

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA, Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master
En Electrotechnique
Option : *Réseaux Electriques*

Thème

Influence des générateurs photovoltaïques Sur la stabilité des réseaux électriques

Elaboré par :

M. BOULKOUANE.MOURAD

M.DJABELLAH.NASSIM.

Encadrés par :

Mr. M.BOUTEBEL

PROMOTION : 2016

Remerciements

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir Donné la force et le courage. A la suite Nous tenons à remercier vivement Mr.

M. BOUTEBEL notre promoteur qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations, ses conseils et ses encouragements qui nous a fourni durant la toute la période consacré travail

Nous tenons aussi à remercier Lyes TIGHZERT de l'équipe soft-computing et applications du laboratoire de recherche LTII pour l'aide qui nous a fourni.

Nous tenons également à remercier mesdames ouzellag et mdjahed les membres de jury pour L'honneur qu'ils nos ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance. Et tous les professeurs de département de Génie électrique.

A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser
Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les
Protège pour leurs soutien moral et financier, pour
Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

A mon camarade Nassim

A mes frères Fatah, Mouhoub

A halime et louiza

A mes sœurs A toute la famille Boulkouane

Aux chers amis (es) surtout Lyes et fawzi

Aux esprits libres

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

A tous mes collègues d'études surtout ceux D'électrotechnique.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïque

I.1.Introduction.....	3
I.2.Définition et Historique du photovoltaïque	3
I.3. Modèles des cellules photovoltaïques.....	4
I. 3.1 Présentation.....	4
I.3.2 Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque	4
I.4. différents Modèles électriques d'une cellule photovoltaïque.....	5
I.4.1 Modèle à une diode	6
I.4.2 Modèle à deux diodes	7
I.4.3 Modèle polynomial	8
I.5. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.5.1 Courant de court-circuit I_{cc}	9
I.5.2 Tension de circuit ouvert V_{0c}	9
I.5.3 la puissance maximale	9
I.5.4 Facteur de forme, FF.....	10
I.5.5 le Rendement, η	10
I.6. Influence des paramètres sur la caractéristique de la cellule PV	11
I.6.1. Paramètres internes	11
I.6.1.1. Influence de la résistance série.....	11
I.6.1.2. Influence de la résistance parallèle R_p	12
I.6.2. Paramètres externe	13
I.6.2.1. Influence de l'éclairement.....	13
I.6.2.2.Influence de la température.....	13
I.7. Les panneaux photovoltaïques.....	15
I.7.1. Association en série	15
I.7.2. Association en parallèle	16
I.8 Conclusion	17

Chapitre II : Les convertisseurs statiques et la commande MPPT

II.1 Introduction.....	18
II.2 Convertisseurs DC/DC.....	18
II.3 Types de hacheurs.....	18
II.3.1 Le hacheur survolteur (Boost).....	19
II.3.1.1 Modèle mathématique équivalent.....	19
II.3.1.2 Principe.....	20
II.3.2 Hacheur dévolteur (Buck).....	20
II-3-3 Le convertisseur Buck-Boost.....	22
II.4 La commande MPPT.....	23
Un MPPT, (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre,	23
II.4.1 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque	23
II.4.2 Principe du MPPT.....	23
II.4.3 Classification des techniques MPPT.....	25
II-5 Les méthodes de poursuite de PPM	26
II.5.1 Algorithme perturbation et observation.....	26
II.6 Convertisseurs DC/AC	27
II-7 Principe de fonctionnement d'un onduleur :	28
II.8 Topologie des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique	29
II.8.1 L'onduleur central.....	30
II.8.2 Les onduleurs string.....	30
II.8.3 Les onduleurs intégrés aux PV	30
II.9 Modélisation de l'onduleur.....	31
II.10. L'équation dynamique du convertisseur DC/AC :	33
II.11 conclusion.....	33

Chapitre III : Modélisation du réseau électrique

III-Introduction.....	34
III-1 Modélisation du réseau	34
III.2 Détermination des puissances	35
III-3 Modélisation de l'alternateur	36
III-3-1 Modèle d'ordre 3 :	36
III-3-2 Equation de mouvement du générateur synchrone.....	36
III-3-3 Equation électrique du générateur synchrone.....	37
III-4 Modélisation du régulateur de tension automatique(AVR)	37
III-5 Conclusion	39

Chapitre IV : Modélisation et linéarisation du système global

IV. Introduction.....	40
VI.1 Equation différentielle.....	42
VI.2 Equations des régulateurs.....	42
VI.3.La linéarisation des courants de ligne	43
VI.4 Linéarisation du système globale	44
IV-5 Schéma bloc.....	44
IV.6 Résultats et discussions	46
IV.6.1 Type et caractéristique électrique du module photovoltaïque MSX-60	47
IV.7 Influence de la température sur les générateurs photovoltaïques.....	48
IV.8 Influence de l'éclairement sur les générateurs photovoltaïques.....	49
IV.9 Simulation du système globale de la figure (IV-1)	51
VI.10 Conclusion.....	54

Listes des figures

Chapitre I

Figure (I.1): Caractéristiques: courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'une cellule photovoltaïque [22]	5
Figure (I-2): schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode [28].	6
Figure (I.3): schéma équivalent d'une cellule PV, Modèle à deux diodes [28].	7
Figure : (I-4): point maximale de puissance d'une cellule élémentaire [6].	10
Figure (I.5): Effet de la résistance série R_s sur la caractéristique (I-V) [23].	12
Figure (I.6): Effet de la résistance shunt R_p sur la caractéristique (I-V) [23].	13
Figure (I.7): Influence de l'ensoleillement sur les courbes (I-V et P-V) [2].	13
Figure (I.8): Influence de la température sur les courbes (I-V et P-V) [2].	14
Figure (I.9): Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques [21].	15
Figure (I.10): Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques [21].	16

Chapitre II

Figure (II.1) : Circuit électrique de base du hacheur survolteur. [19]	19
Figure (II.2) : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur [19].	21
Figure (II.3) : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur [19].	21
Figure (II.4) : Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck [19].	22
Figure (II.5) : circuit électrique de base du hacheur survolteur-dévolteur [19].	23
Un MPPT, (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre,	23
Figure (II.6) : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT [16].	24
Figure (II.7) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale	25
Figure (II.8) : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O). [3]	27
Figure (II.9) : symbole et signal d'un onduleur	28
Figure (II.10) : Topologies des systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique [9].	30
Figure (II.11) : Convertisseur DC/AC a modeliser	32

Chapitre III

Figure (III.1) : Générateur synchrone connecté au réseau électrique	34
Figure (III.2) : système d'excitation IEEE-type ST1A.	38

Listes des figures

Chapitre IV

Figure (IV.1): système de puissance connecter a une centrale photovoltaïque.....	40
Figure (VI.2) : diagramme vectoriel du système de puissance	42
Figure (IV.3) : système de puissance linéarisé avec l'intégration de la centrale photovoltaïque.....	45
Figure (IV.4) : Modèle linéarisé de la partie de la production PV et du contrôle.	46
Figure (IV.5) : schéma bloc du système global sur Matlab/Simulink.....	47
Figure (IV.6) : Résultats de simulation de la caractéristique $P=f(V)$	48
Figure (IV.7) : Résultats de simulation de la caractéristique $P=f(I)$	48
Figure (IV.8) : Résultats de simulation de la caractéristique $I(V)$	49
Figure (IV.9) : Résultats de simulation de la caractéristique $I=f(V)$	50
Figure (IV.10) : Résultats de simulation de la caractéristique $P(V)$	50
Figure (IV.11) : Résultats de simulation de la caractéristique $P(I)$	50
Figure (IV.12) : Résultats de simulation de la variation du couple mécanique (pu).....	51
Figure (IV.13) : Résultats de simulation de variation de la tension du régulateur de tension en fonction du temps (pu).....	52
Figure (IV.14): Résultats de simulation de variation de la vitesse rotorique en fonction du temps (pu)	52
Figure (IV.15) : Résultats de simulation de la variation de l'angle de la machine en (degré)	53
Figure (IV.16) : Résultats de simulation de la variation de tension d'excitation en (pu).....	53

Liste des symboles et des abréviations

PV	Photovoltaïque
GPV	Générateurs photovoltaïques
I _{cc}	Courant de court-circuit
V _{oc}	Tension de circuit ouvert
RP	Résistance parallèle
RS	Résistance série
I	Le courant fourni par la cellule
I _{ph}	Le courant délivré par le générateur photovoltaïque (photo généré).
I _s	Le courant de saturation de la diode
I _r	L'irradiance
q	Charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$)
K	Constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K)
n	Facteur d'idéalité de la cellule photovoltaïque
T	La température effective de la cellule en kelvin.
P _{max}	La puissance maximale
FF	Facteur de forme (ou fill factor en Anglais)
T _{ref}	La température de référence
K _i	Constante donné par le constructeur exprimé par (mA/C°)
E _g	Energie de bang-gap
DC	Courant continue
AC	Courant alternatif
MPPT	point de puissance maximale (maximum power point Tracking)
MLI	Modulation de la largeur d'impulsion
K	Le taux de conversion dépendant de la structure de l'onduleur,
V _{dc}	La tension continue aux bornes du condensateur C_{dc}

Liste des symboles et des abréviations

Δ	Préfixe pour désigner le petit incrément d'une variable
d, q	Indice pour indiquer les composants d et q d'une variable
δ	L'angle du rotor
ω	La vitesse du générateur synchrone
E_q	tension d'axe q
E_q'	la tension transitoire du générateur synchrone
E_{fd}	Tension d'Excitation du régulateur automatique(AVR)
P_t	La puissance électrique
P_m	La puissance mécanique
V_t	La tension aux bornes du générateur
V_{tref}	La tension de référence du générateur
ω_0	La vitesse de synchronisme
D	Coefficient d'amortissement naturel
x_d, x_d', x_q, x_q'	Les réactances transitoires
V_s	Tension aux jeux de barre s
V_b	Tension aux jeux de barre infinis b
V_c	Tension a la sortie du convertisseur DC/AC
I_{sb}, I_{ts}, I_s	Courants de lignes
x_{ts}, x_{sb}, x_s	Réactances des lignes
I_{pv}, V_{pv}	Courant et tension à la sortie de la centrale pv
P_{pv}	La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque
P_s	La puissance à la sortie convertisseur DC/AC

Liste des symboles et des abréviations

Introduction générale

I. Introduction générale

I.1 Contexte et enjeux

Avec l'augmentation de la population mondiale et la réduction des ressources naturelles, les compagnies d'électricité sont confrontées aux défis de satisfaire la demande en énergie sous la contrainte de l'acceptabilité de son coût. Avec l'augmentation de l'émission des gaz à effets de serre, la demande des énergies renouvelables a augmenté de manière significative. Parmi les différents types de sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire est devenue la plus prometteuse en raison des facteurs suivants:

- l'augmentation de l'efficacité des cellules solaires
- l'amélioration de la technologie de fabrication
- des économies d'échelle [1].

Durant les dernières décennies, l'humanité a eu recours aux énergies renouvelables. Par conséquent, dans de nombreux pays, nous constatons une effervescence en termes des modules photovoltaïques raccordés aux réseaux de distribution.

Contrairement aux autres ressources renouvelables, telles que le vent et les générateurs solaires thermiques, les générateurs photovoltaïques sont plus flexibles et par conséquent peuvent être déployés plus facilement [2].

Les installations photovoltaïques de petite échelle peuvent être montées sur les toits des maisons, sur les bâtiments commerciaux et résidentiels, ou tout simplement montées au sol. Quant aux installations de grande échelle, elles sont généralement construites à des endroits éloignés. Ces installations, dont la production est significative, doivent être reliées aux réseaux de distribution. Néanmoins, la connexion de ces dernières aux réseaux pose de grandes contraintes. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail. Il est dédié, entre autre, à l'étude, à l'analyse, à la modélisation et à la simulation des effets des installations photovoltaïques sur la stabilité et les performances des réseaux de distribution. Ce travail reprend les grands principes mathématiques, physiques et électriques des systèmes de génération, de production et de transport de l'énergie électrique dans les réseaux de distribution.

I.2 Objectifs et organisation

L'objectif principal de cette étude est l'assurance de la stabilité du réseau auquel est reliée une centrale photovoltaïque. Pour y parvenir, un plan de travail très adéquat a été suivi.

Introduction générale

Pour commencer, nous avons consulté une large bibliographie. Cela inclut les mémoires rédigés à ce titre, les dernière publications internationales tirées des archives des revues IEEE et autres.

Dans le chapitre I, la thématique est introduite. Les concepts de base et les généralités sont clairement explicités aux lecteurs. Elle sert comme partie introductive.

Dans le chapitre II, une modélisation des convertisseurs statiques, onduleur en commande MLI et hacheur Boost en commande MPPT, est abordée. Les modèles obtenues sont non-linéaires, leur exploitation technique en termes de simulation est abordée au chapitre4.

Le chapitre III aborde la modélisation de l'alternateur connecté au réseau. L'assemblage des différents blocs constituant le système centre photovoltaïque-réseau électrique est abordé au chapitre IV. Le système global est caractérisé par de hautes non-linéarités. L'étude de l'influence de la centrale photovoltaïque est effectuée autour des points de fonctionnement opérationnels. Les modèles mathématiques sont linéarisés autour de ces points par la théorie des petites perturbations. Ainsi, l'influence des générateurs photovoltaïques sur la stabilité des réseaux électriques est clairement explicitée et étudiée par une finesse et adresse de rigueur.

Chapitre I

*Généralités et modélisation du
générateur photovoltaïque*

I.1.Introduction

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, (étoile la plus proche de la terre). Il fournit une énergie colossale à la Terre (10 000 fois l'énergie nécessaire) sous forme d'énergie lumineuse, La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie couvre une partie importante de la surface terrestre [1].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Bien que l'énergie photovoltaïque la plus jeune des énergies renouvelables, et devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance (disponibilité), l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre, et elle est souple et fiable [7].

I.2.Définition et Historique du photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité.

L'histoire du PV remonte en 1839, lorsque le physicien français Antoine César Becquerel découvrait le principe photovoltaïque. L'effet photovoltaïque en tant que tel a été découvert en 1887 par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz [10].

C'est Albert Einstein, qui le premier, a pu expliquer le principe du photovoltaïque en 1923. En 1955, des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Téléphone, développèrent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6%. En 1959, le premier satellite alimenté par des piles PV fut lancé.

La première maison avec une installation photovoltaïque a vu le jour en 1973 à l'université de Delaware aux Etats-Unis d'Amérique.

Alors, en 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcouru 4000 kilomètres en Australie [11].

Aujourd'hui, avec l'amélioration du rendement de conversion et la réduction des coûts de production, le marché photovoltaïque s'est considérablement développé. Durant ces vingt dernières années, il a progressé de 20 % à 25 % par an atteignant 427 MW en 2002. Néanmoins, le photovoltaïque représente moins de 0,1 % de toute la production énergétique mondiale

I.3. Modèles des cellules photovoltaïques

I.3.1 Présentation

La modélisation d'un générateur photovoltaïque est utilisée généralement pour approximer la sortie du générateur (tension, courant) en fonction de deux entrées qui sont la température et l'éclairement reçu sur le générateur PV. Le courant généré par le module photovoltaïque à une tension donnée dépend uniquement de l'éclairement et de la température de la cellule.

Plusieurs modèles ont été élaborés pour décrire le fonctionnement et le comportement d'un générateur photovoltaïque, Ces modèles ont été développés, dont le but d'obtenir la caractéristique courant-tension pour l'analyse et l'évaluation des performances d'un système photovoltaïque [10].

I.3.2 Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

Les caractéristiques électriques (**Fig. I-2**) d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque en trois zones:

- **Zone 1:** Le courant I est donné presque constant la cellule se comporte comme un générateur de courant (pratiquement constant de valeur voisine de ISC). Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.
- **Zone 2:** Région correspondante aux valeurs élevées de RC. La cellule se comporte comme un générateur de tension en circuit ouvert V_{co} . Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.
- **Zone 3:** le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables.

C'est dans la Zone 3 que se situe le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale (MPP), caractérisé par le couple (I_{max}, V_{max}) , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées [23].

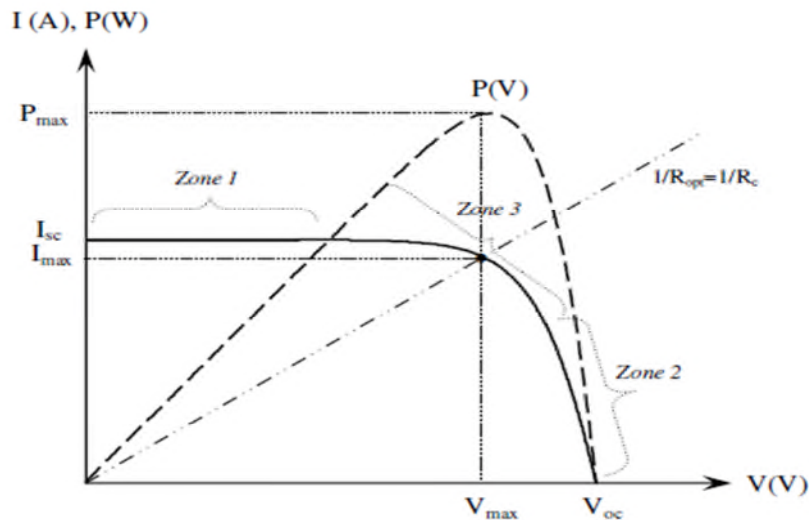


Figure (I.1): Caractéristiques: courant-tension ($I-V$) et puissance-tension ($P-V$) d'une cellule photovoltaïque [22]

I.4. différents Modèles électriques d'une cellule photovoltaïque

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque [22].

