REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Energies renouvelables

Option : Energies renouvelables en électrotechnique

THEME

MODELISATION ET COMMANDE D'UN SYSTEME DE POMPAGE HYBRIDE PHOTOVOLTAIQUE-EOLIEN

Proposé et dirigé par,

Promoteur: Dr.MEDJBER Ahmed

Co-Promoteur: Dr. MOUALDIA Abdelhafid

Préparé et présenté par,

Mr. Ali Turki Walid

Promotion : 2019-2020

Dédicace

A ***Allah****, Tout puissant Qui m'a inspiré, Qui m'a guidé dans le bon chemin. Louanges et remerciements pour votre clémence et miséricorde.*

À MES CHERS PARENTS Et ma Sœur

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Puisse Dieu, vous accorder santé, bonheur et longue vie. Et toute la famille et mes amis et les enseignants qui m'ont enseigné depuis mon enfance.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment

ملخص

يعد استخدام الطاقة الهجينة الكهروضوئية في المواقع المعزولة لتطبيقات مختلفة، مثل ضخ المياه، من الاهتمامات الرئيسية للأشخاص في البلدان النامية الذين لا يحصلون على مياه الشرب.

الغرض من هذه المذكرة هو حساب المعلمات من مضخة الطرد المركزي وفقا لعدد قرية صغيرة لتلبية الحاجة إلى المياه و بالتالي يتم استخدام مكافحة ناقلات وحدة غاطسة مضخة غير متزامن.

يتكون تركيب هذا النظام من توربين ،MSAP، مقوم ، ناقل و عاكس للجهد يغذي آلة غير متزامنة مقرونة بمضخة طرد مركزي ،و يضمن تشغيل الطاقة القصوى لنظام التوربينان الهوائية .

الكلمات المفتاحية : الكهروضوئية-الطاقة الشمسية-طاقة الرياح- MPPT-آلية التحكم-محرك تيار متردد-عاكس كهربائي للتوتر-مضخة طرد مركزي

Résumé

L'utilisation de l'énergie hybride photovoltaïque-éolienne dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès sûr l'eau potable.

L'objectif de ce mémoire est calcul les paramètres d'une pompe centrifuge suivant le nombre d'un petit village pour satisfaire le besoin d'eau. Donc on utilise la commande vectorielle associée à un groupe motopompe asynchrone immergée.

La configuration de ce système comporte un générateur photovoltaïque, hacheur survolteur, un bus DC, une turbine éolienne, une MSAP, un redresseur, et un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone couplée à une pompe centrifuge.

Mots clés : Hybride, Photovoltaïque, éolienne, contrôle MPPT, machine synchrone, machine asynchrone, redresseur, Onduleur, commande vectoriel, pompe centrifuge.

Abstract

The use of hybrid energy in isolated sites for different applications, such as pumping water, is of primary interest to people in developing countries that do not have access to water drinking.

The purpose of this memo is to calculate the parameters of a centrifugal pump according to the number of a small village to satisfy the need for water.

Therefore, the vector control is used for a submersible asynchronous pump unit.

The configuration of this system comprises a photovoltaic generator, wind turbine , a MSAP ,a rectifier , a bus and a voltage inverter feeding an asynchronous machine coupled to a centrifugal pump and ensuring maximum power operation of the wind turbine system.

Keywords: Hybride, solar energy, wind energy, MPPT control, rectifier, Inverter et asynchronous machine, synchronous machine, centrifugal pump.

Liste des symboles

Liste des symboles

V_V	La vitesse du vent (m/s)
P_t	La puissance mécanique de la turbine (Watt)
R	Le rayon du rotor éolien (m)
P	La densité de l'air (kg/m^3)
C_p	Le coefficient de puissance
λ	La vitesse spécifique
β	L'angle de calage
Ω_t	La vitesse de rotation du rotor éolien (rad/s)
C_{em}	Couple électromagnétique (N.m)
C_{eol}	Couple éolienne
[Va VB Vc]^t	Vecteur tension des phases statorique
[ia ib ic]^t	Vecteur courant des phases statoriques
E	Energie solaire (Wh/m²)
V_{OC}	Tension de circuit ouvert [V]
I_{SC}	Courant de court circuit [A]
R_s	Résistance des phases statoriques
V_d , V_q	Tensions statorique dans le repère de Park (d,q) (V).
p	Nombre de paires de pôles
I_d	Courant statorique selon l'axe d
I_q	Courant statorique selon l'axe q
L_d	Inductance statorique selon l'axe d
L_q	Inductance statorique selon l'axe q
Ψ_f	Flux inducteur
C_m	Couple moteur appliqué sur la génératrice

J	Moment d'inertie total de la machine ($kg.m^2$)
f	Coefficient de frottement visqueux
i_c	Courant circulant dans la capacité
V_{dc}	Tension du bus continu (volt)
C_{dc}	Capacité du bus continu
L_s	Inductance propre d'une phase statorique
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases de stator
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases de rotor
Θ_{sr}	Ecart angulaire entre une phase statorique et la phase rotorique correspondante
f_m	Coefficient du frottement visqueux
C_r	Couple de charge
v_{sd} , v_{sq}	Tension statoriques direct et quadratique
v_{sd} , v_{sq}	Courant statoriques direct et quadratique
φ_{sd} , φ_{sq}	Flux statoriques direct et quadratique
I_{rd} , I_{sq}	Courant rotoriques direct et quadratique
φ_{rd} , φ_{rq}	Flux rotoriques direct et quadratique
Ω_s	Inductance cyclique statorique
Ω_r	Inductance cyclique rotorique
L_r , L_s	Respectivement Inductances de fuite statorique et rotorique
M	Mutuelle inductance
$\frac{d\Theta_s}{dt} = \omega_s$	Pulsation des grandeurs statorique
$\frac{d\Theta_r}{dt} = \omega_s$	Pulsation des grandeurs rotorique
ρ	La densité du liquide (pour l'eau =1000 K_g/m^3)

g	l’accélération de pesanteur (g=9.81m/s^2)
H	Hauteur manométrique totale(m)
V	Le volume de liquide dans le réservoir (m^3)
S	La surface du réservoir (m^2)

Liste des abréviations

PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur photovoltaïque
CC	Courant Continu
CA	Curant Alternatif
MSAP	Machine synchrone à aimant permanant
MADA	Machine asynchrone double alimentation
HMT	Hauteur Manométrique Totale
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
DC	Courant continu
AC	Courant alternatif
P&O	Perturbation et observation
MPPT	Maximum power point tracking
H_g	Hauteur géométrique à l'aspiration
N_p	Nombre moyen des personnes pour chaque famille.
N_f	Nombre de familles de la ferme
Q_p	Consommation moyenne d'eau quotidienne pour une personne
Q_{an}	Quantité moyenne d'eau destinée pour La consommation des animaux de la ferme.
Q_{irr}	Quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation de la ferme

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

N° du Tableau	Titre	Page
I.1	Classification des SEH par gamme de puissance	14
IV.1	Détermination des besoins en eau journaliers de l'installation de pompage	71
IV.2	Détermination de la hauteur manométrique totale (HMT)	71

Liste des Figures

Liste des figures

Figure I.1 Principaux domaine d'application des SHER ……... 7
Figure I.2 Système autonome hybride photovoltaïque-éolien avec stockage électrochimique pour le pompage d'eau ……..... 8
Figure I.3 Schéma général d'un système hybride d'énergie …… 11
Figure I.4 Structure à bus DC d'un système hybride ……... 15
Figure I.5 Structure à bus AC d'un système hybride ……... 16
Figure I.6 Structure à bus mixte **(**DC& AC) d'un système hybride ……. 16
Figure II.1 Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque ……..... 19
Figure II.2 Caractéristique d'un panneau PV a) $I_{pv}(V_{pv})$ b) $P_{pv}(V_{pv})$ ……. 21
Figure II.3 Influence du branchement série parallèle a) $I_{pv}(V_{pv})$ et b) $P_{pv}(V_{pv})$ …… 22
Figure II.4 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ ... 22
Figure II.5 la caractéristique a) I_{PV} (V_{PV}) et b) P_{PV} (V_{PV}) pour les différentes températures …….. 23
Figure II.6 Circuit idéal d'un convertisseur Boost …….. 24
Figure II.7 Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) K fermé ;(b) ouvert 24
Figure II.8 Schéma synoptique du couplage photovoltaïque avec MPPT …….. 26
Figure II.9 Organigramme de l'algorithme P&O ……..…….. 27
Figure II.10 Réponse de l'Algorithme P&O lors de fonctionnement standard …….. 28
Figure II.11 évolution du point de fonctionnement du GPV d'une augmentation de l'éclairement ……. 28
Figure II.12 Représentation schématique du modèle triphasé de la machine dans l'espace électrique …… 29
Figure II.13 Référentiel tournant d'axes (d– q) …… 33
Figure II.14 Principe de la commande vectorielle …… 39
Figure II.15 Schéma bloc de commande vectorielle de la MAS alimenté en tension ... 43
Figure II.16 Eclairement solaire ……43
Figure II.17 Vitesse mécanique de la MAS ……. 43
Figure II.18 Puissance PV …… 44
Figure II.19 Puissance de la MAS …… 44
Figure II.20 Couple de la MAS …… 44
Figure II.21 Flux rotorique de la MAS …… 44
Figure II.22 Courant PV …….. 44
Figure II.23 Courant de phase de la MAS ……... 44
Figure II.24 Tension du bus continu …… 45
Figure II.25 Débit d'eau …….. 45
Figure II.26 Puissance PV ……... 45
Figure II.27 Niveau d'eau …… 45
Figure III.1 Allure de Cpen fonction de λ pour différentes valeurs de β …… 50
Figure III.2 Allure de la puissance P …….. 50
Figure III.3 Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park ……... 51
Figure III.4 Circuit équivalent de MSAP –convention moteur ……... 53
Figure III.5 Schéma d'un redresseur ……... 54
Figure III.6 Schéma électrique de bus continu …… 54
Figure III.7 Onduleur triphasé à deux niveaux …… 55
Figure III.8 L'allure de la puissance en fonction de la vitesse mécanique pour une déférente variable de vent ……. 57
Figure III.9 Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse …… 57

Figure III.10 Découplage par compensation …….. 60
Figure III.11 Commander découplée …….. 60
Figure III.12 Représentation de l'ensemble onduleur –MAS ……. 61
Figure III.13 a) Principe de la MLI sinus triangle et b) signaux de commande de l'onduleur ……... 63
Figure III.14 Tension de sortie simple de l'onduleur avec r=0.8, m=9 …….. 63
Figure III.15 Profil du vent ……. 64
Figure III.16 Vitesse mécanique de la MAS …….. 64
Figure III.17 Puissance active de la MSAP …… 64
Figure III.18 Puissance active de la MAS …….. 64
Figure III.19 Couple électromagnétique de la MSAP …… 64
Figure III.20 Couple électromagnétique de la MAS …….. 64
Figure III.21 Tension du bus continue …… 65
Figure III.22 Débit d'eau …… 65
Figure III.23 Puissance de la pompe …… 65
Figure III.24 Niveau d'eau …….. 65
Figure IV.1 Schéma synoptique du système de pompage global …… 68
Figure IV.2 Réservoir de stockage d'eau …… 73
Figure IV.3 Algorithme de la gestion d'énergie hybride …… 73
Figure IV.4 Profil du vent …… 74
Figure IV.5 Evolution de l'éclairement ……74
Figure IV.6 Vitesse mécanique de la MSAP ……75
Figure IV.7 Vitesse mécanique de la MAS …… 75
Figure IV.8 Vitesse mécanique de référence ……75
Figure IV.9 Conditions hybrides ……..75
Figure IV.10 Puissance de la MSAP ……75
Figure IV.11 Puissance de la MAS ……..75
Figure IV.12 Couple de la MSAP ……76
Figure IV.13 Couple de la MAS ……..76
Figure IV.14 Courant quadrature de la MSAP ……76
Figure IV.15 Courant de phase de la MSAP ……76
Figure IV.16 Courant rotorique de la MAS ……76
Figure IV.17 Courant de phase rotorique ……76
Figure IV.18 Flux rotorique ……77
Figure IV.19 Tension du bus continu ……..77
Figure IV.20 Puissance de la pompe ……77
Figure IV.21 Débit d'eau ……77
Figure IV.22 Niveau d'eau de réservoir ……..77

Table des matières

Table des matières

Introduction générale 1
Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes hybrides d'énergies
Introduction ……..5
I.1 Systèmes hybrides d'énergie ……....6
I.1.1 définition ……....6
I.1.2 Importance de l'hybridation ……6
I.1.3 Applications des systèmes hybrides à énergies renouvelables ……7
I.1.4 État de l'art sur les systèmes hybrides à énergies renouvelables ……..7
I.1.4.1 Descriptions des composantes du système hybride
photovoltaïque-éolien ……8
I.1.5 Combinaison des SHER ……....10
I.1.6 Avantages et inconvénients d'un système hybride ……....11
I.1.7 Classifications des systèmes d'énergies hybrides ……13
I.1.7.1 Source d'énergie classique ……13
I.1.7.2 Dispositif de stockage ……...13
I.1.7.3 Régime de fonctionnement ……..13
I.1.7.3a Système d'énergie hybride autonome ……13
I.1.7.3b Système d'énergie hybride connecté au réseau ……..14
I.1.7.4 Gamme de puissance ……....14
I.1.8 Configurations de bus dans les systèmes hybrides ……..14
I.1.8.1 Architecture à bus DC ……14
I.1.8.2 Architecture à bus AC ……...15
I.1.8.3 Architecture mixte ……....16
I.2 Conclusion ……...17
Chapitre II : Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque
II.1 Introduction ….....19
II.2 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à deux diodes (GPV)...19
II.2.1 Modèle électrique d'un champ photovoltaïque à deux diodes ……19
II.2.2 Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à deux diodes ……..19
II.2.3 Résultat de simulation d'un module PV à une seule diode ……..21
II.2.4 Influence du branchement série parallèle sur les caractéristiques
I(V) et P(V) ……21
II.2.4.1 Influence de l'éclairement ……22
II.2.4.2 Influence de la température ……23
II.3 Modélisation d'un convertisseur continu-continu (Hacheur DC-DC) …….23
II.3.1 Convertisseur Boost (Hacheur survolteur) ……24
II.4 Commande de recherche du point de puissance maximale ……...25
II.4.1 Algorithme Perturbation et Observation (P&O) ……26
II.4.2 Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT ……..27
II.5 Modélisation du groupe moteur-pompe ……29
II.5.1 Modélisation du moteur asynchrone ……..29
II.5.1.1 Modèle mathématique de la machine asynchrone ……...29
II.5.2 Modélisation diphasée dans le repère de Park ……31
II.5.2.1 Introduction ……..31
II.5.2.2 Modèle triphasé d'une transformation de Park ……32
II.5.2.3 Application de la transformée de Park au modèle triphasé ……..33
II.5.2.4 Choix du repère ……37
II.6 Commande de la chaine motopompe ……37

II.6.1 Définition ……37
II.6.2 Différentes méthodes de la commande vectorielle ……38
II.6.2.1 Commande vectorielle directe ……38
II.6.2.2 Commande vectorielle indirecte ……..38
II.6.3 Principe de la commande vectorielle ……..39
II.7 Résultats de simulation ……..43
II.7.1 Interprétation ……..45
II.8 Conclusion ……....46
Chapitre III : Modélisation et commande d'un système de pompage éolien
III.1 Introduction ……..48
III.2 Modélisation des composants du système de pompage éolien ……48
III.2.1 Modélisation de la vitesse du vent ……48
III.2.2 Modélisation de la turbine éolienne ……..48
III.2.3 Modèle du multiplicateur de vitesse ……49
III.2.4 Modélisation de la machine synchrone à aiment permanents MSAP …...50
III.2.5 Modélisation du redresseur ……...54
III.2.6 Modélisation du bus continu ……54
III.2.7 Modélisation de l'onduleur de tension ……..55
III.3 Méthode de recherche du point maximum de puissance ……..56
III.3.1 Résultats de simulation ……..57
III.3.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse ……...57
III.3.3 Commande vectorielle de MSAP alimentée en tension ……58
III.3.3.1 Principe de la commande vectorielle ……..58
III.3.3.2 Découplage ……..58
III.3.3.2.1 Découplage par compensation ……..59
III.3.4 Modélisation de l'onduleur à deux niveau ……..60
III.3.4.1 Définition ……60
III.3.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé de tension à deux niveau ……61
III.3.4.3 Résultats de simulation ……63
III.4 Résultats de simulation …….....63
III.5 Conclusion ……66
Chapitre IV : Modélisation et commande d'un système de pompage hybride
IV.1 Introduction ……68
IV.2 Modèle globale du système ……68
IV.2.1 Etapes de dimensionnement d'un système de pompage ……68
IV.2.2 Analyse des besoins et des conditions d'exploitations ….....69
IV.2.2.1 Estimations des besoins en eau et dimensionnement de la pompe ……...70
IV.3 Dimensionnement et modélisation du réservoir de stockage d'eau ……...72
IV.3.1 Dimensionnement du réservoir ……...……72
IV.3.2 Modélisation du réservoir ……...……74
IV.4 Résultats de simulation ……..74
IV.5 Conclusion ……78
Conclusion générale
Conclusion générale ……...……80
Référence bibliographique
Référence bibliographique ……82
Annexe
Annexe A …….....89
Annexe B ……...……91

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant quels que soient les cas de figures envisagés.

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles et fissiles: le gaz à effet de serre.

Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables.

Ces deux énergies ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

Ainsi cette complémentarité d'énergie est accompagnée par un système de stockage assuré par des batteries au plomb, pour cela le dimensionnement de stockage optimale basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système et la charge de l'utilisation.

Parmi les nombreuses solutions de rechange, le photovoltaïque et l'énergie éolienne ont été considérés comme prometteuses pour répondre à la demande croissante pour l'énergie. Les sources d'énergie éoliennes et photovoltaïques sont inépuisables, les processus de conversion sont sans pollution, et leur disponibilité est gratuite. Pour les systèmes à distance tels que les relais de télécommunication en plein désert, les Stations terrestres de satellites, ou aux sites isolés qui sont loin d'un système d'énergie conventionnelle, les systèmes hybrides ont été considérés comme des sources alternatives attrayantes et privilégiées.

Pour les applications autonomes, le coût de stockage représente encore la principale contrainte économique. Combinant à la fois l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque conduirait à réduire au minimum l'exigence de stockage, et donc le coût global du système.

La variabilité dans la forme d'énergie disponible dans le système éolien - PV, exige de choisir une meilleure taille du banc de batteries et du générateur PV pour que le système satisfaire la demande de la charge à toute heure de l'année. C'est dans cette problématique que se situe ce mémoire : étudier et optimiser un système de pompage hybride éolien-photovoltaïque totalement autonome.

Dans ce mémoire, on va présenter le dimensionnent (modélisation et commande) d'un système hybride (photovoltaïque-éolien) de pompage d'eau. Notre travail consiste 4 chapitre comme suit:

- Introduction générale
- Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes hybrides d'énergies
- Chapitre II : Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque
- Chapitre III : Modélisation et commande d'un système de pompage éolienne
- Chapitre IV : Modélisation et commande d'un système de pompage hybride
- Conclusion générale

Une introduction générale de la thèse étudiée au début de ce mémoire.

Le 1er chapitre est consacré à la présentation d'état de l'art des systèmes hybrides d'énergie (définition, classification, applications …).

Le 2eme chapitre consiste la modélisation et la commande du système de pompage photovoltaïque ainsi que tous les composants de ce système (GPV, convertisseur ...) ainsi que les résultats de la simulation.

Le 3eme chapitre consiste la modélisation et la commande du système de pompage éolien ainsi que tous les composants de ce système (turbine, onduleur ...) ainsi que les résultats de la simulation.

Le 4eme chapitre consiste la modélisation et la commande du système de pompage hybride (photovoltaïque-éolien) ainsi que les résultats de la simulation.

Une conclusion générale de notre travail est présentée à la fin de ce mémoire.

Chapitre I :

Etat de l’art sur les systèmes d’énergie hybrides

I. Introduction

Aujourd'hui, plus de 85% [1] d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique [2]. Les énergies servent pour de nombreux usages comme les transports, le chauffage, l'industrie, l'éclairage... La consommation d'énergie a augmenté fortement ces dernières années (+35% entre 1973 et 2000). [5] La limitation de la quantité de ces réserves, la crise successive du pétrole en 1973 et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et a développer de nouvelles sources d'approvisionnement.

L'énergie est généralement définie comme la capacité d'un système à réaliser un travail. La quantité d'énergie que possède un système représente la quantité de travail qu'il peut réaliser.

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie d'origine naturelle issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre. Elles offrent des nombreux avantages, tel que inépuisables, gratuites et sont compatibles avec certain respect environnemental.

Cependant une des propriétés qui limite son utilisation, est due à son aspect stochastique et les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières et ne sont pas forcément corrélées avec ces ressources. Pour les régions isolées, la solution à retenir est l'assemblage de plusieurs sources d'énergie, afin de constituer les systèmes d'énergies hybrides.

Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération de l'électricité et de la chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire.

- Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire chaleur ou électricité.
- La biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).
- L'éolienne utilise l'énergie du vent de manière mécanique.
- La géothermie est l'utilisation directe des gradients des températures terrestre ou de sources chaudes.

I.1 Système hybride d'énergie (SHE)

I.1.1 Définition

Un Système d'Energie Hybride (SEH) est une installation qui associe différentes technologies de la génération d'énergies électriques : sources renouvelables, sources conventionnelles, dans le but de réunir les avantages de chaque système et offrir un rendement énergétique global plus élevé.

D'après [23], de nos jours, les systèmes hybrides d'énergie associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs au diesel, et au moins une source d'énergie renouvelable.

Les systèmes hybrides d'énergie sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les systèmes hybrides à énergies renouvelables sont fiables, sans pollution et permettent de répondre à la demande d'énergie sur de longues périodes.

I.1.2 Importance de l'hybridation

Aujourd' hui, il est devenu impératif pour les chercheurs de trouver en dehors des énergies fossiles et fissiles d'autres sources d'énergie propre et renouvelable. Il s'agit entre autre des énergies provenant des sources comme le soleil, le vent, la géothermie, la biomasse et l'océan. Ces sources d'énergie propre et durable sont favorables à l'environnement contrairement aux sources d'énergie conventionnelles. Toutefois, ces sources d'énergies renouvelables varient en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année. La nature aléatoire de ces sources a conduit les chercheurs à se tourner vers l'hybridation, c'est-à-dire la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables. L'hybridation apporte donc au système une disponibilité accrue et un approvisionnement constant des charges en énergie.

Cependant, ces solutions exigent un dimensionnement laborieux préalable basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation en amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval.

Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle.

Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante, ce qui exige l'utilisation d'un système de stockage.

I.1.3 Applications des systèmes hybrides à énergies renouvelables

L'hybridation des systèmes à bases d'énergies renouvelable est utilisée dans divers domaines de la vie quotidienne afin de produire l'électricité qui est nécessaire dans notre vie, figure(I.1). On cite quelque domaine : l'éclairage public, l'industrie, le pompage d'eau (source de vie) pour utilisations domestique, agricole …etc.

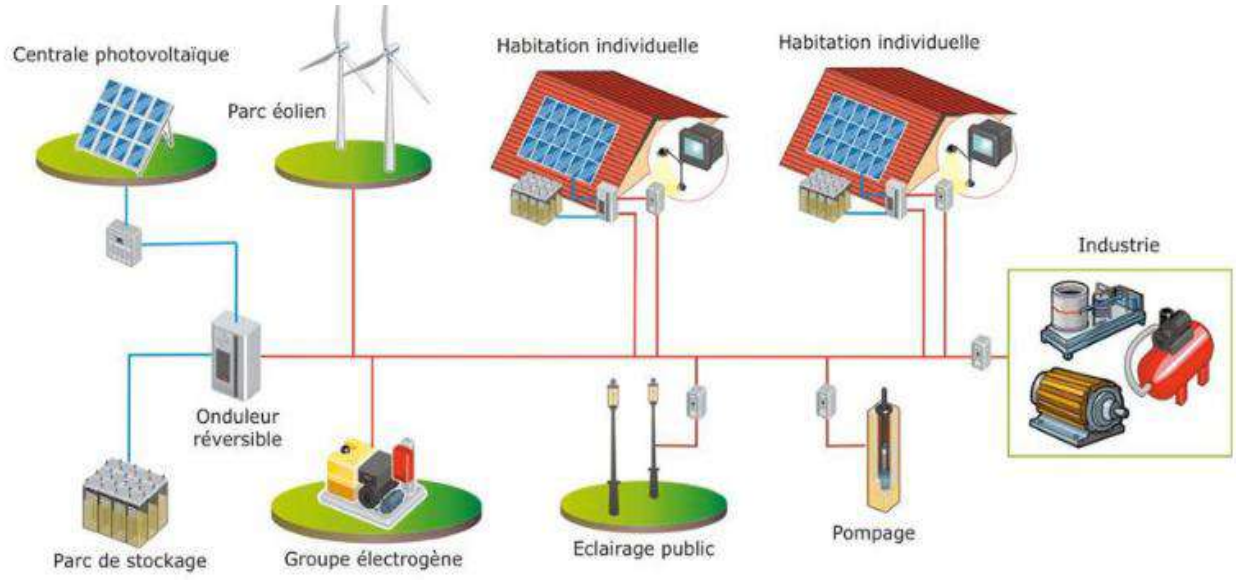


Figure (I.1) Principaux domaine d'application des SHER

I.1.4 État de l'art sur les systèmes hybrides à énergies renouvelables

D'après José L. et collaborateurs [24], les systèmes autonomes hybrides à énergies renouvelables sont généralement plus adaptés que les systèmes qui ont une seule source d'énergie pour l'approvisionnement en électricité des applications hors réseau, en particulier dans les zones isolées et difficiles d'accès. Ces types de systèmes démontrent une plus grande fiabilité que les systèmes simples photovoltaïque (PV) ou éolien. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante, ce qui exige l'utilisation d'un système de stockage. Les systèmes hybrides les plus utilisés sont les combinaisons PV -Éolien-Batterie et PV-Diesel-Batterie.

