

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques
Présenté par :

Mansouri yousef

Ben dadi alli

Thème :

**Optimisation d'un système de pompage
photovoltaïque a' base d'un moteur synchrone
a' aimants permanents eu utilisant la logique floue**

Soutenu publiquement

Le :8/7/2019

Devant le jury :

M^f Meghni bilhel

MCA

Président

UKM Ouargla

M^f Belkebir amel

MAA

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^f Taïbi Djamel

MAA

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2018/2019



Dédicace

A l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail que je dédie :

A deux êtres qui me sont très chers dans cette vie, à savoir mon père Mohamed Lakhder et ma mère Houria

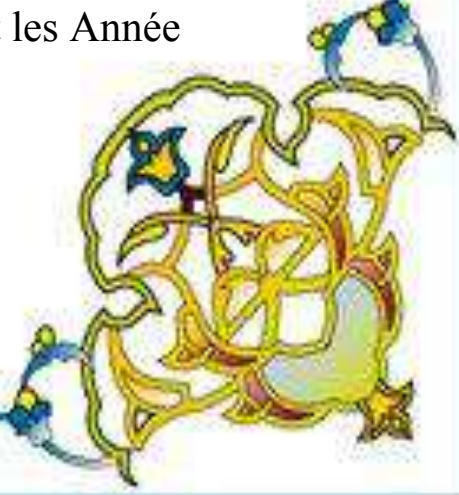

Je leur dis merci Papa du fond de mon cœur pour ton éducation, ton sacrifice, ton assistance et pour ce que tu m'as fait et qui m'a permis d'avoir cette réussite et ce bonheur.

Je te dis merci et mille fois merci Mama pour ta patience, ton courage et ton sacrifice pour moi.

Mes chers frères : Mokhtar , Moussa, Aissa.

Me chère sœur : Zoubida, Halima, khadidja. Et a toute ma famille Mansouri .

A mes chers amis: Shemseddin gousseum, Oussama Berrekbia .



Et A tous mes amies qui j'ai connus dans: Tout les Année universitaire



Remerciements



Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné courage, patience et force durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à exprimer notre remerciement et notre gratitude à notre encadreur : Mr. Belkebir amel pour la confiance qu'il nous a prodigué pour la direction de ce travail, sans cesser de nous encourager et de nous pousser vers les horizons de recherche scientifique.

Nos remerciements au département de Génie Electrique de l'université de Ouargla et à tous les enseignants qui nous enseignés durant les années du cursus.

Nos remerciements sont également adressés aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Enfin nous remercions aussi toutes les nos familles et les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail spécifiquement notre bon frère.



Liste de tableaux

Tableau (3 .1): Les règles utilisées pour déterminer la sortie ΔV_{reff}	40
--	-----------

Listes de figures

Figure (1.1) Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque	5
Figure (1.2) : schéma qui représente les différents composants d'un système photovoltaïque	6
Figure (1.3) : Couplage via convertisseur DC/AC	8
Figure (1.4) : Pompe centrifuge	11
Figure (1.5) : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge	11
Figure (1.6) : Pompe volumétrique	12
Figure (1.7) : Caractéristiques d'une pompe volumétrique	12
Figure (2.1) : Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque	15
Figure (2.2) : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque	16
Figure (2.3) : Caractéristique courant-tension	17
Figure (2.4) : Caractéristique puissance-tension	17
Figure (2.5) L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	18
Figure (2.6) : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$	18
Figure (2.7) : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	19
Figure (2.8) : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	19
Figure (2.9) : Schéma de la machine synchrone	20
Figure (2.10) : Schéma de la machine synchrone dans le référentiel (d, q)	21
Figure (2.11) : Machine à Courant Continu	23
Figure (2.12) : Schéma fonctionnel du régulateur de courant	25
Figure (2.13) : Schéma fonctionnel du régulateur de vitesse	26
Figure (2.14) : Schéma de la commande vectorielle du MSAP	27
Figure (2.15) : Onduleur de tension triphasé	28
Figure (2.16) : a) Représentation des vecteurs tensions réalisables par l'onduleur b) Projection du vecteur à réaliser sur ses deux vecteurs adjacents	30
Figure (2.17) : Reconstitution des signaux de commande	30
Figure (3. 1) : Recherche du PPM par la méthode (P&O)	36
Figure (3.2) : Organigramme de l'algorithme P&O	36
Figure (3. 3) : L'organigramme de P&O amélioré par logique floue avec un pas variable	37
Figure (3.4) : Bloc du calculateur de pas variable FLC proposé	38
Figure (3 .5) : Les fonctions d'appartenance des entrées	39

Figure (3. 6) : Les fonctions d'appartenance de la sortie	40
Figure. (3.7) : Schéma de simulation de système de pompage solaire munie d'une commande vectorielle du MSAP	42
Figure (3.8) : Résultats de simulation de deux algorithmes MPPT P&O avec 0.01, P&O avec 0.05 et P&O avec FLC.	43
Figure (3.7) : Résultats de simulation de la méthode FLC base sur P&O pour $T=25C^0$ et $E=1000W/m^2$:(a,b) la puissance P_{pv} , (c) courant I_{pv} , (d)tension V_{pv} , (e) courant de stator i_{abc} , (f) vitesse de moteur.	45
Figure (3.8) : Résultats de simulation de la méthode FLC base sur P&O pour $T=25 C^0$ et $E=500W/m^2$:(a,b) la puissance P_{pv} , (c) courant I_{pv} , (d)tension V_{pv} , (e) courant de stator i_{abc} , (f) vitesse de moteur.	47

Liste de symboles

G : L'intensité du rayonnement solaire (W/m^2).

λ : Longueur d'onde m

E : L'énergie de chaque photon.

h : La constante de Planck. $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

C : La vitesse de propagation. $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

η_{STC} : Le rendement de la cellule photovoltaïque ;

P_m : La puissance produite par le générateur PV ;

$ESTC$: L'éclairement absorbé par la cellule ;

cellule : La surface de la cellule [m^2].

A : Facteur de qualité

I_p : Photo- courant (A)

I_d : Courant traversant la diode.

q : Charge de l'électron. $1,60217646 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

k : La constante de Boltzmann. $1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J. K}^{-1}$

U_T : tension thermique (v).

I_s : courant de saturation (A)

V : tension à la borne de la diode (v).

T : température absolue (en kelvin).

R_s : résistance série (Ω)

R_{sh} : résistance shunt (Ω)

A : Facteur de qualité

I_{CC} : courant de court-circuit (A).

V_{CO} : Tension à circuit ouvert (v)

P_{max} : Puissance maximale (w) .

ff : Facteur de forme.

c :Rendement d'une cellule solaire.

$P_{solaire}$: Puissance du rayonnement solaire incident.

S : Surface du module photovoltaïque (m^2).

NS : Nombre de module en série.

T : la période de commutation

α : rapport cyclique du commutateur

I_{op} : le courant optimal.

V_{op} : la tension optimale.

J_m : courant d'excitation

B_m : un champ magnétique d'induction

MCC : moteur a courant continu

k_e, k_t : constantes de tension et de couple de moteur.

I_a : le courant d'armature de moteur.

R_a : la résistance de circuit d'armature de moteur.

C_e :le couple électromagnétique de moteur.

C_r :le couple résistant de moteur.

Q : débit (m³/h)

H_g : hauteur géométrique

ρ : Masse volumique de l'eau (Kg/m³).

g : accélération de la pesanteur (m/s²).

ΔH : Sommes de toutes les pertes de charges dans les tuyauteries d'aspiration et de refoulement (tuyauteries, vannes, accessoires).

P_m : puissance fournie par le moteur

K_{fr} : Coefficient de perte de charge relatif à la pompe.

K_c : Coefficient de pertes de charge relatif à la pompe.

K_1 : Coefficient correcteur dépendant des dimensions de la pompe.

H_p : Hauteur réelle.

H_t : Hauteur théorique

ΔH : Les pertes de charges dans les tuyauteries d'aspiration et de refoulement.

K_f : Coefficient de débit

P_{ah} : Puissance hydraulique absorbée (ou puissance utile à la conversion)

T : couple de torsion sur l'arbre de la pompe

ω : vitesse angulaire de la pompe

H_s : Hauteur statique

λ :Coefficient des pertes de charge linéaires

L :La longueur d'un tronçon de conduite (m).

D :Le diamètre d'un tronçon de conduite (m).

V : La vitesse d'écoulement dans la conduite.

g : L'accélération de la pesanteur (m/s).

K_p : Constante de la canalisation

K_1, K_2, K_3 : des constantes propre de la pompe donnée par le constructeur

K_r : Coefficient de proportionnalité [(Nm/rad.s⁻¹)].

C_s : Couple statique

η_g : rendement du générateur à la température de référence(25C°)

A : surface active du générateur (m²)

d, q : Composantes de Park (lié au rotor) directe et quadrature

α, β : Référentiel fixe lié au stator

f.m.m : Force magnétomotrice

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

T : Temp(s)

P : Opérateur de la Place(dt d)

V_s : Tension instantanés des phases statorique (V)

I_s : Courant instantanés des phases statorique (A)

i_a, i_b, i_c : Courants des phases statorique (A)

V_a, V_b, V_c : Tensions des phases statorique (V)

L_a, L_b, L_c : Inductances propres des phases a,b,c respectivement (H)

M_{ab}, M_{bc}, M_{ac} : Inductances mutuelles entre les phases (H)

φ : Flux statorique (Wb)

L_{ss} : Inductance statorique (H)

R_s : Résistance statorique (Ω)

F : Coefficient de frottement visqueux (Nm/Rad/s)

J : Inertie de l'entraînement(Kg.M²)

p : Nombre de pair de pôles

Ω : Vitesse de rotation mécanique (Rad/s)

Notations et symboles

Ω_{ref} : Vitesse de référence (Rad/s)

ω : Pulsation électrique de rotor (rad/s)

C_e : Couple électromagnétique (N.m)

C_r : Couple mécanique résistant (N.m)

θ_{ref} : Position de référence (Rad)

θ : Position réelle (Rad)

V_d, V_q, V : Tensions statorique du repère de Park (V)

V : Tensions statorique du repère de Park (V)

i_d, i_q, I : Courants statorique du repère de Park (A)

ψ_d, ψ_q, ψ : Flux du stator selon les axes d,q (Wb)

L_d, L_q, L : Inductance du stator selon les axes d,q (H)

ψ_f : Flux des aimants (Wb)

k_p : L'action proportionnelle du régulateur

k_i : L'action intégrale du régulateur

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point tracking.

P&O: Méthode de Perturbation et observation .

FLC: Fuzzy Logic Controller.

MSAP :machine synchrone à aimant permanent .

HMT: Hauteur manométrique totale (m).

DC/DC : Convertisseur continu –continu.

DC/AC : Convertisseur continu-alternatif.

Sommaire

Sommaire

Liste de tableaux	
Listes de figures	
Liste de symboles	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
<u>Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque</u>	
1.1 Introduction	3
1.2 Définition de l'énergie photovoltaïque.....	3
1.3 Historique de L'effet photovoltaïque.....	3
1.4 Principe de conversion photovoltaïque	4
1.5 Constitution d'un système de pompage photovoltaïque.....	5
1.5.1 Générateur photovoltaïque.....	6
1.5.2 Electronique de commande et contrôle	7
1.5.3 Adaptateur de charge.....	7
1.5.4 Convertisseur DC/AC (onduleur).....	7
1.6 Groupe moteur-pompe.....	9
1.6.1 Moteurs :.....	9
1.6.2. Moteur à courant continu	9
1.6.3. Moteur à courant alternatifs	9
1.6.4 Pompes photovoltaïque.....	10
1.6.5 Pompes centrifuges.....	10
1.6.6 Pompes volumétriques.....	11
1.7 Stockage.....	12
1.7.1 Pompage avec stockage électrochimique (batteries)	13
1.7.2 Pompage au fil de soleil.....	13

1.10 Conclusion.....	13
----------------------	----

Chapitre 2 : Modélisation du système de pompage photovoltaïque

2.1 Introduction.....	14
2.2 Modélisation du générateur photovoltaïque.....	14
2.2.1 Model idéal d'une cellule photovoltaïque	14
2.2.2 Modèle réel d'une cellule photovoltaïque.....	15
2.3 Simulation d'une cellule PV sous Matlab /Simulink.....	16
2.4 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	17
2.4.1 Influence de l'éclairement.....	17
2.4.2 Influence de la température.....	18
2.5 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent.....	19
2.5.1 Mise en équation de la machine synchrone.....	20
2.5.2 Equations électriques.....	20
2.5.3 Equations magnétiques.....	21
2.5.4 Transformation de Park.....	21
2.5.5 Modèle de la MSAP dans le référentiel de Park.....	22
2.5.6 Equations mécanique.....	20
2.6 Avantages et inconvénients de la MSAP.....	20
2.7 La commande vectorielle.....	23
2.7.1 Principe de la commande vectorielle de la MSAP.....	23
2.7.2 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle	24
2.8 La Régulation.....	24
2.8.1 Régulateur de courant.....	24
2.8.2 Régulateur de vitesse.....	26
2.8.3 Description du système global	27
2.9 Modélisation du convertisseur DC/AC.....	27

2.10 MLI vectorielle (SVPWM).....	39
2.11 Pompe photovoltaïque.....	31
2.11.1 Modélisation de la pompe centrifuge.....	31
2.11.2 Hauteur manométrique totale.....	31
2.11.3 Pertes de charges linéaires.....	31
2.11.4 Pertes de charges singulières (locales).....	31
2.11.5 Caractéristique couple-vitesse de la pompe $C_e(\omega)$	32
2.12 Taille du générateur photovoltaïque.....	32
2.12.1 Méthode analytique.....	32
2.12.2 Calcul de la puissance en watt crête.....	33
2.12.3 Nombres de modules.....	33
2.12.4 Nombre de modules en série.....	34
2.12.5 Nombre de modules en parallèle.....	34
2.13 Conclusion.....	34

Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

3.1 Introduction	35
3.2 Poursuite du point de puissance maximale.....	35
3.3 Algorithme de perturbation et observation (P&O).....	35
3.4 Algorithme P&O basé sur la logique floue.....	37
3.5 Contrôleur flou FLC utilisé avec un pas variable.....	38
3.6 Taille du générateur PV	41
3.7 Simulation <i>et</i> Interprétations on Résultats	41
3.8 Conclusion.....	48
Conclusion Générale.....	49

Introduction Générale

Généralités et problématique

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules (PV) en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV), [1].

En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT) [2].

Les moteurs électriques jouent un rôle essentiel dans les systèmes photovoltaïques car l'efficacité du système est directement affectée par l'efficacité du moteur et son entraînement. Les systèmes d'entraînement à moteur électrique sont utilisés pour contrôler la direction, la vitesse et le couple pendant les régimes dynamiques et statiques. Les machines asynchrones à cage sont préférées à l'autre type de machines dans de nombreuses applications en raison de leurs structures robustes et à faible coût. Cependant, ils n'ont pas l'efficacité par rapport aux MSAP qui ont une performance élevée, une bonne réponse dynamique, un couple élevé, une faible inertie, un rendement et une puissance volumique élevés. En outre, le rotor à aimant permanent présente de nombreux avantages, y compris l'élimination de l'excitation et les pertes de rotor, ce qui conduit à une efficacité accrue. L'efficacité supérieure permet une réduction de la taille de la machine [3].

Dans ce travail, un système d'entraînement à vitesse variable consiste en un ensemble d'éléments en interaction tels que: les panneaux photovoltaïques, le moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) et la pompe centrifuge.

Le moteur, la commande MLI vectorielle, le modèle PV et l'algorithme P & O seront expliqués en détail.

Objectifs de ce travail

Dans ce travail, sept principaux objectifs étaient fixés à savoir:

- ❖ Recherche bibliographique sur les énergies photovoltaïques.
- ❖ Présentation du principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque.
- ❖ Modélisation et simulation de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) sous environnement MATLAB
- ❖ Présentation de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP), ainsi que la méthode de calcul des différents régulateurs.

- ❖ Modélisation du convertisseur DC/AC avec la commande MLI vectorielle (SVPWM)
- ❖ Etude des techniques de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O), la technique de perturbation et d'observation 'P&O' basée sur la logique floue (FLC)
- ❖ Simulations du système de pompage solaire.

Présentation du mémoire

Pour aboutir aux objectifs de ce travail, notre mémoire sera structuré en trois chapitres comme suit: Le premier chapitre présentera une description générale des systèmes de pompage photovoltaïques. Il se décompose en deux parties : la première un rappel historique sur l'évolution des recherches dans l'effet photovoltaïque. La deuxième partie la constitution d'un système photovoltaïque.

Le deuxième chapitre, sera consacré à la modélisation mathématique des différents éléments de système de pompage photovoltaïque. Il se décompose en trois parties : la première La modélisation de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) en se basant sur les équations électriques, magnétiques et mécaniques, qui régissent le comportement de la machine, La deuxième partie la nécessité d'employer une commande vectorielle et la troisième partie étudiera l'onduleur de tension avec une commande MLI vectorielle (SVPWM).

Dans le but de l'optimisation de la poursuite du point de puissance maximale, nous étudierons dans le dernier chapitre, certaines techniques de MPPT: la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et la méthode de la logique floue (FLC) basé sur la technique de perturbation et d'observation 'P&O' et nous présenterons les résultats de simulation de système étudié sous l'environnement Matlab/Simulink .

Enfin, on terminera notre mémoire avec une conclusion générale qui résumera l'intérêt de notre étude.

Chapitre 1 :
Généralités sur le
systeme
photovoltaïque

1.1) Introduction

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Cette conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV). La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. L'association possible de plusieurs cellules PV en série/parallèle permet d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande [2]. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (GPV) avec des caractéristiques courant-tension $I(V)$ spécifiques, non-linéaires. L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts fondamentaux de système photovoltaïque. On commencera tout d'abord par la compréhension de principe de conversion photovoltaïque. Ensuite, on présentera la Constitution d'un système de pompage photovoltaïque et enfin on citera les différents systèmes de pompes existants, sans stockage d'énergie électrique et avec batterie.

1.2) Définition de l'énergie photovoltaïque

Le terme est composé du mot grec ancien " photos " qui signifie lumière et de "volta" nom de famille du physicien italien (Alessandro volta), qui définissait la volt comme l'unité de mesure de la tension électrique. L'énergie photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur (le silicium, le CdTe, ou Tellure de Cadmium, etc.) d'un photon en électron. [3]

1.3) Historique de l'effet photovoltaïque

1839 : le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

✓ 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi -conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

- ✓ 1954: trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- ✓ 1958 : une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- ✓ 1973 : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- ✓ 1983 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.
- ✓ La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.[4]

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. [4]

1.4) Principe de conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée [4]. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un paire électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les

électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule [1], voir la figure (1.1).

