

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE:	1
1. CHAPITRE 1: GENERALITE SUR L'ENERGIE EOLIENNE	3
1.1 Introduction.	4
1.2 Qu'est-ce que c'est que l'énergie éolienne ?	5
1.3 Pourquoi choisir l'énergie éolienne ?	5
1.3.1 Domaine d'application de l'énergie éolienne.....	6
1.3.2 Inconvénients de l'énergie éolienne :.....	6
1.4 Définition d'un système éolien.....	6
1.5 Les parcs éoliens.....	7
1.5.1 Les différents types de parcs éoliens.....	8
1.5.2 Critère de choix d'un parc éolien :	8
1.6 Les Différents Types des turbines éoliennes :	9
1.6.1 Classement selon la structure :	9
1.6.2 Classement selon la taille et la puissance délivrée :	11
1.7 Principaux composants d'une éolienne.	12
1.7.1 Le mât :	12
1.7.2 La base :	13
1.7.3 L'Hélice (rotor) :	13
1.7.4 Système d'orientation de la nacelle :	13
1.8 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne.	15
1.9 Types d'éoliennes.	16
1.9.1 Eoliennes à vitesse fixe.	16
1.9.2 Eoliennes à vitesse variable.....	19
1.10 Conclusion :	20
2. CHAPITRE 2 : ASSOCIATION DE LA MADA ET LA TURBINE EOLIENNE.	21
2.1 Introduction.	22

2.2	Pourquoi les machine à courant alternatif ?.....	22
	La machine asynchrone à double alimentation	22
2.3	Etat de l'art de la MADA.	22
2.3.1	Description de la machine asynchrone à double alimentation.	22
2.3.2	Représentation de la machine asynchrone à double alimentation :.....	24
2.4	Domaine d'application de la MADA.....	24
2.5	Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation.	25
2.5.1	Avantages de la machine asynchrone à double alimentation.	25
2.5.2	Inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation.	26
2.6	Classification des machines asynchrone à double alimentation.....	26
2.6.1	Machine asynchrone à double alimentation sans collecteur-balais.....	26
2.6.2	Machine asynchrone à double alimentation en cascade asynchrone.....	27
2.6.3	Machine asynchrone à double alimentation simple :	28
2.7	Régime de fonctionnement de la MADA.	28
2.8	Mode de fonctionnement de la MADA.	30
2.8.1	Fonctionnement en moteur hypo-synchrone.	30
2.8.2	Fonctionnement en moteur hyper-synchrone.	30
2.8.3	Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone.....	30
2.8.4	Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone.....	30
2.9	Les différentes configurations de la MADA avec les convertisseurs de puissances. 31	
2.9.1	Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur.....	31
2.9.2	Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs.....	32
2.9.3	Association des convertisseurs en fonctionnement en génératrice.	33
2.10	Mode de variation de vitesse de la MADA.....	34
2.10.1	Action sur le glissement.	34
2.10.2	Action sur la fréquence.	35
2.10.3	Action sur le nombre de pôles.....	35

2.11	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.	35
	Hypothèse simplificatrice.....	36
2.12	Equations électriques de la machine.	36
2.13	Transformation de PARK.	38
2.13.1	Modélisation de la MADA dans le repère de PARK.	39
2.14	Modèle de la machine en représentation d'état.....	41
2.15	Simulation et interprétation des résultats :.....	43
2.15.1	Démarrage à vide.	44
2.15.2	Introduction de couple de charge.	45
2.16	La turbine éolienne.	47
2.17	Modélisation du vent.....	47
2.18	Modélisation de la turbine.....	48
2.18.1	Schéma d'une turbine éolienne.	48
2.18.2	La courbe de puissance.	48
2.18.3	La puissance cinétique du vent.....	49
2.18.4	Coefficient de puissance.....	49
2.18.5	Puissance aérodynamique.....	50
2.18.6	Le couple aérodynamique.	50
2.18.7	La limite de betz.	50
2.19	Modèle du multiplicateur.	50
2.20	Equation dynamique de l'arbre :.....	51
	51
2.21	Simulations et interprétations des résultats :.....	52
2.22	Commande de la turbine éolienne.....	53
2.22.1	La commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale.	53
2.23	Association MADA – Turbine éolienne.	54

2.24	Conclusion :	56
3.	COMMANDE VECTORIEL DE LA MADA.	57
3.1	Introduction :	58
3.2	Principe de la commande vectoriel de la MADA.	58
3.3	Principe de la commande à flux orienté	59
3.4	Procède d'orientation du flux :	60
3.4.2	Commande vectorielle directe (DFOC) :	65
3.4.3	Commande indirecte :	65
3.4.4	La commande indirecte en boucle ouverte :	66
3.4.5	La commande indirecte en boucle fermé :	66
3.5	La commande vectorielle directe	67
3.5.1	Définition générale	67
3.5.2	Commande directe en puissance active et réactive de la MADA en génératrice	67
3.6	Commande indirecte	68
3.6.1	Définition générale	68
3.6.2	Commande indirecte en puissance active et réactive de la MADA en génératrice	68
3.7	Etude de la régulation pour la commande.	69
3.7.1	Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI)	69
3.8	Simulation et interprétation des résultats :	70
3.4.1	Interprétation des résultats :	74
3.9	Conclusion.	74
4.	Chapitre 4 : APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE SUR LA MADA.	75
4.1	Introduction :	76
4.2	Historique de la logique floue:	76
4.3	Domaine d'application:	77
4.4	Principe de la logique floue :	77

4.5	Eléments de bases de la logique floue.....	78
4.5.1	Variables linguistiques :	78
4.5.2	Ensembles floue :	78
4.5.3	Fonctions d'appartenance :	79
4.5.4	Operateurs de la logique floue :	80
4.5.5	Règles floues :	81
4.6	Commande par la logique floue:	82
4.6.1	Régulateur flou :	82
4.6.2	Développement pratique du contrôleur flou :	84
4.7	Application de la logique floue à la commande de la puissance active et réactive de la GADA :	85
4.7.1	Résultats de simulation :	85
4.8	Conclusion :	88
5.	Conclusion générale.	89
6.	Références bibliographiques.	90
7.	ANNEXE.	93

Acronyme et Abréviations.

Acronyme	Signification
MADA	: M achine A synchrone à D ouble A limentation.
MADASC	: M achine A synchrone à D ouble A limentation Sans Collecteur.
MADAS	: M achine A synchrone à D ouble A limentation Simple.
GADA	: G énératrice A synchrone à D ouble A limentation.
DFIM	: D oubly F ed I nduction M achine.
MAS	: M achine A synchrone
MS	: M achine S ynchrone.
MCC	: M achine à C ourant C ontinue.
MLI	: M odulation de L argeur d' Impulsion
IGBT	: I nsulated G âte B ipolar T ransistor
GTO	: G âte T run O ff.
PI	: P roportionnel I ntégral
FTBO	: F onction de T ransfert en B oucle O uverte.
FTBF	: F onction de T ransfert en B oucle F ermée
MPPT	: M aximum P ower P oint T racking.

Liste des symboles.

\mathbf{p} : Operateur de LAPLACE

ρ : Densité de l'air 1.225 kg.m^{-3} .

$\mathbf{S}_{\text{éolienne}}$: Surface balayée par le rotor de l'éolienne.

\mathbf{R} : Rayon du rotor éolien.

\mathbf{G} : Gain du multiplicateur.

\mathbf{C}_p : Coefficient de puissance de l'éolienne.

\mathbf{v} : Vitesse relative de l'éolienne.

β : L'angle de calage (l'angle de l'orientation des pales).

\mathbf{P}_{vent} : Puissance du vent.

\mathbf{V}_{vent} : Vitesse du vent.

$\mathbf{P}_{\text{éolienne}}$: La Puissance extraite par l'éolienne.

\mathbf{C}_g ; Couple de la génératrice.

$\mathbf{C}_{\text{éolienne}}$: Couple de l'éolienne (aérodynamique).

\mathbf{C}_f : Le couple résistant dû aux frottements.

f : Le coefficient de frottement.

\mathbf{P}_{nom} : Puissance nominale.

$\mathbf{C}_{\text{em-ref}}$: Couple électromagnétique de référence.

\mathbf{K}_{ass} : Régulateur de vitesse.

$\mathbf{\Omega}_{\text{ref}}$: Vitesse de référence.

$\mathbf{\Omega}_{\text{turbine}}$: La Vitesse de rotation de la turbine.

$\mathbf{\Omega}_{\text{turbine-ref}}$: La vitesse de référence de la turbine.

$\mathbf{C}_{p\text{max}}$: Le Coefficient de puissance maximale.

\mathbf{C}_{mec} : Le couple mécanique.

$C_{aér_est}$: Le couple aérodynamique estimé.

$V_{estimé}$: La valeur estimée de la vitesse du vent.

$\Omega_{turbine-estimé}$: La vitesse estimée de la turbine.

C_p^{opt} : Coefficient de puissance optimale.

s, r : Indice du stator, du rotor.

d, q : Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature.

V_A, V_B, V_C : Tension aux phases A, B et C.

I_{ds}, I_{qs} : Composant direct du stator dans le repère Park.

g : Glissement d'une machine asynchrone.

f_1, f_2 : Fréquence statorique et rotorique.

R_s, R_r : Résistance d'une phase statorique et rotorique.

L_s, L_r : Inductances cycliques statorique et rotorique.

M : Inductance mutuelle cyclique stator-rotor (magnétisante).

M_s, M_r : Inductances mutuelles stator-stator et rotor-rotor.

M_{sr} : Inductance mutuelle stator-rotor.

Φ_s, Φ_r : Respectivement flux statorique et rotorique.

$\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{dr}$: Respectivement flux statorique et flux rotorique sur les axes d et q.

Liste des figures.

<u>Figure 1-1 : Les étapes de conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique.</u>	7
Figure 1-2 : Principaux organes du système de conversion éolien [4].	7
Figure 1-3 : Les parcs éoliens terrestres (Onshore).	9
Figure 1-4 : Les parcs éoliens sur mer (Offshore).	9
Figure 1-5 : Différents types d'éoliennes à axe vertical.	10
Figure 1-6 : Différents types d'éoliennes à axe horizontale.	11
Figure 1-7: Taille des hélices en mètres et puissance en MW [2].	12
Figure 1-8 : Schéma d'une éolienne.	15
Figure 1-9 : Eolienne a vitesse fixe reliée directement au réseau [8]	16
Figure 1-10 : caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone. [8]	17
Figure 1-11 : représentation de la puissance électrique en fonction de la vitesse du vent.	18
Figure 1-12 : Génération à puissance électrique constante (pales orientables).	18
Figure 1-13 : Eolienne à vitesse variable [8]	19
Figure 2-1 : Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation.	23
Figure 2-2 : représentation de la structure de la MADA.	23
Figure 2-3 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation	24
Figure 2-4 : Comparaison de Zone de fonctionnement en survitesse sans démagnétisation : MAS et MADA.	25
Figure 2-5 : Schéma de la machine asynchrone à double alimentation sans collecteur.	27
Figure 2-6 : Schéma de principe de la régulation de la machine asynchrone à double alimentation en cascade asynchrone.	27
Figure 2-7 : Schéma de principe de la régulation de la machine asynchrone à double alimentation simple.	28
Figure 2-8 : les différents modes de fonctionnement de la MADA.	31

Figure 2-9 : Schéma d'un système utilisant une machine asynchrone à double alimentation en moteur alimenté par un seul convertisseur.	32
Figure 2-10 : Schéma d'un système utilisant une machine asynchrone à double alimentation en moteur alimenté par deux convertisseurs.	33
Figure 2-11 : Schéma d'un système utilisant une machine asynchrone à double alimentation en génératrice alimenté par un seul convertisseur.	34
Figure 2-12 : Représentation graphique de la MADA.	36
Figure 2-13 : Représentation de la machine dans le repère diphasé.	39
Figure 2-14 : Les résultats de simulation de la machine en vide.	44
Figure 2-15 : Schéma d'une turbine éolienne.	48
Figure 2-16 : La courbe de puissance d'une éolienne.	49
Figure 2-17 : Schéma bloc de l'ensemble turbine -multiplicateur- arbre.	51
Figure 2-18 : Simulation de la turbine mode sous MATLAB.	52
Figure 2-19 : Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne à grande puissance.	53
Figure 2-20 : Résultat de simulation de l'association MADA/Turbine.	55
Figure 3-1 : Commande d'une MCC et commande vectorielle d'une MADA.	58
Figure 3-2 : orientation du flux statorique.	59
Figure 3-3 : Schéma bloc du système à réguler.	64
Figure 3-4 : Schéma bloc de la commande directe.	65
Figure 3-5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.	66
Figure 3-6 : la commande vectorielle indirecte en boucle fermé.	67
Figure 3-7 : Schéma de régulation avec PI classique.	69
Figure 3-8 : Réponse dynamique de la puissance active statorique.	71
Figure 3-9 : Réponse dynamique de la puissance réactive statorique.	71

Figure 3-10 : <i>Le couple électromagnétique.</i>	72
Figure 3-11 : <i>le courant statorique direct.</i>	72
Figure 3-12 : <i>le courant statorique quadrature.</i>	72
Figure 3-13 : <i>le courant rotorique direct.</i>	73
Figure 3-14 : <i>le courant rotorique en quadrature.</i>	73
Figure 3-15 : <i>Le flux rotorique direct.</i>	73
Figure 3-16 : <i>Le flux rotorique en quadrature.</i>	74
Figure 4-1 : <i>Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.</i>	78
Figure 4-2 : <i>Différente forme des fonctions d'appartenances.</i>	79
Figure 4-3 : <i>Représentation graphique des ensembles flous d'une variable linguistique.</i>	80
Figure 4-4 : <i>Schéma synoptique d'un contrôleur flou.</i>	82
Figure 4-5 : <i>Schéma bloc d'une boucle régulation à contrôleur flou.</i>	84
Figure 4-6 : <i>La puissance active statorique.</i>	86
Figure 4-7 : <i>La puissance réactive.</i>	86
Figure 4-8 : <i>Le courant direct rotorique.</i>	87
Figure 4-9 : <i>Le courant direct en quadrature.</i>	87
Figure 4-10 : <i>Le couple électromagnétique.</i>	87

INTRODUCTION GENERALE:

Les machines asynchrones sont les plus utilisées dans l'industrie en raison de leur fiabilité et leur construction simple. Elles occupent plus de 80% dans le domaine de conversion électromagnétique d'énergie. Leur dynamique non linéaire est un problème assez délicat car elle rend la commande très difficile. [26]

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très répandue puisqu'elle exploite de plusieurs avantages par rapport à d'autres types de machines à vitesse variable, son utilisation dans la chaîne de conversion électromécanique en tant qu'aérogénérateur ou moteur a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années.

Un intérêt de plus en plus croissant est accordé à la machine asynchrone à double alimentation. Cet intérêt est dû aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor. Certaines études font d'elle une sérieuse concurrente à plusieurs machines électriques, particulièrement la machine asynchrone à cage classique. Pourtant à première vue, la balance semble pencher tout de suite du côté de la machine à cage d'écureuil : La machine asynchrone à rotor bobiné est plus volumineuse, utilise des balais et nécessite plus de convertisseurs pour un fonctionnement moteur. [26]

La GADA utilisée pour la génération d'énergie électrique dans un site isolé ceci est considéré comme une solution écologique intéressante. Le générateur à induction double alimentation «GADA" est d'avantage adapté pour cette application, par ce qu'il reçoit une vitesse variable sur son arbre, et il doit produire une tension à amplitude et fréquence constantes coté charge, donc pour une génératrice autonome, débitant sur un site isolé, le problème devient plus complexe, car il faut contrôler aussi la tension et la fréquence du côté du stator [26].

Dans le domaine de la commande des machines électriques, les travaux de recherche s'orientent de plus en plus vers l'application des techniques de commande modernes. Ces techniques évoluent d'une façon vertigineuse avec l'évolution des calculateurs numériques et de l'électronique de puissance. Ceci permet de générer des systèmes industriels de hautes performances.

Ce mémoire, est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré pour l'étude et la modélisation de la turbine éolienne, ensuite le 2^{ème} chapitre est pour l'étude générale de la MADA et ses applications ainsi sa modélisation afin de simplifier le chemin vers une loi de commande qui est nécessaire pour la commande vectorielle.

Le 4^{ème} chapitre est basé sur l'amélioration des performances de la régulation par une technique s'appelle « floue ».

Ce travail sera terminé par une conclusion générale.

1. CHAPITRE 1: GENERALITE SUR L'ENERGIE EOLIENNE.

1.1 Introduction.

De nos jours, l'électricité joue un rôle primordial dans la vie de tous les jours et devient un élément important dont on ne peut pas s'en passer. Cette énergie est considérée comme une énergie propre car les équipements consommant l'énergie électrique n'émettent ni de gaz polluant, ni de gaz à effet de serre. Toutefois, l'énergie électrique n'est pas disponible naturellement sur terre, et sa production nécessite certains processus qui peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement et nuire à la nature.

C'est pour cela, l'utilisation des énergies renouvelables devient une nécessité, et le nombre des centrales à énergie renouvelables ne cesse pas d'augmenter car elles représentent une solution écologique pour la production de l'énergie électrique et constituent une bonne alternative aux sources d'énergies fossiles (charbon...) et d'énergies fissiles (nucléaire).

Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Cette dernière sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par l'intermédiaire d'une énergie mécanique (turbine), à l'aide des dispositifs et des machines synchrones et asynchrones en particulier la machine asynchrone à double alimentation.

Le vent qui représente l'énergie primaire dans un système éolien est une grandeur aléatoire, de nature très fluctuante et qui varie à tout instant, c'est pour cela, une éolienne est constituée d'une façon à ce qu'elle capte un maximum d'énergie sur une grande plage de variation de vitesse de vent afin d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes et de maximiser la puissance résultante pour une quantité de vent donnée.

Grâce au développement des variateurs électroniques, aujourd'hui, les éoliennes peuvent fonctionner à des vitesses variables contrairement aux anciennes éoliennes qui fonctionnaient seulement à une vitesse fixe, ces éoliennes modernes ont permis d'augmenter la plage de fonctionnement, le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques, et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

La puissance générée par l'éolienne est variable et non stable à cause du vent qui est une source intermittente (varie à tout instant), cela peut perturber la stabilité du réseau dont elle est connectée mais depuis l'apparition des éléments de l'électronique de puissance, un remède est apparu à ce problème.

Toutefois, malgré les avantages de l'énergie éolienne, elle présente quand même un certain nombre de désavantages qui peuvent se résumer à un coût élevé, et à un rendement limité, ainsi qu'une puissance générée très réduite par rapport à l'énergie nucléaire, elle modifie aussi le paysage, et est aussi une source de nuisance sonore.

1.2 Qu'est-ce que c'est que l'énergie éolienne ?

Le vent, une source inépuisable, et disponible sur terre contenant naturellement une énergie cinétique, et depuis longtemps, l'humain a cherché à capter cette énergie naturelle et de la rendre exploitable, les premières utilisations étaient pour moulin à grain grâce au fameux moulin à vent, elle a aussi été utilisée pour le pompage d'eau et pour faire avancer les navires.

L'invention de l'éolienne fut une révolution, et depuis, l'énergie du vent est devenue exploitable sous forme d'énergie électrique.

En effet, le mot éolienne vient du mot grec Éole, dieu du vent, signifiant rapide, vif et qui désignait dans l'antiquité le dieu du vent, ce mot est également utilisé pour nommer les machines qui utilisent cette énergie : Les éoliennes. [1]

1.3 Pourquoi choisir l'énergie éolienne ?

L'énergie éolienne est une énergie inépuisable et disponible naturellement sur terre, son utilisation représente certains avantages comme :

- Coût de production relativement faible par rapport à l'énergie produite.
- La surface occupée par les éoliennes est moins importante. En effet, lorsqu'un parc éolien est installé sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol est requis pour l'éolienne, tout en assurant la continuité de l'activité agricole.
- Elle est considérée comme une énergie propre (pas d'émission de gaz à effet de serre, pas de déchets toxiques ou radioactifs).

1.3.1 Domaine d'application de l'énergie éolienne.

- Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année.
- Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètre sont choses courantes.
- Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire jusqu'à 4.5 MW [2].

1.3.2 Inconvénients de l'énergie éolienne :

Malgré les avantages de l'énergie éolienne mais toutefois, elle représente quand même certains nombres d'inconvénients.

Le principal désavantage de cette énergie est en réalité le caractère intermittent de sa ressource, le vent. La puissance obtenue est fortement dépendante de la vitesse du vent puisque proportionnelle au cube de celle-ci et est donc elle-même hautement instable, ce qui la rend difficilement prévisible. Or, l'un des intérêts des exploitants du réseau électrique est justement de contrôler la production à venir et de la répartir sur le réseau de manière à répondre au mieux à la demande. [3]

On peut ajouter à cela d'autres inconvénients comme :

- Faible rendement (il faudrait environs 900 centrales éoliennes pour remplacer une centrale nucléaire).
- Son impact visuel qui est parfois non accepté par les riverains.
- Le bruit engendré par le fonctionnement de l'éolienne conduit à des nuisances sonores.

1.4 Définition d'un système éolien.

Un système de conversion éolien, appelé aussi un aérogénérateur, est un dispositif qui permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique grâce à une turbine, ensuite de multiplier l'énergie mécanique grâce à un multiplicateur, cette énergie

mécanique résultante sera convertie à son tour à une énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice, l'énergie électrique sera ensuite injecter au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur statique, et d'un transformateur élévateur pour qu'elle soit acheminée par des câbles souterrains vers des centres de transformations sous 20KV.

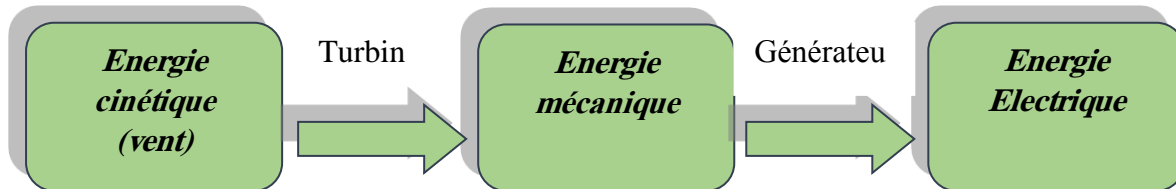


Figure 1-1 : Les étapes de conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique.

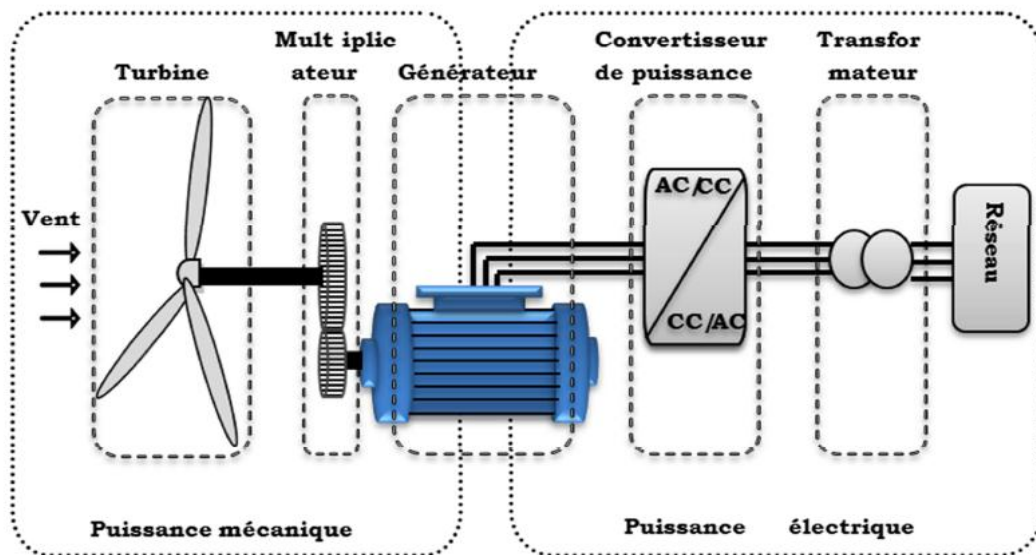


Figure 1-2 : Principaux organes du système de conversion éolien [4].

1.5 Les parcs éoliens.

Généralement, l'exploitation de l'éolien dans le cadre de la production d'électricité se fait sous forme de ferme éolienne, où plusieurs turbines éoliennes sont regroupées sur un seul site, c'est ce qui forme : Un parc éolien. Ce type de configuration permet nécessairement la réduction des coûts d'investissement, puisque des économies peuvent être effectuées sur plusieurs points : l'infrastructure électrique, en particulier les lignes électriques, ce qui en même temps réduira les pertes de puissance, les dépenses liées à l'obtention des concessions sur des terrains pour implanter la ferme éolienne, les tâches liées à la maintenance et

l'exploitation de la ferme éolienne seront certes facilitées, et enfin la facilité du raccordement au réseau de distribution électrique. [5]

1.5.1 Les différents types de parcs éoliens.

On peut distinguer deux types de parcs éoliens, parc éolien terrestre (Onshore) et parc éolien sur mer (offshore) :

1.5.1.1 Parc éolien terrestre (Onshore) :

- Présence du vent variable et réduite par rapport aux parcs éolien sur mer ce qui diminue le rendement.
- Facilité de déplacement des matériaux lors de construction du parc éolien terrestre.
- Raccordement au réseau haute tension plus court.
- Impact visuel et nuisance sonores pour les riverains.

