



Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Réalisé par :

AID Fatiha

Et

AMRANE Hadda

Thème

Etude d'un système hybride pour la génération de l'énergie électrique

Soutenu le : **02/07/2023**

Devant le Jury composé de :

Mr : HAROUN	M.C.B	Univ. Bouira	Président
MAAFA AMAR	M.C.A	Univ. Bouira	Encadreur
YASSA Nacera	M.C.A	Univ. Bouira	Examineur



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) عيد فتيحة الصفة: طالب

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 100416953 والصادرة بتاريخ 2016/04/05

المسجل(ة) بكلية: العلوم والعلوم التطبيقية. قسم: الهندسة الكهربائية

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Etude d'un système hybride pour la génération de l'énergie électrique

تحت إشراف الأستاذ : MAAFA Amar

أصرح بشرفي أنألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية

المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023/07/09

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

% 29

النسبة: %

الامضاء:



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة): عمران حدة الصفة: طالب

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 401023190 والصادرة بتاريخ 2022/03/15

المسجل(ة) بكلية: العلوم والعلوم التطبيقية. قسم: الهندسة الكهربائية

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Etude d'un système hybride pour la génération de l'énergie électrique:

تحت إشراف الأستاذ: MAAFA Amar

أصح بشرفي أنألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023/07/09

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

h. melly

% 29

النسبة: itin

الامضاء:

Dédicace 1

Je dédie ce modeste travail :

A MES TRÈS CHERS PARENTS pour m'avoir donné le goût aux études et m'avoir apporté un grand support moral lors de la rédaction de ce mémoire et tout au long de mes études, qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond
Amour.

A mes chères sœurs,

A ma cousine **SOUAD AID** et ma famille,

A mes amis (**SYLIA, SAADI, KADIROU ET YACINE**),

A mon binôme et ma meilleure amie **AMRANE HADDA**,

A tout le groupe d'Electrotechnique industrielle,

A ceux que j'aime et je respecte infiniment,

FATIHA

Dédicace 2

Je dédie ce modeste travail :

A MES CHÈRE PARENTS symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que dieu les protègent pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie. Je ne saurai jamais vous remercier pour toutes les années de sacrifice et de veuille
sur moi.

A mes chères sœurs en particulier **HANANE** et **SAMIRA** pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mon seul cher frère **SLIMANE** et ma famille

A mon binôme et ma meilleure amie **AID FATIHA**,

A mes amis (**SYLIA, SAADI, KADIROU ET YACINE**),

A tout le groupe d'Electrotechnique industrielle,

A ceux que j'aime et je respecte infiniment,

HADDA

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences et sciences appliquées de l'Université de Bouira.

Nous tenons particulièrement à remercier, Dr. MAAFA Amar, d'avoir honoré notre mémoire comme promoteur.

Nous remercions également tous les membres du jury qui nous faisons honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

Enfin, nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص

سلسلة في متزامنتين غير لألتين مزدوجة طاقة إمداد على يعتمد للرياح هجين نظام دراسة هو الأطروحة هذه من الغرض ومولد الطاقة شبكة بين الاتجاه ثنائي باتصال الألتين سلسلة تسمح. الشمسية الألواح أساس على الكهروضوئية والطاقة الألواح على القائم الكهروضوئي النظام تركيب يمكن. كهرباء إلى الرياح طاقة تحويل كفاءة من استخدام يزيد. الرياح في الطاقة العام التوافر تحسين على الشمسية الألواح تكامل يعمل. ضعيفة الرياح فيها تكون التي المناطق في الشمسية النظام هذا مثل جدوى عليها الحصول تم التي المحاكاة نتائج تؤكد. الهجين النظام.

الشمسية, الواح , آلات , هجين : المفاتيحية الكلمات

Résumé

L'objet de ce mémoire est d'étudier un système hybride éolien à base de deux machines asynchrones double alimentation en cascade (MASEC), et photovoltaïque à base de panneaux solaire. La cascade de deux machines permet une connexion bidirectionnelle entre le réseau électrique et le générateur éolien. L'utilisation d'une MASEC permet de maximiser l'efficacité de conversion de l'énergie éolienne en électricité.

Le système photovoltaïque à base de panneaux solaires peut être installé dans les zones où le vent est faible. L'intégration de panneaux solaire permet d'améliorer la disponibilité globale de l'énergie dans le système hybride. Les résultats de simulation obtenus confirment la faisabilité d'un tel système.

Mots clés : système, hybride, Cascade, panneau, solaire

Abstract

The purpose of this work is to study a wind hybrid system based on cascaded doubly fed induction machine and photovoltaic based on solar panels. The machine cascade allows a two-way connection between the electrical network and the wind generator. The use of a CDFIG allows maximizing the efficiency of conversion of wind energy into electricity. And photovoltaic hybrid system based on solar panels can be installed in the area where the wind energy production is low. The simulation results obtained confirm the feasibility of this system.

Keywords : system, hybrid, cascade, solar, panel.

Sommaire :

Dédicace	I
Remerciements	II
Liste des figures.....	7
Liste des tableaux	8
Introduction générale	11
Introduction Générale	1
Chapitre I : Systèmes hybrides à énergies renouvelables	2
I.1. Introduction	2
I.2. Production de l'électricité à partir des sources d'énergies renouvelables	2
I.3. Les type des énergies renouvelables.....	2
I.3.1. Energie hydroélectrique	2
I.3.2. Energie solaire thermique	3
I.3.3. Energie Biomasse	4
I.3.4. Energie géothermique	4
I.3.5. Energies marine	5
I.3.6. Energie éolienne	6
I.3.7. Energie photovoltaïque	6
I.4. Système hybride	7
I.4.1. Définition	7
I.4.2. Classification	8
I.4.2.1. Le régime du fonctionnement.....	8
I.4.2.2. La structure du système hybride	8
I.4.3. Avantages et inconvénients des systèmes hybrides.....	9
I.4.3.1 Avantages	9
I.4.3.2 Inconvénients.....	10
I.4.4. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle	10
I.4.4.1. Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle	10
I.4.4.1.1. Types de structures.....	10
I.4.4.2. Systèmes éolien/source conventionnelle	12
I.4.4.3. Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel	12
I.4.5. Systèmes hybrides sans source conventionnelle	13
I.4.5.1. Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage	13
I.4.5.2. Système hybride éolien/stockage.....	13
I.4.5.3. Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage	13
I.4.5.4. Source renouvelable avec réseau	13

Chapitre II : Modélisation mathématique de la chaîne de conversion.....	15
II.1. Introduction.....	16
II.2. Modélisation de la turbine	16
II.2.1. Modèle du multiplicateur.....	18
II.2.2. Equation dynamique de l'arbre	18
II.3. Modélisation de l'onduleur de tension	19
II.4. Le principe de la commande MLI	20
II.5. Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné.....	21
II.5.1 Description de la MAS	21
II.5.2. Hypothèse de travail	21
II.5.3. Modèle de la MAS a rotor bobiné dans le repère (abc).....	21
II.5.4. Modèle dynamique de la MAS à rotor bobiné dans le repère de Park :.....	22
II.5.5. Représentation d'état de la MAS a rotor bobiné	23
II.5.6. Modélisation de la machine asynchrone en cascade MASEC	25
II.5.6.1. Machine asynchrone en cascade.....	25
II.5.6.2. Modèle de la cascade	26
II.6. Résultats de la simulation	30
II.7. Conclusion	32
Chapitre III : Contrôle des puissances de la MASEC.....	33
III.1. Introduction	40
III.2. Description du système étudié	40
III .3. Modèle pour le contrôle indépendant des puissances du stator 1	41
III .4. Relation entre la tension du deuxième stator et son courant	43
III.5. Relation entre la puissance du premier stator et le courant du deuxième stator ...	43
III .6. Contrôle direct de puissance	44
III .7. Synthèse du régulateur PI.....	45
III .8. Les résultats de la simulation.....	46
III .8. Conclusion	47
Chapitre IV : Etude du système hybride	48
IV.1. Introduction	53
IV.2. Description du système étudié	53
IV.3. Paramètres caractéristiques d'un panneau photovoltaïque.....	53
IV.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	55
IV.4.1. Différentes équations de la cellule PV	56
IV.4.1.1. Le photo-courant I_{ph}	56
IV.4.1.2. Le courant de saturation I_0 :.....	56
IV.4.1.3. Courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) I_{rs} :.....	57

IV.4.1.4. Le courant de résistance shunt :	57
IV.4.1.5. Le courant du panneau	57
IV.5. Simulation sous Matlab-Simulink	58
IV.6. Conclusion.....	60
Conclusion générale.....	62
Liste des références.....	63

Liste des figures

Chapitre I : Systèmes hybrides à énergies renouvelables

Figure I. 1. Les parcours de conversion pour les énergies renouvelables	2
Figure I. 2. schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique.....	3
Figure I. 3. Energie solaire thermique : tour solaire et parc solaire	4
Figure I. 4. Bilan de cycle biomasse.....	4
Figure I. 5. Le principe d'utilisation de la géothermie pour générer de l'électricité.....	5
Figure I. 6. L'énergie marémotrice et vague.....	5
Figure I. 7. Ferme éolienne	6
Figure I. 8. Conversion de l'énergie solaire en électricité	7
Figure I. 9. Schéma général du système d'énergie hybride	8
Figure I. 10. Classification des systèmes hybrides.....	9
Figure I. 11. Système hybride avec connexion série.....	11
Figure I. 12. Système hybride à commutation	11
Figure I. 13. Système hybride à connexion parallèle	12

Chapitre II : Modélisation mathématique de la chaîne de conversion

Figure II. 1. Schéma de la turbine éolienne	16
Figure II. 2. Coefficient de puissance (C_p) en fonction du ratio de la vitesse de la turbine(λ).....	17
Figure II. 3. Schéma bloc du modèle de la turbine	19
Figure II. 4. Schéma de l'onduleur de tension à changer	19
Figure II. 5 .Machine asynchrone en cascade	26
Figure II. 6. la vitesse de rotation de la MASEC	31
Figure II. 7. les puissances active et reactive de stator 1	31
Figure II. 8. La tension et courant de stator1	31

Chapitre III : Contrôle des puissances de la MASEC

Figure III. 1.Schéma du système étudié.....	40
Figure III. 2.Schéma-bloc du système à réguler	44
Figure III. 3.Schéma-bloc du contrôle direct	45
Figure III. 4..Représentation schématique de la boucle de régulation	45
Figure III. 5. Les résultats de simulation	47

Chapitre IV : Etude du système hybride

Figure IV. 1.Système étudié.....	53
Figure IV. 2.Courbe caractéristique P-V	54
Figure IV. 3.Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	55
Figure IV. 4.les résultats de simulation	59

Liste des tableaux

Tableau II. 1.Pulsations des grandeurs des deux machines	27
Tableau IV. 1.Caractéristique électrique d'une photopile (cellule PV)	57
Tableau IV. 2. Caractéristique électrique de la cellule PV dans les conditions standards<CST> T=25°C, G=1000W /m ²	58

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

MADAs	Machine asynchrone double alimentation
MASEC	Machine asynchrone double alimentation en cascade
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
PI	Proportionnel Intégrateur

Symboles

P_v	Puissance du vent ou puissance éolienne (W)
ρ	la densité de l'air (1.22kg/m ³ à la pression atmosphérique à 15°C)
S	la surface circulaire balayée par la turbine
V	la vitesse du vent (m/s)
P_{aer}	Puissance aérodynamique (W)
C_p	Le coefficient de puissance
B	Angle de l'orientation de la pale (°)
λ	Rapport de vitesse
$\Omega_{turbine}$	Vitesse angulaire de la turbine (rad/s)
C_g	le couple issu du multiplicateur
R	Rayon de la pale (m)
C_{aer}	couple aérodynamique
Ω_{mec}	la vitesse de la génératrice
J_{totale}	l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice
C_{mec}	le couple mécanique
C_{em}	le couple électromagnétique
C_{vis}	le couple des frottements visqueux
f_p	le rapport entre la fréquence de la porteuse
f_r	la fréquence de la référence
L_{ss}	Matrice d'inductances statoriques.

L_{rr}	Matrice d'inductances rotoriques.
M_{sr}	Matrice d'inductances mutuelles stator-rotor.
$L(\theta)$	la matrice inductance
Z	Matrice d'impédance
L	Matrice d'inductance
p_j	La puissance dissipée
P_{em}	La puissance électromagnétique.
ω_{s1}	Pulsation statorique de MADA1
ω_{g1}	Pulsation rotorique de la MADA1
ω_{s2}	Pulsation statorique de la MADA2
ω_{g2}	Pulsation rotorique de la MADA2
Ω	vitesse mécanique du synchronisme de l'arbre commun ;
p_1	Nombre de paires de pôles de la MADA 1
p_2	Nombre de paires de pôles de la MADA2
U	Vecteurs des tensions dans le repère de Park
i	courants dans le repère de Park

Introduction générale

Introduction Générale

Dans ces dernières années la consommation mondiale énergétique augmente [1], par conséquence un épuisement des énergies fossiles avec une grave pollution qui menace les organismes vivants et l'environnement. Cependant, l'utilisation des énergies renouvelables est limitée par la variabilité des sources qui risque de diminuer leur fiabilité, ainsi que la fluctuation de la charge selon les périodes annuelles ou journalière. L'énergie électrique provenant de source renouvelable en particulier le vent, qui est considéré comme une alternative de production intéressante dans les systèmes d'énergie électrique du monde d'aujourd'hui.

La solution à retenir, en particulier, est certainement la combinaison des différents types d'énergies renouvelables associées avec des unités disponibles de stockage ; pour assurer la continuité de la fourniture électrique à l'utilisateur [2]. Dans ce contexte on s'intéresse à l'étude d'un système hybride éolien à base de machine asynchrone en cascade (MASEC) et photovoltaïque à base de panneaux solaire.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres traitant respectivement les thèmes suivants :

Le premier chapitre est consacré à la définition du système hybride, ses différents types, leurs architectures, ainsi que les avantages et les inconvénients de chacun système.

Le deuxième chapitre réservé au développement, sur Matlab, du modèle mathématique de la chaîne de conversion ; à savoir la turbine éolienne, un onduleur de tension, ainsi que la modélisation de la machine asynchrone en cascade.

Le troisième chapitre portant sur le contrôle de puissance de la MASEC et son association avec un convertisseur. [3]

Le quatrième chapitre se concentre sur l'analyse d'un système énergétique hybride combinant une éolienne et des panneaux solaires photovoltaïques. L'objectif principal est le contrôle précis de la puissance et le maintien une tension stable et la continuité de système.

Ce mémoire sera clôturé avec une conclusion générale qui résumera toutes les étapes que l'on a réalisées pour notre système hybride.

Chapitre I : Systèmes hybrides à énergies renouvelables

I.1. Introduction

Un système hybride est une combinaison de plusieurs sources d'énergie qui permet de produire de l'électricité ou de la puissance mécanique. Ces sources d'énergie peuvent être traditionnelles (comme l'électricité du réseau ou les générateurs à combustion interne) ou renouvelables (énergie solaire, éolienne, hydraulique). Le but premier d'un système hybride est de réduire les émissions de gaz à effet de serre en limitant l'utilisation d'énergie fossile, tout en améliorant la fiabilité et l'efficacité de l'alimentation électrique. De nos jours, les systèmes hybrides peuvent être utilisés pour une variété d'applications, allant des maisons aux entreprises, en passant par les véhicules, les sites isolés et les zones urbaines.

