

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de la Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

**Commande d'un MAS Alimenté par un GPV à Puissance
Maximale à Travers Un Onduleur à Trois Niveaux**

Présenté par :

**BEN SLIMANE Sabrina
BELHAMDI Sadika Badra**

Devant le jury composé de :

**Pr. MILOUD Yahia
Dr. SEKOUR Mhamed
Mr. BENYAHIA Mokhtar**

**Encadreur
Président
Examineur**

Promotion 2020-2021

Remerciements

Je remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Pr. MLOLD YAHIA. Je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Je remercie infiniment le président de jury ainsi que ces membres d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à tous mes professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Je remercie profondément toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenue de près ou de loin.

Dédicace:

Je dédie ce modeste travail à :

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères et mes sœurs, et mes amis je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.

Sadika Badra Belhamdi

Dédicace:

Je dédie ce modeste travail à :

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères et mes sœurs, et mes amis je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements

Sabrina Ben Slimane

RÉSUMÉ

De nos jours, les systèmes d'alimentation photovoltaïque se répandent de plus en plus avec l'augmentation de la demande en énergie et le souci de la pollution de l'environnement dans le monde. Les onduleurs à plusieurs niveaux et plus particulièrement les onduleurs trois niveaux ont attiré beaucoup d'attention dans le domaine de la distribution et du contrôle de l'énergie en raison de leurs avantages dans les applications à forte puissance et avec de faibles harmoniques.

Le travail effectué et décrit dans ce mémoire a pour objectif une contribution à l'amélioration des performances de l'onduleur multi-niveaux à diode de bouclage. La commande de cette topologie engendre une complexité quand il dépasse trois niveaux, L'onduleur qui va commander un MAS et qui a comme source d'entrée une tension continue obtenue par un hacheur boost à MPTT est présenté et simulé. La technique de suivi du point de la puissance maximale (MPPT) est à la base de P&O qui est utilisée pour garantir le fonctionnement du générateur photovoltaïque à la puissance maximale et pour régler la tension continue. La stratégie utilisée dans la commande des onduleurs multi-niveaux est la modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle disposition en phase. La simulation a été effectuée à l'aide de MATLAB Sim power system. Les résultats de la simulation montrent la faisabilité et la capacité de la topologie trois niveaux à améliorer les spectres harmoniques des grandeurs de sortie et donc la qualité de l'énergie.

Mots-clés — Générateur photovoltaïque, convertisseurs boost, MPPT, onduleurs multi-niveaux, MAS, topologie à diode de bouclage, MLI, THD.

Sommaire

Sommaire

Résumé.....	1
Sommaire.....	2
LISTE DES ABRÉVIATIONS	6
Liste des figures.....	8
Liste des tableaux.....	12
Introduction générale.....	13
1. <u>Chapitre 01 : Le système photovoltaïque</u>	
1.1. Introduction.....	15
1.2. Définition de photovoltaïque	15
1.3. Historique de la photovoltaïque.....	15
1.4. Cellules photovoltaïques.....	17
1.4.1. Structure de la cellule photovoltaïque.....	17
1.4.2. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque	18
1.5. Les différentes générations des cellules solaires.....	18
1.5.1. Première génération: Silicium cristallin (mono et poly).....	19
1.5.1.1. Les cellules monocristallines.....	19
1.5.1.2. Les cellules polycristallines	19
1.5.2. Deuxième génération:(couches minces)	20
1.5.2.1. Les cellules au Telluride de Cadmium(CdTe)	20
1.5.2.2. Les cellules au silicium amorphe (a-Si)	20
1.5.3. Troisième génération :(Perovskites, multijonction, concentration).....	21
1.5.3.1. Les Cellules Pérovskites.....	21
1.5.3.2. Les Cellules multi jonction	21
1.5.3.3. Les Cellules à concentration.....	21

1.6. le rendement des différentes technologies des cellules photovoltaïques.....	22
1.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	23
1.8. Module photovoltaïque.....	24
1.9. Association des modules photovoltaïques.....	25
1.9.1. Association en série.....	25
1.9.2. Association en parallèle.....	25
1.9.3. Association série-parallèle.....	26
1.10. Les caractéristiques électriques de modules	26
1.11. Générateur photovoltaïque.....	28
1.12. Simulation d'une cellule photovoltaïque	28
1.12.1. Modèle de simulation.....	29
1.12.2. Effet de l'irradiation et de température	29
1.12.2.1. Influence de l'irradiation	30
1.12.2.2. Influence de la température.....	30
1.13. Avantages et inconvénients PV.....	31
1.14. Conclusion	31
2. <u>Chapitre 02 : Le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT (P&O)</u>	
2.1. Introduction.....	33
2.2. Convertisseur DC-DC.....	33
2.2.1. Hacheur élévateur (Boost).....	34
2.2.1.1. Principe de Fonctionnement.....	34
2.2.1.2. Les paramètres d'élévateur	36
2.3. Le point de puissance maximum (MPPT).....	38
2.4. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.....	39
2.5. Les Techniques MPPT.....	39
2.5.1. La Technique Perturbé et Observer.....	40

2.6.	Simulation et interprétation.....	41
2.7.	Conclusion.....	46
3.	<u>Chapitre 03 : Modélisation de la Machine Asynchrone</u>	
3.1.	Introduction.....	47
3.2.	Modélisation de la machine asynchrone triphasée.....	47
3.2.1.	Mise en équations de la machine asynchrone.....	48
3.2.1.1.	Equations électriques.....	49
3.2.1.2.	Equations magnétiques.....	49
3.3.	Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone triphasée	50
3.4.	Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK.....	52
3.4.1.	Équations des tensions	52
3.4.2.	Choix du référentiel.....	52
3.4.2.1.	Dans un référentiel lié au stator.....	53
3.4.2.2.	Dans un référentiel lié au rotor.....	53
3.4.2.3.	Dans un référentiel lié au champ tournant.....	54
3.4.3.	Équations des flux.....	55
3.4.4.	Représentation d'état de PARK.....	56
3.4.5.	Couple électromagnétique.....	57
3.4.6.	Equation mécanique.....	57
3.5.	Simulation et interprétations des résultats.....	58
3.6.	Conclusion.....	60
4.	<u>Chapitre 04 : Simulation de l'onduleur trois-niveaux alimentant un MAS</u>	
4.1.	Introduction.....	61
4.2.	L'onduleur trois niveaux à diode de bouclage.....	61
4.2.1.	Principe de fonctionnement.....	62
4.3.	La modulation de largeur d'impulsion(MLI).....	64

4.3.1. La modulation sinus-triangle.....	65
4.4. Simulation onduleur trois niveaux-MAS.....	67
4.4.1. Simulation de l'onduleur trois niveaux à diode de bouclage.....	69
4.4.1.1. Résultats obtenus.....	71
4.5. Conclusion.....	74
Conclusion générale.....	75
Bibliographié	77

LISTE DES ABRÉVIATIONS

	NOMENCLATURES
A	la surface génératrice en m ²
D	Le rapport cyclique
dD	Le changement du rapport cyclique
dE (k)	Le changement d'erreur
E (k)	L'erreur
f	Fréquence de commutation
G	Ensoleillement en W/m ²
I	Courant de sortie photovoltaïque
I _{cc}	Courant de court-circuit
I _d	Le courant circulant dans la diode.
I _m	Courant à la puissance maximale
I _{ph}	Courant généré par ensoleillement dans un module PV
I _{sh}	Le courant dérivé par la résistance parallèle.
I _o	Courant de saturation de la diode
k	Constante de Boltzmann (1.3806503 e-23 J K ⁻¹),
n	Facteur d'idéalité température.
P(k)	La puissance actuelle
P (k-1)	Puissance précédent
q	Charge d'électrons (1.60217646 e-19C),
R _s	Résistance en série de la cellule PV
R _{sh}	Résistance shunt intrinsèque de la cellule PV
T	Température solaire, °C
V	Tension de sortie photovoltaïque, V
V _e	Tension d'entrée d'élévateur
V _m	Tension à la puissance maximale
V _{oc}	Tension de circuit ouvert
V _s	La tension de sortie d'élévateur
V _T	Tension thermique
	SYMBOLES GRECS
η	Rendement de la cellule
μ _{icc}	Coefficient de température du courant de court-circuit, A / K

LISTE DES ABRÉVIATIONS

	LES ABRÉVIATIONS
AC	Alternative Current
a-Si	Amorphous Silicium cristallin
CdTe	Telluride de Cadmium
DC	Direct Current
FFT	Fast Fourier Transform
FC	Flying Capacitor
MLI	Modulation à Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NPC	Neutral-Point Clamped Diode
PO	Perturbation et Observation
Si -C, mon	Silicium Cristallin monocristallin
Si-C, poly	Silicium Cristallin polycristallin
STC	Standard Test Conditions
THD	Total Harmonic Distorsion

<u>Liste des figures</u>		<u>page</u>
	<u>Chapitre 01 : Le système photovoltaïque</u>	
Figure.1.1	Cellule photovoltaïque.....	17
Figure.1.2	La structure de la cellule photovoltaïque.....	18
Figure.1.3	Principe de fonctionnement de cellule.....	18
Figure.1.4	Cellule monocristallines.....	19
Figure.1.5	Cellule polycristallines.....	19
Figure.1.6	Cellule au Telluride de Cadmium.....	20
Figure.1.7	Cellule au silicium amorphe.....	20
Figure.1.8	Cellule Pérovskites.....	21
Figure.1.9	Cellule multi jonction.....	21
Figure.1.10	Cellule à concentration.....	22
Figure.1.11	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	23
Figure.1.12	Modules photovoltaïques.....	24
Figure.1.13	Association série deux modules solaires.....	25
Figure.1.14	Caractéristiques IV des modules en série aux conditions standards.....	25
Figure.1.15	Association parallèle deux modules solaires.....	26
Figure.1.16	Caractéristiques IV des modules en parallèle aux conditions standards.....	26
Figure.1.17	Association mixte des modules solaires.....	26
Figure.1.18	Caractéristiques IV des modules en Série-Parallèle aux conditions standards.....	26
Figure.1.19	Caractéristique courant-tension (I-V) d'un module photovoltaïque.....	27

Liste de figures

Figure.1.20	Champ photovoltaïque.....	28
Figure.1.21	Modèle de simulation d'un générateur PV.....	29
Figure.1.22	Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du générateur en fonction de l'irradiation ($T = 25^{\circ} \text{C}$).....	30
Figure.1.23	Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du générateur en fonction de la température.....	30
	<u>Chapitre 02 : Le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT (P&O)</u>	
Figure.2.1	Circuit électrique de base du hacheur survolteur.....	34
Figure.2.2	Circuit équivalent du convertisseur Boost pour T_{on}	35
Figure.2.3	Circuit équivalent du convertisseur boost pour T_{off}	36
Figure.2.4	Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur élévateur.....	38
Figure.2.5	Schéma fonctionnel a conversion photovoltaïque.....	38
Figure.2.6	Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.....	39
Figure.2.7	Modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme Perturbé et Observer.....	40
Figure.2.8	Organigramme de l'algorithme perturbé et observé.....	41
Figure.2.9	Modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé par MPPT.....	42
Figure.2.10	Les points de puissance maximale simulés par P & O.....	42
Figure.2.11	Puissances du générateur photovoltaïque obtenues par la technique (P&O)	43
Figure.2.12	La variation d'irradiation	44
Figure.2.13	L'évolution de puissance PV pour l'irradiation variable	44
Figure.2.14	La variation de température	45

Liste de figures

Figure.2.15	L'évolution de la puissance PV pour une température variable	45
	<u>Chapitre 03: Modélisation de la Machine Asynchrone</u>	
Figure.3.1	Représentation des enroulements de la machine asynchrone.....	48
Figure.3.2	Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique	51
Figure.3.3	Représentation des différents référentiels.....	55
Figure.3.4	Modèle MATLAB/SIMULINK de la machine asynchrone	58
Figure.3.5	Démarrage direct du moteur asynchrone a) à vide ; b) à charge (10N.m)	59
	<u>Chapitre 04: Simulation de l'onduleur trois-niveaux alimentant un MAS</u>	
Figure.4.1	Un bras (a) de l'onduleur trois niveaux à diode de blocage.....	62
Figure.4.2	Première configuration du bras (a).....	63
Figure.4.3	Deuxième configuration du bras (a).....	63
Figure.4.4	Troisième configuration du bras (a).....	64
Figure.4.5	Signal combiné porteuse, référence et leurs résultats	66
Figure.4.6	Principe de la MLI sinus-triangle	66
Figure.4.7	Circuit de simulation	68
Figure.4.8	Circuit de simulation d'un onduleur trois niveaux à diode de bouclage	70
Figure.4.9	Le schéma bloc de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur trois niveaux du bras A	70
Figure.4.10	Forme d'onde de la commande MLI sinusoïdale d'un onduleur trois niveaux	71
Figure.4.11	La vitesse du moteur à vide.....	71
Figure.4.12	Le couple de moteur à vide.....	71

Liste de figures

Figure.4.13	Le courant de sortie à vide	72
Figure.4.14	Le zoom du courant de sortie à vide.....	72
Figure.4.15	La tension de sortie à vide.....	72
Figure.4.16	Le zoom de la tension de sortie à vide.....	72
Figure.4.17	La vitesse du moteur en charge.....	73
Figure.4.18	Le couple de moteur en charge.....	73
Figure.4.19	Le courant de sortie en charge.....	73
Figure.4.20	Le zoom du courant de sortie en charge.....	73
Figure.4.21	La tension de sortie en charge.....	74
Figure.4.22	Le zoom de la tension de sortie en charge.....	74
Figure.4.23	Spectre de la tension composée.	74

<u>liste de tableaux</u>		<u>page</u>
	<u>Chapitre 01 : Le système photovoltaïque</u>	
Tableau.1.1	Rendement des différentes technologies.....	22
Tableau.1.2	Caractéristique électrique du panneau dans les conditions standards <CST> T=25°C, G=1000W /m².....	29
	<u>Chapitre 02:Le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT (P&O)</u>	
Tableau.2.1	Valeurs de calcul du convertisseur élévateur(Boost).....	37
Tableau.2.2	Caractéristiques électriques du panneau dans les conditions standards <CST> T=25°C, G=1000W /m²	41
Tableau.2.3	Les points de puissance maximale simulés par (P & O).....	43
	<u>Chapitre 04: Simulation de l'onduleur trois-niveaux alimentant un MAS</u>	
Tableau.4.1	Les états de commutation de bras de l'onduleur trois niveaux.....	64
Tableau.4.2	Caractéristiques électriques du panneau dans les conditions standards <CST> T=25°C, G=1000W /m².....	68
Tableau.4.3	Paramètres de l'onduleur trois niveaux.....	69
Tableau.4.4	Paramètres du moteur à induction.....	69

Introduction générale

Introduction générale:

Au cours de ces dernières années, le monde s'est tourné vers des énergies renouvelables telles que l'énergie photovoltaïque (PV) qui a été largement utilisée. La source principale de cette énergie est le soleil qui est répartie presque à travers la terre. De plus, elle est propre et ne présente aucun inconvénient pour l'environnement.

L'extraction de l'énergie du module photovoltaïque dépend des conditions climatiques. Ce système a un point de fonctionnement optimal appelé Maximum Power Point (MPPT) qui dépend en grande partie de l'intensité de l'éclairage. L'adaptation des panneaux PV à la charge est nécessaire pour extraire la puissance maximale du module PV. Ceci est fait à travers un convertisseur boost qui contrôle la puissance maximale en utilisant la technique perturbation et observation (P&O).

Les onduleurs multi-niveaux et plus particulièrement l'onduleur trois niveaux a attiré beaucoup d'attention dans le domaine de la distribution et du contrôle de l'énergie en raison de son avantage dans les applications à forte puissance et avec de faibles harmoniques. L'énergie photovoltaïque conviendra parfaitement pour ce type d'onduleur.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre met en évidence, l'historique du photovoltaïque, le principe de fonctionnement de la cellule PV et sa modélisation. Enfin, on présente les caractéristiques du générateur photovoltaïque dans des conditions atmosphériques différentes.

Le deuxième chapitre présente l'étude détaillée et la simulation de la méthode de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) P&O ainsi que les détails du principe de fonctionnement du convertisseur (boost). Les résultats et discussions des simulations effectuées du système photovoltaïque seront abordés.

Le troisième chapitre sera consacré à modéliser le moteur asynchrone par:

- La mise en équation de la machine asynchrone à partir d'hypothèses simplificatrices.
- La simplification de ces équations par l'introduction de la transformation de Park.
- La mise sous forme d'équation d'état.
- La simulation de ce moteur asynchrone sera effectuée à vide et à charge.

Introduction générale

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter la structure et le principe de fonctionnement de l'onduleur trois niveaux alimentant le moteur à induction. Les résultats et les discussions de simulation seront effectués.

Enfin, on termine ce mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives pour la continuité de ce travail.

Chapitre 1

Le système photovoltaïque

1.1.Introduction

La nouvelle technologie énergétique est l'une des cinq domaines du développement économique mondial qui a la force la plus décisive du 21ème siècle. L'énergie solaire est une nouvelle énergie propre, efficace et durable. Dans la nouvelle réalité, les gouvernements utiliseront les ressources en énergie solaire en tant que stratégie nationale de développement durable. La génération d'énergie photovoltaïque est sûre et fiable, sans bruit, sans pollution, moins contrainte, avec un taux de défaillance faible, un entretien facile, etc.

L'électricité peut être obtenue à partir de l'énergie photovoltaïque sans recourir à des combustibles fossiles (charbon, pétrole ou gaz naturel) ou à des réactions de fission nucléaire, et éviter la plupart des menaces associées aux techniques actuelles de production d'électricité [1].

On rappelle dans ce chapitre l'histoire de photovoltaïque, le principe de fonctionnement de la cellule PV et également ses trois générations d'évolutions technologiques. Ensuite, on décrit la modélisation de la cellule. Enfin, on présente les caractéristiques du générateur photovoltaïque en différentes conditions atmosphériques.

1.2. Définition de photovoltaïque

Le mot «photovoltaïque» se compose de deux mots: photo, un mot grec pour lumière, et voltaïque, qui définit la valeur de mesure par laquelle l'activité du champ électrique est exprimée, c'est-à-dire la différence de potentiel. Donc, la définition de la conversion photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. La principale source lumineuse inépuisable étant le soleil [2,3].

1.3.Histoire de la photovoltaïque

L'effet photovoltaïque (PV), a été découvert en 1839 par un physicien français, Alexandre Edmond Becquerel (en irradiant une électrode en argent dans un électrolyte, il obtint une tension électrique [4].

En 1875, le physicien Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

La première cellule solaire fonctionnelle fut construite en 1883 par Charles Fritts. Mais le rendement de sa cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation[5].

Seulement, le phénomène est encore considéré comme anecdotique jusqu'à la seconde guerre mondiale. Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium.

Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille et ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphone. On entrevoit alors la possibilité de fournir de l'électricité grâce à ces cellules. Au même moment, l'industrie spatiale naissante, cherche de nouvelles solutions (autre que le procédé nucléaire) pour alimenter ses satellites[2].

C'est en 1958, que les premiers satellites avec panneaux solaires sont envoyés dans l'espace et au même moment une cellule avec un rendement de 9% est mise au point[6].

Mais il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industries investissent dans la technologie photovoltaïque. En effet, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. Et en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware[1].

Ainsi, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. La croissance de l'industrie fut spectaculaire, et notamment à travers de nombreux produits de faible puissance fonctionnant grâce à l'énergie solaire, tel que : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. En 1983 la première voiture, alimentée par énergie photovoltaïque, parcourt une distance de 4 000 km en Australie[1].

