



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Intitulé du sujet

**Simulation d'un système photovoltaïque alimentant
une machine asynchrone**

Présenté par :

Guerraoui Imen

Maghraoui Mohamed El Habib

Soutenu le / / 2020 devant le jury composé de :

Président : Mr. Chaouch Abdellah

Université de Mostaganem

Examineur: Mr. Omari Hamza

Université de Mostaganem

Encadreur : Mr. Hadri Baghdad

Université de Mostaganem

Co-Encadreur :

Mr. Fatah Abdelkader

Université de Mostaganem

Année Universitaire 2019/2020

REMERCIEMENTS

Louange à Allah pour tous les bienfaits qu'il a mis à notre disposition, c'est lui qui nous a donné les forces morales et physiques et nous a guidés dans le chemin de la science.

Grâce à dieu nous avons pu compléter notre formation par ce modeste travail de mémoire de fin d'études qui, nous l'espérons, sera bénéfique à d'autres étudiants.

Nous tenons à remercier vivement nos encadreurs Mrs Hadri Baghdad et Fatah Abdelkader pour leur constante disponibilité à notre égard et pour leur précieuse aide, ce qui nous a permis de mener à bien ce travail.

Nous adressons toute notre gratitude aux membres du jury qui ont eu l'amabilité d'accepter de lire et de juger notre travail.

Nous remercions tous les enseignants de la Faculté des sciences et de la Technologie en général, et spécialement les enseignants du département de Génie Electrique qui ont contribué largement à notre formation.

Nous remercions d'autre part l'ensemble des étudiants de notre faculté et surtout nos camarades de promotion, avec lesquels nous avons passé cinq merveilleuses années.

A la fin, permettez-nous d'adresser nos sincères remerciements à tous nos amis, à nos proches et à toute personne qui nous a encouragé et cru en nous.

DEDICACES

De Maghraoui Mohamed El Habib

Je dédie ce travail :

En premier lieu à mes très chers parents à qui je ne rendrais jamais assez. Je leur témoigne ma profonde reconnaissance pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Je les remercie pour l'amour qu'ils ne cessent de me témoigner et pour le soutien indéfectible qu'ils m'ont apporté durant toutes mes études.

Que dieu les bénisse et les protège.

A mes sœurs

A mes tantes et mes oncles

A mes cousines et cousins

A tous mes amis

Et à tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

De Guerraoui Imen

Je dédie ce travail :

En premier lieu à ma très chère maman à qui je ne rendrais jamais assez. Tout naturellement, je pense à ma mère car c'est elle qui m'accompagne et qui me soutient tout le temps par ses aides et encouragements incessants pour l'élaboration de ce travail. Les derniers mots vont naturellement à ceux qui m'ont toujours bercé d'amour. Je tiens à leur exprimer ma gratitude et mes grands remerciements, je vous dois beaucoup mes chers parents.

A mes frères et à mes sœurs ainsi qu'à toutes les personnes qui me sont chères.

Sommaire

Sommaire

Liste des figures	I
Liste des tableaux	II
Liste des symboles et abréviations	III
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique	4
I.3 Energie solaire	5
I.4 Le rayonnement solaire.....	5
I.4.1 Le rayonnement direct.....	7
I. 4.2 Le rayonnement diffus.....	7
I.4.3 Le rayonnement réfléchi.....	7
I.5 L'ombrage.....	7
I.6 Le système photovoltaïque.....	8
I.6.1 Définition.....	8
I.7 Energie photovoltaïque.....	8
I.7.1 Définition.....	8
I.8 Les composants d'un système photovoltaïque	9
I.8.1 Les modules photovoltaïques.....	9
I.8.2 Stockage	10

I.8.3 Batterie	10
I.8.4 Régulateur	11
I.9 Types des systèmes PV	11
I.9.1 Systèmes autonomes (off grid).....	11
I.9.2 Systèmes raccordés au réseau (on grid).....	11
I.9.3 Systèmes hybrides	11
I.10 Types de raccordement des panneaux solaires.....	12
I.10.1 - Raccordement série.....	12
I.10.2- Raccordement parallèle	12
I.10.3- Raccordement mixte (série-parallèle).....	12
I.11 Effet photovoltaïque.....	12
I.12 Les panneaux photovoltaïques	12
I.13 Cellule photovoltaïque	13
I.14 Fabrication des cellules photovoltaïques	14
I.15 Principe de Fonctionnement d'une cellule solaire PV	14
I.16 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	15
I.17 Différents types de cellules photovoltaïques	16
I.17.1 Les cellules monocristallines	16
I.17.2 Les cellules poly-cristallines.....	17
I.17.3 Les cellules amorphes	17
I.17.4 Les cellules multi-jonctions	17

I.17.5 Les cellules organiques.....	17
I.18 Caractéristiques électriques d'une cellule PV.....	18
I.18.1. Caractéristiques courant / tension	18
I.18.2. Caractéristiques puissance / tension.....	19
I.18.3 l'Influence de l'éclairement.....	20
I.18.4. Influence de la température	21
I.19 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à 1 diode..	22
I.20 Le générateur photovoltaïque	24
I.21 Module (ou panneau) photovoltaïque	24
I.22 Champ photovoltaïque.....	25
I.23 Potentiel solaire en l'Algérie.....	26
I.24 Avantages du photovoltaïque	27
I.25 Inconvénients du photovoltaïque	28
I.26 Protection.....	28
Conclusion.....	29

Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC et la commande MPPT

II.1 Introduction.....	31
II.2 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	31
II.3 La technique de découpage.....	32
II.4 Rapport cyclique des impulsions de commande	33
II.5 Types de convertisseurs DC-DC	33

II.5.1 : Hacheur dévolteur	34
II.5.1.1 Modélisation d'un convertisseur dévolteur	34
II.5.2 : Hacheur survolteur.....	36
II.5.3 Hacheur dévolteur-survolteur.....	38
II.6 La commande MPPT	40
II.6.1 définition	40
II.6.2 Différents types de commandes MPPT.....	41
II.6.3 Les différents algorithmes de contrôle MPPT	42
II.6.3.1 Algorithme d'incrémentatation de la conductance.....	42
II.6.3.2 Méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	44
Conclusion.....	47

Chapitre III : Onduleur triphasé et Machine Asynchrone

III.1 Etude de l'onduleur de tension triphasé	48
III.1.1 introduction.....	48
III.1.2 Structure et éléments de base des onduleurs	48
III.1.3 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux de tensions et de sa commande MLI.....	50
III.1.4 Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	51
III.1.4.1. Commande MLI sinus – triangle	51
III.1.4.2. Onduleur de tension triphasé à commande 120°	54
III.2 La machine asynchrone.....	61

III.2.1 Introduction	61
III.2.2 Constitution de la machine asynchrone	62
III.2.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	64
III.2.4 Caractéristiques électromécaniques.....	64
III.2.4.1 Puissance nominale.....	64
III.2.4.2 Vitesse nominale.....	65
III.2.4.3 Intensité nominale.....	65
III.2.4.4 Facteur de puissance $\cos \varphi$ et rendement η.....	65
III.2.4.5 Le courant de démarrage.....	65
III.2.4.6 Le couple utile.....	66
III.2.4.7 La variation de la vitesse dans les MAS.....	67
III.2.4.7.1 Réglage par variation de tension.....	67
III.2.4.7.2 Réglage par action sur le glissement.....	67
III.2.4.7.3 Réglage par variation de la fréquence d'alimentation..	67
III.2.5 Types de démarrage de la machine asynchrone.....	67
III.2.6 Modélisation de la MAS.....	68
III.2.6.1 Hypothèses simplificatrices	68
III.2.6.2 Equations des tensions et des flux.....	68
III.2.6.3 Modèle de Park de la Machine Asynchrone.....	71
III.2.6.4 Transformation de Park.....	73
III.2.6.5 Choix du référentiel	75

Conclusion.....	77
-----------------	----

Chapitre IV : Modélisation, simulation et résultats

IV.1 Introduction	79
IV.2 simulation de la cellule solaire	79
IV.2.1 Résultats de simulation de la cellule solaire	80
IV.2.2 L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques de la cellule solaire.....	81
IV. 2.3 L'influence de la température de fonctionnement	82
IV.3 Simulations du convertisseur DC/DC	84
IV.4 Simulation de l'onduleur triphasé	87
IV.4 .1 Simulation de l'onduleur triphasé avec commande à 120°	87
IV.4 .2 Simulation de l'onduleur triphasé avec commande sinus- triangle.....	91
IV.5 Simulation du moteur asynchrone triphasé	96
IV.5.1 Simulation du moteur asynchrone triphasé avec couple résistant constant.....	97
IV.5.2 Simulation du moteur asynchrone triphasé avec couple résistant variable	102
IV.6 Schéma de simulation du système PV global.....	106
IV.6.1 Résultats de la simulation du système PV global dans le cas du moteur asynchrone avec couple de charge constant	107
IV.6.2 Résultats de la simulation du système PV global dans le cas du moteur asynchrone avec couple de charge variable	111

IV.7 Conclusion.....115

Conclusion générale

Références Bibliographiques

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Figure I.1 Mouvement de la terre	5
Figure I.2 Différentes positions du soleil durant la journée	6
Figure I.3 Les différents types de rayonnements solaires	7
Figure I.4 GPV partiellement ombragé par le passage d'un nuage.....	8
Figure I.5 Conversion Energie solaire en Energie électrique.....	9
Figure I.6 Structure d'un module photovoltaïque	10
Figure I.7 Module PV.....	10
Figure I.8 Types de raccordement	12
Figure I.9 Cellule photovoltaïque.....	14
Figure I.10 Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque.....	15
Figure I.11 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	16
Figure I.12 Types de cellules photovoltaïques	18
Figure I.13 Caractéristique I(V)	19
Figure I.14 Caractéristique P(V).....	19
Figure I.15 Caractéristique $I = f(U)$	20
Figure I.16 Caractéristique $P = f(U)$	20
Figure I.17 Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)	21
Figure I.18 Schéma équivalent de la cellule solaire à une diode.....	22
Figure I.19 Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque.....	24
Figure I.20 Cellule, module et champ photovoltaïque	25
Figure I.21 Deux chaînes de modules constituant un champ photovoltaïque	25
Figure I.22 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu. Période 1992-2002.....	27
Figure I.23 : Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée. Période 1992-2002.....	27

Liste des figures

Chapitre II : Etude des convertisseurs DC/DC et de la commande MPPT

Figure II.1 Schéma symbolique d'un convertisseur DC /DC.....	31
Figure II.2 Schéma de principe d'une alimentation à découpage	32
Figure II.3 Symbole du transistor MOSFET.....	32
Figure II.4 Temps de passage et de blocage d'un commutateur	33
Figure II.5 : Schéma de principe d'un hacheur dévolteur Buck.....	34
Figure II.6 Schémas équivalents du hacheur dévolteur avec commutateur : (a) fermé, (b) ouvert.....	35
Figure II.7 Schéma de principe d'un hacheur survolteur Boost.....	37
Figure II.8 Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) :K fermé, (b) :K ouvert.....	37
Figure II.9 Schéma de principe du convertisseur dévolteur-survolteur.....	39
Figure II.10 Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur.Avec commutateur (a) : K fermé, (b) : K ouvert.....	39
Figure II.11 Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (A) et la charge R_{CH} (B). Pf : Puissance à la sortie du GPV	41
Figure II.12 Signe de dP/dV pour différentes zones de fonctionnement.....	43
Figure II.13 Organigramme de la méthode Incrémentation de la Conductance.....	44
Figure II.14 Organigramme de la méthode P&O.....	46

Chapitre III : L'onduleur triphasé et la machine asynchrone

Figure III.1 Schéma d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux	49
Figure III.2 Période de commutation d'un interrupteur	49
Figure III.3 Principe de la MLIST.....	52
Figure III.4 MLIST (a) tension de référence sinus et porteuse triangle (b) Impulsions modulées obtenues.....	53
Figure III.5 Schéma simplifié d'un onduleur triphasé.....	54
Figure III.6 Séquence de conduction des interrupteurs pour la commande 120°	55
Figure III.7 Schéma électrique équivalent lorsque T_1 et T_6 conduisent (interrupteurs fermés)...	55

Liste des figures

Figure III.8 Schéma électrique équivalent lorsque T_1 et T_2 conduisent (interrupteurs fermés)...	56
Figure III.9 Schéma électrique équivalent lorsque T_3 et T_2 conduisent (interrupteurs fermés)...	57
Figure III.10 Schéma électrique équivalent lorsque T_3 et T_4 conduisent (interrupteurs fermés)...	57
Figure III.11 Schéma électrique équivalent lorsque T_5 et T_4 conduisent (interrupteurs fermés)...	58
Figure III.12 Schéma électrique équivalent lorsque T_5 et T_6 conduisent (interrupteurs fermés)...	59
Figure III.13 Tensions simples et tensions composées à la sortie de l'onduleur triphasé pour une commande à 120°	60
Figure III.14 Constitution de la machine asynchrone	62
Figure III.15 Types de stators avec les 3 enroulements	62
Figure III.16 Le rotor, a, b) à cage d'écureuil, c) bobiné	64
Figure II.17 Évolution du courant de démarrage d'un moteur asynchrone triphasé.....	66
Figure III.18 Courbe typique du couple en fonction de la vitesse pour moteur asynchrone triphasé de 1 KW.....	67
Figure III.19 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.....	69
Figure III.20 Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée et biphasée équivalente obtenue par transformation de Park.....	72
Figure III.21 Le modèle simplifié de la machine après la transformation de Park.....	72
Figure III.22 Représentation des axes de la machine et des axes de Park.....	73

Chapitre IV : Modélisation simulation et résultats

Figure IV.1 Schéma de simulation d'une cellule solaire	79
Figure IV.2 Caractéristique I-V dans les conditions standards.....	80
Figure IV.3 Caractéristique P-V dans les conditions standards.....	80
Figure IV.4 Caractéristiques I-V de la cellule avec variation de l'irradiation à température constante.	81
Figure IV.5 Caractéristiques P-V de la cellule avec variation de l'irradiation à température constante	82
Figure IV.6 Caractéristiques I-V de la cellule avec variation de la température et irradiation	

Liste des figures

constante	83
Figure IV.7 Caractéristiques P-V de la cellule avec variation de la température et irradiation constante	83
Figure IV.8 Schéma de simulation d'un convertisseur DC/DC de type Buck-Boost avec boucle de régulation PID	85
Figure IV.9 Tensions V_e et V_s en régime abaisseur	85
Figure IV.10 Tensions V_e et V_s en régime élévateur.....	86
Figure IV.11 Schéma de simulation de l'onduleur triphasé avec commande à 120°	88
Figure IV.12 Graphe des tensions triphasées entre phases $U_{abc}(t)$ avant filtrage.....	88
Figure IV.13 Graphe des tensions triphasées entre phase et neutre $V_{abc}(t)$ avant filtrage.....	89
Figure IV.14 Graphe des tensions triphasées $U_{abc}(t)$ après filtrage.....	89
Figure IV.15 Graphe des tensions triphasées $V_{abc}(t)$ après filtrage.....	90
Figure IV.16 Graphe des courants triphasés $I_{abc}(t)$ après filtrage.....	90
Figure IV.17 Les tensions $V_{abc}(t)$ vues à l'oscilloscope.....	91
Figure IV.18 Les courants $I_{abc}(t)$ vus à l'oscilloscope.....	91
Figure IV.19 Schéma de simulation de l'onduleur triphasé avec commande sinus-triangle.....	92
Figure IV.20 Graphe des tensions triphasées entre phases $U_{abc}(t)$ avant filtrage.....	93
Figure IV.21 Graphe des tensions triphasées entre phase et neutre $V_{abc}(t)$ avant filtrage.....	94
Figure IV.22 Graphe des tensions triphasées U_{abc} filtrage.....	94
Figure IV.23 Graphe des tensions triphasées $V_{abc}(t)$ après filtrage.....	95
Figure IV.24 Graphe des courants triphasés $I_{abc}(t)$ après filtrage.....	95
Figure IV.25 Schéma de simulation du Moteur Asynchrone Triphasé avec couple constant...	98
Figure IV.26 Caractéristique de la vitesse du moteur avec couple constant.....	99
Figure IV.27 Courant moyen absorbé par le moteur pour un couple de $0.5C_n$	100
Figure IV.28 Puissance active moyenne absorbée par le moteur pour un couple de $0.5C_n$	101
Figure IV.29 Valeur moyenne de la puissance active absorbée par le moteur en régime permanent et	

Liste des figures

pour un couple de $0.5C_n$	101
Figure IV.30 Schéma de simulation du Moteur Asynchrone Triphasé avec couple de charge variable.....	102
Figure IV.31 Variation du couple utile de charge en fonction du temps.....	103
Figure IV.32 Caractéristique de la vitesse du moteur avec couple de charge variable.....	103
Figure IV.33 Courant absorbé par le moteur pour un couple de charge variable.....	104
Figure IV.34 Variations du courant en ligne et de la tension de phase pour un couple de charge variable.....	105
Figure IV.35 Puissance active absorbée par le moteur pour un couple de charge variable.....	105
Figure IV.36 Schéma de simulation du système PV global.....	107
Figure IV.37 Caractéristique de la vitesse du moteur avec couple de charge constant.....	108
Figure IV.38 Valeur moyenne de la vitesse du moteur avec couple de charge constant.....	108
Figure IV.39 Courant absorbé par le moteur pour un couple de charge C_n	109
Figure IV.40 Puissance active absorbée par le moteur pour un couple de charge C_n	110
Figure IV.41 Variations des tensions de phases et des courants en lignes pour un couple de charge C_n	110
Figure IV.42 Caractéristique de la vitesse du moteur avec couple de charge variable.....	112
Figure IV.43 En rouge le profil de la vitesse moyenne du moteur pour chaque valeur du couple de charge.....	112
Figure IV.44 Courant absorbé par le moteur pour un couple de charge variable.....	113
Figure IV.45 En rouge le profil du courant moyen absorbé par le moteur pour chaque valeur du couple de charge.....	114
Figure IV.46 Variations des courants en ligne absorbés par le moteur pour un couple de charge variable.....	114
Figure IV.47 Puissance active absorbée par le moteur pour un couple de charge variable.....	115

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1 Potentiel solaire en Algérie27

Chapitre III :

Tableau III.1 Nombre de paires de pôles et vitesse de synchronisme.....63

Chapitre IV :

Tableau IV.1 Paramètres du convertisseur DC/DC.....84

Tableau IV.2 Paramètres de l'onduleur triphasé.....87

Tableau IV.3 Paramètres de l'onduleur triphasé.....92

Tableau IV.4 Paramètres du moteur triphasé.....96

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et abréviations

MLI	modulation de largeur d'impulsion.
DC-AC	direct current- alternative current
DC-DC	direct current- direct current
PID	proportionnel intégral derivate (Controller)
PV :	photovoltaïque
GPV	générateur photovoltaïque
P_M	puissance maximale
FF	Facteur de forme
AM	Air mass
D	diode de roue libre
MPPT	Maximum Power Point Tracking
T_{amb}	Température ambiante (25°C)
T_c	Température de la cellule
R_p	Résistances parallèle shunt
P_m	La puissance maximale produite (PV)
V_m	Tension qui correspond à la puissance maximale
I_m	Courant qui correspond à la puissance maximale
I_{cc}	Courant de court-circuit (A)
V_{co}	Tension en circuit ouvert
N_p	Nombre de modules en parallèle (dans le panneau)
N_s	Nombre de cellules en série dans le module
I_{ph}	Photo-courant
a, b, c	Indices correspondants aux trois phases a, b, c.
d, q	Axes correspondants au référentiel lié au champ tournant.
Θ	Angles électriques statorique et rotoriques.
α, β	Axes correspondants au référentiel fixe par rapport au stator.
L_s	Inductances cycliques statorique.
M	Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.
M_s	Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du stator.

Liste des symboles et abréviations

M_r	Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du rotor.
R_s, R_r	Résistances d'enroulement statorique , rotorique par phase.
l_s, l_r	Inductances d'enroulement statorique , rotorique par phase.
p	Nombre de paire de pôles moteur asynchrone.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_e^*	Couple de référence.
C_u, C_r	Couple utile, couple résistant.
Ω	Pulsation électriques statorique et rotoriques.
Φ_s	Flux statorique
Φ_r	Flux rotorique
U_{abc}	Système de tensions composées (phase-phase)
V_{abc}	Système de tensions simples (phase-neutre)
V_{ao}, V_{bo}, V_{co}	Tensions phase-point milieu (fictif)
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Tensions phase-neutre
V_{dc}	Tension de source continue
S_a, S_b, S_c	Etats des interrupteurs de l'onduleur
M	L'indice de modulation

Introduction générale

Introduction générale

Les besoins énergétiques des pays industrialisés et des pays en voie de développement ne cessent d'augmenter d'une année à l'autre ce qui nécessite une production de plus en plus importante. Certaines études ont montré que la production d'énergie a triplé depuis les années 60 à nos jours. Hors, comme nous le savons, la majeure partie de la production mondiale d'énergie provient de sources fossiles (hydrocarbures et gaz naturel). La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre (CO_2) et contribue par conséquent à une augmentation de la pollution atmosphérique et à celle de l'environnement par le biais des déchets. En plus un excès de consommation énergétique conduira à un épuisement des ressources naturelles et par conséquent mettra en danger les générations futures. Pour éviter un tel scénario et surtout pour réduire les effets néfastes d'une pollution plus ou moins généralisée de notre planète il s'avère nécessaire de trouver des solutions énergétiques de remplacements assez propres et surtout durables.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies traditionnelles. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

L'énergie photovoltaïque connaît une progression rapide en raison de son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. En effet, selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) plus de 22 GW ont été produite en 2010 contre 0.4 GW en 1998, soit une augmentation de 5500%. Cependant, le rendement de la conversion photovoltaïque reste relativement faible. Ceci conduit à l'utilisation et à la mise en œuvre de techniques permettant d'optimiser le profit de cette technologie en tirant le maximum de la puissance pouvant être produite.

Selon les statistiques actuelles, les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules connectés en série ou parallèle (chaque module étant lui-même composé d'un ensemble de cellules photoélectriques) et d'un ensemble de composants électroniques qui permettent d'adapter l'électricité produite par les modules aux spécifications des appareils récepteurs.

L'objectif de notre travail de fin d'études est de procéder à la modélisation et à la simulation du système d'alimentation d'un moteur asynchrone par le biais d'un champ photovoltaïque.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, on procèdera à des généralités sur les générateurs photovoltaïques. On présentera le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photoélectrique et ses paramètres.

Dans le deuxième chapitre, on étudiera quelques types de convertisseurs DC/DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques et on décrira la commande MPPT appliquée aux convertisseurs DC/DC.

Dans le chapitre trois, on présentera les différentes parties du circuit de puissance, l'onduleur triphasé, la commande MLI et la machine asynchrone triphasée.

Enfin dans le quatrième chapitre, on présentera les schémas de modélisation et les résultats de simulation par MATLAB-SIMULINK de chaque élément du système PV.

On terminera ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1: Introduction

L'énergie fournie par le soleil à la terre est énorme, elle est sous forme de radiations lumineuses et elle est estimée à 10.000 fois l'énergie nécessaire. Mais la forme sous laquelle nous la recevons ne permet pas une utilisation directe par l'homme. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion de plus en plus performants et il se trouve que les cellules solaires photovoltaïques peuvent offrir cette possibilité même si leur rendement reste assez médiocre [1]. Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée. [2]

L'énergie photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique qui permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement lumineux. Cette conversion de la lumière en électricité se fait grâce à des cellules solaires et peut représenter une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins plus ou moins limités. Le développement dans le domaine des semi-conducteurs et plus spécialement celui de l'électronique de puissance a donné lieu à une activité de recherche très importante afin d'améliorer et de maximiser l'efficacité des modules photovoltaïques.

On peut considérer cette forme d'énergie comme étant propre puisque sa production énergétique à partir des modules PV n'engendre pas de déchets impliquant la pollution à la terre. Cette ressource présente toutefois deux inconvénients à savoir, la production dépend des conditions climatiques et comme le rendement des modules PV reste relativement faible, une surface considérable est nécessaire pour produire de grandes quantités d'énergie.

Dans ce chapitre nous détaillons les éléments ayant trait à cette ressource et à sa transformation en énergie électrique dans le but d'alimenter une machine asynchrone triphasée.

I.2 Historique

En 1873, l'ingénieur américain "Willoughby Smith" découvre les propriétés photosensibles du sélénium.

En 1877, "W.G.Adam" et "R.E.Day" expliquent l'effet photovoltaïque du sélénium.

En 1883, "Charles Frits" construit la première cellule en sélénium et or. Elle atteint un rendement d'environ 1%.

En 1905, "Albert Einstein" publie sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. Cet article lui vaudra le prix Nobel de physique en 1922.

L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1939 par le savant français Antoine Becquerel qui a constaté que certains matériaux pouvaient produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière.[3]

En 1954, les chercheurs américains Gerald Pearson, Darry Chapin et Calvin Fuller travaillant pour les laboratoires Bell mettent au point une cellule PV au silicium.

Les premières applications ont eu lieu dans les années 60 pour alimenter les satellites spatiaux. En effet, les américains lancent en 1954 le satellite Vanguard celui-ci étant alimenté par des piles photovoltaïques ayant un rendement de 9%. Puis à partir de 1970, l'utilisation terrestre est pratiquée sur des sites isolés. Dans les années 1980, on assiste à la mise en place des premières centrales photovoltaïques. [2]

I.3 Energie solaire :

Le soleil est une étoile située à environ 150 millions de km de la terre, son diamètre est 100 plus grand que celui de notre planète. Composé principalement d'hydrogène et d'hélium il est le siège de réactions thermonucléaires perpétuelles qui donnent lieu à d'intenses rayonnements électromagnétiques émis dans tout l'espace [4].

La terre décrit son mouvement autour du soleil (fig. I.1) dans un plan dit "plan de l'écliptique" tout en tournant sur elle même, selon un axe incliné de $23^{\circ}27'$ sur le plan de l'écliptique.

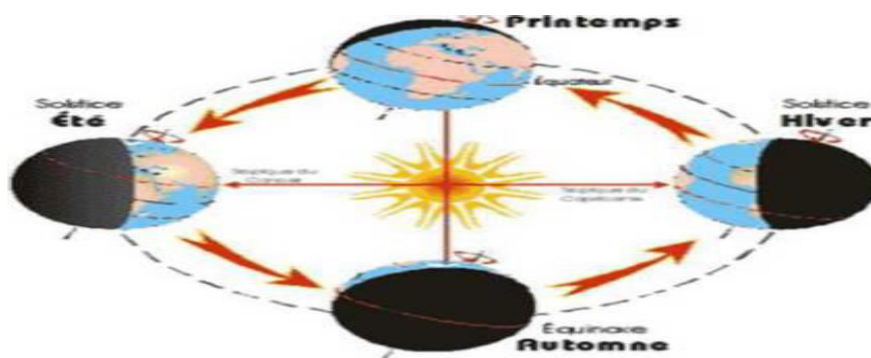


Figure I.1 Mouvement de la terre.

I.4 le Rayonnement solaire :

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de cette énergie

solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce qu'on appelle la constante solaire elle est égale à 1367 W/m^2 [5].

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

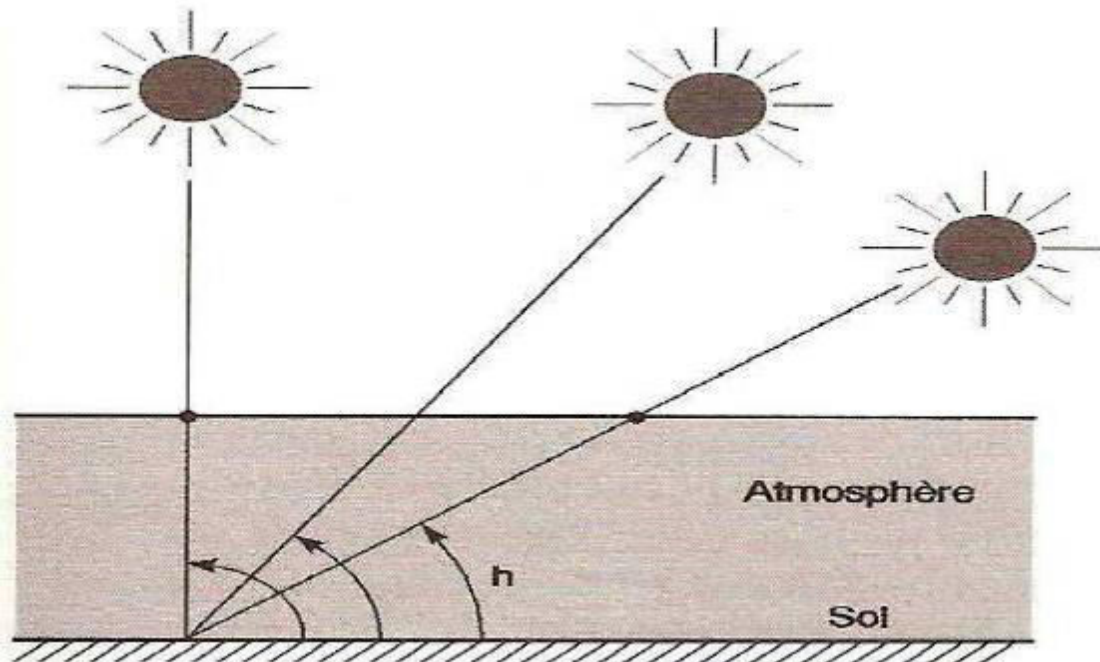


Figure I.2 Différentes positions du soleil durant la journée.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit comme étant le rayonnement de la masse d'air "1" (AM1).

Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel (fig. I.2), la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, et perd plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 [6].

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

La valeur "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant le rayonnement direct et le rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

I.4.1 Le rayonnement direct

Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de modification (sans diffusion par l'atmosphère). Les rayons restent parallèles entre eux.

I. 4.2 Le rayonnement diffus

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de répartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions.

I.4.3 Le rayonnement réfléchi

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée.

Le rayonnement global est la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure suivante (fig. I.3) [7].

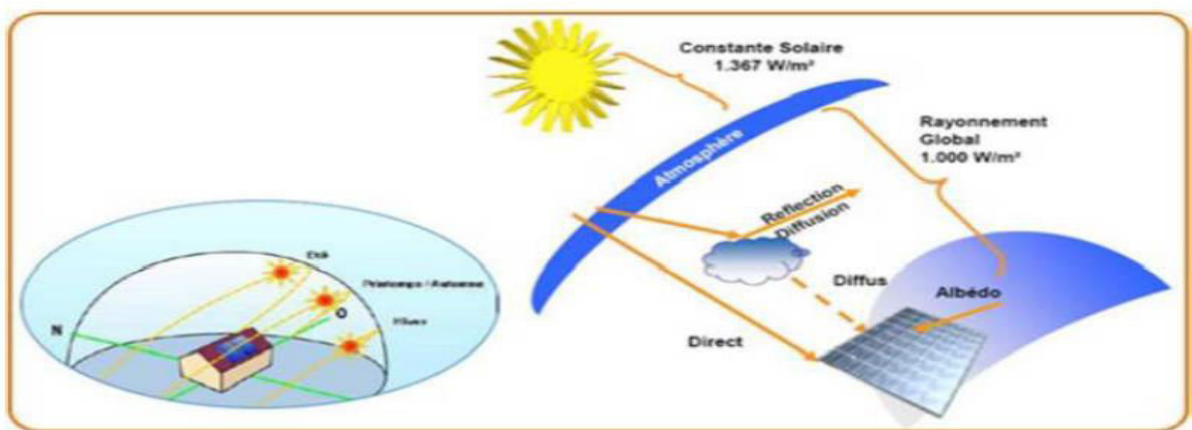


Figure I.3 Les différents types de rayonnements solaires.

I.5 L'ombrage :

Il se peut qu'un obstacle naturel (murs, bâtiments, arbres ...) ou climatique (nuages) (fig. I.4) crée un effet d'ombrage sur les panneaux PV et les prive ainsi d'une partie du rayonnement solaire. Cet ombrage sur les capteurs photovoltaïques entraîne une perte de production d'énergie. Cette perte de production varie en fonction de la taille et de la densité des obstacles, il devient nécessaire de mieux quantifier l'importance de la perte avant d'entreprendre la mise en place d'une nouvelle installation photovoltaïque.

On peut distinguer deux types d'ombrages : l'ombrage partiel et l'ombrage totale.

L'ombrage est total lorsque le panneau PV est entièrement couvert par l'obstacle (couverture, mur, bâtiment, branches cassées et feuillage, saletés de toute nature, poussière, sable,...) qui empêche le passage des rayons, par contre l'ombrage partiel laisse passer en partie les rayons du soleil.

Il faut savoir que les cellules photovoltaïques sont montées en série et la cellule la plus faible va donc avoir un impact sur le rendement des autres cellules, ainsi, l'ombrage total d'une rangée de cellules peut rendre l'ensemble du module photovoltaïque inefficace.

Toutefois, les panneaux photovoltaïques sont aujourd'hui équipés de diodes by-pass, ce qui permet de limiter l'impact d'un ombrage sur une partie du panneau. Si un ombrage affecte une cellule alors la série de cellules branchée sur la même diode by-pass est court-circuitée et le reste du panneau continue de produire

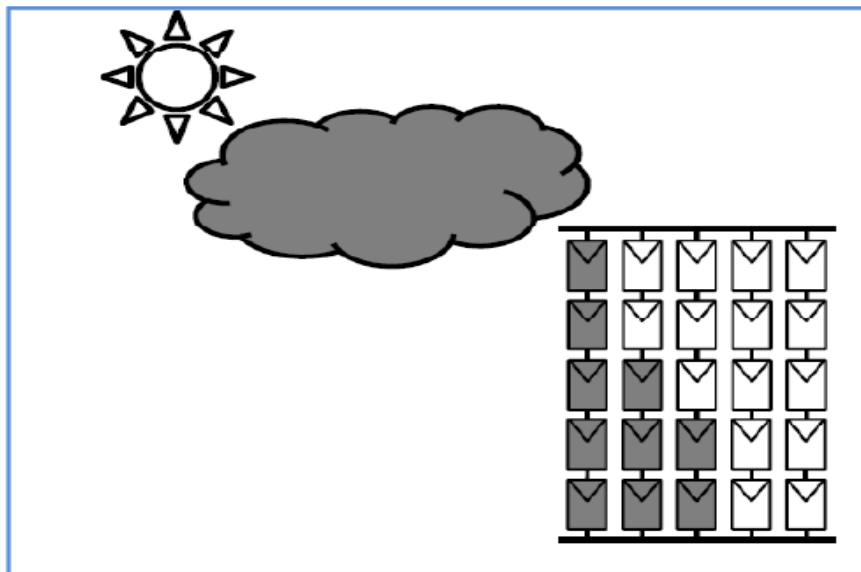


Figure I.4 GPV partiellement ombragé par le passage d'un nuage.

I.6 Le système photovoltaïque

I.6.1 Définition

Le système photovoltaïque SPV est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque), une interface de puissance (les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie. [8]

I.7 Energie photovoltaïque

I.7.1. Définition

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui produit de l'électricité par la transformation du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque (fig. I.5). Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Ces derniers regroupés sont appelés champ photovoltaïque.

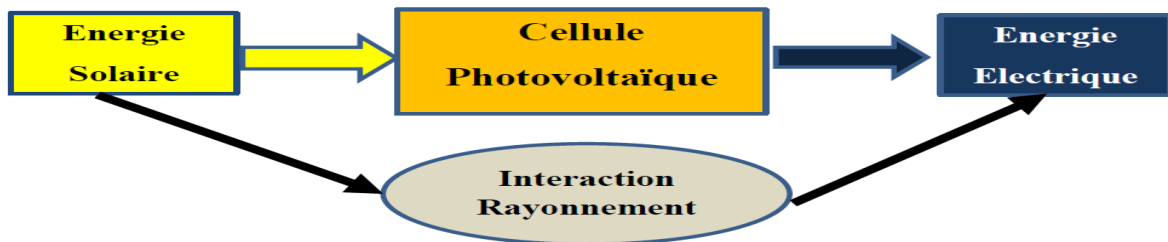


Figure I.5 Conversion Energie solaire en Energie électrique

I.8 Les composants d'un système photovoltaïque

Afin de bien comprendre le fonctionnement d'un système photovoltaïque, il est utile d'analyser les principaux composants. Les éléments d'un système photovoltaïque dépendent de l'application Considérée.

Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque :

- Modules.
- Batteries.
- Régulateurs de charge.
- Convertisseurs.
- Générateurs.
- Stockage.
-

I.8.1 Les modules photovoltaïques

Un module photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu lorsqu'il est exposé à la lumière. Le module photovoltaïque est constitué d'un cadre rigide le plus souvent en aluminium permettant la fixation et d'une vitre transparente en verre trempée sur le dessus.

A l'intérieur se trouve un ensemble de cellules photovoltaïques reliées électriquement entre elles. En effet ce sont elles qui génèrent le courant. Elles sont assemblées en série ou en parallèle à l'intérieur du module afin de cumuler leur puissance et de les rendre plus résistantes à l'environnement externe. [9]

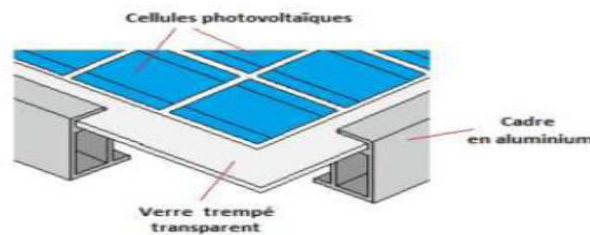


Figure I.6 Structure d'un module photovoltaïque. Figure I.7 Module PV

I.8.2 Stockage

Le stockage assure deux fonctions principales :

- Il permet de satisfaire les besoins en énergie électrique malgré le caractère aléatoire et discontinu de l'énergie solaire (rythme jour/nuit, variation en fonction des heures du jour et des saisons).
- Outre sa fonction de stockage d'énergie, il assure un rôle de tampon, entre la production et l'utilisation en fixant la tension du système. Celle-ci reste dans la zone de fonctionnement optimal (fonction d'adaptation d'impédance).

Les deux principaux types d'accumulateurs utilisables actuellement sont :

- Les accumulateurs au plomb.
- Les accumulateurs au cadmium-nickel (accumulateurs à électrolyte alcalin).
- Les accumulateurs au cadmium-nickel peuvent être utilisés pour des applications de puissance relativement faible.

Le coût élevé de ce type d'accumulateurs (par rapport aux accumulateurs au plomb) en limite l'utilisation pour les mini et micro-puissances. Le stockage est représenté par des batteries, disposées en série dont le nombre définirait la tension de fonctionnement et la capacité de stockage désirées.

La durée de vie des accumulateurs dépend en général de leur condition d'utilisation, pour ces deux types des batteries la durée de vie est de 10 à 15 ans, mais à une condition essentielle, c'est de maintenir leur état de charge supérieur à 50 %.

I.8.3 Batterie

Il existe trois grandes utilisations pour les accumulateurs :

- La batterie de démarrage.
- La batterie de traction.
- La batterie stationnaire.

Une batterie n'est pas seulement caractérisée par ses dimensions, son nombre d'éléments et sa capacité, mais doit répondre à différents critères :

- Durée de la décharge.
- Régime de décharge.
- Aptitude à la recharge.
- Température d'utilisation.
- Résistance mécanique.

- Fréquence des adjonctions d'eau distillée.
- Entretien.
- Durée de vie envisagée.

Il y a parfois contradiction dans les exigences, nécessitant alors un compromis ; c'est le cas de la batterie solaire à laquelle on demande des performances de batterie de traction et de batterie stationnaire :

- Batterie de traction, parce qu'on lui demande un cycle journalier de décharge (pas toujours suivi d'une recharge).
- Batterie stationnaire, parce qu'on lui demande de stocker une énergie et de la restituer en cas de coupure secteur, qui sera le non ensoleillement. [9]

- **Influence des différents paramètres :**

Les paramètres les plus importants agissant sur la vitesse des réactions chimiques et électrochimiques sont :

- Paramètres externes** : température, pression, temps.
- Paramètres électriques** : potentiel, intensité.
- Paramètres de l'électrode** : nature de matériau, surface, géométrie, état de surface.
- Paramètres de la solution** : concentration des espèces électro actives, nature du solvant, concentration de l'électrolyte.
- Paramètre du transfert de masse** : mode (diffusion), concentration de l'électrolyte.
- Paramètre du transfert de masse** : mode (diffusion), concentration à la surface de l'électrode.

I.8.4 Régulateur

- Le régulateur assure deux fonctions principales :
- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du générateur PV à l'utilisation.

- **Principe de son fonctionnement :**

La densité de l'électrolyte de la batterie est théoriquement un excellent indicateur d'état de charge, mais souvent cet indicateur ne prend sa valeur caractéristique que plusieurs jours après sa charge.

I.9 Types de systèmes PV [10]

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type que vous choisirez dépendra de vos besoins, de votre emplacement et de votre budget.

I.9.1 Systèmes autonomes (off grid)

Ils sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie.

I.9.2 Systèmes raccordés au réseau (on grid)

Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique.

I.9.3 Systèmes hybrides

Reçoivent une partie de leur énergie d'une ou de plusieurs sources supplémentaires, En pratique, les modules de systèmes PV sont souvent alliés à une éolienne ou à une génératrice à combustible. De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie [10].

