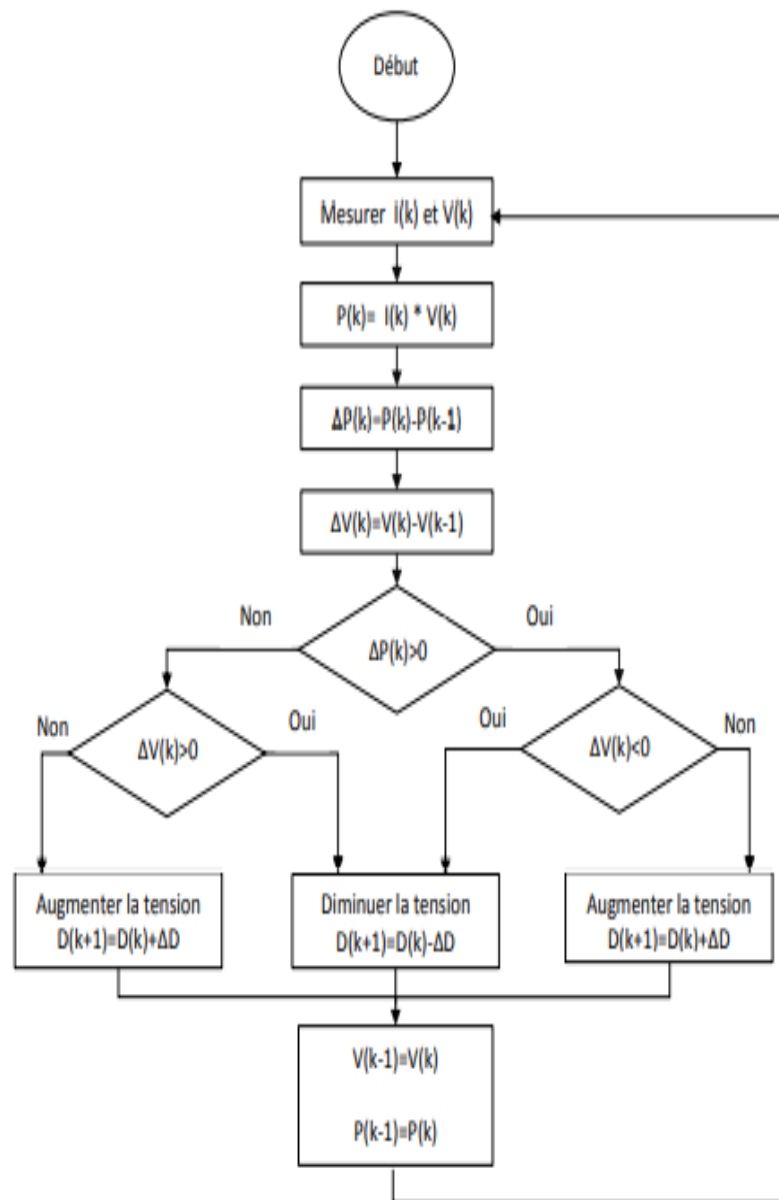


Figure (II.6) Algorithme de P&O Classique

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint .[28].

Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation. [37].

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité.

Ce qui rend cette commande difficile à optimiser Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions climatiques restent constantes, une perturbation  $\Delta V$  dans la tension  $V$  amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2, sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C.

Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance. [33].

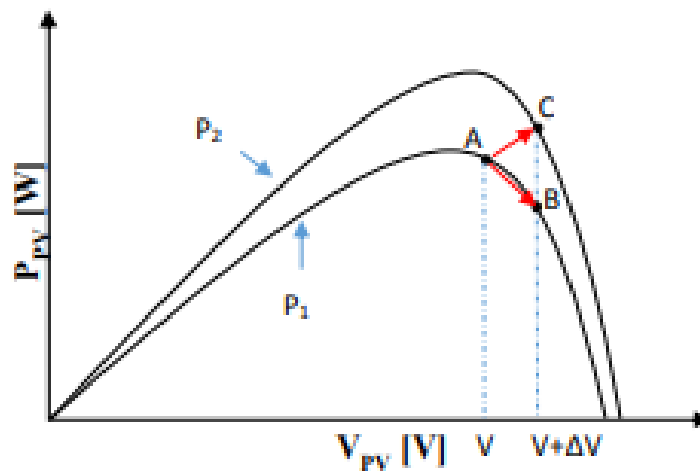


Figure (II. 7) Divergence de la méthode P&O

Pour remédier à l'inconvénient de la méthode P&O simple, des versions améliorées de l'algorithme P&O sont proposées : On pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation.

L'algorithme de cette méthode (the thrène-point Wight comparaison) a été présenté dans la Figure (II.8) avec les trois points sont point actuel A, un point B perturbé d'un point A et un point C doublement perturbée dans le sens opposé du point B [29].

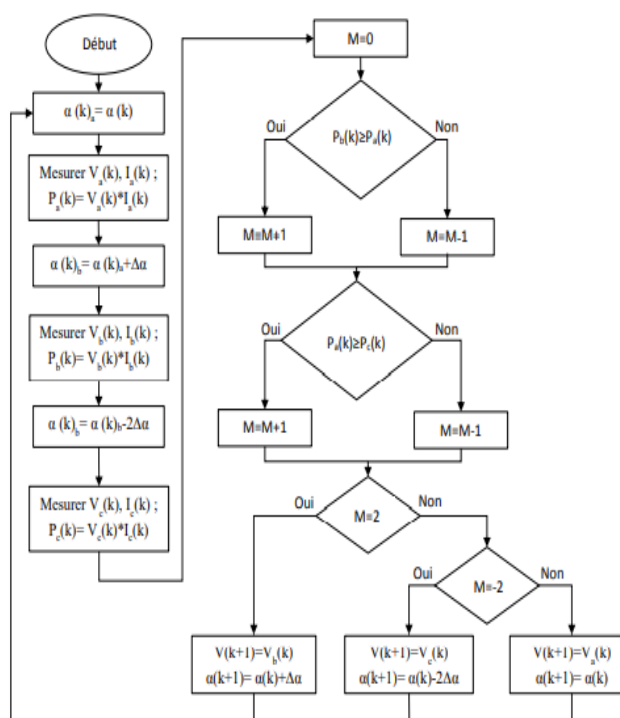


Figure (II.8) Algorithme du poids d'un Troisième point

Une autre solution sera de garder le même algorithme de la méthode po classique sauf que le pas de perturbation est variable .où plusieurs échantillons de puissance Pp est utilisé pour ajuster dynamiquement l'amplitude de la perturbation de manier qu'il est diminué quand il est proche du point maximum. Certain études. [29].

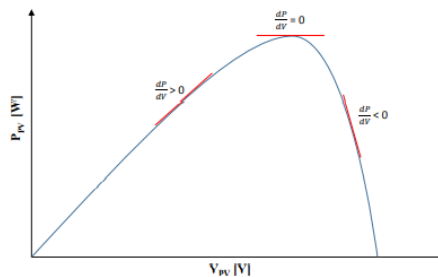
Propose que le pas soit :

$$A(k) = a(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k) - p(k-1)}{V(k) - v(k-1)} \right| \quad (II-3)$$

La recherche dans ce domaine est toujours en cours.

**II.4.4 Conductance Incrémentale (Inchon, Incremental Conductance.**

Méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à Cette gauche et négative à droite. Figure (II.9) On observer que :



**Figure (II.9) Caractéristique de Tension – puissance du panneau**

On observer que :  $\frac{dp}{dv} = 0$  au PMM

$$\frac{dp}{dv} > 0 \text{ a gauche PMM} \quad (II-4)$$

$$\frac{dp}{dv} < 0 \text{ À droite PMM}$$

Puisque : La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V \times I \quad (II-5)$$

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(v)}{dv} = 1 + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{II-6})$$

Donc, l'équation (II-4) Peut être comme suit :

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{I}{V} \text{ Le point de fonctionnement est sur le PMM}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > \frac{I}{V} \text{ Le point de fonctionnement est à gauche le PM} \quad (\text{II-7})$$

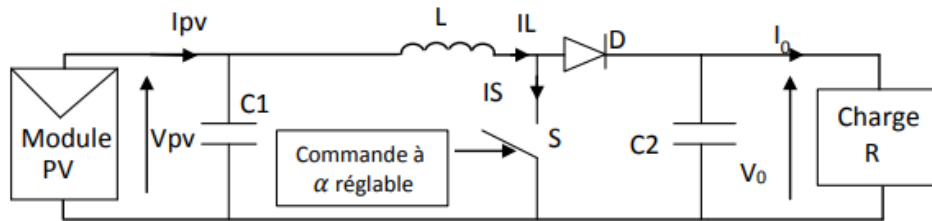
$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < \frac{I}{V} \text{ Le point de fonctionnement est à droite le PMM}$$

1. Le PPM peut être atteinte en comparant à chaque instant la valeur de la conductance (IPV/VPV) avec celle de l'incrément de conductance (dpi/dpi).
2. Si l'incrément de conductance (dg) est supérieur à l'opposé de la conductance (-G), on diminue le rapport cyclique e. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique.
3. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM.
4. La Figure (II.10) montre l'algorithme de cette méthode. Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du MPP car il est difficile de remplir la condition dpi/dv =0, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher.
5. L'algorithme Inchon est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long. Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme Inchon pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert Voce sur le courant de court-circuit IC.
6. Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux. Une manière moins évidente pour effectuer la méthode Inchon est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrément de la conductance pour générer un signal d'erreur. [33].
7.  $e = I V + dI dV \quad (\text{II-8})$
8. D'après l'équation (III-8), l'erreur est nulle au MPP. Un régulateur PI peut donc être utilisé pour annuler cette erreur. La mesure de la tension et du courant instantanés du panneau PV nécessite deux capteurs. La méthode Inchon se prête parfaitement à la commande par DSP ou microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant



**II.5. Étage d'Adaptation de Type BOOST.**

Considérons l'exemple de la figure II.17 correspondant à un convertisseur DC-DC élévateur (booste). Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV. [21] :



**Figure (II.11) Exemple de Convertisseur statique DC-DC pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge**

Au premier temps ( $\alpha T$ ), le transistor ( $S$ ) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin du premier intervalle. Ensuite, le transistor ( $S$ ) s'ouvre et l'inductance ( $L$ ) à la diminution de courant ( $I_L$ ), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge ( $R$ ) à travers la diode ( $D$ ). [27].

