

**République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar-El Oued
Faculté des Sciences et de Technologies**



Mémoire Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Électrique
Spécialité: Machines électriques

Thème

**Modélisation et commande d'un
système de pompage
photovoltaïque**

Dirigé par :

Dr: LAMMOUCHI Zakaria

Réalisé par :

GOAR Mohammed Abdalfattah

GHANIA Aissa

AHMADI ABDALLAH brahim

Promotion 2022

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Nous remercions, en premier lieu, **Allah** le tout puissant de nous avoir donnés la volonté et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

Nous aimerions exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Dr. LAMOUCHI Zakaria pour son appui, son orientation et ses conseils qui nous ont été très précieux.

Enfin, tous nos remerciements vont à nos familles
et nos amis de l'université d'EI-Oued qui ont été nombreux
à nous aider et à nous encourager.

ABDALAH Ibrahim & Aissa & Mohammed Abdalfattah



DEDICACE



Dédicace

Nul plaisir ne peut égaler celui de partager son bonheur avec les gens que l'on aime.

Arrivé au terme de mes études, j'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail :

A ma chère mère à qui je dois ce que je suis, elle qui a été toujours là pour moi et qui n'a jamais cessé de prier pour mon bonheur.

A mon cher père, pour tous les conseils qui m'a donnés, le soutien qui m'a montré et les sacrifices qu'il a consentis pour qu'il me voie réussir.

A mes chères sœurs et chers frères.

A toute ma grande famille.

A tous mes amis.

A tous mes camarades des groupes 2^{EME} Master ME.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.



BOTANICAL BEAUTY

ABDALAH Ibrahim & Aissa & Mohammed Abdalfattah

RESUME

Résumé

Le besoin en énergie dans les sites isolés augmente sans cesse. Alors pour satisfaire répondre à ce besoin, la solution du développement des systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque performante est d'actualité. Toutefois, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque dépend amplement des conditions atmosphériques.

Donc l'objectif de ce mémoire est d'apporter une contribution à l'étude d'un système photovoltaïque fonctionnant à sa puissance maximale et énergétiquement autonome. Le cas étudié dans ce travail, concerne la commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque dans un site isolé. Pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, l'utilisation d'un algorithme dit MPPT est devenu une nécessité. Dans ce but, la technique de perturbation et observation (P&O) a été choisie ; la modélisation et la simulation des différents constituants de la chaîne de conversion d'énergie sont présentées en premier lieu..

Mots clés : Energie solaire photovoltaïque, machine asynchrone, commande MPPT, pompe centrifuge hydraulique, commande vectorielle,

ملخص:

الحاجة إلى الطاقة في المواقع المعزولة تتزايد باستمرار. لذلك لتلبية هذه الحاجة، فإن الحل لتطوير أنظمة تحويل الطاقة الكهروضوئية الفعالة هو موضوع موضوعي. ومع ذلك، فإن استخدام الطاقة الكهروضوئية يزيل التلوث إلى حد كبير من الظروف الجوية.

لذا فإن الهدف من هذه الأطروحة هو المساهمة في دراسة نظام كهروضوئي يعمل بأقصى طاقته ومستقل بنشاط. تتعلق الحالة التي تمت دراستها في هذا العمل بالتحكم في سلسلة ضخ كهروضوئية في موقع معزول. من أجل أن يعمل النظام الكهروضوئي بطاقته القصوى، أصبح استخدام خوارزمية تسمى MPPT ضرورة. لهذا الغرض، تم اختيار تقنية الاضطراب والملاحظة (P & O)؛ يتم تقديم النمذجة والمحاكاة للمكونات المختلفة لسلسلة تحويل الطاقة في المقام الأول

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية الكهروضوئية ، آلة غير متزامنة ، تحكم م ب ب ت ، مضخة الطرد المركزي الهيدروليكية ، تحكم شعاعي.

SOMMAIRE

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Sommaire	
Liste des Figure	
Liste des tableau	
Introduction Générale	01

CHAPITRE I

Généralités Sur Les Systèmes Pompages Photovoltaïque

1. Introduction	02
2.Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque	02
2.1.Conversion du rayonnement solaire par effet photovoltaïque	02
2.2.Technologies des cellules photovoltaïques	03
2.2.1. Technologie de la 1ère génération : cellules cristallines	04
2.2.2. Technologie de la 2ème génération : couches minces "thin films	05
2.2.3. Technologie de 3ème génération : multi jonction, concentration	05
2.3. Assemblage des cellules PV	07
2.4. Les panneaux photovoltaïques	07
2.5. Le module photovoltaïque	08
2.5.1 Association des Modules	08
2.5.1.1. Association en série	08
2.5.1.2. Association en parallèle	08
2.5.1.3.Association mixte des générateurs photovoltaïques	09
2.6. Association mixte des générateurs photovoltaïques	10
3. Les convertisseurs statiques	11
3.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur)	11
3.2. Convertisseur DC/AC (Onduleur)	11
4. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries)	12
4.1. Batteries solaires	12

4.2. La pompe	13
4.2.1. Types de pompes	13
4.2.1.1. Les pompes volumétriques	12
4.2.1.2. Les pompes centrifuges	14
4.2.1.2.1. Principe de fonctionnement	14
4.2.1.2.2. Constitution	14
5. Classification des systèmes photovoltaïque	15
5.1. Systèmes autonomes	15
5.2. Systèmes connectés au réseau	16
6. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques	16
6.1. Avantage	16
6.2. Inconvénients	17
7. Conclusion	17

CHAPTER II

Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque

1. Introduction	18
2. Description du système à étudier	18
3. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	19
3.1. Modèle à une diode sans résistance shunt :(cellule idéale)	19
3.2. Modèle à une diode : (cellule réelle)	20
3.3. Paramètres d'une cellule photovoltaïque	22
3.3.1. Courant de court-circuit I_{cc}	23
3.3.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co})	23
3.3.3. Puissance maximale	23
3.3.4. Rendement énergétique	24
3.3.5. Le point de puissance maximale (PPM)	24
3.3.6. Facteur de forme	25
3.3.7. Influence de la température sur une cellule PV	25
4. Modélisation d'un GPV	26

4.1. Modélisation sous simulink	27
4.2. Caractéristique tension-courant d'un GPV	27
5. Modélisation du hacheur boost	28
5.1. Fonctionnement	28
5.2. Modèle mathématique équivalent	28
6. Modélisation de l'onduleur	29
6.1. Principe d'onduleur MLI sinusoïdale	31
7. Modélisation de la pompe	32
8. Le modèle électrique de la batterie	33
9. Optimisation du système de pompage photovoltaïque	33
9.1. Fonctionnement des panneaux PV dans les conditions	33
9.2. Définition de l'MPPT d'un système solaire photovoltaïque	34
9.3. La technique perturbation et observation « p&o »	34
10. Généralités sur la machine asynchrone	36
10.1. Définition de la machine asynchrone	36
10.2. Les organes mécaniques	36
10.3. Principe de fonctionnement	36
10.4. Modélisation du moteur asynchrone	37
10.4.1. Hypothèses simplificatrices	37
10.4.2. Mise en équations	37
10.4.2.1. Equations électriques	38
10.4.2.2. Equation magnétiques	39
10.4.2.3. Equations mécaniques	41
10.4.3. Transformation de PARK	41
10.4.3.1. Equations électriques	43
10.4.3.2. Equations magnétiques	43
10.4.3.3. Expression du couple électromagnétique et de la puissance	44
10.5. Différents repères	45
10.5.1. Choix du référentiel	45
10.5.1.1. Référentiel lié au stator (α , β)	46
10.5.1.2. Référentiel lié au rotor	46
10.5.1.3. Référentiel lié au champ tournant	47
10.6. Application de la transformation de PARK de la MAS	47

10.6.1. Equations électriques	47
10.6.2. Equations magnétiques	48
10.6.3. Equations mécaniques	49
10.7. Mise sous forme d'équation d'états	49
11. Conclusion	49

CHAPTER III

Commande vectorielle du système de pompage photovoltaïque

1.Introduction	50
2.Simulation du système global	50
3.Dimensionnement de l'installation de pompage	50
3.1.Dimensionnement de la Pompe Centrifuge	50
3.2.Dimensionnement du module photovoltaïque	51
4.Commande vectorielle indirecte	53
4.1.Découplage par compensation	54
4.2.Dimensionnement des Régulateur	55
a) Régulateur de courant	55
b) Régulateur de vitesse	57
5.Simulation de la chaine de pompage photovoltaïque avec commande véctorielle	58
5.1. vitesse de référence	58
5.1. Résultats De Simulation	58
6. Conclusion	61
CONCLUSION GENERAL	62
ANNEXE	63
BIBLIOGRAPHIE	64

LISTE DES FIGURES

CHAPTER I

Généralités Sur Les Systèmes Pompages Photovoltaïque

Figure I.1. Schéma d'un système de pompage photovoltaïque	02
Figure I.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	03
Figure I.3. caractéristique I_{PV} (V_{PV}) et P_{PV} (V_{PV})	03
Figure I.4. Cellules cristallines	04
Figure I.5. Cellule à couche mince	05
Figure I.6. cellules multijonction et à concentration	06
Figure 1.7. Constitution d'un générateur photovoltaïque	07
Figure I.8. composant d'un générateur photovoltaïque	08
Figure I.9. Cellules en séries	09
Figure I.10. Cellules en parallèles	09
Figure I.11. Configuration d'un GPV sous un ombrage partiel (mixte)	10
Figure I.12. Caractéristiques I(V) et P(V) en fonctionnement normal et sous ombrage	10
Figure I.13. Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retou	12
Figure I.14. Principe de fonctionnement du pompage avec stockage	13
Figure I.15. Exemple d'installation avec une pompe centrifuge	15
Figure I.16. Système photovoltaïque autonome avec stockage	16
Figure I.17. Système photovoltaïque connecté au réseau électrique	17

CHAPTER II

Modélisation Des Eléments Du Système De Pompage Photovoltaïque

Figure II.1: Système globale à étudier	18
Figure II.2: Schéma équivalent à une cellule idéale.	19
Figure II.3: Schéma équivalent d'une cellule solaire à une diode.	20
Figure II.4: Schéma équivalent d'une cellule PV	24
Figure II.5: Le facteur de forme	25
Figure II.6: Caractéristique P(V) d'un GPV dans les conditions standards	27
Figure II.7: Schéma électrique d'un hacheur Boost	28
Figure II.8: Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé	28
Figure II.9: Schéma électrique d'un hacheur Boost ouvert	29
Figure II.10: Structure de l'onduleur de tension triphasé	29
Figure II.11: Principe de la MLI sinus-tria	31

Figure II.12: Modèle R-C de la batterie	33
Figure II.13 : Couplage d'un système de pompage PV avec optimisation	34
Figure II.14: Application de la commande P&O sur la caractéristique P_{PV} (V_{PV})	35
Figure II.15: Schéma explicatif de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O)	35
Figure II.16: Définition des repères statoriques et toriques	38
Figure II.17 : Passage du repère triphasé au repère biphasé	41
Figure II.18: Les enroulements équivalents dans le repère (d, q).	42

CHAPTER III

Commande vectorielle du système de pompage photovoltaïque

Figure III.1 Bloc de simulation du système global de pompage	51
Figure III-2A: Courbe P_{pv} - V_{pv} pour PV	52
Figure III.2: Schéma simplifié de la commande vectorielle indirecte de la MAS alimentée en tension.	53
Figure III.3 : Découplage par addition des termes de compensation.	54
Figure III.4: Boucle du courant I_{qs} après découplage.	55
Figure III.5: Boucle de régulation du courant I_{qs} .	56
Figure III.6 : Schéma Boucle de la régulation de vitesse.	57
Figure III.7: Structure de la commande vectorielle de la chaîne de pompage	58
Figure III.8: Allure de la vitesse de référence.	59
Figure III.9: Allure de vitesse du moteur pour une consigne de 150 rad/s.	59
Figure III.10 : Allure du couple résistant appliqué au moteur.	59
Figure III.11 : Allure de la tension du générateur photovoltaïque.	60
Figure III.12 : Allure de la tension de liaison CC	60
Figure III.13 : Allure du flux rotorique.	60
Figure III.14 : Allure de la puissance du générateur photovoltaïque.	61

LISTE DES TABLEAUX

CHAPTER I

Généralités Sur Les Systèmes Pompes Photovoltaïque

Tableau I.1: performance des différentes technologies des cellules photovoltaïque	07
---	----

CHAPTER II

Modélisation Des Éléments Du Système De Pompage Photovoltaïque

Tableau II.1: Les conditions nominales et les conditions de test standard	21
---	----

CHAPTER III

Commande Vectorielle Du Système De Pompage Photovoltaïque

Tableau III.1: Spécifications Du Système PV	52
Tableau III.2: Spécifications Du Module PV	52

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

La production d'énergie impure était d'une grande importance dans les années précédentes. Et dès la découverte des énergies naturelles telles que le soleil, l'eau, le vent et la chaleur de la terre, que l'on appelle aussi les énergies renouvelables, ont assuré le développement de l'humanité, et l'eau et le soleil sont les éléments de notre vie quotidienne. Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles; l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre. [6]

Parmi les énergies renouvelables, dans cette thèse nous avons utilisé des cellules photovoltaïques dans le processus de pompage de l'eau. Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que la première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules photovoltaïques, la pompe sans batterie «pompe au fil du soleil» utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son [6].

Dans notre étude nous sommes intéressés à la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque optimisé, de ce fait, le présent mémoire est subdivisé en trois chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous :

La première partie de ce travail correspond à la généralisation aux systèmes de pompage PV, et tout ce qui est en relation avec le pompage photovoltaïque et les Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément qui constitue le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteur asynchrone et la pompe centrifuge, et Nous parlerons de l'optimisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque en utilisant des algorithmes de la MPPT (Maximum Power Point Tracking), surtout application de la commande P&O.

Le dernier chapitre sera consacré à la simulation et à l'interprétation des résultats. Nous terminerons notre travail par une conclusion générale

CHAPTER I

Généralités Sur Les Systèmes Pompages Photovoltaïque

1. Introduction

Le système photovoltaïque est un ensemble d'éléments qui sert à la production d'électricité à partir du rayonnement solaire. Un générateur PV alimente une charge continue ou alternative via une interface d'électronique de puissance. Il est capable de fournir une puissance allant d'un milliwatt à quelques mégawatts. Le composant de base de ce système s'appelle : cellule PV ou photopile. Il produit de l'énergie électrique à chaque fois qu'il reçoit de l'éclairement.

Dans ce chapitre, on donnera une présentation simple du générateur photovoltaïque. Ensuite, on présente les systèmes de conversion photovoltaïques, où on donne leurs différentes topologies system PV [1]

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC/AC, un sous-système de pompage (moteur et pompe), la tuyauterie et accessoires et enfin un réservoir d'eau (voir figure I.1).

Dans les systèmes de pompage photovoltaïque qui fonctionnent au fil du soleil, le stockage de l'eau dans les réservoirs est la solution la plus adoptée, par rapport au stockage électrochimique dans les batteries.

Le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie photovoltaïque est utilisé pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation. [10]

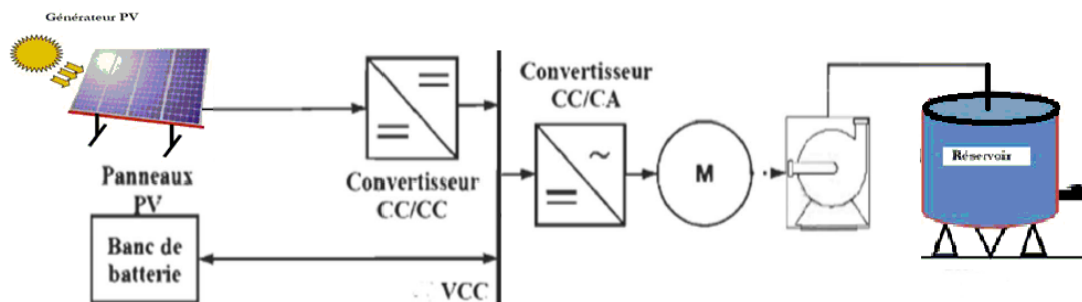


Figure I.1. Schéma d'un système de pompage photovoltaïque

2. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque

2.1. Conversion du rayonnement solaire par effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Cet effet peut être expliqué par le fait qu'un photon reçu du rayonnement solaire, heurte une cellule PV, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule. Avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position

normale dans l'atome (de la bande de valence à la bande de conduction traversant la bande interdite), créant ainsi un trou qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique. C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou, comme la montre la figure ci-dessous.