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

En 2002, le total des installations photovoltaïques installées dans le monde atteint 2 000 MW. Il a fallu 25 ans pour atteindre les 1 000 premiers MW et seulement 3 ans pour le doubler; la production de cellules de silicium cristallin dépasse 100 MW par an chez Sharp Corp. (Japon). BP Solar cesse la R et D et la production de modules à couches minces a-Si et CdTe aux États-Unis, mettant ainsi fin à plus de 20 ans d'efforts [1].

En 2012, la capacité mondiale en énergie solaire a dépassé la barrière magique de 100 GWp. Entre 1999 et 2012, la capacité photovoltaïque installée a donc augmenté. En d'autres termes, au cours des 13 dernières années, la croissance annuelle moyenne de la capacité photovoltaïque installée a été d'environ 40%. [1].

1.4. Cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs [7]. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [8,9].



Fig. 1.1. Cellule photovoltaïque [8].

1.4.1 Structure de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négatives (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle -) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle +) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule.

Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante[8,10], comme le montre la figure (1.2).

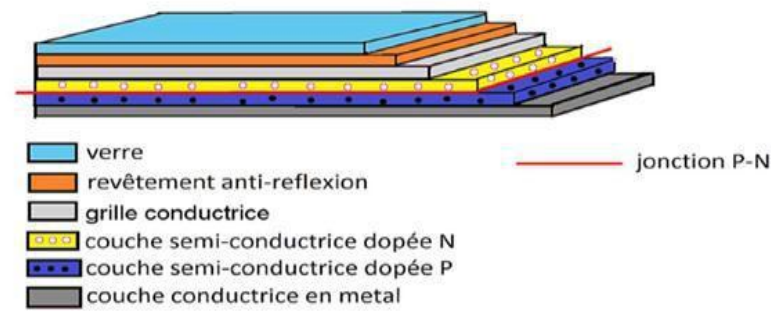


Fig. 1.2. La structure de la cellule photovoltaïque[10].

1.4.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Dans une cellule photovoltaïque, lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque [7,10], comme le montre la figure (1.3).

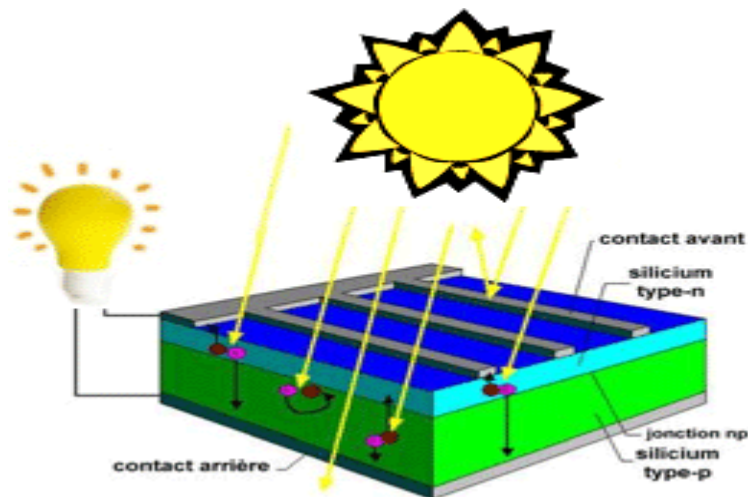


Fig. 1.3. Principe de fonctionnement de cellule [11].

1.5. Les différentes générations des cellules solaires :

Les cellules solaires sont généralement classées en première, deuxième et troisième génération. Les cellules solaires à silicium cristallin (c-Si et mc-Si) sont acceptées en première génération, tandis que les cellules à couches minces (a-Si et CdTe) sont considérées en deuxième génération. Les cellules solaires de troisième génération sont basées sur les nanotechnologies: cellules solaires tandem, super tandem, à bande intermédiaire, etc[11].

1.5.1. Première génération: Silicium cristallin (mono et poly) :

Les cellules solaires de première génération (silicium cristallin) sont divisées en deux types: monocristallin (c-Si, SIN) et poly cristallin (mc-Si, poly-Si). Le rendement des cellules solaires monocristallines est de 15 à 18%, [11].

1.5.1.1. Les cellules monocristallines :

Elles sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 15 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse [11,12].



Fig. 1.4. Cellule monocristalline [12].

1.5.1.2. Les cellules poly cristallines :

Elles sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples et leur coût de production est moins élevé que les cellules mono-cristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Durée de vie estimée approximativement 25 ans. Le rendement des cellules solaires poly cristallines est de 12 à 15%[11,12].

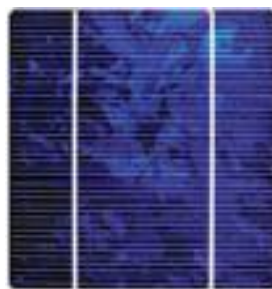


Fig. 1.5. Cellule poly cristalline [12].

1.5.2. Deuxième génération:(couches minces "thin films")

Les cellules solaires de deuxième génération (couches minces) sont regroupées en deux espèces: Amorphous (a-Si) et Tellurure de cadmium (CdTe). Ces types de cellules représentent 7% du marché des cellules solaires en raison de leur faible rendement. Ces cellules structurées assez minces, dont l'épaisseur varie de 1 à 4 μm seulement, ont une efficacité de 7 à 14%, [11].

1.5.2.1. Les cellule au Telluride de Cadmium (CdTe) :

L'efficacité des cellules solaires à base de tellurure de cadmium est d'environ 17%. Le prix de fabrication est nettement inférieur à celui des autres types de cellules solaires. L'Université de Californie à Riverside a utilisé deux panneaux photovoltaïques en CdTe pour produire de l'hydrogène par électrolyse en 1992. Ce système est considéré comme le premier du genre [11,12].



Fig. 1.6. Cellule au Telluride de Cadmium[12].

1.5.2.2. Les cellules au silicium amorphe (a-Si) :

Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible. L'efficacité des cellules solaires amorphes (a-Si) est de 8 à 10% seulement [12,13].



Fig. 1.7. Cellule au silicium amorphe [12].

1.5.3. Troisième génération :(Perovskites, multijonction, concentration)

Les cellules solaires de troisième génération sont des cellules solaires basées sur la nanotechnologie (pérovskites, multi-jonction, concentration, etc.) et sont en phase de recherche et développement. Étant donné que ces types de cellules ont le potentiel d'efficacité supérieure, cela les rend très attractives et une avancée majeure est considérée si elles peuvent être fabriquées de manière rentable, [12].

1.5.3.1. Les Cellules Pérovskites :

Elles sont des cellules composées d'un élément hybride organique-inorganique ayant une structure de pérovskite. En 2016, le rendement est passé à 22,1 % ce qui en fait une alternative prometteuse. Leur coût de production est faible. L'inconvénient de ces cellules réside dans leur instabilité et faible résistance aux agents extérieurs (eau, températures...)[13].

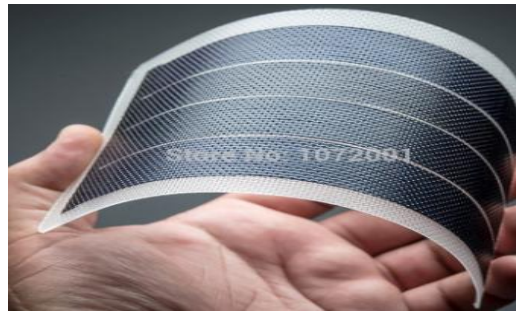


Fig. 1.8. Cellule Pérovskites[14].

1.5.3.2. Les Cellules multi-jonction :

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces avec une base en silicium affichant un rendement de conversion de 32 % à 39 % [14].

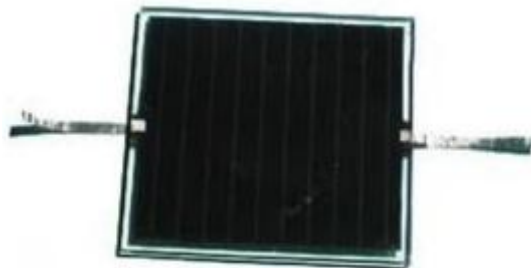


Fig. 1.9. Cellule multi jonction [14].

1.5.3.3. Les Cellules à concentration :

Le photovoltaïque à concentration est basé sur un principe simple : la lumière du soleil est concentrée plusieurs centaines de fois par un dispositif optique (miroir parabolique ou lentille

de Fresnel) avant d'atteindre la cellule photovoltaïque. Et ainsi d'avoisiner des rendements cellules de l'ordre de 40%.

Leur sensibilité à la température est largement inférieure aux cellules en silicium, les rendant particulièrement efficaces en zones à fort ensoleillement[15].



Fig. 1.10. Cellule à concentration[14].

1.6. Le rendement des différentes technologies des cellules photovoltaïques :

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire.[11].

Le tableau suivant compare le rendement des différentes technologies des cellules PV.

Generations	Type des cellules	Rendement des cellules
Première	Silicium mono-cristallines	17-20 %
	Silicium poly-cristallines	16 à 18%
Deuxième	CdTe(Tellure de Cadmium)	15 %
	Silicium amorphe	13,4 %
Troisième	Pérovskites	22,1 %
	Cellules à concentration	40%
	Cellules multi-jonction	32 % à 39%

Tableau 1.1. Rendement des différentes technologies[10, 11,13].

1.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent de la cellule PV est illustré à la figure 1. Dans le diagramme ci-dessus, la cellule PV est représentée par une source de courant en parallèle avec une diode. R_s et R_{sh} représentent respectivement les résistances série et parallèle. Le courant et la tension de sortie de la cellule PV sont représentés par I et V [15].

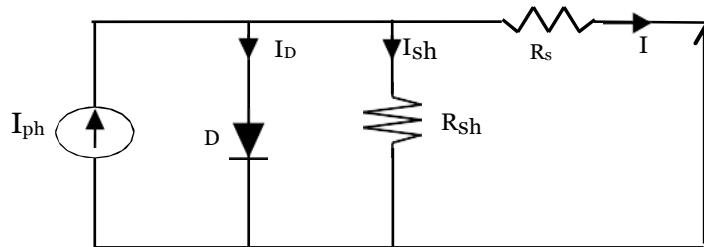


Fig. 1.11. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque(I) se met sous la forme mathématique suivante [14,15]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.1)$$

Où :

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_d : Le courant circulant dans la diode.

I_{sh} : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

L'expression qui donne le courant de la diode ; il est représenté sous la forme suivante[15,16] :

$$I_d = I_o \cdot [\exp(\frac{V + R_s \cdot I}{nV_T}) - 1] \quad (1.2)$$

Où :

I_o : courant de saturation de diode.

V : tension aux bornes.

R_s : résistance en série d'un module PV,

R_{sh} : résistance shunt intrinsèque de la cellule,

V_T : tension thermique;

n : facteur d'idéalité

Le courant dérivé par la résistance parallèle est donc [10,17]:

$$I_{sh} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

En substituant les équations (1.2; 1.3) dans l'équation (1.1), le courant I devient [09,16]:

$$I = I_{ph} - I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

Où :

$$V_T = \frac{K \cdot T}{q} \quad (1.5)$$

q : charge d'électrons (1.60217646 e-19C),

k : constante de Boltzmann (1.3806503 e-23 J K-1),

T : condition de température de travail.

1.8. Module photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est le courant qui augmentera [17,18].



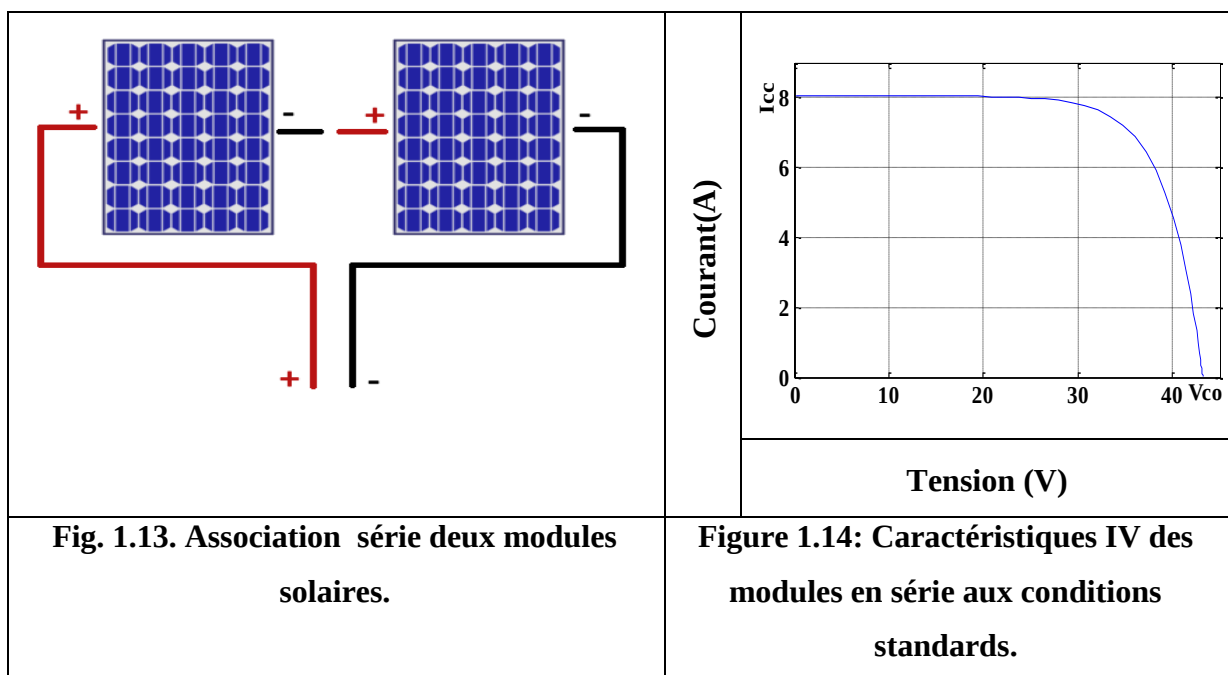
Fig. 1.12. Modules photovoltaïques[18].

1.9. Association des modules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il est nécessaire de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'exclusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc..) peuvent endommager les cellules de façon permanente[7].

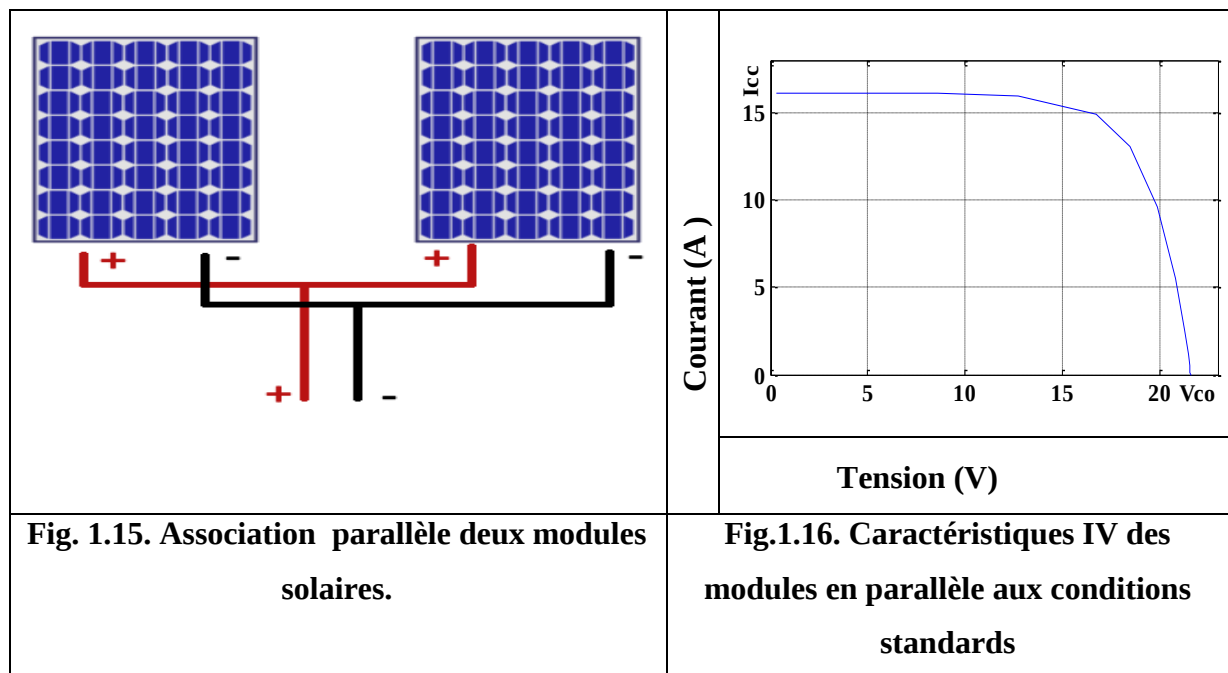
1.9.1. Association en série

L'association en série des modules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'un seul module [18,20].



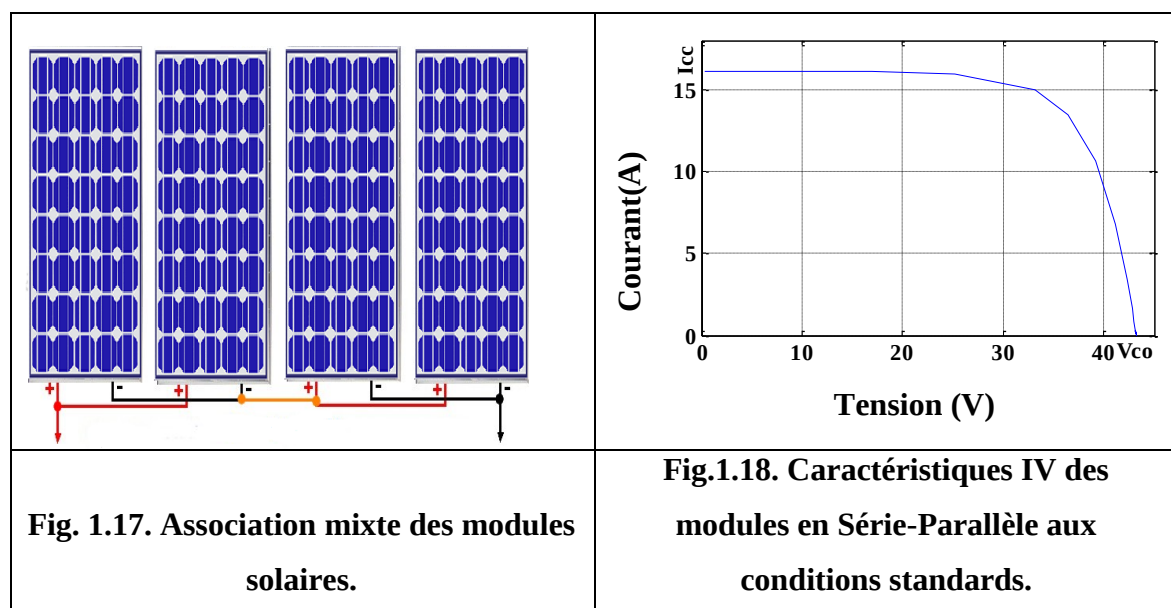
1.9.2 Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [17,19].



1.9.3 Association série-parallèle

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire série-parallèle [17,19].



1.10. Les caractéristiques électriques de modules

Sous un éclairage donné, tout module photovoltaïque est caractérisé par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre le module. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [17] :

Tension de circuit ouvert (v_{oc})

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant de module est nul. Il est lié à la résistance de shunt et à la barrière d'énergie. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'insolation[19].

