

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : MACHINES ELECTRIQUES

Présenté par
Hichem TEBANI
Yesser TOURI

Thème

COMMANDE VECTORIELLE EN PUISSANCE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

Mémoire soutenu publiquement le 22 septembre 2016 devant le jury composé de:

M^r Belkacem MOULA
M.C.B, UMMTO, Président

M^{elle} Nadia KECILI
M.A.B, UMMTO, Encadreur

M^{elle} Samia BELBAZ
M.A.A, UMMTO, Examineur

M^{elle} Malika LOUANCHI
M.A.A, UMMTO, Examineur

Remerciements

Nous exprimons nos sincères remerciements à notre encadreur : Mademoiselle KECILI Nadia à l'université MOULOUD MAMERI de Tizi-Ouzou, pour sa rigueur scientifique, ses qualités humaines, ses conseils et ses critiques.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury pour avoir accepté de lire, de critiquer et d'enrichir ce travail.

Nos remerciements aussi tous les enseignants et les responsables du Département d'Electrotechnique de l'Université de Tizi-Ouzou pour leurs aides et leurs encouragements sans oublier nos amis.

Nous remercions aussi tous les étudiants qui nous ont aidés avec des très importants conseils pour le bon déroulement de ce travail

Nous remercions nos parents, pour tout ce qu'ils font pour nous. Ils se sont beaucoup sacrifiés pour nous offrir toutes les conditions nécessaires afin que nous puissions devenir ce que nous sommes. Nous tenons enfin à remercier vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail A mes chers parents,

Mon père qui ne cesse de m'encourager,

Ma mère symbole de Sacrifice,

Sans eux je ne serais pas ce que je suis

Aujourd'hui.

A mes chères sœurs et frères

A toute la famille

A tous mes amis

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

A la mémoire de mes grands-parents.

Hichem

Dédicace

A ma chère mère, la personne qui a beaucoup sacrifié pour moi sans elle je

N'aurais eu la volonté d'atteindre ce niveau ;

A mon cher père sens de responsabilité

A mes sœurs et mon frère

A toute ma famille ;

A tous mes amis;

A tous mes collègues;

A tous ceux que j'ai connu durant toutes mes études;

A tous ceux pour qui je compte et qui comptent pour moi;

Je dédie ce travail.

Yesser

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre 1 : généralités sur l'énergie éolienne	
I.1.Introduction.....	3
I.2.La Production éolienne.....	3
I.3.Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	3
I.4.La chaîne de transformation énergétique.....	4
I.4.1.La transformation de l'énergie par les pales.....	4
I.4.2.L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur.....	4
I.4.3.La production d'électricité par le générateur.....	4
I.4.4.Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur.....	4
I.5.Choix de type d'éoliennes.....	4
I.6.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	5
I.6.1.Avantages.....	5
I.6.2.Inconvénients.....	6
I.7.Classification des éoliennes.....	6
I.7.1.Différents types d'éolienne et leurs utilisations.....	7
I.7.1.1.Les éoliennes à axe vertical.....	7
I.7.1.1.1.Les type d'éoliennes à axe vertical.....	8
I.7.1.1.1.a.Rotor de Darrieus.....	8
I.7.1.1.1.b.Rotor de Savonius.....	8
I.7.1.1.2.Les avantages et Les inconvénients d'éolienne à axe vertical.....	9
I.7.1.2.Les éoliennes à axe horizontal.....	9
I.7.1.2.1.Les types d'éoliennes à axe horizontal.....	10
I.7.1.2.1.a.Eoliennes lentes.....	10
I.7.1.2.1.b.Eoliennes rapides (Aérogénérateurs).....	10
I.7.1.2.2.Principaux composants d'une éolienne.....	11
I.7.1.2.2.a.Le mât.....	11
I.7.1.2.2.b.La nacelle.....	12
I.7.1.2.2.c.Une armoire de commande.....	13
I.7.1.2.2.d.Le rotor.....	13
I.7.2.La Vitesse de rotor.....	13
I.7.2.1.Fonctionnement à vitesse fixe.....	13
I.7.2.2.Fonctionnement à vitesse variable.....	14

I.7.3.Les générateurs utilisés dans le système central électrique.....	15
I.7.3.1.Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	15
I.7.3.1.1.Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE).....	15
I.7.3.1.2.Générateur asynchrone à double stator.....	15
I.7.3.1.3.MACE connectée au réseau avec une interface d'électronique de Puissance.....	16
I.7.3.1.4.Systèmes utilisant Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné".....	17
I.7.3.2.Systèmes utilisant la machine synchrone.....	17
I.8.Classification des éoliennes.....	18

Chapitre II: Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.

II.1.Introduction.....	19
II.2.Structure de la machine.....	19
II.3.Mode de fonctionnement de la MADA.....	19
II.3.1.Fonctionnement en mode moteur.....	20
II.3.1.1.Moteur hypo synchrone.....	20
II.3.1.2.Moteur hyper synchrone.....	20
II.3.2.Fonctionnement en mode génératrice.....	21
II.3.2.1.Génératrice hypo synchrone.....	21
II.3.2.2.Génératrice hyper synchrone.....	21
II.4.Modélisation de la machine à double alimentation.....	22
II.4.1.Hypothèses simplificatrices.....	22
II.4.2.Les équations électriques de la MADA (dans les axes a,b,c).....	23
II.5.Changement de repère.....	25
II.5.1.La transformation de Park.....	25
II.5.2.Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d, q)	27
II.5.3.Choix du référentiel.....	28
II.5.4.Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant.....	28
II.5.5.Mise sous forme d'équation d'état.....	29
II.6.Simulation de la machine asynchrone à double alimentation.....	30
II.6.1.Diagramme fonctionnel sous MATLAB.....	30
II.6.2.Les résultats de simulation.....	31
II.7.Interprétation des résultats.....	33
II.8.Conclusion.....	34

Chapitre III: Commande Vectorielle de la MADA.

III.1.Introduction.....	35
III.2.Le principe de la Commande Vectorielle.....	35
III.3.Etablissement du modèle de la MADA.....	36
III.4.Choix du référentiel pour le modèle diphasé.....	36
III.4.1.Suivant l'orientation du repère.....	36
III.4.2.Commande vectorielle directe.....	41
III.4.3.Commande vectorielle indirecte.....	44
III.4.3.1.Commande sans boucle de puissance.....	46
III.4.3.2.Commande avec boucle de puissance.....	48
III.5.Modélisation des Convertisseurs statiques.....	49
III.5.1.Modélisation Onduleur de tension.....	49
III.6.Conclusion.....	51

Chapitre IV : simulation de la Commande vectorielle en puissance de la MADA

IV.1.Introduction.....	52
IV.2.Résultats de Simulation des Commandes Directe et Indirecte de GADA.....	52
IV.2.1.Résultats de Simulation de la Commande Directe sans onduleur.....	53
IV.2.2.Résultats de Simulation de la Commande Indirecte avec onduleur.....	54
IV.2.2.1.Commande Indirecte sans Boucle de Puissance.....	54
IV.2.2.2.Commande Indirecte avec Boucles des Puissances.....	56
IV.3.Conclusion.....	58
Conclusion générale.....	59

Liste des figures

Figure.I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	3
Figure.I.2 : Correspondance taille-puissance des éoliennes.....	5
Figure.I.3 : Les éoliennes à axe vertical.....	7
Figure. I.4 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Darrieus.....	8
Figure.I.5 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Savonius.....	8
Figure.I.6 : Eoliennes à axe horizontal.....	9
Figure. I.7 : Configuration à axe horizontal.....	11
Figure. I.8 : principaux composants d'une éolienne.....	11
Figure .I.9: Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil.....	15
Figure. I.10: Générateur asynchrone à double stator.....	16
Figure. I.11: Connexion indirecte d'une machine asynchrone au réseau.....	16
Figure. I.12: Générateur asynchrone connectée au réseau par deux onduleurs.....	17
Figure .I.13: Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.....	17
Figure.I.14: Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable..	18
Figure. II.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	19
Figure.II.2 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	20
Figure.II.3 : fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	20
Figure.II.4 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....	21
Figure.II.5 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.....	21
Figure.II.6 : Représentation schématique du modèle d'une MADA.....	22
Figure.II.7 : Représentation de la MADA dans le repère de Park.....	26

Liste des figures

Figure.II.8 : Schéma de simulation de la MADA alimentée en tension.....	31
Figure.II.9 : Résultats de la simulation fonctionnement(MAS).....	32
Figure.II.10 : Résultats de la simulation fonctionnement en MADA.....	33
Figure .III.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.....	36
Figure. III.2: Bloc de contrôle à flux orienté.....	38
Figure .III.3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....	40
Figure. III.4: Schéma bloc de la commande directe.....	41
Figure. III.5 : système régulé par un PI.....	42
Figure. III.6 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.....	42
Figure .III.7 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.....	44
Figure .III.8 : Structure de la cascade du redresseur du courant à MLI et Onduleurs de tension à deux niveaux –MADA.....	47
Figure .III.9 : Onduleur de tension.....	48
Figure. IV.1 : Schéma de simulation.....	52
Figure. IV.2 : Résultats de simulation de la commande vectorielle directe de la MADA.....	54
Figure .IV.3 : Résultats de simulation de la commande vectorielle in directe de la MADA sans boucle de puissance.....	56
Figure. IV.4 : Résultats de simulation de la commande vectorielle indirecte de la MADA avec boucle de puissance	57

Indices et notations

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

GADA : Générateur asynchrone à double alimentation.

MAS : Machine Asynchrone.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

GACE : Génératrice asynchrone a cage d'écureuil.

MACE : Moteur asynchrone a cage d'écureuil.

Ω_{ref} : Vitesse de rotation de référence.

Ω_r : La vitesse de rotation de la machine.

g : Le glissement.

C_{em} : Le couple électromagnétique.

C_{em-ref} : Couple électromagnétique de référence.

C_r : Le couple résistant.

f : Le coefficient de frottement visqueux de la MADA.

j : Moment d'inertie totale.

Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la MADA.

f_r : Fréquence des grandeurs rotorique.

f_s : Fréquence des grandeurs statorique.

ω_r : Pulsations des grandeurs électriques rotoriques.

ω_s : Pulsations des grandeurs électriques statoriques.

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

R_r : Résistance d'une phase du rotor.

R_s : Matrice résistance statorique.

L_s : Inductance propre d'une phase du stator.

L_r : Inductance propre d'une phase du rotor.

M_{ss} : Inductance mutuelle entre phase du stator.

M_{sr} : Inductance mutuelle entre phase du stator et du rotor.

M_{rr} : Inductance mutuelle entre phases du rotor.

M : Inductance mutuelle maximale.

n_p : Nombre de paires des pôles.

V_{ds}, V_{qs} : Composantes de la tension statorique respectivement suivant l'axe d et q .

V_{dr}, V_{qr} : Composantes de la tension rotorique respectivement suivant l'axe d et q .

I_{ds}, I_{qs} : Composantes du courant statorique respectivement suivant l'axe d et q .

I_{dr}, I_{qr} : Composantes du courant rotorique respectivement suivant l'axe d et q .

Φ_{ds}, Φ_{qs} : Composantes du flux statorique respectivement suivant l'axe d et q .

Φ_{dr}, Φ_{qr} : Composantes du flux rotorique respectivement suivant l'axe d et q .

$[P(\theta_s)]$: Matrice de transformation directe de PARK.

$[P(\theta_s)]^{-1}$: Matrice de transformation inverse de PARK.

Indices et notations

ω_{coor} : Vitesse de rotation du repère de PARK.

P_s : Puissance active statorique

Q_s : Puissance réactive statorique

P_r : Puissance active rotorique

Q_r : Puissance réactive rotorique

$\Phi_{abc(S)}$: Vecteur flux total statorique.

$V_{abc(S)}$: Vecteur tension statorique appliqué aux trois phases.

$I_{abc(S)}$: Vecteur courant traversant les enroulements statoriques.

φ_{sq} , φ_{sd} : Les flux statoriques directe et en quadrature.

φ_{rq} , φ_{rd} : Les flux rotoriques directe et en quadrature.

Introduction Générale

Introduction générale

Avec la crise mondiale marquée par la baisse du prix du pétrole, nous constatons l'émergence des énergies renouvelables qui se caractérisent par leur stock inépuisable et durable. Elles sont propres et ont un faible impact sur l'environnement d'où leur succès grandissant dans l'opinion publique, chez les investisseurs et les pouvoirs publics. La source principale de ce type d'énergie est le soleil. Cette énergie est captée dans sa forme primaire à travers les cellules photovoltaïques ou thermo solaires.

L'énergie renouvelable peut être également transformée par la nature en courants marins à l'origine de l'énergie hydrolienne (énergie des vagues) ou en mouvement de masse d'air à l'origine de l'énergie éolienne (énergie du vent). Cette dernière offre des bénéfices certains pour la communauté, son prix peut être maîtrisable sans faire l'objet de spéculation sur le marché. Le développement de son industrie a pour effet d'absorber une main d'œuvre nombreuse et variée. Ce type d'énergie procure l'avantage de ne pas être centralisé mais d'être disponible là où a lieu la demande. En effet, l'éloignement engendre des pertes considérables à travers les câblages dont l'investissement se caractérise par des coûts très importants. Aujourd'hui, le transport classique de l'électricité est remis en question grâce à la disponibilité et la démocratisation des éoliennes et donc une décentralisation de la production. Compte tenu de ces arguments, de la grande superficie et du fort potentiel Algérien relatif au gisement éolien, nous avons choisi de traiter le processus de production de ce type d'énergie. Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient les machines asynchrones. En effet, celles-ci présentent plusieurs avantages tels que leur moindre coût, leur robustesse et leur entretien réduit. Dans notre travail, nous nous sommes intéressés :

Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de la génératrice éolienne est présenté dans le premier chapitre, on rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie.

Dans le second chapitre, nous avons présenté des généralités sur la MADA, ses applications, ses différents modes de fonctionnement et sa modalisation dans le repère de Park ensuite, nous avons simulé le modèle de la machine en mode moteur asynchrone et MADA en génératrice.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la commande vectorielle en puissance de la machine asynchrone à double alimentation, à savoir la commande vectorielle directe et indirecte.

Nous terminons par un quatrième chapitre en présentant les résultats de la simulation de la commande vectorielle de la MADA alimentée par un onduleur à MLI sinus-triangle, avec et sans puissance.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

I.2. La production éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oublié, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers [01].

I.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Pour convertir l'énergie disponible dans le vent en énergie électrique, les turbines éoliennes doivent être composées d'une partie mécanique et d'une partie électrique. La partie mécanique sert à capter l'énergie cinétique disponible dans le vent et à la transformer en énergie mécanique rotative. Cette dernière est transmise via un système d'entraînement, habituellement composé d'une boîte de vitesse, à une génératrice électrique. La conversion d'énergie mécanique en énergie électrique est effectuée via la génératrice électrique [01].