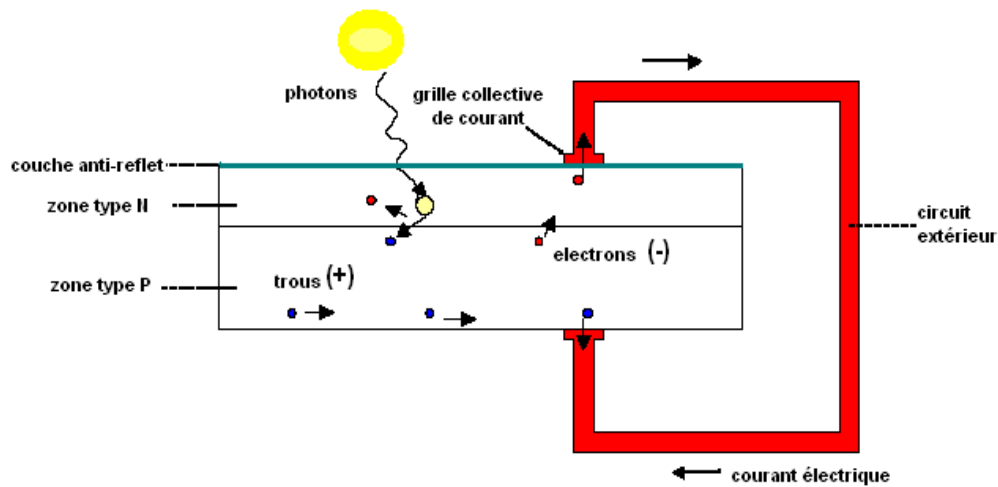


Figure I.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [3]

- La caractéristique courant-tension et puissance-tension :

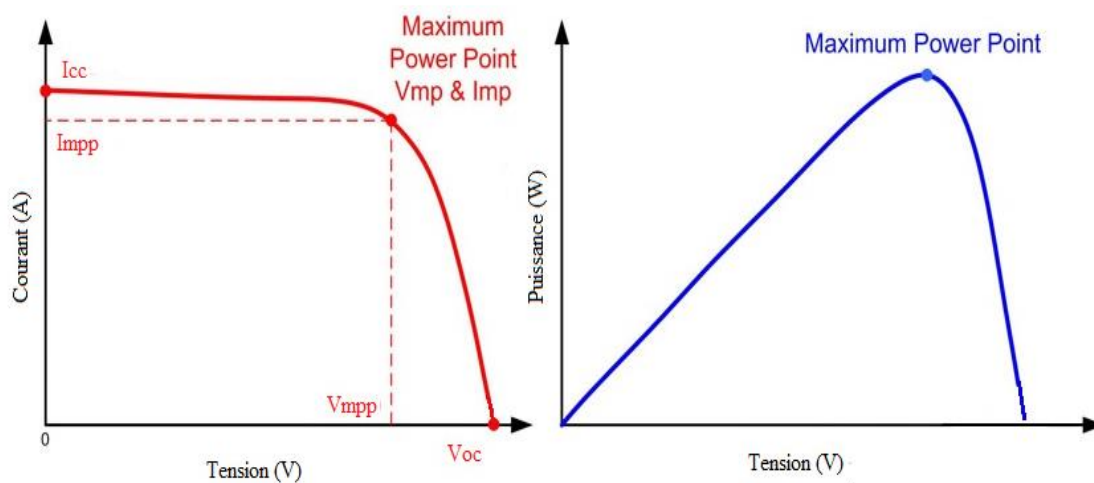


Figure I.3. Caractéristique I_{PV} (V_{PV}) et P_{PV} (V_{PV})

2.2. Technologies des cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois types principaux de cellule solaire suivant leur mode de production : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques.

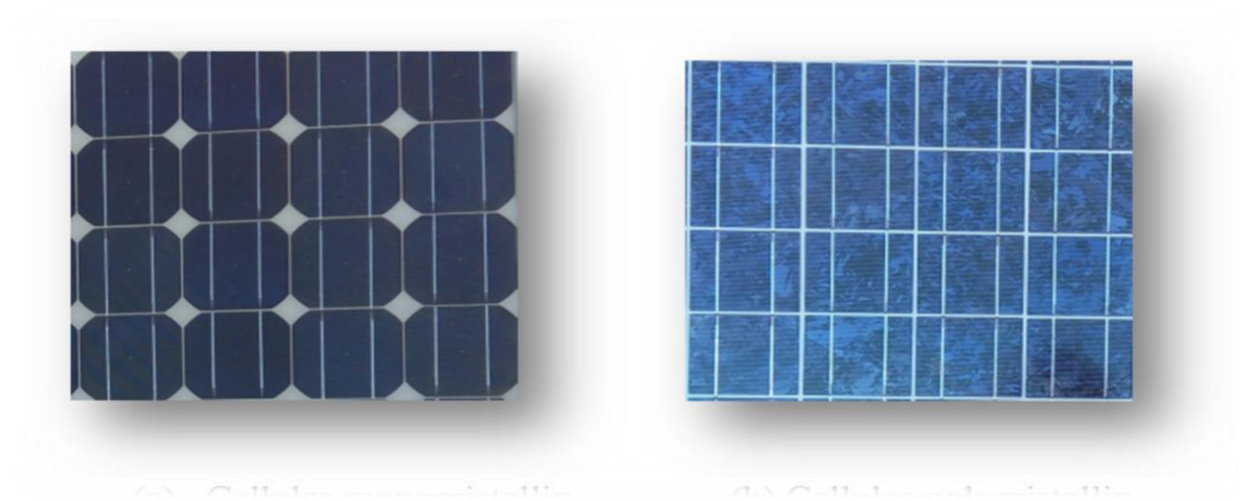
2.2.1. Technologie de la 1ère génération : cellules cristallines

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers (fines tranches) de silicium. Cette méthode est très énergivore et donc très chère, elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté.

Le silicium cristallin domine le marché à plus de 80%. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin.

Les cellules de silicium monocristallin sont effectivement composées d'un seul cristal divisé en deux couches. Ces cellules sont les plus efficaces, de 16% à 18%, mais elles sont aussi les plus chères.

Les cellules de silicium poly-cristallines (multi cristallin) sont composées d'un agglomérat de cristaux avec une efficacité de 13% à 15%, a grandement contribué à baisser le coût des modules.



(a) Cellules monocristallin (b) Cellules polycristallin

Figure I.4. Cellules cristallines

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme.

Les cellules poly-cristallines ont un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe. L'un des inconvénients de ces deux technologies sont le rendement faible sous un faible éclaircissement.

2.2.2. Technologie de la 2ème génération : couches minces "thin films"

Dans le cas de "couches minces", le semi conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple). On distingue plusieurs types de cellules couches minces à savoir :

Le silicium amorphe (a-si).

Le tellurure de Cadmium (CdTe).

Le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS).

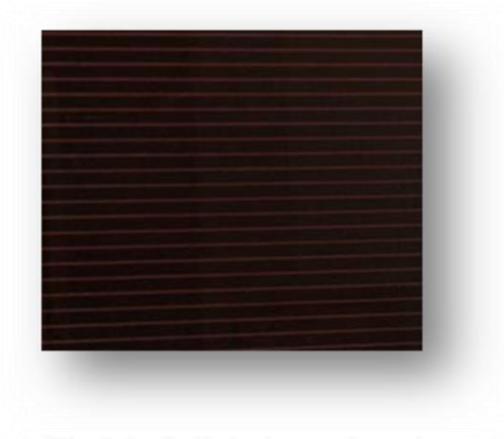


Figure I.5.Cellule à couche mince

Son prix est plus faible que les cellules cristallines; en revanche, son rendement est inférieur à celui des cellules cristallines, il est entre 7% et 11%. Elles fonctionnent avec un éclairage faible captent très bien le rayonnement diffus. Elles sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct offrant donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

2.2.3. Technologie de 3ème génération : multi jonction, concentration

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules:

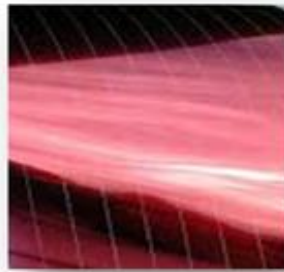
Cellules multicouches : superposition de multiples cellules aux propriétés différentes (utilisant des bandes d'énergie différentes permettant un balayage plus large du spectre solaire).

Cellules à concentration : (permet d'utiliser des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule). Les rendements obtenus sous concentration sont très prometteurs (de l'ordre de 30 %).

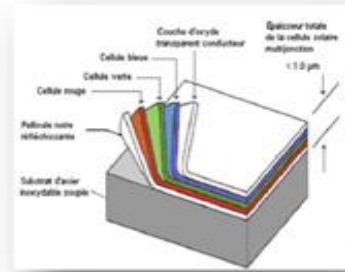
Cellules organiques : sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement les cellules photovoltaïques organiques et les cellules photovoltaïques organiques en polymères moléculaires.



(a) Cellule à concentration



(b) Cellule organique



(c) Cellule multicouche

Figure I.6.cellules multi jonction et à concentration [4]

Dans le tableau (I.1), ci-dessous on résume les différentes performances des technologies citées précédemment.

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
Silicium monocristalline	13-17%	Bon rendement pour une cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium poly-cristallin	11-15%	Bon rendement pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium amorphe	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
CdTe	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	
CIGS	20%	Energie de gap ajustable, 99% des photons absorbés	Manque de matière première	
Cellules organiques	$\leq 5\%$	Faible cout de fabrication, flexible	Rendement encore trop bas	

Tableau I.1: Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques. [12].

2.3. Assemblage des cellules PV

La cellule photovoltaïque a une surface à peu près 150 cm², génère 2,3 Watt-crête sous approximativement une tension de 0,5 Volt. Cette faible puissance est insuffisante pour la plupart des applications photovoltaïques domestiques ou industrielles. Afin de fournir au récepteur extérieur une tension et une puissance importante, plusieurs cellules photovoltaïques doivent être connectées entre elles, pour constituer ce qu'on appelle : « un module ». Les modules peuvent être assemblés en série et/ou en parallèle pour former des panneaux (Figure 1.7), eux-mêmes interconnectés pour faire un champ photovoltaïque.

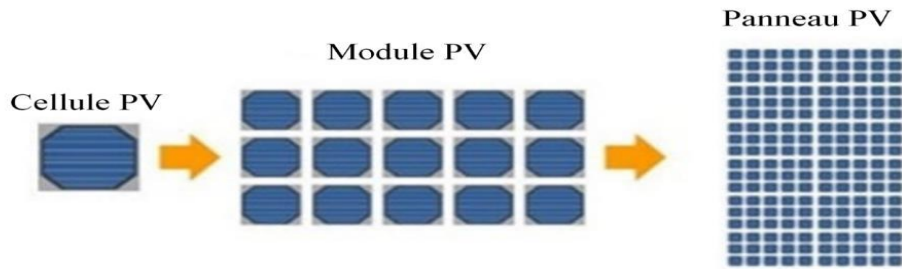
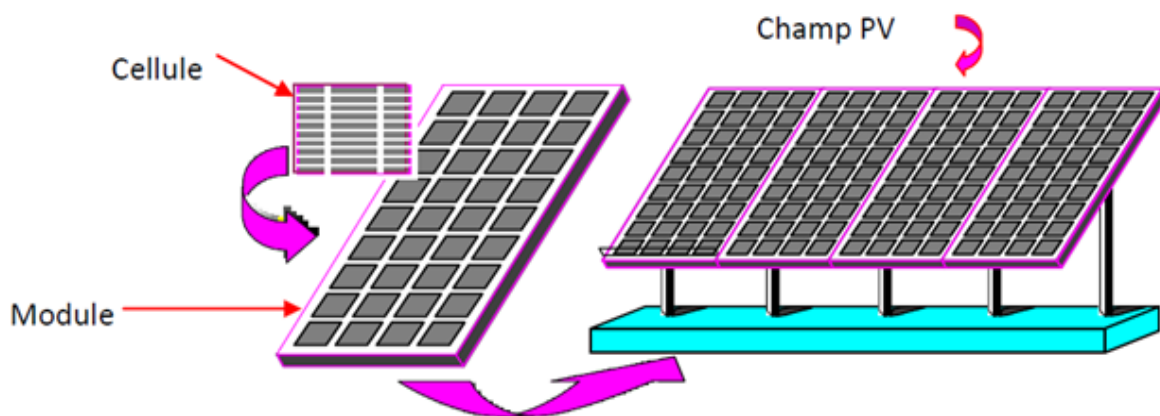


Figure 1.7. Constitution d'un générateur photovoltaïque.[1]

2.4. Les panneaux photovoltaïques

Un générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules connectés en série et en parallèle pour fournir le courant et la tension nécessaires.

La tension de sortie du générateur photovoltaïque dépend du nombre de modules en série alors que le courant de sortie dépend du nombre de modules en parallèle.



[10].

Figure I.8.composant d'un générateur photovoltaïque

2.5. Le module photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque produit une tension d'environ 0.6V, pour augmenter cette tension on connecte un certain nombre des cellules (36 ou 72 cellules) en série pour aboutir à une tension désirée de l'ordre de 21V. Quand les cellules connectées en séries sont placées dans une armature, l'ensemble constitue un module photovoltaïque.

Un module de 36 cellules fournit une tension appropriée pour charger une batterie de 12V, et pareillement un module de 72 cellules est approprié pour une batterie de 24V.

2.5.1. Association des Modules

Il existe trois types de l'association :

2.5.1.1. Association en série

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant.

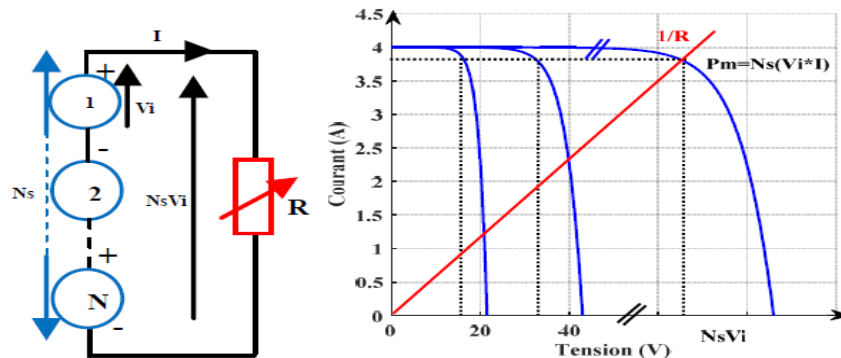


Figure I.9. Cellules en séries [4]

2.5.1.2. Association en parallèle

Les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension.

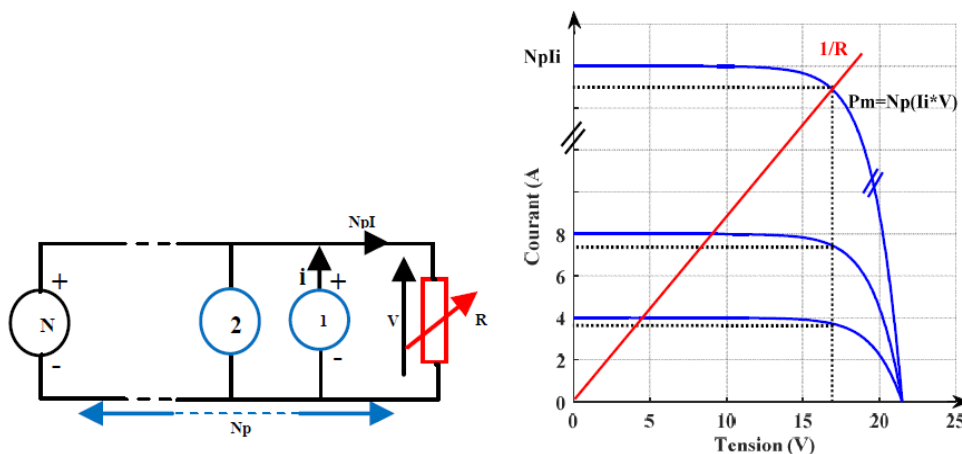


Figure I.10. Cellules en parallèles

2.5.1.3. Association mixte des générateurs photovoltaïques

Pour appliquer les caractéristiques : courant tension $I(V)$ et puissance tension $P(V)$ d'une seule Cellule sur un module, quelques hypothèses sont nécessaires :

- Tous les modules ont les mêmes caractéristiques électriques (même I_{cc} et même V_{co})
- Aucune occultation partielle.
- Aucune influence thermique.

L'équation relative à un groupement mixte forme par la mise de β cellules en série et α en parallèle est la suivante :

$$I = \alpha I_{cc} \left(\frac{\varphi}{1000} \right) - \alpha I_0 \left(e^{\frac{(\beta V + \frac{\beta R_{s1}}{\alpha})}{\beta V_T}} \right) - \frac{\beta V + \frac{\beta R_{s1}}{\alpha}}{\frac{\beta}{\alpha} R_{sh}} \quad (I.1)$$

La puissance de sortie du module est égale à la puissance de sortie totale de toutes les cellules PV sous un éclairement solaire uniforme. Mais dans une condition d'éclairement non uniforme, l'ombre par exemple (l'ombre d'arbres, de maison d'un voisin ou d'un panneau PV à l'autre), comme il est représentée sur la figure (I.11.), certaines de ces photopiles vont se comporter en récepteur, en polarisation directe ou inverse entraînant une élévation de la température de ces photopiles et peut détériorer le module PV.

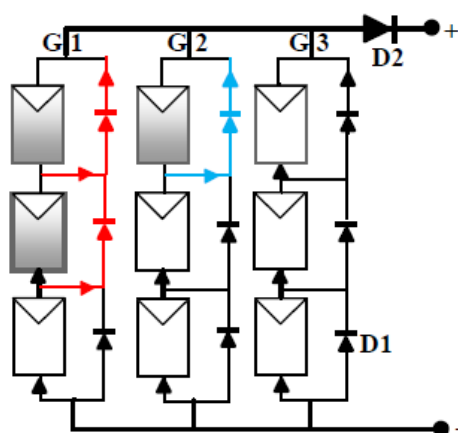


Figure I.11. Configuration d'un GPV sous un ombrage partiel (mixte).

Les courbes $I(V)$ et $P(V)$ en fonctionnement normal et sous ombrage sont représentées dans la figure (I. 12.)