1.5.1.2 Parc éolien sur mer (Offshore) :

- Présence du vent plus régulière et constante.
- Contraintes mécaniques et techniques beaucoup plus lourdes et difficultés d'acheminement du matériel pour construction.
- Chemin de raccordement au réseau de haute tension beaucoup plus long.
- Impact visuel moins important.

1.5.2 Critère de choix d'un parc éolien :

Le choix de l'emplacement du parc éolien influe fortement sur l'efficacité et le rendement de l'éolienne, c'est pour cela, les parcs éoliens ne peuvent pas être construits n'importe où et le choix de ces sites est soumis à certains critères. Avant toute construction, le site réservé au parc doit être soumis à une observation du potentiel du vent (histoire des vents depuis au moins une décennie) pour conclure l'aptitude du site à être un parc éolien. Les parcs éolien doivent être installés dans des endroits de hauteur dégagés de tout obstacle (pour éviter le phénomène de turbulence) soumis en permanence à des vents réguliers dont la vitesse et la direction est constante (10 à 20km/h) sans toutefois atteindre des valeurs excessifs, les parcs doivent aussi se situer dans des endroits éloignés de l'habitation pour éviter l'impact visuel et la nuisance sonores au riverains.



Figure 1-3 : *Les parcs éoliens terrestres (Onshore).*



Figure 1-4 : *Les parcs éoliens sur mer (Offshore).*

1.6 Les Différents Types des turbines éoliennes :

1.6.1 Classement selon la structure :

Le monde des éoliennes ne se résume pas à la structure de l'éolienne à 3 pâles, mais elles diffèrent de part leurs structures, leurs tailles, ou encore leurs puissances. La forme de l'éolienne est conditionnée par l'axe de rotation du rotor, selon leurs structures, on peut distinguer deux types d'éolienne :

- Les éoliennes à axe vertical.
- Les éoliennes à axe horizontale.

1.6.1.1 Les éoliennes à axe vertical.

Les éoliennes à axe verticales sont des éoliennes dont les pâles du rotor sont placées de manière verticales, c'est les premières éoliennes développées pour produire de l'énergie éolienne, ce genre d'éoliennes possèdent l'avantage d'être moins encombrantes, esthétiques, et plus silencieuse ainsi qu'elles fonctionnent à la présence des vents faibles et irréguliers, ce qui les rendent des éoliennes parfaites pour les milieux urbains. Toutefois, elles présentent certains désavantages comme leurs coûts augmentés, leurs structures complexes, ainsi que leurs rendements très faibles par rapport aux éoliennes à axes horizontales.

On peut distinguer deux types d'éoliennes à axes verticales :

Types Savonius : constituées de plusieurs pâles sous la forme d'un demi cylindres reliées à un axe verticale, elles sont plus sensibles aux vents faible et silencieuses, mais elles ont un rendement faibles par rapport au éoliennes de types Darrieus.

Types Darrieus : a pâles verticales, paraboliques ou hélicoïdales, leurs encombrement est plus faibles ce qui leurs donnent un avantage en terme d'intégration paysagère et architecturale.

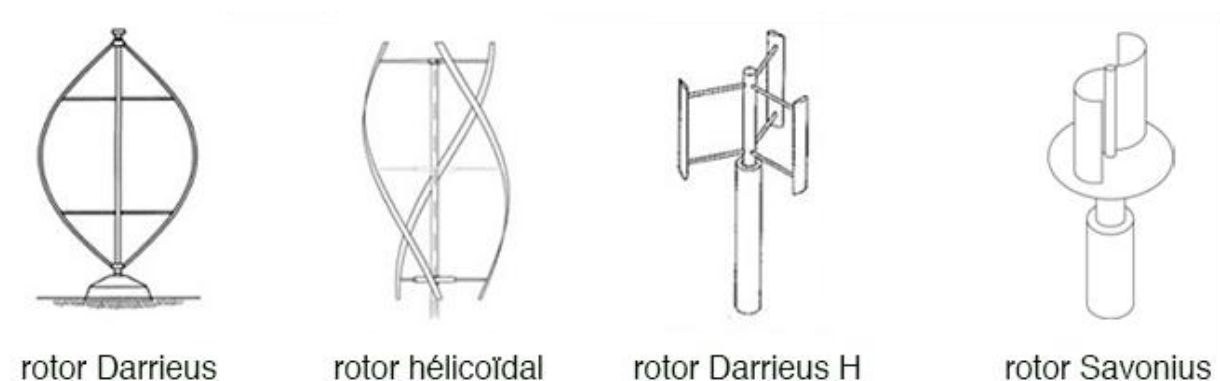


Figure 1-5 : Différents types d'éoliennes à axe vertical.

1.6.1.2 Les éoliennes à axe horizontales.

Leurs structures est tirée de la structure de l'ancien moulin à vent, elles sont généralement composées de pâles dont le nombre peut être très variables, de 1 à 3 pâles, l'éolienne a 3 pâles (tripale) est la plus utilisée car elle constitue un bon compromis entre le puissance générée, le coût et le poids de l'éolienne.

Pour fonctionner efficacement, les éoliennes à axes verticales doivent toujours s'orienter face au vent, cela est réalisé à l'aide d'un système de pivot automatique et un capteur de direction

du vent (girouette), le pivot s'oriente automatiquement selon le signal issu de la girouette pour s'orienter face au vent à tout moment.

Le principe de fonctionnement de ces éoliennes est d'utiliser la force portance du vent appliquée aux pâles, à la manière d'ailes d'avion, pour actionner une machine fonctionnant en génératrice (MADA).

Ce genre d'éoliennes est le plus répandus vu ce qu'elles offrent comme avantages, rendement élevé pour un coût réduit, leurs structures est moins complexes que les éoliennes à axe verticales et représentent moins de contrainte mécanique.

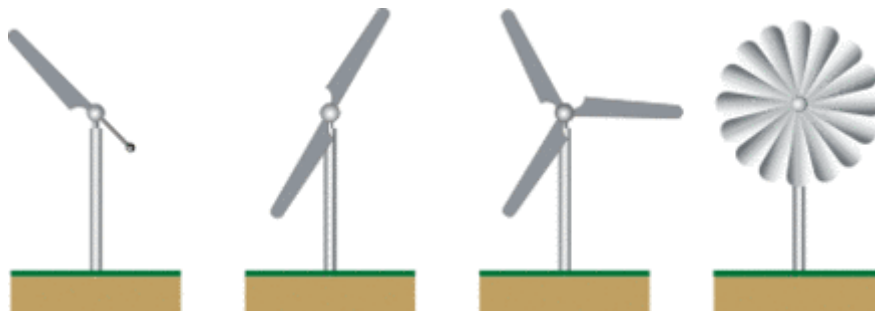


Figure 1-6 : Différents types d'éoliennes à axe horizontale.

1.6.2 Classement selon la taille et la puissance délivrée :

On peut classer les éoliennes selon la taille en trois classes principales : les petites, moyennes et grandes éoliennes. Le tableau 1-1 représente le classement des éoliennes selon leurs tailles et leurs puissances.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
<i>Petite</i>	Moins de 12m	Moins de 40KW
<i>Moyenne</i>	12m à 45m	De 40KW à 1MW
<i>Grande</i>	46m et plus	1MW et plus

Tableau 1-1 : Classification des turbines éoliennes [6].

La figure 1.7 montre le rapport taille hélice/puissance délivrée. On remarque que plus la taille de l'hélice augmente et plus la puissance délivrée est grande.

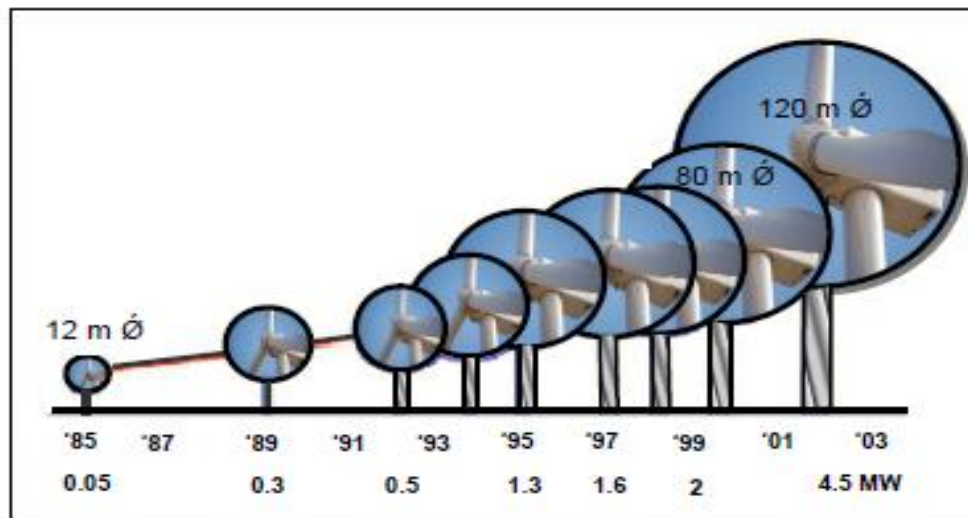


Figure 1-7: Taille des hélices en mètres et puissance en MW [2].

1.7 Principaux composants d'une éolienne.

Une éolienne (ou aérogénérateur) est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie électrique. Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins une « éolienne » classique est généralement constituée de :

1.7.1 Le mât :

C'est une tour faite d'aluminium ou de métal résistant à la rouille implantée au sol et qui supporte l'ensemble (nacelle+ hélice), la hauteur des tours d'éoliennes actuelles varient entre 10m jusqu'à 100m, elles doivent être placées à des altitudes où les vents sont forts et réguliers où il ne sont pas perturbés par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons..., on peut distinguer plusieurs types de mâts : Mât de forme tubulaire, mât haubané et les tours en treillis,

Les mâts tubulaires ont moins d'impact visuels et sont plus esthétiques, ce qui les rendent actuellement les plus utilisés par rapport aux autres types de tours malgré leurs coûts augmentés.

1.7.2 La base :

Souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres. La base permet le maintien de la structure globale.

1.7.3 L'Hélice (rotor) :

C'est la partie tournante de l'éolienne, il s'agit de l'outil permettant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle est généralement composée de trois pâles qui peuvent balayées jusqu'une surface de 120 mètres, ces pâles sont fixées sur un moyeu, La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pâles (un cercle).

On peut distinguer deux types de rotor :

1.7.3.1 Les rotors à vitesse fixe :

Ce type de rotor possède la particularité d'être directement connecté au réseau sans le passage par les éléments de l'électronique de puissance. Lors de la rotation, la vitesse du rotor est maintenue toujours au voisinage de la vitesse de synchronisme grâce à un système automatique d'orientation des pâles. Les rotors à vitesse fixe ont l'avantage d'être moins complexes et d'avoir un coût faible.

1.7.3.2 Les rotors à vitesse variable :

Ils sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pâles est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance est nécessaire. Les pâles des rotors à vitesse variables se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques, et les matériaux dont elles sont constituées sont les fibres de carbone pour sa légèreté et sa forte résistance mécanique.

1.7.4 Système d'orientation de la nacelle :

Il s'agit d'un système de pivot automatique recevant une information de la girouette pour orienter la nacelle en face du vent à tout instant.

1.7.4.1 Une nacelle :

C'est une partie soutenue par le mât, elle contient les éléments nécessaires qui permettent la conversion énergétique (force du vent vers énergie électrique), l'énergie

électrique produite est ensuite transportée vers le transformateur de bas à travers des câbles électriques se trouvant le long du mât.

Les éléments se trouvant à l'intérieur d'une nacelle sont les suivants :

1) Le multiplicateur :

Le multiplicateur relie l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide.

2) L'alternateur (Génératrice) :

C'est une machine à courant alternatif (synchrone ou asynchrone) fonctionnant en génératrice qui permet de transformer l'énergie mécanique issue du multiplicateur en une énergie électrique. En effet, la rotation du rotor de la génératrice permet de créer un champ tournant à une vitesse de 1500 tr/min, ce dernier va générer un courant triphasé de fréquence 50 Hz dans les bobines du stator.

3) **Frein:** c'est un frein mécanique relié à un capteur de vitesse de vent (anémomètre) qui s'active automatiquement lors de la présence d'un vent violent où sa vitesse dépasse les 90 km/h, ce qui empêche l'hélice de tourner pour des raisons de sécurité (risque d'endommagement de la génératrice). On peut aussi activer le frein manuellement pour effectuer la maintenance de l'éolienne en cas de défaut ou pour l'entretien par l'opérateur.

4) **Convertisseur d'électronique de puissance :** il permet le traitement des signaux générés par la génératrice.

5) **Divers dispositifs de refroidissement** (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

Les éléments se trouvant à l'extérieur de la nacelle :

L'anémomètre: Cet instrument sert à connaître la vitesse du vent. Il se situe sur la nacelle derrière les pales. Il mesure en permanence la vitesse du vent qu'il va transmettre au système de contrôle de façon à démarrer ou arrêter l'éolienne. En général, une éolienne est enclenchée à partir de 3 à 4 m/s et est arrêtée approximativement à 25m/s (90 km/h).

Girouette : Elle sert à connaître la direction du vent pour pivoter la nacelle en face du vent à tout moment.

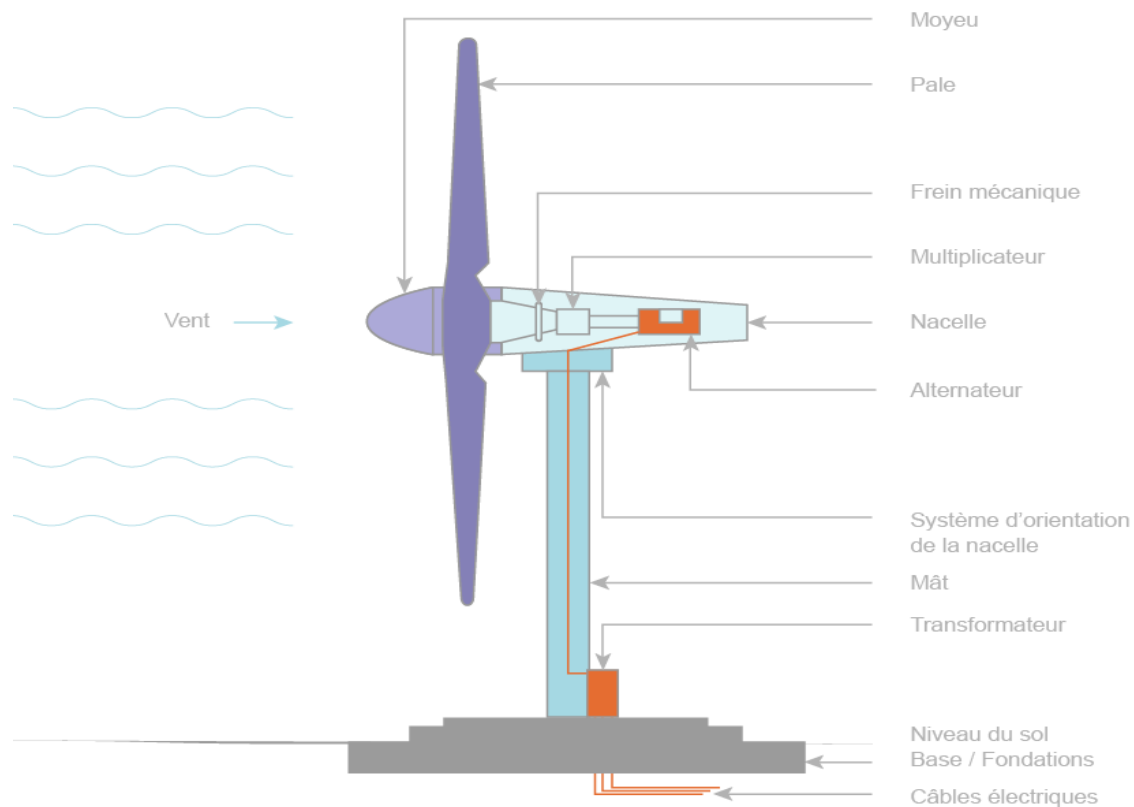


Figure 1-8 : Schéma d'une éolienne.

1.8 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en une énergie électrique.

La chaîne de conversion passe par plusieurs étapes :

- l'éolienne est équipée d'une girouette permettant de connaître la direction du vent, la turbine s'oriente automatiquement en face du vent grâce au système de pivot automatique de la nacelle afin d'optimiser l'énergie cinétique du vent absorbée par la turbine.
- Une fois la nacelle face au vent, un autre système automatique est appliqué qui a le même rôle que le système précédent permettant d'orienter les pâles de la turbine automatiquement selon la direction du vent.

- La quantité du vent optimisée permet de faire tourner la turbine et l'énergie cinétique est transformée en énergie mécanique.
- L'énergie mécanique n'est pas assez suffisante pour la génératrice, un multiplicateur de gain G intervient pour multiplier la vitesse reçue, cette énergie multipliée est reçue par l'arbre du rotor et qui provoque sa rotation.
- La rotation du rotor permet de créer un champ tournant, ce champ permet de créer des courants dans les enroulements du stator.
- L'énergie électrique produite est ensuite envoyée à un transformateur élévateur de tension pour qu'elle soit injectée au réseau.

1.9 Types d'éoliennes.

Il existe deux types d'éolienne : les éoliennes à vitesse fixe et celle dont le fonctionnement est à vitesse variable, ces dernières sont les plus utilisées et constituent la partie majeure des éoliennes d'aujourd'hui.

1.9.1 Eoliennes à vitesse fixe.

Ce type d'éoliennes est les premières à être utilisées dans le domaine d'énergie éolienne, la particularité de ce type est qu'elles sont directement couplées au réseau, ce qui fait que leur vitesse est donc imposée par la fréquence du réseau « f_s » et par le nombre de pôles de la génératrice.

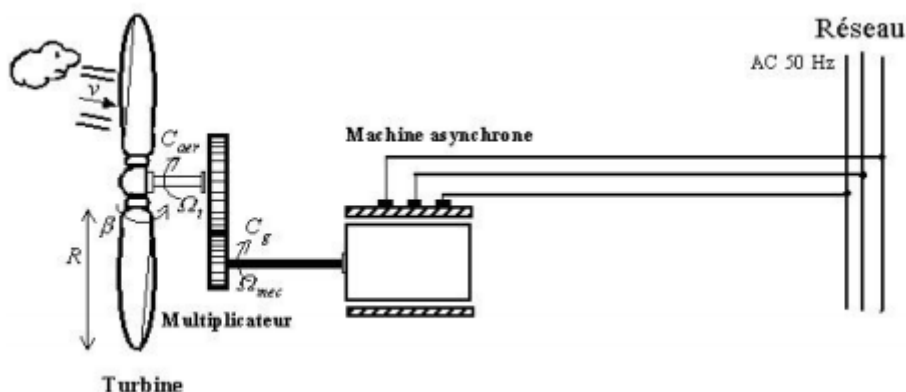


Figure 1-9 : Eolienne à vitesse fixe reliée directement au réseau [8]

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 légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500 \text{ tr/min}$ ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [8].

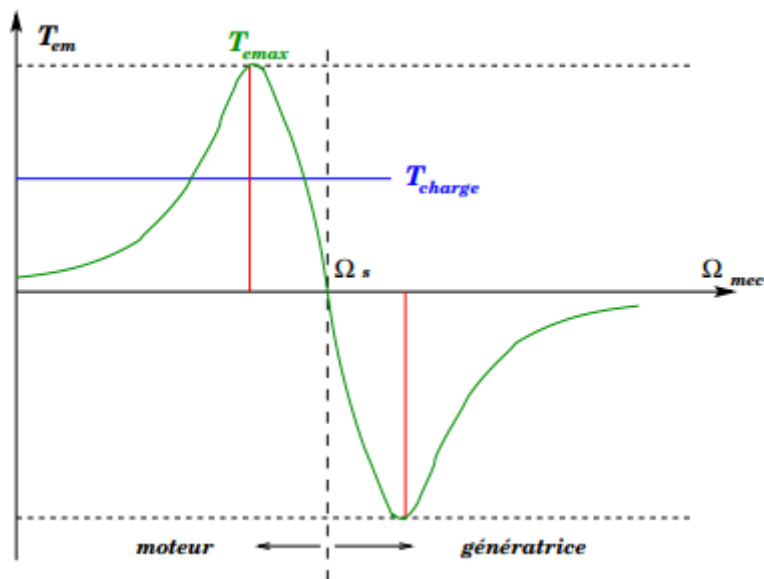


Figure 1-10 : caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone. [8]

On peut donc distinguer deux types d'éolienne à vitesse fixe :

- Les éoliennes à décrochage aérodynamiques.
- Les éoliennes à pâles orientables.

1.9.1.1 Les éoliennes à décrochage aérodynamiques.

Les éoliennes à décrochage aérodynamique (stall) génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond en général 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. [8]

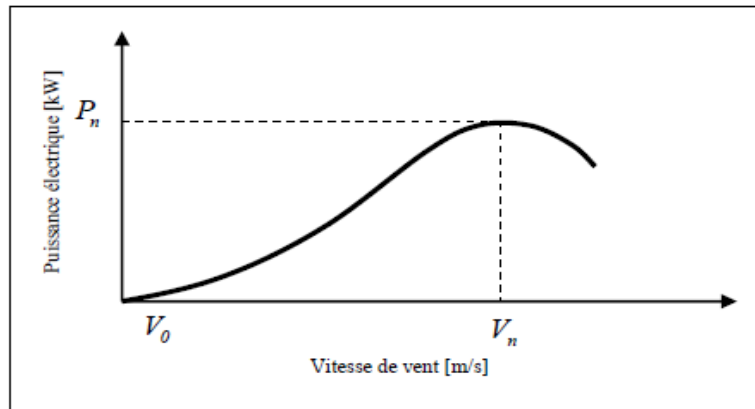


Figure 1-11 : représentation de la puissance électrique en fonction de la vitesse du vent.

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 pâles (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. [8]

1.9.1.2 Eoliennes à pales orientable.

L'utilisation d'un système d'orientation des pâles 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

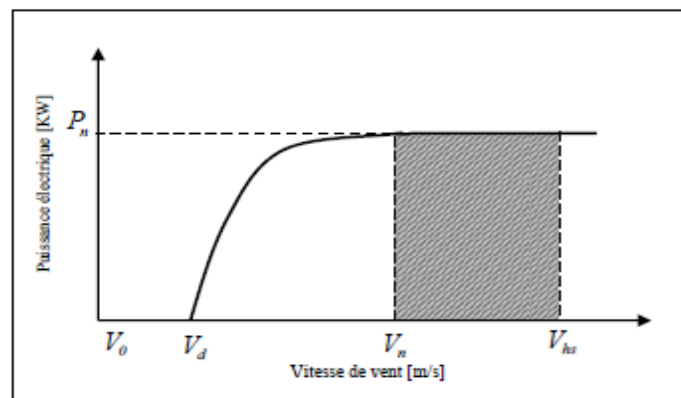


Figure 1-12 : Génération à puissance électrique constante (pales orientables).

Avec

V_d : la vitesse pour laquelle le générateur démarre.

V_n : la vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.

V_{hs} : la valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

1.9.2 Eoliennes à vitesse variable.

Le développement des éléments de l'électronique de puissance a permis l'apparition des éoliennes fonctionnant à vitesse variable. Ce genre d'éoliennes donnent l'avantage d'éliminer les contraintes mécaniques des éoliennes à vitesse fixe, elles nécessitent moins de maintenance périodique, ce qui diminue leur coût d'exploitation et augmente la durée de vie, ainsi qu'elles permettent une qualité d'énergie générée nettement plus meilleure et assurent une stabilité du réseau dont elles sont connectées.

Il existe deux structures d'éoliennes à vitesse variable qui sont présentées dans la **figure 1-13**.