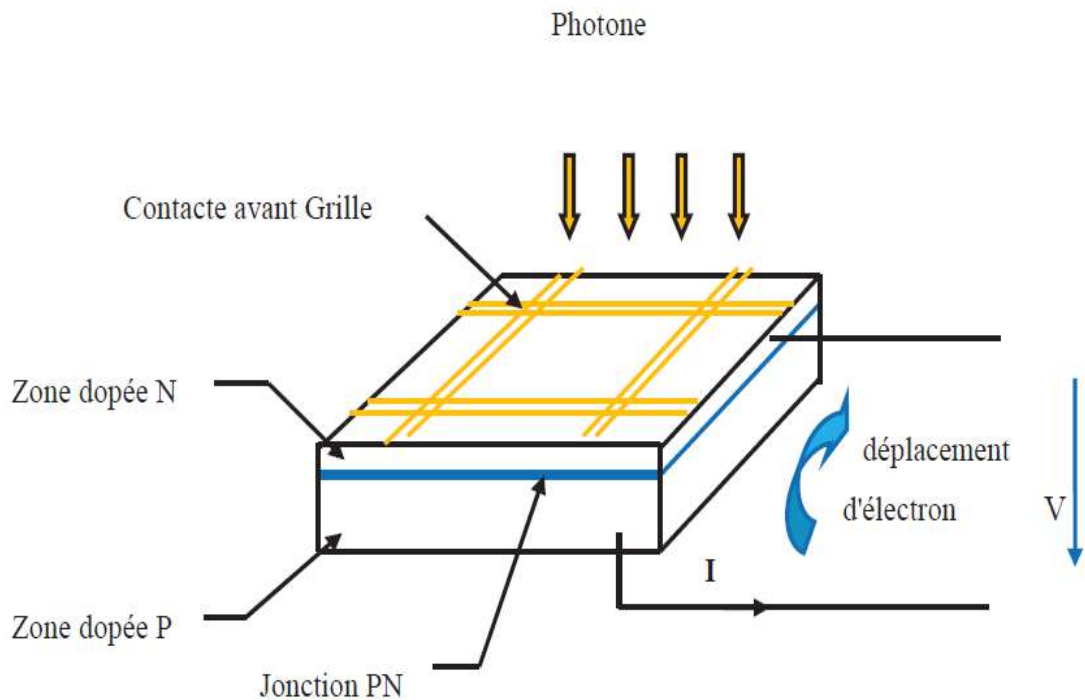


Figure (1.1) Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque [1].

1. 5) Constitution d'un système de pompage photovoltaïque

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant de l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable. La performance du pompage photovoltaïque dépend des caractéristiques du site (ensoleillement, température, obstacles géographiques), du rendement des modules photovoltaïque, mais aussi des caractéristiques des autres équipements (modules photovoltaïque, onduleur, moteur, pompe, etc..).

Le système de pompage photovoltaïque est généralement composé de :

- Le générateur photovoltaïque
- L'électronique de commande et de contrôle
- Le groupe électropompe
- La partie stockage le cas échéant

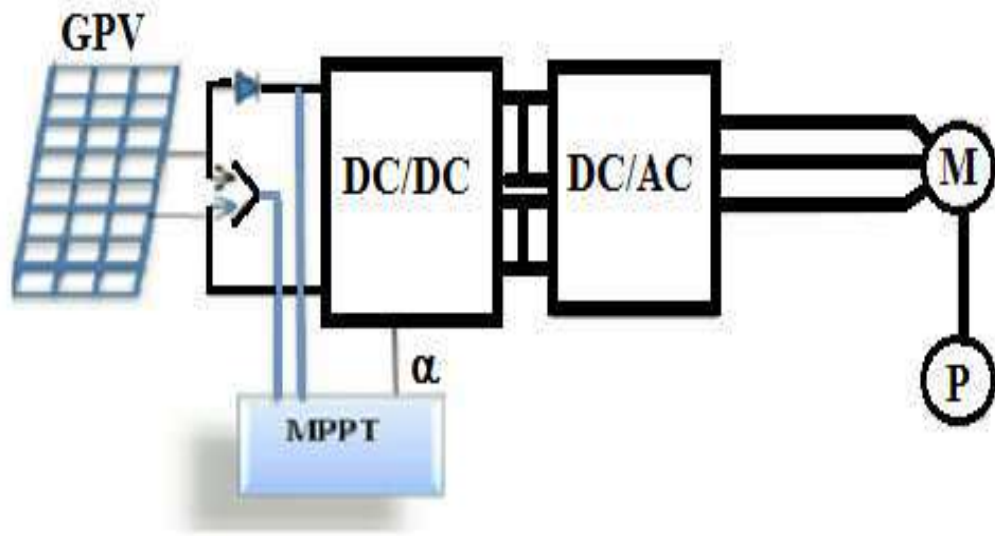


Figure (1.2) : schéma qui représente les différents composants d'un système photovoltaïque

1.5.1) Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque peut être constitué d'un ou plusieurs modules photovoltaïques appelé champ photovoltaïque destiné à produire de l'énergie électrique à partir du rayonnement solaire.

En effet, le champ photovoltaïque est une association en série et parallèle de modules photovoltaïques selon la puissance et la tension d'utilisation. Sa caractéristique (I-V) est similaire à celle d'un module et les cellules sont protégées par des diodes série (anti-retour) et des diodes parallèle (by-pass). Il constitue la surface de captage de l'énergie solaire et de production d'électricité. [5]

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui convertissent les irradiations provenant du soleil en électricité à courant continu. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium mono ou poly cristallin, amorphe, tellure de Cadmium (CdTe), et d'Arséniure de Gallium (GaAs).

Les caractéristiques d'un module photovoltaïque sont :

- ✓ **La puissance crête PC :** puissance électrique maximum que peut fournir le module dans la condition standard (25°C et un éclairement de 1000W/m²).
- ✓ **La caractéristique I (V) :** courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- ✓ **Tension à vide V_{oc}** : tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairage « plein soleil ».
- ✓ **Courant de court circuit I_{cc}** : courant débité par un module en court circuit pour un éclairage « plein soleil ».
- ✓ **Point de fonctionnement optimale (U_m, I_m)** : lorsque la puissance de crête est maximale en « Plein soleil », $P_m = U_m \cdot I_m$.
- ✓ **Rendement maximal** : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- ✓ **Le facteur de forme** :
$$ff = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}}$$

1.5.2) Electronique de commande et contrôle

Le dispositif de commande et de contrôle est assuré par un onduleur.

1.5.2.1) Adaptateur de charge

Les courbes de caractéristiques courant-tension du groupe motopompe et du générateur solaire peuvent être très variables. En fait, selon l'instant de la journée, le type de pompe utilisée et les conditions d'utilisation du forage, le moteur de la pompe ne fonctionnera pratiquement jamais au point maximal (P_m) du générateur PV durant la journée. Nous allons voir au chapitre 3 que l'adaptateur de charge (maximum power point tracking ou MPPT) est un dispositif électronique permettant de varier le point de fonctionnement du champ. L'adaptateur de charge sera particulièrement nécessaire au démarrage d'une pompe volumétrique, en augmentant la tension de fonctionnement acceptable par le moteur. Il permettra également de meilleurs résultats du groupe motopompe lors d'ensoleillements faibles [10].

1.5.2.2) Convertisseur DC/AC (onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite. Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrée et de sortie fixe. Son coût assez élevé et la nature variable de l'ensoleillement et du couple résistant des pompes en général ont longtemps exclu l'emploi des moteurs à courant alternatif pour le pompage solaire [10].

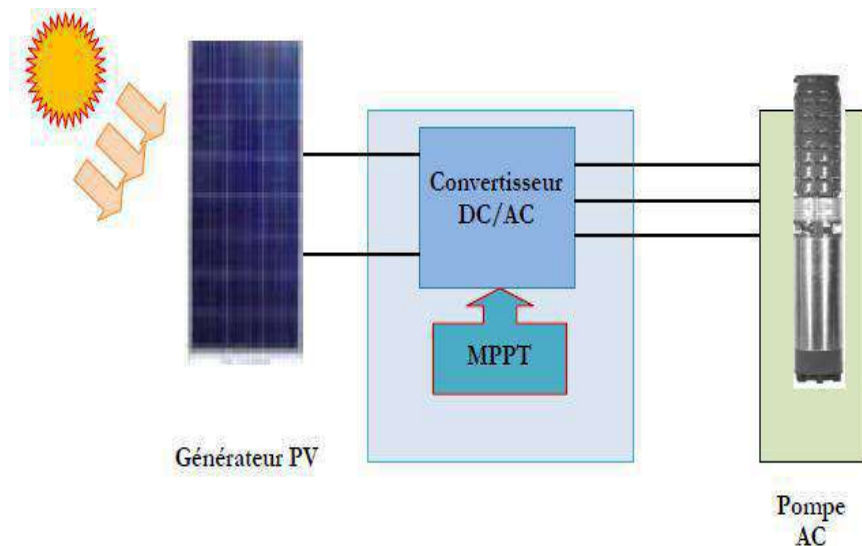


Figure (1.3) :Couplage via convertisseur DC/AC

Les onduleurs de pompage sont en général à fréquence (f) variable afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe. Dans ce cas, le rapport de la tension alternative (U) sur la fréquence ($U/f = \text{constant}$). La fréquence du courant alternatif est directement proportionnelle à l'intensité de l'ensoleillement. On distingue plusieurs types d'onduleurs suivant la qualité du signal de sortie :

- Onduleur à onde sinusoïdale modifiée, en marche d'escalier, générateur d'une onde proche de l'onde sinusoïdale.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (PWM, *pulse-width modulation*).
- Onduleur à onde sinusoïdale.
- Onduleur à commande (MLI VM):

L'onduleur à onde sinusoïdale modifiée peut supporter de fortes surcharges et sa distorsion harmonique est relativement faible, de sorte qu'il n'introduit que peu de pertes par effet Joule susceptibles de causer l'échauffement des moteurs. Il est souvent employé avec de petits systèmes de pompage. L'onduleur à modification de largeur d'impulsion utilise des commutateurs électroniques rapides pour varier la largeur d'impulsion. En utilisant un filtre à la sortie, l'onde sinusoïdale peut être reconstruite. Ces onduleurs relativement peu coûteux sont très efficaces, fonctionnant à près de 90%-95% de rendement. Ils sont employés par la plupart des systèmes de pompage à courant alternatif. L'onduleur à onde sinusoïdale n'a pas la capacité de surcharge des précédents onduleurs et son coût est relativement élevé. Il est peu employé pour les systèmes de pompage. [10].

1.6) Groupe moteur-pompe

Un groupe motopompe est un ensemble composé d'un moteur électrique entraînant une pompe hydraulique.

1.6.1) Moteurs:

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais nous allons voir que l'évolution des convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout, moins cher. [7] .

1.6.1) Moteur à courant continu:

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation. Son principal défaut réside dans l'ensemble balais/ collecteur rotatif qui s'use, il est complexe à réaliser et consomme de l'énergie. [8]

1.6.2 Moteur à courant alternatifs :

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilos Watts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de 120°) utilisé par les distributeurs d'électricité. Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- - Les moteurs synchrones.
- - Les moteurs asynchrones.

a) Moteurs synchrones :

- La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors « Alternateur ». Mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1500 MW. Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des

courants qui les traversent [8].

b). Moteurs asynchrones :

- La machine asynchrone, connue également sous le terme d'origine anglo-saxonne de « machine à induction », est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme anglais provient des courants induits dans le rotor par induction magnétique. Le terme « asynchrone » provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent [8]. L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé), plus robuste moins cher et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïques. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur [9].

1.6.2) Pompes photovoltaïque

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrivons plus loin, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : la pompe à aspiration et la pompe à refoulement. La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau [10]. Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur. [6]

1.6.2.1) Pompes centrifuges

Les pompes centrifuges utilisent les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie mécanique d'un moteur est transmise au fluide. La vitesse donnée au fluide va donner de l'énergie cinétique à celui-ci. L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie de pression. Les caractéristiques des pompes centrifuges sont les suivantes.

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage ; cela est particulièrement intéressant dans le cadre de l'utilisation de modules photovoltaïques car la pompe tourne même par très faible ensoleillement.
- Grâce à son extrême simplicité, le système peut être couplé directement sur une machine tournante : moteur électrique, essence, diesel...
- Il n'y a pas ou presque pas d'aspiration : elles doivent être amorcées pour fonctionner, de manière à éviter tout risque de destruction si fonctionnement à sec.
- Elles peuvent être aussi bien immergées que disposées en surface. [6]

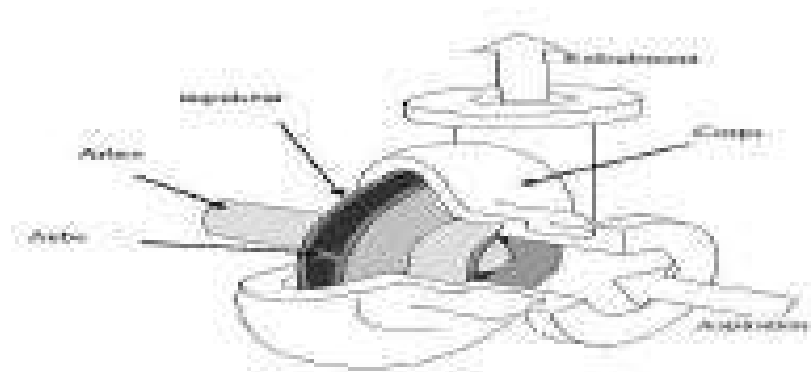


Figure (1.4) :Pompe centrifuge [11].

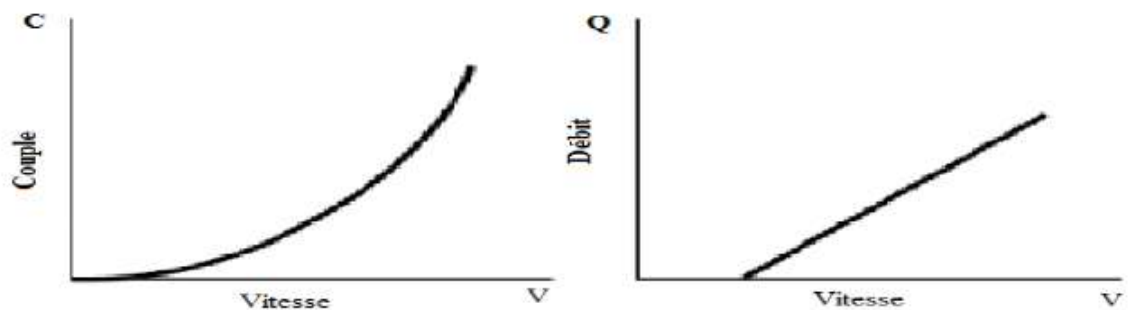


Figure (1.5) :Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge [11].

1.6.2.2) Pompes volumétriques

Les pompes volumétriques utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palette et à engrenage. Leurs principaux atouts sont les suivants :

- elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m³/h) et aux grandes hauteurs.

- elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont auto-amorçantes.
- le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique $I = f(V)$ de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable. Pour pallier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.

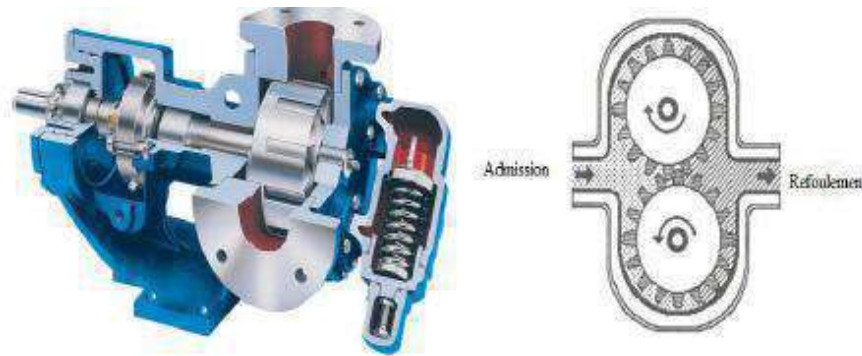


Figure (1.6) :Pompe volumétrique [11].

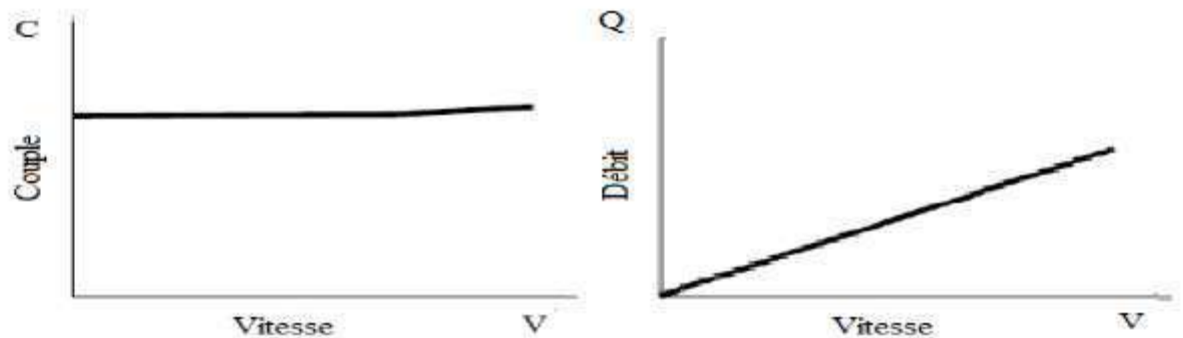


Figure (1.7) :Caractéristiques d'une pompe volumétrique [11].

1.7 Stockage

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. Le réservoir ne requiert pas d'entretien complexe et est facile à réparer localement.

Aussi, le système de stockage avec batterie génère un coût additionnel, des problèmes de maintenance des batteries et de l'obligation les remplacer après 3 à 5 ans d'usage. De plus le rendement énergétique est dégradé avec des accumulateurs. Dans le cas de notre étude, nous

retenons la méthode de pompage au fil de soleil car la demande en eau n'est pas régulière dans la localité d'étude, elle se fait notamment pendant la journée. [5]

1.7.1) Pompage avec stockage électrochimique (batteries) :

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage. Cependant, le stockage en photovoltaïque apparaît actuellement comme le maillon faible et le plus coûteux. Lorsqu'un stockage de l'eau avec un réservoir n'est pas possible, l'installation de pompage photovoltaïque peut fonctionner sur batteries [10].