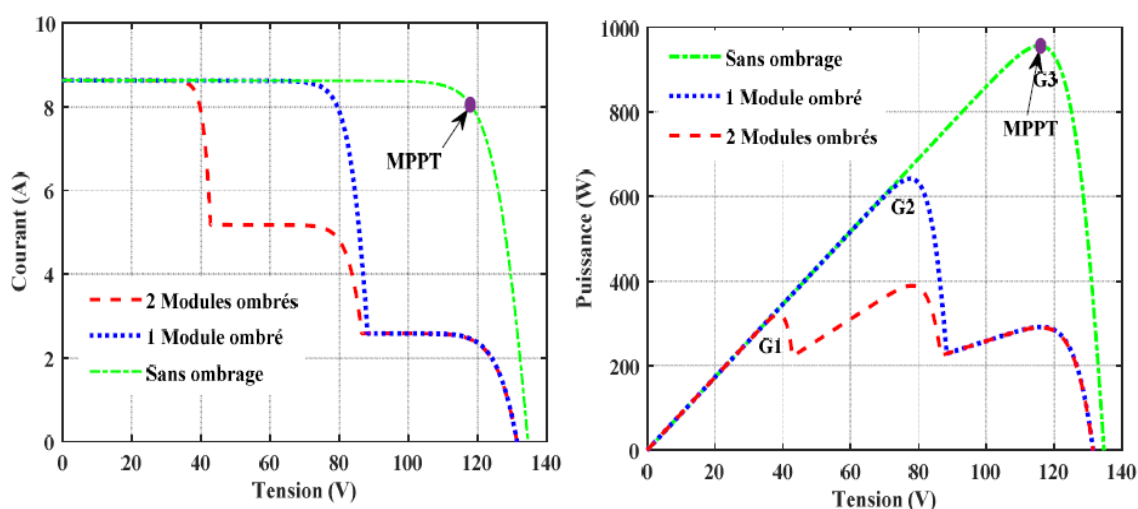


Figure I.12. Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ en fonctionnement normal et sous ombrage

Lorsqu'une cellule PV est ombrée, la puissance maximale diminue et les caractéristiques $P(V)$ contiennent plusieurs points de puissance maximale (MPP) locaux, ce qui pose une difficulté au suivi du global MPP.

Pour éviter ces problèmes, la plupart des modules PV sont constitués par des sous réseaux de cellules connectées en série avec l'association de diode by-pass (D1) Figure (I.11.) .Le nombre de cellules par sous réseaux est un compromis économiques entre protection et pertes d'une partie importantes du GPV en cas de défaut partiel.

Les diodes de blocage (D2) évitent que le flux de courant soit inverse entre les strings de modules reliés en parallèle. Les diodes by-pass servent alors à protéger les cellules à l'ombre en dérivant l'intensité "normale" pour l'empêcher de passer dans la cellule "masquée". Un panneau solaire dispose d'une à trois diodes by-pass, en fonction de son nombre de cellules (en moyenne 36 cellules pour 3 diodes by-pass). [4]

2.6. Protections des GPV

Pour éviter les pannes destructrices liées à l'association des cellules lors d'une installation des panneaux photovoltaïques en cas d'ombrage, deux types de protections sont intégrés dans les Systèmes:

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour). Elle est nécessaire quand la charge du module PV est une batterie.
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) afin d'éviter les points chauds.

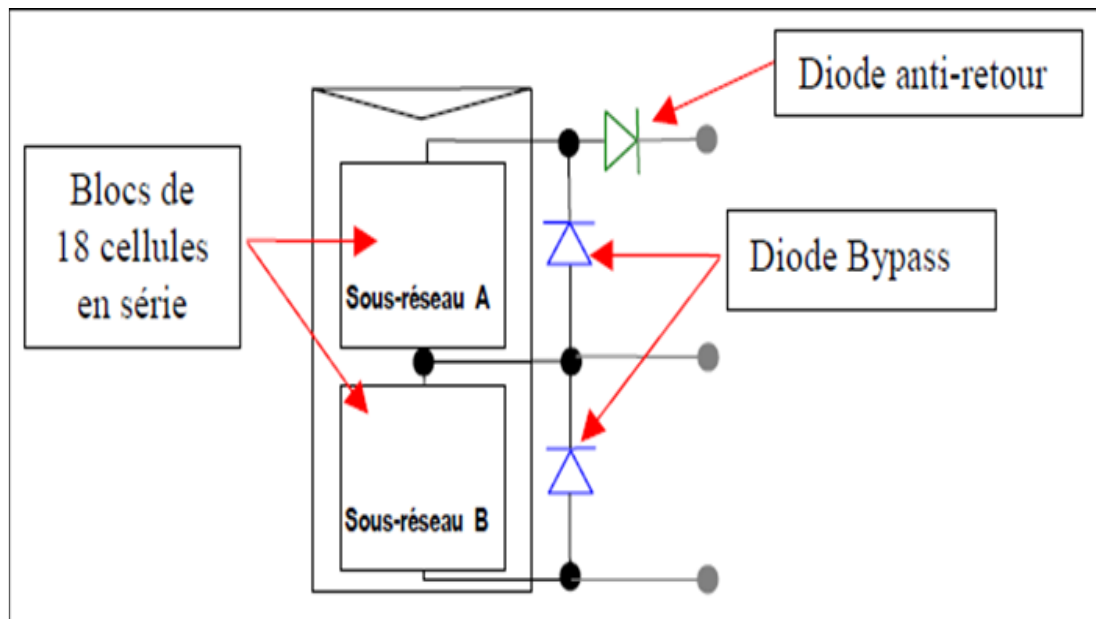


Figure I.13.Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.[14]

3. Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des systèmes permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques :

3.1. Convertisseur DC/DC (Hacheur):

Les convertisseurs DC/DC dont pour fonction de fournir une tension continue variables à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé.

3.2. Convertisseur DC/AC (Onduleur):

La fonction de l'onduleur est de transformer le courant continu produit par le générateur photovoltaïque, en courant alternatifs monophasé ou triphasé.

Les onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT (transistors de puissance).[6]

4. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries)

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage.

Le pompage photovoltaïque avec batterie, permet d'assurer une autonomie énergétique, et un débit constant selon la demande.

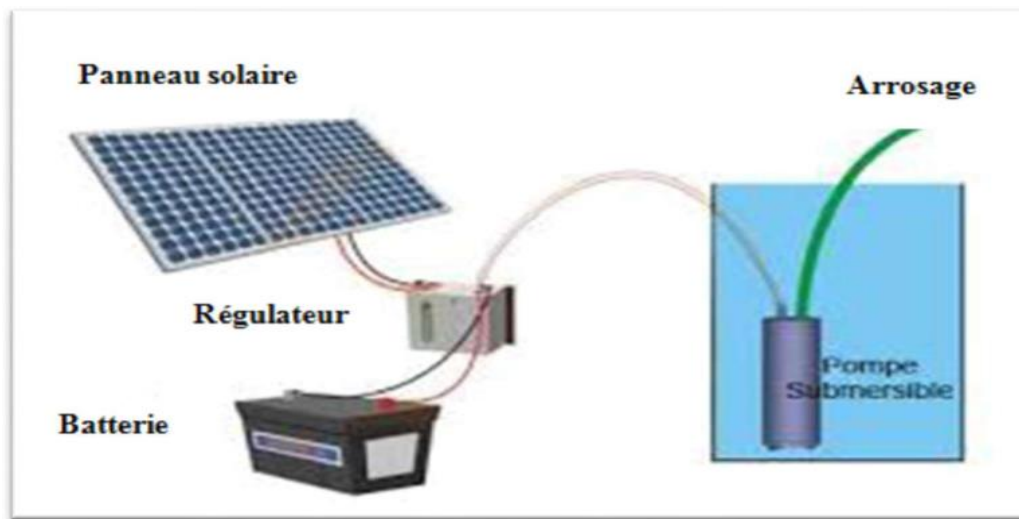


Figure I.14. Principe de fonctionnement du pompage avec stockage.

Les batteries permettent de stocker l'électricité afin de la restituer en temps voulu. Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou Les décharges profondes nocives pour sa durée de vie. [11].

4.1. Batteries solaires

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert).

Une batterie utilisée avec des panneaux solaires ou une éolienne est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires ou éoliennes.

Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes.

On peut brancher une batterie solaire directement sur un panneau solaire, mais en faisant ça on risque d'endommager la batterie si son niveau de charge dépasse les 90%. C'est pour cela qu'il est vivement recommandé d'installer un régulateur solaire entre le panneau solaire photovoltaïque et les batteries solaires.

On distingue généralement trois types de batteries solaires :

- a- Batterie a plomb ou liquide.
- b- Batterie a Gel ou AGM.
- c- Batterie au lithium ion.

Caractéristiques

- Généralement les batteries sont caractérisées par :
- La technologie utilisée Acide ou AGM ou Gel ou lythrum.
- La tension de service 6V, 12V ou 24V.
- La capacité on Ampère heur 50 Ah, 100Ah, 200Ah.
- La vitesse de décharge C10 ou C20.
- La durée de vie ou le nombre de cycle (charge et décharge).

4.2. La pompe

Une pompe est un appareil transformant une énergie mécanique (couple et vitesse de rotation de l'arbre), en énergie hydraulique (débit et pression). Elle est utilisée dans des forages et choisie selon la hauteur manométrique que devra fournir la pompe pour garantir le fonctionnement.

4.2.1. Types de pompes

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

4.2.1.1. Les pompes volumétriques

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.

4.2.1.2. Les pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont les plus rencontrées dans le domaine du pompage d'eau. Elles sont couplées avec les moteurs asynchrones constituant un groupe électropompe.

4.2.1.2.1. Principe de fonctionnement

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes.

L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (**HMT**) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur.

Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur.

On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres).

Ci-dessous est donnée l'illustration d'une pompe centrifuge.

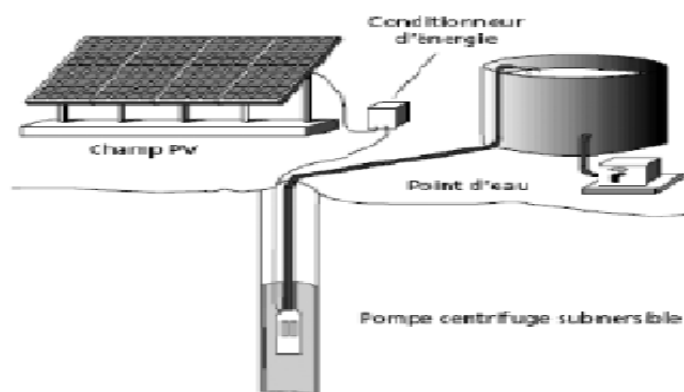


Figure I.15. Exemple d'installation avec une pompe centrifuge [2].

4.2.1.2.2. Constitution

Une pompe centrifuge est constituée par :

- Une roue à aubes tournant autour de son axe.
- Un distributeur dans l'axe de la roue.
- Un collecteur de section croissante, en forme de spirale. [10]

5. Classification des systèmes photovoltaïque

Il existe plusieurs types des systèmes photovoltaïques les plus couramment rencontrés sont :

Les systèmes autonomes, et les systèmes connectés au réseau électrique.

5.1. Systèmes autonomes

Ce sont des systèmes qui travaillent 24 h/24 h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique, et cela à l'aide de plusieurs composants mais le plus importants ce sont les batteries qui aident à emmagasiner de l'énergie électrique et d'un contrôleur de charge pour assurer la durabilité des batteries.

Il faut mentionner que les batteries les plus utilisées dans le marché actuellement sont : Accumulateurs au plomb-acide et accumulateurs au nickel-cadmium.

Le système autonome doit être capable de fournir du courant aux consommateurs pendant la période de l'année de moindre irradiation lumineuse. Si on a besoin du courant toute l'année, la période de moindre irradiation est l'hiver (pour l'Algérie). Pendant cette période, il faudra plus de panneaux pour couvrir les mêmes besoins qu'en été.

En général ces installations comprennent quatre éléments :

- Un ou plusieurs modules PV
- Le système de régulation
- Une ou plusieurs batteries
- L'onduleur

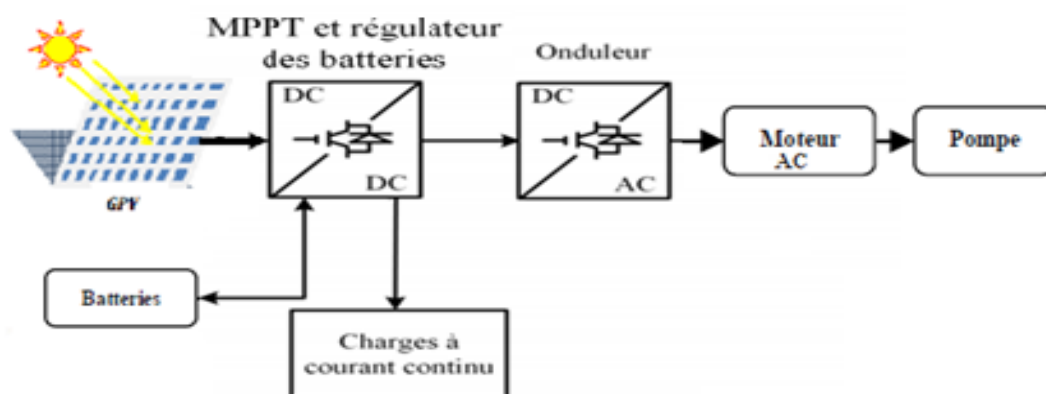


Figure I.16. Système photovoltaïque autonome avec stockage.

5.2. Systèmes connectés au réseau

Un système photovoltaïque connecté au réseau, c'est un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la

production et la consommation d'électricité. L'électricité générée n'est donc pas stockée mais fournie au réseau local de distribution.

On distingue deux types d'installations connectées au réseau :

Installation centralisée : génération de la puissance Photovoltaïque à grande échelle centralisée dans les stations de puissance Photovoltaïque.

Installation décentralisée : forme alternative de génération de puissance distribuée dans les unités situées directement dans le lieu du consommateur. [18]

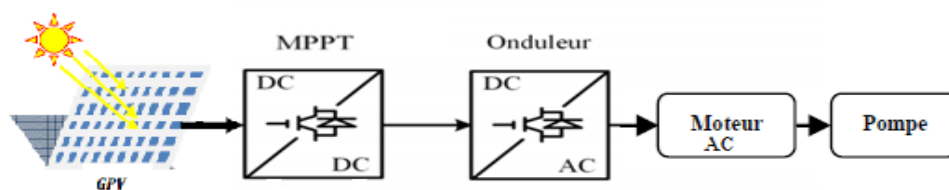


Figure I.17. Système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

6. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

6.1. Avantages

1- Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.

2- Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc.

Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.

3- Les systèmes photovoltaïques ont les avantages suivants par rapport aux options de concurrence de puissance:

- ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.

- ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant.

6.2. Inconvénients

Prix: les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale.

Rayonnement du soleil: l'intensité d'irradiance du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et flotte.

- le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %,
 - ils sont tributaires des conditions météorologiques.
 - l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage ($< 30V$) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
 - beaucoup des appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.
- [3]

7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque, avec ces avantages et ces inconvénients et les différents systèmes photovoltaïques. Nous nous intéressons particulièrement au système de pompage photovoltaïque avec batteries. Aussi que les principes de fonctionnement de chaque élément, ce qui permet d'introduire à la modélisation et l'analyse de ce système, chose qu'on va présenter dans le chapitre II.

CHAPTER II

Modélisation Des Éléments Du Système
De Pompage Photovoltaïque

1. Introduction

La modélisation est une étape essentielle qui doit précéder toute phase de dimensionnement, d'optimisation ou de simulation du système. Le système étudié est un système de pompage photovoltaïque composé particulièrement d'un générateur photovoltaïque (GPV), des convertisseurs statiques et du groupe moteur-pompe.

Dans ce chapitre nous présentons les différents modèles mathématiques de chacun de ces éléments composants ce système. [12]

2. Description du système à étudier

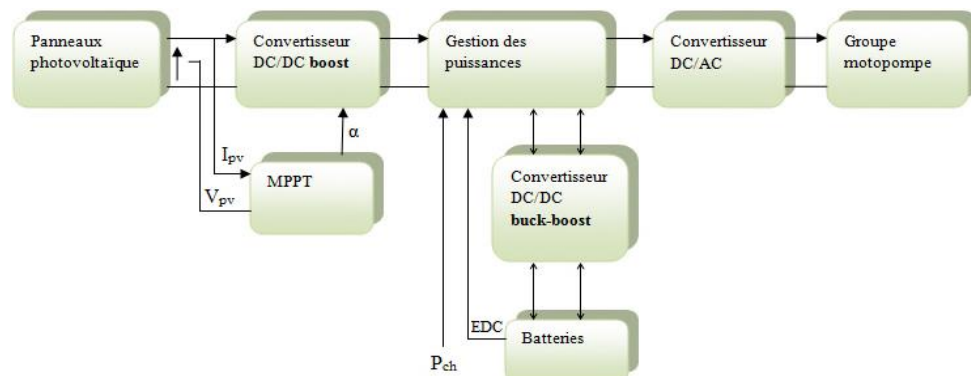


Figure II.1: Système globale à étudier.

Le système de pompage photovoltaïque avec batterie peut être comparé à une charge alimentée par une batterie qui est chargée par un générateur photovoltaïque.

Ses éléments de base sont :

- Les panneaux photovoltaïques: permettent l'alimentation de la charge (motopompe) et le stockage (batterie).
- La commande MPPT : permet d'extraire la puissance maximale produite par le champ de modules PV.
- La batterie : alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique.
- Le système de gestion : assure la gestion du flux d'énergie entre les différents composants et protège la batterie contre la surcharge et les décharges.

profondes.

- Le convertisseur DC/DC : fournit une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.
- Le convertisseur DC/AC : fournit une tension alternative à partir d'une tension continue.
- Groupe motopompe : convertit l'énergie électrique en énergie hydraulique. [6]

3. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Nous rencontrons 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. [11]

3.1. Modèle à une diode sans résistance shunt :(cellule idéale)

Dans le cas idéal, la jonction PN d'un générateur photovoltaïque soumis à un éclairement, peut être schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode qui représente la jonction P-N de la cellule.

La figure (II.2) illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode.