I.10 Type de raccordement des panneaux solaires [11]

I.10.1 - Raccordement série : dans ce mode la tension augmente mais le courant reste lui-même.

I.10.2- Raccordement parallèle : dans ce mode le courant augmente mais la tension reste elle-même.

I.10.3- Raccordement mixte (série-parallèle) : dans ce mode le courant et la tension augmentent.

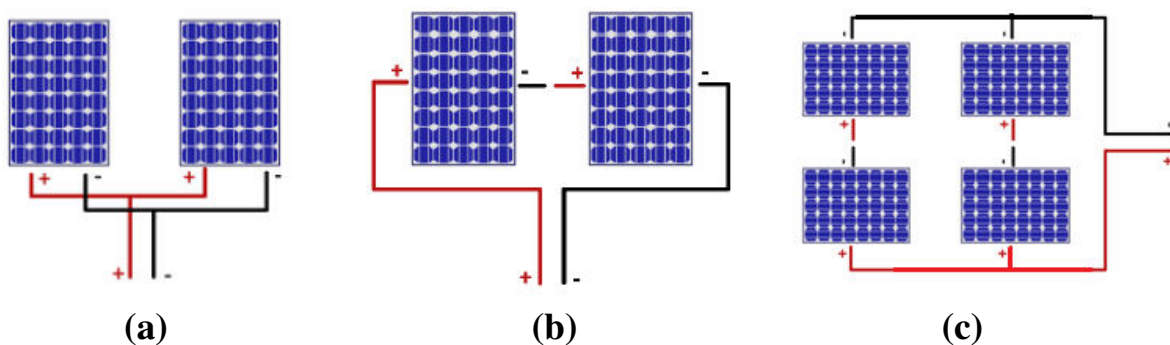


Figure I.8 Types de raccordement, a) parallèle, b) série, c) mixte.

I.11 Effet Photovoltaïque

Le terme « *photovoltaïque* » vient du Grec, « *photos* » signifie lumière et « *volta* » nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique. L'effet

photovoltaïque se manifeste sous forme d'une différence de potentiel entre les deux côtes d'une jonction P-N à semi-conducteur lorsque cette jonction reçoit le rayonnement solaire de longueur d'onde adéquate et reliée à l'extrémité avec une charge, le matériau le plus utilisé industriellement est à base de silicium [12].

I.12 Les panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique (courant continu DC). On parle aussi de modules photovoltaïques.

Ils sont composés de cellules photovoltaïques encapsulées dans un support souple ou rigide. On les distingue généralement par la technologie de cellules dont ils sont composés :

- Panneaux au silicium cristallin (monocristallins ou polycristallins)
- Panneaux au silicium amorphe
- Panneaux multi-jonctions

Les panneaux sont en général reliés en série entre eux de façon à augmenter la tension du système, puis ces séries de panneaux sont reliées entre elles en parallèles de façon à augmenter le courant.

Ces groupes de chaînes sont ensuite connectés à un chargeur DC/DC et à des batteries, ou à un onduleur pour convertir directement l'énergie continue en courant alternatif pour l'usage courant.

I.13 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photovoltaïque, c'est à dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée, l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur. Ce phénomène génère ainsi des paires électron-trou qui peuvent contribuer au transport du courant par le matériau lorsque celui-ci est polarisé. Comparable à une diode utilisée classiquement en électronique, une cellule PV (fig. I.9) peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore). Entre les deux zones se développe une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode [9].

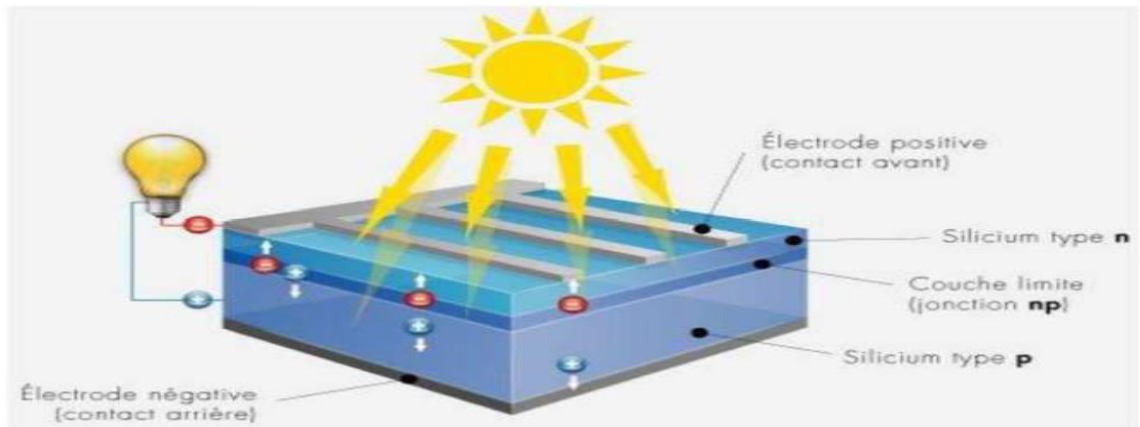


Figure I.9 Cellule photovoltaïque.

I.14 Fabrication des cellules photovoltaïques

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques. [13]

I.15 Principe de Fonctionnement d'une cellule solaire PV :

La cellule solaire est une photodiode à jonction PN de grande surface qui génère un signal électrique sans l'aide d'une source d'énergie auxiliaire. Lorsque les photons issus du soleil frappent la cellule, certains sont réfléchis et d'autres sont transmis ou absorbés dans la cellule solaire, seuls les photons absorbés participent à l'effet photoélectrique. La conversion photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- L'absorption de la lumière dans le matériau,
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques,
- La collecte des charges.

Il est donc clair que les matériaux constituant une cellule solaire doivent avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion

photovoltaïque. Dans le but de collecter les paires électron-trou générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons /trou créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.10.

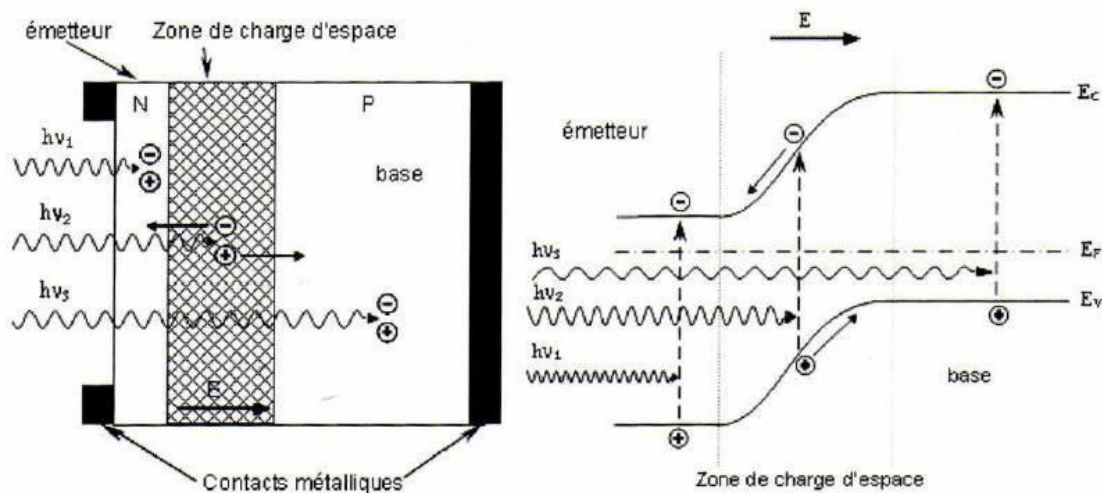


Figure I.10 Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque.

Les photons incidents génèrent des paires électron-trou dans les régions de type N et P et dans la zone de charge d'espace. Les paires électron-trou générées se comportent différemment suivant la région :

- Dans les 2 zones N et P, les porteurs minoritaires diffusent. Ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la zone P (pour les trous) et vers la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Ce transport de porteurs de charges engendre un photo-courant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou photo générées vont être entraînées par le champ électrique vers la région N (électrons) et la région P (trous). Ce déplacement des photo-porteurs donne naissance à un photo-courant de génération. Ces deux contributions ensemble ont pour résultat de donner un photo-courant total I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [14].

I.16 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclaircissement et celui d'un générateur de courant produisant un courant I_{ph} auquel se soustrait le courant de la polarisation de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement de la cellule

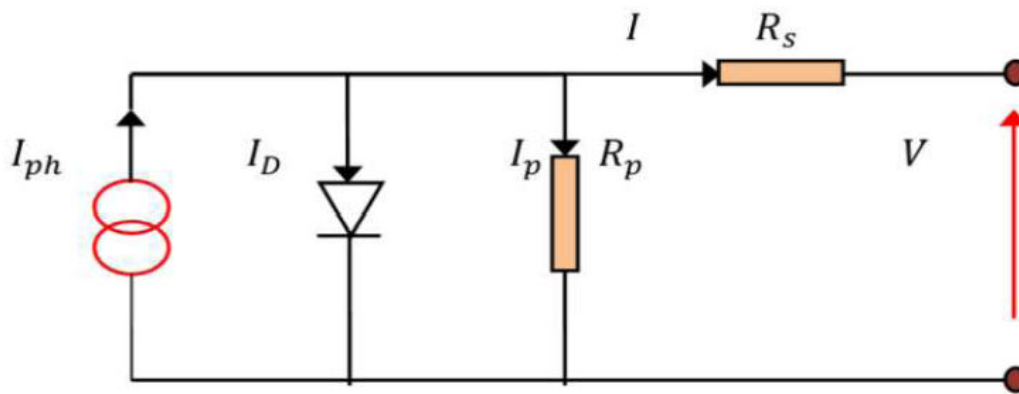


Figure I.11 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Les différents paramètres de ce modèle sont :

- a.** Le générateur de courant : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photo généré.
- b.** La résistance série R_s : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- c.** La résistance R_p : également connue sous le nom de court circuit, elle peut être due à un court circuit sur les bords de la cellule. On l'appelle aussi résistance de fuite.
- d.** La diode : modélise la diffusion des porteurs dans la base de l'émetteur [15]

I.17 Différents types de cellules photovoltaïques [8]

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs: de sulfure de cadmium (CDs), de tellure de cadmium (CdTe), de Germanium (Ge), de sélénium (Se) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le semi-conducteur le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. En effet, il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques dont les plus importants sont les suivantes

I.17.1 Les cellules monocristallines :

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d'un seul cristal. Elles sont en général d'un bleu uniforme.

Avantage :

Elles permettent d'obtenir des rendements élevés (rendement entre 13 à 17%).

Inconvénients :

Leur cout est très élevé.
Rendement faible sous un faible éclairement.

I.17.2 Les cellules poly-cristallines : (générateurs)

Elles sont constituées de plusieurs cristaux .la cellule a un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme). Leur rendement est de 11 a 15%.

Avantage :

Un bon rendement, mais cependant moins bon que pour les cellules monocristallins.

Elles offrent actuellement un bon rapport qualité/prix.

Inconvénients :

Rendement faible sous un faible éclairement

. I.17.3 Les cellules amorphes : (cellules de calculatrices par exemple)

Le silicium est utilisé en couche mince, il n'est pas cristallisé. Il est déposé sur une plaque de verre. Ce type de cellule on le trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation (montre, calculatrice).

Avantage :

Moins cher que les autres.

Fonctionnement avec un éclairement faible.

Inconvénients :

Rendement faible.

Performances qui diminuent avec le temps, durée de vie courte.

I.17.4 Les cellules multi-jonctions :

Les cellules multi jonctions sont constituées de différentes couches qui permettent d'absorber la majorité de spectre solaire. Mais ces cellules ne sont pas commercialisées

I.17.5 Les cellules organiques :

Encore au stade de la recherche, cette nouvelle technologie permet à présent la production de cellules solaires organiques légères, flexibles sur une grande surface et moins chères à produire.

Les cellules PV organiques sont de trois types ; moléculaire, polymère et hybride.

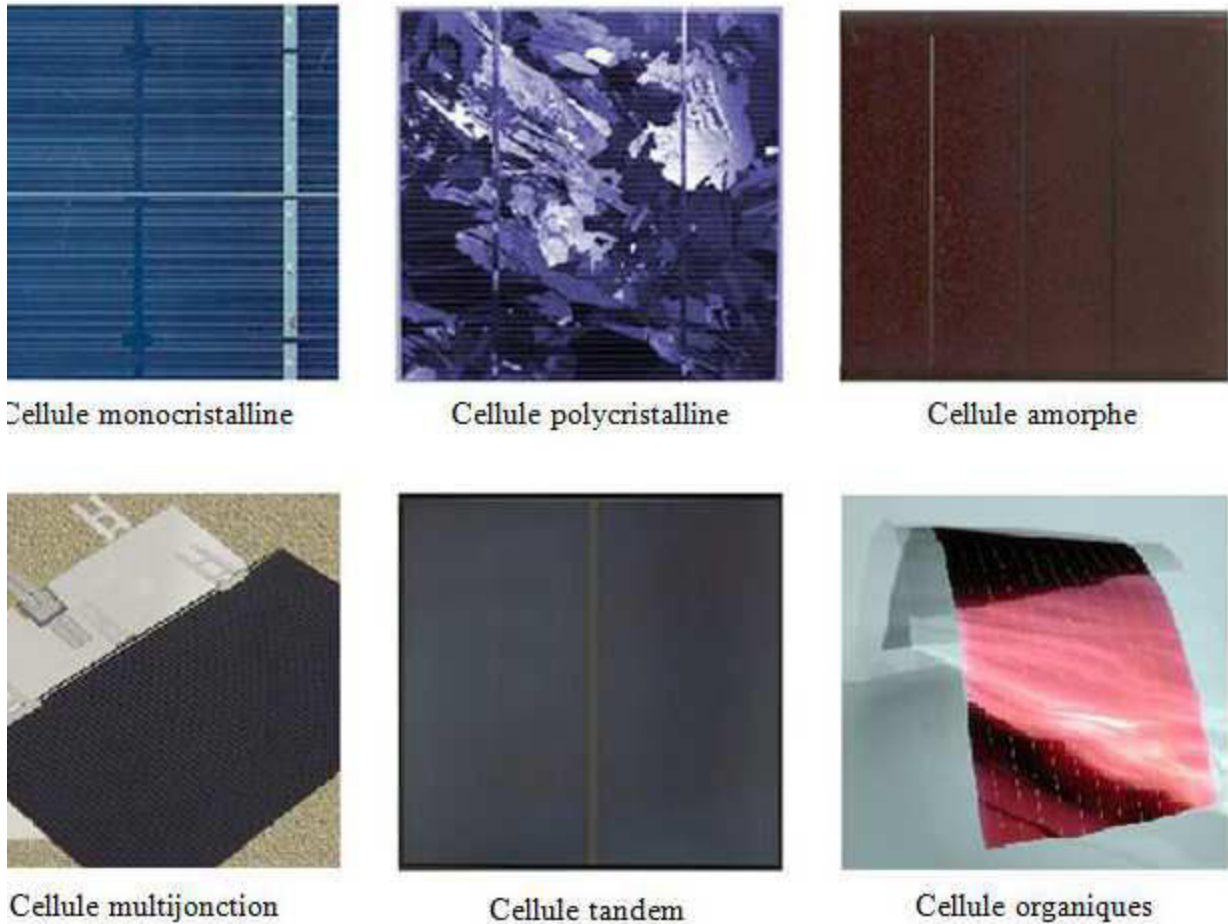


Figure I.12 Types de cellules photovoltaïques.

I.18 Caractéristiques électriques d'une cellule PV [16]

I.18.1. Caractéristiques courant / tension :

A température et éclairement fixés ($G = 1000\text{W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$), la caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante :

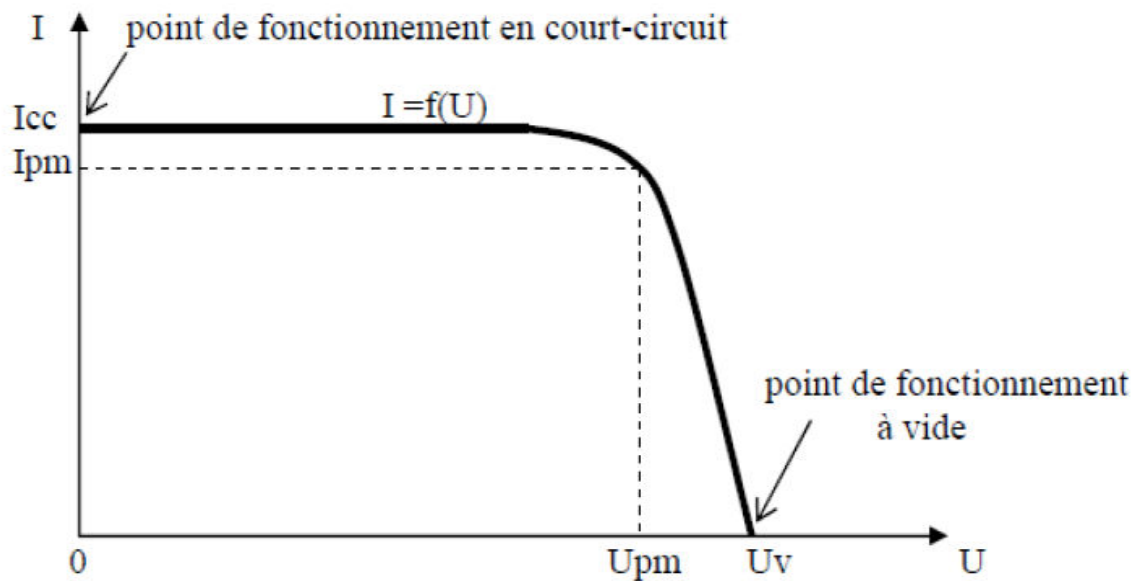


Figure I.13 Caractéristique I(V).

Sur cette courbe, on repère :

le point de fonctionnement à vide : U_v pour $I=0$

le point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $U = 0V$

I.18.2. Caractéristiques puissance / tension

La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = U.I$. Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(U)$. Cette courbe a l'allure suivante :

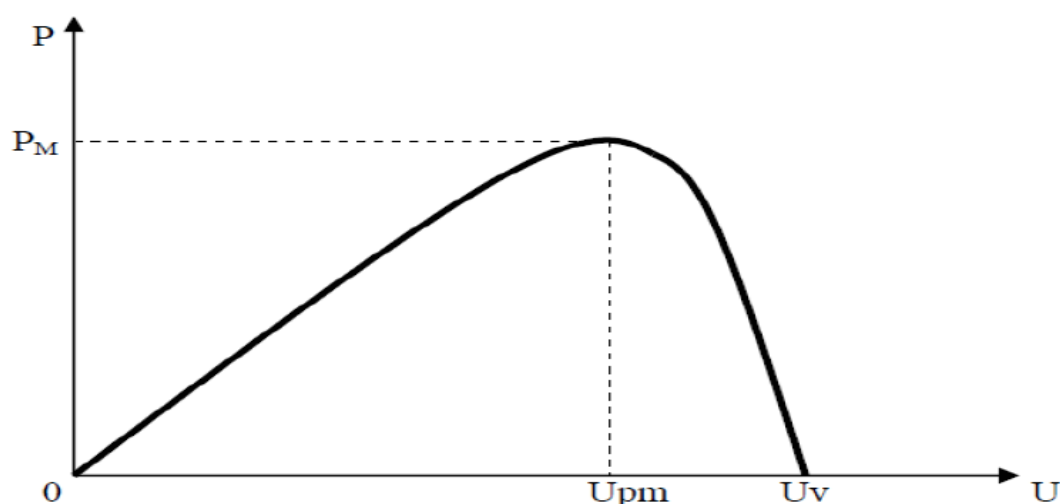


Figure I.14 Caractéristique P(V).

Cette courbe passe par un maximum de puissance (P_M). A cette puissance correspond, une tension U_{pm} et un courant I_{pm} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(V)$.

I.18.3 l'Influence de l'éclairement

La température étant constante, la caractéristique $I = f(U)$ dépend fortement de l'éclairement (fig.I.15). Sur ces courbes, on remarque que le courant de court-circuit augmente avec l'éclairement alors que la tension à vide varie très peu. A partir des courbes précédentes on peut tracer les courbes de puissance $P=f(U)$ (fig.I.16). Sur ces courbes, on remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'éclairement.

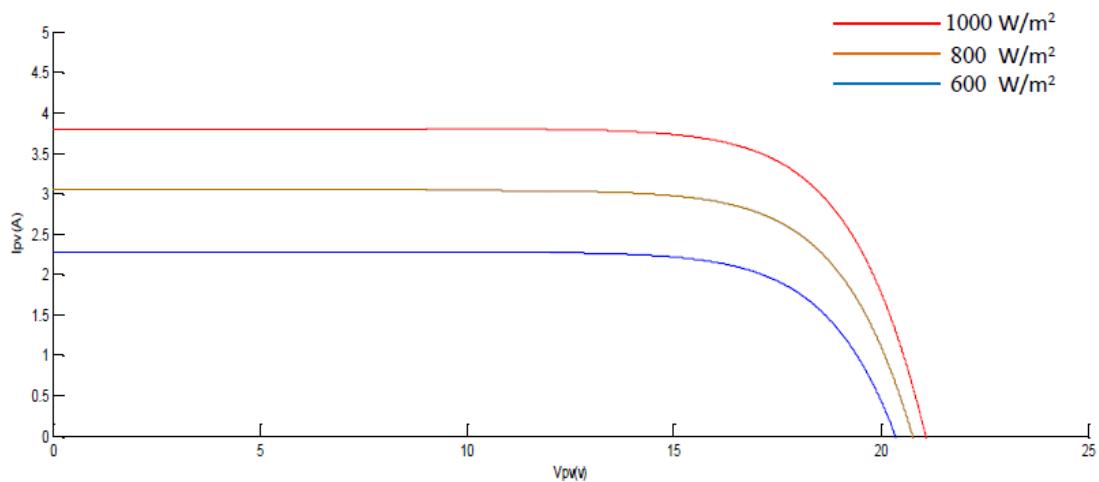


Figure I.15 Caractéristique $I = f(U)$.

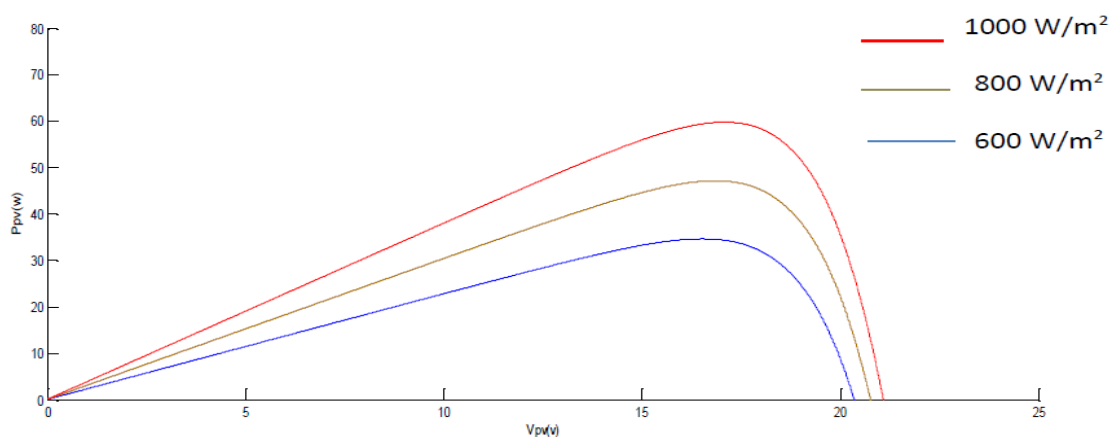


Figure I.16 Caractéristique $P = f(U)$.

I.18.4. Influence de la température :

Pour un éclairement fixé, les caractéristiques $I = f(U)$ et $P = f(U)$ varient avec la température de la cellule photovoltaïque (fig. I.17).

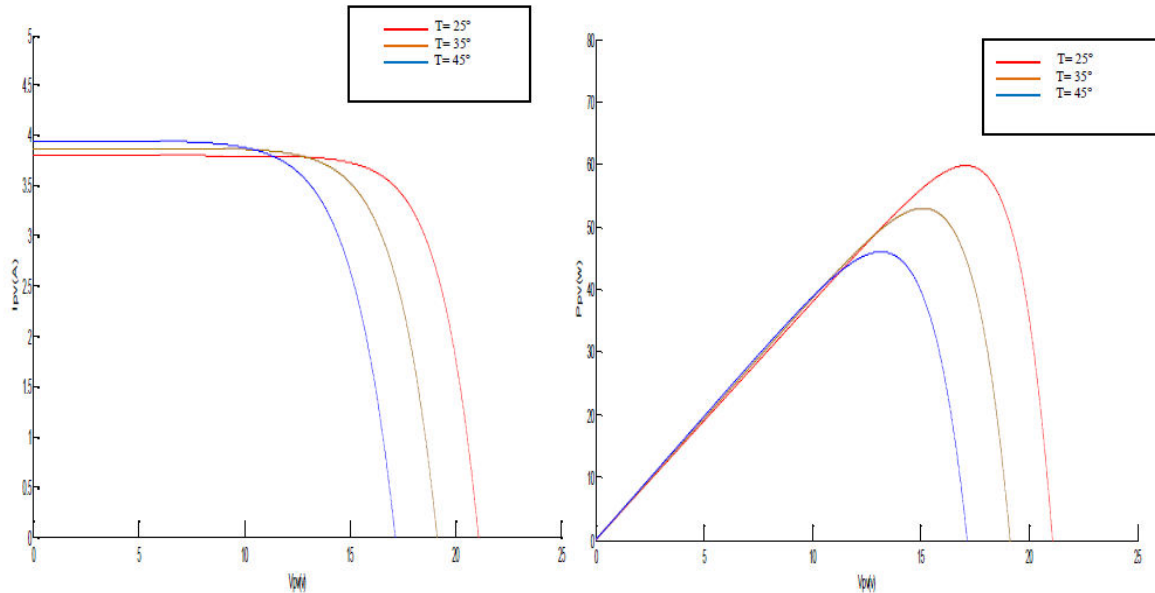


Figure I.17 Influence de la température sur les courbes $I(V)$ et $P(V)$.

Sur ces courbes, on remarque que la tension à vide et la puissance maximum diminuent lorsque la température augmente, l'éclairement étant constant 1000W/m^2 [16].

I.19 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à une diode

Le choix du modèle à cinq paramètres, permet d'effectuer une analyse et une évaluation des performances du module photovoltaïque, les plus proches de la réalité.

Ce modèle (fig. I.18) représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série R_s représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite résistance shunt R_p représente le courant de fuite. Une diode en parallèle modélise la jonction PN [17].

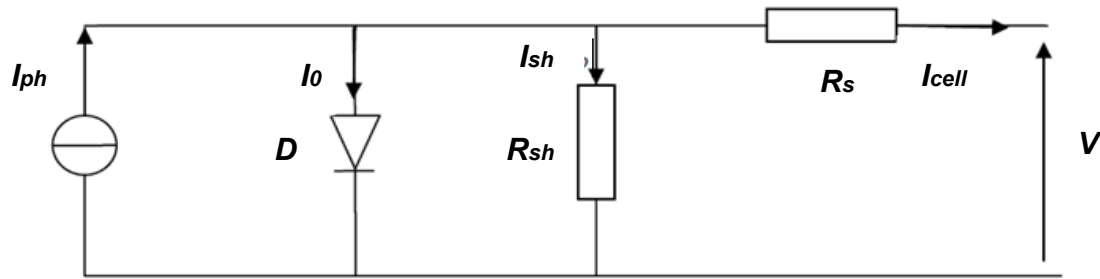


Figure I.18 Schéma équivalent de la cellule solaire à une diode.

L'équation des courants du modèle à une diode de la cellule PV est le suivant:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{sh} - I_0 \quad (1.1)$$

Avec :

I_{cell} : Courant délivré par la photopile.

I_{ph} : Photo courant.

I_0 : Courant de la diode.

I_{sh} : Courant shunt

Photo-courant: Le courant I_{ph} d'une cellule PV dépend de la température et de l'ensoleillement ainsi que du coefficient de température du courant de court-circuit généralement donné dans les références constructeurs. Le courant I_{ph} a pour expression générale :

$$I_{ph} = (I_{sc} + k_i (T + T_{ref})) \frac{G}{G_{ref}} \quad (1.2)$$

I_{sc} [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

k_i [A/K] : coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule à 25°C et 1000 W/m² ($k_i = 0.0032$).

T [K] : Température de fonctionnement.

G [W/m²] : Irradiation sur la surface de la cellule.

T_{ref} [K] : Température de référence (ambiante) (25 °C + 273 °C = 298K).

G_{ref} [W/m²] : Irradiation de référence (1000 W/m²).

Courant de saturation inverse de la diode :

Le courant de saturation inverse de la diode qui représente la valeur asymptotique du courant I en polarisation inverse, dépend de la température et de la largeur de bande d'énergie du matériau de la cellule solaire :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{q \cdot E_{g0} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}{A \cdot K} \right] \quad (1.3)$$

avec :

I_{rs} [A] : courant inverse de saturation

q [C] : charge de l'électron (1.6×10^{-19} C)

E_{g0} [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium polycristallin à 25°C).

A : facteur d'idéalité de la jonction (diode) (1,3) ($1 < A < 2$)

K [J/K] : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$)

Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) est donné par l'expression suivante :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{A \cdot N_s \cdot K \cdot T}\right) - 1} \quad (1.4)$$

avec :

V_{oc} [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

N_s : Nombre de cellules connectées en série.

Le courant dans la résistance shunt est donné par:

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

I [A] : courant débité par le module

V [V] : tension aux bornes du module

Le courant total débité par le module est donné par:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{A \cdot N_s \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

Remarque : pour N_p modules connectés en parallèle le courant I est multiplié par

$$N_p : \quad I_{tot} = N_p \times I \quad (1.7)$$

Pour N_s modules connectés en série la tension V est multipliée par N_s :

$$V_{\text{tot}} = N_s \times V \quad (1.8)$$

I.20 Le générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance D'enseillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit. Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'enseillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu.

Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

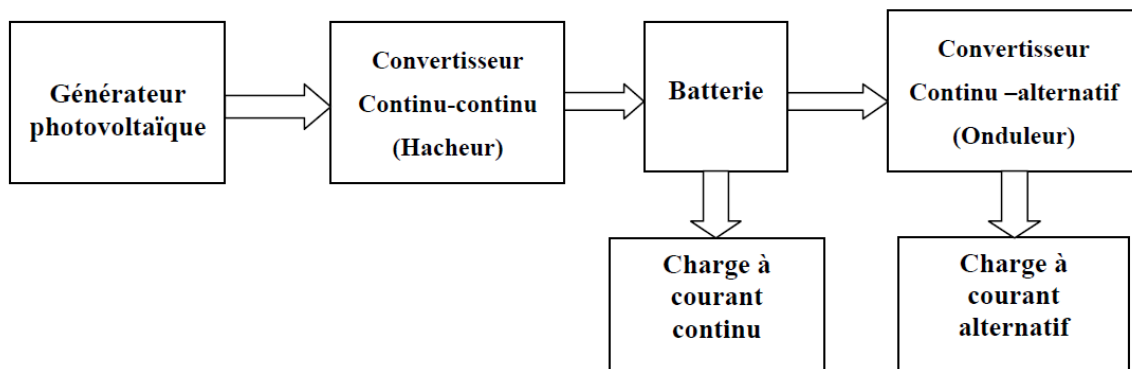


Figure I.19 Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque.

I.21 Module (ou panneau) photovoltaïque

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement une tension de 0,5 Volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. Une association série de plusieurs cellules donne un module solaire (appelé aussi panneau photovoltaïque), et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un champ photovoltaïque (fig. I.20).

Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique. Le passage d'un module à une chaîne (string) se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.[2]

I.22 Champ photovoltaïque :

Afin d'obtenir la tension nécessaire pour une charge, les panneaux sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules ou string. Les chaînes sont ensuite associées en parallèle et forment ainsi un champ photovoltaïque (champ PV) (fig. I.20 et I.21). [18]

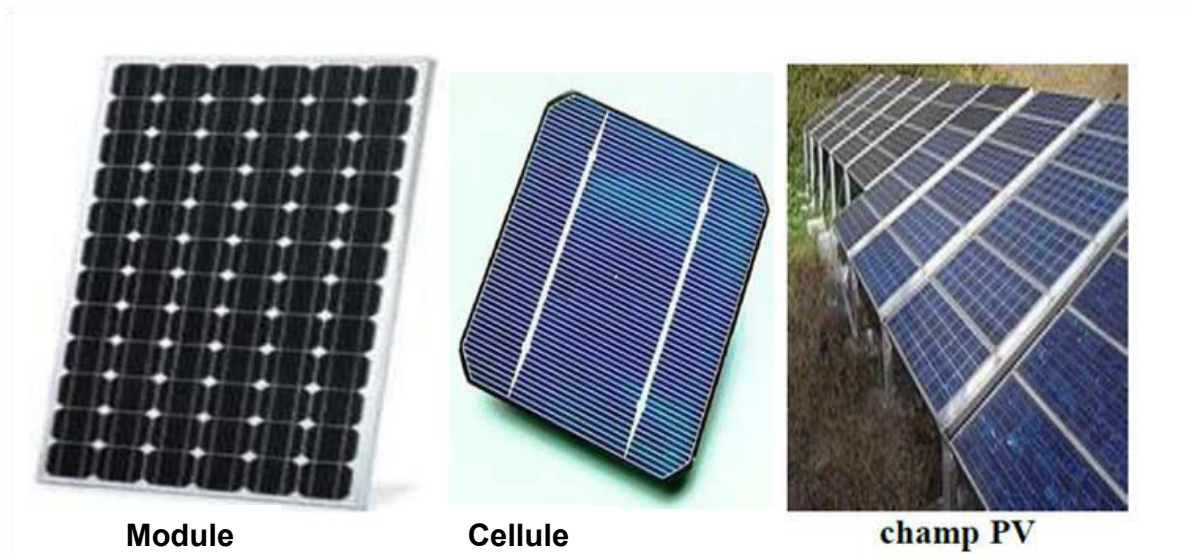


Figure 1.20 Cellule, module et champ photovoltaïque.

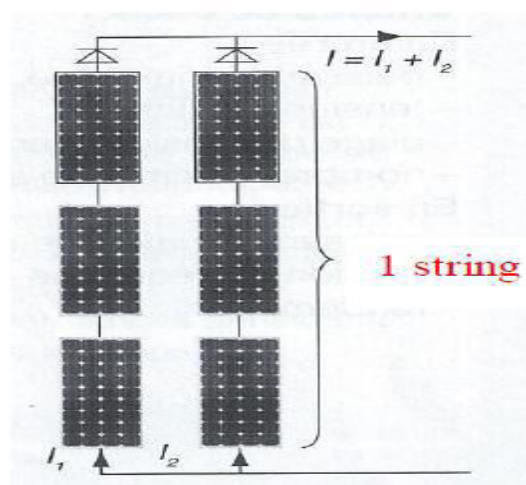


Figure I.21 Deux chaînes de modules constituant un champ photovoltaïque.

I.23 Potentiel solaire en Algérie :

De par sa situation géographique l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m^2 est de l'ordre de 5 kW/h sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700 \text{ (kW/h/m}^2\text{)}/\text{an}$ au Nord et $2263 \text{ (kWh/m}^2\text{)}/\text{an}$ au Sud [19].

Le tableau suivant illustre les statistiques des degrés d'ensoleillement par zones :

Région	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie %	04	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (H/A)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçu ($\text{kWh/m}^2/\text{an}$)	1700	1900	2650

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie [19].

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6 h/j en période estivale [20].

Grâce à sa position géographique (la latitude $\varphi = 27.8^\circ$, la longitude $\lambda = - 0.18^\circ$ et l'altitude = 230 m), la région d'Adrar est grossièrement ensoleillée et est considérée parmi les wilayas qui contiennent le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figures I.22 et I.23).

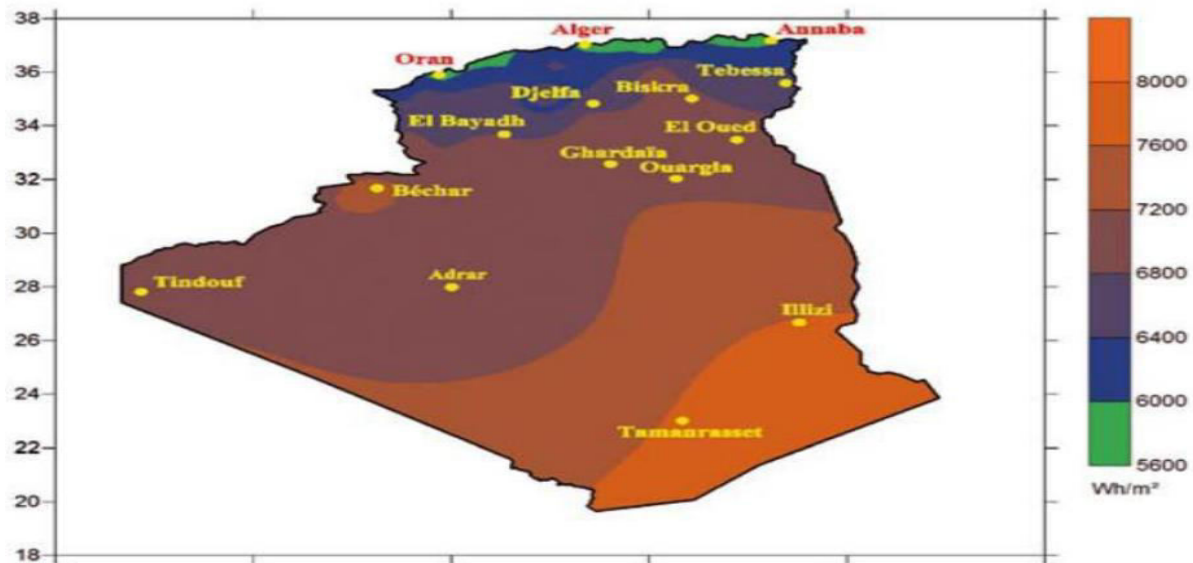


Figure I.22 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu. Période 1992-2002 [19].

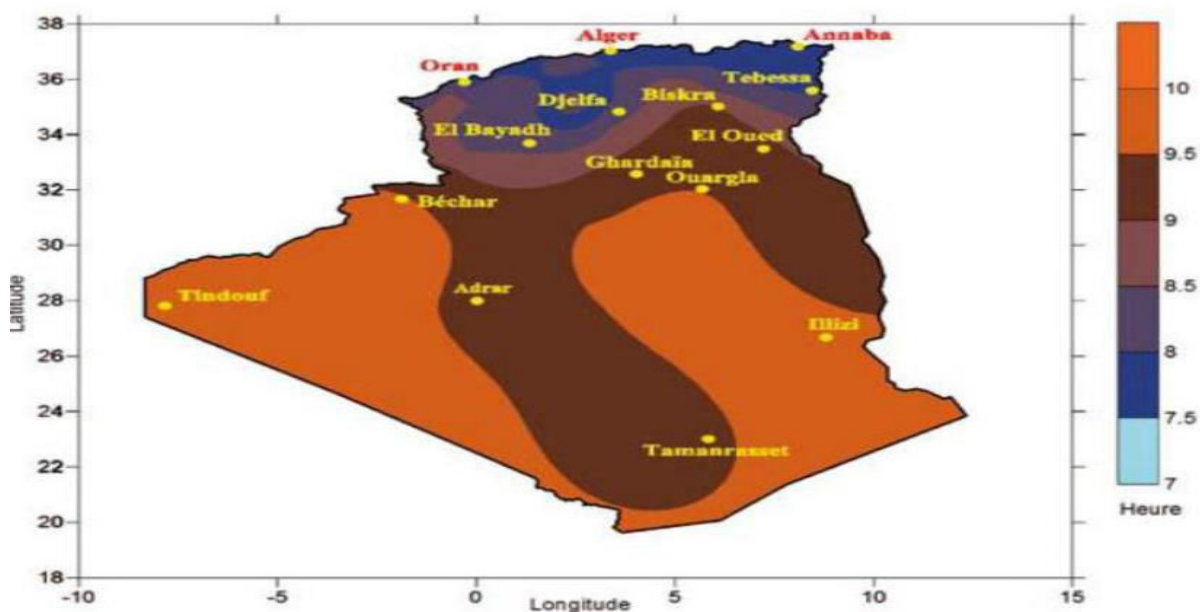


Figure I.23 Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée. Période 1992-2002 [20].

I.24 Avantages du photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.

- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
 - Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
 - Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
 - Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
 - Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Ils ont une longue durée de vie.
 - Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

I.25 Inconvénients du photovoltaïque

Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.

Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevée.

Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement.

I.26 Protection

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnements. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexions en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode *by-pass*).

Conclusion :

Nous avons donné, dans ce chapitre, un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques. Des généralités sur le système solaire photovoltaïque ont été faites à partir d'une description de la cellule PV, sa constitution et son principe de fonctionnement jusqu'au modèle mathématique de la cellule et ses caractéristiques électriques. Les différents types technologiques des cellules ont été énumérés ainsi que la formation du module PV et la constitution du champ PV. Enfin nous avons terminé par un bref aperçu sur le potentiel solaire en Algérie.

