REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Automatique et systèmes

Spécialité : Automatique et systèmes

Commande MPPT-CSA d'un système photovoltaïque alimentant une MAS

Présenté par :

Zahroui Bachir

Drouche Laid

Proposé et Dirigé par :

Dr. Hamidia Fatiha

Dr. Abbadi Amel

Promotion 2022

dédicaces

Tout au début, je tien sà remercier le bon dieu de m'avoir donné du courage et de patience afin de réaliser ce modeste travail que je dédie à :

Mes parents pour leur sacrifice, leur multiples soutiens, et pour leur affection quotidienne, merci d'être présents dans toutes circonstance Je pris le tout puissant de vous donner une longue vie et m'aider à être toujours votre fierté.

A Mes frères : hamza-Ibrahim- Houari – Hocine -Youcef

A Mes sœurs Lamia –Khadîdja – aicha

A l'âmes des mes grands parents

A tous mes amis

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Zahroui bachir

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Nous tenons à adresser nos plus grands remerciements à nos encadrantes Dr Fatiha Hamidia et Dr Abbadi Amel, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nous tenons également à remercier les membres de Jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

A travers ce mémoire, nous adressons nos remerciements aux enseignants qui ont contribué à la formation de notre connaissance depuis la première classe du primaire jusqu'à aujourd'hui

Enfin,

On remercie tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci à tous et toutes

ملخص

الهدف من العمل المقدم في هذه الاطروحة هو تحسين النظام الكهروضوئي لكي يعمل باقصى طاقته ولانه من الضروري الحفاظ على ثبات الجهد الذي يوفره النظام الكهروضوئي لتغذية الالة الغير متزامنة والذي يتم التحكم فيها عن طريق التحكم المباشر في عزم الدوران . سنقترح من هذا تتبع أقصى نقطة للطاقة بتقنية خوارزمية بحث الغراب

الكلمات المفتاحية

الة غير متزامنة . النضام الكهروضوئي . التحكم المباشر في عزم الدوران . تتبع أقصى نقطة للطاقة .

خوارزمية بحث الغراب .

Résumé

L'objectif de travail présenté dans ce mémoire est d'améliorer les performances de notre système photovoltaïque. Afin de fonctionner à pleine capacité et parce qu'il est nécessaire de maintenir la tension délivrée par le système photovoltaïque constante., pour alimenter la machine asynchrone, qui est contrôlée par la commande direct du couple (DTC). Nous vous suggérons de suivre le point de puissance maximal (MPPT) avec l'algorithme de recherche de corbeau (CSA).

Mots clés

La machine asynchrone (MAS), PVG, la commande directe du couple (DTC), MPPT, CSA,

Abstract

The aim of the work presented in this thesis is to improve the performance of our photovoltaic system. In order to operate at full capacity and because it is necessary to keep the voltage delivered by the photovoltaic system constant. To power the asynchronous machine, which is controlled by direct torque control (DTC). We suggest you track the maximum power point (MPPT) with the crow search algorithm (CSA).

Key words

Induction machine, PVG, Direct Torque Control (DTC), MPPT, CSA,

Liste des figures

Figure I.1	Schema d'un system photovoltaïque	03
Figure I.2	Structure d'une cellule photovoltaïque	04
Figure I.3	Cellule photovoltaïque	04
Figure I.4	Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque	05
Figure I.5	Silicium monocristallin	07
Figure I.6	Silicium polycrystalline	07
Figure I.7	Silicium amorphe	08
Figure I.8	Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau	09
Figure I.9	Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque	10
Figure I.10	Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque	11
Figure I.11	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(U)	11
Figure I.12	Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque	12
Figure I.13	Influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(U)	12
Figure I.14	Influence de la température sur la caractéristique I=f(U)	13
Figure I.15	Cellules photovoltaïque en parallèle	13
Figure I.16	Cellules photovoltaïque en Série	14
Figure II.1	Schéma fonctionnel général du système P(V) avec MPPT	16
Figure II.2	Symbole d'un convertisseur DC-DC	17
Figure II.3	Schéma électrique du convertisseur Boost	17
Figure II.4	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost	18
Figure II.5	Schéma électrique d'un hacheur boost fermé	19
Figure II.6	Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert	19
Figure II.7	Schéma électrique d'un hacheur buck	20
Figure II. 8	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck	21
Figure II.9	Schéma électrique d'un hacheur buck fermé	21
Figure II.10	Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert	22
Figure II.11	Schéma électrique d'un hacheur buck- boost	22
Figure II.12	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT	23
Figure II.13	Principe de la commande MPPT	24
Figure III.1	Constitution de La machine asynchrone	27
Figure III.2	Représentation schématique d'une machine	29
Figure III.3	Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique	32
Figure III.4	Représentation de l'onduleur à deux niveaux alimentant une MAS	35
Figure III. 5	Résultat de simulation d'une MAS sans onduleur	37
Figure III.6	Résultat de simulation d'une MAS avec onduleur	38

Liste des figures

Figure IV.1	Structure générale de contrôle direct du couple.....	40
Figure IV.2	Evolution de l'extrémité du vecteur φs	44
Figure IV.3	Sélection des tensions correspondant au contrôle de l'amplitude de fluxstatorique	45
Figure IV.4	Correcteur de couple à trois niveaux.....	45
Figure IV.5	Evolution du couple, flux statorique et de courant de la MAS.....	48
Figure V.1	Système de hypride proposé.....	50
Figure V.2	Diagramme d'état 1 dans CSA (a) fl1.....	53
Figure V.3	Pseudo code du CSA propose……	53
Figure V.4	Réponse de la tension Udc en appliquant MPPT-CSA et MPPT-P&O.....	56
Figure V.5	Réponse de la tension et le rapport cyclique en appliquant MPPT-CSA	57
Figure V.6	Résultat simulation de MPPT-CSA……	58
Figure V.7	Performance du système photovoltaïque en appliquant MPPT-CSA pour alimenter MAS avec commande DTC…….	59

Ipv	Le courant fournie par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur(A)
Iph	Les photo- courants générés par les cellules solaires (A).
Isat	Le courant de saturation (A).
Icc	Le courant de court-circuit (A).
Vpv	La tension aux bornes du PV (V).
Vco	La tension de circuit ouvert (V).
Rs	La résistance série (Ω).
Rsh	La résistance parallèle (Ω).
E	La charge d'électron $(e = 1.6 \times 10^{-19} C)$.
N	Le facteur de qualité de la diode.
K	La constante de Boltzmann $(1.381 \times 10^{-23}\, J/K\ )$.
T	La température des cellules en Kelvin (K).
Pmax	La puissance maximale (W).
Vmax	La tension maximale (V).
Imax	Le courant maximale (A).
FF	Facteur de forme.
η	Le rendement.
D	Le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur
Ts	La période des impulsions.
m_s	La pulsation statorique (rad/sec).
m_r	La pulsation rotorique (rad/sec).
P	Nombre de pair de pole.
Ωs	Vitesse glissement.
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Les tensions simples statoriques (V).
v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}	Les tensions simples rotoriques (V).
ϕ_s	Le flux statorique (Wb).
ϕ_r	Le flux rotorique (Wb).
R_s	Résistance statorique (Ω).
R_r	Résistance rotorique (Ω).
I_r	Courant rotorique (A).
I_s	Courant statorique (A).
L_s, L_r	L_s, L_r : matrices d'inductances statorique et rotorique (H)
M_{rs}, M_{sr}	Matrices d'inductances mutuelles entre stator et rotor (H).
l_s, l_r	Coefficients d'inductances statoriques et rotoriques (H).
m_{sr}, m_{rs}	Valeurs maximales de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor (H).
C_{em}	Le couple électromagnétique (N.m).
C_r	Couple résistant (N.m).
J	Le moment d'inertie des parties tournantes (Kg.m^2)
f	Coefficient de frottement (N.m sec/rad).

$\boldsymbol{P(\theta)}$	La matrice de transformation de Park.
$\boldsymbol{V_{sdq0}, V_{rdq0}}$	La tension statorique et rotorique dans le repère (d, q, 0)
$\boldsymbol{I_{sdq0}, I_{rdq0}}$	Le courant statorique et rotorique dans le repère (d, q, 0).
$\boldsymbol{L_{s0}, L_{r0}}$	Coefficient d'inductance homopolaire statorique et rotorique
$\boldsymbol{P_{elec}}$	La puissance électrique (W).
$\boldsymbol{\theta_s}$	Position de stator (rad).
$\boldsymbol{\theta_r}$	Position de rotor (rad).
$\boldsymbol{d}$	Indice de l'axe direct.
$\boldsymbol{q}$	Indice de l'axe en quadrature.
$\boldsymbol{o}$	Indice de l'axe homopolaire.
$\boldsymbol{\sigma}$	Coefficient de dispersion magnétique.

MAS	Machine Asynchrone.
GPV	Générateur photovoltaïque.
MPPT	Maximum Power Point TracKing.
DTC	Commande directe du couple.
AC	Courant alternatif.
DC	Courant continue.
P&O	Perturbation et Observation.
CSA	Algorithme de recherche corbeau
MLI	Modulation à Largeur d'Impulsions.
BO	Boucle Ouverte
BF	Boucle Fermée
GS	Le gain statique.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I: Généralité sur les systèmes photovoltaïques 3

I.1 Introduction 3

I.2 Définition du photovoltaïque 3

I.3 L'effet photovoltaïque 4

I.4 La cellule photovoltaïque 4

I.5 Circuit équivalent et modèle mathématique 5

I.6 Modèle d'une cellule photovoltaïque 6

I.6.1 Silicium monocristallin 6

I.6.2 Silicium poly cristallin (multi cristallin) 7

I.6.3 Silicium amorphe 8

I.7 Système Photovoltaïque 9

I.8 Générateur photovoltaïque 9

I.9 Caractéristique d'un Générateur PV 10

I.9.1 Caractéristiques courant / tension 10

I.9.2 Caractéristiques puissance / tension 10

I.10 Influence de l'éclairement 11

I.11 Influence de la température 12

I.12 ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES 13

I.12.1 Association Parallèle 13

I.12.2 Association Série 13

I.12.3 Système de refroidissement 14

I.13AVANTAGES ET INCONVENIENT DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUE . 14

I.14 Conclusion 15

CHAPITRE II: CONVERTISSEURS DC-DC et commande MPPT 16

II.1 Introduction 16

II.2 Étages d'adaptations 16

II.3 Les convertisseurs DC-DC (Hacheurs) 16

II.3.1 Hacheurs survolteur ou boost converter 17

II.3.2 Hacheurs dévolteur ou Buck converter 20

TABLE DES MATIERES

II.3.3 Hacheur dévolteur-survolteur 22

II.4 Commande MPPT des convertisseurs DC-DC 23

II.5 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche 24

II.5.1 La méthode indirectes 24

II.5.2 la méthode directe 25

II.6 Conclusion 25

CHAPITRE III: LA MODÉLISATION DE LA MAS 26

III.1 Introduction 26

III.2 Description de la machine asynchrone 27

III.3 Modélisation du moteur asynchrone 28

III.3.1 Hypothèses simplificatrices 28

III.4 Représentation de la machine asynchrone dans l'espace électrique 28

III.5 Mise en équations de la machine asynchrone 29

III 5.1 Equations électriques 29

III.5.2 Equations magnétiques 30

III.5.3 Equation mécanique 31

III.6 Modélisation diphasée de la machine asynchrone 31

III.6.1 Transformation de Park 31

III.7Choix de référentiel 34

III.8 Représentation d'état du système 34

III.9 Modélisation de l'onduleur 35

III.9.1 Les tensions dans les phases de la MAS 35

III.10 Onduleur de tension à MLI 36

III.10.1Résultats de simulation sans onduleur 37

III.10.2Résultats de MAS avec onduleur 38

III.10.3 Interprétation des résultats 39

III.12 Conclusion 39

CHAPITRE IV: LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE 40

IV.1 Introduction 40

IV.2 Principe de la Commande DTC 41

TABLE DES MATIERES

IV.3 Commande Directe de Couple 41

IV.4 Avantages de la Commande DTC 42

IV.5 Inconvénients de la Commande Directe de Couple 42

IV.6 Contrôle du flux et du couple 42

IV.6.1 Contrôle du de flux 42

IV.6.2 Contrôle du couple 4 3

IV.7 Estimateurs 43

IV.7.1 Estimateur du flux statorique 43

IV.7.2 Estimateur du couple électromagnétique 44

IV.8 Correcteur du flux 44

IV.9 Correcteur de couple 45

IV.9.1 Le correcteur a trois niveaux…… 45

IV.10 Elaboration de la table de commutation 46

IV.11 Résultats de Simulation de la DTC de la MAS 47

IV.12 Conclusion 49

CHAPITRE V: MPPT-CSA d'un système PV alimentant une MAS commandée par DTC 49

V.1 Introduction 49

V.2 Comportement des corbeaux 50

V.2.1 Les corbeaux sont parmi les animaux les plus intelligents 50

V.2.2 Les corbeaux communiquent par signes 50

V.2.3 Les corbeaux sont extrêmement adaptables 50

V.3 Algorithme de recherche des corbeaux dédié à l'optimisation 50

V.4 L'influence de la portée de vol 51

V.5 La méthodologie de la CSA pour l'optimisation 52

V.6 Les paramètres de CSA 54

V.6.1 Simulation et résultats 55

Conclusion 58

Conclusion générale 59

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....

Introduction générale

L'énergie électrique nous accompagne dans notre vie quotidienne à tous les niveaux. Elle est nécessaire pour les simples citoyens que pour les industriels dans tous les pays du monde. Néanmoins, la production de cette énergie électrique présente des défis sur le plan économique et environnemental. Le défi sur le plan économique concerne la diminution des ressources fossiles utilisées dans la production de cette énergie électrique, tandis que le défi sur le plan environnemental est lié au dégagement des gaz toxiques et les gaz à effet de serre, où les compagnies de production de l'énergie électrique sont obligées à réduire leur niveau de génération à cause du protocole mondiale de Kyoto 1997 (relative à la protection de l'environnement). Pour ces raisons, l'utilisation des énergies renouvelables représente une alternative intéressante qui pourra dans le futur remplacer les centrales électriques traditionnelles. Parmi ces énergies, on cite celle qui est basée sur l'énergie solaire, c'est l'une des solutions viables. Elle présente des avantages potentiels pour produire l'électricité gratuitement, et réduire la consommation de réserves du carburant non renouvelable, ce qui permet de réduire les émissions des gaz toxiques. Malgré les avantages de l'intégration des sources à énergie renouvelables dans le réseau.

La technologie photovoltaïque (PV) est une solution attrayante comme un remplacement ou complément des sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de nombreux avantages.

Dans la plupart des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, on trouve une technique ou un algorithme particulier nommé « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) qui se traduit par, poursuite du point de puissance maximale. Cette technique, comme son nom l'indique, traque le MPP dans le temps et permet de tirer le maximum de puissance quele panneau est apte à fournir. Le MPPT vise à améliorer et à optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques.[FER08]

Notre mémoire se compose de cinq chapitres :

- ✓ ***Dans le premier chapitre***, nous présentons des généralités sur les systèmes photovoltaïques, la construction des cellules PV, et le principe de l'effet photovoltaïque et un rappelle sur les générateurs PV.
- ✓ ***Dans le deuxième chapitre,*** On va étudier quelques types de convertisseurs DC-DC, Ainsi, on décrive des commandes MPPT comme la technique (P&O) avec les avantages et inconvénients.
- ✓ ***Dans le troisième chapitre,*** nous présentons la machine asynchrone, ses caractéristiques et son principe de fonctionnement, ses avantages et inconvénients.Ce chapitre est

aussi consacré à la modélisation de la MAS, nous commençons par son modèle basé sur la transformation de Park afin d'obtenir sa représentation d'état, nous commentons par la suite les résultats de simulation après illustration et visualisation.

- ✓ ***Le quatrième chapitre,*** est dédié à la présentation de la technique de commande (DTC) qui possède plusieurs avantages. Les performances de cette commande seront montrées par des résultats de simulation.
- ✓ ***Dans le cinquième chapitre,*** pour améliorer les performances du système hybride PV-DTC-MAS, on appliquera la commande MPPT basé sur la méthode CSA pour remplacer la technique classique dite la méthode P&O, ensuite nous exposerons les résultats de simulation.

Finalement, On termine par une conclusion sur l'ensemble de cette étude, on propose des perspectives à ce travail et l'annexe contient les paramètres du panneau photovoltaïque et de la machine utilisée.

Chapitre I :

Generalités sur les systémes photovoltaïques

I.1 INTRODUCTION

Les énergies renouvelables connaissent depuis le milieu de l'année 1990 une vogue quisemble se renforcer d'année en année. Ces énergies sont les plus anciennement utilisées par l'humanité, elles sont essentiellement tirées des cinq éléments : la terre, l'eau, l'air et le feu et du soleil. Les énergies renouvelables sont inépuisables et d'un usage immémorial. On désigne aujourd'hui par énergies renouvelables, un ensemble de filières diversifiées dont la mise en œuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale. Les sources d'énergie renouvelables sont celles qui produisent de l'électricité.

Les cellules photovoltaïques transforment l'énergie solaire en électricité sans moyens mécaniques ou processus chimiques. Cette technologie évolue sans cesse, tout comme celles des autres composantes qui constituent les systèmes photovoltaïques, mais elle est déjà une option privilégiée pour assurer l'approvisionnement en électricité dans de nombreuses situations.

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

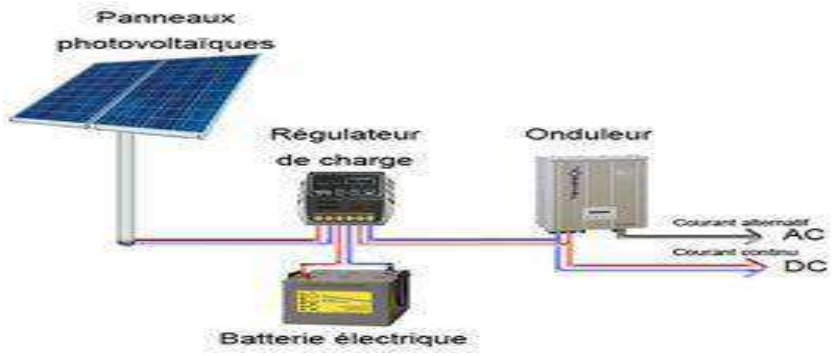


Figure I.1 : Schéma d'un système photovoltaïque

I.2 Définition du photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » est associé à la production d'une tension à partir de la lumière,un terme plus courant pour une cellule photovoltaïque, cette dernière génère une énergie électrique renouvelable produite à partir du rayonnement solaire.

Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

I.3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, c'est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs. Le plus connu d'entre eux est le silicium utilisé pour les composants électroniques.

L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère un courant. En effet, lorsque les photons heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique.

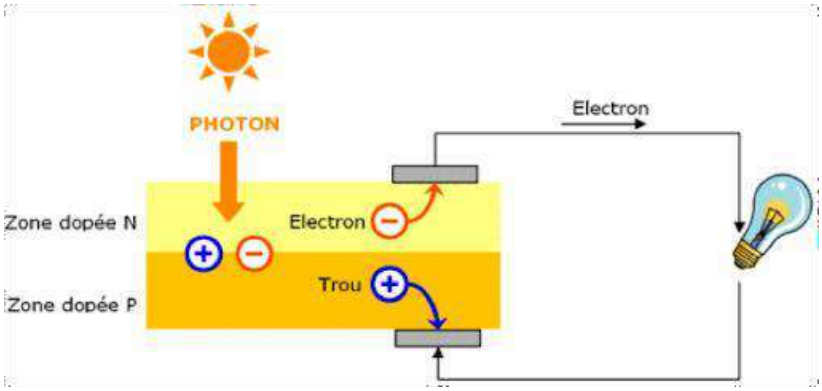


Figure.I.2: Structure d'une cellule photovoltaïque **[MAY16].**

I.4 Cellule photovoltaïque

L'énergie électrique d'origine photovoltaïque provient de la conversion directe de l'énergie transportée par des photons contenus dans la lumière du soleil ou d'une lumière artificielle. L'élément à la base de cette conversion est la cellule photovoltaïque, dont le principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque.



Figure.I.3: Cellule photovoltaïque **[ABB14].**

La composante élémentaire du panneau photovoltaïque est la cellule photovoltaïque. Cette dernière peut être considérée comme une source idéale de courant fournissant un courant proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui est représenté par la jonction P-N.

I.5 Circuit équivalent et modèle mathématique

La cellule PV peut être modélisée par la figure I.4. Dont les équations correspondantes sont les suivantes:

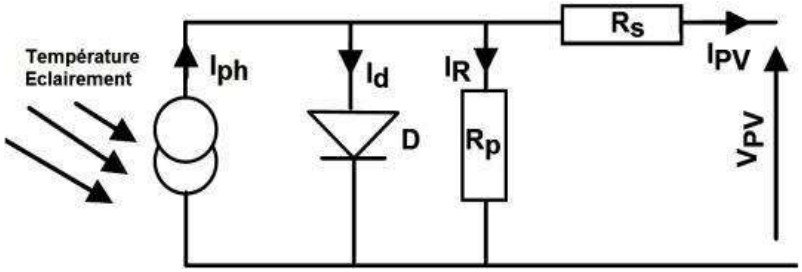


Figure.I.4 : Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque **[ABB14].**

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_P \quad \textbf{(I.1)}$$

Le courant I_{ph} est donné par l'équation suivante:

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_I \times \Delta T) \times E/E_n \quad \textbf{(I.2)}$$

L'expression du courant au niveau de la jonction est la suivante:

$$I_D = I_S \times \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + R_C \times I_{PV}}{nV_T} \right) - 1 \right] \quad \textbf{(I.3)}$$

Le courant dans la résistance R_P est égal à

$$I_P = \left(\frac{V_{PV} + R_S \times I_{PV}}{R_P} \right) \quad \textbf{(I.4)}$$

Alors :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_S \times \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + R_S \times I_{PV}}{nR_T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{PV} + R_S \times I_{PV}}{R_P} \right) \quad \textbf{(I.5)}$$

Où

I_S est le courant de saturation.

- VT = N_S. k. T/q la tension thermique du module PV ayant k est la constante de Boltzmann (k = 1,381 × 10^{-23} J/K).
- T est la température effective des cellules en Kelvin(K).
- q est la charge de l'électron (e = 1,6 × 10^{-19} C).
- N_S cellules connectées en série.
- n est le facteur d'idéalité de la jonction (1 < n < 3).
- I_{PV} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur.
- V_{PV} est la tension aux bornes de cette même cellule.
- I_{ph} est la photo courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit).
- R_P est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.
- R_S est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions**[ABB14].**

Le module PV est constitué par un regroupement, en série et on parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaire. L'association parallèle de N_S cellules en série permet d'augmenter la tension du GPV. Une association parallèle de N_P cellules possible afin d'accroitre le courant de GPV. La relation entre le courant et la tension dans un module PV, constitué de plusieurs Cellules connectées en série et en parallèle, est donnée par l'équation suivante :**[MAY16]**

$$I_{PV} = N_P.I_{ph} - N_P.I_S \times \left[\exp\left(\frac{\frac{V_{PV}}{N_S} + \frac{R_S \times I_{PV}}{N_P}}{nV_T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{\frac{N_P}{N_S} V_{PV} + R_S \times I_{PV}}{R_P} \right) \quad \textbf{(I.6)}$$

I .6Modèle d'une cellule photovoltaïque

I.6.1 Silicium monocristallin

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs Photovoltaïques. Pour les fabriquer, on fond du silicium en forme de

barreau. Lors d'unrefroidissement lent et maîtrisé, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal degrande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules.Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. Durée de vie :20 à 30 ans. **[MAY16]**



Figure.I.5: Silicium monocristallin **[MAY16].**

- Avantages
  - Bon rendement, de 12% à 18%
  - Bon ratio Wc/m2 (environ 150 Wc/m2) ce qui permet un gain de place si nécessaire
  - Nombre de fabricants élevé

- Inconvénients
  - Coût élevé
  - Rendement faible sous un faible éclairement

I.6.2 Silicium poly cristallin (multi cristallin)

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux.La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs Créés par les différents cristaux.

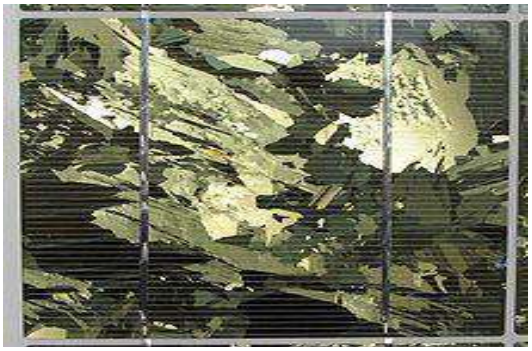


Figure.I.6: Silicium polycristallin **[MAY16].**

➢ Avantages

- Cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant unmeilleur foisonnement dans un module,
- Moins cher qu'une cellule monocristalline

➢ Inconvénients

- Moins bon rendement qu'une cellule monocristalline : 11 à 15%
- Ratio W_C/m^2 moins bon que pour le monocristallin (environ 100 Wcm2) Rendement faible sous un faible éclairement

I.6.3 Silicium amorphe

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites"solaires".



Fig.I.7 : Silicium amorphe **[MAY16].**

➢ Avantages

- Fonctionne avec un éclairement faible ou diffus (même par temps couvert)
- Un peu moins chère que les autres technologies
- Intégration sur supports souples ou rigides.

➢ Inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil, de 6% à 8%
- Nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation desilicium cristallin (ratio Wc/m^2 plus faible, environ 60 Wc/m2)
- Performances qui diminuent avec le temps (environ 7%)

I.7 Système Photovoltaïque :

Le générateur PV est un ensemble d'équipements connectés pour exploiter l'énergie PV afin de Satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les panneaux peuvent être Assemblés pour constituer un "champ PV". 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'ensoleillement.

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement mais à d'autres moments qui nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de Réfrigérateurs, par exemple). On dote alors le système de batteries qui permettent de stocker l'électricité et de la rétablir en cas de nécessité.

Un régulateur est alors essentiel pour parer aux problèmes de surcharges ou les décharges Profondes de la batterie. Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur PV, est converti à l'aide d'un onduleur PV en courant alternatif.

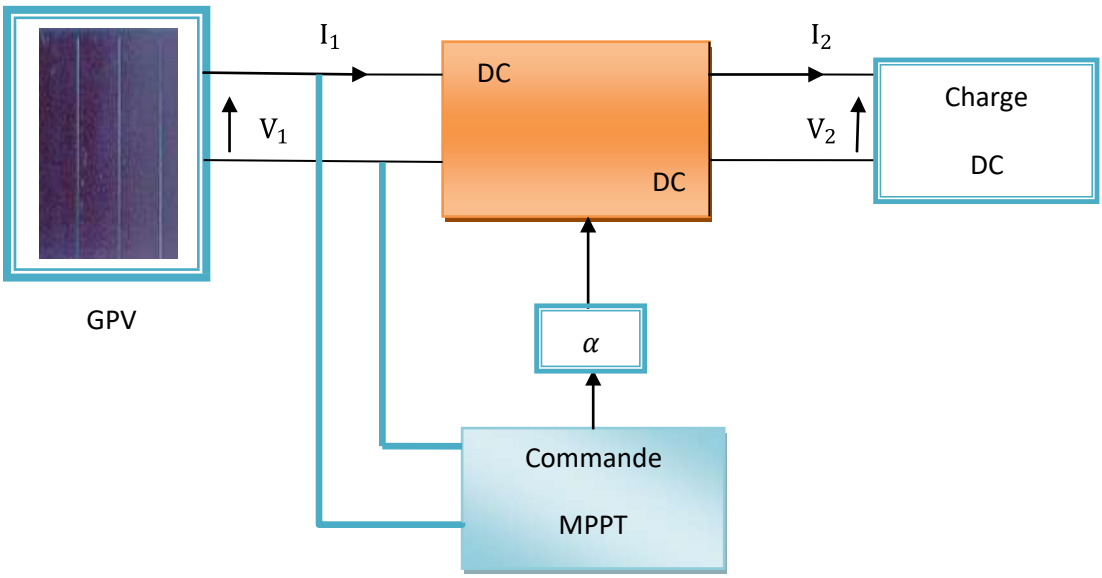


Figure.1.8 Schéma synoptique d'un système PV.

I.8 Générateur photovoltaïque

C'est un dispositif qui transforme l'énergie PV en électricité. Selon la puissance crête désirée, ce générateur PV est constitué d'un certain nombre de modules assemblés entre eux en série ou en parallèle.

Les modules PVs sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la puissance et la tension V_{CO}, le courant I_{CC} à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules. 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. **[OUL08]**

I.9 Caractéristique d'un Générateur PV

I.9.1 Caractéristiques courant / tension

A température et éclairement fixés, la caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante:

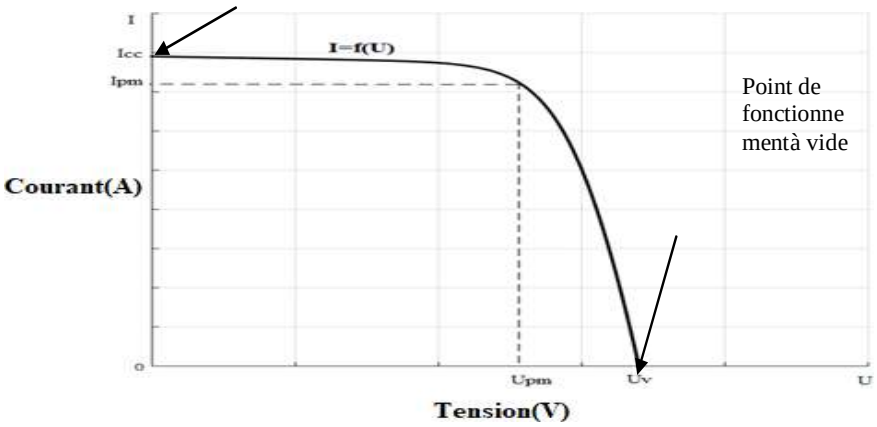


Fig. I.9 : Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque

Sur cette courbe, on repère :

- Le point de fonctionnement à vide : V_{co} pour I = 0A
- Le point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour U = 0V

I.9.2 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

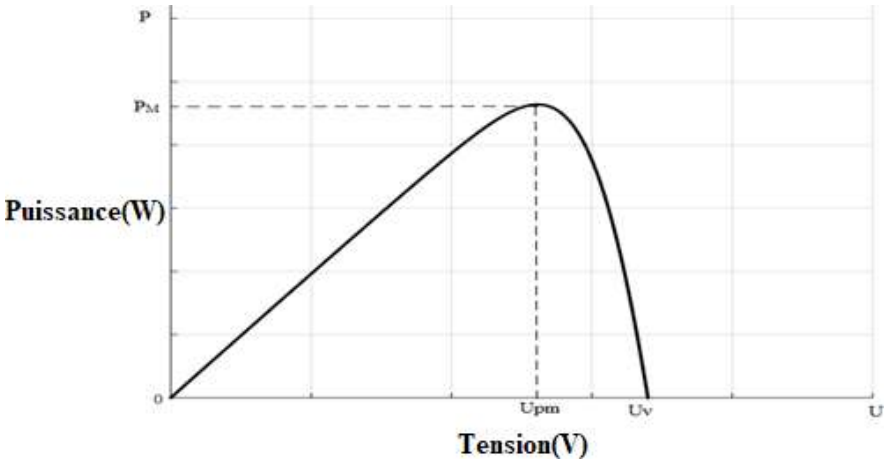


Fig.I.10: Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque.

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

I.10 Influence de l'éclairement

A température constante, la caractéristique I = f(U) dépend fortement de l'éclairement :

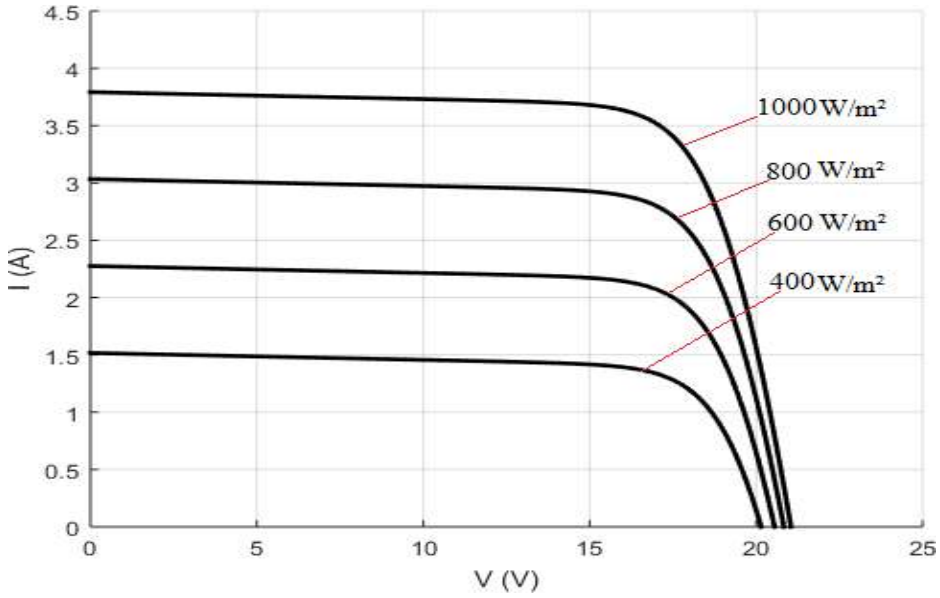


Fig. I.11: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(U)

Comme la, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe P = f(U). Cette courbe a l'allure suivante :

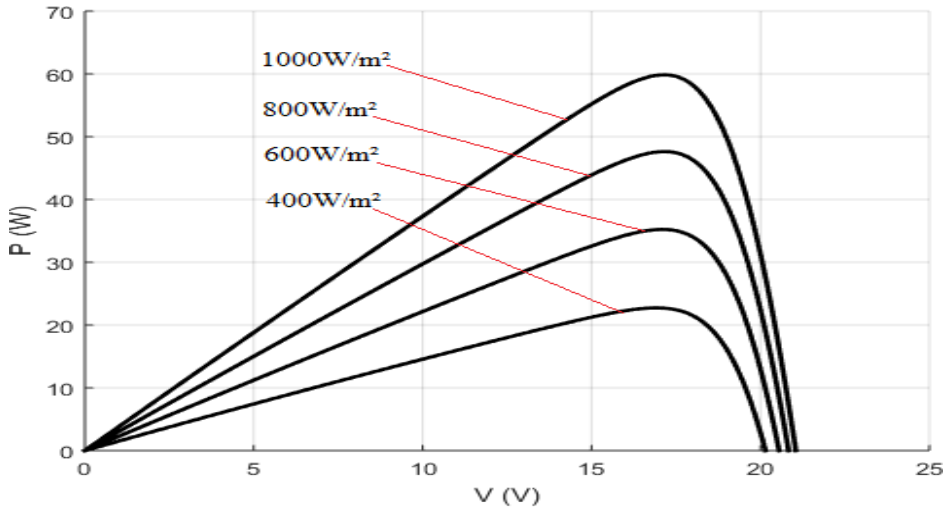


Fig.I.12: Influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(U)

Sur ces courbes, on remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'éclairement

I.11. 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:

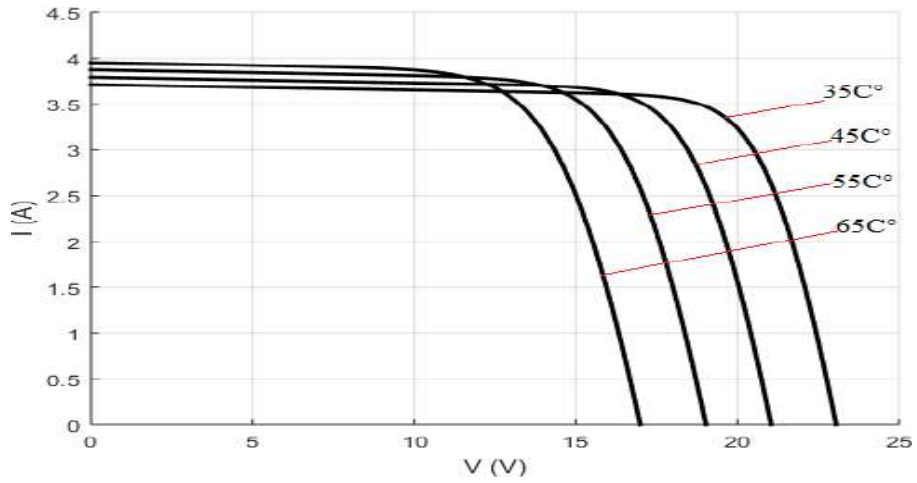


Fig. I.13: Influence de la température sur la caractéristique I=f(U)

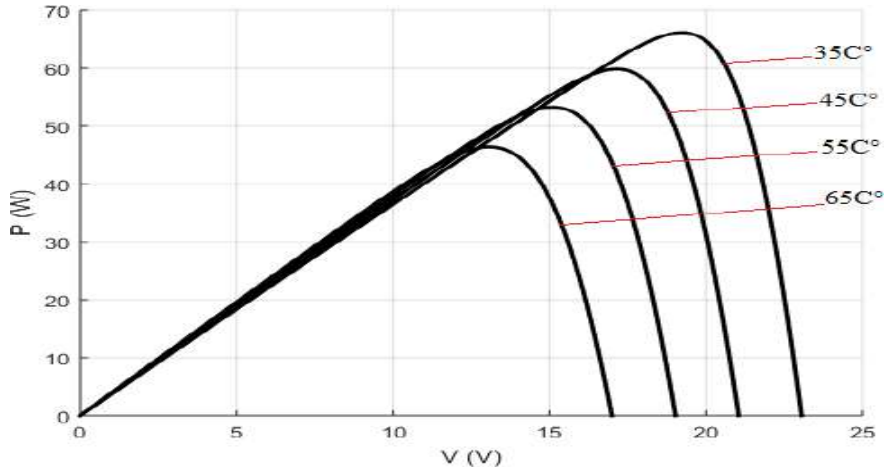


Fig. I.14: Influence de température sur la caractéristique P=f(U)

Sur ces courbes, on remarque que la tension à vide et la puissance maximum diminuent lorsque la température augmente.