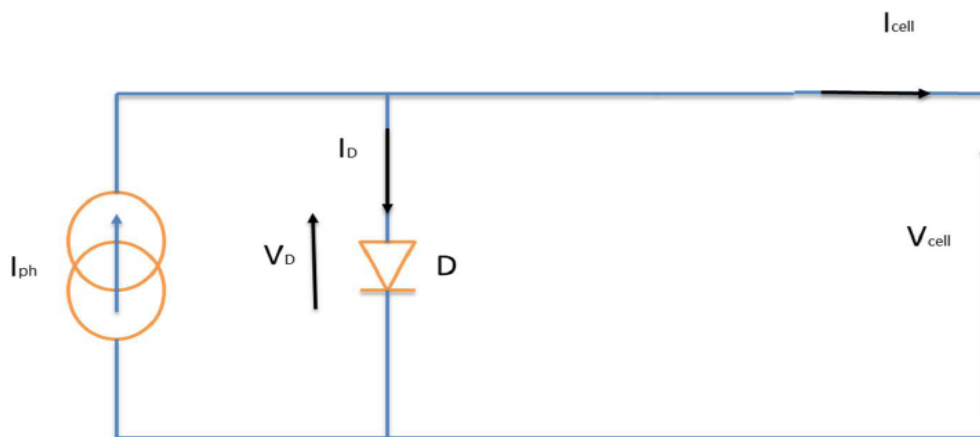


Figure II.2: Schéma équivalent à une cellule idéale. [11]

Le modèle mathématique d'une cellule PV idéal illuminée utilisant la loi de Kirchhoff est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D(2.1)$$

$$I_D = I_S \times \left[e^{\frac{V_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right](2.2)$$

$$I_{cell} = I_{ph} - I_S \times \left[e^{\frac{V_{cell}}{V_t}} - 1 \right](2.3)$$

$$V_{th} = \frac{n \times k \times T}{q}(2.4)$$

3.2. Modèle à une diode : (Cellule réelle)

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant :[12]

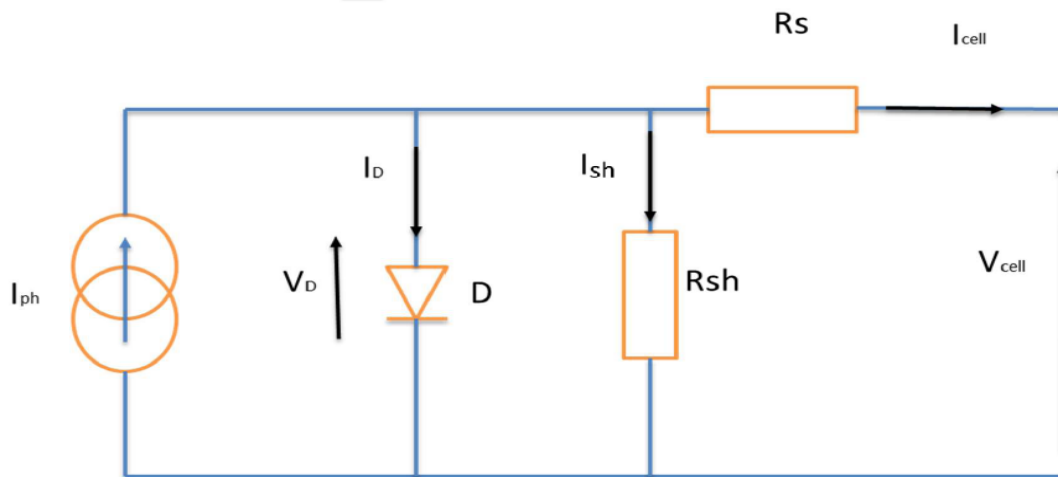


Figure II.3: Schéma équivalent d'une cellule solaire à une diode. [11]

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir à un générateur de courant, une diode pour les phénomènes physiques et deux résistances (série et shunt).

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

- La résistance en série(R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles,
- La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle

dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

La Figure (II.3):montre un schéma équivalent électrique représente le comportement statique d'une cellule PV réelle. Ce modèle permet de modéliser le comportement d'une source d'énergie électrique provenant de capteurPV.

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_S \times \left[e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1 \right] \quad (2.5)$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (2.6)$$

$$I_{cell} = I_{ph} - I_S \times \left[e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1 \right] - \left(\frac{V_{cell} + R_S I_{cell}}{R_P} \right) \quad (2.7)$$

$$V_D = V_{cell} + R_S I_{cell} \quad (2.8)$$

$$I_D = I_S \times \left[e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1 \right] \quad (2.9)$$

Pour une modélisation plus précis de la cellule PV, l'influence du niveau d'éclairement ainsi que celle de la température doivent être prisent en compte.

Alors, les paramètres de la cellule sont donné par le fabricant dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominale comme l'indique le tableau suivant :

Condition nominales	Conditions de Test standard
Eclairement $E_{nom}=800 \text{ W/m}^2$	Eclairement $E_0=1000 \text{ W/m}^2$
Température ambiant $T_{a,nom}=20 \text{ }^\circ\text{C}$	Température de la cellule $T_0=25 \text{ }^\circ\text{C}$
Vitesse du vent : 1 m/s	

Tableau II.1: Les conditions nominales et les conditions de test standard. [12]

Sous les conditions nominales, la température de la cellule TNOCT (NOCT : Nominal Operating Cell Température) est mentionnée sur le catalogue du fabricant.

La température de fonctionnement de la cellule T elle dépend de l'éclairement E et de la température ambiante T_a , selon l'équation empirique suivant :

$$T = T_a + \frac{T_{NOCT} - T_{a,nom}}{E_{nom}} \cdot E \quad (2.10)$$

Le courant photonique est lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de test standard, l'expression suivante représente le courant photonique en fonction de l'irradiation E à température de référence T_0 sous STC:

$$I_{ph(T_0)} = \frac{E}{E_0} \cdot I_{cco} \quad (2.11)$$

Le courant photonique dépend aussi de la température, son expression est donnée par :

$$I_{ph} = I_{ph(T_0)}(1 + K_0(T - T_0)) = \frac{E}{E_0}(I_{cco} + K_0(T - T_0)) \quad (2.12)$$

Le courant de saturation dépend de la température .Sa valeur pour une température donnée et calculer par l'équation suivant :

$$I_S = I_{S0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{n}} \exp\left(\frac{-qV_g}{nk} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (2.13)$$

Ou : V_g est l'énergie de band gap.

I_{S0} : Courant de saturation de diode sous la condition standard ; Avec :

$$I_{S0} = \frac{I_{cco} + K_0(T - T_0)}{\exp\left(\frac{V_{co} + K_0(T - T_0)}{N_S \cdot V_{th0}} \right) - 1} \quad (2.14)$$

Alors le courant généré par la cellule est donné par l'expression :

$$I_{ceh} = I_{ph} - I_S \times \left[e^{\frac{V_{cell} + R_S I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right] - \left(\frac{V_{cell} + R_S I_{cell}}{R_p} \right) \quad (2.15)$$

3.3. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés partir des courbes courants-tension, ou de l'équation caractéristique, les plus usuels sont les suivants:

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle, en annulant la tension V_{cell} dans l'équation précédente, on obtient :

3.3.1. Courant de court-circuit I_{cc}

$$I_{cc} = I_{ph} - I_S \times \left[e^{\frac{R_S I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right] - \left(\frac{R_S I_{cell}}{R_p} \right) \quad (2.16)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_S \cong \left[e^{\frac{R_S I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right]$ Devant I_{ph} , l'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_S}{R_p} \right)} \quad (2.17)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (Pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

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

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'une cellule photovoltaïque). En annulant le courant I_{cell} dans l'équation (2.14) on obtient :

$$0 = I_{cc} - I_S * \left[e^{\frac{R_S I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right] - \left(\frac{V_{cell}}{V_{th}} \right) \quad (2.18)$$

Dans le cas idéal:

$$V_{co} = V_{th} * \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_S} + 1 \right) \quad (2.19)$$

3.3.3. Puissance maximale

Pour une cellule idéale, la puissance maximale idéale $P_{midéale}$ aux bornes de la cellule photovoltaïque correspond donc à la tension du circuit ouvert multipliée par le courant de court- circuit :

$$P_{midéal} = V_{co} * I_{cc} \quad (2.20)$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque est plus arrondie et la tension au point de puissance maximale V_m est inférieure à la tension du

circuit ouvert V_{co} , de même que le courant fourni I_m est inférieur pour cette même tension au courant de court-circuit I_{cc} .

L'expression de la puissance en ce point est:

$$P_m = V_m * I_m \quad (2.21)$$

3.3.4. Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance fournie à la charge par GPV et la puissance maximale de GPV.

Il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{charg}}{P_{max}} \quad (2.22)$$

3.3.5. Le point de puissance maximale (PPM)

Le point de puissance maximale (PPM), représenté par la Figure (II.4), correspond au courant I_{MPP} et à la tension V_{MPP} . Il est défini comme un point dans lequel la charge est alimentée par un maximum de puissance.

Le schéma électrique équivalent qui décrit le fonctionnement réel de la cellule PV est présenté en figure (II.4)

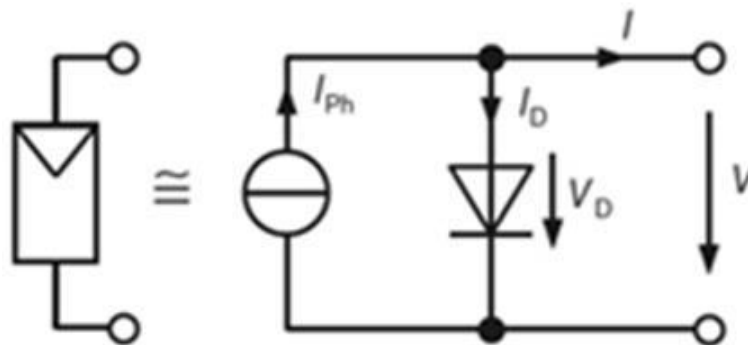


Figure II.4: Schéma équivalent d'une cellule PV [14]

3.3.6. Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{Max} (V_{opt} , I_{opt}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale).

Le facteur de forme indique la qualité de la cellule, il est définie par :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} [11] \quad (2.23)$$

La Figure (II.5) présente le facteur de forme, qui est défini par le quotient de la surface hachurée sur la surface non hachurée.

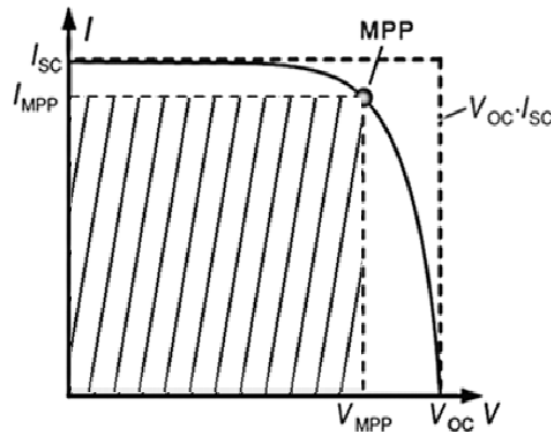


Figure II.5:Le facteur de forme

Le facteur de forme prend des valeurs comprises entre 0,75 et 0,85 pour une cellule PV à base de silicium et des valeurs comprises entre 0,60 et 0,75 pour des matériaux à base des couches minces.

3.3.7. Influence de la température sur une cellule PV

Une élévation de la température d'un semi-conducteur conduit à une augmentation du mouvement thermique de l'électron intégré dans la maille du cristal. A cet effet, les électrons seront arrachés de leurs orbites vers la bande de conduction et par conséquent la concentration intrinsèque des porteurs de charge augmente et provoque une augmentation du courant de saturation I_s . D'après l'équation I.03, une

augmentation du courant I_s conduit à une réduction de la valeur de la tension en circuit ouvert V_{oc} . Dans la littérature, on trouve l'influence de la variation de la température sur V_{oc} pour une cellule solaire au silicium pour une valeur de -2,3 mV/K. Cependant l'influence de la variation de la température sur le courant de court-circuit reste insignifiante.

La connaissance de l'influence de la variation de la température sur la puissance est d'un intérêt particulier pour les utilisateurs d'une cellule photovoltaïque. Ainsi, l'augmentation de la température induit la dégradation de la puissance de la cellule PV au silicium de 0,4 à 0,5/K. Autrement dit, la puissance d'une cellule solaire est réduite d'environ 5% avec une augmentation de température de 10 K. [14]

4. Modélisation d'un GPV

Nous avons vu que le modèle mathématique d'une cellule PV est donnée par:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \times \left[e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right] - \left(\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \right) \quad (2.24)$$

Cette expression est donnée par une représentation adéquate du comportement intrinsèque d'une cellule solaire au silicium typique. Néanmoins, le générateur photovoltaïque est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble des cellules identiques branchées en série- parallèle.

Alors le modèle mathématique qui est utilisé pour modéliser le fonctionnement GPV peut être exprimé par :

$$I_{pv}^p = N_p I_{ph}^c - N_p I_s^c \times \left[\left(e^{\frac{V_{pv}^p + R_s^p I_{pv}^p}{N_s \cdot V_{th}}} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{pv}^p + R_s^p I_{pv}^p}{R_p} \right) \quad (2.25)$$

Les paramètres du panneau portent l'indice "p" et les paramètres de la cellule PV, l'indice 'c'.

Ainsi, le courant I_{pv} , généré par le module PV, dans des conditions de fonctionnement arbitraire. Avec :

La résistance série équivalente :

$$R_s^p = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s^c \quad (2.26)$$

La résistance parallèle équivalente :

$$R_p^p = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_p^c \quad (2.27)$$

4.1. Modélisation sous Simulink

Dans le but d'avoir un modèle simple à utiliser, nous avons procédé à la mise en œuvre d'un modèle du panneau photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK qui va être utilisé dans la suite de notre travail.

Le modèle est basé sur l'équation (2.23), comporte deux paramètres d'entrée : la température et l'ensoleillement et deux paramètres de sortie : la tension et le courant).

Dans notre étude, le module Shell SP 75 est choisi comme modèle de simulation sous MATLAB/SIMULINK. Ce module est constitué de 36 cellules solaires en silicium monocristallin en série et fournit 75 W de puissance nominale.

4.2. Caractéristique tension-courant d'un GPV

La figure (II.6) illustre la caractéristique non linéaire I(V) d'un GPV à base de silicium pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$ et une température $T=25^\circ\text{C}$ (conditions de fonctionnement standards)

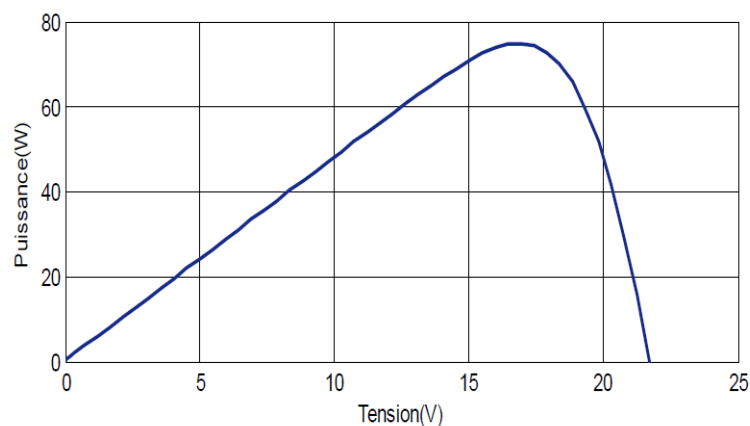


Figure (II.6):Caractéristique P(V) d'un GPV dans les conditions standards.

5. Modélisation du HacheurBoost

La Figure (II.7) suivantes représente la modélisation d'un hacheur Boost.

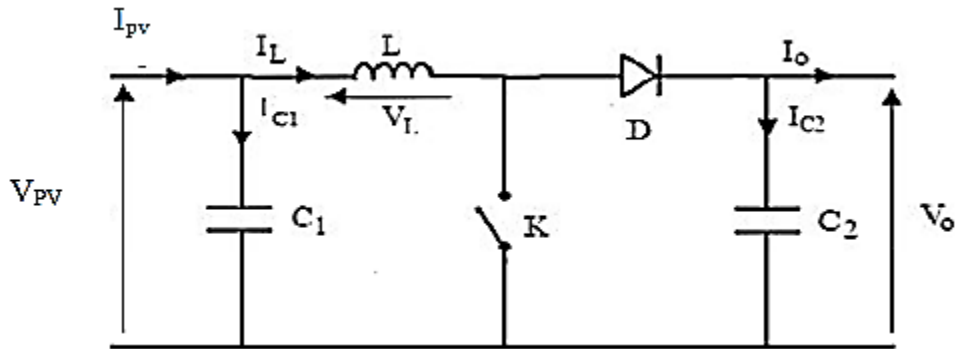


Figure II.7: Schéma électrique d'un hacheur Boost.

5.1.Fonctionnement

Quand l'interrupteur K est fermé pendant la durée αT , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Aux deuxième temps $((1-\alpha) T)$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D.

En supposant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à

$$V_c(1-\alpha) = V_{pv}$$

5.2.Modèle mathématiqueéquivalent

La Figure (II.8)et (II.9)suivantes représente la modélisation des hacheurs Boost ferme et ouvert

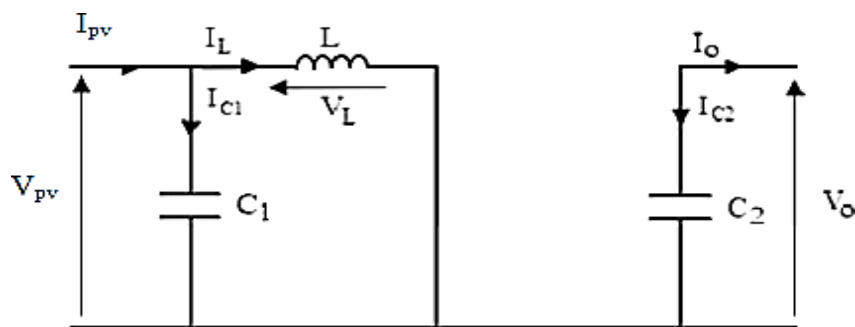


Figure II.8: Schéma électrique d'un hacheur Boostfermé.