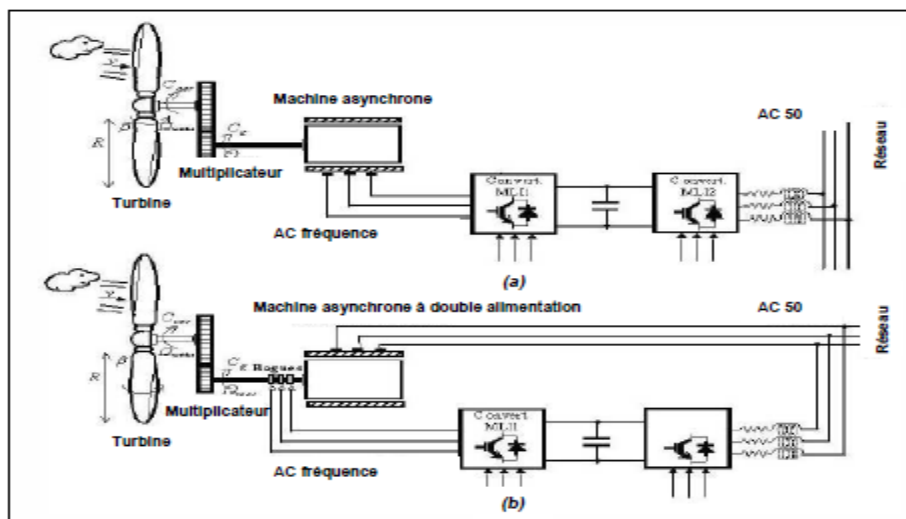


Figure 1-13 : Eolienne à vitesse variable [8]

La configuration de la **Figure 1-13a** 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 1-13b** 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. [8]

1.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu le système de la génération de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne, l'avantage et l'inconvénient de ce type d'énergie. Nous avons aussi vu le système de conversion éolien, et la différence entre les différents outils permettant d'appliquer cette conversion éolienne/électrique et les éléments de bases constituant les tours éolienne ainsi que leurs différents types.

**2. CHAPITRE 2 :
ASSOCIATION DE LA MADA
ET LA TURBINE EOLIENNE.**

2.1 Introduction.

Dans ce chapitre nous allons voir la machine asynchrone à double alimentation (MADA), sa modélisation et son modèle d'état, ainsi que la modélisation de la turbine éolienne, et l'association de la MADA et la turbine éolienne.

2.2 Pourquoi les machine à courant alternatif ?

Les machines à courant alternatifs sont des machines qui ont réalisés une grande révolution dans le milieu industrielle grâce à leurs robustesse, à leurs coût de fabrication réduit, leur construction relativement simple, vitesse de rotation plus élevée et n'exigent pas d'entretien permanent, mais à cause de l'impossibilité de varier la vitesse, ils ont été lentement concurrencés par les Machine à courant continue, qui offrent la possibilité de varier la vitesse par une simple action sur la tension d'induit et en gardant le flux d'induction constant, mais la présence du système balais collecteur qui nécessite un entretien périodique ce qui augmente le coût d'exploitation et leurs volumes augmentés a rendu les MCC défavorables dans les domaine des grandes puissances ainsi que dans des milieux corrosifs. Face au contraintes des MCC et avec les exigences des applications industrielles et électriques qui demandent des performances de plus en plus fiables, la variation de vitesse des MAS devient une nécessité et les recherches se sont orientés vers la résolution de ce problème, une chose qui devient faisable depuis l'apparition des éléments de l'électronique de puissance, ce qui a permet au MAS d'avoir un comportement similaire à celui des MCC.

La machine asynchrone à double alimentation

2.3 Etat de l'art de la MADA.

2.3.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation.

La machine asynchrone à double alimentation (MADA, appelée en Anglais "doubly-fed induction generator (DFIG)" lorsqu'elle est utilisée dans la génération de l'énergie éolienne, ou DFIM (Doubly Fed Induction Motor) pour des applications d'entraînement à vitesse variable est une machine triphasé à courant alternatif possédant deux enroulements triphasés où chaque enroulements est composé de trois bobines décalées de 120 degrés les unes des autres, dans le cas de la MADA, ces deux enroulements sont alimentés par une source de

tension alternative contrairement à la machine asynchrone classique où on alimente que les enroulements statoriques.

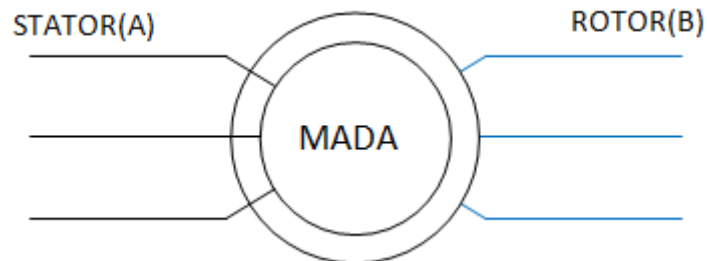


Figure 2-1 : Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation.

La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux parties. Le stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques (A), et le rotor (B) tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et séparé du stator par un entrefer.

En principe les circuits électriques du stator sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent des balais. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un convertisseur de puissance. [10]

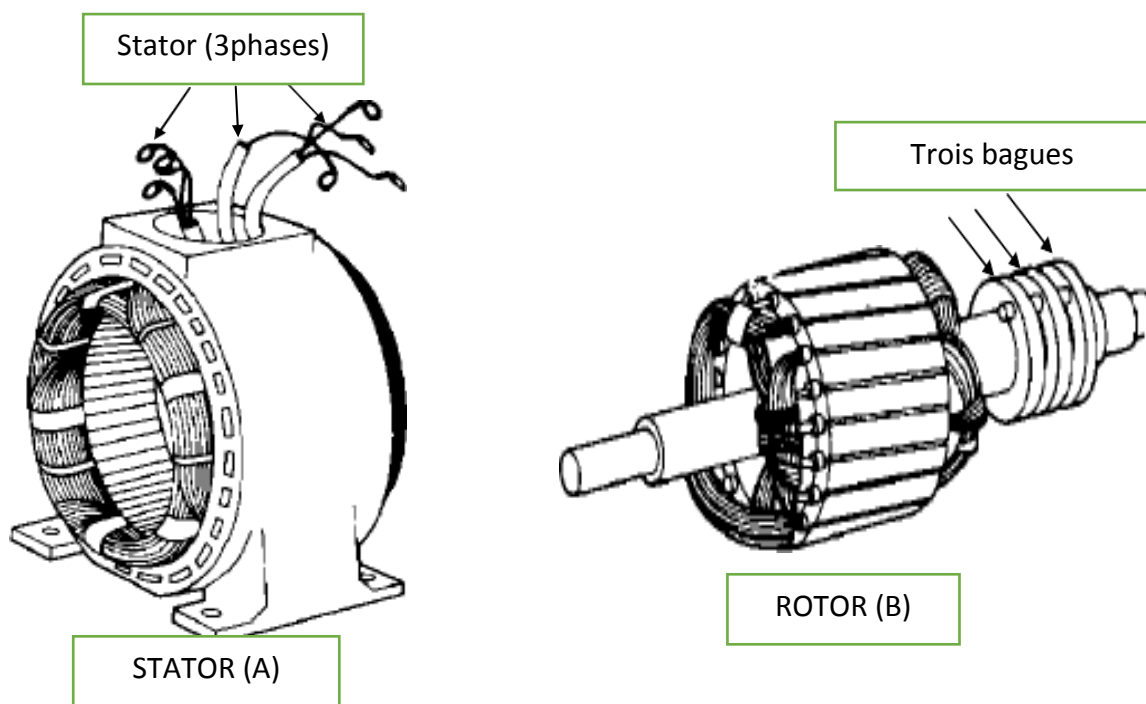


Figure 2-2 : représentation de la structure de la MADA.

2.3.2 Représentation de la machine asynchrone à double alimentation :

Les enroulements des trois phases statorique et rotorique dans l'espace électrique peuvent être représentés comme indiqué en **Figure (2.3)** :

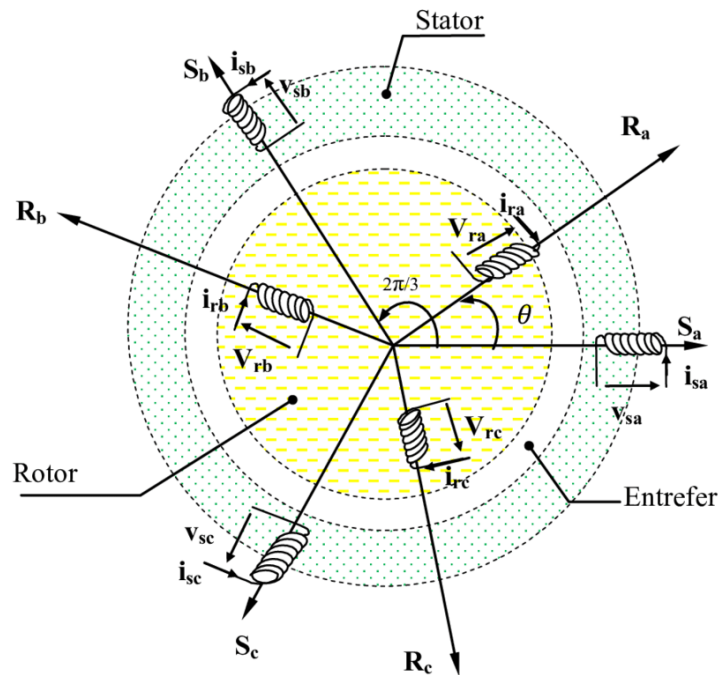


Figure 2-3 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

2.4 Domaine d'application de la MADA.

La machine asynchrone à double alimentation offre de nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone classique et synchrone, surtout en ce qui concerne la gamme de la vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La MADA peut être utilisée dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante, comme les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éolienne et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau. [11]

2.5 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation.

Nous allons introduire dans ce paragraphe les différents avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

2.5.1 Avantages de la machine asynchrone à double alimentation.

- De fait de sa double alimentation, les grandeurs rotoriques et statoriques sont accessibles, ce qui offre une grande flexibilité et précision lors du control de flux et du couple électromagnétique.
- Elle offre un large domaine d'application grâce à sa double alimentation notamment dans le domaine de génération de l'énergie éolienne.
- Dans le domaine des grandes puissances, la MADA présente une puissance massique (ratio puissance/masse en W/kg) élevée par rapport aux autres machines.
- au-delà de la vitesse nominale, la MADA peut continuer à fonctionner à couple constant.
- pour un fonctionnement autour de la vitesse de synchronisme, le convertisseur lié au rotor est dimensionné à un tiers (1/3) de la puissance nominale, ce qui réduit le coût et les pertes de ce dernier, et par conséquent, un rendement élevé de la machine.
- La MADA peut fonctionner en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, la machine continue a fonctionner.

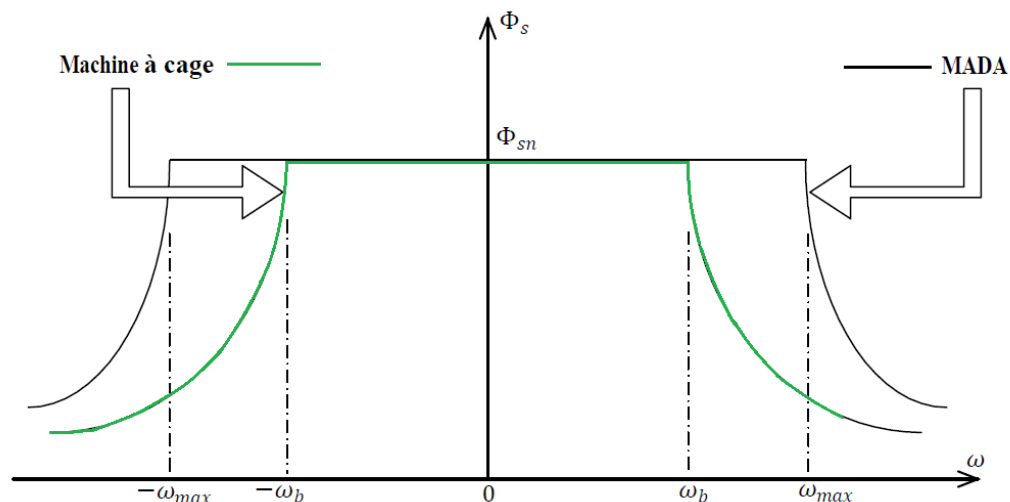


Figure 2-4 : Comparaison de Zone de fonctionnement en survitesse sans démagnétisation : MAS et MADA.

2.5.2 Inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation.

L'alimentation d'une partie tournante nécessite la présence du système balais-collecteur, c'est le cas du rotor de la machine asynchrone à double alimentation qui présente des inconvénients liés essentiellement à la présence de ce système.

- Pour une puissance donnée, la MADA est plus volumineuse que la machine asynchrone classique, généralement elle est longue à cause des balais.
- Utilisation d'un nombre important de convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou bien un redresseur commun et deux onduleurs) contrairement à la machine asynchrone à cage (un onduleur et un redresseur), ce qui augmente le coût et les pertes.
- elle nécessite une maintenance périodique, ce qui augmente le coût d'exploitation.
- La présence du système balais-collecteur engendre des effets indésirables sur la machine comme le frottement.

2.6 Classification des machines asynchrone à double alimentation.

2.6.1 Machine asynchrone à double alimentation sans collecteur-balais.

Ce type de machine est constitué d'un stator possédant deux enroulements statoriques ayant un nombre de pôles différents, l'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau, tandis que le deuxième enroulement statorique est alimenté par le réseau via un convertisseur de fréquence alternatif/alternatif AC/AC. La somme des paires de pôles des deux enroulements statorique est égale au nombre de paires de pôles des enroulements rotoriques. Ce type de machines possède la particularité de ne pas avoir le système collecteur/balais des machines asynchrones à double alimentation simple.

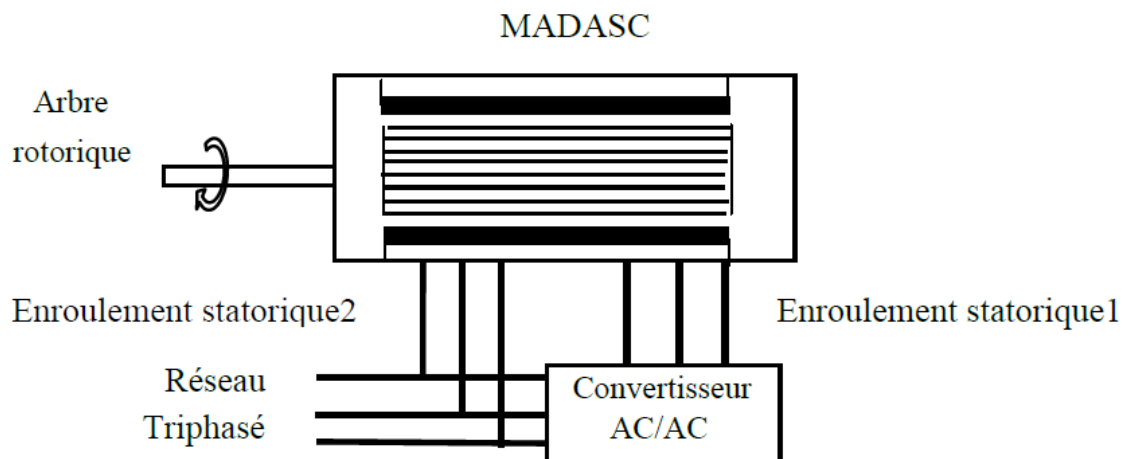


Figure 2-5 : Schéma de la machine asynchrone à double alimentation sans collecteur.

2.6.2 Machine asynchrone à double alimentation en cascade asynchrone.

Ce type de machines permet d'avoir un comportement similaire à une MADA à partir de la combinaison de deux machines asynchrones à rotor bobinés permettant un découplage entre les puissances actives et réactives. En effet, cette structure est constituée de deux machines asynchrones à rotor bobinés couplés électriquement et mécaniquement, le stator de la première machine (MAS 1) est alimenté directement par réseau, tandis que le stator de la deuxième machine (MAS2) est alimenté par le réseau via un convertisseur de fréquence AC/AC. Il est tout à fait possible de commander l'ensemble par action sur le convertisseur de fréquence.

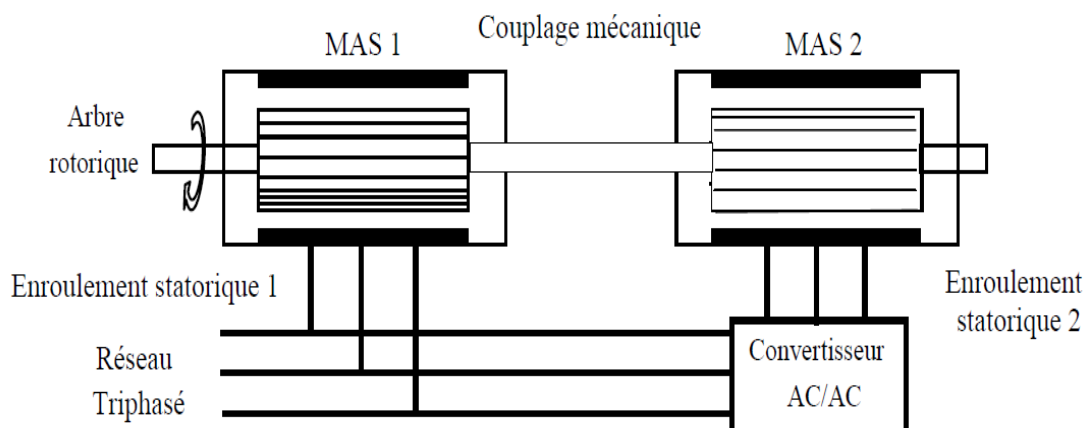


Figure 2-6 : Schéma de principe de la régulation de la machine asynchrone à double alimentation en cascade asynchrone.

2.6.3 Machine asynchrone à double alimentation simple :

La machine à double alimentation simple (MADAS), est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague (Single Doubly Fed Induction Machine). Le stator est alimenté directement par le réseau, ainsi que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif/alternatif (AC/AC) de telle sorte que le glissement de la machine peut être contrôlé. Il faut noter que le convertisseur peut être composé par un redresseur et un onduleur (conversion indirecte) ou bien peut être un cyclo-convertisseur (conversion directe) [12].

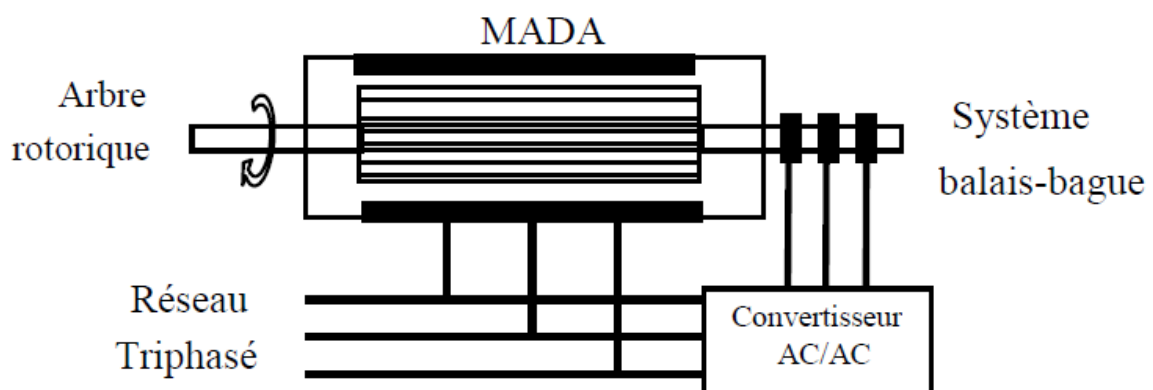


Figure 2-7 : Schéma de principe de la régulation de la machine asynchrone à double alimentation simple.

2.7 Régime de fonctionnement de la MADA.

La machine asynchrone à double alimentation contient un stator constitué de trois enroulements connectés directement au réseau et d'un rotor constitué lui aussi de trois enroulements reliés au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance.

Dans le cas où le nombre de pôles des enroulements rotoriques et statoriques est identiques, la vitesse angulaire de rotation du rotor peut être donnée par l'équation suivante :

$$\omega = \omega_s \pm \omega_r = p \times \Omega_r \quad (2.1)$$

Avec :

Ω_r : La vitesse de rotation de la machine.

s et r désignent les grandeurs statoriques et rotoriques respectivement.

p : Représente le nombre de pôles.

- Lorsque le champ tournant créé par les enroulements statoriques tourne dans le même sens que le champ tournant créé par les enroulements rotoriques, on a donc un

fonctionnement de la machine en mode **Hypo-synchrone** ($\omega_s > \omega_r$), et l'équation (3-1) devient :

$$\omega = \omega_s + \omega_r \quad (2.2)$$

- Lorsque le champ tournant créé par les enroulements statoriques tourne dans le même opposé que le champ tournant créé par les enroulements rotoriques, on a donc un fonctionnement de la machine en mode **Hyper-synchrone** ($\omega_s < \omega_r$) et l'équation devient :

$$\omega = \omega_s - \omega_r \quad (2.3)$$

On peut définir le glissement comme suit :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.4)$$

Avec :

f_r : la fréquence rotorique.

f_s : La fréquence statorique.

On peut donc déduire les différents régimes de fonctionnement selon la valeur du glissement :

- **Stationnaire ($g = 1$).**

Dans ce cas, la MADA se comporte comme un transformateur, le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence statorique f_s , et le rotor est le siège d'une FEM de fréquence rotorique f_r , dans ce cas la fréquence statorique est égale à la fréquence rotorique ($f_s = f_r$).

- **Synchrone ($g=0$).**

Au point où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Dans ce cas les enroulements du rotor tournent avec la même vitesse que celle du flux statorique ; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor. On constate que la puissance du stator est égale à celle du réseau, alors que celle du rotor est nulle (l'écoulement de puissance entre le réseau et le rotor s'arrête).

- **Hyper synchrone ($g < 0$).**

Par d'avantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative. L'augmentation de la vitesse des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

2.8 Mode de fonctionnement de la MADA.

La MADA peut fonctionner en plusieurs modes de fonctionnement en moteur ainsi qu'en génératrice.

2.8.1 Fonctionnement en moteur hypo-synchrone.

La puissance fournie au stator par le réseau est partiellement transformée en énergie mécanique, le reste de l'énergie va se manifester au rotor sous forme de puissance de glissement. Cette dernière va être réinjecté au réseau par le rotor, on aura donc un fonctionnement en moteur au-dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage peut fonctionner dans ce régime mais la puissance de glissement sera dissipée en pertes joules au rotor.

2.8.2 Fonctionnement en moteur hyper-synchrone.

Dans ce cas, le réseau fournit de l'énergie au stator, et fournit également la puissance de glissement au rotor, on aura donc un fonctionnement en moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas fonctionner dans ce régime.

2.8.3 Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone.

Dans ce mode fonctionnement, le stator fournit de l'énergie électrique au réseau, et fournit aussi une puissance de glissement au rotor, on a donc un fonctionnement en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas fonctionner dans ce régime.

2.8.4 Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone.

Le stator fournit de la puissance électrique au réseau, et fournit aussi une puissance de glissement au rotor, cette puissance est ensuite réinjectée au réseau à partir du rotor, on a donc un fonctionnement en dessus de la vitesse de synchronisme. La machine à cage peut

fonctionner dans ce régime mais la puissance de glissement récupérée par le stator est dissipée sous forme de pertes joules au rotor.

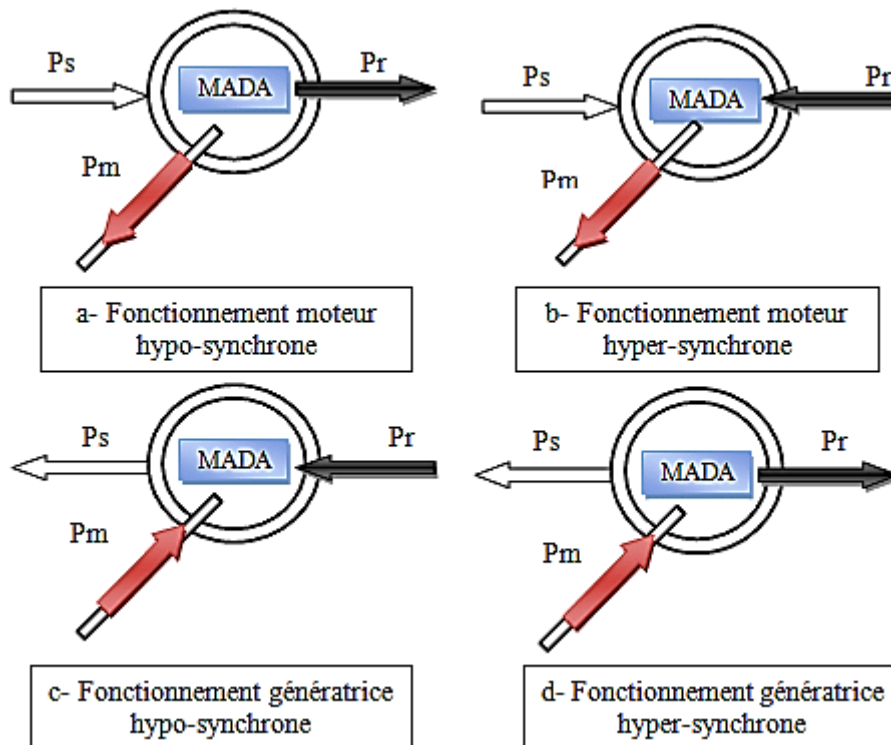


Figure 2-8 : les différents modes de fonctionnement de la MADA.