I.12 ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES :

I.12.1 Association Parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. **[SLA11]**

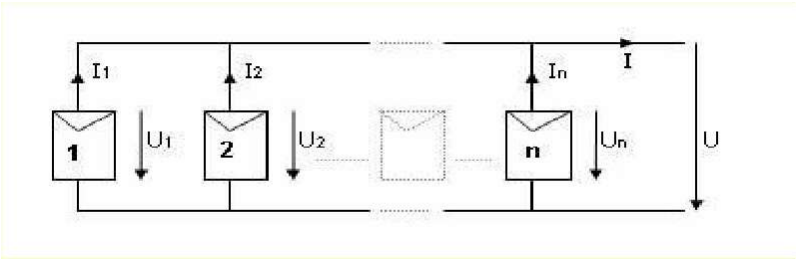


Fig. I.15: Cellules photovoltaïque en parallèle

I.12.2 Association Série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

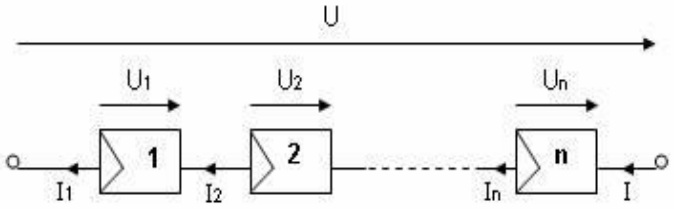


Fig. I.16: Cellules photovoltaïque en Série

I.13 Système de refroidissement

La température intérieure d'un panneau solaire peut facilement atteindre 100°C.En conséquence, la température intérieure du panneau ne dépasse jamais 75 °C même si le système est éteint.

Le système de refroidissement est automatique, avec des ventilateurs qui nous a permis de placer la cellule PV à l'intérieur du panneau, placée derrière une couche plastique robuste qui protège contre les jets de pierre. **[BEL19]**

I.14 AVANTAGES ET INCONVENIENT DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUE

I.14.1 Avantages

- Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni de déche toxique par son utilisation
- Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.
- Pas de pollution, ni émissions ou odeurs discernables
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
- Grande fiabilité
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergies pour augmenter lafiabilité du système.
- Ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant. **[TAR14]**

I.14.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie etrequiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10−17%.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique(batterie) estNécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

I.15 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude sur la production directe d'électricité à partir d'une irradiation solaire est présentée basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque,un modèle mathématique a été établi pour ce phénomène physique.

Ce qui permettre de tracer les caractéristiques de la cellule PV, Les caractéristiques courant- tension I(V) et puissance-tension P(V) étaient fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module.

Dans le chapitre prochain, nous présenterons une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leur commande MPPT pour chercher le point ou la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

Chapitre II :

CONVERTISSEUR DC-DC ET COMMANDE MPPT

II.1 INTRODUCTION

Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque dépendent de l'éclairement solaireet de la température, Comme on a vu dans le chapitre précédent. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. À cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur photovoltaïque et le récepteur un convertisseur statique DC-DC (hacheur). **[LAT16]**

Dans ce chapitre, nous présentons quelques types des convertisseurs statiques DC-DC (hacheur) utilisés dans les systèmes PV.

II.2 Étages d'adaptations

Dans les chaines de conversion photovoltaïque à connexion directe entre un GPV et unecharge continue exige l'existence d'un point de fonctionnement qui correspondant à l'intersection entre la caractéristique I(V) du GPV et la caractéristique I(V) de la charge électrique quel que soit sa nature.

Il est possible d'insérer un convertisseur DC-DC entre le générateur PV et la charge, en commandant un suiveur de point maximum de la puissance (PPM). Ce convertisseur est appelé traqueur maximum de point de puissance (MPPT) géré par un algorithme de suiveurs de PPM. Comme le montre la (figure II.1), l'entrée du convertisseur DC-DC est le générateur photovoltaïque (GPV) et la sortie est la charge. Le rôle du MPPT est d'assurer le fonctionnement du générateur PV à son PPM, extrayant la puissance disponible maximale.

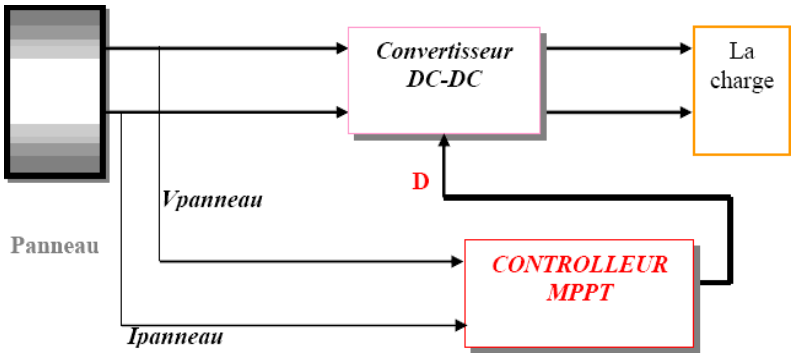


FIGURE II.1 Schéma fonctionnel du système PV avec MPPT

II. 3 CONVERTISSEURS DC-DC (HACHEUR)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. **[HAM6]**

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solairepour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont :

- Convertisseur dévolteur (ou Buck)
- Convertisseur survolteur (ou boost)
- Convertisseur dévolteur- survolteur (Buck-boost) **[KOR16]**

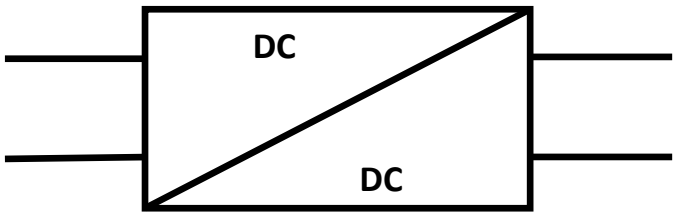


Figure. II.2: Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.3.1 Hacheurs survolteur ou boost converter

Un convertisseur élévateur dit Boost permet de convertir une tension d'entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l'entrée. C'est pour celaqu'il est dit élévateur de tension. **[TAZ16]**. Son schéma de principe de base celui de la figure (II.3).

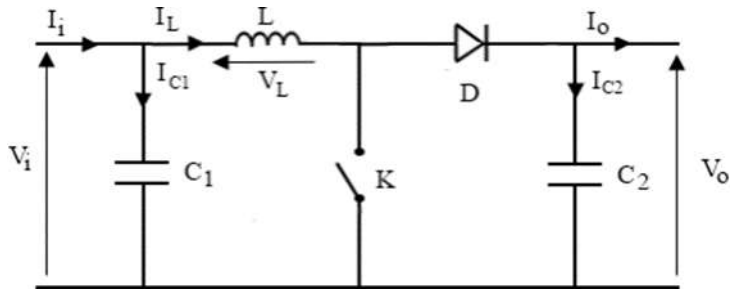


Figure. II.3 : Schéma électrique d'un hacheur boost

1- Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, αTe le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps Tc[αTe; Te] l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors V_0 = Vk En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle [**KOR16**].

$$V_i = V_0(1-\alpha) \qquad \textbf{(II.1)}$$

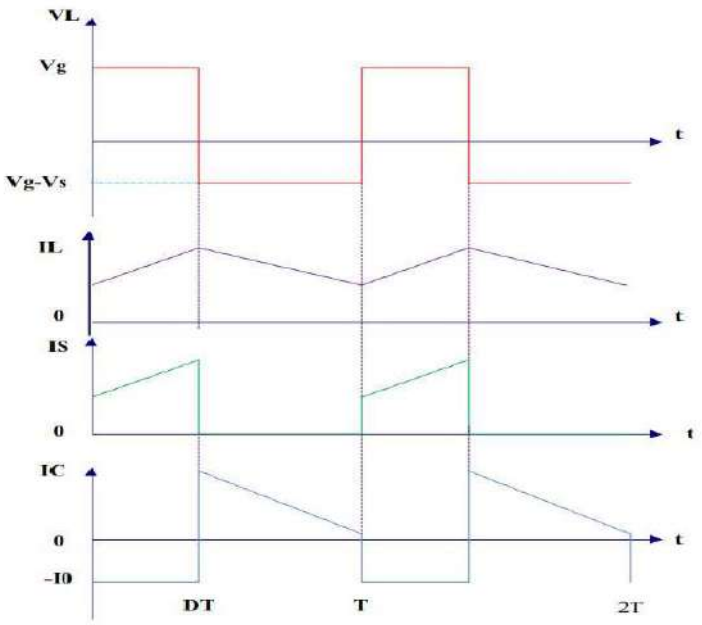


Figure. II.4 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

2-Modèle mathématique équivalent

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions de l'hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur

K. celui de la figure II.5, présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. entre [0, αTe]. **[OUA14]**

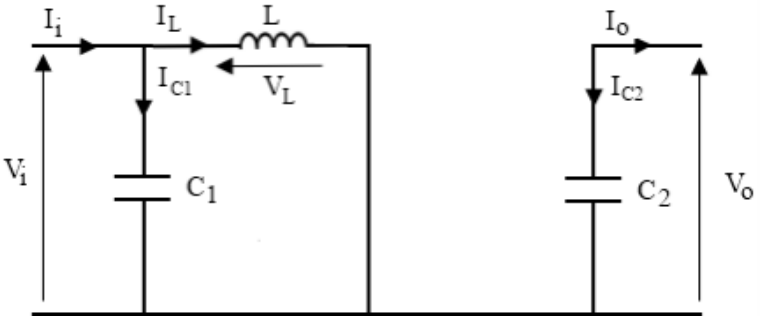


Figure. II.5 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

$$I_{C1} = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t) \quad \textbf{(II.2)}$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dv_1(t)}{dt} = I_0(t) \quad \textbf{(II.3)}$$

$$V_L = L \frac{dvL}{dt} = V_i(t) \quad \textbf{(II.4)}$$

L'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du boost. Voire la figure. II.6

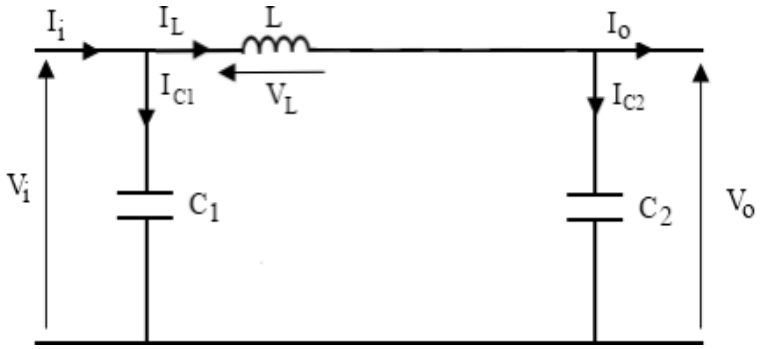


Figure. II.6 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$V_i = V_0(1-\alpha) \quad \textbf{(II.5)}$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = I_{L2}(t) - I_0(t) \quad \textbf{(II.6)}$$

$$V_L = L \frac{dv_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad \textbf{(II.7)}$$

II. 3.2 Hacheurs dévolteur ou Buck converter

C'est un convertisseur abaisseur direct DC-DC. Le convertisseur Buck dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur dévolteur ou hacheur série. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant **[BEN15].**

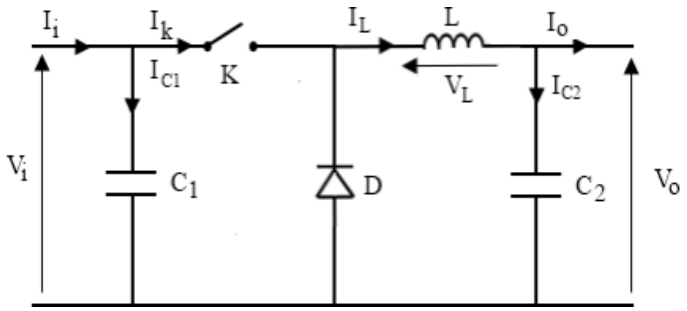


Figure. II.7 : Schéma électrique d'un hacheur buck

1- Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, αTe la tension appliquée aux bornes de la diode est Vi l'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage fe = 1/Te La source Vi fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps Tc [αTe; Te]

L'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle **[OUA14]**

$$V_0 = \alpha . V_i \qquad \textbf{(II.8)}$$

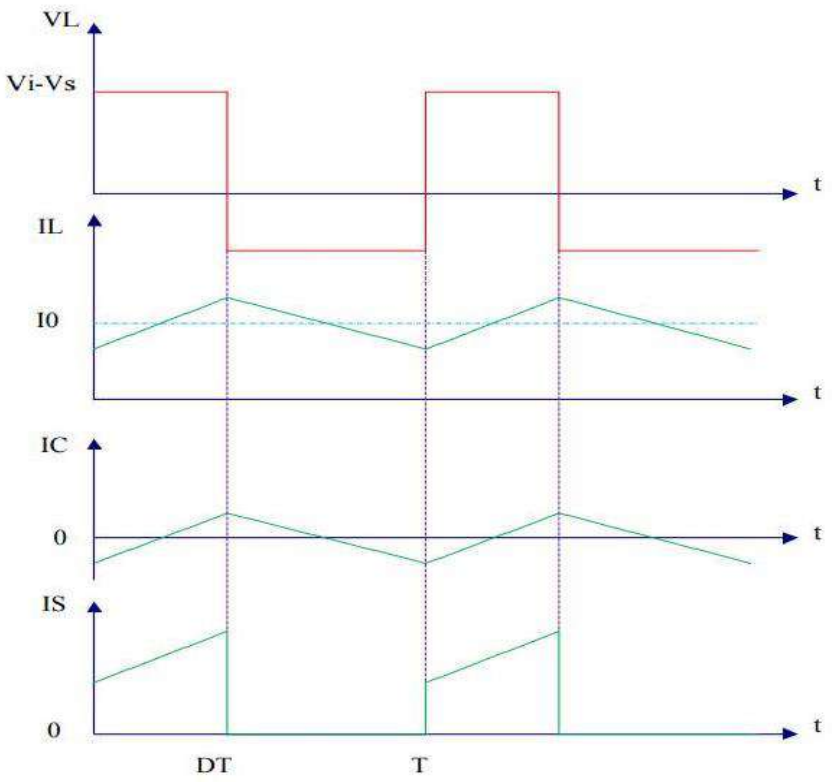


Figure. II.8 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

2- Modèle mathématique équivalent

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure. II.9 montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure. II.10 représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1 - \alpha)$ Te. **[KOR16]**

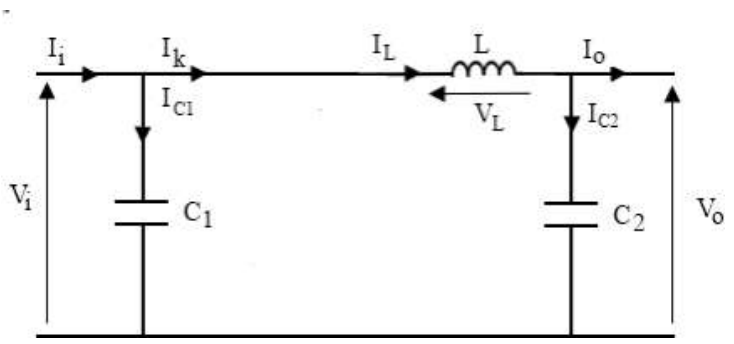


Figure. II.9 : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les circuits équivalents suivants :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \textbf{(II.9)}$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad \textbf{(II.10)}$$

$$V_L = L \frac{dv_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad \textbf{(II.11)}$$

