



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :.....

Mémoire de fin d'étude

présenté pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande électrique

THEME

**Implémentation d'un système de
contrôle de pompage photovoltaïque
triphase**

Réalisées par : - *BOURICHE Aya*

- *GUIDOUM lamis*

Devant Le Jury :

Président:	Dr. MOKHTARI Khalil
Rapporteur:	Pr. BOUTABBA Tarek
Examineur:	Dr.SAIDI Abdelkader

Promotion 2022/2023

REMERCIEMENT

*Je tiens profondément à remercier tout d'abord DIEU l'unique qui a
Permis à ce travail de voir la lumière.*

*Je tiens à remercier vivement mon père, ma mère, mon partenaire et
l'encadrant Monsieur "Dr. BOUTABBA TAREK", pour ses orientations
éclairées, ses conseils constructifs, son esprit critique et son aide précieuse.*

*Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour
L'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs de notre
Mémoire.*

*Tous les enseignants qui ont contribué à notre formation pendant notre cycle de
formation.*

*Pour la même occasion je tiens à remercier Mlle **Lekmine Anfel** qui a été
toujours présent pour m'aider et m'encourager par sa précieuse aide.
Que tous ce qui a contribué de près ou de loin, dans ma formation ainsi qu'à la
réalisation de ce travail reçoit ici le témoignage de ma grande sympathie.*

DÉDICACE

Je dédie entièrement ce travail à mon père et à ma mère, mes piliers, mes exemples, mes premiers supporteurs et ma plus grande force. Merci pour votre présence, votre soutien, votre aide financière, et surtout votre amour, merci de n'avoir jamais douté de moi.

Tout ce que j'espère, c'est que vous soyez fiers de moi aujourd'hui. Enfin je dédie ce travail à TOUT MA FAMILLE pour son courage, sa sagesse, et sa force et surtout MON PERE pour son affection et son amour sincère pour moi.

*A tous les amis (es) d'études surtout
Ceux d'électrotechnique (commande des systèmes électrique)
Promotion 2023. A vous*

À tous ceux qui m'aiment... je les remercie tous.

AYA BOURICHE

DÉDICACE

Je remercie Dieu le tout puissant qui nous a donné la force

Et la chance de mener ce travail à bien.

A mon père et ma mère

Vous avez toujours été là pour moi, m'entourant de votre

Bienveillance, usant de tous les sacrifices possibles.

J'espère être à la hauteur de votre attente.

Que dieu vous préserve et vous prête une longue vie de joie.

A mes frères: Oussama, Iyad et Akrem

A ma sœur : Raouan

A toute mes amies : Hadjer, Imane, Rania, AYA

*Puisse notre amitié durer encore longtemps. Puisse Dieu vous accorder une
longue vie.*

A tout qui ma partagé ces moments de joie.

GUIDOUM LAMIS

SOMMAIRE

REMERCIEMENT

DEDICACE 1

DEDECASE 2

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I :

GENERALITE SUR LE SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

I.1 Introduction.....	13
I.1.1 Gisement solaire en Algérie	13
I.1.2 Situation énergétique en Algérie.....	14
I.2 Description des différentes technologies de l'énergie solaire	
L'énergie solaire thermique	15
I.2.1 Technologie photovoltaïque	16
I.3 Description d'énergie renouvelable.....	17
I.3.1 Effet photovoltaïque	17
I.3.2 Les différents panneaux solaires	19
I.4 Constitution d'un système de pompage photovoltaïque.....	20
I.5 LA COMMANDE MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING).....	23
I.5.1 Les convertisseurs	28
I.6 Différentes modèles d'une cellule photovoltaïque	32
I.7 Courbes caractéristiques (I-V P-V).....	34
I.7.1 Courbe caractéristique I-V.....	35
I.7.2 Courbe caractéristique P-V.....	35
I.8 Influences météorologiques sur les caractéristiques électriques .	36
I.8.1 INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT	36
I.8.2 Influence de la température.....	37

I.9 Dimensionnement d'un systeme pompage photovoltaïque:.....	38
I.9.1 Conception du panneau solaire photovoltaïque:	38
I.9.2 Conception de tension de bus DC :.....	39
I.9.3 Conception de conductateur DC:.....	39
I.9.4 Conception de pompe :.....	40
I.10 Résultats et interprétations	40
I.11 CONCLUSION	43

**CHAPITRE II : CONCEPTION ET REALISATION NOTRE PROJET DE
SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE**

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal aux mois de Juillet et Décembre.

Figure I-2: Répartition de la production nationale d'électricité en Algérie.

Figure I-3: Croissance annuelle du marché mondial du solaire thermique.

Figure I-4: Production de l'énergie solaire thermique.

Figure I-5: Les différents types cellules photovoltaïques

Figure I-6: Module photovoltaïque

Figure I-7: Panneau solaire

Figure I-8: Schéma d'un système de pompage photovoltaïque.

Figure I-9 : Structure d'une cellule photovoltaïque

Figure I-10 : Composant d'un générateur photovoltaïque

Figure I-11: Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

Figure I-12: Illustration du principe de la commande MPPT type « P&O »

Figure I-13 : Algorithme type de la méthode P&O.

Figure I-14 : Positionnement du point de fonctionnement suivant

Figure I-15: Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de conductance.

Figure I-16: Hacheur type BUCK

Figure I-17: Hacheur type Boost

Figure I-18: Onduleur triphasé

Figure I-19: Schéma équivalent d'une cellule solaire, modèle d'une diode

Figure I-20: Schéma équivalent d'une cellule solaire, modèle avec deux diodes

Figure I-21: Courbe caractéristique I_{pv}

Figure I-22: Courbe caractéristique P_{pv}

Figure I-23: Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V

Figure I-24: Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V.

Figure I-25: Effet de la température sur la caractéristique I-V

Figure I-26: Effet de la température sur la caractéristique P-V

Figure I-27 : représente le schéma de système photovoltaïque

Figure I-28 : représente courbe de la tension V_{pv}

Figure I-29 : représente courbe de courant I_{pv}

Figure I-30 : représente courbe de la puissance P_{pv}

Figure I-31 : représente courbe de tension V_{bus}

Figure II-1 Modèle d'une machine asynchrone triphasée.

Figure II-2 Référentiel tournant d'axes (d- q).

Figure II-3 Schémas d'un onduleur à deux niveaux alimentant la MAS

Figure II-4 Principe de la MLI Sinus-Triangle.

Figure II-5 : Constitution d'une pompe centrifuge

Figure II-6 : Schéma bloc d'un MAS sans pompe

Figure I-7 : comparaison des caractéristiques obtenues sans et avec onduleur de tension à MLI.

Figure II-8 1: Schéma bloc d'un mas avec la pompe

Figure II-9 : comparaison des caractéristiques obtenues sans et avec onduleur de tension

Figure II-10: Schéma Classique de commande scalaire.

Figure I-11 : Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer).

Figure I-12 Modèle de la machine

Figure II-13 Découplage par addition des termes de compensation.

Figure II-14 : représente le schéma bloc de la CVI à flux rotorique orienté de la MAS alimentée en tension par un onduleur à MLI.

Figure II-15 : Schéma bloc de commande scalaire

Figure II-16 : représentant les résultats de la commande scalaire

Figure III-17 : Schéma bloc de la commande indirecte

Figure II-18 : représentant les résultats de la commande vectorielle

Figure III-1 : Photo montrant une vue de dessus du convertisseur SEMIKRON

Figure III-2 : Photo montrant les éléments essentiels constituant le banc d'essais

Figure III-3 : Carte d'acquisition associée aux capteurs de courant et de tension

Figure III-4 : Synoptique du banc d'essais

Figure III-5 : représente la vitesse de rotation

Figure III-6 : représente les courants statorique

Figure III-7: zoom de courants statorique

Figure III-8: représentas les tensions

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES

SYMBOLES	NOTATIONS	Unité
	C_e	Couple électromagnétique [Nm]
$i_{a,b,c}$	Courants instantanés des phases de la machine	[A]
	i_{sd}	Courants statorique suivant l'axe direct [A]
	i_{sq}	Courants statorique suivant l'axe en quadrature [A]
	$i_{s\alpha}$	Courants statorique suivant l'axe α [A]
	$i_{s\beta}$	Courants statorique suivant l'axe β [A]
	J	Moment d'inertie du rotor [Nms ² rad ⁻¹]
	L_s	Inductance de fuite cycliquestatorique [H]
	L_r	Inductance de fuite cycliquerotorique [H]
	M_s	Inductance mutuelleentre deux phases du stator [H]
	M_r	Inductance mutuelleentre deux phases du rotor [H]
	M_{sr}	Inductance mutuellecyclique stator/rotor [H]
	M_{rs}	Inductance mutuellecyclique rotor/stator [H]
	p	Nombre de paires de pôles [-]
	R_r	Résistance d'une phase rotorique [Ω]
	R_s	Résistance d'une phase statorique [Ω]
$V_{a,b,c}$	Tension instantanées des phases de la machine	[V]
	V_{sd}	Tension statorique suivant l'axe direct [V]
	V_{sq}	Tensions tatorique suivant l'axe en quadrature [V]
	$V_{s\alpha}$	Tension statorique suivant l'axe α [V]
	$V_{s\beta}$	Tension statorique suivant l'axe β [V]
	σ	Coefficient de dispersion de Blondel [-]
	θ_s	Angle de Park [degré]
	ω_a	Vitesse angulaire de rotation du système d'axe dq [rads ⁻¹]
	ω	Vitesse rotorique [rads ⁻¹]
	ω_s	Pulsation statorique [rads ⁻¹]
	φ_{rq}	Flux rotorique suivant l'axe en quadrature [Wb]
	φ_{rd}	Flux rotorique suivant l'axe en quadrature [Wb]
	φ_{sd}	Flux statorique suivant l'axe [Wb]
	φ_{sq}	Flux statorique suivant l'axe [Wb]
	$\varphi_{r\alpha}$	Flux rotorique suivant l'axe α [Wb]
	$\varphi_{r\beta}$	Flux rotorique suivant l'axe β [Wb]
	Ω	Vitesse mécanique du rotor [tr/min]
	CV	Commande vectorielle [-]
MAS	Machine Asynchrone	[-]
	FOC	Commande Vectorielle à Flux Orienté [-]
	PI	Régulateur proportionne l'intégrale [-]
	\bar{V}_s^*	Vecteur complexe de tension statorique [-]
	K_p, K_i	Gains des régulateurs PI [-]
	m	Minute [-]
	[P]	Matrice de Park [-]
[Co]	Matrice de Concordia	[-]
[Cl]	Matrice de Clarke	[-]
[R]	La matrice de la résistance	[-]

$\varphi_{réf}$	Flux de référence	[Wb]
	d,q Axes correspondants au référentiel lié au champ ou rotor	[-]
	X,y Axes correspondant au référentiel lié au stator	[-]
	α, β Axes correspondant au référentiel fixe par rapport au stator	[-]

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis la découverte de système photovoltaïque, la récupération de l'énergie solaire est devenue l'un des applications les plus prometteuses, dans les pays développés ou l'utilisation de système photovoltaïque est l'instant le plus courant, il sert habituellement de complément d'énergie électrique à usage domestique en milieu urbain, et les panneaux solaires sont placés sur les toits d'habitation, profitant des conventions écologiques qui préconisent la consommation d'énergie propre ou renouvelables, son utilisation se généralise, et il est très fréquent de voir des compagnies d'électricités réaliser des installations d'appoint connectées au réseau. De plus en dépit du coût d'installation qui peut s'avérer conséquent, l'énergie solaire reste très compétitive par rapport aux autres formes d'énergie, et ce malgré le faible et aux d'ensoleillement de ces pays développés qui ont majoritairement un climat tempéré[1]

L'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres telles que l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage[2]

En raison de l'augmentation des coûts de l'électricité et du diesel, les systèmes de pompage solaire photovoltaïque sont devenus une bonne solution, en particulier dans les zones rurales. Ce travail présente un système de pompage d'eau photovoltaïque (PV) autonome (PVWPS) entraîné par un moteur à induction sans stockage d'énergie pour améliorer les performances du système de pompage. Tout d'abord, une présentation des méthodes de (MPPT) maximisation de puissance générées par les panneaux photovoltaïques. L'étude de ces techniques nous permettra de comprendre laquelle peut aboutir à un système avec moins d'oscillations et une plus 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. Ensuite, ce convertisseur se combine avec un onduleur de source de tension (VSI) pour convertir le courant continu en courant alternatif. Deuxièmement, nous utilisons plusieurs techniques de contrôle (commande scalaire, commande vectorielle directe et indirecte) qui ont pour rôle d'entraîner le moteur à induction triphasé pour faire fonctionner la pompe centrifuge. Les

résultats de simulation de ce travail ont été obtenus à l'aide de la plateforme MATLAB Simulink

Notre travail est subdivisé en quatre chapitres:

Le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur l'énergie photovoltaïque, ces principes notions sur la conversion photovoltaïque avec une description des différents convertisseurs DC-DC(BUCK,BOOST), ainsi les méthodes utilisées pour l'extraction du maximum de puissance (MPP) fournie par le système photovoltaïque à travers le contrôle de convertisseur DC-DC, suivi par le convertisseur DC-AC (onduleur triphasé) on termine le chapitre par une simulation et interprétation des résultats obtenues de notre système panneaux photovoltaïque avec un hacheur (BOOST) et commande MPPT (P&O).

Le deuxième chapitre sera divisé en deux parties essentielles:

En premier lieu, Nous présenterons la modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS) avec l'utilisation de transformation de Park, la MAS est défini dans les trios référentiels et on présentera la relation entre eux. En deuxième partie, la modélisation mathématique de ces systèmes de pompage (pompe en général et la pompe centrifuge) sera présentée.

Le troisième chapitre sera consacré au système de contrôle de motopompe où le contrôle de systèmes à travers la commande vectorielle directe et indirecte du moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux sera présenté.

Le quatrième chapitre présente le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque, ainsi que la simulation et l'implémentation de commande scalaire dans le système de contrôle dSPACE 1104. ainsi que la prestation des différents matériels utilisés.

A la fin de cette mémoire une conclusion générale qui englobera l'étude sera présentée.

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉ SUR LE
SYSTÈME DE POMPAGE
PHOTOVOLTAÏQUE

I.1 Introduction

La première génération des systèmes de pompage photovoltaïque, en particulier ceux pour les applications à hauteur basse et moyennes incorporent des moteurs à courant continu à aimant permanent. Ces dernières années, un moteur asynchrone alimenté par un convertisseur de fréquence variable est devenu le moteur standard pour des applications de pompage solaires. Cela est dû principalement à sa simplicité, robustesse et faible prix comparé au moteur à courant continu [3]

Un système de pompage photovoltaïque est devenu de nos jours un enjeu majeur. Pour l'amélioration des conditions déviée le développement des zones rural le set désertiques.

Dans ce chapitre nous avons présenté une approche générale sur l'énergie photovoltaïque, tels que présenté principe de fonctionnement, les types de cellules photovoltaïques, le modèle électrique et les courbes caractéristiques pour une meilleure compréhension d'un module photovoltaïque, les différents types de système photovoltaïque comme le système autonome, raccordé au réseau et hybride, nous avons présenté aussi le stockage de l'énergie PV de notre système. Et la commande du maximum de puissance (MPP) fournie par le système photovoltaïque à travers le contrôle de convertisseur DC-DC (BOOST) qui on présente de ce chapitre.

I.1.1 Gisement solaire en Algérie

Les dépôts solaires sont un ensemble de données qui décrivent l'évolution du rayonnement solaire disponible à un endroit donnée sur une période de temps donnée. Il permet de simuler le fonctionnement possible d'une installation solaire, ainsi son dimensionnement le plus précis peut être effectué en fonction de la demande d'énergie à satisfaire [4].

De par sa situation géographique, l'Algérie possède l'un des gisements solaires les plus élevés au monde [5]. Presque toutes les régions du pays ont plus de 2000 heures d'ensoleillement par an, avec un maximum de 3900 heures (hauts plateaux et désert du Sahara). La majeure partie du pays reçoit environ 5 kWh d'énergie par jour au niveau de 1 m², soit près de 1700

kWh/m²/an au nord et 2263 kWh/m²/an au sud [6,7].

La figure I.1 montre l'irradiation solaire globale quotidienne reçue sur un plan horizontal pour les mois de Décembre et Juillet [5].

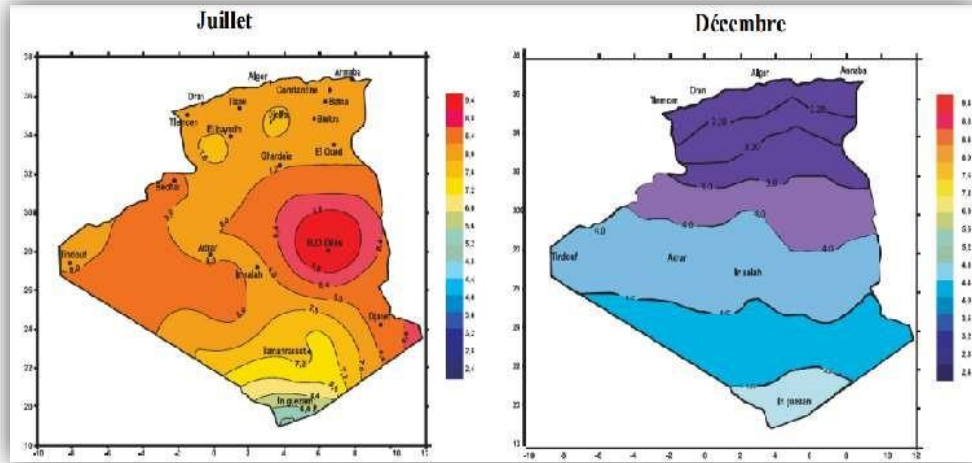


Figure I-1: Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal aux mois de Juillet et Décembre [5].

I.1.2 Situation énergétique en Algérie

L'énergie solaire est l'une des premières sources d'énergie utilisées par les humains (juste après l'énergie musculaire). Elle est à l'origine de la formation de réserves d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et des sources d'énergies renouvelables (bois, vent, eau) [8].

En effet, le vent est créé par des différences de température (et de pression), et le rayonnement solaire en est l'origine. Ce rayonnement provoque également l'évaporation de l'eau sous forme de pluie et entraîne les roues du moulin, elle est vitale pour les organismes à l'origine du charbon, du pétrole et du gaz. Récemment, il y a eu un regain d'intérêt pour l'utilisation directe du rayonnement solaire par les centrales solaires, les fours solaires, les chauffe-eau solaires, le chauffage solaire, les cellules solaires ou les cellules photovoltaïques [8].

En Algérie, 99.2% de la production totale d'électricité (soit 57.2 TWh en 2012) provient des combustibles fossiles, notamment le gaz naturel qui est l'énergie la plus disponible. Le peu qui reste (0,8%) provient des énergies renouvelables qui se résument pratiquement à une production hydraulique avec 0.7% et 0.1% pour la filière solaire photovoltaïque [9].

La figure ci-après montre cette répartition des ressources sur la production d'électricité dans l'Algérie.



Figure I-5 : Répartition de la production nationale d'électricité en Algérie [9].

I.2 Description des différentes technologies de l'énergie solaire L'énergie solaire thermique

Ces dernières années, la filière du solaire thermique semble la plus prometteuse parmi les différents technologies de la génération d'énergie à partir du soleil vue l'adéquation qu'elle offre cette technologie pour la production de l'énergie en grande échelle. Cette adéquation est issue du coût qui diminue avec la capacité de production des centrales solaires thermiques. Cette filière fournira 10% de la production mondiale de l'énergie renouvelable à l'horizon de 2050 selon l'Agence Internationale de l'Energie(IEA) [10].

L'IEA prévoit des sérieuses perspectives pour l'énergie solaire thermique, environ 2000 TW/h sera produite annuellement par la technologie du solaire thermique à 2050. En plus le solaire thermique va continuer à se développer après l'an 2050. En fait le solaire thermique a fait déjà ces preuves et de nombreuses centrales sont opérationnelles dans plusieurs pays dont les leaders sont l'Espagne et les États-Unis. Cette technologie présente la meilleure solution pour le bassin méditerranéen et surtout le nord-africain les pays comme l'Algérie le Maroc et la Lybie, qui ont un immense potentiel de production dans ce domaine [10]. Ces pays ont une capacité de production moyenne de 32 MW/km², ce qui rend cette région la plus favorable pour des

investissements dans les centra les solaire athermiques [11].

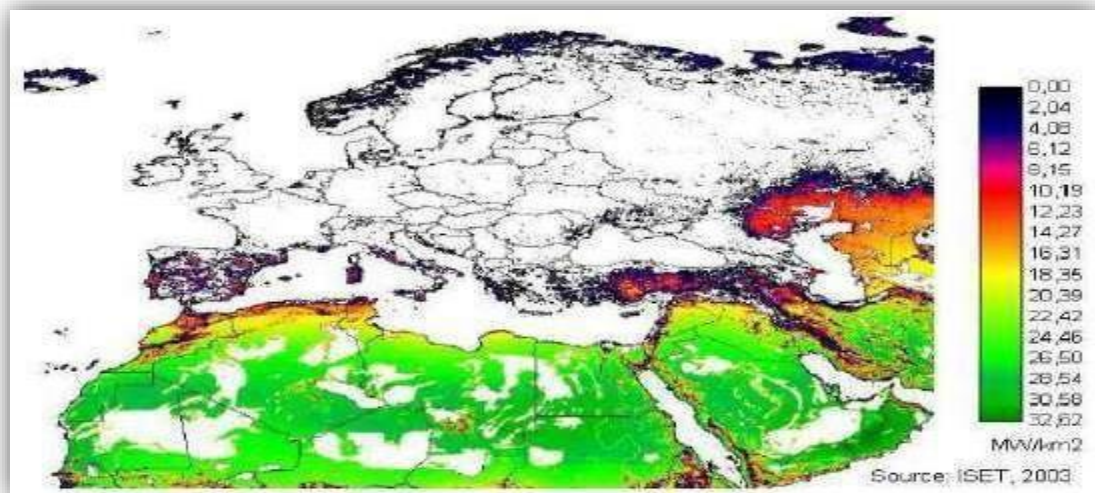
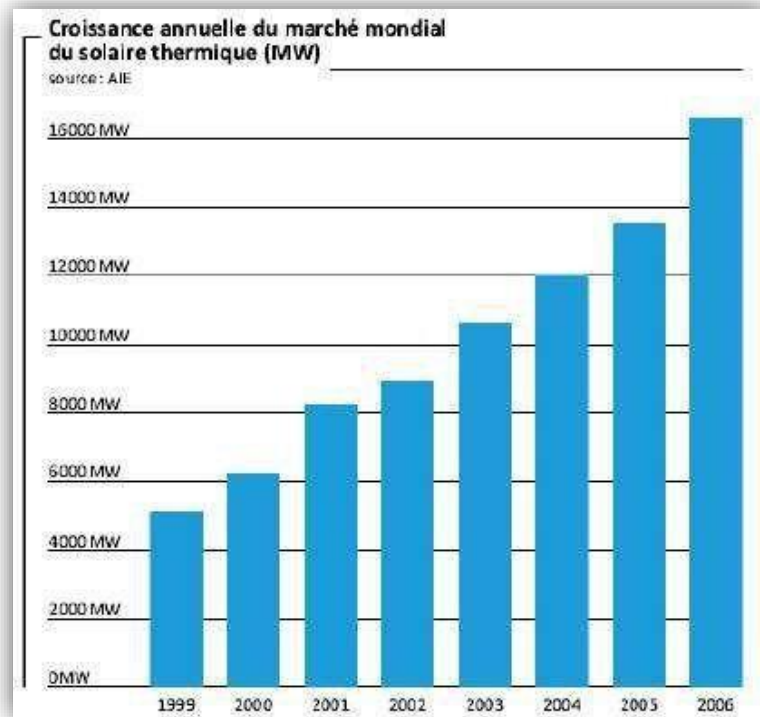


Figure I-3: Croissance annuelle du marché mondial du solaire thermique

I.2.1 Technologie photovoltaïque

Comme son nom indique, cette technologie est basée sur l'effet photovoltaïque qui est composé par photo-volt, ce qui signifie la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien ranch

ABecquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905. Son principe Peut être illustré par une simple diode qui fonctionne en inverse où le champ intrinsèque que fait migrer les électrons d'une jonction à autre jonction. Cela est possible grâce à l'effet photovoltaïque qui permet la transition des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction .Ces électrons vont constituer le courant qui traverse les cellules du panneau photovoltaïque, donc le rôle de la lumière c'est l'augmentation du nombre des électrons disponibles à la conduction électrique et non pas la conduction électrique. Les électrons provient des atomes du dopage (Phosphore, Bore), l'utilisation des semi-conducteurs est nécessaire pour la fabrication des panneaux photovoltaïques vue leurs conductivité moyenne [10].

I.3 Description d'énergie renouvelable

I.3.1 Effet photovoltaïque

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, poly-cristallin, ou monocristalline. D'autres matériaux sont utilisables: Arséniure de Gallium, Tellurure de Cadmium.

1.3.1.1 Les différents types des cellules photovoltaïques :

- **Les cellules monocristallines**
 - La première génération de photopiles;
 - Un taux de rendement excellent (12-16%) (23%en Laboratoire)
 - Une méthode de fabrication la boiseuse et difficile, donc très chère
 - Il faut un égrin de quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur
- ***LES CELLULES POLY-CRISTALLINES***
 - Coût de production moins élevé
 - Procédé nécessitant moins d'énergie
 - Rendement 11-13%(18%en Labo)
- ***LES CELLULES AMORPHES*** (cellules de calculatrices par exemple)

Chapitre I : généralité sur le système photovoltaïque

- Coût de production bien plus bas;
- Rendement plus bas:8-10%(13%en labo);
- Durée de vie plus faible.

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc. ... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse.

De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la



production).

