

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences De L'ingéniorat.
Département : Electrotechnique.
Domaine : Science et Technique.
Filière : Electrotechnique.
Spécialité : Commande Electrique.

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Etude De L'alimentation D'une Station De Pompage à Partir
D'un Système Photovoltaïque**

Présenté par :

- BOURAS HOUSSEM EDDINE

- BOUSLAMA IBRAHIM

Encadrant :

GHOUELBOURK SIHEM

MCA

Badji Mokhtar-Annaba

Jury de Soutenance :

Adjabi Mohamed	Pr	Badji Mokhtar-Annaba	Président
Ghouelbourk Sihem	MCA	Badji Mokhtar-Annaba	Encadrant
Omeiri Amar	Pr	Badji Mokhtar-Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023



Remerciements

Avant toute chose, nous remercions dieu tout puissant de nous avoir donné la vie et le courage pour terminer nos études. Nous réservons une pensée toute particulière à nos chers parents qui nous ont toujours soutenus et guidés tout au long de nos études.

Qu'ils trouvent ici, le témoignage de notre profonde reconnaissance. Nos remerciements les plus particuliers vont à notre encadreur Madame Ghoudelbourk Sihem pour son rôle majeur dans l'élaboration de ce travail par ses remarques constructives et ses suggestions pertinentes, qu'elle trouve ici notre vif témoignage de reconnaissance pour son rôle important dans l'amélioration de la rédaction de ce mémoire.





Dédicace:

Je dédie ce modeste travail Aux étoiles qui éclairent ma vie, ma source de tendresse, mes parents. Ces deux êtres qui ont su m'éduquer, qui étaient toujours derrière moi et qui m'ont poussé à aller de l'avant. A tous ceux qui m'ont soutenu avant et pendant la réalisation de ce travail.

A ma sœur,

A toute ma famille,

A tous mes amis.

BOUSLAMA.I





Dédicace

*Je dédie ce modeste travail : A mes très chers parents,
que dieu les garde et les protège pour leurs soutien
moral et financier, pour leurs encouragements et les
sacrifices qu'ils ont endurés. A mes sœurs
A toutes familles Bouras
, Aux chers amis (es)
A tous ce que j'aime et qui m'aiment
A tous mes collègues d'études surtout ceux
D'électrotechnique.*

BOURAS.H



sommaire

Sommaire :

Sommaire :

<u>Introduction Générale</u>	1
<u>Chapitre I: Etat De L'art Des Système De Pompage Photovoltaïque</u>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Systèmes de pompage photovoltaïque	4
I.2.1 Le pompage au fil du soleil	4
I.2.2.Le pompage avec stockage électrochimique (batteries)	5
I.3 Le Système Photovoltaïque.....	5
a) L'énergie solaire thermique.....	5
b) L'énergie solaire photovoltaïque.....	5
I.3.1 Effet photovoltaïque	5
I.3.1.1La cellule photovoltaïque.....	6
I.3.1.2 Le principe de fonctionnement	6
I.3.2 Les différents types des cellules photovoltaïques.....	6
1. 3.3 Le module photovoltaïque	7
a)Association en série	7
b) Association en parallèle	7
I.3.4 Différents types de systèmes photovoltaïques	8
I.3.4.1. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	8
I.3.4.2 Systèmes photovoltaïques autonomes	9
I.3.4.2.1. Systèmes autonomes sans stockage électrochimique	9
I.3.4.2.2. Systèmes autonomes avec stockage électrochimique	9
I.4 L'énergie solaire en Algérie.....	9
I.5 Générateur photovoltaïque	10

Sommaire :

I.6 Les convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes de Système de Pompage Photovoltaïque.....	10
I.6.1 Convertisseur DC/DC (Hacheur)	11
I.6.1.1 Convertisseur Buck (hacheur série)	11
I.6.1.2 Convertisseur Boost (Hacheur parallèle)	11
I.6.1.3 Convertisseur DC/AC (Onduleur)	11
I.7 Groupe moteur-pompe	12
I.7.1. Moteurs (machine asynchrone).....	12
I.7.2 Les Pompes	12
I. 7.2.1 Les Types de pompes.....	12
a) Les pompes volumétriques	12
b) Les pompes centrifuges	13
I.7.3 La pompe centrifuge.....	13
I.8 Conclusion	14

Chapitre II: Modélisation et commande de système de pompage photovoltaïque

II.1. Introduction	15
II.2 Modélisation du système d'alimentation.....	16
II.2.1 Modélisation du générateur photovoltaïque.....	16
II.2.2 Modélisation du Hacheurs (Convertisseur DC/DC).....	19
II.2.2.1 Constitution	19
II.2.2.2. Les type des convertisseurs DC-DC	21
II.2.3 Hacheur parallèle (BOOST)	22
II.2.4 La commande MPPT.....	22
II.2.5. La méthode Perturbation & Observation (P&O).....	23

Sommaire :

II. 3 Modélisation de la pompe et de la machine asynchrone	24
II.3.1 Modèle de la pompe.....	24
II.3.1.1.Caractéristique débit- vitesse	25
II.3.1.2.Caractéristique couple – vitesse.....	25
II.3.1.3.Caractéristique débit-hauteur.....	26
II.3.2 Modèle de la machine asynchrone	27
II.3.2.1. Hypothèses simplificatrices	28
II.3.2.2. Conventions de signes	28
II.3.2.3. Mise en équation de la machine asynchrone	28
a) Equations électriques	28
• Phase statorique	28
• Phase rotorique	29
b) Equations magnétiques	29
c) Equation mécanique	30
II. 4 Modélisation de l'onduleur de tension	30
II .5 Commande vectorielle indirecte	32
II.5.1. Principe de la commande vectorielle	32
II.5.2. Structure	33
II.5.3. Le contrôle indirect (IFOC).....	33
II.5.3.1. Commande en courant.....	34
II.5.3.2. Commande en tension.....	35
II.5.3.3.Structure de la commande indirecte (IFOC) de la MAS alimentée en tension	35
II.6.Conclusion	36

Sommaire :

Chapitre III: Dimensionnement et Simulation de système de pompage photovoltaïque

III.1.Introduction	37
III.2.Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque	37
III.2.1.Dimensionnement du champ photovoltaïque	37
III.2.1.1. Détermination de l'énergie solaire disponible.....	37
a. Inclinaison du générateur photovoltaïque.....	37
b. Mois de dimensionnement.....	37
c. Evaluation de l'énergie moyenne journalière requise par la charge.....	38
d. Estimation du nombre de module en séries.....	38
e. Estimation du nombre de branche en parallèle.....	38
f. Calcul de la puissance du générateur.....	38
g. Calcul de la surface totale du générateur.....	38
III.2.2.Dimensionnement du moteur.....	38
III.2.3.Dimensionnement de la pompe centrifuge.....	39
III.2.4.Dimensionnement de la tuyauterie.....	39
III.2.5. perte de charge.....	39
Les accessoires.....	40
III. 3. Résultats de la Simulation De System de Pompage Photovoltaïque.....	40
III.3.1.Schéma bloc d un module photovoltaïque.....	40
a-Influence de température	41
b-Influence de l'irradiation.....	41
III.3.2 Résultats de la Simulation de MPPT.....	42
III.3.3. Résultats de la Simulation de système moto-pompe.....	45
III.3.3.1 Résultats de la Simulation du Moteur asynchrone à vide	45

Sommaire :

III.3.3.2 Résultats de la Simulation Groupe Moto-Pompe (Moteur en charge) sans boucle de vitesse.....	47
III.3.3.3 Résultats de la Simulation du Groupe Moto-Pompe avec boucle de régulation IFOC.....	49
a- Résultats de la Simulation du Groupe Moto-Pompe avec boucle de régulation IFOC à vide avec irradiation variable.....	49
b- Résultats de la Simulation du Groupe Moto-Pompe avec boucle de régulation IFOC en charge avec irradiation variable.....	52
III.4 Conclusion	54

*Liste Des
Figures*

Liste des figures

Chapitre I :

Fig. I.1. Systèmes de pompage solaires bétail et irrigation en eau.....	03
Fig. I.2. Etape de conversion.....	03
Fig. I.3. Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil.....	04
Fig. I.4. Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie.....	05
Fig. I.5. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	06
Fig. I.6. Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.....	07
Fig. I.7. Caractéristique courant tension de (N_p) cellules en parallèles.....	08
Fig. I.8. Systèmes photovoltaïque connectés au réseau	08
Fig. I.9. Carte préliminaire des irradiations solaires de l'Algérie.....	10
Fig. I.10. Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques.....	10
Fig. I.11. Le schéma de principe du hacheur série.....	11
Fig. I.12. Le schéma de principe du hacheur parallèle.....	11
Fig. I.13. Vue en face d'une pompe centrifuge.....	13
Fig. I.14. Exemple d'installation avec une pompe centrifuge.....	14
Fig. I.15. Composant de système de pompage photovoltaïque étudié.....	14

Chapitre II :

Fig. II.1. Principe de fonctionnement d'une pompe solaire.....	15
Fig. II.2. Modélisation du circuit électrique équivalent d'une cellule PV	16
Fig. II.3. Schéma bloc du générateur photovoltaïque.....	18
Fig. II.4. Caractéristique (I-V), (P-V) du panneau	18
Fig. II.5. Schéma de principe du hacheur parallèle.....	19
Fig. II.6. Schéma de principe du convertisseur série	20

Liste des figures

Fig. II.7. Convertisseur DC-DC.....	20
Fig. II.8. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.	21
Fig. II.9. Schéma de principe de l'hacheur parallèle	21
Fig. II.10. Schéma équivalent lorsque $S=1$	22
Fig. II.11. Schéma équivalent lorsque $S=0$	22
Fig. II.12. Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	23
Fig. II.13. Schéma de principe de la méthode P&O.....	24
Fig. II.14. Algorithme de la méthode P&O.....	24
Fig. II.15 la caractéristique débit-vitesse d'une pompe centrifuge.....	25
Fig. II.16. Caractéristique couple-vitesse d'une pompe centrifuge.....	25
Fig. II.17. Caractéristiques de la pompe $H_m(Q)$ et de la canalisation	27
Fig. II.18. Repérage angulaire des axes magnétiques d'une MAS triphasé.....	27
Fig. II.19 Modèle simplifié de l'onduleur triphasé.....	31
Fig. II.20. Orientation du flux rotorique.....	33
Fig. II.21. Modèle en courant par orientation de flux rotorique.....	34
Fig. II.22. Schéma fonctionnel de la structure de commande en tension.....	36

Chapitre III :

Fig.III.1 Simulation et schéma system global.....	40
Fig.III.2 Schéma bloc d un Module photovoltaïque	41
Fig.III.3 Influence de Température (courant fonction de la tension).....	41
Fig.III.4 Influence de Température (puissance en fonction de la tension).....	41
Fig.III.5 Influence de l'éclairement « irradiation » (courant) fonction de la tension.....	42
Fig.III.6 Influence de l'éclairement « irradiation » (puissance) en fonction de la tension.....	42

Liste des figures

Fig.III.7 Schéma bloc d'un hacheur boost.....	43
Fig.III.8 Température fixe 25 en fonction du temps.....	44
Fig.III.9 Irradiation variable en fonction du temps.....	44
Fig.III.10 Le rapport cyclique D du hacheur boost en fonction du temps.....	44
Fig.III.11 Le courant I à la sortie de le hacheur boost en fonction du temps.....	44
Fig.III.12 La Tension à la sortie de l'hacheur boost en fonction du temps.....	44
Fig.III.13 La Puissance de l'hacheur boost en fonction du temps.....	44
Fig.III.14 Schéma bloc d'un moteur asynchrone	45
Fig.III.15 Courant Ia Ib Ic a vide en fontion du temps.....	45
Fig.III.16 évaluation de Vitesse de rotation w_1 de moteur a vide en fonction de temps.....	46
Fig.III.17 Evaluation de Couple utile T_e de moteur a vide en fonction de temps..	46
Fig.III.18 le courant Isa a vide en fonction du temps.....	46
Fig.III.19 schéma bloc groupe moto pompe.....	47
Fig.III.20 Schéma bloc de la pompe centrifuge.....	47
Fig.III.21 Courants Ia Ib Ic a vide/charge (groupe moto pompe) en fonction du temps.....	48
Fig.III.22 évaluation de Vitesse a vide/charge (groupe moto pompe) en fonction de temps sans boucle de vitesse.....	48
Fig.III.23 Couple C_e à vide/charge (groupe moto pompe) en fonction du temps...	48
Fig.III.24 Schéma bloc d'un ifoc.....	49
Fig.III.25 Température fixe 25 en fonction du temps.....	49
Fig.III.26 Irradiation variable en fonction du temps.....	49
Fig.III.27 La vitesse de rotation et la vitesse de référence d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps.....	50
Fig.III.28 le Couple utile T_e et T_{pompe} d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps	50

Liste des figures

Fig.III.29 le courant d'entre et de sortie I_{dq} et I_{dqs} d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps.....	51
Fig.III.30 Le flux d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps).....	51
Fig.III.31 La vitesse et la vitesse ref d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps.....	52
Fig. III.32 Le couple utile T_e d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps.....	52
Fig.III.33 le courant d'entre et de sortie d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps.....	53
Fig.III.34 la Puissance utile T_e d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps.....	53
Fig.III.35 Le flux d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps.....	53

*Liste Des
Tableaux*

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

CHAPITRE I

Tableau I-1 Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques..... 06

Tableau I-2 Potentiel solaire en Algérie..... 09

CHAPITRE II

Tableau II.1 Caractéristiques du panneau..... 18

CHAPITRE III

Tableau III.1 Paramètres du module PV..... 42

***NOTIONS ET
ABREVIATION***

NOTIONS ET ABRÉVIATION

I : Le courant délivré par le module.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

I_{sat} : Courant de saturation

I_{sh} : Le courant de la résistance shunt

T_a : Température ambiante.

i_L : courant dans la bobine L,

E : tension d'entrée,

V_{dc} : tension de sortie

α : la commande.

L : l'inductance de la bobine en [H],

C : la capacité du condensateur en [F]

R : la résistance de la charge R en [Ω].

T_S : est la période de commutation qui est égale $\frac{1}{F_s}$

d: le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

kr : Coefficient de proportionnalité [[Nm]/(rd. S⁻¹)]

Cs: Couple statique, très petit[Nm]

ω: vitesse de rotation(rd. S⁻¹)

W: La vitesse de rotation[rd. s⁻¹].

Hm : La hauteur manométrique[m].

Hg: Hauteur géométrique

Q: Débit volumique [m³/s].

Kh : Constante donnée de la pompe.

R_s : Résistance de la phase du stator.

R_r : Résistance de la phase du rotor.

J : Moment d'inertie ramené sur l'arbre de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique développé par la machine.

C_r : Couple résistant de la charge.

F : Coefficient de frottement visqueux.

P : est le nombre de paires de pôles.

P_{elec} : Puissance électrique du moteur asynchrone (W).

h : La durée d'utilisation quotidienne moyenne (en h)

U : Tension d'installation en V.

N_p : Nombre de module en parallèle.

N : Nombre de module.

P_{cm} : Puissance crête d'un module.

P_s : Puissance crête d'un générateur.

S : C'est la surface d'un module en m^2 .

N : Nombre de module.

P_h : Puissance hydraulique [W].

g : Accélération de la pesanteur [$9.81m/s^2$].

H : Hauteur manométrique totale[m].

D : Diamètre de la tuyauterie [m].

K : Coefficient qui varie de 0.75 à 1.4.

Les abréviations

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PPM : Point de Puissance Maximal.

P&O : Perturbation et observation.

HMT : Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe (m).

IFOC : Indirect Field Oriented Control

RESUME

Résumé

Du jour au lendemain, l'utilisation des systèmes photovoltaïques deviennent indispensable devant la demande croissante d'énergie électrique notamment pour les régions isolées. Dans cette optique, le travail réalisé dans ce mémoire est consacré à l'étude de l'approvisionnement en électricité pour le pompage de l'eau dans des zones rurales à partir d'un générateur photovoltaïque. Le système proposé est constitué d'un ensemble d'éléments, à savoir le générateur PV, les convertisseurs DC/DC et DC/AC, une pompe immergée entraînée à travers un moteur asynchrone. Afin d'assurer l'extraction de la puissance maximale du générateur photovoltaïque nous avons utilisé l'algorithme de recherche du point de puissance maximale MPPT-P&O et dans le but d'obtenir un contrôle dynamique performant du couple, et de réaliser un découplage entre le couple moteur et le flux nous avons appliqué la commande vectorielle indirecte par orientation de flux rotorique (CVIOFR). Les résultats des simulation ont montré l'autonomie et la robustesse du système étudié.

Mots clés : Motopompe Générateur PV ; Commande vectorielle indirecte par orientation de flux rotorique (CVIOFR) ; MPPT-P&O.

Abstract

Overnight, the use of photovoltaic systems becomes essential in the face of the growing demand for electrical energy, especially for isolated regions. With this in mind, the work carried out in this dissertation is devoted to the study of the supply of electricity for pumping water in rural areas from a photovoltaic generator. The proposed system consists of a set of elements, namely the PV generator, the DC/DC and DC/AC converters, a submersible pump driven through an asynchronous motor. In order to ensure the extraction of the maximum power from the photovoltaic generator, we used the maximum power point search algorithm MPPT-P&O and in order to obtain an efficient dynamic control of the torque, and to achieve a decoupling between the motor torque and the flux we applied the vector control indirect by orientation of rotor flux (CVIOFR). The results of the simulations showed the autonomy and the robustness of the studied system.

Keywords: Motor Pump PV Generator; Indirect Vector Control by Rotor Flux Orientation (CVIOFR); MPPT-P&O.

المخلص

بين عشية وضحاها ، يصبح استخدام الأنظمة الكهروضوئية أمرًا ضروريًا في مواجهة الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية ، خاصة في المناطق المعزولة. مع وضع هذا في الاعتبار ، تم تخصيص العمل الذي تم في هذه الرسالة لدراسة الإمداد بالكهرباء لضخ المياه في المناطق الريفية من مولد كهربائي ضوئي. يتكون النظام المقترح من مجموعة من مضخة غاطسة يتم تشغيلها من خلال ، DC / AC و DC / DC العناصر ، وهي المولد الكهروضوئي ، ومحولات محرك غير متزامن. من أجل ضمان استخراج الطاقة القصوى من المولد الكهروضوئي ، استخدمنا خوارزمية البحث عن

ومن أجل الحصول على تحكم ديناميكي فعال في عزم الدوران ، ولتحقيق فصل MPPT-P & O نقطة الطاقة القصوى (CVIOFR) بين عزم دوران المحرك و طَبَقْنَا التَّحْكَمَ فِي التَّدْفِيقِ غَيْرِ الْمَبَاشِرِ عَنِ طَرِيقِ اتِّجَاهِ تَدْفِيقِ الْجُزْءِ الْمُتَحَرِّكِ وَأَظْهَرَتْ نَتَائِجَ الْمَحَاكَاةِ اسْتِقْلَالِيَّةً وَمَتَانَةً النِّظَامِ الْمَدْرُوسِ.

الكلمات المفتاحية: مولد مضخة المحرك. التحكم في المتجهات غير المباشرة عن طريق اتجاه تدفق الدوار (CVIOFR) ؛ MPPT-P&O.

INTRODUCTION
GENERALE

L'énergie renouvelable est une énergie qui provient des ressources naturelles de l'environnement et qui ne s'épuise pas. L'énergie renouvelable est produite à partir du vent, du soleil et de l'eau, en plus de celle des marées ou de l'énergie géothermique. L'énergie renouvelable est considérée comme une énergie respectueuse de l'environnement contrairement à l'énergie traditionnelle qui dépend des combustibles fossiles et du pétrole.

Les énergies renouvelables, à savoir l'énergie photovoltaïque, est l'énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire au travers de panneaux solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable car sa source le soleil est considérée comme inépuisable à l'échelle des temps humains. En fin de vie, le panneau photovoltaïque aura produit 20 à 40 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage.

La cellule photovoltaïque, principal composant électronique du système, utilise l'effet photoélectrique pour convertir les ondes électromagnétiques émises par le soleil en électricité. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire PV ou un collecteur, et ces unités groupées forment ensemble une installation solaire. L'électricité est consommée ou stockée sur place, ou transportée par le réseau de distribution et de transport d'électricité.

La demande croissante d'eau dans les zones rurales et sites isolés a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme source d'énergie aux groupes moteur-pompes. En effet, la réalisation des systèmes de pompage autonomes constitue une solution pratique et économique aux problèmes de manque d'eau dans les zones rurales tels que les régions désertiques en Algérie.

Parmi les avantages importants de la conversion photovoltaïque, nous pouvons citer, la décentralisation de la production d'énergie pour de petites communautés très dispersées comme, les pompes solaires dont le fonctionnement s'est révélé très acceptable et l'autonomie du système photovoltaïque, autonomie de lieu mais tout aussi importante est l'autonomie de fonctionnement.

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée. Car, il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. Ajouter à cela, le rendement énergétique est meilleur quand il n'y a pas d'accumulateurs.

Introduction générale

Dans ce contexte s'inscrit ce projet, qui a été mené pour étudier un système de pompage photovoltaïque en utilisant un moteur asynchrone MAS avec une adaptation entre la source et la charge. Le système proposé est constitué d'un ensemble d'éléments, à savoir le générateur PV, les convertisseurs DC/DC et DC/AC, une pompe immergée entraînée à travers un moteur asynchrone. Afin d'assurer l'extraction de la puissance maximale du générateur photovoltaïque nous allons utiliser l'algorithme de recherche du point de puissance maximale MPPT-P&O et dans le but d'obtenir un contrôle dynamique performant du couple, et de réaliser un découplage entre le couple moteur et le flux la commande vectorielle indirecte par orientation de flux rotorique (CVIOFR) sera étudié et utilisé.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre, est dédié pour mettre en évidence les dispositifs principaux des systèmes photovoltaïques. En commençant par une présentation des énergies renouvelables notamment les générateurs photovoltaïques PV. Puis, nous présentons les différents dispositifs d'un système PV utilisé pour le pompage de l'eau, à savoir la cellule solaire, le module PV, le panneau PV, les convertisseurs DC/DC (hacheur), DC/AC (onduleur) alimentant un MAS triphasé entraînant une pompe centrifuge immergée.

La modélisation et la simulation des différents éléments constituant le système de pompage photovoltaïque avec le dimensionnement du système a fait l'objet du deuxième chapitre, aussi dans cette partie nous allons mentionner la commande vectorielle indirecte (IFOC) et son principe de fonctionnement.

Le dernier chapitre constitue la finalité de notre travail : la simulation du système complet et nous présenterons les résultats de la modélisation et de la simulation du système étudié afin de valider le choix et la robustesse de la commande proposée.

Une conclusion générale clôture notre travail.

Chapitre I :

Etat de l'art des Système de Pompage Photovoltaïque

I.1 Introduction

L'énergie renouvelable, telle que l'énergie photovoltaïque, est la plus répandue dans le monde, elle est également respectueuse de l'environnement et s'appuie sur des technologies modernes et efficaces, sur lesquelles tout le monde parie comme une source alternative d'énergie conventionnelle dans un avenir proche. Cette énergie est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, la réfrigération et le pompage d'eau. L'utilisation des systèmes de pompage solaires a pour but de fournir des approvisionnements domestiques, bétail et irrigation en eau dans des régions éloignées. Non seulement les pompes à eau solaires sont rentables, mais elles sont écologiques et elles sont bien adaptés aux besoins des communautés éloignées disposant d'un bon ensoleillement tels que l'Algérie qui dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. L'objectif de ce chapitre est de donner un Etat de l'art des Système de Pompage Photovoltaïque et un aperçu des composants qui constitue les systèmes de pompage photovoltaïques.



