

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierie
Département : Electrotechnique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Production de l'énergie par éolienne

Présenté par : *Boumaiza Chaouki*
Kheroufi Ahmed

Encadrant : *Bouchikha Hocine* MCB BADJI Mokhtar - Annaba

Jury de Soutenance :

Omeiri Amar	Professeur	BADJI Mokhtar - Annaba	Président
Bouchikha Hocine	MCB	BADJI Mokhtar - Annaba	Encadrant
Kelaiaia Samia	MCB	BADJI Mokhtar - Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

ملخص

إن مصادر الطاقات في المناطق المعزولة والمحرومة المتجددة، التي تمكننا من إنتاج الطاقة الكهربائية، تؤدي إلى حل مشاكل توزيع الكهرباء من كل مصادر الطاقة، وتحسين مستواهم المعيشي. في هذه المذكرة قمنا بدراسة سلسلة لتحويل طاقة الرياح والتي تعتمد على مبدأ العنبر غير متزامنة ذات تغذية مزدوجة في منطقة معزولة. في البداية قمنا بمحاكات النموذج لكل طابق من السلسلة المقترحة لمختلف المكونات لهذه السلسلة كذلك إيصال المكونات لتشكيل هذا النموذج الكامل بواسطة نظام برمجة يدعى Simulink/MATLAB. إن النتائج المتحصل عليها تسمح لنا بتحليل سلوك النظام الذي يعطينا كل المعلومات من أجل وضع نظام تحكم ومراقبة دقيقة.

Résumé

Les sources d'énergie renouvelable, qui permettent une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus sont dépourvus de toutes sources énergétiques, qui peuvent au moins subvenir ou satisfaire leur besoin énergétique même minime et améliorer ainsi leurs conditions de vie.

Ce mémoire traite la simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation destiné à un site isolé. Dans un premier temps, un modèle de chaque étage de la chaîne de conversion est proposé. Les différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet qui est implémenté dans l'environnement MATLAB-Simulink. Les résultats de simulation obtenus ont permis d'analyser le comportement du dispositif éolien et ont fournis des informations pouvant être utiles à la mise en œuvre d'un système de commande et de contrôle adéquat.

Abstract

Renewable energy, allows a decentralized electrical energy production, which contributes to the solution of supplying isolated area with the necessary energy.

This memory calls the simulation of a wind energy conversion chains to basis a machine asynchronous double-fed for an isolated site. In a first time, a model of every floor constituting the chain of conversion is proposed. The different constituent of the chains of conversion are then connected between them in order to form the complete model that is implement in the Matlab environment. The results of simulation gotten permit to analyze the behaviour of the wind device and provide some information capable to be useful to the setting in work of a system of order and appropriate control.

Remerciements

Avant tout, Nous tenons à remercier surtout le bon Dieu, le tout puissant pour le courage, la volonté, la patience et la santé qu'il nous a offert durant toutes ces années d'études. Ce qui nous a permis de supporter et de surpasser toutes les difficultés et mener à bien ce travail. Nous voudrions remercier notre enseignant et encadreur Dr. Bouchikha Hocine pour ses conseils avérés, sa patience et ses suggestions.

Nous tenons à remercier le jury, qui nous a fait l'honneur D'avoir 'accepter de juger et apprécier ce mémoire de fin d'étude.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes très chers adorables parents
pour leurs soutien moral et financier, pour leurs
encouragements et pour les sacrifices qu'ils ont endurés
dans les moments les plus ardues pour nous permettre de poursuivre nos
études et nous facilité la vie.

A mes frères

A mes sœurs

Et à toute la famille Boumaiza et Mazouzi

Et mes amis.

A tous mes collègues de la promotion 2021.

Chaouki

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes très chers et adorables parents
pour leurs soutien moral et financier, pour leurs
encouragements et pour les sacrifices qu'ils ont endurés
dans les moments les plus ardues pour nous permettre de poursuivre nos
études et nous facilité la vie.

A mes frères

A mes sœurs

Et à toute la famille kheroufi et Mazouzi

Et mes amis.

A tous mes collègues de la promotion 2021.

Ahmed

Table des matières

LISTE DES SYMBOLES
TABLE DES FIGURES ET LISTE DES TABLEAUX
INTRODUCTION GENERAL

Chapitre I : état de l'art de l'énergie éolienne

<u>I.1 INTRODUCTION</u>	11
<u>I.2 GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS</u>	11
<u>I.2.1 D'OU VIENT LE VENT</u>	11
<u>I.2.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE</u>	11
<u>I.2.3 DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE EOLIENNE</u>	11
<u>I.2.4 TAILLE DES EOLIENNES</u>	12
<u>I.2.5 LES DIFFERENTS TYPES DES EOLIENNES</u>	13
<u>I.2.5.1 Les éoliennes à axe vertical</u>	13
<u>I.2.5.2 Les éoliennes à axe horizontal</u>	14
<u>I.2.6 EMLACEMENT DES PARCS EOLIENS</u>	16
<u>I.3 GENERALITES SUR LES MACHINES ELECTRIQUES DEDIEES A LA PRODUCTION EOLIENNE</u>	17
<u>I.3.1 CLASSIFICATION DES MACHINES ELECTRIQUES</u>	17
<u>I.3.1.1 Les moteurs électriques</u>	17
<u>I.3.1.2 Les génératrices électriques</u>	19
<u>I.3.1.3 Les transformateurs</u>	19
<u>I.4 LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION</u>	20
<u>I.4.1 STRUCTURE DE LA MADA</u>	20
<u>I.4.2 CONFIGURATION DES SYSTEMES EOLIENS BASES SUR LA MADA</u>	21
<u>I.4.2.1 Structure de Kramer de la MADA</u>	21
<u>I.4.2.2 Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur de la MADA</u>	21
<u>I.4.2.3 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI de la MADA</u>	22
<u>I.4.3 LES APPLICATIONS DE LA MADA</u>	22
<u>I.4.4 LES DIFFERENTS MODES DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA</u>	23
<u>I.4.4.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone</u>	23
<u>I.4.4.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone</u>	23
<u>I.4.4.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone</u>	23
<u>I.4.4.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone</u>	23
<u>I.4.4.5 Plage de variation de la vitesse de la MADA</u>	24
<u>I.4.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA</u>	25
<u>I.4.5.1 Avantages de la MADA</u>	25
<u>I.4.5.2 Inconvénients de la MADA</u>	26
<u>I.5 LA MACHINE SYNCHRONE</u>	26
<u>I.5.1 STRUCTURE DE LA MACHINE SYNCHRONE</u>	26
<u>I.5.2 CONFIGURATION D'UN SYSTEME EOLIEN BASE SUR LA MACHINE SYNCHRONE</u>	26
<u>I.5.3 LES TYPES DES MACHINES SYNCHRONES</u>	27
<u>I.5.3.1 Machines à pôles saillants</u>	27
<u>I.5.3.2 Machines à pôles lisses</u>	28
<u>I.5.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MACHINE SYNCHRONE</u>	28
<u>I.5.4.1 Avantages de la machine synchrone</u>	28
<u>I.5.4.2 Inconvénients de la machine synchrone</u>	28
<u>I.6 LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT</u>	29
<u>I.6.1 STRUCTURE DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANT PERMANENT</u>	29
<u>I.6.2 CONFIGURATION D'UN SYSTEME EOLIEN BASE SUR LA MSAP</u>	29
<u>I.6.3 LES AIMANTS PERMANENTS</u>	30

<u>I.6.3.1</u>	<u>Définition des aimants permanents</u>	30
<u>I.6.3.2</u>	<u>Aperçu sur l’historique des aimants</u>	30
<u>I.6.3.3</u>	<u>Propriété des aimants permanents</u>	30
<u>I.6.4</u>	<u>PRESENTATION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MSAP</u>	31
<u>I.6.4.1</u>	<u>Présentation de la MSAP</u>	31
<u>I.6.4.2</u>	<u>Principe de fonctionnement de la MSAP</u>	31
<u>I.6.4.3</u>	<u>Domaines d’application de la MSAP</u>	31
<u>I.6.5</u>	<u>AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MSAP</u>	32
<u>I.6.5.1</u>	<u>Avantages de la MSAP</u>	32
<u>I.6.5.2</u>	<u>Inconvénients de la MSAP</u>	33
<u>I.7</u>	<u>CONCLUSION</u>	33

Chapitre II : Modulisat

<u>II.1</u>	<u>INTRODUCTION</u>	35
<u>II.2</u>	<u>MODELE DU VENT</u>	35
<u>II.3</u>	<u>CONVERSION DE L’ENERGIE EOLIENNE</u>	37
<u>II.3.1</u>	<u>CONVERSION DE L’ENERGIE CINETIQUE DU VENT EN ENERGIE MECANIQUE</u>	37
<u>II.3.2</u>	<u>LOI DE BETZ</u>	38
<u>II.3.3</u>	<u>COEFFICIENT DE PUISSANCE</u>	39
<u>II.3.4</u>	<u>LA VITESSE SPECIFIQUE OU NORMALISEE [TIP-SPEED-RATIO]</u>	41
<u>II.3.5</u>	<u>COEFFICIENT DE COUPLE</u>	41
<u>II.3.6</u>	<u>PRODUCTION D’ENERGIE MECANIQUE</u>	42
<u>II.3.7</u>	<u>L’ANGLE D’INCLINAISON (BLADE PITCH ANGLE)</u>	43
<u>II.3.8</u>	<u>EFFORT SUR UNE PALE D’EOLIENNE</u>	45
<u>II.3.9</u>	<u>RELATION DU COEFFICIENT DE PUISSANCE AVEC L’ANGLE DE CALAGE ET LA VITESSE RELATIVE</u>	46
<u>II.4</u>	<u>POURSUIITE DU POINT DE MAXIMUM DE PUISSANCE (MAXIMAL POWER POINT TRACKING, MPPT)</u>	46
<u>II.5</u>	<u>PRODUCTION OPTIMALE D’ENERGIE</u>	47
<u>II.6</u>	<u>MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN</u>	49
<u>II.6.1</u>	<u>PRESENTATION DU SYSTEME</u>	49
<u>II.6.2</u>	<u>HYPOTHESE SIMPLIFICATRICES POUR LA MODELISATION DE LA TURBINE</u>	49
<u>II.6.3</u>	<u>MODELISATION DE LA TURBINE</u>	50
<u>II.6.3.1</u>	<u>Modèle du multiplicateur</u>	51
<u>II.6.3.2</u>	<u>Equation dynamique de l’arbre</u>	51
<u>II.7</u>	<u>CONCLUSION</u>	53

Chapitre III : Modulisat

<u>III.1</u>	<u>INTRODUCTION</u>	55
<u>III.2</u>	<u>MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION</u>	55
<u>III.2.1</u>	<u>HYPOTHESE SIMPLIFIEES</u>	56
<u>III.2.2</u>	<u>MODEL DE MADA DANS LE REPERE ABC</u>	56
<u>III.2.2.1</u>	<u>Equation électrique</u>	56
<u>III.2.2.2</u>	<u>Equation magnétique :</u>	58
<u>III.2.2.3</u>	<u>Equation mécanique :</u>	59
<u>III.3</u>	<u>MODEL DE MADA DANS LE REPERE DE PARK :</u>	59
<u>III.3.1</u>	<u>TRANSFORMATION DE PARK</u>	60
<u>III.3.2</u>	<u>EQUATION ELECTRIQUE :</u>	62

<u>III.3.3</u>	<u>EQUATION MAGNETIQUE :</u>	63
<u>III.3.4</u>	<u>EXPRESSION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE :</u>	65
<u>III.3.5</u>	<u>EQUATION MECANIQUE :</u>	65
<u>III.4</u>	<u>MODELE DE LA MADA SOUS FORME D'EQUATION D'ETAT</u>	65
<u>III.5</u>	<u>MODELISATION DU SYSTEME DE L'ALIMENTATION DE LA MADA</u>	67
<u>III.5.1</u>	<u>MODELISATION DU REDRESSEUR TRIPHASE A DIODE</u>	68
<u>III.5.2</u>	<u>MODELISATION DU FILTRE :</u>	69
<u>III.5.3</u>	<u>MODELISATION DE L'ONDULEUR DE TENSION</u>	70
<u>III.5.4</u>	<u>LE PRINCIPE DE LA COMMANDE MLI</u>	73
<u>III.6</u>	<u>CONCLUSION</u>	75

Chapitre IV : Simulation de la chaîne de production d'énergie éolienne

<u>IV.1</u>	<u>INTRODUCTION</u>	77
<u>IV.2</u>	<u>SIMULATION DE LA CHAINE GLOBALE</u>	77
<u>IV.2.1</u>	<u>MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION</u>	78
<u>IV.2.2</u>	<u>ONDULEUR</u>	78
<u>IV.2.3</u>	<u>LA COMMANDE MLI</u>	79
<u>IV.3</u>	<u>RESULTATS DE SIMULATION</u>	80
<u>IV.3.1</u>	<u>RESULTATS DE SIMULATION POUR UNE VITESSE DE VENT 5 M/S</u>	82
<u>IV.3.2</u>	<u>RESULTATS DE SIMULATION POUR UNE VITESSE DE VENT 10 M/S</u>	84
<u>IV.3.3</u>	<u>RESULTATS DE SIMULATION POUR UNE VITESSE DE VENT 20 M/S</u>	87
<u>IV.4</u>	<u>CONCLUSION</u>	90

CONCLUSION GENERAL

ANNEXE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

P_n	Puissance nominale de la turbine [W].
V_n	Vitesse de vent nominale [m/s].
V_m	Vitesse de vent maximale [m/s].
β	Angle de calage des pales [°].
R	rayon de l'aérogénérateur ou la longueur des pales [m].
G	Gain du multiplicateur de vitesse.
P_v	Puissance du vent [W]
ρ	Masse volumique de l'air [approximativement 1,225 kg/m]
S	Surface décrite par les pales de l'éolienne en rotation [m ²]
λ	Rapport de vitesse.
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine [rad/s].
C_p	Coefficient de puissance.
P_{aer}	Puissance aérodynamique extraite par la turbine [W].
C_t	Couple aérodynamique [N.m].
J_t	Moment d'inertie de la turbine [Kg.m ²].
J_m	Moment d'inertie de la MADA [Kg.m ²].
f_v	Coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA [N.m/rad/s].
C_m	Couple mécanique sur l'arbre de la MADA [N.m].
Ω_m	Vitesse de rotation de la MADA [rad/s].
J	Inertie totale [Kg.m ²].
C_{em}	Couple électromagnétique de la MADA [N.m].
v_{est}	Vitesse du vent estimé [m/s].
V_s	Tension statorique [V].
V_r	Tension rotorique [V].
Φ_s	Flux statorique [Wb].
Φ_r	Flux rotorique [Wb].
I_s	courant rotorique [A].
I_r	Courant rotorique [A].

R_s	Résistance statorique [Ohm].
R_r	Résistance rotorique [Ohm].
l_s	Inductance cyclique statorique [mH].
l_r	Inductance cyclique rotorique [mH].
M_{sr}	Inductance mutuelle stator-rotor [mH].
M_s	Inductance mutuelle entre phases statorique [mH].
M_r	Inductance mutuelle entre phases rotorique [mH].
p	Nombre de paires de pôles.
ϑ	Angle de transformation de Park.
V_{ds}, V_{qs}	Composantes diphasées des tensions statoriques [V].
V_{dr}, V_{qr}	Composantes diphasées des tensions rotoriques [V].
I_{ds}, I_{qs}	Composantes diphasées des courants statoriques [A].
I_{dr}, I_{qr}	Composantes diphasées des courants rotoriques [A].
Φ_{ds}, Φ_{qs}	Composantes diphasées des flux statoriques [Wb].
Φ_{dr}, Φ_{qr}	Composantes diphasées des flux rotoriques [Wb].
ω_s	Pulsation du champs statorique [rad/s].
ω_r	Pulsation du champs rotorique [rad/s].
s	Opérateur de Laplace.
P_s	Puissance active statorique de la MADA [W].
Q_s	Puissance reactive statorique de la MADA [Var].

TABLE DES FIGURES

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART ET GENERALITES SUR LES EOLIENNES

Figure I.1 Evolution mondiale de l'énergie éolienne	12
Figure I.2 Correspondance entre la taille et la puissance produite par les éoliennes.	13
Figure I.3 Différents types d'éoliennes à axe vertical	14
Figure 1.4 Différents types d'éoliennes à axe horizontal.	15
Figure I.5 Eoliennes devant et derrière le vent	15
Figure I.6 Différents parcs éoliens.	17
Figure I.7 Schéma simplifié du moteur asynchrone	18
Figure I.8 Schéma simplifié du moteur synchrone	18
Figure I.9 Schéma simplifié du moteur à courant continu	19
Figure I.10 Schéma simplifié du dynamo	19
Figure I.11 Schéma simplifié d'alternateur	19
Figure I.12 Schéma simplifié du transformateur	20
Figure I.13 Structure de Kramer de la MADA d'un système éolien	21
Figure I.14 Structure de Scherbius à base de cyclo-convertisseur d'un système éolien	21
Figure I.15 Structure de Scherbius à base de convertisseurs MLI d'un système éolien	22
Figure I.16 Les différents modes de fonctionnement de la MADA	24
Figure I.17 Plages de variation de la vitesse de la MADA	25
Figure I.18 Système éolien basé sur la génératrice synchrone	27
Figure I.19 Types des rotors de la machine synchrone à rotor bobiné	27
Figure I.20 Système éolien basé sur la génératrice synchrone à aimant permanent	30
Figure I.21 Courbe de désaimantation.	31

CHAPITRE II

MODULISATION DE LA TURBINE EOLIENNE

Figure II.1 Simulation du profil de la vitesse du vent	36
Figure II.2 Colonne d'air animée d'une vitesse v	37
Figure II.3 Tube de courant autour d'une éolienne	38
Figure II.4 Coefficient de puissance	40
Figure II.5 Exemple de variation du coefficient de puissance en fonction de l'angle d'orientation des pales et de la ration de vitesse	40
Figure II.6 Vitesse de vent V et vitesse tangentielle de l'aubage	41
Figure II.7 Puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent	42
Figure II.8 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné	43
Figure II.9 Eléments caractéristiques d'une pale	44
Figure II.10 Directions du vent sur un tronçon de pale	45
Figure II.11 Forces appliquées sur un tronçon de pale	45
Figure II.12 caractéristiques $C_p=f(\lambda)$ pour sept valeurs de β	46
Figure II.13 Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent	47
Figure II.14 Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable	48
Figure II.15 interface d'électronique de puissance	48
Figure II.16 Modèle mécanique simplifié de la turbine	49
Figure II.17 schéma de la turbine éolienne.	50
Figure II.18 Organigramme de simulation de la turbine éolienne	51
Figure II.19 Schéma bloc d'une turbine éolienne à vitesse variable.	52

CHAPITRE III

MODULISATION DE LA MADA ET DES CONVERTISSEURS STATIQUES

Figure III.1 Représentation schématique de la machine asynchrone double alimentée	55
---	----

Figure III.2 circuit équivalent de la phase <i>_a_</i> du stator d'une machine asynchrone	56
Figure III.3 transformation de Park	60
Figure III.4 Schéma synoptique proposé pour l'alimentation de la machine	68
Figure III.5 Schéma d'un redresseur triphasé double alternance à diodes	68
Figure III.6 Représentation de la tension redressée	69
Figure III.7 Représentation du filtre RLC	70
Figure III.8 Schéma de l'onduleur de tension	71
Figure III.9 Modèle sous Simulink de l'onduleur triphasé	73
Figure III.10 Signaux de comparaison (référence et porteuse)	74
Figure III.11 Impulsion de commande du premier transistor	74
Figure III.12 Tension composée de sortie de l'onduleur (V)	74

CHAPITRE IV

SIMULATION DE LA CHAÎNE DE PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Figure IV.1 schéma bloc de la chaîne de conversion (MATLAB-Simulink)	77
Figure IV.2 Schéma bloc Machine asynchrone double alimentation.	78
Figure IV.3 Modèle de l'onduleur de tension.	79
Figure IV.4 Modèle de la commande MLI à porteuse triangulaire	79
Figure IV.5 résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique »	80
Figure IV.6 résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique »	80
Figure IV.7 résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique »	81
Figure IV.8 résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive »	81
Figure IV.9 résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique pour $V=5\text{m/s}$ »	82
Figure IV.10 résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour	

V=5m/s »	83
Figure IV.11 résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour V=5m/s »	83
Figure IV.12 de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive statorique pour V=5m/s »	84
Figure IV.13 résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse m mécanique pour V=10m/s »	84
Figure IV.14 résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour V=10m/s »	85
Figure IV.15 résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour V=10m/s »	85
Figure IV.16 résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive statorique pour V=10m/s »	86
Figure IV.17 résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse m mécanique pour V=20m/s »	87
Figure IV.18 résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour V=20m/s »	87
Figure IV.19 résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour V=20m/s »	88
Figure IV.20 résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive statorique pour V=20m/s »	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Classification des turbines éoliennes	16
Tableau III.1 : les Tensions et les flux du MADA dans le repère de Park	65
Tableau III.2 : Etablissement des expressions des tensions simples et composées	72

Introduction général

Introduction général

Face à une demande croissante d'énergie et à l'épuisement à plus ou moins long terme des énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Suite aux crises pétrolières, certains pays ont mené une politique orientée vers le nucléaire alors que d'autres ont massivement utilisé les énergies renouvelables avec l'adoption de l'éolien. 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. D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel. Pour subvenir aux besoins 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'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui, éventuellement, pourraient être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont assurés. Les types de modèles utilisés dans le domaine des énergies nombreux, parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : les énergies renouvelables sont d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...). Pendant des siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique. L'exemple le plus connu est le moulin à vent. En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batteries. La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il aura vendu 72 exemplaires en 1908.

En raison de la nature fluctuante du vent, l'éolien ne peut être considéré que comme une source d'énergie de complément et non de remplacement des solutions classiques. Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. L'Allemagne est aujourd'hui le premier producteur mondial avec une production de 14.6 GW en 2003, l'Espagne est au deuxième rang avec 6.4 GW, les USA au troisième rang avec 6.3 GW et le Danemark au quatrième rang avec 3.1 GW. La France est au dixième rang européen avec 0.253 GW. L'Union

Européenne avec 4,15 GW. En Algérie, on a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s, voir carte des vents). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux.

Pour le site de Tamanrasset, le potentiel éolien étant très faible alors que le potentiel solaire semble plus satisfaisant. Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des plus prometteuse avec dans notre pays.

- Une généralité et état de l'art sur les systèmes éoliens est présentée dans le premier chapitre.
 - Le second chapitre comporte la modélisation de la turbine de l'éolienne.
 - Le troisième chapitre en présente la modélisation de la MADA et des convertisseurs statiques.
 - En suit dans le quatrième chapitre nous donnons les résultats de simulation en utilisant une machine asynchrone double alimentation.
 - Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale suivie de quelques perspectives envisagées dans nos travaux futurs.
-

Chapitre I

Etat de l'art de l'énergie éolienne

I.1 INTRODUCTION

Depuis longtemps, l'homme utilise l'énergie éolienne. Au début, cette énergie est utilisée pour faire avancer les bateaux, moulin à vent ou pomper de l'eau. Par la suite pendant plusieurs décennies l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique, que ce soit à l'échelle individuelle avec les petites éoliennes ou à grande échelle avec les grandes éoliennes. L'énergie du vent peut contribuer à diversifier la production d'énergie électrique, en outre. Elle est aussi une énergie propre, renouvelable et peut pallier aux problèmes environnementaux. Plusieurs technologies comme les présentes ce chapitre sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes.

I.2 GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLIENS

I.2.1 D'où vient le vent

Le vent est formé par le mouvement des masses d'air qui est du indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie.

Cette énergie propre et renouvelable, elle est utilisée depuis plus de 3000 ans [1], elle est utilisée pour la production d'électricité depuis 100 ans [2].

I.2.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement d'une éolienne est simple, il est basé sur le bénéfice du mouvement linéaire du vent pour faire tourner des pales des turbines afin de transformer l'énergie cinétique rotationnelle en un couple en tournant le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

L'électricité est dirigée à la suite vers le réseau électrique ou vers les batteries de stockage d'électricité [3].

I.2.3 Développement de l'énergie éolienne

La demande croissante en énergie électrique dans le monde, le problème du réchauffement climatique et les émissions de gaz à effet de serre sont des vérités qui ont fait de l'énergie éolienne une source d'énergie alternative et durable, pour les dernières années

L'énergie électrique basée sur l'éolienne est considérablement développée de manière très remarquable, la capacité mondiale a atteint d'un plus de 650GW.

Depuis 2018, la croissance de capacité éolienne cumulée mondiale est a atteint de 9.17 %.

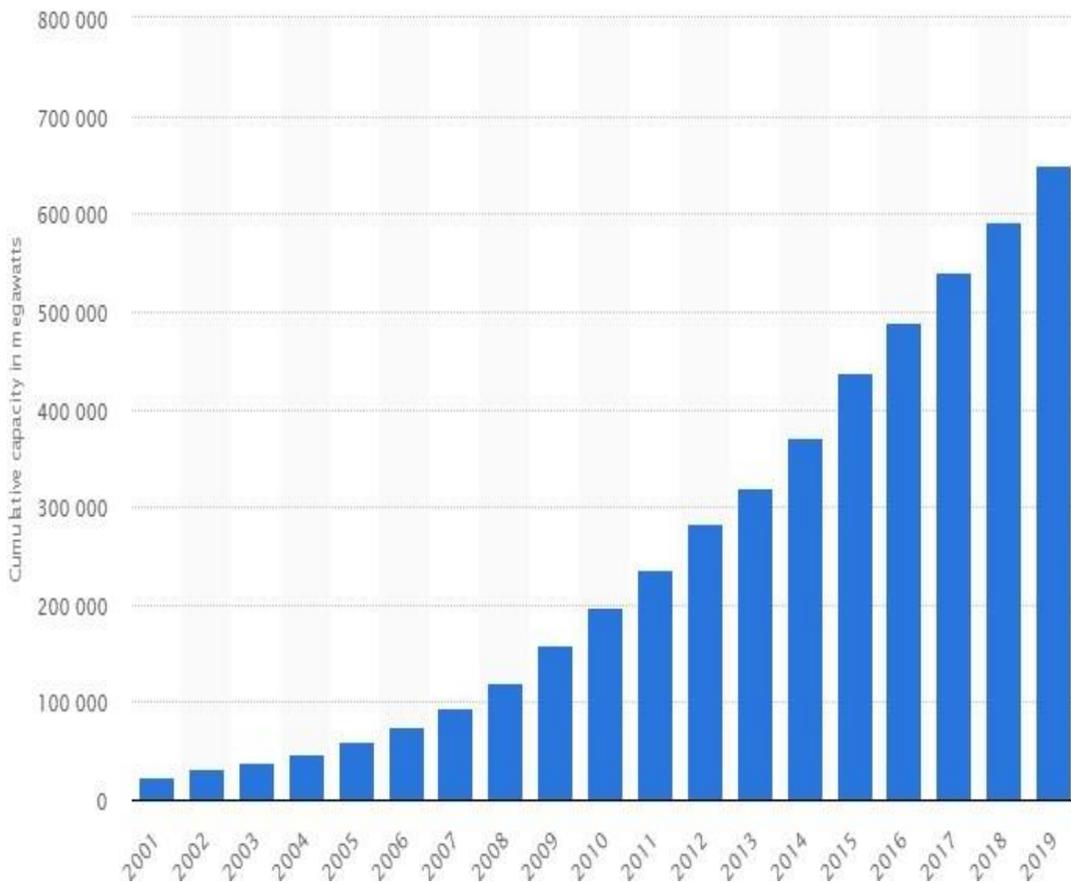


Fig.I.1 Evolution mondiale de l'énergie éolienne [4].