2.9 Les différentes configurations de la MADA avec les convertisseurs de puissances.

La MADA offre plusieurs possibilités de configuration avec son association avec les convertisseurs de puissance. Ces configurations dépendent essentiellement du domaine d'application de la MADA. D'après la littérature, on peut distinguer les configurations suivantes. [13]

2.9.1 Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur.

Le stator de la machine est connecté directement au réseau, et le rotor est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur qui peut être un cyclo-convertisseur ou un onduleur. La puissance du convertisseur est dimensionnée à un tiers de la puissance nominale, ce qui

permet de réduire la taille du convertisseur utilisé, ce qui donne un avantage en matière d'emplacement et de coût.

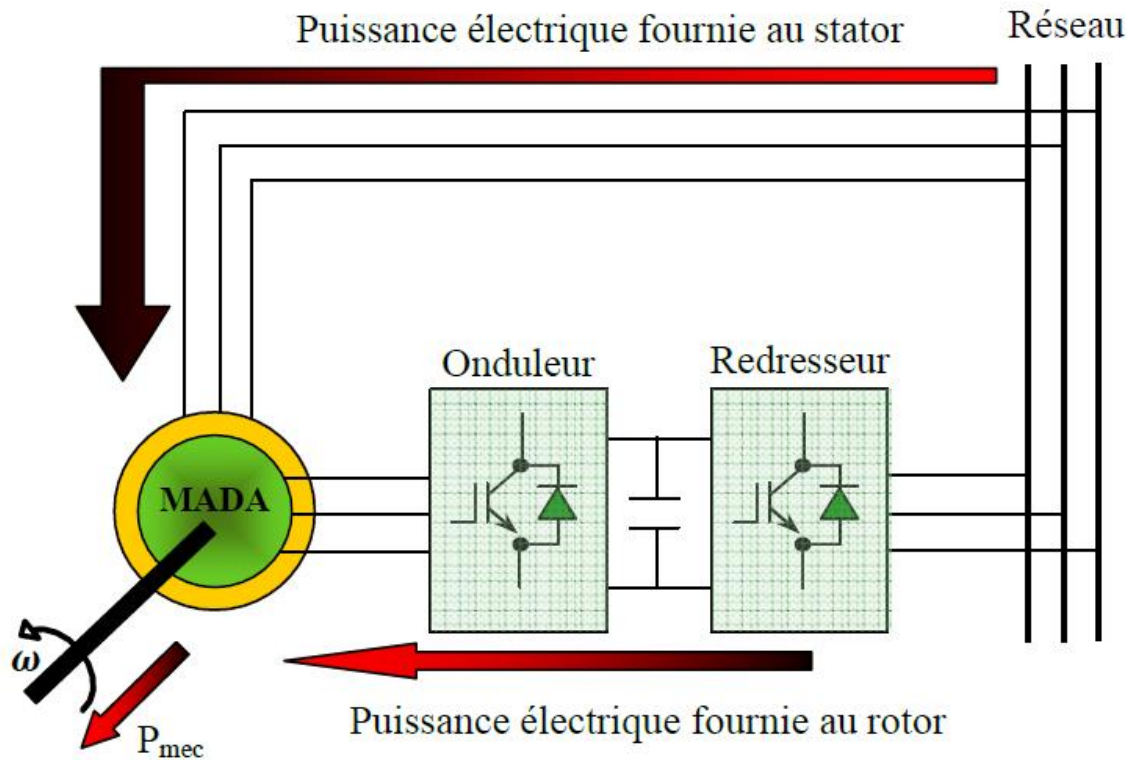


Figure 2-9 : Schéma d'un système utilisant une machine asynchrone à double alimentation en moteur alimenté par un seul convertisseur.

2.9.2 Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs.

Cette configuration consiste en une MADA dont les deux côtés, stator et rotor, sont alimentés par des onduleurs de tension. [12]

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs.
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun.
- Deux cyclo-convertisseurs.

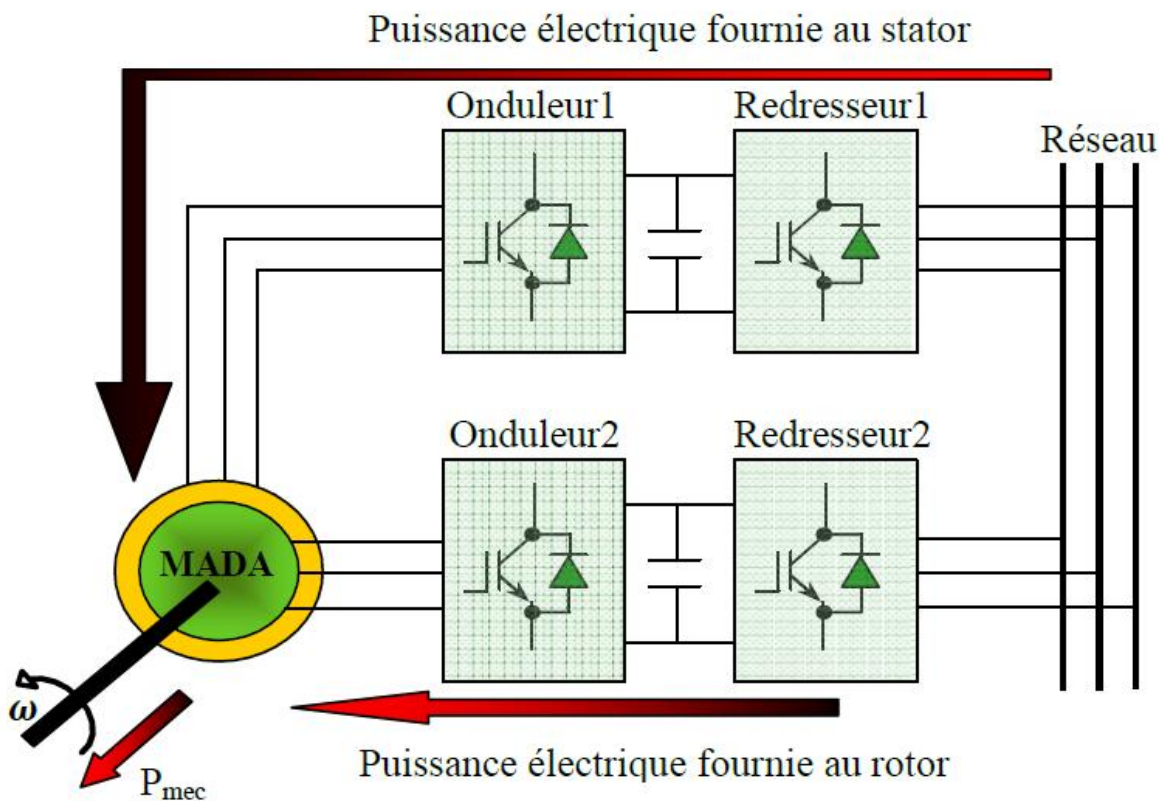


Figure 2-10 : Schéma d'un système utilisant une machine asynchrone à double alimentation en moteur alimenté par deux convertisseurs.

2.9.3 Association des convertisseurs en fonctionnement en génératrice.

Dans ce type d'association, le stator est connecté directement au réseau, et le rotor est connecté à un convertisseur de puissance, cette structure donne les avantages suivants :

- La génération d'une tension et fréquence fixes même lors d'une fluctuation de vitesses.
- Vu que la majorité de la puissance générée est par le stator (>70%), et le reste est fourni par le rotor, on pourrait donc sous-dimensionner le convertisseur ce qui offre un avantage au niveau du prix.

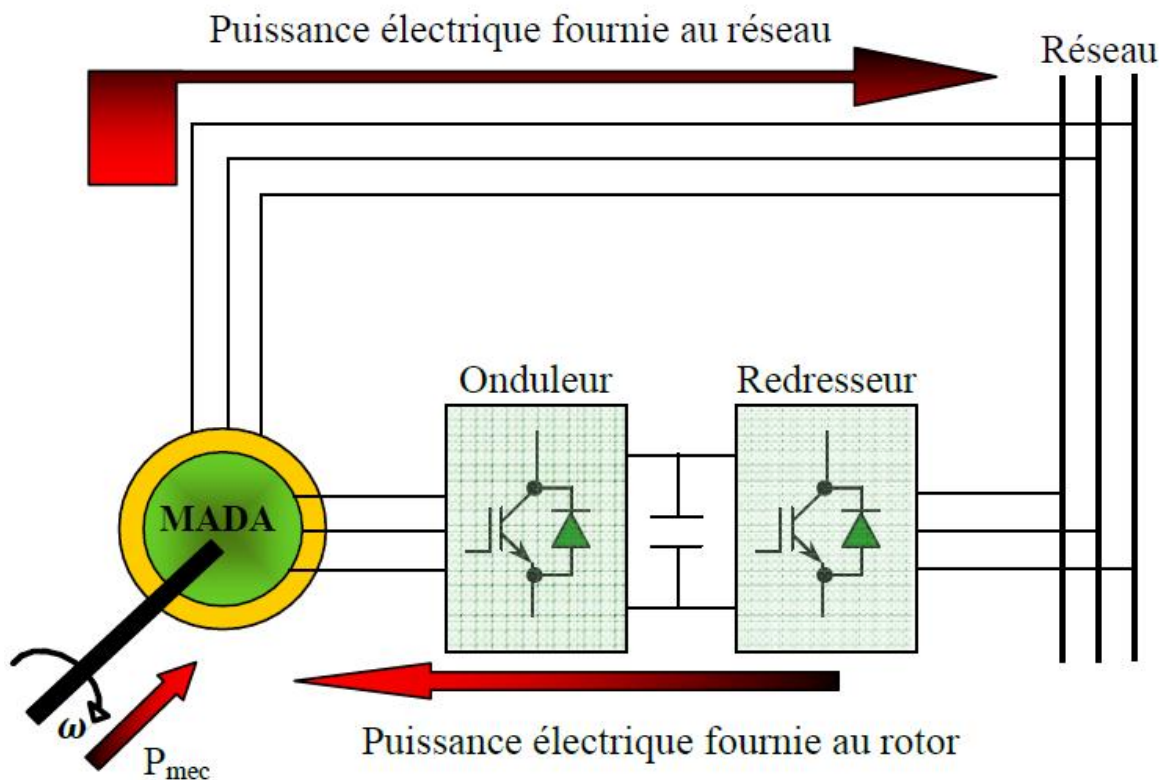


Figure 2-11 : Schéma d'un système utilisant une machine asynchrone à double alimentation en génératrice alimentée par un seul convertisseur.

2.10 Mode de variation de vitesse de la MADA.

L'équation de la vitesse angulaire de rotation est comme suit :

$$\Omega_r = \frac{2\pi}{p} f_s (1 - g) f_r \quad (2.5)$$

A partir de l'équation, on peut déduire les différents de variation de la vitesse de la MADA.

2.10.1 Action sur le glissement.

On peut varier la vitesse de la MADA en agissant sur la valeur de glissement. Ceci est réalisé en plaçant entre le réseau et le moteur un gradateur pour chaque phase. Le gradateur permet de faire varier l'angle de passage du courant pour chaque alternance.

2.10.2 Action sur la fréquence.

Selon l'équation (3-5), on peut faire varier la vitesse de la MADA en variant la fréquence, ceci est réalisé à l'aide des convertisseurs (Onduleur MLI) ou à l'aide des variateurs de vitesses (de fréquence).

2.10.3 Action sur le nombre de pôles.

C'est un mode constructif par action sur le nombre de pôles, cette technique de bobinage consistant à changer la polarité de la machine par un changement des sens de courant. La vitesse varie du simple au double et inversement ce qui implique une variation discontinue. [12]

2.11 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.

La modélisation de la MADA consiste à faire manifester le comportement de la machine sous formes d'équation mathématiques. Elle permet de prédire le comportement de la machine sous différents régimes et lors de la présence d'un défaut, ainsi de déterminer l'influence des différents facteurs extérieurs (charge...) et intérieurs (défauts interne...) sur le comportement de la machine.

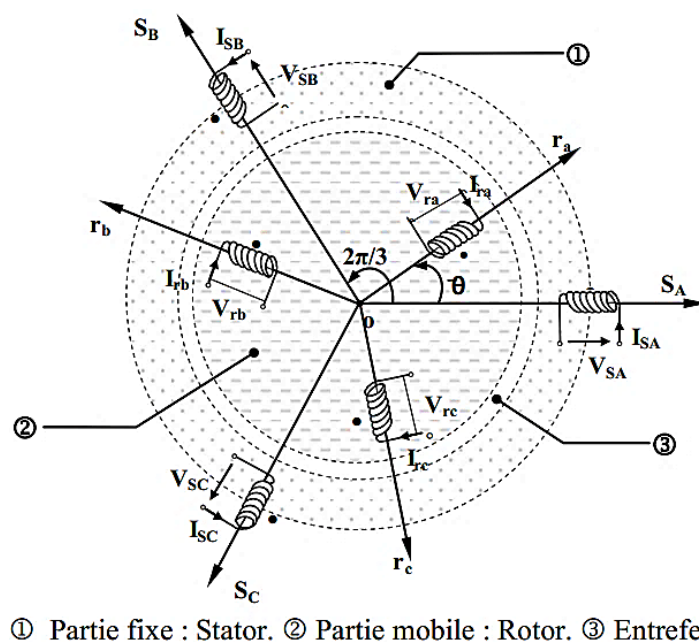


Figure 2-12 : Représentation graphique de la MADA.

Hypothèse simplificatrice.

Afin de faciliter la modélisation de la machine, il est nécessaire d'appliquer un certains nombres d'hypothèses simplificatrices.

- L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoches négligeable.
- La saturation magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements sont constantes et l'effet de peau négligeable.
- On admet que la f.é.m. créée par chacune des phases des deux armatures est de répartition sinusoïdale.
- La machine est symétrique, par conséquent, la somme des courant et des tensions est égale à zéro.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- L'additive des flux,
- La constance des inductances propres,
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

En utilisant l'approche des circuits couplés magnétiquement, la loi d'Ohm et la loi de Faraday et en tenant compte des hypothèses cités ci-dessous, le comportement dynamique la MADA peut être décrit par le système d'équations différentielles suivant : [14]

2.12 Equations électriques de la machine.

A l'aide des hypothèses simplificatrices, les équations de tensions statoriques et rotoriques s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

Au stator :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (2.6)$$

Au rotor :

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (2.7)$$

Avec: $[V_r] \neq 0$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} v_{Ar} \\ v_{Br} \\ v_{Cr} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} i_{Ar} \\ i_{Br} \\ i_{Cr} \end{bmatrix} \quad (a)$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (b)$$

R_s, R_r : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

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

l_s, l_r : Inductances de fuites statoriques et rotoriques.

M_s, M_r : Inductances mutuelles.

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

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

Avec :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t \quad (**)$$

En remplaçant (2.8) dans (2.6) et (2.7), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r]) + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [I_s]) \end{cases} \quad (2.9)$$

2.13 Transformation de PARK.

La machine asynchrone est une machine complexe et fortement couplée, et sa représentation dans le système triphasé est difficile. afin de faciliter la modélisation de machine asynchrone, on fait appel à la transforme de PARK permettant le passage d'un système triphasé a un système diphasé.

Le modèle diphasé (d-q) donné par la transformation de Park est utilisé. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par :

$$P(\alpha) = 2/3 \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\alpha) & -\sin(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (***)$$

L'angle α est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps. Le fait que $[P(\alpha)]$ soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée :

$$[P(\alpha)]^{-1} = [P(\alpha)]^t \quad (1)$$

Pour : $\theta = \theta_s \quad (2)$

Les vitesses angulaires de rotation sont obtenues telles que :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (a)$$

$$\frac{d\theta_{sl}}{dt} = \omega_{sl} \quad (b)$$

$$\omega_s = \omega_{sl} + \omega_r \quad (c)$$

2.13.1 Modélisation de la MADA dans le repère de PARK.

Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante :

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [V_{r,abc}] \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} [i_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [i_{s,abc}] \\ [i_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [i_{r,abc}] \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} [\Phi_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [\Phi_{s,abc}] \\ [\Phi_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [\Phi_{r,abc}] \end{cases} \quad (2.12)$$

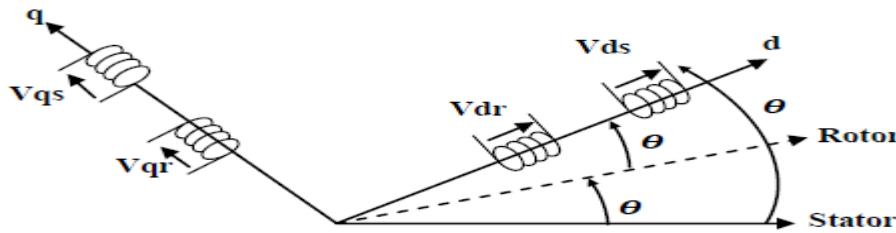


Figure 2-13 : Représentation de la machine dans le repère diphasé.

Après l'application de transformation de Park pour l'équation (2.6) du stator et l'équation (2.7) du rotor, l'expression des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par:

A. Les équations des tensions :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (2.13)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (w_s - w_r) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (w_s - w_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.14)$$

On applique aussi la transformation de Park pour l'équation (2.8) du flux statorique et flux rotorique on obtient les expressions suivant :

B. Les équations des flux :

Au stator :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (2.15)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (2.16)$$

$L_s = l_s - M_s$ Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$ Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$ Inductance Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

C- Equation mécanique

Afin d'obtenir le modèle complet de la machine asynchrone doublement alimentée, il faut qu'on tienne compte de l'équation mécanique. En appliquant les relations fondamentales de la dynamique à la machine, l'équation mécanique est :

$$\frac{P}{J} \frac{d(\omega_r)}{dt} = (C_e - C_r - C_f) \quad (2.17)$$

Où :

J : Moment d'inertie des parties tournantes (du moteur avec la charge) ;

C_r : Couple résistant ;

C_f : Couple de frottement ;

Le couple de frottement est donné par :

$$C_f = \frac{f_r}{P} \omega_r = f_r \Omega \quad (2.18)$$

Avec :

f_r = Coefficient de frottement visqueux.

Enfin l'équation mécanique peut être formulée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \left(\frac{P}{J} \frac{d(\omega_r)}{dt} \right) = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_s} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) - C_r - f_r \Omega \quad (2.19)$$

2.14 Modèle de la machine en représentation d'état.

La représentation d'état de la MADA dépend du repère et du choix des variables d'état pour les équations électriques. On écrit les équations dans le repère (d, q) car c'est la solution la plus générale.

Le choix des variables d'état, dépend des objectifs soit pour la commande soit pour l'observation, pour le modèle complet C_e est un variable d'état, pour les quatre variables électriques, notre choix pour la modélisation est le vecteur d'état suivant :

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix}^T \quad \left\{ \begin{array}{l} i_{dr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{dr} - \frac{M}{L_r} i_{ds} \\ i_{qr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{qr} - \frac{M}{L_r} i_{qs} \\ \Phi_{ds} = L_s \sigma i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \sigma i_{qs} + \frac{M}{L_r} \Phi_{qr} \end{array} \right. \quad (2.20)$$

Avec :

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

En remplaçant Φ_{ds} et Φ_{qs} en fonction de Φ_{dr} et Φ_{qr} dans le système (2.13), on aboutit aux équations suivants :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + L_s \sigma \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - w_s \left[L_s \sigma i_{qs} + \frac{M}{L_r} \Phi_{qr} \right] \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + L_s \sigma \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + w_s \left[L_s \sigma i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \right] \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Phi_{dr} = -R_r i_{dr} + (w_s - w_r) \Phi_{qr} + V_{dr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qr} = -R_r i_{qr} - (w_s - w_r) \Phi_{dr} + V_{qr} \end{cases} \quad (2.22)$$

On écrit le modèle de la machine utilisée pour la commande sous forme d'un système d'équations d'état :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (2.23)$$

$$Y = CX \quad (2.24)$$

Avec :

X : Vecteur d'état du système $[i_{ds}, i_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{qr}]^T$

A : matrice d'état du système.

B : matrice de commande.

U : vecteur de commande $[V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T$

Y : vecteur de sortie.

C : matrice d'observation.

$$A = \begin{bmatrix} -\gamma & w_s & \frac{K}{T_r} & w_r K \\ -w_s & -\gamma & -w_r K & \frac{K}{T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & w_{sl} \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -w_{sl} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Avec : $T_r = \frac{L_r}{R_r}$; $T_s = \frac{L_s}{R_s}$; $\gamma = \frac{1}{\sigma \cdot T_r}$; $K = \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r}$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma.L_s} & 0 & K & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma.L_s} & 0 & K \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

La décomposition des équations d'état nous donne :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{ds} = -\gamma i_{ds} + w_s i_{qs} + \frac{K}{T_r} \Phi_{dr} + w_r K \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma.L_s} V_{ds} + K V_{dr} \\ \frac{d}{dt} i_{qs} = -w_s i_{ds} - \gamma i_{qs} - w_r K \Phi_{dr} + \frac{K}{T_r} \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma.L_s} V_{qs} + K V_{qr} \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Phi_{dr} = \frac{M}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \Phi_{dr} + w_{sl} \Phi_{qr} + V_{dr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qr} = \frac{M}{T_r} i_{qs} - w_{sl} \Phi_{dr} - \frac{1}{T_r} \Phi_{qr} + V_{qr} \end{cases} \quad (2.28)$$

L'équation mécanique régissant la partie tournante de la machine est donnée par :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{3}{2} P \frac{M}{J L_s} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) - \frac{C_r}{J} - \frac{f_r}{J} \Omega \quad (2.29)$$

$$C_e = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_s} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (2.30)$$

Remarque : Dans le d'un fonctionnement en génératrice :

- Le couple aura une valeur négative.
- Ce couple représente le couple résistant pour la turbine éolienne.
-

2.15 Simulation et interprétation des résultats :

Afin de simuler la machine, on a fait appel au logiciel MATLAB/ SIMULIK. Les paramètres de la machine sont donnés en annexe. Le stator de la machine étant alimenté à partir du réseau avec le rotor en court-circuit ; c'est-à-dire que la machine fonctionne en moteur.

2.15.1 Démarrage à vide.

Les résultats de la simulation de la machine en démarrage à vide sont illustrés dans les figures comme suit :

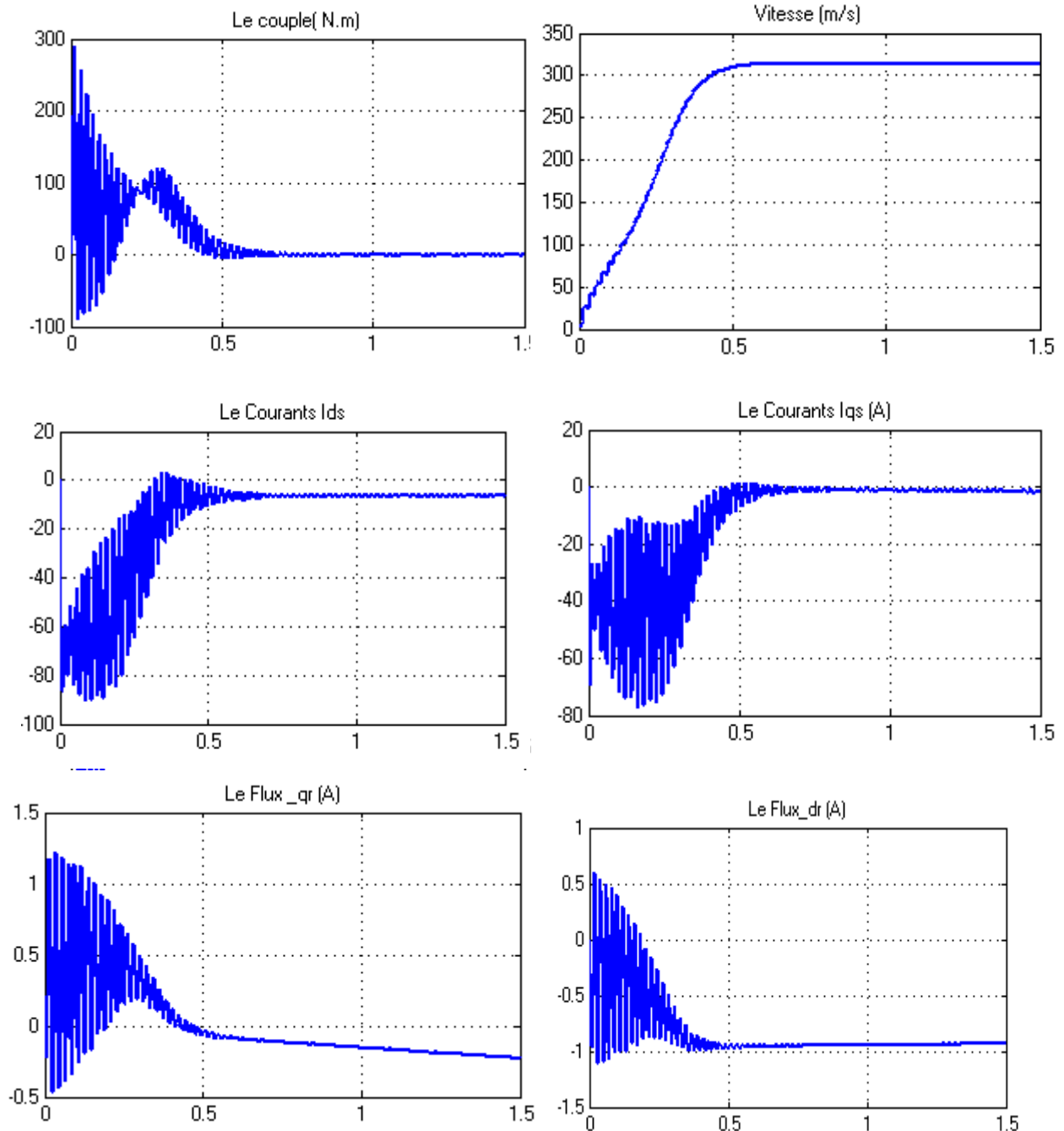


Figure 2-14 : Les résultats de simulation de la machine en vide.

