

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA-BEJAIA
Département de génie électrique

Mémoire de fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme de Master en Electromécanique
Spécialité : Electromécanique

Thème :

Etude, modélisation et commande d'un système
de pompage photovoltaïque

Présenté par :

- *M^{elle} MEZIANI Cylia*

Encadré par :

- *M^{me} S. BELAID*

Promotion 2021/2022

Remerciement

J'offre ma grande gratitude à Dieu qui m'a aidé à faire ce travail. J'exprime ma profonde gratitude à mes parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

Je remercie ma promotrice M^{me} S. BELAID pour les efforts qu'elle a déployée, pour m'aider, conseiller, encourager et corriger.

Je voudrais remercier les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je remercie aussi tout le corps enseignant dans le département de Génie électrique qui a contribué à ma formation universitaire.

En fin, Je remercie tous ceux de près ou de loin qu'ont contribué à la réalisation de ce travail. Trouvent ici ma sincère reconnaissance.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail, à mes parents, à ma
source de générosité*

Et de patience tout au long de ma carrière scolaire.

Que Dieu vous protège.

*À mes frères qui m'ont toujours indiqué
la bonne voie et qui ont su m'aider.*

*À toute ma famille qui m'ont toujours soutenue et
encouragée tout au long de mon parcours.*

À tous mes amis qui m'aiment et qui m'apprécient.

Cylia.

Remerciement	
Dédicace	
Sommaire.....	I
Liste des tableaux	IV
Liste des figures	V
Liste des abréviations	VIII
Introduction générale	1

Chapitre I :Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque.

Introduction.....	4
I.1. Généralités sur l'énergie solaire.....	4
I.1.1. L'énergie solaire	4
I.1.2. L'effet photovoltaïque	4
I.1.3. Principe de la conversion photovoltaïque	4
I.1.4. La cellule photovoltaïque	5
I.1.5. De la cellule au générateur photovoltaïque	5
I.1.6. La mise en série et en parallèle de la cellule photovoltaïque	5
I.1.7. Protection classique d'un GPV	7
I.2. Le pompage photovoltaïque	8
I.2.1. Pompage au fil du soleil.....	8
I.2.2. Pompage électrochimique (avec batterie).....	9
I.2.3. Les composants d'un système de pompage photovoltaïque	9
I.2.3.1. Convertisseurs statiques DC/DC	9
I.2.3.2. Convertisseur statique DC/AC.....	10
I.2.3.3. Groupe moteur -pompe	10
I.2.3.4. Les pompes.....	13
I.3. Description du système à étudier	16

Conclusion	17
------------------	----

Chapitre II : Modélisation du système global.

Introduction	19
II.1. Modélisation du système	19
II.1.1. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque	19
II.1.2. Caractéristique courant –tension et puissance-tension d'un module photovoltaïque	22
II.1.2.1. Influence de l'irradiation	23
II.1.2.2. Influence de la température	24
II.2. Modélisation du convertisseur statique DC/DC	26
II.3. Modélisation du l'onduleur de tension MLI.....	28
II.4. Modélisation de la machine asynchrone	28
II.4.1. Modélisation dans le repère triphasé	28
II.4.2. Transformation du système triphasé	31
II.4.3. Transformation du park	31
II.5. Modélisation du bus continu	32
II.6. Modélisation de la pompe centrifuge	33
Conclusion	34

Chapitre III : Commande du système global.

Introduction.....	36
III.1. La commande vectorielle de la machine asynchrone	36
III.1.1. Principe de la commande par orientation du flux rotorique	36
III.2. La commande du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking).....	39
Conclusion	42

Chapitre IV : Simulation et résultats .

Introduction	44
IV.1. Etude dimensionnel du système	44
IV.1.1. Evaluation des besoins quotidiens de l'eau	44
IV.1.2. Calcul de l'énergie électrique nécessaire	44
IV.1.3. Dimensionnement de l'énergie solaire disponible	44
IV.1.4. Inclinaison et orientation optimale des capteurs Photovoltaïques	45
IV.1.5. Mois de dimensionnement	45
IV.1.6. Choix des composants.....	45
IV.2. Simulation du système de pompage photovoltaïque.....	47
IV.3. Résultats de simulation et interprétations	48
IV.3.1. Fonctionnement sous des différents niveaux d'ensoleillement et de température	48
IV.3.2. Fonctionnement sous des conditions variables d'ensoleillement et de température.....	53
Conclusion	55
Conclusion générale	56
Références bibliographiques	57
ANNEXE	60
Résumé	61

Liste des tableaux

Tableau (1): Paramètres d'un panneau solaire SIEMENS 110-24 60

Tableau (2): Paramètres de la machine asynchrone..... 60

Liste des figures

Figure (I.1) : Constitution d'un générateur photovoltaïque	5
Figure (I.2) : Association de 3 cellules photovoltaïques en série	6
Figure (I.3): Caractéristiques P-V et I-V accordées en série	6
Figure (I.4): Association de 3 cellules PV en parallèle	6
Figure (I.5): Caractéristique P-V et I-V accordées en parallèle	7
Figure (I.6) : Mise en série –parallèle des cellules photovoltaïques	7
Figure (I.7) : Protection d'un générateur avec by-pass et diode anti retour.....	8
Figure (I.9) : Pompage au fil soleil	9
Figure (I.10) : Pompage avec batterie.....	9
Figure (I.10) : Représentations symboliques couramment utilisées aux entrées-sorties des convertisseurs DC/DC.....	10
Figure (I.11) : Schéma d'un onduleur	10
Figure (I.12) : Moteur à courant continue	11
Figure (I.13) : Machine asynchrone	12
Figure (I.14) : Machine synchrone	12
Figure (I.15) : Pompe volumétrique	13
Figure (I.16) : Caractéristiques d'une pompe volumétrique.....	14
Figure (I.17) : Pompe centrifuge.....	15
Figure (I.18) : Caractéristiques d'une pompe centrifuge	16
Figure (I.19) : Structure d'un système de pompage PV à étudier	16
Figure (II.1) : Schéma simplifié du système de pompage photovoltaïque	19
Figure (II.2) : Modèle simplifié d'un module PV.....	20
Figure (II.3) : Modèle à une diode d'un module PV	20
Figure (II.4) : Représente les deux caractéristiques P(V) et I(V) dans les conditions stabdards	22
Figure (II.5) : Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)et I(V)àT=25°C	23
Figure (II.6) : Influence de la température sur la caractéristique I(V).....	24
Figure (II.7) : Influnce de la température sur la caractéristique P(V)	24

Figure (II.8) : Schéma électrique de base d'un convertisseur élévateur.....	25
Figure (II.9) : Schéma électrique du l'onduleur triphasé relié à la MAS	26
Figure (II.10) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.....	29
Figure (II.11) : Filtrage capacitif	32
Figure(III.1) : Schéma de principe de découplage de la MAS par analogie avec la MAS par analogie avec la MCC	36
Figure (III.2) : Orientation du flux rotorique	37
Figure (III.3) : Schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté	39
Figure (III.4) : Caractéristique (puissance, tension) dans les conditions standards de la commande MPPT	40
Figure (III.5) : Caractéristique (courant, tension) dans les conditions standards de la commande MPPT	40
Figure (III.6) : Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O	41
Figure (III.7) : Organigramme de l'algorithme P&O.....	42
Figure (IV.1) : Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de bejaia de 1998 à 2007	45
Figure (IV.2) : Schéma global de fonctionnement du système de pompage PV	47
Figure (IV.3) : Courbe de la variation d'ensoleillement.....	48
Figure (IV.4) : Courbe de la variation de la température.....	48
Figure (IV.5) : Courbe de la tension photovoltaïque en fonction du temps	48
Figure (IV.6) : Courbe du courant photovoltaïque en fonction du temps.....	49
Figure (IV.7) : Courbe de la puissance photovoltaïque en fonction du temps	49
Figure (IV.8) : Courbe de la vitesse de la MAS en fonction du temps.....	50
Figure (IV.9) : Courbe du couple électromagnétique C_{em} et du couple résistant C_r	50
Figure (IV.10) : Courbes des courants statoriques de la MAS et leurs zooms	51
Figure (IV.11) : Courbe du flux rotorique en fonction du temps.....	51
Figure (IV.12) : Courbe du débit de la pompe centrifuge.....	52
Figure (IV.13) : Courbe d'ensoleillements variables.....	52

Figure (IV.14) : Courbe des températures variables 53

Figure (IV.15) : Courbe de la puissance photovoltaïque 54

Figure (IV.16) : Courbe de la vitesse de la MAS 54

Figure (IV.17) : Courbe du couple électromagnétique et couple résistant 54

Figure (IV.18) : Courbe du débit de la pompe centrifuge..... 55

Liste des abréviations

I_d	Courant de la diode
I_{ph}	Courant produit par la photopile
R_s	Résistance série est due aux pertes joule
R_{sh}	Résistance shunt
V_{co}	La tension en circuit ouvert
I_{sc}	Le courant de court-circuit
G, G_{stc}	Ensoleillement, ensoleillement dans les conditions standards en W/m^2
N_s, N_p	Nombre de module série, parallèle
G	Accélération de la pesanteur
T_{stc}	Température de référence des panneaux ($T_{stc} = 25^\circ C$)
I_{pv}	Courant photovoltaïque
V_{pv}	Tension photovoltaïque
α_{sc}	Représente un coefficient d'incrémentation du courant I_{sc}
α_{oc}	Représente un coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc}
ΔI	Représente la variation du courant
ΔT	Représente la variation de la température
ΔV	Représente la variation de la tension
H_{mt}	Hauteur manométrique de la pompe
I_{mpp}	Courant au point de puissance maximale
J	Moment d'inertie de la machine
L_s, L_r	Inductances propres statoriques et rotorique de la machine asynchrone
M	Inductance mutuelle maximale entre une phase de stator et une phase de rotor
IGBT	Transistor bipolaire à gille isolé
P_c	Puissance crête
P_{mpp}	Puissance maximale fournie par le générateur
P_n	Puissance nominale du moteur asynchrone
P_{pv}	Puissance photovoltaïque
Q	Débit d'eau pompé
H	Rendement de groupe motopompe
R_r	Résistance rotorique
R_s	Résistance série
R_{sh}	Résistance shunt
R_{st}	Résistance statorique
T_c	Température dans les conditions quelconque
T_{em}	Couple électromagnétique
V_{dc}	Tension à l'entrée de l'onduleur
L	L'inductance
i_L	Courant de l'inductance
C_1, C_2	Capacité 1, capacité 2

V_o	Tension aux bornes de la charge
R	Résistance
u	Interrupteur
I_{red}	Courant de redresseur
I_{ond}	Courant de l'onduleur
I_c	Courant capacitif
PV	Photovoltaïque
DC	Courant continu
AC	Courant alternatif
STC	Standard Test Conditions
GPV	Générateur photovoltaïque
MPPT	Extraction du point de puissance maximale
P&O	Perturbation et observation
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
P	Matrice de Park
[P]⁻¹	Matrice de Park inverse
V_{mp}	Tension au point de puissance maximale
α	Rapport cyclique
σ	Coefficient de dispersion de blondel
Ψ_{ref}	Flux de référence
Ω_n	Vitesse nominale du moteur asynchrone
Ω_{ref}	Vitesse de référence
ρ	Densité de l'eau (1000kg /m ³)
Ψ_r	Flux rotorique

Introduction générale

La nécessité de fournir l'énergie électrique essentiellement pour les zones éloignées et isolées augmente jour après jour et la meilleure solution à ce problème est le recours aux énergies renouvelables, qui sont naturelles et inépuisables mais abandonnées. L'énergie renouvelable permet de produire de l'électricité sans l'émission des gazes polluantes contrairement aux énergies non renouvelables dites les ressources combustibles fossiles qui menacent l'environnement et qui sont sur la voie d'épuisement total à leurs réserves.

Parmi les énergies renouvelables, on trouve l'énergie solaire qui permet à l'aide des panneaux photovoltaïques de capter les rayons solaires et les transformer en puissance utilisable pour divers applications telle que le pompage de l'eau. On résume cette application sous le nom « pompage photovoltaïque » qui représente la solution la plus efficace pour l'approvisionnement en l'eau dans les régions éloignées où on trouve une absence d'électricité et dans les régions arides où il y a un manque de l'eau. Les performances d'une installation de pompage photovoltaïque dépendent de la commande appliquée sur le système.

L'objectif de notre travail est la commande d'un système de pompage photovoltaïque. Le plan de travail est présenté comme suit :

Le premier chapitre est consacré sur la présentation des généralités sur le système de pompage photovoltaïque en commençant par les généralités sur l'énergie solaire, puis on va parler brièvement sur les différents types de ce système de pompage photovoltaïque, et donner quelques définitions sur les composants du système et on termine par la description de notre système à étudier.

Le deuxième chapitre est consacré sur la modélisation de chaque composant du système : le générateur photovoltaïque GPV, les convertisseurs statiques (Hacheur et Onduleur), la machine asynchrone, le bus continu et la pompe centrifuge.

Le troisième chapitre est consacré sur la commande globale de la chaîne de conversion, en commençant par la commande de la machine asynchrone qui est basée sur la commande vectorielle

à flux rotorique orienté, puis la présentation d'une méthode MPPT de type P&O pour extraire la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

Le quatrième chapitre est consacré au dimensionnement du système de pompage puis la simulation du système global sur MATLAB/SIMULINK du système global avec interprétation des résultats obtenus.

On termine par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I :

**Généralités sur les systèmes de pompage
photovoltaïque.**

Introduction

Face à la nécessité de l'énergie électrique à fournir, on a de plus en plus recours aux énergies renouvelables, principalement l'énergie solaire et l'eau. Ces derniers sont exploités pour les systèmes de pompage photovoltaïque qui sont considérés comme une solution performante et fiable pour la production d'électricité pour répondre aux besoins des zones éloignées et isolées.

I.1. Généralités sur l'énergie solaire

I.1.1. L'énergie solaire

L'énergie est la seconde énergie qui existe en grande quantité sur la surface terrestre. Elle est caractérisée par l'ensoleillement fournie par le soleil par unité de surface sur une période donnée en J/m^2 , et par l'irradiation correspondante à la puissance à un temps donnée en W/m^2 [Cro 13].

I.1.2. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [Pas 06].

I.1.3. Principe de la 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 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 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 vers la bande de conduction. 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 [Bel 15].

I.1.4. La cellule photovoltaïque

L'élément principal dans un système photovoltaïque est la cellule photovoltaïque qui convertit l'énergie reçue par ce rayonnement solaire en énergie électrique. Elle peut être assimilée à une photodiode en convention générateur.

I.1.5. De la cellule au générateur photovoltaïque

Typiquement la puissance maximale délivrée par une cellule photovoltaïque dans des conditions d'ensoleillement standards (1000w/m^2 , 25C°) est d'environ de 2 à 3 watts crête sous approximativement une tension de 0.5V, donc la puissance délivrée par une cellule photovoltaïque reste insuffisante vis-à-vis des besoins de la pluparts des applications industriels ou domestique. Pour cela et afin d'obtenir un niveau de puissance compatible avec ces applications, donc il est nécessaire d'associer plusieurs de ces cellules en série et/ou en parallèle formant des modules photovoltaïque afin d'obtenir les caractéristiques désirées. En effet, les modules photovoltaïques sont eux-mêmes associées en série et /ou en parallèle pour former un panneau ou un générateur photovoltaïque pour produire la puissance requise [Ghe 19]. Comme on peut le voir sur la figure suivante :

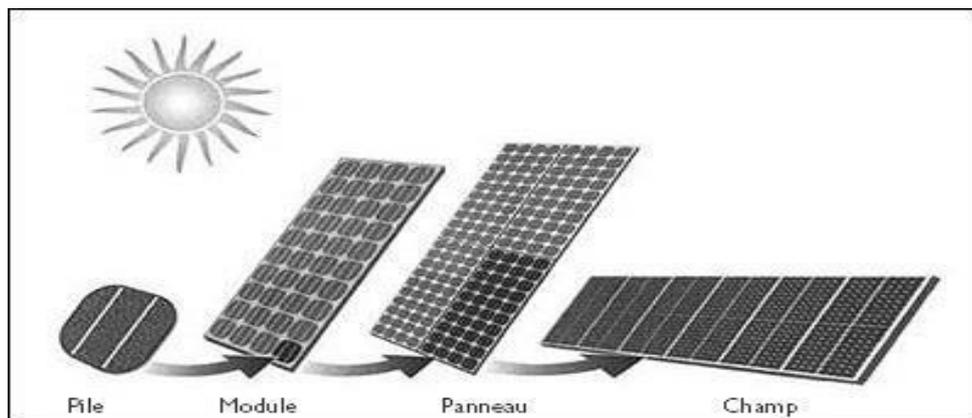


Figure (I.1) : Constitution d'un générateur photovoltaïque.

I.1.6. La mise en série et en parallèle de la cellule photovoltaïque

- **Mise en série [Sla 18]**

Dans un groupement en série, les cellules sont parcourues par un même courant et la caractéristique résultante du réseau en série est obtenue en additionnant les tensions à un courant donné.

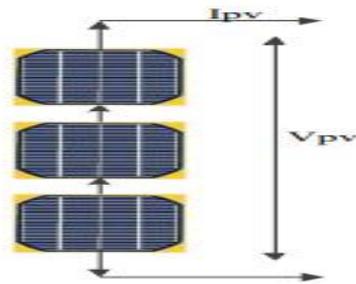


Figure (I.2) : Association de 3 cellules photovoltaïques en série [Sla 18].

La figure (I.2) montre la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{sco}) obtenue en association en série (indice s) N_s cellules identiques (I_{cc} , V_{co}) :

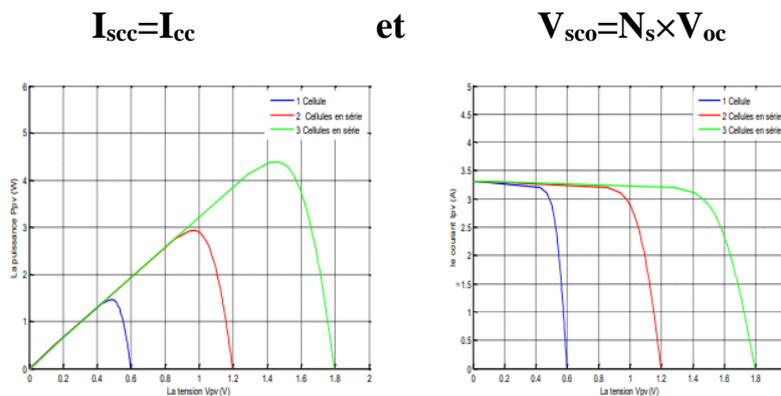


Figure (I.3) : Caractéristiques P-V et I-V accordées en série [Sla 18].