I.2. Production de l'électricité à partir des sources d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables englobent toutes les sources d'énergie considérées comme inépuisables. Leur origine est directe ou indirecte du soleil, cependant, leur disponibilité est limitée à des endroits et des moments spécifiques. La Figure I.1 représente une vision d'ensemble des principales ressources énergétiques disponibles sur Terre, qui peuvent être exploitées de manière durable pour produire de l'électricité. Ces formes d'énergie ont un impact environnemental réduit, principalement en évitant les émissions de gaz à effet de serre et la production de déchets dangereux lors de leur utilisation.[4]

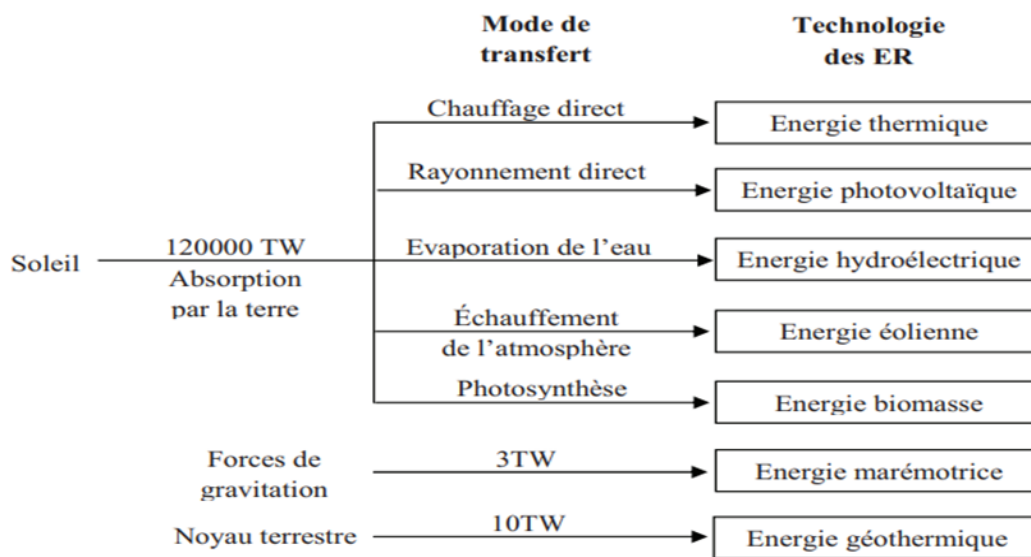


Figure I. 1. Les parcours de conversion pour les énergies renouvelables

I.3. Les type des énergies renouvelables

I.3.1. Energie hydroélectrique

Il est important de souligner que l'énergie hydraulique est, de loin, la forme d'énergie renouvelable la plus mature et la plus avancée. Elle implique la conversion de l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique à l'aide d'une ou plusieurs turbines hydrauliques

couplées à des générateurs électriques. La puissance maximale générée dépend de la hauteur de la chute d'eau, du débit d'eau et des caractéristiques mécaniques de la turbine.[5]

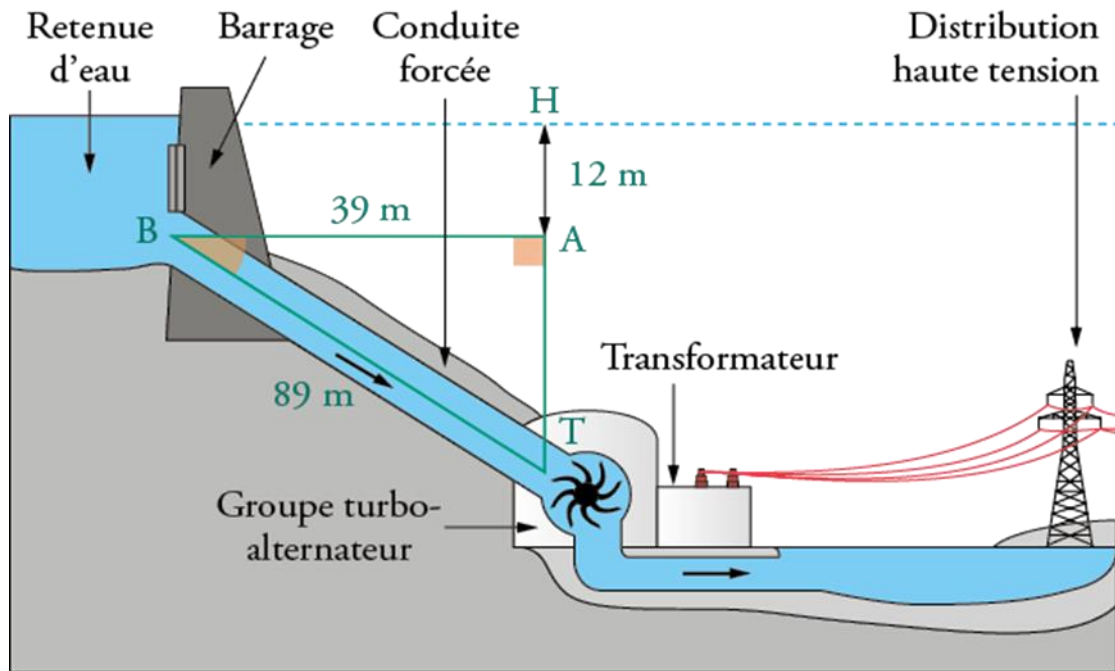


Figure I. 2. schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique

I.3.2. Energie solaire thermique

Les systèmes thermo-solaires sont spécifiquement conçus pour concentrer les rayons solaires, ce qui permet d'atteindre des températures élevées et d'optimiser le rendement des machines thermiques (selon le principe de Carnot). Les générateurs de puissance élevée se déclinent principalement en deux types qui exploitent le rayonnement direct du soleil.[5]

La technologie thermo-solaire à rayonnement direct se manifeste sous deux formes principales :

- Le parc solaire utilise des réflecteurs paraboliques qui prennent la forme de sections de cylindres.
- La tour solaire centrale capte les rayons lumineux provenant d'un ensemble de miroirs appelés héliostats, disposés au sommet de la tour et suivant le mouvement du soleil.



Figure I. 3. Energie solaire thermique : tour solaire et parc solaire

I.3.3. Energie Biomasse

La biomasse se réfère à la partie biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture, de l'élevage des animaux, de la pêche, de l'aquaculture, ainsi que des déchets industriels et municipaux [5].

La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- La fermentation des déchets permet de capturer le gaz méthane, qui peut ensuite être utilisé comme source d'énergie.
- La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans les deux cas, l'énergie thermique produite peut être utilisée pour générer de l'électricité dans des centrales thermiques. Cette forme d'énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées ne dépassent pas les quantités produites.



Figure I. 4. Bilan de cycle biomasse

I.3.4. Energie géothermique

La croûte terrestre présente un gradient de température moyen de 3 °C par tranche de 100 mètres [6]. La géothermie consiste à étudier et exploiter ce phénomène d'augmentation de la température en fonction de la profondeur. Son objectif est d'extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour la convertir en électricité en utilisant des turbines.

Pour capturer l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut provenir d'une nappe captive naturelle, de l'injection d'eau dans une roche chaude imperméable ou de puits spéciaux.

Dans tous les cas, le fluide se réchauffe en absorbant la chaleur du sol et remonte ensuite avec une température plus élevée. Le principe d'utilisation de la géothermie pour générer de l'électricité est illustré dans la figure I.5.

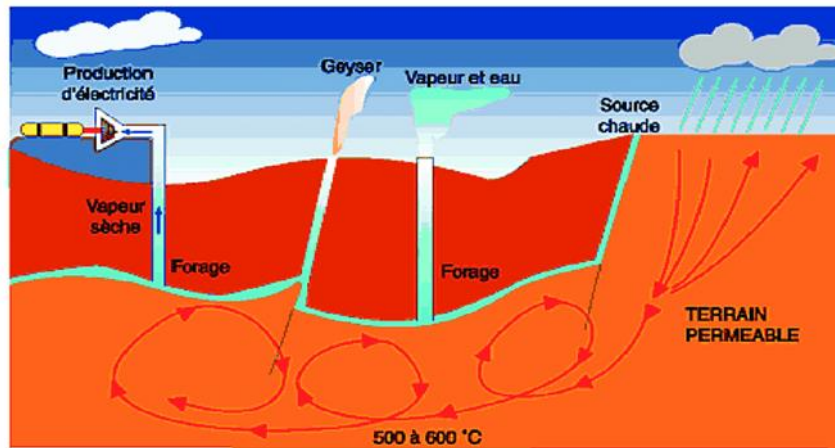


Figure I. 5. Le principe d'utilisation de la géothermie pour générer de l'électricité

I.3.5. Energies marine

L'énergie marine, également appelée énergie des mers, est produite à partir de différentes sources présentes dans le milieu marin. Parmi celles-ci, on trouve l'énergie marémotrice qui tire parti du mouvement de l'eau créé par les marées. On trouve également l'énergie des vagues qui exploite la puissance du mouvement des vagues. Une autre technologie utilise les courants sous-marins pour générer de l'énergie. Ces différentes sources d'énergie marine sont utilisées pour produire de l'électricité de manière durable et renouvelable.

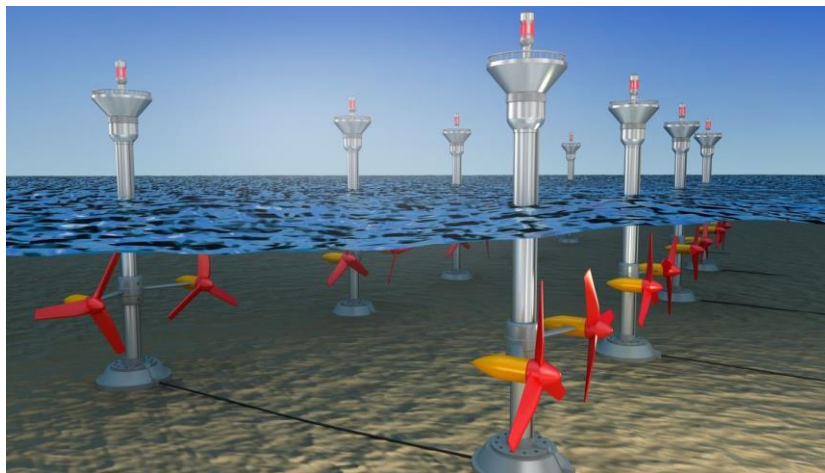


Figure I. 6. L'énergie marémotrice et vague

Comme les autres sources d'énergie renouvelable, l'énergie marine ne génère pas de pollution lors de sa production. On remarque également que son potentiel énergétique disponible est immense, ce qui lui confère de grandes perspectives d'avenir [6]. Cependant, il est important de noter que la récupération de cette énergie est extrêmement complexe en raison des défis posés par l'environnement marin, qui est à la fois hostile et imprévisible [7]. De plus, les investissements nécessaires pour développer cette technologie sont considérables. Malgré ces obstacles, des progrès sont réalisés dans la recherche et le développement afin de surmonter ces difficultés et d'exploiter au maximum le potentiel de l'énergie marine.

I.3.6. Energie éolienne

Une éolienne est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique grâce à une machine électrique. Les termes "parc éolien" ou "ferme éolienne" sont utilisés pour désigner des ensembles regroupant des unités de production d'électricité éolienne, qu'elles soient installées sur terre ("onshore") ou en mer ("offshore").[6]



Figure I. 7. Ferme éolienne

I.3.7. Energie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue en exploitant directement le rayonnement solaire. Les modules photovoltaïques, qui sont composés de cellules photovoltaïques à base de silicium, sont capables de convertir les photons en électrons. Cette conversion photovoltaïque se produit au sein de matériaux semi-conducteurs. En résulte un courant continu d'énergie qui peut être utilisé directement [8].

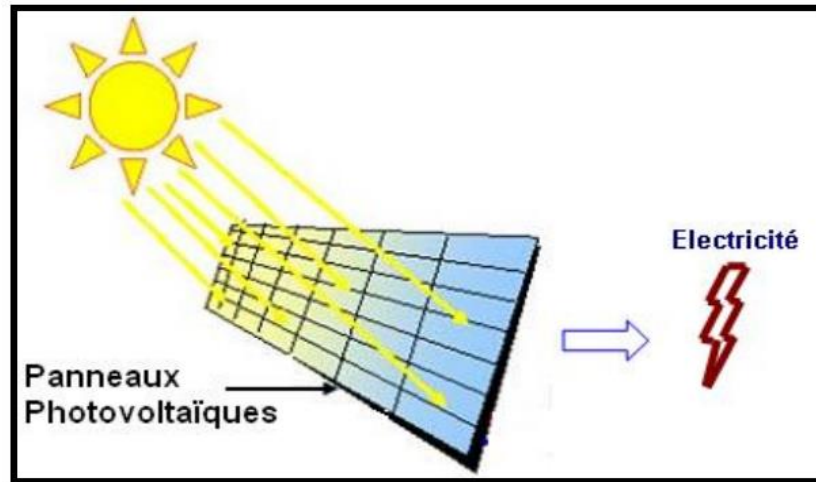


Figure I. 8. Conversion de l'énergie solaire en électricité

I.4. Système hybride

I.4.1. Définition

Un couplage des sources d'approvisionnement et la création d'un système hybride (SH) peuvent résoudre le problème de l'électricité variable et peu fiable produite par les énergies renouvelables. Un système électrique hybride à énergie renouvelable (SHSER) se compose de plus d'une source d'énergie. Un dispositif de stockage peut être inclus dans un système hybride. D'un point de vue plus global, le système énergétique d'un pays donné peut être considéré comme un système hybride.[9][10]

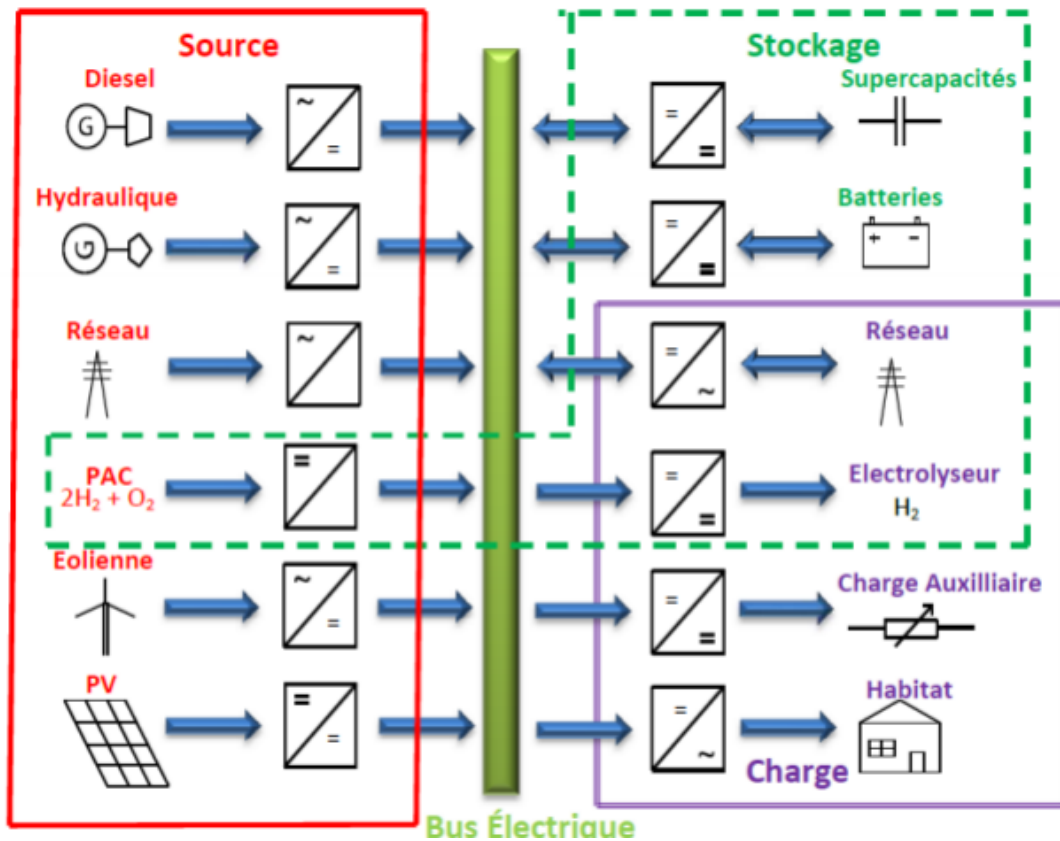


Figure I. 9. Schéma général du système d'énergie hybride

I.4.2. Classification

Il existe plusieurs classifications de systèmes hybrides basées sur des critères sélectionnés. Les classifications les plus courantes sont présentées ci-dessous.

I.4.2.1. Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on a un système hybride qui fonctionne en parallèle avec le réseau, également appelé connexion réseau. Ces systèmes aident à répondre à la charge du système électrique du pays. Le deuxième groupe de systèmes hybrides fonctionne en mode isolé ou autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs hors réseau : refuges de montagne, îles, villages isolés, signalisation routière, etc. [13]

I.4.2.2. La structure du système hybride

Selon la structure organisationnelle du système, le processus de classification peut tenir compte de trois facteurs. La présence ou l'absence d'une source d'énergie traditionnelle est le premier critère. Cette source conventionnelle pourrait être un générateur diesel, une petite turbine à gaz, ou une centrale électrique complète dans le cas d'une étude de réseau électrique.

Un deuxième critère est de savoir si un dispositif de stockage est présent ou non. Avoir un stock permet une meilleure satisfaction de la charge électrique pendant l'absence d'une ressource primaire qui peut être convertie en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent

être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des avions volant à l'inertie, etc.

La dernière catégorie qui peut être utilisée est celle qui traite du type de sources d'énergie renouvelables qui sont employées. La structure du système peut inclure un système photovoltaïque, un éolien, un convertisseur d'énergie hydraulique (utilisant des centrales hydroélectriques centrales ou utilisant des courants d'eau), ou une combinaison de ces sources. La quantité d'énergie disponible, qui dépend de l'endroit où le système hybride est installé, est un facteur clé dans le choix de la source à utiliser. La consommation d'électricité est un autre facteur qui influence. La nécessité d'une source supplémentaire, d'un périphérique de stockage et/ou d'une source conventionnelle, entre autres, est déterminée par son importance.[9][14]

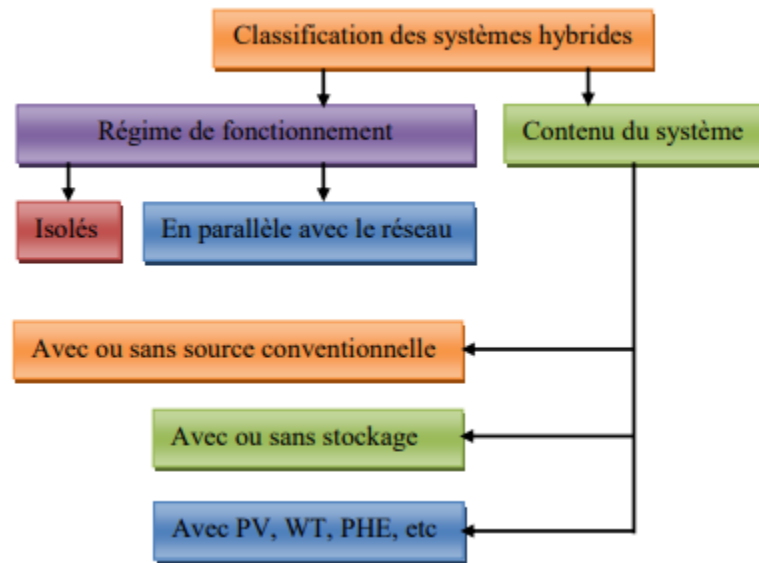


Figure I. 10. Classification des systèmes hybrides

I.4.3. Avantages et inconvénients des systèmes hybrides

Les avantages et les inconvénients des systèmes énergétiques hybrides peuvent être résumés comme suit [17], [18] :

I.4.3.1 Avantages

- Deux ou plusieurs sources d'énergie renouvelables peuvent être intégrées dans un seul système, dépend du potentiel local d'énergie renouvelable local.
- Tous les systèmes hybrides d'énergie renouvelable ne produisent aucune forme d'émissions, (telles que le photovoltaïque et les éoliennes).
- Modulaire (systèmes photovoltaïques et éoliens) sont faciles à installer et dans la plupart des cas ne nécessite aucune conception pour un usage domestique.
- Les petits systèmes hybrides sont moins chers que les grands systèmes complexes comme les systèmes nucléaires.
- Le combustible du SEH est abondant, gratuit et inépuisable, donc l'électricité générée grâce à ce système est indépendant du prix du carburant.