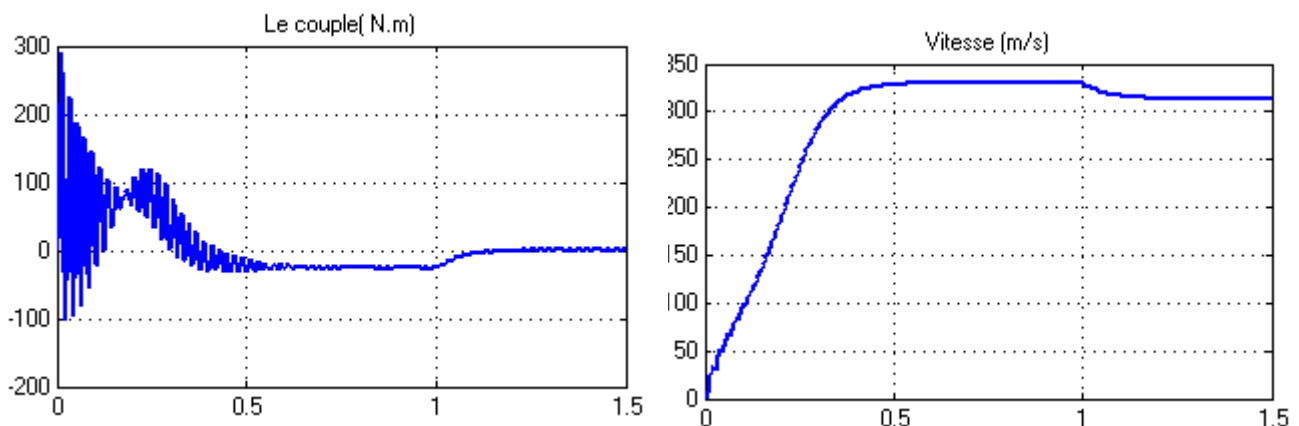
On remarque que lors du démarrage à vide et en régime transitoire une légère oscillation apparaît durant un temps de 0.15s après le démarrage avant d'en arriver à la vitesse de 100 rd/s, et à partir de cela, la vitesse augmente uniformément jusqu'à atteindre une valeur maximale en régime permanent de 330 rd/s avec un temps de réponse de 0.55s.

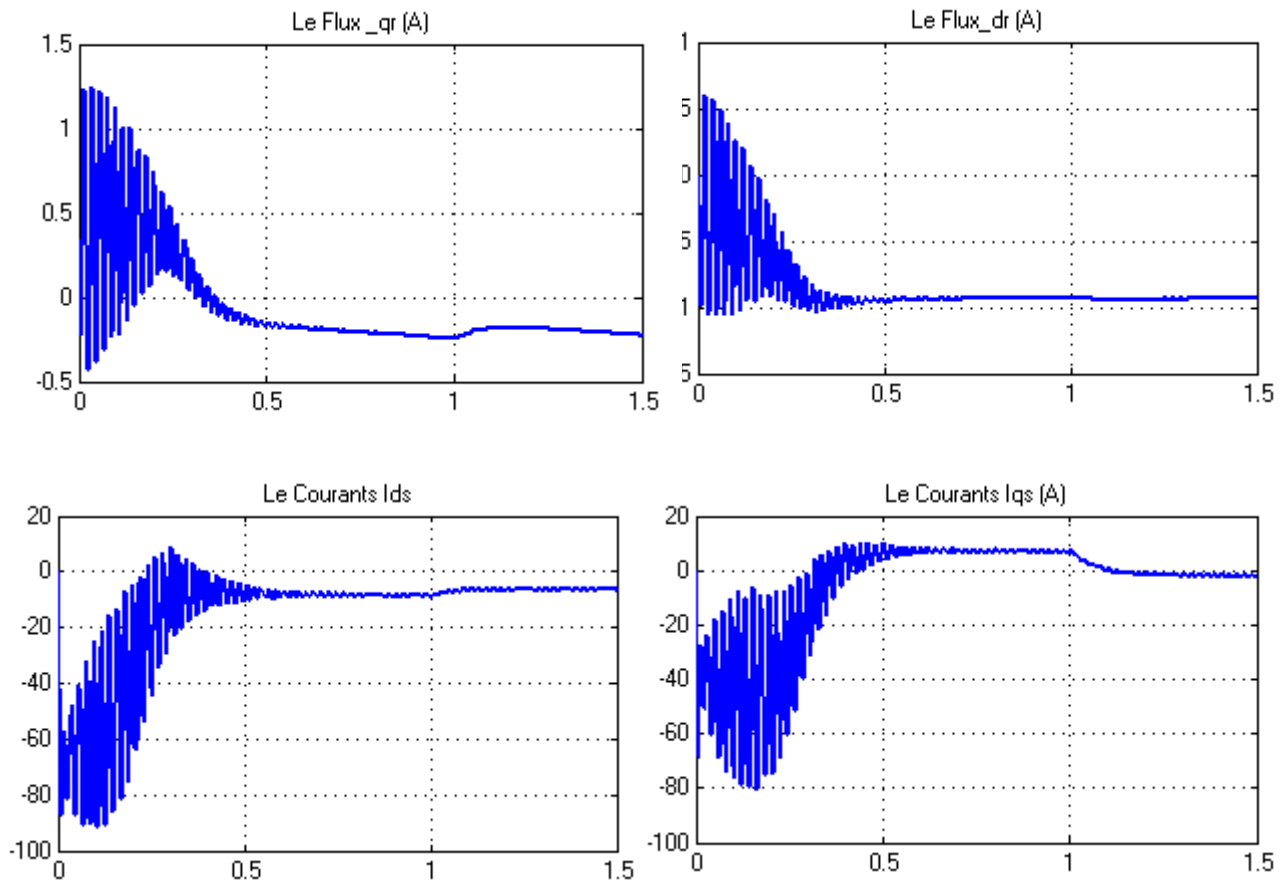
Lors du démarrage, le couple est oscillatoire durant tout le régime transitoire, il prend des valeurs positives et négatives, ces valeurs sont comprises entre $[-100 * 300]$ N.m. en régime permanent le couple se stable a une valeur nulle.

Lors du démarrage, et en régime transitoire, les courants statoriques sont oscillatoires et finissent par se stabiliser en régime permanent a des valeurs de $I_{ds}=-6A$ et $I_{qs}=-1A$.

Les courbes des flux montrent qu'en régime transitoire, les flux sont oscillatoires, leurs valeurs sont comprises entre $[-1.1 * 0.6]$ Wb pour le flux rotorique directe, et $[-0.47 * 1.22]$ Wb pour le flux rotorique quadrature. En régime permanent ces valeurs vont être moins oscillatoire.

2.15.2 Introduction de couple de charge.





L'introduction d'une charge de 25N.m à l'instant ($t=1$ s), se traduit par l'augmentation du couple électromagnétique pour compenser l'augmentation de la valeur du couple résistant, et on remarque une légère diminution de la valeur de la vitesse à cause de l'augmentation de la valeur du glissement.

Les flux et les courant statoriques auront un petit changement de valeur lors de l'introduction de la charge pour se stabiliser apres en régime permanent.

2.16 La turbine éolienne.

La turbine est l'outil permettant de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique pour qu'elle soit ensuite transmise à la génératrice à travers un multiplicateur.

Une turbine éolienne est constituée d'une certaine forme afin de maximiser la conversion énergétique, et d'extraire efficacement l'énergie du vent.

La turbine éolienne doit être liée à des équipements nécessaires pour sa rotation afin de capter le vent, et des équipements permettant de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, ainsi des équipements permettant le démarrage, le contrôler et l'arrêt de la turbine.

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à la modélisation de la turbine avec les différentes équations, ainsi qu'à son control.

2.17 Modélisation du vent.

L'énergie cinétique continue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle. Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie [7]

Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien, de nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés, l'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent. [7]

Donc la vitesse du vent peut être composée en deux composantes :

$$V(t) = V_0 + V_T(t)$$

V_0 : Appelée la composante lente, qui représente la moyenne de la vitesse du vent sur une période (plus au moins longue) pour un site donné.

$V_T(t)$: Appelée la composante turbulente, elle représente l'irrégularité de la vitesse du vent, il s'agit donc d'un processus aléatoire stationnaire.

2.18 Modélisation de la turbine.

La turbine qui sera modélisée est constituée de trois pâles de longueur R , fixées sur un moyeu tournant à une vitesse *turbine* Ω , et qui entraîne une machine asynchrone à double alimentation fonctionnant en génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

2.18.1 Schéma d'une turbine éolienne.

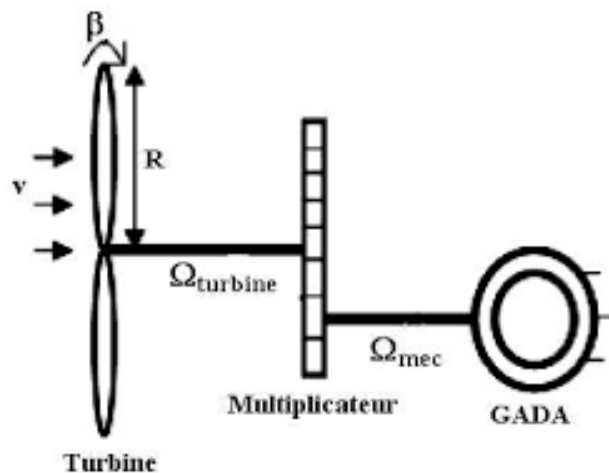


Figure 2-15 : Schéma d'une turbine éolienne.

2.18.2 La courbe de puissance.

La courbe de puissance est un graphe représentant la puissance de sortie d'une éolienne à des vitesses de vent différentes.

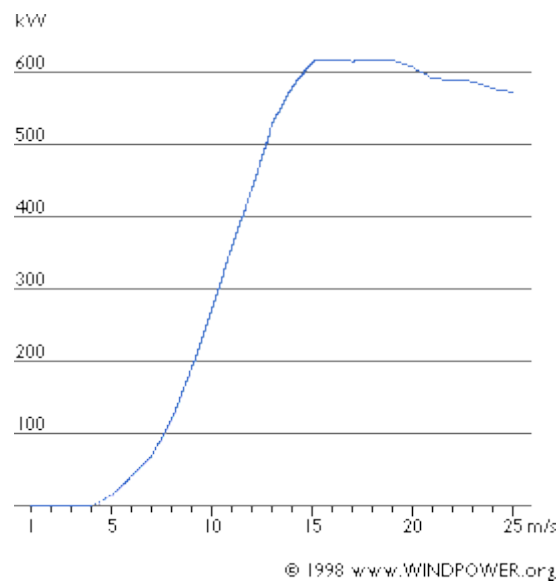


Figure 2-16 : La courbe de puissance d'une éolienne.

2.18.3 La puissance cinétique du vent.

La puissance d'une éolienne de longueur de pâles R , soumise à un vent de vitesse V_v est donnée par l'équation suivante :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} S_{\text{éolienne}} \rho V_v^3 \quad (2.31)$$

$S_{\text{éolienne}}$: La surface balayée par l'éolienne qui est égale à $\pi x R^2$ (m²)

ρ : La masse volumique de l'air (1.225 Kg/m³).

V_v : La vitesse du vent.

2.18.4 Coefficient de puissance.

L'énergie cinétique du vent ne peut pas être entièrement extraite à travers la turbine car le vent n'est pas nul après la turbine, c'est pour cela, on introduit un coefficient C_p appelé coefficient de performance qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pâles. Ce coefficient correspond au rendement de la turbine de l'éolienne.

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167 - \beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta}\right) - 0.00184 (\lambda - 3) \beta \quad (2-32)$$

β : Est l'Angle d'orientation des pâles.

λ : Est le rapport de vitesse qui est définie par :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{\text{turbine}}}{V_v(t)} \quad (2-33)$$

2.18.5 Puissance aérodynamique.

La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aer} = C_p P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} S_{\text{éolienne}} \rho V_v^3. \quad (2-34)$$

2.18.6 Le couple aérodynamique.

Le couple aérodynamique apparaissant sur l'arbre du rotor de l'éolienne est donné par l'équation suivante :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{\text{turbine}}} = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} S_{\text{éolienne}} \rho V_v^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{\text{turbine}}} \quad (2-35)$$

2.18.7 La limite de betz.

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent.

C'est pour cela, on a introduit un coefficient appelé coefficient de puissance qui est spécifique à chaque éolienne (il s'exprime en fonction de la vitesse relative λ) et qui représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable donc la puissance extractible pour une vitesse de vent donnée

Ce coefficient présente un maximum de 16/27 soit 0,59 appelée la limite de Betz.

2.19 Modèle du multiplicateur.

Le multiplicateur peut être modélisé comme suit :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.36)$$

C_g : Couple issu du multiplicateur.

C_{aer} : Couple aérodynamique.

G : gain du multiplicateur.

Donc la vitesse de la turbine est donnée par l'équation suivante :

$$\Omega_{\text{turbine}} = \frac{\Omega_{\text{méc}}}{G} \quad (2.37)$$

2.20 Equation dynamique de l'arbre :

L'équation mécanique est la suivante :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{méc} \quad (2.38)$$

$J = C$ est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

$C_{méc} = C$ est le couple mécanique, ce dernier prend en compte :

- Le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} .
- Le couple de frottement visqueux C_{vis} .
- Le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.39)$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{méc} \quad (2.40)$$

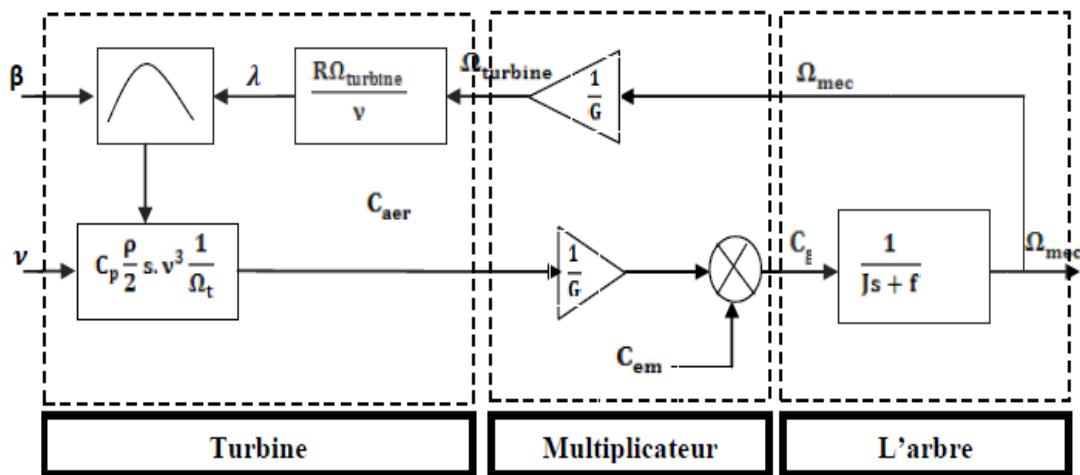


Figure 2-17 : Schéma bloc de l'ensemble turbine -multiplicateur- arbre .

2.21 Simulations et interprétations des résultats :

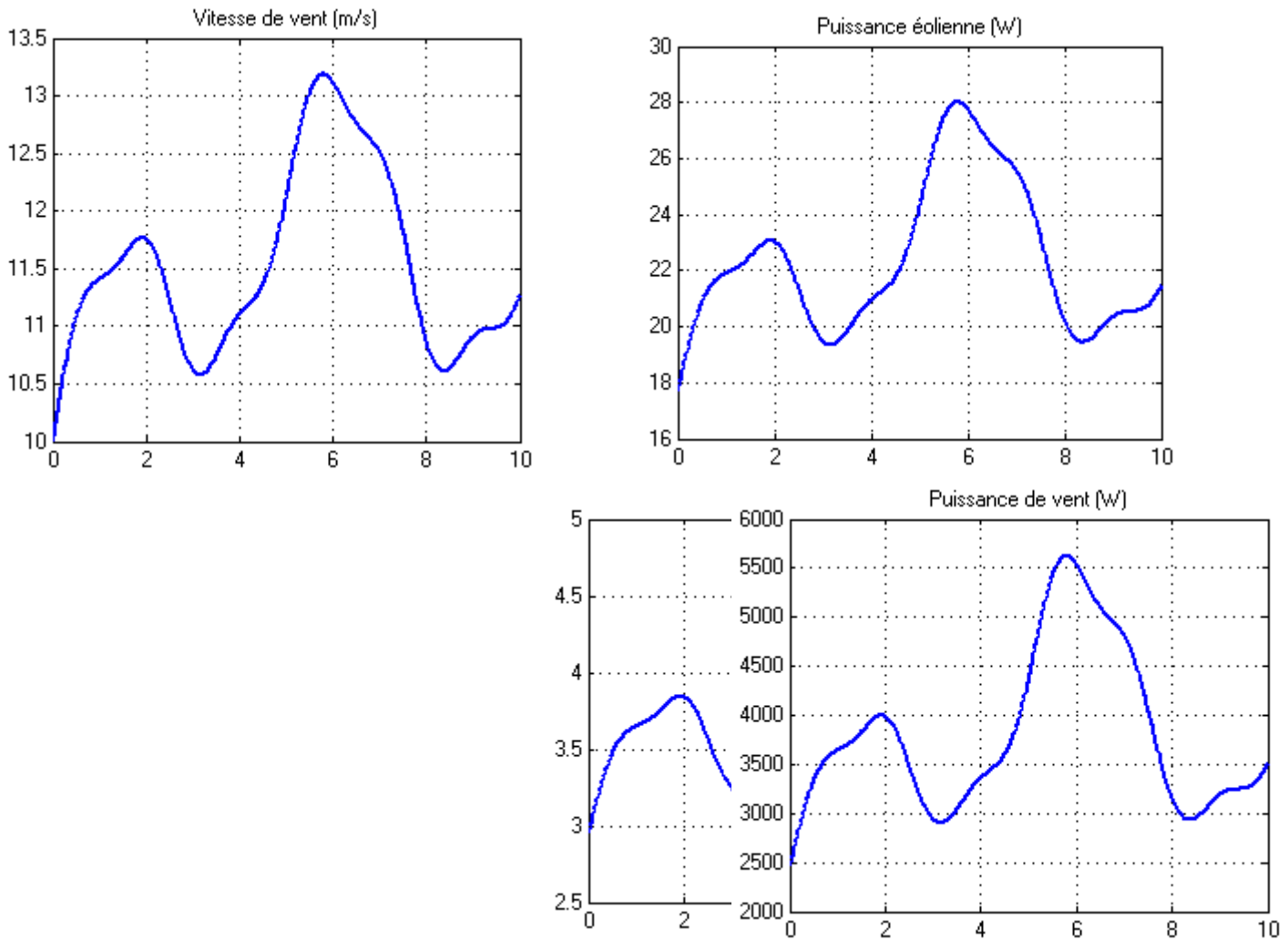


Figure 2-18 : Simulation de la turbine mode sous MATLAB.

On applique un vent de vitesse variable pour voir son influence sur le comportement de la machine. La **figure 2.18** montre que la puissance au niveau de la turbine dépend de la variation de la vitesse du vent.

2.22 Commande de la turbine éolienne.

2.22.1 La commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale.

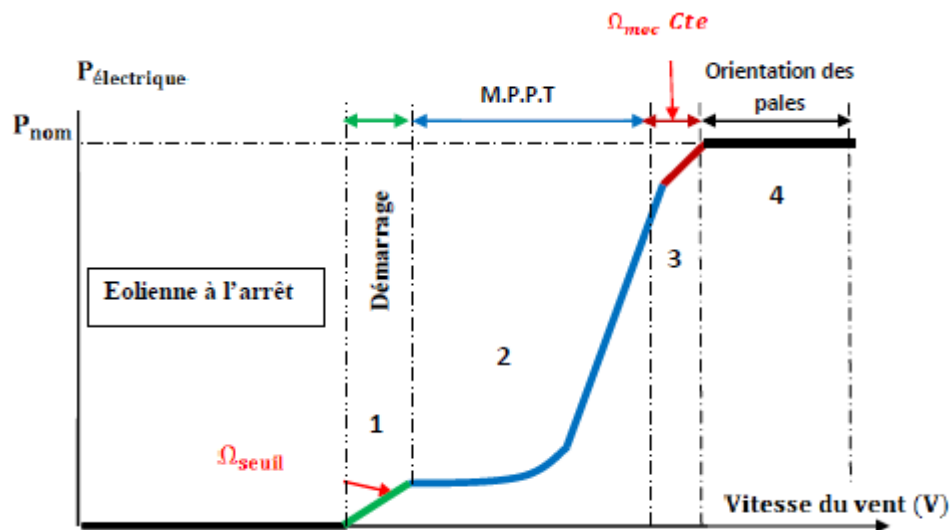


Figure 2-19 : Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne à grande puissance.

- **Zone 1 :** c'est le moment de démarrage de la turbine, le démarrage peut être effectué lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω . (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle l'éolienne a démarré).
- **Zone 2 :** Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué « MPPT » (Maximum Power Point Tracking, dans ce cas l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale ($\beta=2^\circ$) afin d'obtenir un C_p maximal).
- **Zone 3 :** dans cette zone, la vitesse de l'éolienne est maintenue constante, et la puissance de l'éolienne est à 90%
- **Zone 4 :**
Dans cette zone, la puissance générée est maximale (Puissance nominale). Lors de cette phase un système d'orientation des pales est activé (Pitch control) permettant de limiter la vitesse de la turbine à des valeurs correctes. L'orientation se fait pour

maintenir la vitesse de rotation de la turbine constante, et au-delà d'une certaine vitesse excessive ou l'orientation des pales ne suffit pas pour limiter la vitesse de la turbine, un système de frein va intervenir pour freiner entièrement la rotation de la turbine.

2.23 Association MADA – Turbine éolienne.

La génération de l'énergie éolienne nécessite la combinaison de la Machine asynchrone à double alimentation et la turbine éolienne.

On a réalisé une simulation grâce au logiciel MATLAB/Simulink de l'association de la MADA et la Turbine éolienne.

Les résultats de simulation ont été affichés dans les graphes ci-dessous :

L'éolienne utilisée est de rayon $R = 35\text{m}$ soumise à une vitesse de vent moyenne de 15m/s .

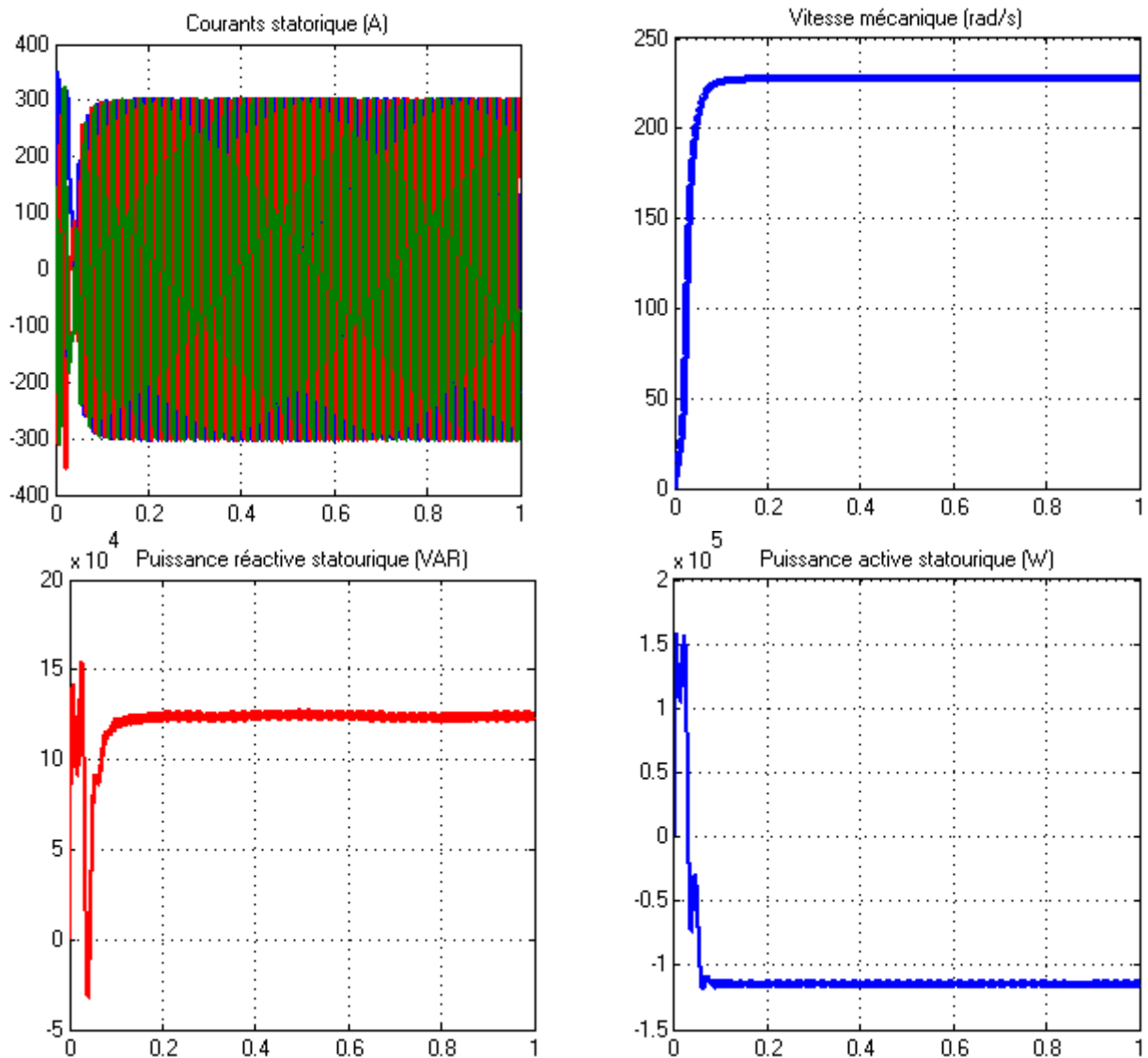


Figure 2-20 : Résultat de simulation de l'association MADA/Turbine.