- **Mise en parallèle [Sla 18]**

Les propriétés du groupement parallèle de cellules sont identiques à celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

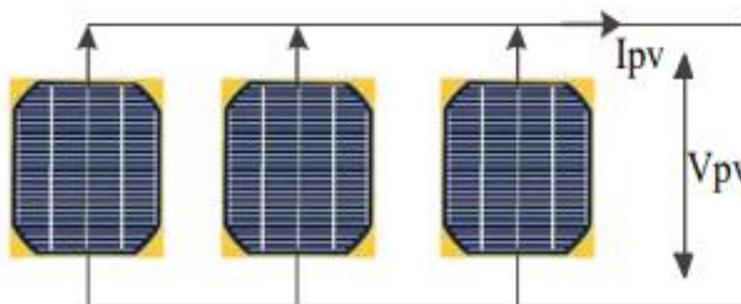


Figure (I.4) : Association de 3 cellules PV en parallèle [Sla 18].

La figure (I.4) montre la caractéristique résultante (I_{pcc}, V_{pco}) obtenue en association en parallèle (indic p) N_p cellules identiques (I_{cc}, V_{co}) :

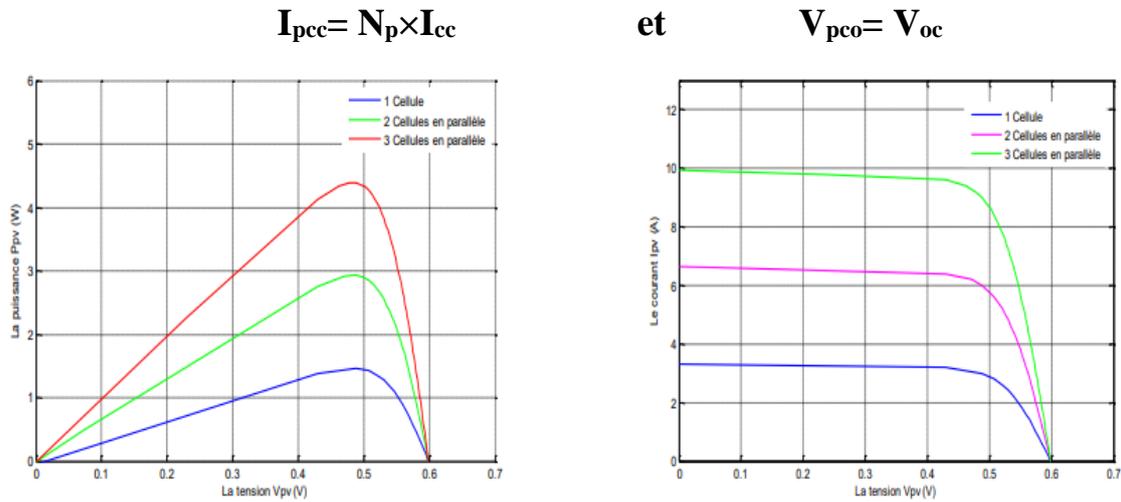


Figure (I.5) : Caractéristiques P-V et I-V accordées en parallèle [Sla 18].

- **Mise en série et en parallèle (mixte) [Bel 15]**

On utilise un groupement mixte (série-parallèle) pour avoir une satisfaction en tension et en courant.

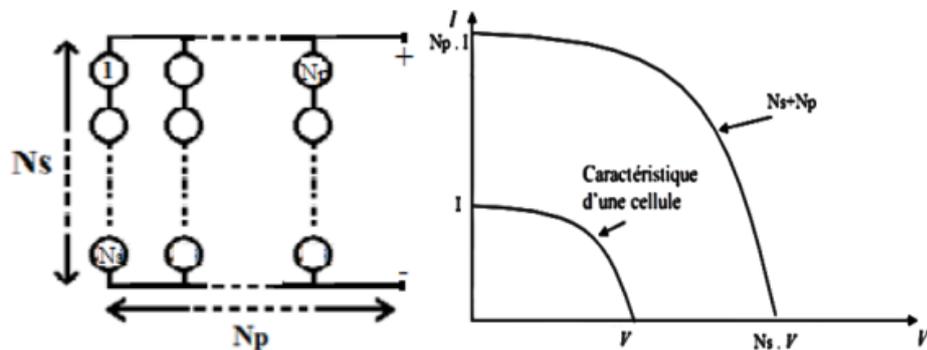


Figure (I.6) : Mise en série-parallèle des cellules photovoltaïques.

I.1.7. Protection classique d'un GPV [Lou 15]

Lors de la réalisation d'une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette dernière afin d'augmenter sa durée de vie en évitant les défaillances destructives dues à la combinaison des cellules et à leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- **La diode anti-retour**

Empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

- **La diode by-pass**

Peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

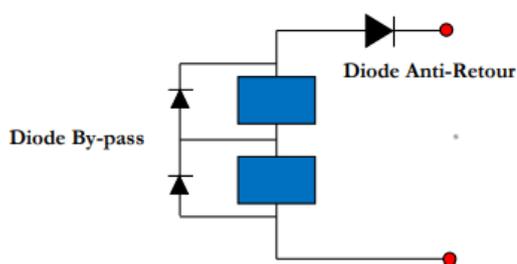


Figure (I.7) : Protection d'un générateur avec diode by-pass et diode anti-retour.

I.2. Le pompage photovoltaïque

Le système le plus utilisé dans les zones rurales non desservies par le réseau électrique est le système de pompage photovoltaïque. Ce dernier consiste à capter l'énergie solaire via des panneaux électriques pour produire de l'électricité pour alimenter une pompe électrique permettant d'assurer l'exhaure de l'eau. On distingue deux types de pompage photovoltaïque :

I.2.1. Pompage au fil du soleil

Ces systèmes fonctionnent au fil du soleil sans stockage électrochimique. L'eau ainsi pompée peut être utilisée directement ou stockée dans un réservoir pour des utilisations ultérieures. Ce type de stockage de l'eau est la solution la plus adoptée par rapport au stockage électrochimique dans des batteries. Le générateur photovoltaïque est responsable de la conversion instantanée de l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque [Aou 15].

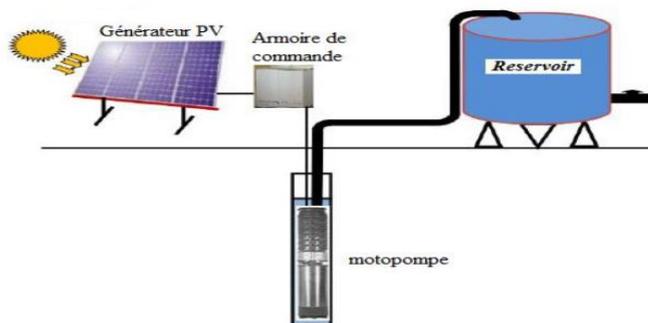


Figure (I.8) : Pompage au fil du soleil [Bou 09].

I.2.2. Pompage électrochimique (avec batterie)

La méthode de pompage d'eau en utilisant l'énergie stockée sur des batteries peut avoir l'avantage de garantir une stabilité d'alimentation des équipements (système présente l'avantage d'un débit régulier, la possibilité de pomper lorsque le soleil est absent). L'énergie emmagasinée pour être utilisée aussi pour d'autres besoins ultérieurs [Lou 15].

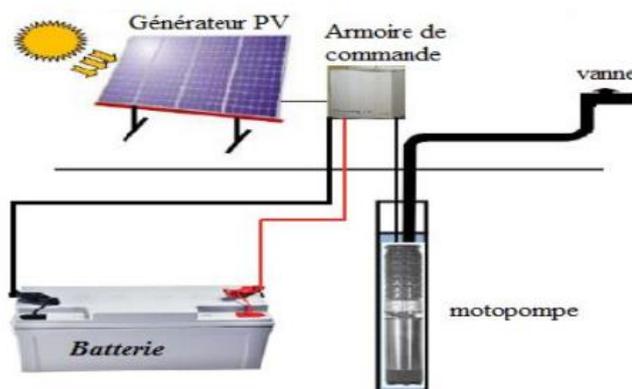


Figure (I.9) : pompage avec batterie [Bou 09].

I.2.3. Les composants d'un système de pompage photovoltaïque

I.2.3.1. Convertisseurs statiques DC/DC [Aou 15]

Par définition, le convertisseur DC/DC a pour vocation le transfert de l'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu (et vice versa). En utilisant la convention réceptrice pour l'entrée du convertisseur DC/DC (qui reçoit de la puissance de la source) et la convention générateur pour sa sortie (qui alimente la charge connectée à ses terminaux), le modèle des tensions-courants à ses entrées-sorties peut être symbolisé comme indiqué sur la figure suivante :

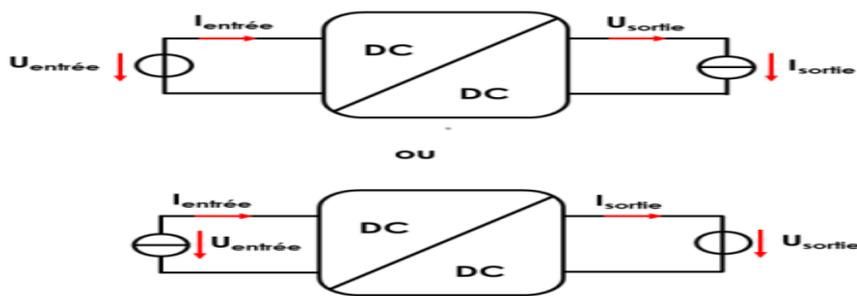
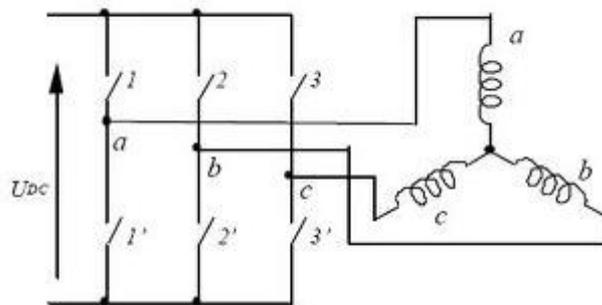


Figure (I.10) : Représentations symboliques couramment utilisées aux entrées-sorties des convertisseurs DC/DC.

I.2.3.2. Convertisseur statique DC/AC

Le convertisseur continu-alternatif appelé onduleur est un dispositif électronique qui permet de convertir une énergie électrique continue en énergie électrique alternative monophasée ou triphasée. Cette transformation est basée sur des composants semi-conducteurs commandables, rapides et robustes comme les interrupteurs IGBT (transistors de puissance).



Figure(I.11) : Schéma d'un onduleur .

I.2.3.3. Groupe moteur-pompe

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

- **Moteurs électriques**

- **Moteur à courant continu**

Les moteurs à courant continu transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. L'utilisation des moteurs à courant continu est assez limitée, car la distribution se fait en courant alternatif. Cependant, pour certaines applications, il est parfois bénéfique d'utiliser des moteurs à courant continu alimentés par des redresseurs. L'avantage de ces moteurs réside dans le

fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse [Wil 05] [Seg 94]. En rencontre ce type de moteur dans la plupart des servomoteurs utilisés pour des fonctionnements à faible puissance (inférieur à 5kW).

Les moteurs à courant continu comportent un induit constitué généralement de bobinages en cuivre ; et un inducteur qui peut être réalisé soit avec des bobinages en cuivre, soit avec des aimants permanents.

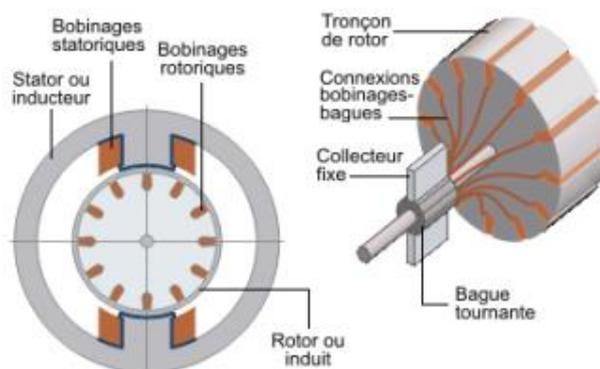


Figure (I.12) : Moteur à courant continue [Bou 13].

- **Moteurs à courant alternatif**

On utilise ce type de moteur selon la puissance dont on a besoin. Pour des faibles et moyennes puissances, le réseau monophasé standard est suffisant. Pour des applications des fortes puissances, on doit alimenter ce moteur par une source de courant polyphasé. Pour les systèmes les plus fréquemment utilisés dits un système triphasé utilisé par les distributeurs d'électricité.

On distingue trois types de moteurs :

- ✓ **Moteurs universels**

Un moteur universel est un moteur électrique qui fonctionne comme une machine à courant continu à excitation série. Le rotor est connecté en série avec l'enroulement inducteur. Le couple de cette machine est indépendant du sens de courant est proportionnel au carré de son intensité. Il peut donc être alimenté indifféremment en courant continu ou en courant alternatif. Le stator et le rotor de ce moteur sont feuilletés afin de limiter les courants de Foucault qui apparaissent systématiquement dans toutes les zones métalliques massives soumise à des champs magnétiques alternatifs.

Dans la pratique, les moteurs universels ont plusieurs inconvénients : mauvais rendement, un cout de fabrication très réduit, un couple faible et une vitesse de rotation très importante.

✓ Moteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones (à cage d'écureuil) à courant alternatif sont les moteurs les plus couramment utilisés pour une large gamme d'applications industrielles. Ils sont particulièrement utilisés pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. L'avènement d'onduleurs efficaces permet l'utilisation de ce type de moteur dans les applications de pompage photovoltaïque [Abo 15]. L'utilisation de moteurs asynchrones (courant alternatif triphasé), plus robustes, moins coûteux et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique, même au prix d'un circuit de contrôle électronique plus complexe pour les systèmes de pompage solaires [Ara 05].



Figure(I.13) : Machine asynchrone [Bou 13].

✓ Moteurs synchrones

La machine synchrone est un convertisseur électromécanique réversible qui peut fonctionner soit en générateur (alternateur) où elle produit un courant électrique dont la fréquence est définie par la vitesse de rotation de la machine ; soit en moteur ; où il absorbe un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation de la machine .



Figure (I.14) : Machine synchrone [Bou 13].

I.2.3.4. Les pompes

Les pompes à eau sont classées selon leur principe de fonctionnement soit de type volumétrique ou centrifuge.

- **Pompe volumétrique**

Les pompes volumétriques utilisent les variations de volume du fluide pompé pour avoir une élévation de pression. Le fluide est initialement aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution du même volume [Sel 15].

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Ce déplacement est cyclique. Pendant un cycle, un volume de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé. Une pompe volumétrique est constituée [Lim 19] :

- D'un corps fixe ou stator.
- D'un ou de plusieurs éléments mobiles participant au déplacement de fluide à l'intérieur de la pompe.
- D'autres éléments mobiles destinés à mettre en mouvement les éléments précédents.

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. [Sel 15]



Figure (I.15) : Pompe volumétrique [Bou 13].

○ Caractéristiques d'une pompe volumétrique

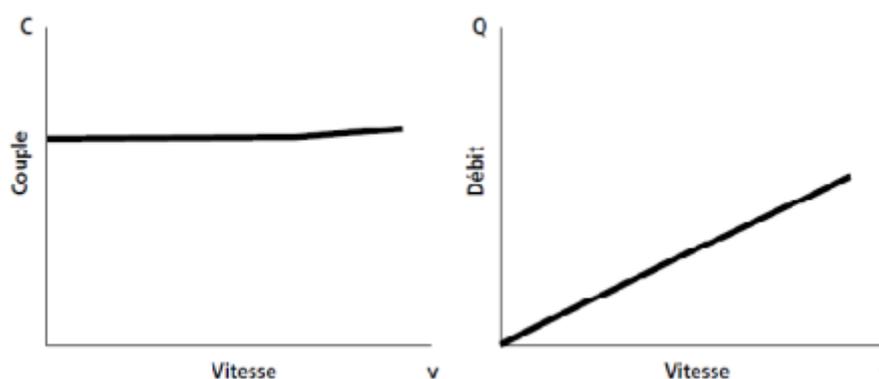


Figure (I.16) : Les caractéristiques couple (vitesse) et débit (vitesse) d'une pompe volumétrique [Bou 11].

La figure (I.16) montre que le couple est pratiquement constant en fonction de la vitesse et le débit est proportionnel à la vitesse.

● Pompe centrifuge

Les pompes centrifuges utilisent les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir une augmentation 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 pompes centrifuges sont de construction très simple en version de base. Elles sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation le rotor appelée aussi roue ou hélice qui tourne dans un carter appelée corps de pompe ou volute [Kar 17]. Elle se compose donc de :

- D'un distributeur : sorte de tubulure qui sert à conduire l'eau avec une vitesse et une direction convenable dans l'axe de la pompe.
- D'une roue : constituée par un moyen porté par un arbre et munie d'aubes à l'intérieur de deux flasques ouverts, semi-ouverts ou fermés.
- D'un corps de pompe : construit en fonte, en générale, en un seul bloc pour les pompes monocellulaires horizontales.
- Tubulure d'aspiration : il fait normalement partie du corps de pompe et la conduite d'arrivée y est reliée.
- Tubulure de refoulement : comme l'orifice d'aspiration, il fait partie du corps de pompe et la conduite de refoulement y est reliée.

- Étanchéité : Pour éviter les pertes ou l'écoulement du fluide autour de l'arbre à l'endroit où celui-ci se trouve en saillie du corps de pompe, on utilise des garnitures et des joints.
- Arbre et chemises : l'arbre est l'élément de la pompe sur lequel s'emboîtent les roues mobiles et qui reçoit la force motrice utilisée.
- Coussinets : Les coussinets supportent l'arbre dans le sens radial et axial et le roulement sur l'axe de tout le groupe rotor.
- Collecteur à volute : l'on peut dire qu'en général le corps de pompe prend sa propre physionomie à partir de la forme du transporteur, nous disons donc que le transporteur est la chambre située autour du refoulement de la roue mobile qui recueille et envoie le fluide aspirer de façon progressivement radiale
- Anneaux d'usure : ce sont des anneaux métalliques montés en série jumelés sur le moyeu de la roue mobile et sur le corps de la pompe.