Courant de court-circuit (i_{cc})

Le courant de court-circuit est le courant obtenu quand les bornes du module sont court-circuitées ($V=0$). Il augmente linéairement avec l'intensité d'illumination du module et est relié sur la surface éclairée, le spectre du rayonnement solaire et la température [19].

Point de puissance maximale, (PPM)

En anglais : maximal power point (MPP), obtenu pour une tension et un courant maximal[19] :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (1.6)$$

La figure (1.19) représente la courbe $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

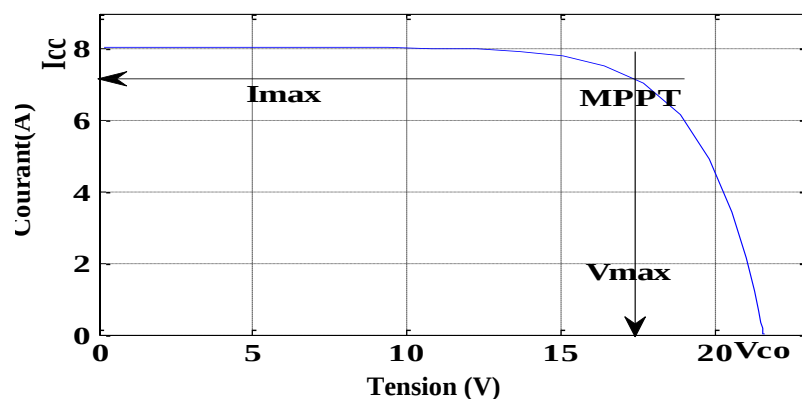


Fig. 1.19. Caractéristique courant-tension (I-V) d'un module photovoltaïque.

Autres paramètres du module solaire :

Factor de suffisance, ff

Le facteur de suffisance d'un module solaire est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Cela reflète combien de résistances en série et peu de résistances shunt dans la cellule solaire. Pendant que le module solaire se dégrade avec l'âge, sa résistance en série tend

à augmenter ce qui conduit à un facteur inférieur de suffisance [20].

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (1.7)$$

Rendement, η

Le rendement d'un module solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par le module à la puissance lumineuse d'incident[21].

$$\eta = \frac{P_m}{GA} \quad (1.8)$$

A est la surface génératrice en m² et G ensoleillement en W/m²

1.11. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules formés par un certain nombre de cellules photovoltaïques, connectées ensemble en série et en parallèle pour fournir le courant et la tension nécessaire. [20].



Fig. 1.20. Champ photovoltaïque [21].

1.12. Simulation d'un générateur photovoltaïque :

Le type de modèle PV poly-cristallin (HA-125-12) a été choisi. Il est constitué de 36 cellules d'une puissance de 125 W. Le Tableau (1.2) résume les caractéristiques de ce module PV.

Les caractéristiques électriques du panneau sont données dans le tableau suivant :

Puissance maximale	125W
Tension de circuit ouvert (V_{co})	21.6 V
Courant de court-circuit (I_{cc})	8.05A
Tension à la puissance maximale (V_m)	17.25 V
Courant à la puissance maximale (I_m)	7.25 A

Tableau .1.2. Caractéristique électrique du panneau dans les conditions standards

<CST> $T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$.

1.12.1. Modèle de simulation

Nous avons procédé à la mise en œuvre d'un modèle du générateur photovoltaïque sous Matlab-Simulink. Le modèle comporte deux paramètres d'entrée (la température et l'ensoleillement) et deux paramètres de sortie (la tension et le courant). La figure (1.21) illustre le modèle du générateur photovoltaïque.

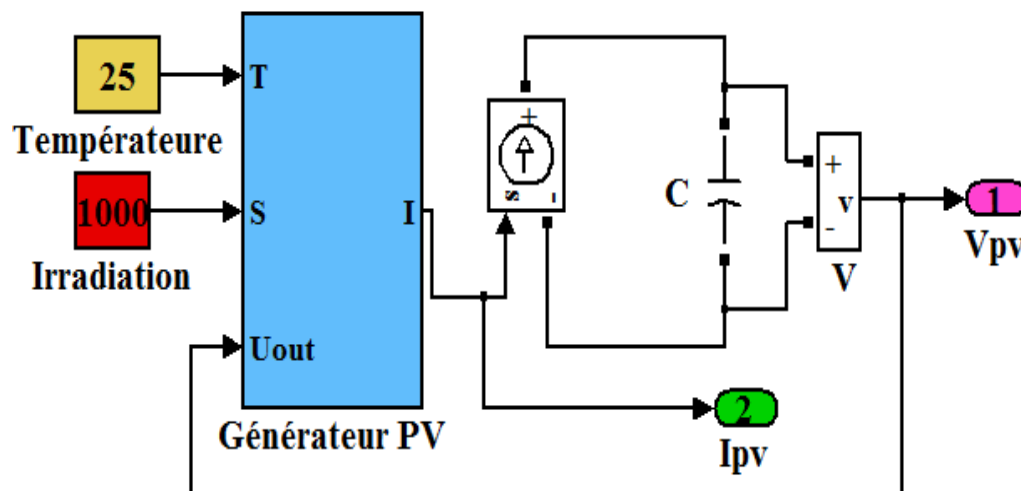


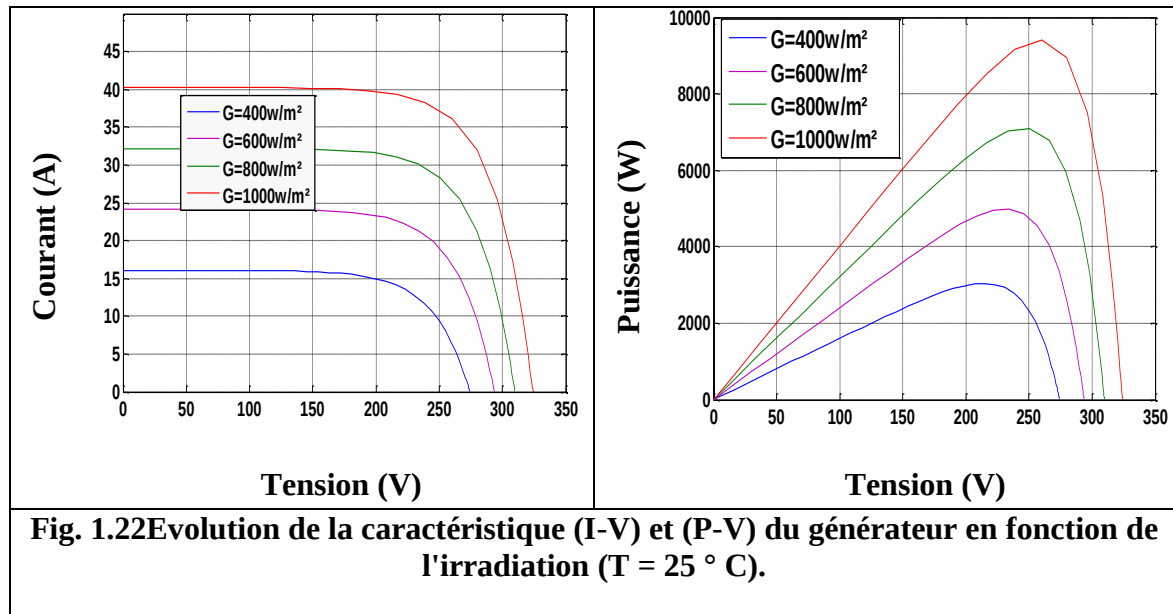
Fig. 1.21. Modèle de simulation d'un générateur PV.

1.1.2-Effets de l'irradiation et de la température :

Nous allons étudier la simulation du générateur photovoltaïque qui est composé de 15 modules en série et de 5 modules en parallèle pour former un générateur PV de puissance de 9.4 KW dans les conditions standard ($E=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$),

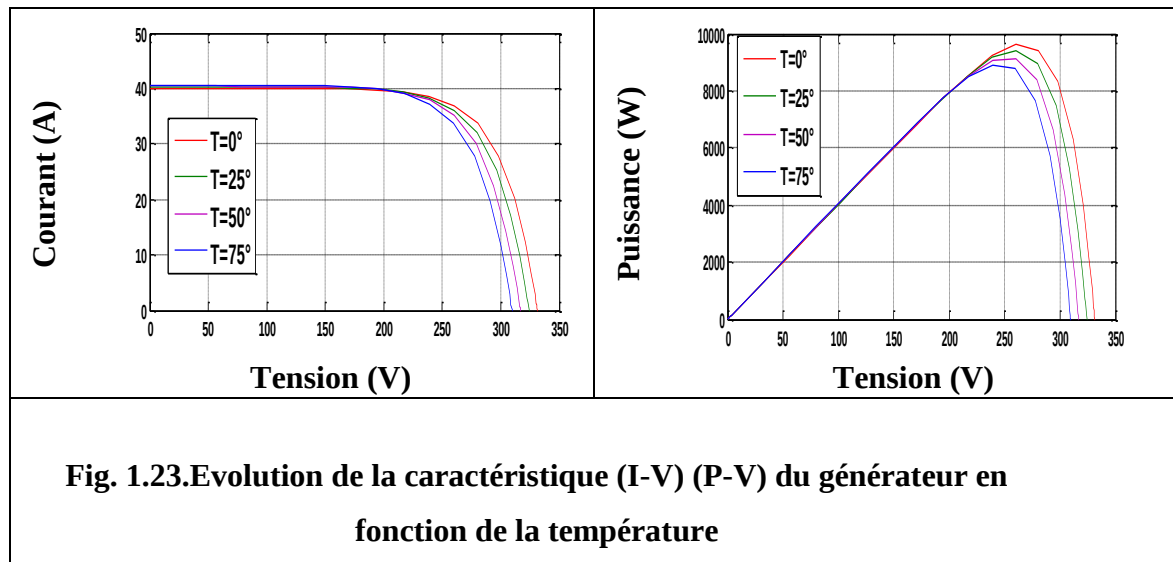
L'effet des conditions météorologiques est simulé à l'aide de Matlab / Simulink. Les caractéristiques I-V et P-V pour différentes conditions d'irradiation solaire et de température sont représentées respectivement :

1.12.2.1. Influence de l'irradiation



Le courant varie directement avec le rayonnement lumineux or la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure (1.22) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement.

1.12.2.2. Influence de la température



Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres, figure (1.23).

Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.

1.13. Avantages et inconvénients PV

Les Avantages : [7,19].

- L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.

Les inconvénients : [7,21]

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

1.14. Conclusion

Le monde de la conversion photovoltaïque connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques. Dans la première partie un petit rappel sur le concept et l'histoire de l'énergie photovoltaïque ainsi que le principe de la conversion photovoltaïque et les différents types des cellules photovoltaïques. La seconde partie du chapitre est consacrée à la modélisation d'une cellule photovoltaïque et avantages et inconvénients du système photovoltaïque.

La simulation a été faite en formant un générateur photovoltaïque constitué de 15 panneaux en série et 5 panneaux en parallèle donnant ainsi une puissance approximative de 9.4 KW. On

a constaté que l'irradiance a un effet direct sur le courant de court circuit tandis que la température affecte la tension à circuit ouvert.

Chapitre 2

Le hacheur boost et la technique de poursuite MPPT (P&O)

2.1. Introduction:

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années ainsi que les contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global, conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables.

Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle. Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (continu/continu) DC/DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le générateur GPV à son point de puissance maximum (MPP) à l'aide d'un contrôleur MPPT (maximum power point tracking), par conséquent, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température).

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPPT du générateur photovoltaïque. Les méthodes évaluées sont: Perturbé et Observe (PO), technique de conductance incrémentielle (IC) et logique floue (FLC).

Dans ce chapitre, nous allons étudier et simuler la méthode de poursuite du point de puissance maximale basée sur perturbe et observe (P&O) avec un convertisseur (boost), Ensuite, les résultats et discussions des simulations de la technique de poursuite seront discutées.

2.2. Convertisseur DC-DC :

Le convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit abaisseur (Buk) dans le cas contraire, il est dit élévateur (Boost). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des configurations d'élévateur et d'abaisseur (Buck-Boost). En ce qui concerne notre travail, on considère le convertisseur élévateur "hacheur boost". [22,23].

2.2.1. Hacheur élévateur (Boost):

Un hacheur élévateur (Boost) est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. On utilise un convertisseur élévateur lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Le schéma de la figure (2.1), représente le circuit électrique de l'élévateur.

Comme le montre la figure (2.1), le convertisseur élévateur est composé de la résistance R , le transistor S et de la diode D . Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultante du découpage sur la tension et le courant de sortie.[22,23,24,25].

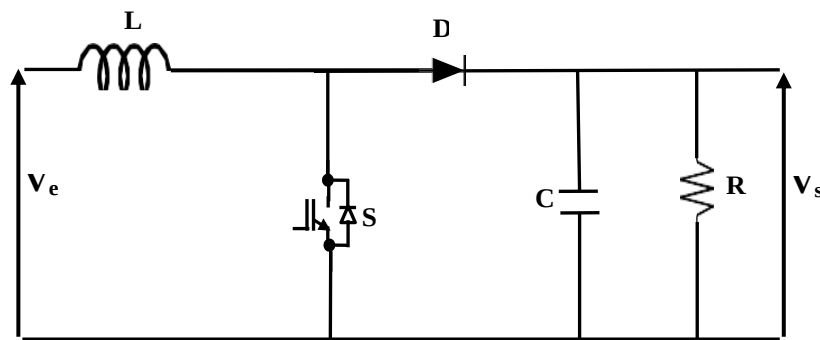


Fig. 2.1. Circuit électrique de base du hacheur survolteur.

2.2.1.1 .Principe de Fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur survolteur peut être divisé en deux phases :

Phase 1 : Pour $t \in [0 \text{ à } \alpha.T]$:

Le transistor est passant et la diode D est bloquée, cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

Schéma équivalent :

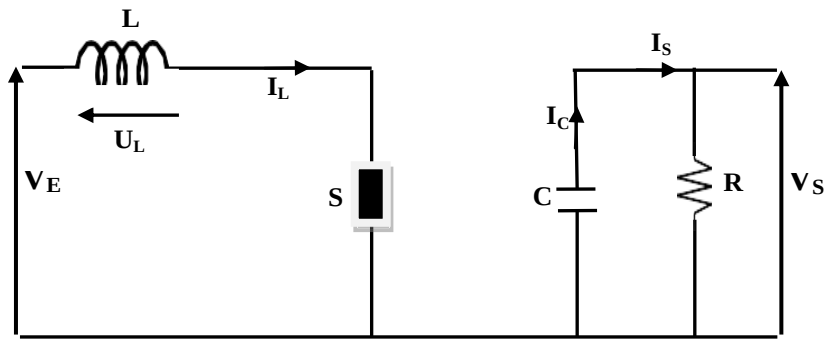


Fig. 2.2. Circuit équivalent du convertisseur Boost pour T_{on} . [22]

La tension d'entrée :

$$V_L = V_E \quad (2.1)$$

Avec

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.2)$$

Le courant dans la bobine :

$$I_L(t) = \frac{V_E}{L}t + I_{\min} \quad (2.3)$$

Le courant dans la diode :

$$I_D(t) = 0 \quad (2.4)$$

Le courant dans le transistor :

$$I_T(t) = I_L(t) \quad (2.5)$$

Phase 2 : Pour $t \in [\alpha.T \text{ à } T]$:

Le transistor est bloqué et la bobine L restitue l'énergie emmagasinée, la diode est passante donc V_s est supérieure à V_E , [22,23,24,25].

Schéma équivalent :

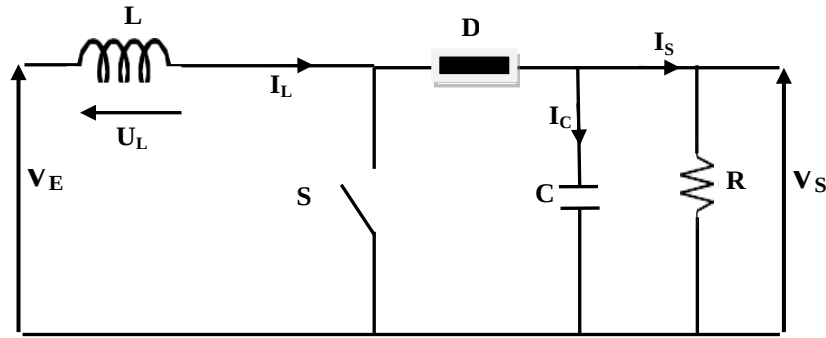


Fig. 2.3. Circuit équivalent du convertisseur boost pour T_{off} .

La tension de sortie :

$$V_S = V_E - V_L \quad [2.6]$$

$$V_L < 0 \quad (2.7)$$

En conséquence

$$V_S > V_E \quad (2.8)$$

Le courant dans la bobine :

$$I_L(t) = -\frac{V_S - V_E}{L}t + I_{\max} \quad (2.9)$$

Le courant dans la diode :

$$I_D(t) = I_L(t) \quad (2.10)$$

Le courant dans le transistor :

$$I_T(t) = 0 \quad (2.11)$$

2.2.1.2 .Les paramètres d'élévateur :

La tension de sortie (V_S) et le rapport cyclique (D) sont donnés par les équations suivantes [31]:

$$V_S = \frac{V_E}{1 - D} \quad (2.12)$$

Alors,

$$D = 1 - \frac{V_E}{V_S} \quad (2.13)$$

En supposant un circuit sans perte,

$$V_E . I_E = V_S . I_S = \frac{I_S . V_E}{1 - D} \quad (2.14)$$

Le courant de sortie moyen est alors:

$$I_S = I_E (1 - D) \quad (2.15)$$

Les relations des filtres d'entrée et de sortie (L) et (C) sont respectivement données par les équations suivantes :

$$L = \frac{D(1 - D)^2 . R}{2 . f} \quad (2.16)$$

$$C = \frac{D}{2 . f . R} \quad (2.17)$$

Par conséquent, les valeurs de conception du convertisseur élévateur sont présentées dans le tableau (2.1).

Les parameters	Les valeurs
Tension d'entrée (V_e)	258.75V
Tension de sortie (V_s)	500 V
Fréquence de commutation (f)	4 Khz
Rapport cyclique (D)	0.4825
Inducteur (L)	0.538mH
Condensateur (C)	1.809 μ F

Tableau 2.1. Valeurs de calcul du convertisseur élévateur(Boost).

La Figure (2.4), illustre les tensions d'entrée(V_e) et de sortie(V_s) du convertisseur élévateur. La tension de sortie correspondante est obtenue à partir de la tension d'entrée à un rapport cyclique choisi.

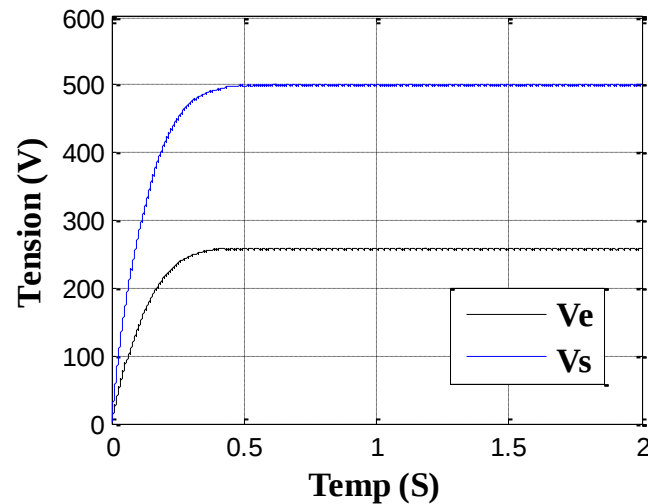


Fig. 2.4. Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur élévateur.