Chapitre II

**Les convertisseurs DC/DC
et la commande MPPT**

II.1 Introduction :

Les modules photovoltaïques sont conçus pour générer une puissance maximale sous des conditions environnementales souvent variables il est nécessaire de réaliser une adaptation permanente de la charge au générateur PV. Cette adaptation est réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) placé entre le générateur PV et la charge. Le contrôle du convertisseur DC-DC se fait par un mécanisme de poursuite du point de puissance maximale « Maximum Power Point Tracking » (MPPT).

L'objectif de ce chapitre est l'étude de quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques, comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur). L'étude sera complétée par quelques types de commandes MPPT.

II.2 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu, ils permettent de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu. De conception simple et facile à commander, ils produisent un rendement élevé [21]. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs électroniques. Tous ces dispositifs consomment peu de puissance active, c'est la raison pour laquelle le rendement des hacheurs est bon.

La représentation symbolique d'un convertisseur DC-DC est donnée par la figure II.1

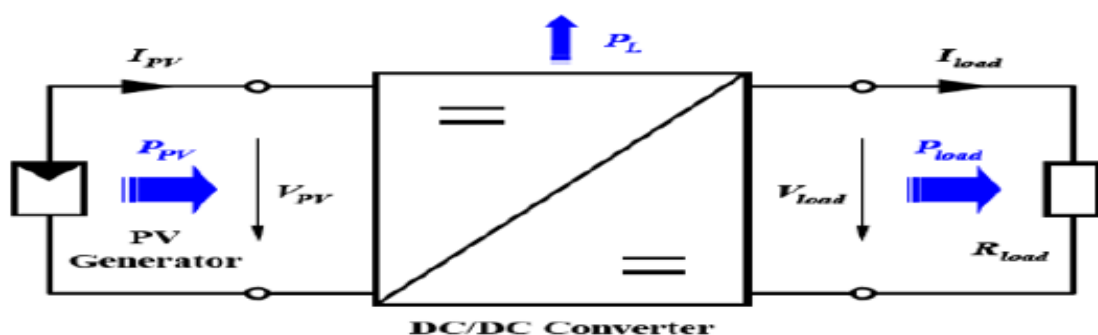


Figure II.1 Schéma symbolique d'un convertisseur DC /DC.

-Le rôle du convertisseur DC/DC dans le cadre des systèmes PV est de réaliser l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour réaliser un transfert de puissance maximal.

II.3 La technique de découpage

Dans une alimentation à découpage (fig. II.2), la tension d'entrée V_i est "hachée" (découpée) à une fréquence F_h à l'aide d'un transistor fonctionnant en tout ou rien (passant / bloqué), rôle d'interrupteur (K). Il en résulte une tension carrée qui sera lissée à l'aide d'une inductance pour obtenir une tension continue.

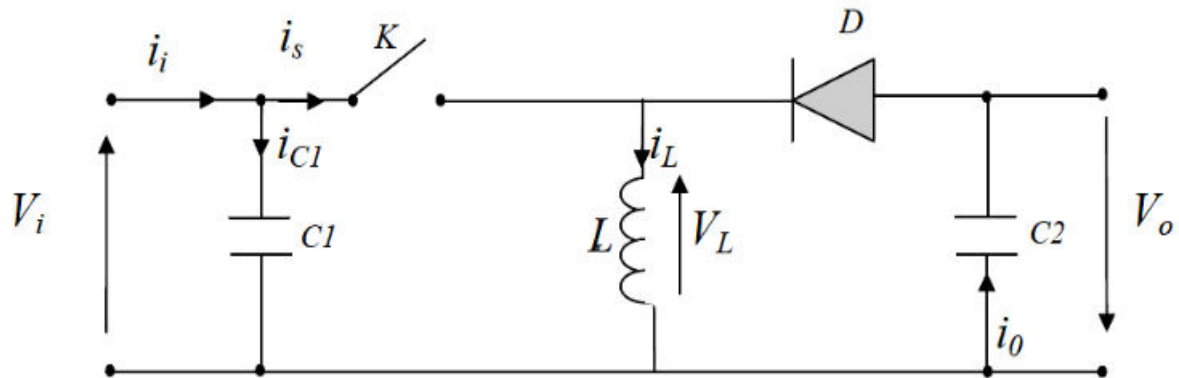


Figure II.2 Schéma de principe d'une alimentation à découpage.

Le transistor qui joue le rôle d'interrupteur dans le montage précédent est en général de type MOSFET. C'est un composant à trois ports (fig. II. 3) :

Le « drain » (noté D), la « grille » (notée G) et la « source » (notée S).

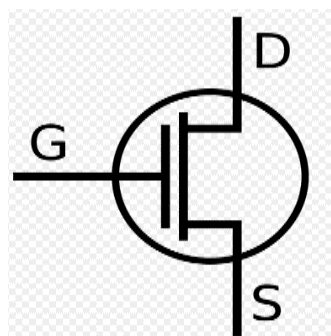


Figure II.3 Symbole du transistor MOSFET.

Les tensions sont mesurées sont : V_{DS} : la tension entre le drain et la source et V_{GS} : la tension entre la grille et la source.

II.4 Rapport cyclique des impulsions de commande :

La tension de sortie du convertisseur doit être stabilisée à un niveau constant ceci est réalisé par une action sur le rapport cyclique des impulsions de commande de l'interrupteur (K). Ce rapport est défini comme étant la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (figure II.4).

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante F_h avec un temps de fermeture égal à $d.T_h$ et un temps d'ouverture égal à $(1-d).T_h$ (voir fig. II.4).

Avec :

- $T_h=1/F_h$ la période de commutation.
- d le rapport cyclique du commutateur, $d \in [0, 1]$ et $1-d = d'$.

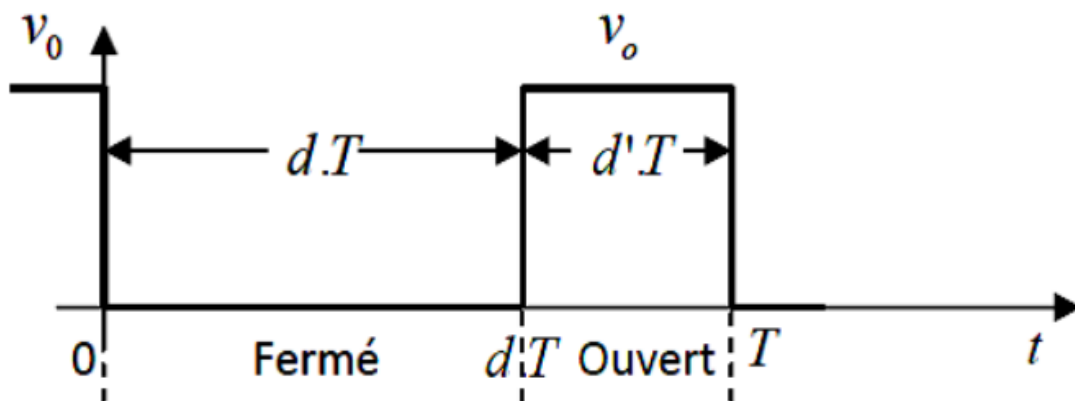


Figure II.4 Temps de passage et de blocage d'un commutateur.

II.5 Types de convertisseurs DC-DC

Les différents types de convertisseurs DC-DC fonctionnent selon l'un des trois principes suivants : dévolteur (abaisseur de tension), survolteur (élevateur de tension) ou mixte (dévolteur/survolteur). Ils sont utilisés dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions souhaitées ainsi que pour réaliser l'adaptation des panneaux solaires avec leurs charges.

II.5.1 : Hacheur dévolteur

Le convertisseur dévolteur est nommé hacheur Buck ou hacheur série. La figure II.5 montre le schéma de principe d'un convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir la tension d'entrée V_i en une tension de sortie V_o inférieure. Le rapport des tensions de sortie et d'entrée V_o/V_i varie avec le rapport cyclique du commutateur.

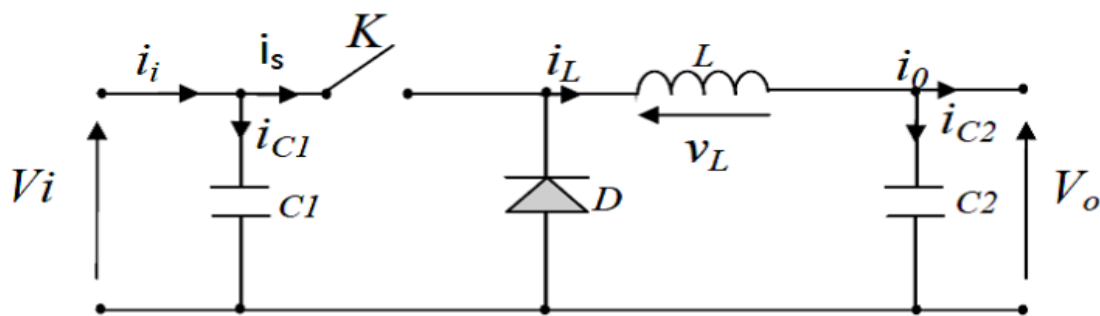


Figure II.5 Schéma de principe d'un hacheur dévolteur Buck.

II.5.1.1 Modélisation d'un convertisseur dévolteur

Pour modéliser le convertisseur nous devons faire la représentation du circuit équivalent pour les deux états fermé/ouvert du commutateur et établir les équations mathématiques reliant les variables d'entrée et de sortie. La figure II.6 montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant $d.T_h$ (fig. II.6a) et l'interrupteur ouvert pendant $(1-d).T_h$ (fig. II.6b).

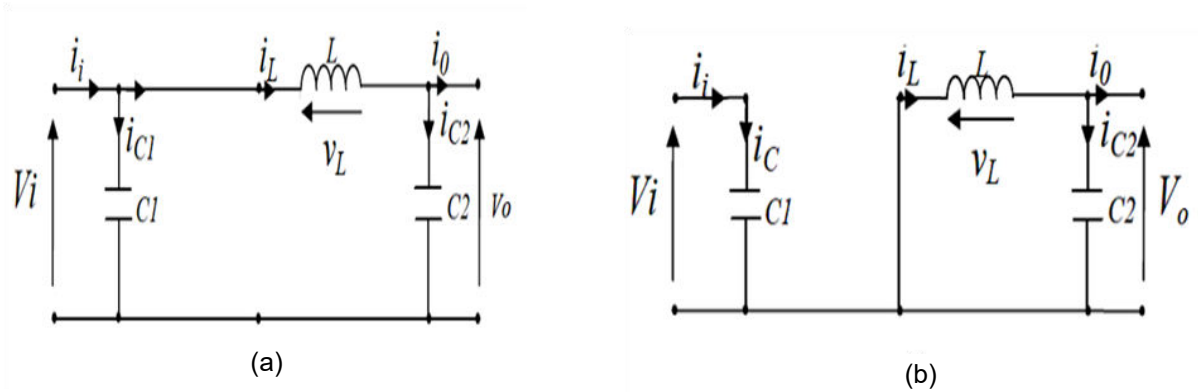


Figure II.6 Schémas équivalents du hacheur dévolteur avec commutateur : (a) fermé, (b) ouvert

Par application des lois de Kirchoff aux deux circuits de la figure II.6, on obtient les systèmes d'équations suivants :

-Pour l'intervalle de temps $(d.T_h)$ le commutateur est fermé:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

-Pour l'intervalle de temps $(1-d).T_h$, le commutateur est ouvert:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c_2}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -v_o(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

Pour trouver une représentation dynamique pour toute la période T_h , on utilise une expression de la forme suivante (2.3) :

$$\left(\frac{dx}{dt} \right) T_s = \frac{dx}{dt} d.T_s + \frac{dx}{dt} (1-d)T_s \quad (2.3)$$

L'application de la relation (2.3) aux systèmes (2.1) et (2.2), donne :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s = d.T_s (i_i - i_L) + (1-d)T_s i_i \\ C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} T_s = d.T_s (i_L - i_0) + (1-d)T_s (i_L - i_0) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} T_s = d.T_s (v_i - v_0) + (1-d)T_s (-v_0) \end{cases} \quad (2.4)$$

A partir des équations (2.4), on obtient les équations suivantes pour les courants et les tensions du modèle sur une période entière T_h :

$$\begin{cases} i_0(t) = i_L(t) - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ i_L(t) = i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_i(t) = \frac{1}{d} \left(L \frac{di_L(t)}{dt} + v_0(t) \right) \end{cases} \quad (2.5)$$

II.5.2 : Hacheur survolteur :

Le convertisseur survolteur est connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe est celui de la figure II.7. Il permet de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

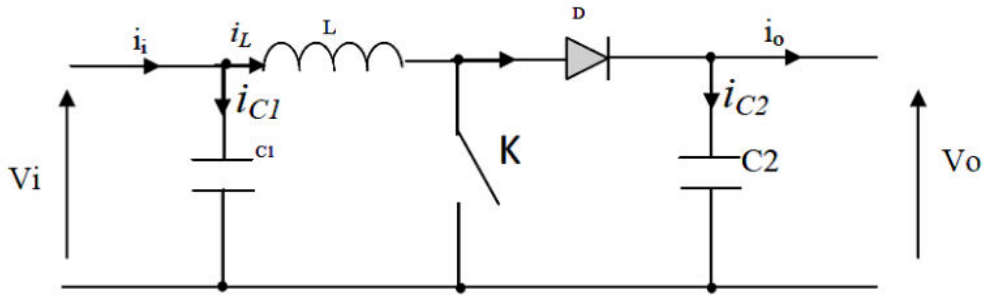


Figure II.7 Schéma de principe d'un hacheur survolteur Boost.

Les schémas équivalents du hacheur survolteur selon les 2 états du commutateur sont donnés par la figure II.8.

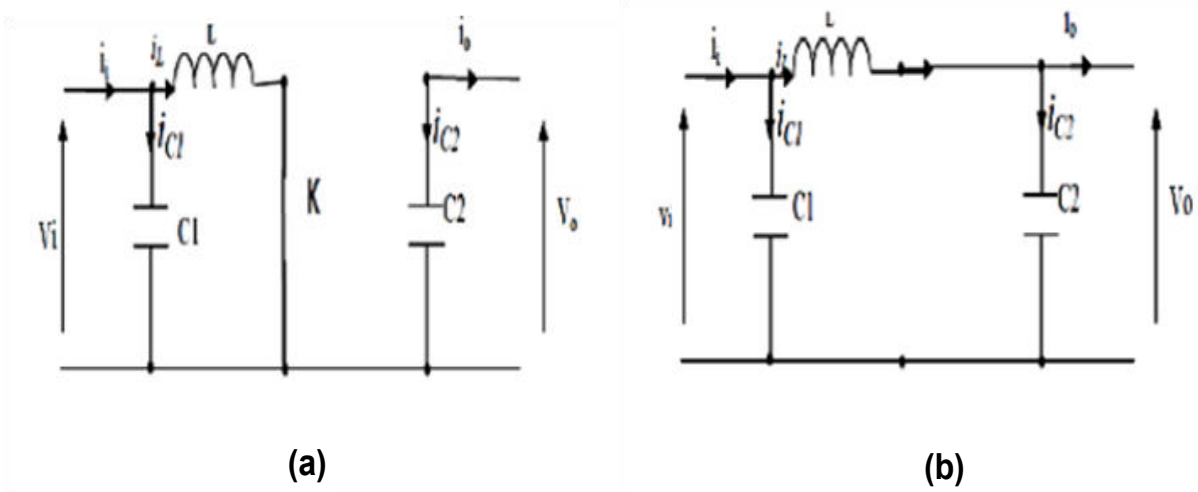


Figure II.8 Schémas équivalents du hacheur survolteur.

Avec commutateur (a) K fermé, (b) K ouvert.

L'application des lois de Kirchhoff aux circuits équivalents du convertisseur (fig. II.8 a et b), donne les systèmes d'équations suivants :

-Pour l'intervalle de temps (d.Ts) :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad (2.6)$$

-Pour l'intervalle de temps $(1-d).T_s$:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dv(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (2.7)$$

L'application de la relation (3.3) aux systèmes d'équations (2.6) et (2.7), donne les équations (2.8) du modèle mathématique du convertisseur survolteur :

$$\begin{cases} i_L(t) = i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_o(t) = (1-d) i_L(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ v_i(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-d) v_o(t) \end{cases} \quad (2.8)$$

II.5.3 Hacheur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur rassemble les propriétés des deux convertisseurs précédents, il permet de convertir la tension d'entrée imposée v_i en une tension de sortie désirée v_o , son schéma de principe est illustré par la figure II.9.

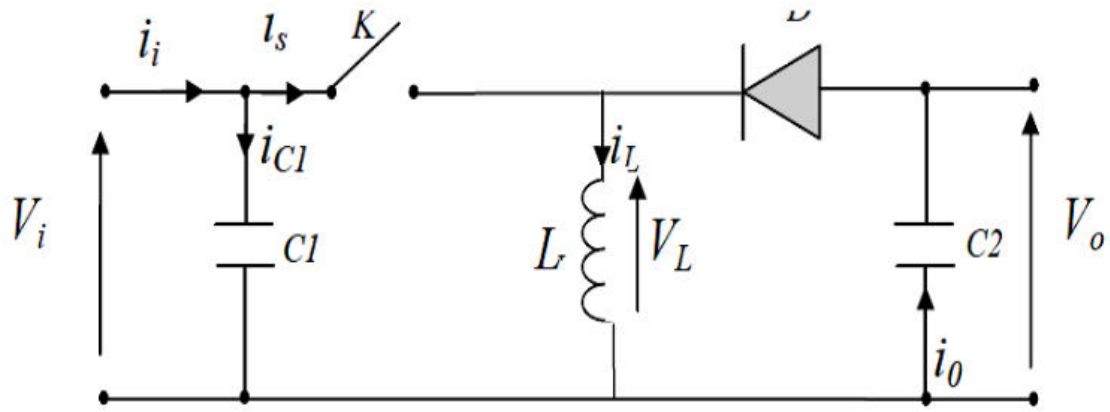


Figure II.9 Schéma de principe du convertisseur dévolteur-survolteur.

La figure II.10 montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les 2 étapes de fonctionnements.

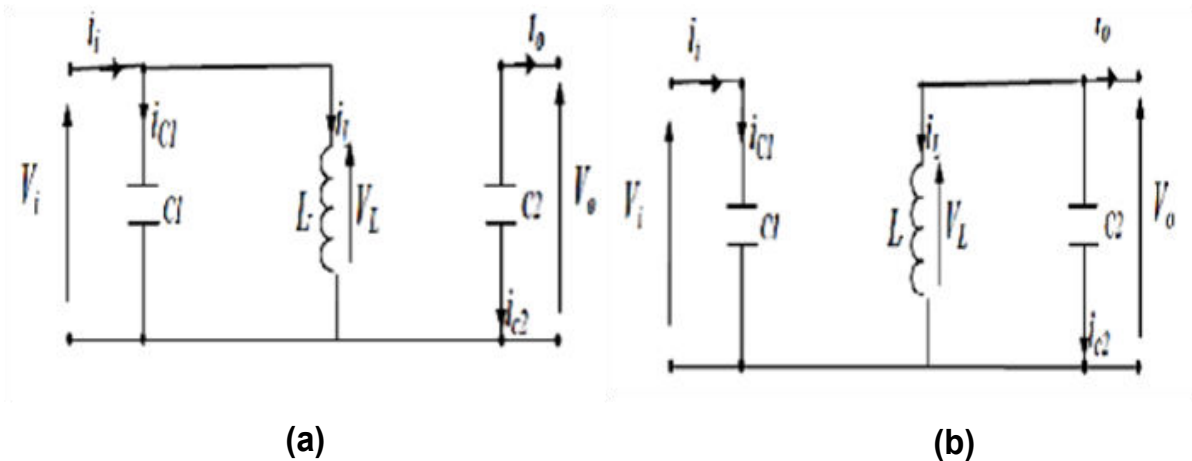


Figure II.10 Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur.

Avec commutateur (a) K fermé, (b) K ouvert.

L'application des lois de Kirchhoff aux circuits équivalents du convertisseur (fig. II.10 a et b), donne les systèmes d'équations suivants :

-Pour l'intervalle de temps (d.Ts):

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad (2.9)$$

Pour l'intervalle de temps $(1-d)T_s$:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_0(t) \end{cases} \quad (2.10)$$

L'application de la relation (2.3) aux systèmes d'équations (2.9) et (2.10), donne le modèle mathématique (2.11) du convertisseur dévolteur-survolteur:

$$\begin{cases} i_L(t) = \frac{1}{d} \left(i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \right) \\ i_0(t) = -(1-d)i_L(t) - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ v_i(t) = \frac{1}{d} \left(-(1-d)v_0(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} \right) \end{cases} \quad (2.11)$$

II.6 La commande MPPT :

II.6.1 définition :

La commande **MPPT** (**M**aximum **P**ower **P**oint **T**racking) est un organe fonctionnel du système PV, il permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV, sachant que ce point dépend toujours des conditions météorologiques et de la variation de la charge [22]. Son principe est basé sur la

régulation automatique du rapport cyclique α des impulsions de commande du convertisseur DC-DC (voir II.4), à la valeur adéquate de manière à délivrer continuellement le maximum de puissance à la sortie du panneau PV.

La conception et le fonctionnement d'une commande numérique doivent être conçus de manière à ce que la puissance optimale délivrée par le panneau solaire soit totalement transférée à la charge de façon automatique quelles que soient l'intensité d'éclairement et la valeur de la charge.

Par exemple, pour une puissance incidente W_1 , la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini α_{1opt} (point PPM₁ sur la figure II.11-A). Si la puissance incidente passe à la valeur W_2 , alors ce point de puissance maximale est le point PPM₂ et le point de fonctionnement du GPV est le point P_f (figure II.11-A) [22]. Pour converger vers le nouveau point PPM₂, il faut ajuster le rapport cyclique α à la valeur α_{2opt} . Il en sera de même lorsque la charge R_{CH} change (figure II.11-B) : le point de puissance maximale dévie de sa position optimale (PPM₁). Pour converger vers ce PPM₁, il faut agir sur le rapport cyclique α . Donc, dans un système PV indépendant et autonome, cette régulation doit être réalisée automatiquement afin de poursuivre le point de fonctionnement optimal. En pratique, cette régulation est effectuée par la commande **MPPT**.

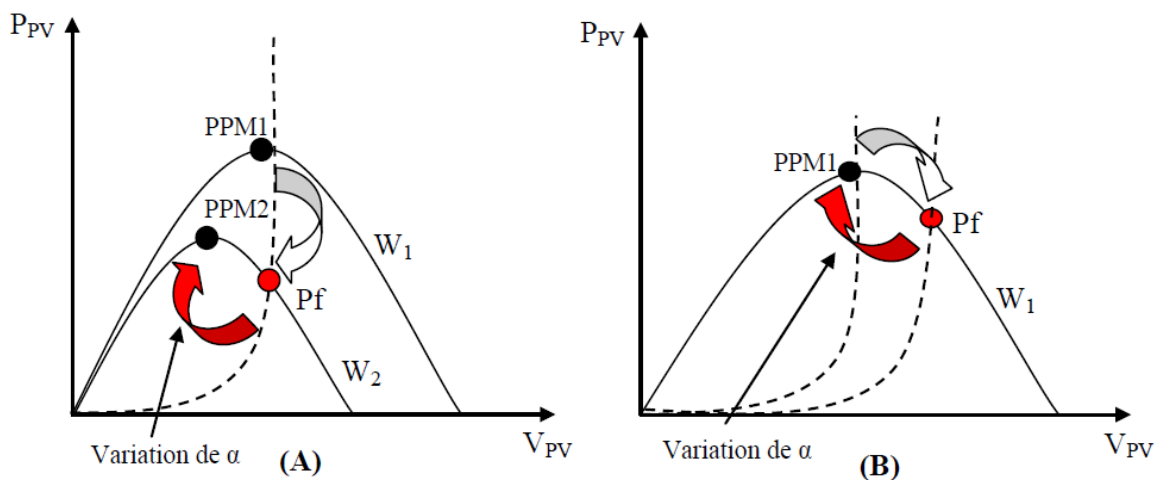


Figure II.11 Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (A) et la charge R_{CH} (B). P_f : Puissance à la sortie du GPV.

II.6.2 Différents types de commandes MPPT :

Pour poursuivre le point PPM réel, il est nécessaire d'obtenir de l'information sur la puissance réelle extraite du module PV. Ceci peut être réalisé en mesurant la tension V_{pv} à la sortie du panneau et le courant I_{pv} qu'il peut fournir. A partir de la puissance électrique calculée $P = V_{pv} \cdot I_{pv}$, on peut appliquer différents algorithmes de contrôle pour poursuivre le PPM du module PV.

Trois implantations de commande MPPT sont possibles [23] :

- **Commande MPPT à implantation analogique** : - Elle se caractérise par une simplicité dans la conception et une grande dynamique vis à vis de son équivalente numérique et aussi des diverses perturbations. Elle peut être complètement réalisée avec des composants analogiques et logiques sans qu'aucun calcul ne soit nécessaire. L'autre avantage de cette commande est sa capacité de fonctionner à des fréquences de découpages élevées (dépassent facilement 1MHz). Cela permet donc de réduire considérablement la taille des composants passifs (capacités et inductances) constituant le convertisseur d'énergie.
- **Commande MPPT à implantation mixte logique et analogique** : - Elle est basée sur l'addition d'un filtre nommé LFR (loss free resistor). Ce concept a été développé par S. Singer dans le cas général de source de puissance fortement non linéaire [23].
- **Commandes MPPT à implantation numérique** : - Elles font intervenir des composants digitaux. La pièce principale de ces commandes est un microcontrôleur. Elles sont souvent incluses avec diverses fonctions notamment de protection. L'algorithme implanté est plus ou moins lourd selon la précision du système, la robustesse et la rapidité de la boucle de commande.

II.6.3 Les différents algorithmes de contrôle MPPT

II.6.3.1 Algorithme d'incrément de la conductance

Cet algorithme est basé sur le calcul de la dérivée de la puissance de sortie du panneau en fonction de la tension à ses bornes, sachant que les 3 paramètres p , v et i varient dans le temps. Puisque la valeur de la dérivée en un point d'une courbe représente la pente de la tangente à la courbe en ce point, on utilise la caractéristique $p=f(v)$ pour calculer la pente de la tangente en différents points de cette courbe. Cette dérivée est nulle au point de puissance maximale MPP, positive à gauche et négative à droite de ce point (fig. II.12).

La puissance instantanée du panneau solaire étant : $p=v \cdot i$

La dérivée partielle dp/dv est donnée par : $\frac{dp}{dv} = i + v \frac{di}{dv}$

Que l'on approxime, en utilisant les accroissements, par : $\frac{dp}{dv} \approx i + v \frac{\Delta i}{\Delta v}$

Au point MPP la pente de la tangente est nulle : $\frac{dp}{dv} = 0 \Rightarrow \frac{\Delta i}{\Delta v} = -\frac{i}{v}$

A gauche du point MPP la pente de la tangente est positive : $\frac{dp}{dv} > 0 \Rightarrow \frac{\Delta i}{\Delta v} > -\frac{i}{v}$

A droite du point MPP la pente de la tangente est négative : $\frac{dp}{dv} < 0 \Rightarrow \frac{\Delta i}{\Delta v} < -\frac{i}{v}$

Le MPP peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée

$G_{ci} = \frac{i}{v}$ du générateur PV à l'incrément de la conductance $\Delta G_{ci} = \frac{\Delta i}{\Delta v}$,

comme le montre l'organigramme de la figure II.13. V_{ref} est la tension de référence pour laquelle le panneau PV est forcé à fonctionner.

Au MPP, $V_{ref} = V_{MPP}$. Une fois que le MPP est atteint, le point de fonctionnement correspondant est maintenu, à moins qu'un changement dans ΔI est noté, indiquant un changement des conditions atmosphériques et donc du MPP. L'algorithme augmente ou diminue V_{ref} pour suivre le nouveau MPP.

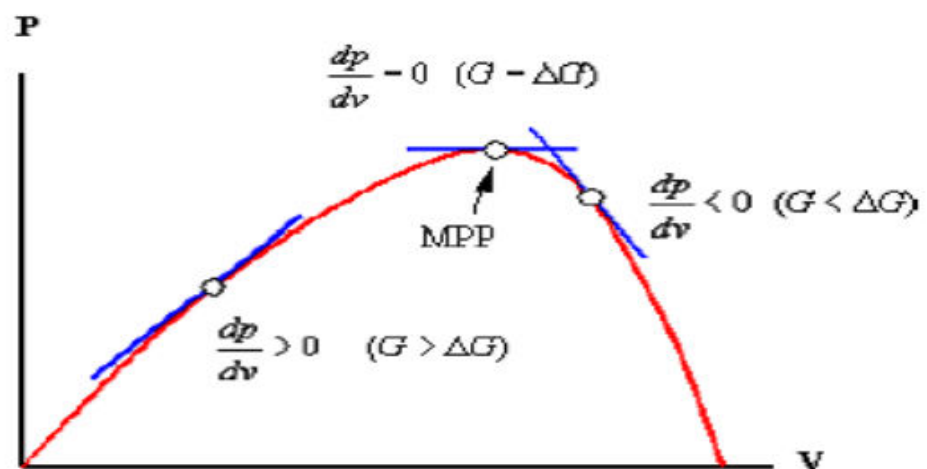


Figure II.12 Signe de dP/dV pour différentes zones de fonctionnement.

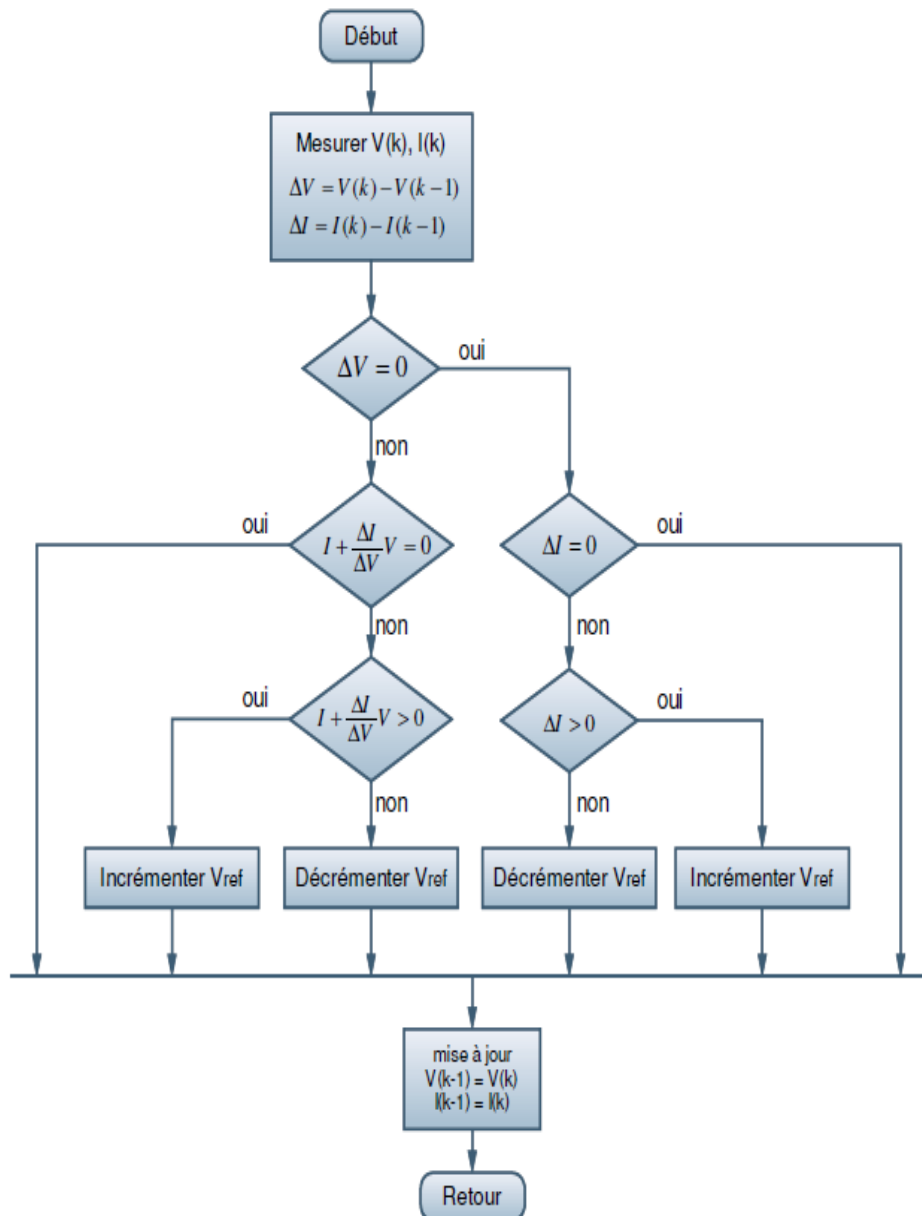


Figure II.13 Organigramme de la méthode d'incrément de la Conductance.

II.6.3.2 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode de perturbation et d'observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et de courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement, elle peut détecter le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et de la température [24].

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

La figure II.14 représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ calculée au cycle précédent.

Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{op} . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrément de la perturbation. Si ce pas d'incrément est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins [25].

Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation de la puissance du panneau. L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance [26].

Pour remédier à l'inconvénient majeur de la déviation de cette méthode lors de la recherche du MPP durant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation, une version améliorée de cet algorithme est proposée, pour laquelle on introduit une nouvelle condition dans la branche « *Oui* » de condition $\Delta P(k) > 0$ dans la structure de l'organigramme de l'algorithme de P&O [27, 28, 29].

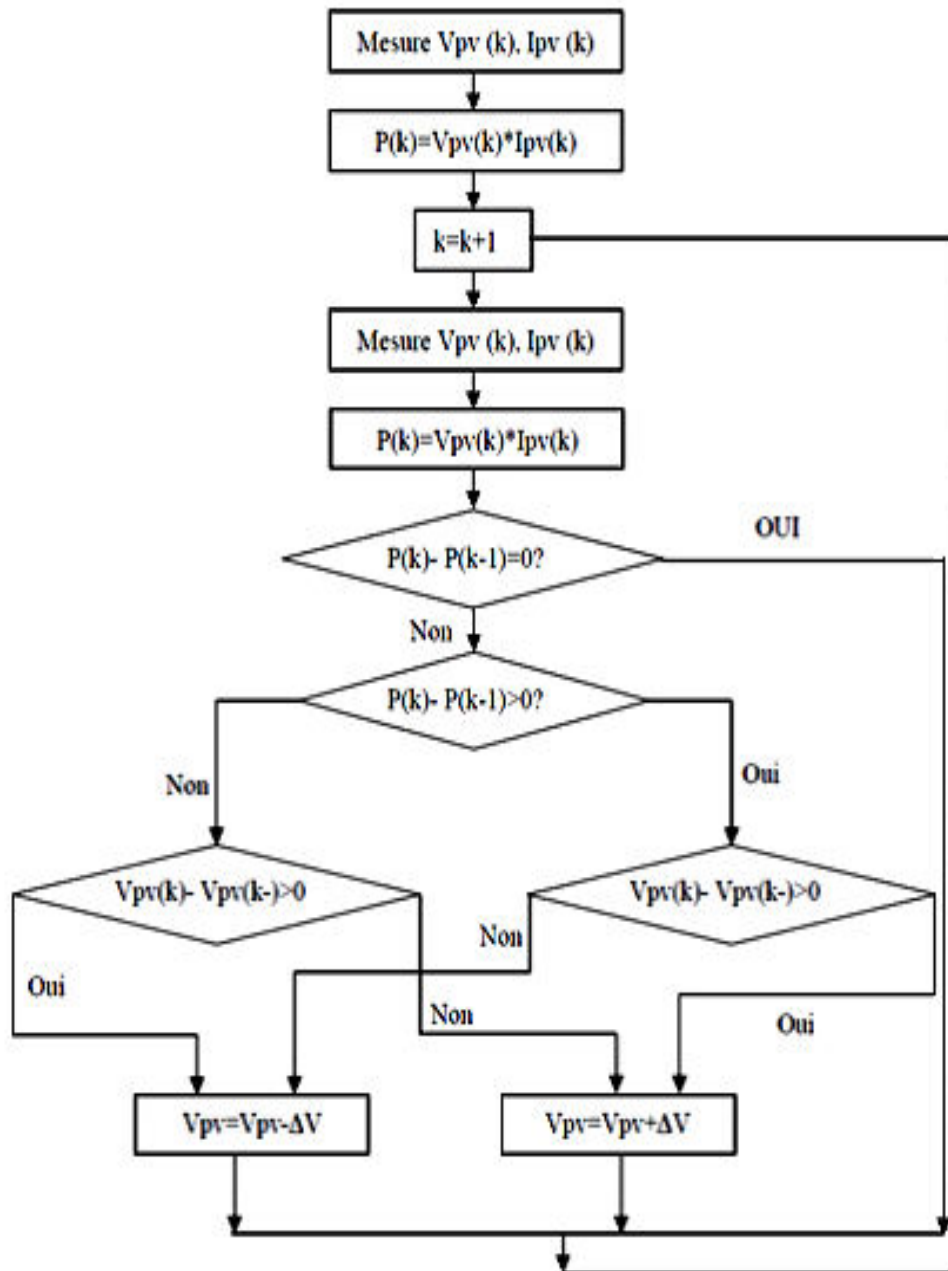


Figure II.14 Organigramme de la méthode P&O.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans une première partie une étude détaillée sur les convertisseurs statiques DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Les trois types de hacheurs qui fonctionnent soit en régime abaisseur (Buck) soit en régime élévateur (Boost) ou les deux en même temps ont été traités. La deuxième partie a été réservée à la commande MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) qui permet d'extraire le maximum de puissance du générateur PV sous différentes conditions de fonctionnement. Un aperçu sur différents algorithmes propres à cette commande a été présenté.

Chapitre III

L'onduleur triphasé et la machine asynchrone triphasee

III.1 Etude de l'onduleur de tension triphasé

III.1.1 introduction

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui assurent la conversion d'une tension continue en tension alternative pour satisfaire les besoins d'alimentation des machines électriques en courants monophasés ou triphasés. Par une commande séquentielle bien étudiée des semi-conducteurs de puissance (interrupteurs électroniques) du convertisseur, il est possible d'obtenir à la sortie de celui-ci une tension alternative de valeur moyenne nulle ; la tension peut comporter un certain nombre de créneaux par alternance [26].

Pour les onduleurs autonomes l'établissement, le maintien et l'ouverture des connexions entre l'entrée et la sortie ne dépendent que de la commande des semi-conducteurs, et dans ce cas ils imposent leur propre fréquence à la forme d'onde de la tension alternative fournie au récepteur.

Pour les onduleurs non autonomes, c'est le réseau alternatif auquel ils sont reliés qui impose sa fréquence à la forme d'onde de la tension alternative fournie en sortie.

III.1.2 Structure et éléments de base des onduleurs :

La figure III.1 montre la structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension. Cet onduleur est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs électroniques montés en pont. La tension continue est donnée par un convertisseur DC-DC, par une batterie d'accumulateurs ou par un pont redresseur.

Les interrupteurs de puissance se composent, selon la puissance commutée, de GTO (Gate Turn Off), de MOS de puissance ou d'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), en parallèle avec une diode (fig. III.1). La diode permet d'assurer la continuité du courant lors du changement de sens de celui-ci. [30]

Les caractéristiques de l'onduleur sont principalement définies par ces composants de puissance qui déterminent la puissance, la tension et le courant maximum commutés.

La fréquence maximale de commutation est déterminée par les temps de commutation (ouverture et fermeture) des interrupteurs et par le temps mort. Sur une période de commutation, un interrupteur commute au maximum 2 fois, à l'ouverture et à la fermeture, figure III.2. Le temps mort sert à prévenir les risques de court-circuit sur un bras (fig. III.2).