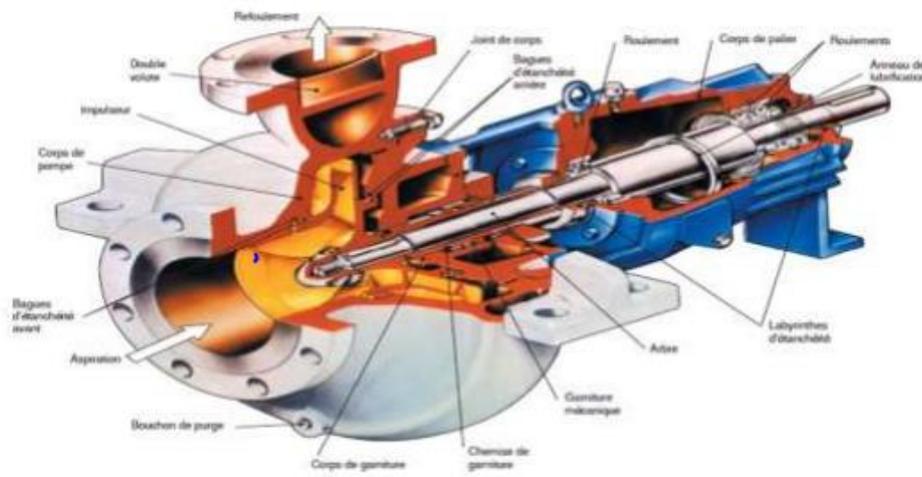


Figure (I.17) : Pompe centrifuge [Ali 15].

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont les suivantes [Sel 15] :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage ; cela est particulièrement important dans le cadre de l'utilisation de modules photovoltaïques car la pompe fonctionne même dans des conditions très faibles ensoleillement.
- Grâce à son extrême simplicité, le système peut être couplé directement sur une machine tournante : moteur électrique, essence, diesel ...
- Elles doivent être amorcées pour fonctionner, de manière à éviter tout risque de destruction si fonctionnement à sec. Certaines sont auto-amorçantes.
- Elles peuvent être aussi bien immergées que disposées en surface.

○ Caractéristiques d'une pompe centrifuge

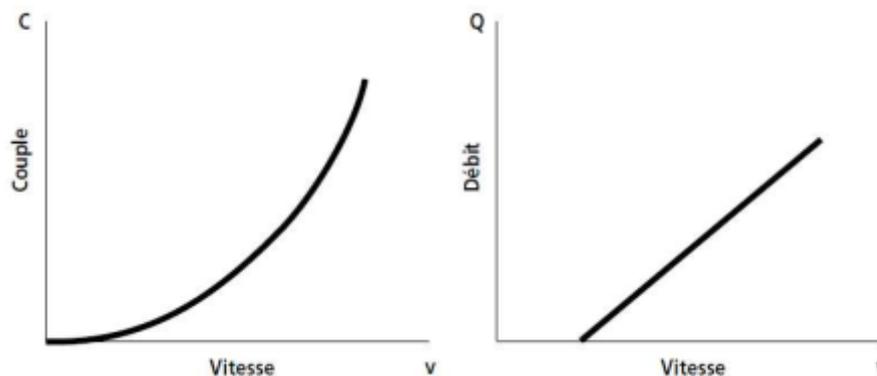


Figure (I.18) : Les caractéristique couple-vitesse et débit vitesse d'une pompe centrifuge [Bou 12].

On voit sur la figure (I.18) une réponse rapide du couple en fonction de la vitesse, et que le débit est proportionnel par rapport à la vitesse

I.3. Description du système à étudier

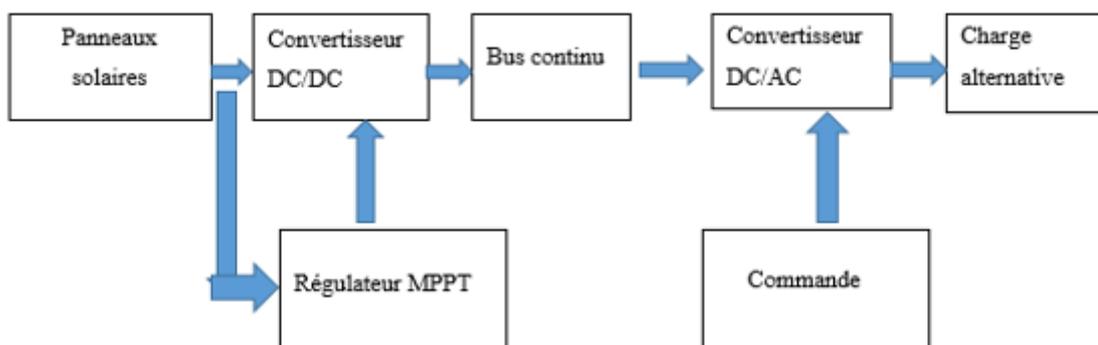


Figure (I.19) : Structure d'un système de pompage PV à étudier.

Ce système de pompage représente la meilleure solution pour l'approvisionnement en eau où l'électricité est absente surtout dans les zones isolées. Pour ce système de pompage il est préférable de stocker de l'eau que de stocker l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, fragile et coûteux.

Ce système qu'on vise à étudier est composé de :

- Un générateur photovoltaïque qui nécessite un fonctionnement de puissance optimal en intercalant entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique (hacheur ou onduleur) pour effectuer le transfert optimal de la puissance.

- Un groupe moteur-pompe.
- Un dispositif de commande et de contrôle.
- Une partie de stockage « réservoir ».

Pour cette étude on utilise un moteur asynchrone car il est plus robuste, moins cher, plus économique et plus pratique au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe et l'utilisation de ce moteur alternatif triphasé augmente l'autonomie et rends l'installation plus fiable. Ce moteur asynchrone est alimenté par un onduleur qui assure l'optimisation du générateur. Le choix de la pompe pour notre étude est la pompe centrifuge qui représente plusieurs avantages car son volume est moins encombrant, son service est silencieux et une mise en œuvre faible avec tous les types de moteurs électriques disponibles sur le marché.

La pompe centrifuge s'adapte aisément à tous les problèmes de traitement des liquides et elle répond aux exigences spécifiques des installations.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités d'un système de pompage photovoltaïque ainsi leurs différents composants. On a terminé par une petite description du système à étudier qui nous a permis de choisir les composants de ce système qu'on va modéliser élément par élément dans le chapitre suivant.

Chapitre II :

Modélisation du système global.

Introduction

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter les équations caractérisant le fonctionnement et les modèles mathématiques détaillés qui seront appliqués pour modéliser les différentes parties du système de pompage photovoltaïque, afin de mieux en évaluer son comportement. En premier lieu, nous représentons les modèles électriques d'un générateur PV et ses caractéristiques courant/tension et puissance/tension, puis le modèle du hacheur élévateur et de l'onduleur ainsi que le modèle du moteur asynchrone et de la pompe centrifuge.

II.1. Modélisation du système

La figure suivante (II.1) représente le schéma global du pompage photovoltaïque à étudier.

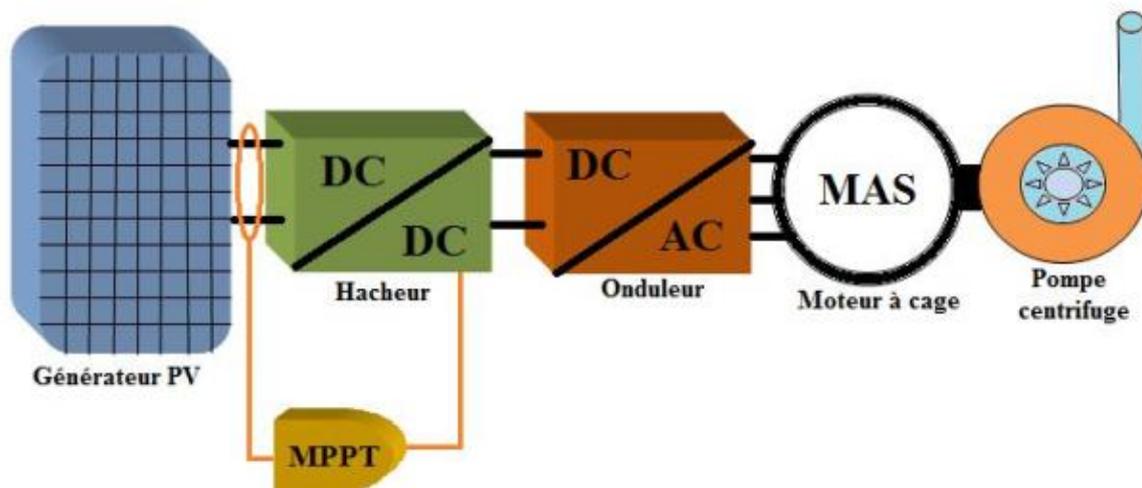


Figure (II.1) : Schéma simplifié du système de pompage photovoltaïque.

II.1.1. Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

Il existe plusieurs modèles électriques qui caractérisent le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, et ils ont comme un point commun la prise en compte de la cellule photovoltaïque comme un générateur du courant idéal. On distingue types différents types de modèle du module photovoltaïque [Dez 09], le modèle utilisé dans cette étude est celui d'une diode.

- **Modèle simplifié [Dez 09]**

Un module photovoltaïque est modélisé par une source du courant I_{ph} en parallèle avec une diode associée à une résistance série R_s qui modélise les pertes ohmiques comme le montre la figure (II.2).

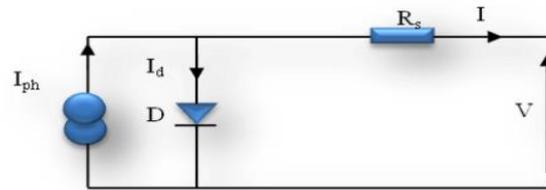


Figure (II.2) : Modèle simplifié d'un module PV.

Le courant résultant I est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{\alpha \cdot V_t} \right) - 1 \right)$$

(II.2)

Avec :

I_{ph} : le photo-courant ;

I_d : le courant traversant la diode ;

Le modèle de l'expression (II. 2) est nommé aussi « modèle à quatre paramètres » (I_{ph} , I_s , R_s , A).

- **Modèle à une diode [Dez 09]**

C'est un modèle semblable au modèle simplifié. Comme le montre la figure (II.2), une source de courant et une diode en parallèle avec une résistance en série, mais dans ce modèle une résistance shunt R_{sh} est ajoutée ayant une grande influence sur le courant généré par le modèle et qui est proche du courant d'une cellule réelle. Cette résistance sert à modéliser les pertes autour de la jonction dues aux impuretés et sur les coins de la cellule.

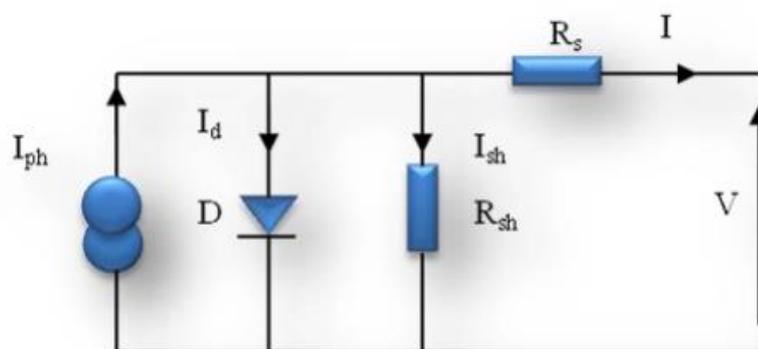


Figure (II.3) : Modèle à une diode d'un module PV.

Le courant généré par ce modèle est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$$I_{sh} = \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (II.4)$$

$$\text{Donc : } I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{\alpha V_t} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (II.5)$$

Le modèle de l'expression (II.5) est nommé aussi « modèle implicite avec cinq paramètres » (I_{ph} , I_s , R_s , R_{sh} , A).

Pour notre étude nous avons choisi un modèle simplifié à cinq paramètres (I_{sc} , V_{oc} , I_{mpp} , V_{mpp} , R_s) celui qui est montré sur la figure (II.3). Ce modèle tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques. Le tableau représenté sur l'annexe montre les données d'un panneau solaire de type SIEMENS SM 110-24.

Le courant I_{pv} du générateur photovoltaïque sous les conditions standards de fonctionnement en négligeant R_{sh} est donné par :

$$I_{pv} = I_{sc} [1 - K_1 (e^{(K_2 * V_{pv}^m - 1)})] \quad (II.6)$$

Où K_1 , K_2 , K_3 , K_4 et m sont des coefficients donnés par :

$$K_1 = 0.01175 \quad (II.7)$$

$$K_2 = \frac{K_3}{V_{oc}^m} \quad (II.8)$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{sc}(1 + K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{sc}} \right] \quad (II.9)$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1 + K_1}{K_1 I_{sc}} \right] \quad (II.10)$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \right]} \quad (II.11)$$

Où :

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}).

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale (V_{opt}).

I_{sc} : Courant en court-circuit.

V_{oc} : Tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (I_{pv}) est applicable que pour un niveau d'insolation ($G_{stc} = 1000W/m^2$) et de température particulière ($T_{stc} = 25^\circ C$), relatif aux conditions standard de fonctionnement.

Quand la température et l'ensoleillement varient on aura les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (II.11)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \times \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{sc, stc} \quad (II.12)$$

$$\Delta V_{pv} = -\alpha_{co} * \Delta T_c - R_s * \Delta I_{pv} \quad (II.13)$$

Avec :

G_{stc} et G : représentent respectivement le niveau d'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques respectivement ;

T_{stc}, T : représentent respectivement le niveau de la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques respectivement ;

$\Delta V_{pv}, \Delta I_{pv}$: représentent respectivement la variation de la tension et du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température ;

$\alpha_{sc}, \square_{co}$: représentent respectivement le coefficient d'incrémentation du courant I_{sc} et de la tension V_{co} quand la température de la surface augmente d'un degré Celsius ($A/^{\circ}C$), ($V/^{\circ}C$) sous les conditions standards de fonctionnement ;

R_s : la résistance série ;

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïques sont données par :

$$I_{pv, \text{nouv}} = I_{pv, \text{stc}} + \Delta I_{pv} \tag{II.14}$$

$$V_{pv, \text{nouv}} = V_{pv, \text{stc}} + \Delta V_{pv} \tag{II.15}$$

Les figures suivantes représentent respectivement l'influence de l'irradiation et de la température sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ du panneau solaire.

II.1.2. Caractéristiques puissance-tension et courant-tension d'un module photovoltaïque

Le module photovoltaïque produit une puissance par qui varie conformément aux variations de l'éclairement solaire et de la température du module [Rou 14].

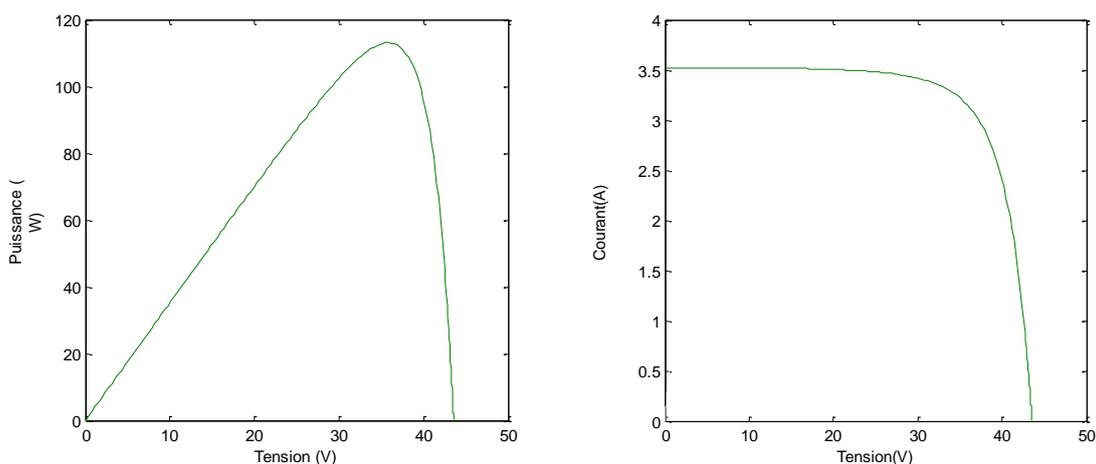


Figure (II.3) : Représente les deux caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ dans les conditions standards.

II.1.2.1. Influence de l'irradiation

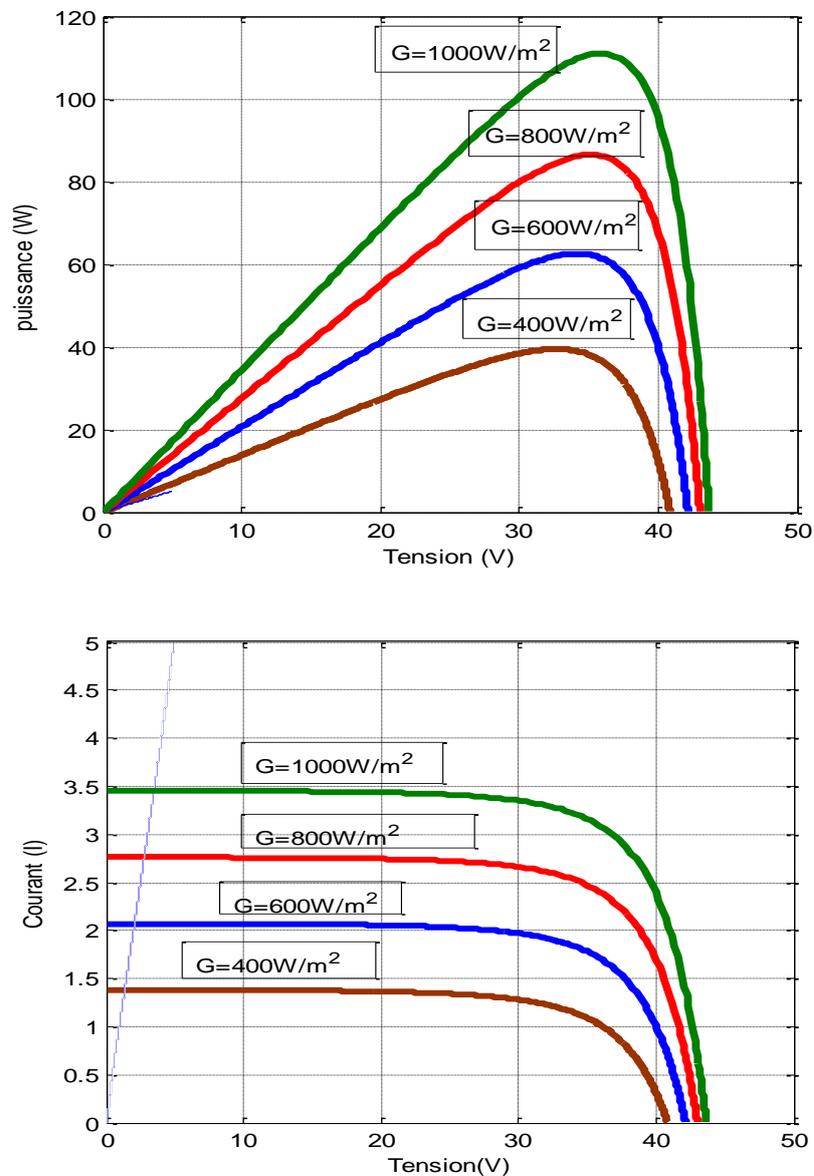
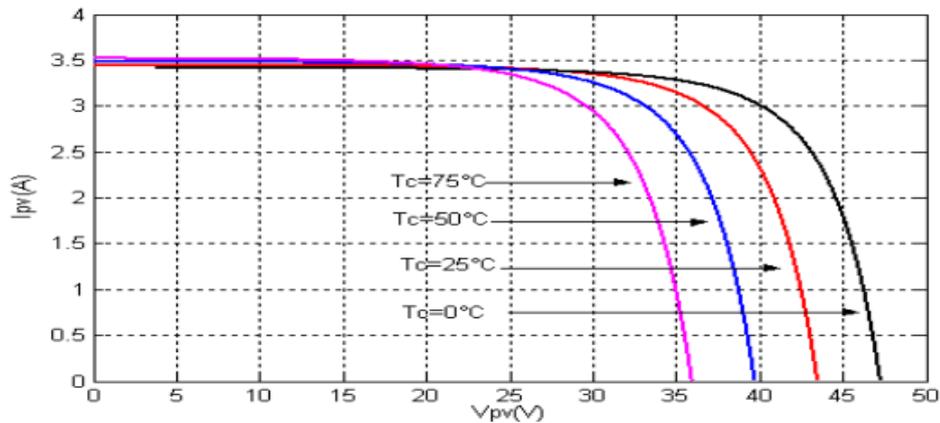


Figure (II.5) : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et $I_{pv}(V_{pv})$ à $T=25^{\circ}\text{C}$.