On va présenter ci-dessous les trois modèles du générateur photovoltaïque (GPV) à savoir:

- *Modèle à une diode.*
- *Modèle à deux diodes.*
- *Modèle polynomial.*

I.4.1 Modèle à une diode

Le générateur PV est constitué de nombreuses cellules photovoltaïques connectées en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant à débiter. Le modèle

électrique d'une cellule photovoltaïque utilisé est un modèle "Standard" à une diode, établi par Shokley pour une seul cellule PV, est généralisé à un module PV, Il correspond à une source de courant en parallèle avec une diode (**Fig. I-2**). Nous modélisons également les chutes ohmiques et les courants de fuites par deux résistances:

- Une résistance "shunt" en parallèle (R_p) modélise les courants de fuite dus aux effets de bord de la jonction PN. Elle est de l'ordre de quelques ohms ($4\Omega \rightarrow 30\Omega$).
- Une résistance en série (R_s) modélise les pertes aux contacts et aux connexions. Elle est très faible [28].

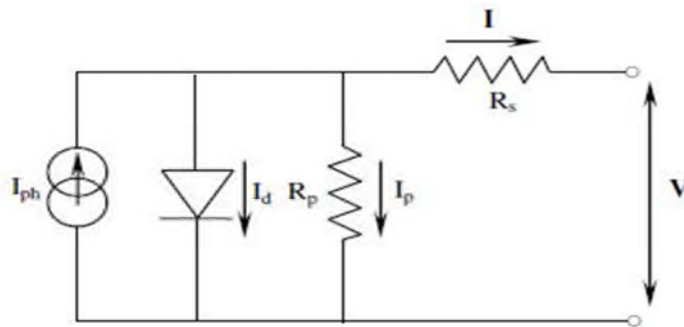


Figure (I-2): schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode [28].

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Dans cette équation, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances. Le comportement d'une cellule PV peut être décrit par l'équation suivante:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \dots\dots\dots (I.1)$$

$$I_p = \frac{V + IR_s}{R_p} \dots\dots\dots (I.2)$$

Le courant traversant la diode est donné par :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_t}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (I.3)$$

La tension thermique est donné par :

$$V_t = \frac{KT}{q} \dots\dots\dots (I.4)$$

En utilisant les équations ci-dessus, on peut en déduire l'expression du courant délivré par la cellule photovoltaïque comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nKT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_p}\right) \dots\dots\dots (I.5)$$

Avec :

- I : Le courant fourni par la cellule
- I_{ph} : Le courant délivré par le générateur photovoltaïque (photo généré).
- I_0 : Le courant de saturation de la diode
- q : Charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$)
- K : Constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K)
- n : Facteur d'idéalité de la cellule photovoltaïque
- T : La température effective de la cellule en kelvin.

I.4.2 Modèle à deux diodes

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans le cas de la figure (I-3) [28].

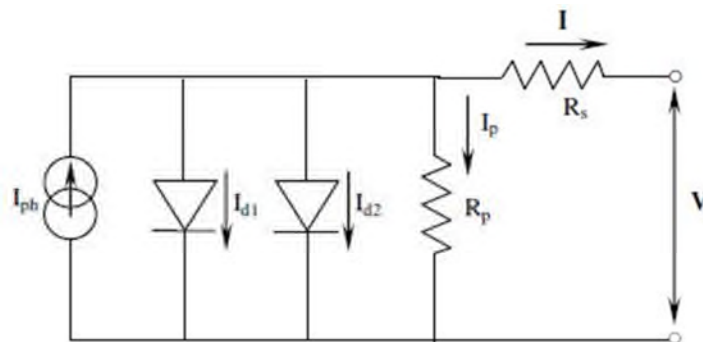


Figure (I.3): schéma équivalent d'une cellule PV, Modèle à deux diodes [28].

Les différents paramètres de ce modèle sont:

- **Le générateur de courant:** il délivre le courant I_{ph} correspondant à courant photo généré.
- **La résistance série R_s :** elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques.
- **La résistance parallèle R_p :** également connue sous le nom de résistance de court-circuit, elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur.

La diode d1 modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion. La diode d2 modélise la génération/recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace.

Le courant au sein de la cellule photovoltaïque est donc donné par la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{S1} \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{n_1 V_T}\right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{n_2 V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \dots \dots \text{(I.6)}$$

I.4.3 Modèle polynomial

Ce modèle, imite les puissances des modules solaires considérés comme fonctionnant aux *MPP* (Maximum Power Point). Il est destiné à la technologie poly-cristalline au silicium.

La puissance maximale P_{max} est donnée par:

$$P_{max} = P_1 \left[1 + P_2 (T - T_{ref}) \right] (P_3 + E) \dots \dots \dots \text{(I.7)}$$

Où:

$P1, P2,$ et $P3$: sont des constantes à déterminer d'après les données de la fiche technique du module; $T_{ref}=25^\circ\text{C}$;

T et E : sont la température et l'éclairement du point de fonctionnement donné respectivement.

Ce modèle simplifié permet de déterminer la puissance maximale fournie par un groupe de modules pour un éclairement (ensoleillement) et une température donnée, avec seulement 3 paramètres constants à déterminer, $P1, P2$ et $P3$ et une équation simple à résoudre en connaissant un ensemble de points de mesures suffisamment étendus [30].

I.5. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

I.5.1 Courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant obtenu aux bornes de la cellule quand la tension à ces bornes est nulle, $V=0$. Il constitue le maximal de courant qui peut être obtenu d'une cellule. Sa valeur typique sera à peu près d'une dizaine de milliampères pour centimètre carré de cellule. Puisque $R_s \ll R_p$ on peut mettre :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_p}} \dots\dots\dots (I.8)$$

On néglige R_s devant R_p on aura : $I_{cc} = I_{ph}$

I.5.2 Tension de circuit ouvert V_{0c}

C'est la tension pour laquelle le courant aux bornes de la cellule est nul; elle constitue la tension maximale qui peut être obtenue d'une cellule; elle se situe autour de 0.6 V pour la cellule en silicium. Elle est obtenue grâce à l'équation (I.5) pour $I=0$ en posant $V_T=KT/q$ comme étant le potentiel thermique on obtient l'expression de V_{0c} comme suit :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{c0}}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{c0}}{R_p}$$

$$V_{0c} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right) = V_T \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right) \dots\dots\dots (I.9)$$

I.5.3 la puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement $P_{max}(V_{max}, I_{max})$ de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{cc} , et tension comprise entre 0 et V_{0c}) (**Fig. I-4**) [25].

Ce maximum (P_{max}) peut être déterminé en portant sur le même graphique la caractéristique IV et les hyperboles de puissance constante. Le point de fonctionnement optimal correspond au point de tangence des deux courbes comme le montre la figure (**I-4**)

La puissance maximale délivrée à la charge est donnée par l'expression :

$$P_{\max} = V_{\max} I_{\max} \dots\dots\dots (I.10)$$

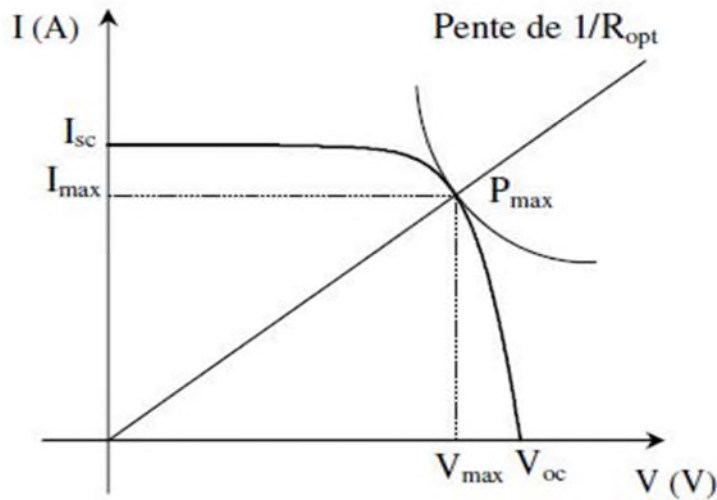


Figure : (I-4): point maximale de puissance d'une cellule élémentaire [6].

I.5.4 Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV: c'est le facteur de remplissage (FF), (ou fill factor en Anglais), ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée Pmax et la puissance formée par le rectangle. I_{cc}, V_{oc} Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes; et diminue avec la température, leur expression est donné par : [27]

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} V_{oc}} = \frac{V_{\max} I_{\max}}{I_{cc} V_{oc}} \dots\dots\dots (I.11)$$

I.5.5 le Rendement, η

Le rendement de la cellule photovoltaïque est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est égal au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses. C'est le paramètre qui définit le mieux fonctionnement de la cellule PV, est donné par:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{\max} I_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} I_{cc} FF}{ES} \dots\dots\dots (I.12)$$

Avec :

La puissance d'entrée qui est l'éclairement incident sur la cellule PV par unité de surface, correspondant à l'éclairement lumineux E du soleil sous forme de photons par unité de surface reçue (aux conditions standard, $1000\text{W}/\text{m}^2$), S est la surface de la cellule et FF est le facteur de forme. [23]

Comme on le voit l'efficacité de conversion de puissance η d'une cellule solaire est proportionnelle aux trois paramètres photovoltaïques principaux: le courant de court-circuit I_{cc} , tension en circuit ouvert V_{oc} , et le facteur de remplissage FF , pour un éclairement donné E

Avec :

I_{cc} : Le courant de court-circuit.

V_{oc} : La tension en circuit ouvert.

P_{max} : Puissance maximale débitée par la photodiode.

I_{max} : Densité de courant au point de puissance maximale.

V_{max} : Tension au point de puissance maximale.

FF : Le facteur de forme.

η : Le rendement de conversion d'énergie [9].

I.6. Influence des paramètres sur la caractéristique de la cellule PV

Le comportement électrique d'une cellule dépend de deux types de paramètres dont:

- Des paramètres internes tels que la résistance série R_s , la résistance shunt R_p .
- Des paramètres externes tels que le flux solaire et la température T [23].

I.6.1. Paramètres internes

I.6.1.1. Influence de la résistance série

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistivité du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi-conducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion.

L'influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule solaire est représentée sur la figure (1.5) [18].

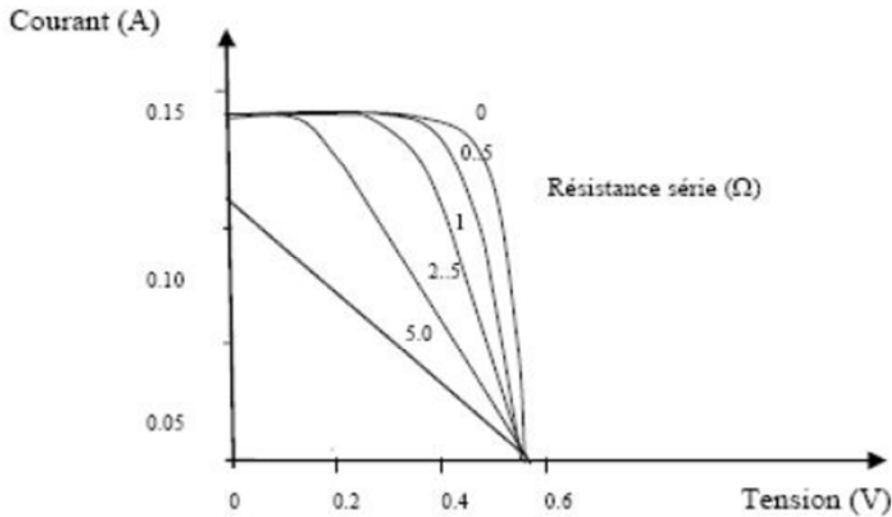


Figure (I.5): Effet de la résistance série R_s sur la caractéristique (I-V) [23].

I.6.1.2. Influence de la résistance parallèle R_p

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge d'espace. L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle (R_p). Ordre de grandeur pour une cellule au Si: $R_p = 10^2 \text{ à } 10^4 \Omega$. R_p augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle. L'influence de la résistance parallèle sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur la figure (1.6) [18].

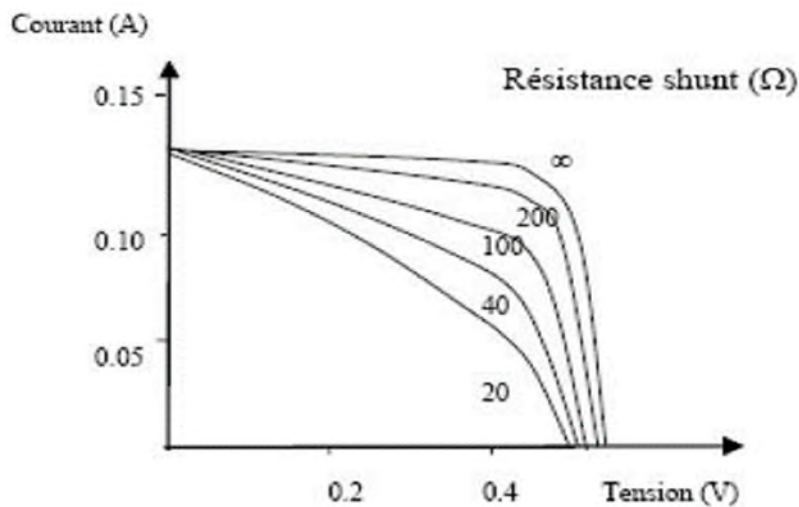


Figure (I.6): Effet de la résistance shunt R_p sur la caractéristique (I-V) [23].

I.6.2. Paramètres externe

I.6.2.1. Influence de l'éclairement

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique $I=f(V)$ suivant l'axe des courants. L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique [6].

L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V de la cellule solaire est représentée sur la figure (I.7), pour une température fixe $T=25^\circ$.

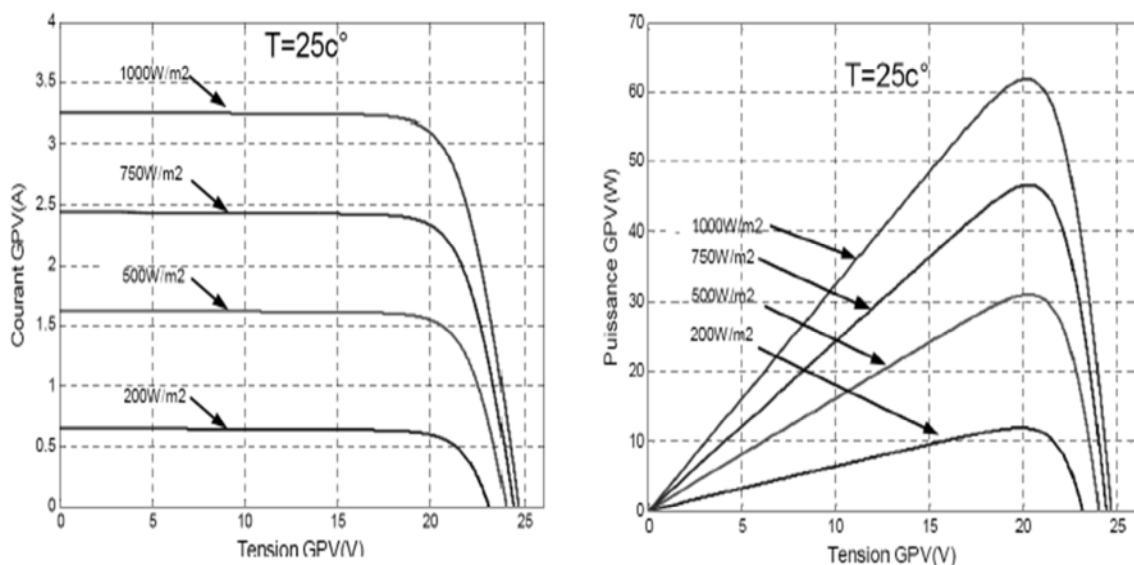


Figure (I.7): Influence de l'ensoleillement sur les courbes (I-V et P-V) [2].

I.6.2.2. Influence de la température

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur. Pour une température qui change, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Ce dernier varie très légèrement.

L'influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V de la cellule solaire est représentée sur la figure I-8, pour un éclairement fixe $E=1000\text{W/m}^2$.

