

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



Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Génie électrique
Spécialité : Electrotechnique Industrielle
Présenté par :
ZINE Yahia
TAMALOUZT Mohand Said

Thème :

**Contrôle et optimisation intelligente du moteur
synchrone à aimants permanents pour un
système de pompage d'eau photovoltaïque**

Soutenu publiquement

Le : **14/06/2023**

Devant le jury :

Mr. KOURAS Sid-Ali	MAA	Président	UKM Ouargla
Mr. TAIBI Djamel	MCB	Encadrant /Rapporteur	UKM Ouargla
Mr. Bourek Yacine	MCB	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous tenons à remercier, tout d'abord, le dieu le plus puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour achever ce travail.

Nous avons l'honneur et le plaisir de présenter nos profondes gratitudee et sincères remerciements au encadrant de ce mémoire Monsieur **TAIBI Djamel** et co-encadrant Monsieur **REZOUG Mohammed Redha** , pour leur précieuse aide, leur patience, ces orientations et le temps qu'ils nous ont accordé pour notre travail.

Nous remercions par ailleurs vivement les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail .

Nous remercions aussi tous les enseignant du Département de Génie Électrique de l'Université de Ouargla qui ont participé à notre formation.

Nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de Loin à la réalisation de ce travail.

MERCI A TOUS

Dédicace

A nos parents qui ont donné leur vie pour nous pour leurs encouragements et leurs courages. Que Dieu les bénisse pour toujours

*A toute la famille **TAMALOUZT** et à toute la famille **ZINE** aussi*

A nos professeurs

A tous nos amis, collègues et tous ceux qui nous ont aidés à Réaliser ce travail.

TAMALOUZT Mohand said

ZINE Yahia

Sommaire

Introduction générale.....	Error! Bookmark not defined.
Chapitre I : Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque	Error! Bookmark not defined.
I-1- Introduction :	6
I-2- Rayonnement solaire :	6
I -3 – Déclinaison du soleil :	7
I- 4 - Modèle simplifié de l'éclairement :	8
I - 5 -Principe de la conversion photovoltaïque :	9
I-6. Caractéristique Courant-Tension et Puissance -Tension	10
I – 7 - Différentes configurations des systèmes PV :	10
I – 7 -1- Système autonome sans batterie :	11
I – 7 - 2- Système autonome avec batterie :	11
I – 7-3 - Système fonctionnant au fil du soleil :	11
I - 8 - Constitution d'un système de pompage photovoltaïque :	11
I-8-1 Différents éléments d'un système de pompage photovoltaïque	12
I-9 Principes généraux du pompage photovoltaïque	13
I-10 Différents systèmes de pompage avec différent moteurs	14
I-10-1 Systèmes de pompage avec moteur à courant continu	14
I-10-2 Systèmes de pompage moteurs à commutation électronique	16
I-10-3 Systèmes de pompage avec moteur à courant alternatif triphasé	16
I-11 Couplage générateur PV – groupe de pompage.....	18
I-11-1 Adaptateur de charge (moteur continu)	19
I-11-2 L'onduleur (moteur alternatif)	19
I-12 Les pompes photovoltaïque	21
I-12-1 Les pompes centrifuges	21
I-12-2 Les pompes volumétriques	22
I-13Conclusion	22
CHAPITRE II : Dimensionnement et Modélisation du système de pompage photovoltaïque	Error! Bookmark not defined.
II-1 Introduction	24

II-2 Pompe photovoltaïque :	24
II-2-1 Pompe centrifuge :	24
II-2-2 -Modélisation de la pompe centrifuge :	24
II-2-3 Pertes de charges linéaires :	25
II-2-4 Caractéristique couple-vitesse de la pompe $C_e(\omega)$:	25
II.3. Dimensionnement de la Motopompe :	25
II-3.1 Estimation des besoins en Eau	26
II-3.2 Rayonnement solaire	26
II-3.3 Hauteur manométrique total	26
II-3.4 Taille du générateur PV	28
II-5 Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque :	29
II-5-1 Modèles électriques d'une cellule PV:	29
II-5-2 Simulation du générateur PV:	30
II-5-2-1. Module type polycristallin -Appolosolar energy ASEC-205 G6M:	30
II-5-2-2 Résultats de simulation :	30
II-6 Choix du moteur électrique	33
II-6-1 Modèle de la MSAP dans le référentiel de Park :	33
II-6-2 Equations mécaniques :	34
II-7 Modélisation et simulation du convertisseur DC/AC:	35
II-7-1 Technique de commande par modulation de largeur d'impulsion MLI	37
II-8. Conclusion	38
CHAPITER III : Commande vectorielle du MSAP	Error! Bookmark not defined.
III-1- Introduction :	40
III-2- Commande vectorielle du MSAP	40
III-2-1- Pourquoi la commande vectorielle :	40
III-2-2- Principe de base de la commande vectorielle :	41
III-2-3- Calcul des paramètres du régulateur pi :	43
III-2-3-1- Régulateur de courant :	43
III-2-3-2- Régulateur de vitesse :	44

III-2-4 –Description du système global :	45
III-2-5 Technique de maximisation de la puissance MPPT :.....	46
III-2-5-1 Principe de la techniques «Perturb and Observe» (P&O): [23]	46
III.3. Résultats de la simulation :.....	49
III.3. 1 Test du fonctionnement de la MPPT	50
III.3. 2 Robustesse vis à vis la variation paramétrique :	52
III-4– CONCLUSION	53
Conclusion générale	Error! Bookmark not defined.
Référence.....	Error! Bookmark not defined.
Annexe.....	59

Listes de figures

Fig (a) : Installation traditionnel de system solaire	3
Fig(b) : l'installation de système solaire propose	3
Fig (I-1) : Réponse spectrale d'une cellule (PV)	7
Fig (I-2) : Courbe de déclinaison du soleil	8
Fig (I-3) : Évaluation de rayonnement solaire en fonction de temps	8
Fig(I-4) : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique	9
Fig(I-5) : caractéristiques courant-tension et puissance tension	10
Fig. (I.6) : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque autonome	11
Fig. (I-7) Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque	12
Fig. (I-8): Pompage au fil du soleil (Fonctionnement automatique sur une journée)	13
Fig. (I-9) : Pompage sur batterie	14
Fig (I-10) : Caractéristiques $C=f(V)$ et de la $V=f(I)$ d'un moteur shunt et série	15
Fig. (I-11) : Courbe du couple en fonction de la vitesse du moteur asynchrone bipolaire	17
Fig. (I-12) : Couplage via convertisseur DC/DC	19
Fig (I-13) : Couplage via convertisseur DC/AC	19
Fig(II.1):Circuit équivalent d'une cellule PV photovoltaïque.	29
Fig(II-2): Caractéristique I-V et P-V d'un module à 20°C	31
Fig(II-3): Caractéristique I-V et P-V d'un champ à 20°C	31
Fig(II-4): Caractéristique I-V et P-V d'un module à $E=1000 \text{ w/m}^2$	32
Fig(II-5): Caractéristique I-V et P-V d'un champ à $E=1000 \text{ w/m}^2$	32
Fig(II-6) schéma de laMSAP dans le repère (dq)	33
Fig (II-7): Onduleur de tension triphasé	34
Fig. (II-8) : Tensions porteuse et modulante	36
Fig (II-9) : Commande F1 de l'onduleur	37
Fig (II-10) : Tension simple à la sortie de l'onduleur	37

Fig (III.1) : Ensemble Commande – Onduleur -Moteur	44
Fig. (III.2) Représentation d’une MCC	45
Fig. (III.3) : bloc de découplage	46
Fig. (III.4) : Schéma fonctionnel du régulateur de courant	47
Fig. (III.5) : Schéma fonctionnel du régulateur de vitesse	48
Fig. (III.6) : Schéma de la commande vectorielle du MSAP	49
Figure (III.7): Caractéristique P(V) d’un panneau solaire.	51
Fig. (III.8) : Algorithme MPPT pour la commande vectorielle .	52
Fig. (III-9) : Schéma de simulation de système de pompage solaire munie d’une commande vectorielle du MSAP	54
Fig(III.10) Fonctionement ou $70\text{ C}^0\cdot 600\text{W/m}^2$	55
Fig(III.11) Fonctionement ou $40\text{ C}^0\cdot 1000\text{W/m}^2$	55
Figure (III.12) : Scénarios de la vitesse en variation des paramètres électriques du la MSAP	57

Liste de tableaux

Tab (II.1) Les besoins journaliers moyens mensuels en eau des palmiers / hectare	26
Tab (II.2) : Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle pour une inclinaison optimale saisonnière	26

Introduction Générale

L'eau et l'énergie sont des éléments essentiels à la vie et leur demande ne cesse d'augmenter. Étant donné l'épuisement inévitable des sources d'énergie traditionnelles, il est crucial de rechercher des sources alternatives, notamment les énergies renouvelables. Résoudre les problèmes liés à l'eau dans les régions isolées joue un rôle essentiel dans le développement et l'irrigation des vastes territoires sahariens. Dans ce contexte, l'énergie photovoltaïque (PV) a un rôle important dans la production d'électricité car il est comme étant une source d'énergie verte.[1]

La pompe photovoltaïque est largement reconnue comme étant l'application prédominante parmi les différentes applications de l'énergie photovoltaïque dans les sites isolés. Cette technologie connaît une évolution graduelle visant à optimiser le fonctionnement du système photovoltaïque à sa capacité maximale.[2]

En 1993, près de 10 000 systèmes photovoltaïques ont été installés pour le pompage d'eau, et après une période de cinq ans, Le nombre de systèmes photovoltaïques a été multiplié par six pour atteindre près de 60 000 systèmes.[3]

La production d'électricité à partir de panneaux solaires est plus coûteuse en raison de l'équipement requis. Les gouvernements soutiennent cette technologie par des subventions ou des tarifs d'achat afin de la rendre compétitive à l'avenir. Pour améliorer l'efficacité des installations solaires, il est important d'augmenter la puissance générée, ce qui réduit les coûts d'électricité provenant d'autres sources. L'efficacité d'une installation solaire dépend principalement de l'efficacité des panneaux solaires, du rendement des convertisseurs et de l'efficacité de l'algorithme utilisé pour maximiser la puissance.

L'amélioration de l'efficacité des panneaux solaires et des convertisseurs est plus difficile que l'amélioration de l'algorithme de contrôle et de suivi du point de puissance maximale (MPP). En effet, l'exécution de ces améliorations implique des ajustements

matériels coûteux et complexes. En revanche, l'amélioration de l'algorithme de contrôle peut être réalisée à moindre coût, même sur des systèmes déjà installés, en mettant à jour leurs logiciels de contrôle. Cette approche offre une flexibilité et une efficacité accrues, permettant d'optimiser les performances des installations photovoltaïques existantes.

Dans le travail que nous présentons dans ce mémoire, nous sommes intéressés à la contrôler d'un système de pompage solaire en façon intelligente utilisant une technique MPPT- P&O amélioré par la logique floue.

Le mémoire présenté est organisé en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous avons expose les calculs numériques et par PVsys pour dimensionner un système du pompage photovoltaïque.
- Le deuxième chapitre est basé sur la modélisation et simulation du système de pompage photovoltaïque en général ainsi que la méthode de commande P&O pour MPPT(techniques de suivi du point de puissance maximale).
- Dans le troisième chapitre, nous présentons la simulation de technique de suivi du point de puissance maximale (MPPT) P&O optimisé par la logique floue pour le système de pompage photovoltaïque Ainsi une étude comparative de cette dernière avec la méthode classique Perturbation et Observation (P&O)
- Finalement, une conclusion générale clôture ce travail avec quelques propositions et perspectives future de ce travail.

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque

I-1- Introduction :

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

L'énergie solaire est disponible partout sur la planète en des degrés divers et elle est entièrement renouvelable. Son apport est variable, au gré des jours et des saisons, mais elle est relativement prévisible. Sa puissance maximale est de 1kW/m^2 et, même si elle est relativement diluée, son apport énergétique annuel pourrait répondre des milliers de fois à la consommation énergétique de la plupart des pays, à l'exception de ceux très industrialisés.

Les systèmes photovoltaïques ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible ; de plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement faibles. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible. Son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement dans les régions rurales des pays en développement et dans les zones hors-réseaux des pays plus industrialisés [6].

Dans ce chapitre, on fait en premier lieu une généralité sur l'énergie solaire son utilisation et les caractéristiques principales du générateur photovoltaïque. En second lieu il expose en générale le fonctionnement et spécifications des systèmes de pompage photovoltaïque, les différents systèmes de pompes existants, sans stockage d'énergie électrique et avec batterie et rappelle les éléments qui constituent le système.

I-2- Rayonnement solaire :

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6Km , la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10^6GW , c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à $10\mu\text{m}$ [4], l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets (< à $0.4\mu m$).
- 47 % dans la bande visibles (0.4 à $0.8 \mu m$).
- 44 % dans la bande des infrarouges (> à $0.8\mu m$).

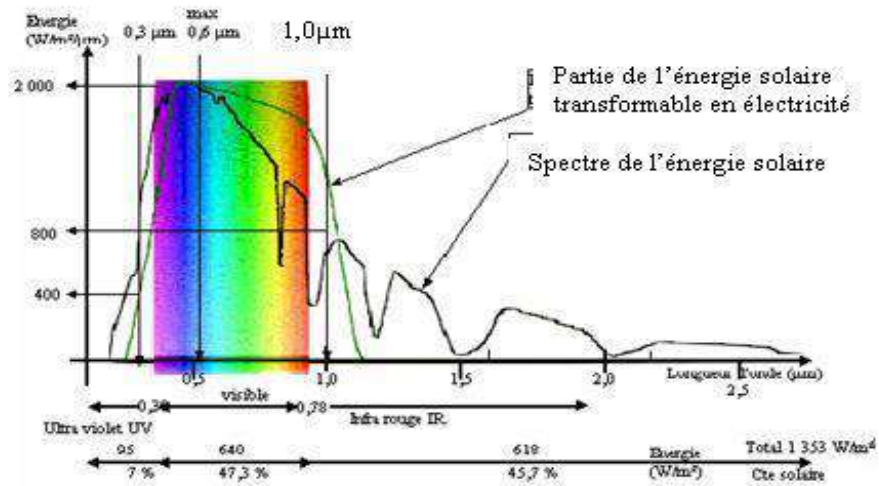


Fig (I-1) : Réponse spectrale d'une cellule (PV), [4]

Au cours de ces dix derniers années ce spectre a été homologué par l'organisation internationale de standardisation (ISO 9845-1 :1992) et la société américaine de test et de matériaux (ASTM E 892-87 :1992) ont fixées le flux de standardisation à $1000 W/m^2$.

Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui à une valeur variable suivant la saison, l'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, humidité,...etc.).

I -3 – Déclinaison du soleil :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre [7], sa valeur en degré est donnée par la relation de Cooper suivante :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[2\pi \cdot \left(\frac{284+j}{365} \right) \right] \quad (1-1)$$

Où j : est le numéro d'ordre du jour de l'année ($n=1$ pour le 1^{er} Janvier, $n=32$ pour le 1^{er} Février,...etc.)

La déclinaison varie entre $-23,45^\circ$ le 21 décembre et $+23,45^\circ$ le 21 juin.

