

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur



et de la Recherche scientifique



Centre Universitaire d'EL-Oued

Institut des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies

Filière: Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

MODALISATION D'UNE CENTRAL EOLIENNE

Diriger par:

GEDERI Abdelkirim

MENNAI Med Laid

Réaliser par:

Ghilani MOUSSA

Moussaoui TAHA YACINE

Soutenu le 10 Juin 2012

Remerciement

Avant tout je remercie Dieu Le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma gratitude à **Mr gediti abdelkarim** et **Mr Mennai med laid** a centre de l'universitaire d'el oued , pour avoir assumé la responsabilité de m'encadrer, m'orienter et de me conseiller tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Des remerciements vont également à tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

A mes très chères sœurs et frères à ma grande famille.

A tous mes amis.

A tous les étudiants de réseaux électrique

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

A vous.

Ghilani MOUSSA et Moussaoui TAHA YACINE

Liste des symboles

V	La vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur.
F	Force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable.
ρ	Masse volumique de l'air.
R	Rayon de la surface balayée par la turbine.
C_p	Le coefficient de puissance.
λ	La vitesse relative de l'éolienne.
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine.
Ω_{mec}	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
G	Gain du multiplicateur.
f	Coefficient des frottements visqueux de l'éolienne et de sa génératrice.
J	Inertie totale de l'arbre.
$J_{turbine}$	Inertie de la turbine.
g	Glissement.
MADA	Machine asynchrone double alimentation.
GADA	Génératrice asynchrone double alimentation
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
d	Indice de l'axe direct.
q	Indice de l'axe en quadrature.
$[V_s]$	Vecteur tension statorique.

Liste des symboles

$[I_s]$	Vecteur courant statorique.
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique.
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\Phi_r]$	Vecteur flux rotorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
$[L_s]$	Matrice inductance statorique.
$[L_r]$	Matrice inductance rotorique.
$[M]$:	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
p	Nombre de paires de pôles.
ω_s	Pulsation électrique statorique.
C_{em}	Couple électromagnétique.
R_s	Résistance statorique.
R_r	Résistance rotorique
L_s	Inductance propre d'une phase statorique.
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique.
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statorique.
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique.

Sommaire

Remerciement	2
Dédicace.....	3
Liste des symboles	4
Introduction générale	8
Chapitre I Etat de l' artsur les énergies éolienne	
1.1Historique.....	11
1.2Introduction.....	11
1.3. Données générales	12
1.3.1 Définition de l'énergie éolienne.....	12
1.3.2. Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne	13
1.3.3 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne.....	13
1.4. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.....	14
1.4.1 Définition de l'énergie éolienne	14
1.4.2 Principaux composants d'une éolienne.....	16
1.5. Les différents types d'éoliennes	17
1.5.1 Eoliennes à axe vertical.....	17
1.5.2 Eoliennes à axe horizontal	18
1.6. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....	20
1.6.1 Loi de Betz.....	20
I.7. Conclusion	

Chapitre II Différents systèmes de energies éolienne

2.1. Introduction	23
2.2. Les différents systèmes de génération de l'électricité	23
2.2.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone	23
2.2.1.1 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"	23
2.2.1.2. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée.....	25
2.2.1.3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer.....	25

2.2.1.4. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	25
2.2.1.5. Machine asynchrone à double alimentation structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	26
2.3 – Conclusion	27

Chapitre III Modélisation du système éolien

3.1. Introduction	29
3.2. Fonctionnement en génératrice à vitesse variable	30
3.3. Mise en équation de la MADA.....	31
3.3.1 Modélisation de la GADA	32
3.3.2. Application de la transformation de Park à la MADA	32
3.3.4. Mise en équation de la MADA dans le repère de Park.....	34
3.4. Modélisation de Redresseur à Commande MLI	35
3.4.1. Principe de fonctionnement	36
3.4.2. Modélisation du redresseur	36
3.4.3. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé	38
3.5. Modélisation de l'onduleur.....	39
3.5.1. Modélisation de l'onduleur de tension	39
3.6. Modélisation d'une turbine éolienne à vitesse variable.....	41
3.6.1. Hypothèses simplificatrices	41
3.6.2. Modélisation de la turbine :	42
3.6.3. Modélisation de l'arbre de la turbine :	43
3.6.4. Graphe informationnelle causal de la modèle de la turbine :	44
3.7. Modèle de la vitesse du vent (V (m/s)).....	45
3.8. Les résultats de simulations et interprétation	46
3.8.1. Résultats de simulation	46
3.8.2. Interprétations des résultats :	48
3.9. Conclusion	49
Conclusion générale	50
Références	51
Annexe.....	52

Introduction générale

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins planétaires en énergie électrique considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Sans oublier que des événements climatiques récents, comme la canicule de l'été 2003 en France, ont soulevé de nouvelles interrogations sur la viabilité du nucléaire, notamment à cause du réchauffement local de la température de l'eau des fleuves utilisée pour refroidir les réacteurs.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, certains pays, aidés par la déréglementation, se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables" faisant appel, de façon directe ou indirecte, à l'énergie solaire. Parmi celles-ci, l'éolien apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire. En effet l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable.

Ce type d'énergie procure l'avantage de ne pas être centralisé mais d'être disponible là où a lieu la demande. En effet, l'éloignement engendre des pertes considérables à travers les câblages dont l'investissement se caractérise par des coûts très importants. Aujourd'hui, le transport classique de l'électricité est remis en question grâce à la disponibilité et la démocratisation des éoliennes et donc une décentralisation de la production.

Compte tenu de ces arguments, de la grande superficie et du fort potentiel Algérien relatif au gisement éolien, nous avons choisi de traiter le processus de production de ce type d'énergie.

Le travail que nous avons à réaliser, consiste en une étude sur la GADA pilotée à travers les grandeurs rotoriques, intégrée dans un système éolien.

Ce travail est structuré en quatre chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré à de l'état de l'art sur l'éolienne, les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne et les différents types, en fin la conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique.

Dans le deuxième chapitre, une présentation des différents systèmes de la conversion électromécanique

Le troisième chapitre représentera la partie principale de cette étude. Etude d'un aérogénérateur (modélisation et simulation), le système aérogénérateur contient un générateur asynchrone double alimentation, l'alimentation du rotor à partir d'un onduleur.

CHAPITRE I

Etat de l'art sur les énergies éolienne

Chapitre I Eta de l'art sur les énergies éolienne

1.1. Historique

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de L'air, dues auréchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre; il s'agit donc d'uneressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grandequantité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partiede cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axevertical. Ils ont été employés dans les montagnes d'Afghanistan pour moudre des grains depuis le 7^{ème}siècle avant Jésus Christ. Ce type de moulins est constitué d'un arbre et de lames horizontauxtournant dans le plan vertical. A partir de la Perse et du moyen Orient, les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et Europe Centrale [1].

On aménage maintenant des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts. Au cours des dix dernières années, la puissancetypique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW ou davantage. Entre 1995 et la fin de 2003, environ 76% des nouvelles connections d'aérogénérateurs au réseau étaient installées en Europe[2].

1.2. Introduction

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de laconsommer il aura fallu la produire, en général dans des unités de production de grandepuissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Dans les paysindustrialisés, ce système est aujourd'hui très centralisé même si les évolutions deréglementation conduisent à une amorce de décentralisation de la production[2].

Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaznaturel pour les plus répandus, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit àun dégagement massif de gaz polluant. Ainsi, la production électrique à partir decombustibles fossiles est à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO₂ ,Enoutre, la part du prix du combustible dans le coût de production est prépondérante ce quiengendre, compte tenu du caractère sensible de ces matières premières, des oscillationscontinuelles et une instabilité à long terme [2].

De plus, l'accès à cette ressource aux pays en voie de développement nécessite des investissements lourds et un niveau de technicité qu'ils sont souvent loin d'avoir. Enfin, contrairement à une idée couramment répandue, les réserves d'uranium sont, comme celles de pétrole, limitées (moins de 100 ans au rythme actuel de la consommation).

1.3. Données générales

1.3.1 Définition de l'énergie éolienne

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.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie fossile (Centrale thermique ou à cycle combiné) 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. Hormis 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.

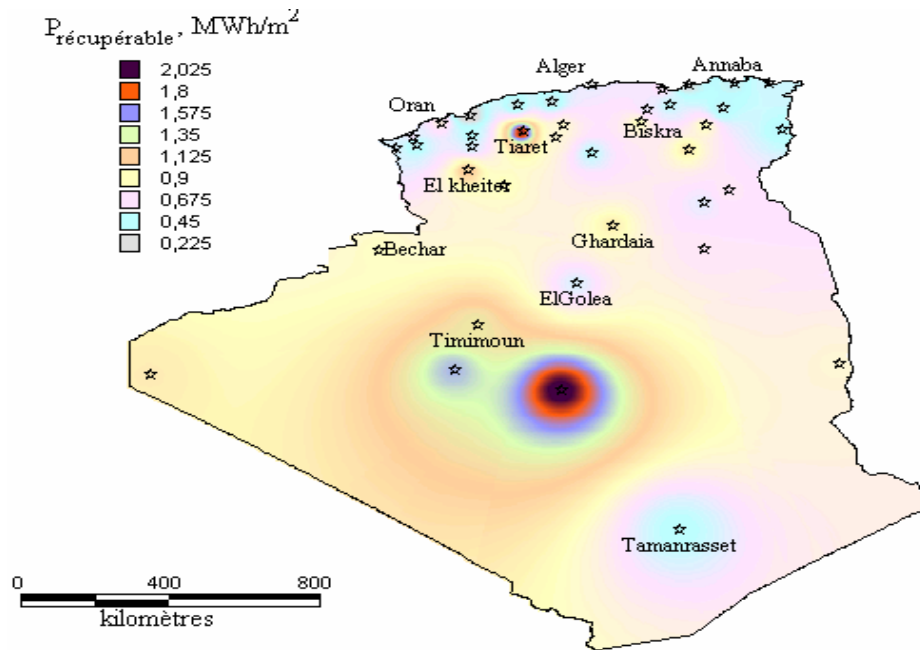


Figure 1.1 Densité de puissance moyenne éolienne récupérable à 10 m du sol en Algérie [2]

1.3.2. Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

L'exploitation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité a eu des hauts et des bas. Les causes de ces fluctuations sont diverses : guerres, crises d'autres types d'énergie, volonté de préserver l'environnement, évolution de la technologie, changement de politique énergétique etc.

A la suite de la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois améliorèrent cette technologie durant la 1^{er} guerre mondiale pour faire face à la pénurie d'énergie électrique. Malgré certains succès technologiques obtenus à cette époque, l'intérêt pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle déclina à la fin de la guerre mondiale.