1.7.2) Pompage au fil de soleil :

Pour éviter un coût supplémentaire de l'installation, la plus part des systèmes de pompage photovoltaïque fonctionnent au ' fil du soleil ' où le moteur d'entraînement est directement couplé au générateur sans stockage d'énergie (la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'éclairement). Cet arrangement est bien adapté aux charges non critiques telles que les pompes, qui ne nécessitent pas une opération continue durant toute la journée, aussi, les horaires de cette production ne sont pas compatibles avec les horaires de la majorité des activités agricoles. (Elles commencent généralement à débiter vers 8h et fonctionnent à leur maximum de 11h à 13h et s'arrêtent vers 17h, soit environ 8 heures de fonctionnement par jour) [12]. Le pompage au fil du soleil n'est pas adapté aux régimes particuliers (applications domestiques à débit faible, applications particulières avec une hauteur manométrique totale (HMT) élevée,...). En revanche, le système au fil du soleil fonctionne parfaitement pour le pompage de l'eau qui est alors directement stockée dans un réservoir.

1.8) Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire, sur les éléments du système de pompage photovoltaïque (panneau, moteur, pompe, convertisseur (hacheur/onduleur), et sur la modélisation des différents constituants qui feront l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 2 :
Modélisation du
système de pompage
photovoltaïque

2.1) Introduction

Les principales composantes d'une chaîne de pompage photovoltaïque seront modélisées dans l'environnement Matlab/Simulink à savoir :

- Le générateur photovoltaïque
- Le convertisseur DC/AC
- la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)
- La pompe centrifuge

Dans nos jours, il nous semble que personne ne peut s'en douter sur l'importance de l'eau et de l'énergie pour les besoins humains. Avec les avancées technologiques, le besoin en énergie ne cesse d'augmenter. Ce problème d'énergie est encore plus sensible dans les sites isolés où l'utilisation des ressources classiques s'avère souvent très coûteuse [1]. Comme nous le savons, la plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon ou encore l'énergie nucléaire. Les études et les prévisions récentes nous alertent que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à l'épuisement total de ces réserves. En plus, tout le monde est mondialement convaincu par le danger de ce processus sur l'environnement. A partir de ce constat, il a été nécessaire de chercher d'autres énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque. Ce type d'énergie n'est pas seulement gratuit et inépuisable, mais aussi très propre pour l'environnement.

2. 2) Modélisation du générateur photovoltaïque

Pour développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire un choix judicieux des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. Pour cela, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Dans la suite nous présentons deux modèles d'une cellule photovoltaïque, à savoir le modèle idéal et le modèle réel.

2.2.1) Model idéal d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque peut être étudiée à partir d'un circuit équivalent donné par la figure(2.1) composé d'un générateur de courant et d'une diode en parallèle.

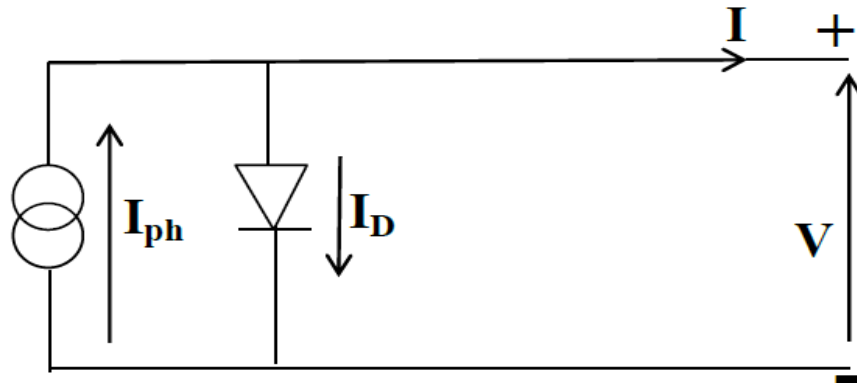


Figure (2.1) :Schéma électrique idéal d'une cellule photovoltaïque

Le courant généré par la cellule PV est donne

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d \tag{2.1}$$

I_d : courant traversant la diode.

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{cc} avec $V_{pv}= 0$, courant de court-circuit.

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i * (T_C - T_{ref})] * \frac{E}{E_{ref}} \tag{2.2}$$

K_i : Coefficient de température du court-circuit de la cellule (Ampères / K)

T_C : Température de la cellule en Kelvin

E : L'éclairement absorbé par la cellule

E_{ref} : L'éclairement de référence (1000 w/m²)

$$I_d = I_0 (e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \tag{2.3}$$

I_0 : Courant de saturation de la diode

$$V_t = \frac{BKT}{q} \tag{2.4}$$

V_t : Tension thermique

B : Facteur d'idéalité

K : Constant de Boltzmann (1,38.10⁻²³J/K)

q : Charge de l'électron (1,6.10⁻¹⁹C)

2.2.2) Modèle réel d'une cellule photovoltaïque

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_P [12]

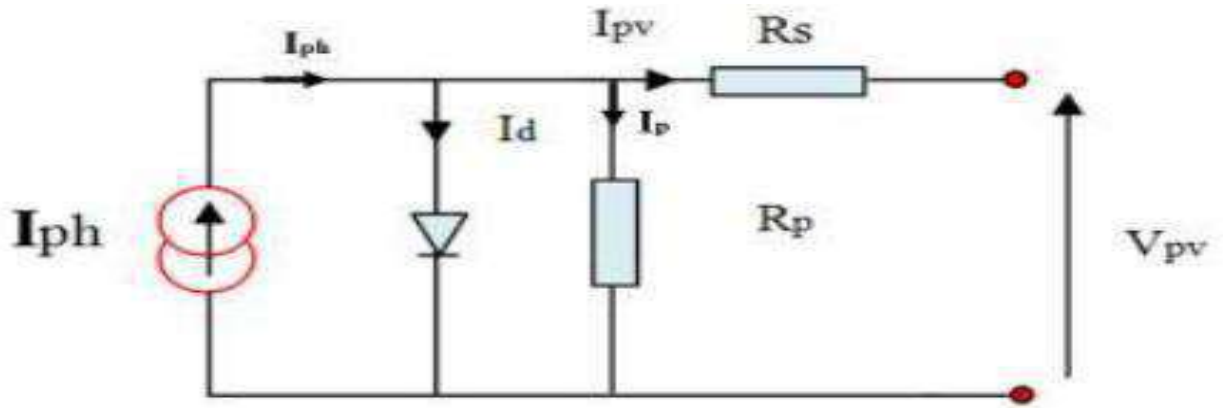


Figure (2.2) : Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque

On définit :

La résistance shunt « R_p » en parallèle avec la diode. (en Ω)

La résistance série « R_s ». (En Ω)

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (2.5)$$

I_{PV} : Courant générer par la cellule photovoltaïque

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

I_d : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

$$I_0 = I_{0r} \left(\left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{E_g}{BK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} \right) \quad (2.7)$$

I_{0r} : Le courant de court- circuit de la cellule à la température et l'éclairement de référence

T: Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}K$]

B : Facteur d'idéalité de la jonction

E_g : Énergie de gap [ev]

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi- conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules

V_{pv} : La tension de sortie

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p

R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n et sur les coins de cellule

$$I_p = \frac{V_{PV} + I.R_s}{R_p} \quad (2.8)$$

En substituant les équations (2.6 ; 2.8) dans l'équation (2.5), le courant I_{PV} devient :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + I.R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I.R_s}{R_p} \quad (2.9)$$

2.3) Simulation d'une cellule PV sous Matlab /Simulink :

➤ présentation du module -(Apollo Solar Energy ASEC-215G6568) :

-Pour faire la simulation d'un générateur PV on a choisi le module (Apollo Solar Energy ASEC-215G6568) dont ces caractéristiques sont les suivants :

- Puissance max de $P_{mp} = 215,0088 \text{ Wc}$

- Tension max de $V_{mp} = 24,24 \text{ V}$

- Courant max $I_{mp} = 8,87 \text{ A}$

- Courant de court-circuit $I_{ccp} = 9,18 \text{ A}$

- Tension de circuit ouvert $V_{cop} = 30,26 \text{ V}$

- Rendement de 15.71%.

À température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards ($E = 1000 \text{ w/m}^2$, $T = 25^\circ \text{c}$), l'allure des caractéristiques courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ est donnée par les figures (2.3) et (2.4) respectivement

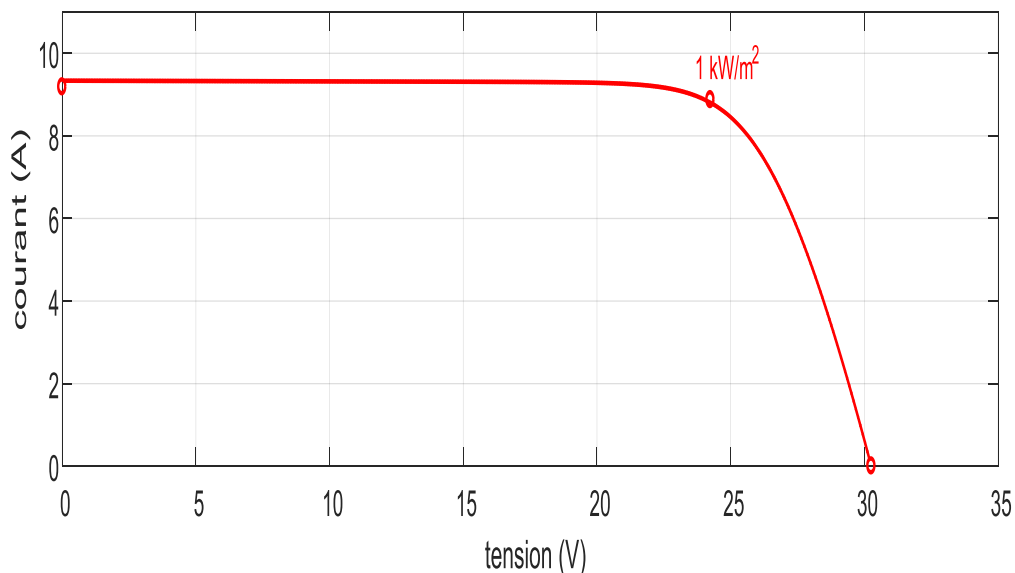


Figure (2.3) : Caractéristique courant-tension

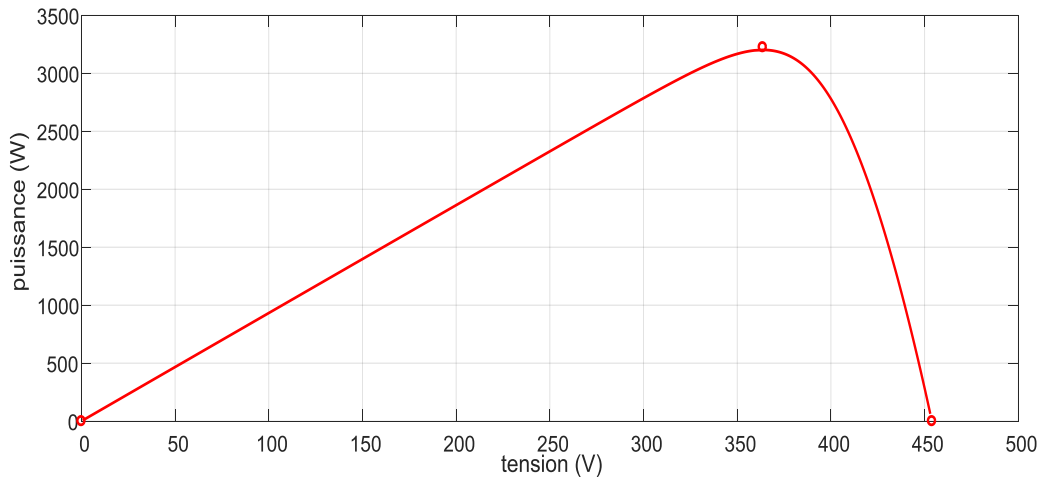


Figure (2.4) : Caractéristique puissance-tension

2.4) Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

2.4.1) Influence de l'éclairement

Les figures (2.5, 2.6) montrent l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(v)$ à une température constante. Nous avons maintenu une température constante (25°C) à différents éclairements ($1000\text{W}/\text{m}^2$, $800\text{W}/\text{m}^2$, $600\text{W}/\text{m}^2$, $500\text{W}/\text{m}^2$)

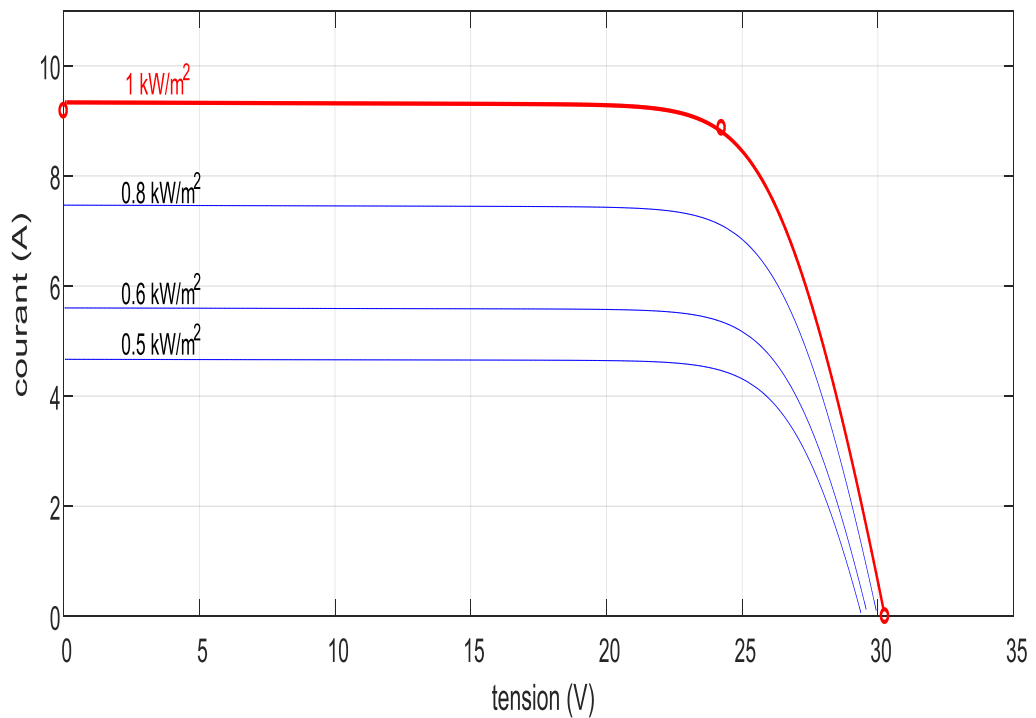


Figure (2.5) L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$

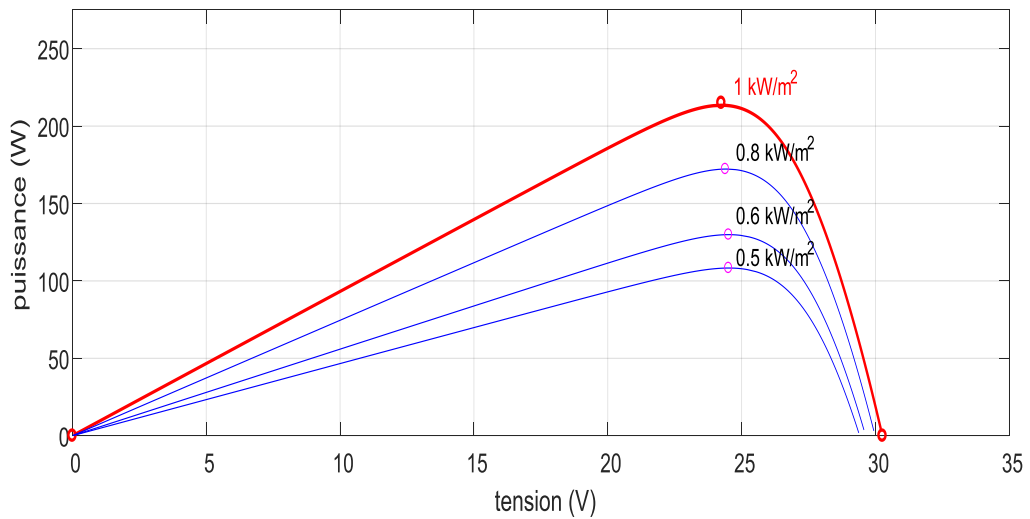


Figure (2.6) : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert varie légèrement. Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté (figure 2.6).

2.4.2) Influence de la température

Les figures (2.7, 2.8) montrent l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(v)$ à un éclairement constant ($100W/m^2$) pour différentes températures ($25^{\circ}C, 40^{\circ}C, 50^{\circ}C, 70^{\circ}C$).

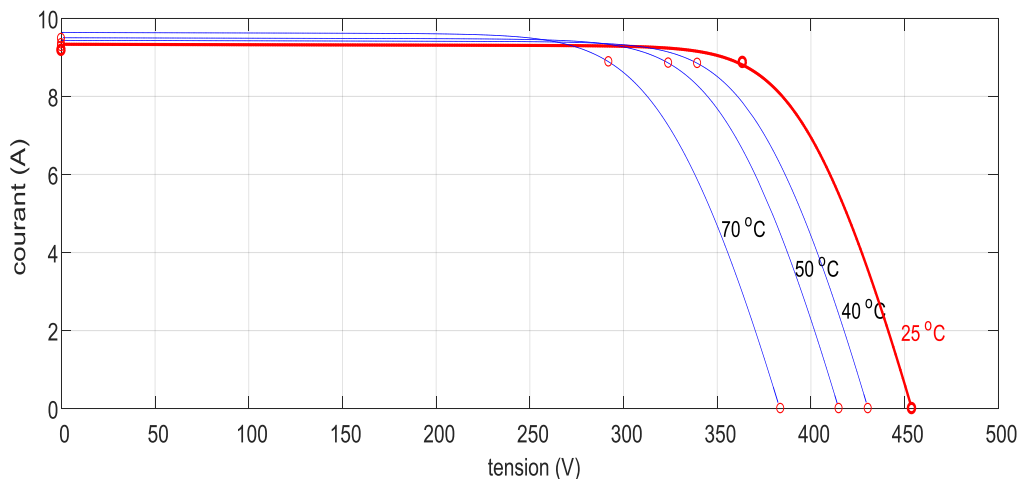


Figure (2.7) : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-

circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente.