En plus des sources d'énergie renouvelable, un système hybride peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif(CA), un système à courant continu(CC), un système de stockage, des convertisseurs de puissance, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision.

Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution [1].

Dans notre système, présenté dans la figure (I.2), les deux chaînes de production se composent de :

- Panneaux photovoltaïques connectés au bus continu à travers des convertisseurs DC/DC à pilotage MPPT.
- Une éolienne reliée au bus continu à Travers un redresseur à diodes.

Le dispositif de stockage de l'énergie, composé des batteries électrochimiques, est relié au bus continu à l'intermédiaire d'un contrôleur de charge / décharge. Le bus continu est relié de son coté aux charges alternatives via un onduleur.

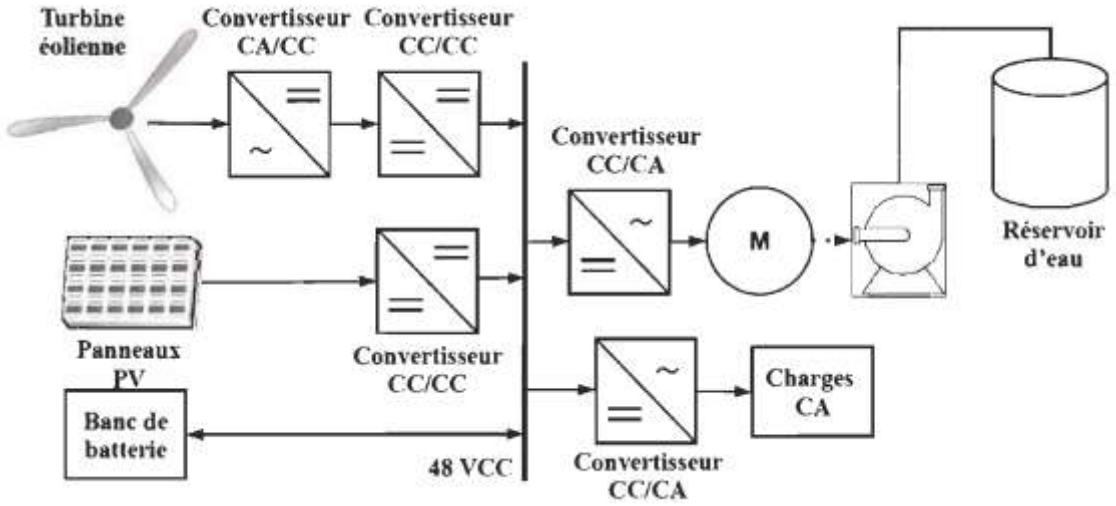


Figure (I.2) : Système autonome hybride photovoltaïque-éolien avec stockage électrochimique pour le pompage d'eau

I.1.4.1 Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien

- **Générateur photovoltaïque**

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques. Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire.

Elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit. La cellule photovoltaïque est donc un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie.

- **Générateur éolien**

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique.

La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique peut être identifiée selon le générateur électrique utilisé : générateur asynchrone, générateur synchrone, générateur à courant continu, générateur à structures spéciales.

- **Système de stockage**

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme.

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries (stockage électrochimique).

Les batteries sont, d'habitude, du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène.

Le stockage de l'eau est adopté an niveau des réservoirs. Cette méthode est pratique et peu coûteuse par rapport au stockage électrochimique dans les batteries.

- **Convertisseurs**

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Les redresseurs réalisent la conversion CA en CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement.

Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont

autonomes lorsqu' ils imposent leur propre fréquence à la charge. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

Les hacheurs ou convertisseur CC/CC permet de modifier la valeur de la tension (moyenne) d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

Il existe 3 types d'hacheur : convertisseur Buck (abaisseur de tension), convertisseur Boost (survolteur de tension), convertisseur Buck-Boost (abaisseur-survolteur).

- **Charges**

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive.

Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

- **Pompe**

Une pompe est une machine capable de transformer l'énergie mécanique en énergie hydraulique.

Il y a plusieurs types de pompes disponibles pour les systèmes de pompage. On dénombre principalement deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétrique.

I.1.5 Combinaison des SHER

Il existe plusieurs structures ou dispositions de systèmes hybrides à énergies renouvelables. L'électronique de puissance est très importante dans un système hybride à énergies renouvelables. Un système hybride à énergies renouvelables combine deux ou plusieurs technologies d'énergies renouvelables comme les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les petites turbines hydroélectriques, etc. En outre, il comprend des équipements d'électronique de puissance et des systèmes de stockage.

Plusieurs sources peuvent être exploitées dans les SEH. Parmis ces sources on peut distinguer les systèmes: photovoltaïque (PV), éolien, diesel, hydraulique, l'énergie contenue dans l'hydrogène (piles à combustible), les systèmes de stockage d'énergie. Ces systèmes peuvent aussi inclure d'autres composants comme les convertisseurs statiques, la charge principale et des charges auxiliaires. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. La figure (I.3) représente un schéma général d'un système hybride.

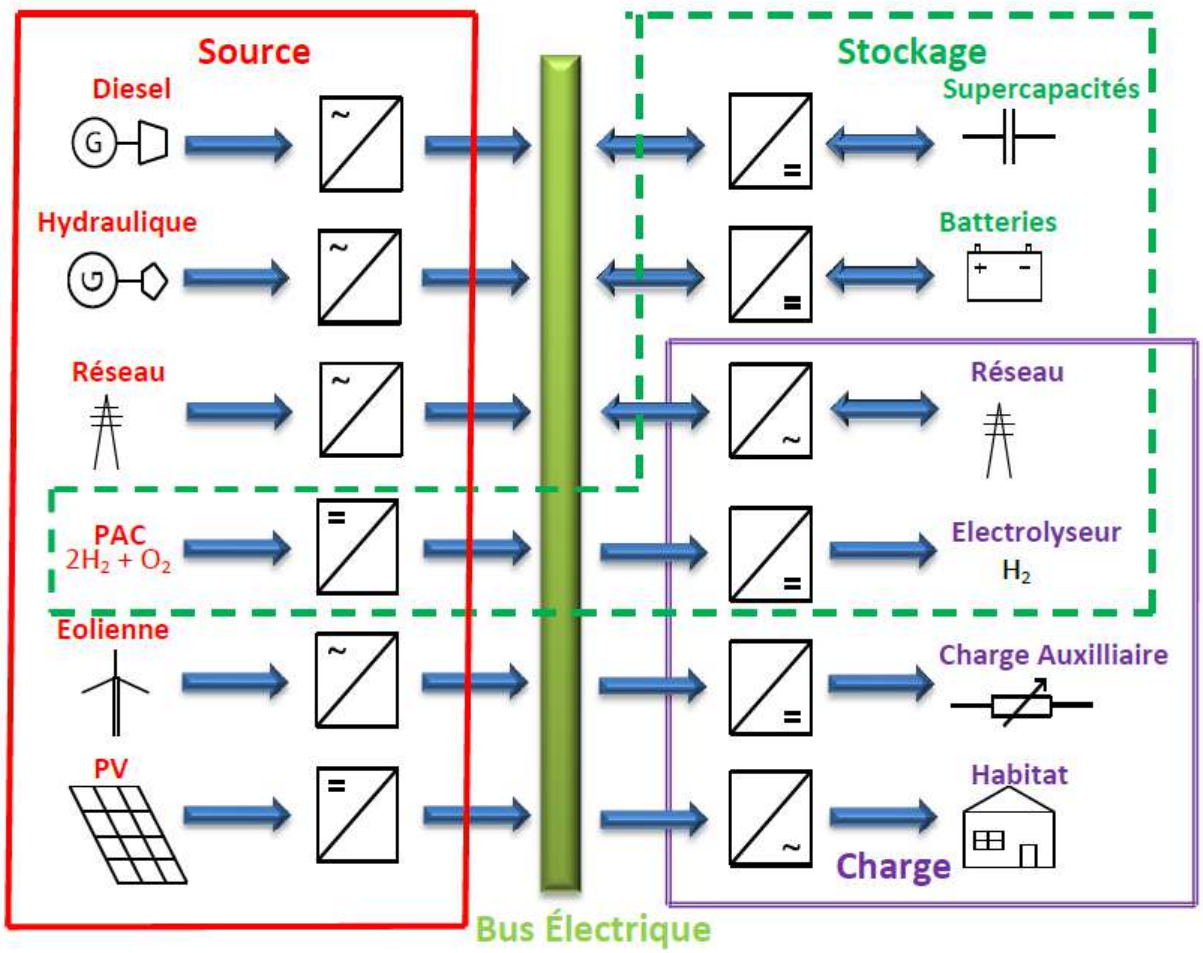


Figure (I.3) Schéma général d'un système hybride d'énergie

I.1.6 Avantages et inconvénient d'un système hybride :

L'intérêt essentiel d'utiliser les technologies d'hybridation est d'assurer la continuité de la production d'énergie demandée par la charge sans interruption et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable [05]. De plus, les technologies d'hybridation permettent de :

- Lisser la puissance délivrée par les sources d'énergies: il s'agit d'être capable, de délivrer régulièrement des puissances supérieures à la puissance moyenne du générateur électrique ou de récupérer de l'énergie pour recharger la source de puissance.

- Palier pendant une durée limitée à l'incapacité partielle ou totale de la source d'énergie. Par exemple, si on prend le système hybride PV-Eolien qui est souvent utilisé, on remarque que le système PV fournit l'énergie pendant le jour où le rayonnement solaire est plus fort, par contre, le système éolien produit l'énergie dans la nuit où le vent peut souffler. De même, le vent souffle plus pendant l'hiver et l'automne et il diminue au printemps tandis que le rayonnement solaire le plus intense se situe pendant l'été. Cette complémentarité journalière et saisonnière des ressources solaires et éoliennes permet par exemple au site isolé d'avoir une disponibilité de l'énergie plus fiable [12].

Néanmoins, les technologies d'hybridation posent certains problèmes [05][12] :

- La nature stochastique des sources d'ER : la difficulté principale des SEH comportant ce type de sources est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge.

- Le problème de l'interconnexion de plusieurs sources complique le système de contrôle: les technologies d'hybridation sont très complexes comparativement à l'utilisation d'une seule source,

- Le problème de la gestion énergétique: il est nécessaire de trouver un algorithme de contrôle efficace afin d'améliorer les performances globales du système.

- La dynamique des générateurs d'ER peut causer des problèmes dans le fonctionnement des SEH : par exemple le démarrage d'une éolienne quand la vitesse du vent est élevée, dans ce cas la puissance produite par l'éolienne atteint presque instantanément la puissance nominale du générateur, en effet la production de l'énergie électrique peut connaitre des changements rapides, il en résulte des

problèmes de qualité d'énergie (variations de tension et de fréquence) qui peuvent détruire des appareils électroniques sensibles et même l'arrêt complet du système.

- La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie des composants individuels.

I.1.7 Classifications des systèmes d'énergies hybrides

On peut distinguer plusieurs classifications des SEH. Cependant le choix du type des SEH dépend particulièrement des endroits d'installation et des objectifs d'utilisations [05]. Nous représentons ci-après les classifications les plus répandues [11] :

I.1.7.1 Source d'énergie classique

Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet une centrale tout entière.

I.1.7.2 Dispositif de stockage

La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc.

I.1.7.3 Régime du fonctionnement

Selon le régime de fonctionnement, les SEH peuvent être divisés en deux grandes familles :

a) Système d'énergie hybride autonome :

Autonome parce qu'ils génèrent de l'énergie sans connexion ou sans avoir besoin de l'assistance du réseau électrique. La production d'énergie est optimisée par l'emploi de plusieurs sources : solaire photovoltaïque, éolien …etc. Souvent, utilisés pour répondre aux besoins des sites qui sont difficilement accessibles ou n'ont pas d'accès à un réseau électrique (par exemple : refuges de montagne, iles, villages isolés…).

b) Système d'énergie hybride connectes au réseau :

L'interface entre le SEH et le réseau électrique peut être constituée par le convertisseur statique, l'onduleur pour assurer la conversion de la puissance continue/alternative (DC/AC). L'énergie produite par le SEH est consommée immédiatement. En effet, le surplus d'énergie est injecté vers le réseau, qui agit comme un système de stockage d'énergie. Par conséquence pour ce type de système, il n'est pas exigé l'utilisation de système de stockage puisqu'en cas d'incapacité du SEH pour assurer la demande de la charge, le réseau intervient pour garantir l'énergie nécessaire.

I.1.7.4 Gamme de la puissance

La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts jusqu'à quelques mégawatts.

Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de faible puissance (< 5 kW) généralement alimentent des petites maisons. Par contre, les systèmes plus grands (puissance > 500 kW) sont conçus pour être connectés à de grands réseaux. Le champ d'application des SEH reste très large. Néanmoins, on peut réaliser une classification selon la gamme de puissance présentée au tableau (I.1)

Gamme de puissance	Utilisation
Faible : inférieur à 5 kW	• Système autonome : petite maison, pompage d'eau
Moyenne : entre 10 à 250 kW	• Alimentation d'un village isolé, des zones rurales…
Grande : supérieure à 500 kW	• Grands réseaux isolés.

Tableau (I.1) Classification des SEH par gamme de puissance **[5]**

I.1.8 Configurations de bus dans les systèmes hybrides

Selon le bus électrique dans la figure (I.3), nous distinguons trois architectures ou configurations de bus dans les systèmes hybrides :

I.1.8.1 Architecture à bus DC :

La figure (I.4) représente la structure à bus DC d'un système hybride [12]. Dans cette architecture, l'énergie fournie par chaque source du système alimente un bus continu DC à travers des convertisseurs DC/DC ou AC/DC. Ce type d'assemblage est adapté pour les sites

isolés, à charge continue ou alternative, reliée au bus DC via un onduleur. L'avantage de cette topologie est la simplicité de la commande par rapport aux autres configurations [05].

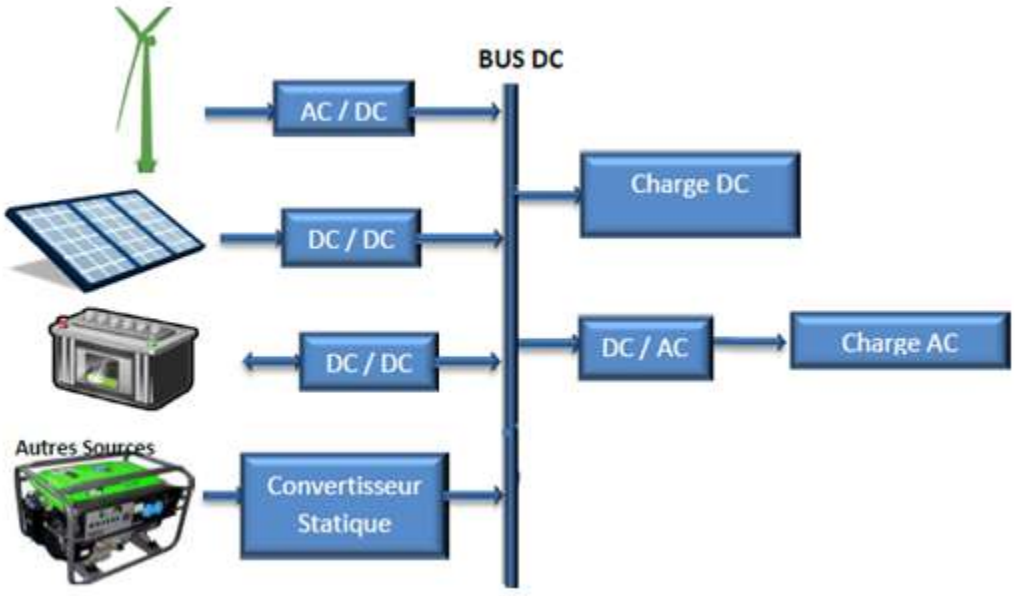


Figure (I.4) Structure à bus DC d'un système hybride

I.1.8.2 Architecture à bus AC :

Dans la topologie à bus AC, toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs comme montrée dans la figure (I.5) [12]. Cette configuration offre des performances supérieures par rapport à la configuration précédente, puisque un découplage de différentes sources de production permettrait à celles-ci d'agir de façon assez indépendante les unes des autres. Cependant, le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause de l'utilisation des convertisseurs statiques et ce type d'association complique le système de commande. L'architecture à bus AC est plus adaptée à une génération distribuée (c.-à-d raccordée au réseau électrique) [13].

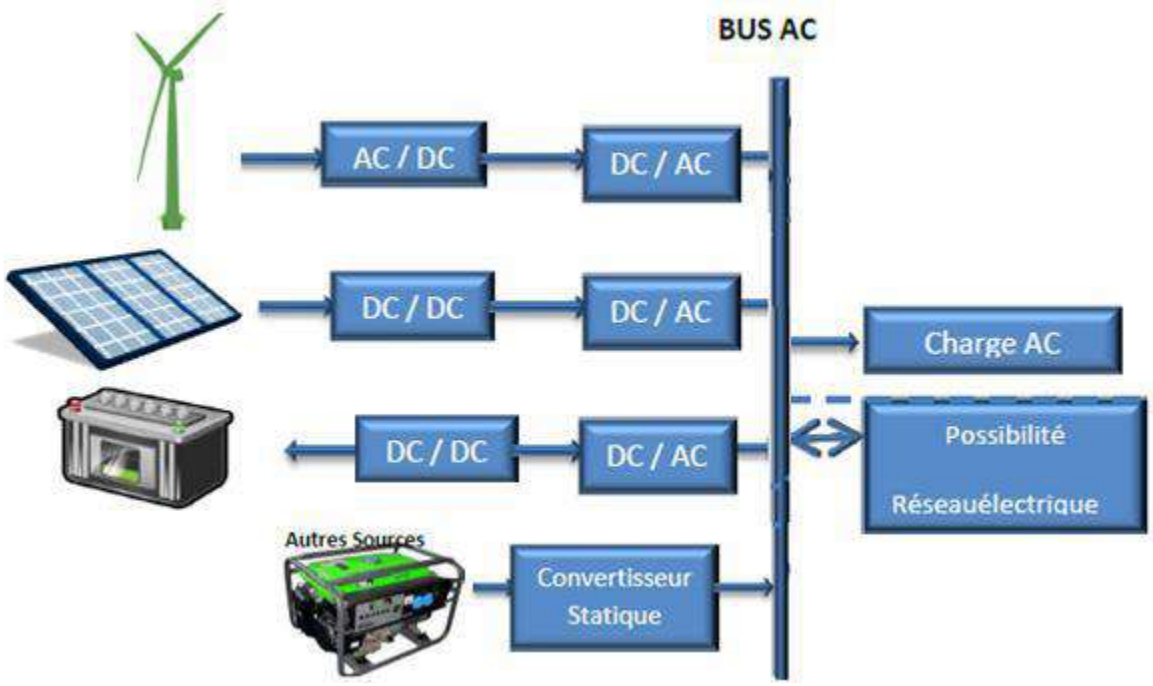


Figure (I.5) Structure à bus AC d'un système hybride

I.1.8.3 Architecture mixte (DC&AC)

La figure(I.6) représente la structure à bus mixte (DC&AC) d'un système hybride [12]. Dans cette configuration, les sources d'énergie peuvent alimenter une charge alternative AC ou une charge continue DC par un convertisseur bidirectionnel qui réalise la conversion continue-alternative et vice versa.

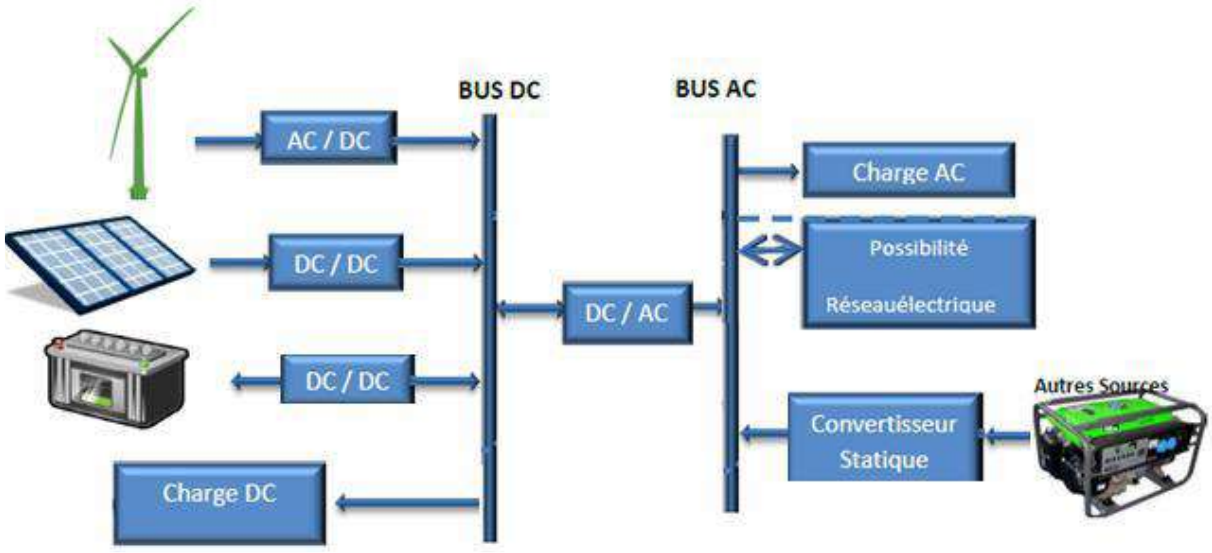


Figure (I.6) Structure à bus mixte **(**DC& AC) d'un système hybride

I.2 Conclusion

Ce chapitre présente d'une part les systèmes hybrides d'énérgies (applications,classification, avantages et incovénients ...etc.) ainsi que leurs états de l'art et l'importance de l'hybridation pour la production de l'énergie électrique afin de satisfaire les besions de la vie humaine.

Dans le chapitre suivant ,on va étudier et modéliser le système de pompage photovoltaïque.

Chapitre II :

Modélisation et commande d’un système de pompage photovoltaïque

II.1 Introduction

On présente dans ce chapitre le système de pompage photovoltaïque, ainsi que la modélisation de ces composants.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié, on doit connaitre alors les critères d'entrées (données de base) les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements.

II.2 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à deux diodes (GPV)

II.2.1 Modèle électrique d'un champ photovoltaïque à deux diodes

Les notations suivantes expliquent le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque :

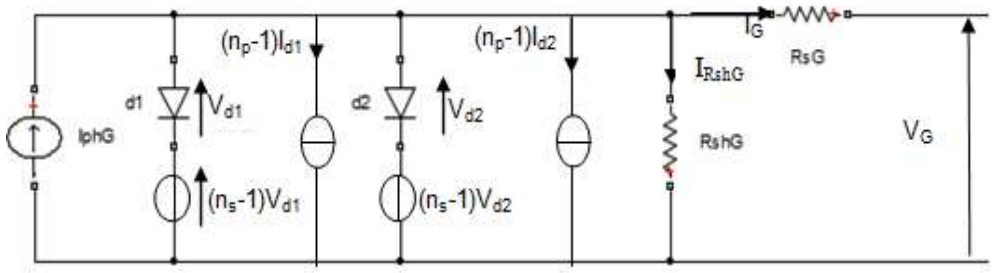


Figure (II.1): Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque. **[49]**

II.2.2 Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à deux diodes

Nous adoptons dans ce qui suit, les notations suivantes

$$R_{sh,G} = \frac{n_s}{n_p} R_{sh} + \frac{n_s}{n_p} R_{sh}(\alpha - 1) e^{-5.5 * G/Gref} \qquad \text{(II.1)}$$

Alors on obtient, une fonction implicite de la forme :

$$I_G = I_{ph,G} - I_{s1}\left[exp\left(\frac{q(V_G + R_{s,G}.I_G)}{\gamma_1.n_s.k.T_C}\right) - 1\right] - I_{s2}\left[exp\left(\frac{q(V_G + R_{s,G}.I_G)}{\gamma_2.n_s.k.T_C}\right) - 1\right] - \frac{V_G + R_{s,G}.I_G}{R_{Sh,G}} \qquad \text{(II.2)}$$

- **Paramètre d'un Générateur photovoltaïque**

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes:

- **Courant de court-circuit (I_{SC})**

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (nulle et infinie), ce courant se confond avec la photo courant dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.2).

Dans ce cas on peut écrire $I_{SC} \approx I_{PH}$ du fait que $R_S << R_{sh}$.

- **Tension de circuit-ouvert (V_{CO})**

C'est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nul Il est exprimé comme suit :

$$V_{CO} = V_t * ln\left({I_{Ph}}/{I_0} + 1\right) \quad \text{(II.3)}$$

Avec :$V_t = \frac{\alpha.K.T}{e}$ qui représente la tension thermique et I_0 le courant de saturation de la diode D.

- **facteur de forme**

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (Fill factor), c'est le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule $P_{max}(\ V_{opt}, V_{opt})$ et le produit du courant de court-circuit I_{SC} par la tension de circuit-ouvert V_{CO} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique.

La qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; il diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites et$R_S$et R_{sh}.