I.2.4 Taille des éoliennes

Pour satisfaire et répondre à la demande croissante de l'énergie électrique, les constructeurs et les chercheurs ont mis le point sur la taille des éoliennes, et cela pour pouvoir utiliser le maximum de la force du vent, tout en cherchant à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est le maximum. La figure (1.2) présente la taille des hélices en (m) et la puissance en (kW) qu'on peut trouver sur le marché des éoliennes. Actuellement, les grandes éoliennes commercialisées possèdent une hélice de plus de 80m. Donc elle est perchée en haut à plus de 80m de hauteur pour produire des puissances de 2.5MW.

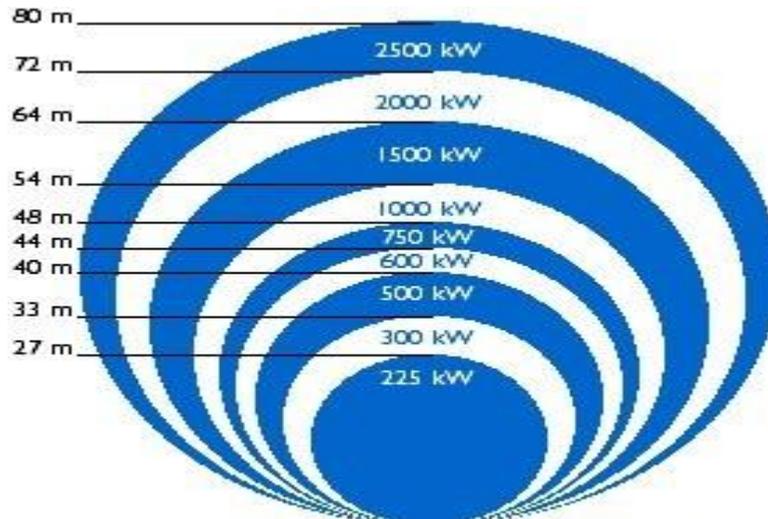


Fig.I.2 Correspondance entre la taille et la puissance produite par les éoliennes [5].

I.2.5 Les différents types des éoliennes

Généralement deux types des éoliennes qui sont les plus utilisés dans le monde : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître et les éoliennes à axe horizontal sont utilisées surtout pour le pompage et la production de l'énergie électrique.

I.2.5.1 Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éoliennes (Fig.I.3) est très peu répandu, les éoliennes à axe vertical ont été les premières éoliennes utilisées pour la production d'électricité ce type présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder tous les organes (partie commande, le multiplicateur et générateur) au niveau du sol.

Donc facilement accessibles, ce qui facilite les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage (mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques), ce qui pousse les constructeurs à de plus en plus à abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) [6], la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose des turbulences et des gradients de vent, ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent [7]. Ce qui concerne leur implantation, elles occupent une surface très importante cela est un grand inconvénient surtout dans les sites agricoles.

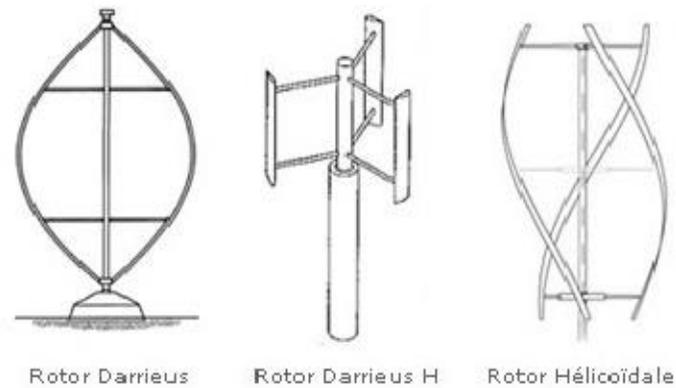


Fig I.3 Différents types d'éoliennes à axe vertical [8].

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus.

- Le rotor de Savonius : (du nom de son inventeur, breveté en 1925) : Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de "trainée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur ;
- Le rotor de Darrieus : inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1925 - 1935 repose sur l'effet de la portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre types de rotor de Darrieus : le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique [9].

I.2.5.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales qui sont les plus courantes et les multiples. La caractéristique de puissance $C_p(\lambda)$ dépend principalement du nombre des pales (Fig I.4).

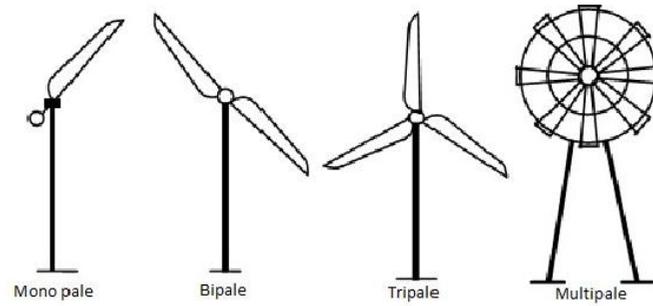


Fig.I.4 Différents types d'éoliennes à axe horizontal.

À dimension d'hélice identique, les éoliennes à axe horizontal produisent plus de puissance par rapport aux éoliennes à axe vertical.

Ces capteurs à axe horizontal occupent une surface au sol très réduite, par rapport aux capteurs à axe vertical, seule la tour qui occupe de la place au sol et regroupe tous les systèmes de raccordement. De plus, leur efficacité énergétique est beaucoup meilleure [10].

La voilure peut être placée avant la nacelle (upwind) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (downwind). Dans ce cas, la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont assez rares, car des vibrations importantes sont à noter dues au passage des pales derrière le mat, la (Fig I.5) montre les deux procédés.

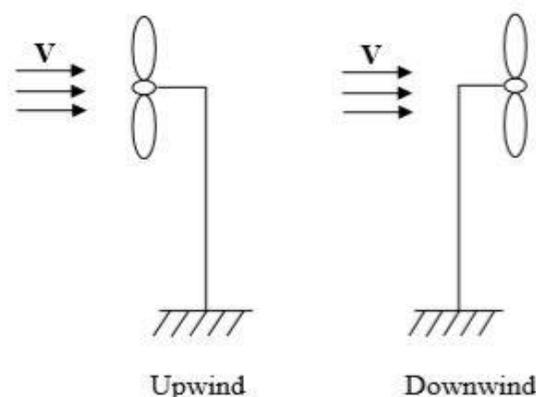


Fig.I.5 Eoliennes devant et derrière le vent.

Le (tableau I.1) suivant présente une classification des turbines éolienne selon leur puissance délivrée :

Tableau I.1 Classification des turbines éoliennes [2]		
Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40Kw
Moyenne	12m à 45m	De 40kW à 999Kw
Grande	46m et plus	1MW et plus

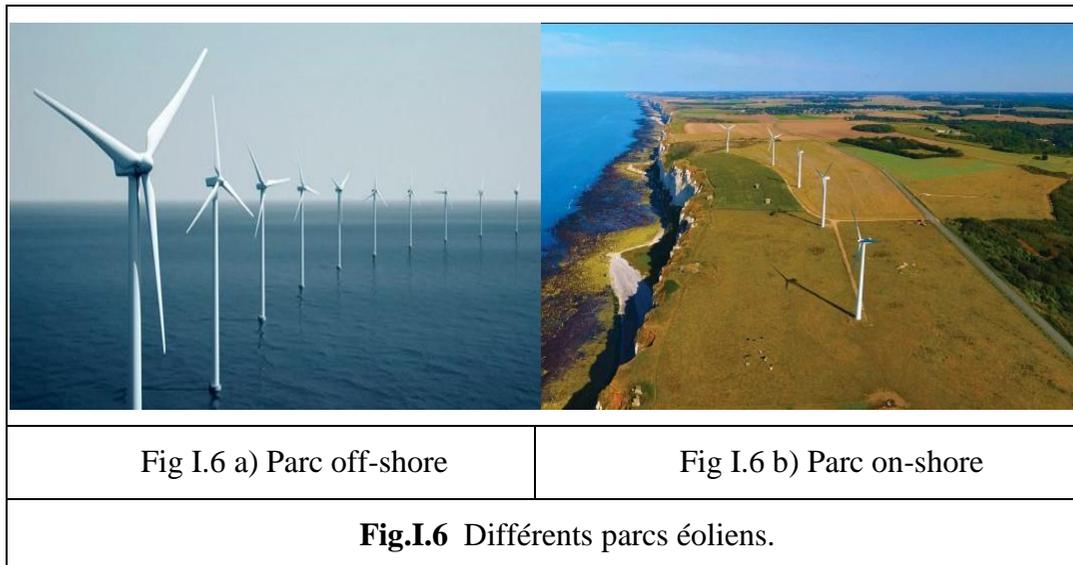
I.2.6 Emplacement des parcs éoliens

Le vent est un phénomène aléatoire, sa vitesse varie d'une journée à une autre, d'une saison à une autre, et d'une région à une autre. Cela est dû aux phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire, la vitesse moyenne du vent varie peu la nuit et augmente pendant la journée à partir du lever de soleil [11]. Les variations mensuelles et saisonnières de la vitesse du vent dépendent du lieu géographique et sont différentes d'un site à un autre.

Le choix de remplacement des parcs est basé donc sur la recherche des sites où il y a un niveau du vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Généralement, les côtes de mers et les plateaux offrent des caractéristiques intéressantes pour remplacement des aérogénérateurs. Ce pendant une question qui se pose dont il faut tenir compte est celle de l'impact de ces parcs sur le paysage, l'éolien off-shore à sembler une solution.

L'éolien off-shore semble une solution pour éviter la dégradation du paysage causée par l'installation des parcs éoliens on-shore (Fig I.6). L'éolien off-shore offre aussi des conditions très intéressantes en termes de vent. La première ferme offshore mise en service était en 1991 en mer baltique sur les côtés du Danemark, les installations éoliennes en Europe totalisaient fin 2019 une puissance de 191GW dont près de 22GW en offshore [12].

Pour la réalisation de ces fermes éoliennes, en off-shore, les mâts sont montés sur des fondations ancrées dans le fond, mais lorsque l'on s'éloigne des côtes, il devient difficilement de conserver ces moyens.



I.3 GENERALITES SUR LES MACHINES ELECTRIQUES DEDIEES A LA PRODUCTION EOLIENNE

Le but essentiel des machines électriques est la transformation de l'énergie d'une forme à une autre, l'une au moins de ces formes étant électrique, l'autre pouvant être électrique ou mécanique. Les machines électriques font intervenir comme éléments fondamentaux à base des grandeurs essentiels comme les courants électriques et les champs magnétiques.

I.3.1 Classification des machines électriques

On peut, a priori, classer les machines électriques en trois catégories principales [13] :

I.3.1.1 Les moteurs électriques

Les moteurs sont les machines qui transforment l'énergie électrique vers une autre mécanique. Leur fonctionnement est basé sur l'obtention d'un effort mécanique par action d'un champ magnétique sur un circuit électrique traversé par un courant électrique.

La machine sera appelée par la forme de courant d'alimentation

- **Moteur à courant alternatif**
- Machine asynchrone (Fig.I.7)

– Machine synchrone (Fig.I.8)

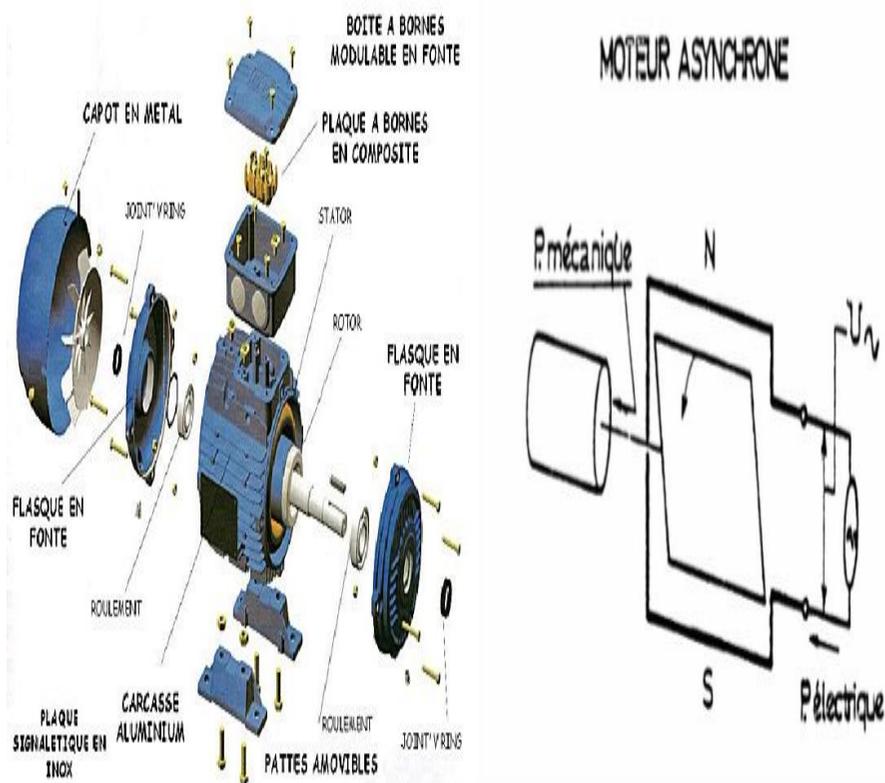


Fig.I.7 Schéma simplifié du moteur asynchrone [13].

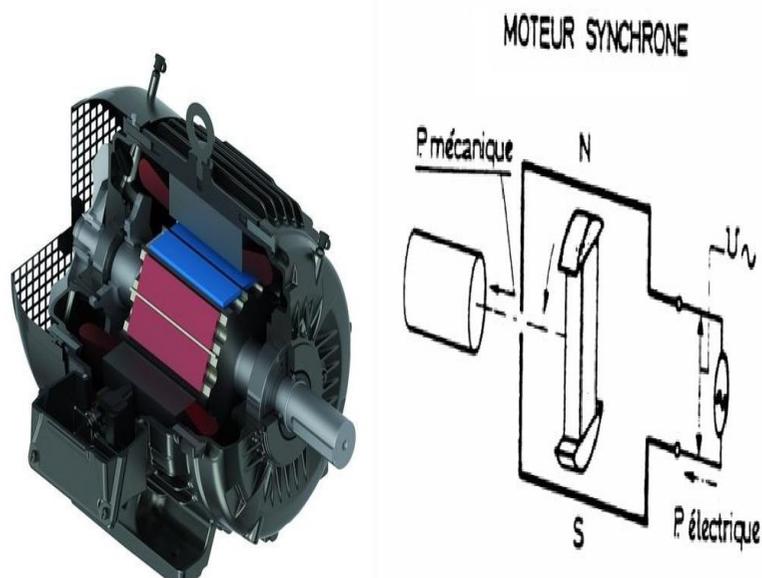


Fig.I.8 Schéma simplifié du moteur synchrone [13].

- Moteur à courant continu

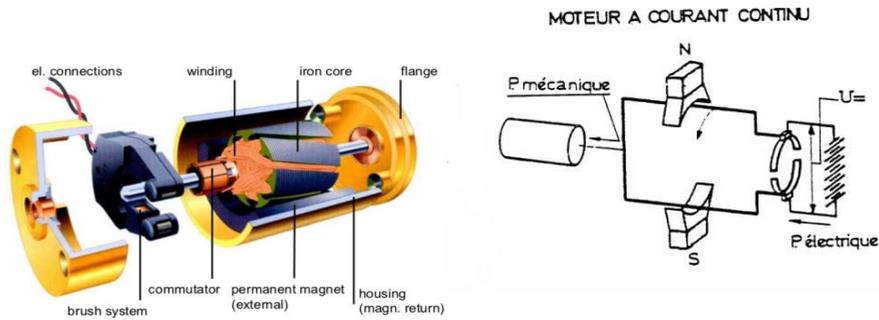


Fig.I.9 Schéma simplifié du moteur à courant continu [13].

I.3.1.2 Les génératrices électriques

Les génératrices électriques transformant l'énergie mécanique vers une autre électrique. Leur fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur par déplacement relatif de celui-ci et d'un champ magnétique, à l'aide d'un moyen d'entraînement mécanique.

Selon que le courant électrique produit (continu ou alternatif), la génératrice sera appelée dynamo ou alternateur (Fig I.10 et Fig I.11).

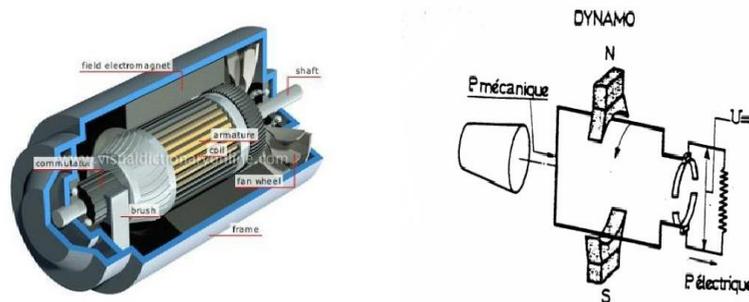


Fig.I.10 Schéma simplifié du dynamo [13].

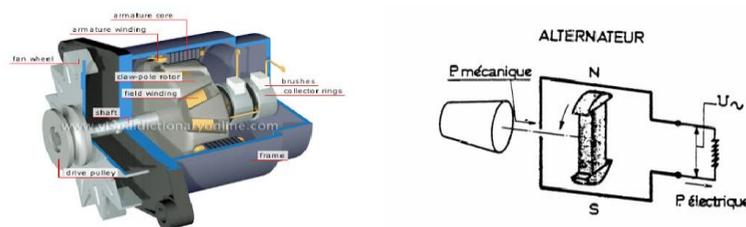


Fig.I.11 Schéma simplifié d'alternateur [13].

I.3.1.3 Les transformateurs

La catégorie la plus importante est le transformateur qui modifie la grandeur des courants et

des tensions alternatifs. Son fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur fixe sous l'action d'un champ magnétique variable.

Ces sont supplantées aujourd'hui par des systèmes statiques utilisant l'électronique de puissance.

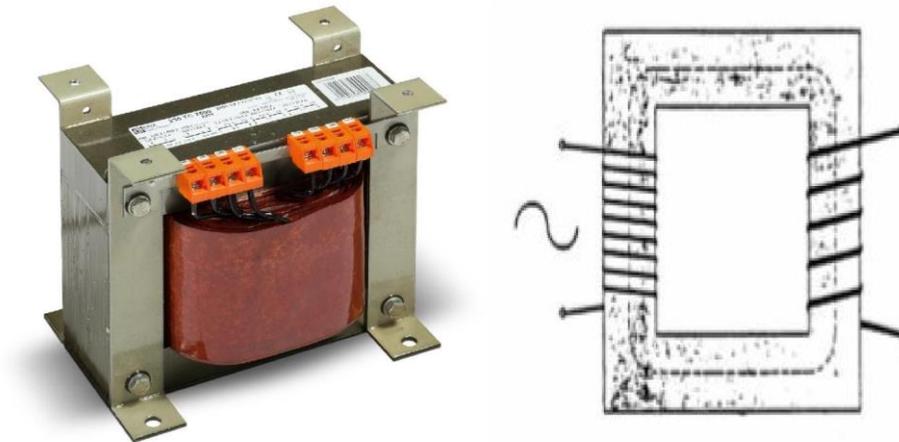


Fig.I.12 Schéma simplifié du transformateur [13].

I.4 LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

La machine asynchrone à double alimentations présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage, mais leur rotor bobiné et alimenté. Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif [14].

Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse. Les problèmes d'instabilités rencontrées dès lors l'ont fait abandonner pour un temps. Mais grâce aux progrès technologiques, diverses applications de la MADA sont alors devenues possibles.

I.4.1 Structure de la MADA

La MADA en générale a la même structure du stator d'un axe normal, mais son rotor est enroulé et alimenté avec une technique différente. Cette machine constitue un commun stator, mais le rotor est constitué de trois bobinages l'un décalé par un 120° degré à les autres

connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine.

I.4.2 Configuration des systèmes éoliens basés sur la MADA

I.4.2.1 Structure de Kramer de la MADA

Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le stator lié directement au réseau, mais le rotor connecté sur un redresseur à diode et après à l'onduleur vers un transformateur lié au réseau (transfert d'énergie du rotor de la machine vers le réseau uniquement). L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, l'inconvénient de ce système est ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme [15].

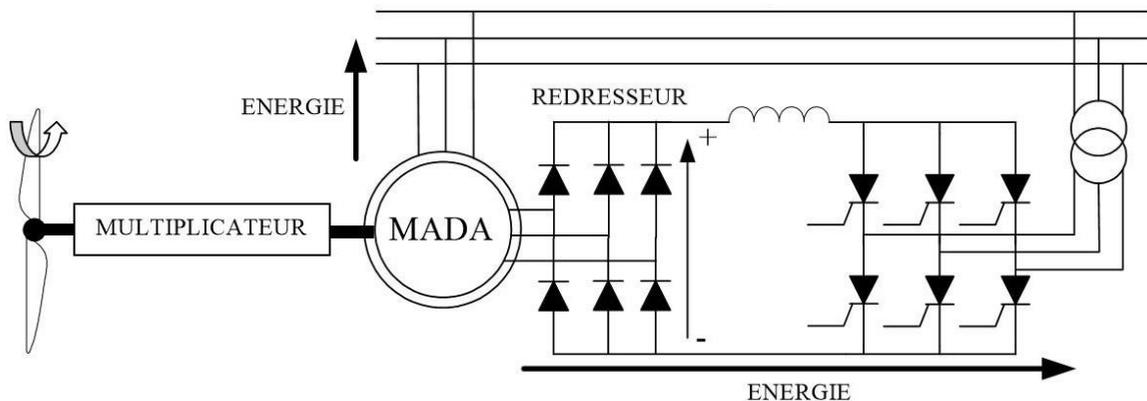


Fig.I.13 Structure de Kramer de la MADA d'un système éolien [16].

I.4.2.2 Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur de la MADA

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cyclo-convertisseur (Fig I.14), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius [15].

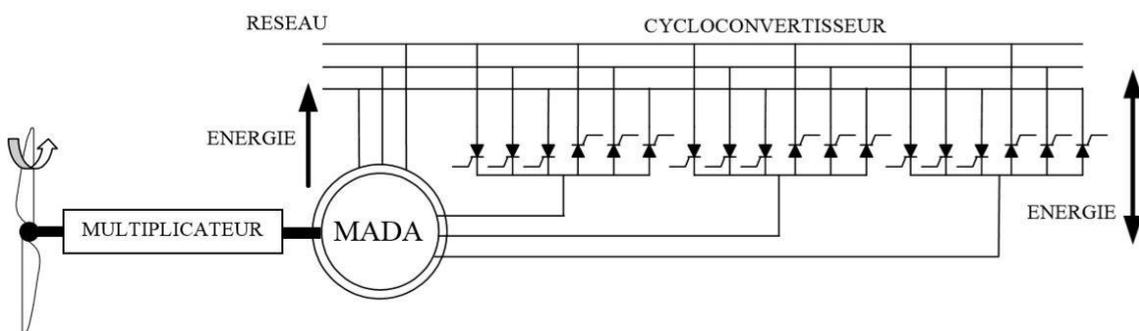


Fig.I.14 Structure de Scherbius à base de cyclo-convertisseur d'un système éolien [16].

I.4.2.3 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI de la MADA

Cette configuration (Fig I.15) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur. Toutefois, les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'impulsions (MLI) dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées) [15].

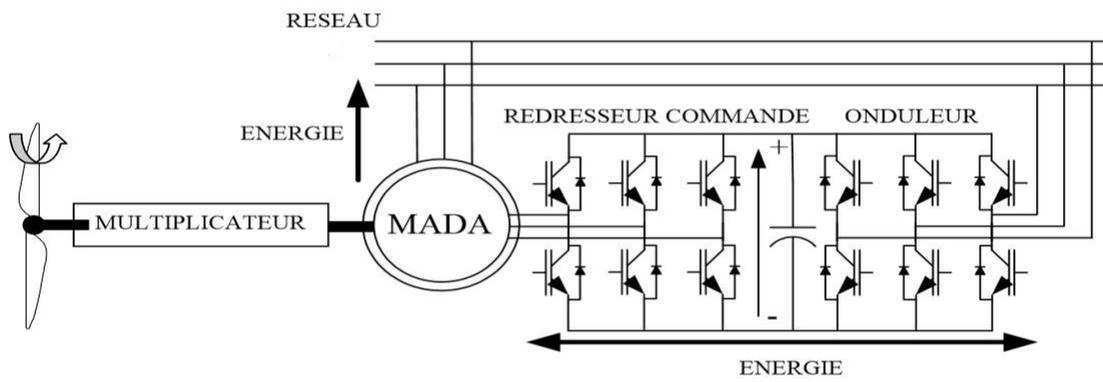


Fig.I.15 Structure de Scherbius à base de convertisseurs MLI d'un système éolien [16].

I.4.3 Les applications de la MADA

La première application de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors leur fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé. Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique, et contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur. La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de

variation de vitesse [16].

I.4.4 Les différents modes de fonctionnement de la MADA

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude. Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la grande différence 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.

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous à sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Pour 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 ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [14] :

I.4.4.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La (Fig I.16) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi, mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [10].

I.4.4.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La (Fig I.16) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement [10].

I.4.4.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La (Fig I.16) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme [10].

I.4.4.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La (Fig I.16) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la

puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme [10].

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages relativement à cage classique la production de puissance électrique quel que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et

la récupération de la puissance de glissement.

