



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
Et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued

Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE
Domaine: Sciences et de Technologies
Filière : Génie Électrique
Spécialité : Machine Électriques

Thème

**Commande directe de puissance d'une
génératrice asynchrone à double
alimentation**

Réaliser par:

- OKBA Mohamed el habib
- HOURI Mohamed Lakhder
- ATOUSSI Bachir
- BEN AMOR Ali

Diriger par:

- Dr. SERHOUD Hicham

Année universitaire : 2021/2022

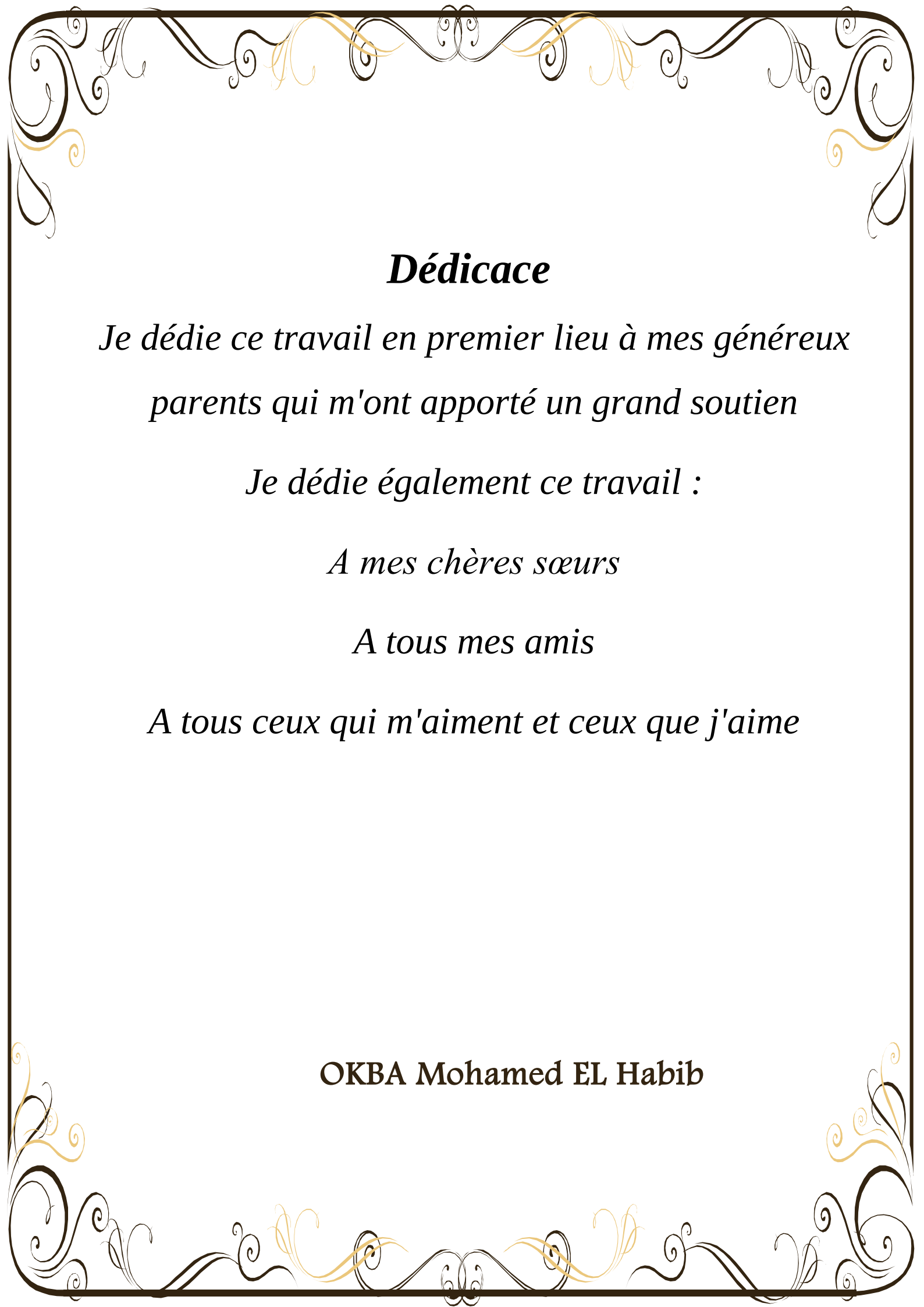
Remerciement

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à **Mr: SERHOUD Hicham** qui nous a fait l'honneur d'être notre encadreur ;*

Nous le remercions profondément pour son encouragement continu et aussi d'être toujours là pour nous écouter, et nous guider durant la préparation de ce travail par ses précieux conseils et suggestions.

Enfin, nous ne pourrons terminer ces remerciements sans oublier nos familles pour leur aide, compréhension, encouragement et soutien, qu'elles nous ont apportées durant nos études et à tous nos amis



Dédicace

*Je dédie ce travail en premier lieu à mes généreux
parents qui m'ont apporté un grand soutien*

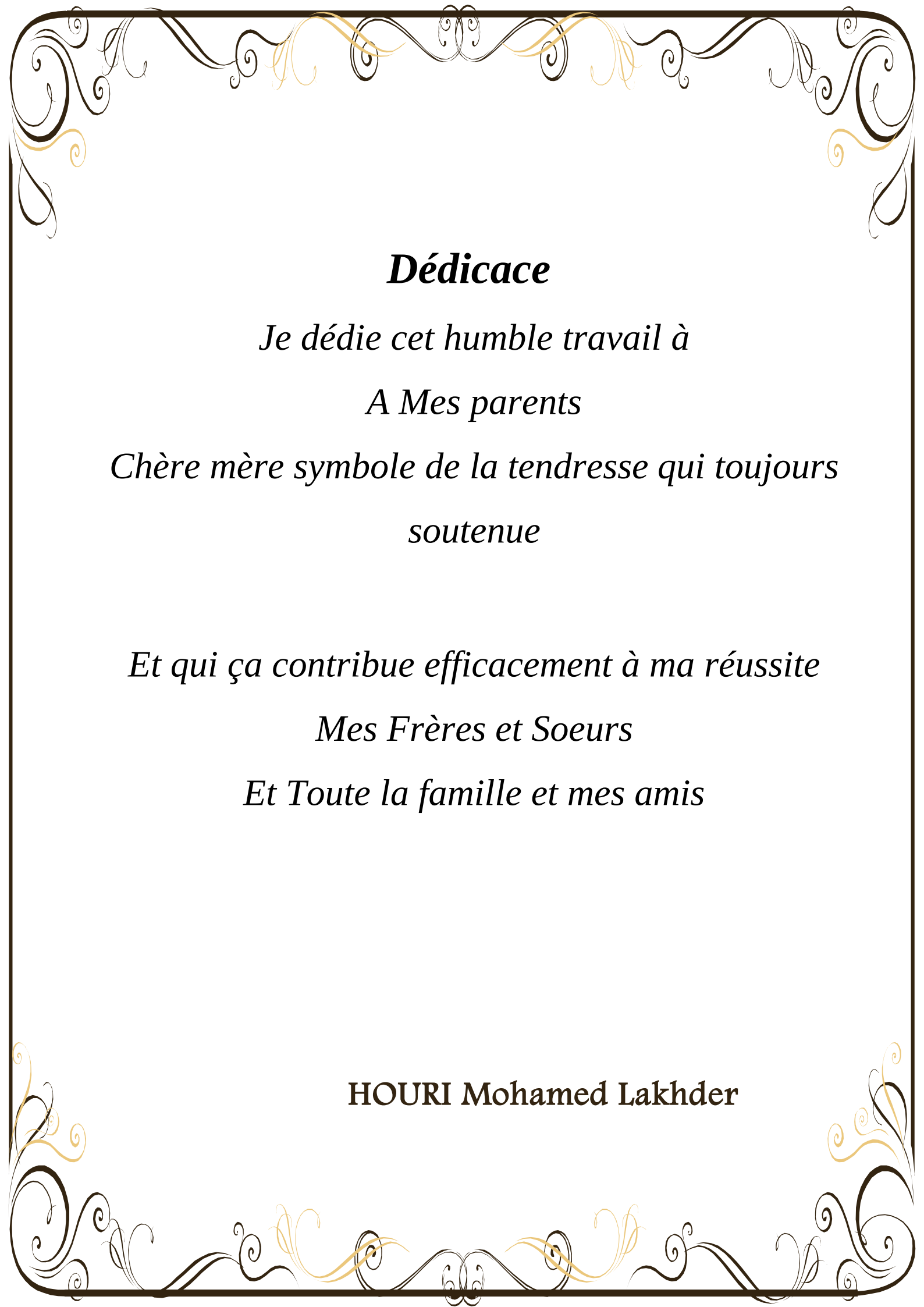
Je dédie également ce travail :

A mes chères sœurs

A tous mes amis

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

OKBA Mohamed EL Habib



Dédicace

Je dédie cet humble travail à

A Mes parents

*Chère mère symbole de la tendresse qui toujours
soutenue*

Et qui ça contribue efficacement à ma réussite

Mes Frères et Soeurs

Et Toute la famille et mes amis

HOURI Mohamed Lakhder



Dédicace

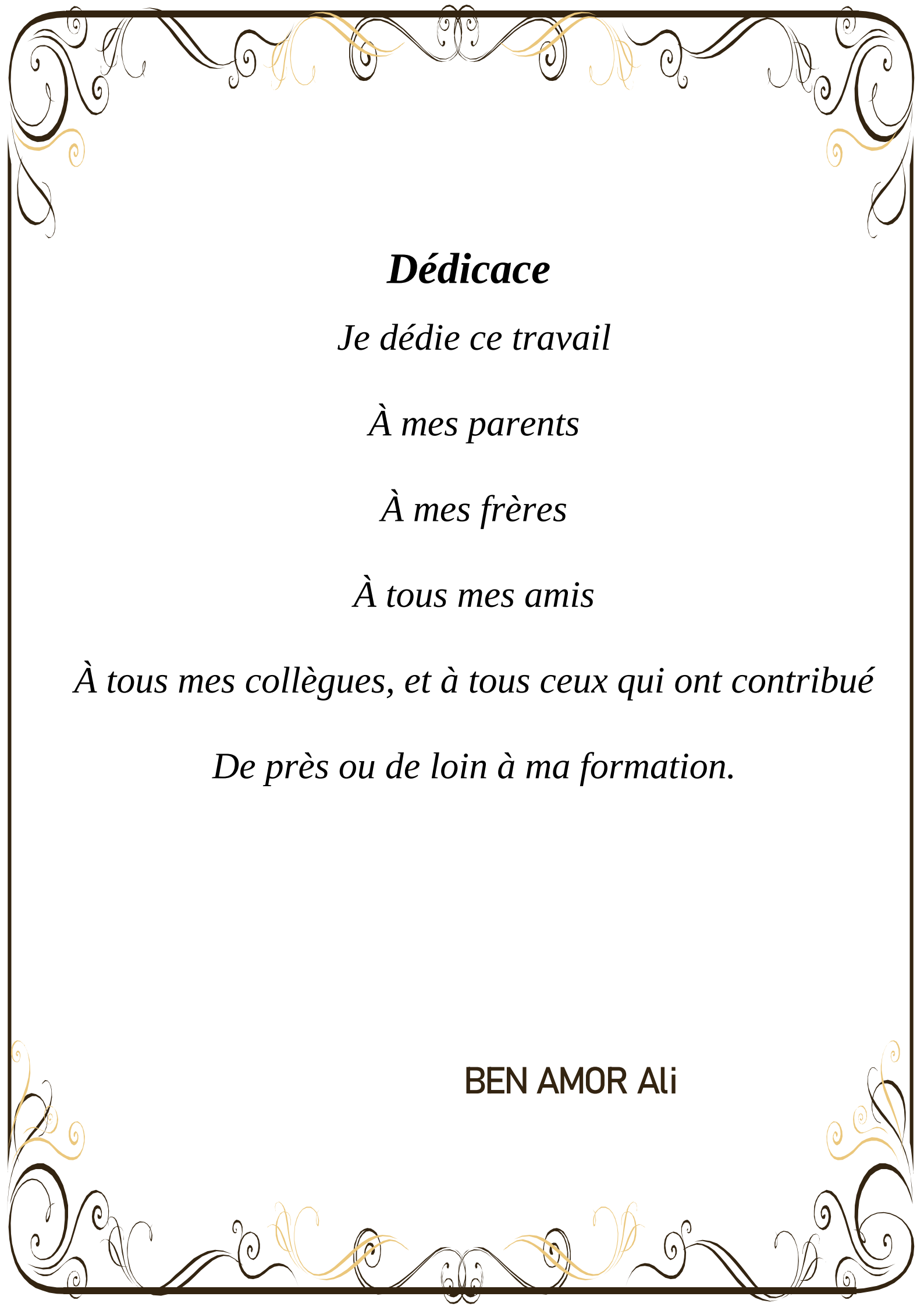
Je dédie ce travail à mon père

A toute chère famille

A tous ceux qui me soutiennent

A mes amis que j'aime tant

ATOUSSE Bachir



Dédicace

Je dédie ce travail

À mes parents

À mes frères

À tous mes amis

À tous mes collègues, et à tous ceux qui ont contribué

De près ou de loin à ma formation.

BEN AMOR Ali

Résumé

Dans ce travail, nous présentons une étude de la commande de la puissance d'une génératrice asynchrone à double alimentation, qui peut être insérée dans le système éolien. L'objectif de cette étude est de contrôler directement la puissance active et réactive par la technique contrôle direct de puissance (DPC), et nous avons extrait les résultats de simulation à l'aide du programme Matlab/Simulink, qui a montré une bonne et excellente efficacité pour le contrôle de la puissance du générateur et ni découplage entre les axes dq.

Mots clés: Énergie éolienne ; modélisation ; GADA ; Commande Vectorielle ; Contrôle Direct de la Puissance

Abstract

In this work, we present a study of the power control of a double-fed asynchronous generator, which can be inserted in the wind system. The objective of this study is to directly control the active and reactive power by the direct power control (DPC) technique, and we extracted the simulation results using the Matlab/Simulink program, which showed good and excellent efficiency for generator power control and no decoupling between dq axes.

Key words: Wind power; modeling; DFIG; Vector Command; Direct Power Control

ملخص :

في هذا العمل ، نقدم دراسة للتحكم في الطاقة لمولد غير متزامن مزدوج التغذية ، والذي يمكن إدخاله في نظام الرياح. الهدف من هذه الدراسة هو التحكم المباشر في القدرة النشطة والمتفاعلة بواسطة تقنية التحكم المباشر في القدرة DPC نتائج المحاكاة باستخدام برنامج ماتلاب سيملينك والتي أظهرت كفاءة جيدة وممتازة للتحكم في طاقة المولد وفصل المحاور dq

كلمات مفتاحية : طاقة الرياح ، النمذجة ، مولد غير متزامن ثنائي التغذية ، التحكم المباشر في الاستطاعة ، dq بين محاور

Glossaire :

GADA : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.

MADA : Machine à double alimentation

MAS : Machine asynchrone à cage

MCC : Machine à Courant Continu

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale, « Maximum Power Point Tracking »

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions

DC/DC : Hacheur Courant Continu/Courant Continu.

DTC : Direct Torque Control

DPC : Commande directe de puissance

DSC : Direct Self Control

DPCSV : Contrôle direct de la puissance avec modulation vectorielle spatiale

GVV : Générateur à Vitesse Variable.

GVC : Génération à Vitesse Constante

CCM : Convertisseur Coté MADA

CCR : Convertisseur Coté Réseau

FTBO : Fonction de transfert en Boucle Ouvert

FTBF : Fonction de transfert en Boucle Fermé

FMM : Force magnétomotrice

Hyper : Hyper synchronisme

Hypo : Hypo synchronisme

LPV : système non linéaire à paramètre variant

PI : Proportionnelle intégrale

Notations et symboles

Notations et symboles

Symbole	Signification	Unité
E_c	Énergie cinétique	mv^2
P	Masse volumique de l'air	Kg/m^3
C_p	Coefficient de puissance	
C_r	Couple résistant	N.m
C_e	Couple électromagnétique	N.m
C_{vis}	Couple visqueux	N.m
C_{mec}	Couple de la génératrice	N.m
C_{aer}	Couple aérodynamique	N.m
K_i, K_p	Gains du régulateur PI classique	
F	Fréquence du réseau électrique	Hz
G	Glissement	
F	Coefficient de frottement visqueux de la MADA	N.m.s/r
J	Courants de phase	A
M	Inductance magnétisante	H
M_{sr}	Inductances mutuelles entre le stator et le rotor	H
M_s	Inductances mutuelles entre les phases statoriques	H
M_r	Inductances mutuelles entre les phases rotoriques	H
L_r	Inductances propres rotorique	H
L_s	Inductances propres statorique	H
L	Valeur d'inductance	H
R_r	Résistances rotorique	Ω
R_s	Résistances statorique	Ω
R	Rayon de la turbine	M
Q_s	Puissance réactive statorique	VAR
P_n	Puissance nominale	W
$P_{rés}$	Puissance de réseau	W
P_v	Puissance portée par le vent	W
P_s	Puissance active statorique	W
P_r	Puissance active rotorique	W
P_{mec}	Puissance mécanique sur l'arbre de la machine	W
S	Surface balayée par le rotor de la turbine	m^2
$C_{aér}$	Couple aérodynamique de la turbine	W
i_{abcr}	Courants instantés des phases rotorique	A

Notations et symboles

v_{abcr}	Tensions instantés des phases rotorique	V
i_{abcs}	Courants instantés des phases statorique	A
v_{abcs}	Tensions instantés des phases statorique	V
i_{dqr}	Composantes du courant rotorique dans le repère (d,q)	A
v_{dqr}	Composantes de tension rotorique dans le repère (d,q)	V
i_{dqs}	Composantes du courant statorique dans le repère (d,q)	A
v_{dqs}	Composantes de tension statorique dans le repère (d,q)	V
P	Nombre de paires de pôles	
S	Opérateur de Laplace	
B	Angle de calage des pales	deg°
A	Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal	deg°
Σ	Coefficient de dispersion	
Ω	Vitesse de rotation mécanique du rotor	rd/sec
Ω_{mec}	Vitesse de rotation mécanique	rd/sec
Ω_{ref}	Vitesse mécanique de la génératrice de référence	rd/sec
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine	rd/sec
C_{ass}	Régulateur de vitesse	
Θ	Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique.	Rd
θ_s	Position de stator	Rd
θ_r	Position électrique de rotor	RD
Λ	Vitesse spécifique	
λ_{cpmax}	Vitesse spécifique optimale de l'éolienne	
Ω	Vitesse angulaire de rotation du rotor	rd/sec
ω_{coor}	Vitesse angulaire du repère biphasé	rd/sec
ω_s	Pulsation des courants statoriques	rd/sec
φ_{abcr}	Flux instantanés des phases rotoriques	Wb
φ_{abcs}	Flux instantanés des phases statoriques	Wb
φ_{dqr}	Composantes du flux rotorique dans le repère (d,q)	Wb
φ_{dqs}	Composantes du flux statorique dans le repère (d,q)	Wb
PI	Proportionnelle intégrale	
$[P(\theta)]^{-1}$	Transformation de Park inverse	
$[P(\theta)]$	Transformation de Park directe	
V	vitesse du vent	m/s
U	Tension composé	V

Notations et symboles

V	Tension simple	V
I	Courants de ligne	A
M	Masse de l'air	Kg
G	Gain du multiplicateur	
B	Nombre de pale	
d	Diamètre d'une pale	m
J _r	Inertie de l'arbre	Kg.m ²

Liste de Figure

	page
Chapitre I : Généralité sur les énergies éoliennes	
Figure I.1 : Capacité installée de production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables dans le monde en 2018, selon la source d'énergie	5
Figure I.2 : Carte des ressources éoliennes et estimation de la densité moyenne de l'énergie éolienne à 100 m au-dessus du niveau de la surface.	7
Figure I.3 : Capacité d'énergie éolienne (en mégawatt) installée dans le monde au cours des sept dernières années.	8
Figure I.4 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne	8
Figure I.5 : Principes composants d'une éolienne	9
Figure I.6 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.	9
Figure I.7 : Principes composants d'une éolienne.	10
Figure I.8 : Exemple de système éolien de type aérogénérateur.	11
Figure I.9 : Eolienne à axe verticale	11
Figure I.10 : Eolienne à axe verticale Savonius	12
Figure I.11 : Eolienne à axe horizontal	13
Figure I.12 : Fonctionnement des éoliennes en amont et en aval.	13
Figure I.13 : Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus	15
Figure I.14 : Aérogénérateur à vitesse fixe	16
Figure I.15 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA	17
Figure I.16 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage.	19
Figure I.17 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable	19
Figure I.18 : MADA avec contrôle du glissement de l'énergie rotorique	21
Figure I.19 : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage.	22
Chapitre II : Commande vectorielle de la MADA	
Figure II.1 : Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée	26
Figure II.2 : Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	27
Figure II.3 : Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	27
Figure II.4 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	27
Figure II.5 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	28
Figure II.6 : Représentation simplifié de la MADA.	31
Figure II.7 : Modèle de PARK de la MADA.	33

Figure II.8: Représentation de la machine dans le repère diphasé	34
Figure II.9 : Orientation de flux statorique	36
Figure II.10 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances	38
Figure II.11 : Schéma bloc de la commande directe.	39
Figure II.12 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle	40
Figure II.13 : Schéma bloc de la commande en boucle ferme	41
Figure II.14 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux	41
Figure II.15 : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale a une porteuse	43
Figure II.16 : Schéma bloqué du modèle de la commande vectorielle de MADA	44
Figure II.17 : Vitesse de rotation	44
Figure II.18 : Vitesse du vent	45
Figure II.19 : Courant rotorique d'une phase	45
Figure II.20 : Courant statorique d'une phase	45
Figure II.21 : Vitesse relative d'éolienne.	46
Figure II.22 : Coefficient de puissance de la turbine.	46
Figure II.23: Puissance active statorique	46
Chapitre III : Commande directe de puissance d'une GADA	
Figure III.1: Configuration de la DPC-C de la MADA	51
Figure III.2 : La décomposition du vecteur flux rotorique dans le plan (α - β).	54
Figure III.3 : Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive	54
Figure III.4 : Présentation des vecteurs de commutation	55
Figure III.5 : Schéma bloqué du modèle de la commande DPC de la GADA	57
Figure III.6 : Vitesse du vent	58
Figure III.7: La vitesse rotorique	58
Figure III.8 : Puissance active	59
Figure III.9 : Puissance réactive	59
Figure III.10 : Courant rotorique	59
Figure III.11 : Courant statorique	60
Figure III.12 : Couple électromagnétique	60
Figure III.13 : Coefficient de puissance la turbine	60
Figure III.14 : Vitesse relative de l'éolienne	61
Figure III.15 : Secteur	61

Figure. B.1 : Schéma block du système de régulation des puissances statoriques	67
Figure. B.2 : Schéma block du système de régulation des courants rotorique	68
Figure. B.3 : Schéma block du système de régulation de vitesse	68

Sommaire

	page
Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Glossaire	
Notations et symboles	
Liste de Figures	
Sommaire	
Introduction générale	01
Chapitre I :Généralité sur les énergies éoliennes	
I.1.Introduction e historique	04
I.2. Production et progression de l'énergie éolienne	05
I.3.Donnés générales	06
I.3.1. Gisement éolien au niveau mondial:	06
I.3.2. Capacité d'énergie éolienne (en mégawatt) installée dans le monde	07
I.4. Définition de l'énergie éolienne	08
I.5.Constitution d'une éolienne	09
I.5.1 Principe	09
I.5.2. Constitution et Fonctionnement d'une éolienne	09
I.6.Les types d'éolienne	11
I.6.1. Éoliennes à axe vertical	11
I.6.1.2. L'éolienne à axe vertical Savonius	12
I.6.1.3. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical Savonius	12
I.6.2. Eoliennes à axe horizontal	12
I.6.2.1. Avantages et inconvénients des éoliennes horizontales	14
I.6.2.2. L'éolienne à axe vertical Darrieus	14
I.6.2.3. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical Darrieus	15
I.6.2.4. Avantages et inconvénients des éoliennes verticales	15
I.7. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique	16
I.7.1. Fonctionnement à vitesse fixe	16
I.7.2. Fonctionnement à vitesse variable	16
I.7.3. Avantage éolienne vitesse variable	17

