

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED
SCIENCES
-T L E M C E N-



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي
والبحث العلمي
المدرسة العليا للعلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'études

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Énergie et Environnement

Présenté par : DIB YASMINE

Thème

**Commande d'un système de pompage
photovoltaïque au fil du soleil**

Soutenu publiquement, le 30/06/2024, devant le jury composé de :

M Mohamed M'HAMMEDI	MAA	ESSA. Tlemcen	Président
M Abdelfettah KERBOUA	MCA	ESSA. Tlemcen	Encadrant
M Fouad BOUKLI HACENE	Professeur	ENP. Oran	Co-Encadrant
M Ahmed TAHOUR	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M Lotfi MERAD	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année Universitaire : 2023 / 2024 .

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
INGÉNIORAT EN ÉLECTROTECHNIQUE**

DIB YASMINE

Dimanche 23 Juin 2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DÉDICACES

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À CEUX QUI ME SONT LES PLUS CHERS

À MES PARENTS, QUI M'ONT TOUJOURS SOUTENU ET ENCOURAGÉ, ET QUI
M'ONT INCULQUÉ LES VALEURS QUI ME GUIDENT AUJOURD'HUI

À MON FRÈRE

À TOUTE MA FAMILLE ET À MES AMIS, POUR LEUR SOUTIEN INDÉFECTIBLE
ET LEURS ENCOURAGEMENTS TOUT AU LONG DE MON PARCOURS

À TOUS MES AMIS DE LA PROMOTION, POUR LES MOMENTS DE PARTAGE ET
DE COMPLICITÉ QUE NOUS AVONS VÉCUS ENSEMBLE

À TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS, ET QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU
DE LOIN À MON SUCCÈS

VOTRE SOUTIEN ET VOS ENCOURAGEMENTS ONT ÉTÉ MA SOURCE DE
MOTIVATION TOUT AU LONG DE CE PARCOURS

JE VOUS REMERCIE DU FOND DU CŒUR

REMERCIEMENTS

TOUT D'ABORD, JE TIENS À EXPRIMER MA SINCÈRE RECONNAISSANCE À ALLAH, LE TOUT-PUISSANT ET MISÉRICORDIEUX. C'EST GRÂCE À DIEU QUE J'AI PU ACCOMPLIR CE MODESTE TRAVAIL.

JE TIENS À EXPRIMER MA PROFONDE GRATITUDE À MON ENCADRANT, **M. KERBOUA ABDELFTTAH**, POUR AVOIR ACCEPTÉ DE ME DIRIGER DANS MON TRAVAIL DE RECHERCHE ; SES EFFORTS INCESSANTS AINSI QUE SES PRÉCIEUX CONSEILS M'ONT PERMIS DE MENER À BIEN LA RÉUSSITE DE CE PROJET.

JE TIENS ÉGALEMENT À REMERCIER TOUT PARTICULIÈREMENT **M. BOUKLI HACENE FOUAD**, MON CO-ENCADRANT, POUR SES CONSEILS, SON AIDE CONSTANTE ET SA BONNE HUMEUR QUI ONT ÉTÉ SOURCE DE MOTIVATION LORS DE CES SIX MOIS DE TRAVAIL.

JE SOUHAITE DE MÊME REMERCIER , **M MHAMMEDI MOHAMED** POUR AVOIR ACCEPTÉ DE PRÉSIDER L'HONORABLE JURY. QUE **M. TAHOUR AHMED ET M. MERAD LOTFI** SOIENT AUSSI REMERCIÉS D'AVOIR ACCEPTÉ D'ÉVALUER MON TRAVAIL EN TANT QU'EXAMINATEURS.

JE TIENS ENFIN À EXPRIMER MA RECONNAISSANCE ENVERS **M. MEGNAFI HICHEM**, NOTRE CHEF DE DÉPARTEMENT, AINSI QU'ENVERS **M. ABDELLAOUI GHOUTI**, NOTRE ESTIMÉ PROFESSEUR, POUR LEUR PRÉCIEUX ACCOMPAGNEMENT ET LEUR INDÉFECTIBLE SOUTIEN.

Table des matières

Dédicaces	2
Remerciements	3
Table des matières	6
Liste des figures	8
Liste des abréviations	9
Introduction générale	10
1 Contexte, enjeux et problématique	12
1.1 Introduction	12
1.2 Contexte et enjeux	12
1.3 Le pompage photovoltaïque au fil du soleil : une alternative durable	13
1.4 Problématique et objectifs de recherche	14
1.4.1 Problématique	14
1.4.2 Objectifs de recherche	14
1.5 Démarche méthodologique	14
1.6 Conclusion	16
2 Revue de la littérature	17
2.1 Introduction	17
2.2 Objectif de la Revue	17
2.3 Modélisation des Systèmes de Pompage Photovoltaïque	17
2.4 Commande du Débit	18
2.5 Contributions Précédentes	18
2.6 Analyse de la Viabilité Environnementale	19
2.7 Optimisation pour Résister aux Variations Climatiques	20
2.8 Conclusion	20
3 Modélisation d'un système de pompage solaire photovoltaïque	21
3.1 Introduction	21
3.2 Modélisation du générateur photovoltaïque	21
3.2.1 Anatomie d'une cellule photovoltaïque	22
3.2.2 Assemblage et protection	22
3.2.3 Mise en série	23

3.2.4	Mise en parallèle	24
3.2.5	Modèle électrique	24
3.2.6	Paramètres essentiels d'une cellule photovoltaïque	25
3.2.7	Facteur de forme, FF	26
3.2.8	Le rendement, η	26
3.2.9	Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque	27
	Principe de la recherche du point de puissance maximal	27
	Gestion de la MPPT	28
	Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature	30
	Les premiers types de commande MPPT	30
	Les commandes MPPT à algorithmes performants	31
	Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O)	31
3.3	Modélisation du convertisseur DC-DC	32
3.3.1	Le Principe de fonctionnement du hacheur BOOST	33
3.3.2	Détermination des paramètres du hacheur Boost :	35
	Calcul de l'inductance L :	35
	Calcul du condensateur C :	36
	Simulation sous matlab du convertisseur boost	38
3.3.3	Avantages du convertisseur Boost :	39
3.4	Modélisation du convertisseur DC-AC	39
3.4.1	Mise en équations	40
	Simulation sous matlab de l'onduleur	41
3.4.2	Choix des interrupteurs	42
3.5	Modélisation du Moteur Asynchrone	43
3.5.1	Les hypothèses simplificatrices	43
3.5.2	Modèle mathématique triphasé	43
	Équations électriques	44
	Équations magnétiques	44
3.5.3	Transformation triphasé/diphasé	45
3.5.4	Équations mécaniques	47
3.6	Modélisation de la pompe centrifuge	48
3.6.1	Principe de fonctionnement et constitution	48
3.6.2	La caractéristique « Couple-Vitesse » de la pompe	49
3.6.3	Bilan de puissance	50
3.7	Conclusion	51
4	Développement et évaluation de stratégie de commande	52
4.1	Introduction	52
4.2	Commande VFD pour un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil	53
4.2.1	Principe de fonctionnement	53
4.2.2	Types de commande VFD	53
4.2.3	Avantages de la commande VFD	54
4.2.4	Modèle du Contrôleur PI	54
4.3	Commande scalaire en tension	55
4.3.1	Régulation de la vitesse	56
	Simulation du système global en boucle ouverte	56
	Simulation du système global en boucle fermée	58

4.3.2	Génération des signaux de contrôle par MLI triangulo-sinusoïdale .	61
4.4	Conclusion	62
5	Résultats et discussions	63
5.1	Introduction	63
5.2	Simulation du démarrage du système de pompage sous les condition STC .	63
5.3	Adaptation de la commande aux conditions variables	67
5.3.1	Influence de l'irradiation	67
5.3.2	Influence de la température	69
5.3.3	Suivi de référence	69
5.4	Conclusion	70
	Conclusion générale	71
	Bibliographie	72
	Résumé	75

Liste des figures

3.1	Encapsulation des cellules [5].	22
3.2	Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.	23
3.3	Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle	24
3.4	Modèle de la cellule photovoltaïque réel [20]	24
3.5	La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM[22].	28
3.6	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.	28
3.7	Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge.	29
3.8	Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale suite à une variation de température[22].	29
3.9	Principe de la première commande MPPT numérique.	30
3.10	Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau solaire.	31
3.11	Algorithme type de la méthode P & O [25].	32
3.12	Le convertisseur BOOST.	33
3.13	(a):Diagramme BOOST en position fermé, (b):Diagramme BOOST en position ouvert.	33
3.14	Signaux caractéristiques d'un convertisseur BOOST	34
3.15	Ondulation du courant	35
3.16	Ondulation de tension	37
3.17	Modèle simulink du convertisseur boost.	38
3.18	Les allures d'entrée et de sortie du convertisseur boost($\alpha = 0.5$).	39
3.19	Schéma de l'onduleur triphasé.	40
3.20	Simulation de l'onduleur.	41
3.21	Les allures des tensions V_{ab} , V_{ca} et V_{bc} de l'onduleur.	41
3.22	Les allures des tensions simples V_{an} , V_{bn} et V_{cn} de l'onduleur.	42
3.23	Représentation de l'utilisation des interrupteurs [27].	42
3.24	Représentation des enroulements statoriques et rotoriques [28].	43
3.25	Les différents systèmes d'axes utilisés.	46
3.26	Présentation extérieure d'une pompe centrifuge	49
4.1	Schéma de principe de la commande scalaire en tension de la MAS.	55
4.2	Modèle simulink du système global.	56
4.3	Profil de vitesse.	57
4.4	Courbe de débit.	57
4.5	Évolution de la vitesse et du débit en fonction de l'irradiation.	58
4.6	Schéma d'un régulateur PI	59
4.7	Schéma électrique d'une phase de la MAS.	59
4.8	Schéma bloc de la régulation de vitesse.	60
4.9	Schéma de principe de la commande MLI triangulo-sinusoïdale.	61

4.10	Signaux de références, la porteuse et l'état S_1 du premier interrupteur. . .	62
5.1	Modèle simulink du système global avec commande.	64
5.2	Circuit de commande scalaire.	64
5.3	Profil évolutif de la vitesse du moteur en boucle fermée.	65
5.4	L'évolution du couple mécanique en boucle fermée.	66
5.5	Évolution du débit de la pompe en boucle fermée.	67
5.6	Évolution de la vitesse du moteur en réponse à différentes intensités d'irradiation solaire (I_r) : 1000, 800 et 500 W/m ²	68
5.7	Évolution du débit de la pompe en réponse à différentes intensités d'irradiation solaire (I_r) : 1000, 800 et 500 W/m ²	68
5.8	Évolution de la vitesse du moteur pour des valeurs de température de 25, 50 et 10 degrés Celsius.	69
5.9	Réponse du système à un échelon de vitesse de référence de 1000 à 1200 tr/min à t=1 s, illustrant la robustesse du correcteur.	70

Liste des abréviations

Abréviation	Définition
VFD	Variable Frequency Drive
MPPT	Maximum Power Point Tracking
GPV	Générateur Photovoltaïque
MOSFET	Metal Oxide Semi-conductor Field Effect Transistor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor

Introduction générale

Le pompage solaire photovoltaïque au fil du soleil représente une avancée significative dans la gestion durable des ressources hydriques, notamment dans les régions éloignées ou non desservies par le réseau électrique traditionnel. Cette technologie innovante utilise l'énergie solaire captée par des panneaux photovoltaïques pour alimenter des pompes qui extraient de l'eau à partir de sources naturelles telles que des puits, des rivières ou des réservoirs, offrant ainsi une solution efficace et écologique pour répondre aux besoins en eau potable, agricole et industriel [1].

Pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire et garantir un approvisionnement en eau constant et fiable, la commande VFD scalaire joue un rôle essentiel. Cette technique permet de superviser et d'ajuster dynamiquement les performances des pompes en fonction des variations d'ensoleillement tout au long de la journée. En ajustant la vitesse des moteurs selon les besoins et les conditions environnementales changeantes, la commande VFD scalaire optimise l'efficacité énergétique du système de pompage, réduisant ainsi les coûts opérationnels et minimisant l'empreinte carbone associée à l'exploitation de l'eau [2].

Ce mémoire se concentre sur l'analyse approfondie de la commande VFD scalaire spécifiquement adaptée aux exigences des systèmes de pompage solaire photovoltaïque au fil du soleil. Nous explorerons en détail les composantes essentielles et les phases critiques de cette commande, mettant en lumière les principes de conception, les stratégies de contrôle et les innovations technologiques nécessaires pour maximiser la performance et la durabilité de ces systèmes vitaux.

En examinant les défis spécifiques rencontrés, tels que la variabilité climatique et la disponibilité des ressources solaires, nous proposerons des solutions innovantes pour renforcer la résilience de ces systèmes et améliorer leur intégration dans un cadre de développement durable. Cette approche systématique vise à fournir des recommandations pratiques pour l'ingénierie et la gestion avancée des systèmes de pompage solaire photovoltaïque au fil du soleil, contribuant ainsi à l'amélioration de l'accès à l'eau potable et à la promotion d'une gestion énergétique durable.

À travers cette étude approfondie, nous visons également à mettre en lumière les avantages économiques, environnementaux et sociaux découlant de l'adoption de la commande VFD scalaire dans les systèmes de pompage solaire photovoltaïque. Nous chercherons donc à illustrer son rôle essentiel dans la promotion des objectifs de développement durable.

Voici un aperçu des chapitres qui composent ce mémoire :

Chapitre 1 - Introduction et Problématique: Ce chapitre expose le défi majeur de répondre à la demande croissante en énergie tout en préservant l'environnement. Il met en lumière la dépendance actuelle aux ressources non renouvelables et ses conséquences néfastes sur l'environnement, notamment en contribuant au changement climatique.

Chapitre 2 - Revue de la Littérature: Ce chapitre offre une analyse exhaustive des travaux de recherche sur le pompage photovoltaïque au fil du soleil, en mettant l'accent sur la modélisation des systèmes et la commande du débit. Il vise à comprendre l'état de l'art, à mettre en lumière les avancées et les lacunes actuelles, et à définir le cadre de recherche du mémoire.

Chapitre 3 - Modélisation du Système de Pompage Solaire: Ce chapitre se concentre sur la modélisation du système de pompage solaire, en mettant en avant l'architecture directe GPV-convertisseur-moteur-pompe. Il présente le modèle global du système de pompage solaire dans l'environnement Simulink, mettant en évidence l'interconnexion des composants principaux pour fournir une solution de pompage efficace et économique.

Chapitre 4 - Développement et Évaluation de Stratégie de Commande: Ce chapitre explore en profondeur les différentes stratégies de commande pour un système de pompage photovoltaïque, en mettant en avant l'utilisation de la commande VFD scalaire. Il démontre l'efficacité de cette méthode pour ajuster la vitesse de rotation du moteur de la pompe en fonction de la disponibilité de l'énergie solaire, offrant une flexibilité et une adaptabilité accrues aux conditions de fonctionnement variables.

Chapitre 5 - Résultats et Discussions: Ce chapitre est dédié à l'analyse approfondie des résultats et des discussions concernant la commande d'un système de pompage solaire. Il évalue l'efficacité et la fiabilité des mécanismes de commande dans des environnements variables, mettant en évidence l'efficacité des stratégies de commande pour optimiser le fonctionnement du système de pompage.

Conclusion Générale: La conclusion générale met en évidence les principales contributions et conclusions tirées de l'étude sur la commande d'un système de pompage solaire photovoltaïque. Elle souligne l'importance du pompage photovoltaïque en tant qu'alternative durable dans le domaine de l'énergie renouvelable et résume les différentes approches et techniques analysées dans le mémoire.

Chapitre 1

Contexte, enjeux et problématique

1.1 Introduction

Répondre à la demande croissante en énergie tout en préservant l'environnement est un défi majeur pour les années à venir. La dépendance actuelle aux ressources non renouvelables, comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel, a des conséquences néfastes sur l'environnement, notamment en contribuant au changement climatique.

Les énergies renouvelables offrent une alternative prometteuse. Elles permettent de produire de l'électricité propre et de réduire la dépendance aux ressources fossiles. Parmi les sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire est la plus dominante et largement exploitable. Elle offre la possibilité aux utilisateurs de subvenir à une partie de leurs besoins en énergie sans intermédiaire.

Cette solution innovante est parfaitement adaptée aux besoins des zones isolées privées du réseau électrique. Elle offre aux habitants une alternative écologique et économique pour leur consommation d'énergie électrique.

Le pompage photovoltaïque, solution écologique et économique, s'avère être une réponse particulièrement adaptée aux défis de l'accès à l'eau en Algérie. Parfaitement compatible avec les conditions climatiques du pays et les besoins des populations rurales, cette technologie permet d'alimenter en eau potable et d'irriguer les terres agricoles de manière durable. Son développement en Algérie contribuera à la sécurité alimentaire, à la préservation des ressources naturelles et à l'amélioration des conditions de vie des populations rurales.

1.2 Contexte et enjeux

L'accès à l'eau potable et à l'irrigation est un défi crucial pour le développement durable et la lutte contre la pauvreté. Dans les zones rurales et isolées, où l'accès à l'électricité conventionnelle est souvent limité ou inexistant, les systèmes de pompage d'eau constituent une solution vitale pour répondre aux besoins des populations.

Les pompes à moteur diesel, couramment utilisées dans ces régions, présentent des inconvénients majeurs :

- **Dépendance aux combustibles fossiles** : Elles reposent sur l'utilisation de combustibles fossiles, tels que le diesel, qui sont des ressources non renouvelables et polluantes.
- **Coûts d'exploitation élevés** : Le prix du diesel est souvent fluctuant et élevé, ce qui représente une charge financière importante pour les communautés locales.
- **Impact environnemental négatif** : La combustion du diesel émet des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques, contribuant au changement climatique et à la dégradation de la qualité de l'air.

1.3 Le pompage photovoltaïque au fil du soleil : une alternative durable

Le pompage photovoltaïque au fil du soleil, également connu sous le nom de pompage solaire direct, se présente comme une alternative économique et écologique aux systèmes de pompage traditionnels. Cette technologie ingénieuse tire parti de l'énergie solaire pour faire fonctionner une pompe directement, sans nécessiter l'utilisation de batteries.

Face aux défis croissants liés à la raréfaction de l'eau et aux impacts environnementaux du changement climatique, le pompage solaire se présente comme une solution durable et prometteuse. En effet, cette technologie innovante offre de nombreux avantages qui en font un choix particulièrement pertinent pour les régions isolées et fragilisées. Parmi les principaux atouts du pompage solaire, on peut citer :

1. Coût plus bas :

- **Système plus simple** : L'absence de batteries réduit le nombre de composants et simplifie l'installation, ce qui se traduit par des coûts d'investissement initiaux moins élevés.
- **Moins d'entretien** : Sans batteries à entretenir ou à remplacer, le pompage au fil du soleil nécessite une maintenance moins importante, réduisant ainsi les coûts d'exploitation sur le long terme.

2. Fiabilité accrue :

- **Moins de composants sensibles** : L'absence de batteries, qui sont des éléments fragiles du système, rend le pompage au fil du soleil plus fiable et moins susceptible de pannes.
- **Stockage d'eau sécurisé** : Le stockage d'eau dans des réservoirs ne présente aucun risque de pollution ou de contamination, contrairement aux batteries qui peuvent contenir des substances nocives pour l'environnement.

3. Respectueux de l'environnement :

- **Impact environnemental réduit** : La fabrication et le recyclage des batteries ont un impact environnemental non négligeable. En les éliminant, le pompage au fil du soleil minimise son empreinte écologique.

- **Utilisation optimale des ressources naturelles** : Le pompage au fil du soleil exploite directement l'énergie solaire, une ressource renouvelable et abondante, sans gaspillage d'énergie stockée dans des batteries.

4. Adaptabilité :

- **Parfaitement adapté aux zones ensoleillées** : Le pompage au fil du soleil tire pleinement parti des régions ensoleillées pour maximiser son efficacité, ce qui le rend particulièrement adapté aux climats arides et semi-arides.
- **Solution évolutive** : La capacité de pompage peut être facilement augmentée en ajoutant des panneaux solaires supplémentaires, sans nécessiter de modifications majeures du système.

1.4 Problématique et objectifs de recherche

Malgré ses nombreux avantages, le pompage photovoltaïque au fil du soleil présente des défis techniques liés à la variabilité de la ressource solaire et à la nécessité d'adapter continuellement le débit et la pression d'eau pompée à la tension et le courant issus du champ des panneaux PV.

1.4.1 Problématique

Établir une commande robuste du débit via le réglage de la vitesse de rotation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil afin de maximiser l'efficacité énergétique, de répondre aux besoins en eau des utilisateurs et de garantir une alimentation économique fiable et durable.

1.4.2 Objectifs de recherche

- Développer un modèle précis du système de pompage photovoltaïque au fil du soleil, prenant en compte les différentes composantes du système et les interactions entre elles.
- Analyser les différentes stratégies de commande du débit existantes et identifier leurs avantages et leurs limites.
- Développer une commande de la vitesse de rotation du MAS pour optimiser les performances du système de pompage photovoltaïque au fil du soleil.

1.5 Démarche méthodologique

La démarche méthodologique de cette recherche s'articule autour des étapes suivantes :

- **Modélisation du système** : Développement d'un modèle mathématique du système de pompage photovoltaïque au fil du soleil, intégrant les différentes composantes du système et les interactions entre elles. La modélisation est une étape essentielle pour comprendre son fonctionnement et développer des stratégies de commande efficaces.

Divers modèles ont été proposés dans la littérature, allant des modèles statiques aux modèles dynamiques plus complexes.

Le choix du modèle approprié dépend de la complexité du système, des objectifs de l'analyse et des ressources disponibles.

- Développement de stratégies de commande : Conception et implémentation de différentes stratégies de commande du débit. La commande du débit joue un rôle crucial dans l'optimisation des performances d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil. L'objectif de la commande est d'adapter le débit d'eau pompée à la disponibilité variable de l'énergie solaire et aux besoins en eau des utilisateurs.