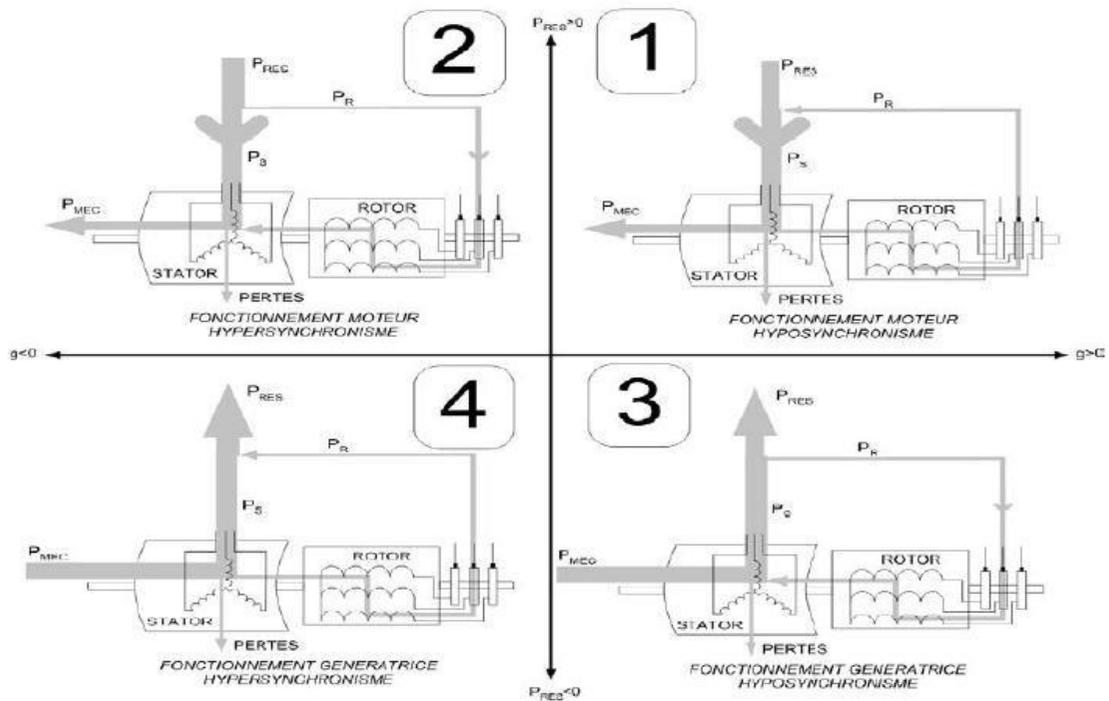


Fig.I.16 Les différents modes de fonctionnement de la MADA [16]

I.4.4.5 Plage de variation de la vitesse de la MADA

La plage de la variation de vitesse de la MADA ne dépasse pas $\pm 30\%$ de la vitesse de synchronisme (Fig.I.17) (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est-à-dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine [16]. Il est alors moins volumineux (réduit d'environ 70 %), moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins.

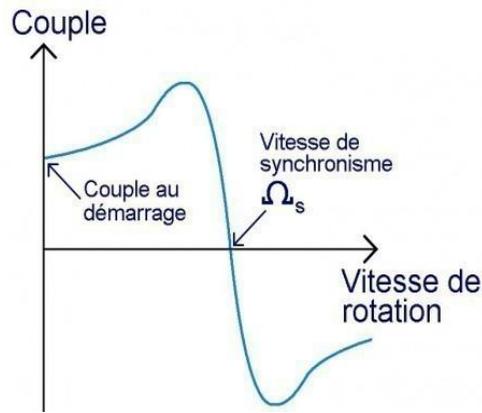


Fig.I.17 Plages de variation de la vitesse de la MADA.

I.4.5 Avantages et inconvénients de la MADA

Ce paragraphe présente les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

I.4.5.1 Avantages de la MADA

La MADA présente plusieurs avantages à savoir :

- 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 ;
- 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 vitesse de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentent son rendement. De plus, l'alimentation de la machine par deux onduleurs permet de travailler à des fréquences relativement élevées évitant ainsi un déclassement des convertisseurs tout en maintenant un couple à l'arrêt. Cette même propriété assure un contrôle quasi insensible aux variations résistives de la machine [17] [18] ;
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine assure un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale ;

- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6) ;
- Un fonctionnement en régime dégradé plus souple que la machine à simple alimentation, quand un onduleur tombe en panne.

I.4.5.2 Inconvénients de la MADA

Contrairement à ses avantages, la MADA présente aussi des inconvénients tels que :

- Un nombre important de convertisseurs est utilisé (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) que celui utilisé pour 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 ;
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines de grande puissance [19] ;
- Problèmes des charbonnes et de bague.

I.5 LA MACHINE SYNCHRONE

Le terme machine synchrone regroupe toutes les machines dont les vitesses de rotation de l'arbre de sortie égales à la vitesse de rotation du champ tournant. Selon la forme du rotor, on peut classer les machines synchrones en deux groupes : machines à pôles lisses et machine à pôles saillances. Il existe aussi une grande variété de structures de machines synchrones à aimants permanents. Elles varient principalement selon les dispositions des aimants.

I.5.1 Structure de la Machine Synchrone

Ce type de machine synchrone est constitué de trois bobines (triphase) statoriques et une seule bobine rotorique excitée par un courant continu, mais elle possède l'inconvénient de la nécessité d'une source d'alimentation indépendante de l'inducteur (rotor) en puissance. Un autre inconvénient est la nécessité d'un entretien régulier du collecteur (système bagues-balais).

I.5.2 Configuration d'un système éolien basé sur la machine synchrone

Cette machine est raccordée à redresseur à diode et après à un onduleur et les tensions de sortie lié au réseau par un transformateur (Fig I.18) mais cette machine a besoin d'excitation et peut être commandé par le courant d'excitation.

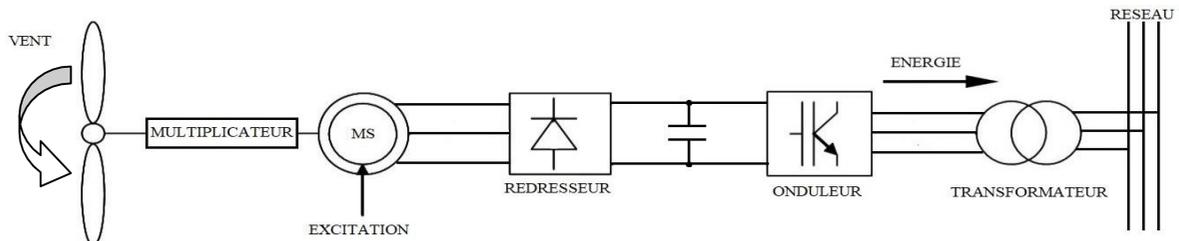


Fig.I.18 Système éolien basé sur la génératrice synchrone.

I.5.3 Les types des machines synchrones

Ce genre de machines est constitué d'un rotor qui comporte des bobines. On alimente ces bobines par des courants continus par l'intermédiaire des contacts glissants balais-bagues pour générer le flux magnétique inducteur dans l'entrefer. On distingue deux types de machines synchrones à rotor bobiné (Fig.I.19) :

- **Les machines à pôles lisses**
- **Les machines à pôles saillants**

La machine à pôles lisses a une inductance constante quelle que soit la position du rotor. Par contre, la machine à pôles saillants a un entrefer magnétique variable suivant la position des pôles, ce qui entraîne une variation d'inductance [20].



Fig.I.19 Types des rotors de la machine synchrone à rotor bobiné.

I.5.3.1 Machines à pôles saillants

Ces machines possèdent un enroulement inducteur monophasé constitué de bobines enroulées autour de pôles ferromagnétiques et mises en série de façon à assurer l'alternance des pôles. On agit sur la forme de l'épanouissement polaire pour obtenir une répartition, proche d'une sinusoïdale, de l'induction dans l'entrefer. Cette structure est ainsi caractérisée par sa simplicité de réalisation et de maintenance. Par contre, pour des raisons mécaniques, elle ne prête généralement qu'à des applications où la vitesse ne dépasse pas 1000 tours par minute.

La principale difficulté pour l'étude de ces machines est liée à l'anisotropie géométrique

(entrefer variable), et donc magnétique du rotor, qui entraîne une dépendance des différentes mutuelle et de la plupart des inductances à la position θ du rotor par rapport au stator. La réaction d'induit varie alors en fonction de l'état de charge de la machine [21].

I.5.3.2 Machines à pôles lisses

Ce type de machine est souvent utilisé pour des applications de fortes puissances et grande vitesse. Des frettes en acier amagnétique peuvent être utilisées afin de maintenir en place les têtes de bobines. Les machines à pôles lisses sont caractérisées par une distance constante entre les deux parties ferromagnétiques statorique et /ou rotorique le long de la périphérie de l'entrefer, l'encoche du stator et/ou du rotor est magnétiquement assimilé à un entrefer constant [22]. Le rotor à pôles lisses est utilisé dans les machines synchrones bipolaires ou tétra polaires qui fonctionnent aux vitesses de 3000 ou 1500 tours par minute. Le rotor à pôles saillant ne convient pas pour de telles machines à cause des difficultés que présente la fixation des enroulements d'excitation concentrés en cas du petit nombre de pôles (surtout dans les machines bipolaires). C'est pourquoi les machines bipolaires et tétra polaires utilisent exclusivement des rotors lisses bien que les rotors à pôles saillants reviennent moins chers [23]. Le courant inducteur est généralement injecté au rotor par l'intermédiaire de bagues sur lesquelles frottent des balais [21].

I.5.4 Avantages et inconvénients de la machine synchrone

I.5.4.1 Avantages de la machine synchrone

- Rendement excellent très supérieur à celui de tous les autres types des machines ;
- Sa vitesse est rigoureusement constante ;
- On peut l'alimenter à des tensions élevées ;
- Fonctionnement en moteur avec un bon facteur de puissance ou en compensateur pour fournir de l'énergie réactif.

I.5.4.2 Inconvénients de la machine synchrone

- Peut décrocher dans le cas d'une surcharge brusque ou d'une chute de tension importante du réseau ;
- A besoin d'une génératrice à courant continu pour assurer l'excitation ;
- Elle peut démarrer qu'à des faibles charges.

I.6 LA MACHINE SYNCHRONNE A AIMANT PERMANENT

La machine synchrone à aimant permanent est comme la machine synchrone leur vitesse de rotation de l'arbre de sortie égale à la vitesse de rotation du champ tournant (vitesse de synchronisme). Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré par des aimants permanents. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en Fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [24].

I.6.1 Structure de la Machine Synchrone à Aimant Permanent

Cette machine a de même principe comme la machine synchrone est constitué de trois bobines (triphase) statoriques laquelle décale par 120° degré à l'autre, mais le rotor n'est plus une bobine, à place de cette bobine un aimant permanent qui généré champ magnétique constant.

I.6.2 Configuration d'un système éolien basé sur la MSAP

Cette machine est connectée à redresseur directement derrière la génératrice après lie au onduleur (fig I.20), l'énergie sortie lie au réseau par un transformateur avec respecté les conceptions de raccordement, cette machine a de meilleur rendement para pour l'autre machine.

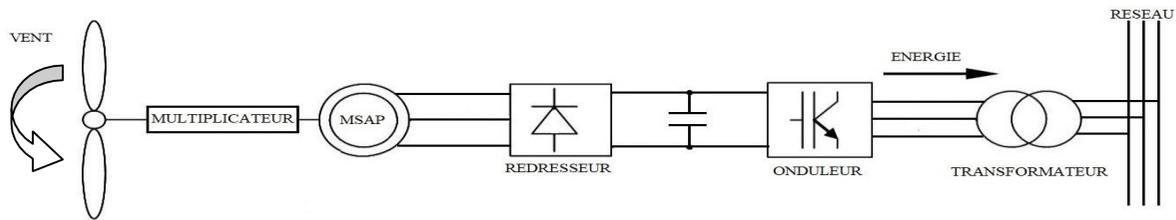


Fig.I.20 Système éolien basé sur la génératrice synchrone à aimant permanent.

I.6.3 Les aimants permanents

I.6.3.1 Définition des aimants permanents

On appelle un aimant permanent tout corps ayant la capacité ou la propriété de conserver une très grande aimantation rémanente et qui est difficile à se désaimanter lorsqu'il est aimanté [25].

Un aimant permanent est un matériau magnétique qui a la particularité d'avoir une bonne résistance à la désaimantation, c'est-à-dire une aimantation rigide qui ne varie pas obligatoirement en présence d'un champ magnétique extérieure [26].

I.6.3.2 Aperçu sur l'histoire des aimants

L'aimant doit son origine au latin ADAMAS qui signifie fer, diamant [27]. Les aimants permanents ont vu le jour aux environ 600 ans avant J-C. Mais ce fut au début de ce siècle qu'eut lieu le véritable essor des aimants permanents dont ils ont pris leur place dans tous les domaines et surtout dans les machines électriques [28].

I.6.3.3 Propriété des aimants permanents

Le choix des aimants permanents est primordial puisqu'ils interviennent beaucoup dans le couple massique de la machine.

Les aimants permanents sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan (B-H) comme le montre la (Fig.I.21), cette courbe est caractérisée par :

- L'induction rémanente (B_r), c'est -à-dire l'induction résiduelle au circuit fermé, c'est - à-dire une induction de la puissance potentielle de l'aimant ;
- Le champ coercitif (H_{cb}), caractérise le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée plus l'aimant est stable ;

- Produit d'énergie volumique (BH) max, ce produit est couramment appelé énergie spécifique de l'aimant, cette énergie caractérise la qualité du matériau. En effet pour un entrefer donné, le volume est d'autant plus faible, que l'énergie spécifique est élevée [28].

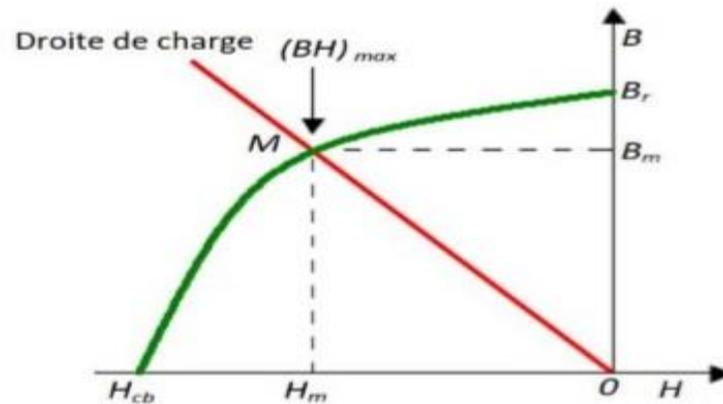


Fig.I.21 Courbe de désaimantation [28]

I.6.4 Présentation et Principe de fonctionnement de la MSAP

I.6.4.1 Présentation de la MSAP

L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statorique. Les F.E.M induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle du champ inducteur.

I.6.4.2 Principe de fonctionnement de la MSAP

Concernant le principe de fonctionnement des MSAP est basé sur la théorie du champ magnétique tournant en synchronisme avec le rotor, selon la loi liant la vitesse de rotation en relation à la fréquence d'alimentation du bobinage statorique et au nombre de paires de pôles $n = 60.f/p$ d'où l'appellation de machine synchrone. Les aimants d'excitation sont situés sur la partie tournante (rotor) alors que la partie fixe (stator) est munie d'un enroulement triphasé à distribution spatiale sinusoïdale.

I.6.4.3 Domaines d'application de la MSAP

Il est utilisé pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels

que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimant convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières comme :

- Les équipements domestiques (machine à laver le linge) ;
- Les automobiles ;
- Les équipements de technologie de l'information (DVD drives) ;
- Les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements ;
- Les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste) ;
- Les servomoteurs ;
- La production d'électricité ;
- La propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins ;
- Les machines-outils.

Elles sont utilisées pour des puissances allant de la gamme des microwatts à celle des mégawatts [29] [32].

I.6.5 Avantages et inconvénients de la MSAP

I.6.5.1 Avantages de la MSAP

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor ;
- Le couple volumique et la puissance massique important permettent une meilleure compacité ;
- L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien ;
- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique ;
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage ;
- Très bon rendement et un facteur de puissance élevé (proche de l'unité) ;
- Grande fiabilité ;

- Fonctionnement à très hautes vitesses.

I.6.5.2 Inconvénients de la MSAP

- Coût élevé (à cause du prix des aimants) ;
- Problème de tenue en température des aimants ;
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit ;
- Impossibilité de régler l'excitation ;
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique a fin de démagnétiser la machine, ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule ;
- Une non-régulation de flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très largeplage de vitesse ;
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine [30] [31] [32].

I.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, son historique et son évolution, puis, un rappel sur les différents types d'éoliennes (axe horizontal et axe vertical). On a présenté aussi les différentes machines électriques utilisées dans la conversion aérodynamique en illustrant quelques spécifications propres liées aux structures d'alimentation différentes.

Ensuite, on a cité quelques caractéristiques de ces machines électriques pour produire de l'énergie électrique à base des éoliennes.

Chapitre II

Modulisation de la turbine éolienne

II.1 Introduction

Une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. D'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable pour parvenir à cet objectif. Idéalement, une éolienne doit comporter.

Un système qui permet de la contrôler mécaniquement au niveau de la turbine, essentiellement pour limiter la puissance pour les vents forts (L'orientation des pales de l'éolienne, l'orientation de la nacelle).

Un système qui permet de la contrôler électriquement au niveau du générateur associé à l'électronique de commande (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne. Dans un premier temps, une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de connaître ses principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance (C_p) et de couple, et la limite de BETZ.

Différentes stratégies de commande sont décrites dans le but de contrôler la puissance aérodynamique de la turbine, et limiter cette puissance lorsque la vitesse du vent devient trop élevée. Un modèle analytique de la turbine éolienne sera réalisé.

II.2 Modèle du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle.

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un

bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer.

Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent de grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent.

Donc la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes :

$$v(t) = v_0 + v_T(t)$$

Une composante turbulente du vent $v_T(t)$ est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent)

Une composante lente V_{moy} ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

Alors la vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V_v(t) = A \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot w_v \cdot t))$$

$$v_T = 9 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t)$$

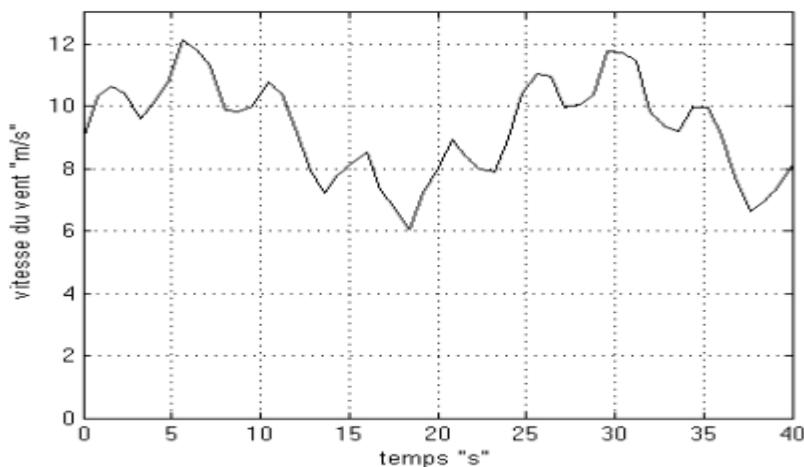


Fig.II.1 Simulation du profil de la vitesse du vent

La (fig. II.I) montre la variation de la vitesse du vent dans un temps de (40s) entre deux valeurs ($V_v=12\text{m/s}$) comme valeur maximale et ($V_v=6\text{m/s}$) comme valeur minimale d'une façon aléatoire ce qui reflète un vent réel.

II.3 Conversion de l'énergie éolienne

II.3.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site.

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S et de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , (Fig. II.2) s'écrit :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \quad (\text{II.1})$$

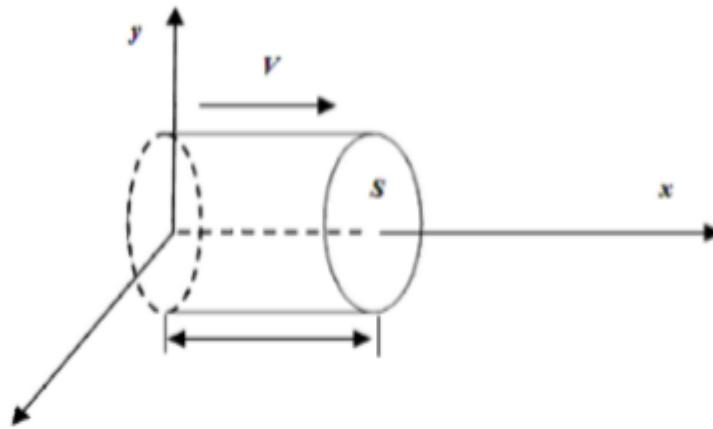


Fig.II.2 Colonne d'air animée d'une vitesse v .

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant $dx = v dt$ on déduit l'expression de P_m :

$$p_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 V^3 \quad (\text{II.2})$$

ρ : masse volumique de l'air, 1,3 kg/m³.

V : vitesse instantanée du vent (en m/s).

E_c : énergie cinétique (en joules)

II.3.2 Loi de BETZ

La loi de BETZ stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de BETZ pour la première fois.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (Fig. II.3) sur lequel on a représenté la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur V_1 et V_2 en aval.

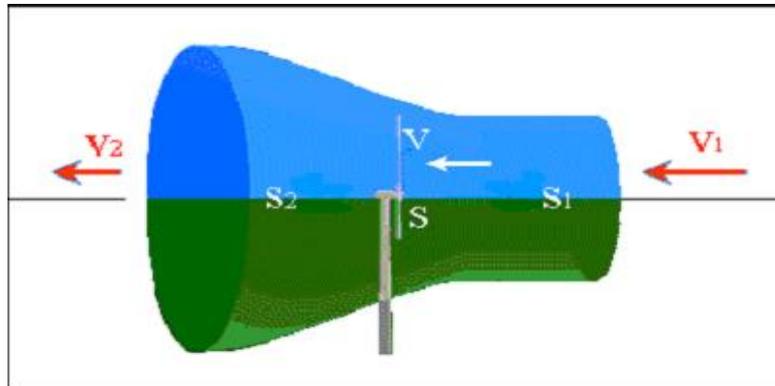


Fig.II.3 Tube de courant autour d'une éolienne.

D'après la théorie de Betz, la puissance récupérable sur l'éolienne est due à la variation de l'énergie cinétique du vent :

$$P_m = \Delta E_c = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{II.3})$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant une surface S des pales en une seconde par une moyenne de vitesse.

$$m = \rho S v = \rho S \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II.4})$$

L'effort qui s'exerce sur l'éolienne est donné par le théorème de la variation de la quantité de mouvement

$$\vec{F} = \rho S V (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \quad (\text{II.5})$$

Cet effort crée une puissance :

$$P_m = \vec{F} \vec{V} = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{II.6})$$

Qui est évidemment la même que celle donnée par (II.3). Ainsi, la combinaison de (II.3) et (II.6) donne

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

V_1 : vitesse du vent dans le plan du rotor en m/s ;

V_2 : vitesse du vent à l'aval du rotor en m/s ;

S : surface balayée par l'hélice en m^2 ;

On pose que $K = \frac{V_1}{V_2}$ on peut écrire :

$$P_m = \frac{1}{4} \rho S V_1^3 (1 + K)^2 + (1 + K) \quad (\text{II.8})$$

Cette puissance admet une valeur maximale pour la valeur de K qui annule sa dérivée

$$\frac{dP_m}{dK} = 0 \Rightarrow 2(1 + K)(1 - K)^2 = 0$$

Soit pour $K=1$ ou $K= 1/3$ or pour ($K= 1$ aucun sens physique) Donc pour $K=1/3$, alors

$$P_{max} = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \approx 0.6 \frac{1}{2} \rho \cdot S \quad (\text{II.9})$$

On a démontré que l'énergie récupérable dépend du rapport V_2 / V_1 et passe par un maximum lorsqu'il est égal à $1/3$. Dans ces conditions, l'énergie récupérable est égale aux $16/27$ de l'énergie cinétique totale. Il n'est donc possible de récupérer, au mieux, que moins de 60% de cette énergie.

Alors pour un vent théoriquement non perturbé traversant cette une S sans diminution de vitesse soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \rho S \frac{V_1^3}{2} \quad (\text{II.10})$$

II.3.3 Coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible :

$$C_p = \frac{p_m}{p_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{v_2}{v_1}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right)}{2} \tag{II.11}$$

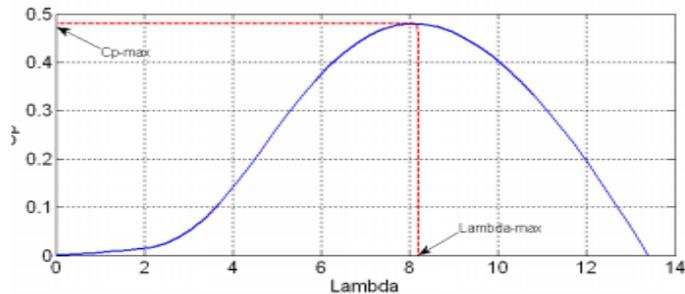


Fig.II.4 Coefficient de puissance

Le coefficient C_p est variable, il est fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ωt et des paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage, [33]. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique λ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de BETZ, est de B C soit 0.593. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte. Pour les meilleures machines à axe horizontale, bipale au tripale, celle-ci situe à 60-65% de la limite de BETZ en ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{pmax} \tag{II.12}$$

C_{pmax} étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} .