**II.5.1. Modèle mathématique équivalent.**

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne : Pour le premier intervalle  $\alpha Ts$

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \tag{II-32}$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_O}{dt} = -I_2 \tag{II-33}$$

$$V_L = l \frac{dI_2}{dt} = V_{PV} - R_L I_L \tag{II-34}$$

Pour le deuxième intervalle  $(1 - \alpha) Ts$  :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{PV} - I_L \tag{II-35}$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_O}{dt} = I_L - I_O \tag{II-36}$$

**II.6.Modèle approximé du convertisseur Booste.**

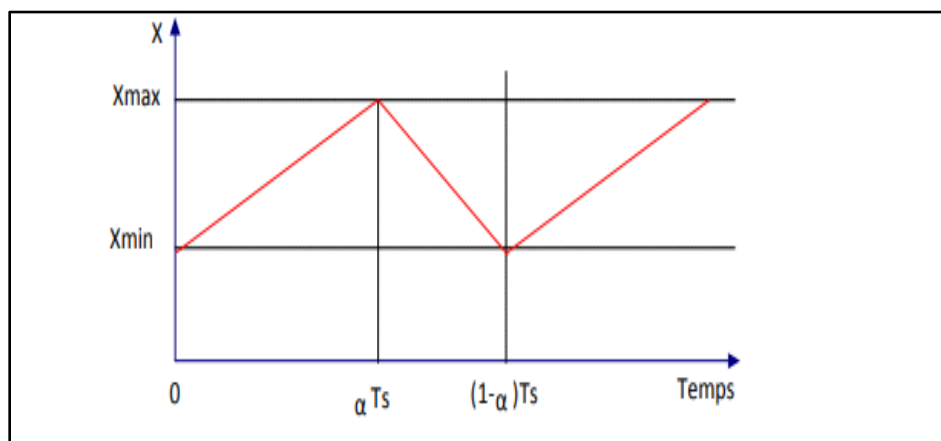
Les systèmes d'équations de base (II-39 à II-41) représentent le convertisseur booste pour un intervalle du temps  $\alpha T_s$  et  $(1 - \alpha) T_s$  respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques  $C_1, V_L$  est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ( $e^{\xi} \approx 1+\xi$  si  $\xi \ll 1$ ) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique  $x$  sur les deux intervalles du temps  $\alpha T_s$  et  $(1 - \alpha) T_s$

$$\left\langle \frac{dy}{dx} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt} \alpha T_s + \frac{dx}{dt_{(1-\alpha T_s)}} (1-\alpha) T_s \tag{II-37}$$

Où  $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$  est la valeur moyenne de la dérivée de  $x$  sur un intervalle  $T_s$ . Cette relation est valide si

$\frac{dx}{dx_{(\alpha T_s)}}$  Et  $\frac{dx}{dt_{((1-\alpha)T_s)}}$  Sont constants sur les intervalles  $\alpha T_s$  et  $(1-\alpha) T_s$  respectivement Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la figure (II.18)



**Figure (II.12) Allure des variables dynamiques  $I_L$**

En appliquant la relation (II-38) sur les systèmes d'équations (II-32 a II-37) obtient les équations qui régissent le système sur un intervalle entier.

$$I_{PV} = C_1 \frac{dV}{dt} \alpha T_s = (I_{PV} - I_L) \alpha T + (T - \alpha) T_s (I_{PV} - I_L) \tag{II.39}$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dI_O}{dt} aT_S = -aT_S I_O (1 - a)T_S (I_L - I_O) \quad (\text{II.40})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} aT_S = (V_{PV} - R_L I_L) aT_S + (1 - a)T_S (V_{PV} - R_L I_L - V_O) \quad (\text{II.41})$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Booste avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Booste.

$$I_L = I_{PV} - C_I \frac{dV_{PV}}{dt} \quad (\text{II.42})$$

$$I_O = (1 - a)I_L - C_2 \frac{dV_O}{dt} \quad (\text{II.43})$$

$$V_{PV} = (1 - a)V_O + l \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \quad (\text{II.44})$$

### **II.3 : Commande pour la Recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT)**

En résumé, la connexion entre une source et une charge peut être optimisée en ajustant le rapport cyclique  $\alpha$  de la CS au but de maximiser la puissance délivrée à la charge plusieurs étaient appliqués. Parmi ces techniques, on trouve la technique de la Poursuite du Point de Puissance Maximale MPPT. Cette partie fera l'objet du chapitre suivant.

### **II.4 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV ainsi que ses performances sous l' influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement). Puis nous avons détaillé le modèle du convertisseur Booste qui représente étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Pour la partie commande MPPT, nous présentons ce type de commande de manière beaucoup plus approfondie dans le chapitre suivant.

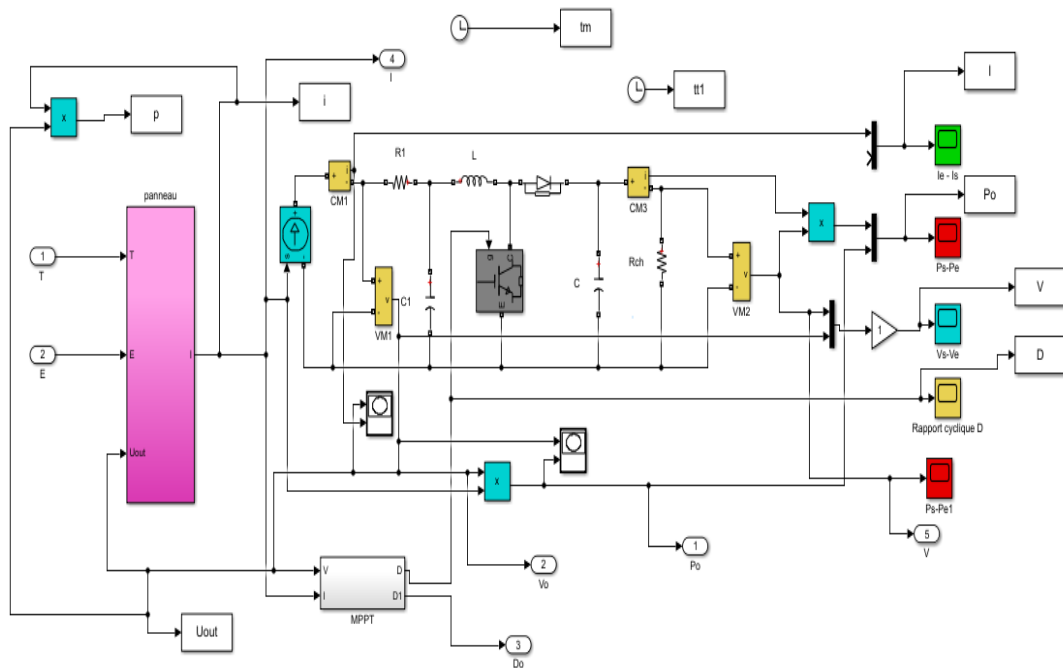


Figure (II.13) : Schéma Bloc de Simulation de la commande MPPT.

### II.5.2. Résultats de Simulation

Afin de tester l'efficacité et la faisabilité de la commande MPT (P&O), des simulations ont été réalisées sous Matlab. Les spécifications du panneau PV sont données à l'annexe, les résultats ci-dessous résument les performances d'un système PV. [34].

En considérant différents changements climatiques ainsi que la variation de la température. Les performances du système, pour une température fixée (25 °C) et l'irradiation variable sont illustrées par la figure (II.14-15-16).

Les résultats obtenus vérifient que, dans tous les cas précédents, la technique proposée (P&O) atteint des bonnes réponses en régime dynamique et réduit fortement les ondulations en régime permanent, surtout lorsque les conditions météorologiques. La figure (II.18-19-20) Montre les résultats obtenus lorsque la température varie selon un profil (25-50-10), on remarque que la technique MPPT (P&O) atteint toujours l'objectif voulu.

La Figure (II .17) montre le signal de commande de l'interrupteur du convertisseur, il semble être un signal logique qui change en fonction des conditions imposées de même pour la figure(II.21).

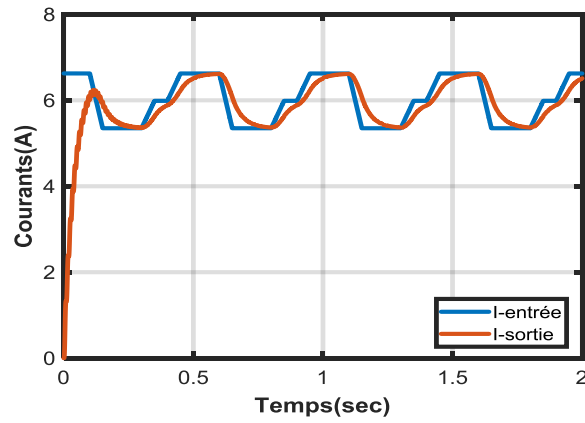


Figure (II.14) :Caractéristique des courants d’entrée et sortie

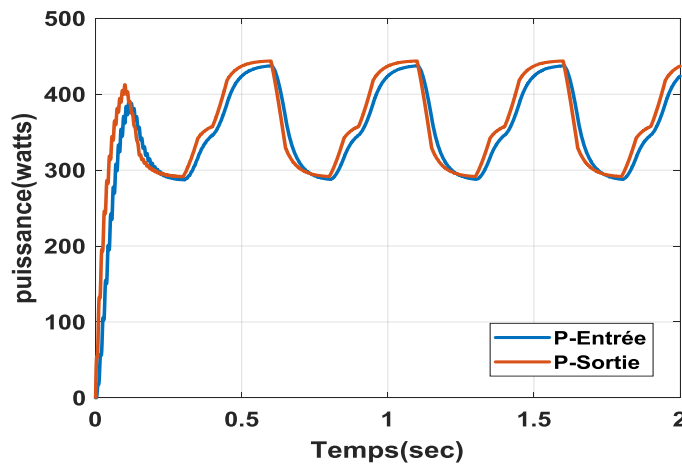


Figure (II.15) Caractéristique des puissances d’entrée et sortie (Booste)