La figure (II.5) montre que le courant et la puissance du module photovoltaïque varie en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement ($G=400\text{W/m}^2$, $G=600\text{W/m}^2$, $G=800\text{W/m}^2$, $G=1000\text{W/m}^2$). On remarque que les graphes montrent la présence des points maximum sur les courbes de puissances qui correspond aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. La tension de circuit ouvert V_{oc} varie légèrement et le courant de court-circuit I_{sc} varie proportionnellement à l'irradiation.

II.1.2.2. Influence de température :



Figure(II.6) : Influence de la température sur la caractéristique I(V).

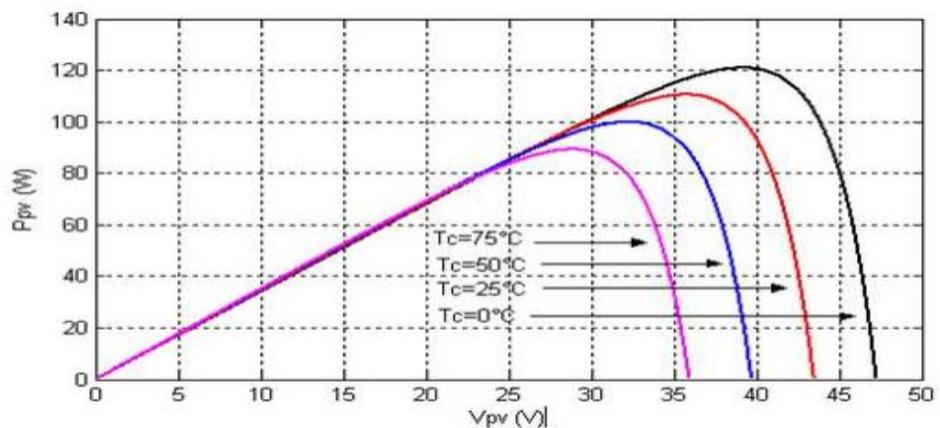


Figure (II.7) : Influence de la température sur la caractéristique P(V).

Le graphe montre que lors de l'augmentation de la température, la tension de circuit ouvert V_{oc} décroît fortement et le courant de court-circuit I_{sc} augmente légèrement.

II.2. Modélisation du convertisseur statique DC/DC [Gul 05] [Kes 14]

Le convertisseur statique DC/DC le plus fréquemment utilisé est l'hacheur parallèle qui est appelé aussi Boost. Ce convertisseur élévateur est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une tension continue de valeur supérieure. Il comprend deux séquences selon que l'interrupteur commandable soit fermé ou ouvert. Les figures (II.10) (a, b, c) présentent respectivement la structure globale du Boost, la structure avec l'interrupteur fermé, la structure avec l'interrupteur ouvert.

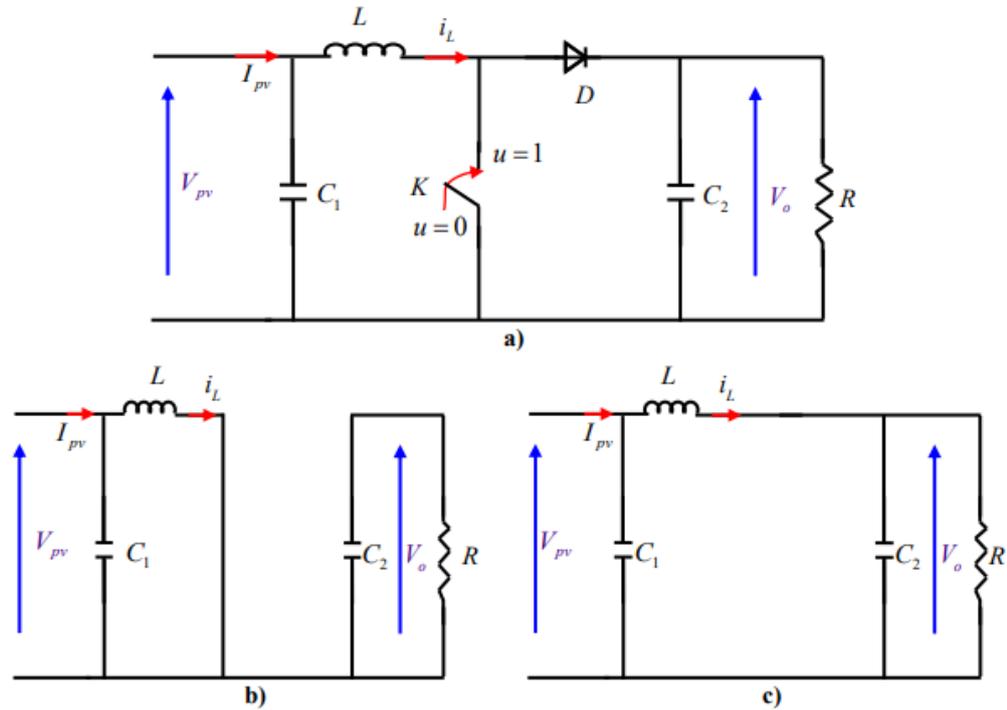


Figure (II.9) : Schéma électrique de base d'un convertisseur élévateur.

a) structure globale.

b) structure avec interrupteur fermé.

c) structure avec interrupteur ouvert.

Pour modéliser le convertisseur, on applique les lois de KIRCHHOFF (loi des mailles et loi des nœuds) aux circuits électriques caractérisant les deux séquences de fonctionnement. La première séquence est caractérisée par $u = 1$, l'interrupteur fermé et la diode ouverte. Les équations qui régissent le convertisseur sont données par :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} \\ \frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{RC_2} \end{cases} \quad (II.16)$$

La deuxième séquence de fonctionnement est caractérisée par $u = 0$, l'interrupteur ouvert et la diode fermée. Le système d'équations qui régit le convertisseur à l'état « off » est présenté ci-après :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} - \frac{V_o}{L} \\ \frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{RC_2} + \frac{i_L}{C_2} \end{cases} \quad (II.17)$$

A partir des deux systèmes d'équations précédents (II.21) et (II.22), le modèle mathématique du hacheur Boost est déduit :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}-V_o}{L} + \frac{V_o}{L} \mathbf{u} \\ \frac{dV_o}{dt} = -\frac{V_o}{RC_2} + \frac{i_L}{C_2} - \frac{i_L}{C_2} \mathbf{u} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Si on pose $x = [x_1 \quad x_2]^{\text{Tr}} = [i_L \quad V_o]^{\text{Tr}}$, alors l'expression (II.23) peut s'écrire :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{V_{pv}-x_2}{L} + \frac{x_2}{L} \mathbf{u} \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{x_2}{RC_2} + \frac{x_1}{C_2} - \frac{x_1}{C_2} \mathbf{u} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1^* \\ \dot{x}_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{x_2}{L} \\ -\frac{x_1}{C_2} & \frac{-x_2}{RC_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{x_2}{L} \\ -\frac{x_1}{C_2} \end{bmatrix} \mathbf{u} + \begin{bmatrix} \frac{V_{pv}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$\dot{x}^* = \frac{dx}{dt} = f(x, t) + g(x,t) \cdot \mathbf{u} + h \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$f(x) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{x_2}{L} \\ -\frac{x_1}{C_2} & \frac{-x_2}{RC_2} \end{bmatrix}, \quad g(x) = \begin{bmatrix} \frac{x_2}{L} \\ -\frac{x_1}{C_2} \end{bmatrix}, \quad h = \begin{bmatrix} \frac{V_{pv}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Le rapport entre la tension d'entrée et celle de la sortie est donné par :

$$\frac{V_o}{V_{pv}} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (\text{II.22})$$

II.3. Modélisation du l'onduleur de tension MLI

Le rôle principal de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur photovoltaïque en courant alternatif monophasé ou triphasé. Pour cette étude on prend en considération le cas idéal du l'onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente une impédance interne négligeable [SI A 11].

La figure suivante présente le schéma de l'onduleur triphasé :

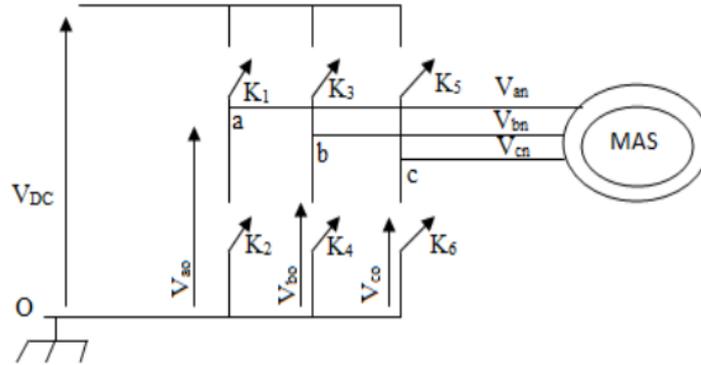


Figure (II.9) : Schéma électrique de l'onduleur triphasé relié à la MAS.

Les tensions V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} sont obtenues à partir de les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} : sont les tensions d'entrée de l'onduleur. On a pris le point(O) le point milieu d'un diviseur fictif à l'entrée comme référence pour les tensions d'entrée.

Les trois tensions à l'entrée continues sont données par la relation de Châle comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

V_{an} , V_{bn} et V_{cn} : sont les tensions de phase de la charge, appelés aussi les tensions de sortie de l'onduleur.

V_{no} : est la tension du neutre de la charge par rapport au point fictif (O).

On a :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.25})$$

En remplaçant (II.24) dans (II.25), on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.26})$$

En introduisant (II.26) dans (II.23), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co}) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{DC} \times S_1 \\ V_{bo} = V_{DC} \times S_2 \\ V_{co} = V_{DC} \times S_3 \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

S_i : est l'état de l'interrupteur K_i , tel que :

$S_i = 1$, si K_i est fermé.

$S_i = 0$, si K_i est ouvert.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$I_{DC} = S_1 \times i_{ach} + S_2 \times i_{bch} + S_3 \times i_{cch} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

S_1, S_2 et S_3 : Sont les fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.4. Modélisation de la machine asynchrone

Les moteurs asynchrones triphasés représentent plus de 80% du parc moteur électrique. On distingue deux types de machines selon leur enroulement rotoriques sont bobinés ou à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone est souvent utilisé dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. Il est caractérisé par un fonctionnement stable, une vitesse pratiquement constante et un rendement élevé autour de la charge nominale [Abd 11].

II.4.1. Modélisation dans le repère triphasé [Zeg 17]

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement sur la figure (II.10), dont les phases statoriques et rotoriques sont repérées respectivement par (as, bs, cs) et (ar, br, cr). Les phases rotoriques sont court-circuitées. Le nombre de paires de pôles est égal à [p] et on note que :

L'angle mécanique (θ) définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases (as) et (ar) choisis comme axes de référence. Les expressions générales des tensions du moteur asynchrone s'obtiennent en écrivant que la tension appliquée à chacun des enroulements est la somme de la chute de tension ohmique et de la chute de tension inductive due au flux total qui le traverse.

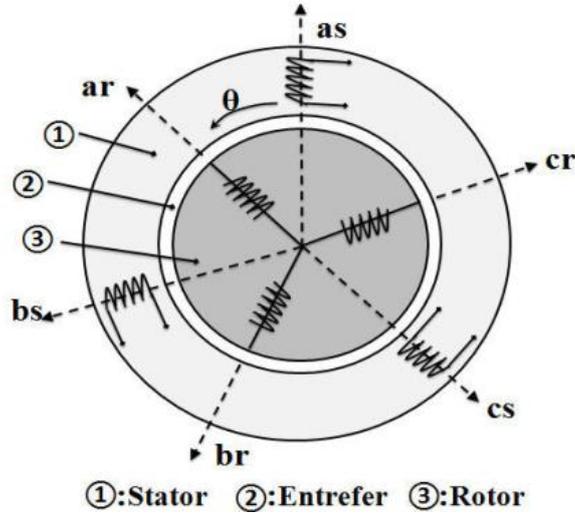


Figure (II.10) : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

• **Equation électrique**

Par l'application de la loi de Faraday à chaque enroulement de la machine représentée par la figure (II.10), on obtient :

Au stator :

$$V_s = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\Psi_s] \tag{II.31}$$

Au rotor :

$$V_r = 0 = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\Psi_r] \tag{II.32}$$

Où :

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, [\Psi_s] = \begin{bmatrix} \Psi_{as} \\ \Psi_{bs} \\ \Psi_{cs} \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \tag{II.33}$$

$$V_r = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}, [\Psi_r] = \begin{bmatrix} \Psi_{ar} \\ \Psi_{br} \\ \Psi_{cr} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \tag{II.34}$$

• **Equations magnétiques**

Les hypothèses que nous avons présentées, conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants. Elles sont exprimées sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \tag{II.35}$$

Où :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

$$[L_{RR}] = \begin{bmatrix} L_R & M_R & M_R \\ M_R & L_R & M_R \\ M_R & M_R & L_R \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

$$[M_{SR}] = [M_{RS}]^T = M_{SR} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Avec :

L_{SS} : Matrice des inductances statoriques ;

L_{RR} : Matrice des inductances rotoriques ;

L_{SR} : Inductance propre d'une phase statorique ;

L_{RS} : Inductance propre d'une phase rotorique ;

M_S : Inductance mutuelle entre phases statoriques ;

M_R : Inductance mutuelle entre phases rotoriques ;

M_{SR} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase de rotor ;

θ_r : L'angle électrique entre une phase du rotor et la phase correspondante du stator ;

En remplaçant (II.40) dans (II.37) et puis dans (II.38), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} V_s = [R_s][i_s] + [L_{SS}] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{SR}][i_r]) \\ V_r = [R_r][i_r] + [L_{RR}] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{RS}][i_s]) \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

• Equations mécaniques

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse).

$$C_e - C_r = J \frac{d}{dt} \Omega + f \Omega \quad (\text{II.40})$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = p [i_s] \frac{d}{dt} [M_{SR}][i_r] \quad (\text{II.41})$$

Avec :

J : Moment d'inertie du rotor ;

f : Coefficient de frottement visqueux ;

Ce : Couple électromagnétique ;

Cr : Couple résistant ;

p : Nombre de pair de pôle ;

II.4.2. Transformation du système triphasé

La transformation triphasée-biphasée aboutit à une famille de modèles de la machine asynchrone où les grandeurs statoriques et rotoriques sont projetées sur deux axes en quadrature. L'idée de cette transformation repose sur le fait qu'un champ tournant créé par un système triphasé équilibré peut l'être aussi, à l'identique, par un système biphasé de deux bobines décalées de $\frac{\pi}{2}$ dans l'espace, alimentée par des courants déphasés de $\frac{\pi}{2}$ dans le temps. On se donne pour objectif que les forces magnétomotrices et la puissance instantanée soient conservées. Les équations (II.35) et (II.36) de la matrice des inductances mutuelles étant à éléments non constants et les coefficients des équations (II.36) sont variables et la résolution analytique de ce système d'équations se heurte à des difficultés insurmontables particulièrement, lors de l'étude des phénomènes transitoires. Pour cela, on utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Donc l'étude analytique du comportement du système est alors relativement difficile, vu le grand nombre de variable. On utilise alors des transformations qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Ceci permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé.

II.4.3. Transformation de Park

Pour passer du système triphasé abc , au système biphasé dq , il faut utiliser les transformations de Park :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

Où :

x_a, x_b, x_c : Sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées ;

x_d, x_q : Sont les valeurs instantanées des grandeurs biphasées ;

x_h : La composante homopolaire ;

$[P]$ et $[P]^{-1}$: Représente la matrice de Park et de Park inverse respectivement.

Les matrices de Park sont donnés par :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

Où θ est l'angle entre l'axe d de référence dans le système triphasé.