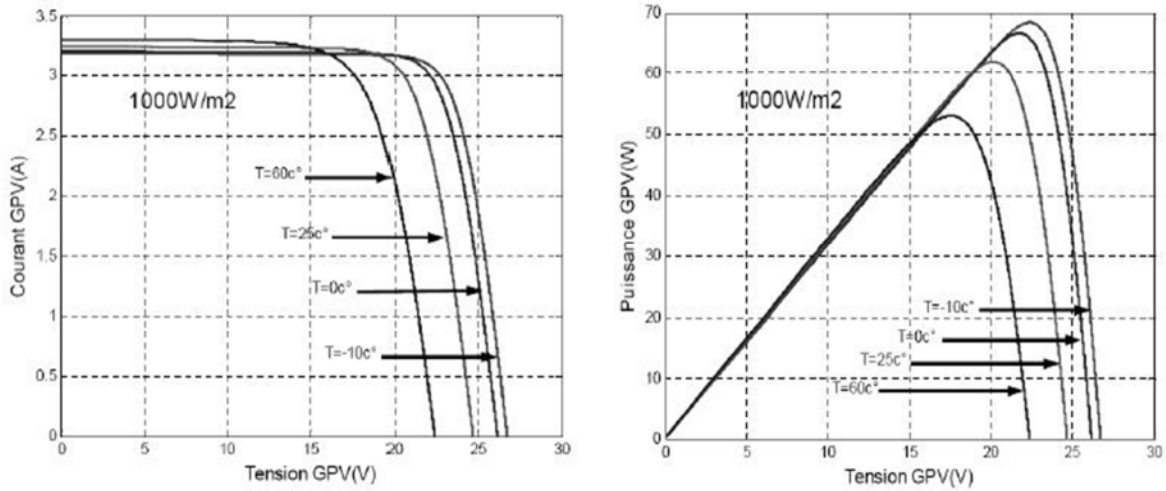


Figure (I.8): Influence de la température sur les courbes (I-V et P-V) [2].

Le photo courant produit par les modules dépend linéairement de l'irradiation solaire et est aussi sous l'influence de la température :

$$I_{ph} = (I_{ph,n} + K_i \Delta T) \frac{E}{E_n} \dots\dots\dots (I.13)$$

Avec :

E : Eclaircement (W/m2)

T : Température (K).

$I_{ph,n}$: Courant de court-circuit de la cellule dans les conditions standards, $E_n = 1000 \text{ W/m}^2$

et $T = 25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_G \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}{nK} \right] \dots\dots\dots (I.14)$$

Avec :

T : la température du travail de la cellule

T_{ref} : est la température de référence

K_i : est donné par le constructeur exprimé par (mA/C°)

I_s : Le courant de saturation

E_G : est l'énergie de bang-gap

q : Charge d'électron

I_{rs} : Courant de saturation inverse.

I.7. Les panneaux photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules qui sont constitués par l'association de cellules en série. La mise en série et en parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés dont les performances dépendent de l'association des cellules et de la matière qui les compose.

Le point de fonctionnement de cet ensemble de panneaux photovoltaïques est défini par l'intersection de sa caractéristique courant-tension avec la ligne de charge [29]

I.7.1. Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure (I.9) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques [6].

$$V_{SC0} = N_s * V_{C0} \dots\dots\dots (I.15)$$

$$I_{sc} = I_{cc}$$

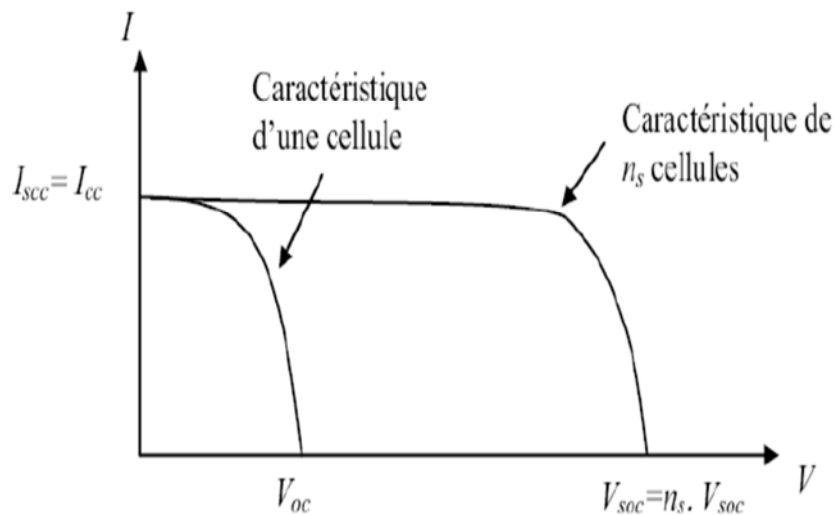


Figure (I.9): Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques [21].

I.7.2. Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. La figure (1.10) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques [6].

$$V_{p0c} = V_{c0} \dots\dots\dots (1.17)$$

$$I_{pcc} = n_p * I_{cc} \dots\dots\dots (1.18)$$

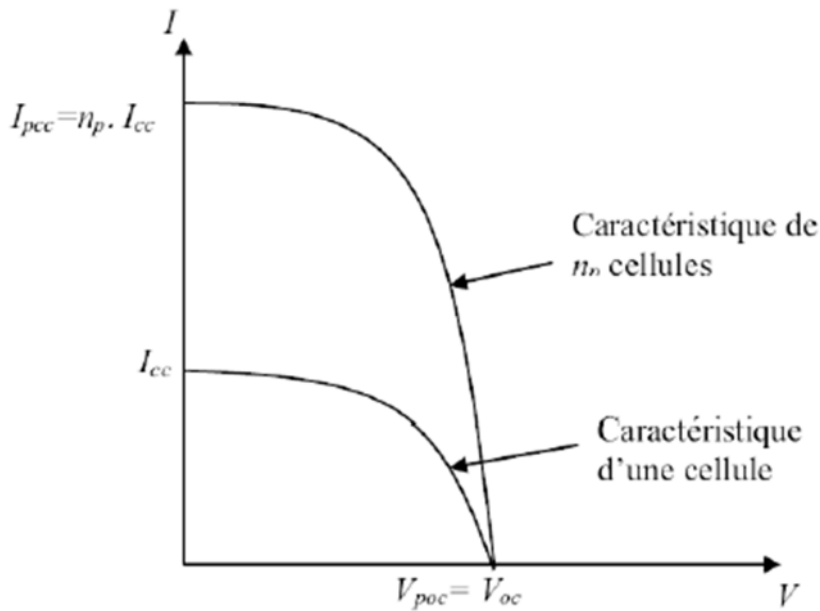


Figure (I.10): Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques [21].

Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïque on est obligé à grouper les cellules photovoltaïque en série et en parallèle pour obtenir un générateur mixte équivalent. L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série n_s cellules et n_p parallèle est la suivante :

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_S \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V}{n_s} + \frac{R_s I}{n_p} \right)}{nKT} \right) - 1 \right] - \left(\frac{n_p V + n_s I R_S}{n_s R_p} \right) \dots\dots\dots (1.19)$$

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et d'une centrale photovoltaïque, les caractéristiques du générateur PV avec ses performances. Ainsi que l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques.

Le modèle mathématique que nous avons obtenu est non linéaire. Le modèle exprime la variation de courant en fonction de la tension (I.V) ainsi que la puissance en fonction de la tension (P.V) qui varie en fonction de la température et de l'éclairement.

La puissance optimale à la sortie de générateur PV peut être atteinte quand l'éclairement est maximal, plus les panneaux sont pleinement exposés au soleil, plus l'énergie produite de ces derniers soit importante est compris le rendement.

Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge ou un autre système que nous allons étudier dans le chapitre suivant.

Chapitre II

*Les convertisseurs statiques et
la
Commande MPPT*

II.1 Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants d'un générateur photovoltaïque, nous passons maintenant à l'étude des convertisseurs statiques. Dans un système de conversion des énergies photovoltaïques La conversion de puissance peut contenir les deux étapes, une première conversion DC/DC puis une conversion DC/AC. Dans les systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux, le convertisseur DC/DC a généralement le rôle d'augmenter la tension pour que l'onduleur puisse réaliser un courant sinusoïdal à la tension du réseau, les convertisseurs sont utilisés pour bien adapter la source à la charge. Ces convertisseurs peuvent être en courant continu , comme dans le cas d'utilisation des MPPT pour une exploitation maximale de la puissance fournie par le générateur PV, ou en courant alternatif comme dans le cas d'utilisation des charges en courant alternatif.

On s'intéresse dans ce chapitre à l'étude des deux types de convertisseurs DC/DC et DC/AC

II.2 Convertisseurs DC/DC

Le convertisseur DC/DC permet de relier le champ PV à un bus continu, auquel les diverses machines énergétiques du système sont reliées : la charge (l'utilisateur final), les autres sources d'énergie (pile à combustible, batteries, autres sources renouvelables) ou les périphériques. Il permet en outre de lisser les fluctuations de la tension des composants au niveau du bus commun,

Trois topologies de base de circuit de conversion seront décrites dans les paragraphes suivants (DC-DC) : Dans cette partie nous présentons le principe des trois types de convertisseurs DC/DC (Buck, Boost et Buck-Boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [5].

II.3 Type des hacheurs

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer:

- des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

+Cela conduit à L'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue deux familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs) :

- *hacheur abaisseur (ou Buck)*
- *hacheur élévateur (ou Boost)*
- *hacheur Buck- Boost. [19]*

II.3.1 Le hacheur survolteur (Boost)

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure

(II.1), représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), 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 de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant 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). [19]

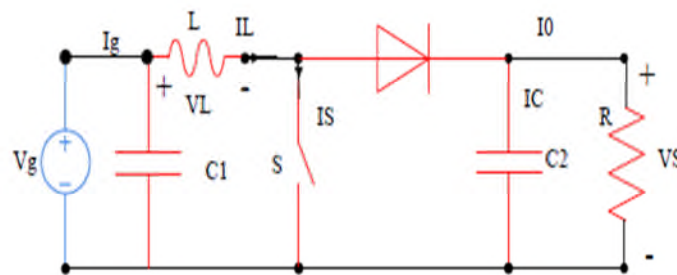


Figure (II.1) : *Circuit électrique de base du hacheur survolteur. [19]*

II.3.1.1 Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

Pour la première période αT_s :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_L \dots\dots\dots (II-1)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \dots\dots\dots (II-2)$$

$$I_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g - R_L I_L \dots\dots\dots (II-3)$$

Pour la deuxième période (1-α) Ts :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_L \dots\dots\dots (II-4)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \dots\dots\dots (II-5)$$

II.3.1.2 Principe

Comme le présente la figure (II.1), lorsque l'interrupteur du transistor (S) est sur la position

(On), le courant de l'inductance du hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode (D) est bloquée (off). Et lorsque (S) tourne sur la position (off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit (RC) bien que la diode (D) est passante [19].

Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la figure (II-2), comme suit :

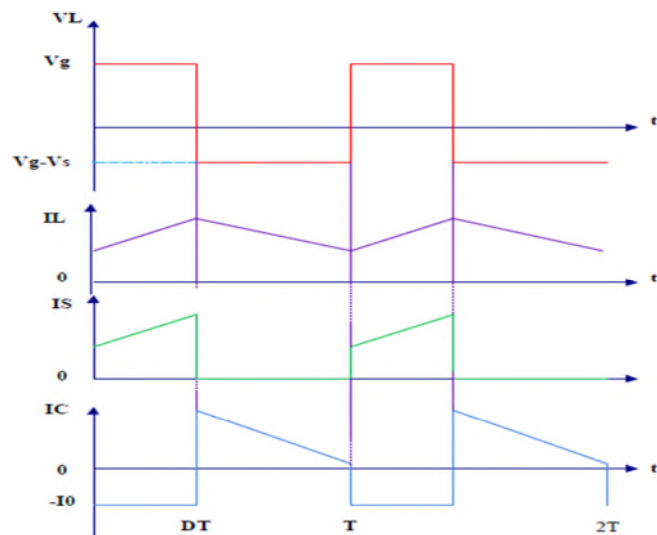


Figure (II.2) : *Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur* [19].

II.3.2 Hacheur dévolteur (Buck)

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la figure (II.3). Les composantes clés sont l'inductance (L), le commutateur (Transistor) (S), la diode (D,) et le condensateur(C). Celui-ci se charge par le commutateur (S) et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement.

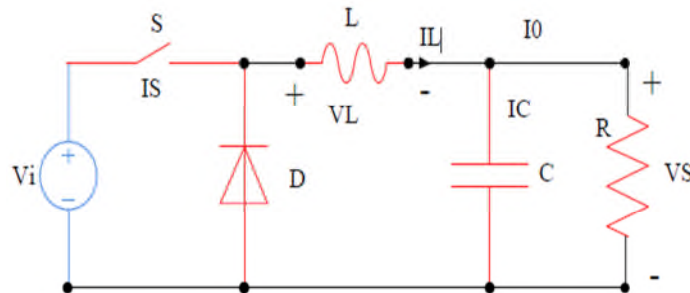


Figure (II.3) : *Circuit électrique de base du hacheur dévolteur* [19].

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge. L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \frac{V_i - V_s}{L} = \frac{1}{L} [V_i - V_s] \dots \dots \dots \text{(II-6)}$$

Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur (S). Dans le premier laps de temps (αT) le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance (L) se charge d'énergie avec augmentation du courant IL.

Dans le deuxième laps de temps ($(\alpha-1) T$), l'inductance (L) libère cette énergie à la charge avec une diminution de courant IL.

En négligeant la chute de tension à travers la diode, le taux de changement du courant est donné par :

$$\frac{\partial I}{\partial t} = -\frac{V_i}{L} \dots \dots \dots \text{(II-7)}$$

Lorsque le courant de l'inductance ne se décroît pas à zéro avant la commutation du transistor, le convertisseur fonctionne dans le mode de conduction continu dans ce cas, si la

tension de charge dépend seulement de la tension de source et du rapport cyclique $\alpha = T / T_{on}$, la tension aux bornes de la charge :

$$V_s = \alpha V_i \dots \dots \dots \text{(II-8)}$$

Dans le mode de conduction discontinu le courant de l'inductance s'annule dans un cycle de commutation entre le transistor (S) et la diode. Dans ce cas, la tension de charge dépend d'une manière plus complexe du rapport cyclique et le courant de la charge, la figure (II.4) montre comment la tension de charge varie avec le courant de charge.

Les caractéristiques des courants et la tension représentant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont données par la figure (II-4)

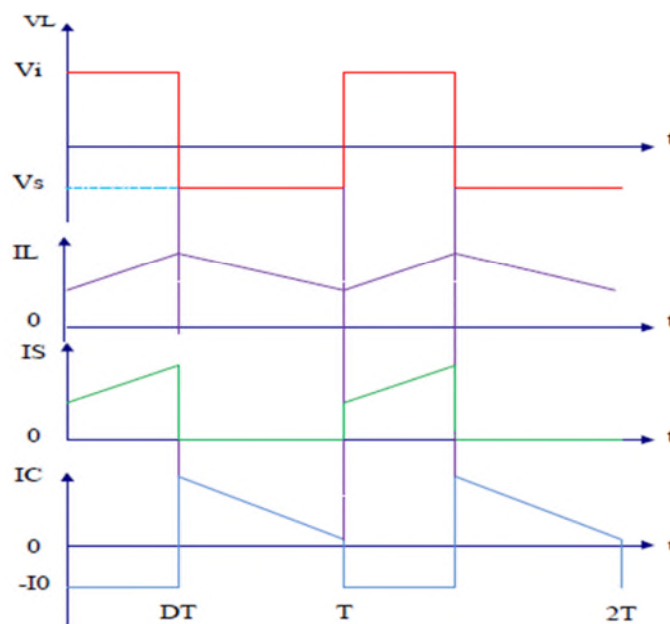


Figure (II.4) : *Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck* [19].

II-3-3 Le convertisseur Buck-Boost

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la figure (II.6). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (off). La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via

la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit :

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \dots \dots \dots \text{(II-9)}$$

Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge sont données par la figure (II.6).

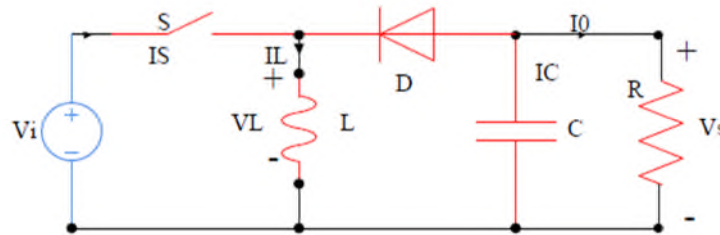


Figure (II.5) : *circuit électrique de base du hacheur survolteur-dévolteur* [19].

II.4 La commande MPPT

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [16].

II.4.1 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [16].

II.4.2 Principe du MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{ppm}, I_{ppm}) .

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC/DC comme représenté sur la figure (II.7).