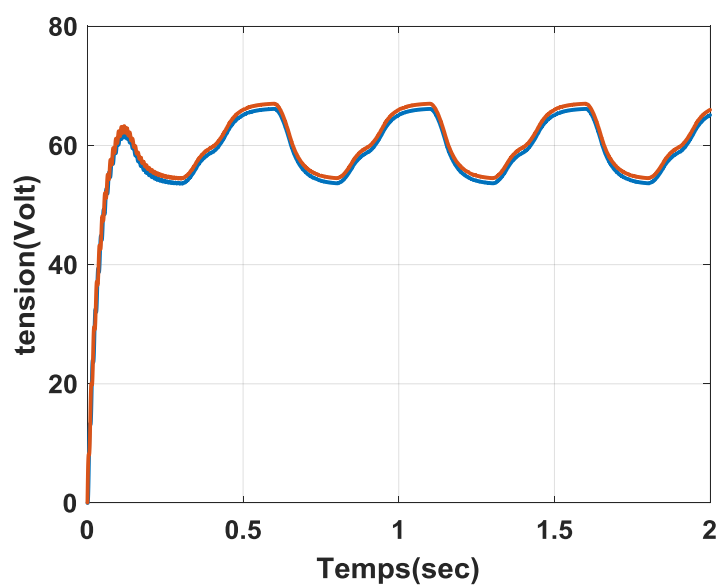


Figure :(II.16) Caractéristique des tensions d’entrée et sortie (Booste)

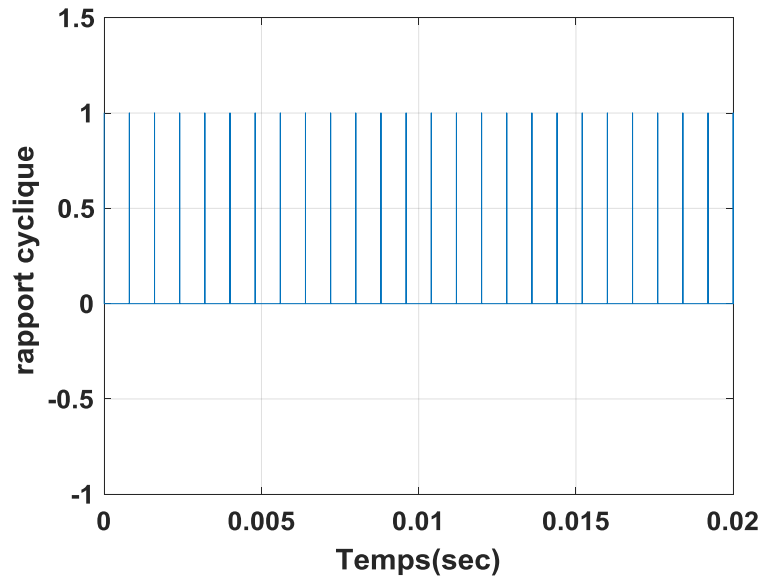


Figure : (II.17) Caractéristique du rapport cyclique

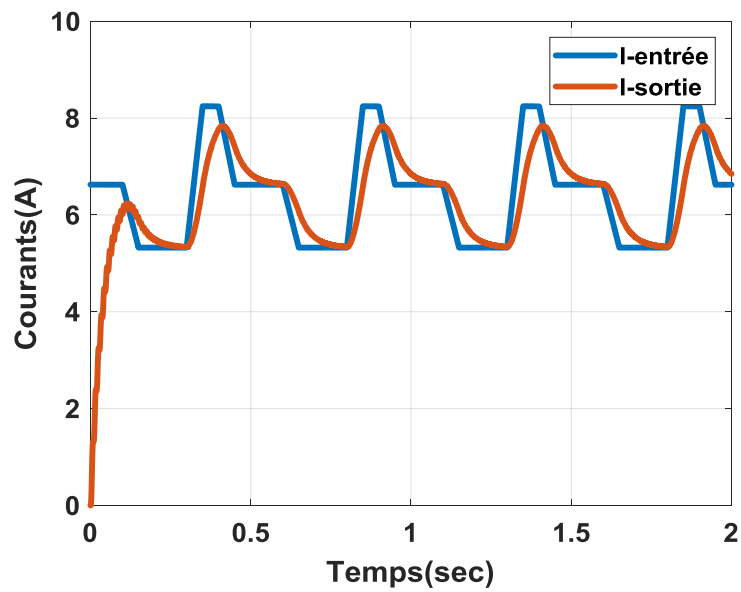


Figure : (II.18) Caractéristique de courant.

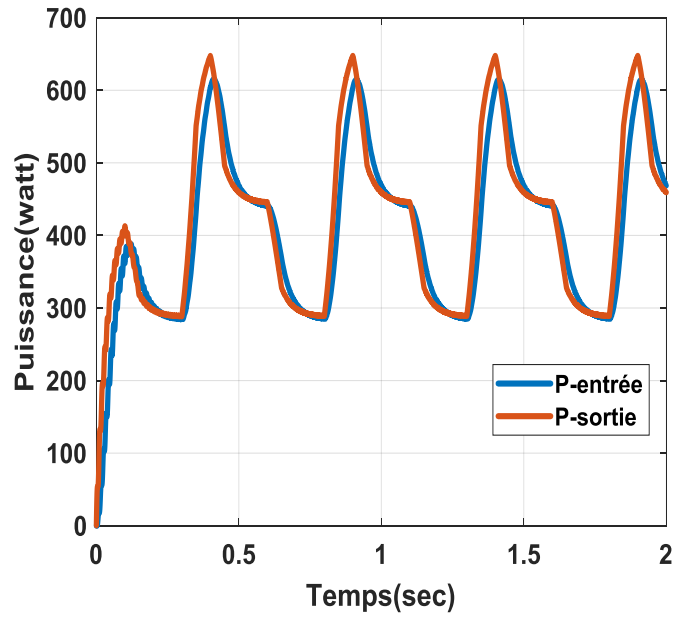


Figure : (II.19) Caractéristique de puissance

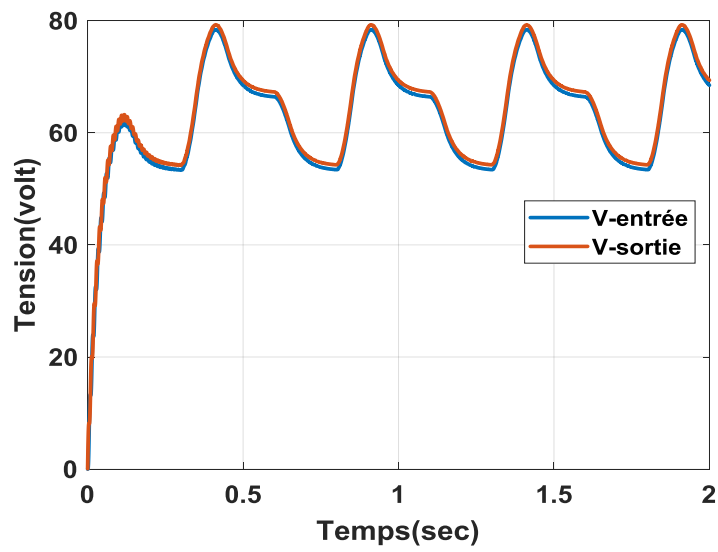


Figure : (II.20) Caractéristique de tension

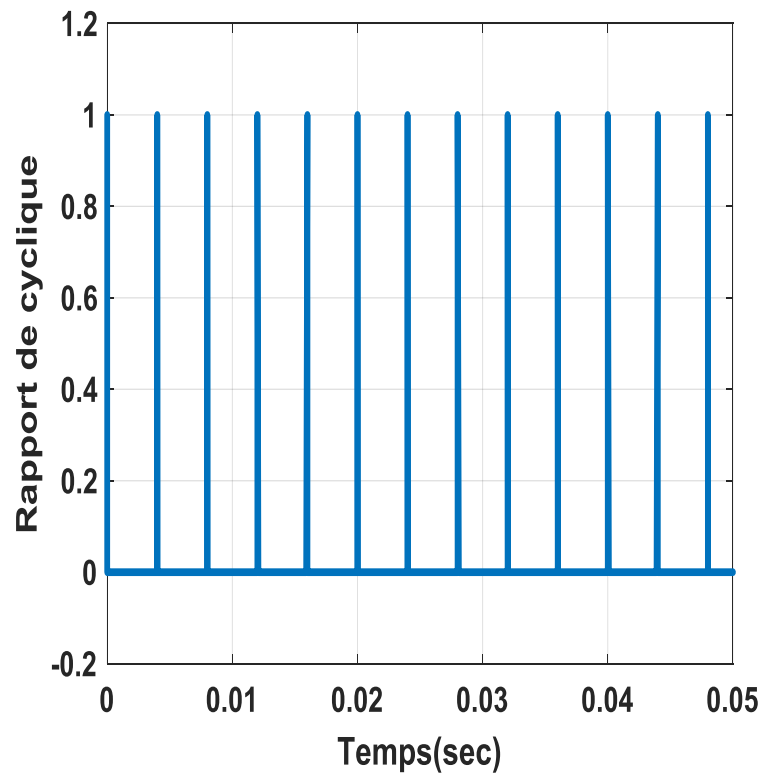


Figure : (II.21) Caractéristique de rapport cyclique

**Chapitre III:**  
**Commande**  
**vectorielle indirecte**  
**de la machine**  
**asynchrone**

### III.1. INTRODUCTION

La stratégie de la commande d'une machine asynchrone triphasée, elle est basée généralement sur le réglage de la vitesse (ou de la position) du rotor et le couple, cette commande ne peut être, que si on introduit une source d'alimentation capable de fournir une tension d'amplitude et de fréquence réglable en valeurs instantanées.