Fig. I.1 Systèmes de pompage solaires bétail et irrigation en eau

L'énergie solaire est convertie en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. Le convertisseur DC/AC transforme le courant continu produit par les panneaux solaires en un courant alternatif triphasé pour actionner le groupe moteur pompe (Voir figure I.2). Les avantages du système de pompage solaire c'est une énergie propre et durable ; compétitif par rapport aux systèmes conventionnels (Gasoil et butane) et a un faible coût d'exploitation et de maintenance.

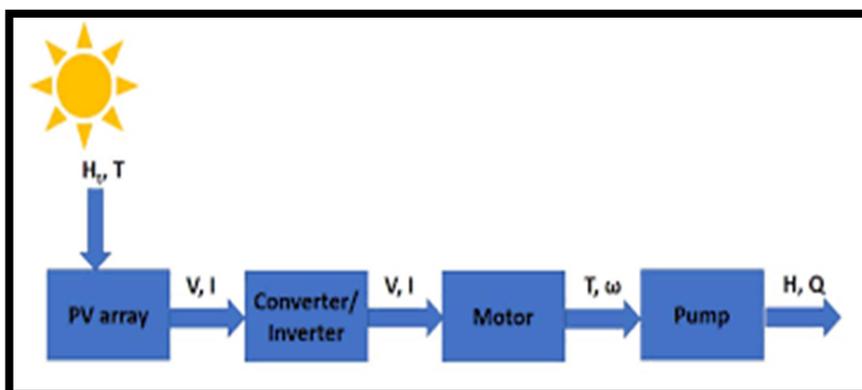


Fig. I.2 Etape de conversion

I.2 Systèmes de pompage photovoltaïque

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans les zones désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides est une question vitale pour les populations .L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent [1]. Actuellement, deux systèmes de pompage photovoltaïque sont utilisés, avec et sans batteries.

I.2.1 Le pompage au fil du soleil

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple [2]. La technologie sans batteries a quelques inconvénients, son principal défaut est d'avoir un débit d'eau qui dépend de l'ensoleillement au cours de la journée.

Le fonctionnement d'une telle installation est encore assez simple. Le réservoir est utilisé pour stocker temporairement l'eau pendant qu'elle est pompée au soleil. Cette option est moins coûteuse, mais ces pompes ne fonctionnent pas sous un certain degré de luminosité (en début et en fin de journée), et leur rendement est plus faible en dehors de leur plage nominale de fonctionnement. La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable en fonction du rayonnement solaire.

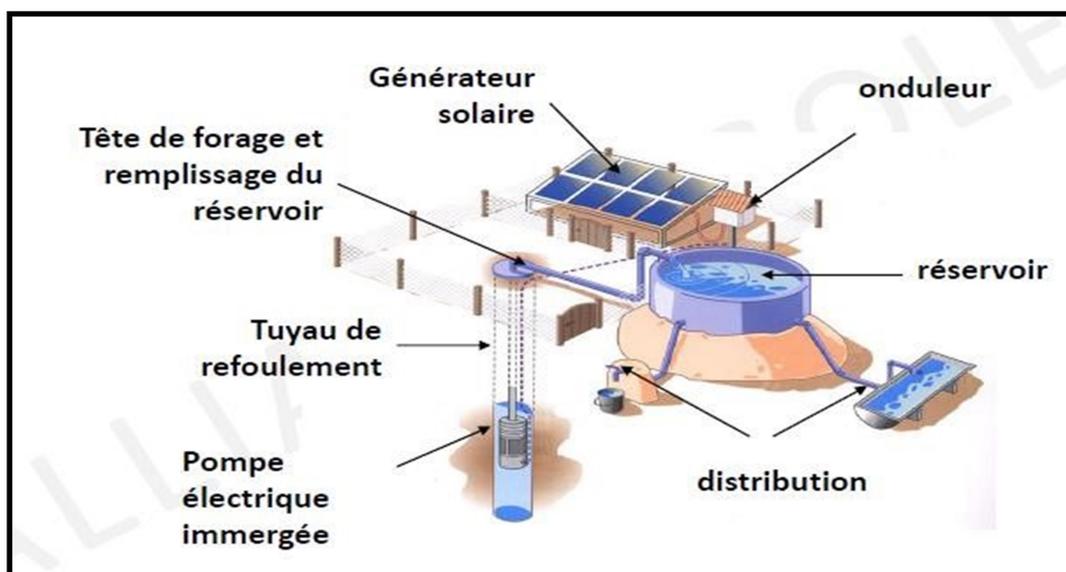


Fig I.3 Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil.

1.2.2 Le pompage avec stockage électrochimique (Batteries)

Le pompage photovoltaïque ne coïncide pas souvent avec les heures d'ensoleillement où une intensité uniforme est nécessaire, ce qui signifie stockage. L'électricité peut être stockée puis récupérée en cas de besoin grâce aux batteries. Par conséquent, un régulateur est nécessaire pour protéger les batteries des décharges profondes ou des surcharges qui raccourcissent leur durée de vie. L'objet de la recherches, le pompage photovoltaïque avec batteries, garantit une indépendance énergétique et un débit constant en fonction de la demande [3]. Comme nous montre la figure ci-dessous :



Fig I.4 Pompage photovoltaïque avec stockage d'énergie

1.3 Le Système Photovoltaïque

C'est l'énergie que le soleil rayonne sous forme de chaleur et de lumière. Cette énergie est considérée comme renouvelable car elle est pratiquement illimitée à l'échelle du temps humain. L'électricité ou la chaleur peuvent être produites à l'aide de l'énergie solaire. L'énergie solaire peut être convertie de deux manières.

- a) **L'énergie solaire thermique** : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- b) **L'énergie solaire photovoltaïque** : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [4].

1.3.1 Effet photovoltaïque

Les cellules solaires, également appelées cellules photovoltaïques, sont des dispositifs optoélectroniques qui convertissent directement la lumière en électricité. Ils sont créés à l'aide de composants semi-conducteurs. Dans la plupart des cas, le silicium agit comme ingrédient principal. Les cellules solaires amorphes, poly-cristallines ou monocristallines peuvent être plus ou moins efficaces selon le procédé de fabrication. L'arséniure de gallium et le tellure de cadmium sont des matériaux supplémentaires qui peuvent être utilisés.

I.3.1.1 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique [5].

I.3.1.2 Le principe de fonctionnement

La conversion des photons absorbés par un semi-conducteur en porteurs de charges électriques (électrons et trous) est l'idée de base d'une cellule photovoltaïque. Du fait de la production de charges, un courant électrique va circuler dans un circuit connecté aux électrodes et une différence de tension va se créer aux bornes des électrodes, comme nous montre la figure ci-dessous :

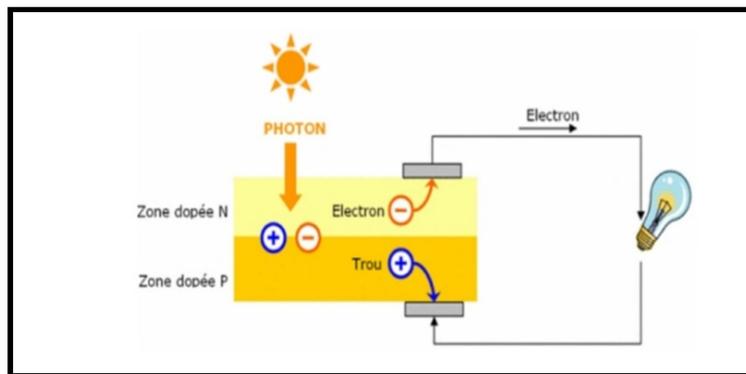


Fig I.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.3.2 Les différents types des cellules photovoltaïques

Tableau 1 : performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques

a) Les cellules monocristallines	b) Les cellules poly cristallines	c) Silicium amorphe (à couche mince)
<ul style="list-style-type: none"> - La première génération de photopiles ; - Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire) ; - Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère ; - Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de production moins élevé ; - Procédé nécessitant moins d'énergie ; - Rendement 11-13% (18% en Labo). 	<ul style="list-style-type: none"> - Cette catégorie a un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), - Ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium déposé sur un support généralement flexible. - Elle est utilisée couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres

1.3.3 Le module photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement en capsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque. Les modules peuvent également être connectés en parallèle afin d'augmenter l'intensité d'utilisation [6].

a) Association en série : Une association de cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule [7].

$$V_{co}N_s = N_s \cdot V_{co} \quad (I.1)$$

$$I_{cc}N_s = I_{cc} \quad (I.2)$$

Avec :

$V_{co}N_s$: La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

$I_{cc}N_s$: Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

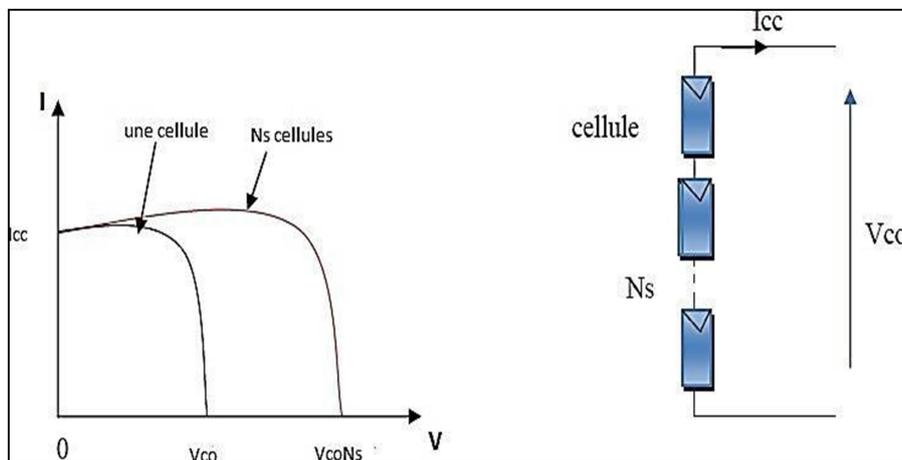


Fig I.6 Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.

b) Association en parallèle : L'Association parallèle de cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement des cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [7].

Avec :

$I_{cc}N_p$: La somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.

$V_{co}N_p$: La tension de circuit ouvert de (N_p) cellule en parallèle.

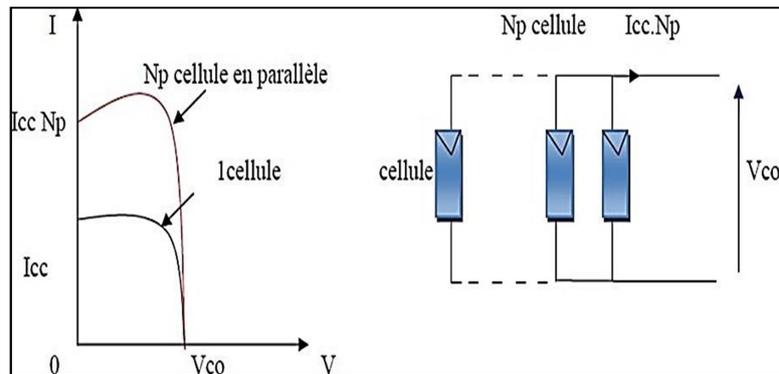


Fig I.7 Caractéristique courant tension de (N_p) cellules en parallèles.

1.3.4 Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau [8]. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

1.3.4.1 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure I-8) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Ils produisent leur propre électricité et acheminent son excédent vers le réseau, auprès duquel ils s'approvisionnent au besoin. Ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ces systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.

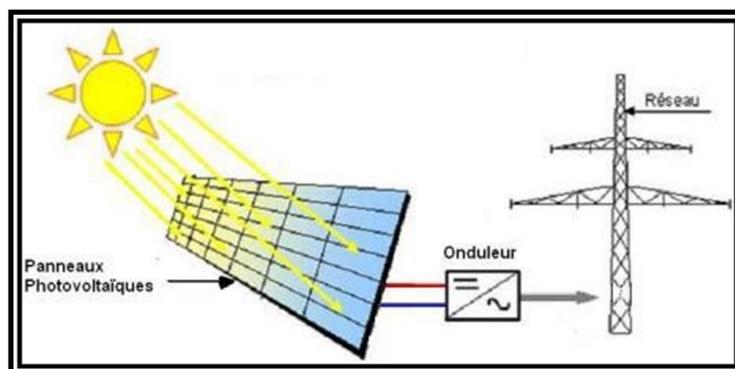


Fig I.8 Système photovoltaïque connecté au réseau

I.3.4.2 Systèmes photovoltaïques autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit [3] :

I.3.4.2.1 Systèmes autonomes sans stockage électrochimique

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonome.

I.3.4.2.2 Systèmes autonomes avec stockage électrochimique

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

I.4 L'énergie solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m^2 /an au Nord et 2263 kwh/m^2 /an au Sud du pays [4]. Le tableau suivant donne le potentiel solaire algérien en chiffres et selon la localisation :

Tableau 2 : Potentiel solaire en Algérie.

	Régions côtières	Haut plateaux	Sahara
Superficie %	4	10	86
Durée moyenne ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Avec un gisement solaire qui dépasse les 5 milliards de GWh , notre pays a mis également en œuvre des initiatives afin de promouvoir l'électricité solaire, notamment dans le cadre de l'électrification décentralisée. La cartographie ci-après présente le rayonnement solaire

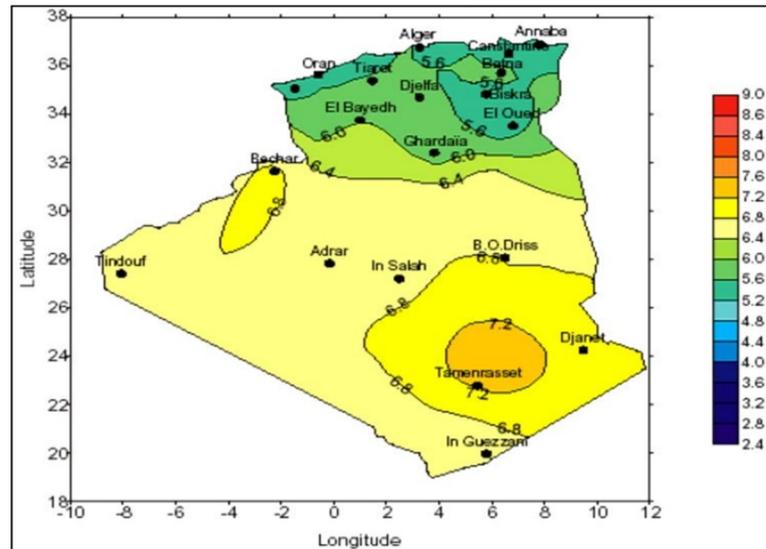


Fig I.9 Carte préliminaire des irradiations solaires de l'Algérie

I.5 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un ensemble de modules constitués de différentes cellules solaires connectées en série et en parallèle, produisant le courant et la tension requis. La variété d'unités de composants de générateur et les cellules qui composent ces unités déterminent les performances du générateur. Le nombre d'unités connectées en série détermine la tension de sortie du générateur solaire, tandis que le nombre d'unités connectées en parallèle détermine le courant de sortie. Le terme "champ PV" fait référence au groupe combiné de modules photovoltaïques [9].

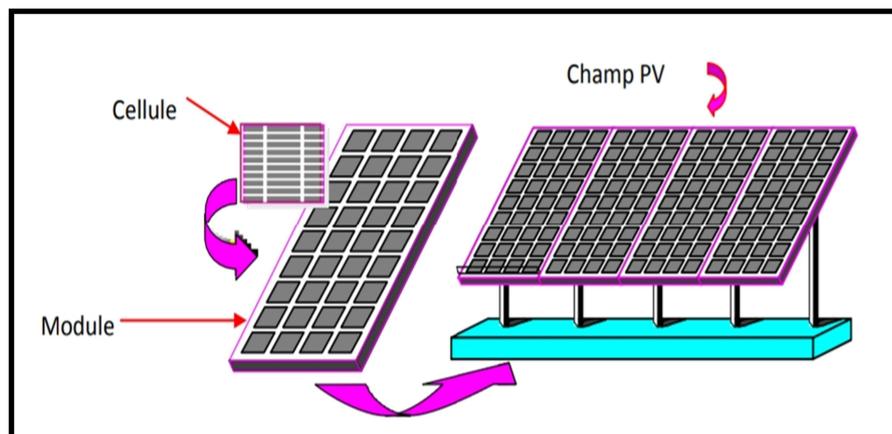


Fig I.10 Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques

I.6 Les convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes de Pompes Photovoltaïques

Les convertisseurs statiques sont des systèmes permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques :

I.6.1 Convertisseur DC/DC (Hacheur)

Les convertisseurs DC/DC dont pour fonction de fournir une tension continue variables à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé [10].

I.6.1.1 Convertisseur Buck (hacheur série)

Le convertisseur Buck, ou hacheur série convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultant du découpage sur la tension et le courant de sortie.

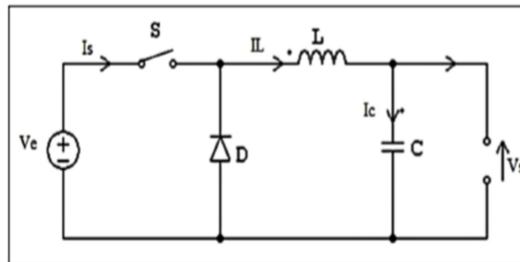


Fig I.11 Le schéma de principe du hacheur série.

L'interrupteur S est fermé pendant la fraction αt de la période de découpage T . La source primaire fournit l'énergie à l'inductance L . Lors du blocage de S , la diode de roue libre D assure la continuité du courant et la décharge de L [11].

I.6.1.2 Convertisseur Boost (Hacheur parallèle)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

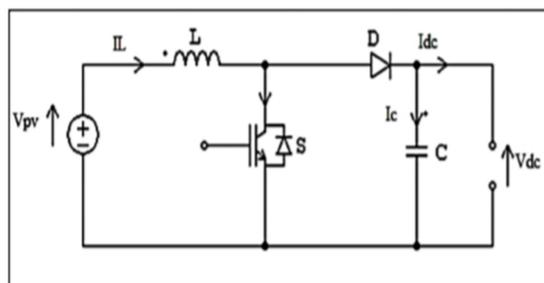


Fig I.12 Le schéma de principe du hacheur parallèle.

I.6.1.3 Convertisseur DC/AC (Onduleur)

Les circuits statiques appelés onduleurs convertissant la puissance alternative à la tension, le courant et la fréquence désirés. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique non sinusoïdale qui peut être assez proche de la forme d'onde requise. L'onduleur triphasé se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en

deux ponts (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre [12].

1.7 Groupe moteur-pompe

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

1.7.1. Moteurs (machine asynchrone)

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce travail, on utilise la machine asynchrone, parce qu'elle est la machine la plus fiable des machines électriques, la plus robuste de sa génération et la moins coûteuse à la fabrication. Dans ce cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif [3]. La machine asynchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. La machine qui nous intéresse dans cette partie est plus précisément une machine à induction.

1.7.2 Les Pompes

Une pompe est une machine hydraulique qui aspire et refoule un liquide (l'eau, l'huile, l'essence, les liquides alimentaires, etc...) d'un point à un endroit voulu. La pompe est destinée à élever la charge du liquide pompé. La charge ou l'énergie est la somme de trois catégories d'énergie :

- Energie cinétique $V^2/2g$
- Energie potentielle H ou Z .
- Energie de pression $P/\rho g$.

La pompe est un appareil qui génère une différence de pression Δp entre l'entrée et la sortie de la machine, l'énergie requise pour faire fonctionner une pompe dépend :

- Des propriétés du fluide : la masse volumique ρ , la viscosité dynamique μ .
- Des caractéristiques de l'écoulement : la pression, la vitesse V , le débit Q , la hauteur H .
- Des caractéristiques de l'installation : la longueur des conduites L , le diamètre D , et la rugosité absolue [13].

1.7.2.1 Les Types de pompes [14]

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications, 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.

a) Les pompes volumétriques : La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations

successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.

b) Les pompes centrifuges : les pompes centrifuges sont les plus rencontrées dans le domaine du pompage d'eau. Elles sont couplées avec les moteurs asynchrones constituant un groupe électropompe.

I.7.3 La 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) .

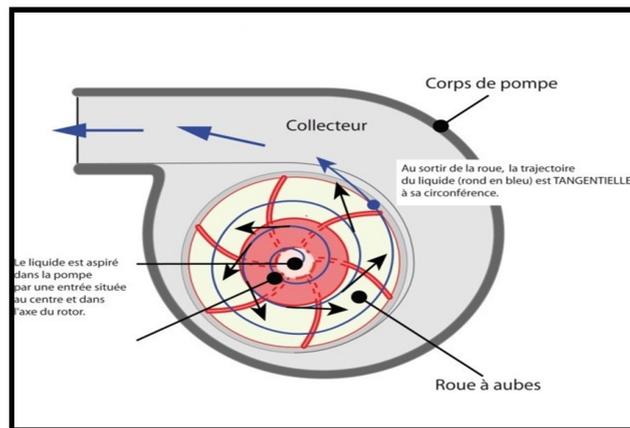


Fig I.13 Vue en face d'une pompe centrifuge

La pompe se compose de deux éléments essentiels :

- Une roue qui impose au liquide un mouvement de rotation. Celle-ci est montée sur un arbre porté par des paliers et entraîné par un moteur.

- Un corps de pompe qui dirige l'écoulement vers la roue et l'en éloigne à nouveau sous plus haute pression. Le corps de pompe comprend une tubulure d'aspiration et une tubulure de refoulement, supporte les paliers et l'ensemble du rotor.

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge. La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (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. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres). Ci-dessous est donnée l'illustration d'une pompe centrifuge.

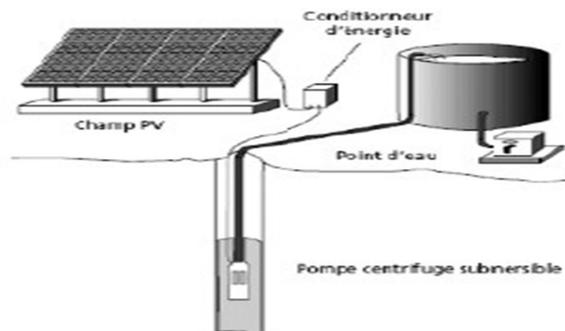


Fig I.14 Exemple d'installation avec une pompe centrifuge [14].

I.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur le système pompage photovoltaïque et l'énergie solaire et (ensoleillement, effet photovoltaïque, ...etc.), ainsi que Les éléments constituant le système de pompage photovoltaïque. Le système de pompage photovoltaïque que nous allons étudier dans les chapitres qui II et III est constitué de : de générateur photovoltaïque, des convertisseurs (les hacheurs, l'onduleur de tension), de moteur asynchrone d'une pompe centrifuge (Voir figure I.2).