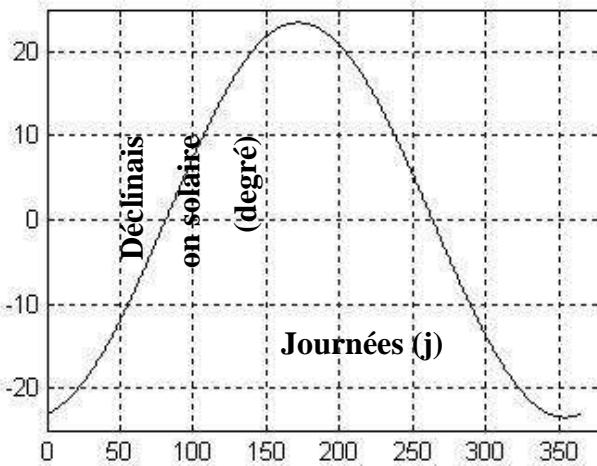


Fig (I-2) : Courbe de déclinaison du soleil

I- 4 - Modèle simplifié de l'éclairément :

Selon [7] la quantification de l'éclairément incident pour une journée est donnée par une expression mathématique qui s'écrit comme suit :

$$E = E_m \sin \left[\frac{\pi(t-t_0)}{12} \right] \tag{1-2}$$

E_m : L'éclairément maximal du site (W/m^2). t :

Temps solaire en heure.

t_0 : temps de la levée du soleil (6^h).

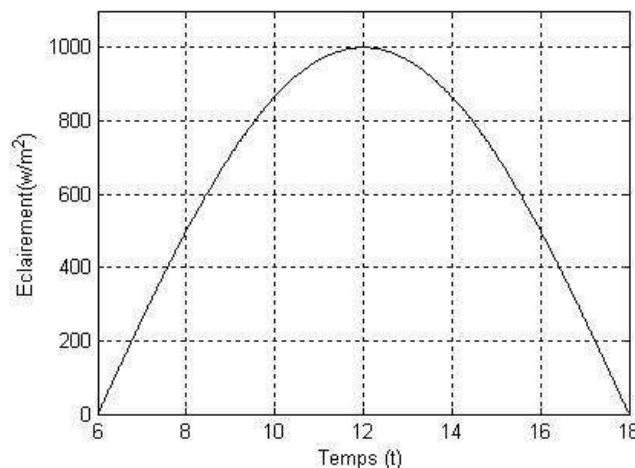
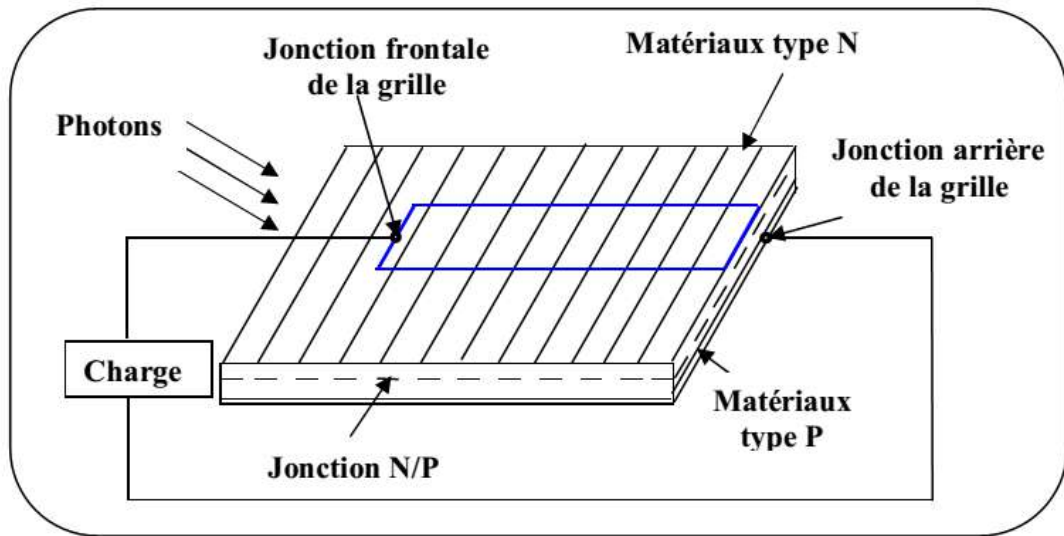


Fig (I-3) : Évaluation de rayonnement solaire en fonction de temps

I - 5 -Principe de la conversion photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule.

La figure suivante illustre une cellule PV typique.



Fig(I-4) : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique 06]

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

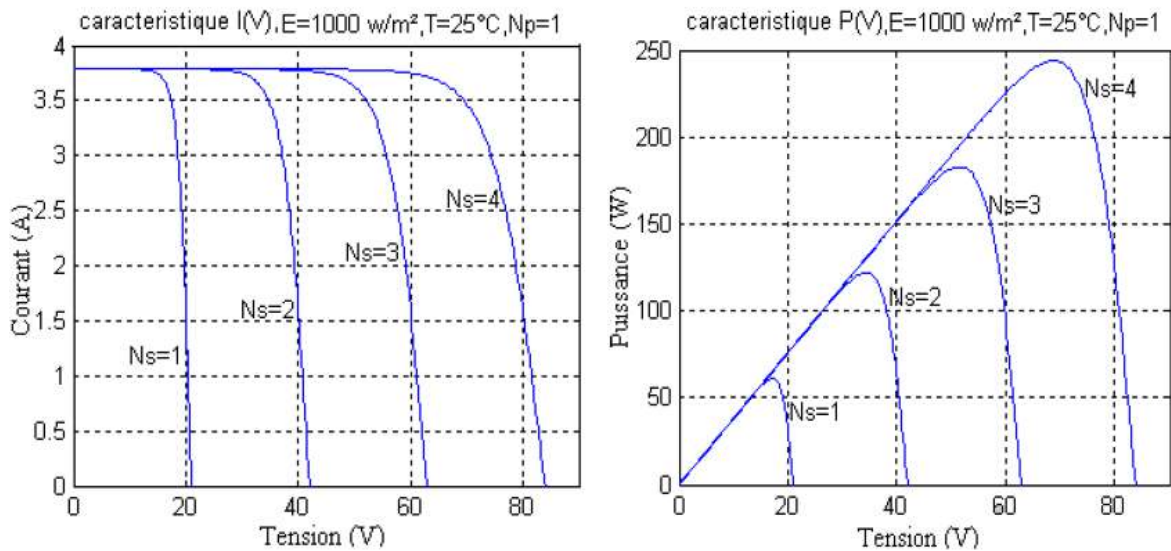
Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteurs, ils transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons (charges N) et des trous (charges P) créent alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connections des bornes positive et négative de la cellule.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{OC} . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées ; il est appelé courant de court-circuit I_{SC} et dépend fortement du niveau d'éclairement.

I-6. Caractéristique Courant-Tension et Puissance -Tension

La figure (I.5) représente la courbe $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C



Fig(I-5) : caractéristiques courant-tension et puissance tension

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point P_m où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point P [4].

I – 7 - Différentes configurations des systèmes PV :

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants :[8].

- un générateur photovoltaïque.
- un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.

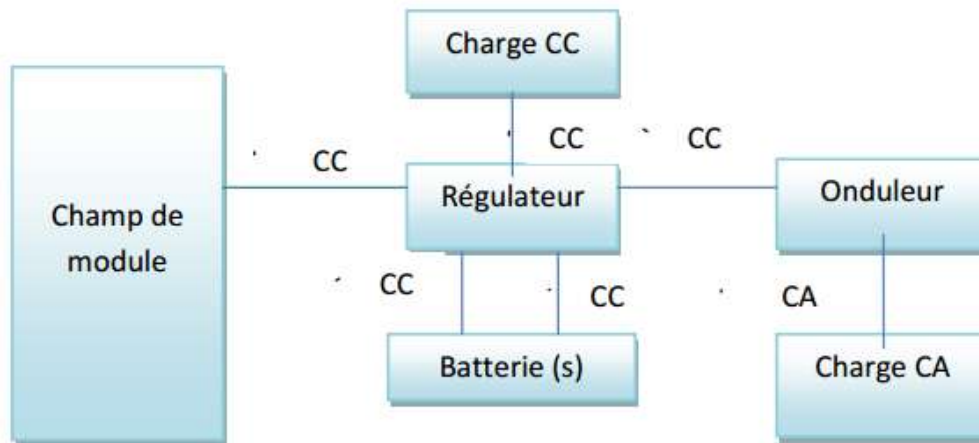


Fig. (I.6) : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque autonome

I – 7 -1- Système autonome sans batterie :

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par les champs de module et charge CC. La charge de type continu est alimentée directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.

I – 7 - 2- Système autonome avec batterie :

Ces systèmes sont représentés par les blocs comme le Fig (I.6) dans le cas où la charge et de type continu on utilise directement le régulateur, et on utilise l'onduleur si la charge et de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence de rayonnement solaire.

I – 7-3 - Système fonctionnant au fil du soleil :

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permet de faire une adaptation entre le générateur et la charge continu Si la charge et de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit

I - 8 - Constitution d'un système de pompage photovoltaïque :

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

Le schéma général d'un système de pompage photovoltaïque étudié dans cette mémoire est le suivant :

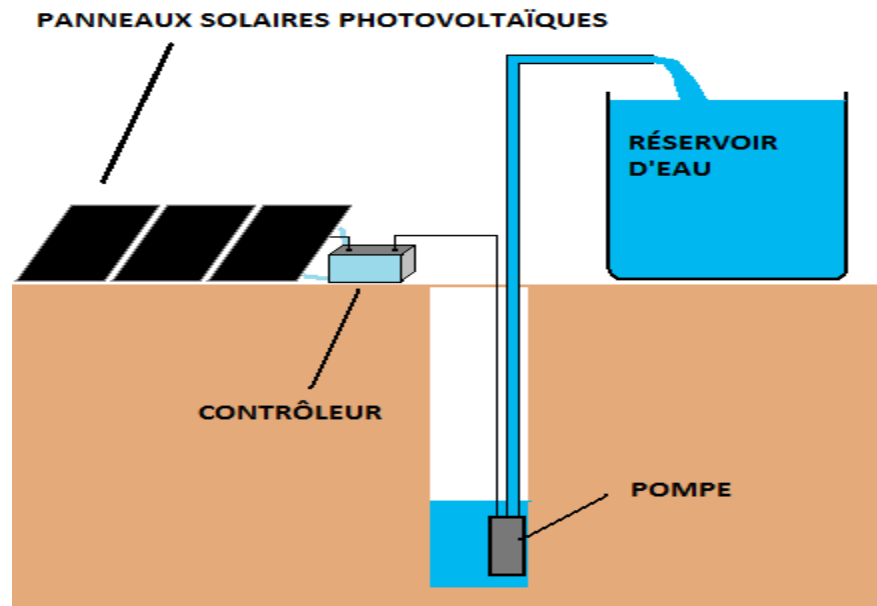


Fig. (I-7) Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque

I-8-1 Différents éléments d'un système de pompage photovoltaïque

En général les systèmes de pompage sont constitués des composants suivants :

- ✓ Un générateur photovoltaïque composé à son tour, de modules interconnectés électriquement jusqu'à constituer une unité de production DC, et une structure de support mécanique
- ✓ Un conditionnement de la puissance, constitué d'un convertisseur DC/AC, capable de varier la fréquence et la tension de sortie, en fonction de la puissance disponible dans le générateur qui, à son tour, est fonction de l'irradiance incidente
- ✓ Un groupe motopompe immergé, constitué de l'association d'un moteur électrique et d'une pompe centrifuge.
- ✓ Un câblage électrique à travers duquel circule l'énergie depuis le générateur jusqu'au moteur, et qui incorpore des fonctions de contrôle et de sécurité
- ✓ Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau depuis la source, normalement un puits, jusqu'aux points de distribution et qui, à son tour, est constitué par quatre éléments : la source d'eau, la conduction entre la source et l'entrée du réservoir de stockage, le réservoir, et la conduction entre le réservoir et les points de distribution. Dans cette définition, nous entendons par conduction l'ensemble des tuyaux, des dispositifs de mesure, et de l'interface avec l'utilisateur : robinets, sources, ...etc.

I-9 Principes généraux du pompage photovoltaïque

La caractéristique de l'énergie solaire est d'être périodique (jour/nuit), continuellement variable en fonction de l'ensoleillement au cours d'une journée. Aussi faut-il en général un stockage tampon afin de pouvoir utiliser des récepteurs, consommateurs d'électricité, quel que soit le moment souhaité.

Le pompage solaire est une exception, il est en effet relativement facile de stocker l'énergie potentielle de l'eau dans un réservoir surélevé, alternative largement moins onéreuse et plus fiable qu'un stockage par accumulateurs électriques, car les batteries ont une durée de vie limitée et nécessitent un entretien rigoureux. Par la variation de vitesse, et donc du débit, le pompage permet d'utiliser directement une puissance continuellement variable, celle issue des modules photovoltaïques. Le débit de pompage va donc évoluer avec l'intensité de l'ensoleillement : c'est ce que l'on appelle le pompage "au fil du soleil". Le débit maximum de la pompe, exprimé en m^3/h , obtenu généralement à midi est environ le sixième du débit journalier [7].

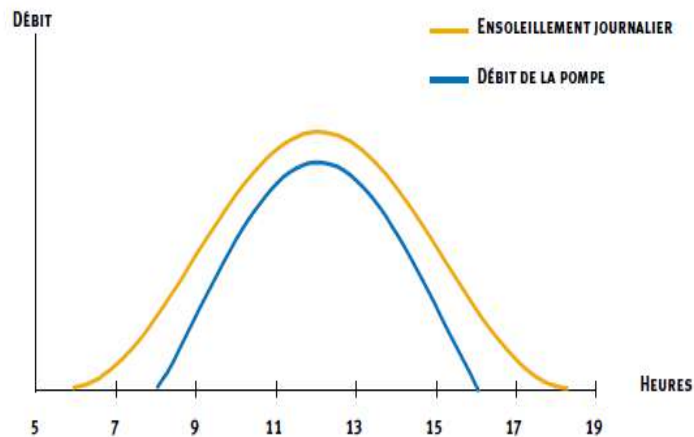


Fig. (I-8): Pompage au fil du soleil (Fonctionnement automatique sur une journée)

Il existe des situations où cet atout ne peut être mis à profit. Elles nécessitent un stockage par banc de batteries. Tel est le cas par exemple des petites unités de pompage à usage domestique. Elles font souvent partie d'un système pourvu de différentes applications, éclairages, froid, équipements audiovisuels déjà doté d'un banc de batteries.

C'est l'utilisateur qui déclenche la mise en route de la pompe qui fonctionne alors en régime fixe.

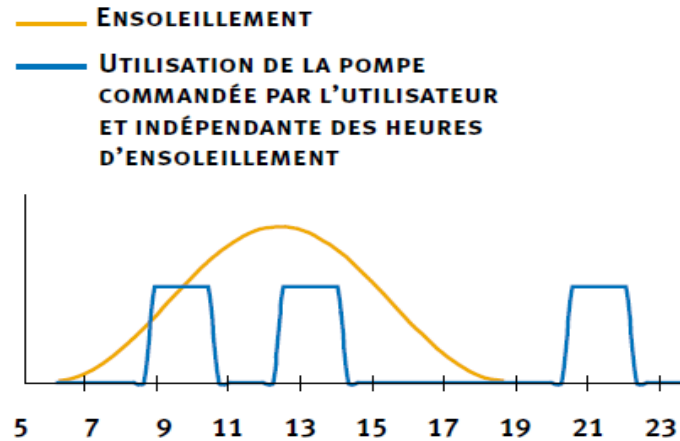


Fig. (I-9) : Pompage sur batterie

I-10 Différents systèmes de pompage avec différent moteurs

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

I-10-1 Systèmes de pompage avec moteur à courant continu

L'énergie électrique appliquée à un moteur est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un induit (habituellement le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un inducteur (habituellement le stator). La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu est effectuée à l'aide de balais composés de charbon et de graphite ou par commutation électronique.