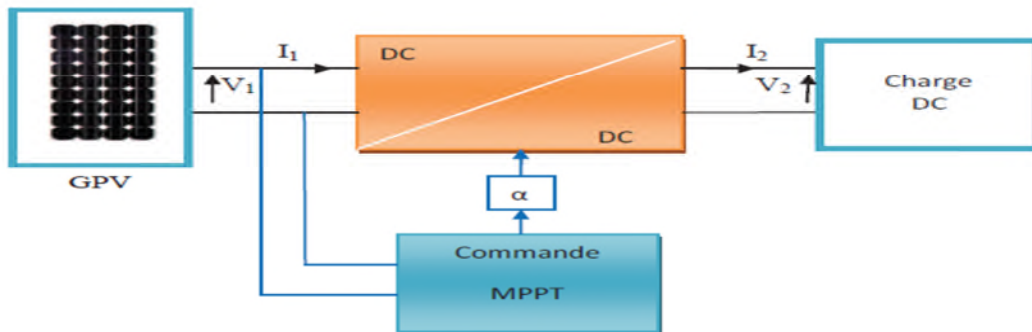


Figure (II.6) : *Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT* [16].

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La figure (II.7) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

- Pour une variation d'ensoleillement (cas a), Il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2
- Variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.
- Pour une variation de charge (cas b).

On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En résumant, le suivi du PPM réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes

MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [12].

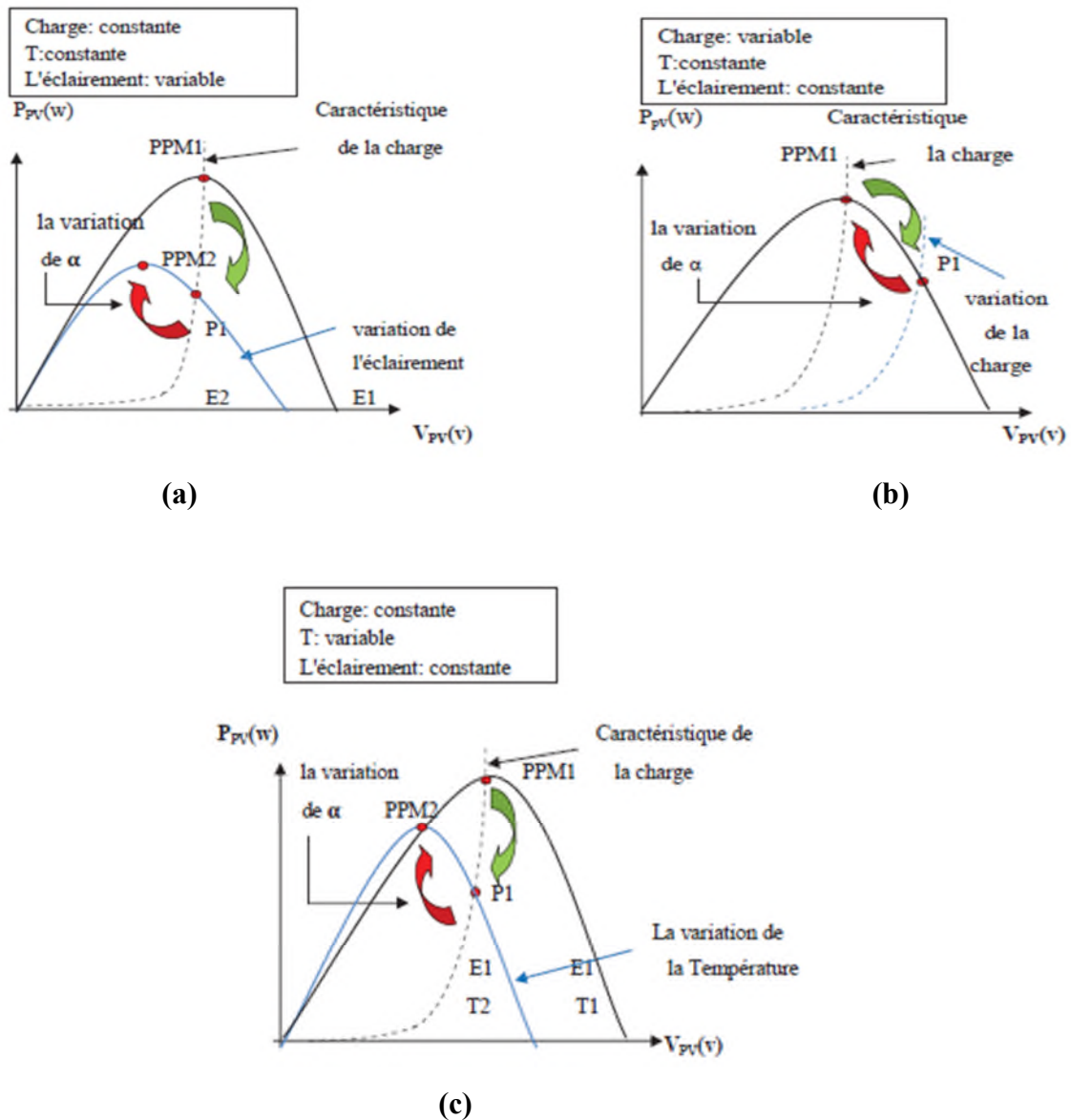


Figure (II.7) : *Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale*

a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de Température [16].

II.4.3 Classification des techniques MPPT

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. Etant donné le grand nombre de publications dans ce

domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative [12].

II-5 Les méthodes de poursuite de PPM

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables, dans notre étude on a basé sur la méthode de perturbation et d'observation (P et O) comme étant la plus utilisée [26].

II.5.1 Algorithme perturbation et observation

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (D).

Si la valeur de la puissance actuelle du générateur est supérieure à la valeur précédente alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la Figure (II.10) [3].

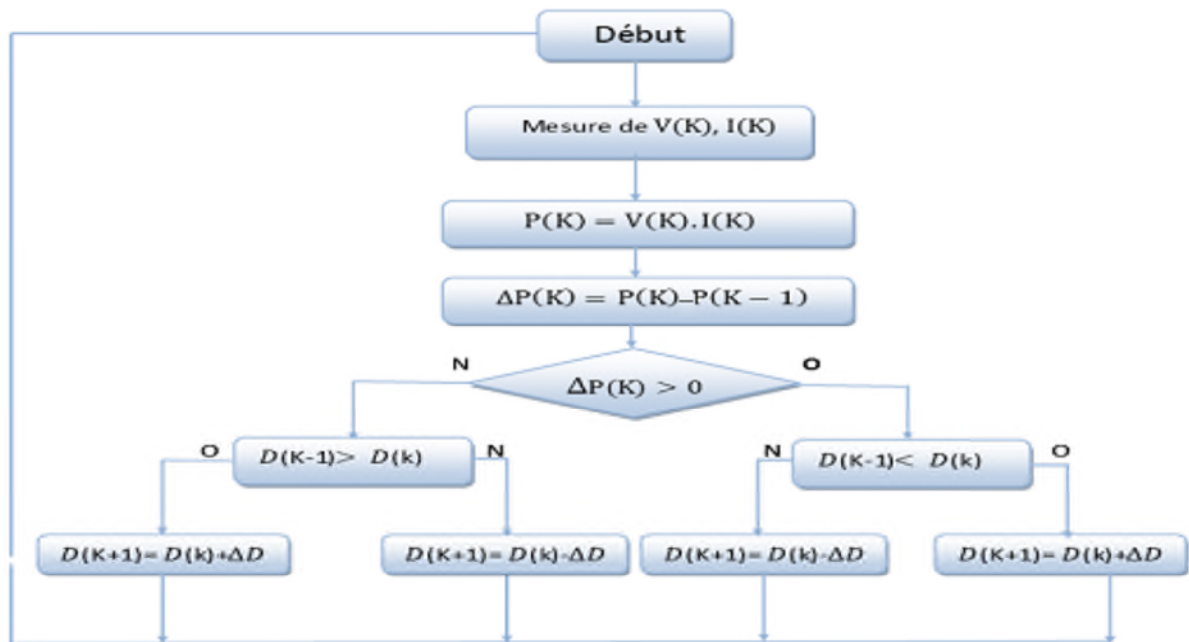


Figure (II.8) : *Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)*. [3]

Telle que :

$p(k)$: La nouvelle puissance

$P(k-1)$: L'enceint puissance dans le temps (t-1)

$$\Delta p = p(k) - P(k-1)$$

La méthode P&O est aujourd'hui 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 [16].

Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

II.6 Convertisseurs DC/AC

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de dix années, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an.

Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution d'électricité, se traduit évidemment par d'importantes innovations technologiques et une baisse de coût des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance. En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des systèmes photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système.

II-7 Principe de fonctionnement d'un onduleur :

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la figure (II-1), on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.

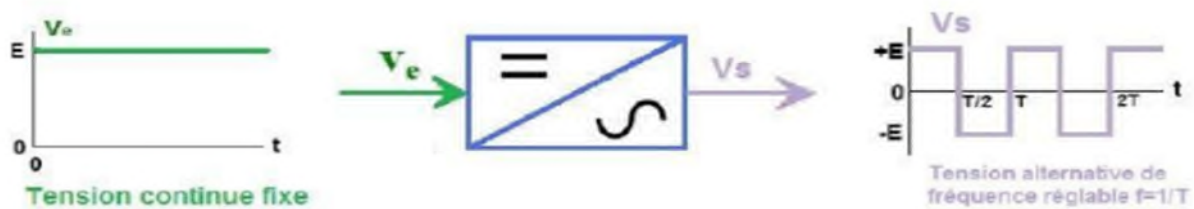


Figure (II.9) : symbole et signal d'un onduleur

L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.

Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui

suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources.

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, l'un des objectifs que doit réaliser l'onduleur connecté au réseau, est le contrôle du courant issu du champ de modules photovoltaïques et de la puissance injectée au réseau suivant les normes en vigueur. De ce fait, les spécifications standards servant à la conception d'un onduleur connecté concerneront la puissance nominale, la tension nominale du réseau, la tension maximale du DC-bus, le contrôle de l'onduleur etc. [9]

Les onduleurs connectés doivent répondre aux exigences suivantes:

- Assurer une connexion optimale à partir des modules photovoltaïques, tout en prenant soin du fonctionnement de l'onduleur.
- Améliorer le rendement du contrôle de l'onduleur connecté par rapport aux techniques obtenues actuellement dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.
- Améliorer la qualité de la puissance électrique générée et injectée.

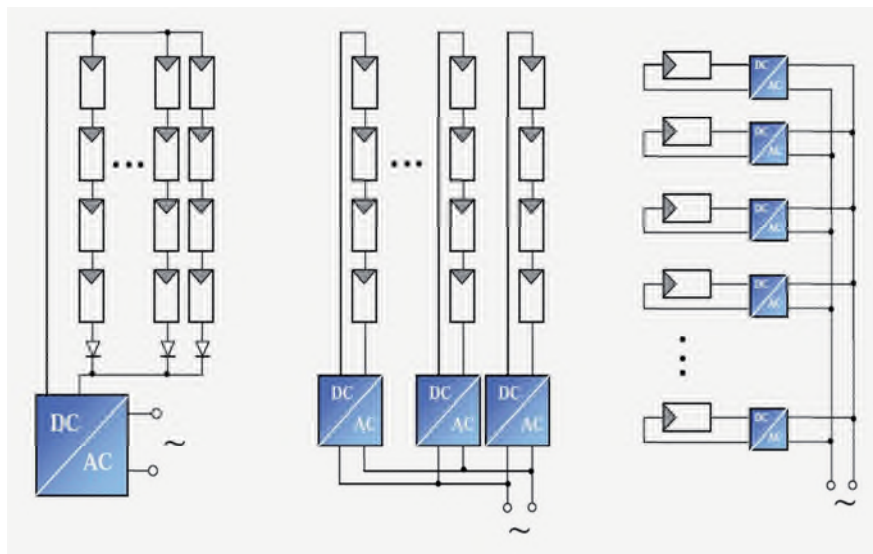
II.8 Topologie des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique

Il existe différentes topologies de gestion de ces systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Néanmoins, toutes ces approches reposent sur un générateur photovoltaïque 'GPV' raccordé au réseau par le biais d'onduleurs qui transfèrent et mettent en forme l'énergie solaire électrique. Les progrès réalisés dans le développement des onduleurs dédiés au photovoltaïque ont permis de faire évoluer grandement ces systèmes de gestion.

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les modules solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (230 V/400V – 50Hz), mais ils exploitent également la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum.

De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre, l'alimentation en cas de problèmes survenant, soit du réseau, soit de l'installation.

Actuellement, il existe principalement trois architectures d'onduleurs donnant de bonnes solutions techniques: l'onduleur central, les onduleurs strings et les onduleurs intégrés aux modules (Figure II-2) [4].



a) Onduleur centrale

b) onduleur string

c) onduleurs intégrés au PV

Figure (II.10) : *Topologies des systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique* [9].

II.8.1 L'onduleur central

Dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String en anglais), elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres, Figure II-2-a). Le générateur PV de forte puissance ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur.

Cet onduleur central présente une grande efficacité énergétique à des coûts réduits. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue la plus compatible avec le réseau et d'examiner en permanence la présence ou non du réseau pour autoriser l'injection du courant. La structure classique de l'onduleur est souvent un circuit en pont permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'interrupteurs de puissance.

Ainsi, lorsqu'une panne de l'onduleur central se produit, elle entraîne l'arrêt complet de l'installation et donc de la production.

II.8.2 Les onduleurs string

De même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de strings (chaînes). Chaque string est toutefois relié à un onduleur (Figure II-2-b). Chaque string peut ainsi

Fonctionner à son PPM. Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retour et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique. Mais il faut prendre en compte l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% nécessaires pour calculer le surcoût d'une telle architecture par rapport à la précédente [17].

II.8.3 Les onduleurs intégrés aux PV

Chaque panneau dispose ici de son propre onduleur (Figure II-2-c), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut. Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-deçà de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre les GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau 230 V. Le nombre nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux panneaux nécessaires dans cette architecture entraîne un travail de couplage nettement plus conséquent. Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W.

Les onduleurs connectés doivent répondre aux exigences suivantes:

- Assurer une connexion optimale à partir des modules photovoltaïques, tout en prenant soin du fonctionnement de l'onduleur.
- Améliorer le rendement du contrôle de l'onduleur connecté par rapport aux techniques obtenues actuellement dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.
- Améliorer la qualité de la puissance électrique générée et injectée [9].

II.9 Modélisation de l'onduleur

L'onduleur DC / AC emploie habituellement La commande MLI (modulation de la largeur d'impulsion) pour réguler l'échange des puissances active et réactive entre la production photovoltaïque et le reste du système. Ceci peut être réalisé en contrôlant le rapport de modulation m et la phase ϕ de l'algorithme MLI grâce à la fonction de tension alternative et la commande de tension continue respectivement :

$$m = m_0 + K_{ac}(s)(V_s - V_{sref}) \dots\dots\dots (II-1)$$

$$\phi = \phi_0 + K_{dc}(s)(V_{dc} - V_{dcref}) \dots\dots\dots (II-2)$$

Où :

$K_{ac}(s)$ et $K_{dc}(s)$: fonction de transfert de la tension alternatif et continue du contrôleur, respectivement.

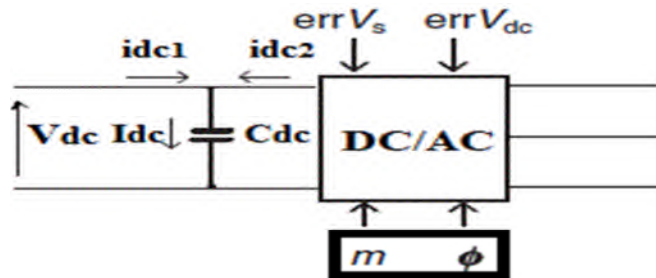


Figure (II.11) : *Convertisseur DC/AC a modeliser*

La tension alternative au borne de l'onduleur DC / AC, \bar{V}_c peut être exprimée en coordonnées d-q du générateur (Figure II- 3) [17].

$$\bar{V}_c = mkV_{dc}(\cos \Psi + j \sin \Psi) = mkV_{dc} \angle \Psi \dots\dots\dots (II-3)$$

Où :

k : Est le taux de conversion dépendant de la structure de l'onduleur,

V_{dc} : Est la tension continue aux bornes du condensateur C_{dc}

La puissance active reçu par le convertisseur DC / AC du système d'alimentation est le produit de la tension de sortie du convertisseur DC /AC et le courant circulant dans le transformateur

$$P_s = \bar{V}_c \bar{I}_s \dots\dots\dots (II-4)$$

Si on néglige les pertes de conversions on aura :

$$V_{dc} I_{dc1} = \bar{V}_c \bar{I}_s \dots\dots\dots (II-5)$$

Ainsi dans les coordonnées d, q :

$$V_{dc} I_{dc1} = v_{cd} i_{sd} + v_{cq} i_{sq} \dots\dots\dots (II-6)$$

On développant l'équation précédente on trouve :

$$V_{dc} I_{dc1} = v_{cd} i_{sd} + v_{cq} i_{sq} = i_{sd} mk V_{dc} \cos \Psi + i_{sq} mk V_{dc} \sin \Psi \dots\dots\dots (II-7)$$

Par conséquent :

$$I_{dc1} = mk \cos \Psi I_{sd} + mk \sin \Psi I_{sq} \dots\dots\dots (II-8)$$

$$(1 - d_c) I_{pv} = I_{dc2} \dots\dots\dots (II-9)$$

Car :

$$P_v = I_{pv} \cdot V_{pv} = V_{dc} \cdot I_{dc2} = (1 - d_c) V_{dc} I_{pv} \dots\dots\dots (II-10)$$

II.10. L'équation dynamique du convertisseur DC/AC :

On a : $I_{dc} = I_{dc1} + I_{dc2}$

Alors on peut écrire :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C_{dc}} (I_{dc1} + I_{dc2}) dt \rightarrow \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} (I_{dc1} + I_{dc2})$$

En substituant I_{dc1} aussi bien que I_{dc2} nous aurons :

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} [i_{sd} mk \cos \Psi + i_{sq} mk \sin \Psi + (1 - d_c) I_{pv}] \dots\dots\dots (II-11)$$

Le rendement de l'onduleur dépend pour une grande partie de la stratégie de commande utilisée. Cependant le contrôle de courant est un des sujets les plus importants dans les applications des onduleurs du fait des avantages qu'il présente et qui sont:

Un contrôle du courant instantané et une grande précision

- Une protection maximale du courant
- Une très bonne dynamique
- Une compensation de la chute de tension des semi-conducteurs et du temps mort du convertisseur
-
- Une compensation de la tension du bus continu et des variations de la tension de sortie [9].
-

II.11 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les différents types des convertisseurs entre les générateurs PV et le reste du système de puissance. On a exposé les différents convertisseurs à savoir DC/DC et DC/AC. Pour le premier on a décrit le hacheur Boost, sa commande MPPT et sa modélisation pour les seconds convertisseurs, on a donné les différentes topologies des onduleurs utilisés dans les systèmes PV pour leur raccordement aux réseaux électriques, ce dernier sera bien détaillé dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Modélisation du réseau électrique

III-Introduction

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute l'énergie électrique. Entraînées par des turbines, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW [20].