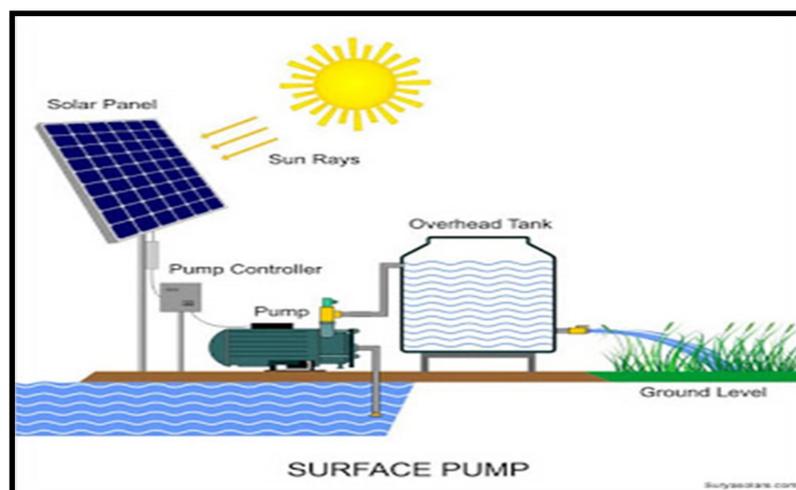


Fig. 1.15 Composant de système de pompage photovoltaïque étudié

Chapitre II :

Modélisation et Commande du Système de Pompage Photovoltaïque

II.1 Introduction

La modélisation d'un système physique conduit à l'établissement des équations mathématiques régissant la dynamique de ce système, d'où un modèle est la représentation mathématique d'une entité réelle de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler le comportement de cette entité [15]. Dans ce chapitre nous allons modéliser un système de pompage photovoltaïque étudié représenté par la figure II.1 qui se compose de trois étages. Le premier est un générateur photovoltaïque connecté à un convertisseur élévateur (DC/DC) qui assure un fonctionnement à puissance maximale en ajustant le rapport cyclique via des techniques de contrôle MPPT pour atteindre sa valeur maximale avec le rayonnement disponible. Le deuxième représente un onduleur de source de tension qui convertit le courant continu en courant alternatif avec Commande vectorielle Indirecte du moteur asynchrone par orientation du flux rotorique (IFOC). La troisième partie est le moteur à induction qui entraîne la pompe pour extraire l'eau.

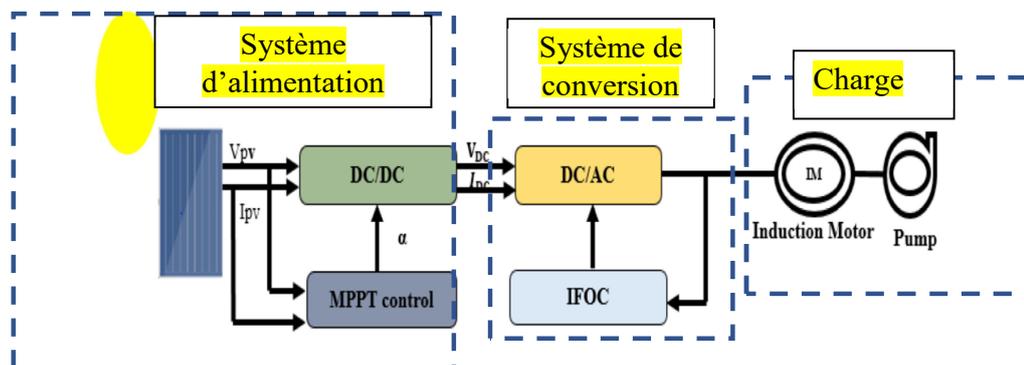


Fig. II.1 Principe de fonctionnement d'une pompe solaire

Le choix du moteur à utiliser repose sur que l'utilisation des moteurs à courant continu sont faciles à utiliser cependant, ces types de moteurs souffrent des problèmes dus aux balais, qui doivent être changés à plusieurs reprises en raison de dommages ce qui augmentent les coûts de maintenance et d'exploitation du moteur. En contrepartie les moteurs à courant alternatif sont plus efficaces, sans entretien et à faible coût. Par contre la vitesse, le flux et le couple de ces moteurs à induction sont compliqués en raison de leur modèle non linéaire. Pour surmonter ce problème, nous allons commander le moteur asynchrone par la commande vectorielle Indirecte du moteur par orientation du flux rotorique (IFOC).

La méthode de commande choisie est la commande vectorielle indirect (IFOC) à cause de la simplicité de sa mise en œuvre ce qui la rend plus attractive et plus utilisée.

II.2 Modélisation du système d'alimentation

Le système d'alimentation est représenté par un générateur photovoltaïque connecté à un convertisseur élévateur (DC/DC) qui assure un fonctionnement à puissance maximale en ajustant le rapport cyclique via des techniques de contrôle MPPT pour atteindre sa valeur maximale avec le rayonnement disponible.

II.2.1 Modélisation du générateur photovoltaïque

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé dans la littérature, est représenté sur la figure (II.2). Ce modèle sert à étudier les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) du générateur photovoltaïque ainsi que son comportement en fonction des paramètres solaires à savoir l'éclairement dans le plan des panneaux et la température de jonction [16]. Dans la figure II.2, la résistance R_{sh} caractérise le courant de fuite au niveau de la jonction et la résistance R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion [17].

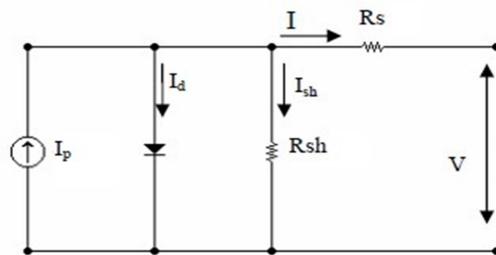


Fig. II.2 Modélisation du circuit électrique équivalent d'une cellule PV [18].

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff comme suivant:

$$I = I_p - I_d - I_{sh} \quad (\text{II-1})$$

avec:

I : Le courant délivré par le module.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

Le courant I_p dépend directement du rayonnement solaire E_s et de la température de la cellule T_j , il est donné par la relation suivante [18].

$$I_p = P_1 \cdot E_s \left[1 + P_2 (E_s - E_{ref}) + (P_3 (T_j - T_{jref})) \right] \quad (II-2)$$

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T_j = T_a + E_s \left(\frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (II-3)$$

où :

T_a : Température ambiante.

N_{oct} : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C). Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V \cdot R_s \cdot I)}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T_j} \right) - 1 \right] \quad (II-4)$$

avec :

I_{sat} : Courant de saturation, il est fortement dépendant de la température ; il est donné par l'expression suivante :

$$I_{sat} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j} \right) \quad (II-5)$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{V \cdot R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (II-6)$$

Le courant du module I est donné par :

$$I = I_p(E_s, T_j) - I_d(V, I, T_j) - I_{sh}(V) \quad (II-7)$$

$$I = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 (T_j - T_{ref})] - P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j} \right) \cdot \left[\exp \left(\frac{q(V \cdot R_s \cdot I)}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T_j} \right) - 1 \right] - \frac{(V_{pv} + R_{sl})}{R_{sh}} \quad (II-8)$$

Le schéma bloc du générateur photovoltaïque est présenté sur la figure (II.3), avec :

- Les deux variables d'entrées sont : ensoleillement dans le plan des panneaux (W/m²) et température de jonction des cellules (°C).
- Les deux variables de sortie sont : I courant fourni par le GPV (A) et V tension aux bornes du GPV (V).

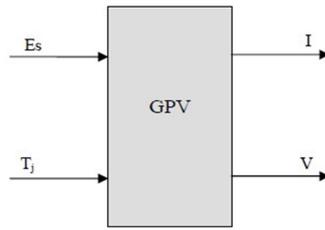


Fig. II-3 Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

Nous avons choisi le module dont les caractéristiques sont :

Tableau II.1 : Caractéristiques du panneau

Puissance maximale (W)	270116 W
Tension à vide (V)	37,9 V
Courant de court circuit (A)	9,07 A
Tension au point de maximum de puissance (V)	30,8 V
Courant au point de maximum de puissance (A)	8,7 V
Nombre de cellules	4 Série 11Parallèle

Le modèle choisi est un modèle intégré dans la bibliothèque « Simulink » du logiciel « MATLAB 2018 ». Dans la même interface on peut tracer les caractéristiques (I-V), (P-V) du panneau choisi.

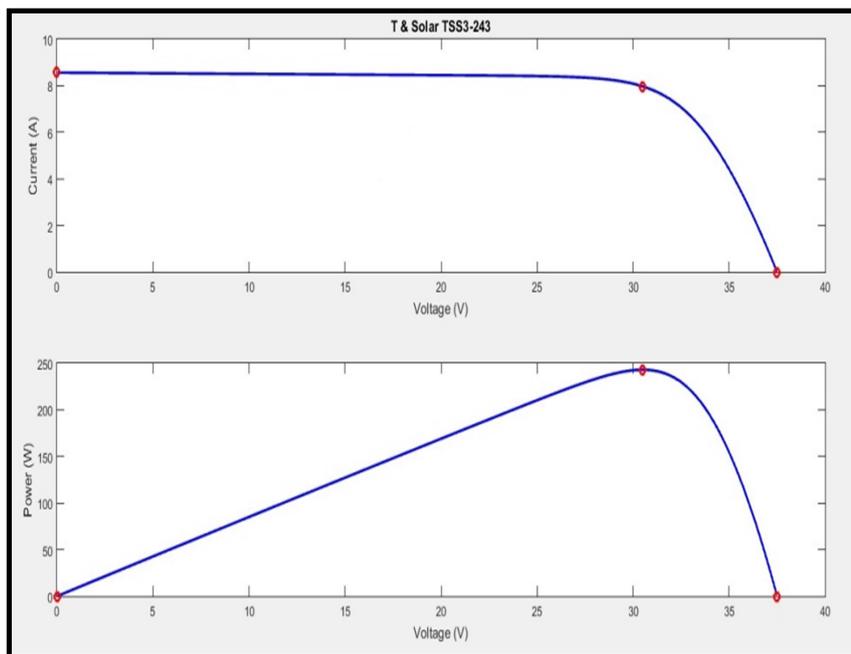


Fig. II.4 Caractéristique (I-V), (P-V) du panneau

II.2.2 Modélisation du Hacheurs (Convertisseur DC/DC)

II.2.2.1 Constitution

Constituent une partie assez importante de la chaîne de conversion. Ils sont utilisés largement dans les connexions à des batteries d'accumulateurs, les systèmes photovoltaïques, les éoliennes, les systèmes hybrides, Ces convertisseurs servent à adapter la tension d'entrée d'un système par rapport à la tension de sortie désirée pour de diverses simulations dans les systèmes des énergies renouvelables, des modèles précis et exacts de hacheur parallèle, de hacheur série et de hacheur série/parallèle sont requis. Ce travail cherche à analyser et proposer deux méthodes de modélisation simples et précises.

Le modèle mathématique du hacheur parallèle est obtenu par l'application des lois de Kirchhoff sur le schéma de base du hacheur, représenté en figure (II-5) et par rapport au régime de fonctionnement et la condition de l'interrupteur S.

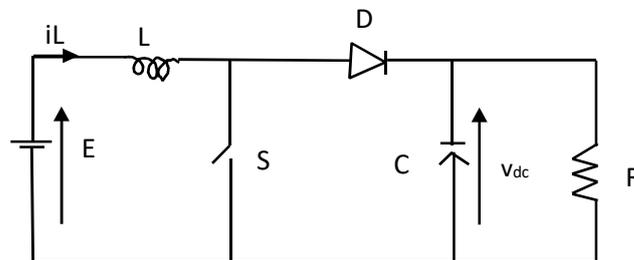


Fig. II-5: Schéma de principe du hacheur parallèle

$$L \frac{di_L}{dt} = E - V_{dc}(1 - a) \quad (\text{II-9})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_L(1 - a) - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II-10})$$

Les équations dynamiques du hacheur sont dérivées pour le courant dans l'inductance et la tension aux bornes du condensateur en régime de conduction continu exprimé en (II-9) où

i_L : Courant dans la bobine L,

E : Tension d'entrée,

V_{dc} : Tension de sortie

L : l'inductance de la bobine en [H],

C : la capacité du condensateur en F]

R : la résistance de la charge R en [Ω].

Le signal de contrôle α est compris dans le domaine discret de $\{0;1\}$ et il indique l'état de l'interrupteur S : ouvert pour 0 et fermé pour 1. Il peut être remplacé par sa valeur moyenne sur une période de découpage α qui représente le rapport cyclique $\alpha = T_{on}/T_s$ où : T_{on} : le temps de conduction ; T_s : la période de découpage.

La présentation de l'opération de ce type de convertisseur par des équations mathématiques doit être réalisée en prenant en compte de l'état de l'interrupteur S dans la figure (II-6). Quand l'interrupteur est en état passant, alors $T_{on} = a \cdot T_s$. Comme résultat, l'énergie stockée dans l'inductance augmente. Quand S est bloqué alors $T_{off} = (1-a) \cdot T_s$ et l'énergie accumulée dans l'inductance se transfère vers la capacité et la charge [19].

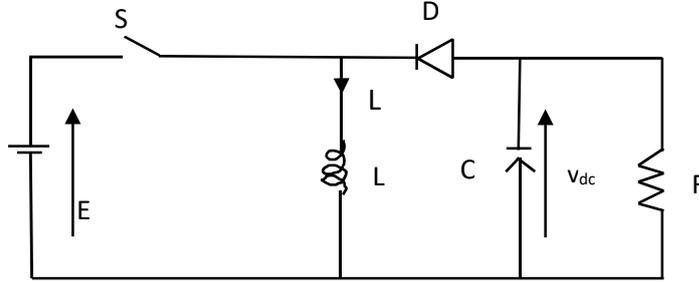


Fig. II.6 Schéma de principe du convertisseur série

$$L \frac{di_L}{dt} = aE - V_{dc}(1 - a) \tag{II-11}$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L(1 - a) - \frac{V_{dc}}{R} \tag{II-12}$$

La procédure de dérivation des équations dynamiques en régime de conduction continue est la même que dans le cas du hacheur parallèle. En régime interrupteur passant, S est égal à 1, la diode est bloquée et les équations dans ce cas sont :

$$L \frac{di_L}{dt} = aE \tag{II-13}$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{V_{dc}}{R} \tag{II-14}$$

Lorsque l'interrupteur est bloqué, S est égal à 0 et la diode conduit. Les paramètres du système sont toujours les mêmes que dans le cas du hacheur parallèle. Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant) [20]. Il se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [21].

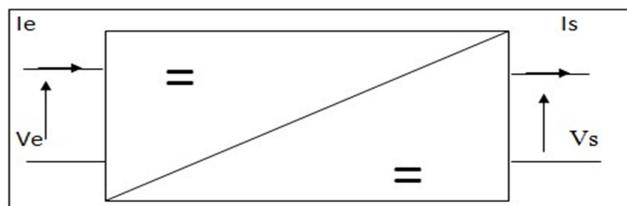


Fig. II.7 Convertisseur DC-DC.

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant Fig. II.8 L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [21]. Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence Constante f_s avec un temps de fermeture = d , T_s et un temps d'ouverture = $(1 - d)_s$.

Où :

T_s : est la période de commutation qui est égale $\frac{1}{f_s}$

d : le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

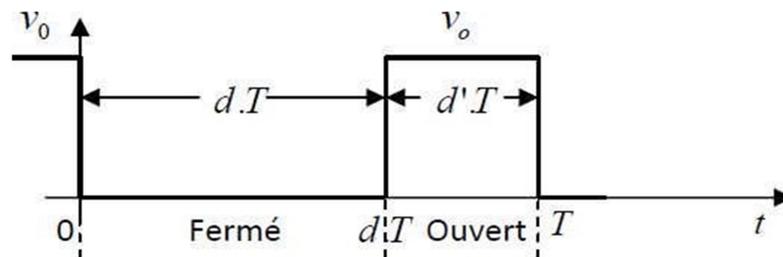


Fig. II.8 Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

II.2.2.2 Les types des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [21]:

- Convertisseur survolteur (hacheur survolteur ou parallèle) (**Boost**)
- Convertisseur dévolteur (ou série) (**Buck**)
- Convertisseur dévolteur- survolteur (**hacheur série –parallèle**).

II.2.3 Hacheur parallèle (BOOST)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

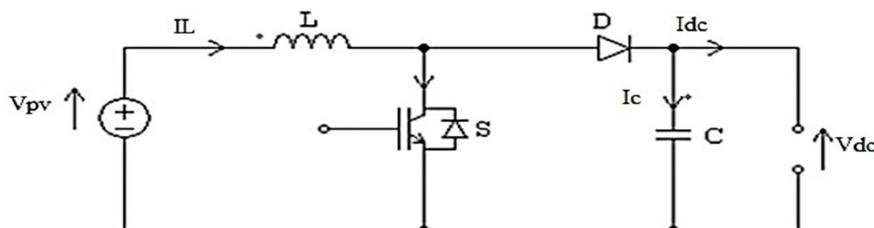


Fig. II.9 Schéma de principe du hacheur parallèle.

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

L'interrupteur S est fermé pendant le temps αT . L'énergie est stockée dans L , la diode D est bloquée. Le blocage de S entraîne la décharge de l'inductance [20].

Le principe de fonctionnement de ce type d'hacheur peut être expliqué de la manière suivante :

Quand l'interrupteur est en position 1, le circuit est séparé en deux parties : à gauche, la source charge l'inductance, pendant ce temps, la capacité à droite maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée.

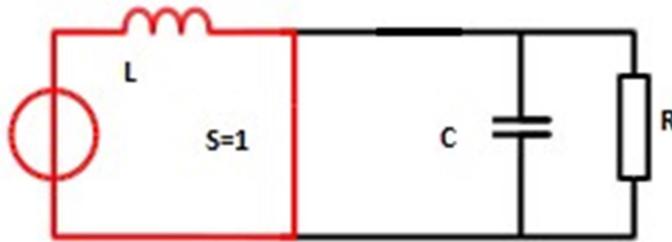


Fig. II.10. Schéma équivalent lorsque $S=1$.

Quand l'interrupteur change de position vers 0, la source DC et l'énergie stockée dans l'inductance vont ensemble alimenter le circuit à droite, d'où une augmentation de la tension de sortie [20].

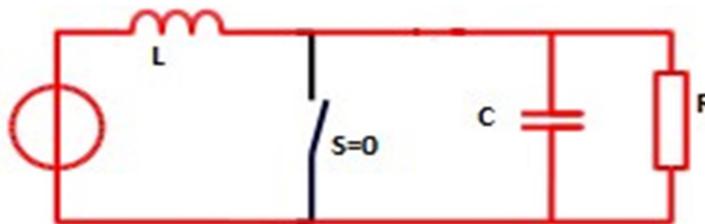


Fig. II.11 Schéma équivalent lorsque $S=0$.

On utilise un convertisseur Boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Les systèmes alimentés par batterie d'accumulateurs utilisent souvent plusieurs accumulateurs en série, afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé. La place disponible étant souvent limitée, il n'est pas toujours possible de disposer d'un nombre suffisant d'éléments. Un convertisseur boost permet d'augmenter la tension fournie par les batteries et ainsi diminuer le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. Les systèmes photovoltaïques sont des exemples typiques d'utilisation des convertisseurs boost [21].

II.2.4 La commande MPPT

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [22].

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (II.16) [23].

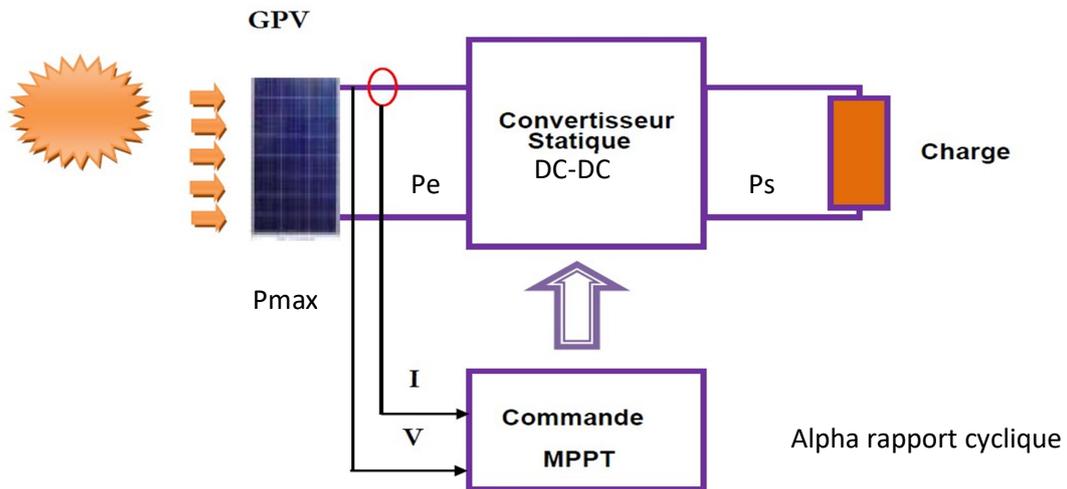


Fig. II.12 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT [27].

II.2.5 La méthode Perturbation & Observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation est une approche largement répandue dans la recherche du point de puissance maximale MPPT parce qu'elle est simple et facile à réaliser. P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau PV comme le montre les figures représente l'algorithme de la méthode P&O. A chaque cycle, la tension V_{pv} et le courant I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k - 1)$ calculée au cycle précédent [24].

Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT. Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale VPPM. Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrément de la perturbation.

Si ce pas d'incrément est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements rapides des conditions de fonctionnement. Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité [25]. Un autre inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer et donner une mauvaise interprétation de la localisation du MPP lors d'un rapide changement des conditions atmosphériques.

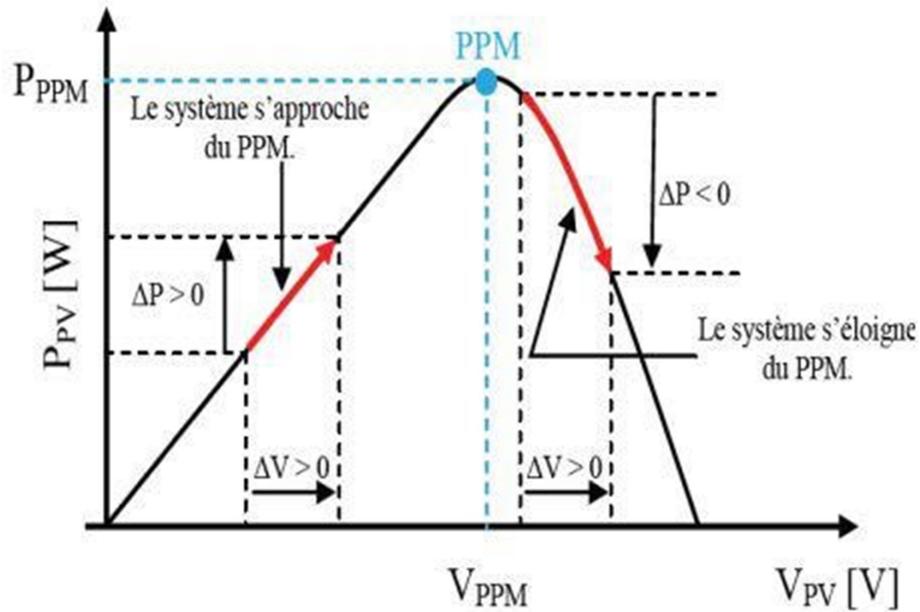


Fig. II.13 Schéma de principe de la méthode P&O.

