

République Algérienne Démocratique et Populaire



**Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued

Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machine Electrique

Thème

***Commande par mode glissant d'un
Système éolien basé sur une MADA***

Réalisé par:

Salem Dhahbi

Ammar ben Mohammed Grira

Mohammed Larbi Sahraoui

Encadre par:

TRIA FATMA ZOHRA

Année universitaire 2020/2021

*T*out d'abord, nous voulons remercier Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la capacité d'atteindre ce niveau.

Nous adressons également nos sincères remerciements à l'éminente Madame **Tria Fatima**, professeur à l'Université d'El Oued, qui, par son expérience et sa compétence, n'a ménagé aucun effort pour mener à bien ce travail. Nous remercions également le professeur **Bennour Cherif**, enseignant à l'INSFP d'El-Oued pour le merveilleux effort que nous avons soutenu, ainsi que Mme **Halem Noura** et tous les enseignants et collègues du département de génie électrique qui nous ont aidé à nous former.

Salem

Ammar

Alarabi

À mes aimables parents,
À la mère de mes enfants,
À mes enfants.

À tous mes bien-aimés

Salem dhahbi

À mes aimables parents,
À tous mes bien-aimés

Ammar grira

À mes aimables parents,
À la mère de mes enfants,
À mes enfants.

À tous mes bien-aimés

Mohammed alarabi sahraui

ملخص :

يقدم هذا العمل دراسة وإستخدام المولدة اللاتزامنية ذات التغذية المزدوجة "GADA" في إنتاج طاقة الرياح. للقيام بذلك ، نقوم بإنشاء نموذج للعنفة الهوائية ، ثم من المولدة اللاتزامنية "GADA" ، وإعتمدنا على استراتيجية التحكم الإنزلاقي للتحكم في الطاقة الفعالة و الرجعية. وأختتمت هذه الدراسة بنتائج المحاكاة للتحقق من صحة النماذج التي تم الحصول عليها.

الكلمات المفتاحية: الرياح ، العنفات ، مولدة الطاقة غير المتزامنة مزدوجة التغذية (GADA) ، النمذجة ، التحكم الإنزلاقي

Abstract:

This work presents the study and use of the asynchronous generator GADA for the production of wind energy. To do this, we create a wind turbine model, and a GADA generator model, and we use a sliding mode regulator on the active and reactive power control strategy. This study was concluded with simulation results to validate the models obtained.

Keywords: wind power, turbines, dual power asynchronous electricity generator (GADA), modeling, slip control.

Résumé:

Ce travail présente l'étude et l'utilisation du générateur asynchrone GADA pour la production d'énergie éolienne. Pour ce faire, nous créons un modèle d'éolienne, et modèle générateur GADA, et nous utilisons sur la stratégie de contrôle puissance active et réactive un régulateur par mode glissant. Cette étude a été conclue avec des résultats de simulation pour valider les modèles obtenus.

Mots clés : éolien, turbines, générateur d'électricité asynchrone à double alimentation (GADA), modélisation, contrôle du glissement.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

chapitre 01: généralité sir les Systèmes éoliens

I –Introduction:	4
II - Descriptif et qualités de l'énergie éolienne :	4
II.1 Qu'est-ce que l'énergie éolienne :	4
II.2 Principaux composants d'une éolienne :	6
III - Les différents types d'éoliennes :	7
III.1 Eoliennes à axe vertical :	7
III.2 Eoliennes à axe horizontal :	8
IV - Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique :	8
IV.1 Loi de Betz :	8
IV.2 Production d'énergie mécanique :	10
V - Stratégies de fonctionnement d'une éolienne :	11
V.1 Bilan des forces sur une pale :	11
V.2 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :	12
V.2.1 Système à décrochage aérodynamique "stall" :	12
V.2.2 Système d'orientation des pales "pitch" :	13
V.3 Production optimale d'énergie :	13
VI - Etat de l'art sur la conversion électromécanique :	15
VI.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone :	15
VI.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil :	15
VI.1.2 Machine asynchrone à double stator :	16
VI.1.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance :	17
VI.1.4 Machine asynchrone à double alimentation :	18
VI.1.5 Machines à courant continu :	19
VI.1.6 Machines synchrones :	19
VI.1.6 .1 Machine synchrone à rotor bobiné à rotor bobiné :	19
VI.1.6 .2 Machine synchrone à aimant permanent :	19
VI.1.7 Machine à reluctance variable (MRV) :	20
VI.1.7.1 Machine à reluctance variable (non excitée) :	20
VI.1.7.2 Machine à reluctance variable excitée :	20
VII . Conclusion :	21

chapitre 2: étude et modélisation de la GADA

I - Introduction:	23
II - Description de la machine asynchrone à double alimentation :	23
III - Principe de fonctionnement de la MADA:	23
IV. Différentes topologies de la MADA :	24
IV.1. Machine asynchrone à double alimentation type« Brushless » :	24
IV.2. Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné :	25
IV.2.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :	26
IV.2.2. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer :	26
IV.2.3. Machine asynchrone à double alimentation Structure Scherbius avec cycloconvertisseur:	27

IV.2.4. Machine asynchrone à double alimentation Structure Scherbius avec convertisseur MLI :	27
V. Emploi des machines asynchrones à double alimentation :	28
VI. Fonctionnement de la MADA à quatre quadrants :	29
VII. Etude de la puissance pour la MADA :	30
VIII. Les formes Application des machines asynchrones à double alimentation :	30
VIII.1. Application moteur :	31
VIII.2. Application génératrice:	31
VIII.3. Application de la MADA dans les systèmes éoliens (GADA):	31
IX. Avantages et inconvénients de la MADA :	31
IX.1. Avantages de la MADA :	32
IX.2. Inconvénients de la MADA :	33
X. Modélisation de la MADA:	33
X.1. Hypothèses simplificatrices de la modélisation de la MADA :	33
X.2. Modèle naturel triphasé de la MADA :	34
X.3. Application de la transformation de Park à la MADA:	35
X.4. Equation de tension :	36
X.5. Equation du flux:	36
X.6. Choix du référentiel :	37
X.6.1. Référentiel lié au stator :	37
X.6.2. Référentiel lié au rotor :	37
X.6.3. Référentiel lié au champ tournant :	37
X.7. Equation mécanique :	37
X.8. Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park :	38
XI. CONCLUSION :	38

chapitre 3: commande par mode glissant de la GADA

I. Introduction:	41
II. Historique de la commande par mode glissant:	41
II.1. Principe de la commande par mode de glissement :	42
II.2. Structure de la commande par mode de glissement :	43
II.2.1. Choix des surfaces de glissement :	43
II.2.2. Conditions d'existence et de convergence du régime glissant :	44
II.2.3. Synthèse des lois de commande du mode glissant [1],[28],[30]:	45
III. Application de la commande à mode glissant à la MADA :	48
III.1 Surface de régulation de la puissance active :	49
III.2. Surface de régulation de la puissance réactive:	50
III.3. Modélisation de l'onduleur de tension à MLI :	51
III.4. Stratégie de maximisation de la puissance :	53
IV. Résultats de Simulation :	54
Conclusion	57
Conclusion générale et perspectives	58

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Fig 1-1	Conversion de l'énergie cinétique du vent	4
Fig 1-2	Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable -----	7
Fig 1-3	Tube de courant autour d'une éolienne -----	9
Fig 1-4	Coefficient de puissance ----	9
Fig 1-5	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes -	10
Fig 1-6	Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné --	11
Fig 1-7	Bilan des forces sur une pale ----	11
Fig 1-8	Flux d'air sur un profil de pale " stal "-----	12
Fig 1-9	Variation de l'angle de calage d'une pale -----	13
Fig 1-10	Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple -----	13
Fig 1-11	Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable -----	14
Fig 1-12	interface d'électronique de puissance -----	14
Fig 1-13	Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles--	15
Fig 1-14	Connexion directe d'un machine asynchrone sur le réseau ---	16
Fig 1-15	Machine asynchrone à double stator ---	17
Fig 1-16	MAS connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur vconduteur-	18
Fig 1-17	Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de MAS "brushless	18
Fig 1-18	Machine asynchrone à rotor bobiné ---	19
Fig 1-19	Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents -----	20

Chapitre 2

Fig 2-1	Représentation de la machine asynchrone à double alimentation	23
Fig 2-2	MADA à double stator	25
Fig 2-3	MADA Brushless	25
Fig 2-4	MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique	26
Fig 2-5	MADA, structure Kramer	27
Fig 2-6	Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur Error! Bookmark not defined.	27
Fig 2-7	Structure de Scherbius avec MLI Error! Bookmark not defined.	28
Fig 2-8	Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	30
Fig 2-9	Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA	32
Fig 2-10	Comparaison de zone de fonctionnement sur vitesse entre la machine à cage et la MADA.....	33
Fig 2-11	Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.....	34

Chapitre 3

Fig 3-1 : <i>Mode de glissante réel</i>	42
Fig 3-2 : <i>Fonction sign (Commande de type relais)</i>	46
Fig 3.3 : <i>Fonction de saturation (Commande adoucie)</i>	47
Fig 3.4 : <i>Commande intégrale</i>	47
Fig 3-5 : <i>Schéma bloc de régulation des puissances active et réactive par mode glissant</i>	51
Fig 3-6 : <i>Onduleur de tension et élaboration des vecteurs tensions</i>	52
Fig 3-7: <i>puissance active et réactives avec ses référence</i>	54
Fig 3-8: <i>composants direct et quadrature du courant rotorique</i>	55
Fig 3-9: <i>couple électromagnétique et courant rotorique</i>	55
Fig 3-10: <i>zooms courant rotorique</i>	55
Fig 3-11: <i>courant de stator et Zoom [17.65 s, 17.7 s] et [34.75 s , 34.8]</i>	56

Notations et symboles

MADA: Machine Asynchrone à double Alimentation

GADA: Génératrice Asynchrone à Double Alimentation;

MLI: Modulation de Largeur d'Impulsion;

PI: Proportionnel et Intégral;

IGBT: Transistors bipolaires à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor) ;

STA: Algorithme du Super-Twisting

$\vec{F}$: Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable

V_1, V_2 : Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne

ρ : densité de l'air 1,225 kg.m⁻³

S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne

m : Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s

P_m : Puissance extraite par le rotor éolien

P_{mt} : Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé

C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne

λ : Vitesse relative de l'éolienne

Ω_1, Ω_2 : Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur

Ω : Vitesse de rotation de la génératrice

P_{mc} : Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice

$\vec{V}$: Vecteur vitesse du vent

β : Angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal

i : Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal

$\vec{V}_{rot}$: Composante de la vitesse du vent due à la rotation de la turbine

$\vec{V}_{res}$: Résultante des vecteurs $\vec{V}$ et $\vec{V}_{rot}$

$\vec{F}_{rot}$: Vecteur force représentant la poussée en direction de la rotation sur la pale

$\vec{F}_{ax}$: Vecteur force représentant la poussée axiale sur une pale

$\vec{F}_{Res}$: Résultante de $\vec{F}_{ax}$ et $\vec{F}_{rat}$

g : Glissement d'une machine asynchrone

f : Fréquence du réseau électrique

R : Résistance électrique

Γ_e : Couple électromagnétique

$\vec{I}$: Vecteur courant électrique

$\vec{B}$: Vecteur champ magnétique

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : (V) Tensions statoriques triphasés;

V_{ar}, V_{br}, V_{cr} : (V) Tensions rotoriques triphasés;

V_{ds}, V_{qs} : (V) Tensions statoriques diphasées dans le repère(d, q) ;

V_{dr}, V_{qr} : (V) Tensions rotoriques diphasées dans le repère(d, q) ;

I_{ds}, I_{qs} : (A) Courants statoriques diphasés dans le repère tournant(d, q) ;

I_{dr}, I_{qr} : (A) Courants rotoriques diphasés dans le repère tournant(d, q) ;

I_{as}, I_{bs}, I_{cs} : (A) Courants statoriques triphasés;

I_{ar}, I_{br}, I_{cr} : (A) Courants rotoriques triphasés;

$f.e.m$: force électromotrice

ω_s : (rad / s) Pulsation électrique des grandeurs statoriques $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$

ω : (rad / s) Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation $\omega = P \cdot \Omega$

ϕ_s, ϕ_r : (Var) Puissances réactives au niveau de stator et de rotor, respectivement;

$\phi_{as}, \phi_{bs}, \phi_{cs}$: (Wb) Flux magnétiques triphasés au stator;

ϕ_{ds}, ϕ_{qs} : (Wb) Flux magnétiques triphasés au stator;

$\phi_{ar}, \phi_{br}, \phi_{cr}$: (Wb) Flux magnétiques triphasés au rotor;

ϕ_{dr}, ϕ_{qr} : (Wb) Flux magnétiques rotoriques dans le repère tournant(d, q)

M_{sr} : Inductances mutuelles stator-rotor.



Introduction Générale

Introduction générale

Le développement rapide des dernières décennies et la généralisation des appareils électroménagers ont conduit à des besoins importants en énergie électrique. Face à cette demande croissante, les pays industrialisés ont cherché à utiliser des centrales nucléaires à haut rendement de production en plus d'être non -polluant pour l'environnement par rapport aux centrales thermiques, mais le danger d'accidents, ainsi que l'élimination des déchets nucléaires, sont parmi les problèmes les plus importants qui incitent beaucoup de ces pays à penser à une alternative. Peut-être que les énergies renouvelables étaient parmi les plus importantes futures alternatives aux énergies classiques, dont l'énergie solaire et éolienne.

Actuellement, de nombreux pays s'orientent vers l'énergie éolienne. Parmi ces pays se trouve l'Allemagne, qui possède la première entreprise mondiale avec une capacité éolienne de 12 gigawatts, suivie par, l'Espagne avec une capacité de 4,15 GW et le Danemark avec 2,9 GW à fin 2002.

La généralisation des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des recherches afin d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de la puissance fournie.

Dans notre recherche, nous avons présenté une étude sur l'utilisation d'un type de contrôle de machine asynchrone dans le système éolien, appelé contrôle par mode glissant, a cette mémoire nous avons divisé cette recherche en trois chapitres.

Le premier chapitre consacré aux systèmes éoliens à travers les équations et concepts physiques régissant leur fonctionnement.

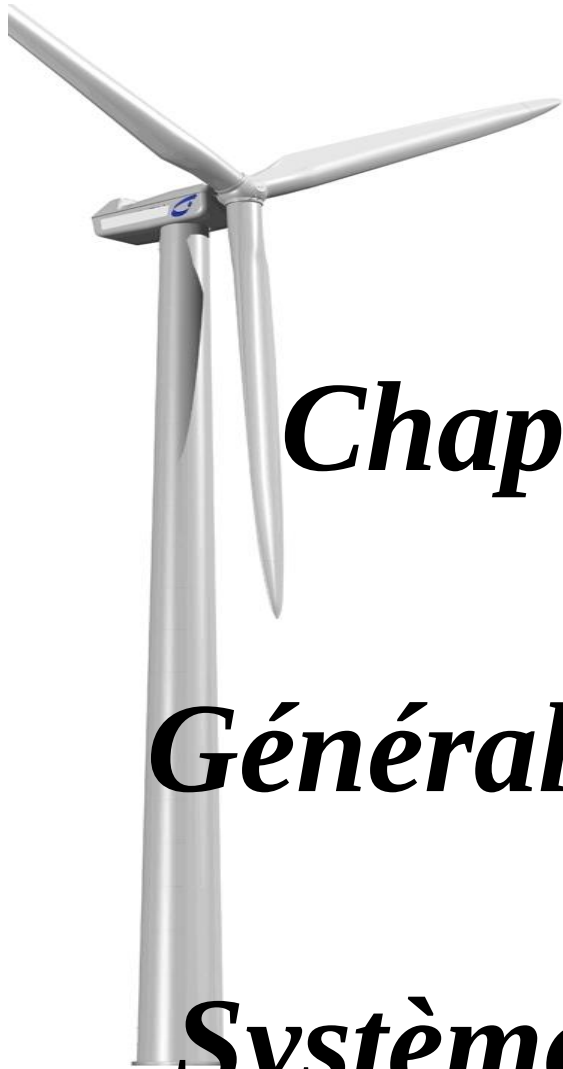
Ce rappel suit l'état de l'art en matière de conversion de l'énergie éolienne et de sa présentation dans des équations mathématiques pour la faire simuler dans MATLAB/SIMULINK et extraire les performances de cette source d'énergie.

Parmi les composants nécessaires d'un système éolien se trouve un générateur qui convertit l'énergie extraite de la turbine en énergie électrique. Génératrice très prometteuse de la dernière génération d'éoliennes, la machine MADA reprend l'intention des créateurs et chercheurs de Domène MADA sera l'objet du chapitre deux, principe de fonctionnement, différents types, et la modélisation MADA est la prochaine étape abordée dans le chapitre deux.

Une stratégie de contrôle est nécessaire pour contrôler MADA, le contrôle vectoriel sera discuté dans le chapitre trois, avec l'utilisation d'un régulateur à mode glissant. Ce type de régulateur, de nombreux travaux l'ont utilisé et ils disent qu'il est insensible aux changements de paramètres du système, facile à travailler et facile à identifier. Nous allons démontrer cette performance.