I.7.4. Inconvénient éolienne vitesse variable	17
I.8. Choix de vitesse variable dans le système éolien	17
I.9. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne	18
I.9.1 Machines asynchrones à cage (MAS)	18
I.9.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) (rotor bobiné)	19
I.9.2.1. Principe de fonctionnement	20
I.9.3. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée	21
I.10. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens	21
I.10.1. Systèmes non couplés au réseau alternatif	21
I.10.2. Systèmes couplés au réseau alternatif	22
I.11. Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne	22
I.11.1. Avantages	22
I.11.2. Inconvénient	23
I.12. Conclusion	23
Chapitre II : Commande vectorielle de la MADA	
II.1. Introduction	25
II.2. Description de la machine asynchrone à double alimentation	25
II.3. Structure de la machine	25
II.4. Modes de fonctionnement de la MADA	26
II.4.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	26
II.4.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	27
II.4.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	27
II.4.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	28
II.5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	28
II.6. Domaines d'application de la MADA	29
II.7. Avantages et inconvénients de la MADA	29
II.7.1. Avantages de la MADA	29
II.7.2. Inconvénients de la MADA	30
II.8. Modélisation de la MADA	30
II.8.1. Hypothèses simplificatrices	30
II.8.2. Modèle mathématique de la MADA	31
II.8.2.1. Equation électrique	31
II.8.2.2. Equations magnétiques	31

II.8.2.3. Equation mécaniques	32
II.8.3. Modèle biphasé de la MADA	32
II.8.3.1. La transformation de Park	32
II.8.3.2. Equation des tensions	34
II.8.3.3. Equation des flux	34
II.8.3.4. Equation du couple électromagnétique	35
II.9. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation	35
II.9.1. Principe	35
II.9.2. Commande de la MADA avec orientation du flux statorique	35
II.9.3. Commande vectorielle de la MADA	36
II.9.3.1. Relations entre les courants statoriques et rotoriques	37
II.9.3.2. Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone	37
II.9.3.3. Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques	38
II.9.4. Contrôle indépendant des puissances active et réactive	38
II.9.4.1. Commande directe	39
II.9.4.2. Commande indirecte	40
II.9.4.2.1. Commande en boucle ouvert	40
II.9.4.2.2. Commande en boucle fermé	40
II.9.4.3. Type du régulateur PI	41
II.9.5. Onduleur de tension a deux niveaux	41
II.9.5.1. Stratégie de commande	42
II.9.5.2. Algorithme de commande	43
II.10. Simulation de la commande de la MADA	43
II.10.1. Résultats de simulation	44
II.11. Interprétations des Résultats	46
II.12. Conclusion	47
Chapitre III : Commande directe de puissance d'une GADA	
III.1. Introduction	49
III.2. Théorie de la commande directe de puissance	49
III.3. Principe du contrôle direct des puissances (DPC)	50
III.4. Commande directe de la puissance active et réactive de la MADA	51
III.4.1. Schéma de la commande directe des puissances active et réactive	52
III.4.2. Estimation de la puissance active et réactive	53

III.4.3. Choix des comparateurs à hystérésis	54
III.4.4. Elaboration de la table de commutation	55
III.5. Avantages et inconvénients de la structure de contrôle DPC classique	57
III.5.1. Avantages de la structure de contrôle DPC classique	57
III.5.2. Inconvénients de la structure de contrôle DPC classique	57
III.6. Simulation de la DPC	57
III.7. Résultats de simulation	58
III .8. Interprétations des résultants	61
III .9. Conclusion	62
Conclusion générale	64
Annexe	66
Références	71

Introduction Générale

Introduction Générale :

L'énergie électrique est au cœur de notre société moderne qui serait bien en peine si elle devait s'en passer. Sa facilité de transport et surtout sa transformation en une autre forme d'énergie en font un élément désormais indispensable. En effet, quel appareil domestique ou industriel n'utilise pas l'électricité que ce soit pour faire de l'éclairage, du chauffage, des mouvements de rotation ou translation, de la transmission de signaux, de l'imagerie médicale et bien d'autres choses encore...la liste est infinie. C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver de solutions afin d'en produire toujours plus mais de manière plus propre et plus durable [1]. La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voire amplifier, cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques. D'une part, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente.

Pour subvenir au besoin en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y'a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergies. C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur une des énergies renouvelables en développement en ce moment qui est l'énergie éolienne qui occupent une place particulière. En effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à se développer fortement dans nombreuses régions, d'autre part, cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau ou elle est injectée.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. De plus, si l'on arrive à faire en sorte que les éoliennes puissent fournir des services systèmes au réseau, tels que, la fourniture de puissance réactive pour la correction du facteur de puissance et l'amélioration de la qualité de l'énergie par le filtrage des harmoniques de courant alors son insertion dans les réseaux sera surement plus simple. C'est donc dans ce cadre que

nous allons développer notre étude sur un système éolien à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à double alimentation.

Dans le premier chapitre, nous présentons les derniers développements dans le domaine de l'énergie éolienne à partir de la date de son exploitation et donnons également une définition de l'énergie éolienne. Nous mettons également en évidence les différents types d'éoliennes et leur développement au cours des dernières décennies, et les diverses combinaisons machine-transformateur, utilisées pour convertir une machine asynchrone à double puissance basée sur le vent que vous étudierez.

Le deuxième chapitre, sera consacré à la modélisation de l'éolienne et la commande vectorielle dans le but de régler la puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée à vitesse variable (avec turbine).

Le dernier chapitre, sera consacré au contrôle direct de la puissance (DPC) pour la conversion de l'énergie éolienne basée sur un générateur asynchrone à vitesse variable et nous créerons et analyserons une simulation de conduite contrôle direct de la puissance (DPC) de générateur.

Chapitre I :

Généralité sur les énergies éoliennes

I.1.Introduction et historique :

Avec l'arrivée du nouveau millénaire, les débats sur l'avenir énergétique de la planète se sont intensifiés, compte tenu des besoins sans cesse croissants dans le domaine et les conséquences que cela peut engendrer à moyen terme. A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore. Les gisements de ressources énergétiques d'origines fissiles, même si elles offrent une alternative à court/moyen terme, posent quant à elles de réels problèmes environnementaux liés à la pollution d'air due aux gaz d'échappement des chaudières des centrales thermiques au traitement des déchets radioactifs et au démantèlement des centrales nucléaires obsolètes. En effet, de nouvelles sources d'énergie propres et renouvelables sont développées. A ce sujet, le soleil, le vent, la biomasse, la mer, ... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. Parmi ces sources d'énergie renouvelables, l'énergie éolienne et photovoltaïque ont vu une croissance notable dans le domaine de la production d'électricité.

Le contexte fluctuant des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale en électricité dans le monde actuel de la production d'énergie propre au quotidien grâce à ses capacités et avantages globaux et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin de l'énergie propre et durable, où l'éolien occupe une place privilégiée. Fort de son potentiel mondial, celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout de l'énergie. Ce qui se traduit par une profonde réorganisation et mutation du marché de l'éolien.

La capacité des éoliennes a augmenté au fil du temps. En 1985, la turbine type avait une capacité nominale de 0,05 mégawatts (MW) et un diamètre rotatif de 15 mètres. Les nouveaux projets éoliens d'aujourd'hui ont des capacités turbo d'environ 2 MW et 3-5 MW [2].

Les éoliennes disponibles dans le commerce ont atteint une capacité de 8 MW, avec des diamètres rotatifs de 164 mètres. La capacité moyenne des éoliennes est passée de 1,6 MW en 2009 à 2 MW en 2014 [2].

L'Algérie est confrontée à des problèmes d'énergie électrique. La puissance fournie ne suffit plus à la demande. Il est grand temps de se tourner vers les autres formes d'énergies renouvelables disponibles en grandes quantités dans notre pays comme le vent.

Ce chapitre présente un état de l'art des différentes technologies et concepts d'éoliennes en présentant. En premier lieu, nous allons introduire quelques notions sur la conversion mécanique de l'énergie éolienne, et un aperçu succinct des deux grandes familles d'éoliennes.

Ensuite nous présentons les différents constituants d'une éolienne. Les systèmes éoliens basés sur la machine synchrone à aimant permanent et des différentes topologies ont été abordés. Après aux autres types de machines, l'idée de consacrer la suite des recherches sur un système utilisant

une machine synchrone à aimant permanent MSAP a été retenue. Leurs avantages et inconvénients. Les objectifs de la commande des éoliennes seront aussi décrits, le chapitre terminera par une conclusion.

I.2. Production et progression de l'énergie éolienne :

La production d'énergie électrique est la première étape dans l'architecture des réseaux électrique cette opération se fait à l'aide des moyens dite moyens de production.

Un moyen de production d'énergie électrique est une installation capable de convertir une source d'énergie primaire en énergie électrique. Ces moyens sont très divers, chaque type a des caractéristiques techniques et économiques propres expliquent l'utilisation des moyens de production pour satisfaire la consommation d'électricité et la constitution du mix des énergies primaires pour produire de l'électricité dans le monde la Capacité installée de production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables dans le monde en 2018, selon la source d'énergie est indiqué dans la Figure I.1

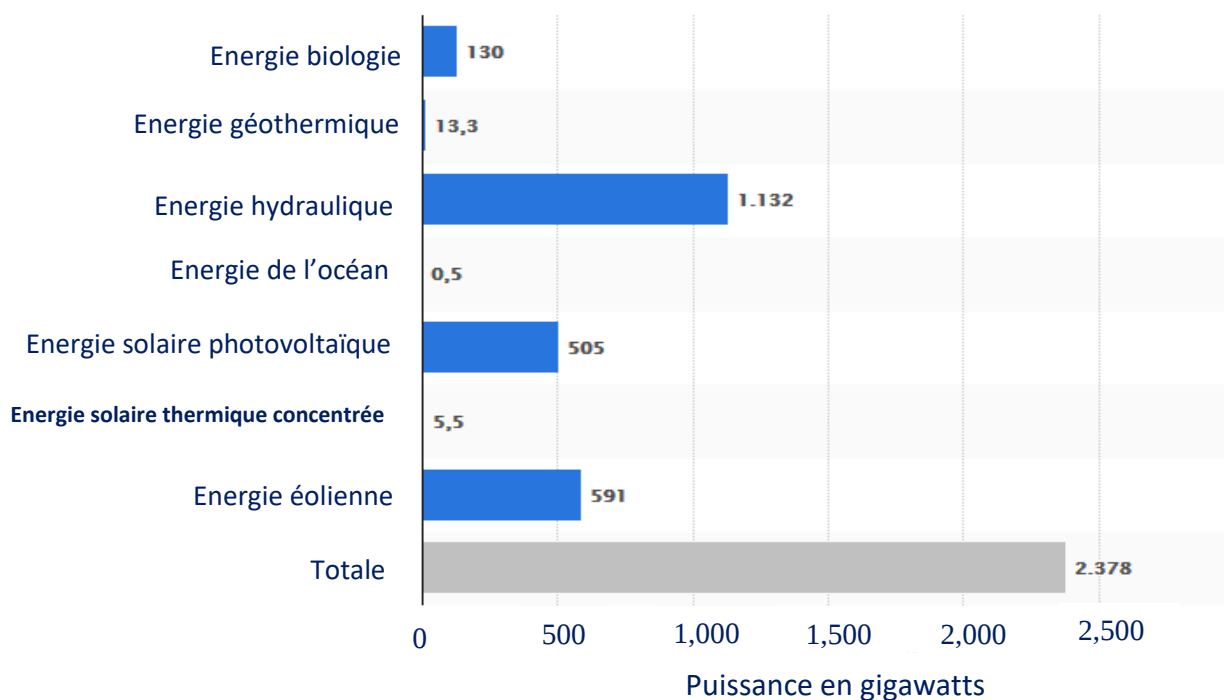


Figure I.1 : Capacité installée de production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables dans le monde en 2018, selon la source d'énergie. [3]

Ce graphique illustre la capacité installée de production d'électricité par des sources d'énergie renouvelables dans le monde en 2018, selon la source d'énergie et en gigawatts. Il en ressort que la capacité mondiale en électricité renouvelable s'élevait à près de 2.300 gigawatts cette année-là, dont plus de 1.100 gigawatts portant sur l'hydroélectricité. En deuxième position, l'énergie éolienne représentait près de 600 gigawatts de la capacité mondiale de production d'électricité renouvelable. [3]

Le vent, une forme indirecte de l'énergie solaire, est une des ressources énergétiques renouvelables de la nature et peut devenir une source d'énergie écologique et fiable. L'énergie éolienne est la forme d'énergie qui connaît la plus forte croissance dans le monde et a permis de réaliser des économies de plus de 50% au cours de la dernière décennie. Les éoliennes sont utilisées pour capter l'énergie du vent et la convertir en électricité. Malheureusement ces ressources ne sont même pas exploitées. Pour utiliser le vent comme source d'énergie, il faut connaître le potentiel éolien d'une région. Les pays industrialisés possèdent des cartes et des atlas de vents, ce qui n'est pas le cas des pays en voie de développement [4].

I.3.Donnés générales :

I.3.1. Gisement éolien au niveau mondial :

Le rayonnement du soleil et la rotation de la terre (hémisphère irradié, hémisphère dans l'obscurité) sont à l'origine d'écarts de pression atmosphérique qui s'établissent à proximité de la surface ou en basse altitude. Les masses d'air s'écoulent alors, avec une vitesse plus ou moins élevée, des régions ou zones de forte pression vers les zones de plus faible pression. Ces masses d'air emportent avec elles une énergie cinétique qui peut être considérable, proportionnelle à la masse volumique de l'air, aux volumes échangés et au carré de la vitesse du vent. La vitesse du vent, sa direction, ses fluctuations, son aléa, etc. au cours d'une période (par exemple, un jour, un mois, une année) sont des informations essentielles qui caractérisent le gisement éolien.

Le gisement éolien est globalement bien réparti à la surface des différents continents et des océans. On estime que son exploitation maximum par des turbines relevant de la technologie actuelle permettrait la production d'électricité d'un minimum de 100 000 TWh/an au plan mondial [5], de quoi couvrir, en théorie, plusieurs fois la consommation annuelle d'électricité, sous réserve que la production d'électricité éolienne soit au fil des heures synchronisées avec la demande d'électricité, aux capacités d'interconnexion des réseaux et de stockage d'énergie près.

Cette carte des ressources éoliennes fournit (comme indiqué par la Figure I.2) une estimation de la densité moyenne de l'énergie éolienne à 100 m au-dessus du niveau de la surface. La densité de puissance indique le potentiel d'énergie éolienne, dont une partie peut être extraite par des éoliennes. La carte est dérivée de distributions de vitesse du vent à haute résolution basées sur une chaîne de modèles, qui réduisent les vents des modèles mondiaux [6].

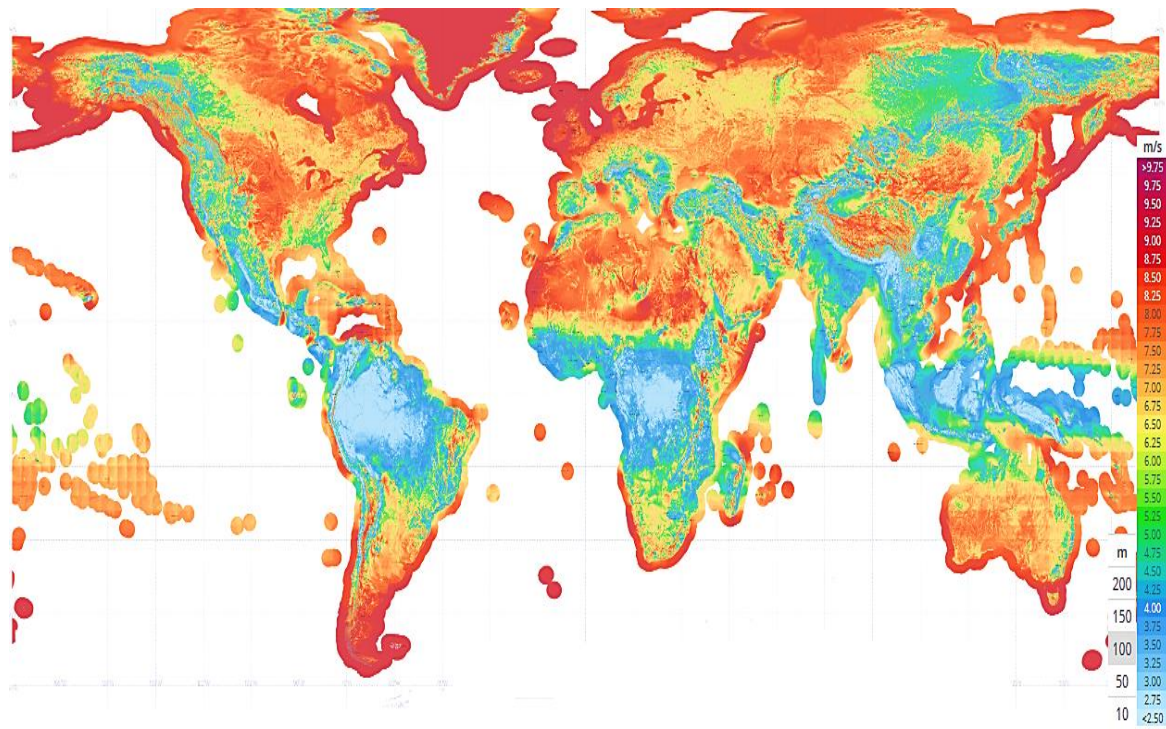


Figure I.2: Carte des ressources éoliennes et estimation de la densité moyenne de l'énergie éolienne à 100 m au-dessus du niveau de la surface.

Il apparaît que le vent est, en moyenne sur l'année, modéré dans la région du Pôle Nord et dans les régions intertropicales. Il est plus fort autour des régions comprises entre 50° et 60° de latitude. En mer, le vent est plus fort.

I.3.2. Capacité d'énergie éolienne (en mégawatt) installée dans le monde :

La capacité totale de toutes les éoliennes installées dans le monde à la fin de 2019 a atteint 650,8 GW, selon les statistiques présentées aujourd'hui par "World Wind Energy Association" (WWEA) lors d'un séminaire en ligne. 59,667 MW ont été ajoutés en 2019, ce qui est nettement plus qu'en 2018, lorsque seulement 50,252 MW avaient été installés. 2019 a été la deuxième année éolienne la plus forte en termes de taille de marché, avec un taux de croissance de 10,1%, supérieur à 9,3% par rapport à l'année précédente mais inférieur à 2016 et 2017. Toutes les éoliennes ont été installées fin 2019 et pourraient couvrir plus de 6% de la demande mondiale d'électricité. La Figure I.3 montre l'énergie éolienne installée dans le monde au cours des sept dernières années.

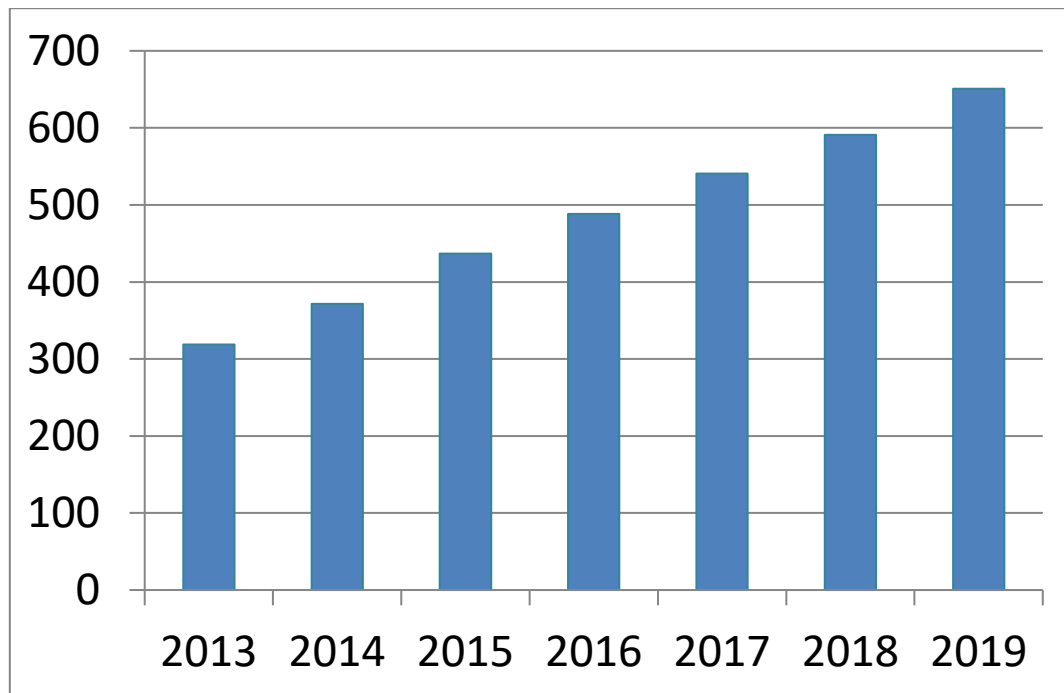


Figure I.3 : Capacité d'énergie éolienne (en mégawatt) installée dans le monde au cours des sept dernières années.

I.4. Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent. [7]

Pour ce qui est d'Un aérogénérateur, plus communément appelé éolien, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

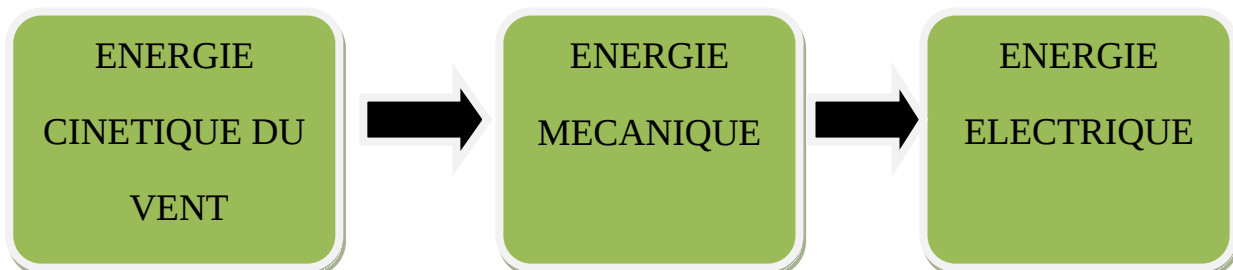


Figure I.4 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne

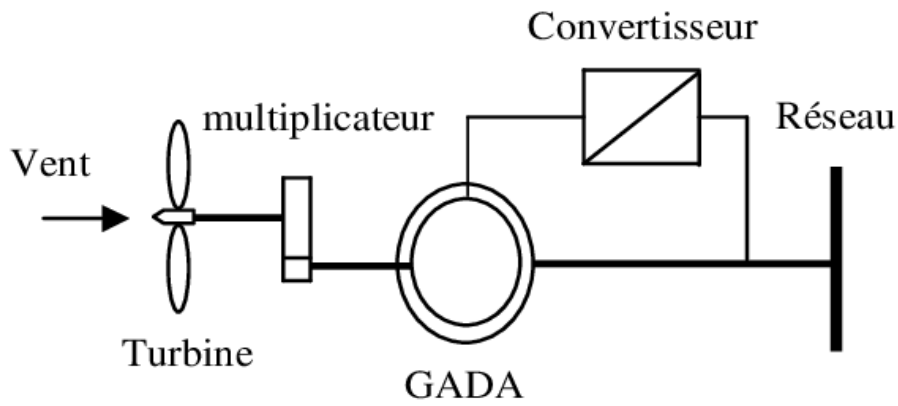


Figure I.5 : Principes composants d'une éolienne

I.5. Constitution d'une éolienne :

I.5.1 Principe :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes : - au niveau de la turbine, qui reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique. Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine.