C'est avec la crise pétrolière des années 70 que cet intérêt ressurgit. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes. Le premier marché véritablement significatif fut celui de la Californie, entre 1980 et 1986, où l'industrie de l'énergie éolienne put se développer.

Les objectifs fixés par l'EWEA ne pourront être atteints qu'à la condition que le coût de l'énergie éolienne continue de baisser [2].

1.3.3 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

1.3.3.1 Les avantages

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement : L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides[1].

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [1].

1.3.3.2 Les inconvénients

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients :

- L'impact visuel. Ca reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle -ci doit donc

être limitée.

- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [3]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro-turbines.

1.4. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.

1.4.1 Définition de 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 (Figure 1-2).

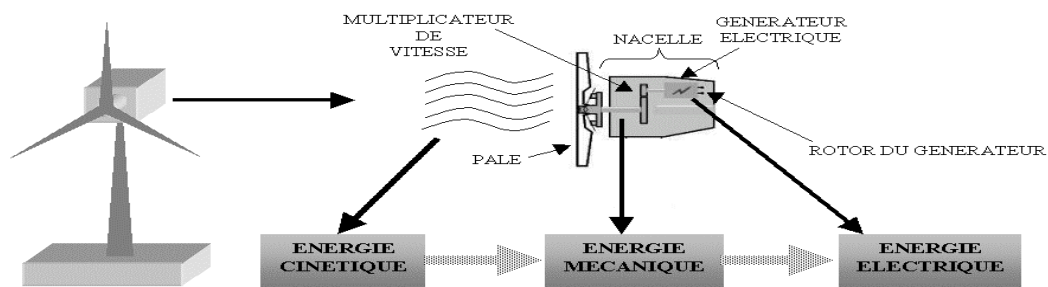


Figure 1-2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

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 [3].

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 mat, 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 [3].

- 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[3].

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.

1.4.2 Principaux composants d'une éolienne

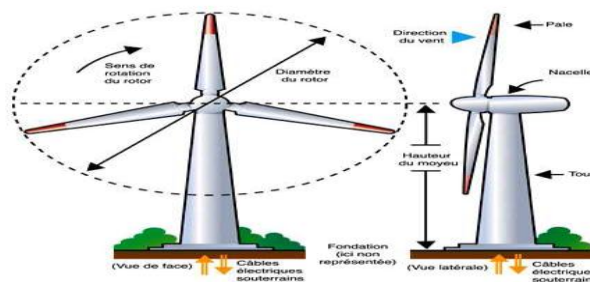


Figure 1-3 : les principaux composants d'une éolienne [10]

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux [3]:

- 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 oeuvre 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).

1.5. Les différents types d'éoliennes

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

1.5.1 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 [3].

- 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 (Figure 1-4).

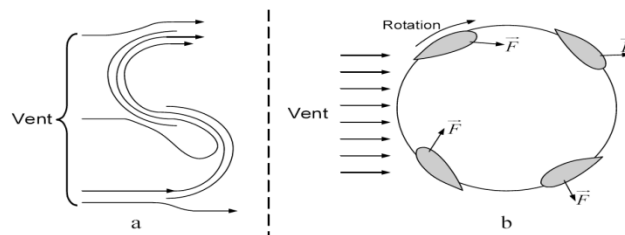


Figure 1-4 : Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable [3].

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 (Figure 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), Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [3].



Figure 1-5 éoliennes a axe verticale

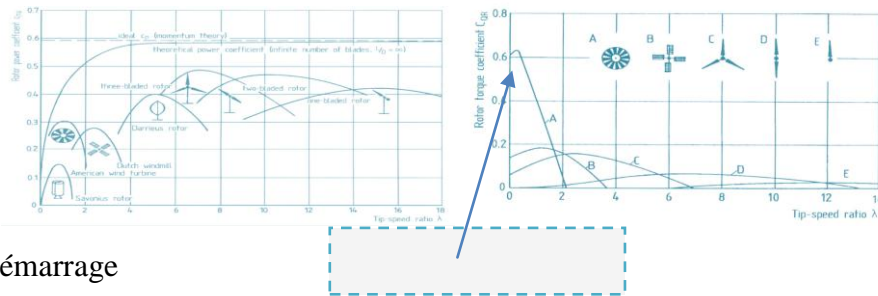
1.5.2 Eoliennes à axe horizontal

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. 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 multi-critères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [3].



Figure 1-6 éoliennes à axe horizontales

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée λ .



Couple de démarrage

Figure 1-7 : Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines [3].

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 (Figure 1-7) 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 (Figure 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 [4].

On peut noter ainsi que :

- les courbes donnant le coefficient de couple montrent que les couples de démarrage sont favorables aux multipales (pompage,...). Il en est de même pour les systèmes à axe vertical ;
- les courbes $C_p(\lambda)$ montrent l'avantage intrinsèque des turbines à axe horizontal en terme de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,...) ;
- les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les « axes horizontaux » à faible nombre de pales (3,2,1) par rapport aux « axes verticaux » ou aux pole multipales. Elles sont donc moins sensibles aux variations de λ autour de λ_{opt} .

1.6. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

1.6.1 Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (1-8) 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 [3] [4]:

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

La 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) :

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

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

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

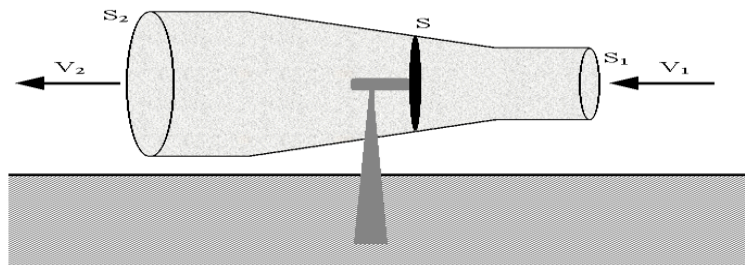


Figure 1-8 : Tube de courant autour d'une éolienne

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 :

$$P_{mt} = \frac{\rho \times S \times V_1^3}{2}$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)}{2} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure 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 [5].

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble sur les différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, et après un rappel des notions nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (loi de Betz), nous avons décrit les différents éléments constitutifs de la turbine (type axe horizontale) ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation.

Enfin on présente les différents générateurs le plus utilisé pour produire de l'électricité dans le monde. Dans le chapitre suivant, nous allons examiner la modélisation de la turbine à axe horizontale qui est utilisée dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

CHAPITRE II

Différents systèmes de génération de l'électricité

Chapitre II Différents système de génération de l'électricité

2.1. Introduction

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue.[5]

Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines capables de produire de l'électricité en grande quantité. En France, les trois principaux modes de production sont les centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles et les centrales hydroélectriques. La turbine et l'alternateur sont les deux pièces maîtresses de ces générateurs d'électricité.[4]

Dans le cas des usines thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où l'on brûle les combustibles, alors que dans le cas des usines hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. La turbine est couplée à un alternateur, un grand aimant cerclé d'une bobine, qui va produire un courant alternatif en tournant. Une fois le courant produit, il doit être amené jusque chez le consommateur [5].

2.2 Les différents systèmes de génération de l'électricité

2.2.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

2.2.1.1 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

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

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.

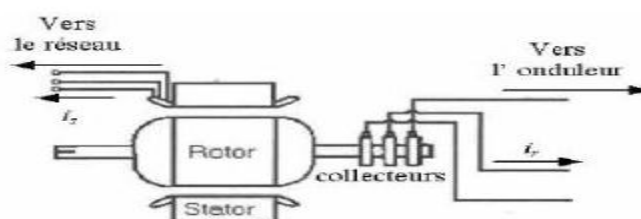


Figure 2-1 : Machine asynchrone à rotor bobiné [7]

2.2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Figure 2-2), 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 [7].

Le contrôle de l' IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

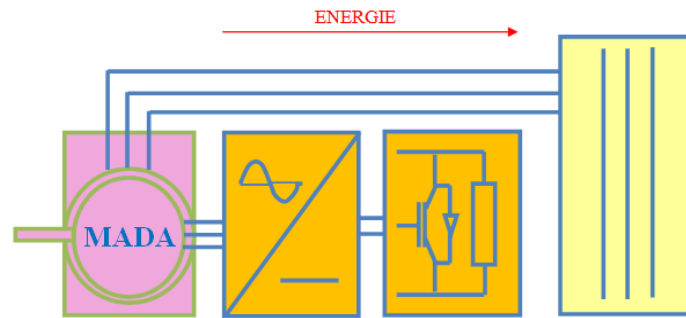


Figure 2-2 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

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 transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en oeuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande.

Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10%.

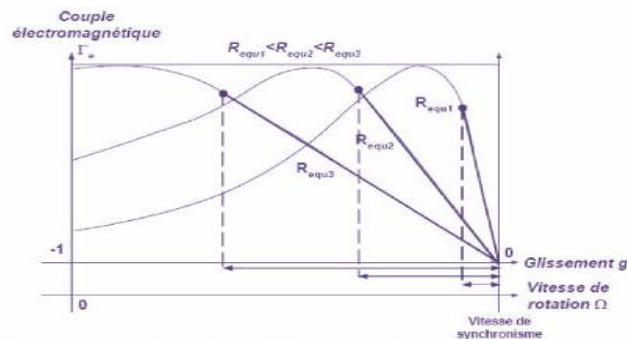


Figure 2-3: Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique [3]

2.2.2.2. 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, Figure 2-4) [14].

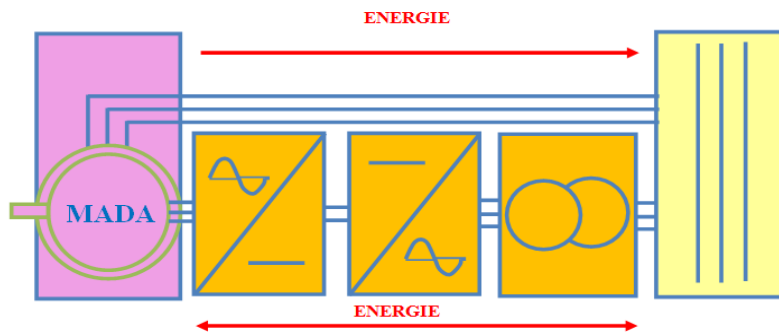


Figure 2-4 : MADA, structure Kramer

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 [14].

2.2.2.3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (Figure 2-5), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius [5] [3].

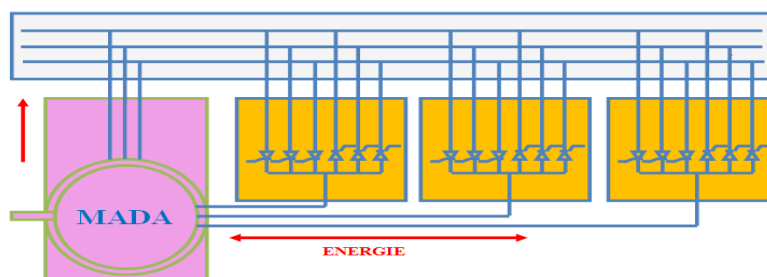


Figure 2-5 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure 2-4. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone).