Enfin, la conclusion générale précisera les résultats de notre simulation, qui est la naissance de nos futurs travaux en matière d'utilisation et d'exploitation de l'énergie éolienne, que nous cherchons

à faire amener les chercheurs au niveau national à adopter le développement de cette énergie en pour l'exploiter, notamment dans les zones reculées.



Chapitre 01:
Généralité sur les
Systèmes éoliens

I –Introduction:

Depuis l'utilisation du moulin à vent , la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer ,c'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.[1]

Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

II - Descriptif et qualités de l'énergie éolienne :

II.1 Qu'est-ce que l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé 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 (Fig 1-1).

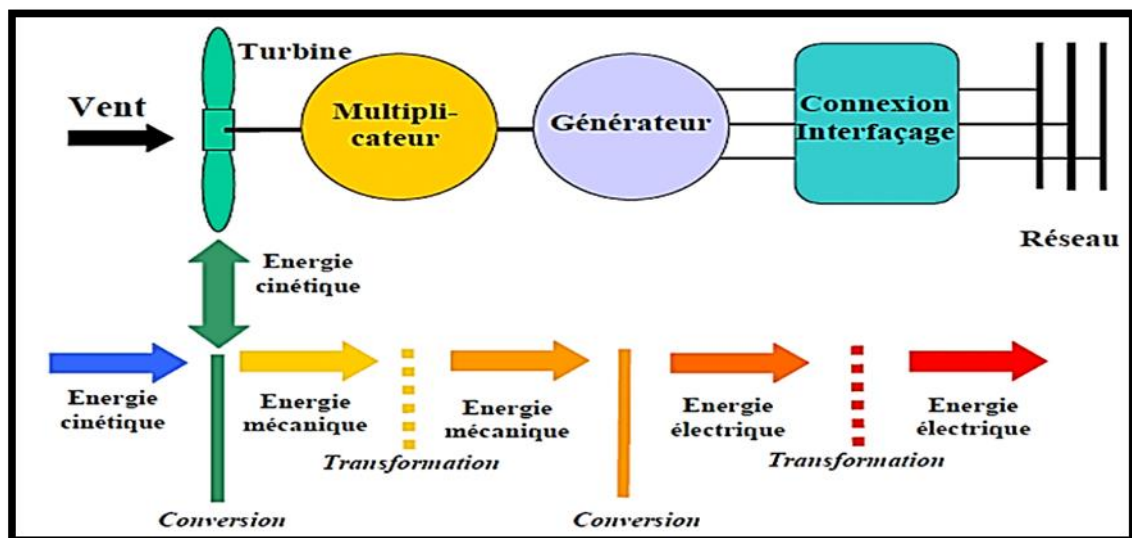


Fig 1-1 Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée).

De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. [1]

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. On distingue deux grands types d'éoliennes :

Les éoliennes à axe vertical : ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches.

Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal. [2]

Les éoliennes à axe horizontal : beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. [1] Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit.

Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, selon l'ADEME, le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au-delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW

II.2 Principaux composants d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

- Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur).
- La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.
- Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale(concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit .[3]

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe). Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

III - Les différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

III.1 Eoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation:[1]

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée 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 (Fig 1-2a).

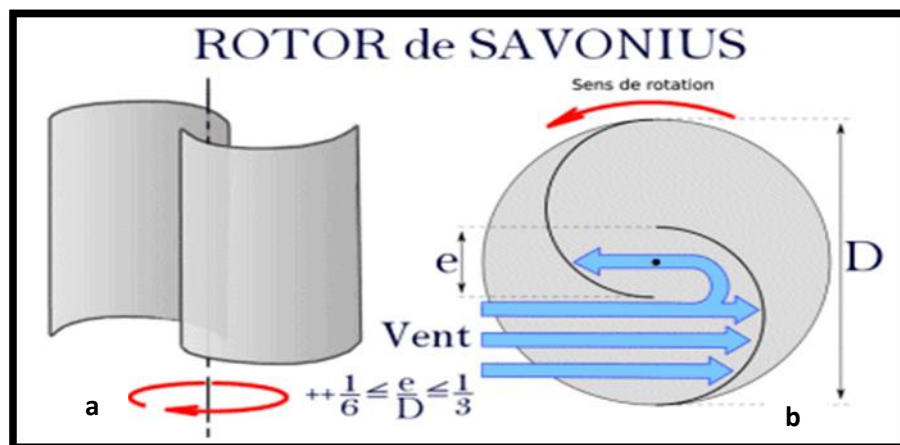


Fig1-2 : Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable

- Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Fig 1-2b) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et

peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.

III.2 Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.[1] Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. [1]

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

IV - Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique :

IV.1 Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (Fig 1-3) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor v_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho S(V_1+V_2)}{2} \quad (1-1)$$

Puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = m \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \quad (1-2)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (1.1):

$$P_m = \frac{\rho S(V_1+V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1-3)$$

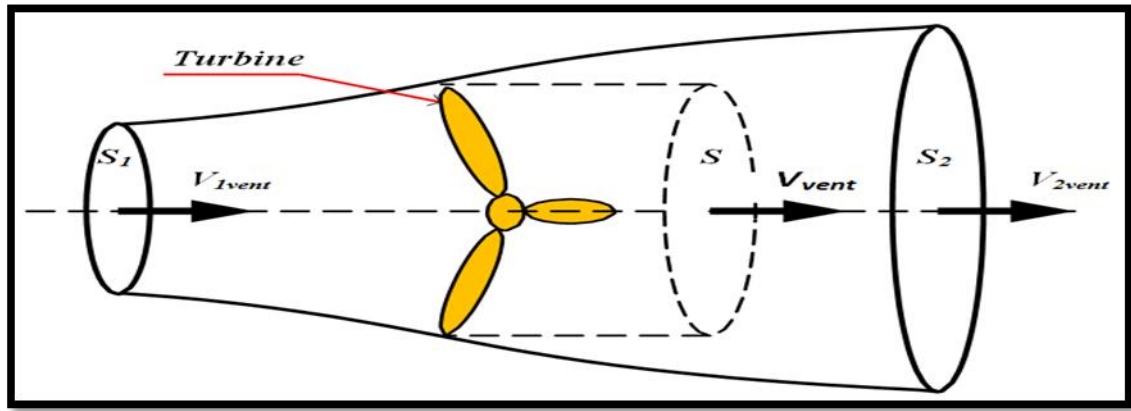


Fig1-3 : Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_m = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors : Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Fig 1-4), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

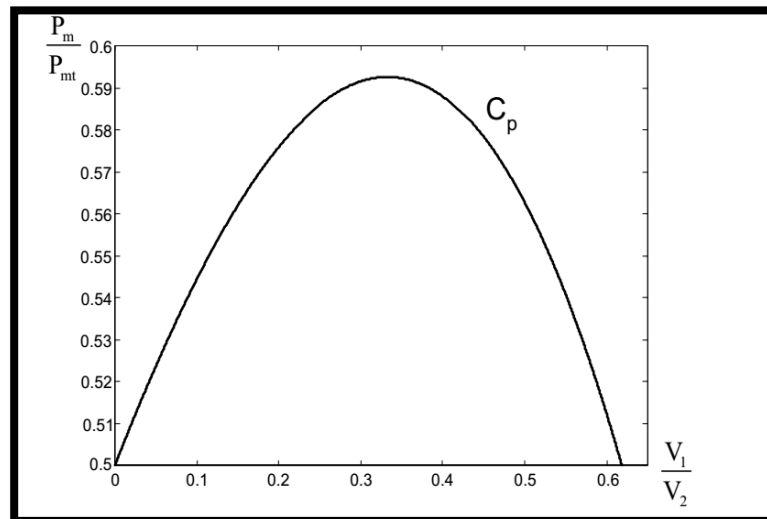


Fig1-4: Coefficient de puissance

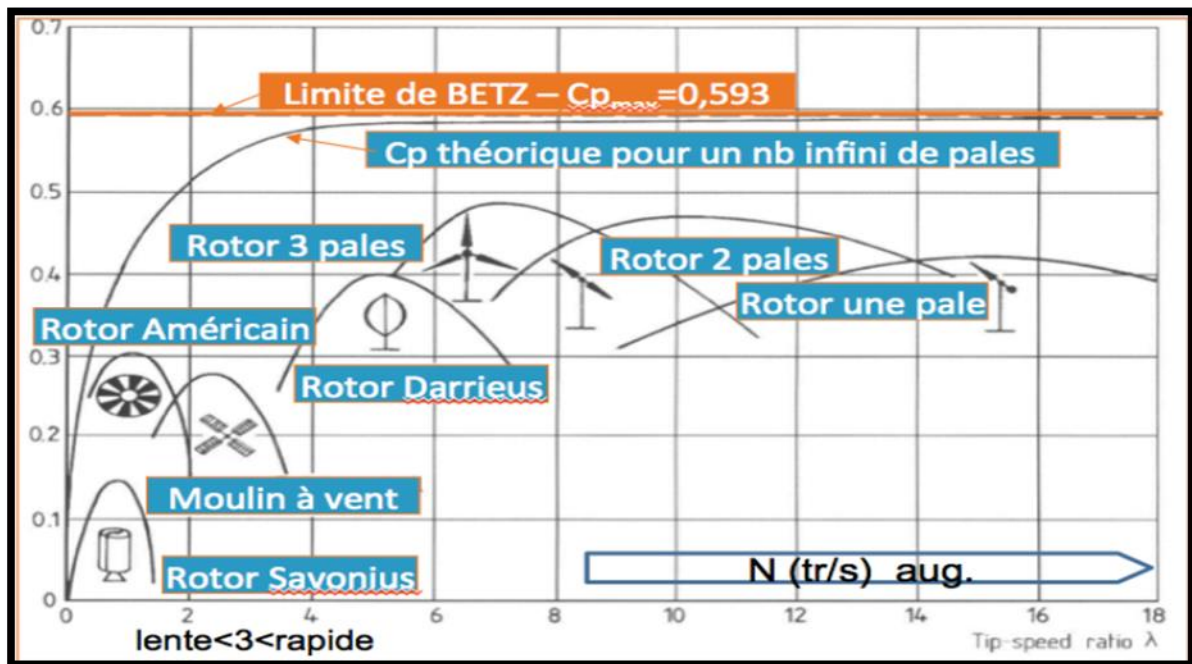


Fig1-5: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Fig 1-5) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Fig 1-5) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s.[1]

IV.2 Production d'énergie mécanique :

En combinant les équations (1.1), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur et R : rayon de l'aérogénérateur. Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K , la puissance mécanique P_{mc} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par : Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur. Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Fig 1-6). [7]

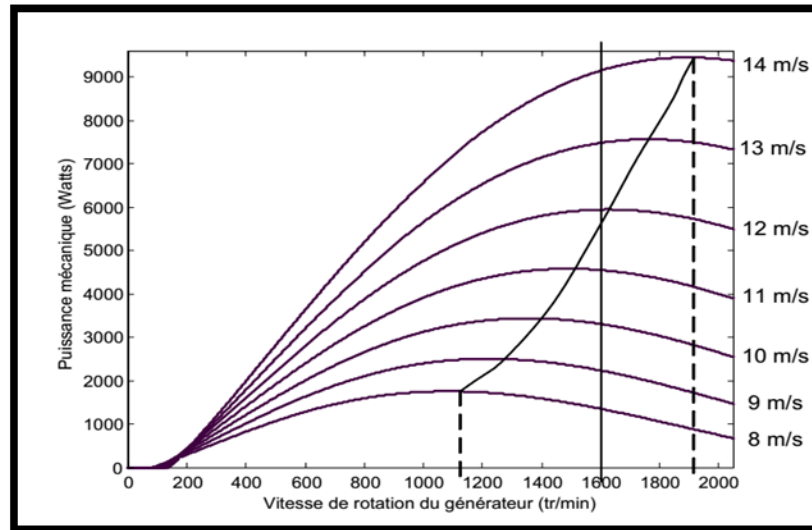


Fig1-6: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Fig 1-6) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

V - Stratégies de fonctionnement d'une éolienne :

V.1 Bilan des forces sur une pale :

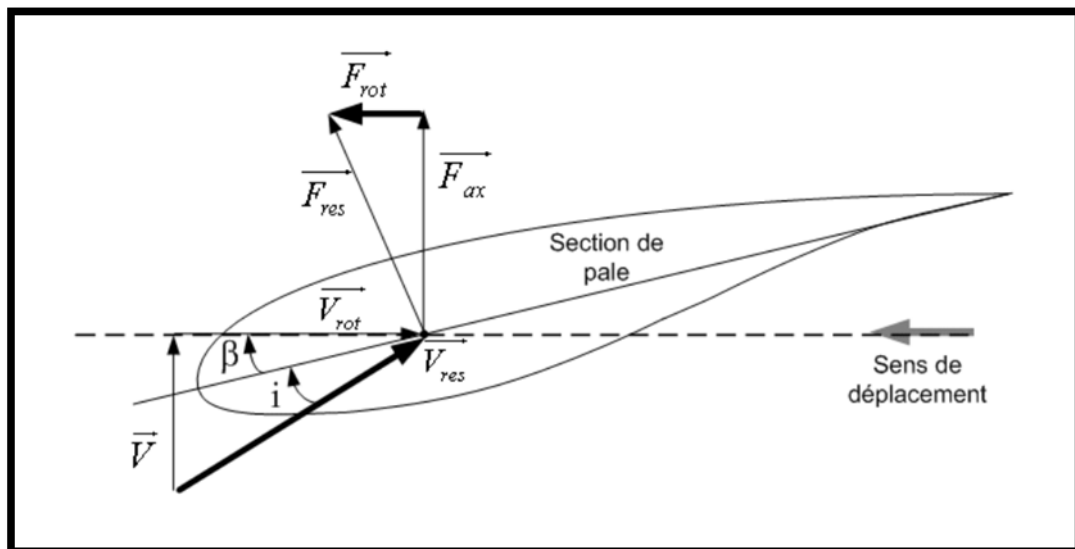


Fig1-7: Bilan des forces sur une pale

La Fig 1-7 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. [1] La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur $\vec{V}$. Le vecteur $\vec{V}_{rot}$ représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée $\vec{V}_{res}$. L'action du vent sur la pale produit une force qui se décompose en une poussée axiale

directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

V.2 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :

V.2.1 Système à décrochage aérodynamique "stall" :

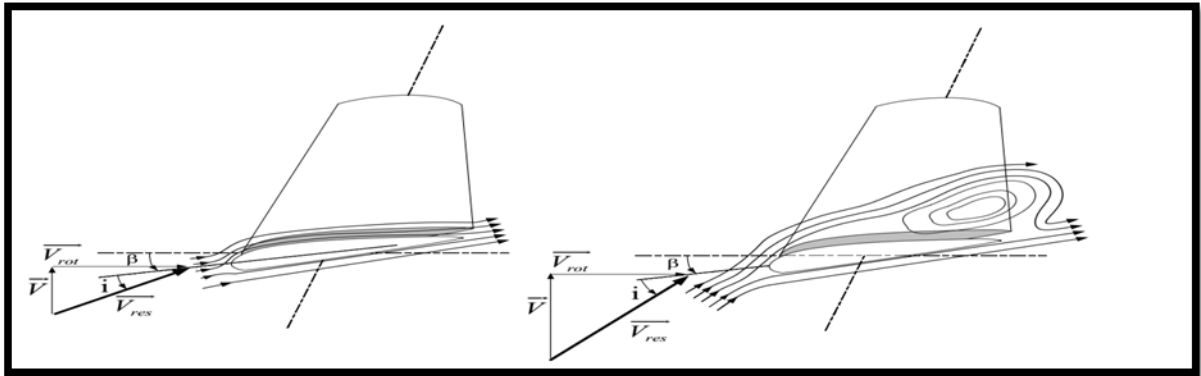


Fig1-8: Flux d'air sur un profil de pale " stall "

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Fig 1-8) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de décalage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante. [1]

V.2.2 Système d'orientation des pales "pitch" :

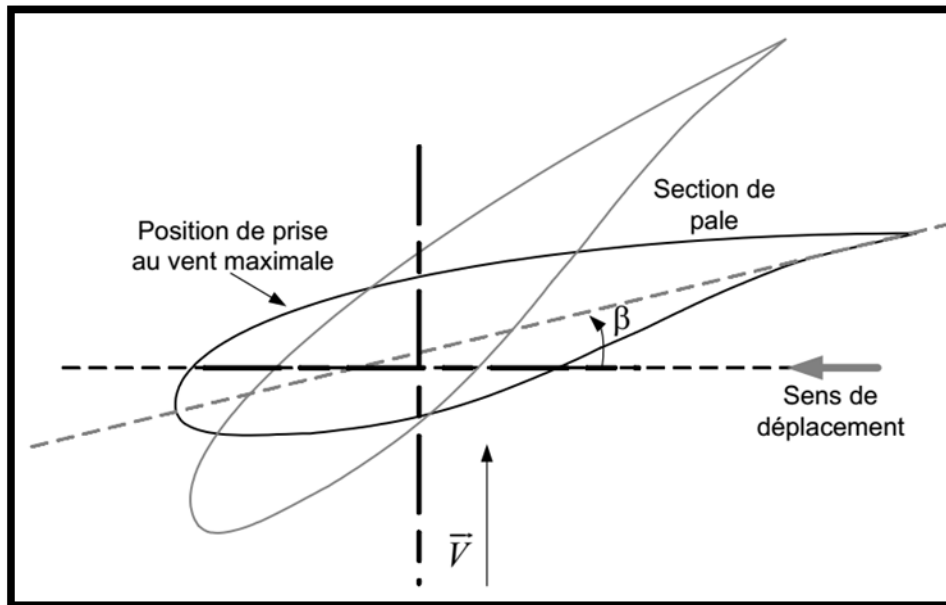


Fig1-9: Variation de l'angle de calage d'une pale

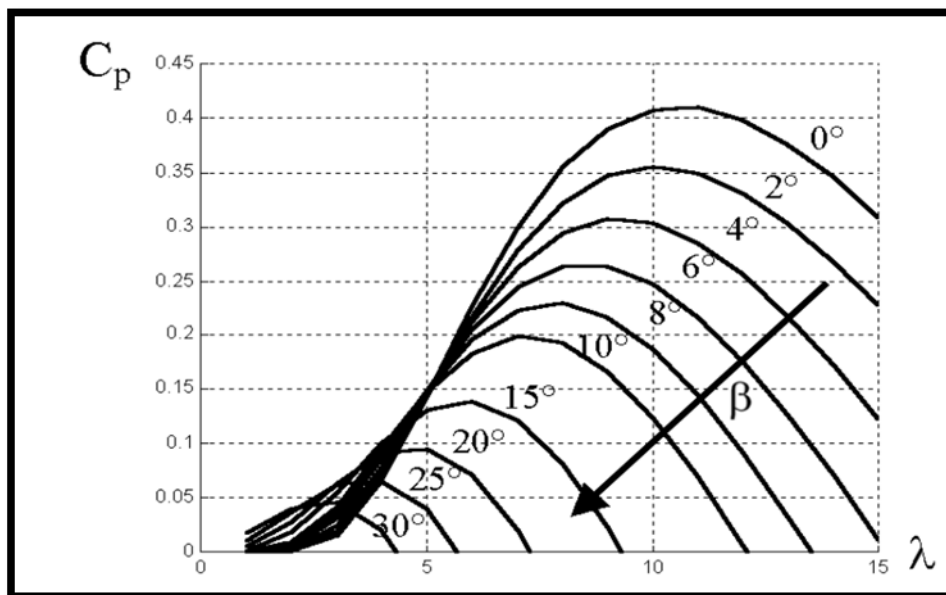


Fig1-10: Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple

V.3 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 de courbes de la (Fig 1-6). 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 :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} \cdot V \quad (1-5)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la (Fig 1-11) [9]. 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.