Les moteurs à balais sont les plus communs, mais leurs balais doivent être changés périodiquement. Ceci est particulièrement problématique dans le cas des pompes à moteur immergé où la pompe doit être retirée du forage pour changer les balais. De plus, l'isolation du moteur ne doit pas être compromise afin de ne pas la fragiliser aux infiltrations d'eau, ce qui n'est pas évident sur le site. Certains fabricants offrent des moteurs à balais de longue durée, réduisant cet entretien à toutes les 5000 heures de fonctionnement. Le champ magnétique de l'inducteur dans un moteur à courant continu est produit soit par un bobinage électromagnétique, soit par des aimants permanents.

Dans le cas d'inducteur à bobinage, les moteurs peuvent être de type série, de type parallèle (moteur shunt) ou de type à excitation composée (moteur compound) selon la manière dont l'induit et l'inducteur sont alimentés. Dans un moteur série à bobinage électromagnétique, l'enroulement inducteur est en série avec l'induit.

Le couple moteur est relativement grand à faible vitesse et décroît à mesure que la vitesse augmente. Réciproquement, le moteur ralentit lorsque le couple résistant augmente. Ainsi, un moteur série ne peut fonctionner à vide car il peut s'emballer. Lorsque le courant décroît rapidement, la vitesse augmente et peut prendre des valeurs dangereuses. D'autre part, la puissance demandée croît moins vite que le couple résistant, ce qui limite l'importance des variations du courant lorsque le couple résistant varie.

Le moteur série s'adapte particulièrement à la traction électrique parce que sa vitesse varie en fonction de la tension et son couple moteur est bien adapté au service demandé. Ainsi, en régime de démarrage, à faible vitesse, le couple moteur est important et permet de fournir l'énergie cinétique suffisante pour la mise en route d'un équipement présentant une grande inertie. À vitesse normale, le couple décroît, mais le moteur n'a plus qu'à vaincre les divers frottements. Ce type de moteur est donc bien adapté à un pompage variable au fil du soleil.

Dans un moteur shunt, les enroulements induits et les inducteurs sont alimentés, en dérivation, par la même source, sous tension constante. La vitesse d'un moteur shunt sera sensiblement constante, peu importe le couple résistant. Par ailleurs, à excitation constante, le couple moteur est proportionnel au courant absorbé (I) ; la puissance demandée sera donc proportionnelle au couple résistant. Le moteur shunt est utilisé surtout dans les machines-outils pour lesquelles il est nécessaire que la vitesse varie peu, quelle que soit la charge. Ce type de moteur est peu adapté au pompage où le couple de démarrage est important [6][7][10].

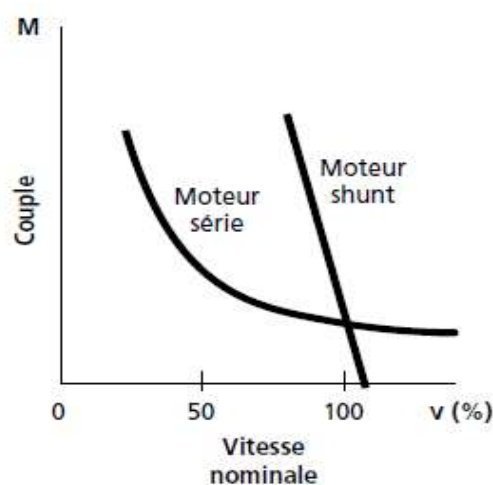


Fig. (I-10) : Caractéristiques $C=f(V)$

Parmi les moteurs à courant continu, seuls les moteurs à aimants permanents (3 HP et moins) et les moteurs série sont utilisés pour des applications de pompage solaire. Eux seuls arrivent à avoir un couple de démarrage suffisant pour vaincre la résistance de démarrage d'une pompe et bien répondre à un courant variable.

I-10-2 Systèmes de pompage moteurs à commutation électronique

Le rendement des moteurs CC peut atteindre 75 à 85%, même à des puissances nominales faibles de l'ordre de 100- 200 watts, comme c'est le cas dans les plus petites installations de pompage à énergie solaire. La plupart des moteurs à courant continu sont munies d'un induit ou rotor à collecteurs/balais, tout comme le moteur universel. Or, il s'agit là d'un inconvénient majeur pour le pompage de l'eau avec des groupes motopompes immergés. Toutefois, des moteurs à aimant permanent sans balais ont été récemment mis au point.

Ces moteurs comportent des aimants fixés au rotor, tandis que les enroulements du stator sont traversés par un courant alternatif de fréquence variable, de manière à s'adapter à la vitesse de rotation. L'adaptation de la vitesse est assurée au moyen d'un capteur de position installé sur le rotor qui mesure la vitesse et détermine la position de l'arbre, ce capteur commande un circuit électronique à alimentation DC pour assurer la fonction de commutation.

Ce type de moteurs a une qualité mécanique du même niveau que le moteur à induction, et ils peuvent, le cas échéant, être scellés en permanence à une pompe immergée. Cependant, ils sont toujours fabriqués en nombre limité, et ils doivent être munis d'un commutateur électronique sophistiqué d'un coût relativement élevé. Avec l'utilisation de plus en plus croissante des pompes solaires, ces moteurs pourraient devenir d'un emploi plus courant et sans doute à un prix plus abordable.

I-10-3 Systèmes de pompage avec moteur à courant alternatif triphasé

Le moteur à courant alternatif est utilisé de plus en plus pour les systèmes de pompage photovoltaïque. Le coût peu élevé du moteur, son faible besoin de maintenance et l'efficacité accrue des onduleurs solaires le rendent particulièrement attrayant pour les systèmes de pompage plus importants où le coût additionnel de l'onduleur est moins significatif.

Les moteurs alternatifs asynchrones sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. Par exemple, les pompes sur réseau utilisent depuis longtemps ce type de moteur. De dimension compacte, il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts.

Depuis quelques années, l'arrivée d'onduleurs efficaces permettant un contrôle de la vitesse de ces moteurs a permis leur utilisation pour des applications de pompage solaire. Le moteur alternatif pour le pompage solaire est habituellement de type asynchrone, triphasé et à rotor en court-circuit (rotor à cage). Celui-ci tourne autour de deux paliers lubrifiés par le liquide de refroidissement dont est rempli le moteur.

Le stator est noyé dans une résine, qui lui assure une bonne tenue mécanique, une bonne dispersion calorique et une étanchéité parfaite. Ces moteurs sont conçus pour être immergés et utilisés dans une eau d'une température maximale d'environ 35 °C. Ils doivent nécessairement être alimentés par un onduleur qui convertira le courant continu des modules PV en courant alternatif [9].

Dans le cas d'un moteur bipolaire à un courant triphasé de fréquence w , la vitesse de rotation du moteur, dite vitesse de synchronisme, est de 2900 à 3 000 T/mn (fréquence de 50 à 60 Hz).

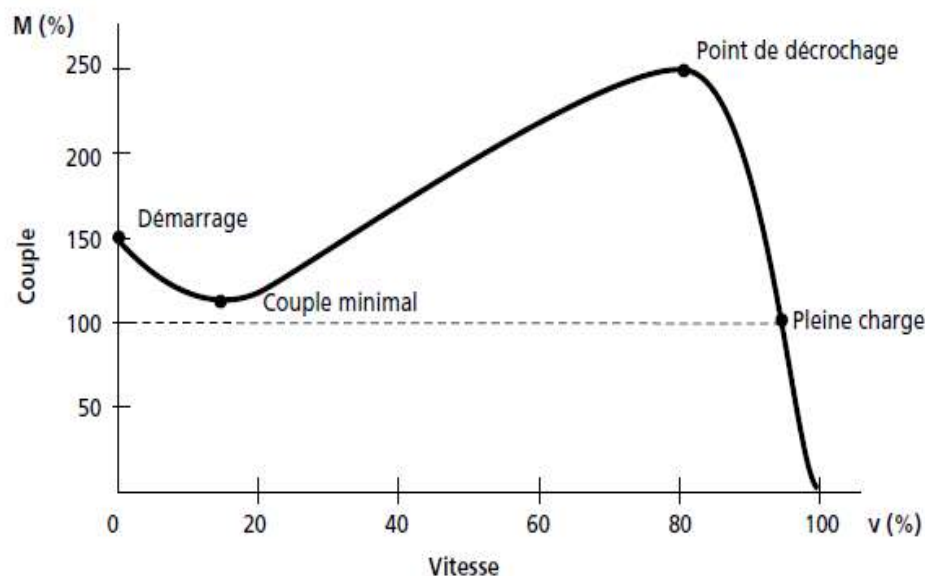


Fig. (I-11) : Courbe du couple en fonction de la vitesse du moteur asynchrone bipolaire

Au démarrage, le moteur développe un couple d'environ 150% du couple nominal. En pleine charge, la vitesse du moteur reste relativement constante pour une grande variation du couple. Si la charge mécanique excède 250%, le moteur s'arrêtera (point de décrochage). Les moteurs de petite puissance (<10kW) atteignent leur couple maximal (point de décrochage) à environ 80 % de la vitesse synchrone. La vitesse nominale est d'environ 4% de la vitesse synchrone (glissement de 4%).

Le rendement moyen d'un moteur asynchrone est de 85 %. À ceci il faut ajouter le rendement de l'onduleur qui est de 90%-95% sur une plage de fonctionnement importante. Le

rendement moyen du moteur/onduleur sera donc de 80 % sur une plage de fonctionnement relativement importante. De plus, ces onduleurs sont équipés pour suivre le point de puissance maximal du champ photovoltaïque permettant un pompage solaire au fil du soleil relativement efficace.

Les moteurs asynchrones à cage sont préférés par rapport les autres type de moteurs dans de nombreuses applications en raison de leurs structures robustes et à faible coût. Cependant, ils n'ont pas efficace plus que les moteurs synchrones à aimants permanents qui ont une performance élevée, une bonne réponse dynamique, un couple élevé, une faible inertie, un rendement et puissance élevé, durabilité et fiabilité. En outre, le rotor à aimant permanent présente de nombreux avantages, y compris l'élimination des pertes de rotor causé par l'enroulement d'excitation, ce qui conduit à une efficacité accrue. L'efficacité supérieure permet une réduction de la taille de la machine [10].

I-11 Couplage générateur PV – groupe de pompage

Parce qu'il est souvent plus économique de construire un réservoir pour stocker l'eau plutôt que de stocker l'électricité dans les batteries, le moteur d'une pompe solaire fonctionnera habituellement « au fil du soleil », c'est-à-dire qu'il sera couplé directement au générateur photovoltaïque, sans batterie.

Dans ce cas, il est important que la puissance fournie par le générateur PV soit utilisée le plus complètement possible au point de fonctionnement maximal du groupe motopompe sur la plage de fonctionnement la plus large possible. Nous avons vu que différents types de moteurs et de pompes engendrent des caractéristiques de fonctionnement différentes.

Le choix d'un régulateur ou d'un onduleur dépendra étroitement de ces caractéristiques. L'emploi d'une batterie fixe le point de fonctionnement du groupe motopompe sur une plus petite plage de fonctionnement. Ainsi, la pompe fonctionne à couple constant, donc à rendement constant dans le cas d'une pompe volumétrique. Le démarrage d'une pompe centrifuge sera également plus efficace, la puissance de démarrage, plus élevée, pouvant être fournie dès le départ.

Néanmoins, l'emploi d'une batterie ne rend pas inutile l'utilisation d'un régulateur de charge. Les caractéristiques de sortie de l'électricité fournies par la batterie sont plus homogènes, mais une adaptation à la charge variable d'une pompe sera néanmoins nécessaire dans la plupart des cas.

I-11-1 Adaptateur de charge (moteur continu)

Les courbes de caractéristiques courant-tension du groupe motopompe et du générateur solaire peuvent être très variables. En fait, selon l'instant de la journée, le type de pompe utilisée et les conditions d'utilisation du forage, le moteur de la pompe ne fonctionnera pratiquement jamais au point maximal (P_m) du générateur PV durant la journée.

Nous allons voir au chapitre 3 que l'adaptateur de charge (maximum power point tracking ou MPPT) est un dispositif électronique permettant de varier le point de fonctionnement du champ. L'adaptateur de charge sera particulièrement nécessaire au démarrage d'une pompe volumétrique, en augmentant la tension de fonctionnement acceptable par le moteur. Il permettra également de meilleurs résultats du groupe motopompe lors d'ensoleillements faibles.

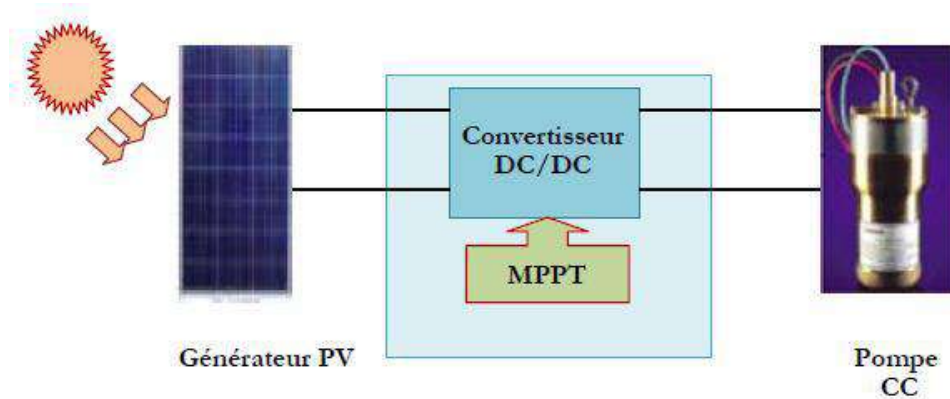


Fig. (I-12) : Couplage via convertisseur DC/DC

I-11-2 Onduleur

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite.

Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrée et de sortie fixe. Son coût assez élevé et la nature variable de l'ensoleillement et du couple résistant des pompes en général ont longtemps exclu l'emploi des moteurs à courant alternatif pour le pompage solaire.