Divers approches de commande ont été développées dans la littérature, pouvant être classées en deux grandes catégories :

- Commandes statiques : Ces commandes reposent sur des principes simples et ne nécessitent pas de calculs complexes en temps réel. Elles sont généralement basées sur des capteurs de pression ou de débit pour ajuster le fonctionnement du système.
 - * Commande par vanne : La commande par vanne consiste à ajuster l'ouverture d'une vanne sur la conduite de refoulement de la pompe pour réguler le débit d'eau. Cette méthode est simple à implémenter mais ne permet pas une adaptation fine aux variations de la ressource solaire.
 - * Commande par variation de vitesse : La commande par variation de vitesse consiste à ajuster la vitesse de rotation du moteur de la pompe pour réguler le débit d'eau. Cette méthode est plus flexible que la commande par vanne mais nécessite un variateur de vitesse et une régulation plus complexe.
- Commandes dynamiques : Ces commandes intègrent des algorithmes de calcul et des techniques de contrôle avancées pour optimiser le fonctionnement du système en temps réel. Elles permettent une adaptation plus fine aux variations de la ressource solaire et aux besoins en eau des utilisateurs.
 - * Commande par algorithmes d'optimisation : Des algorithmes d'optimisation, tels que le suivi du point de puissance maximale (MPPT), peuvent être utilisés pour maximiser l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en eau pompée. Ces algorithmes adaptent le fonctionnement du système en fonction des conditions instantanées d'ensoleillement.
 - * Commande par intelligence artificielle : Des techniques d'intelligence artificielle, telles que les réseaux neuronaux artificiels ou les systèmes flous, peuvent être employées pour apprendre et modéliser le comportement complexe du système et optimiser sa commande en temps réel. Ces approches permettent une gestion plus fine et adaptative du système.

Le choix de la commande adaptée dépend de plusieurs facteurs, tels que la complexité du système, les besoins en eau des utilisateurs, la disponibilité des ressources et le budget disponible.

- Evaluation des performances : Simulation numérique et expérimentation des stratégies de commande développées pour évaluer leurs performances en termes d'efficacité énergétique, de réponse aux besoins en eau et de stabilité du système.

- Analyse et interprétation des résultats : Analyse des résultats obtenus pour identifier les stratégies de commande les plus performantes et proposer des recommandations pour l'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque au fil du soleil.

1.6 Conclusion

Ce chapitre introductif éclaire sur les enjeux du pompage photovoltaïque au fil du soleil, mettant en lumière son rôle potentiel en tant que solution durable. En définissant la problématique et en énonçant les objectifs de recherche, il établit une base solide pour cette étude. La démarche méthodologique présentée promet une exploration rigoureuse et structurée. Ainsi, ce chapitre inaugure une investigation approfondie et éclairée sur le sujet.

Chapitre 2

Revue de la littérature

2.1 Introduction

Le pompage photovoltaïque au fil du soleil représente une technologie prometteuse pour l'exploitation durable des ressources en eau, particulièrement dans les régions isolées et en développement.

Cette technologie utilise directement l'énergie solaire captée par des panneaux photovoltaïques pour alimenter des pompes à eau, sans besoin de stockage intermédiaire de l'énergie. Cette méthode se distingue par son coût, sa simplicité, son efficacité énergétique et son faible impact environnemental.

2.2 Objectif de la Revue

Cette revue de la littérature vise à offrir une analyse exhaustive des travaux de recherche portant sur le pompage photovoltaïque au fil du soleil, en mettant particulièrement l'accent sur deux aspects cruciaux : la modélisation des systèmes et la commande du débit.

L'objectif est de comprendre l'état de l'art, de mettre en lumière les principales avancées et les lacunes actuelles, et de définir le cadre de recherche de ce mémoire.

2.3 Modélisation des Systèmes de Pompage Photovoltaïque

La modélisation des systèmes de pompage photovoltaïque est essentielle pour optimiser leur conception et leur fonctionnement. Plusieurs études ont abordé ce sujet, en développant des modèles mathématiques et des simulations pour prédire le comportement des systèmes sous différentes conditions environnementales. Par exemple, l'étude de Khatib T. [9] propose un modèle de performance des systèmes de pompage photovoltaïque intégrant des variables météorologiques et hydrauliques, offrant ainsi un outil précieux pour la planification et la gestion des ressources en eau dans les zones rurales.

De même, la recherche menée par Iqbal M. [10] développe un modèle dynamique basé sur les équations différentielles pour simuler la performance d'un système de pompage sous différentes intensités de rayonnement solaire et débits d'eau, montrant l'importance de la modélisation précise pour une performance optimale. Une autre étude significative, celle de Cervera-Gascó [11], propose un modèle hybride combinant des méthodes analytiques et de machine learning pour prédire les performances du pompage photovoltaïque, offrant une précision accrue et une adaptabilité aux variations climatiques.

2.4 Commande du Débit

En parallèle, la commande du débit dans les systèmes de pompage photovoltaïque est un domaine de recherche actif, visant à maximiser l'efficacité et la fiabilité des systèmes. Les méthodes de commande incluent des stratégies telles que la commande par logique floue, la commande par algorithmes de maximum power point tracking (MPPT), et la commande prédictive basée sur des modèles. L'étude de Shah K. [12] explore l'application des algorithmes MPPT pour optimiser le rendement des pompes photovoltaïques, montrant des améliorations significatives en termes de performance et de stabilité du système.

De plus, la recherche de El Ghzizal A. [13] démontre l'efficacité d'une commande par logique floue dans l'amélioration de la réactivité et de la robustesse des systèmes de pompage sous des conditions météorologiques variées. Une étude par Singh [14] présente l'intégration de la commande prédictive dans les systèmes de pompage photovoltaïque, permettant une anticipation des variations de l'ensoleillement et ajustant en temps réel les paramètres du système pour maintenir une performance optimale.

2.5 Contributions Précédentes

L'étude menée par Neama Yussif, et al [36] se concentre sur le contrôle amélioré des moteurs à induction dans les systèmes de pompage d'eau solaire en utilisant une méthode de contrôle quadratique V/f. Leur recherche démontre que le contrôle quadratique offre des avantages significatifs par rapport au contrôle linéaire V/f classique, notamment en termes d'efficacité accrue, de réduction de la magnitude du courant de phase et d'amélioration de la réponse dynamique du système. Les simulations et les expériences en laboratoire ont confirmé la supériorité de cette approche, soulignant son potentiel pour améliorer les performances des systèmes de pompage d'eau solaire.

Une autre étude expérimentale menée par S. Ashokkumar, et al de l'Institut de technologie Aarupadai Veedu [15] se concentre sur un système d'irrigation solaire pour l'agriculture. Ce système utilise des panneaux solaires photovoltaïques (PV) pour générer de l'électricité, des pompes à eau à double action et des moteurs CC pour pomper l'eau de manière efficace. Les composants clés du système comprennent des panneaux solaires PV, un mécanisme de surveillance, une structure de support, des composants électroniques de contrôle, des câbles, des tuyaux et des pompes. Le système peut être configuré avec un couplage direct ou un couplage de batterie pour stocker l'énergie excédentaire.

En outre, le document souligne l'importance de l'efficacité énergétique du système, en mettant en avant l'utilisation de moteurs CC et de la technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour optimiser les performances des pompes solaires. Cette approche permet une utilisation efficace de l'énergie solaire, réduisant les coûts opérationnels et offrant une solution durable pour l'irrigation agricole.

2.6 Analyse de la Viabilité Environnementale

D'autres travaux notables incluent l'analyse de la viabilité économique et environnementale des systèmes de pompage photovoltaïque. Par exemple, Hossain [16] ont mené une étude comparative des coûts et des avantages environnementaux des systèmes de pompage photovoltaïque par rapport aux systèmes traditionnels, concluant que les solutions photovoltaïques offrent des avantages substantiels sur le long terme.

En complément, une étude de Bouzidi [17] se concentre sur l'optimisation des systèmes de pompage d'eau photovoltaïques pour l'irrigation des palmiers dattiers dans les régions sahariennes de l'Algérie. L'objectif est d'accroître la viabilité économique en utilisant l'eau produite de manière efficace pour l'irrigation, ce qui est crucial pour le développement durable dans les zones énergétiquement déficientes. L'optimisation de l'ensemble photovoltaïque et du réservoir de stockage permet d'augmenter la production primaire dans les secteurs agricole et pastoral. L'étude propose également de réduire l'excès d'eau produite en l'associant judicieusement à d'autres cultures dans la palmeraie, améliorant ainsi le taux d'utilisation de l'eau de 56% à 86%.

Une analyse récente de Kumar [39] examine les facteurs qui ont influencé les agriculteurs du Gujarat à adopter des systèmes de pompage d'eau solaire.

Les résultats ont révélé que sept variables, regroupées en "avantages économiques" et "politiques gouvernementales", ont joué un rôle crucial dans cette adoption. Les avantages économiques comprenaient les coûts initiaux réduits des systèmes de pompage d'eau solaire, des politiques de crédit flexibles encourageant l'adoption de ces systèmes, des économies sur les coûts d'électricité et la maintenance abordable. Les agriculteurs ont constaté une augmentation significative de leurs revenus en vendant de l'eau d'irrigation et de l'électricité excédentaire. L'étude recommande la mise en œuvre de systèmes de pompage solaire avec irrigation goutte à goutte pour augmenter les revenus des agriculteurs, réduire la consommation d'eau souterraine et améliorer la qualité de production. Ces conclusions soulignent l'importance des politiques gouvernementales et des avantages économiques dans l'adoption réussie de systèmes de pompage d'eau solaire.

2.7 Optimisation pour Résister aux Variations Climatiques

Les défis techniques tels que la variation des conditions météorologiques et leur impact sur la performance des systèmes de pompage ont également été largement étudiés. Par exemple, Mekhilef [18] se concentrent sur l'optimisation de la conception des systèmes pour résister aux variations climatiques, en proposant des solutions hybrides combinant le pompage photovoltaïque avec d'autres sources d'énergie renouvelable pour garantir une alimentation continue en eau.

Une autre étude de Zanetti [19] explore l'utilisation de systèmes de stockage de l'énergie pour compenser les variations diurnes et saisonnières, améliorant ainsi la résilience et l'efficacité des systèmes de pompage.

2.8 Conclusion

Cette revue de la littérature a synthétisé les connaissances actuelles sur le pompage photovoltaïque au fil du soleil, mettant en évidence les contributions majeures et les défis persistants dans les domaines de la modélisation et de la commande du débit. L'analyse a révélé l'importance cruciale de la modélisation des systèmes de pompage photovoltaïque pour optimiser leur fonctionnement et développer des stratégies de commande efficaces. Les diverses approches de commande, allant des techniques simples aux méthodes complexes intégrant l'intelligence artificielle, soulignent la richesse des solutions disponibles.

Ce chapitre a fourni les bases théoriques et contextuelles nécessaires à la recherche présentée dans ce mémoire. Les chapitres suivants détailleront le développement, l'évaluation et la validation d'une stratégie de commande visant à optimiser les performances des systèmes de pompage photovoltaïque au fil du soleil, contribuant ainsi de manière significative au développement durable et à la gestion efficace des ressources en eau dans les régions les plus nécessiteuses.

Chapitre 3

Modélisation d'un système de pompage solaire photovoltaïque

3.1 Introduction

La modélisation complète d'un système de pompage solaire photovoltaïque est une démarche fondamentale pour son optimisation et son déploiement efficace. Ce système, exploitant l'énergie solaire captée par des panneaux photovoltaïques pour actionner une pompe, représente une alternative écologique et autonome aux méthodes conventionnelles de pompage d'eau. L'étude approfondie de chaque composant de ce système, de la source d'énergie solaire au moteur de la pompe, revêt une importance capitale pour sa conception, sa performance et sa fiabilité.

Dans cette étude, nous nous penchons sur la modélisation détaillée d'un tel système, en examinant rigoureusement chaque élément crucial qui le compose. Nous commençons par explorer en profondeur la structure et le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, en mettant en lumière les paramètres électriques fondamentaux et les stratégies avancées de recherche du point de puissance maximale (MPPT). Par la suite, nous abordons avec précision la modélisation des convertisseurs DC-DC et DC-AC, ainsi que du moteur asynchrone, en présentant des équations mathématiques pour chaque composant.

L'objectif principal de cette démarche est de fournir une base théorique solide pour l'analyse approfondie, la simulation précise et l'optimisation pointue des systèmes de pompage solaire photovoltaïque. Une telle approche, basée sur des modèles précis et des simulations avancées, permettra de développer des systèmes plus performants, plus durables et mieux adaptés aux spécificités de chaque application.

3.2 Modélisation du générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque, également appelée photopile, est le composant élémentaire d'une installation solaire. Véritable bijou de technologie, elle opère la magie de transformer directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Découvrons ensemble les secrets de fabrication et de fonctionnement de cette merveille miniature.[3][4]

3.2.1 Anatomie d'une cellule photovoltaïque

1. **Le cœur semi-conducteur** : La cellule est constituée d'une fine couche de matériau semi-conducteur, tel que le silicium, dont la conductivité électrique est astucieusement modulée. Cette couche joue le rôle d'une barrière énergétique, que les électrons ne peuvent franchir sans un apport d'énergie supplémentaire. C'est là que la magie opère !
2. **Capter la lumière** : Pour maximiser l'absorption de la lumière du soleil, une couche anti-reflet est appliquée sur la surface de la cellule. Cette couche minimise les réflexions indésirables et permet à davantage de photons d'atteindre le matériau semi-conducteur.
3. **Collecter l'électricité** : Deux grilles métalliques, une cathode sur le dessus et une anode en dessous, se chargent de collecter les électrons libérés par l'énergie lumineuse. Ces grilles servent de points de contact pour le courant électrique produit.
4. **Optimisation continue** : Les cellules les plus récentes intègrent une combinaison ingénieuse de couches réfléchissantes multicouches juste en dessous du semi-conducteur. Ce système innovant permet à la lumière de rebondir plus longtemps à l'intérieur de la cellule, améliorant ainsi son rendement de conversion énergétique.

3.2.2 Assemblage et protection

1. **Liaison étroite** : Les cellules photovoltaïques sont reliées entre elles par de fins rubans métalliques en cuivre étamé. Ces rubans assurent la continuité électrique entre les cellules, permettant à la tension et au courant de circuler librement.
2. **Encapsulation protectrice** : Pour garantir leur robustesse et leur durabilité, les cellules sont encapsulées sous vide entre deux couches de films thermoplastiques transparents, généralement en EVA (Ethylène Acétate de Vinyle). Cette encapsulation protège les cellules contre les agressions extérieures telles que l'humidité et la poussière.

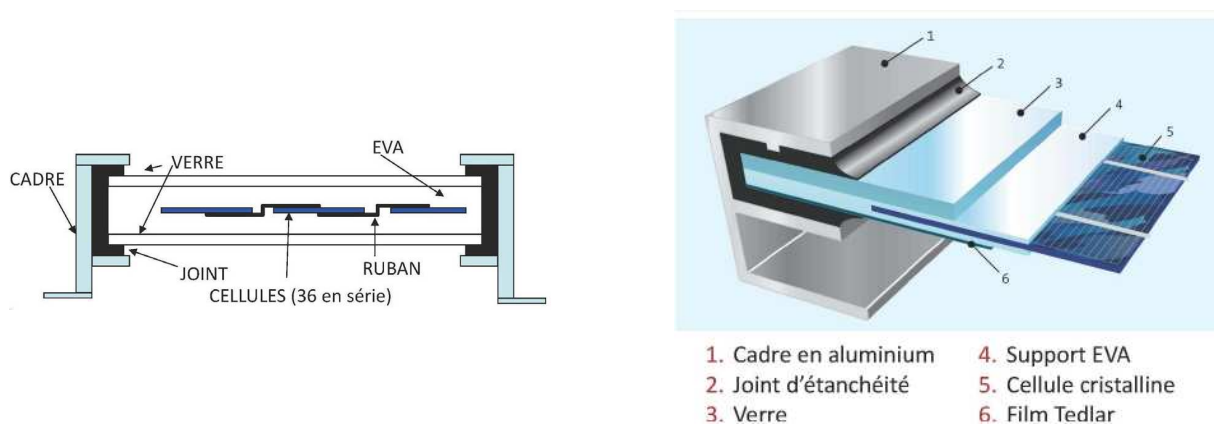


Figure 3.1: Encapsulation des cellules [5].

3. **Cadre solide** : La plupart des cellules sont intégrées dans un cadre en aluminium robuste, doté d'un joint périphérique pour assurer l'étanchéité et permettre la dilatation des matériaux en cas de variations de température.
4. **Protection frontale** : Un verre trempé est fixé sur la face avant de la cellule pour la protéger des chocs et des rayures, tout en laissant passer la lumière du soleil.
5. **Dos sécurisé** : La face arrière de la cellule est généralement constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR, un matériau résistant aux intempéries et aux rayons UV.
6. **Connexion centralisée** : Une boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement des cellules et intègre des diodes by-pass. Ces diodes permettent de protéger les cellules contre les surchauffes et d'optimiser leur fonctionnement en cas de faible luminosité.
7. **Câblage final** : Deux câbles unipolaires sont raccordés à la boîte de connexion pour acheminer l'électricité produite vers le reste du système photovoltaïque.

3.2.3 Mise en série

Une association de (N_s) cellules en série, comme indiqué dans la figure 3.2, permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules [4].

$$V_{coN_s} = N_s \times V_{co} \quad (3.1)$$

$$I_{cc} = I_{ccN_s} \quad (3.2)$$

Où :

V_{coN_s} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{ccN_s} : courant de court-circuit de N_s cellules en série.

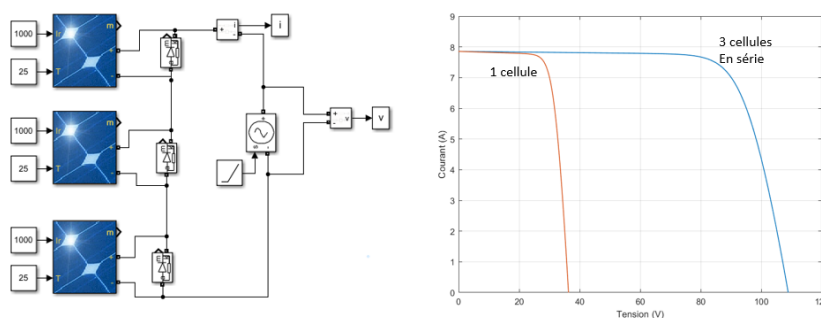


Figure 3.2: Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.

3.2.4 Mise en parallèle

Une association parallèle de N_p cellules (NP) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [4].

$$I_{cc_{NP}} = N_p \times I_{cc} \quad (3.3)$$

$$V_{co} = V_{co_{NP}} \quad (3.4)$$

Où :

$I_{cc_{NP}}$: La somme des courants de court-circuit de N_p cellules en parallèle.

$V_{co_{NP}}$: Tension du circuit ouvert de N_p cellules en parallèle.

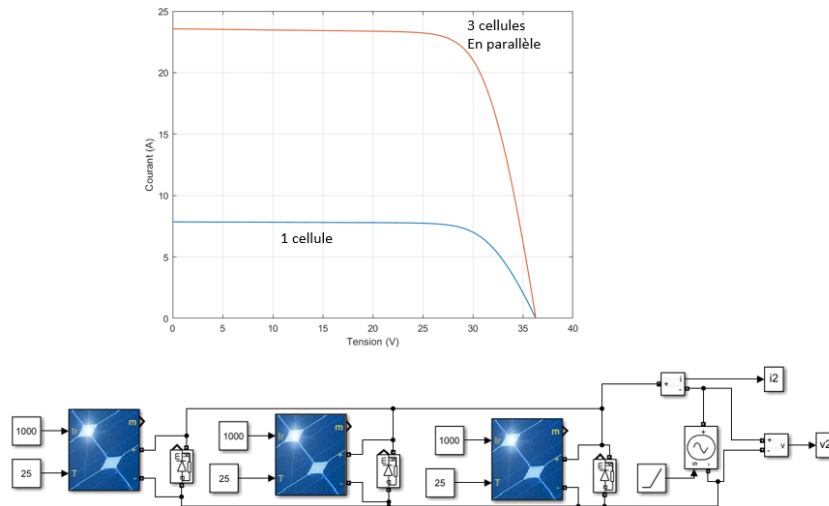


Figure 3.3: Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle

3.2.5 Modèle électrique

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode figure (3.4). Le modèle est complété par une résistance série R_s due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt R_p qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule [3].

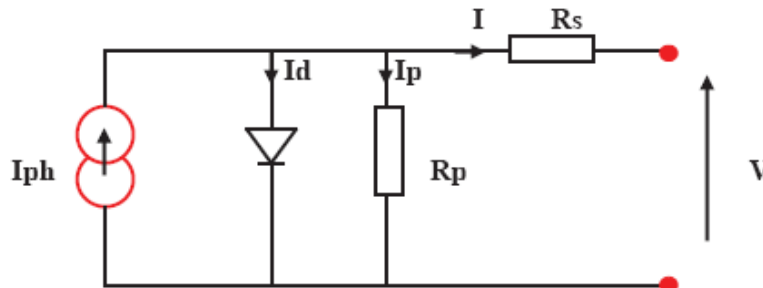


Figure 3.4: Modèle de la cellule photovoltaïque réel [20]

$$I_{pv} = I_s \left(e^{\frac{qV_{pv}}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V_{pv}}{R_{sh}} + \frac{V_{pv}}{R_s} \quad (3.5)$$

Avec:

- I_{pv} : courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur.
- V_{pv} : tension aux bornes de la cellule.
- I_s : courant de saturation.
- K : constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} J/K$).
- T : température effective des cellules en Kelvin (K).
- e : charge de l'électron ($e = 1.6 \times 10^{-19} C$).
- n : facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$).
- I_{ph} : photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température (ou courant de court-circuit).
- R_{sh} : résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.
- R_s : résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

3.2.6 Paramètres essentiels d'une cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$.

- Courant de court-circuit (I_{cc}) : Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs ; ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.
- Tension de circuit ouvert (V_{co}) : Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend également de l'éclairement de la cellule.