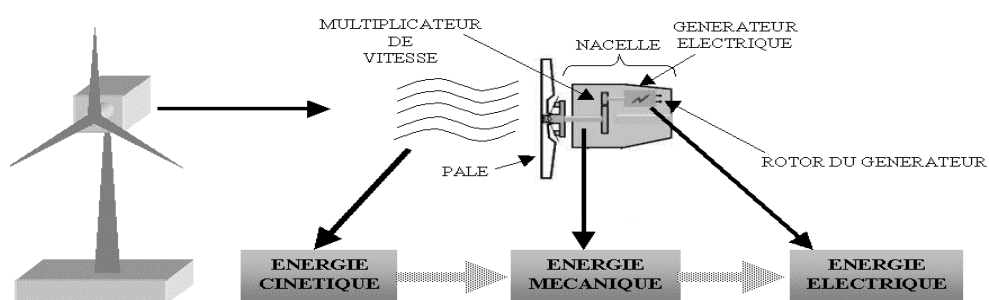


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.4. La chaîne de transformation énergétique :

Une éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes :

I.4.1. La transformation de l'énergie par les pales :

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion: La différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

I.4.2. L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur :

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.

I.4.3. La production d'électricité par le générateur :

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité.

I.4.4. Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur :

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement, elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20 000 Volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis distribuée aux consommateurs les plus proches [18].

I.5. Choix de type d'éoliennes :

Aujourd'hui, la plupart des éoliennes commerciales raccordées au réseau sont à axe horizontal, car elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon

autonome et présentent un faible encombrement au sol. Le nombre de pales varie de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu, car il représente un bon compromis entre le cout, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. D'ailleurs dans la suite de ce memoire ne seront étudiées que les éoliennes à axe horizontal [09].

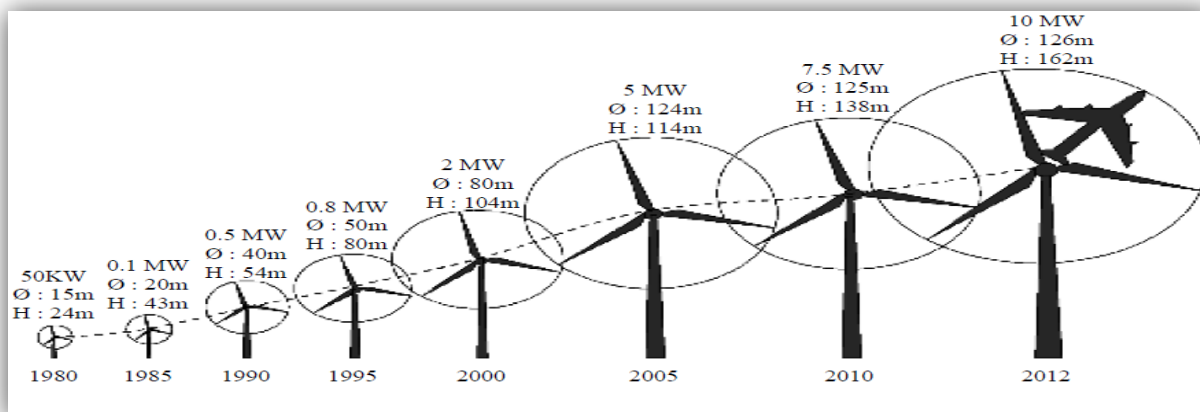


Figure I.2 : Correspondance taille-puissance des éoliennes

ECHELLE	DIMÉTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
PETITE	moins de 12 m	moins de 40 kw
MOYENNE	12 m à 45 m	De 40 kw à 1 Mw
GRANDE	46 m et plus	1 Mw et plus

Tableaux I.1 : Classification des turbines éoliennes

I.6. avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

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

I.6.1. Avantages :

- l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [16].
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO2 [14].

- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire [19].

L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [17].

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [17].
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales [16].
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [16].

I.6.2. Inconvénients :

- la nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux [16].
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés [14].
- Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs [17].
- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire [17].

I.7. Classification des éoliennes :

On peut classer les générateurs éoliens selon les différents critères. Ces derniers peuvent alors se classer selon.

- Le type du capteur (à axe horizontal ou vertical).
- La nature du convertisseur électromécanique (machine asynchrone, synchrone, à courant continu, etc....).
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).

- Le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable).

I.7.1. Différents types d'éolienne et leurs utilisations :

L'organe capteur transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique afin de réaliser la conversion électromécanique tant que le mouvement est rotatif, les capteurs alors seront classés selon deux catégories [10] :

- ◆ Capteurs à axe horizontal. Et ◆ Capteurs à axe vertical.

I.7.1.1. Les éoliennes à axe vertical :

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

En revanche , certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [10].



Figure I.3 : Les éoliennes à axe vertical

I.7.1.1.1. Les type d'éoliennes à axe vertical :

I.7.1.1.1. a. Rotor de Darrieus:

Est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée.

Toute fois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet [15].

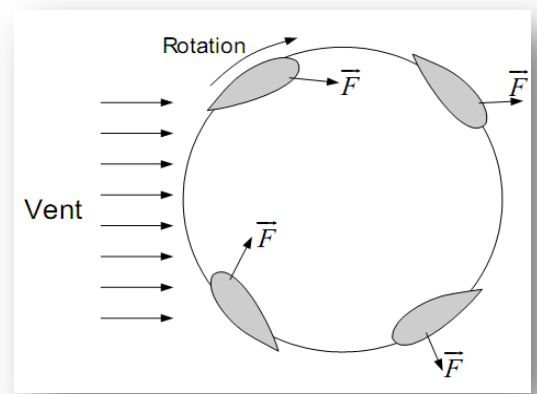


Figure I.4 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Darrieus

I.7.1.1.1.b. Rotor de Savonius :

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure [25].

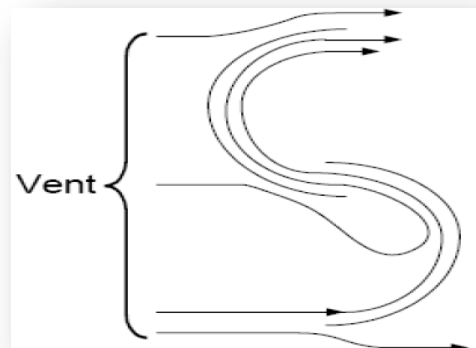


Figure I.5 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Savonius.

I.7.1.1.2. Les avantages et Les inconvénients d'éolienne à axe vertical :

✚ Les avantages :

- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien [25].
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction [25].
- Construction souvent simple [14].
- Faible bruit [7].

✚ Les inconvénients :

Les inconvénients principaux d'une éolienne axe vertical sont :

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance [25].
- Faible vitesse du vent à proximité du sol [25].
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement (Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s) [15].

I.7.1.2. Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent [11].



Figure I.6 : Eoliennes à axe horizontal

I.7.1.2.1. Les types d'éoliennes à axe horizontal :

I.7.1.2.1.a. Eoliennes lentes :

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi pales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau [24].

I.7.1.2.1.b. Eoliennes rapides (Aérogénérateurs) :

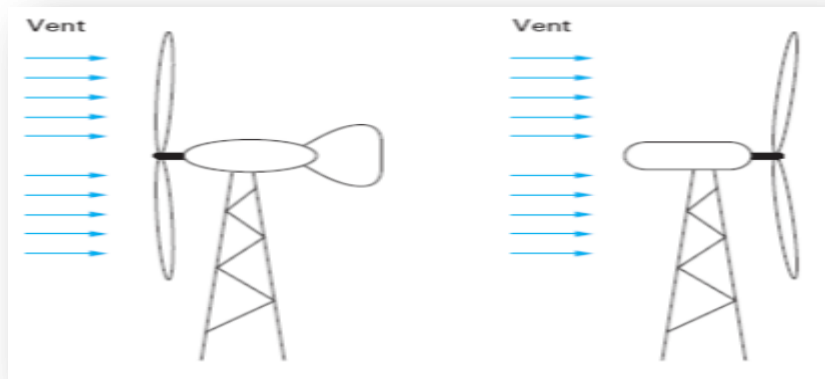
Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible.

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent » [24].

🚩 **Amont :** Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

🚩 **Aval :** Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable.

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction [23].



Eolienne Amont

Eolienne Aval

Figure I.7 : Configuration à axe horizontal

I.7.1.2.2.principaux composants d'une éolienne :

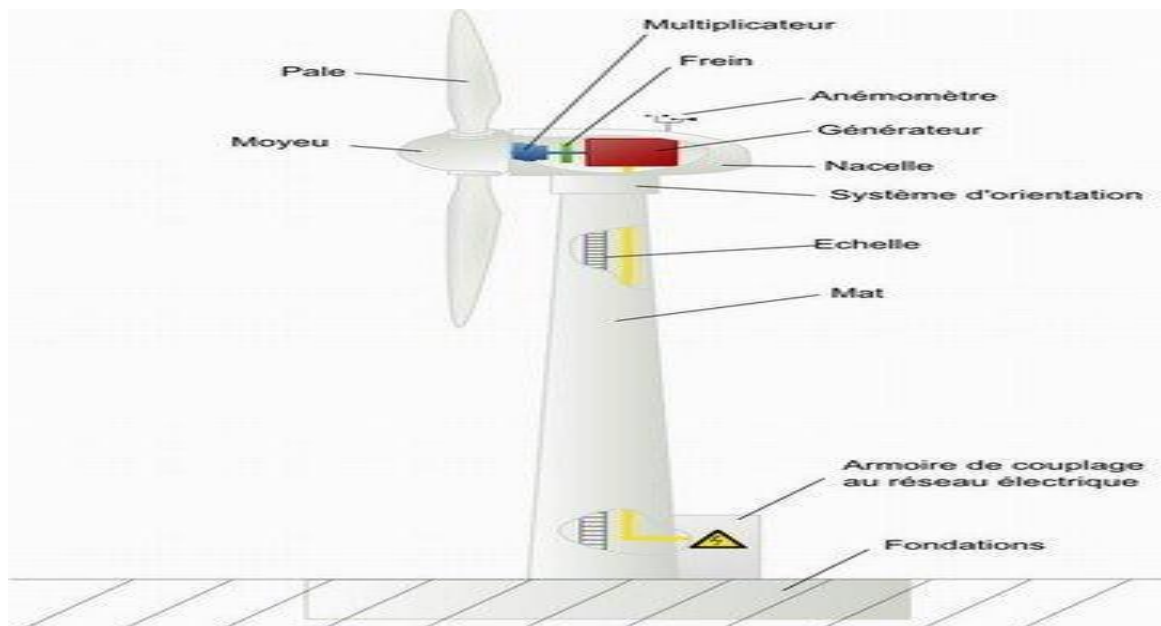


Figure I.8 : principaux composants d'une éolienne

I.7.1.2.2.a. Le mât :

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toute fois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du

rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur) [26].

I.7.1.2.2.b. La nacelle :

Regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande [22].

Un multiplicateur:

Adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique, Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne [25].

Le système de refroidissement:

Comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau [22].

La génératrice (ou l'alternateur):

Pour transformée l'énergie mécanique en énergie électrique.

Anémomètre:

Sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25 m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne [22].

Le système de contrôle-commande :

Comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique [22].

I.7.1.2.2.c. Une armoire de commande :

Comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle [22].

I.7.1.2.2.d. Le rotor :

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [20,24].

I.7.2. La Vitesse de rotor :

I.7.2.1. Fonctionnement à vitesse fixe :

Les premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique. Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage [25].

✚ Avantage et Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe [14] :

❖ Avantage :

- Système électrique plus simple.
- Moins cher.
- Plus fiable (moins d'entretien).

❖ Inconvénients :

- L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- Difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau.
- Présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance.

I.7.2.2.Fonctionnement à vitesse variable :

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent [25].

✚ Avantages et Inconvénients [14] :

❖ Avantage :

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance. Les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple.
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Ce type de machines offre une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité.
- Réduction des bruits acoustique.

❖ Inconvénients :

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,...).
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

I.7.3. Les générateurs utilisés dans le système central électrique :

I.7.3.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone :

I.7.3.1.1. Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE) :

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau [10].

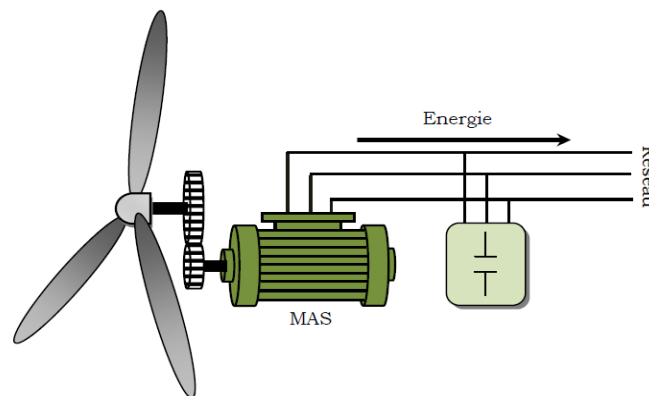


Figure I.9: Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil

I.7.3.1.2. Générateur asynchrone à double stator :

Cas deux enroulements statoriques, l'un conçu pour les faibles vitesses du vent à grand nombre pair de pôles et l'autre pour les fortes vitesses du vent à petit nombre pair de pôles. Donc le système fonctionne à une vitesse de rotation fixe avec deux points de fonctionnement tout en réduisant le bruit causé par l'orientation de l'angle de calage. Mais l'inconvénient majeur de système est la présence d'un second bobinage statorique qui rend la sa conception difficile ainsi que son coût de revient est trop important [4].

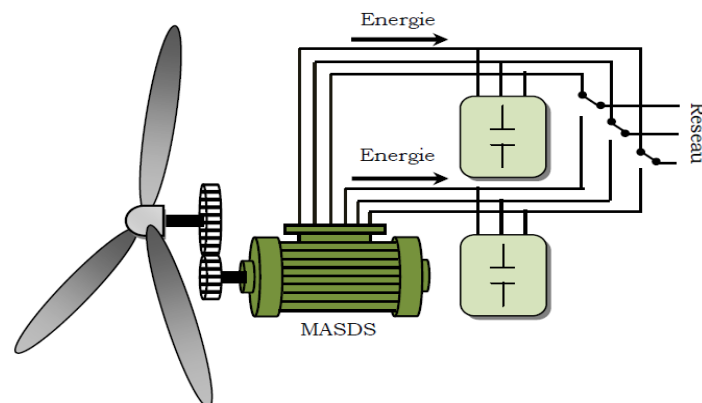


Figure I.10: Générateur asynchrone à double stator

I.7.3.1.3. MACE connectée au réseau avec une interface d'électronique de puissance :

Le système permet un fonctionnement à vitesse variable, quelle que soit la vitesse du vent on aura une tension à fréquence fixe, en effet la tension produite sera redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire [4].

