

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMARI, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Électrotechnique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme

DE MASTER ACADEMIQUE EN ELECTROTECHENIQUE
OPTION : MACHINES ELECTRIQUES

Thème:

**Etude de générateur Asynchrone à vitesse fixe
et variable appliqué à une éolienne**

Proposé par :

Mr. T.OTMANE CHERIF

Présenté par :

Mr. HABAREK
Mr. AMANI

Merizek
Kaci

Promotion 2013

Remerciements

Remerciements

Nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de nous avoir appris ce que nous ignorions, de nous avoir donné la santé et tout ce dont on avait besoin pour réaliser le travail imposé et rédiger ce mémoire.

Ainsi, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à Monsieur Tahar OTMANE-CHEFF, maître de conférences à l'UNM70, pour avoir dirigé ce travail, et pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail.

Nos remerciements distingués vont à Monsieur Hamid SEDKI, maître de conférences à l'UNM70, pour son encadrement de haute qualité, ses précieux conseils et sa disponibilité sans faille.

Nous remercions les Doctorants Koussaila MESBAH et M. BECHOUCHE Ali, pour leur aide et leurs encouragements.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail de près ou de loin.

Dédicaces

D é d i c a c e s

A ux être qui me sont les plus chers

« M E S P A R E N T S »

P our leurs A M O U R leur E D U C A T I O N et leurs
S A C R I F I C E S .

A mes frères et ma sœur, pour qui je souhaite la
réussite dans leurs projets en avenir .

A mes tantes, mes oncles, mes cousins, mes cousines .

A mes cher amis et frères Slimane, Hamid, Malik,
Mourad, Hakim, Achour, Azdine .

A mes amies et sœurs Tinhinane, Chafiaa, Souad .

A toute ma famille .

A toute l'association culturelle Tazrart

A tout mes amis .

A tous ceux qui m'ont aidé à faire ce travail .

M E R I Z E K

DEDICACES

Je dédie ce travail :

En premier lieu à ma mère et à mon père qui ont consenti beaucoup de sacrifices pour me permettre de réaliser mes objectifs et Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.

A ma grand-mère

A ma sœur et mes frères

A mes oncles et tantes

A mes cousins et cousines

A mon meilleur ami Hamid

A mon binôme Merizek

A tous mes amis(es)

Tous ceux qui me sont chers.

Amani Kaci

Résumé

Notre objectif préalablement défini dans ce travail consiste à l'étude d'une chaîne de conversion éolienne à vitesse fixe et à vitesse variable par la machine asynchrone et la commande en puissance de la machine à double alimentation appliqué à une éolienne.

Ce travail a été scindé en quatre parties, la première a été consacrée pour la présentation de l'état de l'art des systèmes éoliens, les différents types d'éoliennes et un rappelle des concepts fondamentaux de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz).

Le deuxième chapitre consiste en la représentation mathématique de la machine asynchrone dans le repère (d-q) et la simulation du fonctionnement à vide de cette machine

Le troisième chapitre a pour but de mettre en évidence dans une chaîne de production éolienne en utilisant une MAS à vitesse fixe et variable dont on a remarqué que dans le mode de fonctionnement à vitesse variable sont plus performant que ceux du mode de fonctionnement à vitesse fixe, ou nous avons pu avoir un rendement meilleur et fixe pour différent vitesse du vent.

Le dernier chapitre est réparti à une étude sur la machine asynchrone à double alimentation en régime permanent, et l'autre partie consacré à l'introduction d'une commande vectorielle à orientation du flux statorique pour cette machine.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Mots clés

Modélisation de MAS, étude d'une chaîne de conversion éolienne à vitesse fixe et variable, commande de la MADA, machine asynchrone, Modélisation de la turbine éolienne.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens	
1 .Introduction	3
I - Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.....	3
I.1 Définition de l'énergie éolienne	3
I.2 Principaux composants d'une éolienne	4
I.3 Les différents types d'éolienne.....	5
I.3.1 Eolienne à axe vertical.....	5
I.3.2 Eoliennes à axe horizontal	5
I.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	7
I.4.1 Les Avantages	7
I.4.2 Les inconvénients.....	8
I.5 Etude de l'énergie cinétique du vent	8
I.5.1 Limite de BETZ	9
I.6 Conclusion	11
Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone	
II.1. Introduction	12
II.2. Principe de fonctionnement	12
II.3.Hypothèses simplification	13
II.4.Conventions de signes suivantes.....	13
II.5.Modélisation d'une MAS en régime permanent.....	13
II.5.1.Equations générales de la machine asynchrone.....	13
II.5.2.Modèle diphasé de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire	15
II.5.3.Choix du référentiel.....	16
II.5.4.Equations de Puissance et de Couple	17
II.5.5.Equations de la machine asynchrone en régime permanent	18
II.5.6.Schéma équivalent ramené au stator	19
II.5.7.Expression des courants \bar{I}_s et	21
II.6.Simulation.....	22
II.6.1.Résultats de simulation de la MAS à vide.....	23
II.6.2.Interprétation des résultats obtenus	23
II.7.Conclusion	23

Chapitre III : Générateur asynchrone à vitesse fixe et vitesse variable

III.1 Etude du générateur à vitesse fixe	24
III.1.1.Principe de fonctionnement.....	24
III.1.2. Les éoliennes à décrochage aérodynamique	24
III.1.2.1. Les Eoliennes à pales orientables	25
III.1.3.Exemple d'étude d'une turbine éolienne.....	25
III.1.3.1.Expression analytique de la courbe du coefficient de puissance utilisé.....	25
III.1.3.2.Calcul de la puissance maximale de la turbine.....	26
III.1.3.3.Calcul du couple mécanique produit par la turbine	27
III.1.4.Partie mécanique de l'éolienne.....	27
III.1.4.1.Zones de fonctionnement	27
III.1.5. Caractéristiques de puissances de la turbine à des vitesses différentes	28
III.1.5.1.Etude du générateur asynchrone couplé à la turbine éolienne	30
III.1.5.1.1.Les points de fonctionnement du système.....	30
III.1.5.2.Etude du rendement de l'installation	31
III.2.Etude du générateur à vitesse variable.....	32
III.2.1.Principe	32
III.2.2. Intérêt de la vitesse variable	33
III.2.3 .Insertion d'un convertisseur coté stator et amélioration du rendement	34
III.2.3.1 fonctionnement à puissance mécanique maximale.....	34
III.2.3.2.Couple C'_{t_max} généré par la turbine en fonction de la vitesse.....	35
III.2.3.3. Fréquence statorique f_s en fonction de la vitesse du vent.....	35
III.2.3.4.Calcul de la tension V_s en fonction de la vitesse N	36
III.2.3.5.L'expression du rendement	36
III.2.4. Calcul le rendement de la vitesse variable à éolienne.....	37
III.2.5. Calcul théorique de rendement	37
III.3.Conclusion.....	40

Chapitre IV : Etude et commande en puissance de la MADA

Introduction.....	41
IV. 1. Machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	41
IV.2. Structure des machines asynchrones à double alimentation	41
IV.2.1. Double alimentation par le stator	42
IV.2.2. Double alimentation par le stator et le rotor.....	42

IV.3. Fonctionnement en génératrice à vitesse variable.....	43
IV.4. Modèle de la MADA en régime permanent.....	44
IV.5. Schémas équivalents d la MADA.....	45
IV.5.1. Schéma équivalent aux inductances couplées.....	46
IV.5.2. Schémas équivalent en T.....	46
IV.5.3. Schémas équivalent ramené au stator avec fuites magnétiques totalisées au stator.....	46
IV.6. Expression du couple électromagnétique.....	48
IV.7. Différente puissances de la MADA.....	48
IV.7.1. Puissance active.....	48
IV.7.2. Puissance réactive.....	49
IV.7.3. Puissance apparente.....	49
IV.7.4. Puissance échangée au stator et au rotor.....	49
IV.8. Rendement de la MADA	51
IV.9. Contrôle de la puissance active et réactive par des régulateurs PI.....	52
IV.9. 1. Principe de la commande vectorielle	52
IV.9.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	52
IV.9.3. Choix du référentiel pour le modèle diphasé	53
IV.10.Synthèse du régulateur PI	57
IV.11.Résultat de Simulation	60
IV.11.1 Interprétation des résultats	61
IV.12. Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62
Bibliographie	
Annexe	

Introduction Générale

De nos jours, l'énergie éolienne est devenue une solution viable pour la production d'énergie, en complément des autres sources d'énergie renouvelables. Alors que la majorité des éoliennes installées sont à vitesse fixe, le nombre des éoliennes à vitesse variable ne cesse d'augmenter [1].

Le mot éolien vient du Grec (Éole) qui est le dieu des vents. Les éoliennes utilisent l'énergie du vent de façon à la transformer en énergie électrique. Leurs pales sont actionnées par le vent. Elles sont reliées à un axe qui entraîné par leur mouvement actionne un moteur permettant ainsi de créer de l'énergie électrique [37].

Le vent est le mouvement des masses d'air résultant du réchauffement inégal de la surface de la terre par le soleil.

L'homme utilise l'énergie éolienne depuis des milliers d'années. Les Perses de l'Antiquité utilisaient déjà l'énergie éolienne pour pomper l'eau. On a exploré le monde à l'aide de navires entraînés par le vent bien avant l'invention du moteur. Pas plus tard qu'en 1920, plus d'un million d'éoliennes servaient à pomper l'eau et à fournir l'électricité aux entreprises agricoles de l'Amérique du Nord. Dans les années 50, des centaines d'éoliennes étaient encore utilisées en Algérie pour le pompage de l'eau. Aujourd'hui, l'énergie électrique d'origine éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire. En 2005, 6183 MW ont été installés dans les pays de la communauté européenne (1808 MW pour l'Allemagne et 1764 MW pour l'Espagne), soit une production électrique de 83 TWh, égale à 2.8% de la consommation électrique de 2004 [38].

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant.

L'Algérie est confrontée à des problèmes d'énergie électrique. La puissance fournie ne suffit plus à la demande elle atteint des pointes de 5100 MW, valeur dépassant sa capacité de production de 200 MW. Il est grand temps de se retourner vers les autres formes d'énergies renouvelables disponibles en grandes quantités dans notre pays comme le vent, qui n'est qu'une forme indirecte de l'énergie solaire. Malheureusement ces ressources sont mal ou peu exploitées. Pour utiliser le vent comme source d'énergie, il faut connaître le potentiel éolien d'une région.

Introduction générale

Notre travail consiste en premier chapitre à des rappels sur les systèmes éoliens. On définit les différents types d'aérogénérateurs et leurs domaines d'application en tenant compte de l'architecture tout en présentant les principaux composants éolienne, les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne et une étude de l'énergie cinétique du vent.

Le second chapitre présente une étude sur une machine asynchrone à travers des équations simples à l'aide de la transformation de Park qui nous a simplifié notre système, tout en tenant compte des hypothèses simplificatrices.

Le troisième et le quatrième chapitre présente une étude sur un générateur à vitesse fixe et à vitesse variable et étudie leur rendement de l'installation.

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes éoliens

1. Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour optimiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Deux technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande).
- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des paliers de l'éolienne, orientation de la nacelle).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent.

I - Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.

I.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 1-1).

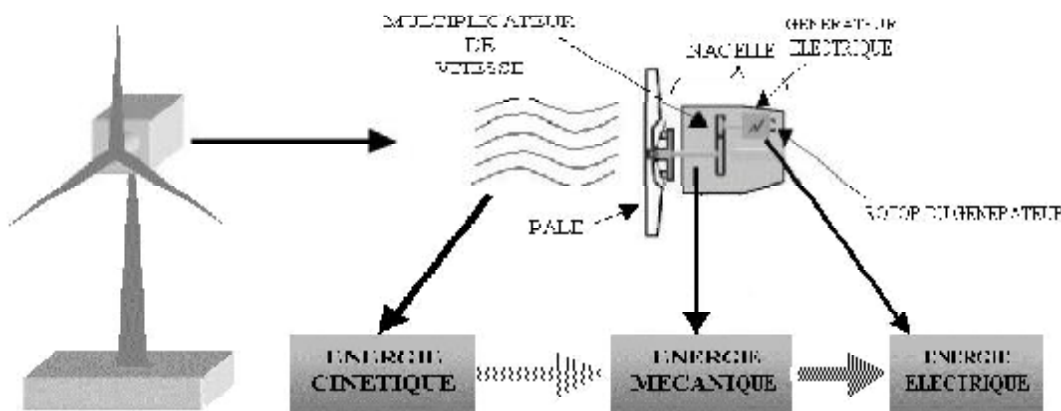


Figure 1-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

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.

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.

I.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:

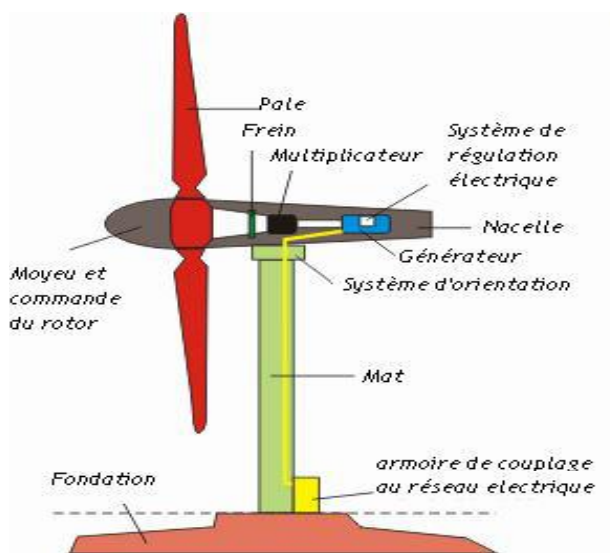


Figure 1-2 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

- **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 [2].

- **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'écuréuil) 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).

I.3 Les différents types d'éolienne :

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

I.3.1 Eolienne 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 et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [3].

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. Selon [4] Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivantes :

- ✓ Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour.
- ✓ Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- ✓ L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- ✓ L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).

I.3.2 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 multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [3].

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6 MW. Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché [5].

Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme les méthodes de description du gisement éolien, des exemples d'architectures, les génératrices utilisées, etc. Nos travaux portent sur un système éolien de petite puissance dédié à un site perturbé comme le milieu urbain, des exemples de réalisations pratiques et industrielles de cette catégorie sont proposés. La turbine à axe vertical de type Savonius qui semble être particulièrement adaptée est alors étudiée du point de vue de son rendement en collaboration avec l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse donnant des indices sur les différents perfectionnements du rendement possibles.

❖ Les raisons pour choisir une grande éolienne

1. Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.
2. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.
3. Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

❖ Les raisons pour choisir une éolienne plus petite

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.
2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.
3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.
4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

On distingue aussi le "grand éolien", qui concerne les machines de plus de 250 KW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 KW et 250 KW) et du petit éolien (inférieur à 36 KW) [13].



Figure 1-3 : Différents types d'éoliennes.

I.4 Avantages et inconvénients 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.

I.4.1 Les Avantages :

- L'énergie éolienne c'est une énergie qui respecte l'environnement [7].
- Bien que ne pouvant envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc. ... [4].
- Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [4].
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [8].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [13].
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [Site 1].
- 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 [Site 1].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [9], selon l'article [10] le coût de l'éolien tend à diminuer presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines [11].
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [Site 1].

I.4.2 Les inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : ce reste néanmoins un thème subjectif [13]. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien [4].

➤ Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux [Site 1].

➤ Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [Site 2]. Selon l'article [11], il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes.

I.5 Etude de l'énergie cinétique du vent:

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passe par la surface active S de l'éolienne et transmet une partie de cette énergie aux pales de l'éolienne. Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (figure1.4).

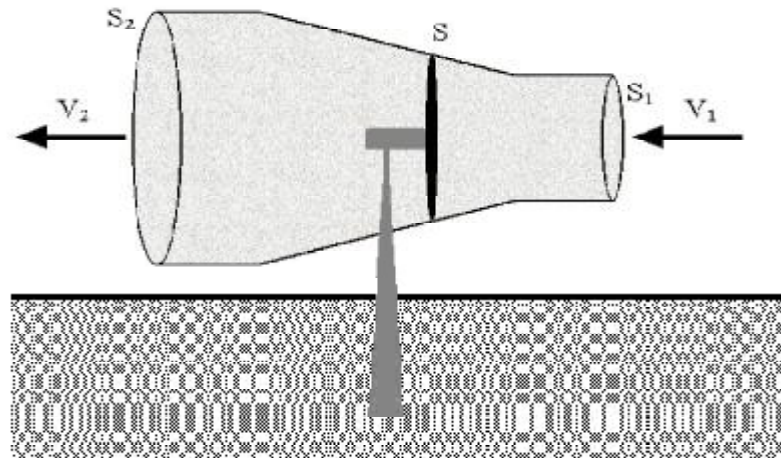


Figure 1.4 : tube de courant autour d'une éolienne [12].

En appliquant la théorie de la quantité de mouvement et du théorème de Bernoulli, on peut déterminer la puissance incidente (la puissance théorique transporté par le vent), due au vent :

$$P_{incidente} = P_v = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} \rho S v^3 \tag{I.1}$$

S : La surface balayée par les pales de la turbine en (m^2)

ρ : La masse volumique de l'air ($\rho = 1.225 Kg / m^3$) à la pression atmosphérique.

v : vitesse du vent m / s

Si l'éolienne développe une puissance mécanique cela veut dire qu'elle a prélevé une partie de la puissance cinétique véhiculé par le vent. Et d'après le principe de conservation de puissance, la puissance à la sortie de l'éolienne serait inférieure à celle de l'entrée, ce qui se traduit par la relation suivante : $P_{v_2} < P_{v_1} \rightarrow \frac{1}{2} \dot{m}_2 v_2^2 < \frac{1}{2} \dot{m}_1 v_1^2$; de plus le débit massique de l'air est le même dans l'entrée et la sortie de l'éolienne $\rightarrow \dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m}$. Nous déduisant alors $v_2 < v_1$.

En vertu de la conservation du débit massique nous pouvons écrire $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ et comme on a montré $v_2 < v_1$, alors pour satisfaire l'égalité on doit obligatoirement avoir $S_2 > S_1$.

La quantité de mouvement d'une masse d'air dm à l'entrée de l'éolienne est donnée par $p_1 = dm \cdot v_1$, en sortie on a $p_2 = dm \cdot v_2$. La variation de la quantité de mouvement entre l'entrée et la sortie vaut donc : $\Delta p = p_1 - p_2 = dm(v_1 - v_2)$. La force résultante F qui s'exerce sur les pales est donnée par :

$$F = \frac{\Delta p}{dt} = \frac{dm}{dt}(v_1 - v_2) = \dot{m}(v_1 - v_2) \tag{I.2}$$

La puissance du vent captée par l'éolienne peut être obtenue en multipliant la force F par la vitesse du vent v au niveau des pales, ce qui donne : $P'_{eol} = F \cdot v = \dot{m}(v_1 - v_2)v$

En comparant $P_{eol} = \frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_2^2)$ et $P'_{eol} = \dot{m}(v_1 - v_2)v$ on peut écrire :

$$P_{eol} = P'_{eol} \Rightarrow \dot{m}(v_1 - v_2)v = \frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_2^2) \Rightarrow v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$$

I.5.1 Limite de BETZ

La puissance prélevée par l'éolienne est égale à la variation de l'énergie cinétique du vent :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \tag{I.3}$$

$$\text{Avec : } v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$$

On obtient :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \rho S \frac{v_1 + v_2}{2} (v_1^2 - v_2^2)$$

En remplaçant v_2 par λv_1 on obtient :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \rho S \left(\frac{v_1 + \lambda v_1}{2}\right) (v_1^2 - \lambda^2 v_1^2) = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 C_p \tag{I.4}$$

Avec : $C_p = \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2)$ appelé coefficient de puissance. La (figure 1.5) montre le tracé de la caractéristique de coefficient C_p en fonction de λ :

On déduit d'après le graphe que C_p passe par un maximum quand $\lambda = \lambda_{opt} = 0.33$

Ce qui signifie que le rendement de la turbine éolienne est maximal quand la vitesse du vent en sortie est de un tiers de celle à l'entrée.