Les résultats de simulation obtenus montrent bien la réponse dynamique rapide de la vitesse (0.015 s). Cette dernière atteint une valeur supérieure à la vitesse du synchronisme (230 rad / s) qui dépend principalement à la vitesse du vent, et de l'angle de l'orientation de la pale β et de la tension rotorique.

Notons aussi que la machine génère plus de l'énergie réactive que l'énergie active ce qui donne un facteur de puissance un peu loin de l'unité ($\cos\varphi = 0.70$) et détériore le facteur de puissance global du réseau.

2.24 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la machine asynchrone à double alimentation, son principe de fonctionnement, sa structure, son domaine d'application ainsi que ces avantages et ces inconvénients. Nous avons aussi modélisé la MADA à l'aide de la transformée de PARK afin de prédire son comportement lors de son fonctionnement à vide et en charge.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la turbine éolienne et sa modélisation sous formes d'équation mathématique ainsi que l'étude de son fonctionnement.

La dernière partie de ce chapitre est destinée à faire l'étude de l'association des deux composants étudiés séparément.

3. COMMANDE VECTORIEL DE LA MADA.

3.1 Introduction :

Afin d'arriver à contrôler facilement la production de l'énergie électrique de l'éolienne, il est nécessaire de réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en introduisant une commande appelée « commande vectorielle par orientation du flux statorique ».

La commande vectorielle par orientation du flux est une solution intéressante pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour les machines asynchrones doublement alimentées aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Pour cela, il est nécessaire d'établir une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique en mode génératrice. Cette loi met des relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations permettent d'agir sur les signaux rotoriques en vue de réaliser le contrôle plaisant.

3.2 Principe de la commande vectoriel de la MADA.

La commande vectorielle agit sur le contrôle des systèmes suivant une loi de commande qui sert à découpler les deux grandeurs flux et couple de façon similaire à celle de la machine à courant continu excitation séparée comme le montre la **figure 3.1**

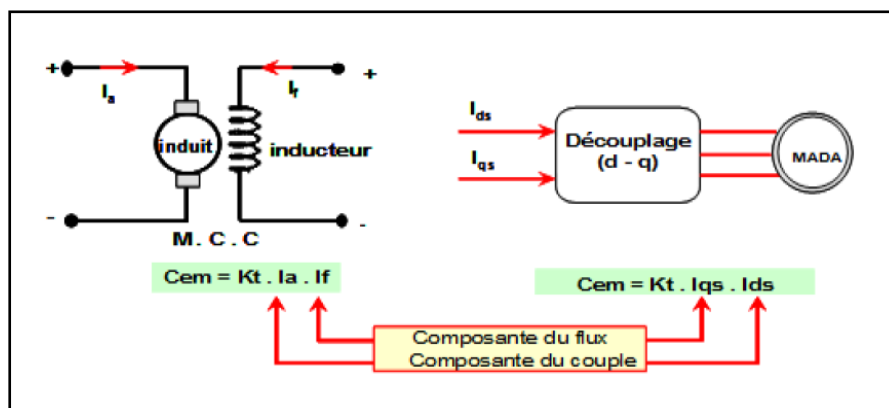


Figure 3-1 : Commande d'une MCC et commande vectorielle d'une MADA.

L'expression du couple électromagnétique de la machine à courant continu :

$$\begin{cases} C_{em} = K \Phi_f \cdot I_a \\ \Phi_f = K \cdot I_f \end{cases}$$

3.3 Principe de la commande à flux orienté

La commande par flux orienté (commande vectorielle) est une expression qui sert à traiter les techniques de contrôle des moteurs électriques. Ce patrimoine est utilisé pour obtenir le mode de fonctionnement visé en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

La MCC est naturellement découplée, par contre le contrôle par flux orienté des machines à courant alternatif est une commande par orientation de ces deux grandeurs.

De nombreuses variétés ont été présentes dans les littérateurs, que l'on peut classer :

Suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant 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.

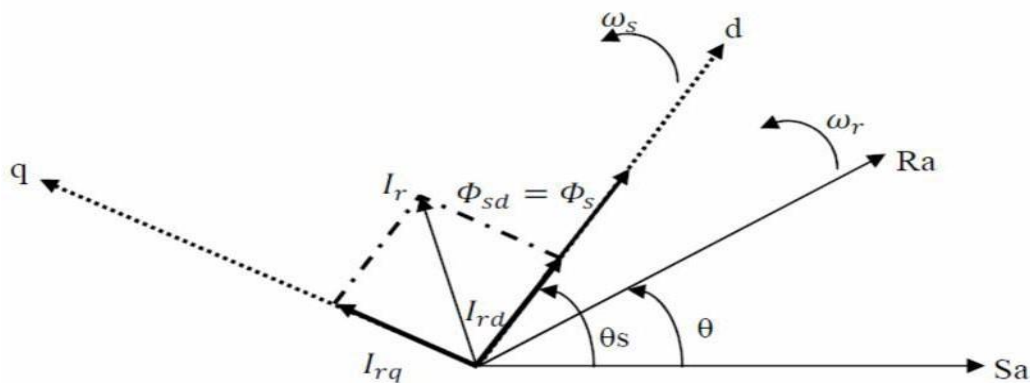


Figure 3-2 : orientation du flux statorique.

3.4 Procède d'orientation du flux :

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter statorique, rotorique ou d'entrefer doit coïncider avec l'axe « **d** ». Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes [15] :

➤ **Orientation du flux rotorique :**

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (*)$$

➤ **Orientation du flux statorique :**

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (**)$$

➤ **Orientation du flux magnétisant :**

$$\begin{cases} \Phi_{dm} = \Phi_m \\ \Phi_{qm} = 0 \end{cases} \quad (***)$$

On utilise dans notre étude la commande vectorielle en puissance active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d, q) suivant le flux statorique.

3.4.1.1 L'équation du flux statorique :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3.1)$$

3.4.1.2 L'équation du flux rotorique :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (3.2)$$

3.4.1.3 L'équation de la tension :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - w_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + w_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (w_s - w) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (w_s - w) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (3.3)$$

3.4.1.4 L'équation du couple électromagnétique :

$$\begin{aligned} C_{em} &= -\frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ &= -\frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} (\Phi_{ds} i_{qr} - \Phi_{qs} i_{dr}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine les équations (3.1), (3.3) et (3.4) deviennent :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} \cdot i_{qr} \quad (3.5)$$

Rappelons que ce couple représente une perturbation pour la turbine éolienne et prend une valeur négative.

Dans l'hypothèse où le flux est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator) et si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de fortes puissances utilisées pour la production éolienne.

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (3.6)$$

Les équations des tensions statoriques se soumettent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ 0 = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3.8)$$

A l'aide de l'équations (3.8) on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3.9)$$

Les puissances active et réactive statoriques d'une MADA s'écrit :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (3.10)$$

En appliquant les hypothèses simplificatrices à l'équation (3.10) on obtient :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot i_{qs} \\ Q_s = V_s \cdot i_{ds} \end{cases} \quad (3.11)$$

En remplaçant i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions (3.9) dans l'équation (3.11) on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\Phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (3.12)$$

En approximant Φ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$, l'expression de la puissance réactive Q_s sera:

$$Q_s = \frac{1}{\omega_s L_s} V_s^2 - V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \quad (3.13)$$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il est nécessaire d'établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

En remplaçant dans l'équation des flux de model de la MADA les courants statoriques par l'expression (3.9) on aura:

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} - \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (3.14)$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (3.14) par leurs expressions dans l'équation (3.3) on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} i_{qr} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \left(\frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \right) \end{cases} \quad (3.15)$$

V_{dr} et V_{qr} Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques souhaités :

$\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$: le terme de couplage entre les deux axes ;

$\left[g \cdot \omega_s \cdot \left(\frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \right) \right]$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

La représentation sous forme de schéma-blocs de la MADA est donnée par la figure ci-dessous **figure 3.3**

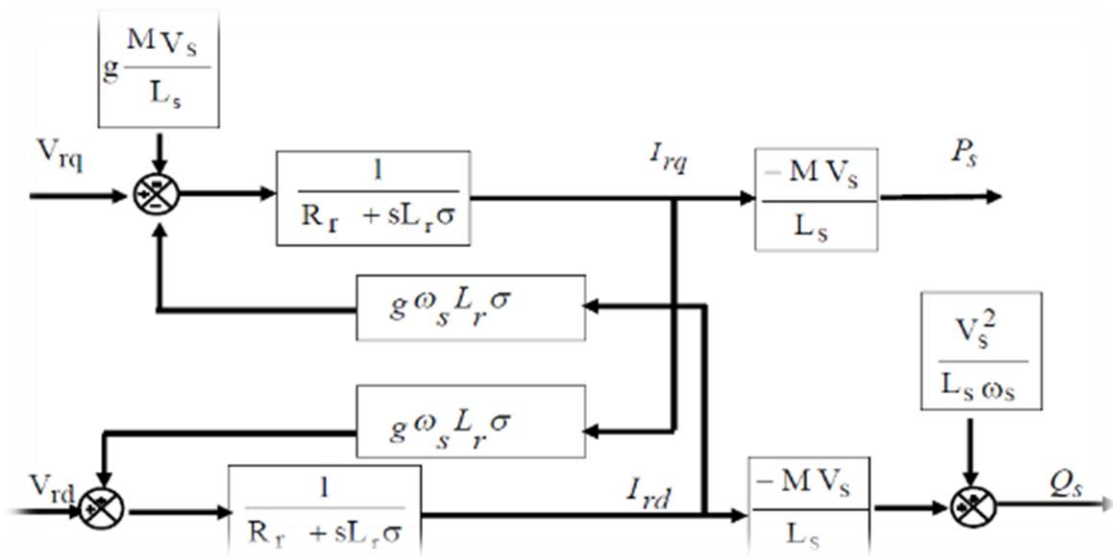


Figure 3-3 : Schéma bloc du système à réguler.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir facilement une commande vectorielle car les influences des termes de couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs. Ainsi, il apparaît deux solutions pour réaliser la commande en puissance de cette machine :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée **méthode directe** car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [16].

3.4.2 Commande vectorielle directe (DFOC) :

Dans le contrôle vectoriel direct, l'idée sur la régulation consiste à contrôler indépendamment et directement les puissances P_s et Q_s de la DFIG, dans lequel on négligera les termes de couplage. Le schéma de la figure suivante présente le principe de la commande dite direct.

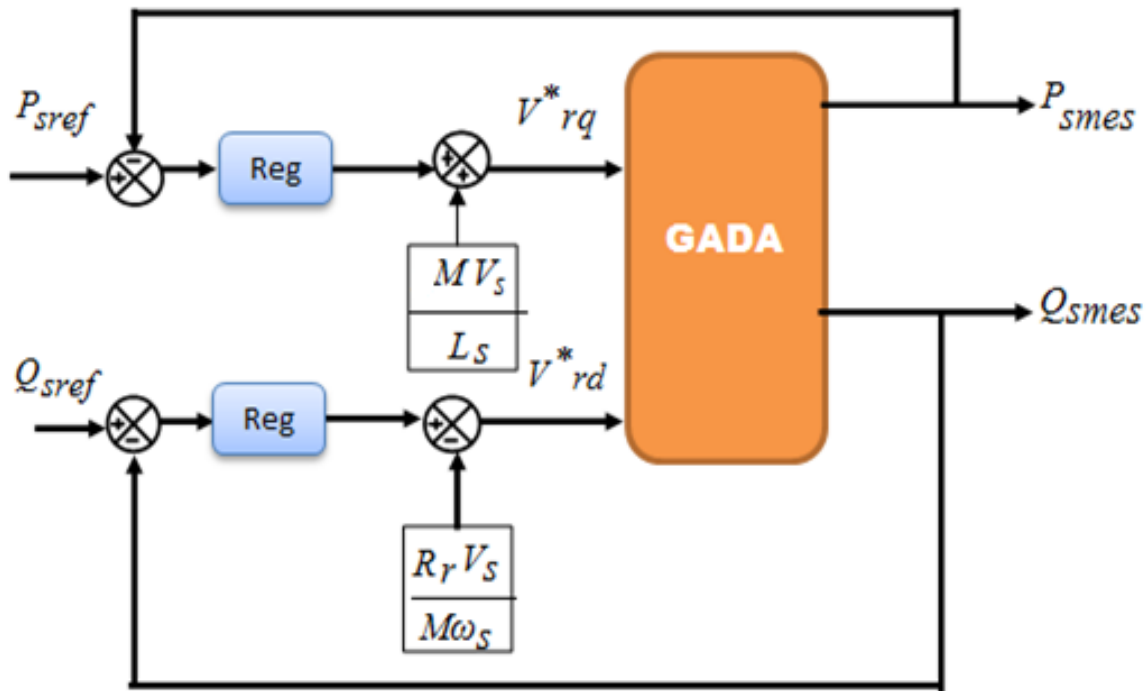


Figure 3-4 : Schéma bloc de la commande directe.

➤ La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée *méthode indirecte* découle directement des équations (3.13) et (3.11).

3.4.3 Commande vectorielle indirecte :

Afin d'améliorer la commande précédente, on introduit un algorithme de commande indirecte des puissances active et réactive de la DFIG en fonction des courants rotoriques, d'où les termes de couplages $g\omega_s L_r \sigma i_{rq}$ et $g\omega_s L_r \sigma i_{rd}$ considérés comme étant des perturbations non négligeables, et seront compensés. La commande, ainsi découplée est réalisée au moyen de régulateurs PI. Il existe deux méthodes de découplage en boucle ouverte

et en boucle fermée pour contrôler les puissances statoriques. En boucle ouverte, les puissances ne sont pas contrôlées et elles le deviennent en boucle fermés.

3.4.4 La commande vectorielle indirecte en boucle ouverte :

Le schéma de l'ensemble commande bloc découplage machine est illustré sur cette figure. Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotorique sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références V_{dr}^* et V_{qr}^* qui convient. De ce fait, la commande par boucle imbriquées qui contrôle le courant rotorique est alors appliquées à la DFIG pour des raisons de sécurité de fonctionnement. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle ouverte) permet de contrôler séparément les courants i_{dr} et i_{qr} en boucle fermé et les puissances P_s et Q_s en boucle ouverte. Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe. Ils sont identiques pour chaque axe.

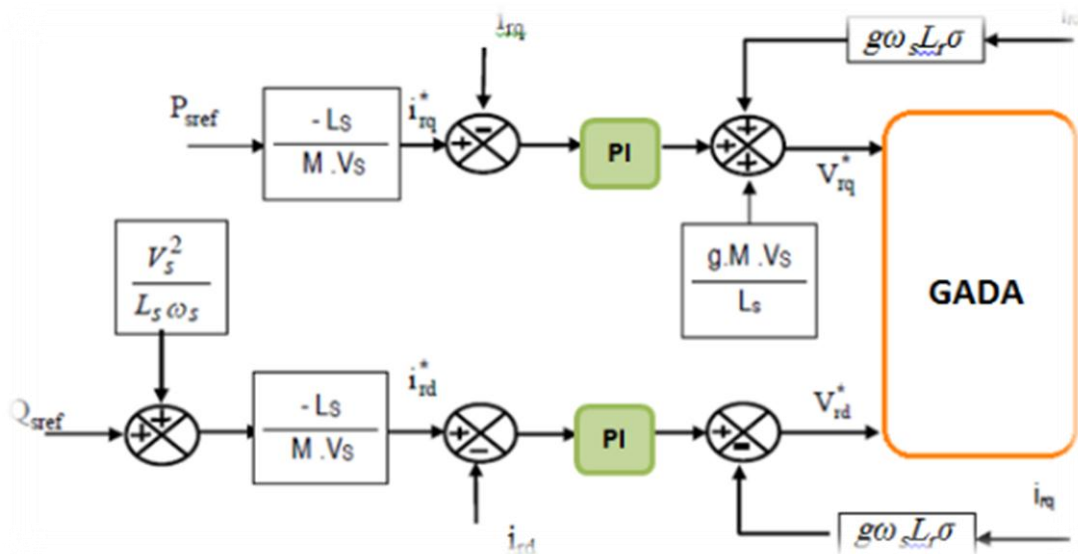


Figure 3-5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

3.4.5 La commande indirecte en boucle fermé :

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances ; on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants de l'ensemble commande bloc découplage machine est illustré sur la figure suivante :

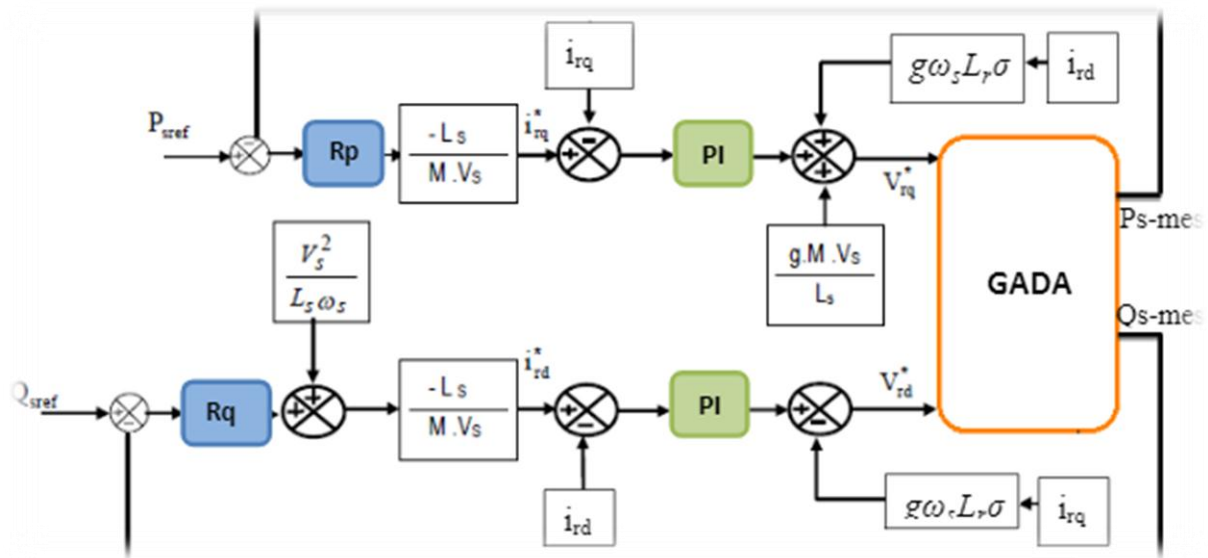


Figure 3-6 : la commande vectorielle indirecte en boucle fermée.

3.5 La commande vectorielle directe

3.5.1 Définition générale

Cette méthode de commande a été proposée par **Blaschke**. Elle exige la connaissance du module de flux et de sa phase pour assurer un découplage entre le couple et le flux pour un régime transitoire effectué. Dans ce cas, le flux est régulé par une contre réaction, donc il doit être mesuré ou estimé à partir des signaux de tensions et des courants statoriques. L'avantage présenté par cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétriques. Cependant, l'inconvénient de cette méthode présenté par la fragilité des capteurs mécanique et leurs faibles résistivités face au comportement dur tel que les vibrations et les échauffements excessifs.

3.5.2 Commande directe en puissance active et réactive de la MADA en génératrice

Dans cette méthode, nous présentons la régulation indépendante des puissances active et réactive statoriques du "GADA" en utilisant deux régulateurs PI où la boucle de régulation de la puissance active Ps et la boucle de régulation de la puissance réactive Qs. **figure 3.4**.

Un nouveau terme est apparu $\frac{M.V_s}{L_s}$. Ce terme est constant dans notre étude, car nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable. Donc nous n'avons pas besoin de placer des régulateurs entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour simplifier la commande de la MADA, nous considérons que la tension du réseau est stable, ce qui nous permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant.

3.6 Commande indirecte

3.6.1 Définition générale

La commande indirecte est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude de flux mais seulement sa position, l'idée est proposée par **Hasse**. Elle consiste à estimer la position du vecteur de flux, et régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire [17], [18], elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de renforcer que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [19], [20].

3.6.2 Commande indirecte en puissance active et réactive de la MADA en génératrice

En se basant sur les équations régissant le fonctionnement de la machine défini dans la modélisation.

En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en conséquence à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la MADA.

On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques et on aura :

$$\begin{cases} V_{dr} = g \cdot w_s \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{\frac{V_s \cdot M}{L_s}} \cdot P_s - \left(\frac{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{\frac{V_s \cdot M}{L_s}} P \right) \cdot Q_s + \left(\frac{R_r \cdot V_s}{w_s \cdot L_s} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{V_s}{w_s \cdot M} P \right) \\ V_{qr} = - \left(\frac{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{\frac{V_s \cdot M}{L_s}} P \right) \cdot P_s - g \cdot w_s \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{\frac{V_s \cdot M}{L_s}} \cdot Q_s + g \cdot w_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{V_s}{w_s \cdot M} \end{cases} \quad (3.16)$$

3.7 Etude de la régulation pour la commande.

Nous avons utilisé des régulateurs de type Proportionnel-Intégral (PI) en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul. Leur tâche est non seulement de comparer les valeurs réelles mesurées avec les valeurs de référence, mais aussi de stabiliser le système à réguler. Ainsi, au cours de la synthèse de ces régulateurs, nous ferons en sorte d'obtenir une dynamique électrique du système aussi rapide que l'autorise la fréquence de la MLI du convertisseur rotorique, ceci dans l'optique de l'insertion du dispositif dans un système éolien à vitesse variable ou dans un autre système utilisant la MADA en génératrice.

3.7.1 Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI)

Le régulateur utilisé pour commander la MADA en génératrice est un régulateur de type proportionnel-intégral (PI) qui permet d'avoir une bonne précision, une rapidité et stabilité du système. La fonction de transfert du régulateur est donnée par : $R(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$

Tel que K_i et K_p sont des constantes.

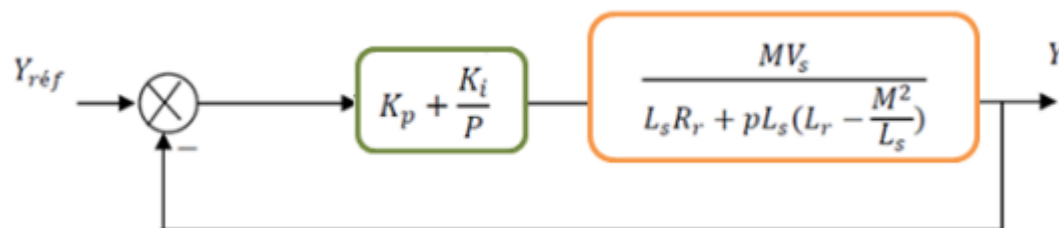


Figure 3-7 : Schéma de régulation avec PI classique.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{M V_s}{L_s (L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + (L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (3.17)$$

Par la méthode de compensation $\frac{K_i}{K_p} = L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MVs}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (3.18)$$

Et la fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1+\tau} \text{ avec } \tau = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MVs} \quad (3.19)$$

A partir des équations des tensions on peut déterminer les gains K_p et K_i en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MVs} \quad K_i = \frac{1}{\tau} \frac{R_r L_s}{MVs} \quad (3.20)$$

3.8 Simulation et interprétation des résultats :

La simulation est réalisée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink en utilisant un régulateur PI classique pour observer les performances de ce type de régulateur qui est injecté dans une chaîne de commande vectorielle de type indirect.