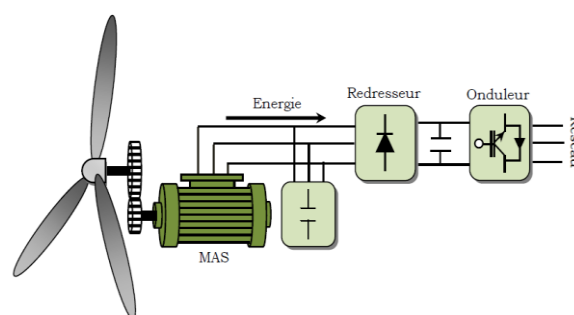


Figure I.11: Connexion indirecte d'une machine asynchrone au réseau

Elle est constituée par un rotor à cage et par deux bobinages triphasés indépendants dans le stator.

Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance (BP), est directement relié au réseau, tandis que l'autre, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire

varier les courants d'excitation de la machine appelé Bobinage de Commande (BC), est alimenté par un convertisseur bidirectionnel [4].

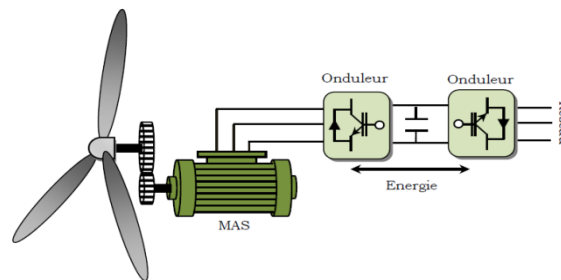


Figure I.12: Générateur asynchrone connectée au réseau par deux onduleurs

I.7.3.1.4. Systèmes utilisant Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" :

Ce type de machines est constitué par des enroulements au stator connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant ou en tension. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution [28].

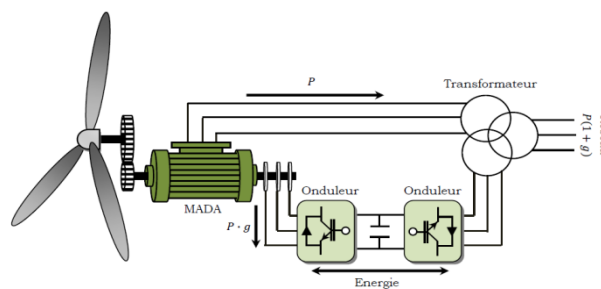


Figure I.13: schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

I.7.3.2. Systèmes utilisant la machine synchrone :

Les génératrices synchrones utilisées dans le domaine éolien sont plus chères que les génératrices à induction de même taille.

Ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se

propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance [28].

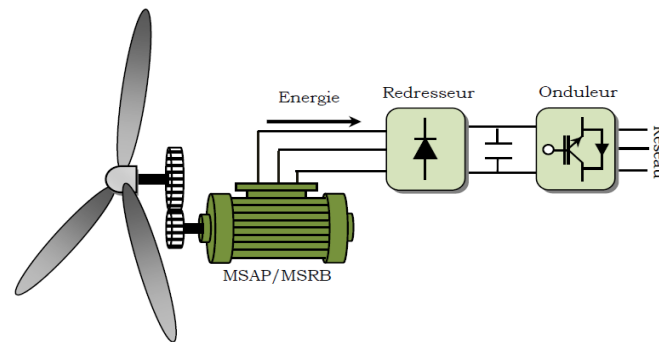


Figure I.14: système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable

I.8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu sur les solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Plusieurs types de machines ont été présentés : machines asynchrones, machine synchrones et machines à structure spéciale.

Chapitre II

Etude et modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.1.Introduction

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude sur la machine asynchrone à double alimentation et ces différents modes de fonctionnement. on présentera aussi sa modélisation dans le repère de Park.

II.2.Structure de la machine :

Une MADA a un stator identique à celui (d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone). Le rotor dispose d'enroulements triphasés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la figure (II.1) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais-bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor [2].

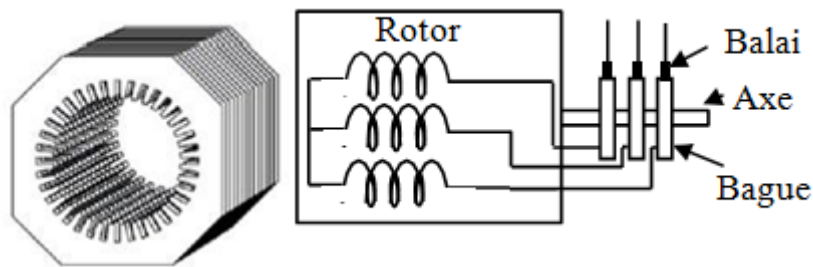


Figure. II.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

II.3.Mode de fonctionnement de la MADA :

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en génératrice, ici c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant aussi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [6] :

II.3.1. Fonctionnement en mode moteur :

II.3.1. 1. Moteur hypo synchrone :

Le fonctionnement en mode hyposynchrone du moteur est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse s'étendant de la vitesse de synchronisme Ω_s à une vitesse plus faible Ω_{\min} la figure ci-dessous montre que la puissance est fournie par le réseaux au stator la vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau via les convertisseurs connectés au rotor c'est le cascade hypo synchrone.

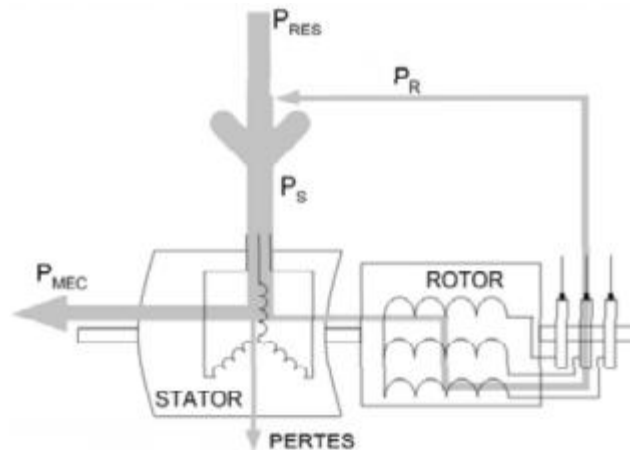


Figure. II.2 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

II.3.1. 2. Moteur hypersynchrone :

Le fonctionnement en mode hypersynchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au delà de la vitesse de synchronisme. Dans la figure suivante nous remarquons que dans ce mode de fonctionnement une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor via les convertisseurs statiques est convertie en puissance mécanique.

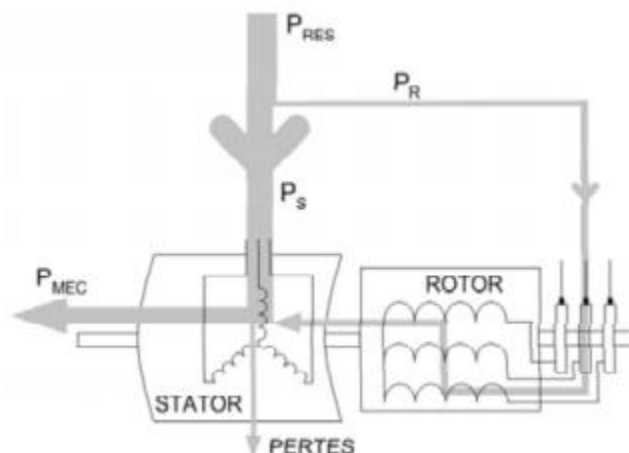


Figure.II.3 : fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

II.3.2. Fonctionnement en mode génératrice :

II.3.2. 1. Génératrice hyper synchrone :

Dans ce mode de fonctionnement comme le montre la figure la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine par la turbine éolienne est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance est transmise par l'intermédiaire du rotor.

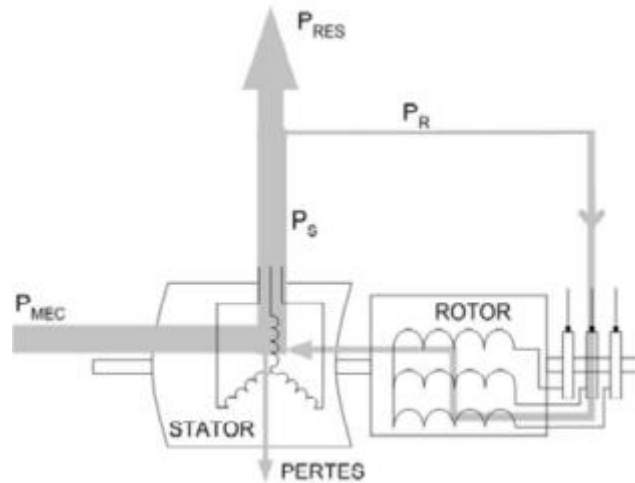


Figure.II.4 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.

II.3.2. 2. Génératrice hypo synchrone :

Puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, une partie de la puissance est transmittant par le stator est réabsorbée par le rotor.

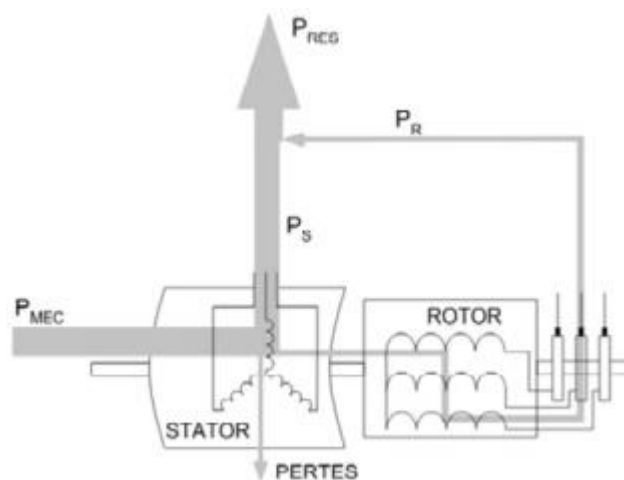


Figure.II.5 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

II.4.Modélisation de la machine à double alimentation :

La machine asynchrone est représentée sur la figure (II.6) par ces six enroulements dans l'espace électrique. L'angle θ repère le décalage de l'axe de la phase rotorique (OAR) par rapport à l'axe fixe de la phase statorique (OAS) [2].

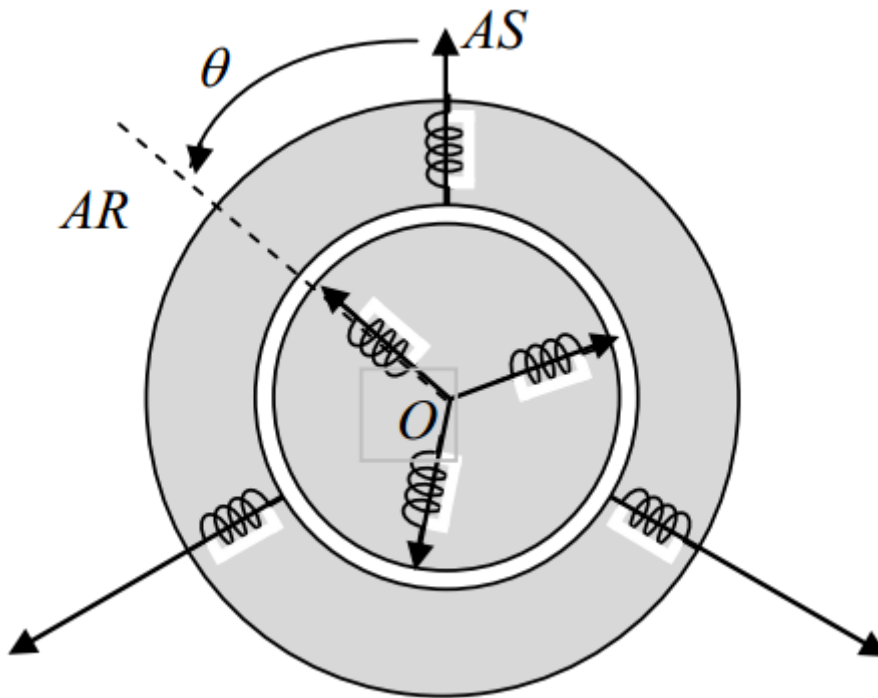


Figure.II.6 : Représentation schématique du modèle d'une MADA.

II.4.1.Hypothèses simplificatrices :

Pour cette mise en équation, nous supposons que le bobinage est reparti de manière à donner une fmm sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.

Nous supposons également que nous travaillons en régime non saturé. Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et effet de peau.

Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié. Ces choix signifient entre autre que :

- Les inductances propres sont constantes.
- Il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements

statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

II.4.2. Les équations électriques de la MADA (dans les axes a,b,c) [2]:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$\text{Grandeurs statoriques :} \quad \begin{cases} [V_s] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T \\ [i_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T \\ [\Phi_s] = [\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Grandeurs rotoriques :} \quad \begin{cases} [V_r] = [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^T \\ [i_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T \\ [\Phi_r] = [\Phi_{ar} \ \Phi_{br} \ \Phi_{cr}]^T \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Les flux statorique et rotorique en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes [2]:

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [M_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\Phi_r] = [L_r] \cdot [I_r] + [M_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

$[R_s]$, $[R_r]$: sont les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

$[L_s], [L_r]$: sont les matrices des inductances propres statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}], [M_{rs}]$: sont les matrices des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

$[M_{ss}], [M_{rr}]$: sont les matrices des inductances mutuelles statorique-statorique et rotorique-rotorique.

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} [R_s]=R_s \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ [R_r]=R_r \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II.5})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [L_s]=L_s \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ [L_r]=L_r \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II.6})$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (\text{II.8})$$

Avec:

M : est le maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et entre une phase rotorique pour $\theta = 0$

L'énergie magnétique peut être calculée à partir de l'expression suivante [2] :

$$W_{\text{mag}} = \frac{1}{2}([\mathbf{I}_s]^T \cdot [\Phi_s] + [\mathbf{I}_r]^T \cdot [\Phi_r]) \quad (\text{II.9})$$

II.5. Changement de repère :

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations de la machine plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park [2].

II.5.1 La transformation de Park :

Elle consiste à appliquer aux courants, tension et flux, un changement de variables faisant intervenir l'angle entre les axes d et q. Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au système biphasé [2].