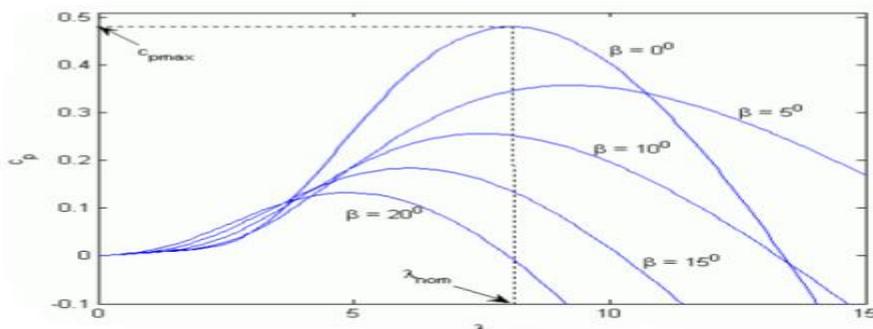


Fig.II.5 : Exemple de variation du coefficient de puissance en fonction de l'angle d'orientation des pales et de la ration de vitesse

II.3.4 La vitesse spécifique ou normalisée [Tip-Speed-Ratio]

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine Ωt et Rt sur la vitesse instantanée de vent V (Fig. II.6) et donnée par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (\text{II.13})$$

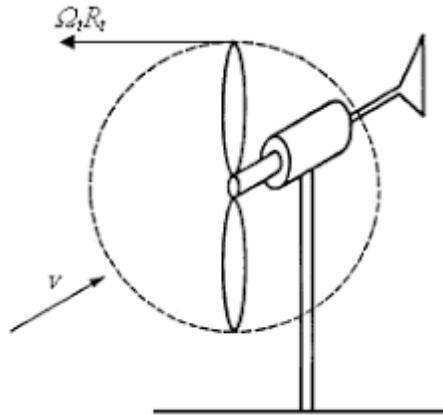


Fig.II.6 Vitesse de vent V et vitesse tangentielle de l'aubage

$\Omega t R t$: Rayon de la surface balayée en m ;

V : vitesse de vent en m/s ;

Ωt : vitesse de rotation avant multiplication en rad/s ;

II.3.5 Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle.

En combinant les équations (II.10), (II.11) et (II.13), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Avec } \lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V}$$

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_i = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda V} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R_t^3 V^2 \quad (\text{II.16})$$

T_i : Couple de la turbine éolienne.

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_i}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V^2} \quad (\text{II.17})$$

II.3.6 Production d'énergie mécanique

En tenant compte du rapport du multiplicateur G, à partir des équations (II.14) et (II.15), l'expression de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur peut s'exprimer par

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_t R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II.18})$$

Cette expression permet d'établir un réseau de courbes donnant cette puissance en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent (Fig. II.8).

Au regard de la courbe en pointilles, qui joint les points de puissance maximales, il apparaît que pour pouvoir optimiser le transfert de puissance pour chaque vitesse de vent, la machine devra fonctionner à vitesses variable :

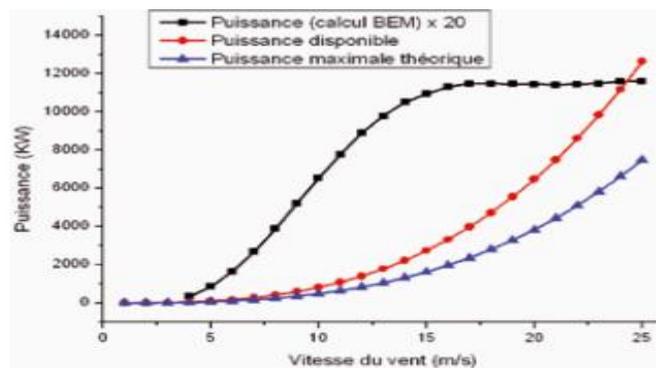


Fig.II.7 Puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38%.

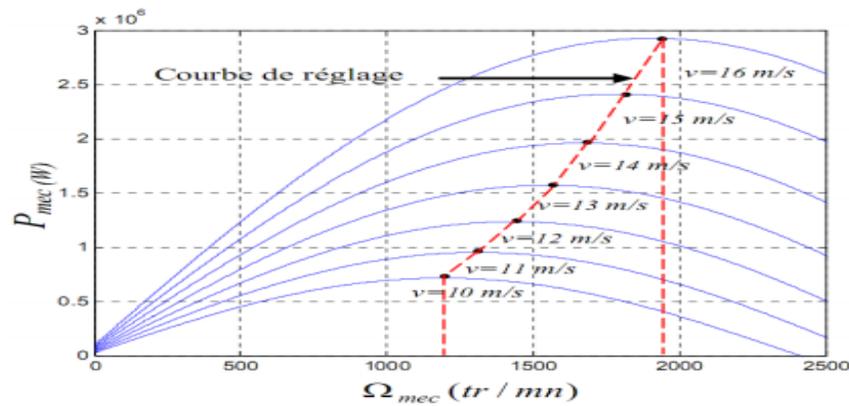


Fig.II.8 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de la caractéristique (Fig. II.8), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

II.3.7 L'angle d'inclinaison (Blade pitch angle)

L'angle d'inclinaison ou de calage permet de faire varier directement le coefficient de puissance d'une turbine. Il peut être utilisé efficacement pour le contrôle de la puissance de sortie du rotor. La réduction mécanique de la puissance du rotor peut être réalisée en réduisant ou minimisant l'angle d'attaque au-dessus de sa valeur critique. En limitant le coefficient de puissance, la puissance extraite à partir du vent est limitée. Ce type de commande de puissance est également connu en tant que commande de l'angle de calage (pitch control). Cette commande peut être utilisée pour atteindre différent objectif :

- Optimisation de la puissance de l'éolienne, en maximisant la puissance mécanique de sortie pour une vitesse de vent donnée, ce qui est généralement appliqué pour des vitesses faibles et modérées du vent, tout en étant inférieur à sa vitesse nominale.
- Prévenir l'excès de puissance mécanique de sortie pour les vents forts au-dessus des vitesses du vent limite. Cela permet de maintenir un contrôle de la puissance mécanique et la maintient au-dessous de la valeur nominale dans le cas des vents forts.
- Pour prévenir le mouvement (rotation) des pales dans le cas de turbines déconnectées.

Il y'a deux façons communes dans lesquelles le contrôle de l'angle de calage peut être utilisé pour la régulation de la puissance de sortie d'éolienne.

- **commande actif de l'angle de calage** : Pour des vitesses variable d'une éolienne, le fonctionnement d'une turbine ainsi que sa puissance de sortie peuvent être affectés soit par des changements de vitesse ou de variation de l'angle de calage des pales. Dessous de la puissance nominale, ces machines fonctionnent à la vitesse variable d'optimiser la vitesse relative au niveau de l'angle de calage fixe. Après la puissance nominale de sortie est obtenu un contrôle de couple de générateur est utilisé pour maintenir la puissance de sortie, tout en hauteur contrôle est utilisé pour maintenir la vitesse du rotor. A des vitesses de vent élevées, la puissance de sortie du générateur peut être maintenue constante, avec une augmentation de la vitesse du rotor. Cette augmentation de l'énergie disponible dans le vent est stockée sous forme d'énergie cinétique dans le rotor. Il en résulte à la fois la réduction du couple aérodynamique et d'accélération du rotor. Si la vitesse du vent continue à rester élevée, l'efficacité aérodynamique du rotor peut être réduite en modifiant l'angle de calage, ce qui réduit la vitesse du rotor.
- **commande passif de l'angle de calage** : En cas de contrôle passif la vitesse du vent est utilisée pour fournir la puissance d'actionnement, ce qui permet d'ajuster l'angle des pas des pales. Dans ces modèles d'éoliennes, les effets des changements dans la vitesse du rotor ou la vitesse du vent sont liés aux changements de l'angle d'inclinaison des pales.

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Figure(II.9) :

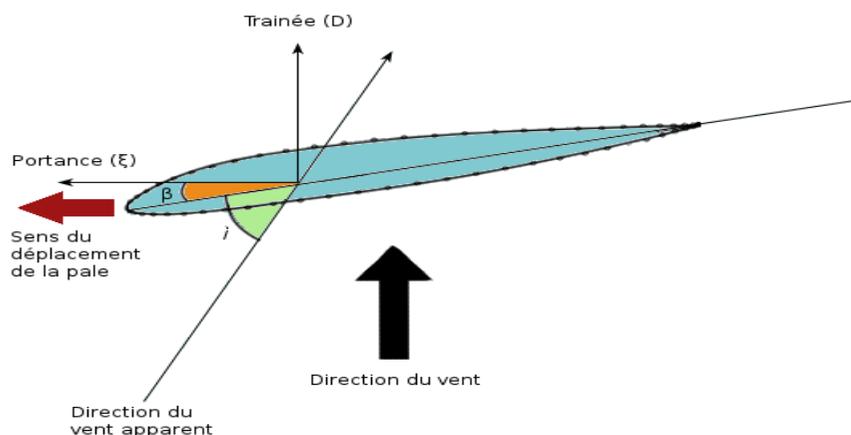


Fig.II.9 : Eléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- Corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- Angle de calage β (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation).
- Extrados : dessus des pales
- Intrados : dessous des pales.

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis.

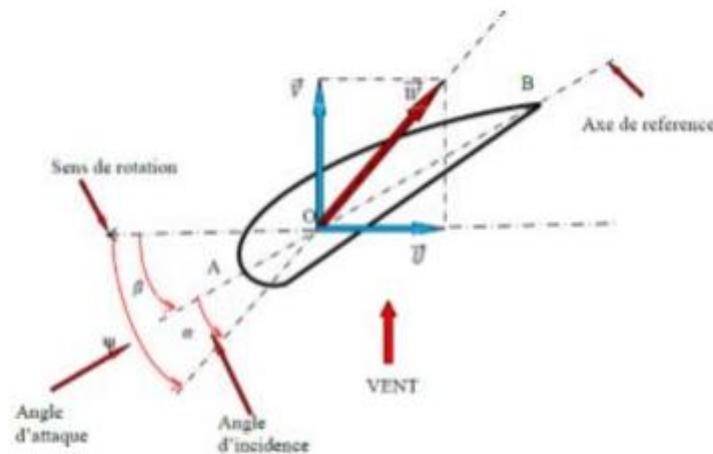


Fig.II.10 : Directions du vent sur un tronçon de pale

II.3.8 Effort sur une pale d'éolienne

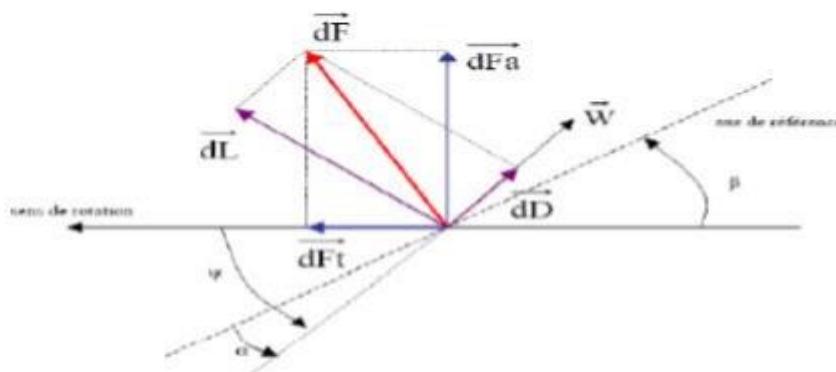


Fig.II.11 : Forces appliquées sur un tronçon de pale

On peut décomposer la force résultante \vec{dF} de la manière suivante :

- La portance \vec{dL} , normale à la direction du vent apparent.
- La force de traînée \vec{dT} , parallèle à la direction du vent. On peut aussi la décomposer d'une autre manière :
- La poussée axiale \vec{dF}_a , perpendiculaire au plan de rotation.
- La poussée tangentielle \vec{dF}_t , dans la direction de rotation.

II.3.9 Relation du coefficient de puissance avec l'angle de calage et la vitesse relative

Une relation empirique entre (coefficient de puissance du rotor), la vitesse relative λ et angle d'inclinaison β est utilisé pour l'élaboration d'une table de consultation qui fournit une valeur de C_p pour une valeur donnée de la vitesse du vent et la vitesse relative. Angle d'inclinaison des pales peut être défini comme l'angle entre le plan de rotation et de pale ligne de corde. Vitesse de pointe rapport est défini comme le rapport de la vitesse linéaire de la lame à pointe à la vitesse du vent.

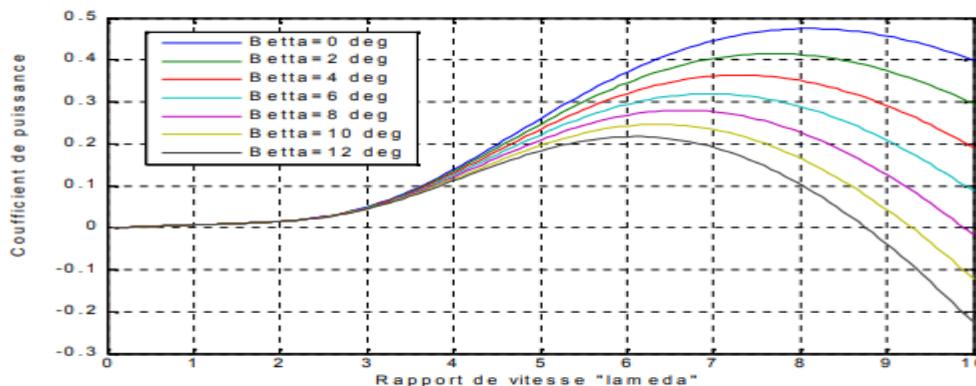


Fig.II.12 : caractéristiques $C_p=f(\lambda)$ pour sept valeurs de β

II.4 Poursuite du point de Maximum de Puissance (Maximal Power Point Tracking, MPPT)

Un dispositif « MPPT », de l'anglais Maximum Power Point Tracking correspond à une stratégie de gestion permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens à

travers une électronique de puissance permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse

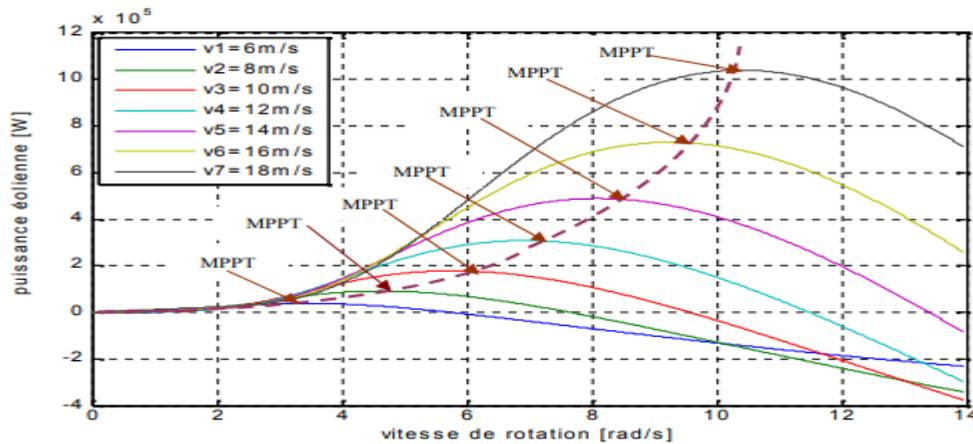


Fig.II.13 : Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent

Par exemple, la figure II.13 montre les extrema que poursuit la MPPT d'une éolienne de type tripale à vitesse du vent variable : la courbe de puissance en forme de cloche, typique des éoliennes et donnée pour chaque vitesse du vent, présente un point de puissance maximale. De plus en plus souvent, les génératrices sont donc reliées à un convertisseur électronique de puissance contrôlé qui permet de réaliser cette fonction. De nombreux concepts ont été introduits pour parvenir à poursuivre efficacement le point de puissance maximum pour le « grand éolien

II.5 Production optimale d'énergie

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau. Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} \cdot v \quad (II.19)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur l'équation (II.19). La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.

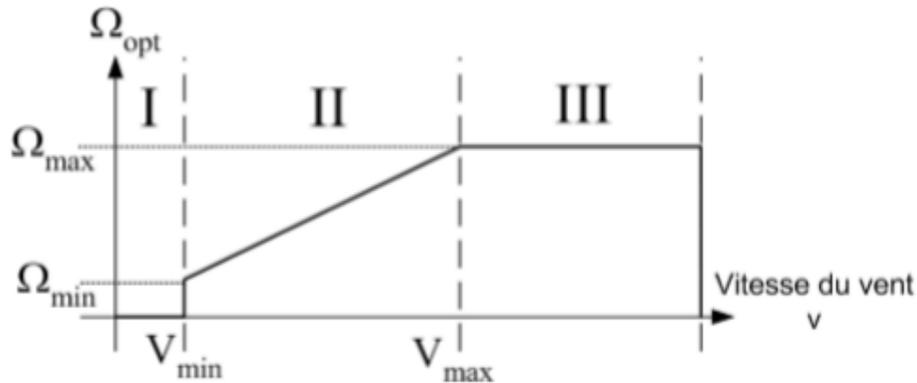


Fig. II.14 : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau (Figure II.14). Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivrée par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables.

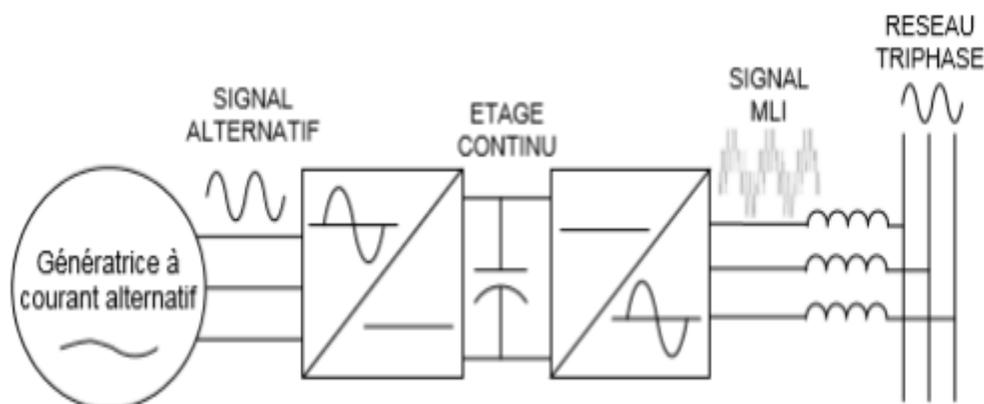


Fig.II.15 : interface d'électronique de puissance

II.6 Modélisation du système éolien

II.6.1 Présentation du système

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, électrique et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension et la forme de la turbine. Un modèle dynamique rassemblant tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine, et le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues.

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R . elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$ qui est relié à un multiplicateur de gain G . ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique.

II.6.2 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine

On peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple.

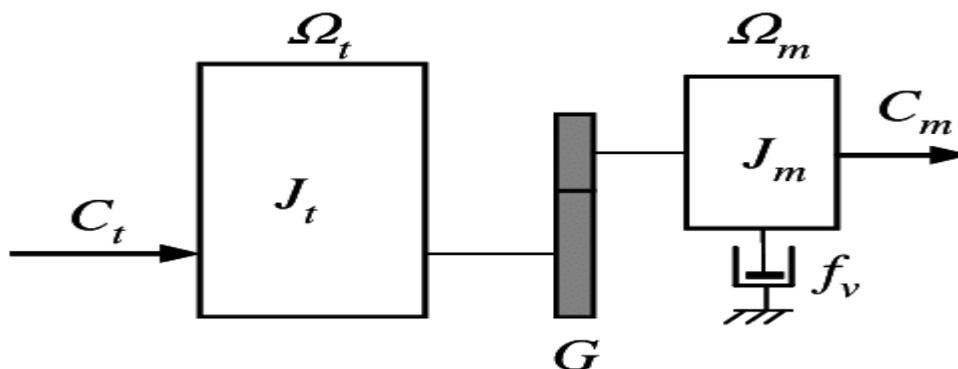


Fig.II.16 Modèle mécanique simplifié de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes :

- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'aire (db) est très faible et peut être ignoré.

- Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice

II.6.3 Modélisation de la turbine

Le dispositif qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Fig. II.16).

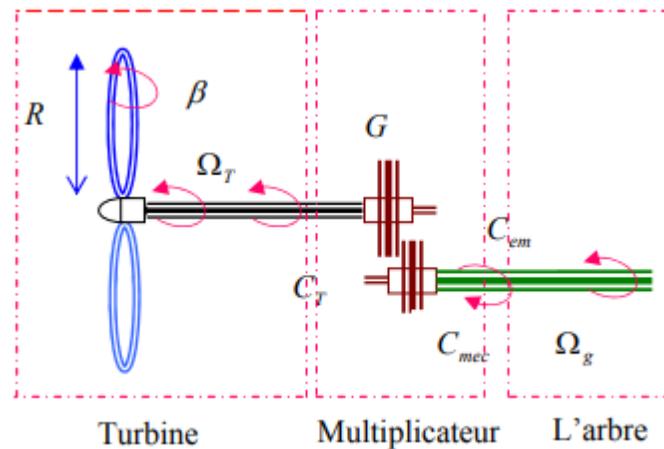


Fig.II.17 schéma de la turbine éolienne.

Les variables d'entrée et de sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

1. La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
2. Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
3. La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales et l'angle de calage. Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrées précédentes.

L'organigramme de simulation de la turbine peut être représenté comme suit :

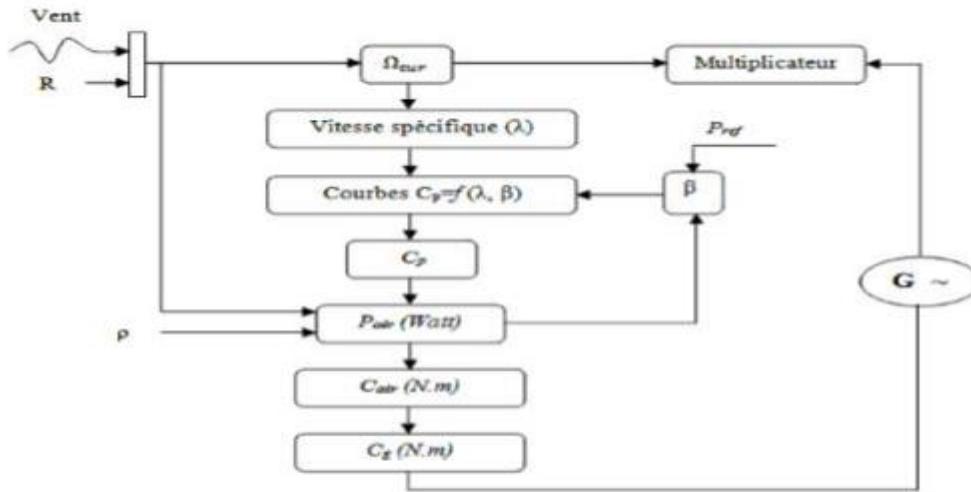


Fig.II.18 Organigramme de simulation de la turbine éolienne

II.6.3.1 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur (Fig.II.17). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \tag{II.20}$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{msc}}{G} \tag{II.21}$$

II.6.3.2 Equation dynamique de l'arbre

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

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \tag{II.22}$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évaluation de la vitesse mécanique à partir de la turbine du couple mécanique totale (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II.23}$$

J: L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant les inerties de la turbine, de la génératrice, des deux arbres et de multiplicateur ;

f: Le coefficient de frottement total du couplage mécanique ;

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \tag{II.24}$$

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice ;

C_g : Le couple issu du multiplicateur ;

C_f : Le couple résistant dû aux frottements ;

$$C_f = f \Omega_{mec}$$

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em}

En se basant sur ce qui a précédé, la turbine d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable peut être modélisée comme le montre le schéma bloc de la figure (Fig. II.19).

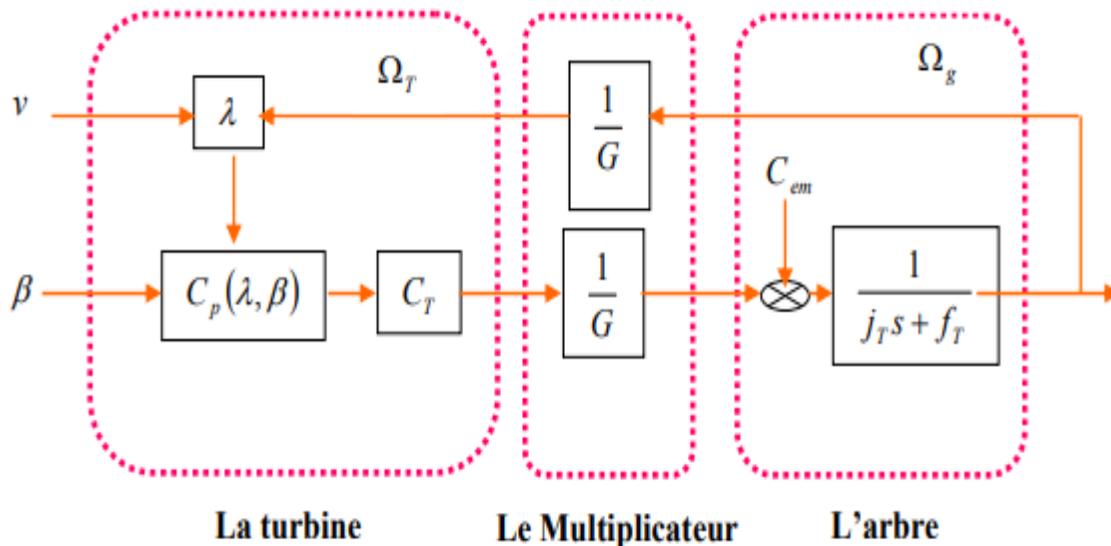


Fig.II.19 Schéma bloc d'une turbine éolienne à vitesse variable.

II.7 Conclusion

Nous avons détaillé dans ce chapitre une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil du vent et des pales utilisées et l'angle de calage. Les stratégies de fonctionnement d'une éolienne (vitesse fixe, vitesse variable) sont également décrites. Nous avons pu valider le model de notre turbine, ce qui nous permettra de l'utiliser par la suite.

Chapitre III

Modulisation de la MADA et des convertisseurs statiques

III.1 Introduction

Après avoir introduit le principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, ce chapitre fera l'objectif d'une étude de modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans un référentiel lié au champ tournant, et cela pour obtenir un modèle mathématique qui nous permettra de valider notre modèle en boucle ouverte. En effet, dans un premier temps on modélisera la machine dans un repère triphasé (a,b,c) tout en donnant les équations électriques et magnétiques puis on introduit la transformation de Park qui nous permettra de passer de système triphasé au système biphasé sur lequel on se basera pour faire la simulation de notre machine. Puis on termine par la modélisation de l'alimentation de la machine.

Ensuite, nous aborderons la modélisation de l'onduleur de tension chargé de la conversion continu- alternatif et leur commande MLI de type sinus triangulaire.