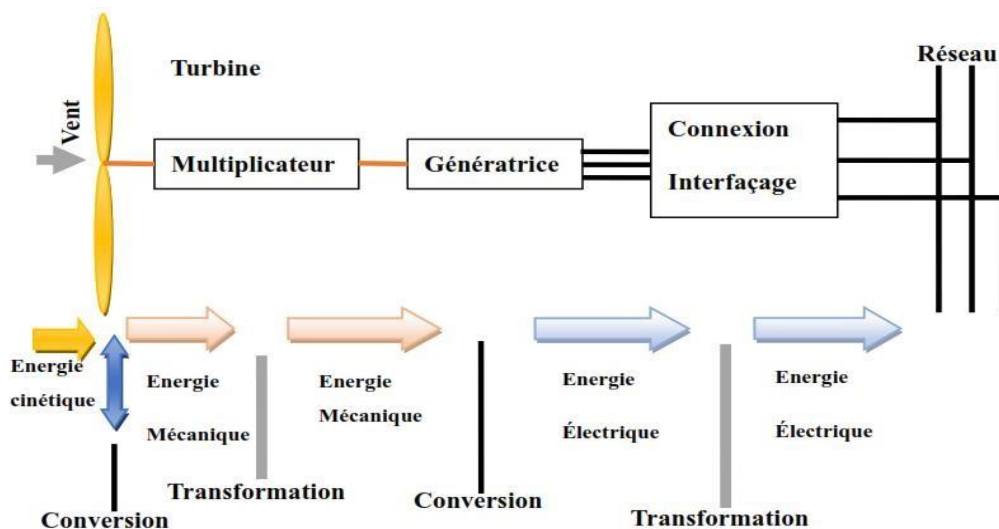


Figure I.6 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne [8].

I.5.2. Constitution et Fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne typique est composée de plusieurs éléments qui sont présentés sur Un rotor, la nacelle, la tour, la base, le mât.

- **Le rotor** : partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par

l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute. [9]

-La nacelle : elle est montée au sommet du mât abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine (dans le cas des éoliennes produisant des électricités, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite par ce mât électromagnétique). [9]

-La tour : composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur. Généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur⁽³⁾ qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau.

-La base : souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de maintenir la structure globale.

-Le mât : il permet de déplacer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal), le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande multiplicateur, générateur, etc..).

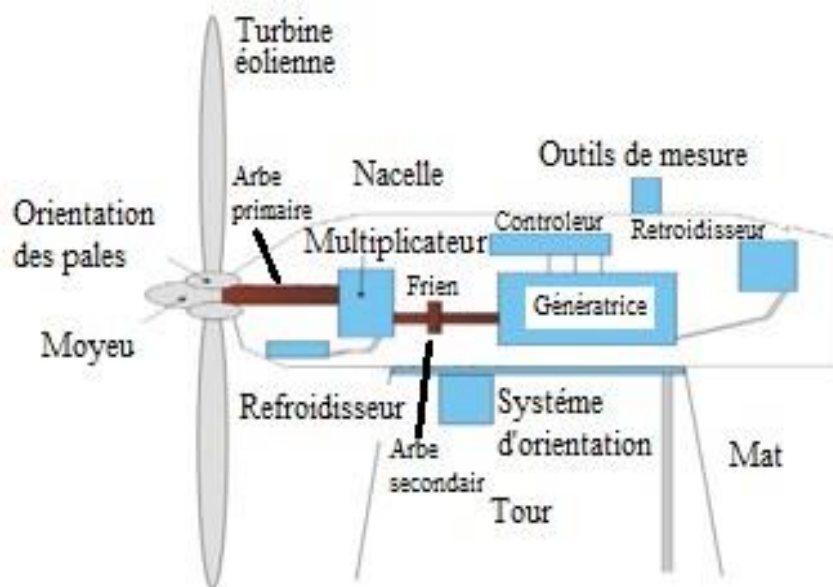


Figure I.7 : Principes composants d'une éolienne. [9]

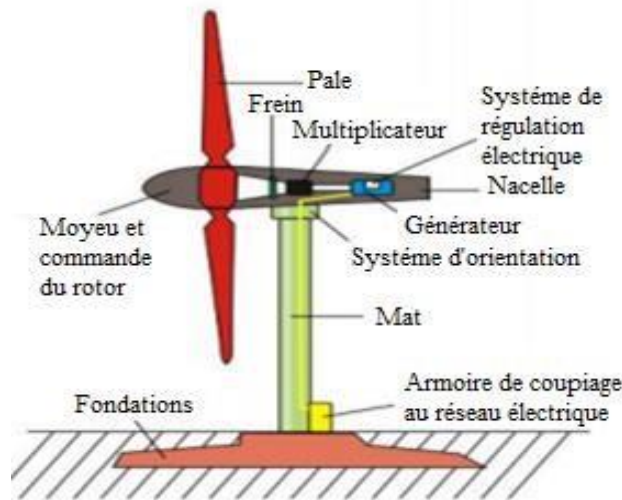


Figure I.8 : Exemple de système éolien de type aérogénérateur [9].

I.6. Les types d'éolienne :

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- Les turbines éoliennes à axe vertical
- Les turbines éoliennes à axe horizontal

I.6.1. Éoliennes à axe vertical :

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir une partie mécanique (multiplicateur génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage à cause des gabarits de leur mât qui subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal. [10].



Figure I.9 : Eolienne à axe verticale

Il existe plusieurs configurations d'éoliennes verticales dont les plus répandues sont le type Darrieus et le type Savonius.

I.6.1.2. L'éolienne à axe vertical Savonius :

Les pales du rotor Savonius se présentent sous la forme de deux demis cylindres, qui tournent sur eux-mêmes avec l'action du vent. Il se peut que les éoliennes verticales de type « Savonius » soient composées de plusieurs étages, chacun des étages étant lui-même composé de deux demis cylindres. Ces pales utilisent la force de traînée du vent pour produire de l'électricité. [11].

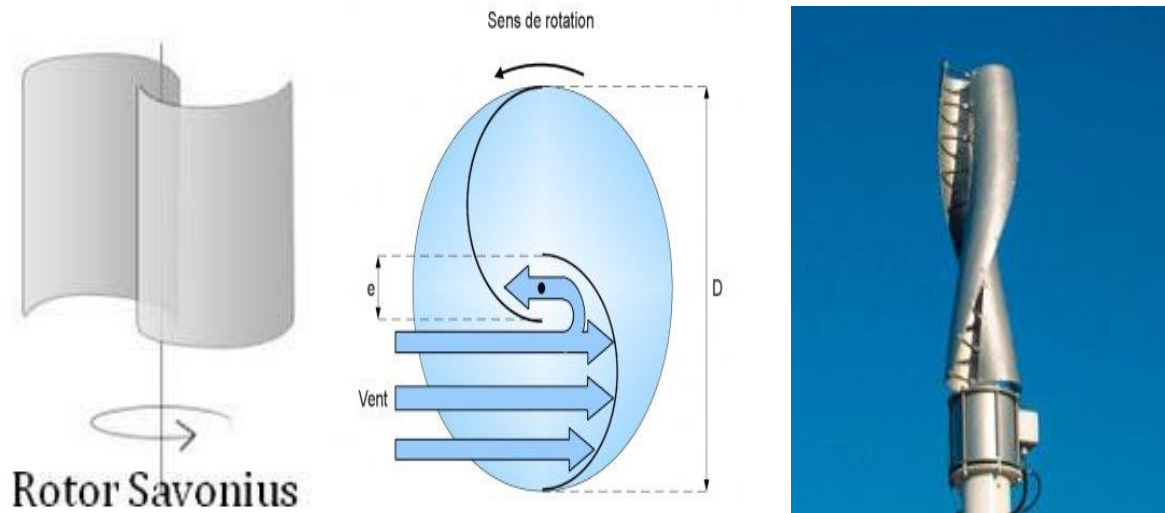


Figure I.10 : Eolienne à axe verticale Savonius [12].

I.6.1.3. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical Savonius :

Avantage :

- Pas de contraintes sur la direction du vent
- Compact et robuste.

Inconvénient :

- Faible rendement par rapport à une éolienne à pôle [12].

I.6.2. Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus utilisées. Elles sont basées sur le modèle des moulins à vent : l'hélice contient deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. Il existe également des éoliennes horizontales monopoles mais celles-ci sont très rares. Les éoliennes à deux pales et les éoliennes à trois pales fonctionnent sur le même principe. Le rendement des éoliennes à axe horizontal est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont également plus solides et coûtent moins cher à la fabrication [13].

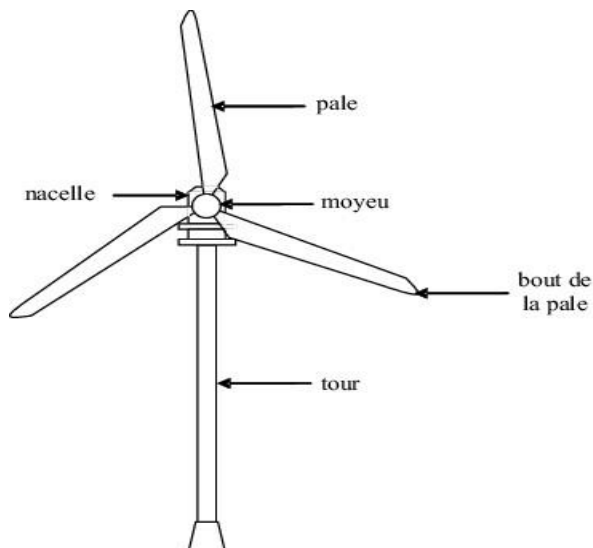


Figure I.11 : Eolienne à axe horizontal.

Il existe deux sortes d'éoliennes à axe horizontal : les éoliennes "amont" et les éoliennes "aval". Dans le fonctionnement des éoliennes "amont", le vent souffle directement sur les pales de l'éolienne. Ce type de configuration requiert des pales rigides qui permettent de bien résister au vent car celles-ci sont plus exposées. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000kW fonctionnent avec ce principe.

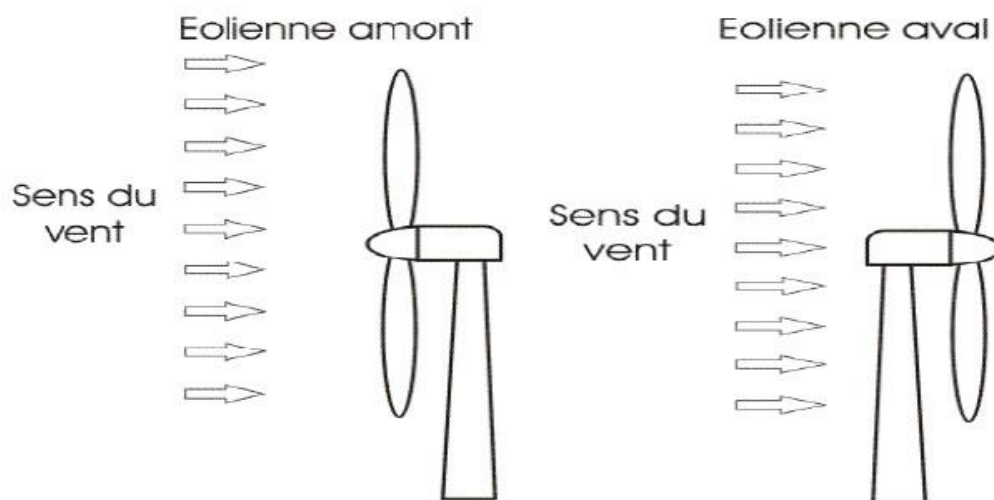


Figure I.12 : Fonctionnement des éoliennes en amont et en aval.

Dans le fonctionnement des éoliennes à axe horizontal "aval", le vent souffle sur l'arrière des pales. Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes de maison qui présentent des pales moins solides que celles des grandes éoliennes industrielles [13].

La disposition turbine en "**amont**" est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction. Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal avec un rotor du type hélice, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle.

I.6.2.1. Avantages et inconvénients des éoliennes horizontales :

-Avantages :

- Elle offre un très bon rendement
- Elle est silencieuse
- Elle est abordable
- Elle est adaptée aux zones les plus venteuses [14].

-Inconvénient :

- L'éolienne à axe horizontal possède quelques inconvénients non négligeables
- Moins résistante aux vents forts que l'éolienne verticale, l'éolienne horizontale doit être renforcée. Ainsi, dans les régions où le risque de vents violents existe, on a recours à des mâts haubanés (l'ancrage est renforcé), et on installe un frein au niveau du rotor.
- Du reste, l'éolienne pour particulier horizontale met plus de temps à se déclencher qu'une éolienne verticale. En effet, elle doit s'orienter par rapport à la direction du vent, ce qui retarde d'autant son déclenchement.
- Enfin, l'installation est bruyante [15].

I.6.2.2. L'éolienne à axe vertical Darrieus :

Créées en 1931 par Darrieus, un ingénieur français, les éoliennes verticales de type Darrieus se déclinent en trois sortes de rotor :

- Le rotor Darrieus, avec des pales de forme cylindrique rattachées en haut et en bas de l'axe.
- Le rotor hélicoïdal, avec des pales de forme parabolique rattachées au sommet et à la base de l'axe.
- Le rotor Darrieus H, avec trois pales parallèles rattachées au sommet de l'axe [11].

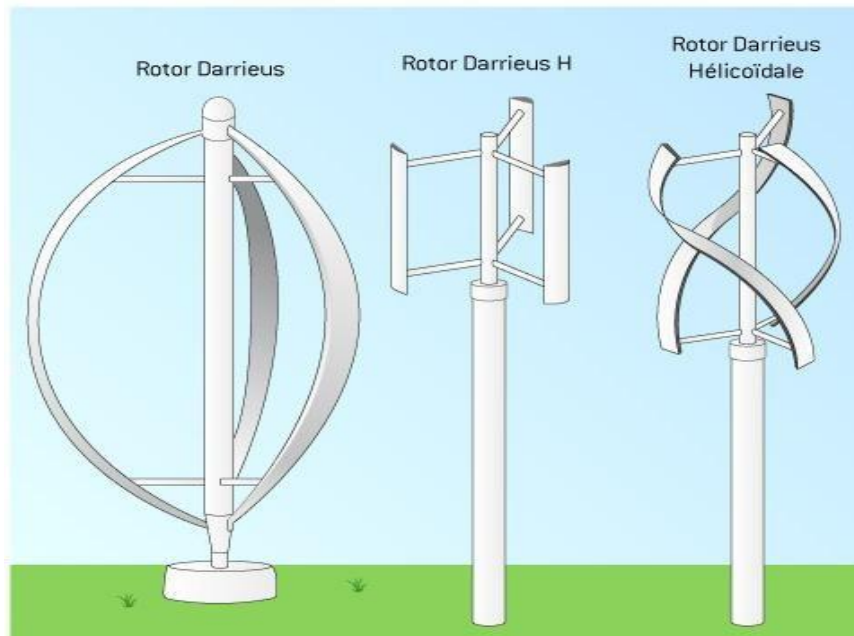


Figure I.13 : Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus

I.6.2.3. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical Darrieus :

Avantage :

- Génératrice pouvant placée au sol (selon les modèles).
- Moins d'encombrement qu'une éolienne "conventionnelle".
- Intégrable au bâtiment.

Inconvénient :

- Démarrage difficile par rapport à l'éolienne de type Savonius.
- Faible rendement. [16]

I.6.2.4. Avantages et inconvénients des éoliennes verticales :

- Souvent citées en exemple pour un usage par vents faibles ou en milieu urbain, elles sont aussi jugées plus esthétiques et silencieuses.
- Cependant les éoliennes verticales ont une production d'électricité et un rendement beaucoup moins intéressant que les éoliennes horizontales.
- Elles produisent moins alors que leur coût d'investissement est lui, plus important.
- Puisqu'elles sont moins efficaces, elles sont moins développées donc plus difficiles à trouver, le choix est alors limité et le coût des modèles existants s'envole.
- Une éolienne verticale peut démarrer par vents faibles, dès 2 m/s (soit 9 km/h) selon les données constructrices, et c'est la raison pour laquelle de nombreux sites la présente comme un choix idéal pour les zones urbaines et habitées. [11].

I.7. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique :

I.7.1. Fonctionnement à vitesse fixe :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse mec est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice.

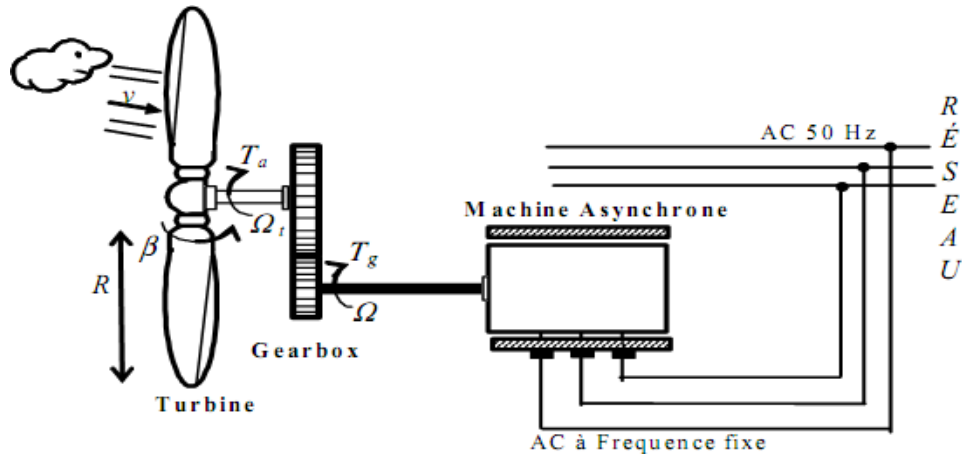


Figure I.14 : Aérogénérateur à vitesse fixe

Le couple mécanique entrainant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $N_s = 1500 \text{ tr/mn}$, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la vitesse du rotor de l'éolienne à celle du rotor de la génératrice. [17]. On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables.

I.7.2. Fonctionnement à vitesse variable :

Afin d'optimiser la puissance de sortie en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de faire un générateur avec une fréquence fixe et une vitesse variable. Les générateurs à vitesse variable peuvent fonctionner dans une large gamme de vents, de sorte que lorsqu'ils fonctionnent à des vitesses de vent faibles, ils peuvent restaurer une puissance maximale tout en réduisant la pollution sonore. A vitesse variable, le système est réglé de manière à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne tourne à sa puissance maximale et c'est ce qu'on appelle le suivi du point de puissance maximale [18].

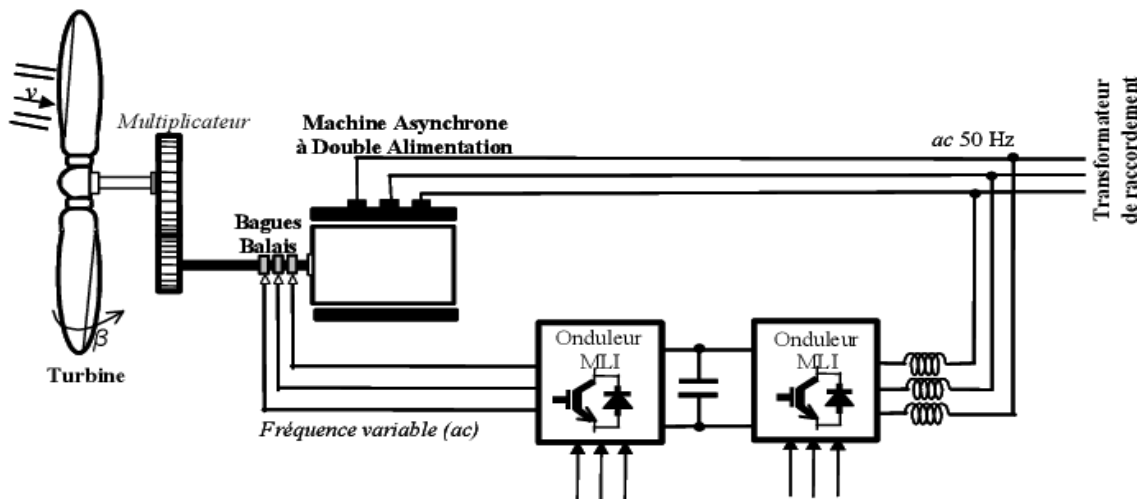


Figure I.15 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA [18].

I.7.3. Avantage éolienne vitesse variable :

- Réduit le stress sur les composantes mécaniques de l'éolienne.
- Permet de maximiser l'efficacité aérodynamique pour une grande plage de vitesses de vent.
- Permet le lissage de la puissance de sortie de la turbine.
- Permet le contrôle de la tension et de la fréquence sur le réseau (contrôle du flux de puissance).
- Permet l'utilisation d'une boîte de vitesse réduite (ou absente produisant moins de pertes par frottement (pleine vitesse variable seulement).

I.7.4. Inconvénient éolienne vitesse variable :

- Nécessite un contrôle complexe.
- Les convertisseurs de puissance sont dispendieux et engendrent des pertes de puissance électrique.

I.8. Choix de vitesse variable dans le système éolien :

Le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage, et non des moindres, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine synchrone à aimants permanents par exemple). En effet, la MADA permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques car ceux-ci sont connectés entre le bobinage rotorique de la MADA et le réseau électrique. Le développement de l'électronique de puissance (moins coûteuse et plus performante) a permis l'implantation de systèmes de GVV en proposant des solutions qui éliminent ou réduisent les problèmes de la GVC. Le surcoût électronique des systèmes de GVV n'est pas

réduisant par rapport à ses avantages au niveau du système mécanique, en termes de maintenance, et de durée de vie. Mieux encore, grâce à l'électronique de puissance, la qualité de l'énergie électrique générée est nettement supérieure et les normes de connexion sont aisément respectées [19].

I.9. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne :

Une machine par définition est un ensemble d'appareils ou d'organes qui sont combinés pour « Recevoir » une forme d'énergie. La « transformer » ou la « convertir », pour la « restituer » par la suite sous une autre forme pour « PRODUIRE » un effet donné.

Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités.

On peut classer dans cette catégorie et cela du point de vue physique : une turbine, Une pompe un compresseur, un moteur, un générateur etc..., puisqu'ils transforment, convertissent, ou produisent une certaine énergie.

D'une manière générale, on ne classe pas dans catégorie des « Machines électriques » quels ensembles utilisant ou produisant de l'énergie électrique Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques.

I.9.1 Machines asynchrones à cage (MAS) :

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en matière d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales importantes), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombre de pôles) est donc l'utilisation des machines du type Dahlander est une solution parfois utilisée, mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesses) et donc très rarement exploitée (Figure 1.16).

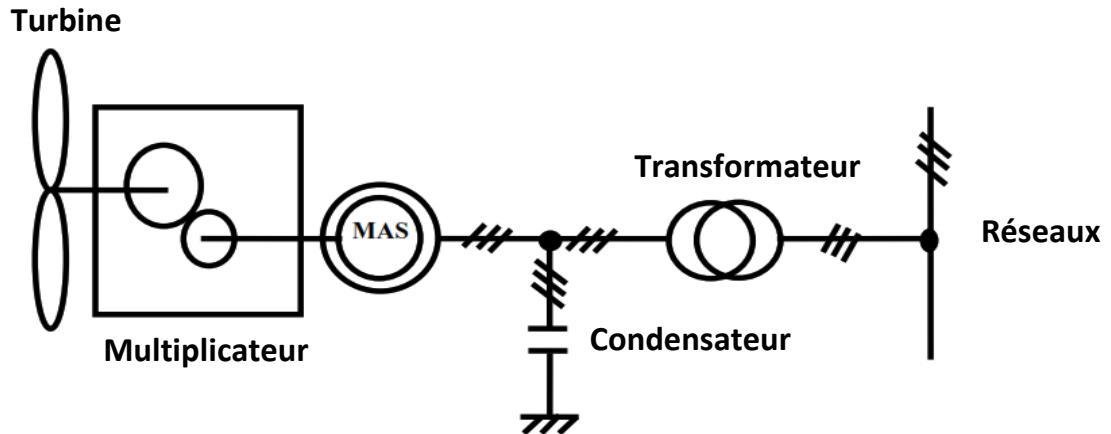


Figure I.16 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage.