Les courants et les tensions qui apparaissent lors d'une perturbation affectant les réseaux électriques, jouent un rôle important dans la stabilité du système. Dans ce chapitre, nous allons étudier le comportement du réseau électrique (machine synchrone, transformateur, lignes). on peut citer comme exemple de perturbation un court-circuit qui provoque un déséquilibre important entre le couple moteur et le couple résistant

En outre, on va modéliser notre réseau connecté à l'alternateur en décrivant les différentes équations dynamiques qui régissent ce réseau, le modèle obtenu est non-linéaire et sera linéarisé dans le chapitre suivant.

III-1 Modélisation du réseau

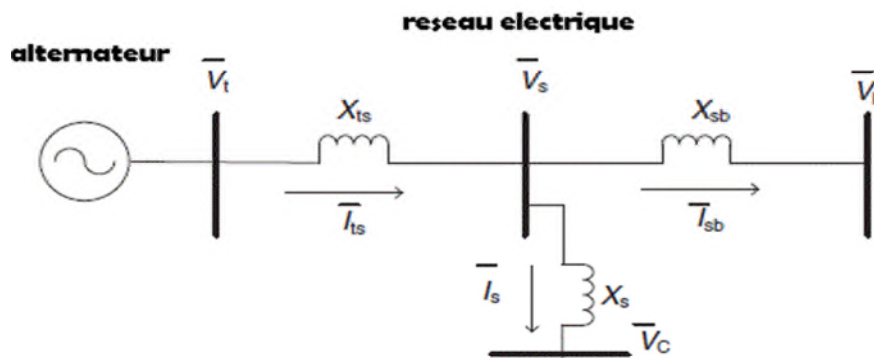


Figure (III.1) : Générateur synchrone connecté au réseau électrique

D'après la figure (III-1) et en appliquant la loi des mailles aux différents jeux de barres on aura les équations suivantes :

$$\bar{V}_t = \bar{V}_s + jx_{ts} \times \bar{I}_{ts} \dots\dots\dots (III-1)$$

$$\bar{V}_s = \bar{V}_c + jx_s \times \bar{I}_s \dots\dots\dots (III-2)$$

$$\bar{V}_s - \bar{V}_b = jx_{sb} (\bar{I}_{ts} - \bar{I}_s) \dots\dots\dots (III-3)$$

De l'équation ci-dessus, nous trouvons :

$$\bar{V}_c - \bar{V}_b + jx_s \bar{I}_s = jx_{sb} (\bar{I}_{ts} - \bar{I}_s) \dots\dots\dots (III-4)$$

$$\bar{V}_t = \bar{V}_b + jX_{sb} (\bar{I}_{ts} - \bar{I}_s) + jX_{ts} \times \bar{I}_s \dots\dots\dots (III-5)$$

Les équations précédente, peut être obtenu sous forme matricielle et en coordonnées (d, q) comme suit :

$$\begin{bmatrix} x_{Sb} & -x_s - x_{Sb} \\ x_q + x_{Sb} + x_{ts} & -x_{Sb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{tsq} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_c \cos \psi + V_b \sin \delta \\ V_b \sin \delta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_{Sb} & -x_s - x_{Sb} \\ x'_d + x_{ts} + x_{Sb} & -x_{Sb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{tsd} \\ i_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_c \sin \psi - V_b \cos \delta \\ E'_q - V_b \cos \delta \end{bmatrix}$$

D'où les courants de lignes peuvent être écrits :

$$\begin{bmatrix} i_{tsq} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -V_c \cos \psi + V_b \sin \delta \\ V_b \sin \delta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.6)$$

$$\begin{bmatrix} i_{tsd} \\ i_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_c \sin \psi - V_b \cos \delta \\ E'_q - V_b \cos \delta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.7)$$

III.2 Détermination des puissances

$$P_t = \frac{V_t V_s}{X_{ts}} \sin(\theta_t - \theta_s)$$

$$Q_t = \frac{V_t^2}{X_{ts}} - \frac{V_t V_s}{X_{ts}} \sin(\theta_t - \theta_s)$$

$$\Rightarrow \theta_t = \sin^{-1} \frac{X_{ts}}{V_t V_s} P_t$$

$$P_{pv} = \frac{V_c V_s}{X_s} \sin(\theta_c - \theta_s)$$

$$Q_{pv} = \frac{V_t^2}{X_{ts}} - \frac{V_c V_s}{X_s} \sin(\theta_c - \theta_s)$$

$$\Rightarrow \theta_c = \sin^{-1} \frac{X_{ts}}{V_t V_s} P_t$$

$$P_t = \frac{V_b V_s}{X_b} \sin(\theta_s - 0)$$

$$Q_t = \frac{V_s^2}{X_b} - \frac{V_b V_s}{X_b} \sin(\theta_s - 0)$$

$$Q_g = \frac{V_t^2}{X_{ts}} - \frac{V_t V_s}{X_{ts}} \sin(\theta_t - \theta_s)$$

$$\Rightarrow \theta_s = \sin^{-1} \frac{X_{ts}}{V_t V_s} P_t$$

$$Q_t = Q_{pv} + Q_g \Rightarrow Q_{pv} = Q_t - Q_g$$

III-3 Modélisation de l'alternateur

III-3-1 Modèle d'ordre 3 :

La variation des flux des circuits d'amortisseurs et des enroulements statoriques sont négligeables, seule la variation du flux de l'enroulement d'excitation est considérée.

Le modèle mathématique générale du générateur synchrone peut être écrit comme suite : $X\dot{g} = f(Xg, \overline{I_{ts}})$ [4].

Xg : est le vecteur d'état variable associé à la dynamique du générateur.

Les équations dynamiques du générateur couramment utilisées pour l'étude de la stabilité des oscillations du système d'alimentation sont :

III-3-2 Equation de mouvement du générateur synchrone

On a 2 équations pour notre modèle, en effet :

$$\dot{\delta} = \omega_0(\omega - 1) \dots\dots\dots (III-8)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} [Pm - Pt - D(\omega - 1)] \dots\dots\dots (III-9)$$

Avec :

δ : l'angle du rotor

ω : La vitesse du générateur synchrone

P_t : La puissance électrique

P_m : La puissance mécanique

ω_0 : La vitesse de synchronisme

D : Le coefficient d'amortissement naturel

M : l'inertie.

III-3-3 Equation électrique du générateur synchrone

$$\dot{E}_{q'} = \frac{1}{T_{d0}} (-E_q + E_{fd}) \dots\dots\dots (III-10)$$

Avec :

E_q : tension d'axe q

$E_{q'}$: La tension transitoire du générateur synchrone

T_{d0} : constante de temps transitoire d'excitation du générateur synchrone

E_{fd} : Tension d'excitation du régulateur automatique de la tension(AVR)

La puissance électrique a la sortie du générateur synchrone est :

$$P_t = V_{td} i_{tsd} + V_{tq} i_{tsq} = (x_q i_{tsq}) i_{tsd} + (E_q' - x_d' i_{tsd}) i_{tsq}$$

$$P_t = E_q' i_{tsq} + (x_q - x_d') i_{tsd} i_{tsq} \dots\dots\dots (III-11)$$

La tension d'axe q peut être écrit sous forme :

$$E_q = E_q' - (x_d - x_d') i_{tsd} \dots\dots\dots (III-12)$$

Est la tension aux jeux de barre à la sortie du générateur synchrone est de :

$$V_t = \sqrt{(V_{td}^2 + V_{tq}^2)} = \sqrt{(x_q i_{tsq})^2 + (E_q' - x_d' i_{tsd})^2} \dots\dots\dots (III-13)$$

Avec :

d, q : Indice pour indiquer les composants d et q d'une variable

V_t : La tension aux bornes du générateur synchrone

V_{tref} : La tension de référence du générateur synchrone

I_{ts}, I_s : courants de lignes du réseau

$I_{tsd}, I_{tsq}, I_{sd}, I_{sq}$: courants de ligne dans le repère (d,q)

X_d, X_d', X_q : Réactances transitoires du générateur synchrone

III-4 Modélisation du régulateur de tension automatique(AVR)

Le système d'excitation est un système auxiliaire qui alimente les enroulements d'excitation de la machine synchrone afin que cette dernière puisse fournir le niveau de puissance demandé. En régime permanent, ce système fournit une tension et un courant continu mais il doit être capable également de faire varier rapidement la tension d'excitation en cas de perturbation sur le réseau. Les systèmes d'excitation sont équipés de contrôleurs,

appelés habituellement régulateurs de tension (Automatic Voltage Regulator : AVR), figure (III-1). Ces derniers sont très importants pour l'équilibre de la puissance réactive qui sera fournie où absorbée selon les besoins des charges. En outre ces contrôleurs représentent un moyen très important pour assurer la stabilité transitoire du système de puissance.

Le régulateur de tension agit sur le courant d'excitation de l'alternateur pour régler le flux magnétique dans la machine et "ramener" la tension de sortie de la machine aux valeurs souhaitées. Une caractéristique très importante d'un régulateur de tension est sa capacité à faire varier rapidement la tension d'excitation.

Les systèmes d'excitation statiques étant les plus installés actuellement, nous avons donc choisi dans notre étude d'utiliser le modèle du système IEEE-ST1A, modèle le plus utilisé dans la littérature. Ce type de système d'excitation se caractérise par sa rapidité et sa sensibilité. [20]

La figure suivante montre le modèle du système d'excitation et de son régulateur de tension utilisé dans notre étude.

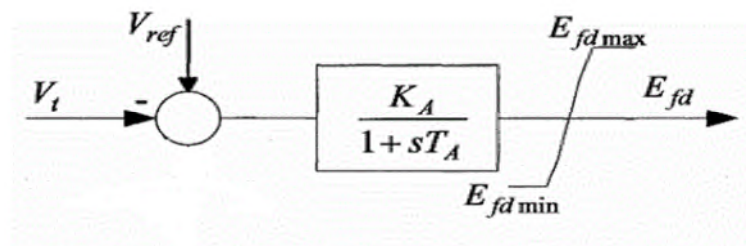


Figure (III.2) : système d'excitation IEEE-type ST1A.

La fonction de transfert du régulateur de tension automatique AVR est donnée comme suite :

$$TE(S) = \frac{K_A}{sT_A + 1} : \text{C'est une fonction de transfert du 1^{er} ordre, pour simplifier l'étude}$$

La relation suivante décrit le fonctionnement dynamique du modèle

$$E_{fd'} = \frac{K_A}{sT_A + 1} (V_{ref} - V_t) \dots \dots \dots (III-14)$$

La grandeur V_{ref} , est la consigne de tension spécifiée pour satisfaire les conditions de l'état D'équilibre. Le régulateur de tension compare le signal V_t à la tension de consigne V_{ref} .

K_a : Gain du régulateur de tension

T_a : Constante de temps du régulateur de tension

III-5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'un réseau d'énergie électrique pour les études de la stabilité aux petites perturbations, dans un premier temps on a décrit les différentes parties constituantes d'un réseau (lignes, alternateur, réseau) et présenté les équations mathématiques qui permettent de les modéliser.

Nous avons aussi présenté un modèle du 3eme ordre du générateur synchrone. Et on a décrit ces équations mécanique et électrique comme on a modélisé le régulateur de tension automatique (AVR).

Chapitre IV

*Modélisation et linéarisation
du système global*

IV. Introduction

Les modules photovoltaïques ont été et seront raccordés au réseau de distribution dans de nombreux pays, cependant les générateurs photovoltaïques peuvent être déployés de manière plus souple, en termes de localisation, que d'autres ressources renouvelables telles que le vent et les générateurs solaires thermiques [24].

Comme observé dans les processus d'interconnexion de la production photovoltaïque, des générateurs à petite échelle varient de moins d'un MW à 20 MW alors que la capacité du projet du générateur photovoltaïque à grande échelle peut se propager de moins de 100 MW à 1000 MW d'interconnexion. À grande échelle les générateurs photovoltaïques sont reliés généralement aux niveaux de transmission en raison de leur plus grande capacité. Les petits générateurs photovoltaïques sont choisis principalement pour interconnecter le réseau de distribution ou de transmission secondaire le plus proche.

Cependant, il est intéressant de noter que la production distribuée classique n'est pas de nature intermittente, donc la plupart de ses impacts peuvent être étudiés grâce à l'état d'équilibre des analyses. En raison de l'intermittence de sa principale ressource, les impacts de la production PV doit être analysés au moyen d'études dynamiques. Donc, dans ce travail, nous voulons étudier l'impact de la pénétration accrue des générateurs photovoltaïques sur la stabilité du système d'alimentation aux petites perturbations. [3]

La figure (IV.1) montre la configuration d'un système de puissance d'une seule machine, où une station de production d'électricité photovoltaïque est connectée aux jeux de barres. [1]

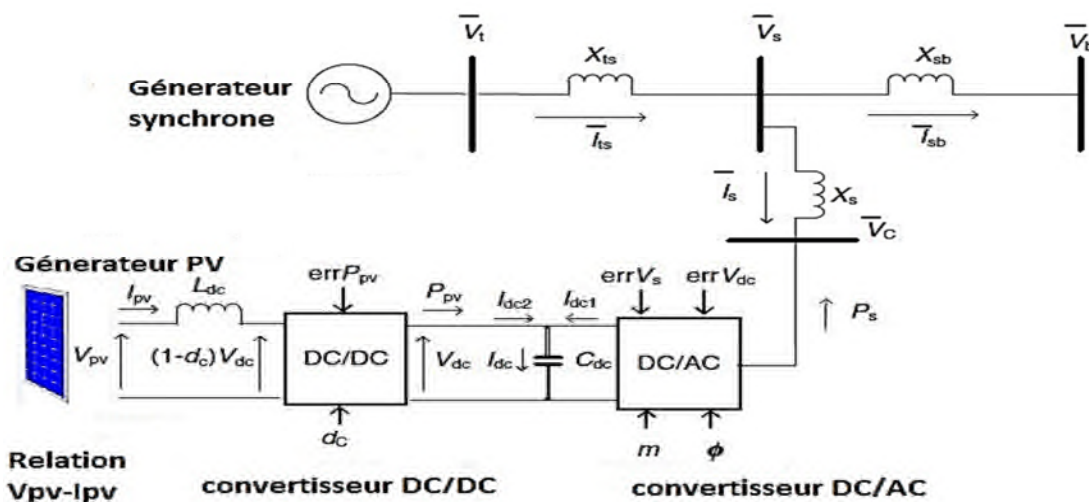


Figure (IV.1): système de puissance connecter a une centrale photovoltaïque

La figure (IV.1) montre la configuration d'un système de puissance connectée à une centrale de production photovoltaïque à grande échelle.

Dans ce système, une centrale photovoltaïque est connectée au réseau de transport, ou elle génère une tension continue fluctuante en sortie. Pour cela elle est directement reliée au convertisseur DC/DC, Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est employée non seulement pour extraire autant de puissance que possible en commandant le rapport cyclique du convertisseur DC / DC, mais aussi pour extraire le maximum de puissance des cellules photovoltaïques.