I.4.3.2 Inconvénients

- Complexité accrue du système.
- Difficulté à optimiser les différents organes du système.
- Plus complexe que les systèmes à source unique, nécessitant du stockage.
- Coût d'investissement élevé par rapport aux générateurs diesel.
- Les composants HES peuvent avoir une durée de vie beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement connecté à un réseau interconnecté).

I.4.4. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle

I.4.4.1. Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle

Ce type de système hybride peut être utilisé dans des endroits caractérisés par des champs solaires très importants, comme notre pays. Le but de ces systèmes lorsqu'ils fonctionnent en mode autonome est de fournir de l'électricité sans interruption aux maisons, aux bâtiments résidentiels ou administratifs ou aux villages. Les systèmes autonomes contiennent généralement des batteries, mais contiennent également d'autres dispositifs de stockage. La batterie et le champ photovoltaïque génèrent du courant continu. D'autre part, un moteur diesel peut entraîner un continu ou un alternateur. La plupart du temps, les consommateurs veulent du courant alternatif. [18] [21]

I.4.4.1.1. Types de structures

Ensuite, on distingue différentes architectures système selon le type de machine électrique couplée au moteur diesel. Ces structures ont été décrites et classées selon le type de flux d'énergie. Chaque configuration a ses avantages et ses inconvénients. Les configurations sont : [12][19][20]

A) Connexion série :

Dans ce cas, un générateur diesel est connecté au bus DC. Le raccordement peut être direct (dans le cas d'un générateur de courant continu) ou via un redresseur. Un système photovoltaïque et des batteries sont également connectés à ce bus. Les consommateurs sont alimentés par des onduleurs. Un schéma fonctionnel d'un système hybride avec cette configuration est illustré à la figure I.11. Dans cette configuration, le générateur diesel peut alimenter la charge ou charger la batterie via un convertisseur électronique. Selon la stratégie de gestion du système hybride, l'énergie générée par l'appareil. Le photovoltaïque peut alimenter directement les charges ou via des batteries.

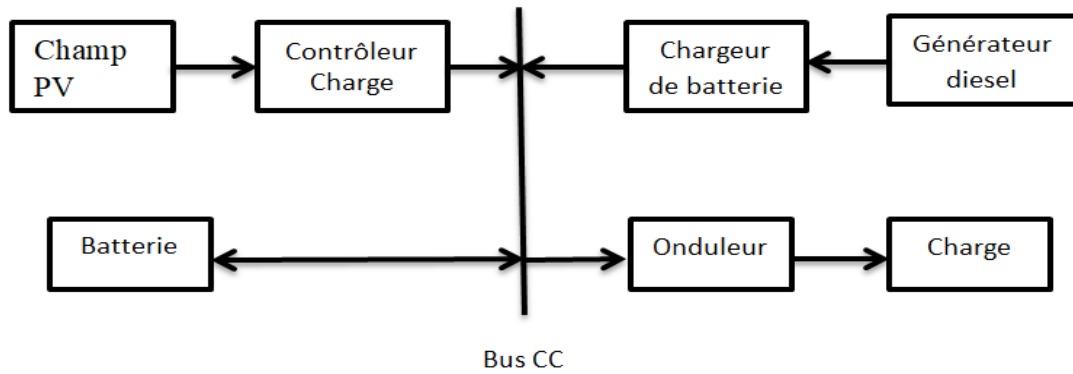


Figure I. 11. Système hybride avec connexion série

B) Configuration à commutation

Malgré quelques inconvénients, il est souvent utilisé. Les consommateurs peuvent être alimentés par des onduleurs à partir de sources d'alimentation conventionnelles ou d'installations photovoltaïques et de batteries. Il est impossible de manger des deux en même temps. Le générateur diesel peut charger la batterie via un redresseur. En raison de la complexité du système hybride, la gestion du système doit être automatisée. Le schéma du système est illustré à la figure I.4.

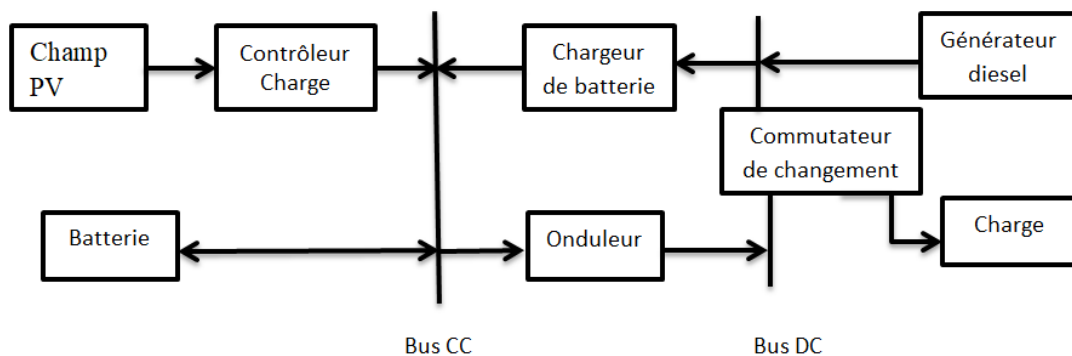


Figure I. 12. Système hybride à commutation

C) Configuration à connexion parallèle

Le générateur diesel est connecté au bus de courant alternatif, tandis que l'installation photovoltaïque et la batterie sont connectées à un autre bus dédié au courant continu. Les deux bus sont reliés par le biais d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Ce convertisseur peut fonctionner de deux manières : en tant que redresseur, lorsque le générateur diesel alimente la consommation électrique et contribue au chargement de la batterie, ou en tant qu'onduleur, lorsque la charge (ou une partie de celle-ci) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. Cette configuration permet ainsi d'alimenter la charge à partir des deux bus simultanément. Vous pouvez observer le schéma de ce système hybride sur la figure I.13.

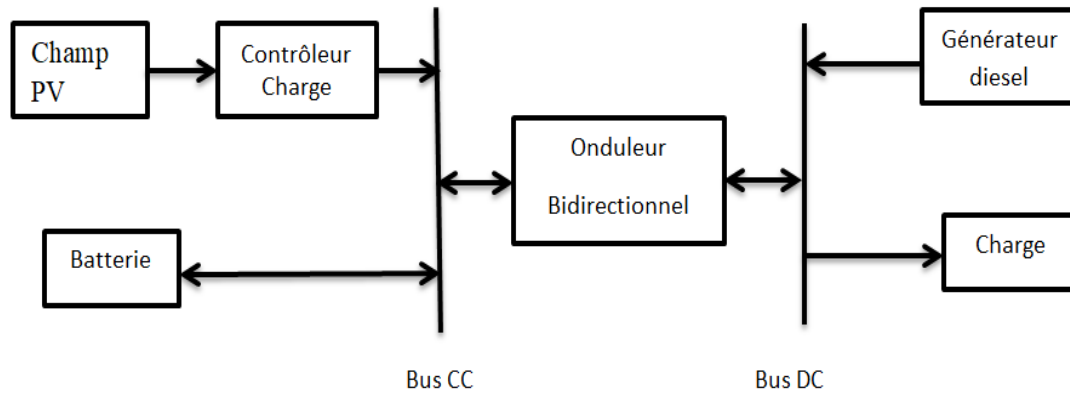


Figure I. 13.Système hybride à connexion parallèle

I.4.4.2. Systèmes éolien/source conventionnelle

Se distinguent des études sur les systèmes hybrides photovoltaïques en raison de la capacité des éoliennes à produire du courant alternatif identique à celui du générateur diesel. Cette similarité permet une réduction de la diversité des configurations possibles pour les systèmes hybrides. Ces systèmes sont particulièrement répandus dans les îles où les brises marines et les vents favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité. Des études ont été réalisées sur des systèmes installés sur des îles de différentes tailles, allant des petites îles comme les îles Canaries, en passant par des îles de taille moyenne comme la Corse, jusqu'aux grandes îles comme l'Angleterre.

Les charges alimentées par ces systèmes hybrides sont diverses et peuvent inclure des habitations isolées, des bâtiments résidentiels, des bâtiments publics, des villages ou même des îles entières.

Dans ces cas, le système hybride fonctionne en régime autonome, ce qui signifie qu'il n'est pas connecté au réseau électrique principal. Lorsqu'un système hybride fonctionne en régime autonome, il est courant d'intégrer un stockage d'énergie classique sous forme de batteries. Cela permet de stocker l'énergie produite par les éoliennes et le générateur diesel pour une utilisation ultérieure lorsque la demande électrique est élevée ou lorsque les sources d'énergie renouvelable ne sont pas disponibles de manière constante [19] [20] [22].

I.4.4.3. Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel

L'installation d'un tel système vise à diversifier les sources d'énergie renouvelable dans le but de réduire de manière significative la consommation de combustible. En combinant les sources d'énergie renouvelable, il est possible d'optimiser la production d'énergie et de réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Des études sont également menées sur l'interconnexion de ces systèmes avec le réseau électrique, en particulier dans l'état de New York.

Ces systèmes sont utilisés pour alimenter en électricité des maisons, des refuges et des villages. Ils peuvent fonctionner de manière autonome, indépendamment du réseau électrique principal, ou être interconnectés avec le système électrique national du pays. Pour assurer un

approvisionnement continu en énergie, le stockage peut être réalisé à l'aide de batteries, de réservoirs d'hydrogène équipés d'électrolyseurs et de piles à combustible, ou d'une combinaison de ces technologies. Ces solutions de stockage permettent de stocker l'énergie produite par les sources renouvelables pour une utilisation ultérieure, garantissant ainsi une alimentation fiable et durable, même lorsque les conditions de production d'énergie renouvelable sont variables [20] [21].

I.4.5. Systèmes hybrides sans source conventionnelle

Ces systèmes hybrides sont principalement utilisés en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou la connexion au réseau électrique sont difficiles, voire impossibles. La suite de ce paragraphe présente quatre configurations de systèmes hybrides, avec ou sans stockage, qui sont utilisées dans ces contextes [18].

I.4.5.1. Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage

L'installation photovoltaïque doit être raccordée à une autre source d'énergie afin de répondre à la charge la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent une maison ou un village, un ensemble d'habitations connectées en parallèle au réseau. Ainsi, il permet de pallier les surtensions en bout de ligne et les coupures de courant lors des coupures de réseau. [18][21][22]

I.4.5.2. Système hybride éolien/stockage

L'interconnexion des dispositifs de stockage d'énergie avec les éoliennes peut avoir deux objectifs possibles : agir comme un tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau, puis le dispositif peut lisser les variations rapides de puissance des éoliennes, un effet à long terme rôle de stockage, en mode autonome permet d'alimenter les consommateurs lors de faibles vitesses de vent. Les réseaux peuvent être grands, comme aux États-Unis, ou petits (réseaux insulaires). Comme pour les autres systèmes décrits précédemment, ils peuvent être utilisés comme maison ou bâtiments (hôtels) et même villages. Les modes de stockage étudiés pourraient être des batteries, des électrolyseurs avec des réservoirs d'hydrogène. [18] [21]

I.4.5.3. Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage

Ce type de système hybride est rarement utilisé car il ne garantit pas une alimentation électrique fiable. Il manque soit une source d'énergie conventionnelle, soit un dispositif de stockage. En raison de ces limitations, les recherches sur ces systèmes sont rares. Ils peuvent toutefois être utilisés pour l'injection d'électricité dans le réseau [22].

I.4.5.4. Source renouvelable avec réseau

Dans la plupart des cas, ces systèmes fonctionnent sans dispositif de stockage. Par exemple, en Algérie, il existe une station photovoltaïque de 2 MWc à Oued Elma, Batna, ainsi qu'une station photovoltaïque de 20 MWc à Adrar. De plus, une station éolienne de 10 MW est également présente à Adrar. [18] [22]

I.5. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons examiné la signification ainsi que les diverses structures des systèmes hybrides de production d'énergie électrique. Nous avons constaté que l'utilisation de sources renouvelables dans la construction d'un système hybride peut résoudre plusieurs problèmes liés à l'impact environnemental de l'utilisation de ressources traditionnelles, en particulier en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre. Le prochain chapitre sera réservé à la modélisation de la chaîne de conversion.

Chapitre II : Modélisation mathématique de la chaine de conversion

II.1. Introduction

Ce chapitre fera l'objectif d'une étude de modélisation de la machine asynchrone à double alimentation et cela pour obtenir un modèle basé sur les équations du circuit est souvent suffisant pour effectuer la synthèse de la commande dans le contexte de l'aérogénérateur étudié. La simplicité de la formulation algébrique permet des simulations rapides, tout en maintenant une précision de modélisation acceptable. Ce dispositif spécifique, l'aérogénérateur, exploite la force cinétique du vent pour générer de l'énergie électrique de manière efficace.

Dans ce chapitre on étudie la modélisation de la turbine éolienne, ensuite nous aborderons la modélisation de l'onduleur de tension et leur commande MLI, enfin nous allons présenter le modèle mathématique d'une machine asynchrone à rotor bobiné, ce modèle sera ensuite utilisé pour créer un modèle en cascade qui représentera le couplage de deux machines.

II.2. Modélisation de la turbine

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure II.1).

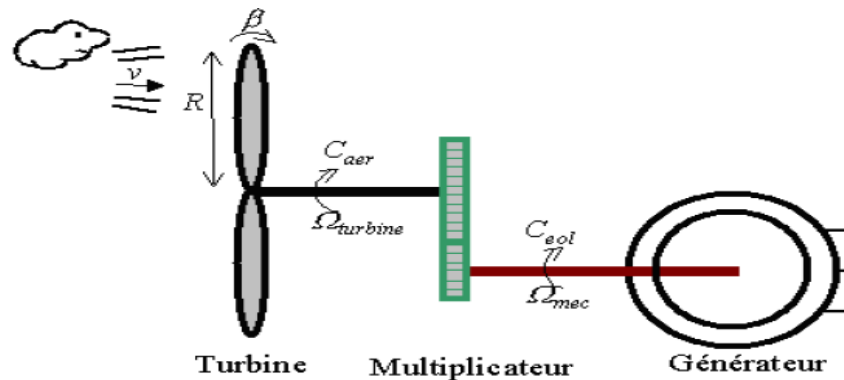


Figure II. 1. Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante [23] :

$$p_v = \frac{\rho \cdot s \cdot v^3}{2} \quad (\text{II.1})$$

Où :

- ρ est la densité de l'air (1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- v est la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$p_{aer} = c_p \cdot p_v = c_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot s \cdot v^3}{2} \quad (\text{II.2})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. [23][24]

La figure II.2 représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β .

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du Vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{\text{turbine}} \cdot R}{v} \quad (\text{II.3})$$

Où Ω turbine est la vitesse de la turbine.

Si le vent est trop faible, la turbine n'est pas entraînée. Les pales sont immobiles. Un anémomètre mesure la vitesse du vent et dès qu'elle est assez élevée, supérieure à la vitesse qui permettra à l'éolienne pour démarrer, l'angle des pales va se fixer sur une valeur pour laquelle la puissance extraite est maximale. Puis, si le vent est trop élevé, on fait varier l'angle des pales pour ralentir la machine puisque le coefficient de puissance C_p se dégrade pour limiter la puissance à sa la valeur nominale.

Dans les cas plus généralisés la variation de ce coefficient est représentée en fonction du ratio λ de vitesse et l'angle de l'orientation de la pale β .

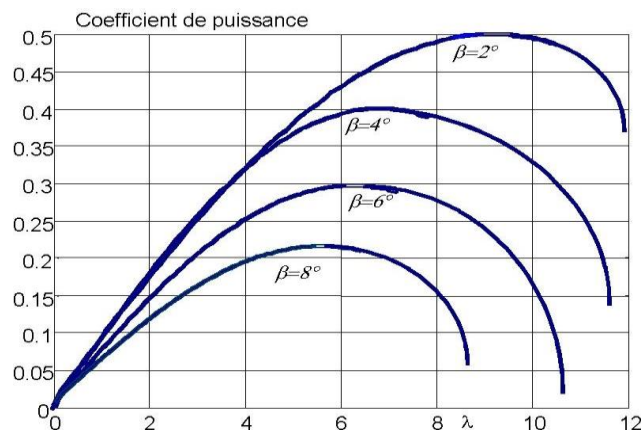


Figure II. 2. Coefficient de puissance (C_p) en fonction du ratio de la vitesse de la turbine(λ)

A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est rapprochée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [25]:

$$c_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda+0.1)}{14-0.44\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (\text{II.4})$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$c_{aer} = \frac{p_{aer}}{\Omega_{\text{turbine}}} c_p \cdot \frac{\rho \cdot s \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{\text{turbine}}} \quad (\text{II.5})$$

II.2.1. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse (rapide) de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$c_g = \frac{\Omega_{turbine}}{K} \quad (II.6)$$

$$\Omega_{mec} = K \cdot \Omega_{turbine} \quad (II.7)$$

Ω_{mec} est la vitesse de la génératrice

Le multiplicateur présente des inconvénients, comme la nécessité d'une maintenance, un taux de panne élevé, des pertes énergétiques supplémentaires, un bruit acoustique parfois gênant et un encombrement important.