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (3.6)$$

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement:

1. Régime des faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} \ll I_s$, ce qui permet d'écrire :

$$\log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (3.7)$$

D'où:

$$V_{co} \approx \frac{KT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (3.8)$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi $V_{co} = R_0 \cdot I_{ph}$, en posant R_0 comme la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

2. Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_s$, soit :

$$V_{co} \approx \frac{KT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (3.9)$$

D'où:

$$V_{co} \approx \frac{KT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (3.10)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le logarithme de I_{ph} , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme $\frac{KT_c}{q}$. En effet, le courant de saturation, I_s , dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme $\frac{KT_c}{q}$. Donc la tension de circuit ouvert V_{oc} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes [21].

3.2.7 Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \times V_{oc}$.

Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales[21]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{oc}} \quad (3.11)$$

3.2.8 Le rendement, η

Le rendement, η , des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{FF \cdot I_{cc} V_{co}}{P_{\text{in}}} \quad (3.12)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

3.2.9 Le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. Ces dernières années plusieurs dispositifs ont été développés, aussi élaborés les uns que les autres. Dans la référence, les auteurs passent en revue les différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes.

Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. 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). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. [22, 23].

- **Principe de la recherche du point de puissance maximal**

Un MPPT, de l'anglais *Maximum Power Point Tracking*, est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La figure 3.5 représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

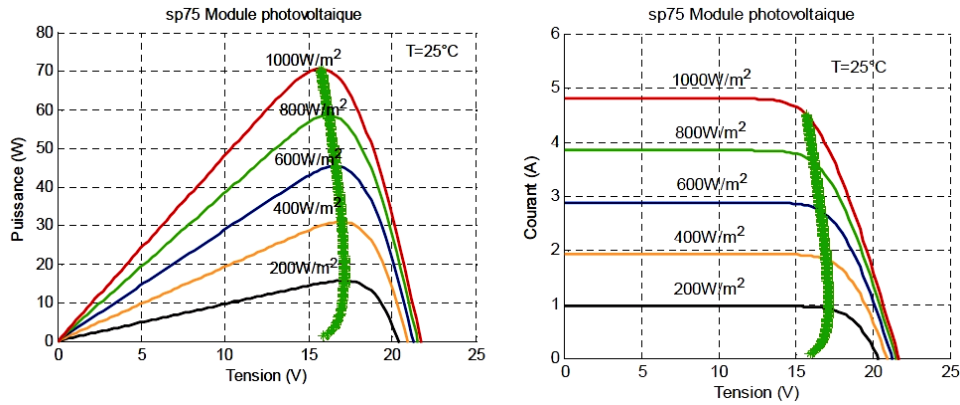


Figure 3.5: La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM[22].

La figure (3.6) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome.

Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. Cet étage d'adaptation d'adaptat ion dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [22].

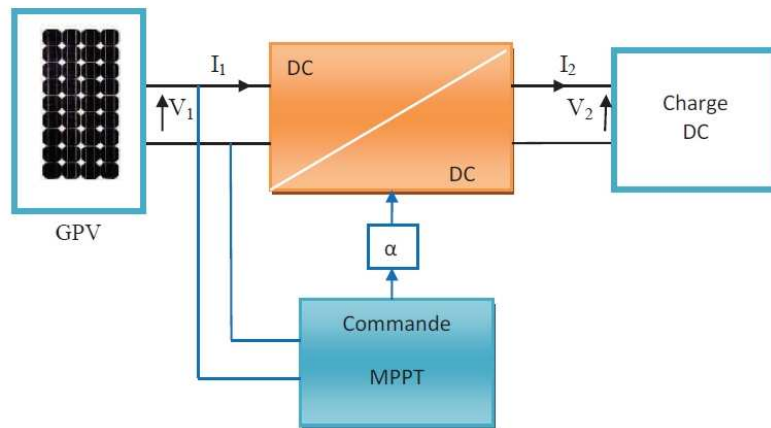


Figure 3.6: Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

Pour assurer le fonctionnement d'un GPV à son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont utilisés, utilisés ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques basées sur des méthodes optimales [22].

• Gestion de la MPPT

Les Figures (3.7) et (3.8) illustrent trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal (PPM1)

vers un nouveau point (P1) de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Dans ce cas, pour une variation d'ensoleillement, il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum (PPM2). Dans le cas b pour une variation de charge, on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin, dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV. Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande[22].

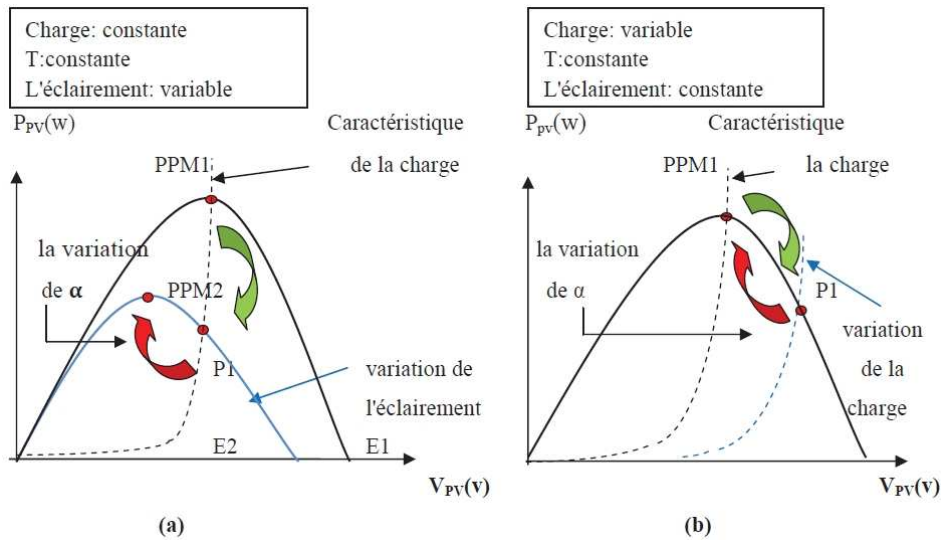


Figure 3.7: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge.

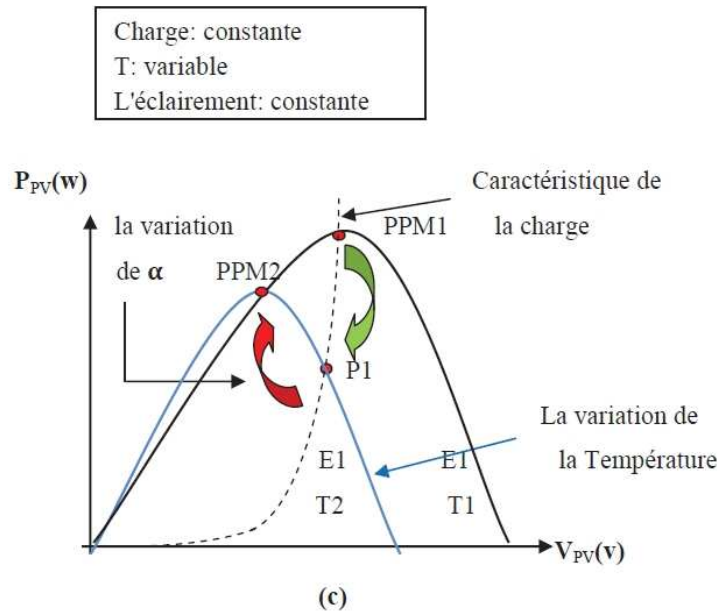


Figure 3.8: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale suite à une variation de température[22].

• Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque.

Étant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative. Seuls les algorithmes qui nous semblent décrire une méthode de recherche spécifique sont reportés dans ce manuscrit et brièvement analysés.

• Les premiers types de commande MPPT

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial, avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. Appliqué initialement au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Boehringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est décrit en figure 3.9 et peut être implanté entièrement en numérique.

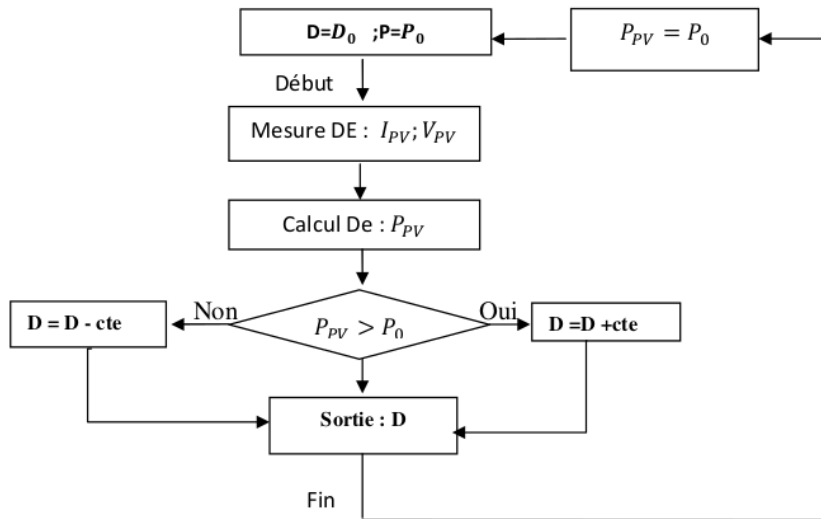


Figure 3.9: Principe de la première commande MPPT numérique.

Il consiste à calculer la puissance à l'instant t_i à partir des mesures de I_{PV} et V_{PV} , et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant t_{i-1} . De là, un nouveau rapport cyclique (D) est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants. Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que

la précision de la recherche du (PPM) associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le (PPM) même temporairement.

- **Les commandes MPPT à algorithmes performants**

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Hill Climbing, Perturb & Observ (P&O) et l'incrément de conductance (IncCond) [24].

- **Principe des commandes "Perturb and 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 III.14, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du (PPM). Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le (PPM). Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, 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.

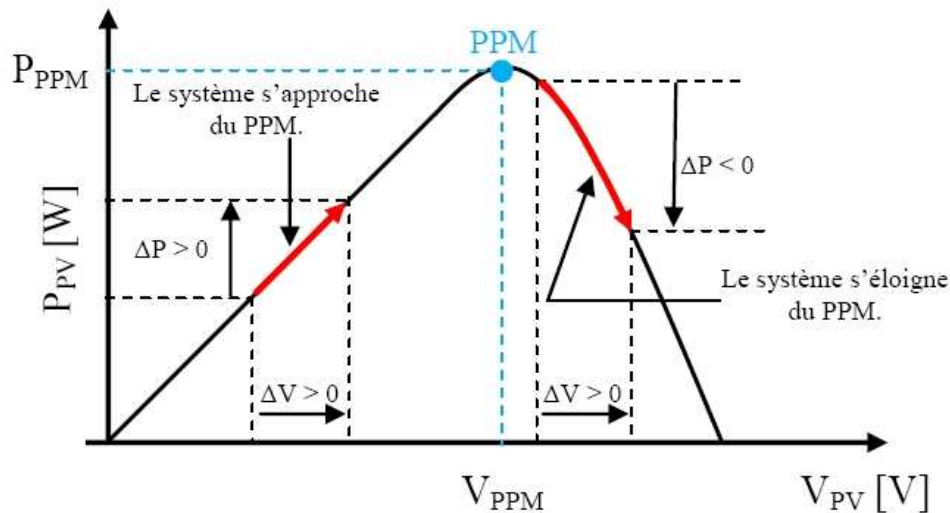


Figure 3.10: Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau solaire.

La Figure(3.11) 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.

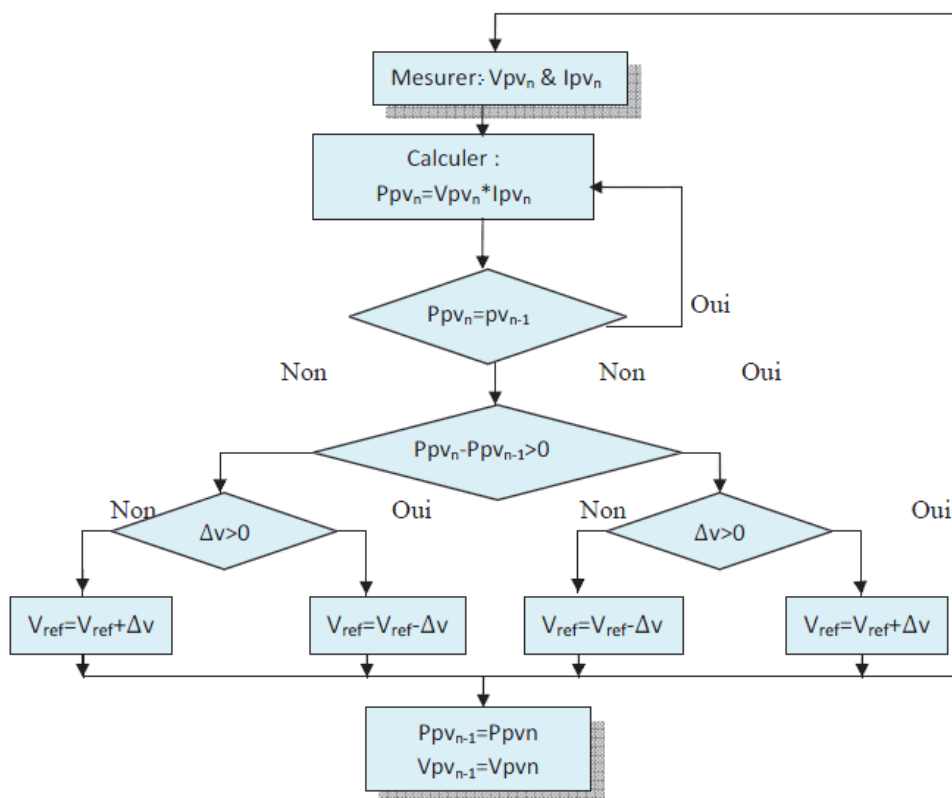


Figure 3.11: Algorithme type de la méthode P & O [25].

Avec :

- P_{pv_n} : La puissance à l'instant (t).
- $P_{pv_{n-1}}$: La puissance à l'instant (t - 1).

$$\Delta V = V_{pv_n} - V_{pv_{n-1}}$$

$$\Delta P = P_{pv_n} - P_{pv_{n-1}}$$

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de part 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. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du (PPM), il faut donc trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

3.3 Modélisation du convertisseur DC-DC

Le convertisseur BOOST est connu par le nom d'élevateur de tension peut être représenté par le circuit donne par la Figure 3.12.

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

L'interrupteur K_1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

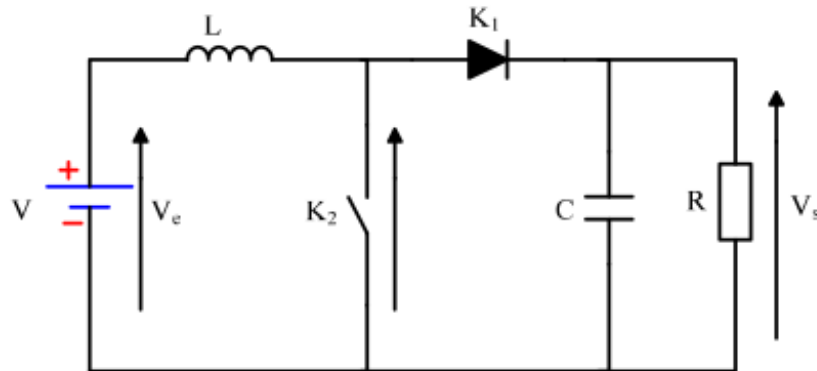


Figure 3.12: Le convertisseur BOOST.

3.3.1 Le Principe de fonctionnement du hacheur BOOST

Déterminer le comportement réel de ce convertisseur nécessite de connaître en détail son modèle mathématique. Pour cela, nous devons représenter le circuit équivalent par les deux états du commutateur et ensuite dériver le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure 3.13 montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur survolteur dans les deux cas : l'interrupteur fermé pendant αT et l'interrupteur ouvert pendant $(1 - \alpha)T$.

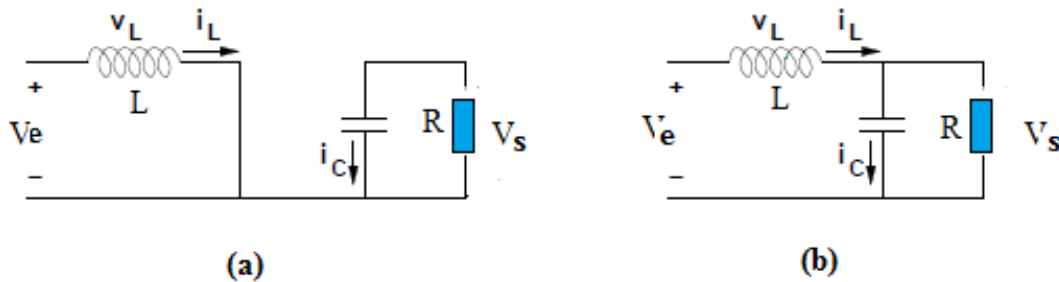


Figure 3.13: (a):Diagramme BOOST en position fermé, (b):Diagramme BOOST en position ouvert.

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure 3.13, on obtient les systèmes d'équations suivants :

- De 0 à αT (état passant) : le MOSFET est en position 1, l'inductance stocke le courant provenant de la source et la capacité maintient la tension de sortie en utilisant l'énergie précédemment stockée. Pendant ce temps, le courant I_L augmente suivant l'équation suivante :

$$V_e = V_L \quad (3.13)$$

$$I_s = \frac{-V_s}{R} \quad (3.14)$$

- De αT à T (état bloqué) : le MOSFET est en position 2. Lorsque l'interrupteur s'ouvre, l'interruption de courant dans l'inductance provoque une surtension qui s'ajoute à celle du condensateur.

$$V_L = V_e - V_s \quad (3.15)$$

$$I_c = I_L - I_s = I_L - \frac{V_s}{R} \quad (3.16)$$

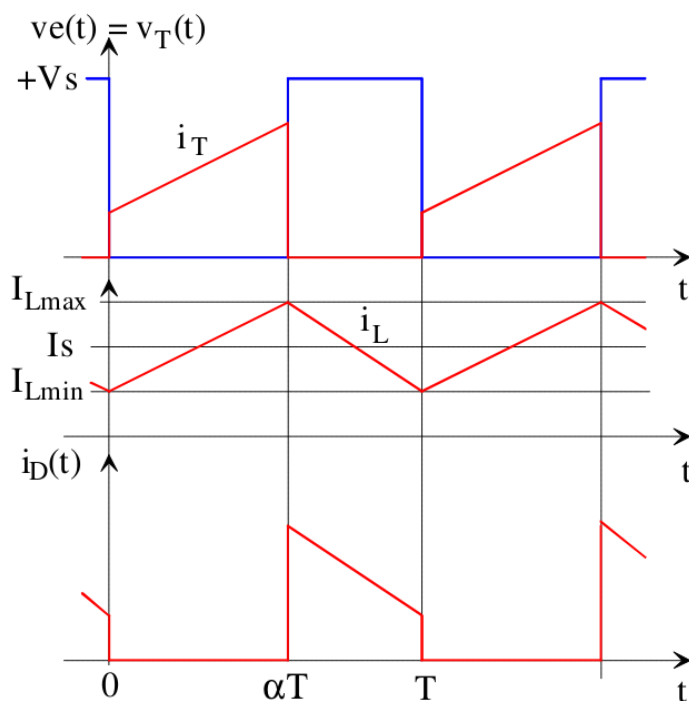


Figure 3.14: Signaux caractéristiques d'un convertisseur BOOST

Dans un convertisseur bien conçu dans l'état d'équilibre, il ne devrait y avoir aucun entraînement significatif sur l'intensité et la tension pendant une période de commutation. Par conséquent, il est supposé que l'ondulation de commutation est beaucoup plus petite que les composantes continues du courant et de la tension.

Cela signifie que le courant et la tension sont les mêmes au début et à la fin d'une période de commutation. C'est la petite approximation d'entraînement et elle mène aux expressions suivantes de la tension de l'inducteur et du courant du condensateur pendant une période de commutation T :

$$\begin{cases} \int_0^T V_L dt = 0 \\ \int_0^T I_C dt = 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

Par conséquent, les expressions de la tension d'inductance et du courant du condensateur dans les deux cas de commutation sont évaluées et considérées sur une période de commutation.

$$I_L = \frac{V_s}{R} \cdot \frac{1}{1 - \alpha} \quad (3.18)$$

$$V_s = V_e \cdot \frac{1}{1 - \alpha} \quad (3.19)$$

Cependant, il est important de dimensionner l'inductance et la capacité pour obtenir les performances données par la figure suivante afin de calculer la valeur de l'inductance.

3.3.2 Détermination des paramètres du hacheur Boost :

L'inductance de lissage L est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source I_{in} . Le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage en sortie du convertisseur.

- **Calcul de l'inductance L :**

L'ondulation de courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue, c'est-à-dire en négligeant l'ondulation de tension vis-à-vis de la valeur moyenne.

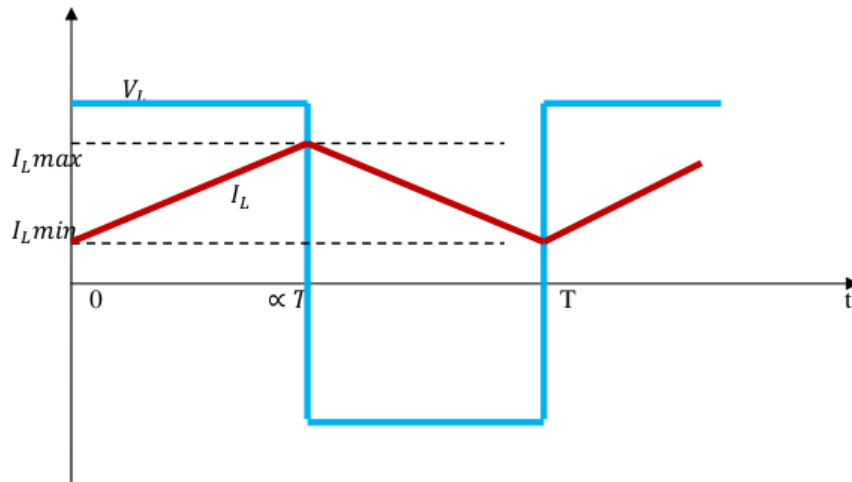


Figure 3.15: Ondulation du courant

Calculons l'ondulation du courant :

- Pour $0 \leq t \leq \alpha T$

$$V_L(t) = \frac{V_e}{L} + I_{Lmin} \quad (3.20)$$

- Pour $t = \alpha T$

$$I_L(\alpha T) = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_{Lmin} \quad (3.21)$$

D'où :

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_e}{Lf_p} \alpha \quad (3.22)$$

Or :

$$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha} \quad (3.23)$$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha(1 - \alpha)}{Lf_p} V_s \quad (3.24)$$

Où :

- V : tension aux bornes du générateur (V).
- V_s : Tension de sortie du convertisseur (V).
- T : période de découpage du signal de l'interrupteur $T = \frac{1}{f_p}$ en secondes (s).
- I_{Lmin} : Courant minimum dans l'inductance (A).
- I_{Lmax} : Courant maximum dans l'inductance (A).
- ΔI_L : Ondulation de courant dans l'inductance (A).
- L : Valeur de l'inductance de lissage (H).
- α : Rapport cyclique du signal de l'interrupteur $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$.