La sortie DC améliorée et lisse est convertie en tension alternatif en mettant en œuvre le convertisseur DC/AC, Afin de régler les échanges de puissance active et réactive entre l'installation photovoltaïque et le reste du système d'alimentation classique, il est employé avec la commande MLI. [1]

La caractéristique tension-courant de la production photovoltaïque est non linéaire, elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_{pv} = \frac{N_s n k T}{q} \ln \left(\frac{N_p I_{cc} I_r - I_{pv}}{N_p I_s} + 1 \right) \dots\dots\dots \text{(IV.1)}$$

Ou :

T : Est la température de jonction,

N_s, N_p : Nombre de cellules en série et en parallèle respectivement

n : Facteur d'idéalité

I_r : L'irradiance

I_{cc} : Courant de court-circuit

I_s : Courant de saturation

q : La charge de l'électron

k : Constante de Boltzmann.

Le diagramme vectoriel du système de puissance de la figure (IV.1) est donné ci-dessous :

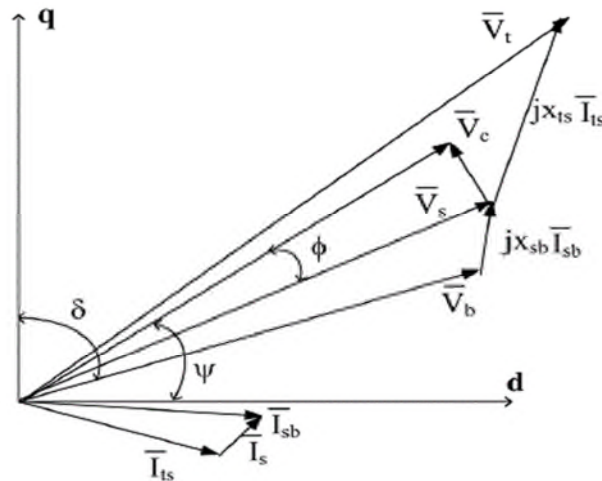


Figure (VI.2) : diagramme vectoriel du système de puissance

VI.1 Equation différentielle

Les équations différentielles et non linéaire qui régissent le système global sont :

$$\dot{\delta} = \omega_0(\omega - 1) \dots \dots \dots (IV.2)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} [P_m - P_t - D(\omega - 1)] \dots \dots \dots (IV.3)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0}} (-E_q + E_{fd}) \dots \dots \dots (IV.4)$$

$$\dot{E}'_{fd} = \frac{K_A}{sT_A + 1} (V_{ref} - V_t) \dots \dots \dots (IV.4)$$

$$\dot{i}_{pv} = \frac{1}{L_{dc}} [V_{pv} - (1 - d_c)V_{dc}] \dots \dots \dots (IV.5)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} [i_{sd}mk \cos \Psi + i_{sq}mk \sin \Psi + (1 - d_c)I_{pv}] \dots \dots \dots (IV.6)$$

VI.2 Equations des régulateurs

C'est les équations dynamiques des convertisseurs DC/AC et DC/AC respectivement et leur commande, elles sont décrites sous la forme suivante :

$$\phi = \phi_0 + K_{dc}(s)(V_{dc} - V_{dcref}) \dots \dots \dots (IV.7)$$

$$m = m_0 + K_{ac}(s)(V_s - V_{sref}) \dots \dots \dots (IV.8)$$

$$d_c = d_{c0} + K_{pv}(s)(P_{pv} - P_{pvmax}) \dots \dots \dots (IV.9)$$

Toutes les équations ci-dessus (différentielle, régulateurs) ont été mentionné et modéliser dans les chapitres précédents.

VI.3.La linéarisation des courants de ligne

La linéarisation des équations (III.6) et (III.7) nous donne:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{tsq} \\ \Delta i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -m_0 k \cos \Psi_0 \Delta V_{dc} - kV_{dc0} \cos \Psi_0 \Delta m + m_0 k V_{dc0} \sin \Psi_0 \Delta \Psi + V_b \cos \delta_0 \Delta \delta \\ V_b \cos \delta_0 \Delta \delta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{tsd} \\ \Delta i_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 k \sin \Psi_0 \Delta V_{dc} + kV_{dc0} \sin \Psi_0 \Delta m + m_0 k V_{dc0} \cos \Psi_0 \Delta \Psi + V_b \sin \delta_0 \Delta \delta \\ \Delta E'_q + V_b \sin \delta_0 \Delta \delta \end{bmatrix}$$

En utilisant l'équation (III.13), la linéarisation du système matricielle ci-dessus peut être obtenue comme suit :

$$\Delta P_t = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q + K_{pdc} \Delta V_{vdc} + K_{pm} \Delta m + K_{p\psi} \Delta \psi$$

$$\Delta E_q = K_4 \Delta \delta + K_3 \Delta E'_q + K_{qdc} \Delta V_{dc} + K_{qm} \Delta m + K_{q\psi} \Delta \psi$$

$$\Delta V_t = K_4 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_{vdc} \Delta V_{dc} + K_{vm} \Delta m + K_{v\psi} \Delta \psi$$

$$V_S = \sqrt{V_{sd}^2 + V_{sq}^2}$$

Avec :

$$V_{sd} = -x_s i_{sq} + km V_{dc} \cos \Psi, V_{sq} = -x_s i_{sd} + km V_{dc} \sin \Psi$$

La tension V_S peut être linéariser comme suit :

$$\Delta V_S = \frac{V_{sd0}}{V_{s0}} \Delta v_{sd} + \frac{V_{sq0}}{V_{s0}} \Delta v_{sq} = B_1 \Delta \delta + B_2 \Delta E'_q + B_{dc} \Delta v_{dc} + B_3 \Delta m + B_4 \Delta \psi$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{v_{sq}}{v_{sd}} \right) - \phi$$

ψ : C'est l'angle de la tension complexe V_c par rapport au repère (d).

De même pour ψ , ça linéarisation est la suivante :

$$\Delta \psi = \Delta \phi + \frac{1}{v_{sd0}^2 + v_{sq0}^2} (v_{sd0} \Delta v_{sq} - v_{sq0} \Delta v_{sd})$$

$$\Delta \psi = \Delta \phi + g'_1 \Delta \delta + g'_2 \Delta E'_q + g'_{dc} \Delta V_{dc} + g'_3 \Delta m + g'_4 \Delta \psi$$

$$\Delta\psi = g\Delta\phi + g_1\Delta\delta + g_2\Delta E'_q + g_{dc}\Delta V_{vdc} + g_3\Delta m$$

VI.4 Linéarisation du système globale

$$\Delta\dot{\delta} = \omega_0\Delta\omega$$

$$\Delta\dot{\omega} = \frac{1}{M}(-\Delta P_t - D\Delta\omega)$$

$$\Delta\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}}(-\Delta E_q - \Delta E'_{fd})$$

$$\Delta E'_{fd} = TE(s)(-\Delta V_t + \Delta V_{t_{ref}})$$

$$\Delta\dot{I}_{pv} = C_1\Delta I_{pv} + C_2\Delta V_{dc}$$

$$\Delta\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}}[C_3\Delta\delta + C_4\Delta E'_q + C_5\Delta V_{dc} + C_6\Delta I_{pv} + K_{dm}\Delta m + K_{d\psi}\Delta\Psi]$$

Sous forme matricielle on aura :

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{E}'_q \\ \Delta\dot{E}'_{fd} \\ \Delta\dot{I}_{pv} \\ \Delta\dot{V}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_1}{M} & \frac{-D}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 & 0 & \frac{-K_{pdc}}{M} \\ \frac{-K_4}{T'_{d0}} & 0 & \frac{-K_3}{T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} & 0 & \frac{-K_{qdc}}{T'_{d0}} \\ \frac{K_A}{T_A} K_5 & 0 & \frac{-K_A}{T_A} K_6 & \frac{-1}{T_A} & 0 & \frac{-K_A}{T_A} K_{vdc} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_1 & C_2 \\ \frac{C_3}{C_{dc}} & 0 & \frac{C_4}{C_{dc}} & 0 & \frac{C_6}{C_{dc}} & \frac{C_5}{C_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta I_{pv} \\ \Delta V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{-K_{pm}}{M} & \frac{-K_{p\psi}}{M} \\ \frac{-K_{qm}}{T'_{d0}} & \frac{-K_{q\psi}}{T'_{d0}} \\ \frac{K_A}{T_A} K_{vm} & \frac{-K_A}{T_A} K_{v\psi} \\ 0 & 0 \\ \frac{K_{dm}}{C_{dc}} & \frac{K_{d\psi}}{C_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m \\ \Delta\Psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\Delta p_m}{M} \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \Delta V_{t_{ref}} \\ -\frac{1}{L_{dc}} \Delta_{dc} V_{dc0} \\ \frac{V_{dc0}}{C_{dc}} \Delta_{dc} \end{bmatrix}$$

IV-5 Schéma bloc

La figure (IV-2) et (IV-3) montre l'interaction de la dynamique entre le générateur photovoltaïque et le générateur synchrone.

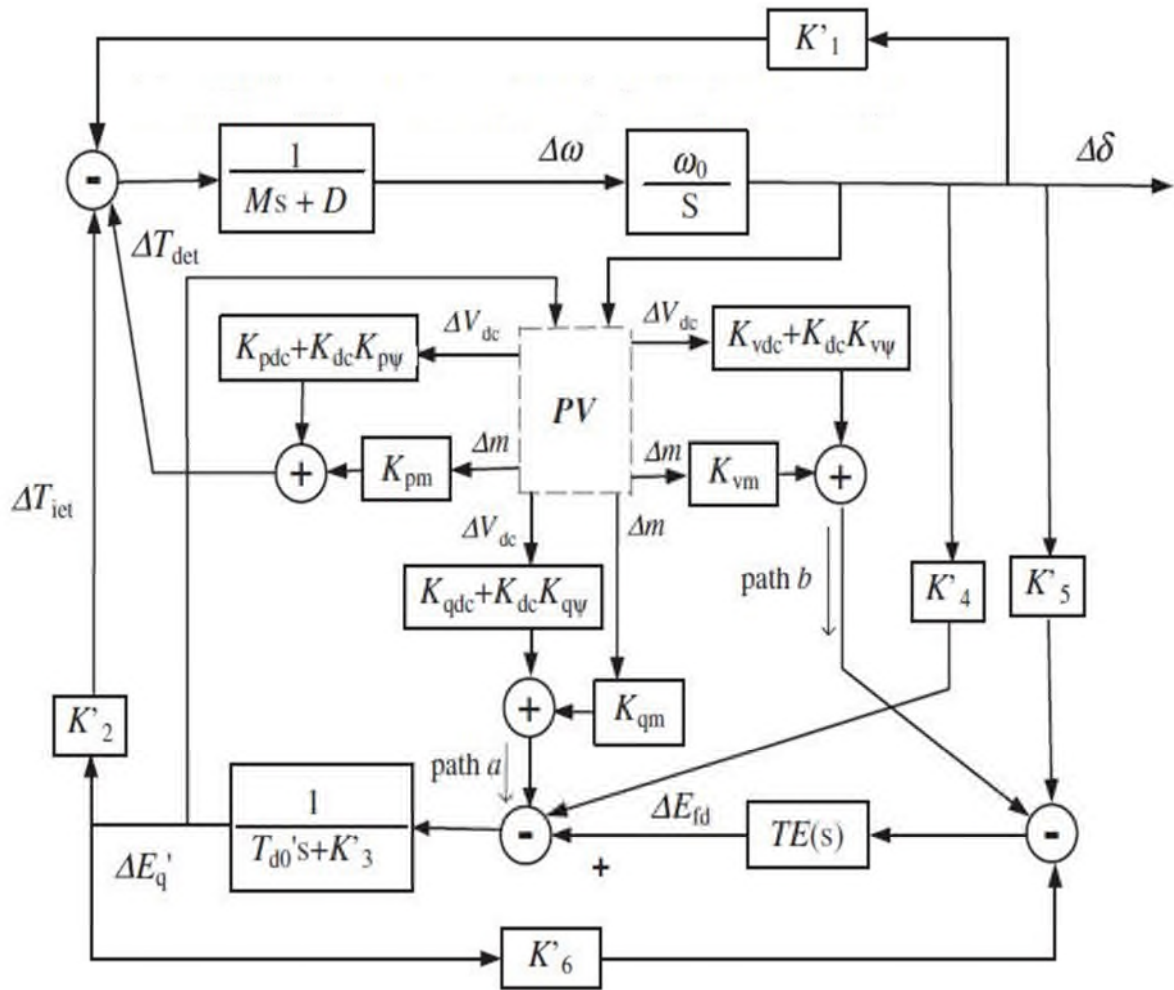


Figure (IV.3) : système de puissance linéarisé avec l'intégration de la centrale photovoltaïque

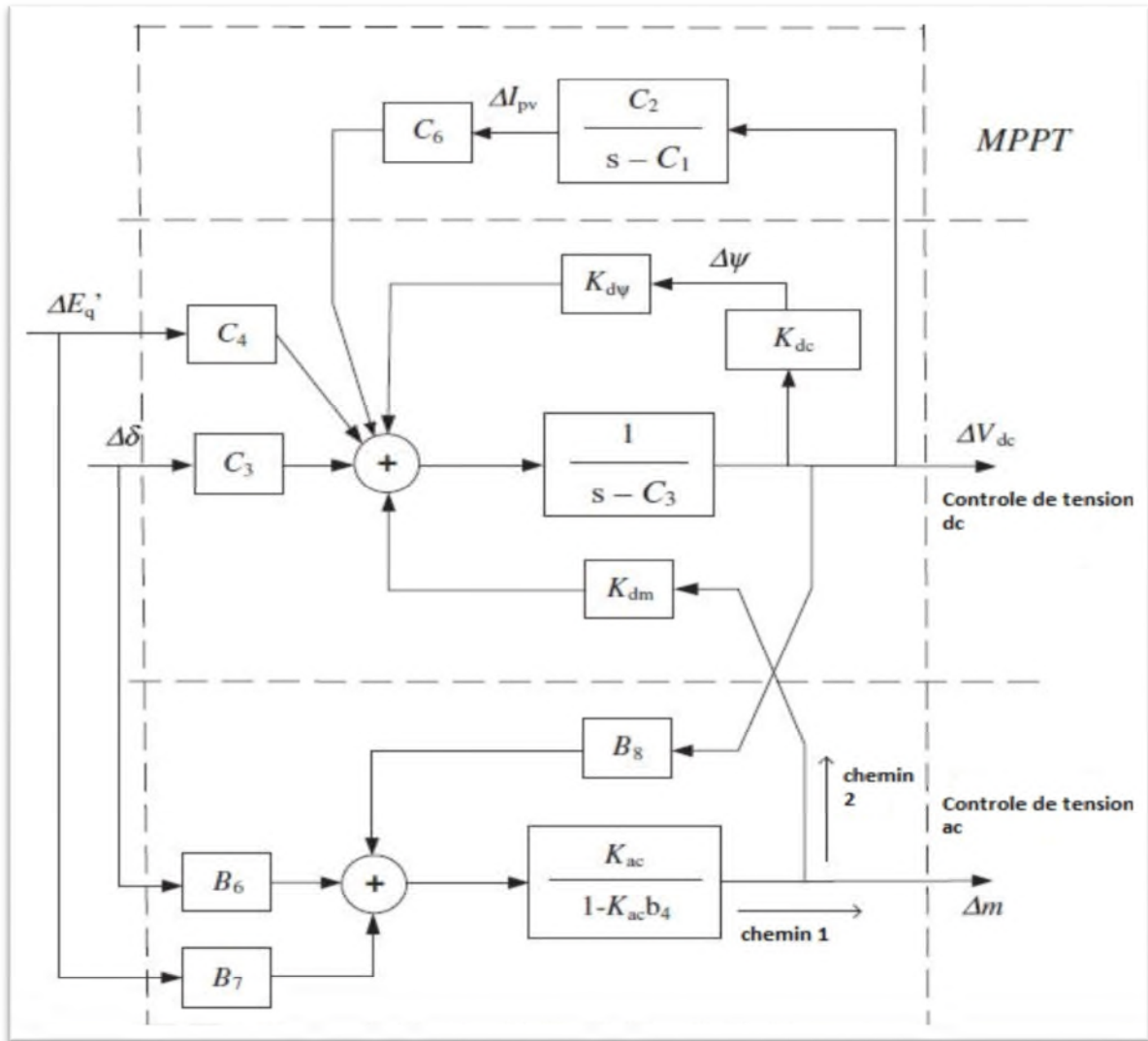


Figure (IV.4) : Modèle linéarisé de la partie de la production PV et du contrôle.

IV.6 Résultats et discussions

Nous présentons dans cette section les résultats obtenus suite aux simulations réalisées sur Matlab/Simulink. L'implémentation du modèle mathématique obtenu à la section (IV.3) sur Simulink est présentée à la Figure (IV-5). Les paramètres du cas pratique sont donnés au tableau (IV-6).