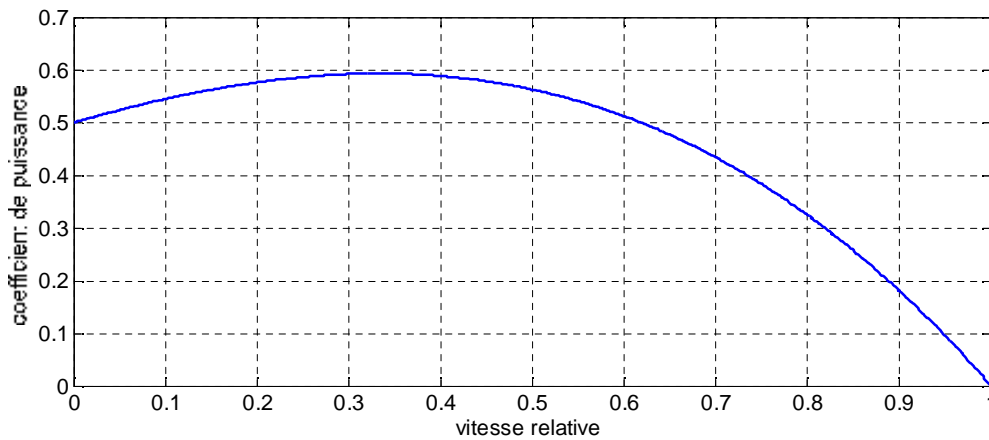


Figure 1.5: coefficient de puissance $C_p(\lambda)$

Le cas où $\lambda = 1$ suppose que le vent à la sortie de l'éolienne est égal à la vitesse d'entrée ($v_1 = v_2$) ; n'a pas donc subit de turbulence et aucune énergie cinétique n'est captée par l'éolienne. Il est évident que $C_p = 0$.

Dans le cas où $\lambda = 0$ suppose que la vitesse du vent à la sortie de l'éolienne est nulle. C'est un cas impossible en pratique.

Le maximum du coefficient de puissance C_p a été déterminé théoriquement par Albert Betz (1920) comme suit : en faisant la dérivée C_p par rapport à λ on obtient :

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = \frac{1}{2} \frac{d[(1-\lambda)(1-\lambda^2)]}{d\lambda} = \frac{1}{2} (1-\lambda^2) - 2\lambda(1+\lambda) - \frac{1}{2} (1-\lambda^2 - 2\lambda - 2\lambda^2) - \frac{1}{2} (3\lambda^2 + 2\lambda - 1) = 0$$

$$\Delta = 2^2 - 4 * 3 * (-1) = 16 \Rightarrow \sqrt{\Delta} = 4$$

Les racines sont donc :

$$\lambda_1 = \frac{-2 - 4}{2 * 3} = -1 \quad \text{Et} \quad \lambda_2 = \frac{-2 + 4}{2 * 3} = \frac{1}{3}$$

La première racine $\lambda_1 = -1$ est écartée puisque cela suppose qu'on $v_1 = v_2$, chose impossible en pratique.

La valeur adéquate est donc $\lambda_2 = \lambda_{opt} = \frac{1}{3}$ et en la remplace par λ dans l'expression de C_p d'où :

$$C_{p_{max}} = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3}\right) \left(\frac{8}{9}\right) \right] = \frac{32}{54} - \frac{16}{27} = 0.592 \quad (I.5)$$

$C_{p_{max}} = 0.592$ Montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59.3% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde ; de cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est définit :

$$C_p^{max}(\lambda) = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (I.6)$$

Cette limite est atteinte théoriquement, quand la vitesse de la sortie de l'éolienne vaut 1/3 de la vitesse d'entrée ($v_1 = 3v_2$).

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.

Le ratio λ peut être exprimé par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v} \quad (I.7)$$

Ω : Vitesse de rotation de la turbine et v : est la vitesse du vent

I.6 Conclusion

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans la première partie de ce chapitre. On peut dire que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

En deuxième partie nous avons donné une vue d'une turbine éolienne, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), Enfin nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques, et nous avons vu que cette partie mécanique est un élément très important dans les systèmes de conversion éoliens.

CHAPITRE II

Modélisation de la machine asynchrone

II.1. Introduction

La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages : elles sont robustes, leurs coût est faible et ont une simplicité mécanique. Par ailleurs, leurs inconvénients se trouvent au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elles tirent soit du réseau, soit elles sont compensées par une batterie de condensateurs. Il existe deux types de machine asynchrone : la machine asynchrone à cage d'écureuil et la machine asynchrone à rotor bobiné. Dans ce chapitre nous allons intéresser à la machine asynchrone à cage d'écureuil, la plus utilisée dans les éoliennes tournant à une vitesse constante, en partant d'un certain nombre hypothèses simplificatrices pour la modélisation mathématique de la machine.

II.2. Principe de fonctionnement

Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant) exprimée par l'équation suivante :

$$\Omega_s = \frac{60f}{p} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- Ω_s : vitesse de synchronisme ;
- f : fréquence des tensions d'alimentation
- p : nombre de paires de pôles.

Le rotor développe ainsi son propre champ magnétique. Lorsque cette génératrice est connectée au réseau, il se met à tourner à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator (fonctionnement de type « moteur »).

Si la vitesse de rotation du rotor devient égale (synchrone) à celle du champ magnétique, aucune induction n'apparaît dans le rotor, et donc aucune interaction avec le stator.

Enfin, si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, il se développe alors une force électromagnétique similaire à celle obtenue avec un générateur synchrone.

La différence entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique est appelée glissement, sa valeur ne dépassant pas en pratique quelques pour-cent. Pour une augmentation limitée de la vitesse de rotation de l'éolienne, le couple et la puissance fournie sont proportionnels au glissement.

Toutefois, à partir d'une certaine vitesse de rotation, une diminution sensible du flux dans la génératrice se produit, ce qui nécessite plus de courant pour un couple équivalent. Passée une valeur maximale de couple, une diminution du couple et donc de la puissance est observé. Il est dangereux que l'éolienne soit amenée à fonctionner dans cette zone, car d'une part la diminution du couple résistant pourrait entraîner une survitesse de la machine et d'autre part la dissipation de puissance dans la génératrice risquerait d'endommager certains éléments par surchauffe. Il faut souligner l'intérêt de ce type de fonctionnement de la génératrice asynchrone car il permet à l'éolienne de subir de faibles variations ponctuelles de la vitesse du vent (rafales) sans solliciter exagérément la transmission (multiplicateur notamment) [13, 14].

II.3. Hypothèses simplification :

Le modèle de la machine asynchrone que nous adopterons repose sur les hypothèses suivantes :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, ce qui permet de considérer que seuls les enroulements (inducteur, induit, amortisseurs) sont parcourus par des courants et en outre on suppose que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).
- La force magnétomotrice créée par chaque phase du stator et du rotor est à distribution spatiale (le long de l'entrefer) sinusoïdale (on ne considère que le premier harmonique), les inductances propres sont, par conséquent, constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales des angles que font les axes magnétiques ; l'effet dû à la présence d'encoches est négligé [15].

II.4. Conventions de signes suivantes :

La machine asynchrone est majoritairement utilisée en moteur.

- ✓ Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif
- ✓ Une f.é.m. positive fait circuler un courant positif.
- ✓ Le stator est considéré comme générateur, le rotor comme récepteur.
- ✓ Les angles et les vitesses de rotation sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.

II.5. Modélisation d'une MAS en régime permanent :

II.5.1 Equations électriques dans les axes a,b,c :

Les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé s'écrivent sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] - [R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{sabc}] \\ [V_{rABC}] - [R_r][I_{rABC}] + \frac{d}{dt}[\phi_{rABC}] = 0 \end{cases} \quad (II-2)$$

Avec :

$[R_s]$ Et $[R_r]$ sont respectivement les matrices des résistances statorique et rotoriques par phase.

$[V_{sabc}]$, $[V_{rABC}]$, $[I_{sabc}]$ et $[I_{rABC}]$ sont respectivement les vecteurs tensions et courants statoriques et rotoriques

$[\phi_{sabc}]$, $[\phi_{rABC}]$ sont les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes A, B, C et a, b, c.

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [V_{rABC}] = \begin{bmatrix} V_{rA} \\ V_{rB} \\ V_{rC} \end{bmatrix} ; \quad [I_{rABC}] = \begin{bmatrix} I_{rA} \\ I_{rB} \\ I_{rC} \end{bmatrix}$$

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

• **Equations magnétiques :**

Les flux s'expriment en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

l_s, l_r : Inductances propres statorique et rotorique ;

l_m : Inductances mutuelles entre une phase statorique et une phase rotorique ;

M_{sr} : Matrice inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$$\begin{cases} [\phi_{sabc}] = [L_s][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rABC}] \\ [\phi_{rABC}] = [M_{sr}][I_{sabc}] + [L_r][\phi_{rABC}] \end{cases} \quad (II-3)$$

Avec : $[L_s]$ Et $[L_r]$ représentent respectivement les matrices inductances statorique et rotorique exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles.

$$[\phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [\phi_{rABC}] = \begin{bmatrix} \phi_{rA} \\ \phi_{rB} \\ \phi_{rC} \end{bmatrix} ; \quad [L_s] = \begin{bmatrix} l_{saa} & l_{sab} & l_{sac} \\ l_{sab} & l_{saa} & l_{sac} \\ l_{sac} & l_{sab} & l_{saa} \end{bmatrix} ;$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_{rAA} & l_{rAB} & l_{rAC} \\ l_{rAB} & l_{rAA} & l_{rAC} \\ l_{rAC} & l_{rAB} & l_{rAA} \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = l_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Équation mécanique de la machine :

L'équation dynamique fait la liaison entre la partie mécanique et la partie électromécanique de la machine

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (II.4)$$

Où

Ω : La vitesse mécanique de la machine

J : Moment d'inertie

C_r : Couple résistant

C_{em} : Couple électromagnétique

f : Coefficient de frottement

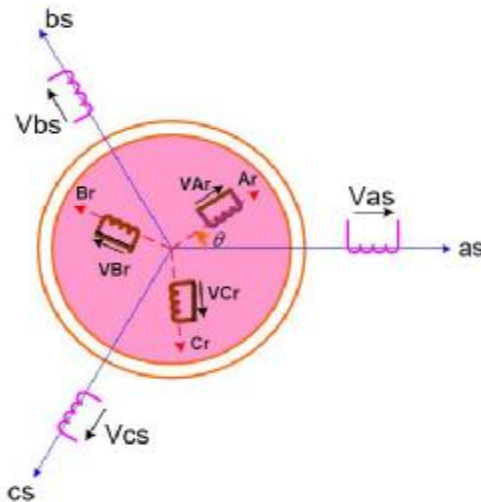


Figure 2.1 : Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

II.5.2 Modèle diphasé de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé [16]. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par :

$$[P(\alpha)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\alpha) & -\sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

Avec : α l'angle entre l'axe **d** et l'axe **as** de la (figure 2.2) pour une transformation au stator ou l'angle entre **d** et **Ar** pour une transformation au rotor. Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [V_{s,dq}] \\ [V_{r,dq}] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} P(\theta_s) \\ P(\theta_s - \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_{sabc}] \\ [V_{rABC}] \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} [\phi_{s,dq}] \\ [\phi_{r,dq}] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} P(\theta_s) \\ P(\theta_s - \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\phi_{sabc}] \\ [\phi_{rABC}] \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} [I_{s,dq}] \\ [V_{r,dq}] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} P(\theta_s) \\ P(\theta_s - \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{sabc}] \\ [I_{rABC}] \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Ainsi, en multipliant les systèmes d'équations (II-2) et (II-3) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = r_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_a \phi_{qs} \\ V_{qs} = r_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_a \phi_{ds} \end{cases} \quad (II-6)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = 0 = r_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_a - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = r_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_a - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (II-7)$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \\ \phi_{dr} = M_{sr} I_{dr} + L_r I_{ds} \\ \phi_{qr} = M_{sr} I_{qr} + L_r I_{qs} \end{cases} \quad (II-8)$$

$$\omega_s = \frac{d}{dt} \theta_s$$

Avec : $\omega_r = \frac{d}{dt} \theta_r$

$$\theta_s = \theta - \theta_r$$

ω_a Désigne la vitesse angulaire électrique du repère d, q :

Dans le nouveau repère, la machine est représentée par la (figure 2.2) ci-dessous.

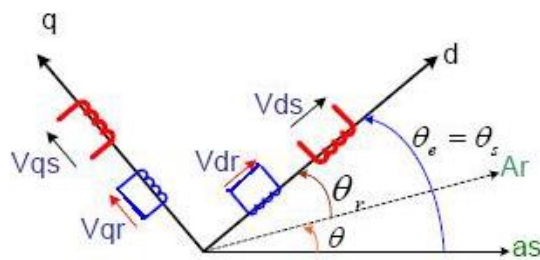


Figure 2.2 : Représentation de la machine dans le repère diphasé

II.5.3 Choix du référentiel

Il est plus intéressant d'écrire les équations dans un référentiel lié soit au stator, soit au rotor, ou au champ tournant, selon les objectifs de l'application. Dans chacun de ces nouveaux référentiels, les équations de la machine deviennent plus simples que dans le référentiel quelconque. Nous représentons ci-dessous, (Figure 2.3), les schémas équivalents suivant les deux axes pour un référentiel quelconque de vitesse ω_a

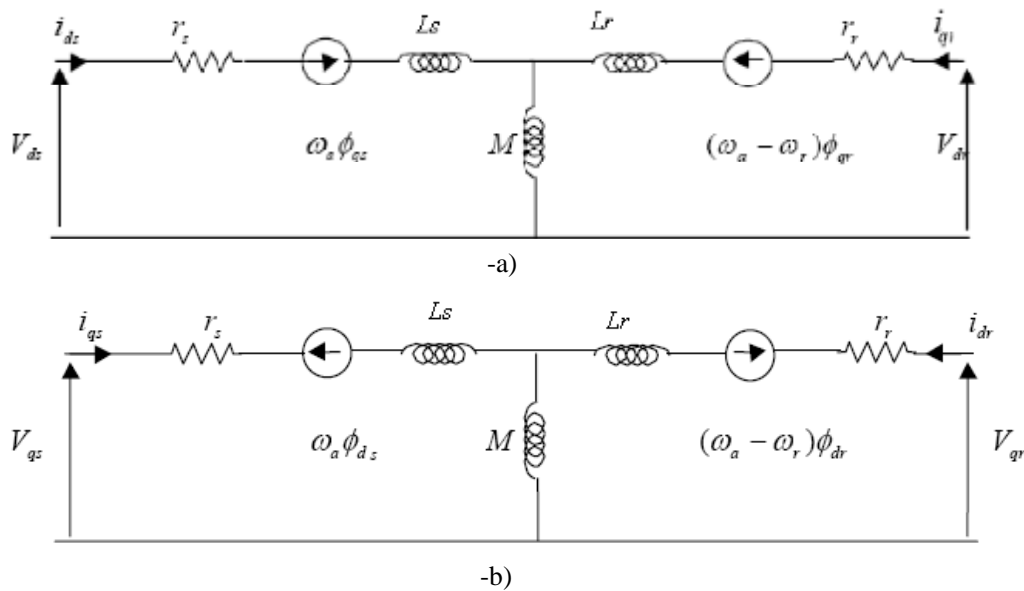


Figure 2.3 : Schéma équivalent en régime dynamique de la machine asynchrone dans un référentiel arbitraire
 a) : Suivant l'axe d ; b) : Suivant l'axe q .

Le choix du référentiel se fait en fonction de la valeur de ω_a

- $\omega_a = 0$ Correspond au référentiel stationnaire.
- $\omega_a = \omega_r$ Correspond au référentiel lié au rotor.
- $\omega_a = \omega_s$ Correspond au référentiel lié au champ tournant.

- Dans notre étude le choix de référentiel lié au champ tournant

II.5.4 Equations de la Puissance et du Couple

Dans le modèle de Park, la puissance électrique statorique instantanée de la machine s'écrit :

$$p(t) = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} - V_{qs} I_{qs}) \tag{II-9}$$

Dans un référentiel lié au champ tournant, en remplaçant V_{ds} et V_{qs} par leurs valeurs, la relation précédente multipliée par dt devient :

$$dW_{ei} = \frac{3}{2} r_s (I_{ds}^2 - I_{qs}^2) dt - \frac{3}{2} (d\phi_{ds} I_{ds} - d\phi_{qs} I_{qs}) + \frac{3}{2} \omega_s (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) dt \tag{II-10}$$

L'énergie électrique fournie au stator pendant le temps dt se décompose ainsi en trois termes :

- Le premier représente l'énergie perdue par effet Joule au stator ;
- Le second représente la variation d'énergie magnétique statorique ;
- Le troisième représente l'énergie dW_s transférée du stator au rotor à travers l'entrefer par l'intermédiaire du champ tournant.

Avec :

$$\begin{aligned}
 dW_{\dot{a}} &= \frac{3}{2} \omega_s (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) dt \\
 &= \frac{3}{2} r_r (I_{dr}^2 - I_{qr}^2) dt + \frac{3}{2} (d\phi_{dr} I_{dr} - d\phi_{qr} I_{qr}) dt - \frac{3}{2} \omega_r (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) dt
 \end{aligned}
 \tag{II-11}$$

L'énergie $dW_{\dot{a}}$ transitant à travers l'entrefer est donc composée de trois termes :

L'énergie perdue par effet Joule au rotor ;

La variation d'énergie magnétique rotorique ;

L'énergie dW_{mec} transformable en énergie mécanique.

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant s'obtient en divisant le troisième terme de l'équation (II-7) par : $\Omega_s dt$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds})
 \tag{II-12}$$

Le couple mécanique s'obtient en divisant le dernier terme de (II-9) par $\Omega_r dt$:

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) = \frac{3}{2} p (\phi_{qr} I_{dr} - \phi_{dr} I_{qr}) = C_r + J \frac{d\Omega_r}{dt} + f \Omega_r
 \tag{II-13}$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques en fonction des inductances, on vérifie que :

$$C_{mec} = C_{em} = \frac{3}{2} p M_{sr} (I_{dr} I_{qs} - I_{qr} I_{ds})
 \tag{II-14}$$

Cette relation très importante met en évidence le fait que le couple résulte de l'interaction de composantes des courants statoriques et rotoriques en quadrature [16, 17].

II.5.5 Equations de la machine asynchrone en régime permanent

Le modèle de la machine asynchrone en régime permanent sera obtenu en annulant, dans les équations précédentes, les dérivés par rapport au temps et les tensions rotoriques V_{dr}, V_{qr} . De plus en remplaçant les différents flux par leurs équations respectives données en fonction des courants on obtient :

$$V_{qs} = r_s I_{qs} + L_s \omega_s I_{ds} + L_m \omega_s I_{dr}
 \tag{II.15}$$

$$V_{ds} = r_r I_{ds} - L_s \omega_s I_{qs} - L_m \omega_s I_{qr}
 \tag{II.16}$$

$$0 = r_r I_{dr} - L_r \omega_r I_{qr} - L_m \omega_r I_{qs}
 \tag{II.17}$$

$$0 = r_r I_{qr} + L_r \omega_r I_{dr} + L_m \omega_r I_{ds}
 \tag{II.18}$$

Les équations (II.12) à (II.15) peuvent être ramenées à deux : une au rotor et une autre au stator.

En introduisant les phasors tensions et courants $\bar{V}; \bar{V}_r; \bar{I}_s$ et \bar{I}_r données par :

$$\bar{V}_s = V_{sd} + j V_{sq}
 \tag{II.19}$$

$$\bar{I}_s = I_{sd} + j I_{sq}$$

(II.20)

$$\bar{I}_r = I_{rd} + j I_{rq}
 \tag{II.21}$$

De même on posera :

$$X_s = L_s \omega_s \tag{II.22}$$

$$X_r = L_r \omega_s \tag{II.23}$$

$$X_m = L_m \omega_s \tag{II.24}$$

$$i_r = g i_s \tag{II.25}$$

Des calculs intermédiaires simples nous permettent d'aboutir à deux équations, l'une au stator et l'autre au rotor, qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone en régime permanent.