L'application de la transformée de Park aux équations (II.31) et (II.32) et l'annulation des composants homopolaires au rotor et au stator dans un système équilibré nous donne le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} + M \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_a (L_r i_{qs} + M i_{qr}) \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + M \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_a (L_r i_{ds} + M i_{dr}) \\ 0 = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{ds}}{dt} + M \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r (L_s i_{qs} + M i_{qs}) \\ 0 = R_r i_{qr} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + M \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r (L_s i_{ds} + M i_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

On doit exprimer ce système dans un référentiel commun, donc nous avons choisi comme repère un référentiel fixe par rapport au stator, l'angle entre l'axe d de la phase du stator est constant et les grandeurs sont sinusoïdales de pulsation égale à celle de l'alimentation. On obtient :

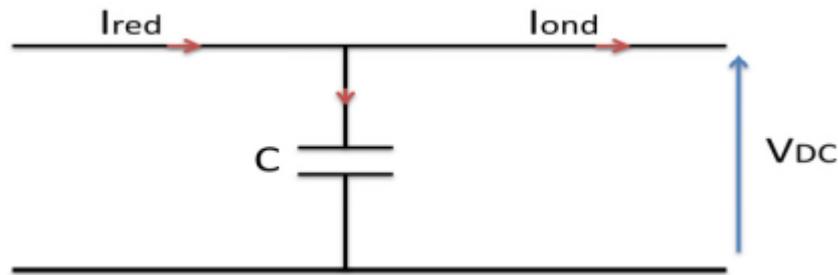
$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} + M \frac{di_{dr}}{dt} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + M \frac{di_{qr}}{dt} \\ 0 = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{ds}}{dt} + M \frac{di_{ds}}{dt} - \omega (L_r i_{qr} + M i_{qs}) \\ 0 = R_r i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + M \frac{di_{qs}}{dt} + \omega (L_r i_{dr} + M i_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_e = p(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.47})$$

II.5. Modélisation du bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité qui est pour objectif de lissage de la tension. Grace à un hacheur survolteur, la tension du bus continue qui est en amont du convertisseur DC/AC reste constante par rapport à sa valeur de référence [Tab 13].



Figure(II.13) : Filtrage capacitif.

On modélise le condensateur du bus continu par [For 00] :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_c \quad (\text{II.48})$$

On obtient la tension de bus continu par l'intégration de son courant capacitif :

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int I_c \cdot dt \quad (\text{II.49})$$

Le courant du condensateur est issu d'un nœud ou circulent deux courants :

$$I_c = I_{red} - I_{ond} \quad (\text{II.50})$$

Avec :

C : capacité de filtrage du bus continu ;

II.6. Modélisation de la pompe centrifuge

La puissance hydraulique de la pompe centrifuge est exprimée par l'équation suivante :

$$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot H_{mt} \cdot Q \quad (\text{II.51})$$

Avec :

P_{hyd} : La puissance hydraulique (W) ;

ρ : La masse volumique de l'eau (1000kg/m³) ;

g : L'accélération de la pesanteur (9.81m/s²) ;

H_{mt} : Hauteur manométrique totale (m) ;

Q : Le débit volumique (m³/s) ;

On exprime l'équation de la puissance mécanique par :

$$P_{méc} = P_{hyd} / \eta_p \quad (\text{II.52})$$

Avec :

$P_{méc}$: La puissance mécanique (W) ;

η_p : Le rendement global de la pompe ;

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = k_r \cdot \Omega^2 \quad (\text{II.53})$$

Où :

$$k_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{II.54})$$

k_r : Coefficient de proportionnalité [(Nm/rad/s)²] ;

Avec :

P_n : La puissance nominale du moteur asynchrone (W) ;

Ω_n : La vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s) ;

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque qui est constitué d'un générateur photovoltaïque, des convertisseurs statiques (hacheur et onduleur), du moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge. La modélisation de ces composants va nous aider à étudier la commande de système globale de pompage photovoltaïque qu'on va présenter dans le chapitre suivant.

Chapitre III :

Commande du système global.

Introduction

Dans ce chapitre nous allons procéder à la commande du système global de pompage photovoltaïque en étudiant en premier on va appliquer la commande vectorielle à la machine asynchrone et des algorithmes d'optimisation (MPPT, P&O) pour avoir la puissance maximal nécessaire qui nous va permettre d'alimenter notre charge.

III.1. Commande vectorielle de la machine asynchrone

Le modèle de la machine asynchrone présente un couplage naturel entre le courant qui crée le couple électromagnétique et le courant qui crée le flux magnétique qui rend la commande de la machine plus difficile contrairement à la machine à courant à courant continu

On distingue deux types de commande : la commande vectorielle directe et la commande vectorielle indirecte. La commande vectorielle dépasse largement la commande scalaire par ces capacités lorsqu'il s'agit d'un contrôle à haute performance, et reste très compétitive dans le domaine de la commande des machines électriques. [Ham 13]

Le but de la commande vectorielle est d'avoir un contrôle indépendant du couple et du flux magnétique en régime transitoire similaire au contrôle de la machine à courant continu à excitation séparée qui assure une réponse rapide du couple.

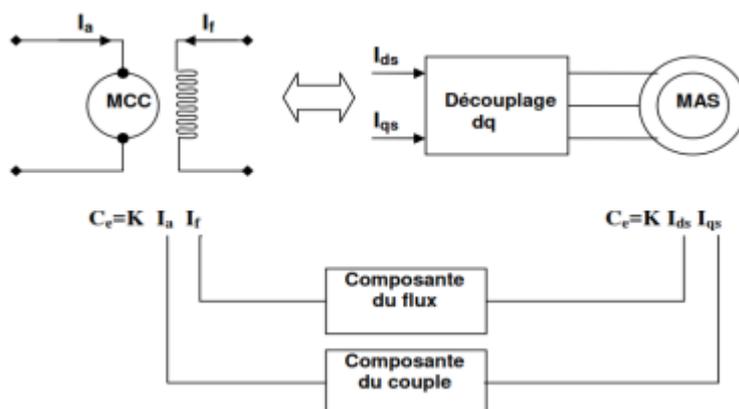


Figure (III.1) : Schéma de principe de découplage de la MAS par analogie avec la MCC [Ham 13].

III.1.1. Principe de la commande par orientation du flux rotorique

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une des deux composantes du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela il faut choisir un système d'axes (d,q) et une loi de commande qui assure le découplage du couple et du flux.

La commande vectorielle directe par orientation du flux est basée sur l'orientation du repère tournant d'axes (d,q) tel que l'axe d soit confondu avec la direction de Ψ , le flux étant orienté sur l'axe d.

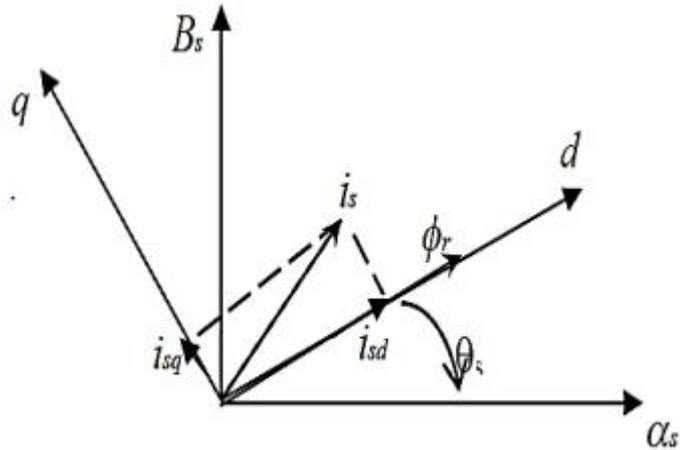


Figure (III.2) : Orientation du flux rotorique.

Dans ce cas, on choisit l'orientation du repère telle que :

$$\Psi_{rd} = \Psi_r \text{ et } \Psi_{rq} = 0 \quad (\text{III.1})$$

Le couple s'écrit alors :

$$T_{em} = p \frac{M}{L_r} \Psi_r \cdot i_{sq} \quad (\text{III.2})$$

On régule le flux en agissant sur la composante i_{sd} du courant statorique et on régule le couple en agissant sur la composante i_{sq} . On a alors deux variables d'action comme dans le cas de la MCC.

- Le flux est gardé constant à sa valeur nominale en imposant le courant i_{sd} constant.
- On peut imposer des variations de couple en agissant sur le courant i_{sq} .

Les tensions sont données par les relations suivantes :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Psi_{sq} \quad (\text{III.3})$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Psi_{sd} \quad (\text{III.4})$$

$$0 = R_r i_{rd} + \frac{d\Psi_r}{dt} \quad (\text{III.5})$$

$$0 = R_r i_{rq} + \omega_r \cdot \Psi_r \quad (\text{III.6})$$

Les flux sont donnés par les relations suivantes :

$$\Psi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \quad (\text{III.7})$$

$$\Psi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \quad (\text{III.8})$$

$$\Psi_r = M \cdot i_{sd} + L_r \cdot i_{rd} \quad (\text{III.9})$$

$$0 = M \cdot i_{sq} + L_r \cdot i_{rq} \quad (\text{III.10})$$

On suppose que la commande maintienne : $\Psi_{rd} = \Psi_r = \text{constante}$ et à partir de l'équation (III.5), on aura :

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = -R_r \cdot i_{rd} \quad (\text{III.11})$$

Par ailleurs, l'équation (III.6) permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotorique sous la forme suivante :

$$\Psi_r = -\frac{R_r}{\omega_r} \cdot i_{rq} \quad (\text{III.12})$$

La relation (III.12) correspond à la condition de calage du référentiel d'axes d et q dans le repère rotorique. Elle donne la valeur que doit avoir Ψ_r en fonction de i_{rq} avec : $\frac{d\Psi_{rq}}{dt} = 0$ et $i_{rd} = 0$ pour que le flux soit orienté.

On peut exprimer le courant i_{rd} et i_{rq} à partir de la relation (III.9) et (III.10) comme suit :

$$i_{rd} = \frac{\Psi_r - M \cdot i_{sd}}{L_r} \quad (\text{III.13})$$

$$i_{rq} = -\frac{M}{L_r} \cdot i_{sq} \quad (\text{III.14})$$

Le repère orienté impose $\Psi_{rq} = 0$. Connaissant le courant i_{sq} , l'expression du couple électromagnétique donné par la relation (III.2) devient :

$$T_{em} = \frac{p \cdot M}{L_r} \Psi_r \cdot i_{sd} \quad (\text{III.15})$$

A partir des équations de la machine asynchrone non saturée dans le repère da Park solidaire du champ tournant, on peut écrire :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} - \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot i_{sq} \quad (\text{III.16})$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s \frac{M}{L_r} \Psi_r + \omega_s \cdot \sigma L_s \cdot i_{sd} \quad (\text{III.17})$$

$$0 = \frac{1}{T_r} \Psi_r + \frac{d\Psi_r}{dt} - \frac{M}{T_r} i_{sd} \quad (\text{III.18})$$

$$0 = -\frac{M}{T_r} i_{sq} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Psi_r \quad (\text{III.19})$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \quad : \text{Le coefficient de dispersion.}$$

Dans la relation (III.11), on remplace i_{rd} par sa valeur exprimée en (III.13), il vient :

$$\Psi_r = \frac{M \cdot i_{sd}}{1 + T_r s} \tag{III.20}$$

Avec :

T_r : Constante de temps rotorique ;

s : Opération de dérivation ;

On se sert de la relation angulaire interne $\omega_s = \omega_r + p \cdot \Omega$ dans l'équation (III.12) on remplace i_{rq} par sa valeur en (III.14), on aura :

$$\omega_r = \frac{M}{T_r \Psi_r} \cdot i_{sq} \tag{III.21}$$

On obtient finalement :

$$\omega_s = \frac{M}{T_r \Psi_r} \cdot i_{sq} + p \Omega \tag{III.22}$$

L'équation (III.22) correspond à un autopilotage de la machine, qui force à zéro une des grandeurs de sortie et permet ainsi de découpler les deux grandeurs restants dans l'expression du couple.

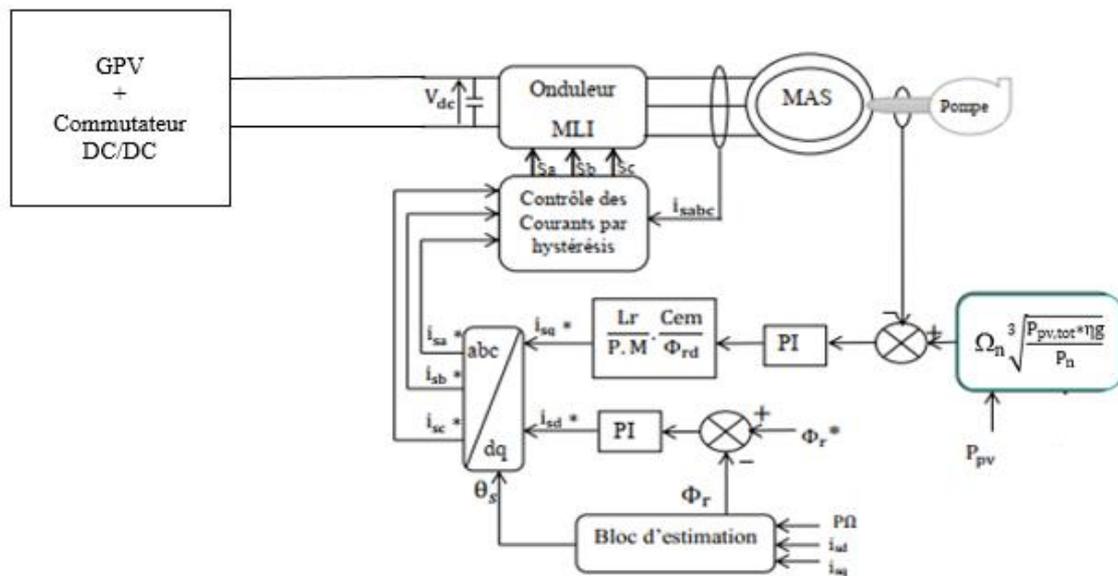


Figure (III.3) : Schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté [Ham 13].

III.2. La commande du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking)

La commande MPPT, liée à un niveau de conversion DC/DC intermédiaire, permet par définition à un générateur photovoltaïque de fonctionner de telle sorte qu'il produise en permanence la puissance maximale quelles que soient les conditions climatiques (ensoleillement, température).

La commande de l'onduleur place le système au point de fonctionnement maximal (V_{opt} et I_{opt}), en gardant la bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer un transfert direct de la puissance maximale à la charge.

Le principe de la commande MPPT est de fournir la puissance maximale P_{max} au point de la tension optimale V_{opt} du panneau photovoltaïque. Les caractéristiques ($I_{pv}(V_{pv})$) et ($P_{pv}(V_{pv})$) sont essentielles pour la conception de la puissance maximale (MPP). On obtient le MPP lorsque la pente est nulle ($dP_{pv}/dV_{pv}=0$). Pour obtenir le MPP de fonctionnement on règle la tension du générateur photovoltaïque en telle sorte qu'elle augmente lorsque la pente est positive et qu'elle diminue lorsque la pente est négative. On peut montrer la caractéristique (puissance, tension) et (puissance, courant) sur les deux figures suivantes :

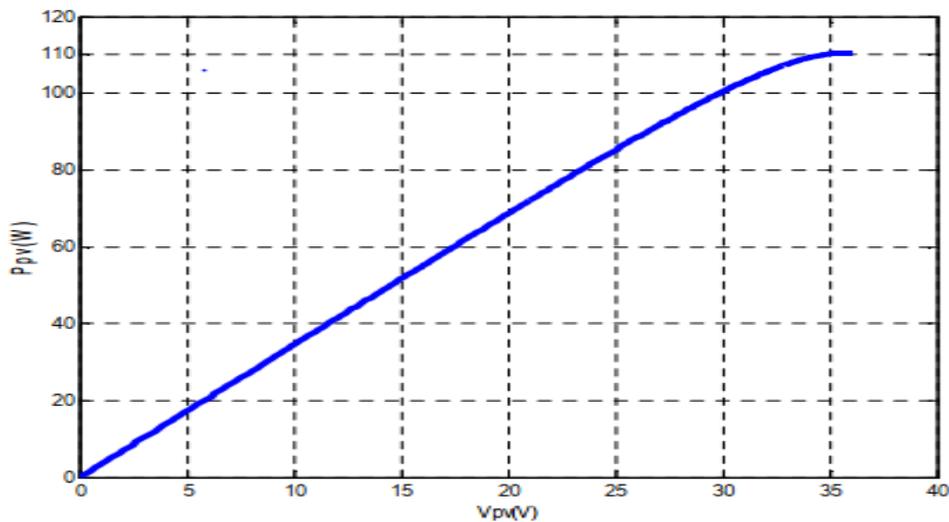
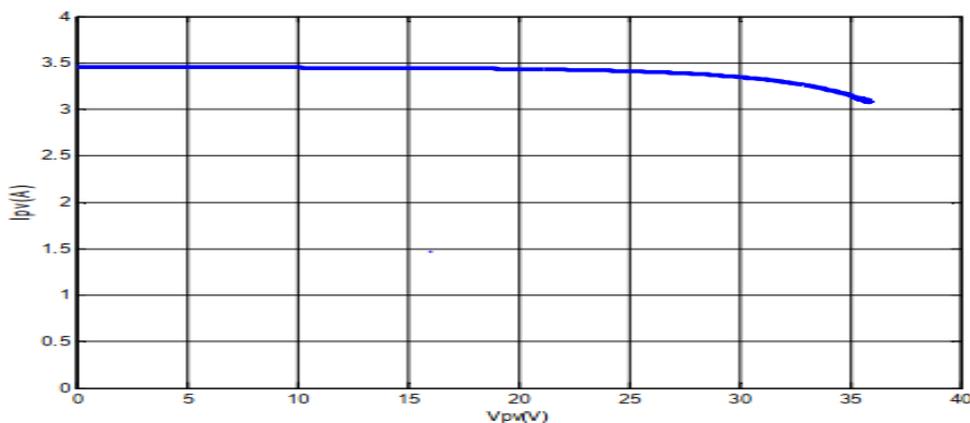


Figure (III.4) : Caractéristique (puissance, tension) dans les conditions standards de la commande MPPT [Ben 16].



Figure(III.5) : Caractéristique (courant, tension) dans les conditions standards de la commande MPPT [Ben 16].

• Principe de la méthode Perturbation et Observation (P&O)

La méthode Perturbation & Observation est de type Hill Climbing. C’est la méthode la plus utilisée dans la pratique grâce à sa facilité de mise en œuvre. Le principe de la méthode P&O se base sur le fonctionnement du système à sa puissance maximale par incrémentation ou décrémentation de la tension du point de fonctionnement et l’observation de son influence sur la variation de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque des perturbations de valeur très faible. Selon l’observation, l’algorithme décide sur l’acte à faire pendant la prochaine itération. Quatre cas de situation P&O sont envisagés sur la figure (III.8) et récapitulé dans le tableau (III.1) [Bel 15].