A)

b)

c)

Figure I-5: Les différents types cellules photovoltaïques [12]

a) : Cellule de silicium monocristallin

b) : Cellule de silicium poly cristallin

c) : Cellule en silicium amorphe

1.3.1.2 Les modules photovoltaïques

Le module est l'élément principal d'une installation photovoltaïque. Lest composé de plusieurs cellules qui sont reliées entre-elle s par un circuit électrique.

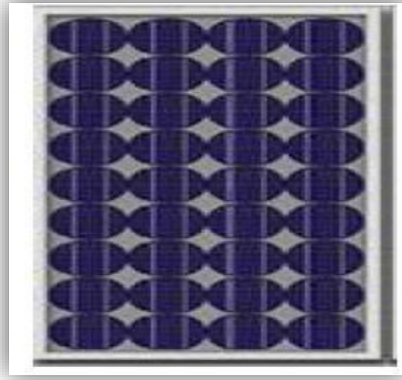


Figure I-6: Module photovoltaïque [13]

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroître courant en conservant la tension.

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

L'inter connexion de module entredeux- en série ou en parallèle-pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

I.3.2 Les différents panneaux solaires

I.3.2.1 Le panneau solaire photovoltaïque

Le panneau solaire ou (générateur photovoltaïque) se compose de modules photovoltaïques inter connectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le panneau solaire avec un angle d'inclinaison spécifique[14]



Figure I-7: Panneau solaire [14]

1.3.2.2 Panneau solaire thermique et thermodynamique

a) domestique (thermique)

Le principe de ce système est d'utiliser un fluide caloporteur. Le fluide est chauffé dans des panneaux exposés au soleil.

Ce fluide transmet sa chaleur à l'eau à usage domestique dans des échangeurs [13]

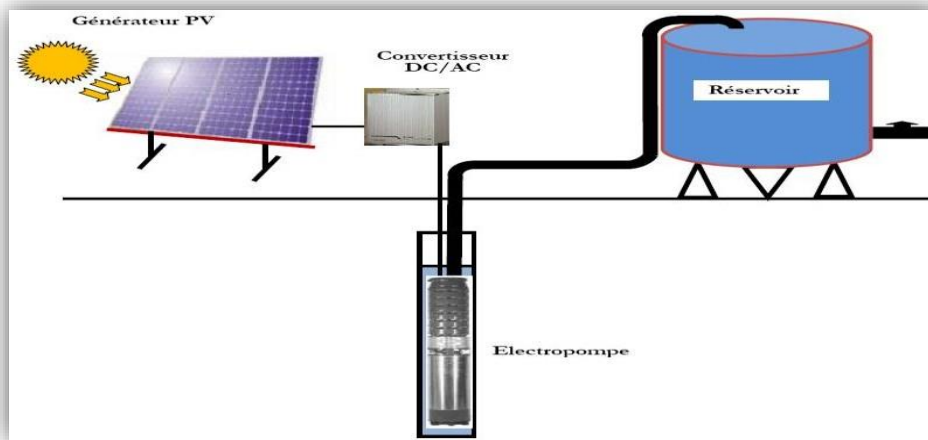
b) Industriel (thermodynamique)

On désigne par une centrale thermodynamique l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée. L'eau chauffée par la température est transformée en vapeur, envoyée dans une turbine. Un alternateur, lié à la turbine, produit alors de l'électricité [15]

I.4 Constitution d'un système de pompage photovoltaïque

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC/AC, un sous-système de pompage (moteur et pompe), la tuyauterie et accessoires et enfin un réservoir d'eau (voir figure I-8) [16]. Dans les systèmes de pompage photovoltaïque qui fonctionnent au fil du soleil, le stockage de l'eau dans les réservoirs est la solution la plus adoptée, par rapport au stockage électrochimique dans les batteries.

Le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie photovoltaïque est utilisé pour



l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation.

Figure I-8: Schéma d'un système de pompage photovoltaïque.

I.4.1.1 Le générateur photovoltaïque

➤ Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [17]. La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la figure I-9 ci-dessous.

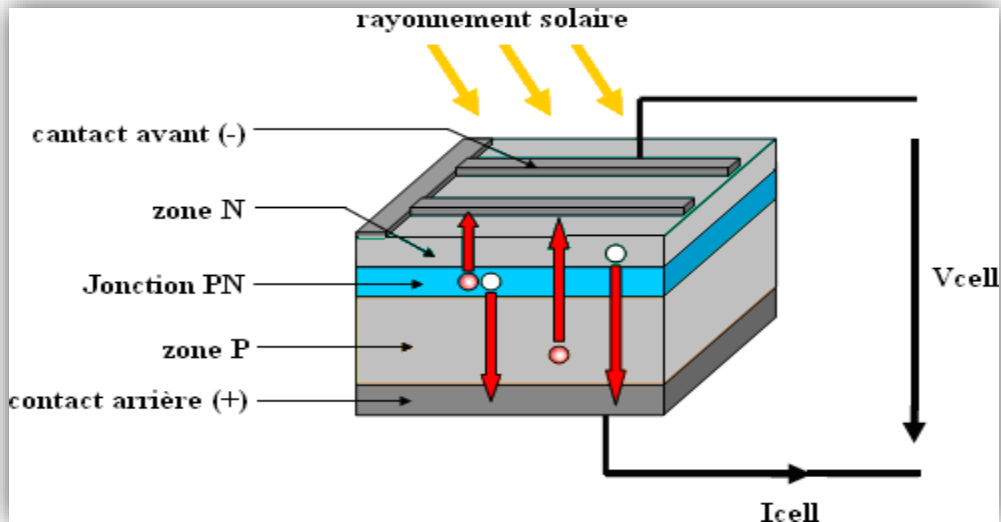


Figure I-9 : Structure d'une cellule photovoltaïque [17]

Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules assemblés en série et en parallèle selon la puissance demandée. Chaque module est lui-même constitué de cellules photovoltaïques généralement montées en série. Celles-ci sont encapsulées dans une même structure pour former un module.

L'encapsulation ainsi réalisée va avoir deux principaux rôles [18] :

- Protection des cellules contre les agressions extérieures (chocs, humidité, corrosion, poussière...etc.).

Contrôle de température des cellules qui vont permettre une bonne dissipation vers l'extérieur de la partie de l'énergie incidente qui n'est pas transformée en énergie électrique.

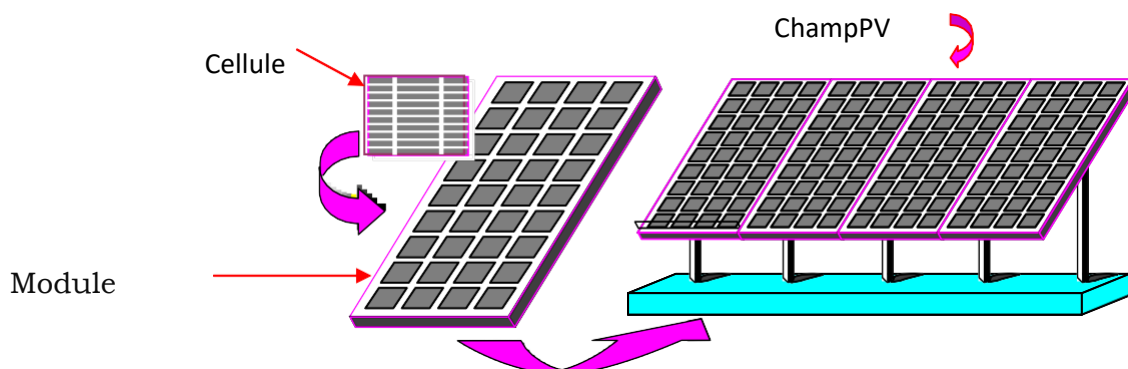


Figure I-10 : Composant d'un générateur photovoltaïque [2]

Chapitre I : généralité sur le système photovoltaïque

La tension délivrée par une cellule PV étant très faible, pour avoir des tensions compatibles avec les charges à alimenter, il faudra associer plusieurs cellules en série ou en parallèle. En outre, le générateur photovoltaïque est obtenu par l'interconnexion de modules en série et/ou en parallèle pour obtenir une puissance en coré plus grande.

➤ **Caractéristiques d'un module**

- La puissance de crête P_c : puissance électrique maximale que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$).
- La caractéristique I/V : courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Tension à vide V_{CO} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».
- Point de fonctionnement optimum (U, I_m): Lors que la puissance de crête est maximum en plein soleil $P_m = U_m \cdot I_m$.
- Rendement: Rapport entre la puissance électrique optimale et la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme: Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir les cellules.

I.5 LA COMMANDE MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING)

Il existe des lois de commandes spécifiques nommées dans la littérature « commande extrême » pour des dispositifs physiques devant fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques même si, a priori ces points ne sont pas connus à l'avance, ces derniers pouvant même à n'importe quel moment se modifier pour diverses raisons. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par la présence d'un à plusieurs Points de Puissance Maximum (PPM). Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT) lorsqu'il est appliqué aux systèmes énergétiques. Le principe de ces systèmes de gestion est d'effectuer à la fois une recherche du PPM tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge

de façon à transférer le maximum de puissance produite vers la charge. La figure III.4 représente une chaîne élémentaire typique de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT fournissant une puissance électrique à une charge DC. [19]

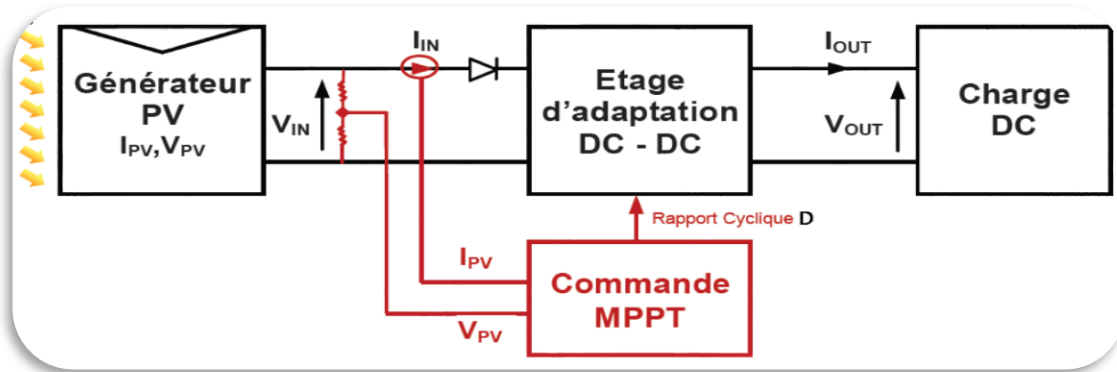


Figure I-11: Schématisation d'une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement, quelles que soient les instabilités météorologiques ou les variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment. On peut distinguer les méthodes basées sur l'incrément de conductance (Inc Cond) et les méthodes « *Perturb & Observe* » (P&O). [20]

I.5.1 Méthode « **Perturb & Observe** » (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type **P&O** consiste à perturber la tension (V_{PV}) d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance (P_{PV}) qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure I-15 on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} en gendre un accroissement de la puissance (P_{PV}), cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

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

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM

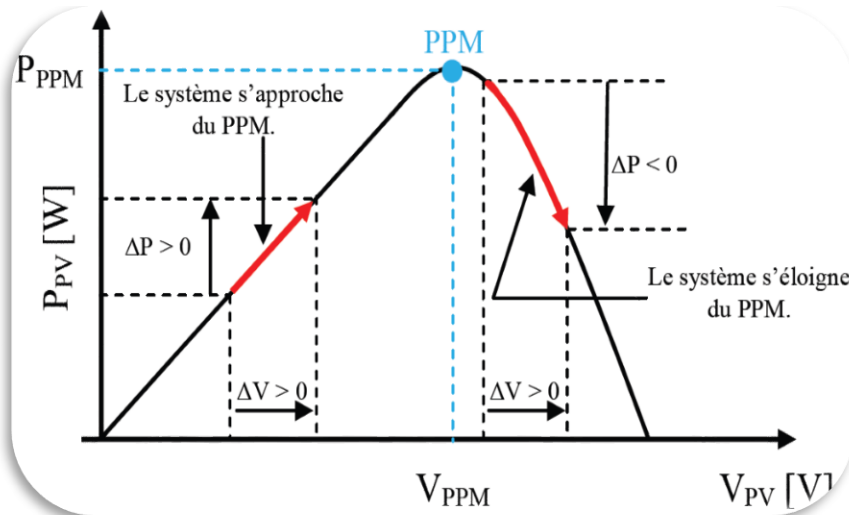


Figure I-12: Illustration du principe de la commande MPPT type « P&O »

La figure (I-12) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant. [19]

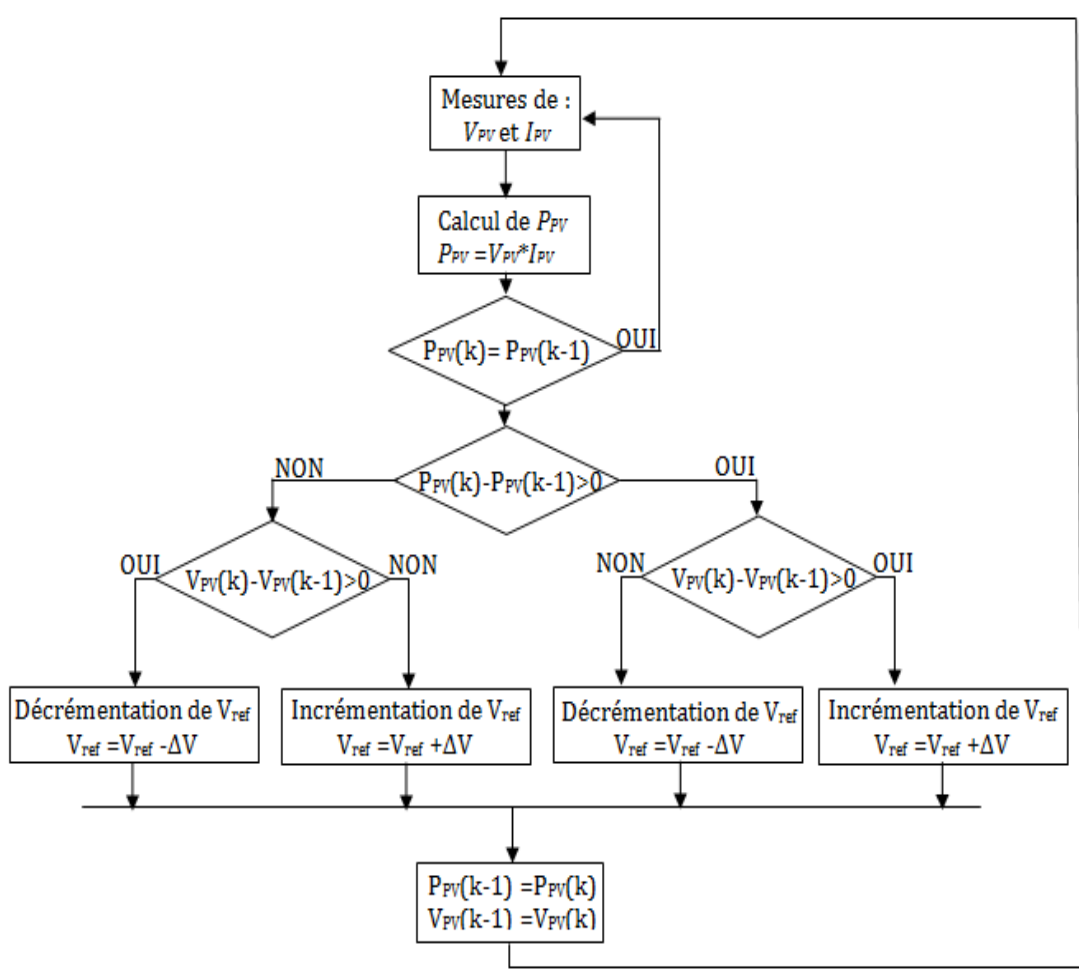


Figure I-13 : Algorithme type de la méthode P&O.

La méthode P&O est aujourd’hui largement utilisée de par sa facilité d’implémentation. Cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu’elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. [19]

I.5.2 La méthode “Incrément de conductance” (In Cond) :

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM[e]. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G = \frac{I_{PV}}{G_{PV}} \quad \text{(I-1)}$$

Et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI_{PV}}{dG_{PV}} \quad \text{(I-2)}$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module (P_{PV}) par rapport à la tension (V_{PV}) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite. La figure I-14 permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dP_{PV}}{dG_{PV}} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM,
- Si $\frac{dP_{PV}}{dG_{PV}} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM,
- Si $\frac{dP_{PV}}{dG_{PV}} < 0$, le point de fonctionnement à droite du PPM,

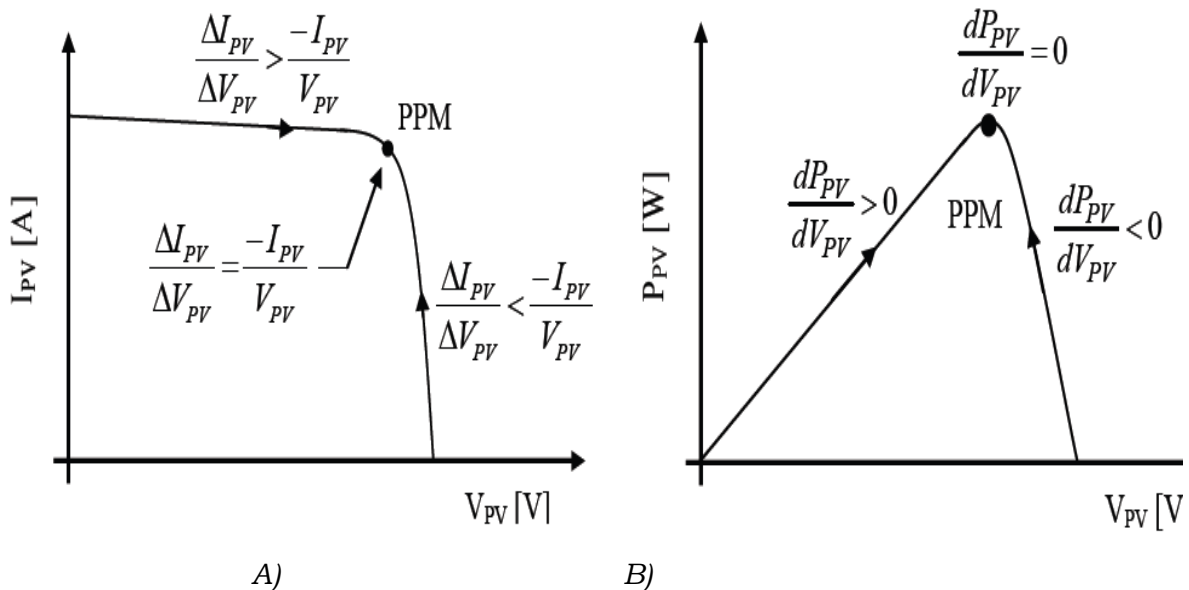


Figure I-14 : Positionnement du point de fonctionnement suivant

A) le signe de dP_{PV}/dV_{PV} sur la caractéristique de puissance

B) le signe de la valeur de $\Delta I_{PV}/\Delta V_{PV}$ sur la caractéristique de courant

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (I-14) et la dérivée de la puissance (dP_{PV}/dV_{PV}) peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(I_{PV} \times V_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \cdot \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \cong I_{PV} + I_{PV} \cdot \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} \quad \text{(I-3)}$$

Le maximum de puissance peut être alors traqué en effectuant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance (I_{PV}/V_{PV}) avec celle de l'incrément de conductance ($\Delta I_{PV}/\Delta V_{PV}$), comme l'illustre l'algorithme de la figure (I-15)

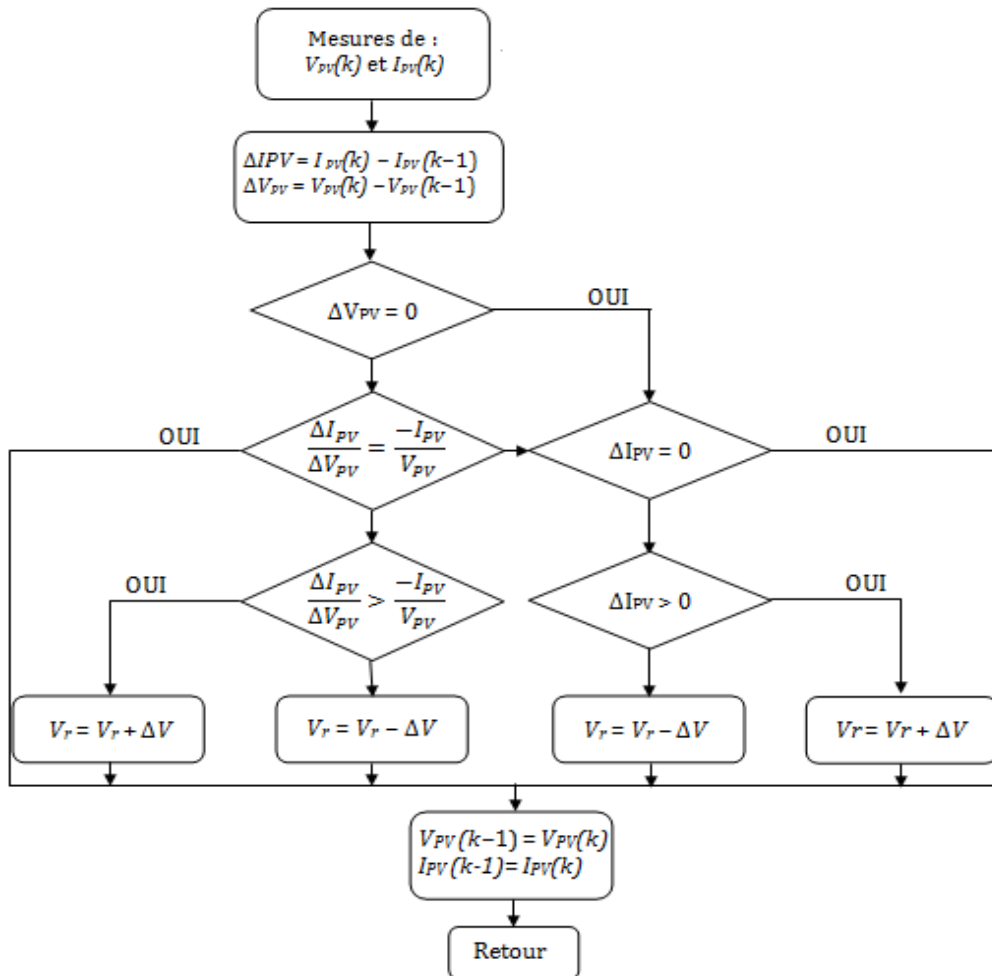


Figure I-15: Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de conductance [19].

I.5.3 Les convertisseurs

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou batteries pour l'adopter à des récepteurs fonctionnant soit en tension continue différente, soit en tension alternative [16].

1.5.3.1 Hacheurs (DC/DC)

Le hacheur est un convertisseur statique continu-continu utilisant essentiellement des interrupteurs électroniques unidirectionnels, des éléments passifs (inductances, condensateurs et diodes).

a) Hacheur (série-abaisseur), type BUCK

La figure (I-16) donne le circuit électrique d'un convertisseur Buck. Le transistor MOSFET travaille en régime commutation avec une période T_s . Dans le premier laps de temps αT_s le transistor dans un état de saturation, alors l'inductance L échange d'énergie avec augmentation du courant I_L . Dans le deuxième laps de temps $(1-\alpha) T_s$ l'inductance L libère cette énergie à la charge Z avec une diminution de courant I_L . Alors le circuit est décomposé en deux circuits linéaires qui correspondent à chaque état du transistor.

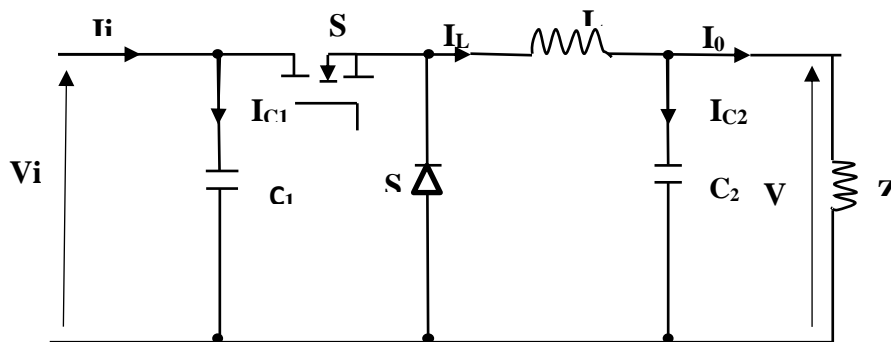


Figure I-16: Hacheur type BUCK [19]

b) Hacheur (parallèle-élevateur), type BOOST

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élevateur de tension. Le schéma de la b figure (I-17) représente le circuit électrique du Boost. Dans l'intervalle $[0, \alpha.TS]$, le transistor S est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la période. Ensuite, le transistor S s'ouvre et l'inductance L s'oppose à la diminution de courant I_L , génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge Z à travers la diode D .

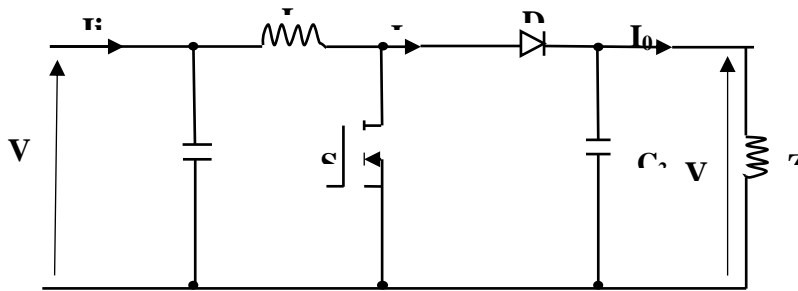


Figure I-17: Hacheur type Boost [19]

c) **Convertisseur Buck-Boost**

Combine les propriétés des deux convertisseurs précédents. Il est utilisé comme un transformateur idéal qui pourrait s'appliquer à n'importe quelle tension d'entrée afin d'obtenir la tension de sortie désirée.