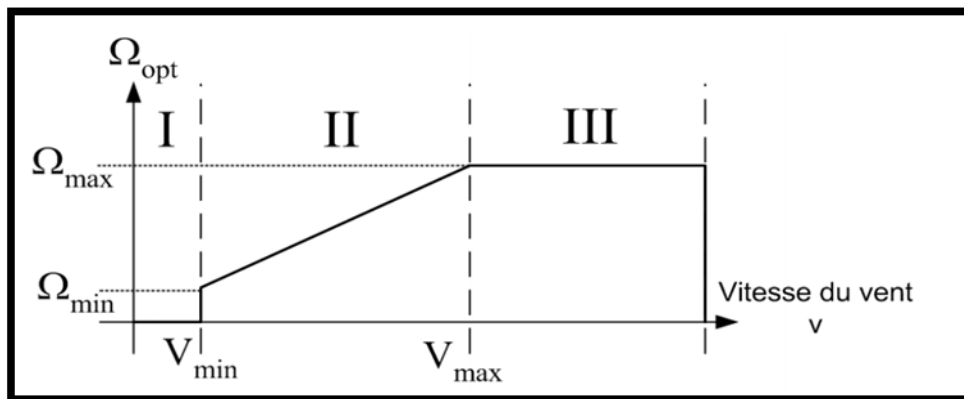


Fig1-11: Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

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 (Fig 1-12). 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.

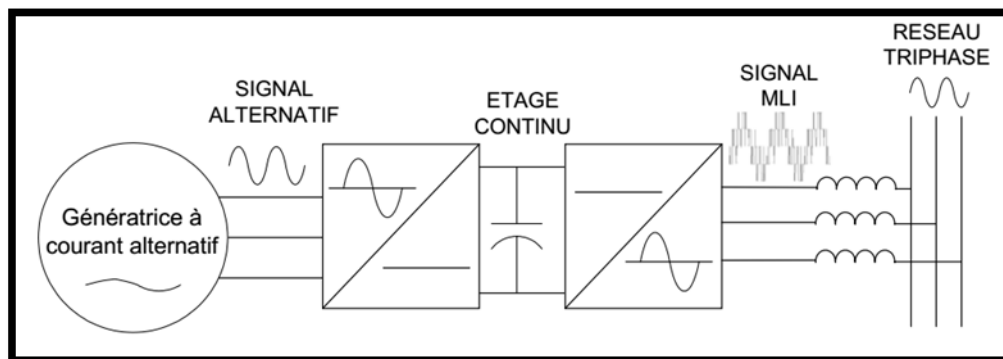
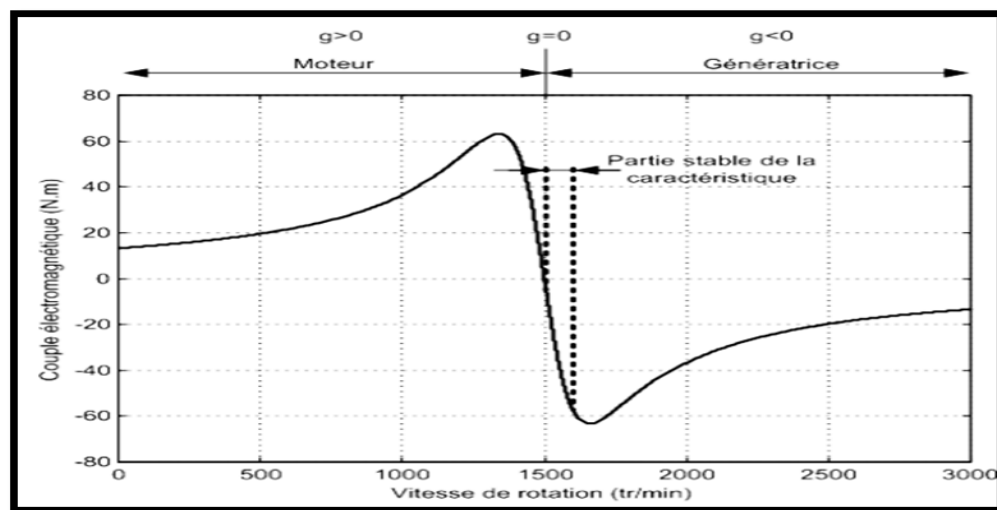


Fig 1-12: interface d'électronique de puissance**VI - Etat de l'art sur la conversion électromécanique :****VI.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone :****VI.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil :**

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la (Fig 1-13) [10].

**Fig1-13: Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles**

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Fig 1-14). La

machine à un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure 1-14 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

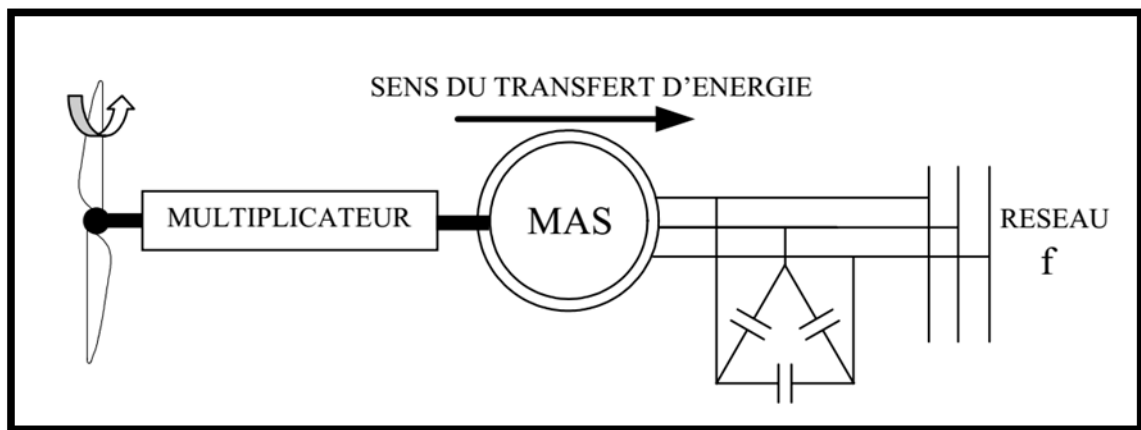


Fig1-14: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. En effet le système est conçu pour fonctionner sur la partie gauche du réseau de courbes de la Figure 1-6, là où celles-ci sont le plus rapprochées les unes des autres. La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse de vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations.

VI.1.2 Machine asynchrone à double stator :

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Fig 1-15) : Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.

Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [11]. Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus

faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

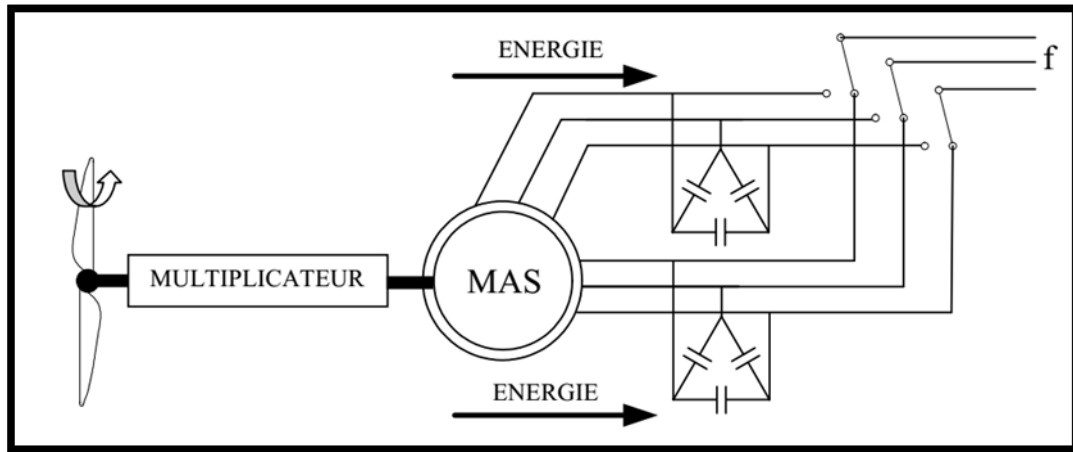


Fig1-15: Machine asynchrone à double stator

VI.1.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance :

Le dispositif de base est représenté sur la Fig 1-16. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur.

Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des dv/dt importants qui peuvent réduire leur durée de vie [12]. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel

important de ce dispositif.

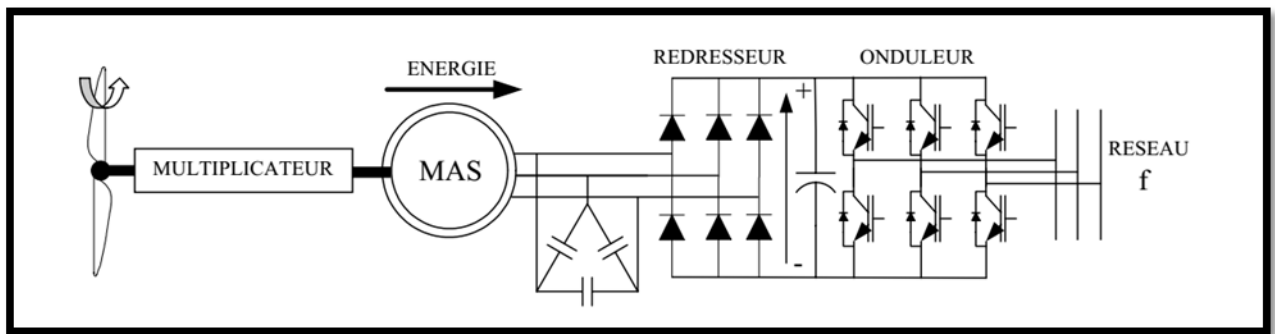


Fig1-16: Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur onduleur

VI.1.4 Machine asynchrone à double alimentation :

Cette machine a la particularité de travailler avec deux alimentations, et cette particularité repose sur deux configurations possibles :

1. A double stator "**brushless**" : Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique.

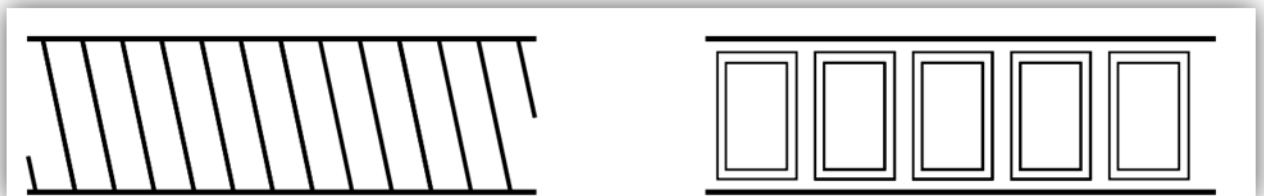


Fig1-17: Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless"

2. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants.

L'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les systèmes éoliens sera détaillée dans le chapitre suivant.

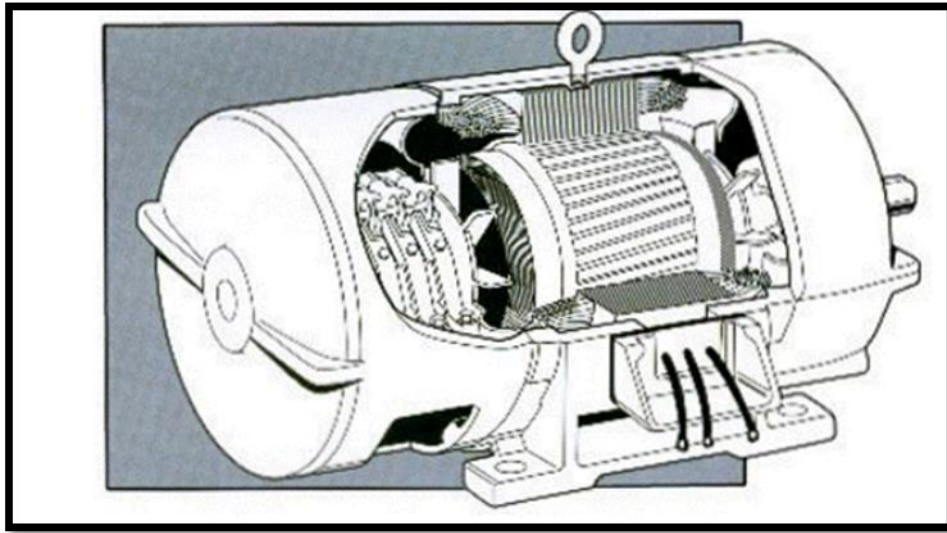


Fig1-18: Machine asynchrone à rotor bobiné

VI.1.5 Machines à courant continu :

Les machines à courant continu sont utilisées pour les éoliennes de faible puissance ; pour charger des batteries et alimenter des installations de type stations de mesure. Ce type de machine comporte un stator portant le circuit inducteur (bobiné ou à aimants permanents), et un rotor constituant le circuit induit connecté en sortie, via le système balais –collecteur.

VI.1.6 Machines synchrones :

Les machines synchrones sont connues par leurs couples très importants qu'elles peuvent offrir à dimensions géométriques convenables. Elles sont donc utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes ; pour minimiser la maintenance et accroître la fiabilité.

VI.1.6 .1 Machine synchrone à rotor bobiné à rotor bobiné :

Ce type de machine fait appel le plus souvent à une excitatrice associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant [4]. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et est généralement équipé de circuits amortisseurs. Pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse, on utilise un rotor cylindrique massif. Mais il est possible de s'affranchir de l'application à grande vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents à basse vitesse.

VI.1.6 .2 Machine synchrone à aimant permanent :

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent de plus en plus compétitifs. Les inducteurs de ces machines permettent de gagner environ 25 % de masse par rapport à ceux de type bobiné [4]. Ces qualités sont contre balancées par un coût plus élevé que la machine asynchrone. Ce type de machine est intéressant dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple).