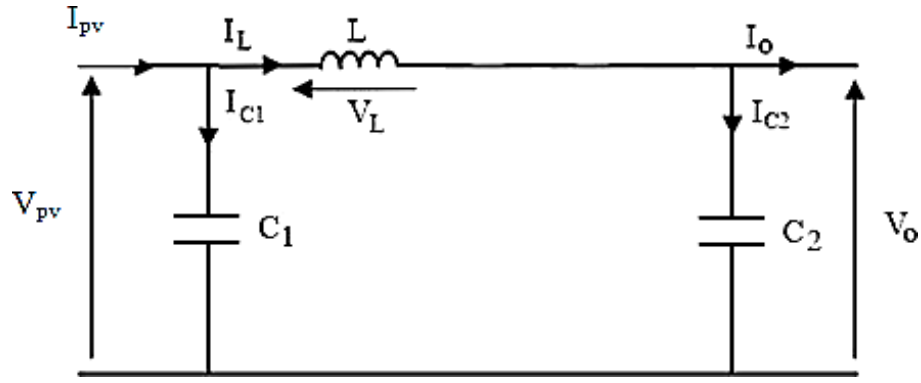


Figure II.9: Schéma électrique d'un hacheur Boostouvert

Phase 1: $T_{ON} = \alpha T_\mu$

$$I_{C1} = C_1 \left(\frac{dV_{pv}}{dt} \right) = I_{pv} - I_L \quad (2.28)$$

$$I_{C2} = C_2 \left(\frac{dV_o}{dt} \right) = -I_o \quad (2.29)$$

$$V_L = L \left(\frac{dI_L}{dt} \right) = V_{pv} \quad (2.30)$$

Phase 2: $T_{OFF} = (\alpha - 1) T_\mu$

$$I_{C1} = C_1 \left(\frac{dV_{pv}}{dt} \right) = I_{pv} - I_L \quad (2.31)$$

$$I_{C2} = C_2 \left(\frac{dV_o}{dt} \right) = I_L - I_o \quad (2.32)$$

$$V_L = L \left(\frac{dI_L}{dt} \right) = V_{pv} - V_o \quad (2.33)$$

6. Modélisation de L'onduleur

La Figure (II.10) suivante représente la modélisation de l'onduleur de tension triphasé

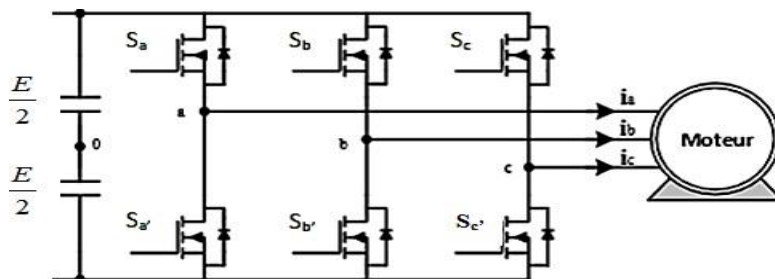


Figure II.10: Structure de l'onduleur de tension triphasé.

L'état des interrupteurs, supposées parfaites, peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_i avec $i = a, b, c$.

- Si le transistor supérieur est en conduction, les variables $S_i = 1$;
- Si le transistor inférieur est en conduction, les variables $S_i = 0$;

Les tensions simples appliquées aux trois phases statorique sont obtenues à partir des relations suivantes en tenant compte du point fictif « o » [6]:

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (2.34)$$

Par addition on a:

$$V_{ao} + V_{bo} + V_{co} = V_{an} + V_{bn} + V_{cn} + 3V_{no} \quad (2.35)$$

Le système de la tension triphasée statorique est symétrique donc :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} + 3V_{no} = 0 \quad (2.36)$$

D'où, on obtient :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2.37)$$

En remplaçant l'équation (2.37) dans le système d'équation(2.34), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = \frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bn} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (2.38)$$

Après arrangement les équations des deux systèmes on obtient le système matriciel

$$\text{suivant : } \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Avec :

$$\begin{aligned}
V_{a_o} &= ES_a \\
V_{b_o} &= ES_b \\
V_{c_o} &= ES_c
\end{aligned}
\tag{2.40}$$

Finalement:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}
\tag{2.41}$$

6.1. Principe d'onduleur MLI sinusoïdale

La technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) est réalisée par la comparaison d'une onde modulante à basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse à haute fréquence de forme triangulaire.

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f .

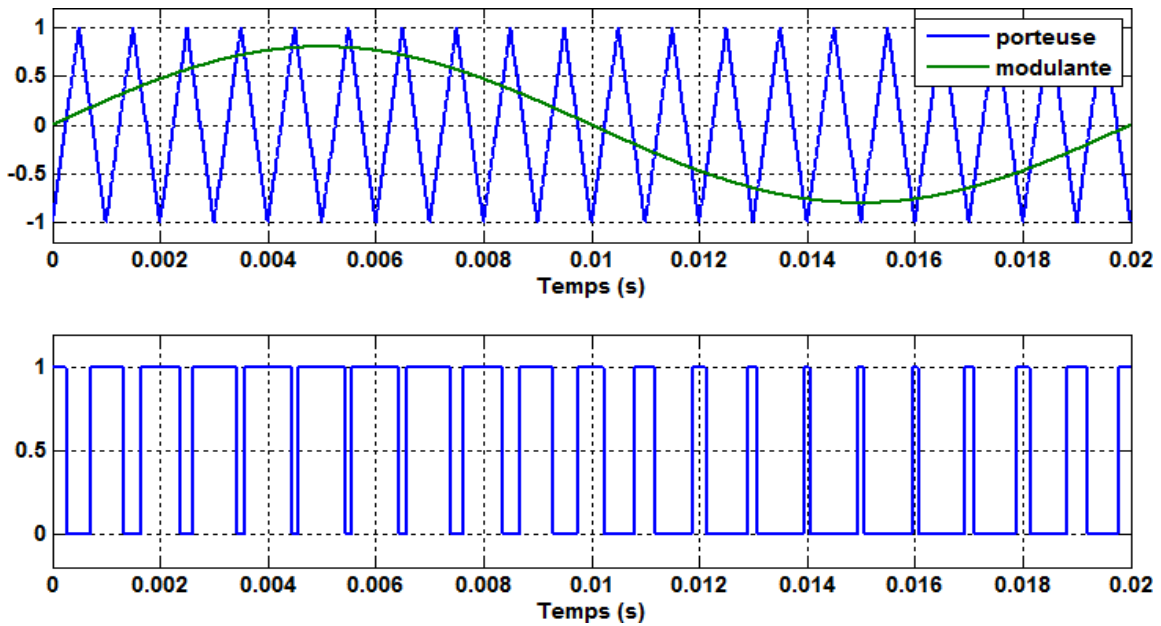


Figure II.11: Principe de la MLI sinus-tria

7. Modélisation de la pompe

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres, la hauteur manométrique, le débit et la vitesse. La hauteur de pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

Dans cette application, la puissance hydraulique de la pompe centrifuge est donnée par :

$$P_h = R_{mp} \cdot P_{ele} = \rho \cdot g \cdot HMT \cdot Q \quad (2.42)$$

Avec :

P_h : Puissance communiquée au fluide par la pompe (W) ;

P_{ele} : Puissance électrique du moteur asynchrone (W) ;

R_{mp} : Rendement du groupe motopompe (%) ;

g : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2) ;

ρ : Masse volumique de l'eau (1000 Kg/m^3) ;

Q : Débit volumique (m^3/s) ;

h : Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe (m).

La pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r .

$$C_r = K_r \Omega^2 \quad (2.43)$$

Où :

Ω : Vitesse du moteur asynchrone (rad/s).

Avec K_r un coefficient de proportionnalité [$\text{Nm} / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})^2$] qui est exprimé par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (2.44)$$

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).

Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

8. Le modèle électrique de la batterie

Le modèle électrique de la batterie comprend une fem. E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_b) et une résistance interne (R_s).

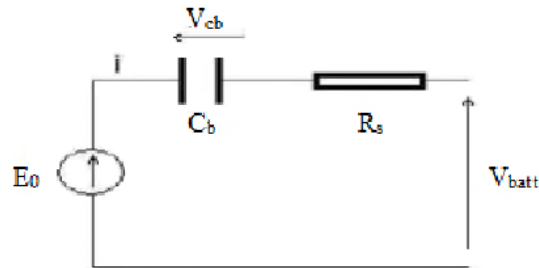


Figure II.12: Modèle R-C de la batterie.

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_s \cdot i - V_{cb} \quad (2.45)$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC - 1 = \frac{Q_d}{C_{batt}} \quad (2.46)$$

C_{batt} : la capacité (Ah) nominale de la batterie.

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{batt} [6]

9. Optimisation du système de pompage photovoltaïque

9.1. fonctionnement des panneaux pv dans les conditions optimales

L'opération optimale d'un système PV est importante pour augmenter l'efficacité de Panneaux solaire.

La caractéristique d'un GPV est non linéaire et varie avec les températures ambiantes et l'airement.. par conséquent, une technique de MPPT est exigée pour obtenir la puissance maximum d'un GPV dans le but d'améliorer son rendement. Autre mentit maximiser la puissance délivrée à la charge reliée aux bornes du générateur[6]

9.2. De l'MPPT d'un système solaire photovoltaïque

Un MPPT (Maximum Power point Tracker) est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec un générateur photovoltaïque. Un régulateur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque de manière à fournir le maximum de puissance à la charge. La Figure (II.13) représente une chaîne de conversion photovoltaïque avec un convertisseur statique contrôlé par MPPT et un moteur asynchrone et la pompe. Plusieurs méthodes permettent de rechercher le point de puissance maximale, la solution proposée dans ce mémoire est la méthode P&O

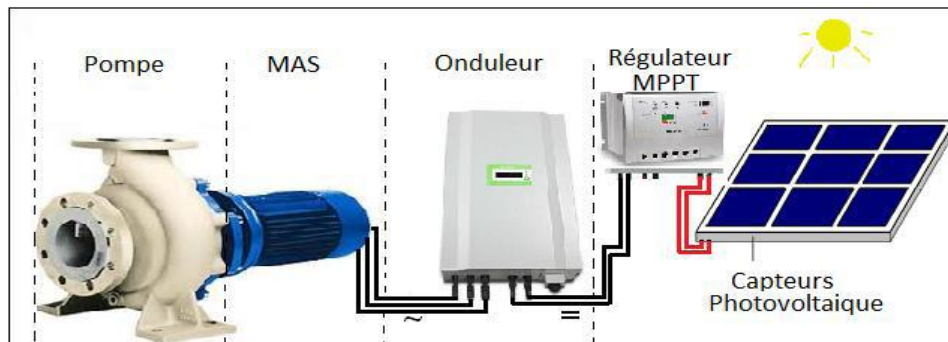


Figure II.13 : Couplage d'un système de pompage PV avec optimisation

9.3. La technique perturbation et Observation « P&O »

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale (Δv) et on observe la variation de la puissance P_{PV} qui en résulte;

Ainsi, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} (c'est-à-dire $\Delta P > 0$), comme illustré dans la figure III.12 la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un autre point plus proche du point de puissance maximal. Et on continue à perturber la tension dans la même direction. Ceci va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, $\Delta P < 0$, le point de fonctionnement s'éloigne du PPM.

Alors, on doit perturber la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le PPM.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de la tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement, et faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié

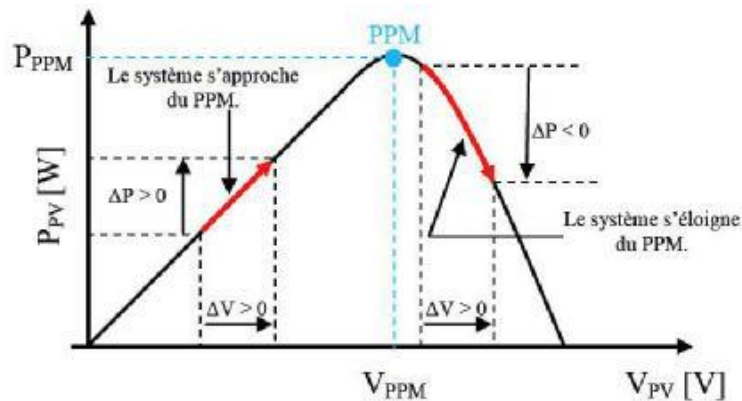


Figure II.14: Application de la commande P&O sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$

Explication en utilisant la perturbation de $V_{réf}$: mesure

$$\text{Si } \Delta P = P_k - P_{k-1} < 0$$

Si $\Delta V_{réf} = V_{réf,k} - V_{réf,k-1} < 0$, on augmente $V_{réf}$;

Si $\Delta V_{réf} > 0$, on diminue $V_{réf}$.

$$\text{Si } \Delta P > 0$$

Si $\Delta V_{réf} < 0$, on diminue $V_{réf}$;

Si $\Delta V_{réf} > 0$, on augmente $V_{réf}$.

$\Delta V = C$ (incrémentement)

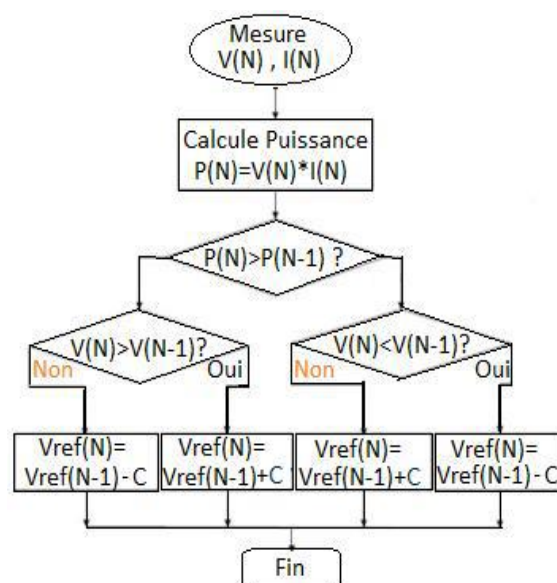


Figure II.15: Schéma explicatif de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O) [13]

La Figure (II.15) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, [7]

10. Généralités de la machine asynchrone

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif, la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales à cause du glissement. Le rotor est toujours en retard par rapport au champ statorique, la machine asynchrone est dite (machine à induction) car l'énergie est transférée du stator au rotor ou inversement par induction électromagnétique.

10.1. Définition de La machine asynchrone

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif, la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales à cause du glissement. Le rotor est toujours en retard par rapport au champ statorique, la machine asynchrone est dite (machine à induction) car l'énergie est transférée du stator au rotor ou inversement par induction électromagnétique.

10.2. les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé.

10.3. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'induction des courants dans le bobinage du rotor par un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ tournant va créer un couple moteur qui s'exerce sur les conducteurs des courants induits, Il provoque ainsi le démarrage et la rotation du rotor dans le même sens que le champ tournant. [20]

On appelle glissement la grandeur g . s'exprime en % :

$$g = \frac{w_r}{w_s} = \frac{(w_s - w)}{w_s} = \frac{(\Omega_s - \Omega)}{\Omega_s} \quad (2.47)$$

w_r : Pulsation rotorique

w_s : Pulsation statorique

w : Pulsation mécanique du rotor.

Dans une machine asynchrone, la condition de fréquence, $w_s = w_r + w$ est constamment satisfaite. Quand la pulsation mécanique w est égale à la pulsation du champ tournant w_s , le phénomène d'induction électromagnétique disparaît.

10.4. Modélisation du moteur asynchrone

10.4.1. Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- Distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est sinusoïdale.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas en fonction de la température de fonctionnement et on néglige également l'effet de peau.

Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.[21]

10.4.2. Mise en équations

La structure principale de la machine asynchrone dans le repère (ABC) est présentée par la Figure (II.16). Les trois axes statoriques sont décalés entre eux d'un angle $2\pi/3$, ainsi les axes rotoriques. Un angle θ repère le déphasage entre les axes rotoriques par rapport aux axes statoriques.

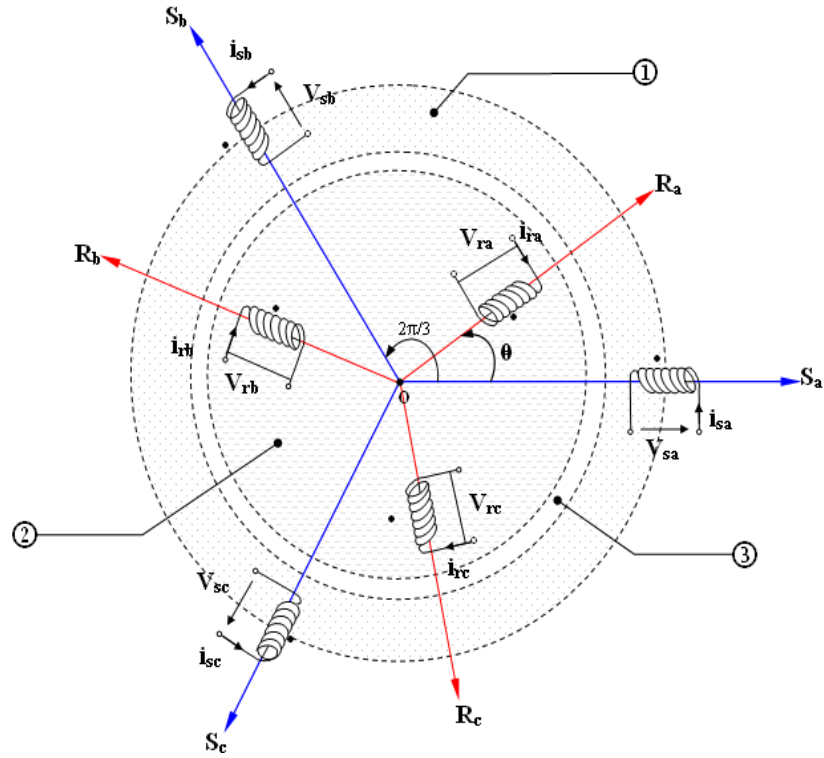


Figure II.16: Définition des repères statoriques et toriques

Dans le cadre des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée, les équations de la machine s'écrivent comme suit:

10.4.2.1. Equations électriques

Les équations de tension des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques

$$\text{sont:} \begin{cases} V_{sa} = r_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ V_{sb} = r_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ V_{sc} = r_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{cases} \quad (2.48)$$

$$\begin{cases} V_{ra} = r_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{ra} \\ V_{rb} = r_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{rb} \\ V_{rc} = r_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{rc} \end{cases} \quad (2.49)$$

En désignant par:

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Les tensions appliquées aux trois phases statoriques.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Les courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$: Les flux totaux à travers ces enroulements

r_s : Résistance d'une phase statorique

r_r : Résistance d'une phase rotorique

Les équations (2.48) et (2.49) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante: pour les stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & r_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & r_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$[V_{sabc}] = [r_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (2.51)$$

Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & r_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & r_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Ou sous forme condensée comme suit :

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] \quad (2.53)$$

10.4.2.2. Equation magnétiques

Pour le stator:

$$[\phi_{sabc}] = [i_{sabc}][L_{ss}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \quad (2.54)$$

Pour le rotor:

$$[\phi_{rabc}] = [i_{rabc}][L_{rr}] + [M_{rs}][i_{sabc}] \quad (2.55)$$

Tel que:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$$

On désignée par:

$[L_{ss}]$: Matrice des inductances statoriques

$[L_{rr}]$: Matrice des inductances rotoriques

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

$[M_{rs}]$: Matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

Avec :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Avec:

L_s : Inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : Inductance mutuelle entre les phases statoriques.