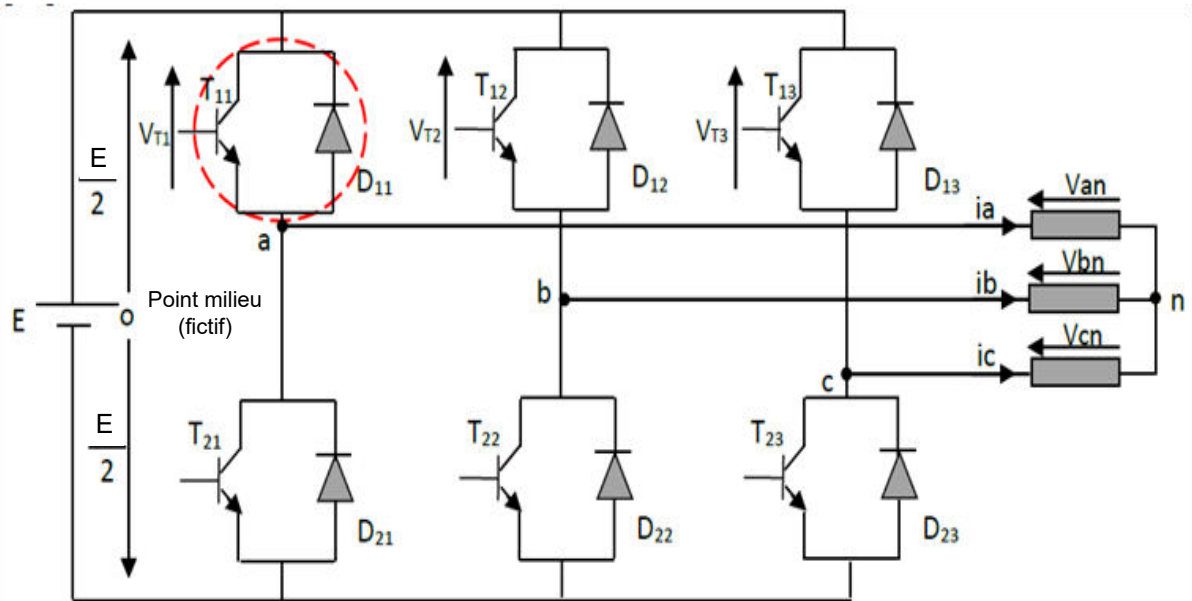


Figure III.1 Schéma d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

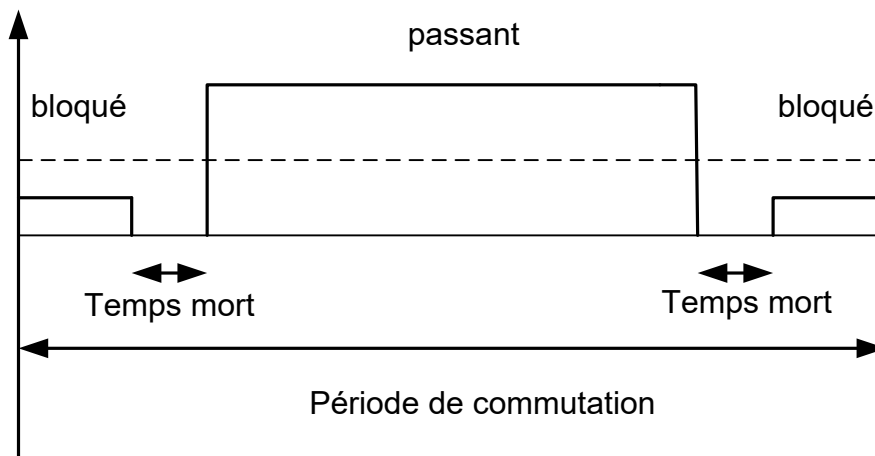


Figure III.2 Période de commutation d'un interrupteur.

Pour simplifier l'étude et la complexité de la structure de l'onduleur, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée est équilibrée et couplée en étoile.

Pour cette structure, plusieurs types de commandes sont possibles, les plus utilisées sont : - la commande à 120°
- la commande à 180°
- les commandes à modulation de largeur d'impulsion MLI

III.1.3 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux de tensions et de sa commande MLI :

L'onduleur est très utilisé avec la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) pour l'alimentation des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variables.

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer au récepteur dans les deux sens. L'onduleur de tension alimenté par une source de tension continue parfaite impose à sa sortie, grâce à la séquence d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux. La fréquence de fonctionnement est fixée par la commande des interrupteurs.

Le montage onduleur triphasé (fig. III.1) est constitué de six interrupteurs bidirectionnels. Les couples d'interrupteurs de chaque bras sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans les phases statiques de la machine asynchrone, et pour éviter de court-circuiter la source continue. Chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche (voir l'ensemble T_{11}, D_{11} sur la figure III.1).

Puisque la charge triphasée est équilibrée, la somme des 3 tensions simples instantanées est nulle :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \quad (3.1)$$

En supposant que la source de tension continue qui alimente l'onduleur possède un point milieu 'o' (fig.III.1) nous pouvons écrire les relations suivantes pour les 3 tensions simples :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad (3.2)$$

En faisant la somme des équations du système (3.2) et en utilisant (3.1) , on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3 v_{on} = 0$$

D'où :

$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3 v_{on}$$

Et on en déduit :

$$v_{on} = -\frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (3.3)$$

En substituant l'équation (3.3) dans le système (3.2), on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Sachant que les interrupteurs statiques (S_k) de l'onduleur ne peuvent avoir que 2 états possibles, $S_k = 1$ si l'interrupteur est fermé et $S_k = 0$ si l'interrupteur est ouvert, avec $k = a, b, c$, les tensions de branches v_{ko} peuvent être exprimées en fonction de S_k par :

$$v_{ko} = (2 S_k - 1) \cdot E/2 \quad (3.5)$$

Après introduction de l'expression (3.5) dans le système (3.4) et simplification, on obtient le système matriciel (3.6) qui représente le modèle mathématique de l'onduleur à deux niveaux de tensions.

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

III.1. 4 Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La commande de l'onduleur par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) permet de produire à partir d'une source de tension fixe, des tensions alternatives variables en amplitude et en fréquence, avec un faible taux d'harmoniques. [30, 31]

La technique de commande MLI sinus – triangle va être développée dans cette section.

III.1.4.1. Commande MLI sinus – triangle

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une bande modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En

triphasé, trois références sinusoïdales de même fréquence f_s et déphasées entre elles de $2\pi/3$ rad sont nécessaires pour réaliser la commande MLI. [32]

La figure III.2 montre le schéma de principe de la commande MLI Sinus-Triangle (MLIST). La modulante sinusoïdale d'amplitude V_m et de basse fréquence f_s est comparée à la porteuse triangulaire d'amplitude V_{pm} et de haute fréquence f_p pour élaborer un signal d'impulsions carrées dont la largeur est modulable (fig. III.3).

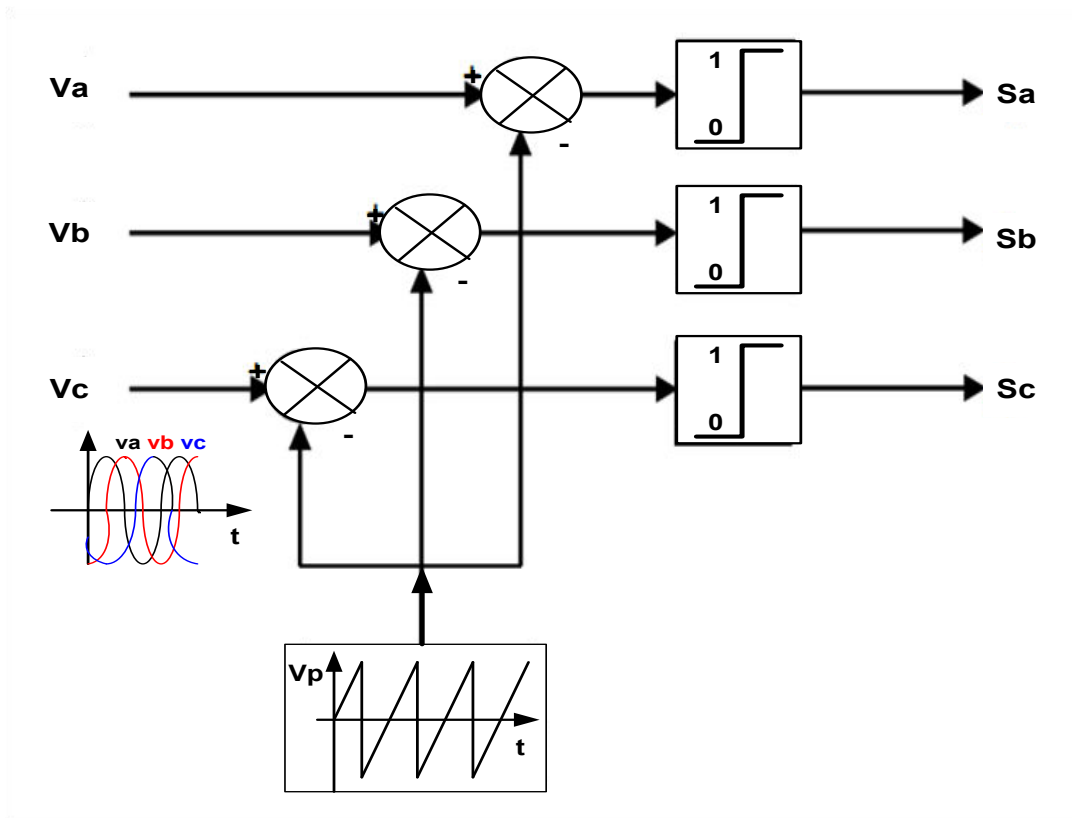


Figure III.3 Principe de la MLIST [30].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{aligned}
 V_a(t) &= V_m \sin(\omega t) \\
 V_b(t) &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 V_c(t) &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left[4 \cdot \left(\frac{t}{T_p} \right) - (4n + 1) \right] & \text{si } t \in \left[n T_p, \left(n + \frac{1}{2} \right) T_p \right] \\ V_{pm} \left[-4 \cdot \left(\frac{t}{T_p} \right) + (4n + 3) \right] & \text{si } t \in \left[\left(n + \frac{1}{2} \right) T_p, (n + 1) T_p \right] \end{cases} \quad (3.8)$$

$$n \in N$$

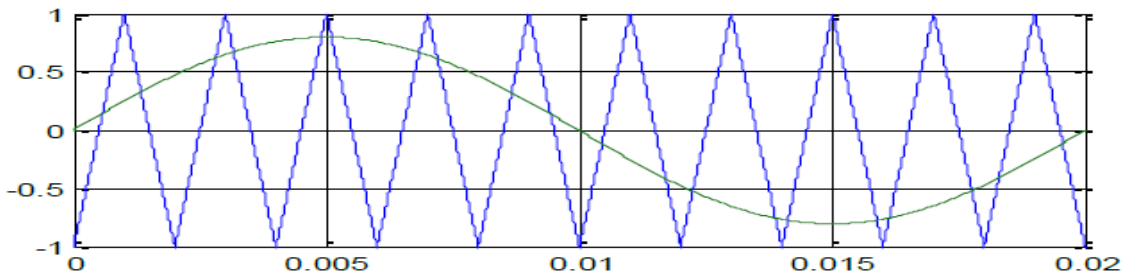
La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison des trois composantes de la tension de référence $V_{a,b,c}(t)$ avec la porteuse $V_p(t)$ afin de calculer les états des interrupteurs de l'onduleur. Ces états (S_a, S_b, S_c) sont donnés par l'expression (3.9).

$$S_{a,b,c} = \begin{cases} 1 & \text{si } V_{a,b,c}(t) \geq V_p(t) \\ 0 & \text{si } V_{a,b,c}(t) < V_p(t) \end{cases} \quad (3.9)$$

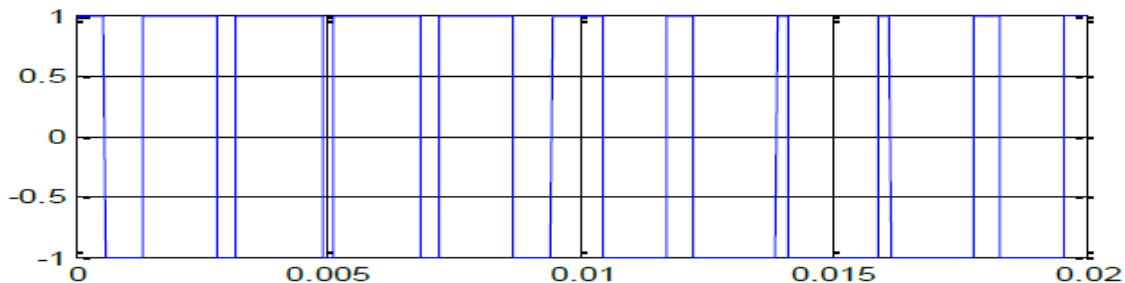
La technique MLI est caractérisée par les deux paramètres suivants :

-L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f_r), $m = \frac{f_p}{f_r}$

- Le taux de modulation r égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_r) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_p), $r = \frac{V_r}{V_p}$



(a)



(b)

Figure III.4 MLIST (a) tension de référence sinus et porteuse triangle (b) Impulsions modulées obtenues [30].

III.1.4.2. Onduleur de tension triphasé à commande 120°

Pour ce type d'onduleur chaque transistor conduit pendant 120° et pour chaque séquence de fonctionnement nous avons deux transistors qui conduisent en même temps.

La figure III.5 montre le schéma simplifié d'un onduleur triphasé, chacun des 6 transistors a été remplacé par un interrupteur supposé idéal. Les différentes tensions à l'entrée de l'onduleur et à la sortie au niveau de la charge résistive équilibrée sont indiquées. Elles sont comme suit :

- tension d'alimentation continue : E
- tensions d'alimentation mesurées par rapport au point milieu : $E/2$ et $-E/2$
- tensions composées mesurées entre phases : $U_{ab}(t)$, $U_{bc}(t)$, $U_{ca}(t)$.
- tensions simples mesurées entre phase et neutre : $V_{an}(t)$, $V_{bn}(t)$, $V_{cn}(t)$.

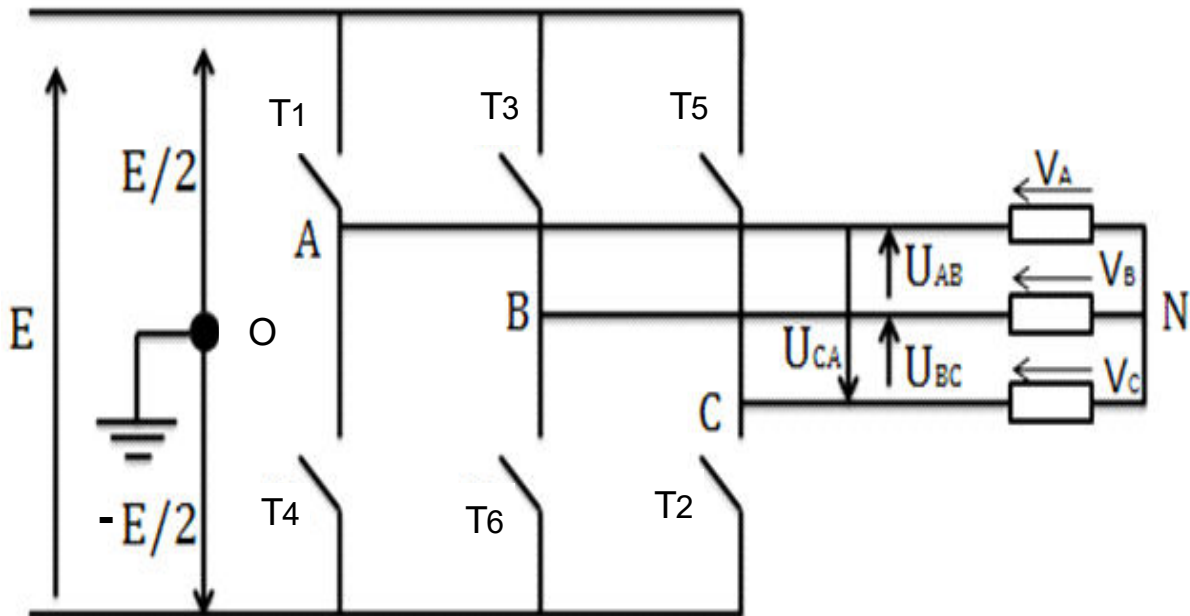


Figure III. 5 Schéma simplifié d'un onduleur triphasé.

La séquence de conduction des interrupteurs pour la commande à 120° est représentée sur la figure III.6. On peut remarquer que chaque transistor (ou interrupteur) est passant pendant $2\pi/3$ rd et chaque paire d'interrupteurs est passante pendant un angle de $\pi/3$ rd.

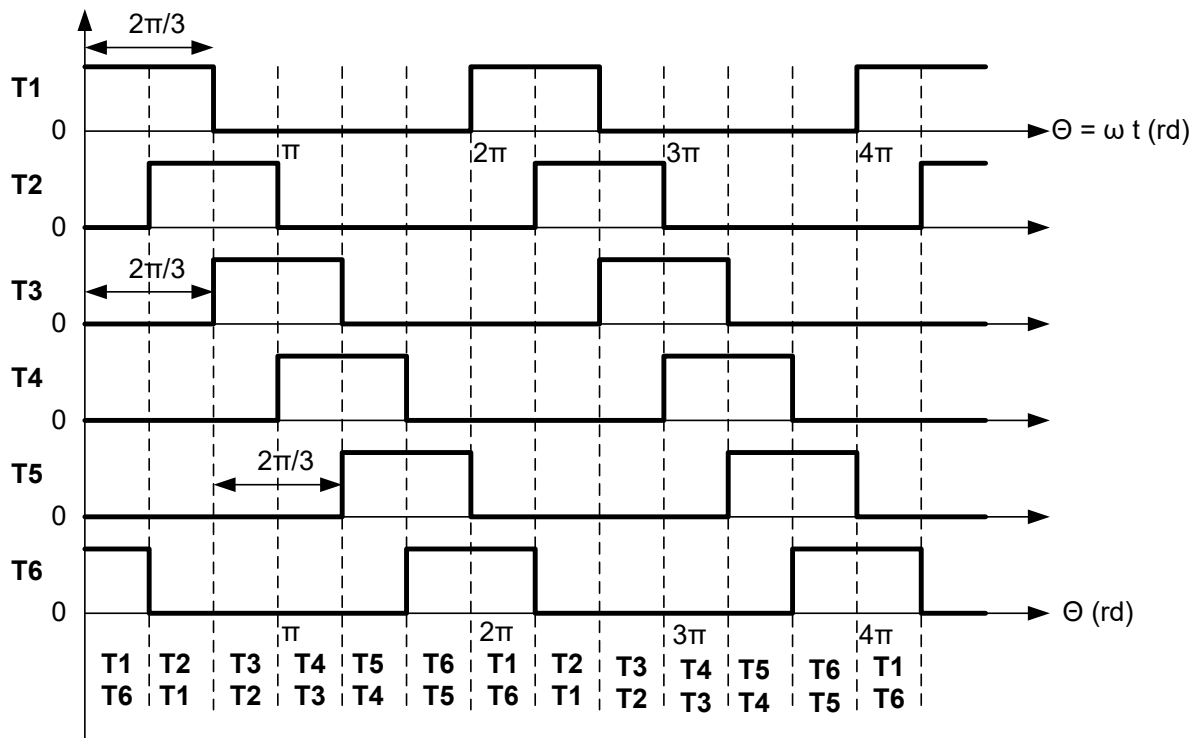


Figure III. 6 Séquence de conduction des interrupteurs pour la commande 120°.

Calcul des tensions de sortie de l'onduleur :

Le calcul des différentes tensions durant chaque phase de conduction peut se faire à l'aide des schémas électriques équivalents obtenus à partir du schéma simplifié de l'onduleur (fig.III.5) et en se basant sur la séquence de conduction des interrupteurs (fig. III.6).

1) Pour l'intervalle $0 < \omega t < \pi/3$ rd : les transistors T1 et T6 conduisent. Le schéma électrique équivalent est le suivant (fig.III.7) :

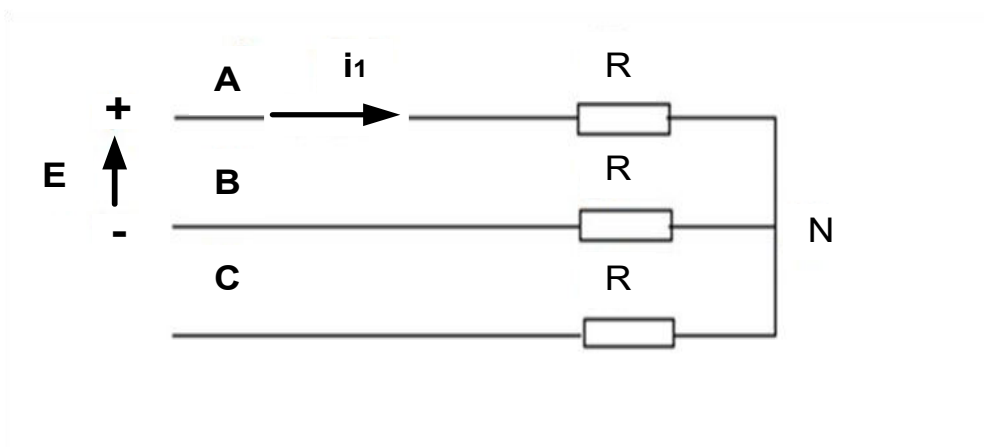


Figure III.7 Schéma électrique équivalent lorsque T₁ et T₆ conduisent (interrupteurs fermés).

D'après ce schéma nous avons les résultats suivants :

La résistance équivalente : $R_{\text{éq}} = R + R = 2R$

Le courant : $I_1 = E/R_{\text{éq}} = E/2R$

Les tensions simples :

$$U_{an}(t) = I_1 \cdot R = (E/2R) R = E/2$$

$$U_{bn}(t) = - I_1 \cdot R = - E/2$$

$$U_{cn}(t) = 0$$

Les tensions composées :

$$U_{ab}(t) = U_{an} - U_{bn} = E/2 + E/2 = E$$

$$U_{bc}(t) = U_{bn} - U_{cn} = - E/2 - 0 = - E/2$$

$$U_{ca}(t) = U_{cn} - U_{an} = - E/2$$

2) Pour l'intervalle $\pi/3 < \omega t < 2\pi/3$ rd : les transistors T1 et T2 conduisent. Le schéma électrique équivalent est le suivant (fig.III.8) :

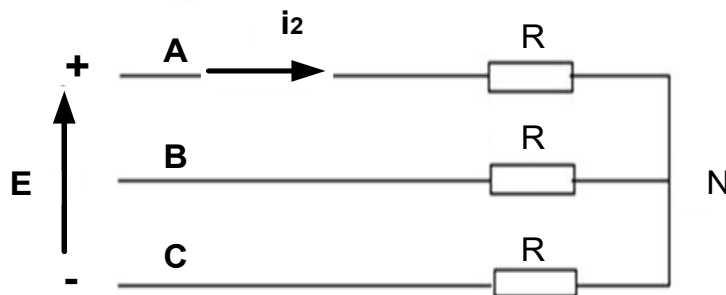


Figure III.8 Schéma électrique équivalent lorsque T₁ et T₂ conduisent (interrupteurs fermés).

D'après ce schéma nous avons les résultats suivants :

La résistance équivalente : $R_{\text{éq}} = R + R = 2R$

Le courant : $I_2 = E/R_{\text{éq}} = E/2R$

Les tensions simples :

$$U_{an}(t) = I_2 \cdot R = (E/2R) R = E/2$$

$$U_{bn}(t) = 0$$

$$U_{cn}(t) = - E/2$$

Les tensions composées :

$$U_{ab}(t) = U_{an} - U_{bn} = E/2 - 0 = E/2$$

$$U_{bc}(t) = U_{bn} - U_{cn} = 0 - (-E/2) = E/2$$

$$U_{ca}(t) = U_{cn} - U_{an} = - E/2 - E/2 = -E$$

3) Pour l'intervalle $2\pi/3 < \omega t < \pi$ rd: les transistors T3 et T2 conduisent. Le schéma électrique équivalent est le suivant (fig.III.9) :

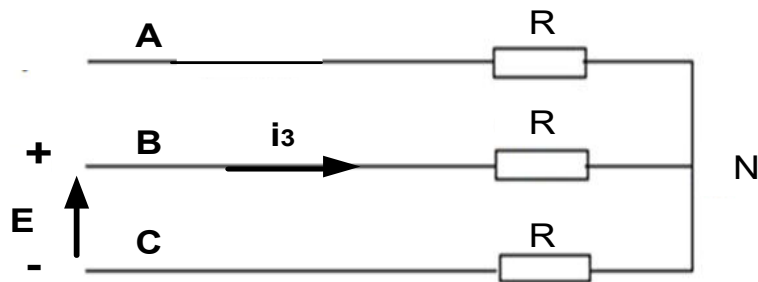


Figure III.9 Schéma électrique équivalent lorsque T_3 et T_2 conduisent (interrupteurs fermés).

D'après ce schéma nous avons les résultats suivants :

La résistance équivalente : $R_{\text{éq}} = R + R = 2R$

Le courant : $I_3 = E/R_{\text{éq}} = E/2R$

Les tensions simples :

$$U_{an}(t) = 0$$

$$U_{bn}(t) = I_2 \cdot R = (E/2R) \cdot R = E/2$$

$$U_{cn}(t) = -E/2$$

Les tensions composées :

$$U_{ab}(t) = U_{an} - U_{bn} = 0 - E/2 = -E/2$$

$$U_{bc}(t) = U_{bn} - U_{cn} = E/2 - (-E/2) = E$$

$$U_{ca}(t) = U_{cn} - U_{an} = -E/2 - 0 = -E/2$$

4) Pour l'intervalle $\pi < \omega t < 4\pi/3$ rd: les transistors T_4 et T_3 conduisent. Le schéma électrique équivalent est le suivant (fig.III.10) :

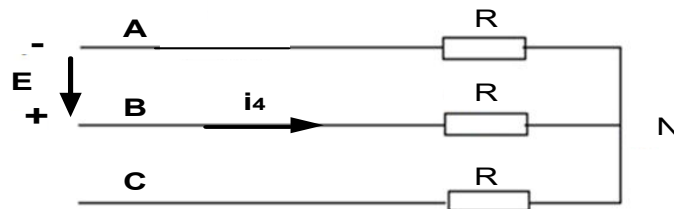


Figure III.10 Schéma électrique équivalent lorsque T_3 et T_4 conduisent (interrupteurs fermés).

D'après ce schéma nous avons les résultats suivants :

La résistance équivalente : $R_{\text{éq}} = R + R = 2R$

Le courant : $I_4 = E/R_{\text{éq}} = E/2R$

Les tensions simples :

$$U_{an}(t) = - E/2$$

$$U_{bn}(t) = I_2 \cdot R = (U_e/2R) R = E/2$$

$$U_{cn}(t) = 0$$

Les tensions composées :

$$U_{ab}(t) = U_{an} - U_{bn} = - E/2 - E/2 = -E$$

$$U_{bc}(t) = U_{bn} - U_{cn} = E/2 - 0 = E/2$$

$$U_{ca}(t) = U_{cn} - U_{an} = 0 - (- E/2) = E/2$$

5) Pour l'intervalle $4\pi/3 < \omega t < 5\pi/3$ rd: les transistors T5 et T4 conduisent. Le schéma électrique équivalent est le suivant (fig.III.11) :

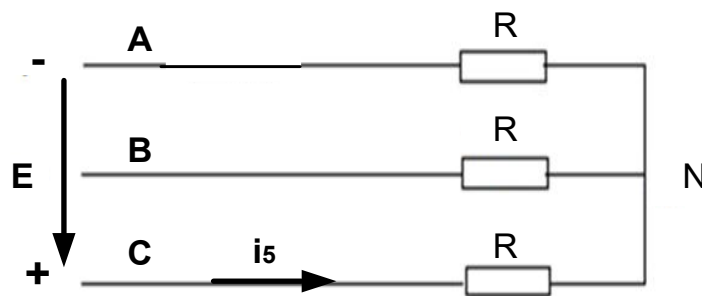


Figure III.11 Schéma électrique équivalent lorsque T₅ et T₄ conduisent (interrupteurs fermés).

D'après ce schéma nous avons les résultats suivants :

La résistance équivalente : $R_{\text{éq}} = R + R = 2R$

Le courant : $I_5 = E/R_{\text{éq}} = E/2R$

Les tensions simples :

$$U_{an}(t) = - E/2$$

$$U_{bn}(t) = 0$$

$$U_{cn}(t) = I_5 \cdot R = (E/2R) R = E/2$$

Les tensions composées :

$$U_{ab}(t) = U_{an} - U_{bn} = - E/2 - 0 = -E/2$$

$$U_{bc}(t) = U_{bn} - U_{cn} = 0 - E/2 = -E/2$$

$$U_{ca}(t) = U_{cn} - U_{an} = E/2 - (- E/2) = E$$

6) Pour l'intervalle $5\pi/3 < \omega t < 2\pi$ rd: les transistors T5 et T6 conduisent.

Le schéma électrique équivalent est le suivant (fig.III.12) :

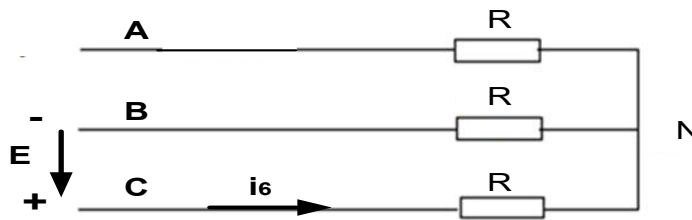


Figure III.12 Schéma électrique équivalent lorsque T_5 et T_6 conduisent (interrupteurs fermés).

D'après ce schéma nous avons les résultats suivants :

La résistance équivalente : $R_{\text{éq}} = R + R = 2R$

Le courant : $I_6 = E/R_{\text{éq}} = E/2R$

Les tensions simples :

$$U_{an}(t) = 0$$

$$U_{bn}(t) = -E/2$$

$$U_{cn}(t) = I_6 \cdot R = (E/2R) R = E/2$$

Les tensions composées :

$$U_{ab}(t) = U_{an} - U_{bn} = 0 - (-E/2) = E/2$$

$$U_{bc}(t) = U_{bn} - U_{cn} = -E/2 - E/2 = -E$$

$$U_{ca}(t) = U_{cn} - U_{an} = E/2 - 0 = E/2$$

Graphes des tensions délivrées par l'onduleur :

Les tensions simples et les tensions composées délivrées par l'onduleur à commande 120° sont représentées comme suit (fig. III.13) :

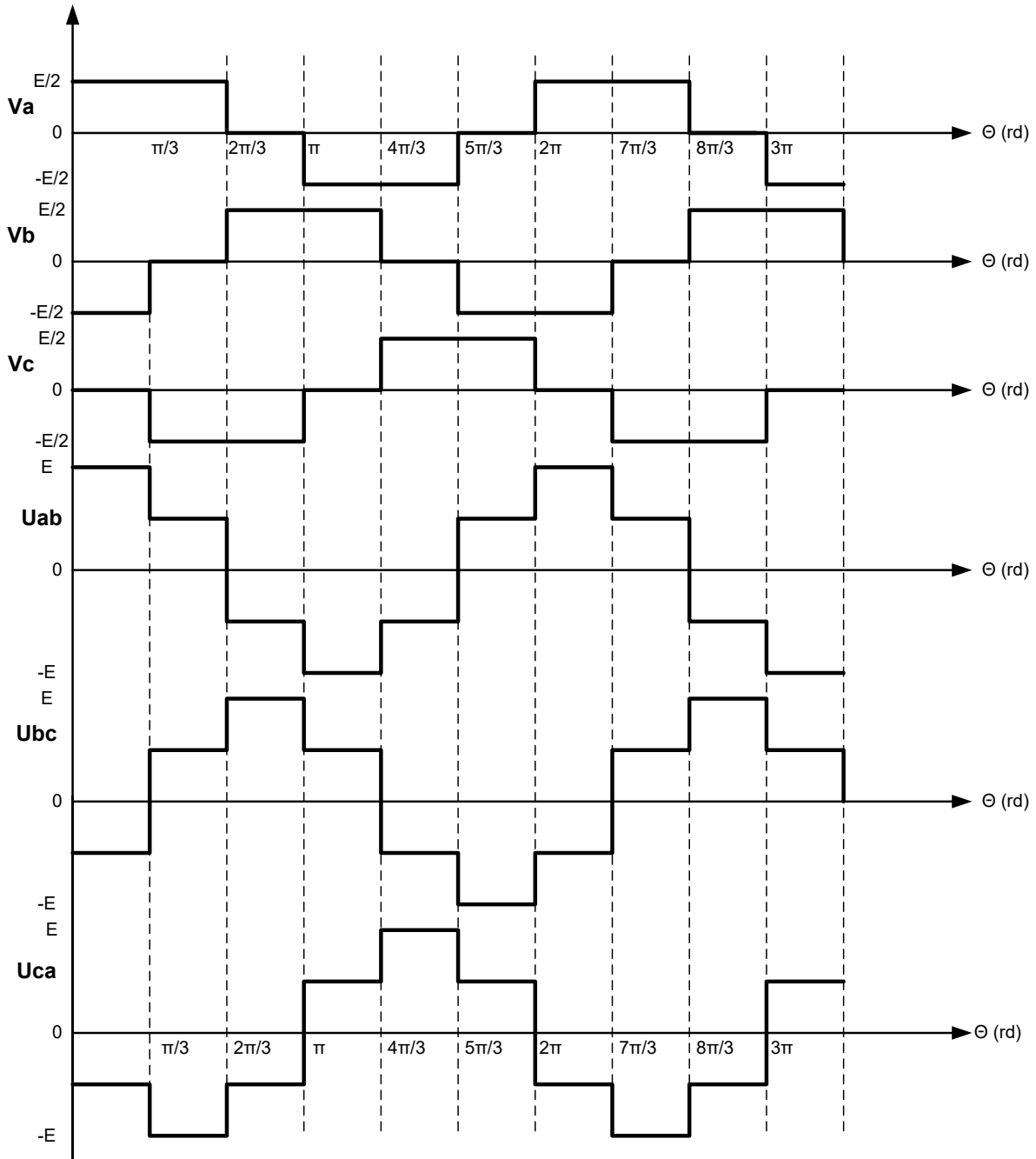


Figure III.13 Tensions simples et tensions composées à la sortie de l'onduleur triphasé pour une commande à 120°.

Les expressions des valeurs efficaces sont :

-pour les tensions composées : $U_{\text{eff}} = \frac{E}{\sqrt{2}}$

-pour les tensions simples : $V_{\text{eff}} = \frac{E}{\sqrt{6}}$

D'où le rapport entre les valeurs efficaces : $U_{\text{eff}} = \sqrt{3} V_{\text{eff}}$

Pour un onduleur triphasé avec commande à 120°, le réglage des valeurs efficaces ne peut se faire que par variation de la tension délivrée par la source de

tension continue qui alimente l'onduleur. Tandis que la variation des instants de commutation des interrupteurs permet de faire un réglage de la fréquence des tensions de sortie.

Pour pouvoir réaliser ces réglages, il faut insérer un convertisseur statique en aval de l'onduleur, et 2 solutions sont possibles selon l'origine de la tension continue : - un hacheur si la source primaire est une batterie d'accumulateurs ou un panneau photovoltaïque.

-un redresseur commandé si la source primaire provient d'un réseau d'alimentation triphasé.

Harmoniques des tensions simples :

La forme de la tension simple V_a est en créneaux alternativement positifs et négatifs et de période T . La décomposition en série de Fourier peut être exprimée comme suit :

$$v_a(t) = \sqrt{3} \frac{E}{\pi} \sin(\omega t) + \sqrt{3} \frac{E}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^k}{6k+1} \sin((6k-1)\omega t) \right] \quad (3.10)$$

k entier naturel impair.

En développant les premiers termes on obtient :

$$v_a(t) = \sqrt{3} \frac{E}{\pi} \sin(\omega t) + \sqrt{3} \frac{E}{5\pi} \sin(5\omega t) + \sqrt{3} \frac{E}{7\pi} \sin(7\omega t) + \sqrt{3} \frac{E}{11\pi} \sin(11\omega t) + \dots \quad (3.11)$$

On remarque que les harmoniques paires et multiples de 3 (3, 9, 12, ...) disparaissent, alors que celles de rangs 5, 7, 11, 13, ... restent présentes dans le spectre.

L'expression de la valeur efficace du fondamental de la tension simple est :

$$V_{1\text{eff}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{E}{\pi} \quad (3.12)$$

III.2 La machine asynchrone

III.2.1 Introduction :

La machine asynchrone occupe une grande place dans les applications industrielles. La croissance dans l'utilisation de cette machine électrique est essentiellement due à sa simplicité de construction, à son faible coût et à sa robustesse mécanique. Actuellement elle est de plus en plus utilisée dans les applications à vitesse variable nécessitant une alimentation par onduleurs de tension dont les composants de puissance doivent commuter très rapidement. L'utilisation des machines à courant alternatif et plus particulièrement les machines asynchrones est de plus en plus répandue dans les milieux industriels.

La machine asynchrone est la machine la plus utilisée du fait qu'elle nécessite peu d'entretien, elle est moins coûteuse et se présente avec une construction assez simple, elle est aussi très connue par sa standardisation et sa robustesse. La machine asynchrone est la plus utilisée comme moteur et a remplacé le moteur à courant continu dans plusieurs applications. Mais sa dynamique non linéaire est un problème assez délicat à résoudre car elle rend la commande très difficile [26].

III.2.2 Constitution de la machine asynchrone

Les différentes parties de la machine asynchrone sont représentées sur la figure III.14

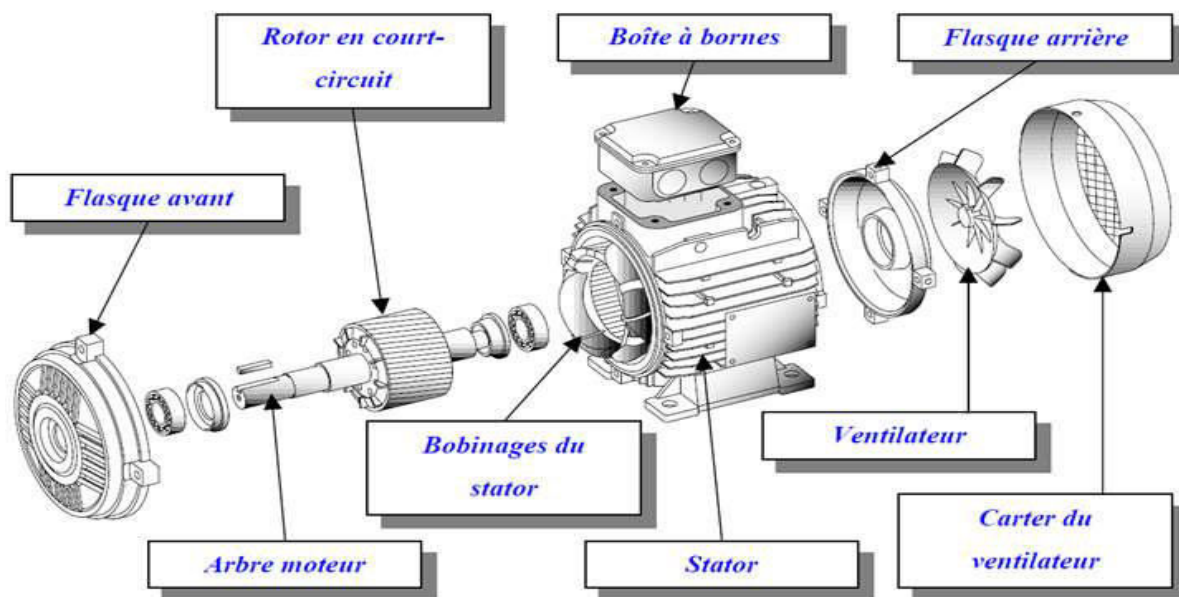


Figure III.14 Constitution de la machine asynchrone [34].

Le Stator (fig. III.15):

Le stator d'un moteur asynchrone triphasé est constitué de 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle et décalés entre eux d'un angle de $2\pi/3$ rd et qui sont alimentés par un système de tensions triphasé équilibré.

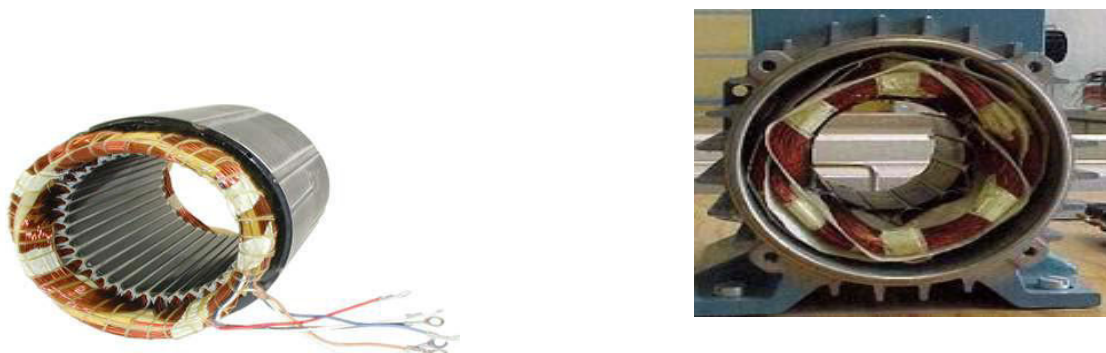


Figure III.15 Types de stators avec les 3 enroulements [33].

Lorsque les 3 enroulements du stator sont parcourus par un courant triphasé ils produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme. Cette vitesse est en fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Algérie) et du nombre de paires de pôles du moteur. La fréquence f du réseau étant fixe, la vitesse de rotation du champ tournant ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles p . Le tableau III.1 donne les vitesses de synchronisme en fonction de p .

La vitesse de synchronisme est donnée par l'expression suivante :

$$n_s = \frac{60.f}{p} \text{ tr/mn} \quad (3.13)$$

Paires de pôles	1	2	3	4	6
Nombre de pôles	2	4	6	8	12
N_0 [tr/min]	3000	1500	1000	750	500

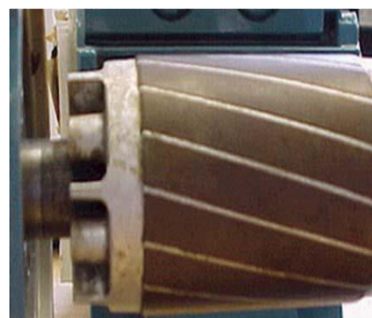
Tableau III.1 Nombre de paires de pôles et vitesse de synchronisme.

Le rotor

C'est l'élément mobile du moteur, il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Les rotors, de par leur technologie, sont de deux types (fig.III.16), le rotor en court-circuit (moteur à cage d'écureuil) et le rotor bobiné (moteur à bagues) ce qui permet de classer les moteurs asynchrone en deux catégories.