II.2.2. Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J_{total} constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J_{total} = \frac{J_{turbine}}{K^2} + J_g \quad (II.8)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor [26] :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.9)$$

J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.10)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.11)$$

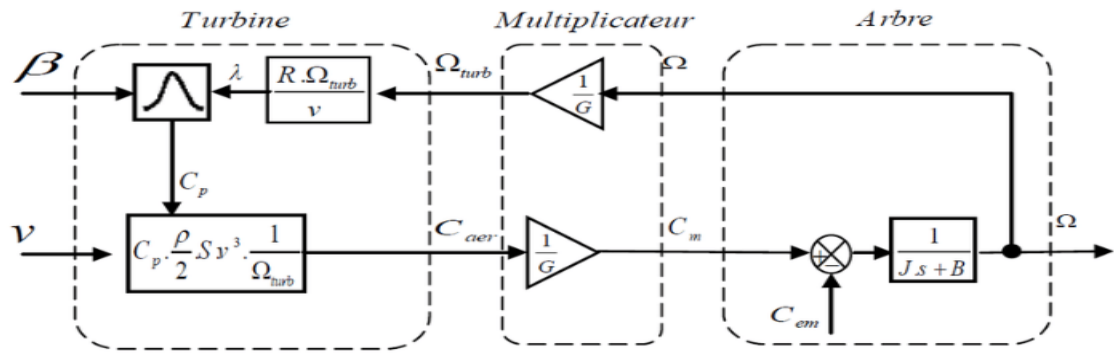


Figure II. 3. Schéma bloc du modèle de la turbine

II.3. Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue. L'onduleur de tension est constitué de cellule de commutation généralement à transistors ou à thyristors pour les grandes puissances. Le schéma de l'onduleur est représenté par la figure (II.4). Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Donc pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne. [27]

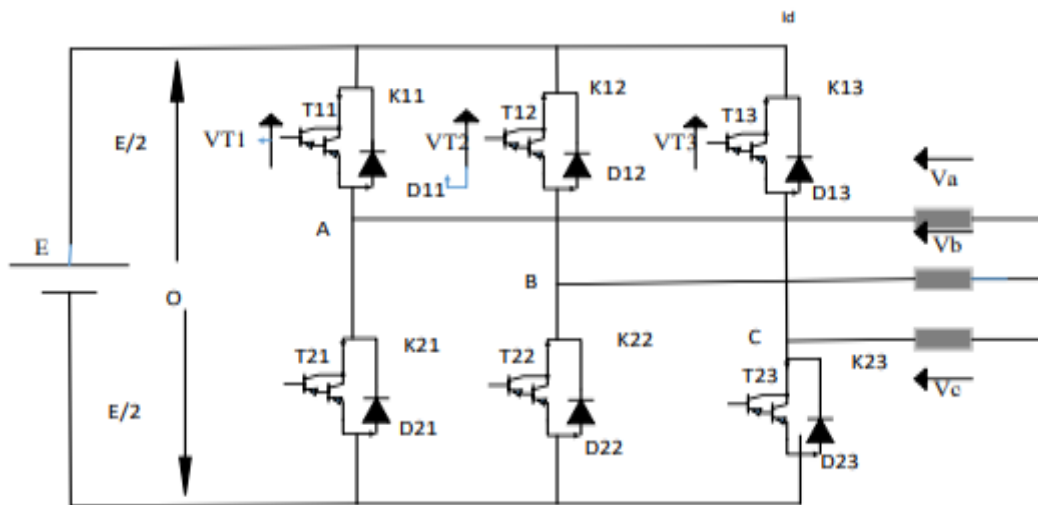


Figure II. 4. Schéma de l'onduleur de tension à changer

Nous avons :

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{On} \\ V_B = V_{BO} + V_{On} \\ V_{AC} = V_{CO} + V_{On} \end{cases} \quad (II.12)$$

Alors :

$$V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{On} = 0 \quad (II.13)$$

Donc

$$V_{On} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (\text{II.14})$$

On remplace (II.14) dans (II.12), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = -\frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

On peut écrire le système (II.15) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Avec

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2}S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2}S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2}S_3 \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Tel que :

$$\begin{cases} S_1 = 1 & \text{si } K_{11} \text{ fermé} & \text{si non } S_1 = -1 & \text{donc } K_{11} \text{ ouvert.} \\ S_2 = 1 & \text{si } K_{12} \text{ fermé} & \text{si non } S_2 = -1 & \text{donc } K_{12} \text{ ouvert.} \\ S_3 = 1 & \text{si } K_{13} \text{ fermé} & \text{si non } S_3 = -1 & \text{donc } K_{13} \text{ ouvert.} \end{cases}$$

On remplace (II.17) dans (II.15), on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

II.4. Le principe de la commande MLI

Elle consiste à convertir une modulante tension de référence (au niveau de commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs. Le signal modulé est généré à la sortie de l'onduleur (au niveau de puissance). Le principe de modulation MLI repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation généralement de forme triangulaire). Dans ce travail, on va utiliser la MLI naturelle en se basant sur la comparaison entre deux signaux pour commander chaque bras de convertisseur. Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale [28].

- L'indice de modulation m qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence : $m = \frac{f_p}{f_r}$

- Le taux de modulation r (ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_p à la valeur crête V_r de la porteuse : $r = \frac{V_r}{V_p}$

II.5. Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné

II.5.1 Description de la MAS

La configuration typique d'une machine asynchrone comprend deux éléments essentiels. Tout d'abord, il y a le primaire, généralement constitué du stator fixe. Le stator est équipé d'un bobinage triphasé qui est placé dans des encoches régulièrement réparties sur sa face interne. Ce bobinage est connecté à une source d'alimentation. Ensuite, il y a le secondaire, généralement représenté par le rotor mobile qui tourne autour de l'axe de symétrie de la machine. Ce rotor peut être soit bobiné et fermé sur lui-même, soit avoir une structure en cage d'écureuil [29].

II.5.2. Hypothèse de travail

Pour faciliter l'étude de la machine asynchrone et la modéliser mathématiquement, les hypothèses couramment utilisées sont les suivantes :

- Le bobinage est conçu de manière à générer une force électromotrice (f.é.m.) sinusoïdale lorsqu'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.
- On suppose que la machine fonctionne dans un régime non saturé, ce qui signifie que le matériau magnétique du noyau ne devient pas saturé.
- Les effets de l'hystérésis magnétique et des courants de Foucault sont négligés.
- L'effet de peau est également négligé.
- On considère que le régime homopolaire est nul, ce qui signifie qu'il n'y a pas de composante symétrique du courant dans la machine. [29]

II.5.3. Modèle de la MAS a rotor bobiné dans le repère (abc)

Equations électriques du stator

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\psi_s] \quad (\text{II.19})$$

Equations électriques du rotor

$$[V_r] = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} [\psi_r] \quad (\text{II.20})$$

Equations magnétiques

Les hypothèses, présentées précédemment, conduisent à une matrice des inductances qui établit les relations linéaires entre les flux totalisés et les courants :

$$\text{Pour le stator :} \quad [\psi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (\text{II.21})$$

$$\text{Pour le rotor :} \quad [\psi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \quad (\text{II.22})$$

Avec:

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

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

$[M_{sr}]$: Matrice d'inductances mutuelles stator-rotor.

Tel que :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$$[M_{rs}]^T = [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Les équations (II.21) et (II.22) peuvent être formulées en bloc de matrice comme suit

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Ou encore :

$$[\psi] = [L(\theta)][i] \quad (\text{II.26})$$

$[L(\theta)]$: la matrice inductance qui comporte 36 coefficients dont la moitié dépend du temps par l'intermédiaire de θ (qui donne la position du rotor par rapport au stator).

En faisant substituer les matrices des flux (II.21) et (II.22) dans (II.19) et (II.20) respectivement, on obtient :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + [L_{ss}] \cdot \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (\text{II.27})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [i_r] + [L_{rr}] \cdot \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{rs}]^T \cdot [i_s]) \quad (\text{II.28})$$

II.5.4. Modèle dynamique de la MAS à rotor bobiné dans le repère de Park :

La transformation de Park, également connue sous le nom de transformation abc-dq, est utilisée pour convertir les enroulements statoriques et rotoriques disposés sur trois axes (a, b, c) en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés sur deux axes (d, q) ou (α , β).

Cette transformation se compose de deux étapes principales. Tout d'abord, il y a une transformation triphasée-diphasée qui convertit les grandeurs triphasées (a, b, c) en grandeurs diphasées (α , β). Les grandeurs diphasées sont déphasées de 90 degrés par rapport aux grandeurs triphasées et sont alignées avec les axes α et β du repère fixe.

Ensuite, il y a une rotation des grandeurs diphasées (α, β) vers les axes d et q du repère mobile (dq). Cette rotation se fait en fonction de l'angle de transformation de Park, qui représente la position de l'axe magnétique du rotor par rapport à l'axe q. Le repère (α, β) reste fixe par rapport au repère (abc), tandis que le repère (dq) est mobile.

L'objectif de cette transformation est de simplifier les calculs et les analyses dans le domaine de l'électrotechnique, en fournissant une représentation simplifiée des grandeurs électriques et magnétiques. Les grandeurs dans le repère (dq) résultant de la transformation de Park peuvent ensuite être utilisées pour la commande et le contrôle des machines électriques.[29]

Equations des tensions

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds1} = R_{s1} \cdot i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \omega_{s1} \cdot \varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} \cdot i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \omega_{s1} \cdot \varphi_{ds1} \\ v_{dr1} = R_{r1} \cdot i_{dr1} + \frac{d\varphi_{dr1}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \cdot \varphi_{qr1} \\ v_{qr1} = R_{r1} \cdot i_{qr1} + \frac{d\varphi_{qr1}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \cdot \varphi_{dr1} \end{array} \right. \quad (\text{II.29})$$

Avec : $\omega_{r1} = P_1 \cdot \Omega$ et $\omega_{g1} = \omega_{s1} - P_1 \cdot \Omega$

Equations des flux

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds1} = L_{s1} i_{ds1} + L_{m1} i_{dr1} \\ \varphi_{qs1} = L_{s1} i_{qs1} + L_{m1} i_{qr1} \\ \varphi_{dr1} = L_{r1} i_{dr1} + L_{m1} i_{ds1} \\ \varphi_{qr1} = L_{r1} i_{qr1} + L_{m1} i_{qs1} \end{array} \right. \quad (\text{II.30})$$

II.5.5. Représentation d'état de la MAS a rotor bobiné

La représentation d'état, également connue sous le nom de modèle d'état, est une approche contemporaine de plus en plus adoptée dans la conception des systèmes de commande et de contrôle des machines asynchrones [30].

$$[X] = \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Dans la suite, nous allons décrire les étapes fondamentales pour construire le modèle d'état de la machine. Dans ce cadre, les équations de flux peuvent être exprimées sous forme matricielle comme suit :

$$[U] = [Z] \cdot [i] + [L] \frac{d[i]}{dt} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$$Z = \begin{bmatrix} R_{s1} & -L_s \cdot \omega_s & 0 & -L_{m1} \cdot \omega_s \\ L_s \cdot \omega_s & R_{s1} & L_{m1} \cdot \omega_s & 0 \\ 0 & -L_{m1} \cdot \omega_{g1} & R_{r1} & -L_r \cdot \omega_{g1} \\ L_{m1} \cdot \omega_{g1} & 0 & L_r \cdot \omega_{g1} & R_{r1} \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 \\ 0 & L_{s1} & 0 & L_{m1} \\ L_{m1} & 0 & L_{r1} & 0 \\ 0 & L_{m1} & 0 & L_{r1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Où :

$[Z]$: Matrice d'impédance ;

$[L]$: Matrice d'inductance.

En exprimant l'équation (II.32) en fonction du vecteur d'état :

$$\frac{d[i]}{dt} = -[L]^{-1} \cdot [Z] \cdot [i] + [L]^{-1} \cdot [U] \quad (\text{II.34})$$

Elle est de la forme :

$$\frac{d[i]}{dt} = [A] \cdot [i] + [B] \cdot [U] \quad (\text{II.35})$$

Equivalente a :

$$\dot{X} = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \quad (\text{II.36})$$

$$\begin{cases} [A] = -[L]^{-1} \cdot [Z] : \text{Matrice d'évolution d'état du systeme;} \\ [B] = [L]^{-1} : \text{Matrice de commande du systeme;} \end{cases}$$

Expression du couple de la MAS a rotor bobiné :

Le couple électromagnétique peut être calculé en dérivant l'expression de la co-énergie ou en effectuant un bilan de puissance [29].

$$P(t) = (v_{as1} \cdot i_{as1} + v_{bs1} \cdot i_{bs1} + v_{cs1} \cdot i_{cs1}) + (v_{ar1} \cdot i_{ar1} + v_{br1} \cdot i_{br1} + v_{cr1} \cdot i_{cr1}) \quad (\text{II.37})$$

Après avoir appliqué la transformation de Park, on aura

$$P(t) = (v_{ds1} \cdot i_{ds1} + v_{qs1} \cdot i_{qs1}) + (v_{dr1} \cdot i_{dr1} + v_{qr1} \cdot i_{qr1}) \quad (\text{II.38})$$

En utilisant l'expression des tensions données par (II.29), on peut écrire :

$$\begin{aligned} P(t) = & [R_{s1}(i_{ds1}^2 + i_{qs1}^2)] + [R_{r1}(i_{dr1}^2 + i_{qr1}^2)] + \left[i_{ds1} \frac{d}{dt} \varphi_{ds1} + i_{qs1} \frac{d}{dt} \varphi_{qs1} \right] + \\ & \left[i_{dr1} \frac{d}{dt} \varphi_{dr1} + i_{qr1} \frac{d}{dt} \varphi_{qr1} \right] + [(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \cdot \omega_{s1}] + [(\varphi_{dr1} \cdot i_{qr1} - \\ & i_{dr1} \cdot \varphi_{qr1}) \cdot \omega_{g1}] \end{aligned} \quad (\text{II.39})$$

Où

- $R_{s1}(i_{ds1}^2 + i_{qs1}^2), R_{r1}(i_{dr1}^2 + i_{qr1}^2)$: (p_j) Représentent respectivement la puissance dissipée en pertes par effet Joule dans les enroulements du stator et du rotor.
- $\left[i_{ds1} \frac{d}{dt} \varphi_{ds1} + i_{qs1} \frac{d}{dt} \varphi_{qs1} \right], \left[i_{dr1} \frac{d}{dt} \varphi_{dr1} + i_{qr1} \frac{d}{dt} \varphi_{qr1} \right]$: (P_{mag}) Représentent respectivement les variations de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator et du rotor. Elles s'annulent en régime établi.
- $[(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \cdot \omega_{s1}], [(\varphi_{dr1} \cdot i_{qr1} - i_{dr1} \cdot \varphi_{qr1}) \cdot \omega_{g1}]$: (P_{em}) Représentent la puissance électrique transformée en puissance mécanique à l'intérieur de la machine ou puissance électromagnétique.

Du système d'équations (II.30), on peut écrire :

$$i_{qs1} \cdot \varphi_{ds1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1} = i_{dr1} \cdot \varphi_{qr1} - i_{qr1} \cdot \varphi_{dr1} \quad (\text{II.40})$$

L'expression de la puissance électromagnétique de la machine s'écrit :

$$P_{em} = [(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \cdot \omega_{s1}] + [(\varphi_{dr1} \cdot i_{qr1} - i_{dr1} \cdot \varphi_{qr1}) \cdot \omega_{g1}] \quad (\text{II.41})$$

En tenant compte de l'égalité (II.40), on aura :

$$P_{em} = (i_{qs1} \cdot \varphi_{ds1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \cdot \omega_{r1} \quad (\text{II.42})$$

Le couple électromagnétique est défini par :

$$C_e = \frac{P_{em}}{\Omega} = P_1 \cdot \frac{P_{em}}{\omega_{r1}} \quad (\text{II.43})$$

On a alors l'expression du couple électromagnétique :

$$C_e = p_1 (i_{qs1} \cdot \varphi_{ds1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \quad (\text{II.44})$$

En tenant compte de l'égalité (II.40) et en utilisant les équations du flux (II.30), on peut écrire l'équation du couple sous plusieurs formes :

$$C_e = p_1 \cdot L_{m1} (i_{dr1} \cdot i_{qs1} - i_{ds1} \cdot i_{qr1}) \quad (\text{II.45})$$

Notons que la condition de formation du couple électromagnétique, dans la MAS, est due à la relation $\omega_{s1} = \omega_{g1} + \omega_{r1}$ appelée relation d'autopilotage.

L'expression du couple électromagnétique peut être le point de départ dans la recherche d'une stratégie de commande.

II.5.6. Modélisation de la machine asynchrone en cascade MASEC

II.5.6.1. Machine asynchrone en cascade

Les machines asynchrones double alimentation en cascade sont une configuration où deux machines asynchrones sont interconnectées pour fonctionner de manière synchronisée. Chaque machine est alimentée par sa propre source d'énergie, offrant ainsi une plus grande flexibilité et des performances améliorées.