L'ondulation est calculée en fonction de l'ondulation maximale de courant souhaitée. L'ondulation maximale de courant est donc donnée par :

$$\Delta I_{Lmax} = \frac{V_s}{4Lf_p} \quad (3.25)$$

Ainsi l'inductance minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation :

$$L = \frac{V_s}{4f_p \Delta I_{Lmax}} \quad (3.26)$$

• Calcul du condensateur C :

Ce condensateur doit pouvoir tenir le courant à fournir lors des pics de puissance. L'ondulation de tension en sortie résulte du courant alternatif dans le condensateur.

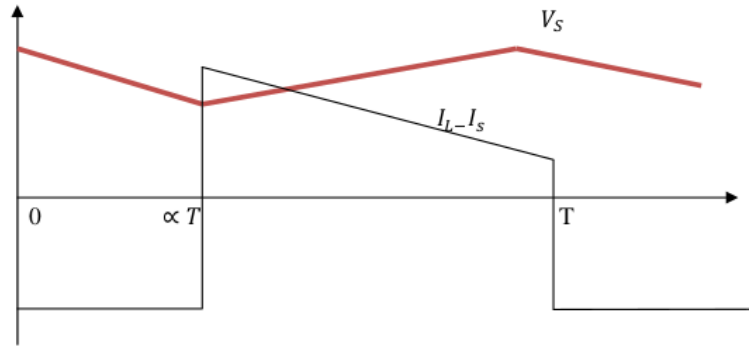


Figure 3.16: Ondulation de tension

Calculons l'ondulation de la tension :

- Pour $0 \leq t \leq \alpha T$

$$V_s(t) = V_{smax} - \frac{I_s}{C}t \quad (3.27)$$

- Pour $t = \alpha T$

$$V_s(\alpha T) = V_{smax} - \frac{I_s}{C}\alpha T = V_{smin} \quad (3.28)$$

D'où :

$$\Delta V_s = V_{smax} - V_{smin} = \frac{I_e}{C f_p} \alpha \quad (3.29)$$

Or :

$$I_s = I_e \times (1 - \alpha) \quad (3.30)$$

Nous pouvons donc écrire:

$$\Delta V_s = \frac{\alpha(1 - \alpha)}{C f_p} \quad (3.31)$$

Où :

- C : valeur du condensateur de filtrage (F).
- V_{smin} : Tension minimum aux bornes de condensateur (V).
- V_{smax} : Tension maximum aux bornes de condensateur (V).
- ΔV_s : Ondulation de tension aux bornes de condensateur (V).

La capacité du condensateur est calculée en fonction de l'ondulation maximale de la tension souhaitée.

L'ondulation maximale de tension est obtenue pour un rapport cyclique de $\frac{1}{2}$ (car $\frac{d\Delta V_s}{d\alpha} = 0$ pour $\alpha = \frac{1}{2}$).

L'ondulation maximale de la tension est donnée par:

$$\Delta V_s = \frac{I_L}{4Cf_p} \quad (3.32)$$

Ainsi la capacité minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation :

$$C = \frac{I_L}{4\Delta V_s f_p} \quad (3.33)$$

- **Simulation sous matlab du convertisseur boost**

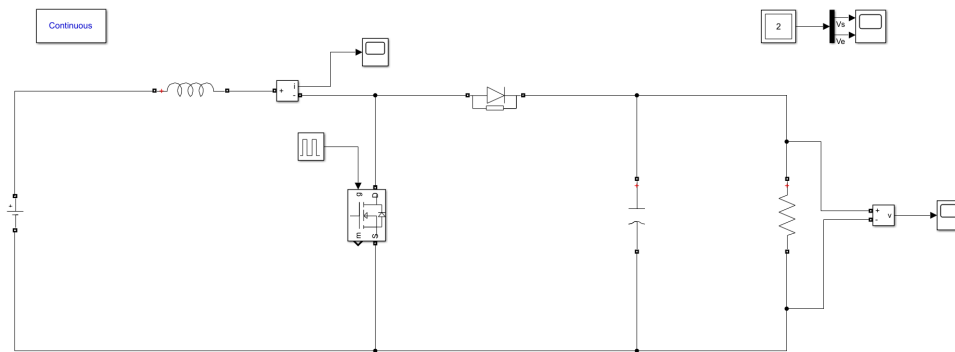


Figure 3.17: Modèle simulink du convertisseur boost.

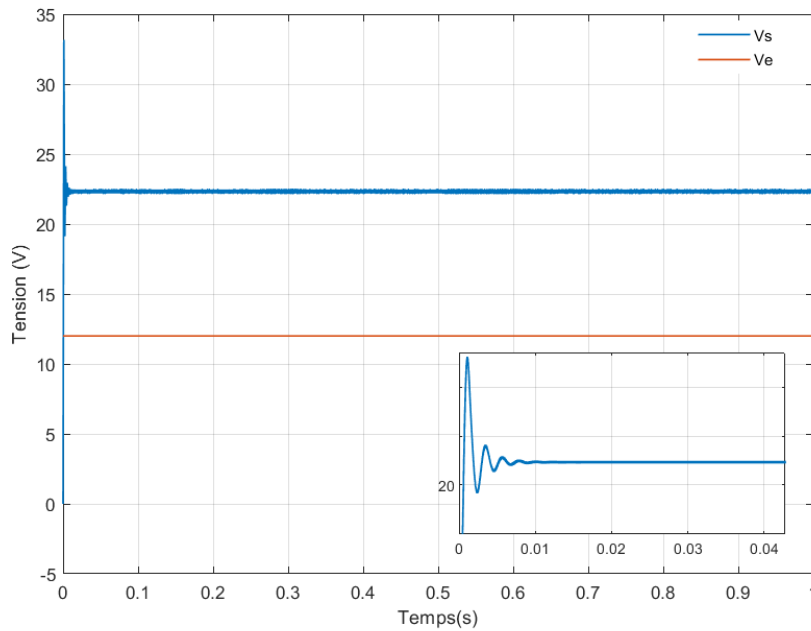


Figure 3.18: Les allures d'entrée et de sortie du convertisseur boost($\alpha = 0.5$).

3.3.3 Avantages du convertisseur Boost :

Malgré le rendement élevé du convertisseur BUCK dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur BOOST peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent, le rendement énergétique du convertisseur BOOST peut être plus grand que le convertisseur BUCK. Le convertisseur BOOST est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur BUCK est employé pour abaisser la tension de sortie [26].

3.4 Modélisation du convertisseur DC-AC

L'onduleur est un convertisseur triphasé capable de convertir une puissance continue en puissance alternative, permet d'imposer à la machine asynchrone des ondes de tensions à amplitudes et fréquences réglables à partir d'une source de tension continue.

Il est constitué des interrupteurs électroniques en pont commandés par la technique modulation de largeur d'impulsion(MLI).[6][7]

La figure 3.19 montre le schéma d'un onduleur triphasé alimentant la MAS.

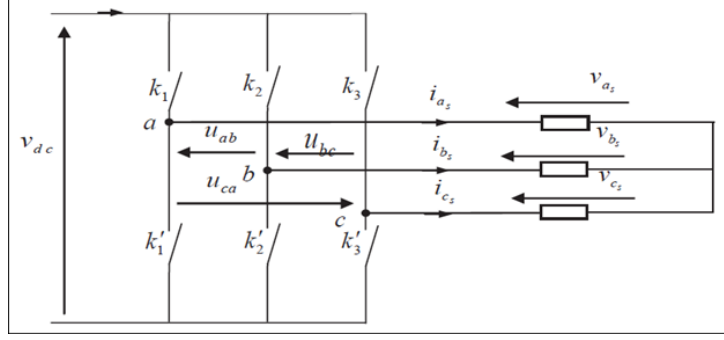


Figure 3.19: Schéma de l'onduleur triphasé.

3.4.1 Mise en équations

Les états des interrupteurs sont modélisés par la fonction logique suivante :

$$C_i = \begin{cases} 1 & \text{si } K_i \text{ conduit et } K'_i \text{ bloqué} \\ 0 & \text{si } K_i \text{ bloqué et } K'_i \text{ conduit} \end{cases} \quad \text{avec } i = a, b, c$$

On suppose que la commutation des interrupteurs K_i est instantanée et que la chute de tension est négligeable. Ainsi, pour les tensions de ligne, on a :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = V_{dc}(C_1 - C_2) \\ U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = V_{dc}(C_2 - C_3) \\ U_{ca} = V_{cs} - V_{as} = V_{dc}(C_3 - C_1) \end{cases} \quad (3.34)$$

Sachant que le système de charge est équilibré (la somme des tensions simples est nulle): $V_{as} + V_{bs} + V_{cs} = 0$ on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{as} = V_{dc} \left(\frac{2C_1 - C_2 - C_3}{3} \right) \\ V_{bs} = V_{dc} \left(\frac{2C_2 - C_1 - C_3}{3} \right) \\ V_{cs} = V_{dc} \left(\frac{2C_3 - C_1 - C_2}{3} \right) \end{cases} \quad (3.35)$$

Les tensions de phases peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

• Simulation sous matlab de l'onduleur

La commande des interrupteurs est choisie de type MLI sinus-triangle. Pour une tension V_{dc} de 100V, une référence de fréquence 50Hz, une porteuse de de fréquence 10^3 Hz, la simulation des tensions composées issues de l'onduleur sont représentées sur la figure 3.21.

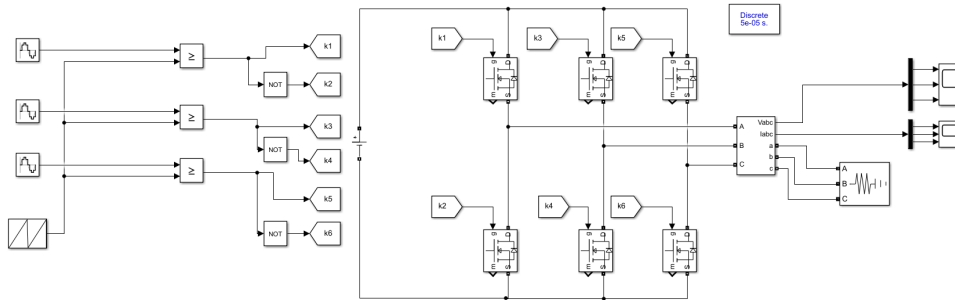


Figure 3.20: Simulation de l'onduleur.

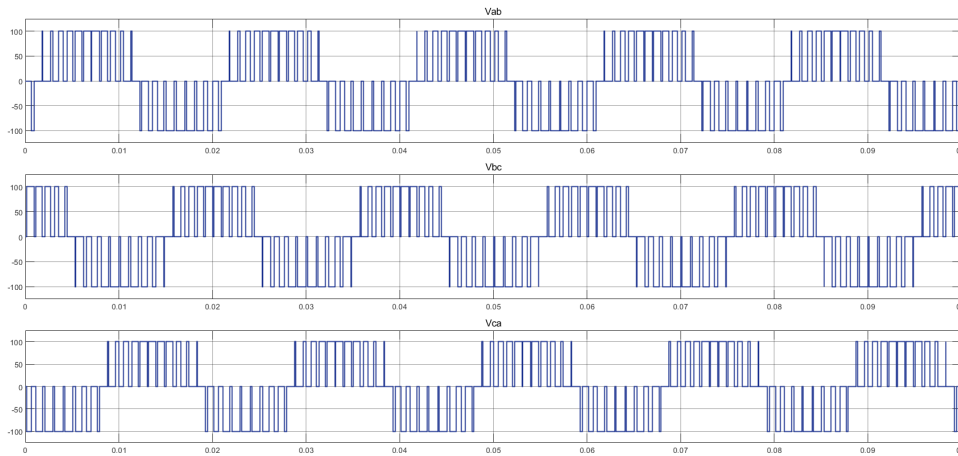


Figure 3.21: Les allures des tensions V_{ab} , V_{ca} et V_{bc} de l'onduleur.

Ainsi que les tensions simples qui seront appliquées à la charge sont représentées sur la figure suivante.

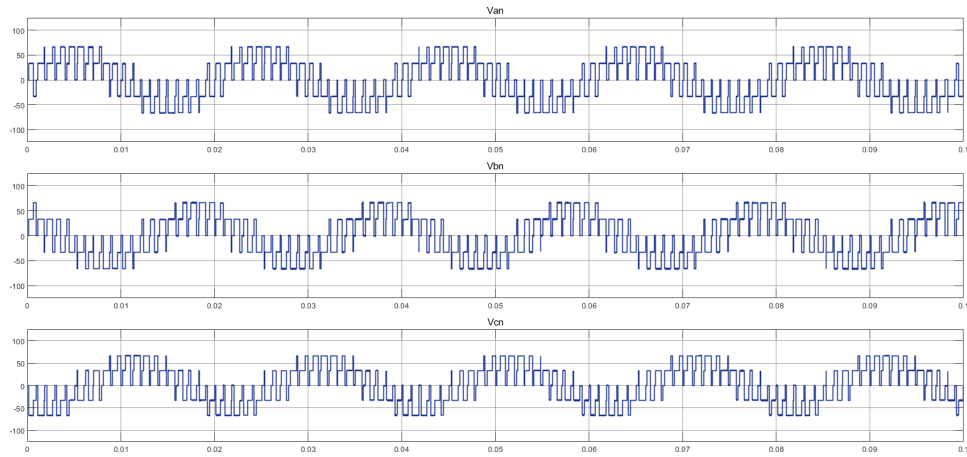


Figure 3.22: Les allures des tensions simples V_{an} , V_{bn} et V_{cn} de l'onduleur.

3.4.2 Choix des interrupteurs

L'interrupteur électronique (K) peut être un transistor de puissance MOSFET (Metal Oxide Semi conductor Field Effect Transistor) qui présente de très bonnes caractéristiques pour les applications à fréquence élevée et le mieux adapté aux basses tensions et il est limité par ses pertes en conduction, ou un thyristor (GTO, BJT) qui bien adaptés aux hautes tensions et fortes puissances, ou un transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) qui bien adaptés aux moyennes et hautes tensions et elle posséder des temps de commutation beaucoup plus courts par rapport aux GTO. [8][27]

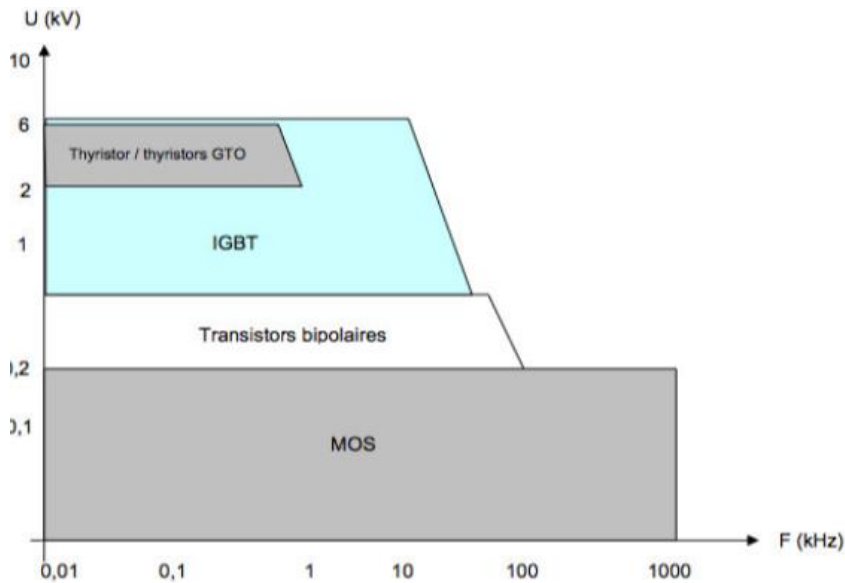


Figure 3.23: Représentation de l'utilisation des interrupteurs [27].

3.5 Modélisation du Moteur Asynchrone

Le moteur convertit l'énergie électrique en énergie mécanique pour fournir la puissance nécessaire au pompage. Les moteurs alternatifs asynchrones sont les plus employés pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts parce qu'ils présentent l'avantage d'être robustes, à faible coût, de construction simple et facilité d'entretien. Mais ils sont de mauvais rendement aux faibles débits.

3.5.1 Les hypothèses simplificatrices

Le comportement du moteur asynchrone est décrit par un système dynamique non linéaire. Pour établir un modèle mathématique en tenant compte des hypothèses simplificatrices suivantes :

- Répartition sinusoïdale du flux dans l'entrefer.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et a une perméabilité constante.
- On néglige les pertes fer par hystérésis et courants de Foucault, ainsi que l'effet de peau.

Dans le but de simplifier la modélisation de la machine asynchrone, l'étude théorique est menée sur une machine bipolaire. Les résultats sont transposables pour une machine multipolaire à condition de multiplier le couple et de diviser la vitesse par p .

3.5.2 Modèle mathématique triphasé

Les enroulements statoriques et rotoriques sont représentés sur la figure 3.24. Les phases rotoriques sont court-circuitées et décalées de l'angle électrique θ par rapport aux phases statoriques [28].

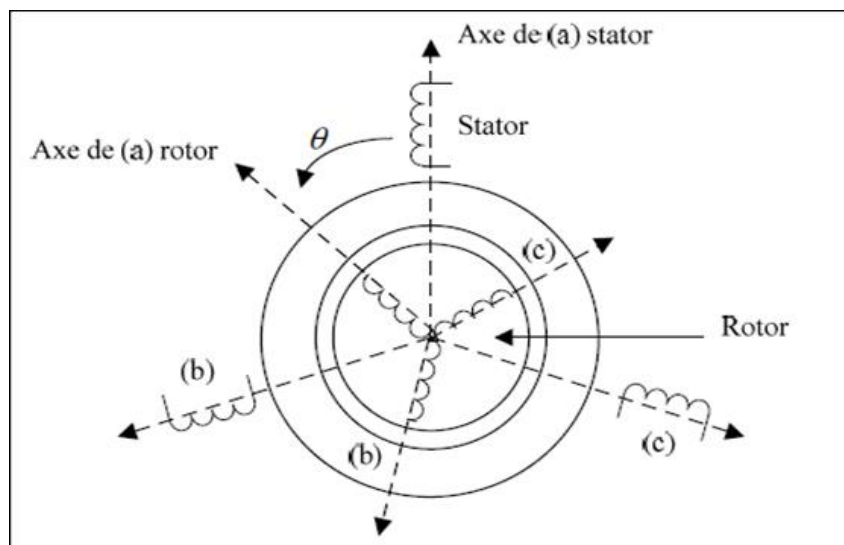


Figure 3.24: Représentation des enroulements statoriques et rotoriques [28].

• Équations électriques

Par l'application de la loi des mailles à chaque enroulement, les expressions électriques de la machine sont définies comme suit [29]:

Au stator :

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s \cdot i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ v_{sb} = R_s \cdot i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ v_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (3.37)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r \cdot i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} = 0 \\ v_{rb} = R_r \cdot i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} = 0 \\ v_{rc} = R_r \cdot i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (3.38)$$

Pour l'écriture matricielle, on a :

$$\begin{cases} [v_{sabc}] = R_s \cdot [i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{sabc}] \\ [v_{rabc}] = R_r \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{rabc}] \end{cases} \quad (3.39)$$

Avec : R_s et R_r les résistances du stator et du rotor respectivement. v_{sabc} et v_{rabc} les tensions simples d'alimentation du stator et du rotor respectivement. i_{sabc} et i_{rabc} les courants du stator et du rotor respectivement.

• Équations magnétiques

Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le repère a, b, c s'expriment comme suit [35]:

Au stator :

$$\begin{cases} \phi_{sa} = l_s \cdot i_{sa} + M_s \cdot i_{sb} + M_s \cdot i_{sc} + M_{rasa} \cdot i_{ra} + M_{rbsa} \cdot i_{rb} + M_{rcsa} \cdot i_{rc} \\ \phi_{sb} = l_s \cdot i_{sb} + M_s \cdot i_{sa} + M_s \cdot i_{sc} + M_{rasb} \cdot i_{ra} + M_{rbsb} \cdot i_{rb} + M_{rcsb} \cdot i_{rc} \\ \phi_{sc} = l_s \cdot i_{sc} + M_s \cdot i_{sa} + M_s \cdot i_{sb} + M_{rasc} \cdot i_{ra} + M_{rbsc} \cdot i_{rb} + M_{rcsc} \cdot i_{rc} \end{cases} \quad (3.40)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} \phi_{ra} = l_r \cdot i_{ra} + M_r \cdot i_{rb} + M_r \cdot i_{rc} + M_{rasa} \cdot i_{sa} + M_{rasb} \cdot i_{sb} + M_{rasc} \cdot i_{sc} \\ \phi_{rb} = l_r \cdot i_{rb} + M_r \cdot i_{ra} + M_r \cdot i_{rc} + M_{rbsa} \cdot i_{sa} + M_{rbsb} \cdot i_{sb} + M_{rbsc} \cdot i_{sc} \\ \phi_{rc} = l_r \cdot i_{rc} + M_r \cdot i_{ra} + M_r \cdot i_{rb} + M_{rcsa} \cdot i_{sa} + M_{rcsb} \cdot i_{sb} + M_{rcsc} \cdot i_{sc} \end{cases} \quad (3.41)$$

La matrice des flux réels s'écrit :

$$\begin{cases} [\phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \\ [\phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}] \end{cases} \quad (3.42)$$

Avec :

$$\begin{cases} [L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \\ [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3.43)$$

Avec l_s , l_r les inductances propres du stator et du rotor respectivement, et M_s , M_r les inductances mutuelles entre deux phases du stator et du rotor respectivement.

La matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor s'écrit :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Le système est équilibré donc la somme des courants statoriques et rotoriques est nulle:

$$\begin{cases} isa + isb + isc = 0 \\ ira + irb + irc = 0 \end{cases} \quad (3.45)$$

Les équations du flux s'expriment alors comme suit :

Au stator :

$$\begin{cases} \phi_{sa} = L_s i_{sa} + M_{rasa} i_{ra} + M_{rbsa} i_{rb} + M_{rcsa} i_{rc} \\ \phi_{sb} = L_s i_{sb} + M_{rasb} i_{ra} + M_{rbsb} i_{rb} + M_{rcsb} i_{rc} \\ \phi_{sc} = L_s i_{sc} + M_{rasc} i_{ra} + M_{rbsc} i_{rb} + M_{rcsc} i_{rc} \end{cases} \quad (3.46)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} \phi_{ra} = L_r i_{ra} + M_{rasa} i_{sa} + M_{rasb} i_{sb} + M_{rasc} i_{sc} \\ \phi_{rb} = L_r i_{rb} + M_{rbsa} i_{sa} + M_{rbsb} i_{sb} + M_{rbsc} i_{sc} \\ \phi_{rc} = L_r i_{rc} + M_{rcsa} i_{sa} + M_{rcsb} i_{sb} + M_{rcsc} i_{sc} \end{cases} \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} \text{Avec : } L_s &= l_s - M_s && \text{Inductance cyclique statorique.} \\ L_r &= l_r - M_r && \text{Inductance cyclique rotorique.} \end{aligned}$$

Pour l'écriture matricielle, on a :

$$[\phi_{sabc}] = L_s [i_{sabc}] + [M_{sr}] [i_{rabc}] \quad (3.48)$$

$$[\phi_{rabc}] = L_r [i_{rabc}] + [M_{rs}] [i_{sabc}] \quad (3.49)$$

3.5.3 Transformation triphasé/diphase

Le changement de repères triphasé/biphase est réalisé par la transformation de Park. Elle consiste à transformer le repère triphasé fixe (a, b, c) au stator et au rotor dans un repère biphase (d, q) pour réduire considérablement la complexité du modèle en vue de commande [29, 34].

La transformation inverse est donnée par :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(\mu) \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\mu) & \cos(\mu - 2\pi/3) \\ -\sin(\mu) & -\sin(\mu - 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Avec l'angle de transformation du repère statorique $\mu = \theta_s$ ou rotorique $\mu = \theta_r$.

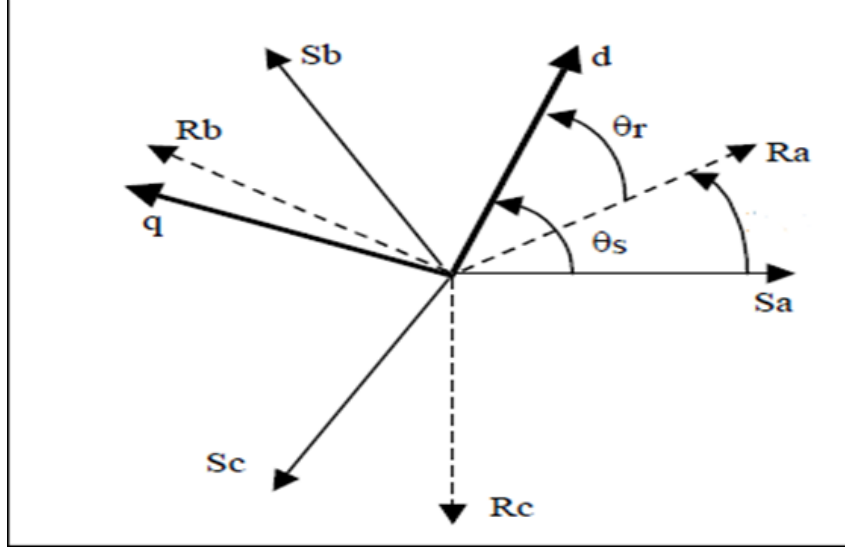


Figure 3.25: Les différents systèmes d'axes utilisés.

La transformation inverse est donnée par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = P(\mu)^T \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\mu) & -\sin(\mu) \\ \cos(\mu - 2\pi/3) & -\sin(\mu - 2\pi/3) \\ \cos(\mu - 4\pi/3) & -\sin(\mu - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

En appliquant la transformation de Park aux équations statoriques et rotoriques de la machine asynchrone, nous obtenons :

$$[v_{sabc}] = P(\theta_s)^T [v_{sdq}] = R_s P(\theta_s)^T [i_{sdq}] + \frac{d}{dt} [P(\theta_s)^T [\phi_{sdq}]] \quad (3.52)$$

$$[v_{rabc}] = P(\theta_r)^T [v_{rdq}] = R_r P(\theta_r)^T [i_{rdq}] + \frac{d}{dt} [P(\theta_r)^T [\phi_{rdq}]] \quad (3.53)$$

En multipliant par $P(\theta_s)$, on obtient :

$$\begin{aligned} [v_{sdq}] &= R_s [i_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sdq}] + P(\theta_s) [P(\theta_s)^T] \frac{d}{dt} [\phi_{sdq}] \\ [v_{rdq}] &= R_r [i_{rdq}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rdq}] + P(\theta_r) [P(\theta_r)^T] \frac{d}{dt} [\phi_{rdq}] \end{aligned}$$

Où :

$$P(\theta_s) \frac{dP(\theta_s)^T}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

On aboutit aux expressions suivantes dans le repère (d, q) :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad (3.55)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{cases} \quad (3.56)$$

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de Park par la relation suivante :

$$\begin{cases} [\phi_{sdq}] = P(\theta_s)[\phi_{sabc}] = P(\theta_s)[L_s[i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]] \\ [\phi_{rdq}] = P(\theta_r)[\phi_{rabc}] = P(\theta_r)[L_r[i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}]] \end{cases} \quad (3.57)$$

$$\begin{cases} [\phi_{sdq}] = P(\theta_s)L_sP(\theta_s)^T[i_{sdq}] + P(\theta_s)[M_{sr}]P(\theta_s)^T[i_{rdq}] \\ [\phi_{rdq}] = P(\theta_r)L_rP(\theta_r)^T[i_{rdq}] + P(\theta_r)[M_{rs}]P(\theta_r)^T[i_{sdq}] \end{cases} \quad (3.58)$$

Donc les équations du flux s'écrivent :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (3.59)$$

Avec M l'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

3.5.4 Équations mécaniques

La puissance électrique instantanée fournie par le moteur asynchrone s'exprime dans le repère (d, q) par [35]:

$$P_e = v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq} \quad (3.60)$$

Le terme $\omega_s(\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd})$ correspond à la puissance mécanique :

$$P_m = \omega_s(\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd}) = C_e \cdot \frac{\omega_s}{p} \quad (3.61)$$

Avec p désignant le nombre de paires de pôles de la machine.

Donc le couple mécanique s'exprime par :

$$C_e = p(\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (3.62)$$

3.6 Modélisation de la pompe centrifuge

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur. Le modèle de la pompe centrifuge est décrit par l'équation suivante :

$$C_r = K_{ch}\Omega^2 \quad (3.63)$$

Où K_{ch} représente la constante de proportionnalité.

Connaissant les performances d'une pompe centrifuge (Q , H et P) pour la vitesse N , les lois de similitude permettent de déterminer les performances (Q' , H' et P') pour une vitesse N' en utilisant les relations suivantes :

$$\frac{N'}{N} = \frac{Q'}{Q} \quad (3.64)$$

$$\left(\frac{N'}{N}\right)^2 = \frac{H'}{H} \quad (3.65)$$

$$\left(\frac{N'}{N}\right)^3 = \frac{P'}{P} \quad (3.66)$$

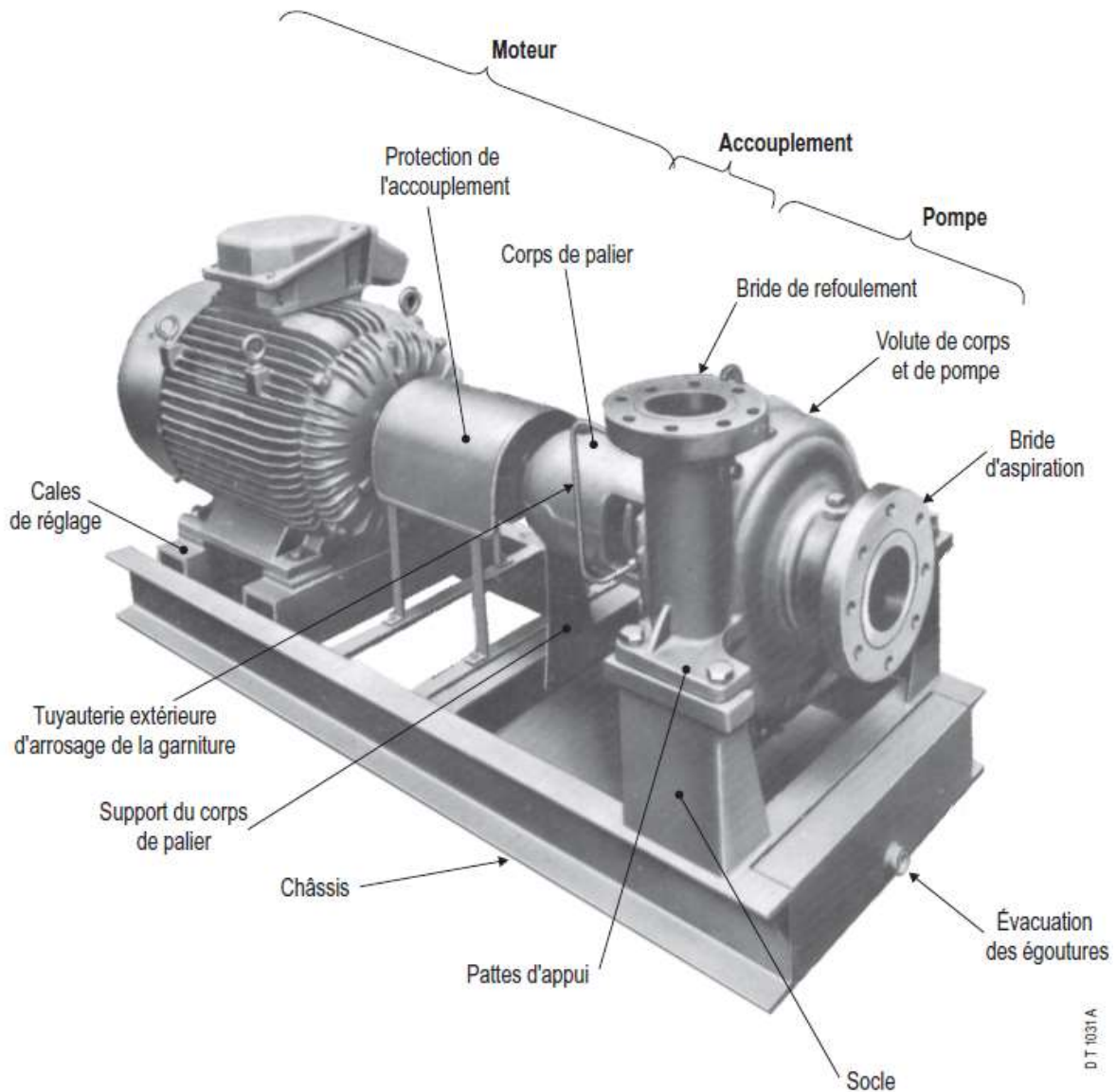
Où Q et Q' représentent les débits correspondants respectivement aux vitesses N et N' , H et H' représentent les hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement aux vitesses N et N' , et P et P' sont les puissances du moteur correspondant respectivement aux vitesses N et N' [37].

3.6.1 Principe de fonctionnement et constitution

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau arrivant est dirigée vers la roue en rotation qui, sous l'effet de la force centrifuge, lui communique de l'énergie cinétique. Cette énergie cinétique est transformée en énergie de pression dans la volute.

On définit la hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe comme étant le travail mécanique utile fourni au fluide refoulé par unité de poids. Les pompes centrifuges sont conçues pour une HMT relativement fixe [38]. Elles sont essentiellement constituées de :

- Une roue à aubes tournant autour de son axe
- Un distributeur dans l'axe de la roue
- Un corps de pompe
- Tubulure d'aspiration
- Tubulure de refoulement
- Arbre et chemises
- Collecteur à volute
- Anneaux d'usure



Présentation extérieure d'une pompe centrifuge monoétagée

Figure 3.26: Présentation extérieure d'une pompe centrifuge .

3.6.2 La caractéristique « Couple-Vitesse » de la pompe

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur [39].

$$T_r = K_r \Omega^2 \quad (3.67)$$

Où K_r est le coefficient de proportionnalité [$\text{Nm}/(\text{rad.s}^{-1})^2$], Ω est la vitesse angulaire de la machine [rad.s^{-1}].

Avec :

$$K_r = \frac{P_{mec}}{\Omega^3} \quad (3.68)$$

3.6.3 Bilan de puissance

- **Puissance Hydraulique:**

La pompe fournit une puissance utile hydraulique exprimée par :

$$P_H = K_r \Omega^3 \quad (3.69)$$

Avec ρ la masse volumique [kg/m^3], Q le débit refoulé [m^3/s], g l'accélération de la pesanteur = $9,81 \text{ m/s}^2$, HMT la hauteur manométrique totale [m].

La puissance absorbée sur l'arbre de la pompe est donnée par la formule :

$$P_{mec} = \frac{P_H}{\eta_p} \quad (3.70)$$

Avec η_p le rendement de la pompe.

La puissance nécessaire mécanique délivrée par le moteur est supérieure à la puissance absorbée par la pompe, compte tenu des pertes d'accouplement entre le moteur et la pompe centrifuge.

- **Puissance active du MAS:**

Le rendement de la machine asynchrone est généralement au voisinage de 80%, ainsi la puissance active du moteur asynchrone est donnée comme par l'équation suivante:

$$P_{elec} = \frac{P_{mec}}{\eta_{moteur}} \quad (3.71)$$

- **Puissance électrique demandée:**

L'onduleur possède un rendement généralement autour de 95% à cause des pertes de commutation. Ainsi, la puissance issue de l'onduleur doit dépasser un minimum de:

$$P_{delivre} = \frac{P_{elec}}{\eta_{ond}} \quad (3.72)$$

- **La puissance du générateur photovoltaïque:**

Les pertes de puissance du GPV+Régulateur attribuables à la température et à la poussière de l'endroit de réalisation présentent un rendement de η_{reg} (environ 95%). La puissance électrique fournie par le champ photovoltaïque est donnée par l'expression suivante:

$$P_{PV} = \frac{P_{delivre}}{\eta_{reg}} \quad (3.73)$$

- **Nombre de panneaux:**

Le nombre des panneaux solaires à utiliser est choisi en arrondissant le rapport de la puissance totale du champ PV sur la puissance nominale d'un panneau solaire. Ce dernier est sélectionné depuis la bibliothèque de MATLAB/SIMSCAPE.

$$N = \frac{P_{PV}}{P_{panneau}} \quad (3.74)$$

- **Référence de la vitesse de rotation:**

Une fois le nombre de panneaux solaires est fixé, nous pouvons déduire la relation donnant la valeur de la référence que doit suivre la vitesse de rotation du groupe moto-pompe. La puissance hydraulique égale donc la puissance du champ PV diminuée des différents rendement des composants de la chaîne de pompage.

$$NP_{panneau} = \frac{K_r \Omega^3}{\eta_{moteur} \eta_{ond} \eta_{reg} \eta_p} \quad (3.75)$$

La relation de la vitesse optimale qui correspond à la puissance maximale pouvant être extraite des panneaux PV est déduite comme suit :

$$\Omega_{opt} = \sqrt[3]{\frac{1}{K_r} \eta_{moteur} \eta_{ond} \eta_{reg} \eta_p NP_{MPPT}} \quad (3.76)$$

La fréquence de rotation du moteur (en) doit correspondes à la vitesse nominale du MAS lorsque le champ PV fonctionne sous les conditions météorologique standards de la région.

$$N_{opt} = \frac{60}{2\pi} \times \sqrt[3]{\frac{1}{K_r} \eta_{moteur} \eta_{ond} \eta_{reg} \eta_p NP_{MPPT}} \quad (3.77)$$

3.7 Conclusion

En conclusion, la modélisation d'un système de pompage solaire photovoltaïque revêt une importance dans sa conception et son perfectionnement. Cette étude exhaustive nous a permis de disséquer chaque élément du système, depuis le générateur photovoltaïque jusqu'au moteur de la pompe, en fournissant des modèles mathématiques précis et des simulations avancées.

Cette approche analytique nous offre une compréhension approfondie du fonctionnement global du système, nous permettant d'identifier les paramètres clés qui influent sur ses performances et d'explorer diverses stratégies pour en améliorer l'efficacité énergétique et la fiabilité. En combinant rigueur théorique et méthodologie de simulation, nous pouvons développer des systèmes de pompage solaire photovoltaïque plus robustes, plus performants et mieux adaptés aux exigences spécifiques de chaque contexte d'application.

Ainsi, la modélisation joue un rôle essentiel dans l'évolution et le déploiement efficace de cette technologie, ouvrant la voie à des solutions innovantes et durables pour l'approvisionnement en eau.

Chapitre 4

Développement et évaluation de stratégie de commande

4.1 Introduction

Dans le contexte actuel de transition énergétique, l'optimisation des systèmes de pompage alimentés par des sources d'énergie renouvelables, telles que les systèmes photovoltaïques, est d'une importance cruciale. La commande par variateur de fréquence (VFD) est une technologie clé pour améliorer l'efficacité et la performance de ces systèmes. Le VFD permet de contrôler la vitesse du moteur de la pompe en ajustant la fréquence et la tension de l'alimentation électrique, offrant ainsi une flexibilité et une adaptabilité supérieures aux conditions de fonctionnement variables.

Cette partie explore en détail l'application de la commande VFD pour les systèmes de pompage photovoltaïques au fil du soleil. Nous commencerons par discuter du principe de fonctionnement des VFD et des différents types de commandes VFD disponibles. Ensuite, nous aborderons les avantages spécifiques de l'utilisation des VFD dans les systèmes de pompage photovoltaïques, notamment en termes d'efficacité énergétique, de protection du système et de flexibilité opérationnelle.

Nous examinerons également les modèles spécifiques du VFD et du contrôleur PI utilisés dans ces systèmes, ainsi que la configuration de la boucle de contrôle complète. La commande scalaire en tension sera présentée en détail, y compris la loi de commande scalaire V/f constante, la pulsation rotorique de glissement ω_r , la régulation de la vitesse, et la génération des signaux de contrôle par modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale.

Enfin, nous discuterons de l'adaptation de la commande VFD aux conditions variables d'irradiation et de température, ainsi que des tests de robustesse pour garantir un fonctionnement fiable et efficace dans diverses conditions environnementales. Cette analyse exhaustive vise à fournir une compréhension approfondie et technique de la commande VFD appliquée aux systèmes de pompage photovoltaïques, en soulignant les bénéfices et les défis associés à cette approche innovante.

4.2 Commande VFD pour un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil

La commande VFD (Variable Frequency Drive), également connue sous le nom de variateur de fréquence, joue un rôle crucial dans l'optimisation des performances d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil. En permettant d'ajuster la vitesse de rotation du moteur de la pompe en temps réel, la commande VFD offre plusieurs avantages importants:

- Adaptation à la ressource solaire variable : La vitesse de la pompe peut être ajustée en fonction de la disponibilité de l'énergie solaire, ce qui permet de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire disponible et de stocker la quantité maximale de l'eau.
- Protection du système : La commande VFD peut protéger le système contre les surcharges, ce qui prolonge la durée de vie des composants et garantit un fonctionnement fiable.
- Fonctionnement souple : La commande VFD offre une grande flexibilité de fonctionnement, permettant de programmer différents modes de fonctionnement et de répondre à des besoins spécifiques en eau.

4.2.1 Principe de fonctionnement

La commande VFD utilise des techniques de conversion électronique pour ajuster la fréquence et la tension du courant fourni au moteur de la pompe. En modifiant l'amplitude et la fréquence du courant, la vitesse de rotation du moteur est contrôlée, ce qui permet de réguler le débit d'eau pompée.

4.2.2 Types de commande VFD

Il existe différents types de commandes VFD, chacune avec ses propres caractéristiques et avantages :

- Commande VFD scalaire : La commande scalaire, également connue sous le nom de commande V/f constant, est une méthode de commande simple et intuitive des moteurs asynchrones (MAS) dans les systèmes de pompage photovoltaïque. Cette technique se base sur la variation simultanée de la tension et de la fréquence d'alimentation du moteur pour contrôler sa vitesse et son couple. En gardant le rapport tension/fréquence constant, le couple sera proportionnel à la vitesse de glissement. Ce qui permet un contrôle de la vitesse de rotation du MAS peu coûteux et facilement réalisable. Cette méthode de commande présente l'inconvénient d'être instable à basse vitesse et très sensible aux variations de la résistance statorique du moteur [30].
- Commande VFD vectorielle : La commande VFD vectorielle, également connue sous le nom de commande à orientation de flux, se présente comme une méthode de commande sophistiquée et performante des moteurs asynchrones dans les systèmes de pompage photovoltaïque. Cette technique repose sur la décomposition du flux

rotorique du moteur en ses composantes directe et inverse, permettant un contrôle découplé du flux et du couple du moteur. Cette technique permet de maximiser l'efficacité énergétique du MAS en optimisant le couple. Cependant, sa mise en œuvre est plus complexe et plus coûteuse que la commande scalaire [31].