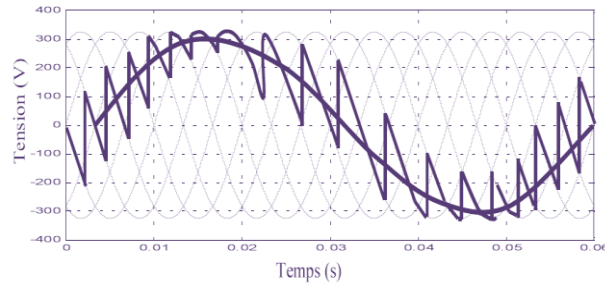


Figure 2-6 : Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur.

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure (Figure 2-6). Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

2.2.2.4. Machine asynchrone à double alimentation structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration (Figure 2-7) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [16]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).[14]

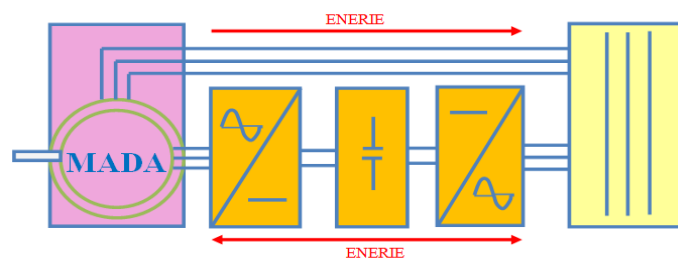


Figure 2-7 : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau [8].[9]. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements[7].

2.3– Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique. Il présente aussi les machines électriques et leurs convertisseurs associés. Trois grandes familles de machines sont présentés : les machines asynchrones, les machine synchrones et les machines à structure spéciale.

En ce qui concerne le fonctionnement autonome, la machine asynchrone à cage d'écuréuil 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.

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 2-14 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.

CHAPITRE III

Modélisation du système éolien

Chapitre III Modélisation du système éolien

3.1. Introduction

Une modélisation correcte de la BDFM devient indispensable pour la conception, l'analyse de fonctionnement et de la commande. Le modèle de la BDFM permet de connaître, à priori, les caractéristiques de fonctionnement de la machine. Pour pouvoir reproduire ces modes de fonctionnement dans une machine réelle on devra connaître la liaison existante entre les paramètres du modèle et les grandeurs physiques mesurables dans la machine.

Les équations de Park sont connues pour l'établissement d'un modèle de connaissance traduisant le comportement dynamique des modes électriques, électromagnétiques et mécaniques de la machine asynchrone. Ce modèle, non linéaire en général, admet plusieurs classes de représentation d'état.[13]

Ces classes de modèles dépendent directement des hypothèses simplificatrices prises en considération, des stratégies de commande adoptées, de la nature de la source d'alimentation et du choix des composantes du vecteur d'état.

Bien que la MADA fût traitée, par J. TSCHERDANZEV [TSC] et J. HERSCHDORFER, dès le début du siècle passé, la complexité de sa commande et l'absence des composants de l'électronique de puissance ont rendu cette machine inexploitable à l'époque.

Les premiers travaux sur la commande vectorielle de la MADA avec deux onduleurs, au stator et au rotor, ont été effectués à la VUB de Bruxelles par Lecoq. A ces travaux s'ajoutent ceux de L. MOREL et D. RAMUZ, ainsi que ceux de R. GHOSN et P.E. VIDAL.[13]

Nous exposons dans ce chapitre, d'abord l'introduction d'un modèle d'état non linéaire de la machine en régime de génération et son alimentation pour les simulations.

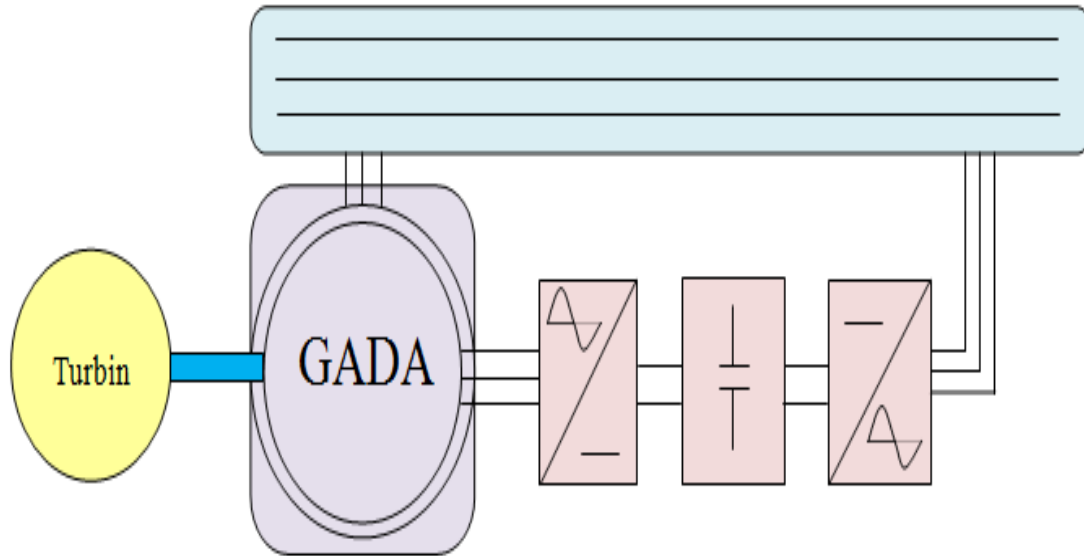


Figure 3.1 : Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application en génératrice

3.2. Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

La Figure (3.1) 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 PWM). PRES est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau ; PS, la puissance transmittant par le stator; PR, la puissance transmittant par le rotor et P MEC, 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 hyposynchrone. En mode moteur hypersynchrone, 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 transmittant 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.

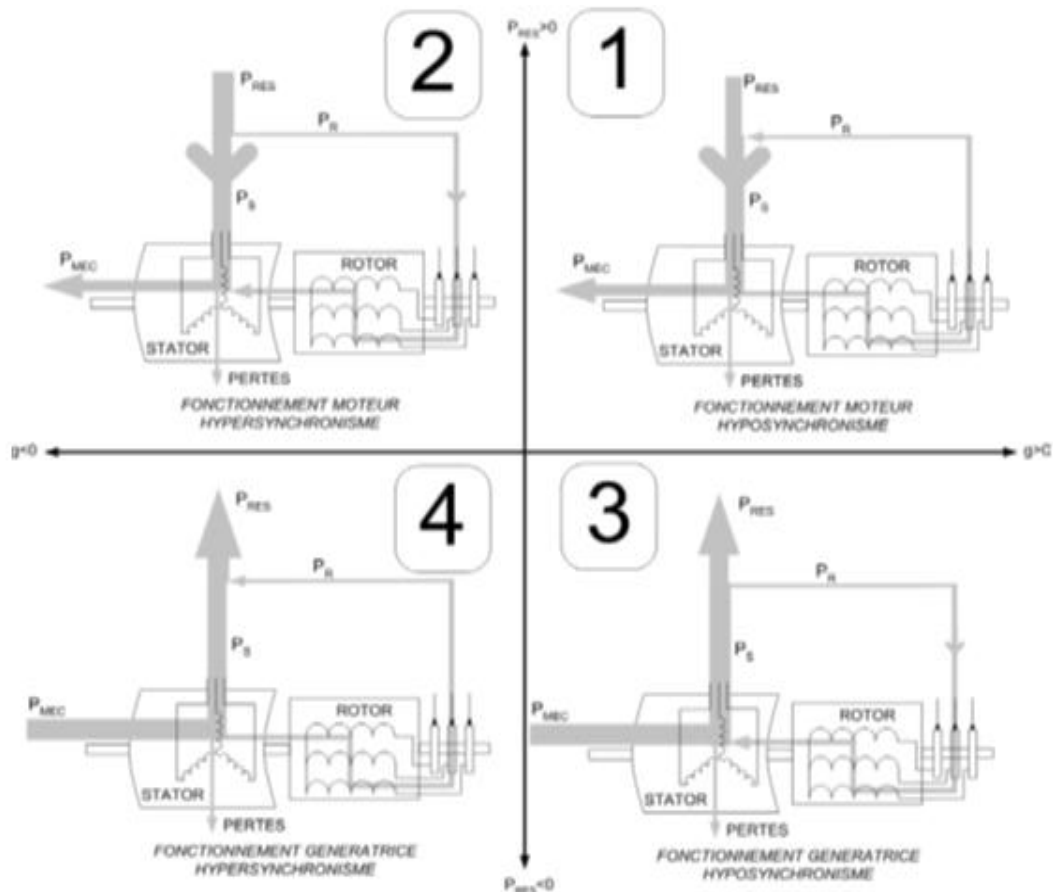


Figure (3.1) : Quadrants de fonctionnement de la MASDA

A titre de comparaison, la Figure (3.2) montre la caractéristique de production optimale pour les deux types de machines (cage d'écuréuil avec convertisseur et MADA) dans un système éolien. Nous constatons que si la machine à cage est capable de produire de l'énergie pour les très faibles vitesses de vent, cette énergie est écrêtée à la puissance nominale lorsque la machine atteint une vitesse très légèrement supérieure au synchronisme. La MADA ne commence à produire qu'à partir de 1000 tr/min (ce qui correspond à la vitesse de synchronisme moins 30%) de façon à ne pas augmenter la taille du convertisseur rotorique. La puissance totale produite par la MADA est la somme des puissances statorique et rotorique.

Or, jusqu'au synchronisme, la puissance rotorique est négative, la MADA produit donc légèrement moins que la machine à cage. En revanche, au-delà du synchronisme, la figure

montre que la MADA est capable de produire de l'énergie par l'intermédiaire du rotor jusqu'à 1900 tr/min (vitesse de synchronisme + 30%).

Dans notre application, nous nous intéresserons au fonctionnement du quadrant n°3 (fonctionnement génératrice hyposynchrone), de façon à ne traiter le transfert de puissance rotorique dans une seule direction (réseau vers rotor). Le convertisseur côté réseau sera donc un simple redresseur unidirectionnel. La tension du bus continu est par conséquent fixée et nous nous intéressons uniquement au contrôle du convertisseur côté rotorique. L'étude de la bi-directionnalité du transfert de puissance entre le rotor et le réseau et la commande du convertisseur coté réseau feront l'objet d'une seconde étape dans l'étude de la MADA en génératrice.