(a)



(b)



(c)

Figure III.16 Le rotor, a, b) à cage d'écureuil, c) bobiné [33].

L'entrefer

C'est le vide entre le stator et le rotor, il doit être d'épaisseur la plus faible possible (de l'ordre du millimètre) pour diminuer les fuites du champ magnétique statorique. Mais cette épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statoriques. Ceci crée des harmoniques dites d'encoches. Pour les réduire, on maintient les encoches fermées à l'aide de cales magnétiques qui permettent de fixer le bobinage statorique [28].

III.2.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La vitesse de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants triphasés qui alimentent les bobinages statoriques. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme n_s (tr/mn) ou Ω_s (rd/s) . Les enroulements rotoriques sont donc soumis aux variations du flux produit par le champ magnétique tournant. Une force électromotrice induite apparaît au niveau des enroulements du rotor et crée les courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple moteur qui tend à mettre le rotor en rotation dans le sens du champ tournant afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz. La machine est dite asynchrone car la vitesse du rotor est toujours inférieure à la vitesse du champ tournant ou vitesse de synchronisme. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement.

III.2.4 Caractéristiques électromécaniques [35]

III.2.4.1 Puissance nominale

La puissance nominale (P_n) est la puissance mécanique disponible sur l'arbre du moteur lorsqu'il tourne à pleine charge à vitesse nominale.

III.2.4.2 Vitesse nominale

La vitesse nominale est la vitesse du moteur avec charge nominale, elle est légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme $n_{\text{nom}} < n_s = \frac{f}{p}$. La différence représente la vitesse de glissement en régime nominal :

$$n_g = n_s - n_{\text{nom}} \quad (3.14)$$

n_{nom} : vitesse nominale du rotor en tr /s

n_s : vitesse de synchronisme, en tr /s.

n_g : vitesse de glissement en tr/s.

f : fréquence du réseau en Hz.

p : nombre de paires de pôles.

III.2.4.3 Intensité nominale

L'intensité nominale est la valeur de l'intensité du courant absorbé par le moteur en régime nominal, elle dépend du type de couplage étoile ou triangle appliqué aux enroulements du stator.

III.2.4.4 Facteur de puissance $\cos \varphi$ et rendement η

Le rendement représente le rapport entre la puissance utile (P_u) disponible sur l'arbre du moteur et par conséquent fournie à la charge et la puissance absorbée (P_a) par le moteur.

Le facteur de puissance ($\cos \varphi$) est le cosinus de l'angle de déphasage entre le courant absorbé par phase et la tension d'une phase, il varie en fonction de la charge du moteur.

La puissance utile sur l'arbre du moteur en triphasé est donné par la relation :

$$P_u = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta \quad (3.15)$$

U : tension entre phases du réseau d'alimentation triphasé, en V.

I : courant d'alimentation en ligne, en A.

φ : déphasage entre I et U , en rd.

η : rendement du moteur, en %, il est donné par le rapport : $\eta = P_u / P_a$ (3.16)

III.2.4.5 Le courant de démarrage

Les moteurs asynchrones triphasés demandent un fort courant (I_d) lors du démarrage direct, selon les modèles utilisés, ce courant peut atteindre une valeur de 3 à 15 fois supérieure à celle du courant nominal, et ceci représente le principal inconvénient de ce type de machine. Comme valeur de base courante, on peut utiliser une valeur de 7 à 8 fois supérieure à celle du courant assigné au moteur (fig.III.17). Cela signifie que pendant le démarrage du moteur, le réseau d'alimentation doit être dimensionné pour fournir cette forte intensité [36].

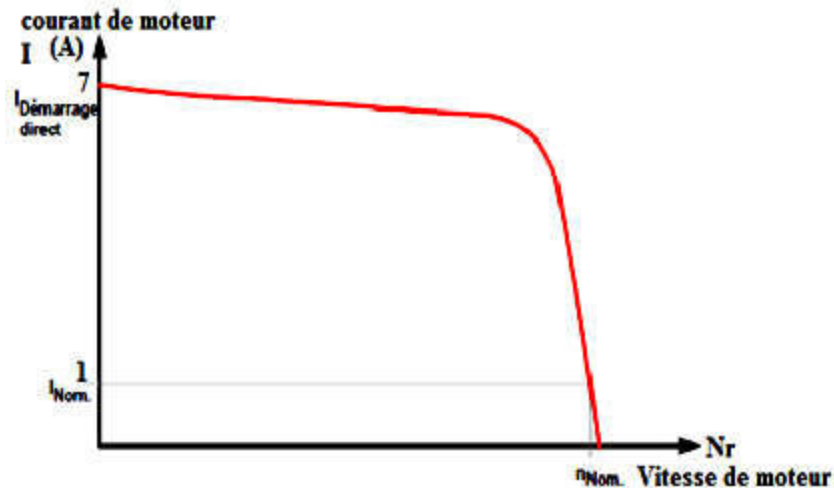


Figure III.17 Évolution du courant de démarrage d'un moteur asynchrone triphasé.

III.2.4.6 Le couple utile

Considérons un moteur asynchrone triphasé à cage, alimenté par une source triphasée dont la tension et la fréquence sont fixes. A mesure qu'on augmente la charge mécanique du moteur (couple utile C), sa vitesse baisse progressivement. La figure III.18 donne la courbe de variation du couple utile en fonction de la vitesse pour un moteur de 1 kW. Si C_n désigne la valeur du couple à pleine charge, on voit que le couple de démarrage C_d vaut $1,5 C_n$. A mesure que la vitesse croit, le couple diminue, et passe par un minimum (C_{minimal}) avant d'augmenter de nouveau. Il atteint une valeur maximale de $2,5 C_n$ à 80 % de la vitesse synchrone. Passé ce point, le couple diminue, tandis que la vitesse continue à augmenter. On passe alors par le point d'opération normal (C_{nominal} , n) de pleine charge, avant d'atteindre la vitesse synchrone n_s , où le couple s'annule.

Les moteurs de petite puissance (10 kW et moins) atteignent leur couple de décrochage à une vitesse n_d qui est d'environ 80 % de la vitesse synchrone tandis que les machines de grosse puissance (1000 kW et plus) décrochent à une vitesse de l'ordre de $0,98 n_s$ [37].

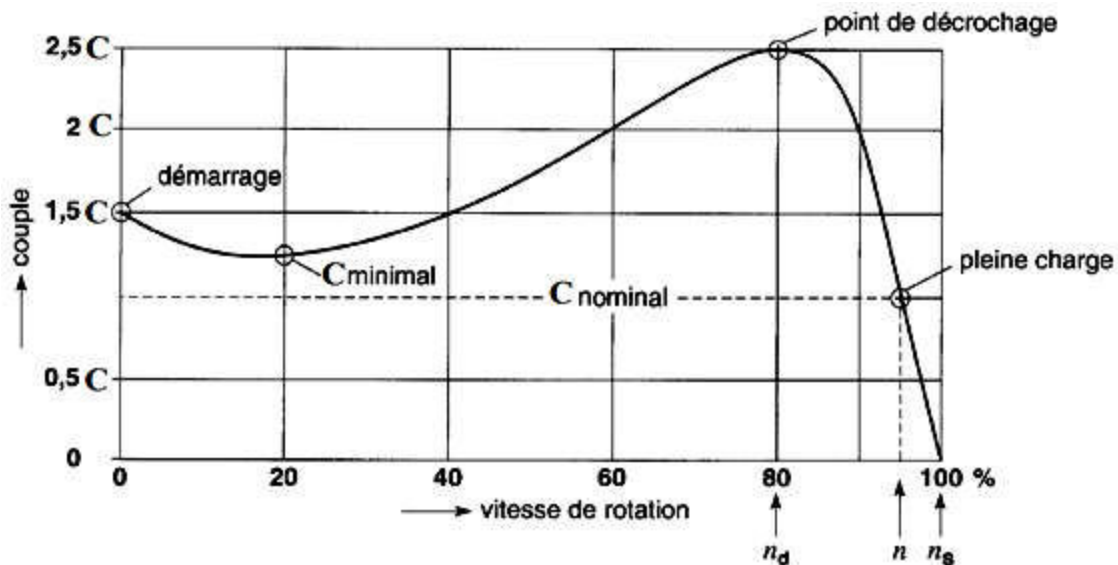


Figure III.18 Courbe typique du couple utile en fonction de la vitesse pour un moteur asynchrone triphasé de 1 kW [37].

III.2.4.7 La variation de la vitesse dans les MAS :

III.2.4.7.1 Réglage par variation de tension :

Le couple électromagnétique (C_m) de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique avec un **gradateur triphasé**. Cette solution est le plus souvent utilisée pour le démarrage de charges à caractéristique de couple quadratique ($C_r = k \cdot \Omega^2$).

III.2.4.7.2 Réglage par action sur le glissement :

L'utilisation de résistances rotoriques permet un réglage de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor : c'est la **cascade hypo-synchrone** réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné.

III.2.4.7.3 Réglage par variation de la fréquence d'alimentation :

La vitesse de rotation de la machine étant au glissement près proportionnel à la fréquence d'alimentation des enroulements statoriques, on essaiera de créer pour ces enroulements un réseau à fréquence variable à l'aide d'**onduleurs de tension**. On peut aussi chercher à injecter des courants dans les enroulements statoriques à l'aide d'**onduleurs de courant**, pour imposer le couple de la machine. On peut également convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus faible (de 0 à 1/3 de la fréquence réseau) à l'aide d'un **cyclo-convertisseur**.

III.2.5 Types de démarrage de la machine asynchrone

Les différents types de démarrage de la MAS sont les suivants :

- Démarrage direct pour un moteur à 1 sens de rotation
- Démarrage direct pour moteur à 2 sens de rotation :
- Démarrage moteur étoile/triangle
- Démarrage par résistances rotoriques
- Démarrage par résistances statoriques
- Démarrage électronique.

III.2.6 Modélisation de la MAS

La modélisation de la machine asynchrone est une étape indispensable pour visualiser et par suite analyser l'évolution dans le temps des différentes grandeurs électromécaniques, électriques et magnétiques caractérisant la machine. Ce qui permettra par la suite de prévoir le contrôle nécessaire à adopter pour atteindre les résultats pratiques demandés.

Pour que le modèle de la machine asynchrone puisse décrire le comportement dynamique des différentes grandeurs concernées par le système de contrôle comme le couple électromagnétique, le flux magnétique, les courants et les tensions, il est nécessaire de poser quelques hypothèses simplificatrices.

III.2.6.1 Hypothèses simplificatrices :

Afin de simplifier la modélisation de la machine, on va admettre les hypothèses simplificatrices suivantes [38] :

- Entrefer constant ;
- Effet des encoches du stator négligé ;
- Répartition sinusoïdale de l'induction magnétique dans l'entrefer ;
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligées (pas de courants de Foucault, ni d'hystérésis) ;
- Pertes mécaniques négligées (pas de frottements) ;
- Influence de l'effet de peau négligée ;
- Les variations des caractéristiques dues à l'échauffement ne sont pas prises en compte ;

III.2.6.2 Equations des tensions et des flux :

Soit une machine asynchrone triphasée représentée schématiquement par la fig. (III.19) et dont les phases sont repérées respectivement (A,B,C) pour le stator et (a,b,c) pour le rotor. (V_A, V_B, V_C) représente le système des 3 tensions simples statoriques et (V_a, V_b, V_c) le système des 3 tensions simples rotoriques. L'angle électrique α variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases « A » et « a » choisis comme axes de référence.

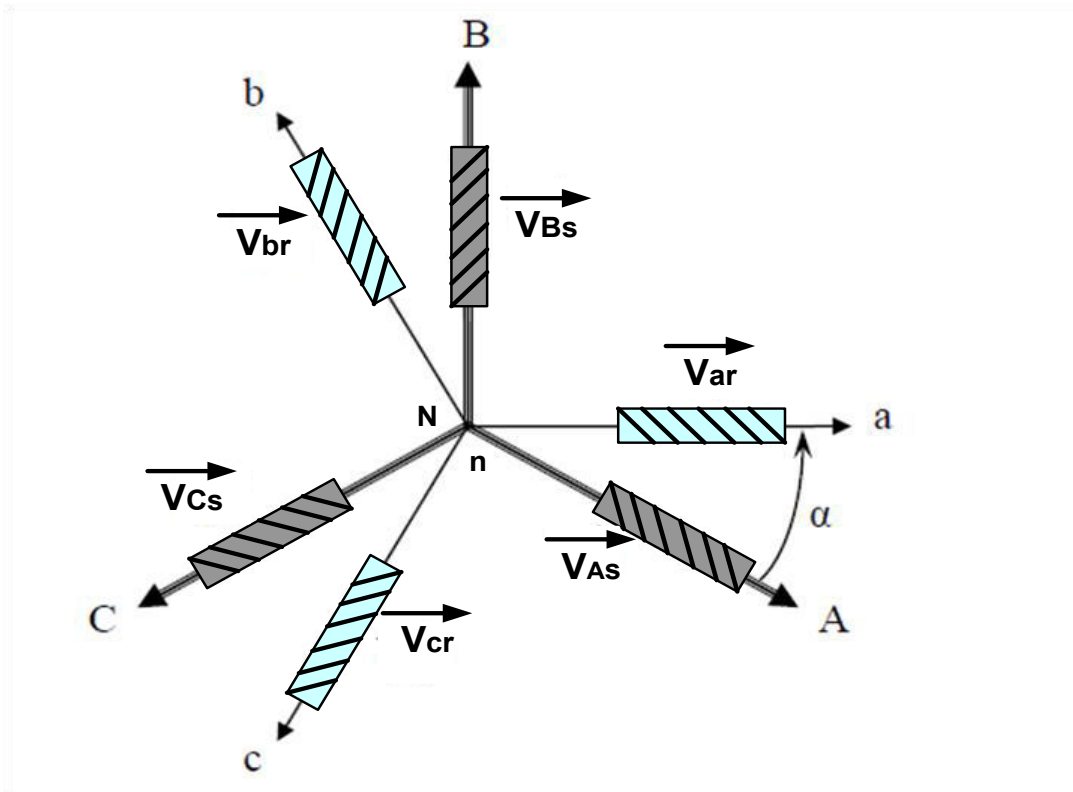


Figure III.19 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

Dans toutes les équations qui seront mentionnées dans cette partie, on spécifiera respectivement les vecteurs et les paramètres statoriques par l'indice s et celles rotoriques par l'indice r . Les indices abc indiqueront quant à eux les phases triphasées. Les paramètres R_s et R_r représenteront respectivement les résistances statoriques et rotoriques par phase. Les vecteurs $[V]$, $[I]$ et $[\Phi]$ représenteront les vecteurs tensions, courants et flux de chacune des armatures.

Les équations des tensions statoriques, écrites dans un référentiel stationnaire lié au stator, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (3.17)$$

Les équations des tensions rotoriques, écrites dans un référentiel tournant lié au rotor, peuvent être exprimées par :

$$[0] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \quad (3.18)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad [V_r] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad [R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{rs}][I_r] \quad (3.19)$$

$$[\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{sr}][I_s] \quad (3.20)$$

Avec :

[L_s]: matrice d'inductances statoriques , [L_r] : matrice d'inductances rotoriques.

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

La machine est définie par 5 inductances :

- 1) l'inductance propre d'une phase statorique l_s ,
- 2) l'inductance propre d'une phase rotorique l_r ,
- 3) l'inductance mutuelle entre phases statoriques M_s ,
- 4) l'inductance mutuelle entre phases rotoriques M_r ,
- 5) l'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique $[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$

La matrice des inductances mutuelles [M_{sr}] entre phases statoriques et rotoriques (matrice de couplage rotor- stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^{tr} = M_{\max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$[M_{sr}]^{tr}$: La matrice des inductances mutuelles rotor-stator.

θ : La position absolue entre stator et rotor.

M_{\max} : représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator/rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

En mettant (3. 19) et (3. 20) dans, respectivement, (3.17) et (3.18), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][I_s] + [M_{rs}][I_r] \} \quad (3.21)$$

$$[0] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_r][I_r] + [M_{sr}]^{tr} [I_s] \} \quad (3.22)$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables (3.20) et (3.21) du fait des termes trigonométriques contenus dans la matrice des inductances mutuelles $[M_{sr}]$ car l'angle θ varie en fonction du temps. La résolution analytique de ce système se heurte à des difficultés pratiquement insurmontables, pour cette raison on fait appel à des transformations mathématiques. Ces transformations permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Ceci permettra d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé et qui restera valable pour la machine réelle. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de R.H.Park.

III.2.6.3 Modèle de Park de la Machine Asynchrone

Cette transformation est ancienne (1929) et si elle revient à l'ordre du jour, c'est tout simplement parce que les progrès de la technologie des composants permettent maintenant de la réaliser en temps réel. [39]

Physiquement, on peut la comprendre comme une transformation des trois enroulements de la MAS (système triphasé) à seulement deux enroulements (système biphasé), comme le montre la figure III.20.

En choisissant un repère « d q o » diphasé tournant, l'axe d peut être repéré par :

θ_s : l'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « A » du stator;
 θ_r : l'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du rotor ;
 θ : l'angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique.

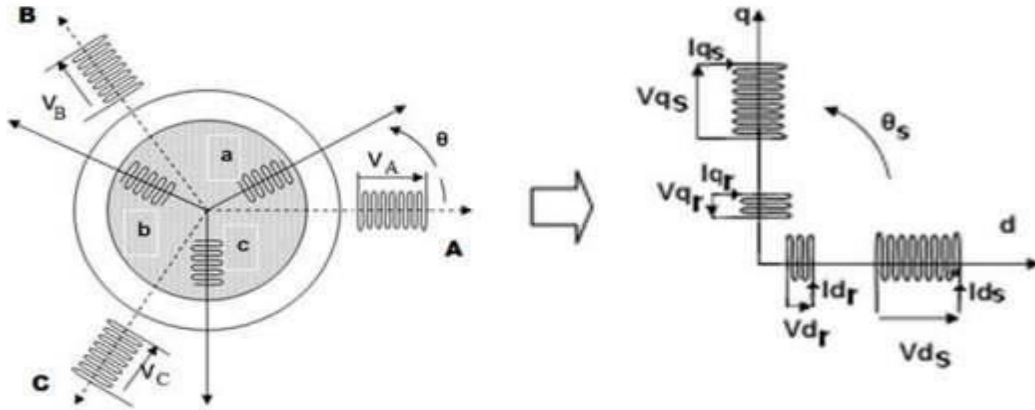


Figure III.20 Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée et biphasée équivalente obtenue par transformation de Park [39].

La figure III. 21 donne le modèle simplifié de la MAS après la transformation de Park.

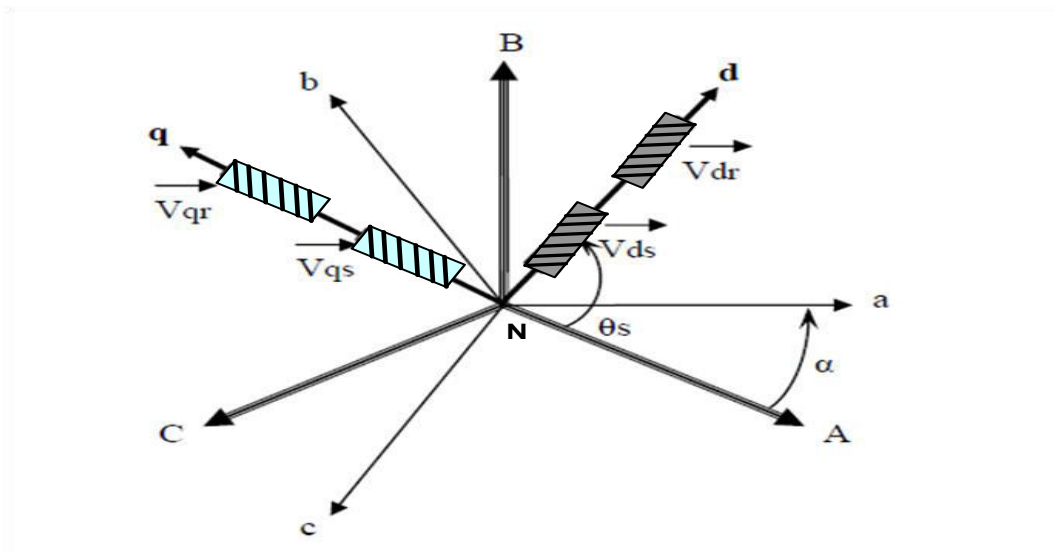


Figure III.21 Le modèle simplifié de la machine après transformation de Park.

III.2.6.4 Transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée – diphasée suivie d'une rotation d'angle θ_s . Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère mobile (dq0). Pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques), on applique la transformation de Park. Pour simplifier les équations, et par conséquent le modèle, les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider. Si l'on note par θ_s (resp. par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques) (figure III.22), ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation :

$$\theta_s - \theta_r = p \cdot \Theta \quad (3.23)$$

p : nombre de paires de pôles de la machine.

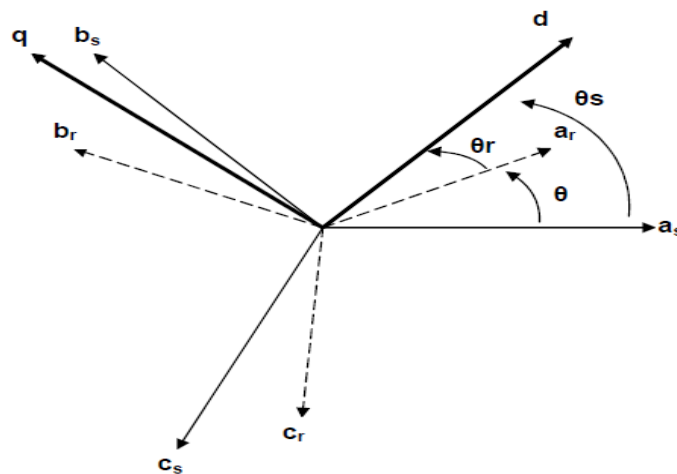


Figure III.22 Représentation des axes de la machine et des axes de Park.

Les amplitudes directe (d) et en quadrature (q) des grandeurs statoriques et rotoriques sont fictives.

Le vecteur x_0 représente la composante homopolaire, normale au plan formé par les vecteurs x_d et x_q représentant les vecteurs diphasés qui correspondent aux vecteurs triphasés x_a , x_b et x_c . La transformation de Park est définie par l'expression (3.23) dans le sens direct et par (3.24) dans le sens inverse.

$$[x_{abc}] = [P(\theta)] [x_{dq0}] \quad (3.24)$$

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)]^{-1} [x_{abc}] \quad (3.25)$$

$[P(\theta)]$ et $[P(\theta)]^{-1}$ étant les matrices de passage direct et inverse, elles sont données par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

et
$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La transformation de Park, est appliquée de manière identique aux vecteurs tensions, courants et flux.

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé.

La transformation des grandeurs statoriques et rotoriques est définie dans le sens direct par :

$$\begin{aligned} [I_{dq0}]_i &= [P(\theta)][I_{abc}]_i \\ [V_{dq0}]_i &= [P(\theta)][V_{abc}]_i \\ [\Phi_{dq0}]_i &= [P(\theta)][\Phi_{abc}]_i \end{aligned} \quad (3.26)$$

avec : $i = s, r$

Et dans le sens inverse par :

$$\begin{aligned} [I_{abc}]_i &= [P(\theta)]^{-1}[I_{dq0}]_i \\ [V_{abc}]_i &= [P(\theta)]^{-1}[V_{dq0}]_i \\ [\Phi_{abc}]_i &= [P(\theta)]^{-1}[\Phi_{dq0}]_i \end{aligned} \quad (3.27)$$

avec : $i = s, r$

Application aux équations des tensions statoriques :

L'application de la transformation de Park aux équations des tensions statoriques avec un angle θ_s donne les équations statoriques suivantes dans le repère dq :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Application aux équations des tensions rotoriques :

L'application de la transformation de Park aux équations des tensions rotoriques avec un angle θ_r donne les équations rotoriques suivantes dans le repère dq:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Application aux équations des flux magnétiques :

Pour les équations des flux statoriques :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Pour les équations des flux rotoriques :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: inductance cyclique statorique

$L_r = l_r - M_r$: inductance cyclique rotorique

l_s : inductance de fuite statorique

l_r : inductance de fuite rotorique

L_m : inductance mutuelle maximale, avec $L_m = 3/2 M_{sr}$.

III.2.6.4 Choix du référentiel :

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

- Référentiel lié au stator : Caractérisé par $\theta_s = 0$, et par conséquence $\theta_r = -\theta$.
- Référentiel lié au rotor : Caractérisé par $\theta_r = 0$, et par conséquence $\theta_s = \theta$.

- Référentiel lié au champ tournant : Dans ce cas, la vitesse du repère **dq** est la vitesse de synchronisme ω_s (vitesse du champ tournant).

L'utilisation du troisième référentiel est très importante car dans ce cas les axes d et q sont solidaires du champ tournant de la machine et en régime permanent, cette solution fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales [40]. Dans cette configuration, en régime sinusoïdal permanent, on a :

$$d\theta_s/dt = \omega_s \text{ et } d\theta_r/dt = \omega_r \quad (3.32)$$

ces deux pulsations sont reliées à la vitesse mécanique Ω (rd/s) du rotor par l'équation suivante : $\omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega$ (3.33)

les systèmes d'équations (3.28) et (3.29) deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ 0 = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ 0 = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (3.34)$$

L'expression du couple électromagnétique dans le repère de Park est donnée par :

$$C_e = P \cdot M \cdot (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (3.35)$$

Et l'équation mécanique de la machine asynchrone est la suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = C_e - C_r \quad (3.36)$$

avec :

P : puissance de la machine

J : moment d'inertie de la machine [kg.m²]

f : coefficient de frottements [Nm/rd.s⁻¹]

Cr : couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine [Nm]

Ce : couple électromagnétique développé par la machine [Nm]

p : nombre de paires de pôles

Ω : vitesse mécanique de la machine, donnée par $\Omega = \omega/p$, [rd/s]

Conclusion :

La première partie de ce chapitre a été réservée à l'étude des onduleurs de tension triphasés à deux niveaux. Certains types de commandes ont été détaillés comme la commande à 120° et la commande MLI sinus – triangle ce qui a permis de faire une comparaison entre-elles et de faire un choix pour notre application. Dans la deuxième partie nous avons présenté des notions générales sur la machine asynchrone, sa constitution, son principe de fonctionnement et ses caractéristiques. La modélisation mathématique et la transformation de Park ont été présentées dans le but de la simulation de la MAS.

Chapitre IV

Modélisation, simulation et résultats

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les schémas de simulation des différents étages du système composé d'un générateur photovoltaïque, d'un hacheur DC-DC, d'un onduleur de tensions triphasé et d'un moteur asynchrone triphasé de moyenne puissance. Les résultats obtenus par simulation sont interprétés et commentés. Tous les travaux sont réalisés à l'aide du logiciel Matlab/Simulink et Simpower/Simscape.

Notre travail commence par la cellule solaire, puis le convertisseur DC-DC dévolteur/survolteur, puis l'onduleur triphasé et enfin la machine asynchrone. Une simulation du système global est prévue.

Notre objectif est d'étudier les performances de chacun des étages qui composent le système avec le GPV en tant qu'alimentation continue travaillant sous les conditions standards d'irradiation solaire et de température ambiante. L'influence des changements climatiques et les variations de l'ensoleillement ou de la température sur le GPV ne sont pas pris en compte dans cette étude.

IV.2 Simulation de la cellule solaire :

La figure IV.1 montre le schéma de simulation de la cellule solaire.

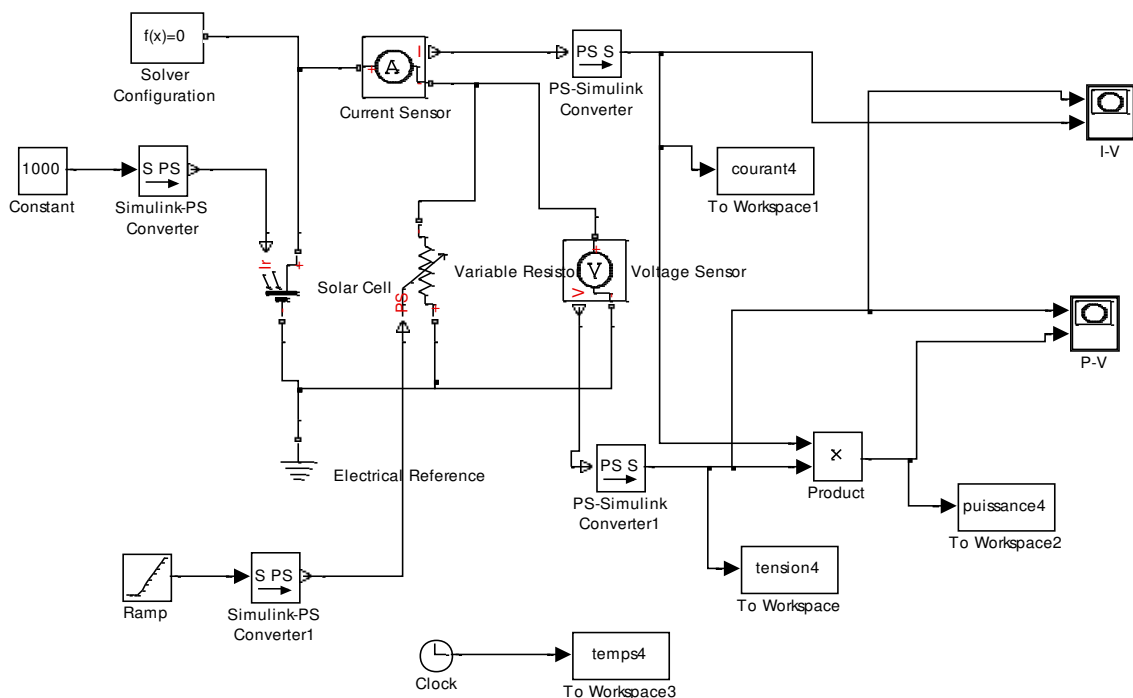


Figure IV.1 Schéma de simulation d'une cellule solaire.

IV.2.1 : Résultats de simulation de la cellule solaire :

***Caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ avec irradiation 1000W/m^2 et température constante de $25\text{ }^\circ\text{C}$:**

Les résultats de la simulation des caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) de la cellule PV dans les conditions standards d'éclairement et de températures ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$) sont représentées par les figures IV.2 et IV 3.

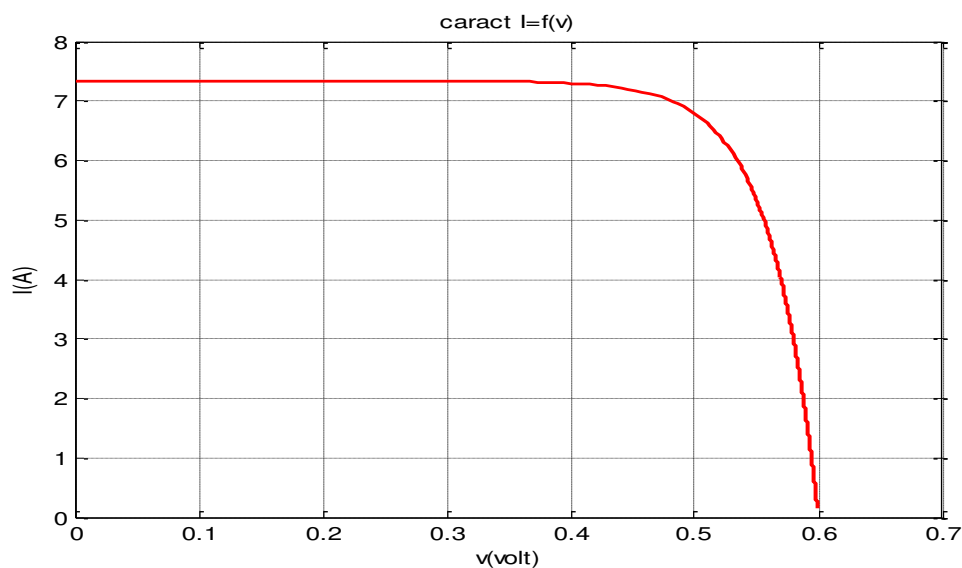


Figure IV.2 Caractéristique I-V dans les conditions standards.

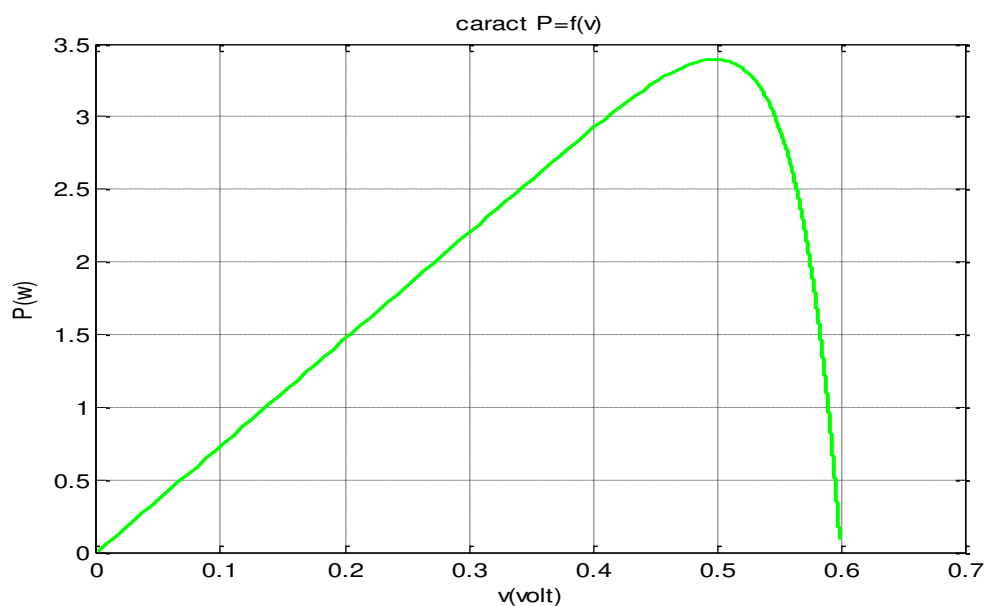


Figure IV.3 Caractéristique P-V dans les conditions standards.

IV.2.2 L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques de la cellule solaire :

Les courbes de la figure IV.4 et IV 5 représentent les caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque obtenues par simulation en faisant varier l'intensité de l'irradiation, la température de fonctionnement étant gardée constante ($T=25^{\circ}\text{C}$).

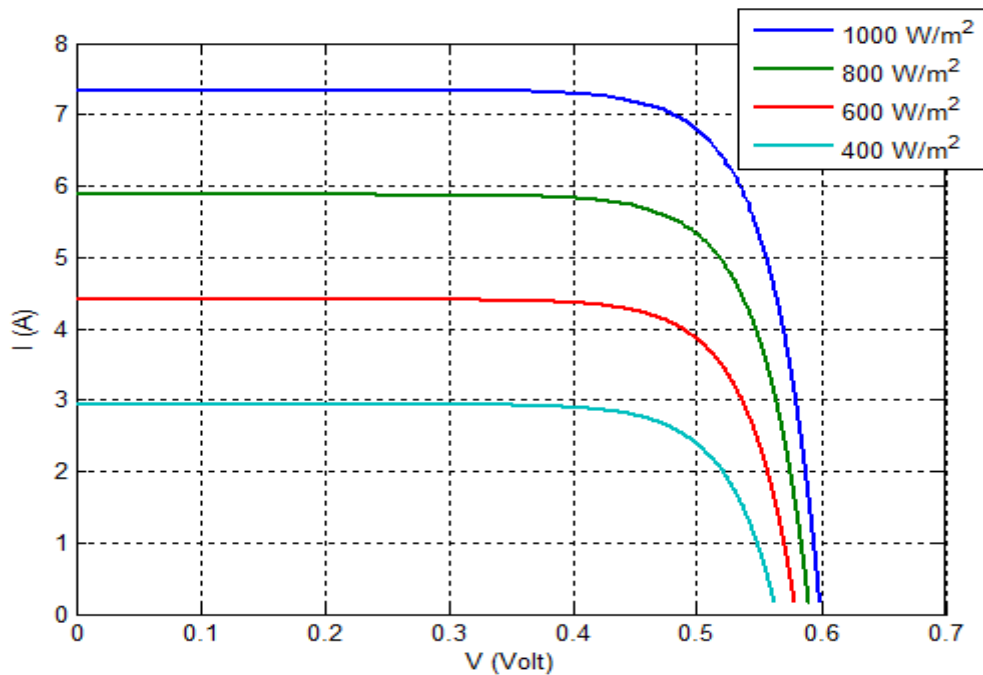


Figure IV.4 Caractéristiques I-V de la cellule avec variation de l'irradiation à température constante.

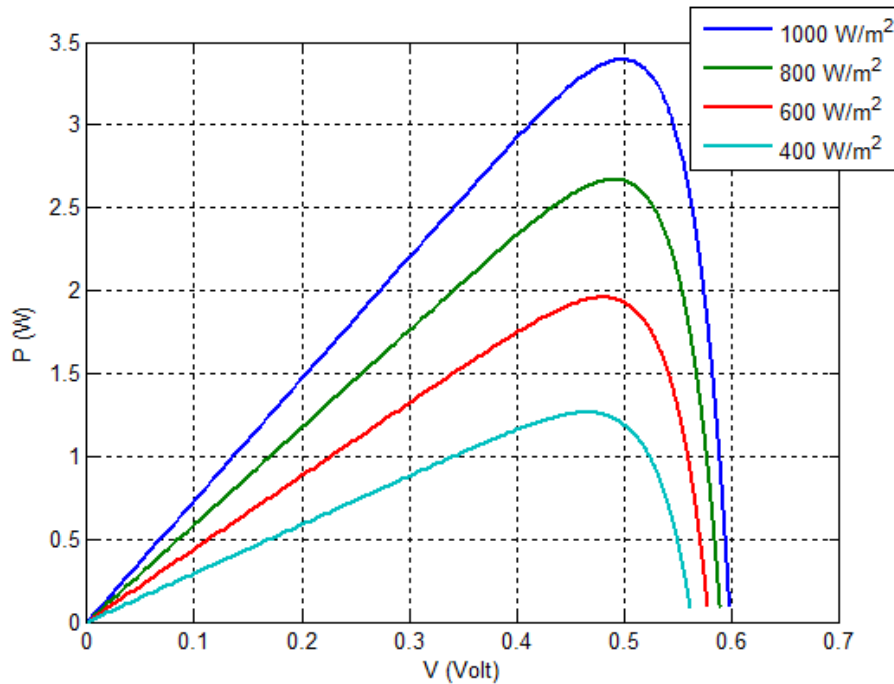


Figure IV.5 Caractéristiques P-V de la cellule avec variation de l'irradiation à température constante.

Interprétation : On remarque d'après la figure IV.4 que le courant de court-circuit augmente nettement avec l'irradiation, par contre la tension en circuit ouvert n'augmente que très faiblement et par conséquent on peut supposer qu'elle reste constante. Comme le courant I augmente avec l'irradiation on en déduit que la puissance $P=V \cdot I$ augmente aussi avec l'irradiation (fig. IV.5).

Commentaire : Pour tirer le maximum de puissance des cellules solaires travaillant sous température constante, il faut exposer ces dernières à un rayonnement solaire maximal. Cette opération peut se faire par orientation correcte du panneau PV vers le soleil en utilisant un système mécanique asservi comme suiveur du soleil.

IV. 2.3 L'influence de la température de fonctionnement :

Les courbes de la figure IV.6 et IV 7 représentent les caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque obtenues par simulation en faisant varier la température de fonctionnement, l'irradiation étant gardée constante ($G=1000 W/m^2$).

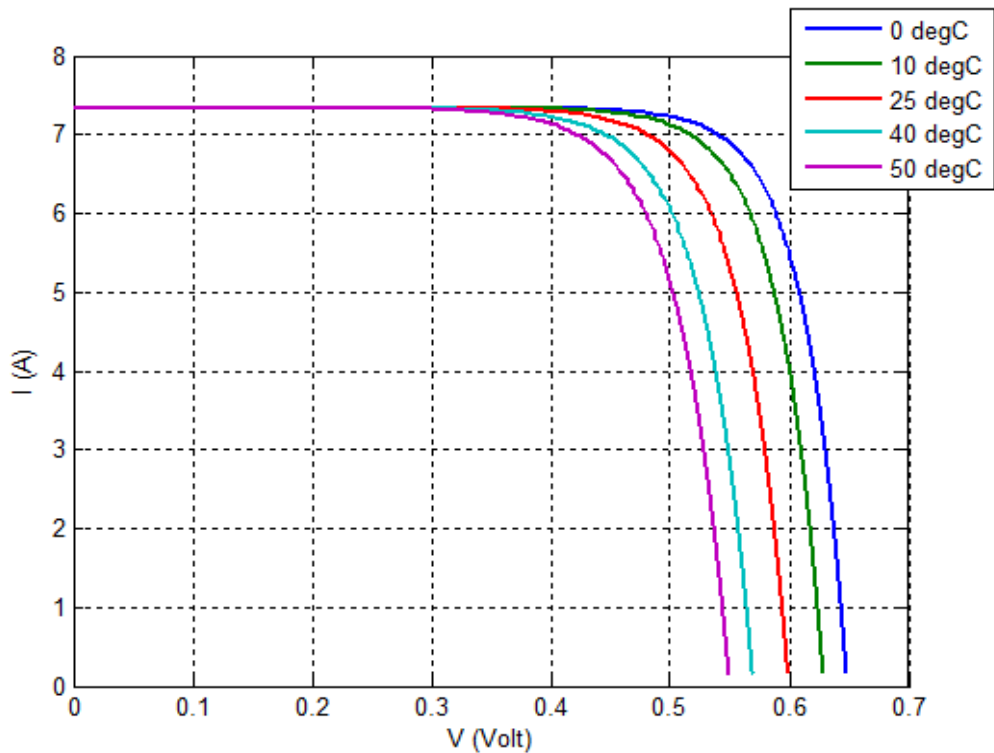


Figure IV.6 Caractéristiques I-V de la cellule avec variation de la température et irradiation constante.