1.5.3.2 Les convertisseurs DC/AC (les onduleurs)

1.5.3.2.1 Définition

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion de l'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative.

On distingue deux grands types d'onduleurs:

- Les onduleurs de tension, alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant, alimentés par une source des courants continu [20]

1.5.3.2.2 Onduleur de tension

L'onduleur utilisé dans ce système est un onduleur de tension triphasé à six inters rupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture ; ce sont des transistors de types IGBT auxquels sont placés des diodes en antiparallèle. L'onduleur est alors constitué de trois bras, dont les deux interrupteurs de chaque bras conduisent de manière complémentaire. Les séquences de commutation des interrupteurs sont fonction de la commande à utiliser (commande en pleine onde, commande en MLI «Modulation de Largeur d'Impulsion»).

La structure de l'onduleur de tension est représentée en figure(I-18).

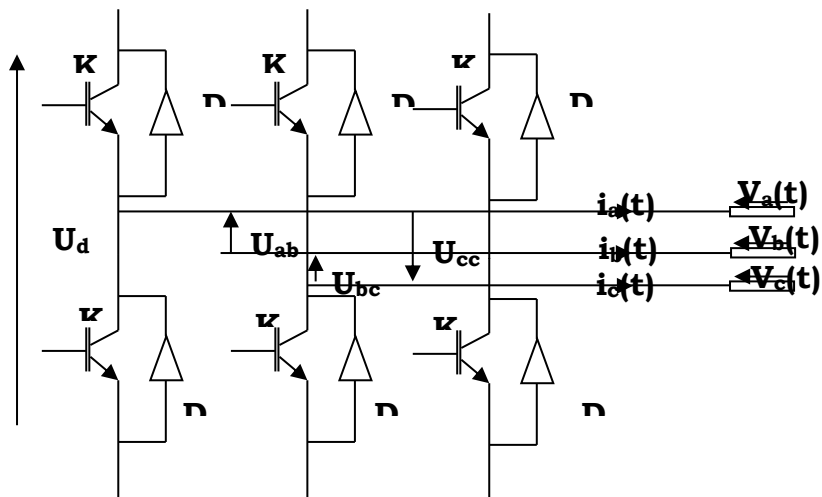


Figure I-18: Onduleur triphasé

I.5.4 Commande d'un onduleur par MLI

Il s'agit d'un mode de commande particulier des onduleurs. Son principe est basé sur le découpage d'une tension (t), par action sur les commutateurs de l'onduleur, en plusieurs créneaux de largeurs différentes (Modulation de Largeurs d'impulsion). L'opération a un double but:

- Modifier le contenu harmonique de la tension en conservant sa période, de façon à repousser vers les rangs élevés ainsi le filtrage de la tension se trouve à facilité ;
- Permettre le réglage de la valeur efficace du fondamental de la tension (t), c'est indispensable dans le cas où l'on veut faire fonctionner à flux constant un moteur à vitesse variable [20]

I.5.5 Les types de commande en MLI

Un nombre important de stratégies de commande MLI, suivant les choix des instants de commutation des interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture, existe et repose sur un compromis entre :

- Un spectre d'harmonique minimal
- Une plage de variation maximale de l'amplitude de la sortie
- Une facilité d'implantation et de mise au point
- Un coût abordable

Chapitre I : généralité sur le système photovoltaïque

- Une facilité de réglage d'amplitude et de la fréquence des ondes de sortie.

Il est possible de classer les modes de commande selon quatre catégories principales:

- Modulation en temps réel : la commutation de l'onduleur est définie par les intersections, en temps réel, de deux ou trois signaux.
- Modulation calculée : les instants de commutation sont préalablement calculés sur la base d'un critère d'optimisation puis mis en mémoire. La lecture de ces instants mémorisés à l'aide d'un microprocesseur, assure la génération des signaux de commande des interrupteurs.
- Modulation par comparaison : le courant de sortie est comparé à une consigne sinusoïdale et l'écart détermine les commutations de l'onduleur.
- Modulation vectorielle : c'est une variante de la modulation calculée, particulière au triphasé. Elle est généralement engendrée de manière numérique à l'aide d'un système à microprocesseur et consiste à faire varier l'état des interrupteurs de manière à avoir un système de tension dont les composantes s'approchent de celles du système que l'on veut obtenir à la sortie.

Dans la suite de ce travail, nous nous intéresserons à la commande MLI sinus-triangle (pour la simulation de l'onduleur) [20]

➤ **MLI sinus-triangle**

La MLI sinus-triangle se réalise par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence sinusoïdale) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la fréquence de la porteuse. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasés d'un angle égale à $\frac{2\pi}{3}$ rad.

I.6 Différentes modèles d'une cellule photovoltaïque

I.6.1 Modèle à une diode

Une cellule photovoltaïque est souvent présente comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de

courant shuntée par une diode.

La figure ci-dessous, représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

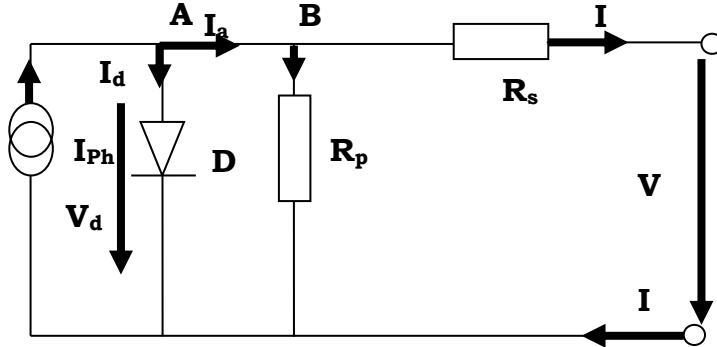


Figure I-19: Schéma équivalent d'une cellule solaire, modèle d'une diode

[19]

✓ **L'équation non linéaire**

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+IR_s}{mV_T}} \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad \text{(I-4)}$$

Avec :

- I_{ph} : photo courant.
- I_d : courant de diode.
- I_s : courant inverse de saturation de la diode.
- m : facteur d'idéalité de la diode, $m = 1 \dots 5$.
- V_T : Tension thermique [V].
- K : constante de Boltzmann.
- T : température absolue, [T] = K (kelvin).
- e : charge d'un électron.
- R_p : résistance parallèle simulant les pertes en courant de la cellule solaire.
- R_s : Résistance série qui tient compte des pertes en tension dues aux contacts

Externes.

1.6.2 Modèle à deux diodes

Le modèle à deux diodes est composé de deux exponentiel, le première, tient compte du phénomène de diffusion tandis que le deuxième exponentiel correspond au phénomène de recombinaison.

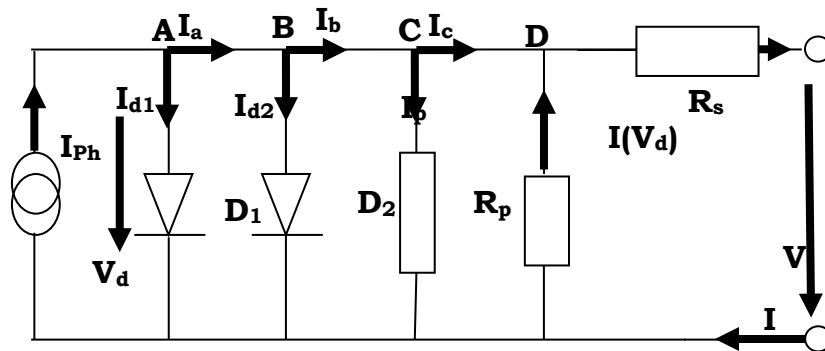


Figure I-20: Schéma équivalent d'une cellule solaire, modèle avec deux diodes [18]

✓ **L'équation non linéaire**

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V+IR_s}{mV_T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{V+IR_s}{mV_T}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} - \alpha(V + IR_s) \left(\frac{V+IR_s}{V_{Br}} \right)^{-n} \quad (\text{I-5})$$

Avec :

- I_{s1} ,

I_{s2} :courant desaturation delapremière et deladeuxièmediodes respectivement.

- m_1, m_2 :facteur d'idéalité de la première et la deuxième diode respectivement.

- V_{Br} : tension de rupture (-15:-50).

- α : facteur de correction ($\alpha=0:1$).

- n :indicedelaruptured'avalanche ($n=1:10$)

• **Courbes caractéristiques (I-V P-V)**

Les fabricants de modules photovoltaïques fournissent des informations dans le catalogue du produit (fiche technique), de sorte que les interprétations sont essentielles pour le bon dimensionnement des installations photovoltaïques. Dans ces informations, des graphiques sont présentés sous forme de courbes dans des conditions d'essai normalisées STC2, appelées courbes I-V [20]. Il est important de noter que les courbes sont exponentielles et varient selon l'équation

I.6.3 Courbe caractéristique I-V

La caractéristique de sortie du module est donnée par la courbe Courant IV Tension. Cette courbe simule le comportement du courant de sortie avec la tension dans différentes conditions de température et rayonnement [20]. La figure (I-21) illustre la courbe caractéristique de sortie du module photovoltaïque en STC avec les principaux points indiqués.

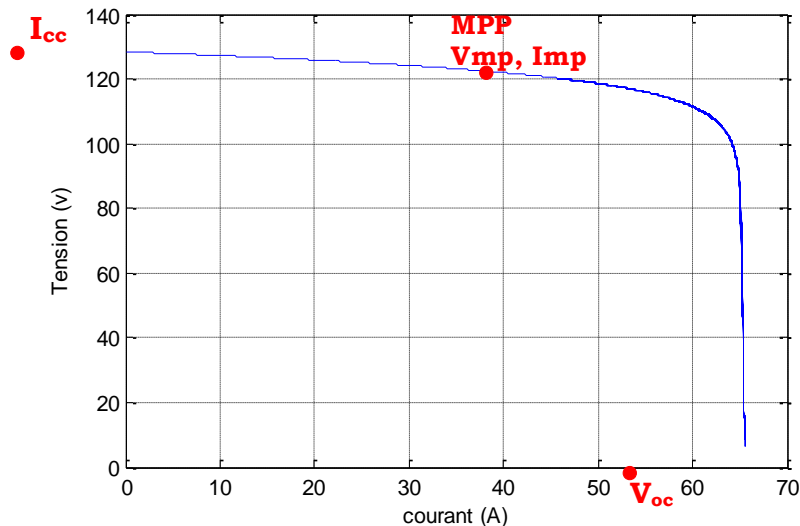


Figure I-21: Courbe caractéristique Ipv

En analysant la Figure (I-21), le terme I_{sc} il indique le courant de court-circuit. C'est le courant maximal que le module produit lorsque ses bornes sont en court-circuit. La tension en circuit ouvert, représentée par le terme V_{oc} , indique la tension maximale fournie par le module PV lorsque ses bornes sont ouvertes. Dans ce cas, il n'y a pas chaîne. De cette manière, la puissance est nulle . Les termes V_{mp} et I_{mp} respectivement la tension et la courante maximum puissance fournie par le module photovoltaïque dans certaines conditions de rayonnement et température

I.6.4 Courbe caractéristique P-V

A chaque point généré sur la courbe IV, représenté sur la Figure, correspond un point sur la courbe PV, c'est-à-dire que la courbe PV montre comment la puissance de sortie d'un module système photovoltaïque varie en fonction de sa tension .Illustration (I-22) représente une courbe PV typique.

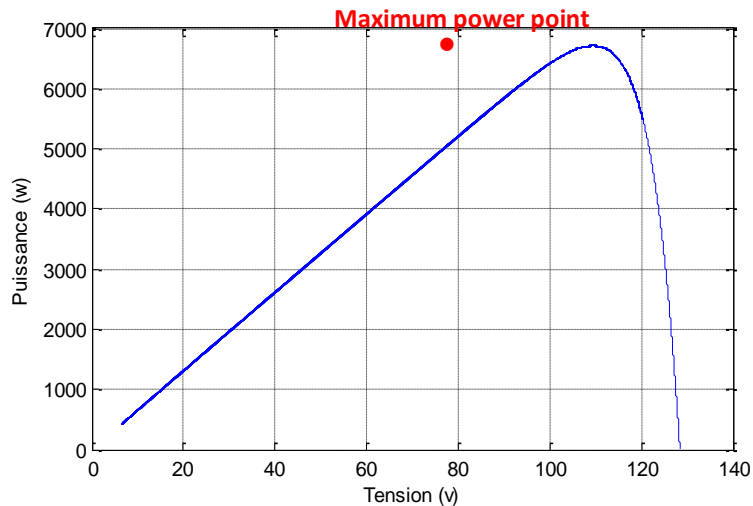


Figure I-22: Courbe caractéristique Ppv

- **Influences météorologiques sur les caractéristiques électriques**

- Deux facteurs climatiques influencent directement les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque, à savoir : l'intensité du rayonnement solaire et la température des cellules [65]. Il est possible de simuler les courbes caractéristiques d'un module et d'observer le comportement de chaque variable sous des conditions de température et de rayonnement solaire dans différentes conditions .

I.6.5 INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT

- Lorsque la variation du rayonnement solaire incident sur un module photovoltaïque se produit, il y a une réduction proportionnelle instantanée du courant généré, réduisant ainsi les performances du module. La tension en circuit ouvert subit peu de changement avec la variation de l'intensité lumineuse, cependant, pour des réductions importantes, il y a un déplacement du point de puissance maximale, provoquant également une réduction de la puissance générée [20]. Les figures (II.23) et (II.24) illustrent cette influence sur les courbes I-V et P-V.

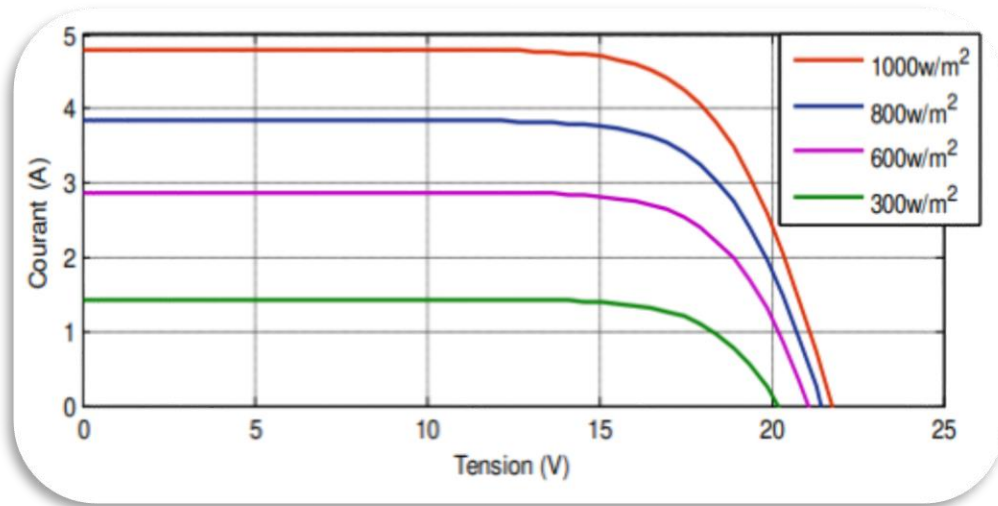


Figure I-23: Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V

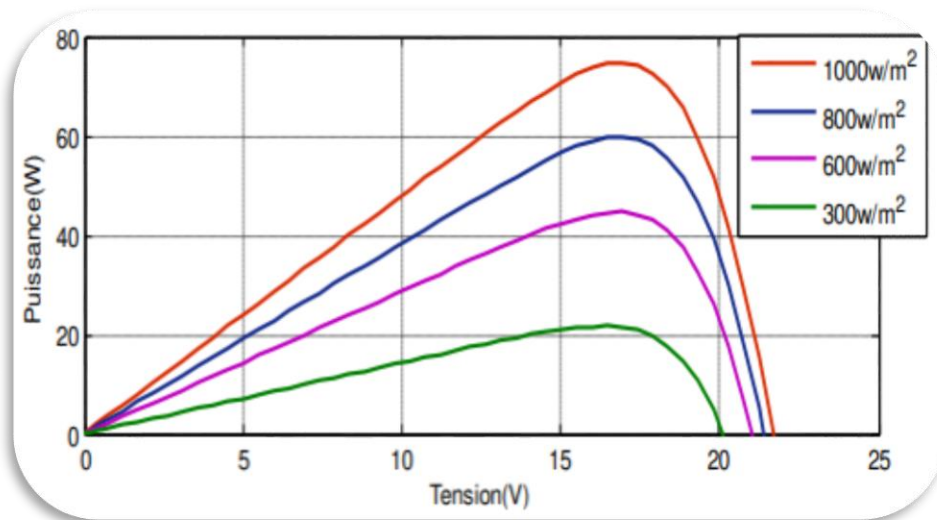


Figure I-24: Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V.

1.6.6 Influence de la température

La température a également une influence directe sur les performances du module photovoltaïque. Cependant, la température n'affecte pas le courant généré dans le module, elle interfère directement avec la tension en circuit ouvert, provoquant une réduction significative de ses valeurs, en plus du déplacement considérable du point de puissance maximale, provoquant également une réduction du généré Puissance .Ainsi, plus la température est élevée, plus la tension fournie par le module est faible et plus la puissance

générée est faible .Les figures (I-25) et (I-26) illustre cette influence sur les courbes I-V et P-V

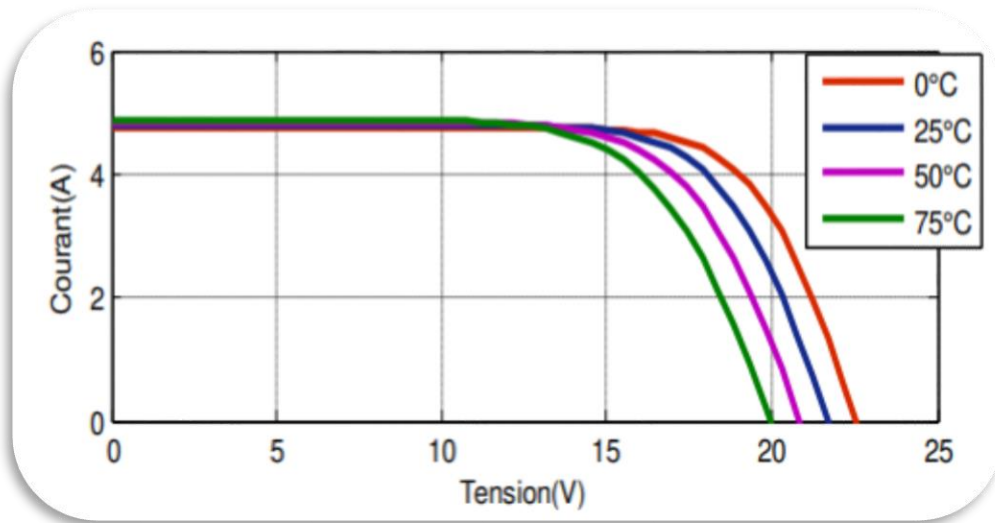


Figure I-25: Effet de la température sur la caractéristique I-V.

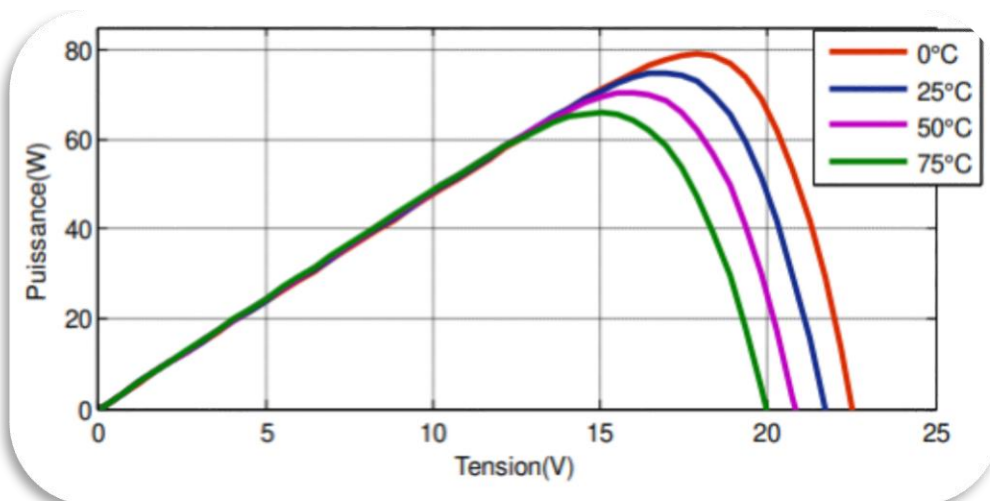


Figure I-26: Effet de la température sur la caractéristique P-V

- **Dimensionnement d'un système pompage photovoltaïque:**

I.6.7 Conception du panneau solaire photovoltaïque:

UN moteur de induction de 750 W est choisi pour le système propose. Si les parts du moteur de la pompe sont negligees, la capacité du générateur PV doit être équivalentement à la capacité du mètre . Dans Ce CAS, la pompe le champ EST sélectionné à partir de 900 W.

$$P_{mp} = (N_p * I_p) * (N_s * V_{mp}) = 900 \text{ W} \quad \text{(I-6)}$$

$$N_s = 8 \quad ; \quad N_p = 1$$

P_{mp} c'est la puissance maximal qui peut être extrait des panneaux en tant que rayonnement donnée,

V_{mp} : la tension du panneaux PV à MPP.

I_{mp} : Le courant du panneaux PV à MPP.

N_p : le nombre de modules en parallèle .

N_s : le nombre de modules en série .

Considérant qu'une tension de circuit ouvert du panneau est proche d'une tension de liaison DC et que la puissance tirée d'un panneau est de 900 W, le nombre de modules en série et en parallèle est sélectionné , soit 11 et 3 . Le module individuel et ses spécifications sont fournis dans le tableau:

I.6.8 Conception de tension de bus DC :

La tension de bus continu de VSI EST estimée à partir de relation suivante:

$$m * \frac{V_{DC}}{2\sqrt{2}} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} \quad (\text{I-7})$$

D'où m EST la modulation ET V_{L-L} EST une tension de ligne aux bornes du moteurs

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot 220 \quad (\text{I-8})$$

Lorsque l'indice de modulation EST 1 la tension de circuit intermédiaire EST choisi à 400 V.

I.6.9 Conception de condensateur DC:

Le condensateur de liaison DC EST censé fournir une énergie efficace lors de transitoires tels que la chute du rayonnement ET une augmentation du fort. Value nous EST calculé

$$\frac{1}{2} C_{DC} [V_{DC}^{*2} - V_{DC}^2] = 3\alpha V I t \quad (\text{I-9})$$

$$\frac{1}{2} C_{DC} [400^2 - 359^2] = 3.1, 2.133.8, 2.0, 005$$

$$C_{DC} = 1260 \mu F$$

Expression V_{DC} nous réfère à la tension de base DC définie tandis que V_{OC} est la tension base acceptable pendant le transitoires, de plus,

α : Facteur de vérification.

t : la durée du transitoire .

I.6.10 Conception de DC-DC Boost convertisseur :

Le cycle de service de l'inducteur de alimentation, on done :

$$D = \frac{V_{DC} - V_{mp}}{V_{DV}} = \frac{400 - 357}{400} = 0.10 \quad \text{(I-10)}$$

$$L_m = \frac{V_{mp} D}{\Delta I_1 f_s} = \frac{375 - 0.10}{1.10} = 37.49 \text{mH} \quad \text{(I-11)}$$

Ainsi, la valeur de l'inductance de sortie 3 mH.

f_s = la fréquence de commutation.

ΔI_1 : Courant d'ondulation

I.6.11 Conception de pompe :

Pour une pompe à eau sélectionnée, la constant de proportionnalité (K) est donnée:

$$K_{pom} = \frac{C}{\omega^2} \quad \text{(I-12)}$$

$$\frac{2\pi N}{60} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 2850}{60} \quad \text{(I-13)}$$

$$\omega^2 = 298.45$$

$$C = K_{pom} * \omega^2 \quad \text{(I-14)}$$

$$C = \frac{P}{\omega} = \frac{750}{298.45} \quad \text{(I-15)}$$

$$C = 2.3(N.m)$$

$$K_{pom} = 2.95 \cdot 10^{-5}$$

• Résultats et interprétations

Les résultats de simulation sur 'interface MALAB /Simulink de système photovoltaïque qui es constitué d'un ensemble des panneaux photovoltaïques ainsi qu'un hacheur élévateur (Boost) et sa commande par l'algorithme de maximisation de puissance P&O (perturbation et observation) et une charge résistive comme présenté dans la figure I.27.