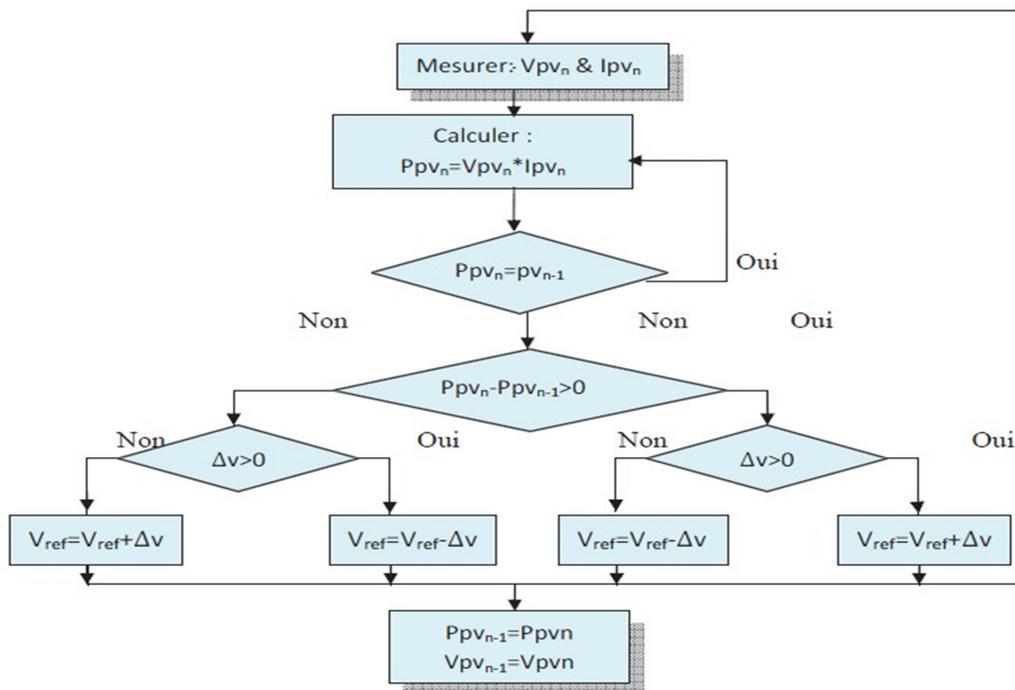


Fig II.14 Algorithme de la méthode perturbation et observation.

II.3 Modélisation de la pompe et de la machine asynchrone

II.3.1 Modèle de la pompe

Les courbes principales qui caractérisent une pompe centrifuge et qui expriment ses performances sont, pour une vitesse de rotation donnée.

II.3.1.1 Caractéristique débit- vitesse

Le débit de cette pompe est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois il faut une vitesse minimale à une hauteur manométrique H_m donnée par barbotage pour obtenir un débit [26].

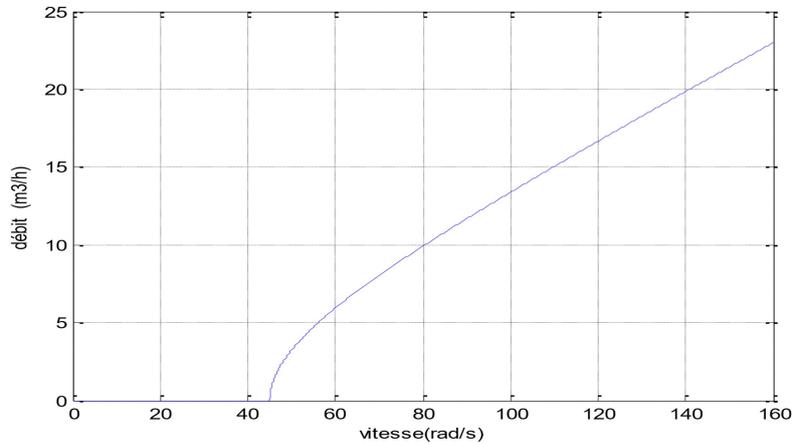


Fig. II.15 la caractéristique débit-vitesse d'une pompe centrifuge.

II.3.1.2 Caractéristique couple - vitesse

Le couple du moteur 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 assurer un bon débit.

Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une H_m donnée pour obtenir un débit de départ non nul [26]. Donc la pompe centrifuge suppose un couple résistant C_r :

$$C_r = K_r \cdot \omega^2 + C_s \quad (\text{II.15})$$

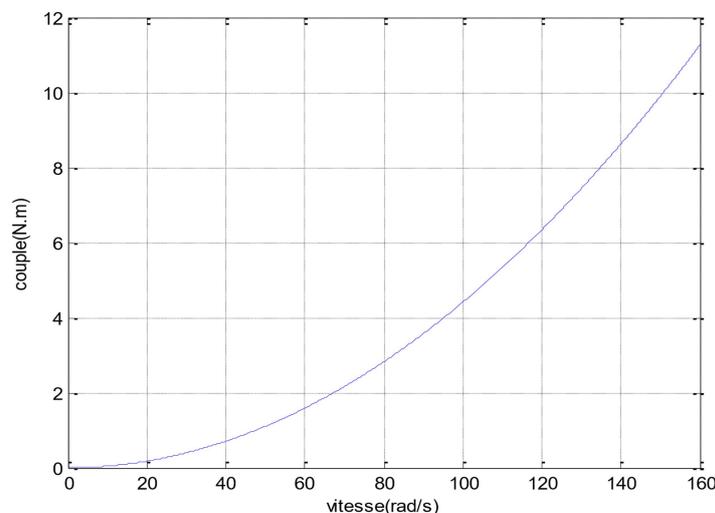


Fig. II.16 Caractéristique couple-vitesse d'une pompe centrifuge.

Avec :

k_r : Coefficient de proportionnalité $[[Nm]/(rd.S^{-1})]$

C_s : Couple statique, très petit $[Nm]$

ω : vitesse de rotation $(rd.S^{-1})$

L'équation de puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la vitesse est donnée par la relation suivante :

$$P_{mec} = K_p \omega^3 \quad (II.16)$$

II.3.1.3 Caractéristique débit-hauteur

La courbe débit-hauteur, exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction du débit. Les constructeurs sont en mesure de fournir au client la courbe $Q(H_m)$ correspondante aux diamètres, maximal et minimal possibles de la roue [27].

Si la charge du moteur est une pompe émergée monocellulaire à roue radiale. Elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale H_m en fonction du débit Q . En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de « PELEIDER-PETERMAN » .

$$H_m = C_1.W^2 - C_2.W.Q - C_3.Q^3 \quad (II.17)$$

Avec :

C_1, C_2 et C_3 : des constantes propres de la pompe données par le constructeur.

W : La vitesse de rotation $[rd.s^{-1}]$.

H_m : La hauteur manométrique $[m]$.

Q : Débit $[m^3/s]$.

Lorsque la quantité d'eau est nulle, cela se manifeste par le phénomène de ' barbotage' qui se traduit par la hauteur de barbotage H_1 , et l'équation précédente devient comme suit :

$$H_1 = C_1 W^2 \quad (II.18)$$

Le banc d'essai étudié est constitué d'un puits, la conduite de refoulement est déterminée par des conditions économiques, son diamètre et sa longueur.

Alors la caractéristique $H_m(Q)$ peut être tracée et la caractéristique résistante $Q(H_m)$ de la canalisation est ensuite déterminée. Cette dernière se met sous la forme suivante:

$$H_c = H_g + \Delta H \quad (II.19)$$

Avec :

H_g : Hauteur géométrique, égale à la différence des hauteurs entre les niveaux libres du

liquide côté d'aspiration et côté de refoulement.

ΔH : désigne la somme de toutes les pertes de charges dues au frottement du fluide contre les parois et divers changements de sections.

$$\Delta H = Kh. Q^2 \tag{II.20}$$

Avec :

Kh : Constante donnée de la pompe.

La courbe $H_m(Q)$ comme indiquée sur la figure (II.19) est une parabole. Le point de rencontre de la courbe $H_m(Q)$ avec l'axe des ordonnées est le point à débit nul, on l'appelle point à vanne fermée ou encore point de barbotage [27]. Le point de fonctionnement de la pompe est le point d'intersection des deux courbes.

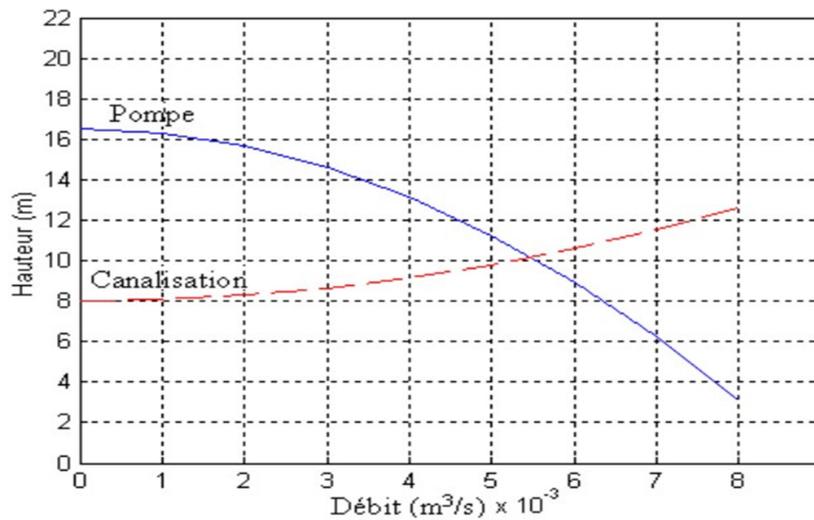


Fig. II.17 Caractéristiques de la pompe $H_m(Q)$ et de la canalisation

II.3.2 Modèle de la machine asynchrone

La représentation schématique de la machine asynchrone dans l'espace électrique est donnée par la figure (II-18).

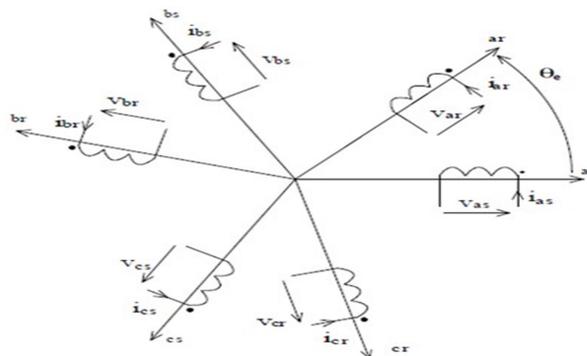


Fig. II.18 Repérage angulaire des axes magnétiques d'une MAS triphasée.

II.3.2.1 Hypothèses simplificatrices

Le modèle de la machine asynchrone que nous adopterons repose sur les hypothèses suivantes :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, ce qui permet de considérer que seuls les enroulements sont parcourus par des courants et en outre on suppose que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).
- La force magnétomotrice créée par chaque phase du stator et du rotor est à distribution spatiale (le long de l'entrefer) sinusoïdale (on ne considère que le premier harmonique), les inductances propres sont, par conséquent, constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales des angles que font les axes magnétiques ; l'effet dû à la présence d'encoches est négligé [28].

II.3.2.2 Conventions de signes

Les machines asynchrones sont surtout utilisées comme moteurs, on adoptera les conventions de signes suivantes :

- Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.
- Une f.é.m. positive fait circuler un courant positif.
- Le stator est considéré comme générateur, le rotor comme récepteur.- Les angles et les vitesses de rotation sont comptés positivement dans le sens trigonométrique [28].

II.3.2.3 Mise en équation de la machine asynchrone

Le comportement de la machine peut être traduit par trois types de phénomènes régis par leurs équations respectives : équation électrique ; magnétique et mécanique [29].

a) Equations électriques

Soient (V_{sabc}) , (i_{sabc}) et (Φ_{sabc}) , respectivement, le vecteur tension, courant et flux des trois phases statoriques de la machine.

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [i_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; [\varphi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Les mêmes notations sont adoptées pour les grandeurs rotoriques en remplaçant l'indice 's' par l'indice 'r'. On définit les tensions statoriques et rotoriques comme suit :

- **Phase statorique**

Pour l'ensemble des enroulements statoriques, on écrira les notations matricielles :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

R_s : Résistance de la phase du stator.

- **Phase rotorique**

Pour l'ensemble des enroulements rotoriques, on écrira en notation matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

R_r : Résistance de la phase du rotor.

b) Equations magnétiques

Les hypothèses citées précédemment, entraînent les relations suivantes entre les flux (Φ) et les courants (i) des phases statorique et rotorique.

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sabc} \\ \varphi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{rs}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sabc} \\ I_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s \\ M_s & L_{as} & M_s \\ M_s & M_s & L_{as} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_r & M_r \\ M_r & L_{ar} & M_r \\ M_r & M_r & L_{ar} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Les mutuelles inductances stator-rotor dépendent de l'angle α (position du rotor) et ont pour valeur crête M_{sr} .

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

On aura finalement les équations magnétiques sous forme matricielle des phases statorique et rotorique comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{as} & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & L_{as} & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \end{bmatrix} \\ \\ \begin{bmatrix} \varphi_{sc} \\ \varphi_{ra} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_s & M_s & L_{as} & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & L_{ar} & M_r & M_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sc} \\ I_{ra} \end{bmatrix} \\ \\ \begin{bmatrix} \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_3 & M_1 & M_2 & M_r & L_{ar} & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & L_{ar} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II.28})$$

Avec :

L_{as} : Inductance propre d'une phase statorique.

L_{ar} : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : Inductance mutuelle d'une phase statorique.

M_r : Inductance mutuelle d'une phase rotorique.

M_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre deux phases statorique et rotorique.

A partir des relations précédentes les équations électriques deviennent :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \} \quad (\text{II.29})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][I_{sabc}] + [L_r][I_{rabc}] \} \quad (\text{II.30})$$

c) Equation mécanique

L'équation mécanique régissant la vitesse de rotation ω de la machine est donnée par

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f\omega \quad (\text{II.31})$$

Avec :

J : Moment d'inertie ramené sur l'arbre de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique développé par la machine.

C_r : Couple résistant de la charge.

F : Coefficient de frottement visqueux.

Le couple électromagnétique est la dérivée partielle de la co-énergie magnétique par rapport à la position. Sachant que les inductances propres sont de dérivées nulles, il ne reste que le terme relatif aux dérivées des inductances mutuelles. Son expression est donnée par :

$$C_{em} = \frac{1}{2} P [I_{sabc}^t] \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} [M_{sr}][I_{rabc}] \quad (\text{II.32})$$

Avec :

P : est le nombre de paires de pôles.

II. 4 Modélisation de l'onduleur de tension

Pour simplifier l'étude, on suppose que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé [25].
- Les interrupteurs sont totalement commandable.
- Pour éviter le court-circuit d'un bras et éviter l'ouverture d'une phase d'une charge inductive ($F_1=1-F_1$).

En s'appuyant sur ces hypothèses, on aboutit au schéma simplifié de la figure (II.19).

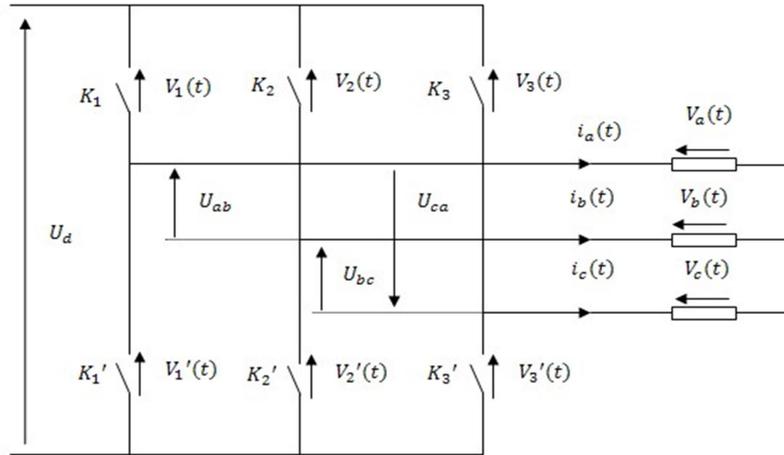


Fig. II.19 Modèle simplifié de l'onduleur triphasé.

$V_a(t), V_b(t), V_c(t)$: Les tensions simples délivrées par l'onduleur.

$U_{ab}(t), U_{bc}(t), U_{ca}(t)$: Les tensions composées délivrées par l'onduleur.

Les équations des tensions composées sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b \\ U_{bc} = V_b - V_c \\ U_{ca} = V_c - V_a \end{cases} \quad (II.33)$$

D'autre part, on a les relations entre les tensions simples et les tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ac}) \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (II.34)$$

L'hypothèse d'un système de tension équilibré implique :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (II.35)$$

Les interrupteurs $K_j, K_j'(1,2,3)$ sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant.

On associe à chaque bras de l'onduleur une fonction logique de connexion $F_j (j = 1, 2, 3)$ correspondant aux signaux de commande des interrupteurs. $F_j (j = 1, 2, 3)$ est définie comme suit :

$$f_1 = \begin{cases} 1 \text{ si } K_j \text{ ferme} \\ 0 \text{ si } K_j \text{ ouvert} \end{cases} \quad (j = 1,2,3) \quad (II.36)$$

$$\begin{cases} \text{si } f_1 = 1 \rightarrow V_1 = 0 \\ \text{si } f_1 = 0 \rightarrow V_1 = U_f \end{cases} \rightarrow V_1 = -(f_1 - 1) \cdot U_f \quad (II.37)$$

$$\begin{cases} \text{si } f_2 = 1 \rightarrow V_2 = 0 \\ \text{si } f_2 = 0 \rightarrow V_2 = U_f \end{cases} \rightarrow V_2 = -(f_2 - 1) \cdot U_f \quad (II.38)$$

$$\begin{cases} \text{si } f_3 = 1 \rightarrow V_3 = 0 \\ \text{si } f_3 = 0 \rightarrow V_3 = U_f \end{cases} \rightarrow V_3 = -(f_3 - 1) \cdot U_f \quad (\text{II.39})$$

Exprimons les tensions composées en fonction des états logiques des interrupteurs :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_2 - V_1 \rightarrow U_{ab} = (f_1 - f_2) \cdot U_f \\ U_{bc} = V_2 - V_3 \rightarrow U_{bc} = (f_2 - f_3) \cdot U_f \\ U_{ca} = V_1 - V_3 \rightarrow U_{ca} = (f_3 - f_1) \cdot U_f \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

Ce qui donne la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = U_f \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

L'expression (II-41) sous forme matricielle s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

En remplaçant (II.41) dans (II.42), on aura le système matriciel (II.43) comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_f \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

II .5 Commande vectorielle indirecte

II.5.1. Principe de la commande vectorielle

Dans les machines électriques, le couple électromagnétique s'exprime par un produit vectoriel du courant induit et du flux inducteur. Pour une machine à courant continu, le champ inducteur et le courant induit sont naturellement orthogonaux. Ainsi, le couple est maximal ce qui donne aux machines à courant continu des performances remarquables en commande. Au contraire, une machine asynchrone présente un fort couplage entre toutes ses grandeurs électromagnétiques.

L'objectif de la commande vectorielle des machines asynchrones est d'améliorer leur comportement dynamique et statique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu. La composante d'axe d du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine et la composante d'axe q joue le rôle du courant induit et permet de contrôler le couple. Cette commande appelée « commande à flux orienté » est basée sur un choix judicieux du repère (d, q). Ce dernier est orienté de manière à ce que l'axe d soit en phase avec le flux désiré. L'expression du couple se voit alors simplifiée et n'est plus fonction que du flux et du courant en quadrature. Ainsi, en maintenant le flux à une valeur constante, le couple ne dépend plus que de la composante en quadrature du courant statorique (i_{sq}) et peut être contrôlé par celle-ci.

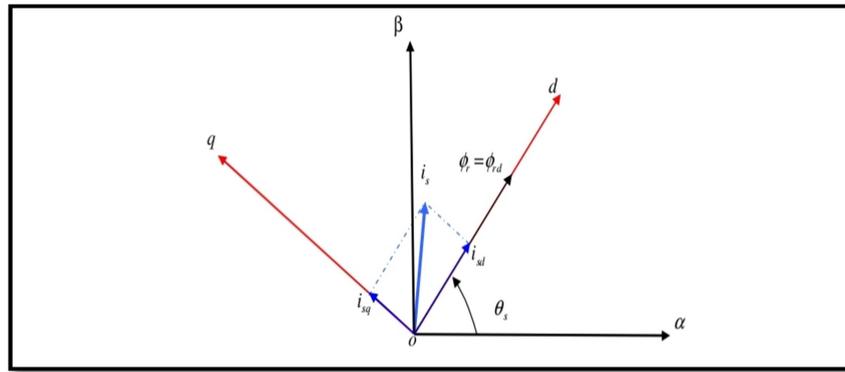


Fig. II.20. Orientation du flux rotorique

L'implantation effective de la commande vectorielle nécessite la réalisation d'une structure de contrôle des courants. Elle permet à partir de consignes de flux et de couple, donc d'une amplitude et une orientation donnée du courant statorique dans le référentiel tournant (d , d'imposer une q) amplitude et une orientation correctes du courant dans le référentiel fixe. Cette structure nécessite la connaissance de la position du référentiel (d , en d'autres termes la position du flux rotorique q).

Dans le cadre de notre travail, Nous allons nous limiter à étudier la version indirecte de la commande vectorielle. Cette version, basée sur les équations de la machine dans le référentiel tournant, permet d'estimer la position du flux rotorique.

Elle présente l'avantage de ne pas nécessiter la mesure ou la reconstitution du flux mais exige la présence d'un capteur de position du rotor. Cette position est calculée à partir de la vitesse de la machine et d'autres grandeurs accessibles comme les courants ou les tensions statoriques. Toutefois, l'utilisation du modèle de la machine rend cette solution très sensible à la précision avec laquelle les paramètres du modèle sont connus. Ces paramètres dépendent largement des conditions de fonctionnement (saturation, échauffement, fréquence,..). En cas d'imprécision sur la détermination de ces paramètres, le découplage entre flux et couple ne sera pas assuré. La conséquence serait une dégradation des performances dynamiques et statiques.

II.5.2 Structure

Le principe de la commande vectorielle est de contrôler les deux composantes (i_d, i_q) du courant, selon qu'on utilise une alimentation contrôlée en courant ou en tension. L'alimentation contrôlée en tension, consiste à imposer les tensions de références qui conviennent pour réguler les courants. La technique de modulation de largeur d'impulsion est très employée, elle permet d'appliquer à la machine, à partir d'une source de tension continue, des créneaux de tensions dont l'amplitude et la fréquence peuvent varier.

II.5.3. Le contrôle indirect (IFOC)

Contrairement à la commande vectorielle directe, la méthode indirecte consiste à ne pas estimer l'amplitude du flux rotorique mais à utiliser directement l'amplitude de référence $\hat{\phi}_{rq}$.