Il exprime comme suite:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC} * V_{CO}} \quad \text{(II.4)}$$

- **Rendement énergétique**

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par générateur $P_{max}(\ V_{opt}, V_{opt})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par:

$$\eta = \frac{P_{max}}{\text{Pinc}} \quad \text{(II.5)}$$

Avec : Pince est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles, ainsi ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Les principales pertes sont dues à :

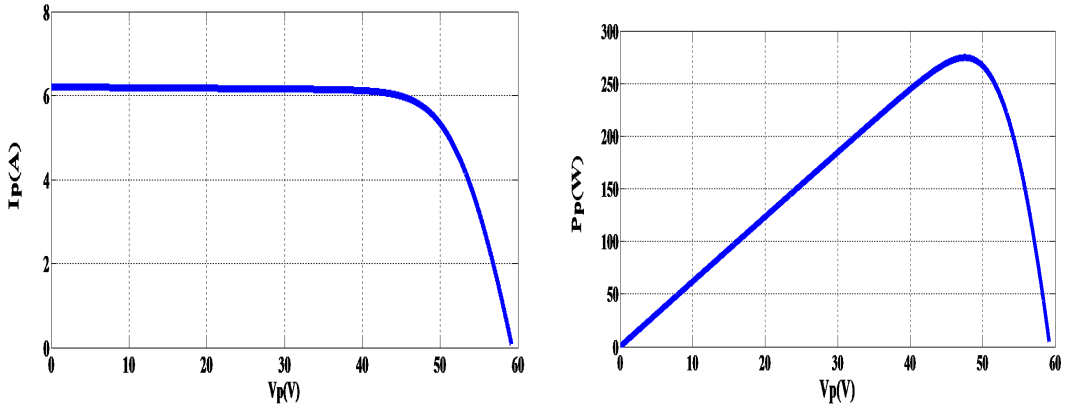
- une absorption incomplète des photons,
- les photons très énergétiques voient la part d'énergie supérieure perdue en chaleur,

La collecte des paires d'électrons trous n'est pas optimum, certaines paires d'électrons trous se recombinent avant d'atteindre la jonction.

- la grille en face avant ne favorise pas la transmission optique maximale
- du rayonnement solaire. Sa forme géométrique est cependant très optimisée par les constructeurs. Chez certains la grille est faite par laser pour en diminuer la surface.
- pertes dues à la résistance série (résistance de contact des deux grilles). **[53]**

II.2.3 Résultat de simulation d'un module PV à une seule diode

L'étude basé sur un module photovoltaïque de type MSX-83. Le générateur est composé de 96 cellules séries, les résultats de simulation en MATLAB/Simulink en utilisant les conditions standard (T=25°C et E=1000W/m2) pour R_s=0.69Ω et R_{sh}=650Ω.



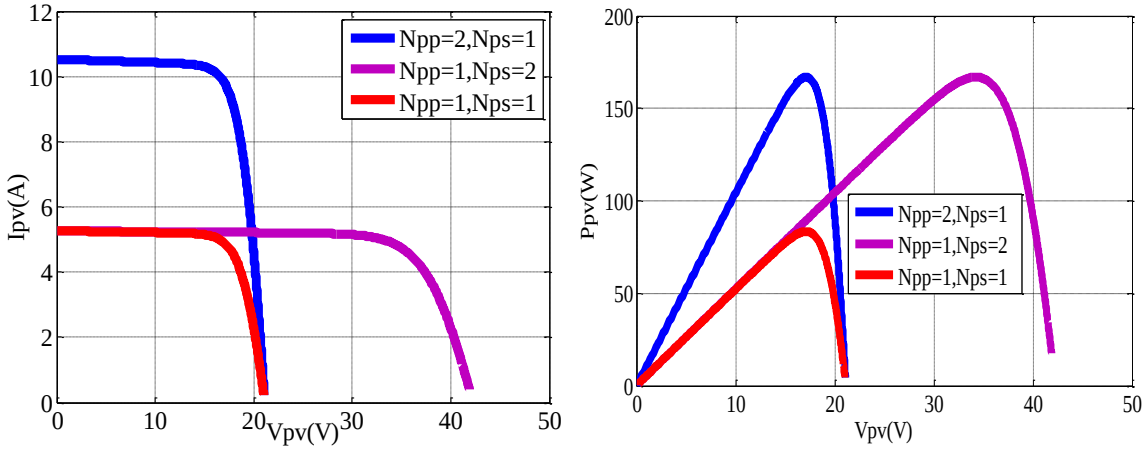
a) **b)**

Figure (II.2) : Caractéristique d'un panneau PV a) $I_{pv}(V_{pv})$ b) $P_{pv}(V_{pv})$.

II.2.4 : Influence du branchement série parallèle sur les caractéristiques I(V) et P(V)

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

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

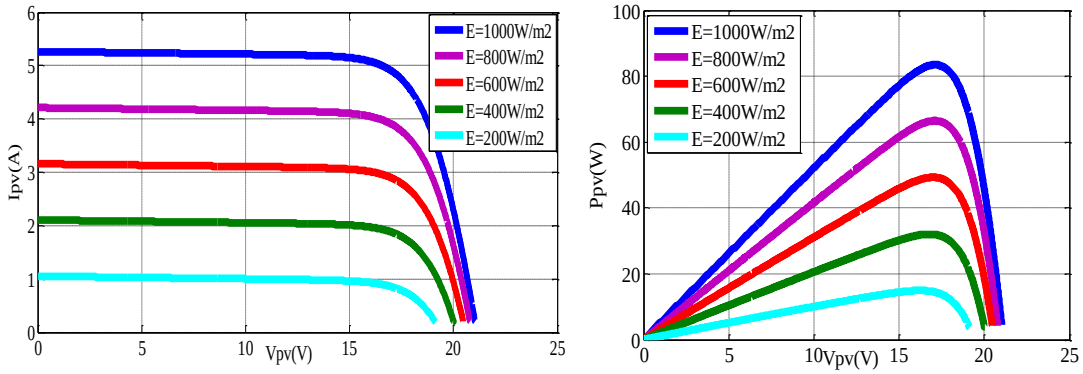


a) **b**

Figure (II.3) : Influence du branchement série parallèle a) sur la caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et b) sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

II.2.4.1 Influence de l'éclairement

On applique une température T=25°C maintenue constante et on varie l'ensoleillement (E) de 200 W/m2 jusqu'a 1000 W/m2, les résultats obtenues sont illustrés en figures (II.7).



a) **b)**

Figures (II.4) : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$.

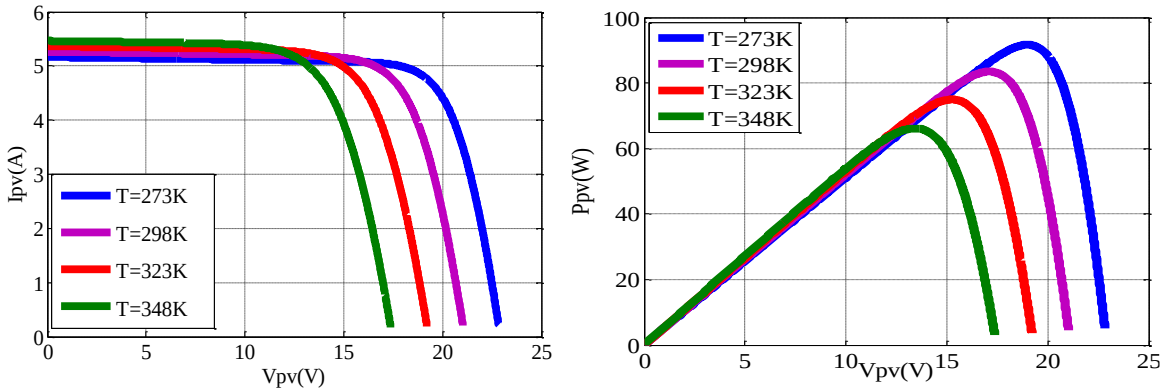
A chacune de ces valeurs de E, correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir le panneau. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert V_{CO}, suite à une chute du flux lumineux.

Illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

II.2.4.2 Influence de la température

Montre l'influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'un panneau photovoltaïque sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution

La figure (b) illustre la variation de la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(Vpv)$.



a) **b)**

Figure(II.5) : la caractéristique a)I_{PV} (V_{PV}) ;b) P_{PV} (V_{PV}) pour les différentes températures.

II.3 Modélisation d'un convertisseur continu-continu (hacheur DC-DC)

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Flyback, en demi-point et en pont complet.

Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté. **[54]**

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entrainement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- Abaisseurs (Buck);
- Elévateurs (Boost);
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

Le convertisseur utiliser dans notre simulation est de type BOOST. La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur.

II.3.1 Convertisseur Boost (hacheur survolteur)

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure(II.6), représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D). **[59]**

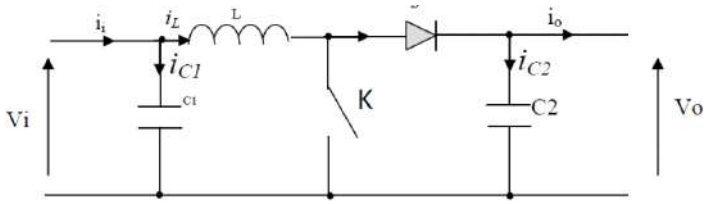


Figure (II.6) : Circuit idéal d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

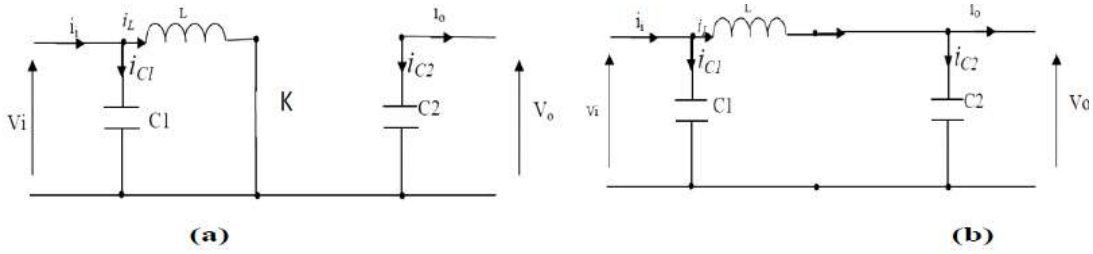


Figure (II.7) : Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K fermé ;(b) : ouvert

Pour la première période αT_S :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L(t)}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \qquad \text{(II.6)}$$

Pour la deuxième période (1-α)T_S *:*

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_1(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.7)}$$

II.4 Commande de recherche du point de puissance maximale

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. 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. La figure (II.8) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (PMAX) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants et les points qu'il restait à améliorer ont été présentée. **[51]**

Dans ce chapitre, nous élaborons la technique d'algorithme de contrôle de PPM à l'aide d'une technique P&O (perturbation & Observation).

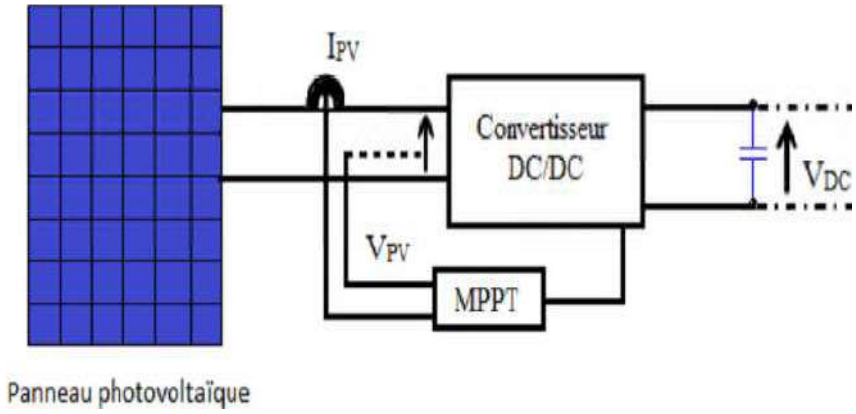


Figure (II.8) : Schéma synoptique du couplage photovoltaïque avec MPPT.

II.4.1 Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

La P&O est la méthode la plus utilisée par ce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température. Comme son nom l'indique, l'algorithme Perturbation et Observation, est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension V_{PV} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle P_{PV}(n) du panneau est supérieure à la valeur précédenteP_{PV} (n-1*)* alors on garde la même direction de la perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure (II.9), Donne L'organigramme de cet algorithme.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes. Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. **[76]**

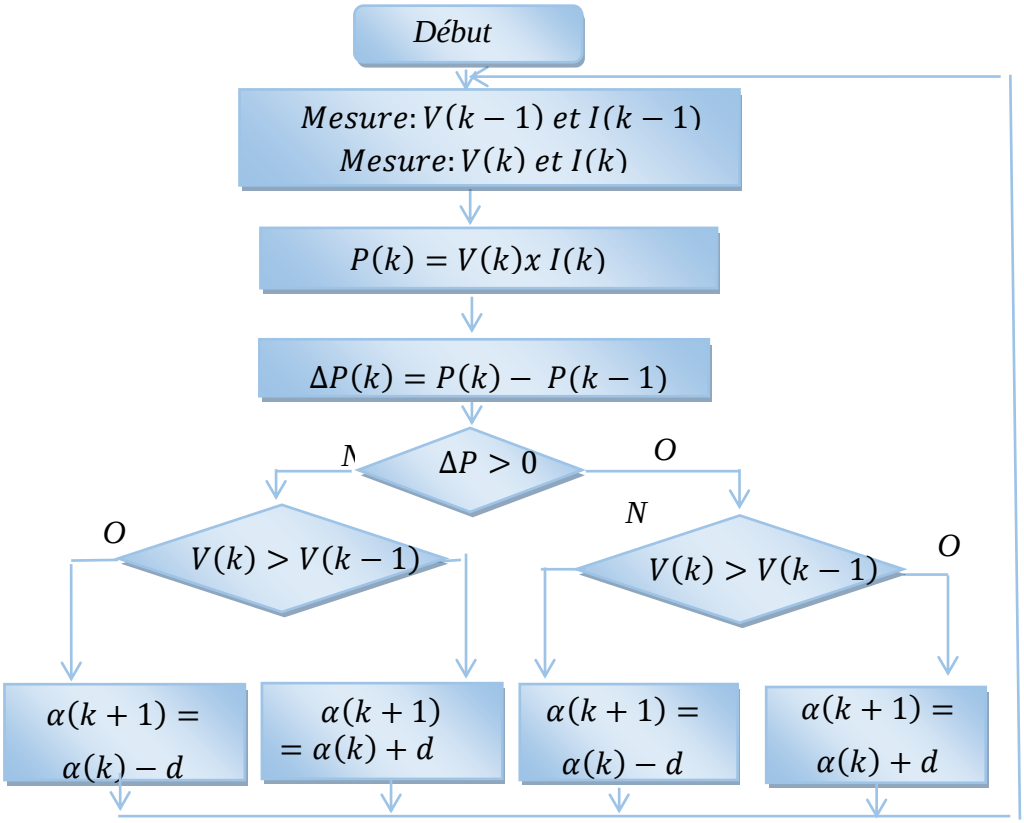
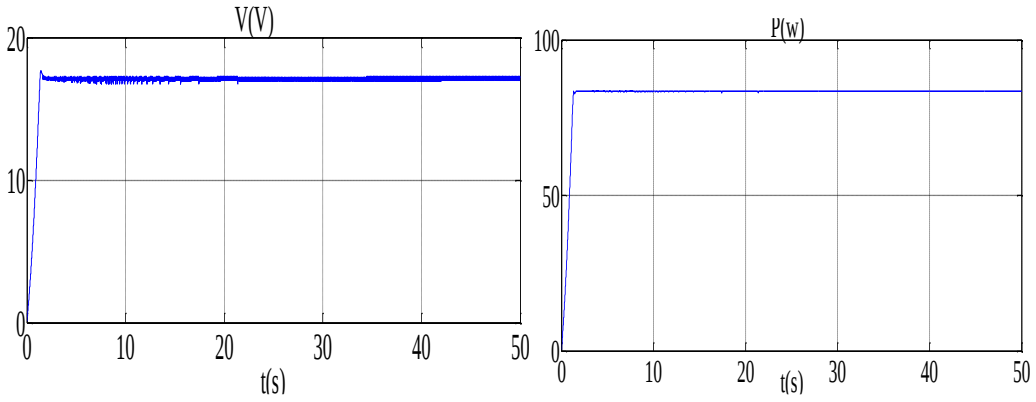


Figure (II.9) : Organigramme de l'algorithme P&O.

II.4.2 Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT

La figure suivante représente la réponse de l'algorithme P&O du fonctionnement dans des conditions standards (T=25°C, E=1000w/m)



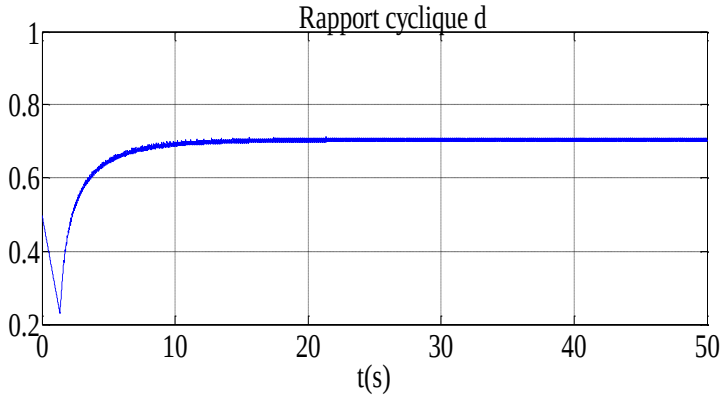
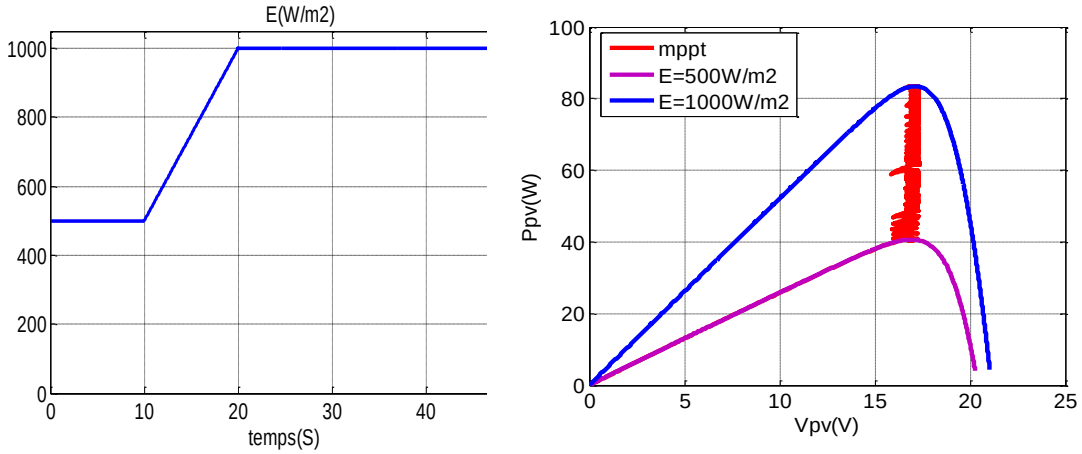


Figure (II.10): Réponse de l'Algorithme P&O lors de fonctionnement standard

Pour une température standard, on simule une augmentation de l'éclairement de 500w/m^2 à 1000 w/m^2 pendant 50 s, on refait l'expérience :



Figure(II.11): évolution du point de fonctionnement du GPV d'une augmentation de l'éclairement.

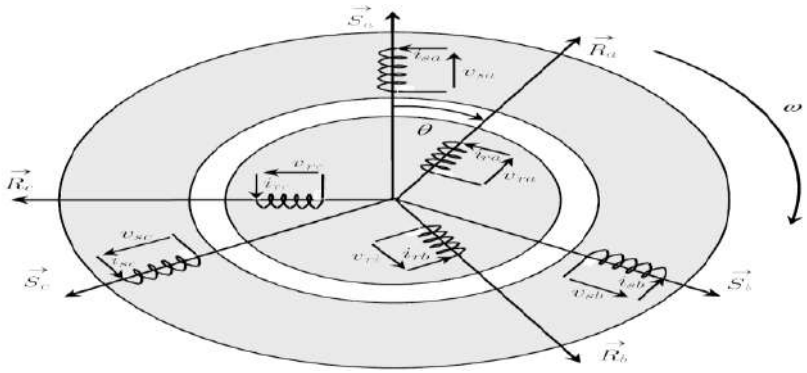
On remarque que le contrôleur P&O parvient à ajuster rapidement le rapport cyclique d de sorte que le point de puissance maximale soit atteint.

Nous avons remarqué au changement de l'éclairement, le dispositif converge vers la puissance maximal, autour du quel il va osciller, c'est à dire le GPV est perturbé a ce point, le régulateur P&O converge vers le point PPM.

II.5 Modélisation du groupe moteur-pompe

II.5.1 Modélisation du Moteur Asynchrone

La machine asynchrone est représentée à la figure (II.12) par ces six enroulements dans l'espace électrique. L'angle θ repère l'axe magnétique de la phase rotorique de référence $\overrightarrow{R_a}$ par rapport àl'axe magnétique fixe de la phase statorique.



Figure(II.12): Représentation schématique du modèle triphasé de la machine dans l'espace électrique.

Notons que θ caractérise la position du rotor (tournant) par rapport au stator (fixe), d'où l'appellation de la vitesse angulaire de rotation. **[68]**

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

II.5.1.1Modèle mathématique de la machine Asynchrone

- **Equations électriques**

En appliquant la loi d'Ohm généralisée à chaque phase, les équations de tension des trois phases statoriques et rotoriques s'écrivent pour le stator avec l'indice "s" et le rotor avec l'indice "r" comme suit :

Au stator:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.8)}$$

Ou: $[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}]$

Au rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.9)}$$

Ou: $[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}]$

➢ **Equations magnétiques**

Les hypothèses que nous avons présentées précédemment, conduisant à une matrice des inductances, qui établissent les relations linéaires entre les flux et les courants, Les équations des flux sous forme matricielle s'écrivent**. [70-71]**

Au stator:

$$\begin{bmatrix}\Phi_{sa}\\ \Phi_{sb}\\ \Phi_{sc}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}I_s & M_s & M_s\\ M_s & I_s & M_s\\ M_s & M_s & I_s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{sa}\\ i_{sb}\\ i_{sc}\end{bmatrix}+[M_{sr}]\begin{bmatrix}\mathrm{i}_{sa}\\ \mathrm{i}_{sb}\\ \mathrm{i}_{sc}\end{bmatrix} \quad \text{(II.10)}$$

Avec:

$$[M_{sr}]=\begin{bmatrix}\cos\theta & \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right)\\ \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta-\frac{4\pi}{3})\\ \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta\end{bmatrix} \quad \text{(II.11)}$$

Ou: $[\Phi_{sabc}]=[L_{ss}][i_{sabc}]+[M_{sr}][\mathrm{i}_{rabc}]$

Avec :

$$[L_{ss}]=\begin{bmatrix}I_s & M_s & M_s\\ M_s & I_s & M_s\\ M_s & M_s & I_s\end{bmatrix} \quad \text{(II.12)}$$

Au rotor:

$$\begin{bmatrix}\Phi_{ra}\\ \Phi_{rb}\\ \Phi_{rc}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}I_r & M_r & M_r\\ M_r & I_r & M_r\\ M_r & M_r & I_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{ra}\\ i_{rb}\\ i_{rc}\end{bmatrix}+[M_{sr}]\begin{bmatrix}\mathrm{i}_{sa}\\ \mathrm{i}_{sb}\\ \mathrm{i}_{sc}\end{bmatrix} \quad \text{(II.13)}$$

Ou: $[\Phi_{rabc}]=[L_{rr}][i_{rabc}]+[M_{rs}][\mathrm{i}_{sabc}]$

Avec :

$$[L_{rr}]=\begin{bmatrix}I_r & M_r & M_r\\ M_r & I_r & M_r\\ M_r & M_r & I_r\end{bmatrix} \quad \text{(II.14)}$$

M_0: représente la valeur maximale des inductances mutuelles entres phases statoriques et rotoriques.

$[L_{ss}]$**:** Matrice d'inductances statorique.

$[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotorique.

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelle stator-rotor.

Par raison de réciprocité mutuelle $[M_{rs}]=[M_{sr}]^T$

- **Equation mécanique**

Pour étudier les caractéristiques dynamiques, on introduit l'équation du mouvement suivante :$J\frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f_r\Omega$

f_r: Coefficient de frottement.

Ω: vitesse mécanique du moteur.

C_e: Couple moteur de la machine (électromagnétique).

C_r: Le couple résistant (charge).

II.5.2 Modélisation diphasée dans le repère de Park

II.5.2.1 Introduction

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques et toriques à un système cartésien d'axes, *dq*.

Dans le repère classique il y a trois axes (a_S, b_S, c_S) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine. Habituellement, l'axe *as* est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Quant au rotor, on a toujours un seul axe (*F* correspondant à la direction de l'aimantation) .

Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulements fictifs à π/2 dans l'espace et alimentés par des courants à π/2 dans le temps. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les l'axes *d* et *q*.

Pour passer du système triphasé, *abc*, au système biphasé, *dq*. **[73-74]**

II.5.2.2 Modèle triphasé d'une Transformation de Park

La transformation de Park consiste à imaginer de remplacer le repère rotorique tournant par un autre repère fictif équivalent fixe à condition de conserver la force magnétomotrice et la puissance instantanée. Pour transformer un système triphasé [abc] en un système biphasé (*d*, *q*) avec une composante homopolaire comme indiqué dans l'équation suivant : **[70-71-72]**

$$[X_{dqo}] = [P][X_{abc}]$$

Le passage inverse est donné par:

$$[X_{dqo}] = [P]^{-1}[X_{abc}]$$

Tel que:

[X] : Peut-être la vectrice tension, courant ou flux.

[P] : est la matrice de transformation directe de Park.