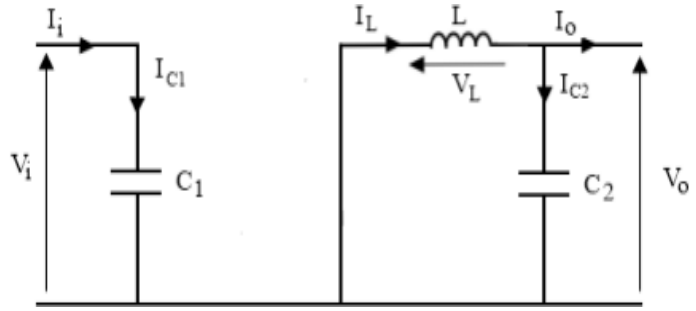


Figure. II.10 : Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert

Les équations suivantes sont déduites de la figure (fig. II.10) :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} = I_i(t) \quad \textbf{(II.12)}$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad \textbf{(II.13)}$$

$$V_L = L \frac{dv_L(t)}{dt} = -V_0(t) \quad \textbf{(II.14)}$$

II.3.3 Hacheur dévolteur-survolteur

Si l'application exige que la tension de sortie ne soit pas inversée, une configuration en cascade du convertisseur Buck et du convertisseur Boost, avec un interrupteur complémentaire peut être effectuée comme est affiché à La figure. (II.11). **[KOR16]**

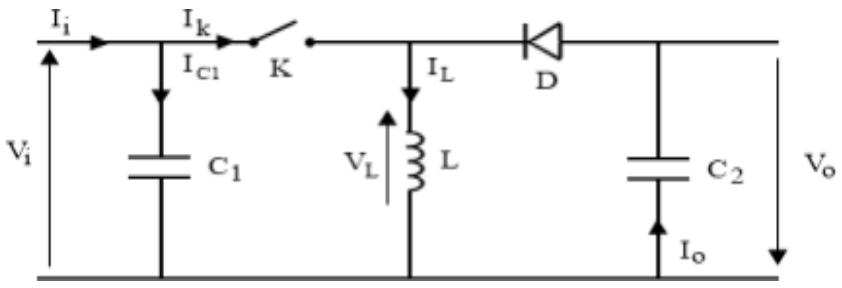


Figure. II.11 : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost

1- Fonctionnement

Pendant la durée αTe, le courant augmente linéairement. La tension est égale à Vi. à l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension VL est égale $\alpha - V_0$. Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que

$$V_0 = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_i$$

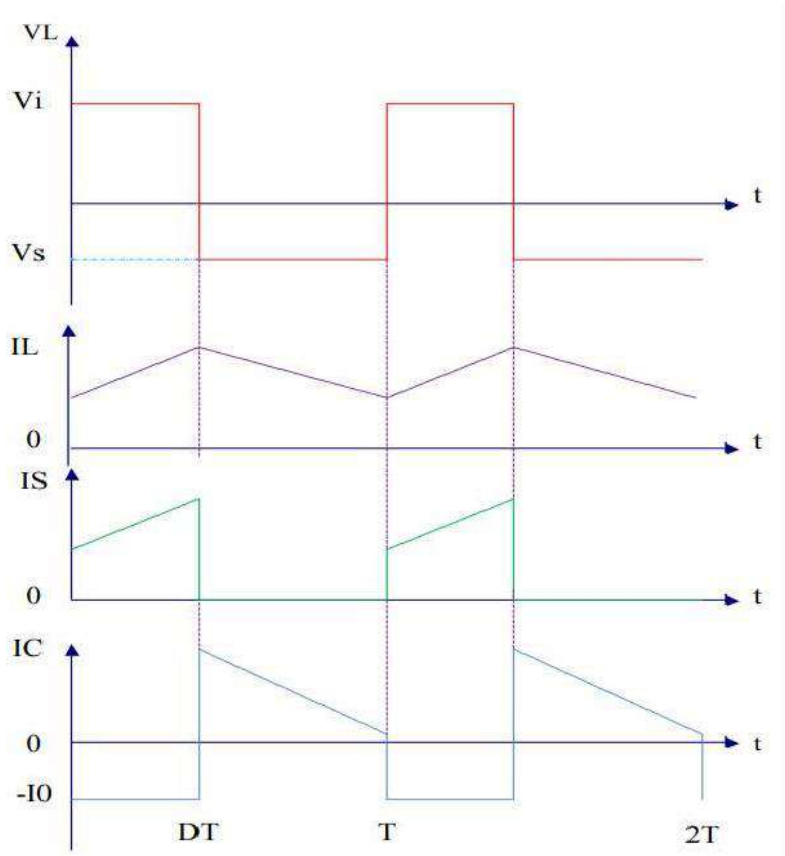


Figure II.12: Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck-BOOST.

II.4 Commande MPPT des convertisseurs DC-DC

La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking', est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires **[BAH20]**

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (α), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est

basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction de L'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP **[BENA15].**

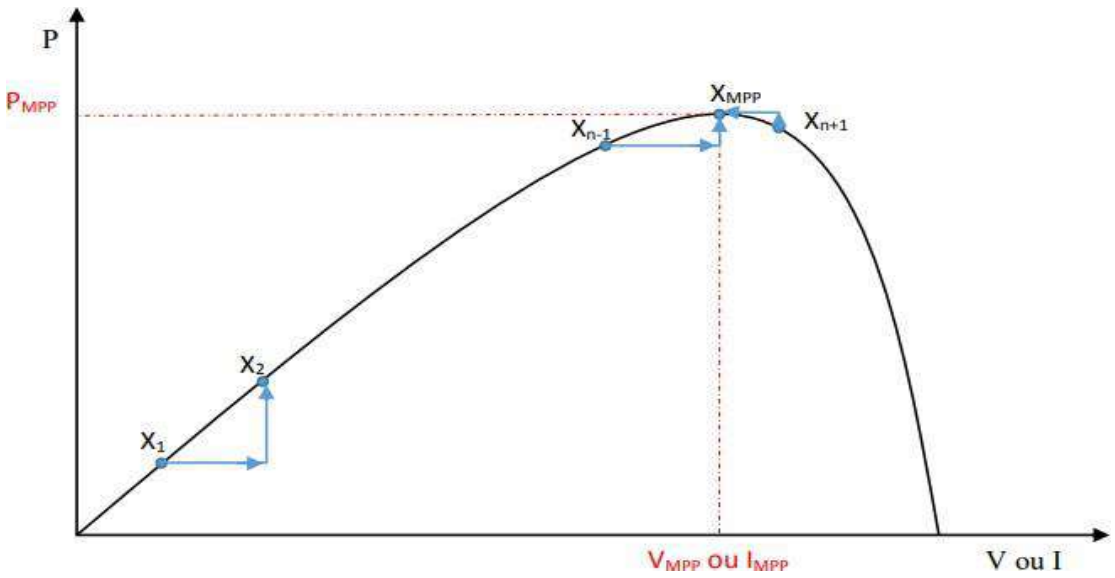


Figure.II.13 : Principe de la commande MPPT

II.5 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes.

II.5.1 La méthode indirectes :

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température ensoleillement…) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode « look up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court- circuit **[AMR17].**

II.5.2 la méthode directe :

Ces méthodes utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des GPV.

II.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs statiques, nous avons présenté la théorie sur les hacheurs, leurs fonctionnements, leurs principales applications et nous avons présenté les différents types des hacheurs. Nous avons basé sur l'étude des convertisseurs DC-DC car ils sont les plus utilisé dans les systèmes photovoltaïques

Et on a présenté la commande MPPT et ses techniques pour rechercher le point de fonctionnement de la puissance maximal du générateur photovoltaïque

Chapitre III :

LA MODÉLISATION DE LA MAS

III.1 Introduction

Le comportement électrique et dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le définir par un modèle mathématique, c'est ce qu'on appelle modélisation, il est donc évident que cette étape de modélisation est un passage indispensable pour concevoir des systèmes de commande performants.

Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques et mécaniques) dans son référentiel triphasé. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de PARK. Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel, biphasé cette fois. **[ROZ02].**

La représentation de la machine asynchrone par des équations selon le système triphasé donne un modèle, dont les équations sont à coefficients variables en fonction du temps. Dans le but de faciliter leur résolution, on a recours à une modélisation dite « transformation de Park », qui consiste à transformer le système triphasé en système à deux axes orthogonaux. L'élaboration d'une telle modélisation est indispensable pour l'étude du régime de contrôle du flux, de couple, de régulation de tension et de vitesse. Dans la première partie de ce chapitre nous nous intéresserons à la modélisation de la machine asynchrone par:

- La mise en équation de la machine asynchrone à partir d'hypothèses simplificatrices.

- La simplification de ces équations par l'introduction de la transformation de Park.

La deuxième partie sera consacrée à un exposé détaillé sur la modélisation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

III.2 Description de la machine asynchrone

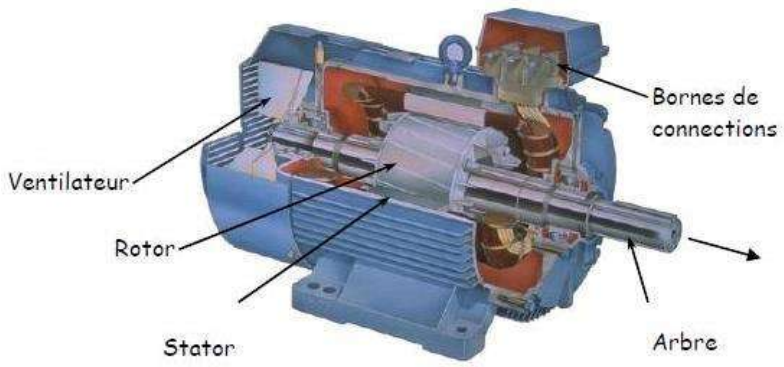


Figure III.1 Constitution de La machine asynchrone

La machine asynchrone comporte une partie fixe constituée d'une carcasse l'intérieure de laquelle sont logés le circuit magnétique et le bobinage du stator d'une part, et une partie mobile appelée rotor d'autre part. La carcasse nervurée à ailettes longitudinales est un monobloc en fonte ou en acier **[DIS].**

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

En fonctionnement normal, le rotor de la machine asynchrone tourne à la vitesse de Ω_r exprimée en radians par seconde, et la force magnétomotrice produite par les courants statoriques tourne à la vitesse de synchronisme à Ω_S exprimée en radians par seconde, mais la vitesse Ω_r est généralement inférieure à Ω_S et on a :

$$\Omega_S = \frac{\omega_S}{P} \qquad \textbf{(III.1)}$$

Avec

ω_S : Pulsation statorique , liée à la fréquence du stator.

P : nombre de pair de pôle de la force magnétomotrice résultante.

Le rotor est constitué de manière à obtenir trois enroulements ayant un nombre de pôles identique à celui du stator. Les enroulements rotoriques sont en court-circuit, la vitesse de

rotation du rotor est inférieure à Ω_S , et on note :

III.3 Modélisation de la machine asynchrone:

III.3.1 Hypothèse simplificatrices :

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

• Les circuits magnétiques sont symétriques.

• La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.

• L'entrefer est constant

On néglige les phénomènes de saturation, ce qui permet de considérer le flux magnétique commefonction linéaire des Courants.

• L'effet de l'encochage est négligeable.

• L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

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

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

III.4 Représentation de la machine asynchrone dans l'espace électrique

La figure III.2 montre la structure de principe de la machine asynchrone triphasée. Elle comporte les trois enroulements statoriques et les trois enroulements rotoriques; l'angle θ repère la position de la phase rotorique (ORa) par rapport celle de la phase statorique (OSa).

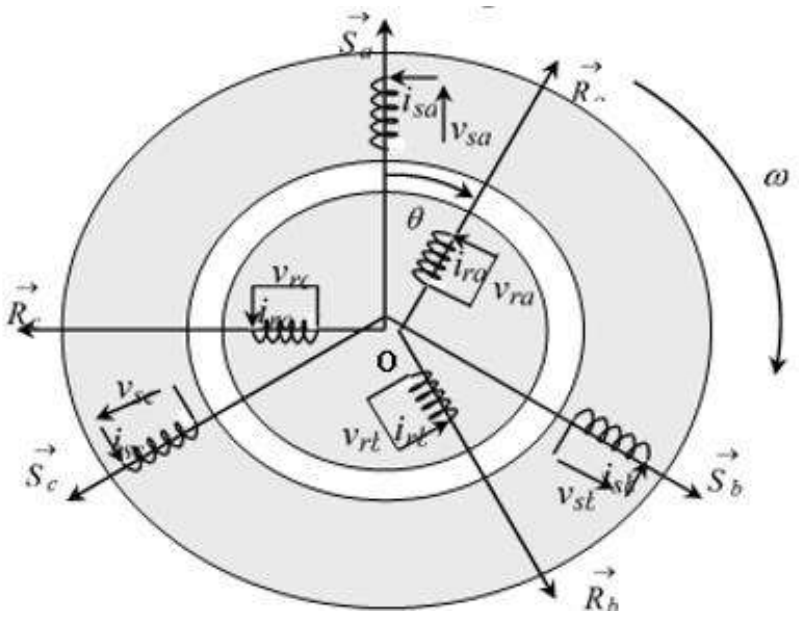


Figure III.2: Représentation schématique d'une machine

III.5 Mise en équations de la machine asynchrone

Le comportement de la machine asynchrone peut être traduit par trois types d'équations :

III 5.1. Equations électriques :

Les équations de tension des phases statoriques et rotoriquess'écrivent sous la forme matricielle par:

$$[V_S] = R_S [I_S] + \frac{d}{dt}[\phi_S]$$
$$[V_r] = 0 = R_r [Ir] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \qquad \textbf{(III.2)}$$

Où :

$[V_S] = [V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}]^t$et $[V_r] = [V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}]^t$: représentent les tensions des trois phases statoriques et rotoriques, respectivement.

$[I_S] = [I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}]^t$ et $[I_r] = [I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}]^t$: sont les vecteurs des courants traversant ces phases.

$[\phi_S] = [\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}]^t$ et $[\phi_r] = [\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}]^t$: correspondent aux vecteurs des flux totalisés

Traversant les enroulements statoriques et rotoriques, respectivement.

R_s et R_r: résistance d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement.

Les matrices des résistances statorique et rotorique de la MAS sont données par

$$[R_S]=\begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \qquad [R_r]=\begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \tag{III.3}$$

III.5.2Equations magnétiques :

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielles comme suit :

$$\begin{bmatrix} [\phi_s] \\ [\phi_r] \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \tag{III.4}$$

Avec

$$[L_{ss}]=\begin{bmatrix} I_{ss} & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & I_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & I_{ss} \end{bmatrix}, \ [L_{rr}]=\begin{bmatrix} I_{rr} & M_{rr} & M_{rr} \\ M_{rr} & I_{rr} & M_{rr} \\ M_{rr} & M_{rr} & I_{rr} \end{bmatrix} \tag{III.5}$$

$$[M_{ss}]=m_{sr}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix} \tag{III.6}$$

l_{ss} et l_{rr} : Inductance propres d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement.

M_{ss} et M_{rr} : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques, respectivement.

m_{sr} : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique.

III.5.3Equation mécanique : La relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$C_{em} - C_r = J\frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad \textbf{(III.7)}$$

Avec

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p} \quad \textbf{(III.8)}$$

Où

C_{em} : représente le couple moteur appliqué.

Cr : représente le couple résistant.

J : le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes.

f : le coefficient de frottement.

Pour remédier ce problème, on cherche des transformations, des variables triphasées de la machine asynchrone, permettant de passer du repère triphasé de la machine réelle à un repère diphasé fixe ou tournant par rapport au stator ou au rotor.

III.6 Modélisation diphasée de la machine asynchrone

III.6.1 Transformation de Park

Le modèle diphasé de la *MAS* s'effectue par une transformation du repère triphasé en un repère diphasé, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs physiques (tensions, flux, et courants), il conduit à des relations indépendantes de l'angle θ et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La transformation de *Park* met en relief l'axe direct *d* du référentiel de *Park*, et l'axe en quadrature d'indice *q* (Figure III.3).[SAD02][ROS02]

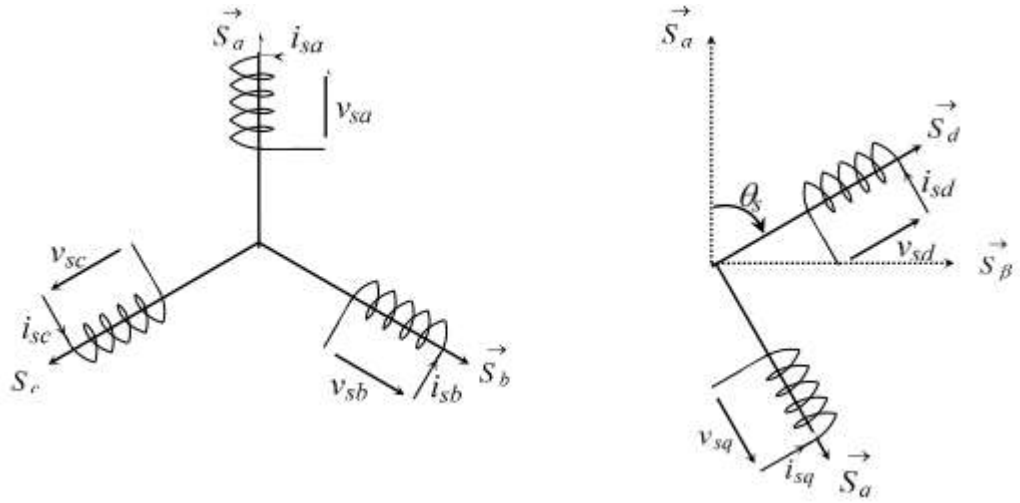


Figure III.3 : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique

Pour transformer un système triphasé [abc] en un système biphasé [d,q] avec unecomposante homopolaire comme indique dans l'équation suivante

$$X_{dq} = \left[P(\theta)\right] X_{abc} \qquad \textbf{(III.9)}$$

Tel que :

X : peut-être : la tension, le courant ou le flux ;

$[P_{(\theta)}]$: est la matrice de la transformation de Park définie par :

$$\left[P(\theta)\right] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} COS\theta & COS\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(III .10)}$$

Et la matrice de transformation inverse par :

$$\left[P(\theta)\right]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} COS\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ COS\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(III.11)}$$

Le changement de variables relatifs aux courants, aux tensions et aux flux est défini par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = \left[p(\theta) \right] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.12)}$$

$X = V.I.\phi$ Avec :

La transformation inverse est obtenue par :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \left[p(\theta) \right]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.13)}$$

Pour un système triphasé équilibré, on a :

$X_a + X_b + X_c = 0$

Cela implique que la composante d'indice « o » (composante homopolaire) est nulle

Équations électriques

Les équations statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \dfrac{d\phi_{sd}}{dt} - \dfrac{d\theta_s}{dt}\phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \dfrac{d\phi_{sq}}{dt} - \dfrac{d\theta_s}{dt}\phi_{sd} \\ v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \dfrac{d\phi_{rd}}{dt} - \dfrac{d\theta_r}{dt}\phi_{rq} \\ v_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \dfrac{d\phi_{rq}}{dt} - \dfrac{d\theta_r}{dt}\phi_{rd} \end{cases} \quad \textbf{(III.14)}$$

On applique la transformation de Park aux équations de flux et de courants (III-13), on trouve les relations électromagnétiques de la machine :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad \textbf{(III.15)}$$

III.7 Choix du référentiel

Suivant la constitution et le principe de fonctionnement de la MAS, On peut trouver trois choix utiles pour le référentiel des deux axes [REZ09],

1. Référentiel fixe au stator ($\theta_S = 0$), (référentiel stationnaire $d\theta s/dt = 0$). Ce référentiel est très souvent utilisé dans l'étude des observateurs.