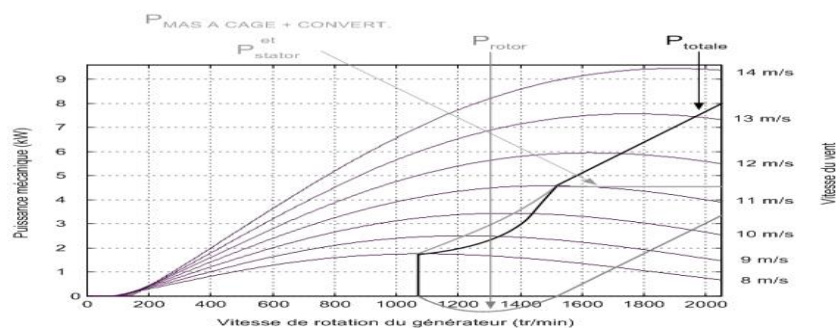


Figure (3.2) : caractéristique de production d'énergie optimale de la MADA et de la machine à cage

3.3. Mise en équation de la MADA

Avant d'aborder la modélisation de l'alimentation du rotor de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), il faut réaliser sa modélisation. Cette modélisation va nous permettre de comprendre ses principes de fonctionnement physique et d'établir un modèle d'action, ainsi que sa simulation en régimes dynamique et permanent. Ce même modèle est utilisé pour dimensionner les convertisseurs alimentant la machine.

3.3.1 Modélisation de la GADA

Les tensions des générateurs électriques étant pratiquement sinusoïdales, elles sont définies par leur module et leur phase. Elles peuvent donc être représentées dans un système de référence à deux dimensions. La référence choisie ici pour modéliser la machine asynchrone à rotor bobiné est un système lié au champ tournant de la machine (à axes fixes). Ce système de référence est illustré par les axes U et V dans la (figure 3.3) .Le passage des grandeurs électriques à ce système de référence, à partir du système de références associé aux trois enroulements statoriques, se fait à travers un changement de repère (transformée de Park).

Avant d'établir le modèle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de sa commande, nous rappelons brièvement le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices, désormais classiques, qui sont :

- ❖ L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;
- ❖ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable ;
- ❖ La f_{mm} créée par chacune des phases des deux armatures est supposée à répartition sinusoïdale ;
- ❖ La symétrie de construction est parfaite ;

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer [11]:

- ❖ L'additivité des flux ;
- ❖ La constance des inductances propres ;
- ❖ La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles.

3.3.2. Application de la transformation de Park à la MADA

La transformation de Park consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes a,b,c , en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes X,Y créant la même forcemagnétomotrice. La composante homopolaire intervient pour équilibrer le système transformé, c'est-à-dire, elle ne participe pas à la création de cette f_{mm} de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (X,Y) .

La condition de passage du système triphasé au système biphasé est la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Ceci conduit à la conservation de puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles, et permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé, qui reste invariable pour la machine réelle [15].

Le schéma de la figure (3.3) montre le principe de la transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à double alimentation.

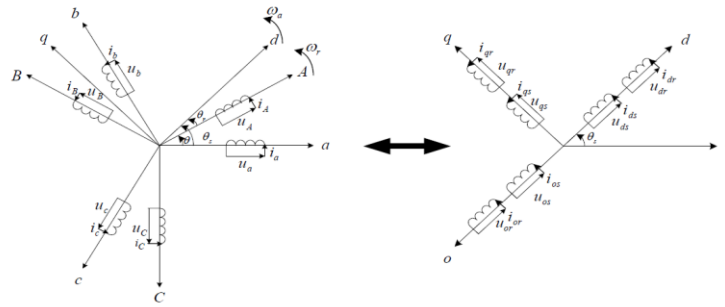


Figure. (3.3) Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA

Où :

θ : est l'angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a ;

θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique A , et l'axe de Park direct d ;

θ_s : est l'angle entre l'axe statorique a , et l'axe de Park direct d ;

ω_a : est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q) ;

ω_r : est la vitesse angulaire électrique rotorique.

Grâce à cette transformation, on définit une matrice unique appelée matrice de Park donnée par :

$$[A] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \varphi & \cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \varphi & -\sin \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Les grandeurs statoriques et rotoriques dans le repère de Park sont exprimées en utilisant les deux transformations suivantes :

❖ Pour le stator :

$$[U_{xy}]_s = [A_s][U_{ABC}] \quad [3.1]$$

❖ Pour le rotor :

$$[U_{xy}]_r = [A_r][U_{abc}] \quad [3.2]$$

Avec :

$$[A_s] = [A(\varphi = \theta_s)] \text{ et } [A_r] = [A(\varphi = \theta_r)]$$

3.3.4. Mise en équation de la MADA dans le repère de Park

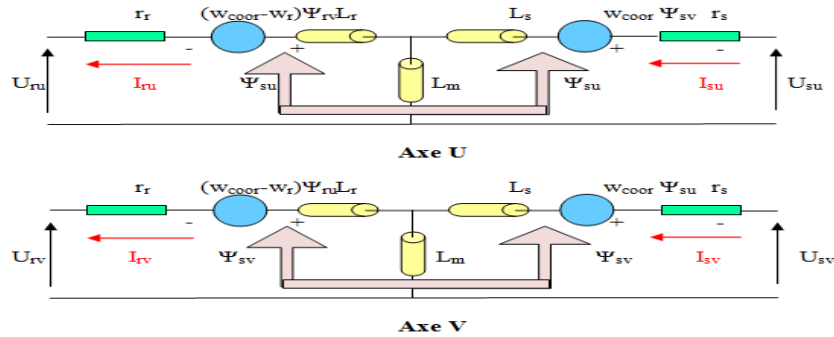


Figure 3.4 schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park généralisé

Les expressions des tensions dans le système d'axe XY sont de la forme [11]:

$$\begin{cases} U_{sx} = -R_s I_{sx} + \frac{d\varphi_{sx}}{dt} - w_{os} \varphi_{sy} \\ U_{sy} = -R_s I_{sy} + \frac{d\varphi_{sy}}{dt} - w_{os} \varphi_{sx} \\ U_{rx} = R_r I_{rx} + \frac{d\varphi_{rx}}{dt} - (w_{os} - w_r) \varphi_{ry} \\ U_{ry} = R_r I_{ry} + \frac{d\varphi_{ry}}{dt} + (w_{os} - w_r) \varphi_{rx} \end{cases} \quad [3.3]$$

Les expressions des flux dans le même système d'axes :

$$\begin{cases} \varphi_{sx} = -L_s I_{sx} + M_{sr} I_{rx} \\ \varphi_{sy} = -L_s I_{sy} + M_{sr} I_{ry} \\ \varphi_{rx} = L_r I_{rx} - M_{sr} I_{sx} \\ \varphi_{ry} = L_r I_{ry} - M_{sr} I_{sy} \end{cases} \quad [3.4]$$

Sachant que $M_{sr} = M_{rs} = M$ et en remplaçant les flux par leurs expressions dans le système d'équations des tensions, on obtiens [11] :

$$\begin{cases} U_{sx} = -R_s I_{sx} - L_s \frac{dI_{sx}}{dt} + M \frac{dI_{rx}}{dt} + w_{os} L_s I_{sy} - w_{os} M I_{ry} \\ U_{sy} = -R_s I_{sy} - L_s \frac{dI_{sy}}{dt} - M \frac{dI_{ry}}{dt} - w_{os} L_s I_{sx} + w_{os} M I_{rx} \\ U_{rx} = R_r I_{rx} + L_r \frac{dI_{rx}}{dt} - M \frac{dI_{sx}}{dt} - (w_{os} - w_r) L_r I_{ry} + (w_{os} - w_r) M I_{sy} \\ U_{ry} = R_r I_{ry} + L_r \frac{dI_{ry}}{dt} - M \frac{dI_{sy}}{dt} + (w_{os} - w_r) L_r I_{rx} - (w_{os} - w_r) M I_{sx} \end{cases} \quad [3.5]$$

Posons $w_m = w_{os} - w_r$.

En mettant le système d'équations précédent sous forme compacte, on obtient :

$$[B][U] = [L][I]' + w_m[C][I] + [D][I] \quad [3.6]$$

Avec :

$$[U] = [U_{sx} U_{sy} U_{rx} U_{ry}]^T ; [I] = [I_{sx} I_{sy} I_{rx} I_{ry}]^T \text{ et } [I]' = \frac{d}{dt} [I]$$

$$[B] = \text{diag}[1 \ 1 \ 1 \ 1] ; [L] = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix} ; [C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & -L_r \\ -M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} -R_s w_{os} L_s & 0 & -w_{os} M \\ -w_{os} L_s - R_s w_{os} M & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

En mettant le système sous forme d'équation d'état, on obtient [11]:

$$[I]' = [L]^{-1} \{ [B][U] - [D][I] - w_m[C][I] \}$$

Les expressions respectives du couple et de la vitesse dynamique rotorique sont :

$$C_e = \frac{3}{2} p M (I_{rx} I_{sy} - I_{ry} I_{sx}) \quad [3.7]$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} + F\Omega = C_m - C_e \quad [3.8]$$

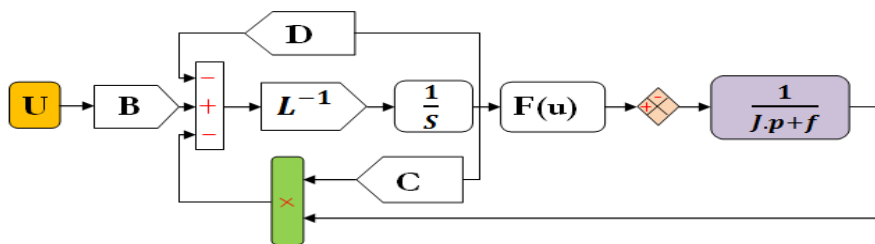


Figure 3.5. Schéma Bloc d'un GADA

3.4. Modélisation de Redresseur à Commande MLI

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide des interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Cette possibilité de commande nous permet un contrôle total du convertisseur, selon nos besoins.

Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs MLI ; commuted redresseur à source de tension, et redresseur à source de courant.

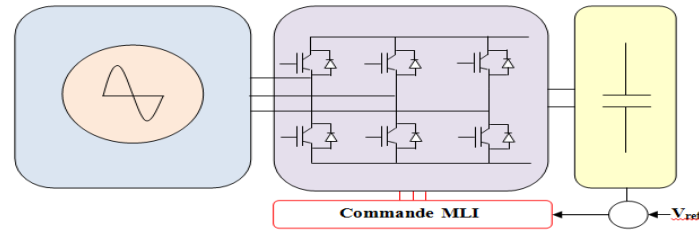


Figure 3.6. Topologie de base d'un redresseur de tension.

3.4.1. Principe de fonctionnement

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée, comme montré dans la Figure 3.6. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu V_{dc} est mesurée et comparée avec une référence V_{ref} , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu V_{dc} mesurée aux bornes du condensateur C .