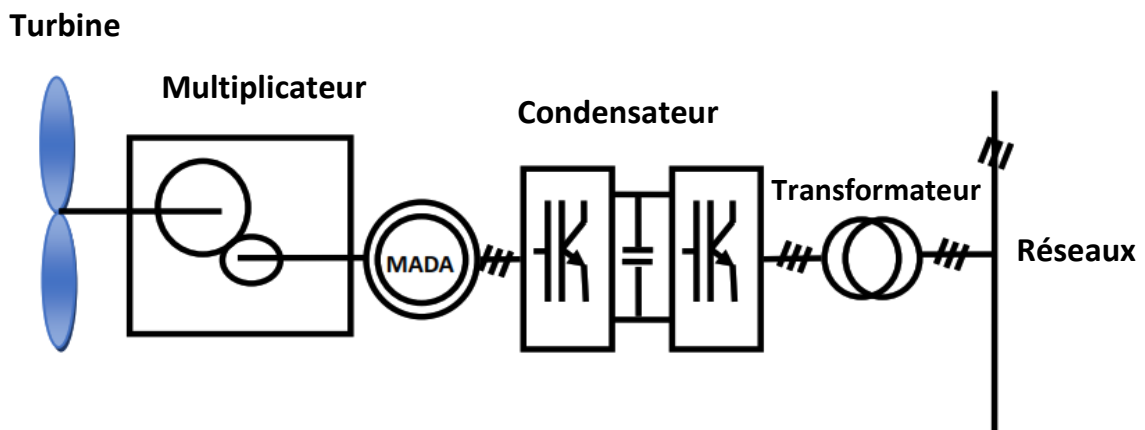


Figure I.17 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible. Mais, au-delà d'une efficacité énergétique moindre par rapport aux systèmes à fréquence variable, la rigidité de ces chaînes dont on a déjà dit qu'elle occasionne des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau en cas de chute de vent sont leurs principaux inconvénients.

I.9.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) (rotor bobiné) :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice [20, 22, 23, 24].

Il existe plusieurs types de machines asynchrones à double alimentation que nous allons décrire ci-dessous. Par ailleurs nous allons nous intéresser plus particulièrement à la génératrice utilisant des convertisseurs MLI (modulation de largeur d'impulsion) qui sont les plus utilisés et sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine (seulement 30%). Ainsi le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensé par l'économie réalisée sur les convertisseurs.

I.9.2.1. Principe de fonctionnement :

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système. Si pour les petites puissances ($< 500\text{kW}$), la partie mécanique peut généralement subir les variations brutales de régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus justifiée, à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne. Parmi les critères à prendre en compte pour juger de la qualité d'un tel système, on trouve l'intérêt de maintenir une fréquence stator bien synchronisée par rapport à celle du réseau, afin de ne pas compromettre la stabilité d'ensemble.

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste gP sort par les ballais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g)P$. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un balai et de collecteurs (Figure I.18). Une fois connecté au réseau un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

I.9.3. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure (I.18), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [20, 21, 22, 23]. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

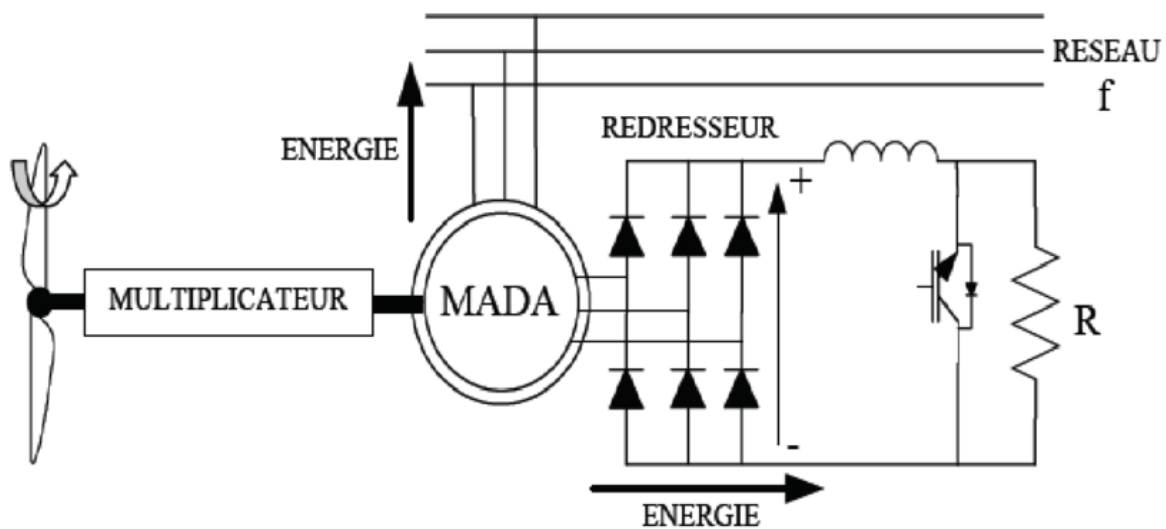


Figure I.18 : MADA avec contrôle du glissement de l'énergie rotorique [25].

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transiting dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

I.10. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens :

La technologie des éoliennes continue de progresser et de s'améliorer. Ce qui a permis à différents types d'éoliennes d'apparaître avec des caractéristiques et des modes de fonctionnements différents. Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir:

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge.
- L'implantation sur terre ferme (On shore) ou en mer (Offshore).
- Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

I.10.1. Systèmes non couplés au réseau alternatif :

Pour les réseaux de petite puissance en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent de diesel. Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et auto amorcée par condensateurs.

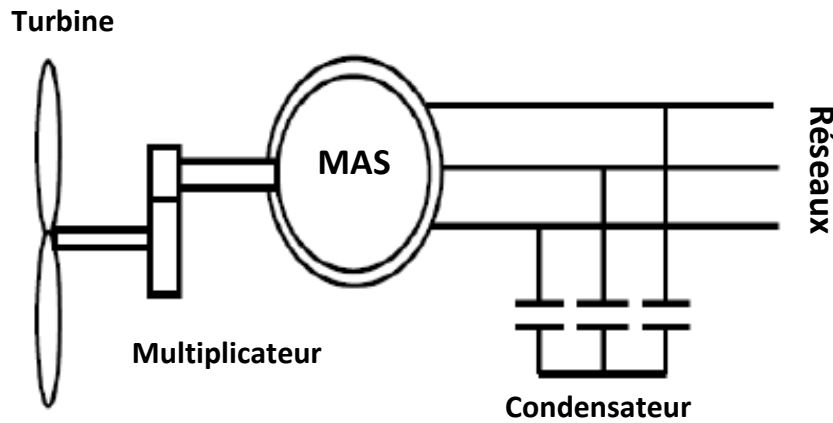


Figure I.19 : Aérogénérateur à génératrice asynchrone à cage.

I.10.2. Systèmes couplés au réseau alternatif :

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [26].

I.11. Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne :

I.11.1. Avantages :

- Ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. Aujourd'hui elle a permis d'éviter l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO₂, 21 milles tonnent de SO₂ et 17.5 milles tonnent de Noix. Ces émissions sont les responsables des pluies acides. [27]
- En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne sans dégrader la qualité de l'air.
- Sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols ni suies, ni cendres.
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisation.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires.
- C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelable.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produit.
- La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple .
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

I.11.2. Inconvénient :

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.
- Des effets sur le paysage (esthétique).
- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- Interférences électromagnétiques perturbant la réception des ondes radio créant une distorsion des images de télévision.

I.12.Conclusion :

Après avoir pris connaissance des nombreux avantages de l'énergie éolienne et de ses quelques inconvénients, il est maintenant tout à fait possible de développer un ensemble de propositions ou de solutions électrotechniques possibles pour produire de l'énergie électrique à l'aide d'éoliennes. Dans ce chapitre, les différents types d'éoliennes et comment ils fonctionnent sont décrits. Dans une autre partie de ce chapitre, les machines électriques et les transformateurs associés adaptables au système éolien sont présentés. Deux grandes familles de machines sont présentées : les machines asynchrones, et les machines synchrones.

Chapitre II :

Commande vectorielle de la MADA

II.1. Introduction :

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps, certaines polémiques donnent la paternité de cette théorie à Blondel. Les premiers développements théoriques de la méthode du flux orienté ont été réalisés au début des années 70 par Blaschke et ses applications effectives ont vu le jour grâce à Léonard dix ans plus tard, [28]. Cependant, elle n'a pas pu être implantée et utilisée réellement qu'avec les avancées en micro-électronique. En effet, elle nécessite des calculs de transformé de Park, évaluation de fonctions trigonométriques, des intégrations, des régulations, ce qui ne pouvait pas se faire en pure démarche analogique. Par ailleurs la commande vectorielle, a pour objectif d'égaliser les performances qu'offre la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux et celle commandant le couple.

Les méthodes de contrôle direct du couple DTC (direct torque control) des machines asynchrones sont initiées dans la deuxième moitié des années 1980 par Takahashi et Depenbrock comme concurrentielles des méthodes classiques, basées sur une alimentation par modulation de largeur d'impulsions (MLI) et sur un découplage du flux et du couple moteur par orientation du champ magnétique. Par opposition, ces deux stratégies de commande (commande vectorielle à flux orienté et la commande directe du couple) ont le même objectif que les machines à courant continu à excitation séparés où le courant et le flux sont naturellement découplés et peuvent être commandés indépendamment. La comparaison de ces deux techniques de contrôle est basée sur des divers critères comprenant les performances statiques et dynamiques de la caractéristique de contrôle de base. L'étude est faite par simulation en utilisant le Matlab/Simulink.

II.2. Description de la machine asynchrone à double alimentation :

La MADA a une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative" [29].

II.3. Structure de la machine :

La machine asynchrone à double alimentation est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles. Son stator est identique à celui de la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS) ou d'une machine synchrone (MS) et son rotor se diffère radicalement puisqu'il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais

d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques (Figure II.1).

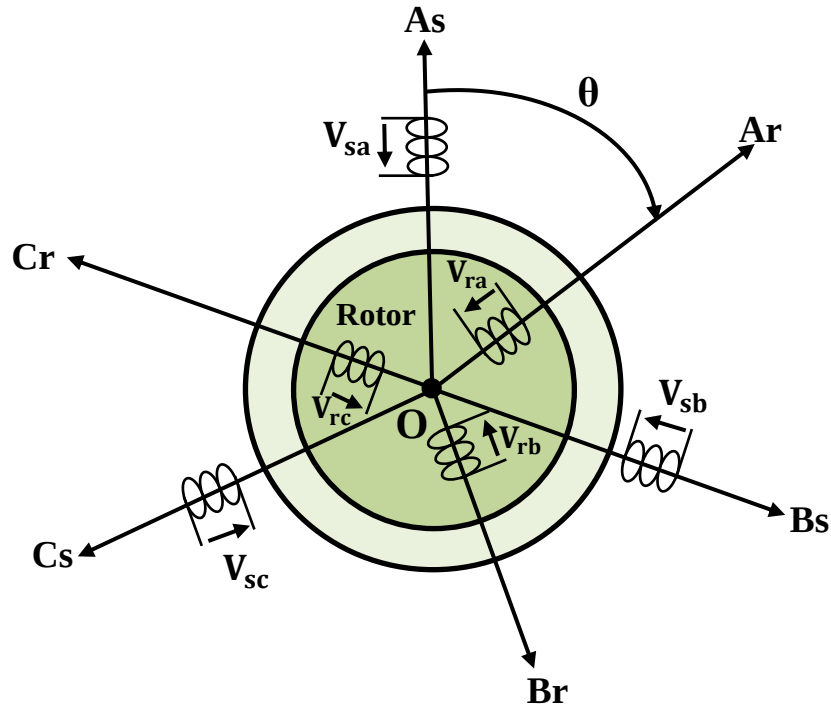


Figure II.1 : Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée.

II.4. Modes de fonctionnement de la MADA :

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur [30].

Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotorique qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement :

II.4.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement" est renvoyée au réseau.
- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionné ainsi mais la puissance de glissant est Alor dissipée en pertes Joule dans le rotor [16].

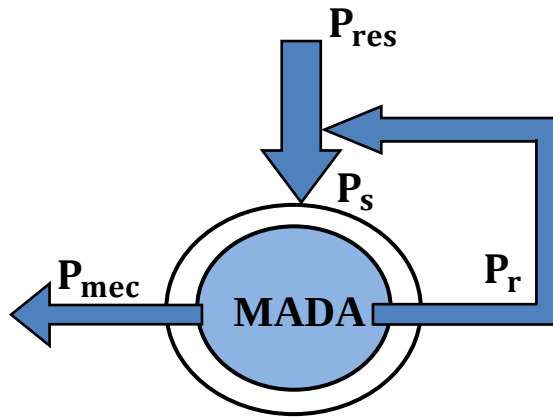


Figure II.2.: Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

II.4.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :

- La puissance fournie par le réseau va au rotor et stator.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme,
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [31].

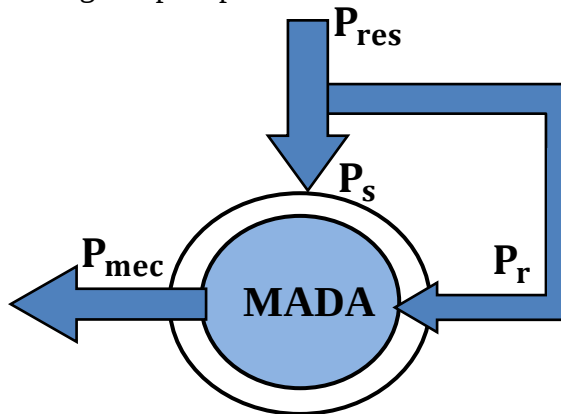


Figure II.3 : Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

II.4.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [16].

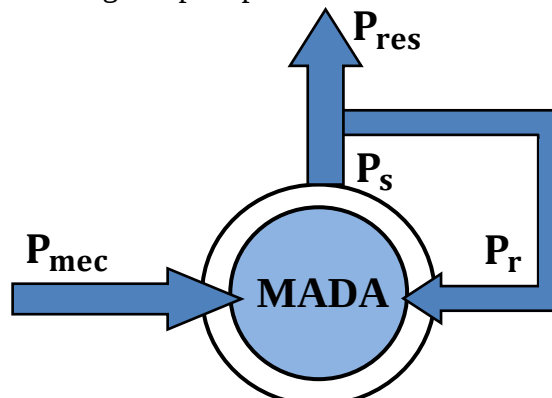


Figure II.4: Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone

II.4.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionné ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [32].

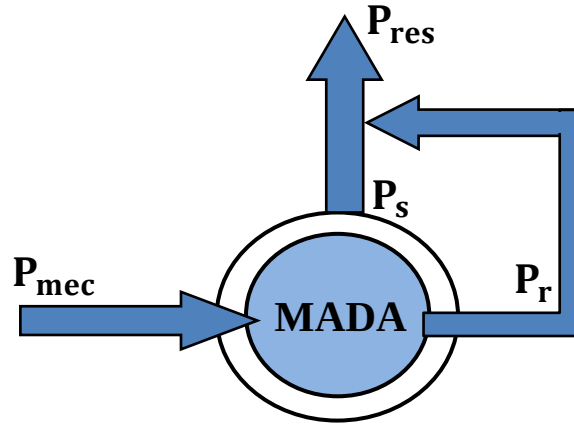


Figure II.5 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

II.5. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation :

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de FMM des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$, et le rotor tourne avec la vitesse ω_r ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des FMM des enroulements rotorique tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que [33] :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_g \quad (II.1)$$

Où : g est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [33].

Pour que la rotation du vecteur résultant des FMM par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_{ro} , définie à partir de $\omega_{gl} = 2\pi f_{ro}$; c'est-à-dire:

$$f_{ro} = fg \quad (II.2)$$

II.6. Domaines d'application de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotorique, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70%.

Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [34].

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation du carburant. [34]

II.7. Avantages et inconvénients de la MADA :

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelque inconvénients que présente la machine asynchrone à double alimentation [35].

II.7.1. Avantages de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation présente plusieurs avantages dont on peut citer:

- Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo en hyper-synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement la puissance nominale sans être surchauffée.
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés que pour une fraction de la puissance de la machine (30%) contrairement au système utilisant la machine asynchrone à cage d'écureuil ou le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance de la machine. [35]
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor en effet dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs qui alimentent la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse ce

fonctionnement présenté la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.

- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale [35]

II.7.2. Inconvénients de la MADA :

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais [35].
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA [35].

II.8. Modélisation de la MADA :

La modélisation des machines électriques consiste en élaboration des modèles mathématique qui permettent de prédire le comportement de la machine dans différents régimes de fonctionnement, en prévoyant ainsi les points qui risquent de provoquer des perturbations.

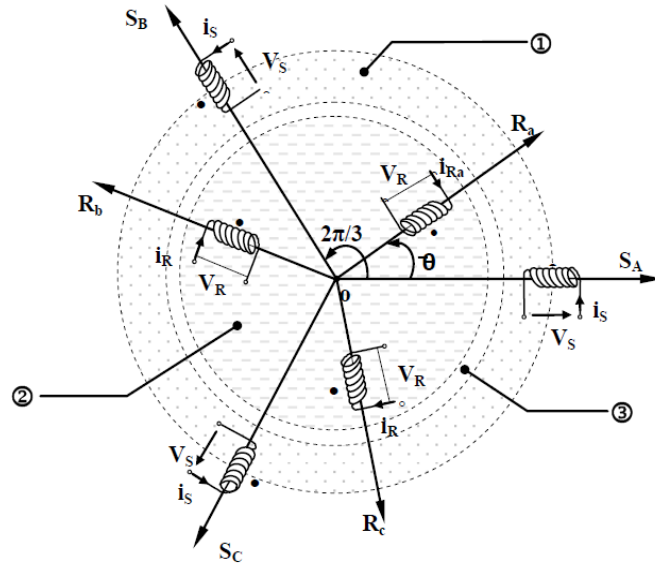
II.8.1. Hypothèses simplificatrices :

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Les Pertes ferromagnétiques négligeables.
- De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [36] [37].

Comportement de la machine asynchrone à double alimentation

- Trois bobines statorique (S_a, S_b, S_c) décalées entre elles par un angle de $(2\pi/3)$.
- Trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator, (R_a, R_b, R_c).

La figure II.6 rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase).



① Partie fixe : Stator. ② Partie mobile : Rotor. ③ Entrefer

Figure II.6: Représentation simplifiée de la MADA.

II.8.2. Modèle mathématique de la MADA :

II.8.2.1. Equation électrique :

Dans les conditions précédentes les équations sous forme matricielle s'écrivent :

- Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

- Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

II.8.2.2. Equations magnétiques :

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \quad (\text{II.5})$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{sr}]^t \cdot [i_s] \quad (\text{II.6})$$

Tel que :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Et

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^t = M \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

Où M représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator- Rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

En remplaçant les relations (II.5) et (II.6) respectivement dans les relations (II.3) et (II.4), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [i_r]) \quad (II.9)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^t \cdot [i_s]) \quad (II.10)$$

Où :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

II.8.2.3. Equation mécaniques :

L'équation mécanique de la machine est décrite sous la forme:

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - f. \Omega \quad (II.11)$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables (II.5) et (II.6). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide des équations différentielles à coefficients constants.

II.8.3. Modèle biphasé de la MADA :

II.8.3.1. La transformation de Park :

Les transformations utilisées doivent conservées la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. (Figure II.7).

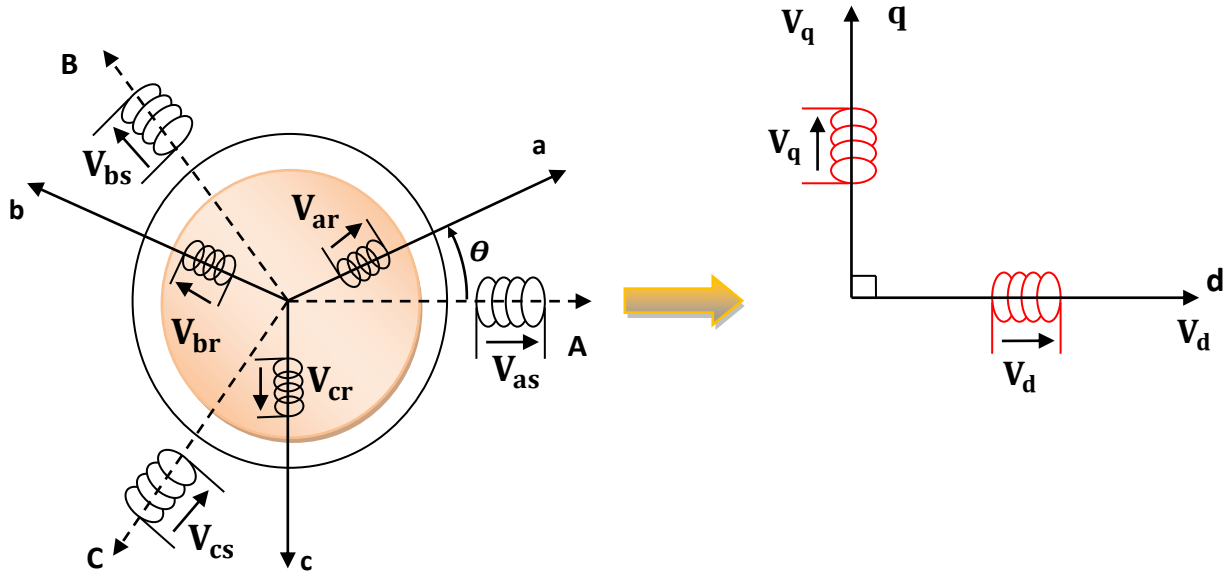


Figure II.7 : Modèle de PARK de la MADA.

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter

Le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d-q) donné par la transformation de Park est alors utilisé. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par [38] :

$$[P(\theta)] = K \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Dans le cas de la conservation de la puissance nous avons $K = \sqrt{\frac{2}{3}}$.

Pour les grandeurs statoriques : $\theta = \theta_s$

Et pour les grandeurs rotorique : $\theta = \theta_s - \theta_r$

$$[P(\theta)]^{-1} = K \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Le changement de variables relatifs aux (courants, tensions et flux) est défini par la transformation (II.14) :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

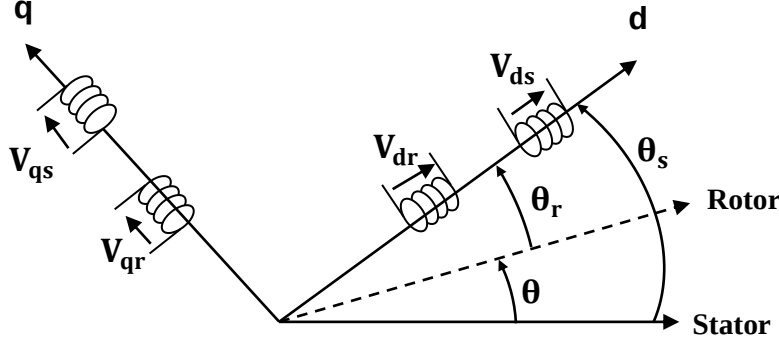


Figure II.8: Représentation de la machine dans le repère diphase

II.8.3.2. Equation des tensions :

Après l'application de transformation de Park pour l'équation (II.3) du stator et l'équation (II.4) du rotor, les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Pour les grandeurs statoriques :

$$\theta = \theta_s \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (\text{II.16})$$

Et pour les grandeurs rotorique :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} = \omega_s - \omega_r \quad (\text{II.17})$$

Telque :

ω_s Pulsation du champ tournant d'axe (d, q).

ω_r Pulsation électrique du rotor.

La composante homopolaire du système (II.17) est nulle pour un système équilibré.

II.8.3.3. Equation des flux :

Cependant, c'est au niveau de l'écriture des flux que ça devient intéressant. Le système matriciel de flux peut également s'écrire sous la forme suivante :

- Au stator :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

- Au rotor:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Tel que : les inductances cycliques

$$L_s = l_s - M_{sr} \quad (\text{II.20})$$

$$L_r = l_r - M_{rs} \quad (\text{II.21})$$

$$L_m = \frac{3}{2} M_{sr} \quad (\text{II.22})$$

II.8.3.4. Equation du couple électromagnétique :

Après qu'ont effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut être exprimé sous différentes formes, on trouve celle-ci [38] :

$$C_e = p (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.23})$$

$$C_e = p \cdot M (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II.24})$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot i_{qs} - \Phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.25})$$

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_s} (\Phi_{qs} \cdot i_{dr} - \Phi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II.26})$$

II.9. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation :

La commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l'énergie électrique [38].