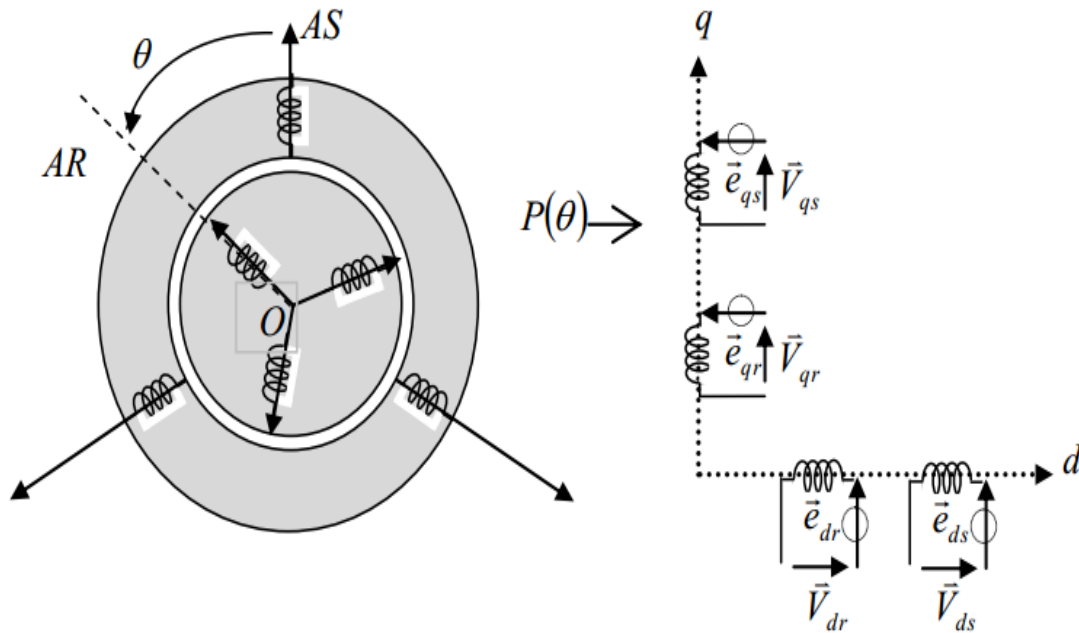


Figure.II.7 : Représentation de la MADA dans le repère de Park.

La transformation de Park, appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires (indice O), d'axe direct (indice d), et d'axe en quadrature (indice q). Dans le cas d'un système de courant (ou tension ou flux), cette transformation s'écrit [8] :

$$\begin{bmatrix} xd \\ xq \\ x0 \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} xa \\ xb \\ xc \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

La variable x peut être une tension, un courant ou un flux. Où θ_s est l'écart angulaire arbitraire entre l'axe d'une phase dans l'une des armatures (stator ou rotor) et l'axe d'observation d . La matrice de transformation $P(\theta_s)$ est donnée par [8]:

$$P(\theta_s) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Son inverse est donné par :

$$p^{-1}(\theta_s) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & -\sin\theta_s & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

✚ Le couple et l'équation mécanique dans le repère (d,q) :

L'expression du couple électromagnétique peut être donnée par [8] :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\Phi_{qs} \cdot i_{dr} - \Phi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II.13})$$

L'équation mécanique est donnée par l'expression suivante [8] :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad (\text{II.14})$$

II.5.2 Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d, q) [2] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_{\text{coor}} \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_{\text{coor}} \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_{\text{coor}} - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_{\text{coor}} - \omega) \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II.15})$$

Avec : ω_{coor} : Vitesse du système d'axe (d, q).

Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le système (d, q) [2] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{II.16})$$

II.5.3 Choix du référentiel :

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines électriques, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe. A partir du système d'axe (d, q) on peut avoir d'autres axes qui sont des cas particuliers. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles :

- Référentiel fixé par rapport au stator : $\omega_{\text{coor}} = 0$
- Référentiel fixé par rapport au rotor : $\omega_{\text{coor}} = \omega_r$
- Référentiel fixé par rapport au champ tournant : $\omega_{\text{coor}} = \omega_s$

Cette dernière représentation qui fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, la conception du contrôle vectoriel par orientation du flux nécessite ce choix et les modèles d'action dépendent de la position du référentiel par rapport aux divers axes de flux [2].

II.5.4 Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant:

On exprime les tensions par [2] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \cdot \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II.17})$$

Avec : $\omega_r = \omega_s - \omega$ et $\omega = p \cdot \Omega$

L'équation du couple sera donc [8] :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\Phi_{qs} \cdot i_{dr} - \Phi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II.18})$$

Les puissances active et réactive statoriques et rotoriques sont représentées par :

$$P_s = (V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs}) \quad (\text{II.19})$$

$$Q_s = (V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs}) \quad (\text{II.20})$$

$$P_r = (V_{dr} \cdot i_{dr} + V_{qr} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II.21})$$

$$Q_r = (V_{qr} \cdot i_{dr} - V_{dr} \cdot i_{qr}) \quad (\text{II.22})$$

II.5.5 Mise sous forme d'équation d'état :

Les équations (II.17) peuvent être disposées sous la forme de représentation d'état. On choisit pour vecteur d'état $x = [\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}]$, on trouve les équations d'état sous forme matricielle [8] :

$$\frac{dx}{dt} = Ax + B.u \quad (\text{II.23})$$

$$\text{Avec : } u = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -as & \omega s & M.as & 0 \\ -\omega s & -as & 0 & M.as \\ as.\beta & -\beta\omega & -\gamma & \omega s - \omega \\ -\beta.\omega & as.\beta & \omega s - \omega & -\gamma \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 1/\sigma r & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 1/\sigma r \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Ou bien :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Phi_s}{dt} = -as \cdot \Phi_{ds} + \omega_s \cdot \Phi_{qs} + M \cdot as \cdot i_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\omega_s \cdot \Phi_{ds} - as \cdot \Phi_{qs} + M \cdot as \cdot i_{qr} + V_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = as \cdot \beta \cdot \Phi_{ds} - \beta \cdot \omega \cdot \Phi_{qs} - \gamma \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) i_{qr} + V_{ds} + \frac{1}{\sigma r} \cdot V_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\beta \cdot \omega \cdot \Phi_{ds} + as \cdot \beta \cdot \Phi_{qs} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} - \gamma \cdot i_{qr} - \beta \cdot V_{qs} + \frac{1}{\sigma r} \cdot V_{qr} \end{array} \right. \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$\sigma r = 1 - (M^2 / L_s \cdot L_r) ; as = R_s / L_s ; \beta = M / (L_s \cdot \sigma r) ; \gamma = R_r / \sigma r + (R_s \cdot M^2) / L_s^2 \cdot \sigma r$$

σ : Coefficient de dispersion.

II.6 Simulation de la machine asynchrone à double alimentation :

Toute étude théorique doit-être suivie par l'étude expérimentale où une simulation numérique qui nous permet d'analyser et de donner une synthèse pour les systèmes avec beaucoup de précision, donc des résultats de simulation sous logiciel MATLAB avec des propositions et interprétation sont données ici dessous [2].

II .6.1 Diagramme fonctionnel sous MATLAB.

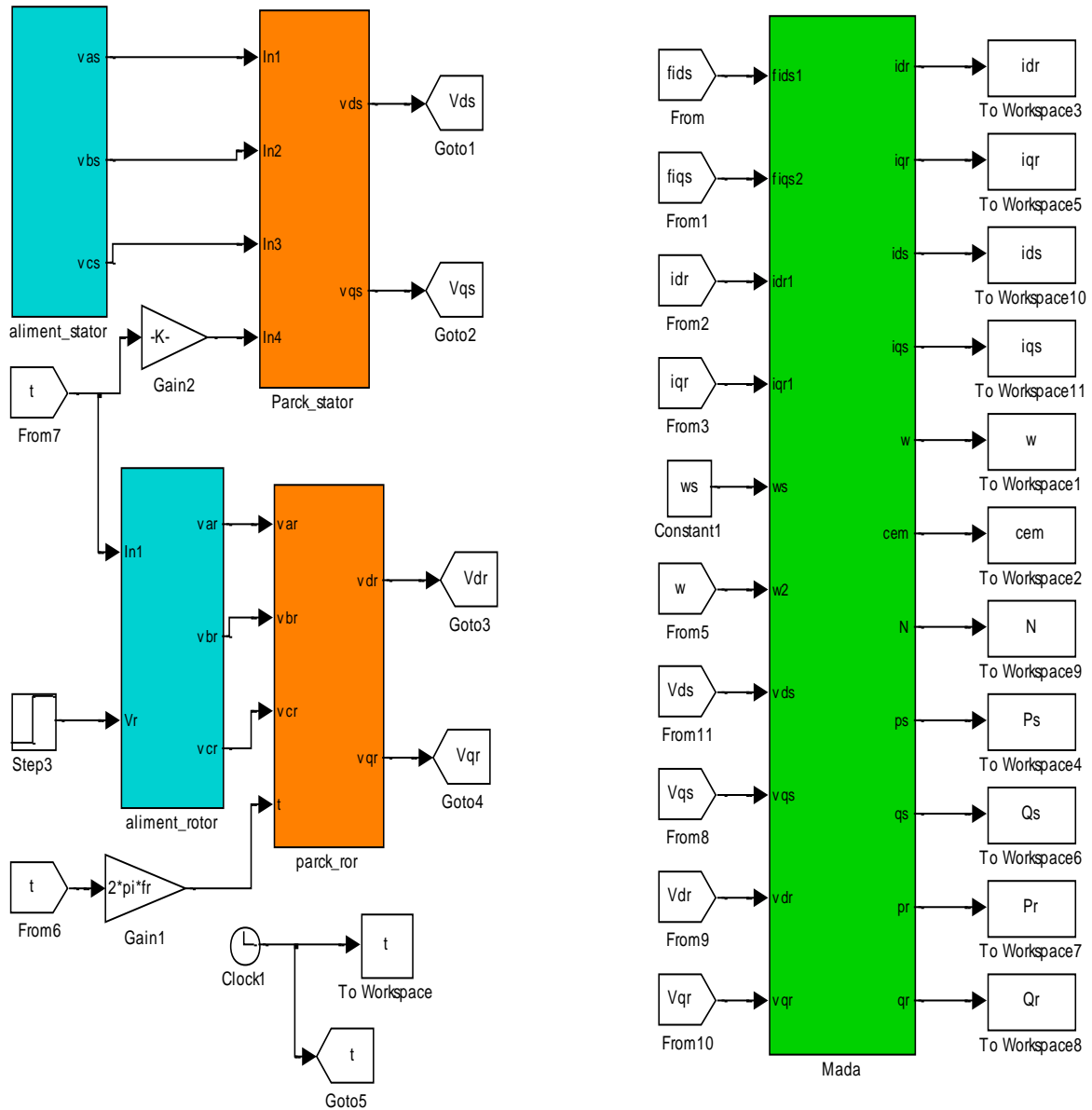


Figure.II.8 : Schéma de simulation de la MADA alimentée en tension.

II .6.2.Les résultats de simulation :

On donne les résultats fonctionnement machine asynchrone (rotor en court circuit) :

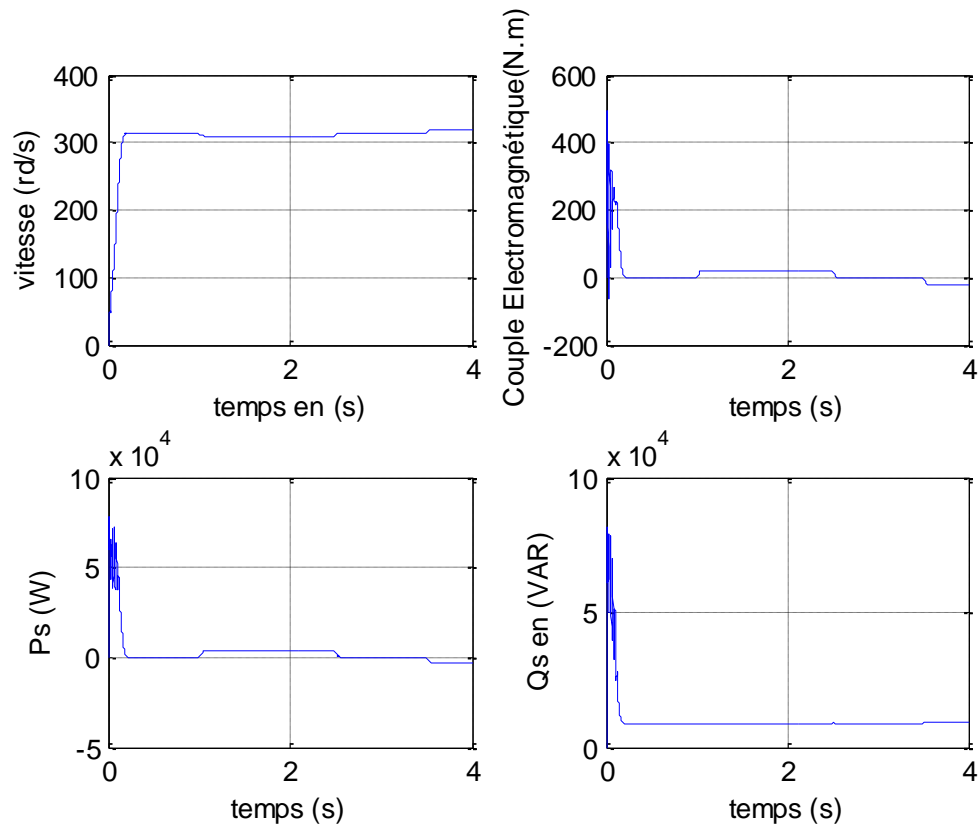


Figure. II.9 : Résultats de la simulation fonctionnement(MAS).