Quand le courant I_{ch} est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande du plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand I_{ch} devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative.

La commande MLI non seulement peut contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive, ce type de redresseur permet la correction du facteur de puissance. En outre, les formes d'onde des courants de la source peuvent être maintenues presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source.

3.4.2. Modélisation du redresseur

Les redresseurs à deux niveaux sont, de par structure, réversibles ils peuvent fonctionner en onduleur et transférer ainsi l'énergie de la source de tension continue à la source de courant alternative ou bien fonctionner en redresseur et assurer alors le transfert énergétique dans le sens inverse.

La figure suivante présente le schéma unifilaire d'un pont de redresseur connecté au réseau, e est tension de la source et R, L sont les paramètres de la ligne, v est la tension d'entées de redresseur.

Sa	Sb	sc	vab	vbc	Vca
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-V _{dc}	V _{dc}
0	1	0	-V _{dc}	V _{dc}	0
0	1	1	-V _{dc}	0	V _{dc}
1	0	0	V _{dc}	0	-V _{dc}
1	0	1	V _{dc}	-V _{dc}	0
1	1	0	0	V _{dc}	-V _{dc}
1	1	1	0	0	0

Tableau (3 .1) les huit états possibles des interrupteurs

De cette table on peut écrire les tensions d'entre du redresseur d'une manière générale comme suit [12]:

$$\begin{aligned} V_{ab} &= (S_a - S_b)V_{dc} \\ V_{bc} &= (S_b - S_c)V_{dc} \\ V_{ca} &= (S_c - S_a)V_{dc} \end{aligned} \quad [3.10]$$

L'expression (3.11) présente la relation entre les tensions simples et composées

$$\begin{aligned} V_{ab} &= (V_a - V_b) \\ V_{bc} &= (V_b - V_c) \\ V_{ca} &= (V_c - V_a) \end{aligned} \quad [3.11]$$

À partir de (3.10), (3.11) on déduit les tensions simples en fonction des interrupteurs :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} V_{dc} \quad [3.12]$$

De plus, la relation entre le courant dans bus continu(I_0) par rapport aux courants alternatifs est définie par l'équation suivant :

$$I_0 = [s_a \ s_b \ s_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

3.4.3. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé

Les équations de tensions pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites comme suite [12]:

$$e = RI + L \frac{di}{dt} + V \quad [3.14]$$

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Donc, de (3.12),(3.14)on déduit le système suivant de coté alternatif :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} V_{dc} \quad [3.15]$$

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme :

$$I_{dc} = I_c + I_{ch} \quad [3.16]$$

Le courant dans la capacité peut être exprimé comme suit :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_c \quad [3.17]$$

$$I_c = I_{dc} - I_{ch} \quad [3.18]$$

Ainsi, le courant i_{dc} est la somme du produit des courants de chaque phase par l'état de son interrupteur :

$$I_c = S_a I_a + S_b I_b + S_c I_c - I_{ch} \quad [3.19]$$

La figure (3.7) représente le schéma bloc d'une redresseur MLI

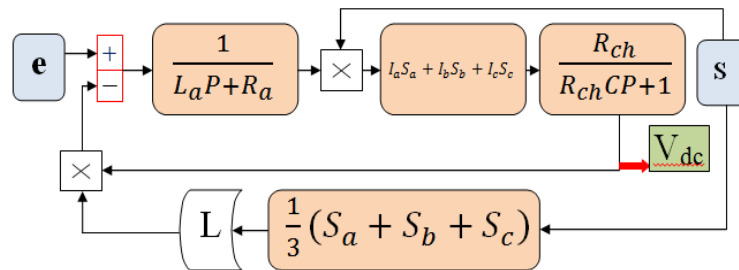


Figure 3.7. Schéma Bloc d'un redresseur MLI

Avec :

$$e = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}; s = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}; L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

3.5. Modélisation de l'onduleur

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristor GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir d'un

réseau standard 220/380V-50Hz. Après redressement, la tension filtrée U_{de} est appliquée à l'onduleur.

Le schéma structurel d'un tel onduleur triphasé à deux niveaux et de sa charge est illustré par la Fig 3.8. Chaque groupe transistor-diode assemblé en parallèles forme un interrupteur bicommandable (à l'ouverture et à la fermeture) dont l'état apparaît complémentaire à celui qui lui est associé pour former ainsi un bras de commutation [13] .

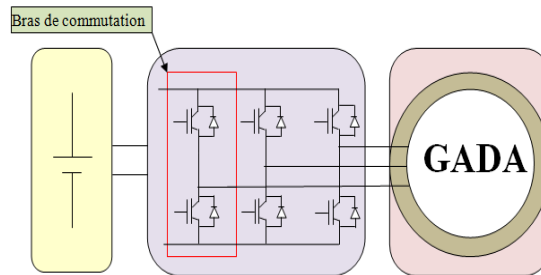


Figure 3.8. Représentation de l'ensembles onduleur GADA

Les couples d'interrupteurs doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court - circuit de la source d'autre part. Les diodes sont des diodes à roue libre assurant la protection des transistors.

3.5.1. Modélisation de l'onduleur de tension

Les hypothèses simplificatrices :

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, supposés idéalisés,
- La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

On a, donc:

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} [3.20]$$

Tel que V_{ao} , V_{bo} et V_{co} sont les tensions d'entrée de l'onduleur ou tensions continues. Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations de Charles, comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} [3.21]$$

V_{an} , V_{bn} et V_{cn} : sont les tensions des phases de la charge (valeur alternative),

V_{no} : Tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

Le système V_{an} , V_{bn} et V_{cn} étant équilibré, il en découle :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 [3.22]$$

La substitution de (3.22) dans (3.21) aboutit à :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) [3.23]$$

En remplaçant (3.23) dans (3.21), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{3}{2}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{2}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{2}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} [3.24]$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif [13].

$$[V_{AC}] = [T][V_{DC}] [3.25]$$

Telle que :

$$[V_{AC}] = [V_{an} V_{bn} V_{cn}]^T$$

$$[V_{DC}] = [V_{ao} V_{bo} V_{co}]^T$$

Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

Commutation supposée idéale : $S_i = (1 \text{ ou } 0) \{ i=1,2,3 \}$.

La matrice de transfert est la suivante :

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix}$$

3.6. Modélisation d'une turbine éolienne à vitesse variable

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, a une variation aléatoire et a une caractéristique très fluctuante. Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent.

3.6.1. Hypothèses simplificatrices

Si on suppose que la turbine étudiée comprend trois pales de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse turbine $\Omega_{turbine}$. Cet arbre entraîne une génératrice électrique.

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie pale J_{pale} .
- la même élasticité pale K_{pale} .
- le même coefficient de frottement par rapport à l'aire $f_{pale/aire}$.

Si on suppose que les pales sont orientables alors elles présentent le même coefficient de frottement f_{pale} par rapport au support. Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées β_1, β_2 et β_3 . Les trois pales reçoivent respectivement les forces F_1, F_2 et F_3 qui dépendent de la vitesse du vent qui leur est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- l'inertie J_{arbre} ;
- l'élasticité K_{arbre} ;
- le coefficient de frottement par rapport au multiplicateur arbre $f_{arbre/multiplicateur}$.

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g ;
- un coefficient de frottement f_g .

Ce rotor transmet un couple entraînant C_g à la génératrice électrique et tourne à une vitesse Ω . Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité des trois forces de poussée ($F_1 F_1 F_1$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être ignoré. De même, pour une grande turbine, sa vitesse étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure (3.9)).

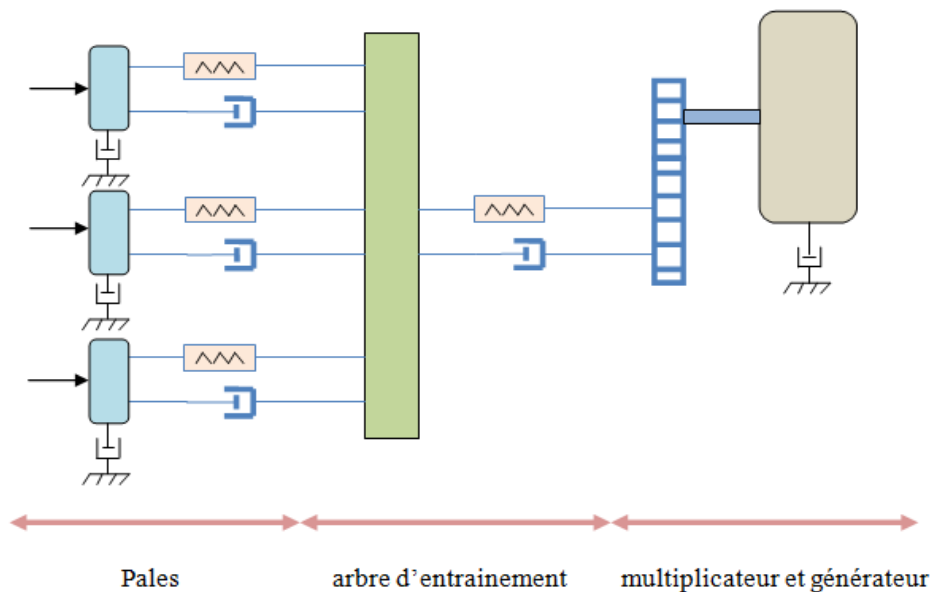


Figure (3.9) Système mécanique de l'éolienne

3.6.2. Modélisation de la turbine :

La turbine éolienne étudiée ici, est constituée de pales de longueur R entraînant une génératrice électrique avec l'intermédiaire de l'arbre de la turbine, (figure (2.4)).

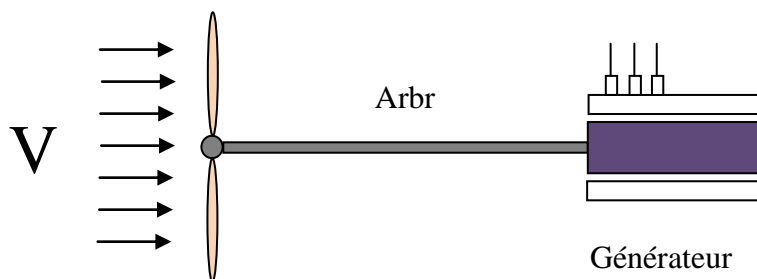


Figure (3.10) Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent P_V ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_V = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} [3.26]$$

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

La puissance aérodynamique P_{aer} apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_V = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S V^3}{2} [3.27]$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient est en fonction du ratio de vitesse et de l'angle d'orientation de la pale β .