II.9.1. Principe :

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe d du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone. Φ_s , Φ_r au choix, afin d'obtenir un découplage ce qui nous permet de faire un contrôle du couple [39].

II.9.2. Commande de la MADA avec orientation du flux statorique :

Pour pouvoir commander facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives par orientation du flux

statorique. Pour simplifier la commande il est nécessaire de faire un choix judicieux de référentiel. Pour cela, on se place dans un référentiel d-q lié au champ tournant avec une orientation du flux statorique (l'axe d aligné avec la direction du flux statorique) comme le montre la Figure (II.9).

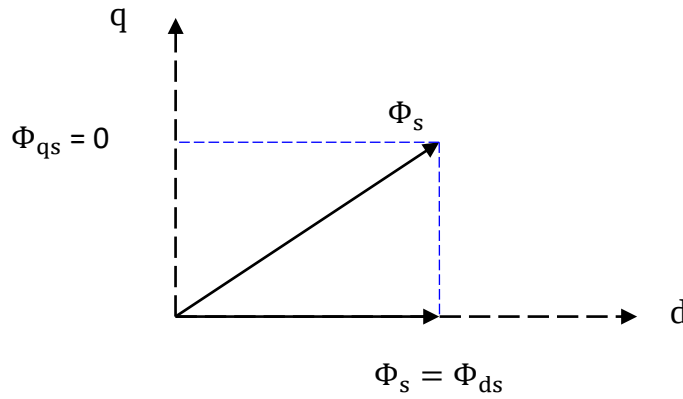


Figure II.9 : Orientation de flux statorique

La particularité de la MADA est qu'elle possède deux courants à contrôler directement à savoir i_{rq} , i_{sq} et deux courants contrôlés indirectement i_{qr} , i_{qs} .

On rappelle d'abord le système d'équations différentielles de la machine.

II.9.3. Commande vectorielle de la MADA :

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. R_s Étant négligeable pour les machines de forte puissance utilisées dans les turbines éoliennes [40], l'expression de la tension statorique devient alors:

$$V_s \cong \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (\text{II.27})$$

Dans le même référentiel et dans l'hypothèse où le flux statorique est constant grâce à une alimentation par un réseau stable, les équations des tensions s'exprimeront par:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

En utilisant les simplifications précédentes, les équations des flux s'exprimeront comme suit:

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors:

$$C_e = \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} i_{qr} \quad (\text{II.30})$$

II.9.3.1. Relations entre les courants statoriques et rotoriques :

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statorique (II.29), nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

II.9.3.2. Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone :

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées par:

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

L'application des hypothèses choisies ainsi que le système d'axes nous permet d'établir la simplification suivante:

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Ainsi en remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

De l'expression (II.28) nous pouvons écrire:

$$\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{II.35})$$

D'où d'après (II.34) :

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (\text{II.36})$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d (les

constante $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ prés imposée par le réseau).

II.9.3.3. Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques :

Les flux rotoriques s'expriment en fonction des courants rotoriques, après avoir remplacé les courants statoriques par leur expression, de la façon suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (II.37)$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (II.38)$$

A partir des systèmes d'équations (II.34) et (II.38), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous :

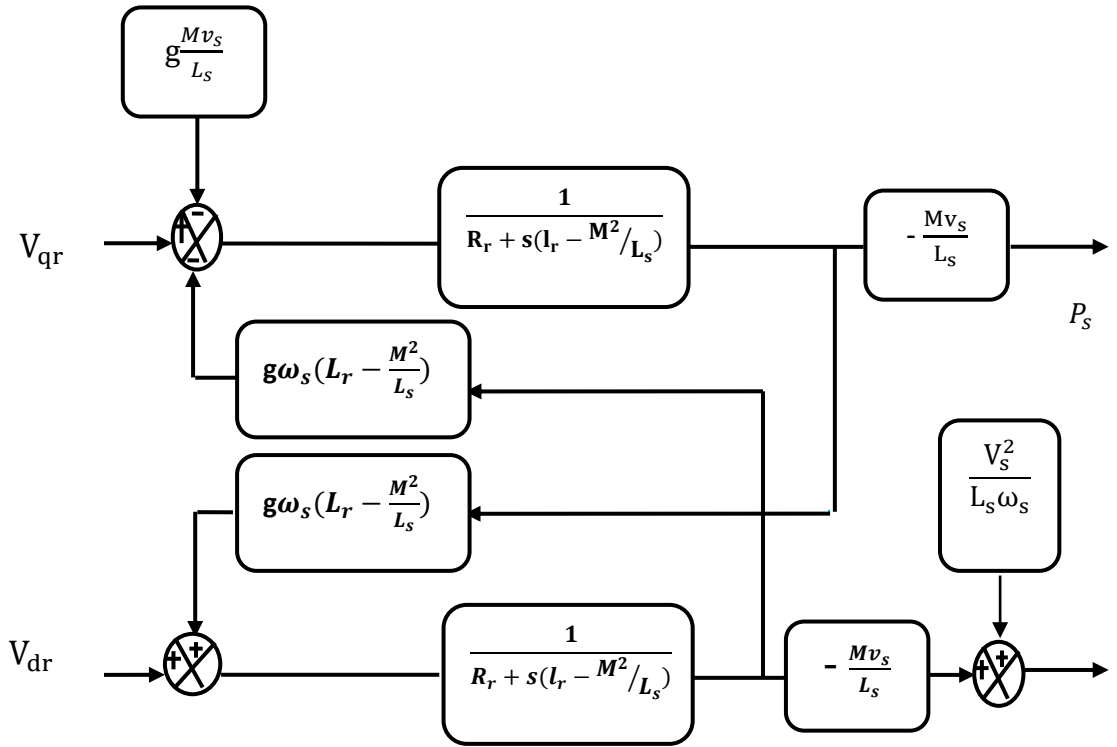


Figure II.10 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances

II.9.4. Contrôle indépendant des puissances active et réactive :

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser son bloc pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

II.9.4.1. Commande directe :

Si l'on observe les équations (II.34), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{MV_s}{L_s}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (II.38) disparaissent en régime permanent [27]. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

L'effet du terme de couplage $g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande.

En revanche, le terme $g \omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe (Figure II.11).

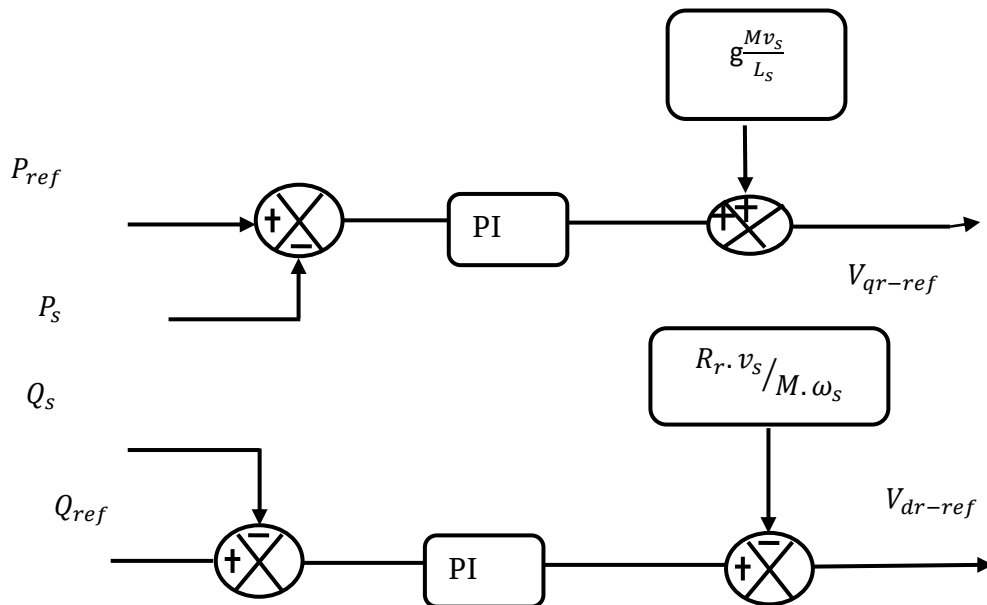


Figure II.11 : Schéma bloc de la commande directe.

II.9.4.2. Commande indirecte :

II.9.4.2.1. Commande en boucle ouvert :

La commande en boucle ouvert est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rétorquent en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rétorquent d'axe d et q.

A partir des expressions de la puissance active et réactive statiques du système (II.34) on déduit les références des courants rétorques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{qr-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} P_{s-ref} \\ I_{dr-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} P_{s-ref} + \frac{V_s}{\omega_s.M} \end{cases} \quad (II.40)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous (Figure II.12) :

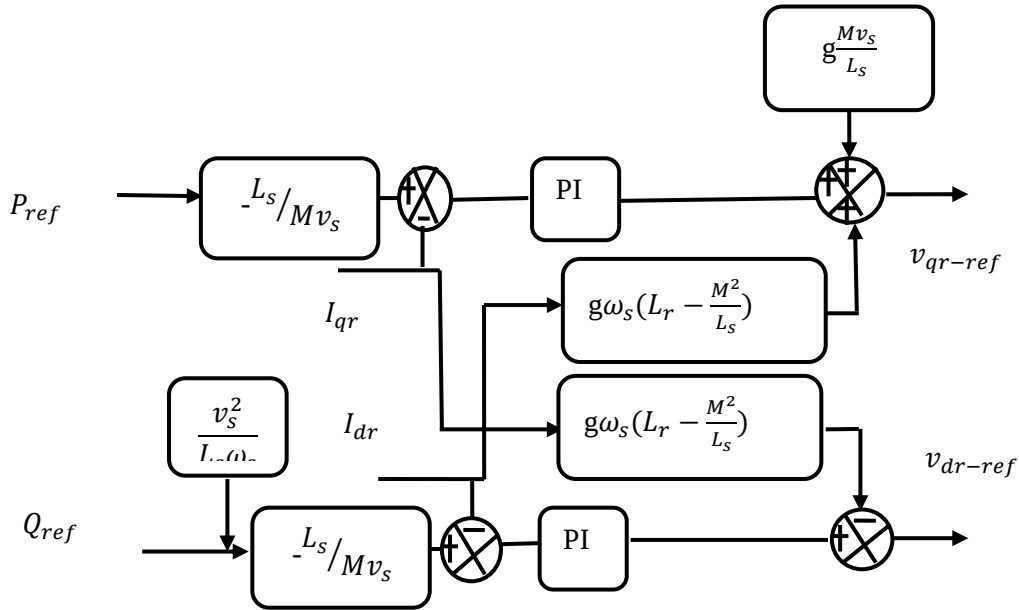


Figure II.12 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle

II.9.4.2.2. Commande en boucle fermé :

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante.

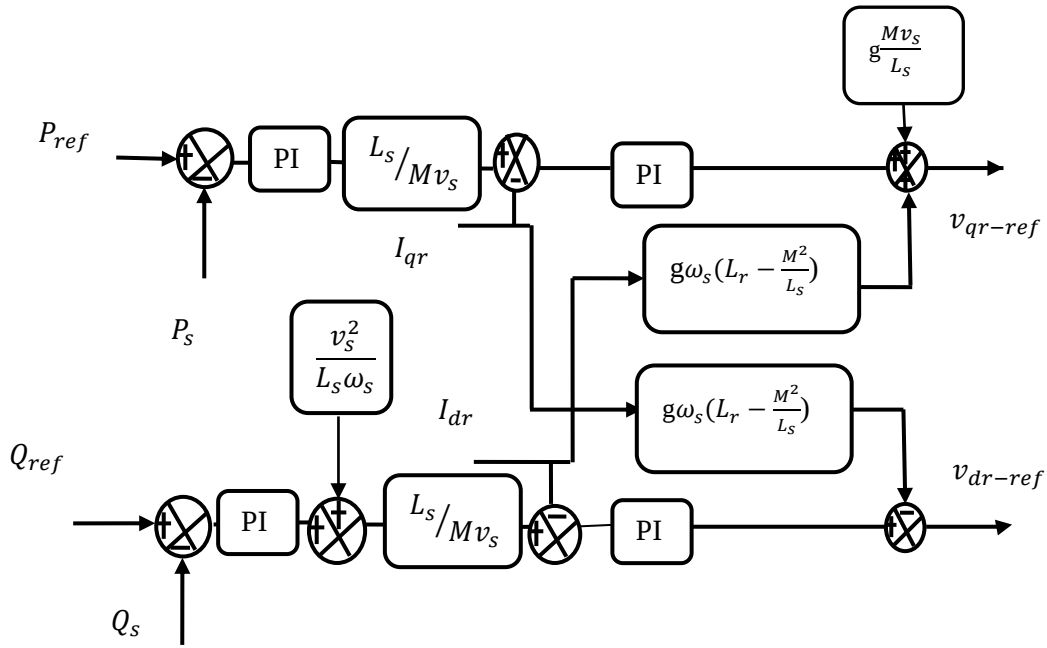


Figure II.13 : Schéma bloc de la commande en boucle ferme

II.9.4.3. Type du régulateur PI :

Les régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants i_{dr} i_{qr} . Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre. Ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré [41]. Le calcul des gains du régulateur est présenté à l'annexe (B) dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

II.9.5. Onduleur de tension à deux niveaux :

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel « S_i ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (Figure II.14).

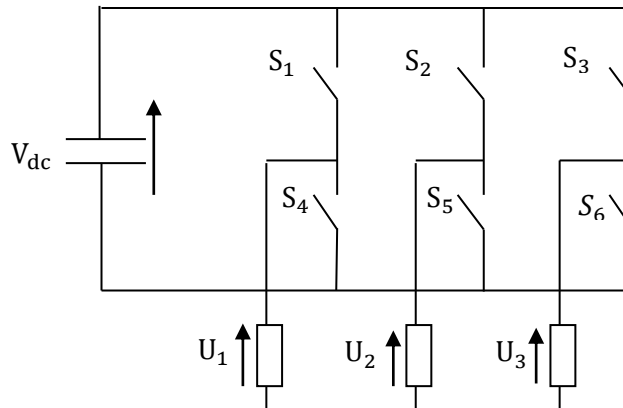


Figure II.14 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables S_a , S_b et S_c se doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

- Branche1 :
 $S_a = 0$ Si S_1 est ouvert et S_4 est fermé.
 $S_a = 1$ Si S_1 est fermé et S_4 est ouvert.
- Branche2 :
 $S_b = 0$ Si S_2 est ouvert et S_5 est fermé.
 $S_b = 1$ Si S_2 est fermé et S_5 est ouvert.
- Branche3 :
 $S_c = 0$ Si S_3 est ouvert et S_6 est fermé.
 $S_c = 1$ Si S_3 est fermé et S_6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc} (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc} (S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc} (S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

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

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

II.9.5.1. Stratégie de commande :

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangulé sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse

Triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance (Figure II.15).

Deux paramètres caractérisent cette stratégie:

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.44})$$

Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref} et celle de la porteuse

$$(U_p): r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{II.45})$$

II.9.5.2. Algorithme de commande :

L'algorithme de commande de la stratégie triangle sinusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes [37]:

❖ Tape 1 :

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{refk} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Tel que V_{dc} est la tension du bus continue.

❖ Tape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

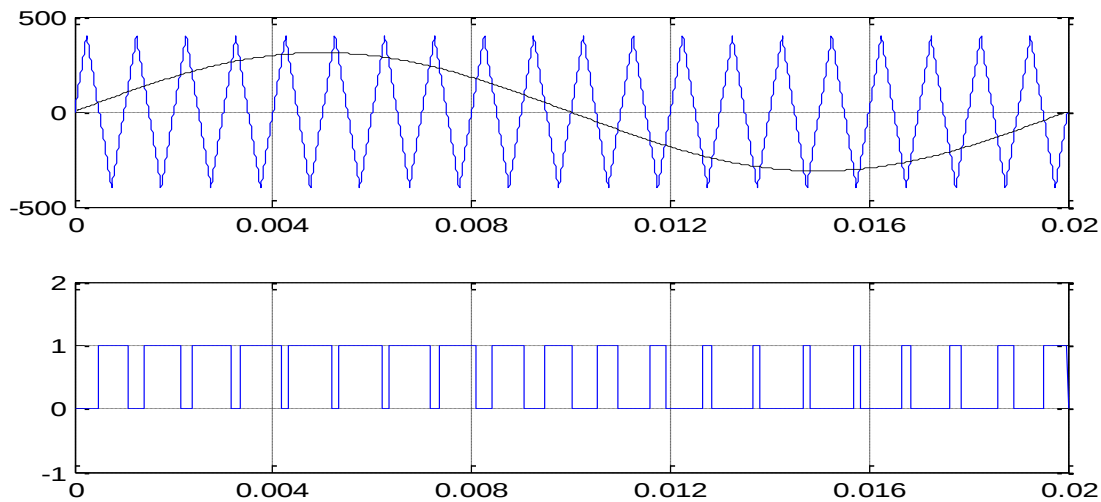


Figure II.15 : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale à une porteuse

II.10. Simulation de la commande de la MADA :

La Figure II.16 représente schéma- bloc de la structure de la commande vectorielle de MADA avec Matlab-2015. Pour une machine asynchrone double alimentation nous visualisons la vitesse mécanique, la puissance active et réactive ainsi que le courant statorique et rotorique.

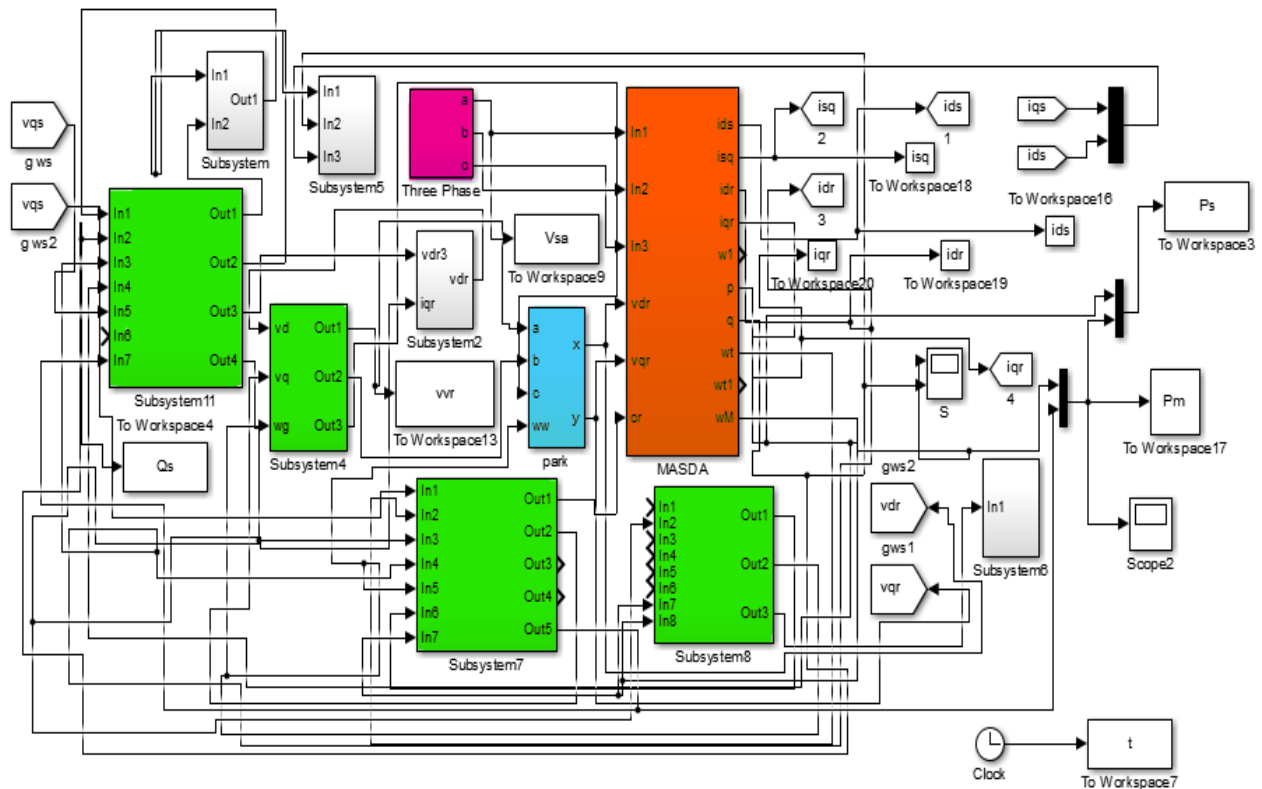


Figure II.16 : Schéma bloqué du modèle de la commande vectorielle de MADA

II.10.1. Résultats de simulation :

Nous avons exécuté le processus de simulation à l'aide du programme Matlab / Simulink pour vérifier les contrôles que nous avons étudiés dans ce chapitre, et nous avons également appliqué différentes vitesses aux pales de l'éolienne, nous avons atteint les résultats de simulation présentés dans les figures suivantes :

