

République Algérienne Démocratique Et Populaire
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen
Faculté de Technologie



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER

Filière : *Electrotechnique*

Spécialité : *Réseaux Electriques et Réseaux Electriques Intelligents*

Préparé au Département de Génie Electrique et Electronique

Présenté par

Mohamed SENOUSSE & Amel SERIR

Intitulé du Mémoire

**Etude et simulation de la robustesse des commandes pour
systèmes photovoltaïque en présence des incertitudes de
paramètre et/ou des perturbations présente dans le réseau
électrique**

Soutenu publiquement le 15 Juin 2017 devant les membres de jury composé de :

S. M. MELIANI	Président	MCA	U.A.B- TLEMCEN
M. A. BRIKCI NIGASSA	Examineur	MAA	U.A.B- TLEMCEN
B. YACOUBI	Examineur	MAA	U.A.B- TLEMCEN
M. C. BENHABIB	Encadrant	MCA	U.A.B- TLEMCEN
A. GORINE	Co-encadrant	MCB	U.A.B- TLEMCEN

Année Universitaire : 2016 / 2017

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

✚ A mes parents :

❖ A ma chère mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

❖ A mon cher père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

✚ Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

✚ A mon cher binôme AMEL, qui m'a aidé et supporté dans les moments difficiles.

✚ Aux chers amis (es).

✚ A tous ce que j'aime et qui m'aiment.

✚ A tous mes collègues d'études.

Mohammed

Dédicace

A l'âme de la femme qui m'a appris la valeur des choses ma grand-mère que Dieu vous accueille dans sa miséricorde.

A ma très chère mère tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. Toute ces années d'études depuis la maternelle jusqu'à ce jour ne pouvait être pour moi un succès sans tes bénédictions. Que dieu te protège du mal, te donner santé et longue vie afin que je puisse te rendre un minimum de ce que je te dois.

A mes chères sœurs Hanane et Hidayet que dieu vous apporte bonheur et que vos rêves se réalisent.

A ma deuxième mère ma tante merci d'être toujours à mes côtés que Dieu te donne bonheur, santé et longue vie.

A mes frères Benamar et Mohamed qui m'avez toujours encouragé que dieu vous garde et vous protège.

A mon binôme, Mohammed, qui m'a toujours soutenu, merci pour tous les bons moments qu'on a partagés ensemble. Que dieu le tout puissant qu'il te protège et que tes rêves se réalise.

A mes très chère amis (es) Afaf, Nadia, Riad, Sidahmed pour tout le soutien et l'encouragement. En témoignage de mon amour je vous dédie ce modeste travail.

A tous ce qui m'ont soutenu de près ou de loin ainsi que les collègues de l'études.

Amel

Remerciement

Nous tenons à remercier tout d'abord notre bon dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

Nous tenons à remercier tout particulièrement à témoigner toute notre reconnaissance aux personnes pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'ils nous ont fait vivre durant cette période de formation éducatif.

Nous adressons nos remerciements à notre encadreur Monsieur M.C. BENHABIB, pour son aide consistante, sa direction attentive et qui été crédité de l'enrichir intellectuellement et pratiquement, et pour ses remarque objectives.

Un grand merci à Monsieur A. GORINE, pour son engagement dans le co-encadrement dans notre thèse, et pour ses suggestions éclairées et critiques honnêtes qui ont été très utiles.

Nous remercions, Monsieur S. M. MELIANI d'avoir l'amabilité de présider le jury de notre mémoire. Nous remercions également les membres du jury M.A. BRIKCI NIGASSA et B. YAKOUBI pour qui ont eu la disponibilité et la bonne volonté pour examiner notre travail et pour leur regard critique que ce soit de près ou de loin. Qui permette l'amélioration de ce mémoire.

Nous tenons à remercier Monsieur Y. DRIS d'avoir guidé nos premiers pas dans le chemin, pour toute l'aide qu'il nous a apporté, sa précieuse aide technique et aussi sa gentillesse et sa modestie qui restent exemplaire.

A tous ceux qui ont contribué à l'achèvement de ce travail moralement et matériellement et que ce soit de près ou de loin.

Liste de symboles et abréviations

Symboles

E_g	Energie de seuil [1.12 eV]
F_f	Facteur de forme
G	Eclairement [W/m^2]
G_o	Eclairement pour les STC
I_{cc}	Courant de court de circuit [A]
I_{pv}	Courant délivré par le panneau [A]
I_d	Courant de la Diode [A]
I_{ph}	Photo-Courant [A]
I_{pv}	Courant délivrée par la cellule (PV) [A]
I_{si}	Courant de Saturation inverse de la diode [A]
I_s	Courant de Saturation [A]
I_p	Courant Shunt [A]
k_i	Constante de Boltzmann [$1,381 \cdot 10^{-23} J/K$]
V_t	Tension thermique à la température T [V]
K_i	Coefficient de la température de I_{ph}
L	Inductance [H]
η	Facteur d'idealite de la diode ($1 < n < 2$)
N_s	Nombre de cellule en Série
N_p	Nombre de cellule en Parallèle
C	Capacité d'entée du convertisseur DC/DC [F]
C_s	Capacité de sortie du convertisseur DC/DC [F]
D	Rapport Cyclique
P_{ppm}	Puissance au Point de puissance maximale [W]
q	Charge électrique élémentaire
R	Résistance [Ω]
R_p	Résistance Parallèle [Ω]
R_s	Résistance Série [Ω]
T	Température absolue de la cellule [K]
T_a	Température ambiante
T_{mod}	Température de fonctionnement de la cellule
T_r	Température référence de la cellule ($300^\circ C/K$).
V_d	Tension aux bornes de la diode [V]
V_{co}	Tension de circuit ouvert [V]
V_{pv}	Tension aux bornes de la cellule [V]
V_{pm}	Tension de puissance maximale [V]
θ	Angle de transformation de Park [rad]

Abréviations

PV	Photovoltaïque
BO	Boucle ouverte
BF	Boucle fermée

DC/DC	Continu/Continu
DC/AC	Continu/Alternative
GPV	Générateur photovoltaïque
IGBT	Transition bipolaire à gâchette isolée
MLI	Modulation à Largeur d'Impulsion (PWM)
MOSFET	Métal Oxide Silicon Field Effect Transition
PPM	Point de puissance Maximale
P&O	Perturbation et Observation
INC	Incrémentale
FCC	Fraction court-circuit
PI	Proportionnel Intégral
CRONE	Correcteur robuste d'ordre non entier

Liste des figures

Figure 1-1 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	5
Figure 1-2 : Schéma synoptique d'une jonction PN	7
Figure 1-3 : Schéma du circuit équivalent d'une cellule solaire	8
Figure 1-4 : simulation du panneau photovoltaïque	11
Figure 1-5 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I(V)	12
Figure 1-6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique P(V)	12
Figure 1-7 : Influence de température sur la caractéristique I(V)	13
Figure 1-8 : Influence de température sur la caractéristique P(V)	13
Figure 2-1 : structure de convertisseur Boost	17
Figure 2-2 : Puissance et tension dans la poursuite du PPM	18
Figure 2-3 : classification des différentes méthodes de poursuite du PPM	19
Figure 2-4 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O)	20
Figure 2-5 : Organigramme de la méthode Incrément de conductance	21
Figure 2-6 : Organigramme de l'algorithme FCC	23
Figure 2-7 : Hacheur avec commande MPPT	23
Figure 2-8 : Pour une MPPT de type P&O	24
Figure 2-9 : Pour une MPPT de type P&O	24
Figure 2-10 : Pour une MPPT de type FCC	25
Figure 2-11 : Comparaison de la porteuse avec le signal en dent de scie	26
Figure 2-12 : Signal MLI résultant	26
Figure 2-13 : Bloc diagramme de PLL	27
Figure 2-14 : signal de ωt estimé	28
Figure 2-15 : Schéma proposé d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique	28
Figure 2-16 : Résultat de simulation du système photovoltaïque complet dans les conditions normales	29
Figure 3-2 : Schéma proposé d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique	33
Figure 3-3 : Schéma globale du système photovoltaïque raccordé au réseau	37
Figure 3-4 : Principe commun de PLL	37
Figure 03-5 : Structure de principe d'une PLL triphasée	38
Figure 03-5 : Simulation de la P.L.L lorsque nous avons des tensions harmoniques	38

Figure 03-6 : Simulation de la P.L.L lorsque nous avons un déséquilibre de tension	39
Figure 03-7 : Schéma d'un filtre multi variable	40
Figure 03-8 : Schéma de la P.L.L incluant le filtre multi variable	41
Figure 03-9 : Simulation de la P.L.L avec FMV lorsque nous avons des tensions Harmoniques	41
Figure 03-10 : Simulation de la P.L.L avec FMV lorsque nous avons un déséquilibre de tension	42
Figure 3-11 : Résultat de simulation du système photovoltaïque complet lors d'un déséquilibre de tension	43
Figure 3-12 : Résultat de simulation du système photovoltaïque complet lorsque $C = 825\mu f$	45
Figure 3-13 : Schéma de la boucle de commande	45
Figure 3-14 : Diagramme de Bode du régulateur, du procédé et de la boucle ouverte.	46
Figure 3-15 : Réponse fréquentielle de la version fractionnaire de KF et réelle KR d'un Régulateur CRONE à phase constante d'ordre non entier.	48
Figure 3-16 : Résultat de simulation du système photovoltaïque complet lorsque $C = 825\mu f$.	51

Sommaire

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
Chapitre 1 : Système photovoltaïque	3
Introduction	4
1.1. Générateur photovoltaïque.....	4
1.2. Propriétés des semi-conducteurs.....	4
1.2.1. Effet photovoltaïque	4
1.2.2. Matériaux semi-conducteurs	5
1.2.3. Dopage et Jonction P-N	6
1.2.4. Cellule photovoltaïque.....	7
1.2.5. Modélisation d'une cellules photovoltaïque.....	7
1.2.6. Calcul des paramètres de la cellule photovoltaïque	9
1.2.7. Simulation d'un générateur photovoltaïque	10
Conclusion	14
Chapitre 2 : Convertisseur et raccordement au réseau électrique.....	15
Introduction	16
2.1. Convertisseur continu- continu :.....	16
2.2. Méthode de poursuite du point de puissance maximale MPPT	17
2.3 Différents types d'algorithmes MPPT existants dans la littérature :	18
2.4 Convertisseur continue/alternatif (onduleur) :	25
Conclusion :	29
Chapitre 3 : Etude et simulation de la robustesse des commandes pour les systèmes incertains et/ou en présence des perturbations dans le réseau électrique.	32
Introduction	33
3.1 Système photovoltaïque Proposé	33

3.2	Tension de raccordement	35
3.3	Systemes photovoltaïque couplé au réseau BT	36
3.3.1	Principe de la PLL :	37
3.3.2	Commande de la tension V_{dc} partie onduleur	43
	Conclusion :	52
	Conclusion générale	53
	Références	55

Introduction générale

La première cellule solaire a vu le jour aux-cours durant le début du vingtième siècle basées sur les découvertes fait par Antoine César et Alexandre Edmond Becquerel.

L'effet de photovoltaïque permet la transformation de l'énergie issue des rayons lumineux en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs, il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

Différentes applications ont été développées avec les panneaux solaire tel que les satellites, la production d'électricité suivi par l'intégration de panneau photovoltaïque pour alimenter les maisons et voitures électrique.

Pendant longtemps, l'énergie solaire a été considérée comme une source d'énergies alternatives utilisée seulement pour alimenter des sites. Les récente crise énergétique ont rendu la branche solaire très attractive vis-à-vis des énergies fossiles.

Pour le système photovoltaïque connecté au réseau, les charges intègre pleinement la production décentralisée. L'énergie produite par les panneaux est injectée dans le réseau par l'intermédiaire d'un compteur de production.

Dans notre mémoire on va étudier et simuler un système photovoltaïque raccordé au réseau sous environnement MATLAB-SimPower System, présenté en trois chapitres :

Le premier chapitre contient la théorie des cellules photovoltaïque avec une étude détaillée sur les principales caractéristiques de l'énergie solaire, ainsi que les schémas équivalents, le modèle mathématique et l'influence de la radiance et de la température sur les paramètres du système.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des convertisseurs de types hacheurs ainsi que leur principe de fonctionnement.

Différentes méthodes de recherche du point de puissance maximale « MPPT » ont utilisé pour la commande de l'hacheur. Ce dernier est connecté au réseau électrique via les onduleurs.

Le dernier chapitre porte sur l'étude, la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté à un onduleur couplé au réseau par l'intermédiaire d'un hacheur.

L'influence des perturbations de tension, déséquilibres ou perturbations courant causées par des charges non linéaires sur la robustesse de ses commandes sera étudié en faisant appel à des commandes robustes tel-que la commande CRONE et filtre multi-variable.

Chapitre 1

Systeme photovoltaïque

Introduction

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie électrique renouvelable, respectueuse de l'environnement, qui est obtenu par la transformation des radiations solaires en énergie électrique grâce aux cellules photovoltaïques. Les modules photovoltaïques sont formés par l'association en série ou parallèle de ces cellules, qui à leurs tours sont regroupés pour former une installation solaire. Ces installations solaires produisent de l'électricité qui peut être consommée directement par des charges continues, stocké par des batteries ou alimenter par un réseau de distribution.

Ainsi, dans ce chapitre, nous allons parler d'une manière générale de la conversion photovoltaïque, des principaux éléments constitutifs d'un système photovoltaïque et d'une manière un peu plus précise du système photovoltaïque raccordé au réseau.

1.1. Générateur photovoltaïque

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 autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur varie en fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et minimum voir nulle la nuit. Pour le raccordement au réseau électrique, le courant continu produit par un système photovoltaïque est convertit en courant alternatif par l'intermédiaire des onduleurs de tensions.

1.2. Propriétés des semi-conducteurs

1.2.1. Effet photovoltaïque

Lorsque la lumière atteint une cellule solaire, une partie de l'énergie incidente se transforme directement en énergie électrique. Cette propriété remarquable est au cœur de toute installation photovoltaïque, elle est appelée effet photovoltaïque. L'effet photovoltaïque est un phénomène physique qui caractérise certains matériaux appelés "semi-conducteurs", qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans 90% des panneaux solaires fabriqués dans le monde. La lumière

produite par le soleil est composée de photons. Ces photons vont heurter la surface du panneau solaire et les électrons présents vont alors se mettre en mouvement dans une direction particulière permettant de créer un courant électrique continu.

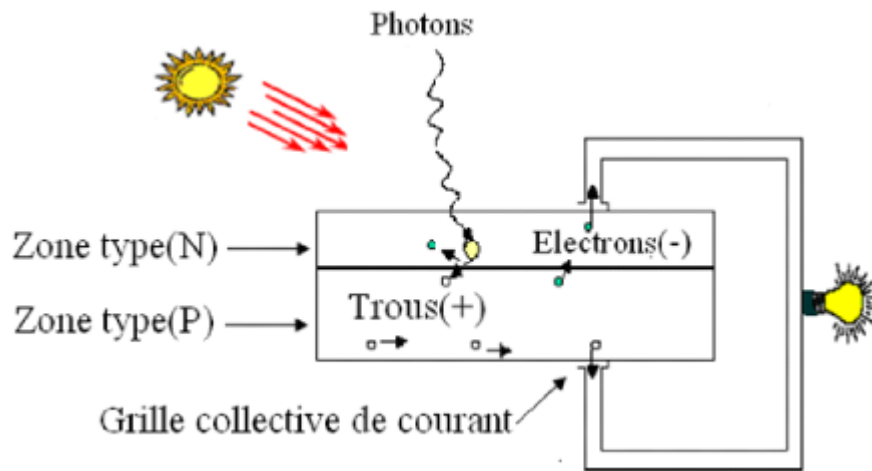


Figure 1-1 : Principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant. Il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du « band gap » (notée E_g), en électronvolt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et varie entre 1,0 et 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,124 eV pour le silicium cristallin (c-Si), et le 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si). [1]

1.2.2. Matériaux semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement des électrons et par celui des « trous »

qu'ils laissent dans la bande de valence. La conductivité électrique des semi-conducteurs peut être contrôlée par dopage, en introduisant une petite quantité d'impuretés dans le matériau afin de produire un excès d'électrons ou un déficit. Des semi-conducteurs dopés différemment peuvent être mis en contact afin de créer des jonctions, permettant de contrôler la direction et la quantité de courant qui traverse l'ensemble. Cette propriété est la base de fonctionnement des composants de l'électronique moderne : diodes, transistors,... etc. Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus commercialisé, vu ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle. Il existe également des dizaines d'autres semi-conducteurs utilisés, tel que le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium.