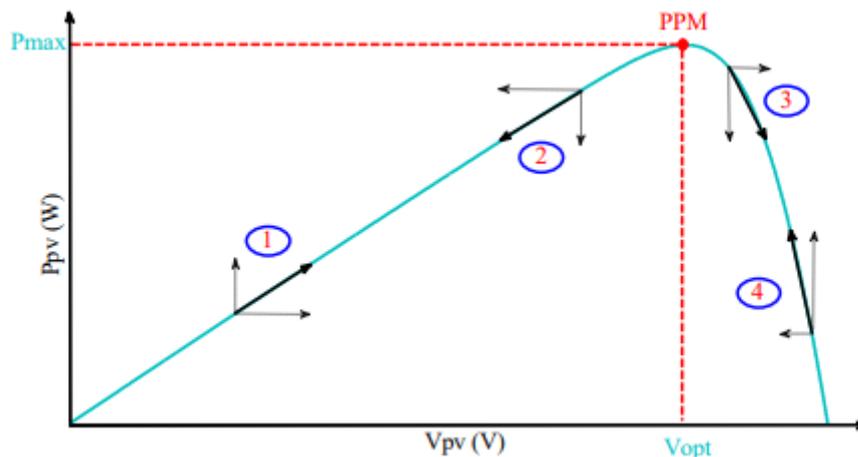


Figure (III.6) : Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O [Bel 15].

Tableau (III.1) : Principe de l’algorithme P&O [Bel 15].

Cas n°	ΔV	ΔP	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	+	Mauvais	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	-	Mauvais	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	-	Bon	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

Pour une perturbation de tension on trouve que si la puissance du panneau $P(k)$ est supérieure à la valeur de puissance précédente $P(k-1)$ la perturbation de tension continuera dans la même direction que celle a été prise au dernier cycle (avec C qui présente la largeur du pas de perturbation), dans le cas contraire la perturbation sera inversée pour que le point de fonctionnement converge vers le MPP. La figure (III.7) représente l'algorithme de la méthode P&O.

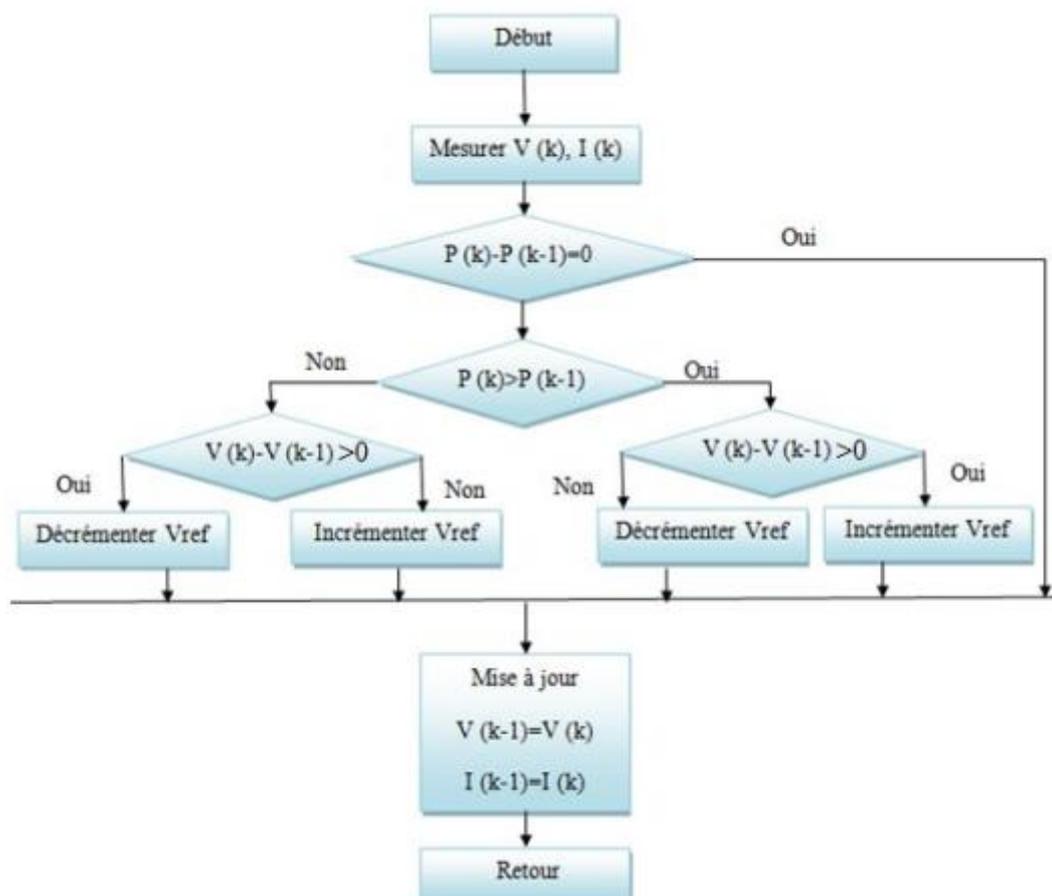


Figure (III.7) : Organigramme de l'algorithme P&O [Afi 18].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande globale du système de pompage PV. La commande de ce système est basée sur la commande vectorielle de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique qui fonctionne avec un algorithme d'optimisation MPPT de type P&O. Le prochain chapitre portera une étude de dimensionnement des besoins en eau pour la simulation du système global.

Chapitre IV :

Simulation et résultats.

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de la simulation du système globale du pompage photovoltaïque avec la commande vectorielle à flux rotorique orienté sous le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce système est composé d'une machine asynchrone accouplée à une pompe centrifuge et alimentée par un générateur photovoltaïque composé de onze panneaux solaires.

IV.1. Etude dimensionnelle du système de pompage photovoltaïque [Ser 12]

IV.1.1. Evaluation des besoins quotidiens de l'eau

Pour déterminer la consommation de l'eau d'une population on doit d'abord savoir leur mode de vie qui se diffère d'une place à une autre. Pour les zones isolées et rural l'estimation des besoins en eau est entre 20 à 30 litres par tête de bétail. Les besoins quotidiens de l'eau dépendent de certain facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année et la méthode d'irrigation). La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau par jour et l'autonomie requise du système.

IV.1.2. Calcule de l'énergie électrique nécessaire

Pour calculer l'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau pour une certaine hauteur donnée pendant une journée on utilise l'équation suivante :

$$E_{el} = \frac{C_h \cdot H_{mt} \cdot Q}{n_{mp}} \quad (IV.1)$$

E_{el} : L'énergie électrique [KWh] ;

n_{mp} : Le rendement d'un groupe moteur-pompe ;

$$C_h = \frac{\rho \cdot g}{3600} = 2.725 \quad (IV.2)$$

IV.1.3. Détermination de l'énergie solaire disponible

Pour déterminer l'énergie solaire nécessaire on doit connaitre l'énergie moyenne reçu par jour sur le site pendant une période donnée [Bed 16], et de connaitre les ressources solaires disponible [Che 07]

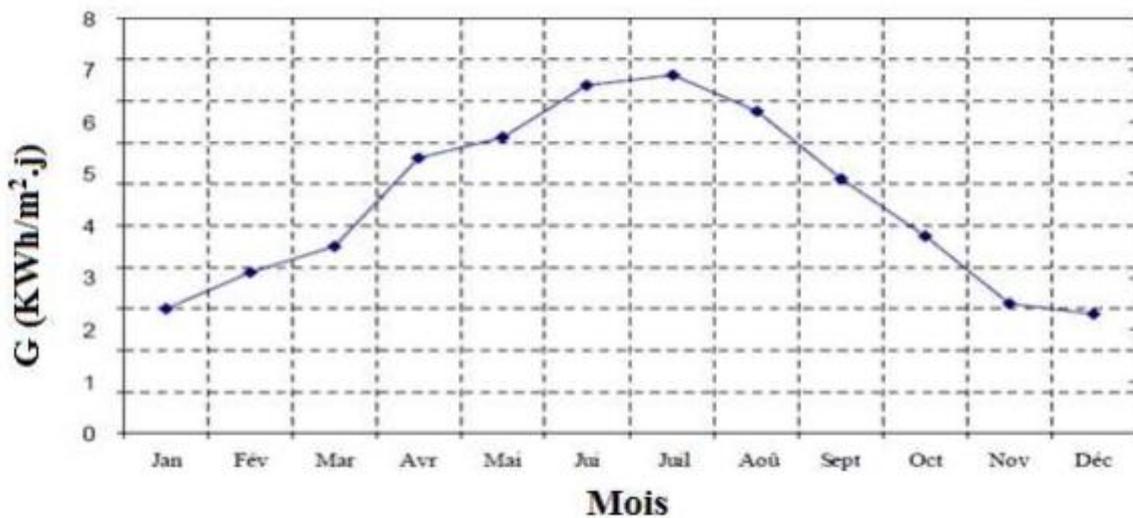


Figure (IV.1) : Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaia de 1998 à 2007 [Lal 05].

IV.1.4. Inclinaison et orientation optimales des capteurs photovoltaïques

L'énergie fournie par les capteurs photovoltaïques est proportionnelle à l'ensoleillement. Pour recevoir une quantité d'énergie solaire importante on doit tenir compte de ces capteurs qui dépendent du bon choix du lieu de l'installation, d'inclinaison et de l'orientation de ces capteurs. Pour gagner cette énergie il faut que les rayons soient proches de la perpendiculaire au plan des panneaux, donc pour avoir une installation idéale on doit maintenir les panneaux sur un angle droit avec les rayons solaires où les orienté en plein Sud dans l'hémisphère Nord et en plein Nord dans l'hémisphère Sud [Tra 11] [Ara 05].

IV.1.5. Mois de dimensionnement

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus désavantageux, son principe est de faire un bilan énergétique dans les conditions les plus difficiles pour le système. C'est-à-dire que si le système fonctionne pendant ce mois, il continuera à fonctionner les autres mois. Il nous assure un fonctionnement annuel. L'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire correspondant à ce mois, seront utilisées pour le choix des composants du système [Tra 11].

IV.1.6. Choix des composants du système

Pour effectuer le choix des composants on doit dimensionner la pompe centrifuge et le champ photovoltaïque.

➤ Dimensionnement de la pompe centrifuge

Pour le cas de cette étude on a choisi un débit journalier de $25\text{m}^3/\text{jour}$ et d'une hauteur manométrique $H_{mt}=15\text{m}$. Le rendement de pompe choisie est de 48% et celui du moteur est de 80%. Le rendement global du moteur-pompe est alors de 44%. L'énergie électrique par la pompe qu'on aura d'après l'équation (IV.1) est égale à :

$$E_{el} = \frac{2.725 \cdot 15 \cdot 25}{0.48} = 2128.9 \text{ wh/j} \quad (\text{IV.3})$$

➤ Dimensionnement du champ photovoltaïque

D'après la figure (IV.1) on remarque le mois de décembre est le mois les plus défavorables dans l'année pour une inclinaison de 36.43° , pour cela l'ensoleillement maximal qu'on peut avoir par jour est de 2.2h. Pour notre étude on suppose que les pertes dues à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur sont égale à 20%. On peut calculer la puissance du champ photovoltaïque (P_c) par l'équation suivante :

$$P_c = \frac{E_{el}}{t(1-\text{pertes})} \quad (\text{IV.4})$$

$$P_c = \frac{2128.9}{2.2(1-0.2)} = 1209.6\text{W}$$

Pour les panneaux de type SIEMENS 110W, $V_{opt}=35\text{V}$, $I_{opt}=3.15\text{A}$, le nombre de panneau solaire à utiliser est calculé par :

$$N_{pv} \geq ENT \left[\frac{P_c}{P_{pv,n}} \right] \quad (\text{IV.5})$$

$$N_{pv} \geq ENT \left[\frac{1209.6}{110} \right] = 10.99 \approx 11 \text{ Panneaux.}$$

On peut calculer la puissance photovoltaïque d'un panneau solaire par :

$$P_{pv} = V_{opt} * I_{opt} = 35 * 3.15 = 110.25\text{W} \quad (\text{IV.6})$$

Donc la puissance photovoltaïque total égale à :

$$P_{pv,tot} = P_{pv} * N_{pv} = 110 * 11 = 1210\text{W} \quad (\text{IV.7})$$

La puissance photovoltaïque total doit être supérieur à la puissance photovoltaïque nominale du moteur qui est égale à $P_n= 1100\text{W}$.

La tension à la sortie du générateur photovoltaïque totale sera :

$$V_{pv,tot} = N_{pv} * V_{opt} = 11 * 35 = 385\text{V} \quad (\text{IV.8})$$

Le courant à la sortie de générateur photovoltaïque total sera :

$$I_{pv} = \frac{P_{pv,tot}}{V_{pv,tot}} = \frac{1210}{385} = 3.14 \text{ A} \quad (\text{IV.9})$$

IV.2. Simulation du système de pompage photovoltaïque

La vitesse de référence Ω_{ref} en fonction de la puissance photovoltaïque optimisée par l'algorithme MPPT « P&O », est calculée par l'expression suivante :

$$\Omega_{ref} = \Omega_n \sqrt[3]{\frac{P_{pv,tot} * \eta_g}{P_n}} \tag{IV.10}$$

Avec :

Ω_n : La vitesse nominale du moteur asynchrone [rad/s] ;

$P_{pv,tot}$: La puissance photovoltaïque totale [W] ;

P_n : La puissance nominale du moteur [W] ;

η_g : Le rendement du moteur ;

- **Le schéma global de fonctionnement**

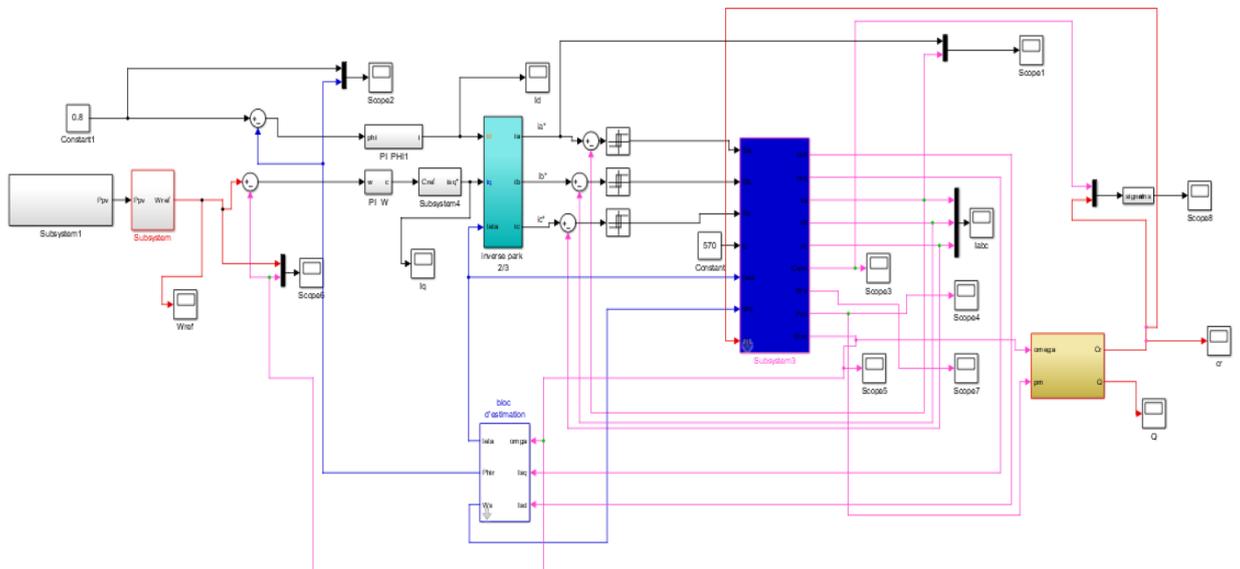


Figure (IV.2) : Schéma global de fonctionnement du système de pompage PV.

IV.3. Résultats de simulation et interprétations

IV.3.1. Fonctionnement sous différents niveaux d'ensoleillement et de température

Nous allons simuler le système global à des différents niveaux d'ensoleillement ($G=1000\text{W/m}^2$ et $G=800\text{W/m}^2$), et pour une température $T_c=25^\circ\text{C}$ qui augmente jusqu'à $T=40^\circ\text{C}$ pour des différents intervalles du temps. Les deux figures suivantes (IV.2) et (IV.3), montrent les courbes d'ensoleillement et de la température respectivement.

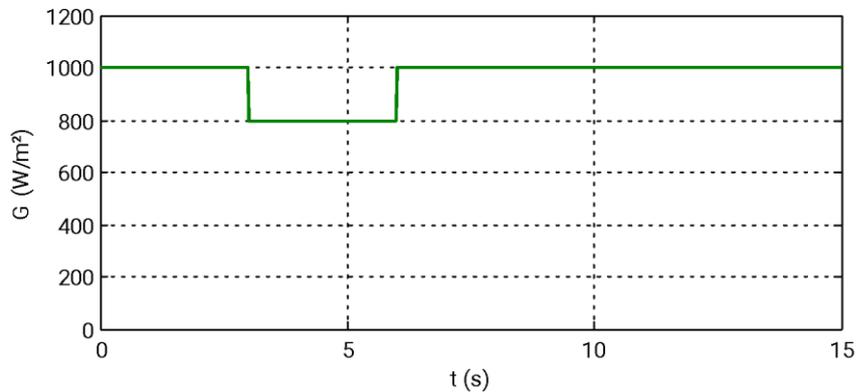


Figure (IV.3) : Courbe de la variation d'ensoleillement.

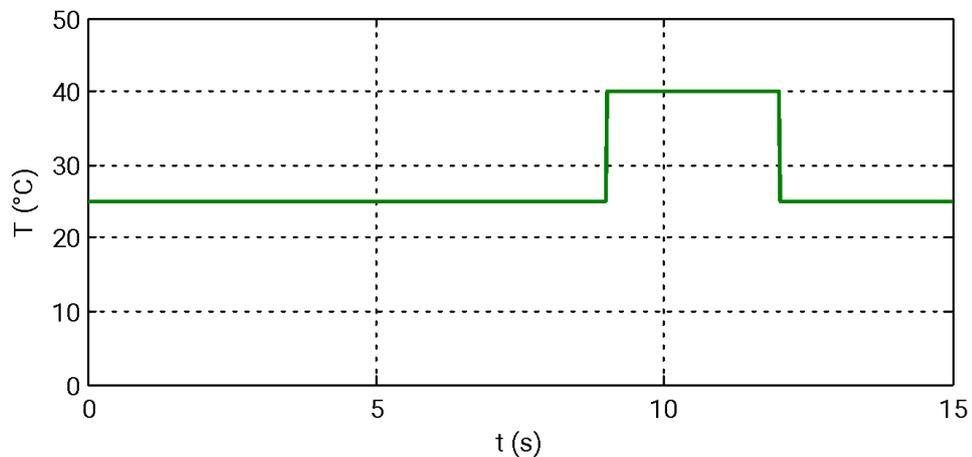


Figure (IV.4) : Courbe de la variation de la température.