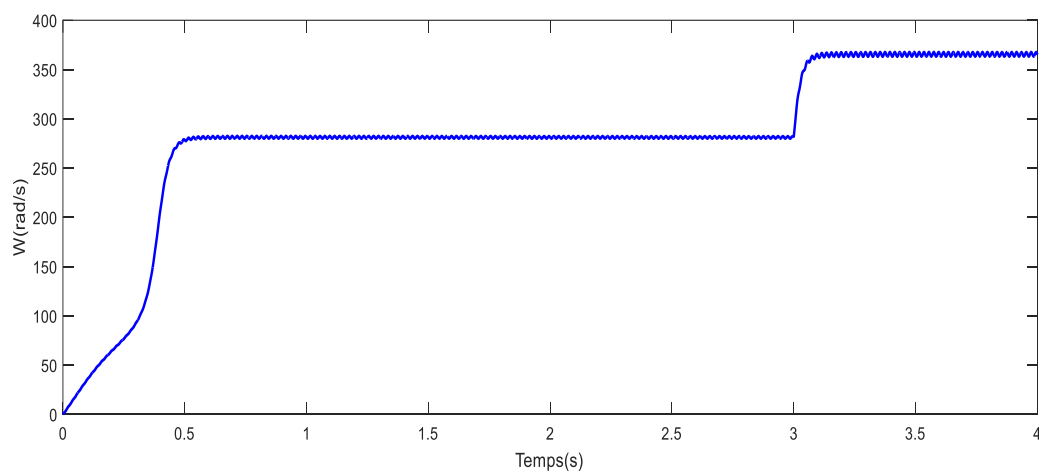
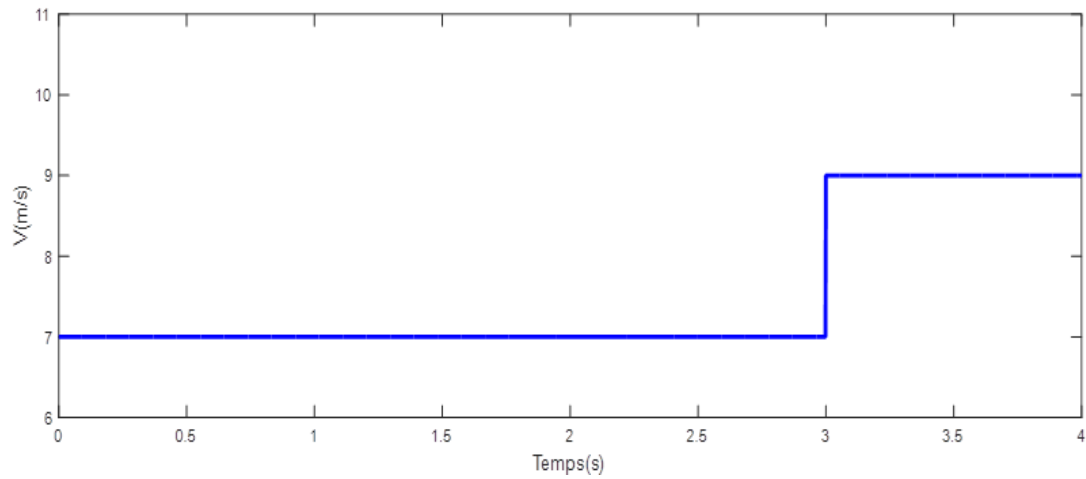
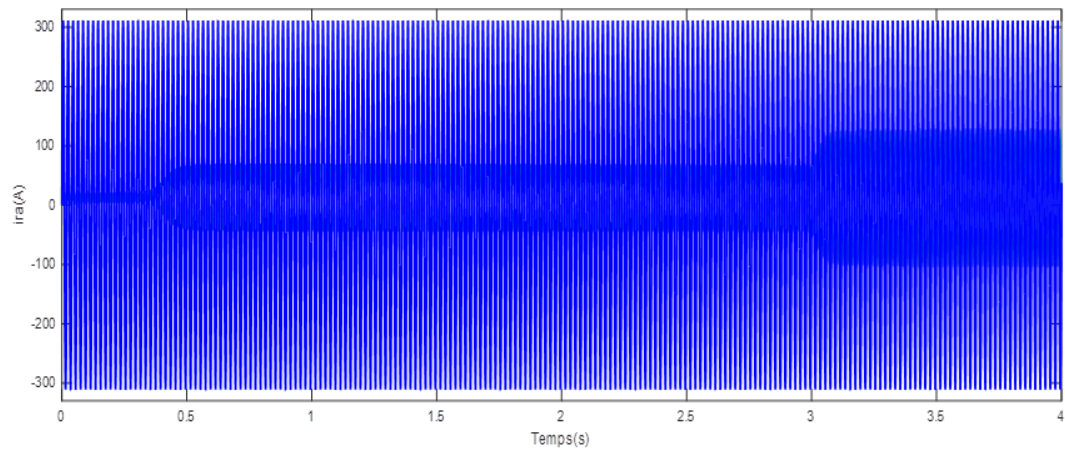
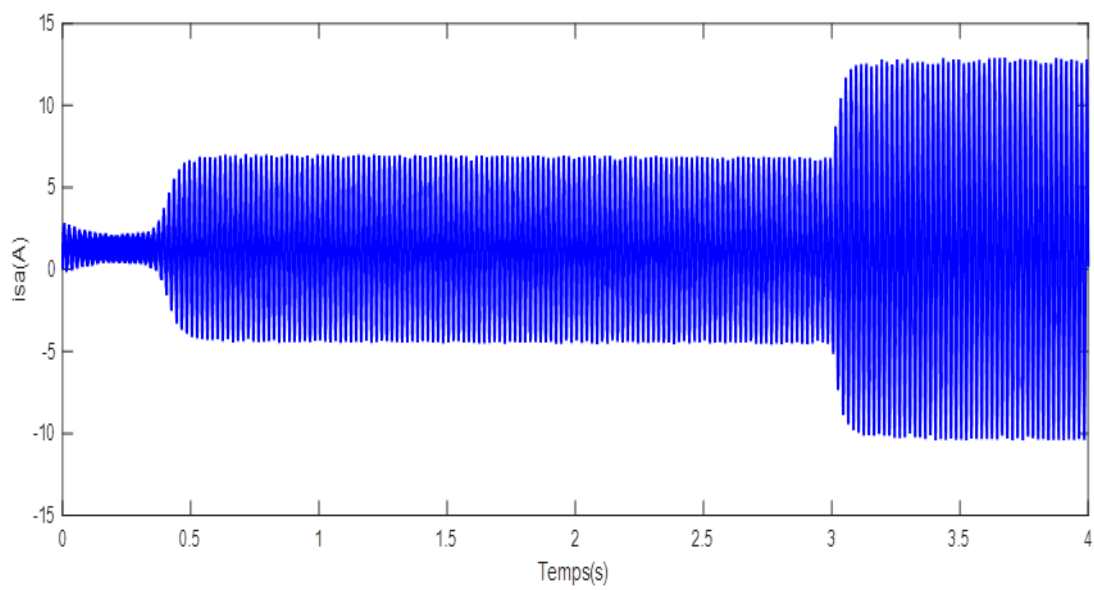
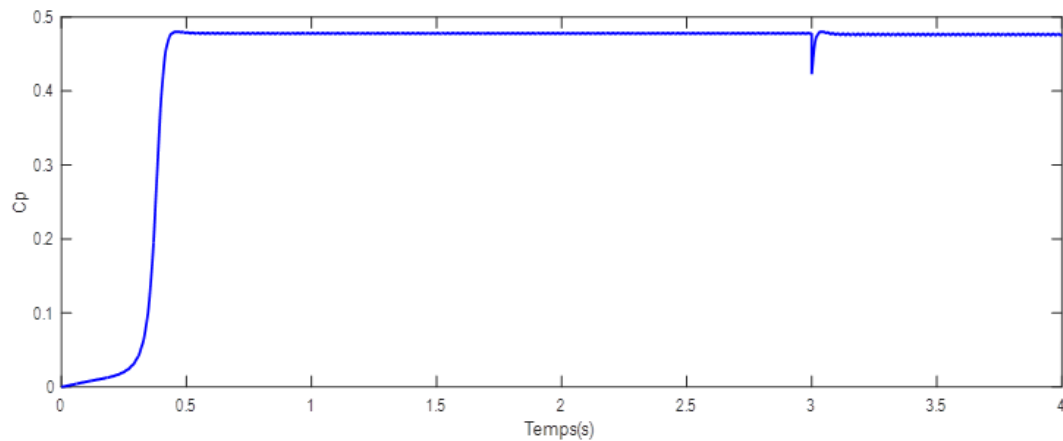
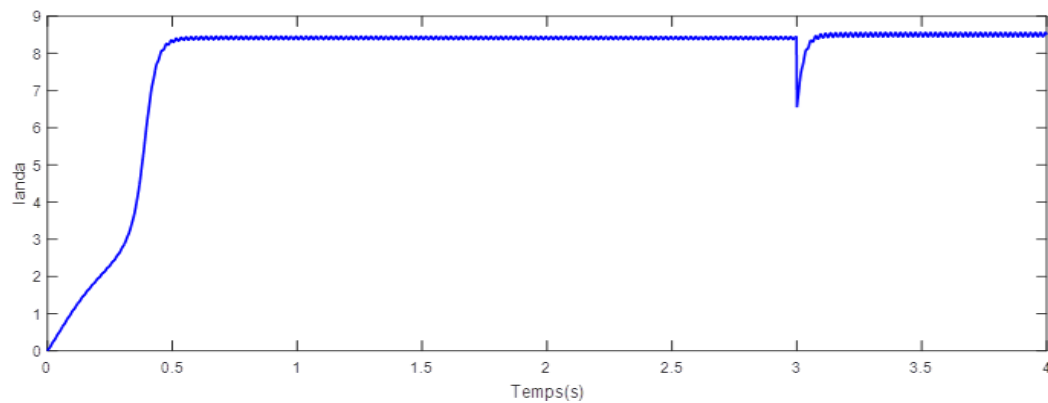
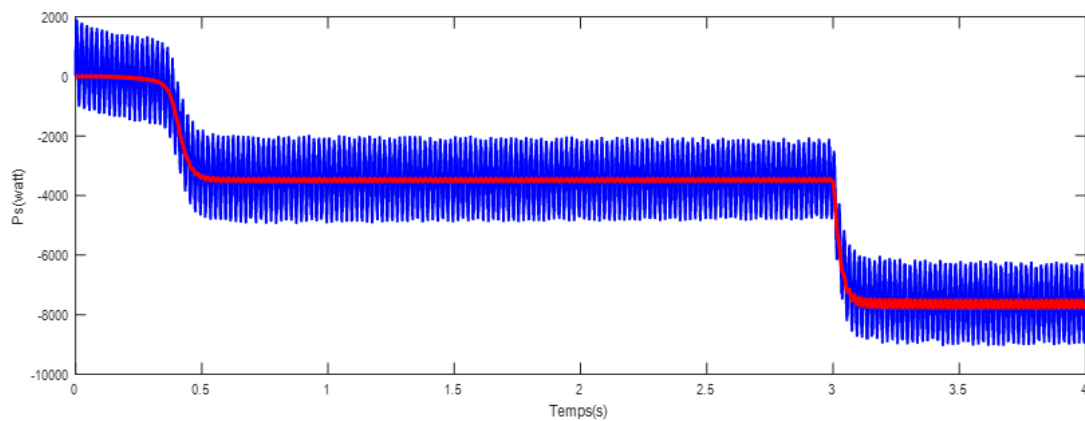


Figure II.17 : Vitesse de rotation (W_r)

**Figure II.18 : Vitesse du vent (V)****Figure II.19 : Courant rotorique d'une phase (I_{rq})****Figure II.20 : Courant statorique d'une phase (I_{sq})**

Figure II.21 : Vitesse relative d'éolienne (C_p)Figure II.22 : Coefficient de puissance de la turbine (λ)Figure II.23: Puissance active statorique (P_s)

II.11. Interprétations des Résultats :

Ces résultats de simulation présentent les différents courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, la vitesse spécifique et le coefficient de puissance ne changent pas beaucoup de valeurs, en régime permanent, ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 8.5 et 0.49 successivement, avec la puissance éolienne capturée suit sa référence optimale.

- Figure (II.8) représente la vitesse de vent en fonction de temps, la vitesse de vent est toujours fixe à partir de 0 (m/s) jusque 3(m/s) après sa en elle va monter au 9 (m/s) .ainsi que la vitesse de rotation (ω_r) de la machine.
- On remarque qu'après l'application se profile de vent sur les pales de la turbine la valeur de coefficient de puissance (C_p) reste à la valeur de C_p max (0.49) (Figure II.20).
- Et le rapport ratio de la vitesse (λ) varie légèrement autour de sa valeur optimale (8.5) (FigureII.21).
- Les résultats de simulation montrent que les variations de la vitesse de la génératrice sont adaptées à la variation de la vitesse du vent (figure II.17).

II.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous étudions la modélisation mathématique de MADA et sur la base des transformations de Park que nous avons étudiées précédemment, nous construisons un système de contrôle vectoriel de la puissance statorique active et réactive d'une machine asynchrone à double alimentation, deux commandes indirectes sont détaillées à l'aide de modules Une commande intégrée proportionnelle, avec ou sans boucle électrique, qui prend en compte le couplage entre les axes et utilise les conditions de compensation pour les corriger Enfin, nous avons simulé cette étude dans un environnement MATLAB/Simulink pour évaluer les performances et les résultats.

Chapitre III :

Commande directe de puissance d'une GADA

III.1. Introduction :

Le contrôle direct a été développé plus tard pour plusieurs applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par un tableau de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de référence et les mesures. La première application développée était le contrôle d'une machine électrique et la structure de contrôle était connue sous le nom de Contrôle Direct de Couple. Dans ce cas, on contrôle le flux statorique et le couple électromagnétique de la machine sans aucun bloc de modulation [42].

Ensuite, une technique similaire appelée Contrôle Direct de Puissance était développée après par [43] pour une application de contrôle des redresseurs connectés au réseau (génératrice dans notre cas). Dans ce cas, les grandeurs contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées.

Deux différentes tendances sont identifiées par les chercheurs qui travaillent sur le Contrôle Direct de Puissance. D'un côté, une définition générale décrit le DPC comme la structure de contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle, en remplaçant les variables de courant utilisées dans les systèmes imbriqués. Cette définition inclut les deux types des correcteurs DPC principaux, le DPC classique et le DPC avec Modulation vectorielle. D'un autre côté, une définition plus restrictive analyse le DPC comme le contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle et qui n'a pas besoin d'utiliser des blocs de modulation car les états de commutation sont choisis directement par un tableau de commutation. Cette définition n'inclut que le DPC classique [43].

III.2. Théorie de la commande directe de puissance :

Généralement, les systèmes évoluent sur des bases qui sont à l'origine très simples et qui se complexifient avec le temps. Le passage de la commande vectorielle vers la commande directe de couple et de flux (DTC) est marqué par une simplification majeure de l'algorithme de commande. Seulement, on pourrait vraiment se demander pourquoi le développement de la commande directe des puissances active et réactive (DPC) n'est pas survenu avant la commande DTC [44]. En effet, si la simplification de l'algorithme de commande a été majeure dans le premier cas, elle l'est tout autant lorsque l'on regarde le passage de la commande DPC vers la commande DTC.

Le développement de cette nouvelle technique (vis-à-vis la DTC) de commande est basé exactement sur les mêmes relations vectorielles qui gouvernent la commande DTC. Seulement, plutôt que de s'attarder à contrôler des composantes estimées à partir des paramètres de la machine, la commande s'intéresse uniquement à l'échange des puissances active et réactive entre la machine

et sa source d'alimentation. De plus, puisque l'on peut calculer les puissances instantanées sans avoir recours à des transformations de référentiels en rotation, l'angle de la position des phases rotoriques ne sera alors plus nécessaire. Aussi, la puissance étant directement calculée à partir des courants et de la tension, la connaissance des paramètres de la machine ne sera plus requise, une caractéristique aussi étonnante que les performances qui en découlent, à rendre jaloux n'importe quel manufacturier d'entraînements électriques [45].

III.3. Principe du contrôle direct des puissances (DPC) :

Afin de bien comprendre le principe de fonctionnement, L'idée principale du DPC classique est illustrée par la Figure III.2 . La commande s'intéresse uniquement à l'échange des puissances active et réactive entre la machine et sa source d'alimentation, dans les puissances active et réactive instantanées sont calculés à partir des courants et de la tension et comparés à leurs valeurs de référence; leurs erreurs sont introduites dans deux comparateurs à hystérésis qui déterminent, avec l'aide d'un tableau de commutations et la valeur du secteur où se trouve la tension du réseau les instants de commande des interrupteurs.

Le contrôle direct de puissance (DPC) est basé sur le concept du contrôle direct du couple et de flux (DTC). Lorsque le vecteur de tension est aligné avec le référentiel tournant choisi, la puissance active instantanée est proportionnelle à la composante directe du courant de sortie et la puissance réactive instantanée au courant en quadrature. Ainsi, pour analyser la variation de puissance, il faut analyser la variation de courant. Donc il suffit essentiellement d'échanger le terme couple par puissance active dans la commande directe de couple et de flux afin d'obtenir un entraînement à commande directe des puissances active et de flux. Malheureusement, une grande difficulté persiste dans le calcul de l'angle du flux rotorique. À cet égard, la commande directe des puissances active et réactive offre un moyen robuste de connaître le secteur actuel du flux rotorique.

Le traitement de la puissance réactive est identique en tout point à celui du flux dans la commande directe de couple et de flux. L'élection du mode de commutation du convertisseur est réalisée de façon à ce que l'erreur entre la valeur de référence de la puissance active instantanée, p_{ref} , et la valeur mesurée, p , rentre dans la bande d'hystérésis $2 \times D_p$. De la même façon, l'erreur de la puissance réactive doit rester dans la bande d'hystérésis $2 \times D_q$.

Les erreurs des puissances active et réactive instantanées sont introduites dans deux comparateurs à hystérésis de deux niveaux, dont les sorties (dp et dq) sont mises à 1 lorsqu'il faut augmenter la variable de contrôle (p ou q) et à 0 lorsque la variable de contrôle doit rester inchangée ou doit diminuer [46].

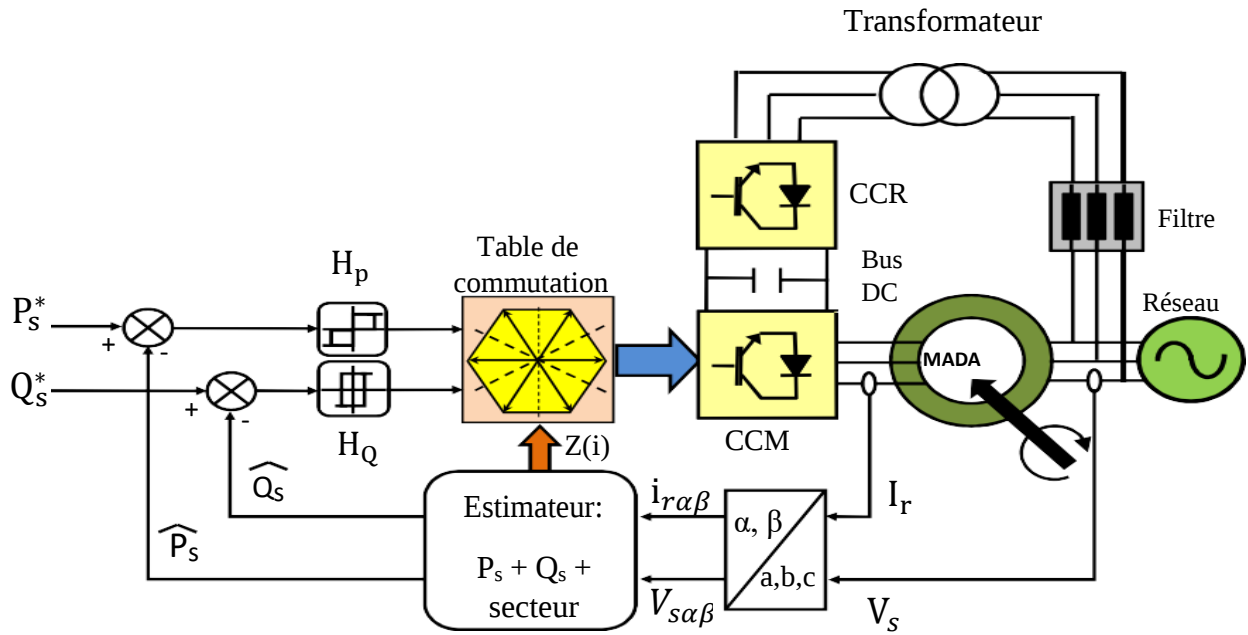


Figure III.1: Configuration de la DPC-C de la MADA.

III.4. Commande directe de la puissance active et réactive de la MADA :

Généralement, les systèmes évoluent sur des bases qui sont à l'origine très simples et qui se complexifient avec le temps. Le passage de la commande vectorielle vers la commande directe de couple et de flux (DTC) est marqué par une simplification majeure de l'algorithme de commande. Seulement, on pourrait vraiment se demander pourquoi le développement de la commande directe des puissances active et réactive (DPC) n'est pas survenu avant la commande DTC [44]. En effet, si la simplification de l'algorithme de commande a été majeure dans le premier cas, elle l'est tout autant lorsque l'on regarde le passage de la commande DPC vers la commande DTC.

Le traitement de la puissance réactive est identique en tous points à celui du flux dans la commande directe de couple et de flux. Un apport en flux rotorique contribue au redressement du facteur de puissance au stator, c'est-à-dire à une diminution de la puissance réactive consommée (positive) par la machine. Cette relation est toujours vraie, quel que soit le mode d'opération de la machine. Après ces conclusions, nous pouvons obtenir le Tableau suivant III.1:

Tableau III.1: Sélection des vecteurs selon la commande en puissance active et réactive

Variable	Augmente	Diminue
Puissance réactive	V_k, V_{k+1}, V_{k-1}	$V_{k+2}, V_{k-2}, V_{k+3}$
puissance active	V_{k+1}, V_{k+2}	V_{k-1}, V_{k-2}

Il en découle que le Tableau III.2 des vecteurs optimaux est dérivé de la même manière en donnant priorité au contrôle de la puissance active sur la puissance réactive.

Tableau III.2: Sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive)

Flux	Erreur	Secteur1	Secteur2	Secteur3	Secteur4	Secteur5	Secteur6
Q + +	P + +	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	P =	V0	V7	V0	V7	V0	V7
	P - -	V6	V1	V2	V3	V4	V5
Q - -	P + +	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	P =	V7	V0	V7	V0	V7	V0
	P - -	V5	V6	V1	V2	V3	V4

$$\begin{aligned} \text{Où } Q + + &\Rightarrow Q^* \geq Q + \Delta Q \\ \text{Et } Q - - &\Rightarrow Q^* \leq Q - \Delta Q \end{aligned} \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{aligned} P + + &\Rightarrow P^* \geq P + \Delta P \\ P - - &\Rightarrow P^* \leq P - \Delta P \\ P = &\Rightarrow P^* \leq P - \Delta P \quad \text{et} \quad P^* \leq P + \Delta P \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Le processus de régulation de la puissance active et réactive ne nécessite que de simples régulateurs à hystérésis et la détection du secteur ne dépend donc d'aucun paramètre interne ou externe à la machine, ni de la connaissance de la position du rotor. Les équations (III.3) et (III.4) sont à elles seules suffisantes à gouverner la MADA.

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{qs} \cdot I_{qs} + V_{ds} \cdot I_{ds}) \quad (\text{III.3})$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs}) \quad (\text{III.4})$$

III.4.1. Schéma de la commande directe des puissances active et réactive :

La structure détaillée de la commande directe des puissances active et réactive de la MADA est une simplicité déconcertante, trois tables de références, deux régulateurs à hystérésis et le calcul des puissances actives et réactives sont nécessaires à son fonctionnement. Les résultats de simulations et expérimentaux montrent que la détection du secteur est très robuste et que le fonctionnement est possible à partir d'une vitesse nulle jusqu'au fonctionnement en mode hyper synchrone. De plus, aucun circuit externe n'est requis afin de synchroniser la MADA avec le réseau électrique puisque la détection du secteur courant s'effectue à l'intérieur de trois périodes d'échantillonnage, ce qui signifie en moins de 150 μ s. Ceci s'explique par le fait que la distance entre deux secteurs différents est d'au plus trois secteurs, donc trois périodes d'échantillonnage.

III.4.2. Estimation de la puissance active et réactive :

Il y a trois méthodes pour calculer la puissance active et réactive :

- a) Par la mesure des courants et des tensions
- b) Par estimation des tensions du réseau et mesure des courants
- c) Par estimation du flux virtuel et mesure des courants

Au lieu de mesurer les puissances sur la ligne, en capturant les courants rotoriques, et en estimons P_s et Q_s . Cette approche donne un contrôle anticipé des puissances dans les enroulements statoriques. Rappelons que la commande DPC sera effectuée sur la base du modèle simplifié de la MADA, c'est à dire celui établi en négligeant la résistance de la phase statorique. Nous pouvons trouver les relations de P_s et Q_s en fonction des deux composantes du flux rotorique dans le référentiel $(\alpha\text{-}\beta\text{r})$. Ce référentiel tourne solidairement avec le rotor de la MADA [45]. Les puissances active et réactive sont contrôlées par deux comparateurs à hystérésis, les valeurs mesurées des puissances étant estimées à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} V_s \Phi_{r\beta} \\ Q_s = \frac{3}{2} \left(\frac{V_s}{\sigma L_s} \Phi_s - \frac{V_s L_m}{\sigma L_s L_r} \Phi_{r\alpha} \right) \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

D'Où :

$$\begin{cases} \Phi_{r\alpha} = \sigma L_r i_{r\alpha} + \frac{L_m}{L_s} \Phi_s \\ \Phi_{r\beta} = \sigma L_r i_{r\beta} \\ |\overline{\Phi_s}| = \frac{|\overline{V_s}|}{\omega_s} \\ \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Si en introduisant l'angle δ qui se trouve entre le vecteur flux statorique et rotorique, P_s et Q_s deviennent :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\overline{\Phi_s}| |\overline{\Phi_r}| \sin \delta \\ Q_s = \frac{3}{2} \frac{\omega_s}{\sigma L_s} |\overline{\Phi_s}| \left(\frac{L_m}{L_r} |\overline{\Phi_r}| \cos \delta - |\overline{\Phi_s}| \right) \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

La dérivée des deux équations dans (III.7) donne :

$$\begin{cases} \frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{L_m \omega_s}{\sigma L_s L_r} |\overline{\Phi_s}| \frac{d(|\overline{\Phi_r}| \sin \delta)}{dt} \\ \frac{dQ_s}{dt} = \frac{3}{2} \frac{L_m \omega_s}{\sigma L_s L_r} |\overline{\Phi_s}| \frac{d(|\overline{\Phi_r}| \cos \delta)}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Comme on le voit dans (III.8), ces deux dernières expressions montrent que les puissances active et réactive statoriques peuvent être contrôlées par la modification de l'angle relatif δ entre les vecteurs flux statorique et rotorique et de leur amplitudes (Figure III.2).