1.2.3. Dopage et Jonction P-N

La formation des bandes interdites étant due à la régularité de la structure cristalline, toute perturbation de celle-ci tend à créer des états accessibles à l'intérieur de ces bandes interdites, rendant le gap plus « perméable ». Le dopage consiste à implanter des atomes correctement sélectionnés (nommés « impuretés ») à l'intérieur d'un semi-conducteur intrinsèque afin de contrôler les propriétés électriques. La technique du dopage augmente la densité des porteurs à l'intérieur du matériau semi-conducteur. Si elle augmente la densité d'électrons, il s'agit d'un dopage de type N. Si elle augmente celle des trous, il s'agit d'un dopage de type P. Les matériaux ainsi dopés sont appelés semi-conducteurs extrinsèques. Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N et d'un semi-conducteur dopé P. La jonction entraîne là l'égalisation des niveaux de Fermi par décalage des bandes. Si on applique une tension positive du côté de la région P, les porteurs majoritaires positifs (les trous) sont repoussés vers la jonction. Dans le même temps, les porteurs majoritaires négatifs du côté N (les électrons) sont attirés vers la jonction. Arrivés à la jonction, soit les porteurs se recombinent (un électron tombe dans un trou) en émettant un photon éventuellement visible, soit ces porteurs continuent leur course au travers de l'autre semi-conducteur jusqu'à atteindre l'électrode opposée : le courant circule. Si la différence de potentiel est inversée, les porteurs majoritaires des deux côtés s'éloignent de la jonction, bloquant ainsi le passage du courant à son niveau. Ce comportement asymétrique est utilisé notamment pour redresser le courant alternatif.

La jonction P-N est à la base du composant électronique nommé diode, qui ne permet le passage du courant électrique que dans un seul sens. De manière similaire, une troisième région peut être dopée pour former des doubles jonctions. [2]

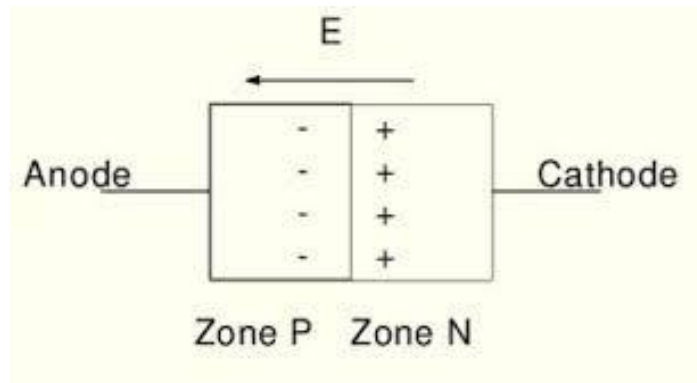


Figure 1-2 : Schéma synoptique d'une jonction PN.

1.2.4. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui produit de l'électricité de type continu à partir de la lumière (photons) grâce à l'effet photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium monocristallin (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs tel que : le Sélénium de cuivre et d'indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$ ou $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), le Tellure de cadmium (CdTe),... etc. Elles se présentent généralement sous la forme de plaques de dimension d'une dizaine de centimètres de chaque côté et d'une fine épaisseur. Ces cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, suivant la puissance recherchée.

1.2.5. Modélisation d'une cellules photovoltaïque

Une cellule solaire peut être modélisée par le circuit électrique illustré sur la figure (1.3) qui représente un modèle à une diode. La cellule est représentée comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série R_s représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt R_p représente le courant de fuite. Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN

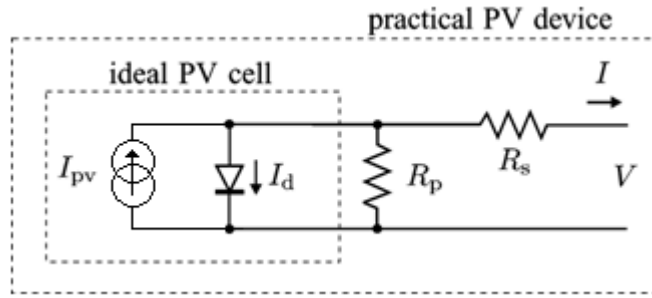


Figure 1-3 : Schéma du circuit équivalent d'une cellule solaire.

Le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque idéale selon la loi de Kirchhoff est donné par l'expression suivante [4] et [6] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (1.1)$$

Avec

$$I_{ph} = [I_{cc} - K_i(T - T_n)] \frac{G}{G_0} \quad (1.2)$$

Le courant délivré par le générateur.

$$I_{Rp} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (1.3)$$

Le courant qui passe dans la résistance R_p .

Et

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) \quad (1.4)$$

Le courant dans la diode.

Avec I_s courant de saturation de la diode donné par l'expression :

$$I_s = I_{si} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 * e^{\frac{q * E_g (T - T_n)}{a * k * T}} \quad (1.5)$$

D'où :

I_{si} est le courant de saturation inverse

$V_t = \frac{k * T}{q}$ est la tension thermique à la température T .

q est la charge de l'électron (1.602×10^{-19} C)

k est la constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/k)

a est le facteur de non idéalité de la jonction

E_g est l'énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

T la température effective de la cellule en degré Kelvin et donner par :

$$T = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} * G \quad (1.6)$$

Avec NOCT étant la Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donné par le constructeur (Data-Sheet).

En remplaçant les équations (1.2), (1.3) et (1.4) dans (1.1) nous obtenons :

$$I_{pv} = [I_{cc} + K_i(T - T_n)] \frac{G}{G_0} - I_s \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (1.7)$$

1.2.6. Calcule des paramètres de la cellule photovoltaïque

▪ Courant de saturation inverse I_{si} :

Nous avons d'après expression suivante :

$$I_{cc} = I_{si} \left[e^{\frac{V_d}{a \cdot V_t}} - 1 \right] + I_{pv} \quad (1.8)$$

Sachant qu'en circuit ouvert nous avons $I_{pv} = 0$, ce qui donne :

$$I_{cc} = I_{si} \left[e^{\frac{V_{oc}}{a \cdot V_t}} - 1 \right] \quad (1.9)$$

De cette expression, nous déduisons :

$$I_{si} = \frac{I_{cc}}{\left[e^{\frac{V_{oc}}{a \cdot V_t}} - 1 \right]} \quad (1.10)$$

▪ Résistance en série R_s :

Sachant que (V_{mp}, I_{mp}) est un couple de valeurs connues on aura alors:

$$I_{cc} = I_{si} \left[e^{\frac{V_{pm} + R_s I_{pm}}{a \cdot V_t}} - 1 \right] + I_{pm} \quad (1.11)$$

De cette expression, nous obtenons :

$$(I_{cc} - I_{pm}) / I_{si} = \left[e^{\frac{V_{pm} + R_s I_{pm}}{a \cdot V_t}} - 1 \right] \quad (1.12)$$

Ce qui nous donne :

$$R_s = \frac{N_s \cdot V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{cc} - I_{pm}}{I_{is}}\right)}{I_{pm}} - \frac{V_{pm}}{I_{pm}} \quad (1.13)$$

▪ Résistance en parallèle R_p :

L'approche proposée dans la section précédente peut être prolongée en tenant compte de la présence de la résistance parallèle appliqué à la puissance maximale. Nous obtenons ainsi la résistance parallèle en fonction de la résistance série come suite :

$$R_p = \frac{V_{pm} + I_{pm} * R_s}{I_{ph} - I_{pm} - I_s * (e^{\frac{V_{pm} + I_{pm} * R_s}{a * V_t}} - 1)} \quad (1.14)$$

- **Le facteur de forme :**

Le facteur de forme représente le rapport entre la puissance maximale (P_m) et la puissance optimale. Autrement dit il représente la mesure de la qualité de la cellule ou d'un générateur. Il est défini par la relation suivante :

$$ff = \frac{V_{pm} * I_{pm}}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (1.15)$$

- **Rendement :**

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques. Il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Autrement dit, le rendement est le pourcentage de l'énergie solaire qui se transforme en énergie électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. Il caractérise ses composants et définit leur performance. Le rendement dépend du type de semi-conducteur utilisé et il est directement lié à un seuil d'énergie « band gap (E_g) ». Pour le silicium cristallin, le rendement théorique maximum est de 44%. Le silicium n'est pas le meilleur matériau, son seuil d'énergie est de 1,10 eV, tandis que celui de l'arséniure de gallium (**GaAs**), il est quasi optimal, et est égal à 1,4 eV. Les cellules monocristallines commercialisées ont un rendement de l'ordre de 12 à 17 % maximum. De plus, Le rendement des cellules photovoltaïques peut être également désigné par une conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff * V_{oc} * I_{cc}}{P_{in}} \quad (1.16)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

1.2.7. Simulation d'un générateur photovoltaïque

Afin de réaliser cette simulation, nous avons choisi le module ENIE SOLAR QA4600SLP dont les données sont obtenues du datasheet. Ainsi, le tableau suivant nous donne les valeurs des paramètres :

Tableau 1.1 : les paramètres électrique utiliser.

	Valeur	Unité
Puissance nominale	250	W
Tension en circuit ouvert (Voc)	38.20	V
Courant de court-circuit (Icc)	8.95	A
Tension mpp (Vpm)	30.77	V
Courant mpp (Ipm)	8.40	A
NOCT	45±2	°C
Coefficient de température de courant	+0.06	%/°C
Coefficient de température de tension	-0.36	%/°C
Résistance série Rs	0.473	Ohm
Résistance parallèle Rp	144.4	Ohm
ff	0.757	

La figure suivante nous donne le schéma de simulation du modèle photovoltaïque à une diode selon les expressions données précédemment.

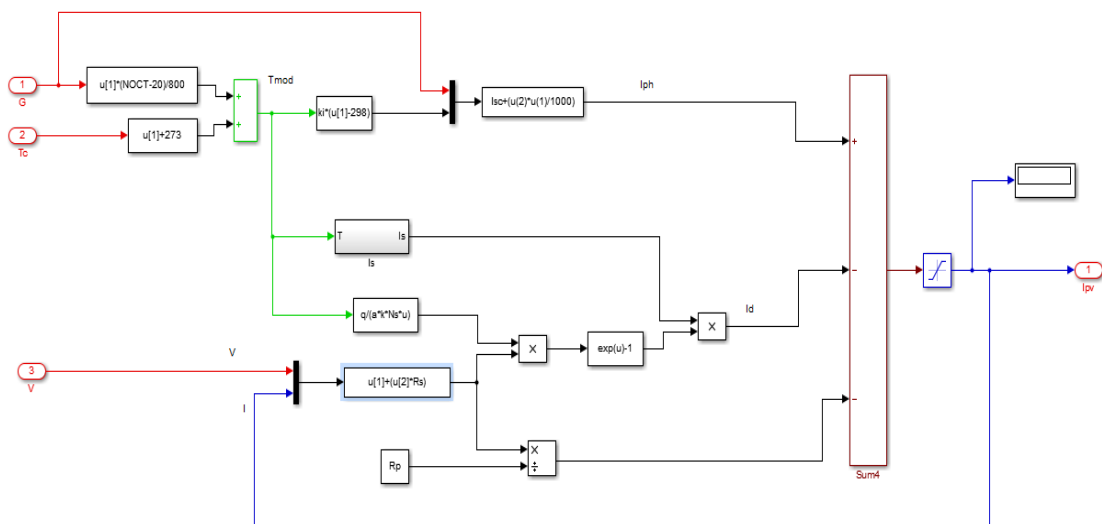


Figure 1-4 : simulation du panneau photovoltaïque.

D'après les résultats de simulation obtenue dans les figures (1.5) à (1.8), nous remarquons que l'ensoleillement et la température ont un impact direct et non négligeable sur les courbes I(V) et P(V) d'un panneau solaire photovoltaïque.

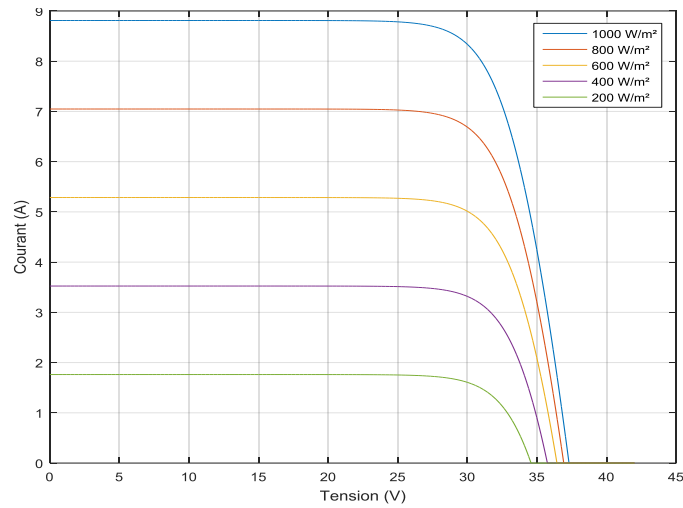


Figure 1-5 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I(V)$.

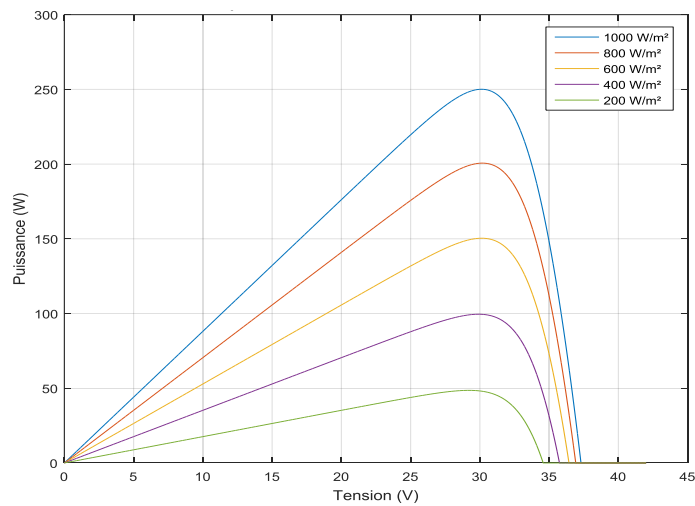


Figure 1-6 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P(V)$.

D'après la figure (1.5), nous remarquons que la variation de l'irradiance sur la caractéristique $I=f(V)$ à température constante, entraîne une variation importante du courant, tandis que celle de la tension est faible. De plus, nous remarquons sur la figure (1.6) une augmentation de la puissance du générateur photovoltaïque suite à cette variation de l'irradiance.

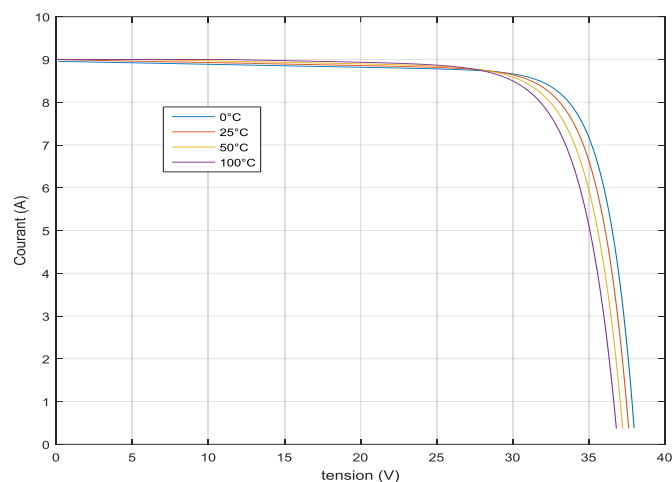


Figure 1-7 : Influence de température sur la caractéristique I(V).

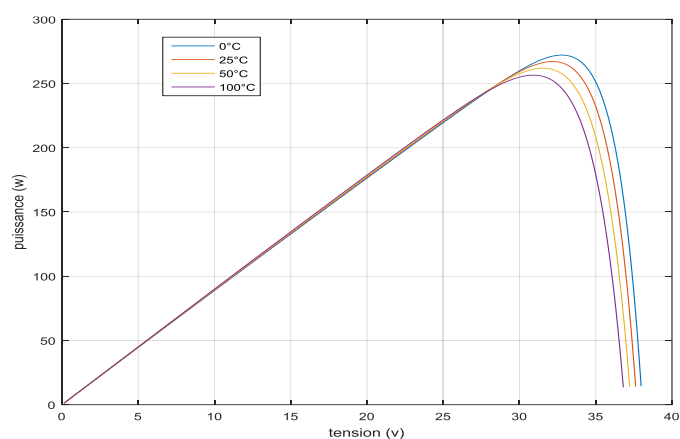


Figure 1-8 : Influence de température sur la caractéristique P(V).

Les figures (1.7) et (1.8) montre l'influence de la température sur les caractéristique I(V) et P(V) du panneau photovoltaïque.

En moyenne, la tension à vide d'une cellule photovoltaïque diminue de 2 mV lorsque la température de la cellule augmente d'un degré Celsius (peut varier d'un fabricant à l'autre), soit une baisse de tension de 0.3 % / °C. C'est ce qu'on appelle le coefficient de température lié à la tension, qu'on notera dans toute la suite de cet ouvrage $K_T(U)$. Ce coefficient de température dépend notamment de la nature de la cellule (cristallin, amorphe, etc...).

Quant au courant, il augmente en moyenne de 2 mA lorsque la température augmente d'un degré Celsius, soit une augmentation de courant de l'ordre de 0.04 %/°C ce qui reste négligeable. C'est ce qu'on appelle le coefficient de température lié au courant, qu'on notera $K_T(I)$.

De même, on définit un coefficient de température lié à la puissance, qu'on notera $K_T(P)$ compris entre $0.4\%/^{\circ}\text{C}$ et $0.5\%/^{\circ}\text{C}$. [3]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un rappel des notions de base sur l'énergie. Nous avons également détaillé le fonctionnement et les équations du panneau photovoltaïque à une diode et les différentes caractéristiques principales du panneau.