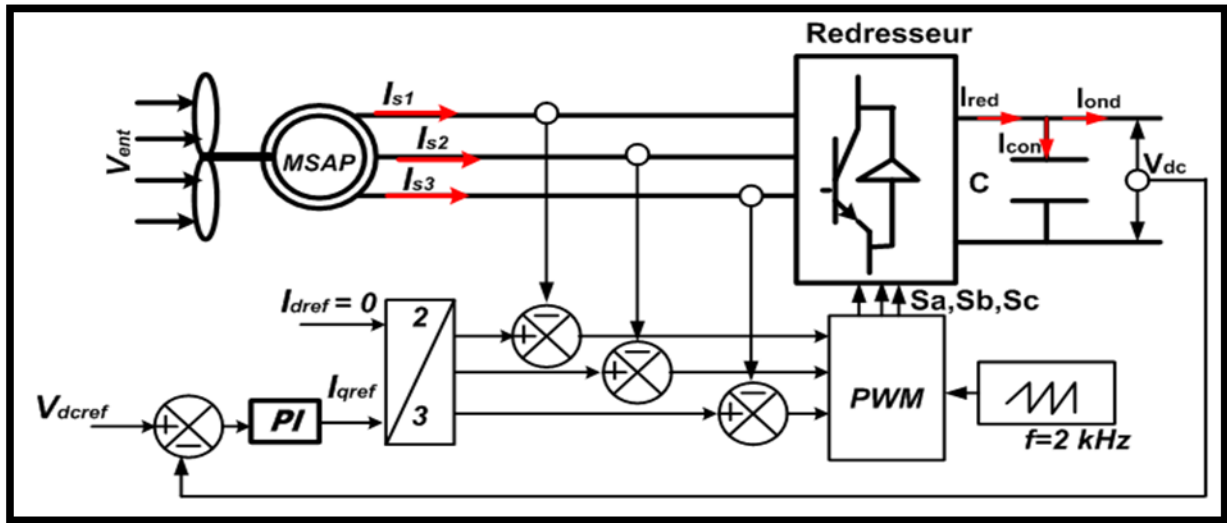


Fig 1-19 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents

VI.1.7 Machine à réluctance variable (MRV) :

Parmi les génératrices à l'étude, plus particulièrement pour les entraînements directs, figurent les machines à réluctance variable pure ou excitée. C'est leur potentiel de faible coût et de robustesse qui conduit à ces recherches [4].

VI.1.7.1 Machine à réluctance variable (non excitée) :

La structure de la MRV dite pure est très simple et composée d'un rotor massif et d'enroulements concentriques au stator. Cette machine est principalement destinée à des fonctionnements à hautes vitesses ; car elle ne possède pas de contacts glissants et elle est très robuste. Son inconvénient majeur est qu'elle possède un facteur de puissance médiocre.

VI.1.7.2 Machine à réluctance variable excitée :

Les MRV excitées pallient au problème de facteur de puissance en intégrant une excitation triphasée au stator. L'application des machines à réluctance variable dans le domaine des éoliens est rare; cependant certaines éoliennes intègrent, comme alternateur de moyenne puissance des MRV excitées ; à dentures répartie au stator. L'excitation est le plus souvent réalisée par des aimants permanents.

VII. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement (calage variable ou décrochage aérodynamique) ont été décrits. La seconde partie du chapitre présente les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien. Trois grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones, machine synchrones et machines à structure spéciale. Compte tenu des deux principaux modes de fonctionnement d'une éolienne, à savoir : génération d'énergie électrique de façon autonome sur des charges isolées ou raccordement sur un réseau déjà existant, il nous a paru intéressant de pouvoir étudier chaque mode de fonctionnement.

En ce qui concerne le fonctionnement autonome, la machine asynchrone à cage d'écureuil auto-excitée par un banc de capacités apparaît comme une solution intéressante du point de vue du coût relativement faible et de la maintenance facilitée grâce à l'absence de contacts glissants. Une première étude portera donc sur les performances et les limites d'un dispositif basé sur l'utilisation de cette machine. Des essais expérimentaux sont réalisés sur un banc d'essai de 3kW. Pour le fonctionnement connecté sur un réseau, nous avons vu qu'il était important que la génératrice puisse fonctionner à vitesse variable et que la présence de convertisseurs entre la génératrice et le réseau nuisait au rendement global de l'installation. Le dispositif de la Figure 1-25 basé sur la machine asynchrone à double alimentation propose un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'il autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. C'est par conséquent cette structure qui sera étudiée dans un deuxième temps. Des stratégies de commande seront établies pour contrôler l'échange de puissance entre la machine et le réseau auquel elle est connectée et différents type de régulateurs seront testés en simulation. Un banc d'essai basé sur une MADA de 7,5 kW sera alors dimensionné dans le but de valider les simulations effectuées.



Chapitre 02: Étude et modélisation de GADA

I - Introduction:

La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) a suscité un grand intérêt surtout en tant que génératrice dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, à travers ce chapitre nous connaissons les raisons d'un tel engouement en commençant par décrire la structure de cette machine, exposer ses différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisées tout en citant ses avantages et ses inconvénients.

Nous essayons d'aborder par la suite la modélisation en mode générateur, ceci a pour l'objectif la connaissance du comportement de ce type de machine dans ses différents régimes de fonctionnement, éventuellement lors de son contrôle (commande).

II - Description de la machine asynchrone à double alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) 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, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (fig 2-1).

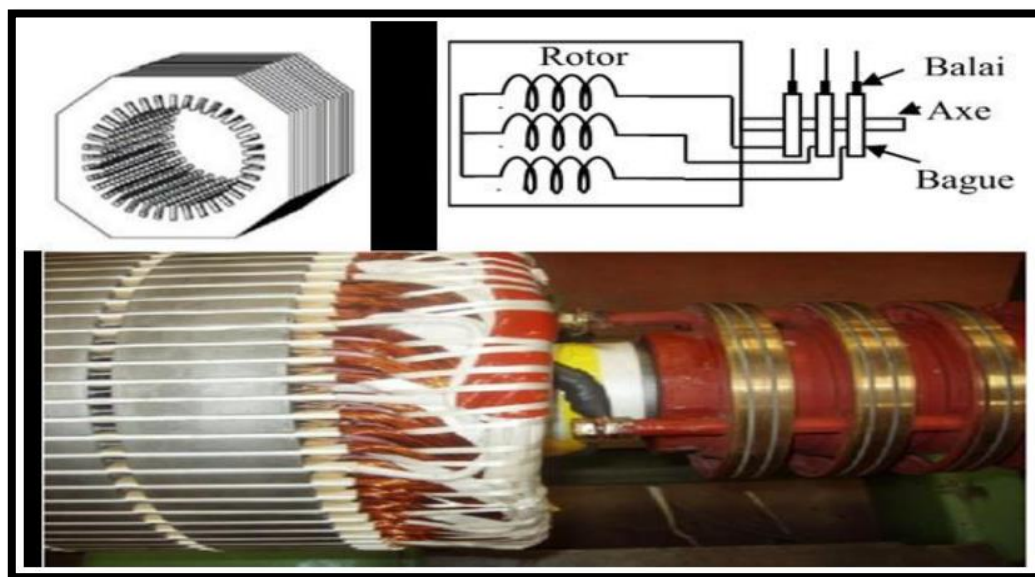


Fig 2-1: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

III - Principe de fonctionnement de la MADA:

Pour expliquer son principe de fonctionnement, en négligeant toutes les pertes. La puissance P_s est fournie au stator et traverse l'entrefer, une partie de cette puissance fournie, $(1-g).P_s$, est retrouvée

sous forme de puissance mécanique, le reste $g.P$ sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $g.f$. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Donc le réseau reçoit $(1+g)P$ [12]. Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique. Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.é.m. dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.e.m. créés au rotor et au stator est :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} = \frac{(w_s - w)}{w_s} \quad (2-1)$$

N_r et N_s : sont respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique.

W_s et W sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

Le courant dans le stator et le rotor est défini comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{I_r}{N_r} = \frac{I_s}{N_s} \quad (2-2)$$

Donc le rapport entre de puissance S_r au rotor et la puissance S_s au stator devient :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{I_r}{I_s} * \frac{E_r}{E_s} = g \quad (2-3)$$

L'équation (2-3) montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g [12].

IV. Différentes topologies de la MADA :

IV.1. Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless » :

Cette machine est à double stator (fig 2-2). Un bobinage transite la puissance qu'il a une grande section et directement connecté au réseau. L'autre bobinage est de section moins importante. Il est connecté à un onduleur pour contrôler les flux d'excitation. Le rotor dans cette machine est à cage d'écureuil, cependant il a une structure différente de celle classique en boucles concentriques [11], [13].

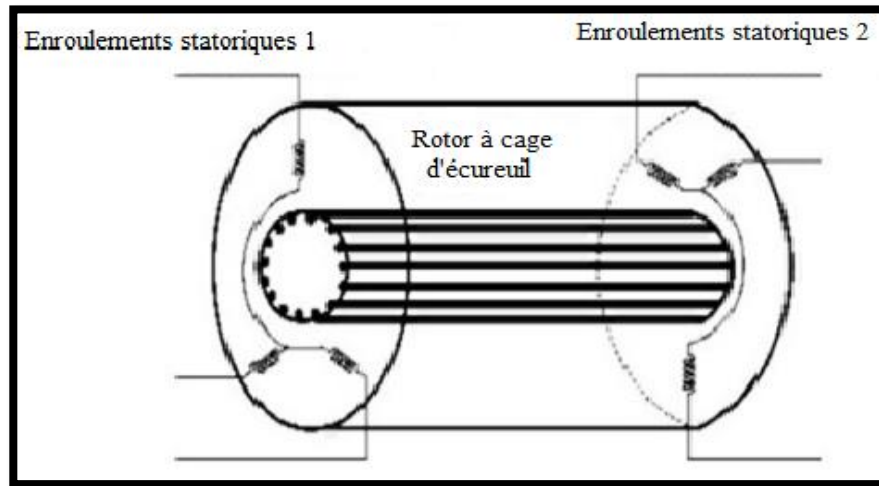


Fig 2-2: MADA à double stator.

Cette machine *présente* l'intérêt de fonctionner à vitesse variable. Le convertisseur est connecté au bobinage de faible puissance donc moins coûteux. Cependant la machine a un stator plus volumineux et plus complexe à réaliser (Fig 2.3).

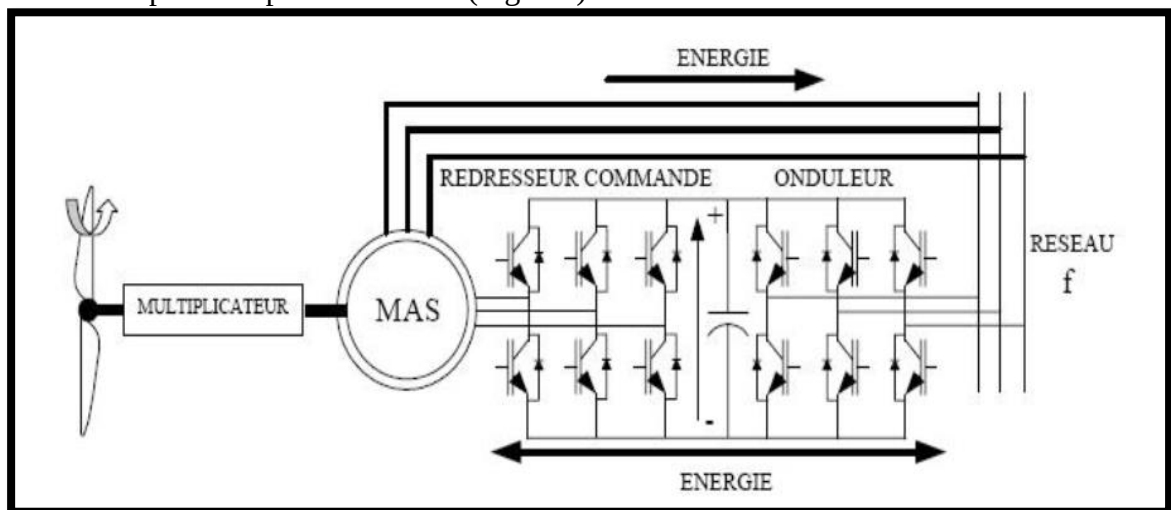


Fig 2-3: MADA Brushless.

Le convertisseur permet de contrôler le facteur de puissance ainsi que le courant rotorique d'où l'optimisation du rendement. La taille du convertisseur est proportionnelle au glissement maximum. Cependant si le glissement dépasse une valeur de 30%, le système devient peu attractif à cause de la diminution de rendement et l'augmentation du coût du convertisseur.

IV.2. Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné :

La MADA à rotor bobiné est une machine qui a un stator identique aux machines asynchrones classiques. Son rotor est bobiné en étoile dont l'accès se fait grâce à un contact glissant. Le contrôle du fonctionnement de la machine se fait grâce à une fraction de la puissance nominale circulant dans le rotor. Cela implique un convertisseur réduit et donc moins coûteux. Il existe différents systèmes décrits ci-dessous :

IV.2.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur (fig 2-4), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

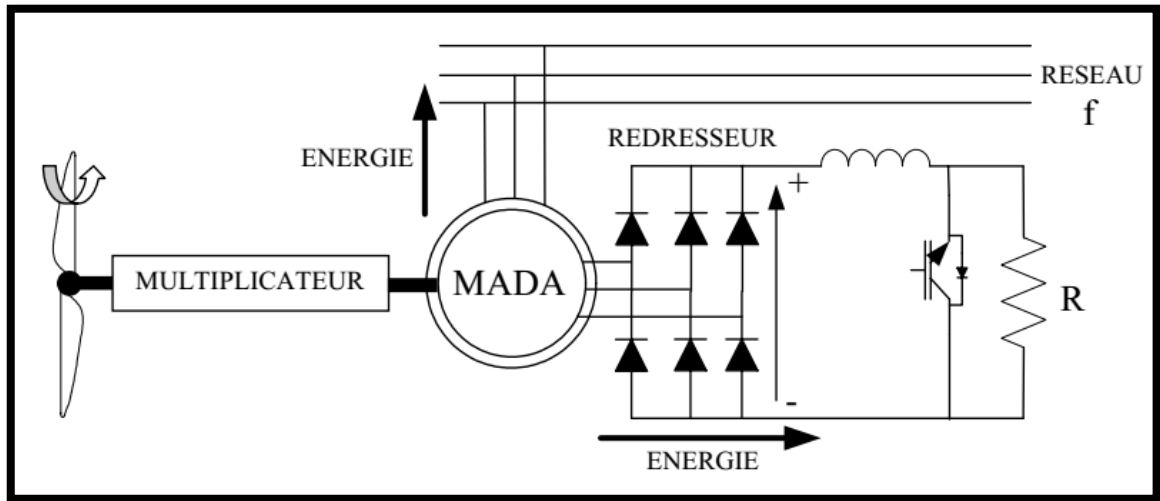


Fig 2-4 : MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique.

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. [14]

IV.2.2. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer :

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, fig 2-5)

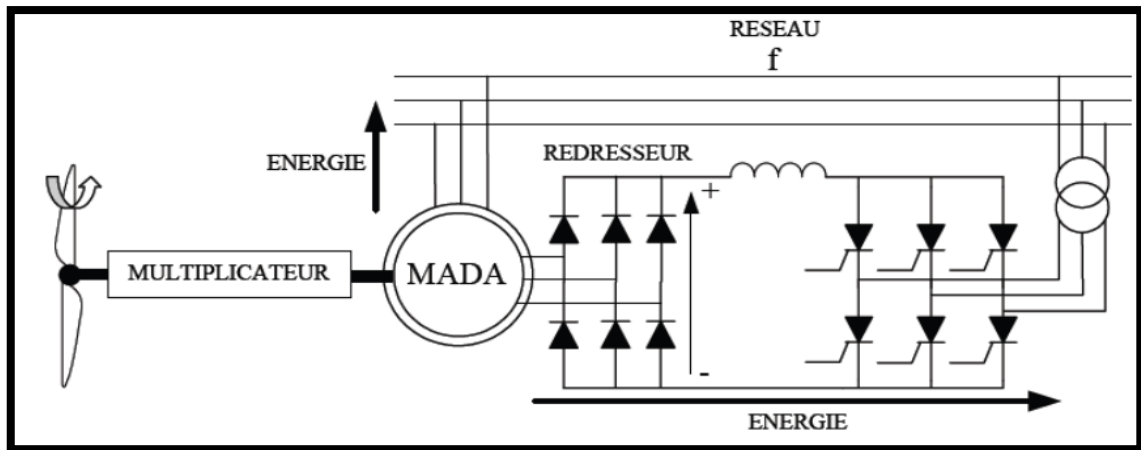


Fig 2-5 : MADA, structure Kramer

L'ensemble « redresseur-onduleur » est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Comme dans le cas de la machine Brushless, 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 glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT. [11]

IV.2.3. Machine asynchrone à double alimentation Structure Scherbius avec cycloconvertisseur:

L'utilisation des thyristors dans ce montage implique une présence de fortes composantes harmoniques nuisant ainsi à la qualité du facteur de puissance. [13]

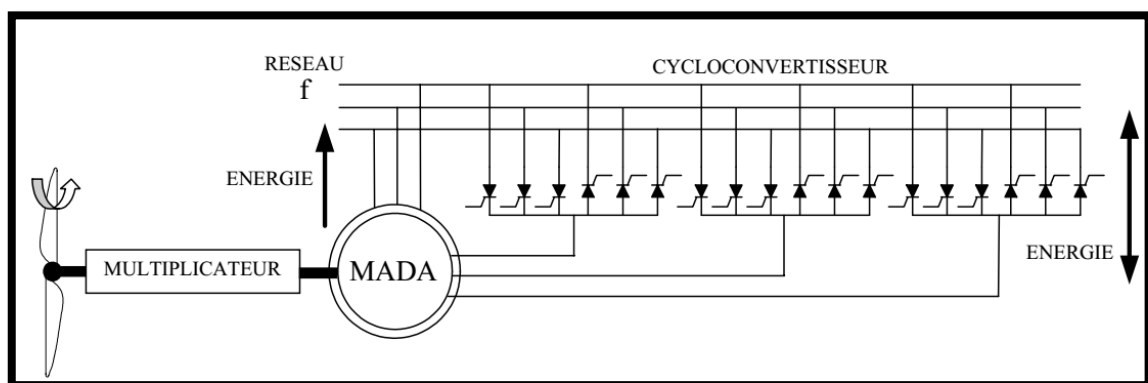


Fig 2-6 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

IV.2.4. Machine asynchrone à double alimentation Structure Scherbius avec convertisseur MLI :

Cette structure (fig 2-7) repose sur le même principe que la précédente. À la place du cycloconvertisseur on utilise un montage redresseur / Onduleur. Les transistors IGBT utilisés dans ce

montage sont commandés à l'ouverture et à la fermeture, ceci implique la possibilité d'utiliser la MLI. Avec une commande appropriée, il est possible d'atténuer les harmoniques non nulles et d'améliorer le facteur de puissance.