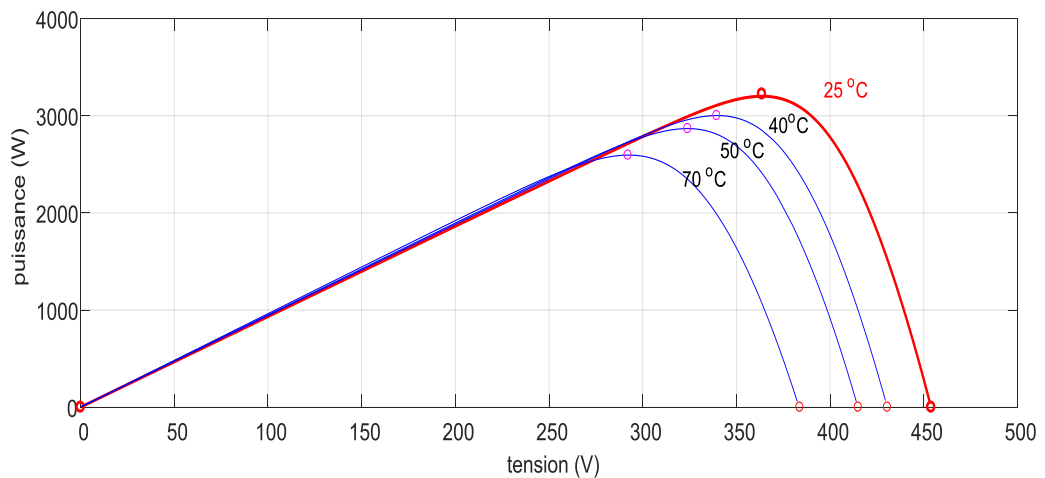


Figure (2.8) : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

D'après la figure (2.8) l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique $P = f(V)$ fait diminuer légèrement la puissance et la tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque.

2.5) Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile et qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés. La modélisation d'un moteur synchrone à aimants permanents est identique à celle d'une machine synchrone classique sauf que l'excitation en courant continu attachée au rotor est remplacée par le flux de l'aimant [13]. Donc, le modèle est issu du modèle de la machine synchrone classique [14].

Les enroulements statoriques sont le plus souvent connectés en étoile à neutre isolé. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor.

Afin de simplifier la modélisation de la machine, les hypothèses usuelles données dans la majorité des références sont adoptées comme suit (Bose, 2002), (Arroyo, 2006), (Nahid, 2001), (Lipo, 1996) :

- l'effet d'amortissement au rotor est négligé,
- le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé,
- la répartition des forces magnétomotrices (FMM) est sinusoïdale,

- les phénomènes d’hystérésis et les courants de Foucault sont négligés,
- les irrégularités de l’entrefer dues aux encoches statoriques sont ignorées.

2.5.1) Mise en équation de la machine synchrone

Pour établir des relations simples entre les tensions d'alimentation du moteur et ces courants, nous considérons le modèle de la machine synchrone idéal suivant : [15].

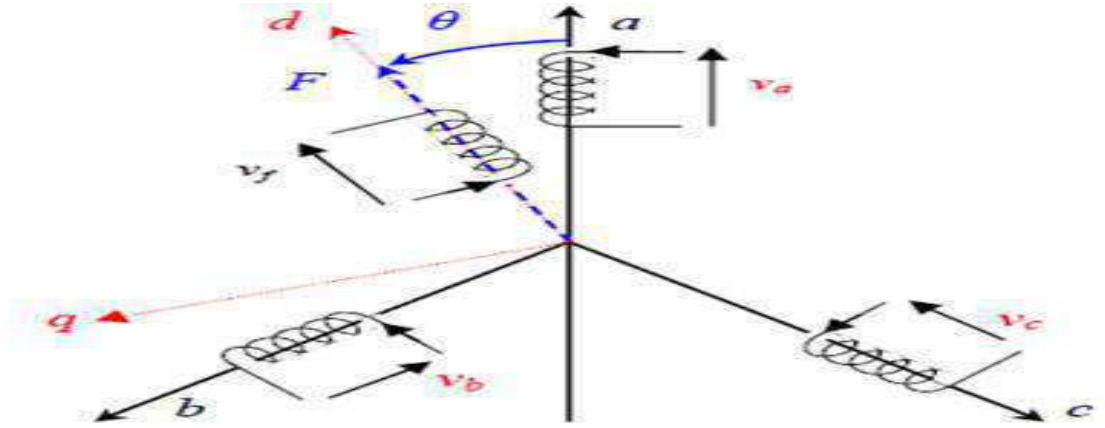


Figure (2.9) :Schéma de la machine synchrone

2.5.2) Equations électriques

Les équations électriques de la MSAP sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

2.5.3) Equations magnétiques

Les relations entre flux et courants s’écrivent sous forme matricielle comme suit :

$$[\phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sf}][I_f] \tag{2.11}$$

On désigne par :

$[L_{ss}]$: Matrice d’inductances statoriques. Elle contient des termes constants que nous regroupons dans $[L_{s0}]$ et des termes variables dépendant de θ , que nous regroupons dans $[L_{s2}(\theta)]$

2.5.4) Transformation de Park

Pour éliminer θ de la matrice $[L_{s2}]$; et afin que les algorithmes de commande traitent des grandeurs électriques continues, les enroulements statoriques (a, b, c) sont remplacés par deux enroulements (d, q) en quadrature, figure (2.10). Ce passage est obtenu par la transformation

de Park. [15]

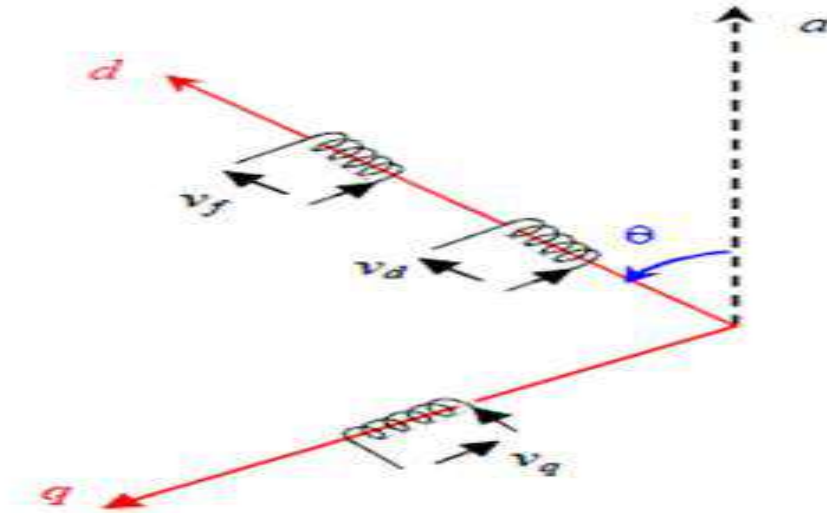


Figure (2.10) :Schéma de la machine synchrone dans le référentiel (d, q)

La matrice de passage notée $P(\theta)$:

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.5.5)Modèle de la MSAP dans le référentiel de Park

La transformation de Park ramène les équations statoriques (2.10) dans un référentiel lié au rotor. Donc la machine équivalente est identique à une machine à courant continu ayant l'enroulement f comme inducteur et ayant deux induits en quadrature.

Alors, le modèle de la MSAP après la transformation de Park est : [15].

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d s & -P\omega L_q \\ P\omega L_d & R_s + L_q s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ P\omega \phi_f \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Avec la même procédure de calcul pour les équations magnétiques et faisant usage du calcul matriciel précédent et en supposant que le système est équilibré, on aura :

$$\begin{cases} \phi_d = L_d I_d + \phi_f \\ \phi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (2.14)$$

ϕ_f : Représente le flux des aimants.

2.5.6) Equations mécaniques

L'équation mécanique développée par la machine est donnée par la relation suivante :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (2.15)$$

Avec: f , J , C_r et Ω définissant respectivement le coefficient d'amortissement, le moment d'inertie du rotor, le couple de charge et la vitesse mécanique de rotation.

Le couple électromagnétique C_e est exprimé par :

$$C_e = \frac{3}{2} P \left((L_d - L_q) I_d I_q + \phi_f I_q \right) \quad (2.16)$$

2.6) Avantages et inconvénients de la MSAP

a) Avantages de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines. [

- Puissances massiques importantes et élevées.
- Absence de contacts glissants.
- Pas des pertes résistives au rotor ; ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due aux pertes dans la machine. Ainsi, il y a suppression d'équipement de refroidissement au rotor.
- Suppression des bagues et des balais, ce qui réduit les problèmes de maintenance.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement en survitesse.

b) Inconvénients de la MSAP

Comme inconvénients de la MSAP on cite :

- Coût élevé des aimants.
- Un problème de tenu à la température des aiment
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps.

2.7) Commande vectorielle

2.7.1) Principe de la commande vectorielle de la MSAP

Le principe du découplage permet de modéliser la machine synchrone comme une machine à courant continu, par application de cette technique de commande. Ceci concilie les avantages des propriétés du moteur à courant continu et de l'absence du collecteur mécanique.

Le contrôle du couple d'une machine alternative nécessite un contrôle en phase et en amplitude des courants d'alimentation d'où le nom de contrôle vectoriel. Pour réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée, il est nécessaire

de maintenir le courant I_d nul et de réguler la vitesse ou la position par le courant I_q via la tension V_q . Physiquement, cette stratégie revient à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation[15].

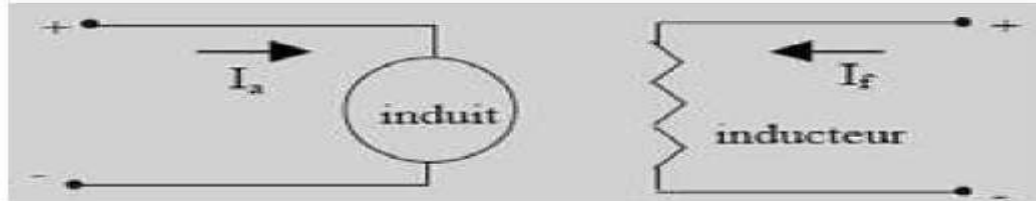


Figure (2.11) : Machine à Courant Continu

En utilisant l'équation (2.17) l'expression du couple devient comme suit :

$$C_e = P \phi_f I_q$$

La commande vectorielle sert alors à contrôler les deux composantes (I_d) et (I_q) du courants statoriques en imposant les tensions (V_d) et (V_q) qui conviennent. Pour imposer ces tensions il suffit d'imposer les tensions de référence (V_{qref}) et (V_{dref}) à l'entrée de l'onduleur. A l'aide des régulateurs, nous allons obtenir des courants de référence (I_{qref}) et (I_{dref}).

2.7.2) Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

2.7.2.1) Avantages de la commande vectorielle

- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

2.7.2.2) Inconvénients de la commande vectorielle

- Le contrôle vectoriel par orientation du flux rotorique présente un certain nombre d'inconvénients :
- Très chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP).
- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique
- Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout à basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction.

2.8) Régulation

Les régulateurs ont, d'une part, la tâche de stabiliser le circuit de réglage, et d'autre part, ils viennent pour assurer une meilleure précision et un temps de réponse meilleur. Les

régulateurs standards de type *PI* ou *PID* sont les plus utilisés dans le domaine des réglages industriels [6].

2.8.1) Régulateur de courant

$$V_d^* = R \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} = (R + S \cdot L_d) \cdot i_d \tag{2.18}$$

$$i_d = \frac{1}{R+S \cdot L_d} \cdot V_d^* \tag{2.19}$$

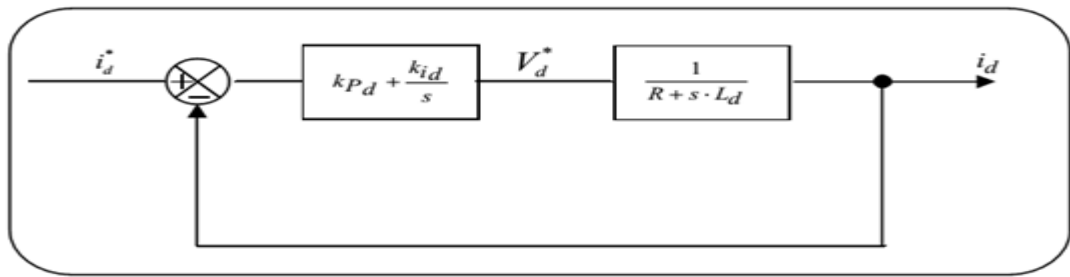


Figure (2.12) :Schéma fonctionnel du régulateur de courant

La fonction de transfert du système en boucle ouverte F_{BO} est :

$$F_{BO} = \left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{S} \right) \cdot \left(\frac{1}{R+S \cdot L_d} \right) = \frac{S \cdot K_{pd} + K_{id}}{S(R+S \cdot L_d)} \tag{2.20}$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée F_{BF} est :

$$F_{BF} = \frac{F_{BO}}{1+F_{BO}} = \frac{S(R+S \cdot L_d) \frac{1}{L_d}}{S^2 + \left(\frac{K_{pd} + R}{L_d} \right) S + \frac{K_{id}}{L_d}} \tag{2.21}$$

Le polynôme caractéristique du système en boucle fermée est :

$$P = S^2 + \frac{R+K_{pd}}{L_d} \cdot S + \frac{K_{id}}{L_d} \tag{2.22}$$

En imposant au polynôme caractéristique en B-F deux pôles complexes conjugués :

$$s_1 = \rho(-1 + j)$$

$$s_2 = \rho(-1 - j)$$

$$P(s) = (s - s_1) \cdot (s - s_2) \quad \hat{=} s^2 + 2 \cdot \rho \cdot s + 2 \cdot \rho^2 \tag{2.23}$$

L'identification terme à terme des deux équations (2.23) et (2.24) nous donne :

$$\left(\frac{R+K_{pd}}{L_d} \right) = 2\rho \Rightarrow K_{pd} = 2 \cdot \rho \cdot L_d - R \tag{2.24}$$

$$\frac{K_{id}}{L_d} = 2\rho^2 \Rightarrow K_{id} = 2 \cdot L_d \cdot \rho^2 \tag{2.25}$$

De la même façon on trouve :

$$K_{pq} = 2 \cdot \rho_S \cdot L_d - R \quad (2.26)$$

$$K_{iq} = 2 \cdot L_d \cdot \rho^2 \quad (2.27)$$

2.8.2) Régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple électromagnétique, l'équation mécanique donne :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e - f_v \cdot \Omega \quad (2.28)$$

$$\frac{J}{P} \cdot \frac{d\omega}{dt} = C_e - \frac{f_v}{P} \cdot \omega \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = \frac{P}{J} \cdot (C_e \omega) \quad (2.29)$$

$$s \cdot \omega = \frac{P}{J} \cdot \left(C_e - \frac{f_v}{P} \cdot \omega \right) \Rightarrow \omega = \frac{P}{s \cdot J + f_v} \cdot C_e \quad (2.30)$$

La chaîne de régulation de vitesse est donnée par le schéma suivant :

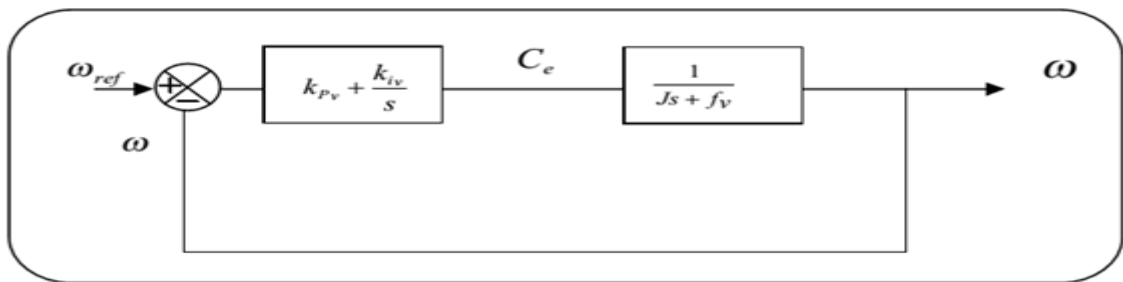


Figure (2.13) : Schéma fonctionnel du régulateur de vitesse

La fonction du transfert du système en boucle ouverte est :

$$T_{BO}(s) = \left(K_{PV} + \frac{K_{iv}}{s} \right) \cdot \left(\frac{P}{s \cdot J + f_v} \right) = \frac{(K_{iv} + s \cdot K_{PV}) \cdot P}{s \cdot (s \cdot J + f_v)} \quad (2.31)$$

La fonction du transfert du système en boucle fermée est :

$$T_{BF}(s) = \frac{T_{BO}(s)}{1 + T_{BO}(s)} \quad (2.32)$$

Le polynôme caractéristique est

$$P(s) = s^2 + \left(\frac{f_v + P \cdot K_{PV}}{J} \right) \cdot s + \frac{P}{J} K_{iv} \quad (2.33)$$

En imposant au polynôme caractéristique en B-F deux pôles complexes conjugués :

$$P(s) = s^2 + 2 \cdot \rho \cdot s + 2 \cdot \rho^2 \quad (2.34)$$

L'identification terme à terme des deux équations (2-33) et (2-34) nous donne :

$$K_{iv} = 2 \cdot \rho^2 \cdot \frac{J}{P} \quad (2.35)$$

$$K_{PV} = \frac{1}{P} \cdot (2 \cdot \rho \cdot J - f_v) \quad (2.36)$$

2.8.3) Description du système global :

La structure de la commande est constituée de l'association d'une machine synchrone à aimant permanent dans le repère (d, q) alimenté par un onduleur de tension. La référence du courant direct i_d^* est fixé à zéro et la sortie du régulateur de vitesse constitue la consigne du couple ou de sont i_q^*

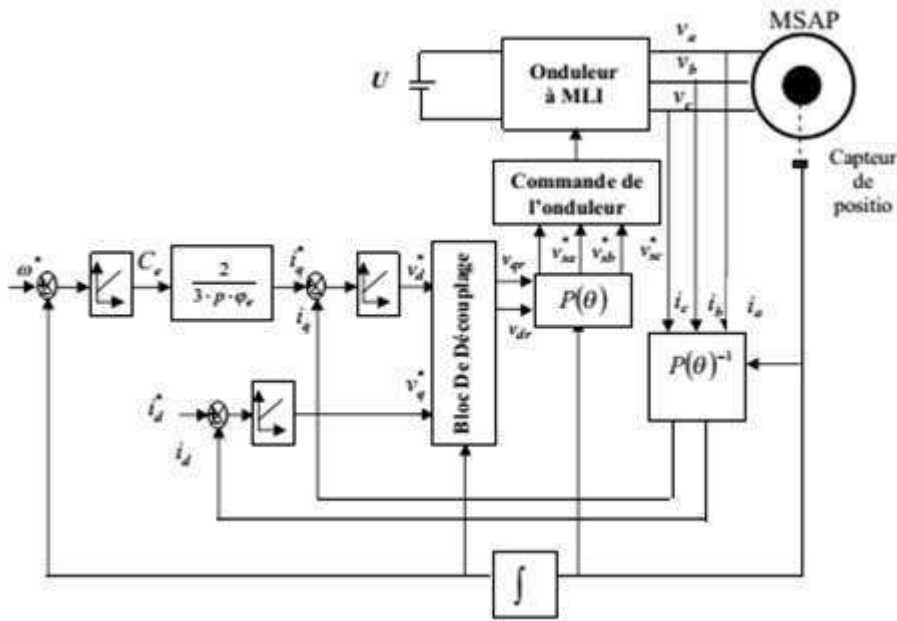


Figure (2.14) :Schéma de la commande vectorielle du MSAP

Les références des courants direct i_d^* et i_q^* sont comparées séparément aux courants réelles de la machine i_d et i_q , les erreurs sont appliquées à l'entées des régulateurs, un bloc de découplage génère les tensions de références v_{dr} et v_{qr} , ces tensions après passage par la transformation de PARK servent de référence des tensions $(V_{sa}^*, V_{sb}^*, V_{sc}^*)$ pour la commande de l'onduleur [6].