III.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Comme nous l'avons précédemment vu, la machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone classique à rotor accessible et identique au stator. Donc, le modèle de la MADA est le même que celui de la MAS avec l'exception des tensions rotorique non nulles

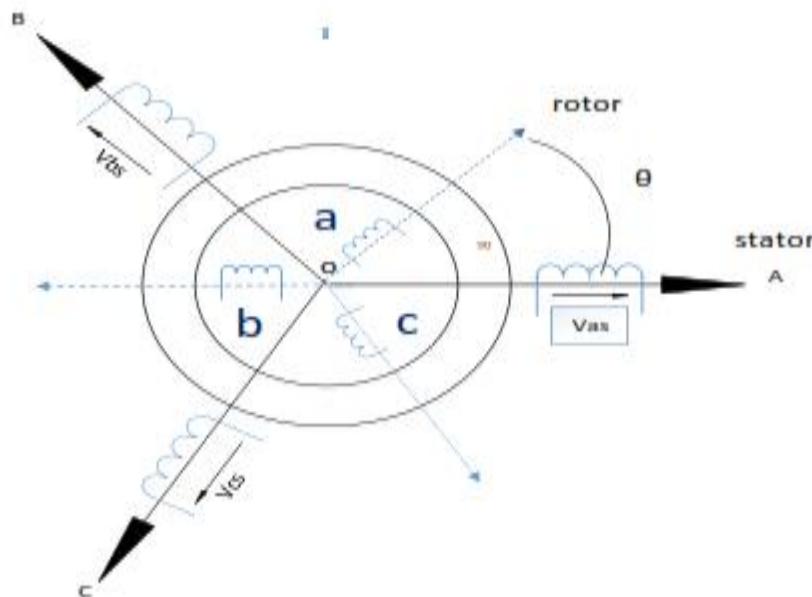


Fig.III.1 : Représentation schématique de la machine asynchrone double alimentée.

Le stator comporte 3 enroulements dont les axes magnétiques OA, OB et OC sont décalés dans l'espace de 120° .

Le rotor (rotor bobiné) comporte 3 enroulements triphasés à même nombre de pôles que celui du stator. Ces 3 bobinages dont les axes magnétiques Oa, Ob et Oc sont décalés dans l'espace de 120° . L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire :

Avec :

$$\omega = P.\Omega$$

ω est la vitesse de rotation angulaire mécanique, et P c'est le nombre de paires de pôles.

III.2.1 Hypothèse Simplifiées

- La parfaite, symétrie de la machine.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et les pertes fers sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- La densité de courant de la section des conducteurs est uniforme (l'effet de peau est négligeable).
- La distribution spéciale des forces magnétomotrices d'entrefer est sinusoïdale.

III.2.2 MODEL DE MADA DANS LE REPERE abc

III.2.2.1 Equation électrique

Chaque enroulement peut être représenté par un circuit électrique équivalent suivant la (Fig III.2), au stator, le circuit électrique se compose simplement d'une inductance en série avec une résistance.

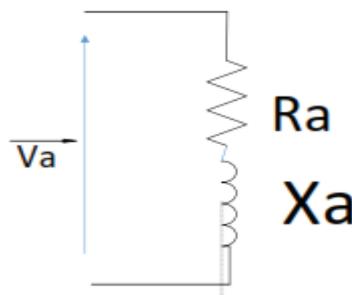


Fig.III.2 : circuit équivalent de la phase $_a_$ du stator d'une machine asynchrone.

La relation entre le flux et la force électromotrice développée au niveau de l'inductance est donnée par la loi de Faraday :

$$-e = \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{III.1})$$

L'application de la loi de maille à ce circuit donne :

$$-e = \frac{d\phi}{dt} = V_a - R_a I_a \quad (\text{III.2})$$

De même manière en appliquant la loi des mailles aux trois enroulements du stator on obtient : Pour le Stator :

$$\begin{cases} V_{as} = R_s I_{as} + \frac{d\phi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = R_s I_{bs} + \frac{d\phi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = R_s I_{cs} + \frac{d\phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Sous format compact :

$$[V_{abc_s}] = R_s [I_{abc_s}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abc_s}] \quad (\text{III.4})$$

Où :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} ; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} ; [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} ; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Pour le Rotor :

$$\begin{cases} V_{Ar} = R_r I_{Ar} + \frac{d\phi_{Ar}}{dt} \\ V_{Br} = R_r I_{Br} + \frac{d\phi_{Br}}{dt} \\ V_{Cr} = R_r I_{Cr} + \frac{d\phi_{Cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Sous forme compacté :

$$[V_{ABC_r}] = R_r [I_{ABC_r}] + \frac{d[\phi_{ABC_r}]}{dt} \quad (\text{III.7})$$

Où :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{Ar} \\ V_{Br} \\ V_{Cr} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{Ar} \\ I_{Br} \\ I_{Cr} \end{bmatrix} ; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{Ar} \\ \phi_{Br} \\ \phi_{Cr} \end{bmatrix} \text{ et } [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

III.2.2.2 Equation magnétique :

Pour le Stator

$$\begin{cases} \phi_{as} = l_s I_{as} + m_s I_{bs} + m_s I_{cs} + m_1 I_{Ar} + m_3 I_{Br} + m_2 I_{Cr} \\ \phi_{bs} = m_s I_{as} + l_s I_{bs} + m_s I_{cs} + m_2 I_{Ar} + m_1 I_{Br} + m_3 I_{Cr} \\ \phi_{cs} = m_s I_{as} + m_s I_{bs} + l_s I_{cs} + m_3 I_{Ar} + m_2 I_{Br} + m_1 I_{Cr} \end{cases}$$

(III.9)

Pour le Rotor

$$\begin{cases} \phi_{Ar} = l_r I_{Ar} + m_r I_{Br} + m_r I_{Cr} + m_1 I_{as} + m_2 I_{bs} + m_3 I_{cs} \\ \phi_{Br} = m_r I_{Ar} + l_r I_{Br} + m_r I_{Cr} + m_3 I_{as} + m_1 I_{bs} + m_2 I_{cs} \\ \phi_{Cr} = m_r I_{Ar} + m_r I_{Br} + l_r I_{Cr} + m_2 I_{as} + m_3 I_{bs} + m_1 I_{cs} \end{cases}$$

(III.10)

Notation

$$\begin{cases} m_1 = M_{rs} \cos(\theta) \\ m_2 = M_{rs} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ m_3 = M_{rs} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.11)$$

Et

$$[M_{sr}(\theta)] = [M_{rs}(\theta)]^T$$

Ou sous forme matriciel :

$$\begin{bmatrix} \theta_{as} \\ \theta_{bs} \\ \theta_{cs} \\ \theta_{Ar} \\ \theta_{Br} \\ \theta_{Cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s m_s m_s m_1 m_3 m_2 \\ m_s l_s m_s m_2 m_1 m_3 \\ m_s m_s l_s m_3 m_2 m_1 \\ m_1 m_2 m_3 l_r m_r m_r \\ m_3 m_1 m_2 m_r l_r m_r \\ m_2 m_3 m_1 m_r m_r l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \\ I_{Ar} \\ I_{Br} \\ I_{Cr} \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

Sous format compacté pour le stator

$$[\phi_{abc_s}] = [L_{ss}][I_{abc_s}] + [M_{sr}(\theta)][I_{ABC_r}] \quad (III.13)$$

Sous format compacté pour le rotor

$$[\theta_{ABC_r}] = [M_{rs}(\theta)][I_{abc_s}] + [L_{rr}][I_{ABC_r}] \quad (III.14)$$

Finalement, on obtient le système d'équations générales utilisables pour l'étude de tous les régimes, équilibres, permanent ou transitoires [34].

$$\begin{aligned}
V_{as} &= R_s I_{as} + l_s \frac{dI_{as}}{dt} + m_s \frac{dI_{bs}}{dt} + m_s \frac{dI_{cs}}{dt} + \frac{d}{dt} (m_1 I_{Ar} + m_3 I_{Br} + m_2 I_{Cr}) \\
V_{bs} &= R_s I_{bs} + l_s \frac{dI_{bs}}{dt} + m_s \frac{dI_{cs}}{dt} + m_s \frac{dI_{as}}{dt} + \frac{d}{dt} (m_2 I_{Ar} + m_1 I_{Br} + m_3 I_{Cr}) \\
V_{cs} &= R_s I_{cs} + l_s \frac{dI_{cs}}{dt} + m_s \frac{dI_{as}}{dt} + m_s \frac{dI_{bs}}{dt} + \frac{d}{dt} (m_3 I_{Ar} + m_2 I_{Br} + m_1 I_{Cr}) \\
V_{Ar} &= R_r I_{Ar} + l_r \frac{dI_{Ar}}{dt} + m_r \frac{dI_{Br}}{dt} + m_r \frac{dI_{Cr}}{dt} + \frac{d}{dt} (m_1 I_{as} + m_2 I_{bs} + m_3 I_{cs}) \\
V_{Br} &= R_r I_{Br} + l_r \frac{dI_{Br}}{dt} + m_r \frac{dI_{Cr}}{dt} + m_r \frac{dI_{Ar}}{dt} + \frac{d}{dt} (m_3 I_{as} + m_1 I_{bs} + m_2 I_{cs}) \\
V_{Cr} &= R_r I_{Cr} + l_r \frac{dI_{Cr}}{dt} + m_r \frac{dI_{Ar}}{dt} + m_r \frac{dI_{Br}}{dt} + \frac{d}{dt} (m_2 I_{as} + m_3 I_{bs} + m_1 I_{cs})
\end{aligned} \tag{III.15}$$

III.2.2.3 Equation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f\Omega \tag{III.16}$$

$$\Omega = \frac{1}{J} (C_e - C_r) \tag{III.17}$$

Avec :

C_e : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

f : Coefficient de frottement visqueux.

Ω : vitesse rotorique.

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

$f\Omega$: Terme de couple de frottement visqueux.

III.3 MODEL DE MADA DANS LE REPERE DE PARK :

La transformation de Park proposée par R.H. Park en 1920, largement utilisée pour la modélisation des machines à courant alternatif, correspond à une projection des grandeurs triphasées sur un repère diphasé tournant, le but étant d'éliminer la position dans la matrice de mutuelles inductances.

Il suffit pour cela d'effectuer un passage du système triphasé abc au système diphasé d-q par la transformation de Park [34].

III.3.1 Transformation de PARK

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de passage d'un système en triphasé vers un système en biphasé

La transformation de Park permet de ramener les variables du repère triphasé (a,b,c) sur les axes d'un repère biphasé tournant d-q ; les grandeurs statoriques et rotoriques sont exprimées dans un même repère comme le montre la (fig III.3) [35].

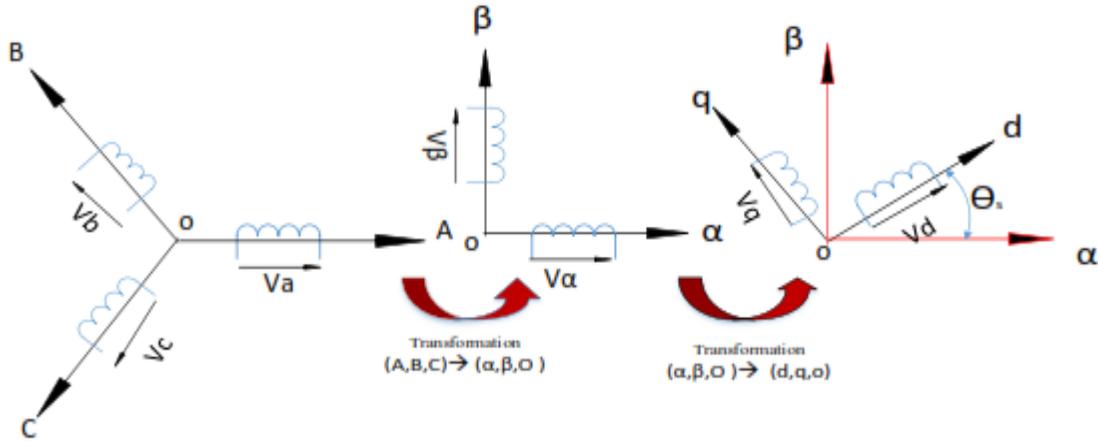


Fig.III.3 : transformation de Park.

Le passage direct :

$$[X_{dqo}] = [p(\theta)][X_{abc}] \quad (\text{III.18})$$

La matrice de transformation de Park est définie comme suit [36] :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) - \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) - \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Le passage inverse est :

$$[X_{abc}] = [p(\theta)^{-1}][X_{dqo}] \quad (\text{III.20})$$

La matrice de transformation inverse de Park est donnée par [36] :

$$[p(\theta)^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

La transformation de Park et la transformation inverse de Park aux équations statorique :

$$[V_{S_{s_{dqo}}}] = [p(\theta_s)][V_{S_{abc}}] \equiv [V_{S_{abc}}] = [p(\theta_s)]^{-1} [V_{S_{dqo}}] \quad (\text{III.22})$$

$$[I_{S_{s_{dqo}}}] = [p(\theta_s)][I_{S_{abc}}] \equiv [I_{S_{abc}}] = [p(\theta_s)]^{-1} [I_{S_{dqo}}] \quad (\text{III.23})$$

$$[\theta_{S_{s_{dqo}}}] = [p(\theta_s)][\theta_{S_{abc}}] \equiv [\theta_{S_{abc}}] = [p(\theta_s)]^{-1} [\theta_{S_{dqo}}] \quad (\text{III.24})$$

D'autre :

$$V_{S_{dqo}} = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{so} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de tension statorique dans le repère de Park.}$$

$$\text{Vecteur : } I_{S_{dqo}} = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{so} \end{bmatrix} \text{ des courants statorique dans le repère de Park.}$$

$$\theta_{S_{dqo}} = \begin{bmatrix} \theta_{sd} \\ \theta_{sq} \\ \theta_{so} \end{bmatrix} : \text{Vecteur des flux statorique dans le repère de Park}$$

La transformation de Park et la transformation inverse de Park aux équations rotorique :

$$[V_{r_{s_{dqo}}}] = [p(\theta_r)][V_{r_{abc}}] \equiv [V_{r_{abc}}] = [p(\theta_r)]^{-1} [V_{r_{dqo}}] \quad (\text{III.25})$$

$$[I_{r_{s_{dqo}}}] = [p(\theta_r)][I_{r_{abc}}] \equiv [I_{r_{abc}}] = [p(\theta_r)]^{-1} [I_{r_{dqo}}] \quad (\text{III.26})$$

$$[\theta_{r_{s_{dqo}}}] = [p(\theta_r)][\theta_{r_{abc}}] \equiv [\theta_{r_{abc}}] = [p(\theta_r)]^{-1} [\theta_{r_{dqo}}] \quad (\text{III.27})$$

D'autre :

$$V_{r_{dqo}} = \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ V_{ro} \end{bmatrix} : \text{Vecteur de tension rotorique dans le repère de Park.}$$

$$I_{r_{dqo}} = \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \\ I_{ro} \end{bmatrix} : \text{Vecteur des courants rotorique dans le repère de Park}$$

$$\theta_{r_{dqo}} = \begin{bmatrix} \theta_{rd} \\ \theta_{rq} \\ \theta_{ro} \end{bmatrix} : \text{Vecteur des flux rotorique dans le repère de Park}$$

III.3.2 Equation Electrique :

L'expression des équations de tension dans le repère de Park sont obtenu ainsi [36].

Au stator :

On multiplie l'équation de tension dans le repère abc(III.4) par la matrice de PARK $[P(\theta)]$:

$$[p(\theta_s)][V_{abc_s}] = [p(\theta_s)][R_s][I_{abc_s}] + [p(\theta_s)] \frac{d}{dt} [\phi_{abc_s}] \quad (III.28)$$

On obtient facilement :

$$[p(\theta_s)][p(\theta_s)]^{-1} [V_{sdqo}] = [p(\theta_s)][R_s][p(\theta_s)]^{-1} [I_{sdqo}] + [p(\theta_s)] \frac{d}{dt} ([p(\theta_s)]^{-1} [\phi_{sdqo}]) \quad (III.29)$$

Avec :

$$[p(\theta_s)][p(\theta_s)]^{-1} = 1$$

Matrice identique

Donc on peut écrire :

$$[V_{sdqo}] = [R_s] [I_{sdqo}] + [p(\theta_s)] \frac{d}{dt} ([p(\theta_s)]^{-1} [\phi_{sdqo}]) \quad (III.30)$$

On calcule séparément le terme :

$$\frac{d}{dt} ([p(\theta_s)]^{-1} [\phi_{sdqo}]) = \frac{d}{dt} ([p(\theta_s)]^{-1} [\phi_{sdqo}]) + [p(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt} ([\phi_{sdqo}]) \quad (III.31)$$

On remplace cette équation dans (III.27) on obtient :

$$[V_{sdqo}] = [R_s] [I_{sdqo}] + [p(\theta_s)] \frac{d}{dt} ([p(\theta_s)]^{-1} [\phi_{sdqo}]) + \frac{d}{dt} ([\phi_{sdqo}]) \quad (III.32)$$

Avec :

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

Finalement on abouti à:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{so} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{so} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{so} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} -\phi_{sq} \\ \phi_{sd} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.33)$$

Au rotor :

On multiplie l'équation de tension dans le repère abc(III.7) par la matrice de PARK $[P(\theta)]$:

$$[p(\theta_r)][V_{ABC_r}] = [p(\theta_r)][R_r][I_{ABC_r}] + [p(\theta_r)] \frac{d}{dt} [\phi_{ABC_r}] \quad (\text{III.34})$$

On obtient facilement :

$$[p(\theta_r)][p(\theta_r)^{-1} [V_{rdqo}]] = [p(\theta_r)][R_r][p(\theta_r)^{-1} [I_{rdqo}]] + [p(\theta_r)] \frac{d}{dt} ([p(\theta_r)^{-1} [\phi_{rdqo}]] \quad (\text{III.35})$$

Avec :

$$[p(\theta_s)][p(\theta_s)^{-1}] = 1$$

Matrice identique

Donc on peut écrire :

$$[V_{rdqo}] = [R_r] [I_{rdqo}] + [p(\theta_r)] \frac{d}{dt} ([p(\theta_r)^{-1} [\phi_{rdqo}]] \quad (\text{III.36})$$

On calcule séparément le terme :

$$\frac{d}{dt} ([p(\theta_r)^{-1} [\phi_{rdqo}]] = \frac{d}{dt} ([p(\theta_r)^{-1} [\phi_{rdqo}]] + [p(\theta_r)^{-1}] \frac{d}{dt} ([\phi_{rdqo}]) \quad (\text{III.37})$$

On remplace les équations (III.35) dans (III.33) on obtient :

$$[V_{rdqo}] = [R_r] [I_{rdqo}] + [p(\theta_r)] \frac{d}{dt} ([p(\theta_r)^{-1} [\phi_{rdqo}]] + \frac{d}{dt} ([\phi_{rdqo}]) \quad (\text{III.38})$$

Avec

$$[p(\theta_r)] \frac{d}{dt} ([p(\theta_r)^{-1}] = \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Finalement on abouti à :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ V_{ro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \\ I_{ro} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \\ \phi_{ro} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} -\phi_{rq} \\ \phi_{rd} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.39})$$

III.3.3 Equation magnétique :

On prend l'équation (III.13) de l'expression de flux statorique et on multiplie par la matrice de transformation $p(\theta_s)$:

$$[p(\theta_s)][\phi_{abc_s}] = [p(\theta_s)][L_{SS}][I_{abc_s}] + [p(\theta_s)][M_{sr}][p(\theta_r)^{-1} [I_{rdqo}]] \quad (\text{III.40})$$

On retrouve, après un développement le flux statorique dans le repère de Park comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{so} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{so} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \\ I_{ro} \end{bmatrix} \quad (III.41)$$

Avec

$l_s = L_{ss} - M_{ss}$: Inductance cyclique statorique de la machine

$M = \frac{2}{3} M_{sr}$: Inductance magnétique de la machine

Pour le rotor, on multiplie les expressions de flux rotoriques (III.14) par la matrice de transformation $p(\theta_r)$:

$$[p(\theta_r)][\Phi_{ABC_r}] = [p(\theta_r)][L_{rr}][I_{ABC_r}] + [p(\theta_r)][M_{sr}][p(\theta_s)^{-1}][I_{r_{dqo}}] \quad (III.42)$$

On retrouve, après un développement le flux rotorique dans le repère de Park comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{ro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \\ I_{ro} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{so} \end{bmatrix} \quad (III.43)$$

$l_r = L_{rr} - M_{rr}$

l_r : Inductance cyclique rotorique de la machine.

En étant compte des équations (III.31), (III.39), (III.41) et (III.43), on peut écrire les tensions et les flux magnétiques dans le repère de Park comme suit :

	Stator	Rotor
Tension	$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} - \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \\ V_{so} = R_s I_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt} \end{cases} \quad (III.44)$	$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} - \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \\ V_{ro} = R_r I_{ro} + \frac{d\Phi_{ro}}{dt} \end{cases} \quad (III.45)$
Flux	$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s I_{sd} + M L_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s I_{sq} + M L_{rq} \end{cases} \quad (III.46)$	$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M L_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r I_{rq} + M L_{sq} \end{cases} \quad (III.47)$

Tableau. III.1 : les Tensions et les flux du MADA dans le repère de Park

III.3.4 Expression du couple électromagnétique :

$$C_e = P \frac{M}{L_s} (I_{rd} \ \phi_{sq} - I_{rq} \ \phi_{sd}) = PM (I_{rd} \ I_{sq} - I_{sd} \ I_{rq}) \quad (\text{III.48})$$

P : Nombre de pair de pole.

l_s : Inductance propre statorique.

C_e : Couple électromagnétique.

ϕ_{sq}, ϕ_{sd} : Flux statorique

III.3.5 Equation mécanique :

Le système d'équation électrique et magnétique est complété par l'équation mécanique :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_e - C_r - f\Omega_m \quad (\text{III.49})$$

Ω_m : vitesse mécanique du rotor.

C_r : Couple résistant.

J : moment d'inertie de la partie tournante.

F : Coefficient de frottement visqueux

III.4 Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statorique et rotorique. En considérant les courants statorique et rotorique comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} X' = \frac{dx}{dt} = AX + BU \\ Y = C.X \end{cases} \quad (\text{III.50})$$

Avec

X : Vecteur d'état.

A : Matrice d'évolution d'état du système.

B : Matrice de la commande.

U : Vecteur du système de commande.

Y : vecteur de sortie.

C : Matrice de sortie (matrice d'observation).

Où :

$$X = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix}; c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Par une représentation matricielle :

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s l_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega)M & -R_r & (\omega_s - \omega)L_r \\ (\omega_s - \omega)M & 0 & (\omega_s - \omega)L_r & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.51})$$

Et :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s l_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega)M & -R_r & (\omega_s - \omega)L_r \\ (\omega_s - \omega)M & 0 & (\omega_s - \omega)L_r & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.52})$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s l_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega)M & -R_r & (\omega_s - \omega)L_r \\ (\omega_s - \omega)M & 0 & (\omega_s - \omega)L_r & -R_r \end{bmatrix} \text{ et } [L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

Alors l'équation (III.44) dévient :

$$\frac{dX}{dt} = [L]^{-1} \cdot [Z] \cdot X + [L]^{-1} \cdot U \quad (\text{III.53})$$

Par analogie de l'équation (III.51) avec l'équation (III.48) on trouve :

$$A = [L]^{-1} \cdot [Z] \text{ et } B = [L]^{-1}$$

Dans le but de simplifier la réalisation par Simulink /MATLAB la matrice [Z] peut être décomposée de la forme suivante :

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, [Z_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}, [Z_3] = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & M \\ -L_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.54})$$

III.5 Modélisation du Système de l'alimentation de la MADA

Pour entraîner en rotation une machine asynchrone, plusieurs méthodes sont utilisables, débranchement direct sur le réseau, aux variateurs de vitesse en passant par les démarreurs. Un variateur de vitesse peut avoir différents objectifs [37] :

- Obtenir des performances importantes dans différentes phases de fonctionnement :
Tourner à différentes vitesses, suivre des profils dynamiques de vitesse, garder une vitesse constante malgré une variation du couple de charge, etc

- Augmenter la durée de vie des moteurs à induction en maîtrisant le niveau de courant dans ces enroulements.
- Minimiser la consommation d'énergie.

On a vu précédemment plusieurs configurations de commande de la MADA à vitesse variable.

Ce système comporte une alimentation à fréquence variable, liée au rotor. L'alimentation comporte les trois parties suivantes :

- Un redresseur triphasé double alternance à diodes
- Un filtre passe-bas passif (L, C).
- Un onduleur de tension à MLI.

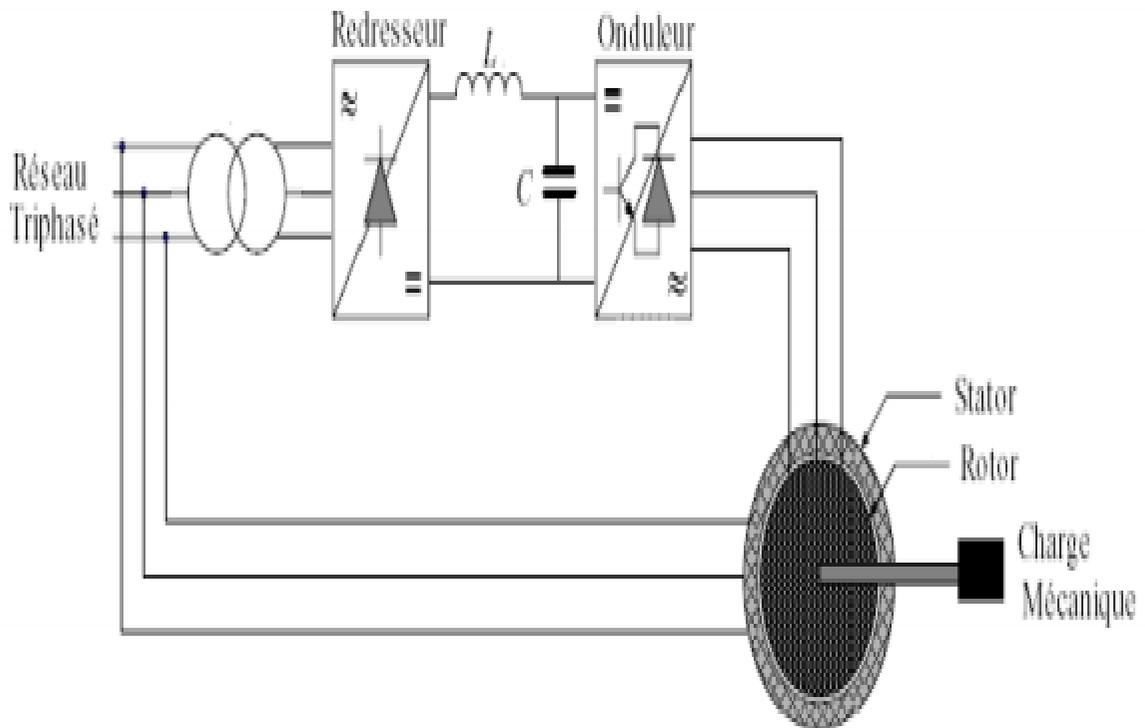


Fig. III.4 : Schéma synoptique proposé pour l'alimentation de la machine

III.5.1 Modélisation du redresseur triphasé à diode

Le redresseur est un convertisseur « alternatif / continu ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternative et il est représenté par la (fig III.9).