- **Commande VFD moderne** : Dans le domaine des systèmes à base du MAS, l'émergence de techniques de commande VFD modernes et intelligentes ouvre de nouvelles perspectives en matière de performance, d'efficacité et d'optimisation. Ces approches, qui s'appuient sur des algorithmes avancés et des techniques d'intelligence artificielle, permettent de repousser les limites des commandes classiques et d'offrir des solutions innovantes pour les applications à base du MAS. Parmi les exemples de commandes VFD modernes et intelligentes, on peut citer ; la commande floue, la commande par réseaux de neurones artificiels et les commandes adaptatives. Ces commandes permettent d'atteindre des performances plus élevées en termes de précision, de vitesse de réponse et d'efficacité énergétique. Malgré leurs nombreux avantages, les commandes VFD modernes et intelligentes présentent certains inconvénients qu'il est important de prendre en compte comme la mise en œuvre qui est plus difficile et le coût qui est très élevé [32].

Le compromis entre les avantages potentiels et les inconvénients de chaque type de commande doit être soigneusement analysé pour déterminer si ces commandes constituent la meilleure solution pour un projet de pompage photovoltaïque donné.

4.2.3 Avantages de la commande VFD

L'utilisation d'une commande VFD pour un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil présente de nombreux avantages :

- **Amélioration de l'efficacité énergétique** : La commande VFD permet de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer l'efficacité globale du système.
- **Augmentation de la durée de vie des composants** : La commande VFD protège le système contre les surcharges et les autres perturbations, ce qui prolonge la durée de vie des composants.
- **Fonctionnement souple** : La commande VFD offre une grande flexibilité de fonctionnement et permet de répondre à des besoins spécifiques en eau.
- **Réduction des coûts d'exploitation** : L'amélioration de l'efficacité énergétique et la prolongation de la durée de vie des composants peuvent contribuer à réduire les coûts d'exploitation du système [33].

4.2.4 Modèle du Contrôleur PI

Le contrôleur PI ajuste la commande de tension pour minimiser l'erreur entre la vitesse de référence $\Omega_{ref}(s)$ et la vitesse réelle $\Omega_m(s)$. La fonction de transfert du contrôleur PI est :

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (4.1)$$

où :

- k_p est le gain proportionnel.
- k_i est le gain intégral.

4.3 Commande scalaire en tension

La commande scalaire de la machine asynchrone repose principalement sur le principe de maintenir le rapport tension-fréquence constant pour conserver un flux magnétique constant dans la machine.

Pour contrôler le couple électromagnétique de la machine asynchrone alimentée en tension par un onduleur MLI de tension contrôlé en tension par MLI triangulo-sinusoïdale, il faut maintenir le flux statorique constant par le contrôle de la pulsation rotorique ω_r .

Le schéma bloc de la figure 4.1 présente la commande scalaire d'une machine asynchrone alimentée en tension par un onduleur MLI de tension contrôlé en tension par MLI triangulo-sinusoïdale.

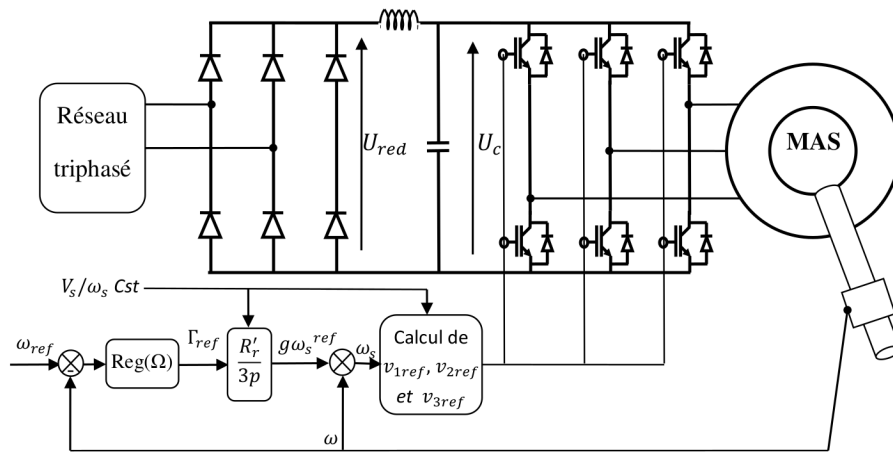


Figure 4.1: Schéma de principe de la commande scalaire en tension de la MAS.

Le circuit de commande de ce schéma comporte trois parties essentielles: la régulation de la vitesse nécessaire pour avoir la pulsation rotorique de référence, la loi de commande scalaire pour construire les tensions de références statoriques, et enfin la technique MLI triangulo-sinusoïdale pour la génération des signaux de commandes des interrupteurs de l'onduleur.

Les tensions de références de la commande MLI triangulo-sinusoïdale sont construites à partir de cette loi de commande et de la relation d'autopilotage $\omega_s = \omega_r + \omega$ comme suit:

$$\begin{cases} v_{s1}^* = \frac{V_s}{2} \sin(\omega_s t) \\ v_{s2}^* = \frac{V_s}{2} \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{s3}^* = \frac{V_s}{2} \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (4.2)$$

Avec : $V_s = \phi_{sn}\omega_s$

Où $\phi_{sn} = \frac{V_{sn}}{\omega_{sn}}$ est le flux nominal en fonctionnement normal.

4.3.1 Régulation de la vitesse

- Simulation du système global en boucle ouverte

La figure présentée illustre le modèle SIMULINK du système de pompage solaire fonctionnant en mode boucle ouverte, ce qui signifie qu'il n'y a pas de régulation de la vitesse du moteur-pompe. Ce modèle permet de simuler le comportement du système sous différentes conditions d'ensoleillement et de charge, fournissant ainsi des informations précieuses sur ses performances dynamiques.

Simulation du système global : La figure (4.2) présente le modèle simulink du système global sans régulation. Ce diagramme met en évidence l'interconnexion des principaux composants du système de pompage photovoltaïque, comprenant les panneaux solaires, l'onduleur, le moteur et la pompe. L'absence de commande permet d'observer les comportements dynamiques naturels du système en réponse aux variations des conditions d'entrée.

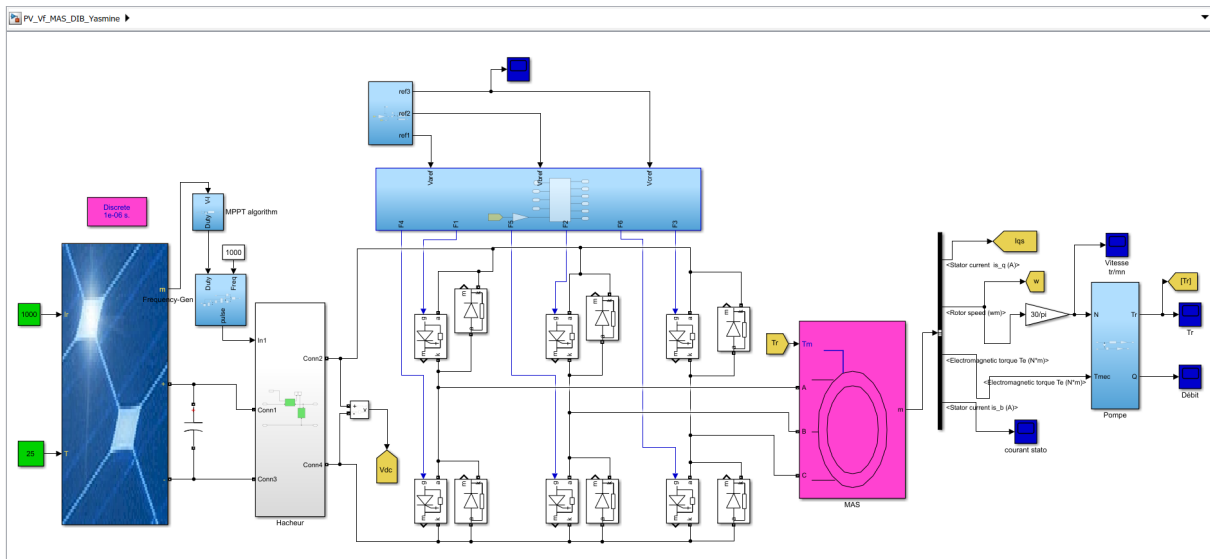


Figure 4.2: Modèle simulink du système global.

Profil de vitesse : La figure (4.3) affiche le profil de vitesse du moteur de la pompe en fonction du temps. Ce graphique détaille les fluctuations de la vitesse de rotation du moteur, reflétant sa réponse aux variations de l'énergie solaire disponible.

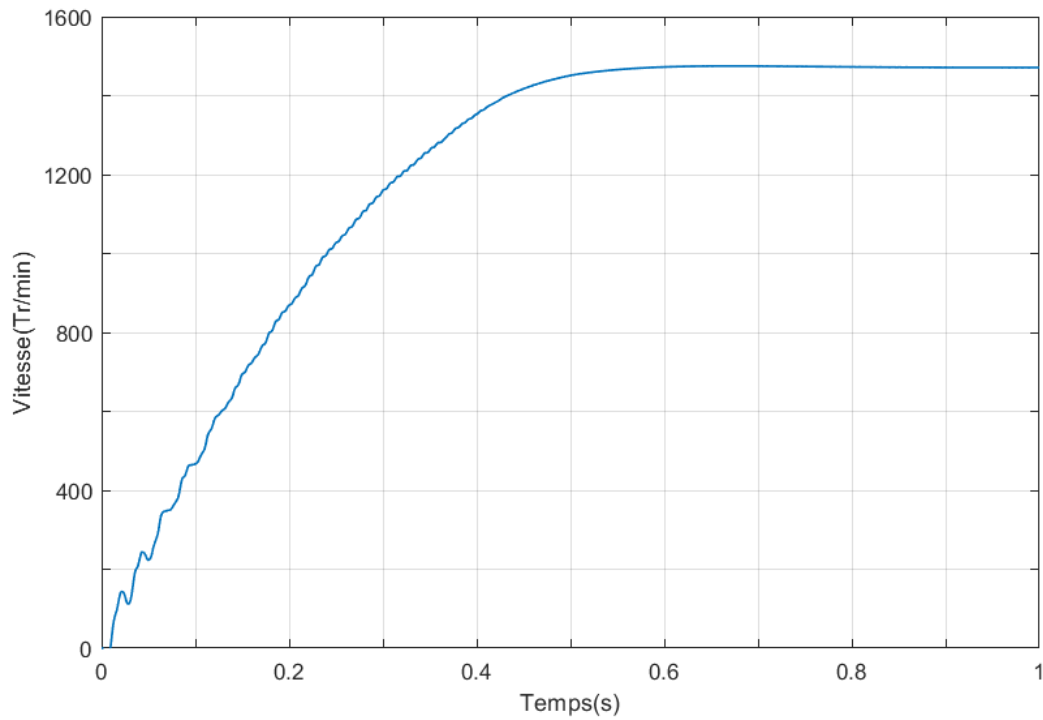


Figure 4.3: Profil de vitesse.

Courbe de débit : La figure (4.4) représente la courbe de débit du système de pompage. Cette courbe fournit une mesure du volume d'eau pompé en fonction du temps, permettant une évaluation de la performance hydraulique de la pompe.

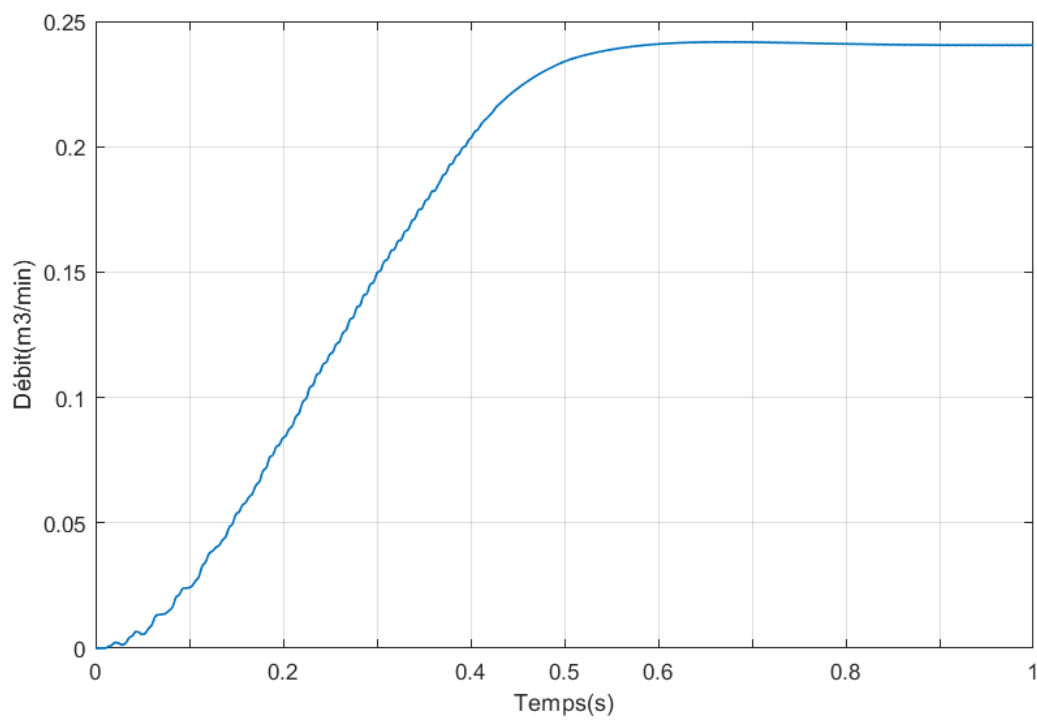


Figure 4.4: Courbe de débit.

La courbe présentée dans la figure (4.5) montre l'évolution de la vitesse et du débit en fonction de l'irradiation. À mesure que l'irradiation varie, la vitesse de la machine et le débit réagissent de manière correspondante. Les fluctuations de l'irradiation se traduisent par des variations de la performance du système, avec des baisses de vitesse et de débit en réponse aux changements d'irradiation. La courbe met en évidence la relation directe entre l'irradiation et la performance opérationnelle du système, soulignant l'importance d'intégrer une régulation pour maximiser la vitesse et le débit afin de répondre aux besoins en eau.

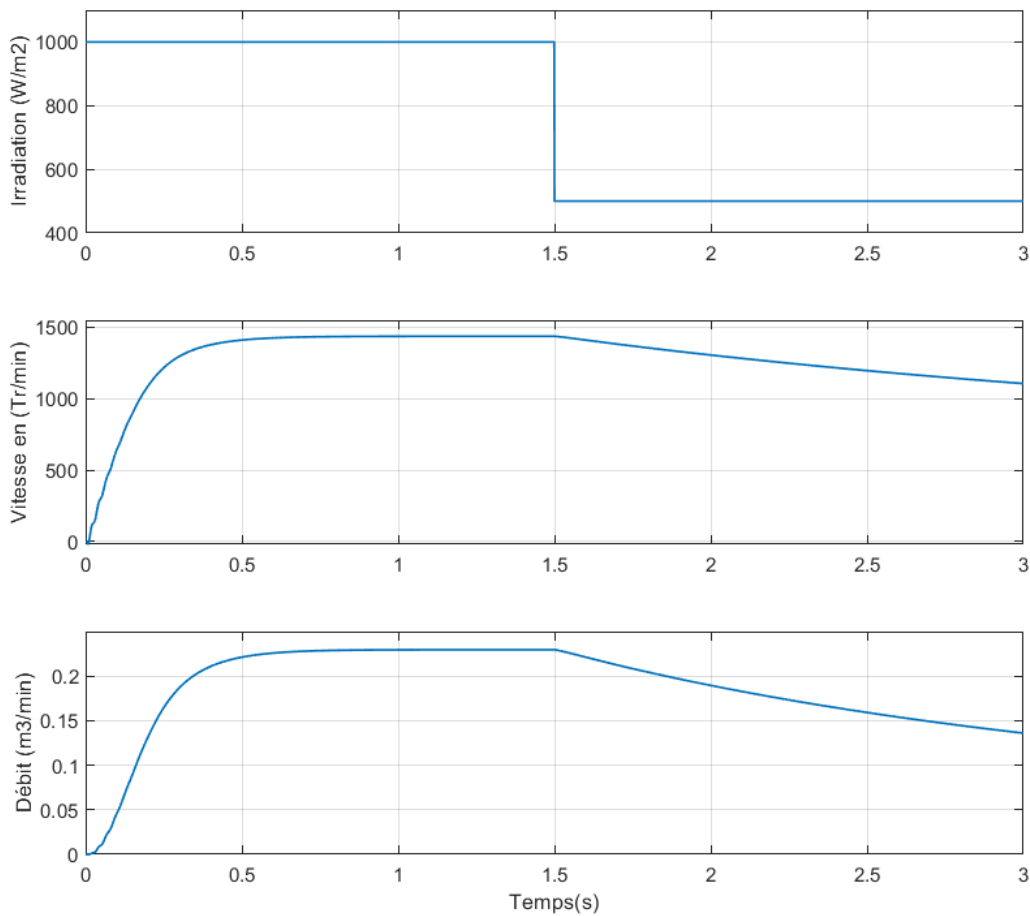


Figure 4.5: Évolution de la vitesse et du débit en fonction de l'irradiation.

- **Simulation du système global en boucle fermée**

La régulation de la vitesse du moteur asynchrone sert à déterminer la pulsation rotorique de référence ω_r^* . Cette dernière est l'image du couple de la machine. Si la machine est chargée, la vitesse décroît, le régulateur va fournir plus de couple (donc plus de glissement) afin d'assurer cet équilibre. La pulsation statorique est donc modifiée en conséquence et la tension est calculée de manière à garantir le mode de contrôle en $\frac{V_s}{f}$ constant.

Les régulateurs à action proportionnelle-intégrale (PI) sont très répandus dans le domaine de la commande des machines électriques. L'action proportionnelle assure la rapidité de la réponse dynamique, et l'action intégrale élimine l'erreur statique en régime permanent. Le schéma d'un régulateur PI est représenté sur la figure (4.6).

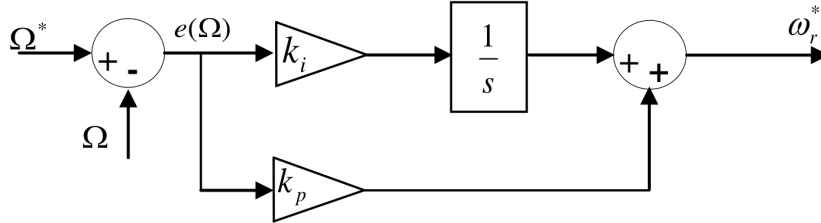


Figure 4.6: Schéma d'un régulateur PI

En se basant sur le schéma électrique d'une phase de la MAS (figure 4.7) en régime permanent et en négligeant les pertes dans le fer. On ramène l'inductance de fuite du stator en aval de la branche magnétisante. Le schéma électrique équivalent avec fuites magnétiques totalisées sera donné comme suit.

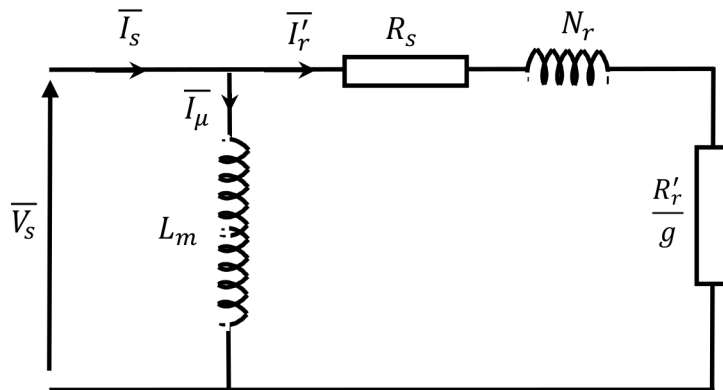


Figure 4.7: Schéma électrique d'une phase de la MAS.

Alors, en partant du schéma par phase de cette figure, on peut écrire l'équation régissant le couple électromagnétique du MAS en régime permanent ainsi :

$$T_e = \frac{3pR_r'}{g\omega_s} \left(\frac{V_s^2}{\left(\frac{R_r'}{g} + R_s\right)^2 + (N_r\omega_s)^2} \right) \quad (4.3)$$

Si l'on écrit le couple en régime permanent en négligeant la résistance du stator de la machine asynchrone, dans ces conditions, on aura :

$$T_e = 3pR_r' \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 \left(\frac{g\omega_s}{(R_r')^2 + (gN_r\omega_s)^2} \right) \quad (4.4)$$

En négligeant " $gN_r\omega_s$ " devant " R_r' " en régime nominal, on aura :

$$T_e = \frac{3p}{R_r'} \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 g \omega_s \quad (4.5)$$

Il est clair que la vitesse du glissement est proportionnelle au couple mécanique de la MAS.

Le schéma de commande de la figure (4.8) présente la manière de réguler la vitesse de la machine en reconstituant la pulsation statorique à partir de la vitesse et de la pulsation rotorique. Cette dernière, qui est l'image du couple de la machine est issue du régulateur de vitesse.

Si la machine est chargée, la vitesse a tendance à baisser, le régulateur va fournir plus de couple (donc plus de glissement) afin d'assurer cet équilibre. La pulsation statorique est donc modifiée pour garder cet équilibre. La tension est calculée de manière à garantir le mode de contrôle en "V/f" constant. d'une machine asynchrone alimentée en tension.

Le schéma bloc de régulation de vitesse peut être représentée par le schéma fonctionnel de la figure (4.8).

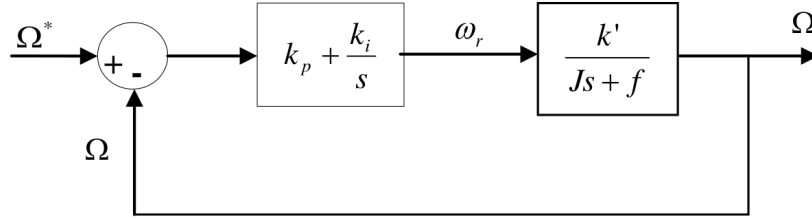


Figure 4.8: Schéma bloc de la régulation de vitesse.