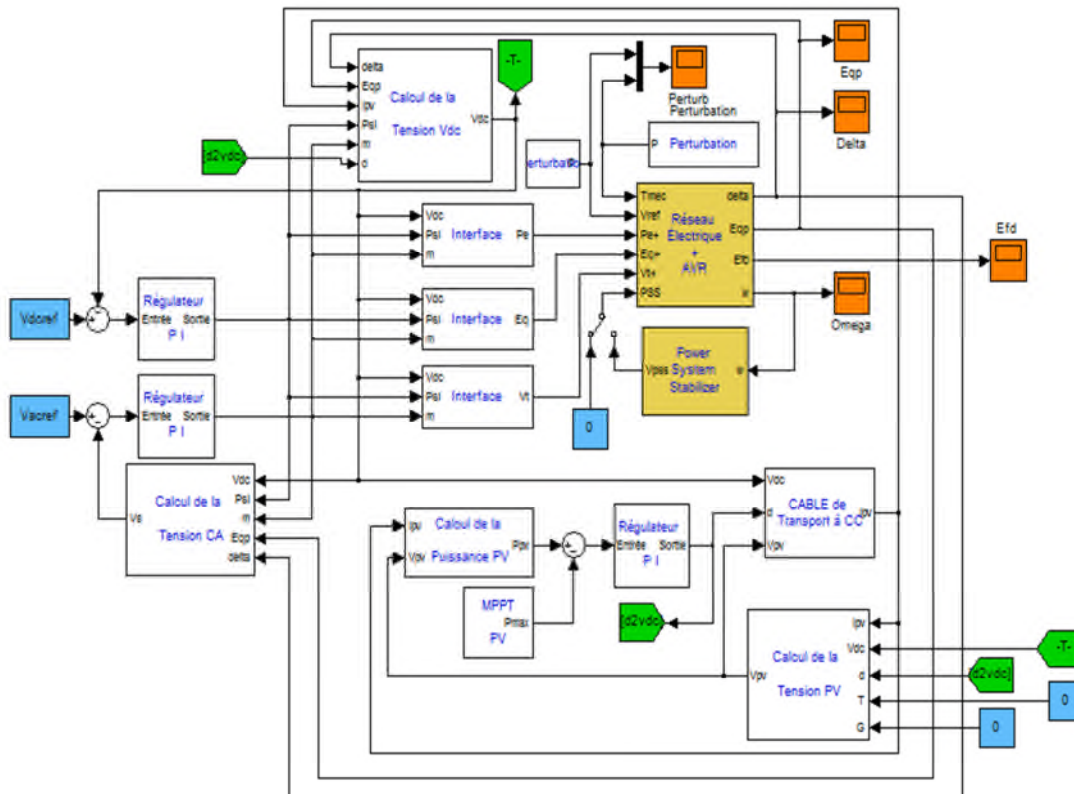


Figure (IV.5) : schéma bloc du système global sur Matlab/Simulink

IV.6.1 Type et caractéristique électrique du module photovoltaïque MSX-60

$P_{max}(W)$	60
$V_{max}(V)$	17.1
$I_{max}(A)$	3.5
$P_{min}(W)$	58
$I_{CC}(A)$	3.8
$V_{OC}(V)$	21.1

Nous commençons par l'étude quantitative de l'influence de la température sur les générateurs photovoltaïques. La sous-section qui suit est consacrée au système global.

IV.7 Influence de la température sur les générateurs photovoltaïques

Nous donnons ici les résultats de la simulation pour les caractéristiques $P(V)$, $P(I)$, $I(V)$ du panneau solaire pour différentes températures et pour un éclairement fixe $E=1000W/ m^2$.
 Résultats de simulation pour les caractéristiques $P(V)$, $P(I)$, $I(V)$ pour différentes températures et pour un éclairement fixe $E=1000W/ m^2$.

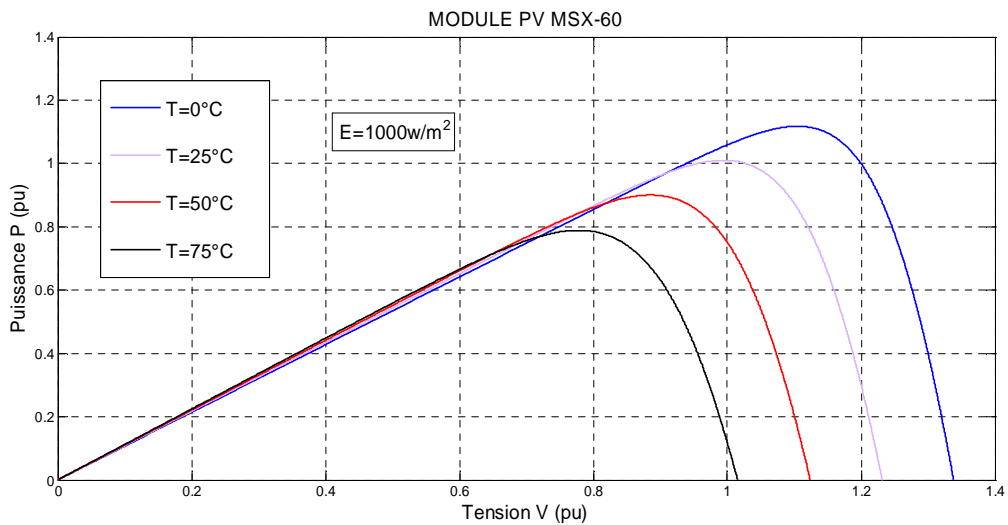


Figure (IV.6) : Résultats de simulation de la caractéristique $P=f(V)$

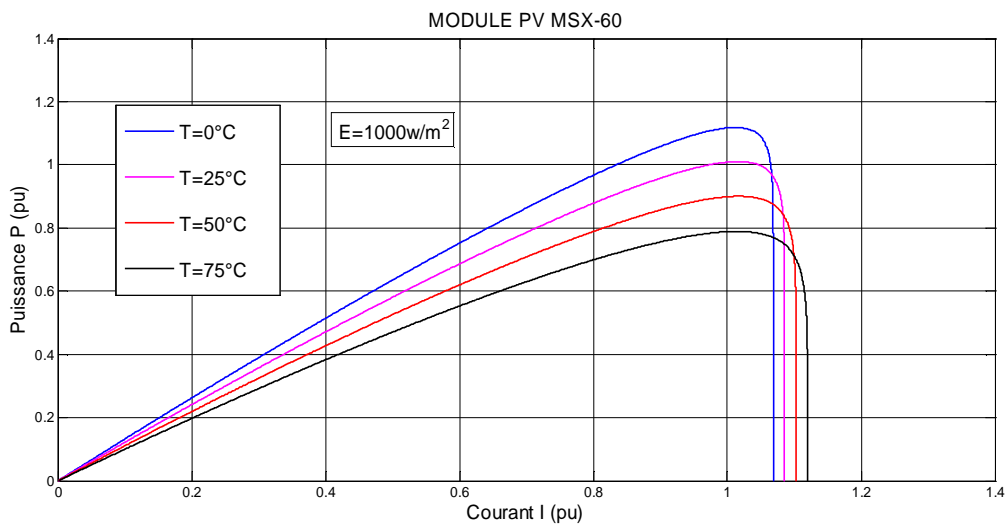


Figure IV.7 : Résultats de simulation de la caractéristique $P=f(I)$

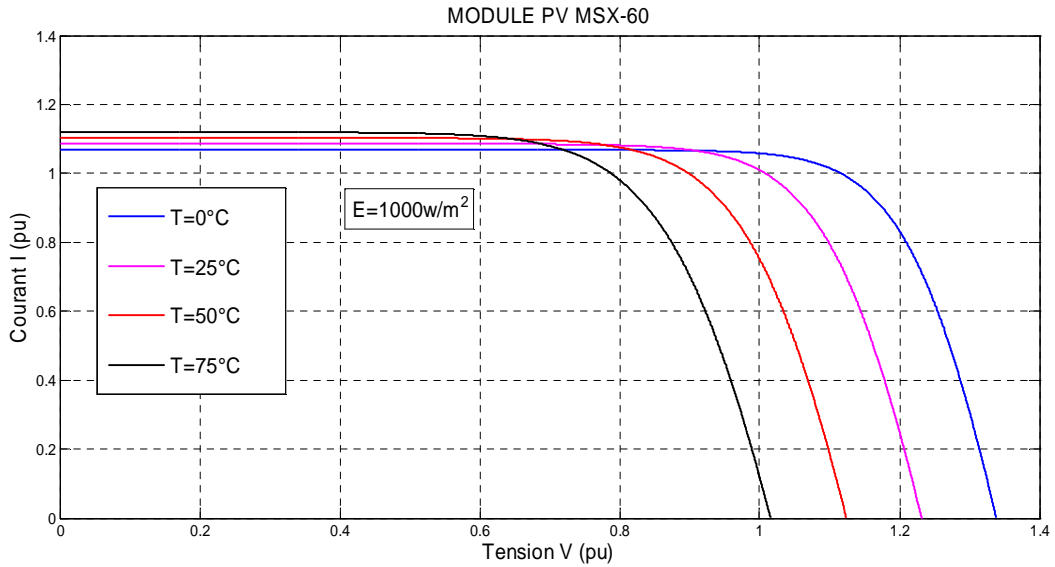


Figure IV.8 : Résultats de simulation de la caractéristique $I(V)$

Pour différents température et un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$, On constate d'après la figure (VI-3) que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert du GPV, contrairement au courant de court-circuit qui reste presque constant. D'après la figure (VI-1) l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique $P(V)$ fait diminuer la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.

La modèle choisi a donné des résultats concordant avec ces obtenus, la littérature reflète bien le comportement physique d'une cellule (PV) vis-à-vis des variations de la température et de l'éclairement, ce qui valide le modèle utilisé. Et pour la Figure (VI-2) $P(I)$ montre que l'augmentation de la température est inversement proportionnelle à la puissance contrairement au courant de court-circuit qui varie légèrement.

IV.8 Influence de l'éclairement sur les générateurs photovoltaïques

Résultats de simulation pour les caractéristiques $P(V)$, $P(I)$, $I(V)$ pour différents éclairements et pour une température fixe $T=25^\circ\text{C}$.

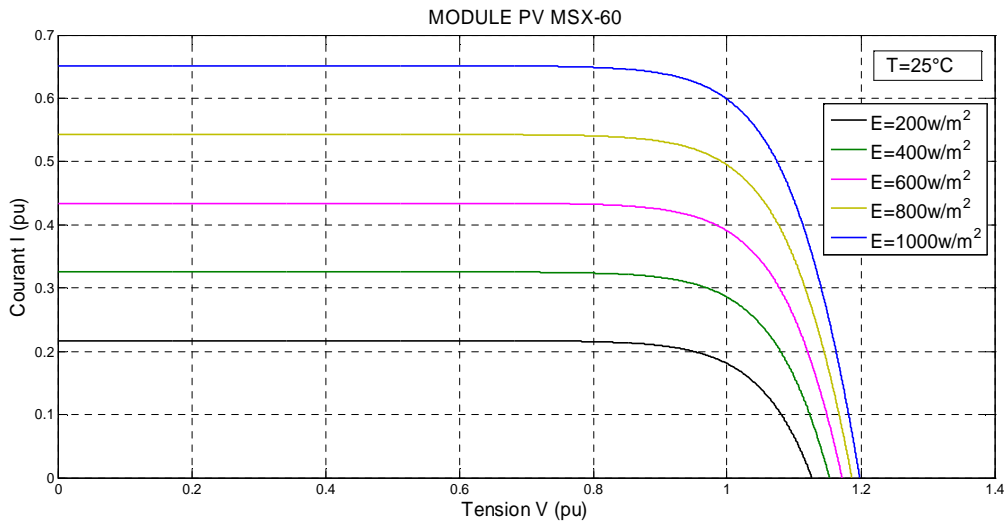


Figure (IV.9) : Résultats de simulation de la caractéristique $I=f(V)$

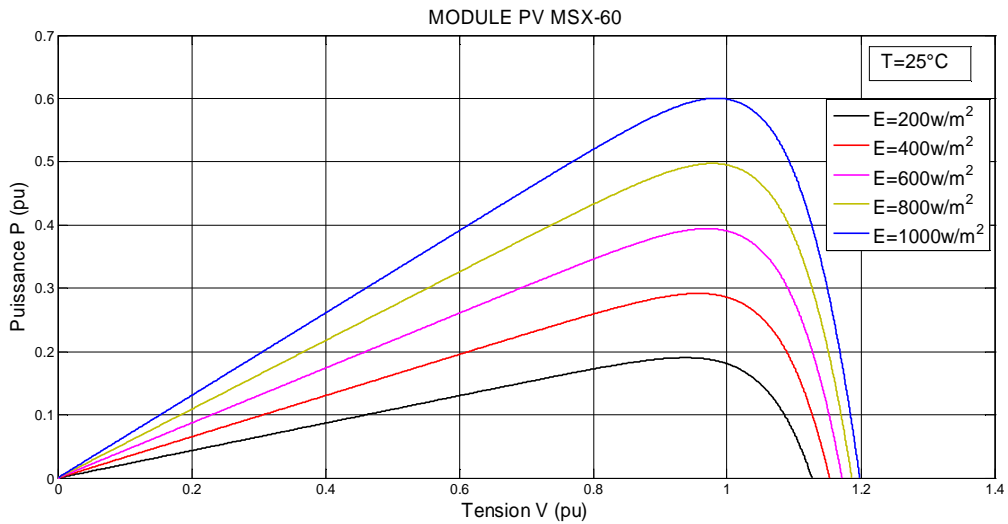


Figure (IV.10) : Résultats de simulation de la caractéristique $P(V)$

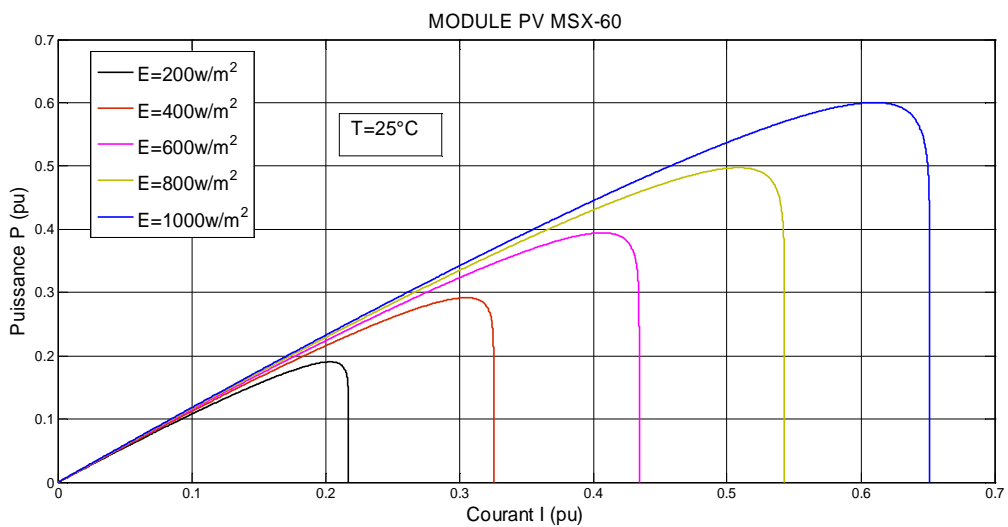


Figure (IV.11) : Résultats de simulation de la caractéristique $P(I)$

D'après la figure (VI-9), on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement (E) et une faible diminution de la tension à circuit ouvert. Par conséquent, le courant de court-circuit de la cellule dépend fortement de l'éclairement, par contre la tension à circuit ouvert subit une légère augmentation lorsque l'éclairement varie de 200 W/m² à 1000 W/m².

On remarque aussi sur les figures (IV-10) et (IV-11) que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension à circuit ouvert du GPV ainsi que le courant de court-circuit.