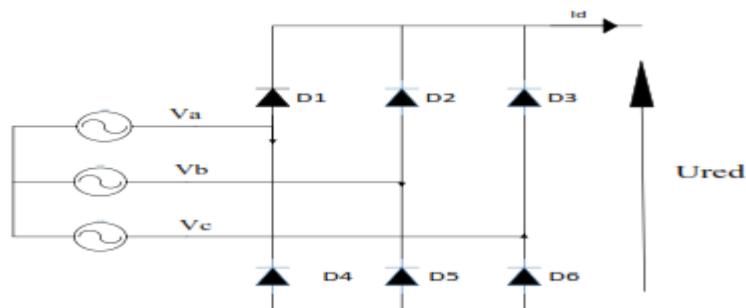


Fig.III.5 : Schéma d'un redresseur triphasé double alternance à diodes.

Ce redresseur comporte trois diodes (D1, D2, D3) à cathode commune assurant l'allée du courant I_d et trois diodes (D4, D5, D6) à anode commune assurant le retour du courant I_d . Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_b = V_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.55})$$

Et si on néglige l'effet d'empiétement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme Suite :

$$V_{red}(t) = \text{Max}[V_a(t), V_b(t), V_c(t)] - \text{Min}[V_a(t), V_b(t), V_c(t)] \quad (\text{III.56})$$

Sa valeur moyenne et donne par :

$$U_{red} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (\text{III.57})$$

La tension redressée est représentée par la figure (III.10):

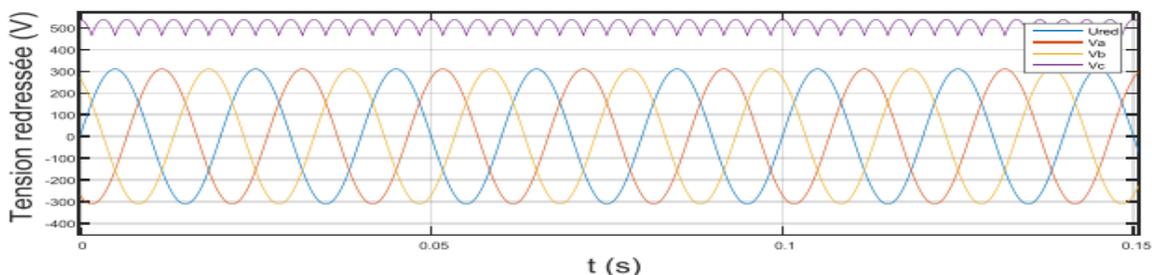


Fig.III.6 : Représentation de la tension redressée.

La tension obtenue par ce redresseur présente des ondulations importantes, ce qui nécessite un filtre.

III.5.2 Modélisation du filtre :

Pour corriger la source de tension continue, on insère à l'entrée de l'onduleur une capacité C , celle-ci absorbe la différence entre le courant unidirectionnel I_d et supprime les brusques variations de V_{dc} lors des commutations ; par contre, pour réduire l'ondulation du courant I et protéger l'onduleur contre la vitesse critique de croissance du courant di/dt , on place en série une inductance de lissage L . L'ensemble (C,L) constitue un filtre pas bas .Figure (III.7)[38] :

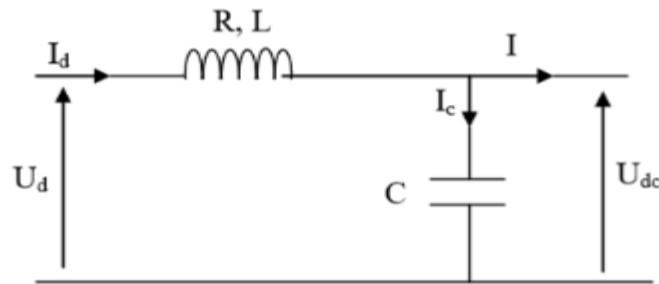


Fig.III.7 : Représentation du filtre RLC.

Les équations du filtre sont données par :

$$\begin{cases} U_d(t) = L \frac{dI_d}{dt} + RI_d + U_{dc}(t) \\ \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C} (I_d(t) - I(t)) \end{cases} \quad (\text{III.58})$$

U_d : est la tension redressée.

U_{dc} : est la tension filtrée appliquée à l'onduleur.

- a) Le rôle de la capacité C est d'assurer le caractère de la source de tension à l'entrée de l'onduleur, de fournir de l'énergie réactive à la machine, et d'absorber le courant négatif restitué par la charge.
- b) Le rôle de l'inductance L est de lisser le courant I_d à travers la source de tension.

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{U_{filtre}}{U_{redressée}} = \frac{1}{LCS^2 + RCS + 1} \quad (\text{III.59})$$

C est un filtre de deuxième ordre dont la pulsation de coupure est :

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2 \cdot \pi \cdot f_c \quad (\text{III.60})$$

f_c : est la fréquence de coupure du filtre

III.5.3 Modélisation de L'onduleur de Tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui permet de fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables à partir d'une source de tension continue. L'onduleur de tension est constitué de cellule de commutation généralement à transistors ou à thyristors pour les grandes puissances. Le schéma de l'onduleur est représenté par la figure (III.12). Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Donc pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne [39].

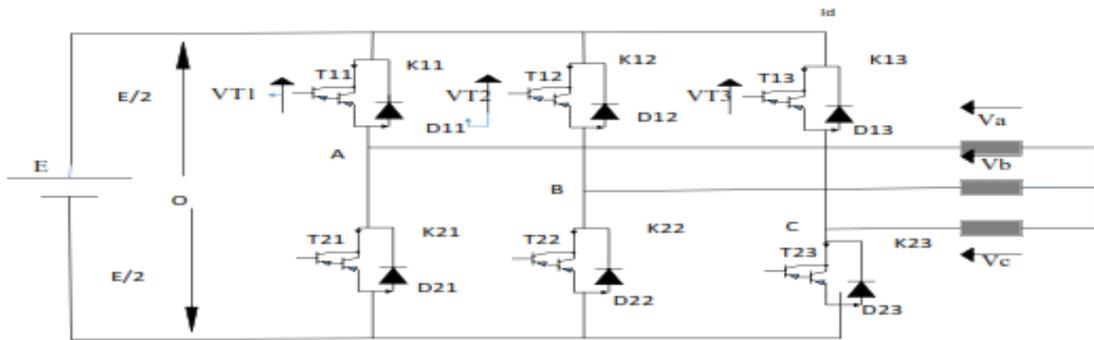


Fig.III.8 : Schéma de l'onduleur de tension.

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_{AC} = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (III.61)$$

Donc:

$$V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0 \quad (III.62)$$

D'ou :

$$V_{ON} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (III.63)$$

On remplace (III.61) dans (III.64), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_V = \frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (III.64)$$

On peut écrire le système (III.65) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (III.65)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2}S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2}S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2}S_3 \end{cases} \quad (III.66)$$

Tel que :

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

On remplace (III.67) dans (III.66), on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.67})$$

Le système (III.68) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI. Le tableau ci-dessous montre les expressions qui prennent les tensions simples et les tensions composées, en fonction de l'état ouvert ou fermé des interrupteurs K_1, K_2, K_3 (les états de K_4, K_5, K_6 sont respectivement complémentaires de ceux de K_1, K_2, K_3).

K_{11}	K_{12}	K_{13}	V_{AO}	V_{BO}	V_{CO}	V_A	V_B	V_C	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}
F	F	F	$E/2$	$E/2$	$E/2$	0	0	0	0	0	0
F	0	F	$E/2$	$-E/2$	$E/2$	$E/3$	$-2E/3$	$E/3$	E	$-E$	0
F	F	0	$E/2$	$E/2$	$E/2$	$E/3$	$-E/3$	$-2E/3$	0	E	$-E$
F	0	0	$E/2$	$-E/2$	$E/2$	$2E/3$	$-E/3$	$-E/3$	E	0	$-E$
0	F	F	$-E/2$	$E/2$	$E/2$	$-2E/3$	$E/3$	$E/3$	$-E$	0	E
0	0	F	$-E/2$	$-E/2$	$E/2$	$-E/3$	$-E/3$	$2E/3$	0	$-E$	E
0	F	0	$-E/2$	$E/2$	$E/2$	$-E/3$	$2E/3$	$-E/3$	$-E$	E	0
0	0	0	$-E/2$	$-E/2$	$E/2$	0	0	0	0	0	0

Tableau III.2 : Etablissement des expressions des tensions simples et composées

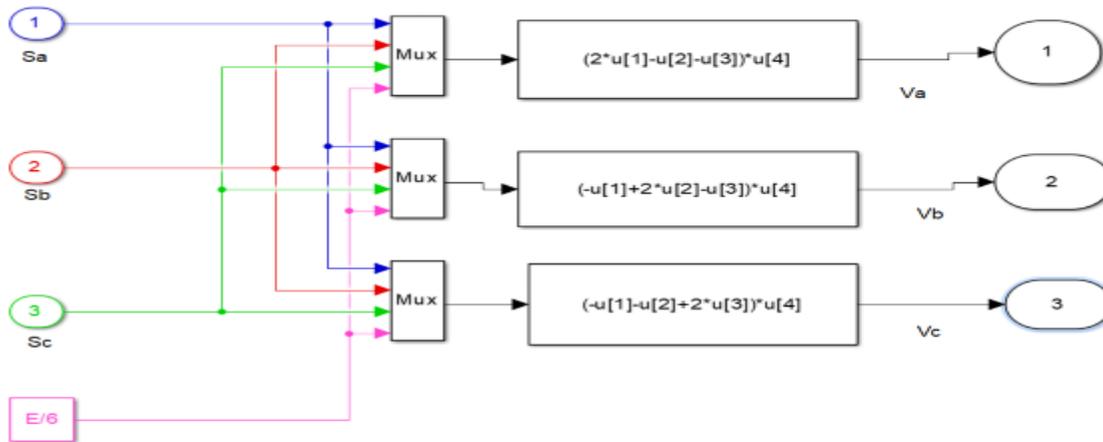


Fig. III.9 : Modèle sous Simulink de l'onduleur triphasé.

III.5.4 Le principe de la commande MLI

Elle consiste à convertir une modulante tension de référence (au niveau de commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs. Le signal modulé est généré à la sortie de l'onduleur (au niveau de puissance). Le principe de modulation MLI repose sur la comparaison de

la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation généralement de forme triangulaire). Dans ce travail, on va utiliser la MLI naturelle en se basant sur la comparaison entre deux signaux pour commander chaque bras de convertisseur.

Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale [40].

- L'indice de modulation m qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et

La fréquence f_r de la référence : $m = \frac{f_p}{f_r}$

- Le taux de modulation r (ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_p à la valeur crête V_r

de la porteuse : $r = \frac{V_r}{V_p}$

Le schéma de principe est donné par :

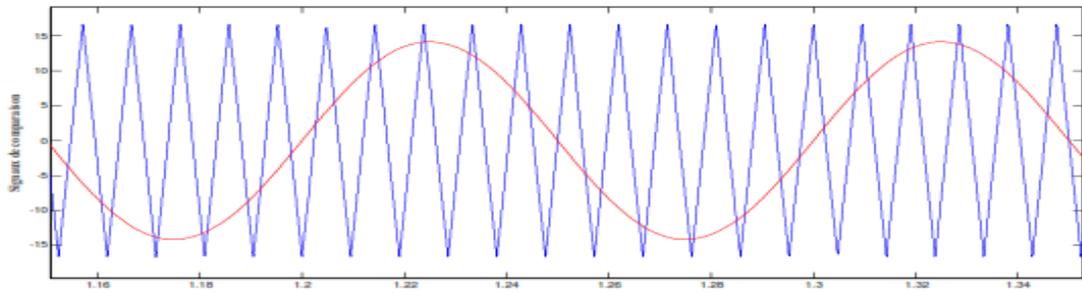


Fig.III.10 : Signaux de comparaison (référence et porteuse).

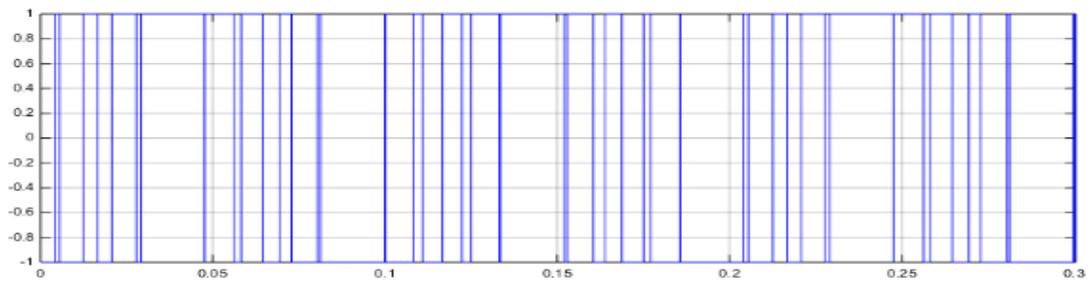


Fig. III.11 : Impulsion de commande du premier transistor.

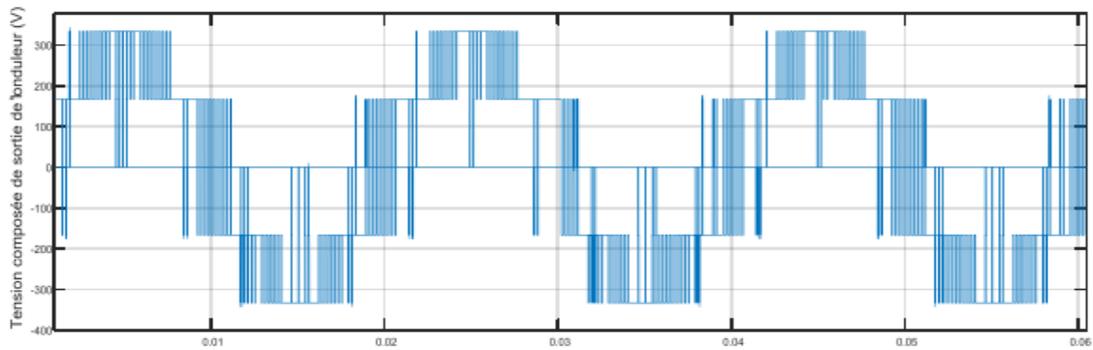


Fig.III.12 : Tension composée de sortie de l'onduleur (V)

Les six signaux de références sont donnés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{rA} = V_r \sin 2\pi f_r t \\ V_{rB} = V_r \left(\sin 2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ V_{rC} = V_r \left(\sin 2\pi f_r t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad \text{(III.68)}$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$\begin{cases} x_1(t) = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) \\ x_2(t) = V_p \left(-1 - 4 \frac{t}{T_p} \right) \end{cases} \quad \text{Si} \quad \begin{cases} t \in \left[0; \frac{T_p}{2} \right] \\ t \in \left[\frac{T_p}{2}; T_p \right] \end{cases} \quad \text{(III.69)}$$

Ou :

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S1, S2, S3 des interrupteurs de l'onduleur. Ceux-ci sont donnés par l'équation suivante [39]

$$S_{123} = \begin{cases} 1 & \text{si } (V_{r_{ABC}} - x(t) \geq 0) \\ -1 & \text{si } (V_{r_{ABC}} - x(t) < 0) \end{cases} \quad (\text{III.70})$$

f : Fréquence de la tension de référence (en Hz).

T_p : Période de la porteuse (en seconde).

V_P : Amplitude de la tension de référence (en V). V_{ref} : Tension de référence (en V).

P_m : Valeur crête de l'onde de modulation (en V).

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de la machine asynchrone doublement alimentée MADA dans le repère de Park. Ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices qu'on doit les respecter. Lors de cette modélisation, nous sommes attachés à développer un modèle en vue de la commande.

Comme on a pu le voir, le modèle mathématique obtenu est fortement non-linéaire et présente des dynamiques différentes et d'ordre élevé. De plus, l'expression du couple électromagnétique montre une interaction complexe entre les champs statorique et rotorique. De ce fait, l'analyse et le contrôle de tels systèmes peuvent s'avérer difficiles.

Ensuite, on a modélisé le système d'alimentation qui comporte le redresseur, le filtre et l'onduleur. Pour ce dernier, on a appliqué la technique de la MLI pour la commander. La modélisation de la MADA et son système d'alimentation.

Chapitre IV

Simulation de la chaîne de production d'énergie éolienne

IV.1 Introduction

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique ou, à défaut, la simulation du processus est nécessaire. La chaîne de conversion a été modélisée et simulée à l'aide des logiciels MATLAB-Simulink. Les convertisseurs électroniques présentés précédemment ont besoin, pour fonctionner, de recevoir des ordres de commande. A l'aide du logiciel de simulation MATLAB-Simulink, on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc.

IV.2 SIMULATION DE LA CHAÎNE GLOBALE

Le schéma bloc global du système étudié sous MATLAB/SIMULINK est donné (voir la fig.IV.1)

La turbine éolienne couplé avec la machine asynchrone à double alimentation (MADA) ; le stator de la machine est connecté directement au réseau triphasé, le rotor alimenté par un onduleur triphasé à deux niveaux commandé par MLI

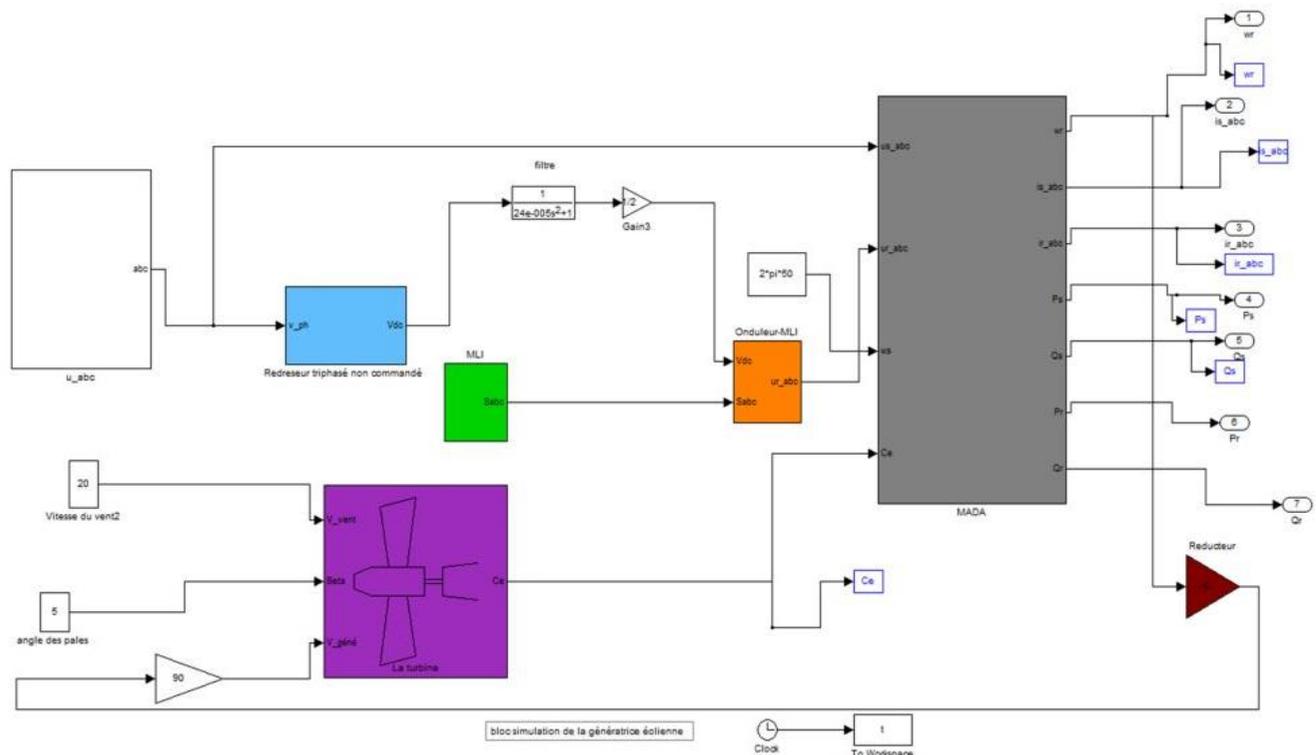


Fig.IV.1 : schéma bloc de la chaîne de conversion (MATLAB-Simulink)

IV.2.1 Machine asynchrone double alimentation

La machine asynchrone double alimentation est utilisée dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. On utilise une MADA pour convertir l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Son schéma bloc est représenté dans la (fig.IV.2)

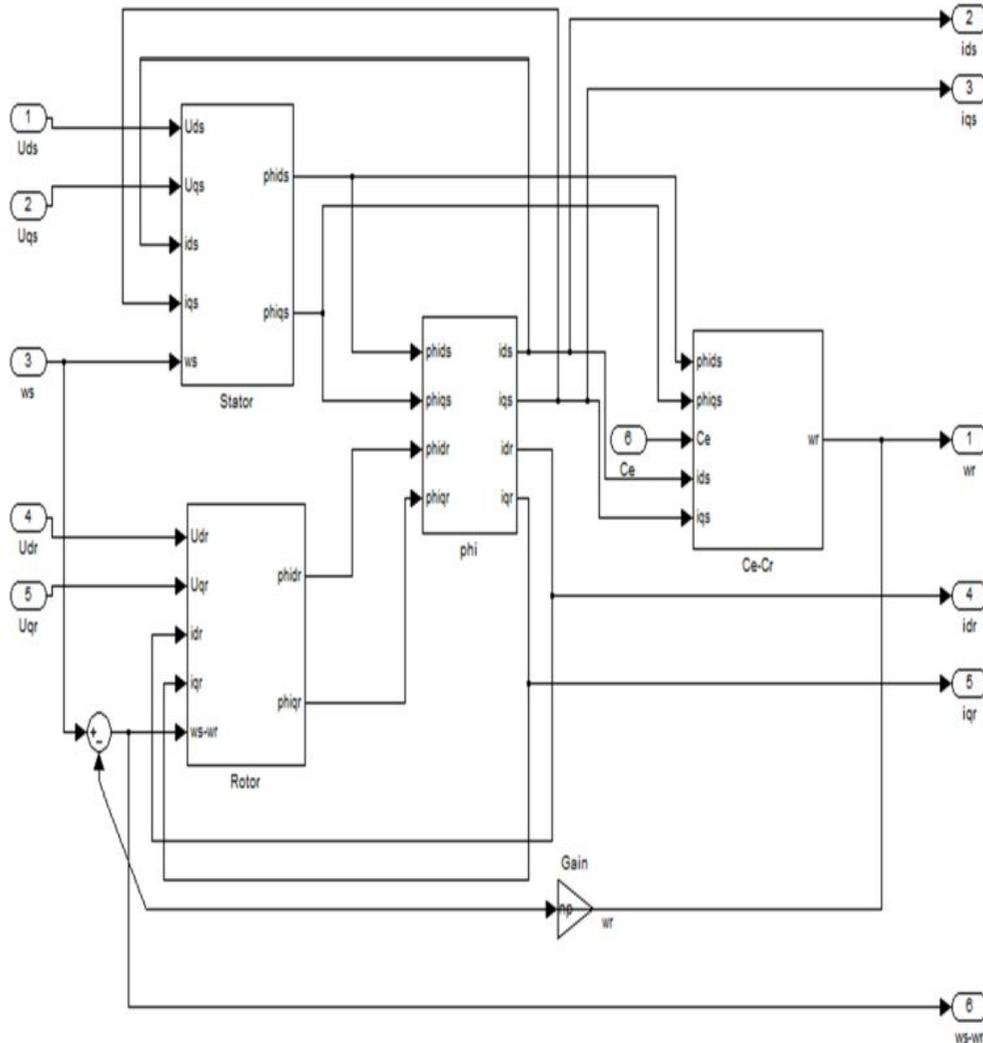


Fig.IV.2 : Schéma bloc Machine asynchrone double alimentation.

IV.2.2 Onduleur

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou des thyristors GTO pour les grandes puissances. Le séquençage imposé aux interrupteurs statiques permet de réaliser un choix précis du vecteur de tension à appliquées à la charge. Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour

assurer la continuité en courants, chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération. Le schéma du modèle de l'onduleur est illustré par la (fig.IV.3).

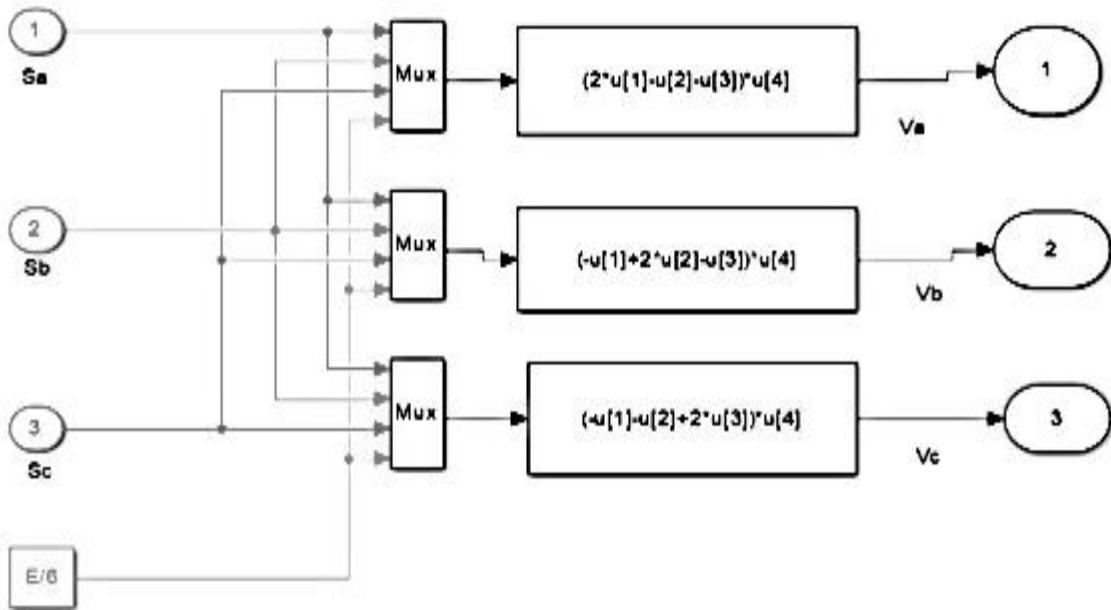


Fig.IV-3 : Modèle de l'onduleur de tension.