L'intérêt de cette méthode est d'utiliser uniquement des grandeurs de référence qui par définition ne sont pas bruitées. En effet, à partir d'un couple électromagnétique de référence Ce^* et du flux rotorique de référence $\hat{\phi}_{rd}$. La méthode de commande indirecte se caractérise donc par le fait qu'aucune estimation du flux n'est nécessaire, le contrôle vectoriel est alors simplifié. Cette méthode est plus facile à implanter et présente de biens meilleurs performances à faible vitesse .

II.5.3.1 Commande en courant

Considérons les deux courants statoriques (I_{ds} , I_{qs}) comme variables de commande, le flux rotorique (ϕ_r) et la vitesse mécanique (ω_r) comme variables d'état, D'après les équations précédentes. Nous obtenons :

$$\begin{cases} Tr \cdot \frac{d\phi_r}{dt} + \phi_r = M \cdot I_{ds} \\ W_{sl} = \frac{M}{Tr} \cdot \frac{I_{qs}}{\phi_r} = \omega_s - \omega_r \\ Ce = \frac{p \cdot M}{L_r} \cdot \phi_r \cdot I_{qs} \\ J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = Ce \cdot Cr - f \cdot \Omega_r \end{cases} \quad (II.44)$$

Nous pouvons remarquer dans les équations précédentes que seule la composante directe (axe "d") du courant statorique (I_{ds}) détermine l'amplitude du flux rotorique (ϕ_r), alors que le couple ne dépend que de la composante en quadrature (axe "q") du courant statorique (I_{qs}) si le flux rotorique est maintenu constant. Ainsi est réalisée une décomposition du courant statorique en deux termes correspondants respectivement au flux et au couple. Le schéma fonctionnel correspondant est le suivant :

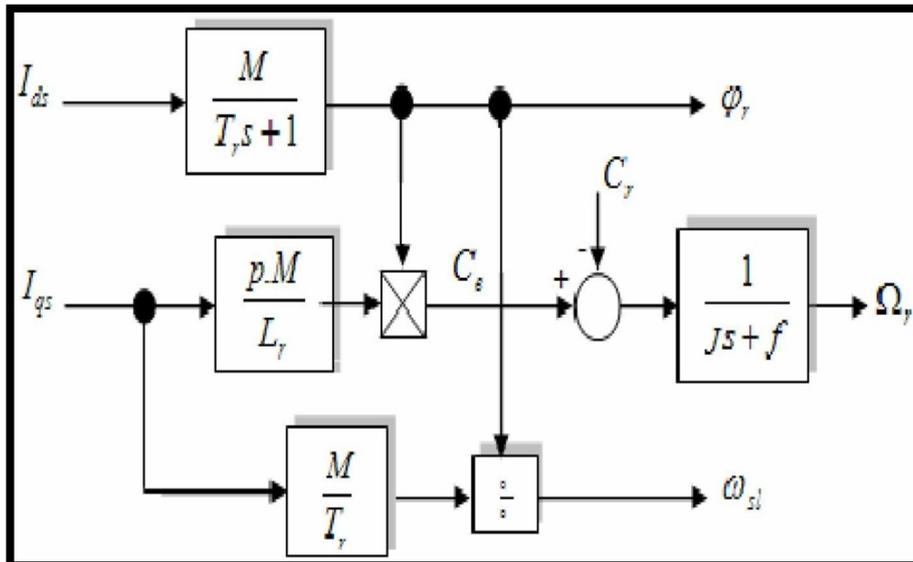


Fig II.21 Modèle en courant par orientation du flux rotorique.

II.5.3.2 Commande en tension

Les idées sont les mêmes que celles exprimées dans le paragraphe précédent, cependant nous ne devons pas seulement considérer la dynamique du rotor mais aussi la dynamique du stator, parce que la machine est alimentée par une source de tension.

Considérons les deux tensions statoriques (V_{ds}, V_{qs}) comme variable de commande, les deux courants statoriques (I_{ds}, I_{qs}), le flux rotorique (Φ_r) et la vitesse mécanique (ω_r) comme variables d'état. Nous obtenons le modèle de la MAS alimentée en tension.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma \cdot T_s \frac{dI_{ds}}{dt} + I_{ds} = \frac{V_{ds}}{R_s} + \sigma \cdot T_s \cdot \omega_s \cdot I_{qs} - \frac{T_s (1-\sigma)}{M} \frac{d\Phi_r}{dt} \\ \sigma \cdot T_s \frac{dI_{qs}}{dt} + I_{qs} = \frac{V_{qs}}{R_s} + \omega_s \left[\sigma \cdot T_s \cdot I_{ds} - \frac{T_s (1-\sigma)}{M} \cdot \Phi_r \right] \\ T_r \frac{d\Phi_r}{dt} + \Phi_r = M \cdot I_{ds} \\ \omega_{sl} = \frac{M}{T_r} \cdot \frac{I_{qs}}{\Phi_r} \\ Ce = \frac{P \cdot M}{L_r} \cdot \Phi_r \cdot I_{qs} \\ J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = Ce - Cr - f \cdot \Omega_r \end{array} \right. \quad (II-45)$$

II.5.3.3 Structure de la commande indirecte (IFOC) de la MAS alimentée en tension

Considérons le couple (C_e) et le flux rotorique (Φ_r) comme référence de commande. Nous inversons le modèle précédent et nous obtenons les équations de commande suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{qs} = \frac{L_r \cdot C_e}{P \cdot M \cdot \Phi_r} \\ I_{ds} = \frac{1}{M} \left(T_r \cdot \frac{d\Phi_r}{dt} + \Phi_r \right) \\ \omega_{sl} = \frac{M}{T_r} \cdot \frac{I_{qs}}{\Phi_r} \\ V_{ds} = R_s \left(\left(\partial \cdot T_s \frac{dI_{ds}}{dt} + I_{ds} \right) + \frac{T_s (1-\sigma) d\Phi_r}{M \cdot dt \cdot R_s} \cdot \sigma \cdot T_s \cdot (\omega_{sl} \cdot P \cdot \Omega_r) I_{qs} \right) \\ V_{qs} = R_s \left(\left(\partial \cdot T_s \frac{dI_{qs}}{dt} + I_{qs} \right) + (\omega_{sl} \cdot P \cdot \Omega_r) \cdot \sigma \cdot T_s + \frac{T_s (1-\sigma)}{M} \Phi_r \right) \end{array} \right. \quad (II-46)$$

Le schéma fonctionnel correspondant de la commande est le suivant :

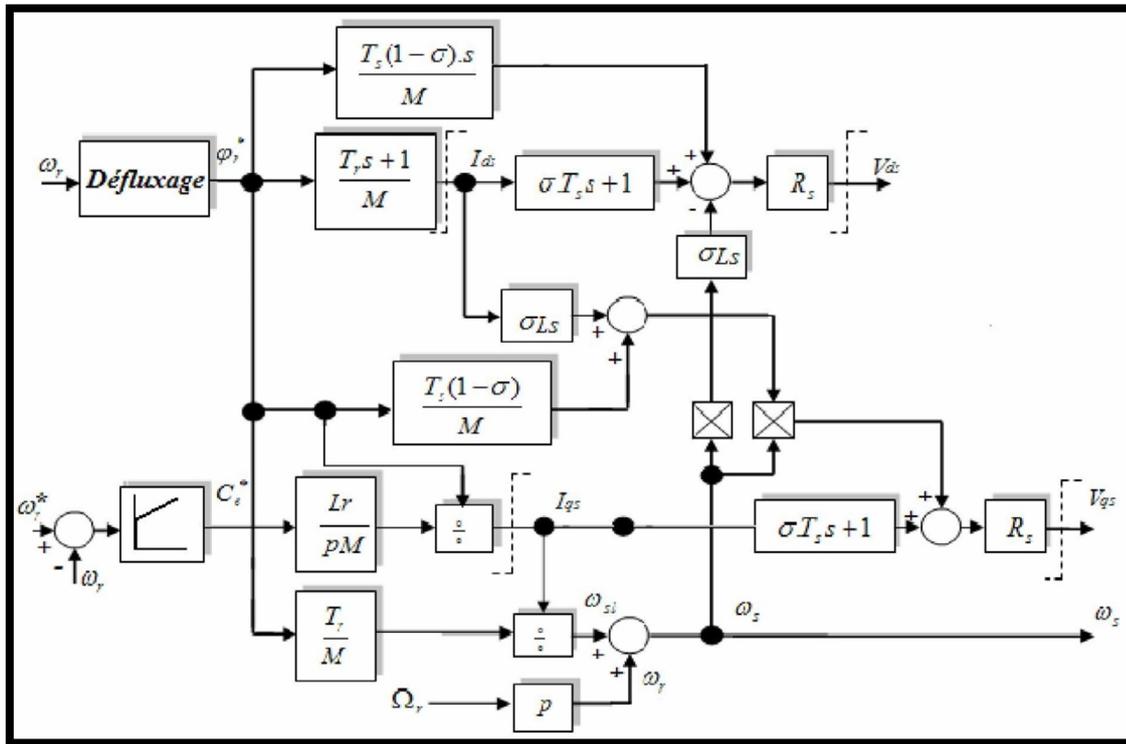


Fig. II.22 Schéma fonctionnel de la structure de commande en tension

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation des différents éléments de système de pompage photovoltaïque : telle que le générateur, les convertisseurs : hacheur, onduleur, la machine asynchrone et la pompe . A la fin de ce chapitre on a présenté La méthode de commande vectorielle indirecte (IFOC) que nous avons choisi à cause de la simplicité de sa mise en œuvre.

Chapitre III :

Dimensionnement et Simulation du Système de Pompage Photovoltaïque

III.1 Introduction

Dans la première partie de ce dernier chapitre on a va présenter la méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui permis de dimensionner une installation de pompage photovoltaïque pour satisfaire les besoin de l'eau d'une consommation bien déterminer .Elle est basée essentiellement sur l'évaluation des besoin d'eau, le calcul de l'énergie hidrotique nécessaire, la détermination de l'énergie solaire disponible et le choix de composants.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous allons présenter un système de pompage d'eau photovoltaïque (PV) autonome entraîné par un moteur à induction sans stockage d'énergie pour améliorer les performances du système de pompage. Tout d'abord, nous allons appliquer au système PV la méthode perturber et observer (P&O) qui assure une grande efficacité lors du suivi du point de puissance maximale du panneau PV dans des conditions d'irradiation soudaine. Ce MPPT fonctionne sur le rapport cyclique de fonctionnement du convertisseur élévateur. Alors, ce convertisseur se combine avec un onduleur de source de tension pour convertir le courant continu en courant alternatif. Deuxièmement, nous utilisons le contrôle indirect orienté champ (IRFOC), qui entraîne à son tour le moteur triphasé à induction pour faire fonctionner la pompe centrifuge. Les résultats de simulation de ce travail seront obtenus à sous l'environnement MATLAB Simulink.

III.2 Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

Dans cette partie on va dimensionner un système de pompage photovoltaïque, avec un degré de précision acceptable. Les facteurs les plus importants de cette approche devront être estimés soigneusement afin d'obtenir un dimensionnement satisfaisant.

III.2.1 Dimensionnement du champ photovoltaïque

III.2.1.1 Détermination de l'énergie solaire disponible :

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible et de l'énergie hydraulique nécessaire.

- a- Inclinaison du générateur photovoltaïque :** L'inclinaison β des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire.
- b- Mois de dimensionnement :** Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, c'est-à-dire celui dont le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire soit minimum. Comme idée de principe, à chaque inclinaison β , correspond un mois le plus défavorable. Le mois de dimensionnement à l'inclinaison optimale sera précisément celui qui présent le plus petit rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique. L'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire correspondantes à ce mois serviront pour le choix des composantes du système [32].

c- Evaluation de l'énergie moyenne journalière requise par la charge [33] :

La consommation moyenne nécessaire pour le fonctionnement des équipements en (Wh/j) est donnée par la formule suivante :

$$C_j = \Sigma P \cdot h \quad (\text{III.1})$$

Avec : P : La puissance électrique consommée par la charge (en W).

h : La durée d'utilisation quotidienne moyenne (en h) .

d- Estimation du nombre de module en séries : Le nombre de module en série est :

$$N_s = \frac{U}{U_n} \quad (\text{III.2})$$

U : Tension d'installation en V.

U_n : Tension nominale d'un module en V.

e- Estimation du nombre de branche en parallèle :

$$N_p = \frac{N}{N_s} \quad (\text{III.3})$$

N_p : Nombre de module en parallèle.

N : Nombre de module.

f- Calcul de la puissance du générateur : La puissance crête délivré par le générateur est :

$$P_s = N_s \cdot P_s \cdot P_{cm} \quad (\text{III.4})$$

P_{cm} : Puissance crête d'un module.

P_s : Puissance crête d'un générateur.

g- Calcul de la surface totale du générateur : La surface totale occuper par le champ sur le sol ou le toi est :

$$S = N \cdot S_m \quad (\text{III.5})$$

S_m : C'est la surface d'un module en m².

N : Nombre de module.

III.2.2 Dimensionnement du moteur

Le moteur utilise est un moteur asynchrone à cage triphasé, d'une puissance de 3.5KW. Le moteur choisi doit être capable de supporter la puissance crête du générateur photovoltaïque.

III.2.3 Dimensionnement de la pompe centrifuge

Le débit crête $[m^3/h]$ est calculé par la relation suivante [32] :

$$Q = \frac{3.6 ph}{g,h} \quad (III.6)$$

Où :

ph : Puissance hydraulique nécessaire [W].

g : Accélération de la pesanteur $[9.81m/s^2]$.

h : Hauteur manométrique totale[m].

III.2.4 Dimensionnement de la tuyauterie

Le diamètre des tuyauteries peut être estimé en utilisant des tableaux ou des graphes qui expriment les pertes par frottement en fonction du débit pour chaque diamètre de la tuyauterie le diamètre le plus économique seront celui qui réduit au minimum la somme des couts de la tuyauterie et de l'énergie perdue par frottement. Il est possible d'obtenir analytiquement les diamètres des tuyauteries de pompage qui approxime a ceux qui minimisent les couts des installations par la formule suivante [34] :

$$D = k\sqrt{Q} \quad (III.7)$$

D : Diamètre de la tuyauterie [m].

K : Coefficient qui varie de 0.75 à 1.4.

Q : Débit crête de la pompe.

On choisi la valeur de k équivaut à fixer la vitesse moyenne du fluide :

$$V = \frac{4}{\pi k^2} \quad (III.8)$$

Le débit est exprimé par l'équation suivante :

$$Q = \frac{\pi^3}{4} V^3 \quad (III.9)$$

III.2.5 perte de charge

La perte de charge est la perte de pression qui se manifeste au fur et à mesure de l'avancement du fluide .Elle est définie comme étant la résistance à l'écoulement et à l'avancement du fluide à cause de la rugosité des surfaces des canalisations. Pour une conduite rectiligne [35] :

$$H = \frac{k.l.v^2}{D} \quad (III.10)$$

K =0.0015 (une conduite ancienne).

K =0.0020 (une conduite neuve fente).

Les accessoires

C'est les obstacles de courte longueur, vanne, soupape, crépine ... ect. Seulement le nombre d'accessoire et en vitesse qui interviennent :

$$H = N.K.V^2 \quad (\text{III.11})$$

N : Le nombre d'accessoires.

K = 0.015 (coude normale).

K = 0.04 (vanne à tiroir).

K = 0.1 (vanne à soupape).

K= 0.4 (crépine 0 clapet).

III.3 Résultats de la Simulation De System de Pompage Photovoltaïque

On a simulé le système de pompage photovoltaïque qui est constitué de générateur Photovoltaïque composé de deux panneaux solaires en parallèle avec un hacheur BOOST commandé par Maximum Power Point Tracking (MPPT) classique qui est Perturb and Observ (P&O). Un onduleur qui le rôle de convertir la tension continué délivrée par le système PV .La charge est composé d'une Moto-pompe (moteur à courant alternative et pompe centrifuge) (Voir figure III.1).La simulation est assuré sous les conditions climatiques : Eclairément variable et température constante $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

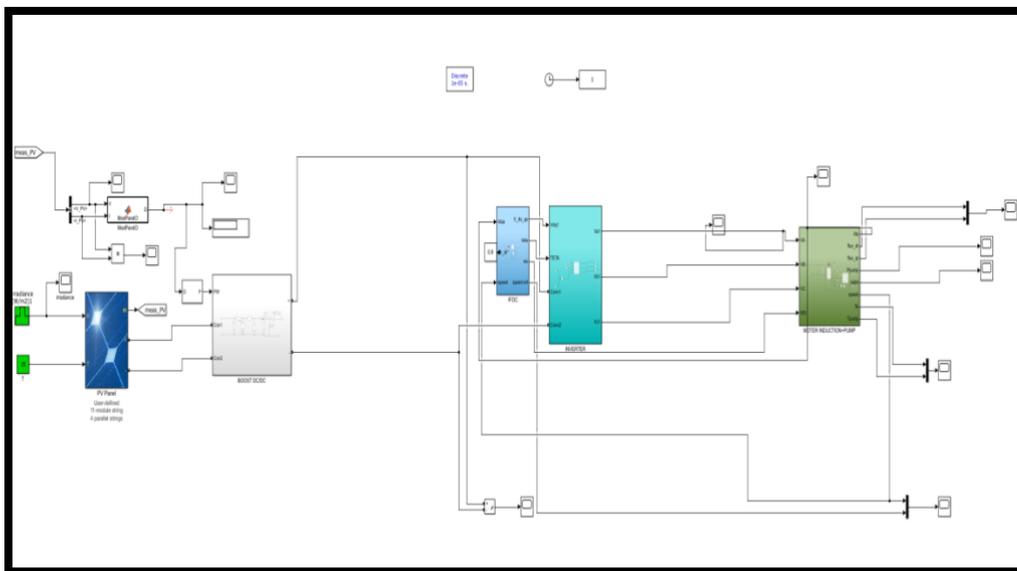


Fig.III.1 Simulation et schéma du system global

III.3.1 Résultats de la Simulation du module photovoltaïque

La figure III.2 représente le schéma interne d'un module photovoltaïque.

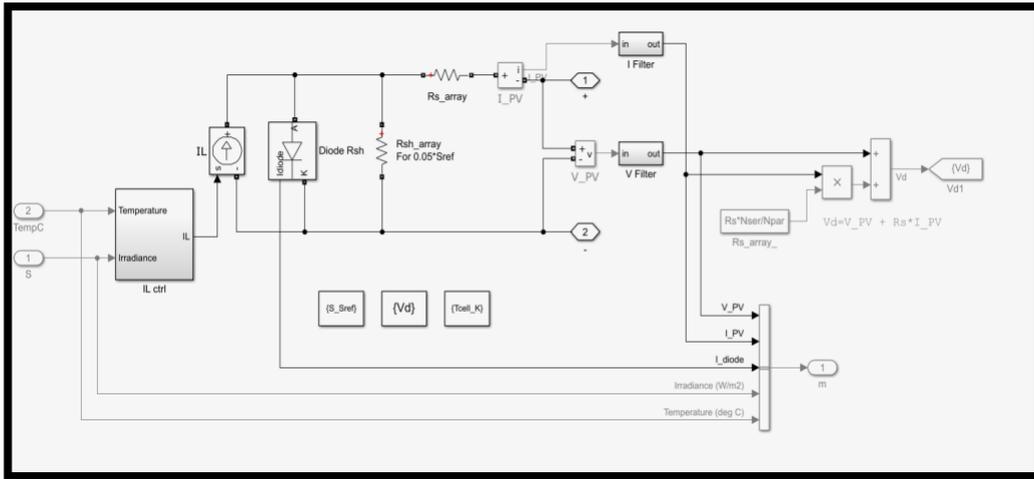


Fig.III.2 : Schéma bloc d'un Module photovoltaïque

a) **Influence de température :** La figure (III.3) et (III.4) représente respectivement l'influence de la température sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du générateur PV à éclairement constant 1000W/m^2 . Le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension. En conséquence la puissance maximale diminue avec la température.

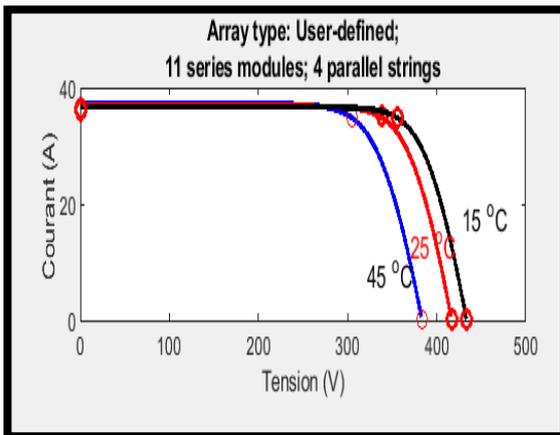


Fig.III.3 Influence de Température (courant fonction de la tension)

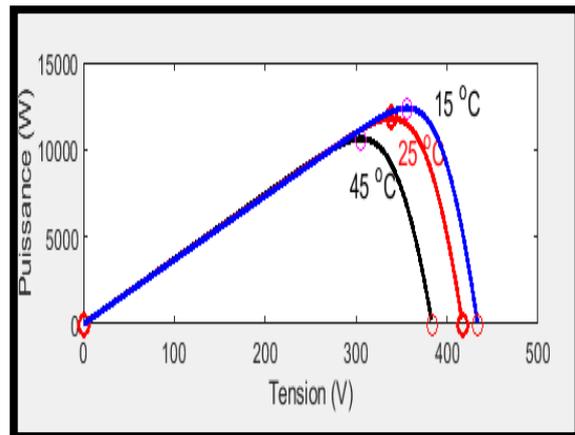


Fig.III.4 Influence de Température (puissance en fonction de la tension)

b- **Influence de l'irradiation :** La figure (III.5) et (III.6) représente l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du générateur PV. A une température constante 25°C , on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. En ce qui concerne la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque, lorsque l'éclairement est plus élevé, le GPV génère plus de puissance. L'irradiation standard, internationalement acceptée pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïque est une intensité rayonnante de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

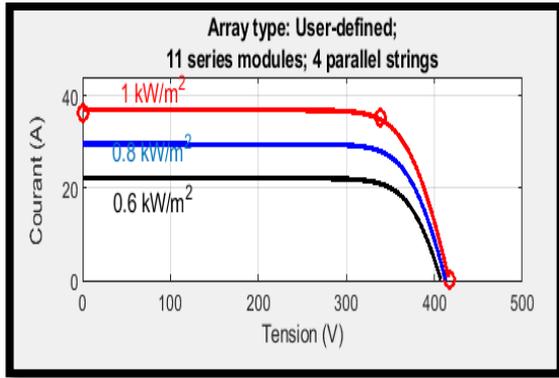


Fig.III.5 Influence de l'éclairement « irradiation » (courant) fonction de la tension

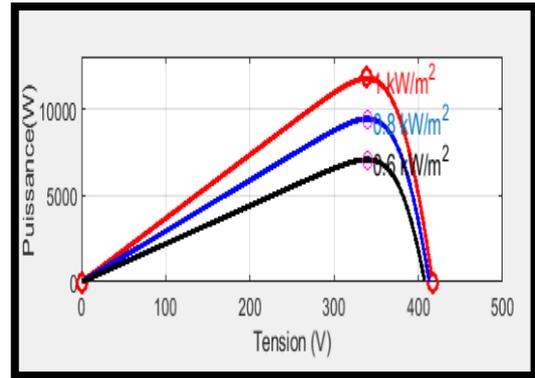


Fig.III.6 Influence de l'éclairement « irradiation » (puissance) en fonction de la tension

Tableau III.1 Paramètres du module PV.		
Paramètres PV	Symbole	Valeurs
Puissance maximum	P_{mp}	270 116 W
Tension en circuit ouvert	cov	37,9 V
Tension à MPPT	vmp	30,8 V
Courant de court-circuit Cellules par module	Icc Ncell	9.07 A 8,7 A

III.3.2 Résultats de la Simulation de MPPT

Le MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un algorithme implémenté dans les Hacheur Boost) pour ajuster de manière continue l'impédance observée sur le panneau solaire afin que celui-ci continue de fonctionner à son point de puissance de crête (ou presque) dans des conditions variables, comme par exemple avec des changements d'irradiante solaire, de température et de charge. Le programme implanté est le suivant :

```

% f=10000 hz (G)
function D = ModPandO(V, I)

Dinit = 0.42; %Initial value for D output
Dmax = 0.8; %Maximum value for D
Dmin = 0.08; %Minimum value for D
deltaD = 0.000005; %Increment value used to increase/decrease the duty cycle D
persistent Vold Pold Dold M;
dataType = 'double';
if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
    M=1;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;
M=abs(dP);
if M < 0.005
    D=Dold;
    
```

```

else
  if dP < 0
    if dV < 0
      D = Dold - deltaD*M;
    else
      D = Dold + deltaD*M;
    end
  else
    if dV < 0
      D = Dold + deltaD*M;
    else
      D = Dold - deltaD*M;
    end
  if D >= Dmax | D <= Dmin
    D=Dold;
  end
  Dold=D;
  Vold=V;
  Pold=P;

```

La figure III.7 représente la simulation d'un hacheur boost sous Matlab Simulink :

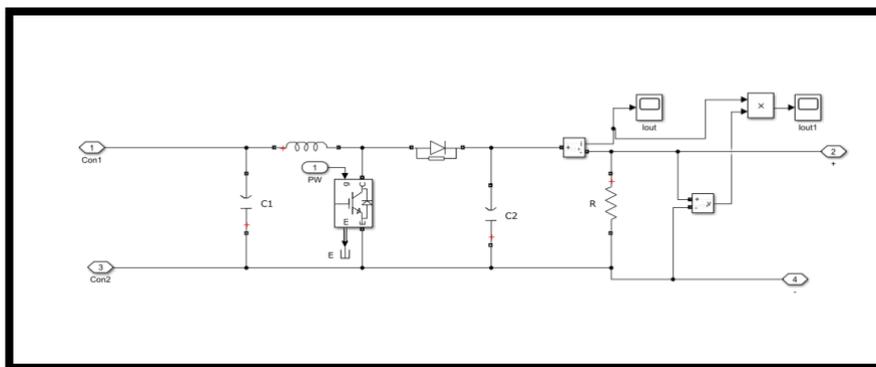


Fig.III.7 Schéma bloc d'un hacheur boost

La simulation est assurée sous les conditions climatiques : Eclairage variable et température constante $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$. D'après les résultats nous remarquons que le système MPPT suit la variation de irradiation et assure quel que soit la variation de l'irradiation la puissance Max .