 **Fonctionnement (MADA) rotor alimenté :**

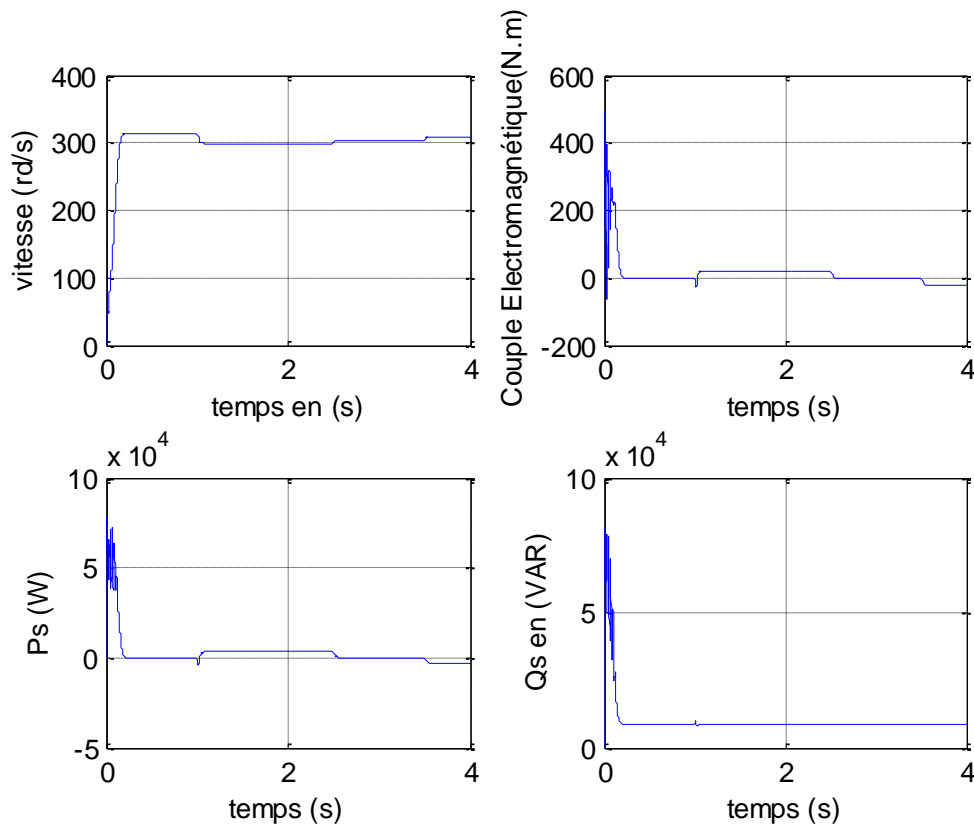


Figure. II.10 : Résultats de la simulation fonctionnement en MADA.

($V_r=12V$, $f_r=1Hz$)

II .7 Interprétation des résultats :

La simulation s'effectue au départ, d'un démarrage à vide. On remarque que le régime transitoire est oscillatoire pour toutes les grandeurs de la machine. Après que le régime permanent s'établi, on applique à l'instant $t=1s$, un couple de charge à la machine $C_r=+20Nm$ qu'on annule à $t=3s$ ensuite, on applique un couple de charge $C_r=-20Nm$ qu'on annule à $t=4s$. Après l'application de cette perturbation, nous observons une bonne stabilité de la machine.

Néanmoins, nous remarquons une variation de la vitesse traduite par un glissement supplémentaire (+g ou -g). Notons qu'à vide la vitesse du rotor est proche de la vitesse de synchronisme (glissement nul), au moment où on applique un couple résistant $C_r=+20N.m$, la vitesse diminue (augmentation du glissement) et pour $C_r=-20N.m$, la vitesse augmente (diminution du glissement) [2,27].

II .8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, son principe de fonctionnement. On a aussi présenté le modèle de la machine dans le repère (a,b,c) auquel on a appliqué la transformation de Park pour le rendre linéaire et plus adapté à la commande. La modélisation de la MADA a pour but de faciliter la mise en œuvre de la commande. Dans le chapitre qui suit nous allons présenter la commande vectorielle par flux orienté appliqué à la MADA.

Chapitre III

Commande vectorielle de la MADA

III.1.Introduction :

La commande vectorielle de la machine à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l'énergie.

Cette solution convient à toutes les applications où les variations de la vitesse sont limitées autour de la vitesse de synchronisme. Puisque la puissance traitée par le côté rotorique (puissance de glissement) est proportionnelle au glissement, une conversion d'énergie est possible en utilisant un convertisseur de puissance du côté du rotorique, celui-ci ne traite qu'une petite fraction de puissance du système global, dans les entraînements à vitesses variables [5].

Dans ce chapitre, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA à rotor bobiné alimenté par un onduleur de tension basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [1],[29].

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc toutes les composantes homopolaires sont nulles. Ensuite, on calcule le régulateur nécessaire pour la commande.

III.2.Le principe de la commande vectorielle de la MADA :

La commande vectorielle est un terme générique désignant l'ensemble des commandes tenant compte en temps réel des équations du système qu'elle commande. Le nom de ces commandes vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence des commandes scalaires. Les relations ainsi obtenues sont bien plus complexes que celles des commandes scalaires, mais en contrepartie elles permettent d'obtenir de meilleures performances lors des régimes transitoires. Il existe des commandes vectorielles pour tous les moteurs à courant alternatif.

Par construction, la machine à courant continu produit un champ magnétique statorique toujours perpendiculaire au rotor, c'est ce comportement que l'on va chercher à obtenir pour

les machines alternatives. Le calculateur qui va agir sur la commande des interrupteurs se doit d'avoir quelques informations pour effectuer les calculs et particulièrement [19]:

- La position du rotor pour les machines synchrones
- La vitesse du rotor pour les machines asynchrones

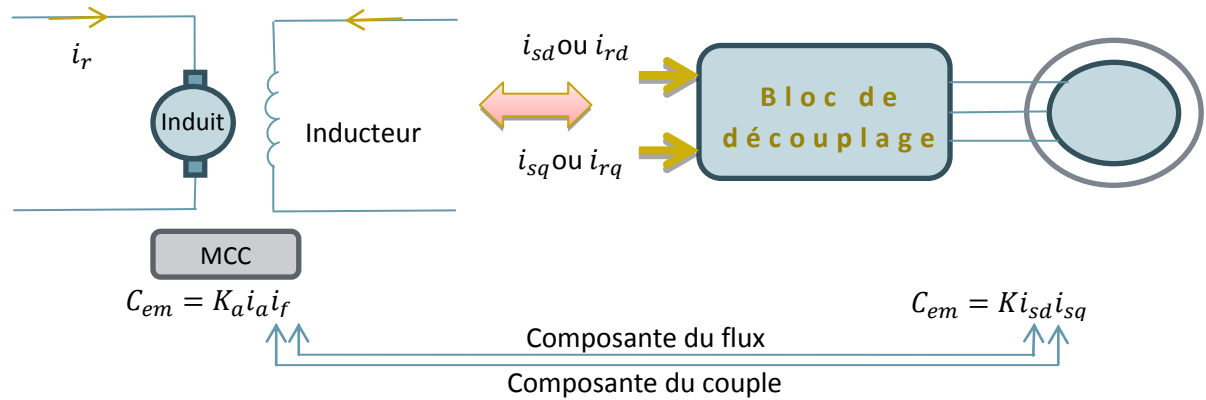


Figure III.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA.

III.3. Etablissement du modèle de la MADA :

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [10].

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

III.4. Choix du référentiel pour le modèle diphasé :

III.4.1. Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique : $\phi_{rd} = \phi_r$

- Le flux statorique : $\phi_{sd} = \phi_s$
- Le flux d'entrefer : $\phi_{gd} = \phi_g$

Dans le cadre de cette partie, nous développons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique. Cette commande se décompose de deux parties :

- Le contrôle des courants rotoriques.
- Le découplage ou compensation.

Avec un flux statorique constant et orienté $\phi_{sd} = \phi_s$, $\phi_{sq} = 0$; ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \phi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\phi_{rd}) - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\phi_{rq}) + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \phi_{sq} = 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \phi_{sd} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

✚ Relation entre le courant statorique et le courant rotorique :

Partir de l'équation de flux, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{M}{L_s} I_{rd} - \frac{\phi_s}{L_s} \\ I_{sq} = \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

✚ Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques:

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

$$\begin{cases} p_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, Et remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} p_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{W_s L_s} - V_{sq} \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

$$V_{sq} = V_s = W_s Q_s \rightarrow Q_s = \frac{V_s}{W_s}$$

En considérant l'inductance magnétisante M constante, la puissance active au stator sera proportionnelle au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive sera proportionnelle au courant rotorique d'axe d à la constante près imposée par le réseau ($\frac{V_s^2}{W_s L_s}$).

Afin de montrer que la commande par orientation du flux statorique permet d'avoir un découplage effectif des grandeurs réelles (puissance active, puissance réactive) de la MADA. On considère les tensions rotoriques V_{dr} , V_{qr} comme variable de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté et les courants rotoriques I_{dr} , I_{qr} comme variable d'état. Ces grandeurs sont fonction des grandeurs de consigne P_{sref} et Q_{sref} .



Figure. III.2: Bloc de contrôle à flux orienté.

$$\begin{cases} p_{s-ref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq-ref} \\ Q_{s-ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_{sq} \frac{M}{L_s} I_{rd-ref} \end{cases} \quad (III.7)$$

✚ relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

A partir du système d'équation (III.3) et on en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} + \frac{M.V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \end{cases} \quad (III.8)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe **d** et **q** sont alors intégrées aux expressions tensions rotoriques diphasées de l'équation (III.1). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{rq}}{dt} - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (III.9)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (III.10)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) P \right] I_{rd} - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) P \right] I_{rq} + g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (III.11)$$

V_{rd} et V_{rq} : Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés.

$(L_r - \frac{M^2}{L_s})$: est le terme de couplage entre les deux axes.une synthèse adéquate des régulateur dans la boucle de commande permettra de les compenser.

$g \frac{V_s M}{L_s}$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

A partir des systèmes d'équations (III.6) et (III.11), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous

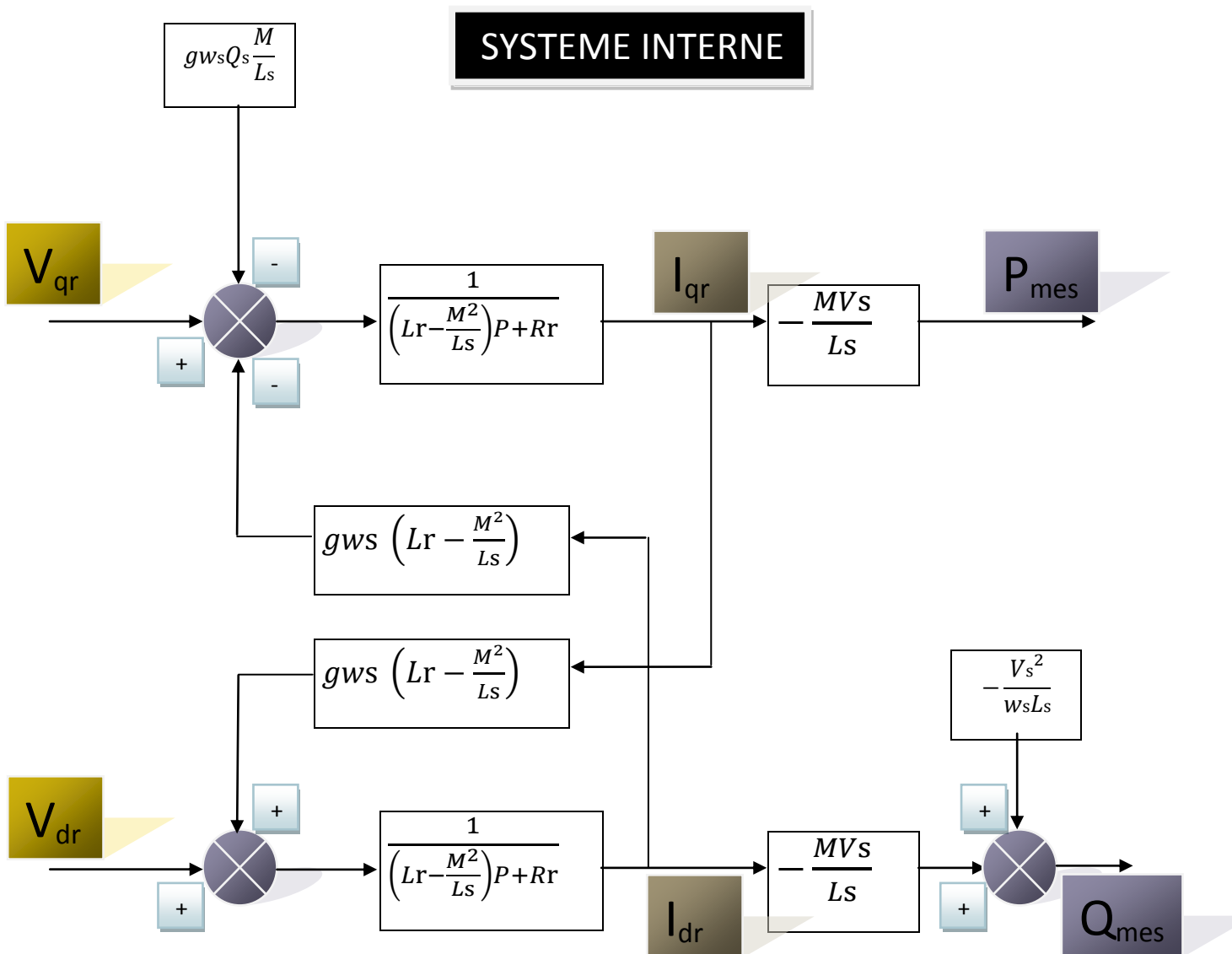


Figure III.3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné que l'influence du couplage est minime, chaque axe peut être commandé indépendamment avec son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs sont : la puissance active au stator pour l'axe **q** et la puissance réactive pour l'axe **d**.

III.4.2. Commande vectorielle directe :

Cette méthode a été proposée par **Blaschke** et rendue publique vers 1970, elle se base sur la connaissance exacte du flux et de sa position. Il faut donc procéder à une série de mesures aux bornes du variateur. Une première possibilité est de placer des capteurs dans le bobinage statorique et de mesurer directement les composantes du flux de manière à en déduire l'amplitude et la phase. Les capteurs mécaniquement fragiles sont soumis à des contraintes sévères dues aux vibrations et à l'échauffement. En outre, ce mode nécessite l'utilisation d'un moteur équipé des capteurs de flux, ce qui augmente considérablement le coût de sa construction.