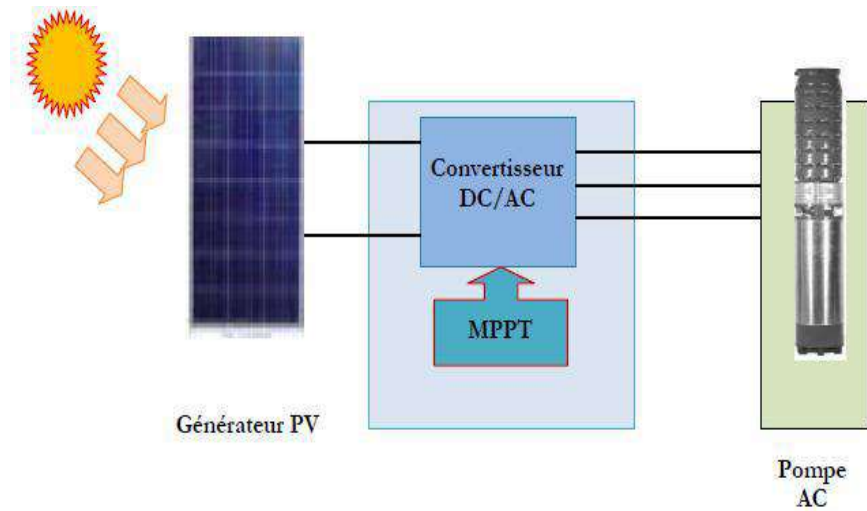


Fig (I-13) : Couplage via convertisseur DC/AC

Les onduleurs de pompage sont en général à fréquence (f) variable afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe. Dans ce cas, le rapport de la tension alternative (U) sur la fréquence – U/f – est constant. La fréquence du courant alternatif est directement proportionnelle à l'intensité de l'ensoleillement.

La tension nominale du courant alternatif peut être standard (220 ou 380 V) ou adaptée à un moteur spécifique d'une application photovoltaïque (24 V). On distingue plusieurs types d'onduleurs suivant la qualité du signal de sortie :

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

L'onduleur à onde sinusoïdale modifiée peut supporter de fortes surcharges et sa distorsion harmonique est relativement faible, de sorte qu'il n'introduit que peu de pertes par effet Joule susceptibles de causer l'échauffement des moteurs. Il est souvent employé avec de petits systèmes de pompage.

L'onduleur à modification de largeur d'impulsion utilise des commutateurs électroniques rapides pour varier la largeur d'impulsion. En utilisant un filtre à la sortie, l'onde sinusoïdale peut être reconstruite. Ces onduleurs relativement peu coûteux sont très efficaces, fonctionnant à près de 90%-95% de rendement. Ils sont employés par la plupart des systèmes de pompage à courant alternatif. L'onduleur à onde sinusoïdale n'a pas la capacité de surcharge des précédents onduleurs et son coût est relativement élevé. Il est peu employé pour les systèmes de pompage.

I-12 Les pompes photovoltaïque

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau [11].

Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur.

I-12-1 Les pompes centrifuges

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

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

I-12-2 Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume.

Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palette et à engrenage. Leurs principaux atouts sont les suivants :

- elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m³/h) et aux grandes hauteurs.
- elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont auto-amorçantes.
- le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique $I = f(V)$ de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable.

Pour pallier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.

I-13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés des généralités sur l'énergie solaire et le pompage photovoltaïque. Nous avons présentés les éléments du système de pompage photovoltaïque et les principes généraux du pompage solaire. Ensuite nous avons présentés les différents systèmes de pompage avec différents moteurs, à courant continu ou alternatif et les différentes pompes utilisées dans le domaine de pompage photovoltaïque

CHAITRE II

Dimensionnement et Modélisation du système de pompage

II-1 Introduction

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un onduleur, et un groupe motopompe. Les systèmes de pompage photovoltaïque étudié fonctionnent au fil du soleil. Dans ce chapitre le dimensionnement et la modélisation de chaque composant de ce système sera présentée.

II-2 Pompe photovoltaïque :

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

II-2-1 Pompe centrifuge :

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur.

La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à $Q \cdot HMT$, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [8].

II-2-2 -Modélisation de la pompe centrifuge :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation [12] :

$$F(H, Q, \omega) = 0 \quad (\text{II.1})$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère l'un des 3 paramètres constant, en générale c'est la vitesse qui est constante La hauteur totale du pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$H = H_s + H_d \quad (\text{II.2})$$

H : Hauteur totale du pompage.

H_s : Hauteur statique qui est la distance entre les niveaux statique de l'eau dans le puit jusqu'au le point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau.

H_d : Est la somme des pertes linéaires et singuliers, ces pertes sont

II-2-3 Pertes de charges linéaires :

Ce sont des pertes d'eau dans la tuyauterie est donnée par la formule suivante [9] :

$$\Delta H = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{II.3})$$

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

L : Longueur de la tuyauterie (m).

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

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

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

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

Au Q : débit (m^3/s).

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left(\frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 D^4 G} \right) \quad (\text{II.5})$$

On remarque que les pertes de charges linéaires sont proportionnelles à la longueur de Canalisation, ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation.

II-2-4 Caractéristique couple-vitesse de la pompe $C_e(\omega)$:

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

$$C_r = K_p * W_r^2 \quad (\text{II.6})$$

avec : $K_p = \frac{P_m}{w^3} = 18.25 * 10^{-6}$

II.3. Dimensionnement de la Motopompe :

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

- Evaluation des besoins en eau
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire
- Détermination de l'énergie solaire disponible
- Choix des composants

II-3.1 Estimation des besoins en Eau

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question). Cependant, la pratique et l'expérience locale restent toujours très indispensables pour une évaluation correcte des besoins. Les besoins d'eau des palmiers pour la région d'Ouargla sont donnés dans le tableau suivant [13].

Tab (II.1) Les besoins journaliers moyens mensuels en eau des palmiers / hectare

Période	L'Evert			Le printemps			L'été			L'automne		
Mois	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.
Eau	13	10	22	36	49	62	67	66	64	50	35	18

II-3.2 Rayonnement solaire

Le tableau ci-après donne les valeurs de rayonnement global journalier calculées sur la moyenne mensuelle pour des rayons incidents sur un plan incliné d'un angle optimal saisonnier sur le site d'Ouargla [14].

Tab (II.2) : Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle pour une inclinaison optimale saisonnière

Période	L'Evert			Le printemps			L'été			L'automne		
Mois	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.
Ray (Wh/m2/j)	5157	6245	6431	5835	6531	6398	7037	7164	6717	5851	5969	5933

II-3-3 Hauteur manométrique total

Pour notre station de pompage, nous avons choisi une hauteur manométrique totale de 48 m. Alors nous choisissons la pompe en fonction du débit et de la hauteur manométrique totale [15]. Débit horaire : Il est calculé par la formule suivante :

$$Q_h = \frac{Q[m^3 / jour]}{h} \quad (II.7)$$

Avec h : le nombre d'heures d'ensoleillement maximal;

Dans notre cas, nous prenons

$$H = 6,7 \text{ heures}$$

$$Q = 67[m^3 / jour]$$

Par conséquent, le débit horaire est le suivant

$$Qh = 10[m^3 /h]$$

Selon nos besoins nous avons 0.5 hectare, d'une part, un débit horaire de 5 m³/h, et une hauteur manométrique totale de 20 m, d'autre part, la puissance de notre pompe sera :

$$P_m = \frac{9.81 * \rho * H * Q}{\eta_p} \quad (II.8)$$

η_p : Le rendement de la pompe.

ρ : La masse volumique de l'eau (=1000Kg au m³)

$$P_m = \frac{9.81 * 1000 * 20 * 5}{0.7 * 3600} = 389 \text{ W}$$

Si on suppose que le rendement de l'accouplement est égal à 1, alors la puissance mécanique du moteur (utile) est égale à la puissance absorbée par la pompe.

Connaissant le rendement du moteur, la puissance électrique absorbée par le moteur est :

$$P_a = \frac{P_u}{\eta_m} \quad (II.9)$$

Pour prévoir certains imprévus d'exploitation, il serait prudent de la puissance absorbée par la pompe des quantités suivantes [16] :

- 30 % pour une puissance absorbée inférieure à 4 kW.
- 20 % pour une puissance absorbée comprise entre 4 et 20 kW.
- 10 % pour une puissance absorbée supérieure à 20 kW.

Dans notre étude la puissance mécanique de la pompe est 389.5 W, on applique alors une marge de sécurité de 30 %. Ce qui veut dire que la puissance mécanique du moteur doit être supérieure ou égale à 505 W.

Dans notre cas on a choisie un moteur synchrone à aimant permanent dont la puissance mécanique est 505 W.

Le rendement du moteur est estimé à 0.94

$$P_a = \frac{P_u}{\eta_m} = \frac{505}{0.94} = 538 \text{ W} \quad (II.10)$$

Le rendement du convertisseur est de l'ordre de 0.98. [17]

$$P_{GPV} = \frac{P_a}{\eta_c} = 549 \text{ W} \quad (II.11)$$

Ou P_{GPV} : la puissance du générateur PV

II-3-4 Taille du générateur PV

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

➤ **Nombres de modules :**

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

$$N_M = \frac{P_C}{P_M} = \frac{549}{250} = 2.19 \quad (\text{II.12})$$

Ou P_M : La puissance du module PV.

N_M : Nombres de modules

➤ **Nombre de modules en série :**

Dans notre cas le moteur est alimenté par une tension de 15 V alors la tension appliquée à l'entrée de l'onduleur.

$$V_d = \frac{3}{\sqrt{2}} v_{eff} \quad (\text{II.13})$$

$$V_d = \frac{3}{\sqrt{2}} 15 = 31.91 \text{ v}$$

Donc le nombre de module en série est $N_s = 1$

➤ **Nombre de modules en parallèle :**

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

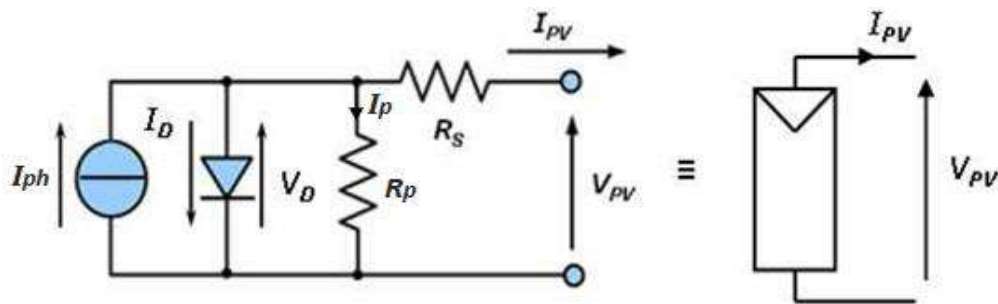
$$N_p = \frac{N_M}{N_s} = 3 \quad (\text{II.14})$$

Dans notre travail, nous choisissons trois panneaux photovoltaïques branchés en parallèle de type **Appolosolarenergy ASEC-205 G6M**. (voir l'annexe).

II-5 Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

II-5-1 Modèles électriques d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode la figure (II.1). Le modèle est complété par une résistance série due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule.[4]



Fig(II.1):Circuit équivalent d'une cellule PV photovoltaïque.

On note :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (II.15)$$

Avec:

$$I_D = I_S \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + I.R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (II.16)$$

$$I_p = \frac{V_{PV} + I.R_s}{R_p} \quad (II.17)$$

$$I_S = I_{SC} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (II.18)$$

$$I_{SC} = I_{SCR} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (II.19)$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (II.20)$$

Où

I_{PV} : Courant fourni par la cellule.

V_{PV} : Tension aux bornes de la cellule

I_D : Courant de diode.

I_{ph} : Photo courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

I_p : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

I_S : Courant de saturation de diode, dépendant de la température

I_{SCR} : Le courant de court-circuit de référence

V_{co} : La tension de circuit ouvert

V_T : La tension thermique

R_p : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant

R_s : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts

G : L'irradiation solaire en W/m^2

q : Charge d'électron $1.602 \cdot 10^{-19} C$

K : Constante de Boltzmann $1.381 \cdot 10^{-23} Nm/^\circ K$

n : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

T : La température effective de la cellule en kelvin.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + I.R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I.R_s}{R_p} \quad (II.21)$$

II-5-2 Simulation du générateur PV

II-5-2-1. Module type polycristallin -Appolosolarenergy ASEC-205 G6M

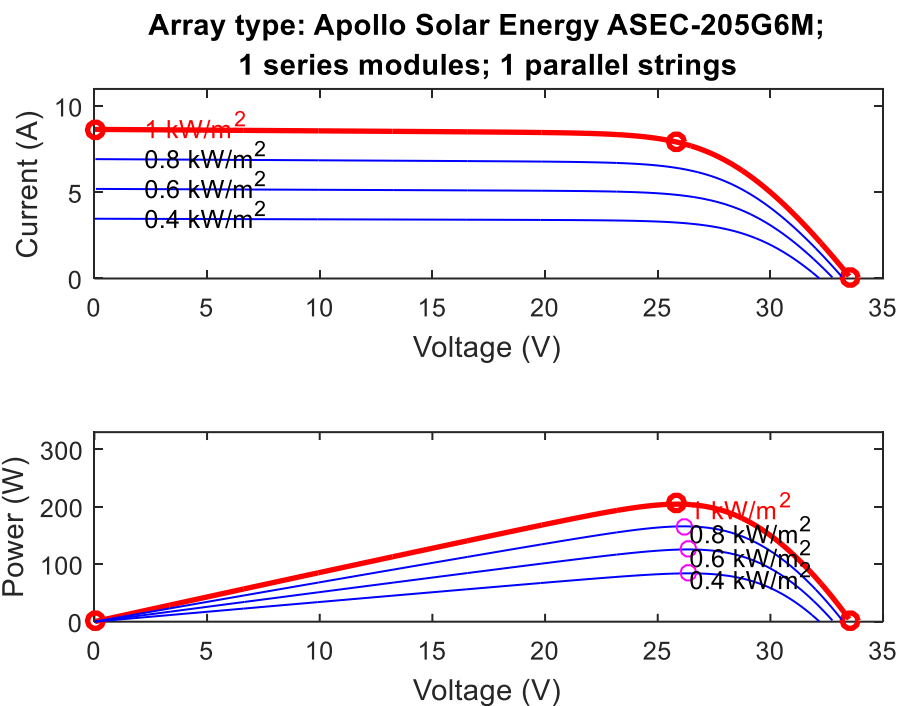
Ce type de module délivre une puissance crête de 205Wc avec une tension max V_{mp} de 24.23 V et un courant I_{mp} de 8.46 A, la tension de circuit ouvert est 30.03 V et un courant de court-circuit de 8.83A et un rendement de 15.71%.

II-5-2-2 Résultats de simulation :

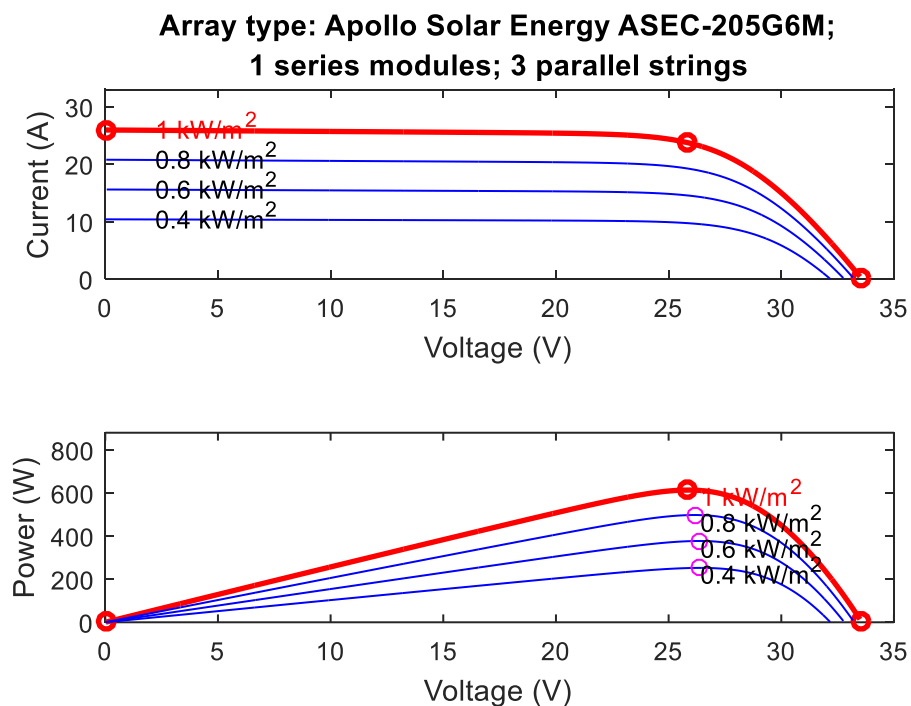
La simulation du module et de champ PV pour différents éclairagements (1000 800 600 400) W/m^2 et pour différentes températures (25 ,50,75) $^\circ C$ a été faite sous l'environnement Matlab/simulink. Les figures (II.2, 3, 4 et 5) donnent les caractéristiques I-V et P-V de ce type.