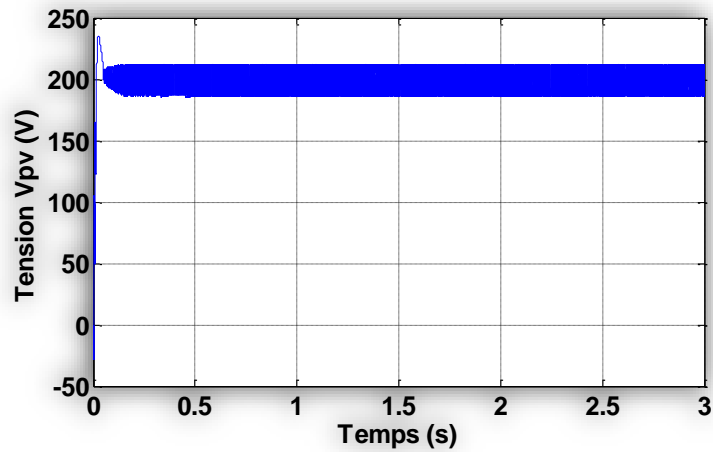


Figure I-28 : représente courbe de la tension V_{pv}

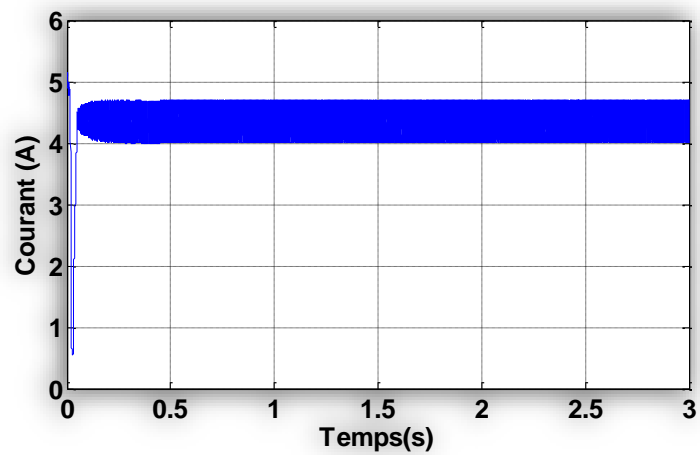


Figure I-29 : représente courbe de courant I_{pv}

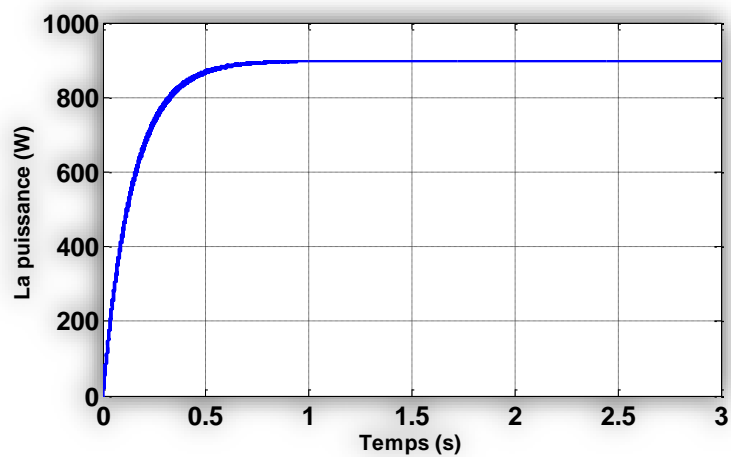


Figure I-30 : représente courbe de la puissance P_{pv}

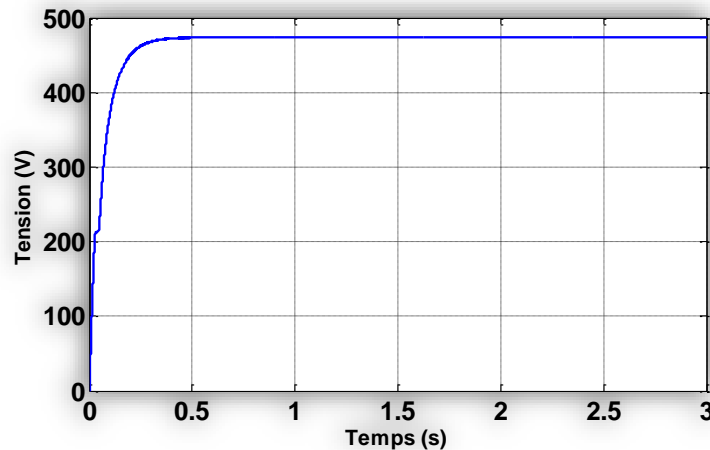


Figure I-31 : représente courbe de la puissance P_{pv}

• CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté une approche générale sur l'énergie photovoltaïque, où dans cette partie on a commencé par le principe de fonctionnement de PV et les différents constituant des systèmes photovoltaïques.

De plus, le modèle électrique et les courbes caractéristiques ont été présentés pour une meilleure compréhension de fonctionnement des modules photovoltaïque, les différents types de système photovoltaïque comme le système autonome, raccordé au réseau et hybride, avec une présentation des systèmes de stockage de l'énergie ont été abordé.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons simulé la chaîne photovoltaïque qui contient le convertisseur (les hacheurs Boost) avec la commande MPPT P&O utilisé pour son control.

CHAPITRE II :
MODÉLISATION ET CONTROL DE
SYSTÈME DE POMPAGE
PHOTOVOLTAÏQUE

II.1 Introduction

La qualité de la MAS, son faible coût, ses performances et sa facilité d'entretien, justifie son intérêt particulier dans l'industrie moderne, elle est la plus utilisée comme moteur et tend à remplacer le moteur à courant continu dans plusieurs applications. Le modèle de Park et l'orientation du flux rotorique qui rendent le modèle compliqué de la machine similaire au modèle de la machine à courant continu, un modèle simple présentant un découplage entre le couple électromagnétique et le flux rotorique est un atout en plus de ses avantages, ce modèle rend sa commande plus facile et plus performante, surtout avec le développement de l'électronique de puissance et les systèmes de commande qui peuvent fournir un signal d'entrée à fréquence et amplitude variables en plus qu'il est faible en harmoniques supérieures.

Les onduleurs à source de tension ont été habituellement considérés comme les convertisseurs de puissance les plus adaptés aux entraînements à courant alternatif. Principalement, parce que ces onduleurs peuvent être appliqués facilement pour les systèmes à modulation de largeur d'impulsions (MLI), avec des fréquences élevées. De même, il assure une commande du moteur facile et effective puisque son circuit de puissance offre la possibilité de travailler sur une large gamme de fréquence et de tension de charge [21].

Dans ce chapitre nous allons présenter deux types de commande ; la première commande est la commande scalaire, la seconde et la commande vectorielle à flux rotorique orienté du moteur à induction (CV-OFR).

Au sein de ce chapitre, la modélisation du moteur à induction et de l'onduleur triphasé va être présentée en premier lieu. Puis, aura lieu une simulation comparative du comportement du moteur à induction vis-à-vis le couplage avec les systèmes de pompage centrifuge,.

Les résultats des simulations seront donnés sous forme de courbes et des zooms en cas de nécessité pour bien faire apparaître les différences. Des

Chapitre II : Modélisation et control de système de pompage photovoltaïque
interprétations et des conclusions seront données pour toutes les simulations.

II.2 Présentation de la machine asynchrone

Une machine asynchrone à cage est constituée de deux parties : le stator et le rotor. Le stator représente la partie statique de la machine. Il est constitué d'un circuit magnétique comportant de multiples encoches à l'intérieur desquelles sont bobinés trois enroulements formant les enroulements statoriques. Au centre de ce cylindre, on trouve le rotor de la machine dont le circuit magnétique est composé de barres généralement en cuivre ou en aluminium coulé sous pression. Ces barres sont reliées entre-elles à chaque extrémité par un anneau de court-circuit.

Notons que les barres sont légèrement inclinées pour éviter l'effet magnétique d'encoche dû à la forte variation de la réluctance qui perturbe le couple. Cette inclinaison facilite également le démarrage et rend le fonctionnement plus silencieux. La cage est traversée par l'arbre mécanique qui sort de chaque côté, [24].

II.2.1 Modélisation de la machine asynchrone

La modélisation des machines électriques est une phase primordiale pour l'élaboration des lois de commande. En effet, aborder la commande des machines électriques nécessite l'emploi d'une méthode de modélisation adaptée à la commande. Il s'agit d'une application simple des méthodes de modélisation modernes de la machine asynchrone, qui présentent des spécificités propres, qui ne sont pas nécessairement communes à d'autres processus physiques. Il est donc évident que cette étape de modélisation soit un passage obligé pour concevoir des systèmes de commande performants et adaptés aux variateurs de vitesse. De nos jours, de nombreuses publications et ouvrages spécialisés présentent ces techniques de modélisation, [23].

II.2.2 Modèle de la machine à induction triphasé

Le modèle de la machine à induction triphasé est illustré par le schéma de la Figure. II-1.

Avec les armatures statoriques et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé, sont trois enroulements du stator : S_A , S_B et S_C , et pour les trois enroulements rotoriques : R_a , R_b et R_c , et θ : Angle entre l'axe de la phase statorique et la phase rotorique.

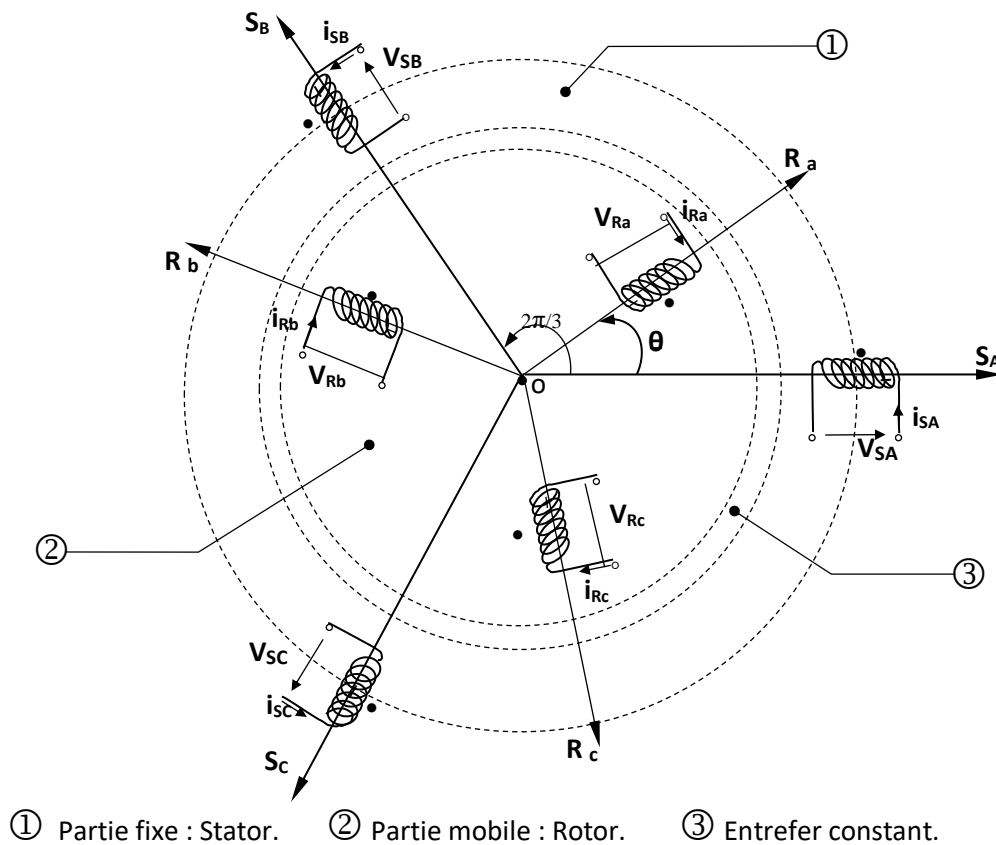


Figure II-1 Modèle d'une machine asynchrone triphasée.

II.2.3 Hypothèses simplificatrices

L'étude de la machine asynchrone traduit les lois de l'électromagnétisme dans le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices suivantes [25] :

- Parfaite symétrie.

- Assimilation de la cage à un bobinage en court-circuit de même nombre de phase que le bobinage statorique.
- Répartition sinusoïdale le long de l'entrefer du champ magnétique de chaque bobinage.
- Absence de saturation dans le circuit.

La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique.

II.2.4 Équations générales de la MAS triphasée

Dans les conditions précédentes, les équations des circuits électriques statoriques et rotoriques se présentent sous forme matricielle donnée ci-après, voir «Figure II-1».

II.2.4.1 Équations électriques

L'application de la loi de Kirchhoff des tensions permet d'écrire les équations d'équilibre de la machine asynchrone, sous forme matricielle comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \end{array} \right. \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_s] = [V_A \quad V_B \quad V_C]^T \\ [I_s] = [I_A \quad I_B \quad I_C]^T \\ [\Phi_s] = [\Phi_A \quad \Phi_B \quad \Phi_C]^T \\ [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} [V_r] = [V_a \quad V_b \quad V_c]^T \\ [I_r] = [I_a \quad I_b \quad I_c]^T \\ [\Phi_r] = [\Phi_a \quad \Phi_b \quad \Phi_c]^T \\ [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II. 2})$$

Où :

R_s : Résistance d'une phase du stator.

R_r : Résistance d'une phase du rotor.

$[V_s] = [V_A \ V_B \ V_C]^T$: Vecteur tensions statoriques.

$[V_r] = [V_a \ V_b \ V_c]^T$: Vecteur tensions rotoriques.

$[I_s] = [I_A \ I_B \ I_C]^T$: Vecteur courants statoriques.

$[I_r] = [I_a \ I_b \ I_c]^T$: Vecteur courants rotoriques.

$[\Phi_s] = [\Phi_A \ \Phi_B \ \Phi_C]^T$: Vecteur flux statoriques.

$[\Phi_r] = [\Phi_a \ \Phi_b \ \Phi_c]^T$: Vecteur flux rotoriques.

II.2.4.2 Équations magnétiques

Les hypothèses citées précédemment conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants moyennant les notations usuelles.

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} [L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \\ [M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II.4})$$

Où :

$l_s, (l_r)$: L'inductance propre d'une phase statorique, (rotorique).

$[L_{ss}], (L_{rr})$: Matrice d'inductances statoriques (rotoriques).

$M_s, (M_r)$: L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques, (rotoriques).

M_0 : Le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

θ : Écart angulaire entre les axes des phases du stator et du rotor.

II.2.4.3 Équations mécaniques

L'équation mécanique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{II. 5})$$

Où :

J : moment d'inertie de la partie tournante.

Ω : vitesse mécanique du moteur

f : Coefficient de frottement visqueux

C_e : couple électromagnétique.

C_r : couple de charge.

En remplaçant l'équation (II. 3) dans (II. 1), on obtient le modèle asynchrone triphasé :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r]) \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s]) \end{cases} \quad (\text{II. 6})$$

La résolution analytique du système d'équation (II. 6) se heurte à des difficultés du fait que les termes trigonométriques de la matrice des inductances varient en fonction de la position ce qui conduira à l'usage de la transformation de Park qui permettra de rendre ces termes indépendants de la position.

II.2.5 Transformation de Park

❖ Notons que des détails sur la transformation de Park, sont donnés à l'annexe (B).

II.2.6 Application de la transformation de Park au modèle de la MAS

On désire transformer les enroulements de la M.AS triphasée en des enroulements biphasé orthogonaux équivalents selon les axes (d – q) lié au champ tournant, voir «Figure II-2», ainsi la composante homopolaire pour équilibrer le système transformé, C'est à dire :

- Direct selon l'axe (d).
- Quadrature (transversal) selon l'axe (q).
- Homopolaire (o).

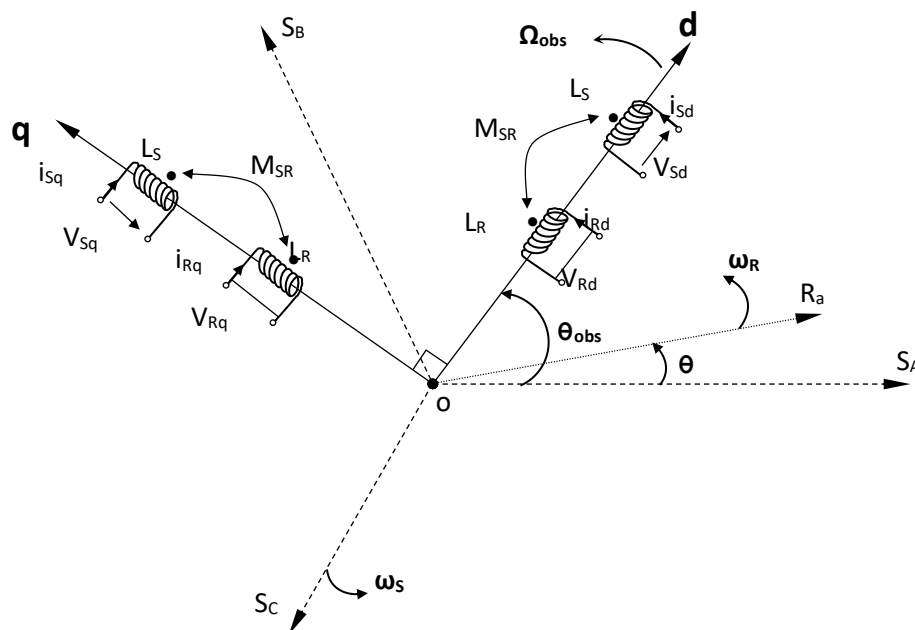


Figure II-2 Référentiel tournant d'axes (d- q).

Où :

$\theta_{obs} = \int \omega_{obs} dt$: est une position quelconque d'observation entre les systèmes d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé.

Les paramètres ainsi que les caractéristiques de la machine a induction

servant de support aux diverses simulations présentées dans ce chapitre sont donnés en annexe (A).

II.2.7 Le modèle vectorielle de la machine

Soit dans la représentation de Fresnel, en nombre complexe, les équations de tension dans un repère (d, q) tournant à la vitesse ω_s [26].

$$\begin{cases} \overline{V}_s = R_s \cdot \overline{I}_s + \frac{d \overline{\Phi}_s}{dt} + j \cdot \omega_s \cdot \overline{\Phi}_s \\ \overline{V}_r = 0 = R_r \cdot \overline{I}_r + \frac{d \overline{\Phi}_r}{dt} + j \cdot \omega_r \cdot \overline{\Phi}_r \\ \overline{\Phi}_s = L_s \cdot \overline{I}_s + M \cdot \overline{I}_r \\ \overline{\Phi}_r = L_r \cdot \overline{I}_r + M \cdot \overline{I}_s \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

On choisissant comme variables d'état le courant statorique \overline{I}_s et le flux rotorique $\overline{\Phi}_r$.

Dans le cas d'un repère (α, β) fixe lié au stator, les équations électriques et électromagnétique sont données par :

$$\begin{cases} \frac{d \overline{I}_s}{dt} = \left(-\frac{R_t}{\sigma L_s} \right) \overline{I}_s + \frac{M}{\sigma L_s L_r} \left(\frac{1}{\tau_r} - j\omega \right) \overline{\Phi}_r + \frac{1}{\sigma L_s} \overline{V}_s \\ \frac{d \overline{\Phi}_r}{dt} = \frac{M}{\tau_r} \overline{I}_s + \left(-\frac{1}{\tau_r} - j\omega_r \right) \overline{\Phi}_r \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left(p \frac{M}{L_r} (\overline{\Phi}_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \overline{\Phi}_{r\beta} i_{s\alpha}) - C_r - f \cdot \omega \right) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

R_t : Résistance totale ramenée au stator, $R_t = R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r$

σ : Le coefficient de fuite total, $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$

τ_r : La constante du temps rotorique, $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$

❖ Notons que des détails sur la modélisation complexe sont donnés en annexe (B).

II.3 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui transforme une source de tension continue en une tension alternative pour pouvoir alimenter des charges en courant alternatif. Les composants semi-conducteurs utilisés dans la structure peuvent être des GTO fonctionnant à des fréquences de commutation relativement basses, ou des IGBT lesquels peuvent atteindre des fréquences de travail de l'ordre de 25 Kz. L'onduleur de tension permet d'imposer à la machine des ondes de tension à amplitude et fréquence variables [34-35]. Le schéma structurel d'un tel ordinateur triphasé à deux niveaux et de sa charge (MAS) est illustré par la figure II.3.

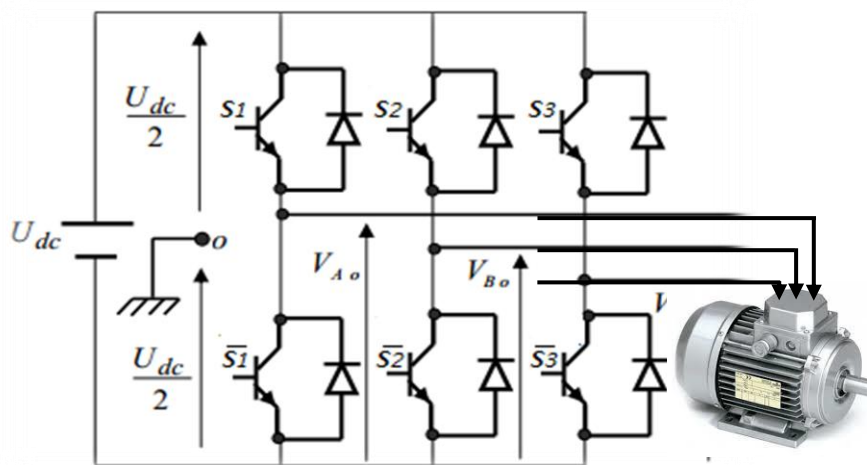


Figure II-3 Schémas d'un onduleur à deux niveaux alimentant la MAS

- ❖ On obtient le modèle de l'onduleur suivant : (voire la démonstration sur l'annexe C).

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 9})$$

La technique de commande en tension MLI (sinus-triangle) permettant de définir les instants de commande des interrupteurs.

II.3.1 Modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle

La MLI Sinus-Triangle utilise le principe d'intersection entre une référence sinusoïdale de fréquence f_s appelée modulante, et un signal triangulaire de haute fréquence f_p appelée la porteuse, pour déterminer les instants de commutation. Le schéma de principe est donné par la figure (II.4).

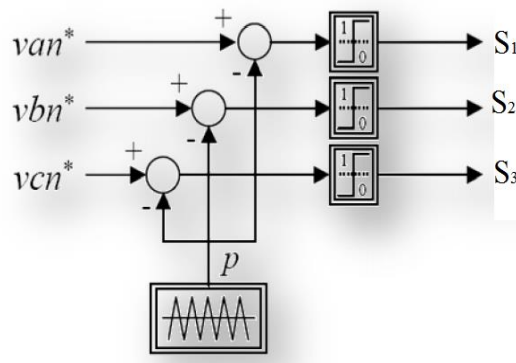


Figure II-4 Principe de la MLI Sinus-Triangle.

L'onduleur MLI triphasé en pont est formé de trois demi ponts monophasés. Pour que les trois tensions de sortie aient fondamentaux de référence sinusoïdales de même amplitude, de même fréquence et déphasées de $\frac{2}{3}\pi$ deux à deux (pour générer les signaux de commande).

Les caractéristiques de la commande :

Deux paramètres qui caractérisent cette technique :

- L'indice de modulation $m = \frac{f_p}{f_r}$.
- Le coefficient de réglage en tension r , qui est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à celle de la porteuse $r = \frac{u_r}{u_p}$.

II.4 SYSTEM DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE

Une pompe est une machine pour convertir la puissance d'entrée mécanique en puissance liquide de rendement. Elle est couplée directement au moteur et elle est caractérisée par un couple, vitesse, débit. Une bonne adaptation entre la pompe et le moteur mène à de bons résultats. On appelle pompe tout appareil qui aspire un fluide d'une région à basse pression pour le refouler vers une région à plus grande pression. Ainsi, d'après cette définition on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide.

L'augmentation de la pression du liquide véhiculé par la pompe a eu lieu suite à la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et

La sortie de la pompe.

Le volume de l'eau pompée dépend de cinq facteurs essentiels :

- ✓Le niveau de rayonnement qui est une mesure de l'énergie disponible du soleil.
- ✓Le générateur photovoltaïque.
- ✓L'efficacité de conversion de la rangée photovoltaïque.
- ✓La température ambiante.

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle

Fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker L'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée

« Pompe au fil du soleil » utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son Utilisation.

II.4.1 DIFFERENTES TYPES DES POMPES

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. A part 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. La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres.

A. LA POMPE VOLUMETRIQUE

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. Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT.

La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes.

B. 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),

II.4.2 CONSTITUTION D'UNE POMPE CENTRIFUGE

Les pompes se composent 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

II.4.3 FONCTIONNEMENT D'UNE POMPE CENTRIFUGE

La théorie des fonctionnements des pompes centrifuges montre qu'entre l'entrée et la sortie de la roue, l'énergie mécanique totale de la veine fluide est augmenté, cette augmentation provient d'une part d'un accroissement de l'énergie de pression et aussi d'un accroissement de l'énergie cinétique, cette dernière est transformée en énergie de pression par ralentissement progressif qui est obtenue dans une pièce placés à l'intérieur de la roue appelle limaçon, celle-ci se termine par un cône divergent.

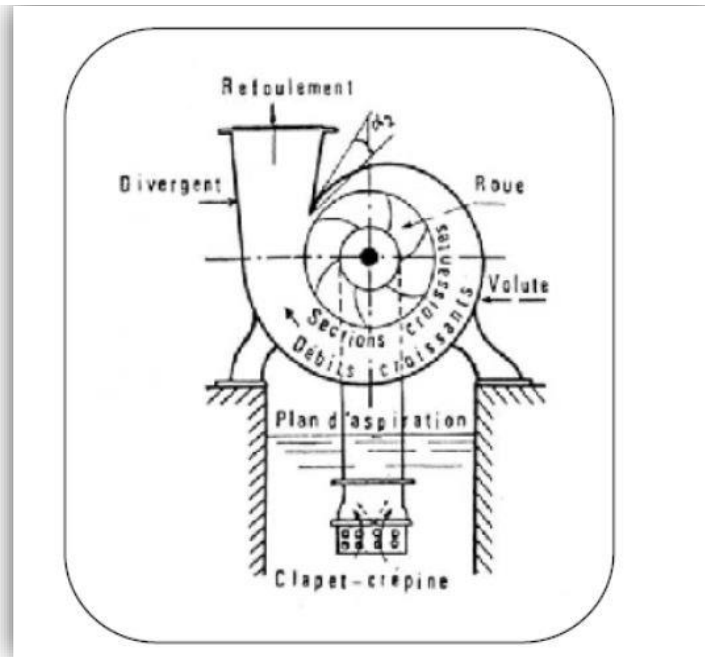


Figure II-5 : Constitution d'une pompe centrifuge

II.4.3 MODELISATION DE LA POMPE CENTRIFUGE

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

$$f(H, Q, \omega) = 0 \quad \text{(II -10)}$$

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

$$H = H_s + H_d \quad \text{(II-11)}$$

H : Hauteur totale du pompage. HS : Hauteur statique qui est la distance entre les niveaux statique de l'eau dans le puit jusqu'au le point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau. Hd : est la somme des pertes linéaires et singuliers, ces pertes sont :

II.4.4 LA CARACTERISTIQUE Q(H) DE LA POMPE

La relation liant la hauteur d'eau H avec le débit de la pompe Q est donnée par le modèle de « PELEIDER - PETERMANN »

$$H = a_0 * \omega^2 - a_1 * \omega * Q - a_2 * (Q^2) \quad \text{(II- 12)}$$

Avec : $a_0; a_1; a_2$ sont des constantes de la pompe donnée par le constructeur.