Dans le prochain chapitre, nous allons étudier un hacheur de type élévateur qui est alimenté par le panneau photovoltaïque et ayant une commande de type MPPT utilisée pour obtenir le maximum de puissance, puis nous présenterons le principe de fonctionnement des onduleurs connecté au réseau électrique.

Chapitre 2

Convertisseur et raccordement au réseau électrique

Introduction

De nos jours, les énergies renouvelables sont plus en plus utilisées et pour cause, cette source d'énergie est disponible presque partout. L'énergie produite sous forme continue, doit être ondulée pour pouvoir alimenter des charges alternatives ou l'injecter au réseau de distribution alternatif, et pour cela les systèmes photovoltaïques commencent à devenir des systèmes de production d'énergie de plus en plus important.

Dans ce chapitre, nous allons faire une étude détaillée sur tous les éléments nécessaires pour le raccordement de système photovoltaïque avec le réseau de distribution. Au début nous allons présenter le principe de fonctionnement d'un hacheur élévateur, ainsi que sa commande qui a pour but de trouver le point de puissance maximale PPM. Nous passons ensuite à l'étude des algorithmes les plus répandues à la recherche du PPM. Ces algorithmes sont considérés comme la base de la MPPT qui nous permet d'obtenir la puissance maximale du panneau solaire pour différentes valeur de température et d'ensoleillement. Puis nous présentons le principe de fonctionnement des onduleurs connecté au réseau électrique.

2.1. Convertisseur continu- continu

Le convertisseur continu/continu nommé hacheur, permet d'assurer le transfert d'énergie entre une source continue (dans notre système le panneau photovoltaïque) et une charge continue. Quelque soit les conditions de fonctionnement (ensoleillement, température, variation de charge, ...), le convertisseur continu/continu garanti le transfert maximal de puissance avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Les hacheurs nous permettent aussi de contrôler le transfert et l'écoulement de l'énergie entre les panneaux solaires et la charge ainsi de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension ou de courant.

Les convertisseurs continu/continu sont généralement utilisés comme :

- Convertisseur élévateur appelé hacheur parallèle.
- Convertisseur abaisseur appelé hacheur série.
- Convertisseur élévateur/abaisseur appelé hacheur série/parallèle.

Dans notre étude nous avons utilisés un hacher élévateur.

Un hacheur parallèle connu aussi sous le nom survolteur, est un système de conversion continu-continu qui permet de transférer une tension continue à une autre tension continue mais plus élevée. Le rôle de ce convertisseur dans notre système est d'amplifier la tension fournie par la cellule photovoltaïque et par conséquent réduire le nombre de cellule nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré.

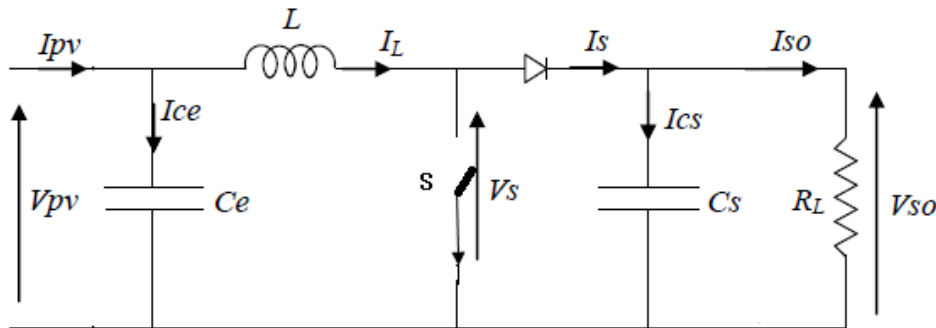


Figure 2-1 : structure de convertisseur Boost.

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur élévateur se divise en deux phases distinctes (selon l'état de l'interrupteur S).

- Lorsque l'interrupteur S est fermé (état passant), le courant traversant l'inductance augmente. L'inductance stocke le courant ce qui conduit au blocage de la diode et par conséquent la charge sera déconnectée.
- Lorsque l'interrupteur S est ouvert (état bloqué), l'inductance sera en série avec le générateur, et la diode sera passante. L'interruption du courant provoque une surtension due à l'inductance. L'énergie cumulée dans l'inductance va être donc transférée vers la capacité.

2.2. Méthode de poursuite du point de puissance maximale MPPT

L'exploitation de l'énergie solaire présente un potentiel énorme. C'est dans cette optique que sont conçus les panneaux photovoltaïques. La recherche de la puissance maximale est donc nécessaire. Or, les panneaux photovoltaïques sont soumis à des conditions changeantes notamment l'ensoleillement et la température ambiante, ce qui nécessite la modification de la puissance. En effet, sous ces conditions changeantes, la puissance est variable, et la fonction de la tension et/ou du courant est imposée aux bornes du panneau photovoltaïque. Un panneau photovoltaïque a des caractéristiques courant-tension (IV) non linéaires, sa puissance de sortie change en fonction des conditions atmosphériques. Il existe seulement un point (PPM) où la puissance est maximale et cela pour chaque courbe puissance en fonction de tension.

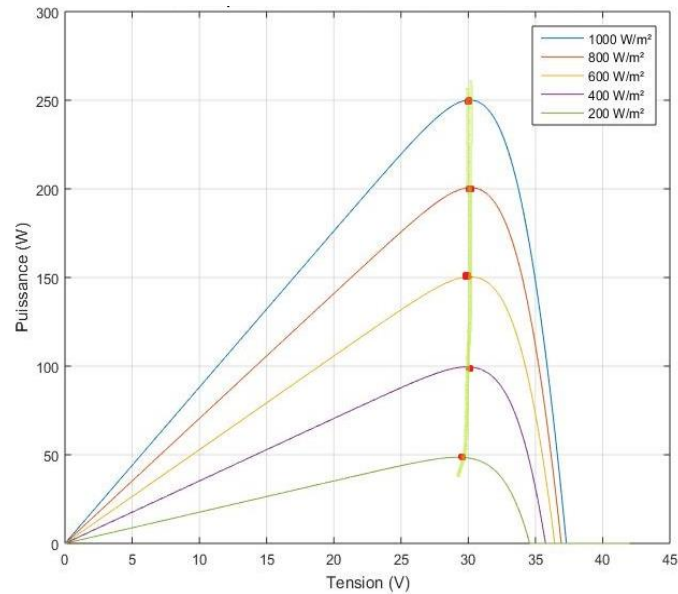


Figure 2-2 : Puissance et tension dans la poursuite du PPM.

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Ce type de commande sont connues dans la littérature par : Recherche du Point de Puissance Maximum. Ou bien en Anglais « Maximum Power Point Tracking » (MPPT).

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale. La commande MPPT est associée à un convertisseur statique permettant de faire une adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge.

2.3 Différents types d'algorithmes MPPT existants dans la littérature

Il existe plusieurs manières de classification des algorithmes MPPT. Ces commandes diffèrent par leur principe de fonctionnement, leur précision et leur rapidité de recherche.

Dans ce qui suit, nous allons citer les principales commandes rencontrées dans la littérature ou selon la technique utilisée pour la poursuite du PPM.

Parmi les algorithmes existant on peut citer les méthodes dont on a utilisé (méthodes directe), ainsi que les méthodes indirectes, comme le montre le tableau suivant :

Tableau (2.1) classification des différentes méthodes de poursuite du PPM.

Commande directe	Commande indirecte
MPPT basé sur l'équilibre de puissance	MPPT basée sur les calculs numériques
Perturber et observer (PO)	MPPT basée sur le courant de court-circuit
Incrémental et inductance	MPPT basée sur la tension en circuit-ouvert

2.3.1 Commande de MPPT Perturber et Observer (P&O)

Le principe de la commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{pv} , ce qui engendre une variation de la puissance. La figure ci-dessous montre, que si l'augmentation de la tension provoque un accroissement de la puissance, le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM, si au contraire la puissance décroît, il est à droite.

De la même manière, on peut faire un raisonnement pour une diminution de la tension. En résumé, pour une perturbation de la tension, si la puissance augmente, la direction de la perturbation est maintenue, sinon elle est inversée pour que le point de fonctionnement converge vers le PPM.

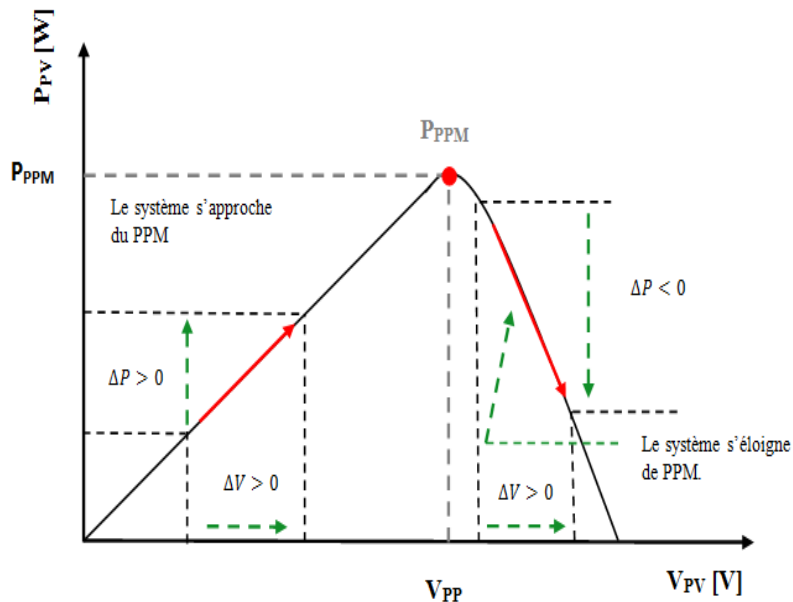


Figure 2-3 : classification des différentes méthodes de poursuite du PPM.

L'algorithme de la MPPT P&O est présenté dans la figure suivante :

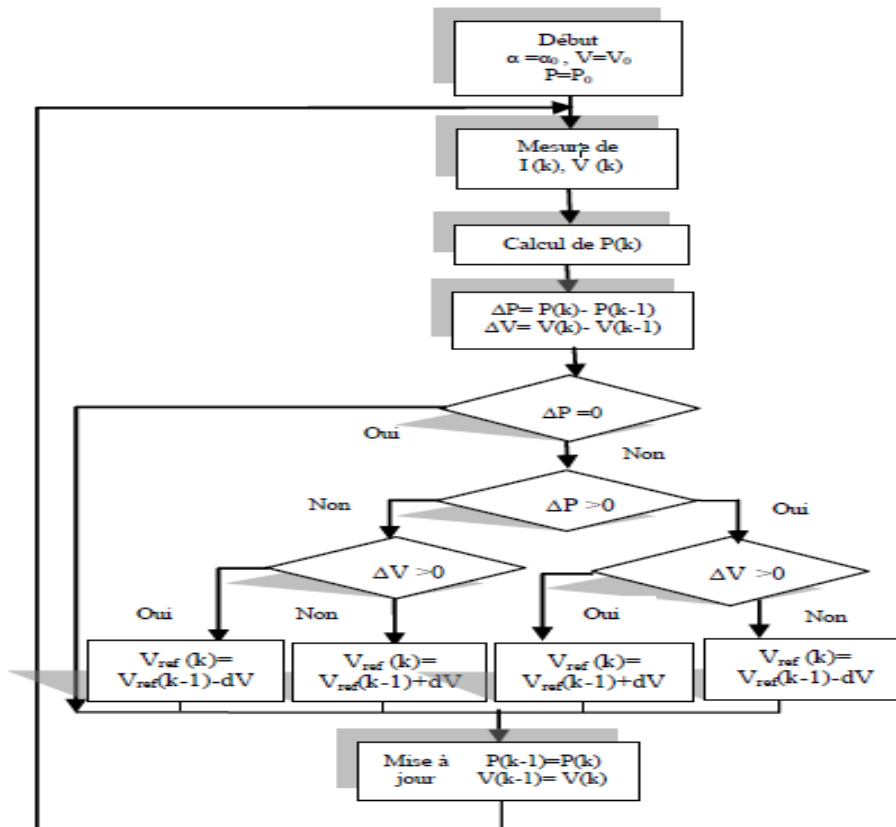


Figure 2-4 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O).

Ce type de commande, largement utilisée aujourd'hui, à cause de son implémentation très aisée. 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, cela oblige le système à osciller en permanence autour du PPM une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité.

2.3.2 Commande MPPT incrémentation d'inductance (INC)

Cette méthode est plus efficace que la méthode P&O. Elle est basée sur la variation de la conductance du générateur photovoltaïque et de son influence sur la position du point de fonctionnement

La figure (2.5) présente l'organigramme de poursuite du PPM par la méthode d'incrément d'inductance.

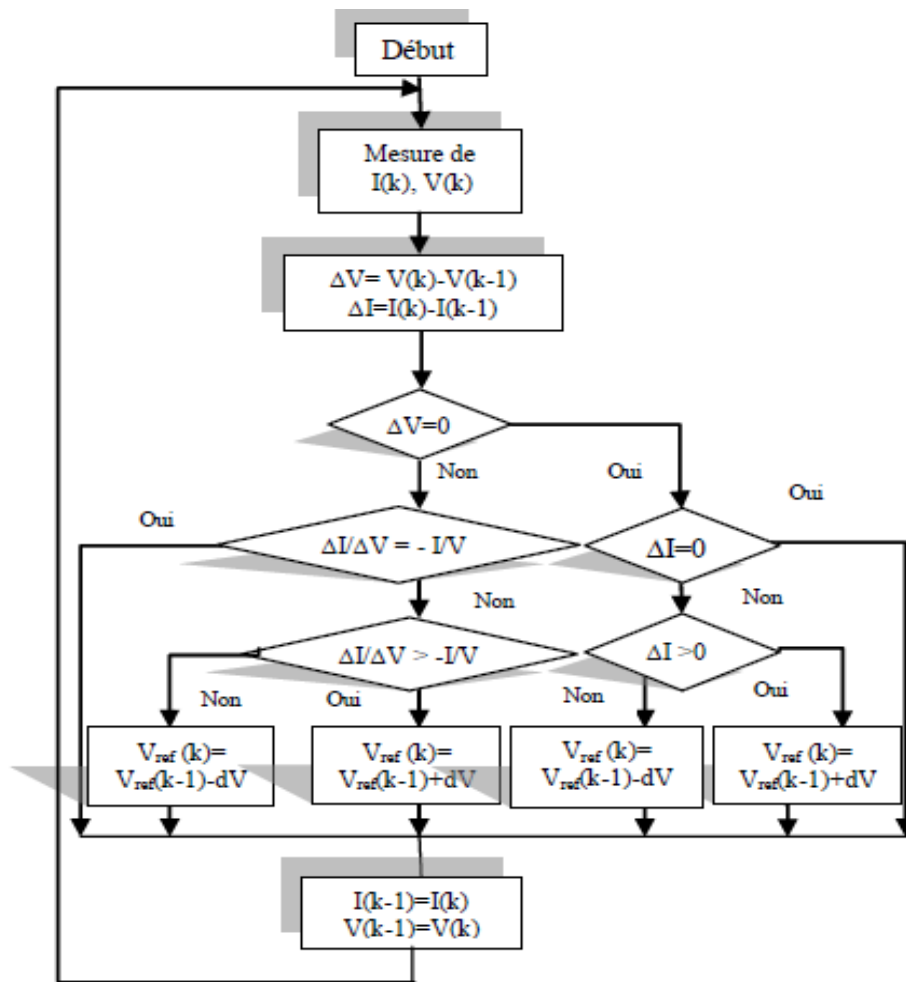


Figure 2-5 : Organigramme de la méthode Incrément de conductance.

On définit la conductance par :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (2.1)$$

Et l'incrémentation par :

$$DG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.2)$$

Cette dérivée est égale à zéro au point de puissance maximale (MPP).

Les caractéristiques puissance-tension du générateur photovoltaïque sont alors donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \text{si } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \text{ à gauche de PPM} \\ \text{si } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \text{ au PPM} \\ \text{si } \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \text{ à droite de PPM} \end{cases}$$

Sachant que :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{dIv}{dV} = I + \frac{dI}{dV}$$

Ces équations peuvent alors être écrites comme suite :

Si $I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ donc le point de fonctionnement se trouve sur le PPM.

Si $I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ donc le point de fonctionnement se trouve à gauche de PPM.

Si $I_{pv} + V_{pv} \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \Rightarrow \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ donc le point de fonctionnement se trouve à droite de PPM.

Le terme $\frac{I}{V}$ désigne la conductance instantanée et le terme $\frac{dI}{dV}$ désigne la variation de cette conductance, tout en signifiant que la tension doit être réduite pour atteindre le PPM.

2.3.3 Commande à Base de la Mesure d'une Fraction du Courant I_{cc} (FCC)

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante :

$$I_{pm} = k * I_{cc} \quad (2.4)$$

Où k est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92.

En effet, le point de fonctionnement optimal est obtenu en amenant le courant du panneau photovoltaïque au courant optimal. Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le panneau atteigne la valeur optimale. La figure suivante montre l'organigramme de l'algorithme FCC.