Les résultats de simulation montre que la variation de l'éclairagement influe sur le courant généré, plus l'éclairagement augmente plus le courant augmente tandis que la tension varie légèrement et la variation de la température influe sur la tension, celle-ci diminue avec l'augmentation de la température tandis que le courant n'est pas influencé par la température.

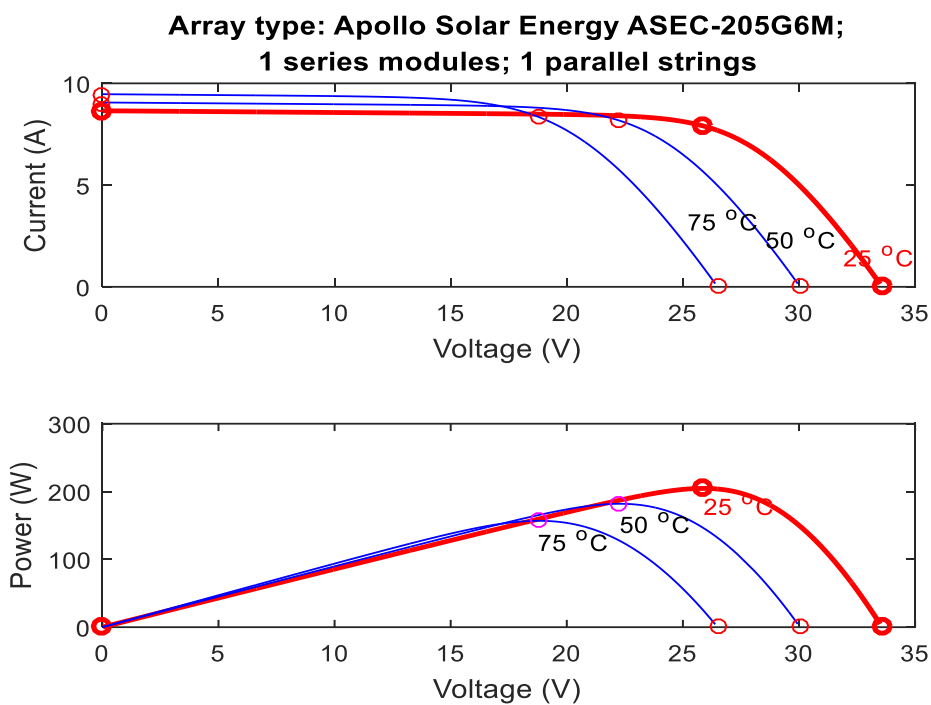
Cette influence atteint automatiquement la puissance du module et du champ du faite de la relation qui relie les trois grandeurs tel que $P = V.I$, on remarque que la puissance augmente avec l'augmentation de l'éclairagement et diminue avec l'augmentation de la température.



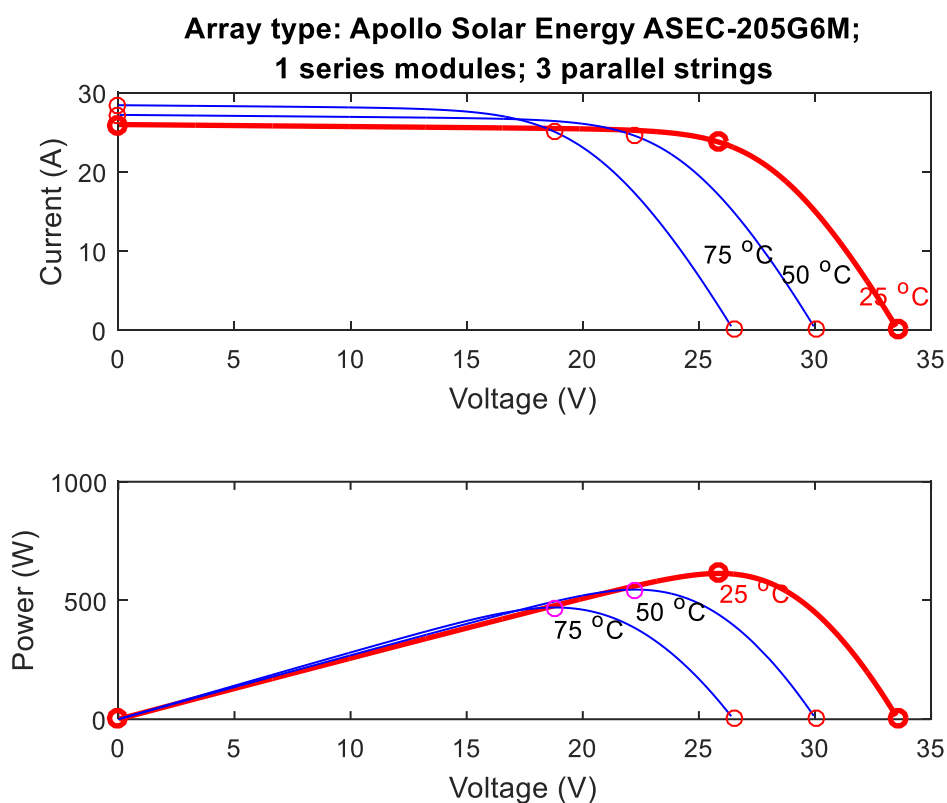
Fig(II-2): Caractéristique I-V et P-V d'un module à 25°C



Fig(II-3): Caractéristique I-V et P-V d'un champ à 20°C



Fig(II-4): Caractéristique I-V et P-V d'un module à $E=1000 \text{ w/m}^2$



Fig(II-5): Caractéristique I-V et P-V d'un champ à $E=1000 \text{ w/m}^2$

II-6 Choix du moteur électrique

Les moteurs électriques devraient être contrôlés pour améliorer l'efficacité du système de pompage, en particulier ceux alimentés par une source d'énergie solaire. Les moteurs asynchrones à cage d'écureuil sont largement utilisés dans ces applications nécessitant une tension amplifiée pour obtenir une tension nominale [19].

Par exemple, un moteur asynchrone triphasé (220Vac, 50 Hz et 2 pôles) nécessite une tension amplifiée qui augmente une tension de 12-24Vdc jusqu'à 300VCC pour fonctionner dans un système d'énergie solaire.

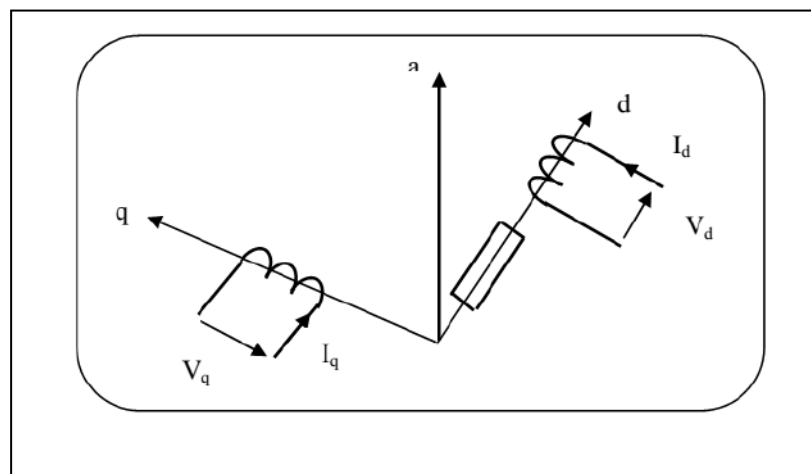
En revanche, le moteur peut être conçu avec une tension basse comme 24V qui n'est pas nécessaire d'une tension boostée. Ainsi, le système de commande du moteur peut être directement connecté aux panneaux PV solaires. Pour cet objectif, un MSAP est utilisé pour obtenir un rendement élevé à basse tension.

II-6-1 Modèle de la MSAP dans le référentiel de Park

La transformation de *Park* dans un référentiel lié au rotor d'un MSAP est identique à une machine à courant continu ayant l'enroulement f comme inducteur et ayant deux induits en quadrature.

Le passage du système triphasé au système biphasé se fait en utilisant les relations suivantes :

$$\begin{cases} [V_d \ V_q \ V_0] = P(\theta)[v_a \ v_b \ v_c] \\ [I_d \ I_q \ I_0] = P(\theta)[i_a \ i_b \ i_c] \\ [\Phi_d \ \Phi_q \ \Phi_0] = P(\theta) [\phi_a \ \phi_b \ \phi_c] \end{cases} \quad (\text{II.22})$$



fig(II-6) schéma de laMSAP dans le repère (dq)

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

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Alors, le modèle de la MSAP après la transformation de Park est :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d s & -P_w L_q \\ P_w L_d & R_s + L_q s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ P_w \phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

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

$$\begin{cases} \phi_d = L_d I_d + \phi_f \\ \phi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

ϕ_f : Représente le flux des aimants.

II-6-2 Equations mécaniques :

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

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (\text{II.26})$$

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

Le couple électromagnétique C_e est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les $FMMs$ dans l'entrefer généré par les courants statoriques. Il est exprimé par :

$$C_e = \frac{3}{2} P \left((L_d - L_q) I_d I_q + \phi_f I_q \right) \quad (\text{II.27})$$

II-7 Modélisation et simulation du convertisseur DC/AC:

Pour modéliser l'onduleur de tension Fig. (II.7) on considère son alimentation par les panneaux PV, supposée d'être de deux générateurs de F.E.M égale à $v_{dc} = \frac{u_0}{2}$ connectés entre eux par un point noté n_0 .

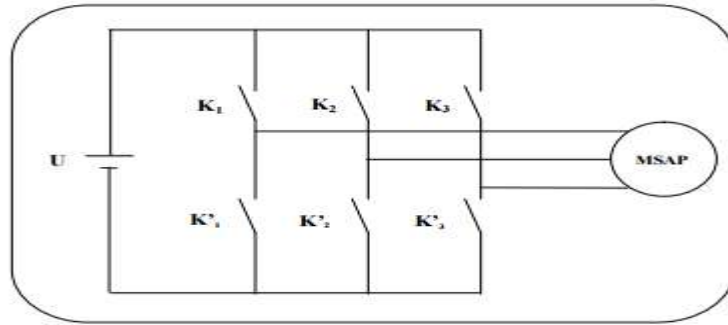


Fig (II-7): Onduleur de tension triphasé

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

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

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

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

$$V_{in0} = s_i v_{dc} \quad (II.28)$$

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (II.29)$$

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

$$V_{an} = \frac{1}{3}[U_{ab} - U_{ca}]$$

$$V_{bn} = \frac{1}{3}[U_{bc} - U_{ab}] \quad (II-30)$$

$$V_{cn} = \frac{1}{3}[U_{ca} - U_{bc}]$$

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

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} &= V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} &= V_{cn0} - V_{an0} \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

En remplaçant (II-31) dans (II.30) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an0} \\ V_{bn0} \\ V_{cn0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Des relations suivantes :

$$\begin{aligned} V_{an0} &= V_{an} + V_{nn0} \\ V_{bn0} &= V_{bn} + V_{nn0} \\ V_{cn0} &= V_{cn} + V_{nn0} \end{aligned} \quad (\text{II-33})$$

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

$$V_{nn0} = \frac{1}{3} [V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (\text{II.34})$$

L'utilisation de l'expression (II-34) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} v_{dc} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-35})$$

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

Dans notre travail, on a appliqué la technique de commande par MLI sinus-triangle,

II-7-1 Technique de commande par modulation de largeur d'impulsion MLI

La technique de MLI triangulo-sinusoïdale est réalisée par comparaison d'une onde modulante (tension de référence) ayant une basse fréquence en triphasé les trois références sinusoïdales sont déphasées de $\frac{2*\pi}{3}$ à la même fréquence à une onde porteuse triangle d'amplitude fixe et une fréquence, supérieure aux trois tensions de référence

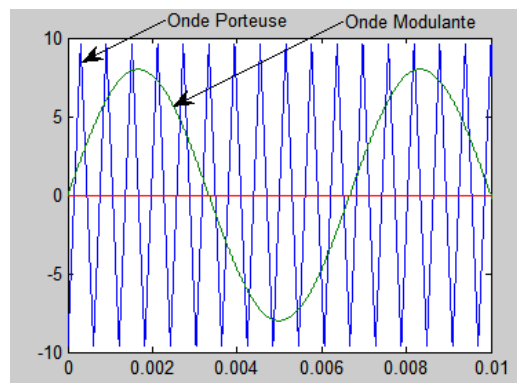


Fig. (II-8) : Tensions porteuse et modulante

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de modulation des interrupteurs est fixée par la porteuse

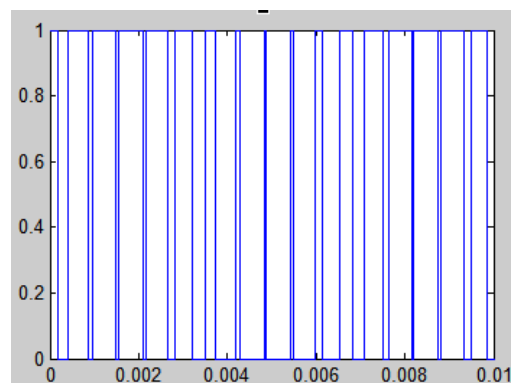


Fig (II-9) : Commande F1 de l'onduleur

La tension de sortie est formée d'un créneau de largeur variable et d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation (+U et -U).

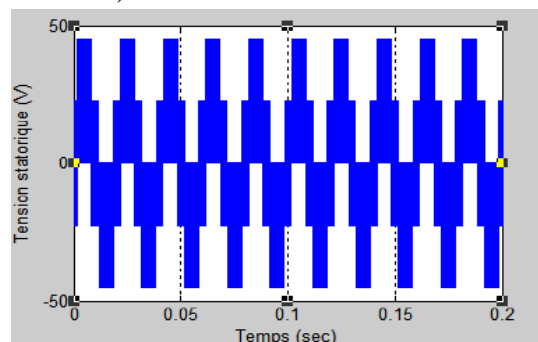


Fig (II-10) : Tension simple à la sortie de l'onduleur

II-8.Conclusion

Dans ce chapitre on a illustre le dimensionnement et la simulation de différents éléments d'un système de pompage solaire à base d'un moteur synchrone à aimants permanents de haute performance, la pompe centrifuge, le générateur photovoltaïque et le système motopompe sont dimensionnés.

En général, les onduleurs de pompage solaire sont à fréquence variable afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe. La fréquence du courant alternatif est directement proportionnelle à l'intensité de l'ensoleillement.