Typiquement, dans ce schéma, la première machine asynchrone est utilisée comme un générateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Cette énergie électrique est ensuite transmise à la deuxième machine asynchrone, qui agit en tant que moteur.[31]

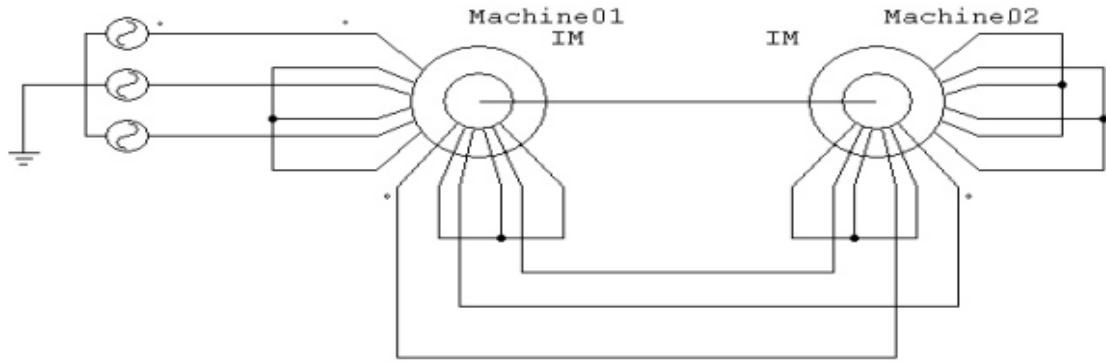


Figure II. 5 .Machine asynchrone en cascade

II.5.6.2. Modèle de la cascade

La méthode d'analyse adopte l'utilisation de la transformation de Park. Les équations des tensions et des flux pour les deux machines asynchrones à double alimentation (MADA) sont les suivantes [32] :

La première machine :

Equations des tensions

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1} \cdot i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \omega_{s1} \cdot \varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} \cdot i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \omega_{s1} \cdot \varphi_{ds1} \\ v_{dr1} = R_{r1} \cdot i_{dr1} + \frac{d\varphi_{dr1}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \cdot \varphi_{qr1} \\ v_{qr1} = R_{r1} \cdot i_{qr1} + \frac{d\varphi_{qr1}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \cdot \varphi_{dr1} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Les équations des flux :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1} i_{ds1} + L_{m1} i_{dr1} \\ \varphi_{qs1} = L_{s1} i_{qs1} + L_{m1} i_{qr1} \\ \varphi_{dr1} = L_{r1} i_{dr1} + L_{m1} i_{ds1} \\ \varphi_{qr1} = L_{r1} i_{qr1} + L_{m1} i_{qs1} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

La deuxième machine :

Equations des tensions

$$\begin{cases} v_{dr2} = R_{r2} \cdot i_{dr2} + \frac{d\varphi_{dr2}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \cdot \varphi_{qr2} \\ v_{qr2} = R_{r2} \cdot i_{qr2} + \frac{d\varphi_{qr2}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \cdot \varphi_{dr2} \\ v_{ds2} = R_{s2} \cdot i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1} - \gamma\omega_{r2}) \cdot \varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \cdot i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1} - \gamma\omega_{r2}) \cdot \varphi_{ds2} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

Les équations des flux :

$$\begin{cases} \varphi_{ds2} = L_{s2}i_{ds2} + L_{m2}i_{dr2} \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}i_{qs2} + L_{m2}i_{qr2} \\ \varphi_{dr2} = L_{r2}i_{dr2} + L_{m2}i_{ds2} \\ \varphi_{qr2} = L_{r2}i_{qr2} + L_{m2}i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

Les pulsations, des grandeurs des deux MADAS, selon la valeur de γ sont regroupées dans le Tableau II.1

Tableau II. 1.Pulsations des grandeurs des deux machines

	Couplage inverse $\gamma = 1$
ω_{s1}	$2\pi f$
ω_{g1}	$\omega_{s1} - p_1\Omega$
ω_{g2}	$\omega_{s1} - p_1\Omega$
ω_{s2}	$\omega_{s1} - \Omega(p_1 + p_2)$
Ω	$\frac{60f}{p_1 + p_2}$

Avec :

ω_{s1} : Pulsation statorique de MADA1 ;

ω_{g1} : Pulsation rotorique de la MADA1 ;

ω_{s2} : Pulsation statorique de la MADA2 ;

ω_{g2} : Pulsation rotorique de la MADA2

Ω : vitesse mécanique du synchronisme de l'arbre commun ;

p_1 : Nombre de paires de pôles de la MADA 1;

p_2 : Nombre de paires de pôles de la MADA2 ;

La modélisation du couplage électrique des deux rotors dépend du type de couplage ; les équations des tensions et des courants seront :

$$\begin{cases} V_{dr1} = \gamma V_{dr2} = V_{dr} \\ V_{qr1} = \gamma V_{qr2} = V_{qr} \end{cases} \quad \begin{cases} i_{dr1} = -\gamma i_{dr2} = i_{dr} \\ i_{qr1} = -\gamma i_{qr2} = i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

On pose : $L_r = L_{r1} + L_{r2}$, $R_r = R_{r1} + R_{r2}$

En remplaçant les équations des flux (II.47) et (II.49) dans les équations des tensions (II.46) et (II.48), selon la valeur de γ , et en substituant les équations (II.40), le système d'équations à 8 équations se réduit à 6 équations. On aura alors :

$$(II.51) \quad \left\{ \begin{array}{l} v_{ds1} = R_{s1} \cdot i_{ds1} + L_{s1} \frac{di_{ds1}}{dt} - \omega_{s1} \cdot L_{s1} \cdot i_{qs1} + L_{m1} \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_{s1} L_{m1} i_{qr} \\ v_{qs1} = R_{s1} \cdot i_{qs1} + L_{s1} \frac{di_{qs1}}{dt} + \omega_{s1} \cdot L_{s1} \cdot i_{ds1} + \omega_{s1} L_{m1} i_{dr} + L_{m1} \frac{di_{qr}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_{g1} L_r \cdot i_{qr} + L_{m1} \frac{di_{ds1}}{dt} - \omega_{g1} L_{m1} i_{qs1} - \gamma L_{m2} \frac{di_{ds2}}{dt} + \gamma \omega_{g1} L_{m2} i_{qs2} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_{g1} L_r \cdot i_{dr} + L_{m1} \omega_{g1} i_{ds1} + L_{m1} \frac{di_{qs1}}{dt} - \gamma \omega_{g1} L_{m2} i_{ds2} - \gamma L_{m2} \frac{di_{qs2}}{dt} \\ v_{ds2} = R_{s2} \cdot i_{ds2} + L_{s2} \frac{di_{ds2}}{dt} - L_{s2} \omega_{s2} i_{qs2} - \gamma L_{m2} \frac{di_{dr}}{dt} + \gamma L_{m2} \omega_{s2} i_{qr} \\ v_{qs2} = R_{s2} \cdot i_{qs2} + L_{s2} \frac{di_{qs2}}{dt} + L_{s2} \omega_{s2} i_{ds2} - \gamma L_{m2} \omega_{s2} i_{dr} - \gamma L_{m2} \frac{di_{qr}}{dt} \end{array} \right.$$

Ce système peut être résumé comme suit :

$$[U] = [Z] \cdot [i] + [L] \cdot \frac{d[i]}{dt} \quad (II.52)$$

Ou :

$[U], [i]$ Vecteurs des tensions et courants respectivement dans le repère de Park.

Avec

$$[Z] = \begin{bmatrix} R_{s1} & -\omega_{s1} L_{s1} & 0 & -\omega_{s1} L_{m1} & 0 & 0 \\ \omega_{s1} L_{s1} & R_{s1} & \omega_{s1} L_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_{g1} L_{m1} & R_r & -\omega_{g1} L_r & 0 & \gamma \omega_{g1} L_{m2} \\ \omega_{g1} L_{m1} & 0 & \omega_{g1} L_r & R_r & -\gamma \omega_{g1} L_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma L_{m2} \omega_{s2} & R_{s2} & -L_{s2} \omega_{s2} \\ 0 & 0 & -\gamma L_{m2} \omega_{s2} & 0 & L_{s2} \omega_{s2} & R_{s2} \end{bmatrix} \quad (II.53)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 & 0 \\ L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -\gamma L_{m2} & 0 \\ 0 & L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -\gamma L_{m2} \\ 0 & 0 & -\gamma L_{m2} & 0 & L_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma L_{m2} & 0 & L_{s2} \end{bmatrix} \quad (II.54)$$

On peut décomposer la matrice Z ainsi

$$Z = A + \omega_{s1} B + \omega_{r1} C + \omega_{r2} D$$

Avec

$$A = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -L_{s1} & 0 & -L_{m1} & 0 & 0 \\ L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_{m1} & 0 & -L_r & 0 & \gamma L_{m2} \\ L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -\gamma L_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma L_{m2} & 0 & -L_{s2} \\ 0 & 0 & -\gamma L_{m2} & 0 & L_{s2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -\gamma L_{m2} \\ -L_{m1} & 0 & -L_r & 0 & \gamma L_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma L_{m2} & 0 & L_{s2} \\ 0 & 0 & \gamma L_{m2} & 0 & -L_{s2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_{m2} & 0 & \gamma L_{s2} \\ 0 & 0 & L_{m2} & 0 & -\gamma L_{s2} & 0 \end{bmatrix}$$

Expression du couple électromagnétique de la cascade

La puissance instantanée absorbée par la cascade est donnée par l'expression suivante :

$$P(t) = (v_{as1} \cdot i_{as1} + v_{bs1} \cdot i_{bs1} + v_{cs1} \cdot i_{cs1}) + (v_{as2} \cdot i_{as2} + v_{bs2} \cdot i_{bs2} + v_{cs2} \cdot i_{cs2}) \quad (\text{II.55})$$

Après avoir appliqué la transformation de Park, on aura :

$$P(t) = (v_{ds1} \cdot i_{ds1} + v_{qs1} \cdot i_{qs1}) + (v_{ds2} \cdot i_{ds2} + v_{qs2} \cdot i_{qs2}) \quad (\text{II.56})$$

En utilisant les expressions des tensions données par (II.46) et (II.48):

$$P(t) = [R_{s1}(i_{ds1}^2 + i_{qs1}^2)] + [R_{s2}(i_{ds2}^2 + i_{qs2}^2)] + \left[i_{ds1} \frac{d}{dt} \varphi_{ds1} + i_{qs1} \frac{d}{dt} \varphi_{qs1} \right] + \left[i_{ds2} \frac{d}{dt} \varphi_{ds2} + i_{qs2} \frac{d}{dt} \varphi_{qs2} \right] + [(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \cdot \omega_{s1}] + [(\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - i_{ds2} \cdot \varphi_{qs2}) \cdot \omega_{s2}] \quad (\text{II.57})$$

Ou

- $R_{s1}(i_{ds1}^2 + i_{qs1}^2), [R_{s2}(i_{ds2}^2 + i_{qs2}^2)]$: (p_j) Représentent les puissances et pertes par effet Joule.
- $\left[i_{ds1} \frac{d}{dt} \varphi_{ds1} + i_{qs1} \frac{d}{dt} \varphi_{qs1} \right], \left[i_{ds2} \frac{d}{dt} \varphi_{ds2} + i_{qs2} \frac{d}{dt} \varphi_{qs2} \right]$: (P_{mag}) Représentent respectivement les variations de l'énergie magnétique emmagasinée. Elles s'annulent en régime établi.
- $[(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \cdot \omega_{s1}], [(\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - i_{ds2} \cdot \varphi_{qs2}) \cdot \omega_{s2}]$: (P_{em}) Représentent la puissance électrique transformée en puissance mécanique à l'intérieur de la cascade.

La puissance électromagnétique de la cascade s'écrit :

$$P_{em} = (\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \cdot \omega_{s1} + (\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - i_{ds2} \cdot \varphi_{qs2}) \cdot \omega_{s2} \quad (\text{II.58})$$

Puisque le couple électromagnétique total est égal à la somme des couples des deux machines alors :

$$C_e = C_{e1} + C_{e2} = \frac{P_{em1}}{\Omega_{s1}} + \frac{P_{em2}}{\Omega_{s2}} \quad (\text{II.59})$$

Avec :

$$P_{em1} = (\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \cdot \omega_{s1} \quad (\text{II.60})$$

Et

$$P_{em2} = (\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - i_{ds2} \cdot \varphi_{qs2}) \omega_{s2} \quad (\text{II.61})$$

Le couple électromagnétique

$$C_e = p_1 \cdot \frac{P_{em1}}{\omega_{s1}} + p_2 \cdot \frac{P_{em2}}{\omega_{s2}} \quad (\text{II.62})$$

On a alors l'expression du couple électromagnétique en fonction des courants et des flux:

$$C_e = p_1 (\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) + p_2 (\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - i_{ds2} \cdot \varphi_{qs2}) \quad (\text{II.63})$$

En remplaçant les flux ($\varphi_{ds1}, \varphi_{qs1}, \varphi_{ds2}, \varphi_{qs2}$) donnés par (II.47) et (II.49) dans (II.63), on obtient :

$$C_e = p_1 L_{m1} (i_{qs1} \cdot i_{dr1} - i_{ds1} \cdot i_{qr1}) + p_2 L_{m2} (i_{dr2} \cdot i_{qs2} - i_{qr2} \cdot i_{ds2}) \quad (\text{II.64})$$

Si nous avons deux machines identiques c'est-à-dire :

$p_1 = p_2 = p$ et $L_{m1} = L_{m2} = L_m$ en substituant les courants ($i_{dr1}, i_{qr1}, i_{dr2}, i_{qr2}$) donnés par (II.50) dans l'équation du couple (II.64) on aura :

Pour la cascade

$$C_e = p L_m [i_{dr} (i_{qs1} - i_{qs2}) - i_{qr} (i_{ds1} - i_{ds2})] \quad (\text{II.65})$$

II.6. Résultats de la simulation

A l'aide de logiciel MATLAB, on va simuler la machine asynchrone à double alimentation en cascade. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park, lié au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une cascade de puissance 1.5MW.

Les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle de MASEC, alimentée directement par une source de tension triphasée parfaite au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz.

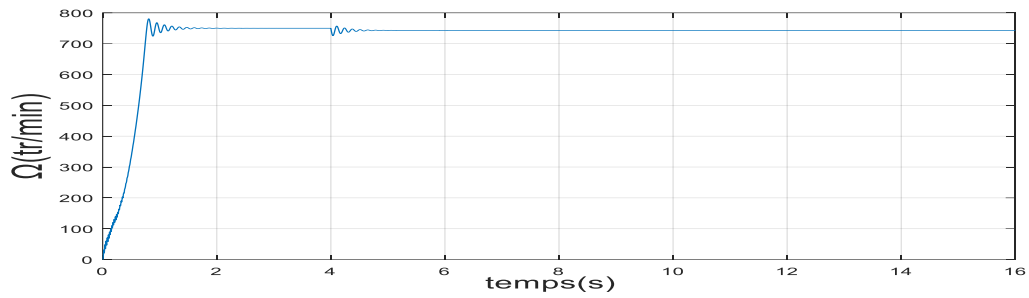
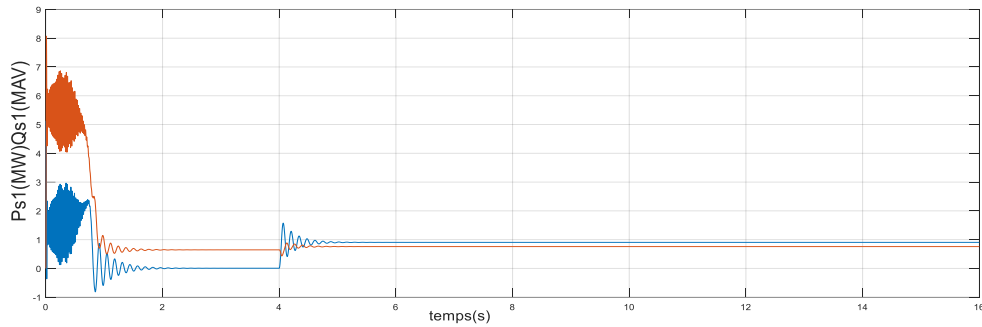


Figure II. 6. la vitesse de rotation de la MASEC



La figure (II. 6) montre la vitesse de rotation en fonction du temps

Figure II. 7. les puissances active et reactive de stator 1

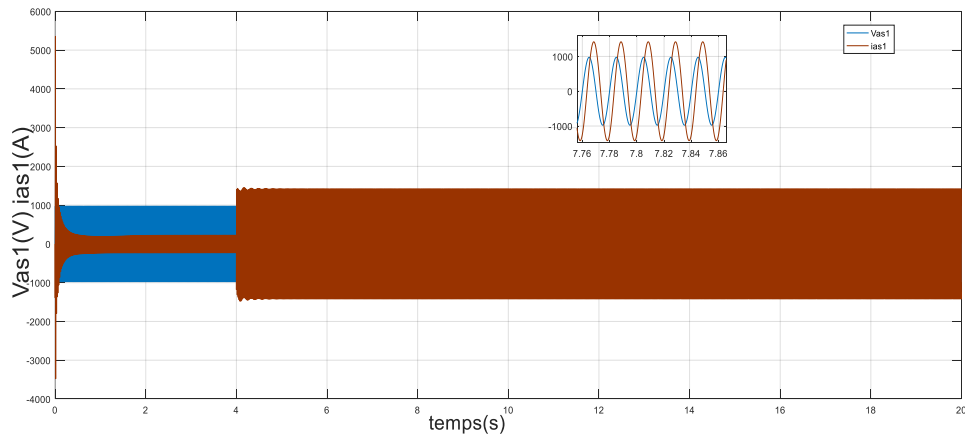


Figure II. 8. La tension et courant de stator1

Nous avons remarqué lorsque la vitesse augmente en régime permanent et se stabilise à une valeur autour de 750 tr/min, à cause de l'introduction du couple résistant on observe une petite chute de la vitesse après une période $t=4s$.