M_r : Inductance mutuelle entre les phases rotoriques.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

θ_r : Angle qui définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phase statoriques et rotoriques.

M_0 : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique lorsque les deux axes se coïncident.

10.4.2.3. Equations mécaniques

L'équation de mouvement est donnée par:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f\Omega_m \quad (2.58)$$

$$C_e = P \begin{bmatrix} i_{sa} & i_{sb} & i_{sc} \end{bmatrix} \left([M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \right) \quad (2.59)$$

Les équations précédentes font apparaître des difficultés pour la résolution analytique du fait que les termes trigonométriques de la matrice des inductances varient en fonction de la position.

Cela conduit à l'usage de la transformation de Park, qui permettra de rendre ces termes indépendants de la position.[22].

10.4.2.4 Transformation de PARK

Les équations précédentes permettent la modélisation de la machine dans le plan "abc". Vu la complexité de ces équations non linéaires et multi-variables, il est très difficile d'en tirer des stratégies de commande.

Pour cette raison, on fait appel à la transformation de PARK qui consiste à imaginer de remplacer le rotor tournant par un rotor fictif équivalent fixe (d,q). A condition de conserver la force magnétomotrice et la puissance instantanée [23].

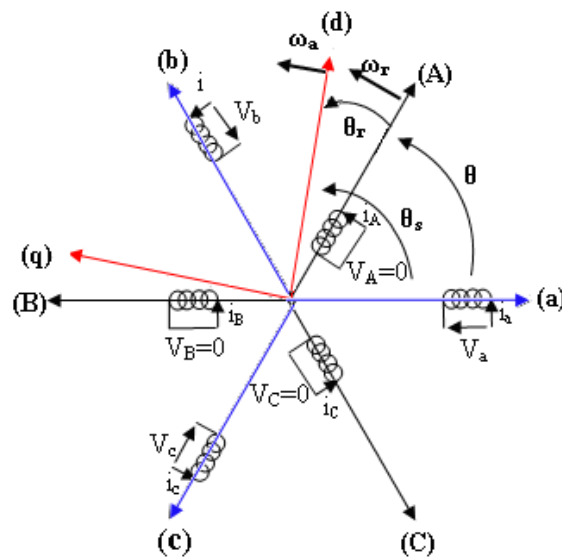


Figure II.17 : Passage du repère triphasé au repère biphasé

θ_{coor} : La position angulaire du système d'axes (dq) choisi par rapport au système d'axes réel (abc)

$\omega_{\text{coor}} = \frac{d}{dt}\theta_{\text{coor}}$: Vitesse de coordonnée de rotation du repère(d q) par rapport un repère fixe (abc).

Dans ces conditions les équations électriques, magnétiques et mécaniques deviennent:

10.4.2.4. Equations électriques

On applique la transformation de Park sur les deux équations(2.52)et (2.54)en admettant quele rotor étant en court-circuit, il en résulte:

$$\begin{cases} V_{sd} = r_s i_{sd} + \frac{d}{dt}\phi_{sd} - \omega_{\text{coor}}\phi_{sq} \\ V_{sq} = r_s i_{sq} + \frac{d}{dt}\phi_{sq} + \omega_{\text{coor}}\phi_{sd} \\ V_{rd} = 0 = r_r i_{rd} + \frac{d}{dt}\phi_{rd} - \omega_{\text{coor}}\phi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = r_r i_{rq} + \frac{d}{dt}\phi_{rq} + \omega_{\text{coor}}\phi_{rd} \end{cases} \quad (2.63)$$

Le système (d ,q) tourne à la vitesse $(\omega_{\text{coor}}-\omega_r)$ par rapport au rotor

10.4.2.5. Equations magnétiques

L'application de la transformation de Park sur les équations (2.54)et (2.55)

donne:

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (2.64)$$

Le nombre des paramètres électromagnétiques est réduit, tel que:

$L_s = I_s - M_s$: Inductance cyclique propre statorique

$L_r = I_r - M_r$: Inductance cyclique propre rotorique.

$M=3/2 M_{sr}$: Inductance cyclique mutuelle entre l'armature du stator et l'armature du rotor.

10.4.2.6. Expression du couple électromagnétique et de la puissance

L'expression du couple électromagnétique est donnée par:

$$C_e = \frac{\partial w_e}{\partial \theta_{géo}} = P \frac{\partial w_e}{\partial \theta_{éle}} \quad (2.65)$$

$$\theta_{géo} = \frac{\theta_{éle}}{P} \quad (2.66)$$

Avec:

W_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique

$\theta_{géo}$: Ecart angulaire de la partie (rotor par rapport au stator)

P : Nombre de paires de pôle

Selon Park, l'expression de la puissance transmise est la suivante:

En remplaçant V_{su} et V_{sv} par leurs expressions il vient que:

$$P(t) = V_{sa}i_{sa} + V_{sb}i_{sb} + V_{sc}i_{sc} \quad (2.67)$$

$$P(t) = V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq} + V_{so}i_{so} \quad (2.68)$$

Le système étant équilibrée, il vient:

$$P(t) = [V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq}] \quad (2.69)$$

En remplaçant V_{sd} et V_{sq} par leurs expressions il vient que:

$$P(t) = [r_s i_{sd}^2 + r_s i_{sq}^2] + \left[i_{sd} \frac{d}{dt} \phi_{sd} + i_{sq} \frac{d}{dt} \phi_{sq} \right] + \omega_c [\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}] \quad (2.70)$$

Cette dernière expression est composée de trois parties:

$[r_s i_{sd}^2 + r_s i_{sq}^2]$ (Représente les chutes ohmiques).

$\left[i_{sd} \frac{d}{dt} \phi_{sd} + i_{sq} \frac{d}{dt} \phi_{sq} \right]$ (Représente la variation de l'énergie magnétique).

$\omega_c [\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}]$ (Représente la puissance transférée du stator au rotor à travers l'entrefer (puissance électromagnétique).

Sachant que :

$$P_e = C_e w_e \quad (2.71)$$

Alors:

$$C_e = [\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}] \quad (2.72)$$

Ou bien encore

$$C_e = \frac{PM}{l_r} [\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}] \quad (2.73)$$

10.5. Différents repères

L'isotropie du moteur asynchrone permet une grande souplesse dans la composition des équations de machine selon deux axes à l'aide de transformation de Park, cela nécessite l'utilisation d'un repère qui permet de simplifier les expressions analytiques. Il existe différentes possibilités pour le choix du repère d'axes, se ramène pratiquement à trois référentiels (système biphasés) orthogonal

Référentiel lié au stator : $\omega_{\text{coor}} = \frac{d(\theta_s)}{dt} = 0$;

Référentiel fixé par rapport au rotor : $\omega_{\text{coor}} = \frac{d(\theta)}{dt} = w$; (2.74)

Référentiel fixé par rapport au champs tournant : $\omega_{\text{coor}} = \frac{d(\theta_s)}{dt} = w_s$;

10.5.1. Choix du référentiel

L'étude analytique du moteur asynchrone à l'aide la transformation de Park, nécessite l'utilisation d'un référentiel qui permet de simplifier au maximum les expressions analytiques.

Il existe différentes possibilités pour le choix du repère d'axes (d,q) qui se fait en fonction du régime de fonctionnement (régime transitoire ou permanent) d'une part et d'autre part a la technique de commande.

10.5.1.1. Référentiel lié au stator (α, β)

Les équations de la machine asynchrone dans le repère (α, β) lié au stator prennent la forme suivante:

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_S i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = R_S i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \phi_{s\beta} \\ 0 = R_R i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \phi_{r\alpha} + \omega_r \phi_{r\beta} \\ 0 = R_R i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \phi_{r\beta} - \omega_r \phi_{r\alpha} \end{cases} \quad (2.75)$$

Ce référentiel possède des tensions et des courants réelles et peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

10.5.1.2. Référentiel lié au rotor

Il se traduit par les conditions

$$\begin{aligned} \omega_{\text{coor}} &= \frac{d(\theta)}{dt} = \omega \\ \begin{cases} V_{sx} = r_S i_{sx} + \frac{d}{dt} \phi_{sx} - \omega_r \phi_{sy} \\ V_{sy} = r_S i_{sy} + \frac{d}{dt} \phi_{sy} + \omega_r \phi_{sx} \\ V_{rx} = 0 = R_R i_{rx} + \frac{d}{dt} \phi_{rx} \\ V_{ry} = 0 = R_R i_{ry} + \frac{d}{dt} \phi_{ry} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.76)$$

Ce système est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones

10.5.1.3. Référentiel lié au champ tournant

Les équations de la machine asynchrone dans le repère (d, q) lié au champ tournant prennent la forme suivante:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ 0 = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{rq} \\ 0 = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{rd} \end{cases} \quad (2.77)$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent.

Il est alors plus facile de faire la régulation de ces grandeurs.[25]

Ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplification dans la formulation des équations.

Il fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, raison pour laquelle ce référentiel est utilisé pour la commande des machines asynchrones.

10.6. Application de la transformation de PARK de la MAS

10.6.1. Equations électriques

En application la transformation de PARK sur les équations électriques et en admettant que le rotor étant en court-circuit il en résulte :

$$\begin{cases} V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \phi_{qs} \\ V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \phi_{ds} \\ V_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (2.78)$$

10.6.2. Equations magnétiques

L'application de la transformation de Park sur l'équation (2.53)et (2.54)

donne:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (2.79)$$

Le nombre des paramètres électromagnétiques est réduit, tel que:

$L_s = I_s - M_s$: Inductance cyclique statorique;

$L_r = I_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique;

M : Inductance mutuelle cyclique entre rotor stator.

En remplaçant les équations des flux dans le système (2.52)on trouve :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{M^2}{l_r T_r}\right) & 0 & \frac{M}{\sigma l_s l_r T_r} & \frac{M}{\sigma l_s l_r} w_r \\ 0 & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{M^2}{l_r T_r}\right) & -\frac{M}{\sigma l_s l_r} w_r & \frac{M}{\sigma l_s l_r T_r} \\ \frac{M}{T_t} & 0 & -\frac{1}{T_t} & -w_r \\ 0 & \frac{M}{T_t} & w_r & -\frac{1}{T_t} \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma l_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma l_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

Avec :

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{l_s l_r}$: Le coefficient du fuite totale

$T_s = \frac{l_s}{r_s}$: Constante de temps statorique.

$T_r = \frac{l_r}{r_r}$: Constante de temps rotorique.

10.6.3. Equations mécaniques

L'équation du couple électromagnétique est donnée par:

$$C_e = \frac{\omega}{\Omega} w_s [\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_d] = P(\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_d) \quad (2.82)$$

10.7. Mise sous forme d'équation d'états

Le modèle de la machine asynchrone est donné sous forme matricielle par:

$$[X] = [A][X] + [B][U] \quad (2.83)$$

Telque :

$$[X] = [i_{sd} i_{sq} \Phi_{rd} \Phi_{rq}]^T : \text{Vecteur d'état.}$$

$[A]$: Matrice d'évolution d'état du système.

$[B]$: Matrice de commande du système.

$$[U] = [V_{sd} V_{sq}]^T : \text{Vecteur de commande } \dot{X} = \frac{d}{dt} X$$

11. Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC et DC/AC, la batterie et le groupe motopompe). Nous avons présenté les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du module photovoltaïque pour des variations des conditions météorologiques. [6]

Dans le deuxième parti, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone triphasée. Cette modélisation nous a permis d'établir un modèle mathématique de cette machine. Ainsi, nous avons utilisé la transformation de Park et le système d'équation d'état de la machine.

CHAPTER III

Commande Vectorielle Du Système De Pompage Photovoltaïque

1. Introduction:

Dans ce chapitre, on va présenter la commande vectorielle pour la variation de vitesse du moteur asynchrone, qui va nous permettre de réguler le débit de la pompe centrifuge. En effet, la régulation du débit par la variation de vitesse du moteur permet d'adapter en permanence la puissance de la pompe aux besoins de l'installation. Lorsque le débit augmente de façon linéaire, les pertes de charges de l'installation dans le carré du débit augmentent. Les pompes centrifuges ont un comportement similaire: lorsque le débit et la vitesse augmentent, la hauteur manométrique augmente avec le carré de la vitesse. En raison de ces lois hydrauliques, une faible variation de vitesse permet de couvrir une plage de fonctionnement importante. On termine ce chapitre par des résultats de simulation de la commande vectorielle de la motopompe dans les conditions de fonctionnement normales [8].

2. Simulation du système global

Une fois les différents composants du système global de pompage solaire sont simulés et connus, nous allons maintenant, simuler l'association directe GPV-convertisseur-Motopompe qui représente le choix le plus simple et le moins coûteux. Le schéma bloc globale du système de pompage est représenté en figure (III.1).

3. Dimensionnement de l'installation de pompage

3.1. Dimensionnement de la pompe centrifuge:

La pompe choisie a un rendement de $\eta_p = 55\%$, et l'efficacité du moteur est d'environ $\eta_{mot} = 85\%$ au point de fonctionnement nominal. Le rendement total du groupe motopompe $\eta_{mp} = 47\%$. La puissance électrique requis par la pompe est décrit par l'équation suivante :

$$P_e = \frac{C_h \times Q_j \times HMT}{\eta_{mp}} \quad (3.01)$$

Avec:

$$C_h = g \times \delta \quad (3.02)$$

δ : Masse volumique de l'eau kg/m^3 .

Donc, on choisit une pompe de puissance $P_p = 3500 \text{ W}$ (voir annexe).

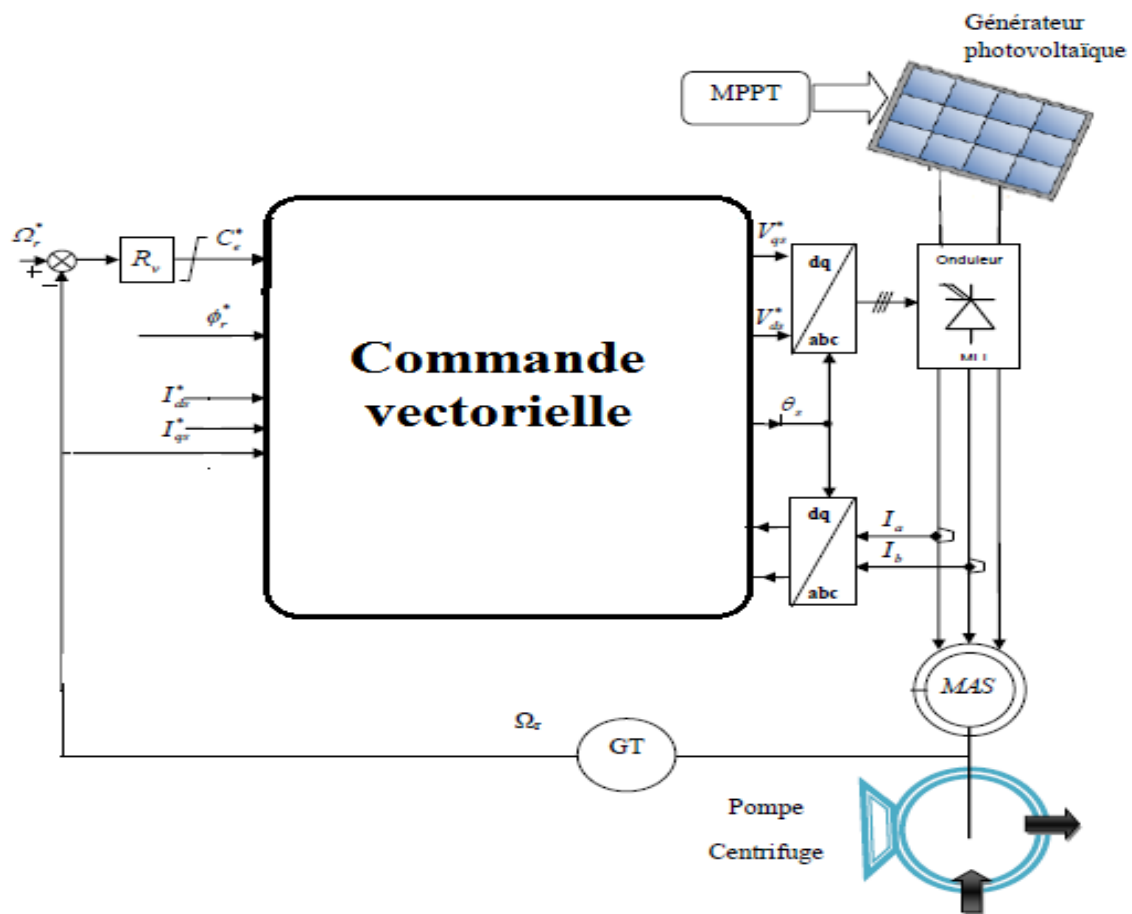


Figure III-1: Structure de la commande vectorielle de la chaine de pompage.