Les tensions de sortie de l'onduleur qui alimente le MSAP sont contrôlées par une technique de modulation de largeur d'impulsion MLI vectorielle qui permet un réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie.

2.9) Modélisation du convertisseur DC/AC:

Pour modéliser l'onduleur de tension Figure. (2.15) on considère son alimentation par les panneaux PV, supposée d'être de deux générateurs de F.EM égale à $v_{dc} = \frac{u_0}{2}$ connectés entre eux par un point noté n_0 .

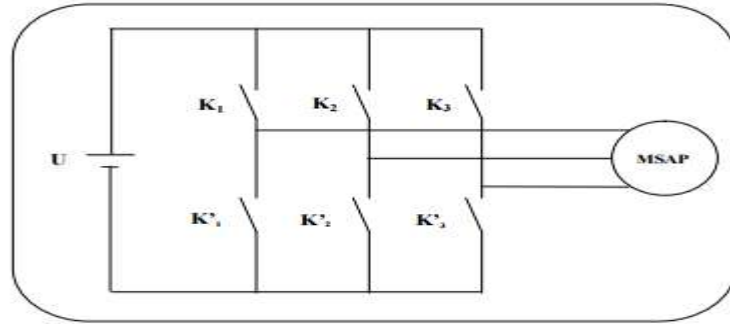


Figure (2.15) :Onduleur de tension triphasé

Le moteur a été modélisé à partir des tensions simples que nous notons V_{an}, V_{bn}, V_{cn} l'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques s_i ($i=a, b, c$). On appelle K_i et K'_i les transistors, on a :

Si $s_i = +1$ alors K_i est passant et K'_i est ouvert,

Si $s_i = -1$, alors K_i est ouvert et K'_i est passant

Dans ces conditions on peut écrire les tensions V_{in0} en fonction des signaux de commande s_i ($i=a, b, c$) et en tenant compte du point fictif n_0 représenté sur la figure (2.15) .

$$V_{in0} = s_i v_{dc} \tag{2.37}$$

Soit "n", le point neutre du côté alternatif (MSAP), alors les trois tensions composées: U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} sont définies par les relations suivantes

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \tag{2.38}$$

La charge constituée par le moteur est équilibrée ($V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$), on aura donc :

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{1}{3} [U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} &= \frac{1}{3} [U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} &= \frac{1}{3} [U_{ca} - U_{bc}] \end{aligned} \tag{2.39}$$

En faisant apparaître le point n_0 , les tensions entre phases peuvent s'écrire :

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} &= V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} &= V_{cn0} - V_{an0} \end{aligned} \tag{2.40}$$

En remplaçant (2-39) dans (2.40) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an0} \\ V_{bn0} \\ V_{cn0} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Des relations suivantes :

$$\begin{aligned} V_{an0} &= V_{an} + V_{nn0} \\ V_{bn0} &= V_{bn} + V_{nn0} \\ V_{cn0} &= V_{cn} + V_{nn0} \end{aligned} \quad (2.42)$$

On peut déduire le potentiel entre les points n et n_0 :

$$V_{nn0} = \frac{1}{3} [V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (2.43)$$

L'utilisation de l'expression (2-43) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} v_{dc} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions le plus sinusoïdal possible, à cet effet, différentes stratégies de commande permettant de déterminer les trois fonctions logiques S_i (a, b, c)

2.10) MLI vectorielle (SVPWM):

L'utilisation des technologies numériques permet le recours à des stratégies de modulation triphasée spécifiques, non déduites des techniques analogiques initialement conçues en monophasé. Parmi ces techniques numériques on trouve la modulation vectorielle (ou *SpaceVector Modulation*) qui traite les signaux directement dans le plan diphasé de la transformée nommée de Concordia. La SVM est certainement la méthode de MLI la mieux adaptée au contrôle des moteurs synchrones. Contrairement à d'autres méthodes, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Un vecteur tension de contrôle est calculé globalement et approximé, sur une période de modulation T , par un vecteur tension moyen. [16] .

Cette technique de modulation repose sur la représentation d'une machine triphasée par une machine diphasée équivalente. On définit ainsi deux repères diphasés, l'un lié au stator (α - β), et l'autre lié au champ tournant (d - q), où le passage des grandeurs triphasées aux grandeurs diphasées se fait par simple projection sur les axes concernés.[16] .

Considérons l'onduleur de tension triphasé Figure (2.15). Ses six interrupteurs sont commandés de manière complémentaire deux à deux, nous avons seulement trois degrés de liberté, ayant deux états chacun: Fermé ou Ouvert. Nous pouvons alors représenter les 8 vecteurs d'états

possibles dans le plan $(\alpha-\beta)$. On peut ainsi reconstruire n'importe quelle tension \vec{V}_s en combinant ses deux vecteurs adjacents. En supposant que \vec{V}_s se trouve dans le 1^{er} secteur du plan $(\alpha-\beta)$, T_1 et T_2 sont les temps d'application de ses vecteurs adjacents : \vec{V}_1 et \vec{V}_2 respectivement.

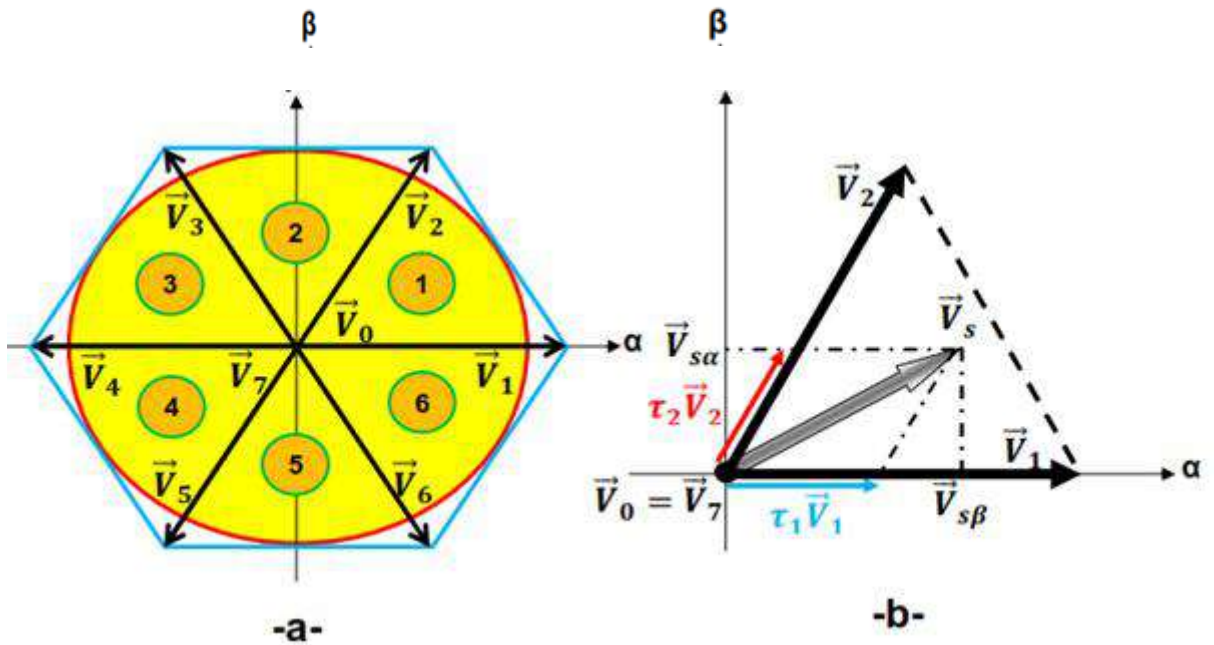


Figure (2.16) : a) Représentation des vecteurs tensions réalisables par l'onduleur
 b) Projection du vecteur à réaliser sur ses deux vecteurs adjacents

La somme des deux vecteurs \vec{V}_1 et \vec{V}_2 respectivement appliqués pendant les durées t_1 et t_2 donne donc le vecteur initial \vec{V}_s . En combinant ces deux vecteurs avec les $(\vec{V}_0$ et \vec{V}_7) et en codant par un 1 un interrupteur fermé et un zéro un interrupteur ouvert, nous pouvons reconstituer les signaux de commande à appliquer pour obtenir le vecteur \vec{V}_s souhaité, comme le montre l'exemple de la Figure. (2.16).[16].

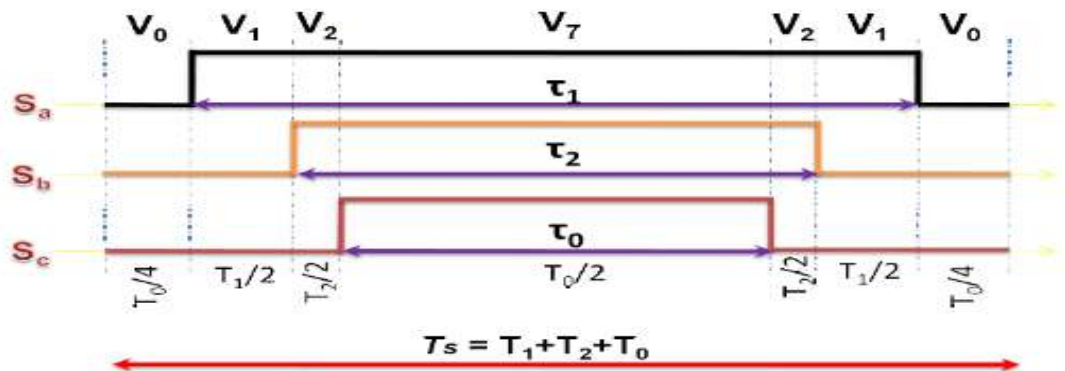


Figure (2.17) : Reconstitution des signaux de commande

2.11) Pompe photovoltaïque :

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée «pompe au fil du soleil», utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation.

2.11.1) Modélisation de la pompe centrifuge

Le dimensionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres : le débit, la vitesse et la hauteur. Celle-ci est majorée par des pertes de charges et de la pression de refoulement dans la conduite.

2.11.1.1) Hauteur manométrique totale

La hauteur manométrique totale dépend fortement de la hauteur géodésique qui est la hauteur nette de transport d'eau. De plus de la hauteur géodésique, d'autres facteurs influent sur la hauteur manométrique totale à savoir les pertes de charge linéaires (ΔH_1) et singulières (ΔH_2) dans les conduites. Cette hauteur peut être exprimée sous cette formule [17, 18, 19, 20]

$$H = H_g + \Delta H \quad (2.45)$$

2.11.1.2) Pertes de charges linéaires

Se sont les pertes d'eau dans la tuyauterie données par la formule (2.46):

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.46)$$

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

L : Longueur de la tuyauterie (m).

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

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

V : Vitesse moyenne du fluide (m/s) qui est donnée par :

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (2.47)$$

Au Q : débit (m^3/s).

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left(\frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 D^5 g} \right) \quad (2.48)$$

Les pertes de charges linéaires sont proportionnelles à la longueur de canalisation. Ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation et quand le diamètre de la conduite augmente, elles diminuent considérablement.

2.11.1.3) Pertes de charges singulières (locales)

Ces pertes dues essentiellement aux divers changements de section qui correspondent aux

accidents de parcours dans les réseaux hydrauliques, elles peuvent être exprimées par [21, 22,] :

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \left(\frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 D^4 G} \right) \quad (2.49)$$

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (2.50)$$

$$\Delta H = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 D^4 G} \right) = k_{fr} Q^2 \quad (2.51)$$

Avec : k_{fr} Constante de canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H = H_s + k_{fr} \quad (2.52)$$

2.11.1.4) Caractéristique couple-vitesse de la pompe $C_e(\omega)$:

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple résistant qui est de la forme suivante

$$C_r = K_r * W_m^2 \quad (2.53)$$

$$\text{avec : } K_r = \frac{P_m}{\omega^3}$$

2.12) Taille du générateur photovoltaïque

2.12.1) Méthode analytique

Une fois connus le volume journalier $V[m^3 / \text{jour}]$, la hauteur manométrique totale H_{MT} et l'irradiation moyenne journalière incidente sur le plan du générateur, la puissance nominale Correspondante du générateur photovoltaïque P_c est calculée par l'expression suivante [23] :
La puissance fournie par le générateur PV dans les conditions standards de mesure CSM. (l'éclairement de $[1000W/m^2]$ et la température $25^\circ C$).

$$P_C = \eta_g . A . G \quad (2.54)$$

Avec :

P_C : la puissance de sortie du générateur (W) sous CSM (puissance crête).

η_g : le rendement du générateur à la température de référence($25^\circ C$).

A : la surface active du générateur (m^2)

G : l'éclairement dans les conditions CSM

L'énergie électrique journalière est donnée par l'équation :

$$E_e = \eta_{pv} A . G_d . (\beta) \quad (2.55)$$

Ou :

η_{pv} :le rendement moyen journalier du générateur dans les conditions d’exploitation

$G_d(\beta)$: L’irradiation moyenne journalière incident sur le plan des modules à l’inclinaison (β) [KWh/m²/j]

Le rendement global du système η_{pv} est calculé par la formule suivante :

$$\eta_{pv}=[1-\gamma(T-T_r)] \eta_g \tag{2.56}$$

Y : Coefficient de température des cellules. Y prend des valeurs entre 0.004 et 0.005 /°C pour Des modules au silicium mono et poly cristallin, et entre 0.001 et 0.002 pour des modules au Silicium amorphe.

T : Température moyenne journalière des cellules durant les heures d’enseillement.

2.12.2) Calcul de la puissance en watt crête

En substituant les équations (2.54) ,(2.55) ,(2.56) dans (2.57) nous obtenons la puissance Crête du générateur :

$$P_c = \frac{G}{\eta_{MPPT} [1-\gamma(T-T_r)]G_d(\beta)} \cdot \frac{E_h}{\eta_{MP}} \tag{2.57}$$

Remarque : pour le système PV que possède un étage d’adaptation et un onduleur, la puissance est calcule par l’équation suivante :

$$P_c = \frac{G}{\eta_{MPPT} [1-\gamma(T-T_r)]G_d(\beta)} \cdot \frac{E_h}{\eta_{MP} X \eta_{Ond}} \tag{2.58}$$

Avec

: η_{MP}, η_{Ond} ,sont respectivement,les rendements du group moteur-pompe, de l'onduleur et η_{MPPT} le rendement de la commande MPPT.

Après le calcul de la puissance du générateur PV. On détermine le nombre de modules constituant le générateur suivant la puissance du module PV choisie.[23]

2.12.3) Nombres de modules

Le nombre total de modules (Nm) constituant le générateur PV est calculé par la formule suivant :

$$N_M = \frac{P_c}{P_M} \tag{2.59}$$

Avec :

P_c : La puissance crête du générateur.

P_M : La puissance du module PV.

2.12.4) Nombre de modules en série

Pour trouver la tension convenable à l'alimentation d'une charge donnée par la mise en série de plusieurs modules PV, le nombre de ces modules est calculé par l'expression suivant:

$$N_{MS} = \frac{V_{ch}}{V_{mp}} \quad (2.60)$$

Avec :

V_{ch} : la tension nominale de la charge(l'onduleur).

V_{mp} : la tension à P max.

2.12.5) Nombre de modules en parallèle

La mise en parallèle de modules donne l'intensité nécessaire à la charge. Le nombre de branches est calculé par l'équation suivant :

$$N_{MP} = \frac{N_M}{N_{MS}} \quad (2.61)$$

2.13 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté le dimensionnement de différents éléments d'un système de pompage solaire, on a commencé par la modélisation du générateur photovoltaïque et de la MSAP en se basant sur les équations électriques, magnétiques et mécaniques, qui régissent le comportement de la machine, en suite nous avons montré la nécessité d'employer une commande vectorielle. Dans la deuxième partie de ce chapitre, on a étudié le convertisseur DC/AC et la pompe centrifuge qui est le type le plus utilisé dans le pompage photovoltaïque.

Chapitre 3 :
Résultats et
Interprétations

3.1) Introduction

Dans ce chapitre on donnera les résultats de simulation à l'aide de logiciel Matlab des caractéristiques de système de pompage photovoltaïque en utilisant l'algorithme « logique floue base sur l'algorithme de perturbation et observation 'P&O' »

3.2) Poursuite du point de puissance maximale

Les méthodes MPPT sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles sont basées sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV.[12] .