$[\boldsymbol{P}]^{-1}$: est la matrice de transformation inverse de Park.

Avec:

La matrice de transformation [P] est donnée par :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\psi & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\psi & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(II.15)}$$

La matrice inverse $[P]^{-1}$est donnée par :

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(II.16)}$$

X_0 : Représente la composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le neutre n'est pas branché.

II.5.2.3 Application de la transformée de Park au modèle triphasé

Le passage du modèle triphasé au modèle diphasé de Park s'effectue par l'application des transformées de Park (θ_s) et (θ_r) respectivement aux grandeurs statoriques et aux grandeurs rotoriques. Désignons par:

θ_s: Angle électrique formé par l'axe direct d et l'axe de la phase a du stator.

θ_r: Angle électrique que forment l'axe direct d et l'axe de la phase a du rotor.

α: Écart angulaire entre l'axe de la phase a du stator avec celui du rotor de la même phase Sur la figure (II.13).Les trois angles sont rigidement liés par la relation suivante dite relation d'auto pilotage : **[70-71]**

$$\theta_s = \theta_r + \alpha$$

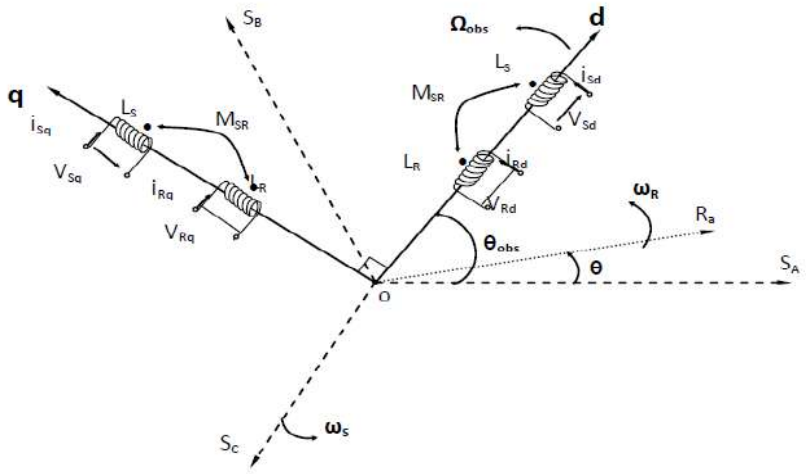


Figure (II.13) : Référentiel tournant d'axes (d– q).

- **Equations des tensions**

Il en est de même pour les équations des tensions au stator et au rotor, pour les ramener dans le repère de Park, il suffit de leur appliquer les transformations de Park modifiées**. [71-72]**

Au stator:

$$[V_{sabc}] = [R_r][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \quad \text{(II.17)}$$

$$[V_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{sdq0}] \quad \text{(II.18)}$$

Mais On aura donc :

$$[P(\theta_s)]^{-1}[V_{sdq0}] = [R_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdq0}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \quad \text{(II.19)}$$

Multiplions à gauche l'équation membre à membre par = $[(\theta_s)]$ nous obtenons :

$$[V_{sabc}] = [P(\theta_s)][R_r][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sabc}] + [P(\theta_s)]\frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}[\Phi_{sabc}]) \quad \text{(II.20)}$$

Sachant que:

$$[P(\theta_s)]\frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left(\frac{d\theta_S}{dt}\right)$$

(II.21)

Et après un simple calcul de produit matriciel, les tensions s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{s0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{so} \end{bmatrix} + \frac{d}{d\theta_s} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{so} \end{bmatrix} \quad \text{(II.22)}$$

Au rotor ; une procédure analogue à celle du stator conduit aux équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ V_{r0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{r0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{ro} \end{bmatrix} + \frac{d}{d\theta_s} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{ro} \end{bmatrix} \quad \text{(II.23)}$$

compte-tenu de la nullité des composantes homopolaires et sachant que :

$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - p\Omega \Leftrightarrow \omega_s - p\Omega$$

Ces équations (II.20) et (II.21) s'écrivent finalement :

Au stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} -\Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix} \quad \text{(II.24)}$$

Au rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} -\Phi_{rq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} \quad \text{(II.25)}$$

- **Equations des flux**

En appliquant la transformée de Park aux flux à travers le stator :

$$[\Phi_{sabc}] = [P(\theta_s)][\Phi_{sdq0}] \quad \text{(II.26)}$$

En substituant le flux par son équation, il devient :

$$[\Phi_{sabc}] = [P(\theta_s)][L_{ss}][i_{sabc}] + [P(\theta_s)]([M_{sr}][\Phi_{sabc}]) \quad \text{(II.27)}$$

Sachant que:

$$[i_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdq0}] \quad \text{(II.28)}$$

$$[i_{rabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{rdq0}] \quad \text{(II.29)}$$

On alors:

$$[\Phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + [P(\theta_s)][M_{sr}]([P(\theta_s)]^{-1}[\mathrm{i}_{rdqo}]) \quad \text{(II.30)}$$

Un long calcul de produits matriciels conduit à ce résultat :

$$\begin{bmatrix}\Phi_{sd}\\ \Phi_{sq}\\ \Phi_{s0}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}l_s - M_r & 0 & 0\\ 0 & l_s - R_r & 0\\ 0 & 0 & l_s + 2R_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{sd}\\ i_{sq}\\ i_{s0}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}3/2\,M_0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 3/2\,M_0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{i}_{rd}\\ \mathrm{i}_{rq}\\ \mathrm{i}_{ro}\end{bmatrix} \quad \text{(II.31)}$$

Si la même opération est effectuée pour les flux à travers le rotor on a:

$$[\Phi_{sabc}] = [P(\theta_r)][\Phi_{rdq0}] \quad \text{(II.32)}$$

En remplaçant le flux par son équation on obtient :

$$[\Phi_{rabc}] = [P(\theta_r)][L_{rr}][i_{rabc}] + [P(\theta_r)]([M_{rs}][\Phi_{sabc}]) \quad \text{(II.33)}$$

Sachant que :$[i_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdq0}]$

Et $[i_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdq0}]$

IL vient que :

$$[\Phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][L_{rr}][P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdqo}] + [P(\theta_r)][M_{rs}]([P(\theta_s)]^{-1}[\mathrm{i}_{sdqo}]) \quad \text{(II.34)}$$

Un long calcul de produits matriciels a conduit à ce résultat :

$$\begin{bmatrix}\Phi_{rd}\\ \Phi_{rq}\\ \Phi_{r0}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}l_r - M_r & 0 & 0\\ 0 & l_r - R_r & 0\\ 0 & 0 & l_r + 2R_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{rd}\\ i_{rq}\\ i_{r0}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}3/2\,M_0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 3/2\,M_0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{i}_{sd}\\ \mathrm{i}_{sq}\\ \mathrm{i}_{so}\end{bmatrix} \quad \text{(II.35)}$$

Définissons à présent :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique du stator.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique du rotor.

$L_{so} = l_s - 2M_s$: Inductance cyclique homo polaire du stator.

$L_{ro} = l_s + 2M_s$: Inductance cyclique homo polaire du rotor.

$M = 3/2M_o$: Inductance mutuelle cyclique du stator par apport au rotor.

Compte-tenu des valeurs nulles des composantes homopolaires des courants statoriques et rotoriques car la machine dont les enroulements sont symétriques est alimentée par un système de tensions triphasées équilibrées, les équations des flux s'écrivent finalement sous cette forme :

Au stator

$$\begin{bmatrix}\Phi_{sd}\\ \Phi_{sq}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_s & 0\\ 0 & L_s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{sd}\\ i_{sq}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}L_M & 0\\ 0 & L_M\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{rd}\\ i_{rq}\end{bmatrix} \quad \text{(II.36)}$$

Au rotor:

$$\begin{bmatrix}\Phi_{rd}\\ \Phi_{rq}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_r & 0\\ 0 & L_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{sd}\\ i_{sq}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}L_M & 0\\ 0 & L_M\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{sd}\\ i_{sq}\end{bmatrix} \quad \text{(II.37)}$$

- **Equation mécanique**

L'application du principe fondamentale de la dynamique des solides en rotation donne:

$$\Sigma C = J\frac{d\Omega}{dt} \quad \text{(II.38)}$$

Avec :

ΣC: est la somme des couples auxquels sont soumises les parties en mouvement.

J : est le moment d'inertie de toutes les parties en mouvement.

Si ce même principe est applique à la machine en fonctionnement moteur, les couples qui S'opposent au mouvement sont :

• Le couple résistant de la charge C_r

• Le couple des frottements visqueux qui est pratiquement proportionnel à la vitesse de rotation Ω, il s'exprime donc par :

$$Cf = f\Omega \quad \text{(II.39)}$$

Ainsi l'équation mécanique, qui vient pour compléter le modèle de la machine, s'écrit donc:

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

Moins simple surtout quand il s'agit de travailler en SIMULINK sous MATLAB.

II.5.2.4 Choix du repère

Le modèle de la machine est représenté dans un repère diphasé d, q dont l'orientation est quelconque. Le choix de l'orientation repose effectivement sur les objectifs visés par l'application.

A chaque orientation, nous adoptons un repère. Il en résulte plusieurs repères possibles :

- **Repère (α, β) :**

C'est le repère dont l'axe d est confondu avec l'axe du champ statorique de la phase Sa ainsi $\theta_s = 0$ et $\theta_r = -\alpha$. Ce repère est choisi lorsque une étude des les grandeurs rotoriques est envisagée.

- **Repère (x, y) :**

C'est le repère dont les axes d, q tournent à la même vitesse que le rotor de manière à ce que l'axe d soit confondu avec l'axe du champ rotorique de la phase Ra, Ce repère convient lorsque l'étude des grandeurs statoriques est envisagée, ainsi$\theta_r = 0\ et\theta_s = \alpha$.

- **Repère (d, q) :**

C'est le repère utilisé lorsqu'une étude de commande est envisagée. Les axes d, q tournent à la vitesse du champ synchrone ω_s et c'est ainsi que

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

Dans ce repère, une grandeur sinusoïdale se voit comme étant une grandeur continue, ce qui facilite l'étude et la réalisation d'une commande.

II.6 Commande de la chaine motopompe

II.6.1 Définition

Pour commander une machine alternative, on rencontre des difficultés dans le fait qu'il existe un couplage fort entre les variable d'entrés, sortie et internes. **[80-81]**

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante de courant et le couple électromagnétique par l'autre composante du courant, pour cela il faut choisir un système d'axe (q, d), une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

II.6.2 Différentes méthodes de la commande vectorielle

La commande par orientation du flux rotorique nécessite une bonne connaissance de la position du flux à orienter à tout instant et de le faire coïncider avec l'axe direct d pour garantir un découplage correct entre le flux et le couple quel que soit le point de fonctionnement. Il existe deux approches pour la détermination de la phase du flux rotorique. **[82-83]**

II.6.2.1 Commande Vectorielle Directe

Cette méthode concerne la connaissance du flux (module et phase) est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux.

En effet, dans la commande vectorielle directe, l'angle de Park θ_s est calculé directement à partir de l'information du flux. Le flux magnétique peut être mesuré directement à l'aide de capteurs basés sur l'effet Hal ou estimé à partir des tensions et des courants statorique. Les capteurs, mécaniquement fragiles, sont soumis à des conditions sévères dues aux vibrations et aux échauffements. Les signaux sont entachés d'harmoniques d'encoches et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables. Ainsi, l'utilisation d'un moteur équipé de capteurs de flux augmente considérablement le coût de sa fabrication et le rend plus fragile. Dans ce cas, on fait appel à des estimateurs ou on effectue des mesures qui sont sensibles aux variations de la constante de temps rotorique. **[84-85-86]**

II.6.2.2 Commande vectorielle indirecte

Cette méthode n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor. Cette dernière peut être développée par deux groupes principaux :

- Le vecteur du flux rotorique est obtenu indirectement à partir des courants et des tensions statoriques mesurées.
- Dans le deuxième groupe, le vecteur de flux rotorique est estimé à partir de la mesure des courants statoriques et de la vitesse du rotor, en se basant sur les équations du circuit rotorique du moteur asynchrone dans un système de référence tournant en synchronisme avec le vecteur de flux rotorique.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation en vers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotorique Tr. En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué. **[87]**

II.6.3 Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle est identique à celui de la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée. Elle consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Il faut donc, choisir un système

d'axe *(d,q)* et une loi de commande qui assure le découplage du flux et du couple. La stratégie de commande la plus souvent utilisée est celle qui consiste à maintenir le courant I_d à une valeur nulle. Cette stratégie permet de simplifier la commande du couple par la linéarisation de la relation entre le couple et le courant. **[88-89]**

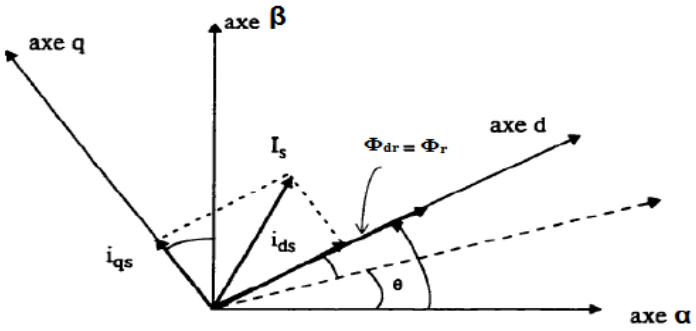


Figure (II.14) : Principe de la commande vectorielle

$\phi_{qr} = 0$; $\phi_{dr} = \phi_r$

Le couple s'écrit alors :

$$C_{em} = p * \frac{M}{Lr} * \phi_{dr}.i_{qs} \Longrightarrow i_{qs} = \frac{L_r.C_e}{P.M.\phi_{dr}} \quad (II.41)$$

$$V_{ds} = (R_S i_{ds} - \omega_s \phi_{qs} + \frac{d}{dt}\phi_{ds}) \quad (II.42)$$

$$V_{qs} = \left(R_S i_{qs} + \omega_s \phi_{ds} + \frac{d}{dt}\phi_{qs}\right) \quad (II.43)$$

$$V_{dr} = 0 = \left(R_r i_{dr} - \omega_r \phi_{qr} + \frac{d}{dt}\phi_{dr}\right) \quad (II.44)$$

$$V_{qr} = 0 = \left(R_r i_{qr} + \omega_r \phi_{dr} + \omega_r \phi_{qr}\right) \quad (II.45)$$

$$\phi_{ds} = (L_S i_{ds} + M i_{dr}) \quad (II.46)$$

$$\phi_{qs} = \left(L_S i_{qs} + M i_{qr}\right) \quad (II.47)$$

$$\phi_{dr} = \phi_r = (L_r i_{dr} + M i_{ds}) \quad \text{(II.48)}$$

$$\phi_{qr} = 0 = (L_r i_{qr} + M i_{qs}) \quad \text{(II.49)}$$

$$C_{em} = P * M(i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds} \quad \text{(II.50)}$$

Et avec l'orientation du flux :

$$\frac{d}{dt}\phi_{dr} = 0 = \frac{d}{dt}\phi_r = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d}{dt}\phi_{qr} = 0$$

A partir de l'équation (II.44). On obtient l'équation dei_{dr}:

$$R_r i_{dr} \text{ D'ou } i_{dr} = 0$$

A partir de l'équation (II.45). On obtient l'équation de ϕ_{dr} :

$$R_r i_{qr} + w_r \phi_{dr} = 0$$

$$\text{d'où } \phi_{dr} = -\frac{R_r . i_{qr}}{w_r} \quad \text{(II.51)}$$

A partir de l'équation (II.48). On obtient l'équation deϕ_{dr} :

$$\phi_{dr} = M . i_{ds} \text{ d'ou } i_{ds} = \frac{\phi_r}{M} \quad \text{(II.52)}$$

A partir de l'équation (II.49). On obtient l'équation de i_{qr} :

$$\phi_{qr} = 0 \text{ D'où } L_r . i_{qr} + M . i_{qs} = 0 \text{d'où} i_{qr} = -\frac{M}{Lr} . iqs$$

$$i_{qr} = -\frac{M}{L_r} . i_{qs} \quad \text{(II.53)}$$

A partir de l'équation (II.52) et (II.53). On obtient l'équation de C_{em}:

$$C_{em} = P * M(-i_{qr} i_{ds}) = P * M\left(\frac{M . i_{qs}}{Lr}\right) . \frac{\phi_r}{M} = P . M \frac{\Phi r . i_{qs}}{Lr} \quad \text{(II.54)}$$

A partir de l'équation (II.44) et (II.48). On obtient les équations de $\frac{d}{dt}\phi_{dr}, \phi_{dr}$ respectivement :

$$\frac{d}{dt}\phi_{dr} = -R_r i_{dr}$$

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + M . i_{ds} \text{d'où } i_{dr} = \frac{\phi_r - M}{Lr} i_{ds} \quad \text{(II.55)}$$

A partir de l'équation (II.57), On obtient l'équation de $\frac{d}{dt}\phi_{dr}$

$$\frac{d}{dt}\phi_{dr} = -R_r\left(\frac{\phi_{dr}-M.i_{ds}}{L_r}\right) = -\frac{R_r}{L_r}\Phi dr + \frac{R_r.M.i_{ds}}{L_r} \qquad \text{(II.56)}$$

En appliquant la TL à l'équation (II.58), on obtient :

$$þ\phi_{dr} = -\frac{Rr}{Lr}\phi_{dr} + \frac{Rr.Mids}{Lr}$$

$$\phi_{dr} = \frac{M.i_{ds}}{1+þ..T_r}$$

Avec . $T = \frac{L_r}{.R_{r_r}}$ (la constante rotorique) et p (la variable de la transformée de Laplace)

Donc on doit agir sur i_{qs} pour régler le couple et sur la composantei_{ds} pour régler le flux. On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une machine courant continu.

Si l'on veut accélérer la machine, donc augmenter la vitesse on impose i_{qs}* positif. Lerégulateur du courant . i_{qs} imposera ce courant.

- **Estimation de w_s et θ_s :**

Seules les grandeurs statoriques sont accessibles, les grandeurs rotoriques ne le sont pas. Il faut donc pouvoir les estimer à partir des grandeurs statorique, donc à partir des équations

$$w_s = w_r + P\Omega \qquad \text{(II.57)}$$

A partir de l'équation (II.53) et (II.55) respectivement :

$$\phi_{dr} = -\frac{R_r.i_{qr}}{w_r}; i_{qr} = -\frac{M}{w_r}i_{qs};$$

Avec : $T_r = \frac{L_r}{R_r}$

$$w_r = \frac{R_r}{L_r}\frac{M}{\phi_{dr}}i_{qs} = \frac{M}{\phi_{dr}T_r}i_{qs} \qquad \text{(II.58)}$$

A partir de l'équation (II.57) et (II.58) on obtient l'équation suivante

$$w_s = \frac{M}{\phi_{dr}T_r}i_{qs} + P\Omega \qquad \text{(II.59)}$$

$$\theta_s = \int w_s dt \qquad \text{(II.60)}$$

- **Le régulateur de vitesse**

Il prend en entrée la vitesse de référence et la vitesse mesurée, il agit sur le couple (C'est- à-dire sa sortie est le couple de référence) pour réguler la vitesse.

- **Le régulateur de flux**

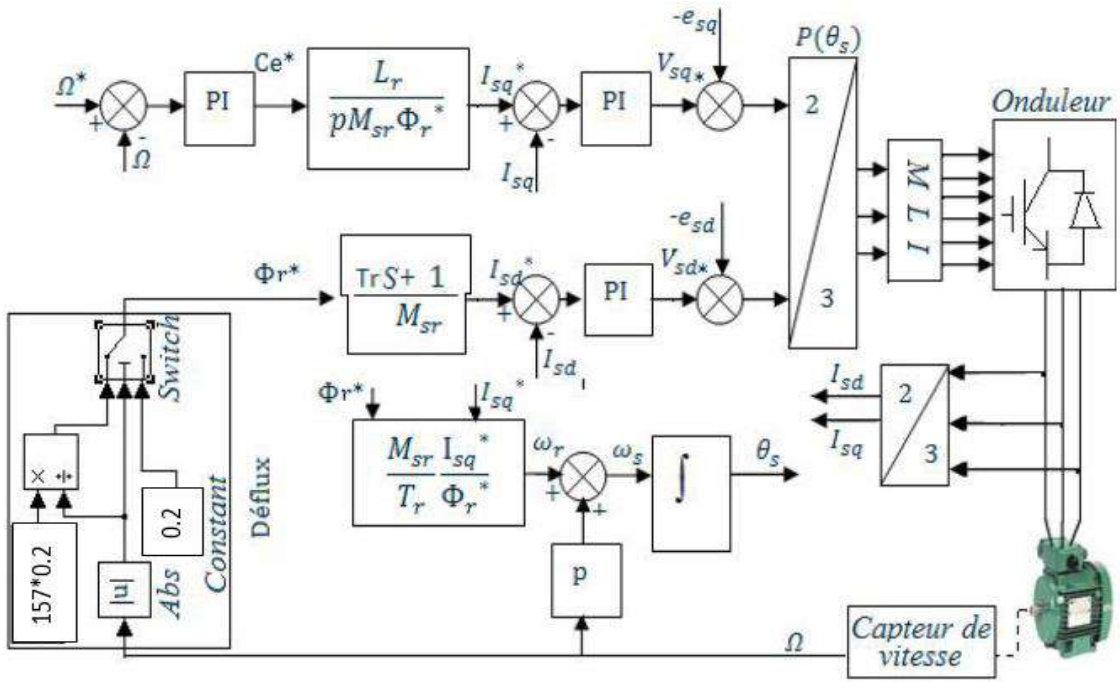
Il prend en entrée le flux de référence et le flux estimé et agit sur i_{ds}*

$$\phi_r = \frac{M}{1+.þ.Tr} i_{ds} \Longrightarrow i_{ds} *= \frac{1+.þTr}{M} \phi_r \qquad \text{(II.61)}$$

- **Le régulateur du couple**

Il prend en entrée le couple et ϕ_{ref} pour réguleri_{qs}*

$$C_{em} = p * \frac{M}{L_r} \phi_{dr}. i_{qs} \qquad \Longrightarrow i_{qs} *= \frac{L_r.C_{em}}{P.M.\phi_{dr}} \qquad \text{(II.62)}$$



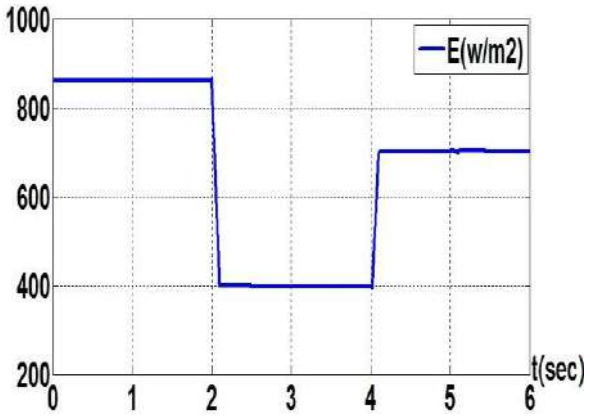
Figure(II.15) : schéma bloc de la commande vectorielle de la MAS alimenté en tension

II.7 Résultat de simulation :

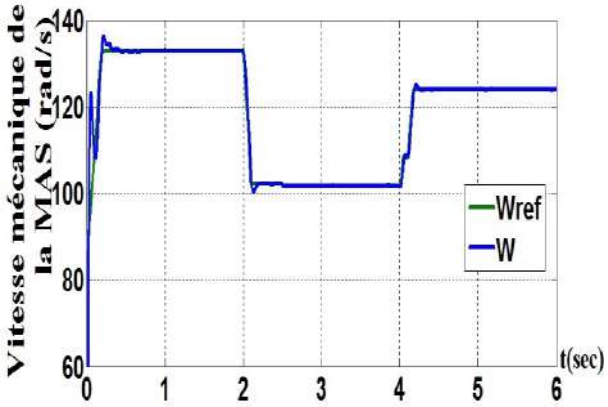
Dans cette partie, nous allons considérer que la pompe de puissance 2.8Kw fonctionne pendant 3heurs avec un débit Q=66.67m^3/H=0.0185m^3/s et la hauteur du réservoir H=4m,

Les résultats de simulation illustrés par les figures suivant concernent le groupe motopompe (MAS + pompe) alimenté par un GPV fonctionnant en régime dynamique, c.à.d. lorsqu'il y a une variation brusque de l'éclairement.

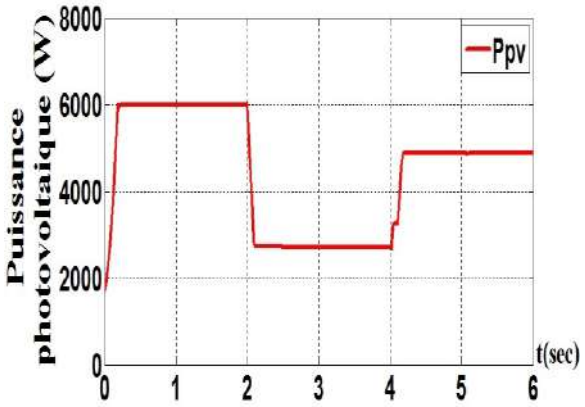
A partir des caractéristiques ci-dessous en vérifiant le principe de la commande à flux rotorique orienté de la machine asynchrone, y compris l'estimation du flux de rotor et le traqueur de point maximum de puissance, des simulations numériques ont été présentées.