3.2. Dimensionnement du module photovoltaïque:

Le nombre total de modules photovoltaïques est calculé en rapportant la puissance globale du champ à celle (P_m) d'un seul module :

$$N = \frac{P_{pv}}{P_m} \quad (3.06)$$

Le nombre de modules connectés en série sera :

$$N_s = \frac{v}{v_m} \quad (3.07)$$

Où V et V_m sont respectivement les tensions du système et du module. Le nombre de branches (modules en parallèle) :

$$N_p = \frac{N}{N_s} \quad (3.08)$$

Tension au maximum MPP, V_{mp}	520V
Puissance à MPP, P_{mp}	3800W
Courant à MPP, $I_{mp} = P_{mp}/V_{mp}$	8.15A
Nombre de modules en série, $N_{ser} = V_{mp}/V_{mpp}$	14
Nombre de modules en parallèle, $N_{par} = I_{mp}/I_{mpp}$	31

Tableau III.1: Spécifications du Système PV

Tension en circuit ouvert V_{oc} d'un module	21.6V
Courant de court-circuit I_{cc} d'un module	0.64A
Tension au maximum MPP, V_{mpp}	$0.81 \times 21.6 = 17.6V$
Courant au maximum MPP, I_{mpp}	$0.9 \times 0.64 = 0.58A$

Tableau III.2: Spécifications du Module PV

La figure (III-2) représente la courbe $I = f(V)$ & $P = f(V)$ d'un panneau photovoltaïque typique pour différentes valeurs d'éclairement (1000-800-600 W/m²) avec de condition standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une température constante de 25°C.

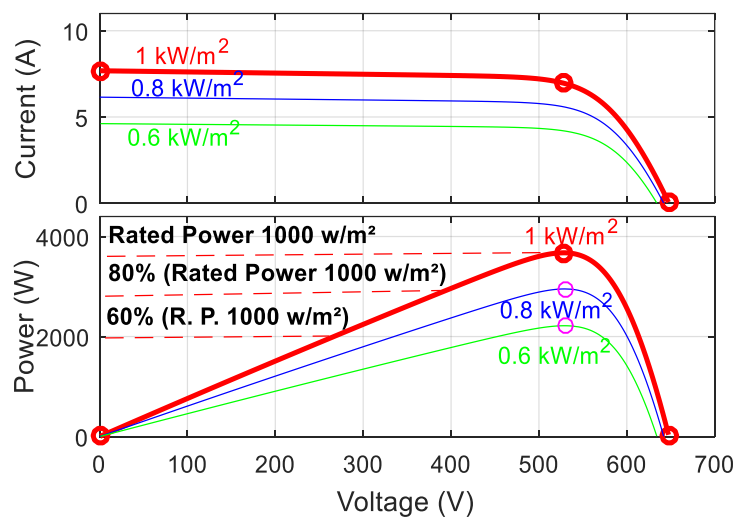


Figure III-2A: Courbe P_{pv} - V_{pv} pour PV

4. Commande vectorielle indirecte:

Le principe d'orientation du flux est apparu dans les travaux de Blaschke au début des années 70, il consiste à faire coïncider l'axe 'd' du repère tournant (d-q) avec le flux, afin de rendre le comportement de la machine asynchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, le flux est donc contrôlé par le courant inducteur et le couple par le courant induit.

Le but de cette commande est d'éliminer le couplage qui existe entre l'induit et l'inducteur et de ramener son fonctionnement comparable à celui d'une MCC en décomposant le courant statorique en deux composantes, dont l'une contrôle le flux (I_{ds}) et l'autre contrôle le couple (I_{qs}).

On distingue deux types des contrôles vectoriels: directe (FOC) et indirecte (IFOC); dans le contrôle vectoriel directe on effectue une régulation du flux qui nécessite la connaissance de celui-ci, alors que dans le contrôle vectoriel indirecte, on s'affranchit de la connaissance de ce flux en faisant quelques approximations.

La commande est dite indirecte lorsque la position du flux considéré est calculée à partir de la mesure de la vitesse du rotor et d'autres grandeurs accessibles, comme les tensions ou les courants statoriques.

La commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone alimentée en tension peut être représentée par la figure (III-2)

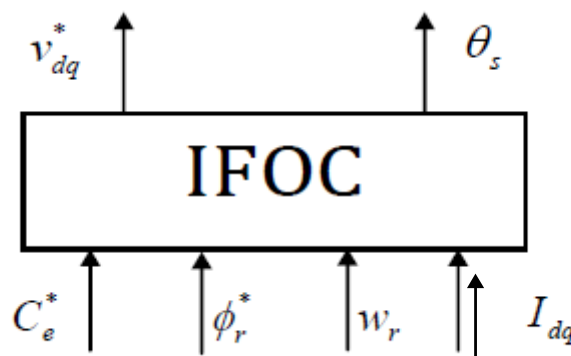


Figure III-2: Schéma simplifié de la commande vectorielle indirecte de la MAS alimentée en tension.

4.1. Découplage par compensation:

Dans le cas de la machine asynchrone alimentée en tension, le modèle de la machine est d'ordre cinq, donc il est nécessaire de découpler les deux axes des tensions statoriques par des f.é.m. de compensation.

Nous utilisons une méthode de compensation qui a pour but d'annuler les termes croisés et les termes non linéaires. Cette méthode consiste à faire la régulation des courants en négligeant les termes de couplage. Ces derniers sont rajoutés à la sortie des correcteurs pour obtenir les tensions des références nécessaires pour le réglage. Les termes supplémentaires sont déterminés de sorte que les tensions restantes soient une relation du premier ordre avec les courants correspondants.

Les tensions statorique s'écrivent:

$$\begin{cases} V_{ds} = \lambda \sigma L_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} - \left(\omega \sigma L_{qs} I_{qs} + \frac{K_s}{T_s} \sigma L_s \phi dr \right) \\ V_{qs} = \lambda \sigma L_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} - \left(\omega \sigma L_s I_{ds} - \omega_r K_s \sigma L_s \phi dr \right) \end{cases} \quad (3.09)$$

Pour rendre les axes d et q complètement indépendant, il est nécessaire d'ajouter des termes identiques de découplages mais de signe opposé à la sortie des régulateurs comme le montre la figure (III-3).

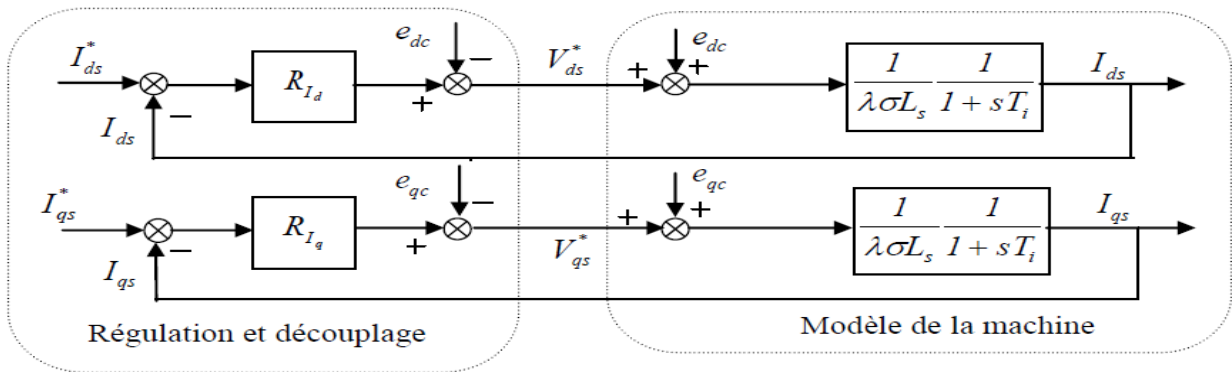


Figure III.3: Découplage par addition des termes de compensation.

Ceci nous amène à écrire les tensions sous la forme :

$$\begin{cases} V_{ds} = V_{ds}^* + e_{dc} \\ V_{qs} = V_{qs}^* + e_{qc} \end{cases} \quad (3.10)$$

Les termes de compensation sont définis par les f.é.m. e_{dc} et e_{qc}

$$\begin{cases} e_{dc} = \bar{\omega} \sigma L_s I_{qs} + \frac{K_s}{T_r} \sigma L_s \phi_{dr} \\ e_{qc} = \bar{\omega} \sigma L_s I_{ds} + \frac{K_s}{T_r} \sigma L_s \phi_{qr} \end{cases} \quad (3.11)$$

Finalement, on obtient un nouveau système d'équations linéaires parfaitement découplé :

$$\begin{cases} V_{ds}^* = \lambda \sigma L_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} \\ V_{qs}^* = \lambda \sigma L_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (3.12)$$

Le découplage permet d'écrire les équations de la machine sous une forme simple ce qui facilite considérablement le dimensionnement des coefficients des régulateurs. Donc, après orientation du flux rotorique et découplage par compensation, on aboutit alors à un schéma bloc simple et identique pour les deux composantes du courant statorique de la figure (III-4).

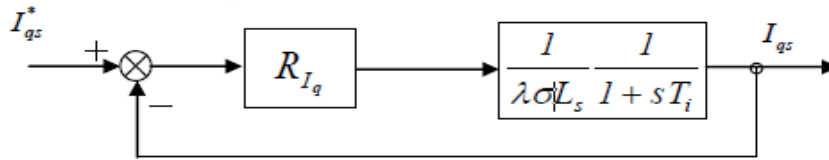


Figure III-4: Boucle du courant I_{qs} après découplage.

4.2. Dimensionnement des régulateur:

Nous proposons de commander notre machine par des régulateurs classiques de type PI (Proportionnel Intégrateur) pour activer la réaction de la réponse de la vitesse de rotation et annule l'erreur statique. Les actions proportionnelles et intégrales de ce régulateur sont mises en parallèles.

a) Régulateur de courant:

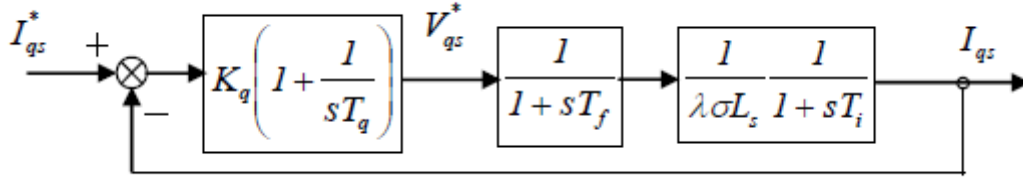
Nous représentons les retards du convertisseur statique (onduleur MLI) et les blocs de Conversion par la fonction de transfert suivante:

$$F_r(s) = \frac{1}{1 + sT_f} \quad (3.13)$$

Pour chacune des boucles de courant, nous avons adopté un régulateur PI. Dont

$$PI = \left\{ K_j \left(1 + \frac{1}{sT_j} \right) \text{ où } j = d, q \right\} \quad (3.14)$$

Le schéma, incluant les différentes fonctions de transfert, pour l'axe q est donné par la figure(III-5) Suivante:

Figure III-5: Boucle de régulation du courant I_{qs} .

Où :

K_q Et T_q : coefficients du correcteur.

T_f : Constante du temps de la commande rapprochée de l'onduleur. La fonction en boucle ouverte est donnée par

$$FTBO(s) = K_q \frac{1+sT_q}{sT_q} \cdot \frac{1}{1+sT_f} \cdot \frac{1/\lambda\sigma L_s}{1+sT_i} \quad (3.15)$$

Pour déterminer les paramètres du régulateur on fait appel à la méthode de compensation du pôle dominant afin d'éliminer le pôle le plus lent, puis calculer K_q . Cela permet d'avoir une réponse rapide avec un minimum de dépassement et une bonne stabilité du système. On pose :

$$T_q = T_i \text{ avec } T_i = \frac{1}{\lambda} \quad (3.16)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient

$$FTBO(s) = \frac{K_q}{\lambda\sigma L_s s(1 + sT_f)} \quad (3.17)$$

La fonction de transfert en boucle fermée devient :

$$\begin{aligned} FTBO(s) &= \frac{K_q}{\sigma L_s T_f} \cdot \frac{1}{s^2 + s \frac{1}{T_f} + \frac{K_q}{\sigma L_s T_f}} \\ &= \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2S\xi\omega_0 + \omega^2} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Avec :

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma L_s}{K_q T_f}} \text{ et } \omega_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_q}{\sigma L_s T_f}} \quad (3.19)$$

Lors d'un échelon de consigne pour un amortissement $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$, on a un dépassement de 43%.

D'où:

$$\begin{cases} K_q = \frac{\sigma L_s}{K_q T_f} \\ T_f = 2ms \end{cases} \quad (3.20)$$

b) Régulateur de vitesse:

Le schéma de régulation en cascade nécessite, pour un bon fonctionnement, que la boucle interne (courant) soit plus rapide que la boucle externe. Par conséquent, le schéma bloc de régulation de vitesse peut être représenté par la figure (3.12).

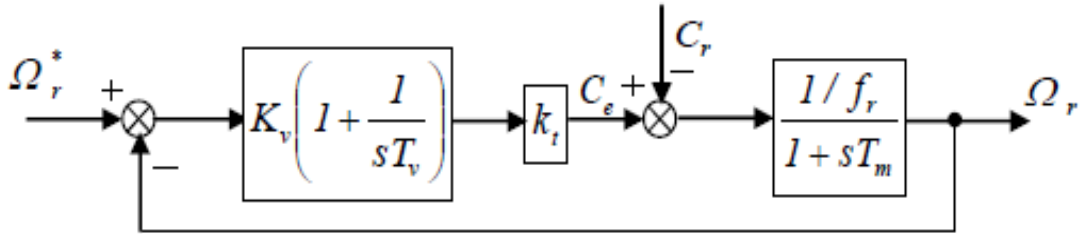


Figure III-6: Schéma Boucle de la régulation de vitesse.

Avec:

$$K_r = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \phi_r \quad (3.21)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par la relation

$$FTBO(s) = K_v \frac{1 + sT_v}{\lambda \sigma L_s S(1 + sT_f)} \cdot \frac{K_1/f_r}{1 + sT_m} \quad (3.22)$$

En appliquant la méthode du pôle dominant par :

$$T_v = T_m = J/f_r$$

On aura la nouvelle fonction de transfert en boucle ouverte :

$$FTBO(s) = \frac{K_v K_1}{f_r} \cdot \frac{1}{sT_m} \quad (3.23)$$

En boucle fermée, on aura :

$$FTBF(s) = \frac{1}{1 + s \frac{T_m}{K_v K_1 / f_r}} \quad (3.24)$$

On choisit généralement le temps de réponse à $3\tau_v(t_{rv(5\%)})$ selon la règle 95%.

$$t_{rv} = 3\tau_v = 3T_m f_r / K_v k_t$$

D'où:

$$K_v = 3J / K_t t_{rv} \quad (3.25)$$

5.Simulation de la chaine de pompage photovoltaïque avec commande vectorielle:

La figure (III-1) représente les éléments constitutions de la chaine de pompage photovoltaïque avec la commande vectorielle.

5.1. Vitesse de référence :

La vitesse de référence peut être obtenue à partir de la somme de deux vitesses. La première vitesse est obtenue en comparant la tension V_{pv} avec la tension DC V_{dc} (sortie de l'algorithme MPPT), qui est envoyé au contrôleur PI afin d'obtenir la vitesse (w_1) et est donné comme suit,

$$\varepsilon_{vdc}(k) = V_{dc}^*(k) - V_{pv}(k) \quad (3.26)$$

$$w_1(k) = w_1(k-1) + K_{Pdc}(\varepsilon_{vdc}(k) - \varepsilon_{vdc}(k-1)) + K_{Idc}\varepsilon_{vdc}(k) \quad (3.27)$$

Nous pouvons obtenir la vitesse de référence de niveau souhaitée (ω_{ref}) à partir du contrôleur PI. Cependant, la réponse dynamique du système dans ce cas est très faible.

Pour une dynamique rapide une autre vitesse est utilisée avec w_1 (par réflexion instantanée de l'énergie PV sur la vitesse du moteur). Pour dériver la seconde vitesse, on utilise la loi de convergence de la pompe par la formule suivante:

$$w_{pv}(k) = (P_{pv}(k) / K_{pm})^{1/3} \quad (3.28)$$

Où K_{pm} est la constante de proportionnalité.

À partir d'équation (3.27) et (3.28), nous écrivons la vitesse de référence sous la forme :

$$w_{ref}(k) = w_1(k) + w_{pv}(k) \quad (3.29)$$

5.2. Résultats de simulation:

La simulation est réalisée par MATLAB/SIMULINK, la pompe centrifuge est entraînée par la machine asynchrone à induction, alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux associé à un module photovoltaïque de 14 panneaux en série et de 31

panneaux en parallèles. La consigne de vitesse de la motopompe à partir l'équation (3-29) avec un irradiation G de 1000 W/m^2 à 800 W/m^2 .

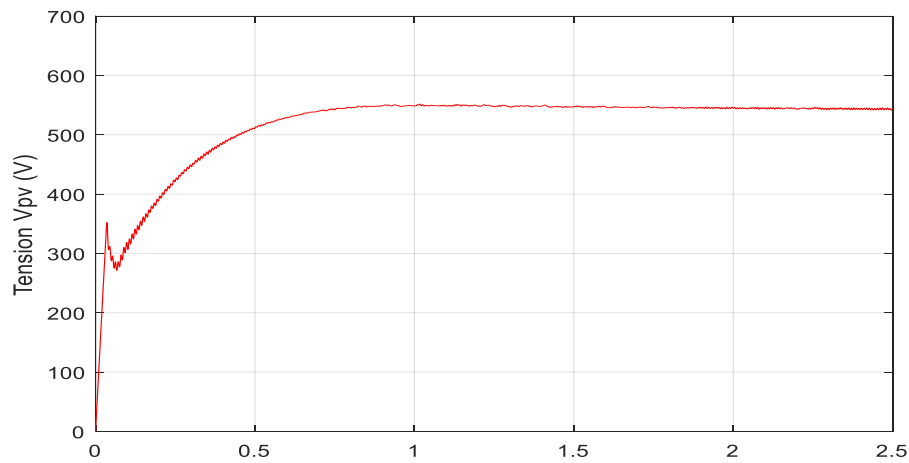


Figure III-8 : Allure de la tension du générateur photovoltaïque.