A. LA CARACTERISTIQUE COUPLE VITESSE $C(\omega)$ DE LA POMPE

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

$$C_R = K_p * \omega^2 \quad (\text{II- 13})$$

Avec :

$$K_p = \frac{P_m}{\omega^3} \quad (\text{II- 14})$$

B. CALCUL DE PUISSANCE

Une pompe est une machine qui fournit de l'énergie à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_H = \rho g Q h(\omega) \quad (\text{II- 15})$$

L'autre expression a considéré est celle de la puissance absorbée par une pompe, c'est à dire la puissance nécessaire pour son entraînement mécanique, qui est exprimé par la relation suivante :

$$P_m = \frac{9.81 \times \rho H h}{\eta_p} (\omega) \quad (\text{II-16})$$

Où η_p : Le rendement de la pompe.

P_m : Puissance mécanique du moteur.

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

C. CALCUL DU RENDEMENT

- Pour les groupes électropompes (pompe et moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement globale.

$$\eta_{mp} = \frac{P_H}{P_a} \quad (\text{II- 17})$$

D. ASSOCIATION DE SYSTEME DE POMPAGE

- Pour tester le bon fonctionnement de l'ensemble des éléments du système on a utilisé l'environnement Simulink, le schéma bloc est représenté comme suit :

Les résultats de simulation du système de pompage solaire :

- Nous représentons les évolutions en fonction du temps de la tension et courant débité par le GPV, le signal de commande du MPPT, de la vitesse de rotation, des couples électromagnétique et résistant, du débit d'eau, de la hauteur manométrique totale, des tensions simples aux bornes du moteur

II.5 Présentation des résultats de simulation

Afin de montrer les résultats obtenus par simulation de cette commande. Nous avons simulé le système dans des différents cas de fonctionnement tels que :

- Démarrage à vide suivi d'une application d'un couple de charge.

Inversion du sens de vitesse.

- **Résultats et interprétation su système (sans pompe)**

Dans cette partie on présentera le modèle de la MAS (sans pompe) qui est présenté par la Figure II-5 .

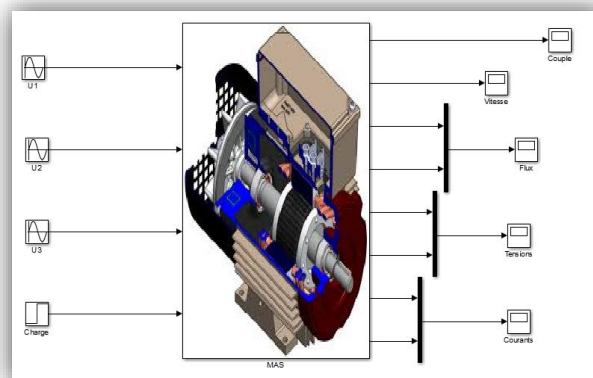
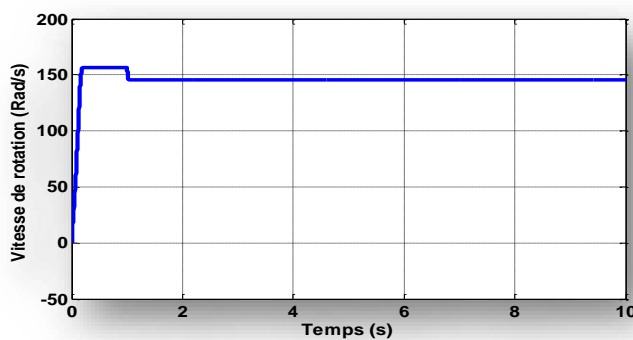


Figure II-6 : Schéma bloc d'un MAS sans pompe

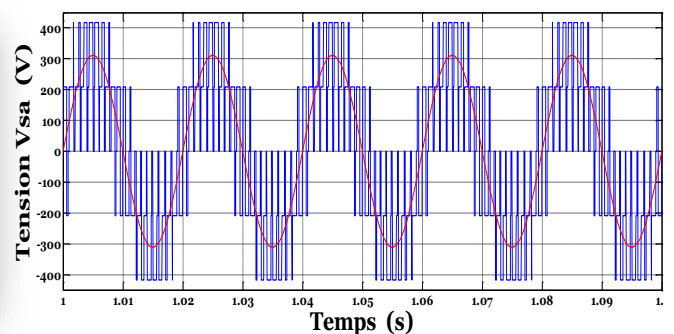
• **Résultats de simulation**

Les courbes de la Figure : II-6 représentent les résultats de simulation pour une machine asynchrone alimentée par le réseau triphasé 220/380(V),50(Hz) d'une part et d'autre part alimenté par un onduleur triphasé à MLI. On effectue un démarrage à vide de la machine suivi d'une application de la charge nominale $C_r=5$ (N.m) à l'instant $t=1$ sec.

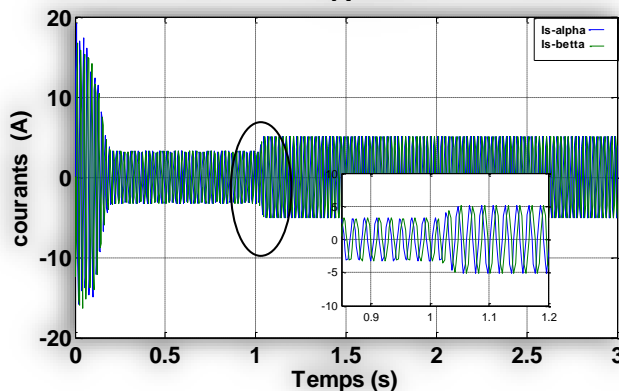
- ❖ La simulation a été effectuée par le logiciel Matlab/Simulink.
- ❖ Les paramètres de la machine sont donnés dans l'annexe (A).



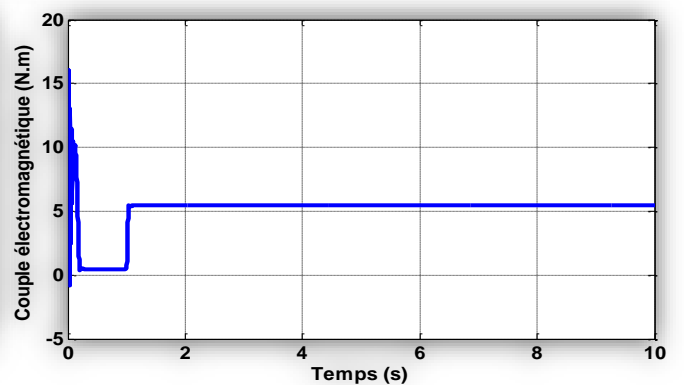
A



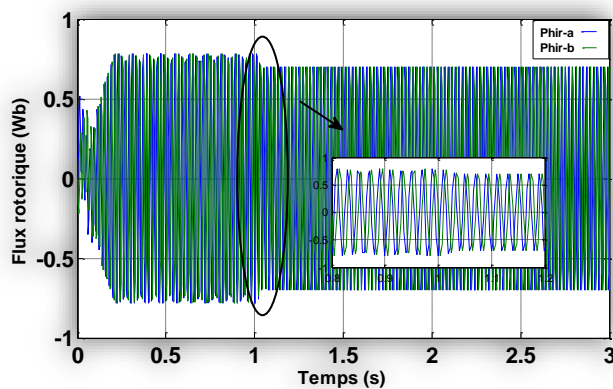
B



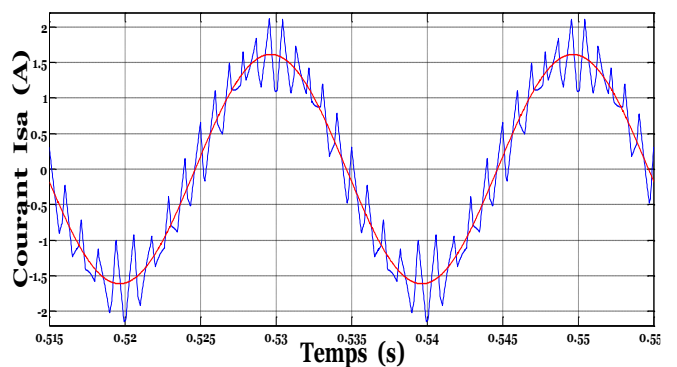
C



D



E



F

Figure II-7 : comparaison des caractéristiques obtenues sans et avec onduleur de tension à MLI.

A : représente la courbe de vitesse de rotation

B : représente la courbe de tension V_{sa}

C : représente la courbe de courant

D : représente la courbe de couple électromagnétique

E : représente la courbe de flux rotorique

F : représente la courbe de courant I_{sa}

• ***Interprétation des résultats de simulation***

❖ Nous remarquons aussi dans la figure : 1-5 que les réponses de la vitesse de rotation se superposent pour les deux modes d'alimentation, mais au niveau des réponses du couple, tension et des courants on remarque que la superposition n'est pas parfaite à cause de l'existence de pulsations provoquées par l'onduleur.

❖ **À vide :**

La courbe de vitesse présente des oscillations au démarrage, ensuite elle se stabilise à (157 rad/sec) puisque le moteur possède 2 paires de pôles.

Au démarrage à vide, le couple est fortement pulsatoire. Il atteint une valeur maximale de l'ordre de 5 fois le couple nominal, après disparition du régime transitoire, il tend vers zéro.

Il y a un fort appel de courant au démarrage égal à 5 fois le courant nominal, après disparition du régime transitoire, il se stabilise à sa valeur nominale.

❖ **En charge :**

On a introduit un couple de charge $C_r = 1.5 N.m$ à l'instant $t = 10sec$.

On constate que cette introduction a provoqué une diminution de la vitesse de rotation. Pour le courant, il y'a une augmentation après l'application du couple de charge.

• **Résultats et interprétation su système (avec pompe)**

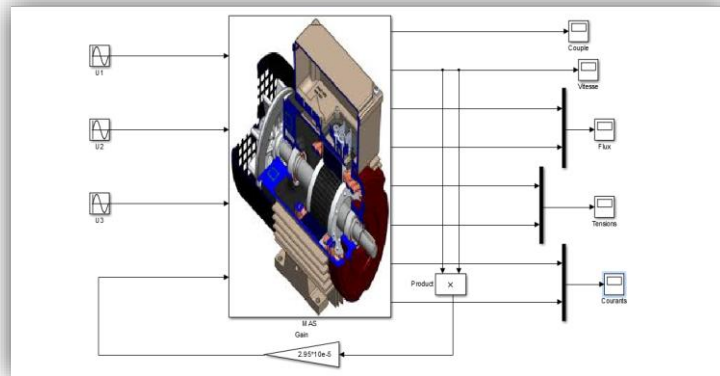
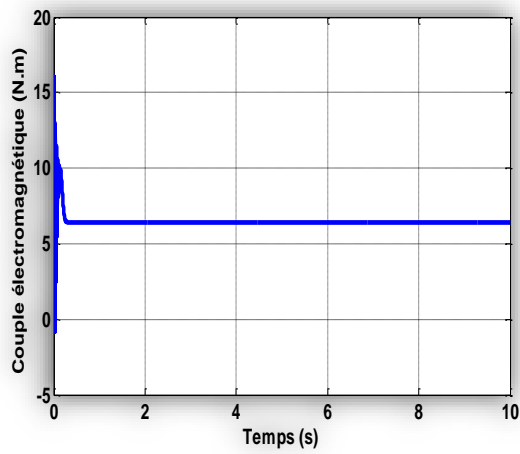
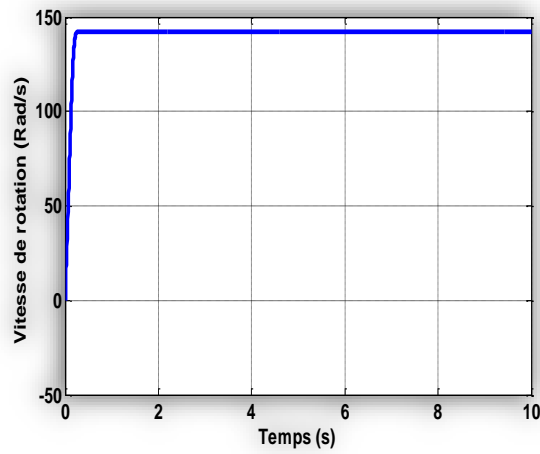


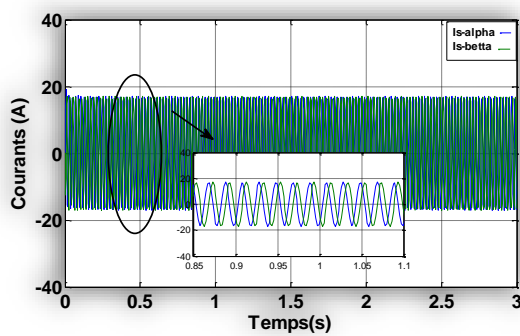
Figure II-8 2: Schéma bloc d'un mas avec la pompe



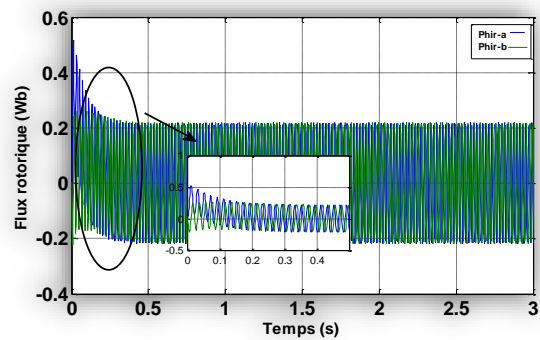
A



B



C



D

A : représente la courbe de couple électromagnétique

B : représente la courbe de vitesse de rotation

C : représente la courbe de courant

D : représente la courbe de flux rotorique

Figure II-9 : comparaison des caractéristiques obtenues sans et avec ondulateur de tension

❖ Nous remarquons aussi dans la figure : II-9 que les réponses de la vitesse de rotation se superposent pour les deux modes d'alimentation, mais au niveau des réponses du couple, tension et des courants on remarque que la superposition n'est pas parfaite à cause de l'existence de pulsations provoquées par l'ondulateur.

❖ **En charge :**

On a introduit un couple de charge $C_r = 16 \text{ N.m}$ à l'instant $t = 10\text{sec}$.

On constate que cette introduction a provoqué une diminution de la vitesse de rotation. Pour le courant, il y'a une augmentation après l'application du couple de charge.

II.6 Commande scalaire :

C'est l'une des premières commandes, développée pour la variation de vitesse des moteurs asynchrones. Dans cette commande, on s'intéresse qu'à l'amplitude de la variable contrôlée et non à sa phase. On considère dans la littérature deux types de commande scalaire [35, 36,37] :

- 1) La commande scalaire indirecte où le flux magnétique est contrôlée en imposant le rapport amplitude / fréquence de la tension ou du courant.
- 2) La commande scalaire directe où le flux magnétique est contrôlé à partir de son estimation ou de sa mesure.

La deuxième méthode est plus difficile à mettre en pratique et nous nous intéressons uniquement à la première approche qui par sa implicite est la plus utilisées [25,32]. En régime statique, le couple est déterminé selon l'équation.

$$C_e = 3p \frac{\phi_r^2}{R_r} \omega_r \quad (\text{II. 18})$$

Cette équation montre que si le flux est maintenu constant, on obtient une caractéristique de commande rappelant celle de la machine à courant continu où le rôle du courant d'induit est joué par la pulsation rotorique ω_r .

En négligeant la chute de la tension ohmique dans le bobinage statorique, le flux rotorique peut être maintenu constant si la tension statorique reste proportionnelle à la pulsation [32]. Cette hypothèse n'est plus applicable aux basses Vitesse et il faut alors imposer à la tension statorique une valeur plus grande que celle que donnerait un rapport (tension/pulsation) constant [38, 39,37].

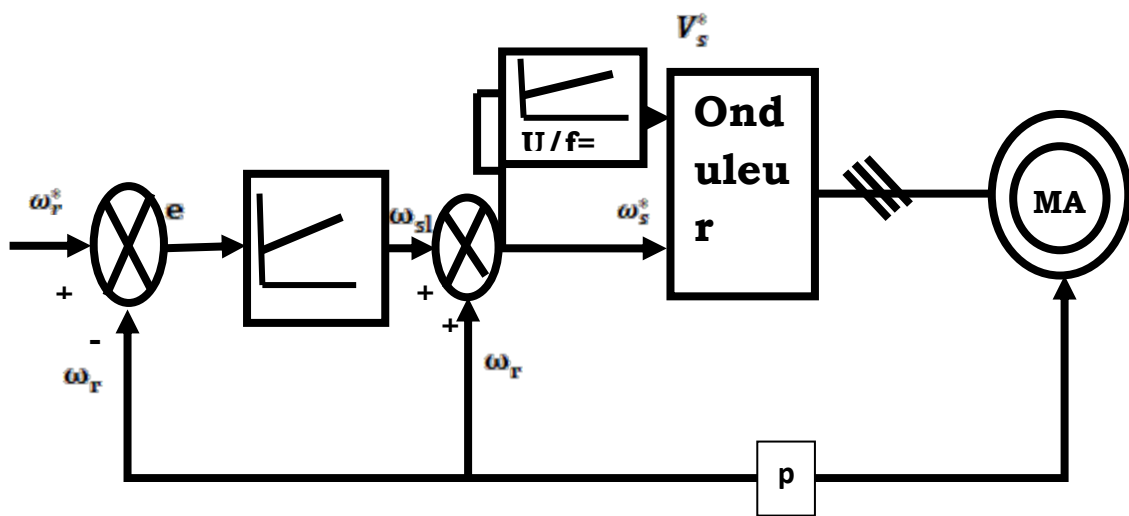


Figure.II-10: Schéma Classique de commande scalaire [28].

La figure (II-10) représente le schéma classique de commande scalaire indirecte [40] L'erreur e de vitesse permet par l'intermédiaire d'un régulateur PI de générer la pulsation de glissement ω_{sl} qui ajoutée à la pulsation rotorique ω_r donne la pulsation $\omega^* S$ des tensions statorique [38].

De cette dernière, on détermine la tension statorique $V^* S$ en utilisant la loi (u/f) constant [41,38], cette stratégie de contrôle permet d'obtenir de bons résultats pour des consigne de vitesse sensiblement constant, cependant,

Chapitre II : Modélisation et control de système de pompage photovoltaïque pour un démarrage ou pour une inversion de sens de rotation de la machine. Le flux oscille fortement avec des grandes amplitudes et son module est variable durant les régimes transitoires [40,41]. Ceci explique pourquoi les relations utilisées pour calculer cette commande ne sont valable que dans le régime permanent.

Ces oscillations vont se reproduire sur la qualité du couple et la vitesse, dégradant ainsi les performances en régime transitoire de la machine. Ce type de commande n'est donc employé que pour des applications où la variation de vitesse n'est pas grande telle en pompage ou en ventilation [42,43]. Ainsi, ce type de contrôle est inadapté lorsque l'on veut réaliser un positionnement de la machine tel en robotique ou en commande numérique de machine outils, il faut alors faire appel à des technique plus adaptées telle que la commande vectorielle, objet de notre étude.

II.7 La commande vectorielle

- ***Généralités***

La commande de la machine asynchrone est devenue un domaine de recherche très actif durant ces dernières décennies. Cet intérêt est motivé par le besoin de prendre sa structure d'état non- linéaire.

Différentes méthodes de commande de la machine asynchrone ont été proposées dans la littérature. Cependant, la commande par orientation de flux, qui assure un découplage entre les variables de commande, reste la plus utilisée, vu les performances dynamiques élevées qu'elle offre pour une large gamme d'applications [27].

- ***Principe de la commande vectorielle par orientation du flux***

Le principe de la commande vectorielle ou par flux orienté consiste à réaliser un découplage efficace entre les deux variables principales de la machine asynchrone soient le couple et le flux dont l'interdépendance est montrée dans l'équation du couple suivante [28].

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \quad (\text{II. 19})$$

La commande par orientation du flux et basée sur une orientation du repère tournant (T) d'axes (d, q) tel que l'axe d soit confondu avec la direction du flux Φ_r comme montre la figure 1-6

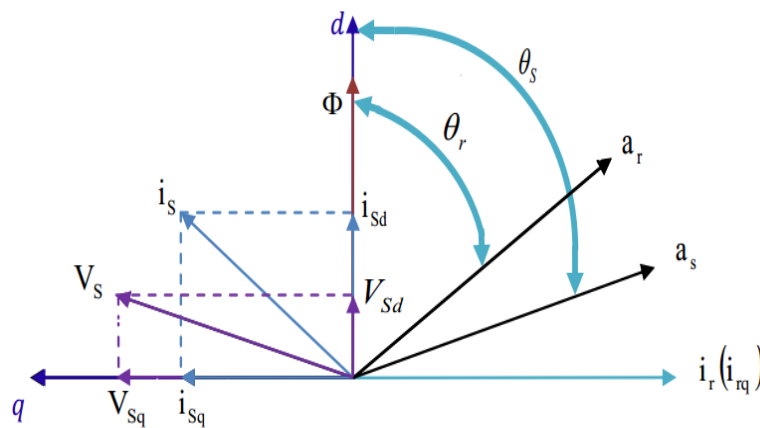


Figure 0-11 : Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer).

Le flux (Φ) peut représenter :

- 1 Flux rotorique : $\Phi_{rd} = \Phi_r$ et $\Phi_{rq} = 0$
- 2 Flux statorique : $\Phi_{sd} = \Phi_s$ et $\Phi_{sq} = 0$
- 3 Flux d'entrefer : $\Phi_{gd} = \Phi_g$ et $\Phi_{gq} = 0$

Dans les trois cas, le couple est proportionnel au produit du flux par la composante en quadrature du courant statorique avec le flux. Seul le choix du flux rotorique permet un découplage naturel caractérisé par une

Chapitre II : Modélisation et control de système de pompage photovoltaïque
indépendance du flux par rapport à la composante en quadrature du
courant statorique [29].

• Principe de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique

La commande par orientation du flux rotorique consisté à réécrire le modèle dynamique de la machine asynchrone dans un référentiel tournant avec le flux du rotor. Par cette transformation non linéaire, il suffit de maintenir le flux du rotor constant pour assurer une commande linéaire en couple par la composante en quadrature du courant statorique [30].

L'orientation du flux rotorique sur l'axe d ne donne : $\begin{cases} \Phi_{rd} = \Phi_r \\ \Phi_{rq} = 0 \end{cases}$

Donc le modèle de la machine alimentée en tension lié au champ tournant s'écrit comme suit :

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \sigma L_s \frac{d I_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d \Phi_r}{dt} - \omega_s \cdot \sigma L_s I_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \sigma L_s \frac{d I_{sq}}{dt} - \omega_s \cdot \frac{M}{L_r} \Phi_r - \omega_s \cdot \sigma L_s I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} T_r \frac{d \Phi_r}{dt} + \Phi_r \cdot \omega_r = M \cdot I_{sd} \\ \omega_r = \omega_s - \omega = \frac{M}{T_r \cdot \Phi_r} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

L'équation du couple (II.21) devient :

$$\begin{aligned} & C_{em} \\ &= P \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_{rd} \cdot i_{sq} \end{aligned} \quad (\text{II. 22})$$

D'après ces équation, on remarque que :

- ✓ Le couple produit par la machine a induction à une similitude remarquable avec celui produit par la machine à courant continu à excitation séparée (relation linéaire entre le couple électromagnétique et le courant i_{sq}).
- ✓ Il y a un couplage entre la composante du courant statorique i_{sq} et la tension V_{sd} et la composante i_{sd} et la tension V_{sq} .

• **Découplage**

Différentes techniques existent : découplage utilisant un régulateur, découplage par retour d'état, découplage par compensation. Nous présentons le dernier type de découplage.