Ces deux équations sont données par :

$$\bar{V}_s = (R_s + jX_s)\bar{I}_s + jX_m\bar{I}_r \tag{II.26}$$

$$0 = jX_m\bar{I}_s + \left(\frac{R_r}{g} + jX_r\right)\bar{I}_r \tag{II.27}$$

Sous forme matricielle ces équations sont données par :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + jX_s & jX_m \\ jX_m & \frac{R_r}{g} + jX_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \end{bmatrix} \tag{II.28}$$

➤ **Schémas équivalents**

Le système d'équation précédent peut être traduit par un schéma équivalent dit : schéma aux inductances couplées et qui donné par la (figure 2.4).

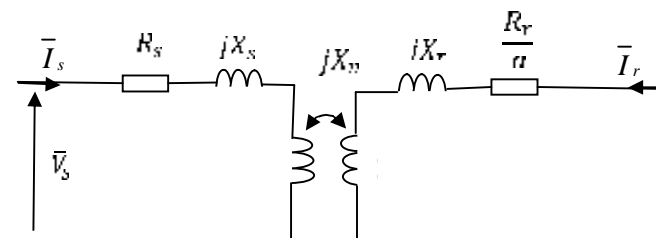


Figure 2.4 : Schéma équivalent aux inductances couplées de MAS

➤ **Schéma équivalent ramené au stator**

Le schéma équivalent de la (figure 2.4) est rarement utilisé en électrotechnique. On préfère souvent adopter le schéma équivalent où toutes les grandeurs sont ramener au stator. Cette représentation serait obtenue en introduisant, au niveau des grandeurs rotoriques, le rapport de transformation rotor-stator défini par $a = X_s / X_m$.

On posera alors :

$$\bar{I}_r = \bar{I}_r / a : \text{ Courant rotorique ramené au stator}$$

$$\bar{V}_s = (R_s + jX_s)\bar{I}_s + jX_s\bar{I}_r \tag{II.29}$$

$$0 = jX_m\bar{I}_s + \left(\frac{R_r}{g} + jX_r\right)\frac{X_s}{X_m}\bar{I}_r \tag{II.30}$$

Après développement et arrangement des équations (II-27) et (II- 28) on obtient :

$$\bar{V}_s = R_s\bar{I}_s + jX_s(\bar{I}_s - \bar{I}_r) \tag{II.31}$$

$$0 = jX_m \bar{I}_s - \frac{R_r X_s}{g} \bar{I}_r + j \frac{X_r X_s}{X_m} \bar{I}_r \tag{II.32}$$

En multipliant l'équation (II- 30) par $a = X_s / X_m$ on obtient :

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + jX_s (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \tag{II.33}$$

$$0 = jX_s \bar{I}_s - \frac{R_r}{g} \left(\frac{X_s}{X_m}\right)^2 \bar{I}_r - jX_r \left(\frac{X_s}{X_m}\right)^2 \bar{I}_r \tag{II.34}$$

En ajoutant puis en retranchant à l'équation (II- 32) le terme $jX_s \bar{I}_r$, on obtient :

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s - jX_s (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \tag{II.35}$$

$$0 = jX_s (\bar{I}_s + \bar{I}_r) + \frac{R_r}{g} \left(\frac{X_s}{X_m}\right)^2 \bar{I}_r + jX_r \left(\frac{X_s}{X_m}\right)^2 \bar{I}_r - jX_s \bar{I}_r \tag{II.36}$$

L'équation (II-32) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + jX_s (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \tag{II.37}$$

$$0 = jX_s (\bar{I}_s - \bar{I}_r) + \frac{R_r}{g} \left(\frac{X_s}{X_m}\right)^2 \bar{I}_r + j \left(\frac{X_s}{X_m}\right)^2 \sigma X_r \bar{I}_r \tag{II.38}$$

On posera :

$R_r' = \left(\frac{L_s}{L_m}\right)^2 R_r = a^2 R_r$: Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator

$X_{\sigma}' = \left(\frac{X_s}{X_m}\right)^2 \sigma X_r = a^2 \sigma X_r$: Résistance de fuite totalisée au stator.

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$: Coefficient de dispersion

Finalement les deux équations (II-34) et (II-35) s'écrivent :

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + jX_s (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \tag{II.39}$$

$$0 = \frac{R_r'}{g} \bar{I}_r + jX_{\sigma}' \bar{I}_r + jX_s (\bar{I}_s + \bar{I}_r) \tag{II.40}$$

L'équation (II-35) et (II- 36) peuvent êtres réécrites sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + jX_s & jX_s \\ jX_s & \frac{R_r'}{g} + jX_s + jX_{\sigma}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \end{bmatrix} \tag{II.41}$$

On aboutit alors au schéma équivalent classique suivant :

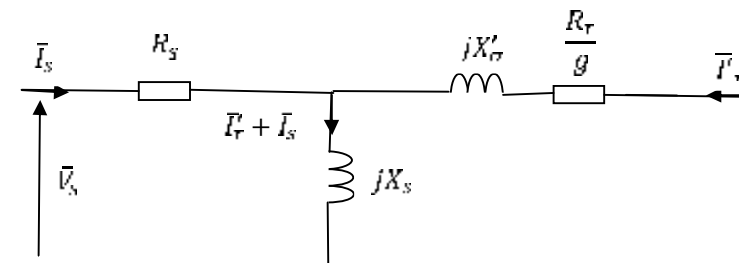


Figure 2.5: Schéma équivalent ramené au stator de la MAS

En négligeant la résistance statorique R_s , on obtient le schéma équivalent simplifié suivant :

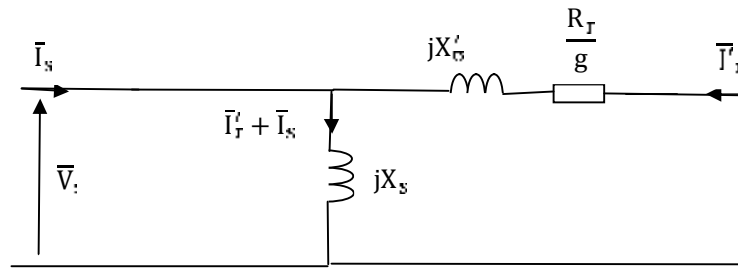


Figure 2.6 : Schéma équivalent par phase de la MAS

❖ Expression des courants \bar{I}_s et \bar{I}_r

A partir du schéma équivalent simplifié précédent, on peut écrire :

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{jX_s // (R_r/g - jX'_\sigma)} = \frac{R_r + jgX_s + jgX'_\sigma}{gX_s^2 + jX_s(R_r + jgX'_\sigma + jgX_s)} \bar{V}_s \tag{II.42}$$

$$\bar{I}_r = \frac{jX_s // (R_r/g - jX'_\sigma)}{R_r/g - jX'_\sigma} \bar{I}_s = \frac{-jgX_s}{gX_s^2 - jX_s(R_r + jgX'_\sigma + jgX_s)} \bar{V}_s \tag{II.43}$$

$$|\bar{I}_r|^2 = \frac{g^2 V_s^2 X_s^2}{(R_r X_s)^2 + (g X'_\sigma X_s)^2} = \frac{g^2 V_s^2}{g^2 X_\sigma'^2 - R_r^2} \tag{II.44}$$

On déduit que le couple électromagnétique développé par la machine asynchrone est donnée par l'expression suivante :

$$P_{em} = C_{em} \Omega_s = 3 \frac{R_r}{g} |\bar{I}_r|^2 = 3 \frac{R_r}{g} \frac{g^2 V_s^2}{g^2 X_\sigma'^2 - R_r^2} \tag{II.45}$$

$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = 3 \frac{R_r}{g \Omega_s} \frac{g^2 V_s^2}{g^2 X_\sigma'^2 + R_r^2}$; On multipliant par $(\frac{\Omega_s}{\Omega_s})$ et on obtient :

$$C_{em} = 3 R_r p^2 \phi_s^2 \frac{g \Omega_s}{g^2 X_\sigma'^2 + R_r^2} \tag{II.46}$$

Avec $\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ et $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$.

La machine asynchrone fonctionne très souvent dans la zone des faibles glissements, par conséquent, la relation $g^2 X_\sigma'^2 \ll R_r^2$ est souvent vérifiée, alors le couple devient en fonction de la vitesse de rotation Ω est une droite qui s'écrit de la façon simplifiée suivante :

$$C_{em} = \frac{3 p^2 \Phi_s^2}{R_r} (\Omega_s - \Omega) = \frac{\pi p^2 \phi_s^2}{10 R_r} (N_s - N) \tag{II.47}$$

$$\Omega_r = \Omega_s - \Omega$$

Avec $\Omega_r = g \Omega_s$

$$\Omega = \frac{2\pi N}{60}$$

- Dans le cas du fonctionnement moteur ($C_e > 0$) :
La vitesse de rotation Ω est inférieure à la vitesse synchrone Ω_s : ($\Omega < \Omega_s$)
- Dans le cas du fonctionnement générateur ($C_e < 0$) :
La vitesse de rotation Ω est supérieure à la vitesse synchrone Ω_s : ($\Omega > \Omega_s$)

II.6 Simulation :

La figure (2.7) présente le schéma bloc de la machine asynchrone triphasée de 3Kw sous MATLAB /SIMULINK. A noter que les paramètres de la machine utilisés sont donnés en annexe.

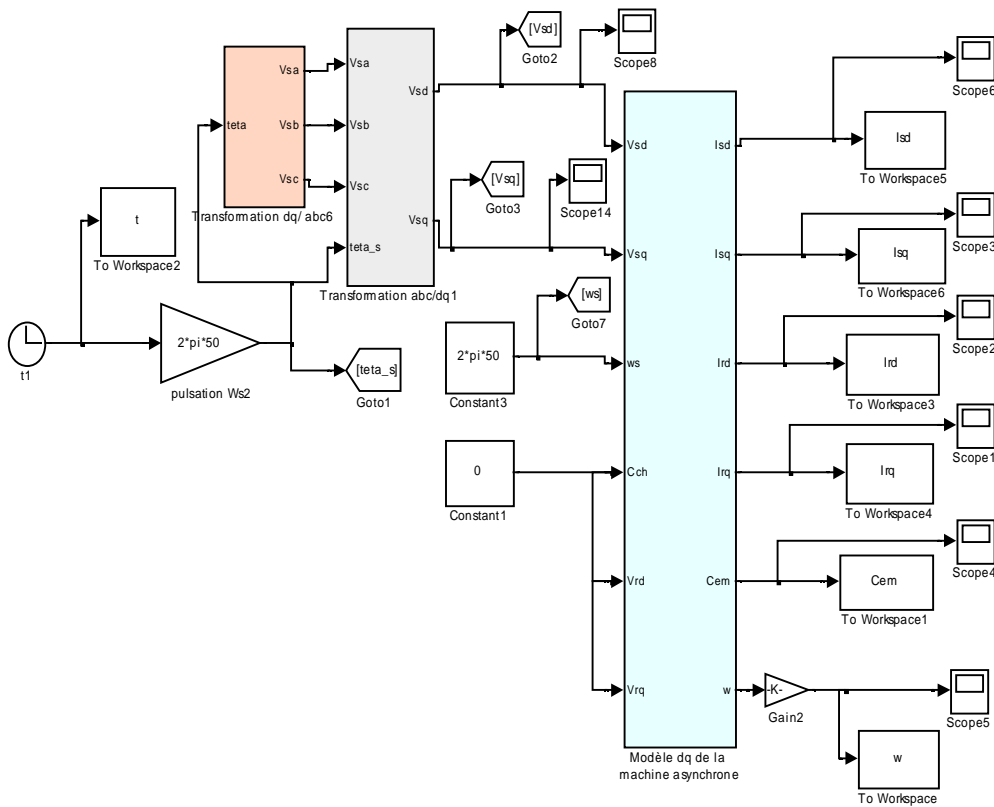
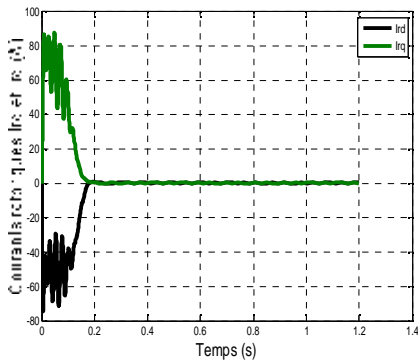
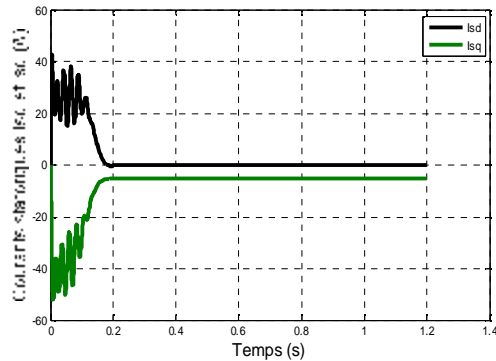


Figure 2.7: Schéma bloc sous MATLAB /SIMULINK de la machine asynchrone à vide alimentée au stator par un réseau triphasé équilibré

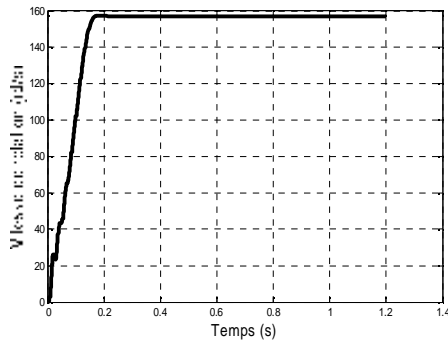
II.6.1 Résultats de simulation de la MAS à vide :



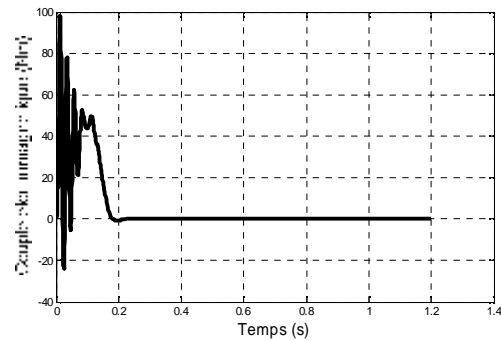
(a) : Les courants rotoriques d'axes d et q.



(b) : Les courants statoriques d'axes d et q.



(c) : La vitesse de rotation



(d) : Le couple électromagnétique

Figure 2.8 : Résultats de simulation de la MAS

II.6.2 Interprétation des résultats obtenus :

Pour le fonctionnement de la MAS à vide, les résultats de la simulation obtenus montrent :

- ✓ Dans le régime transitoire, la machine consomme des courants importants, et présente des oscillations considérables, pour qu'elle puisse démarrer, puis décroît aux faibles courants nécessaires à la magnétisation de cette dernière.
- ✓ La vitesse de rotation s'approche de la valeur du synchronisme dans un instant très court (le temps de réponse), puis elle se stabilise.
- ✓ Le couple électromagnétique présente un pic important et des oscillations au régime transitoire pour vaincre le couple d'inertie au départ, avant de se stabiliser par la suite autour de zéro du moment qu'on a négligé les pertes mécanique.

II.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, l'étude de la machine asynchrone (MAS) Dans la première partie on a donné la représentation mathématique de la machine asynchrone à travers des équations simples à l'aide de la transformation du Park qui nous a simplifié notre système, tout en tenant compte des hypothèses simplificatrices. Dans la seconde partie on a étudié les équations de puissance, le couple et les équations d'une MAS en régime permanent. Enfin, on terminera ce chapitre par la simulation d'une MAS à vide et l'interprétation ces résultats. Les résultats obtenus sont satisfaisants, ils répondent bien à l'évolution d'une opération d'un démarrage à vide de la machine asynchrone alimentée en tension.

CHAPITRE III

Générateur asynchrone à vitesse fixe et vitesse variable

III.1. Etude du générateur à vitesse fixe :

La génératrice asynchrone à cage est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie éolienne à vitesse fixe. Son principal intérêt réside dans l'absence de contacts électriques par balais-collecteurs, ce qui conduit à une structure simple, robuste et facile à construire.

III.1.1 Principe de fonctionnement

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice (figure 3.1).

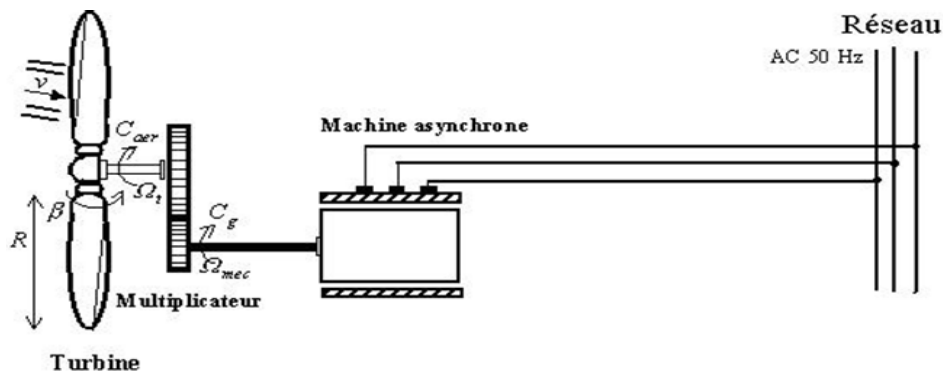


Figure 3.1 : Eolienne directement connectée au réseau

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est l'égerment supérieure à la vitesse du synchronisme $N_s = 1500tr/mn$, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la vitesse du rotor de l'éolienne à celle du rotor de la génératrice.

On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables.

III.1.2 Les éoliennes à décrochage aérodynamique

Les éoliennes à décrochage aérodynamique (stall) génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond en générale à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent (figure 3.2) [19].

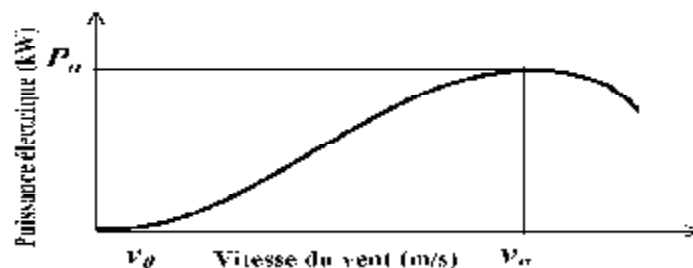


Figure 3.2 : Génération à puissance électrique variable (pales fixes, décrochage aérodynamique) [38]

On définit :

- P_n , la puissance nominale de l'éolienne.
- v_0 , la valeur de vitesse pour laquelle le rotor de la turbine commence à tourner.
- v_n , la valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte.

Pour obtenir cette caractéristique de puissance, les pales (fixes) sont conçues avec un profil qui permet d'obtenir une décroissance brusque de la portance à partir d'une vitesse donnée pour laquelle la puissance doit être diminuée. Au delà de cette vitesse de vent, la puissance diminue très rapidement et un fonctionnement à puissance nominale constante n'est donc pas possible.

Pour les machines de fortes puissances, on trouve également le système " Stall actif ".[38]

Le décrochage aérodynamique est alors obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pales étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux que le système à orientation des pales qui est maintenant présenté.

III.1.2.1 Les Eoliennes à pales orientables

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent supérieure à v_n (figure 3.3).

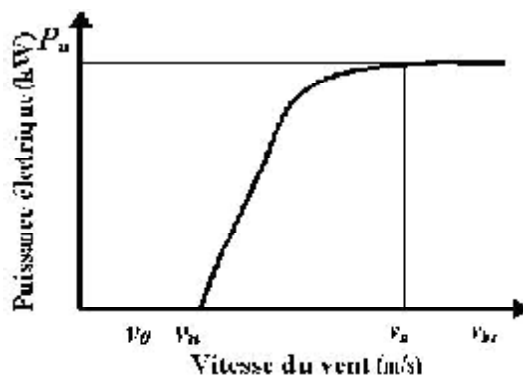


Figure 3.3 : Génération à puissance électrique constante (pâles orientables)

Avec :

- v_n , la vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.
- v_{br} , la valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

III.1.3 Exemple d'étude d'une turbine éolienne

III.1.3.1 Expression analytique de la courbe du coefficient de puissance utilisé :

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [6], [33].