Les figures suivantes présentent les résultats de simulation de celle des puissances active et réactive et le couple électromagnétique, les courants et les flux vis-à-vis l'utilisation de ce type de régulateur PI classique.

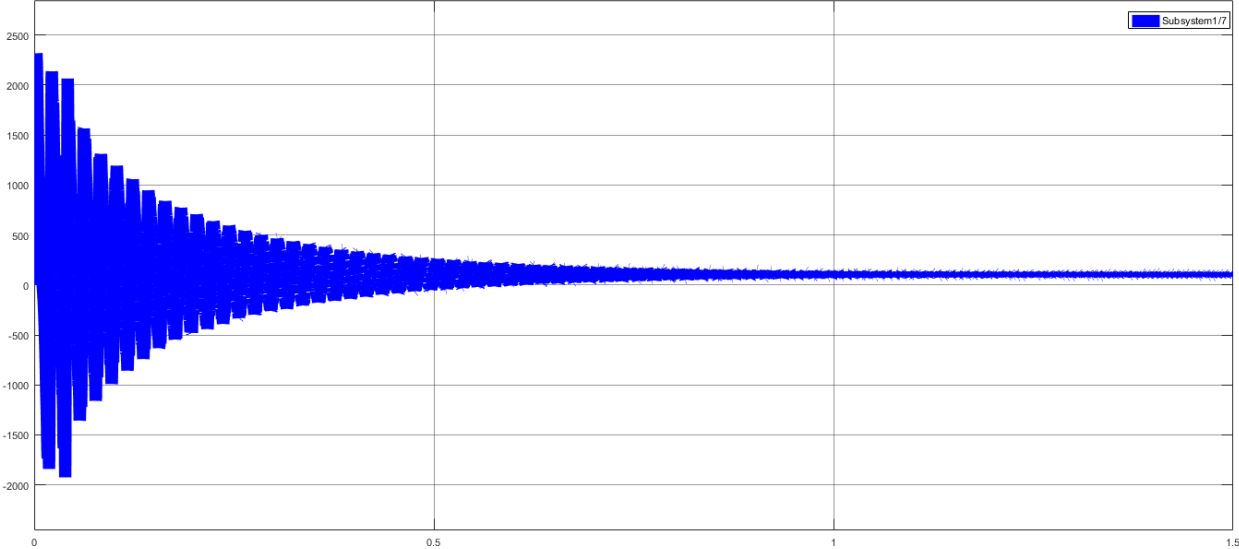


Figure 3-8 : Réponse dynamique de la puissance active statorique.

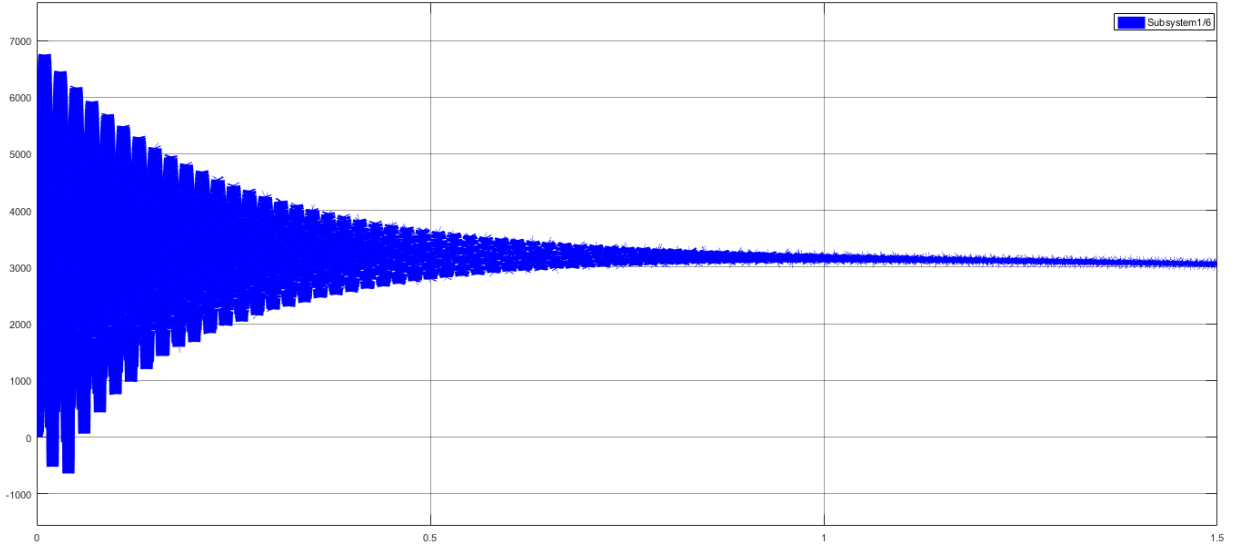


Figure 3-9 : Réponse dynamique de la puissance réactive statorique.

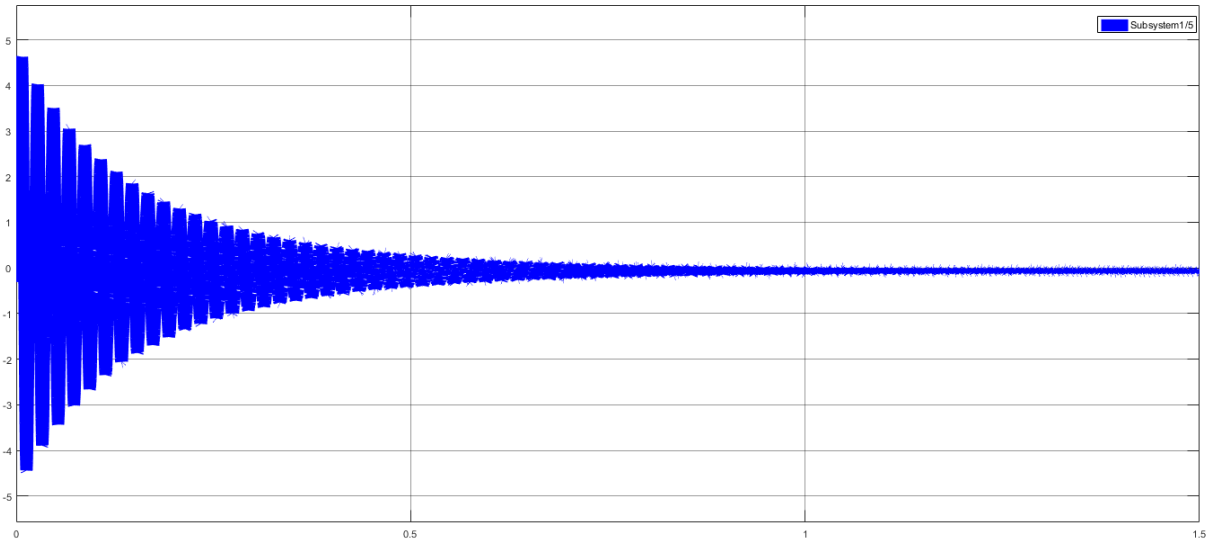


Figure 3-10 : Le couple électromagnétique.

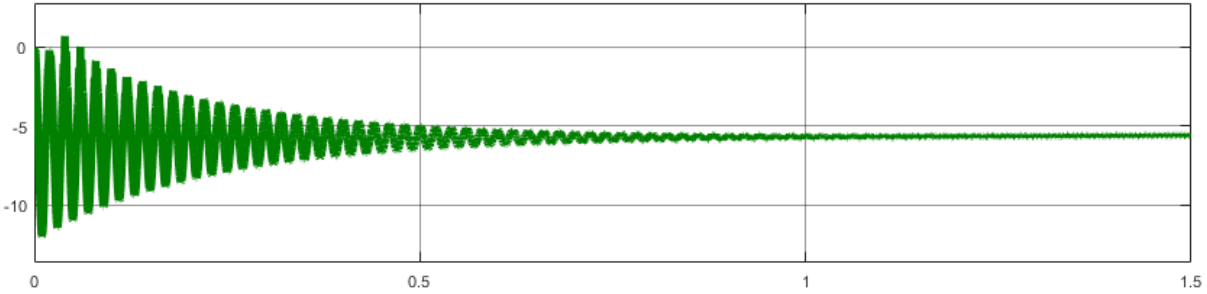


Figure 3-11 : le courant statorique direct.

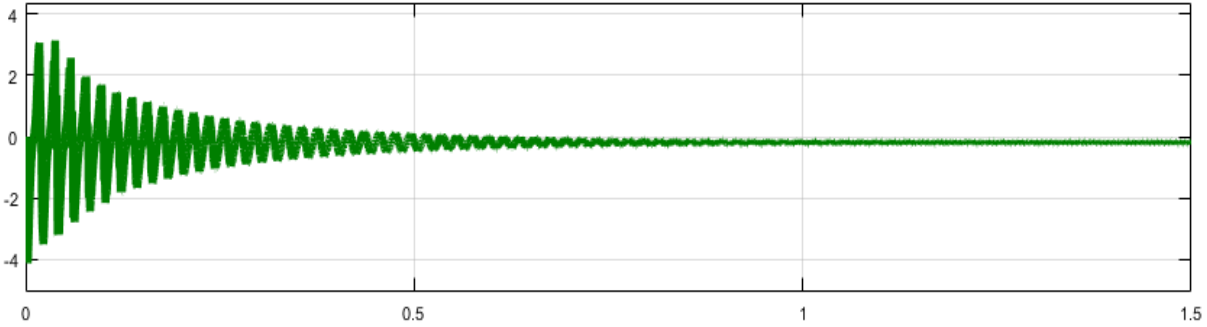


Figure 3-12 : le courant statorique quadrature.

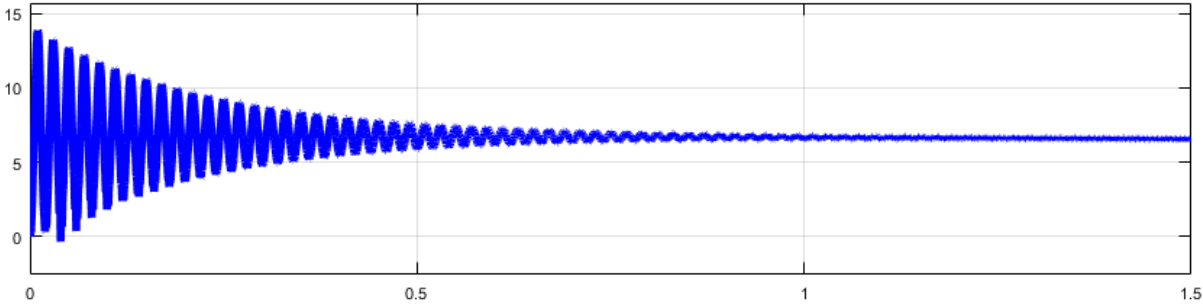


Figure 3-13 : le courant rotorique direct.

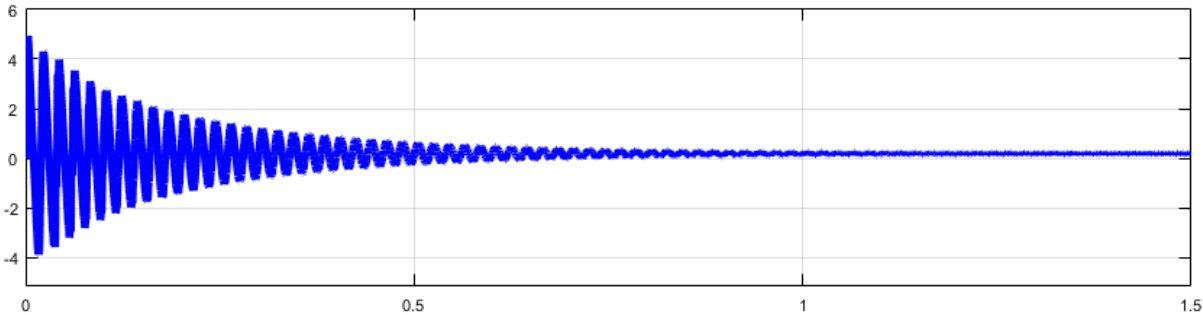


Figure 3-14 : le courant rotorique en quadrature.

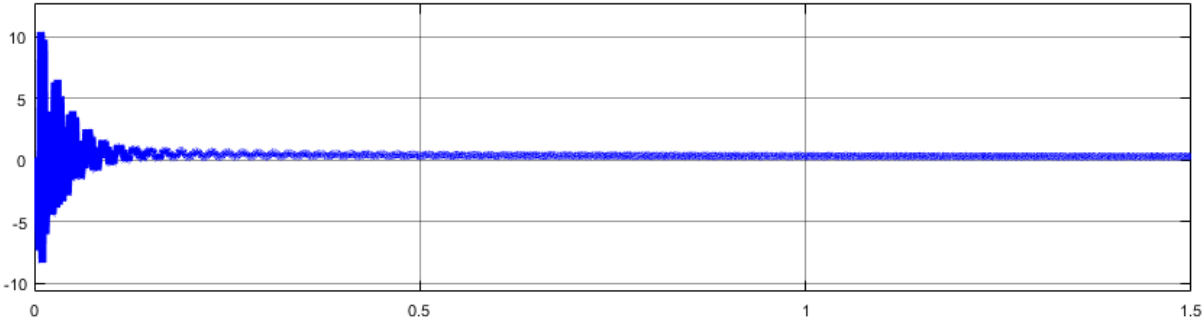


Figure 3-15 : Le flux rotorique direct.

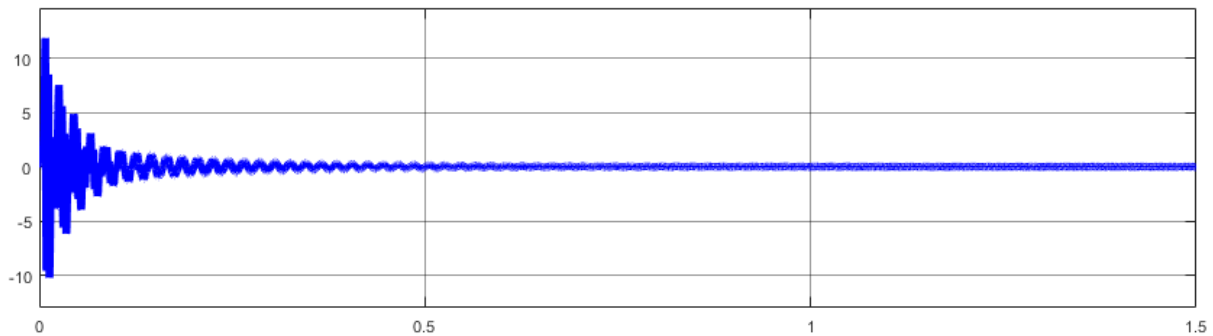


Figure 3-16 : *Le flux rotorique en quadrature.*

3.4.1 Interprétation des résultats :

On remarque que l'allure du couple électromagnétique dépend de la puissance active statorique avec une réponse plus ou moins oscillatoire avec des harmoniques négligeables, mais ces performances obtenues avec le régulateur PI classique ne sont pas suffisantes, ce qui nous fait réfléchir à trouver une solution plus performante que ce dernier. Donc notre choix est tombé sur le régulateur PI par la logique floue.

3.9 Conclusion.

Dans ce chapitre on a présenté une stratégie de commande orientée par le flux statorique et ces résultats de simulation en introduisant un régulateur PI classique.

A partir de la simulation numérique, 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. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

4. Chapitre 4 : APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE SUR LA MADA.

4.1 Introduction :

La logique floue amène dans cette période un revenu très important de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels. C'est le traitement des incertitudes et l'une des méthodes de l'intelligence artificielle. Elle sert à présenter les objets de l'étude et aussi la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approximatif. Elle est complémentaire et utilisée particulièrement lorsqu'on ne dispose pas de modèles mathématiques loyal et bien précis du processus à commander, ou lorsque ce dernier présente une forte non linéarité. Les premières utilisations de la logique floue au niveau des systèmes n'apparurent que dès 1975 par les Japonais qui commencent à appliquer dans des produits industriels pour résoudre les problèmes de réglages des systèmes et dernièrement cette technique de commande est impliquée en Europe. Beaucoup de recherche ont été faite afin d'engager avec de principe de réglage. Les performances et l'effet de cette technique seront montrés par des résultats de simulation.

4.2 Historique de la logique floue:

La logique floue a été introduite en 1965 par L. A. Zadeh de l'université de Californie de Berkeley. Ses principes ont été appliqués en 1974 par E. H. Mamdani à la construction d'un premier contrôleur flou. Les recherches effectuées sur la logique floue permettent de résoudre les problèmes d'identification, de commande des systèmes linéaires et non linéaires [21]. En 1978, c'est la société danoise F.L. Smidth-Fuller qui réalise le contrôle d'un four à ciment : c'est la première véritable application industrielle de la logique floue ; Puis en 1983, c'est un épurateur d'eau à commander par logique floue qui est mis au point avec succès. A partir de 1985, la logique floue est introduite par le chercheur M. Suegno au Japon. Ce type de commande fut alors l'objet des premières réalisations remarquables développées à la fin des années 80 et au début des années 90 telles que le métro Sendai (1987) et le lave-linge Aïsaigo Pay Fuzzy de Matsushita (1990).

4.3 Domaine d'application:

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications, on peut citer [22].

- Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs...)
- Appareils électroménagers
- Systèmes autonomes mobiles
- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur...)
- Systèmes de conditionnement d'ambiance.
- Robotique
- Produits de consommation courante.

Et plusieurs autres domaines d'utilisation.

4.4 Principe de la logique floue :

Dans la théorie des ensembles conventionnels, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble, donc le « degré d'appartenance » d'un élément à un ensemble ne peut être que nul ou égal à l'unité. Par contre dans la théorie des ensembles flous, un élément peut plus ou moins appartenir à un ensemble, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur comprise dans l'intervalle $[0,1]$. Contrairement à la théorie des limites des ensembles définis. Dans la théorie classique les contours des ensembles sont « nets », tandis que pour les ensembles flous les contours sont « graduels », ou bien flous comme le montre cette figure (4.1)

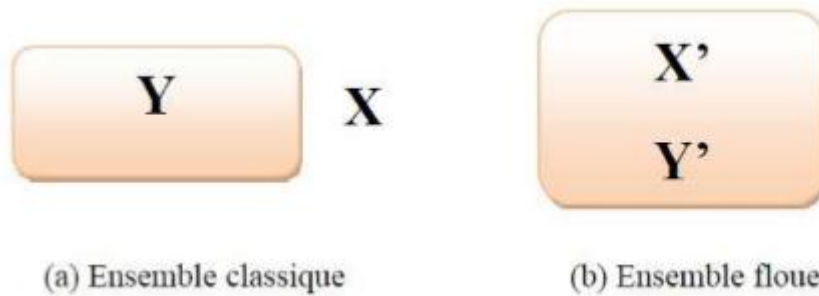


Figure 4-1 : Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.

X : n'appartient pas à « a » ;
Y : appartient totalement à « a ».

X' : appartient partiellement à « b ». Y' :
appartient partiellement à « b ».

4.5 Eléments de bases de la logique floue.

Dans cette partie, on va exposer d'une façon non exhaustive les éléments de base de la logique floue.

4.5.1 Variables linguistiques :

La notion des variables linguistiques joue un rôle très important dans le domaine d'application de la logique floue. Une variable linguistique est définie par des mots ou des phrases au lieu des nombres. En effet, la description d'une situation donnée, d'un phénomène ou d'un système contient des expressions floues comme "quelque, beaucoup, souvent, chaud, froid, rapide, lent, grand, petit ...etc. Ce genre d'expressions forme ce qu'on appelle des variables linguistiques de la logique floue. Une "variable linguistique " appliquée par la logique floue est définie par son domaine de variation, souvent appelé univers de discours qui peut être divisé en plusieurs sous-ensembles au moyen de fonctions d'appartenance.

4.5.2 Ensembles floue :

Dans la théorie classique des ensembles, c'est la fonction caractéristique qui définit l'ensemble. Cette fonction ne prend que les deux valeurs discrètes 0 (l'élément n'appartient pas ...) ou 1 (l'élément appartient à l'ensemble). Par contre l'élément de base de la logique floue est l'ensemble flou ; défini par une fonction d'appartenance qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1 et qui joue un rôle fondamental pour le passage du qualitatif au quantitatif. Le concept de ce dernier a pour but d'éviter le passage brusque d'une

classe à une autre et de permettre des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe ; c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à une classe.

4.5.3 Fonctions d'appartenance :

Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles. Les fonctions d'appartenance peuvent avoir différentes formes, comme il est montré sur la figure (IV.2) : Monotones (croissantes ou décroissantes); Triangulaires ; Trapézoïdales; En forme de cloche (Gaussiennes)

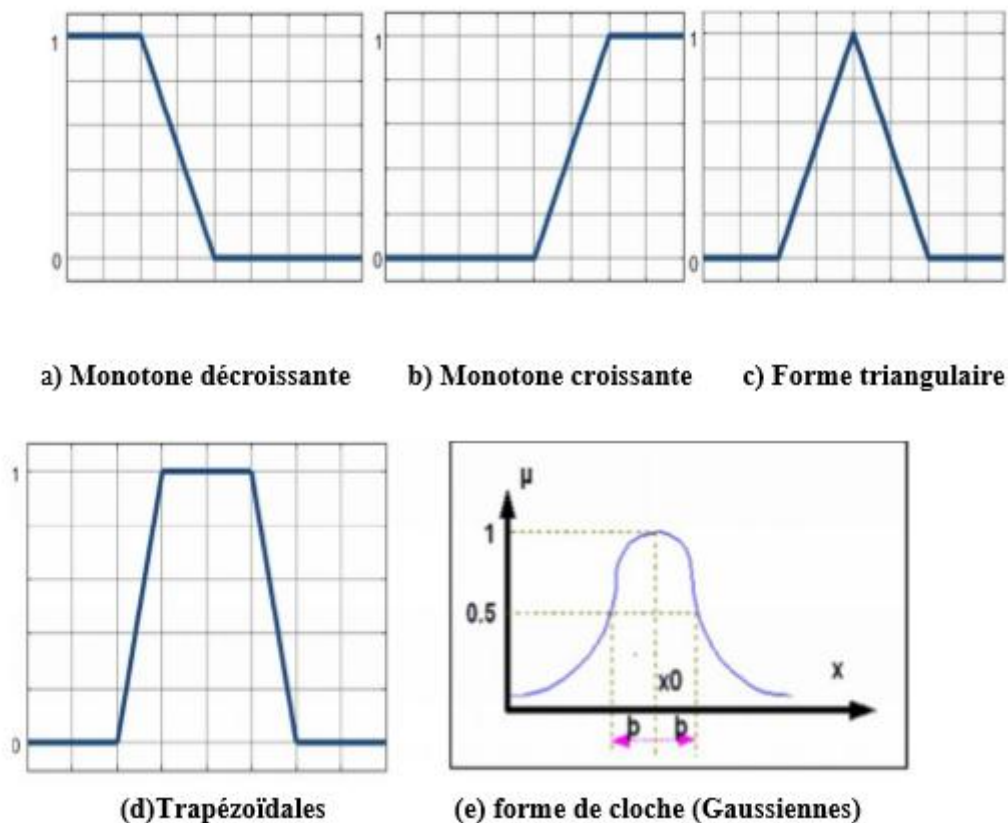


Figure 4-2 : Différente forme des fonctions d'appartenances.

Généralement, les plus souvent utilisées sont les fonctions de forme trapézoïdale ou triangulaire.

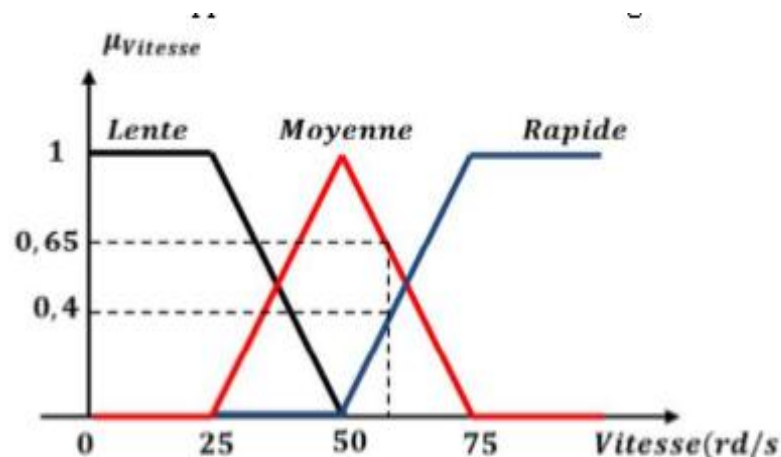


Figure 4-3 : Représentation graphique des ensembles flous d'une variable linguistique.