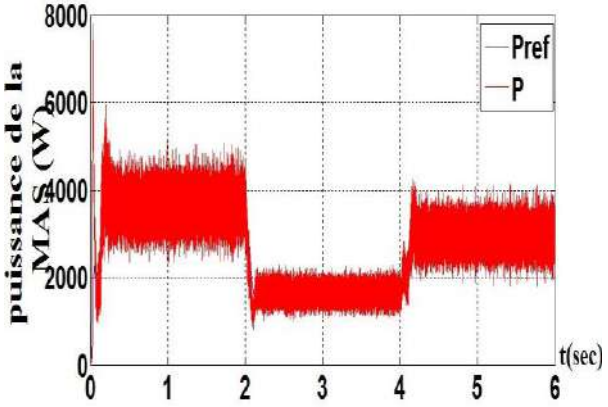
Figure(II.16) : Eclairement solaire



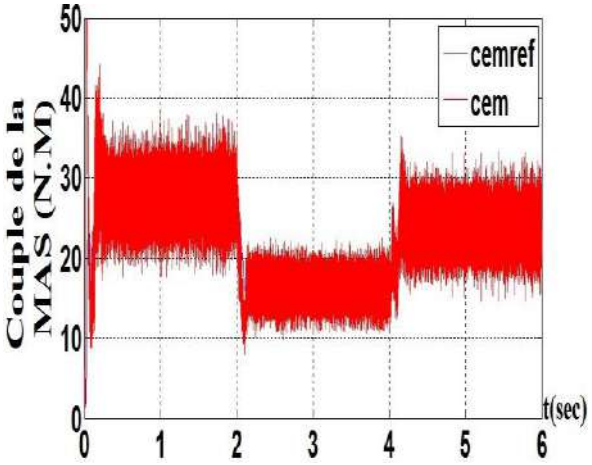
Figure(II.17) : vitesse mécanique de la MAS



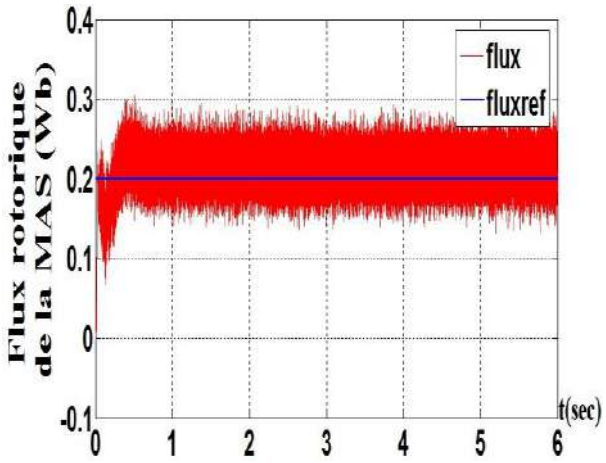
Figure(II.18) : Puissance PV



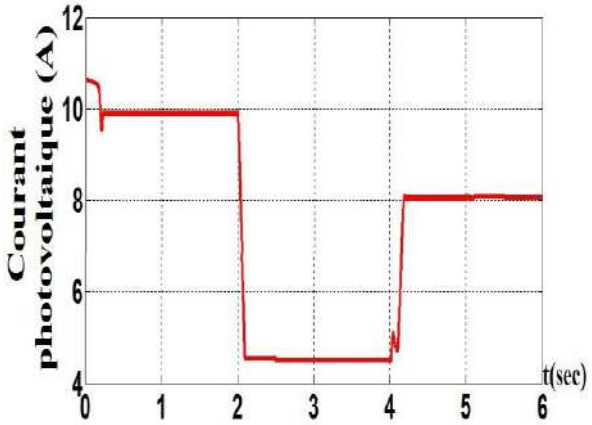
Figure(II.19) : Puissance de la MAS



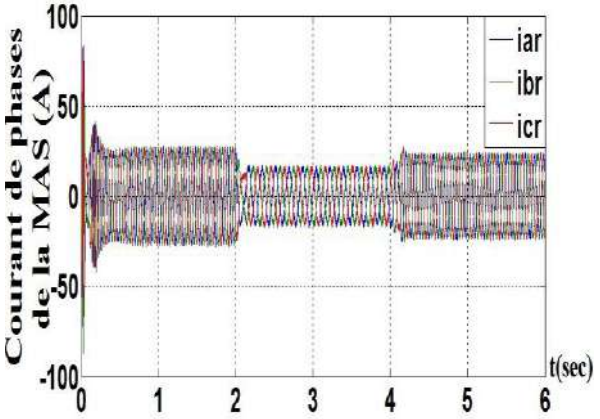
Figure(II.20) : Couple de la MAS



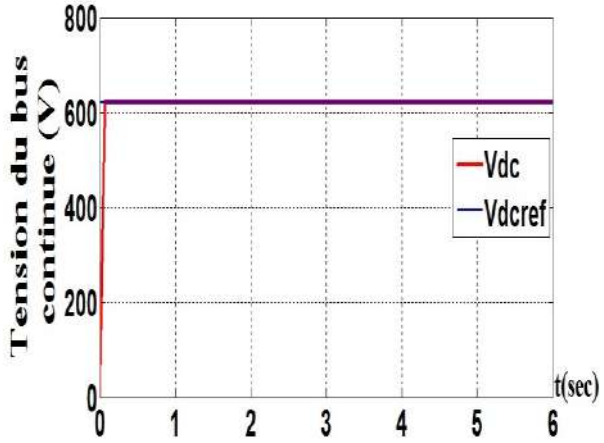
Figure(II.21) : Flux rotorique de la MAS



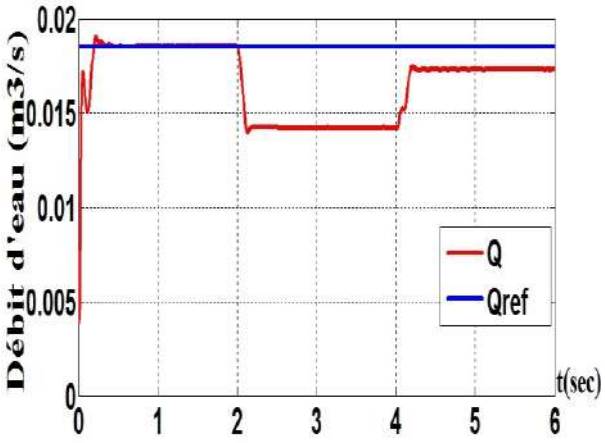
Figure(II.22) : Courant PV



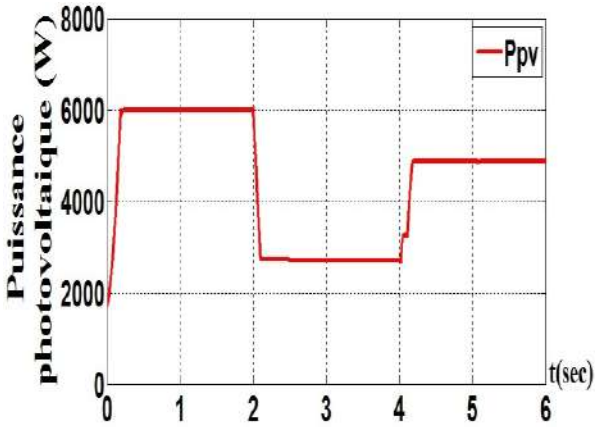
Figure(II.23) : Courant de phase de la MAS



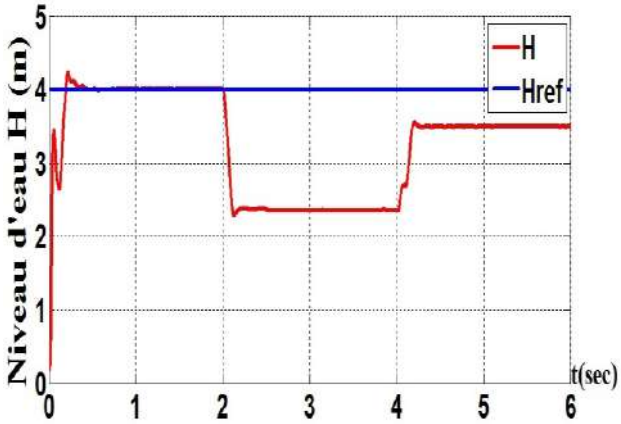
Figure(II.24) : Tension du bus continu



Figure(II.25) : Débit d'eau



Figure(II.26) : Puissance PV



Figure(II.27) : Niveau d'eau

II.7.1 Interprétation:

D'après les résultats de la simulation précédente, il est remarquable que la variation des paramètres des blocs motopompe (MAS-pompe) est proportionnelle à celles des blocs de commande. Donc lorsque l'éclairement augmente plus le courant augmente aussi, et comme la puissance est proportionnelle au courant, il est évident que l'énergie électrique nécessaire est liée avec l'énergie hydraulique fournie par la pompe.

Le changement de l'éclairement influe sur les caractéristiques de la machine asynchrone et par la suite sur les performances de la pompe. Le courant et la tension du GPV convergent vers leurs valeurs optimales montrant ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT. A chaque fois que l'ensoleillement change, la vitesse de consigne suit sa valeur optimale.

Les résultats de simulation montrent ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT dans l'extraction de la puissance maximale, afin d'exploiter la vitesse optimale en vue d'obtenir le débit maximal disponible pour satisfaire les besoins journaliers d'eau.

D'après les figures précédentes, on remarque que dans les intervalles [(0-2) s] et [(4-6) s], les allures de la puissance, débit d'eau, tension...etc. sont au dessous des valeurs de référence de chaque figure dus à l'insuffisance de l'énergie photovoltaïque pour satisfaire les différentes besoins journaliers d'eau. Cette insuffisance est satisfaite dans le système hybride photovoltaïque-éolien présenté dans le 4ème chapitre.

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présentés un dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque (modélisation+commande).

L'optimisation du système proposé utilise la méthode MPPT « Perturbations et Observation ».Cet algorithme ne tient pas compte de la variation des paramètres influençant le modèle du système de pompage, tels que la température et les paramètres du moteur. Ce qui limite sa robustesse.

Dans le chapitre prochain, nous allons présenter le dimensionnement d'un système de pompage éolien.

Chapitre III :

Modélisation et commande d’un système de pompage éolien

III.1Introduction

La modélisation consiste à traduire en équation le comportement d'un système physique donné, afin de pouvoir comprendre son fonctionnement, faciliter son dimensionnement et éventuellement simuler son évolution dans le temps sous un logiciel, qui dans notre cas est la bibliothèque Simulink de Matlab.

III.2 Modélisation des composants du système de pompage éolien

III.2.1 Modélisation de la vitesse du vent

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, à une variation aléatoire et une caractéristique très fluctuante.

Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent, car la puissance éolienne dans les conditions optimales, et en fonction de la vitesse du vent au cube. La vitesse du vent est tridimensionnelle. **[19]**

La vitesse du vent (Vv) peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps : Vv = f(t).

III.2.2 Modélisation de la turbine éolienne

Le rotor éolien est un système de conversion d'énergie qui transforme l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement en énergie mécanique disponible sur l'arbre. **[16]**

Pour capter l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement, les pâles du rotor éolien se présentent obliquement au vent avec un angle appelé angle de calage β, provoquant la rotation par un effet de vis ou de tire-bouchon. La puissance maximale qui peut être récupérée est décrite par l'équation de Belz :

$$P_t = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 V_v^3 C_p \qquad \text{(III.1)}$$

Où :

Pt est la puissance mécanique de la turbine (Watt) ;

ρ est la densité de l'air (kg/m^3);

R est le rayon du rotor éolien (m) ;

Vv est la vitesse du vent (m/s).

Cp : est le coefficient de puissance (un paramètre sans dimension qui exprime l'efficacité du rotor éolien dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique). Ce coefficient est fonction de l'angle de calage β et de la vitesse spécifique λ définie par :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_v} \qquad \text{(III.2)}$$

Où :Ω_t est la vitesse de rotation du rotor éolien.

Le coefficient de puissance a une valeur théorique maximale donnée par la limite de Betz C_{pmax}= 0.593. **[16]**

$$C_{p(\lambda,\beta)} = C_1\left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4\right)e^{C_5/\lambda_i} + C_6\lambda \qquad \text{(III.3)}$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Les coefficients C_1 à C_6 sont :C_1 = 0.5176,C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4= 5, C_5= 21

C_6 =0.0068. Les caractéristiques de $C_p - \lambda_i$.Pour différentes valeurs de l'angle de tangage *β,* sont illustrées ci-dessous (modèle MATLAB) (Figure III.1). La valeur maximale de C_p (C_{pmax}=0,48) est obtenue pour *β*= 0 et pour, λ = 8.1.

III.2.3 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement sont négligés. Les pertes énergétiques dans cet organe sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Cette multiplication est modélisée mathématiquement par l'équation suivante :

$$\Omega_{Turbine} = \frac{\Omega_{Géneratrice}}{G}$$

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport du multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

$$C_{Géneratrice} = \frac{C_{Turbine}}{G}$$

- Pour une vitesse de vent constant (Vv=13.8m/s)

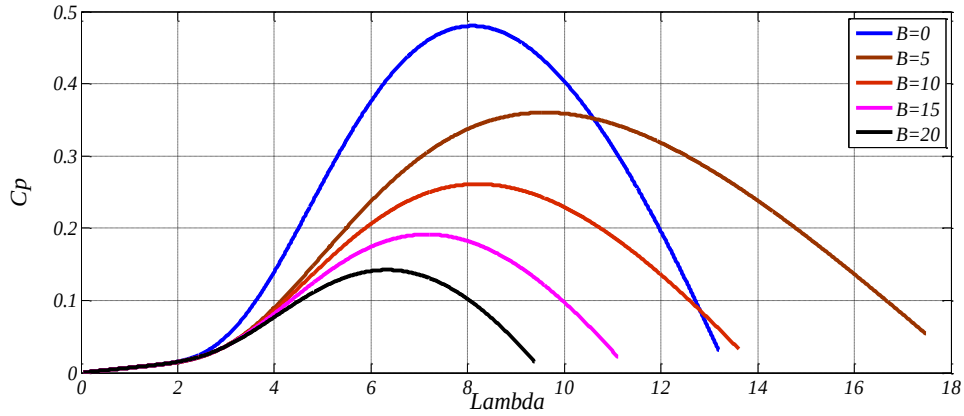


Figure (III.1) : Allure de Cpen fonction de λ pour différentes valeurs de β

- La puissance en fonction de lambda Pour une vitesse de vent variable et nombre de calage β=0

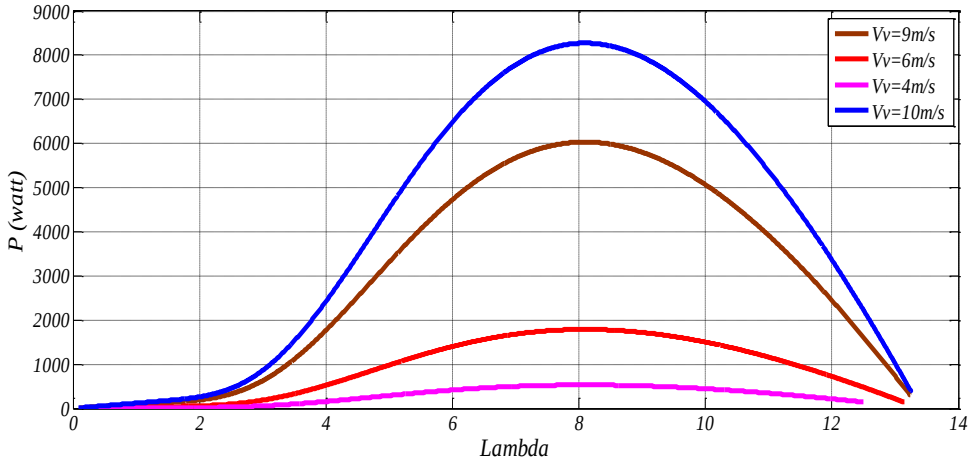


Figure (III.2) : Allure de la puissance P

III.2.4 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent MSAP

Le modèle mathématique de la machine synchrone est établi sur la base de certaines hypothèses simplificatrices essentielles : **[34]**

- absence de saturation dans le circuit magnétique.

- hystérésis, courants de Foucault et effet de peau négligé.

- effet d'encochage négligeable.

- résistance des enroulements ne variant pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.

- **Equations électriques**

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = Rs \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi a \\ \Psi b \\ \Psi c \end{bmatrix} \qquad \text{(III.4)}$$

$[Va\ VB\ Vc]^t$: Vecteur tension des phases statoriques.

$[ia\ ib\ ic]^t$: Vecteur courant des phases statoriques.

Rs : Résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé. Dans ce cas, la somme instantanée des courants statoriques est nulle, il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire, de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le calcul du moment du couple. Le comportement de la machine peut être défini par deux variables indépendantes. **[35-34]**

- **Equations électriques dans le repère de Park (d, q)**

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, un changement de repère est nécessaire. Cette transformation mathématique permet de remplacer les trois bobines statoriques fixes déphasées de 2π/3 en deux bobines fictives équivalentes, situées sur le rotor, déphasées de π/2 (Figure III .3). **[14]**

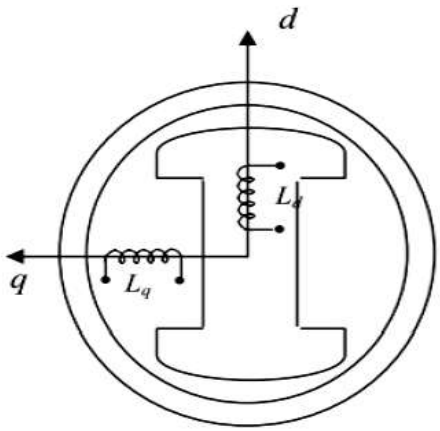


Figure (III.3) : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park **[14]**

La transformation de Park est Le changement de variable effectué, les équations des tensions, courants et flux obtenues (III.5), (III.6), (III.7), (III.8). Ainsi les équations de la machine dans le repère de Park (III.9), (III.10).

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(III.5)}$$

$$[i_{d,q}] = P(\theta)[i_{abc}] \quad \text{(III.6)}$$

$$[V_{d,q}] = P(\theta)[V_{abc}] \quad \text{(III.7)}$$

$$\theta_c = P(\theta)[\phi_{abc}] \quad \text{(III.8)}$$

$$V_d = R_S\, id - L_d \frac{di_d}{dt} \omega . L_q . i_q \quad \text{(III.9)}$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \omega . L_d i_d \quad \text{(III.10)}$$

- **Equations magnétiques**

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, Ψ_d et $\Psi_q$sont fonctions linéaires des courants id et iq :

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_q + \Psi f \\ \Psi_q = L_d i_d \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

Où :

L_dEtL_q :les inductances directes et en quadrature, elles sont supposées indépendantes de θ.

Ψf: représente le flux des aimants.

Les circuits électriques équivalents de la MSAP peuvent être représentés comme suit :**[14]**

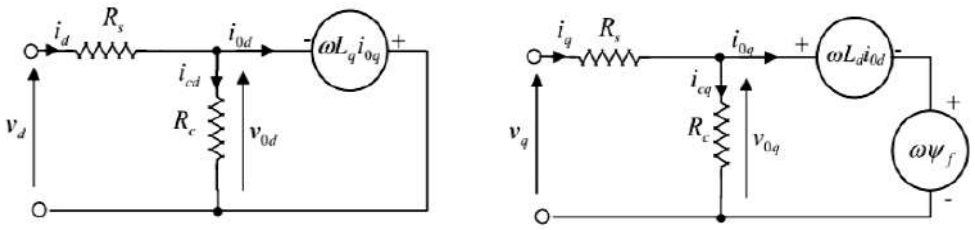


Figure (III.4) : Circuit équivalent de MSAP –convention moteur- **[14]**

- **Expression du couple électromagnétique**

$$C_{em} = \frac{3}{2} p\left[\left(L_d - L_q\right) i_q i_{d+} i_q \Psi_f\right] \quad \text{(III.12)}$$

Où :

P : nombre de paires de pôlesL_d : Inductance statorique selon l'axe d

id : Courant statorique selon l'axe dL_q: Inductance statorique selon l'axe q

iq: Courant statorique selon l'axe qΨ_f : Flux inducteur.

- **Equations mécaniques**

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$C_m - C_{em} - f\Omega = \frac{jd\Omega}{dt} \quad \text{(III.13)}$$

Où : Cm : couple moteur appliqué sur la génératrice,

Ω_t: Couple de frottement,

J : moment d'inertie total de la machine,

f : coefficient de frottement visqueux.

III.2.5 Modélisation du redresseur

Parmi tous les convertisseurs AC-DC, la solution de référence est le redresseur triphasé à modulation de largeur des impulsions. Il permet un contrôle totalement réversible de la puissance instantanée, il peut contrôler les grandeurs électromécaniques telles que le couple électromagnétique ou la vitesse de rotation de la génératrice.

Les inconvénients de cette structure reposent sur la complexité du montage qui comporte bras complets donc six interrupteurs et la commande nécessitant généralement un capteur mécanique de position. Nous allons développer cette structure car elle est la plus courante dans les applications éoliennes et donne une indication sur l'efficacité énergétique relative aux autres montages. **[16]**

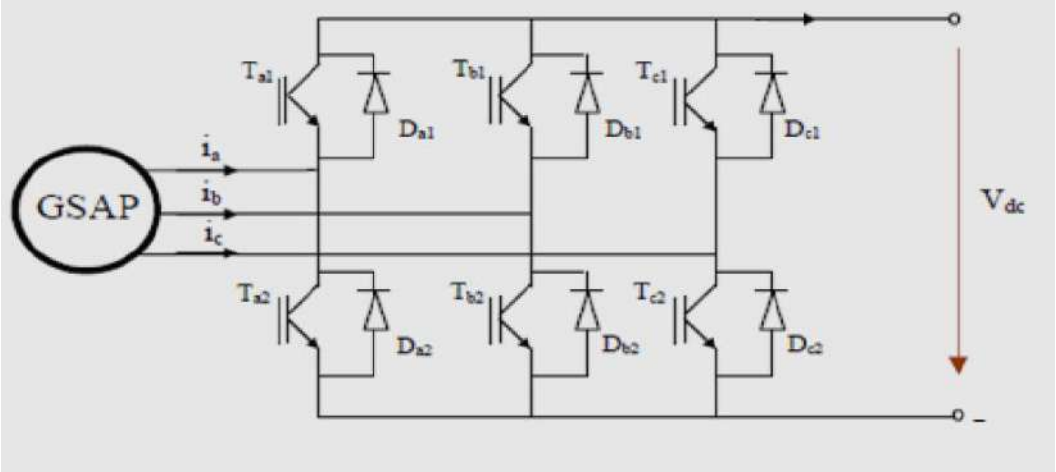


Figure (III.5) : Schéma d'un redresseur

III.2.6 Modélisation de bus continu :

Le bus continu est composé d'une capacité, étant la partie continue entre le redresseur et l'onduleur permettant le découplage de la fréquence de la source et celle de la charge.

$$i_{dc} = i_1 - i_2$$

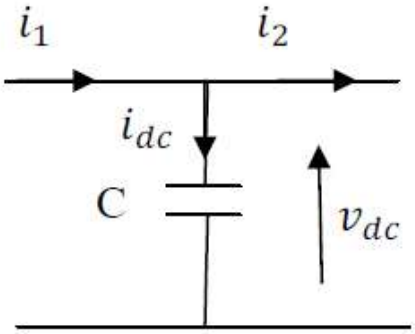


Figure (III.6) : Schéma électrique de bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif i_c:

$$v_{dc} = \int \frac{1}{C_{dc}} i_c dt$$

i_c : Courant circulant dans la capacité ;

V_{dc}: Tension du bus continu ;

C_{dc}: Capacité du bus continu.

III.2.7 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension représente aujourd'hui la « brique de base » dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. Il permet entre autres de contrôler les puissances (active et réactive) échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas.

L'onduleur est constitué de trois branches où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivant :

$$f_i = \begin{pmatrix} 1 \text{ linterrupteur i est fermé}(K_i \text{ conduit}) \\ 0 \text{ linterrupteur i est ouvert (Ki bloqué)} \end{pmatrix}$$

La figure (III.7) représente le schéma de l'onduleur triphasé.

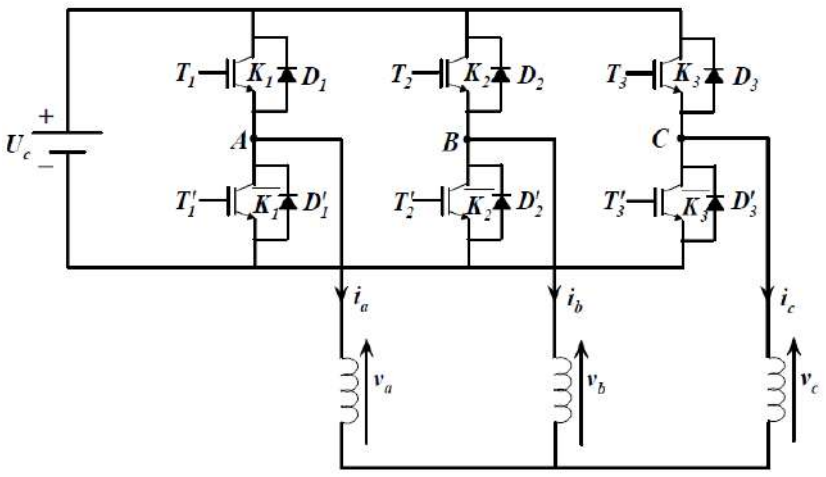


Figure (III.7) : Onduleur triphasé à deux niveaux

Les tensions composes sont :

$$U_{AB} = V_a - V_b = f_1 - f_2 \quad \text{(III.14)}$$

$$U_{CA} = V_c - V_a = f_3 - f_1 \quad \text{(III.15)}$$

$$U_{BC} = -V_c = f_2 - f_3 \quad \text{(III.16)}$$

Les tensions simplesV_a , V_b etV_c forment un système triphasé équilibré, tel que :

La résolution des équations (17) – (18) nous donne :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad \text{(III.17)}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_C}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad \text{(III.18)}$$

III.3 Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est une courbe non linéaire en forme de « cloche » **.** Pour chaque vitesse du vent, le système doit atteindre sa puissance maximale qui correspond à sa vitesse de rotation optimale. **[42-43]**

La figure(III.2) illustre la puissance en fonction de la vitesse de rotation de la turbine de l'éolienne. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent Vv donnée.