2. Référentiel fixe au rotor ($\theta r = 0$), (référentiel tournant avec $d\theta s/dt = \omega = p.\Omega$). Ce choix est très utilisé dans l'étude des régimes transitoires des machines asynchrones.

3. Référentiel fixe au champ tournant statorique (référentiel tournant à la vitesse de pulsation statorique $d\theta_S / dt = \omega_S$,): axes désigné par (d, q) . Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude et la synthèse des lois de commande

III.8 Représentation d'état du système

Afin de réduire le nombre d'équations, nous utilisons la représentation biphasée, pour une meilleure représentation de la machine asynchrone, nous prenons comme variable d'état i_{sd} , i_{sq} ,i_{rd} ,

ϕrq et ωr . Le modèle de la machine dans un repère (d-q) lié au champ tournant à la vitesse de synchronisme est:

$$A=\begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma L_s}\left(R_s+\frac{1}{T_r}\frac{L_m{}^2}{L_r}\right) & \varpi_s & \frac{1}{\sigma L_s}\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\frac{1}{T_r} & \frac{1}{\sigma L_s}\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\varpi_r \\ -\omega_s & -\frac{1}{\sigma L_s}\left(R_s+\frac{1}{T_r}\frac{L_m{}^2}{L_r}\right) & -\frac{1}{\sigma L_s}\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\varpi_r & \frac{1}{\sigma L_s}\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\frac{1}{T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_s-\omega \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -(\omega_s-\omega) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.16)}$$

Où :

$T_r = \frac{L}{R}$ est la constante de temps rotorique.

III.9 Modélisation de l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique permettant, à partir d'un signal continu, d'imposer unsignal alternatif à fréquence et amplitude variables, il joue un rôle très important dans la

commande des machines, particulièrement la machine asynchrone, la figure (III.4) illustre le schéma structure d'un onduleur triphasé à deux niveaux alimentant le stator d'une machine asynchrone. **[PET 96] [BER 95].**

Le montage onduleur est constitué de six interrupteurs bidirectionnels, chaque interrupteur est Constitué d'un transistor et une diode de récupération montée en tête-bêche Figure (III.4).

Les couples d'interrupteurs (K11, K12),(K21,K22),(K31,K32) sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans les phases statoriques de la machine, et pour éviter de court-circuiter la source.

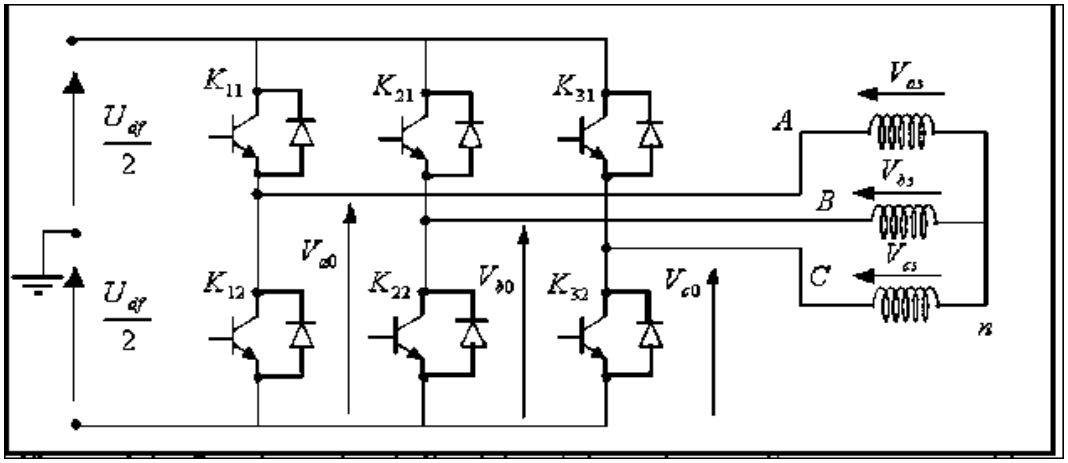


Figure III.4 : Représentation de l'onduleur à deux niveaux alimentant une MAS**.**

III.9.1 Les tensions dans les phases de la MAS

Pour simplifier l'étude, on suppose que la commutation des interrupteurs est instantanée et onnéglige les chutes de tension aux bornes des interrupteurs. Les tensions composées sont données par :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{BC} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{CA} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad \textbf{(III.17)}$$

V_{ao} , V_{bo}, V_{co} et sont les tensions de sortie de l'onduleur par rapport à la référence 'o'. Lestensions des phases sont données par :

$$\begin{cases} V_{ac} = V_{ao} - V_{no} \\ V_{bs} = V_{bo} - V_{no} \\ V_{cs} = V_{co} - V_{no} \end{cases} \quad \textbf{(III.18)}$$

$\mathbf{V_{no}}$: est la tension de neutre de la charge par rapport au point 'o'

III.10 Onduleur de tension à MLI

Plusieurs types de MLI se présentent pratiquement, dont on peut citer :

- Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence Sinusoïdal à une porteuse en général triangulaire.
- Les modulations pré calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculées Hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre de la tension, et donner une certaine onde fondamentale.
- Les modulations post calculées appelées encore MLI régulières symétriques ou MLI vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.

III.11 Résultats de simulation sans et avec onduleur

Afin de simuler le MAS à cage, nous avons opté pour le logiciel MATLAB**,** Nous avons simulé le MAS à cage alimenté par réseau triphasé équilibré, sans et avec onduleur de tension :

- Alimentation : U =220 V (valeur efficace), fréquence 50 Hz.
- Démarrage à vide puis nous avons appliqué un couple résistant d'une valeur de10N.m à l'instant entre 2s et 2.5s.

III.11.1 Résultats de MAS sans onduleur

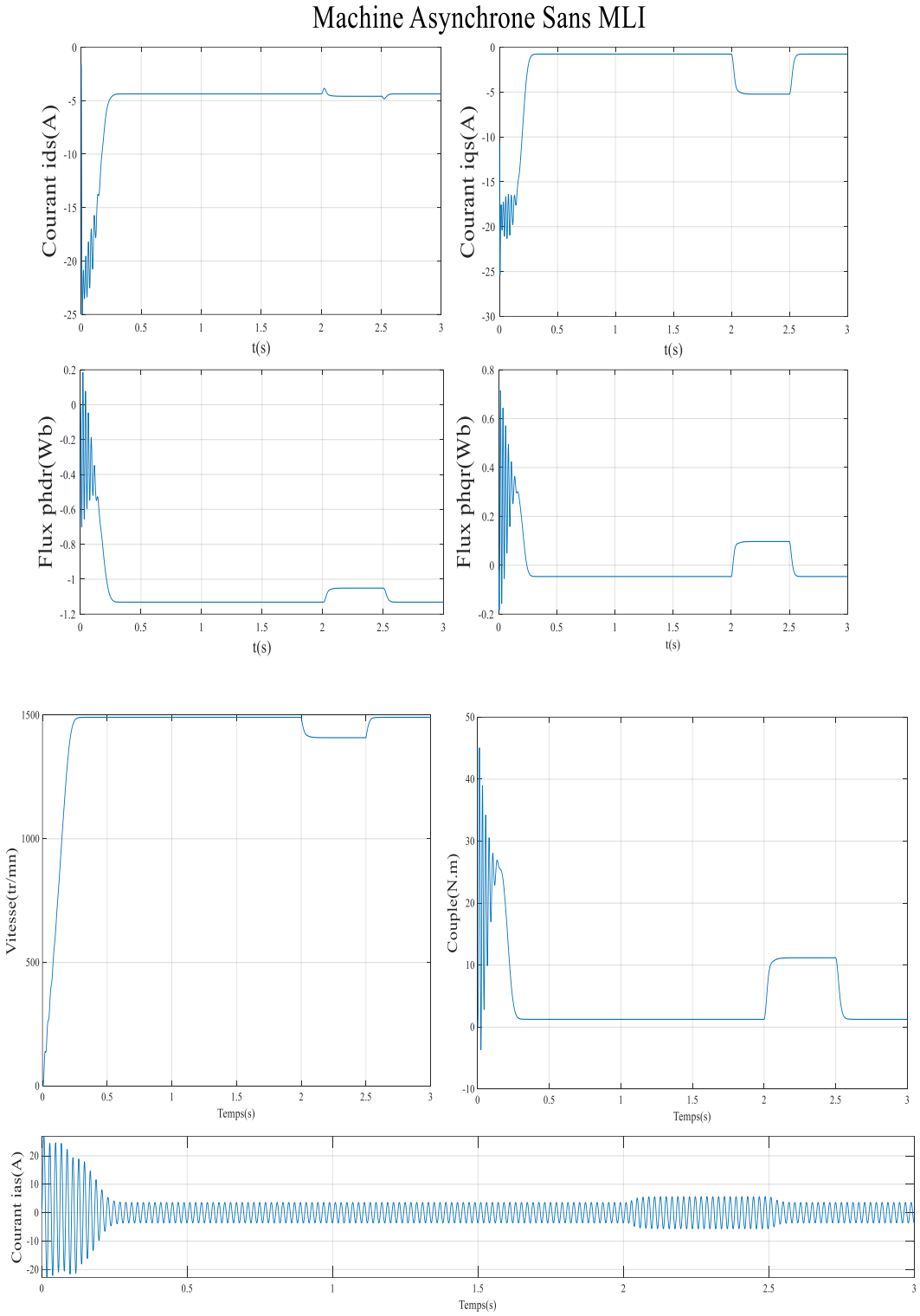


Fig III. 5. Résultat de simulation d'une MAS sans onduleur

III.11.2 Résultats de MAS avec MLI

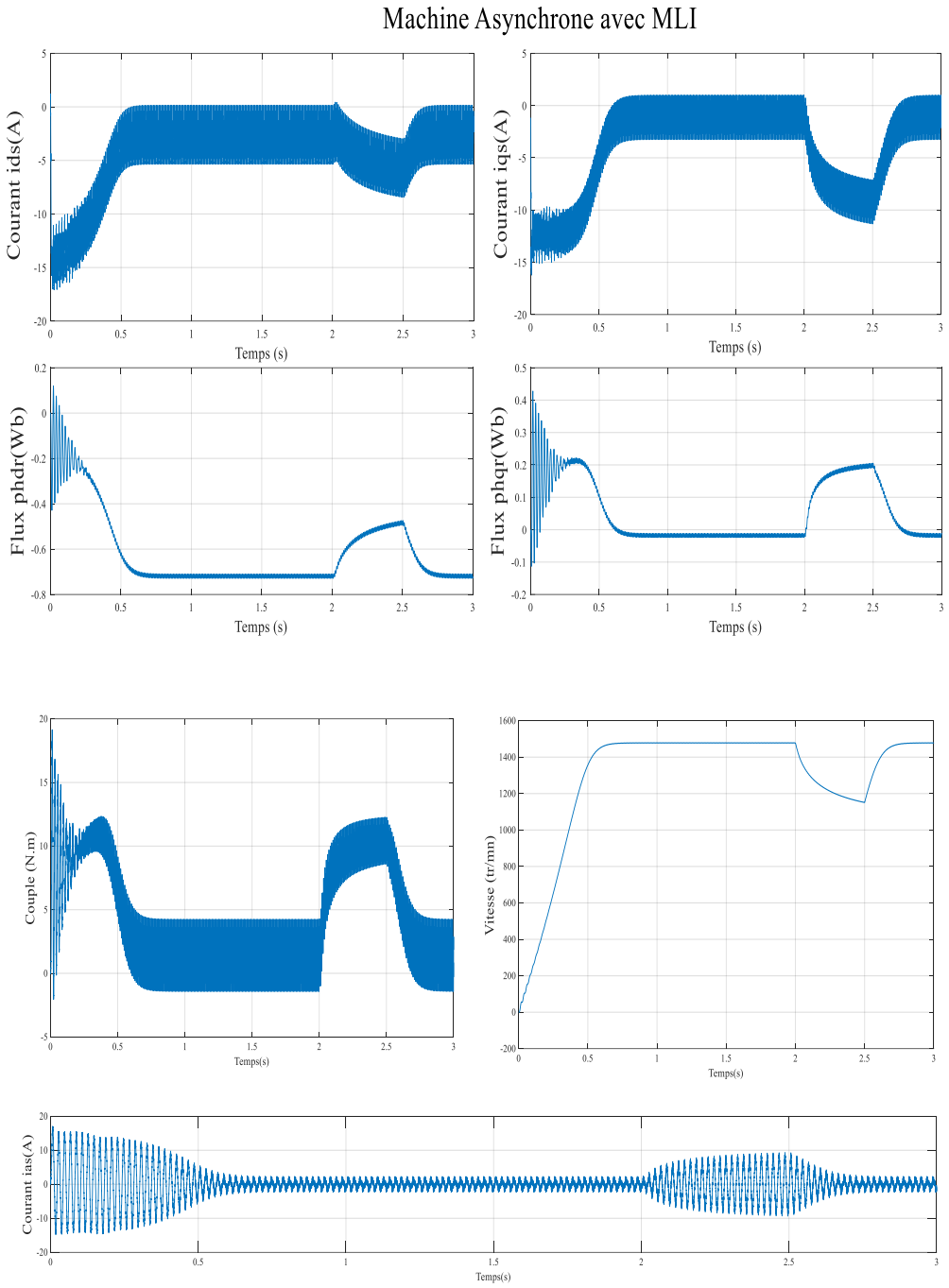


Fig III. 6. Résultat de simulation d'une MAS avec onduleur.

III.11.3 Interprétation des résultats

Lors du démarrage, on constate des pics de courants importants qui s'atténuent avec l'évolution du régime transitoire. La (figure III.5) et (figure III.6) représente l'évolution des courants, des flux, la vitesse et de couple en fonction du temps.

En régime transitoire du MAS sans et avec onduleur. L'évolution du couple dans l'intervalle de temps 2 et 2.5 s est une allure caractéristique type de tous les moteurs asynchrones à cage. Celui-ci présente aux premiers instants des pulsations très importantes. Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatoire, puis se stabilise en fin du régime permanent. On remarque que le passage d'un régime à vide vers un régime en charge à l'instant t =2.5 s (ou bien d'un régime en charge vers un autre s'établit presque instantanément, sans oscillations, avec un très faible dépassement).

III.11 Conclusion

Comme on a pu le voir, le modèle mathématique obtenu est fortement non-linéaire et présente des dynamiques différentes et d'ordre élevé de plus, l'expression du couple électromagnétique montre une interaction complexe entre les champs statorique et rotorique.