Tout en ayant la même philosophie de fonctionnement que la structure « Brushless » le dispositif « Scherbius » offre une simplicité de fonctionnement (présence d'un seul bobinage au rotor et au stator et donc un faible coût de fabrication et de maintenance).

Le glissement est compris entre $[-30, +30]$ %, le convertisseur et donc dimensionné pour 30% de la puissance nominale. La puissance produite n'est pas limitée à la puissance nominale car le rotor au fonctionnement hyper synchrone produit de l'énergie et la fournit au réseau. Cependant la commande MLI entraîne des gradients de tension importants d'où la présence de courants rotoriques de fréquences élevée responsable de pertes fer plus importantes. Plusieurs études récentes confirmées par des réalisations industrielles montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien.

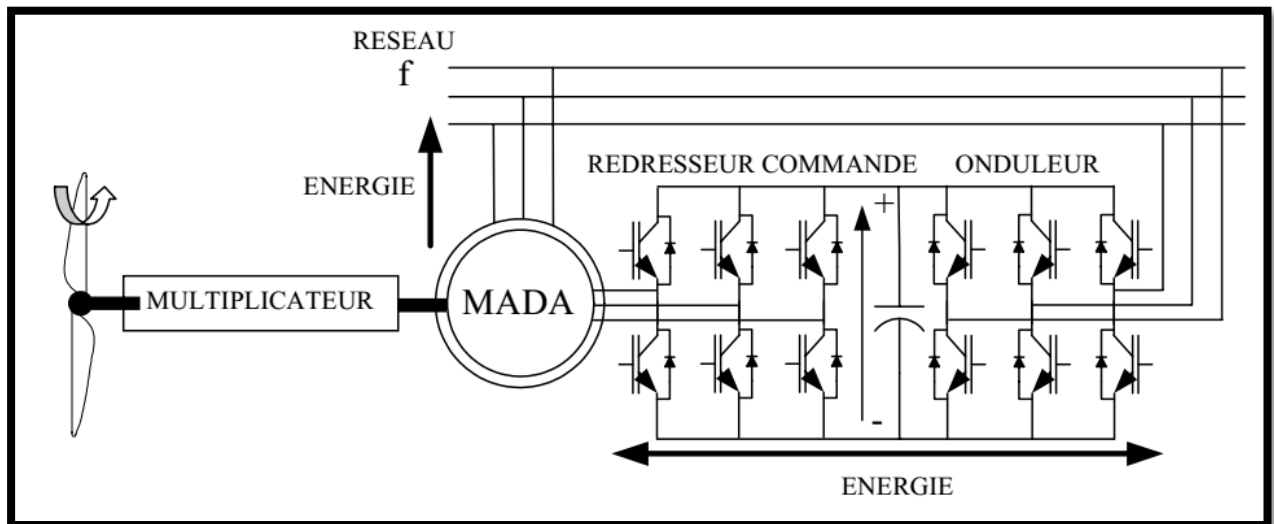


Fig 2-7: Structure de Scherbius avec MLI.

V. Emploi des machines asynchrones à double alimentation :

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet

de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hypo synchrone [11].

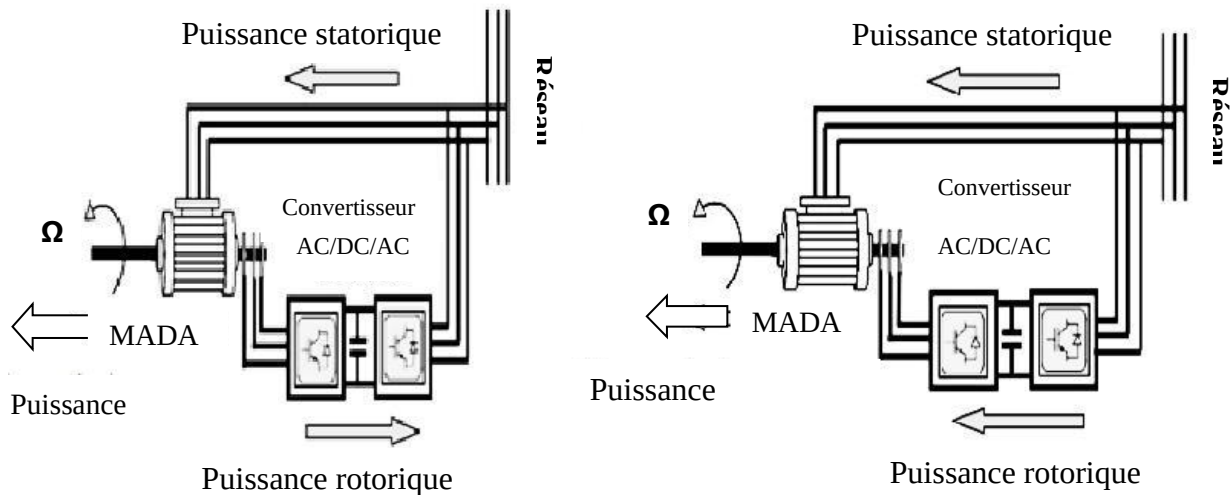
Nous verrons comment nous pouvons utiliser la "réversibilité" de ce principe afin de faire fonctionner la machine asynchrone à double alimentation en générateur à vitesse variable. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur.

VI. Fonctionnement de la MADA à quatre quadrants :

La (fig 2-8) montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure Scherbius onduleur PWM +Redresseur). P_{RES} est la puissance délivrée ou fournie par le réseau, PS la puissance transitant par le stator, P_R la Puissance transitant par le rotor et P_{MEC} est la puissance mécanique.

- Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hypo synchrone. En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.
- En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hyposynchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hypersynchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g.P_{MEC}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au-delà de la vitesse de synchronisme (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. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage [14].



Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone - Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

Fig 2-8 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.

VII. Etude de la puissance pour la MADA :

Les puissances (en ignorant les pertes) de la MADA peuvent être écrites par les expressions suivantes :

$$P_r = -gP_s. \quad (2-4)$$

$$P_m = -(1 - g) P_s. \quad (2-5)$$

Tableaux (2.1): mode de fonctionnement de la MADA

Type de fonctionnement	Moteur $P_m < 0$	Générateur $P_m > 0$
Hyposynchrone: $P_s = -(P_m = P_r)$	$P_s > 0, P_r < 0$	$P_s < 0, P_r > 0, g = \frac{(n_s - n_r)}{n_s}$
Hypersynchrone: $P_m = -(P_s + P_r)$	$P_s > 0, P_r > 0$	$P_s < 0, P_r < 0$

VIII. Les formes Application des machines asynchrones à double alimentation :

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

VIII.1. Application moteur :

La première application importante 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 d'écreuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. En générale La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

VIII.2. Application génératrice:

La machine à double alimentation offre de nombreux avantages par rapport à la Machine asynchrone classique et synchrone. Surtout en ce qui concerne la gamme de la Vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée Par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la Commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La GADA peut être utilisée dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante, comme les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éolienne et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et Navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau [10].

VIII.3. Application de la MADA dans les systèmes éoliens (GADA):

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas ($\pm$) 30% en de ça ou au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale.

IX. Avantages et inconvénients de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation est couramment appelée machine généralisée. Sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue soit à une machine asynchrone classique en court-circuitant les enroulements rotoriques, soit à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative".

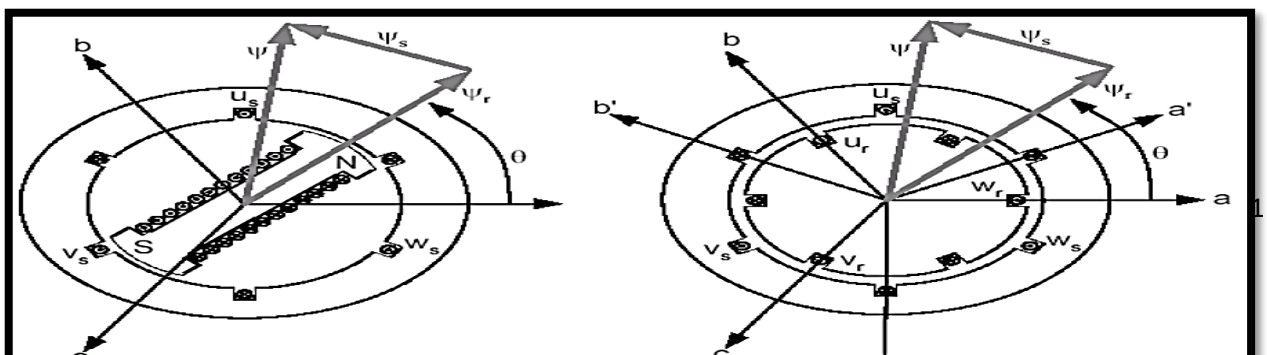


Fig 2-9: Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA.

Le vecteur flux ϕ présent dans l'entrefer de la machine représente la résultante des flux créés par les bobinages statoriques ϕ_s et du flux rotorique ϕ_r qui est créé soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu (MS) soit par l'alimentation alternative des bobinages rotoriques triphasés (MADA). Le remplacement de la roue polaire par le circuit triphasé alimenté en alternatif permet d'avoir un vecteur du flux rotorique ϕ_r qui a une amplitude et une phase totalement contrôlable par l'alimentation du circuit. Ainsi, la dynamique du flux dépend uniquement de la constante du temps électrique du système [15].

Dans ce contexte, il est clair que la machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone en plus les avantages envisagés grâce à sa double alimentation. D'autre part, comme toutes les autres machines électriques, la MADA a des inconvénients qu'on va les citer ci-dessous.

IX.1. Avantages de la MADA :

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme.
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir:

1. Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
2. Régulation découplée des puissances active et réactive.

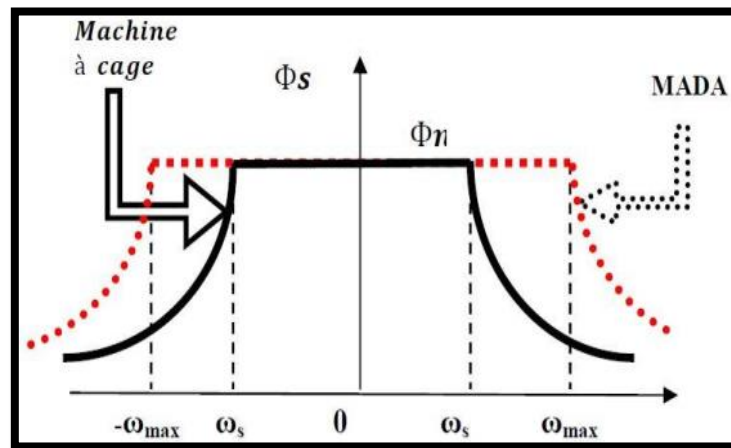


Fig 2-10: Comparaison de zone de fonctionnement En survitesse entre la machine à cage et la MADA.

IX.2. Inconvénients de la MADA :

- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique.
- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais.

X. Modélisation de la MADA:

X.1. Hypothèses simplificatrices de la modélisation de la MADA :

A cause de la répartition des enroulements de la MADA et la géométrie propre complexe et afin de faciliter les difficultés, on prend quelques hypothèses simplificatrices avancées habituellement pour modéliser les machines électriques en vue de leur commande en général :

- La machine sera supposée idéale, c'est à dire que les ampères-tours seront supposés distribués sinusoïdalement le long de l'entrefer de la machine et que les harmoniques d'espace seront négligés ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau ;
- Les pertes dans le fer (par hystérésis et courant de Foucault) seront négligées ;
- La saturation du circuit magnétique sera négligée ;
- Les grandeurs homopolaires seront considérées comme nulles [15].

X.2. Modèle naturel triphasé de la MADA :

Comme toutes les autres machines, la machine asynchrone double alimentée (MADA) est une machine réversible qui peut fonctionner en mode génératrice (GADA). En cas où on inverse son couple en injectant un couple moteur au lieu d'un couple résistant au niveau de son arbre, elle garde toujours son propre modèle. En prenant en compte les hypothèses simplificatrices citées précédemment, on peut exprimer le modèle de cette machine en se basant sur les relations suivantes :

$$\text{Grandeurs statoriques : } \begin{cases} [V_S] = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T \\ [I_S] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T \\ [\phi_S] = [\phi_{as} \ \phi_{bs} \ \phi_{cs}]^T \end{cases} \quad (2-6)$$

$$\text{Grandeurs rotoriques : } \begin{cases} [V_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T \\ [I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T \\ [\phi_r] = [\phi_{ar} \ \phi_{br} \ \phi_{cr}]^T \end{cases} \quad (2-7)$$

Voici alors les équations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

Où :

R_S, R_r : sont respectivement la résistances statorique et rotorique ;

L_S, L_r : inductances propres statorique et rotorique ;

M_{sr} : Inductances mutuelles entre le stator et le rotor ;

M_s : Inductances mutuelles entre les phases statoriques ;

M_r : Inductances mutuelles entre les phases rotoriques ;

Avec :

$$[M_{sr}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

X.3. Application de la transformation de Park à la MADA:

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système biphasé (repère d, q, o) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution [11]. Cette transformation peut être appliquée sur le courant, tension et flux.

La transformée de Park appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réels leurs composantes :

- Direct selon l'axe (d) .
- Quadrature (transversal) selon l'axe (q).
- Homopolaire(o).

Les grandeurs statoriques et rotoriques seront alors exprimées dans un même repère (axe direct d et axe en quadrature q) [15].

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ est donnée sous la forme suivante :

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)][x_{abc}] \quad (2-13)$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$[P(\theta)]^{-1}=[P(\theta)]^T \quad (2-14)$$

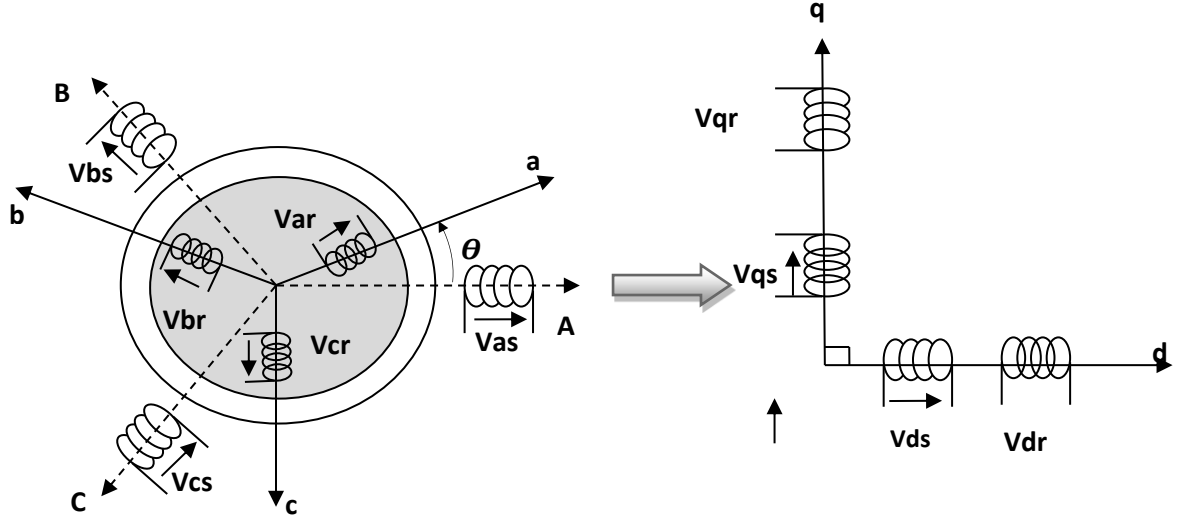


Fig 2-11 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

X.4. Equation de tension :

Après l'application de la transformation de Park pour l'équation (2.8) du stator et l'équation (2.9) du rotor, les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_{coor} \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_{coor} \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega) \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_{coor} - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (2-15)$$

Avec :

ω_{coor} : Pulsation du référentiel d'axe (d, q).

ω : Pulsation mécanique du rotor.

X.5. Equation du flux:

On applique la transformation de Park sur les équations des flux statorique et rotorique on obtient :

$$\phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \quad (2-16)$$

$$\phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M i_{qr} \quad (2-17)$$

$$\phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \quad (2-18)$$

$$\phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \quad (2-19)$$

X.6. Choix du référentiel :

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique :

X.6.1. Référentiel lié au stator :

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (α, β) . Dans ce cas, $(\omega_{coor} = 0)$. Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques.