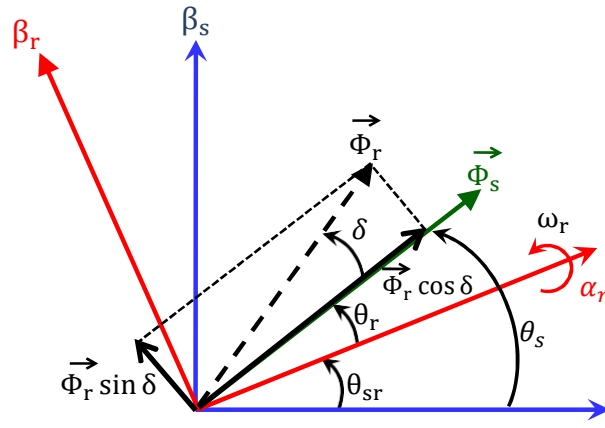


Figure III.2 : La décomposition du vecteur flux rotorique dans le plan $(\alpha-\beta)$.

III.4.3. Choix des comparateurs à hystérésis :

De manière à obtenir de très bonnes performances dynamiques, le choix d'un correcteur à hystérésis à deux niveaux semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande de la puissance active et réactive. Ces comparateurs (Figure III.3) doivent permettre de contrôler l'échange de la puissance active et réactive entre la MADA et le réseau électrique dans les deux sens et avec les deux modes de fonctionnement hypo et hyper-synchrone de la MADA.

Similairement à la DTC, la DPC pour la MADA est basée sur la sélection d'un vecteur de tension rotorique de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence sont réduites et maintenues entre les limites des bandes d'hystérésis.

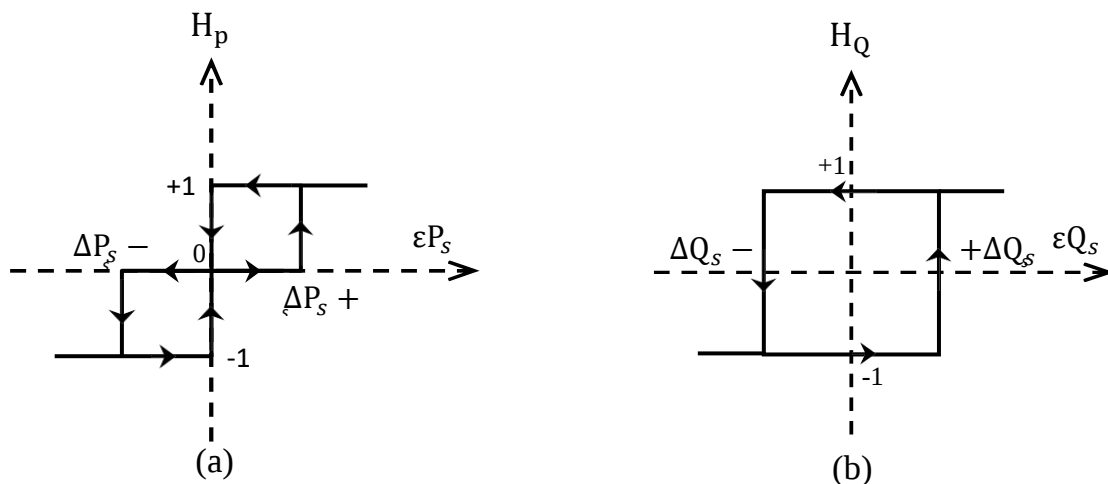


Figure III.3 : Comparateurs à hystérésis : (a) puissance active, (b) puissance réactive

Ces comparateurs à hystérésis, appliqués sur la puissance active et réactive, permettent de détecter les dépassements de la zone de contrôle et de respecter :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } \varepsilon Q_s \geq \Delta Q_s \Rightarrow H_Q = 1 \\ \text{Si } \varepsilon Q_s \leq -\Delta Q_s \Rightarrow H_Q = -1 \\ \text{Si } \varepsilon P_s \geq \Delta P_s \Rightarrow H_P = 1 \\ \text{Si } -\Delta P_s \leq \varepsilon P_s \leq \Delta P_s \Rightarrow H_P = 0 \\ \text{Si } \varepsilon P_s \leq -\Delta P_s \Rightarrow H_P = -1 \end{array} \right. \quad (\text{III.9})$$

Les comparateurs analogiques ont un désavantage notable : la fréquence d'échantillonnage est variable. Mais, ce problème peut être éliminé, si on utilise des comparateurs discrets. Par cela, les variations des puissances ne sont pas maintenues exactement dans la bande d'hystérésis, mais on fonctionne à temps d'échantillonnage fixe [45].

III.4.4. Elaboration de la table de commutation :

Il est mentionné précédemment (§III.4) que le traitement de la puissance active et réactive est identique en tous points à celui du couple et de flux dans la commande DTC. Donc, un apport en flux rotorique contribue au redressement du facteur de puissance au stator, c'est-à-dire à une diminution de la puissance réactive consommée (positive) par la machine. Cette relation est toujours vraie, quel que soit le mode d'opération de la machine.

Pour sélectionner le vecteur de tension rotorique optimum, il faut connaître la position relative du flux rotorique dans les six sextants (Figure III.4). Un onduleur triphasé à deux niveaux de tension peut produire huit combinaisons différentes, ces huit combinaisons engendrent huit vecteurs de tension qui peuvent être appliqués aux bornes rotoriques de la MADA.

Il y a six vecteurs actifs et deux vecteurs nuls. Les positions spatiales dans le plan (α_r - β_r) des Vecteurs actifs de tensions sont montrées dans la Figure III.4.

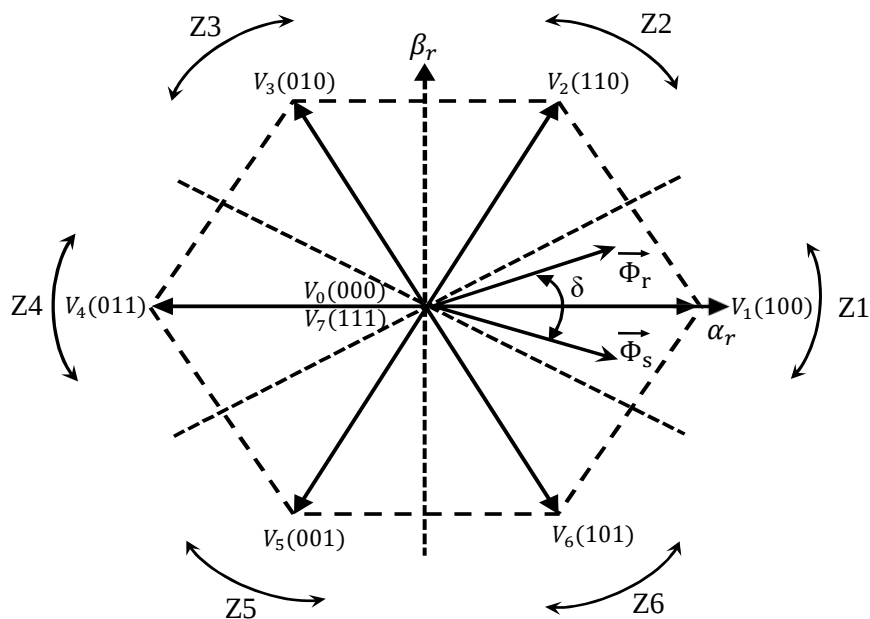


Figure III.4 : Présentation des vecteurs de commutation.

Le partage du plan complexe en six zones angulaires i Z ($i=1\dots,6$) peut être déterminé par la relation suivante :

$$-\frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3} \leq Z(i) < \frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3} \quad (\text{III.10})$$

Il en découle que le tableau 5.1 des vecteurs optimaux est dérivé de la même manière en donnant priorité au contrôle de la puissance active sur la puissance réactive. Les signaux de H_P et H_Q ainsi la position de vecteur flux rotorique δ , représentent les entrées de cette table de vérité, alors que les états de commutation S_a, S_b, S_c représentent sa sortie.

Tableau III.3 : Table de sélection des vecteurs optimaux (puissance active et réactive) [44].

		Comparateur	3 niveaux			3 niveaux		
			2 niveaux			2 niveaux		
		Puissance réactive : H_Q	1			-1		
		Puissance réactive : H_P	1	0	-1	1	0	-1
Secteur $Z(i)$ Vis-à-vis de l'angle δ	1	$(330^\circ, 30^\circ)$	V_5	V_7	V_3	V_6	V_0	V_2
	2	$(30^\circ, 90^\circ)$	V_6	V_0	V_4	V_1	V_7	V_3
	3	$(90^\circ, 150^\circ)$	V_1	V_7	V_5	V_2	V_0	V_4
	4	$(150^\circ, 210^\circ)$	V_2	V_0	V_6	V_3	V_7	V_5
	5	$(210^\circ, 270^\circ)$	V_3	V_7	V_1	V_4	V_0	V_6
	6	$(270^\circ, 330^\circ)$	V_4	V_0	V_2	V_5	V_7	V_1
$V_0 = [0,0,0]$; $V_1 = [1,0,0]$; $V_2 = [1,1,0]$; $V_3 = [0,1,0]$; $V_4 = [0,1,1]$; $V_5 = [0,0,1]$; $V_6 = [1,0,1]$; $V_7 = [1,1,1]$								

En fait, cette table de commutation (Tableau III.3) n'est pas la seule table utilisée par la DPC. On Va donc trouver une variété des tables des commutations proposées dans la littérature [44], [46], [47], [48], [49], [50]. Nous avons déjà vérifié quelques-unes par Simulation et les résultats obtenus sont presque les mêmes.

Néanmoins, la réalité fondamentale sur laquelle s'appuie la commande DPC est que le déplacement du flux rotorique dans la machine suit une progression continue dans le temps et qu'il semblera traverser chaque secteur un à un s'il est échantillonné suffisamment. L'étude du Tableau III.3 nous indique que si le flux rotorique était par exemple dans le secteur 2 et que le vecteur V_3 venait tout juste d'être appliqué, la variation de la puissance réactive mesurée au stator doit inévitablement être négative puisque le vecteur V_3 diminue la puissance réactive au stator. S'il n'en avait pas été ainsi, nous serions contraints d'admettre que notre estimation du secteur n'est plus juste et que le flux serait plutôt dans le secteur 1 ou 5. Compte tenu qu'il était précédemment dans le

secteur 2, il serait peu probable qu'il soit maintenant dans le secteur 5, puisqu'il aurait « sauté » par-dessus deux autres secteurs.

III.5. Avantages et inconvénients de la structure de contrôle DPC classique :

La structure de contrôle DPC avec modulation vectorielle présentent plus d'avantages par rapport à la structure DPC classique. Pourtant, elle a aussi quelques inconvénients. Par la suite, on résume les points forts et faibles :

III.5.1. Avantages de la structure de contrôle DPC classique :

- Réponse dynamique très élevée.
- Non utilisation des boucles imbriquées, ni des transformations de coordonnées nid modulateur, ni de découplage entre les composantes du courant.

III.5.2. Inconvénients de la structure de contrôle DPC classique :

- Fréquence d'échantillonnage très élevée, entraîne l'utilisation d'un microprocesseur très rapide.
- Une fréquence de commutation variable, la valeur de l'inductance doit être assez élevée pour lisser la forme d'onde du courant.

III.6. Simulation de la DPC :

La Figure II.5 représente schéma- bloc de la structure de la commande directe de puissance de la GADA avec Matlab 2015. Nous avons extrait des résultats simulés la vitesse mécanique, le couple électromagnétique et la puissance active et réactive ainsi que le courant statorique et rotorique aussi le secteur.

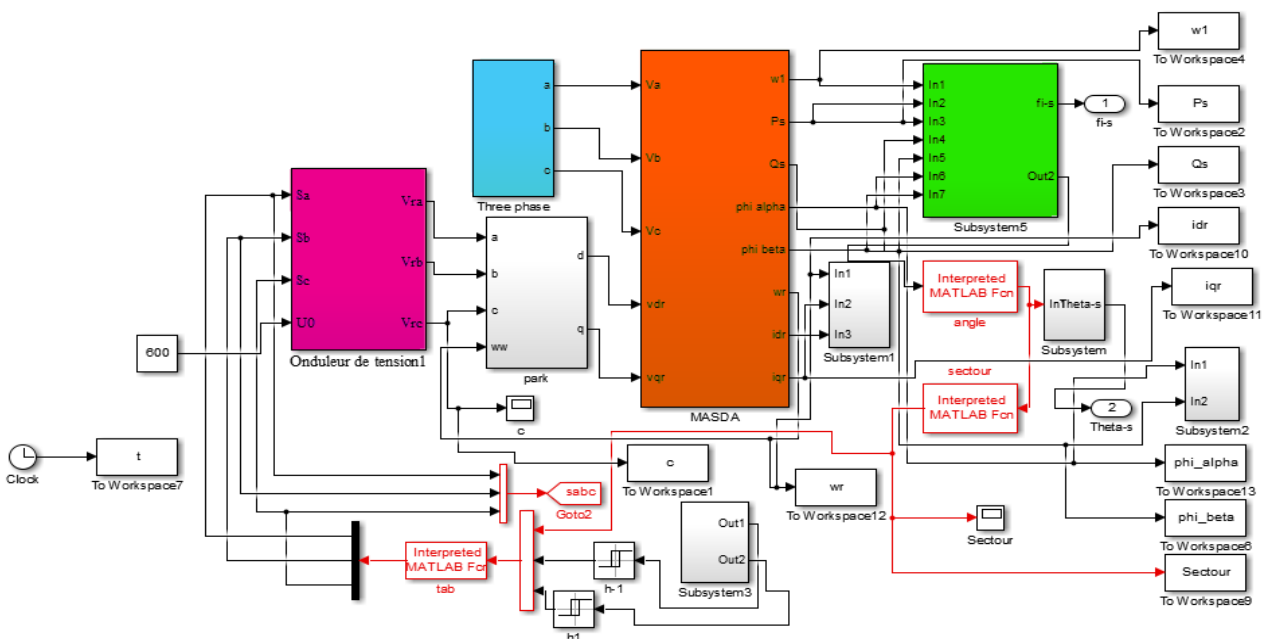


Figure III.5 : Schéma bloque du modèle de la commande DPC de la GADA

III.7. Résultats de simulation :

Dans cette section la commande DPC de la GADA de 7.5 KW (le paramètre de la MADA +turbine est présent dans l'annexe(A)) a été testée par simulation sous environnement MATLAB/SIMULINK.

Les résultats de simulations avec la commande directe de puissance active et réactive sont Présentés à la Figure III.8 et III.9.

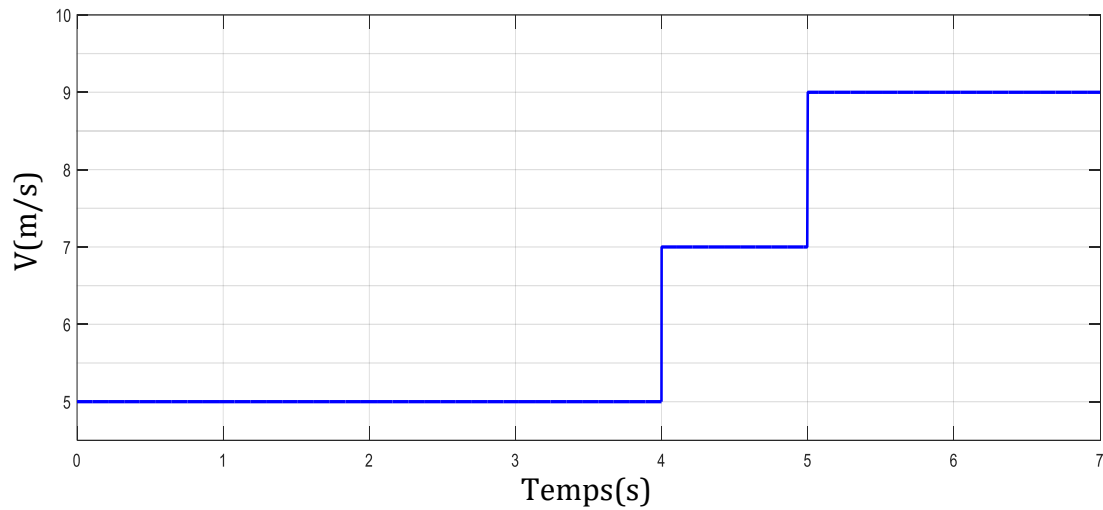


Figure III.6 : Vitesse du vent (V)

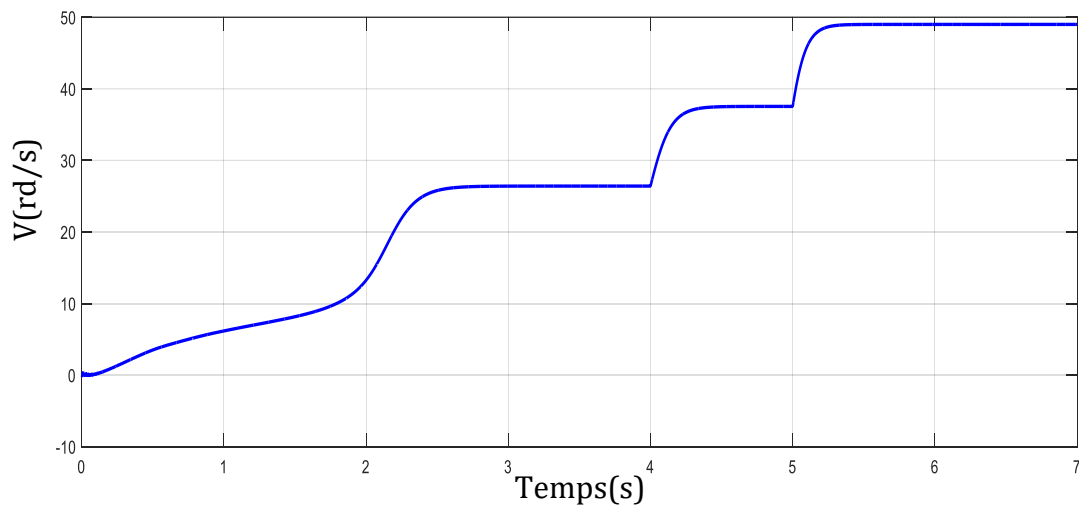
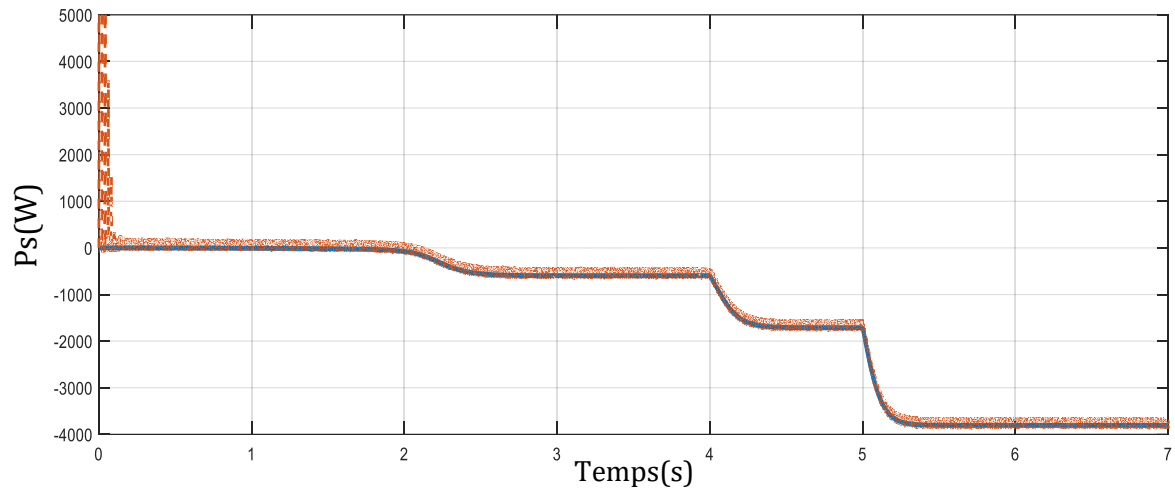
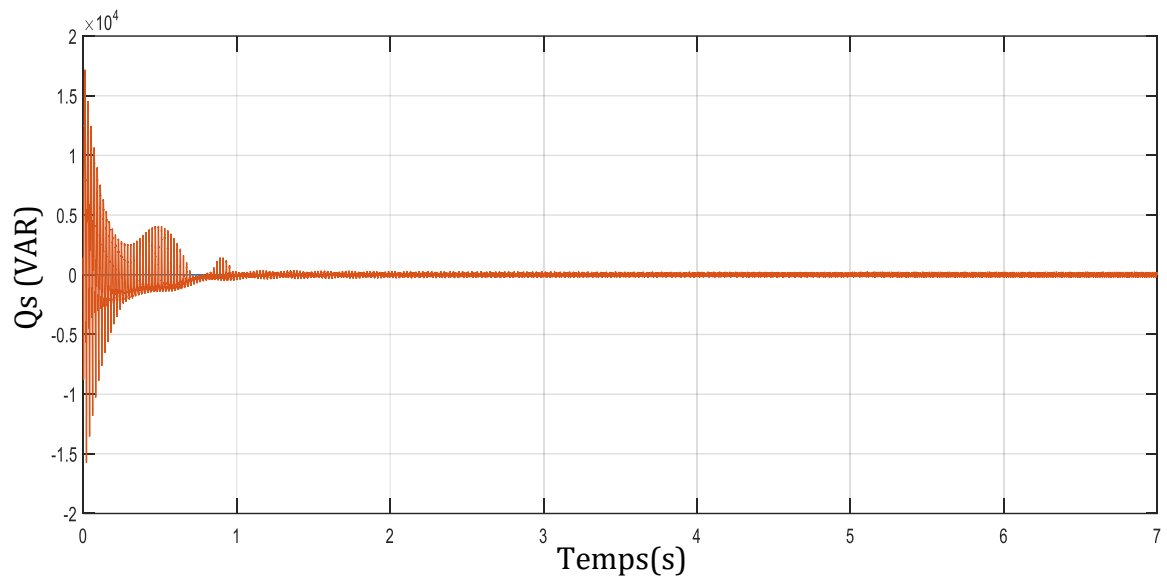
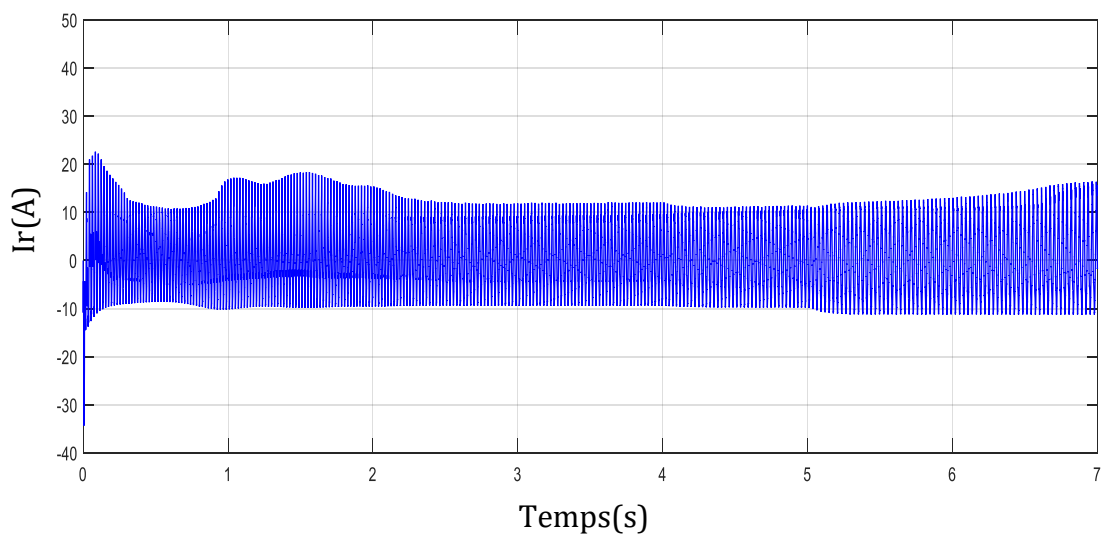
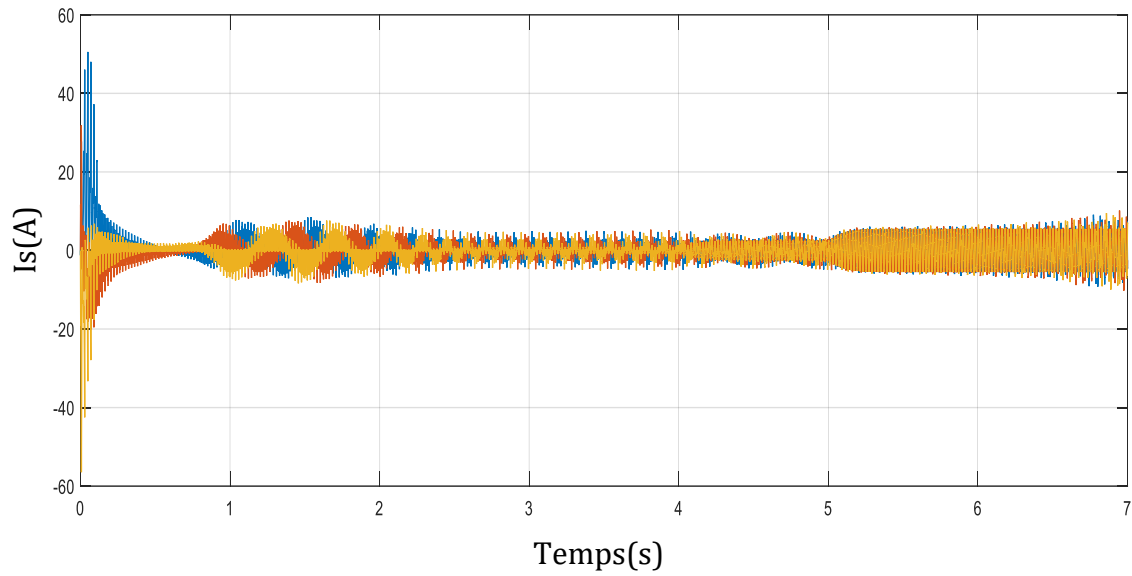
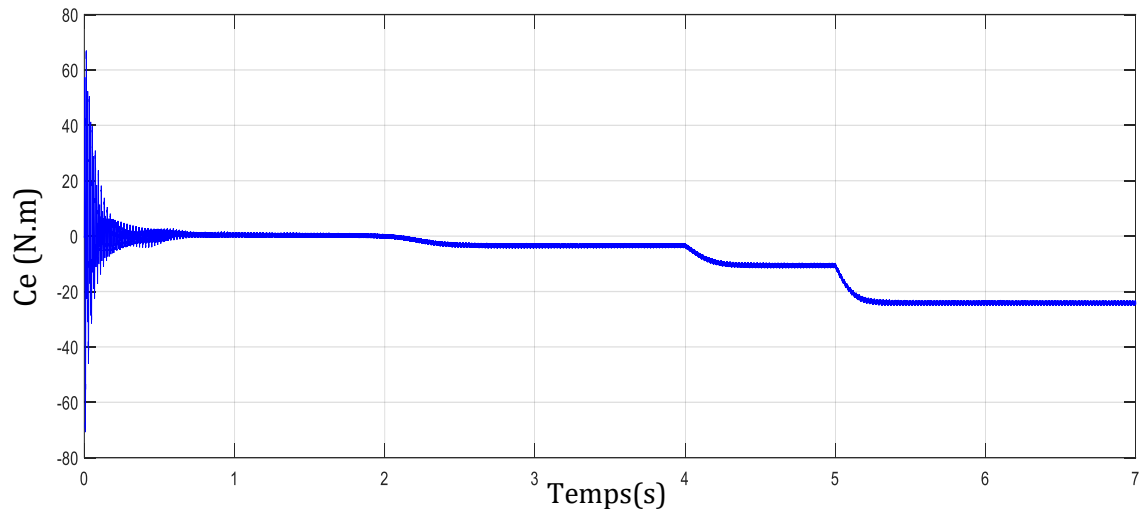
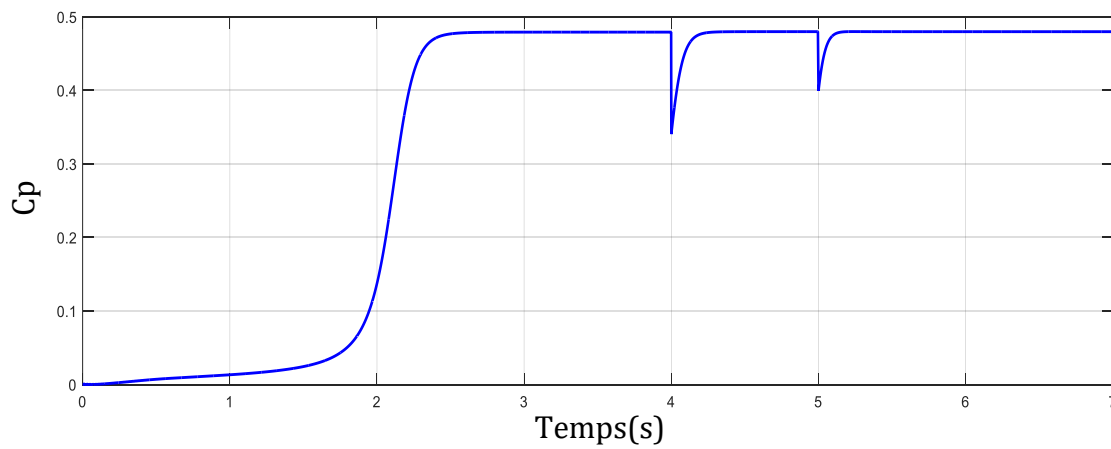