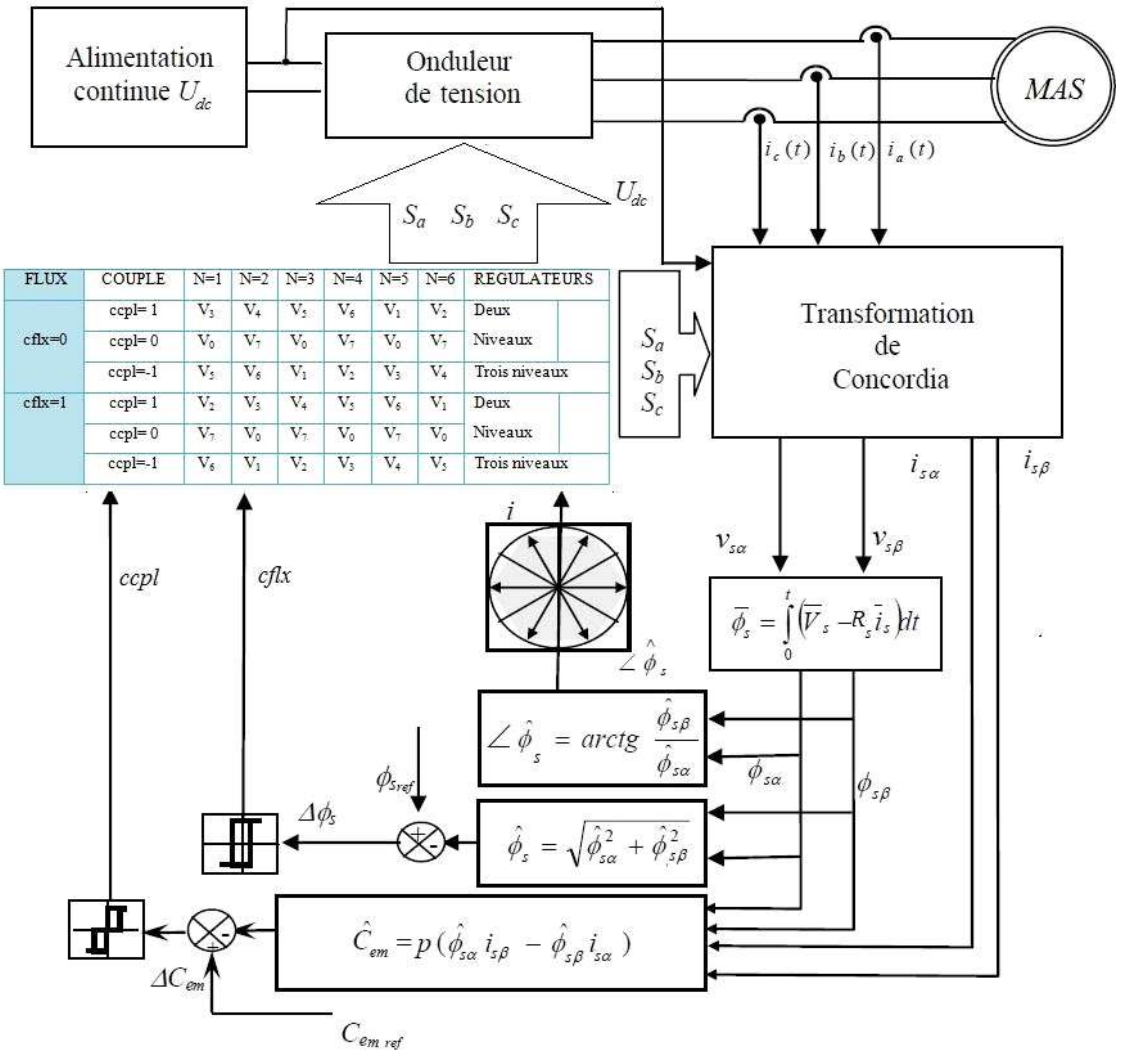
De ce fait, dans ce chapitre, on a commencé par une description générale de la machine asynchrone, ensuite, on a abordé sa modélisation. La transformation de Park est introduite pour simplifier le modèle de la machine et analyser ses comportements en régime transitoire. Ensuite on a fait la modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux et sa commande.

Chapitre IV

La commande directe de couple

VI .1 Introduction:

Au cours de ces dernières décennies, l'avancement technologique dans le domaine de l'électronique de puissance et les progrès de l'informatique industrielle, permettent de développer des stratégies de commande avancées pour les machines électriques. Afin de positionner notre étude dans le domaine de la commande DTC, un état de l'art de la commande DTC



FLUX	COUPLE	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6	REGULATEURS
cflx=0	ccpl= 1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	Deux
	ccpl= 0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	Niveaux
	ccpl=-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	Trois niveaux
cflx=1	ccpl= 1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	Deux
	ccpl= 0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	Niveaux
	ccpl=-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	Trois niveaux

Figure VI.1 : Structure générale de contrôle direct du couple

VI.2 Principe de la commande DTC

Le principe de la commande DTC est différent. L'objectif est la régulation directe du couple de la machine, par l'application des différents vecteurs de tension de l'onduleur, qui détermine son état. Les deux variables

contrôlées sont : le flux statorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des régulateurs à hystérésis. Il s'agit de maintenir les grandeurs de flux statorique et le couple électromagnétique à l'intérieur de ces bandes d'hystérésis. Les sorties de ces régulateurs déterminent le vecteur de tension de l'onduleur optimal à appliquer à chaque instant de commutation. L'utilisation de ce type derégulateur suppose l'existence d'une fréquence de commutation variable dans le convertisseur nécessitant un pas de calcul très faible **[LAC06 et FAI03]**

VI.3 Commande Directe de Couple

La Commande DTC a été proposée par Takahashi au milieu des années 80. Comparée à la commande vectorielle, la commande DTC est moins sensible aux variations paramétriques de la machine et permet d'obtenir une dynamique précise et rapide du couple. Le principe de cette commande est de contrôler directement le couple et le flux statorique dela machine. Dans ce cadre, deux comparateurs à hystérésis sont utilisés et qui permettent de comparer les valeurs estimées avec celles de références, ensuite on commande directement les états de l'onduleur à travers une table de sélection prédéfinie. La stratégie de la Commande DTC de la machine asynchrone.

Les principaux éléments constitutifs de la structure de commande DTC avec asservissementde vitesse sont les suivants :

- Deux estimateurs du couple et du flux statorique basés sur le modèle lié au stator,
- Une table de sélection du vecteur tension désiré du stator, établie en concordance avecles erreurs du flux et du couple engendré,
- Deux comparateurs à hystérésis l'un à deux niveaux destiné pour le contrôle du flux,l'autre à trois niveaux consacré au contrôle du couple électromagnétique,
- Un régulateur de vitesse.

On rappelle dans la suite de ce paragraphe les avantages et les inconvénients de la stratégie decommande DTC [**BEH09].**

VI.4 Avantages de la Commande DTC:

Parmi les avantages de la Commande DTC on peut citer :

- Une excellente dynamique du couple,
- Une bonne robustesse vis-à-vis des variations des paramètres du rotor de la machine,
- Absence d'utilisation des transformations de Park et de son inverse,
- Absence des blocs de calculs de la modulation de tension MLI,
- Absence de découplage des courants par rapport aux tensions de commande,
- Absence de nécessité de connaître l'angle de position rotorique. Seul le secteur danslequel se trouve le flux statorique est nécessaire,
- Absence de nécessité d'utiliser un capteur de vitesse pour l'implémenter. **[BEH09]**

VI.5 Inconvénients de la Commande Directe de Couple:

Les inconvénients de la Commande DTC peuvent être résumés par les points suivants :

- L'existence des ondulations souvent importantes de couple et de flux,
- La fréquence de commutation n'est pas contrôlée,
- La nécessité d'utiliser des estimateurs de flux statorique et de couple,
- Un fonctionnement mal contrôlé à basse vitesse,
- Les courants statoriques sont mal contrôlés en régimes transitoires.

IV.6 CONTROLE DU FLUX ET DU COUPLE

IV.6.1 CONTROLE DU FLUX

On se place dans le repère fixe (α, β) lié au stator de la machine. Le flux statorique du MAS est obtenu à partir de l'équation suivante :

$$\overline{V_S} = R_S \overline{I_S} + \frac{d\overline{\phi_s}}{dt} \Rightarrow \overline{\phi_s} = \overline{\phi_{S0}} + \int_0^1 \left(\overline{V_S} - R_S \overline{I_S}\right) dt \qquad \textbf{(VI.1)}$$

Si on néglige la chute de tension due à la résistance l'équation (IV.1) devient :

$$\overline{\phi}_s(K+1) \approx \overline{\phi}_s(K) + \overline{V}_s T_e \Rightarrow \Delta\overline{\phi}_s \approx \overline{V_s} T_e \qquad \textbf{(VI.2)}$$

Où :

$\overline{\phi}_s$ (k): Vecteur de flux statorique au pas d'échantillonnage actuel ;

$\bar{\phi}_s\ (k+1)$: Vecteur du flux statorique au pas d'échantillonnage suivant.

$\Delta\bar{\phi}_s$: Variation du vecteur flux statorique ;

T_e : Période d'échantillonnage.

IV.6.2 CONTROLE DU COUPLE

Le couple électromagnétique est proportionnel au produit vectoriel des deux flux statorique et rotorique.

$$C_e = K\left(\bar{\phi}_s \wedge \bar{\phi}_r\right) = K\left|\bar{\phi}_s\right|\left|\bar{\phi}_r\right|\sin(\theta) \qquad \textbf{(VI.3)}$$

L'angle θ est le déphasage entre les deux flux. Le flux statorique est la somme du flux rotorique et de flux de fuites totales.Les dynamiques de ces deux composantes ne sont pas les mêmes : **[MER08]**

• Le flux de fuites a une dynamique rapide suite aux variations de la tension, car les inductances de fuites sont faibles

• Le flux rotorique, dépendant de l'inductance magnétisante, a une dynamique plus lente, environ dix fois plus lente en référence au coefficient de dispersion σ dont la valeur moyenne est d'environ 0.1.

Dans ces conditions, on peut supposer qu'entre deux commutations, le flux rotorique reste constant. Par contre, le flux statorique est directement affecté par les variations des flux de fuites. Donc le couple dépend uniquement du produit φ s sinθ.

IV.7 ESTIMATEURS

IV.7.1 ESTIMATEUR DU FLUX STATORIQUE

L'estimation du flux peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs statoriques courants et tension de la machine.

A partir de l'équation :

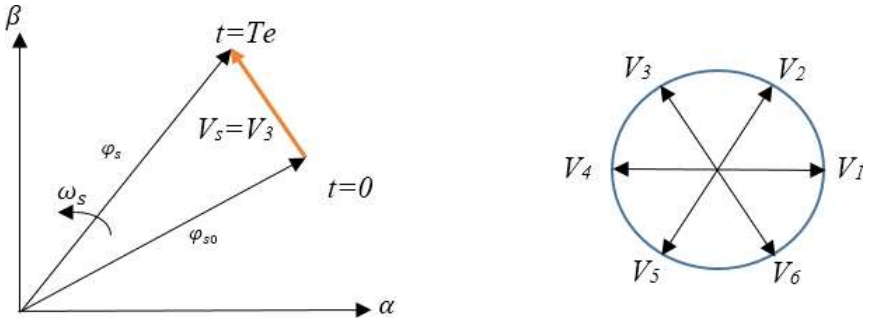


Figure VI .2 : Evolution de l'extrémité du vecteur φs.

$$\overline{\phi_s} = \int_0^1 \left(\overline{V_s} - R_s \overline{I}_s\right) dt \qquad \textbf{(VI.4)}$$

On obtient les composantes α et β du vecteur φs :

$$\phi_{s\alpha} = \int_0^t \left(\overline{V_{s\alpha}} - R_s \overline{I}_{s\alpha}\right) dt \qquad \textbf{(VI.5)}$$

$$\phi_{s\beta} = \int_0^t \left(\overline{V_{s\alpha}} - R_s \overline{I}_{s\beta}\right) dt \qquad \textbf{(VI.6)}$$

Le module du flux statorique s'écrit :

$$\phi_s = \sqrt{\phi_{s\alpha}^2 + \phi_{s\beta}^2} \qquad \textbf{(VI.7)}$$

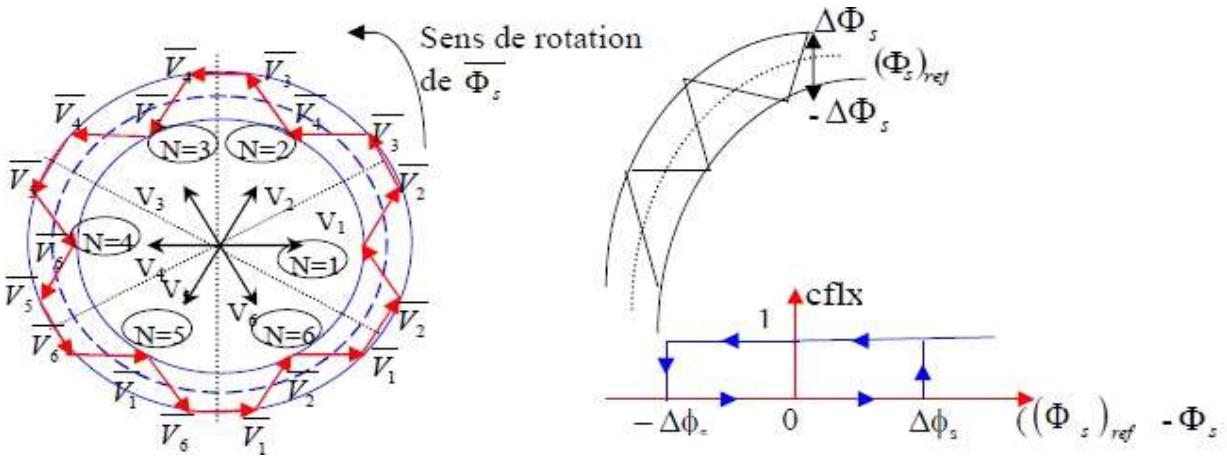
IV.7.2 ESTIMATION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

Le couple peut être estimé à partir de la relation suivante :

$$C_e = \frac{3}{2} P\left(\hat{\phi}_{s\alpha} I_{s\beta} - \hat{\phi}_{s\beta} I_{s\alpha}\right) \qquad \textbf{(VI.8)}$$

IV.8 CORRECTEUR DE FLUX

L'objectif de cette correction est de conserver l'amplitude du flux statorique dans une bande et de maintenir ainsi l'extrémité de ce dernier dans une couronne circulaire comme le montre la figure IV.4. **[BAG99] [MER08]**



FigureVI.3: Sélection des tensions correspondant au contrôle de l'amplitude de flux statoriqu

VI.9 Correcteur de couple

Le correcteur de couple a pour but de maintenir le couple dans sa bande d'hystérésis etd'imposer ainsi l'amplitude des ondulations du couple dans les limites Avec

Cem ref : Le couple de référence ; ΔC La bande d'hystérésis du correcteur. **[BOU 13][BEN 10]** Cependant une différence avec le contrôle du flux est que le couple peut être positif ou négatifselon le sens de rotation de la machine. Deux solutions peuvent être envisagées :

VI.9.1 Le correcteur à trois niveaux

Il permet de contrôler le moteur dans les deux sens de rotation, soit pour un couple positif ou négatif. La sortie du correcteur, représentée par la variable booléenne indique directement si l'amplitude du couple doit être augmentée en valeur absolue (ccpl=1 pour une consigne positive et ccpl= -1 pour une consigne négative) ou diminuée (ccpl=0). La figure (IV.4) montre ce type de correcteur.

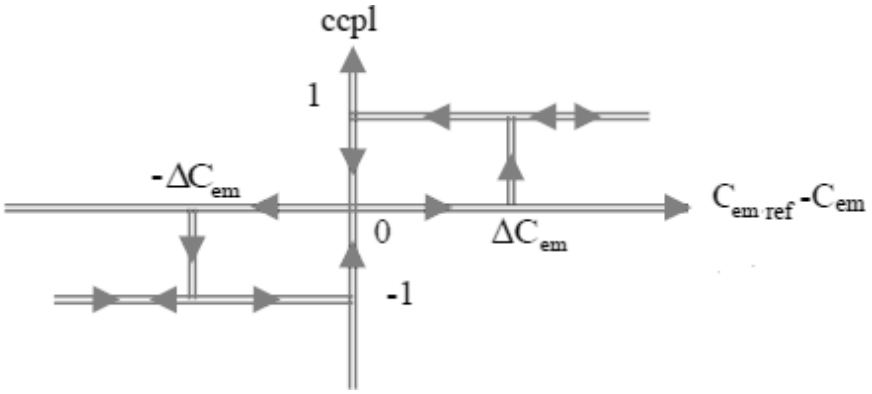


Fig VI.4 Correcteur de couple à trois niveaux

VI.10 Elaboration de la table de commutation:

En fonction du secteur et de l'évolution du flux et du couple on peut choisir le vecteur tension V_s à appliquer de manière à respecter la consigne de flux et de couple. La table de vérité permettant de choisir le vecteur adéquat est représentée dans tableau Ce dernier est élaboré en se basant sur les erreurs de flux $\Delta\varphi_s$ et de couple ΔC_e et selon la position duvecteur de flux statorique (i=1.,6).

Le tableau des séquences ci-dessous, proposé par Takahashi pour contrôler le flux statorique et le couple électromagnétique de la machine asynchrone est le suivant [TakI89].

Tableau VI.1 Tableau de la DTC conventionnelle définissant les séquences d'un onduleur.

Secteur		N1	N2	N3	N4	N5	N6
cflx	ccpl						
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
0	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

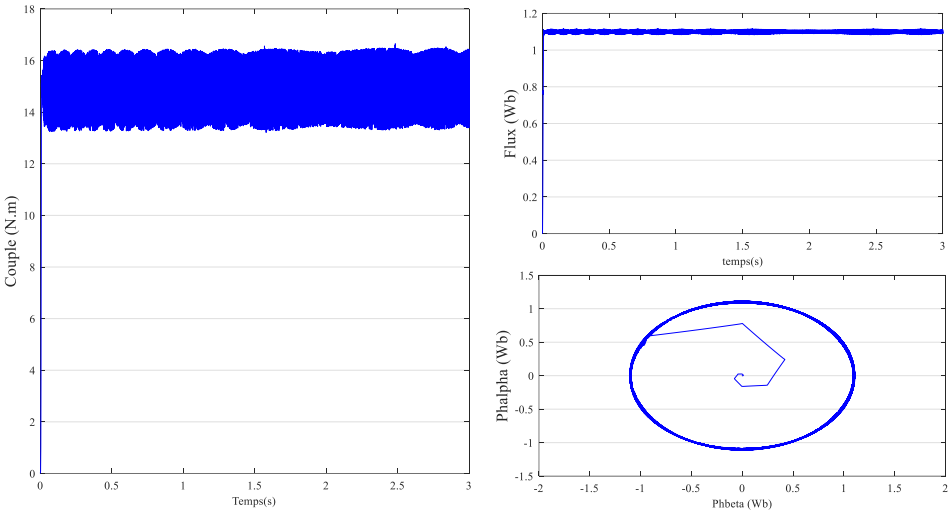
Les séquences nulles V_0 et V_7, sont indépendantes de l'état du flux, elles sont liées uniquement à l'écart ccpl. Ces séquences sont appliquées lorsqu'on souhaite maintenir le couple dans sa bande : $-\varepsilon_{Ce} \leq \Delta ccpl \leq \varepsilon_{Ce}$.

VI.11 Résultats de simulation

On présente dans ce paragraphe les résultats de simulation relatifs à la commande DTC a deux niveau de la MAS alimentée par un onduleur de tension triphasé. Un programme de simulation, établi sous l'environnement Matlab, nous a permis de reproduire fidèlement le comportement des divers grandeurs électriques et mécaniques. Les simulations sont effectuéesen temps discret pour une période d'échantillonnage de 50 μs.