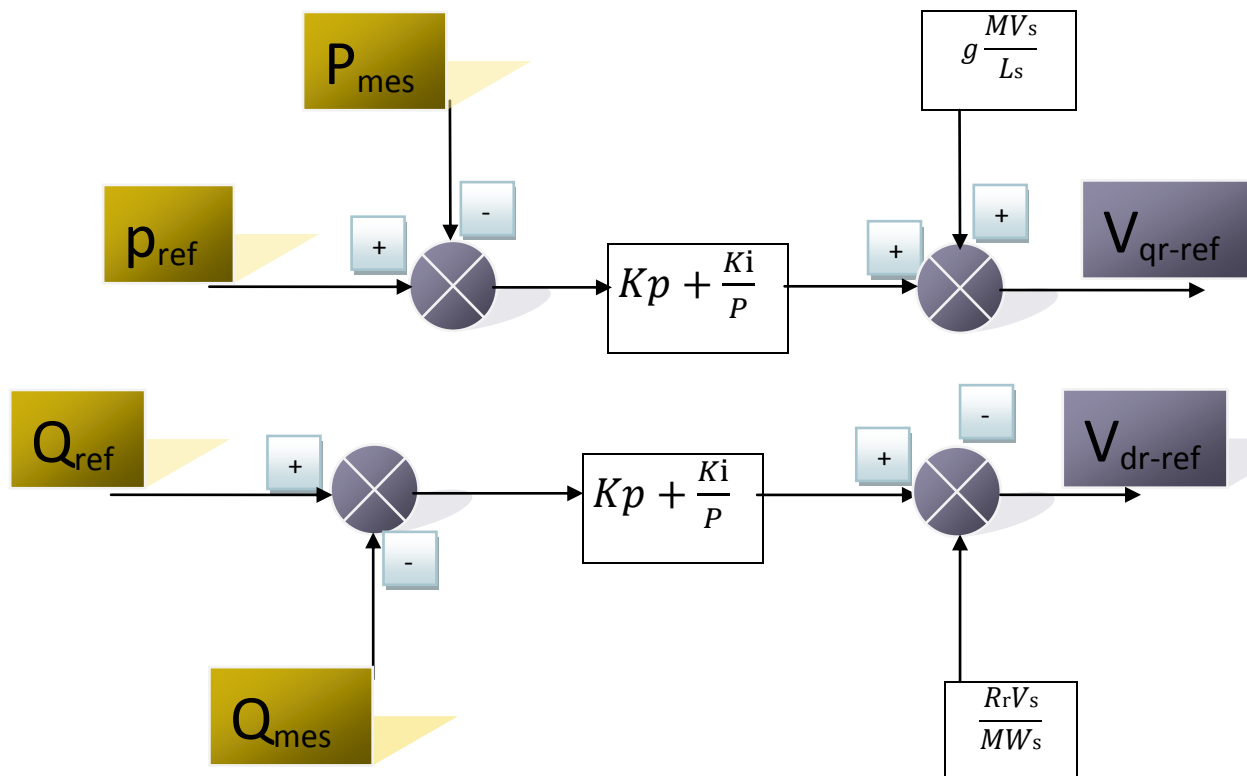


Figure. III.4: schéma bloc de la commande directe.

Par conséquent, dans la grande majorité des cas, on fait appel à des estimateurs ou des observateurs à partir des mesures effectuées sur le variateur.

La méthode directe a l'avantage de prendre beaucoup moins les variations des paramètres de la machine [12]

✚ Dimensionnement du régulateur PI :

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables.

La figure III.9 montre une partie de notre système bouclé est corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $(kp + \frac{Ki}{p})$ [21].

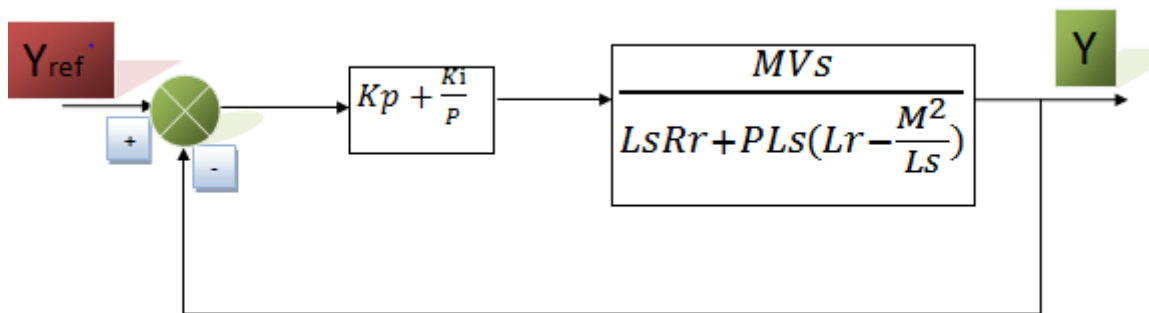


Figure. III.5 : système régulé par un PI.

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

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} + \frac{\frac{M V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{P + \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (III.12)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (\text{III.13})$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante.

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{M V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{P} \quad (\text{III.14})$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r P} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} \quad (\text{III.16})$$

Avec τ_r le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10ms.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} \quad (\text{III.17})$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{M V_s} \quad (\text{III.18})$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour le dimensionnement du régulateur PI.

III.4.3. Commande vectorielle indirecte :

Cette méthode consiste à estimer les valeurs des tensions rotoriques à partir des valeurs des puissances actives et réactives. Ainsi, les courants rotoriques seront réglés indirectement [10].

✚ Régulateur de courant :

Il prend en entrée le courant $I_{r\text{réf}}$ de référence et sa mesure. Il agit sur la tension de référence $V_{r\text{réf}}$ pour ajuster le courant $I_{r\text{q}}$. La figure dessous montre la régulation du courant avec un PI [21].

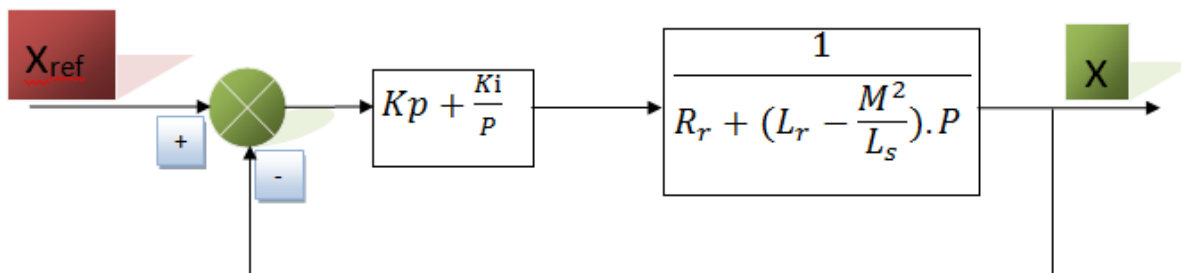


Figure III.6 : Schéma bloc du système régulé par PI

La fonction de transfert est donnée par l'équation suivant :

$$\frac{I_{rd}}{V_{rd}} = \frac{1}{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot P} \quad (\text{III.19})$$

Pour les axes d et q, la fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence des régulateurs est :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \cdot \frac{1}{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot P} \quad (III.20)$$

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \cdot \frac{\frac{1}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{\frac{R_r}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})} + P} \quad (III.21)$$

Avec la méthode de la compensation des pôles on obtient :

$$p + \frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})} + P \quad (III.22)$$

Alors on a :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (III.23)$$

Dou :

$$K_i = \frac{K_p}{T_r \cdot \sigma} \quad \text{Avec} \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (III.24)$$

Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{1}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (III.25)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime par :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} \quad (III.26)$$

$$FTBF = \frac{K_p \cdot \frac{1}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{1 + \frac{K_p \cdot \frac{1}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p}} \quad (III.27)$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{K_p} p} \quad (III.28)$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{On déduit } \tau_r = \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{K_p} \quad (III.29)$$

$$K_p = \frac{\sigma L_r}{\tau_r} \quad \text{et} \quad K_i = \frac{R_r}{\tau_r} \quad \text{Avec } \sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s}\right) \quad (III.30)$$

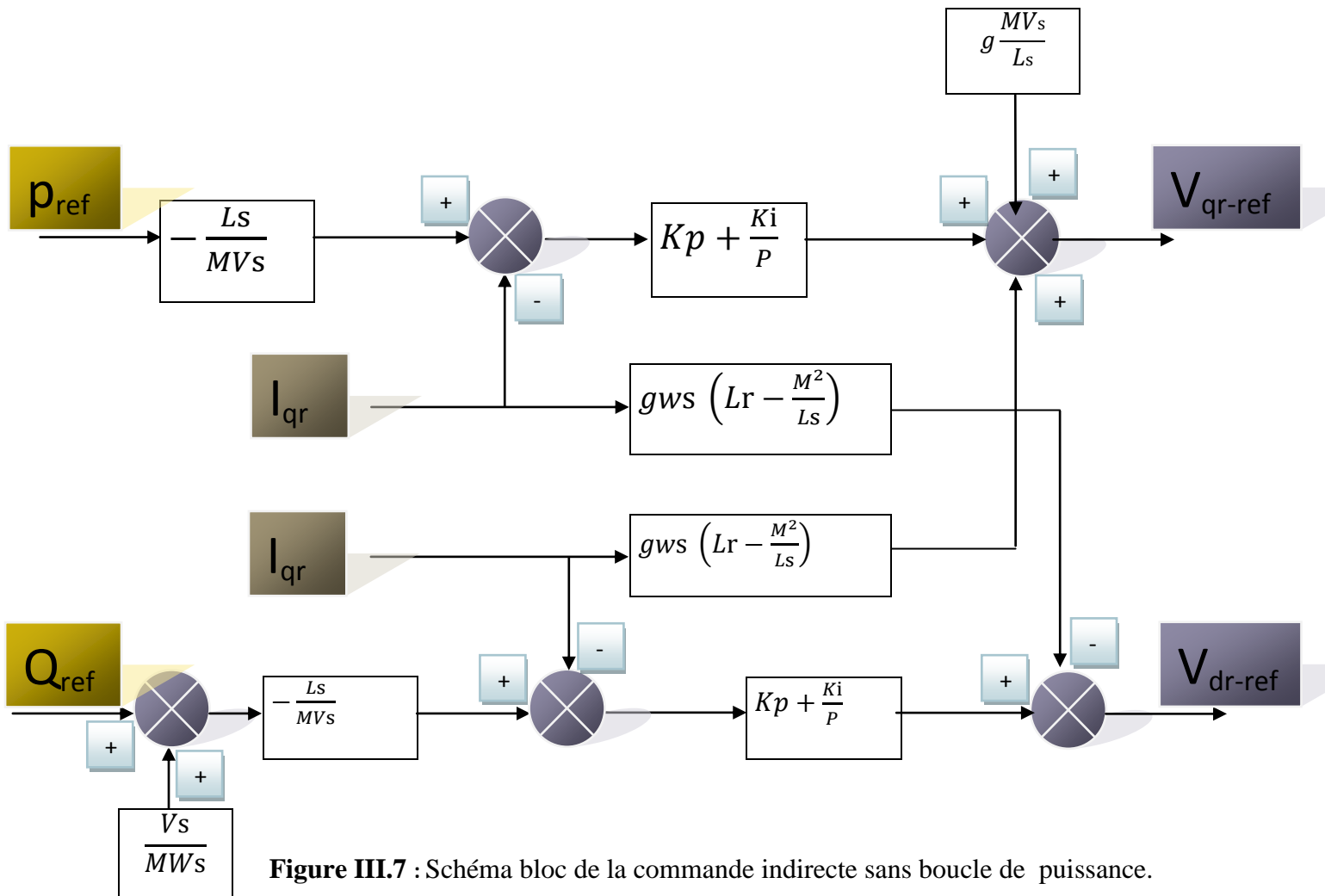
III.4.3.1. Commande sans boucle puissance :

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q [2].

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système(III.6) on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot P_{s-ref} \\ I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot Q_{s-ref} + \frac{V_s}{M.\omega_s} \end{cases} \quad (III.31)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.



Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

III.4.3.2. Commande avec boucle de puissance :

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante :

III.5. Modélisation des Convertisseurs statiques :

La commande de la MADA nécessite un onduleur qui règle l'amplitude et la fréquence des tensions envoyées à son rotor. Ce convertisseur a besoin à son tour d'une alimentation continue régulée obtenue grâce à un redresseur à MLI. Cette partie vise à modéliser ces convertisseurs à part.

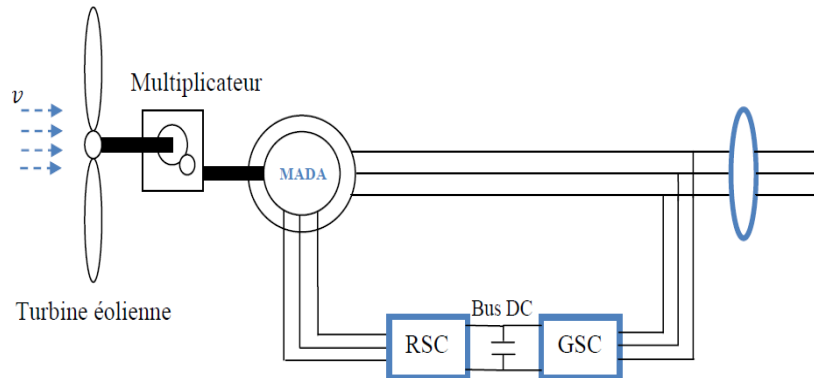


Figure III.9 : Structure de la cascade du redresseur du courant à MLI à deux niveaux- Onduleurs de tension à deux niveaux –MADA.

III.5.1. Modélisation Onduleur de tension :

L'onduleur utilisé est un simple onduleur triphasé à deux niveaux (six interrupteurs). En définissant la fonction de connexion d'un interrupteur F_{ks} , où k représente le numéro du bras ($k=1,2$ ou 3) et s le numéro de l'interrupteur considéré ($s=1$ pour l'interrupteur du haut et $s=0$ pour l'interrupteur du bas). Et sachant que les interrupteurs d'un même bras sont complémentaires, on peut écrire :

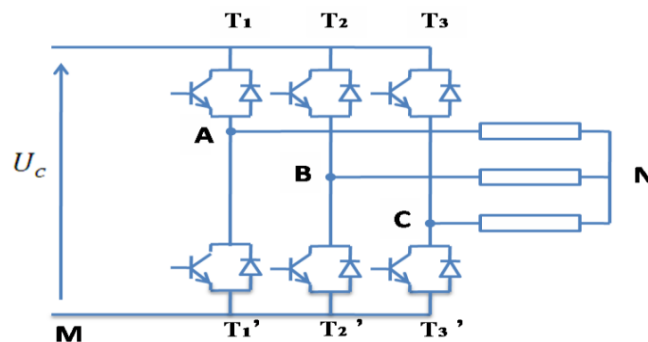


Figure III.10 : Onduleur de tension

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- la commutation des interrupteurs est instantanée.
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont:

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

Avec : $V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON}$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

$$V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0 \rightarrow V_{ON} = \frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (\text{III.33})$$

On remplace (III. 20) dans (III. 21), on aura le système suivant

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = \frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = \frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

On peut écrire le système (III. 34) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

Et :

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2}S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2}S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2}S_3 \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

Talque:

$$\begin{array}{llllll}
 V_{AO}=E/2S_1 & & S_1=1 & \text{si } K_1\text{fermé} & (v_{r1} \geq v_p) & \text{si non } S_1=-1 \\
 V_{BO}=E/2S_2 & \text{Ou} & S_2=1 & \text{si } K_2\text{fermé} & (v_{r2} \geq v_p) & \text{si non } S_2=-1 \\
 V_{CO}=E/2S_3 & & S_3=1 & \text{si } K_3\text{fermé} & (v_{r3} \geq v_p) & \text{si non } S_3=-1
 \end{array}$$

On remplace (III. 36) dans (III. 35) .Les équations précédentes permettent d'exprimer les tensions simples de l'onduleur au moyen des fonctions de connexion comme suite :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.37})$$

Le système (III.37) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation et la commande vectorielle ont été exposées. La méthode du flux orienté appliquée depuis quelques années à la machine asynchrone à double alimentation reste la méthode la plus répandue. Dans le chapitre suivant, nous présentons les résultats de simulation de la commande vectorielle en puissance alimentée en onduleur à MLI sinus-triangle.