L'ensemble des sommets (points optimaux recherchés) de ces caractéristiques définit la courbe de puissance optimale. L'équation de cette courbe est :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}).\rho.S.V_V^3 \quad \text{(III.19)}$$

Pour la zone 2, le fonctionnement idéal du système éolien nécessite l'utilisation de la commande Maximum Power Point Tracking (MPPT). Afin de maximiser la puissance électrique générée, la stratégie utilisée consiste à contrôler le couple électromagnétique pour régler la vitesse. On distingue deux approches possibles :

- La première, la moins classique**,** considère que la caractéristique C p= f (λ) n'est pas connue. **[43]**
- La deuxième, la plus répondue, suppose que la caractéristique C p= f (λ) soit connu, pour que l'éolienne fonctionne dans des conditions optimales, il est nécessaire de suivre la courbe optimale de puissance.

III.3.1 Résultat de simulation

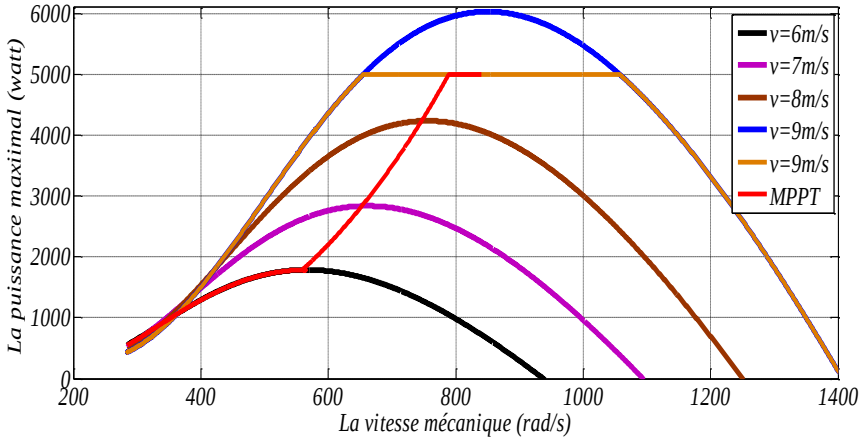


Figure (III.8) L'allure de la puissance en fonction de la vitesse mécanique pour une déférente variable de vent

III.3.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

Afin d'extraire un maximum de puissance, malgré les variations fréquentes de vitesse du vent, une commande par l'asservissement de la vitesse de rotation permet de maintenir le rapport entre la puissance extraite et celle du vent à sa valeur maximale. En d'autres termes, il faut maintenir le coefficient de puissance Cp à sa valeur maximale. Cette commande nécessite l'utilisation d'un régulateur de vitesse. **[33-34]**

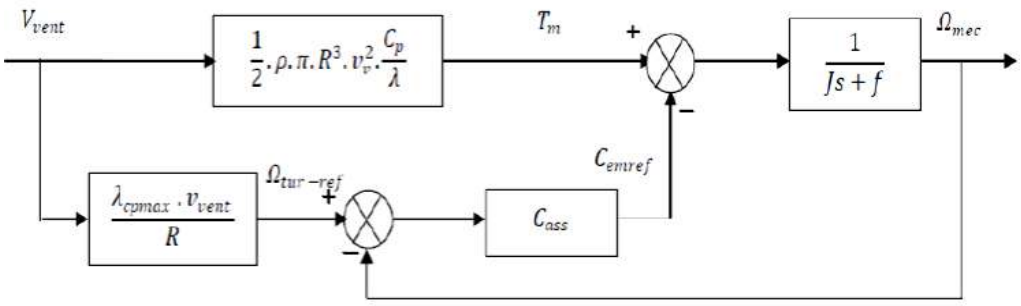


Figure (III.9) Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse. **[45]**

Le vent, source principale d'énergie de fonctionnement du système, fournit le couple aérodynamique Tm. Si de ce dernier est soustrait le couple électromagnétique créé dans la génératrice, le couple mécanique obtenu permet de calculer la vitesse de rotation.

Pour générer le couple électromagnétique de référence, par l'utilisation d'un contrôleur, il est nécessaire de calculer la vitesse correspondante à C_{pmax} . La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique λ_{opt} et le coefficient de puissance maximale C_{pmax} est donné par la relation (III.20) :

$$\boldsymbol{\Omega_{ref}} = \frac{\lambda_{opt}.V_v}{R} \qquad \text{(III.20)}$$

III.3.3 Commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension

III.3.3.1 Principe de la commande vectorielle

L'idée fondamentale de cette stratégie est d'assimiler le comportement de la machine synchrone à celui d'une machine à courant continu, c'est-à-dire un modèle linéaire et découplé ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique. **[46-47]**

Le couple est dépendu de deux variables i_d, i_q.

$$C_{em} = \frac{3}{2}p\left[(L_d - L_q)i_d i_q + i_q\phi_f\right] \qquad \text{(III.21)}$$

Parmi les stratégies de commande, on utilise souvent celle qui consiste à maintenir la composante i_d nulle. Cette stratégie permet de l'obtention d'une loi de commande simplifiée avec une relation linéaire entre le couple et le courant. On retrouve alors une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée. **[48]**

$$C_{em} = \frac{3}{2}pi_q\phi_f \qquad \text{(III.22)}$$

Comme le flux ϕ_f est constant, le couple est directement proportionnel à i_q .

$$C_{em} = K_t i_q \qquad \text{(III.23)}$$

Avec :

$$K_t = \frac{3}{2}p\phi_f \qquad \text{(III.24)}$$

Nous constatons que l'équation du couple est analogue à celle du couple de la machine à courant continu à excitation séparée et qu'un contrôle indépendant du couple et du flux est établi.

III.3.3.2 Découplage

Le modèle de la machine synchrone dans le référentiel de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants i_d, i_q, ne sont pas indépendants l'un de l'autre. Ils sont reliés par des termes non linéaires $L_q\omega i_q$ et $L_d\omega i_d$.

$$\begin{cases} V_d = \left(R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt}\right) - \omega L_q i_q \\ V_q = \left(R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt}\right) + \omega(L_d i_d + \phi_f) \end{cases} \quad \text{(III.25)}$$

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation. Cette dernière méthode consiste à faire ajouter des termes afin de rendre les axes *d* et *q* complètements indépendants.

III.3.3.2.1. Découplage par compensation

La compensation donc, a pour but de découpler les axes *d* et *q*. Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs.

Le principe de ce découplage revient à définir deux nouvelles variables de commande e_d, e_q représente dans la Figure (III.10) telle que : **[49]**

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad \text{(III.26)}$$

Avec :

$$\begin{aligned} V_{d1} &= L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d \\ V_{q1} &= L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q \end{aligned} \quad \text{(III.27)}$$

Et

$$\begin{cases} e_d = L_q \omega i_q \\ e_q = \omega(L_d i_d + \phi_f) \end{cases} \quad \text{(III.28)}$$

On a donc les courants i_d et i_q sont découplés. Le courant i_d ne dépend que deV_{d1} et i_q ne dépend que V_{q1} , à partir de l'équation (III.29) les courants i_d et i_q s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{R_s + PL_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{R_s + PL_q} \end{cases} \quad \text{(III.29)}$$

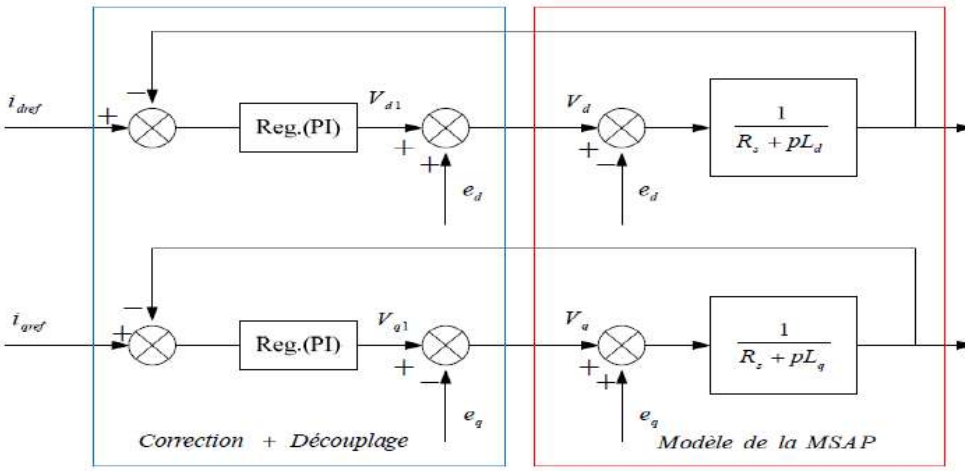


Figure III.10: Découplage par compensation

Les actions sur les axes *d* et *q* sont donc découplés et représentées par la Figure (III.11)

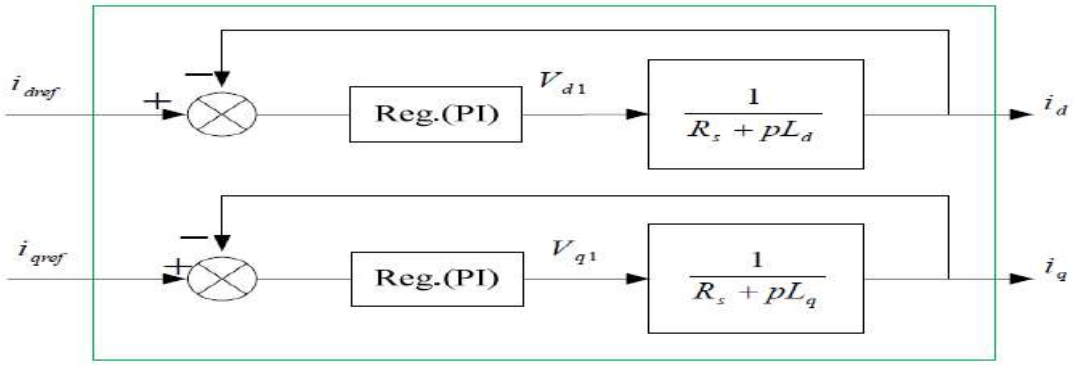


Figure III.11: Commander découplée

III.3.4 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux

III.3.4.1 Définition

Dans l'étude de l'ensemble onduleur-machine, nous supposerons que la charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé et la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable. **[61-62]**

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Si on dispose à l'entrée d'une tension continue, grâce à des semi-conducteurs, on relie chacune des bornes du récepteur une tension tantôt positive, tantôt négative.

Par une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs, il est donc possible de produire à la sortie du l'onduleur une tension alternative de valeur moyenne nulle. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (Pulse Width Modulation, en anglo-saxon).

On distingue plusieurs types d'onduleurs :

Selon la source :

- Onduleur de tension.
- Onduleur de courant. **[63-64-65]**

Pour la modélisation de l'onduleur, on considère les hypothèses suivantes :

- Transistors parfaits : la commutation des transistors est instantanée (temps de fermeture et ouverture nuls) et sans pertes. Enfin, la chute de tension dans les transistors est considérée nulle ;
- Alimentations parfaites : la tension aux bornes du bus continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée.

III.3.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure (III.12), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être constituée de deux générateurs de f.é.m.

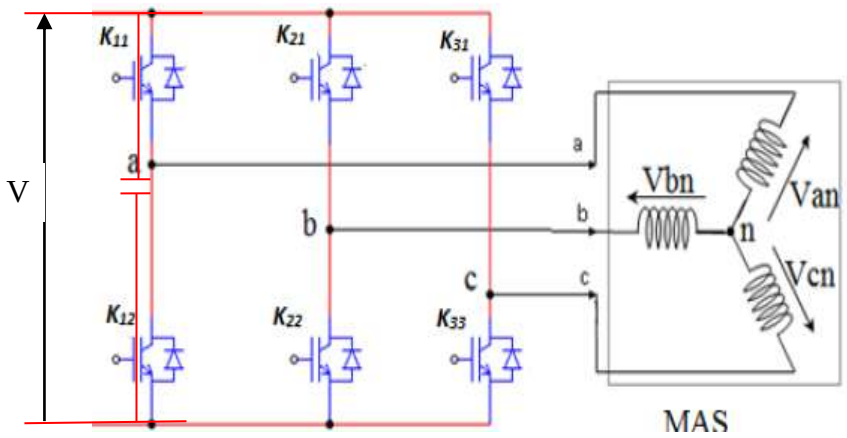


Figure (III.12) : Représentation de l'ensemble onduleur –MAS

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée ;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé n ;

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notonsV_{an}, V_{bn} etV_{cn}. L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques Si. On appelle Ti et Ti' les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux). On a :

- Si S_i=1, alors $T_i$est passant et $T_{i'}$ est ouvert.

- Si S_i=0, alorsT_i est ouvert et $T_{i'}$ est passant. **[66]**

Les tensions composées (de lignes) délivrées par l'onduleur sont données comme suit :

$V_{ab}= V_{an}-V_{bn}=\mathrm{E}(S_a - S_b)$ (III.30)

$V_{bc}= V_{bn}-V_{cn}=\mathrm{E}(S_b - S_c)$ (III.31)

$V_{ca}= V_{cn}-V_{an}=\mathrm{E}(S_c - S_a)$ (III.32)

Les tensions V_{an}, V_{bn} etV_{cn} forment un système de tension triphasée équilibrée alors :

$$V_{an}+V_{bn} + V_{cn} = 0$$

On a:

$$V_{an} = \frac{1}{3}\mathrm{E}\,(2S_a - S_b - S_c) \quad \text{(III.33)}$$

On à:

$$V_{bn} = \frac{1}{3}\mathrm{E}\,(2S_b - S_a - S_c) \quad \text{(III.34)}$$

On à:

$$V_{cn} = \frac{1}{3}\mathrm{E}(2S_c - S_a - S_b) \quad \text{(III.35)}$$

Donc:

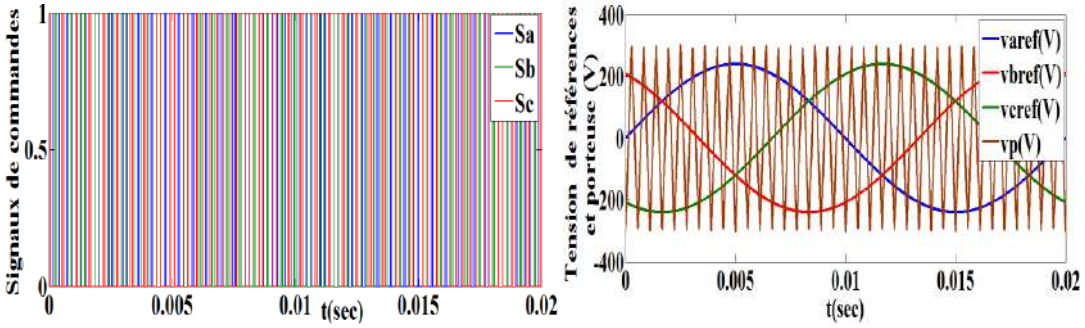
$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{ab} \\ V_{ac} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\mathrm{E}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{(III.36)}$$

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

Dans notre travail, on a appliqué deux techniques pour la commande de l'onduleur :

- La technique de commande par MLI sinus-triangle,
- La stratégie de commande par MLI vectorielle (SVM). **[67]**

III.3.4.3 Résultats de simulation



a) b)

Figure (III.13) : a) Principe de la MLI sinus triangle b) signaux de commande de l'onduleur

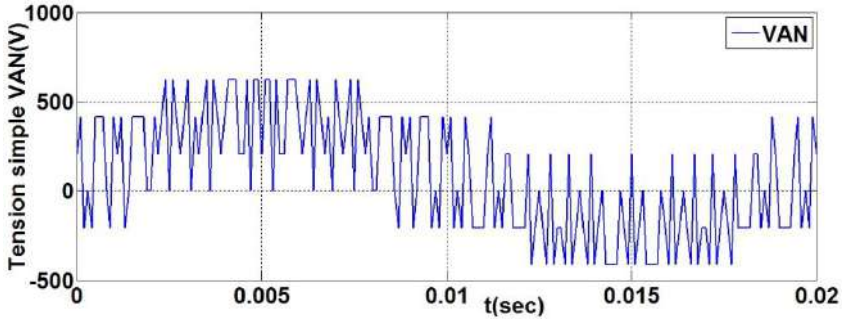
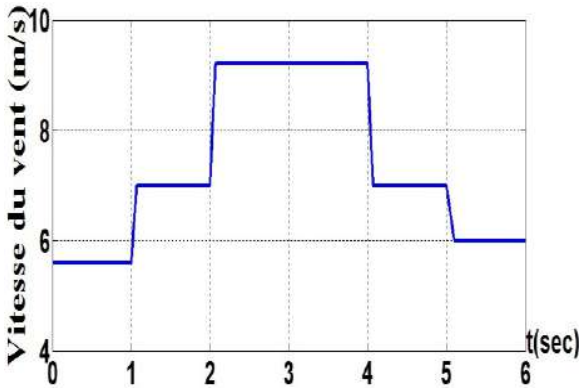


Figure (III.14) : Tension de sortie simple de l'onduleur avec r=0.8, m=9.

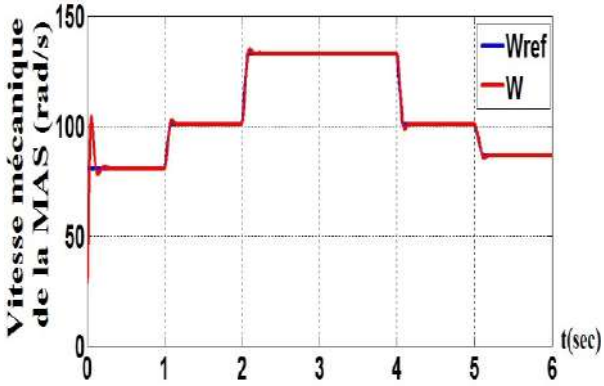
Le principe de cette technique consiste à comparer un signal triangulaire (P) d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure appelée porteuse, au trois signaux sinusoïdaux, d'amplitude variable et de fréquence f appelée référence. L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

III.4 Résultat de simulation

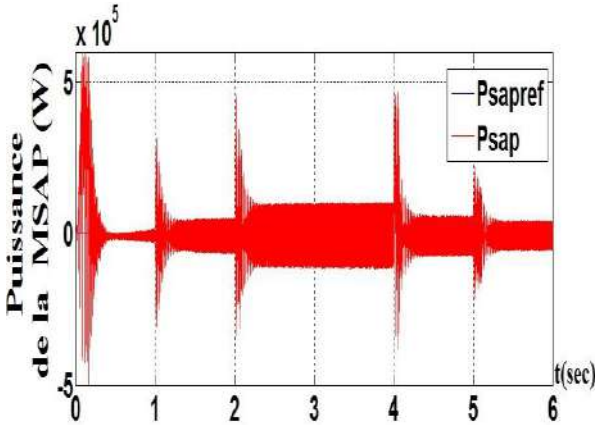
Par la suite, nous allons présenter les résultats de simulation de notre système de pompage en supposant que le pompage fonctionne 3 heures par jour, on aura un débit d'eau Q= 200m^3/J .donc Q=66.67 m^3/h=0.0185m^3/s et la hauteur de réservoir H=4m.



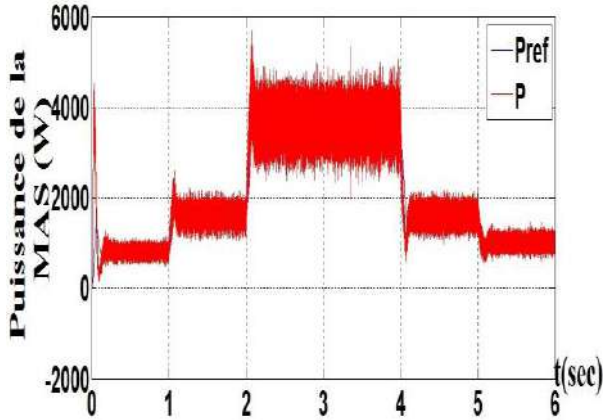
Figure(III.15) : Profil du vent.



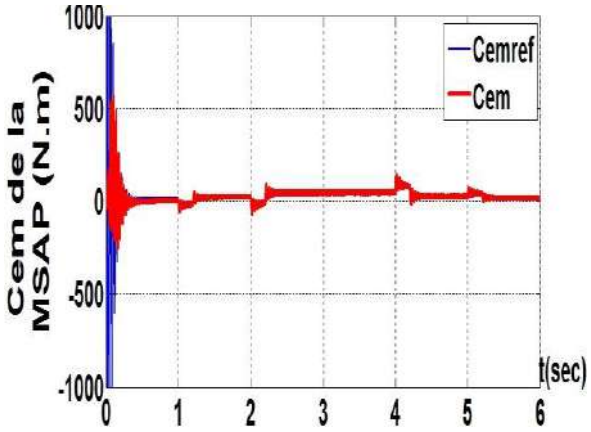
Figure(III.16) : Vitesse mécanique de la MAS.



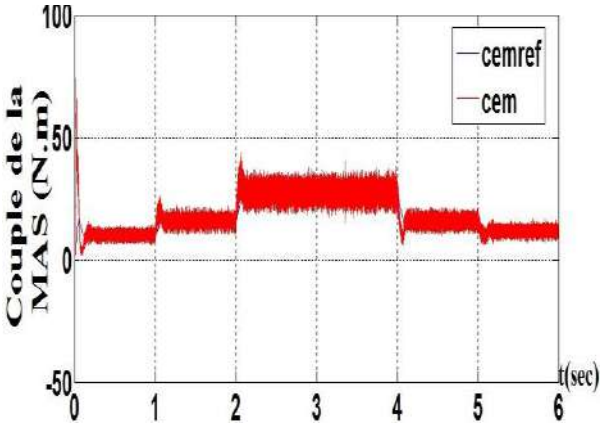
Figure(III.17) : Puissance active de la MSAP.



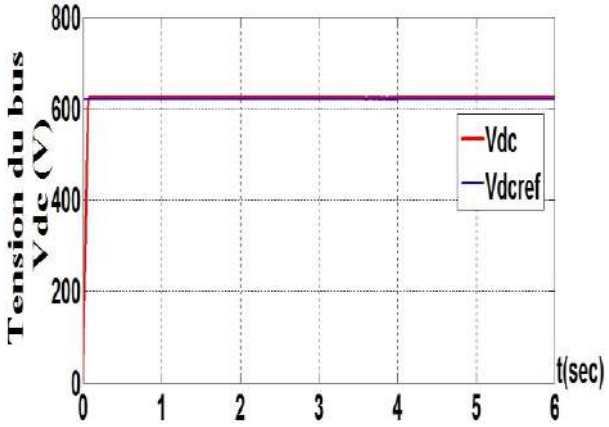
Figure(III.18) : Puissance active de la MAS.



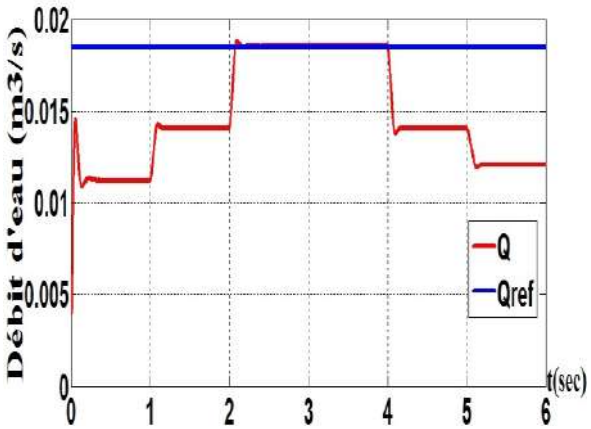
Figure(III.19) : Couple électromagnétique de la MSAP.



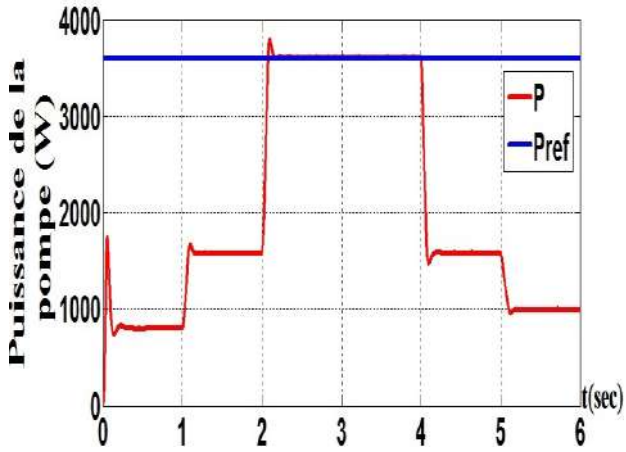
Figure(III.20) : Couple électromagnétique de la MAS.



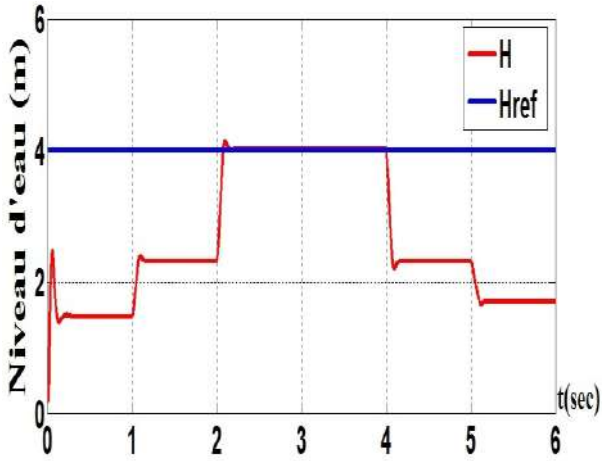
Figure(III.21) : Tension du bus continue.