La figure (3.4) montre l'évolution du coefficient de puissance en fonction de λ . Le tracé peut être obtenu expérimentalement sur plusieurs mesures. Suite à ces observations, nous avons alors fixé sa valeur maximale à 0,41 et ses variations sont modélisées par l'approximation polynomiale suivante:

$$C_p(\lambda) = -0.000151585.\lambda^4 - 0.0031283.\lambda^3 - 0.043818.\lambda^2 - 0.34489.\lambda - 0.5717 \quad [36] \quad (III-1)$$

Chapitre III Générateur asynchrone à vitesse fixe et à vitesse variable

La courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt} = 6.6, C_{pmax} = 0.41$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. La caractéristique de la puissance est déterminée en fonction de la vitesse de rotation de la turbine, pour une vitesse du vent donnée.

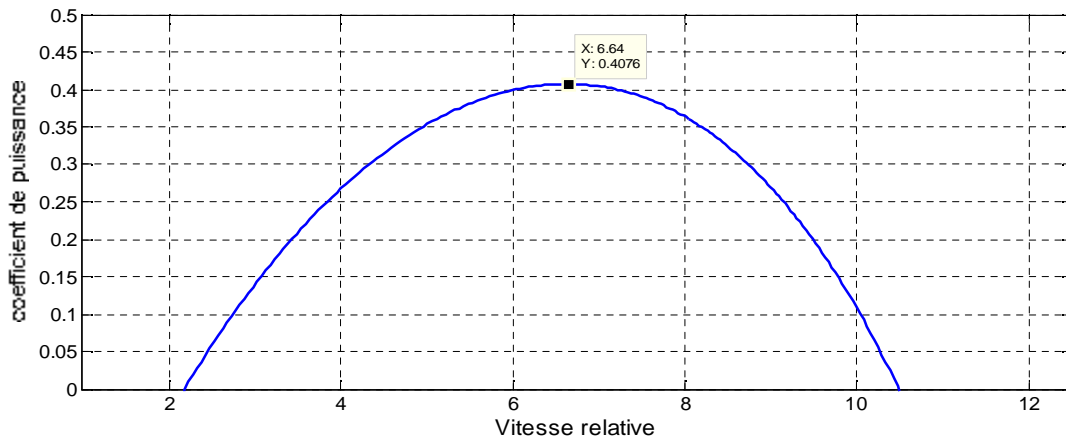


Figure 3.4 : Exemple de coefficient de puissance d'une turbine éolienne de 3Kw

Nous allons représenter un réseau de caractéristiques de la puissance et du couple éolien en fonction de la vitesse rotation de la génératrice, le paramètre étant la vitesse du vent qui varie entre 3 et 6m/s.

III.1.3.2 Calcul de la puissance maximale de la turbine

La puissance cinétique P_v véhiculée par le vent soufflant à une vitesse v est :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 = \frac{1}{2} \rho (\pi R^2) v^3 \quad (\text{III-2})$$

Un vent v est appliqué sur les pales de l'éolienne. Il a pour effet de créer la mise en rotation de l'éolienne et une puissance mécanique sera transmise à l'arbre de la turbine.

Selon la théorie de Betz, la puissance maximale théorique $P_{th\ max}$ que peut capter la turbine éolienne est : $P_{th\ max} = C_{p\ max} P_v$ (III-3)

Pour évaluer cette puissance on utilise généralement la courbe qui est propre à chaque turbine éolienne. Le coefficient de puissance est donné en fonction de λ Correspondant à $C_{p\ max}$ est : sachant que :

$$\lambda = \frac{v_t}{v} = \frac{\Omega_t R}{v} \quad , \quad \lambda_{opt} = \frac{\Omega_{t\ opt} R}{v} \quad (\text{III-4})$$

Sur la figure 3.4 on peut lire $C_{p\ max} = 0.41$; $\lambda_{opt} = 6.6$

A partir de l'équation (III-4) on tire la vitesse de rotation de la turbine (rad/s) qui est :

$$\Omega_{t\ opt} = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \quad (\text{III-5})$$

À la sortie du multiplicateur elle vaut :

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{K} \quad (\text{III-6})$$

K : Le gain de multiplicateur.

III.1.3.3 Calcul du couple mécanique produit par la turbine :

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique $C_{t \max}$ disponible sur l'arbre de la turbine peut donc s'exprimer par :

$$C_{t \max} = \frac{P_{t-\max}}{\Omega_t} \quad (\text{III-8})$$

Le couple à la sortie du multiplicateur :

$$C'_{t \max} = \frac{C_{t \max}}{K} \quad (\text{III-9})$$

III.1.4 Partie mécanique de l'éolienne

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_t , relié à un multiplicateur de gain K . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique. Les trois pales sont considérées de conception identique. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. On peut alors considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques comme nous le montre la (Figure 3.5)

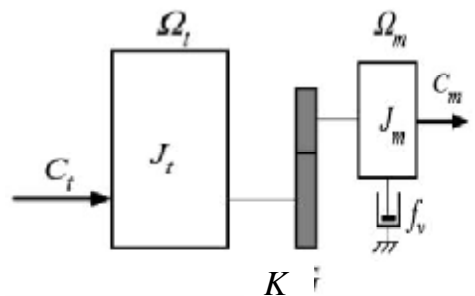


Figure 3.5 : Partie mécanique de l'éolienne

III.1.4.1 Zones de fonctionnement

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent comme le montre la figure suivante :

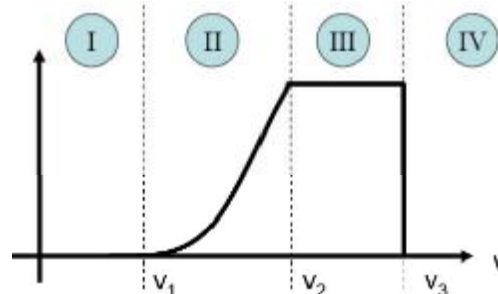


Figure 3.6: Zones de fonctionnements

Chapitre III Générateur asynchrone à vitesse fixe et à vitesse variable

V_1 : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_1 varie entre 2.5m/s et 4m/s pour éoliennes de forte puissance.

V_2 : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, V_2 varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

V_3 : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenues mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_3 vaut 25m/s.

Zone I : $V < V_1$:

La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : $V_1 < V < V_2$:

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle

Zone III : $V_2 < V < V_3$:

La puissance disponible devient trop importante ; la puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge (P_c).

Zone IV : $V > V_3$:

La vitesse du vent devient trop forte ; la turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

III.1.5 Caractéristiques de puissances de la turbine à des vitesses différentes:

A partir de schéma bloc de la (figure 3.7) on obtient les différentes caractéristiques de la turbine pour dans le cas des données nominales suivantes : $P_n = 3Kw$, $R = 4.5m$, $K = 24$ $\rho = 1.2 Kg/m^3$.

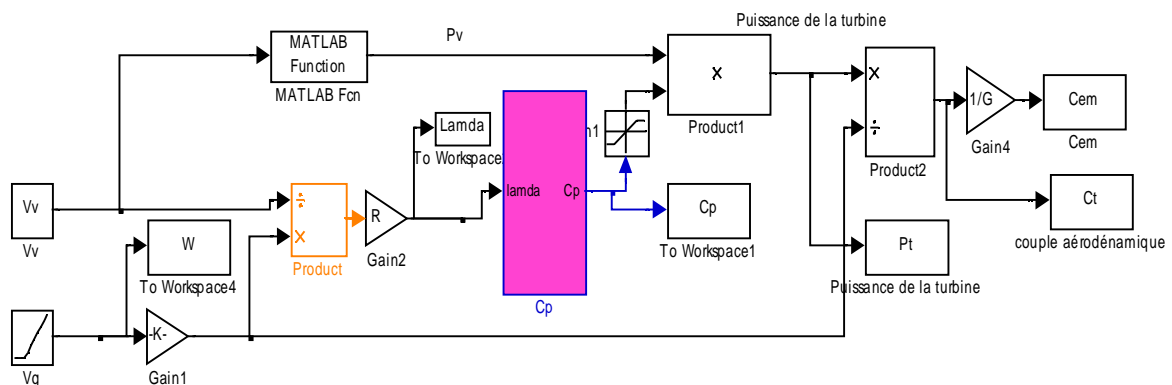


Figure 3.7 : Schéma bloc de la turbine éolienne sous MATLAB /SUMULINK.

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de la courbe de puissance pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie : Maximum power Point Tracking (MPPT) sera mise au point. La stratégie de la M.P.P.T consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de rotation de manière à maximiser la puissance électrique générée.

Nous présentons sur la (figure 3.8) et (figure 3.9), l'évolution de la puissance mécanique et du couple de la turbine en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour différentes valeurs de la vitesse du vent. On constate que la puissance de la turbine varie en fonction de la vitesse du vent, ainsi que pour le couple mécanique de la turbine.

La puissance mécanique de la turbine à l'égard du couple mécanique représente des maxima, le maximum de la puissance de la turbine pour une vitesse du vent donné correspond au coefficient de puissance optimal qui est $C_p = 0.41$.

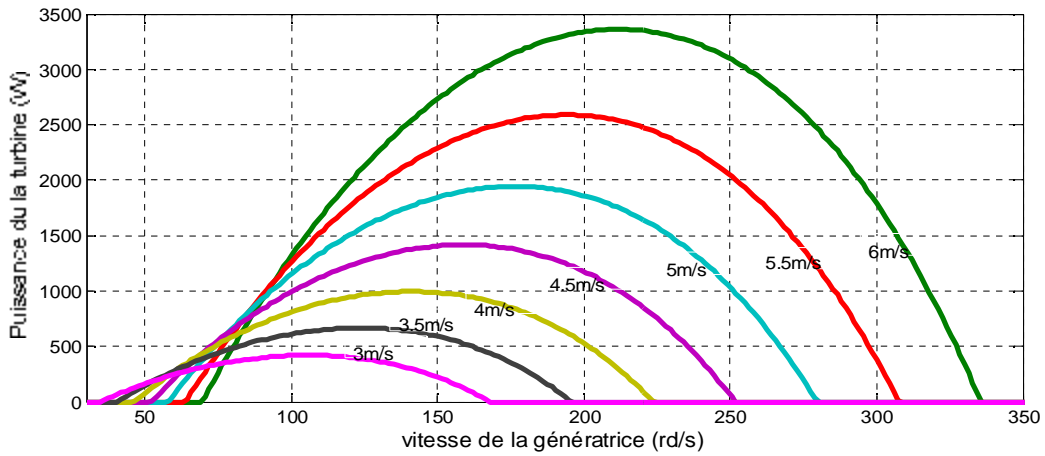


Figure 3.8 : l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse de génératrice

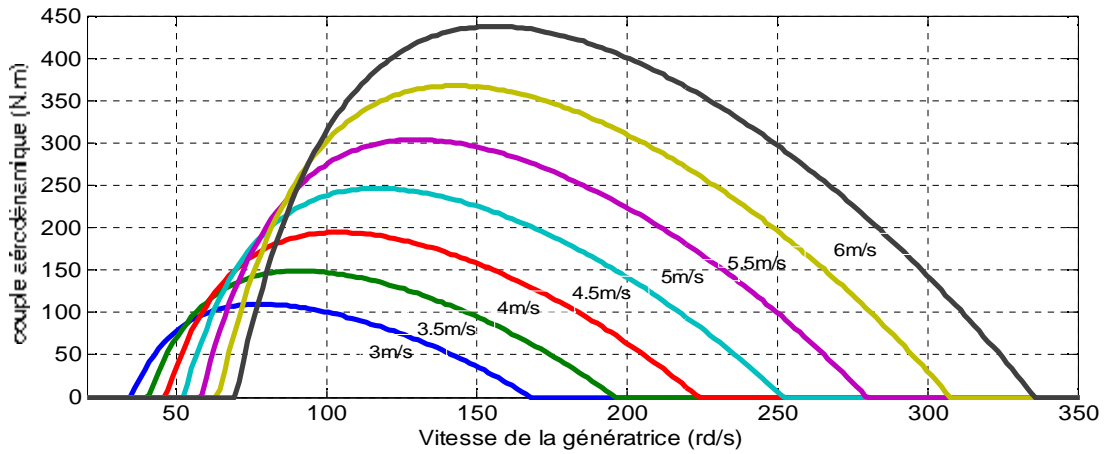


Figure 3.9 : l'évolution du couple de la turbine en fonction de la vitesse de génératrice

Le couple et la puissance sont deux notions différentes, par ailleurs, On constate de la (figure 3.10) et (figure 3.11) que la maximum de couple pour une vitesse donnée ne correspond pas au maximum de la puissance pour cette même vitesse. Donc une courbe du couple optimale peut être obtenue à partir de l'équation (III-9), pour extraire au mieux la puissance maximale du vent.

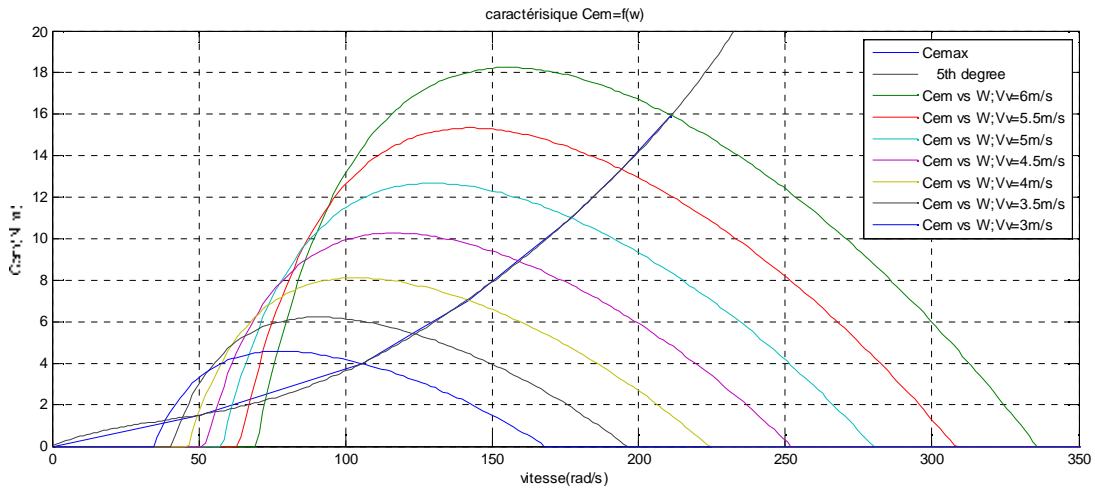


Figure 3.10 : l'évolution du couple max de la turbine en fonction de la vitesse de génératrice

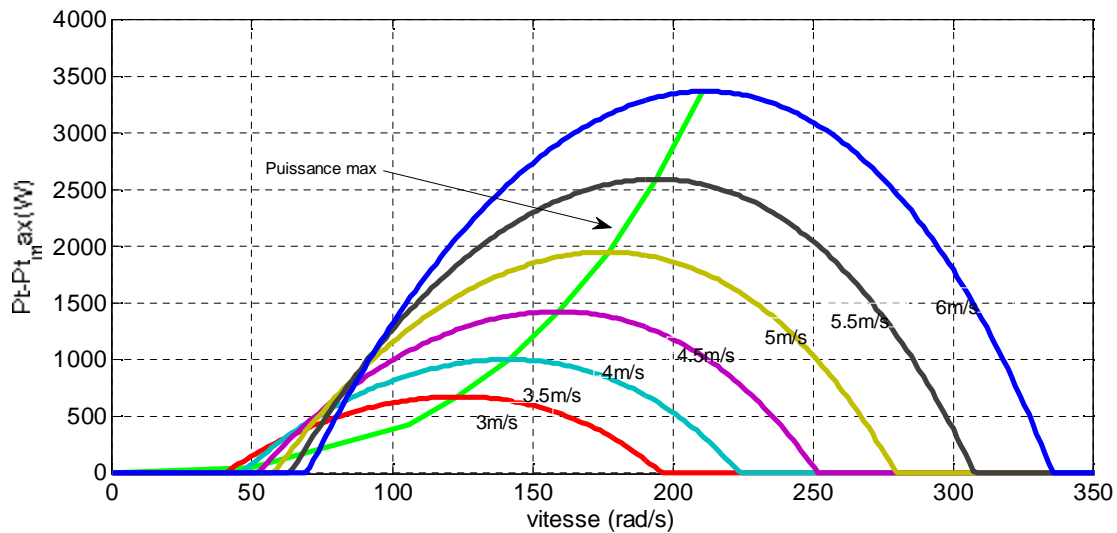


Figure 3.11 : l'évolution de la puissance maximum en fonction de la vitesse de génératrice

La (figure 3.11) décrit la courbe caractéristique d'un contrôle dit *MPPT*, présentant la puissance produite par la génératrice de notre éolienne en fonction de la vitesse du vent, les courbes correspondent à la puissance produite pour différents angles de calage des pales. On remarque que la commande MPPT oriente les pales, en fonction de la vitesse du vent, afin de maximiser la puissance produite.

III.1.5.1 Etude du générateur asynchrone couplé à la turbine éolienne :

On veut à présent déterminer les points de fonctionnement couple-vitesse du système pour différentes vitesse du vent.

III.1.5.1.1 Les points de fonctionnement du système

Les points de fonctionnement du système dans le plan couple-vitesse, pour différentes vitesses du vent v , sont donnés par l'intersection de la caractéristique de la turbine éolienne $C'_t(N)$ avec la caractéristique mécanique $C_{em}(N)$ de la génératrice asynchrone c'est-à-dire $C_{em}(N) = C'_t(N)$

L'expression $C'_t(N)$ peut s'écrire à partir des équations (III-8), (III-7) et (III-6) en fonction de la vitesse de la génératrice comme suit :

$$C'_t(N) = \frac{C_t}{K} = \frac{P_t}{\Omega_s K} = \frac{60P_t}{2\pi N}$$

Alors que le couple électromagnétique de la MAS est donné par l'équation (II-44) on a :

$$C_{em}(N) = \frac{P^2 \pi \phi_s^2}{10R_r} (N_s - N)$$

Les points de fonctionnement du système éolien seront obtenus par la résolution de l'égalité $C_{em}(N) = C'_t(N)$. Graphiquement en traçant les deux caractéristiques des points de fonctionnement du système pour différentes vitesses du vent.

Chapitre III Générateur asynchrone à vitesse fixe et à vitesse variable

Le tableau suivant représente les résultats de calcul qui nous a permis de tracer les points de fonctionnement de la génératrice pour plusieurs vitesses de vents.