Définissons deux nouvelles variables de commande V_{sd1} et V_{sq1} telle que V_{sd1} réagisse que sur I_{sd} et V_{sq1} sur I_{sq} telle que :

$$V_{sd} = V_{sd1} + E_d \quad \text{et} \quad V_{sq} = V_{sq1} - E_q$$

Avec :

$$\begin{cases} E_d = \mathcal{S} \cdot \frac{M}{L_r} \Phi_r - \omega_s \cdot \sigma L_s I_{sq} \\ E_q = \omega_s \cdot \left(\frac{M}{L_r} \Phi_r + \sigma \cdot L_s I_{sd} \right) \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

Nous pouvons représenter la machine par le schéma bloc suivant :

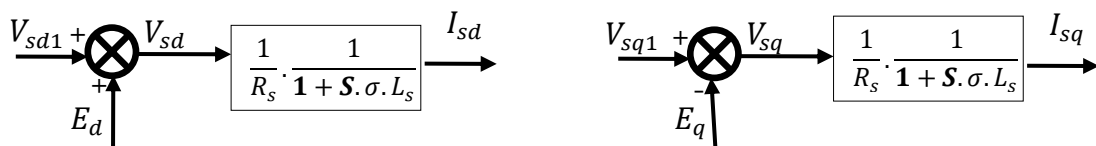


Figure 0-12 Modèle de la machine

Le principe de découplage par compensation est décrit en détail sur la figure suivante :

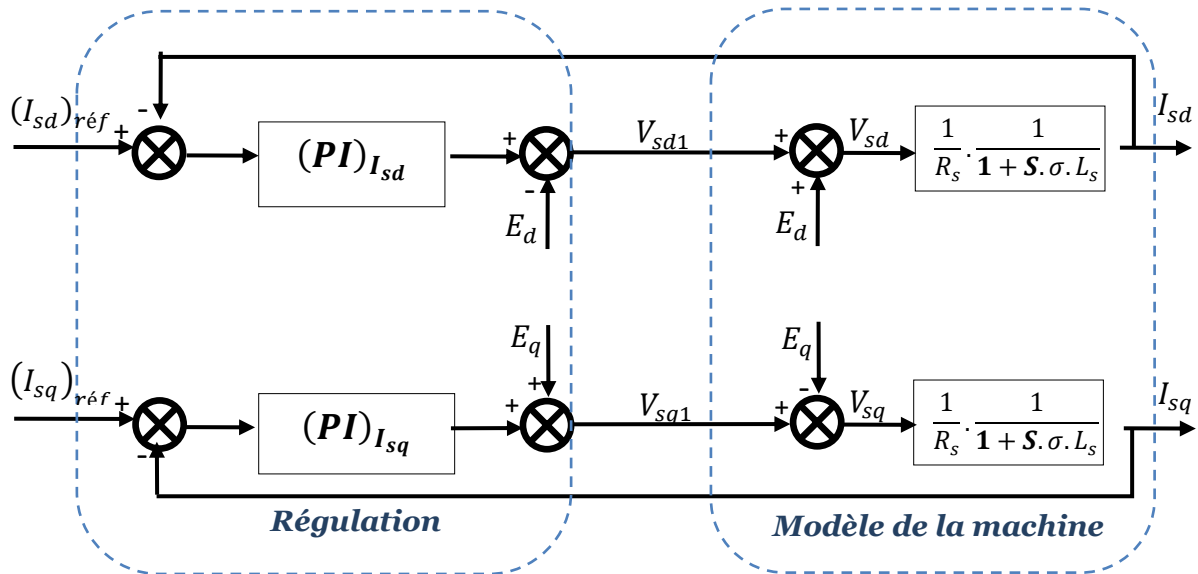


Figure II-13 Découplage par addition des termes de compensation.

- **Détermination Φ_r de et ω_s**

II.7.1 Calcul de Φ_r

Les grandeurs d'état ou de sorties utilisées pour l'élaboration de la commande sont souvent difficilement accessibles pour des raisons techniques (c'est le cas du flux) ou pour des problèmes de coût.

Le flux peut être reconstitué par :

- Des estimateurs utilisés en boucle ouverte,
- Des observateurs corrigeant en boucle fermée les variables estimées.

Les estimateurs reposent sur l'utilisation d'une représentation de la machine sous forme de Park définie en régime permanent (estimateur statique) ou transitoire (estimateur dynamique). Ils sont obtenus par une résolution directe des équations associées à ce modèle.

L'équation (II.20) permet d'estimer le flux $\hat{\Phi}_r$ tel que :

$$\hat{\Phi}_r = \frac{M \cdot I_{sd}}{T_r \cdot s + 1} \quad (\text{II. 24})$$

II.7.2 Calcul de θ_s

La position θ_s est mesurée par la méthode indirecte.

La pulsation statorique s'écrit :

$$\begin{aligned} \omega_s &= \omega \\ &+ \frac{M \cdot I_{sq}}{T_r \cdot \Phi_r} \end{aligned} \quad (\text{II. 25})$$

- **Schéma de la commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté**

La figure II-14 représente le schéma bloc de la CVI à flux rotorique orienté de la MAS alimentée en tension par un onduleur à MLI.

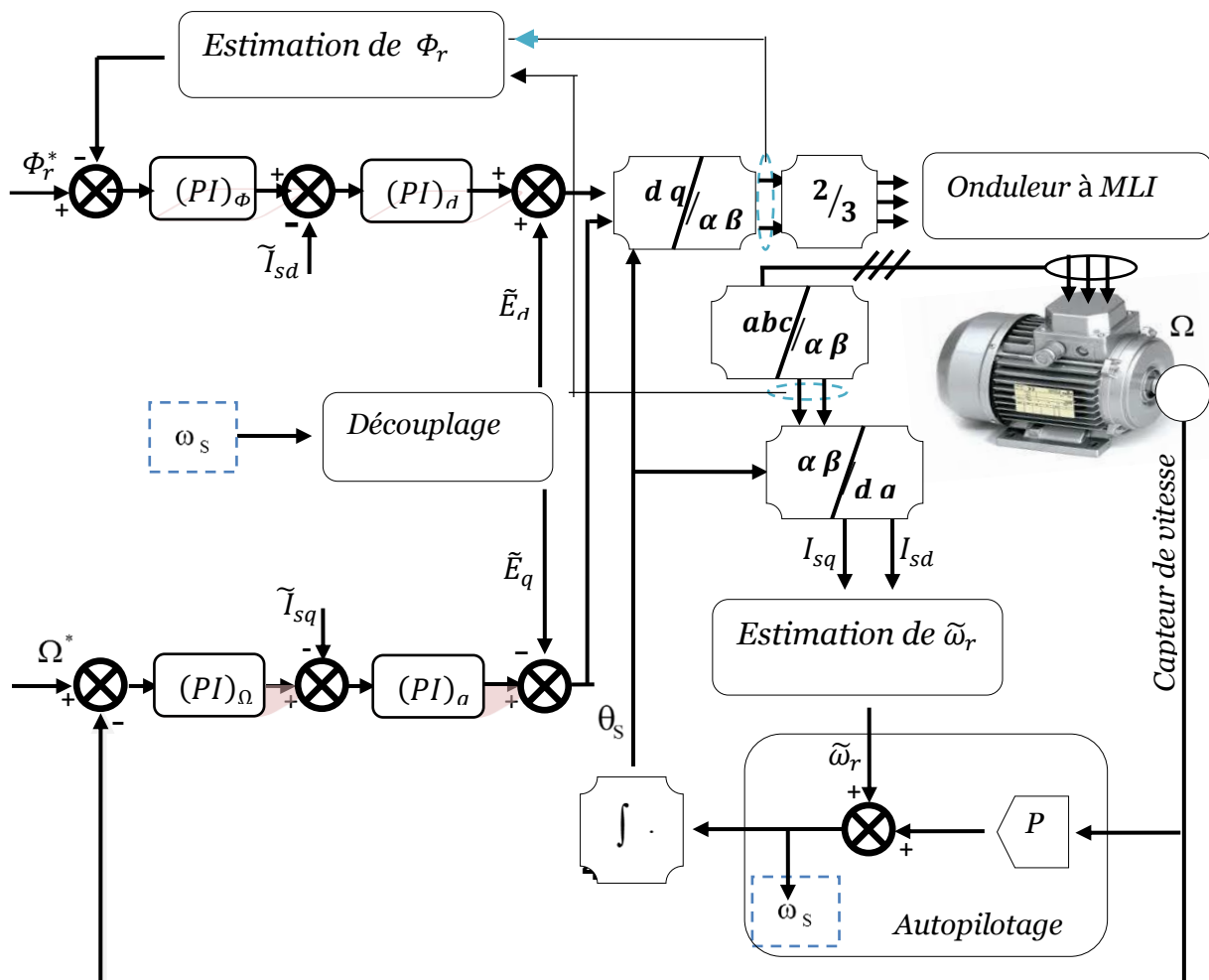


Figure II-14 : représente le schéma bloc de la CVI à flux rotorique orienté de la MAS alimentée en tension par un onduleur à MLI.

Résultats de simulation de la CV lors de l'inversion de vitesse

Calcul des régulateurs (**vitesse, flux et courant**).

- ❖ pour voir la démonstration sur le calcul des régulateur (voir l'annexe D).

Simulation de la commande vectorielle et la commande scalaire

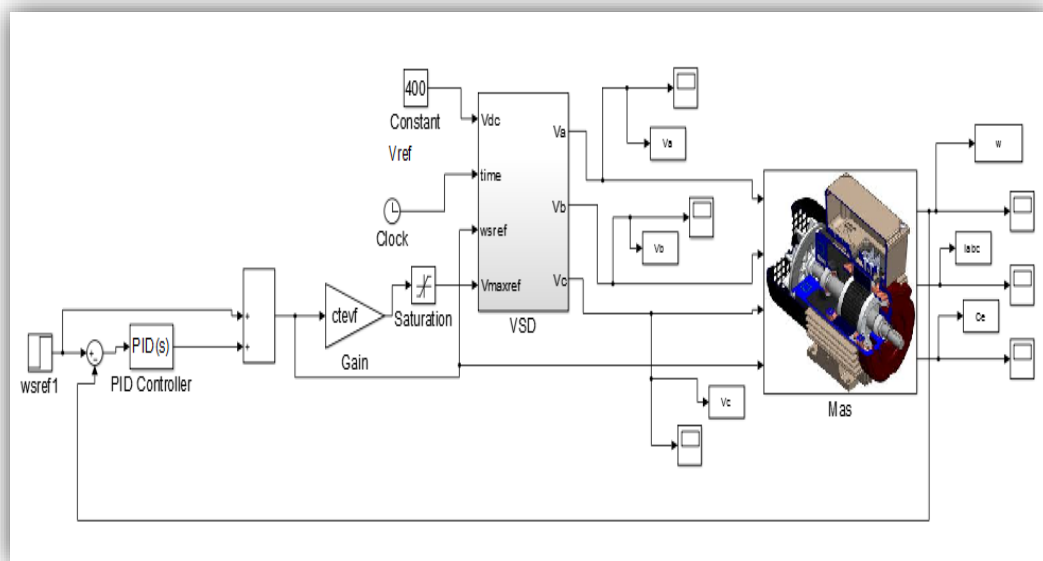


Figure II-15 : Schéma bloc de commande scalaire

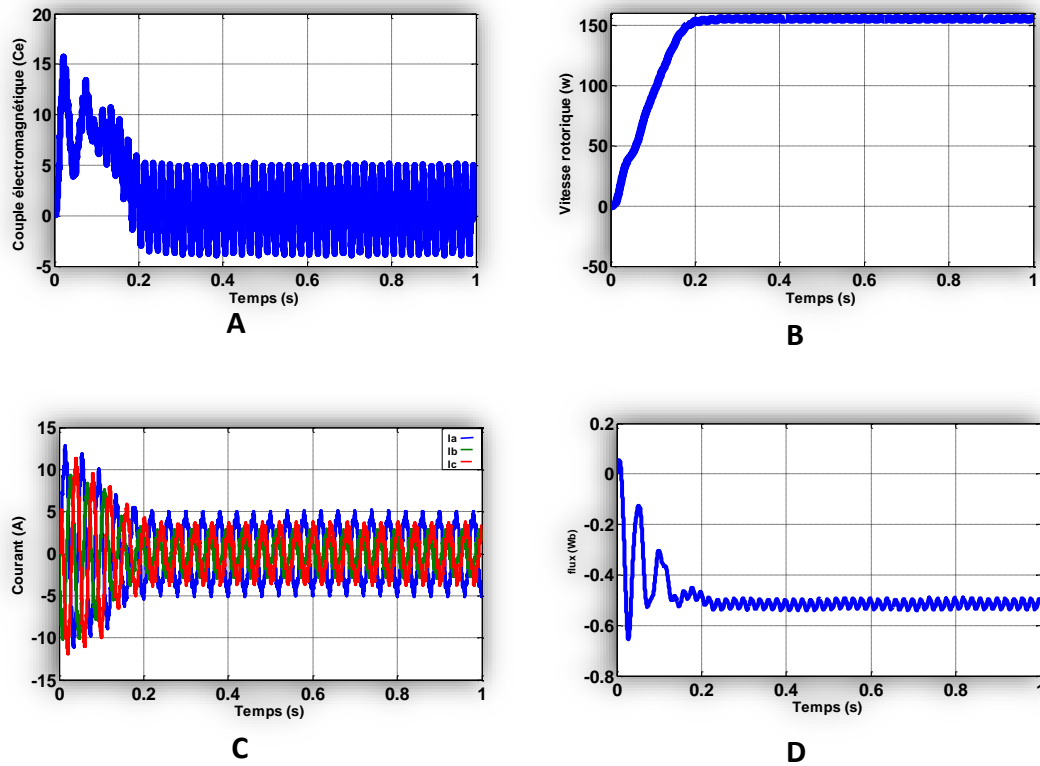


Figure II-16 : représentant les résultats de la commande scalaire

A : représente la courbe de couple électromagnétique

B : représente la courbe de vitesse de rotation

C : représente la courbe de courant

D : représente la courbe de flux rotorique

Les courbes des figures (II-16) représentant les résultats de simulation pour un démarrage à vide ($C_r=0$), l'analyse de ces courbes permet de déterminer le temps d'établissement (0,2s) de toutes les grandeurs la vitesse en régime permanent se stabilises à (159 rad /s).

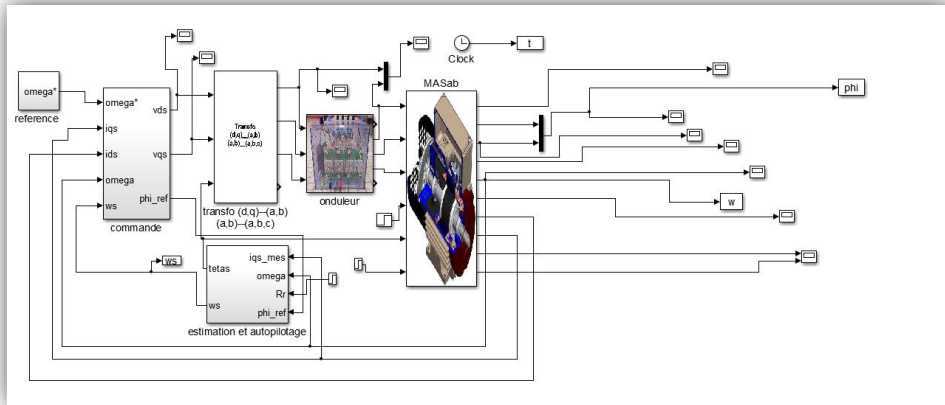


Figure III-17 : Schéma bloc de la commande indirecte

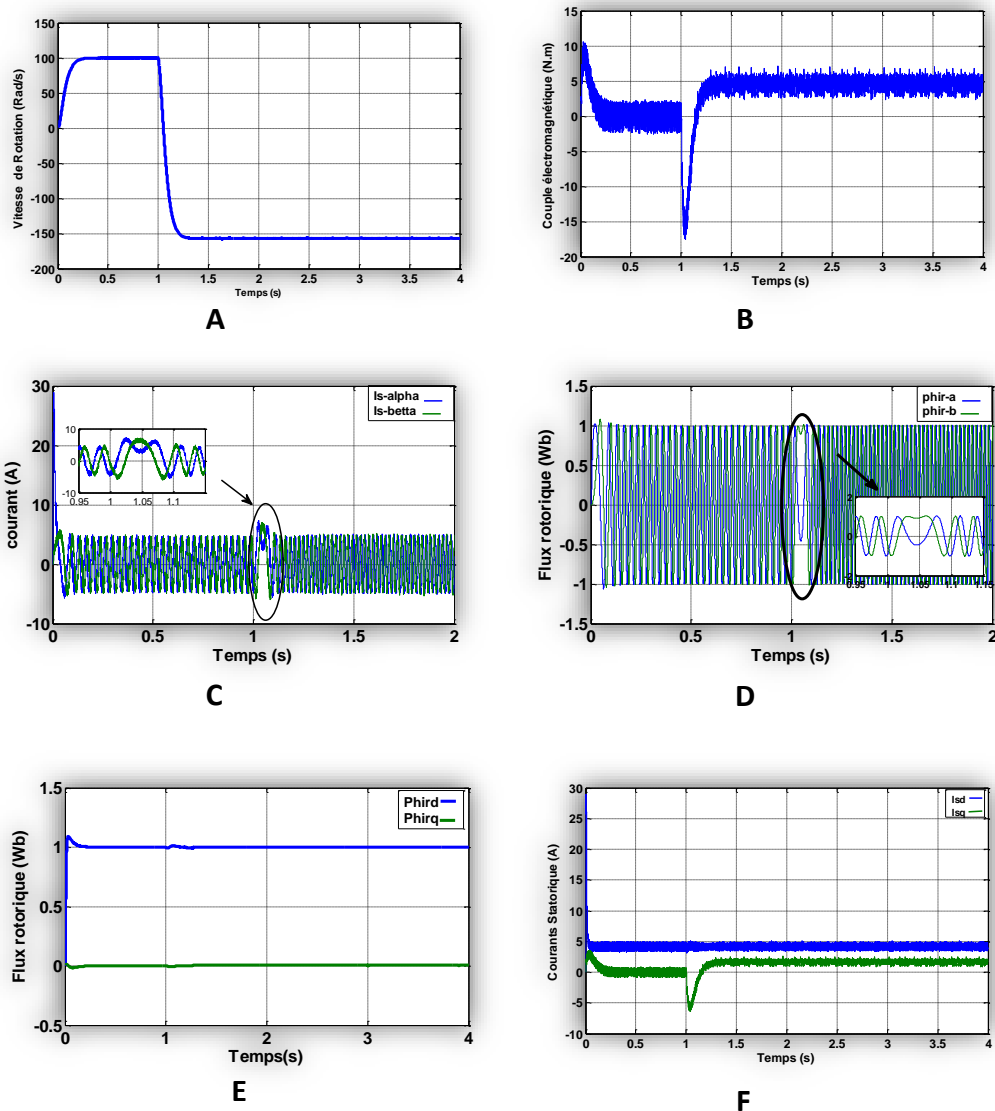


Figure II-18 : représentant les résultats de la commande vectorielle

A : représente la courbe de vitesse de rotation

Chapitre II : Modélisation et control de système de pompage photovoltaïque

B : représente la courbe de couple électromagnétique

C : représente la courbe de courant

D : représente la courbe de flux rotorique

E : représente la courbe de flux rotorique

F : représente la courbe de courant statorique

Les courbes des figures (II-18) représentant les résultats de simulation pour un démarrage à vide ($C_r=10$), l'analyse de ces courbes permet de déterminer le temps d'établissement (1s) de toutes les grandeurs la vitesse en régime permanent se stabilises à (159 rad /s).

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu établir le modèle mathématique de la machine asynchrone avec son alimentation, pour étudié le comportement dynamique de la machine asynchrone. Ensuite, on a fait la modélisation et la simulation de la machine asynchrone associé à un onduleur de tension triphasé. Enfin, on a implanté les commandes scalaires ainsi que la commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté, et on a testé sa robustesse.

Ce mode de contrôle garantit un découplage correct entre le flux et le couple quel que soit le point de fonctionnement de la machine . En plus on an à étudier le comportement de a machine couplé a une pompe centrifuge pour tester ces performances.

Dans les chapitres suivants, on va dimensionner le système de pompage photovoltaïque est on validera expérimentalement l'une des technique de

CHAPITRE III : CONCEPTION ET RÉALISATION
NOTRE PROJET DE SYSTÈME DE POMPAGE
PHOTOVOLTAÏQUE

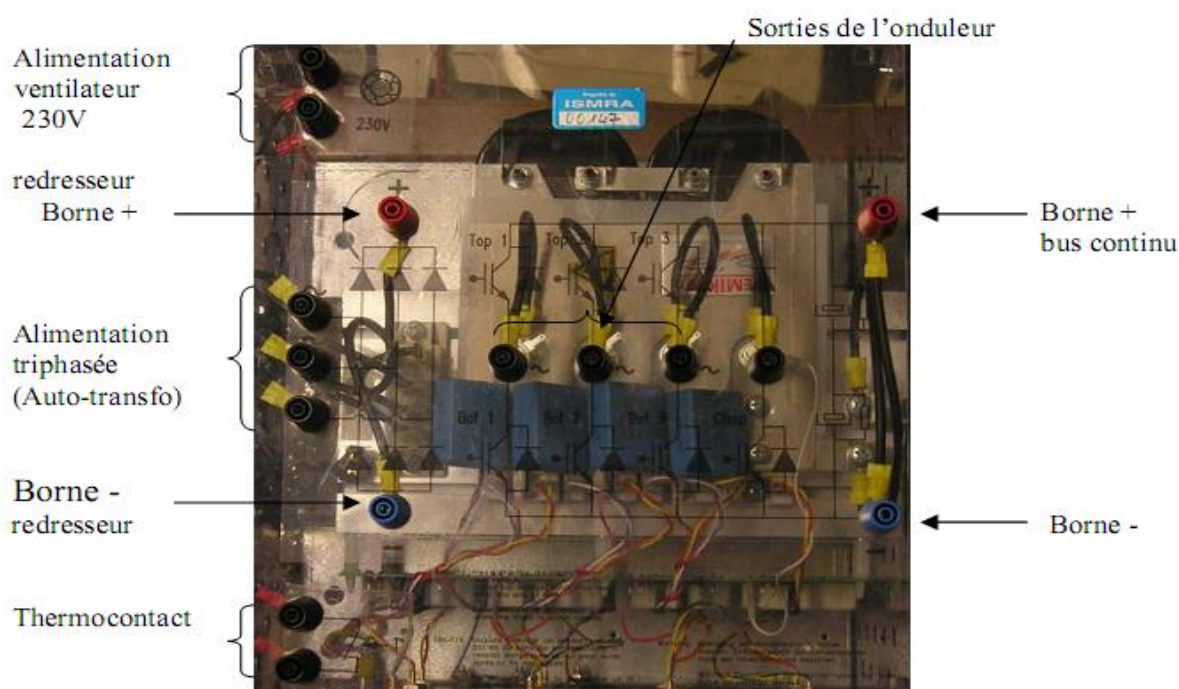
III.1 PRESENTATION DU BANC D'ESSAIS

Pour la mise en œuvre expérimentale de lois de commande, un banc d'essais a été conçu au laboratoire LSPIE à l'université de Batna en utilisant le matériel mis à notre disposition.

Le banc d'essais, dont la photo est montrée par la figure (4.1), est constitué de parties essentielles suivantes :

III.1.1 PARTIE "PUISSANCE"

- ❖ Une machine Synchrone d'une puissance de $1kW$, dont les caractéristiques sont données en annexe 1.
- ❖ Le convertisseur statique alimentant la machine est un onduleur de tension, *SEMIKRON*, $4kW$, à base de composants de haute fréquence de découpage (transistors IGBT).
- ❖ La machine synchrone est accouplée à une machine à courant continu.
- ❖ Un autotransformateur (0-450V entre phases) permet d'ajuster le niveau de tension sur le bus continu en sortie du pont redresseur à diodes. La commande des bras de pont est réalisée par modulation de largeur d'impulsion (PWM), dont la fréquence de découpage choisie est de 3 kHz.



Chapitre III : Conception et réalisation notre projet de système de pompage photovoltaïque

Figure III-1 : Photo montrant une vue de dessus du convertisseur SEMIKRON

III.1.2 PARTIE "COMMANDE"

❖ La partie commande est fondée sur la carte dSPACE® DS1103 qui possède son propre processeur : le Motorola PowerPC 604 e – 400/333 Mhz, permettant de gérer l'application, et un DSP : le TMS320F240 de Texas Instruments spécialement conçu pour le contrôle des convertisseurs statiques de puissance en générant les signaux de commande MLI en logique TTL. La carte DS1103 est implantée dans un PC qui sert d'interface Homme-Machine et constitue la partie "*hardware*" de dSPACE®. La partie "*software*" se compose, quant à elle, de deux logiciels. Le premier, Matlab/Simulink®, permet une programmation aisée de l'application temps réel sous Simulink par utilisation de blocs spécifiques (appartenant à la "Real Time Interface (RTI) toolbox ", permettant de configurer les entrées/sorties de la carte DS1103. Le second logiciel, *ControlDesk*, possède une GUI interactive, qui permet l'acquisition de données et la modification en temps réel des structures et/ou des paramètres de l'algorithme. Le Real-Time Workshop de Matlab est capable de générer automatiquement un fichier objet à partir du modèle *Simulink*. Ce fichier est ensuite implanté dans la mémoire de la carte DS1103. Celle-ci reçoit du processus à commander, les informations nécessaires et fournit les signaux de pilotage de l'onduleur.

Chapitre III : Conception et réalisation notre projet de système de pompage photovoltaïque

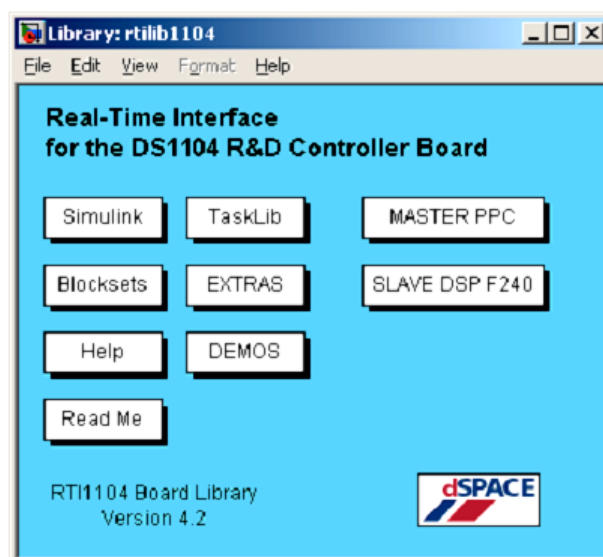


Figure III-2 : Photo montrant les éléments essentiels constituant le banc d'essais

III.1.3. PARTIE "MESURES"

L'échange d'informations entre les deux parties décrites ci-dessus s'effectue par l'intermédiaire d'un boîtier externe de raccordement (CP1103), relié à la carte via un câble blindé. L'environnement de mesures comporte :

- ❖ Une carte d'acquisition associée aux capteurs de courant LEM-LA 25-NP et de tension LEM-LV 25-P à effet Hall ;

Chapitre III : Conception et réalisation notre projet de système de pompage photovoltaïque

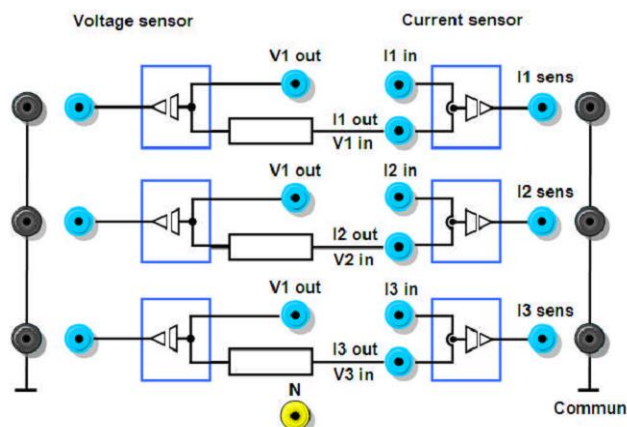


Figure III-3 : Carte d'acquisition associée aux capteurs de courant et de tension

- ❖ Une dynamo tachymétrique est monté sur l'axe des machines et permettant de capter la vitesse de rotation et de l'envoyer directement sur le port parallèle de la carte CP1103.