IV.2.3 La commande MLI

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire compare trois modulatrices sinusoïdales décalées de 120° entre elles avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. Le modèle mathématique de la commande MLI présentée en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink est illustré par la (fig.IV.4).

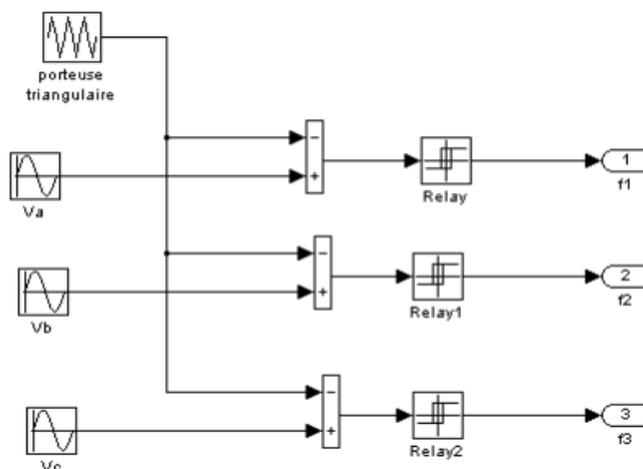


Fig.IV.4 : Modèle de la commande MLI à porteuse triangulaire

IV.3 RESULTATS DE SIMULATION

Dans cette partie, quelques résultats de simulation d'une éolienne reposant sur la machine asynchrone double alimentation obtenus sous MATLAB/Simulink sont présentés, (à partir des paramètres fournis en annexe).

On commence notre simulation avec une vitesse de vent test de 16m/s de manière à montrer un résultat de simulation de la génératrice éolienne sous différents paramètres

- **Vitesse mécanique**

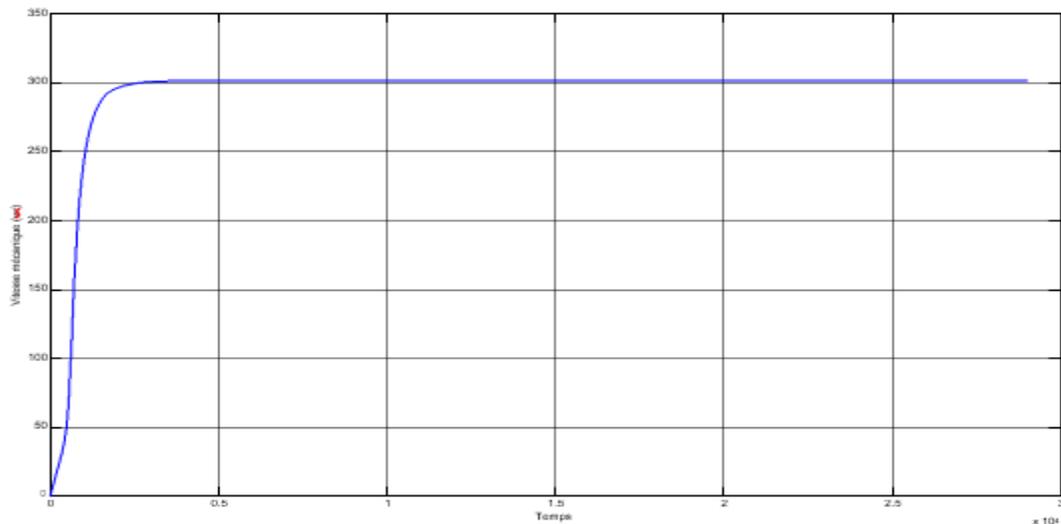


Fig.IV.5. résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique »

- **Couple électromagnétique**

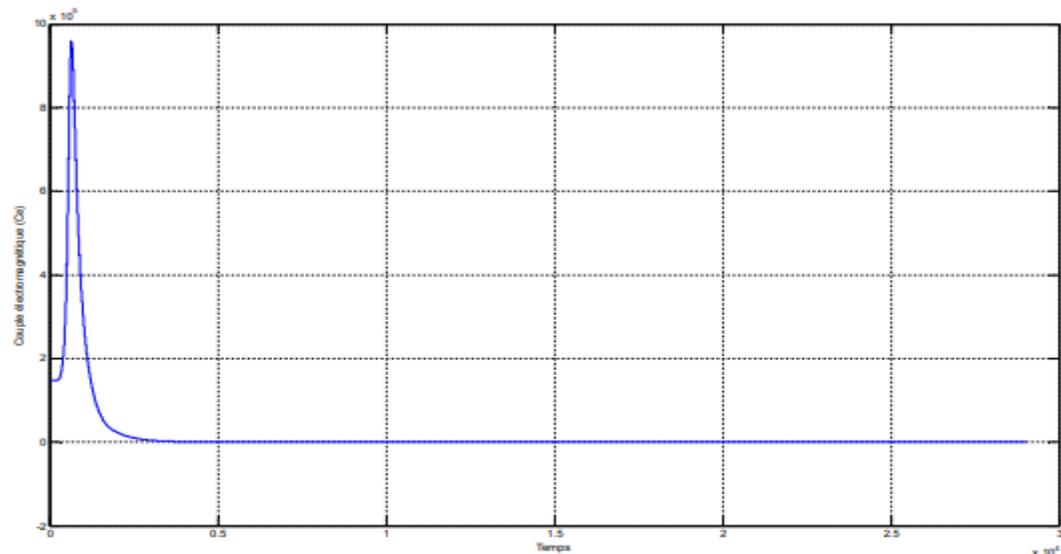


Fig.IV.6. résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique »

- Courant statorique

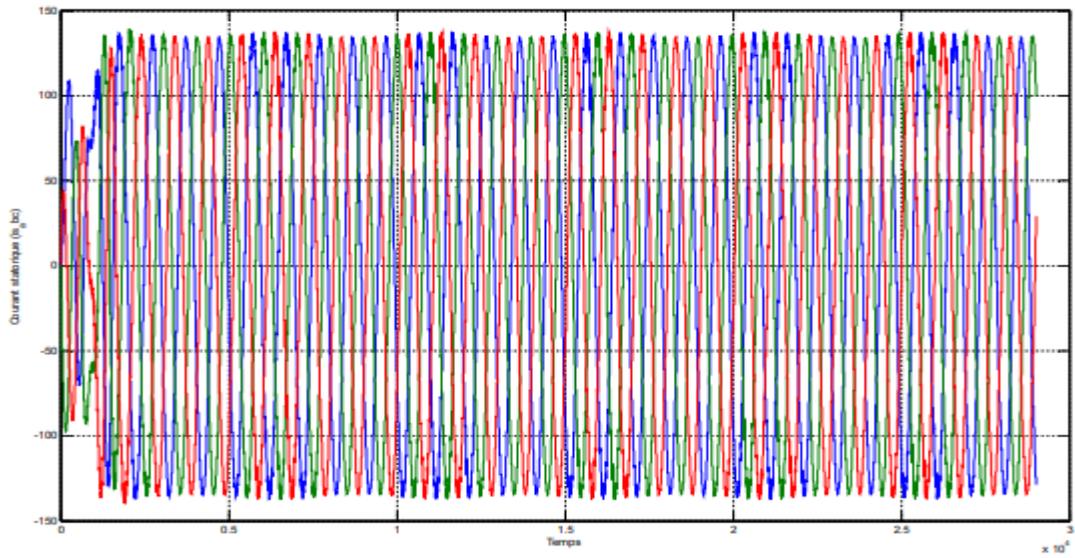


Fig.IV.7. résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique »

- Puissance active et réactive statorique

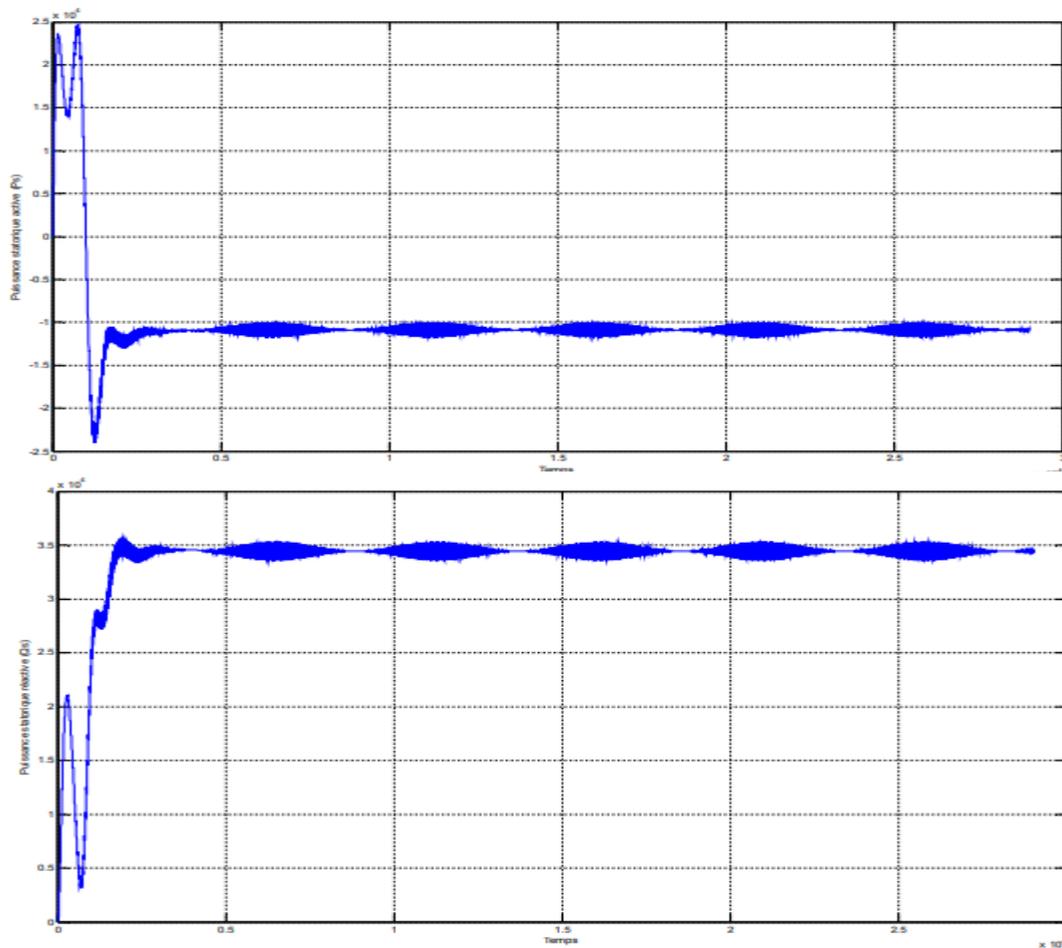


Fig.IV.8. résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive »

➤ **Interprétation**

Les résultats de simulation obtenus montrent bien la réponse dynamique rapide de la vitesse mécanique. Cette dernière atteint une valeur légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme ça dépend de plusieurs paramètres, principalement à la vitesse de vent, l'angle de calage.

Des fluctuations sont présentées au niveau des puissances dues à la technique MLI à cause des commutations des interrupteurs de l'onduleur.

Notons aussi que la machine génère plus de l'énergie réactive que l'énergie active pour cette vitesse de vent 16m/s.

- ❖ Suivant notre thème étudier on doit prendre des vitesses de vent variable pour ce cas on va prendre une vitesse moyenne d'un vent faible, moyen et fort ou on va sortir des résultats et leur interprétation puis à la fin on sorte avec comparaison des résultats des différentes vitesses de vent en plus une conclusion sur les résultats.

IV.3.1 Résultats de simulation pour une vitesse de vent 5 m/s

Dans ce premier cas on va prendre une vitesse moyenne de vent faible (5 m/s)

- **Vitesse mécanique**

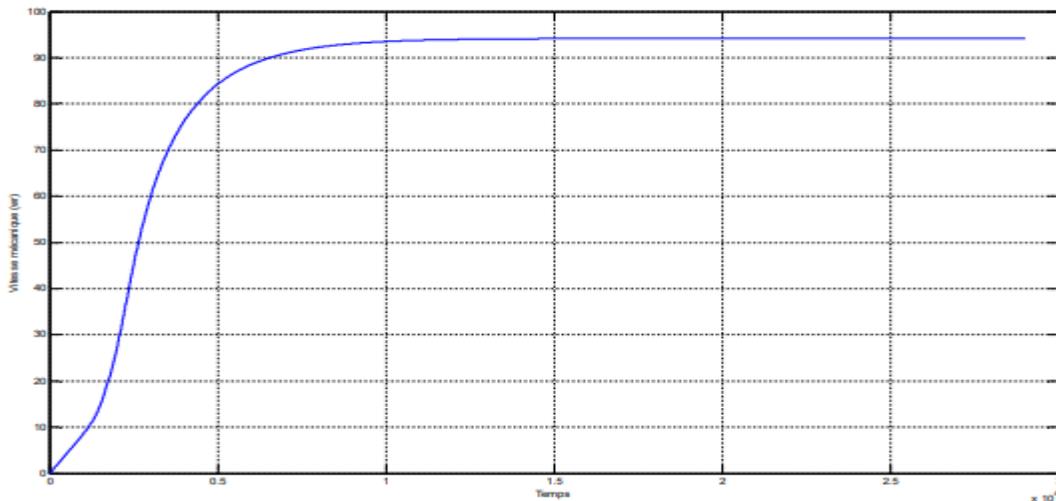


Fig.IV.9. résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique pour $V=5\text{m/s}$ »

- **Couple électromagnétique**

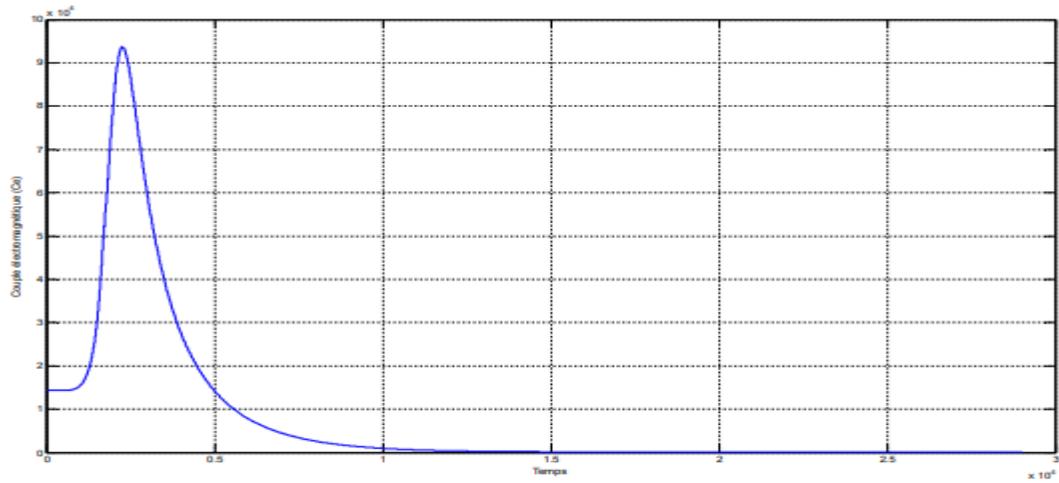


Fig.IV.10. résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour $V=5\text{m/s}$ »

- Courant statorique

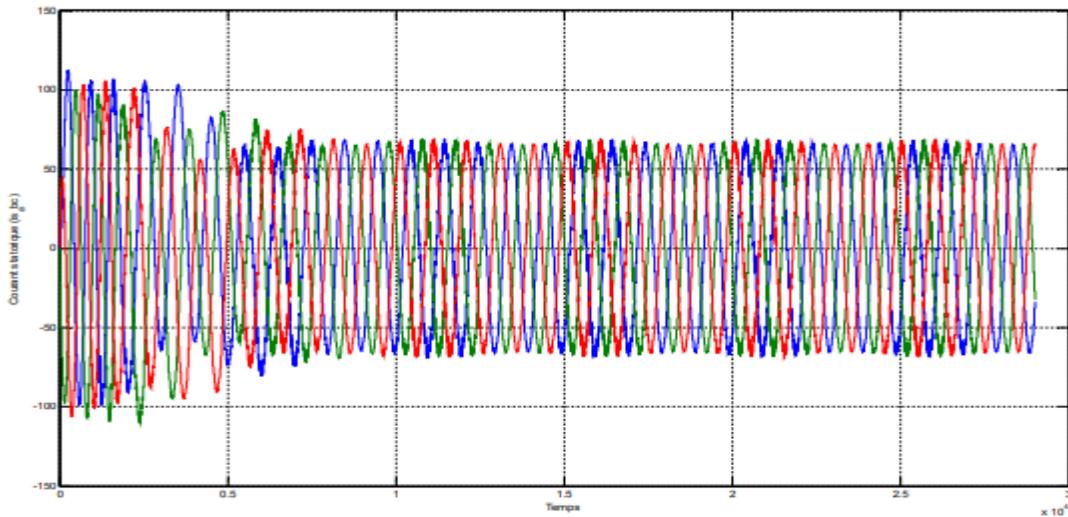
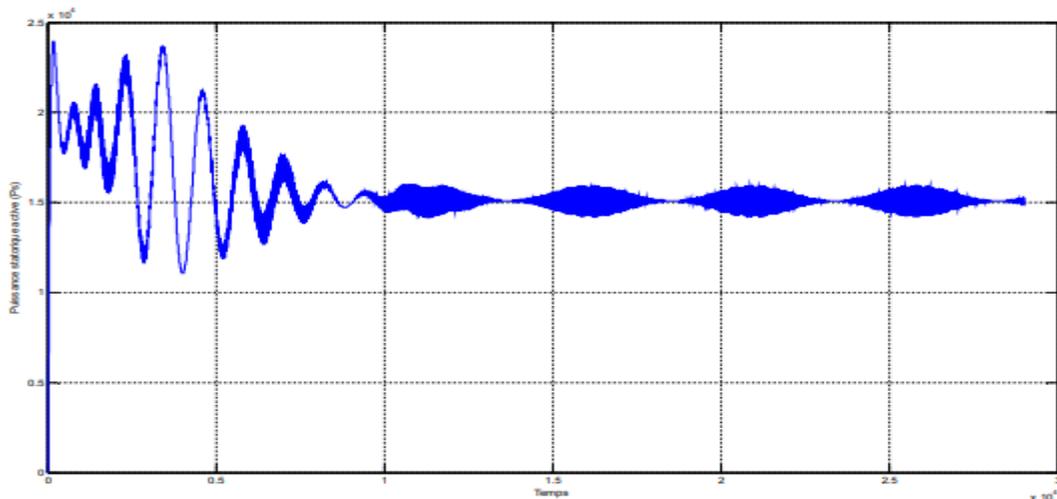


Fig.IV.11. résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour $V=5\text{m/s}$ »

- Puissance active et réactive statorique



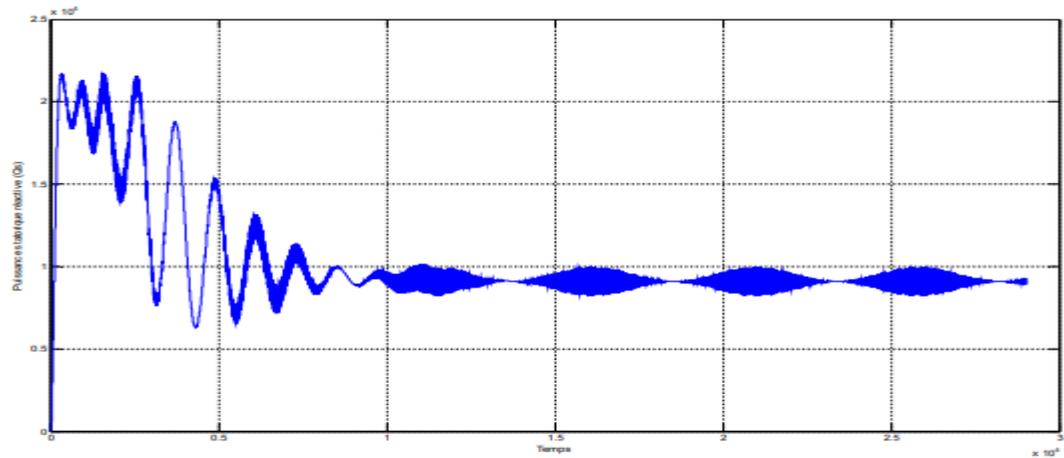


Fig.IV.12. de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive statorique pour $V=5\text{m/s}$ »

➤ Interprétation

Les résultats de simulation montrent que la réponse dynamique de la vitesse mécanique est plus lente, prenant un temps de 0,044 s pour atteindre une vitesse maximale de 95,9 rad/s. On note aussi que pour cette vitesse de vent la génératrice génère une puissance active plus grande que la puissance réactive.

Dans ce cas on voit que la génératrice éolienne absorbe une puissance active ce qui représente le fonctionnement de la MADA comme moteur (l'énergie active absorbée par la génératrice éolienne est avec un signe (+))

IV.3.2 Résultats de simulation pour une vitesse de vent 10 m/s

Dans ce deuxième cas on va prendre une vitesse moyenne de vent moyen (10 m/s)

• Vitesse mécanique

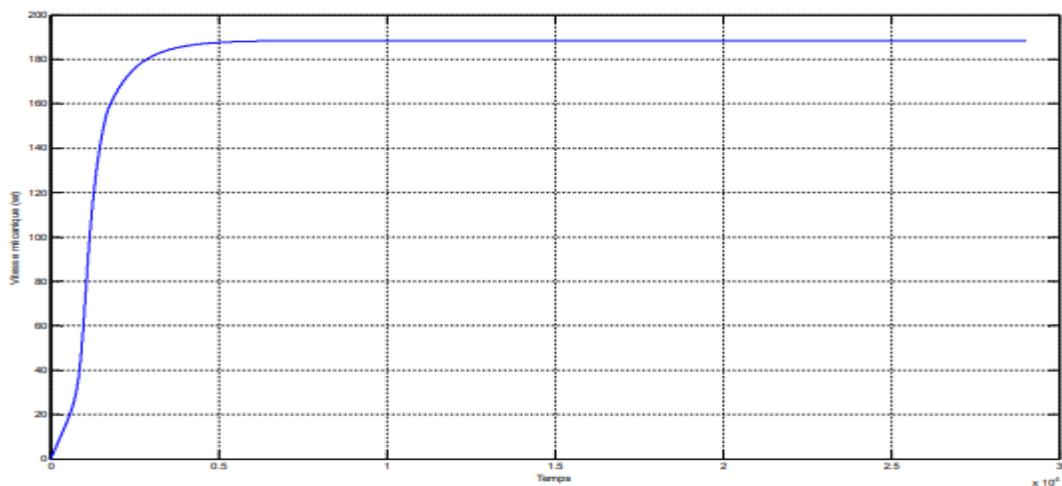


Fig.IV.13. résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse mécanique pour $V=10\text{m/s}$ »

- Couple électromagnétique

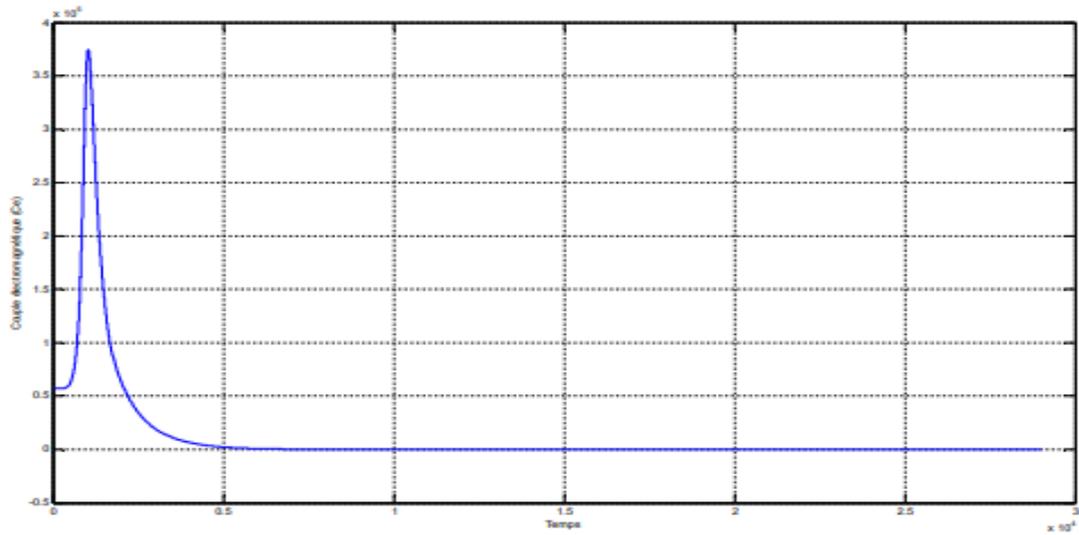


Fig.IV.14. résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour $V=10\text{m/s}$ »

- Courant statorique

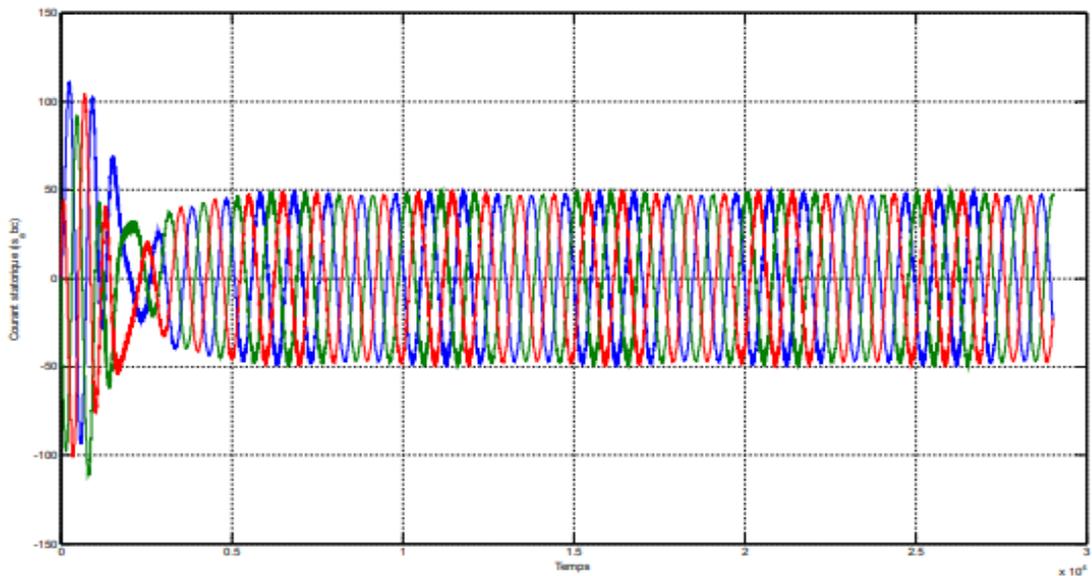


Fig.IV.15. résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour $V=10\text{m/s}$ »