X.6.2. Référentiel lié au rotor :

Dans ce cas, le système d'axes (d, q) est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse $(\omega_{coor} = p\Omega)$. Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

X.6.3. Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (X, Y) , il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire $(\omega_{coor} = \omega_s)$.

Dans notre travail, on utilise le référentiel lié au champs tournant $(\omega_{coor} = \omega_s)$ pour la modélisation et commande de la MADA. Dans ce cas, le modèle de la MADA devient :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (2-20)$$

X.7. Equation mécanique :

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

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (2-21)$$

Où

C_e : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant.

J : Moment d'inertie des parties tournantes.

Ω : Vitesse de rotation du rotor de la MADA.

f : Coefficient de frottement visqueux de la MADA.

p : Nombre de paires de pôles.

X.8. Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park :

$$C_e = p(\phi_{ds}i_{qs} - \phi_{qs}i_{ds}) \quad (2-22)$$

$$C_e = p.M(i_{qs}.i_{dr} - i_{ds}.i_{qr}) \quad (2-23)$$

$$C_e = \frac{p.M}{L_r}(\phi_{dr}.i_{qs} - \phi_{qr}.i_{ds}) \quad (2-24)$$

$$C_e = \frac{p.M}{L_s}(\phi_{qs}.i_{dr} - \phi_{ds}.i_{qr}) \quad (2-25)$$

XI. CONCLUSION :

Ce chapitre nous a permis de présenter la structure d'une machine asynchrone à double alimentation que envisagées dans l'industrie où nous avons effectué une présentation de ses différentes configurations.

Afin de mieux comprendre les avantages que peut présenter cette machine, nous avons analysé les possibilités qu'elle offrait en fonctionnement générateur. L'analogie de fonctionnement qui peut être faite avec les machines synchrones dans la configuration des flux a conduit à dénommer cette machine: "machine généralisée".

Après avoir illustré les avantages et les inconvénients de la MADA, nous avons cité les domaines d'application, où cette machine représente la solution la plus convenable. Pour simplifier le modèle de la machine nous avons par la suite, établi le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (**d_q**) lié au stator à l'aide de la transformation de PARK. Les résultats de simulation montrent que pour le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement générateur. Ainsi que l'étude de fonctionnement de la MADA faite apparaître la stabilité pour le cas de fonctionnement générateur.

Ce modèle sera exploité pour étudier la stratégie de commande de la machine asynchrone à double alimentation en puissance active et réactive.



Chapitre 03:

Commande par mode

glissant de la GADA

I. Introduction:

Comme nous l'avons précédemment annoncé, ce chapitre est dédié à la commande non- linéaire de la MADA. Il s'agit d'une Commande à Structure Variable (CSV) qui, dans la bibliographie du génie électrique, porte le nom de commande par mode de glissement. Les avantages de la commande par mode de glissement sont importants et multiples : la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité, l'invariance, la robustesse...etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour les systèmes ayant un modèle imprécis.

Souvent, il est préférable de spécifier la dynamique du système durant le mode de convergence. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode de glissement et une autre, discontinue, représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire, car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle. Nous présenterons dans un premier temps quelques éléments de la théorie de contrôle par mode de glissement, ensuite nous l'appliquerons successivement la modélisation en puissance avec la transformation de Park. Nous donnerons finalement les résultats de simulation obtenus avec ces différentes modélisations qui confirme la validation de la commande.

II. Historique de la commande par mode glissant:

Le mode glissant est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable. La théorie de ces systèmes a été étudiée et développée en union soviétique, tout d'abord par le professeur EMELYANOV, puis par d'autres collaborateurs également UTKIN, à partir des résultats des études du mathématicien FILIPOVE sur les équations différentielles à second membre discontinu. Ensuite, les travaux ont été repris aux Etats-Unis par SLOTINE, et au Japon par Young, HARASHIMA et HASHIMOTO .Ce n'est qu'à partir des années 80 que la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable est devenue intéressante et attractive. Elle est considérée comme l'une des approches les plus simples pour la commande des systèmes non linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis

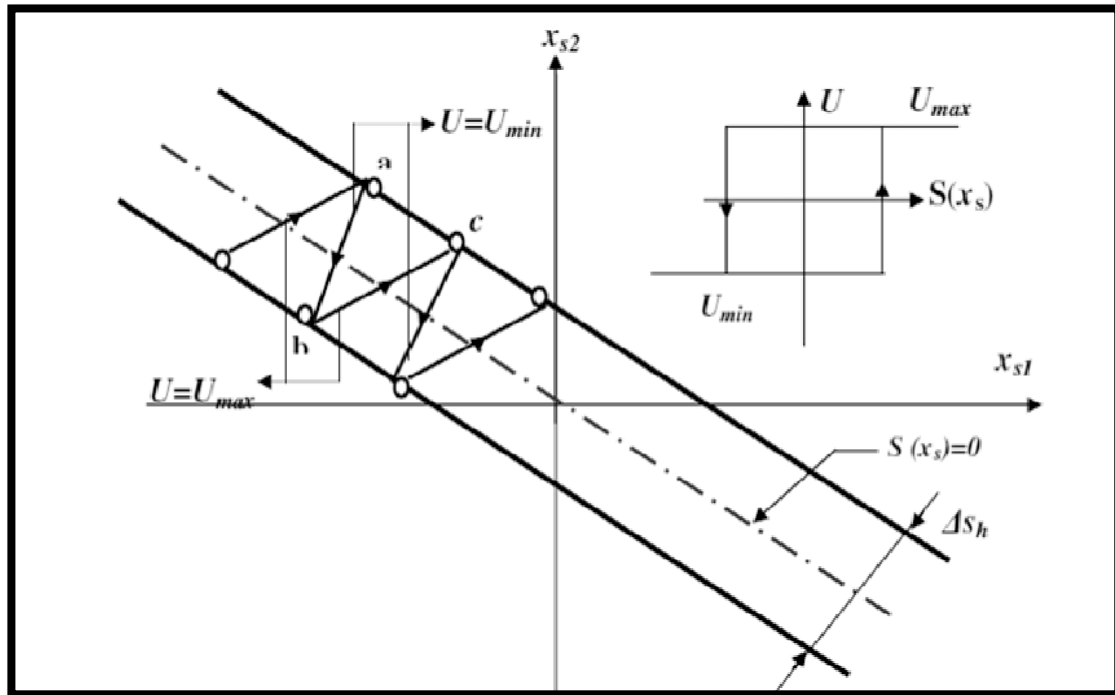


Fig 3-1 : Mode de glissement réel

II.1.Principe de la commande par mode de glissement :

Un système à structure variable est un système dont la structure change durant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. Ainsi, dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface. Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée d'y rester au voisinage de cette surface (figure 3.1). Cette dernière est appelée surface de glissement.

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes :

- Le mode de convergence (MC) : durant lequel la variable à réguler se déplace à partir de n'importe quel point du plan de phase vers la surface de commutation () et l'atteint dans un temps fini. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- Le mode de glissement (MG) : durant lequel la variable d'état a atteint la surface glissante et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement () .
- Le mode de régime permanent (MRP) : il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre. Il caractérise la qualité et la performance de la commande. Il est utilisé spécialement pour l'étude des systèmes non linéaires.

II.2. Structure de la commande par mode de glissement :

Les avantages de la commande par mode de glissement sont importants et multiples, comme la haute précision, la stabilité, la simplicité, un temps de réponse très faible et notamment la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adapté pour traiter les systèmes à modèle imprécis, dû soit à un problème d'identification soit à un problème de modélisation. Souvent, il est préférable de spécifier la dynamique du système durant le mode de convergence. Dans ce cas, la structure du contrôleur comporte deux parties. Un premier continu représentant la dynamique du système durant le mode de glissement et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette deuxième est importante dans la commande non linéaire, car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécision et de perturbation sur le modèle. La conception de la commande par mode de glissement prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche, qui s'effectue principalement en trois étapes principales complémentaires l'une de l'autre, définies par :

- ✓ Le choix des surfaces de glissement ;
- ✓ La définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant ;
- ✓ La détermination de la loi de commande.

II.2.1. Choix des surfaces de glissement :

On considère le modèle d'état suivant :

$$[\dot{\mathbf{X}}] = [\mathbf{A}][\mathbf{x}] + [\mathbf{B}][\mathbf{U}] \quad (3.1)$$

Où $[\mathbf{x}] \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $[\mathbf{U}] \in \mathbb{R}^m$ le vecteur de commande, avec $n < m$.

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande $[\mathbf{U}]$

Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état vers sa valeur de référence, il faut choisir une surface de glissement. Elle est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface. Nous trouvons dans la littérature différentes formes de surface de glissement, et chaque surface présente de meilleures performances pour une application donnée. Dans ce travail, nous nous intéressons à une surface non linéaire

$$S(X) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-1} e(X) \quad (3.2)$$

avec :

$S(X) = X - X^*$ écart de la variable à réguler ;

r : est un degré relatif qui représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande ; λ : gain positif.

L'objectif de la commande est de garder la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x) = 0$

II.2.2. Conditions d'existence et de convergence du régime glissant :

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation [6]. Il existe deux conditions pour assurer le mode de convergence:

➤Approche directe

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro, elle est donnée sous la forme :

$$S(X) \cdot \dot{S}(X) < 0 \quad (3.3)$$

➤Approche LYAPUNOV

L'approche de **LYAPUNOV** qui est une condition globale d'accès au mode glissant. Il s'agit de choisir une fonction scalaire positive appelée fonction de LYAPUNOV qui peut être donnée par :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (3.4)$$

L'idée est de choisir cette fonction pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence, et de concevoir une commande U telle que le carré de la surface correspond à une fonction de LYAPUNOV. La dérivée de la fonction $V(x)$ donne :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (3.5)$$

Pour que la fonction candidate de **LYAPUNOV** puisse décroître et converger vers zéro (pour garantir l'existence du mode de glissant), il suffit d'assurer que :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (3.6)$$

II.2.3. Synthèse des lois de commande du mode glissant [1],[28],[30]:

Afin d'assurer l'attractivité et l'invariance de la surface de glissement, on doit définir une loi de commande sous la forme suivante :

$$U = U_{eq} + U_n \quad (3.7)$$

Telle que U_{eq} est la commande équivalente définie par **Utkin**. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement (propriété d'invariance). La commande équivalente est exprimée, en considérant que la dérivée de la surface est nulle c'est à dire $\dot{S}(x) = 0$. En effet, on peut interpréter la grandeur de commande équivalente comme étant la valeur moyenne de la commande lors de la commutation rapide entre ces deux valeurs U_{max} et U_{min} . Tandis que U_n est la commande discrète qui est déterminée afin de vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système quand le système défini par l'équation (3.1) fonctionne en régime glissant, sa dynamique vérifie la condition $\dot{S}(x) = 0$. La dérivée de la surface de glissement est donnée par :

$$\dot{S}(x) = \frac{ds}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{ds}{dx} (Ax(t) + BU(t)) \quad (3.8)$$

En remplaçant l'expression de U dans l'équation (3.6), on obtient :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dx} [Ax(t) + BU_{eq}] + \frac{dS}{dx} BU_n \quad (3.9)$$

Lorsque le mode glissant est atteint et en régime permanent, la surface de glissement est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où, on déduit l'expression de la commande équivalente

$$U_{eq} = -\left[\frac{ds}{dx} B\right]^{-1} \left[\frac{ds}{dt} Ax(t)\right] \quad (3.10)$$

Pour assurer l'attractivité de la surface de glissement, il suffit d'ajouter le terme U_n à la loi de commande, de telle sorte que :

$$\dot{S}(x)S(x) < 0 \quad (3.11)$$

C'est-à-dire :

$$S(x) \frac{ds}{dt} BU_n < 0 \quad (3.12)$$

Pour que cette condition soit vérifiée, il suffit que le signe de U_n soit opposé à celui de $S(x) \frac{dS}{dx} B$. Généralement la commande discrète en mode glissant peut prendre la forme de type relais donnée par l'expression suivante :

$$U_n = K \text{sign}(S(x)) \quad (3.13)$$

La figure suivante représente la fonction de la commande discrète de type relais[39] :

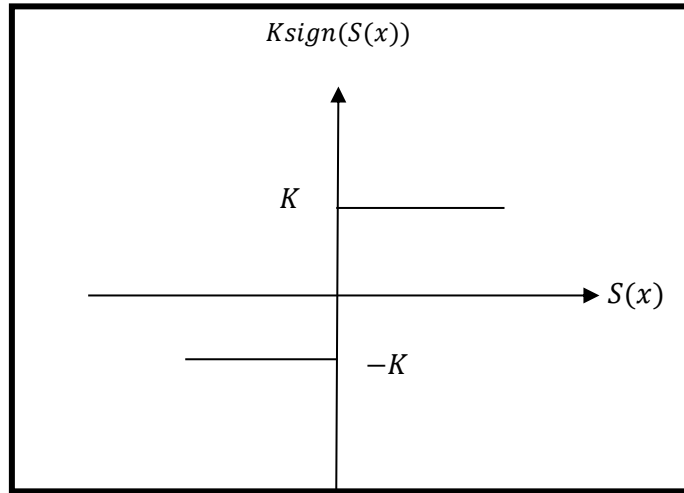


Fig 3-2 : Fonction sign (Commande de type relais).

Le principal inconvénient de la commande de type relais réside dans le phénomène bien connu de "chattering". En régime permanent, ce dernier apparaît comme une oscillation de haute fréquence autour du point d'équilibre, à cause de la nature très discontinue de la fonction signe. Ce phénomène de chattering ou broutement est un sérieux obstacle pour les applications de commande par mode de glissement, car les oscillations dues à ce phénomène peuvent nuire le fonctionnement du circuit de puissance. Ce phénomène est presque toujours problématique et des efforts de recherche significatifs ont été dirigés de sorte à éliminer ou du moins réduire ses effets. L'une des solutions envisagées consiste à introduire une bande d'arrêt autour de la surface de commutation. Pour ce faire, il suffit de substituer une fonction de saturation voir figure(3-2) à la fonction signe dont les discontinuités au voisinage de zéro sont moins brutales.[28]. Cette fonction de saturation peut être exprimée par :

$$\text{sat}(S(x)) = \begin{cases} K & \text{Si } S(x) > \varepsilon \\ -K & \text{Si } S(x) < -\varepsilon \\ \frac{K \cdot S(x)}{\varepsilon} & \text{Si } |S(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (3..14)$$

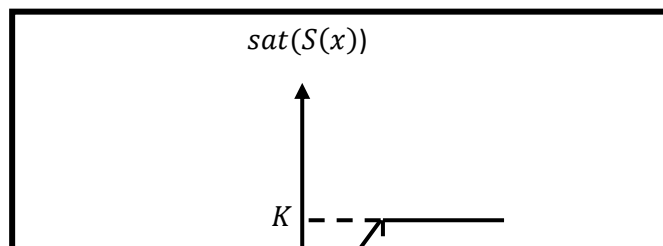


Fig 3.3 :Fonction de saturation (Commande adoucie).

Les oscillations de hautes fréquences qui apparaissent sur les réponses en régime glissant peuvent être évitées en rendant continue la commande discontinue. Pour cela, on remplace la fonction *sign* par la fonction intégrale. Elle est définie comme suit

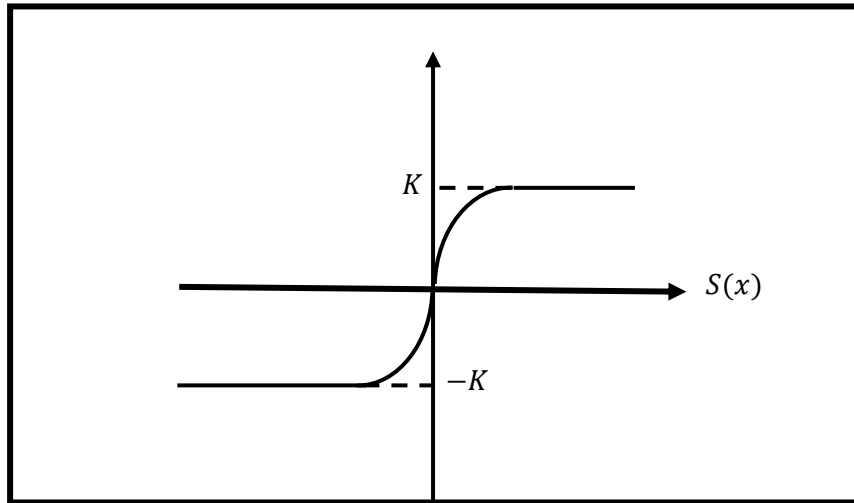
$$u_n = K \frac{S(x)}{S(x)+\delta} + \mu \quad (3.15)$$

avec:

$$\delta = \begin{cases} \delta_0 & \text{si } |S(x)| \geq \varepsilon \\ \delta_0 + \gamma \int S(x) dt & \text{si } |S(x)| < \varepsilon \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\mu = \begin{cases} \delta_0 & \text{si } |S(x)| \geq \varepsilon \\ \xi + \gamma \int S(x) dt & \text{si } |S(x)| < \varepsilon \end{cases} \quad (3.17)$$

où: $\xi, \gamma, \varepsilon, \delta$ et μ sont des constantes positives. La commande est illustrée à la figure (3.4):

**Fig 3.4 : Commande intégrale**

III. Application de la commande à mode glissant à la MADA :

Pour des raisons évidentes de simplifications, un référentiel d-q lié au champ tournant statorique le couple électromagnétique est donne par :

$$C_e = \frac{p.M}{L_s} (\Phi_{qs} \cdot i_{dr} - \Phi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (3.18)$$

les puissances actives et réactives statoriques d'une génératrice asynchrone s'écrivent :

$$P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (3.19)$$

$$Q_s = V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs} \quad (3.20)$$

basant sur les principe de la commande vectorielle, (un flux statorique aligné sur l'axe d ont été adoptés [8]. De plus, la résistance statorique peut être négligée), pour réaliser la loi de commande nous choisissons d'orienter le flux statorique suivant l'axe d.