La relation entre la pulsation rotorique et le signal d'erreur $e(\Omega) = \Omega^* - \Omega$ est donnée comme suit :

$$\omega_r = k_p e(\Omega) + \frac{k_i}{s} e(\Omega) \quad (4.6)$$

La Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) du système de la figure (4.8) est :

$$\text{FTBO} = \frac{\Omega}{\Omega^*} = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \left(\frac{k'}{Js + f} \right) = \frac{k'(k_p s + k_i)}{s(Js + f)} \quad (4.7)$$

La Fonction de transfert du système en boucle fermé (FTBF) est :

$$\text{FTBF} = \frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{\text{FTBO}}{1 + \text{FTBO}} = \frac{\frac{k'(k_p s + k_i)}{s(Js + f)}}{1 + \frac{k'(k_p s + k_i)}{s(Js + f)}} \quad (4.8)$$

L'équation (4.8) peut être simplifiée comme suit :

$$\text{FTBF} = \frac{k'(k_p s + k_i)}{s(Js + f) + k'(k_p s + k_i)} = \frac{\frac{k'}{J}(k_p s + k_i)}{s^2 + \frac{(f + k'k_p)}{J}s + \frac{k'k_i}{J}} \quad (4.9)$$

Soit la fonction de transfert d'un système désiré de 2ème ordre :

$$\text{FTBF} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.10)$$

Par identification du polynôme caractéristique de la FTBF (dénominateur de la FTBF) avec le polynôme caractéristique du système désiré et si l'on néglige l'effet de zéro sur la stabilité du système, on obtient :

$$\begin{cases} f + k'k_p = 2\zeta\omega_n J & \Rightarrow k_p = \frac{2\zeta\omega_n J - f}{k'} \\ k'k_i = \omega_n^2 J & \Rightarrow k_i = \frac{\omega_n^2 J}{k'} \end{cases} \quad (4.11)$$

4.3.2 Génération des signaux de contrôle par MLI triangulo-sinusoïdale

La méthode de la MLI triangulo-sinusoïdale ou MLI sinusoïdale (en anglais : Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) consiste à comparer une onde de référence dite modulatrice avec une onde triangulaire dite porteuse d'une amplitude et d'une fréquence fixées.

Ce contrôle peut être mis en œuvre par un comparateur qui, à partir de l'écart entre la tension de référence et la porteuse, détermine les signaux de commande des interrupteurs comme il est indiqué sur la figure (4.9). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

Dans cette technique de commande, la fréquence de commutation est fixe, le réglage s'effectue par variation de la largeur des signaux de commande.

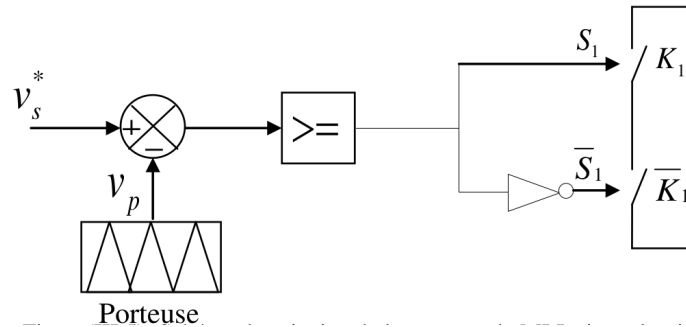


Figure 4.9: Schéma de principe de la commande MLI triangulo-sinusoïdale.

La technique MLI triangulo-sinusoïdale consiste à obtenir après modulation une tension en sortie égale en valeur moyenne sur une période de découpage (T_d) à sa référence.

$$\langle V_s \rangle_{T_d} = v_s^* \quad (4.12)$$

Cette équation peut être satisfaite sur une période de découpage avec un signal de commande S_1 égal à 1 si la tension de référence v_s^* est supérieure à la porteuse v_p , et 0 dans le cas contraire, comme indiqué dans la figure (4.10).

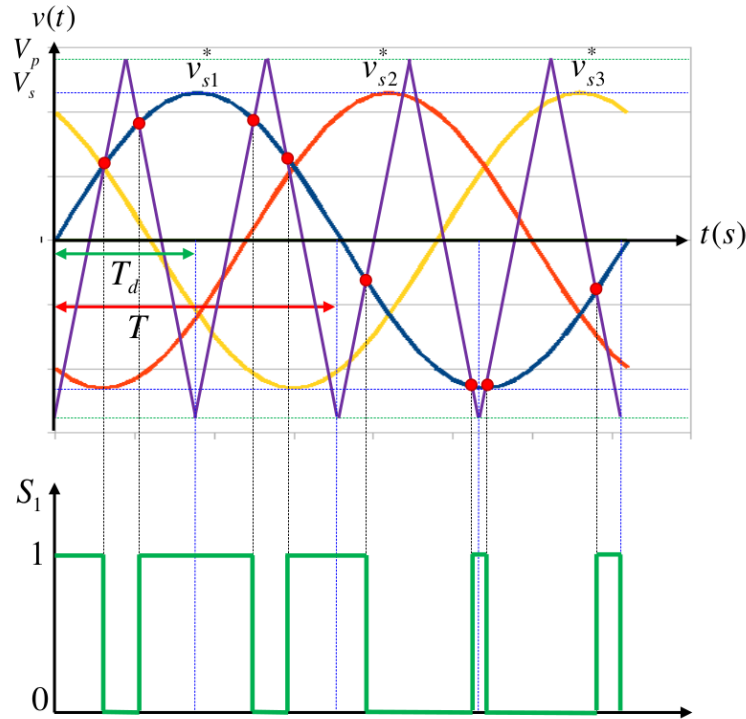


Figure 4.10: Signaux de références, la porteuse et l'état S_1 du premier interrupteur.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a traité en profondeur des diverses stratégies de commande pour un système de pompage photovoltaïque, avec une attention particulière portée à l'utilisation de la commande VFD scalaire. Cette méthode a démontré son efficacité pour ajuster la vitesse de rotation du moteur de la pompe en fonction de la disponibilité de l'énergie solaire, conférant ainsi au système une flexibilité et une adaptabilité accrues.

Les principaux avantages de la commande VFD incluent une meilleure adaptation aux variations de la ressource solaire, une protection renforcée du système contre les surcharges et autres perturbations, ainsi qu'une optimisation de l'efficacité énergétique. En permettant une régulation précise de la vitesse du moteur, la commande VFD contribue également à prolonger la durée de vie des composants et à réduire les coûts d'exploitation.

Nous avons également présenté quelques types de commande VFD, telles que la commande scalaire, vectorielle et floue, chacune avec ses caractéristiques et avantages spécifiques. La commande scalaire se distingue par sa simplicité de mise en œuvre, tandis que les commandes vectorielle et modernes offrent des niveaux supérieurs de précision et d'adaptabilité.

Enfin, nous avons détaillé la modélisation de la commande scalaire en tension ainsi que la génération des signaux de contrôle par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) triangulo-sinusoidale. Ces techniques permettent de maintenir un flux magnétique constant dans la machine, assurant ainsi des performances optimales du système.

Chapitre 5

Résultats et discussions

5.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à l'analyse approfondie des résultats et des discussions concernant la commande d'un système de pompage solaire. Permettant l'évaluation de l'efficacité et de la fiabilité des mécanismes de commande dans des environnements variables.

Nous examinerons les performances du système sous divers niveaux d'irradiation solaire et de température, mettant en évidence l'efficacité des stratégies de commande pour optimiser le fonctionnement du système de pompage. Afin d'évaluer la capacité du système à s'adapter aux fluctuations environnementales tout en maintenant des performances optimales.

Ainsi, ce chapitre revêt une importance capitale dans la compréhension approfondie des performances et des limitations des systèmes de pompage solaire, ouvrant la voie à des développements futurs et à une diffusion élargie de cette technologie dans le domaine de l'énergie renouvelable.

5.2 Simulation du démarrage du système de pompage sous les condition STC

Suite à la simulation et à l'analyse approfondie des différents composants du système global de pompage solaire, nous nous concentrerons désormais sur la modélisation de l'architecture directe GPV-convertisseur-moteur-pompe, qui représente l'option la plus simple et la plus économique en termes d'implantation.

La figure (5.1) montre le modèle global du système de pompage solaire modélisé dans l'environnement Simulink. Cette représentation inclut tous les composants principaux, à savoir le générateur photovoltaïque (GPV), le convertisseur, le moteur, et la pompe. Le schéma met en évidence la manière dont ces éléments sont interconnectés pour fournir une solution de pompage efficace et économique.

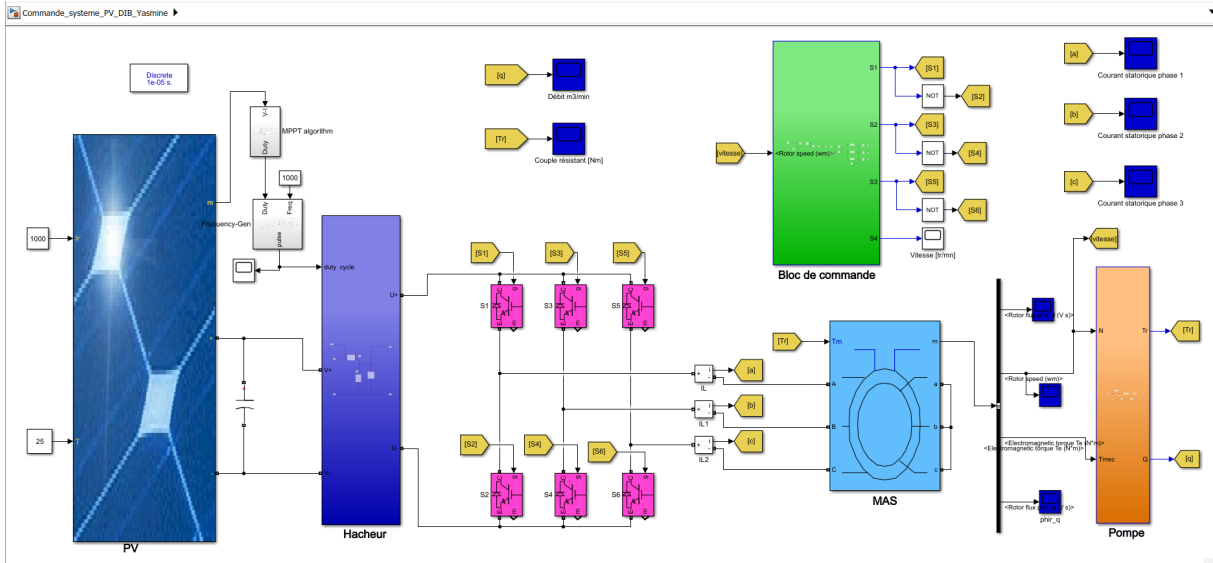


Figure 5.1: Modèle simulink du système global avec commande.

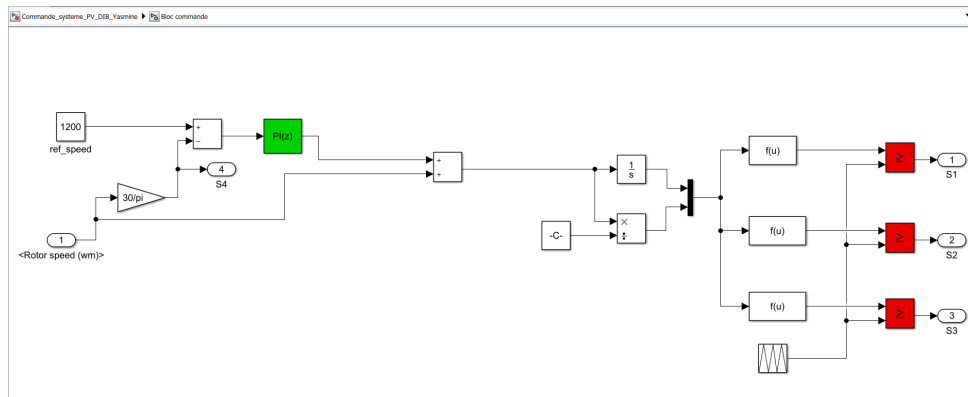


Figure 5.2: Circuit de commande scalaire.

La figure (5.3) illustre l'évolution de la vitesse du moteur avec la commande appliquée. Cette courbe permet de visualiser comment la vitesse du moteur est régulée au fil du temps pour assurer un fonctionnement optimal du système de pompage. Nous pouvons vérifier que la vitesse du moteur reste dans des plages opérationnelles sûres et efficaces et qui respecte la consigne, calculée selon l'équation (3.77) La vitesse de rotation fait un dépassement acceptable due au poles imposés en boucle fermée puis tend à sa valeur de référence de manière à avoir une erreur statique nulle.

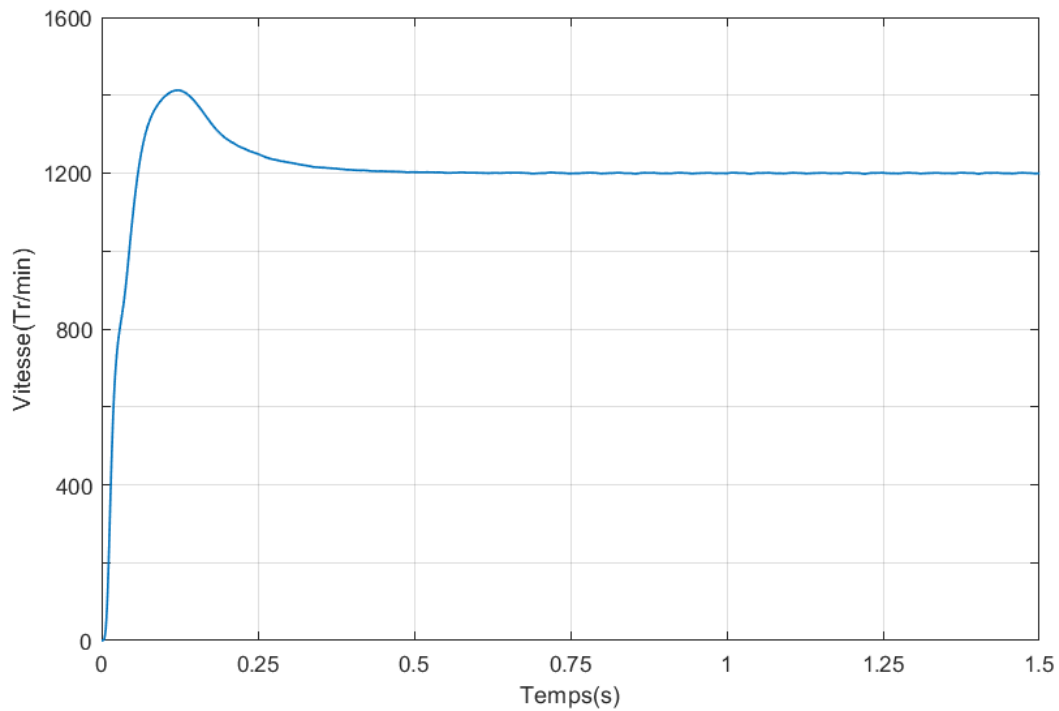


Figure 5.3: Profil évolutif de la vitesse du moteur en boucle fermée.

La figure (5.4) présente l'évolution du couple mécanique de la pompe exercé par le moteur asynchrone lorsque la commande est appliquée. Cette dernière permet de maintenir ce couple à des niveaux acceptables pour éviter des surcharges et garantir la durabilité du moteur. Il est clair que ce couple augmente de manière très dure car le couple résistant est proportionnel au carré de la vitesse, puis il se stabilise à une valeur proche de sa valeur nominale.

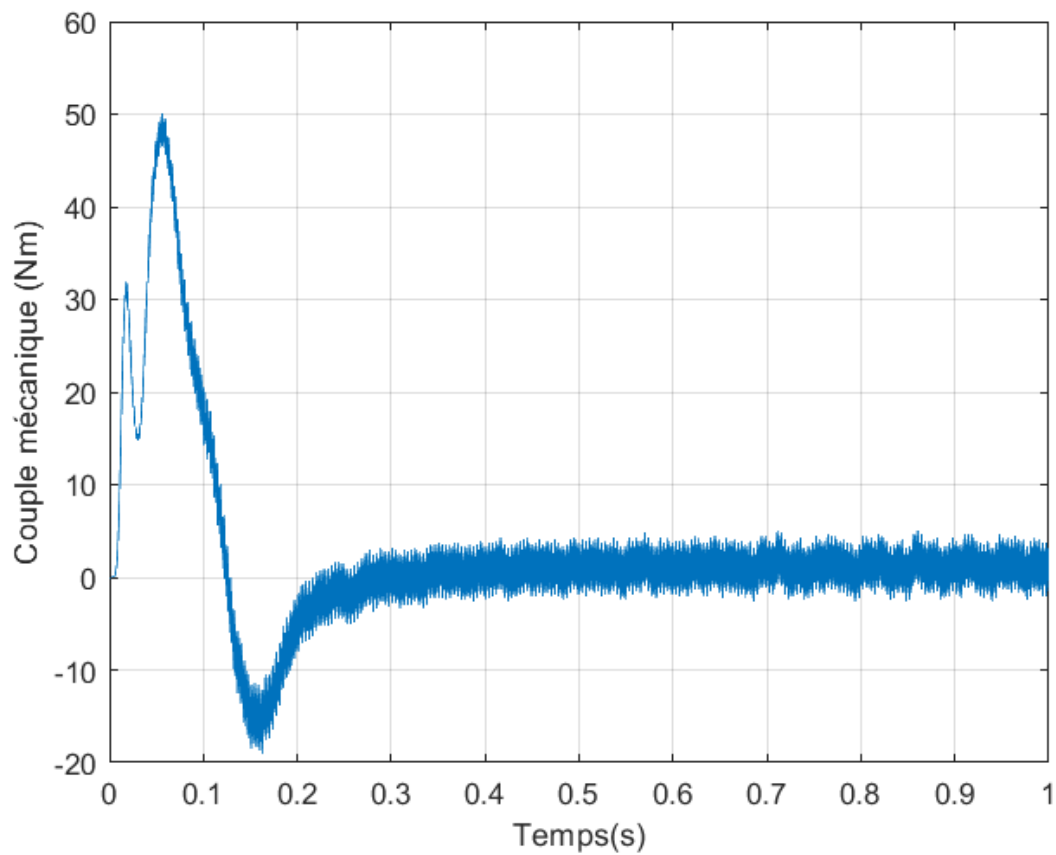


Figure 5.4: L'évolution du couple mécanique en boucle fermée.

La figure (5.5) montre l'évolution du débit de la pompe avec la commande en place. L'allure du débit suit celle de la vitesse de rotation conduisant à un débit stable et optimal. Ceci est un indicateur clé de performance pour le système de pompage solaire.

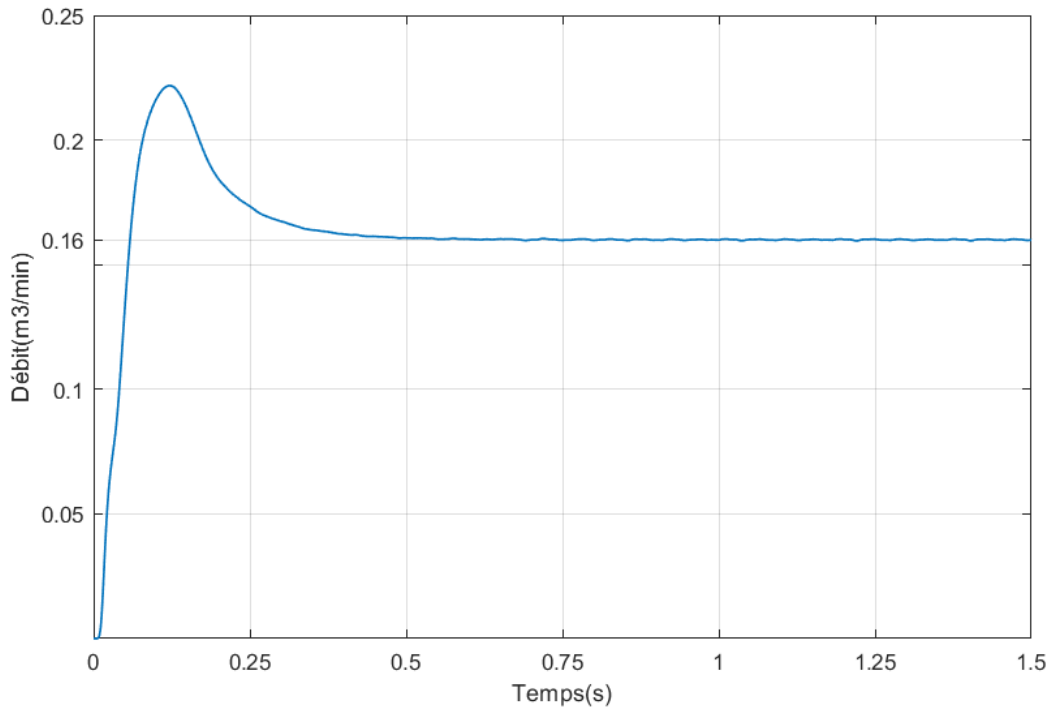


Figure 5.5: Évolution du débit de la pompe en boucle fermée.

5.3 Adaptation de la commande aux conditions variables

5.3.1 Influence de l'irradiation

Dans cette partie, nous avons augmenté le nombre de panneaux de sorte que la vitesse optimale de 1200tr/mn soit assurée même sous l'irradiation minimale ($500\text{W}/\text{m}^2$).

La variation de la vitesse de rotation du moteur en fonction des niveaux d'irradiation (1000 , 800 et $500\text{W}/\text{m}^2$) est présentée dans la figure (5.6). L'observation met en lumière l'ajustement précis opéré par la stratégie de commande pour adapter les performances du système de pompage photovoltaïque, même face aux fluctuations d'irradiation. Cette adaptation permet de garantir la demande précise en eau et d'assurer la fiabilité du système.