- **Puissance active et réactive statorique**

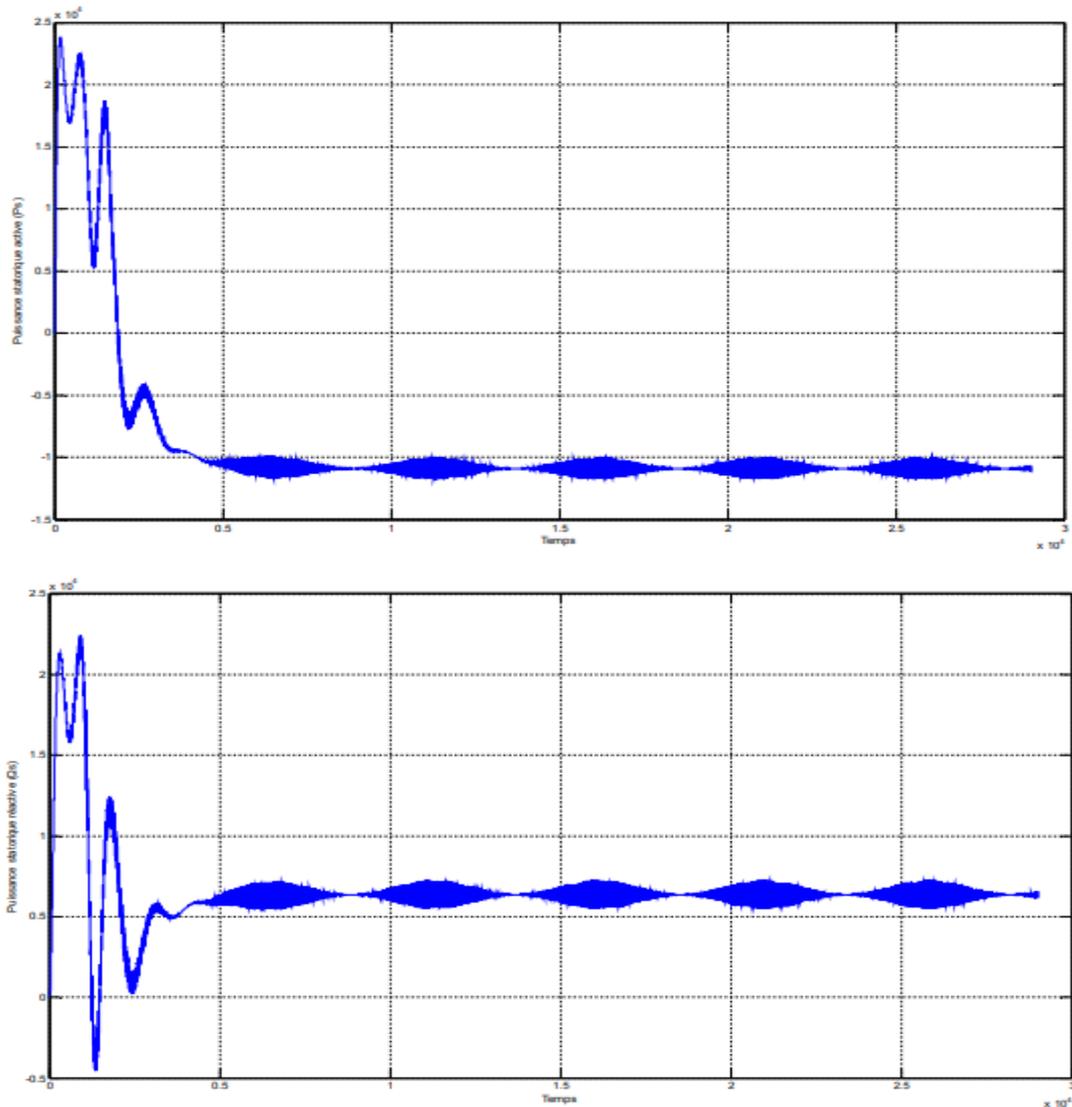


Fig.IV.16. résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive statorique pour $V=10\text{m/s}$ »

➤ **Interprétation**

Les résultats de simulation montre que la réponse dynamique de la vitesse mécanique mis un temps de 0.021s pour atteindre une vitesse maximal de 188.47rad/s. on constate que pour cette vitesse de vent la génératrice génère plus de puissance réactive que la puissance active

Dans ce cas on voit que la génératrice éolienne génère une puissance active qui donne un fonctionnement de la MADA comme génératrice (l'énergie active générer est avec un signe(-))

IV.3.3 Résultats de simulation pour une vitesse de vent 20 m/s

- Vitesse mécanique

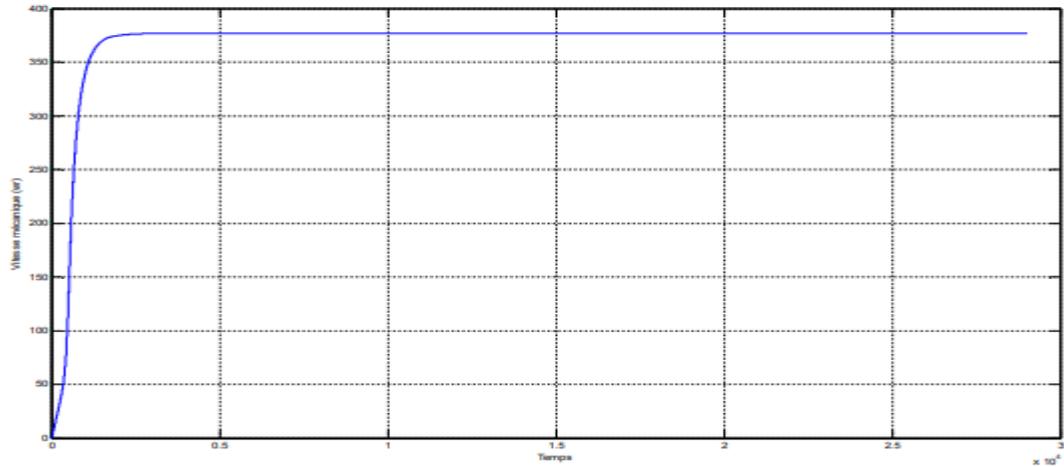


Fig.IV.17. résultat de simulation de la génératrice éolienne « vitesse m mécanique pour $V=20\text{m/s}$ »

- Couple électromagnétique

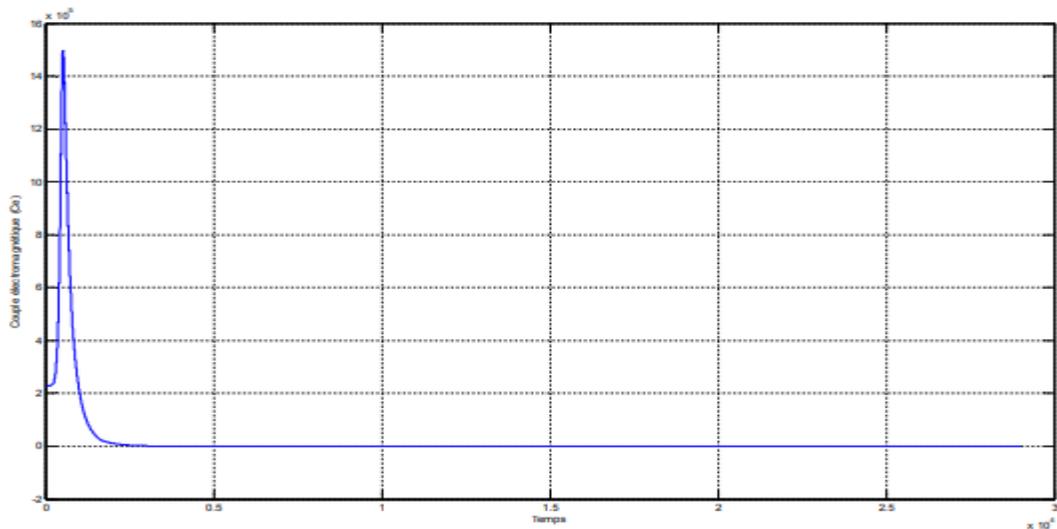


Fig.IV.18. résultat de simulation de la génératrice éolienne « couple électromagnétique pour $V=20\text{m/s}$ »

- Courant statorique

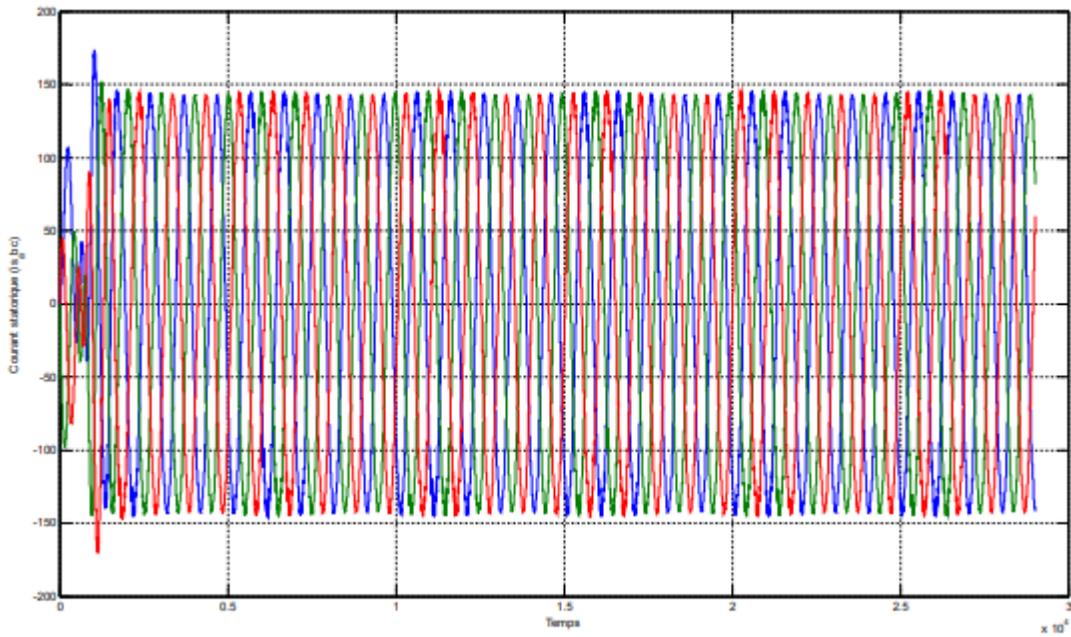
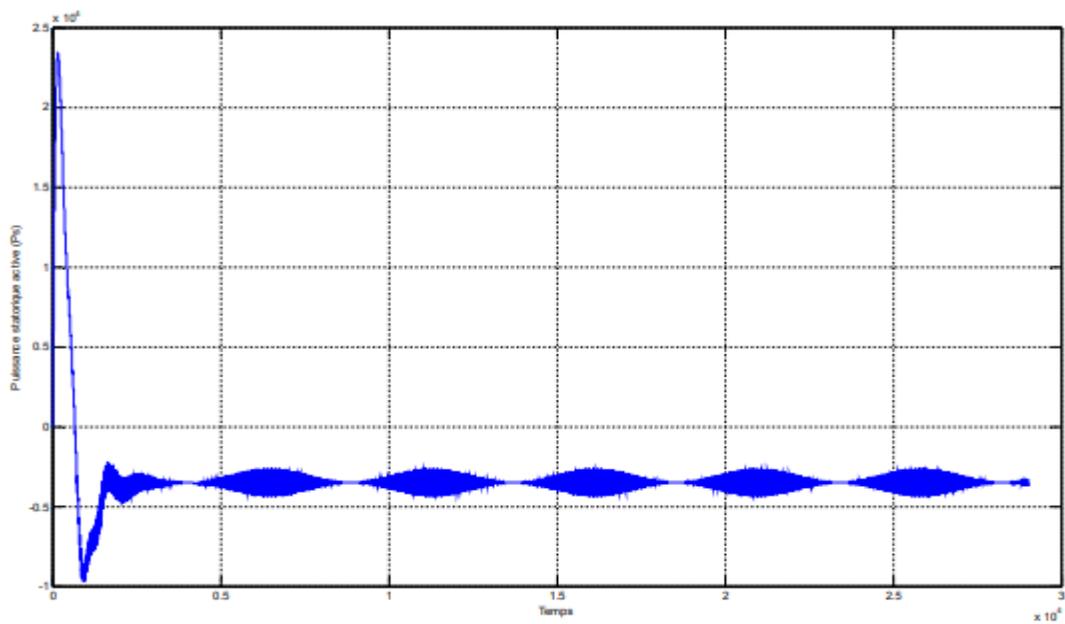


Fig.IV.19. résultat de simulation de la génératrice éolienne « courant statorique pour $V=20\text{m/s}$ »

- Puissance active et réactive



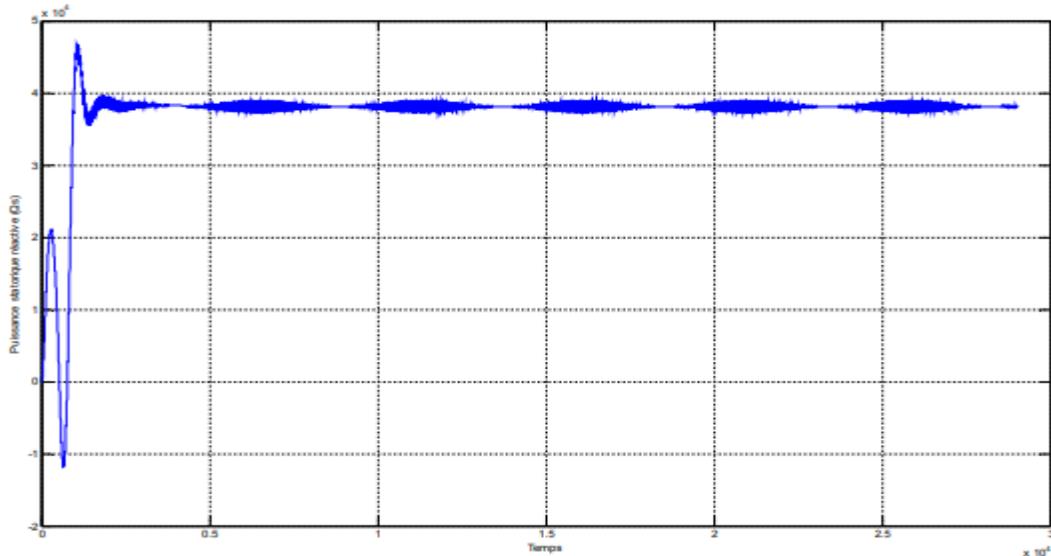


Fig.IV.20. résultat de simulation de la génératrice éolienne « puissance active et réactive statorique pour $V=20\text{m/s}$ »

➤ Interprétation

Les résultats de simulation montre que la réponse dynamique de la vitesse mécanique est mettra un temps de 0.011s pour atteindre une vitesse maximal de 376.91rad/s. on notera aussi que la génératrice génère une puissance réactive plus que la puissance active pour cette vitesse de vent

Dans ce cas aussi on le fonctionnement de la MADA comme génératrice

- par une comparaison entre les résultats de simulations pour ces vitesse on constate que :
 - Plus la vitesse de vent est fort plus la réponse dynamique de la vitesse mécanique est rapide.
 - La génératrice génère une puissance active à partir d'une vitesse de vent 8.3m/s qui permet un fonctionnement de la MADA comme génératrice
 - Pour permettre une production d'électricité sur une large gamme de vitesse de vent il faut que l'éolienne soit équipée de dispositifs de réglage de l'incidence des pales. Ceci permet de produire une puissance constante quel que soit la force de vent, ce qui diminue les perturbations sur le réseau.

IV.4 Conclusion

L'essentiel de notre contribution est abordé dans le présent chapitre, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité. Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne et décrit les différentes chaînes de conversion d'énergie éolienne en présentant les résultats de simulation avec des commentaires pour chaque courbe obtenue.

Conclusion général

Conclusion général

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'utilisation de la machine asynchrone double alimentation avec des convertisseurs statiques de puissance dans un système de conversion d'énergie éolienne. Dans un premier temps, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Vue l'importance de l'énergie éolienne, on s'intéressera dans les chapitres suivants à la conception et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne avec une machine asynchrone double alimentation.

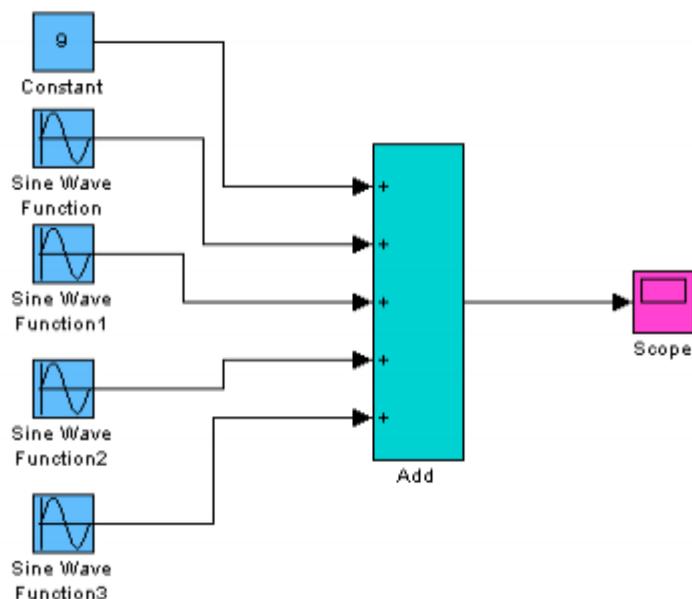
Dans un second temps, nous avons abordé la description des machines électriques (en s'intéresse à la MADA), on a passé en revue la machine asynchrone double alimentation et la modélisation des différents blocs de la chaîne de conversion, tels que la MADA, les convertisseurs statiques (onduleur et redresseur) et la commande M.L.I.

Dans un dernier temps, l'essentiel de notre contribution est abordé, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité.

Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne, décrit les différents constituants de la chaîne de conversion et présenter les résultats de simulation. En perspective, ce travail peut être poursuivi et complété afin d'améliorer la production décentralisée et ceci, par l'étude des points suivants :

- Etude des systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne - photovoltaïque), (éolienne-diesel), (éolienne - photovoltaïque -diesel)...etc.
 - Application de plus de commandes pour l'énergie éolienne, par exemple, les modèles de simulation des aérogénérateurs à vitesse variable avec régulation pitch.
-
-

- Etudier les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT).
- Etudier la gestion des systèmes, c.à.d réalisé des optimisations sur des critères de minimisation du coût.
- Appliquer des techniques de commande intelligents tels que la logique floue et les réseaux de neurones.



Bloc de simulation de la vitesse du vent.

Paramètres de la machine

Symbole	Description	Valeur	Unité
R_S	Résistance statorique	0.435	Ω
R_R	Résistance rotorique	0.816	Ω
L_S	Inductance statorique	0.071	H
L_R	Inductance rotorique	0.071	H
M	Inductance mutuelle	0.069	H
J	Inertie de moteur	50	$KG. M^2$
P	Nombre de paire pole	2	

Paramètres de filtre

Symbole	Description	Valeur	Unité
C_f	Capacité filtre	600	μF
L_f	Inductance filtre	400	mH

Paramètres d'éolienne

Symbole	Description	Valeur	Unité
<i>R</i>	Rayon d'éolienne	35.25	<i>M</i>
<i>G</i>	Gain du multiplicateur	90	

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Énergie Eolienne Site web Disponible à : <https://www.connaissance-desenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>, Consulté le 28-09-2020.
 - [2] F. Dione, “Étude d’une Chaîne de Conversion d’Énergie Eolienne à Base de Machine Synchrones à Aimants Permanents”, Thèse de Master Électrotechnique Industrielle, Université d’Annaba, 2018.
 - [3] Principe Fonctionnement d’une Eolienne’ Site web disponible à : <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/principe-fonctionnement.eolienne/>, Consulté le 28-09-2020.
 - [4] Global Cumulative Installed Wind Power Capacity From 2001 to 2019”, Site web Disponible à : <https://www.statista.com/statistics/268363/installed-wind-power-capacity-worldwide/>, Consulté le 28-09-2020.
 - [5] Power Output Increases with the Swept Rotor Area”, Site web Disponible à : <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/size.htm> Consulté le 28-09-2020.
 - [6] J. Martin, “Énergies Eoliennes”, Technique de l’Ingénieur, Traité de Génie Énergétique, pp .B8585 V1 B8585 21.
 - [7] A. Petersson, “Analyse Modeling and Control Doubly fed Induction Generator”, Thèse de License en Électrotechnique, Université Technologique de Chalmers, Goteborg, Sweden, 2003.
 - [8] “Éolienne à Axe Vertical de Type Darrieus”, Site web Disponible à https://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne_verticale_Darrieus”, Consulté le 28-09-2020.
 - [9] L. Khettache, “Étude et Commande d’un Système Éolien à Base d’une Machine Électrique Double Alimentée”, Mémoire de Magister, Université de Batna Algérie, 2007.
 - [10] A. Boyette, “Contrôle Commande d’un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec Système de Stockage pour la Production Éolienne”, Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Université d’Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2006.
 - [11] M. Kasbadji, “Évaluation du Gisement Énergétique Éolien Contribution à la
-

- Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie”, Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2006.
- [12] H. H. Molinaro et B. Multon “Énergie Electrique : Génération Eolienne”, Article de culture science de l’ingénieur France, 02/07/2020.
- [13] “Les Machines Electriques Generalites”, Site web Disponible, <http://fuuu.be/polytech/ELECH300/CHAP2-ELEC-H-300.pdf>, Consulté le 28-09-2020.
- [14] T. Boumediene, “Commande par Mode Flou Glissant de la Machine Asynchrone Double Alimentée Utilisée en Aérogénérateur”, Thèse de Magister en Automatique Université d’Oran Mohamed Boudiaf, 2015.
- [15] S. Ghoudelbourk, “Etude et Modélisation des Convertisseurs Statiques dans une Chaîne Eolienne à Base de la GADA”, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar–Annaba, 2016.
- [16] F. 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 Réseaux)”, Thèse de Doctorat de génie électrique, Université Nantes, France, 2003.
- [17] B. Leghrib, “Commande Vectorielle et Transfert des Puissances de la Machine Asynchrone à Double Alimentation”, Thèse de Magister Machines électriques en Electrotechnique Université du 20 Aout 1955 – Skikda, 2011.
- [18] D. Ramuz, “Machine Généralisée Alimentée par Deux Convertisseurs”, Thèse de Doctorat-UFR des Science Techniques et Gestion de l’Industrie, Université de Franche, Comté, 2000.
- [19] S. Ameziane, “Optimisation du Rendement d’un Générateur Eolien à Axe Horizontal Basé sur Machine Asynchrone”, Thèse de Master en Electromécanique de Université de Akli Mohand Oulhadj Bouira, 2018.
- [20] L. E. Radaorozandry, “Conception et Optimisation des Machines Synchrones Avec des Modèles Analytiques en Tenant Compte de la Saturation Magnétique”, Mémoire pour l’obtention du grade de maîtrisées sciences, Université Laval, Canada, 2007.
- [21] N. A. Amara, “ Etude Comparative des Machines Synchrones Excitées par Aimants et Courants Electriques”, Thèse de Master Electromécanique en Electrotechnique de Université de A. Mira Bejaia, 2014.
- [22] W. Zhenwei, “Conception Optimal d’une Entrainement Electrique pour la Chaîne de
-

- Traction d'un Véhicule Hybride Electrique", Thèse de Doctorat, Université de France Comté, 21 Mars 2012.
- [23] A. Ivanov-Smolenski, "Machines Electriques Tome 2", Livre, Technique Soviétique, 1983.
- [24] L. Bellahcene et M. Djaouani, "Commande Vectorielle en Vitesse du Moteur Synchrone à Aimants Permanents Dotée d'un Observateur MRAS", Mémoire de Magister Commande des machines, Université Aboubakr Bel ka'id Tlemcen, 2017.
- [25] M. Ounnadi, "Elaboration d'un Model en Régime Dynamique d'une Machine à Aimant Permanent", Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Tizi- Ouzou, 2010.
- [26] V. Nguyen, "Systeme de Creation de Champ Magnetique Homogene a Aimants Ferrites pour l'Imagerie RMN", Thèse de Doctorat, France, 1996.
- [27] T.H. Martin, "Mémoires Présentés par Divers Savants Etrangers à l'Académie", pp 391-41, 1860.
- [28] I. Dourari, "Calcul Analytique du Champ dans une Machine Synchrone à Aimants Permanents à Pôles Lisses ", Mémoire de Master de Réseaux électriques, Université de Mouloud Mameri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [29] R. Saraoui, "Etude d'une Machine Synchrone Avec la Méthode des Eléments Finis", Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mouloud Mameri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [30] A. Lebsir, "Performances Comparées de Machines Synchrones à Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à une Chaîne de Conversion d'Energie Renouvelable", Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université des Frères Mentouri Constantine, 2016.
- [31] F. Louar , "Modélisation et Simulation d'une Chaîne de Conversion d'Energie Eolienne à Base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent", Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [32] H. Senoussi, "Etude des Défauts des Machines à Aimants Permanents–Excentricité du Rotor", Mémoire pour obtenir Master, Université de Larbi Ben M'Hidi Oum El Bouaghi, 2015.
- [33] LATRECHE Mohammed Tahar « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », 2012
-

- [34] B. Kamal, « conception de la commande d'une machine asynchrone », Mémoire de Magister, Université Mouhamed Boudiaf d'Oran,2015.
 - [35] A. Abd Elkarim, « Alimentation d'une machine asynchrone par un onduleur de tension multi-niveaux à MLI optimisée », Université Kasdi Merbah Ouargla,2017.
 - [36] T Zineb Et T Amel, « Etude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) », Mémoire de fin d'études de Master en Génie Electrique Option, Commande des Système Electrique, Université A/Mira de Bejaia,2016.
 - [37] R Sadaoui, « Analyse Et Commande De La Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire De Maîtrise En Génie Électrique L'université Du Québec À TroisRivières,2017.
 - [38] A Sid Ahmed El Mahdi, « Commande en vitesse par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire De Magistère En Electrotechnique, UNIVERSITE de SIDI-BEL-ABBES,2010.
 - [39] B. Rafik Et M, Abdelhalim, « Commandes non linéaires d'une machine asynchrone double alimentation » Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen,2016.
 - [40] E Youcef, « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté », Mémoire de Magister en électrotechnique de l'université de Batna,2009.
-