Le schéma synoptique de la figure (4.4) illustre la constitution du banc d'essais.

Chapitre III : Conception et réalisation notre projet de système de pompage photovoltaïque

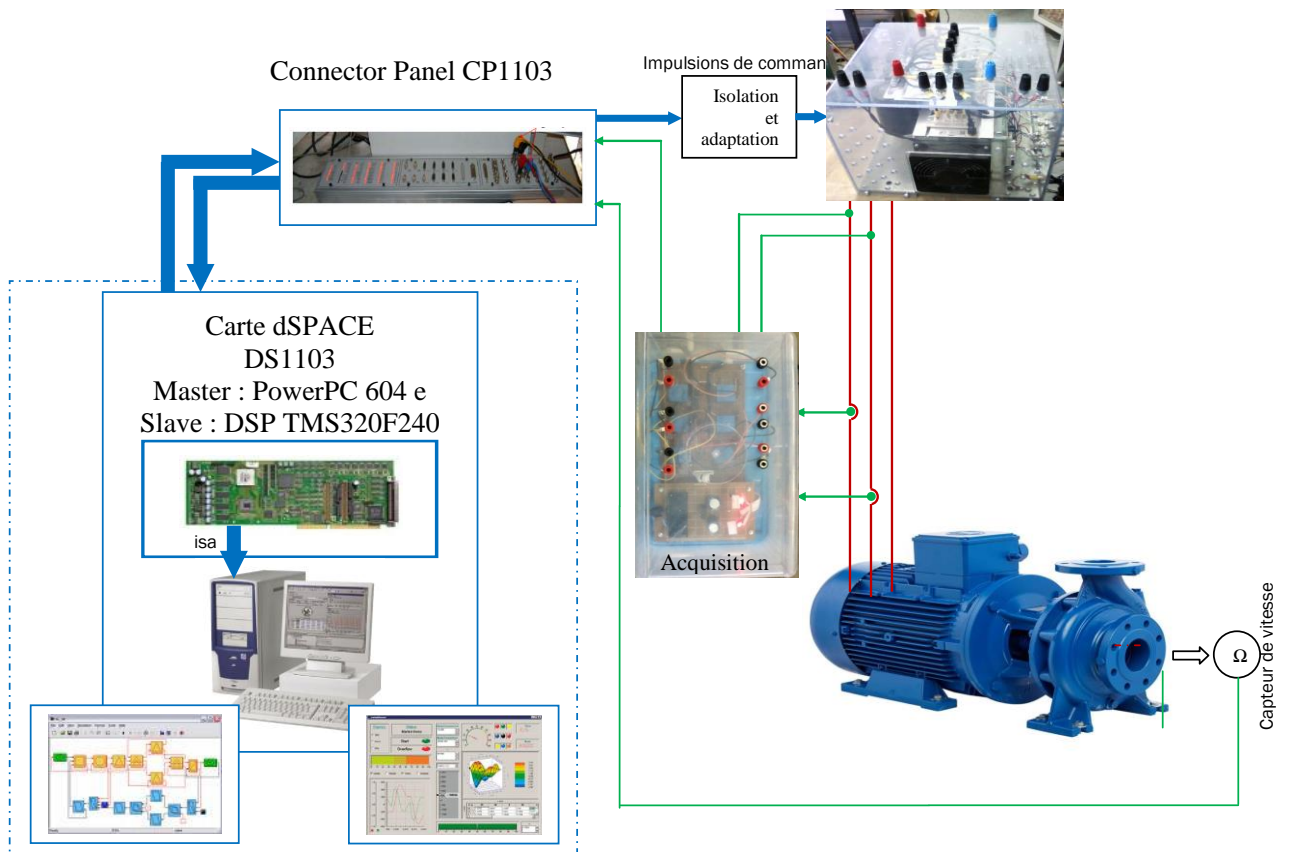


Figure III-4 : Synoptique du banc d'essais

Les blocs Real Time Interface (RTI) pour Simulink sont insérés à la place du modèle de la machine

III.2 Résultats et interprétation :

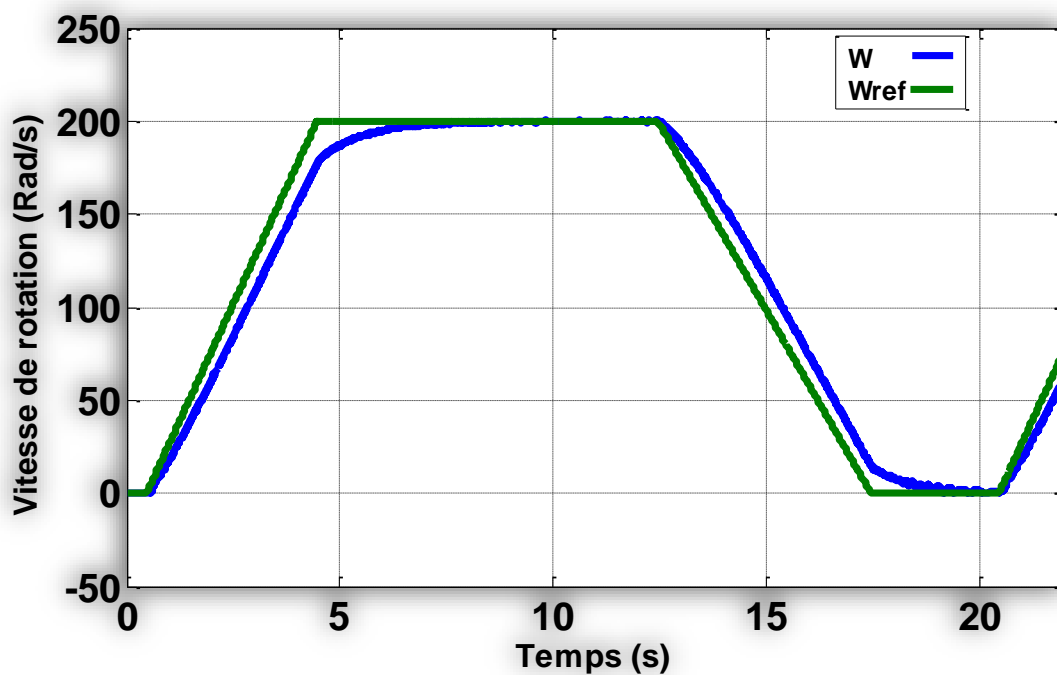


Figure III-5 : représente la vitesse de rotation

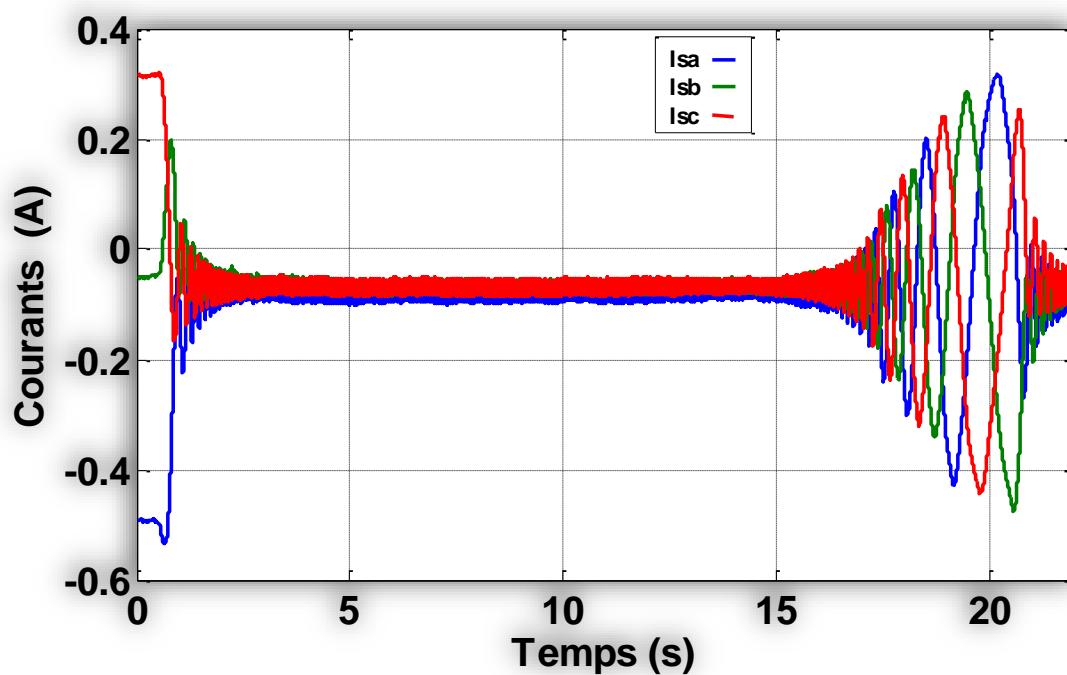


Figure III-6 : représente les courants statorique

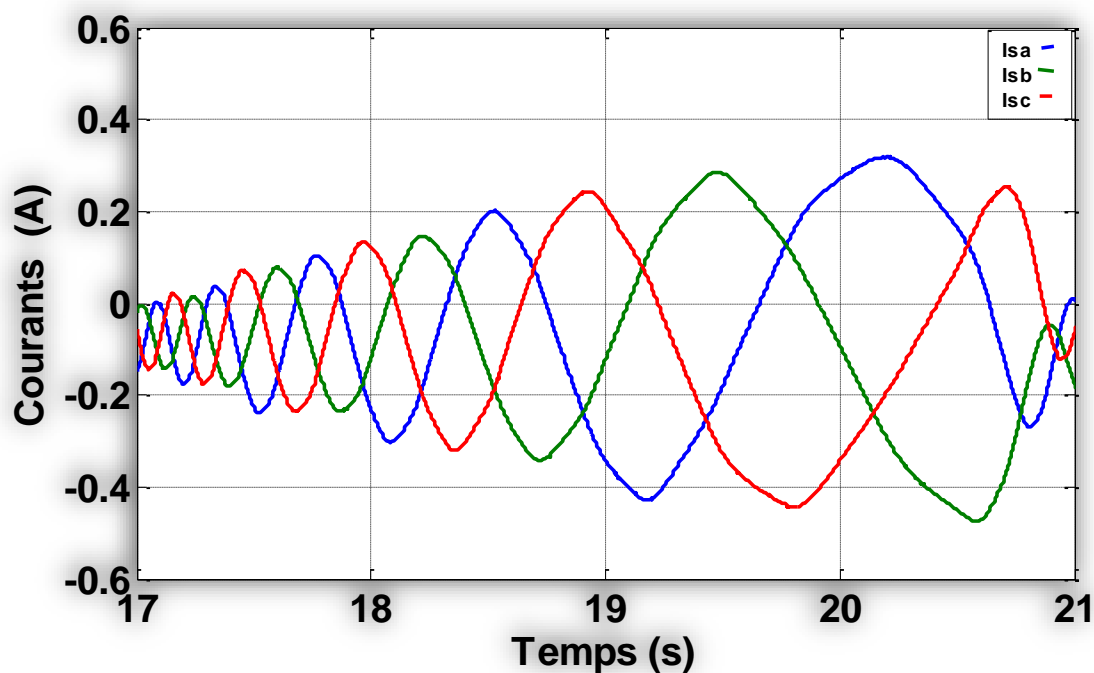


Figure III-7: zoom de courants statorique

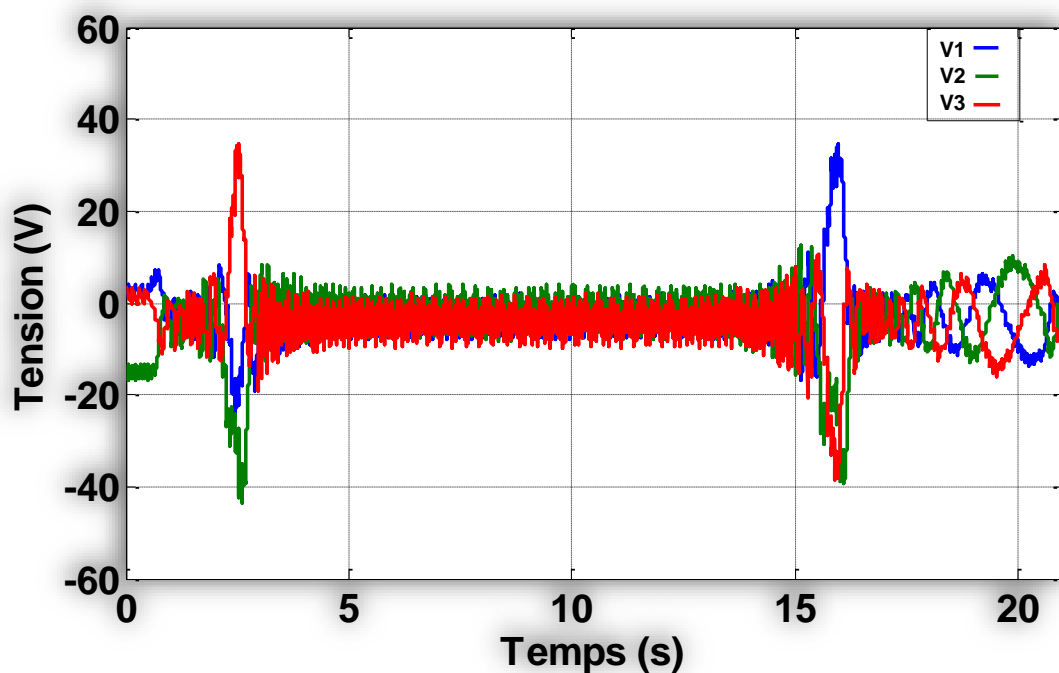


Figure III-8: représentas les tensions

III.2.1 Interprétation:

Dans la Figure (III-5 III-6 II-7 III-8) On voit bien que:

- ✓ la vitesse du rotor suit parfaitement sa référence ce qui nous permet de dire le système répond positivement à ce test, on voit [0, 5s] la vitesse est

Chapitre III : Conception et réalisation notre projet de système de pompage photovoltaïque

en augmentation jusqu'à 200(Rad/s) et ensuite [5,12s] la vitesse est constante et après de ça elle est déminiez jusqu'à [17 s] est nulle.

✓ La figure IV-16 représente les courbes des courants statorique (I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}) on voit que les courant au démarrage qui augment jusqu'à des valeurs de 0.3 (A) et diminue par le temps jusqu'à ($t=15$ s), les trois courbes en forme sinusoïdales est constant jusqu'à ($t=15$ s)est augmenter au freinage de la pompe.

✓ la figure IV-18 représente les trois courbes de tension statorique ($V1, V2, V3$) on voir que les trois tensions est sinusoïdales triphasés symétrique.

III.3 Conclusion

Le quatrième chapitre présente 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. Consiste à implémenter l'un des méthodes de commande de l'onduleur pour alimenter notre système. L'acquisition des grandeurs électriques faite par la carte dSPACE DS1104 est visualisée sur le logiciel Control Desk en temps réel.

CONCLUSION GÉNÉRAL

Conclusion Général

Conclusion Général

La commande V/f est proposée pour actionner un moteur à induction pour un système de pompage d'eau solaire PV à couplage direct. Les courbes de couple et de vitesse sont caractéristiques des charges de pompage et, par conséquent, une approche V/f et IFOC correspondante a été utilisée. Par rapport à la commande linéaire classique V/f et IFOC, la commande a obtenu des performances supérieures sur toute la plage de vitesse de fonctionnement. Pour vérifier la performance de la méthode de contrôle V/f proposée, une étude de cas a été simulée pour examiner le comportement du système sous différents niveaux de puissance d'entrée. De plus, un prototype de système a été construit en laboratoire pour valider la méthode de contrôle proposée.

Tant la simulation que les essais ont été conformes aux résultats théoriques et confirment entièrement la suprématie du contrôle basé sur V/f sur le contrôle linéaire classique basé sur V/f, en particulier le fonctionnement à l'état stable. L'amélioration des performances a été montrée en termes de magnitude de courant de phase inférieure, de vitesse de pompe plus élevée et d'efficacité plus élevée pour la même puissance d'entrée. Les simulations ont également confirmé une amélioration relative de la réponse dynamique du système sous contrôle V/f.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographique

Références Bibliographiques

- [1] KY.THIEMY, S .MAURICE « SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE DIMENSIONNEMENT POUR UN POMPAGE IRRIGATION GOUTTE –A-GOUTTE» MEMOIRE DE DEA 2007.
- [2] :KY.THIEMY, S .MAURICE « SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE DIMENSIONNEMENT POUR UN POMPAGE IRRIGATION GOUTTE –A-GOUTTE» MEMOIRE DE DEA 2007.
- [3] JIMMY ROYER, THOMAS DJIAKO, ERICO SCHILLER, BOKAR SADA : «LE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE».MANUEL DE COUR A L'INTENSION DES INGENIEURS ET DES TECHNICIENS
- [4] M.ROUF : « OPTIMISATION DE L'ENSEMBLE ONDULEUR ; MOTEUR ET POMPE BRANCHE SUR GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE ».ELECTROTECHNIQUE THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE CONSTANTINE.
- [5] LAZIZI, ALDJIA«MODELISATION, CONTROLE ET GESTION ENERGETIQUE D'UNE INSTALLATION DE POMPAGE SOLAIRE » UNIV-BOUMERDES.DZ, 2020
- [6] Y.BAKELLI, –CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME», THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA, ALGERIE, 2012.
- [7] L.CHITER, –MODELISATION ET SIMULATION D'UN SYSTEME DE POMPAGE SOLAIRE A BASE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASEI, MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE DE HADJ LAKHEDHAR, BATNA, ALGERIE, 2012.
- [8] WILGENBUS, DAVID. "DOSSIER « L'ENERGIE SOLAIRE »." 14 PP. 22/03/2022PDFPROF.COM
- [9] OBSERV'ER, L'OBSERVATOIRE DES ENERGIES RENOUVELABLES, –LA PRODUCTION D'ELECTRICITE D'ORIGINE RENOUVELABLE DANS LE MONDEI, QUINZIEME INVENTAIRE EDITION 2013.
- [10] CHEHAM ABDELJALIL EL MAGBED SEDDIK, COMMANDE ROBUSTE D'UN CONCENTRATEUR SOLAIRE CYLINDRO-PARABOLIQUE : UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA2018
- [11] A.C. PASTOR: « CONCEPTION ET REALISATION DE MODULES PHOTOVOLTAÏQUES ELECTRONIQUES », ECOLE DOCTORALE : GEET, LABORATOIRE D'ANALYSE ET D'ARCHITECTURES DES SYSTEMES (LAASCNRS), TOULOUSE, 29 SEPTEMBRE 2006.

Références Bibliographique

- [12] BENCHIKH ELHOUCINE HANANE, ' SIMULATION NUMERIQUE DE MODELE DE COLLECTEUR HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE/PHOTO THERMIQUE', MEMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITE DE CONSTANTINE, ALGERIE, 2009.
- [13] T.FROUMHERZ, F.PADINGER, D.GEBEYEHUR, C.BARBAREC, J.C.HIMMELEN: «SANICIFEI COMPARISON OF PHOTOVOLTAIC DEVIRCES CONTAING VARIONS BLENDS OF POLYMER AND FULLEREME DERIVATIES».
- [14] WWW.WEAKEPDIRACOM.
- [16] R.A.MESSENGER AND J.V ENTRE, PHOTOVOLTAIC SYSTEMS ENGINEERING, SECOND EDITION, CRC PRESS LLC, 2004
- [17] J-C. SABONADIERE: NOUVELLES TECHNOLOGIE DE L'ENERGIE ; LES ENERGIES RENOUVELABLE 2006.
- [18] O. GERGAUD, « MODELISATION ENERGETIQUE ET OPTIMISATION ECONOMIQUE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION EOLIEN ET PHOTOVOLTAÏQUE COUPLE AU RESEAU ET ASSOCIE A UN ACCUMULATEUR », THESE DE DOCTORAT, DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN, DECEMBRE 2002.
- [19] A.C. PASTOR: « CONCEPTION ET REALISATION DE MODULES PHOTOVOLTAÏQUES ELECTRONIQUES », ECOLE DOCTORALE : GEET, LABORATOIRE D'ANALYSE ET D'ARCHITECTURES DES SYSTEMES (LAASCNRS), TOULOUSE, 29 SEPTEMBRE 2006.
- [20] A. SAADI : « ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES D'OPTIMISATION DES SYSTEMES DE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE ». MEMOIRE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, UNIVERSITE MOHAMMED KHIDER, BISKRA 2001.
- [21] Souad Chaouch « Contribution à l'alimentation de la commande d'un redresseur à MLI vectorielle alimenté par un réseau perturbé » mémoire de magistère Univ-Batna, 1998.
- [22] KHELDOUN Aissa « Amélioration des Performances d'un Variateur de Vitesse par Moteur Asynchrone Contrôlé par la Méthode à Flux Orienté. » Thèse de doctorat à l'université de Boumerdes – 2007.
- [23] N MOHAMMED-A MOUSSA « Contribution à l'identification paramétrique de la machine asynchrone à flux radial » mémoire de magistère Univ-Msila 2005.
- [24] I. AIT MOHAMED SAID « Commande Plate de la Machine Asynchrone.» Thèse de magister de l'université de Batna, 2013.
- [25] C. Canudas, « Commande des moteurs asynchrones : Modélisation [21]

Références Bibliographique

- [26] Contrôle vectoriel et DTC » Vol. 1, Hermès Science publications, Paris, 2000.
- [27] R.BELHADEFet B.BOUTAYA « Commande Vectorielle et par Logique Floue de la Machine Asynchrone Sans Capteur » Thèse de magister de Ecole Nationale Polytechnique, 2008.
- [28] Katia. Kouzi, « commande vectorielle d'une MAS sans capteur de vitesse par un réglage PI-Flou à gains-Flous adaptés associer à un observateur d'état par modes de glissement ». Thèse de magister, Univ-Batna, 2002.
- [29] D. SIHAM «Commande vectorielle de la M.A.S et introduction aux convertisseurs matricielles » Mémoire d'ingénieur université de Batna, 2004
- [30] TARBOUCHI Mohamed « Commande par linéarisation exacte d'une machine asynchrone »,,. Thèse présentée pour l'obtention du grade de (P.Hd) à l'université de Laval. Québec – 1997.
- [31] CHAOUCH Souad « Commande vectorielle robuste d'une machine à induction sans capteur de vitesse», Thèse présentée pour l'obtention du titre de doctorat en science à l'université de Batna – 2005.
- [32] CHATELAIN Jean, Traité d'électricité Tome 1, Presse polytechniques Romandes –1983.
- [33] M.S. NAIT SAID & N. NAIT SAID « Modélisation vectorielle d'une machine à courant alternatif triphasé & symétrique. » Cours destiné aux ingénieurs en électrotechnique des années avancées et en Post-Graduation. Université de Batna - 2004.
- [34] Haron A.R., Idris N.R.N. « Simulation of MRAS-based Speed Sensorless Estimation of Induction Motor Drives using Matlab/Simulink », Power and Energy Conference, IEEE International Vol., pp. 411–415 Nov. 2006.
- [35] M. Rashed, A.F. Stronach « A stable back-EMF MRAS-based sensorless low-speed induction motor drive insensitive to stator resistance variation », IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 151, No. 6, Nov. 2004.
- [36] Joachim Holtz « Sensorless Control of Induction Motor Drives », Proceedings of the IEEE, Vol. 90, No. 8, Aug 2002
- [37] jamel ghouili, «commande sans capteur d'une machin asynchrone avec estimation de la vitesse par réseaux de neurones» l'université du Québec à Trois-Rivières, avril 2005.
- [38] R. Magureanu, C. Ilas, V. Bostan, M.Cuibus, V. Radut, "Luenberger, Kalman, neural observers and fuzzy controllers for speed induction motor", Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. Proceedings. IPEMC 2000. The Third International Vol.3, Issue, pp.1256 – 1261. 2000
- [39] F. Morand, "Techniques d'observation sans capteur de vitesse en vue de la commande des machines asynchrones," Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2005.
- [40] A. TITAOUINE, « commande d'une machine synchrone a aimants

Références Bibliographique

- permanents et estimation de ces paramètres en utilisant le filtre de Kalman étendu », Laboratoire LMSE, Université Biskra, B. P 145 Biskra, Algérie, Courrier du Savoir – N°07, Décembre 2006.
- [41] G. Soto Guillermo, " Etude et mise en œuvre d'Estimation et d'Observateurs Robuste de Flux et de Vitesse pour une Machine à Induction a cage Commandée Vectoriellement "Thèse de doctorat de l'Université de Paris XI, Fra, 19nce98.
- [42] G.Grellet, G.Clerc, «Actionneurs Electriques, Principe, Modèles, Commande.» Collection Electrotechnique. Edition Eyrolles 1997.
- [43] E. Poirier, «Optimisation Energétique et Entraînement Sans Capteur de Position des Machine à courant alternative», Thèse de Doctorat Faculté d'ingénierie, Université de Monton, 2001.
- [44] C. Shah, «Sonsorless Control of Stepper Motor Using kalman Filter», Thesis of Doctoral, Faculty d'ingénirie, Master of Science in Electrical Engineering at the Cleveland State Univercity, December 2004
- [45] M. Hilairret, F. Auger, C. Darengosse, "Two efficient Kalman filters for Flux and veolocity estimation of Induction Motors," Proc IEEE PESC 2000, pp 891-896,2000.
- [46] Dariusz L.Sobczuk, «Application of ANN for control of PWM inverter fed induction motor drives », Ph.D.thesis, Warsaw university of technology, Warszawa, 1999.
- [47] CH. Azeddine, « Commande Backstepping d'une machine asynchrone sans capteur de vitesse »thèse de magister, université de Batna, 2011.
- [48] J.Maes, J.A.Melkebeek, «Speed-Sensorless Direct Torque Control of Induction Motors Using an Adaptative Flux Observer », IEEE Trans. On industry Electronics, Vol.36,No.3, Muy/June.2000,pp.778-785.
- [49] T. Saheb, "Etude du Comportement du filtre de Kalman et de l'observateur de Luenberger au Voisinage d'un point non-observable: Application à l'estimation du Flux et de la Vitesse de la Machine Asynchrone," LCGE'03, saint-Nazaire, France, pp 205- 210, juin 2003.
- [50] B. Akin, "State estimation techniques for speed sensor less field oriented control of induction motors, ". Thesis of Master, The Middle East Technical University, Turkey, 2003.
- [51] A. Akrah, M. Hilairret, D. Diallo, "A sensorless PMSM drive using a two stage extended Kalman estimator," 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, IECON 2008, pp. 2776-2781, Orlando, USA, 10-13 Nov. 2008.
- [52] C. Schauder, « Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers », Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, San Diego, California, pp.493- 499, 1989.
- [53] D. Lubineau, C. Canudas, J.P. Barbot, " Compte-rendu du Séminaire de Gordes: Groupe de Travail sur la Commande de Moteur Asynchrone Sans Capteur," Laboratoire d'Automatique de Grenoble, France.