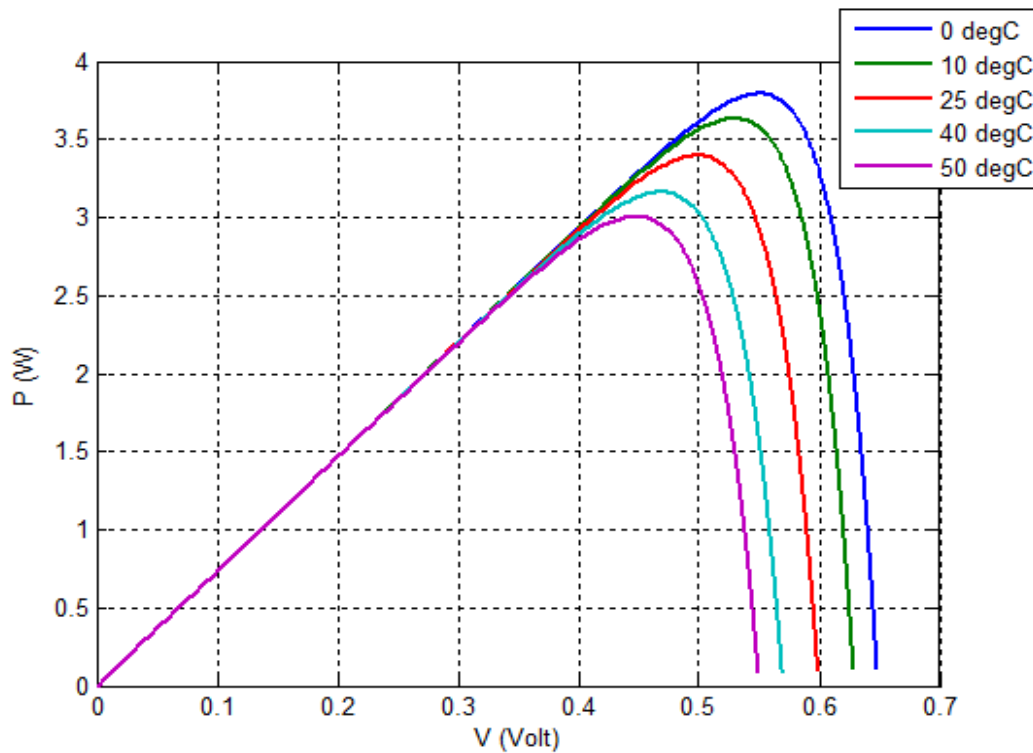


Figure IV.7 Caractéristiques P-V de la cellule avec variation de la température et irradiation constante.

Interprétation : Les caractéristiques I-V obtenues (fig. IV.6) montrent que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire augmente lorsque la température de fonctionnement diminue par contre le courant de court-circuit reste pratiquement constant et par conséquent la puissance maximale du générateur PV augmente avec la diminution de la température (fig. IV.7).

Commentaire : Pour tirer le maximum de puissance des cellules solaires travaillant sous irradiation constante par exemple dans un endroit où le ciel est très dégagé pendant une longue période de l'année comme dans les wilayas du sud (Adrar, Béchar, Tamanrasset,...), il faut exposer ces cellules à la plus basse température de fonctionnement possible.

IV.3 Simulations du convertisseur DC/DC :

Comme étage d'adaptation entre le GPV et l'onduleur nous avons simulé un convertisseur de type Buck-Boost qui peut travailler en régime abaisseur ou élévateur et qui est contrôlé par une boucle de régulation de type PID. La figure IV.8 montre le schéma de simulation réalisé sous Matlab/ Simulink et Simpower.

Les paramètres utilisés sont donnés par le tableau suivant :

Tableau IV.1: Paramètres du convertisseur DC/DC.

Tension d'entrée V_e	600 V
Résistance de charge R	100 Ω
Capacité de filtrage C	1.99 μF
L'inductance L	0.024 H
Tension de référence V_{ref}	400 V pour le régime abaisseur (Buck) et 800V pour le régime élévateur (Boost)

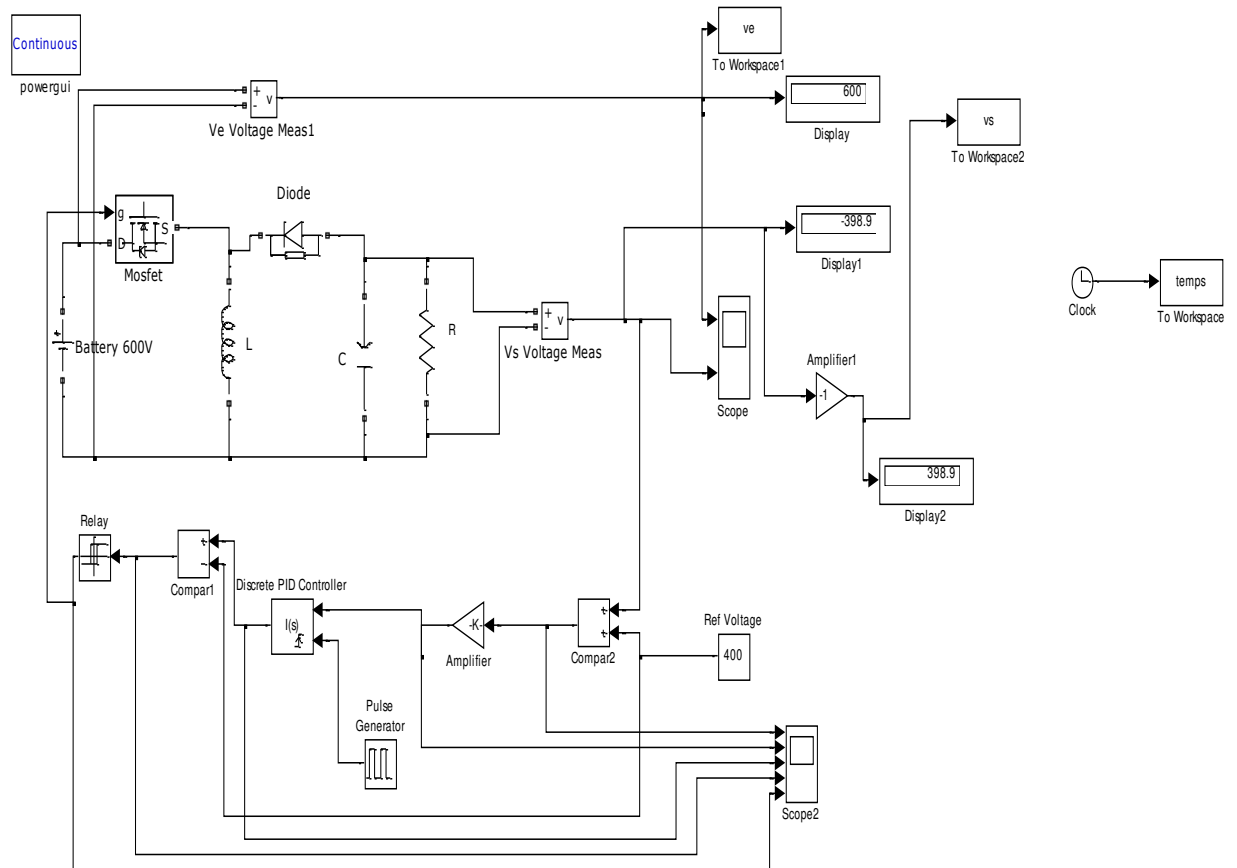


Figure IV.8 Schéma de simulation d'un convertisseur DC/DC de type Buck-Boost avec boucle de régulation PID.

Résultats de la simulation du convertisseur en régime dévolteur (Buck) :

Les tensions d'entrée $V_e(t)$ et de sortie $V_s(t)$ du convertisseur en régime dévolteur (abaisseur) sont données par la figure IV.9.

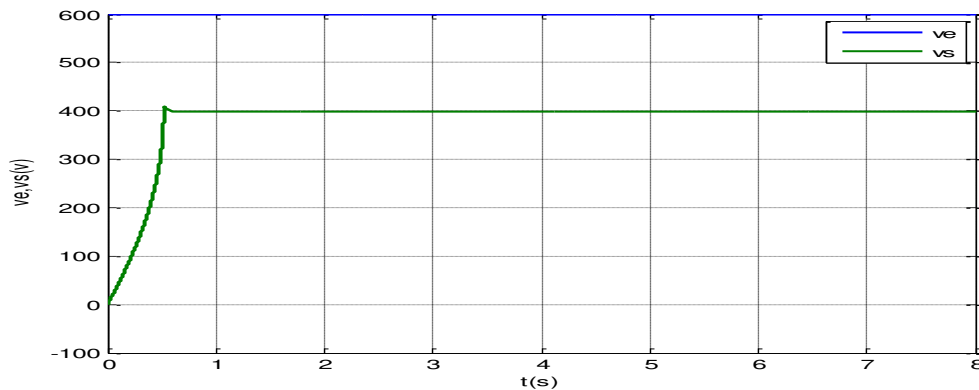


Figure IV.9 Tensions V_e et V_s en régime abaisseur.

D'après la fig.IV.9, on remarque que la tension de sortie V_s a diminué par rapport à la tension d'entrée V_e , sachant que la tension de référence du régulateur est fixée à $V_{ref} = 400V$. La tension V_s passe par un régime transitoire de très courte durée (environ 0.53 s), avec un pic de dépassement de 12V à l'instant $t = 0.51s$. Les oscillations du système sont rapidement amorties et V_s se stabilise à une valeur finale de 398.9V. Le temps de réponse du système est d'environ $Tr=0.53s$.

Résultats de la simulation du convertisseur en régime survolteur (Boost) :

Les tensions d'entrée $V_e(t)$ et de sortie $V_s(t)$ du convertisseur en régime survolteur (élévateur) sont données par la figure IV.10.

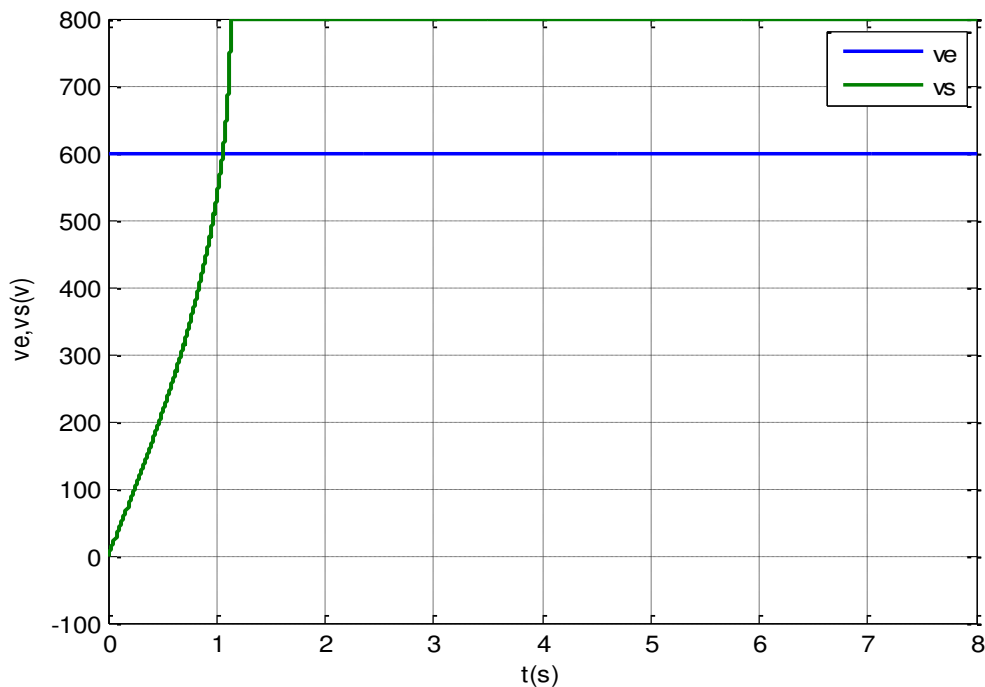


Figure IV.10 Tensions V_e et V_s en régime élévateur.

D'après la fig. IV.10, on remarque que la tension de sortie V_s a augmenté par rapport à la tension d'entrée V_e , sachant que la tension de référence du régulateur est fixée à $V_{ref} = 800V$. La tension V_s passe par un régime transitoire d'environ 1.21 s, ne présente pas de pic de dépassement et se stabilise à une valeur finale de 798.8V. Le temps de réponse du système est d'environ $Tr=1.22s$.

Commentaire :

La comparaison entre les résultats obtenus dans les deux cas de régime de fonctionnement du convertisseur DC/DC montre que la précision sur la tension de sortie V_s comparée à la tension de référence V_{ref} est très bonne aussi bien pour le dévolteur que pour le survolteur. Mais sur la base du temps de réponse qui est un paramètre très important pour les systèmes PV, il est préférable d'utiliser le régime dévolteur.

IV.4 Simulation de l'onduleur triphasé :

Pour générer le système de tensions triphasées nécessaire à l'alimentation du moteur asynchrone triphasé à partir de la tension continue obtenue à la sortie du convertisseur DC/DC, nous avons simulé un onduleur triphasé à deux niveaux de tensions. Cet onduleur est constitué de six interrupteurs électroniques (transistors MOSFET) montés en pont (figure IV.11 et 19). Nous avons appliqué deux types de commande, la première du type commande à 120° et la deuxième du type commande sinus-triangle. A la sortie nous avons placé un filtre triphasé de type LC intercalé entre l'onduleur et la charge résistive triphasée pour éliminer les harmoniques d'ordres supérieures.

IV.4.1 Simulation de l'onduleur triphasé avec commande à 120° :

La figure IV.11 donne le schéma de simulation de l'onduleur triphasé avec la commande à 120° réalisé sous Matlab/Simulink et Simpower.

Les paramètres utilisés sont donnés par le tableau suivant :

Tableau IV.2 : Paramètres de l'onduleur triphasé.

Elément	valeur/type
Charge triphasée résistive, couplage étoile	$R=10 \Omega$
Filtre triphasé LC	$C=360\mu\text{F}$, $L=5,6 \text{ mH}$
Transistor de puissance	type MOSFET
Tension entrée (V_e)	600 V, DC
Impulsions de commande	amplitude=1 V, fréquence=4 kHz, les signaux sont dans l'ordre déphasés de $2\pi/3$ rd, l'un par rapport à l'autre.

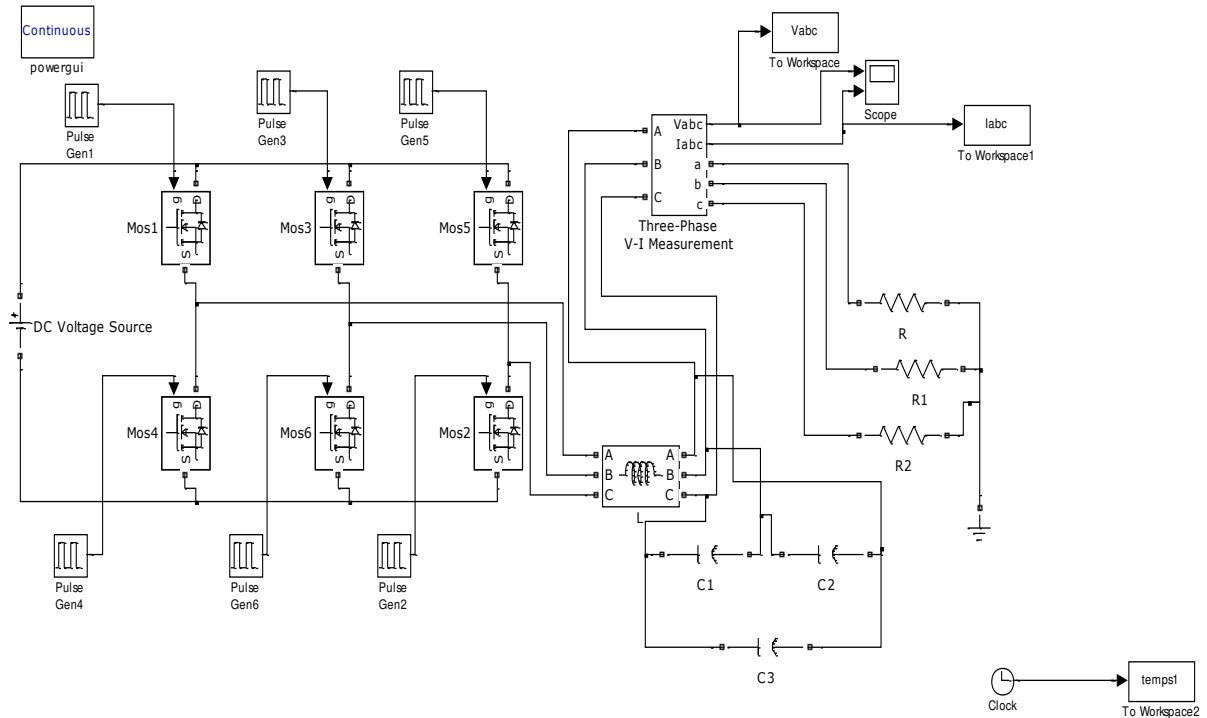


Figure IV.11 Schéma de simulation de l'onduleur triphasé avec commande à 120°.

Résultats de la simulation de l'onduleur triphasé avec commande à 120° :

Les figures IV.12 et IV 13 montrent respectivement les variations du système de tensions triphasées composées U_{abc} et celles du système de tensions simples V_{abc} en fonction temps à la sortie de l'onduleur et avant filtrage.

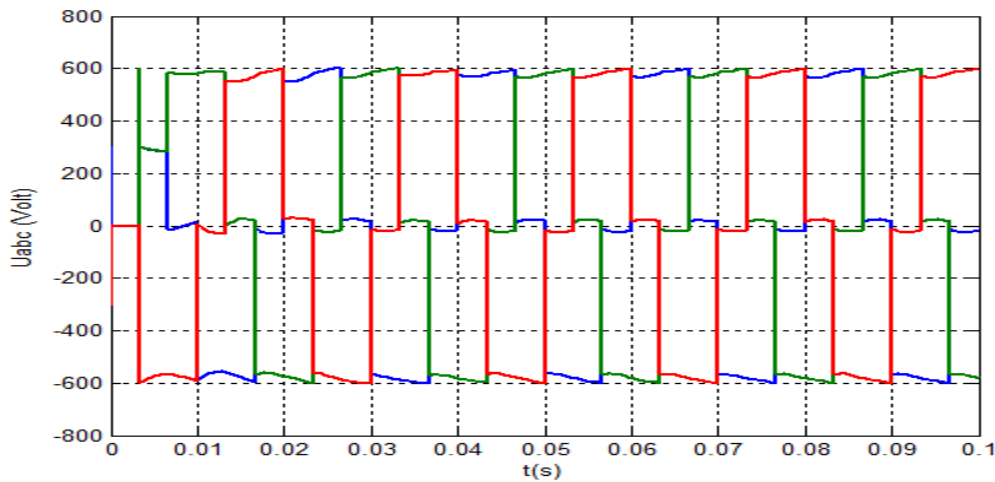


Figure IV.12 Graphe des tensions triphasées entre phases $U_{abc}(t)$ avant filtrage.

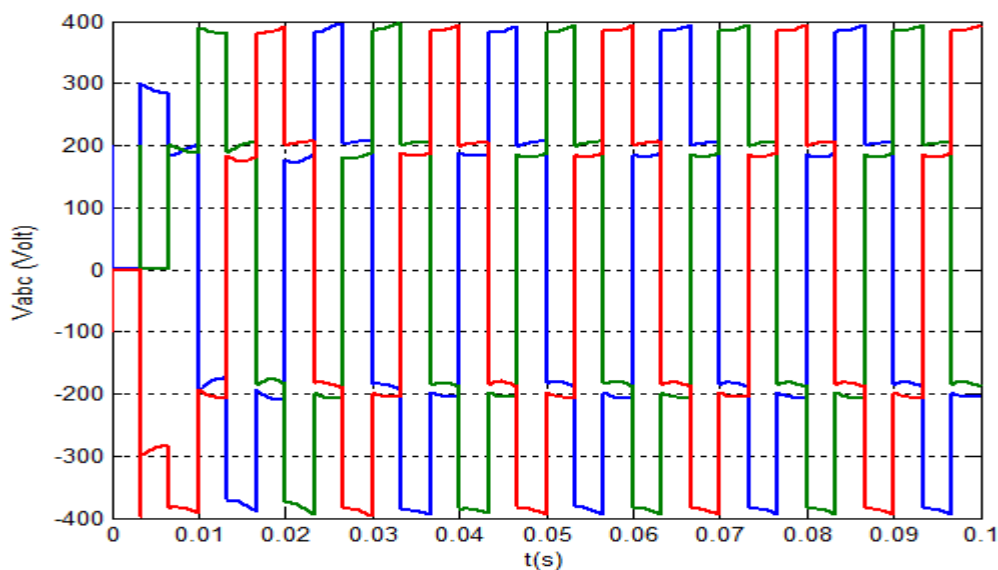


Fig. IV.13 Graphe des tensions triphasées entre phase et neutre $V_{abc}(t)$ avant filtrage.

Les figure IV.14, IV.15 et IV.16 montrent respectivement les variations des systèmes de tensions triphasées composées U_{abc} et simples V_{abc} en fonction temps, et les variations des courants triphasés $I_{abc}(t)$ débités dans la charge résistive, après filtrage.

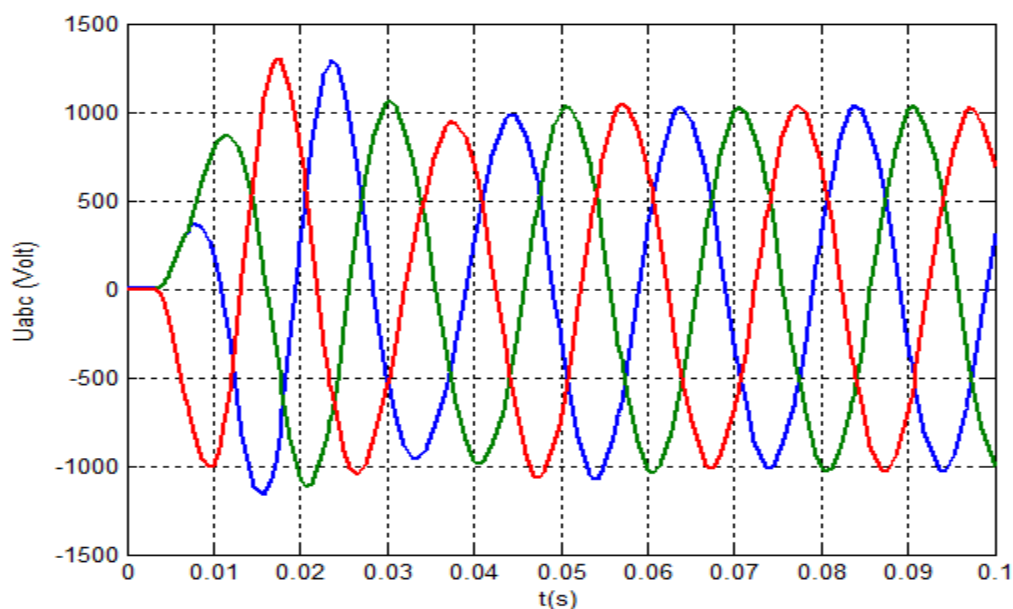


Figure IV.14 Graphe des tensions triphasées $U_{abc}(t)$ après filtrage.

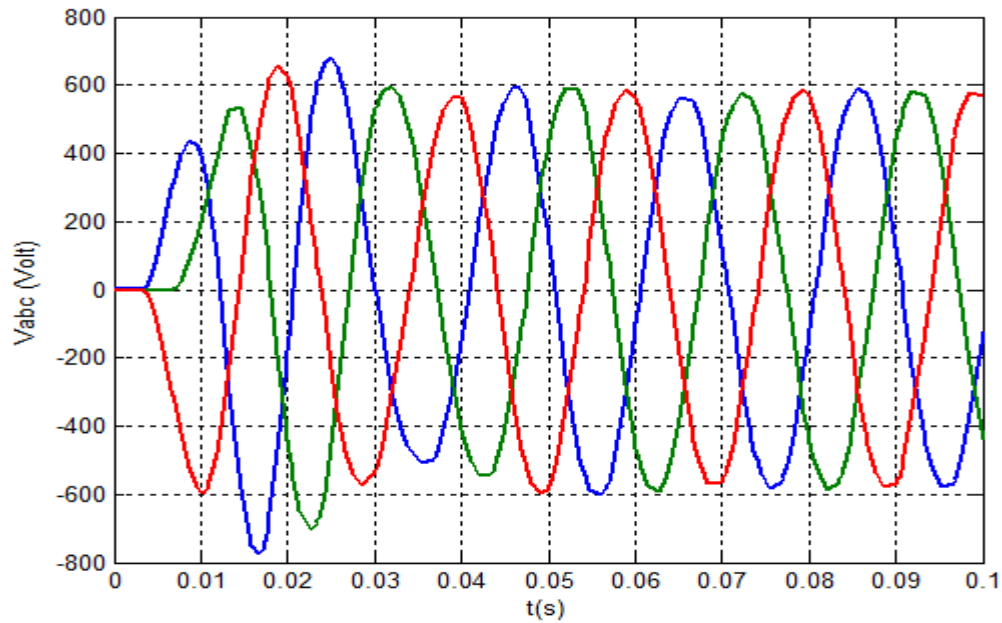


Figure IV.15 Graphe des tensions triphasées $V_{abc}(t)$ après filtrage.

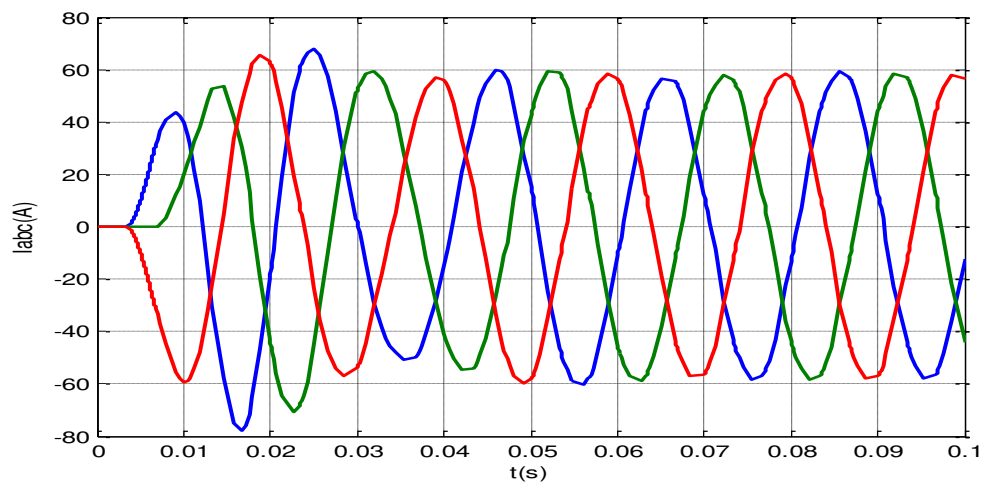


Fig. IV.16 Graphe des courants triphasés $I_{abc}(t)$ après filtrage.

Les captures d'écran des figures IV.17 et 18 IV montrent les résultats obtenus précédemment pour les tensions triphasées $V_{abc}(t)$ et les courants triphasés $I_{abc}(t)$ obtenus par simulation de l'onduleur triphasé.

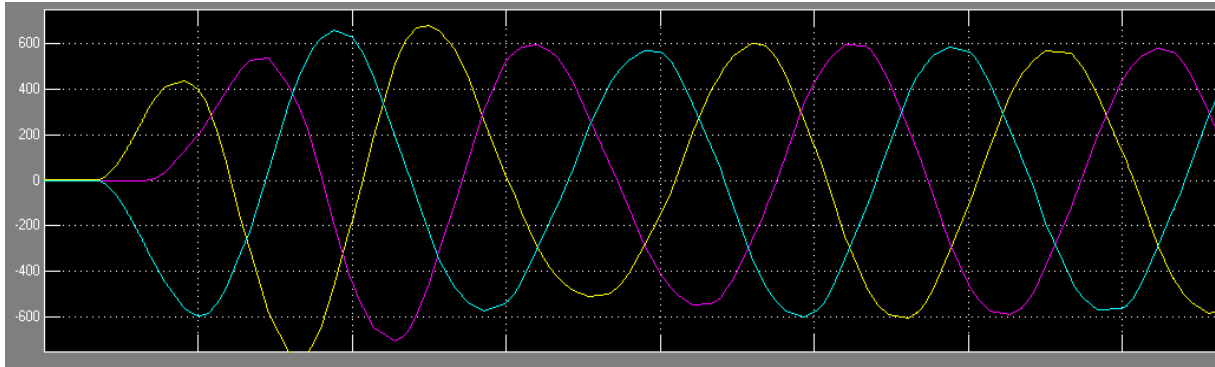


Figure IV.17 Les tensions $V_{abc}(t)$ vues à l'oscilloscope.

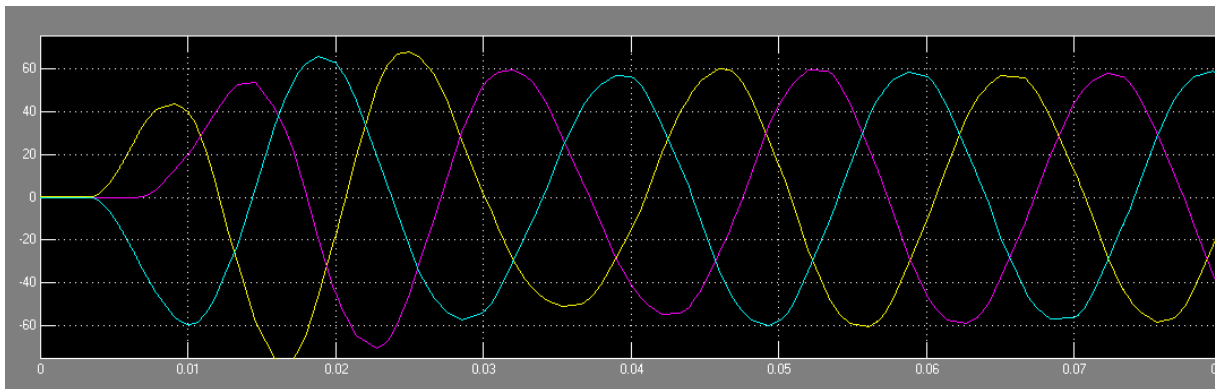


Figure IV.18 Les courants $I_{abc}(t)$ vus à l'oscilloscope.

Interprétation :

Les figures IV.12 et 13 montrent que les variations des tensions composées $U_{abc}(t)$ et celles des tensions simples $V_{abc}(t)$ obtenues avant filtrage sont très conformes aux résultats théoriques du chapitre 3. Etant composées de plusieurs harmoniques ces tensions ne sont pas sinusoïdales et ont une forme en escaliers symétriques qui suit les impulsions de commande qui eux ont une largeur constante. Les figures IV.14 et 15 et 17 montrent les variations des tensions $U_{abc}(t)$ et $V_{abc}(t)$ qui sont devenues presque sinusoïdales après filtrage. Le filtrage étant efficace il a permis d'éliminer les harmoniques supérieures et de lisser les courbes.

IV.4 .2 Simulation de l'onduleur triphasé avec commande sinus-triangle :

La figure IV.19 donne le schéma de simulation de l'onduleur triphasé avec la commande sinus-triangle réalisé sous Matlab/Simulink et Simpower.

Les paramètres utilisés sont donnés par le tableau suivant :

Tableau IV.3: Paramètres de l'onduleur triphasé.

Elément	valeur/type
Charge triphasée résistive, couplage étoile	$R=10\ \Omega$
Filtre triphasé LC	$C=360\ \mu\text{F}$, $L=5,6\ \text{mH}$
Transistor de puissance	type MOSFET
Tension entrée (V_e)	600 V, DC
Signal sinusoïdal (modulante)	amplitude=1 V, fréquence=50 Hz, les 3 signaux sont dans l'ordre déphasés de $2\pi/3$ rd, l'un par rapport à l'autre.
Signal triangulaire (porteuse)	amplitude variable (à régler), fréquence= 4 kHz

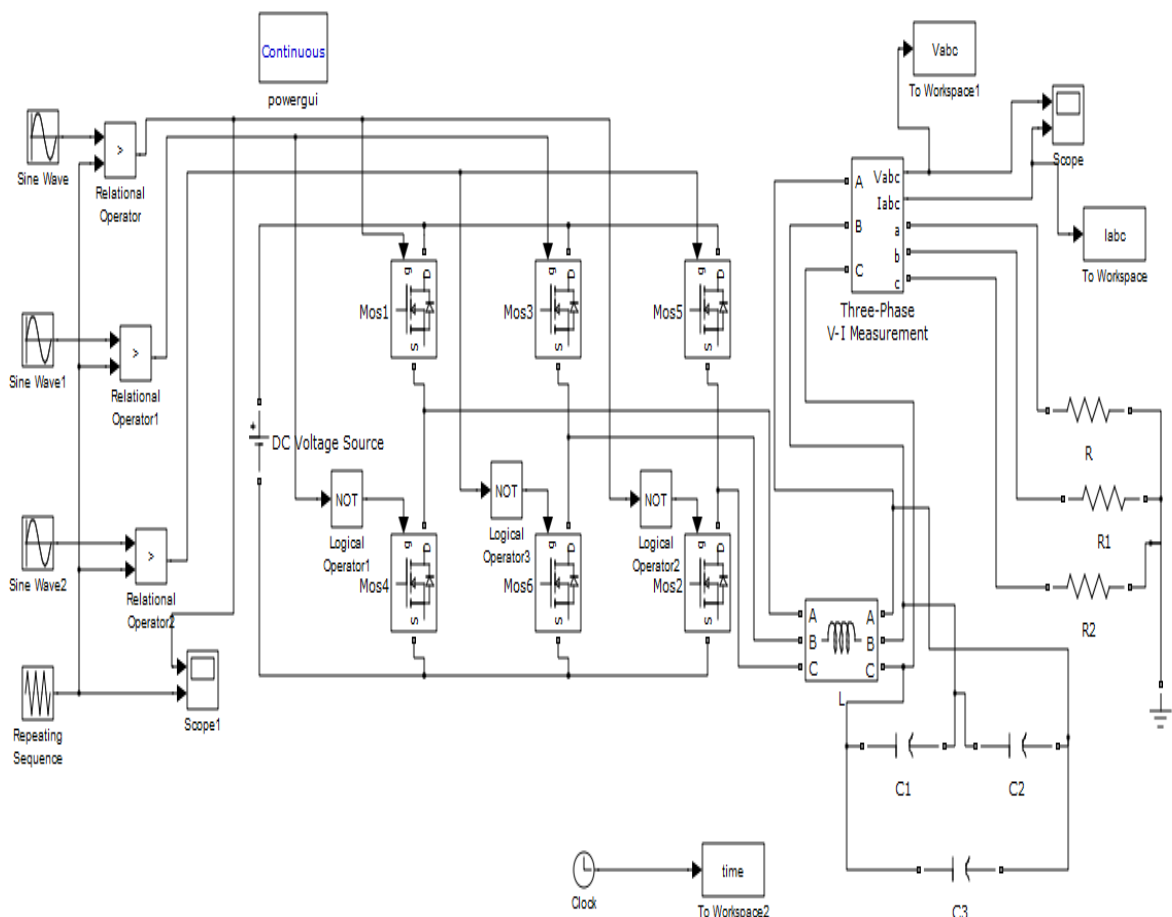


Figure IV.19 Schéma de simulation de l'onduleur triphasé avec commande sinus-triangle.

Résultats de la simulation de l'onduleur triphasé avec commande sinus-triangle :

Les figures IV.20 et 21 montrent respectivement les variations du système de tensions triphasées composées U_{abc} et celles du système de tensions simples V_{abc} en fonction temps à la sortie de l'onduleur et avant filtrage.

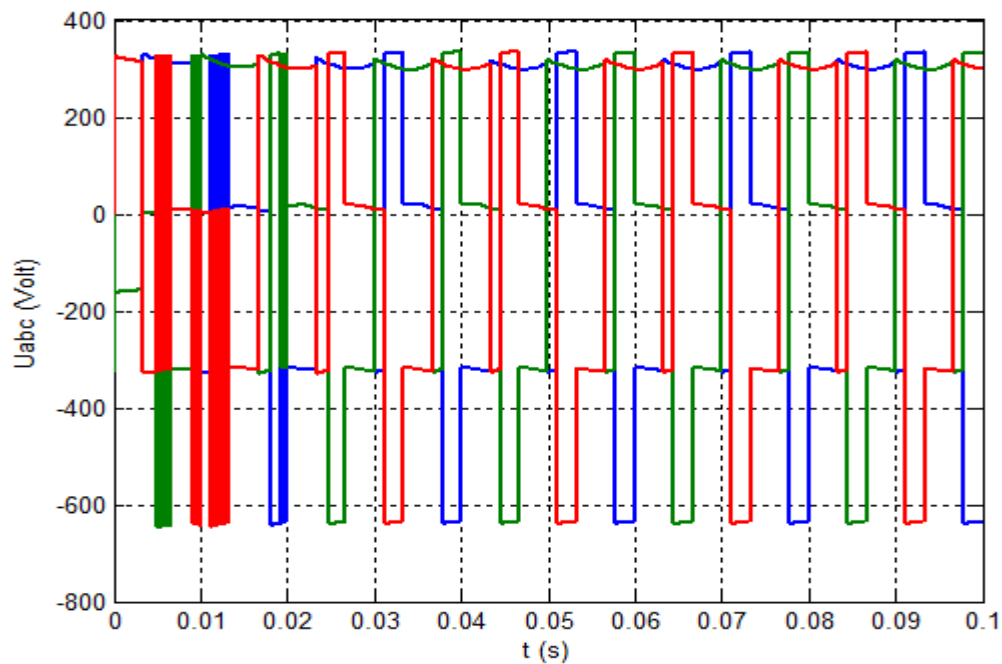


Figure IV.20 Graphe des tensions triphasées entre phases $U_{abc}(t)$ avant filtrage.

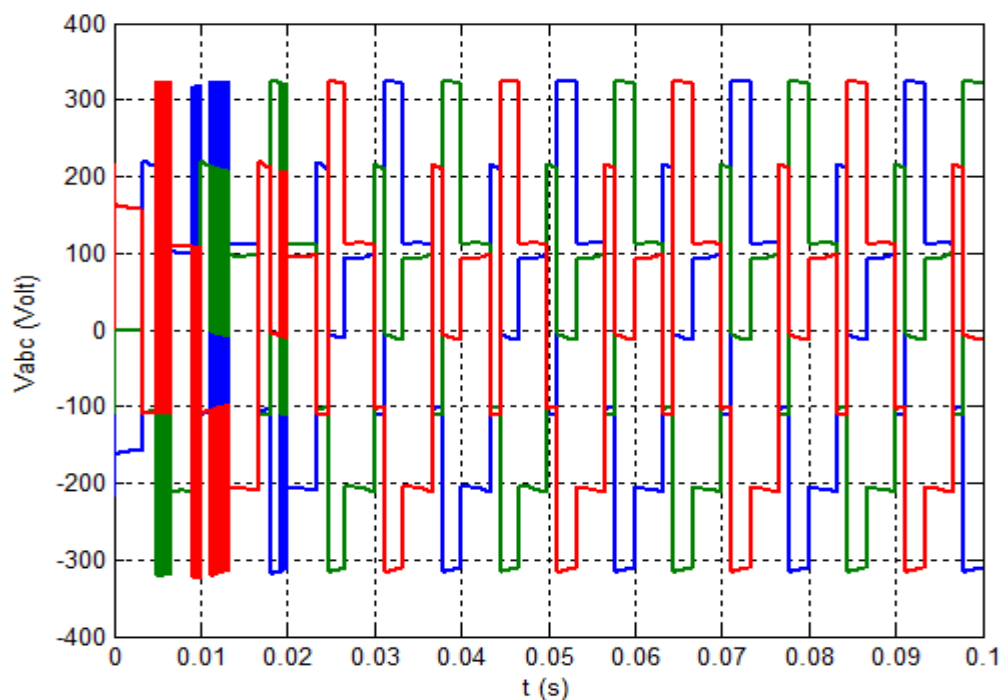


Figure IV.21 Graphe des tensions triphasées entre phase et neutre $V_{abc}(t)$ avant filtrage.

Les figure IV.22, 23 et 24 montrent respectivement les variations des systèmes de tensions triphasées composées U_{abc} et simples V_{abc} en fonction temps, et les variations des courants triphasés $I_{abc}(t)$ débités dans la charge résistive, après filtrage.