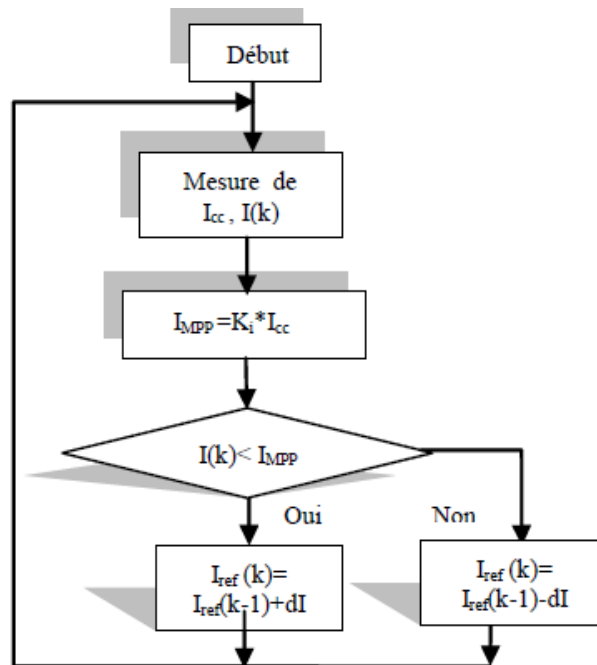


Figure 2-6 : Organigramme de l'algorithme FCC.

Ce type de commande ayant besoin uniquement d'un capteur s'avère plus facile à mettre en œuvre et un peu moins coûteuse que d'autres commandes sauf que leur précision est faible notamment à cause du procédé d'estimation de I_{cc} . De plus, chaque fois que la mesure de courant est faite, cela exige un arrêt obligatoire de transfert de puissance et donc des pertes énergétiques qui ne sont pas négligeables au cours d'une journée.

2.3.4 Comparaison entre les différentes commandes

Afin de voir le fonctionnement de ces différents types de MPPT, nous avons réalisé des simulations d'un hacheur seul avec chacune des commandes MPPT comme le montre la figure 2-7.

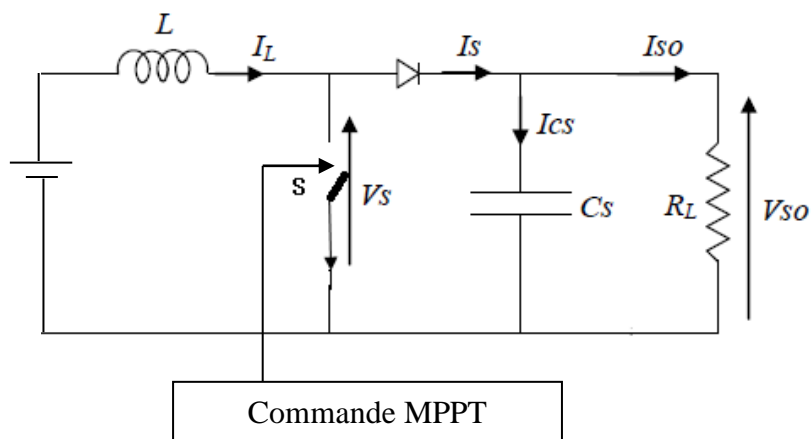
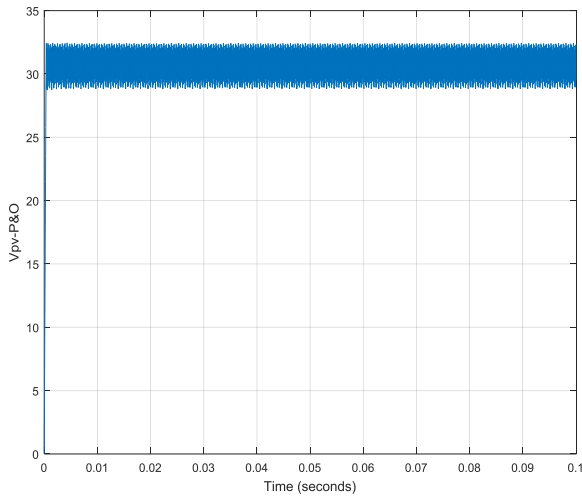


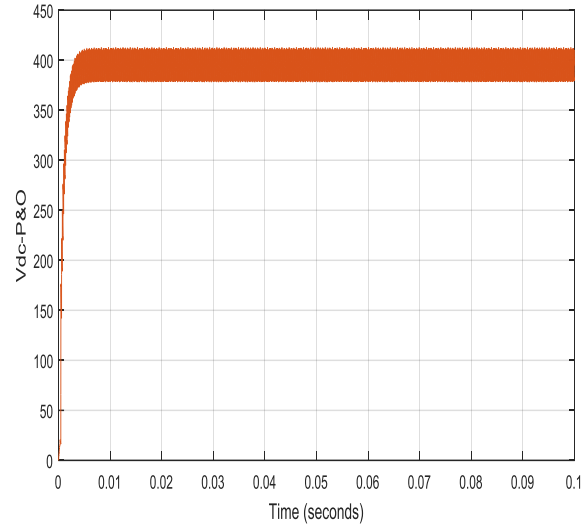
Figure 2-7 : Hacheur avec commande MPPT.

L'objectif était d'atteindre une tension de sortie de 400 V pour une tension d'entrée de 30 V. Ainsi, nous avons obtenu les résultats de simulation présentés ci-dessous :

- **Pour une MPPT de type P&O**



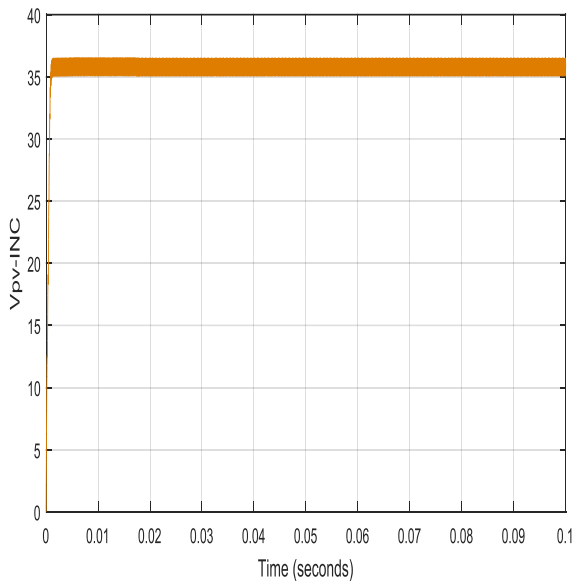
Tension à l'entrée de l'hacheur



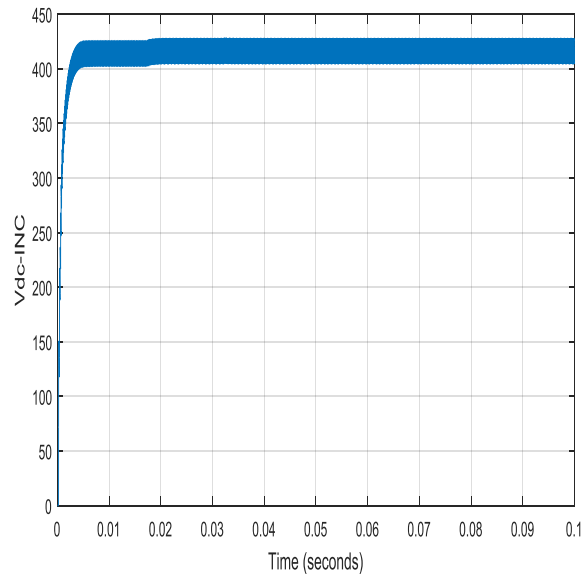
Tension à la sortie de l'hacheur

Figure 2-8 : Pour une MPPT de type P&O.

- **Pour une MPPT de type INC**



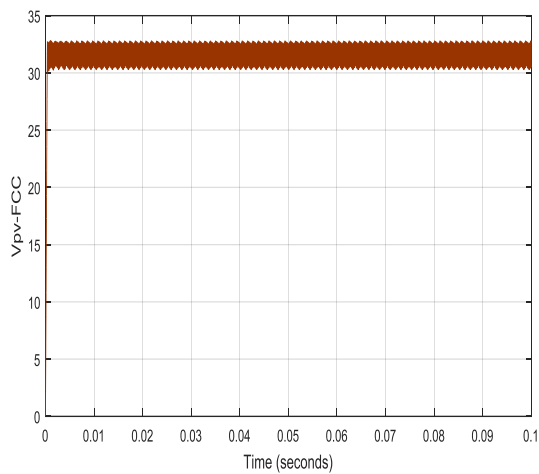
Tension à l'entrée de l'hacheur



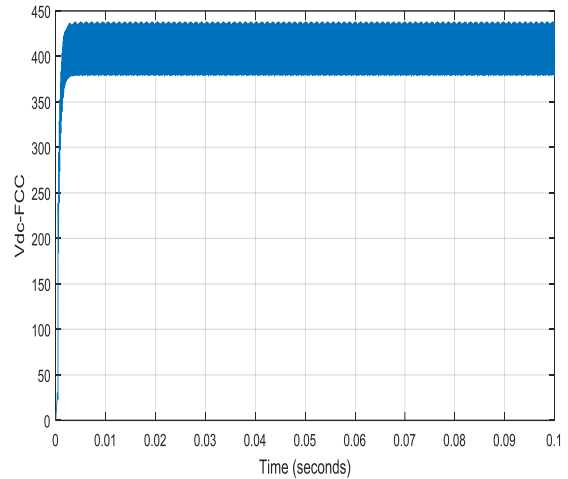
Tension à la sortie de l'hacheur

Figure 2-9 : Pour une MPPT de type P&O.

- **Pour une MPPT de type FCC**



Tension à l'entrée de l'hacheur



Tension à la sortie de l'hacheur

Figure 2-10 : Pour une MPPT de type FCC.

Nous remarquons de ces figures que la commande MPPT qui nous donne le meilleur résultat est de type INC et le résultat le plus rapide et celle de la commande FCC.

2.4 Convertisseur continue/alternatif (onduleur)

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance qui permet de délivrer une tension alternative à partir d'une source continue. La source de tension continue peut-être soit un aérogénérateur ou des panneaux solaires. Comme le hacheur, un onduleur dépend essentiellement de la nature de la source. Cela conduit à distinguer :

- Les onduleurs de tension, alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant, alimentés par une source de courant continue.

La structure d'un onduleur est généralement constituée d'interrupteurs d'électroniques de puissance à base IGBT ou MOSFET. Ils doivent répondre aux exigences de rendement élevé, de fiabilité et de simplicité d'installation. Concernant l'onduleur triphasé, il est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant qui sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en parallèle avec une diode. Parmi les éléments constituant la commande d'un onduleur nous avons :

- Hystérésis ou MLI :** La commande par hystérésis est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteinte la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. Concernant la technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI) qui est une technique couramment utilisée pour synthétiser des signaux sinusoïdaux à partir de signaux continus. Les circuits d'électronique de puissance qui se servent de cette technique sont très nombreux comme les onduleurs et les variateurs de vitesse. La méthode la plus classique consiste à comparer la modulante (le signal à synthétiser) à une porteuse en dent de scie, comme le montre la figure suivante :

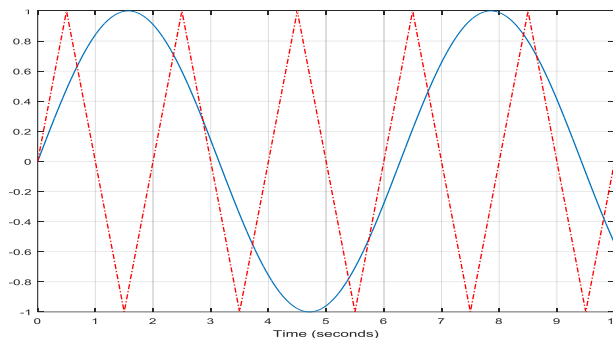


Figure 2-11 : Comparaison de la porteuse avec le signal en dent de scie.

Le signal de sortie vaut 1 si la modulante est plus grande que la porteuse, sinon 0 ; le signal de sortie change donc d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse

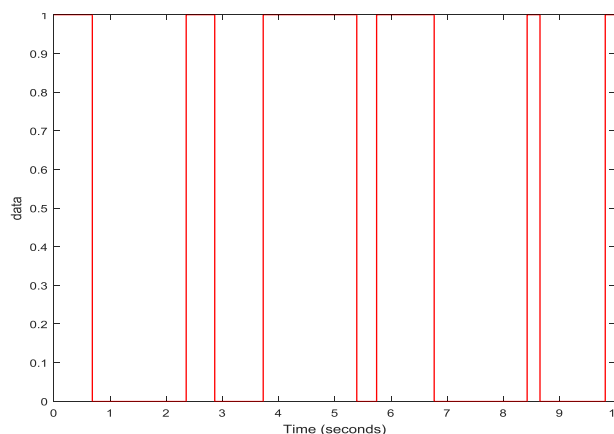


Figure 2-12 : Signal MLI résultant.

La technique de commande par MLI (commande par modulation de largeur d'impulsion) résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une

fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. Elle permet également d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant.

- PLL** : Historiquement, le principe de boucle à verrouillage de phase ou boucle à asservissement de phase (en anglais phase-locked loop) remonte aux années 1930 [9]. Il a été décrit par le physicien français Henri de Bellescize [9] qui en cherchant à améliorer les conditions de réception des radios signaux fortement noyés dans le bruit, a inventé le principe de la régulation automatique de phase. Depuis ce temps, les techniques de PLL n'ont cessé de croître et d'être exploités dans plusieurs domaines des télécommunications et la télédétection. Dans les applications réseau électrique, la PLL sert à estimer et filtrer la phase et l'amplitude instantanée du phaseur équivalent d'un système triphasé. La boucle à verrouillage de phase est aujourd'hui l'un des composants les plus répandus dans le domaine traitement du signal ainsi que cette technique a été utilisée pour synchroniser les convertisseurs raccordés au réseau électrique, c'est pourquoi l'information de phase de fréquence de la tension du réseau est nécessaire.

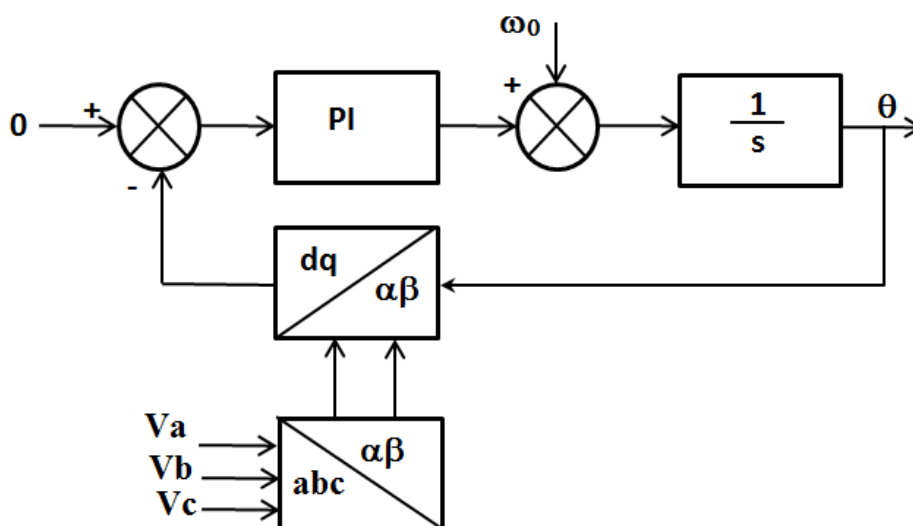


Figure 2-13 : Bloc diagramme de PLL.