Chapitre IV

Simulation de la commande vectorielle en puissance de la MADA

IV.1.Introduction :

Dans cette partie, les résultats de simulation de la commande en puissance ont été obtenus avec la MADA alimentée au stator par une alimentation triphasé sinusoïdale et au rotor par un convertisseur coté rotor à partir d'une source continue.

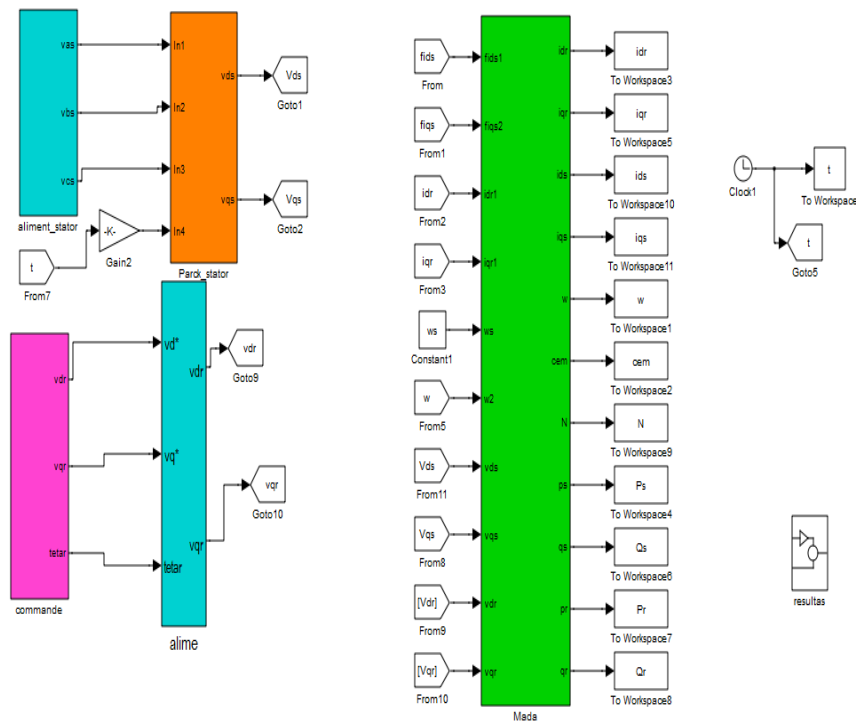


Figure IV.1 : Schéma de simulation de la commande vectorielle

IV.2.Résultats de Simulation des Commandes Directe et Indirecte de la GADA:

Pour examiner et visualiser le comportement de chaque type de commande, dans cette partie, nous avons donc soumis ces commandes à des échelons des puissances, active et réactive, statoriques. Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur utilisée dans la simulation sont reportés en annexe.

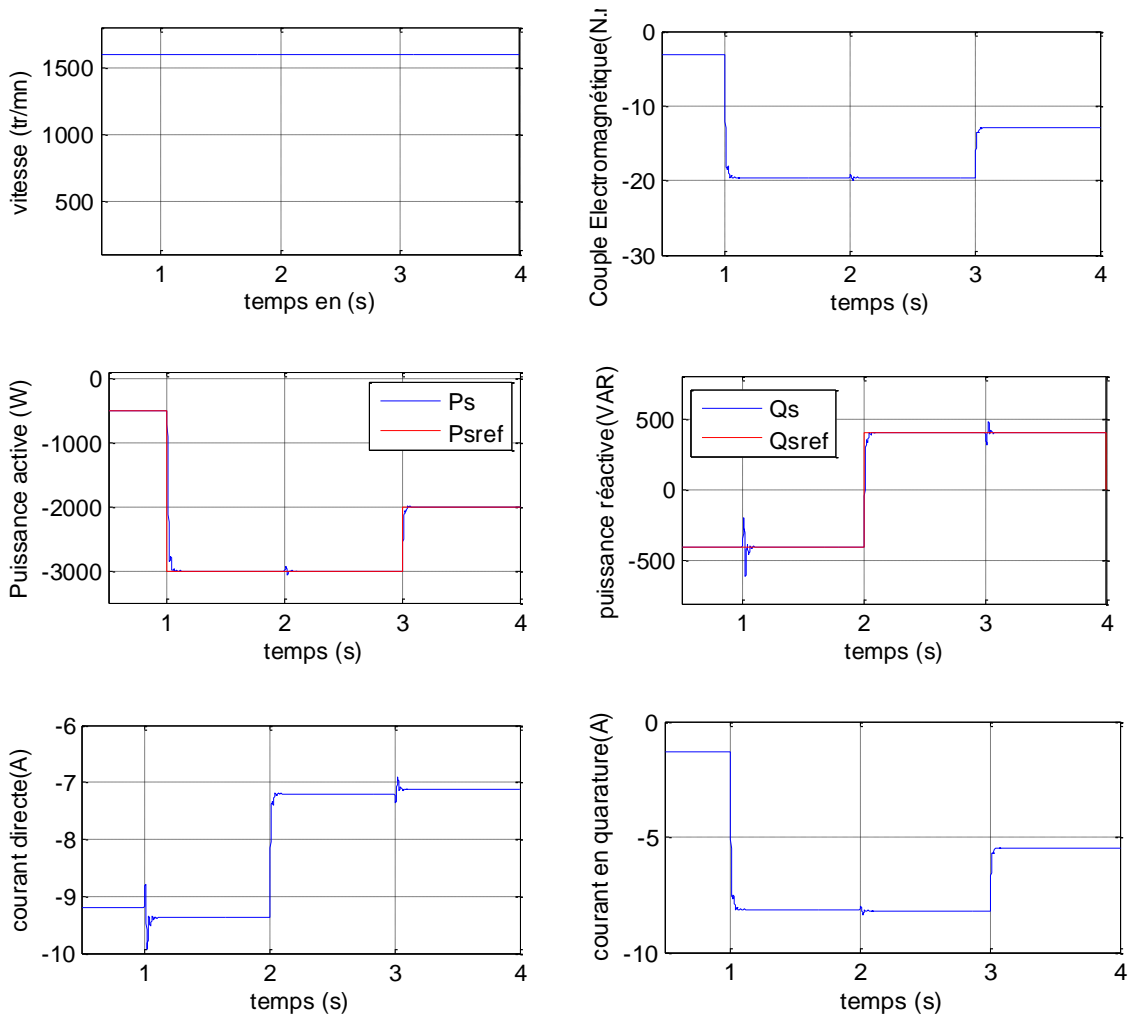
On note ici que la vitesse mécanique qui entraîne le rotor du GADA est une vitesse fixe d'une valeur de 1600 tr/mn (168 rad/s).

Les échelons des puissances active et réactive, qui sont appliqués à chaque type de commande du GADA. Cet essai consiste à appliquer aux entrées de commande des échelons de puissance active et réactive.

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

- Pour la puissance réactive :
 - De $t=0s$ à $t=2s$: un échelon négatif de -400 VAR,
 - De $t=2s$ à $t=4s$: un échelon positif de 400 VAR,

IV.2.1 Résultats de Simulation de la Commande Directe sans onduleur:



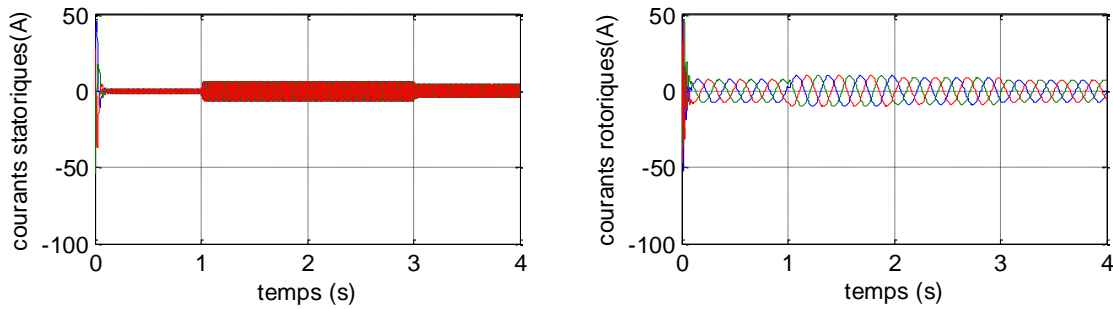


Figure IV.2 : Résultats de simulation de la commande vectorielle directe de la MADA

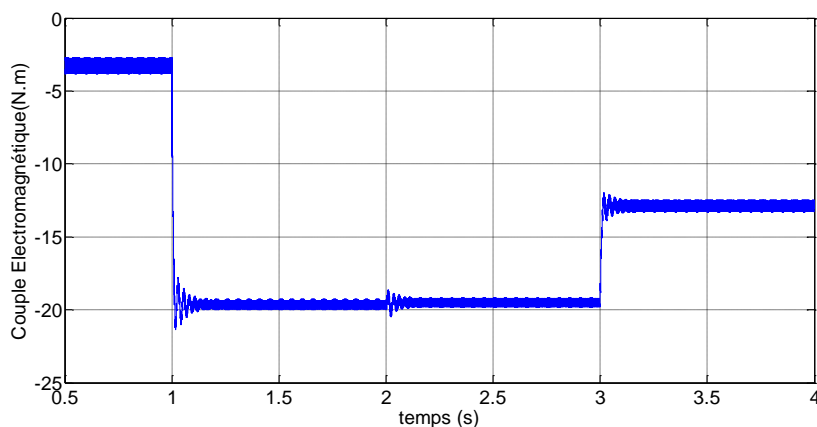
Pour les résultats de la figure IV.2, nous remarquons que les échelons de la puissance active et réactive statorique sont bien suivis, rapidement et sans dépassement par le générateur. Cependant les variations des échelons de la puissance active influent sur la puissance réactive.

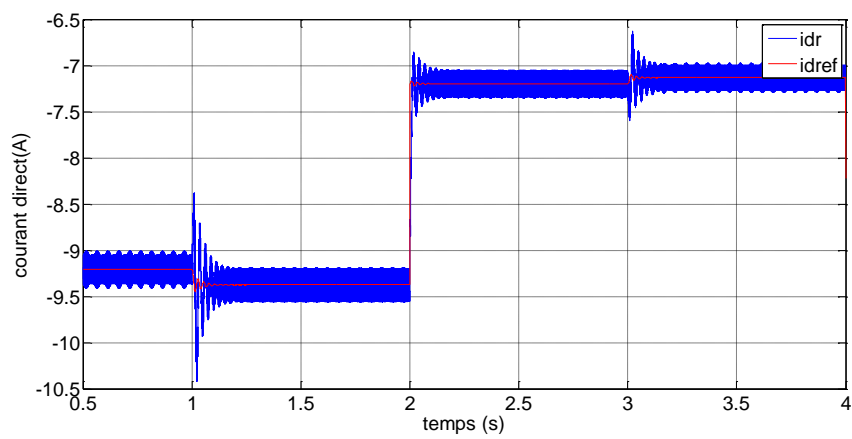
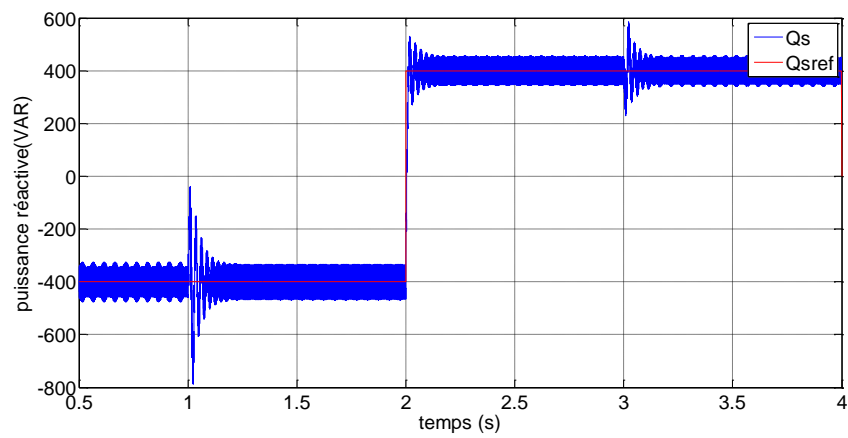
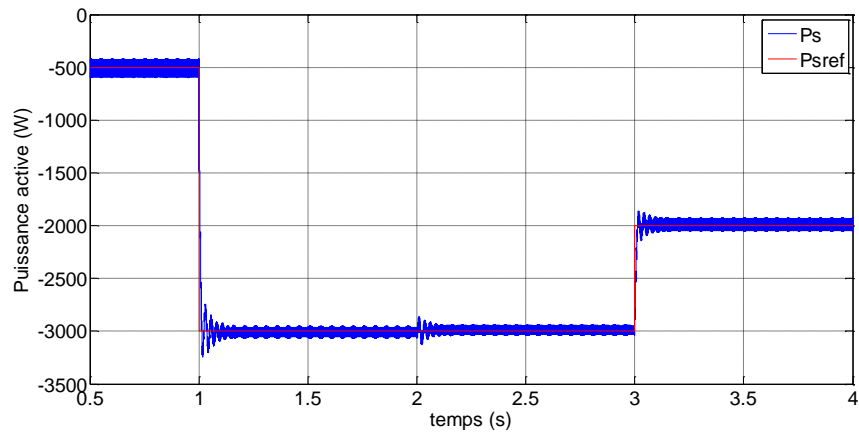
Les courants obtenus au stator et au rotor sont de formes sinusoïdales, ce qui implique une énergie propre sans harmoniques fournie ou absorbée par le GADA.

IV.2.2. Résultats de Simulation de la Commande Indirecte avec onduleur:

Pour la commande indirecte sans et avec boucles des puissances, on applique les mêmes échelons de la puissance active et réactive statorique qui ont été utilisés dans la commande directe.