Figure(III.22) : Débit d'eau.



Figure(III.23) : Puissance de la pompe.



Figure(III.24) : Hauteur de réservoir.

D'après les résultats de la simulation précédente, on remarque que la variation des paramètres des blocs motopompe (MAS-pompe) est proportionnelle à celles des blocs de commande. Les figures précédentes montrent l'évolution de la vitesse mécanique qui bien suivi sa référence, du couple de la turbine éolienne. . Ce qui permet par la suite d'atteindre le débit et la hauteur manométrique totale désirés.

Les résultats de simulation montrent ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT dans l'extraction de la puissance maximale, afin d'exploiter la vitesse optimale en vue d'obtenir le débit maximal disponible pour satisfaire les besoins journaliers d'eau.

D'après les figures précédentes, on remarque que dans les intervalles [(0-2) s] et [(4-6) s], les allures de la puissance, débit d'eau, tension...etc. sont au dessous des valeurs de référence de chaque figure dus à l'insuffisance de l'énergie éolienne pour satisfaire les

différentes besoins journaliers d'eau. Cette insuffisance est satisfaite dans le système hybride photovoltaïque-éolien présenté dans le 4ème chapitre.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés un dimensionnement d'un système de pompage éolien (modélisation+commande).

Nous avons pu aboutir à l'optimisation du système étudié pour garantir les besoins journaliers d'eau demandé.

Dans le chapitre prochain, nous allons présenter le dimensionnement d'un système de pompage hybride (photovoltaïque-éolien).

Chapitre IV :

Système de pompage hybride photovoltaïque-éolien

IV.1 Introduction

Après avoir modélisé et simulé indépendamment les chaines de conversion d'énergies photovoltaïque et éolienne, maintenant on va simuler notre système d'énergie hybride globale.

Pour assurer une alimentation continue de notre charge quelque soit les conditions météorologique, un bon dimensionnement s'avère important pour un bon fonctionnement et une bonne exploitation du système de pompage, car l'efficacité de toute installation électrique dépond essentiellement de la rigueur de son dimensionnement et influe directement sur le cout et les performances de l'installation.

Le dimensionnement de notre installation sera organisé comme suite:

- Détermination de la puissance de charge (énergie consommée).
- Dimensionnement des sources d'énergie renouvelable.

IV.2 Modèle global du système

La Figure (IV.1) représente le schéma synoptique du système de pompage photovoltaïque global avec les différentes commandes utilisées. **[90]**

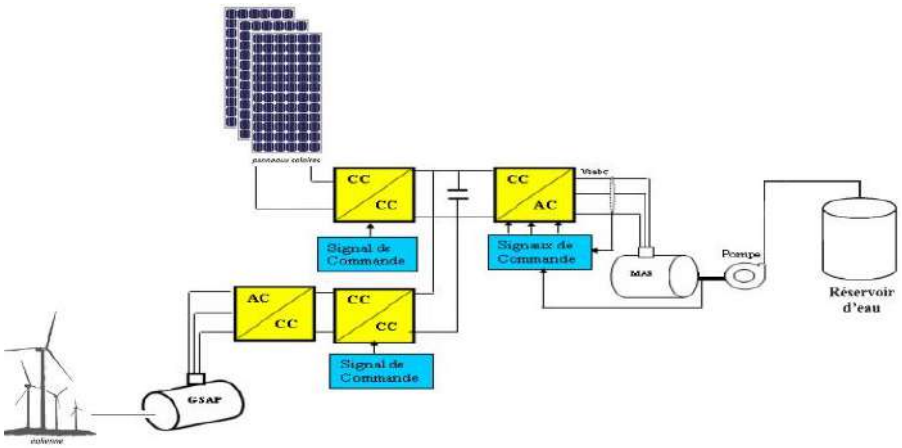


Figure (IV.1): Schéma synoptique du système de pompage global.

IV.2.1 Etapes de dimensionnement d'un système de pompage

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage, il est donc important de bien faire le dimensionnement de la pompe selon les conditions du terrain.

En d'autres mots, une pompe doit être choisie selon les caractéristiques réelles de l'installation dans laquelle on doit l'installer. Les données suivantes seront nécessaires pour dimensionner la pompe: débit d'eau *(*Q) et hauteur manométrique totale (HMT).

Le débit (Q) est la quantité de liquide que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné, normalement exprimé en m^3/h. En pompage, le débit est habituellement donné en litres par heure (l/h) ou gallons par heure (g/h).

La hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Autrement dit, c'est la somme de la hauteur géométrique dans les niveaux du liquide et les pertes de charges causées par de frottements intérieurs qui se forment au passage du liquide dans les tuyaux, dans la pompe et dans les accessoires hydrauliques. Cette hauteur peut être calculée comme suit : $HMT = H_g + \Delta H$

H_g= Hauteur géométrique à l'aspiration (H_{ga}) + Hauteur géométrique au refoulement (H_{gr})

ΔH = Somme des pertes de charge dans l'installation (pertes linéaires et singulières) calculée selon les éléments suivants:

• Diamètre, longueur et matériel composant les tuyaux d'aspiration et de refoulement

• Quantité et type des coudes dans la tuyauterie et accessoires hydrauliques comme clapet de pied avec crépine, vannes, clapet anti-retour, filtres éventuels.(tableau n°1 dans l'annexe)

• Nature du liquide (si différent de l'eau), température, viscosité et densité.

Le diamètre des conduites doit être calculé afin que ces pertes de charge correspondent au plus à 10 % de la hauteur géométrique totale (H_g). (tableau n°2 dans l'annexe) [91].

IV.2.2 Analyse des besoins et des conditions d'exploitation

L'analyse des besoins et des conditions d'exploitation doit permettre de déterminer la puissance et le type de pompe choisie pour la situation donnée. **[91]**

Il y'a trois paramètres techniques qui délimitent l'évaluation d'une pompe. Afin d'obtenir l'évaluation la plus exacte possible, il est essentiel que ces trois paramètres soient estimés le plus précisément possible. Ces trois paramètres sont :

• La quantité d'eau requise par jour.

• La disponibilité de l'eau.

• Les ressources solaires.

L'évaluation de la quantité d'eau requise et la disponibilité de l'eau sont parfois difficiles à estimer et varient souvent de saison en saison et d'année en année. Les facteurs comme l'accroissement d'une population dans une ferme et un niveau dynamique variable du puits ou

du forage, selon le débit et les saisons, compliquent ce qui au premier abord peut paraître simple.

IV.2.2.1 Estimation des besoins en eau et dimensionnement de la pompe

La boisson, la cuisine, la lessive et la toilette constituent les principaux usages de l'eau pour les besoins humains. Les animaux aussi ont besoin d'eau pour leur survie. La demande en eau est également primordiale dans les domaines de l'agriculture et de l'industrie, quelle qu'en soit leur ampleur.

L'estimation des besoins en eau et le dimensionnement du système de pompage sont détaillés ci-dessous.

- **Fiche de dimensionnement**

Estimation de la charge choisir ou définir la charge, c'est-à-dire déterminer le débit requis et la HMT.

- Pour obtenir le débit, il faut déterminer les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.
- Pour obtenir la HMT il faut mesurer le niveau statique, le rabattement maximal, la hauteur du réservoir et les pertes de charge dues à la tuyauterie.

Les besoins en eau pour l'irrigation dépendent du type de cultures, des facteurs météorologiques et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser surla pratique et l'expérience locale.

N_P: Nombre moyen des personnes.

N_F: Nombre de familles.

Q_P: Consommation moyenne d'eau quotidienne pour une personne.

Q_{an}: quantité moyenne d'eau destinée pour la consommation les animaux.

Q_{irr}: quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation.

Mais la taille maximale du réservoir est calculée comme suit:

$$N_{total} = N_P * N_F = 56 \implies$$

$N_{total} = N_P * N_F = 56$ personne $\implies$ $Q_F = Q_P * N_{total} = 2.8 m^3/J$

$Q_{(besoin)} = Q_F + Q_{an} + Q_{irr}$

$$Q = 192.8 m^3/J \approx 200 m^3/J$$

Les tableaux (IV.1) et (IV.2) suivants présentent respectivement les besoins en eau journaliers de l'installation de pompage et la hauteur manométrique totale.

Débit			
Irrigation			
Type cultures à l'échelle d'un ferm	Surface(hectare) 3	m^3/jours/hectare 60	Totale 180m^3/jours
Eau domestique			
N_P 7	N_F 8	Q_P litres/personne 50litres/jours/personne	Totale 2.8m^3/jours
Eau animaux			10m^3/jours
Totale			192.8m^3/jours

Tableau (IV.1): Détermination des besoins en eau journaliers de l'installation de pompage

HMT			
Hauteur géométrique à l'aspiration	Hauteur géométrique au refoulement	Pertes tuyauterie	HMT
H_{ga} 7	H_{gr} 7	PC% 10	$(H_{ga}+H_{gr})(1+PC)$ 15.4

Tableau (IV.2): Détermination de la hauteur manométrique totale (HMT)

D'après les tableaux (IV.1) et (IV.2), pour 3 hectares de terre agricole et 56 personnes, les besoins en eau de l'installation considérée sont estimés à 200 m^3/jours, et la HMT est estimée à 15.4 mètres.

Pour déterminer la quantité d'eau nécessaire au système de pompage, il est important de connaitre l'efficacité du système d'irrigation.

Il y a trois modes de distribution de l'eau [92]:

- une distribution gravitaire ou de surface: L'objectif est de pouvoir inonder rapidement toute la surface sur une même hauteur;
- une distribution par aspersion: ce système arrose les plantes grâce à une pluie artificielle. L'eau sous pression est amenée à la parcelle par des canalisations, L'aspersion est réalisée grâce à des asperseurs rotatifs
- une distribution localisée ou goutte à goutte: l'irrigation localisée ou goutte à goutte n'arrose qu'une fraction du sol à partir de goutteurs ou de perforations dans une conduite sous pression.

➢ **Choix de la pompe centrifuge**

Après avoir établi les valeurs de débit Q et de la hauteur manométrique totale HMT de l'installation, Pour déterminer la puissance hydraulique requise de la pompe, il faut appliquer l'équation suivant :

$$P_H = \rho\, g\, H\, Q$$

Les donnés de la pompe sont comme suit :

En supposant que le système de pompage fonctionne 3 heurs par jour, on aura un débit de $200 m^3/J$ .donc Q = 66.67 m^3/h = 0.0185m^3/s

La hauteur manométrique totale H de la pompe doit atteindre est donc : H=15.4m

ρ : C'est la densité du liquide (pour l'eau = 1000 K_g/m^3) ;

g : l'accélération de pesanteur (g = 9.81m/s^2) ;

Considérant ces paramètres à évaluant l'équation (IV.4), on obtient :

$$P_H = 1000 * 9.81 * 15.4 * 0.0185 = 2.8 \text{ KW}$$

Le rendement η de la pompe est 78% (pompe NM4 125/250 CALPEDA) ; n = 1450tr/min

$$\eta = \frac{P_H}{P_{méc}}$$

$$P_{méc} = \frac{P_H}{\eta} = \frac{2.8}{0.78} = 3.6 \text{ KW}$$

IV.3 Dimensionnement et modélisation du réservoir de stockage d'eau

IV.3.1 Dimensionnement du réservoir

Le concepteur devra déterminer la dimension optimale du réservoir d'eau non seulement selon la durée anticipée de stockage pour pallier les variations journalières, mais aussi et sur

tout selon les besoins des utilisateurs et, bien sûr, selon le coût du système de stockage. Le dimensionnement du réservoir repose donc sur un certain nombre de facteurs qu'il faudra avoir évalués au préalable:

- Lorsque la pompe est au fil du soleil, le réservoir doit pouvoir stocker l'eau nécessaire pour la journée, ou au moins pouvoir stocker l'eau fournie par la pompe.
- le réservoir peut permettre de tirer l'eau de façon constante afin de maximiser le débit du forage ou du puits, surtout en période sèche.
- le réservoir doit permettre une certaine autonomie durant les journées peu ensoleillées.

La taille du réservoir solaire dépend du nombre de personnes et de la consommation d'eau par personne et par jour. Le débit journalier requis pour ce système de pompage est de 200 m^3 par jour. En supposant qu'on a l'autonomie d'un jour.

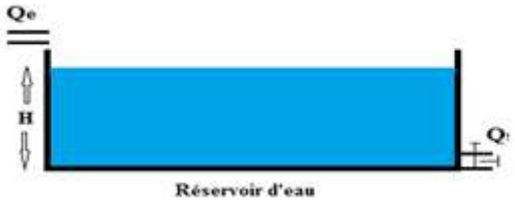


Figure (IV.2): Réservoir de stockage d'eau.

Algorithme de gestion d'énergie hybride

Nous allons présenter sur la figure(IV-25) l'organigramme relatif au programme MATLAB du Système hybride.

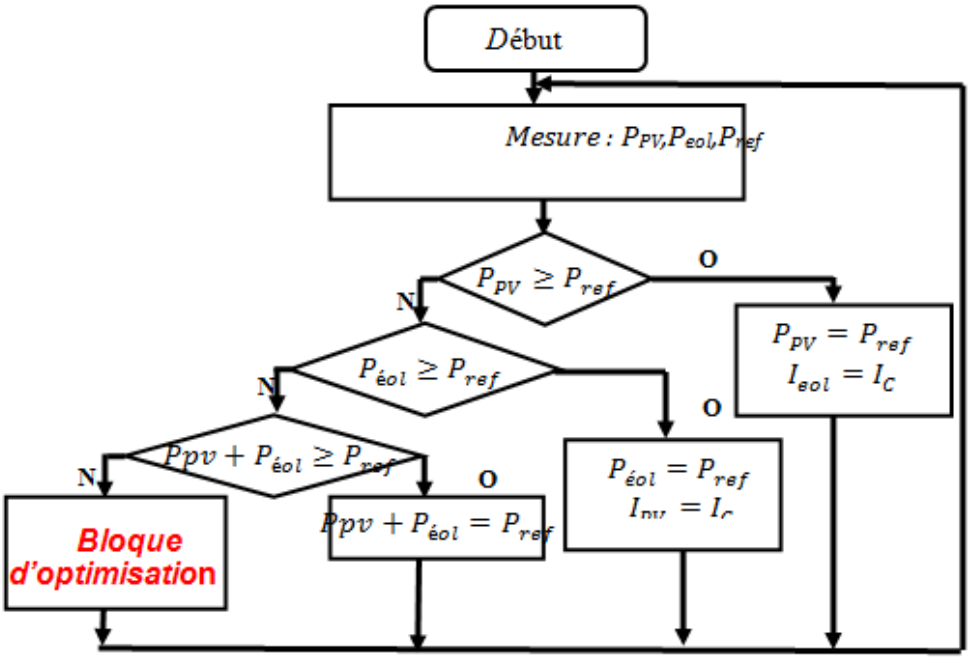


Figure (IV.3): Algorithme de la gestion d'énergie hybride.

IV.3.2 Modélisation du réservoir

Sur la figure(IV.2), on constate que l'eau entre dans le réservoir par le haut avec un débit Q_e fourni par la pompe et elle sorte par le bas à travers une valve avec un débit Q_s.

Le débit Q_s à la sortie du réservoir est considéré comme une perturbation et dépend essentiellement de la consommation d'eau. L'équation différentielle permettant de trouver la hauteur h du liquide dans le réservoir est donnée par :

$$\frac{dV}{dt} = S\frac{dH}{dt} = Q_e - Q_s$$

où:

V:*est* le volume de liquide dans le réservoir;

S: est la surface du réservoir;

Q_e et Q_s sont respectivement le débit à l'entrée et à la sortie du réservoir.

À partir de l'équation, nous avons modélisé le réservoir d'eau dans l'environnement MA TLAB/Simulink.

IV.4 Résultat de simulation:

Dans ce qui suite, nous avons simulé notre système en appliquant la gestion de l'algorithme globale qui fait l'organisation entre deux systèmes à énergie renouvelable

éolienne et PV, Pour cela, nous avons choisie l'évolution différent entre les conditions météo-logiques pour d'obtenir tous les cas possibles de communication entre ces systèmes. Nous appliquons 3 niveaux d'éclairement (E = 860W/m², E = 400 W/m², E = 695 W/m², successivement) chaque 2s, tout en gardant une température constante égale à 25°C, les résultats de simulation obtenus sont présentés par les figures suivant :

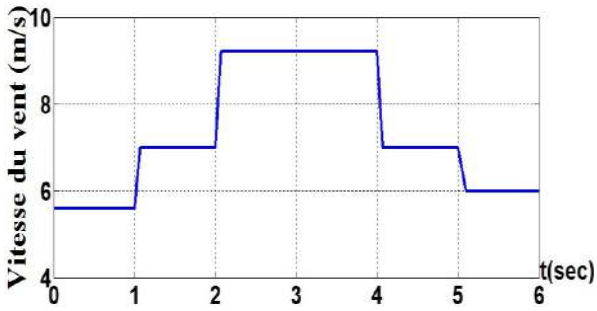


Figure (IV.4): Profil du vent.

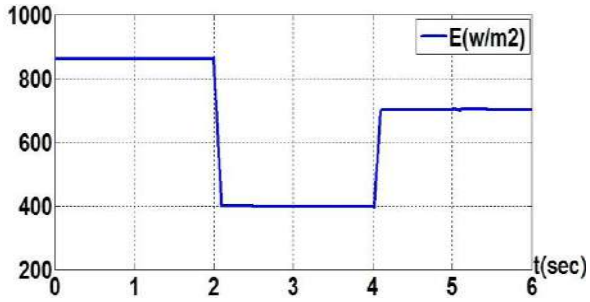


Figure (IV.5) : Evolution de l'éclairement.

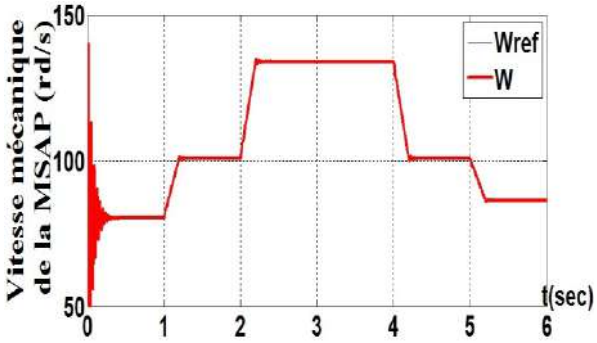


Figure (IV.6): Vitesse mécanique de la MSAP.

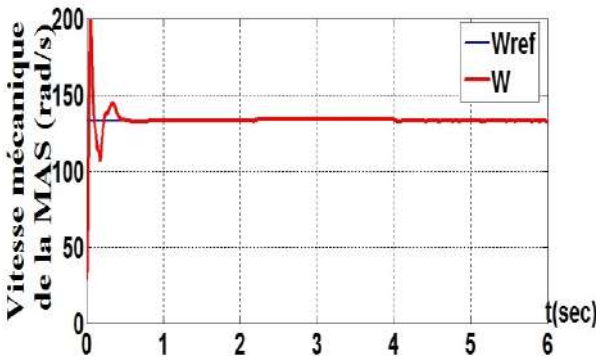


Figure (IV.7): Vitesse mécanique de la MAS

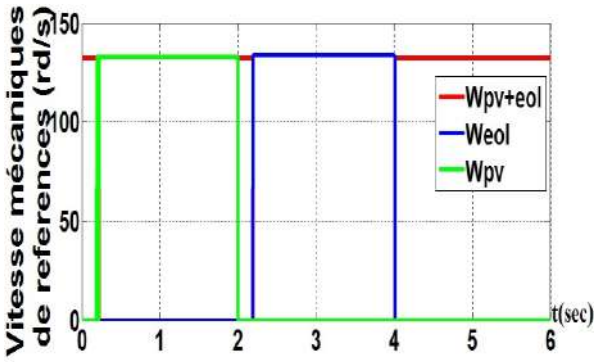


Figure (IV.8): Vitesse mécanique de références

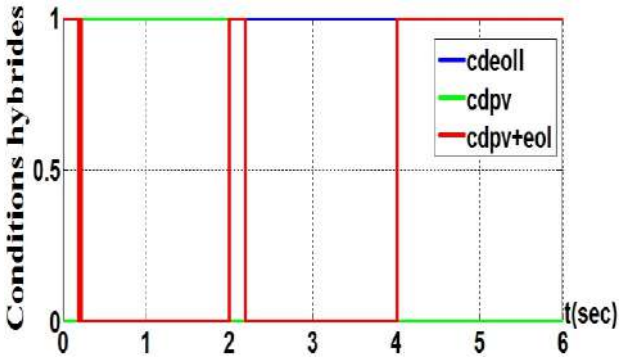


Figure (IV.9): Conditions hybrides

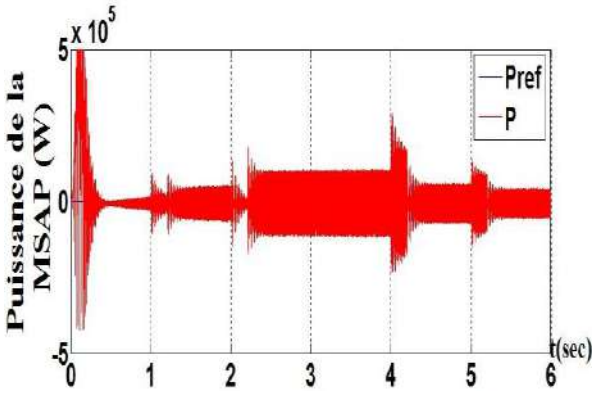


Figure (IV.10): Puissance de la MSAP.

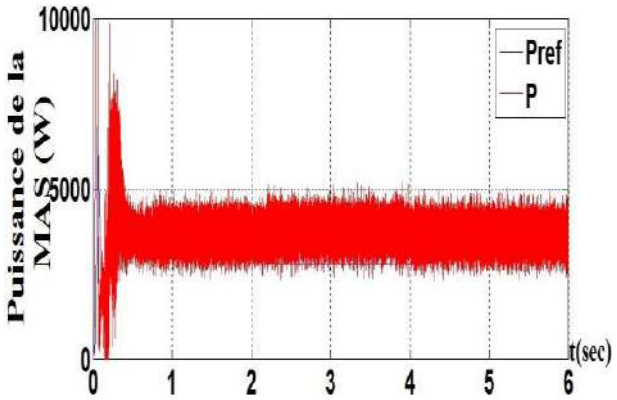


Figure (IV.11): Puissance de la MAS.