Le coefficient λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V} [3.28]$$

où : $\Omega_{turbine}$ est la vitesse de la turbine et R la longueur de la pale ;

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique peut être donné comme suit :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S V^3}{2 \cdot \Omega_{turbine}} [3.29]$$

Le rôle du multiplicateur est l'adaptation de la vitesse lente de la turbine à la vitesse nominale de la génératrice s'il est nécessaire. Ce multiplicateur est peut être modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} [3.30]$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega}{G} [3.31]$$

3.6.3. Modélisation de l'arbre de la turbine :

La masse de l'éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. L'inertie totale de l'arbre J qui apparaît sur le rotor de la génératrice peut être donnée comme suit :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g = J_{turbine} + J_g [3.32]$$

où : G^2 est le gain du multiplicateur égale à 1 dans notre cas et J_g l'inertie de la génératrice électrique.

Il est à noter que le moment d'inertie de la génératrice peut être négligé devant l'inertie de la turbine et cela dans le cas des grosses éoliennes. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor.

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{mec} [3.33]$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_r [3.34]$$

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

$$C_r = f\Omega [3.35]$$

En se basant sur ce qui a précédé, la turbine d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable peut être modélisée comme le montre le schéma bloc de la figure (3.9).

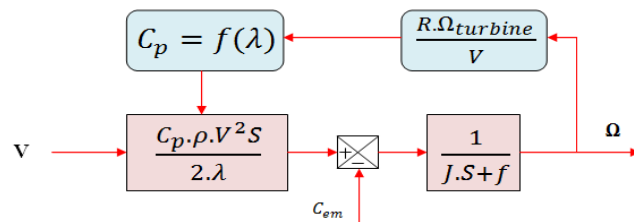


Figure (3.11) Schéma bloc d'une turbine éolienne à vitesse variable.

3.6.4. Graphe informationnelle causal de la modèle de la turbine :

Une représentation globale du modèle de cette turbine utilisant le graph informationnel causal est montré à la figure (3.12)

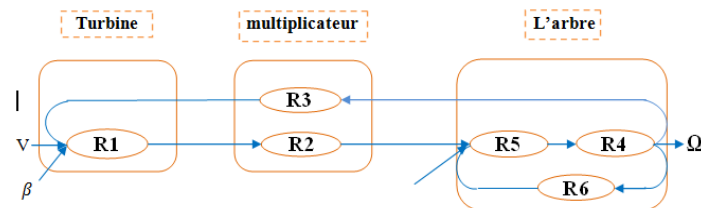


Figure (3.12) Graph informationnel causal du modèle de la turbine

Ce graphe illustre les principales des causes à effet des grandeurs qui interviennent au niveau de la turbine. Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales, et la vitesse de rotation de la turbine, le modèle de la multiplicateur transforme la vitesse mécanique ; et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de la multiplicateur (relation R3 et R4), la modèle de l'arbre d'écrit la dynamique de la vitesse

mécanique il a donné deux entrées : le couple de multiplicateur, le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

L'expression de coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [15] :

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta [3.36]$$

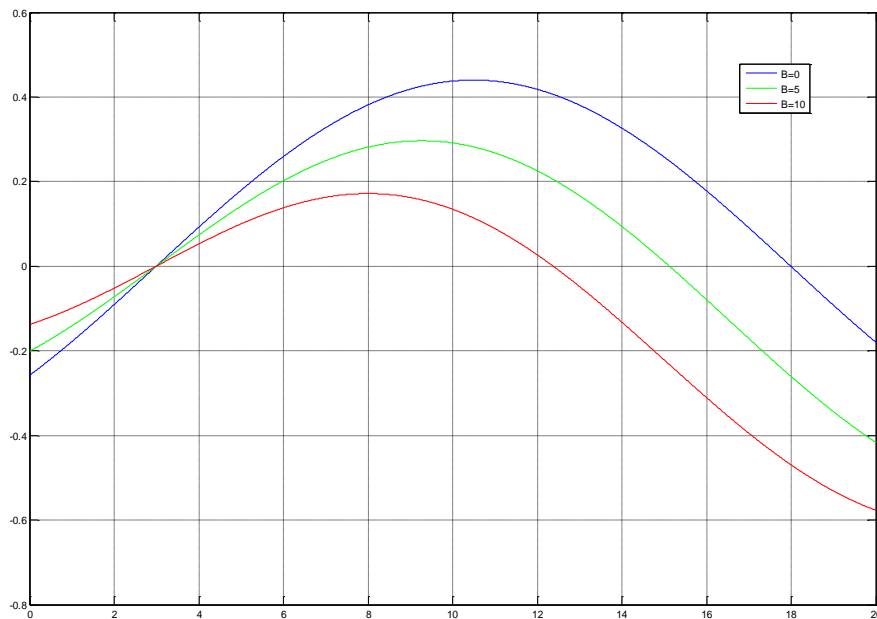


Figure (3.13) Evolution du C_p en fonction de Lambda ' λ '.

3.7. Modèle de la vitesse du vent (V (m/s))

Dans le but de reproduire les caractéristiques de la vitesse du vent, il existe deux possibilités qui sont les mesures expérimentales et la modélisation analytique. La première consiste à effectuer des mesures expérimentales sur un site éolien bien défini. Cette première solution est certes beaucoup plus précise que la deuxième mais seulement elle ne permet pas de simuler différents types de profil de vitesse du vent. Ceci veut dire que le profil de la vitesse du vent obtenu sera propre à un site donné et ne pourra plus être modifié si on veut obtenir un fonctionnement ne correspondant pas au profil du site considéré.

Dans notre travail la vitesse du vent prend le profil illustré sur la figure ci-dessous :