4.5.4 Opérateurs de la logique floue :

Une fois les ensembles flous définis, des opérations mathématiques concernant ce type d'ensembles ont été développées. Les opérateurs mathématiques élaborés ressemblent beaucoup à ceux reliés à la théorie des ensembles conventionnels [23]. Les opérateurs de l'intersection, l'union, la complémentation et l'implication sont traduites, Par les opérations « ET, OU, NON et ALORS » respectivement. Soit A et B deux ensembles flous, dont les fonctions d'appartenance sont, respectivement, le tableau suivant résume quelques fonctions utilisées pour réaliser les différentes opérations. D'autre part, l'implication floue se construit à partir des propositions floues élémentaires. Pour cette opération, il existe encore plusieurs méthodes. Les plus souvent utilisées sont données par le tableau suivant.

Appellation	Implication floue
Zadeh	$\text{Max} \{ \min ((\mu_A(x), \mu_B(y)), 1 - \mu_A(x)) \}$
Mamdani	$\text{Min} (\mu_A(x), \mu_B(y))$
Reichenbach	$1 - (\mu_A(x) + \mu_A(y) \cdot \mu_B(y))$
Willmott	$\text{Max} \{ 1 - \mu_A(x), \min (\mu_A(x), \mu_B(y)) \}$
Diènes	$\text{Max} (1 - \mu_A(x), \mu_B(y))$
Brown gold1	1 Si $\mu_A(x) \leq \mu_B(y)$ $\mu_B(y)$ sinon
Lukasiewicz	$\text{Min} (1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y))$
Larsen	$(\mu_A(x), \mu_B(y))$

Tableau 4.1 : Implication floue.

4.5.5 Règles floues :

La règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication entre deux propositions floues. Par exemple, considérons deux variables linguistiques $(V1, U, Tv1)$ $(V2, U, Tv2)$ et les deux propositions suivantes 'V1 est A', 'V2 est B', ou A et B sont deux ensembles flous de $V1$ et $V2$. On peut définir la règle floue par l'expression, si V1 est A Alors V2 est B.

- La proposition ' V1 est A ' est la condition de l'implication.
- La proposition ' V2 est B ' est la condition de l'implication.

Les règles floues peuvent être décrites de plusieurs façons :

- **Linguistiquement** : dans ce cas, on exprime les règles de façon explicite comme dans l'exemple suivant : "Si l'accélération est faible et la vitesse est faible Alors faire appel à un grand couple".
- **Symboliquement** : il s'agit, dans ce cas, d'une description linguistique où l'on remplace la désignation des ensembles flous par des symboles tels que PG, PP, NP....etc. Désignant (positif Grand, positif petit, Négatif Petit,..., etc.)

- Par matrice d'inférence : dans ce cas, on rassemble toutes les règles qui sont désignées symboliquement dans un tableau appelé "Matrice d'inférence".

4.6 Commande par la logique floue:

La commande floue est certainement le domaine d'application de la logique floue le plus utilisé. Son but est, comme en automatique classique de gérer un processus selon une consigne désirée, par action sur des grandeurs physiques. Sa particularité est de reproduire le comportement d'un opérateur humain, plutôt que de réaliser un modèle mathématique du système.

4.6.1 Régulateur flou :

De façon opposé à un régulateur classique, Le régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basent sur des variables linguistiques [24], [25], La majorité des régulateurs flous actuelles utilisent le schéma simple proposé par E.Mamdani. Ce schéma est illustré par la figure (IV.4). Donc un régulateur flou est constitué principalement de 4 blocs :

- Fuzzification ;
- Base de règles ;
- Inférence ;
- Défuzzification ;

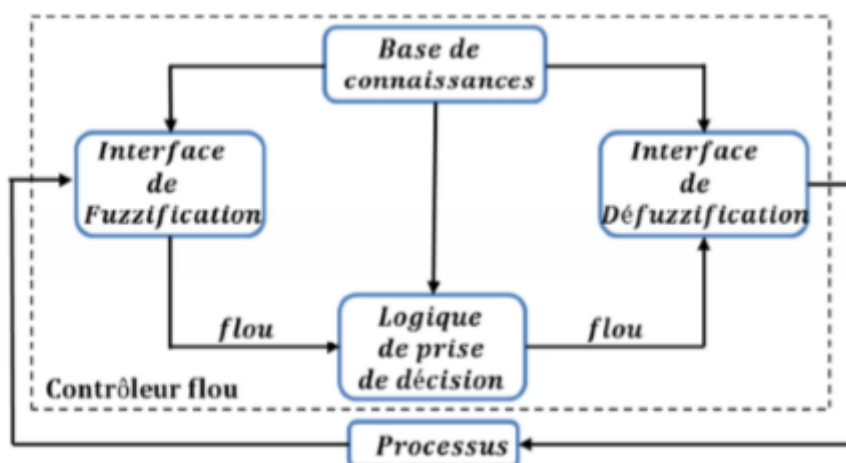


Figure 4-4 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou.

Interface de fuzzification :

La fuzzification est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables [25]. Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Définition des fonctions d'appartenance de toutes les variables d'entrées
- Transformation des grandeurs physiques (réelles ou numériques) à des grandeurs linguistiques ou floues
- Représentation d'échelle transférant la plage des variables d'entrées aux univers de discours correspondants
- Pour les fonctions d'appartenance, on utilise généralement les formes triangulaires et trapézoïdales.

4.6.1.1 Base de règles :

La base de règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques. Elle est composée de :

- D'une base de données fournissant les informations nécessaires pour les fonctions de normalisation.
- La base de règle constitue un ensemble d'expressions linguistiques structurées autour d'une connaissance d'expert, et représentée sous forme de règles : Si (Condition) Alors (Conséquence).

4.6.1.2 Mécanisme d'inférence floue :

Le principe de cette action consiste à établir la liaison entre les grandeurs d'entrée du régulateur exprimées par des termes linguistiques et la variable de sortie sous sa forme linguistique à partir d'une connaissance bien déterminée du système à régler et d'une estimation concernant le fonctionnement du processus à régler. Les trois méthodes d'inférence les plus utilisés sont :

- Max-Produit
- Somme-produit

- Max-Min (Implication de Mamdani).

4.6.1.3 Interface de défuzzification :

La défuzzification consiste à déduire une valeur numérique précise de la sortie du régulateur à partir de la conclusion résultante floue issue de l'opération d'inférence, donc on peut dire elle permet la conversion d'une grandeur numérique à une grandeur analogique. Les méthodes habituellement utilisées sont :

- * La méthode de centre de gravité
- * La méthode du maximum
- * La méthode des surfaces
- * La méthode des hauteurs

La relation mathématique qui présente la méthode de centre de gravité est comme suit :

$$X_{Gr} = \frac{\int xr \cdot \mu_{RES.}(Xr) \cdot dxr}{\int \mu_{RES.}(x) \cdot dxr}$$

4.6.2 Développement pratique du contrôleur flou :

La majorité des contrôleurs flous utilisent des algorithmes se basant sur le schéma simple. De Mamdani pour un système mono-variable :

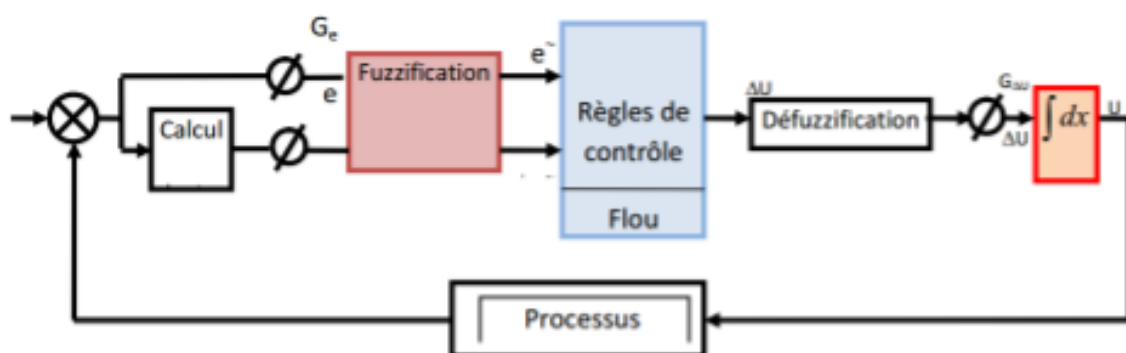


Figure 4-5 : Schéma bloc d'une boucle de régulation à contrôleur flou.

D'après le schéma ci-dessus, le système de régulation floue se compose essentiellement du contrôleur flou et du processus à contrôler. Le contrôleur flou comprend :

- Un bloc de calcul de la variation de l'erreur au cours du temps ;
- Les facteurs d'échelle associés à l'erreur, à sa variation et à celle de la commande ;
- Un bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation ;
- Les règles de contrôle flou ;
- Un bloc de défuzzification de la variation de la commande ;
- Un bloc intégrateur ;

4.7 Application de la logique floue à la commande de la puissance active et réactive de la GADA :

Dans ce chapitre, nous allons des règles d'inférence utiliser à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK afin d'observer les performances qui peut porter par le régulateur floue ainsi que son effet sur les signaux qui seront présenté dans ce chapitre.

4.7.1 Résultats de simulation :

Ces résultats sont obtenus toujours en appliquons la loi de commande avec des régulateur flou placé sur l'axe d et q afin d'agir sur les 2 puissances active et réactive ainsi que le couple électromagnétique.

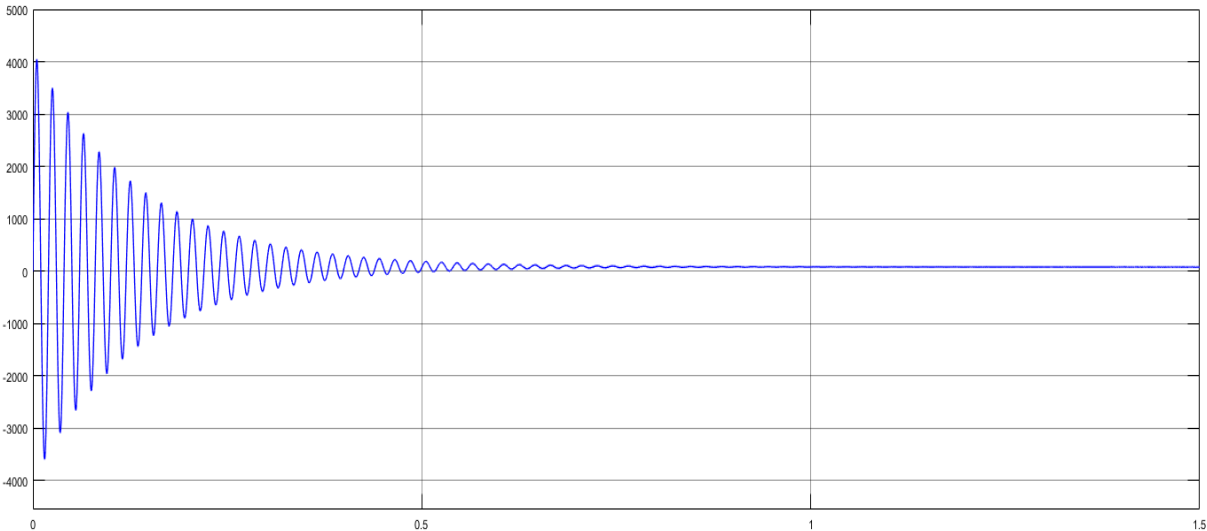


Figure 4-6 : La puissance active statorique.

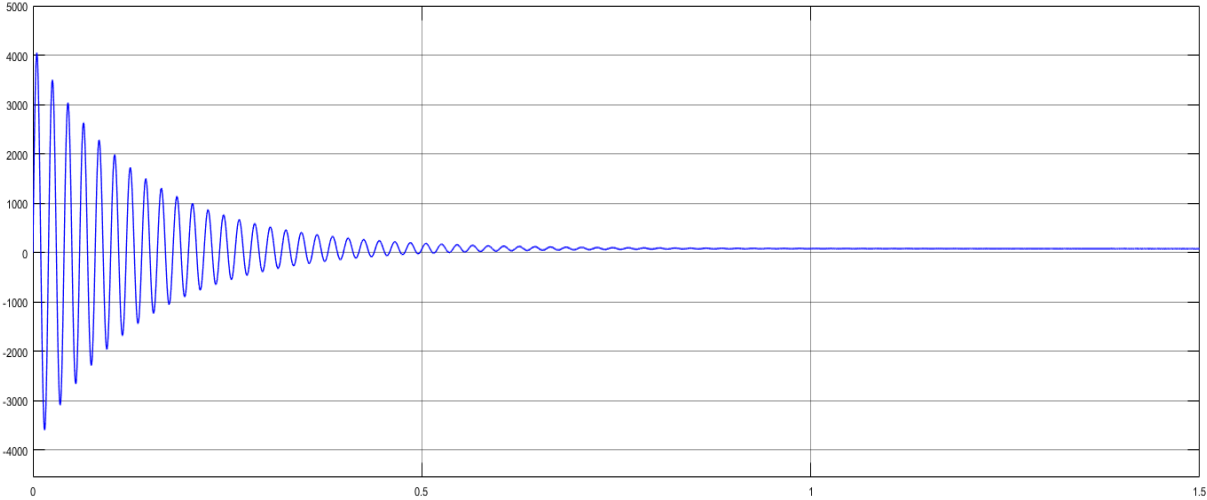


Figure 4-7 : La puissance réactive.

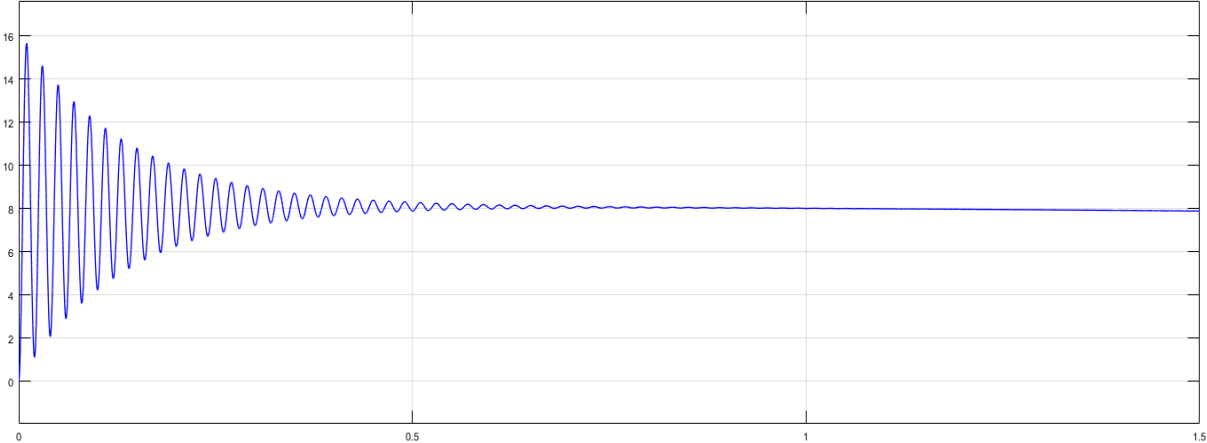


Figure 4-8 : Le courant direct rotorique.

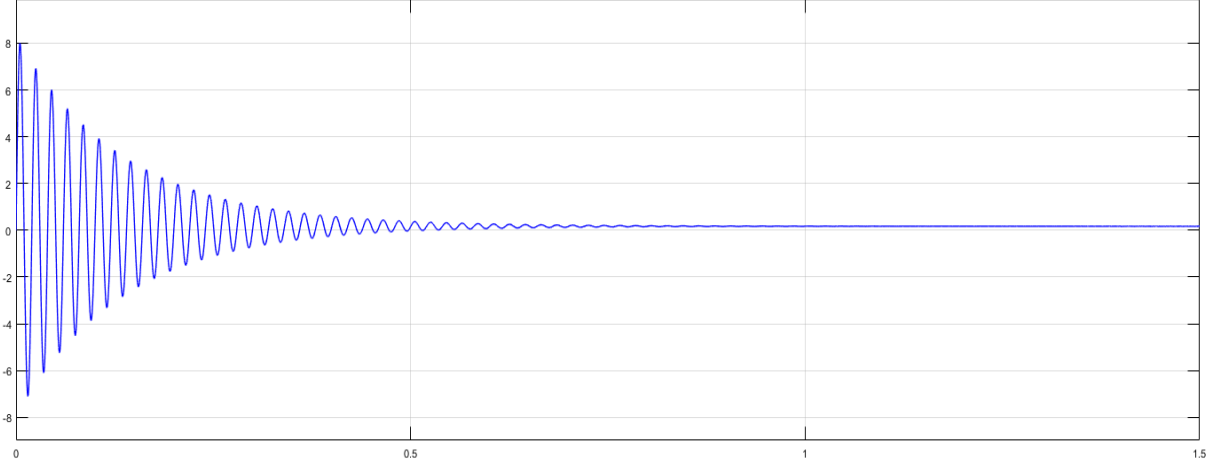


Figure 4-9 : Le courant direct en quadrature.

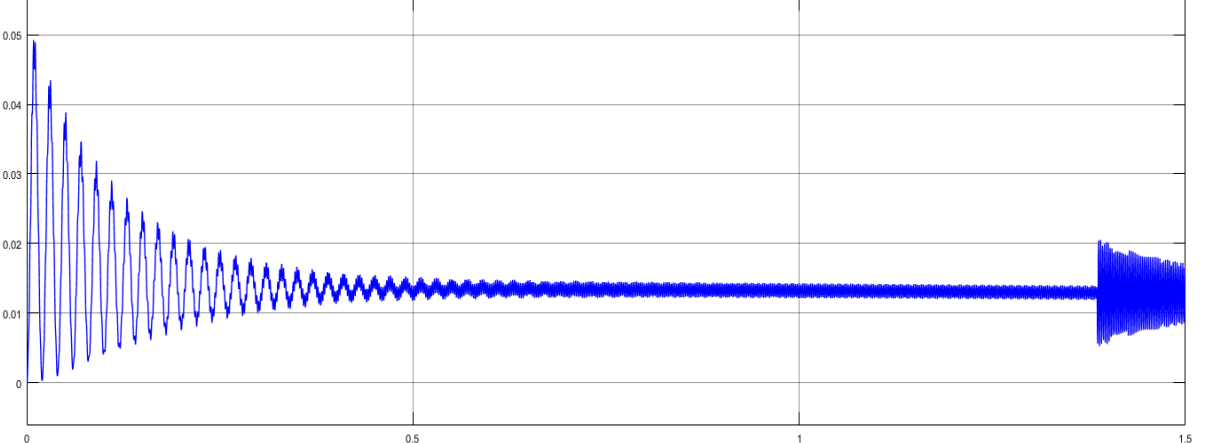


Figure 4-10 : Le couple électromagnétique.

4.8 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les résultats de simulation d'un régulateur PI floue injecté dans une chaîne de commande et son effet sur les différents signaux.

Comme il est connu, le régulateur floue n'exige pas d'un modèle mathématique pour simplifier la commande comme les autres régulateurs classiques, et voilà les résultats obtenus prouvent la justesse de cette caractéristique de non nécessité d'un modèle mathématique tel que des résultats avec moins d'oscillation avec amélioration des performances du couple électromagnétique avec moins d'oscillation toujours sans dépassement et des oscillations moins élevées avec un bon découplage et stabilité, ainsi que de bonnes performances.

Conclusion générale.

Ce mémoire a pour but de présenter la régulation floue d'une génératrice asynchrone à double alimentation et sa modélisation comme un outil de commande.

Ses performances sont remarquées en comparant bien sûr avec la commande à flux statorique orienté.

Dans le premier chapitre, nous avons présentés des généralités sur les turbines éoliennes, ses types, ses applications, ses modes de fonctionnement et ses avantages et ensuite, on a présentés l'asservissement de la chaîne éolienne pour obtenir des études sur le réglage de la vitesse du système.

En suite, nous avons consacré le 2^{ème} chapitre pour l'étude de la MADA en générale, son principe de fonctionnement, ses applications, ses avantages, après on a fait une modélisation à l'aide de la transformation de PARK, avec une étude de deux modes de fonctionnement en moteur et en génératrice afin de bien connaître le comportement de cette machine.

Les résultats de simulation sont réalisés par MATLAB/SIMULINK et elle a prouvé que la MADA fonctionne bien en génératrice qu'en moteur.

Dans le 3^{ème} chapitre, une étude sur la commande vectorielle à flux statorique orienté a été effectuée tel que le contrôle est réalisé par des puissances active et réactive de références afin de viser l'étude sur l'échange de puissance active et réactive entre le stator et le réseau.

Le dernier chapitre nous a permis d'avoir une vue générale sur les systèmes flous caractérisés par un régulateur flou qui est utilisé dans une chaîne de commande afin d'observer les performances portées par ce type de régulation.

5. Références bibliographiques.

[1] : <http://tpe-energie-eolienne.e-monsite.com/pages/sommaire/introduction.html>

[2] : **A. BOYETTE** « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »; Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11 Décembre 2006.

[3] : **Rachel Baïle** Analyse et modélisation multifractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne.

[4] : **TIR ZOHEIR** « Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade » mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2010.

[5] : **Mourad Djamaï** Emplacement optimal des turbines obtenu par Mosetti.

[6] : **Désiré Le GOURIERE**, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations, édition Eyrolles, 1982.

[7] : **H. BOUKHARI et S.GUERMACHE**, « Étude d'une éolienne à vitesse variable avec Génératrice asynchrone pilotée par le stator », Mémoire de Master, USTHB, 2010.

[8] : **S. E. AIMANI** « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » ; Thèse de doctorat en génie électrique, Université des sciences et technologies de Lille 1, (USTL), France.

[10] : **BELRECHID Raouf, BELMOKHTAR Boualem**, "Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pilotée par un convertisseur matriciel appliqué dans une chaîne de production d'énergie électrique (Eolienne)", Thème de l'Ingénieur de l'Ecole Nationale supérieure Polytechnique d'Alger, Juin 2011

[11] : **HAMZAOUI Ihssen**, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", Mémoire de Magister de l'ENP d'Alger, 20 janvier 2008.

[12] : **FENNI Atmane**, "Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs En Mode Glissant D'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)", Mémoire de Magister de l'université Mohamed Khider de Biskra, 19 décembre 2013.

- [13] : **CHAIBA Azeddine**, "Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle", Thèse de Doctorat de l'université de Batna, 11 juillet 2010.
- [14] : **B. ROBYNS, M.ESELIN**, « Power control of an inverter. Transformer association in a Wind generator », Electromotion, vol.6, No. 1-2, 1999, pp.3-7.
- [15] **A.CHAIBA** « Commande par la Logique Floue de la Machine Asynchrone a Double Alimentation Alimentée en Tension », Thèse de Magister, Université de Batna-2004.
- [16] **J. MARTIN**, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [17] **MTOUK et BOUGHERBAL.A** « Etude d'un MPPT d'une éolienne ».Mémoire d'ingénieur .U.S.T.H.B Algérie.2010.
- [18] **G. GRELLET & G. CLERC** « Actionneurs Électriques : Principes, Modèles, Commande » ; Deuxième tirage, Éditions Eyrolles, Paris, France, 1997.
- [19] **A. L. NEMMOUR** « Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation » ; Mémoire de Magister en électrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [20] **Y.A. Bencherif**, « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne » mémoire d'ingénieur d'état, Ecole Nationale Polytechnique 2008.
- [21] **R. KETATA** , « Méthodologies de régulation numérique incluant la logique floue »- Thèse de Doctorat L.A.A.S Toulouse – 1992
- [22] **O.Guennounou**, "Méthodologie de Contrôleurs Intelligents par l'Approche Génétique Application a un Bioprocédé". Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse-III, 2009.
- [23] **E.Merbat**, "Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile ". Thèse de Doctorat de l'université de Batna, 2008.
- [24] **G. Tarak**, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » Thèse de Doctorat, par l'école centrale de lille et l'école militaire polytechnique d'Alger. 29/09/2011

[25] **V. Lacrose**, "Réduction de la Complexité des Contrôleurs Flous : Application à la Commande Multi variable", Thèse de Doctorat en Automatique et Informatique Industrielle, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France, 1997.

[26] **G. Grellet et G. Clerc**, "Actionneurs Electriques : Principes, Modèles, Commande", Deuxième Tirage, Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.

6. ANNEXE.

Données de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

Valeurs nominales

Puissance nominale : $P_n = 4.8 \text{ kW}$

La tension nominale : $v/U = 220/380 - 50 \text{ HZ}$

La vitesse nominale : $\omega_n = 1440 \text{ tr/min}$

Nombre de paires de pôles : $P=2$

Paramètres :

Résistance statorique : $R_s = 1.2 \text{ ohm}$

Résistance rotorique : $R_r = 1.8 \text{ ohm}$

Inductance statorique : $L_s = 0.1554 \text{ H}$

Inductance rotorique : $L_r = 0.1568 \text{ H}$

Inductance mutuelle : $L_m = 0.15 \text{ H}$

Constante mécanique :

Moment d'inertie : $J = 0.2 \text{ kg.m}^2$

Coefficient de frottement : $f = 0.001 \text{ N.m.S/rad}$