Le premier test concerne le fonctionnement de la MAS en régime nominal. Pour des consignes du flux et du couple égal respectivement a 1.1 Wb et 10 Nm, la figure VI.3 illustre l'évolution temporelle de couple, de flux statorique, des courants statoriques, de la vitesse et de la trajectoire de l'extrémité du vecteur flux statorique

(A)



(B)

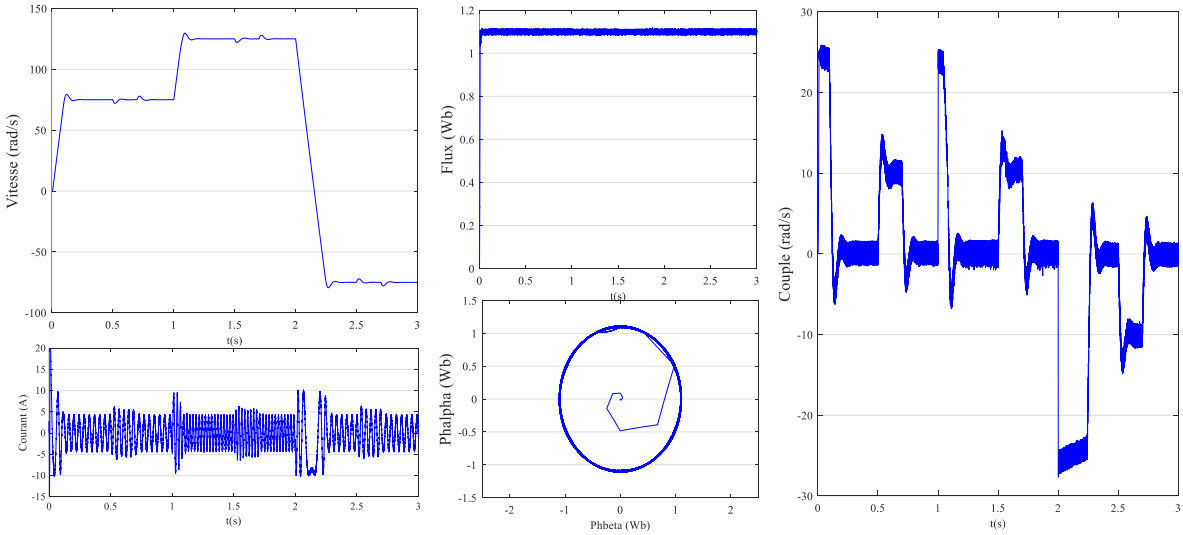


Figure IV.5 : Evolution du couple, flux statorique et de courant de la MAS-DTC (A : boucle ouverte , B : boucle fermée)

VI.12 Conclusion:

La commande DTC offre une réponse précise et rapide du couple électromagnétique et du flux statorique, Cependant, les inconvénients majeurs de cette commande sont liés à l'existence des ondulations importantes dans le couple et la variation de la fréquence de commutation due à l'utilisation des comparateurs à hystérésis.

Les résultats obtenus montrent que le contrôle du couple d'une machine asynchrone basé sur la technique du contrôle DTC permet d'obtenir de hautes performances dynamiques avec une structure simple. Ainsi il apporte une solution concrète aux problèmes de robustesse et de dynamique rencontrés dans la structure de commande FOC pour le même type de machine

Chapitre V :

MPPT-CSA d'un systéme PV alimentant une mas commandée par DTC

V.1. Introduction

Les méthodes de recherche conventionnelles ont longtemps été appliquées pour résoudre les problèmes d'optimisation. Bien que ces méthodes trouvent des résultats prometteurs dans de nombreux problèmes réels, ils peuvent échouer dans plusieurs problèmes de conception complexes. Dans les problèmes de conception réels, le nombre des variables de décision peut être très grand et son effet sur la fonction objective peut être très compliqué. La fonction objective peut se piéger dans de nombreux optima locaux, alors que le décideur s'intéresse à l'optimum global. De tels problèmes ne peuvent pas être traités par les méthodes conventionnelles. A cet effet, les chercheurs se sont orientés vers le développement de nouvelles techniques d'optimisation appelées méta–heuristiques, plus efficaces inspiré de la nature et des comportements des animaux pour la découverte de nouvelles solutions qui s'adaptent au contraints des problèmes traités. Les algorithmes méta-heuristique ont montré des performances prometteuses pour résoudre la plupart des problèmes d'optimisation complexe du monde réel qui sont extrêmement non linéaires et multimodaux. Pour cette raison, ce chapitre explique une nouvelle approche basée sur une méta-heuristique récente appelée algorithme de recherche de corbeau (Crow Search Algorithm-CSA) et sa version améliorée (CSA Améliorée), proposé pour la résolution du problème de dispatching économique.

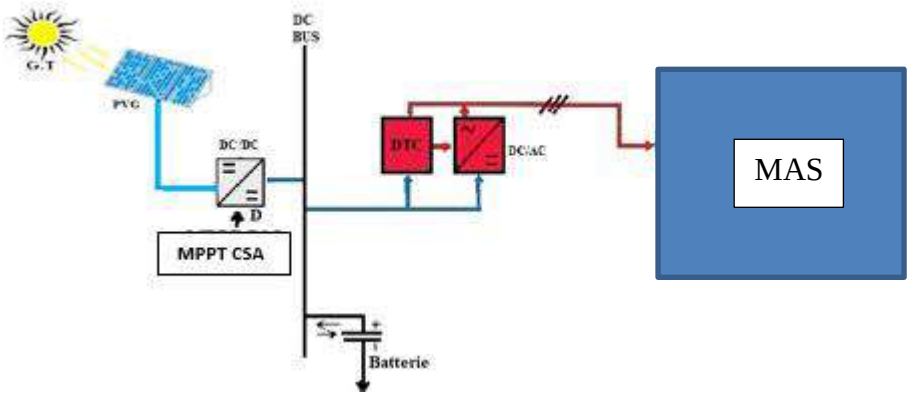


Figure V.1 : Système hybride proposé

V.2. Comportement des corbeaux

V.2.1 Les corbeaux sont parmi les animaux les plus intelligents

De tous les oiseaux, il s'agit de ceux qui ont le cerveau le plus développé. On considère que les corbeaux ont l'intelligence d'un enfant de 2 à 5 ans. Dans la nature, plusieurs éthologues ont rapporté avoir vu des corbeaux utiliser des outils comme des branches pour faire certaines choses. On a aussi vu des corbeaux sauvages pousser des pierres sur des personnes essayant de grimper jusqu'à leurs nids, voler du poisson en tirant la ligne d'un pêcheur, De même, on observe assez fréquemment que les corbeaux ont recours à la feinte ou au bluff. Par exemple, si un corbeau sait qu'un autre corbeau l'observe tandis qu'il cache de la nourriture, il peut très bien faire semblant de déposer la nourriture à un endroit, pour ensuite la cacher autre part **[ASK 16]**

V.2.2 Les corbeaux communiquent par signes

Il se trouve que les corbeaux font entre eux des signaux non-vocaux extrêmement sophistiqués. Alors que la majorité des oiseaux communiquent vocalement (en chantant ou en piaillant) pour s'envoyer des informations simples (défense du territoire ou parade nuptiale), les corbeaux sont capables de faire des gestes pour communiquer, comme une sorte de langue des signes.

V.2.3 Les corbeaux sont extrêmement adaptables

Du point de vue de l'évolution, il faut croire que les corbeaux ont toutes les cartes en main, ils sont capables de vivre dans une grande variété d'habitats, de la neige au désert en passant par les montagnes ou encore les forêts. Leur régime alimentaire est omnivore et très varié : ils peuvent consommer du poisson, de la viande, des graines, des fruits, des carcasses d'animaux, et de déchets.

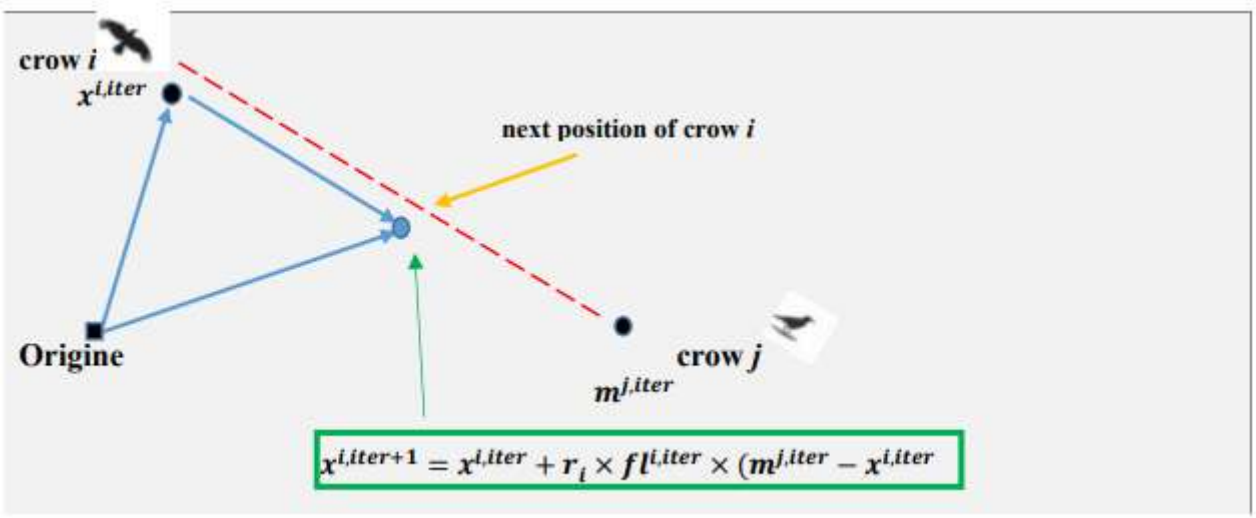
V.3. Algorithme de recherche des corbeaux dédié à l'optimisation

L'optimisation dans le modèle de l'essaim CSA, est une technique utilisée pour explorer l'espace de recherche et de simuler le comportement intelligent du corbeau pour trouver l'ensemble des variables pour la solution optimale du problème d'optimisation avec les meilleures performances. Les corbeaux cachent leur surplus de nourriture dans certaines positions (cachettes) de l'environnement et récupèrent la nourriture stockée quand c'est nécessaire. Les corbeaux sont des oiseaux avides puisqu'ils se suivent pour obtenir de meilleures sources de nourriture. Trouver une source de nourriture cachée par un corbeau n'est pas un travail facile car si un corbeau en trouve une autre qui

le suit, il essaye de le tromper en allant dans une autre position de l'environnement Pour cette approche d'optimisation, la fonction objective et les contraintes proposées sont présentés, l'environnement est un espace de recherche, chaque position du corbeau de l'environnement correspond à une solution réalisable, la qualité de la source de nourriture est une fonction objective (fonction fitness) et la meilleure source de nourriture de l'environnement est la solution globale du problème. Sur la base de ces similitudes, l'algorithme CSA tente de simuler le comportement intelligent des corbeaux pour trouver la solution aux problèmes d'optimisation

V.4 L'influence de la portée de vol $\boldsymbol{f}$

La figure (V.2) montre le schéma de l'état (1) et l'effet $\boldsymbol{fl}$ sur la capacité de recherche. Les petites valeurs de $\boldsymbol{fl}$ conduisent à une recherche locale (à proximité de $x\ i,iter$) et les grandes valeurs à une recherche globale (loin de $x\ i,iter$). Comme le montre la figure (III.1.a), si la valeur de $\boldsymbol{fl}$ est inférieure à 1, la position suivante du corbeau i est sur la ligne en rouge discontinue entre $x\ i,iter$et $mi,iter$. Comme l'indique la figure (III 1.b), si la valeur de $\boldsymbol{fl}$ est supérieure à 1, la position suivante du corbeau i se trouve sur la ligne en vert continue qui dépasse $mj,iter$ **[ASK 16]**



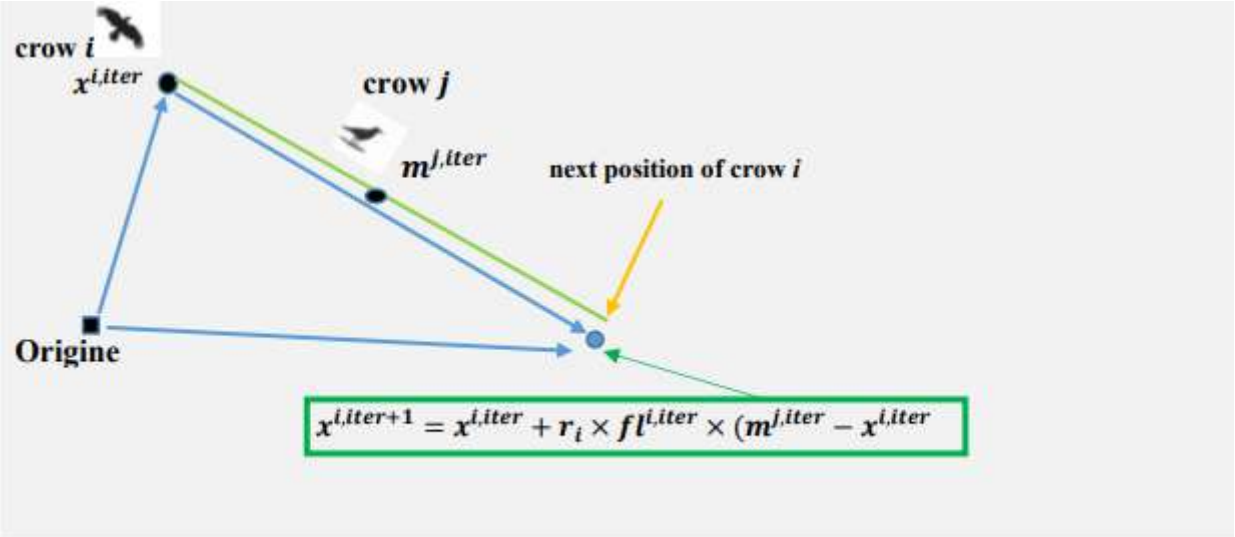


Fig V.2 : Diagramme d'état 1 dans CSA (a) fl1 **[ASK16]**

V.5. La méthodologie de la CSA pour l'optimisation

La procédure étape par étape pour la mise en œuvre de l'algorithme de CSA est décrite comme suit :

Initialiser aléatoirement la position d'un troupeau de N corbeaux dans l'espace de recherche
Évaluer la position des corbeaux
Initialiser la mémoire de chaque corbeau
tandis que iter < iter max
  pour ¡= 1 : N (tous les N corbeaux du troupeau)
    Choisissez au hasard l'un des corbeaux à suivre par exemple j)
    Définissez une probabilité de conscience
    si r > Ap^{iter}
      $x^{i,iter+1} = x^{iter+1} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{j,iter} - x^{iter})$
    else
      $x^{i,iter+1}$ = une position aléatoire de l'espace de recherche
    fin si
fin pour
Vérifier la faisabilité de nouveaux postes
Évaluer la nouvelle position des corbeaux
Mettre à jour la mémoire des corbeaux
fin

Fig V.3 Pseudo code du CSA proposé **[ASK16]**

Étape 1 : Initialiser le problème et les paramètres réglables

Le problème de l'optimisation, les variables de décision et les contraintes sont définis. Ensuite, les paramètres réglables du CSA :

➢ Taille du corbeau (N)

➢ Nombre maximal d'itérations (***itermax***) ➢

La portée de vol (***fl***) ➢

Probabilité de conscience (***AP***)

Étape 2 : Initialiser la position et la mémoire des corbeaux

N corbeau sont positionnés au hasard dans un espace de recherche de d-dimensions comme des membres de l'essaim. Chaque corbeau indique une solution réalisable du problème et d est le nombre de variables de décision

$$Corbeaux = \begin{pmatrix} \vdots & X_1^1 & X_2^1 \dots & X_d^1 \\ & X_1^N & X_2^N \dots & N_d^N \end{pmatrix}$$

Le mémoire de chaque corbeau est initialisé puisque à l'itération initiale, les corbeaux n'ont aucune expérience, on suppose qu'ils ont caché leurs aliments à leurs positions initiales.

$$Mémoire = \begin{pmatrix} \vdots & m_1^1 & m_2^1 \dots & m_d^1 \\ & m_1^N & m_2^N \dots & m_d^N \end{pmatrix}$$

Étape 3 : Évaluer la fonction fitness (fonction objectif)

Pour chaque corbeau, la qualité de sa position est calculée en introduisant les valeurs des variables de décision dans la fonction de maximisation de la puissance

Étape 4 : Générer une nouvelle position

Les corbeaux génèrent une nouvelle position dans l'espace de recherche de la manière suivante on suppose que le corbeau i veut générer une nouvelle position. Pour ce but, ce dernier choisit au hasard un des corbeaux (par exemple corbeau j) et le suit pour découvrir la position des

aliments cachés par ce corbeau (mj). La nouvelle position du corbeau i est répété pour tous les corbeaux**. [ASK16]**

Étape 5 : Vérifier la faisabilité de nouvelles positions

La faisabilité de la nouvelle position de chaque corbeau est vérifiée. Si la nouvelle position d'un corbeau est faisable. Le corbeau met à jour sa position. Sinon, le corbeau reste dans la position actuelle et ne passe pas à la nouvelle position générée

Étape 6 : Évaluer la fonction fitness des nouvelles positions

La valeur de la fonction fitness de la nouvelle position de chaque corbeau est calculée.

Étape 7 : Mettre à jour la mémoire

Étape 8 : Vérifier le critère d'arrêt

Les étapes 4-7 sont répétées jusqu'à ce que l'itération itermax soit atteinte. Lorsque le critère d'arrêt est atteint, la meilleure position de la mémoire en termes de valeur de fonction objectif est rapportée comme la solution du problème d'optimisation. **[ASK16]**

V.6 Les paramètres de CSA :

- ✓ La Taille de l'essaim des corbeaux (nombre de population): Npop=50.
- ✓ Nombre des itérations maximales : $\boldsymbol{itermax}$ =300.
- ✓ La portée du vol : $\boldsymbol{fl}$=0.8.
- ✓ Probabilité de conscience : $\boldsymbol{AP}$=0.2.