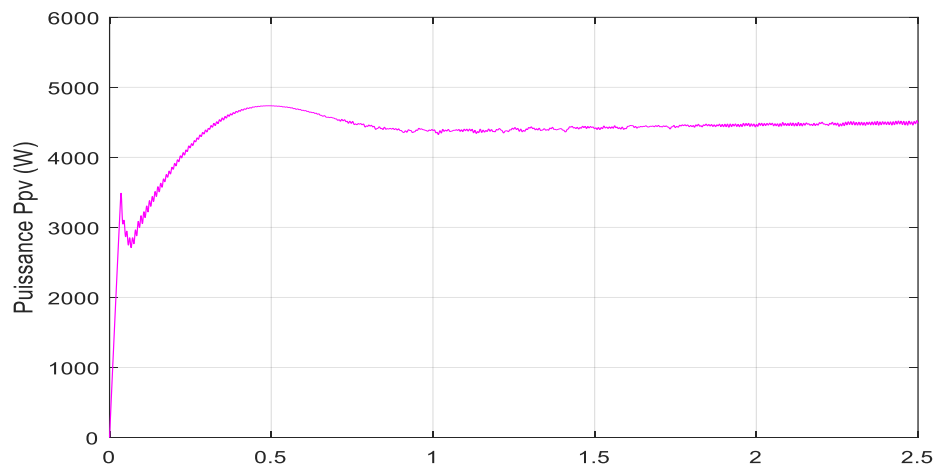


Figure III-9 : Allure de la puissance du générateur photovoltaïque.

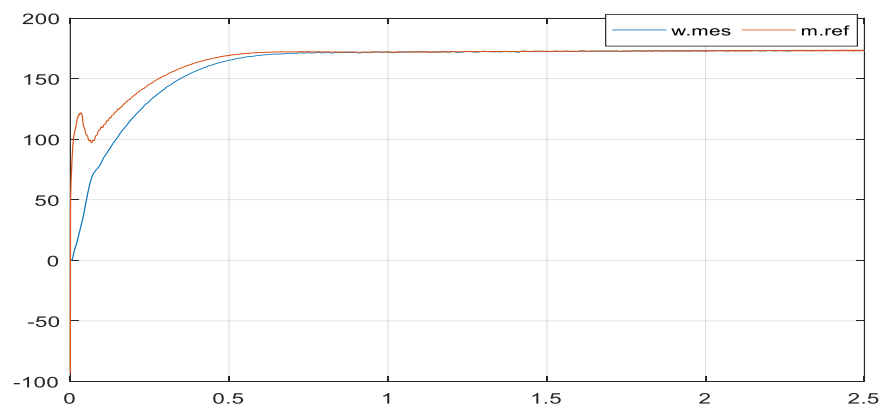


Figure III-10: Allure de vitesse du moteur et la vitesse de référence

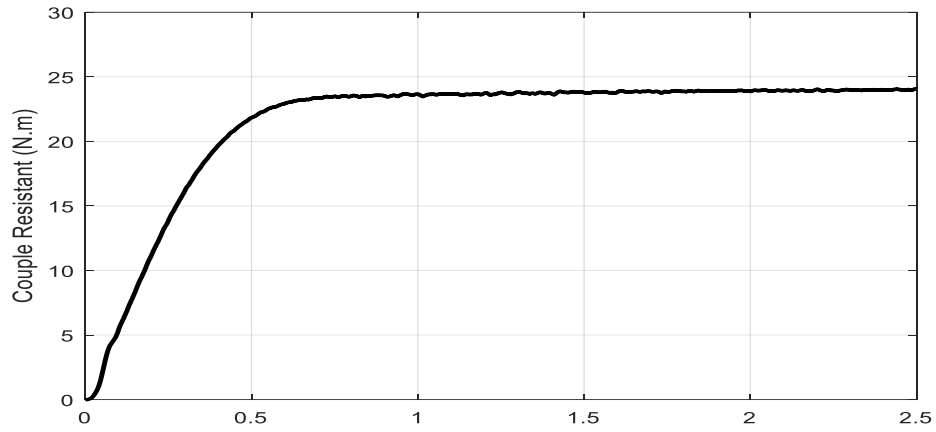


Figure III-11 : Allure du couple résistant appliqué au moteur.

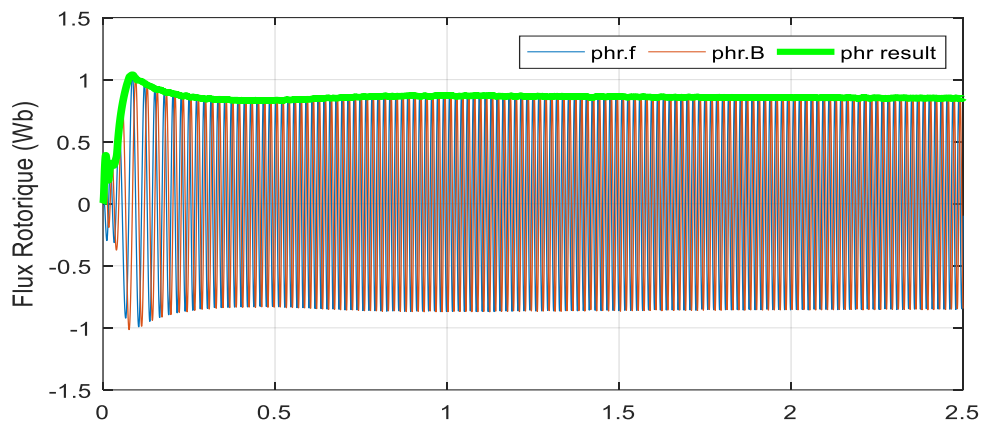


Figure III-12 : Allure du flux rotorique.

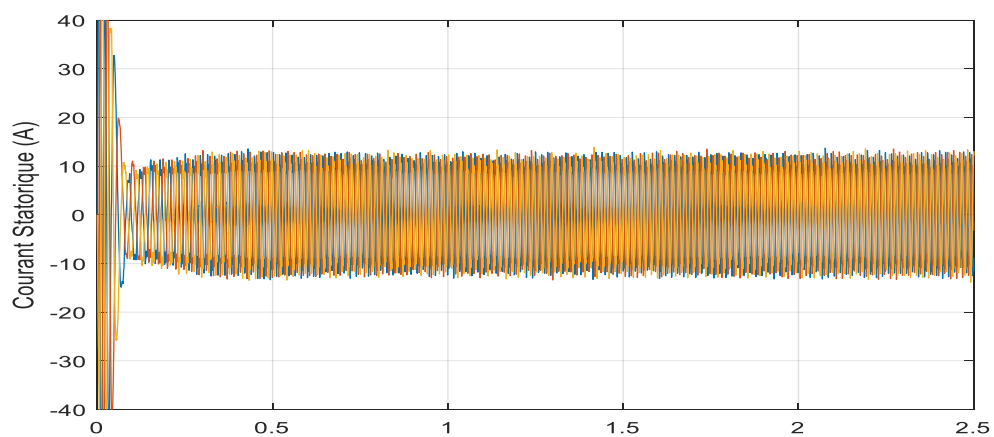


Figure III-13 : Allure de courant statorique.

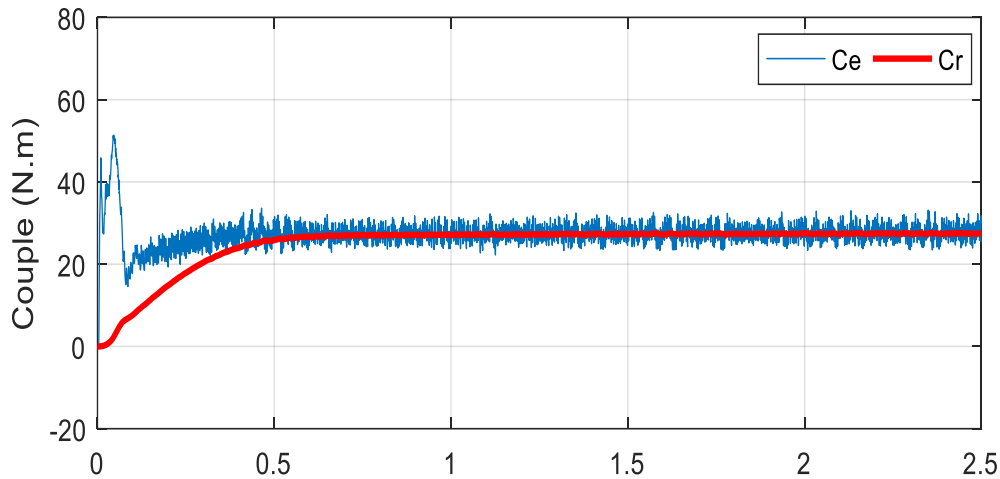


Figure III-14: Allure du couple moteur par application du couple résistive de la pompe.

- A partir de ces résultats, on note que le point de puissance maximale est atteint rapidement avec précision et une réponse transitoire lisse.
- Les variables contrôlées convergent asymptotiques vers les valeurs de référence.
- D'après les Figures III (10,..., 14) on constat que chaque variation subit au vitesse de rotation, elle va affecter les réponses de la pompe car sont proportionnelles à la vitesse de rotation du moteur.

6. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons traité les différents types de commandes MPPT ou on a choisis la méthode P&O dans notre étude, puis la détermination du dimensionnement de l'installation de pompage. Ensuite nous avons présenté la commande vectorielle à flux rotorique orienté et on a constaté qu'elle donne de meilleures performances pour un système invariant, les performances dynamiques et statiques de cette technique de commande sont dégradées.

VII APPENDICES**A .Solar PV Array (Simulation Data)**

$V_{oc}=760V$, $V_{mp}=600 V$, $I_{sc}=16 A$, $I_{mpp}=14.5 A$, $N_{ser}=34$, $N_{par}=12$, $(f_s)= 10 \text{ kHz}$,

Capacité (Cdc)= 2500 μF . Puissance du pompe : $P_p= 3500 W$

B. Induction Motor Parameters (Simulation Data)

*3.5 kW, 3-phase, 380 V (L-L), 2 poles, $R_s=0.7384 \Omega$, $R_r= 0.7043 \Omega$, $L_{ls}= 0.003045 H$,
 $L_{lr}= 0.003045 H$, $L_m=0.1241 H$, $J=0.0343 \text{ Kg-}$*

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Notre travail c'est porté sur la modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque. Le système proposé se compose : d'un générateur photovoltaïque commandé par un algorithme MPPT pour obtenir le point de puissance maximale, un convertisseur statique et un groupe motopompe. Le convertisseur est un onduleur triphasé qui sert à convertir le courant continu en courant alternatif pour alimenter le groupe motopompe (moteur asynchrone, pompe centrifuge). Aussi il est souvent plus économique de construire un réservoir pour stocker l'eau plutôt que de stocker l'électricité dans des batteries, le moteur de notre pompe solaire fonctionnera au fil du soleil. Ensuite nous avons appliqué une commande vectorielle afin d'avoir un débit réglable, et étudier le contrôle de la motopompe.

Le premier chapitre de ce travail a été consacré aux différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de pompage photovoltaïque et les principes de fonctionnement de chaque élément.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation de tous les éléments de notre chaîne de pompage photovoltaïque, chaque modélisation est basée sur des équations provenant de la littérature scientifique, ainsi qu'on voit l'effet de la température et l'éclairement sur les caractéristiques du GPV (puissance-tension et courant-tension).

Au début du troisième chapitre nous avons présenté notre choix de la commande MPPT qui est basé sur l'algorithme de MPPT « P&O » avec laquelle notre générateur photovoltaïque sera optimisé. Puis la définition de toutes les étapes à suivre pour le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque étudié, ainsi que la commande vectorielle qui améliorera les performances de notre moteur asynchrone, responsable de l'entraînement de la pompe centrifuge. Enfin nous avons donné des résultats de simulations obtenus par le logiciel MATLAB/SIMULINK afin de constater que cette commande donne des meilleures performances dans les conditions de fonctionnement normales de la motopompe.

ANNEXE

Annexe

- Paramètres caractéristiques du générateur PV :

Eclairement standart, E_0	1000 W/m ²
Température standart, T_0	25 C°
Puissance maximal (P_{max})	75 W
Tension à Pmax (V_{mp})	17.6V
Courant à Pmax(I_{mp})	0.58A
Tension à circuit ouvert (V_{co})	21.6V
Courant de court-circuit (I_{cc})	0.64A
Coefficient de température de I_{cc}	0.0017C°
Coefficient de température de V_{co}	-160 ± 20 mV/ C°
Nombre des cellules en série (N_s)	36
Nombre des cellules en parallèle (N_p)	16
Résistance série	0.338 Ω
Résistance parallèle	1850 Ω
Facteur d'idéalité de la jonction, n	1.3971

- Paramètres de la machine asynchrone à cage d'écureuil 3.7 kW:

Puissance nominale	3.7 kW
Tension nominale	415(ph-ph) V
Rendement nominal	85%
Facteur de puissance nominal	0.8
Vitesse nominale	1500 tr/min
Fréquence nominale	50 Hz
Courant nominal	11.25/6.5 A
Résistance statorique	1.9 Ω
Résistance rotorique	1.8 Ω
Inductance cyclique statorique	0.00967 H
Inductance cyclique rotorique	0.00967 H
Inductance mutuelle	0.2105 H
Nombre de paires de pôles	2
Moment d'inertie	0.031 kg.m ²
Coefficient de frottement visqueux	0.00114 N.m.s/rd

- Paramètres de la pompe centrifuge :

Puissance hydraulique	719.4 W
Débit volumique	22 m ³ /h
Hauteur manométrique	12 m
Rendement	55 %
Vitesse nominale	1500 tr/min

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [01] Abdellatif MAHAMMEDI, 2020, Contribution à la Commande d'un Convertisseur de Puissance aux Topologies Améliorées Associé à un Générateur Photovoltaïque Basée sur les Techniques Avancées, Thèse de doctorat, Université de Djelfa.
- [02] MEFLAH Aissa, 2012, Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque, Thèse de Magister Université De Tlemcen
- [03] AOUI Saliha, 2014, Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque, Thèse de Magister, Université de Sétif.
- [04] BOUCHAKOUR Abdelhak, 2018, Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université De Sidi-Bel-Abbes.
- [05] DEBILI Narimene, 2015, Etude et optimisation en environnement Matlab /Simulink d'un Système de pompage Photovoltaïque, Thèse de Magister, Université Constantine I.
- [06] BENDJOUDI Faouzi, 2014, Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries, Thèse de Master, Université De Bejaïa
- [07] BENLAHRECHE Houssein Eddine, 2012, Etude et optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque, Thèse de Master, Université De Constantine.
- [08] M. Degla et B.Ben Ahmed, 2017, « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque » ; Mémoire de master, Université de Ouargla.
- [09] M.NEFSI, 2008, «Commande directe du couple d'une machine asynchrone sans capteur mécanique», Mémoire de magister, Université De Sidi-Bel-Abbès.
- [10] Melle AZOUAGH Lynda, 2013, Etude d'un système de pompage photovoltaïque, Thèse de Master, Université De Tizi Ouzou.
- [11] Alili Zakaria, 2020, Étude et simulation d'un pompage solaire au fil du soleil, Thèse de Master, Université de Biskra
- [12] Mr. KHEDIRI Nasreddine, 2019, Etude, modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque, Thèse de Master, Université De Sidi-Bel-Abbes.
- [13] BENMAIL Samia, 2012, Contribution à la modélisation et à l'optimisation des systèmes photovoltaïque, Thèse de Magister, Université Bejaia.
- [14] MOHAMMED BELHADJ Souheyb, 2019, Etude Et Réalisation D'un Système de pompage photovoltaïque, thèse d'ingénieur, Ecole Supérieure En Sciences Appliquées Tlemcen.

- [15] Mr. Bessoltane Ismail, 2019, Etude technico-économique de système de pompage Photovoltaïque, en comparaison aux autres productions d'eau, cas de la région de Mostaganem, Thèse de Master, Université de Mostaganem.
- [16] Yakoub BERKAS, 2020, Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque, Thèse de Master, Université de Jijel
- [17] Mr. SAKRI Djamel, 2013, Étude et simulation d'un système de pompage d'eau couplé à un générateur photovoltaïque, Thèse de Master, Université De Oum Elbouaghi.
- [18] SAID Islam, 2021, Commande et modélisation de l'énergie photovoltaïque interconnectée au réseau électrique, Thèse de Master, Université Bordj Bou Arreridj
- [19] R .Abdessemed, K. kadjoudj «Modélisation des machines électriques, » Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997.
- [20] Jean-Pierre Caron, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", vol. 7, TECHNIP, coll. « Méthodes et pratiques », 1995.
- [21] J-P Caron, J-P.Hautier « Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone. »Edition TECHIP, paris 1995
- [22] M.Pinard « Commande électronique des moteurs électriques »Edition Dunod, Paris, 2004.
- [23] D.Hadiouche,« Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation,alimentation et structure », Thèse de doctorat, Université Nancy-I, Décembre 2001
- [24] H.TAMRABET «Robustesse d'un control vectoriel de structure minimale d'une machine Asynchrone», Thèse de magister de l'Université de Batna, Algérie, 2006
- [25] F.Barret «Régime Transitoire des Machines Tournantes Electriques. » Collection des études de recherches Edition Eyrolles, paris 1982
- [26] M.Degla et B.Ben Ahmed, « *Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque* » ; Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [27] M.NEFSI, «Commande directe du couple d'une machine asynchrone sans capteur mécanique», Mémoire de magister, Université Djilali Liabes De Sidi-Bel-Abbès, 2008.