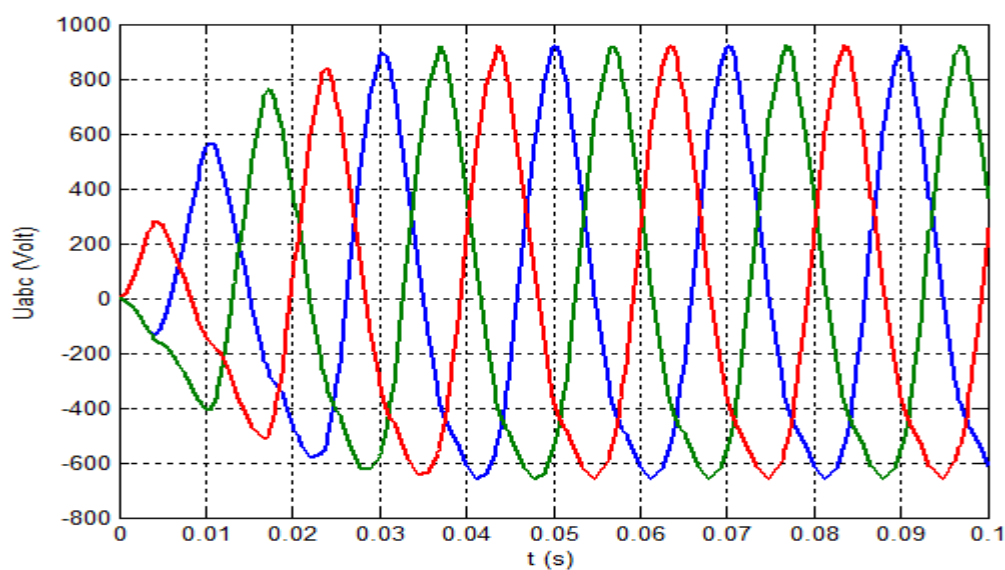


Figure IV.22 Graphe des tensions triphasées $U_{abc}(t)$ après filtrage.

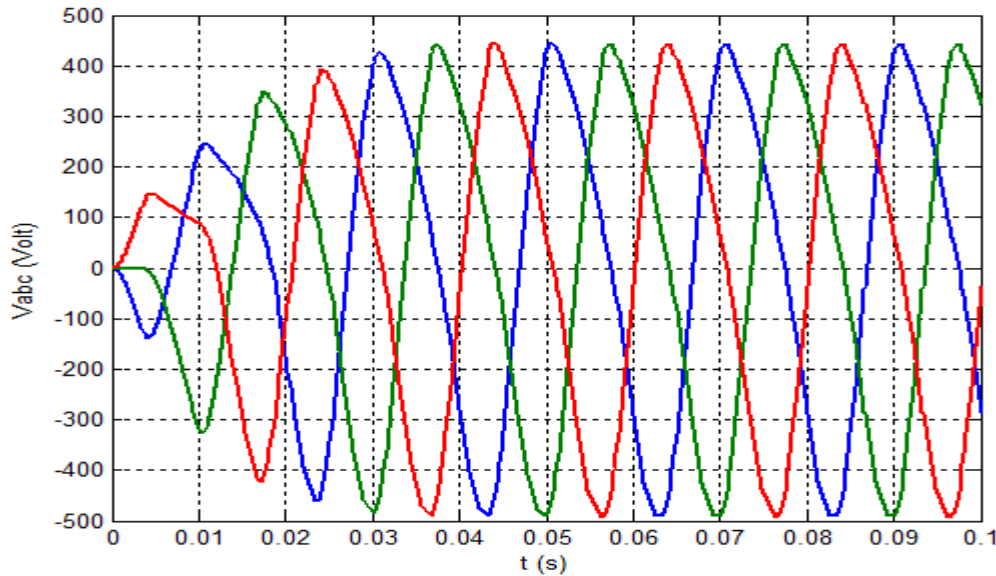


Figure IV.23 Graphe des tensions triphasées $V_{abc}(t)$ après filtrage.

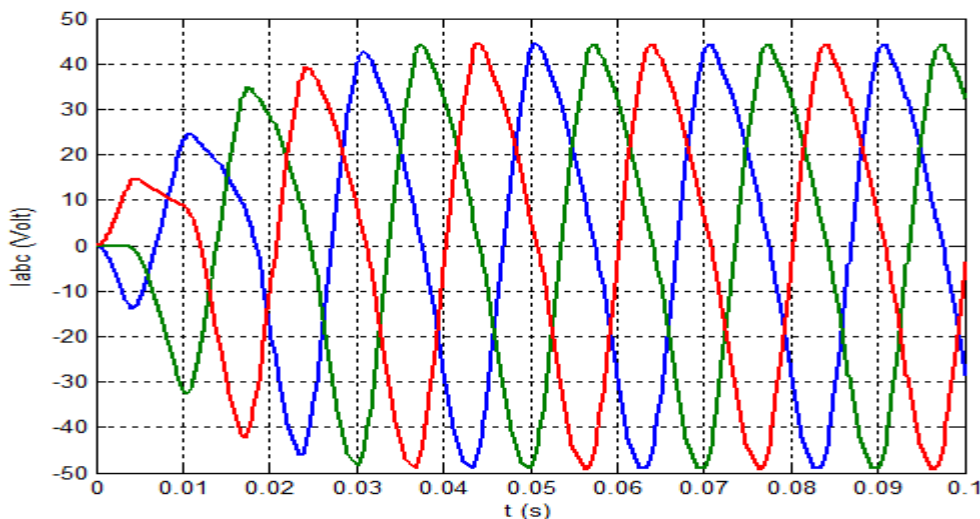


Figure IV.24 Graphe des courants triphasés $I_{abc}(t)$ après filtrage.

Interprétation :

Les figures IV.20 et 21 montrent que les variations des tensions composées $U_{abc}(t)$ et celles des tensions simples $V_{abc}(t)$ obtenues avant filtrage étant composées de plusieurs harmoniques ne sont pas sinusoïdales et ont une forme en escaliers asymétriques qui varie en fonction de la modulation de la largeur des impulsions de commande (MLI). Les figures IV. 22 et 23 montrent les variations des tensions $U_{abc}(t)$ et $V_{abc}(t)$ qui se rapprochent de la forme sinusoïdale après filtrage. Le filtrage n'étant pas très efficace il a permis d'éliminer quelques harmoniques supérieures et de lisser les courbes.

Commentaire : Dans les deux cas de commande, le système de tensions triphasées après un très court passage par un régime transitoire d'environ 0,03 s, prend son régime permanent. La forme d'un système sinusoïdale après filtrage est beaucoup plus marquée pour la commande à 120° ce qui montre l'élimination de la plupart des harmoniques d'ordres supérieures de fréquences plus grandes que 50Hz. Ces harmoniques peuvent avoir une influence néfaste sur le fonctionnement du moteur asynchrone triphasé (échauffement, effet de résonance ,...).

IV.5 Simulation du moteur asynchrone triphasé :

Pour tester les performances du moteur asynchrone triphasé à cage en court-circuit nous l'avons simulé sous deux régimes de fonctionnement différents. Dans un premier temps, le régime de fonctionnement est constant et le moteur est soumis à un couple résistant constant. Dans un deuxième temps, le régime de fonctionnement est variable et le moteur est soumis à un couple résistant variable. Dans les deux cas le paramètre à vérifier est la vitesse du moteur pour voir si le moteur répond correctement lorsqu'il est soumis à la contrainte du couple résistant produit par la charge qu'il entraîne.

Les paramètres du moteur triphasé utilisé sont donnés par le tableau suivant :

Tableau IV.4: Paramètres du moteur triphasé.

Caractéristique/paramètre	Valeur/type
Moteur asynchrone triphasé	rotor en court-circuit (cage d'écureuil)
Nombre de pôles	4
Puissance nominale	4 kW (ou 5,4 HP)
Vitesse nominale	1430 tr/mn
Tension d'alimentation	U = 400 V (entre lignes), f=50Hz
Couplage	étoile
Facteur de puissance	0,8
Résistance et inductance statorique (bobinage/phase)	$R_s = 1,405 \Omega$, $L_s = 5,839 \text{ mH}$
Résistance et inductance rotorique	$R_r = 1,395 \Omega$, $L_r = 5,839 \text{ mH}$
Inductance mutuelle	$L_m = 0,1722 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0,0131 \text{ kg.m}^2$
coefficient de friction	$F=0,002985 \text{ N.m.s}$

Calcul du couple nominal :

La puissance utile nominale (P_{un}) est reliée au couple utile nominal (C_{un}) par la relation suivante : $P_{un} = C_{un} \times \Omega_n$

Avec Ω_n la vitesse angulaire nominale, exprimée en fonction de la vitesse de rotation nominale (n) par : $\Omega_n = 2\pi \frac{n}{60}$ (rd/s)

D'où le couple nominal : $C_{un} = \frac{60 \times P_{un}}{2\pi n} = 26,711$ (N.m)

Calcul du courant nominal :

Le rendement du moteur étant le rapport entre la puissance utile P_u et la puissance absorbée P_a : $\eta = \frac{P_u}{P_a}$

On en déduit $P_a = \frac{P_u}{\eta}$

La puissance absorbée nominale (P_{an}) est reliée au courant nominal (I_n) en ligne par la relation suivante : $P_{an} = \sqrt{3} U_n I_n \cos\varphi$

D'où le courant nominal en ligne : $I_n = \frac{P_{un}}{\sqrt{3} \eta U_n \cos\varphi}$

Puisque dans les données précédentes sur le moteur choisi, il n'y a pas la valeur du rendement, nous allons faire le calcul pour 2 valeurs typiques du rendement pour une machine asynchrone. Nous pourrions vérifier ensuite la valeur du rendement à l'aide des résultats obtenus par simulation.

Pour un rendement $\eta = 0.70$, nous avons: $P_{an}=5714,3$ W et $I_n = 10,31$ A.

Pour un rendement $\eta = 0.80$, nous avons: $P_{an}=5000$ W et $I_n = 9,02$ A.

IV.5.1 Simulation du moteur asynchrone triphasé avec couple résistant constant :

La figure IV.25 donne le schéma de simulation du moteur asynchrone triphasé soumis à un couple constant réalisé sous Matlab/Simulink et Simpower.

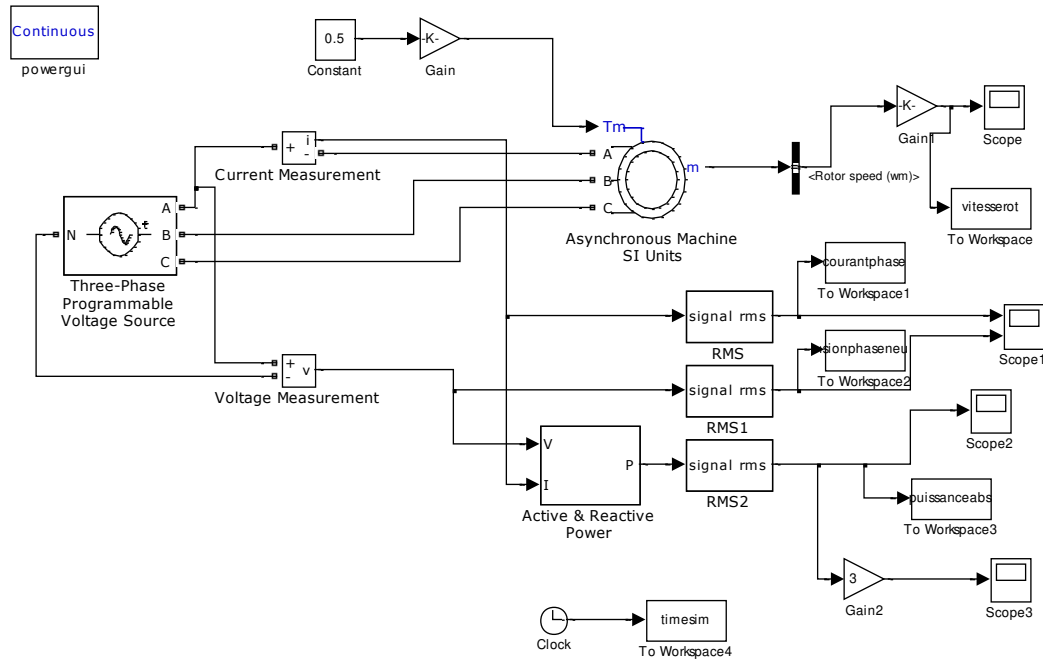


Figure IV.25 Schéma de simulation du Moteur Asynchrone Triphasé avec couple constant.

Résultat de la simulation de la machine asynchrone avec couple de charge constant :

Les résultats suivants ont été obtenus par simulation du moteur asynchrone pour un couple de charge utile C_u constant et égal à la moitié du couple nominal ($C_u=0.5 \times C_n$).

La figure IV.26 donne la caractéristique de vitesse du moteur. La valeur finale de la vitesse en régime permanent est de 1468.4 tr/mn.

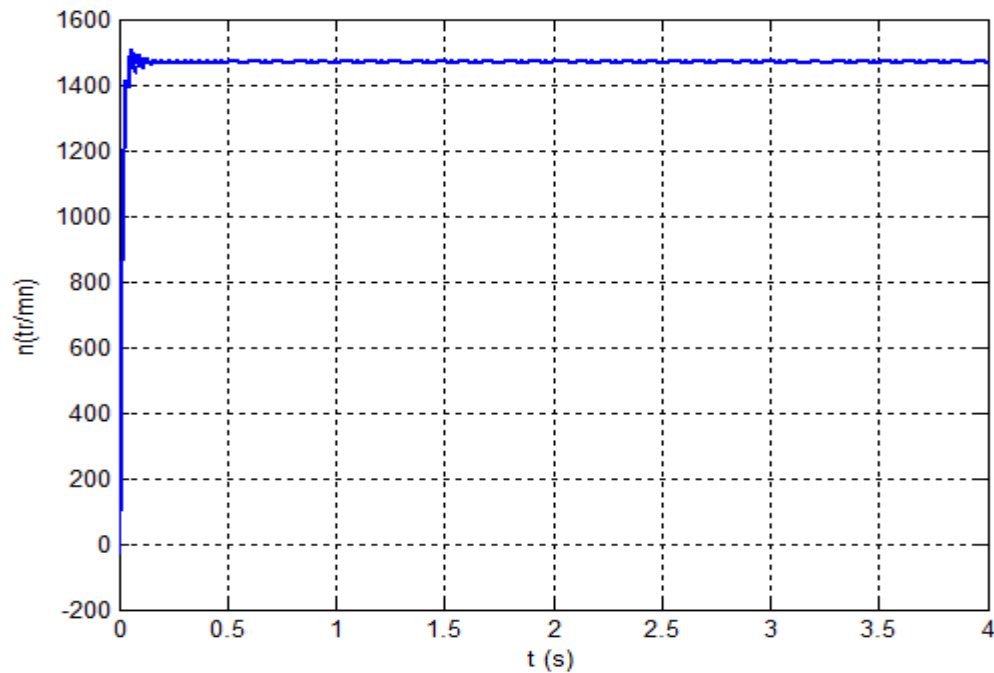


Figure IV.26 Caractéristique de la vitesse du moteur avec couple constant.

La figure IV.27 donne la valeur moyenne du courant absorbé par le moteur. La valeur finale du courant en ligne en régime permanent est de 4.3 A. Nous pouvons remarquer que le courant absorbé lors d'un démarrage en charge est très fort environ 10 fois le courant en régime établi dans notre cas. Cette phase ne dure que très peu de temps mais peut détruire les bobinages du moteur par effet Joule. D'où la nécessité de protéger le moteur asynchrone contre les surintensités au démarrage.

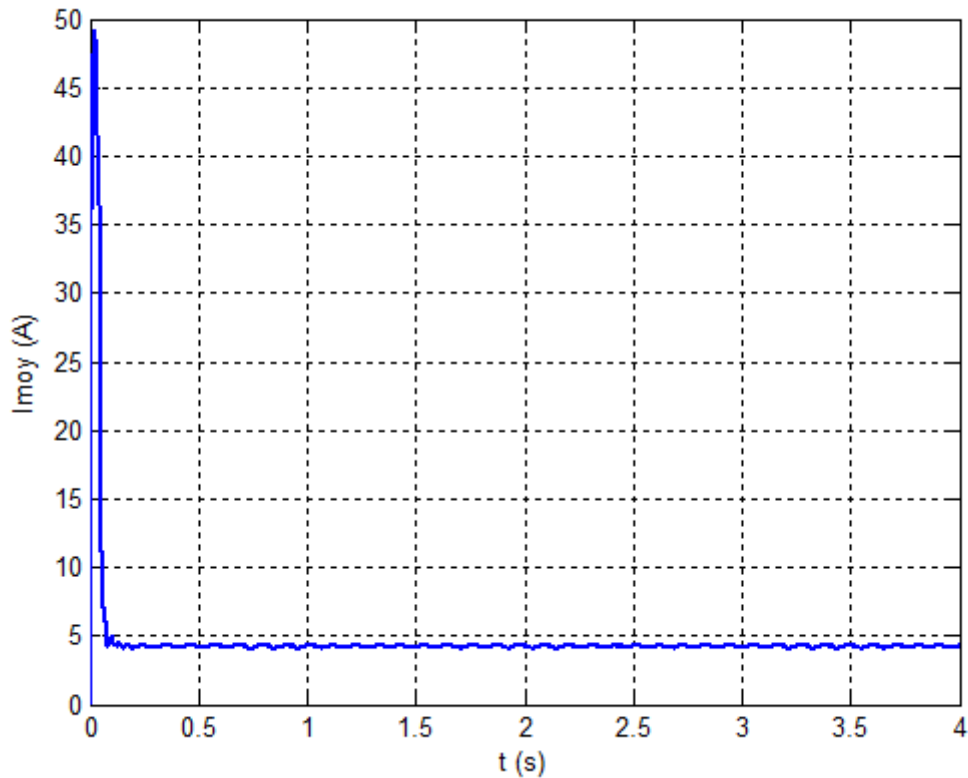


Figure IV.27 Courant moyen absorbé par le moteur pour un couple de $0.5C_n$.

La figure IV.28 donne la valeur moyenne de la puissance active absorbée par le moteur. La valeur finale de la puissance active absorbée par le moteur en régime permanent est de 2283 W (soit 761 W par phase) (voir fig.IV.29). Nous pouvons remarquer que la puissance active absorbée au démarrage en charge est très forte ceci est dû au fort courant de démarrage, la tension entre ligne étant constante.

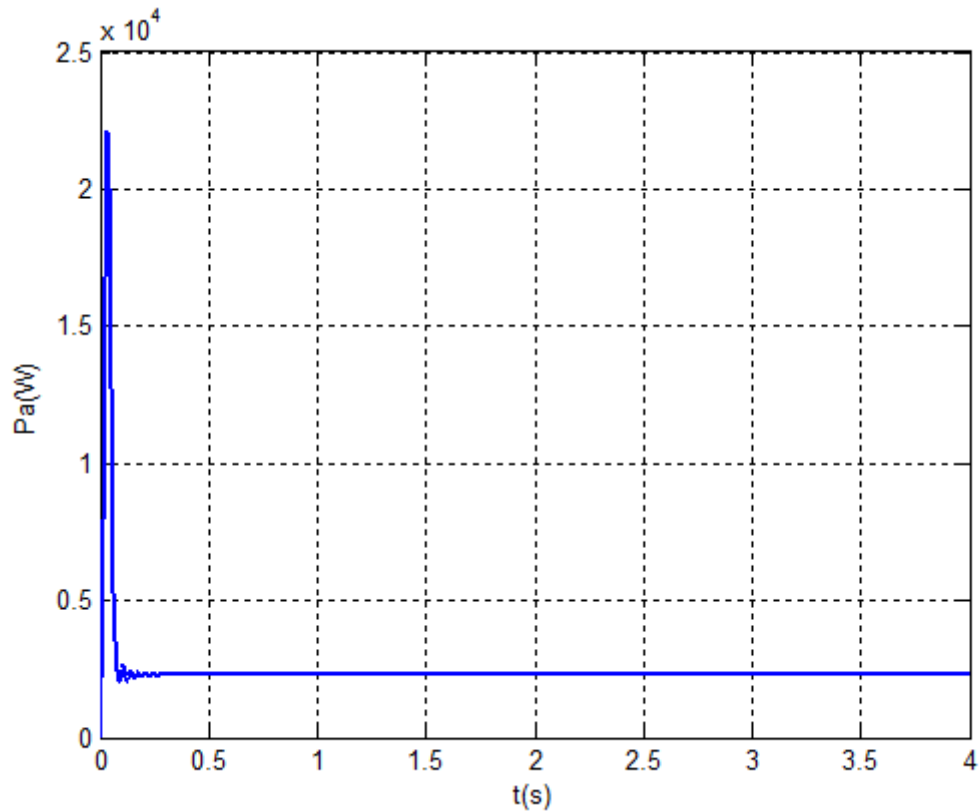


Figure IV.28 Puissance active moyenne absorbée par le moteur pour un couple de $0.5C_n$.

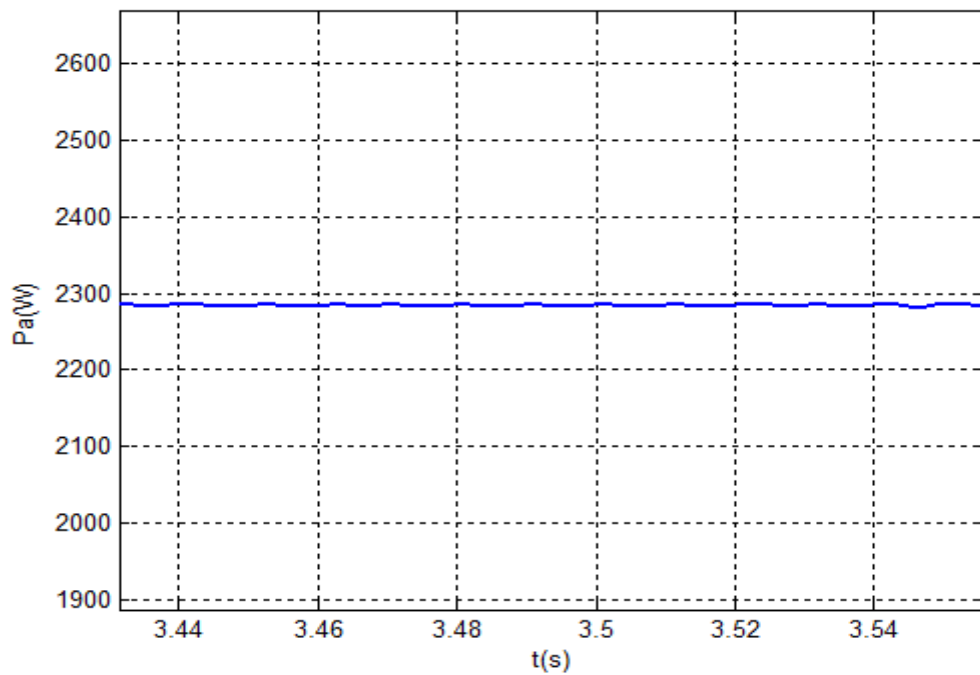


Figure IV.29 Valeur moyenne de la puissance active absorbée par le moteur en régime permanent et pour un couple de $0.5C_n$.

Interprétation : Le moteur asynchrone n'atteint ses caractéristiques réelles qu'après une courte phase transitoire au démarrage où le courant absorbé est très fort et peut endommager le moteur si celui-ci n'est pas protégé contre les surintensités. Le couple résistant appliqué au moteur étant la moitié du couple nominal la vitesse de rotation (1468,4 tr/mn) obtenue par simulation est supérieure à la vitesse nominale (1430tr/mn) donnée par le constructeur. Tandis que la puissance absorbée (2283W) est inférieure à la puissance absorbée en régime nominal (environ 5000 W). Le courant en ligne obtenu (4,3 A) est lui aussi inférieur au courant nominal (environ 9 A). Les résultats de simulation sont conformes aux prévisions obtenues par calculs.

IV.5.2 Simulation du moteur asynchrone triphasé avec couple résistant variable :

La figure IV.30 donne le schéma de simulation du moteur asynchrone triphasé soumis à un couple variable réalisé sous Matlab/Simulink et Simpower. La variation du couple utile de charge en fonction du temps $C_u = f(t)$ (fig.IV.31) a été réalisée à l'aide du block Signal Builder de Simulink. Il faut remarquer que les valeurs en abscisse doivent être multipliées par la valeur du couple nominale C_n .

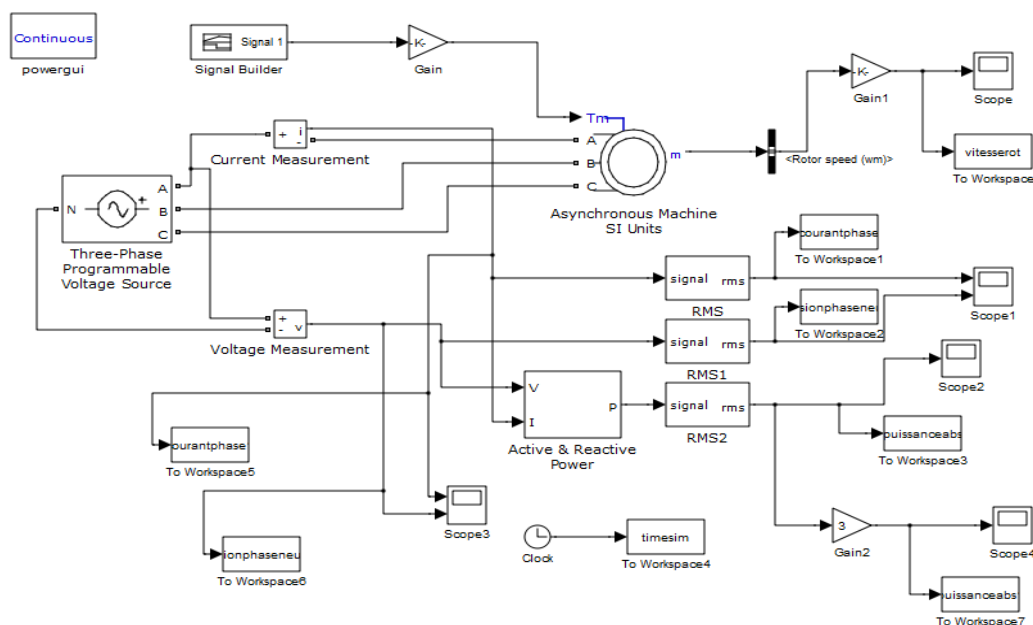


Figure IV.30 Schéma de simulation du Moteur Asynchrone Triphasé avec couple de charge variable.

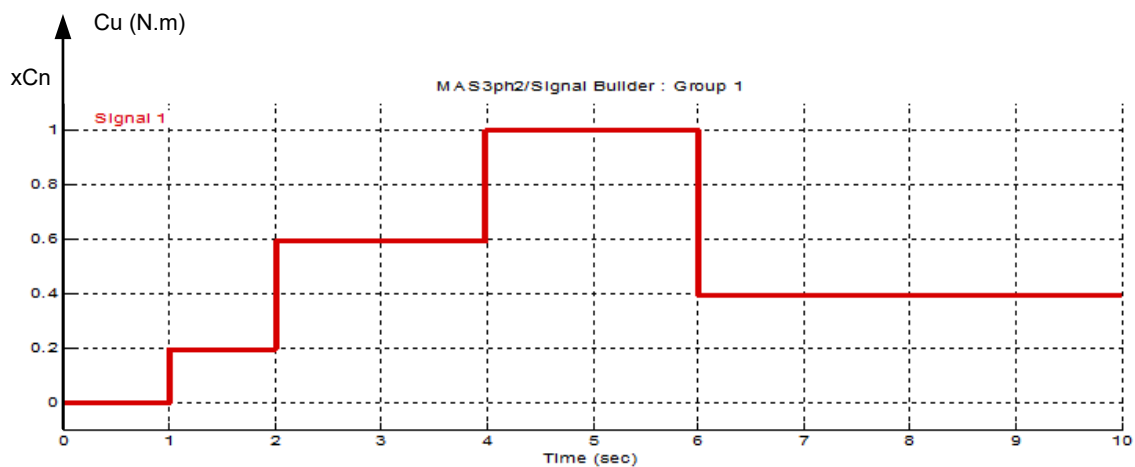


Figure IV.31 Variation du couple utile de charge en fonction du temps.

Résultats de la simulation du moteur asynchrone avec couple de charge variable :

Les résultats suivants ont été obtenus par simulation du moteur asynchrone pour un couple de charge utile C_u variable (voir figure IV.31).

La figure IV.32 donne la caractéristique de vitesse du moteur asynchrone. La valeur de la vitesse en régime permanent est, dans l'ordre pour chaque intervalle de temps, comme suit: 1498 ; 1487 ; 1462 ; 1435 et 1475 tr/mn.

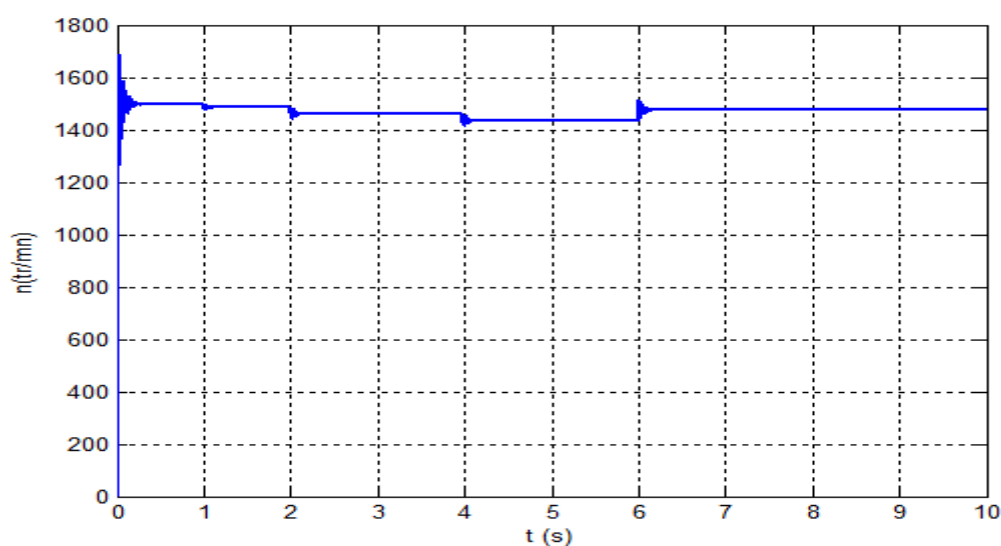


Figure IV.32 Caractéristique de la vitesse du moteur avec couple de charge variable.

La figure IV.33 donne la valeur moyenne du courant absorbé par le moteur. La valeur du courant en ligne en régime permanent est, dans l'ordre pour chaque intervalle de temps, comme suit: 2,7 ; 2,9 ; 4,7 ; 7,2 et 3,6 A. La figure IV.34 du haut, donne les variations du courant en ligne absorbé par le moteur et celle du bas donne les variations de la tension de phase appliquée au moteur. Nous constatons que le courant change suivant le couple résistant appliqué au moteur tandis que la tension reste pratiquement constante.

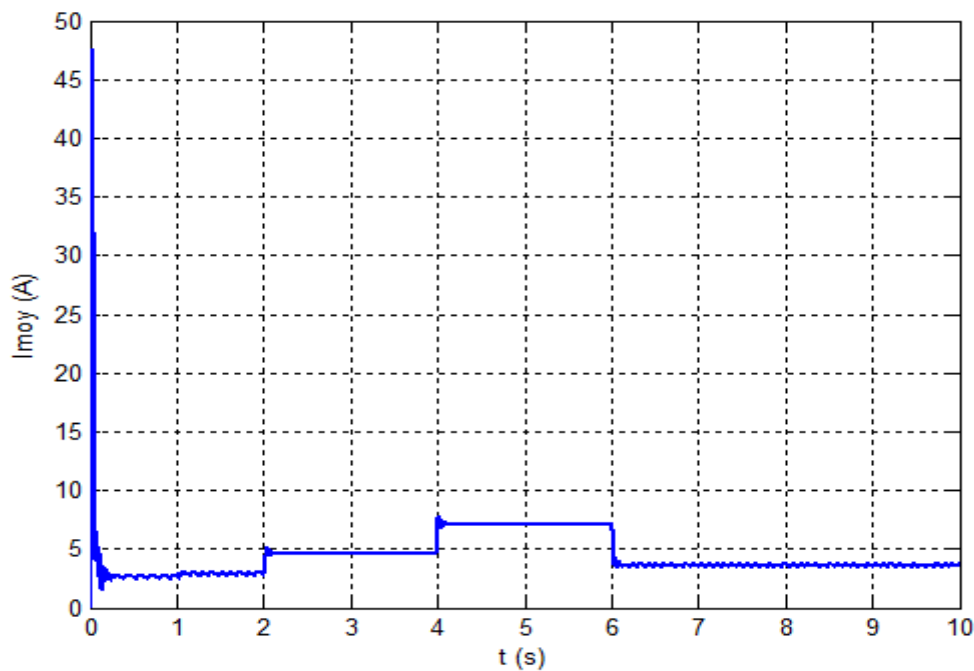


Figure IV. 33 Courant absorbé par le moteur pour un couple de charge variable.

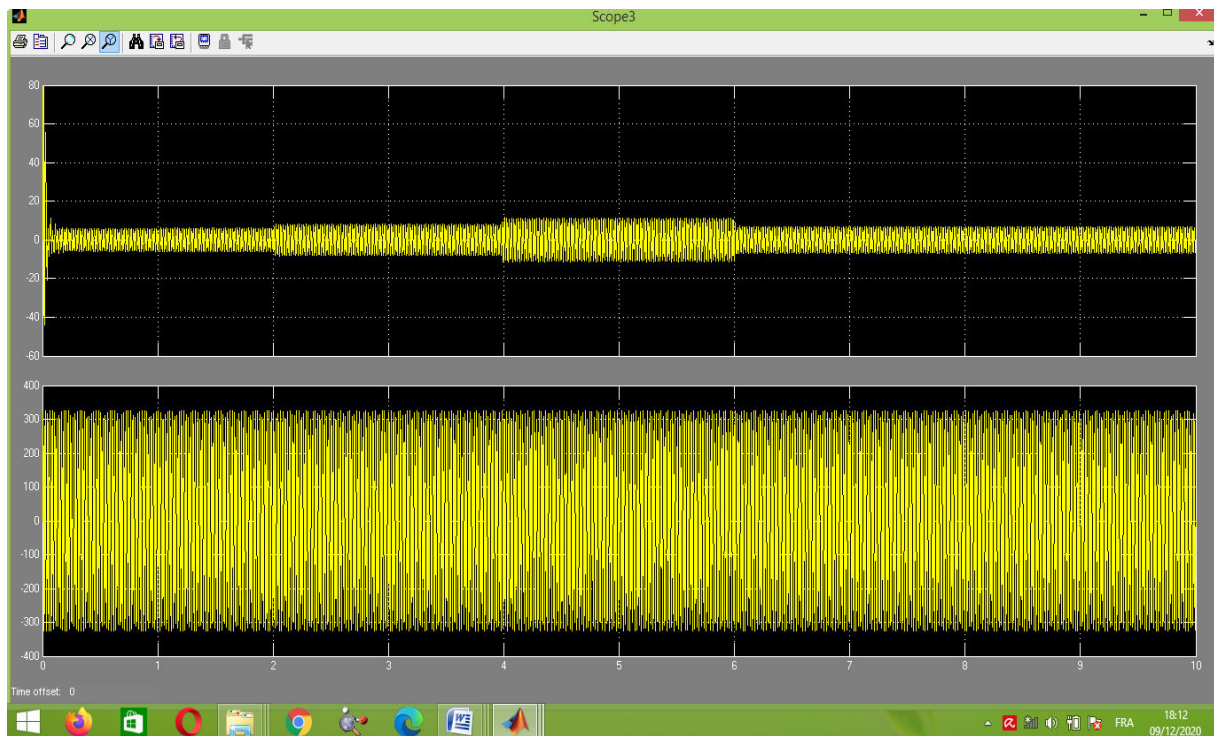


Figure IV. 34 Variations du courant en ligne et de la tension de phase pour un couple de charge variable.

La figure IV.35 donne la valeur moyenne de la puissance active absorbée par le moteur. La valeur de la puissance active absorbée en régime permanent est, dans l'ordre pour chaque intervalle de temps, comme suit: 150 ; 965 ; 2700 ; 4525 et 1825 W.

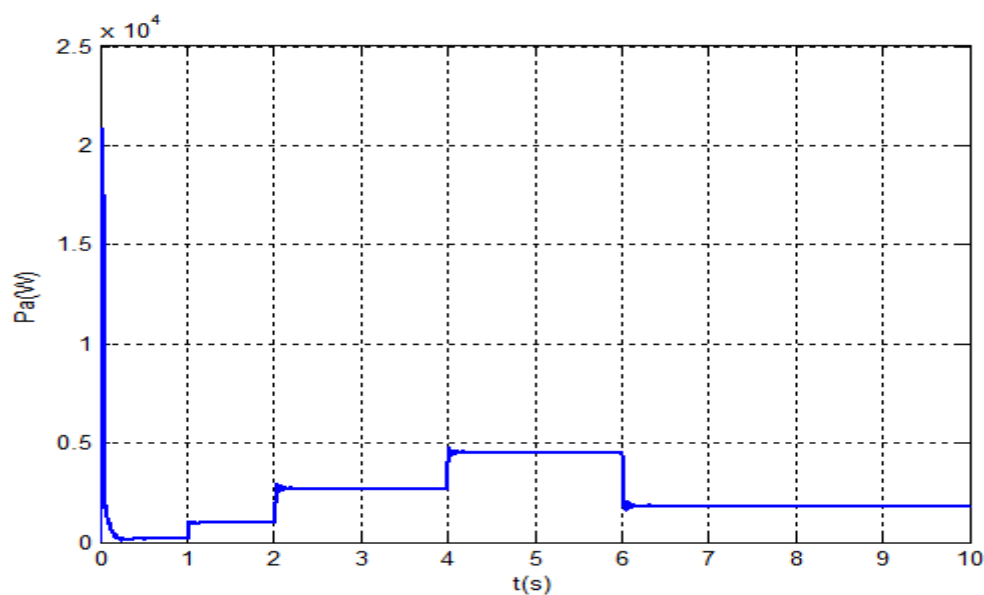


Figure IV.35 Puissance active absorbée par le moteur pour un couple de charge variable.

Interprétation : Nous constatons à partir des résultats de simulation que les caractéristiques courant en ligne, puissance absorbée et vitesse de rotation du moteur asynchrone triphasé s'adaptent parfaitement à une variation du couple de charge même lorsque celle-ci est brusque. Les performances obtenues sont très proches de la réalité.

Calcul du rendement du moteur et du courant en ligne pour le couple utile nominal en utilisant les résultats de simulation :

Le rendement : $\eta = P_u/P_a = 4000/4525 = 0.88$

Courant : $I_a = 4525/(1.732 \times 400 \times 0.88) = 7,42A$

Commentaire : Les avantages des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil résident dans leur simplicité de construction et d'entretien, dans leur robustesse mécanique et dans leur faible prix de revient. Ils sont utilisés dans une large gamme de puissances allant de quelques centaines à plusieurs milliers de watts. Ils sont caractérisés par un fonctionnement stable, une vitesse pratiquement constante et un rendement élevé autour de la charge nominale. Ils peuvent s'adapter facilement à des régimes de couples de charges variables comme dans certains systèmes automatisés. Néanmoins, ils présentent certains défauts lors du démarrage comme la présence d'une surintensité de courant.

IV.6 Schéma de simulation du système PV global

La figure IV.36 montre le schéma de simulation du système photovoltaïque global composé des différents étages étudiés précédemment. Le générateur PV a été modélisé de façon suivante : 8 strings en parallèle ; chaque string comprend 12 modules en série ; chaque module comprend 54 cellules en série. La tension aux bornes en circuit ouvert est d'environ 396V et le courant de court-circuit 66 A. Le module simulé est de marque Kyocera KG200GT, type poly-cristallin dont les paramètres du modèle à 1 diode sont les suivantes :

paramètre	Valeur
I_{sc}	8.21
V_{oc}	32.9
I_{mp}	7.61
V_{mp}	26.3
I_o	9.825×10^{-8}
I_{pv}	8.214
a	1.3

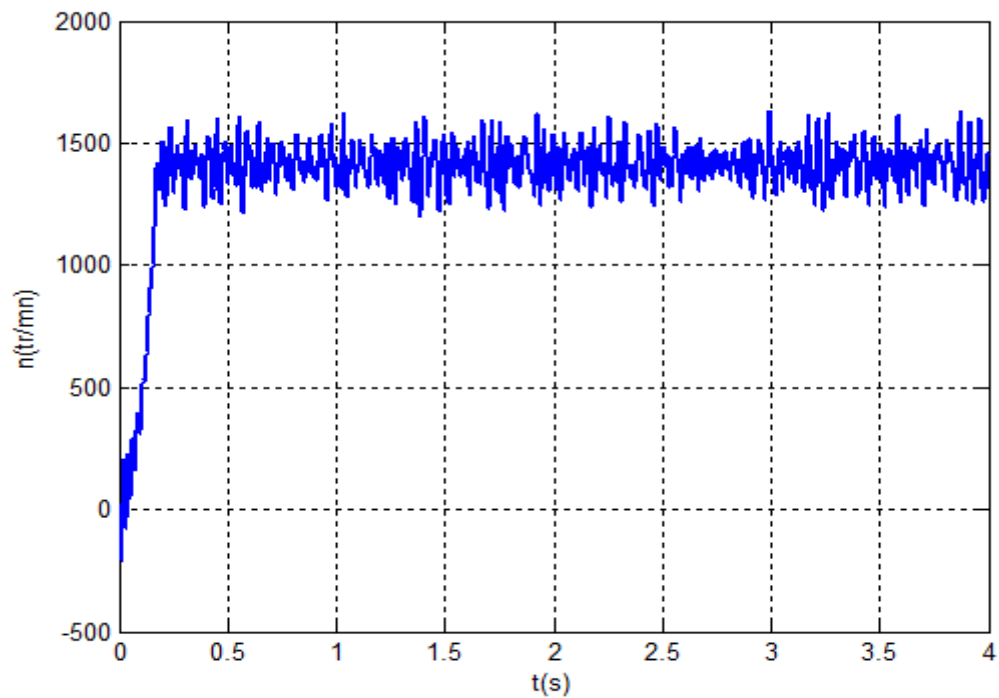


Figure IV.37 Caractéristique de la vitesse du moteur avec couple de charge constant.