La puissance extraite est calculée à partir des mesures de courant et de tension du module et la multiplication de ces deux grandeurs. Ces mesures sont utilisées par divers algorithmes qui poursuivent le MPP réel. Il existe plusieurs types algorithmes MPPT, parmi les quels, on présente le principe de l'algorithme de perturbation et observation ('P&O) et l'algorithme de la logique floue basé sur 'P&O

3.3) Algorithme de perturbation et observation (P&O)

L'algorithme perturber et observer est considéré comme l'algorithme MPPT le plus couramment utilisé parmi les autres techniques en raison de sa structure simple et de sa facilité d'implémentation. Il est basé sur le concept que sur le changement de la puissance du générateur PV est égal à zéro ($\Delta P_p = 0$) en haut de la courbe P-V, comme illustré sur la Figure (3.1). Le P&O fonctionne en perturbant périodiquement (en incrémentant ou en décrémentant) la tension du générateur PV et en comparant la puissance de sortie correspondante du générateur P (k) à celle de la perturbation précédente P(k-1). Si la perturbation de la tension aux bornes entraîne une augmentation de la puissance PV ($\Delta PV > 0$), la perturbation doit être maintenue dans la même direction, sinon la perturbation est déplacée dans la direction opposée. Le cycle de perturbation est répété jusqu'à atteindre la puissance maximale à ($\Delta PV = 0$). L'organigramme de P&O est montré dans la Figure (3.2) [12]. Nous préférons l'algorithme P & O pour ses avantages, mais n'oublions pas son inconvénient qui est l'oscillation imparable autour de la puissance même quand elle atteint le MPP, ce qui provoque des pertes de puissance supplémentaires. On peut remédier à cela en mettant en œuvre soit un contrôle direct du cycle de service dans lequel la puissance est mesurée à chaque cycle PWM [24], soit un contrôle de la tension de référence dans lequel une

tension de référence est manipulée en tant que paramètre de perturbation et un contrôleur proportionnel intégral (PI). est nécessaire pour tenir compte du cycle de service.

Pour éliminer la limitation qui existe dans les implémentations de l’algorithme P & O classique, nous utilisons un algorithme P & O basé sur l’algorithme conventionnel modifié, dans lequel nous avons implémenté un bloc de contrôleur à logique floue pour fournir un pas variable de tension de référence.[24] .

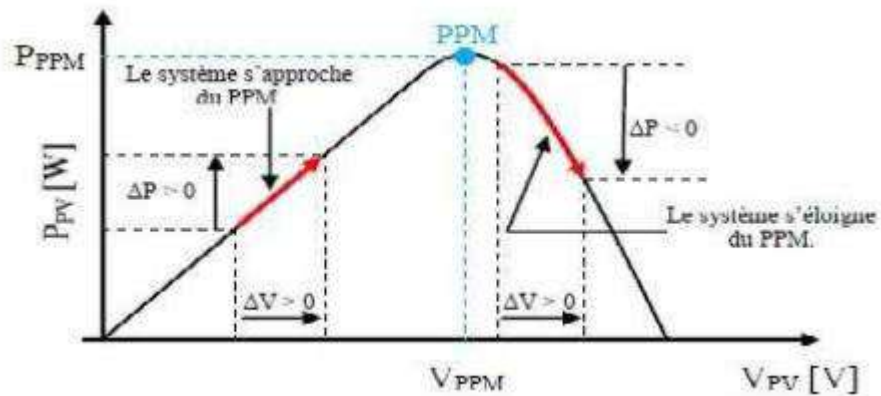


Figure (3. 1) : Recherche du PPM par la méthode (P&O)

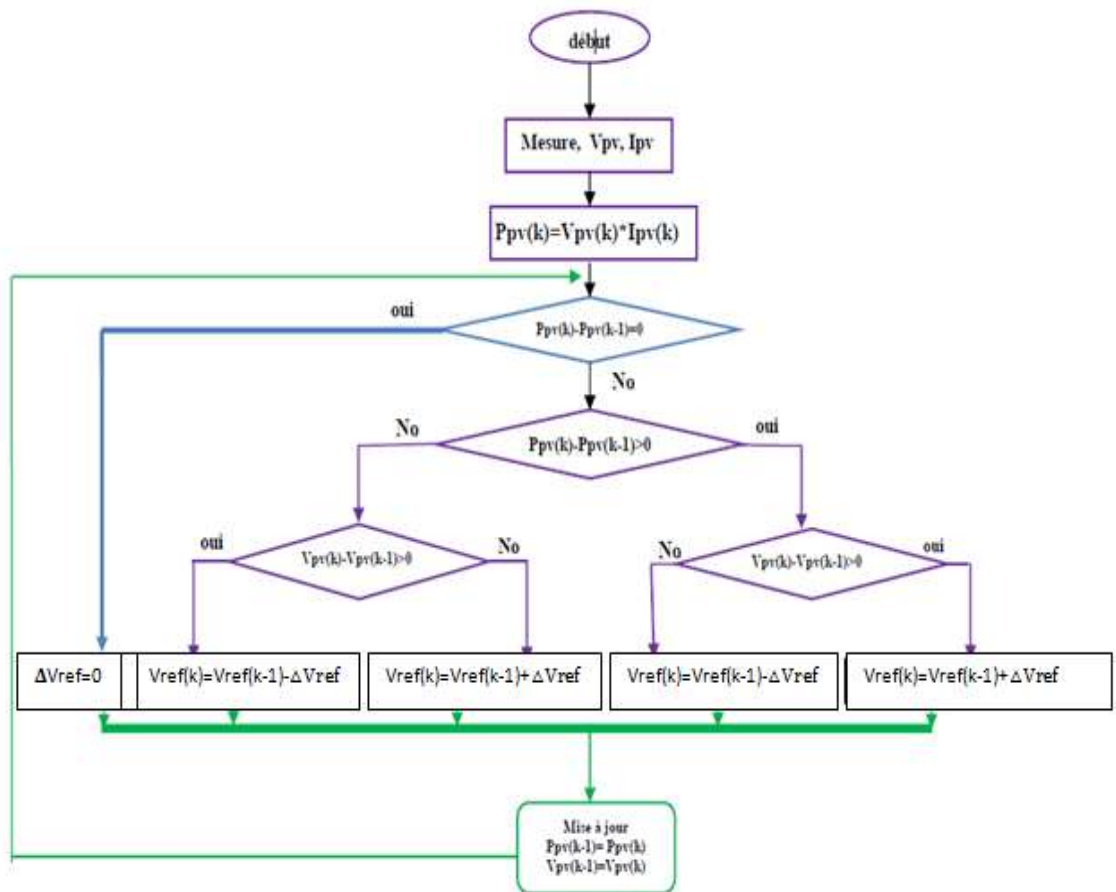


Figure (3.2) : Organigramme de l’algorithme P&O

3.4) Algorithme P&O basé sur la logique floue

L'algorithme MPPT proposé est basé sur l'algorithme P&O conventionnel, mais un bloc de contrôleur de logique floue est utilisé pour fournir un pas variable afin de surmonter la limitation qui existe dans les implémentations de l'algorithme P&O conventionnel. L'organigramme de l'algorithme P&O modifié basé sur la logique floue avec un pas variable (ΔV) est illustré à la Figure (3.3)

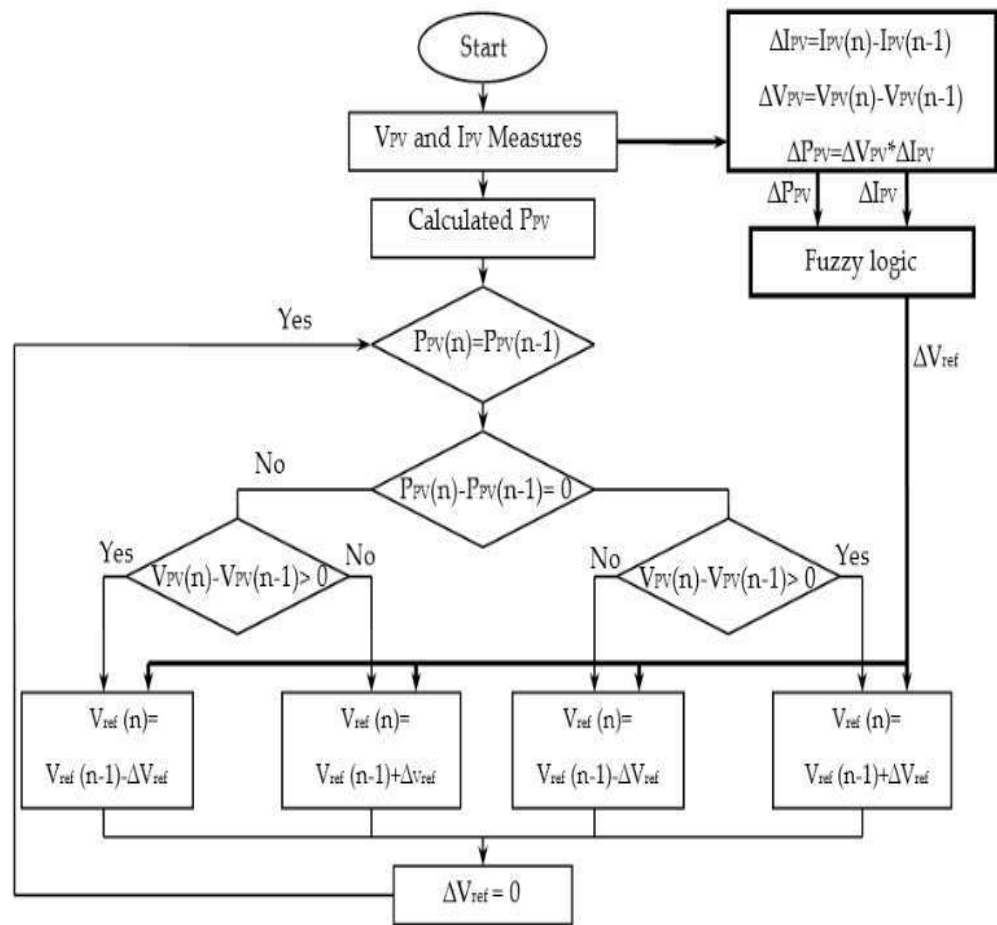


Figure (3. 3) : L'organigramme de P&O amélioré par logique floue avec un pas variable

Les entrées du contrôleur de logique floue sont la variation de la puissance du générateur PV et la variation du courant, et le contrôleur ajuste le pas de l'algorithme P&O en fonction de l'éclairement et de la température. Pour réduire le coût et la complexité de la mise en œuvre du contrôleur floue, la tension et le courant du GPV sont utilisés comme des entrées de l'algorithme P&O et de bloc FLC[12]

Le principe du P&O conventionnel a déjà été introduit en, il perturbe périodiquement la tension de sortie et calcule la variation de la puissance de sortie en comparant la puissance instantanée à celle du cycle de perturbation précédent. Si le changement de puissance est

positif, la perturbation continuera dans la même direction dans le prochain cycle de perturbation sinon, la perturbation se déplacera dans la direction opposée. En répétant ce processus, le point de fonctionnement se déplace progressivement vers le point de puissance maximale [19].

La variable de perturbation choisie dans l'algorithme proposé est la tension de référence (V_{ref}), cette variable est perturbée en ajoutant ou en soustrayant le pas (ΔV_{ref}) en fonction de la variation de la puissance de sortie PV. Cependant, le pas n'est pas fixe et il est calculé par le bloc FLC.

Le principe du bloc FLC est d'ajuster la valeur de pas en fonction de la position du point de fonctionnement. Le FLC donne une valeur du pas élevée, lorsque le point de fonctionnement est éloigné du PPM. Si le point de fonctionnement est proche du PPM, la valeur du pas est ajustée à une valeur faible. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que MPP soit atteint, avec une valeur du pas nulle, qui garantit une réponse dynamique rapide et élimine les oscillations autour du PPM lorsqu'un état stable est atteint

3.5) Contrôleur flou (FLC) utilisé avec un pas variable

Le contrôleur flou FLC est utilisé pour faire varier en continu le pas d'incrément ou de décrémentation. Le contrôleur flou proposé est basé sur la connaissance préalable du système par un expert. La figure (3.4) montre le schéma de principe d'un P&O amélioré par FLC avec un pas variable (ΔV_{ref}). Il se compose de quatre parties, Fuzzification, l'inférence, Défuzzification et les Bases de connaissances. Dans notre mémoire, le FLC construit avec deux variables d'entrée et une sortie. Les variables d'entrée du FLC sont la variation de la puissance du générateur PV, et la variation du courant du GPV, tandis que la variable de sortie du FLC est la variation du pas, ΔV_{ref} qui est envoyé à l'algorithme P&O [12].

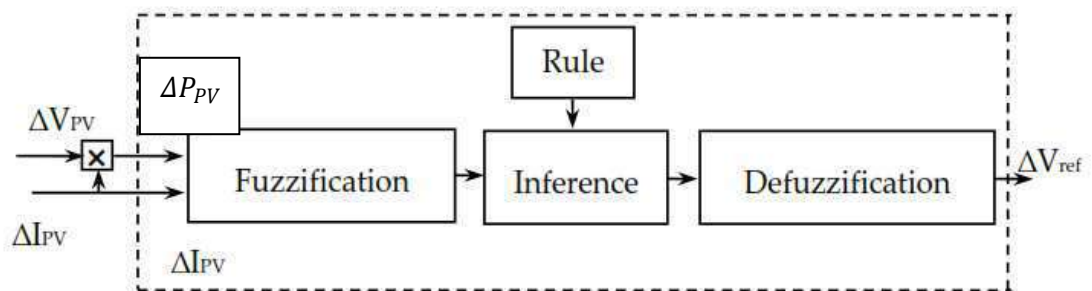


Figure (3.4) : Bloc du calculateur de pas variable FLC proposé

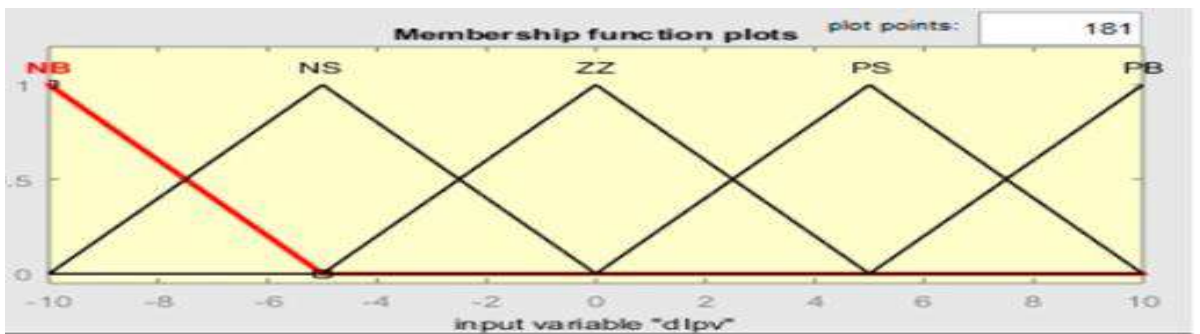
Les entrées de bloc FLC peuvent être calculées à partir du capteur du courant et de tension. Les variables d'entrées, ΔP et ΔI , de bloc FLC proposé peuvent être calculées par les équations suivantes, où $P(k)$ et $I(k)$ sont respectivement la puissance et le courant du générateur PV et $V(k)$ est la tension du réseau GPV.

$$P_p(k) = V_p(k) * I_p(k) \tag{3.1}$$

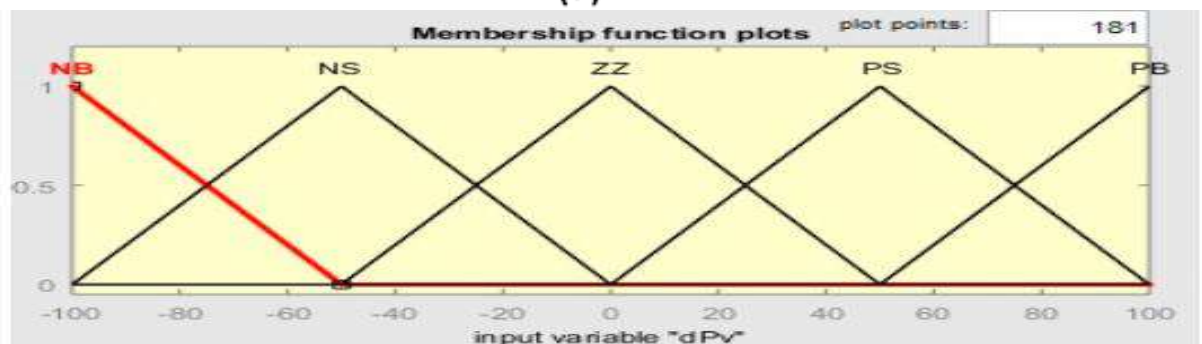
$$\Delta P_p(k) = P_p(k) - P_p(k - 1) \tag{3.2}$$

$$\Delta I_p(k) = I_p(k) - I_p(k - 1) \tag{3.3}$$

Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sorties utilisées dans ce modèle est illustrée dans la Figure (3.5), (3.6). Toutes les fonctions d'appartenance sont exprimées avec une fonction triangulaire et se composent de cinq sous-ensembles flous qui sont notés NB (Négative Grande), NS (Négative Petite), ZZ (zéro), PS (Positive Petite) et PB (Positive Grande).

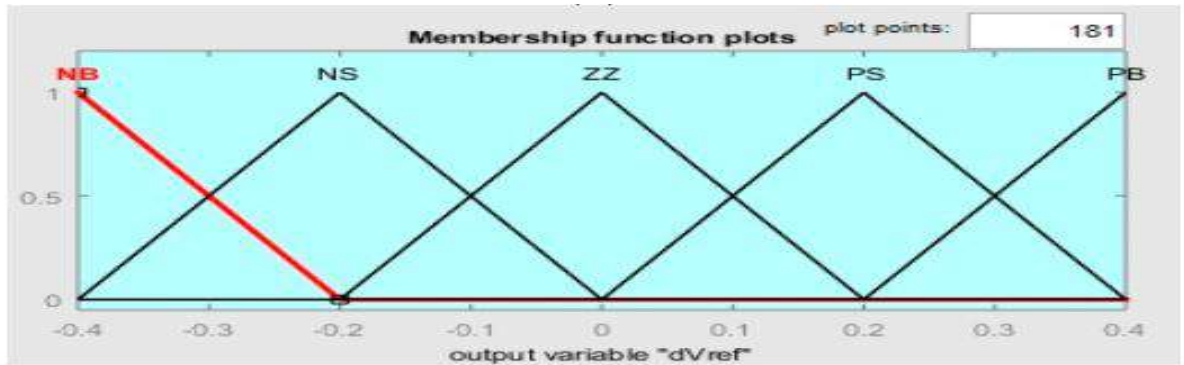


(a)



(b)

Figure (3.5): Les fonctions d'appartenance des entrées



(c)

Figure (3.6) : Les fonctions d'appartenance de la sortie

La base de règles floues est une collection de règles si-alors que toutes les informations sont disponibles pour les paramètres contrôlés. Puisque le nombre de fonctions d'appartenance de chaque entrée est 5, alors les règles d'inférence floue du FLC consistent en 25 règles illustrées dans le tableau (3.1). Ces règles sont utilisées pour déterminer la sortie du contrôleur (le pas variable pour l'algorithme P&O) afin de suivre le point de puissance maximale.