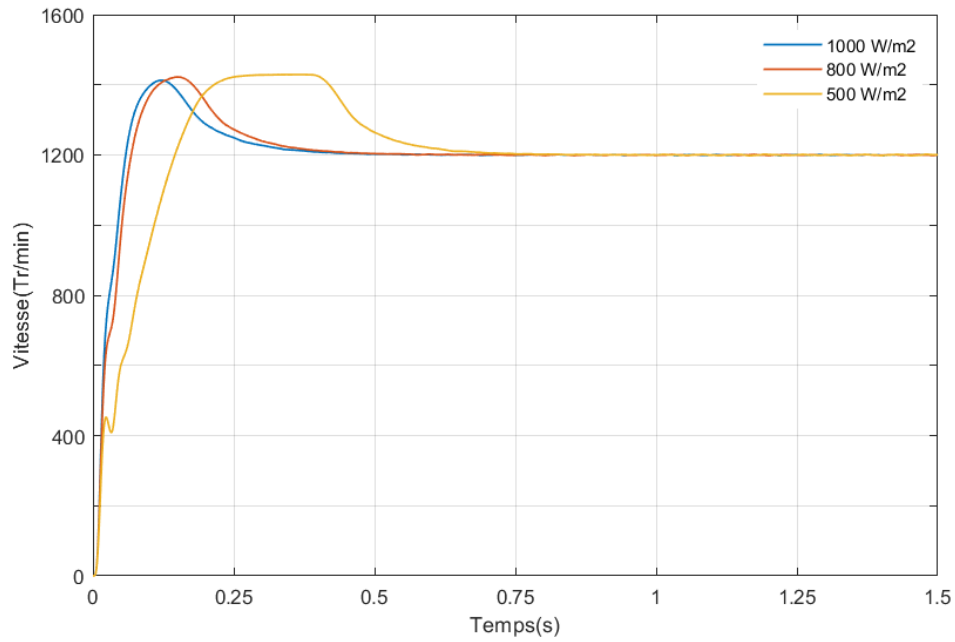


Figure 5.6: Évolution de la vitesse du moteur en réponse à différentes intensités d'irradiation solaire (I_r) : 1000, 800 et 500 W/m².

La figure (5.7) montre la variation du débit de la pompe en fonction des niveaux d'irradiation de 1000, 800 et 500 W/m². Ce graphique met en évidence l'efficacité de la commande, démontrant la capacité du système commandé à réguler le débit de manière dynamique, assurant ainsi un fonctionnement adapté aux besoins en eau..

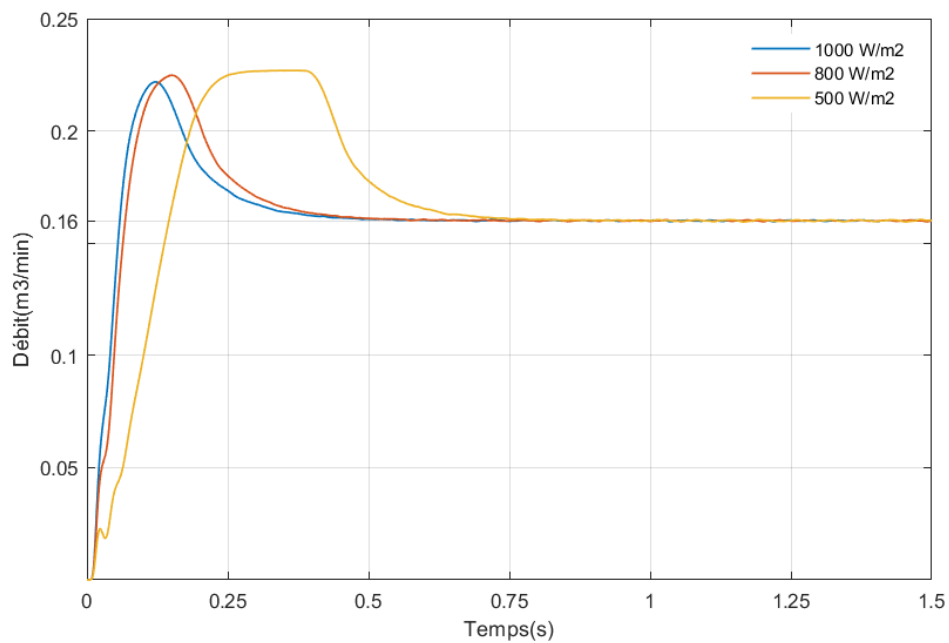


Figure 5.7: Évolution du débit de la pompe en réponse à différentes intensités d'irradiation solaire (I_r) : 1000, 800 et 500 W/m².

5.3.2 Influence de la température

Dans cette partie, il est simulé la réponse de la vitesse et du débit sous différentes températures.

La figure (5.8) présente l'évolution de la vitesse de rotation du moteur pour des températures ambiantes de 20, 50 et 10 degrés Celsius. Ce diagramme montre l'impact des variations de température sur les performances du moteur et la capacité de la commande à compenser ces variations pour maintenir une opération stable et efficace du système de pompage photovoltaïque.

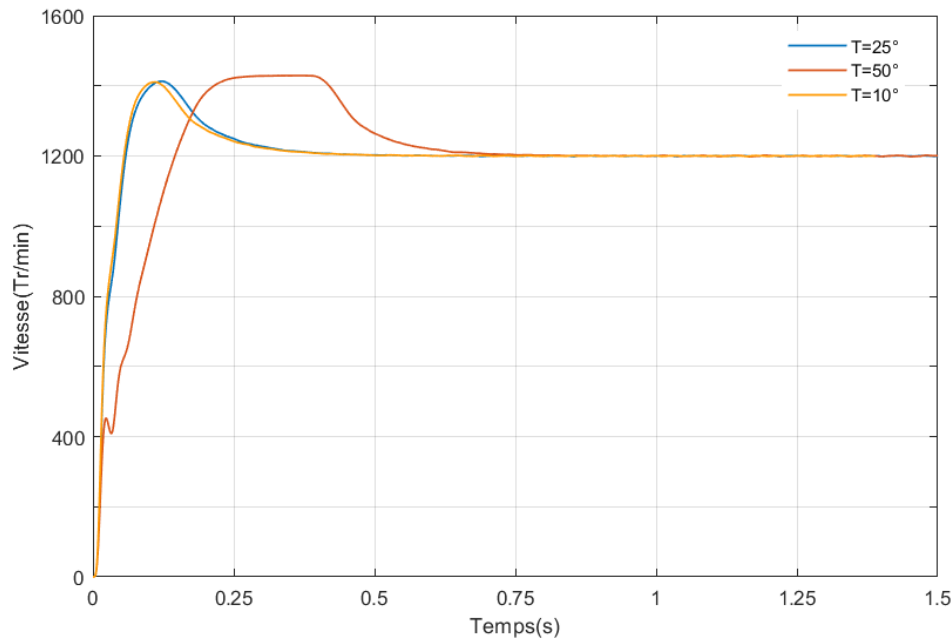


Figure 5.8: Évolution de la vitesse du moteur pour des valeurs de température de 25, 50 et 10 degrés Celsius.

5.3.3 Suivi de référence

La figure (5.9) représente la réponse du système à un échelon de vitesse de référence, passant de 1000 à 1200 tr/min à $t=1$ s. La courbe illustre le suivi précis de la consigne par le système, mettant en évidence l'efficacité et la robustesse du correcteur utilisé.

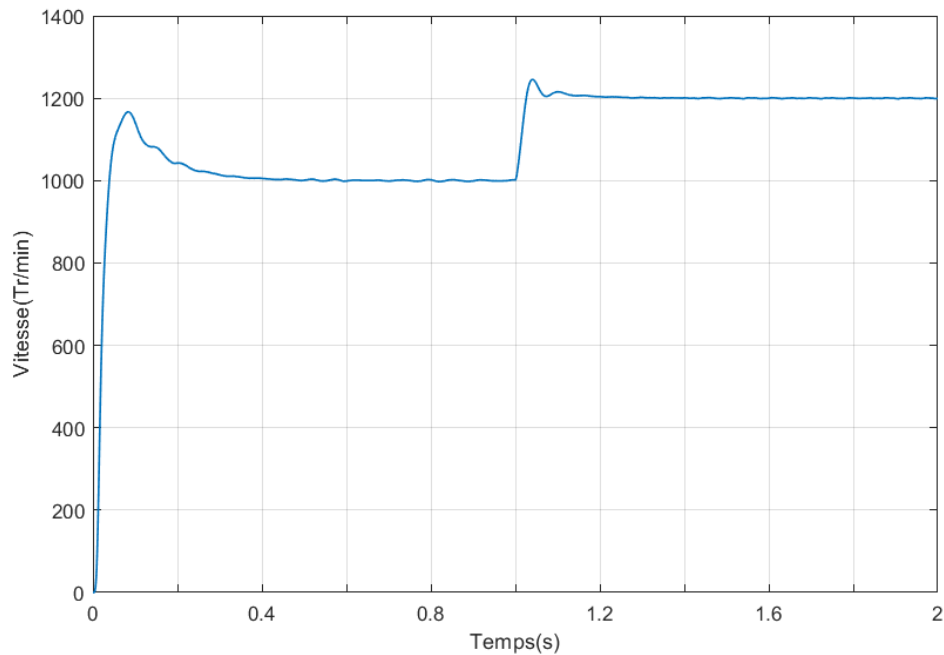


Figure 5.9: Réponse du système à un échelon de vitesse de référence de 1000 à 1200 tr/min à $t=1$ s, illustrant la robustesse du correcteur.

5.4 Conclusion

Ce chapitre se consacre à une analyse rigoureuse des résultats et des discussions concernant la commande d'un système de pompage solaire, visant à évaluer son efficacité et sa fiabilité dans des conditions météorologiques variables.

Nous avons examiné les performances du système sous différentes intensités d'irradiation solaire et de température, mettant en évidence la capacité de la commande à optimiser le fonctionnement du système tout en s'adaptant aux fluctuations météorologiques.

Les résultats ont révélé que la stratégie de commande était capable de réguler précisément la vitesse du moteur et le débit de la pompe, même face à des changements significatifs dans les conditions extérieures. Cette capacité d'adaptation assure non seulement une efficacité énergétique maximale, mais aussi la fiabilité et la durabilité du système dans divers contextes d'utilisation.

Conclusion générale

Ce mémoire met en évidence les principales contributions et conclusions tirées de l'étude sur la commande d'un système de pompage solaire photovoltaïque.

Tout d'abord, nous avons posé le contexte et les enjeux entourant le pompage photovoltaïque, soulignant son importance en tant qu'alternative durable dans le domaine de l'énergie renouvelable. La problématique a été clairement énoncée, mettant en avant les défis à relever pour optimiser l'efficacité et la fiabilité de ces systèmes.

La revue de la littérature a permis de dresser un état de l'art des connaissances actuelles sur la modélisation, la commande et l'optimisation des systèmes de pompage solaire. Les différentes approches et techniques existantes ont été analysées, offrant ainsi un cadre théorique solide pour la recherche entreprise.

La modélisation du système de pompage solaire a constitué une étape fondamentale, permettant de comprendre en détail le fonctionnement de chaque composant et leur interrelation. Les modèles électriques, et mathématiques ont été développés, posant les bases pour l'évaluation des stratégies de commande. Dans le développement et l'évaluation des stratégies de commande, l'approche principale qui a été explorée est la commande scalaire en tension. Des simulations détaillées ont été réalisées pour évaluer les performances de cette stratégie dans des conditions variables d'irradiation solaire et de température.

Les résultats et discussions ont mis en évidence l'efficacité des stratégies de commande à s'adapter aux fluctuations environnementales et à maintenir des performances optimales du système de pompage.

En conclusion, cette étude apporte une contribution significative à la compréhension et à l'optimisation des systèmes de pompage solaire photovoltaïque. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des développements futurs visant à renforcer encore l'efficacité, la fiabilité et la durabilité de ces technologies, contribuant ainsi à la transition vers un avenir énergétique plus durable et écologique.

Il ressort que les commandes modernes sont essentielles pour gérer la variabilité des ressources solaires et les besoins fluctuants en eau, et que l'intelligence artificielle offre des perspectives prometteuses pour des commandes plus intelligentes et performantes. Les futures recherches devraient se concentrer sur le développement de commandes modernes avancées, intégrant les dernières avancées en intelligence artificielle et en apprentissage automatique, ainsi que sur l'exploration de nouvelles solutions de stockage d'énergie pour améliorer la fiabilité et la durabilité des systèmes.

Bibliographie

- [1] **Actu-Environnement.** "Pompage solaire : vers un accès à l'eau durable et autonome." Actu-Environnement, Disponible à l'adresse : <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-25206-pompage-solaire.pdf>. Consulté le 21 juin 2024.
- [2] **Guisser, M'hammed.** "Stratégies de Commande pour l'Optimisation des Systèmes Photovoltaïques Autonomes et Connectés au Réseau." 10.13140/RG.2.2.32260.83840, 2015.
- [3] **A. T. Singo,** Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [4] **S. Petibon,** Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Thèse de Doctorat, université de Toulouse, 2009.
- [5] **Hurter, Warren, Plessis, Haydn, and Rensburg, Nickey.** "Simplified encapsulation of solar cells using glass fibre reinforced polymers." 2013. 1-5. 10.1109/AFRCON.2013.6757596.
- [6] **B. Hosseini,** Prototypage rapide à base de FPGA d'un algorithme de contrôle avancé pour le moteur à induction, Thèse de Doctorat, Université de Québec a trois rivières, Canada, 2010.
- [7] **A. Meroufel,** Contrôle de la machine asynchrone, Université Djilali Liabés Sidi Bel Abbes, Algérie, 2009.
- [8] **Bernard Multon** Électronique de puissance : alimentations à découpage, Master, France, 2017.
- [9] **Khatib, T.,** "Design of Photovoltaic Water Pumping Systems at Minimum." 2010.
- [10] **Jahanfar, A., Iqbal, M. T. .** "Dynamic Modeling and Simulation of Solar Water Pumping With Hybrid Storage System." 2023.
- [11] **Cervera-Gascó, J., Perea, R. G., Montero, J., and Moreno, M. A..** "Prediction Model of Photovoltaic Power in Solar Pumping Systems Based on Artificial Intelligence." 2022.
- [12] **Shah, K., Krishnasamy, V., and Neeli, S.** "Sliding Mode Assisted MPPT Technique Using Quadratic Boost Converter for Solar PV Based DC Water Pumping System." 2017 International Conference on Intelligent. 2017.

-
- [13] **Errouha, M., Motahhir, S., Combe, Q., Derouich, A., and El Ghzizal, A.** "Fuzzy-PI Controller for Photovoltaic Water Pumping Systems." 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). 2019.
- [14] **Khan, K., Shukla, S., and Singh, B.** "Improved Performance Design Realization of a Fractional Kilowatt Induction Motor With Predictive Current Control for Water Pumping." IEEE Transactions on Industry. 2017.
- [15] **Ashokkumar, S.** "Solar Water Pumping System for Agriculture." International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2020.
- [16] **Hossain, M. A., Hassan, M. S., Mottalib, M. A., et al.** "Feasibility of Solar Pump for Sustainable Irrigation in Bangladesh." International Journal of Energy and Environment Engineering, vol. 6. 2015.
- [17] **Bouzidi, B., and Campana, P.** "Optimization of Photovoltaic Water Pumping Systems for Date Palm Irrigation in the Saharan Regions of Algeria: Increasing Economic Viability with Multiple-Crop Irrigation." Energy, Ecology and Environment. 2020.
- [18] **Olatomiwa, L., Mekhilef, S., Huda, A. S. N., and Ohunakin, O. S.** "Economic Evaluation of Hybrid Energy Systems for Rural Electrification in Six Geo-Political Zones of Nigeria." Renewable Energy. 2015.
- [19] **Zanetti, E., Aprile, M., Kum, D., Scoccia, R., and Motta, M.** "Energy Saving Potentials of a Photovoltaic Assisted Heat Pump for Hybrid Building Heating System via Optimal Control." , Journal of Building Engineering, 2020.
- [20] **R. C. Campbell,** 'A Circuit-based Photovoltaic Array Model for Power System Studies', 39th North American Power Symposium (NAPS '07), pp. 97–101, Sept. 30 2007 - Oct. 2 2007.
- [21] **Helali Kamelia,** Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque, Etude Comparative, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, Thèse de Magister 2012.
- [22] **C. Cabal,** 'Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque', Thèse de doctorat université de Toulouse III, 2008.
- [23] **Y. Pankow** 'Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. application au générateur photovoltaïque', thèse de doctorats de l'école nationale, 2004.
- [24] **K. H. Hussein, I. Muta, T. Hshino, and M. Osakada,** 'Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions', Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 142, no. 1, Jan. 1995, pp. 59-64.
- [25] **C. Cabal,** 'Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque', Thèse de doctorat, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.
- [26] **H. Lequeu** – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, disponible sur <https://www.thierry-lequeu.fr/data/2005-2006-IUT-EDP-9.pdf>. Consulté le 21 avril 2024.

-
- [27] **Sylvain Noblecourt**, Conception et réalisation de composants de puissance à superjonction et à tranchées profondes pour des applications 600 V et 1200 V, Université Paul Sabatier - Toulouse III, Thèse de doctorat, 2016.
- [28] **A. Merabet**, 'Commande Non Linéaire à Modèle Prédicatif pour une Machine Asynchrone', Thèse de Doctorat en Ingénierie, Université du Québec, mai 2007.
- [29] **R. Saleh**, 'Application à la Machine Asynchrone : Commande Vectorielle sans Capteurs Mécaniques SVPWM Mode Glissant MRAS', Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2009.
- [30] **Caron, J. P.**, and **Hautier, J. P.** "Modélisation et commande de la machine asynchrone." Ed Technip, 1995, 279p.
- [31] **Sturtzer, G.**, and **Smigielski, E.** "Modélisation et commande des moteurs triphasés. Commande vectorielle des moteurs synchrones, Commande numérique par contrôleurs DSP." Ellipses, 2000, 244 p. ISBN: 2-7298-0076-X.
- [32] **Bitsi, K.**, **Wallmark, O.**, and **Bosga, S.** "An Induction Machine with Wound Independently-Controlled Stator Coils." 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 2019, pp. 1-5.
- [33] **Xylem**. "Variable Speed Wastewater Pumping." Xylem, Disponible à l'adresse: <https://www.xylem.com/siteassets/brand/flygt/resources/white-paper/variable-speed-wastewater-pumping-1894.pdf>. Consulté le 21 juin 2024.
- [34] **J. P. Caran** and **J. P. Hautier**, 'Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone', Collection dirigée par Pierre Borne, Éditions Technip, 1995.
- [35] **Rachid Abdessemed**, 'Modélisation Et Simulation Des Machines Électriques', disponible sur: <https://www.scribd.com/document/652181530/Modelisation-Et-Simulation-Des-Machines-Electriques-1>.
- [36] **Yussif, N.**, **Sabry, O. H.**, **Abdel-Khalik, A. S.**, **Ahmed, S.**, and **Mohamed, A. M.** "Enhanced Quadratic V/f-Based Induction Motor Control of Solar Water Pumping System." Energies. 2021.
- [37] **Mansouri, M. N.**, **Ghanmi, N.**, & **Mimouni, M. F.** Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Tunisie, 2008.
- [38] **Royer, J.**, & **Djiako, T.** Le Pompage Photovoltaïque. Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa/EIER/CREPA, 1998.
- [39] **Kumar, M. Sathish, Lad, Y. A.**, and **Pundir, R. S.** "Factors Influencing Farmers' Adoption of Solar Water-Pumping Systems in Gujarat." Clean Energy. 2024.

Résumé

Ce mémoire se concentre sur la commande des systèmes de pompage solaire photovoltaïque pour garantir leur efficacité et leur fiabilité dans des environnements variables. Après avoir posé le contexte et défini les enjeux, une revue de la littérature est réalisée pour établir un cadre théorique solide. La modélisation du système est ensuite effectuée, suivie du développement et de l'évaluation de stratégie de commande, notamment la commande scalaire du moteur asynchrone. Les résultats démontrent l'efficacité de la commande à s'adapter aux fluctuations environnementales et à maintenir des performances optimales, notamment grâce à la gestion précise du Maximum Power Point Tracking (MPPT). En conclusion, ce mémoire contribue à l'optimisation des systèmes de pompage solaire photovoltaïque, ouvrant la voie à des développements futurs pour renforcer leur efficacité, leur fiabilité et leur durabilité.

Mots clés: commande, panneaux photovoltaïque, pompage solaire photovoltaïque, pompe centrifuge, performances optimales, MPPT.

Abstract

This thesis focuses control in photovoltaic solar pumping systems to ensure their efficiency and reliability in variable environments. After setting the context and defining the issues at stake, a literature review is carried out to establish a sound theoretical framework. System modeling is then carried out, followed by the development and evaluation of control strategies, in particular scalar MAS control. The results demonstrate the effectiveness of the control strategies in adapting to environmental fluctuations and maintaining optimum performance, notably through the precise management of Maximum Power Point Tracking (MPPT). In conclusion, this thesis contributes to the optimization of photovoltaic solar pumping systems, paving the way for future developments to enhance their efficiency, reliability and sustainability.

Keywords: control, photovoltaic panels, photovoltaic solar pumping, centrifugal pump, optimal performance, MPPT.

ملخص

تركز هذه الأطروحة على تحسين التحكم في أنظمة الضخ الكهروضوئية الشمسية لضمان كفاءتها وموثوقيتها في البيئات المتغيرة. بعد تحديد السياق وتعريف القضايا، يتم إجراء مراجعة للأدبيات لوضع إطار نظري سليم. ثم يتم تنفيذ نمذجة النظام، يليه تطوير وتقييم استراتيجيات التحكم، ولا سيما التحكم في الجهد القياسي. تُظهر النتائج فعالية استراتيجيات التحكم في التكيف مع التقلبات البيئية والحفاظ على الأداء الأمثل، لا سيما من خلال الإدارة الدقيقة لتتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT). في الختام، تساهم هذه الأطروحة في تحسين أنظمة الضخ الشمسي الكهروضوئي الضوئي، مما يمهّد الطريق للتطورات المستقبلية لتعزيز كفاءتها وموثوقيتها واستدامتها.

الكلمات المفتاحية: التحكم، الألواح الكهروضوئية، الضخ الشمسي الكهروضوئي، الكفاءة، الموثوقية، مضخة الطرد المركزي، الأداء الأمثل، تتبع نقطة الطاقة (MPPT).