2.3. Le point de puissance maximum (MPP):

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un algorithme inclus dans les contrôleurs de charge utilisés pour extraire la puissance maximale disponible du système photovoltaïque quelques soient les conditions météorologiques. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique (D) en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le générateur PV[26,27].

Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance tirée du générateur photovoltaïque. Le schéma fonctionnel du système est présenté à la Figure (2.5) :

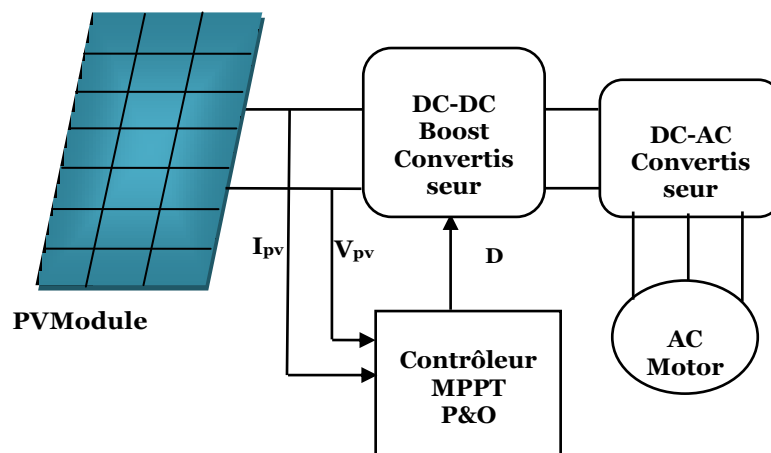


Fig. 2.5. Schéma fonctionnel à conversion photovoltaïque.

2.4. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT:

Nous devons chercher le point de puissance maximale, pour cela nous comparons un point de puissance actuel $P(k)$ avec un point de puissance précédent $P(k-1)$.

Si $P(k-1) = P(k)$, la dérivée est nulle, cela veut dire le point de fonctionnement est situé au maximum.

Si $P(k-1) < P(k)$, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximale MPPT. Si la dérivée est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximale. Ainsi, au démarrage du système, la recherche de MPPT se fait progressivement, en cherchant le premier point maximum [28,29].

Le concept de base du MPPT sur une courbe PV d'un générateur photovoltaïque est illustré à la figure (2.6).

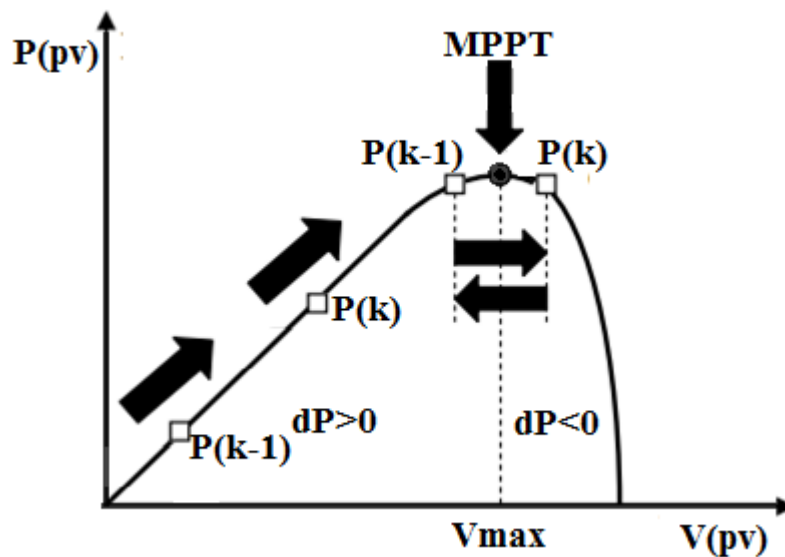


Fig. 2.6. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT

2.5. Les Techniques MPPT:

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPPT ont été développées. Les techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs requis, la complexité, le coût, la portée d'efficacité, vitesse de convergence, suivi correct en cas d'irradiation ou changement de température, le matériel nécessaire à la mise en œuvre ou la popularité, entre autres. Certaines des techniques MPPT les plus populaires sont [30,31]:

- Perturbation et observation.
- Méthode de conductance incrémentale.
- Courant de court-circuit fractionnel.
- Tension de circuit ouvert fractionnaire.
- Logique floue.
- Réseaux de neurones.

2.5.1. La Technique Perturbation et Observation:

Dans ce mémoire, nous avons utilisé la méthode perturbation et observation (P&O) qui est

Une approche largement répandue dans la recherche du MPPT. Elle est basée sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. L'avantage de cette dernière technique est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Par contre, elle possède l'inconvénient dû aux oscillations autour du MPPT en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du MPPT lors de changement rapide des conditions climatiques. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du MPPT, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser [32].

D'abord la tension $V(k)$ et le courant $I(k)$ sont mesurés pour calculer la puissance $P(k)$. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure $P(k-1)$. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du générateur PV est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation du cycle précédent sinon on inverse la perturbation du cycle. De même manière répété jusqu'à ce que le point maximal soit suivi [38,39]. Le modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme Perturbation et Observation (P & O) est présenté à la figure (2.7), [34,35,36].

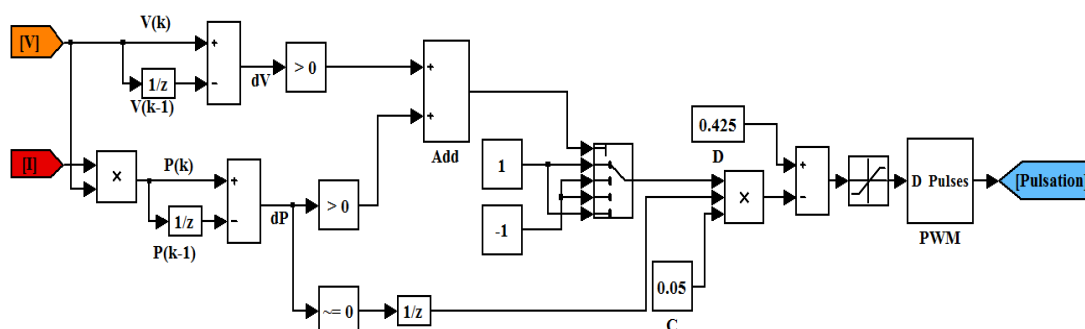


Fig. 2.7. Modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme Perturbation et Observation.

La figure (2.8) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O'

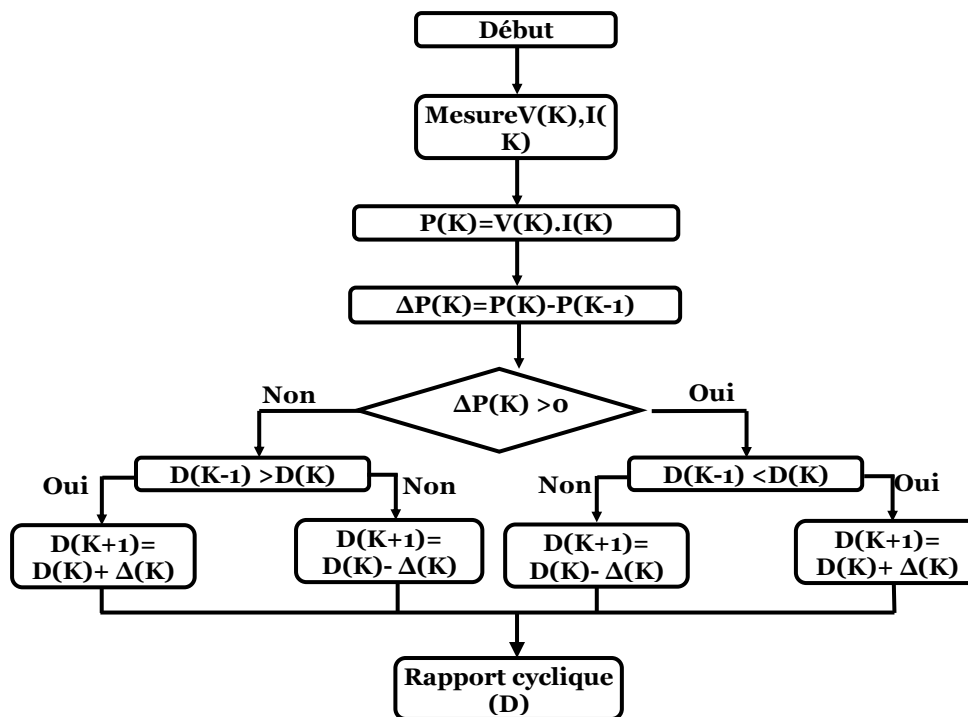


Fig. 2.8. Organigramme de l'algorithme perturbé et observé.

2.6. Simulation et interprétation:

Générateur photovoltaïque :

Le type PV poly-cristallin (HA-125-12) a été choisi. Il est constitué de 36 cellules d'une puissance de 125 W. Le Tableau (2.2) résume les caractéristiques de ce module PV. Les caractéristiques électriques du panneau sont données dans le tableau suivant :

Puissance maximale	125W
Tension de circuit ouvert (V_{co})	21.6 V
Courant de court-circuit (I_{cc})	8.05A
Tension à la puissance maximale (V_m)	17.25 V
Courant à la puissance maximale (I_m)	7.25 A

Tableau 2.2. Caractéristiques électriques du panneau dans les conditions standards

<CST> $T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$.

Le générateur photovoltaïque est constitué de 75 panneaux, 15 en série et 5 en parallèle donnant une puissance maximale de 9.4 KW et une tension d'entrée égale à 258.75V.

La figure (2.8), montre le schéma fonctionnel du modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé et simulé à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink, basé sur l'algorithme MPPT de la méthode perturbation et observation. Tout d'abord, nous suivrons le point de puissance maximum sous irradiation solaire variable et la température constante (25 ° C). Les résultats de la simulation sont illustrés à la figure (2.10).

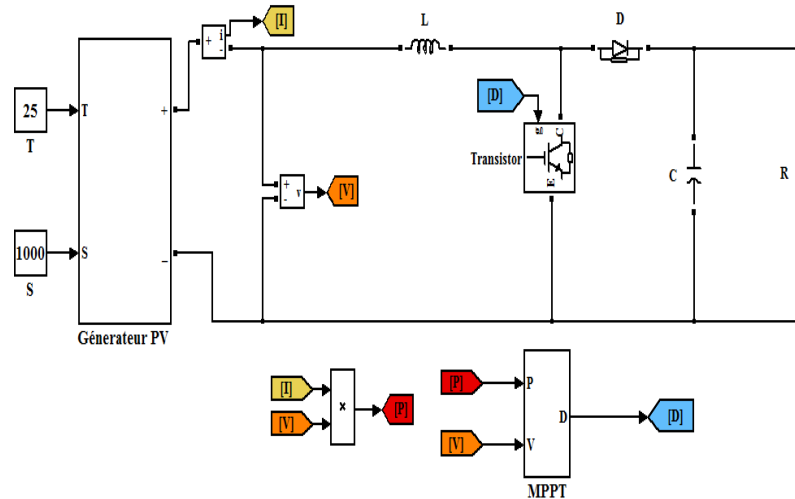


Fig.2.9. Modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé par MPPT.

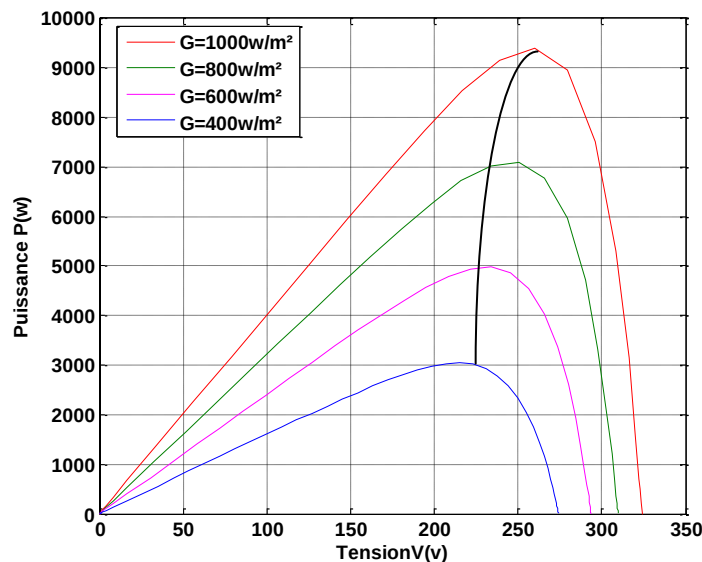


Fig 2.10. Les points de puissance maximale simulés par (P & O).

Irradiation solaire (W/m ²)	Perturbation et Observation, P(W)
1000	9.407×10^3
800	7.1×10^3
600	5×10^3
400	3×10^3

Tableau 2.3. Les points de puissance maximale simulés par (P & O)

Sur la base du tableau (2.3) et de la figure (2.10), nous observons que le point de puissance maximale obtenu en appliquant la technique P&O (9.4×10^3 watts) est atteint lorsque l'éclairement énergétique est de **1000 W/m²**.

Cependant, avec un éclairement énergétique réduit, le point de poursuite optimal a été réduit.

La figure (2.11) ci-dessous présente la variation de la puissance de cette évolution respectivement du générateur photovoltaïque avec la techniques (P&O) sous les conditions atmosphériques standard (1000W / m², 25 ° C) pour tester le temps de réponse de cette techniques MPPT.

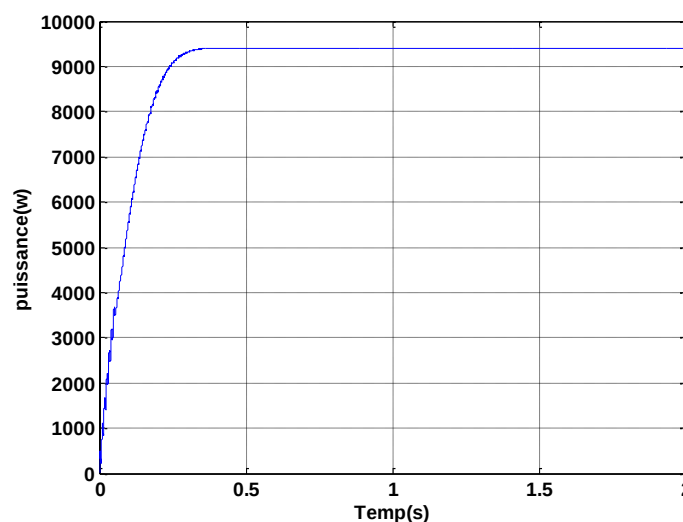


Fig. 2.11. Puissance du générateur photovoltaïque obtenue par la technique (P& O).

En régime permanent, la puissance maximale fournie par le système PV commandé par la commande (P&O) est atteinte, cela prouve l'efficacité de cet algorithme proposé.

Nous allons maintenant tester la performance de commande MPPT précédemment développée en effectuant séparément des variations sur la température et l'ensoleillement. Dans la figure (2.12), nous apportons des variations sur l'irradiation solaire et nous supposons que la température est constante et égale à 25°C. L'irradiation de 0 à 0,6 seconde correspond au rayonnement (1000 W / m^2), puis de 0,6 à 1 seconde réduite à 600 W / m^2 et à 1 seconde augmentation à 800 W / m^2 .

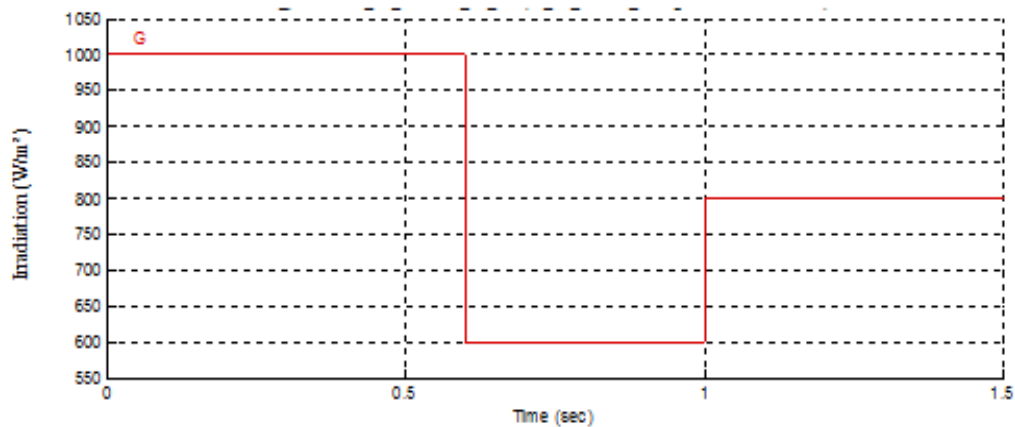


Fig.2.12. La variation d'irradiation.

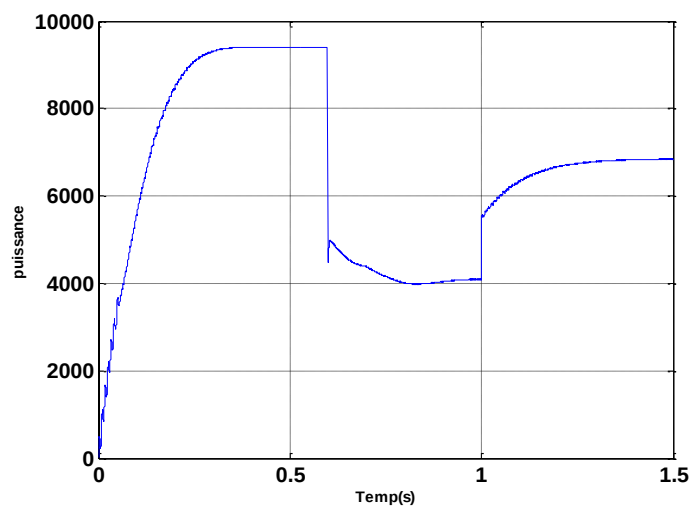


Fig.2.13. L'évolution de puissance PV pour l'irradiation variable.

La figure (2.13) montre l'évolution de la puissance correspondante à la variation de l'irradiation.

Nous remarquons que la commande (P&O) en général donne des résultats acceptables et atteint la puissance maximale quelle que soit la variation de l'irradiation.

Dans cette simulation, figure (2.14), on a varié la température entre 0.7s et 1s et entre 1s et 1.5s tout en gardant l'irradiation constante (1000 W/m^2) pour voir le comportement de notre commande. Notre commande MPPT à base de l'algorithme P&O a bien réagi et il y a une poursuite parfaite à ce changement de température.

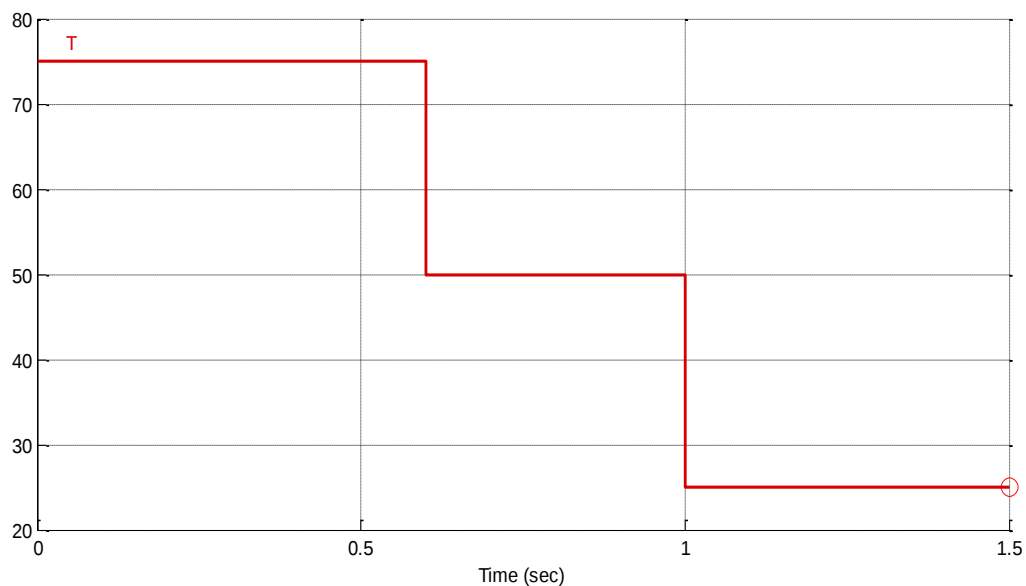


Fig. 2.14. La variation de température ($^{\circ}\text{C}$).