Pour obtenir des performances statiques et dynamiques élevés à vitesse variable, on applique la commande vectorielle para pour la commende scalaire dans le chapitre suivant.

CHAPTER III :

Commande vectorielle du MSAP

III-1- Introduction :

L'asservissement des machines à courant alternatifs alimentés par des convertisseurs statiques pour faire fonctionner des actionneurs à des vitesses variables devient de plus en plus courants, parmi les machines électriques utilisés, les machines synchrones à aimant permanent qui ont une inertie très faibles et des inductances relativement faibles ce qui entraîne des réponses rapides des courants et donc du couple [20].

III-2-Commande vectorielle du MSAP

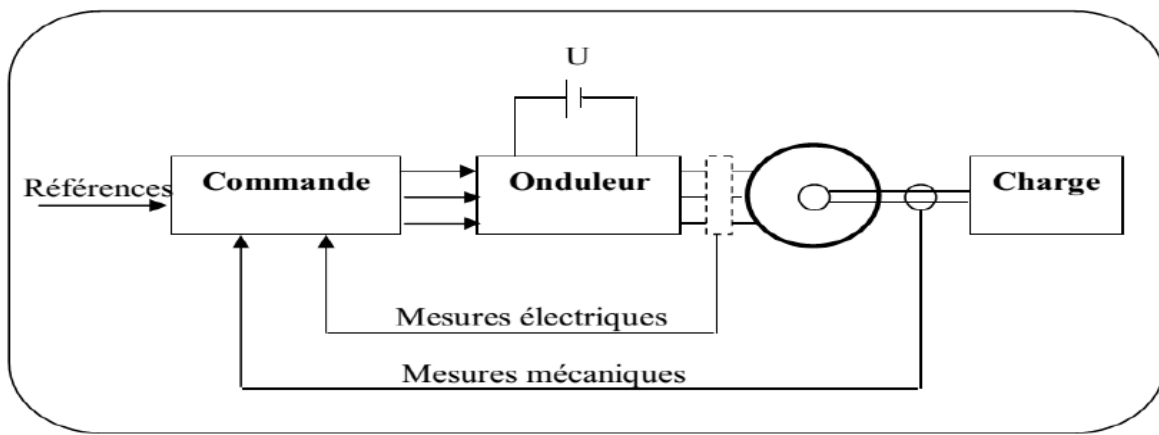


Fig (III.1) : Ensemble Commande – Onduleur -Moteur

III-2-1- Pourquoi la commande vectorielle

La machine à courant continu à un avantage primordial d'être facilement commander, le flux et le couple sont découplés et sont contrôlés indépendamment.

- le flux produit le courant d'excitation (inducteur) I_f .
- le couple est produit par le courant induit I_a .

$$C_e = K \cdot I_a \cdot I_f$$

Le couple est proportionnelle au produit du flux inducteur et le courant induit, pour une machine à excitation sépare si on maintient le flux inducteur constant le couple est directement proportionnel au courant d'induit.

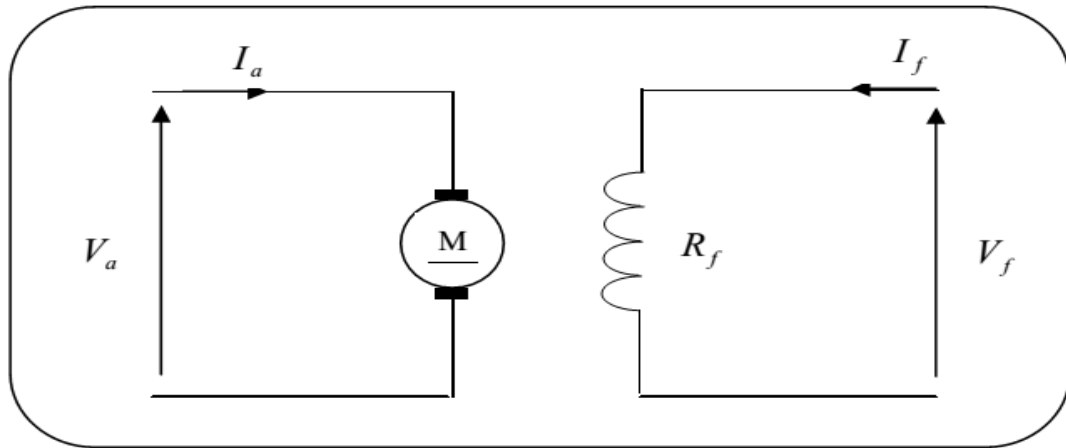


Fig. (III.2) Représentation d’une MCC

Cependant la présence du collecteur et des balais a toujours été le point faible de la machine à courant continu, ce commutateur mécanique limite la puissance et la vitesse, et son entretien devient plus exigeant.

Pour le MSAP, le découplage naturel de la MCC n’existe plus, ce qui rend la machine difficile à commander, cette difficulté réside dans le fait qu’il existe un couplage entre les variables d’entrées (tension, fréquence) et les variables de sortie (couple, vitesse).

Pour qu’on arrive à un contrôle semblables à la MCC, une nouvelle théorie de commandes des machines à courant alternatif dite « commande vectorielle » ou « commande par flux orienté » qui a été découverte dans les années soixante-dix.

III-2-2- Principe de base de la commande vectorielle :

Le but de la commande vectorielle est d’arriver à assimiler la MSAP à une MCC à excitation séparée.

$$C_e = \frac{3 \cdot p}{2} \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_d + \varphi_e] \cdot i_q \tag{III.1}$$

A partir de cette équation, on constate que pour contrôler le couple il faut contrôler les composantes directes et en quadrature du courant.

Pour un MSAP à pôles saillants, il faut assurer l’orthogonalité entre le flux rotorique φ_e et la composante en quadrature du courant statique, ceci revient à imposer le courant direct $i_d = 0$.

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \varphi_e \cdot i_q \tag{III.2}$$

Et comme le flux des aimants est constant, on voit que le couple électromagnétique obtenu est proportionnel au courant i_q .

On constate que l’équation du couple de la MSAP est (analogue à celle du couple de la MCC à excitation séparée).

Les courants i_d et i_q sont les composantes du courant statiques portées par les axes direct et en quadrature et qui sont analogues respectivement au courant d'excitation I_f et au courant induit I_a dans une MCC.

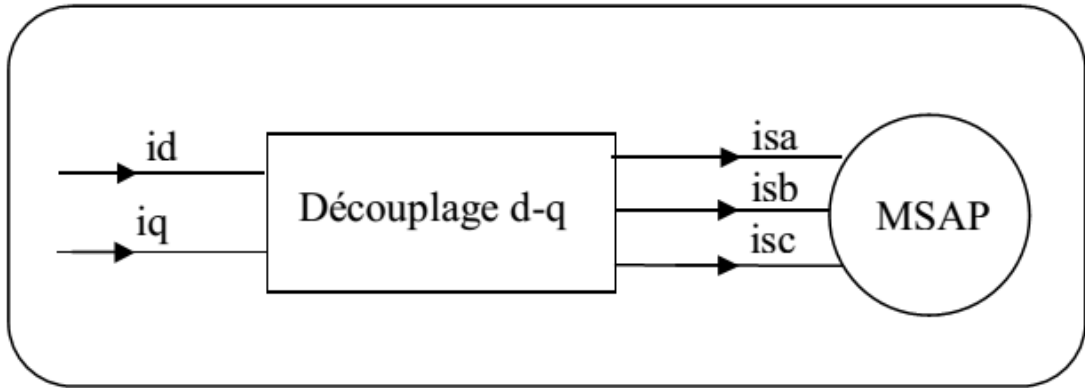


Fig. (III.3) : bloc de découplage

D'après les équations du MASP obtenues au chapitre I

$$V_d = R \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q \cdot i_q \tag{III.3}$$

$$V_q = R \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega (L_d \cdot i_d + \varphi_e) \tag{III.4}$$

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot P [(L_d - L_q) \cdot i_d i_q + \varphi_e i_q] \tag{III.5}$$

Ces équations montrent que V_d et V_q dépendent à la fois des courants statiques sur les axes d, q ce qui nous amène à implanter un découplage.

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation [21], cette dernière consiste à faire une régulation des courants en négligent les termes de couplage qui seront rajoutés aux sorties des régulateurs des courants afin d'obtenir des tensions de références pour alimenter l'onduleur. Les termes de couplage sont définis de telle sorte que les tensions restantes soient en relation du premier ordre avec les composantes des courants.

$$V_d^c = -\omega L_d \cdot i_q \tag{III.5}$$

$$V_q^c = \omega (L_d \cdot i_d + \varphi_e) \tag{III.6}$$

Les sorties des régulateurs des courants sont :

$$V_d^* = R \cdot i_d + L_D \cdot \frac{di_d}{dt} \tag{III.7}$$

$$V_q^* = R \cdot i_q + L_D \cdot \frac{di_q}{dt} \quad (III.8)$$

Les termes de références sont alors :

$$V_{qr} = V_d^* + V_q^c \quad (III.9)$$

$$V_{qr} = V_q^* + V_d^c \quad (III.10)$$

III-2-3- Calcul des paramètres du régulateur pi :

III-2-3-1- Régulateur de courant :

$$V_d^* = R \cdot i_d + L_D \cdot \frac{di_d}{dt} = (R + S \cdot L_d) \cdot i_d \quad (III.11)$$

$$i_d = \frac{1}{R+S \cdot L_d} \cdot V_d^* \quad (III.12)$$

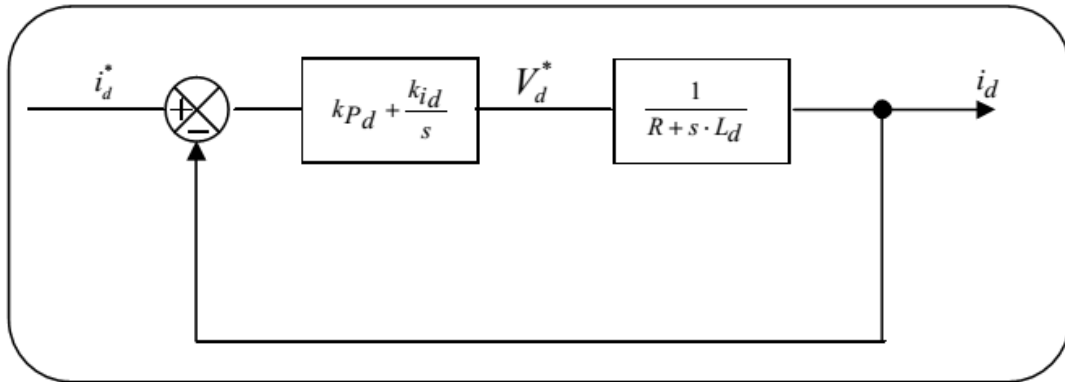


Fig. (III.4) : Schéma fonctionnel du régulateur de courant

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

$$F_{BO} = \left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) \cdot \left(\frac{1}{R+S \cdot L_d} \right) = \frac{S \cdot K_{pd} + K_{id}}{S(R+S \cdot L_d)} \quad (III.13)$$

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

$$F_{BF} = \frac{F_{BO}}{1+F_{BO}} = \frac{S(R+S \cdot L_d) \frac{1}{L_d}}{S^2 + \left(\frac{K_{pd}+R}{L_d} \right) + \frac{K_{id}}{L_d}} \quad (III.14)$$

Le polynôme caractéristique du système en boucle fermée est :

$$P(S) = S^2 + \frac{R+K_{pd}}{L_d} \cdot S + \frac{K_{id}}{L_d} \quad (III.15)$$

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

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

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

$$P(s) = (s - s_1) \cdot (s - s_2) = s^2 + 2 \cdot \rho \cdot s + 2 \cdot \rho^2 \quad (III.16)$$

L'identification terme à terme des deux équations (III.15) et (III.16) nous donne

$$\left(\frac{R+K_{pd}}{L_d}\right) = 2\rho \Rightarrow K_{pd} = 2 \cdot \rho \cdot L_d - R \quad (III.17)$$

$$\frac{K_{pd}}{L_d} = 2\rho^2 \Rightarrow K_{id} = 2 \cdot \rho \cdot L_d \cdot \rho^2 \quad (III.18)$$

De la même façon on trouve :

$$K_{pq} = 2 \cdot \rho \cdot L_d - R \quad (III.19)$$

$$K_{iq} = 2 \cdot \rho \cdot L_d \cdot \rho^2 \quad (III.20)$$

III-2-3-2- Régulateur de vitesse :

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

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e - f_v \cdot \Omega \quad (III.21)$$

$$\frac{J}{P} \cdot \frac{d\omega}{dt} = C_e - \frac{f_v}{P} \cdot \omega \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = \frac{P}{J} \cdot \left(C_e - \frac{f_v}{P} \cdot \omega \right) \quad (III.22)$$

$$s \cdot \omega = \frac{P}{J} \cdot \left(C_e - \frac{f_v}{P} \cdot \omega \right) \Rightarrow \omega = \frac{P}{s \cdot J + f_v} \cdot C_e \quad (III.23)$$

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

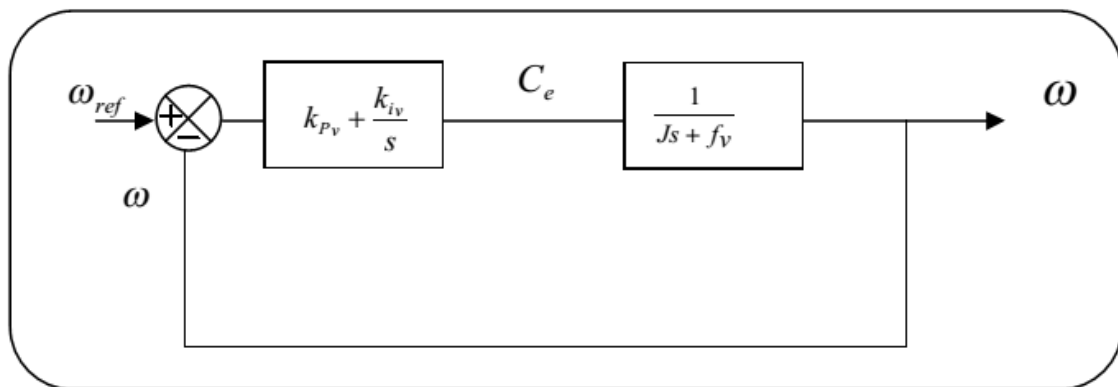


Fig. (III.5) : Schéma fonctionnel du régulateur de vitesse

La fonction du transfert du système en boucle ouverte est :

$$T_{BO}(s) = \left(K_{PV} + \frac{K_{iv}}{s} \right) \cdot \left(\frac{P}{s \cdot J + f_v} \right) = \frac{(K_{iv} + s \cdot K_{PV}) \cdot P}{s \cdot (s \cdot J + f_v)} \quad (III.24)$$

La fonction du transfert du système en boucle fermée est :

$$T_{BF}(s) = \frac{T_{BO}(s)}{1 + T_{BO}(s)} \quad (III.25)$$

Le polynôme caractéristique est :

$$P(s) = s^2 + \left(\frac{f_v + P \cdot K_{PV}}{L_q} \right) \cdot s + \frac{P}{J} \quad (III.26)$$