Autrement dit il faut se disposer d'un onduleur, comme le montre le schéma de la figure (III.1)

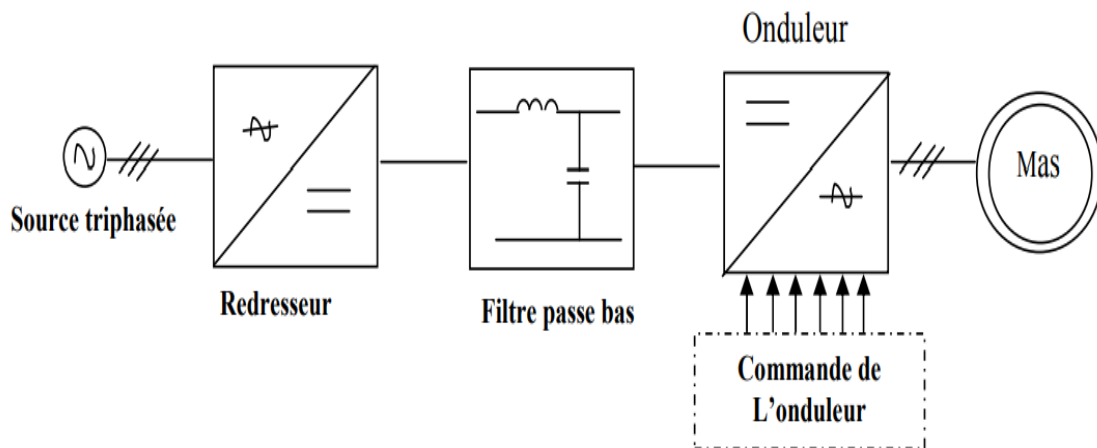
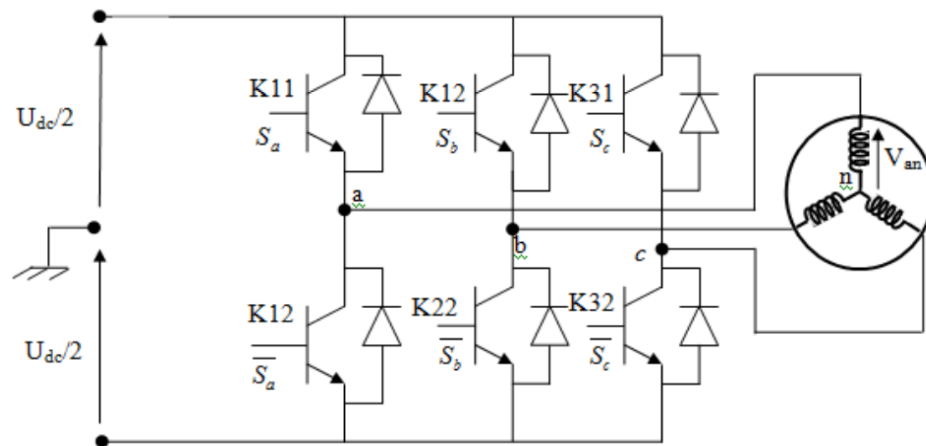


Figure. (III .1) : Schéma de l'association onduleur –machine asynchrone

### III.2.Modélisation de l'onduleur

Pour l'étude et la réalisation d'une commande de la machine asynchrone, il est nécessaire de modéliser l'onduleur utilisé. Le schéma de la figure (III .2) illustre une machine asynchrone triphasée alimentée par un onduleur à deux niveaux de tension composée de six interrupteurs généralement a transistors ou a thyristors GTO pour les grandes puissances. Le principe de fonctionnement de l'onduleur est basé sur des séquences imposées aux interrupteurs statiques. Ces séquences sont réalisées par la méthode de modulation de la largeur des impulsions (MLI).



**Figure. (III .2) : Schéma de principe d'onduleur –machine asynchrone**

Les trois cellules de commutation formant l'onduleur triphasé sont bidirectionnelles en courant. On suppose que les interrupteurs sont idéaux, donc ayant une image exacte des signaux de commandes  $s_{abc}$ .

- $s_j = 1$  si l'interrupteur du haut est fermé et celui de bas est ouvert.
- $s_j = 0$  si l'interrupteur du haut est ouvert et celui de bas est fermé.

Les tensions composées sont déterminées par le système d'équations suivant :

$$V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo}$$

$$V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \quad (III.1)$$

$$V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao}$$

Où

$V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  et  $V_{co}$  sont les tensions d'entrée de l'onduleur autrement dit les tensions continues fournis par le redresseur. Elles sont référencées par rapport au point milieu (0) d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations de Charles, comme suit :

$$V_{ao} = V_{an} + V_{no}$$

$$V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \quad (III.2)$$

$$V_{co} = V_{cn} + V_{no}$$

### Chapitre III: Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone

Avec :

$V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  sont les tensions simples appliquées à la charge.  $V_{n0}$  Est la tension entre le point neutre (n) de la charge et le point milieu fictif (0). Le système triphasé fourni par l'onduleur étant équilibré, il en découle :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{III.3})$$

On obtient :

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (\text{III.4})$$

Et on aura :

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{bn} &= -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{cn} &= -\frac{1}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

Ce système s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Posons :

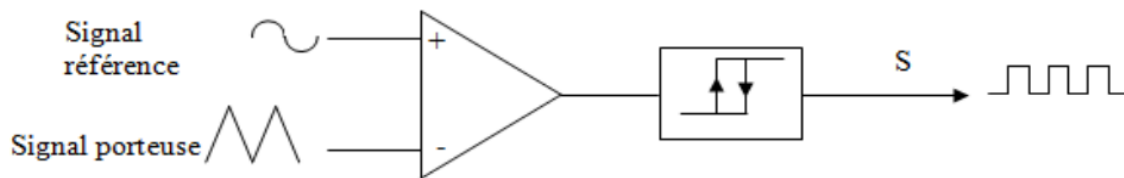
$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Et} \quad [V_{a0} \quad V_{b0} \quad V_{c0}]^T = \frac{U_{dc}}{2} [s_a \quad s_b \quad s_c]^T = E \cdot [s_a \quad s_b \quad s_c]^T \quad (\text{III.8})$$

Donc l'onduleur est modélisé par la matrice de transfert [T] avec  $U_{dc}$  est la tension continue à la sortie du filtre.

### III.1.2. Générateur de MLI

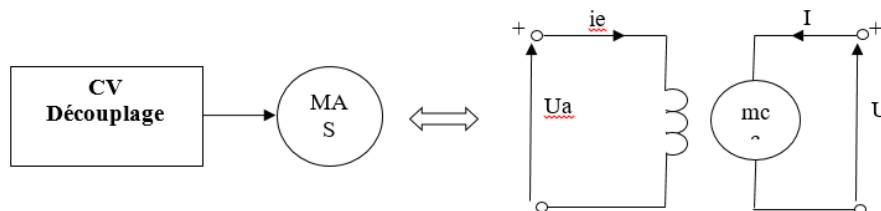
Plusieurs techniques sont utilisées pour la réalisation de la PWM, par exemple on utilise la stratégie la PWM (MLI) à hystérésis. Pour se faire on génère dans les circuits de commande une onde sinusoïdale de référence à la fréquence désirée et on la compare à l'onde triangulaire décalée de fréquence très supérieure.



**Figure. (III.3) : Générateur de la PWM à Comparateur à deux seuils.**

### III. Commande vectorielle de la MAS triphasée

Le but de la commande vectorielle est d'assurer un découplage entre les variables de commande c'est-à-dire de réduire la complexité de l'expression du couple. Donc on peut dire que le principe de cette commande est analogue à celle de la machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux ( le courant d'excitation) et celle liée au couple( le courant d'induit) comme le montre la figure (III.4). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple.



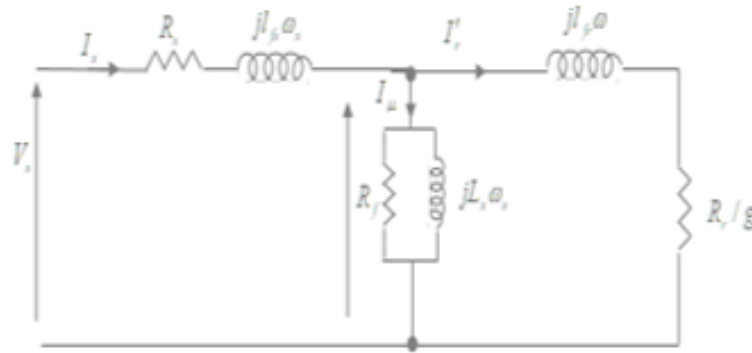
**Figure. (III.4) : Générateur de la PWM a Comparateur à deux seuils.**

Dans le cas de la machine à courant continue, le couple électromagnétique est donné par

$$C_e = K.I.\varphi(i_e)$$

Le réglage du flux est réalisé par la variation du courant d'excitation ( $i_e$ )

On considère le modèle de la machine asynchrone ramené au stator suivant la figure (III.5)



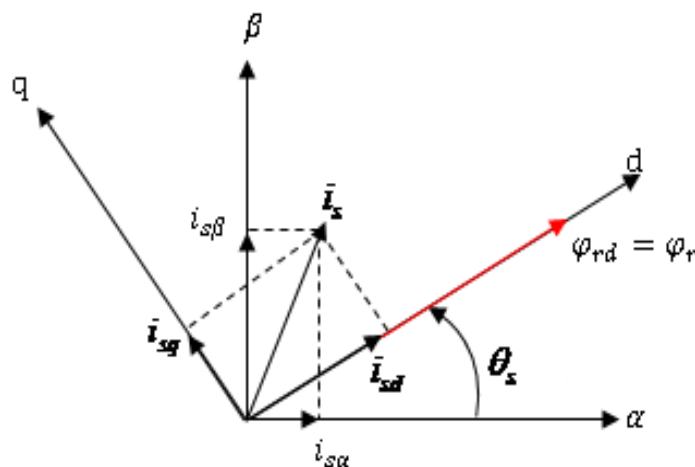
**Figure. (III .5)Modèle de la machine a synchrone ramenté au stator .**

$$C_e = 3 \frac{1}{\Omega_s} \frac{R_r}{g} I_r'^2 = 3 \frac{1}{\Omega_s} \frac{R}{g} V_s^2 \frac{1}{\left(\frac{R_r}{g}\right)^2 + (\omega L_{fr})^2}$$

Les grandeurs  $I_\mu$  et  $I'_r$  sont respectivement de même nature que les grandeurs  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ . D'après Le schéma, si on maintient le flux rotorique constant, la commande du couple peut être réalisée en agissant sur la pulsation  $\omega$  seule, alors l'évolution du couple ne dépend que d'une seule grandeur qui est la vitesse.