Les figures (III.8) ; (III.9) ; (III.10) ; (III.11) et(III.12) représentent respectivement les résultats de simulation du Hacheur Boost avec une température fixe de 25°C et irradiation déférente .Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur est supérieure à celle d'entrée et qu'elle varie avec le rapport cyclique. Donc l'Hacheur Boost effectue correctement sa fonction. La figure (III.13) représente l'analyse temporelle de la puissance utile.L'évolution de la puissance utile est proportionnelle à la vitesse, elle augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale

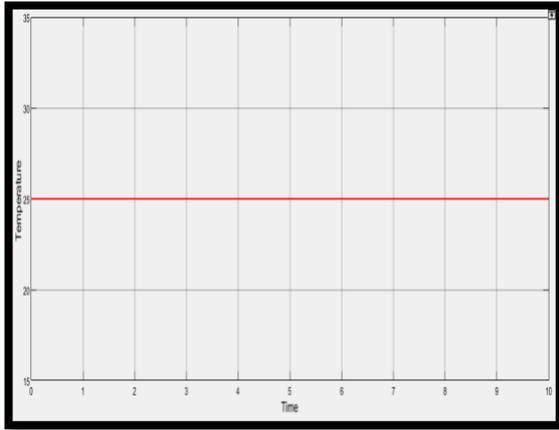


Fig.III.8 Température fixe 25 en fonction du temps

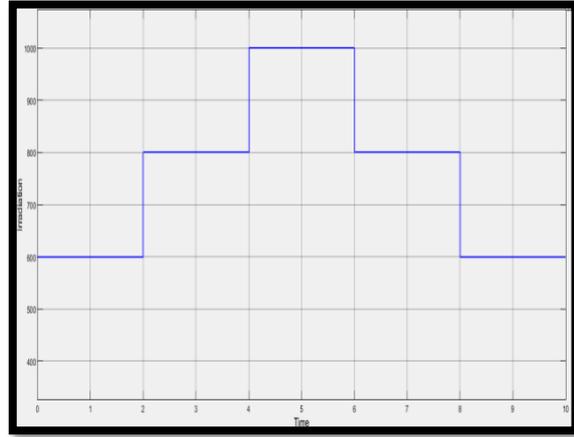


Fig.III.9 Irradiation variable en fonction du temps

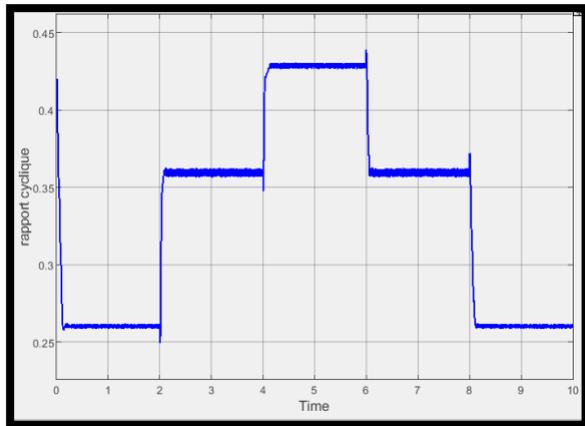


Fig.III.10 Le rapport cyclique D du hacheur boost en fonction du temps

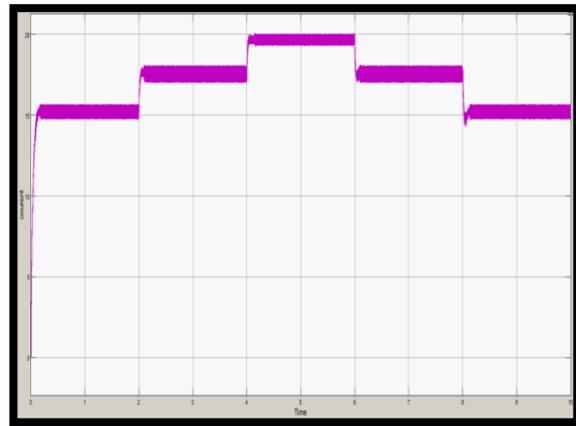


Fig.III.11 Le courant I à la sortie de le hacheur boost en fonction du temps

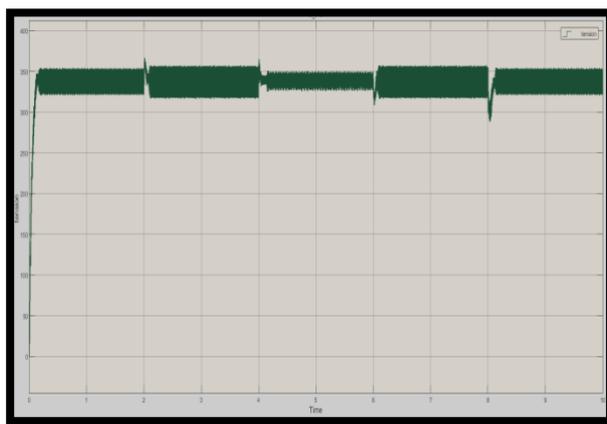


Fig.III.12 La Tension à la sortie de l'hacheur boost en fonction du temps

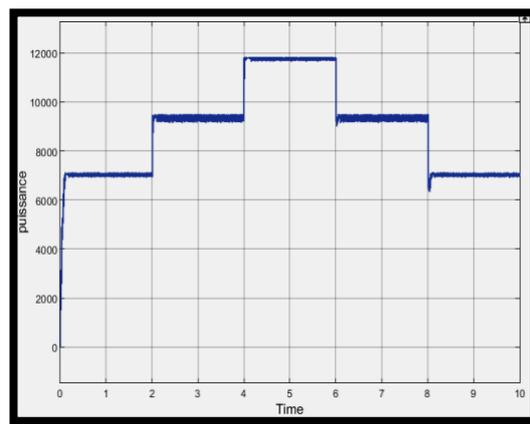


Fig.III.13 La Puissance de l'hacheur boost en fonction du temps

III.3.3 Résultats de la Simulation de système moto-pompe

III.3. 3.1 Résultats de la Simulation du Moteur asynchrone à vide

Les figures (III.15) ; (III.16) ; (III.17) ; (III.18) représentent respectivement les paramètres du moteur asynchrone à vide On remarque qu'il y a un régime transitoire où les courants statoriques de démarrage sont relativement plus grands que les courants statorique en régime normal ce qui est tout à fait normal . La vitesse de rotation du rotor est aux environs de la vitesse nominale $w_r = 149.1$ rd/s qui suit au mieux la vitesse de référence souhaitée. et le couple électrique augmentent pendant le démarrage, ensuite ils diminuent et se stabilise .

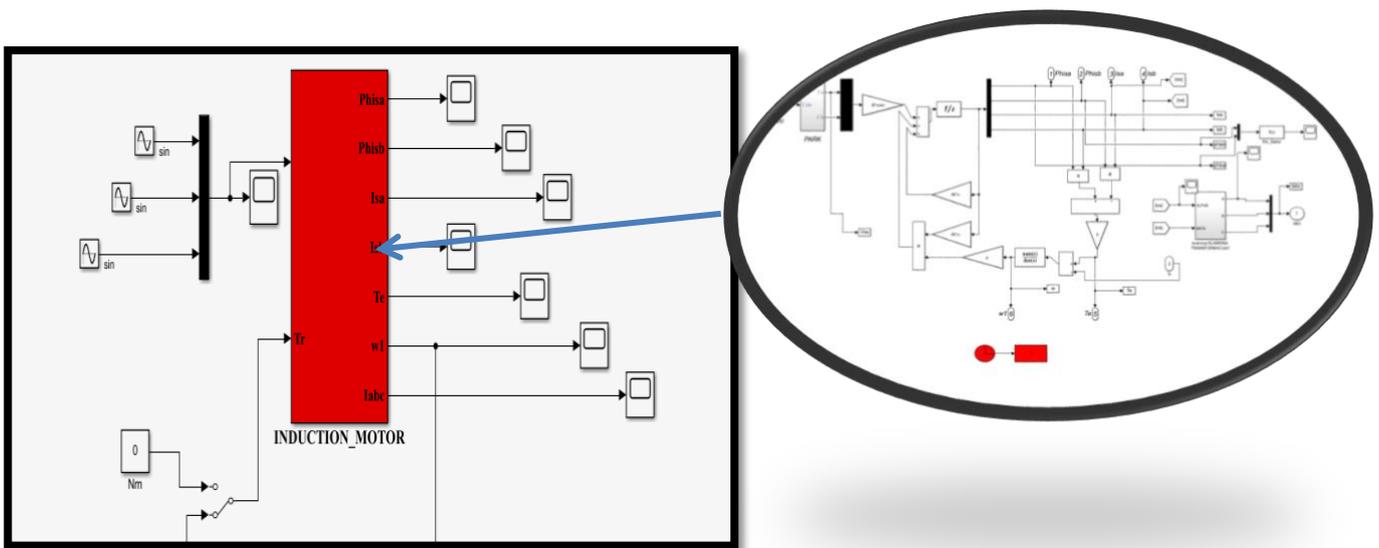


Fig.III.14 Schéma bloc d'un moteur asynchrone

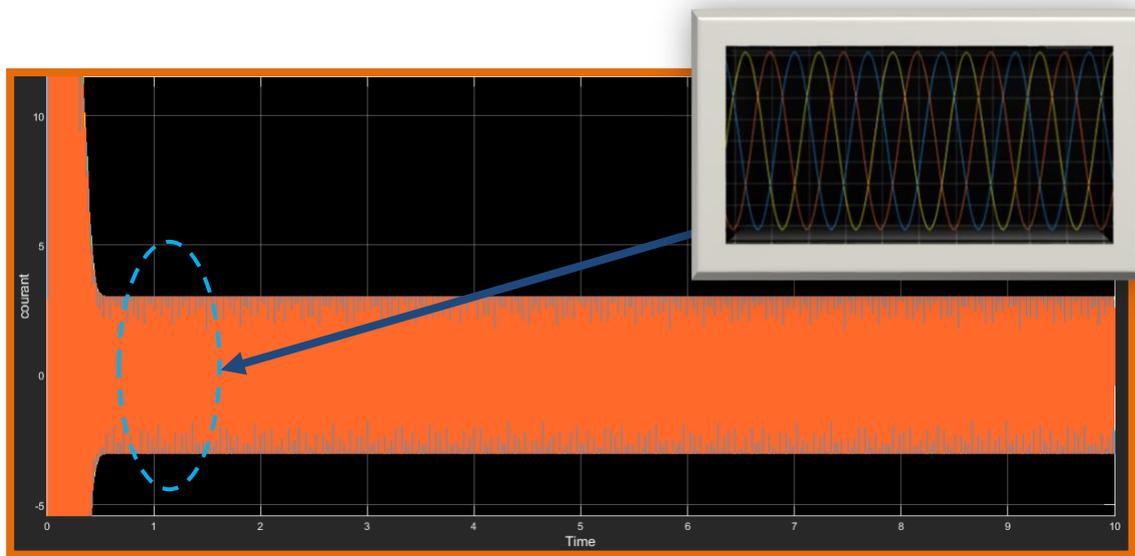


Fig.III.15 Courant I_a I_b I_c à vide en fonction du temps

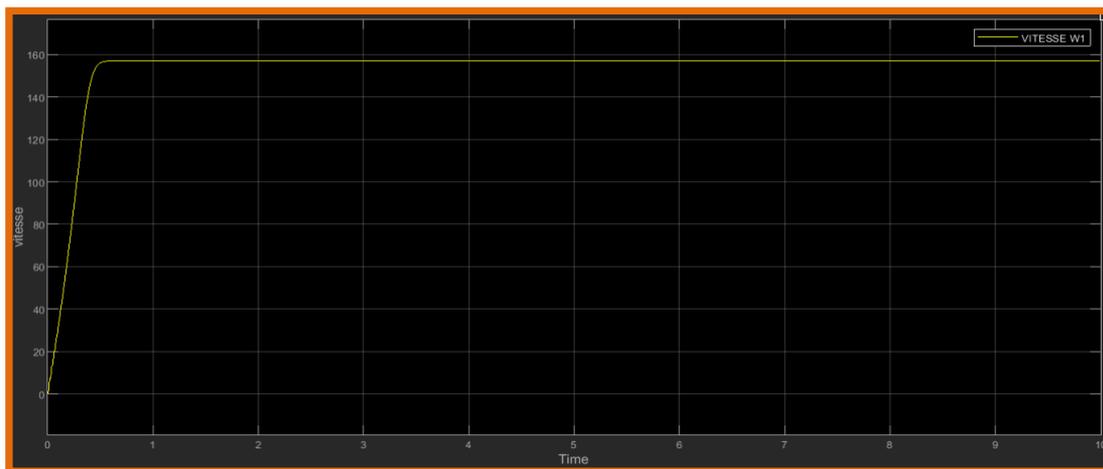


Fig.III.16 évaluation de Vitesse de rotation w_1 de moteur a vide en fonction de temps

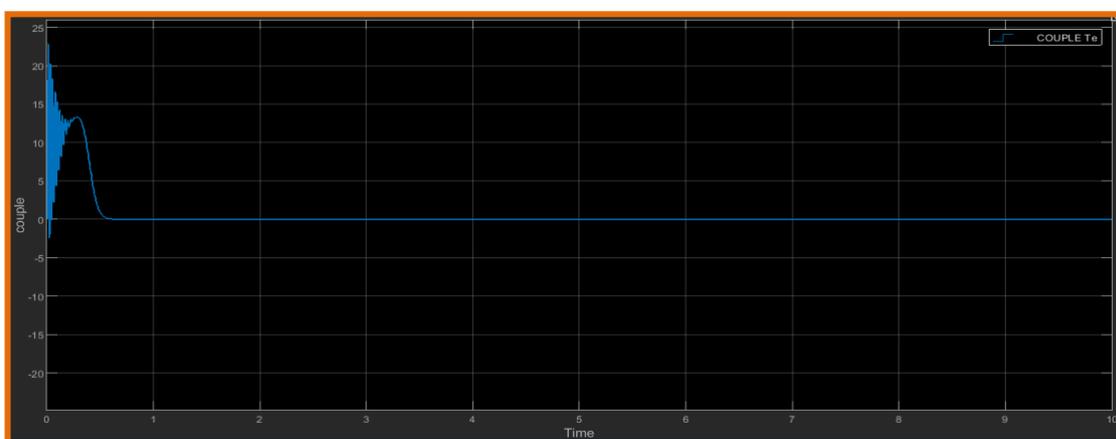


Fig.III.17 évaluation de Couple utile T_e de moteur a vide en fonction de temps

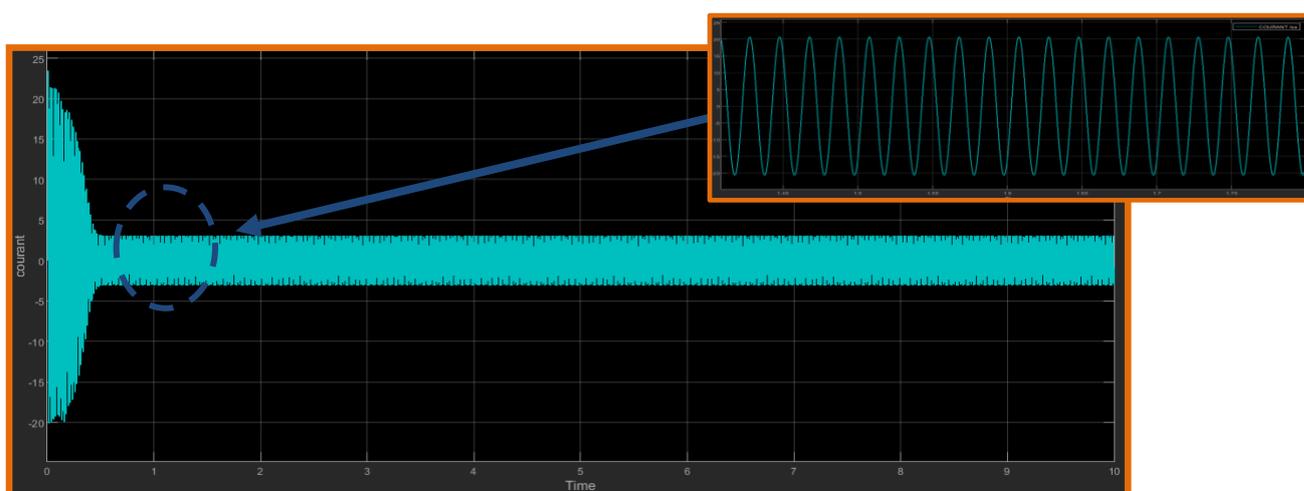


Fig.III.18 le courant I_{sa} à vide en fonction du temps

III.3.3.2 Résultats de la Simulation Groupe Moto-Pompe (Moteur en charge) sans boucle de vitesse

Les figures (III.21) ; (III.22) et(III.23) illustrent les paramètres de moto-pompe. La vitesse de rotation augmente progressivement après elle se stabilise (à vide) mais quand en charge à (t=2s=4s=6s=8s) la vitesse diminue avec une petite variation . Le courant d'inducteur et le couple électrique augmentent pendant le démarrage, ensuite ils diminuent et stabilisent(à vide) et quand en charge (moto-pompe) le courant et le couple augment.