On conclure la relation en cascade de deux machines, comme si nous avons une machine de p paires de pôles.

La figure (II.7) montre la puissance active et réactive de la première machine. La puissance est positive donc la machine absorbe l'énergie active et réactive, la puissance active augmente et devient supérieure à la puissance réactive et cette dernière a également légèrement augmenté.

La figure (II.8) montre le courant et la tension du premier stator.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit le modèle de la machine asynchrone doublement alimentée (MADA) dans le repère de Park. A partir du modèle de la MADA nous avons élaboré le modèle de cascade des deux machines asynchrones.

Ce modèle a été développé en prenant en compte certaines hypothèses simplificatrices qui doivent être respectées. Notre objectif lors de cette modélisation était de créer un modèle adapté à la commande de la machine.

Le prochain chapitre sera réservé au contrôle de puissance de MASEC

Chapitre III : Contrôle des puissances de la MASEC

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons simuler éolienne à base de machine asynchrone double alimentation en cascade. L'objectif est contrôlé les puissances actives et réactives de la MASEC. L'outil utilisé pour faire ces simulations est le Matlab/Simulink.

III.2. Description du système étudié

La MASEC est équipée de deux stators : le premier est directement connecté au réseau, tandis que le deuxième est relié via un convertisseur. Le but est le contrôle des puissances actives et réactive circulant dans le premier stator. En cas de dépassement de la capacité du premier stator. Ce qui revient, dans ce cas, à alimenter le réseau du maximum de puissance possible.

Dans le but de réguler la production d'électricité d'une éolienne, nous mettrons en œuvre un système de commande permettant de contrôler de manière indépendante la puissance active et réactive du premier stator. Ce contrôle sera réalisé en établissant des équations qui établissent une relation entre les tensions du deuxième stator, générées par un convertisseur, et les puissances actives et réactive du premier stator.[33]

Le système à étudier est illustré sur la figure III.1

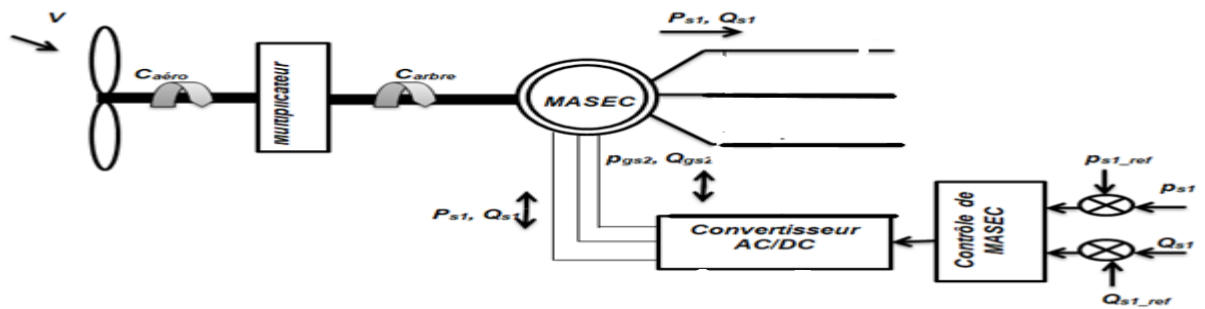


Figure III. 1.Schéma du système étudié

Les équations des tensions de la cascade sont obtenues en substituant la valeur de $\gamma = 1$ dans les systèmes d'équations (II.48) et (II.50):

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1} \cdot i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \omega_{s1} \cdot \varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} \cdot i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \omega_{s1} \cdot \varphi_{ds1} \\ v_{dr1} = R_{r1} \cdot i_{dr1} + \frac{d\varphi_{dr1}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \cdot \varphi_{qr1} \\ v_{qr1} = R_{r1} \cdot i_{qr1} + \frac{d\varphi_{qr1}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \cdot \varphi_{dr1} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{cases} v_{dr2} = R_{r2} \cdot i_{dr2} + \frac{d\varphi_{dr2}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \cdot \varphi_{qr2} \\ v_{qr2} = R_{r2} \cdot i_{qr2} + \frac{d\varphi_{qr2}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \cdot \varphi_{dr2} \\ v_{ds2} = R_{s2} \cdot i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1} - \omega_{r2}) \cdot \varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \cdot i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1} - \omega_{r2}) \cdot \varphi_{ds2} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Dans les systèmes équations des flux (II.47) et (II.49), on remplace la valeur de $\gamma = 1$ et on exprime les courants i_{dr1} , i_{qr1} , i_{dr2} et i_{qr2} en fonction des courants i_{dr} et i_{qr}

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1} \cdot i_{ds1} + L_{m1} \cdot i_{dr} \\ \varphi_{qs1} = L_{s1} \cdot i_{qs1} + L_{m1} \cdot i_{qr} \\ \varphi_{dr1} = L_{r1} \cdot i_{dr} + L_{m1} \cdot i_{ds1} \\ \varphi_{qr1} = L_{r1} \cdot i_{qr} + L_{m1} \cdot i_{qs1} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

$$\begin{cases} \varphi_{ds2} = L_{s2} \cdot i_{ds2} - L_{m2} \cdot i_{dr} \\ \varphi_{qs2} = L_{s2} \cdot i_{qs2} - L_{m2} \cdot i_{qr} \\ \varphi_{dr2} = -L_{r2} \cdot i_{dr} + L_{m2} \cdot i_{ds2} \\ \varphi_{qr2} = -L_{r2} \cdot i_{qr} + L_{m2} \cdot i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

En introduisant les équations du couplage électrique des deux rotors, on aura

$$\begin{cases} V_{dr1} = V_{dr2} = V_{dr} \\ V_{qr1} = V_{qr2} = V_{qr} \end{cases} \quad \begin{cases} i_{dr1} = -i_{dr2} = i_{dr} \\ i_{qr1} = -i_{qr2} = i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Les puissances actives et réactives du stator 01 et du stator 2 sont exprimées par :

$$\begin{cases} P_{s1} = v_{ds1} \cdot i_{ds1} + v_{qs1} \cdot i_{qs1} \\ Q_{s1} = v_{qs1} \cdot i_{ds1} - v_{ds1} \cdot i_{qs1} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

$$\begin{cases} P_{s2} = v_{ds2} \cdot i_{ds2} + v_{qs2} \cdot i_{qs2} \\ Q_{s2} = v_{qs2} \cdot i_{ds2} - v_{ds2} \cdot i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

III .3. Modèle pour le contrôle indépendant des puissances du stator 1

Pour réaliser le découplage de puissances de la MASEC et obtenir un contrôle indépendant de la puissance de la MASEC, nous suivrons certaines étapes. Dans ce processus, nous orienterons le repère (dq) de manière à aligner l'axe d sur le flux du premier stator φ_{s1} . Cette orientation simplifie à la fois le modèle de la MASEC et le dispositif de commande associé. De plus, il est important de noter que le flux du premier stator le long de l'axe q sera toujours nul.[33]

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \varphi_{s1} \\ \varphi_{qs1} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des flux comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \varphi_{s1} = L_{s1} \cdot i_{ds1} + L_{m1} \cdot i_{dr} \\ \varphi_{qs1} = 0 = L_{s1} \cdot i_{qs1} + L_{m1} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Les courants du stator 1 en fonction des courants du rotor sont :

$$\begin{cases} i_{ds1} = -\frac{L_{m1}}{L_{s1}} i_{dr} + \frac{1}{L_{s1}} \varphi_{s1} \\ i_{qs1} = -\frac{L_{m1}}{L_{s1}} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

L'équation du couple électromagnétique aura la forme suivante :

$$c_e = p_1 \cdot \varphi_{s1} \cdot i_{qs1} + p_2 (\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2}) \quad (\text{III.12})$$

Si on suppose deux machines identiques c'est à dire $p = p_1 = p_2$, alors le couple devient :

$$c_e = p (\varphi_{s1} \cdot i_{qs1} + \varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2}) \quad (\text{III.13})$$

En supposant que le réseau électrique soit stable, avec une tension simple V_s , cela entraîne un flux statorique ϕ_{s1} constant. De plus, si nous négligeons la résistance des enroulements du stator 1 ($R_{s1} = 0$), ce qui est une hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées dans la production éolienne, les équations des tensions du stator 1 se simplifient à :

$$\begin{cases} v_{ds1} = 0 \\ v_{qs1} = v_s = \omega_{s1} \cdot \varphi_{s1} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Du fait que les enroulements des rotors sont couplés électriquement, on aura alors l'égalité suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_{r1} \cdot i_{dr} + L_{m1} \cdot i_{ds1} = -L_{r2} \cdot i_{dr} + L_{m2} \cdot i_{ds2} \\ \varphi_{qr} = L_{r1} \cdot i_{qr} + L_{m1} \cdot i_{qs1} = -L_{r2} \cdot i_{qr} + L_{m2} \cdot i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

On pose :

$$c = \frac{L_{m2}}{L_{r1} + L_{r2} - \frac{L_{m1}^2}{L_{s1}}}$$

En remplaçant les courants de l'équation (III.11) dans l'égalité (III.15), on trouve :

$$\begin{cases} i_{dr} = C \cdot i_{ds2} - C \cdot \frac{L_{m1} \cdot V_s}{\omega_{s1} \cdot L_{s1} \cdot L_{m2}} \\ i_{qr} = C \cdot i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

A partir des équations (III.11) et (III.15), on peut écrire les relations liant les courants des stators 1 et 2 :

$$\begin{cases} i_{ds1} = \frac{V_s}{\omega_{s1} \cdot L_{s1}} \left(1 + \frac{C \cdot L_{m1}^2}{L_{s1} \cdot L_{m2}} \right) - C \cdot \frac{L_{m1}}{L_{s1}} \cdot i_{ds2} \\ i_{qs1} = C \cdot \frac{L_{m1}}{L_{s1}} \cdot i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Avec : $\varphi_{s1} = \frac{V_{qs1}}{\omega_{s1}}$

On définit les glissements suivants : $s_1 = \frac{\omega_{s1} - p_1 \Omega}{\omega_{s1}}$; $s_2 = \frac{s_1 \cdot \omega_{s1} - p_2 \Omega}{s_1 \cdot \omega_{s1}}$

Le glissement total de la MASEC devient :

$$s = s_1 \cdot s_2 = \frac{\omega_{s1} - \omega_{r1} - \omega_{r2}}{\omega_{s1}} = \frac{\omega_{s1} - \Omega(p_1 + p_2)}{\omega_{s1}} \quad (\text{III.18})$$

Il en découle que : $\omega_{s2} = s \cdot \omega_{s1}$

III.4. Relation entre la tension du deuxième stator et son courant

On remplace l'équation (III.16) dans (III.4), le flux du deuxième stator devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = (L_{s2} - L_{m2} \cdot C) i_{ds2} + \frac{L_{m1}}{L_{s1} \cdot \omega_{s1}} C \cdot V_s \\ \varphi_{qs1} = (L_{s2} - L_{m2} \cdot C) i_{qs2} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Sachant que :

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2} \cdot i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - s \cdot \omega_{s1} \cdot \varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \cdot i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} - s \cdot \omega_{s1} \cdot \varphi_{ds2} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

En remplaçant les flux (III.19), dans les expressions des tensions du deuxième stator (III.20), on aura :

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2} \cdot i_{ds2} + (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) \frac{di_{ds2}}{dt} - s \cdot \omega_{s1} (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) i_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \cdot i_{qs2} + (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) \frac{di_{qs2}}{dt} - s \cdot \omega_{s1} (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) i_{ds2} + C \cdot s \frac{L_{m1} \cdot V_s}{L_{s1}} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants du stator 2 diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2} \cdot i_{ds2} - s \cdot \omega_{s1} (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) i_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \cdot i_{qs2} - s \cdot \omega_{s1} (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) i_{ds2} + C \cdot s \frac{L_{m1} \cdot V_s}{L_{s1}} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Les composantes diphasées des tensions du deuxième stator, V_{ds2} et V_{qs2} , sont utilisées pour imposer les courants I_{ds2} et I_{qs2} souhaités à la machine. L'influence des termes de couplage entre les deux axes, tels que $s \cdot \omega_{s1} (L_{s2} - C \cdot L_{m2})$, est minime. Une synthèse appropriée des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser efficacement. En revanche, le terme $C \cdot s \frac{L_{m1} \cdot V_s}{L_{s1}}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son impact n'est pas négligeable, car il introduit une erreur de traînage. Par conséquent, le contrôle du système devra prendre en compte cette erreur pour assurer une performance optimale.[33]

III.5. Relation entre la puissance du premier stator et le courant du deuxième stator

A partir de la simplification (III.14), les puissances active et réactive du premier stator deviendront :

$$\begin{cases} P_{s1} = v_{qs1} \cdot i_{qs1} = v_s \cdot i_{qs1} \\ Q_{s1} = v_{qs1} \cdot i_{ds1} = v_s \cdot i_{ds1} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

En substituant l'équation (III.17) dans (III.23) et en approximant ϕ_{s1} par v_s / ω_{s1} , les expressions des puissances active P_{s1} et réactive Q_{s1} deviennent alors :

$$\begin{cases} p_{s1} = -C \cdot V_{s1} \frac{L_{m1} \cdot V_s}{L_{s1}} \cdot i_{qs2} \\ Q_{s1} = \frac{V_s^2}{\omega_{s1} \cdot L_{s1}} \left(1 + \frac{C \cdot L_{m1}^2 \cdot V_s}{L_{s1} \cdot L_{m2}} \right) - C \cdot V_{s1} \frac{L_{m1} \cdot V_s}{L_{s1}} \cdot i_{ds2} \end{cases} \quad (III.24)$$

Le schéma bloc du système électrique à réguler tirer des équations (III.21) et (III.24) est illustré dans la figure III.2.

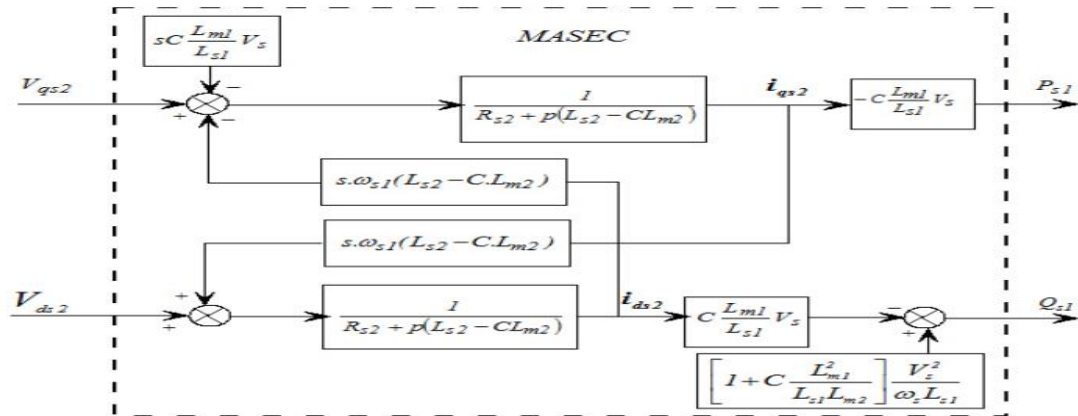


Figure III. 2.Schéma-bloc du système à réguler

III .6. Contrôle direct de puissance

Cette méthode se caractérise par le fait de négliger les effets de couplage et utilisation un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler séparément les puissances actives et réactives. Cette méthode sera nommée contrôle direct car les régulateurs de puissance agissent directement sur les tensions du deuxième stator de MASEC. L'un des avantages significatifs de cette méthode réside dans sa rapidité et sa simplicité de mise en œuvre.[34]

Dans notre cas, nous supposons que la machine est connectée à un réseau stable, donc la tension Vs est constante. Chaque axe sera donc équipé d'un seul régulateur, comme illustré dans la figure III.3.

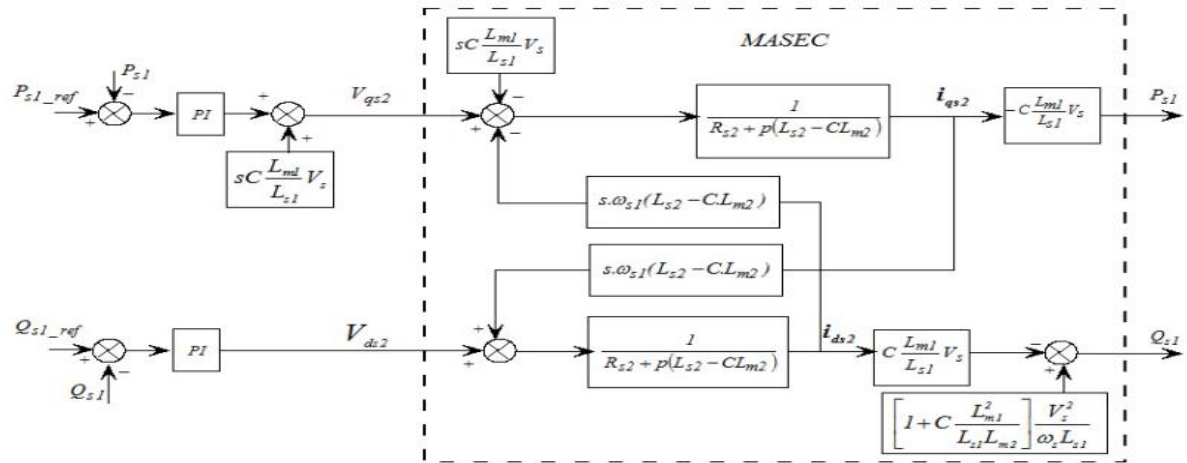


Figure III. 3.Schéma-bloc du contrôle direct

III .7. Synthèse du régulateur PI

Les régulateurs à action proportionnelle-intégrale PI sont très courants dans le domaine de la commande. L'action du régulateur proportionnel (P) permet d'assurer une réponse dynamique rapide, tandis que l'action du régulateur intégral (I) supprimé l'erreur statique en régime permanent.