$v(m/s)$	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
$P_t(W)$	142.48	530.57	954.8	147.3	1915.6	2444.5	2995
$C_t'(N.m) = \frac{P_t}{\Omega}$	0.91	3.335	5.98	8.8	11.805	14.95	18.156
$C_{em}(N.m)$	-0.8889	-3.33	-5.965	-8.79	-11.8	-14.93	-18.14

Tableau 3.1 : résultats de calcul pour des vitesses de vent allant de 3 à 6 m/s

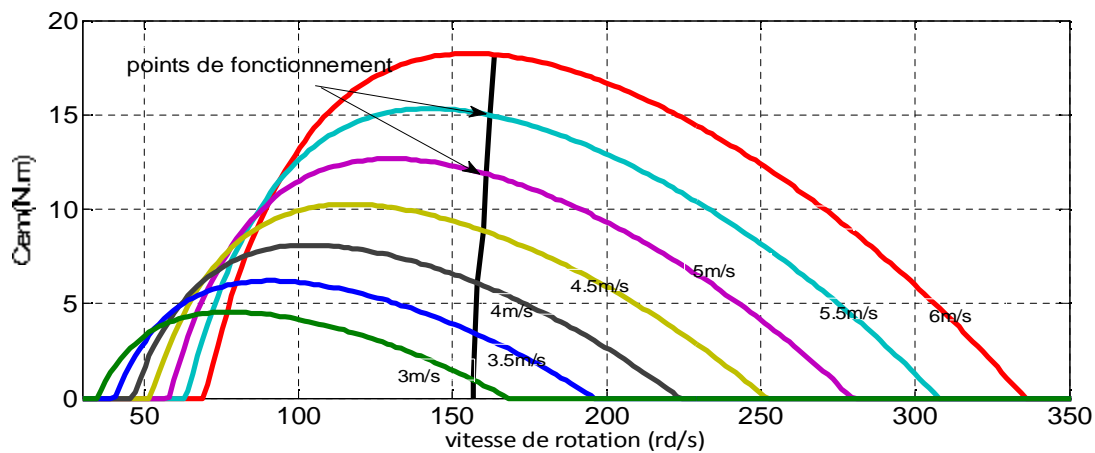


Figure 3.12 : caractéristique de couple-vitesse avec les points de fonctionnement

III.1.5.2 Etude du rendement de l'installation:

Pour évaluer les performances du système pour différentes vitesses du vent v , on va tracer le rendement global η de l'installation en considérant le rapport entre la puissance électrique P_g renvoyé et la puissance véhiculée par le vent P_v

$$\eta(v) = \frac{P_g}{P_v} = \frac{1}{2} \frac{f^3 (\pi r^2) v}{C_t' \Omega_s} \quad (\text{III-11})$$

Chapitre III Générateur asynchrone à vitesse fixe et à vitesse variable

D'après les résultats obtenus dans le (tableau 3.2) on a tracé la courbe du rendement $\eta(v)$ de l'installation

$v(m/s)$	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
$P_t(W)$	142.48	530.57	954.8	147.3	1915.6	2444.5	2995
$C_t(N.m) - \frac{P_t}{\Omega}$	0.91	3.335	5.98	8.8	11.805	14.95	18.156
$C_{em}(N.m)$	-0.8889	-3.33	-5.965	-8.79	-11.8	-14.93	-18.14
$\Omega(rd/s)$	157.48	158.6	159.80	160.9	162.25	163.6	165
$P_g - C_t \frac{2\pi N_s}{60}$	142.03	525.63	938.5	1392.5	1853.57	2345.8	2850.7
$P_v(W) = \frac{1}{2} \rho (\pi r^2) v^3$	1030.6	1636.55	2442.9	3475.28	4771.2	6350.6	8244.8
$\eta \frac{P_g}{P_v}$	0.1378	0.3212	0.3842	0.3974	0.3885	0.3694	0.3456

Tableau 3.2 : résultats de calcul pour des vitesses

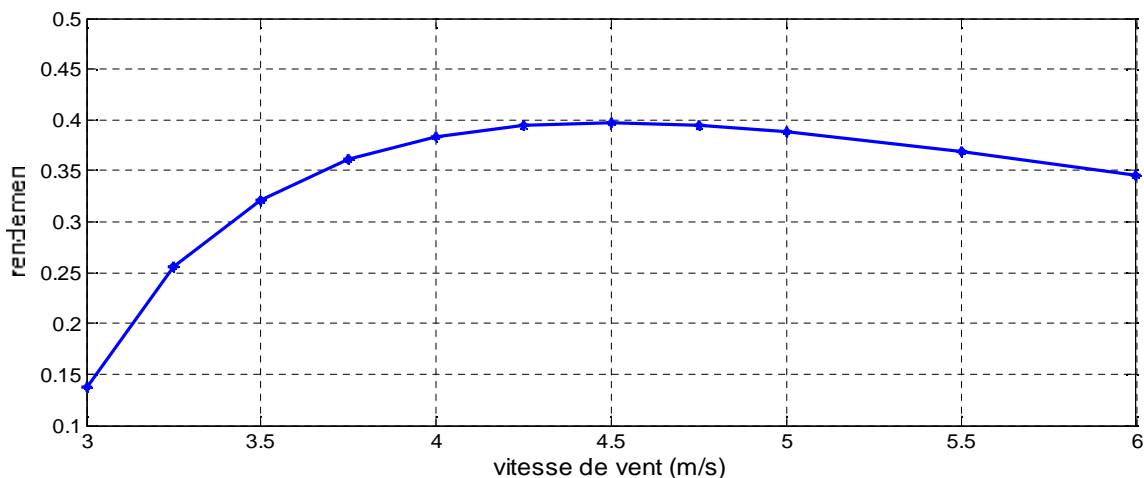


Figure 3.13 : rendement de l'installation

❖ Remarque :

On remarque que le rendement augmente jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur 0.4 qui correspond à la vitesse du vent 4.5 m/s puis diminue, ce qui montre que le système est sur le point de fonctionnement.

III.2 Etude du générateur à vitesse variable :

La génératrice asynchrone à cage peut fonctionner à vitesse variable grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance, et peut générer une production de puissance électrique sur une vaste gamme de vitesse du vent. Une adaptation constante est ainsi possible entre la puissance aérodynamique et le réseau de distribution.

III.2.1 Principe

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la (figure 3.14). La configuration de la (figure 3.14-a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la (figure 3.14-b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

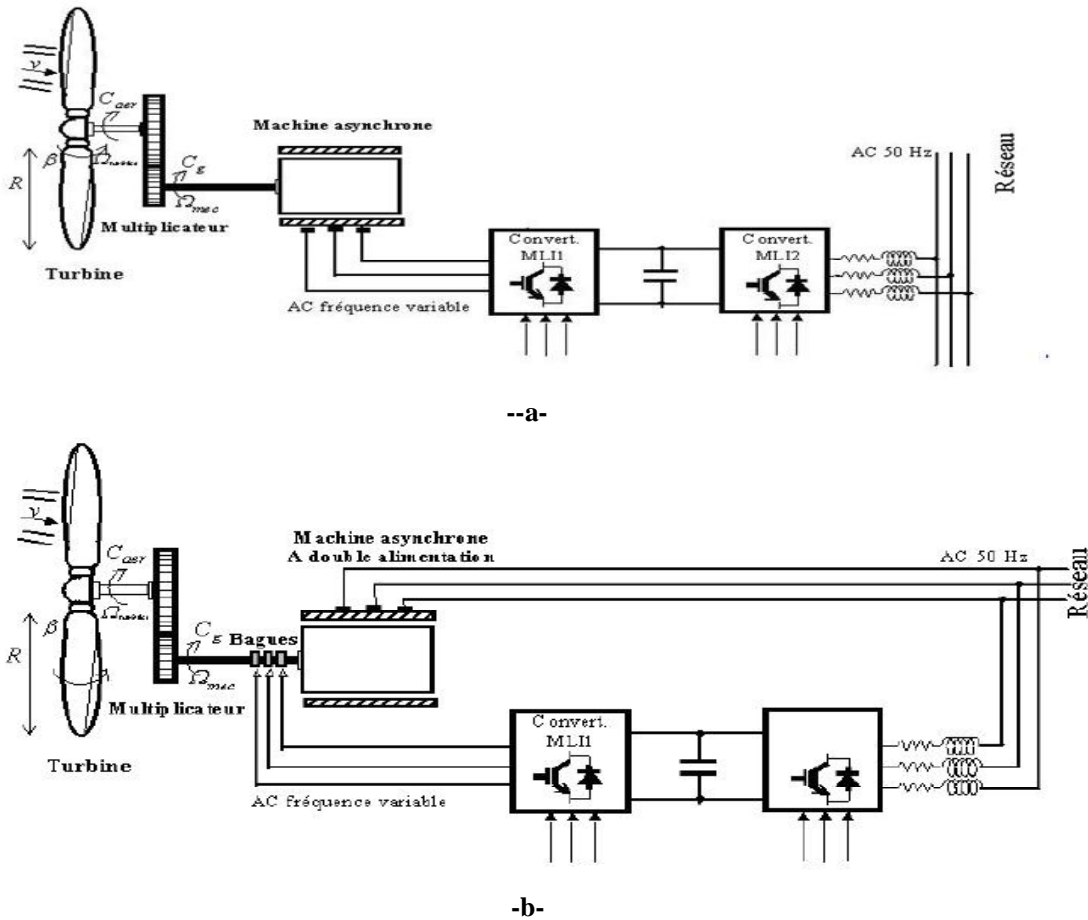


Figure 3.14 : Eoliennes à vitesse variable

III.2.2 Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la (figure 3.15).

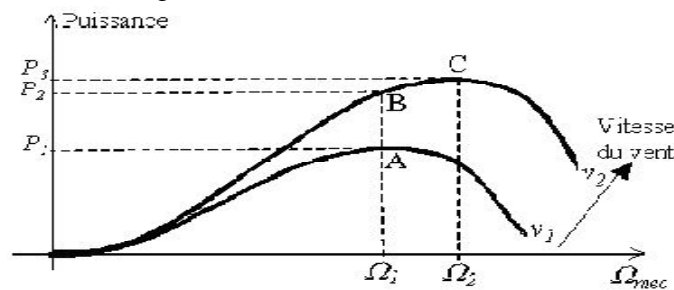


Figure 3.15 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 ; on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée. Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence (Ω_{ref}) calculée pour maximiser la puissance extraite.[39]

III.2.3 Insertion d'un convertisseur coté stator et amélioration du rendement :

Pour améliorer le rendement du système éolien et extraire le maximum de puissance quelque soit la vitesse du vent, il faut adapter la vitesse du générateur de telle sorte que le rapport des vitesses $(\lambda - \frac{v_t}{v} - \frac{\Omega_t \cdot R}{v})$ soit toujours égal à λ_{opt} autrement dit de travailler toujours à C_{pmax} . Pour cela on est amené à insérer un convertisseur (onduleur MLI + redresseur MLI) du côté statorique de la machine qui permettra de varier la fréquence statorique et par conséquent la vitesse de rotation du générateur. Le schéma d'une telle installation est donné à la (figure 3.14-a).

III.2.3.1 fonctionnement à puissance mécanique maximale

La caractéristique de la turbine éolienne en fonctionnement à puissance mécanique maximale $P_{t_max}(N)$ est donnée par :

$$P_{t_max} = C_{pmax} \cdot P_v = C_{pmax} \cdot \frac{1}{2} \rho (\pi R^2) v^3 \quad (III-12)$$

Sachant que la vitesse du vent est donnée par :

$$v = \frac{\Omega_t R}{\lambda_{opt}} \quad (III-13)$$

On remplace (III-13) dans (III-12) est on obtient :

$$P_{t_max} = C_{pmax} \cdot \frac{1}{2} \rho (\pi R^2) \left(\frac{\Omega_t R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \quad (III-14)$$

En remplaçant la vitesse de rotation de la turbine par $\Omega_t = \frac{\Omega}{K} = \frac{2\pi N}{60K}$ on obtient :

$$P_{t_max} = C_{pmax} \cdot \frac{1}{2} \rho (\pi R^2) \frac{\Omega_t^3}{K^3 \lambda_{opt}^3} = C_{pmax} \cdot \frac{1}{2} \rho (\pi^4 R^5) \frac{8N^3}{60^3 K^3 \lambda_{opt}^3} = C_{pmax} \cdot \frac{\rho (\pi^4 R^5)}{54000 K^3 \lambda_{opt}^3} N^3 \quad (III-15)$$

$$P_{t_max} = AN^3 \quad (III-17)$$

Tel que :

$$A = C_{pmax} \cdot \frac{\rho (\pi^4 R^5)}{54000 K^3 \lambda_{opt}^3}$$

III.2.3.2 Couple C'_{t_max} généré par la turbine en fonction de la vitesse :

Le couple C'_{t_max} généré par la turbine est donnée par :

$$C'_t = \frac{C_{t_max}}{K} \frac{P_{t_max}}{K\Omega} \quad (III-18)$$

On remplace P_{t_max} par son expression on obtient

$$C'_t = C_{p_max} \cdot \rho (\pi^4 R^5) \frac{N^3}{5400 K^3 \lambda_{opt}^3 \Omega} \quad (III-19)$$

Si on remplace $\Omega = \frac{2\pi N}{60}$ dans l'équation de C'_t on aura :

$$C'_t = C_{p_max} \cdot \rho (\pi^4 R^5) \frac{N^2}{1800 K^3 \lambda_{opt}^3} A' N^2 \quad (III-20)$$

Avec :

$$A' = C_{p_max} \cdot \frac{\rho (\pi^4 R^5)}{1800 K^3 \lambda_{opt}^3}$$

III.2.3.3 Fréquence statorique f_s en fonction de la vitesse du vent :

Pour que le générateur fonctionne à puissance maximal, la fréquence f_s à imposer à l'onduleur, en fonction de la vitesse N , doit varier selon une loi bien déterminée.

En utilisant l'égalité en le couple mécanique de la turbine et le couple électromagnétique $C_{em} = C'_{t_max}$ ont obtient :

$$C_{em} = C'_{t_max} \rightarrow A' N^2 = 0.22 (N_s - N) \rightarrow N_s = \frac{N}{0.22} (A' N + 0.22) = N (1 + 18.25 \cdot 10^{-6} N) \quad (III-21)$$

A partir de l'équation (III-23) on peut déterminer la fréquence statorique en fonction de la vitesse de vent, en n remplaçant N et N_s par les ces deux relations :

$$N = \frac{60\Omega}{2\pi} \text{ sachant que } \Omega = \frac{K \lambda_{opt} v}{R} \rightarrow N = \frac{\lambda_{opt} \cdot 60 \cdot v \cdot K}{2\pi R} \rightarrow N = \frac{\lambda_{opt} \cdot 60 \cdot v \cdot K}{2\pi R} \quad (III-22)$$

$$\text{Et } N_s = \frac{60 f_s}{p} \quad (III-23)$$

On obtient :

$$\frac{60 f_s}{p} = \frac{\lambda_{opt} \cdot 60 \cdot v \cdot K}{2\pi R} (1 + 18.25 \cdot 10^{-6} \frac{\lambda_{opt} \cdot 60 \cdot v \cdot K}{2\pi R}) \quad (III-24)$$

Donc l'expression de la fréquence statorique devient :

$$f_s = \frac{p \lambda_{opt} v K}{2\pi R} (1 + 18.25 \cdot 10^{-6} \frac{30 \cdot \lambda_{opt} v \cdot K}{\pi R}) \quad (III-25)$$

Chapitre III Générateur asynchrone à vitesse fixe et à vitesse variable

III.2.3.4 Calcule de la tension V_s en fonction de la vitesse N :

Le principe de la commande scalaire utilisée dans notre cas est de faire varier la vitesse de la machine asynchrone en agissant sur la fréquence des tensions statorique tout en gardant le flux constant. Pour maintenir le flux constant on doit garder dans tous les fonctionnements le rapport constant.

$$\phi_{sn} = \frac{V_s}{\omega_s} = \frac{V_{sn}}{\omega_{sn}} \quad (\text{III-26})$$

On a :

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{2\pi p N_s}{60} \\ N_s = N(1 - 18.25 \cdot 10^{-6} N) \end{cases} \quad (\text{III-27})$$

On remplace les équations (III-29) dans (III-28) on obtient La loi de variation de la tension V_s en fonction de la vitesse N sera donnée par :

$$V_s = \frac{\phi_{sn} p \pi}{30} N_s = \frac{\phi_{sn} p \pi}{30} N(1 - 18.25 \cdot 10^{-6} N) \quad (\text{III-28})$$

On peut également calculer la tension V_s une fois que la fréquence f_s déterminée par la relation :

$$V_s = \phi_{sn} 2\pi f_s \quad (\text{III-29})$$

III.2.3.5 L'expression du rendement :

L'expression du rendement en fonction de la vitesse du vent est donnée par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_g}{P_v} = \frac{C_t \frac{2\pi N_s}{60}}{\frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3} = \frac{C_t N_s}{15 \rho r^2 v^3} \quad (\text{III-30})$$

Chapitre III Générateur asynchrone à vitesse fixe et à vitesse variable

Exemple : vitesse du vent à $3m/s$.

D'après les équations précédentes, on calcul :

✓ Le flux :

$$\phi_{sn} = \frac{V_s}{\omega_s} = \frac{V_{sn}}{\epsilon \omega_{sn}} = \frac{220}{314} = 0.7 = \text{Constante}$$

✓ La fréquence statorique :

$$f_s = \frac{p \lambda_{opt} v K}{2\pi R} \left(1 - 18,25 \cdot 10^{-6} \frac{30 \lambda_{opt} v K}{\pi R}\right)$$

$$= \frac{2 * (6.1) * 3 * 24}{2 * (3.14) * (4.5)} \left(1 - 18,25 * 10^{-6} \frac{30 * (6.1) * 3 * 24}{(3.14) * (4.5)}\right)$$

$$f_s = 30.55 \text{ Hz}$$

✓ La tension :

$$V_s = \phi_{sn} 2\pi f_s = 0.7 * 2 * (3.14) * 30.55 = 134.3 \text{ Volts}$$

✓ La vitesse de synchronisme :

$$\Omega_s = \frac{2\pi f_s}{p} = \frac{2 * (3.14) * 30.55}{2} = 95.927 \text{ rd/s}$$

✓ La puissance du vent :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 = \frac{1}{2} * (1.225) * (3.14) * (4.5)^2 * (3)^3 = 1051.53 \text{ Watts}$$

✓ La vitesse de la turbine :

$$\Omega_t = \frac{\lambda_{opt} v}{R} = \frac{6.1 * 3}{4.5} = 4.066 \text{ rd/s}$$

✓ Le couple à la sortie de multiplicateur :

$$C'_{t \max} = \frac{C_{p \max} \cdot P_v}{K \Omega_t} = \frac{0.41 * 1051.53}{24 * 4.066} = 4.41 \text{ Nm}$$

✓ Le rendement :

$$\rightarrow \eta = \frac{C'_{t \max} \cdot \Omega_s}{P_v} = \frac{4.41 * 95.927}{1051.53} = 0.4$$

Chapitre III Générateur asynchrone à vitesse fixe et à vitesse variable

D'après la simulation des résultats obtenus dans le (tableau 4.1) à l'aide du logiciel MATLAB /SIMULINK. On a obtenu les courbes du f_s (Hz), V_s (V), et $\eta(v)$ de l'installation qu'elles sont représentées dans les figures ci-dessous :

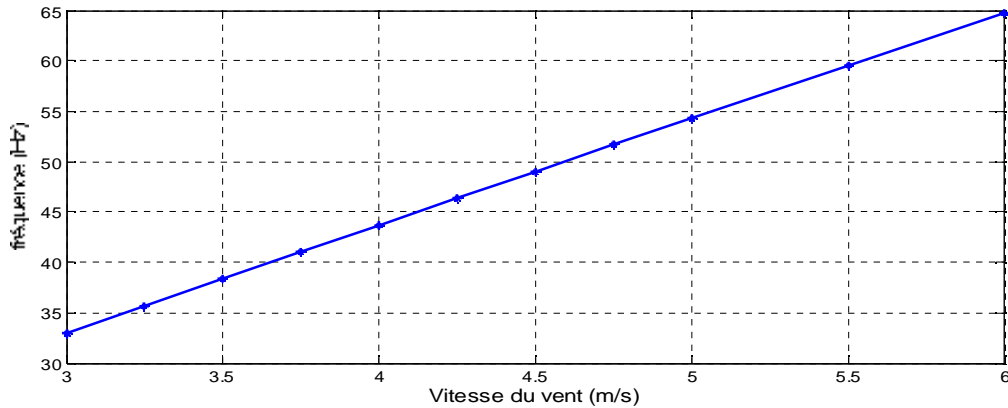


Figure 3.17 : Fréquence statorique en fonction de la vitesse du vent

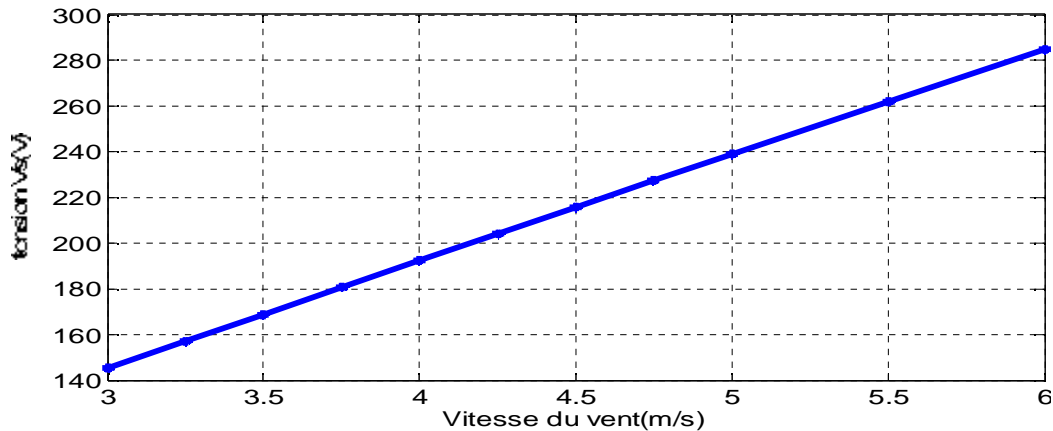


Figure 3.18 : Tension statorique en fonction de la vitesse du vent

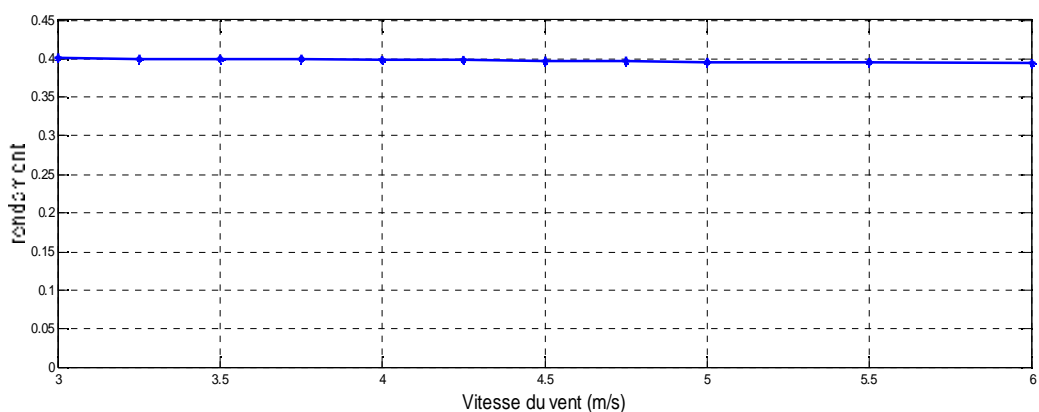


Figure 3.19 : Rendement du système en fonction de la vitesse du vent

❖ Remarque :

Pour le fonctionnement à vitesse variable on constate l'amélioration du rendement énergétique à une valeur constante de 0.4 qu'elle que soit la vitesse du vent par rapport au fonctionnement de la vitesse constante.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude a été menée sur le générateur à vitesse fixe, qui est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie éolienne à vitesse fixe, cette étude a montré que le générateur à vitesse fixe est un simple système électrique qui n'a pas besoin d'un système électronique de commande et donne de performance acceptable.