Afin voir si la PLL fonctionne correctement, nous avons introduit dans la simulation trois signaux sinusoïdaux équilibrés donnés par l'expression suivante :

$$v_k(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t - \frac{2(k-1)\pi}{3}) \quad (2.5)$$

Nous obtenons alors après simulation la figure de la position angulaire (ωt) estimé :

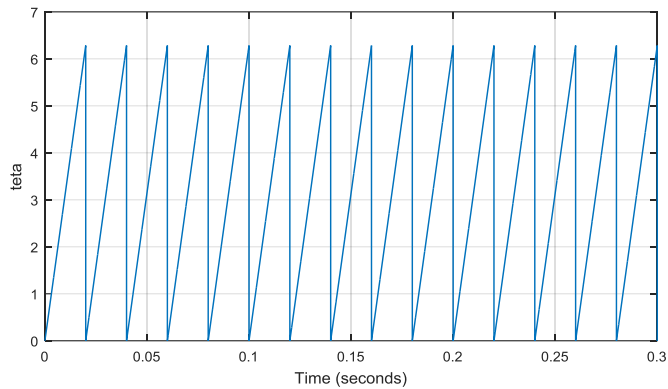


Figure 2-14 : signal de ωt estimé

Ensuite, nous avons réalisé une simulation du système photovoltaïque complet dans les conditions normales, comme il est représenté dans la figure suivante :

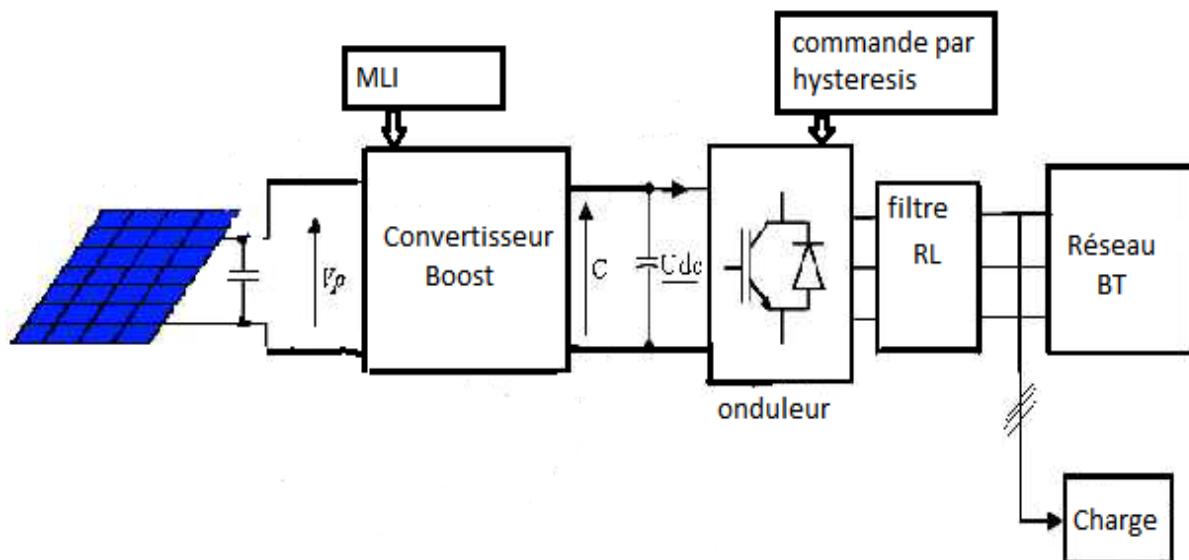
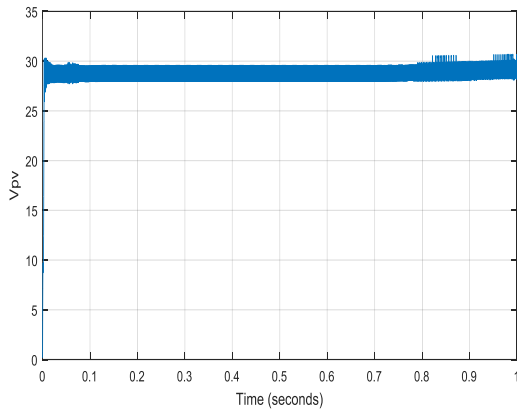
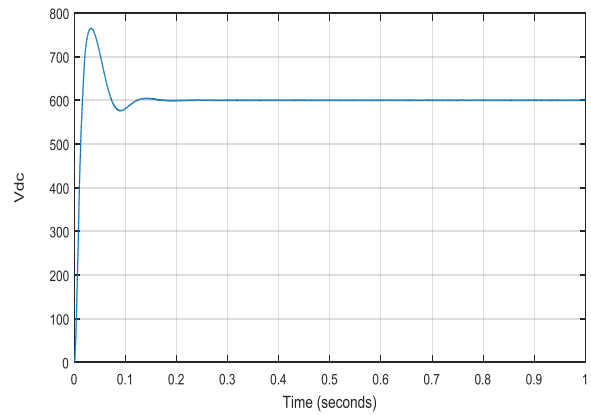


Figure 2-15 : Schéma proposé d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique.

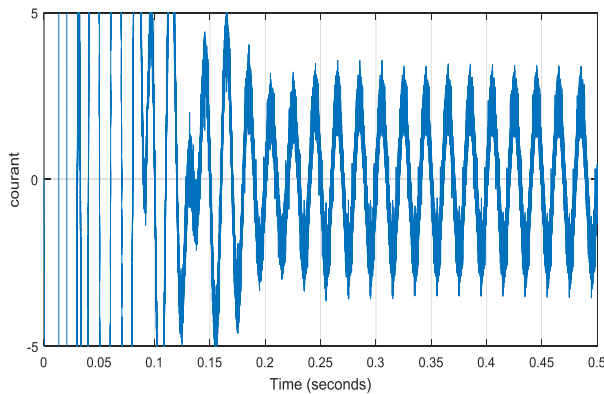
Après simulation nous avons obtenu les résultats suivants :



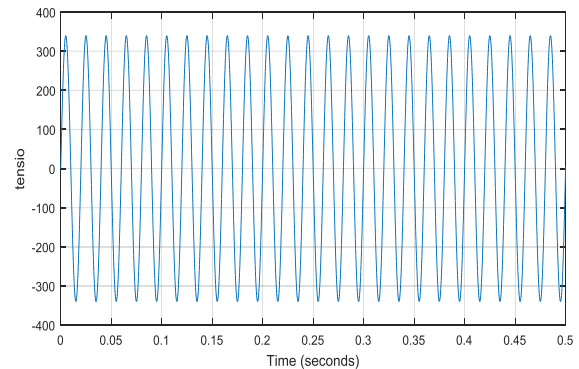
a-Tension à la sortie du panneau solaire



b- Tension à la sortie de l'hacheur



c- Tension à la sortie de l'onduleur



d- Courant à la sortie de l'onduleur

Figure 2-16 : Résultat de simulation du système photovoltaïque complet dans les conditions normales.

Nous remarquons de cette simulation que le système panneau photovoltaïque – hacheur – onduleur connecté au réseau électrique et alimentant une charge linéaire nous donne des signaux de tension et de courant correcte

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents composants constituant le système photovoltaïque couplé au réseau électrique tel que les convertisseurs (continu-continu) et l'onduleur (convertisseur continu-alternatif). Dans la première partie, nous avons présenté le hacheur élévateur et les différentes techniques utilisées pour extraire la puissance maximale disponible qui est influencée par l'irradiation et la température. La commande de ces convertisseurs s'effectue par une variation du rapport cyclique du signal de commande de l'interrupteur qui est déduit de l'algorithme

du MPPT. Dans la deuxième partie, nous avons présenté la théorie de base d'un onduleur qui est un convertisseur continu-alternatif, dans cette partie il a également été question de synchronisation de l'onduleur avec le réseau de distribution. Le recours à des circuits PLL est la façon la plus moderne et appropriée d'assurer ce synchronisme. Les résultats de simulation nous ont montré le fonctionnement du système complet panneau photovoltaïque – hacheur – onduleur connecté au réseau électrique et alimentant une charge linéaire

Chapitre 3

Etude et simulation de la robustesse des commandes pour les systèmes incertains et/ou en présence des perturbations dans le réseau électrique.

Introduction

L'énergie produite à l'aide de panneaux photovoltaïques est une source d'énergie renouvelable, propre et illimitée qui représente une alternative énergétique viable pour la production d'électricité. Son potentiel est très important à l'échelle du besoin de l'activité humaine, il est aussi très largement réparti sur l'ensemble du globe ce qui lui confère un intérêt partagé par tous. Avec la diminution du prix des modules photovoltaïques (PV) et l'augmentation du prix des énergies fossiles, l'exploitation de cette ressource devient viable et rentable.

Dans le but d'étudier la stabilité de notre système photovoltaïque nous allons injecter des perturbations due à des charges non linéaires qui sont caractérisée par une pollution harmonique, la présence d'énergie réactive ou des déséquilibres, et/ ou prendre en considération les composants qui contiennent des incertitudes tels que les résistances, les capacités et les inductances (R, L, C).

Ainsi, dans ce chapitre nous allons montrer lors de présence d'incertitude de composant passif et de perturbation dans le réseau électrique, si notre commande du système photovoltaïque fonctionne correctement et qu'elles sont les parties que nous pouvons améliorer afin que cette même commande fonctionne correctement en présence de perturbation.

3.1 Système photovoltaïque Proposé

Le système que nous proposons pour l'étude à déjà été présenté dans le chapitre 2 et qui est comme suite :

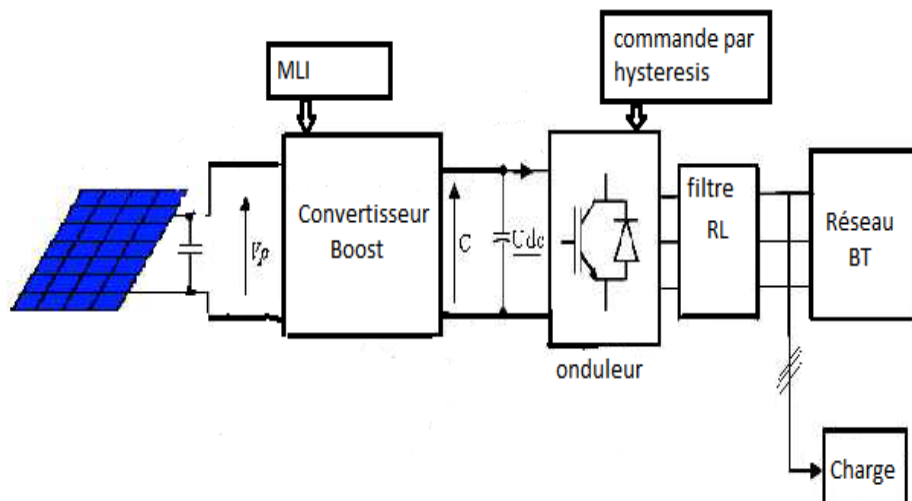


Figure 3-1 : Schéma proposé d'un système photovoltaïque relié au réseau électrique.

Le modèle global de notre système photovoltaïque représenté par cette figure est constitué :

- **D'un panneau photovoltaïque :** Formé de 60 cellules mises en série. Nous avons étudié l'influence des paramètres extérieurs, par exemple l'influence d'éclairement sur la caractéristique (courant-tension) et cela dans le premier chapitre.
- **D'un convertisseur Boost (Continu- Continu) :** Ce convertisseur est connu par le nom d'élévateur de tension, qui est l'étage d'adaptation (Continu- Continu) entre le panneau et la charge de sortie. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant à stocker de l'énergie ou une charge. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande (MPPT) (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le point de puissance maximal (PPM) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque [10]. Nous avons étudié les différents types de MPPT pour cette structure dans le deuxième chapitre.
- **D'un convertisseurs Continu-Alternatif :** Ils sont relativement peu nombreux ; Ils se distinguent principalement par la nature de l'étage continu et par le nombre de phases de la source alternative. Si l'étage continu est vu comme étant une source de courant, les convertisseurs continu-alternatif associés sont des onduleurs de courant. Si l'étage continu est vu comme étant une source de tension, les convertisseurs continu-alternatif associés sont des onduleurs de tension. Le plus souvent, on utilise deux ou trois phases [11]. Dans notre travail on va utiliser l'onduleur de tension a trois phases. Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle au réseau et le faire fonctionner comme une source de courant, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive (L ou LCL). La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau. Et d'autre part de réduire la dynamique du courant, de façon à le rendre plus facile à contrôler. Le filtre de type (L) permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation. Pour obtenir cela, la valeur de cette inductance doit être relativement élevée [12]. Nous avons également montré le fonctionnement de l'onduleur dans le chapitre 2.
- **Et du réseau électrique :** qui représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude $V_r = 230 \text{ V}$ et de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$. Le système photovoltaïque complet et des charges linéaires et/ non linéaire sont connecté à ce réseau électrique.

3.2 Tension de raccordement

Le producteur communique au gestionnaire du réseau public de distribution d'électricité les caractéristiques techniques de l'installation de production et de la demande qui sont nécessaires pour la définition du raccordement. Les éléments justificatifs attestant sont :

- L'aptitude de l'installation de production doit fonctionner dans les conditions normales de tension et de fréquence (la tension au point de livraison ne s'écarte pas de la tension contractuelle de plus ou de moins 5 % et la fréquence doit être comprise entre 49,5 Hz et 50,5 Hz) rencontrées sur le réseau public de distribution d'électricité sans limitation de durée.
- L'aptitude de l'installation de production doit rester en état de fonctionnement lorsque la fréquence ou la tension sur le réseau public de distribution d'électricité atteint des valeurs exceptionnelles pendant des durées limitées.

Par contre le gestionnaire du réseau public de distribution d'électricité identifie l'éventuel impact que le raccordement de l'installation de production pourrait avoir sur :

- L'intensité maximale admissible dans les ouvrages du réseau public de distribution d'électricité.
- Le pouvoir de coupure des disjoncteurs, la tenue thermique et la tenue aux efforts électrodynamiques des ouvrages du réseau public de distribution d'électricité ainsi que, d'une façon générale, sur le fonctionnement des dispositifs de protection de ce réseau.
- Le pouvoir de coupure des disjoncteurs, la tenue thermique et la tenue aux efforts électrodynamiques des ouvrages du poste de livraison de l'installation de production à raccorder.
- Le pouvoir de coupure des disjoncteurs, la tenue thermique et la tenue aux efforts électrodynamiques des ouvrages des postes de livraison des autres utilisateurs du réseau public de distribution d'électricité déjà raccordés.
- Le niveau de la tension au point de livraison de l'installation de production.
- Le niveau de la tension aux points de livraison des autres utilisateurs du réseau public de distribution d'électricité déjà raccordés, y compris les postes HTA/BT ;
- Le fonctionnement du plan de protection du réseau public de distribution d'électricité.
- Le fonctionnement de la transmission des signaux tarifaires.

3.3 Systèmes photovoltaïque couplé au réseau BT

Les onduleurs photovoltaïques comportent deux étages de réglage et souvent deux étages de conversion. Les systèmes photovoltaïques produisant un courant continu, la connexion au réseau électrique rend nécessaire un étage de conversion continu/alternatif parfois un seul convertisseur assure les deux réglages usuels : l'extraction du maximum de puissance et l'injection au réseau de courants sinusoïdaux. Mais on se prive ainsi de degrés de la liberté du fait qu'il n'y a qu'un seul étage de conversion. C'est pour cela que la plupart de structures industrialisées comportent deux étages de conversion : une structure continu/continu souvent un hacheur parallèle (boost) et une structure continu/alternatif souvent un onduleur de tension. (Figure (3.1)). L'onduleur couplé au réseau doit surveiller tous les perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau. Il existe plusieurs types d'étage d'adaptation. Dans le chapitre 2, nous avons présenté une liste des schémas correspondant à l'application photovoltaïque. Le type d'hacheur parallèle (Boost) est souvent choisi.

Cette partie présente le développement d'une commande global de l'onduleur de tension pour régler le courant sortie et la tension du bus continu, laquelle comporte :

- Une boucle a verrouillage de phase (PLL : Phase locked Loop) pour la synchronisation avec la tension du réseau.
- Une boucle de réglage de la tension du bus continu laquelle impose la référence du courant à injecter au réseau
- Une boucle de poursuite de courant réseau désiré.

La figure suivante représente le système photovoltaïque détaillée constitué d'un panneau solaire branché a un onduleur par l'intermédiaire d'un hacheur, d'une charge linéaire et/ou non linéaire et du réseau électrique.

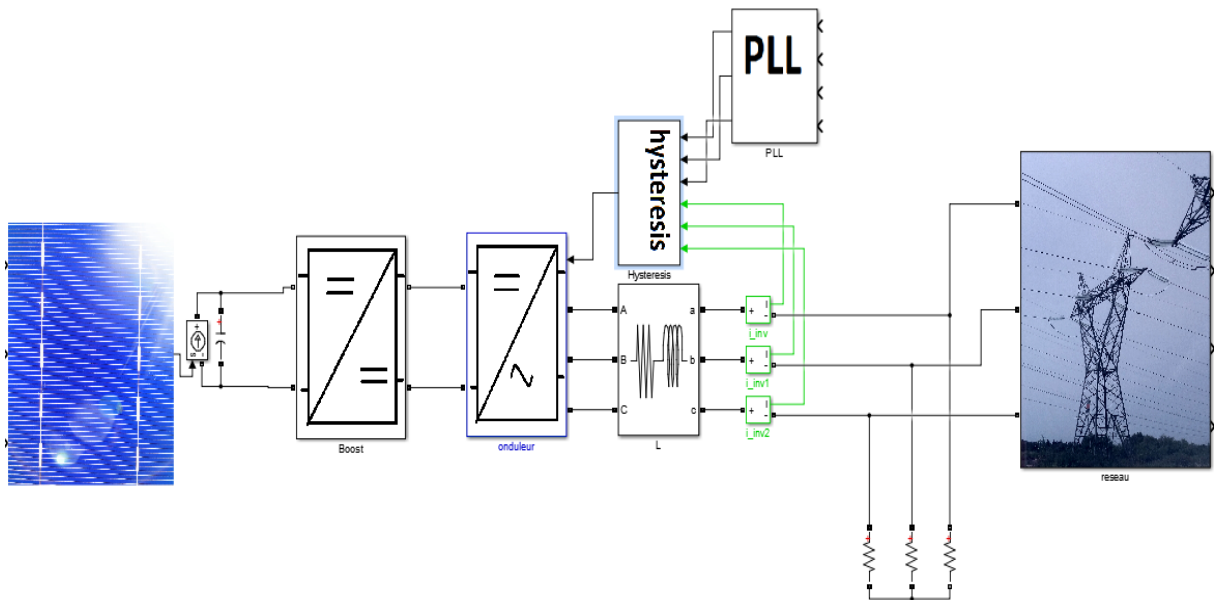


Figure 3-2 : Schéma globale du système photovoltaïque raccordé au réseau.

3.3.1 Principe de la PLL

Pour notre commande de notre onduleur un des éléments clé de cette commande est l'utilisation d'une PLL (Phase Lock Loop). Il existe plusieurs structures de P.L.L, mais quel que soit les différences existantes entre les structures tous comprennent toujours trois blocs qui sont : le détecteur de phase (DP) ; le correcteur et l'oscillateur de commande en tension (OCT) comme le montre la **Figure (3-3)**.