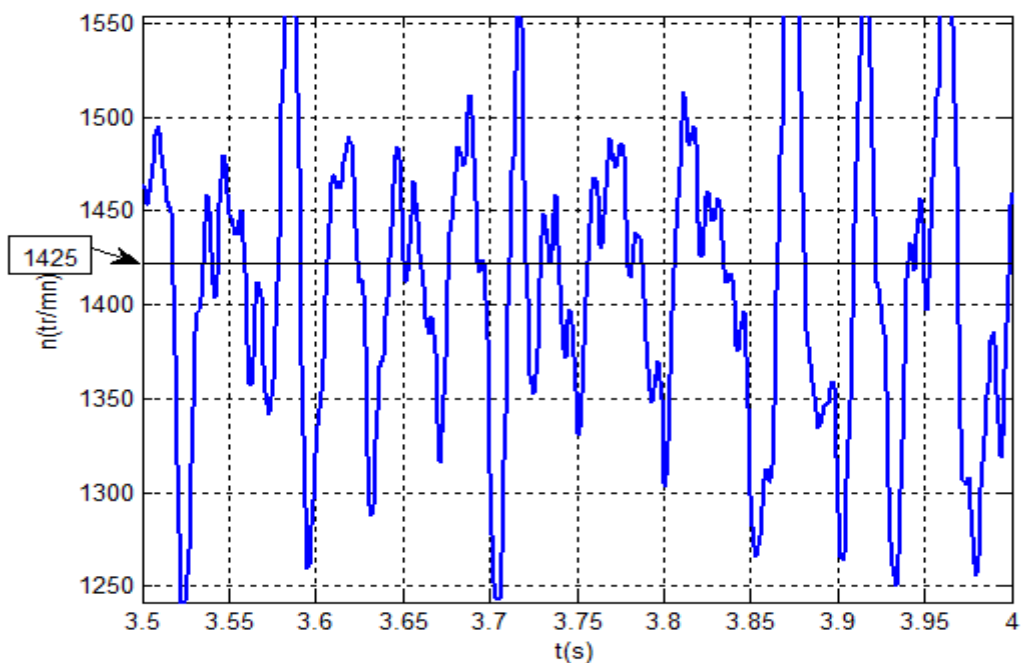


Figure IV.38 Valeur moyenne de la vitesse du moteur avec couple de charge constant.

La figure IV.39 donne les variations dans le temps du courant absorbé par le moteur. Nous pouvons constater que ce courant n'est pas constant en régime permanent, il présente des fluctuations autour d'une valeur moyenne qui est de 11.2 A. Nous pouvons aussi remarquer que le courant absorbé lors du démarrage en charge est très fort environ 4 fois le courant en régime établi dans notre cas.

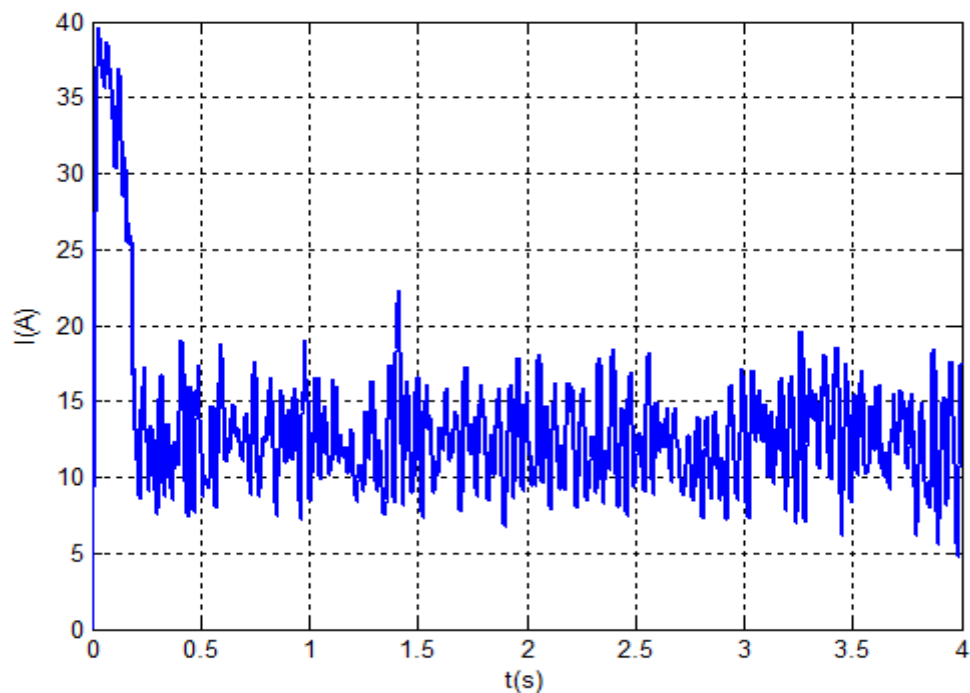


Figure IV.39 Courant absorbé par le moteur pour un couple de charge C_n .

La figure IV.40 donne la courbe de variation dans le temps de la puissance active absorbée par le moteur. Cette puissance fluctue pendant le régime permanent autour d'une valeur moyenne qui est de 5600 W.

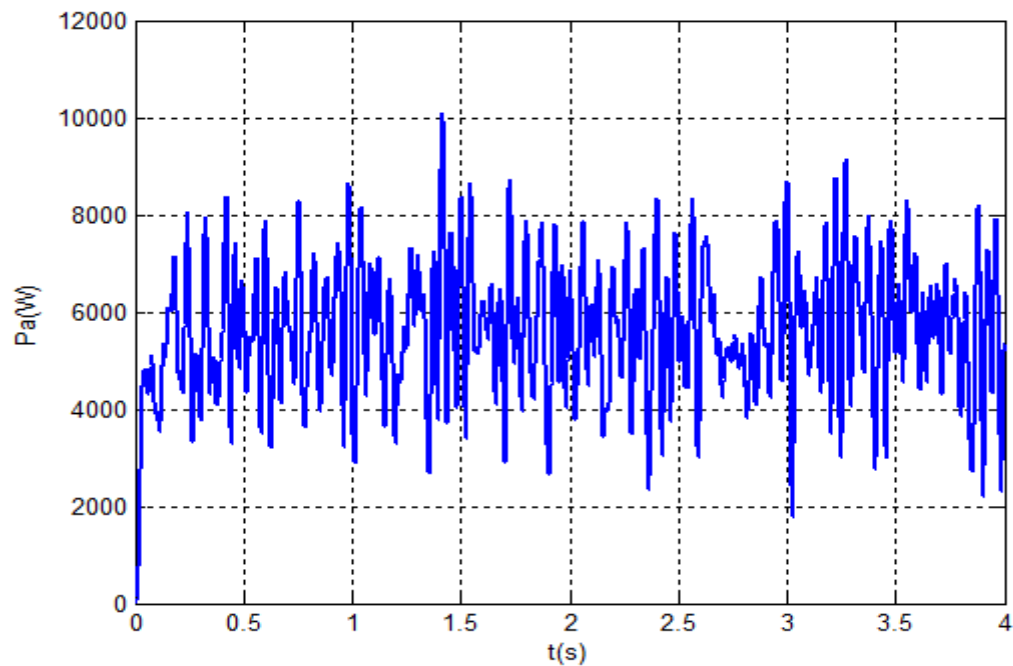


Figure IV.40 Puissance active absorbée par le moteur pour un couple de charge C_n .

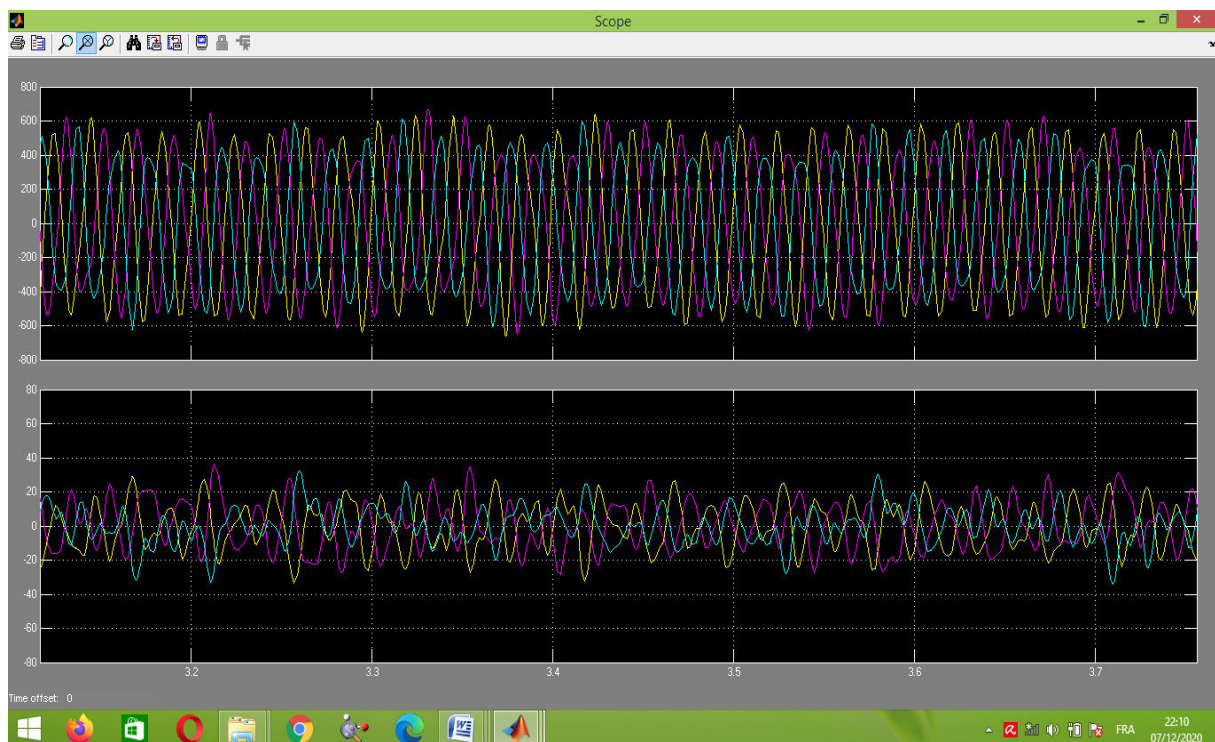


Figure IV.41 Variations des tensions de phases et des courants en lignes pour un couple de charge C_n .

La figure IV.41 du bas, donne les variations des courants en lignes absorbés par le moteur et celle du haut donne les variations des tensions de phases appliquées

au moteur. Nous constatons que les tensions sont alternatives périodiques et présentent des déformations. De même pour les courants en ligne qui présentent des déformations assez nettes.

Interprétation : Les fluctuations constatées sur les caractéristiques précédentes proviennent des 2 étages placés avant le moteur asynchrone. En premier lieu la tension produite à la sortie du hacheur n'est pas constante mais varie autour d'une valeur moyenne. Les fluctuations de cette tension sont causées par le transistor Mosfet qui fonctionne à haute fréquence en plus des charges et décharges des condensateurs de cet étage. En deuxième lieu la tension de sortie du hacheur étant appliquée à l'entrée de l'onduleur triphasé influe sur son fonctionnement en plus des 6 transistors Mosfet de cet étage qui sont commandés par des impulsions à basse fréquence pour la commande à 120° et à haute fréquence pour la commande MLI. D'où on obtient à la sortie de l'onduleur des tensions triphasées alternatives périodiques et non sinusoïdales, fluctuantes autour d'une valeur moyenne. A cause des circuits inductifs RL des bobinages des 3 phases du moteur et des inductances mutuelles rotor-stator les courants en lignes du moteur sont alternatives périodiques, présentent des déformations assez nettes et ne sont plus sinusoïdaux. Nous pouvons ajouter aussi que des phénomènes de résonance peuvent se produire à cause des éléments RLC présents dans le système, ce qui peut expliquer la présence des pics de courant ou de tension sur les caractéristiques obtenues.

IV.6.2 Résultats de la simulation du système PV global dans le cas du moteur asynchrone avec couple de charge variable :

Les résultats suivants ont été obtenus par simulation du moteur asynchrone pour un couple de charge utile C_u variable et qui prend successivement les valeurs suivantes : $0 \times C_n$; $0,2 \times C_n$; $0,6 \times C_n$; $1 \times C_n$ et $0,4 \times C_n$ (voir fig. IV.31)

La figure IV.42 donne la caractéristique de vitesse du moteur en fonction des différentes valeurs du couple appliqué pendant des intervalles de temps successifs. La figure IV.43 indique en trait rouge le profil de la vitesse moyenne du moteur durant chaque intervalle. Nous constatons pour chaque régime de fonctionnement, la présence de fluctuations de la vitesse du moteur autour d'une valeur moyenne. Nous pouvons déduire que lorsque le couple résistant augmente la vitesse diminue et lorsque le couple résistant diminue la vitesse augmente.

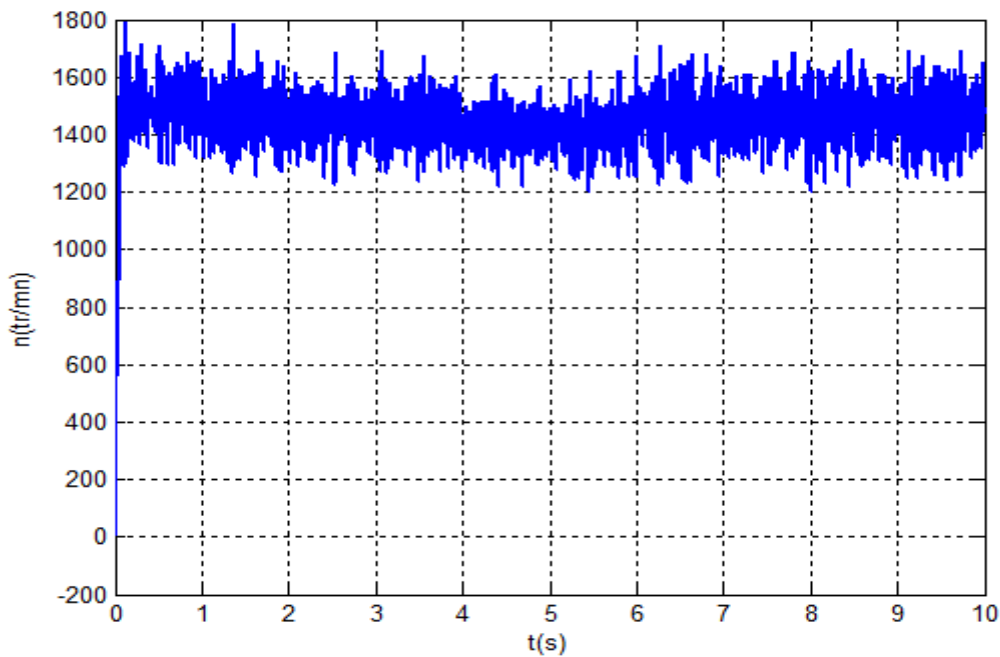


Figure IV.42 Caractéristique de la vitesse du moteur avec couple de charge variable.

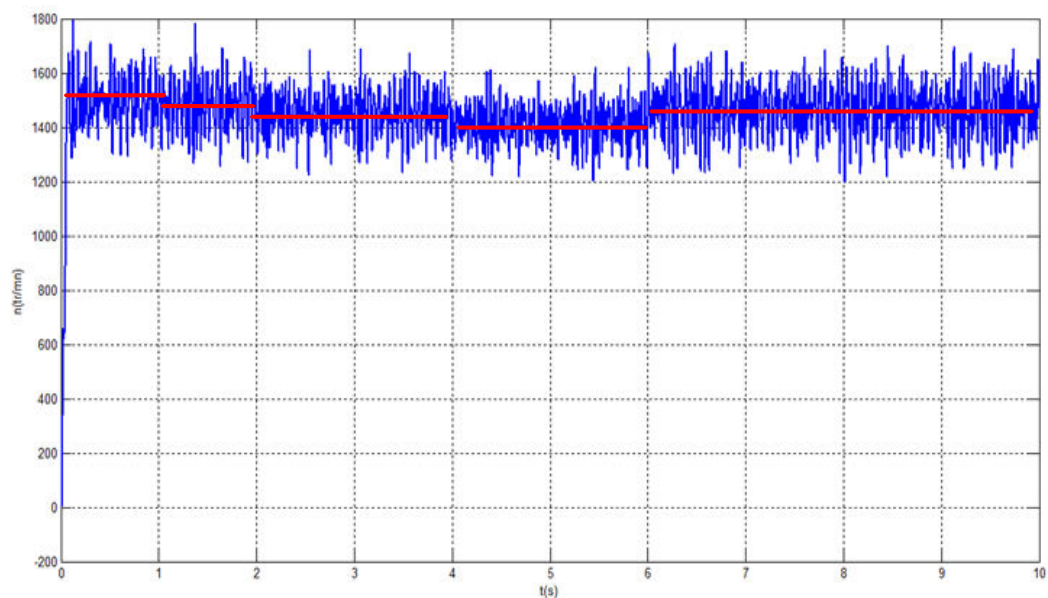


Figure IV.43 En rouge le profil de la vitesse moyenne du moteur pour chaque valeur du couple de charge.

La figure IV.44 donne les variations dans le temps du courant absorbé par le moteur en fonction des différentes valeurs du couple appliqué pendant des intervalles de temps successifs. La figure IV.45 indique en trait rouge le profil du courant moyen absorbé durant chaque intervalle et la figure IV.46 montre les

variations des courants en ligne. Nous constatons pour chaque régime de fonctionnement, la présence de fluctuations du courant absorbé autour d'une valeur moyenne. Nous pouvons aussi remarquer que le courant absorbé lors du démarrage est très fort. Cette phase ne dure que très peu de temps mais peut détruire les bobinages du moteur par effet Joule.

Nous pouvons déduire que pendant ce régime de fonctionnement, lorsque le couple résistant augmente le courant absorbé augmente et lorsque le couple résistant diminue le courant absorbé diminue.

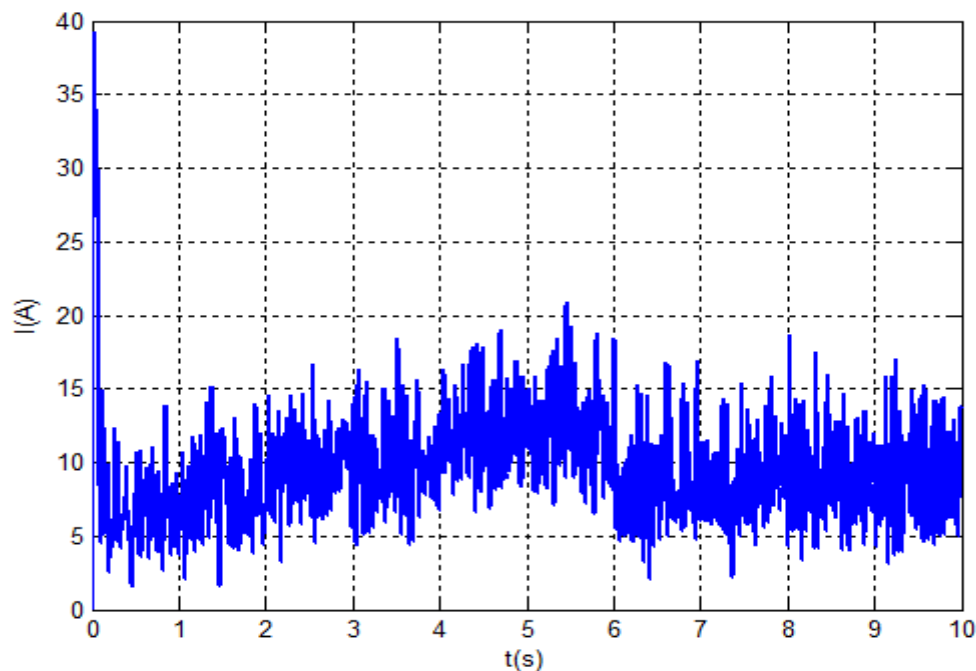


Figure IV.44 Courant absorbé par le moteur pour un couple de charge variable.

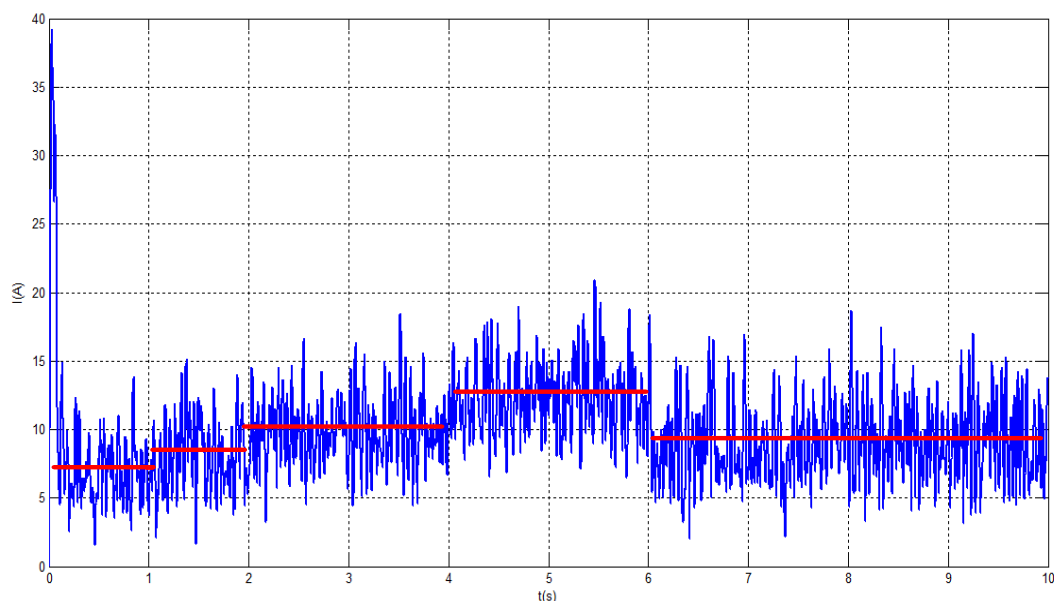


Figure IV.45 En rouge le profil du courant moyen absorbé par le moteur pour chaque valeur du couple de charge.

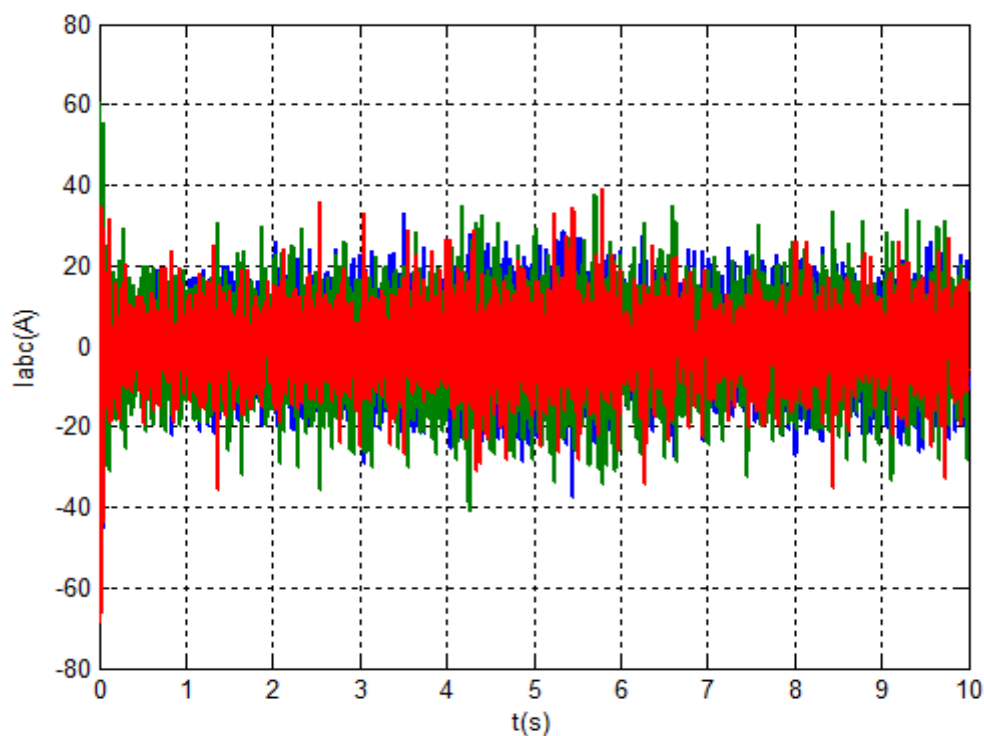


Figure IV.46 Variations des courants en ligne absorbés par le moteur pour un couple de charge variable.

La figure IV.47 donne la courbe de variation dans le temps de la puissance active absorbée par le moteur. Cette puissance fluctue pendant chacun des 5 régimes de couple résistant imposé au moteur autour d'une valeur moyenne.

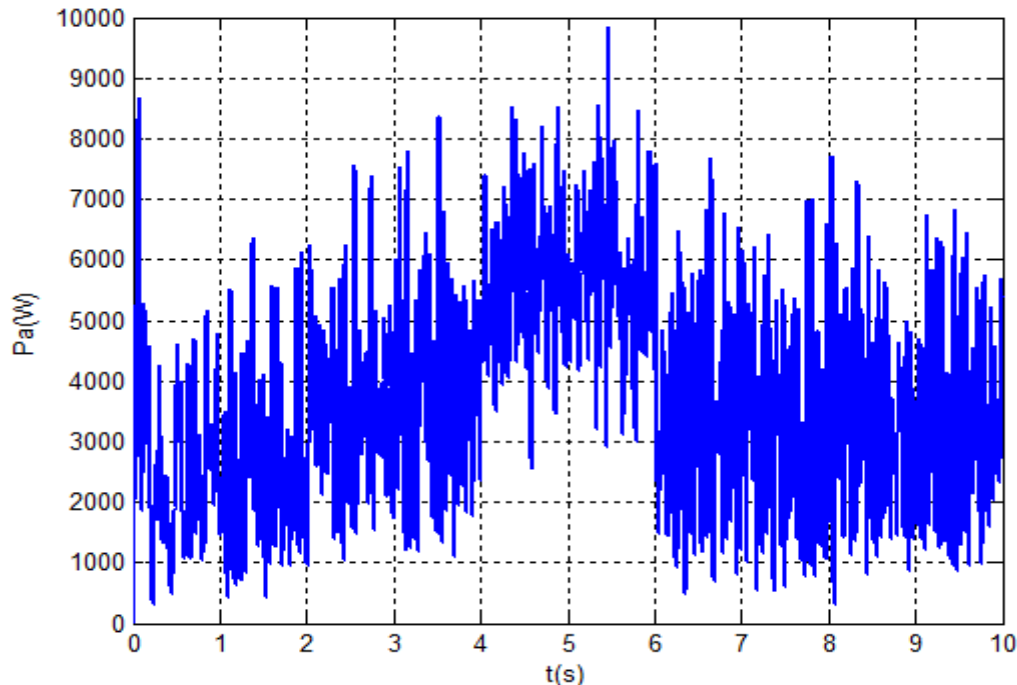


Figure IV.47 Puissance active absorbée par le moteur pour un couple de charge variable.

Interprétation : Nous constatons à partir des résultats de simulation que les caractéristiques courant en ligne, puissance absorbée et vitesse de rotation du moteur asynchrone triphasé s'adaptent du point de vue valeurs moyennes à une variation du couple de charge. Les performances obtenues peuvent être qualifiées d'acceptables.

IV.7 Conclusion :

La simulation des différents étages qui composent le système photovoltaïque étudié nous a permis de tester les performances de chaque étage et de vérifier leur conformité avec les résultats théoriques. La simulation du système PV global montre que les résultats obtenus diffèrent de celles de la simulation de chaque étage à part mais qu'elles sont très proches de la réalité et qu'elles sont par conséquent acceptables. Une réalisation réelle du montage est possible si on fait une étude technique approfondie. L'adaptation des différents étages reste un problème assez délicat à résoudre ainsi que les réglages des différents

paramètres pour pouvoir atteindre un rendement élevé. Nous savons aussi que dans la réalité les conditions environnementales du site d'utilisation qui sont de nature climatique (ombrages), irradiations solaires et températures peuvent perturber le fonctionnement du système et influencer sur son rendement.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de ce travail de mémoire de fin d'études est de modéliser et simuler un système générateur photovoltaïque qui, associé à un convertisseur DC-DC et à un onduleur triphasé, permet d'alimenter un moteur asynchrone triphasé en charge.

Pour atteindre cet objectif, nous nous sommes tout d'abord intéressés, dans le premier chapitre, au générateur photovoltaïque le plus simple qui est la cellule solaire, par présentation de son principe de fonctionnement, de ses caractéristiques électriques et des différentes technologies rencontrées dans le marché. Ensuite nous avons modélisé une cellule solaire à partir de son modèle mathématique à une seule diode dans le but d'obtenir les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V). Cela nous a permis par la suite de modéliser le champ photovoltaïque par le biais du panneau solaire et d'avoir une idée sur le comportement électrique du générateur photovoltaïque qui est destiné à alimenter les différents étages du projet. Ce chapitre a été terminé par une présentation générale du potentiel solaire en Algérie et des perspectives d'exploitation de cette énergie.

Le deuxième chapitre a été consacré aux principes théoriques des différents convertisseurs DC/DC, et à leurs régimes de fonctionnement en abaisseur, en élévateur ou les deux en même temps. Le système MPPT associé au convertisseur a été aussi abordé pour montrer son importance dans le contrôle du point de puissance maximale. Sachant que la commande MPPT nécessite toute une étude particulière et très compliquée, elle n'est pas l'objet de notre travail. Dans le troisième chapitre, nous avons étudiés les systèmes onduleurs triphasés à deux niveaux avec deux types de commandes différentes. Ces onduleurs seront utilisés pour convertir la tension continue en tension alternative. Les principes des deux commandes ont été expliqués en détail. Les notions fondamentales de la machine asynchrone ont été ensuite présentées ainsi que la transformation de Park qui est d'une grande importance dans la simulation des systèmes triphasés. Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons présenté tous les résultats des simulations réalisées à partir des modèles élaborés sous les logiciels

Matlab/Simulink et Simpower/Simscape. Tous les résultats obtenus ont été analysés et commentés pour donner une image fidèle et très proche du système réel.

Nous pouvons considérer que le but de cette étude a été atteint avec des résultats de simulations très satisfaisants, néanmoins l'amélioration du travail et l'apport de solutions beaucoup plus performantes sont tout à fait envisageables. Parmi les tâches essentielles qui pourraient être conduites pour compléter ce

Conclusion Générale

travail nous pouvons citer les suivantes :

-Améliorer le rendement du système par l'introduction d'un contrôle MPPT bien étudié et adaptable selon un choix judicieux de l'algorithme et de la logique appliquée.

- Faire une étude de dimensionnement préalable basée sur les conditions géographiques et climatiques du site d'implantation.

-Tenir compte des conditions climatiques qui peuvent influencer sur le générateur PV en particulier et étudier leurs effets sur les différents étages qui composent le système.

A la fin nous espérons que l'étude que nous avons menée peut ouvrir de nombreuses perspectives à d'autres étudiants et chercheurs dans les domaines d'applications de l'énergie photovoltaïque.

Bibliographie

Bibliographie

Références Bibliographiques :

- [1] B. Wafa, S. Samah, « étude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque " Mémoire ingénieurs.Biskra, 2006.
- [2] R. Jimmy et al., *Le pompage photovoltaïque*, Édition Multi mondes, 1999.
- [3] H. Derbal, Thèse de doctorat « Cellules solaires photovoltaïques plastiques nanostructurées » Ecole Doctorale d'Angers. Juillet 2009.
- [4] B.Benmahrez, F.Oudihat, « étude et dimensionnement d'une alimentation solaire pour les locaux administratifs de la société IFRI", mémoire d'ingénieur, université de Béjaia,2010.
- [5] P. Bessemoulin, J. Olivieri, « le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », La Météorologie 8e série - n° 31 - septembre 2000
- [6] M.N. Mechalikh, C.E. Hamada, *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau*, mémoire de master. Université Kasedi Merbah Ourgla. 2013.
- [7] F. Hananou et A. Rouabah, *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque*, mémoire de master. Université Kasedi Merbah Ouargla. 2014.
- [8] S. Mayouf, *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle*, mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2016.
- [9] A. Chelabi et A.Ibelhoulen, *Etude d'un système hybride autonome*, mémoire de master. Université de Bejaia. 2012.
- [10] A. Bouchakour, *Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque*, thèse de doctorat. Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes. 2018.
- [11] O. Gergaud, *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*, Thèse de doctorat en électrotechnique. Ecole normale supérieure de Cachan. 2002.
- [12] P. Pernet, *Développement des cellules solaires en silicium amorphe de type « N.I.P » sur substrats souples*. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Thèse N°2303, 2000.
- [13] J. J. Beziane, *L'énergie solaire*, (18 Nov.2012).
- [14] H. Mathieu, "*Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*", 2^{ème} Edition, Masson, 1990.
- [15] A. RICAUD, *Photopiles solaires*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (Suisse), Collection « Cahiers de Chimie », 2004
- [16] A. Sivert, *Panneaux photovoltaïques , Etude d'une valise solaire*, IUT Génie Electrique & Informatique Industriel de Soissons. Iut en ligne, le catalogue de ressources de l'enseignement technologique universitaire.12 mars 2019.
- [17] N. Benahmed Benabdallah , *Propriétés physique des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules à base de Si*, Thèse de Magister,2006, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen
-

Bibliographie

- [18] B.Yacoubi , *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau*, mémoire de master ,université Belkaid Tlemcen,2016.
- [19] Ministère des énergies, <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=potentiels>. 24 Avril 2019.
- [20] D. Benatiallah, *Etude et simulation de flux solaire avec intégration d'un système d'information géographique (S.I.G) pour la wilaya d'Adrar*, mémoire de magister. Université Africaine Ahmed Draia Adrar, 2014.
- [21] C.Hamida, H. Ratiba, « *modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau*», mémoire de master, université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, 2016.
- [22] H. Bilal et B. Ismail, « *Étude d'un système de pompage photovoltaïque au fil soleil*», mémoire de master commande des machines électriques, université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, 2016.
- [23] Ch .Ghabara, H. Jouini, M. Lahbib et A. Mami, *Stratégie d'optimisation floue du point d'extraction de la puissance maximale (MPPT) pour les petites éoliennes connectées à des sites isolés*. IJSET. Université de Tunis EL Manar, Vol. 5pp .48-54,2017.
- [24] T. Nacer Eddine, G. Slimane, “*Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque*”, Mémoire Master, Université Echahid Hama Lakhdar d'El-Oued,2015.
- [25] K. Bilal, “*Techniques Intelligentes pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Système Photovoltaïque*”, Projet de fin d'études, Université Libanaise, 2012.
- [26] K.Sabour, S.Elazazi, « *Commande vectorielle da la machine asynchrone à double alimentation* » mémoire master, université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, année 2015
- [27] A. Bounaceur, *Etude et conception d'un système hybride de production d'énergie*, mémoire de master. Université KM Ouargla. 2015.
- [28] S. Poignant, *L'énergie photovoltaïque*, Rapport d'information, 2009, Assemblée Nationale Constitution du 4 Octobre 1958 Treizième Législature.
- [29] A. Cheron, *Le rayonnement solaire dans l'environnement terrestre*, 2014.
- [30] D. Cherifi, *Estimation de la vitesse et de la résistance rotorique pour la commande par orientation du flux rotorique d'un moteur asynchrone sans capteur mécanique*. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. Juin 2014.
- [31] M. Naar, F. Arbaoui, *Commande par mode flou-glissement de la machine asynchrone*, mémoire d'ingénieur d'état. Centre universitaire de Bechar,2005.
- [32] N.Adjimi,W. Belaidi, *Modélisation et commande d'un onduleur MLI*. Universitaire Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi. 2009.
- [33] E. Gaucheron, «*Les moteurs électriques... pour mieux les piloter et les protéger*»,<http://www.schneider-electric.com>, avril2018.
- [34] F. Cherier, G. Amade, « *Modélisation en vue du diagnostic des défauts dans une machine asynchrone* », mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université M'hamed Bougara-Boumerdès, 2009.
- [35] H. Ney, « *Électro système-1ère SIT* » livre, édition technique1997.
- [36] C. Chevas, G. Valentin, « *Machine asynchrone* », cours et problèmes, version du 21/09/2014.
- [37] W. Theodor, S.Gilbert, « *Electrotechnique* » livre, 3ème édition, 1999.
-

Bibliographie

[38] K. Idjdarene, « *Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes* », Thèse en cotutelle entre l'Université de Bejaia, Algérie et l'Université Lille 1, France, 2010.

[39] W. Bendemmagh , « *Commande de la machine asynchrone par la cascade hyposynchrone à base des logiciels simpower et matlab* », mémoire de master, Université de Sétif 1, 2013.

[40] S. Bensmail ,« *Optimisation Et Gestion d'Energie D'un Système Hybride A Energies Renouvelables* », thèse de doctorat, Laboratoire de Technologie Industrielle et de l'Information(LTII), Université A.Mira-Bejaia, 2017.

Résumé :

Actuellement les progrès de la technologie permettent d'exploiter certaines sources d'énergies naturelles comme les irradiations solaires et les forces éoliennes. A l'échelle humaine, ces énergies qui se renouvellent assez rapidement, peuvent être considérées comme inépuisables. L'énergie solaire photovoltaïque est considérée parmi les énergies renouvelables les plus exploitées dans le monde et particulièrement en Algérie. Elle permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques, grâce à la lumière du soleil captée par ces derniers. Notre étude s'intéresse à la conversion de cette énergie photovoltaïque en système de courants alternatifs triphasés dans le but d'alimenter une machine asynchrone triphasée. Le système étudié doit comprendre un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC-DC, un onduleur triphasé et un moteur triphasé.

L'objectif de ce travail est l'évaluation des performances des différents éléments du système photovoltaïque par simulation à l'aide du logiciel Matlab/Simulink et Simpower.

Mots clé : Energies renouvelables ; Energie solaire photovoltaïque ; Convertisseur DC-DC ; Onduleur triphasé ; Machine asynchrone triphasée.

Abstract :

Currently, advances in technology make it possible to exploit certain natural energy sources such as solar irradiation and wind power. On a human scale, these energies, which renew themselves quite quickly, can be considered inexhaustible. Photovoltaic solar energy is considered among the most exploited renewable energies in the world and particularly in Algeria. It makes it possible to manufacture electricity from photovoltaic panels, using the sunlight captured by them. Our study focuses on the conversion of this photovoltaic energy into a three-phase alternating current system in order to power a three-phase asynchronous machine. The studied system must include a photovoltaic generator, a DC-DC converter, a three-phase inverter and a three-phase motor. The objective of this work is to evaluate the performance of the different elements of the photovoltaic system by simulation using Matlab/Simulink and Simpower software.

Keywords: Renewable energy; Photovoltaic solar energy; DC-DC converter; Three-phase inverter; Three-phase asynchronous machine.

ملخص :

حالياً تنتج التطورات التكنولوجية إمكانية استغلال بعض مصادر الطاقة الطبيعية مثل الإشعاع الشمسي و طاقة الرياح. على المستوى البشري يمكن اعتبار هذه الطاقات التي تتجدد بسرعة كبيرة غير آيلة للزوال. تعتبر الطاقة الشمسية

الكهروضوئية من أكثر الطاقات المتجددة استغلالاً في العالم و بالخصوص في الجزائر. و تسمح بتصنيع الكهرباء عن طريق الألواح الكهروضوئية التي تلتقط ضوء الشمس. تركز دراستنا على تحويل هذه الطاقة الكهروضوئية إلى نظام تيار متناوب ثلاثي الطور من أجل تشغيل آلة غير متزامنة ثلاثية الطور. يجب على النظام المدروس أن يشتمل على مولد كهروضوئي و محول تيار مستمر- تيار مستمر و موج عاكس ثلاثي الطور و محرك ثلاثي الطور.

الهدف من هذا العمل هو تقييم أداء العناصر المختلفة للنظام الكهروضوئي عن طريق المحاكاة باستخدام برنامج Matlab/Simulink و Simpower.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة ، الطاقة الشمسية الكهروضوئية ، محول تيار مستمر- تيار مستمر ، موج عاكس ثلاثي الطور ، آلة غير متزامنة ثلاثية الطور.