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{sq} = 0 \quad (3.21)$$

et l'équation des flux devient :

$$\varphi_s = L_s i_{ds} + M_s i_{dr} \quad (3.22)$$

$$0 = L_s i_{qs} + M_s i_{qr} \quad (3.23)$$

Les puissances active et réactive s'écrivent alors :

$$P_s = -V_s \frac{M_s}{L_s} i_{qr} \quad (3.24)$$

$$Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s M_s}{L_s} i_{dr} \quad (3.25)$$

A l'aide de l'équation (3.14) et (3.15), on peut écrire les courants rotoriques sous la forme:

$$i_{qr} = -\frac{L_s}{V_s M_s} P_s \quad (3.26)$$

$$i_{qr} = \frac{L_s}{V_s M_s} \left(\frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - Q_s \right) \quad (3.27)$$

A partir du chapitre deux, on tire le système d'équations suivant :

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\left(L_s - \frac{M_s^2}{L_s}\right)} \left(V_r - R_r i_r + w_r \left(L_r - \frac{M_s^2}{L_s} \right) i_r \right) \quad (3.28)$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\left(L_s - \frac{M_s^2}{L_s}\right)} \left(V_r - R_r i_r + w_r \left(L_r - \frac{M_s^2}{L_s} \right) i_r - W_r \frac{V_s M_s}{W_s L_s} \right) \quad (3.29)$$

III.1 Surface de régulation de la puissance active :

Pour contrôler la puissance active on prend le degré relatif ($r=1$), l'expression de la surface de contrôle de la puissance active à la forme suivante :

$$S(P) = (P_s^* - P_s) \quad (3.30)$$

La dérivée de la surface est :

$$S^*(P) = (P_s^* - P^*) \quad (3.31)$$

On remplace l'expression (3.17) en (3.25), on trouve :

$$S^*(P) = \left(P_s^* - \left(-\dot{V}_s \frac{M_s}{L_s} i_{rq} \right) \right) \quad (3.32)$$

En introduisant l'équation (3-28) dans (3-32), on aura :

$$S^*(P) = \left(P_s^* + \frac{V_s M_s}{L_s} \frac{1}{\left(L_s - \frac{M_s^2}{L_s}\right)} \left(V_r - R_r i_r + W_r \left(L_r - \frac{M_s^2}{L_s} \right) i_r - W_r \frac{V_s M_s}{W_s L_s} \right) \right) \quad (3.33)$$

On a

$$\sigma = \left(1 - \frac{M_s^2}{L_s L_r} \right) \quad (3.34)$$

On remplace (3-34) dans (3-33), on aura :

$$S^*(P) = \left(P_s^* + \frac{V_s M_s}{L_s L_r \sigma} \left(V_r - R_r i_r + W_r L_r \sigma i_r - W_r \frac{V_s M_s}{W_s L_s} \right) \right) \quad (3.35)$$

À présent, en remplaçant la tension par la tension de commande, la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$S^*(P) = \left(P_s^* + V_s \frac{M_s}{\sigma L_r L_s} \left((V_r^e + V_r^n) - R_r i_r - W_r L_r \sigma i_r - W_r \frac{V_s M_s}{W_s L_s} \right) \right) \quad (3.36)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, on a $S(P) = 0$ et par conséquent $\dot{S}(P) = 0$ et $V_r^n = 0$, d'où on tire la formule de la commande équivalente à partir de la relation (3.36):

$$V_r^{eq} = R_r i_r + L_r W_r \sigma i_r + W_r \frac{V_s M_s}{W_s L_s} - \dot{P}_s^r \frac{\sigma L_r L_s}{V_s M_s} \quad (3.37)$$

Durant le mode de convergence, la condition $\dot{S}(P).S(P) < 0$ doit être vérifiée. En remplaçant (3.37) dans (3.36), on obtient :

$$S^*(P) = \left(-\frac{V_s M_s}{L_s L_r \sigma} V_r^n \right) \quad (3.38)$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_r^n = K.Sing(S(P)) \quad (3.39)$$

III.2. Surface de régulation de la puissance réactive:

prenant la même surface que celle de la puissance active

$$S(Q_s) = (Q_s^r - Q_s) \quad (3.40)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(Q_s) = (\dot{Q}_s^r - \dot{Q}_s) \quad (3.41)$$

On remplace l'expression de la puissance réactive à partir du chapitre deux on trouve :

$$\dot{S}(Q_s) = (\dot{Q}_s^r - \frac{V_s M_s}{L_s} \dot{I}_r) \quad (3.42)$$

En introduisant l'équation (3-27) dans (3-41), on aura :

$$\dot{S}(Q_s) = (\dot{Q}_s^r - (\frac{V_s M_s}{L_s L_r \sigma} (V_r - \dot{R}_r I_r + W_r L_r \sigma \dot{I}_r))) \quad (3.43)$$

En remplaçant l'expression de par + , la commande apparaît clairement dans l'équation suivant :

$$\dot{S}(Q_s) = \left(\dot{Q}_s^r - \left(-\frac{V_s M_s}{L_s L_r \sigma} ((V_r^e + V_r^n) - R_r I_r + W_r L_r \sigma \dot{I}_r) \right) \right) \quad (3.44)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$S(Q_s) = 0$ $\dot{S}(Q_s) = 0$ et $V_r^n = 0$, d'où on tire la formule de la commande équivalente à partir de la relation (3.43).

$$V_r^e = \left(-\dot{Q}_s^r - \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M_s} + (R_r I_r - W_r L_r \sigma \dot{I}_r) \right) \quad (3.45)$$

Durant le mode de convergence, la condition $S(P).\dot{S}(P) < 0$ doit être vérifiée. En remplaçant (3-45) dans (3.44), on trouve :

$$\dot{S}(Q) = -\frac{V_s M_s}{L_s L_r \sigma} V_r^n \quad (3.46)$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_r^n = K.Sing(S(Q)) \quad (3.47)$$

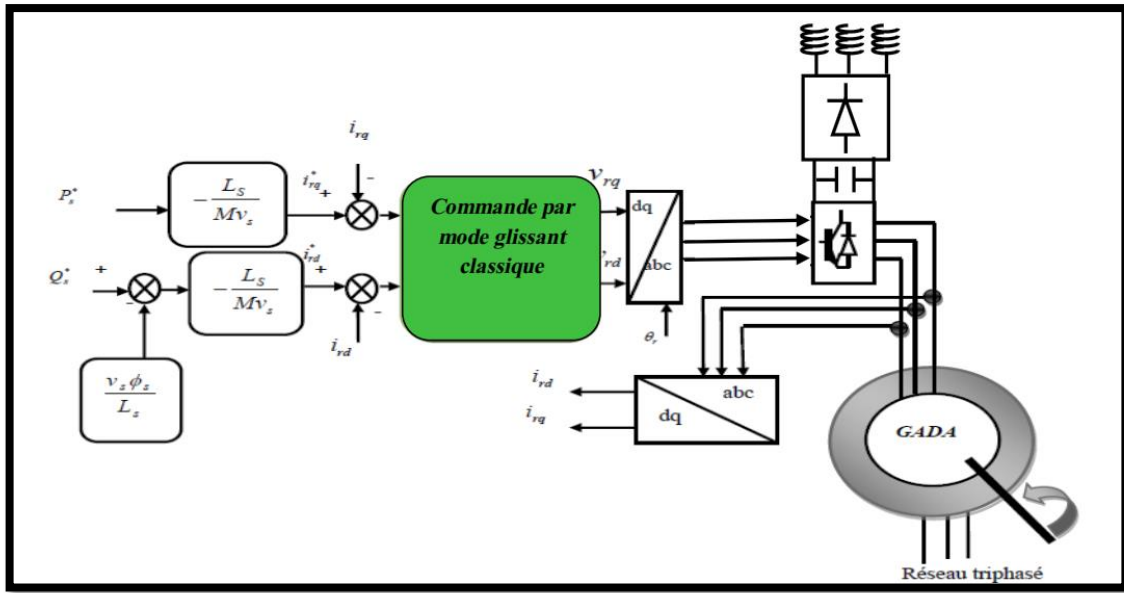


Fig 3-5 : Schéma bloc de régulation des puissances active et réactive par mode glissant

III.3. Modélisation de l'onduleur de tension à MLI :

L'onduleur de tension à MLI est habituellement choisi pour sa réponse rapide et ses performances élevées. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau standard 220/380-50Hz. Après redressement, la tension filtrée U (étage continu) est appliquée à l'onduleur Figure (3-4). Le fonctionnement de l'onduleur obéit à un séquençement de 180 de conduction par interrupteur d'un même bras. Les diodes de roue libres assurent la continuité du courant dans la MAS une fois les interrupteurs sont ouverts. Il est à noter qu'un temps de retard doit exister pratiquement entre les interrupteurs haut et bas d'un même bras afin d'éviter le court-circuit de la source continue. Les composants de puissance (interrupteurs) sont déterminés en fonction des niveaux de la puissance et la fréquence de commutation. En règle générale, plus les composants sont rapides (fréquence de commutation élevée), plus la puissance commutée est grand et inversement.

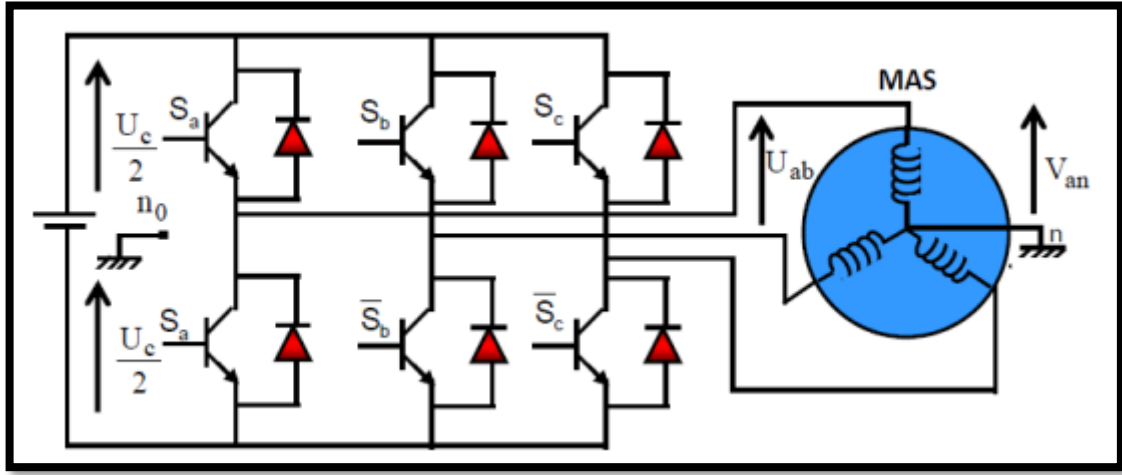


Fig 3-6 : Onduleur de tension et élaboration des vecteurs tensions

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_i ($i = a, b, c$) :

- ✓ $S_i = 1$ le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- ✓ $S_i = 0$ le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Dans ces conditions, on peut écrire les tensions de phases en fonction des signaux de commande S_i :

$$U_{ina,b,c} = S_i U_c - \frac{U_c}{2} \quad (3.48)$$

Les trois tensions composées, et sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « **O** », Fig(3-6).

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (3.49)$$

Soit « **n** » le point neutre du coté alternatif (MAS), alors on a :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (3.50)$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte

$$V_{an} = V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (3.51)$$

La substitution nous donne:

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (3.52)$$

En remplaçant (3.52) dans (3.50) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (3.53)$$

Les différentes combinaisons des trois grandeurs (S_a, S_b, S_c) permettent de générer huit vecteurs tensions dont deux correspondent au vecteur nul. L'utilisation de l'expression (3.48) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Avec V_{ao}, V_{bo}, V_{co} comme tensions d'entrée de l'onduleur (valeurs continues), et si

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} sont les tensions de sortie de cet onduleur, donc l'onduleur est modélisé par la matrice de transfert $\mathbf{T}$ donnée par

$$\mathbf{T} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

III.4. Stratégie de maximisation de la puissance :

Les équations de la puissance électrique et mécanique du système en régime permanent permettent à nouveau la formulation du nouvel objectif principal. Cependant, pour la fonction de la puissance mécanique une forme plus simple utilisée. Pour réduire les degrés de liberté des systèmes, la vitesse du vent, seule variable non contrôlable du système, est sortie de la formulation mathématique par l'utilisation d'une forme optimale [10]. Si le rapport de vitesse λ est maintenu à sa valeur optimale λ^{opt} , le coefficient de puissance est à sa valeur maximale $C_{pM} = C_p(\lambda^{\text{opt}})$ ainsi que la puissance de l'éolienne :

$$P_{\text{eol}}^{\text{opt}} = \frac{1}{2} C_{pM} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^2 \quad (3.56)$$

D'autre part, si l'équation du rapport de vitesse supposé maintenu à la valeur optimale,

$$\lambda^{\text{opt}} = \frac{\Omega R}{V} V_v \rightarrow \frac{R}{\lambda^{\text{opt}}} \cdot \Omega \quad (3.57)$$

on, isole la vitesse du vent (3.56) pour la remplacer dans l'équation de la puissance mécanique maximale, on obtient l'équation (3.57)

$$P_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} C_{pM} \cdot \rho \cdot S \cdot \left(\frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^2 \cdot \Omega^2 \quad (3.58)$$

On obtient donc une forme analytique de la puissance mécanique maximale de la turbine éolienne en fonction de sa vitesse de rotation Ω uniquement. En supposant que les conditions sont optimales (à puissance optimale), alors l'équation (3.57) permet le calcul de la valeur du couple optimal :

$$C_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} C_{pM} \cdot \rho \cdot S \cdot \left(\frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^2 \cdot \Omega^2 \quad (3.59)$$

IV. Résultats de Simulation :

A l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK , on a réalisé le simulation du système éolien global (composé de la turbine éolienne, la génératrice asynchrone à double alimentation, et la commande par régulateur à mode glissant) avec un profil de vent qui prend les valeurs:

- de 0 jusqu'à 15 s la vitesse de vent est 8 m/s
- de 15 jusqu'à 30 s la vitesse de vent est 10 m/s.
- de 30 jusqu'à 45 s la vitesse de vent est 12 m/s.