Les régulateurs PI, utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants i_{dr} , i_{qr} , présente divers avantages, notamment une mise en œuvre rapide et simple, ainsi que des performances acceptables en termes de régulation du système considéré.[35] La figure III.4 représente le système bouclé et corrigé par ce régulateur PI, dont la fonction de transfert est de la forme : $K_p + \frac{K_i}{p}$.

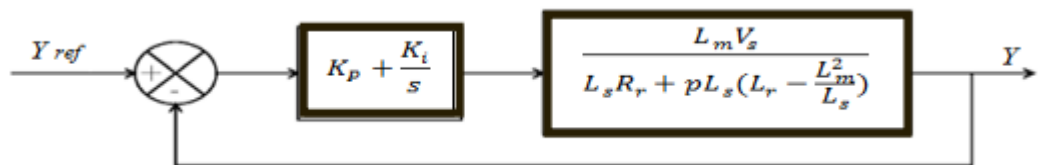


Figure III. 4..Représentation schématique de la boucle de régulation

La

Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{p} \frac{C.L_{m1}.V_s}{L_{s1}(L_{s2}-C.L_{m1})}}{\frac{p}{k_p} \frac{R_{s2}}{P + \frac{R_{s2}}{(L_{s2}-C.L_{m2})}}} \quad (III.25)$$

Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_{s2}}{(L_{s2}-C.L_{m2})} \quad (III.26)$$

Nous notons ici que l'intérêt de la compensation de pôles ne se manifeste uniquement que si les paramètres de la machine sont identifiés avec précision puisque les gains des correcteurs

sont établis en fonction de ces mêmes paramètres. Si les paramètres réels sont différents de ceux utilisés dans la synthèse, la compensation est inefficace [33].

Si on effectue la compensation, on obtient la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) suivante :

$$FTBO = \frac{1}{1+p \frac{L_{S1}(L_{S2}-C.L_{M1})}{k_p.C.L_{M1}.V_s}} \quad (III.27)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBO = \frac{1}{1+\tau_r p} \quad (III.28)$$

Où :

$$\tau_r = \frac{1}{1+p \frac{L_{S1}(L_{S2}-C.L_{M2})}{k_p.C.L_{M1}.V_s}}$$

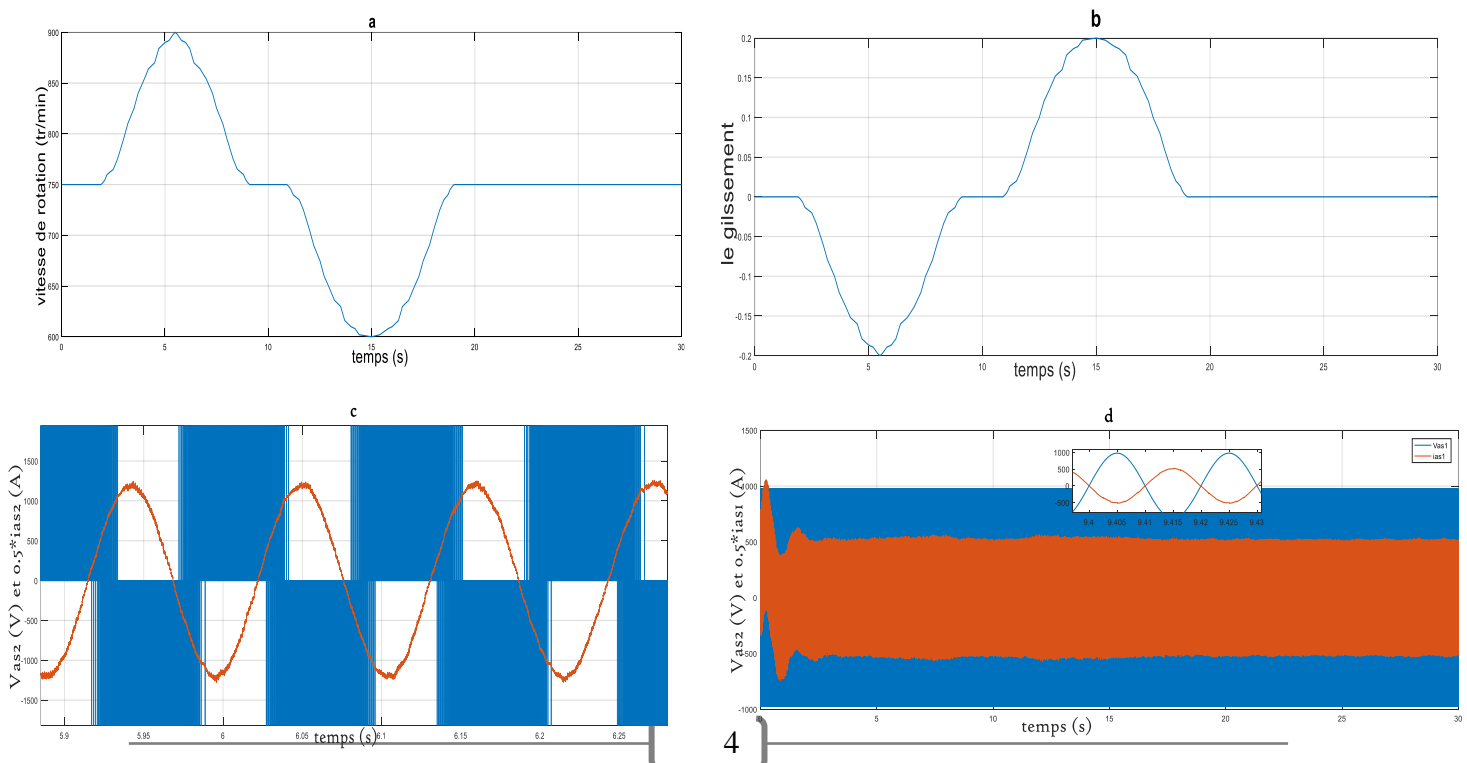
Avec : τ_r Constante de temps de réponse de système, donc les gains du régulateur K_p et K_i peuvent être exprimés de fonction de τ_r et des paramètres de la machine comme suit :

$$k_p = \frac{L_{S1}(L_{S2}-C.L_{M2})}{\tau_r.C.L_{M1}.V_s} \quad (III.29)$$

$$k_i = k_p \frac{R_{S2}}{(L_{S2}-C.L_{M2})} = \frac{L_{S1}.R_{S2}}{\tau_r.C.L_{M1}.V_s} \quad (III.30)$$

III .8. Les résultats de la simulation

Nous présentons les résultats par simulation effectués sur MASEC avec d'une puissance de 1,5 MW. Cette phase montre les résultats de simulation de contrôle de puissance direct réalisée par de régulateur PI.



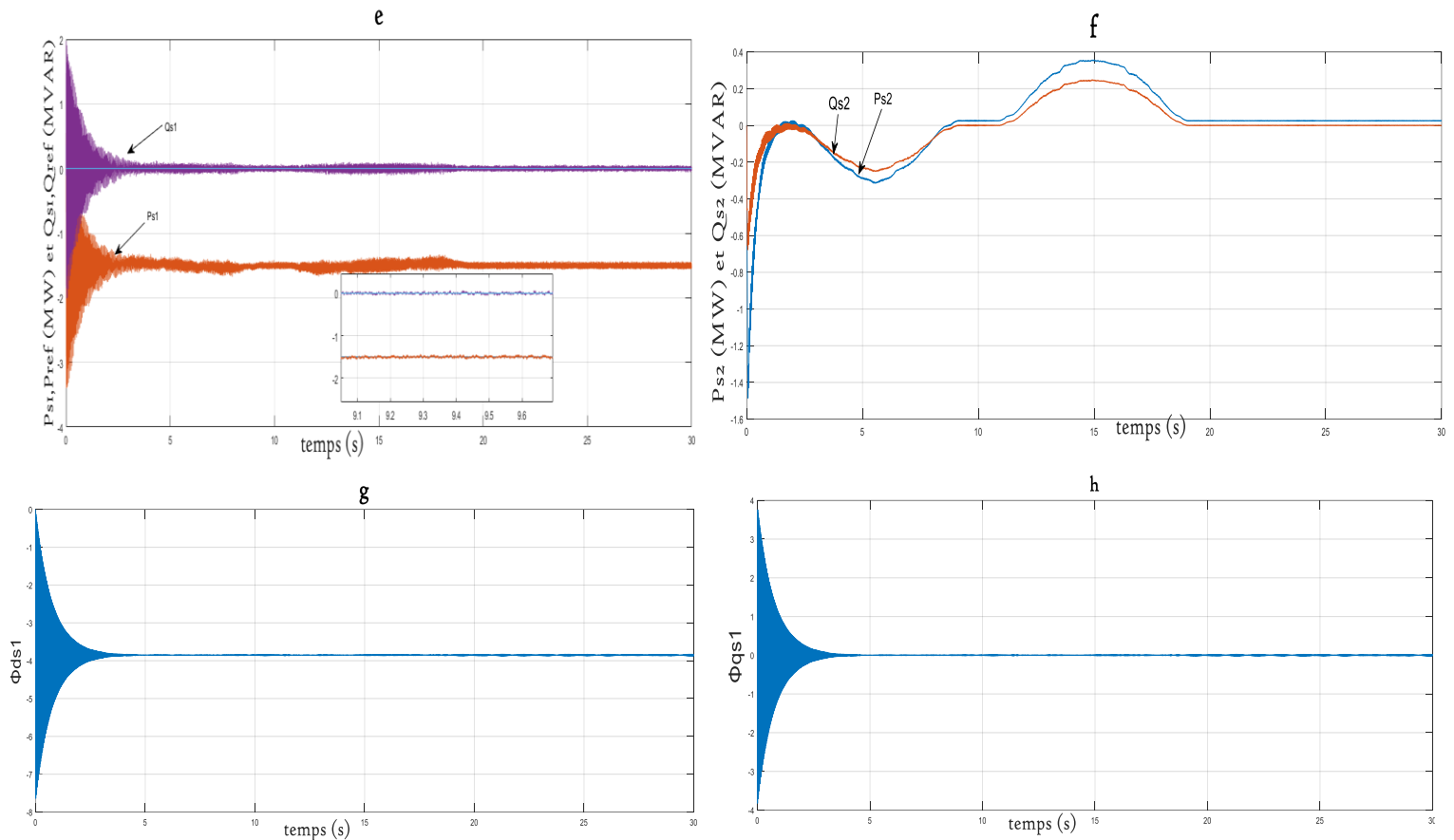


Figure III. 5. Les résultats de simulation

Les résultats de simulation obtenus sont similaires aux résultats qu'on peut obtenir avec la MADA. Cela met en évidence l'importance de l'utilisation de la MASEC.

III .8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de notre commande. Ces derniers confirment la faisabilité de notre système c'est-à-dire lors de l'association de la turbine éolienne à la MASEC les résultats obtenus sont conforme à ceux de l'association de la turbine éolienne à une MADA.

Le prochain chapitre sera consacré au système hybride.

Chapitre IV : Etude du système hybride

IV.1. Introduction

Durant ce chapitre nous essaierons de réaliser un contrôle des puissances à travers la réalisation d'une commande vectorielle. Le choix du régulateur adéquat peut nous aider à retrouver de bons résultats. Des résultats de simulation seront présentés afin de valider notre système de commande.

IV.2. Description du système étudié

MASEC est équipé de deux stators : le premier est directement connecté au réseau, tandis que le deuxième est relié à un panneau solaire via un convertisseur.

Le système étudié est constitué par le générateur PV, le convertisseur AC-DC, une machine de puissance égale à 1.5MW. Le convertisseur AC-DC est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion. La figure ci-dessous présente le synoptique de l'ensemble du système :

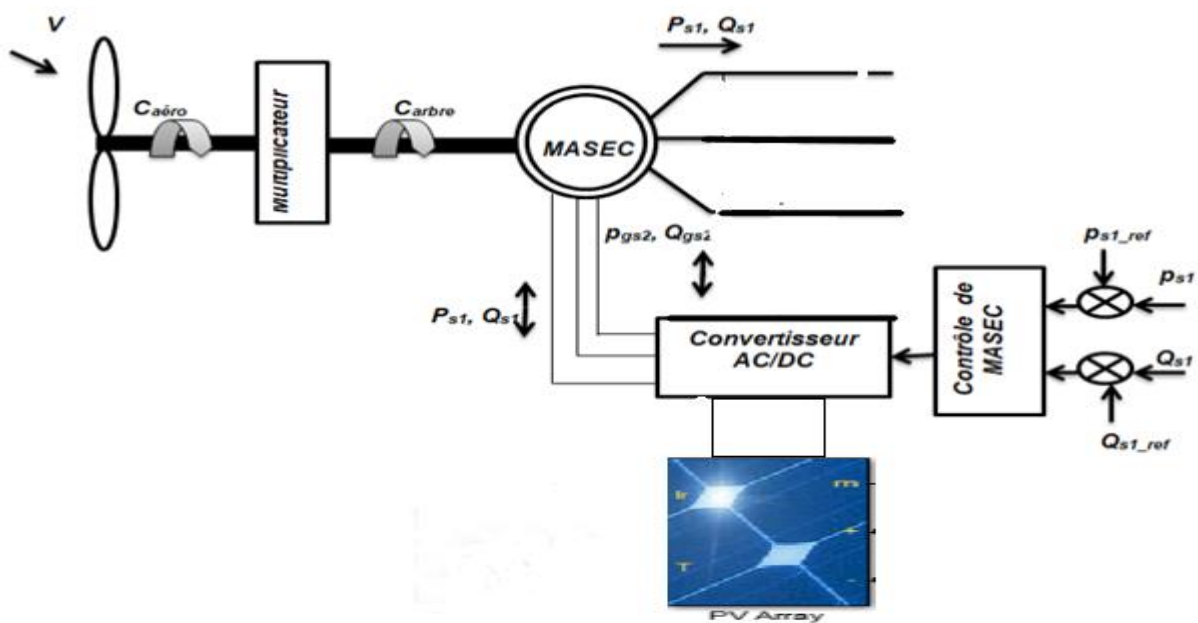


Figure IV. 1. Système étudié

IV.3. Paramètres caractéristiques d'un panneau photovoltaïque

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc} , V_{co} , FF, η) déterminés à partir des courbes courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. [36]

- **Courant de court-circuit I_{cc}**

C'est le courant obtenu en court-circuitant la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Ce courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule, sa valeur est dépendante de la surface éclairée. De la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. [37]

- **Tension de circuit ouvert V_{co}**

C'est la tension aux bornes de la cellule, pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul. [37]

$$V_{C0} = \ln\left(\frac{nkt}{q}\right) \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

n: Facteur d'idéalité de la diode

K : Constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ Joule/Kelvin)

t : Température de la jonction p-n des cellules

q: Charge d'électron ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

E : Eclairement reçu

E0 : Eclairement de référence

- **Puissance maximale**

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairement, température, etc,

$$P = I * V \quad (\text{IV.2})$$

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV (Watt)

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV (Volt)

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV (Ampère)

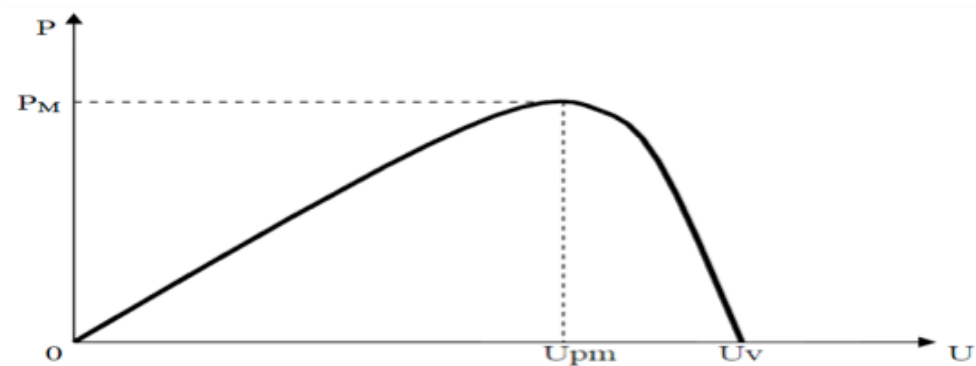


Figure IV. 2. Courbe caractéristique P-V

Pour une cellule solaire idéale s'écrit :

$$P_{max\ idéal} = I_{cc} * V_c \quad (\text{IV.3})$$

P max idéale : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV idéale (W)

V_{oc} : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV(V)

I_{cc}: Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV(A)

Par simplification, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance nominale aux conditions de fonctionnement standard (STC).

Ce paramètre n'est autre que la puissance maximale mesurée sous ces conditions (en général un ensoleillement de 1000W/m² et une température de 25°C). [36]

- **Le facteur de forme FF**

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximum fournie par la Cellule P_{max}, et le produit du courant de court-circuit (I_{cc}) par la tension de circuit ouvert (V_{co}). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante et diminue avec la température :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}} \quad (IV.4)$$

- **Rendement de conversion**

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance.