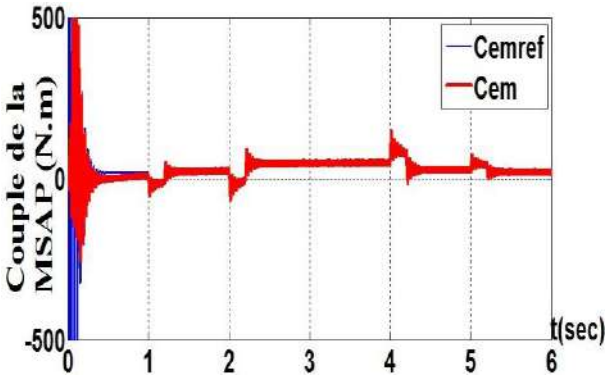


Figure (IV.12): Couple de la MSAP

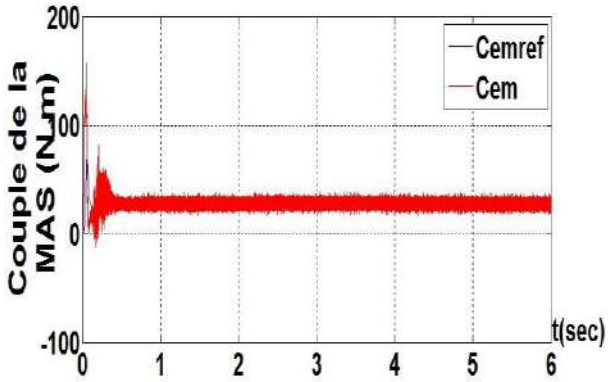


Figure (IV.13): Couple de la MAS

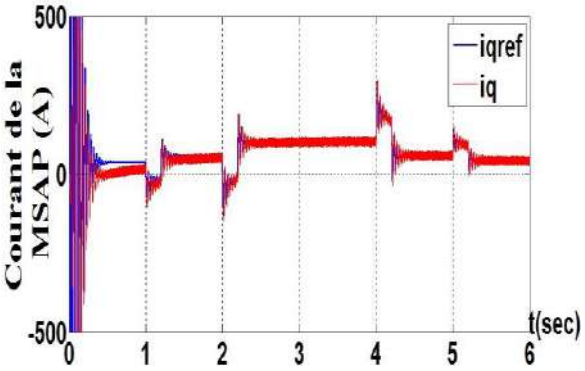


Figure (IV.14): Courant quadrature de la MSAP

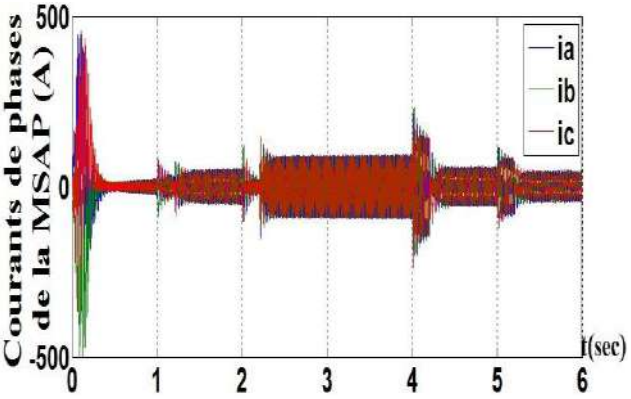


Figure (IV.15): Courant de phase de la MSAP

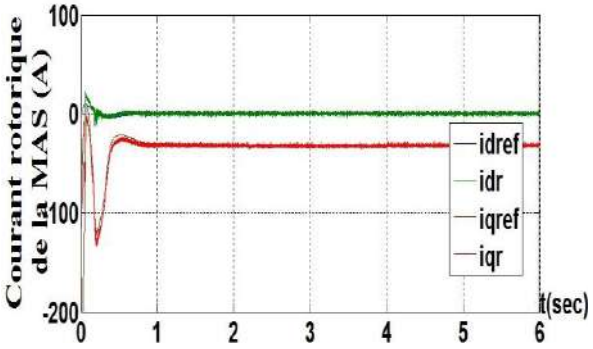


Figure (IV.16): Courant rotorique de la MAS

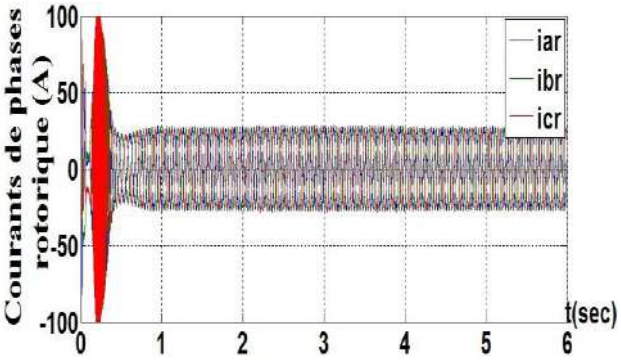


Figure (IV.17): Courants de phase rotorique

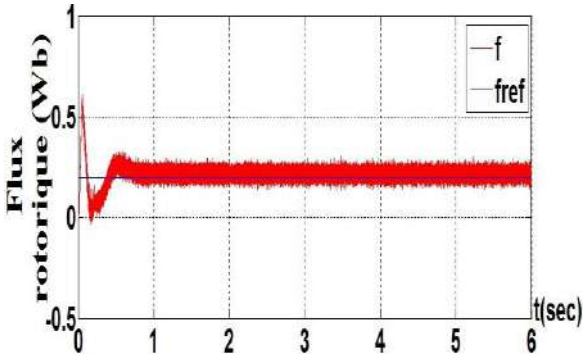


Figure (IV.18): Flux rotorique

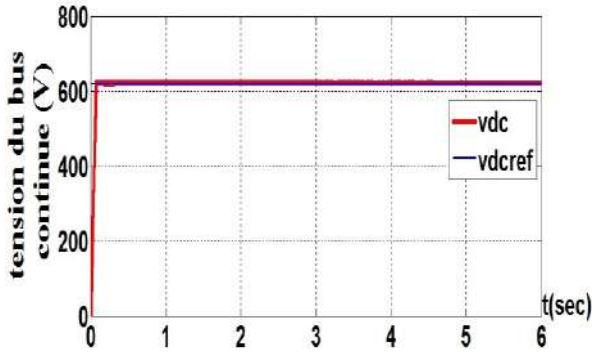


Figure (IV.19): Tension du bus continu

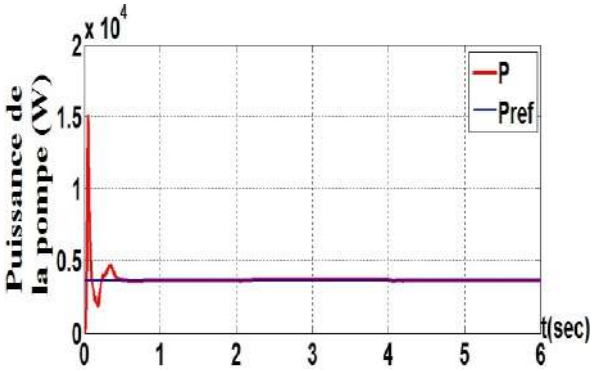


Figure (IV.20): Puissance de la pompe

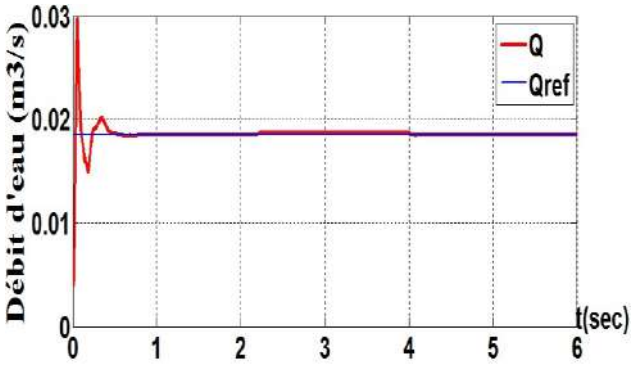


Figure (IV.21): Débit d'eau

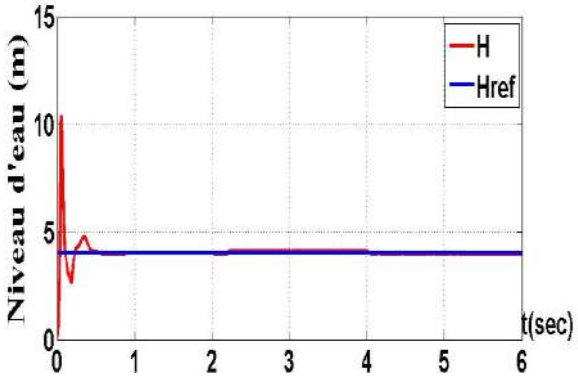


Figure (IV.22): Niveau d'eau de réservoir.

D'après les résultats de la simulation précédente, on remarque que la variation des paramètres des blocs motopompe (MAS-pompe) est proportionnelle à celles des blocs de commande. Les figures précédentes montrent l'évolution de la vitesse du vent, l'éclairement ainsi que la vitesse mécanique de la MAS et la MSAP qui bien suivie sa valeur de référence du couple.

Les résultats de simulation montrent ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT dans l'extraction de la puissance maximale, afin d'exploiter la vitesse optimale en vue d'obtenir le débit maximal disponible.

On remarque le niveau d'eau de réservoir, le débit d'eau ainsi que la puissance de pompe suivent leurs valeurs de référence et l'insuffisance enregistrée dans les simulations du 2ème et 3ème chapitre ont été réglé avec succès grâce à l'hybridation d'énergie photovoltaïque-éolien d'où la satisfaction des besoins journaliers d'eau.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés un dimensionnement d'un système de pompage hybride photovoltaïque-éolien (modélisation+commande).

Nous avons pu aboutir à l'optimisation du système étudié pour garantir les besoins journaliers d'eau demandé.

On conclu l'efficacité de l'hybridation dans un système de pompage hybride photovoltaïque-éolien pour satisfaire les besoins journaliers d'eau.

Conclusion générale

Conclusion :

Ce mémoire présente une étude d'un système de pompage hybride photovoltaïque-éolien totalement autonome. L'objectif de ce système est de garantir la production d'électricité nécessaire pour pomper de l'eau afin de satisfaire les besoins journaliers d'eau au niveau d'une ferme.

Dans le 1er chapitre, nous avons présenté les différents composants de ce système et leur principe de fonctionnement. Ainsi que leurs modèles mathématiques (modélisation).

En ce qui concerne le 2ème chapitre (système de pompage photovoltaïque), nous avons utilisé un hacheur Boost commandé par la technique MPPT (basé sur la méthode perturbation-observation), pour maximiser la puissance produite par le générateur photovoltaïque.

Pour le 3ème chapitre (système de pompage éolien), nous avons développé un code Matlab qui permet de calculer la puissance générée par l'éolienne choisie.

Dans le 4ème chapitre, nous avons présenté le système de pompage hybride photovoltaïque-éolien ainsi que tous ses composants et leurs modélisations en utilisant MATLAB/SIMILUNK. On a pu aboutir à des résultats meilleurs et plus satisfaisantes que les systèmes précédents (Le photovoltaïque en 2ème chapitre et l'éolien en 3ème chapitre).

Enfin, on conclure l'efficacité des systèmes hybrides à bases d'énergies renouvelables comme le système de pompage photovoltaïque-éolien autonome étudié, qui représente la meilleure solution pour la production d'électricité (pompage d'eau) aux niveaux des sites isolées dans le but de satisfaire les différents besoins journaliers des consommateurs.

Références Bibliographiques

[1] S.Belakehal ;« Commande des Machines à Aimants Permanents dédiées Aux Energies renouvelables », Thèse de doctorat, Université, Constantine, 2010.

[2] A. Abdelli « Optimisation Multicritère d'une Chaîne Eolienne Passive » Thèse de doctorat, Université de Bejaia, 2007.

[3] A.Guettaf « Optimisation Floue- Génétique d'un Système de Pompage Eolien », Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013.

[4] H. X. Yong, L, U, J .Burnett, «Weather data and probability analysis of Hybrid PV winds power generation systems in Hong Kong » Renewable energie 28(2003):1813-1824

[5] P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI, « Éoliennes », Techniques de L'Ingénieur, BM 4 640-2005.

[6] G.CUNTY, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud , Aixen- Provence, 2001, www.edisud.com.

[7] http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/comp/index .htm : Danish Wind Industry Association, 2010.

[8] B.Multon,X.Roboam, B.Dakyo, C.Nichita, O. Gergaud et H.Ben Ahmed, " Aérogénérateurs électriques," Techniques de l'ingénieur, D 3960, 2004.

[9] NAOUEL HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices Éolienne », mémoire de magister en électrotechnique, université MENTOURI de Constantine, 24/01/2008

[10] Energie éolienne,Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.

[11] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des Systèmes éoliens –intégration dans les réseaux électriques", la Revue3EL, no. 39, 2004

[12] L. Leclerq « Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans Un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes » thèse de Doctorat, université des sciences et technologies de Lille, France, 2004.

[13] A.Tamaarat **«** Modélisation et commande d'un système de Conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA » thèse doctorat Université Mohamed Khider de Biskra, 2005.

[14] Annane Adel « Analyse du comportement du moteur synchrone dans les Entraînements électriques à vitesse variable » thème magister en Électrotechnique, Université BADJI MOKHTAR- ANNABA, Faculté Des:Sciences de l'ingenieur Departement d'electromecanique

2009/2010

[15] A,F Jawad « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de La Localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à Aimants Permanents ». Thèse de Doctorat l'Université de technologie De Belfort- Montbéliard, 05 décembre 2008.

[16] K. Azeddine « Etude d'une commande non- lineaire adaptative d'une Machine synchrone à aimants permanents », Ph, Québec, Canada, 2000

[17] Toufik Rekioua « contribution à la modélisation et à la commande Vectorielle Des machines synchrones à aimants permanents ≫ Doctorat De l'I.N.P.L, Institut national de polytechnique de lorraine 1991

[18] Abdellauoi Hassina « etude experimentale de la position rotorique d'un Moteur synchrone a aimant permanent par variable électrique ».Mémoire De Magister en électrotechnique université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

[19] M.N.Mechalikh et C.Hamada, " Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau,"Mémoire, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2013.

[20] L.Zarour,"Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-Éolien Hors réseau," Thèse doctorat, Université Mentouri Constantine, Juin, 2010.

[21] H.Ibrahim, A.Ilinca and 1. Perron, Investigations des différentes Alternatives Renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites Isolés,Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne LREE-03-Septembre 2008.

[22] M.Chadel« dimensionnement d'un système de pompage d'eau potable Pour les sites de Tlemcen et Adrar » université de Tlemcen, 2012

[23] A.El Khabote et A.Wardi, J.P.Compte.« Problématique de l'alimentation En eau des populations rurales au Maroc, 2012 »

[24] A.Guettaf «Optimisation floue-Génétique d'un système de pompage Éolien », Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013

[25] N.Kasbadji Merzouk, M. Merzouk «Perspectives du pompage éolien en Algérie», Colloque CIRESS, 12-13 Decembre 2005, Ouargla

[26] KY. Thierry, S.Maurice « système photovoltaïque dimensionnement pour Pompage d'eau, pour une irrigation goute a goute », Mémoire de DEA en Physique appliqué, université d'Ouagadougou, 2010.

[27] B.Equer « le pompage photovoltaïque manuelle de cours », Energie Solaire Photovoltaïque Edition ellipses 1993

[28] J.Royer, T.Djianko, E.Schiller, B.sada Sy « le pompage photovoltaïque » Manuelle de cours à l' intention des ingénieurs et des techniciens

Bibliothèque nationale du canada, 1998

[29] A. Abdelli « Optimisation multicritère d'une chaine éolienne passive », Thèse de doctorat, 2007

[30] lonel Vechiu, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies rénouvelables dans un réseau autonome, 2005.

[31] Adam MIRECKI«Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie Dédiées à une éolienne de petite puissance», THÈSE de Doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, Nº D'ordre : 2213/2005.

[32] LATRECHE Mohammed Tahar « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système Éolien», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012

[33] GASSAB SAMIR «Modélisation d'une centrale hybride photovoltaïque-Éolienne» mémoire de magister de l'Université Ferhat Abbas – Sétif, décembre 2011.

[34] Mayouf Mesaoud, Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur Synchrone à aimant permanant, thèse de magister de l'université de Batna, 13-02-2008.

[35] B. N. Mobarkah, « Commande vectorielle sans capteur mécanique des Machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification 'en ligne' des paramètres », thèse de doctorat de L'Université de Téhéran, Iran. Décembre 2001

[36] S. Lalouni « Etude, commande et Simulation d'une chaine hybride (photovoltaiqueeolienne) de production d'énergie électrique » Thèse Doctorat, université de Bejaia, 2009

[37] N. Benbelaid, R. Maizia « Commande et optimisation d'un système de Pompage hybride (PV-Eolienne) » Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2016

[38] Steve Wilson, Pump affinity laws for centrifugal pumps, Grundfos. https://www.grundfos.com/content/dam/CBS/global/whitepapers/Affinity Laws . pdf.

[39] A.Khiareddine, C. Ben Salah, and M. F. Mimouni, "Determination of the Target speed corresponding to the optimum functioning of a photovoltaic System pumping and regulation of the water level," International Conference on Electrical Engineering and Software Applications, 2013, pp. 1-5

[40] K.Kendouci«Contribution à la Commande sans Capteur Mécanique d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », Thèse de doctorat. Université d'Oran, 2012

[41] B. Molle, « Les stations de pompage individuelles pour l'irrigation », juin 1996.

[42] Meflah Aissa « modélisation et commende d'une chaine de pompage photovoltaïque»

[43] MEDJBER.A ; « Modélisation et optimisation d'une système de production d'énergie hybride pv-éolien à l'aide des technique de l'intelligence artificielle » ; thèse de doctorat, Blida ,2016

[44] Denis Zoungrana « Cours d'approvisionnement en eau potable », EIER Novembre 2003

[45] F. Gacem. « Simulation des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable ». Mémoire de magister, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Saad Dahleb de Blida, 2008.

[46] Degla M. et Ben Ahmed B., « Dimensionnement d un système de pompage photovoltaïque », mémoire de fin d étude, mastère, Université de Wargla, juin 2017.

[47] L.Debou et D.Maghribi. <<Commande d'un système hybride(photovoltaïque éolienne)
de production d'énergie >>. Mémoire d'ingénieure d'état. Université de bejaia2008

[48] HAMZA Azzedine (Modélisation et Commande d'un Système Photovoltaïque

[49] MEDJBER.A "Modulisation et optimisation du système de pruction d'énergie hybride photovoltaique -éolinne à l'aide de technique de l'intéligence artificiel " thése de doctorat univ-Blida 2016

[50] D.Boukhers Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application ou au pompage.(2007 , Mémoire de Master université Mentouri de Constantine) .

[51] Mlle BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA « *La Commande D'un Système Photovoltaïque D'un Satellite* » *;mémoire de mastere ;* P 33 **;**Université de Tlemcen ; 8 Octobre 2013.

[52] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho, Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.24, mai 2009

[53] S.M.Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecol Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[54] A. Oi, *Design and simulation of photovoltaïque water pumping système,* Thèse de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.

[55] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d‟un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d‟ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005.

[56] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d‟un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d‟ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005.

[57] S. Issaadi, « Commande d‟une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger,2006

[58] N. Abouchabana, «Etude d‟une nouvelle topologie buck-Boost appliquée à un MPPT »;Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009

[59] Mme.OBEIDI,"Commande des hacheurs MPPT par logique floue", Ecole Nationale Polytechnique Mémoire de Magister, 2006.

[60] Antonio Luque and Steven Hegedus, «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», John Wiley & Sons Ltd, 2003

[61] Mariusz C. M. S., „„PWM rectifier with active filtering,““ *Ph.D. Thesis,Warsaw University of Technology, Poland 2004.*

[62] Ben Ammar F., „„Variateur de vitesse de hautes performances pour machine asynchrone de grande puissance,““ *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, N° 708, 1993.*

[63] G. Séguier et R. Bausiére, "les convertisseurs de l'électronique de puissance", la conversion continu-alternatif Tome 4, deuxième édition, Lavosier TEC II DOC.

[64] F. Labrique et G. Séguier, "La conversion Continu-Alternatif", Technique et Documentation, Paris, 1995.

[65] Benbrahim Amel, «Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents», Thèse de Magistère à université de Batna, juin 2009.

[66] A. Ferroudj. Commande Non Linéaire de la MSAP Sans Capteur de vitesse. Apporte des Méthode de l'Intelligence Artificielle, mémoire de magister, université de Batna, 2011

[67] Noureddine BOUNASLA"Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents"Université Ferhat ABBAS Sétif -1;*2014.p16*

[68] Ard-16] S.ARDALLAH, «Etude comparative entre un onduleur deux et trois nivaux de tension: appliqués à la commande d'une MAS à double alimantation» mémoire de master, Université Dr-Moulay Tahar de saida,2016.

[69] A. Mezouar, « Décomposition et réduction de modèles des procédés

électromécaniques : application à la commande des machines asynchrones », Thèse de doctorat, Université de Sidi-Bel-Abbes, Sidi- Bel-Abbes,2006.

[70] X.KESTELYN,''Modélisation vectorielle multi machines pour la commande des ensembles convertisseurs machines polyphasés'', Thèse de doctorat, Université de Lille 1, France, 2003.

[71] *RACHID ABDESSAMED, " Modélisation et simulation des machines électrique", livre en électrotechnique, Ellipses Edition Marketing S, A, 2011, Paris.*

[72] Bouhafna Sebti *" Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone Apport des Réseaux de Neurones" mémoire de magistère université de Batna 2013.*

[73] F. benchabane " Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattring"Mémoire de magister, université de Biskra, 2005

[74] A. Saiad "Commande à structure variable d'un système d'entraînement électrique" Mémoire de Magister, université de Batna, 2002.

[75] M.N. Mansouri*, N. Ghanmi et M.F. Mimouni "Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal"*Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008) 1 – 17*

[76] L.ZAROUR «Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque- éolien hors réseau », Thèse de doctorat en électrotechnique, université de Constantine, 2010.

[77] C. Hua, C. Shen, " Study of Maximum Power Tracking Techniques and Control of DC/DC Converters for Photovoltaic Power System", 29th annual IEEE power electronics specialists conference, PESC 98 record, Vol 1, pp 86-93, 1998.

[78] R.Chenni, L Zarour, M. Amarouayache, A Bouzid, A New Design for Analogue Maximum Power Point Tracking " International Review of Electrical Engineering -February 2008.

[79] L.Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », *Thèse présentée pour l'obtention du titre de doctorat à l'université Henri Poincary, Nancy I, en génie électrique* , 1999.

[80] D.Aitkaid « commande d'une machine asynchrone sans capteur mécanique, à l'aide de régulateurs fonctionnaires », Mémoire d'ingéniorat. Université de Tizi ouzo, 2011

Annexe

Annexe A

➢ Paramètre de GPV (6kw) :

- $R_s = 0.69$ Ohm
- $R_{sh} = 650$ Ohm
- $N_{CS} = 96$
- $N_{PP} = 2$
- $N_{PS} = 12$
- $\gamma = 1.16$
- $I_{cc} = 0.2$ A
- $q = 1.6\ 10^{-19}$ C
- $E = 1000 W/m^2$
- T=25°C=298K

➢ Paramètre de la turbine éolienne (5kw)

- R =3 m
- ro =1.22 kg/m^3
- G=35
- f=0.0003881 N.m/rad.s-1
- j=0.00176 $kg.m^2$
- Pi=3.14
- Lan=8
- P=1

➢ Paramètre de la GSAP (5kw)

- $R_s = 0.9585$ **Ohm**
- $L_d = 0.00525$ H
- $L_q = 0.00525$ H
- P=4
- V=132.5525 volt

➢ Paramètre de MAS (4kw)

- $R_s = 0.435$ohm
- $R_r = 0.815$ ohm
- L_s =2e-3 H
- $L_r = 2^e$-3 H
- M=69.31e-3H

- V=220 volt
- P=2238 VA
- J=0.089 Kg.m^2
- P=2
- F=50 Hrtz

➢ **Performances de la pompe centrifuge à une vitesse de 132.76 rd/s**

- Q_{ref}=0.0185 m^3/s
- H_{ref}=4 m
- $P_{mécref}$=3600 W
- η =78%
- ρ=1000 kg/m^3
- g=9.81m/s^2
- HMT=15.4 m

Annexe B

Table n.1

Pertes de charge dans les tuyaux d'acier (calcul des pertes dans la tuyauterie)

Tuyau G fi mm	Q m³/h	1	3	6	9	12	18	24	30	36	42	48	60	90	120	180	240	300	360	420
	Q l/min	16	50	100	150	200	300	400	500	600	700	800	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000	7000
G 1 DN 25		2,7 0,6	21 1,7	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
G 1 1/4 DN 32		0,7 0,35	5,5 1	22 2,1	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
G 1 1/2 DN 40		·	1,8 0,7	7 1,35	14 1,9	23 2,5	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
G 2 DN 50		·	0,5 0,4	2,2 0,8	4 1,25	8 1,5	17 2,5	28 3,2	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
G 2 1/2 DN 65		·		0,6 0,5	1,2 0,75	2,1 1	4,2 1,4	8 2	12 2,5	17 3	22 3,4	28 4	·	·	·	·	·	·	·	·
DN 80	HL v	·	·	·	·	0,8 0,7	1,6 0,95	2,8 1,25	4,2 1,6	6,5 2	7,5 2,1	10,5 2,6	15 3,3	·	·	·	·	·	·	·
DN 100	m/100m m/s	·	·	·	·	·	0,55 0,6	0,9 0,8	1,4 1,1	2 1,25	2,4 1,4	3,5 1,6	5 2	11 3,2	20 4	·	·	·	·	·
DN 125		·	·	·	·	·	·	·	·	·	0,9 0,95	1,2 1,1	1,8 1,4	4 2	6,5 2,7	15 4	·	·	·	·
DN 150		·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	0,6 0,9	1,5 1,4	2,5 1,7	5 2,7	8 3,5	14 4,8	·	·
DN 200		·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	0,4 0,8	0,6 1	1,3 1,6	2 2	3,5 2,6	4,6 3	6,5 3,5
DN 250		·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	0,4 1	0,7 1,3	1,1 1,6	1,6 2	2 2,3
DN 300		·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	0,3 0,9	0,45 1,25	0,7 1,4	0,9 1,6

Q : Débit.

HL : Pertes de charge en m pour 100 m.

v = Vitesse de passage max 1,5 mis pour l'aspiration et 3 *mis* pour le refoulement.

Table n. 2

Pertes de charge en cm pour les courbes, vannes, clapet de pied et clapet de non-retour

Vitesse de l'eau m/sec.	Courbes à angle vif α					α = 90° Courbes à angle arrandi					Vannes standard	Clapet de pie	Clapet de non-retour
	α = 30°	α = 40°	α = 60°	α = 80°	α = 90°	d/R = 0,4	d/R = 0,6	d/R = 0,8	d/R = 1	d/R = 1,5			
0,4	0,43	0,52	0,71	1,0	1,2	0,11	0,13	0,16	0,23	0,43	0,23	32	31
0,5	0,67	0,81	1,1	1,6	1,9	0,18	0,21	0,26	0,37	0,67	0,37	33	32
0,6	0,97	1,2	1,6	2,3	2,8	0,25	0,29	0,36	0,52	0,97	0,52	34	32
0,7	1,35	1,65	2,2	3,2	3,9	0,34	0,40	0,48	0,70	1,35	0,70	35	32
0,8	1,7	2,1	2,8	4,0	4,8	0,45	0,53	0,64	0,93	1,7	0,95	36	33
0,9	2,2	2,7	3,6	5,2	6,2	0,57	0,67	0,82	1,18	2,2	1,20	37	34
1,0	2,7	3,3	4,5	6,4	7,6	0,7	0,82	1,0	1,45	2,7	1,45	38	35
1,5	6,0	7,3	10	14	17	1,6	1,9	2,3	3,3	6	3,3	47	40
2,0	11	14	18	26	31	2,8	3,3	4,0	5,8	11	5,8	61	48
2,5	17	21	28	40	48	4,4	5,2	6,3	9,1	17	9,1	78	58
3,0	25	30	41	60	70	6,3	7,4	9	13	25	13	100	71
3,5	33	40	55	78	93	8,5	10	12	18	33	18	123	85
4,0	43	52	70	100	120	11	13	16	23	42	23	150	100
4,5	55	67	90	130	160	14	21	26	37	55	37	190	120
5,0	67	82	110	160	190	18	29	36	52	67	52	220	140