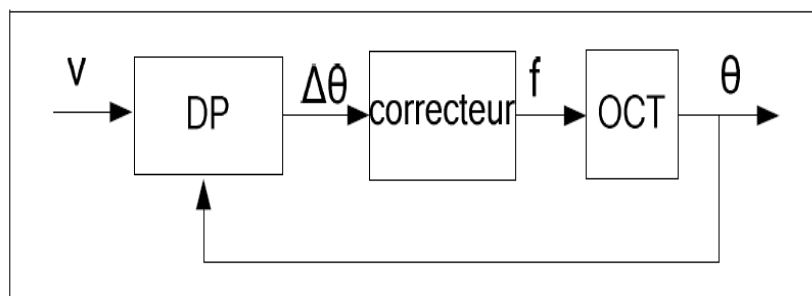


Figure 3-3 : Principe commun de PLL.

Les techniques avancées de la P.L.L porte sur une recherche une poursuite robuste de la phase du réseau malgré l'existence des perturbations. Les principales perturbations sont : saut de phase, creux de tension, harmonique et saut de fréquence.

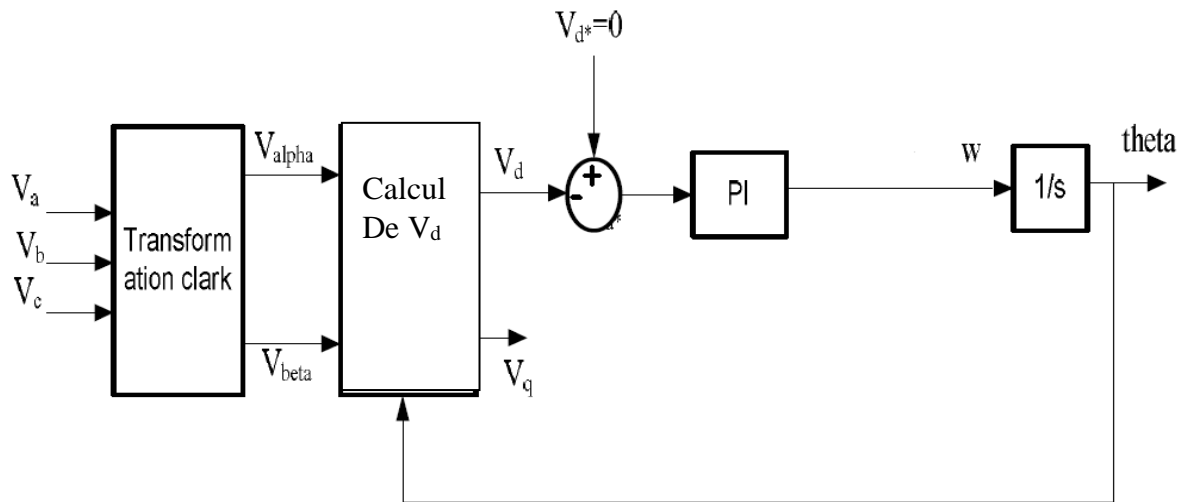
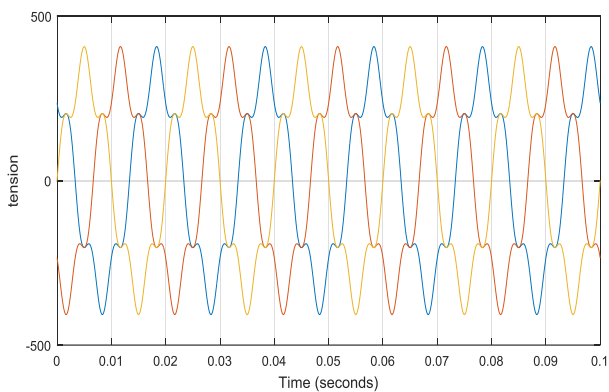


Figure 03-4 : Structure de principe d'une PLL triphasée.

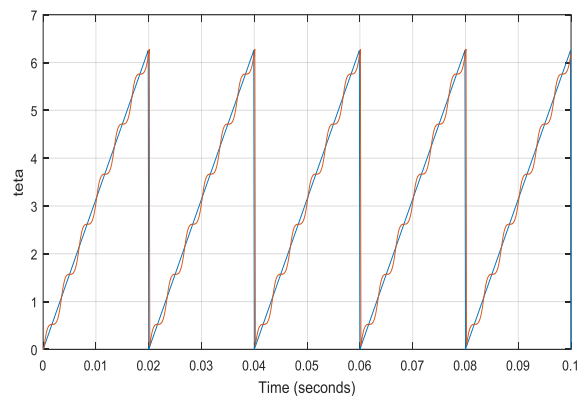
Ainsi, afin de valider notre P.L.L lors de la présence de perturbation nous avons fait les tests suivant :

- **Test 1 : Présence d'harmonique**

Nous avons simulé notre P.L.L en présence d'harmonique, nous avons obtenu les résultats suivants :



a-Tension harmoniques dans les trois phases



b- Position angulaire estimé ωt

Figure 03-5 : Simulation de la P.L.L lorsque nous avons des tensions harmoniques.

Nous remarquons que lorsqu'il y a une perturbation harmonique dans la tension la P.L.L ne fonctionnent plus correctement, ce qui engendre un mauvais fonctionnement de la commande notre onduleur du fait qu'il n'arrive pas à générer des signaux sinusoïdaux correctement.

Pour résoudre ce problème nous avons décidé d'introduire un filtre multi variable après la transformation de Concordia

- **Test 2 : Lors d'un déséquilibre**

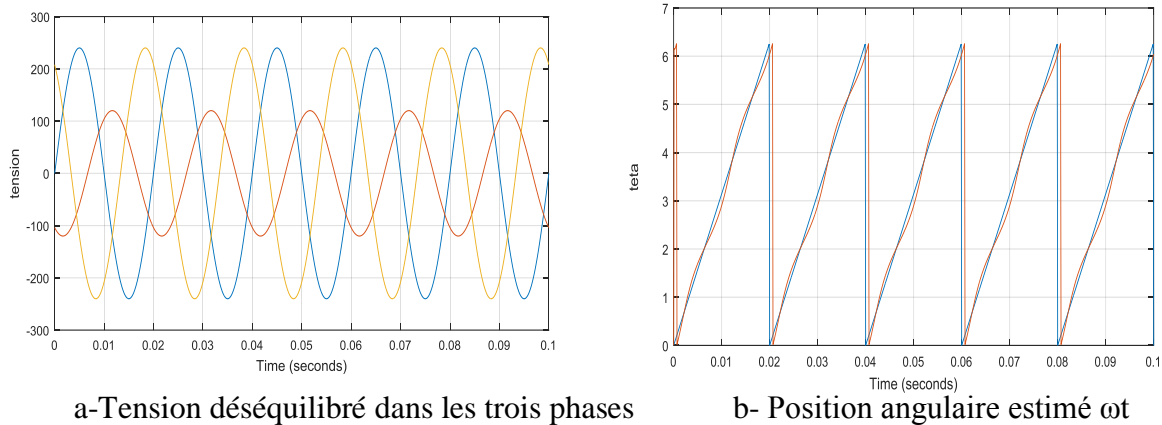


Figure 03-6 : Simulation de la P.L.L. lorsque nous avons un déséquilibre de tension.

Ainsi, nous remarquons de ces figures que lors de perturbation, la P.L.L. ne fonctionne pas correctement pour résoudre ce problème-là, nous avons décidé d'introduire un filtre multivariable qui permet de rejeter ces perturbations. Ce filtre d'extraction dit multi-variable (FMV) a été développé par [8]. Son principe est de calculer la fonction de transfert de l'intégrale d'une fonction dans le référentiel lié au synchronisme, son expression est donnée comme suite :

$$\text{Soit : } V_{xy}(t) = e^{j\omega t} \int e^{-j\omega t} U_{xy}(t) \quad (3.1)$$

La transformée de Laplace de l'équation (3.1) nous donne la fonction de transfert suivante :

$$H(s) = \frac{V_{xy}}{U_{xy}} = \frac{s+j\omega_c}{s^2+\omega_c^2} \quad (3.2)$$

En Introduisons maintenant deux constantes K1 et K2 dans (3.2) :

$$H(s) = \frac{V_{xy}}{U_{xy}} = K_2 \frac{(s+K_1)+j\omega_c}{(s+K_1)^2+\omega_c^2} \quad (3.3)$$

Ainsi, il est possible de réécrire la fonction de transfert (3.3) sous la forme :

$$H(s) = \frac{V_{xy}}{U_{xy}} = K \frac{(s+K)+j\omega_c}{(s+K)^2+\omega_c^2} \quad (3.4)$$

Avec : $K = K_1 = K_1$

En remplaçant V_{xy} par $\hat{x}_{\alpha\beta}(s)$, et U_{xy} par avec $x_{\alpha\beta}(s)$, nous obtenons les deux expressions suivantes après un simple développement :

$$\begin{aligned} \hat{x}_\alpha(s) &= \frac{K(s+K)}{(s+K)^2+\omega_c^2} x_\alpha(s) - \frac{K\omega_c}{(s+K)^2+\omega_c^2} x_\beta(s) \\ \hat{x}_\beta(s) &= \frac{K(s+K)}{(s+K)^2+\omega_c^2} x_\beta(s) + \frac{K\omega_c}{(s+K)^2+\omega_c^2} x_\alpha(s) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Ce qui nous donne pour terminer :

$$\begin{aligned} \hat{x}_\alpha(s) &= \frac{K}{s} (x_\alpha(s) - \hat{x}_\alpha(s)) - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_\beta(s) \\ \hat{x}_\beta(s) &= \frac{K}{s} (x_\beta(s) - \hat{x}_\beta(s)) + \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_\alpha(s) \end{aligned} \quad (3.6)$$

De là, nous obtenons le schéma du filtre multi-variable suivant :

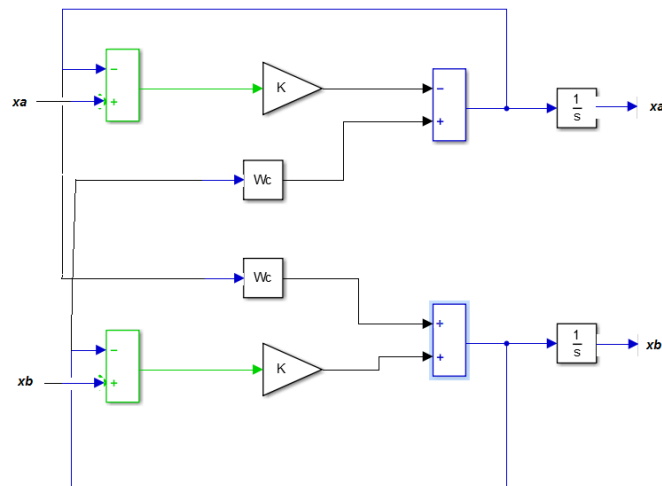


Figure 03-7 : Schéma d'un filtre multi variable.

Donc le schéma complet de notre P.L.L à base du filtre multi variable est donné par le schéma suivant :

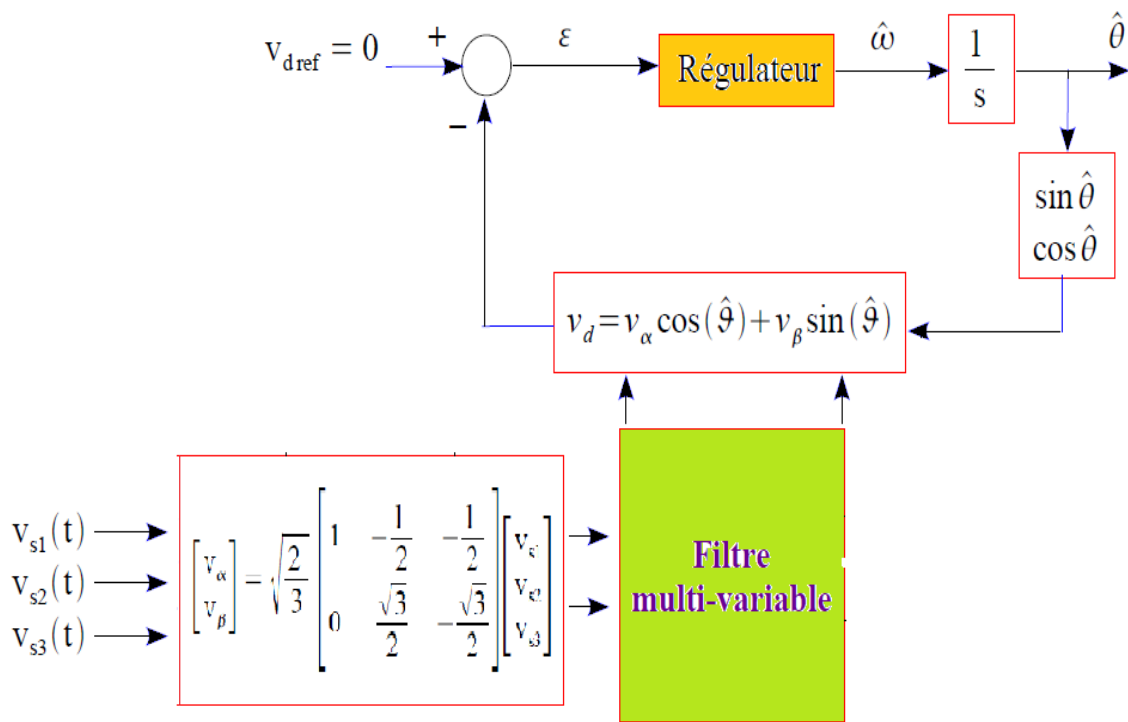
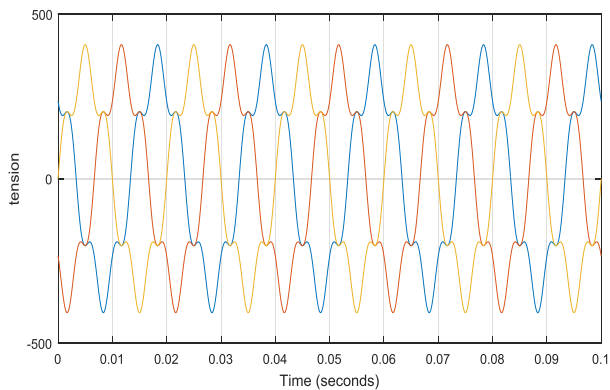


Figure 03-8 : Schéma de la P.L.L incluant le filtre multi variable.

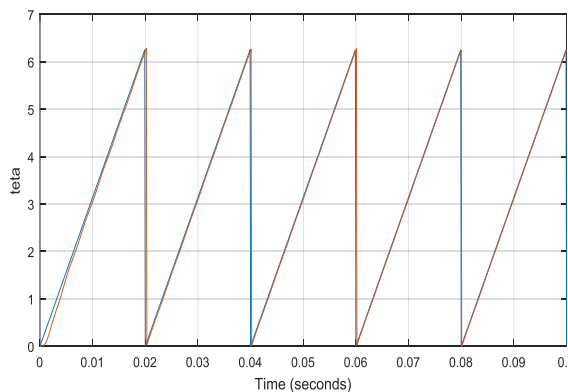
Afin de valider notre nouvelle P.L.L à base du filtre multi variable lors de la présence de perturbation nous avons fait les tests suivant :

- **Test 1 : Présence d’harmonique**

Nous avons simulé notre P.L.L à base du filtre multi variable en présence d’harmonique, nous avons obtenu les résultats suivants :



a-Tension harmoniques dans les trois phases

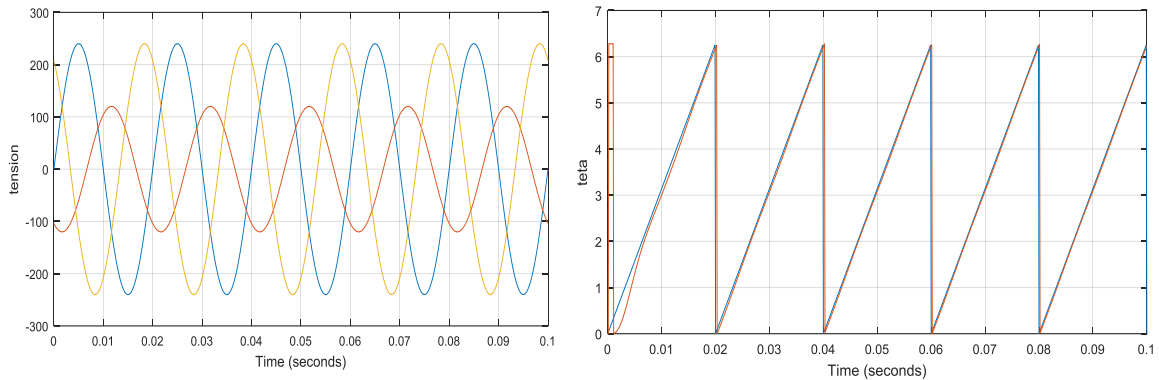


b- Position angulaire estimé ωt

Figure 03-9 : Simulation de la P.L.L avec FMV lorsque nous avons des tensions harmoniques.

Nous remarquons que lorsqu'il y a une perturbation harmonique dans la tension la P.L.L. correctement car il a rejeté les harmoniques.