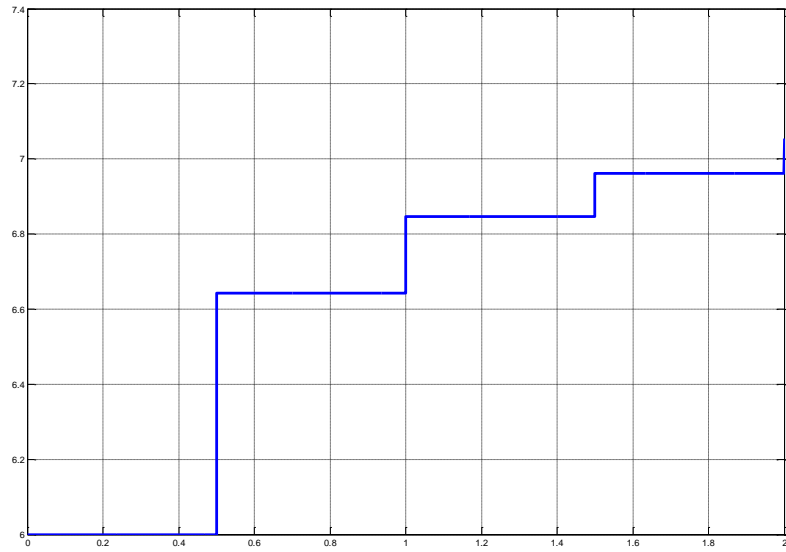


Figure (3.13) la vitesse du vent

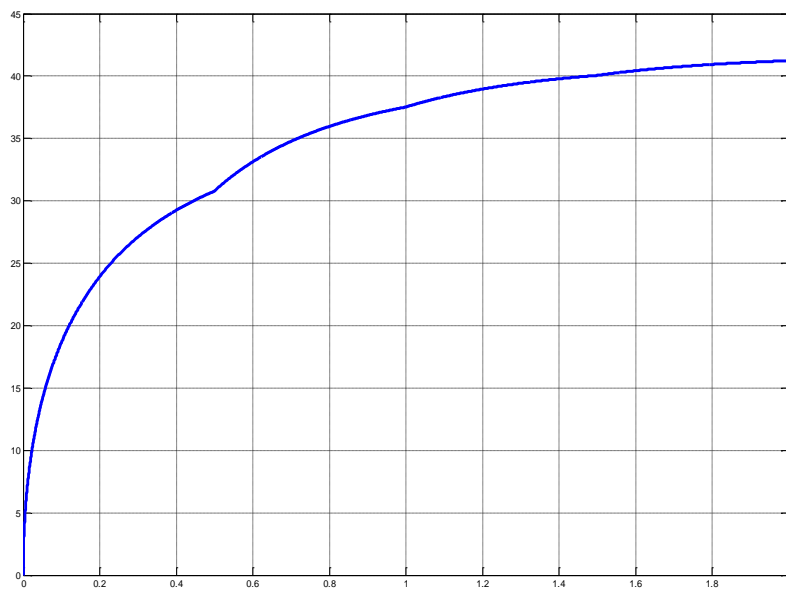


Figure (3.14) la vitesse de la turbine

3.8. Les résultats de simulations et interprétation

3.8.1. Résultats de simulation

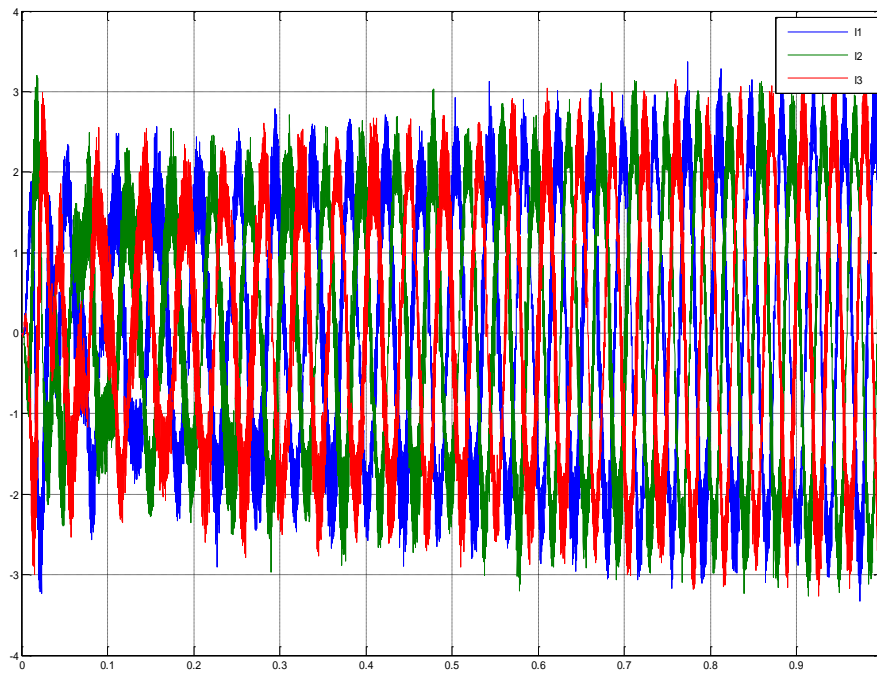


Figure (3.15) Le courant statorique

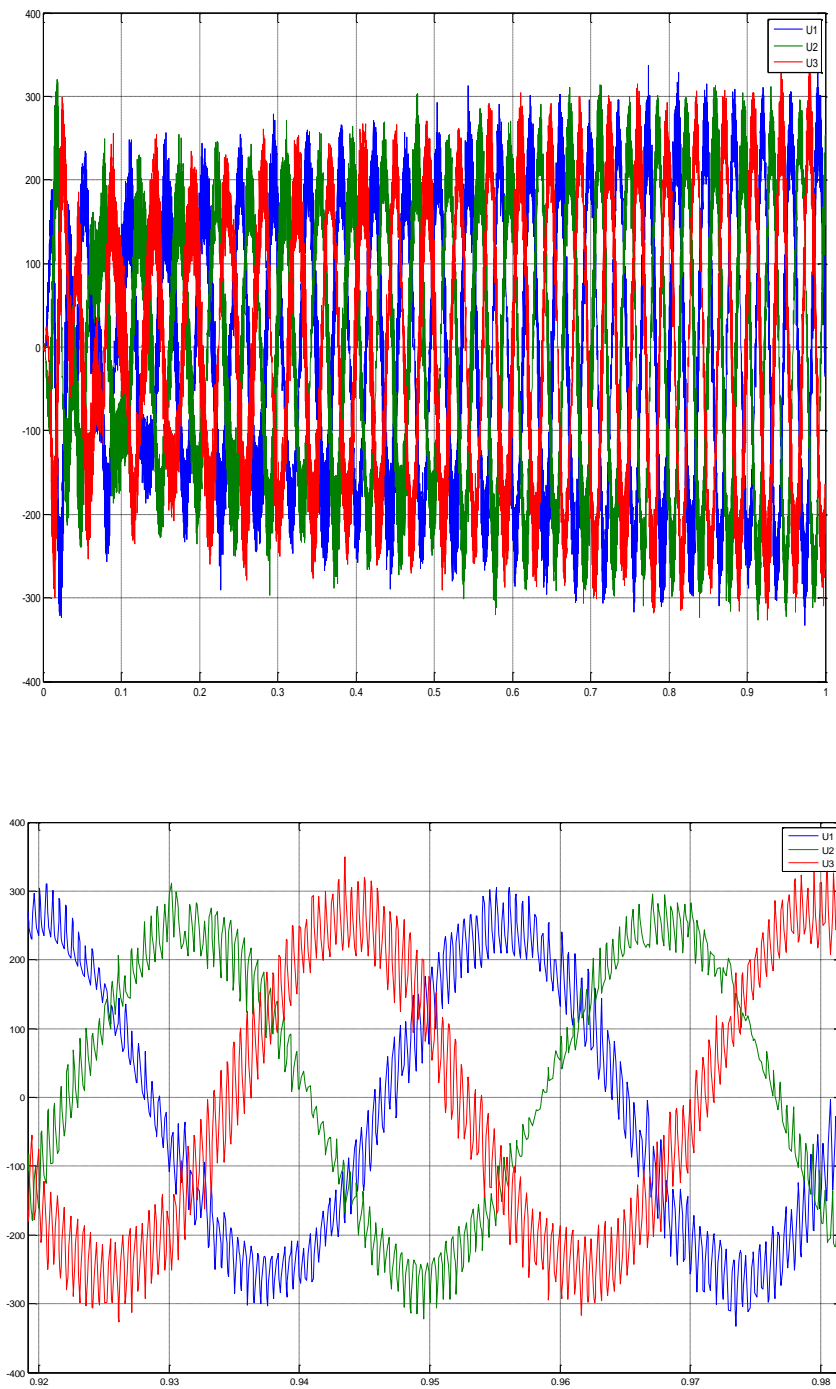


Figure (3.16) La tension ou borne de la génératrice (alimentation du rotor par onduleur)

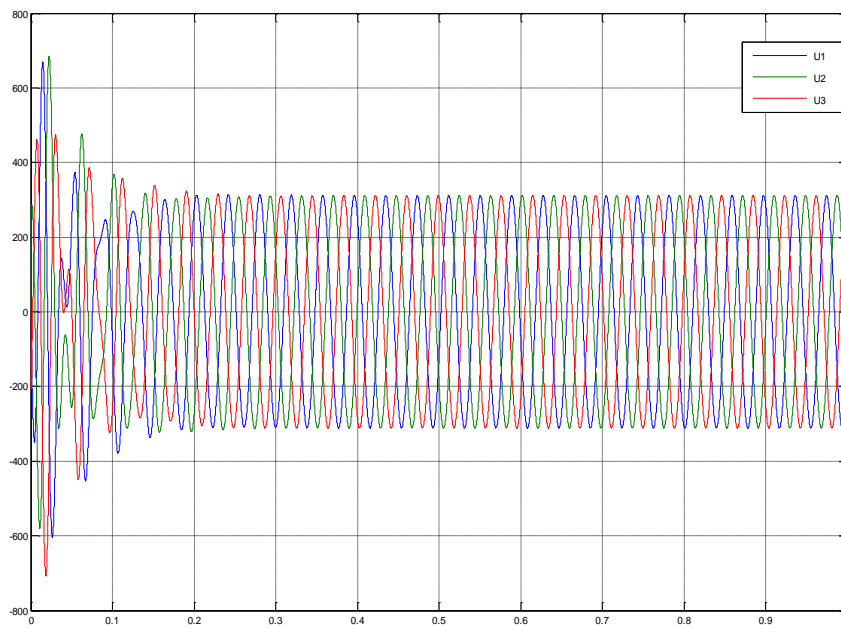
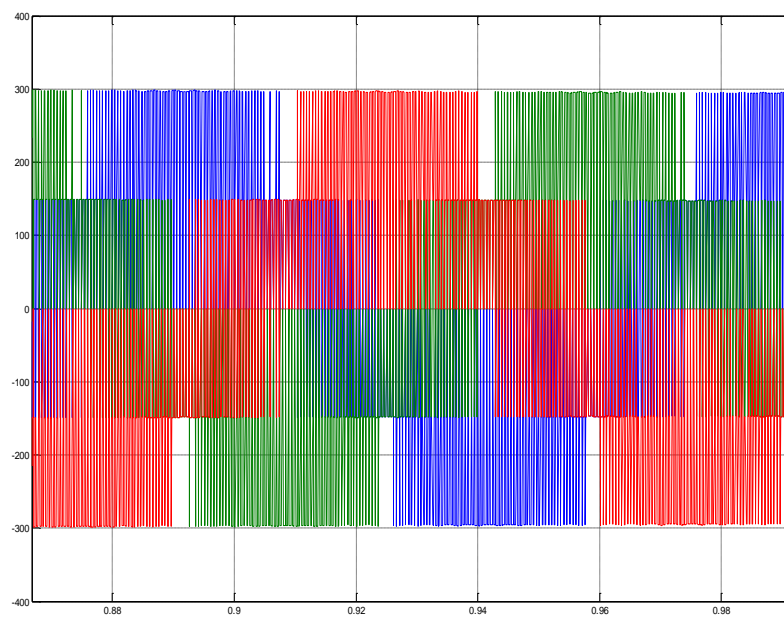
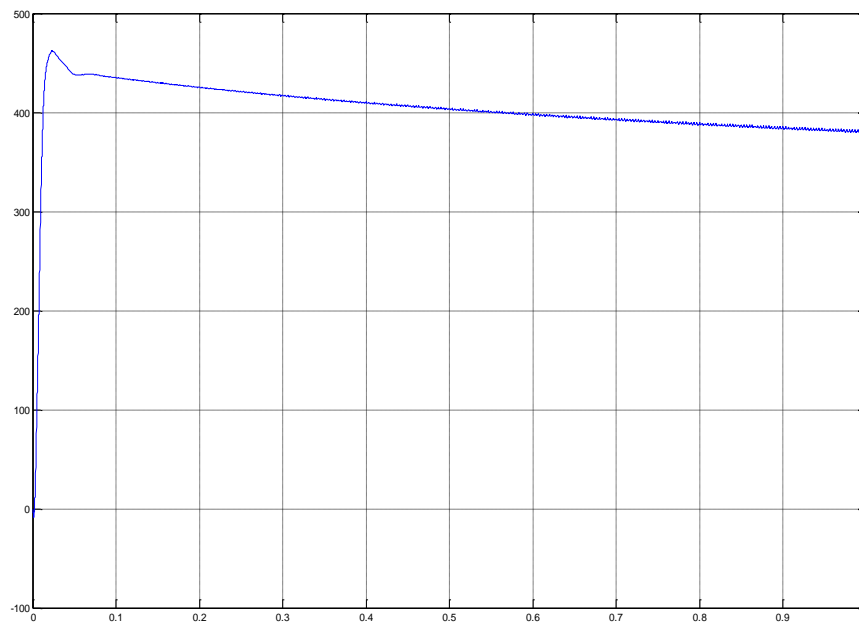


Figure (3.17) La tension aux bornes de la génératrice (alimentation du rotor par réseau)