La méthode de Mamdani est utilisée comme une méthode d'interface floue avec l'opération max-min combinée à la loi floue dans ce travail. La sortie du FLC proposé est défuzzifier pour calculer ΔV_{reff} .

ΔI_{pv}	ΔP_{pv}				
	NB	NS	ZZ	PS	PB
NB	NB	NS	NS	ZZ	ZZ
NS	NS	ZZ	ZZ	ZZ	PS
ZZ	ZZ	ZZ	ZZ	PS	PS
PS	ZZ	PS	PS	PS	PB
PB	PS	PS	PB	PB	PB

Tableau (3.1): Les règles utilisées pour déterminer la sortie ΔV_{reff}

3.6) Taille du générateur PV

Après le calcul de la puissance du générateur PV, on détermine le nombre de modules constituant le générateur suivant la puissance du module PV choisie.

➤ **Nombres de modules :**

Le nombre total de modules N_M constituant le générateur PV est calculé par la formule suivante :

$$N_M = \frac{P_c}{P_M} = \frac{3225}{215} = 15 \quad \text{avec } P_c = 3225W$$

➤ **Nombre de modules en série :**

Dans notre cas la tension de $V_{dc} = 365V$ alors

$$N_S = \frac{V_c}{V_M} = \frac{365}{24.24} = 15$$

Donc le nombre de module en série est $N_s = 15$

➤ **Nombre de modules en parallèle :**

La mise en parallèle de modules donne l'intensité nécessaire à la charge. Le nombre de branches est calculé par l'équation suivante :

$$N_p = \frac{N_M}{N_s} = 1$$

3.7) Simulation dans les conditions de fonctionnement normales :

La simulation est réalisée en utilisant des blocs MATLAB / SimPowerSystem comme indiqué dans Fig.3-9. Le temps d'échantillonnage du modèle de contrôle est $1.10^{-6}s$.

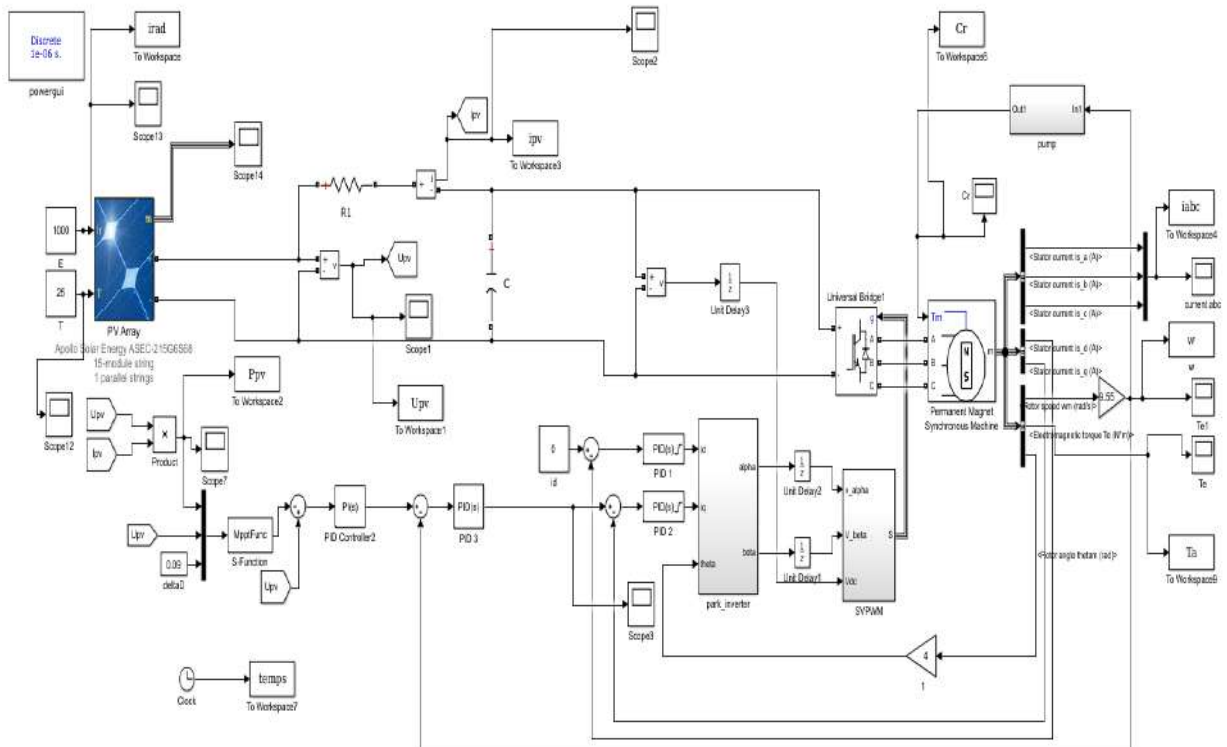


Figure. (3.7) : Schéma de simulation de système de pompage solaire munie d'une commande vectorielle du MSAP

Le bloc P & O modifié nécessite que les VPV et IPV du générateur photovoltaïque soient en mesure d'estimer la tension de référence illustrée à la figure(3.7). La tension V_{ref} est comparée à VPV et régulé par un contrôleur PI pour définir la vitesse de référence du moteur de la pompe.

Dans la première partie, une étude comparative sur le P & O conventionnel et le P & O basé sur une logique floue est réalisée pour montrer la performance des deux techniques dans des conditions similaires. L'étude comparative prend en considération deux caractéristiques importantes: la vitesse de poursuite du point de puissance maximale et l'oscillation en régime permanent. Pour montrer la pratique de l'algorithme P & O suggéré basé sur FLC, cet algorithme a été testé avec deux échelons de tension de référence: 0,01 et 0,05 comme indiqué dans la Figure (3.8)

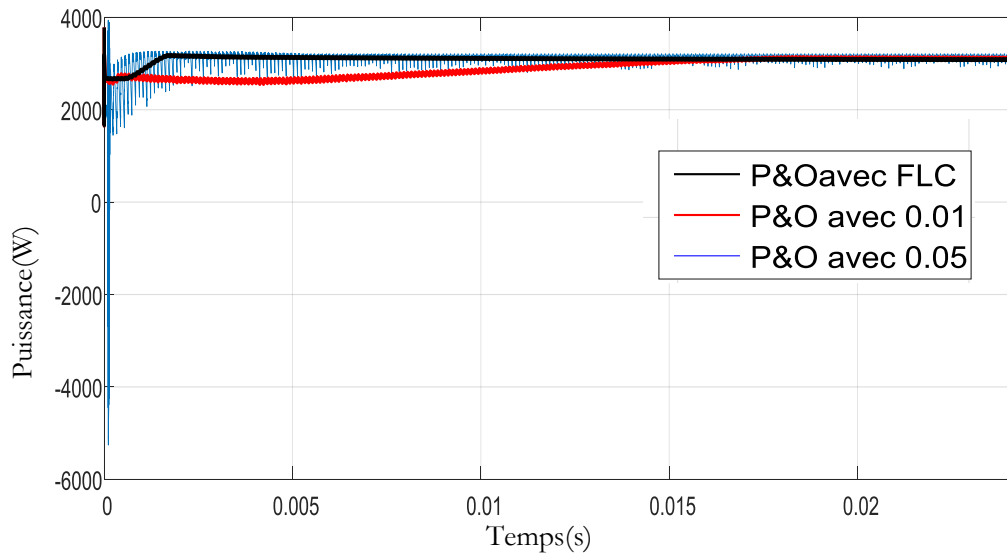


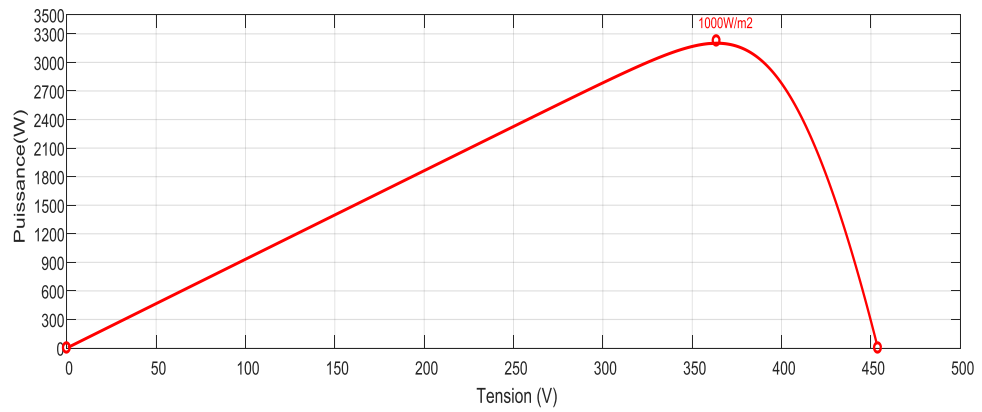
Figure (3.8) : Résultats de simulation de deux algorithmes MPPT
P&O avec 0.01, P&O avec 0.05 et P&O avec FLC

La méthode P & O avec un pas de 0,05 montre une bonne performance dynamique. Le résultat peut converger plus rapidement vers l'état stable, mais l'oscillation est beaucoup plus grande. La performance dynamique de l'algorithme P & O peut encore être améliorée avec un plus grand pas.

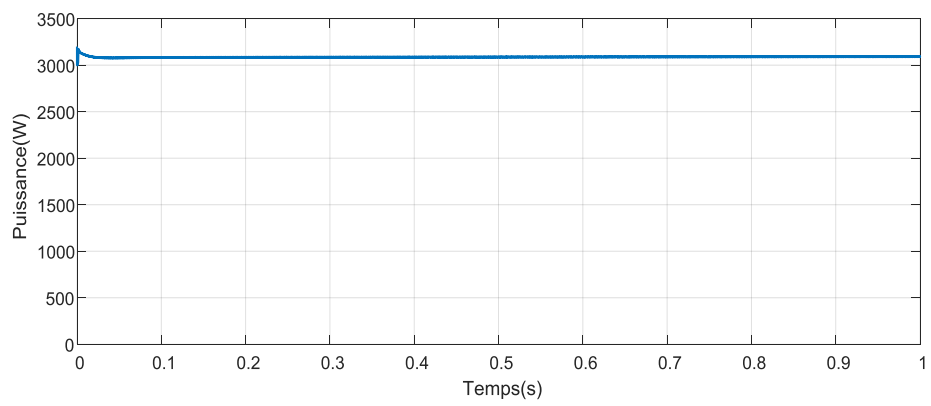
Les résultats du système d'entraînement du moteur de pompe solaire sont obtenus pour fonctionner à 25°C et $1\,000\text{ W/m}^2$. Ils sont donnés dans la figure 3.9a – f. La caractéristique de puissance du générateur photovoltaïque est illustrée à la figure (3.9a) avec un point de puissance maximale déterminé à 3200 W . La tension et le courant du générateur PV sont modifiés comme indiqué à la figure 3.9 c et 3.9.d. Il faut savoir que la tension du générateur PV est ajustée au MPP d'environ 365V . Les courants de stator triphasés sont donnés à la figure 3.9 e. La vitesse du moteur est modifiée, comme illustré à la figure 3.9f, qui est limitée à la vitesse maximale disponible d'environ 1200 tr/min .

Dans un deuxième travail, l'irradiation est ajustée à 500 W/m^2 . Les résultats sont donnés à la Figure (3.10a–f) pour cette condition ajustée. Dans ce cas, le MPP du générateur photovoltaïque est obtenu à environ 1600 W , comme présenté à la figure 3.10a. Le courant du générateur photovoltaïque a diminué de 9 A à 4.9 A , comme illustré à la figure 3.10.c. En fonction de cette diminution du courant, les courants du stator et la vitesse du moteur sont diminués comme indiqué à la figure (3.10e – f). La vitesse du moteur est réduite de 1200 tr/min à 850 tr/min . Les résultats montrent que le moteur fonctionne au point de puissance

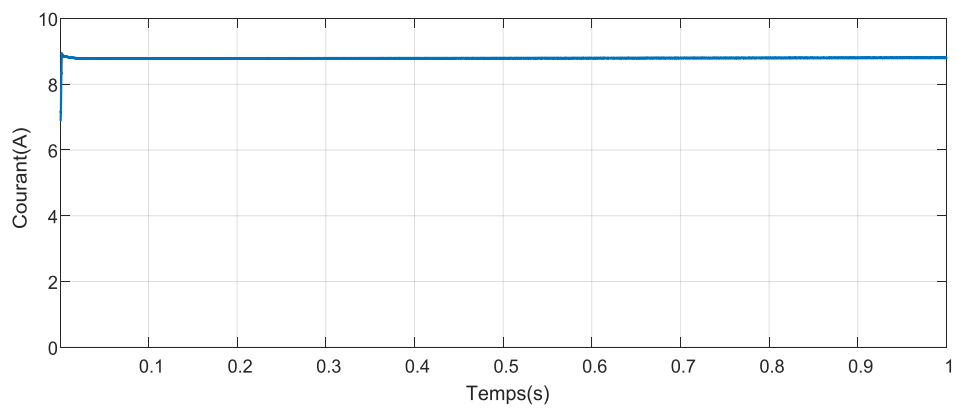
maximale.



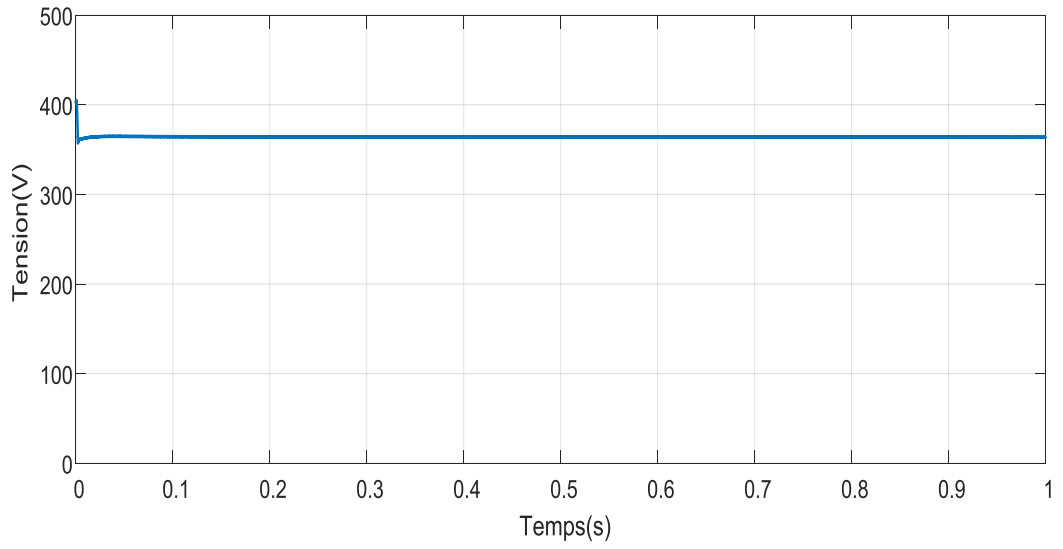
(a)



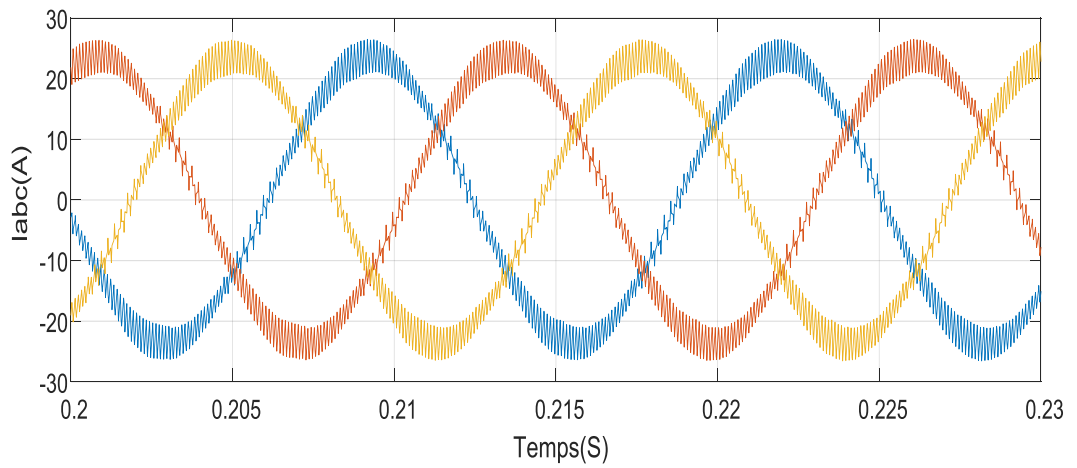
(b)



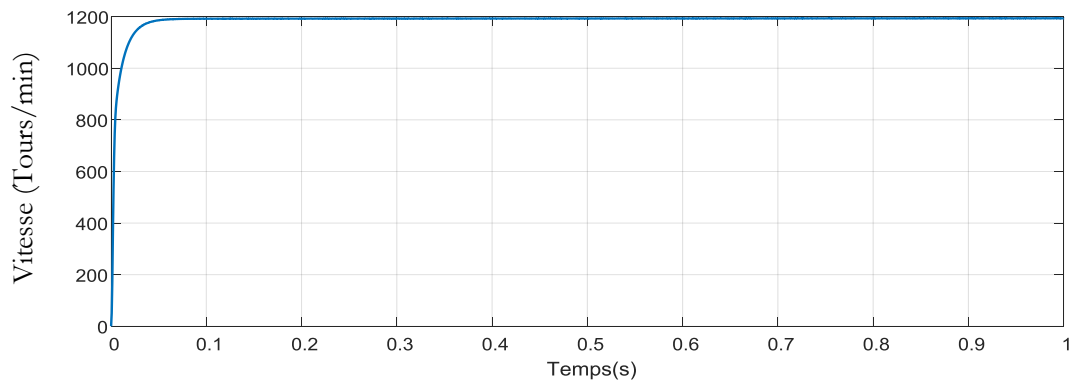
(c)



(d)