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

$$P(s) = s^2 + 2 \cdot \rho \cdot s + 2 \cdot \rho^2 \quad (III.27)$$

L'identification terme à terme des deux équations (II-26) et (II-27) nous donne :

$$K_{iv} = 2 \cdot \rho^2 \cdot \frac{P}{J} \quad (III.28)$$

$$K_{PV} = \frac{1}{P} \cdot (2 \cdot \rho \cdot J \cdot f_v) \quad (III.29)$$

III-2-4 –Description du système global

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

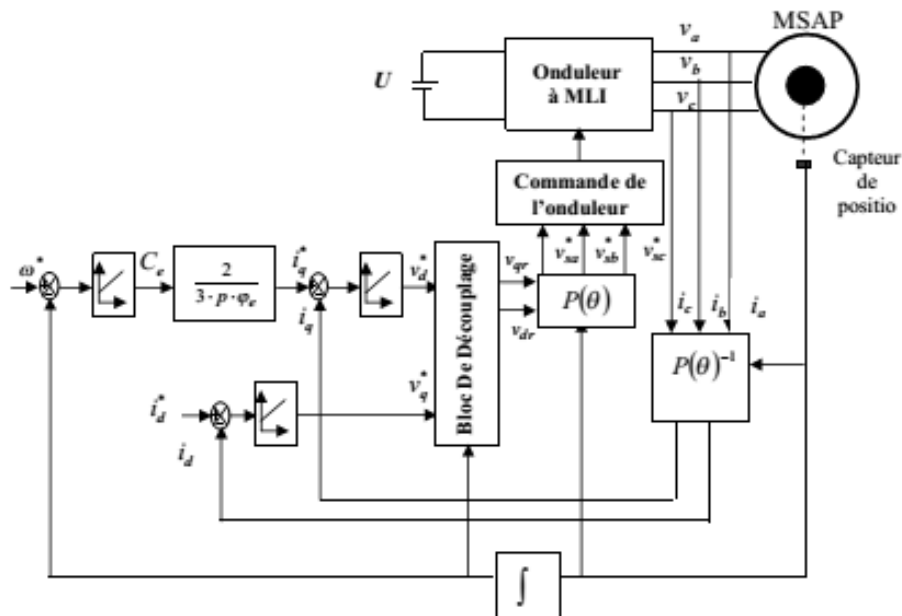


Fig. (III.6) : Schéma de la commande vectorielle du MSAP

Les références des courants direct id^* et iq^* sont comparées séparément aux courants réelles de la machine id et iq , les erreurs sont appliquées à l'entrée des régulateurs, un bloc de découplage génère les tensions de références v_{dr} et v_{qr} , ces tensions après passage par la transformation de PARK servent de référence des tensions (V_{sa}^* , V_{sb}^* , V_{sc}^*) pour la commande de l'onduleur. [22]

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

III-2-5 Technique de maximisation de la puissance MPPT

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sorties mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique I(V) du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température.

Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Ces convertisseurs connus sous le nom de MPPT (**Maximum Power Point Tracking**) assurent le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

III-2-5-1 Principe de la techniques «Perturb and Observe» (P&O) [23]

Le principe de commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte ainsi, comme l'illustre la Fig. (III.7), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM.

Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV (V_{PV}), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

La fig (III.8) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

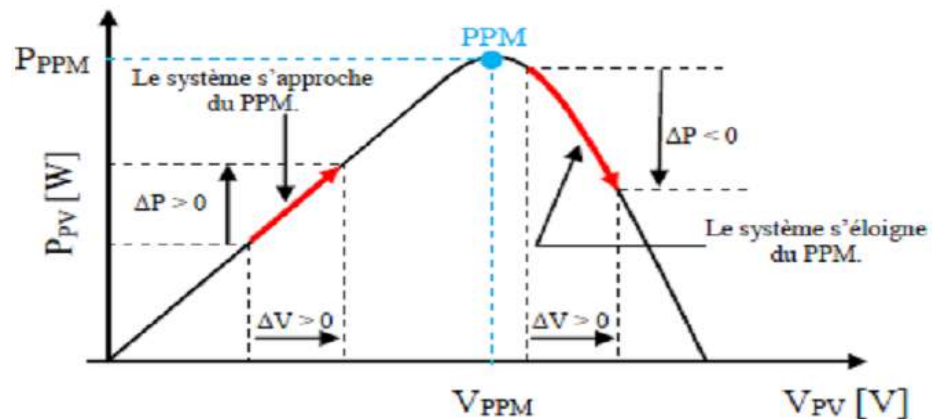


Figure (III.7): Caractéristique P(V) d'un panneau solaire.

Dans ce travail, la MPPT doit être effectué en ajustant la vitesse de référence du moteur qui dépend de la puissance du PV. Dans ce cas, le point maximum de la puissance photovoltaïque devrait être déterminé par PPM pour limiter le courant du moteur en utilisant la commande vectorielle. La caractéristique du panneau PV est illustrée dans la Fig (III- 7). On peut noter que la puissance du PV est réduite avec l'augmentation du courant PV. Par conséquent, le système d'entraînement devrait fonctionner au point maximum PPM pour obtenir une haute efficacité. Le point de fonctionnement maximal est déterminé en utilisant un algorithme MPPT donné dans la Fig. (III-8), cet algorithme est effectué en mesurant la tension et le courant du générateur photovoltaïque. La puissance du PV est calculée instantanément selon les valeurs mesurées. La puissance maximale est déterminée après le démarrage du moteur.

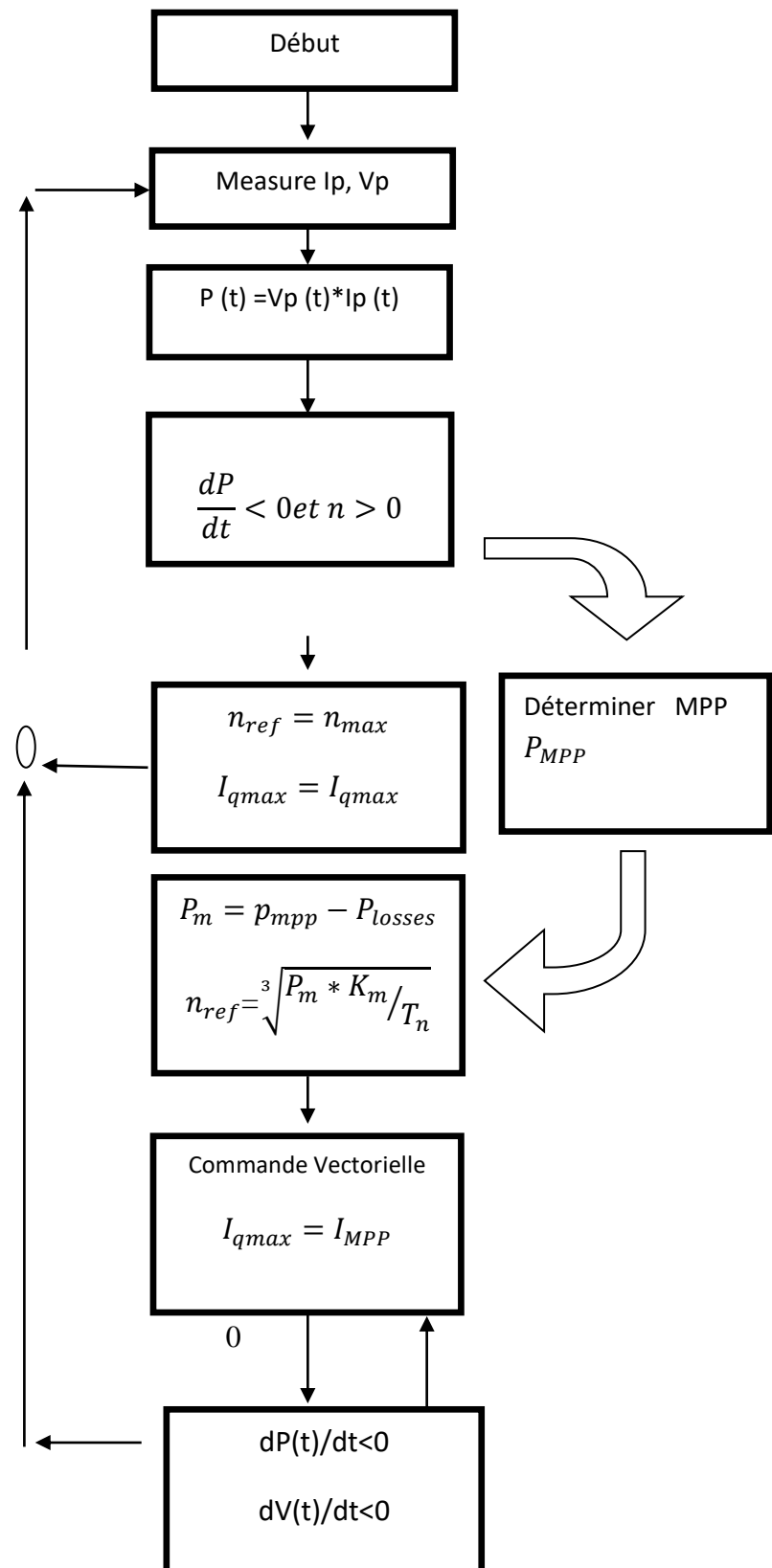


Fig. (III.8) : Algorithme MPPT pour la commande vectorielle [24].

La vitesse de référence est déterminée pour fonctionner au point maximum de puissance.

La puissance de sortie du moteur est calculée comme indiqué dans l'équation (III.30).

$$P_m = p_{mpp} - P_{losses} \quad (III.30)$$

Où P_m est la puissance utile du moteur, P_{MPP} est la puissance maximale correspondant le point maximale et P_{losses} est les pertes de puissance totale du moteur et d'onduleur. La vitesse de référence du moteur est calculée pour obtenir la vitesse maximale puisque l'opération à grande vitesse est généralement requise des moteurs de pompe d'eau. Dans ce cas, La vitesse de référence du moteur n_{ref} est calculée en fonction de la puissance maximale donnée dans l'équation (II.17).

$$n_{ref} = \sqrt[3]{P_m * K_m / T_n} \quad (III.31)$$

Où K_m : est la constante de transformation de la vitesse maximale,

T_n : est le couple maximal du moteur.

n_{ref} : est la mise à jour de vitesse de référence, lorsque le point de puissance maximum est modifié.

III.3. Résultats de la simulation :

Toutes les simulations présentées dans notre travail sont réalisées sur un MSAP associé à un onduleur de tension, dont les paramètres sont mentionnés dans l'annexe.

Les coefficients des régulateurs utilisés sont donnés par le tableau suivant :

Boucles de régulations	Ki	Kp
Courant i_d	2.36	3.56
Courant i_q	2.36	3.56
Vitesse	80	1

Simulation dans les conditions de fonctionnement normales

Le système de pompage solaire raccordé au GPV est simulé dans les conditions de fonctionnement normales figure (III.9)

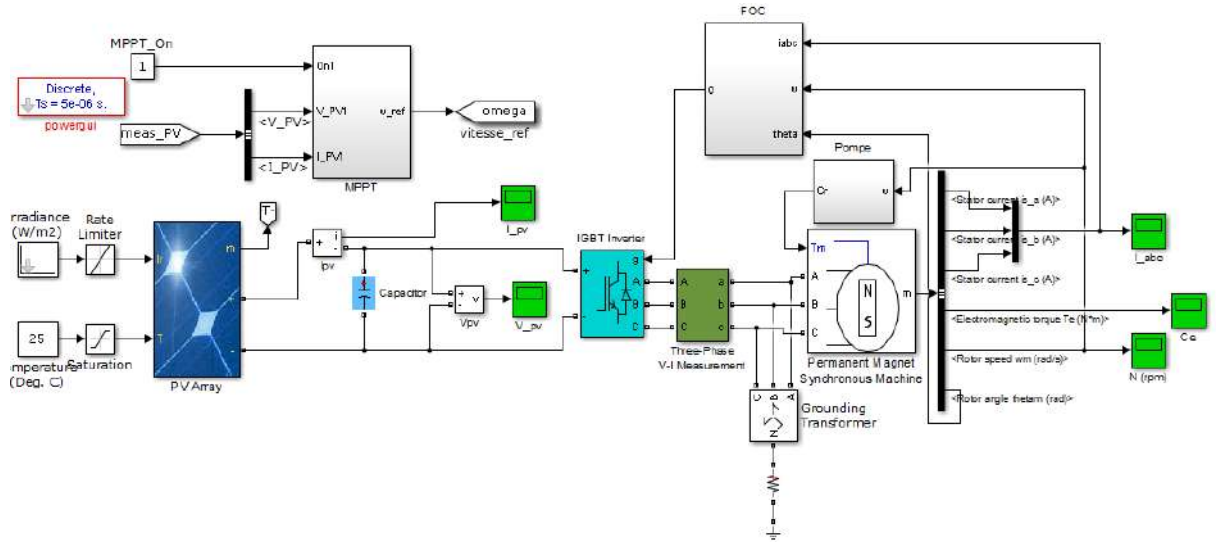


Fig. (III-9) : Schéma de simulation de système de pompage solaire muni d'une commande vectorielle du MSAP

La simulation est réalisée en utilisant des blocs MATLAB / SimPowerSystem comme indiqué dans Fig.III-9. La période d'échantillonnage du modèle de contrôle est 10 us. Le moteur de la pompe ne fonctionne pas toujours à la vitesse maximale puisque la puissance du générateur photovoltaïque est affectée par l'irradiation et la température. Par conséquent, la vitesse de référence est calculée simultanément à l'aide de l'algorithme MPPT pour fonctionner au point de puissance maximale.