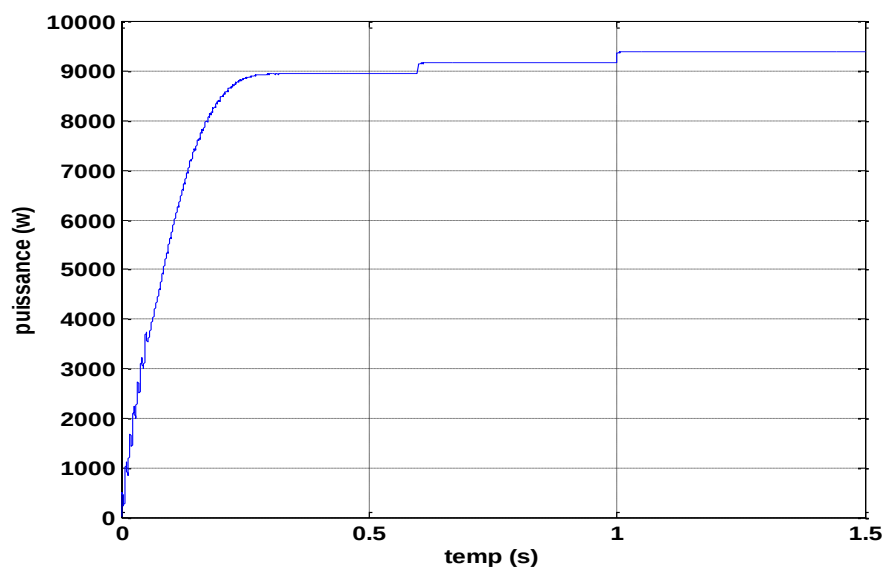


Fig. 2.15. L'évolution de la puissance PV pour une température variable.

2.7. Conclusion:

Le point de puissance maximale (MPPT) permet d'augmenter l'efficacité des systèmes photovoltaïques en assurant les paramètres de fonctionnement du générateur dans des conditions optimales et améliorant ainsi le rendement du système photovoltaïque et par la suite la réduction des coûts.

Ce chapitre est une tentative pour étudier et discuter la techniques MPPT (perturbé& observé) . La technique de la suivie de la puissance maximale (MPPT) est utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour extraire le maximum de puissance. La technique MPPT la plus populaire est la Perturbation et Observation suite à sa simplicité et la facilité de son implémentation pratique.

Les résultats obtenus de simulation montrent l'efficacité de la technique MPPT utilisé dans ce mémoire point de vu poursuite de la puissance maximale.

Chapitre 3

Modélisation de la Machine Asynchrone

3.1. Introduction:

Avant toute synthèse de loi de commande, il est indispensable d'analyser le processus à contrôler, d'établir une modélisation adaptée et d'interpréter ses dynamiques propres.

La représentation des processus physiques par des modèles mathématiques est une étape très importante dans l'asservissement des systèmes. En effet, afin d'élaborer une structure de commande, il est important de disposer d'un modèle mathématique représentant de manière satisfaisante les caractéristiques du processus.

Dans notre étude, le processus à contrôler est constitué d'une machine asynchrone triphasée et de son alimentation, assurée par un ensemble de convertisseurs statiques.

Le problème de la modélisation est très important pour la conception et l'analyse des performances statiques et dynamiques du processus. La modélisation de la machine asynchrone triphasée est généralement traitée par la théorie des deux axes qui utilise la théorie de l'espace vectoriel pour le passage d'un système triphasé réel à un système biphasé fictif. Il nous faut donc, un modèle de la machine asynchrone qui permet de simuler son fonctionnement en régime transitoire et qui permet de déboucher sur une commande suivant un schéma de contrôle vectoriel indirect par orientation du flux rotorique.

3.2. Modélisation de la machine asynchrone triphasée:

Parmi tous les types de machines à courant alternatif, la machine d'induction, particulièrement le type à cage d'écureuil est la plus utilisée dans l'industrie. Ces machines sont économiques, robustes, et fiables, et sont disponibles dans une gamme de faible puissance à des puissances élevées.

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Figure (3.1) représente les six enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques (a_s , b_s , c_s) à p paires de pôles ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à $\frac{2\pi}{3}$, [37].

Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constantes ou par un onduleur de tension ou de courant à fréquence et amplitude réglable, [37].

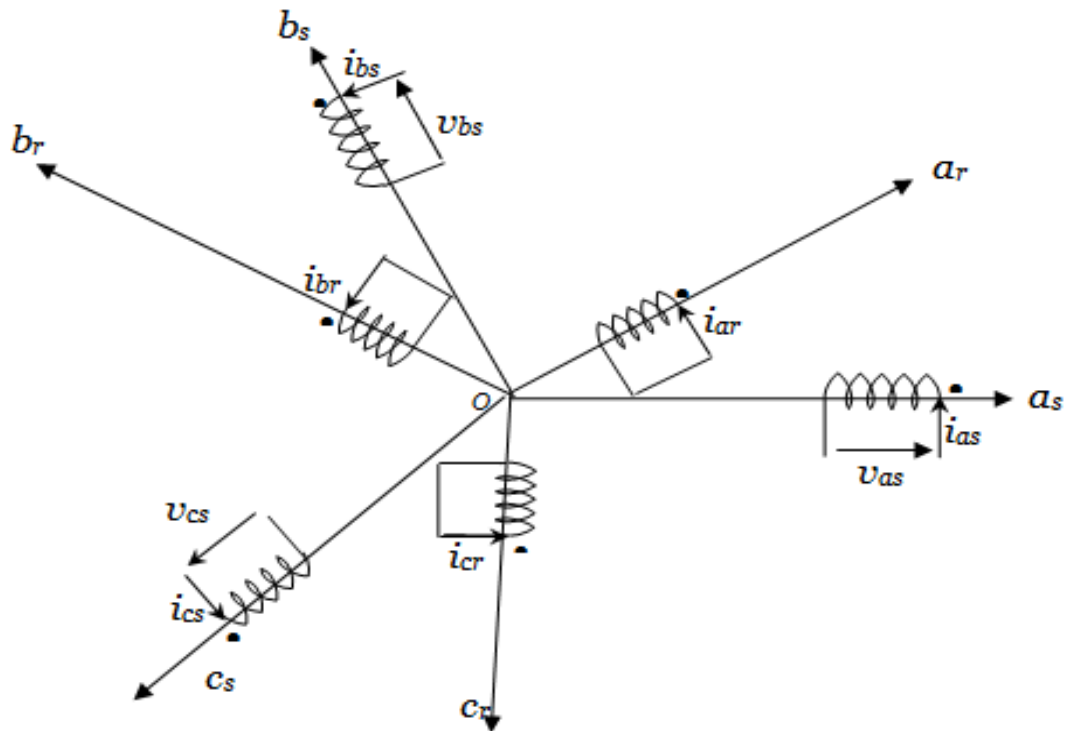


Fig 3.1. Représentation des enroulements de la machine asynchrone

La structure électrique du rotor peut-être réalisée par :

- Soit par un système d'enroulements triphasé (rotor bobiné), raccordés en étoile à trois bagues sur lesquelles frottent trois balais fixes accessibles par la plaque à bornes et mis en court-circuit pendant les régimes permanents.
- Soit par une cage conductrice intégrée aux tôles ferromagnétiques (rotor à cage).

Il sera admis que la deuxième structure est électriquement équivalente à la première.

3.2.1. Mise en équations de la machine asynchrone:

Le comportement dynamique de la machine asynchrone est caractérisé par trois types de grandeurs : électriques, magnétiques et mécaniques. Ce comportement peut se traduire par trois types d'équations : équations électriques, équations magnétiques et équations mécaniques. Quant aux équations mécaniques, elles seront introduites à la fin de la modélisation de la machine asynchrone.

3.2.1.1. Equations électriques:

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$v = Ri + \frac{d\phi}{dt} \quad (3.1)$$

On déduit pour l'ensemble des phases des équations de tensions statoriques et rotoriques écrites sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [v_s] = R_s [i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [v_r] = R_r [i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec :

$$[v_s] = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^t ; [i_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t ; [\phi_s] = [\phi_{as} \ \phi_{bs} \ \phi_{cs}]^t$$

$$[v_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^t ; [i_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t ; [\phi_r] = [\phi_{ar} \ \phi_{br} \ \phi_{cr}]^t$$

Les trois enroulements a_r, b_r, c_r sont en court – circuit d'où : $[v_r] = [0 \ 0 \ 0]^t$.

3.2.1.2. Equations magnétiques:

Les hypothèses précédemment citées, entraînent les relations suivantes entre flux et courants, écrites également sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} [\phi_s] \\ [\phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} [\phi_s] \\ [\phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Finalement :

$$[v_{abcs}] = [R_s][i_{abcs}] + (d/dt) \{ [L_s][i_{abcs}] + [M_{sr}][i_{abcr}] \} \quad (3.6)$$

$$[v_{abcr}] = [R_r][i_{abcr}] + (d/dt) \{ [M_{sr}]^t [i_{abcs}] + [L_r][i_{abcr}] \} \quad (3.7)$$

3.3.Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone triphasée :

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de base faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes « d » et « q ».

Ainsi, les enroulements statoriques S_a, S_b, S_c et les enroulements rotoriques R_a, R_b et R_c sont remplacés respectivement par deux enroulements statoriques d_s, q_s et deux enroulements rotoriques d_r, q_r . La figure (3.2) permet de définir les divers référentiels et les relations spatiales qui les lient [38].

On désigne par :

d : axe direct.

q :axe axe en quadrature.

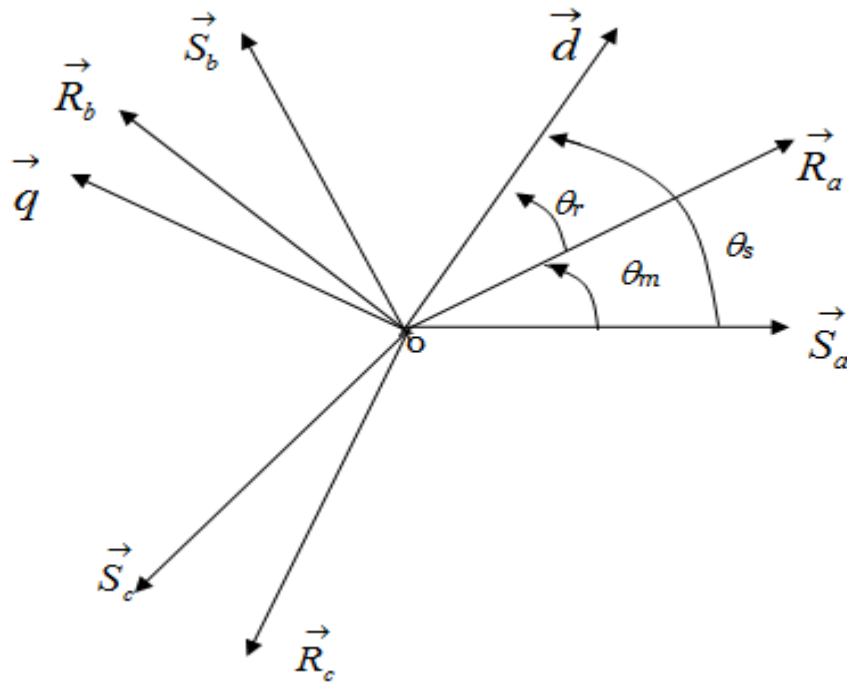


Fig 3.2 : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.

On remarque sur la figure (3.2) que θ_s et θ_r sont naturellement liés à θ_m par la relation rigide :

$$\theta_m = \theta_s - \theta_r \quad (3.8)$$

et par suite :

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (3.9)$$

Dans la transformée initiale de Park, on définit une matrice unique de transformation qui est la suivante [38] :

$$P(\theta_s) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

et son inverse est défini par :

$$[p(\theta_s)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

La transformée de Park permet en général, le passage du système triphasé par a, b, c à un système diphasé d, q quelques soient les grandeurs électriques ou électromagnétiques (flux, courant et tension). La transformation des grandeurs statoriques ainsi est définie par :

$$[i_{dq}] = [p(\theta_s)][i_{abc}] \quad (3.12)$$

$$[v_{dq}] = [p(\theta_s)][v_{abc}] \quad (3.13)$$

$$[\phi_{dq}] = [p(\theta_s)][\phi_{abc}] \quad (3.14)$$

La matrice $[p(\theta_s)]$ représente la matrice de transformation appliquée au stator.

La transformation des grandeurs rotoriques s'obtient en remplaçant l'indice (s) par l'indice (r).

3.4. Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK:

3.4.1. Équations des tensions:

Les équations de Park statoriques et rotoriques [39], s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \quad (3.15)$$

Avec $v_{dr} = 0$ et $v_{qr} = 0$

3.4.2. Choix du référentiel:

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axes d, q qui dépendent des objectifs de l'application [40] :

- a) Axes tournants à la vitesse du rotor ($\theta_r = 0$) : étude des grandeurs statoriques,
- b) Axes liés au stator ($\theta_s = 0$) : étude des grandeurs rotoriques,
- c) Axes solidaires du champ tournant : étude de la commande.

La conception du control vectoriel par orientation du flux nécessite le choix (c) et les modèles d'actions dépendent de la position du repère par rapport aux divers axes du flux.

On désigne par $\omega_s = d\theta_s / dt$, la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère statorique (S, abc) et par $\omega_r = d\theta_r / dt$, la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère rotorique (R, abc).

3.4.2.1. Dans un référentiel lié au stator :

Ce référentiel est noté (α, β) , il se traduit par les conditions $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$; $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m$

D'où les équations électriques suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \left(\frac{d\phi_{\alpha s}}{dt} \right) \\ v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \left(\frac{d\phi_{\beta s}}{dt} \right) \\ 0 = R_r i_{\alpha r} + \left(\frac{d\phi_{\alpha r}}{dt} \right) + \omega_r \phi_{\beta r} \\ 0 = R_r i_{\beta r} + \left(\frac{d\phi_{\beta r}}{dt} \right) - \omega_r \phi_{\alpha r} \end{array} \right. \quad (3.16)$$

3.4.2.2. Dans un référentiel lié au rotor :

Ce référentiel est noté (X, Y) , il se traduit par les équations :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_m, \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 0.$$

d'où les équations électriques :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{Xs} = R_s i_{Xs} + \left(\frac{d\phi_{Xs}}{dt} \right) - \omega_m \phi_{Ys} \\ v_{Ys} = R_s i_{Ys} + \left(\frac{d\phi_{Ys}}{dt} \right) + \omega_m \phi_{Xs} \\ 0 = R_r i_{Xr} + \left(\frac{d\phi_{Xr}}{dt} \right) \\ 0 = R_r i_{Yr} + \left(\frac{d\phi_{Yr}}{dt} \right) \end{array} \right. \quad (3.17)$$

Ce référentiel peut être intéressant dans les problèmes de régimes transitoires ou la vitesse de rotation est considérée comme constante.

3.4.2.3. Dans un référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est noté (d, q) , il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s ; \quad \frac{d\theta_m}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_m = p\Omega \quad (3.18)$$

$$\text{d'où } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m = \omega_{gl}$$

où ω_{gl} est la pulsation de glissement.

Donc, les équations électriques (3.15) s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \left(\frac{d\phi_{ds}}{dt} \right) - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \left(\frac{d\phi_{qs}}{dt} \right) + \omega_s \phi_{ds} \\ 0 = R_r i_{dr} + \left(\frac{d\phi_{dr}}{dt} \right) - \omega_{gl} \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \left(\frac{d\phi_{qr}}{dt} \right) + \omega_{gl} \phi_{dr} \end{cases} \quad (3.19)$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel, est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation.

Dans la suite de notre travail nous allons opter pour ce référentiel.

La figure (3.3) montre les différents référentiels qu'on a définis auparavant :

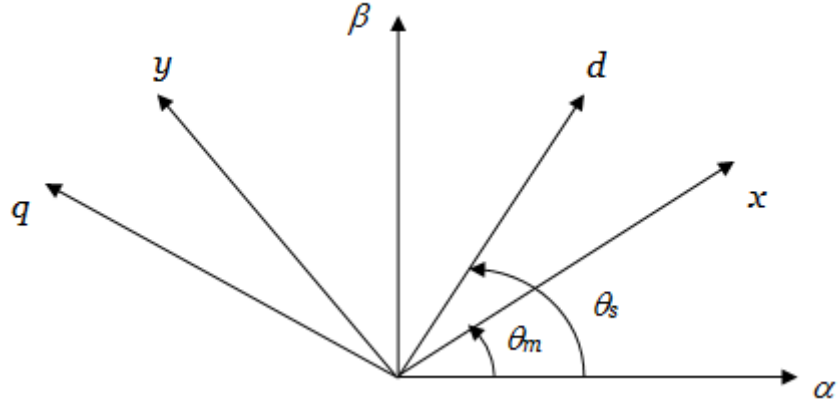


Fig 3.3 : Représentation des différents référentiels.

3.4.3. Équations des flux :

Les composantes de Park des flux statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (3.20)$$

Avec: $L_s = l_s - M_s$

$L_r = l_r - M_r$

$M = 3/2 M_{sr}$

En développant les flux en fonction des courants dans l'équation (3.19), on obtient les équations électriques de la machine asynchrone dans le repère d'axes d, q :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \left(\frac{d}{dt} \right) & -L_s \omega_s & M \left(\frac{d}{dt} \right) & -M \omega_s \\ L_s \omega_s & R_s + L_s \left(\frac{d}{dt} \right) & M \omega_s & M \left(\frac{d}{dt} \right) \\ M \left(\frac{d}{dt} \right) & -M \omega_{gl} & R_r + L_r \left(\frac{d}{dt} \right) & -L_r \omega_{gl} \\ M \omega_{gl} & M \left(\frac{d}{dt} \right) & L_r \omega_{gl} & R_r + L_r \left(\frac{d}{dt} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

3.4.4. Représentation d'état de PARK :

La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = f(x, u, t) \\ Y = g(x, u, t) \end{cases} \quad (3.22)$$

Avec :

X : Vecteur d'état.

U : Vecteur d'entrée.

Y : Vecteur de sortie.