### III.2.1 Commande vectorielle par orientation du flux rétorque

L'orientation du flux rétorque, veut dire que le système d'axe (d-q) soit orienté de manière à ce que l'axe «d » soit en phase avec le flux  $\varphi_{rd}$  comme le montre la figure (6), c'est-à-dire :  $\varphi_{rd} = \varphi_r$  et  $\varphi_{rq} = 0$ .



**Figure. (III.6) : Représentation de l'orientation de repère (d, q).**

## Chapitre III: Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone

Les paramètres à commander sont le flux  $\varphi_{rd}$  et le courant  $i_{sq}$ , donc il est nécessaire d'utiliser le modèle de la machine dans le repère lié au champ tournant.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R}{\sigma L_s} i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{M}{\sigma L_s L_r} \left( \frac{1}{T_r} \varphi_{rd} + \omega \varphi_{rq} \right) + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{R}{\sigma L_s} i_{sq} - \omega_s i_{sd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \left( \frac{1}{T_r} \varphi_{rq} - \omega \varphi_{rd} \right) + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} \\ \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rd} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sq} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rq} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{array} \right.$$

L'équation mécanique est donnée par :  $J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - f \cdot \Omega - C_r$

Pour  $\varphi_{rq} = 0$  il vient :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R}{\sigma L_s} i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \varphi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} \quad (\text{III.10})$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{R}{\sigma L_s} i_{sq} - \omega_s i_{sd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega \varphi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} \quad (\text{III.11})$$

$$\frac{d\varphi_{rd}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rd} \quad (\text{III.12})$$

$$0 = \frac{M}{T_r} i_{sq} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \quad \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rd} \quad (\text{III.13})$$

$$C_e = \frac{3pM}{2L_r} (\varphi_{rd} \varphi_{sq}) \quad (\text{III.14})$$

$\theta_s$  Est l'angle de Park (appelée angle de l'autopilotage) déterminée à partir de l'équation (III.13)

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt = \int_0^t \left( \omega + \frac{M \cdot i_{sq}}{T_r \varphi_{rd}} \right) dt \quad (\text{III.15})$$

Rappelons que :  $\theta_s = \theta + \theta_r$

De l'équation (III.12), On peut écrire :

$$\Phi_r \left( 1 + T_r \frac{d}{dt} \right) = M i_{sd} \quad (\text{III.16})$$

Si le flux rotorique est maintenu constant alors, l'évolution du flux rotorique suit celle du courant statorique  $i_{sd}$ .

L'expression du couple devient donc :

$$C_e = p \frac{3M^2}{2Lr} i_{sd} i_{sq} = K i_{sd} i_{sq} \quad (\text{III.17})$$

**Remarque :**

L'expression du couple (III.17) est analogue à celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante car  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  sont des composantes continues ; on peut dire qu'avec l'orientation du flux, le contrôle du couple devient linéaire, et réglable par action sur  $i_{sq}$  lorsque le flux  $\Phi_r$  est maintenu constant.

### III.2.2 Commande vectorielle indirecte IFOC

Dans le cas de la commande vectorielle indirecte, le flux rotorique est maintenu constant  $\varphi_{rd} = \varphi_r$ .

On rappelle que l'angle  $\theta_s$  d'autopilotage utilisé pour la transformation directe et inverse donnée par (III.6) est :

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt = \int_0^t \left( \omega + \frac{M \cdot i_{sq}}{T_r \varphi_{rd}} \right) dt$$

Avec :  $\omega_s = \omega + \omega_{sl}$ ,  $\omega = p\Omega$  Et 
$$\omega_{sl} = \frac{M \cdot i_{sq}}{T_r \varphi_{rd}}$$

### Chapitre III: Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone

---

$\omega_{sl}$  : est la vitesse relative du référentiel (dq) par-rapport au repère rotorique, elle est définie aussi comme vitesse de glissement.

On sait que le flux rotorique n'est pas directement accessible, en revanche on peut l'exprimer en fonction du courant statorique  $i_{sd}$  comme l'illustre l'équation (III.16),

$$\Phi_{rd} \left( 1 + T_r \frac{d}{dt} \right) = M i_{sd}$$

On définit  $\hat{i} = \frac{\varphi_{rd}}{M}$  le courant magnétisant alors :

$$\hat{i} = \frac{1}{\left( 1 + T_r \frac{d}{dt} \right)} i_{sd}$$

(III.18)

Il vient que :

$$\omega_{sl} = \frac{1}{T_r \hat{i}} i_{sq}$$

(III.19)

Les expressions (III.18) et (III.19) représentent les estimateurs simples du courant magnétisant et de la vitesse du référentiel par-rapport au repère rotorique, dans ces deux équations, on voit apparaître principalement la constante de temps rotoriques  $T_r$  qui lie le flux rotorique et le courant  $i_{sd}$  qui le contrôle, mais elle apparaît surtout dans l'expression de  $\omega_{sl}$ .

#### **Remarque :**

Une surestimation ou une sous-estimation de la constante de temps rotorique conduit à une surexcitation ou une sous excitation de la machine. Dans les deux cas, l'amplitude et la phase du flux rotorique ne sont pas celles que l'on voudrait imposer, il en résulte une dégradation des performances, voire une instabilité du système. Le contrôle vectoriel sera perdu. La dépendance vis-à-vis les paramètres de la machine peut être réduits en utilisant une commande basée sur des observateurs et estimateurs robustes.

### III.2.2.1 Découplage

On rappelle les équations de la machine données par (III.10) et (III.11) :

$$\sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + Ri_{sd} = \sigma L_s \omega_s i_{sq} - \frac{M}{T_r L_r} \varphi_{rd} + V_{sd}$$

$$\sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + Ri_{sq} = -\omega \frac{M}{L_r} \varphi_{rd} - \omega_s \sigma L_s i_{sd} + V_{sq}$$

On pose :

$$e_d = \sigma L_s \omega_s i_{sq} - \frac{M}{T_r L_r} \varphi_{rd} \quad \text{et} \quad e_q = -\omega \frac{M}{L_r} \varphi_{rd} - \omega_s \sigma L_s i_{sd}$$

Posons  $U_{sd} = V_{sd} + e_d$  et  $U_{sq} = V_{sq} + e_q$ , on obtient le modèle découplé par compensation :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + Ri_{sd} = U_{sd} \\ \text{(III.20)} \end{array} \right.$$

$$\sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + Ri_{sq} = U_{sq}$$

(III.21)

Paramètres de compensation sont Les  $e_d$  et  $e_q$

### III.2.3. Commande IRFO à MLI basée sur les tensions de commande

$$U_{sd} \text{ et } U_{sq}$$

La figure (III.7) illustre l'organisation fonctionnelle de la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique à MLI basée sur les tensions de commande  $U_{sd}$  et  $U_{sq}$

Les principaux constituants dans cette commande sont la boucle de régulation du couple électromagnétique, celle du flux rotorique, le bloc de calcul de  $\theta_s$  et les transformations directe et inverse.



### Chapitre III: Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone

---

Pour les vitesses supérieures à la vitesse nominale, on procède à la technique de dé fluxage c'est-à-dire le flux de référence devient en fonction de la vitesse de référence comme le montre le schéma de la figure (III.8),

Le flux de référence lors du dé fluxage est donné donc par :

$$\varphi^* = \varphi_n \quad \text{Pour } \omega^* \leq \omega_n$$

$$\varphi^* = \varphi_n \frac{\omega_n}{|\omega|} \quad \text{Pour } |\omega| > \omega_n$$

$$\varphi^* = \varphi_n \frac{\omega_n}{|\omega|} \quad \text{Pour } |\omega| > \omega_n$$

Avec :  $\varphi^*$  : flux rotorique de référence ;

$\varphi_n$  : Flux rotorique nominal ;

$\omega_n$  : vitesse nominale de rotation.

Le couple maximal imposé pendant le dé fluxage devient alors plus faible. Cette technique est utilisée en particulier dans le domaine de traction électrique où l'on a besoin d'un fort couple pendant la phase de démarrage et d'un couple plus faible (pour limiter l'effet des frottements) pendant le fonctionnement nominal.