V.6.1 Simulation et résultats :

Après l'exécution du programme de CSA on a obtenu les résultats correspondants à la solution optimale qui donne:

Comme montre la figure V.4, on trouve bien que la tension continue obtenue suit parfaitement la valeur nécessaire pour alimenter notre machine qui est égale à 520V en utilisant MPPT basé sur la CSA, cependant, que la tension obtenue par la méthode P&O est très grande et ne suive pas la valeur désirée

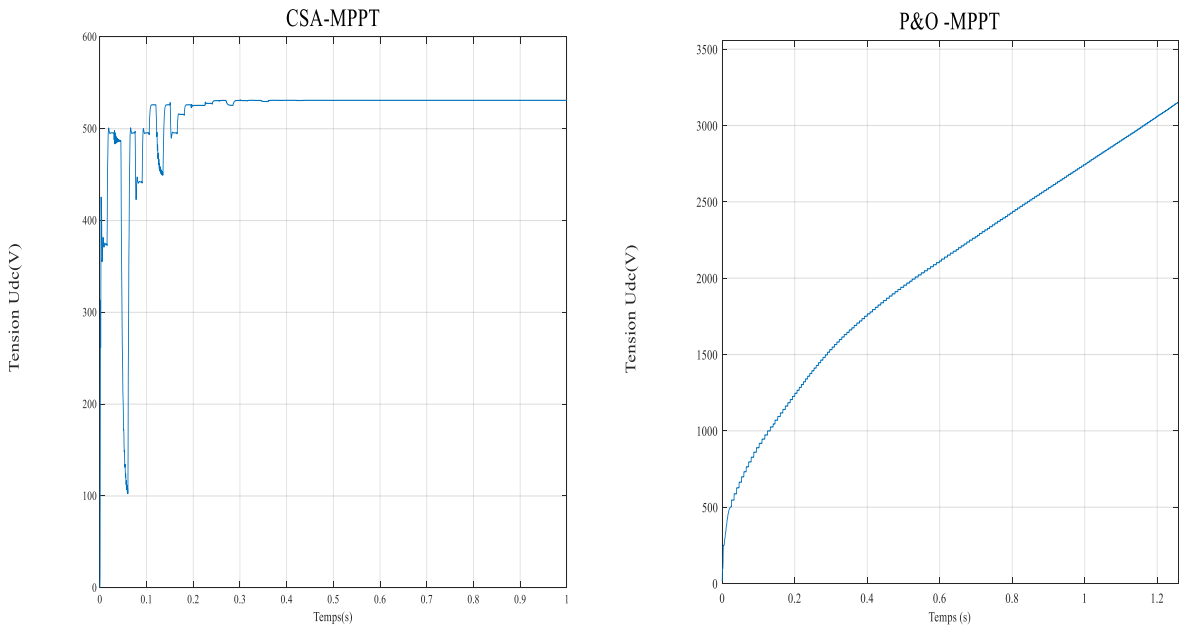


FIG V.4 Réponse de la tension Udc en appliquant MPPT-CSA et MPPT-P&O

La figure V.5 représente la tension Udc qui suive bien la valeur désirée à partir de 0.3s et réponse du rapport cyclique qui serve à piloter le convertisseur statique DC-DC pour chercher le PPM.

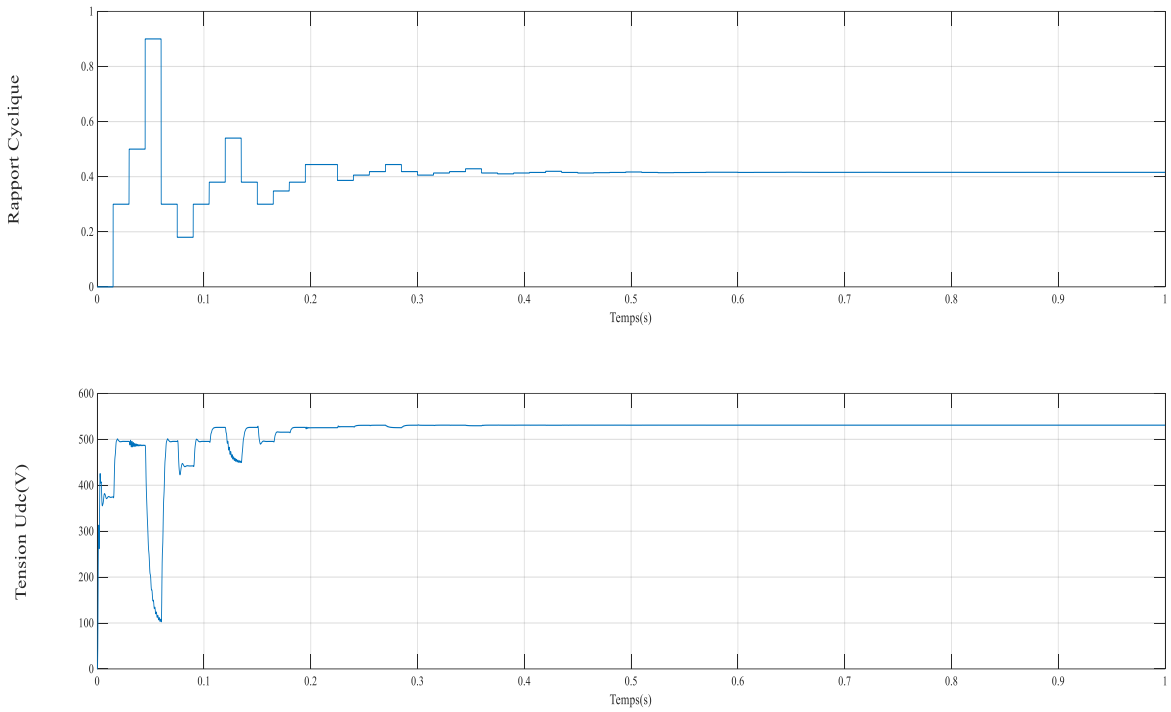


Figure V.5 : Réponse de la tension et le rapport cyclique en appliquant MPPT-CSA

La figure V.6 représente la réponse de la puissance, courant, rapport cyclique et la tension du panneau photovoltaïque relié à une charge (PV-BOOST-DC) en utilisant MPPT basé sur la CSA.

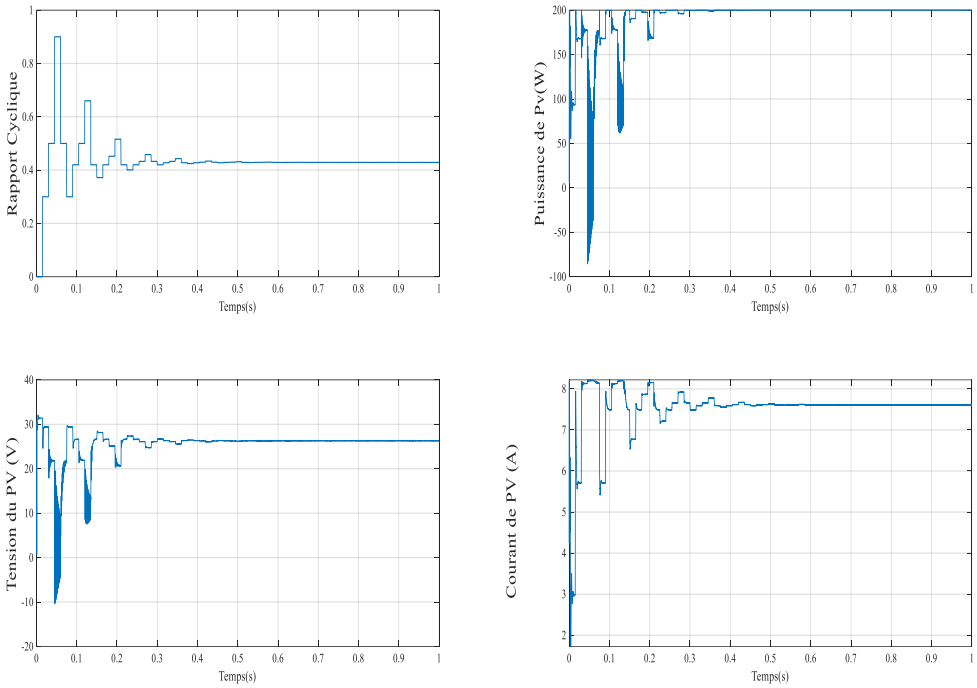


Figure V.6 : Résultat simulation de MPPT-CSA

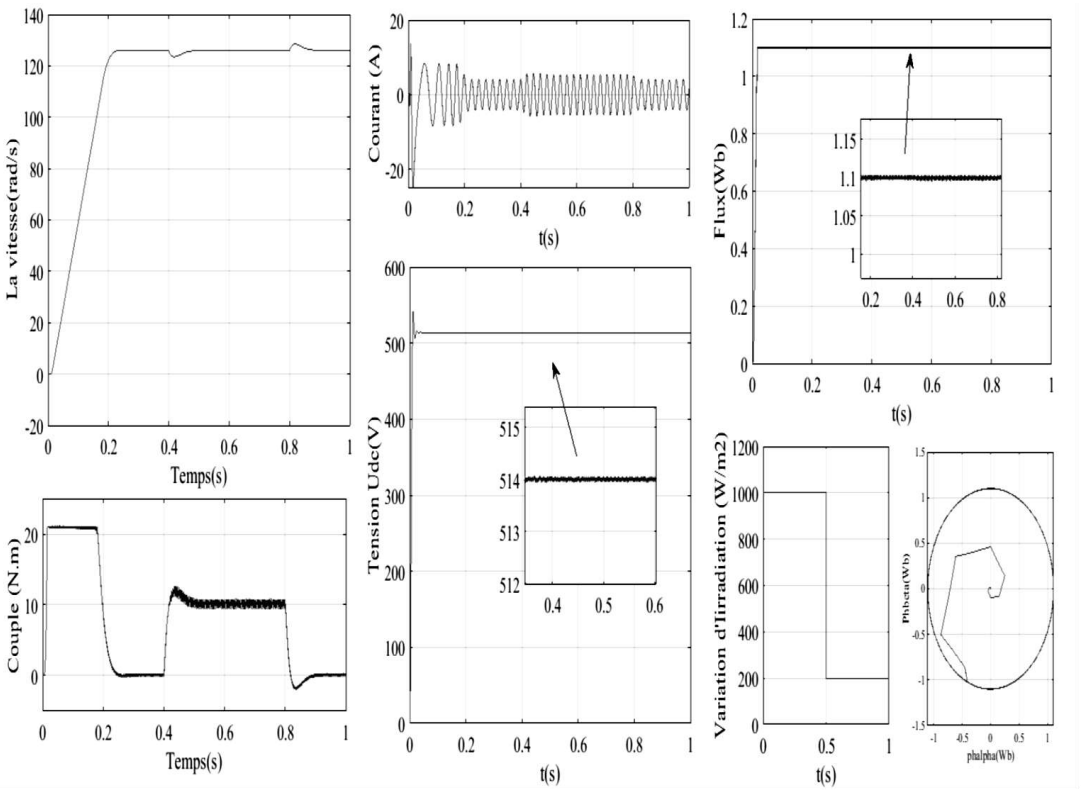


Figure V.7 : Performance du système photovoltaïque en appliquant MPPT-CSA pouralimenter MAS avec commande DTC.

V.7 Conclusion

Plusieurs travaux ont été portés sur les systèmes à énergie renouvelable, que ce soit lesénergies photovoltaïques, éolienne ou encore hybride. Dans ce chapitre, on a proposé d'améliorer les performances de système en utilisant la méthode méta-heuristique MPPT-CSA dont le but de remplacer les techniques classiques tel MPPT-P&O. La CSA est une méthode parmi les méthodes optimisations qui est simple et efficace.

Les résultats de simulation ont illustré les performances de notre système pour différentes valeurs de la température et de l'irradiation.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, on a proposé une nouvelle approche pour la commande d'un système photovoltaïque résidentiel afin d'extraire le maximum d'énergie du panneau photovoltaïque (fonctionnement optimal du système photovoltaïque).

Le travail présenté dans ce mémoire, fait la synthèse d'une machine asynchrone alimenté par un panneau photovoltaïque, ce système est alors testé pour une chaine utilisant un hacheur boost contrôlé par MPPT base sur l'algorithme d'optimisation (CSA)

La méthode de contrôle direct du couple est utilisée pour la commande de la vitesse du moteur électrique. Pour extraire le maximum de puissance du panneau photovoltaïque et améliorer encore les performances de ce système sous la variation de la charge (comme par exemple le couple électromagnétique) et la variation des condition atmosphérique (changement de la température et l'irradiation), on proposera le suiveur MPPT basé la méthode intelligente CSA pour remplacer la méthode classique P&O, et pour assurer une tension constante sous ses contrainte même pendant la nuit, ce système est relié à une batterie.

Dans ce travail, Nous avons fait une étude générale de modélisation de la MAS, en se basant sur le modèle équivalent de Park en tenant compte des hypothèses simplificatrices pour obtenir un modèle simple qui traduit fidèlement le fonctionnement de la MAS, Après la simulation de la machine alimentée par une source triphasée et équilibrée accordé par un onduleur de tension à commande MLI.

On a utilisé l'algorithme pour extraire le point maximal de puissance du générateur photovoltaïque qui permet un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Pour ce objectif nous avons proposé une technique constitue sur l'intelligence des corbeaux (CSA), et comparé avec la méthode la plus classique dite P&O. les résultats de la simulation obtenus montre la bonne performance du système.

Références bibliographiques

[ABB14] H. ABBES, H. ABID, K. LOUKIL, A. TOUMI et M. ABID, « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système Photovoltaïque », Control & Computer Engineering, revue des énergies Renouvelables vol.17 Nº3(2014), pp 435-445

[ASK 16] A.ASKARZADEH, «A novel meta-heuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm », Ordinateurs et structures vol 169 (2016), pp. 1-12.

[BAG99] L. Baghli « Contribution à la commande de la machine asynchrone utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques » Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 1999

[BAH20] A. BAHRI, ABDELKRIM Thameur, MORDJAOUI Mourad, BECAR Belgasem, BOURAGHDA Skander « Etude comparative des algorithmes d'optimisation MPPT pour un système photovoltaïque » The national conference on Energy Systems, Environment, Plasma and Materials "ESEPM2020", MESTEL Laboratory, Université de Ghardaïa

[BEH09] M. BEHLOUL, « Commande Directe du Couple par Modes Glissants (DTC-SMC) d'un Actionneur Asynchrone Destiné pour un Bras de Robot »,Mémoire de magister, Université de Batna, Batna, 2009**.**

[BEN10] L. BENALIA**,** « Commande en tension des moteurs à induction double alimentés », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010**.**

[BEN15] BENTAYEB Meryem « Etude de la commande MPPT à incrémentation de la conductance appliquée aux panneaux solaire » mémoire de Master Centre Universitaire, Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent 2015

[BOU13] S. BOUHAFNA**,** « Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone Apport des Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Université de Batna, Batna, 2013**.**

[DIS] Dissa Abdennour, « Contrôle direct du couple du moteur à induction sans capteur de vitesse associée à un observateur non linéaire » , mémoire de magister ,Université de Batna , 2010 .

Références bibliographiques

[FER08] FERRAI.A, « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village »Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.

[GDA13] S. Gdaim, A. Mtibaa, M. F. Mimouni, "Design and implementation of Direct Torque Control of Induction Machine on FPGA ". 5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO). 2013 IEEE.

[GDO09] S.M. Gdoue, D. Giaouris, J.W. Finch, «Artificial intelligence based speed control of DTC induction motor drives. A comparative study», Electric Power Systems research pp 210-219, 2009. Elsevier Publisher

[GUY] Guy Strutzer, Eddie Samigiel, « Modélisation et Commande des Moteurs Triphasés

Commande vectorielle des moteurs synchrones, commande numérique par contrôleurs»

(Livr292).

[HAM] Hamuli wivine valentine « étude analytique d'un systeme photovoltaïque connecte au reseau electrique de goma « Cas de la cabine Lipton » diplôme d'ingénieur A0 en électro énergétique universite catholique la sapientia

[KOR16] KORICHI Taki Eddine « Modélisation et commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique » mémoire de master université Mohamed Boudiaf - m'sila 2016

[LAC06] S. Lachtar. « Commande à Structure Variable d'un Moteur Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) ». Mémoire de Magistère : Annaba, Université de Badji Mokhtar : 2006.

[LAT16] LATRECHE Soufiane**,** BOUZID Kheir eddine « Etude et Réalisation d'un système photovoltaïque à base d'une carte Arduino uno » mémoire master professionnelle universite kasdi merbah ouargla . 2016

[MAY16] MAYOUF Somia, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle », mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2016.

[MER08] E. Merabet, « Commande floue adaptative d'une machine asynchrone double étoile », mémoire de magister de l'Université de Batna, 04 /06 / 2008.

Références bibliographiques

[OUA14] OUABDELKADER Katia, MERSEL Houria **«** Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau » mémoire de master Université Abderrahmane Mira de Bejaia 2014

[OUL08] A.OULD MOHAMED YAHYA et I.YOUM, « étude et modélisation d'un générateur photovoltaïque », Revue des énergies renouvelables, vol.11n°3, Sénégal, 2008**.**

[REZ09] S. REZGUI, « Commande de machine électrique en environnement Matlab/Simulink et temps réel Application à la machine asynchrone : Commande vectorielle sans capteurs mécaniques SVPWM, mode glissant,MRAS », Mémoire de Magister, Université de Mentouri, Constantine, 2009**.**

[ROS02] ROSENDO PEÑA EGUILUZ « Commande algorithmique d'un système mono onduleur bi machine asynchrone destiné à la traction ferroviaire », Thèse Doctorat De l'INPT Toulouse 2002**.**

[SLA11] M. SLAMA FATEH, « Modélisation D'un Système Multi Générateurs Photovoltaïques Interconnectés Au Réseau Electrique », Mémoire De Magister, Université Ferhat Abbas – Setif,2011

[TAZ16] F. TAZERART, R. ABDELLI,« Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage », mémoire de master. Université Abderahmane Mira De Bejaïa. 2016.

.