Différentes possibilités sont offertes pour le choix du vecteur d'état. Parmi ces choix, nous citons :

$$\begin{aligned} X &= (\phi_{ds} \quad \phi_{qs} \quad i_{ds} \quad i_{qs})^t \\ X &= (i_{ds} \quad i_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr})^t \quad X = (\phi_{ds} \quad \phi_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr})^t \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$X = (i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr})^t$$

Dans notre étude, nous choisissons le vecteur d'état suivant :

$$X = (i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{dr} \quad i_{qr})^t \quad (3.24)$$

L'équation (3.21) peut s'écrire donc sous la forme suivante [41] :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (3.25)$$

Avec :

$$X = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma T_s} & \omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_m & \frac{M}{\sigma L_s T_r} & \frac{M}{\sigma L_s} \omega_m \\ -\left(\omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_m\right) & -\frac{1}{\sigma T_s} & -\frac{M}{\sigma L_s} \omega_m & \frac{M}{\sigma L_s T_r} \\ \frac{M}{\sigma L_r T_s} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega_m & -\frac{1}{\sigma T_r} & \omega_s - \frac{1}{\sigma} \omega_m \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega_m & \frac{M}{\sigma L_r T_s} & -\omega_s + \frac{1}{\sigma} \omega_m & -\frac{1}{\sigma T_r} \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{M}{L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{L_r} \end{bmatrix} \text{ et } U = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}$$

$$\text{où } \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$$

3.4.5. Couple électromagnétique:

Nous avons exprimé les équations de la machine mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. Il en résulte plusieurs expressions toutes égales (où p est le nombre de paires de pôles) en appliquant les différents flux statoriques et rotoriques.

$$C_e = (3/2)pM(i_{dr}i_{qs} - i_{ds}i_{qr}) \quad (3.26)$$

$$C_e = (3/2)p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr}i_{qs} - \phi_{qr}i_{ds}) \quad (3.27) \quad C_e = (3/2)p(\phi_{ds}i_{qs} - \phi_{qs}i_{ds}) \quad (3.28)$$

$$C_e = (3/2)p(\phi_{qr}i_{dr} - \phi_{dr}i_{qr}) \quad (3.29)$$

$$C_e = (3/2)p \frac{M}{\sigma L_s L_r} (\phi_{dr}\phi_{qs} - \phi_{ds}\phi_{qr}) \quad (3.30)$$

C'est la première expression que nous allons utiliser pour la modélisation de la machine asynchrone et la deuxième expression sera utilisée dans la commande vectorielle.

3.4.6. Equation mécanique:

La relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire:

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega \quad (3.31)$$

où C_e représente le couple moteur appliqué, C_r le couple résistant, J le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes et f le coefficient de frottement. On obtient ainsi la vitesse en appliquant la transformée de Laplace :

$$\Omega = \frac{C_e - C_r}{Js + f} \quad (3.32)$$

Où se représente la variable de Laplace.

Cette équation montre que le contrôle de la vitesse passe par le contrôle du couple.

3.5. Simulation et interprétations des résultats :

La figure (3.4) représente le modèle MATLAB/SIMULINK pour la simulation de la machine asynchrone triphasée. Ce modèle a été obtenu en appliquant les équations (3.13), (3.25, (3.26) et (3.32).

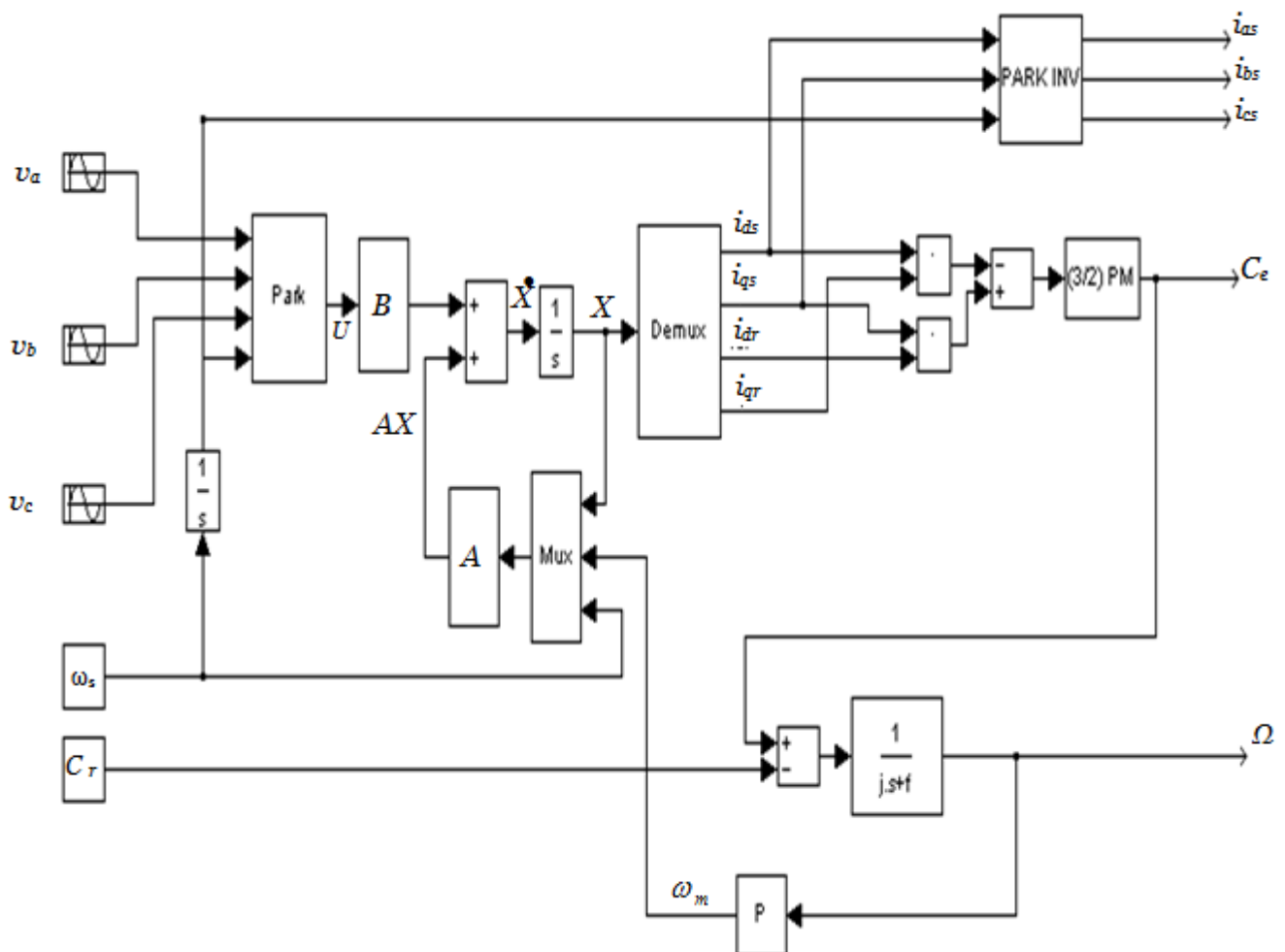


Fig.3.4. Modèle MATLAB/SIMULINK de la machine asynchrone.

Les résultats de simulation présentés à la figure (3.5) concernent donc une machine asynchrone triphasée. Cette figure détaille séparément l'évolution du courant statorique, du couple et de la vitesse pour un démarrage direct du moteur à vide, ensuite en charge.

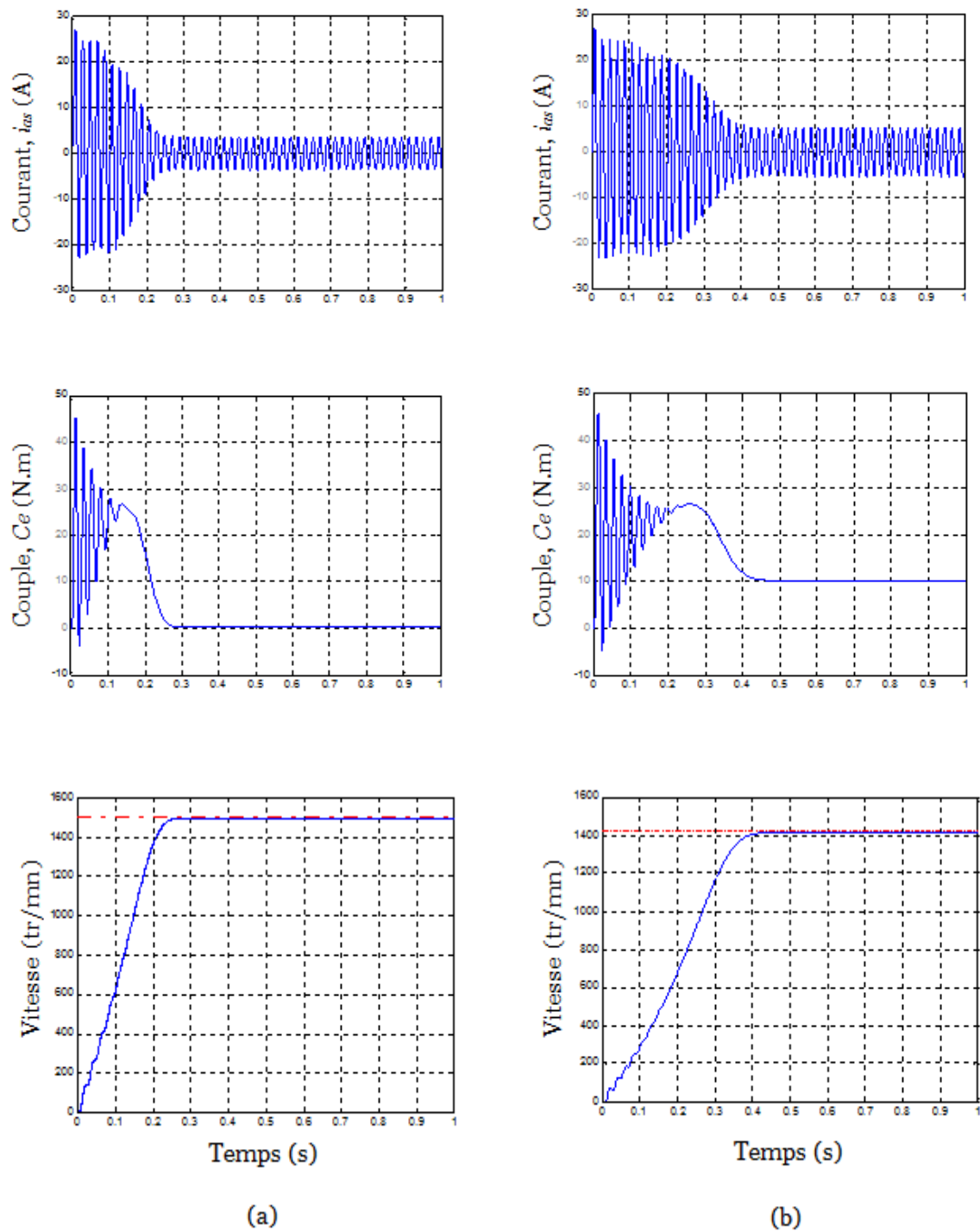


Fig 3.5. Démarrage direct du moteur asynchrone
a) à vide ; b) à charge (10N.m)

Lors du démarrage à vide, on constate d'emblée l'importance du courant statorique pouvant atteindre 5 à 7 fois le courant nominal. L'oscillation du couple est l'élément marquant de cette figure pendant le régime transitoire. Les oscillations du couple se font évidemment ressentir sur l'évolution de la vitesse qui oscille légèrement en régime transitoire avant de se stabiliser à environ 1500 tr/mn en régime permanent.

En démarrnant le moteur en pleine charge (10 N.m), le couple électromagnétique tend vers la valeur du couple résistant en régime permanent et l'amplitude du courant vers une valeur correspondante au courant nominal. Quant à la vitesse, on constate une chute de 6% qui est due à l'application de la charge.

3.6. Conclusion:

Ce travail présente la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. D'autres régimes de fonctionnement du moteur peuvent être facilement étudiés. On remarque également qu'il n'y a aucune oscillations au niveau du couple au régime permanent et cela est du bien entendu à la non utilisation de l'onduleur. Le moteur est démarré directement du réseau.

Chapitre 4

Simulation de l'onduleur trois-niveaux alimentant un MAS

4.1. Introduction

Un convertisseur multi niveau est un système électronique de puissance qui synthétise une tension de sortie souhaitée à partir de plusieurs niveaux de tensions continues en tant qu'entrées. Avec un nombre croissant de DC sources de tension, la forme d'onde de la tension de sortie du convertisseur se rapproche d'une forme d'onde presque sinusoïdale tout en utilisant un schéma de commutation de fréquence fondamentale. Le principal avantage des onduleurs multi niveaux réside dans leur faible tension de sortie qui se traduit par une qualité de sortie supérieure, des composantes harmoniques plus basses et des pertes de commutation plus faibles [42].

Les onduleurs à plusieurs niveaux ont également un intérêt dans le domaine des applications haute tension et haute puissance telles que les compresseurs, les broyeurs, les convoyeurs. La topologie de circuit de puissance la plus connue pour les convertisseurs multi niveaux repose sur l'onduleur multi niveau à diode de bouclage. La question clé dans la conception d'un onduleur multi niveau efficace est de s'assurer que la distorsion harmonique totale (THD) de la forme d'onde de la tension de sortie se situe dans des limites acceptables [43].

Pour les fréquences de commutations élevées, la stratégie MLI sinus triangle est la plus utilisée pour l'onduleur multi niveau, car elle est très simple et facile à implémenter. Dans ce chapitre, nous allons étudier et simuler différents niveaux d'onduleur à diode de bouclage avec comme charge moteur à induction, Ensuite, les résultats des simulations du système photovoltaïque seront discutés.

4.2 L'onduleur trois niveaux à diode de bouclage :

Dans les applications de fortes puissances, les onduleurs à trois niveaux sont plus adaptés par rapport aux onduleurs classiques, du fait que les tensions et courants de sortie présentent un taux d'harmoniques nettement plus faible [45].

Les onduleurs à diode de bouclage sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. L'énergie stockée à l'étage intermédiaire peut être réduite [45].

Figure (4.1) montre un bras d'un onduleur trois niveaux à diode de bouclage. Dans ce circuit, la tension du bus continu est divisée en trois niveaux par deux condensateurs de masse connectés en série, C_1 et C_2 . Le point milieu des deux condensateurs (o) peut être défini comme le point neutre. Chaque bras de l'onduleur est constitué de quatre paires (diode-transistor) en séries et deux diodes médianes permettant d'avoir le niveau zéro de la tension de sortie de l'onduleur. [44,46]. La tension de sortie V_{an} a trois états: $V_{dc} / 2$, 0 et $-V_{dc} / 2$.

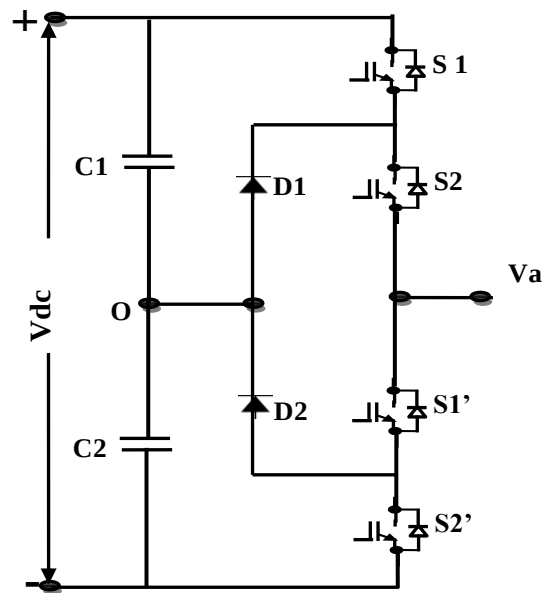


Fig. 4.1. Un bras (a) de l'onduleur trois niveaux à diode de bouclage.

4.2.2 Principe de fonctionnement :

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne (a) de la charge et le point neutre o. Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs S1, S2, S1' et S2' du bras.

Pour ce type d'onduleur, seules trois configurations sont fonctionnelles. Elles sont décrites comme suit:

Première configuration {1100}

S1, S2 sont passants et S1', S2' sont bloqués (figure 4.2). On a la valeur de la tension simple de sortie donnée comme suit :

$$V_{ao} = + V_{dc} / 2$$

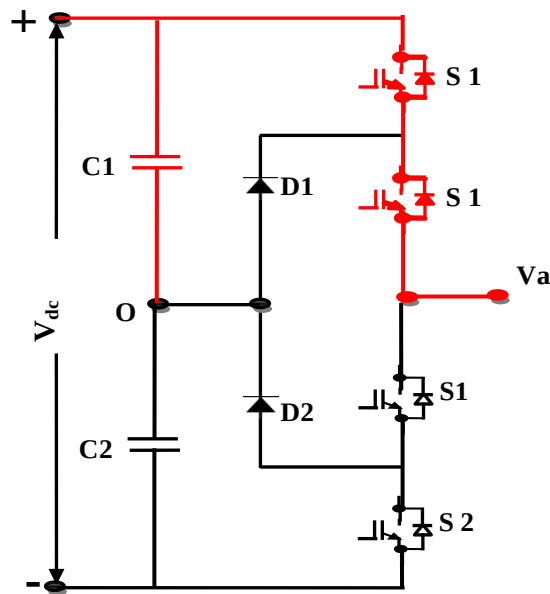


Fig.4.2. Première configuration du bras (a).

Deuxième configuration {0110}

S2, S1' sont passants et S1, S2' sont bloqués (figure 4.3). Le point a est relié directement au point neutre o. alors, la tension de sortie V_{ao} est nulle.

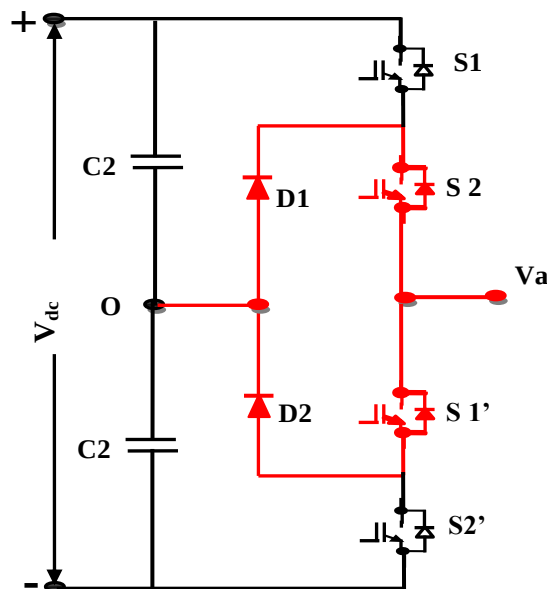


Fig. 4.3. Deuxième on figuration du bras (a).

Troisième configuration {0011}

S1', S2' sont passants et S1, S2 sont bloqués (figure 4.4). La tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -V_{dc} / 2$$

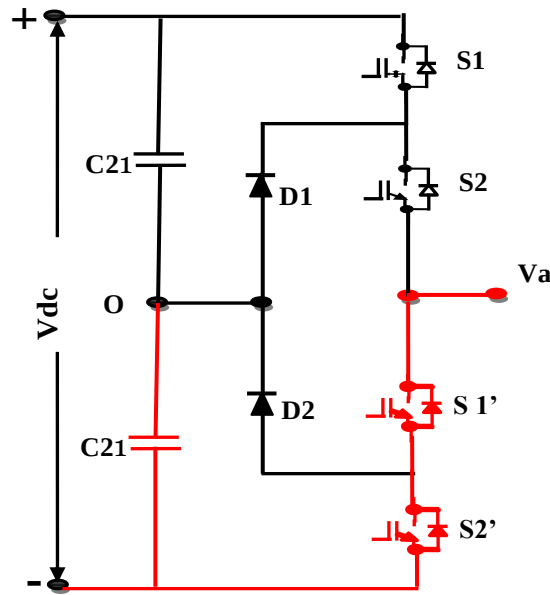


Fig. 4.4. Troisième configuration du bras (a).

Pour synthétiser une tension de phase à trois niveaux, la commutation des séquences sont données dans le tableau 4.1. La condition d'état 1 signifie l'activation et 0 la désactivation.