La seconde partie, nous avons décrit en premier, le principe de fonctionnement de la machine asynchrone à vitesse variable en fonctionnement génératrice, on a vu aussi que la vitesse variable permet d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

CHAPITRE IV

Etude et commande en puissance de la MADA

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter l'étude de la machine asynchrone à double alimentation en introduisant des généralités sur la MADA ainsi que ses modes de fonctionnement et on le conclut par sa modélisation en régime permanent en premier temps, puis nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice.

Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [18].

IV.1 Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

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

Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice [19, 20,21, 22].

IV.2 Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [19].

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 (Figure 4.1)

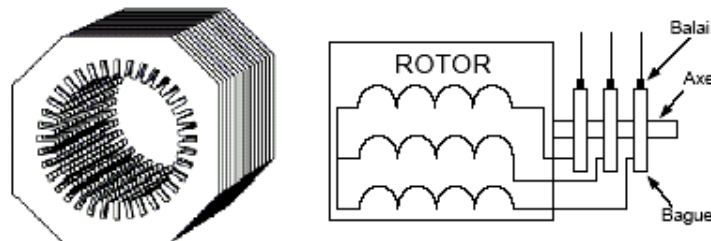


Figure 4.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [19].

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

IV.2.1 Double alimentation par le stator

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (figure 4.2)

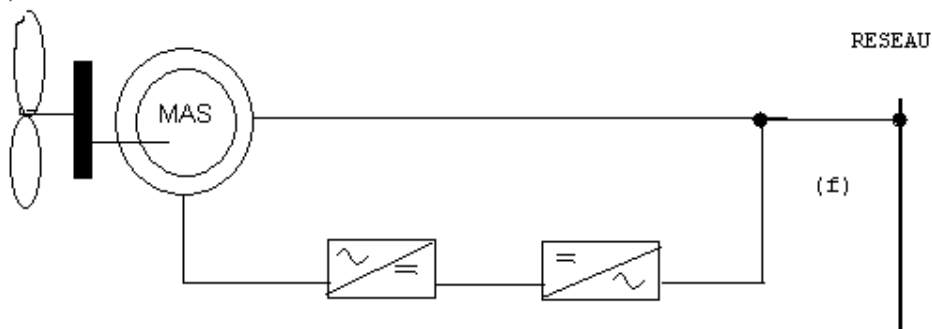


Figure 4.2 : Machine asynchrone à double bobinage statorique

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation. Ce dernier possède un autre nombre de paire de pôles que celui du premier bobinage. L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une partie du courant nominal de la génératrice y circule. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit.

Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation permet de contrôler le flux statorique de la machine ; le glissement peut être ainsi contrôlé et donc la vitesse de la génératrice. En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également. Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu. Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive. Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum.

IV.2.2 Double alimentation par le stator et le rotor

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (Figure 4.3). Pour expliquer le principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance p est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournit, $(1 - g)p$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste gp 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. Ce réseau reçoit donc $(1 + g)p$; les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (figure 4.4). 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.

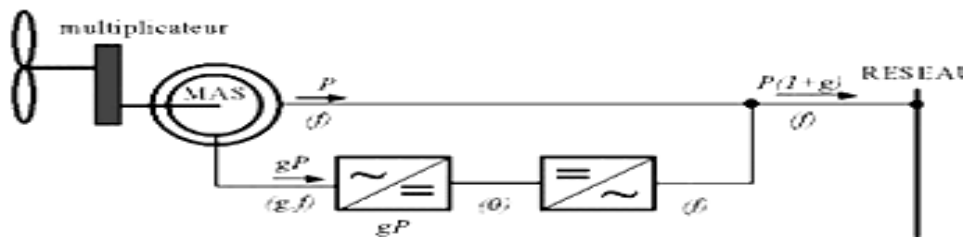


Figure 4.3 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

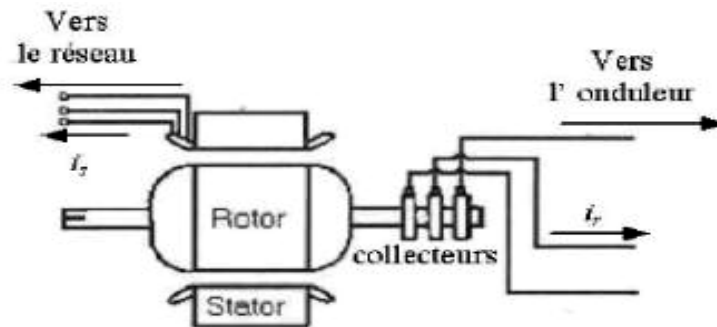


Figure 4.4 : Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices [23]

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement.

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe où vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants :

IV.3 Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

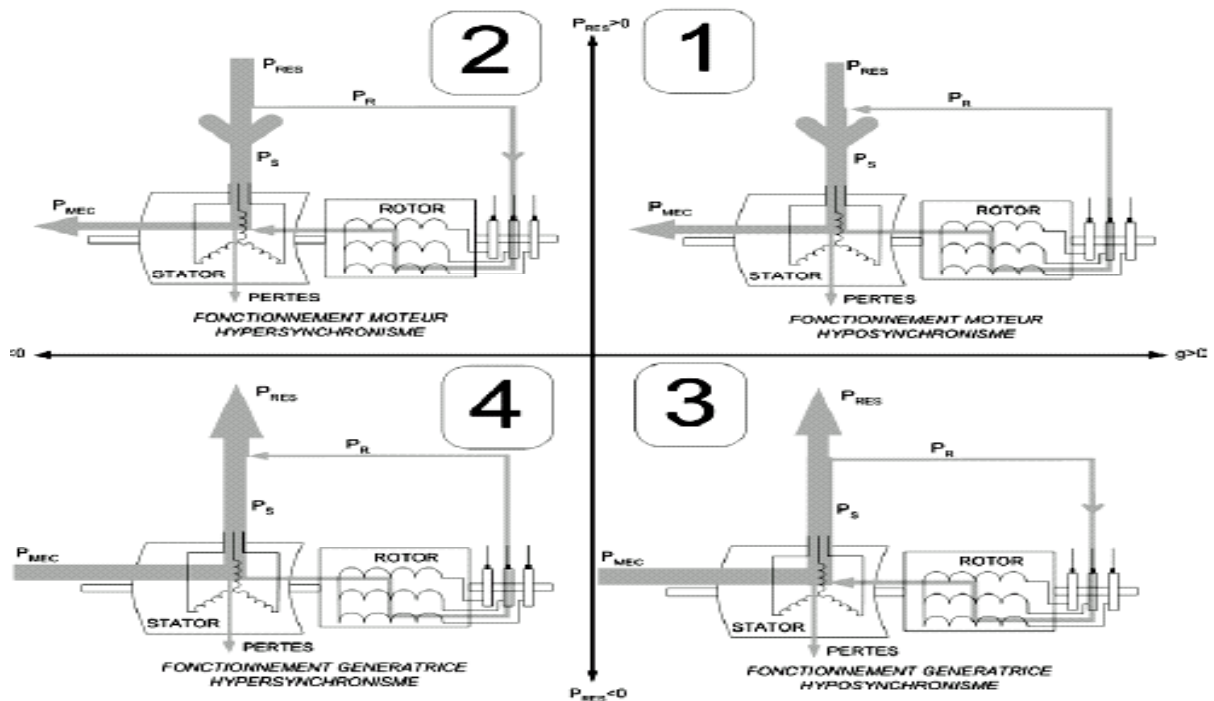


Figure 4.5 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [19], [22].

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 générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique.

En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

En mode hyper synchrone, 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 N 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 [24], [25].

Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbation que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

IV.4 Modèle de la MADA en régime permanent:

En annulant les dérivées des équations électriques (II-3 et II-4) par rapport au temps on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \omega_r \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad (IV-1)$$

En remplaçant les flux par leurs expressions données par le système (II-5) on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_s L_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s L_s I_{ds} + \omega_s M I_{dr} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} - \omega_r L_r I_{qr} - \omega_r M I_{qs} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \omega_r L_r I_{dr} + \omega_r M I_{ds} \end{cases} \quad (IV-2)$$

Pour transformer ce système de quatre équations en deux systèmes à deux équations, un pour le stator et l'autre pour le rotor on introduit les phasors de tension et courant suivants :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = V_{ds} + jV_{qs} \\ \bar{V}_r = V_{dr} - jV_{qr} \\ \bar{I}_s = I_{ds} + jI_{qs} \\ \bar{I}_r = I_{dr} - jI_{qr} \end{cases} \quad (IV-3)$$

On posera :

$$\begin{cases} X_s & \omega_s L_s \\ X_r & \omega_s L_r \\ X_m & -\omega_s M \\ \omega_r & g \omega_s \end{cases} \quad (IV-4)$$

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s I_{ds} - \omega_s L_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} + j(R_s I_{qs} + \omega_s L_s I_{ds} + \omega_s M I_{dr}) \\ \bar{V}_r = R_r I_{dr} - \omega_r L_r I_{qr} - \omega_r M I_{qs} + j(R_r I_{qr} - \omega_r L_r I_{dr} + \omega_r M I_{ds}) \end{cases} \quad (IV-5)$$

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s (I_{ds} - j I_{qs}) - j \omega_s L_s (I_{ds} + j I_{qs}) + j \omega_s M (I_{dr} + j I_{qr}) \\ \bar{V}_r = R_r (I_{dr} + j I_{qr}) + j \omega_r L_r (I_{dr} + j I_{qr}) + j \omega_r M (I_{ds} + j I_{qs}) \end{cases} \quad (IV-6)$$

$$\begin{cases} \bar{V}_s = (R_s - jX_s) \bar{I}_s + jX_m \bar{I}_r \\ \frac{\bar{V}_r}{g} = \left(\frac{R_r}{g} - jX_r \right) \bar{I}_r + jX_m \bar{I}_s \end{cases} \quad (IV-7)$$

Ce dernier système peut s'écrire sous forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{V}_r \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + jX_s) & jX_m \\ jX_m & \left(\frac{R_r}{g} + jX_r \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \end{bmatrix} \quad (IV-8)$$

IV.5. Schémas équivalents d la MADA:

IV.5.1 Schéma équivalent aux inductances couplées

A partir du système d'équations (IV.7) on aboutit à un schéma équivalent par phase dans lequel inductances L_s et L_r sont couplé par la mutuelle inductance cyclique L_m .

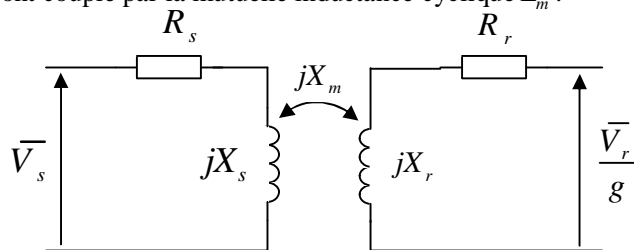


Figure 4.6 : Schéma équivalent aux inductances couplées.

IV.5.2 Schémas équivalent en T:

On transforme le système d'équation (IV-5) en ajoutant puis retranchant, respectivement au stator puis au rotor, les termes $jX_m \bar{I}_r$ et $jgX_m \bar{I}_s$

On obtient :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + j(X_s + X_m) \bar{I}_s + jX_m (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \\ \bar{V}_r = \frac{R_r}{g} \bar{I}_r - j(X_r - X_m) \bar{I}_r + jX_m (\bar{I}_s + \bar{I}_r) \end{cases} \quad (IV.9)$$

Posant

$$\begin{cases} N_s = L_s - L_m \\ N_r = L_r - L_r \\ \bar{I}_m = \bar{I}_s - \bar{I}_r \end{cases} \quad (IV.10)$$

Avec

N_s, N_r : Inductances de fuites cycliques statorique et rotorique respectivement.

\bar{I}_m : Courant magnétisant.

Le système devient :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + j\omega_s N_s \bar{I}_s + jX_m \bar{I}_m \\ \bar{V}_r = \frac{R_r}{g} \bar{I}_r + j\omega_s N_r \bar{I}_r + jX_m \bar{I}_m \end{cases} \quad (IV.11)$$

Les équations (IV.11) peuvent être traduites par un schéma équivalent en T qui est le suivant :

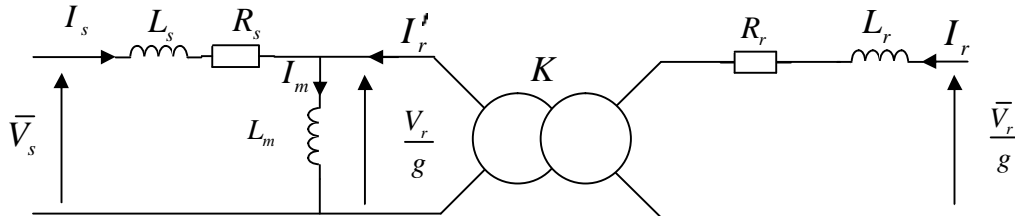


Figure 4.7 : Schéma équivalent en T

IV.5.3 Schémas équivalent ramené au stator avec fuites magnétiques totalisées au stator

Soit les tensions V_s et \bar{V}_r' définies par :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = j\omega_s L_s \bar{I}_s + j\omega_s M \bar{I}_r \\ \bar{V}_r' = j\omega_s L_r \bar{I}_r + j\omega_s M \bar{I}_s \end{cases} \quad (IV.12)$$

De la première équation on tire

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{j\omega_s L_s} - \frac{L_s}{M} \bar{I}_r \quad (IV.13)$$

On pose :

$$\frac{L_s}{M} \bar{I}_r = \bar{I}_r + K \bar{I}_r \tag{IV.14}$$

$$\bar{V}_r = j\omega_s L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \bar{I}_r + \frac{M}{L_s} \bar{V}_s \tag{IV.15}$$

On remplaçant \bar{I}_s donnée par (IV.13) dans (IV.9), on obtient :

$$\begin{aligned} \bar{V}_s &= R_s \bar{I}_s - jX_s (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \\ \frac{L_s}{M} \frac{\bar{V}_r}{g} &= \frac{R_r}{g} \left(\frac{L_s}{M}\right)^2 \bar{I}_r + j\omega_s N_r \left(\frac{L_s}{M}\right)^2 \bar{I}_r + j\omega_s L_s (\bar{I}_s + \bar{I}_r) \end{aligned} \tag{IV.16}$$

On introduisant \bar{I}_r dans système (IV.9) et on multipliant la deuxième équation du même système par

$$K = \frac{M}{L_s} \text{ Où } K \text{ est le facteur de transformation de la machine.}$$

Le système devient :

$$\begin{aligned} \bar{V}_s &= R_s \bar{I}_s + jX_s (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \\ \frac{L_s}{M} \frac{\bar{V}_r}{g} &= \frac{R_r}{g} K^2 \bar{I}_r + j\omega_s N_r K^2 \bar{I}_r + j\omega_s L_s (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \end{aligned} \tag{IV.17}$$

On pose :

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \text{ Coefficient de dispersion.}$$

$$N_r = \sigma L_r \text{ L'inductance de fuite totalisée au rotor}$$

$$R_r' = R_r \left(\frac{L_s}{M}\right)^2 \text{ Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator.}$$

$$X_f = \omega_s N_r \left(\frac{L_s}{M}\right)^2 \text{ Réactance de fuite totalisée au rotor ramenée au stator.}$$

$$\bar{V}_r' = \left(\frac{L_s}{M}\right) \bar{V}_r \text{ Tension d'alimentation du rotor ramenée au stator}$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_s &= R_s \bar{I}_s - jX_s (\bar{I}_s + \bar{I}_r) \\ \frac{\bar{V}_r'}{g} &= \frac{R_r'}{g} \bar{I}_r + jX_f \bar{I}_r + jX_s (\bar{I}_s - \bar{I}_r) \end{aligned} \tag{IV.18}$$

Sous forme matricielle on aura

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \frac{\bar{V}_r'}{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + jX_s) & jX_s \\ jX_s & \left(\frac{R_r'}{g} + jX_f + jX_s\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \end{bmatrix} \tag{IV.19}$$

Ce système nous conduit vers le schéma équivalent suivant :

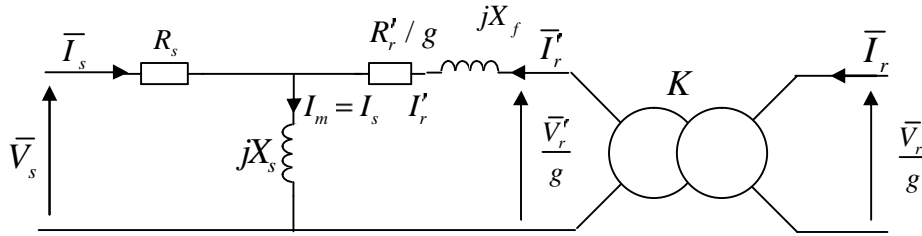


Figure 4.8 : Schéma équivalent ramené au stator avec fuites magnétiques totalisées au rotor

IV.6. Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r} (I_{sq} - I_{sd} \phi_{rq}) \quad (IV.20)$$

On remplaçant le flux par leurs expressions données par (II-5) on obtient

$$C_{em} = pM (I_{sq} I_{rd} - I_{sd} I_{rq}) - pL_s \Im(\bar{I}_s^* \cdot \bar{I}_r) \quad (IV.21)$$