IV.9 Simulation du système globale de la figure (IV-1)

On prend : $P_e = 0.6 pu$ et $P_{pv} = 0.4 pu$

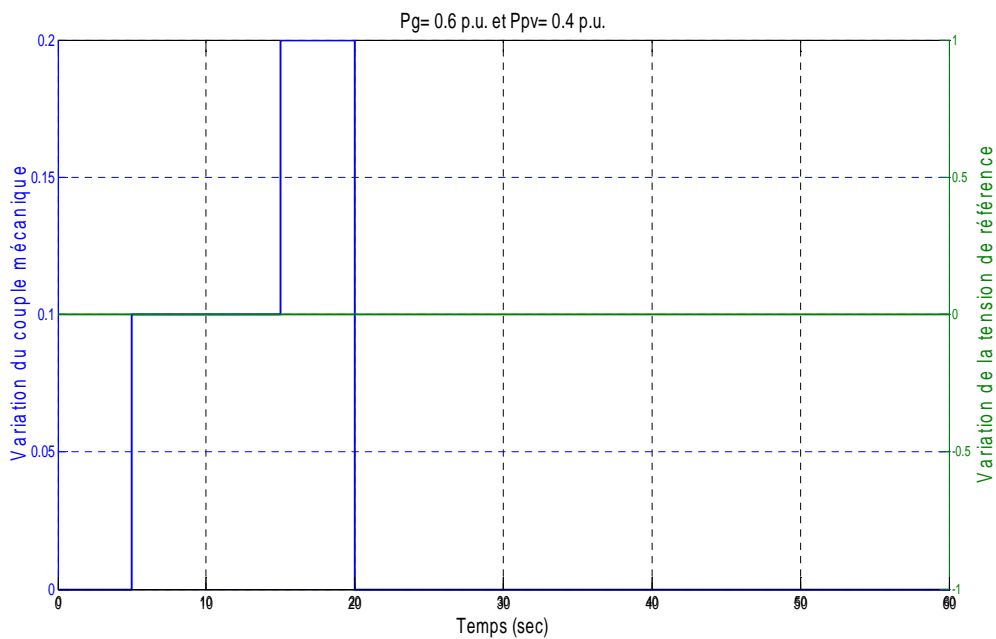


Figure (IV.12) : Résultats de simulation de la variation du couple mécanique (pu)

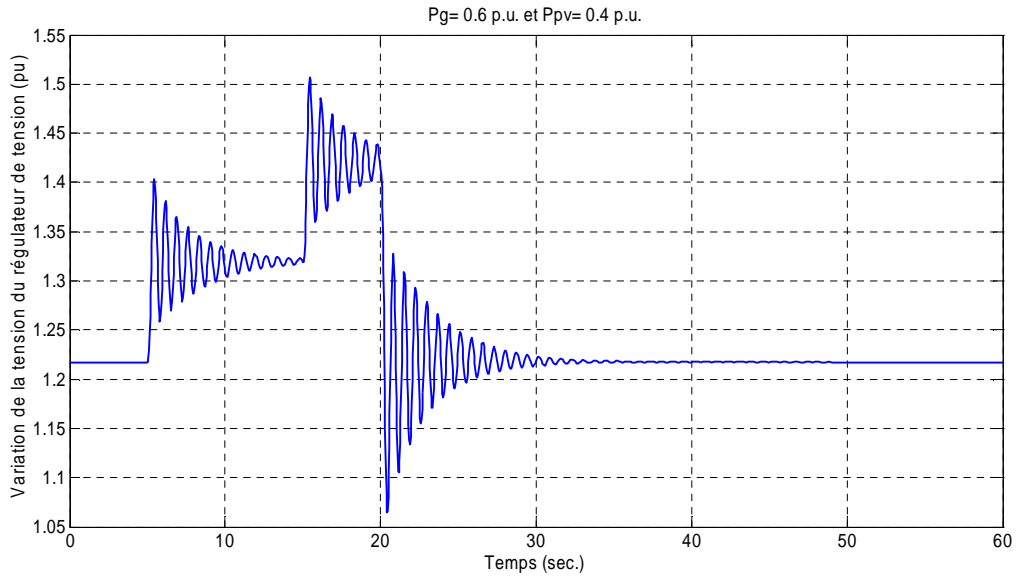


Figure (IV.13) : Résultats de simulation de variation de la tension du régulateur de tension en fonction du temps (pu)

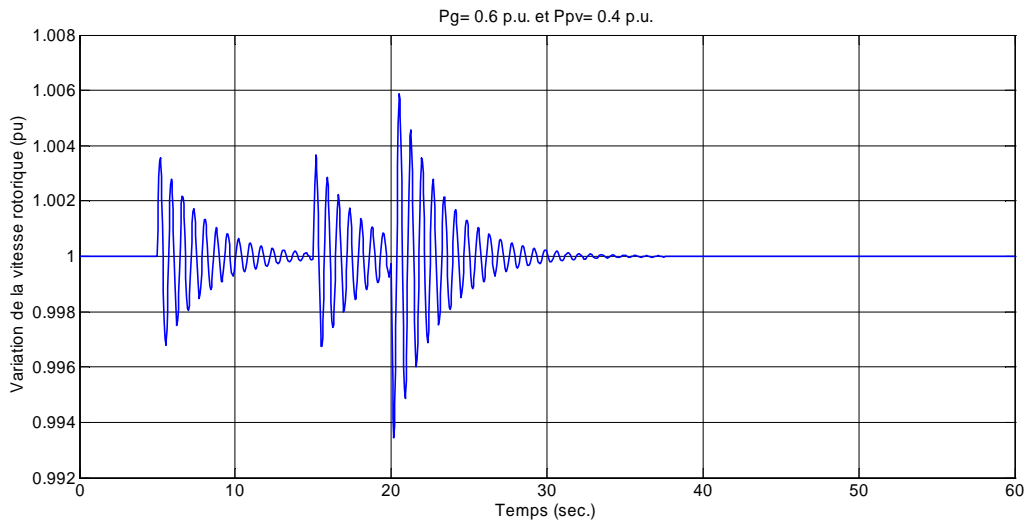


Figure (IV.14): Résultats de simulation de variation de la vitesse rotorique en fonction du temps (pu)

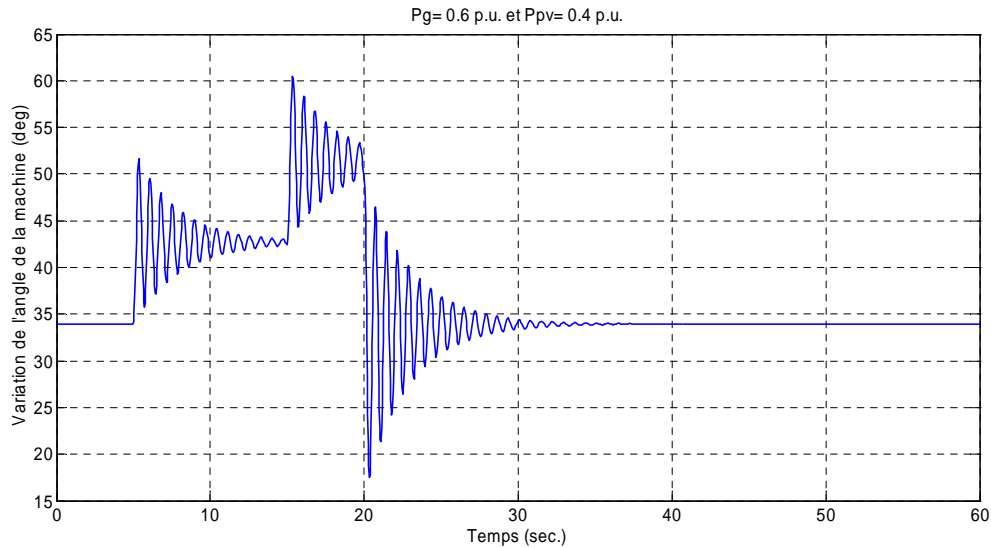


Figure (IV.15) : Résultats de simulation de la variation de l'angle de la machine en (degré)

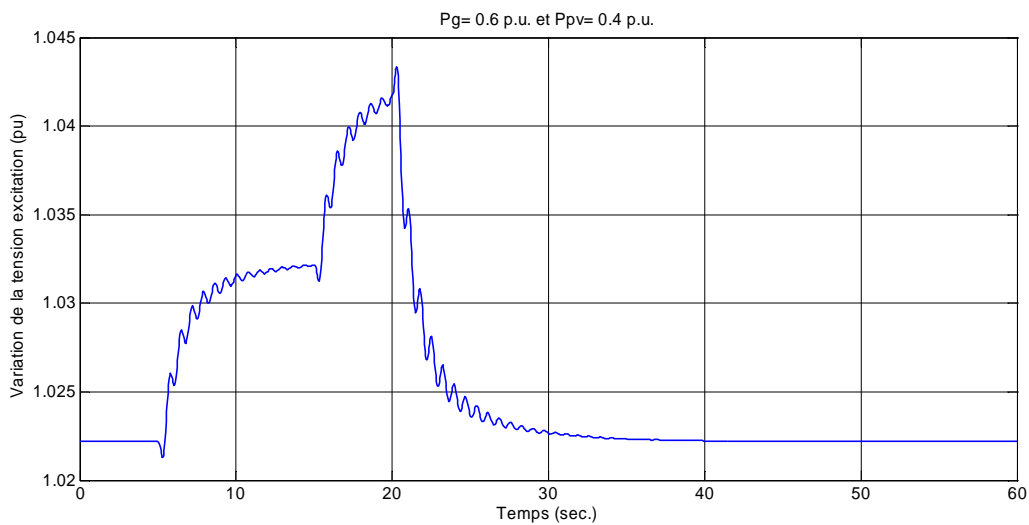


Figure (IV.16) : Résultats de simulation de la variation de tension d'excitation en (pu)

La figure (IV.15) donne les variations de la tension du régulateur (sa sortie) en fonction du temps. Nous Distinguons la présence des trois perturbations qui sont injectées au réseau à fin d'en étudier leur influence. Comme étant présenté, Figure (IV.15) la variation de la tension du régulateur connaît des sauts de 10% en terme d'amplitude. Le système étant amorti du à son mode d'oscillation qui est défini par les pôles conjugués $-0.15 \pm j 4.29$. Comme la

partie réelle est négative: le mode est stable. Nous remarquons bien que le système retrouve son équilibre peu après le début des perturbations.

L'étude que nous présentons ici, comprend aussi les variations des grandeurs les plus influentes sur le fonctionnement du réseau. A la Figure (IV.14) est présentée la variation de la vitesse rotorique de la génératrice synchrone. L'angle correspondant (Ψ) est présenté à la Figure (VI.15) La tension d'excitation de cette machine est donnée à la figure (VI.16)

La Figure (IV.12) présente la variation du couple mécanique et de la tension de référence (fixée à 0.1 pu). La variation du couple mécanique suit un schéma en escalier, c'est-à-dire qu'elle peut être mathématiquement définie comme une somme de trois échelons retardés dont les amplitudes sont respectivement 0.1, 0.1 et -0.2.

VI.10 Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'influence des générateurs photovoltaïques sur la stabilité du réseau électrique. Après l'étude et la modélisation mathématique et analytique du système globale, constitué d'un générateur PV, des convertisseurs statique de la machine synchrone et le tout connecté au réseau. Nous aboutissons à un modèle hautement non linéaire. Une linéarisation par la théorie des petites perturbations est effectuée. Le modèle d'état obtenu est d'ordre 6. Nous présentons des résultats de simulation obtenus sur Simulink/Matlab. L'étude ainsi réalisée conclue sur la stabilité du réseau auquel est connecté le générateur PV.

Conclusion Générale

Conclusion et perspective

Nous présentons dans ce travail une étude théorique très détaillée des effets de la connections des générateurs PV aux réseaux électriques de transport. Ce travail nous a permis, entre autres, de nous confronter à plusieurs problèmes interdisciplinaires toujours en relation avec les réseaux électriques.

L'étude menée comprend la madérisation mathématique des différentes parties du système globale, à savoir : le générateur PV, les convertisseurs statiques DC/DC et DC/AC, de la génératrice synchrone et du réseau de transport. Cette étape est présentée au trois premiers chapitre du ce mémoire.

Dans le chapitre quatre, nous proposons d'étudier en détails les générateurs photovoltaïques connectés aux réseaux électriques. Comme le système étudié est composé d'un GPV et d'une centrale électrique conventionnelle, ce processus a été modélisé par un système d'équations différentielles non-linéaire à fin d'évaluer les performances des différents régulateurs.

L'effet des générateurs photovoltaïques sur la stabilité du système pour les petites perturbations, varie avec les changements des conditions de fonctionnement du système, car la contribution du couple d'amortissement de la centrale PV pourrait être positive ou négative. Le fonctionnement critique de la centrale photovoltaïque n'aura lieu que lorsque des changements de signe du couple d'amortissement sont contribués.

Dans le but d'étudier l'influence des GPV sur la perturbation angulaire, un modèle linéaire a été adopté, en cas de petites perturbations. Le modèle complet développé est mis en œuvre afin d'étudier l'influence des GPV sur les performances des réseaux électriques de transports de manière très conséquente. Différentes simulations ont été menées qui nous ont permis de statuer sur la stabilité du système complet.

L'analyse a conclu que, la production PV ne peut pas ajouter un mode d'oscillation supplémentaire pour le système, parce qu'il n'a pas de composante de rotation, il affecte la stabilité du système pour les petites perturbations en raison de son interaction avec le couple d'amortissement a la production conventionnelle (générateur synchrone).en effet, Lorsque la charge totale fournie par la centrale conventionnelle et photovoltaïque est fixé, une pénétration de PV supérieur doit être évitée parce que cela augmente les chances d'endommager la stabilité du système.

Plusieurs extensions de ce travail peuvent être envisagées. Une généralisation du modèle pour tenir compte d'un réseau électrique multi-machines avec des générateurs photovoltaïques (GPV) implantés dans différents sites. La coordination optimale des paramètres des différents régulateurs à fin d'optimiser l'amortissement des oscillations en cas de forte perturbations. Néanmoins, nous souhaitons que ce travail soit repris pour servir de matière première pour des études plus approfondies et pour d'éventuelles extensions.

Références

- [1] **Tan YT, Kirschen DS, Jenkins N.** “A model of PV generation suitable for stability analysis”. IEEE Transactions on Energy Conversion 2004; 19(4): 748–755.
- [2] **Wang L, Lin T.** “Dynamic stability and transient responses of multiple grid-connected PV systems”. Proceedings of IEEE PES T&D Conference 1–8 2008.
- [3] **Tan YT, Kirschen DS.** “Impact on the power system of a large penetration of photovoltaic generation”. Proceedings of IEEE PES General Meeting 1–8 2007.
- [4] **C. Alonso,** "*Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie*", thèse de doctorat, université Paul Sabatier – Toulouse III, 2003.
- [5] **D. Rekioua1 et S. Lalouni1,** "*Etude d'un Convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque autonome avec batteries de stockage*", Département de génie électrique, université de Bejaia, 2007.
- [6] : **Z. Bendjellouli,** "*Contribution à la modélisation d'une cellule solaire*", mémoire de magister, université de Bechar, 2009.
- [7] **A. Cid-Pastor,** "*Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques*", l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.
- [8] **M.N.Mchalikh et CH.Hmada** "*Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau* " Mémoire de Master Université Kasdi merbah–Ouargla 2013.
- [9] **M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, and V.G. Agelidis,** “Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems—An overview”, in Proc. IEEE PESC'02, vol. 2, pp. 1995–2000, 2002.
- [10] **S. Alem-Boudjemline,** "*Réalisation et caractérisation des cellules Photovoltaïques plastiques*", thèse de doctorat, université d'Angers, 2004.
- [11] **S. Berson,** "*Synthèse, caractérisation et nano structuration de dérivés de la photo poly thiophène pour des applications en cellules photovoltaïques organiques*", thèse de doctorat, l'université Joseph Fourier – Grenoble I, 2007.
- [12] **S.Lhlah** "*Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc. On) et Hill climbing (H.C)*" Mémoire Magister université El hadj Lakhdar Batna 2007.
- [13] **S. Mekhilef and N.A. Rahim,** “Xilinx FPGA based three phase PWM inverter and its application for utility connected PV system”, Proceeding of IEEE TENCON'02, pp. 2079-2082, 2002.

Références

- [14] **M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, and V.G. Agelidis**, “Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems—An overview”, in Proc. IEEE PESC’02, vol. 2, pp. 1995–2000, 2002.
- [15] **V. Didier et B. Gaidon**, “Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l’ Art et Etude des Performances”, HESPUL, Août 2007.
- [16] **Jain S, Agarwal V.** “*Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-phase grid-connected photovoltaic systems*”. *IEE Proceedings. Electric Power Applications* 2007; pages: 753–762.
- [17] **CIGRE task force**. “*Modeling of power electronics equipment (FACTS) in load flow and stability programs*”. *CIGRE Technical Report*, T F 38-01-08, 1998.
- [18] **R. Maouedj**, “*Application de l’énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah*”, mémoire de magister, université de Tlemcen, 2005.
- [19] **Mme.OBEIDI**, “*Commande des hacheurs MPPT par logique floue*”, Ecole Nationale Polytechnique, Mémoire de Magister, 2006.
- [20] **De Mello FP, Concordia C.** “*Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* “1969; 88(4):316–329.
- [21] : **N. Kabouch**, “*Optimisation d’un système photovoltaïque application à la protection cathodique*”, mémoire de magister, université de la science et de la technologie Hourri Boumediene (USTHB), Alger, 2009.
- [22] **Z. Bendjellouli**, “*Contribution à la modélisation d’une cellule solaire*”, mémoire de magister, université de Bechar, 2009.
- [23] **A. Mehdaoui et al**, “*Développement de deux modèles neuro-flous pour la poursuite du MPPT des modules photovoltaïques UDTS-50 Application au site d’Adrar*”, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°2, pp 257 – 268 (2009).
- [24] **Wang L, Lin T**, « Dynamic stability and transient responses of multiple grid-connected PV systems. Proceedings of IEEE PES T&D » Conférence 1–8 2008.
- [25] **H. Chenoufi**, “*Optimisation du procédé technologique de réalisation d’une cellule solaire par la technique de diffusion*”, mémoire de magister, université de Batna, 2005
- [26] **Jain S, Agarwal V.** Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single phase Grid-connected photovoltaic systems. *IEE Proceedings. Electric Power Applications* 2007; 5(1): 753–762.

Références

- [27] **Y. Pankow**, "*Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque*", thèse de doctorat, centre nationale de recherche technologique de Lille, 2004.
- [28] **S. Rabih**, "*Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques*", thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, 2008.
- [29] **A. Bouden**, "*Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque*", mémoire de magister, université de Constantine, 2008.
- [30] **Ho MT, Chung HSH**. "An integrated inverter with maximum power tracking for grid-connected PV systems. IEEE Transactions on Power Electronics" 2005; 20(4): 953–962.