### Chapitre III: Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone

$$C_e = K i_{sq}^* \quad i_{sq}^* = \frac{2L_r C_e}{3pM\varphi_r^*} \quad \varphi_r^* = M i_{sd}^* \quad \text{Et} \quad K = \left( \frac{3pM^2}{2L_r} \right) i_{sd}^*$$

La fonction de transfert de la boucle de régulation de la vitesse rotorique est :

$$\frac{\omega}{\omega^*} = \frac{K_i K}{Js^2 + (f + K_p K)s + K_i K} \quad (\text{III.22})$$

La fonction de transfert (I.48) est de la forme :

$$\frac{\omega}{\omega^*} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{III.23})$$

$$\text{Par identification : } \delta = \frac{f + K_p K}{2\sqrt{JK_i K}} \quad \text{et} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K_i K}{J}}$$

Pour un échelon unitaire, la réponse est

$$\omega = \omega^* \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{(s+p_1)(s+p_2)} \quad (\text{III.24})$$

Afin d'obtenir une réponse rapide sans dépassement, le système devrait être amorti de façon critique, c'est-à-dire.  $\delta = 1$  Et  $p_1 = p_2 = -\omega_n$  puis, l'équation (24) devient :

$$\omega = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{(s+\omega_n)^2} = \frac{1}{s} - \frac{\omega_n}{(s+\omega_n)^2} - \frac{1}{s+\omega_n} \quad (\text{III.25})$$

Donc la réponse transitoire du système est donnée par :

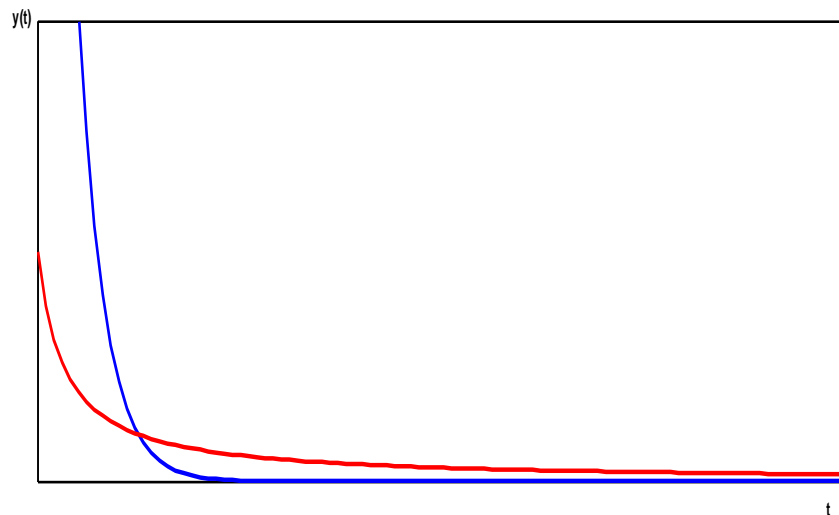
$$\omega(t) = 1 - \omega_n t e^{-\omega_n t} - e^{-\omega_n t} \quad (\text{III.26}) \quad e^{-\omega_n t} (t.\omega_n + 1) = 0.1$$

Le temps de réponse est obtenu lorsque la variable contrôlée atteint les 90% de la valeur désirée.

$$0.9 = 1 - \omega_n t e^{-\omega_n t} - e^{-\omega_n t} \quad (\text{III.27})$$

$$e^{-\omega_n t} (t.\omega_n + 1) = 0.1$$

Cette équation peut être résolue graphiquement, comme suit :



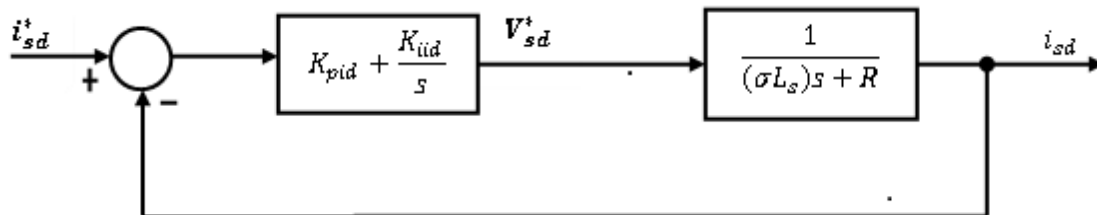
Et enfin les paramètres du contrôleur peuvent être calculés par les équations ci-dessous :

$$\begin{cases} \frac{f+K_pK}{2\sqrt{JK_iK}} = 1 \\ \omega_n = \sqrt{\frac{K_iK}{J}} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Dans ce contexte, et pour assurer la rapidité sans dépassement ni oscillations ( $\delta = 1$ ), la fréquence propre du système doit être très faible.

**b- Régulateur de courant  $i_{sd}$**

La composante de référence  $V_{sd}^*$  est obtenue à partir de la boucle de régulation du courant direct  $i_{sd}$ , cependant, l'équation (III.20) constitue le système à réguler ; Figure (III.10)



**Figure (III.10) : Schéma bloc de la boucle de régulation du courant  $i_{sd}$  .**

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$G_o = K_{pi} \left( s + \frac{K_{iid}}{K_{pid}} \right) \frac{1}{s} \frac{1}{\frac{R}{\sigma L_s} + s} \quad (\text{III.29})$$

Pour assurer la stabilité du système, on utilise la méthode de compensation des pôles. Ce qui

conduit à :

$$\frac{K_{iid}}{K_{pid}} = \frac{R}{\sigma L_s} \quad (\text{III.30})$$

Par conséquent, la fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_f = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (\text{III.31})$$

$$\text{Avec : } \tau = \frac{\sigma L_s}{K_{pi}}$$

Les valeurs des paramètres du régulateur sont calculées selon la constante de temps.

### c- Régulateur de courant $i_{sq}$

La régulation du courant  $i_{sq}$  se fait de la même façon que celle du courant  $i_{sd}$ , l'équation (III.21) constitue le système à réguler comme le montre la figure (III.11).

### d- Calcul des valeurs nominales

La valeur nominale  $i_{\phi N}$  du courant magnétisant est, en régime permanent, celle du courant  $i_{sd}$  absorbé à couple nul. On suppose que le glissement est nul, il vient :

$$i_{dN} = \frac{V_{sdN}}{L_s \omega_{sN}} \quad (\text{III.32})$$

Pour  $V_{sN} = 220V$  et  $\omega_{sN} = 314 \text{ rad/s}$  où  $i_{dN}$  est le courant absorbé nominal efficace.

$$\text{Exemple : } i_{dN} = \frac{220}{0.428 * 314} = 1.6A$$

Lorsque la chute de tension statorique est négligée. On obtient la valeur instantanée du courant absorbé :

$$i_{\phi} = i_{sdN} = \sqrt{3} I_{dN} = 2.8A$$

Sachant que le couple nominal du moteur est de 6.3 Nm, de l'équation (III.17) on peut calculer la valeur nominale du courant  $i_{sq}$ .

### III.3.2. Commande IRFO par Hystérésis

Dans ce cas on utilise une MLI basée sur les courants de commande  $I_{sd}$  et  $I_{sq}$  qui génèrent les courants triphasés de référence.

La commande par hystérésis force le courant de phase à poursuivre le courant de référence. L'imposition des courants sinusoïdaux à la machine asynchrone garantit un couple électromagnétique non fluctuant.

L'approche de cette commande consiste à réaliser la comparaison entre le courant de phase mesuré et le courant de référence comme le montre la figure (III.11) à l'aide d'un comparateur à hystérésis.

Celui-ci produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur de façon à limiter le courant de phase dans une bande d'hystérésis autour du courant de référence.

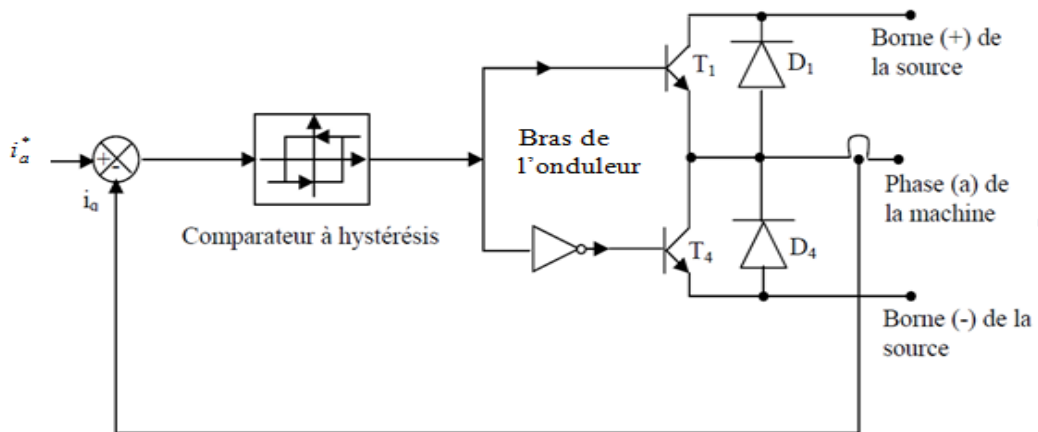


Figure.III.11 : Schéma du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur.

Les séquences de commutation des trois bras Si (i=abc) de l'onduleur sont définies de la manière suivante :

$$S_{abc} = -1 \quad \text{Si } i_{abc} \geq i_{abc}^* + \Delta i$$

$$S_{abc} = 1 \quad \text{Si } i_{abc} \leq i_{abc}^* - \Delta i$$

$$S_{abc} = S_{abc-1} \quad \text{Si } i_{abc} = i_{abc}^*$$

Avec :

$i_{abc}$  : Les courants des phases statorique (ai, ibis).

### Chapitre III: Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone

$i_{abc}^*$  : Les courants de référence issus des circuits de commande des trois bras de l'onduleur.

$\Delta i$  : La bande d'hystérésis. Elle est choisie de façon à ne pas dépasser la fréquence de commutation admissible des semi-conducteurs contrôlés et à minimiser suffisamment les harmoniques des courants.