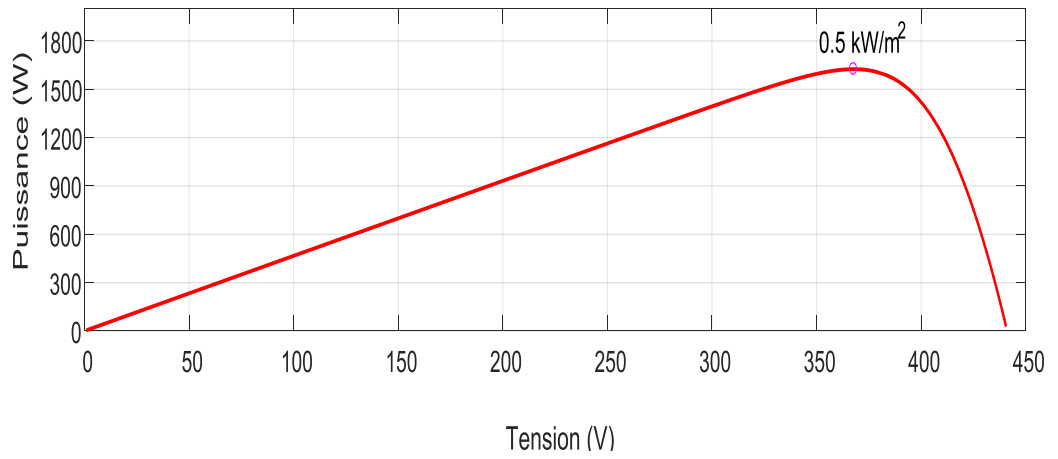


(e)

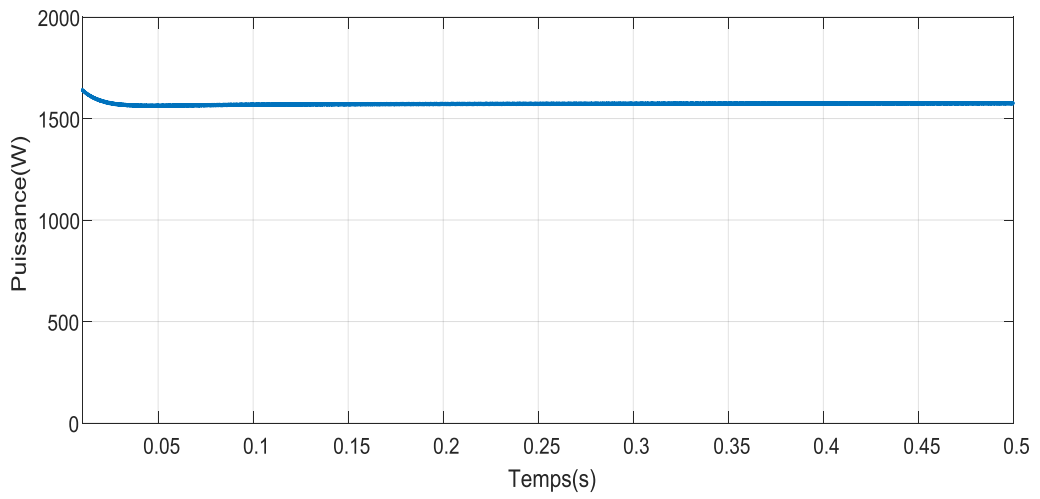


(f)

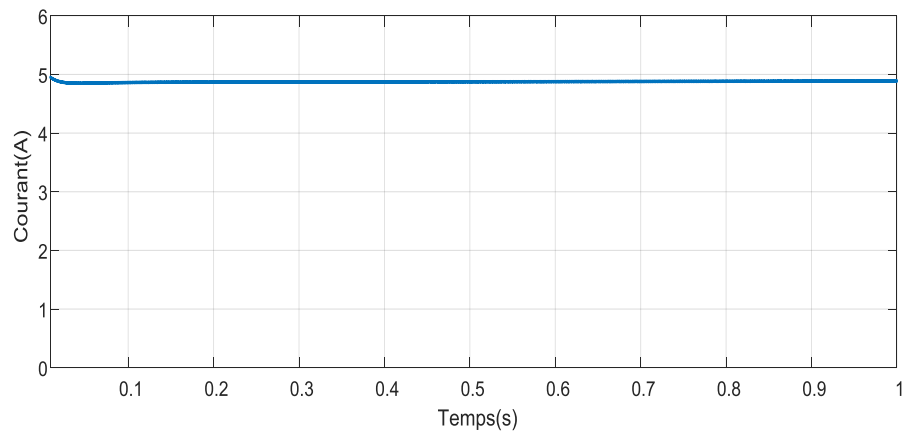
Figure (3.7) : Résultats de simulation de la méthode FLC base sur P&O pour $T=25C^0$ et $E=1000W/m^2$: (a,b) la puissance P_{pv} , (c) courant I_{pv} , (d) tension V_{pv} , (e) courant de stator i_{abc} , (f) vitesse de moteur.



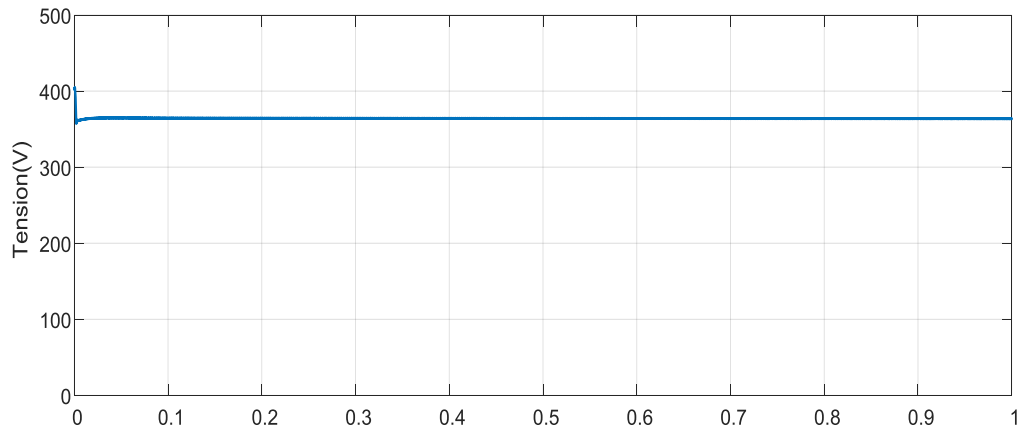
(a)



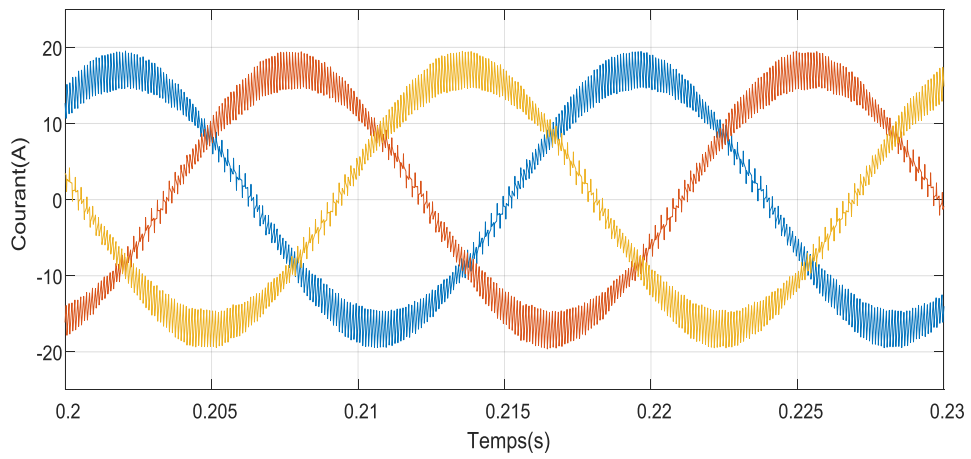
(b)



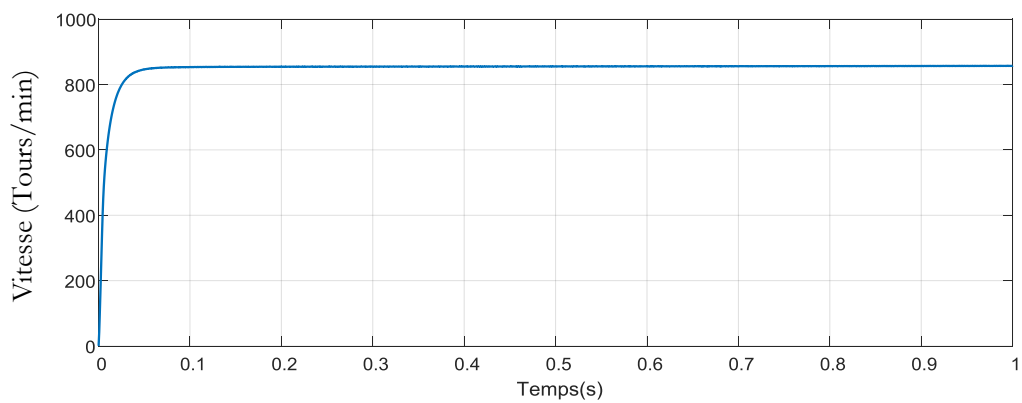
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure (3.8) : Résultats de simulation de la méthode FLC base sur P&O pour $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $E=500\text{ W/m}^2$: (a,b) la puissance P_{pv} , (c) courant I_{pv} , (d) tension V_{pv} , (e) courant de stator i_{abc} , (f) vitesse de moteur.

3.8)Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté quelques résultats de simulations de système de pompage solaire.

On peut conclure qu'avec les deux algorithmes 'P&O'' et FLC basé sur 'P&O'', le panneau PV peut fournir la puissance maximale pour le système de pompage photovoltaïque. Cependant, la performance du MPPT de la logique floue basé sur 'P&O'' est meilleure que celle des algorithmes traditionnels P&O.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, une amélioration de l'algorithme P&O avec la logique floue est développée. Le système est connecté directement aux panneaux photovoltaïques. Pour assurer une alimentation nominale de 365 volts au moteur, quinze panneaux en série suffisent.

En raison de la nécessité d'une vitesse de rotation de 1200tr / min, la fréquence nominale du moteur est égale à 80Hz.

Une commande vectorielle du MASP est utilisée pour augmenter l'efficacité et la performance du système. Le point de puissance maximale est déterminé en utilisant une technique MPPT (P&O, FLC base sur P&O).

D'après les résultats de simulation, on peut conclure qu'avec les deux algorithmes, le panneau PV peut fournir la puissance maximale. Cependant, la performance du MPPT basé sur la logique floue est plus robuste, et plus précis que celui du (P&O).

En ce qui concerne les perspectives de ce travail, nous pouvons citer :

- L'optimisation de système de pompage photovoltaïque par des techniques de l'intelligence artificielle comme les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones artificiels.
- Développer des lois de commande à base des techniques intelligentes et ceux-ci en vue de surmonter les problèmes de non linéarité du modèle imposé par la source PV et la charge. Par ailleurs, l'amélioration du bilan énergétique pourrait être examinée en considérant le niveau du flux rotorique comme un degré supplémentaire dans la procédure d'optimisation.

Bibliographie

- [01] A.Zouzou , H .Hanachi “Optimisation de la poursuite de point de puissance maximale d’un système photovoltaïque” mémoire de master ,université de Ouargla, 2018.
- [02]. Mr. Yassine LASMI "Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d’un système photovoltaïque par les techniques intelligentes" , Mémoire de Magister, Université de Sétif -1, 2013.
- [03]. H. Messaoudene, "Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2013.
- [04]. C.Cabal, " Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ", Thèse de Doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.
- [05]. LAFIA SEIDOU Imorou. " Etude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du Bénin : cas de Adjakpata ", mémoire de master 2016.
- [6]. A Chacha et M Nessil :dimensionnement et simulation d’un entraînement électrique à base d’un moteur synchrone à aimants permanents pour une application de pompage photovoltaïque ,mémoire de master 2017
- [07] : A. Belhocine et S.Zaidi « Etude et dimensionnement d’un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master. Université de Bejaïa, 2012.
- [08] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique
- [09]: L. Boudrahem et L. Djouadi « Commande non linéaire d’un système de pompage photovoltaïque » Mémoire de Master, université de Bejaia 2012.
- [10]SALI Sara OUAkli Aldjia. " Commande non linéaire d’un système de pompage photovoltaïque : ", Université Abderrahmane MIRA de Bejaia . mémoire de master 2017.
- [11] : S. BelaidLalouni « Cours énergie solaire photovoltaïque ». Destiné aux étudiants Master 2 ER, 2015.
- [12] . F TATI , O BEN LAMOUDI, " Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue ", mémoire master , UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2018.
- [13] Multon B. «Application des aimants aux machines électriques» Notes de cours version 2006 Ecole Normale Supérieure de Cachan, antenne de Bretagne, Département de Mécatronique.
- [14] Kant M, «Actionneurs à collecteur à aimant permanent». Technique de l’ingénieur traité Génie électrique D 3695.
- [15]D M AbdeAlkader, Optimisation de rendement énergétique d'un panneau solaire (application pompage solaire))”, mémoire de master ,Université de Jijel 2017.

- [16]. Cour technique de commande ‘modélisation de l’ensemble MAS convertisseur’, université de Batna 2008/2009.
- [17] A. Ghoneim, “Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems,” *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 11, pp. 1449-1463, Oct 2006.
- [18] A. Mokeddem and A. Midoun, “Performance of a directly-coupled PV water pumping system,” *Bibliographie Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 10, pp. 3089-3095, April 2011.
- [19] J. Appelbaum, “Starting and steady-state characteristics of dc motors powered by solar cell generators,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. EC-1, no. 1, pp. 17-25, March 1986.
- [20] P. Packiam and N. K. Jain, “Steady and transient characteristics of a single stage PV water pumping system,” *Energy Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 173-199, December 2014.
- [21] H. Bouzeria, C. Fetha and T. Bahi, “Fuzzy logic space vector direct torque control of PMSM for photovoltaic water pumping system,” *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 760-771, April 2015.
- [22] A. Betka and A. Attali, “Optimization of a photovoltaic pumping system based on the optimal control theory,” *Solar Energy*, vol. 84, no. 7, pp.1273-1283, April 2010.
- [23]. M. louazene,”Contribution a l’optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l’irrigation dans les zones sahariennes- application zone de Ouargla”, thèse de doctorat, universite Batna 2015.
- [24].M.Rezoug, R.Chenni,D.Taibi “Fuzzy Logic-Based Perturb and Observe Algorithm with Variable Step of a Reference Voltage for Solar Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System Fed by Direct-Connected Photovoltaic Array” *Appl. Energy* 2018, 11, 462

Annexe

Motor Paramètre ;

$$V_{dc} = 365V;$$

$$F=80Hz;$$

$$R_s = 0,0918\Omega;$$

$$L_d=L_q = L=0.00975$$

$$P= 4;$$

$$T_n=24. Nm;$$

$$J=0.003945 - kg.m^2;$$

$$B=0 Nm s/rad.$$

Abstract

Photovoltaic pumping system is considered as a promising application of PV cells industry sustained by the increased interest on sustainable development and the reduction of greenhouse effect due to dioxide Carbone emission.

In the present work we propose the study, modeling and control of the whole subsystems forming part of photovoltaic pumping system by using A vector controlled Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)

The most significant conventional P&O algorithm restriction is the difficulty faced when choosing the variable step of the reference voltage value, a good compromise between the swift dynamic response and the stability in the steady state. To adjust the step reference voltage according to the location of the operating point of the maximum power point (MPP), a fuzzy logic controller (FLC) block adapted to the P&O algorithm is used. This allows the improvement of the tracking pace and the steady state oscillation elimination. The suggested method was evaluated by simulation using MATLAB/SimPowerSystems blocks and compared to the classical P&O un der different irradiation levels. The results obtained show the effectiveness of the technique proposed and its capacity for the practical and efficient tracking of maximum power.

Keywords: photovoltaic pumping, MPPT, MSAP , fuzzy logic control.

Résumé

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'industrie grandissante de fabrication des cellules solaires soutenue par les tendances actuelles de développement durable et à la réduction des émissions des gaz à effet de serre.

Dans le présent travail nous proposons l'étude, la modélisation et la commande de l'ensemble des sous-systèmes faisant partie d'un système de pompage photovoltaïque par l'utilisation d'un moteur synchrone a aimant permanent (MSAP).

La restriction la plus importante de l'algorithme P & O conventionnel est la difficulté à choisir le pas variable de la valeur de la tension de référence, un bon compromis entre la réponse dynamique rapide et la stabilité en régime permanent. Pour ajuster le pas de la tension de référence en fonction de l'emplacement du point de fonctionnement du point de puissance maximale (MPP), un bloc de contrôleur à logique floue (FLC) adapté à l'algorithme P & O est utilisé. Cela permet d'améliorer la cadence de suivi et d'éliminer les oscillations en régime permanent. La méthode suggérée a été évaluée par simulation à l'aide de blocs MATLAB / SimPowerSystems et comparée à la méthode P & O classique sous différents niveaux d'irradiation. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de la technique proposée et sa capacité à suivre de manière pratique et efficace la puissance maximale.

Les Mots clé : Pompage photovoltaïque, MPPT, MSAP. Logique floue

ملخص الدراسة:

يعتبر نظام الضخ الكهروضوئي تطبيقاً واعداً لصناعة الخلايا الكهروضوئية يدعمه الاهتمام المتزايد بالتنمية المستدامة وتقليل تأثير الدفيئة الناتجة عن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

في العمل الحالي، نقترح في دراستنا علي النمذجة والتحكم في النظم الفرعية بأكملها التي تشكل جزءاً من نظام الضخ الكهروضوئي باستخدام ناقل مغناطيسي دائم متزامن (MSAP) متحرك به متجه

إن أكثر قيود الخوارزمية التقليدية في مجال P&O هي الصعوبة التي تواجهها عند اختيار الخطوة المتغيرة لقيمة الجهد المرجعي، وهو حل وسط جيد بين الاستجابة الديناميكية السريعة والاستقرار في الحالة المستقرة. لضبط الجهد المرجعي للخطوة وفقاً لموقع نقطة التشغيل لطاقة القصوى (MPP)، يتم استخدام التحكم بالمنطق ضبابي (FLC) لتكيف مع خوارزمية P&O. هذا يسمح بتحسين سرعة التتبع وإزالة تذبذب الحالة المستقرة. تم تقييم الطريقة المقترحة من خلال المحاكاة باستخدام برنامج

MATLAB / SimPower Systems ومقارنتها بـ P&O الكلاسيكية تحت مستويات الضوء المختلفة. توضح النتائج التي تم الحصول عليها فعالية التقنية المقترحة وقدرتها على التتبع العملي والفعال لأقصى قدر من القدرة.