IV.2.2.1. Commande Indirecte sans Boucle de Puissance :





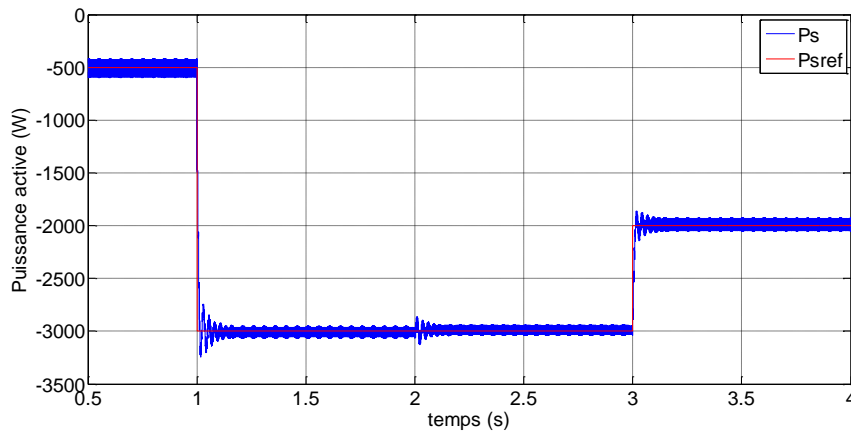
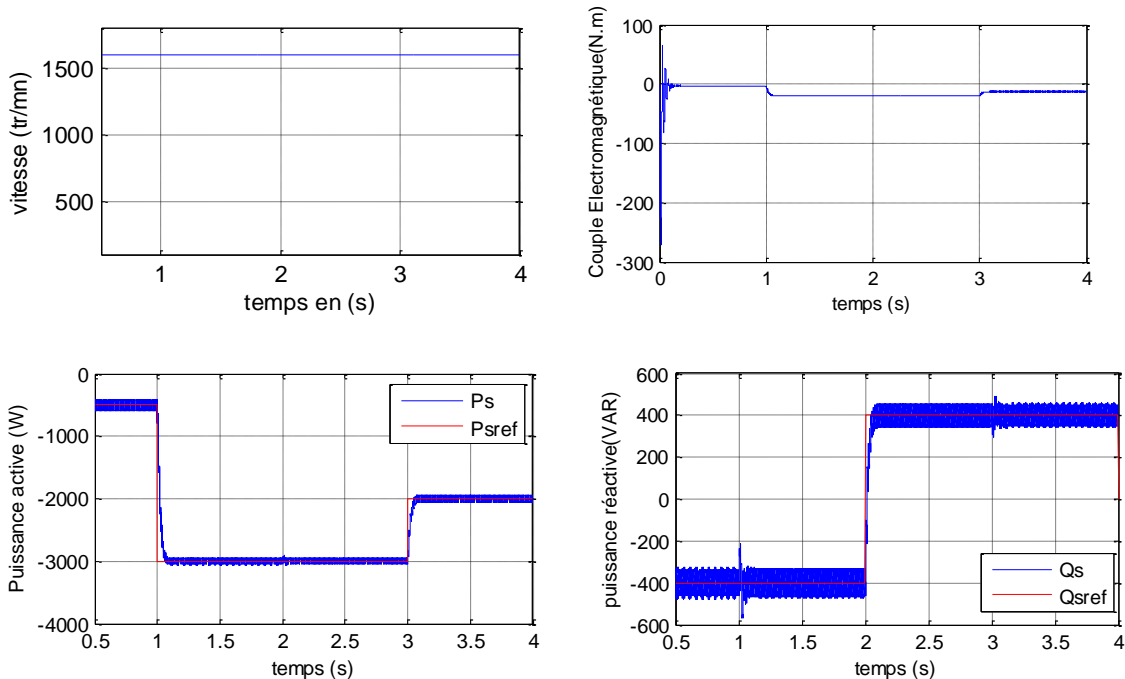


Figure IV.3 : Résultats de simulation de la commande vectorielle indirecte de la MADA sans boucle de puissance.

Les résultats obtenus montrent bien les performances du contrôle indirect de la puissance active et réactive sans boucles de puissance, ceci a été confirmé par le découplage parfait et la bonne poursuite avec une réduction des ondulations au niveau de la puissance active et réactive statorique.

Les courants obtenus au stator et au rotor sont aussi de formes sinusoïdales avec une amélioration de qualité par rapport à ceux obtenus par la commande directe.

IV.2.2.2. Commande Indirecte avec Boucles des Puissances :



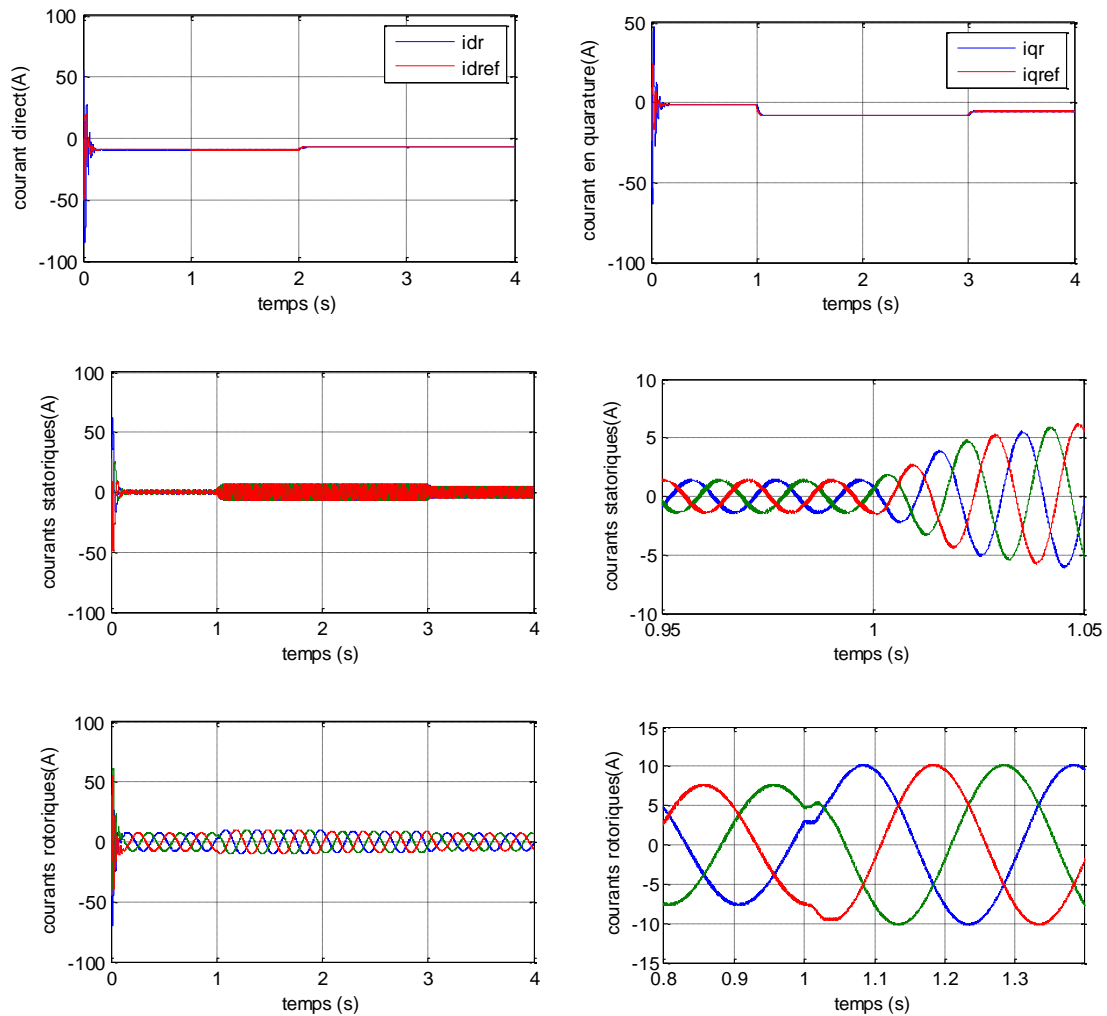


Figure IV.4 : Résultats de simulation de la commande vectorielle indirecte de la MADA avec boucle de puissance

Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présentait plus de perturbations entre les deux puissances [21].

La commande indirecte sans et avec boucle de puissance ont les mêmes performances, mais la commande indirecte sans boucle de puissance est plus rapide que celle avec boucle de puissance, parce que la commande indirecte avec boucles de puissance utilise quatre (04) régulateurs (02 régulateurs de courant et 02 régulateurs de puissance), par contre la commande indirecte sans boucles des puissances utilise seulement deux (02) régulateurs de courant.

IV.3. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d . La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répondue.

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.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'objectif principal de ce mémoire est de présenter une contribution à l'étude de la commande vectorielle en puissance avec un régulateur PI d'une génératrice asynchrone (GADA) alimentée au stator par des tensions sinusoïdales triphasées équilibrées, au rotor par un onduleur contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à un rappel des concepts fondamentaux de la chaîne de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique, en dressant un état de l'art sur les différents types d'éoliennes et sur les différentes associations machines électriques-convertisseurs.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté des généralités sur la MADA, ses applications, ses différents modes de fonctionnement et sa modalisation dans le repère de Park ensuite, nous avons simulé le modèle de la machine en mode moteur asynchrone et MADA en génératrice.

Le troisième chapitre présente une étude théorique de la commande vectorielle, où nous avons exprimé les grandeurs statoriques de la MADA en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la MADA par le rotor.

Enfin, au quatrième chapitre, nous présentons des résultats de simulation de la commande vectorielle directe et indirecte de la MADA alimentée au rotor par un onduleur à MLI. L'intérêt de la commande est d'aboutir à un découplage entre les puissances actives et réactives. Les résultats des simulations démontrent que la commande réalisée peut être considérée comme une solution intéressante dans le domaine de production de l'énergie éolienne.

En guise de perspective de recherche, nous citons :

- L'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs pour la minimisation des harmoniques renvoyés au réseau.
- L'intégration éventuelle d'un système de stockage inertiel.
- L'étude d'un modèle de la MADA prenant en compte la saturation magnétique

- L'utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : logique flou, réseaux de neurones, mode glissant...etc.
- L'implémentation expérimentale des différents algorithmes de commande de la MADA.

Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation :

Puissance nominale	$P_n = 3 \text{ kW}$
Courant nominal	$I_n = 6 \text{ A}$
Tension nominale	$V_n = 380 \text{ V composée}$
Resistance du stator	$R_s = 1.2 \Omega$
Resistance du rotor	$R_r = 1.8 \Omega$
Inductance propre du stator	$L_s = 0.1554 \text{ H}$
Inductance propre du rotor	$L_r = 0.1568 \text{ H}$
Inductance mutuelle	$M = 0.15 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 0.2 \text{ kg.m}^2$
Coefficient de frottement	$f = 0.001 \text{ Nm.s/rd}$
Nombre des pôles	$p = 2$

Références bibliographiques

- [01] **NAOUEL HAMDI** « modélisation et commande des génératrices éoliennes » magister, université frères Mentouri Constantine, 24 /01/2008.
- [02] **BENNOUR CHERIF** « simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » magister, université Mohamed khider – Biskra, 19/11/2012.
- [03] **DOMINIQUE GUERETTE** « asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d'un système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration » ingénierie, l'université du Québec à Rimouski, novembre 2010.
- [04] **WWW.ENR.FR - WWW.FEE.ASSO.FR** « syndicat des énergies renouvelables », France, énergie éolienne, février 2009.
- [05] **Nadji fouad-Yousfi Yacine** « Commande vectorielle de la machine à induction avec observateur de flux » diplôme d'ingénieur d'état, université de Msila, juin 2005.
- [06] **CHEBBAT Hayat, GANI Farida**, « Etude et simulation de la machine asynchrone et à double alimentation », mémoire d'ingénieur, université de Tizi-Ouzou.
- [07] **AIT RAMDANE NAIMA** « commande robuste d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne » ingénieur d'état, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ,03/07/2012.
- [08] **Azeddine Chaiba**, « commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle », thèse de doctorat, université de Batna, 2010.
- [09] **BOIDJELLAL BILAL** « amélioration des performances du réseau électrique par la commande d'un système éolien à base d'une MADA » master en génie électrique, université de Msila ,2012/2013.
- [10] **MEZERZI IMAD** « contribution à la modélisation et la commande d'une éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation » master en génie électrique, université de Msila, 2012/2013.
- [11] **CHERFIA NAÏM** « conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens » magister, université frères Mentouri Constantine, 07/ 06 / 2010.
- [12] **MR. ABDERRAHIM ZEMMIT** « commandes en tension d'un moteur asynchrone à double alimentation (MADA) » » master en génie électrique, université de Msila ,2012/2013.
- [13] **YACINE BENTALEB, YOUSEF HASENE** « étude d'un émulateur éolien » diplôme d'ingénieur d'état, 2008.

- [14] **MAYOUF MESSAOUD** « contribution a la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents » magister, université de Batna ,13/02/2008.
- [15] **HASSINI NEE BELGHITRI HOUDA** « modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque » magister, université Abou-Bakrbelkaid de Tlemcen, 2010.
- [16] **HARITZA CAMBLONG** « minimisation de l'impact des perturbation d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » doctorat, école nationale supérieure d'arts et métiers centre de bordeaux ,2003.
- [17] **FARID MERRAHI** « alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) » diplôme de magister, école nationale polytechnique, 30/06/2007.
- [18] **BOUARAKI MOULOUD** « étude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : application sur un site à Tindouf » magister, université M'Hamed bougara-Boumerdes, 2011/2012.
- [19] **KHETTACHE LAID** « étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée » diplôme de magister, université de Batna ,2007.
- [20] **F. KENDOULI, K. NABTI, K. ABED ET H. BENALLA** « modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation » revue des énergies renouvelables, université des frères Mentouri Constantine, 25 mars 2011.
- [21] **ARMAND Boyette** « contrôle-commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy1, 2006.
- [22] **HASSAD MOHAMED AMINE** « influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques. » diplôme de magister, université Sétif, 2012.
- [23] **KHALED FERKOUS** « étude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne » diplôme de magister, frères Mentouri Constantine, 27 /05 / 2009.
- [24] **MOUSSA SIDDO ABDOULAZIZ** « étude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » diplôme d'ingénieur d'état, école nationale polytechnique, 2007.
- [25] **TARAK GHENNAM** « supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des

Bibliographie

éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » docteur, école militaire polytechnique d'Alger, école centrale de Lille, 29/09/2011.

[26] **FREDERIC POITIERS** « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne *machine asynchrone à cage autonome *machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau » doctorat, université de Nantes, 19 décembre 2003.

[27] **FENNI Atmane**, « commande non linéaire par des régulateurs en mode glissant d'une machine asynchrone a double alimentation », Mémoire magister, université de Biskra 2013.

[28] **BENARIOUA Sofiane** « Etude d'un Système Eolien à Vitesse Variable », diplôme De Magister, 24/10/2012.

[29] **Hamzaoui Ihssen** « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », mémoire de magister en électrotechnique ; Ecole Nationale Polytechnique ,2008.