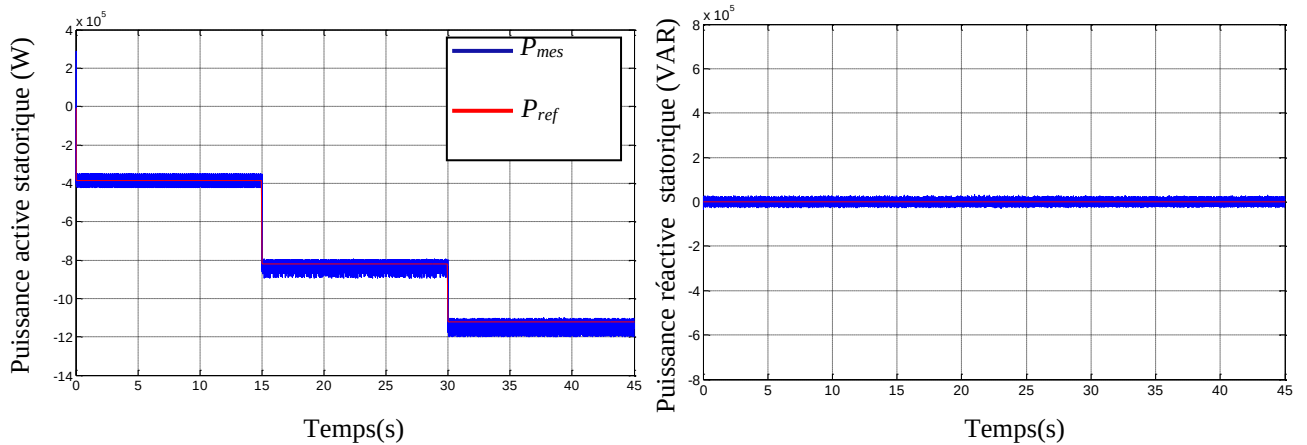


Fig 3-7: puissance active et réactives avec ses références

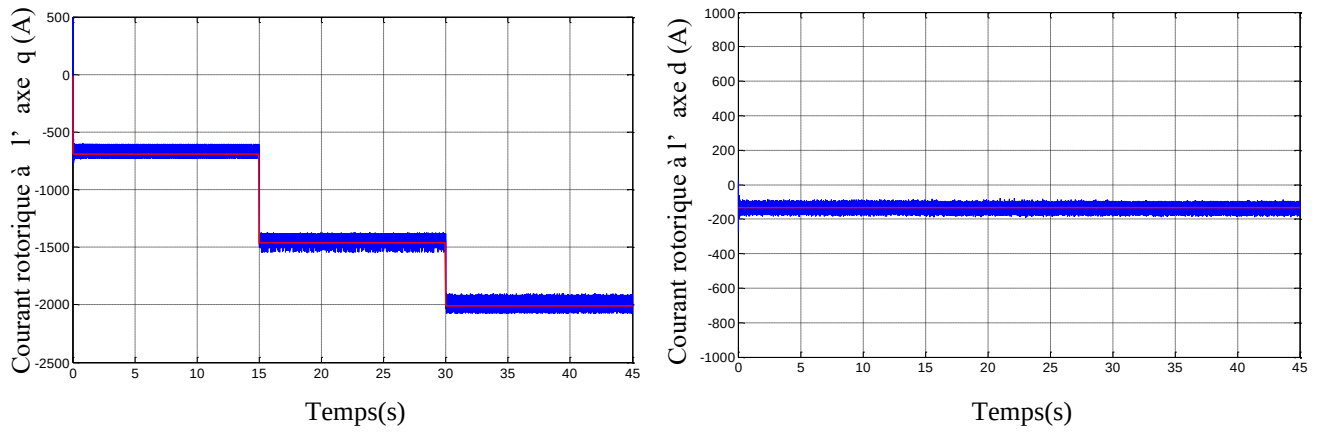


Fig 3-8: composants direct et quadrature du courant rotorique

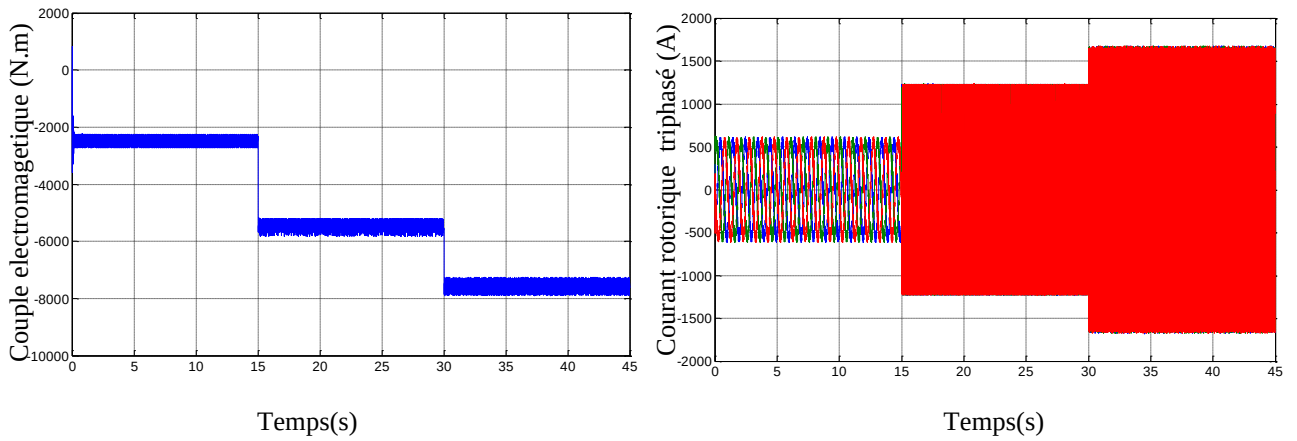


Fig 3-9: couple électromagnétique et courant rotorique

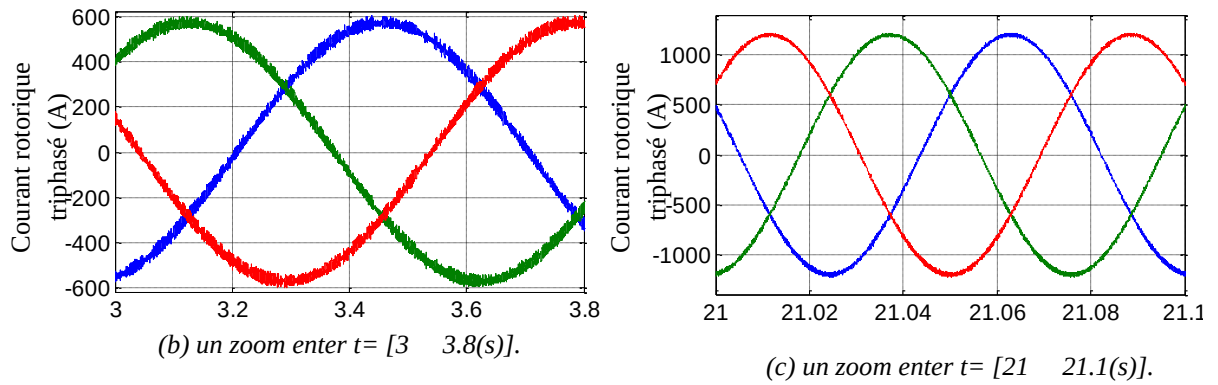


Fig 3-10: zooms courant rotorique

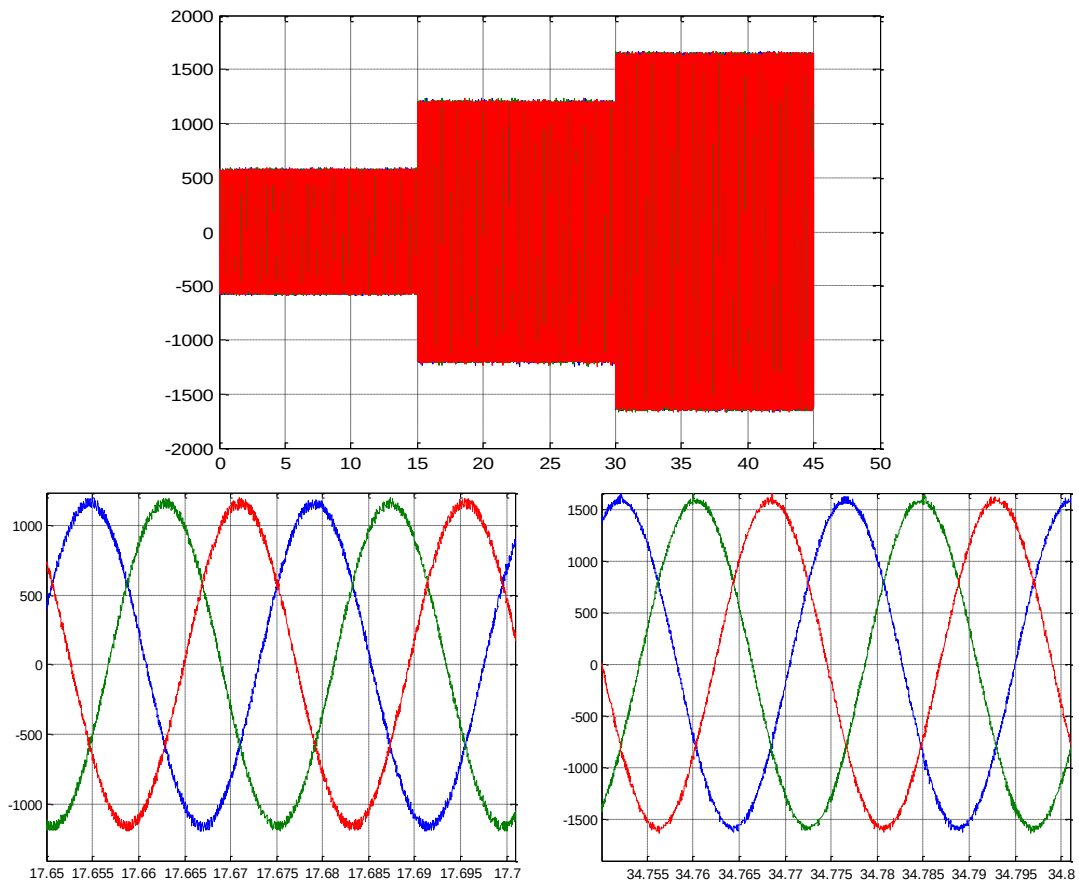


Fig 3-11: courant de stator et Zoom [17.65 s, 17.7 s] et [34.75 s , 34.8]

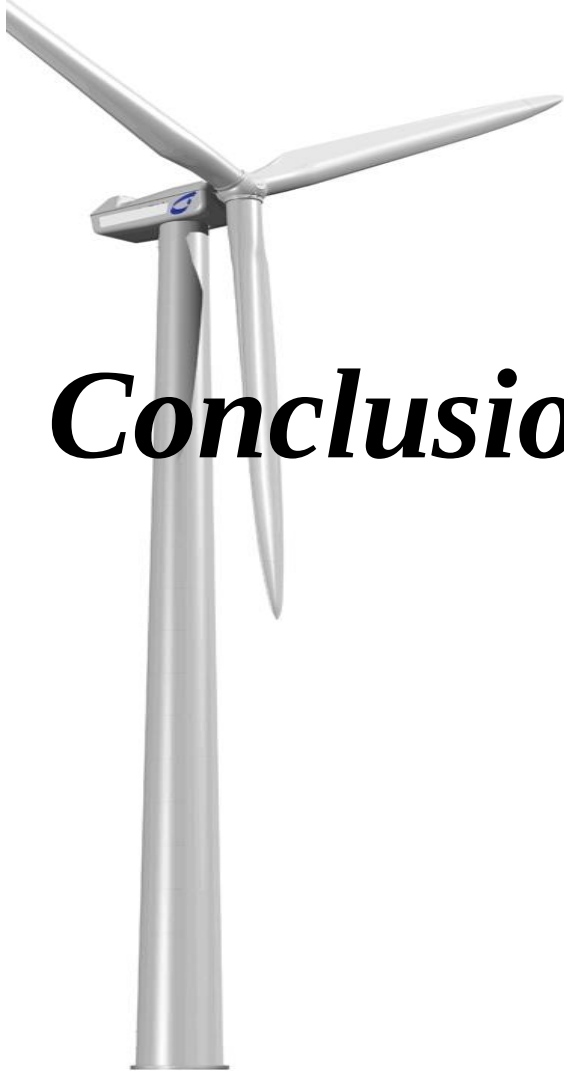
Ces résultats montrent les performances de régulation pour la commande par le régulateur à mode de glissement tel que précision et stabilité au niveau des puissances statorique active et réactive qui suivent ces références parfaitement ainsi qu'au niveau des courants rotoriques avec des fréquences rotoriques 1.12 Hz pour la vitesse de vent 8 m/s et 12.5 Hz pour la vitesse de vent 10 m/s.

Ce type de régulateur offre un bon découplage entre les grandeurs à contrôler. La puissance active est l'image du courant rotorique suivant l'axe q et la puissance réactive est l'image du courant rotorique suivant l'axe d .

Concernant la qualité d'énergie fournie au réseau électrique, la puissance réactive reste presque nulle - une valeur minimale pour la magnétisation de la machine - ce qui nous donne un facteur de puissance unitaire, et le courant statorique a une forme triphasée équilibrée avec une fréquence de 50 Hz ce qui nous autorise l'envoi au réseau.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, la théorie du mode glissant a été brièvement présentée, avec quelques notions sur la commande à structure variable avec surface de commutation non linéaire. Nous avons appliqué, à une modélisation en courant de la MADA, une stratégie de contrôle des puissance active et réactive de stator par un régulateur à mode glissant. Le régulateur à mode de glissement a montré de bonnes performances dynamiques et une grande capacité de poursuite de la consigne de puissance et découplage entre les grandeurs commandés.



Conclusion Générale

Conclusion générale et perspectives

Les problématiques abordées dans ce mémoire nous ont permis d'étudier deux modes de fonctionnement des machines asynchrones utilisées dans systèmes éolien ainsi que la simulation de la turbine éolienne.

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et dresse un état de l'art sur les différentes associations machines électriques – convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne. Au regard de ce chapitre, il est apparu que la production d'énergie électrique par éoliennes se divise en deux grandes catégories : l'éolien de proximité où les machines sont très souvent autonomes et de petites puissances, et le grand éolien où l'énergie électrique est produite directement sur le réseau de distribution avec des machines de plusieurs centaines de kW, voire de plusieurs MW.

Nous avons choisi la machine asynchrone à double alimentation pour l'utiliser comme génératrice dans un système éolien, donc elle était l'objectif de deuxième chapitre

Nous avons mis en évidence les principes fondamentaux de cette machines, qui présente un bon compromis technico-économique. Nous avons commencé par l'étude de la modélisation de la MADA à partir des équations mathématiques dans le repère diphasé en utilisant la transformation de Park, pour obtenir un modèle simple qui traduit finalement le fonctionnement de la MADA. ce modèle sera utilisé pour élaborer une stratégie de commande approprier, contrôler les puissance active et réactive fournies aux réseaux de distribution.

Le troisième chapitre, expose la commande vectorielle indirecte de la machine Asynchrone Double Etoile dont le principe consiste à avoir un couple similaire à celui de la machine à courant continu. Pour se faire, nous avons basée sur le principe d'orientation du flux rotorique qui est appliquée pour la commande en puissance à l'aide des régulateurs mode glissant, puis l'association de la machine avec un onduleur de tension commandée par la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI. Pour réaliser ce type de commande trois étapes doivent être effectuées [1], [28], [30] :

- Choix de la surface de glissement.
- Détermination des conditions d'existence du régime glissant ou conditions d'accès.
- Synthèse des lois de commande du mode glissant,

Ce régulateur présente des bonnes performances tel que : poursuite et temps de réponse et insensibilisation contre les variations des paramètres de système.

Des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du dispositif MADA – convertisseur sont envisageables :

- ❖ Remplacement du redresseur côté réseau par un onduleur autorisant la bidirectionnalité du transfert de puissance entre le rotor et le réseau.
- ❖ Etablissement d'un modèle de la MADA prenant notamment en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- ❖ Intégration éventuelle d'un système de stockage et optimisation technique et économique de la chaîne de conversion.
- ❖ Utiliser des techniques avancées de MPPT.

Références bibliographiques

- [1] P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi, "The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology", NREL/TP-500-28607, Février 2001.
- [2] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [3] Site Internet de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne, "<http://www.windpower.org/fr/core.htm>".
- [4] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [5] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [6] A. D. Diop, "Contribution au Développement d'un Simulateur Electromécanique d'Aérogénérateurs : Simulation et Commande en Temps Réel d'une Turbine de Puissance Moyenne à Angle de Calage Variable", Thèse de doctorat, Université du Havre, 8 juillet 1999.
- [7] J. Ancel, "Machines Asynchrones, Fonctionnement et Calcul", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique, D 451-9, D3II.
- [8] A. Tounzi, "Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité", Revue 3EI, Mars 2000, pp. 24-38.
- [9] D. Schreiber, "State of art of variable speed wind turbines", 11th International symposium on power electronics – Ee 2001, Novi Sad, Oct.-Nov. 2001, CDROM proceedings.
- [10] G.SALLOUM, "*Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation*", INP TOULOUSE, 13 Mars 2007.
- [11] F.POITIER, "*Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne*", Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [12] I.HAMZAOUI, "*Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*", Ecole National Polytechnique, 20 janvier 2008.
- [13] Y.A.BENCHERIF "*Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne*", à L'ENP, 2008.
- [14] M.S. ABDOULAZIZ, I .SOUMANA NOUHOU "*Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne*", à L'ENP, 2007.
- [15] B. ROBYNS, P. BASTARD, « Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques », Revue 3EI, n°39, décembre 2004, pp.5-13.

- [16].D.Hamdi Naouel ,«Commande à mode glissant de la machine asynchrone à double Alimentation» ,Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du Diplôme de Master a Ain el Beida le Juin 2017
- [17] M. KERCHA, « Commande par mode de glissement d'un moteur pas à pas à aimant Permanent » , Mémoire de Magister de l'Université El-Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 2005.
- [18] SAIBI. A, MAHMOUDI.M .O .H, L. NAZLI, “Commande par mode de glissement d'une machine synchrone double étoile alimentée par onduleurs `a MLI `a trois niveaux” 4th International Conférence on Electric Engineering, CEE'06, Batna University, pp. 215–220, 7–8 Novembre 2006.
- [19] SLOTINE J. J. HEDRICK J. K. MIZAWA E. A. “ On sliding observer for nonlinear Systems”. Jour. Dynam. Syst. Measur. Control, Vol.109-245, 1987.
- [20] SABANOVIC A. BILALOVIC F.“Sliding modes control of AC motor drive”. IEEE Trans. Idust. Applic. Vol.25, N°.1, pp.70-75, 1989.
- [21] M. A. FNAIECH, F. BETIN, F. FNAIECH, G. A. CAPOLINO,“Sliding mode control for dual three-phase induction motor drives,” IEEE ISIE, Montréal, Québec, Canada, pp. 2281–2285, July 9–12 2006.
- [22] Mohamed Adjoudj, «Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne», Revue « Nature et Technologie ». n° 02/Janvier 2010. Pages 27 à 34
- [23] DEHOUM FAWZI, «Commande d'un système éolien basé sur une GADA Par différentes techniques». Mémoire de Master de l'Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [24] HOUAS BRAHIM, KHALDI ABDERRAOUF «Amélioration De La Commande Par Mode Glissant D'un Générateur Asynchrone a Double Alimentation». Mémoire de Master de l'Université Hama Lakhder d'El-Oued.