Références Bibliographique

- [54] E. Sedda, " Estimation en ligne de l'état et des paramètres d'une machine asynchrone par filtrage à erreur borné et par filtrage de Kalman," Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6, France, 1998.
- [55] W. Laala, Commande Vectorielle de la Machine Synchrone à Aimants Permanents Sans Capteurs de Position et de Vitesse. Thèse de Magister, Université de Biskra 2001.
- [56] Franck Morand, "Techniques d'observation sans capteur de vitesse en vue de la commande des machines asynchrones", Thèse de Doctorat de Lyon 2005 France.
- [57] ZHENG Zedong, «Commande à haute performance et sans capteur mécanique du moteur synchrone à aimants permanents », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2008.
- [58] A. Benchaib, "application des modes de glissement pour la commande en temps réel de la machine asynchrone,"Thèse doctorat, Univ. Amiens France, Déc 1998.
- [59] T. Djamel, " Contrôle du Moteur à Induction Sans Capteur de Vitesse et de Position ". Thèse de magister, Université de Batna, Juin 2005.
- [60] Canudas Carlos de wit, « Commande des moteurs asynchrones 2, optimisation Discrétisation et observateur », édition Hermes science, Europe Ltd, Paris, 2000.
- [61] Lotfi Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », Thèse de Doctorat, soutenue à Henri Poincaré, Nancy-I, France, le 14 janvier 1999.

Références Bibliographique

Annexes

Annexe a- PARAMETRES DE LA MAS

- paramètre de panneaux photovoltaïque

Tension de circuit ouvert du module (V_{dc})	41.79 V
Courant de court-circuit du module (I_{sc})	7.13A
Tension du module (V_{mp})	33.9 V
Courant du module (I_{mp})	6.63
Puissance de module (P_{mp})	900W
Tension de circuit ouvert d'un panneau (V_{oc})	459,69 V
Courant de court-circuit d'un panneau (I_{sc})	7.13 A
Tension de panneau (V_{mp})	372.9 V
Courant de panneaux (I_{mp})	6.63 A

Annexes

Annexe A- PARAMETRES DE LA MAS

1. La machine utilisée est une machine asynchrone à cage d'écureuil. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- ✓ Puissance nominale : $P_n = 0.9 \text{ Kw}$
- ✓ Tension nominale : $V_n = 220/380 \text{ V}$
- ✓ Courant nominale : $I_{sn} = 4.7/2.7 \text{ A.}$
- ✓ Couple nominale : $C_e = 3.33 \text{ N.m}$
- ✓ Vitesse de rotation : $\Omega = 1450 \text{ tours/min}$
- ✓ Nombre de paires de pôles : $P = 2$

2. A.1-Paramètres électriques :

- ✓ Résistance statorique : $R_s = 12.75 \Omega$
- ✓ Résistance rotorique : $R_r = 5.1498 \Omega$
- ✓ Inductance du stator : $L_s = 0.4991 \text{ H}$
- ✓ Inductance du rotor : $L_r = 0.4331 \text{ H}$
- ✓ Inductance mutuelle : $M = 0.4331 \text{ H}$

3. A.2-Paramètres mécaniques :

- ✓ Moment d'inertie du rotor : $J = 0.035 \text{ Kg.m}^2$
- ✓ Coefficient de frottement : $f = 0.001 \text{ SI}$

4. A.3-Paramètres de simulation :

- ✓ Méthode de simulation : Fixed step size - ode 4 (Runge-Kutta).
- ✓ Temps d'échantillonnage : $T_e = 0.0001 \text{ S.}$

Annexe B- MODELISATION DE LA MAS

B.1-Modèle vectoriel de la machine asynchrone :

L'interaction des champs magnétiques pulsatoires génèrent un champ magnétique tournant [12].

Tout vecteur peut être représenté par un vecteur tournant de la forme :

$$x = K \left(x_a + x_b \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + x_c \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right) \quad \text{B.01}$$

Compte tenu des relations entre différentes grandeurs, il est possible d'étendre la notion de vecteur tournant à tout ensemble des grandeurs triphasés $[I_s]$, $[V_s]$, $[\Phi_s]$, $[\Phi_r]$ [2,11].

5. B.1.1-Relation de passage entre référentiels :

Sachant que \bar{x} la norme de définie par x est invariante quelques soient les repères en rotations, on a :

- ✓ Dans le stator (S) : $\bar{x}^{(S)} = x \cdot e^{j\theta_s}$
- ✓ Dans le rotor (R) : $\bar{x}^{(R)} = x \cdot e^{j\theta_r}$
- ✓ Dans le référentiel tournant (T) : $\bar{x}^{(T)} = x \cdot e^{j\theta_{Obs}}$

6. Passage (stator –rotor) et réciproquement :

$$7. \bar{x}^{(S)} = \bar{x}^{(R)} \cdot e^{j\theta} \quad \text{Ou} \quad \bar{x}^{(R)} = \bar{x}^{(S)} \cdot e^{-j\theta}$$

8. Passage (stator –Tobs) et réciproquement :

$$9. \bar{x}^{(S)} = \bar{x}^{(T)} \cdot e^{j\theta_{Obs}} \quad \text{Ou} \quad \bar{x}^{(T)} = \bar{x}^{(S)} \cdot e^{-j\theta_{Obs}}$$

10. Passage (rotor – Tobs) et réciproquement :

$$11. \bar{x}^{(R)} = \bar{x}^{(T)} \cdot e^{j(\theta_{Obs}-\theta)} \quad \text{Ou} \quad \bar{x}^{(T)} = \bar{x}^{(R)} \cdot e^{-j(\theta_{Obs}-\theta)}$$

12. En applique l'équation (B2.01) sur (I.01) et (I.02) engendre :

B.1.2-Équation de tension :

Le modèle vectoriel électromagnétique de la machine asynchrone dans le référence liée au champ tournant est donne par

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Phi}_s}{dt} + j\omega_s \cdot \bar{\Phi}_s \\ \bar{V}_r = 0 = R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Phi}_r}{dt} \pm j(\omega_s - \omega) \cdot \bar{\Phi}_r \end{cases} \quad \text{B.02}$$

Annexes

Ou :

$$\overline{V}_s = V_s + jV_s \quad \text{Et} \quad \overline{V}_r = V_r + jV_r$$

B.1.2-Équation magnétique :

$$\begin{cases} \overline{\Phi}_s = L_s \cdot \overline{I}_s + M \cdot \overline{I}_r \\ \overline{\Phi}_r = L_r \cdot \overline{I}_r + M \cdot \overline{I}_s \end{cases} \quad \text{B.03}$$

Ou :

$$\overline{\Phi}_s = \Phi_s + j\Phi_s \quad \text{Et} \quad \overline{\Phi}_r = \Phi_r + j\Phi_r$$

$$\overline{I}_s = I_s + jI_s \quad \text{Et} \quad \overline{I}_r = I_r + jI_r$$

-l'équation du couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} \text{Im}(I_s \otimes \Phi_r) \quad \text{B.04}$$

- l'équation mécanique est donne par :

$$J \frac{d \Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad \text{B.05}$$

Avec :

J : moment d'inertie du rotor.

f : coefficient de frottements visqueux.

C_r : couple de charge.

B.2-Modèle de PARK de la machine :

En appliquant, la transformation de PARK [p(θ)] sur les équations (I.01), (I.03) et après simplification, on obtient les équations électriques et magnétiques dans un repère (d, q) tournant à la vitesse ω_s :

➤ Les équations électriques :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d \Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d \Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \\ V_{rd} = 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d \Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d \Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \Phi_{rd} \end{cases} \quad \text{B.06}$$

➤ Les équations magnétiques :

Annexes

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad \text{B.07}$$

$$\omega_r = \omega_s - \omega$$

$L_s = l_s - M_s$: L'inductance cyclique statorique ;

$L_r = l_r - M_r$: L'inductance cyclique rotorique ;

$M = \frac{3}{2} M_0$: L'inductance mutuelle ou inductance naturelle cyclique entre stator et rotor.

➤ L'équation du couple :

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \quad \text{B.08}$$

Pour que le modèle de la machine asynchrone soit complet, on établit l'équation mécanique soit :

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\omega \quad \text{B.09}$$

Avec :

P : Nombre de paire de pôles.

f : Coefficient de frottement.

C_r : Couple résistant.

C_{em} : Couple électromagnétique.

B.3-Le modèle vectoriel de la machine asynchrone dans le repère (α, β) :

B.3.1-Équation de Clark :

La projection des équations du second modèle vectoriel dans le référentiel fixe lié au stator, sur les deux axes (α, β) du référentiel,

On obtienne :

$$\text{Équation électrique :} \quad \begin{cases} V_{s\alpha} = R_s \cdot I_{s\alpha} + \frac{d\Phi_{s\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s \cdot I_{s\beta} + \frac{d\Phi_{s\beta}}{dt} \\ V_{r\alpha} = 0 = R_r \cdot I_{r\alpha} + \frac{d\Phi_{r\alpha}}{dt} + \omega \cdot \Phi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = 0 = R_r \cdot I_{r\beta} + \frac{d\Phi_{r\beta}}{dt} - \omega \cdot \Phi_{r\alpha} \end{cases} \quad \text{B.10}$$

Annexes

$$\text{Équation magnétique : } \begin{cases} \Phi_{s\alpha} = L_s \cdot I_{s\alpha} + M \cdot I_{r\alpha} \\ \Phi_{s\beta} = L_s \cdot I_{s\beta} + M \cdot I_{r\beta} \\ \Phi_{r\alpha} = L_r \cdot I_{r\alpha} + M \cdot I_{s\alpha} \\ \Phi_{r\beta} = L_r \cdot I_{r\beta} + M \cdot I_{s\beta} \end{cases} \quad \text{B. 11}$$

Équation du couple électromagnétique :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \Phi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \quad \text{B. 12}$$

13.

14. B.4-TRANSFORMATION DE PARK :

15. La transformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en le ramenant à un modèle unique, Cette conversion est appelée souvent transformation des axes, fait correspondant aux deux enroulements de la machine originale suivie d'une rotation, les enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. Cette transformation ainsi, pour l'objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation [6].

Elle est illustrée selon la loi de suivante :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [p(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \text{B. 13}$$

La transformée inverse de Park (du biphasé au triphasé) est donnée par :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [p(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad \text{B.14}$$

Où : $[X_a \ X_b \ X_c]^T$ vecteur triphasé quelconque de l'espace.

X_0 : Composante homopolaire du vecteur espace (égale à zéro pour un système symétrique et équilibré).

$[p(\theta)]$: Matrice de passage du triphasé au biphasé dite de Park orthonormée.

Avec :

Annexes

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2.\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4.\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2.\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4.\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{B.15}$$

La transformation inverse de Park est donner par :

$$[p(\theta)^{-1}] = [p(\theta)]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2.\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2.\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4.\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4.\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{B.16}$$

La transformation de Concordia (α, β) peut également être obtenue à partir des composantes de Park (d,q) en faisant une rotation de l'angle θ_s . Le passage des composantes de Park à celles de Concordia se fait par :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) \\ \sin(\theta_s) & \cos(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad \text{B.17}$$

La transformation inverse est donner par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \sin(\theta_s) \\ -\sin(\theta_s) & \cos(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad \text{B1.06}$$

Annexe C- MODELISATION DE L'ONDULEUR

Chaque bras d'onduleur est associé à une fonction logique de connexion, S_i , \overline{S}_i ($i = 1,2,3$) définie comme suit :

$S_i = 1$: Si S_i est fermé et \overline{S}_i est ouvert.

$S_i = 0$: Si S_i est ouvert et \overline{S}_i est fermé.

Dans ces conditions, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{AO} = U_{dc}(S_1 - \frac{1}{2}) \\ V_{BO} = U_{dc}(S_2 - \frac{1}{2}) \\ V_{CO} = U_{dc}(S_3 - \frac{1}{2}) \end{cases} \quad \text{C1-01}$$

Les tensions composées sont déterminées par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AO} + V_{OB} = V_{AO} - V_{BO} \\ V_{BC} = V_{BO} + V_{OC} = V_{BO} - V_{CO} \\ V_{CA} = V_{CO} + V_{OA} = V_{CO} - V_{AO} \end{cases} \quad \text{C1-02}$$

V_{AO}, V_{BO}, V_{CO} : Les tensions d'entrée de l'onduleur. Elles sont référencées par rapport au point milieu (O) d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations de Charles [1], comme suit :

$$\begin{cases} V_{AO} = V_{AN} + V_{NO} \\ V_{BO} = V_{BN} + V_{NO} \\ V_{CO} = V_{CN} + V_{NO} \end{cases} \quad \text{C1-03}$$

Avec :

V_{AN}, V_{BN}, V_{CN} : sont les tensions simples appliquées à la charge.

V_{NO} : est la tension entre le point neutre (N) de la charge et le point milieu fictif (O).

Le système triphasé fourni par l'onduleur étant équilibré, il en découle :

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0 \quad \text{C1 - 04}$$

Utilisant les équations (C1-03) et (C1-04) on obtient :

$$V_{NO} = \frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad \text{C1-05}$$

Annexes

Remplaçons (C1-05) dans (C1-03), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad \text{C1 - 06}$$

Remplaçons (C1-01) dans (C1-06), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad \text{C1 - 07}$$

L'onduleur est modélisé par la matrice de transfert T suivant :

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad \text{C1 - 08}$$

Annexe D- CALCULS DES REGULATEURS

D.1-Calcul du régulateur de flux :

De la première équation du système (I.13), il est possible de tirer l'équation suivante

$$\text{du flux : } \frac{\Phi_r}{i_{sd}} = \frac{M}{1 + s \cdot T_R} \quad \text{D.01}$$

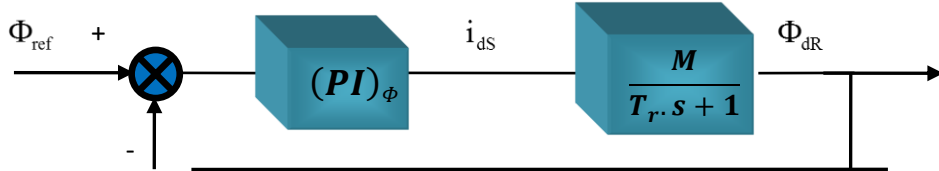


Figure (D-1) : schéma fonctionnel du contrôle du flux

Le correcteur de flux $(PI)_\phi$ de la figure (C-1) est présenté par la fonction de transfert :

$$(PI)_\phi = k_p + \frac{k_i}{s} = k_p \cdot \frac{s + z_i}{s} \quad ; \quad z_i = \frac{k_i}{k_p} \quad \text{D.02}$$

La fonction de transfert en boucle ouvert est donnée par :

$$T(s) = \frac{\Phi_{rd}}{\Phi_{ref}} = k_p \cdot \frac{s + z_i}{s} \cdot \frac{M/T_r}{s + 1/T_r} \quad \text{D.03}$$

On choisit le zéro du correcteur de façon à compenser le pôle du processus avant régulation, ce qui revient à choisir : $z_i = \frac{1}{T_r}$ d'où :

$$T(s) = \frac{k_p \cdot M}{s \cdot T_r} \quad \text{D.04}$$

La fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) sera donnée par :

$$F(s) = \frac{T(s)}{1 + T(s)} = \frac{1}{1 + \frac{T_r}{k_p \cdot M} s} = \frac{1}{1 + \tau_\phi \cdot s} \quad \text{D.05}$$

τ_ϕ : est la constante de temps après régulation du flux, donc on obtient :

$$k_p = \frac{T_r}{\tau_\phi} \cdot \frac{1}{M}, \quad k_i = \frac{1}{\tau_\phi} \cdot \frac{1}{M} \quad \text{D.06}$$

D.2.1-Calcul du régulateur de courant statorique i_{sd} :

Le schéma bloc de la régulation de la composante directe du courant statorique i_{sd} est représenté par la figure suivante :

Annexes

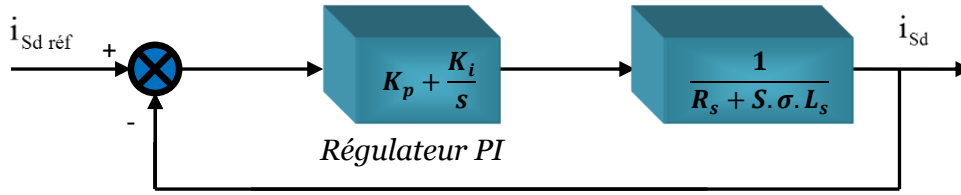


Figure (D-2) : Schéma bloc de la régulation du courant statorique i_{sd} .

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$F = k_p \cdot \frac{s + z_i}{s} \cdot \frac{1/\sigma L_s}{s + \frac{R_s}{\sigma L_s}} \quad ; z_i = \frac{k_i}{k_p} \quad \text{D.07}$$

Compensons le pôle $(s + z_i)$ par $(s + \frac{R_s}{\sigma L_s})$, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$F = \frac{k_p}{\sigma L_s S} \quad \text{D.08}$$

La fonction de transfert en boucle fermée (B.F) est donnée par :

$$G = \frac{1}{1 + \frac{\sigma L_s}{k_p} S} = \frac{1}{1 + \tau S} \quad \text{D.09}$$

Nous obtenons une réponse de type 1^{er} ordre de constante de temps $\tau = \frac{\sigma L_s}{k_p}$

$$\text{Donc : } \begin{cases} k_p = \frac{\sigma L_s}{\tau} \\ k_i = \frac{R_s}{\tau} \end{cases} \quad \text{D.10}$$

D.2.2-Calcul du régulateur de courant statorique i_{sq} :

On remarque que le courant i_{sq} à la même dynamique que le courant i_{sd} , on trouve alors les mêmes paramètres que précédemment.

$$\text{Alors } \begin{cases} k_p = \frac{\sigma L_s}{\tau} \\ k_i = \frac{R_s}{\tau} \end{cases} \quad \text{D.11}$$

D.3-Calcul du régulateur de vitesse :

La chaîne de régulation de vitesse est représentée par le schéma fonctionnelle suivant :

Annexes

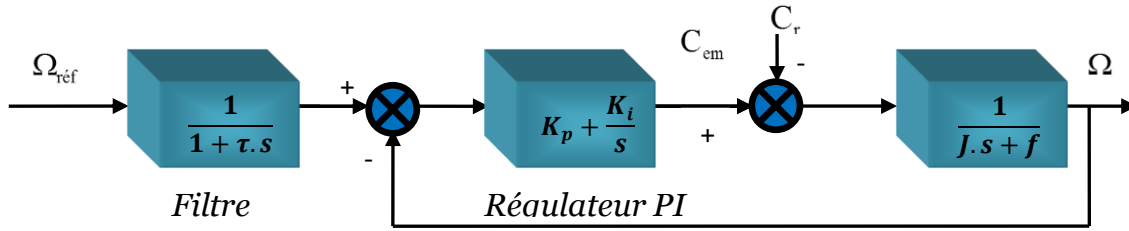


Figure (D-3) : schéma fonctionnel du contrôle de vitesse avec filtre

La fonction de transfert du système en boucle ouverte avec un couple résistant nul est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\Omega}{\Omega_{\text{réf}}} = \frac{k_p \cdot s + k_i}{s(J \cdot s + f)} \quad \text{D.12}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$G = \frac{k_p \cdot s + k_i}{J \cdot s^2 + (k_p + f)s + k_i} \quad \text{D.13}$$

En trouvant :

$$G = \frac{1 + \tau s}{\frac{1}{k_i} s^2 + \left(\frac{f}{k_i} + \tau\right) s + 1} \quad \text{Avec : } \tau = \frac{k_p}{k_i} \quad \text{D.14}$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de 2^{ème} ordre, dont la forme canonique :

$$G^* = \frac{1}{\frac{J}{w_n^2} \cdot s^2 + \frac{2\xi}{w_n} \cdot s + 1} \quad \text{D.15}$$

Pour un coefficient d'amortissement $\xi = 1$ et une pulsation w_n donnée, donc par comparaison on obtient alors :

$$\begin{cases} k_i = J \cdot w_n^2 \\ k_p = 2 \cdot J \cdot w_n - f \end{cases} \quad \text{D.16}$$

Pour supprimer le dépassement sur la réponse de la FTBF, on filtre la référence par un filtre du premier ordre donné par : (figure C-3)

$$C_{\text{comp}} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad \text{D.17}$$

Résume :

ns les régions rurales et éloignées, les systèmes de pompage d'eau à énergie solaire photovoltaïque (PV) sont favorisés par rapport aux systèmes de pompage d'eau à moteur diesel en raison de considérations environnementales et économiques. PV dans une source propre d'énergie électrique offrant un faible coût de fonctionnement et de maintenance. Cependant, le SPWPS à couplage direct nécessite des solutions inventives pour améliorer l'efficacité du système en cas de variations de l'énergie solaire tout en produisant la quantité requise d'eau pompée simultanément. Ce document introduit un nouveau V/I (QV/) méthode de commande pour actionner un moteur à induction alimenté directement à partir d'une source photovoltaïque solaire à l'aide d'un convertisseur de puissance à deux étages sans batteries de stockage erreur de tension de liaison à l'aide d'un simple contrôleur à intégrale proportionnelle (P). Le système Q V/f proposé est comparé à la commande linéaire classique V/f à l'aide d'une étude de cas de simulation dans différentes conditions d'exploitation.. Un prototype expérimental est utilisé pour valider la VQ/f proposée dans diverses conditions d'exploitation.

Mots clés:

Abstact :

In rural and remote areas, solar photovoltaic energy (PV) water pumping systems (SPW- PS) are being favored over diesel-powered water pumping due to environmental and economic considerations. PV in a clean source of electric energy offering low operational and maintenance cost. However, the direct-coupled SPWPS requires inventive solutions to improve the system's efficiency under solar power variations while producing the required amount of pumped water concurrently This paper introduces a new V/I (QV/) control method to drive an induction motor powered directly from a solar PV source using a two-stage power converter without storage batteries Conventional controllers usually employ linear V/f control, where the reference motor speed in derived from the PV input power and the de-link voltage error using a simple proportional-integral (P) controller. The proposed Q V/f-based system is compared with the conventional linear V/f control using a simulation case study under different operating conditions.. An experimental prototype system is used to validate the proposed QV/f under diverse operating condition.

ملخص

في المناطق الريفية والنائية، يتم تفضيل أنظمة ضخ المياه للطاقة الشمسية الكهروضوئية (SPW- PS) (PV) على ضخ المياه بالديزل لاعتبارات بيئية واقتصادية PV. في مصدر نظيف للطاقة الكهربائية يوفر تكلفة تشغيل وصيانة منخفضة. ومع ذلك، تتطلب SPWPS المقترنة مباشرة حلاً مبتكرة لتحسين كفاءة النظام في ظل اختلافات الطاقة الشمسية أثناء إنتاج الكمية المطلوبة من المياه المضخة في نفس الوقت. تقدم هذه الورقة V/I جديدًا طريقة التحكم (QV/) لقيادة محرك حثي يعمل مباشرة من مصدر الطاقة الشمسية الكهروضوئية باستخدام محول طاقة من مرحلتين بدون بطاريات تخزين عادة ما تستخدم وحدات التحكم التقليدية التحكم الخطي V/f، حيث السرعة المرجعية للمحرك المشتقة من طاقة إدخال الكهروضوئية وخطأ جهد فك الارتباط باستخدام وحدة تحكم تكاملية (P) بسيطة. ويقارن النظام المقترح القائم على Q V/f مع التحكم الخطي التقليدي V/f باستخدام دراسة حالة محاكاة في ظل ظروف تشغيل

مختلفة. يتم استخدام نظام النموذج الأولي التجريبي للتحقق من صحة QV/f المقترح في ظل حالة تشغيل متنوعة