La figure (III.12) montre le Schéma bloc de la commande par hystérésis de la machine asynchrone

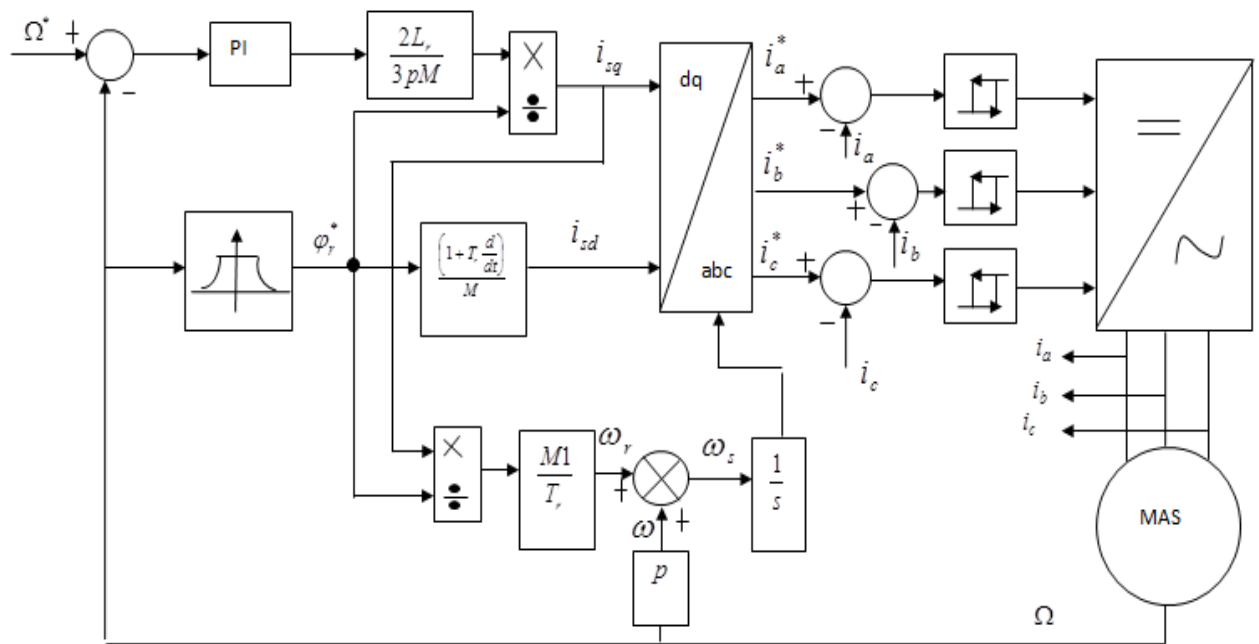


Figure :(III.12) : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte par hystérésis

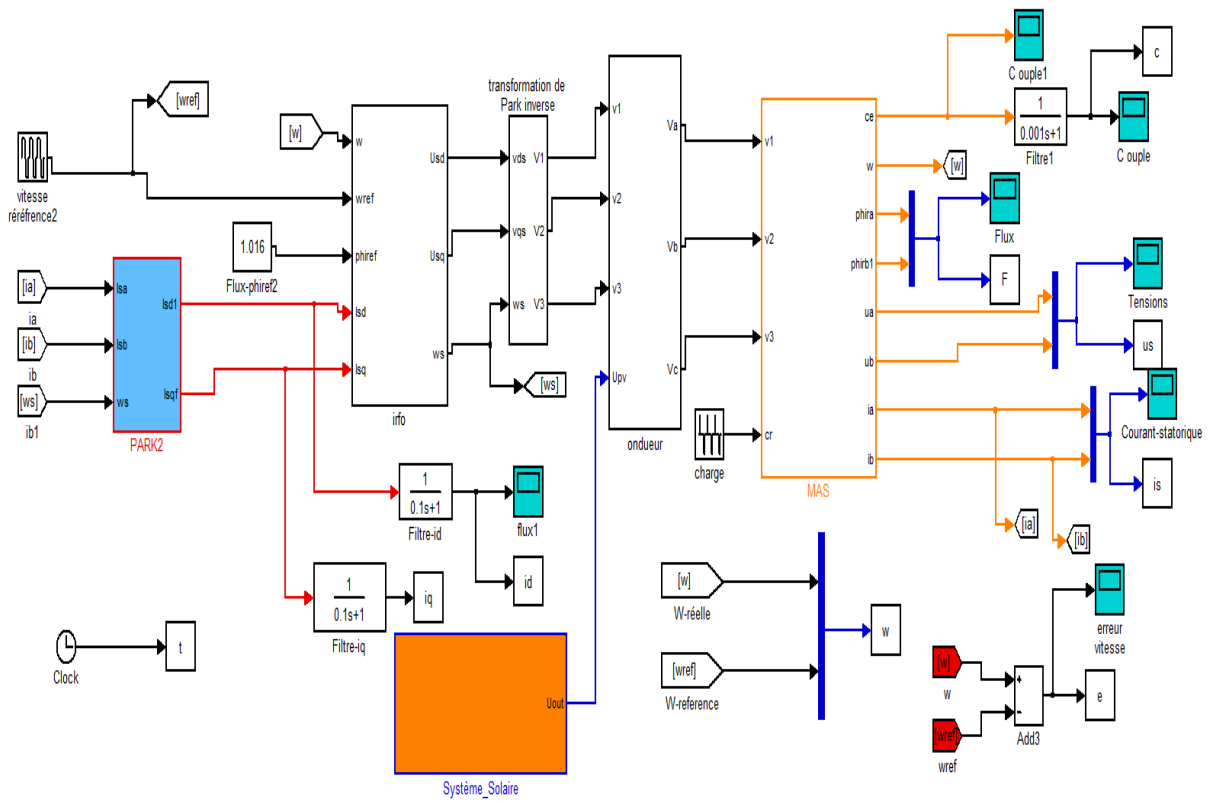


Figure : (III.13). Schéma bloc de la Simulation

### III.3.3 : Résultats de simulation

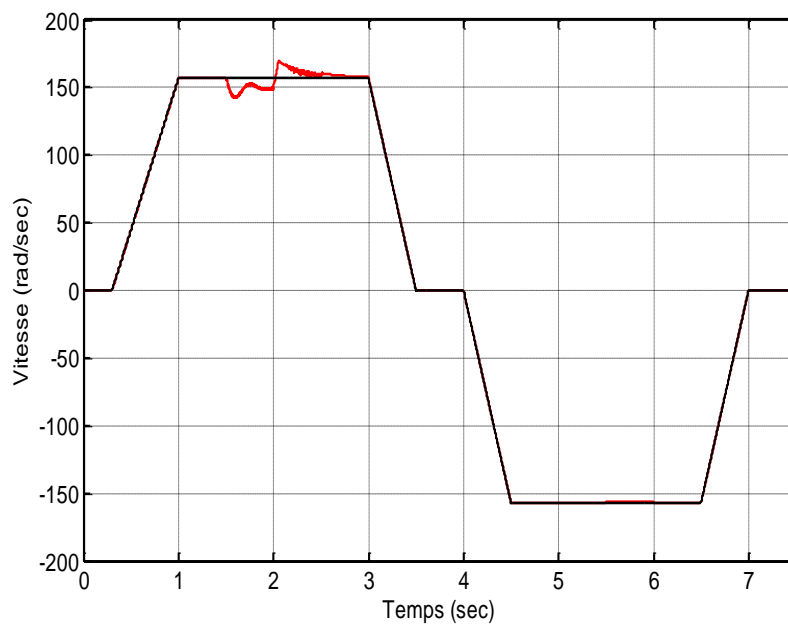


Figure : (III.14) : Caractéristique de la vitesse.

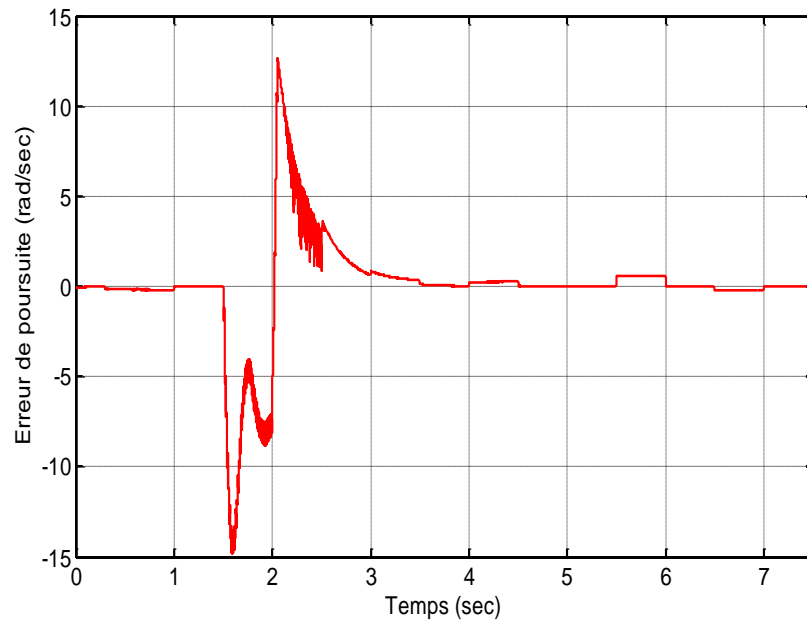


Figure : (III.15) : Erreur de poursuite (rad/sec).

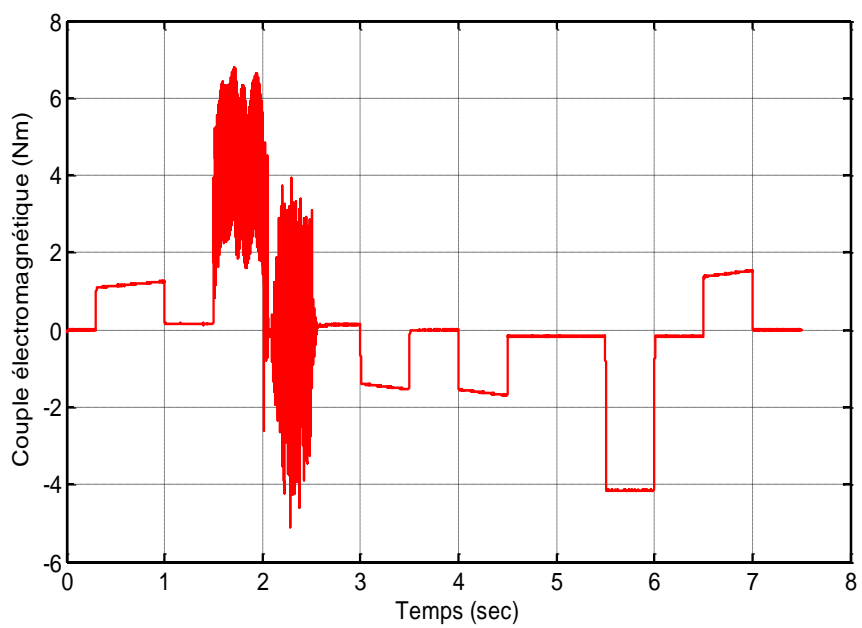


Figure : (III.16) : Caractéristique du couple.