- **Test 2 : Lors d'un déséquilibre**



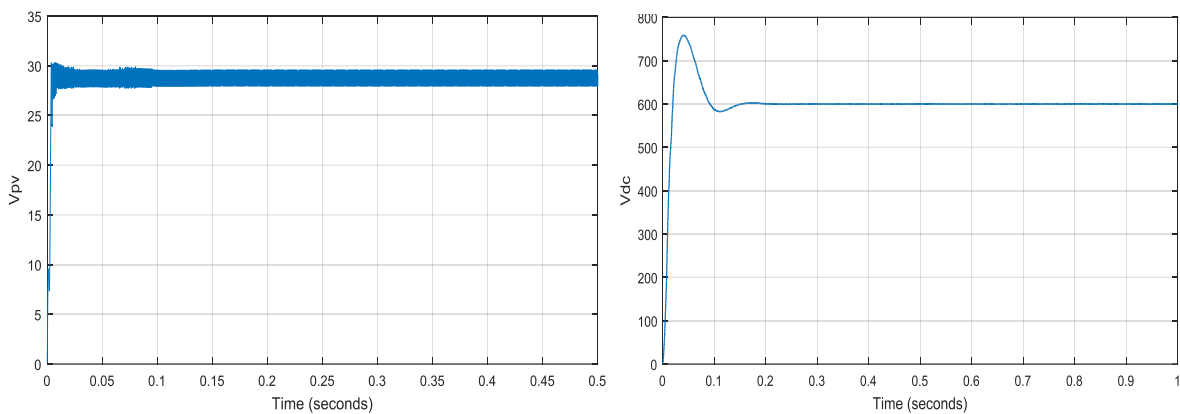
a-Tension déséquilibré dans les trois phases

b- Position angulaire estimé ωt

Figure 3-10 : Simulation de la P.L.L avec FMV lorsque nous avons un déséquilibre de tension.

Nous remarquons également que lorsqu'il y a un déséquilibre de tension, nous avons alors la P.L.L. qui réagit correctement.

Pour valider l'efficacité de notre P.L.L nous l'avons introduit dans notre système photovoltaïque complet. Après simulations nous obtenons les figures suivantes :



a-Tension à la sortie du panneau solaire

b- Tension à la sortie du hacheur

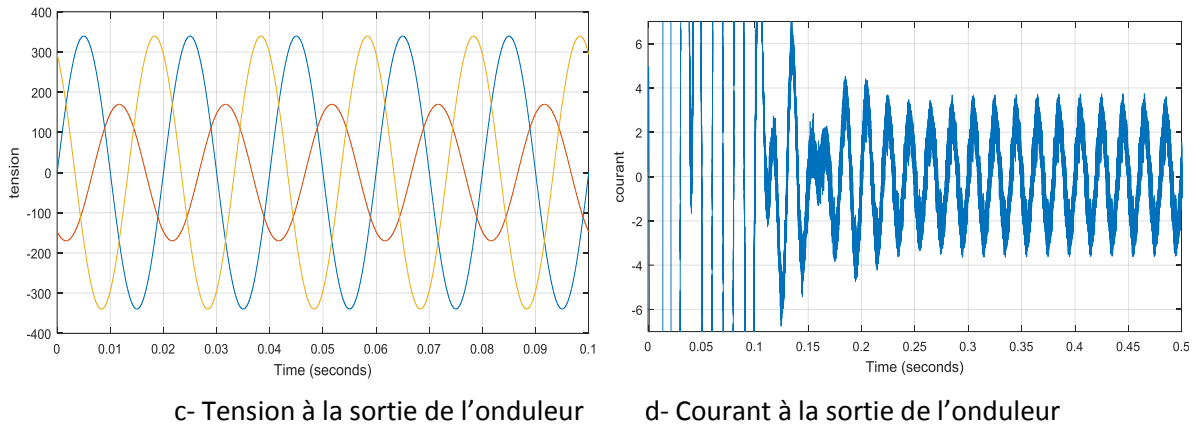


Figure 3-11 : Résultat de simulation du système photovoltaïque complet lors d'un déséquilibre de tension.

Nous remarquons de ces simulations que malgré un déséquilibre de tension nous avons toujours un fonctionnement correct de notre système photovoltaïque.

3.3.2 Commande de la tension V_{dc} partie onduleur

Le deuxième composant qui peut affecter le bon fonctionnement de notre onduleur et la régulation du condensateur. Un correcteur PI est utilisé pour déterminer I_{L_ref} dont les coefficients K_p et K_i sont calculés comme suit :

L'équation du condensateur C est donnée comme suite :

$$C \cdot \frac{dV_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_L \quad (3.7)$$

En appliquant la transformée de Laplace de l'équation (3.7), on obtient la fonction de transfert du modèle en petits signaux :

$$\frac{V_{pv}(S)}{i_L(S)} = \frac{-1}{C \cdot S} \quad (3.8)$$

Avec un correcteur PI de fonction de transfert : $R(s) = \frac{K_p \cdot S + K_i}{s}$, la fonction de transfert de la boucle fermée (FTBF) s'écrit :

$$FTBF(S) = \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} \cdot S}{1 + \frac{K_p}{K_i} \cdot S - \frac{C}{K_i} \cdot S^2} \quad (3.9)$$

Les paramètres K_i et K_p peuvent être obtenus par identification du dénominateur de FTBF avec la forme normalisée $S^2 + 2\xi\omega_n.S + \omega_n^2$, on aura donc :

$$\begin{cases} K_i = \frac{Cs}{T^2} \\ K_p = \frac{2\xi.C}{T} \end{cases} \quad (3.10)$$

Avec $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$ et On veut un temps de réponse $T=10ms$ ou bien d'où $\omega=1/T$.

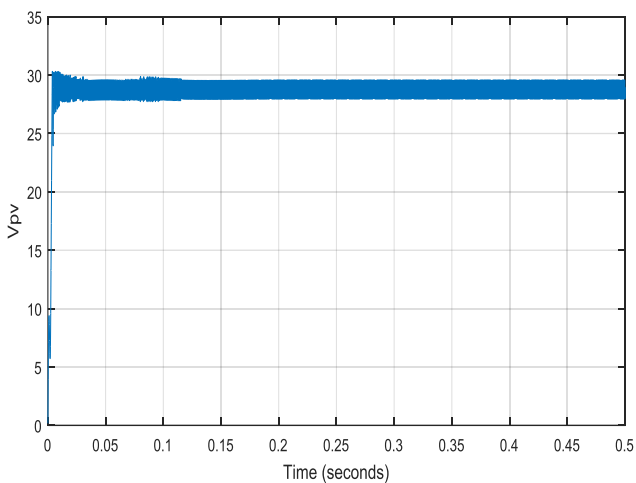
En remplaçant K_i et K_p dans (4.3) nous obtenons :

$$R(s) = \frac{2.\xi.\omega.C.S + \omega^2.C}{s} \quad (3.11)$$

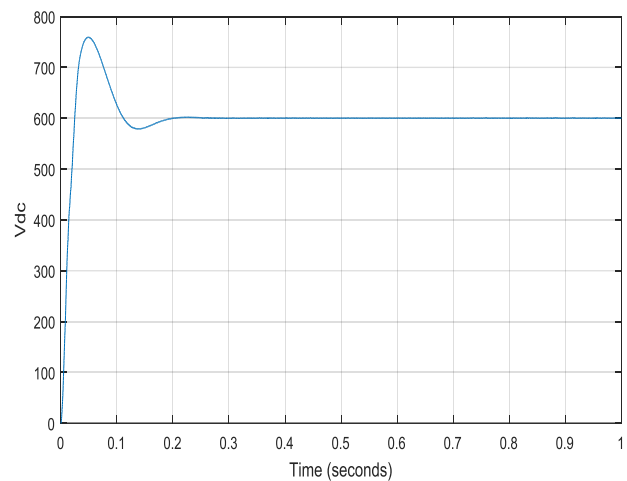
Pour $C = 550\mu F$ après discrétisation du régulateur avec une fréquence d'échantillonnage $T_s = 0.1ms$ nous obtenons :

$$R(s) = \frac{23.33z - 26.17}{z-1} \quad (3.12)$$

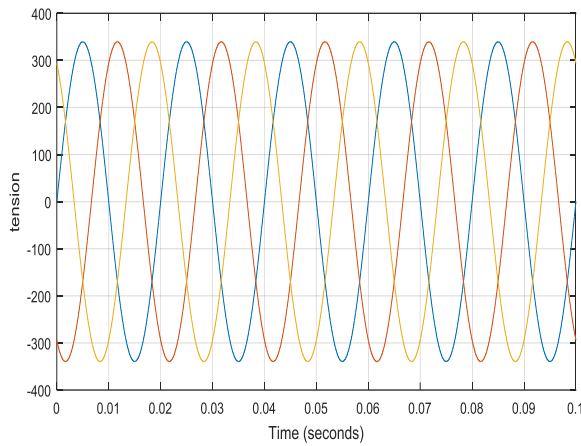
Pour voir le fonctionnement de notre régulateur PI nous allons l'introduire dans notre système photovoltaïque complet. Nous considérons que notre condensateur à une valeur de $C = 550\mu F + 50\%$. Ce qui nous donne une valeur de $C = 825\mu F$. Les simulations nous donnent les résultats suivants :



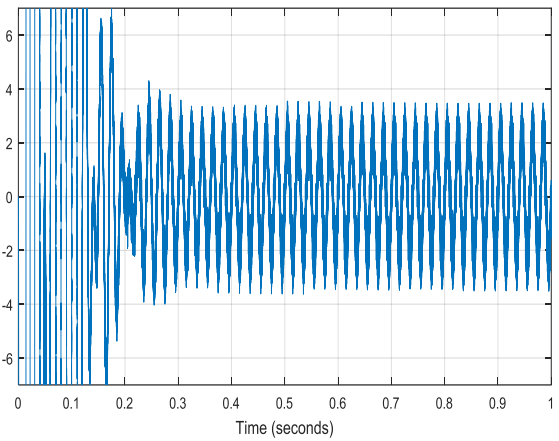
a-Tension à la sortie du panneau solaire



b- Tension à la sortie du hacheur



c- Tension à la sortie de l'onduleur



d- Courant à la sortie de l'onduleur

Figure 3-12 : Résultat de simulation du système photovoltaïque complet lorsque $C = 825\mu f$.

Nous remarquons que le régulateur fonctionne bien car il converge vers sa référence.

Nous proposons d'utiliser également un autre régulateur beaucoup plus robuste car il prend en compte les incertitudes dès le début de son dimensionnement. Ce régulateur utilise la méthode CRONE (commande robuste d'ordre non entier). Le schéma block de commande par régulateur CRONE est donné par la figure suivante :

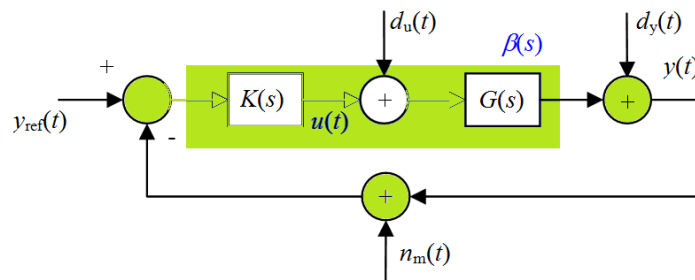


Figure 3-13 : Schéma de la boucle de commande.

La propriété de robustesse d'un régulateur se traduit par la conservation des différentes performances de la boucle d'asservissement lors de l'implémentation de $K(s)$ sur l'ensemble des fonctions ou matrices de transfert $G(s)$. La particularité de la commande CRONE est la recherche de la robustesse du degré de stabilité là où d'autres lois de commande ne recherchent que la robustesse de la stabilité. La robustesse du degré de stabilité est une robustesse plus sévère que la robustesse de la stabilité seule et on s'intéressera au maintien de la performance dynamique que constitue le facteur de résonance ou le facteur d'amortissement en asservissement vis-à-vis des variations paramétriques du procédé. Les facteurs de résonance et le coefficient d'amortissement en asservissement sont en effet généralement liés au premier dépassement réduit de la réponse libre ou

indicielle en asservissement et donc permettent une estimation de la robustesse du degré de stabilité des systèmes bouclés sans qu'aucune simulation temporelle ne soit nécessaire.

Considérons le schéma de commande élémentaire donné par la Figure (3-13), dans le contexte de la robustesse du degré de stabilité, précisons la nature des variations de phase qui contribuent à celles de la marge de phase M_ϕ . Les variations de la marge de phase M_ϕ peuvent résulter :

- Des variations de la phase du procédé à la fréquence au gain unité en boucle ouverte ω_u .
- Des variations de la phase du régulateur autour de la fréquence ω_u .

Une façon de rendre robuste le degré de stabilité de la commande vis-à-vis des variations des paramètres du procédé, consiste notamment à réduire les variations de la marge de phase M_ϕ . Ceci pourra se faire soit en diminuant les variations de phase dues au régulateur Figure (3.14), soit en faisant en sorte que le produit $G(s)K(s)$ c'est-à-dire la fonction de transfert de la boucle ouverte, ait une phase constante quel que soit l'état paramétrique du procédé. Cette idée est à la base des deux premières générations de la commande CRONE.

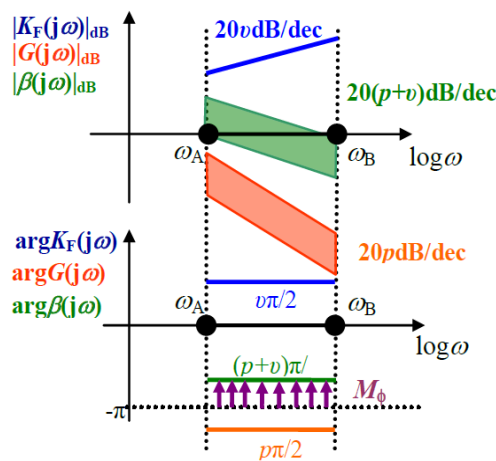


Figure 3-14 : Diagramme de Bode du régulateur, du procédé et de la boucle ouverte.

La stratégie la plus immédiate pour rendre robuste la boucle fermée de la Figure (3.13) est de choisir une pulsation ω_u se situant dans une plage de fréquence où les variations de phase du procédé ne sont pas excessives et de réduire au maximum les variations de phase du régulateur. En adoptant cette stratégie, la variation de la marge de phase ne sera plus qu'égale à la variation de la phase du procédé. La Figure (3-14) illustre le cas où la variation de la pulsation ω_u dans la plage de fréquence $[\omega_A, \omega_B]$ est due à une variation du gain du procédé

G(S). La recherche d'un régulateur CRONE à phase constante K(s) définit l'approche initiale de la commande CRONE qu'utilise, notamment, la commande CRONE de première génération. Le régulateur CRONE défini par la transmittance d'ordre non entier réel bornée en fréquence :

$$R(s) = C_0 \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_b}} \right)^n \quad (3.13)$$

Le calcul des paramètres du régulateur CRONE de première génération se fait en suivant l'algorithme :

- Calcul du degré de la Boucle Ouverte :

$$m = (180 - \text{PMd})/90 \quad (3.14)$$

Avec PMd : Marge de phase désirée

- Variation du gain autour de ω_u :

$$\delta G = ||G1(\omega_u)|_{\text{db}} - |G2(\omega_u)|_{\text{db}}| \quad (3.15)$$

- La Pente désirée :

$$P_d = 20 \times m \quad (3.16)$$

- Nombre de décades pour garder la pente désirée :

$$x = \frac{\delta G}{P_d} \quad (3.17)$$

- Distance entre ω_A et ω_B :

$$D = 10^x \quad (3.18)$$

- Calcul de ω_A et ω_B :

$$\omega_A = \frac{\omega_u}{\sqrt{D}} \quad (3.19)$$

$$\omega_B = \omega_u \times \sqrt{D} \quad (3.20)$$

- Calcul de ω_b et ω_h :

$$\omega_b = \frac{\omega_A}{10} \quad (3.21)$$

$$\omega_h = \omega_B \times 10$$

- Calcul du degré du correcteur n :

$$n = \frac{(-90m - \text{ArgGn}(\omega_u))}{\left(\arctg\left(\frac{\omega_u}{\omega_b}\right) - \arctg\left(\frac{\omega_u}{\omega_h}\right) \right)} \quad (3.22)$$

$$\text{Si} \begin{cases} n \geq 1 \\ \text{où} \\ n \leq 0 \end{cases}$$

Donc l'ordre du correcteur est hors des limites, cette génération ne peut pas corriger ce système il faut passer à la deuxième génération.