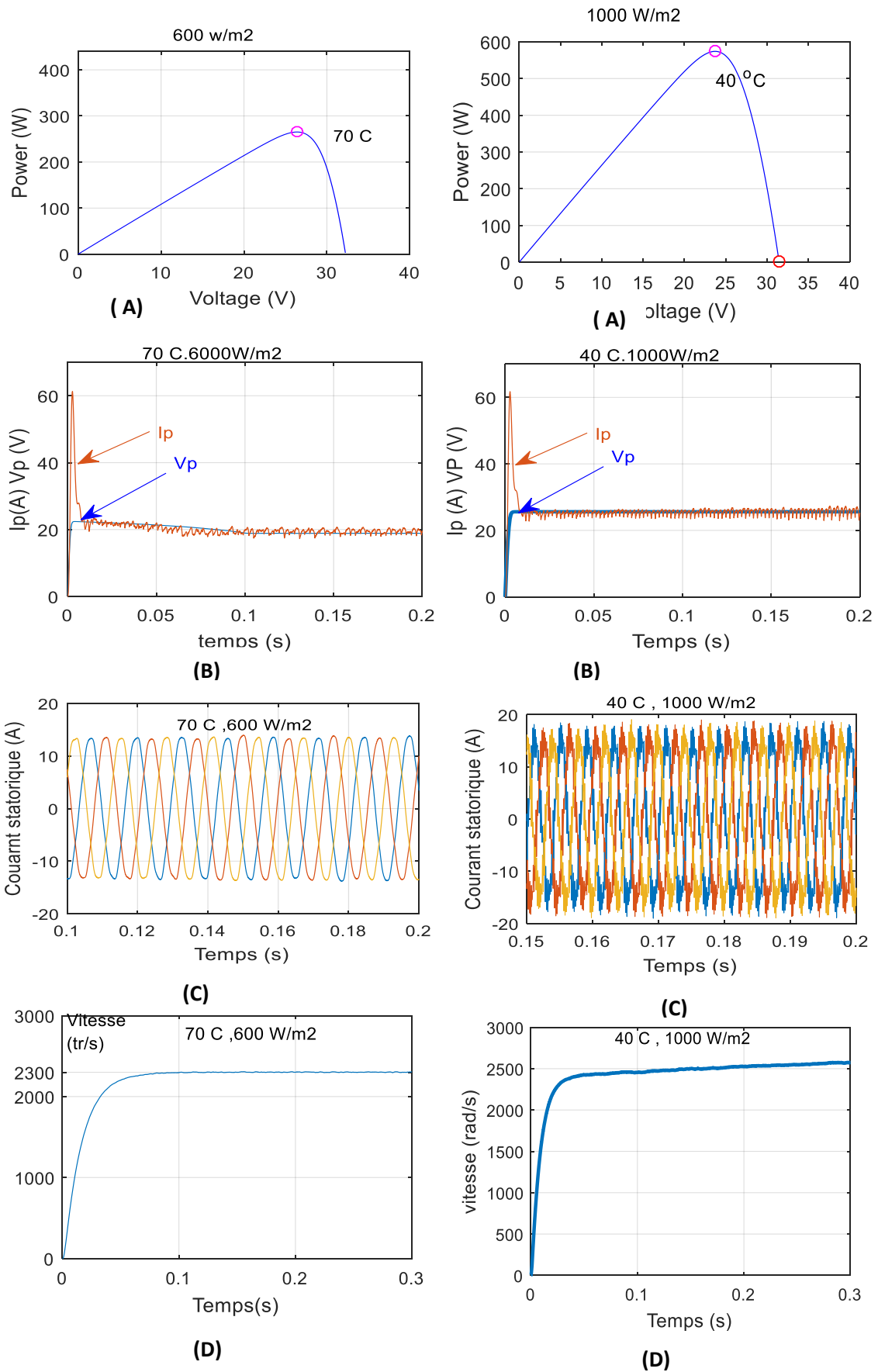
III.3. 1 Résultats de simulation

Le système de pompage raccordé au générateur PV est simulé dans les conditions de fonctionnement normales Fig (III.10) et Fig (III-11)

On fait varier la température et l'éclairement et on relève les courbes de la tension V_{pv} , du courant I_{pv} , les courants de phases et la vitesse de rotation du moteur. D'après les figures suivantes on constate :

- la tension V_{pv} est influencée par la variation de la température et le courant I_{pv} est influencé par la variation de l'éclairement en conséquence la vitesse est variable suivant la variation de l'éclairement et la température.
- Les courants statoriques sont influencés par la variation de l'éclairement.

:



Fig(III.10) Fonctionnement à 70 C⁰ et 600W/m²

Fig(III.11) Fonctionnement à 40 C⁰ et 1000W/m²

III.3. 2 Robustesse vis à vis la variation paramétrique

Dans cette partie, nous étudions la robustesse de la commande vectorielle vis-à-vis la variation des paramètres électriques du MSAP.

L'analyse de la robustesse de la commande est explorée vis-à-vis la variation de résistance (R_s) et des inductances (L_d , L_q) du MSAP, selon les tests de robustesse présentés par la figure : III.12.

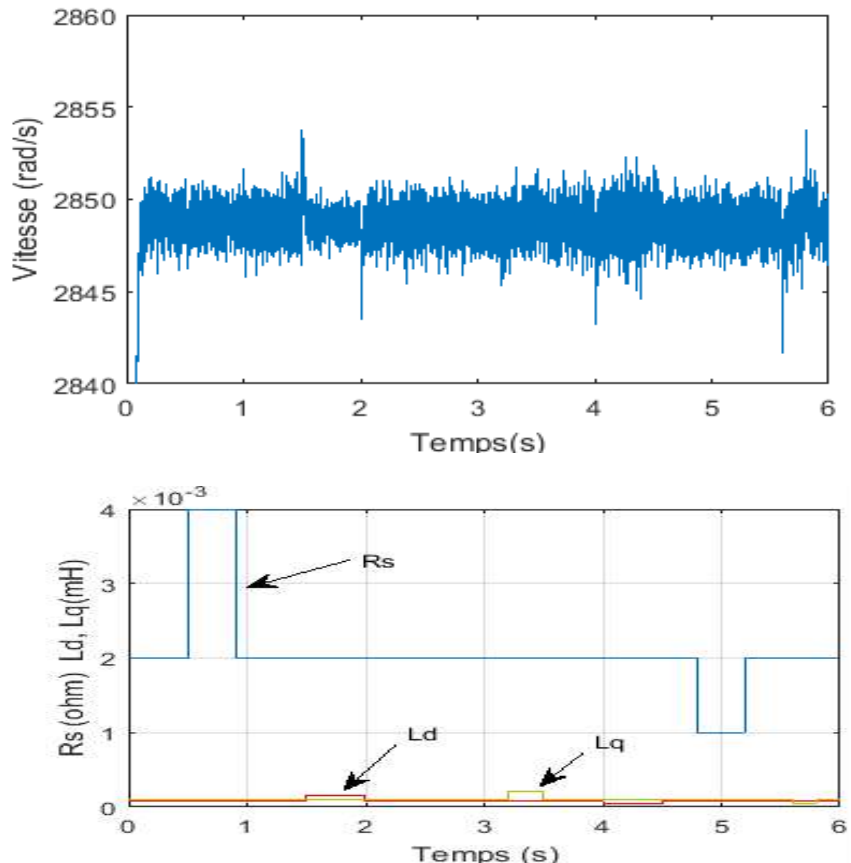


Figure (III.12) : Tests de robustesse vis-à-vis la vitesse variation des paramètres électriques de la MSAP

Les résultats obtenus dans la Figure III.12 montrent la robustesse de la commande vectorielle vis-à-vis des variations paramétriques du MSAP

III-4– CONCLUSION

Dans ce chapitre on a présenté le principe de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP), ainsi que la méthode de calcul des différents régulateurs, Enfin nous avons présenté résultats de simulations de système de pompage solaire avec une technique de contrôle MPPT modifiée.

Conclusion générale

Dans notre travail, l'étude est basée sur le contrôle intelligent de MSAP de système pompage d'eau photovoltaïque.

L'étude propose deux différentes méthodes MPPT qui sont utilisées pour optimiser l'énergie d'un panneau solaire en tenant compte des variations des paramètres météorologiques. L'avantage de notre méthode réside dans sa capacité à suivre efficacement le point de puissance maximale (MPP) même lors de changements rapides d'ensoleillement et de température.

Au premier chapitre, nous avons examiné les étapes nécessaires et les calculs essentiels pour dimensionner un système de pompage d'eau photovoltaïque. Ensuite, nous avons validé ces calculs en utilisant le programme PVsyst.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation et simulation du système de pompage photovoltaïque, On a présenté la technique poursuite le point de puissance maximale (MPPT) basé sur l'algorithme P&O standard .Ensuite la simulation sous Matlab/Simulink a permis d'étudier l'effet du changement des conditions climatiques (ensoleillement et température). Les résultats de simulation ont démontré que la méthode P&O peut avoir des oscillations autour de la valeur idéale. Son principal inconvénient est qu'il ne réagit pas bien lorsqu'il y a un changement d'ensoleillement ou de température.

Dans le troisième chapitre, nous avons abordé le problème de la recherche du point de puissance maximale (MPPT). Pour cela, nous avons présenté et comparé deux méthodes MPPT : : la méthode P&O et la méthode P&O améliorée par la logique floue. Les résultats des simulations nous ont permis de conclure que les deux techniques permettent au panneau solaire de fournir la puissance maximale. Cependant, la performance du MPPT basé sur la logique floue est plus robuste et plus précise que celle du P&O classique. Elle a la capacité de réduire les fluctuations de puissance lorsque le point de puissance maximale

est atteint.

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

- Nous avons acquis une bonne compréhension du fonctionnement de la cellule photovoltaïque grâce à notre étude bibliographique sur le générateur photovoltaïque.
- Les conditions climatiques, notamment le rayonnement solaire et la température, ont une forte influence sur les performances d'un générateur photovoltaïque. De manière générale, ces performances s'améliorent lorsque la lumière augmente et que la température diminue.

Le "P&O" est l'un des algorithmes les plus couramment utilisés, mais nous avons constaté que la commande P&O basée sur la logique floue présente un comportement satisfaisant et des performances supérieures par rapport aux autres méthodes.

Références et Bibliographique

Reference

- [1] B. K. Bose, "Global warming: Energy, environmental pollution, and the impact of power electronics," IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 4, no. 1, pp. 6–17, Mar. 2010.
- [2] Y. K. Renani, B. Vahidi and H. A. Abyaneh, "Effects of Photovoltaic and Fuel Cell Hybrid System on Distribution Network Considering the Voltage Limits," Advances in Electrical and Computer Engineering, vol.10, no.4, pp. 143-148, 2010.
- [3] Solar Electricity cannot serve any significant fraction of U.S. or world electricity needs [Online]. Available: <http://www1.eere.energy.gov/solar/myths.html>
- [4]. BP statistical review of world energy 2009, BP Inc., 2009, p. 6, 22, 32, 40
- [5] Z. Liang, R. Guo, J. Li, A.Q. Huang, "A High-Efficiency PV Module Integrated DC/DC Converter for PV Energy Harvest in FREEDM Systems," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 26, no. 3, pp.897- 909, 2011.
- [6] G. Acciari, D. Graci, A. La Scala, "Higher PV Module Efficiency by a Novel CBS Bypass," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 26, no. 5, pp.1333-1336, 2011.
- [7] B. Yang, W. Li, Y. Zhao, X He, "Design and Analysis of a Grid Connected Photovoltaic Power System," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 25, no.4, pp.992-1000, 2010.
- [8] Y.H. Ji, D.Y. Jung, J.G. Kim, J.H.Kim, T.W. Lee, "A Real Maximum Power Point Tracking Method for Mismatching Compensation in PV Array Under Partially Shaded Conditions," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 26, no.4, pp.1001-1009, 2011.
- [13] - B.Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993
- [14] - K. Benlarbi « Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-Floue d'un système de Pompage Photovoltaïque Entraînées par différents machines électriques », Thème de Magister, Université de Batna 2003.
- [15]- A. Betka « Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque au Fil du Soleil », Thème de Magistère, Université de Biskra.1997

- [16] A. DJAFOUR, « Etude d'une station de pompage photovoltaïque dans une région saharienne », Thème de magistère, université de Ouargla, 2000.
- [17] S. Beringer, H. Schilke, I. Lohse, G. Seckmeyer, Case study showing that the tilt angle of photovoltaic plants is nearly irrelevant, *Solar Energy* 2011; 85: 470–476
- [18] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque », *Rev. Energ. Ren.* Vol. 8 (2005) 19 – 26.
- [19] - A. Dupont « Hydraulique urbaine », Tome 2 Edition Eyrolles 1988.
- [20] - R. Chenni , L. Zarour , A. Bouzid and T. Kerbache « Comparative study of»
- [21] Omur AYDOGMUS. Design of a Solar Motor Drive System Fed by a Direct-Connected Photovoltaic Array. Volume 12, Number 3, 2012
- [22] - B. N. Mobarakeh « Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants permanents », Thèse de doctorat de L'INPL 2001
- [23] - G. Grellet, G.Clerc « actionneurs électriques principe/commande/modèle », Editions Eyrolles 1997
- [24]- N. BESSOUS « Commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent », mémoire de PFE, Université de Constantine 2005.

Annexe

Motor Paramètres;

$P_u=505$ watt

$V_{dc} = 20$ V;

$F=300$ Hz;

$R_s = 0,002 \Omega$;

$L_d=7,86.10^{-5}$ H;

$L_q=1,02.10^{-4}$ H;

$p=6$;

$T_n=1.8$ Nm;

$J=14.68.10^{-4}$ kg.m² ;

$B=0$ Nm s/rad.

Résumé

Ce mémoire présente une nouvelle approche de contrôle qui associe l'algorithme perturbation et observation (P&O) traditionnel à l'optimisation par logique floue. L'objectif de cette stratégie de contrôle basée sur une taille de pas variable est d'optimiser la performance d'un système de pompage photovoltaïque (PV) en le faisant fonctionner au point de puissance maximale (MPP). Elle ajuste le pas de rapport cyclique en fonction des variations de tension et de puissance du panneau photovoltaïque. Pour cela, un mécanisme de logique floue surveille ces variations et génère une taille de pas de rapport cyclique optimale qui ramène rapidement le rapport cyclique à son état optimal. Cette combinaison permet d'améliorer les performances du l'algorithme P&O-MPPT standard. Le système de pompage photovoltaïque (PV), comprenant l'ensemble du moteur synchrone à aimant permanent (MSAP), a été modélisé et simulé à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. Les résultats des simulations démontrent la supériorité de cette stratégie de contrôle proposée sur la stratégie P&O classique, indépendamment des conditions météorologiques.

Mots-clés: Système photovoltaïque, GPV, stratégie de contrôle, P&O-MPPT, logique floue, pompage solaire, Moteur synchrone à aimant permanent, MSAP

Abstract

This thesis presents a new control approach that combines the traditional perturb and observe (P&O) algorithm with fuzzy logic optimization. The objective of this control strategy based on a variable step size is to optimize the performance of a photovoltaic pumping system by tracking it at the maximum power point (MPPT). It adjusts the actual duty cycle of the acceleration converter according to the voltage and power variations of the photovoltaic panel. For this, a fuzzy logic mechanism monitors these variations and generates an optimal duty step size that quickly returns the service cycle to its previous optimal state. This combination improves the good performance of the standard P&O-MPPT control. The PV pumping system, comprising the permanent magnet synchronous motor (PMSM), was modeled, and simulated using MATLAB/Simulink software. The results of the simulations and experiments demonstrate the superiority of this proposed control strategy over the standard P&O-MPPT strategy, regardless of weather conditions.

Keywords: Photovoltaic system, P&O-MPPT control strategy, Fuzzy logic, Solar pumping, permanent magnet synchronous motor, PMSM

المخلص

تقدم هذه المذكرة نهج تحكم جديد يجمع بين خوارزمية P&O التقليدية وتحسينها بالمنطق الغامض. الهدف من استراتيجية التحكم هذه بناءً على حجم الخطوة المتغير هو تحسين أداء نظام ضخ الماء الكهروضوئي عن طريق تشغيله عند نقطة الطاقة القصوى (MPPT) يقوم بتعديل دورة العمل الفعلية للمحول وفقاً لتغيرات الجهد والطاقة للوحات الكهروضوئية لهذا الغرض تراقب آلية المنطق الغامض هذه الاختلافات وتولد حجماً مثاليًا للخطوة يعيد النظام بسرعة إلى حالته المثلى السابقة. يحسن هذا المزيج أداء التحكم الكلاسيكي P&O-MPPT. تم تصميم ومحاكاة نظام الضخ الكهروضوئي الذي يتكون من المحرك المتزامن للمغناطيس الدائم (MSAP)، تظهر نتائج عمليات المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink تفوق استراتيجية التحكم المقترحة هذه على استراتيجية P&O-MPPT الكلاسيكية، بغض النظر عن الظروف الجوية.

كلمات مفتاحية: نظام الخلايا الضوئية، استراتيجية التحكم P&O-MPPT، المنطق المضرب، نظام الضخ بالطاقة الشمسية، محرك المغناطيس الدائم، PMSM