Après la simulation avec ces variations d'ensoleillement et de la température, nous avons obtenues les courbes suivantes :

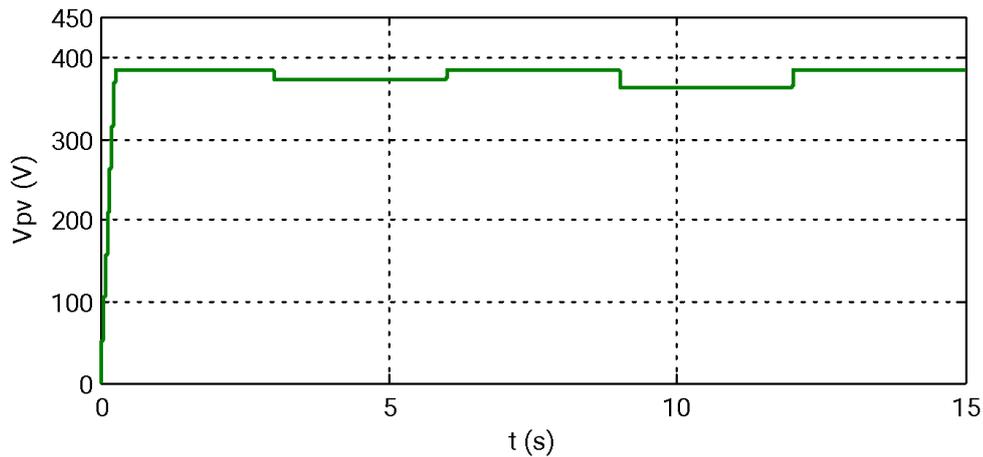


Figure (IV.5) : Courbe de la tension photovoltaïque en fonction du temps.

On voit bien sur cette figure que la tension V_{pv} augmente lors d'augmentation de la valeur d'ensoleillement et vice versa, mais contrairement avec la température, car à $t=8s$ la température augmente de $T_c=25^{\circ}C$ jusqu'à $T_c=40^{\circ}C$ où on remarque que la tension à la sortie du panneau photovoltaïque diminue de $V_{pv}=390V$ jusqu'à $V_{pv}=380V$, la tension V_{pv} varie avec des petites valeurs. Alors on peut dire que la tension V_{pv} est proportionnelle par rapport à l'ensoleillement et inversement proportionnel par rapport à la température.

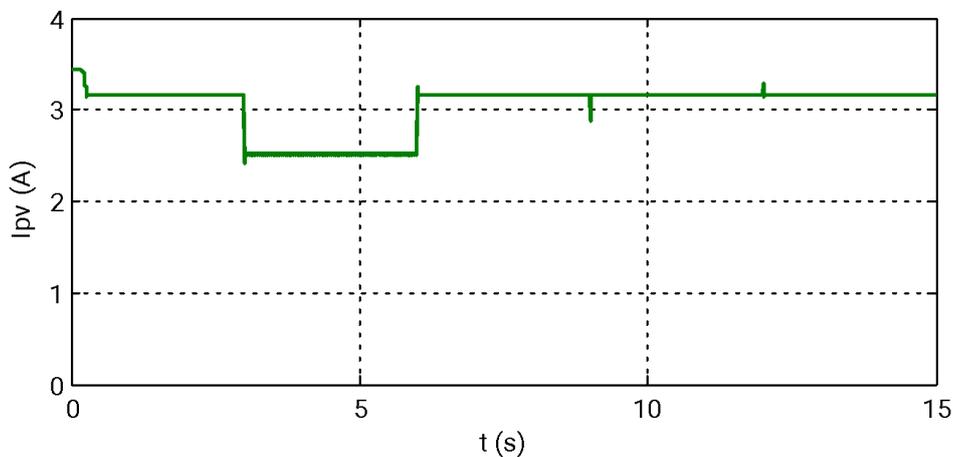


Figure (IV.6) : Courbe du courant photovoltaïque en fonction du temps.

On remarque dans cette courbe que le courant photovoltaïque I_{pv} diminue de sa valeur nominale 3.45A jusqu'à la valeur $I_{pv}=3.15$ qui est la valeur de courant au point maximal. Lors de diminution d'ensoleillement on remarque que même le courant I_{pv} diminue, mais il n'influe pas lors de la variation de la température. Donc le courant photovoltaïque est proportionnel par rapport à l'ensoleillement.

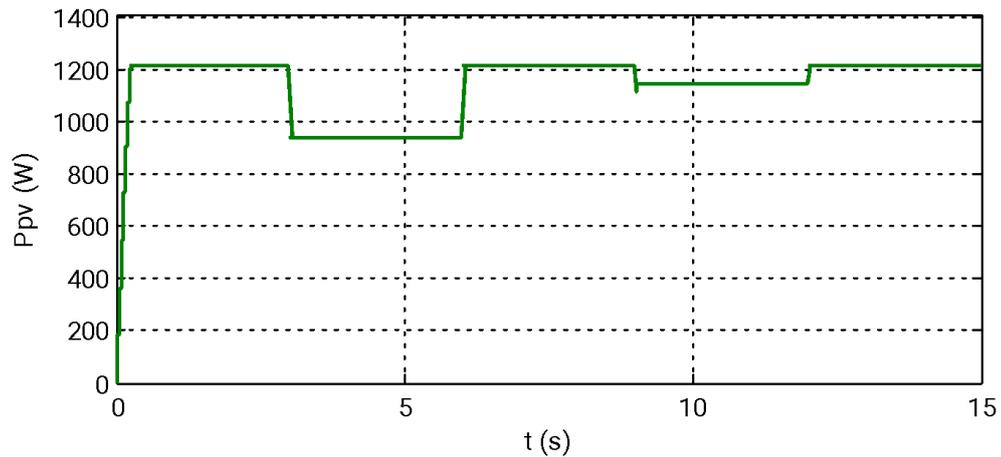


Figure (IV.7) : Courbe de la puissance photovoltaïque en fonction du temps.

Pour la puissance photovoltaïque P_{pv} , on remarque que cette puissance augmente fortement jusqu'à la valeur maximale et reste constante. Lorsque la valeur de l'ensoleillement diminue on remarque une diminution un peu forte de puissance et lors d'augmentation de la température cette puissance diminue avec une valeur très petite. Donc la puissance à la sortie est proportionnelle par rapport à l'ensoleillement et inversement proportionnelle par rapport à la température.

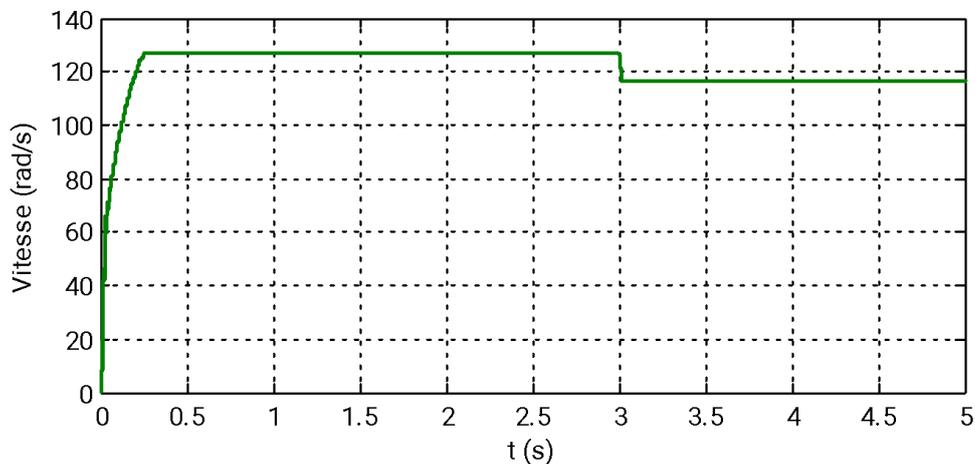


Figure (IV.8) : Courbe de la vitesse de la MAS.

On remarque que la vitesse de la MAS a une réponse rapide au début de fonctionnement et reste constante pour un ensoleillement constant. Lorsqu'on diminue de la valeur d'ensoleillement la vitesse diminue avec des valeurs très petites. La vitesse est proportionnelle par rapport à l'ensoleillement.

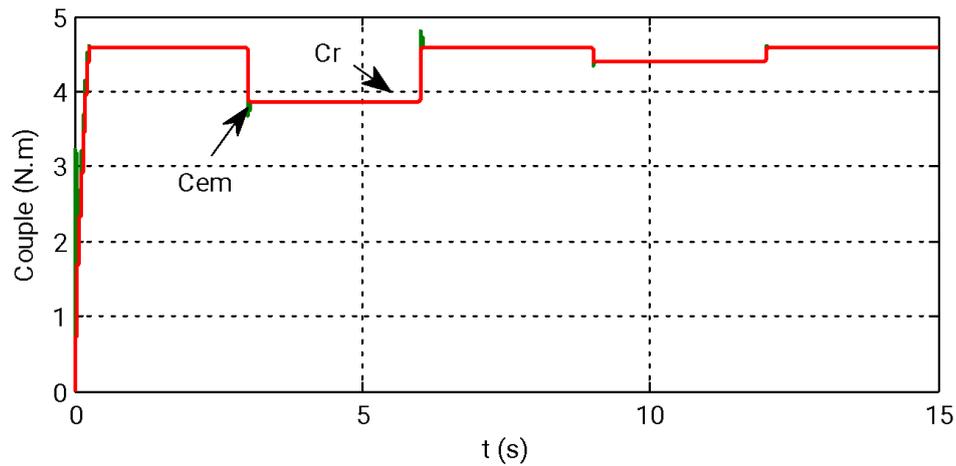


Figure (IV.9) : Courbe du couple électromagnétique C_{em} et du couple résistant C_r .

Les deux couples électromagnétique (C_{em}) et résistant (C_r) représentent des réponses rapides. Ces derniers diminuent lorsque la vitesse de la MAS est diminuée et augmente lorsque la vitesse de MAS est augmentée. Donc les deux couples de la MAS sont proportionnelles à la vitesse de la machine asynchrone.

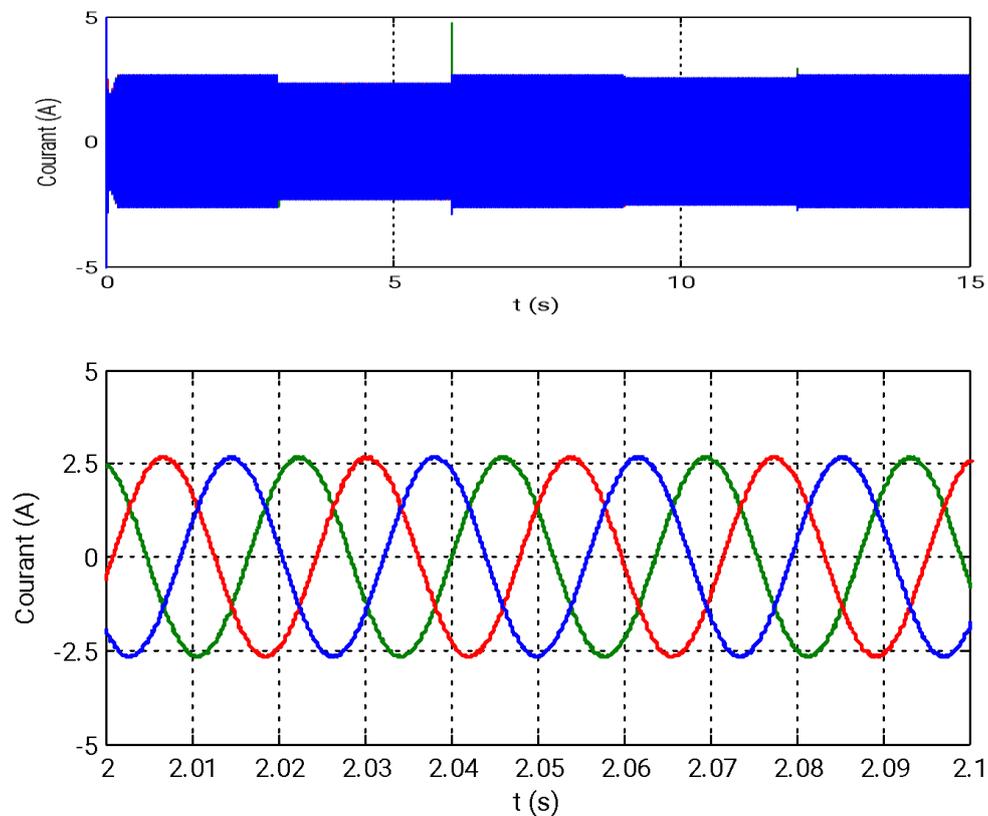


Figure (IV.10) : Courbes des courants statoriques de la MAS et leur zoom.

Les courants de la MAS sont sinusoïdaux. Ces derniers dépendent de l'ensoleillement et de la température. On remarque que les courants de la MAS ne dépassent pas la valeur maximale $I_{mp} = 3.15A$ grâce à la mise en série des panneaux photovoltaïques.

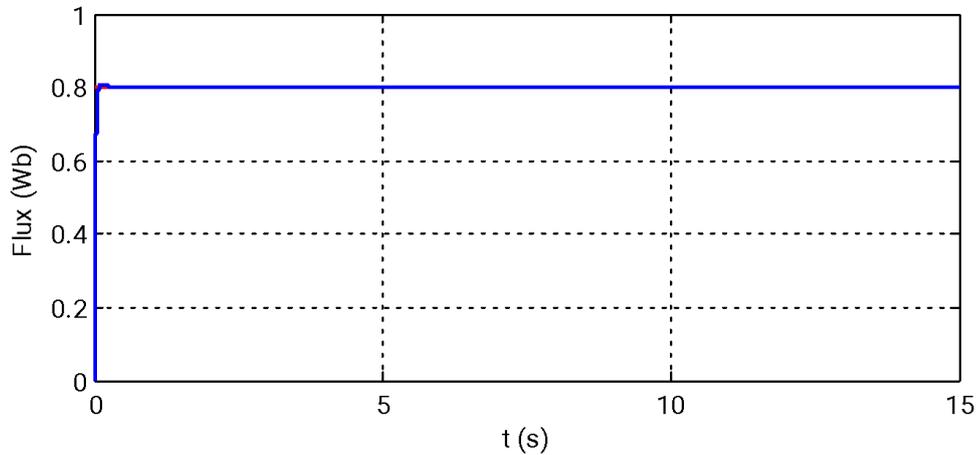


Figure (IV.11) : Courbe du flux rotorique en fonction du temps.

Au cours de la simulation le flux rotorique reste constant et on constate que le flux est indépendant des conditions météorologiques à cause de découplage du flux et du couple qu'on a fait par la commande vectorielle de la MAS.

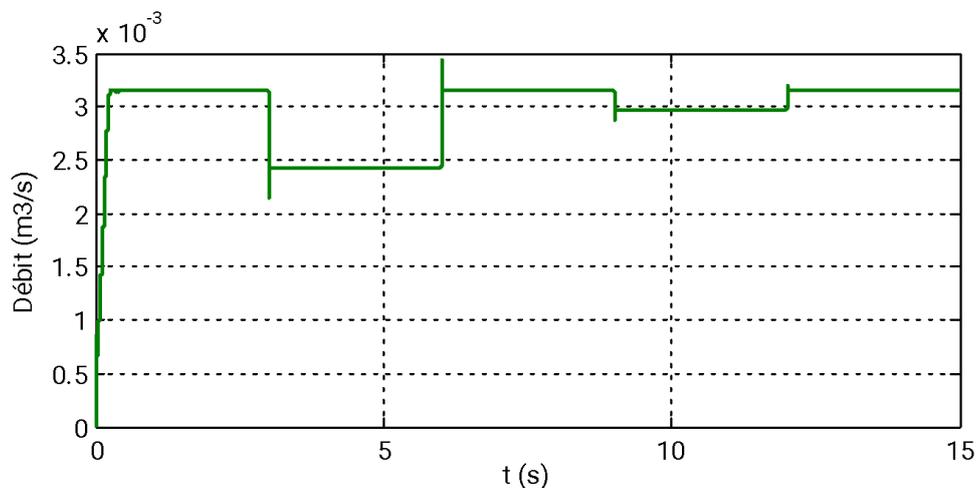


Figure (IV.12) : Courbe du débit de la pompe centrifuge.

Le débit de la pompe diminue avec des valeurs remarquables ($Q = 3.1 \text{ m}^3/\text{s}$ jusqu'à $Q = 2.45 \text{ m}^3/\text{s}$) quand l'ensoleillement et la vitesse sont diminués, et lorsque la température augmente le débit diminue avec des petites valeurs non remarquables. Alors, le débit de la pompe centrifuge varie proportionnellement par rapport à la variation de la vitesse qui est dû à la variation de la température et du l'éclairement.

IV.3.2. Fonctionnement sous des conditions variables d'ensoleillement et de température

Dans cette partie nous allons simuler le système global pour des niveaux d'ensoleillements et des températures variables qui sont représentés sur les figures suivantes :

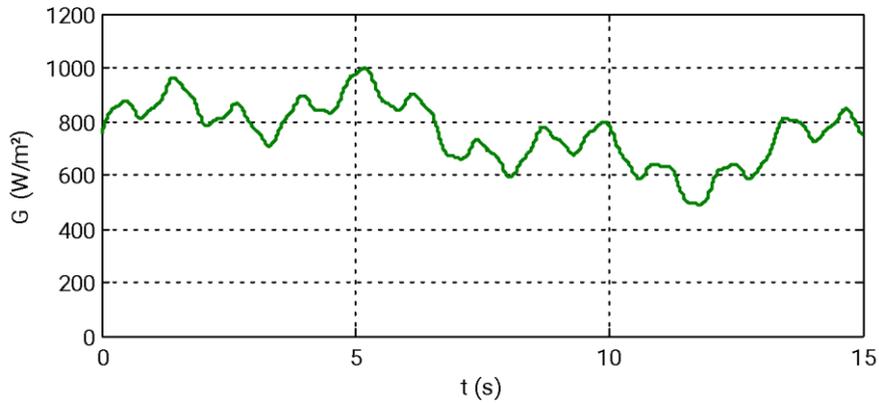


Figure (IV.13) : Courbe d'ensoleillements variables en fonction du temps.