Si non il faut trouver les paramètres de la version idéal du régulateur CRONE donnée par :

$$C_0 = \frac{1}{|G_n(\omega_u)|} \times \sqrt[n]{\left(\frac{1 + \left(\frac{\omega_u}{\omega_h}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega_u}{\omega_b}\right)^2}\right)} \quad (3.23)$$

Fonction de Transfert du correcteur CRONE version idéal :

$$R(s) = C_0 \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_b}} \right)^n$$

Les paramètres de la fonction de Transfert version réelle du correcteur CRONE sont donné par :

$$N = \text{round} \left(\frac{\log_{10} \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)}{\log_{10}(5)} \right) \quad (3.24)$$

$$\alpha = \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{n}{N}}$$

$$\beta = \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{1-n}{N}}$$

Distribution récursive de poles et zeros :

$$R_{r\acute{e}el}(s) = \prod_{i=1}^N \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega'_i}}{1 + \frac{s}{\omega_i}} \right)$$

Avec :

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_b \sqrt{\beta} \\ \omega'_1 = \alpha \times \omega_1 \end{cases} \quad \text{et :} \quad \begin{cases} \omega'_{i+1} = (\alpha\beta)^i \times \omega'_1 \\ \omega_{i+1} = (\alpha\beta)^i \times \omega_1 \end{cases}$$

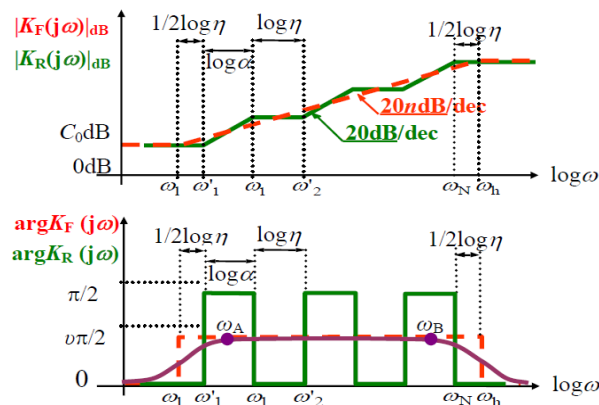


Figure 3-15 : Réponse fréquentielle de la version fractionnaire de KF et réelle KR d'un Régulateur CRONE à phase constante d'ordre non entier.

La particularité de la commande CRONE de première génération se situe dans l'apport de phase constante par le régulateur représenté par la figure (3-15) dans la plage de fréquence où est susceptible d'évoluer la pulsation au gain unité en boucle ouverte.

A l'inverse de la commande CRONE de première génération qui avait l'avantage d'être simple d'utilisation. Celle de deuxième génération a pour but d'annuler globalement les variations de la phase de la réponse fréquentielle en boucle ouverte et plus uniquement celle du régulateur. Il n'est donc plus nécessaire de chercher une fréquence au gain unité où les variations paramétriques du procédé se répercutent essentiellement sur le gain.

La fonction de transfert correcteur CRONE version idéal définie par :

$$R(s) = C_0 \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_b}}{1 + \frac{s}{\omega_h}} \right)^n \quad (3.25)$$

Fonction de Transfert du correcteur version réelle :

$$R_{réel}(s) = \prod_{i=1}^N \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_i^l}}{1 + \frac{s}{\omega_i^h}} \right) \quad (3.26)$$

D'où calcul des paramètres du régulateur CRONE de deuxième génération est donnée comme suite :

Calcul du degré de la Boucle Ouverte :

$$m = (180 - PMd)/90 \quad (3.27)$$

Variation du gain autour de ω_u :

$$\delta G = ||G1(\omega_u)|_{ab} - |G2(\omega_u)|_{ab}| \quad (3.28)$$

Pente désirée :

$$P_d = 20 \times m \quad (3.29)$$

Nombre de décades pour garder la pente désirée :

$$x = \frac{\delta G}{P_d} \quad (3.30)$$

Distance entre ω_A et ω_B :

$$\text{Si : } x > 1 : D = 10^x \quad (3.31)$$

Si non : $D = 10$

Calcul de ω_A et ω_B :

$$\omega_A = \frac{\omega_u}{\sqrt{D}} \quad (3.32)$$

$$\omega_B = \omega_u \times \sqrt{D} \quad (3.33)$$

Calcul de ω_b et ω_h :

$$\omega_b = \frac{\omega_A}{20} \quad (3.34)$$

$$\omega_h = \omega_B \times 40$$

Calcul du degré du correcteur n :

$$n = \frac{(-90m)}{\left(\arctg\left(\frac{\omega_u}{\omega_h}\right) - \arctg\left(\frac{\omega_u}{\omega_b}\right)\right)} \quad (3.35)$$

$$\text{Si } \begin{cases} n < 1 \\ \text{où} \\ n > 2 \end{cases}$$

Donc l'ordre du correcteur est hors des limites, cette génération ne peut pas corriger ce système il faut passer à la troisième génération.

Si non :

$$C_0 = \sqrt[n]{\left(\frac{1 + \left(\frac{\omega_u}{\omega_b}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega_u}{\omega_h}\right)^2}\right)} \quad (3.36)$$

Fonction de Transfert du correcteur CRONE version idéal :

$$R(s) = C_0 \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_b}}{1 + \frac{s}{\omega_h}}\right)^n \quad (3.37)$$

Les paramètres de la Fonction de Transfert du correcteur version réelle peuvent être calculer comme suite :

$$N = \text{round}\left(\frac{\log_{10}\left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)}{\log_{10}(5)}\right) \quad (3.38)$$

Soit : n_e la partie entière de n .

$$\begin{cases} \alpha = \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{n_e}{N}} \\ \beta = \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{1-n_e}{N}} \end{cases}$$

En fin la distribution récursive de pôles et zéros :

$$R_{réel}(s) = \prod_{i=1}^N \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega'_i}}{1 + \frac{s}{\omega_i}}\right) \quad (3.39)$$

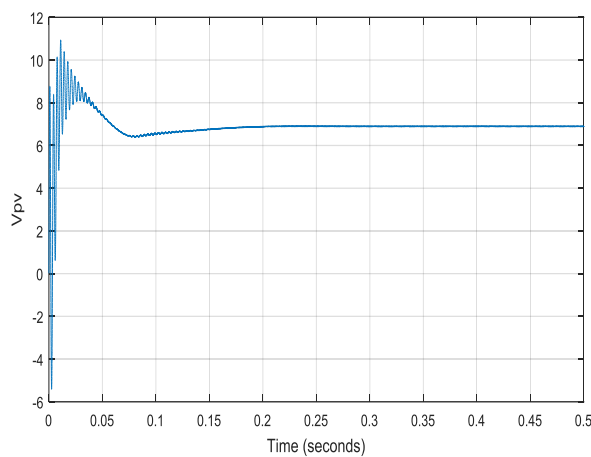
Avec :

$$\begin{cases} \omega_1 = \omega_b \sqrt{\beta} \\ \omega'_1 = \alpha \times \omega_1 \end{cases} \quad \text{et :} \quad \begin{cases} \omega'_{i+1} = (\alpha\beta)^i \times \omega'_1 \\ \omega_{i+1} = (\alpha\beta)^i \times \omega_1 \end{cases}$$

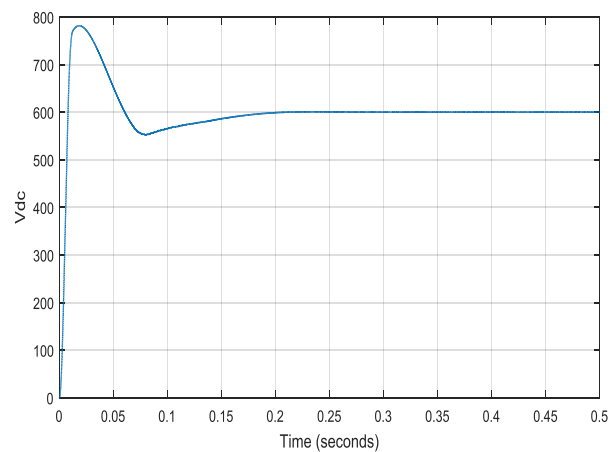
Après programmation sur Matlab nous obtenons le correcteur $R(z)$ suivant :

$$R(Z) = \frac{0.25898(z-0.192)(z-0.8469)(z-0.9922)(z-0.9983)(z-1)(z^2-1.124z+0.3956)}{z(z-0.9994)(z-0.999)(z-0.9954)(z-0.9797)(z-0.9123)(z-0.6633)(z-0.1595)} \quad (3.40)$$

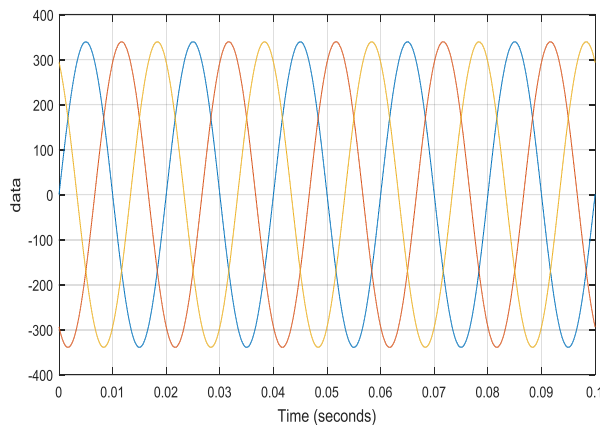
Pour voir le fonctionnement de notre régulateur PI nous allons l'introduire dans notre système photovoltaïque complet. Nous considérons que notre condensateur à une valeur de $C = 550\mu\text{F}$. Ce qui nous donne une valeur de $C = 825\mu\text{f}$. Les simulations nous donnent les résultats suivants :



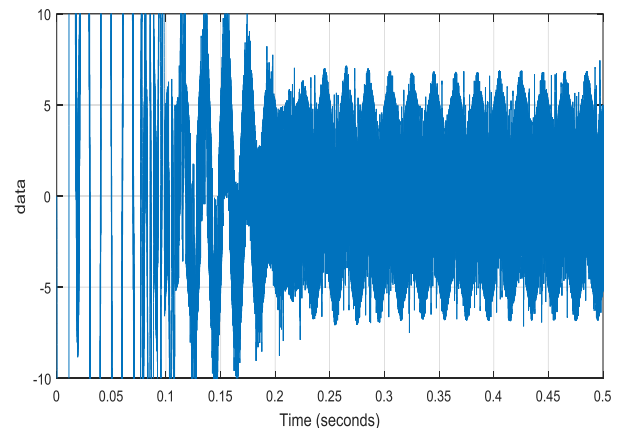
a- Tension à la sortie du panneau solaire



b- Tension à la sortie du hacheur



c- Tension à la sortie de l'onduleur



d- Courant à la sortie de l'onduleur

Figure 3-16 : Résultat de simulation du système photovoltaïque complet lorsque $C = 825\mu\text{f}$.

De ces figures nous remarquons que la tension aux bornes du condensateur suit sa référence. Cependant, nous remarquons une diminution de la tension à la sortie panneau photovoltaïque et beaucoup de perturbation du courant à la sortie de l'onduleur.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé et simulé tous les composants de notre système photovoltaïque connecté au réseau, tel que, le générateur photovoltaïque, l'hacheur Boost, l'onduleur de tension et la charge.

Le couplage de l'onduleur avec le réseau est assuré par la synchronisation de sa commande par rapport à l'évolution des tensions du réseau, qui a pour objectif de reconstituer une information sur la composante directe de la tension fondamentale.

Ainsi nous avons utilisé la commande CRONE et un filtre multi-variable pour étudier la stabilité lorsque le système est incertain ou la présence des creux de tension ou des perturbations de courant causé par des charges non linéaires. De plus nous avons pris en compte les incertitudes des paramètres utilisés tel que la capacité ce qui nous a permis d'avoir des résultats plus proches de la réalité.

Conclusion générale

Dans le nouveau contexte économique de changement majeur provoqué par l'ouverture du marché de l'énergie et l'évolution de la distribution électrique par l'intégration des énergies renouvelables tel que les systèmes photovoltaïques. Il est important que ces systèmes photovoltaïques connecté au réseau reste stable que ce soit en régime transitoire ou permanent et ce indépendamment des variations de paramètre passif qui les constituent de même lors des perturbations électriques survenue dans le réseau électrique où ils y sont connectés due par exemple à la présence de charge non linéaire.

Ainsi, l'objectif de ce travail consistait à proposer des solutions permettant d'étudier et d'éliminer les effets des différentes perturbations appliquées à notre système photovoltaïque, suivi par une étude de robustesse.

Au début nous avons donné une présentation générale des systèmes photovoltaïque, leur modélisation et l'influence de l'irradiation et la température sur le modèle. Le système étudié été un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique. Il est constitué dans sa structure par un générateur photovoltaïque qui alimente un onduleur de tension couplé au réseau via un hacheur élévateur Boost.

Le générateur photovoltaïque de modèle ENIE SOLER de 250 W que nous avons modélisé delivre en sortie quelque dizaine de volte. Pour avoir la tension nécessaire pour alimenter notre onduleur raccordé au réseau. La commande de notre hacheur est basée sur un algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT). Cet algorithme permet d'extraire la puissance maximale délivré par le générateur photovoltaïque.

Après avoir obtenu une tension continue suffisante à la sortie de notre hacheur, nous avons étudié la modélisation et la simulation de notre onduleur de tension permettant de convertir cette tension continue à une tension alternative conforme à celle du réseau électrique. La simulation a été faite sous Matlab-SimPower System.

Le fait que notre onduleur de tension doit être raccordé au réseau donc la synchronisation avec le réseau est nécessaire, ceci a été possible par l'emploi d'une PLL. De plus, ce système de synchronisation que nous avons étudié (PLL robuste dans le domaine d-q) a pour objectif d'extraire la composante directe de la tension fondamentale du réseau, permettant d'avoir de bonne performance à notre commande indépendamment des diverses perturbations pouvant survenir sur notre réseau.

Concernant la commande de l'onduleur, nous avons utilisé la commande d'hystérésis qui consiste à maintenir le courant à l'intérieur d'une bande enveloppant sa référence, consiste à faire la comparaison entre le courant mesuré et le courant de référence. L'utilisation d'un filtre multi-variable ou de la commande robuste d'ordre non entier (CRONE) ont permis d'avoir des performances très satisfaisante de notre système photovoltaïque lorsque ce dernier contenait des paramètres incertains.

Références

- [1] K. Ayache « Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique » Mémoire de Magister de l'Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, 2014.
- [2] A.H. YAHY « raccordement d'un système photovoltaïque au réseau de distribution électrique » mémoire de l'université de Sidi Bel Abbès, Octobre 2012.
- [3] GuidEnR « Effet de la température sur la cellule photovoltaïque » Cours GuidEnR PHOTOVOLTAÏQUE, 2011.
- [4] J.A.GOW « Development of photovoltaic array mode for use in power-electronics simulation studies » IEE, mars 1999.
- [5] Nicola Femia et al. « Power Electronics and control techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems » edition CRC, 2013.
- [6] M. KERMAS « Etude d'un onduleur, application dans une installation photovoltaïque » l'université de Sidi Bel Abbès, 2015.
- [7] M.G.Villalva « comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays » IEEE, mai 2009.
- [8] M.C.Benhbab « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande ». Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 17 décembre 2004.
- [9] M.Corrévon « Boucles à verrouillage de phase PHASE-LOCKED LOOPS (PLL) ». Cour de systèmes électroniques, Haute Ecole Spécialisé De Suisse Occidentale
- [10] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [11] H. FOCH, « Convertisseurs continu-alternatif et alternatif-continu ». Techniques de l'Ingénieur
- [12] I. Etxeberria-Otadui, « Les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique : application à la qualité de l'énergie ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, septembre 2003.
- [13] B. FEYTOUT « Commande CRONE Appliquée à l'optimisation de la production d'une éolienne ». Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux, 2013.

Résumé

Dans ce mémoire nous allons présenter l'étude et la simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique.

Nous avons fait une étude générale du générateur photovoltaïque fonctionnant à sa puissance maximale « MPP » suivant les variations de température et de radiation.

Par l'intermédiaire d'un hacheur survolteur commandé par un algorithme MPPT nous avons optimiser le rendement du système.

Nous avons utilisé un onduleur triphasé pour raccorder le système au réseau électrique.

Enfin nous avons utilisé deux lois de commande : la première est basé sur un régulateur classique proportionnelle intégral et la deuxième est basé sur la méthode CRONE, pour rendre système le moins influençable face aux perturbations.

Les résultats de simulation ont été obtenues à l'aide du logiciel Matlab/SimPower System.

Abstract

In this work, we will present the study and the simulation of a photovoltaic system connected to the electrical network. We have made a general study of photovoltaic generator operating at its maximum power according to temperature and radiation variations. With a chopper booster controlled by an MPPT algorithm, we optimize their efficiency. We used a three-phase inverter to connect the system to the electrical network.

At the end, we used two control law: The first one PI regulator and the second one is based on CRONE method. To decrease the interaction under disturbances.

The simulation results are obtained by using MATLAB/SimPower System.

ملخص

في هذه المذكرة قمنا بتقديم دراسة ومحاكاة الأنظمة الكهروضوئية المتصلة بالشبكات الكهربائية. قمنا بدراسة شاملة عن المولد الكهروضوئي يعمل بطاقة قصوى بإتباع تغيرات درجة الحرارة والإشعاع، مما أدى إلى استمرار النقطة المثلى لعمل MPP ضرورية لتحسين مردود النظام، وهذا قد يتحقق باستخدام محول تيار مستمر hacheur مطلوب من خوارزمية تقصي الاستطاعة القصوى MPPT. قمنا باستخدام موج onduleur لربط النظام بالشبكة الكهربائية. وفي الأخير قمنا بتطبيق قانونين من نظام التشغيل، الأول استند على ناظم كلاسيكي PI والثاني هو قانون نظام تشغيل قوي غير تام بطريقة (CRONE). الحسابات ومحاكاة النظام تحققت بمساعدة برمجية MATLAB/SimPower System.