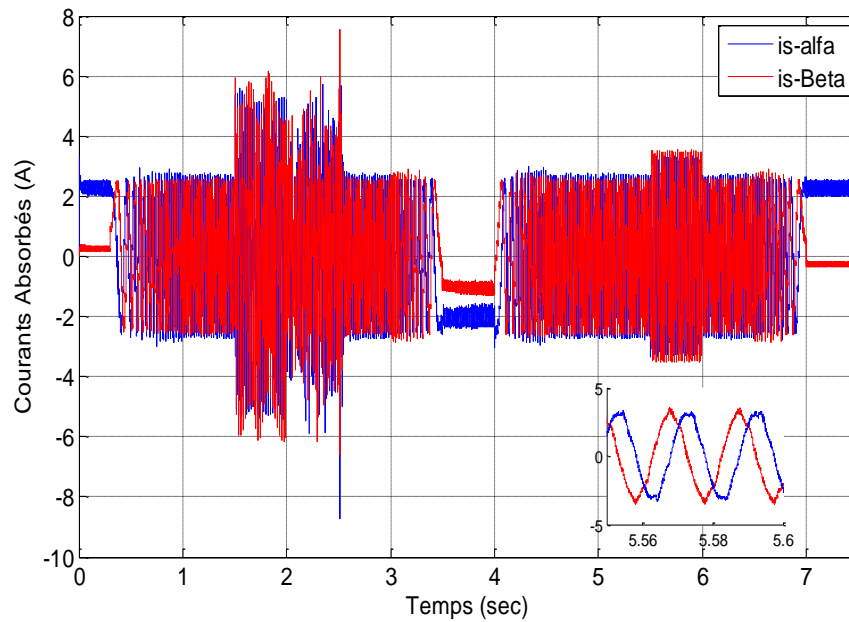


Figure : (III.17) . Caractéristique des courants absorbés  $i_{s\alpha}$  et  $i_{s\beta}$ .

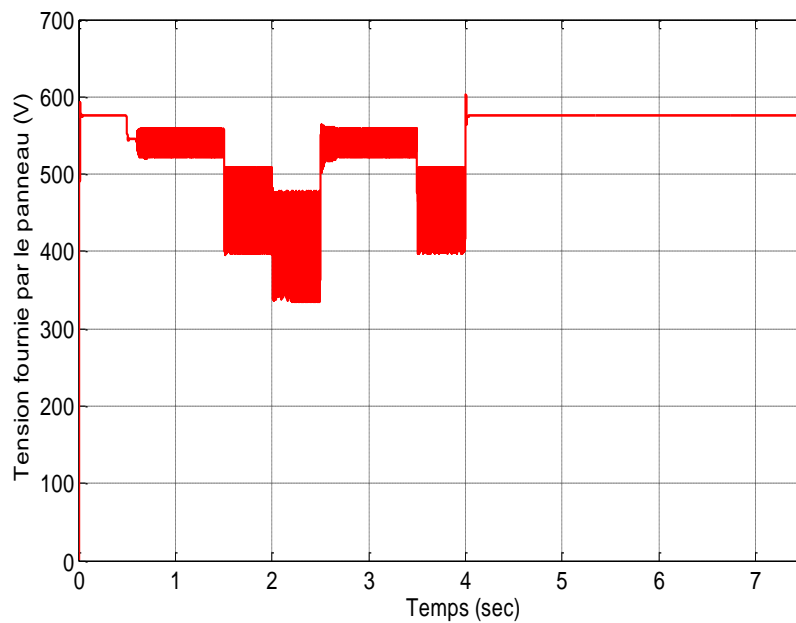


Figure : (III.18) .Tension délivrée par le Panneau photovoltaïque.

### I.5.2.Interprétation :

#### *1<sup>ier</sup> cas : Alimentation par réseau*

La figure (III.14) montre le comportement du la commande de moteur à induction avec des paramètres nominaux. Le moteur démarre à vide selon le profil de la vitesse de référence : 0, -100, 0, et 100 rad/s (figureIII.18)

## **Chapitre III: Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone**

---

Le couple de charge 5N.m est appliquée à  $t=2.6s$  (figure I.18). D'après les figures (I.19) et(I.20) on remarque l'appel du courant et la tension statorique pour satisfaire la puissance demandée durant l'application de la charge. En termes de suivi de trajectoire, la vitesse de rotor et le flux convergent rapidement à leurs références comme il est montré sur figures (III.16) et (III.17), respectivement. Le découplage est vérifié (figure (III.18)).

### ***2<sup>me</sup> cas : Alimentation par PV***

Dans le cas où l'alimentation du moteur est assurée par un générateur PV. Le profil de variation de l'éclairement (1000, 800, 500 and 200 W/m<sup>2</sup>) est montré par la figure (III.16) Les allures des puissances et tension de bus DC sont illustrés par les figures (III.18) et (III.19). La tension de bus DC est contrôlée à une référence de 515V à l'entrée de l'onduleur assurant ainsi une tension alternative entre phase de 380V.

Les réponses de vitesse et de flux rotorique ainsi que les courants et tension statoriques (figure (III.20)) sont semblables à celles obtenus dans le test 1 qui représente les performances avec une alimentation continue idéale. D'après les figures des puissances, on peut distinguer les deux modes de fonctionnement énergétique du système qui sont donnés comme suit :

### **III.4 : Conclusion générale**

Dans ce mémoire on a présente l'optimisation d'un système photovoltaïque afin de l'appliquer pour la commande d'un moteur asynchrone triphasé à cage.

En premier lieu, pour optimiser la production du générateur photovoltaïque

Nous avons utilisé une commande MPPT robuste basée sur la technique Perturbation et Observation classique, Des tests numériques ont montré l'efficacité de la commande MPPT du PV pour toutes les conditions de climatiques.

Le système photovoltaïque PV-Batterie est interconnecté au système de commande du moteur asynchrone à travers un convertisseur DC-DC Booste.

Ce dernier va alimenter un onduleur DC-AC triphasé.

D'après les résultats de simulation, la stratégie de gestion d'énergie du système montre la robustesse et l'efficacité de la structure proposée ; elle offre de plus des meilleures performances face aux variations climatiques (éclairement, température). L'approche

### **Chapitre III: Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone**

---

proposée a montré également des bonnes performances en régime dynamique et statique. Les tests de robustesse effectués ont attesté une bonne poursuite de la vitesse de référence, un bon rejet de perturbation ainsi qu'un degré de robustesse acceptable vis-à-vis les dérives paramétriques.

En perspectives, les travaux de recherches dans ce sujet peuvent être concentrés davantage sur:

- L'exploitation d'autres techniques de commandes robustes pour un système PV hybride connecté au réseau,
- L'optimisation de la commande par des nouvelles techniques exploitant les techniques de l'intelligence artificielle.
- L'optimisation de la stratégie de gestion énergétique des systèmes énergétiques hybrides.
- L'étude technico-économique des systèmes PV hybride.

# **Conclusion générale**

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Dans ce mémoire on a présente l'optimisation d'un système photovoltaïque afin de l'appliquer pour la commande d'un moteur asynchrone triphasé à cage.

En premier lieu, pour optimiser la production du générateur photovoltaïque, nous avons utilisé une commande MPPT robuste basée sur la technique Perturbation et Observation classique, Des tests numériques ont montré l'efficacité de la commande MPPT du PV pour toutes les conditions de climatiques.

Le système photovoltaïque PV-Batterie est interconnecté au système de commande du moteur asynchrone à travers un convertisseur DC-DC Booste. Ce dernier va alimenter Un onduleur DC-AC triphasé.

D'après les résultats de simulation, la stratégie de gestion d'énergie du système montre la robustesse et l'efficacité de la structure proposée ; elle offre de plus des meilleures performances face aux variations climatiques (éclairage, température). L'approche proposée a montré également des bonnes performances en régime dynamique et statique. Les tests de robustesse effectués ont attesté une bonne poursuite de la vitesse de référence, un bon rejet de perturbation ainsi qu'un degré de robustesse acceptable vis-à-vis les dérives paramétriques.

En perspectives, les travaux de recherches dans ce sujet peuvent être concentrés davantage sur :

- ❖ L'exploitation d'autres techniques de commandes robustes pour un système PV Hybride connecté au réseau,
- ❖ L'optimisation de la commande par des nouvelles techniques exploitant les techniques de l'intelligence artificielle.
- ❖ L'optimisation de la stratégie de gestion énergétique des systèmes énergétiques hybrides.
- ❖ L'étude technico-économique des systèmes PV hybride.

# **Bibliographies**

## Bibliographies

### GENERALITE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

#### Chapitre : I :

- [1] Introduction, Benbaha Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Préparée au sein du laboratoire LSPIE'2000 Batna.
- [1] [2] [1] Cellules photovoltaïques, Benbaha Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique Préparée au sein du laboratoire LSPIE'2000 Batna
- [3] [4] Modélisation de la cellule photovoltaïque, Benbaha Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Préparée au sein du laboratoire LSPIE'2000 Batna.
- [5] [6] [7] [8] Cellule PV réelle, Benbaha Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique Préparée au sein du laboratoire LSPIE'2000 Batna.

### COMMANDE MPPT ORDINAIRE

#### CHAPITRE II :

- [1] - [28] - [21] - [129] Techniques de recherche du point de puissance maximale  
224 Document PDF.
- [29] Commandes MPPT Fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS  
224 Document PDF.
- [29] [2-29] Commandes MPPT Fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur, 224 Document PDF.
- [29] MPPT Direct, 224 Document PDF.
- [30-31] [30] [32] Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage) , 224 Document PDF.
- [31] -[33] -[30] Approche Du Courant Constant (Constant Cure) , 224 Document PDF.
- [34] - [35] - [36] - [33] - [28] - [37] - [33] Perturbation Et Observation (P&O, Perturba And Observe), 224 Document PDF.

## Bibliographies

---

-[29] -[33] -[38] Conductance Incrémentale (Inchon, Incrémental Conductance, 224 Document PDF.

-[21] -[27] Étage d'Adaptation de Type BOOST, 224 Document PDF.

-[34] Résultats de Simulation, Benbaha Thèse, Doctorat en Sciences en Electrotechnique Préparée au sein du laboratoire LSPIE'2000 Batna

### **CHAPITRE III : Commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone**

Cours de Master 2 Commande électrique.