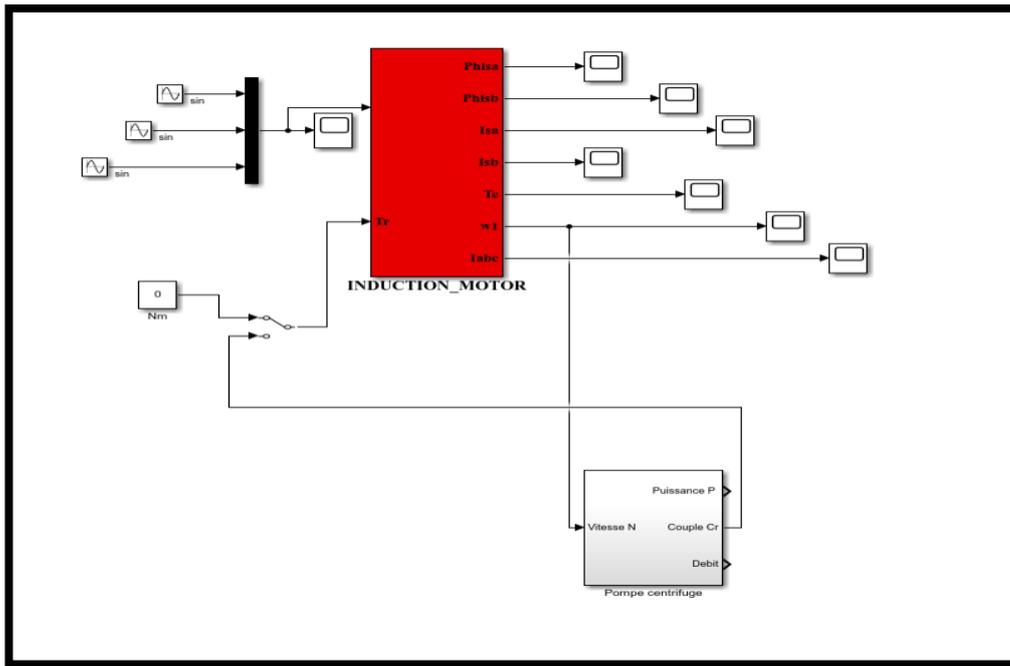


Fig.III.19 schéma bloc groupe moto pompe

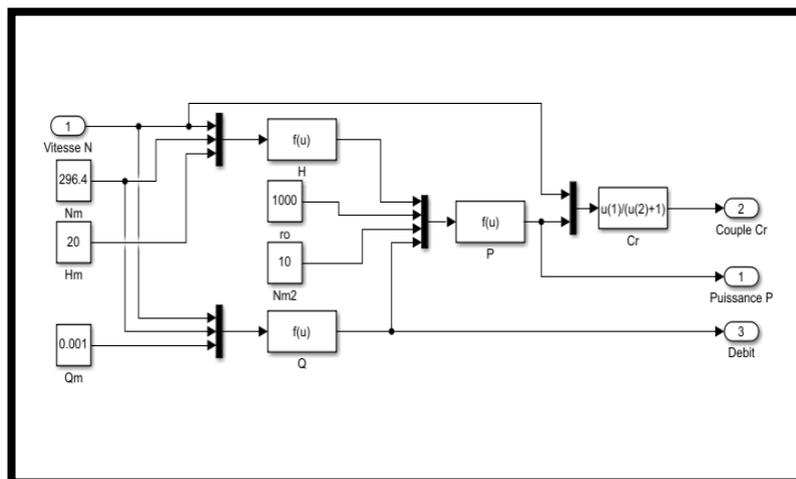


Fig.III.20 Schéma bloc de la pompe centrifuge

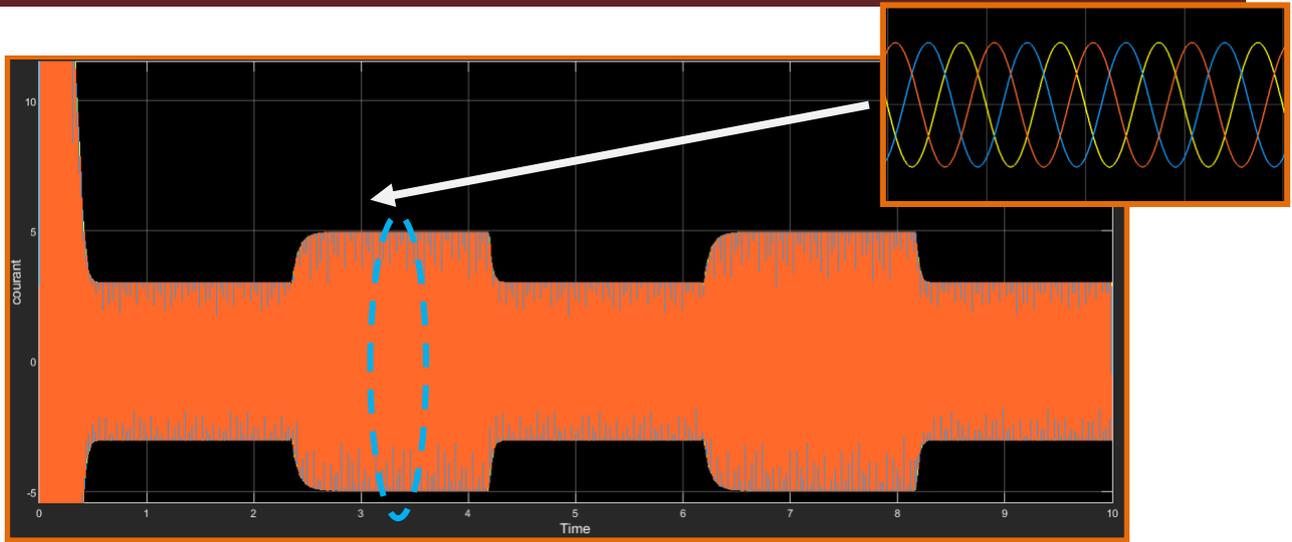


Fig.III.21 Courants I_a I_b I_c à vide/charge (groupe moto pompe) en fonction du temps

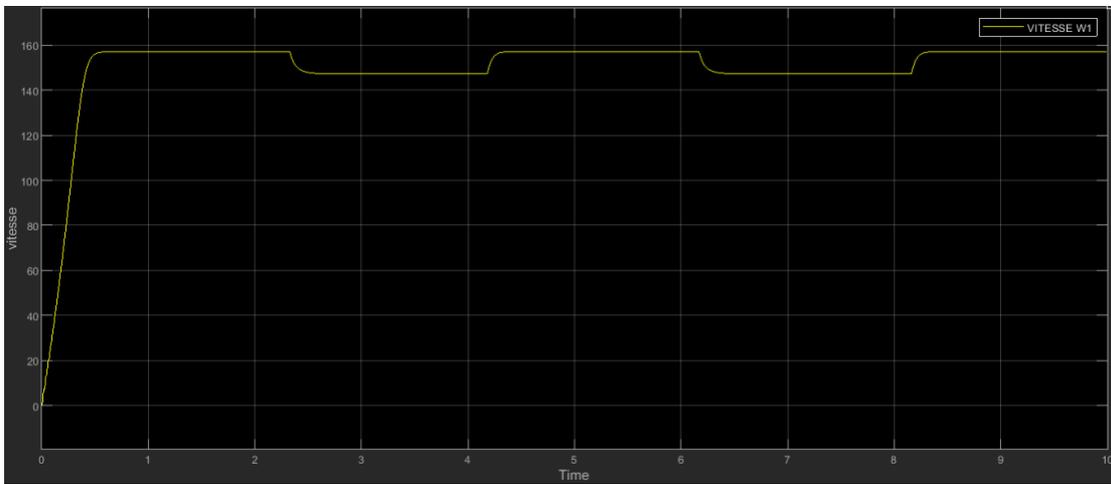


Fig.III.22 évaluation de Vitesse à vide/charge (groupe moto pompe) en fonction de temps sans boucle de vitesse

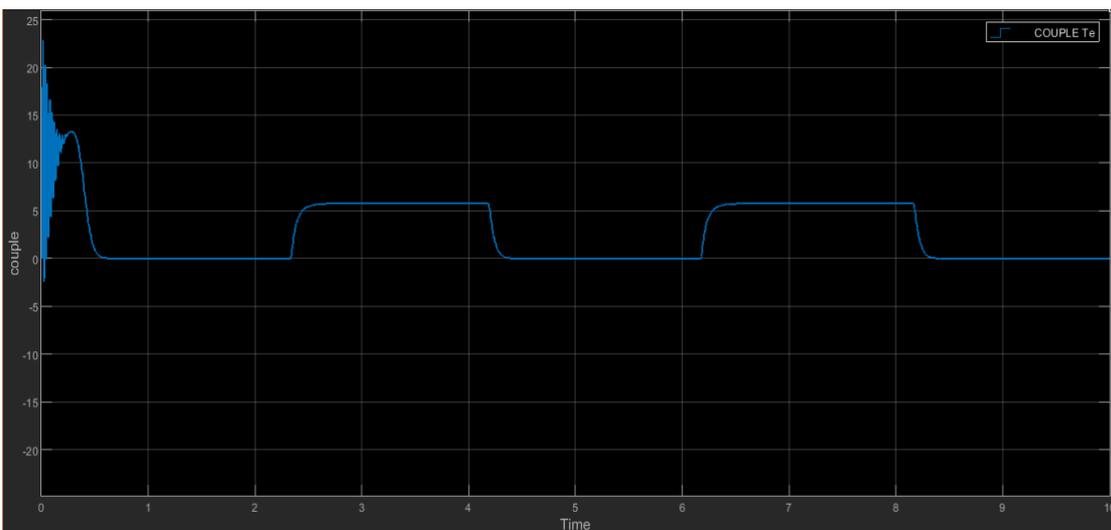


Fig.III.23 Couple C_e à vide/charge (groupe moto pompe) en fonction du temps

III.3.3.3 Résultats de la Simulation du Groupe Moto-Pompe avec boucle de régulation IFOC

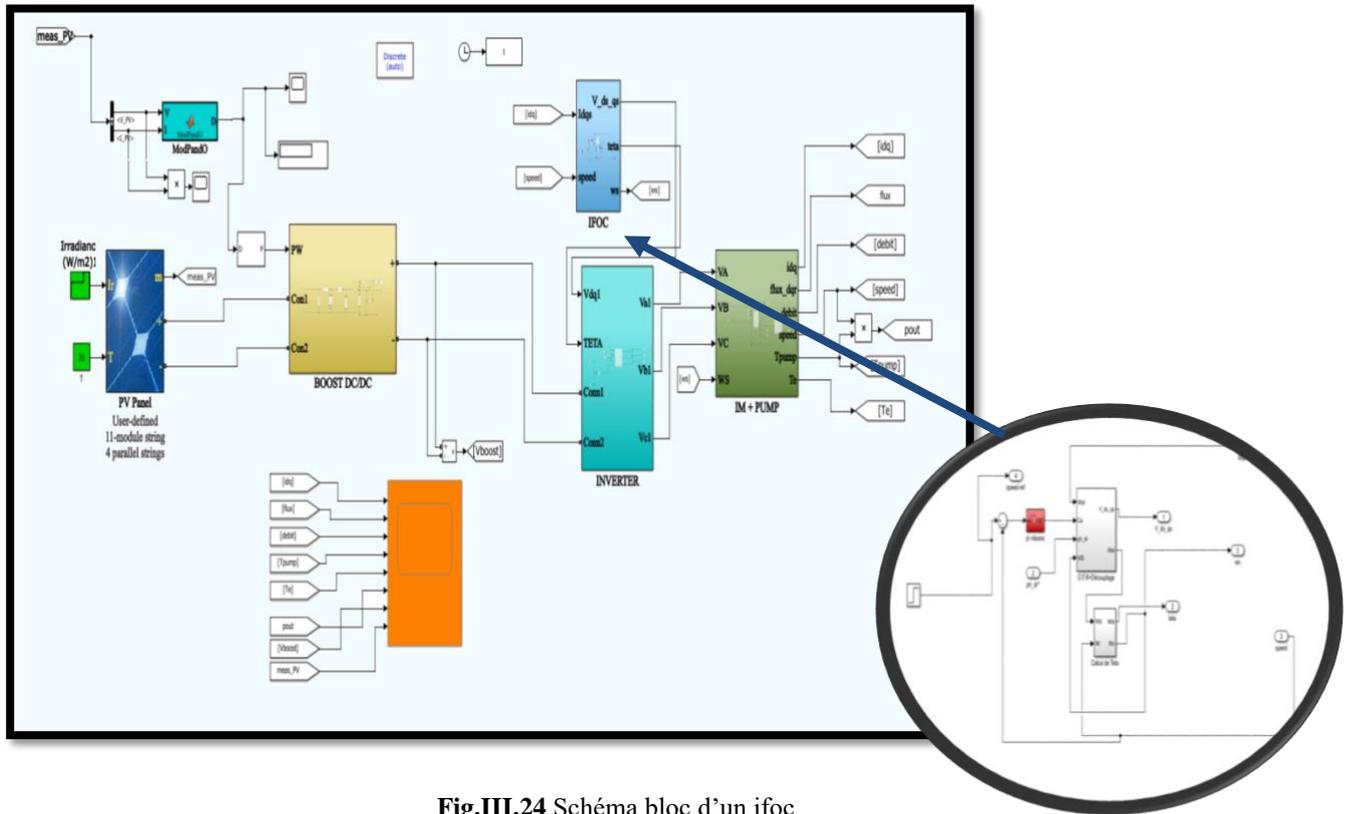


Fig.III.24 Schéma bloc d'un ifoc

a- Résultats de la Simulation du Groupe Moto-Pompe avec boucle de régulation IFOC à vide avec irradiation variable

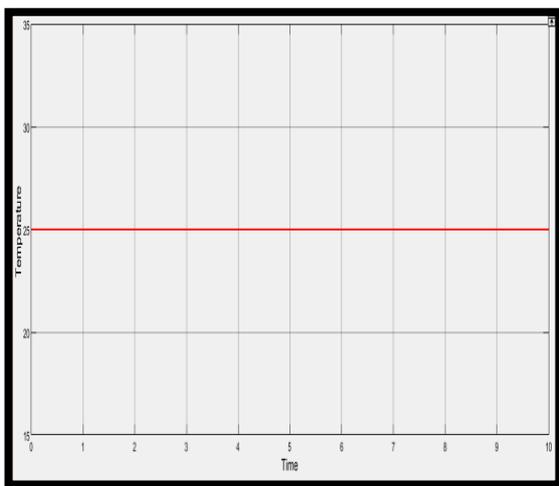


Fig.III.25 Température fixe 25 en fonction du temps

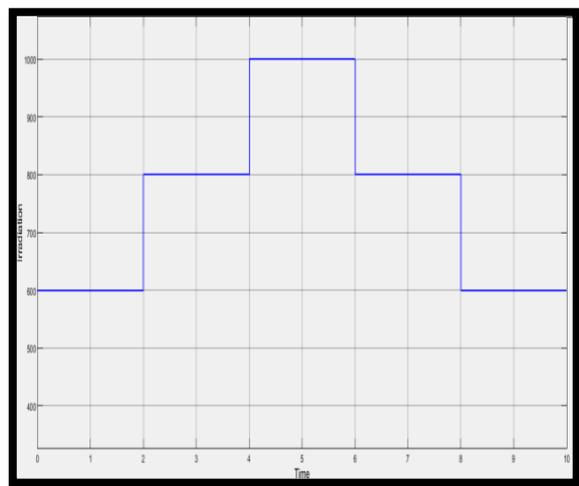


Fig.III.26 Irradiation variable en fonction du temps

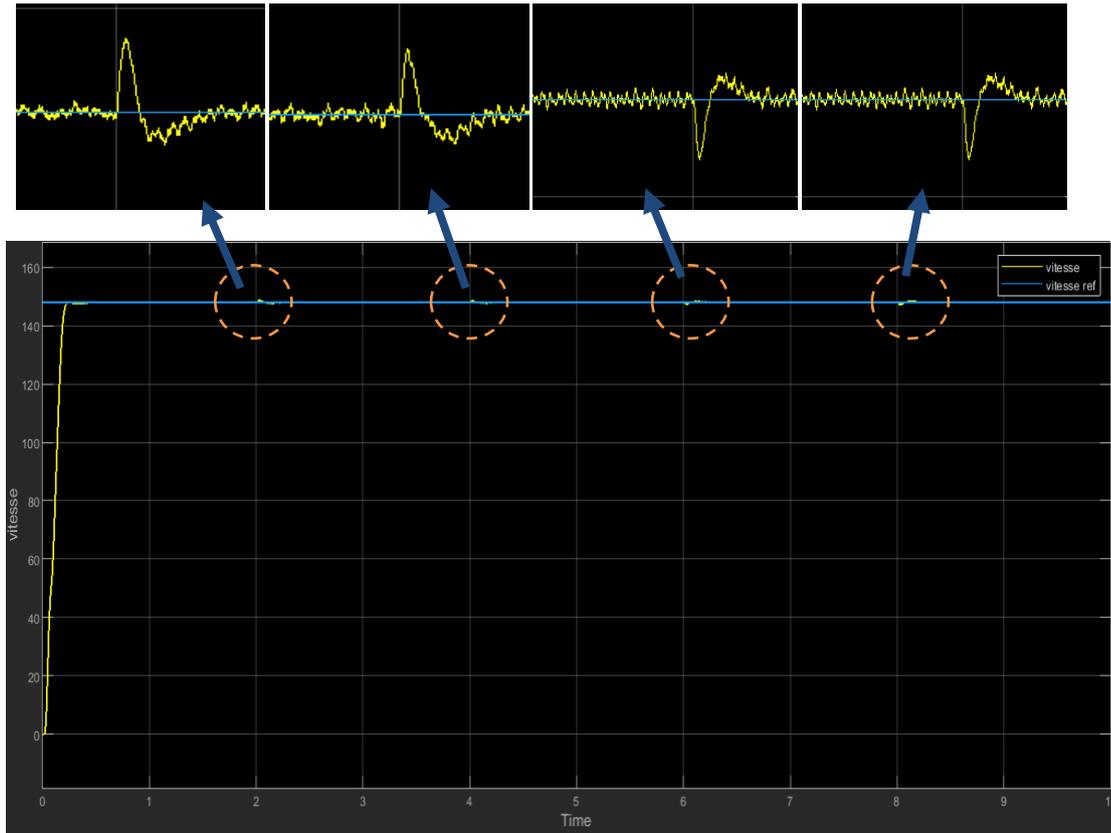


Fig.III.27 La vitesse de rotation et la vitesse de référence d’une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps

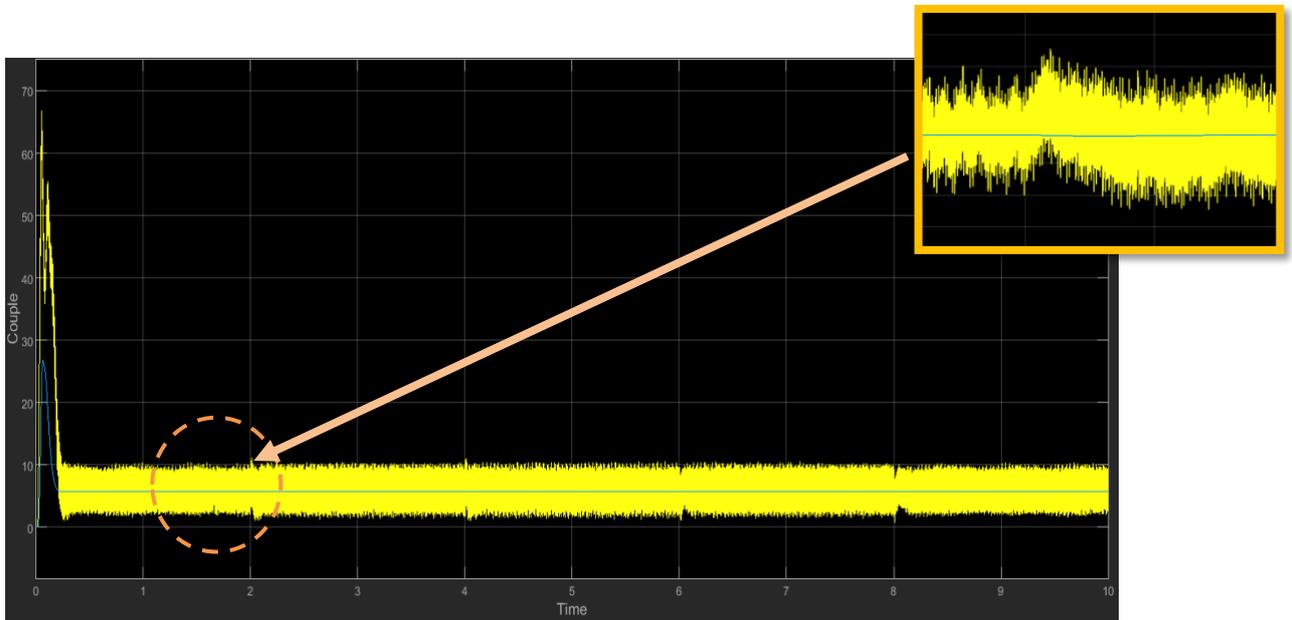


Fig.III.28 le Couple utile T_e et T_{pompe} d’une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps

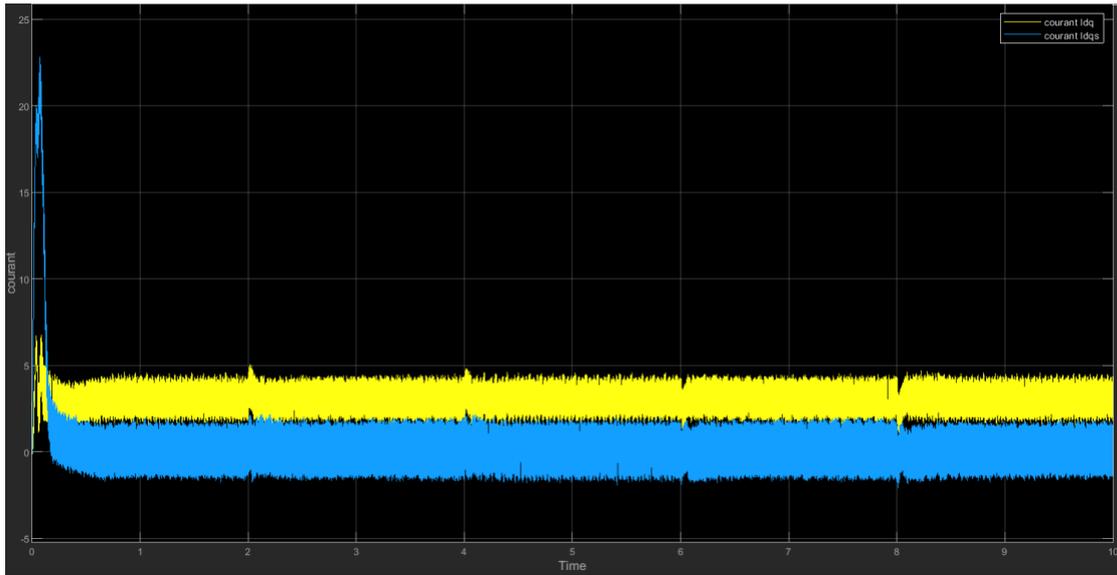


Fig.III.29 le courant d entre et de sortie I_{dq} et I_{dqs} d’une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps

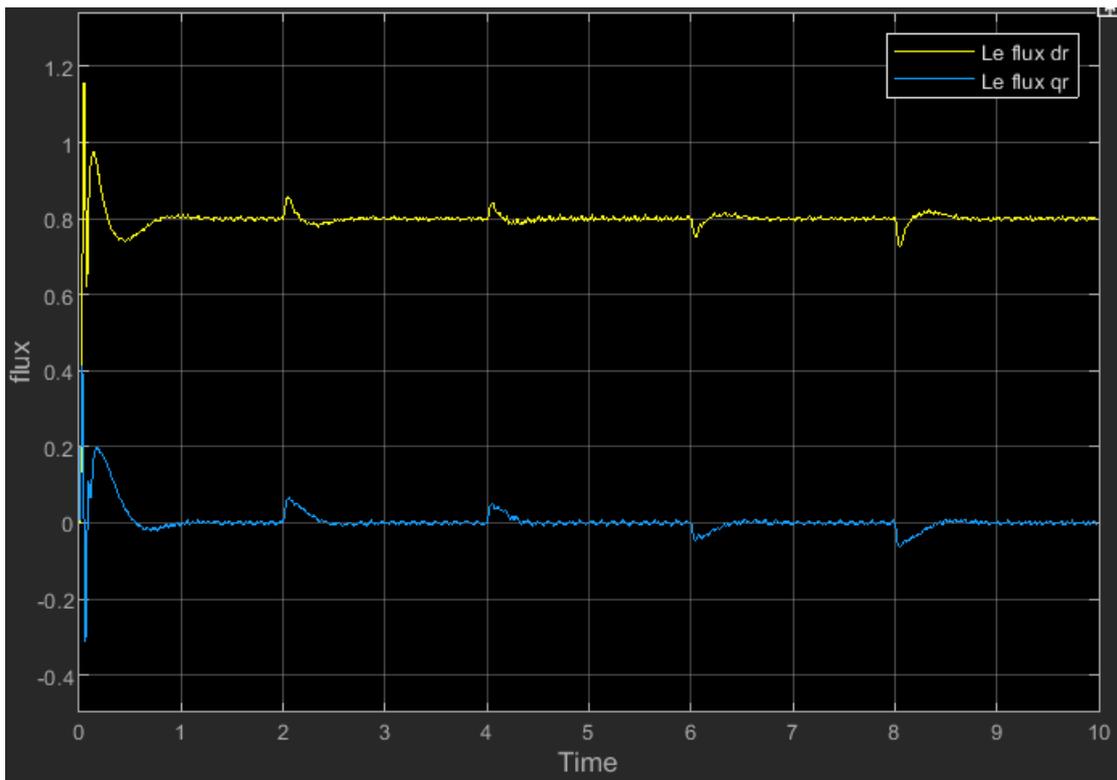


Fig. III.30 Le flux Q_r et D_r d’une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps)

b- Résultats de la Simulation du Groupe Moto-Pompe avec boucle de régulation IFOC en charge avec irradiation variable