Tension V_{ao}	État de commutation			
	S1	S2	S1'	S2'
$+V_{dc}/2$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1

Tableau.4.1.Les états de commutation de bras de l'onduleur trois niveaux [47].

4.3. La modulation de largeur d'impulsion(MLI) :

La modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable[45].

L'essor de la modulation de largeur d'impulsion est lié aux progrès de développement des semi-conducteurs de puissance ; l'augmentation des nombres des commutations entrainerait des pertes excessives si on n'avait pas réussi à réduire les pertes à chacune des commutations.

La multiplication des nombres d'impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie offre la possibilité de moduler la forme de cette tension de manière à avoir la forme sinusoïdale que possible.

La modulation de largeur d'impulsion permet de repousser vers des fréquences, élevées les harmoniques de la tension de sortie; ce qui facilite le filtrage, la multiplication du nombre des impulsions, formant chacune des alternances d'une tension de sortie, faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie. Elle offre la possibilité de moduler la forme de cette tension et obtenir une forme d'onde approximant de la sinusoïde.

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de commander la tension de sortie de l'onduleur en amplitude et en fréquence à partir des signaux de commandes des interrupteurs de l'onduleur tout en limitant l'effet des harmoniques [48].

On distingue plusieurs types de techniques de modulation de largeur d'impulsion qui peuvent être considérées, dont on peut citer: la modulation sinus-triangle, la modulation en pleine onde, et la MLI vectorielle etc...

4.3.1. La modulation sinus-triangle

La MLI sinus triangle utilise le principe d'intersection entre un signal sinusoïdale de fréquence f_r , appelée référence et un signal triangulaire de haute fréquence f_p , appelée porteuse, pour déterminer les instants de commutation des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure (4.5). En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées de $(2\pi/3)$ à la même fréquence, [45].

Les équations présentées ci-dessous expriment les formes d'onde de référence [49].

$$U_{ra} = \sqrt{2} * E * \sin(\omega t)$$

$$U_{rb} = \sqrt{2} * E * \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (4.1)$$

$$U_{rc} = \sqrt{2} * E * \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

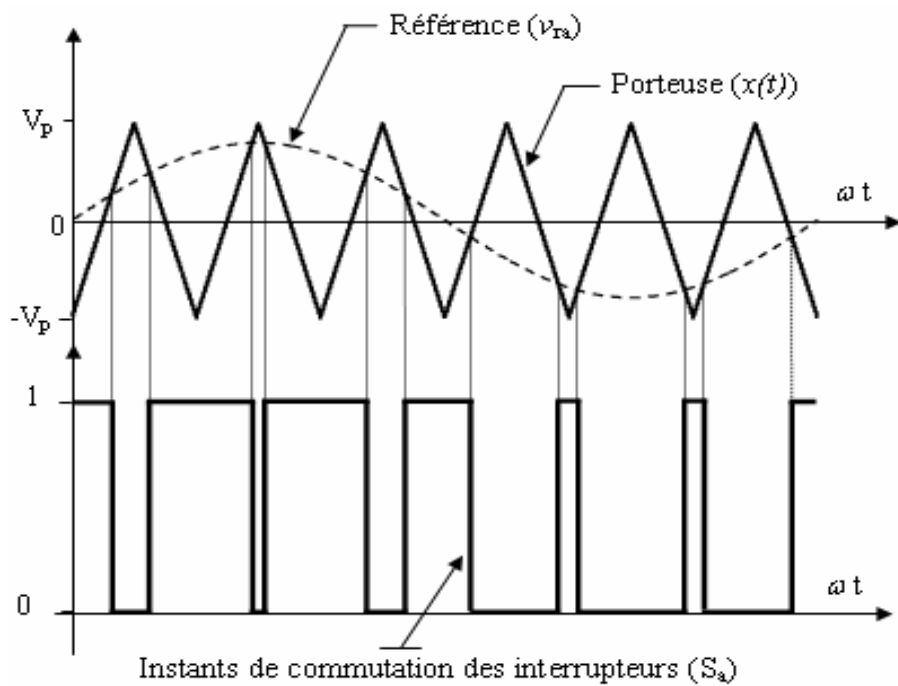


Fig.4.5 : Signal combiné porteuse, référence et leurs résultats [50].

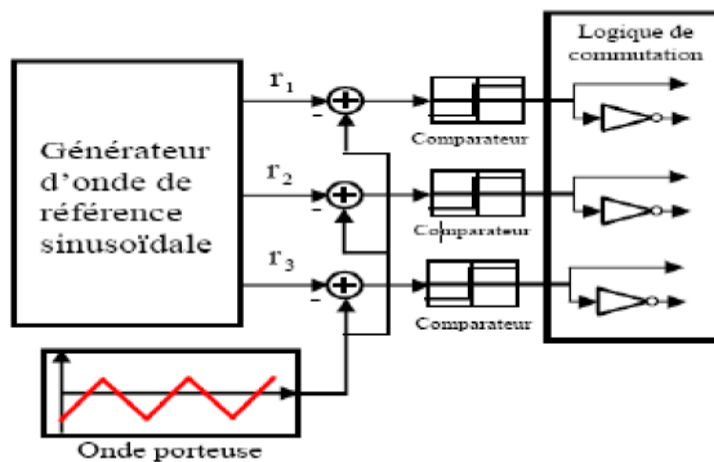


Fig.4.6. Principe de la MLI sinus-triangle.

Caractéristique de la modulation sinus-triangle

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la modulation :

Indice de modulation (m) : Il est égal au rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_r de la référence [45,50] :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (4.2)$$

f_p : Fréquence de modulation de la porteuse.

f_r : Fréquence de la référence (modulante).

On choisit généralement les valeurs de « m » supérieures à l'unité afin de déplacer les harmoniques vers les fréquences élevés.

Taux de modulation (r) : Il est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence V_r à celle de la porteuse V_p [50] :

$$r = \frac{V_r}{V_p} \quad (4.3)$$

Avec :

$$0 < r < 1$$

V_r : Amplitude de la référence.

V_p : Amplitude de la porteuse.

Taux de distorsion harmonique :

Le facteur de distorsion totale des harmoniques de la tension de sortie THD, est défini par le rapport de la somme quadratique des harmoniques de tension à la valeur de la somme quadratique du fondamental et des harmoniques de la tension [51].

$$THD = \frac{(\sum_{i=2}^n V_i^2)^{\frac{1}{2}}}{(\sum_{i=2}^n V_i^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (4.4)$$

4.4. Simulation de l'onduleur trois niveaux-MAS

L'onduleur triphasé à multi-niveaux à diode de bouclage alimenté par un système photovoltaïque a été simulé à l'aide Matlab _Sim power system. Ce système comprend le générateur photovoltaïque, le convertisseur élévateur de tension continu-continu. Le convertisseur CC est commandé par un signal de modulation de largeur d'impulsion avec une poursuite de point de puissance maximale (MPPT) basée sur la perturbation et observation.

Les signaux de commutation pour le convertisseur multi-niveaux à diode de bouclage sont commandés par la technique MLI sinus triangle (Dissipation en phase). Un moteur à induction a été utilisé comme une charge avec l'onduleur pour obtenir les résultats. La figure (4.7) montre le modèle pour le système complet utilisé dans la simulation.

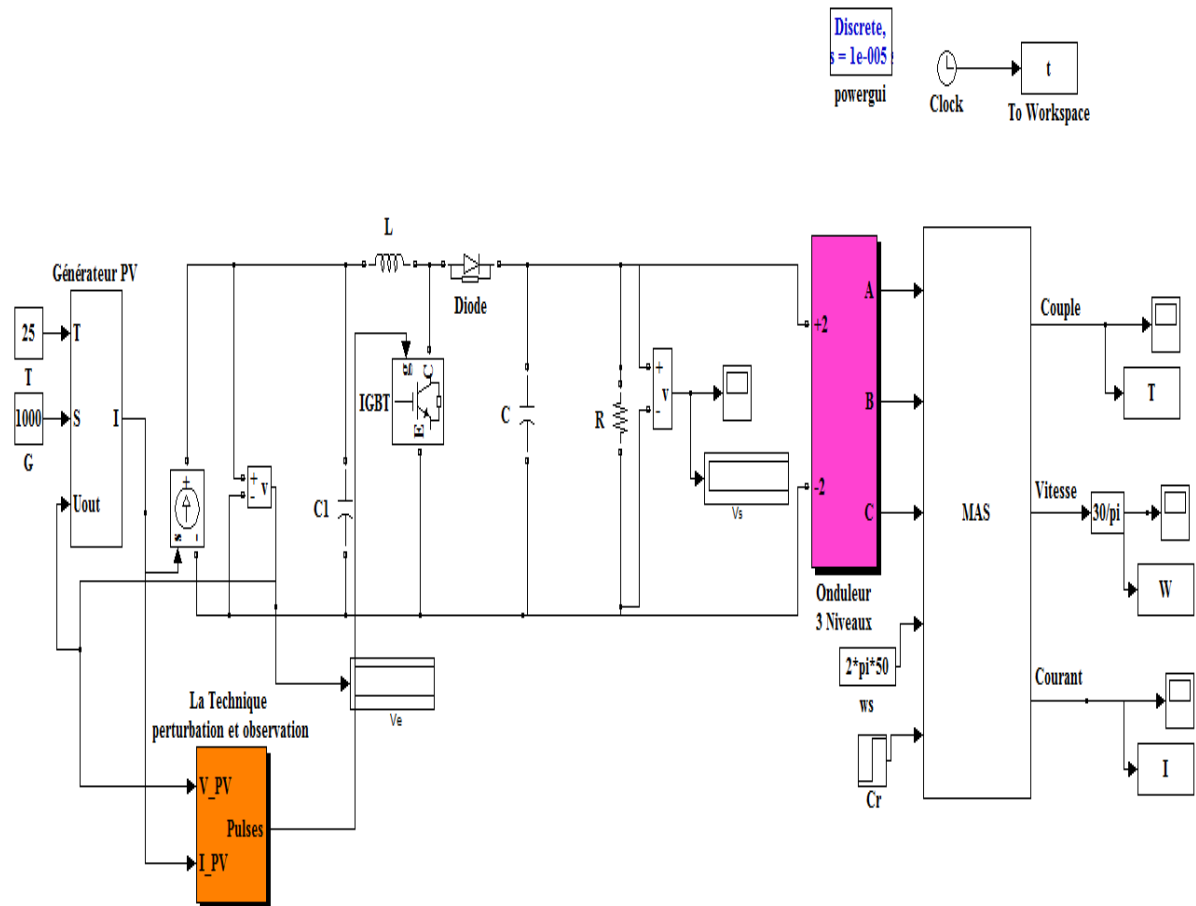


Fig. 4.7. Circuit de simulation.

Les tableaux (4.2), (4.3) et (4.4) donnent respectivement les caractéristiques électriques du panneau dans les conditions standards, les paramètres de l'onduleur à diode de bouclage et les paramètres du moteur à induction utilisés dans la simulation.

Puissance maximale	125W
Tension de circuit ouvert (V_{co})	21.6 V
Courant de court-circuit (I_{cc})	8.05A
Tension à la puissance maximale (V_m)	17.25 V
Courant à la puissance maximale (I_m)	7.25 A

Tableau .4.2. Caractéristiques électriques du panneau dans les conditions standards
<CST> T=25°C, G=1000W /m².

La fréquence de commutation	12 KHz
La fréquence fondamentale	50 Hz
Indice de modulation	0.98
La tension d'alimentation (V_{dc})	500 Volt

Tableau .4.3. Paramètres de l'onduleur trois niveaux.

Tension nominal U_n	220/380 V
Courant nominal I_n	6.4/3.7A
Puissance nominal P_n	1.5 Kw
Nombre de pôles p	4
Résistance du stator R_s	4.85 Ω
Résistance du rotor R_r	3.805 Ω
La fréquence f	50 Hz
Inductance du stator L_s	274 mH
Inductance du rotor L_s	274 mH
Inductance mutuelle L_m	258 mH
Coefficient de frottement f_r	0.00114 K.m ² /s
Inertie J	0.031 Kg.m ²

Tableau .4.4. Paramètres du moteur à induction.**4.4.1. Simulation de l'onduleur trois niveaux à diode de bouclage :**

Pour réaliser la simulation de l'onduleur de tension à trois niveaux à diode de bouclage commandé par la stratégie de commande MLI, on représente d'abord sa structure générale donnée par la figure (4.8) schématisée par un schéma bloc développé dans l'environnement MATLAB. Les figures (4.9) et (4.10) montrent respectivement le schéma bloc et la forme d'onde de la commande MLI sinusoïdale de l'onduleur à trois niveaux.

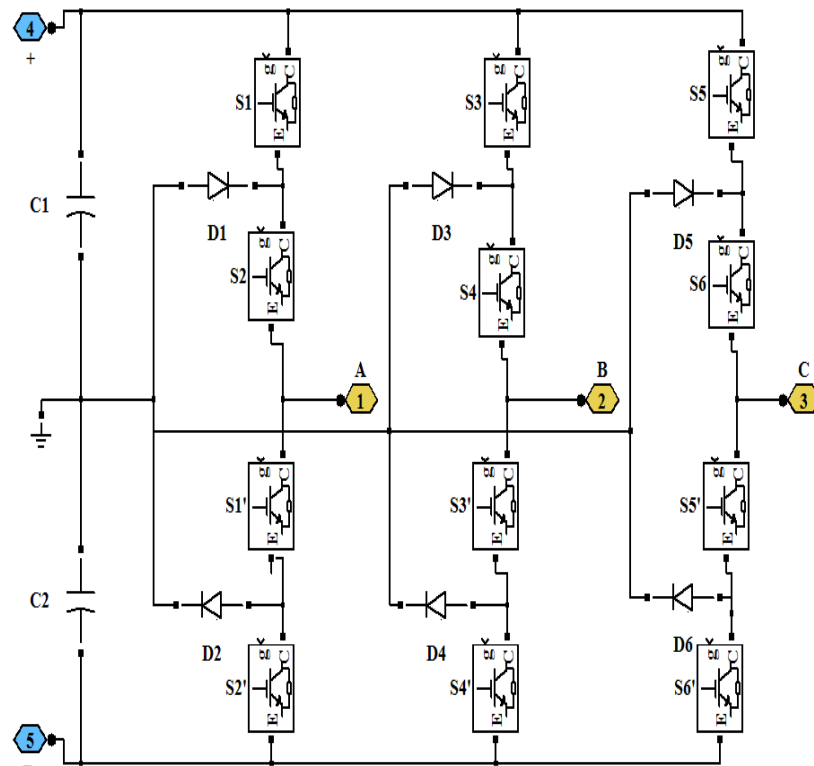


Fig. 4.8. Circuit de simulation d'un onduleur trois niveaux à diode de bouclage.

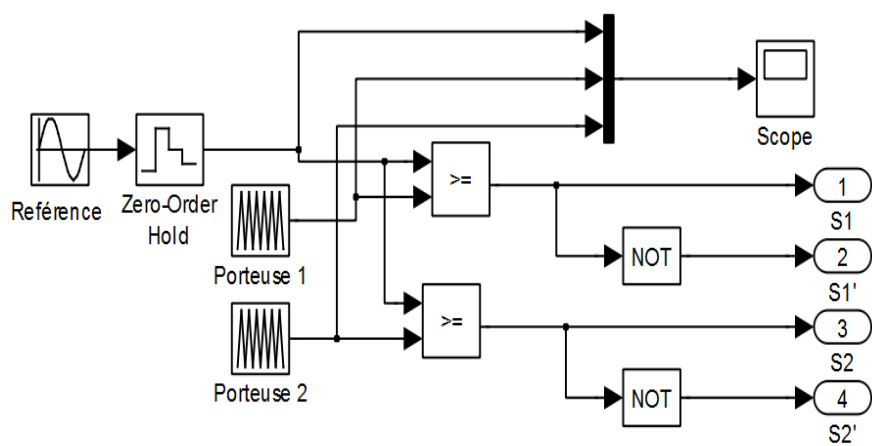


Fig. 4.9. Le schéma bloc de la commande MLI sinus-triangled'un onduleur trois niveaux du bras A.

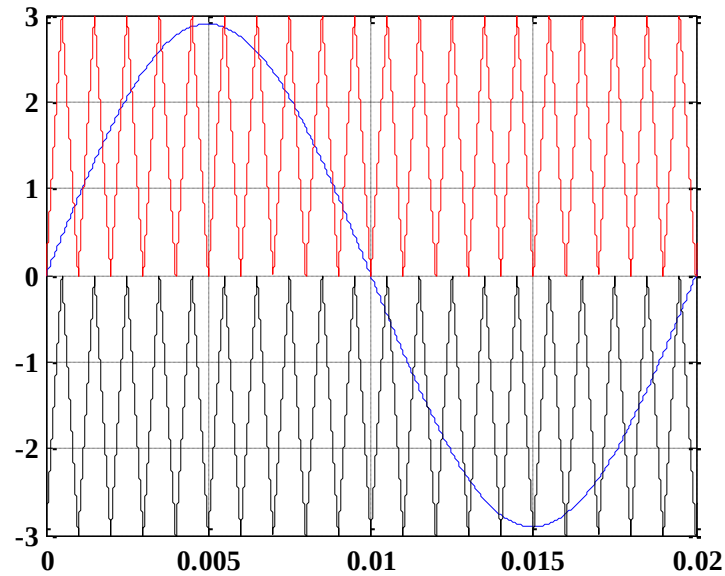


Fig. 4.10. Forme d'onde de la commande MLI sinusoïdale d'un onduleur trois niveaux.

4.4.1.1 Résultats obtenus

L'onduleur trois niveaux est alimenté par une source photovoltaïque dont la tension est V_{dc} . ($V_{dc}=500V$). Les capacités C1 et C2 assurent la répartition équitable de cette tension entre les bras de l'onduleur. Autrement dit, les bras supérieurs et inférieurs sont soumis à une tension $V_{dc}/2$ Chacun.

Les formes d'ondes respectivement du MAS et sorties de l'onduleur à trois niveaux sont illustrées à la figure suivante :

➤ **A vide :**

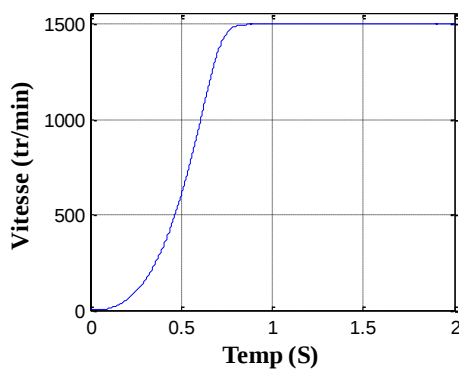


Fig.4.11. La vitesse du moteur.

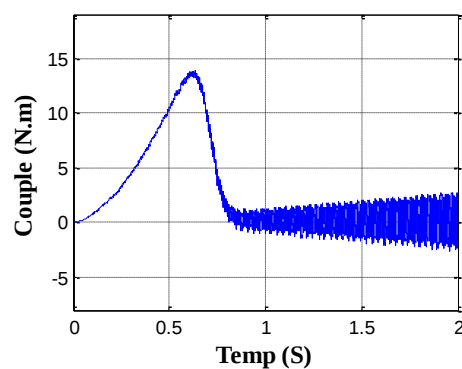


Fig.4.12. Le couple moteur

La figure (4.11) et la figure (4.12) représentent respectivement la vitesse et le couple du moteur à induction à vide. La vitesse atteint 1500 tr/mn au régime permanent à environ 0.75s tandis que le couple se stabilise à une valeur presque nulle après un couple important au démarrage.