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} (I_{opt}, V_{opt}) et la puissance solaire incident. [36]

$$\eta = \frac{P_{max}}{n} \quad (IV.5)$$

IV.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance Shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I=f(V) :

- **La résistance série** : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. [37]
- **La résistance shunt** : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle Dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [37]

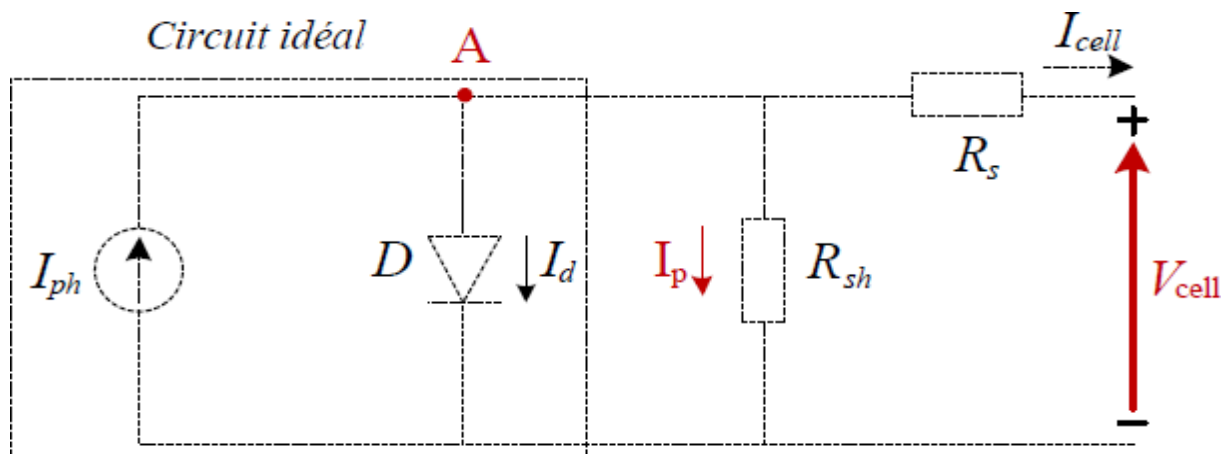


Figure IV. 3.Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes. [36].

Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont : Le photo-courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_0), le facteur d'idéalité de la jonction (n), la Résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}).

- Si on néglige l'effet de la résistance shunt R_{sh} , en le considérant infini, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé.
- Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres.

Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude même le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision. [37]

Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants : L'étude physique d'une photopile nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_{rs} \quad (IV.6)$$

Avec :

I_{cell} : Courant délivré par la photopile

I_{ph} : Photo courant

I_d : Courant de la diode

I_{Rsh} : Courant shunt

La valeur de la résistance (R_{sh}) est très élevée donc on peut négliger le courant R_{sh} , d'où l'équation s'écrit :

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d \quad (IV.7)$$

IV.4.1. Différentes équations de la cellule PV

IV.4.1.1. Le photo-courant I_{ph}

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante

$$I_{ph} = I_{sc} - K(T - 298) \frac{G}{1000} \quad (IV.8)$$

I_{sc} [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur)

K [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau

T [K] : Température ambiante

G [W/m²] : Irradiation sur la surface de la cellule.

IV.4.1.2. Le courant de saturation I_0 :

Ce courant varie avec la température et est donné par

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_{go} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)}{n \cdot k}\right] \quad (\text{IV.9})$$

Eg [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 ev pour le silicium poly cristallin à 25°C)

IV.4.1.3. Courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite) I_{rs} :

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{q \cdot v_{oc}}{n \cdot N_s \cdot k \cdot T}\right) - 1} \quad (\text{IV.10})$$

Où :

Isc [A] : courant de court-circuit du panneau

Voc [V] : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV

q [°C] : Charge de l'électron (1.602. 10⁻¹⁹ °c)

Ns : Nombre de cellules connectées en série

n : Constante d'idéalité de la jonction (1<n<2)

K [J/K] : Constante de Boltzmann (1.3805 .10⁻²³ J/K)

IV.4.1.4. Le courant de résistance shunt :

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}\right) \quad (\text{IV.11})$$

IV.4.1.5. Le courant du panneau

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un Module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{n \cdot K N_s \cdot T}\right) - 1 \right] - I_{sh} \quad (\text{IV.12})$$

Où :

Ns : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

Np : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

Tableau IV. 1. Caractéristique électrique d'une photopile (cellule PV)

Isc	8,32A en 25c° et 1000W/m2
T	T=298 k
Tn	T =25C°
G	G=1000W/ m2
Q	(1,6 .10-19)

Vos	32,9V
N	1,3
K	(1,38.10-23 j/k)
Eg0	(1,1eV)
Ns	54 Cellule
Np	1
Rs	221
Rsh	415,405

Tableau IV. 2. Caractéristique électrique de la cellule PV dans les conditions standards<CST>
T=25°C, G=1000W /m²

Puissance nominale	200 W
Tension a puissance maximal	26.4 V
Courant à puissance maximal	7.58 A
Tension de circuit ouvert	32.9 V
Courant de court-circuit	8.21 A
Nombre des cellules en série Ns	54
Nombre des cellules en parallèle Np	1

IV.5. Simulation sous Matlab-Simulink

Les résultats de simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, basée sur le générateur PV et de la MASEC contrôlée par le stator2. La puissance active maximale limitée à la valeur de -1,5 MW et la puissance réactive est nulle pour maintenir la facture de puissance unitaire.

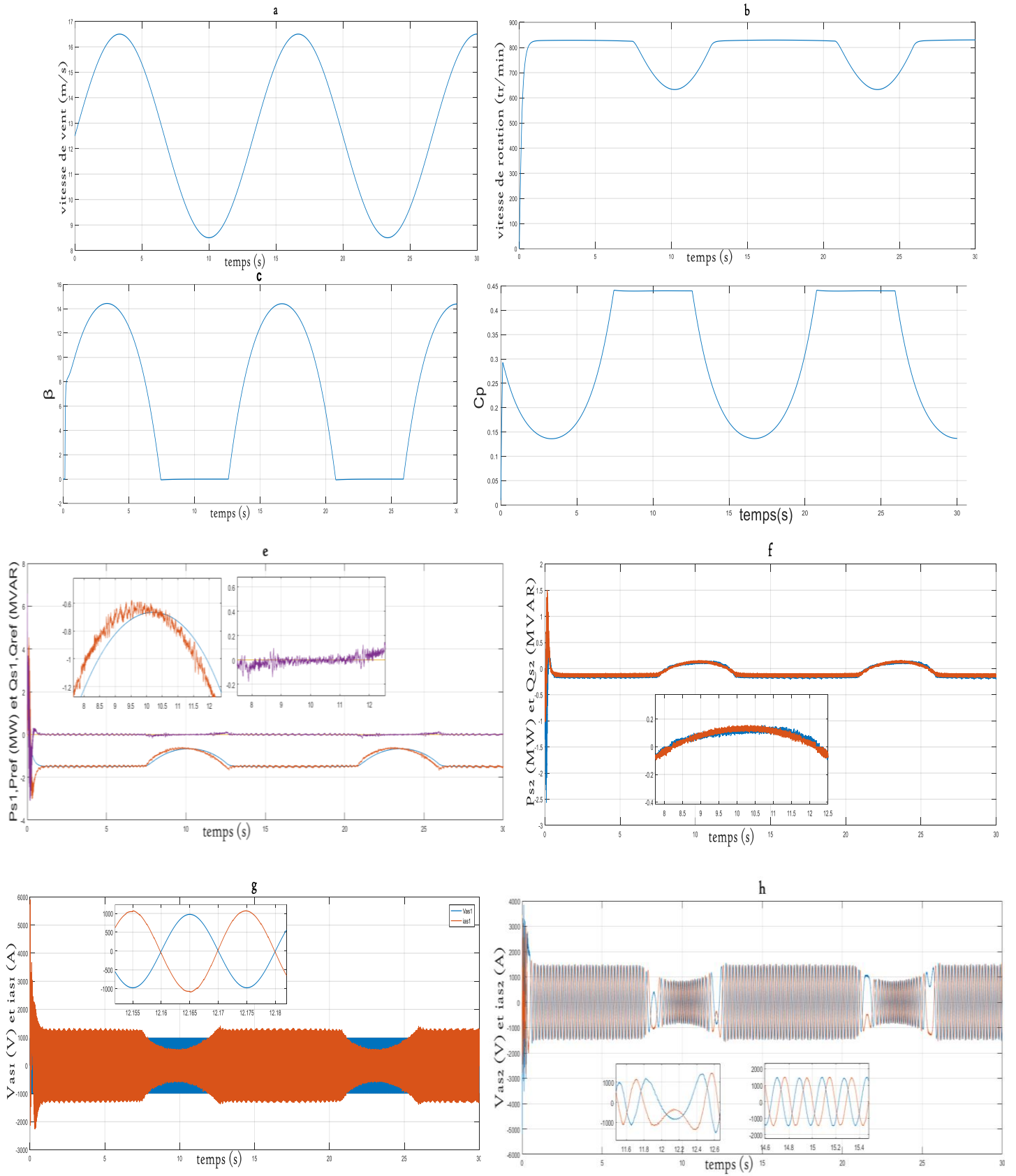


Figure IV. 4. les résultats de simulation

Discussion

- La figure (IV.4 (a)) représente le profil du vent choisi avec des valeurs bien déterminées.
- Dans la figure (IV.4 (b)) on remarque que la vitesse de rotation est variable dans le temps.
- Figure (IV.4 (d)) représente le coefficient de puissance de la turbine qui diminue avec l'augmentation de l'angle B (figure IV.4 (c)). L'angle B augmente et le C_p est détérioré pour des vitesses très élevées
- On remarque, dans la figure (IV.4. (e)), que la puissance active du premier stator est stable lorsque la puissance de la turbine est satisfaisante et diminue lorsque nous avons des vents faibles.
- Dans la figure (IV.4 (f)) on remarque que la puissance active et réactive du deuxième stator est variable selon le mode de fonctionnement. Positive en mode hypo-synchrone et négative en hyper-synchrone
- On remarque dans la figure (IV.4 (g)) le courant et la tension sont tout le temps en opposition de phase
- La figure (IV.4 (h)) représente la tension et le courant du deuxième stator.

IV.6. Conclusion

La chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur un aérogénérateur et une station photovoltaïque est une solution fiable pour la production d'énergie d'origine renouvelable. La combinaison d'un générateur photovoltaïque et d'une éolienne offre également beaucoup plus de robustesse à notre système.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de notre travail est de contrôler les puissances actives et réactives de la machine asynchrone double alimentation en cascade, dans système hybride éolien à base de machine asynchrone en cascade (MASEC) et photovoltaïque à base de panneaux solaire.

Le premier chapitre est spécifiquement dédié aux énergies renouvelables et aux systèmes hybrides. Nous aborderons en détail les différentes technologies d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, ainsi que les systèmes qui combinent plusieurs sources d'énergie renouvelable. En remarque que l'installation d'un système à énergie hybride est bonne pour le rendement du système dans des conditions climatiques variables.

Le deuxième chapitre présente la modélisation de chaque composant de la chaîne de conversion. Cela inclut la modélisation mathématique de la turbine éolienne, l'onduleur MLI, la machine asynchrone à rotor bobiné (MADA) et la cascade de deux machines asynchrones. Des modèles mathématiques et des équations ont été développés pour représenter de manière précise le comportement de la machine. Finalement un démarrage direct de la MASEC est réalisé.

Durant troisième chapitre, on se consacre à étudier comment contrôler et réguler la puissance produite par la MASEC. Les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants.

Dans le dernier chapitre on se concentre à l'étude de la MASEC intégré dans un système éolien, il consiste à raccorder le premier stator de la MASEC directement au réseau est le deuxième stator à un panneau photovoltaïque via convertisseur. L'objectif est assuré la stabilité du réseau électrique et fournir une alimentation électrique fiable et continue aux clients.

Liste des références

- [1] H. Lund, " large-scale integration of optimal combinations of PV, Wind and wave power into the electricity supply", *Renew energy*,2006.
- [2] Yang, H. Zhou, W. Lu, L, Z. Fang, "Optimal sizing method for standalone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm", *Solar Energy*, vol.82, pp. 354-367, 2008.
- [3] M.Sadaoui, M.Meddouri ,«Gestion d'énergie dans un système hybride (photovoltaïque_éolien)», Mémoire de master électrotechnique, université Bejaia, 2012.
- [4] Benoît ROBYNS. 2021. "La production d'électricité à partir d'énergie renouvelable", Benoît Robyns, Arnaud Davigny Bruno François, Antoine Henneton, Jonathan Sprooten Production d'énergie électriques à partir des sources renouvelables, Hermes Science,P7.
- [5] K. Hristiyan, "Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain", Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Ecole Central de Lille, France, 2014.
- [6] CH. DARRAS, "Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque / hydrogène : applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H)", Thèse de Doctorat en Energétique et Génie des Procédés, Université de Corse, France, 2011.
- [7] O. Rourke, F. Boyle, A. Reynolds, " Tidal energy update 2009 ", *Applied Energy*, 2010.
- [8] Ressources naturelles de la canada, "Les systèmes photovoltaïques (guide de l'acheteur)", Division de l'Énergie Renouvelable Électrique, Ottawa, Canada, 2002.
- [9] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables", Thèses de Doctorat, Université Technique de Sofia ,2011.
- [10] C. Ashari, M. Nayar, C. V. Keerthipala, W.W.L, "Optimum operation strategy and economic analysis of a photovoltaic - diesel - battery –mains hybrid uninterruptible power supply", *Renewable Energy*, Vol.22, Issues 1-3, pp.247- 254, March, 2001.
- [11] T. Zhou, "Commande et supervision énergétique d'un générateur hybride actif éolien incluant du stockage sous forme d'hydrogène et des super-condensateurs pour l'intégration dans le système électrique d'un micro réseau", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2009.
- [12] M. Aysar, M. Yasin, "Distributed generation systems based on hybrid wind/photovoltaic/fuel cell structures", Thèse de Doctorat, Université Degli Studi di Catania Scuola Superiore di Catania, 2012.
- [13] I. Vechiu, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome", Thèses de Doctorat, Université du Havre, 2005.

- [14] V. Courtecuisse, "Supervision d'une centrale multi-source à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique", Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2008.
- [15] A. Payman, "Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides multi-sources multi-charges", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [16] J. Bernard, "Véhicules hybrides à pile à combustible, dimensionnement et stratégies de commande", Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2007.
- [17] Caisheng Wang, "Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems", Thèse de Doctorat, Dissertation, Montana State University, July 2006.
- [18] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables, Energie électrique", Thèse de Doctorat, Université Pascal Paoli, France, 2011.
- [19] M. Dahmane, "Gestion, Optimisation et Conversion des Énergies pour Habitat Autonome", Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale en Sciences Technologie et Santé (ED 585), Université de Picardie Jules Verne, France, 2015.
- [20] B. A. Brahim, "Etude des différentes configurations des systèmes d'énergie hybrides PV/diesel et de leur impact sur le coût de production d'électricité, Mémoire pour l'obtention du master d'ingénierie en eau et environnement, option : Energie et Procédés Industriels, Centre Commun de Recherche Energie et Habitat Durable, France, 2013.
- [21] Nouar Aoun, "Performance Analysis of a 20 MW Grid-Connected Photovoltaic Installation in Adrar, South of Algeria", Advanced Statistical Modeling, Forecasting, and Fault Detection in Renewable Energy Systems, IntechOpen, 2020.
- [22] O. GUERRI, "L'Énergie éolienne en Algérie : un bref aperçu", Recherche et Développement, 2020.
- [23] C. Saget, "La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne", REE, 1998.
- [24] R. Mukand Patel, "Wind and solar power systems", CRC Press, 1999.
- [25] E. S. Abdin, W. Xu, "Control design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine- Induction Generator Unit", IEEE Trans, on Energy Conversion, March, 2000.
- [26] E. De Vries, "Wind turbines technology trends", Vol. 6, No. 4, James & James (Science Publishers), Renewable Energy World, July-August 2003
- [27] B. Rafik, M. Abdelhalim, "Commandes non linéaires d'une machine asynchrone double alimentation", Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2016.
- [28] E. Youcef, "Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté", Mémoire de Magister en électrotechnique, Université de Batna, 2009.

- [29] A. Boussouf, "Commande de la machine asynchrone Modélisation et Simulation de la Machine Asynchrone", Cours M1/S2 EM, University de Mila, 2022.
- [30] A. Petron, "Analysis, Modeling and control of Doubly fed Induction Generator for Wind Turbine", Thèse de Doctorat, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2005.
- [31] Ekanayake J, Holdsworth L, Jenkins N. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines. Electric Power Systems Research, 2005.
- [32] A. MAAFA, D. AOUZELLAG, K. GHEDAMSI, R. ABDESSEMED, "Study of the cascade doubly fed induction machine (CDFIM) ", International conference on electrical, electronics and automatic 10, University of Bejaia, Algeria, 2010.
- [33] A. MAAFA, "Intégration d'une cascade de deux machines asynchrones dans un système éolien", Thèse de Doctorat, Université A. Mira de Bejaïa, 2017.
- [34] B. Cherif, "simulation de la commande vectorielle", Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, 2012.
- [35] F. A. TRIA, "Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA par différentes techniques" Mémoire de Magister, Université d'El-oued, 2012 /2013.
- [36] A. Haloune, "modélisation de transfert radiatif dans strates supérieur d'un module photovoltaïque", Université de Boumerdes, Algérie, 2016.
- [37] M. Haroubia, "étude simulation d'un panneau photovoltaïque", Université d'Annaba, Algérie, 2019.