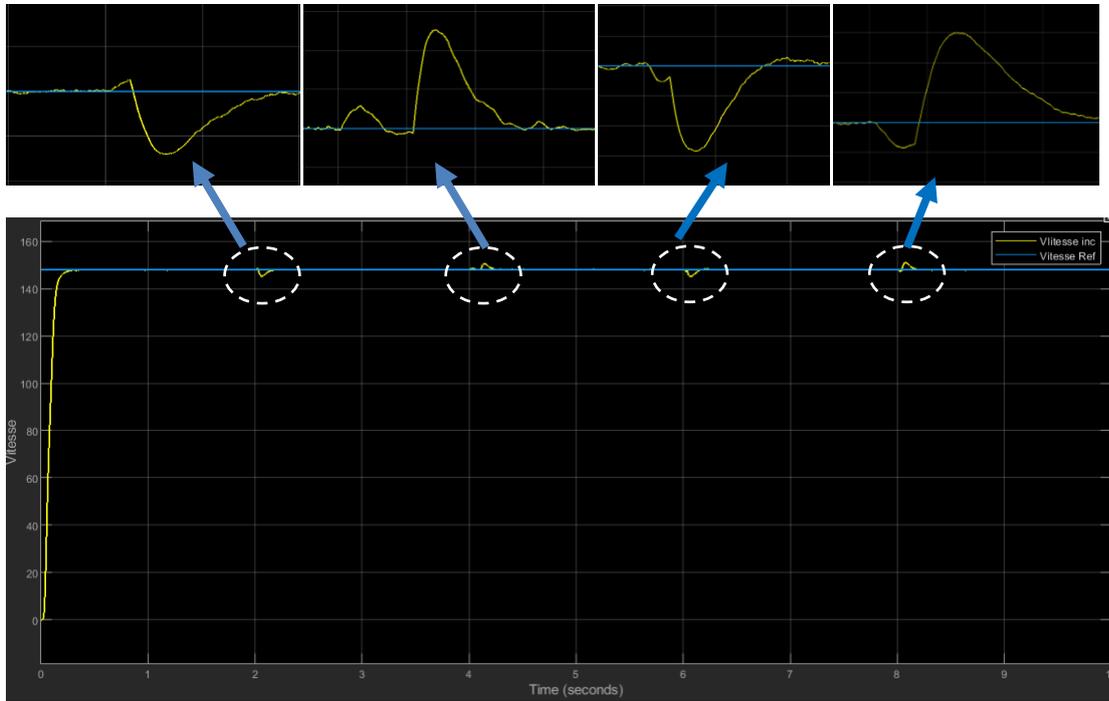


Fig.III.31 La vitesse et la vitesse ref d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps

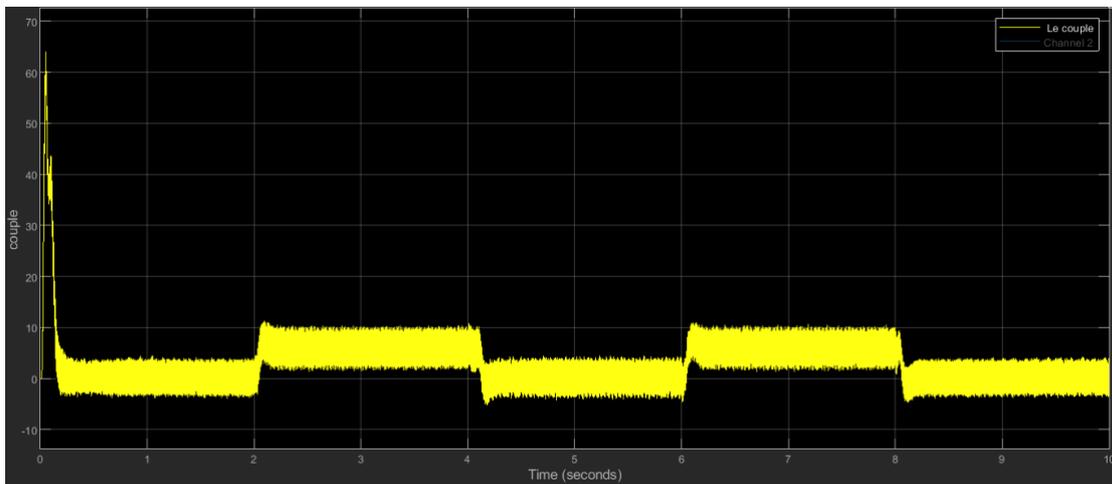


Fig.III.32 Le couple utile C_e d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps

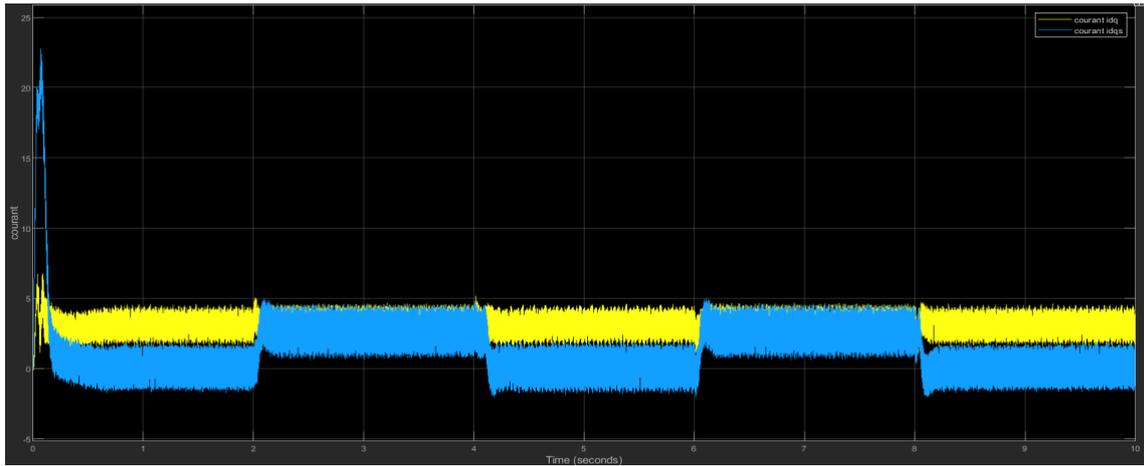


Fig.III.33 Le courant d entre et de sortie d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps

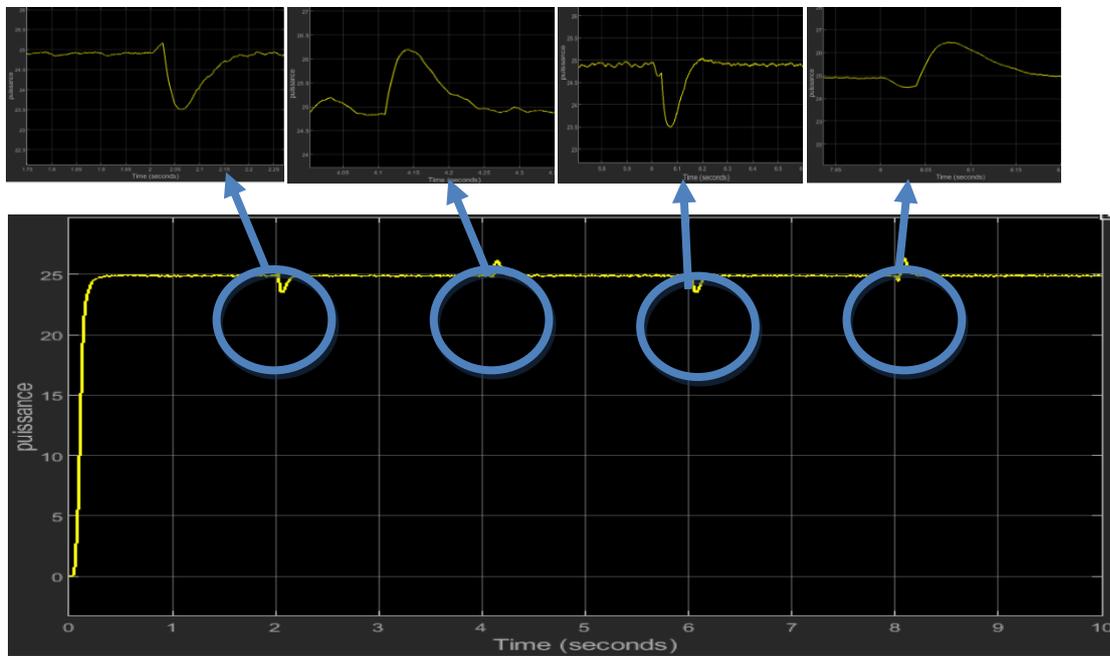


Fig.III.34 la Puissance utile T_e d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps

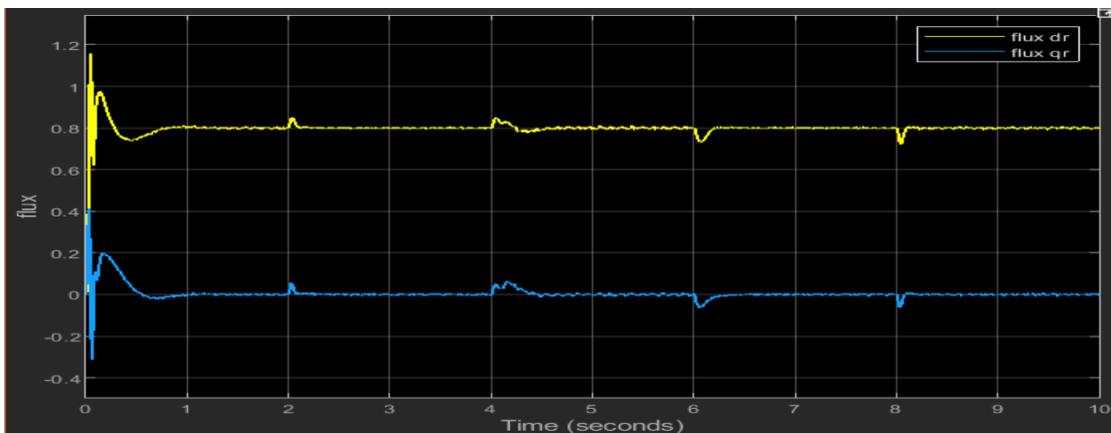


Fig.III.35 Le flux d'une commande vectorielle indirecte (ifoc) en fonction du temps

Afin de tester les résultats obtenus par simulation de la commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone. Nous avons simulé le système dans des conditions de fonctionnement variable à savoir la variation de l'alimentation, de la vitesse et de la charge. D'après les résultats de simulation et les résultats montrés sur les figures ci-dessus, on peut constater que :

- La vitesse réelle suit parfaitement la vitesse de la commande.
- Les résultats de simulation des courants montrent une bonne similitude et aucun dépassement n'est enregistré dans les deux cas (avec variation de l'irradiation à vide et en charge).
 - Le principe du flux rotorique orienté est assuré, du fait que sa composante sur l'axe q est égale à zéro et sa composante sur l'axe d est constante (la commande est découplée) .
 - Conformément à la théorie, la composante du courant statorique sur l'axe q est proportionnelle à la variation du couple de charge, par contre sa composante sur l'axe d reste constante.

Dans la figure (Fig.III.31), on voit clairement un pic important dans la courbe de la vitesse suite à l'application d'un échelon de couple de charge égale à 8 N.m. Ce qui rend cette méthode peu robuste.

III.4 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présentés la méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui nous permis de dimensionner une installation de pompage photovoltaïque pour satisfaire les besoins en eau d'une consommation bien déterminée et dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons élaboré sous Matlab 2018 la simulation des différents blocs du pompage photovoltaïque. Dans ce travail, les performances de pompage d'eau photovoltaïque ont été améliorées avec succès en effet sur la base d'études de simulation sous des changements soudains des conditions climatiques, et sous la variation de charge la performance du système on utilisant l'IFOC cette commande a été analysé qui présentaient une command en boucle fermé nous avons remarqué que le système présente moins d'oscillations et se comportaient mieux lors de changements brusques d'irradiation ou de charge .

CONCLUTION
GENERALE

Conclusion générale

Parmi les avantages importants de la conversion photovoltaïque, on peut citer la décentralisation de la production d'énergie pour les petites communautés très dispersées comme le prouvent déjà les pompes solaires dont le fonctionnement s'est avéré très acceptable et l'autonomie du système photovoltaïque, autonomie de lieu mais tout aussi importante est l'autonomie opérationnelle.

Pour éviter des coûts d'installation supplémentaires, la plupart des systèmes de pompage fonction photovoltaïque "au-dessus du soleil" où le moteur asynchrone couplé au générateur et un onduleur sans stockage d'énergie. Cette disposition est bien adaptée aux charges non critiques telles que les pompes, qui ne nécessitent pas un fonctionnement continu tout au long le jour.

Notre travail c'est porté sur la modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque. Le système proposé se compose : d'un générateur photovoltaïque commandé par un algorithme MPPT pour obtenir le point de puissance maximale, un convertisseur statique et un groupe motopompe. Le convertisseur est le hacheur boost qui sert à convertir une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur, pour alimenter le groupe motopompe.

Dans le premier chapitre nous avons présenté l'état de l'art des systèmes de pompage, et un rappel sur les différentes combinaisons des systèmes photovoltaïques, ainsi que leurs principaux constituants.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation de tous les éléments de notre chaîne de pompage photovoltaïque, chaque modélisation est basée sur des équations provenant de la littérature scientifique, ainsi que l'optimisation du système proposé nous avons utilisé la méthode MPPT « Perturbations et Observation ». Les résultats, présentés dans le présent mémoire, montrent que l'utilisation de cette commande permet d'améliorer le rendement de l'installation de pompage photovoltaïque.

A la fin de ce chapitre on a présenté la méthode de commande vectorielle indirecte (IFOC) que nous avons choisi à cause de la simplicité de sa mise en œuvre et le but de son utilisation est d'obtenir un contrôle dynamique performant du couple, et de réaliser un

Conclusion générale

découplage entre le couple moteur et le flux la commande vectorielle indirecte par orientation de flux rotorique (CVIOFR).

Le troisième chapitre a été partagé en deux parties, dans la première partie nous avons présenté toutes les étapes à suivre pour le bon dimensionnement du système de pompage photovoltaïque étudié, et dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus de la simulation de notre système étudié sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

D'après les résultats obtenue et l'utilisation de l'algorithme MPPT et la commande IFOC nous pouvons conclure que les performances de pompage d'eau photovoltaïque ont été améliorées avec succès et le système présente une autonomie en énergie et une robustesse remarquable face aux changements brusque de la charge ou bien aux changements soudains des conditions climatiques.

BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] : A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, «Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque» ; Revue des Énergies Renouvelables. Vol.8, pp (19 – 26), 2005.
- [2] : F.Bendioudi et F.Lakhdari, « etude et simulation d'un systeme de pompage photovoltaïque avec batteries » ; Memoire De Master, Universite Abderrahmane Mira, Bejaïa, 2014.
- [3] : A. Belhocine et S.Zaidi, « etude et dimensionnement d'un systeme de pompage photovoltaïque autonome » ; Memoire De Master., Universite Debejaïa, 2012.
- [4] : A. Ferrai, « Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources Énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village» ; Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [5] : Akassewa Tchapo SINGO, Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [6] : J. ROYER, T. DJIAKO, E. SCHILLER et B. SADASY « Le pompage photovoltaïque» manuel de cours à l' intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF, université d'Ottawa, EIER, CREPA.ISBN 2-89481-006-7, 1998.
- [7] : I.Bchsaiset A.Sebbagh A, « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation d'un hectare de palmier dattier en utilisant les méthodes métaheuristiques. » ; Mémoire de master, Université m'hamed Bougara-Boumerdes, 2017.
- [8] : A. Labouret, M. Viloz, « Energie solaire photovoltaïque », Le manuel du professionnel, Edition DUNOD, Paris - France, Août 2003.
- [9] : M.Benaïssa, « contribution a l'étude du transfert d'énergie dans les systemes photovoltaïques » ; These Doctorat, Universite Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2018.
- [10] : S.Zahar et C.Makhlouf, «etude et simulation d'un generateur photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleur gestion energetique » ; Memoire De Master,Universite Mohamed Boudiaf – Msila, 2017.
- [11] : M. T. Boukadoum, A. Hamidat et N. Ourabia, «le pompage photovoltaïque» ; Revue Des Energies Renouvelables. : Zones Arides Pp (69-73) ,2002.
- [12] : L.Debbou et D.Maghribi, «commande d'un système hybride (photovoltaïque-eolienne) De production d'énergie» ; Mémoire D'ingenieur D'état. Universite de bejaïa, 2008.
- [13] : Jimmy Royer, thomas Djiako, Erico SCHILLER, Bokar Sada : «le pompage photovoltaïque».manuel de cour à l'intension des ingénieurs et des techniciens.

- [14] : Belguelil Nadjat, « etude comparative du point de vue fonctionnement et maintenance des installation de pompage », memoire de master, Universite Mohamed Boudiaf-M'sila, 2015.
- [15] :Dj. Bellalia : «contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application au système photovoltaïque» : Mémoire de magistère université de Batna.
- [16] : Dr. Farid Fodil Pacha, Rapport technique, Stagiaire : Yahya Mawlawi Superviseur : Prof. Johan Gyselinck, Stage installation et émulation des panneaux photovoltaïques 30/Mars/2009.
- [17] : Ionel VECHIU : « Modélisation et Analyse de L'Intégration des énergies renouvelables Dans les Réseaux Autonomes ». Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Havre (Basque de san Sebastian), 2005.
- [18] : O.AMRANI, D.REKIOUA : « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques ». Université de Bejaïa.
- [19] : M.Abdelghani Bessem « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque » Université BADJI MOKHTAR-ANNABA ,2018.
- [20] : K. EL-Melouani, « dimensionnement d'un hacheur survolteur » ; Application noté de polytech Clermont-Ferrand, France, 2010.
- [21] : F. Labrique, G. Segulier, R. Baussiere« Les convertisseur de l'électronique de puissance, la conversion continu – alternatif », Tec. Doc. Paris 1995.
- [22]. : M.Abdelghani Bessem « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque » Université BADJI MOKHTAR-ANNABA ,2018.
- [23] : K. EL-Melouani, « dimensionnement d'un hacheur survolteur » ; Application noté de polytech Clermont-Ferrand, France, 2010.
- [24] : F. Labrique, G. Segulier, R. Baussiere« Les convertisseur de l'électronique de puissance, la conversion continu – alternatif », Tec. Doc. Paris 1995.
- [25] : Mohamed Lakhdar Louazene, mémoire de magister, électrotechnique, option maîtrise d'énergie, Université El hadj lakhdar – batna, 2008.
- [26] : A. Bouden : « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque». Mémoire de Magister en Electronique, Option : Instrumentation- Composants Electroniques et Systèmes 2008.
- [27] : A. Saadi :« Etude Comparative Entre Les Techniques D'optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque ». Mémoire De Magister en Electrotechnique, Université Mohammed Khider, Biskra 2001.

- [28] : SLAMA Fateh, Mémoire de Magister, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » Université Ferhat Abbas –SETIF, 2011.
- [29] : Site web (Internet), www.solaris-store.com/content/44-principe-de-fonctionnement-dun-regulateur solaire.
- [30] : A.hadj Arab,M.Benghanemi et A.Gharbi : centre de développement des énergies renouvelables,B.P.62,Bouzareah,Alger.Faculté de génie Electrique U.S.T.H.B.B.P.32. ALAlia, Bab-ezzouar ,Alger.
- [31] :chahraze e, ai t .kahi na : « dimensionnement et installa on d' un système photovoltaïque ,applica on a la F .G. E. I ». Mé mo i re d' ingéni eur d' état en électroni- que université de T.O 2008-2009.
- [32] : D.Kefsi, F.Ouikene : « Commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique université de T.O 2009-2010.
- [33] : A.Hamidat,A.hadj Arab,F.chenlo and M.Abella « performances of the centrifugal and dis placement pumps ».WREC1998,pp1951-1954.

Annexe

1-Choix du Régulateur

La première priorité dans le choix de tout régulateur est de s'assurer que ce dernier puisse garantir une bonne stabilité tout en assurant une précision satisfaisante et acceptable. La structure générale d'un régulateur proportionnel intégral, noté P-I, est composée de la fonction proportionnelle et de la fonction intégrale mises en parallèle comme le montre la figure suivante :

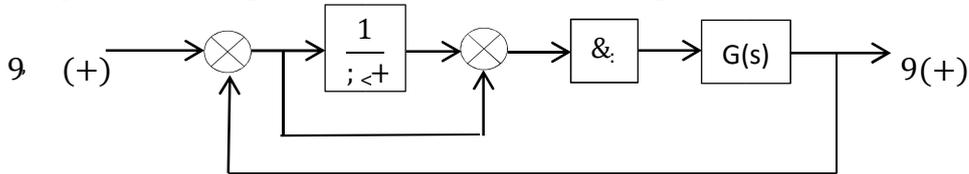


Fig : Schéma de commande utilisant la structure PI

Il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur de consigne. La fonction de transfert d'un régulateur PI est donnée par

$$C(p) = k(p) \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$$

2 Calcul des paramètres du régulateur

Il existe plusieurs méthodes de synthèse du régulateur PI. On présente dans ce qui suit une méthode simple à mettre en œuvre. Elle se base sur un modèle de référence qui doit représenter toutes les performances à imposer à la boucle fermée.

Soit $G(S)$ un système de premier ordre donné par:

$$G(S) = \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{G_0}{1 + T_s S}$$

Soit $H(S)$ la fonction que l'on souhaite imposer à la boucle fermée, de constante de temps T_{bf} répondant aux objectifs fixés.

$$H(S) = \frac{1}{1 + T_{bf} S} = \frac{Y(S)}{Y_{ref}(S)}$$

En utilisant la méthode de synthèse directe pour déterminer les différents paramètres de régulateur on obtient:

$$C(S) = \frac{1}{G(S)} \frac{H(S)}{1 - H(S)}$$

Donc :

$$C(S) = \frac{1 + T_S}{G_0} \frac{\frac{1}{1+T_{bf}S}}{1 - \frac{1}{1+T_{bf}S}} = \frac{1 + T_S}{G_0} \frac{1}{T_{bf}S} = \frac{T}{G_0 T_{bf} S} \left(1 + \frac{1}{T_S}\right)$$

Les paramètres du régulateurs PI sont alors donnés par:

$$\begin{cases} K_p = \frac{T}{G_0 T_{bf}} \\ \tau_i = T \end{cases}$$

Le numérateur de la fonction de transfert du régulateur C(s) est (1+Ts). Celui-ci représente également le dénominateur de la fonction de transfert du système à commander G(s). C'est ce que l'on obtient lorsqu'on utilise la méthode de synthèse par compensation de pôle

Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, de la vitesse ou même de la position. Le contrôle le plus primaire est celui des courants et donc du couple, puisque l'on a vu que le couple pouvait s'écrire directement en fonction des courants.

Une fois que l'on maîtrise la régulation du couple, on peut ajouter une boucle de régulation externe pour contrôler la vitesse. On parle alors de régulation en cascade; les boucles sont imbriquées l'une dans l'autre. Le couple de référence doit être imposé par l'application des courants; c'est le rôle des régulateurs de courants.