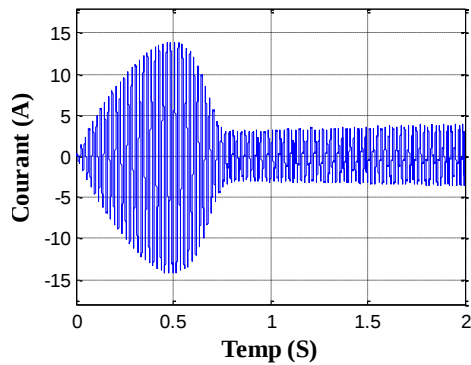


Fig.4.13. Le courant de sortie

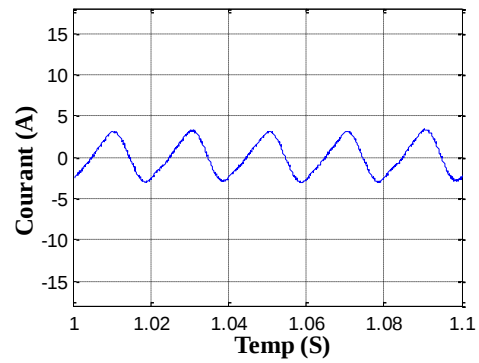


Fig.4.14. Le zoom du courant de sortie

On remarque d'après la figure (4.13) que La forme d'onde de courant est proche à la sinusoïde. La tension maximale de sortie de l'onduleur est 500v.

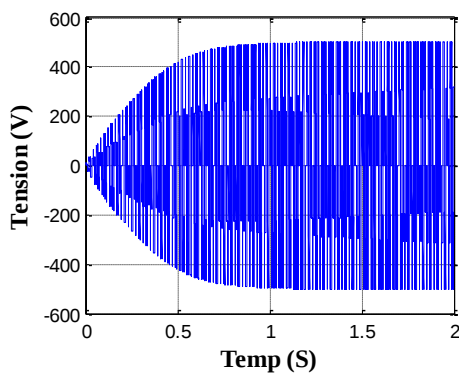


Fig.4.15. La tension de sortie

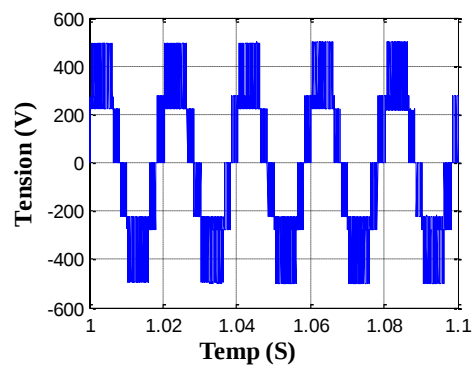
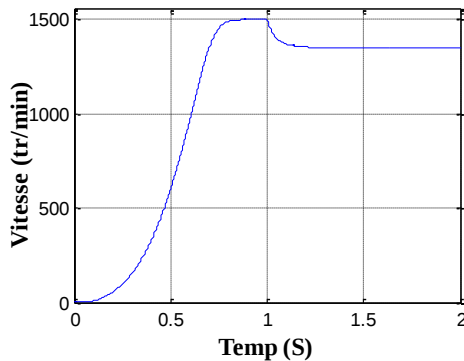
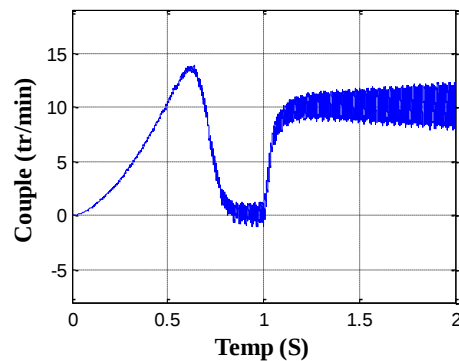
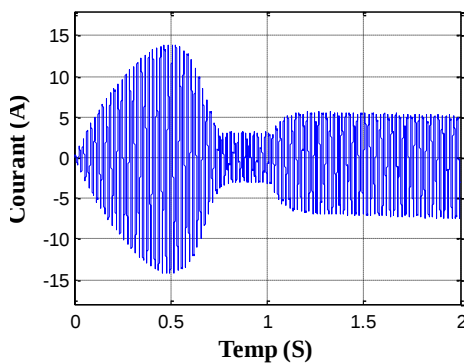
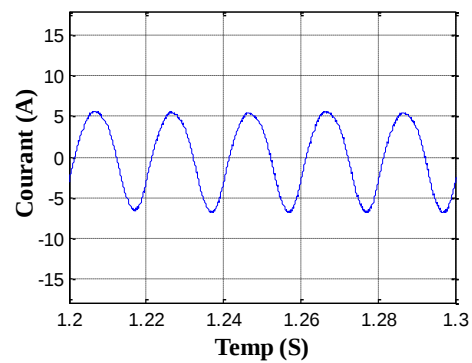


Fig.4.16. Le zoom de la tension de sortie.

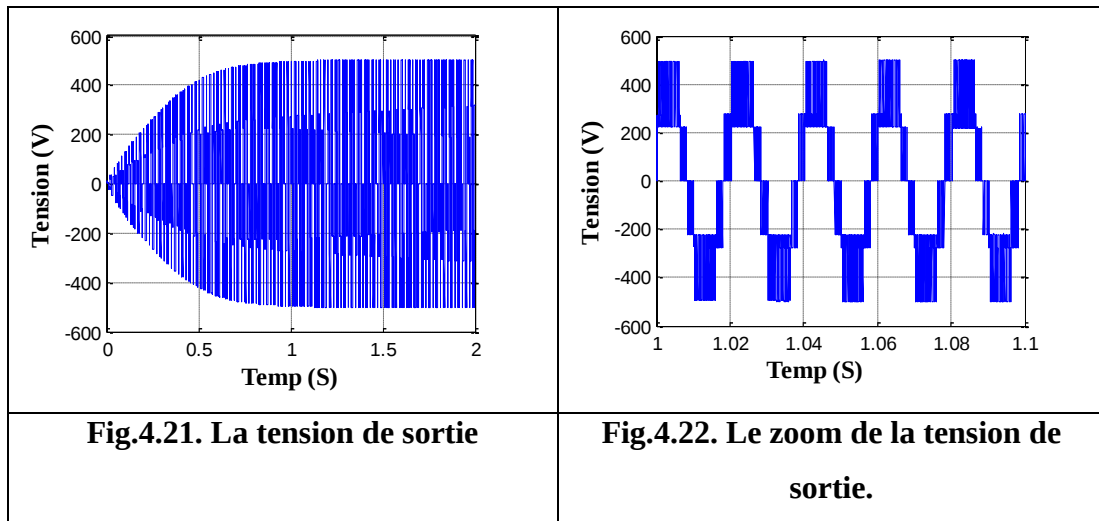
➤ En charge :**Cr=10 N.m****Fig.4.17 La vitesse du moteur****Fig.4.18 Le couple moteur**

Les figures (4.17) et (4.18) représentent respectivement la vitesse et le couple du moteur à induction. Le moteur a été démarré sans charge et à 1 s, une charge de 10 N.m a été appliquée. L'application de charge a entraîné une diminution de la vitesse, qui s'est stabilisée à environ 1400 tr / min et le couple s'est stabilisé à sa valeur nominale, 10 N.m.

**Fig.4.19 Le courant de sortie****Fig.4.20 Le zoom du courant de sortie**

Les figures (4.19) et (4.20) représentent la forme d'onde du courant et son spectre.

On remarque d'après cette figure que la forme d'onde du courant est presque sinusoidale et on constate également une augmentation de courant en régime permanent qui est égal à 5A.



Pas de changement de la forme de la tension dans la figure 4.21. Son zoom montre sa forme réelle qui est sous forme escalier.

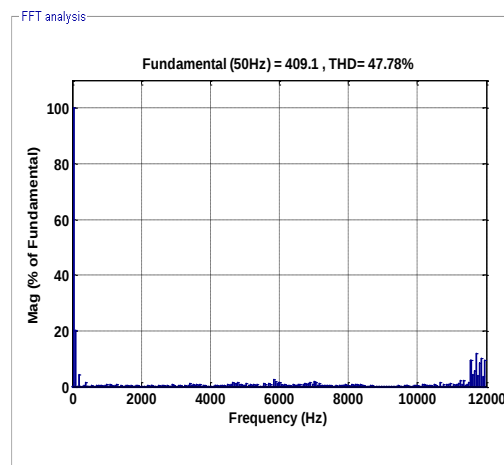


Figure.4.23. Spectre de la tension composée.

4.5. Conclusion

La commande de la vitesse du moteur asynchrone a été établie par le choix d'un onduleur trois niveaux alimentant ce moteur. Le générateur photovoltaïque fournit de la tension d'entrée au hacheur boost avec un rapport cyclique obtenu par une technique P&O pour une puissance maximale. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

Conclusion générale

Conclusion générale:

De nombreuses structures multi-niveaux ont été créées grâce à l'évolution de l'électronique de puissance. Depuis, de nombreuses structures sont apparues ayant des propriétés assez intéressantes, comme la topologie à diode de bouclage trois niveaux qui joue un rôle important sur la réduction du taux de distorsion harmonique.

Le module PV a été abordé dans le premier chapitre, en commençant par un aperçu historique de l'énergie photovoltaïque ainsi que le principe de la conversion photovoltaïque et les différents types des cellules photovoltaïques. La seconde partie du chapitre est consacrée à la modélisation d'une cellule photovoltaïque et les avantages et inconvénients du système photovoltaïque en général. La simulation a été effectuée pour différentes irradiances et températures en traçant le courant en fonction de la tension, ensuite la puissance en fonction de la tension. Les résultats obtenus montrent bien l'efficacité de ce générateur photovoltaïque.

Le convertisseur élévateur (boost), son fonctionnement et la technique de commande retenue en vue de poursuivre le point de puissance maximale du GPV sont abordés au deuxième chapitre. Le choix de la technique MPPT s'est basé sur la technique perturbe et observe. D'après les résultats, notre technique proposée a efficacement fonctionné.

La modélisation de la machine asynchrone a été abordée dans le chapitre trois. Cette modélisation est basée sur la théorie de Park, l'intérêt primordial de cette transformation est de simplifier le problème dans le modèle triphasé.

Les résultats obtenus par simulation montrent la validité du modèle de Park de la machine asynchrone. Un démarrage à vide ensuite à charge a été effectué et notre moteur a bien réagi vis à vis la vitesse, couple et courant.

Le quatrième chapitre décrit la simulation de l'onduleur 3 niveaux avec la stratégie de la commande MLI sinus-triangle. Le système complet de la simulation est composé du générateur PV ; le boost ; MPPT à base de l'algorithme P&O ; l'onduleur trois niveaux et enfin le moteur asynchrone.

D'après les résultats de simulations obtenues, nous avons remarqué que l'analyse harmonique du courant et de la tension montrent une meilleure qualité spectrale pour cet onduleur proposé.

Conclusion générale

Comme perspective, nous pouvons proposer la continuité du travail effectué avec l'introduction d'autres algorithmes et contrôleurs pour la poursuite de la puissance maximale ainsi que d'autres onduleurs multi niveaux pour améliorer davantage le THD du courant.

Bibliographiques

Bibliographiques :

- [1]: Antonio Luque, Steven Hegedus, 'Handbook of Photovoltaic Science and Engineering', ISBN 0-471-49196-9, 2003.
- [2] :Mekemeche abdelkader, 'Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes', Rapport de thèse de doctorat ,L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem,04/07/2017.
- [3]: Roger a. messenger jerry ventre , 'Photovoltaic Systems Engineering' ,second edition, This edition published in the Taylor & Francis e-Library, 2005.
- [4] :Paulescu, Marius, et al , 'Weather modeling and forecasting of PV systems operation', Springer Science & Business Media, 2012.
- [5]:L.M.Fraas,'Low- cost solar électrique power',springer international publishing Switzerland 2014.
- [6] : David réaux 'Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-SiH/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface', Rapport de thèse de doctorat, l'université paris-sud, le 30 juin 2017.
- [7] : Zegrar mansour,' Optimisation de l'association gpv- onduleur multi niveau',rapport de thèse de doctorat , Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2016 / 20 17.
- [8] : M. Angel Cid Pastor,' Conception et réalisation de modules photovoltaïques, , Rapport de thèse de doctorat , l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse,29 septembre 2006.
- [9] : Abderrezek mahfoud,'Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement, Rapport de thèse de doctorat ? L'université de Sétif 1, le 18/02/2015
- [10] : Mohamed An soumane Camara,' Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs', rapport de thèse de doctorat, l'université Paris Est Créteil, 4 juillet 2011.
- [11]: Sahin, Mustafa Ergin, and Halil İbrahim okumuş,'Physical structure, electrical design, mathematical modeling and simulation of solar cells and modules', Turkish Journal of Electromechanics and Energy 1.1 (2016).
- [12] : Omar ibrahimElmi,'Nouvelles structurez de cellules solaires à base de silicium : Texturation, passivation et association de réseaux de nanostructures métalliques avec une

couche Down-Conversion', rapport de thèse de doctorat, L'université de Lille 1, Le 30 Mars 2017.

[13]: Bagher, Askari Mohammad, Mirzaei Mahmoud AbadiVahid, and MirhabibiMohsen, 'Types of solar cells and application', American Journal of optics and Photonics 3.5 (2015): 94-113.

[14]: Bellia, Habbati, Ramdani Youcef, and Moulay Fatima, 'A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB', NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics 3.1 (2014): 53-61.

[15]: Celik, AliNaci, and Nasır Acikgoz, 'Modeling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four-and five-parameter models', Applied energy 84.1 (2007): 1-15

[16]: Manuel Godinho Rodrigues, Eduardo, et al, 'Simulation and Comparison of Mathematical Models of PV Cells with Growing Levels of Complexity', Energies 11.11 (2018): 2902.

[17]: Brahamiimen souhila épouse bousmaha, 'Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires', rapport de thèse de doctorat, l'université djillaliliabes de sidi-bel-abbes, En 2018.

[18]: Mohamed Arrouf, 'Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque', rapport de thèse de doctorat, L'université mentouri de Constantine, le 25/12/2007.

[19]: Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller et Bocar SadaSy, 'Le Pompage Photovoltaïque', Publ. en collab. avec : IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA, ISBN 2-89481-006-7.

[20]: Mohamed Djarallah, 'Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique', rapport de thèse de doctorat, l'université de Batna, le 16 / 01 / 2008.

[21]: Soltane Soltane belakehal, 'Conception et Commande des Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables', rapport de thèse de doctorat, l'université de Constantine, le 10/06/ 2010.

[22] Muhammad Harunur Rashid, "Power Electronics : Circuits, Devices and Applications", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 2004.

- [23] B.K. Bose, « Power Electronics and AC drives », Prentice-Hall, Inc. 1986, pp-402.
- [24] Séguier. G, Francis. L, and Philippe. D, 'Electronique de puissance'. Edition DUNOD.1999.
- [25] Masri. S, and Chan. P.W, 'Design and development of a dc-dc Boost converter with constant output voltage'. In Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), International Conference on (pp. 1-4).IEEE.2010.
- [26] Salas. V, Olias. E, Barrado. A, and Lazaro. A, 'Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems '.Solar energy materials and solar cells 90.11: 1555-1578. 2006.
- [27] Ayache. Z, Bendaoud. A, Slimani. H, Benazza. B, Miloudi. H, and Bentaallah. A, 'Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque par la logique floue'. International Conference on Electrical Networks (ICEN), Sidi Bel-Abbès. 2010.
- [28] Alsumiri. M. A, Jiang. L, and Tang. W. H , 'Maximum power point tracking controller for photovoltaic system using sliding mode control'. 7-3.2014. Bibliographie
- [29] Singh. S, Mathew. L, and Shimi. S. L, 'Design and simulation of intelligent control MPPT technique for PV module using MATLAB/SIMSCAPE'.Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng 2: 4554-4566.2013.
- [30] Abbas. H, Abid. H, Loukil. K, Toumi. A, and Abid. M, 'Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque'. Revue des Energies Renouvelables 17.3: 435-445.2014.
- [31] Tumma, A, and Balasu bramanian. V.G , 'Study on using maximum power point algorithms to improve the efficiency of solar energy storage for unmanned aerial vehicles'. International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication 1.8 2: 49-54.2013.
- [32] Cabal. C, ' Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque'. Rapport de thèse, université de Toulouse 3-Paul Sabatier. 2008.
- [33] Faranda. R, and Leva. S, 'Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems', WSEAS transactions on power systems 3.6: 446-455.2008.
- [34] Ngan. M. S, and Tan. C. W, 'A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC) (pp. 22-27). 2011.
- [35] Aouchiche. N, Cheikh. M. A, and Malek. A, 'Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation '.Revue des Energies Renouvelables 16.3: 485-498.2013.

- [36] Mekhloufi .M, Dris. K, and Salem. A, 'Optimisation de la production d'un GPV par différentes techniques MPPT'.L' université Ammar Teliji Laghouat .2009.
- [37] Muhammad Harunur Rashid," Power Electronics : Circuits, Devices an Applications", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 2004.
- [38] G. Grellet, G. Clerc, « Actionneurs Electriques (Principes – Modèles – commandes) », Edition Eyrolles, 1997.
- [39] B.K. Bose,« Power Electronics and AC drives», Prentice-Hall, Inc. 1986, pp-402.
- [40] B. Delmontey, «Contribution à la Commande des Moteurs Asynchrones de forte puissance »: 'Application au problème de traction ». Thèse de Doctorat, del INP LORAIN, 1995.
- [41] : J.P. Caron, J.P. Hautier, « Modélisation et commande de la MAS », Edition Technique,1995.
- [42] : Rodriguez, Jose, et al. "Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications." Proceedings of the IEEE 97.11 (2009): 1786-1817.
- [43] : Sagar uttam shinde, Vadira jacharya,'Performance comparison of three phase five level and seven level dcml', International journal of advanced research in electrical and electronics engineering ,volume: 2 issue: 2 08-apr-2014,issn_no: 2321-4775.
- [44] :Rodriguez, Jose, Jih-Sheng Lai, and Fang Zheng Peng,'Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications', IEEE Transactions on industrial electronics 49.4 (2002): 724-738.
- [45] : Berkoune, Karima,'Approche mathématique pour la modulation de largeur d'impulsion pour la conversion statique de l'énergie électrique: application aux onduleurs multiniveaux', Rapport de thèse doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2016.
- [46] : Serpa, Leonardo A,' Current control strategies for multilevel grid connected inverters'. ETH Zurich, 2007.
- [47] : Prafulla j. kale, Vandana deodhar-kulkarni, Shital bhad,' Modelling & simulation of five level diode clamped inverter for reduction of common mode voltage in induction motor drive', International journal of engineering research & technology (ijert), 2278-0181,2015
- [48] : Benaouda Omar Fethi,'la contribution du contrôle direct de couple d'une mas alimentée par des onduleurs multi-niveaux en appliquant l'intelligence artificielle (logique floue-réseau

de neurone)', rapport de thèse doctorat, université des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf , 2017.

[49] : Miloudi Abdallah,' Etude et conception de régulateurs robustes dans différentes stratégies de commandes d'un moteur asynchrone', rapport de thèse doctorat , université des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf.

[50] : Benzazah, Chirine, Mustapha Ait Lafkih, and Loubna Lazrak,'Etude comparative entre deux topologies d'onduleurs triphasés, classique à 2-niveaux et NPC à 3-niveaux avec deux différentes méthodes de commande MLI-ST et SWM',International Journal of Innovation and Applied Studies 9.2 (2014): 841-852.

[51] : Zegrar mansour,' Optimisation de l'association gpv- onduleur multi niveau', rapport de thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2016 / 20 17.