Figure III.7 : La vitesse rotorique (W_r)

**Figure III.8 : Puissance active (P_s)****Figure III.9 : Puissance réactive (Q_s)****Figure III.10 : Courant rotorique (I_r)**

**Figure III.11 : Courant statorique (I_{sabc})****Figure III.12 : Couple électromagnétique (C_e)****Figure III.13 : Coefficient de puissance la turbine (C_p)**

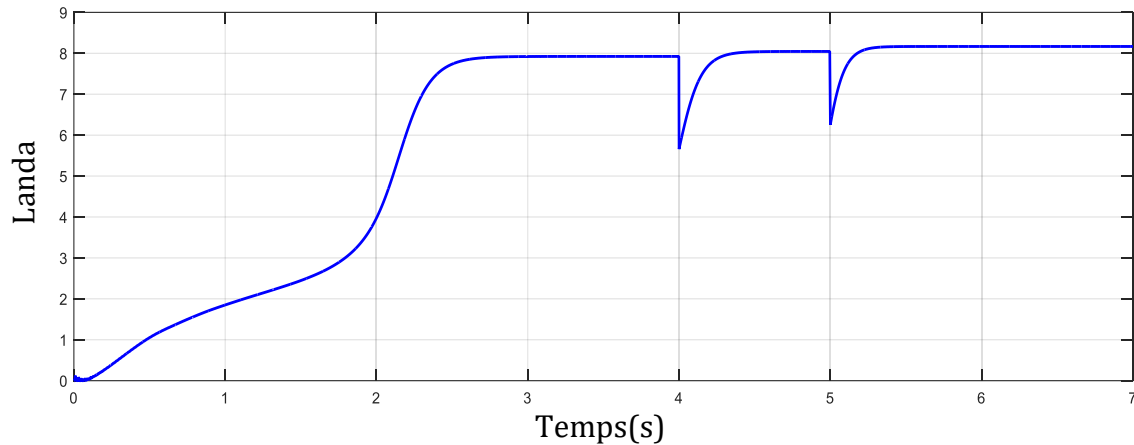


Figure III.14 : Vitesse relative de l'éolienne (λ)

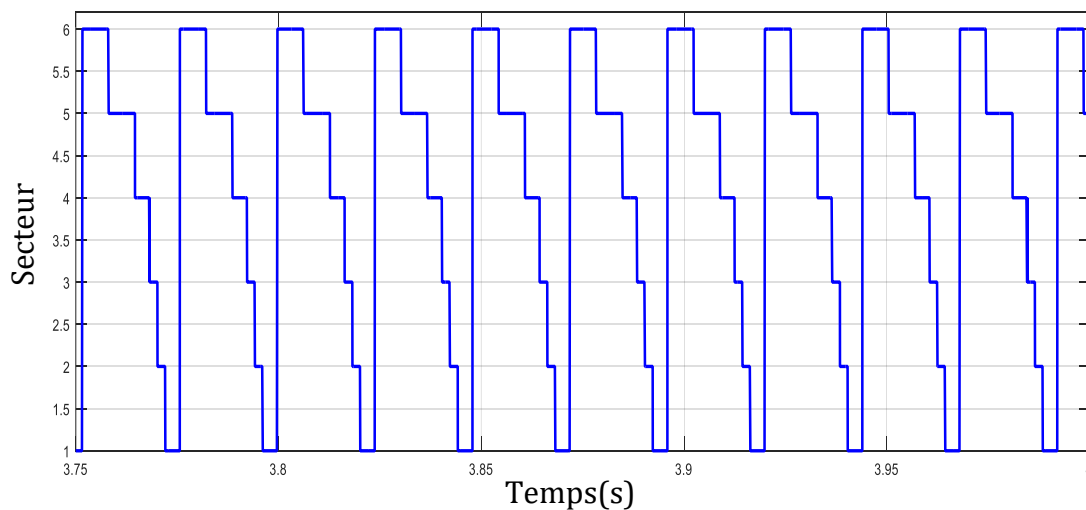


Figure III.15 : Secteur

III .8. Interprétations des résultants :

La courbe du puissance active (Figure III.8) suit parfaitement en concordance avec la commande des consignes, avec quelques ondulations au démarrage, on remarque que la production de puissance est proportionnel au vitesse du vent.

On remarque aussi que les courants sont parfaitement sinusoïdaux et On voit que la variation de la puissance active influe directement sur l'amplitude du courant statorique, les courants rotoriques suivent la variation de la consigne de puissance (Figure III.9), implique directement sur le couple électromagnétique.

On peut noter que :

➤ En régime permanent, il y a une ondulation dans le couple. Cette ondulation dépend de la fréquence de commutation de l'onduleur qui est déterminée par bande des régulateurs a hystérisis de couple et de flux.

- La vitesse de rotation de la MADA est stable dans toutes les vitesses de vent.
- Le couple négatif parce que la MADA fonctionne en mode générateur et le temps de réponse très rapide, sans dépassement. Le découplage entre les deux puissances de la MADA est vérifié.
- De même, les courants statorique et rotorique réponds bien aux variations imposées sur le vent et que leurs formes sont très proches de la sinusoïde.
- Les figures montrent l'efficacité de la commande DPC dans le réglage des puissances même à vitesse du vent variable.
- En fin les résultats obtenus confirment l'efficacité de la stratégie de commande utilisée (DPC) pour le contrôle du système de conversion d'énergie éolienne à base de GADA et attestent les performances désirées.

III .9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la loi de la commande DPC qui contribue à la séparation entre la puissance active et réactive de la GADA. L'étude a montré que la technique proposée (DPC) permet d'obtenir une réponse dynamique rapide. Non utilisation des régulateurs PI, ni des transformations de coordonnées du modulateur MLI, ni de découplage entre les composantes du courant. Cependant, cette stratégie de commande donne quelques inconvénients avec la fréquence de commutation variable.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

L'objectif principal de ce travail est d'étudier par la simulation numérique de la commande de génératrice asynchrones double alimentation qui peut être utilisé dans la production de l'énergie éolienne. Nous avons choisi deux stratégies de commande (la commande vectorielle et Commande directe de puissance).

Le premier chapitre, nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits.

Au chapitre deux, nous avons modélisé le système turbine éolienne associer à la MADA, on a pu voir l'intérêt de la transformée de Park qui a permis d'avoir un système d'équation facile à exploiter. Nous avons également exécuté une simulation d'éolienne basée sur MADA avec la commande vectorielle qui est la plus utilise pour produire de l'énergie électrique à partir de turbine éolienne.

Dans la dernière partie, nous abordons une modélisation complète d'un système global de conversion d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation utilisant des stratégies de contrôle direct de la puissance (DPC) qui reposent sur les régulateurs a hystérésis et le table de commutation. Les résultats de simulation obtenus juger de la qualité du contrôle DPC qui permet d'obtenir des performances dynamiques très satisfaisantes. Face à ces constats et aux résultats obtenus, il existe des points de vue intéressants qui peuvent contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la commande DPC de la GADA intègre dans le système éolien :

- Une étude expérimentale du système éolien ave GADA
- Application d'autres algorithmes de modulation GADA tels que la DPC-SVM qui repose sur l'utilisation d'une modulation MLI vectorielle

Annexes

Annexe (A)**1.machine à induction double alimentée :**

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale (P_n)	7.5KW
Résistance statorique (R_s)	0.474 (Ω)
Résistance rotorique (R_r)	0.7614 (Ω)
Inductance mutuelle (M)	0.107 (H)
Inductance statorique (M_s)	0.12 (H)
Inductance rotorique (M_r)	0.122 (H)
Nombre de paires de pôles (P)	2
Tension du réseau utilisé (V)	220 V
Fréquence du réseau (F)	50 Hz

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Paramètre	Valeur numérique
Nombre de pale (B)	3
Diamètre d'une pale (d)	3 m
Gain du multiplicateur (G)	2
Inertie de l'arbre (J_r)	0,5 Kg.m ²
Coefficient de frottement (F)	0.0024 N.m.s/rad

Paramètres du redresseur :

$r= 0.3 \Omega$, $l= 14e-3 H$, $c=2e-3 F$.

Annexe (B)

Calcul des paramètres du régulateur PI [37]

Dans notre travail, nous nous intéressons à la méthode de conception qui est basé sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler. La Figure (B.1) montre un système de réglage de chaque puissance au niveau de stator de la MADA en boucle fermée par un régulateur PI.

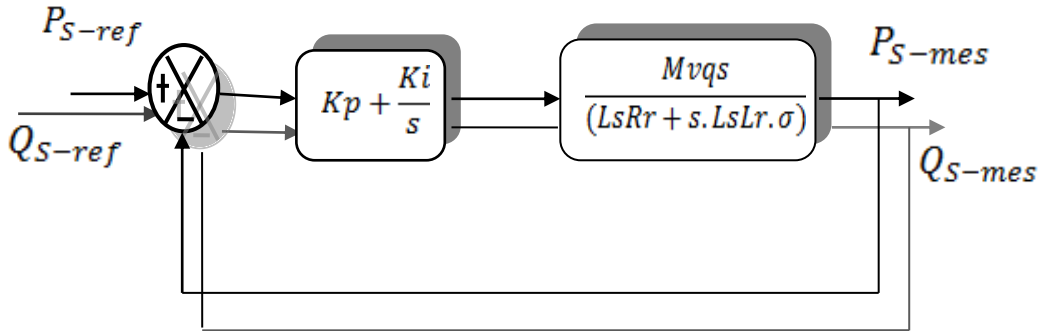


Figure. B.1 : Schéma block du système de régulation des puissances statoriques.

$$\text{Avec} \quad \sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}\right)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (F_{BO}) du système de régulation de la figure (B.1) s'écrit comme suit :

$$F_{BO} = \frac{s + \frac{K_i}{K_P}}{\frac{s}{K_P}} \cdot \frac{\frac{Mv_{qs}}{L_s L_r \sigma}}{\frac{R_r}{L_r \sigma} + s}$$

La méthode de compensation des pôles consiste à éliminer le zéro de la fonction de transfert et ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_P} = \frac{R_r}{L_r \sigma}$$

Après la compensation, on obtient la fonction F_{BO} suivante :

$$F_{BO} = \frac{K_P Mv_{qs}}{L_s L_r \sigma \cdot s}$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante :

$$F_{BF} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}$$

Avec :

$$\tau = \frac{L_s L_r \sigma}{K_p M v_{qs}}$$

τ est le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms :

$$K_p = \frac{L_s L_r \sigma}{\tau M v_{qs}}$$

$$K_i = \frac{R_r L_s}{\tau M v_{qs}}$$

On applique la même méthode sure :



Boucle des courants

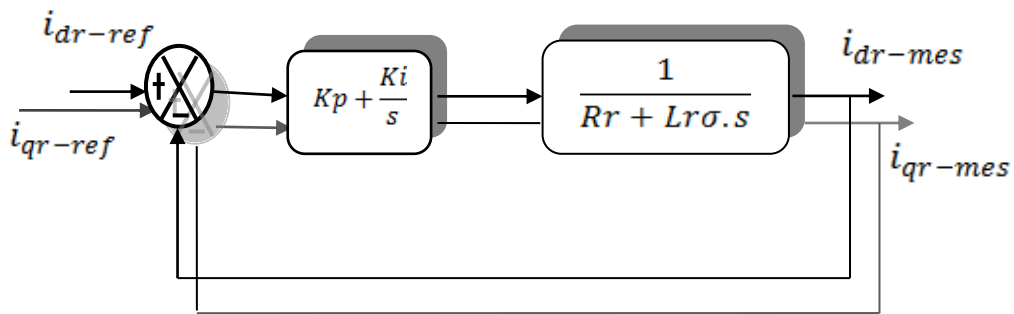


Figure. B.2 : Schéma block du système de régulation des courants rotorique.



Boucle de vitesse

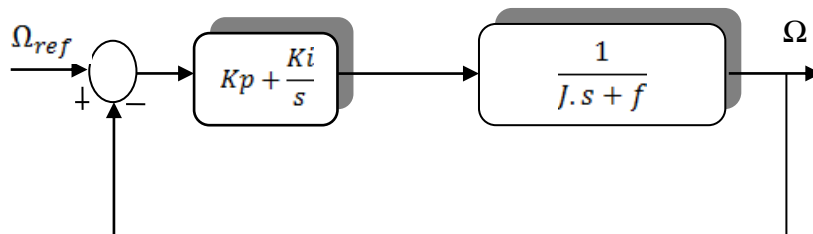


Figure. B.3 : Schéma block du système de régulation de vitesse.

Paramètres du régulateurs PI classique :

<i>Régulateurs des puissances</i>	<i>Régulateurs des courants</i>
$K_P = 710.64$	$K_P = 200$
$K_I = 8894.5$	$K_I = 50$

Références

Références :

- [1] Par Armand BOYETTE « contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, le 11 décembre 2006.
- [2] www.irena.org
- [3] fr.statista.com
- [4] K. MESSAITFA, L'EAU, L'ENERGIE & LE VENT A TRAVERS LA REGION D'ADRAR, DOCUMENT ALGERIE T. CHERGUI (URER/MS) BP 478 ADRAR 01000.
- [5] www.wwea.org
- [6] Globalwindatlas.info
- [7] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-eolienne>
- [8] Ch. Said “Contribution à l’optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaines de conversion d’énergie éolienne ”Thèse de Doctorat de Université Larbi Ben M’hidi-Oum El Bouaghi Juillet 2017.
- [9] B. Beltran, “Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation: du mode glissant classique au mode glissant d’ordre supérieur,” Thèse de Doctorat de l’Université de Bretagne Occidentale, Juillet 2010.
- [10] F. Poitiers, “Etude et commande des génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne: machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau,” Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes, 12/2003.
- [11] <https://www.diwatt.fr/eolienne-verticale.php>
- [12] <https://www.ecosources.org/eolienne-verticale-savonius>
- [13] <http://www.info-eolien.com/eoliennes-horizontal.html>
- [14] <https://www.choisir.com/energie/articles/158984/leolienne-horizontale>
- [15] <https://eolienne.ooreka.fr/comprendre/eolienne-horizontale>
- [16] <https://www.ecosources.org/eolienne-verticale-darrieus>

-
- [17] S. El aimani « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyen tension ». Thèse doctorat, Ecole centrale de lille 2004.
- [18] <http://www.da-engineering.com/mooc/lecon-3-eolienne-2/>
- [19] Z.TIR « Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade » mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [20] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.
- [21] H. BÜHLER, Electronique de puissance, Traité d'électricité, d'électronique et d'électronique, vol XV, 2ème édition Georgi, 1981.
- [22] H. BÜHLER, Electronique de réglage et de Commande, Traité d'électricité, d'électronique et d'électronique, vol XVI, édition Georgi, 1979.
- [23] J. L DALMASSO, Electronique de puissance Commutation, édition Belin, 1986.
- [24] A. BOYETTE, Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec un système de stockage pour la production Eolienne, Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [25] MOUSSA SIDDO Abdoulaziz « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne ». Diplôme d'Ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique 2007.
- [26] L. khettache, "Étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation", mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.
- [27] L. khettache, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine.
- [28] F. BLASHKE, The principle of field-orientation as applied to the Trans vector closed-loop control system for rotating-field machines 'in Siemens Revue 34, 1972, pp. 217–220.
- [29] B. toual "Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable" thèse de magister de l'Université de Batna ,2010.
- [30] N. Cherfia, "conversion d'énergie produite par des Générateurs éoliens", thèse de Magister, Université Mentouri - Constantine.

-
- [31] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, B 8 585 1- B 8 585 21.
- [32] Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Robar, Stéphan Astier, Brayima Dakyo, Cristian Nichita. État de l'art dans les aérogénérateurs électriques, 2002.
- [33] Y. Elbia, "Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté," Thèse de magister de l'université de Batna, 2009.
- [34] F. merrahi, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)" thèse de magister de l'Ecole Nationale polytechnique, 2007.
- [35] M. Bouaraki "Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF", thèse de magister de l'université M'hamedbougara, boumardas, 2011.
- [36] N. abu-tabak. « Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation ». Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon 2008.
- [37] F. Poitier, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [38] L. BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [39] S Metatla, " Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une mada", thèse de Magister Ecole nationale polytechnique d'Alger 2009.
- [40] Paul-Etienne V., " Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation," Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [41] B. Beltran, "contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrice Asynchrone Double alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode glissant D'ordre supérieur "thèse de Doctorat Université de Bretagne Occidentale, 2010.
- [42] HASSAD Mohamed Amine : « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux « électriques » Thèse de Magister, Sétif 2012.

- [43] C. BELFEDAL « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne- Etude et Expérimentation – » Thèse de doctorat, Université d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2007.
- [44] R. Datta, V.T. Ranganathan, « Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors »; In: IEEE Trans. Power Electron., Vol.16, No.3, May 2001, pp.390-399.
- [45] E. Tremblay, « Contribution à la commande de l'éolienne a MADA en permettant l'amélioration de la qualité de l'onde du réseau électrique »; M. ING, ETS (QC), Montréal, Canada, Janvier 2009.
- [46] Pena, R., Clare, J. C., Asher, G. M. “A doubly fed induction generator using back to back converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine”. In: IEE Proceeding on Electrical Power Applications 143 (September (5)) 1996.
- [46] Y. Djeriri, A. Meroufel, A. Massoum and Z. Boudjema, « A comparative study between field oriented control strategy and direct power control strategy for DFIG »; Journal of Electrical Engineering, JEE, Romania, ISSN 1582-4594, Vol.14, No.2, pp.169-168, June 2014.
- [47] Y. Djeriri, A. Meroufel, A. Massoum and Z. Boudjema, « Direct power control of a doubly fed induction generator based wind energy conversion systems including a storage unit »; Journal of Electrical Engineering, JEE, Romania, ISSN 1582- 4594, Vol.14, No.1, pp.196-204, March 2014.
- [48] A. Moualdia, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2014.
- [49] E. Tremblay, S. Atayde, A. Chandra, « Comparative Study of Control Strategies for the Doubly Fed Induction Generator in Wind Energy Conversion Systems: A DSP Based Implementation Approach »; IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol.2, No.3, pp.288-299, July 2011.
- [50] L. Xu, P. Cartwright, « Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation »; IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.2, No.3, pp.750-758, September 2006.