Figure(3.18a)La tension à la sortie de l'ond



Figure(3.18b)La tension à la sortie du red

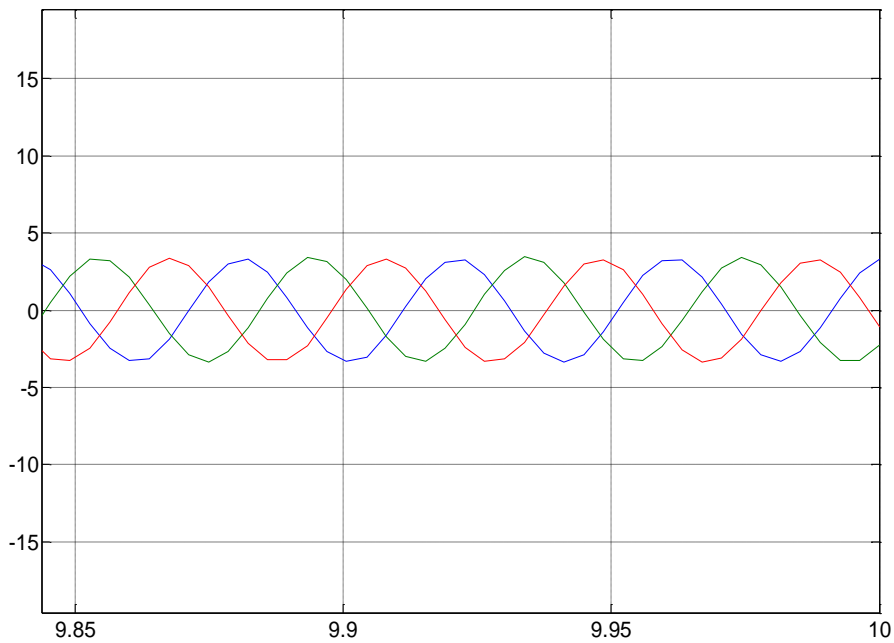


Figure (3.19) Le courant statoriqueavec zoom

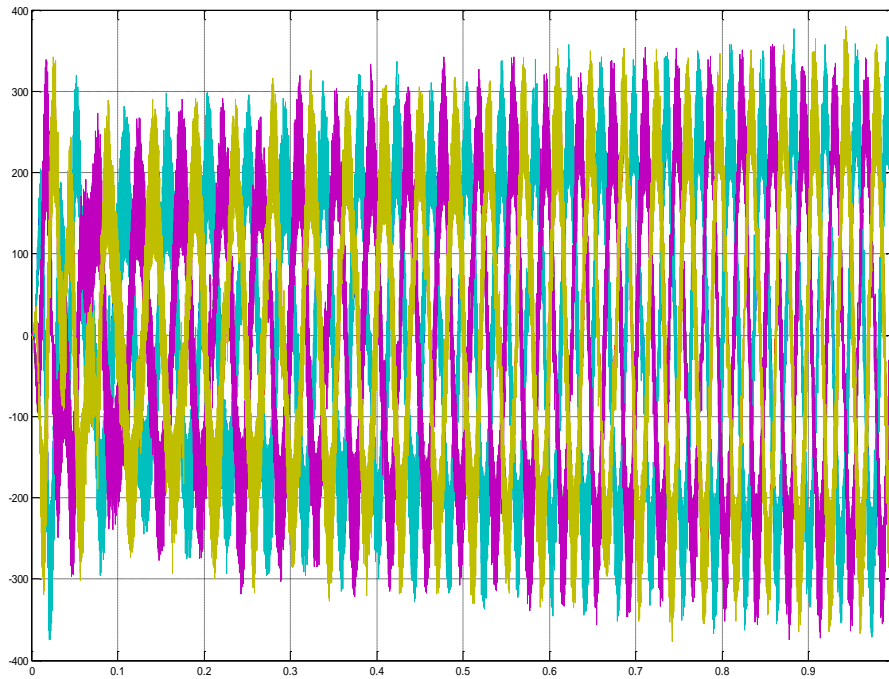


Figure (3.20a) La tension pour une charge

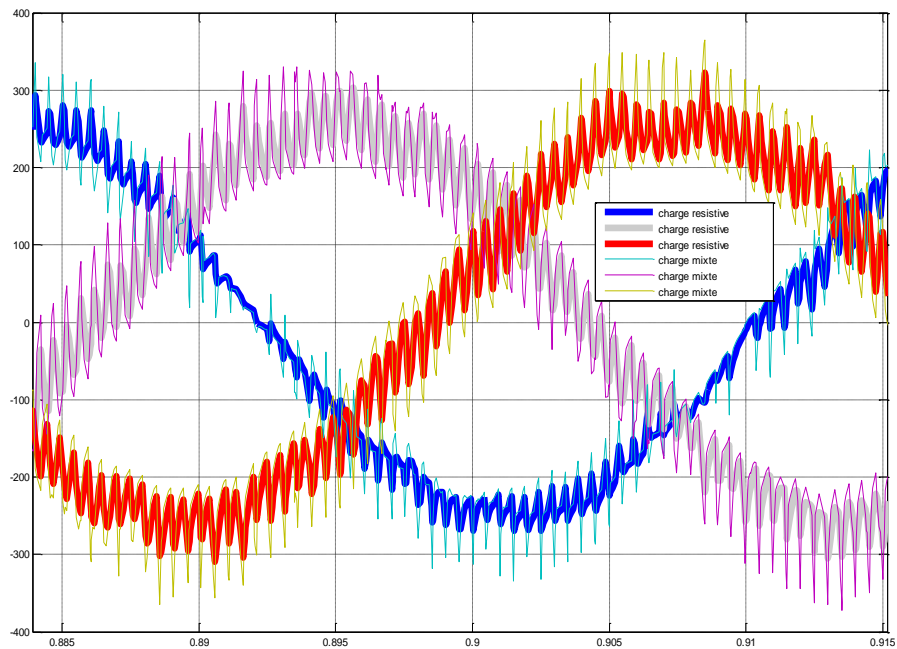


Figure (3.20b) La tension pour une charge (mixte) avec zoom

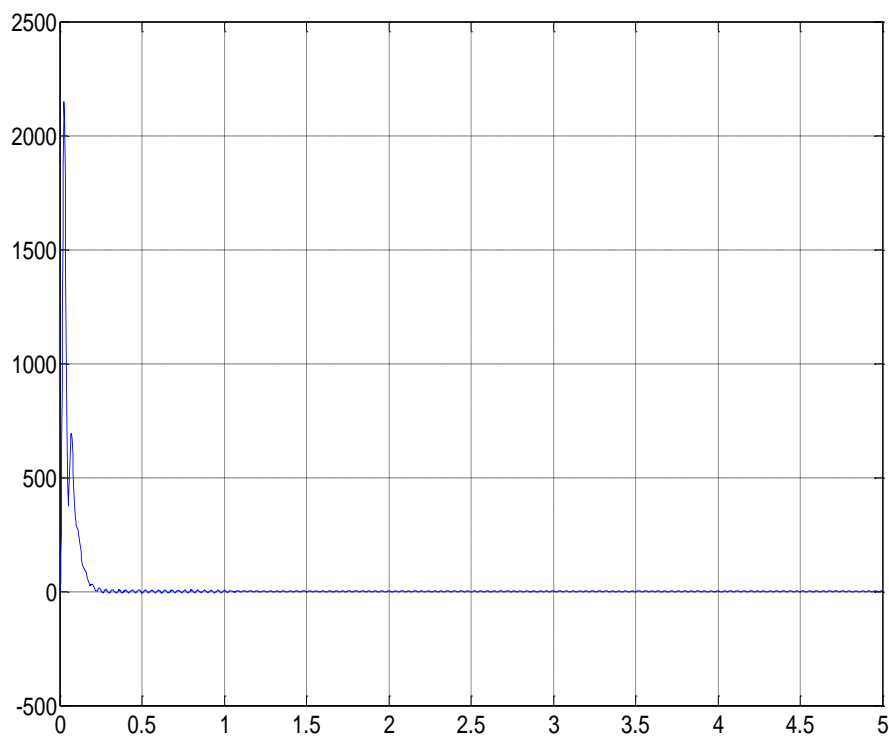


Figure (4.7) Le couple de génératrice

3.8.2. Interprétations des résultats :

La tension et le courant obtenu avec une charge mixte ($R=100(\Omega)$, $L=0.01(H)$), on remarque que la tension augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent, les harmoniques dans la tension et le courant sont dues à la présence de l'onduleur, si la charge est mixte les harmoniques augmentent.

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, on a passé en revue la machine Asynchrone double alimentation en fonctionnement génératrice et la modélisation des différents blocs de la chaîne de conversion, tels que la turbine, le vent, la machine Asynchrone double alimentation, les convertisseurs statiques (onduleur et redresseur) et la commande MLI.

Ensuite des simulations utilisant le logiciel Simulink/Matlab des différentes parties de la chaîne de conversion et de la chaîne globale. Elles ont été menées et des résultats présentés et commentés.

Conclusion générale

Lors de cette étude nous avons modélisé un système global de génération d'électricité à partir d'énergie éolienne. Celle-ci a été suivie d'une modélisation et simulation d'une cascade de deux MADA.

Notre travail s'est déroulé selon les étapes suivantes :

- L'établissement d'un état de l'art relatif aux énergies éoliennes
- L'étude de différents systèmes de génération de l'électricité
- L'établissement de la cascade alimentant le rotor à partir de l'onduleur a deux niveaux. d'un bus continu et d'un redresseur. Grâce à une commande MLI nous avons pu imposer une référence sur la tension du bus continu mais aussi limiter les harmoniques injectées dans le réseau.

Nous avons pu noter alors, que la MADA fonctionnait d'une façon efficace dans les conditions auxquelles nous l'avons soumise. Cela prouve la viabilité de son application dans un système éolien.

A travers cette étude nous obtenons non seulement un moyen générant de l'énergie avec un rendement optimal, mais aussi un outil améliorant et contribuant à la qualité du réseau.

Références

- [1] :Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne (ingénieur d'états a Ecole Nationale Polytechnique Département de Génie Electrique Spécialité Electrotechnique)
- [2] : L.KHETTACHE, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation", mémoire de magister, Université de BATNA, 2007.
- [3] : Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne (Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes)
- [4] : contrôle-commande d'un générateur asynchrone double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne (thèse doctorat de l'université Henri Poincaré)
- [5] : modélisation de différentes technologies d'éoliennes intègre dans un réseau de moyenne tension (thèse doctorat de l'école centrale de Lille)
- [7] :document (Joliet Equipment)
- [8] : C. Kelber, W. Schumacher, "Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machines", VSSHy 2000. European Conference Variable Speed in Small Hydro. Grenoble, France, 26-28 Jan. 2000.
- [9] R. Datta and V. T. Ranganathan, "Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine - A Comparison With Alternative Schemes", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 17, No. 3, September 2002
- [11]: R.Abdesmed, «Modélisation et simulaion des Machines Electriques. » Editions Ellipses ,2011
- [12] :Predictive Control Of The 2l-Vsi And 3l-Npc Vsi Based On Direct Power Control For Mv Gridconnected Power Applications, Sergio Aurtenechea Larrinaga,Arrasate – Mondragon (Spain) 2007
- [13]: tamrabet hanene Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine AsynchroneMémoire de Master université de batna.
- [14] :frédéric poitiers Etude et commande de génératrice asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne, thèse de doctorat université de nantes
- [15] :Control Design and Dynamic Performance Analysisof a Wind Turbine-Induction Generator UnitEzzeldin S. Abdin and Wilson Xu, Senior Member, IEEE

Annexe

Paramètres utilisés

1. Paramètres de la MADA:

- Résistance statorique: $R_s = 1.2 \quad \Omega$.
- Résistance rotorique: $R_r = 1.8 \quad \Omega$.
- Inductance cyclique statorique: $L_s = 0.1554 \quad H$.
- Inductance cyclique rotorique: $L_r = 0.1568 \quad H$.
- Inductance cyclique mutuelle: $L_m = 0.15 \quad H$.
- Le nombre de paires de pôles est: $p = 2$.

2. Constantes mécaniques de la MADA:

- Moment d'inertie : $J_{mach} = 0.2 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement visqueux : $f = 0.001 \text{ N.m.s/rd}$.

3. Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Nombre de pales = 3.
- Rayon de la surface balayée par les pales : $R = 35\text{m}$.
- Gain du multiplicateur : $G = 70$.
- Moment d'inertie de la turbine $J_{turbine} = 256 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement visqueux : $f = 0 \text{ N.m.s/rd}$.