IV.7. Différente puissances de la MADA

IV.7.1 Puissance active

La puissance active P_{gen} produite par le générateur est définie, avec les conventions adoptées pour le rotor et le stator par :

$$P_{gen} = P_s + P_r \quad (IV.22)$$

La puissance statorique P_s est elle-même la somme de la puissance P_{js} perdue par effet joule dans la résistance statorique R_s et de la puissance électromagnétique transmise au rotor P_e

$$P_s = P_e + P_{js} = (P_r + P_{mec} - R_r |\bar{I}_r|^2) + R_r |\bar{I}_r|^2 + P_r \quad (IV.23)$$

Enfin, on déduit que P_{gen} qui est :

$$P_{gen} = P_e - P_r = -(P_r + P_{mec} - R_r |\bar{I}_r|^2) - R_s |\bar{I}_s|^2 - P_r \quad (IV.24)$$

$$= P_{mec} + R_r |\bar{I}_r|^2 - R_s |\bar{I}_s|^2$$

$$= P_{mec} + P_{js}$$

IV.7.2 Puissance réactive

Rappelons que le rotor d'une MADA est généralement alimenté par un onduleur à MLI. La tension du bus continu de cet onduleur, qui se trouve aux bornes d'une capacité c , est maintenue constante par une commande adéquate d'un redresseur MLI. Ce dernier est alimenté par le réseau triphasé via un transformateur. De plus, la commande du redresseur assure un facteur de puissance

égale à l'unité et la puissance réactive consommée coté rotor est considérée nulle. On définit alors la puissance réactive Q_{gen} du générateur comme étant celle fournie uniquement au stator $Q_{gen} = Q_s$

IV.7.3 Puissance apparente

La puissance apparente produite par la MADA est la somme vectorielle de la puissance apparente produite au stator et celle produite au rotor. Comme au rotor la puissance réactive est considérée comme nulle, la puissance apparente coté rotor sera identique à sa puissance active.

$$\bar{S}_{gen} = \bar{S}_s - \bar{S}_r = \bar{S}_s + P_r \quad \bar{V}_s + \bar{I}_s^* - (\bar{V}_r^* \bar{I}_r^*) \quad (VI.25)$$

IV.7.4. Puissance échangée au stator et au rotor

➤ Côté stator

$$\begin{cases} P_s = \Re(\bar{V}_s \bar{I}_s^*) = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = \Im(\bar{V}_s \bar{I}_s^*) = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (IV.26)$$

$$\begin{cases} P_s = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \omega_s M (I_{dr} I_{qs} - I_{qr} I_{ds}) \\ Q_s = -V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (IV.27)$$

➤ Côté rotor:

$$\begin{cases} P_r = \Re\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \bar{I}_r^*\right) = \frac{V_{dr}}{g} I_{dr} + \frac{V_{qr}}{g} I_{qr} \\ Q_r = \Im\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \bar{I}_r^*\right) = \frac{V_{qr}}{g} I_{dr} - \frac{V_{dr}}{g} I_{qr} \end{cases} \quad (IV.28)$$

$$\begin{cases} P_r = \frac{R_r}{g} (I_{dr}^2 + I_{qr}^2) + \omega M (I_{dr} I_{qs} - I_{qr} I_{ds}) \\ Q_s = \frac{V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr}}{g} \end{cases} \quad (IV.29)$$

$$\begin{cases} P_r = \frac{R_r}{g} |\bar{I}_r| + \frac{\omega_s}{P} C_{em} \\ Q_r = \frac{(V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr})}{g} \end{cases} \quad (IV.30)$$

On pose :

$$P_{airg} = \frac{\omega_s}{P} C_{em} \quad \text{La puissance dans l'entrefer.}$$

$$p_{jr} = \frac{R_r}{g} |\bar{I}_r|^2 \quad \text{Pertes joule rotorique.}$$

$$P_{js} = R_s |\bar{I}_s|^2 \quad \text{Pertes joule statorique.}$$

D'où

$$P_r = P_{jr} + P_{airg} \quad (IV.31)$$

$$P_{airg} = P_r - p_{jr} \quad (IV.32)$$

$$P_{airg} = \Re\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \cdot \bar{I}_r^*\right) - p_{jr} \quad (IV.33)$$

$$P_{airg} = -R_r |\bar{I}_r|^2 - \Re\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \cdot \bar{I}_r^*\right) + \frac{1-g}{g} \left\{ \Re(\bar{V}_r \cdot \bar{I}_r^*) - R_r |\bar{I}_r|^2 \right\} \quad (IV.34)$$

D'autre part

$$P_{airg} = \Re(\bar{V}_r \cdot \bar{I}_r^*) - P_{jr} + P_{mec} \quad (VI.35)$$

Par identification

$$P_{mec} = \left\{ P_r - R_r |\bar{I}_r|^2 \right\} \cdot \frac{1-g}{g} \quad (IV.36)$$

D'où le schéma équivalent de (figure 4.8) devient

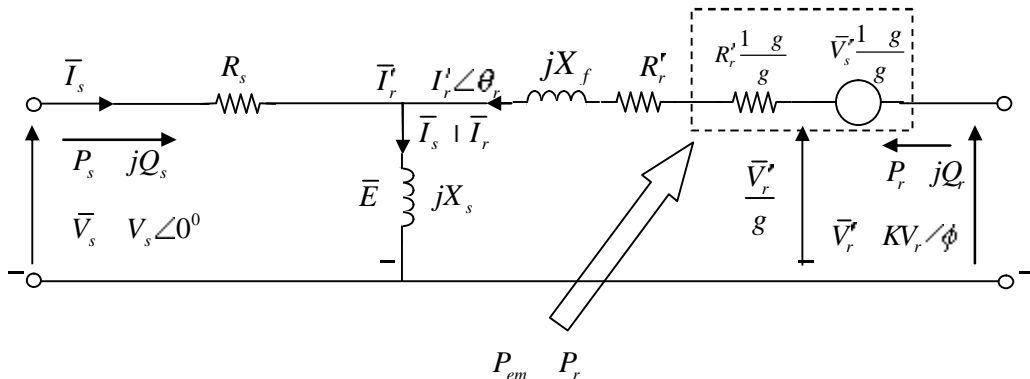


Figure 4.9 : Schéma équivalent en T réaliste [35]

Le schéma équivalent de la (figure 4.9) est devenu plus réaliste en donnant une interprétation physique sur la source fictive $\frac{\bar{V}_r}{g}$. Et la résistance fictive $\frac{R_r}{g}$ et cela en raisonnant sur les différentes puissances transitant par le rotor.

D'après ce schéma équivalent de la (figure 4.9), on peut conclure que la puissance électromagnétique P_e transmise au stator est égale à la puissance fournie par la source $\frac{\bar{V}_r}{g}$ moins les

pertes joules dissipées dans la résistance fictive $\frac{\bar{R}_r}{g}$:

$$P_e = \Re\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \cdot \bar{I}_r^*\right) - \frac{R_r}{g} |\bar{I}_r|^2 \quad (IV.37)$$

D'un coté la puissance électromagnétique P_e est la somme de la puissance active P_r fournie par la source réelle \bar{V}_r plus la puissance mécanique P_{mec} moins la puissance perdue par effet joule dans la résistance réelle R_r .

$$P_e = \Re\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \cdot \bar{I}_r^*\right) - P_{jr} + P_{mec} \quad (IV.38)$$

En faisant membre à membre l'égalité entre les deux équations, on aboutit à l'expression de la puissance mécanique suivante :

$$P_e = \Re\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \cdot \bar{I}_r^*\right) - P_{jr} + P_{mec} = \Re\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \cdot \bar{I}_r^*\right) - \frac{R_r}{g} |\bar{I}_r|^2 \quad (IV.39)$$

$$P_{mec} = \frac{1-g}{g} \Re\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \cdot \bar{I}_r^*\right) - \frac{1-g}{g} R_r |\bar{I}_r|^2 = \frac{1-g}{g} \left[P_r - R_r |\bar{I}_r|^2 \right] \quad (IV.40)$$

On constate d'après la dernière équation que la puissance mécanique est composée de deux termes ; le premier terme, est une partie de la puissance fournie par la source qui se transforme en puissance mécanique, le second terme, représente la puissance mécanique fournie de l'extérieur. On tenant compte de pertes joule dans la résistance.

IV.8. Rendement de la MADA:

- **Fonctionnement en générateur :**

Dans le cas ou la MADA fonctionne en générateur ($P_{mec} > 0$), le rendement η_{gen} Est défini comme étant le rapport entre la puissance électrique produite P_{mec} et la puissance mécanique absorbée P_{gen} .

$$\eta_{gen} = \frac{P_{gen}}{P_{mec}} = \frac{P_s - P_r}{P_{mec}} = \frac{-P_{mec} - P_j}{P_{mec}} \left| \frac{R_s |\bar{I}_s|^2 - R_r |\bar{I}_r|^2}{\left\{ P_r - R_r |\bar{I}_r|^2 \right\} * \frac{1-g}{g}} - 1 \right| \quad (IV.41)$$

- **Fonctionnement en moteur :**

Dans le cas ou la MADA fonctionne en moteur ($P_{mec} < 0$), le rendement η_{mot} est défini, contrairement au fonctionne en générateur, comme étant le rapport entre la puissance électrique produite P_{mec} et la puissance mécanique absorbée P_{gen} .

$$\eta_{mot} = \frac{1}{\eta_{gen}} \quad (IV.42)$$

IV.9. Contrôle de la puissance active et réactive par des régulateurs PI

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère (d,q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement de celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner [26],[27].

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

IV.9.1 Principe de la commande vectorielle

La commande par orientation de flux proposé par Blaschke, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, I_{dr} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant I_{qr} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes I_{dr} et I_{qr} sont mutuellement découplées [27]. De nombreuses variétés de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant :

1. la source d'énergie :
 - Commande en tension.
 - Commande en courant.
2. orientation du repère :
 - Le flux rotorique.
 - Le flux statorique.
 - Le flux d'entrefer.
3. la détermination de la position du flux :
 - Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
 - Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

IV.9.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

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

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s I_{ds} - \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\
 V_{qs} &= R_s I_{qs} - \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\
 V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\
 V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr}
 \end{aligned} \tag{IV.43}$$

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les flux statoriques et les courants rotoriques comme des vecteurs d'état. Les équations (IV.43) peuvent être disposées sous la forme d'une représentation d'état comme suite :

$$\begin{aligned}
 L \frac{dx}{dt} &= Ax - BU \\
 y &= Cx
 \end{aligned} \tag{IV.44}$$

Avec

$$U = [V_{ds} \ V_{qs} \ V_{dr} \ V_{qr}]^T, B = [I]_{4 \times 4}, x = [\phi_{ds} \ \phi_{qs} \ I_{dr} \ I_{qr}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_s & \frac{R_s M}{L_s} & 0 \\ -\omega_s & -\frac{R_s}{L_s} & 0 & \frac{R_s M}{L_s} \\ 0 & \frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & -R_r & \sigma(\omega_s - \omega_r) \\ -\frac{M}{L_s} & 0 & -\sigma(\omega_s - \omega_r) & -R_r \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{IV.45}$$

IV.9.3 Choix du référentiel pour le modèle diphasé

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine (orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul). Nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned}
 \phi_{ds} = \phi_s, \phi_{qs} = 0 \\
 \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} - \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} - \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} - \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{IV.46}$$

Dans le repère triphasé (a, b, c), la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{ns} = R_s I_{ns} - \frac{d\phi_{ns}}{dt} \quad (\text{IV.47})$$

De plus, si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à [28] :

$$V_{ns} = \frac{d\phi_{ns}}{dt} \quad (\text{IV.48})$$

Cette relation montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur de tension statorique et qu'il est en avance de $(\pi/2)$ sur ce même vecteur. Toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant, on peut écrire :

$$V_{ds} = 0, V_{qs} = V_s$$

Le principe d'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la (figure 4.10)

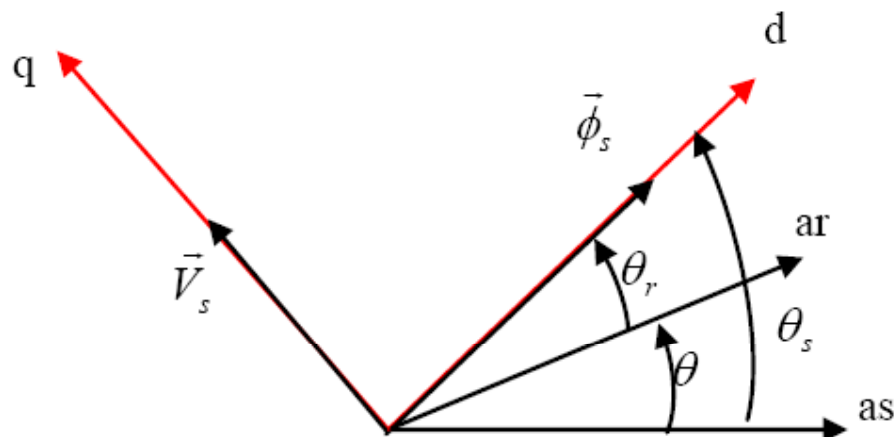


Figure 4.10: Orientation du flux statorique

Dans l'hypothèse où le flux ϕ_{ds} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator). Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q. L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_e = n_p \frac{M}{L_s} \phi_{ds} \cdot I_{qr} \quad (\text{IV.49})$$

n_p : Nombre des pôles.

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

$$\begin{cases} \dot{V}_{ds} = 0 \\ \dot{V}_{qs} = V_s \omega_s \phi_{ds} - \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (IV.50)$$

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{ds} = \phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \dot{\phi}_{qs} = 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (IV.51)$$

A partir des équations (IV.51), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (IV.52)$$

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent:

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = -V_{qs} I_{qs} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (IV.53)$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds} = 0$) donne:

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = -V_{qs} I_{qs} \end{cases} \quad (IV.54)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (IV.52) dans l'équation (IV.53), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_{qs} \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (IV.55)$$

En tirant ($\phi_s = V_s / \omega_s$) de l'équation (IV.54), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (IV.56)$$

Ces équations montrent qu'on a un découplage entre les commandes des puissances où la puissance active peut être commandée par la composante en quadrature du courant I_{qr} . La puissance réactive peut être commandée par la composante directe du courant I_{dr} [29]. On considère les tensions rotoriques V_{dr}, V_{qr} comme variables de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux

orienté et les courants rotoriques I_{dr} , I_{qr} comme variables d'état. Ces grandeurs sont en fonction des grandeurs de consigne P_{sref} et Q_{sref} .

$$\begin{cases} P_{sref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qrref} \\ Q_{sref} = \frac{V_s \phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{drref} \end{cases} \quad (IV.57)$$

Les équations des flux

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{dr} \\ \phi_{dr} = L_s I_{dr} + M I_{qs} \\ \phi_{qr} = L_s I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (IV.58)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, on aura :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} - \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{qr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \end{cases} \quad (IV.59)$$

A partir de ces équations, les expressions des tensions deviennent :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_s I_{dr} - (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_s I_{qr} - (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (IV.60)$$

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

$(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ Est le terme de couplage entre les deux axes.

$g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr}$ Représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

Les équations (IV.54), (IV.60) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler (figure 4.11).

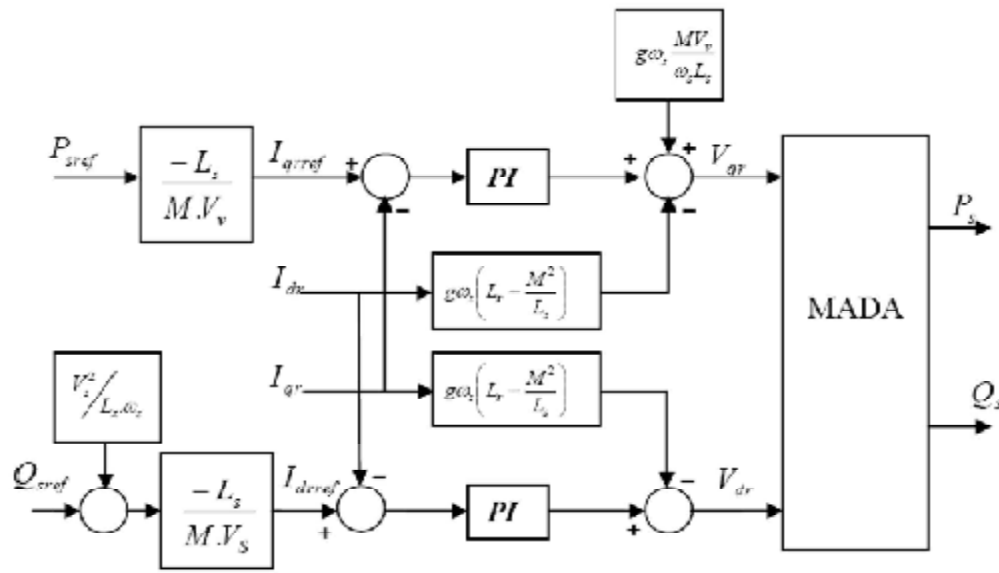


Figure 4.11 : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA alimentée en tension

IV.10. Synthèse du régulateur PI

Nous allons procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice [30], ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industrielle.

Il est simple et rapide de mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. [19], [31]. Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'éliminer l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée. Le dimensionnement du régulateur PI est présenté dans ce qui suit :

La figure (4.11) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI

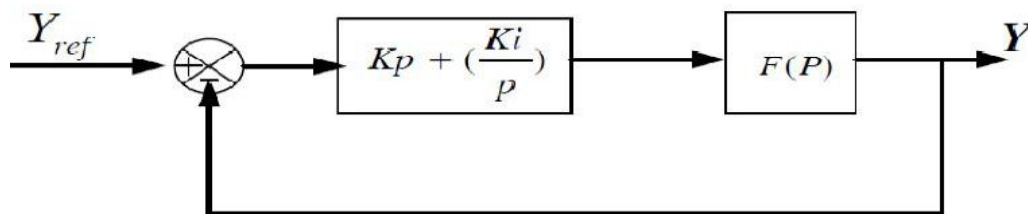


Figure 4.12 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI

La forme du correcteur est la suivante :

$$C_p \quad K_p - \frac{K_i}{p} \tag{IV.61}$$

Avec :

K_p : est le gain proportionnel du régulateur ;

K_i : est le gain intégral du régulateur.

Si on considère la fonction du transfert suivante :

$$F(p) = \frac{K}{1 + \tau p} \tag{IV.62}$$

En boucle ouverte on aura la fonction de transfert suivante :

$$F_{BO}(p) = K \cdot \frac{K_p}{1 - \tau p} \cdot \frac{\frac{K_i}{p}}{p(1 + \tau p)} = KK_i \frac{1 + \frac{K_p p}{K_i}}{p(1 - \tau p)} \tag{IV.63}$$

On prend

$$\tau = \frac{K_p}{K_i}$$

Alors

$$F_{BO}(p) = \frac{KK_i}{p} \tag{IV.64}$$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$F_{BF}(p) = \frac{KK_p}{KK_i + p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{KK_i} p} \tag{IV.65}$$

Pour notre système représenté dans (IV.60), la fonction de transfert du régulateur est donnée par:

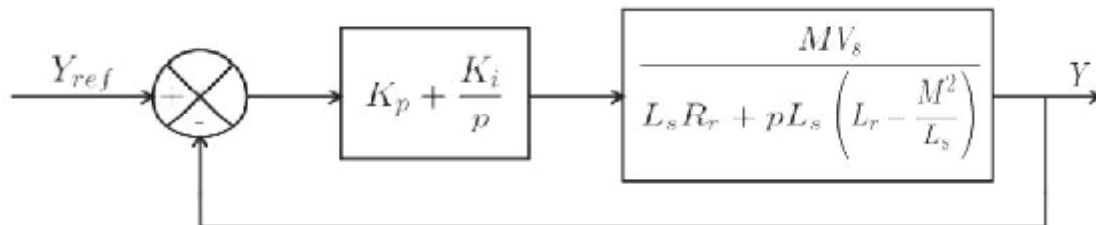


Figure 4.13: Schéma bloc du système [22]

$$K_p - \frac{K_i}{p} = K_p \left(1 + \frac{K_i}{K_p p}\right) = \frac{K_p}{p} \left(p - \frac{K_i}{K_p}\right) = \frac{p \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \quad (\text{IV.66})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte F_{BO}

$$F_{BO} = \frac{p - \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \frac{\frac{MV_s}{L_s}}{R_r + p\left(L_s + \frac{M^2}{L_s}\right)} \quad (\text{IV.67})$$

$$F_{BO} = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \frac{\frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}}{p \frac{L_s L_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}} \quad (\text{IV.68})$$

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

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{R_r}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \quad (\text{IV.69})$$

La fonction en boucle ouverte F_{BO} devient :

$$F_{BO} = \frac{K_p}{p} \frac{MV_s}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \quad (\text{IV.70})$$

La fonction de transfert en boucle fermée F_{BF}

$$F_{BF} = \frac{F_{BO}}{1 + F_{BO}} = \frac{1}{1 + \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}{MV_s K_p}} \quad (\text{IV.71})$$

Le terme τ désigne ici le temps de réponse du système. Nous choisissons de fixer celui-ci à 10 ms, ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie sur le réseau avec la MADA de 3 kW. Une valeur inférieure est susceptible d'engendrer des régimes transitoires avec des dépassements importants et ne présente pas d'intérêt particulier pour notre application [19].