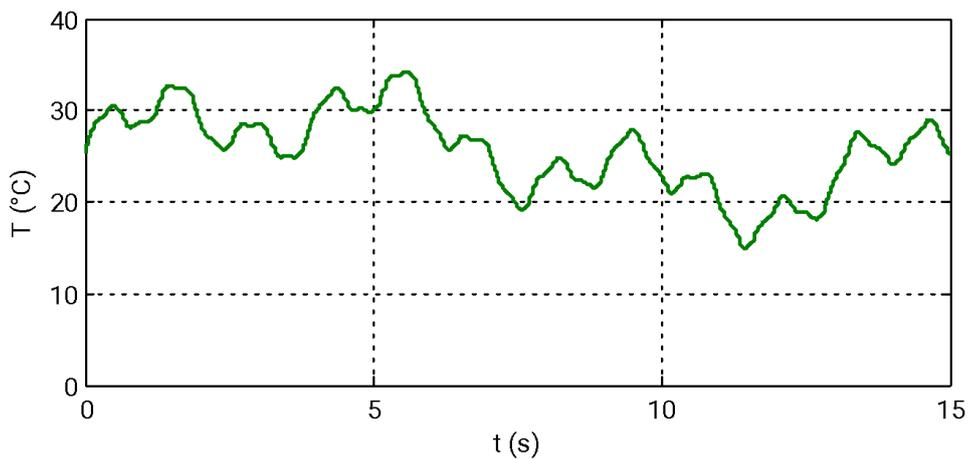


Figure (IV.14) : Courbe des températures variables en fonction du temps.

Après la simulation du système nous avons obtenu les courbes suivantes :

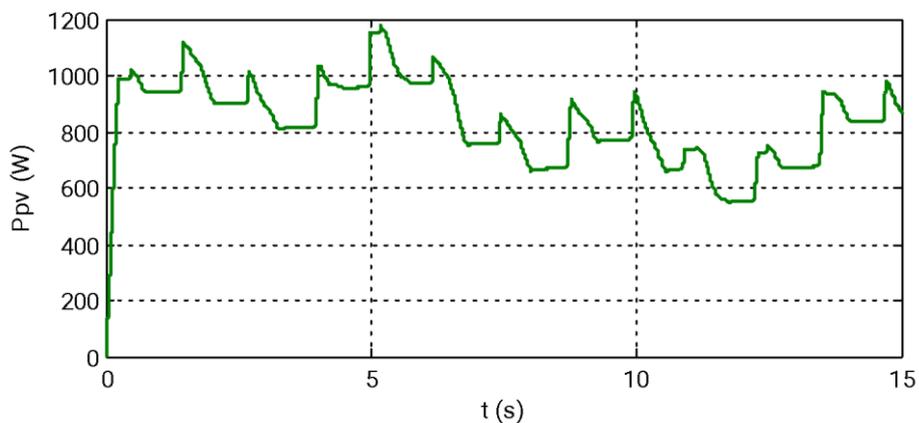


Figure (IV.15) : Courbe de la puissance photovoltaïque.

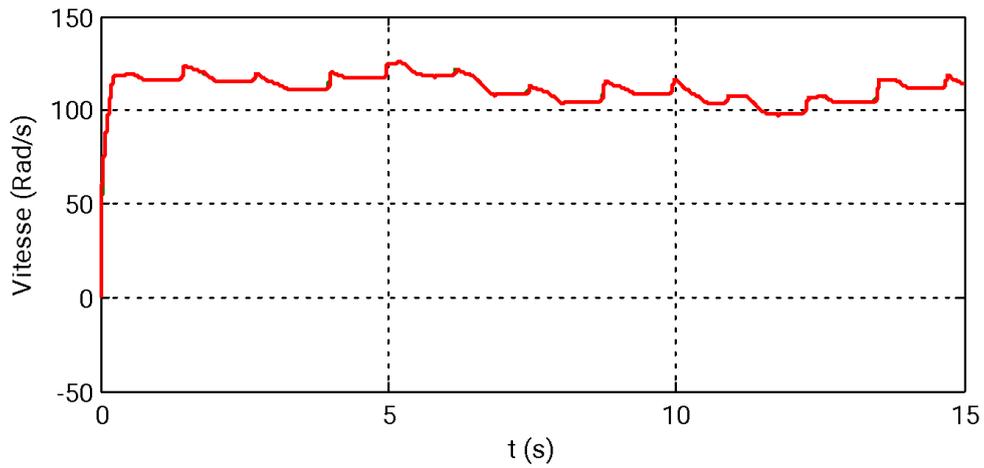


Figure (IV.16) : Courbe de vitesse de la MAS.

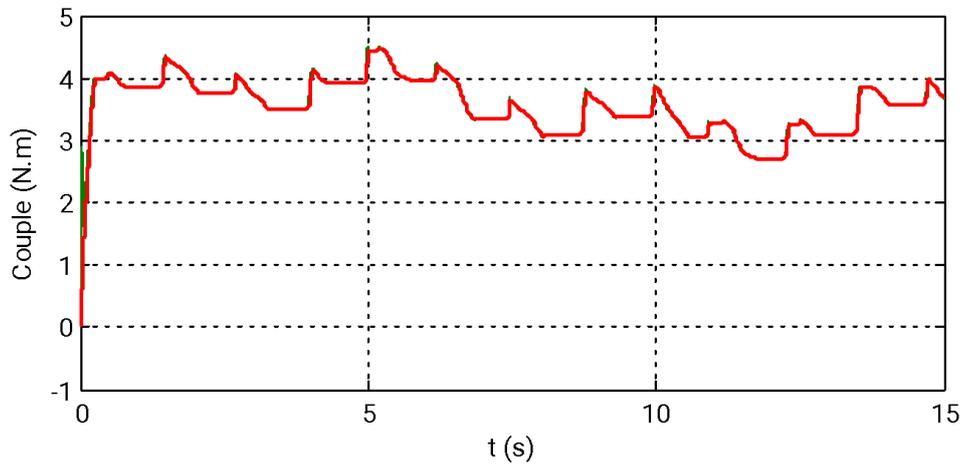


Figure (IV.17) : Courbe du couple électromagnétique et couple résistant.

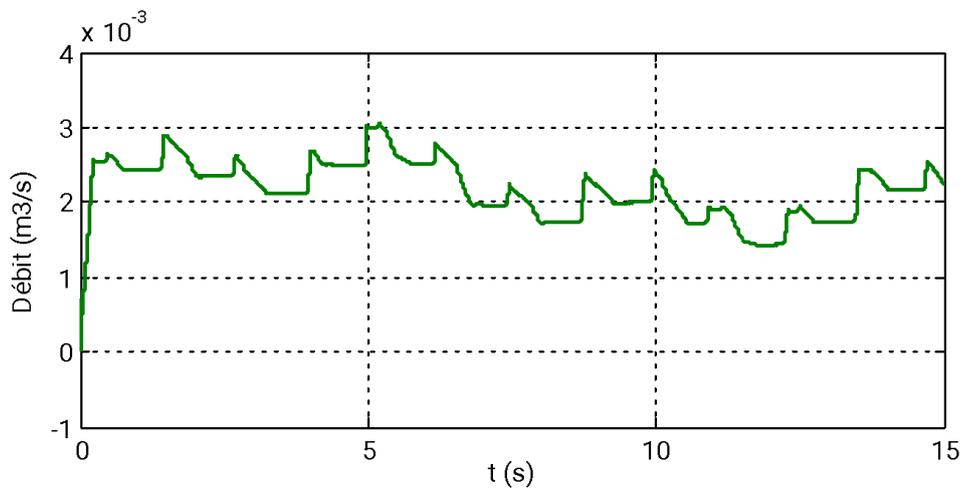


Figure (IV.18) : Courbe du débit de la pompe centrifuge.

Nous avons obtenu des courbes qui ont des valeurs aléatoires qui due à la variation des deux conditions : ensoleillements et températures. On remarque que la puissance photovoltaïque, la vitesse de la MAS, les deux couples : couple électromagnétique (C_{em}) et couple résistant (C_r), et le débit, dépendent de la température et de l'ensoleillement. Alors les caractéristiques obtenues sont proportionnelles par rapport à la variation des paramètres de fonctionnement variable.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait en premier l'étude dimensionnelle du système pour pouvoir calculer le nombre des panneaux photovoltaïques dont on a besoin pour faire un pompage d'eau. Pour notre étude on a besoin de onze panneaux photovoltaïques de 110W placés en série. Dans un second travail, nous avons présentés les résultats de simulation du système global pour deux modes de fonctionnement : fonctionnement sous des différents niveaux d'ensoleillement et de température et fonctionnement sous des conditions variables d'ensoleillement et de température. On constate après les résultats qu'on a obtenu que les caractéristiques du système de pompage dépendent de ces deux paramètres : température et ensoleillement.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est porté sur l'étude, modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque qui est constitué d'un générateur photovoltaïque, d'une machine asynchrone et d'une pompe centrifuge.

En premier, nous avons commencé par des brèves définitions sur l'énergie solaire et les différents composants qu'on peut trouver dans un système de pompage photovoltaïque, et on a terminé par la description du système global et le choix de ces composants.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation de chaque élément du système, en commençant par le générateur photovoltaïque pour connaître ces comportements en fonction de l'éclairement et de la température, puis un hacheur élévateur qui assure la conversion DC/DC, ensuite la modélisation du convertisseur DC/AC qui est pour objectif d'alimenter la machine asynchrone pour entraîner la pompe centrifuge, et que la modélisation de ces derniers est présentés.

Dans le troisième chapitre nous avons commandé la machine asynchrone par la commande vectorielle à flux rotorique orienté pour assurer le découplage du flux et du couple afin d'avoir un comportement similaire à la machine à courant continu à excitation séparée pour obtenir une réponse rapide du couple et un débit réglable et étudier le contrôle de la vitesse de la machine asynchrone en utilisant un régulateur PI. Puis nous avons présenté la commande MPPT en utilisant la méthode P&O pour atteindre le point de puissance maximale à chaque changement des conditions météorologiques.

En dernier chapitre, nous avons commencé par l'étude dimensionnelle du système de pompage pour effectuer le bon choix des composants et pouvoir calculer le nombre de panneaux photovoltaïques dont on a besoin pour effectuer le pompage. Ensuite, nous avons présenté les courbes des différentes caractéristiques du système en appliquant deux modes de fonctionnement (un fonctionnement sous des différents niveaux d'ensoleillement et de température et un fonctionnement sous des conditions variables d'ensoleillement et de température). Pour les deux fonctionnements, on constate que les différentes caractéristiques du système dépendent de l'éclairement et de la température qu'elles soient constantes ou variables.

Comme perspectives, il est intéressant d'utiliser d'autres méthodes de commande de la machine asynchrone et d'autres méthodes d'optimisation MPPT pour un fonctionnement optimal du générateur PV.

Références bibliographiques

[Abd 11] : ABDESSAMED, R. Modélisation et simulation des machines électriques : électrotechnique, Ellipses, 2011.

[Abo 15] : ABOUDA, S, Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : Application aux systèmes de pompage, Thèse de doctorat, Reins, 2015.

[Afi 18] : AFIR, Set SACI, M, Etude non linéaire d'un moteur asynchrone utilisé dans un système de pompage photovoltaïque, Mémoire Master, Université de Bejaïa, 2018.

[Ali 15] : ALLILI, F et BENSID, A. Etude d'une station de pompage anti incendie au sein de complexe de Hassi R'mel, Mémoire Master, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen. 2015.

[Aou 15] : AOUI, S, Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2015.

[Ara 05] : ARAB, A, Hadj. BENGHANEM, M et GHARBI, A, Dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque, Revue des énergies renouvelables, Vol 08, 2005.

[Bed 16] : BEDJOU, S et AMROUCHE, R, Contrôle d'un système de pompage photovoltaïque. Mémoire Master, Université de Bejaïa, 2016.

[Bel 15] : BELAID, S. Cours énergie solaire photovoltaïque, Destinés aux étudiants Master 2 ER, 2015.

[Belk 15] : BELKAID, A, Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2015.

[Ben 16] : BENBELAID, Net MAIZIA, R, Commande et optimisation d'un système de pompage hybride (photovoltaïque-éolien), Mémoire Master, Université de Bejaia, 2016.

[Bou 09] : BOUMARAF, F, Commande intelligente d'une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation, Thèse de doctorat, Université de Batna, 2009.

- [Bou 10]** : BOUSSEKINE, A et GUERMOUCHE, N. Contribution à l'étude des systèmes de pompage photovoltaïque. Mémoire Master. Université de Bejaïa. 2010.
- [Bou 12]** : BOUDRAHEM, L et DJOUADI, L, Commande non linéaire du système de pompage photovoltaïque, Mémoire Master, Université de Bejaïa, 2012.
- [Bou 13]** : BOUDJNAH, M, Etude d'un système hybride (Eolien, Photovoltaïque), Mémoire Master, Université de Bejaïa, 2013.
- [Cro 13]** : CROCI, L. Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïques et éolien avec stockage hybride batteries/super-condensateurs. Thèse de doctorat. Université de Poitiers. 2013.
- [Dez 09]** : DEZSO, S. modélisation en temps réel, diagnostics et MPPT optimisé pour les systèmes photovoltaïques résidentiels, 2009.
- [For 00]** : FOREST, F et FUCH, H, Onduleur de tension : mise en œuvre, Technique de l'ingénieur, Référence D31 77 2000.
- [Ghe 19]** : GHEBBACHE, M. Stratégie de commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique dans le but d'optimiser la qualité d'énergie, Thèse de doctorat, Université de Québec à Trois- Rivières, 2019.
- [Gul 05]** : GUDEMIR, H, Sliding mode control of DC-DC boost converter, Journal of Applied Sciences, Vol. 5, no 3, p 588-592, 2005.
- [Ham 13]** : HAMDOUN, H., Commande vectorielle par la logique floue de la machine asynchrone, Mémoire Master, Université de Blida, 2013.
- [Kar 17]** : KARA OMAR, A. Etude des performances des pompes centrifuges transportant des fluides complexes. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2017.
- [Kes 14]** : KESHRI, R, BERTOLUZZO, M, et BUJA, G. Intégration d'un panneau photovoltaïque avec une citadine électrique. Composants et systèmes d'alimentation électrique, vol. 42, n° 5, p. 481-495, 2014.
- [Lal 05]** : LALOUNI, S, Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur batterie, Mémoire de Magister, Université de Bejaïa, 2005.
- [Lim 19]** : LIMAM, M et BENHAMMAMI, N, Etude de comparaison énergétique d'un groupement de pompes d'un fluide incompressible : en série et en parallèle, Mémoire master académique, Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem, 2019.

- [Lou 15]** : LOUAZENE, M, Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques pour l'irrigation dans les zones sahariennes, Application zone d'Ouargla, Thèse de doctorat. Université de Batna 2, 2015.
- [Pas 06]** : PASTOR, A, C, Conception et réalisation de module photovoltaïque électronique, Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2006.
- [Rou 14]** : ROUABAH, F et HANINOUE, A, Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2014.
- [Sla 18]** : SLAMA, F, Modélisation d'un système multi-générateur photovoltaïque interconnecté au réseau électrique, Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2018.
- [Seg 94]** : SEGUIER, G et NOTELET, F. Electrotechnique industrielle. 2 ème édition. Technique et documentation. 1994.
- [Sel 15]** : SELLAMA, H, Etude et réalisation d'un système de pompage solaire à base d'un moteur monophasé, gouverné par un microcontrôleur Pic pour les systèmes photovoltaïques domestique, Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2015.
- [Ser 12]** : SERIR, C, Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque, Thèse de doctorat. Université de Bejaïa, 2012.
- [SI A 11]** : SI AMMOUR, A, Contribution à la commande par mode glissant d'ordre fractionnaire, Thèse de doctorat, Université de Mouloud Mammeri. De Tizi-Ouzou, 2011.
- [Tab 13]** : TABTI, A et AHMDI, Z, Commande et modélisation d'une éolienne à base d'une MSAP couplé au réseau, Mémoire Master, Université de Bejaïa, 2013.
- [Tra 11]** : TRAHI, F, Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA, Mémoire de Magistère, Université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [Zeg 17]** : ZEGAI, M. Synthèse des techniques de commande DTC associé et l'intelligence artificielle appliqué au contrôle d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur multi-niveaux. Thèse de doctorat. Université d'Oran. 2017.
- [Wil 05]** : WILDI, T et SYBILLE, G. « Electrotechnique », Edition 04. Presses de l'Université Laval, 2005.

ANNEXE :

Tableau (1) : Paramètres d'un panneau solaire SIEMENS 110-24.

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_{mpp}	110 W
Tension au point de puissance maximale V_{mpp}	35 V
Courant au point de puissance maximale I_{mpp}	3.15 A
Courant de court-circuit I_{sc}	3.45 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	43.5 A
Coefficient d'incrémentation du courant I_{sc} (α_{sc})	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc} (β_{oc})	-152 mA/°C

Tableau (2) : Paramètres de la machine asynchrone.

Paramètres	Valeurs
Puissance nominale	1100 W
Résistance rotorique	$R_r=3.6\Omega$
Résistance statorique	$R_s=7.6\Omega$
Inductance rotorique	$L_r=0.6015$ H
Inductance statorique	$L_s=0.6015$ H
Inductance mutuelle	$M=0.5796$ H
Moment d'inertie	$J=0.0049$
Coefficient de frottement	$f=0$
Nombre de pôle	$P= 2$

Résumé :

Dans ce travail, nous avons étudié, modélisé et commandé un système de pompage photovoltaïque. Nous avons appliqué deux commandes du système global. La première est la commande vectorielle de la machine asynchrone à flux rotorique orienté, afin de piloter la vitesse de la machine asynchrone qui va entraîner la pompe centrifuge. La deuxième est la commande Maximum Power Point Tracking pour assurer le fonctionnement du système à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques appliquées sur le système. Après une étude dimensionnelle du système nous avons pu calculer le nombre des panneaux photovoltaïque dont on a besoin pour alimenter la machine à une puissance de 1100W en appliquant différents profils (ensoleillement et température). Les résultats de simulation sont obtenus par le logiciel MATLAB/SIMULINK et d'après ces résultats nous avons constaté que les caractéristiques du système dépendent des conditions météorologiques quel que soit le mode de fonctionnement.

Mots clés : Machine asynchrone, commande Maximum Power Point Tracking, pompage photovoltaïque, pompe centrifuge.

Abstract :

In this work, we have studied, modeled and controlled a photovoltaic pumping system. We have applied two controls of the global system. The first one is the vector control of the asynchronous machine with oriented rotor flux, in order to control the speed of the asynchronous machine that will turn the centrifugal pump. The second is the Maximum Power Point Tracking control to ensure the operation of the system at its maximum power whatever the weather conditions applied on the system. After a dimensional study of the system we were able to calculate the number of photovoltaic panels needed to power the machine at 1100W by applying different profiles (sunshine and temperature). The simulation results are obtained by MATLAB/SIMULINK software and according to these results we found that the system characteristics depend on the weather conditions regardless of the operating.

Keywords: Asynchronous machine, Maximum Power Point Tracking control, photovoltaic pumping, centrifugal pump.