Les termes K_p et K_i sont alors exprimés en fonction de ce temps de réponse et des paramètres de la machine:

$$\tau = \frac{1}{K_p} \frac{L_s}{MV_s} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \tag{IV.72}$$

$$K_i = K_p \frac{R_s}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \tag{IV.73}$$

$$K_p = \frac{1}{\tau} \frac{L_s}{MV_s} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \tag{IV.74}$$

$$K_i = \frac{1}{\tau} \frac{L_s L_r}{MV_s} \tag{IV.75}$$

IV.11. Résultat de Simulation :

Le premier essai consiste à appliquer aux entrées de commande des échelons de puissance active et réactive, alors que la machine est entraînée à vitesse fixe de 167 rd/min.

• Pour la puissance active

- De t=0s à t=1s : un échelon négatif de -500 W,
- De t=1s à t=3s : un échelon négatif de -3000 W,
- De t=3s à t=5s : un échelon négatif de -2000 W.

• Pour la puissance réactive :

- De t=0s à t=2s : un échelon négatif de -400 VAR,
- De t=2s à t=4s : un échelon positif de 400VAR,
- De t=4s à t=5s : un échelon nul de 0 VAR.

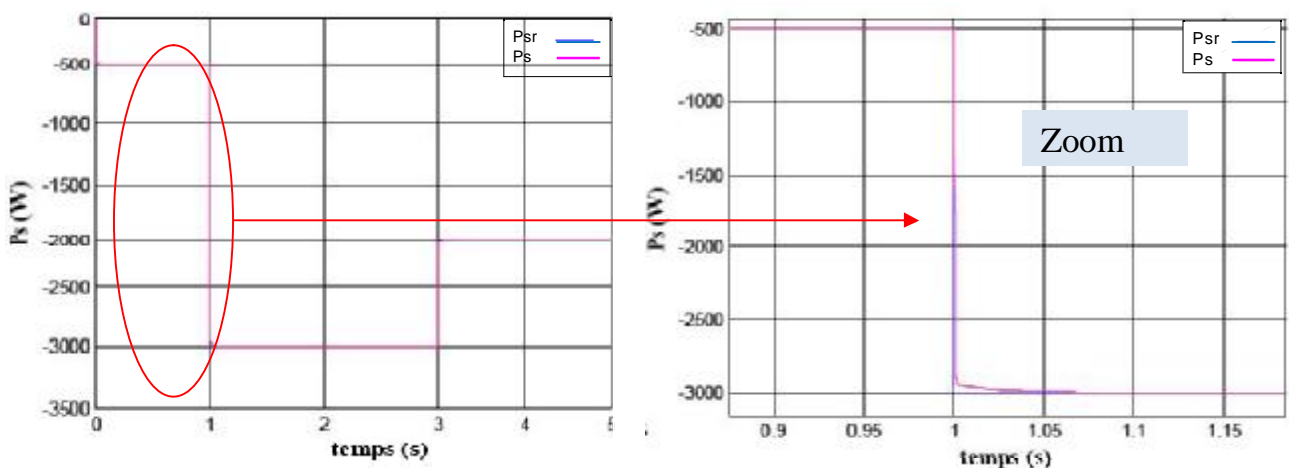


Figure 4.15 : Puissance réactive de stator avec un zoom.

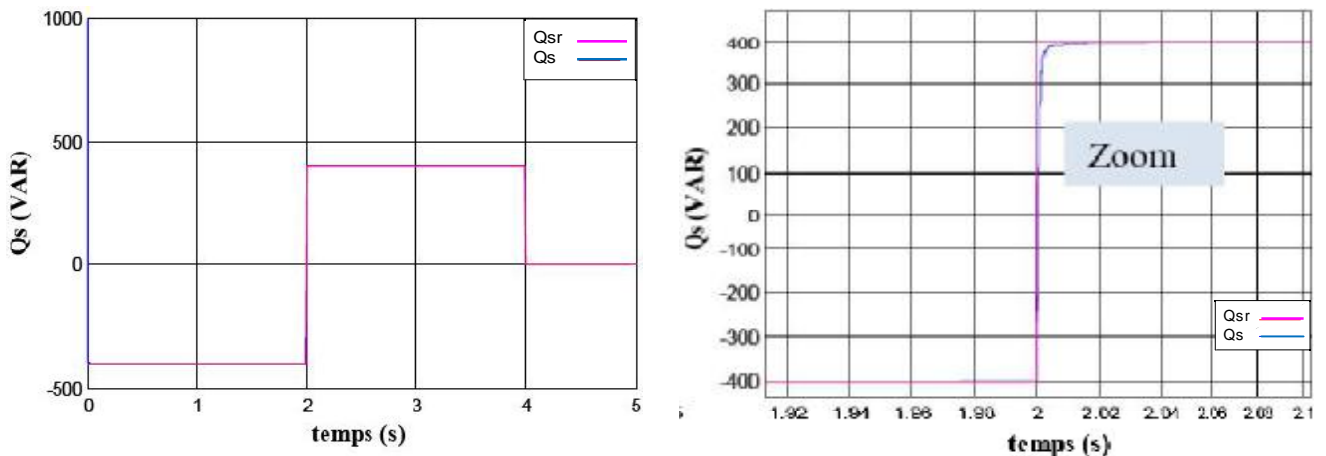


Figure 4.15 : Puissance réactive de stator avec un zoom.

IV.11.1 Interprétation des résultats :

On observe une dynamique qui réagit rapidement pour la puissance réactive et celle de la puissance active du stator avec un temps de réponse de 0.01s.

La puissance active du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA, La puissance réactive est réglable selon les besoins du réseau (ajustement sur le $\cos(\varphi)$), et les deux sont découplées entre eux (la puissance active est commandée par la composante I_{qr} et la puissance réactive par le composante I_{dr}).

IV.12. Conclusion

Dans ce chapitre, la première partie on a présenté une étude sur la machine asynchrone à double alimentation en régime permanent, sa structure, son principe de fonctionnement et les différents Schémas équivalents et puissances ainsi que son rendement. La modélisation de la MADA et de son système d'alimentation a pour but de faciliter la mise en œuvre de la commande.

Dans la deuxième partie nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix de l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. Cette méthode du flux orienté nous de simplifier le modèle de la machine et de découpler la régulation du couple et celle du flux. A partir de la simulation, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active.

Conclusion Générale

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

L'objectif préalablement défini dans ce travail consiste à l'étude d'une chaîne de conversion éolienne à vitesse fixe et à vitesse variable par la machine asynchrone et la commande en puissance de la machine à double alimentation.

Ce travail a été scindé en quatre parties, la première a été consacrée pour la présentation de l'état de l'art des systèmes éoliens, les différents types d'éoliennes, ainsi que l'établissement d'un modèle mathématique qui nous a permis d'étudier le fonctionnement de l'éolienne. Et un rappel des concepts fondamentaux de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), et nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques, et nous avons vu que cette partie mécanique est un élément très important dans les systèmes de conversion éoliens.

Le deuxième chapitre consiste en la représentation mathématique de la machine asynchrone dans le repère (d-q), pour cela nous avons fait appel à la transformation de Park qui nous a simplifié notre système tout en tenant compte des hypothèses simplificatrices, puis on s'est intéressé à l'étude des équations du couple et de puissance et la simulation du fonctionnement à vide de cette machine.

Le troisième chapitre a pour but de mettre en évidence dans une chaîne de production éolienne en utilisant une MAS à vitesse fixe et variable dont on a remarqué que les résultats obtenus dans le mode de fonctionnement à vitesse variable sont plus performant que ceux du mode de fonctionnement à vitesse fixe, ou nous avons pu avoir un rendement meilleur et fixe pour différent vitesses du vent.

Le dernier chapitre est réparti en deux parties; la première partie consiste en une étude sur la machine asynchrone à double alimentation en régime permanent, et l'autre nous avons consacré l'autre partie à l'introduction d'une commande vectorielle à orientation du flux statorique pour cette machine. Ce contrôle est réalisé avec corrélation par des puissances de références afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator et le réseau.

En perspectives de ce mémoire, on propose les idées suivantes :

- Utilisation du système de conversion d'énergie éolienne à base de la MADA pour le filtrage des harmoniques.
- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant notamment en compte la saturation magnétique ;
- Une réalisation expérimentale du système hybride éolien/ solaire.

Tout cela demande autant d'études qui devraient apporter des solutions pour rendre encore plus facile l'insertion des éoliennes dans le réseau électrique afin de produire une énergie propre et durable.

Bibliographie

- [1] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [2] Site Internet de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne, "<http://www.windpower.org/fr/core.htm>".
- [3] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, «Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications », IEEE industry applications conference, St Louis, novembre 5-8, 1998.
- [4] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).
- [5] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.
- [6] C. Sagnet, « la variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne » .REE, n° 7, juillet 1998, pp. 42-48.
- [7] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly-coupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [8] Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue 3Ei No36 mars 2004, pp. 1-14.
- [Site 1] Site Internet « L'éolien, un gisement d'énergie renouvelable exploitable en Ile- de France », agence régionale de l'environnement et de nouvelles énergies, <http://www.arenidf.org>
- [9] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June 6 à 12, 2004.
- [10] R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 2002 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paper N° 20027, pp. 716-724.
- [11] J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, «Interconnection studies for wind generation», conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.
- [Site 2] Site Internet, www.rncan.gc.ca/penser. Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables.
- [12] Adam MIRECKI, « étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse
- [13] B. MULTON, X. ROBOAM, B. DAKYO, C. NICHITA, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, Aérogénérateurs électriques, Techniques de l'Ingénieur, D3 960.
- [14] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.

Bibliographie

- [15] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo, E. Ceanga, N.A. Cutululis, "Modelling non-Stationary Wind Speed for Renewable Energy Systems Control", The annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle III, 2000 ISSN 1221-454X, pp.29-34.
- [16] Jean Chatelain, Machines électriques, Traité d'électricité, Vol X, Presse Polytechniques romandes, édition Georgi, 1983.
- [17] Luc MUTREL, Régimes statique et dynamique des Machines Asynchrones, Technosup, édition Ellipses
- [18] HAMZAOU Ihsen, « modélisation de la machine asynchrone a double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », mémoire de magister, ENP Alger, 2008
- [19] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [20] H. BÜHLER, Electronique de réglage et de Commande, Traité d'électricité, d'électronique et d'électronique, vol XVI, édition Georgi, 1979.
- [21] J. L DALMASSO, Electronique de puissance Commutation, édition Belin, 1986.
- [22] A. BOYETTE, Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec un système de stockage pour la production Eolienne, Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [23] MOUSSA SIDDO Abdoulaziz , Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne. Ingénieur d'état en Electrotechnique, ENP Alger, 2007
- [24] A.Petersson, "Analyse, Modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines", Thèse de licence en électrotechnique, université technologique de Chalamer, Göteborg, Sweden 2003.
- [25] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems, Royal Institute of Technology
- [26] Georges Salloum, « contribution a la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation », thèse de doctorat, Institut polytechnique de Toulouse, 2007.
- [27] AKKARI NADIA, « contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation » thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [28] A. Meroufel, Y. Djeriri, A. Massoum et A. Hammoumi, « commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels de l'énergie d'une MADA intégrée a un système éolien » Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 669 – 682, 2010.
- [29] M. Ali Dami, K. Jemli, M. Jemli, M. Gossa « doubly fed induction generator, with crow-bar system, under micro-interruptions fault », International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Volume 2, Number 3, 2010.
- [30] Miguel LOPEZ, " Contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée", Thèse Doctorat Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes » Université Paris Sud 11, France,2008.

Bibliographie

[31] F.J POSA, “Modélisation, conception et commande d’une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable.”, Thèse de Doctorat, INP, Grenoble, France, Octobre 2003.

[32] H. BÜHLER, Electronique de puissance, Traité d’électricité, d’électronique et d’électrotechnique, vol XV, 2ème édition Georgi, 1981.

[33] L. Xu & W. Cheng “Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless schem “, IEEE trans. On Industry Application 31 (1995), no. 3, p. 636{642, mai/juin 1995.

[34] E.Hau, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd ed. Springer, 2005.

[35] Messbah,Boudinare « Etude et caractérisation d’une MADA en régime permanent application a une éolienne connecté ou réseaux »mémoire de master ,2011

[36] BECHOUCHE.A. « Utilisation des techniques avancées pour l’observation et la commande d’une machine asynchrone Application à une éolienne » Thèse de Doctorat, université mouloud Mammeri de Tizi ousou ,2013

[37] The World Wind Energy Association, Half-year Report 2011.

[38] A.Petersson, “Analyse, Modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines’’, Thèse de licence en électrotechnique, université technologique de Chalamer, Göteborg, Sweden 2003.

[39]L. Khettache, “Etude et commande d’un système éolien à base d’une machine électrique double alimentée,” Mémoire de Magister de l’Université de Batna, Algérie, 2007.

Annexe

Paramètre de simulation

Les paramètres mécaniques de la turbine éolienne de 3KW basée sur une machine asynchrone de 3KW :

Paramètre de la machine :

$R_s = 1.5$	(Résistance statorique)
$R_r = 0.7$	(Résistance rotorique)
$L_s = 0.24$	(Inductance de fuite statorique)
$L_r = 1.7507e-4$	(Inductance de fuite rotorique)
$M = 0.0135$	(Mutuelle inductance)
$L_s = l_s + (M)$	(Inductance statorique)
$L_r = l_r + (M)$	(Inductance rotorique)
$p = 2$	(Nombre de paires de pôles)
$T_s = L_s / R_s$	(Constante de temps statorique)
$T_r = L_r / R_r = 0.099$	(Constante de temps rotorique)
$\sigma = 1 - (M^2 / L_r * L_s) = 0.0872$	(Coefficient de dispersion)
$J = 0.037$	(Inertie de l'arbre)
$f = 0.0125 * 1.4$	(Coefficient de frottement)

Paramètre de la turbine :

$R = 4.5$	(Rayon de l'éolienne)
$S = \pi * (R)^2$	(Surface)
$\rho = 1.2$	(Densité volumique de l'air)
$K = 24$	(Gain de multiplicateur de vitesse)

Annexe

P	Nombre de paire de pôles.
f	Fréquence [Hz]
P_{\max}	puissance maximale [W]
I_{\max}	courant maximal [A]
V_{\max}	tension maximale [V]
$\dot{\theta}$	Vitesse angulaire du glissement [rd/s]
V_{abc}	Tensions efficaces de la lign[V]
P_s	Puissance active statorique [W]
Q_s	Puissance réactive statorique [VAR]
P_r	Puissance active rotorique [W]
Q_r	Puissance réactive rotorique [VAR]
P_{sref}	Puissance active de référence statorique [W]
Q_{sref}	Puissance réactive de référence statorique [VAR]
f_s	Fréquence statorique[Hz]
f_r	Fréquence rotorique[Hz]
g	Glissement
K	Gain du multiplicateur
V_v	Vitesse du vent [m/s]
V_v	Vitesse moyenne du vent [m/s]
ρ	Masse volumique de l'air[Kg/m ³]
S	Surface balayée par les pâles [m ²]
P_v	Puissance extraite du vent [W]
C_p	Coefficient de puissance
R	Rayon des pales [m]
Ω	Vitesse de rotation [rd/s]
P_n	Puissance nominale [W]
C_{est}	Couple estimé de la turbine[N.m]
Ω_{top}	Vitesse de rotation optimale de la turbine [rd/s]
$\tilde{\lambda}$	Vitesse spécifique
$\tilde{\lambda}_{opt}$	Vitesse spécifique optimale

Annexe

C_{em}	Couple électromagnétique [N.m]
C_t	Couple aérodynamique avant multiplicateur [N.m]
C'_t	Couple mécanique après multiplicateur [N.m]
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine [rd/s]
$F(p)$	fonction de transfert du régulateur
J	moment d'inertie des masses tournantes [Kg.m ²]
J_m	moment d'inertie de la machine [Kg.m ²]
J_t	moment d'inertie de la turbine [Kg.m ²]
λ_{opt}	Vitesse spécifique correspondant à $C_p max$
C_r	Couple résistant dû au frottement [N.m]
f_r	Coefficient de frottement de la machine [N.s/rd]
V_{abcs}	Tensions simples du stator de la MADA [V]
V_{abcr}	Tensions simples du rotor de la MADA [V]
I_{abcs}	Courants du stator de la MADA [A]
I_{abcr}	Courants du rotor de la MADA [A]
Φ_{abcs}	Flux statorique de la MADA [web]
Φ_{abcr}	Flux rotorique de la MADA [web]
R_s	Résistance d'une phase du stator [Ω]
R_r	Résistance d'une phase du rotor [Ω]
L_s	Inductance propre d'une phase du stator [H]
L_r	Inductance propre d'une phase du rotor [H]
M_{ss}	Inductance mutuelle entre phases du stator [H]
M_{sr}	Inductance mutuelle entre phase du stator et du rotor [H]
M_{rr}	Inductance mutuelle entre phases du rotor [H]
M	Inductance mutuelle maximale [H]
n_p	Nombre de paires des pôles
V_{ds}, V_{qs}	Composantes de la tension statorique respectivement suivant l'axe d et q [V]
V_{dr}, V_{qr}	Composantes de la tension rotorique respectivement suivant l'axe d et q [V]
I_{ds}, I_{qs}	Composantes du courant statorique respectivement suivant l'axe d et q [A]
I_{dr}, I_{qr}	Composantes du courant rotorique respectivement suivant l'axe d et q [A]
Φ_{qs}, Φ_{ds}	Composantes du flux statorique respectivement suivant l'axe d et q [web]
Φ_{dr}, Φ_{qr}	Composantes du flux rotorique respectivement suivant l'axe d et q [web]

Annexe

$[P(\theta)] :$	Matrice de transformation directe de PARK
$[P(\theta)]^{-1}$	Matrice de transformation inverse de PARK
ω_s	Vitesse électrique du champ tournant [rd/s]
ω_r	Vitesse électrique du rotor [rd/s]
$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right)$	Coefficient de dispersion.
$N_r \sigma L_r$	L'inductance de fuite totalisée au rotor [H].
$R_r' = R_r \left(\frac{L_s}{M}\right)^2$	Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator [Ω].
$X_f = \omega_s N_r \left(\frac{L_s}{M}\right)^2$	Réactance de fuite totalisée au rotor ramenée au stator [Ω].
$\vec{V}_r' = \left(\frac{L_s}{M}\right) \vec{V}_r$	Tension d'alimentation du rotor ramenée au stator [v].
P_{airg}	La puissance dans l'entrefer [W].
P_{jr}	Pertes joule rotorique [W].
P_{js}	Pertes joule statorique [W].