الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Électrique

Option : *Automatique*

THEME

Etude et Implémentation de la Commande Vectorielle Appliquées à un Moteur Asynchrone a Rotor Bobiné

Proposé et dirigé par

Dr .Boudana Djamel
Dr. MoualdiaAbdelhafid

Préparé et présenté Par
Sadat Abdelkader

Kadri Hakim

2016-2017

Dédicace

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire « ya Rahman »

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite,

A ma mère

Amon père, qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager,

à me donner l'aide

Que Allah les gardes et les protège

.À mes chers frères et mes chères sœurs.

À toute ma famille,Àtout mes amis

abdelkader

Remerciement

Tout d'abord Nous remercions infiniment mon dieu le tout puissant de la bonne santé, la volonté et la patience qu'il m'a donné tout le long de mes études.

Nous exprimons notre grande reconnaissance et

Remerciements à Dr.Moualdiya et Dr.boulkhrachef et notre promoteur Dr.Boudana pour son aide, ces conseils et de nous avoir orienté et mis à notre disposition tous les moyens nécessaires durant notre travail. Nous remercions également les membres du jury qui ont acceptés d'honorés par leur présence ma soutenance afin de juger nos travail.

Nous exprimons nos profonds remerciements à tous les enseignants qui contribués a notre formation spécialement les enseignants de Automatique

et tous ceux qui nous ont aidons de près ou de loin à réaliser ce travail.

Avec nos sincères gratitudes

الملخص:

طاقة الرياح هي مصدر في متناول الجميع .ذات جودة و وفرة . تطور تكنولوجيا طاقة الرياح بسرعة متغيرة و بتردد ثابت اصبحت ميدان مهم اليوم . هذا العمل يساهم في دراسة هذا النوع من الطاقة

و قد تم تطبيق نضام (CVI) للتحكم في الة بوضع محرك و تهدف هذه السيطرة على عزم الدوران و التمويه .ثم سيطرنا على المحرك التعريفي مع لفاف الدوار كمولد مزدوج .وقد طبقنا (CVI) للتحكم عليها بتغيير القوة الفاعلة و المتفاعلة (GADA) . و الشبكة

بعد تركيب وحدات تحكم (PI) المستخدمة من قبل اجهزة نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها من فعالية الطريقة المقترحة تم اجراء منطقة تجريبية على خريطة (1103dSPACE) في مختبر الابحاث الكهربائية و الالية بجامعة المدية لتاكيد نتائج المحاكاة . و النتائج التجريبية تظهر بوضوح من صحة خوارزمية التحكم المستخدمة.

الكلمات المفتاحية : خريطة (1103 dSPACE) طاقة الرياح, المحرك التعريفي, القوة الفاعلة و المتفاعلة, وحدات التحكم (PI) ,(CVI).

Résumé :

L'énergie éolienne est une source abordable, efficace et abondante d'électricité. Le développement de la technologie éolien a vitesse variable et a fréquence constate est devenue un domaine d'intérêt majeur aujourd'hui ce travaille est une contribution à l'étude de la génération de ce type d'énergie.

La commande vectorielle indirecte a été appliquée dans un premier temps pour commander la machine asynchrone en mode moteur. Cette commande a pour objectif le contrôle du couple et du flux. Ensuite nous avons commandé la machine asynchrone à rotor bobiné comme génératrice à double alimentation. L'application de la commande vectorielle indirecte a permet de découpler le modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation et de contrôler séparément l'échange des puissances active et réactive entre la GADA et le réseau.

Après la synthèse des régulateurs PI utilisé par cette stratégie de contrôle, les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité de la méthode proposée.

Une plate-forme expérimentale à base d'une carte dSPACE 1103 a été réalisée au laboratoire de recherche en électrotechnique et en automatique de l'université de Médéa afin de confirmer les résultats de simulation obtenus. Les résultats expérimentaux obtenus montrent clairement la validité de l'algorithme de commande utilisé.

Mots clés : Carte dSPACE 1103; Eolienne; Machine asynchrone à double alimentation (MADA); commande vectorielle indirecte; puissance active puissance réactive ,régulateurs PI.

Summary :

Wind power is an affordable, efficient and abundant source of electricity. The development of wind technology with variable speed and frequency has become a major area of interest today is a contribution to the study of the generation of this type of energy. The indirect vector control was first applied to control the asynchronous machine in motor mode. The purpose of this command is to control torque and flow. Then we ordered the wound rotor asynchronous machine as a dual power generator. The application of the indirect vector control a enables the model to be decoupled from the double power asynchronous generator and to control separately the active and reactive power exchange between the GADA and the network. After the synthesis of the PI regulators used by this control strategy, the simulation results obtained showed the efficiency of the proposed method. An experimental platform based on a dSPACE 1103 card was carried out at the research laboratory in electrical engineering and automation at the University of Médéa in order to confirm the simulation results obtained. The experimental results obtained clearly show the validity of the control algorithm used.

Keywords:dSPACE card 1103; Wind turbine; Asynchronous double feeding generator (GADA); Indirect vector control; Active power reactive power, PI regulators.

SOMMAIRE

Liste des Tableaux……..…..…A

Liste Des Figures…….. C

Notations et Abréviations……D

Introduction générale……...…….....01

Chapitre I : Etat de l'art des génératrices éoliennes

I.1 Introduction……..……..04

I.2 Historique……04

I.3 Développement de l'éolien……..06

I.3.1 Production mondiale d'électricité éolienne ……..07

I.3.2 Production d'électricité éolienne en Algérie…….08

I.4 Les différents types d'éoliennes…….10

I.4.1 Eoliennes a axe vertical……...12

I.4.2 Eoliennes a axe horizontal…….13

I.4.2.1. Principaux composants d'une éolienne horizontale……..14

I.5. Etat de l'art sur les génératrices d'éoliennes……16

I.5.1. éolienne à vitesse fixe……..16

I.5.2. éolienne à vitesse variable……17

I.6 Les avantages et inconvénients de l'éolien……..17

I.6.1. Avantages de l'éolien……...17

I.6.2 Inconvénients de L'éolien…….19

I.7 Différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens…….19

I .7.1. Systèmes éoliens utilisant les génératrices synchrones……19

I.7.2. Systèmes éoliens utilisant les génératrices asynchrones……...21

I.7.3. Systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation……21

I.8. Structure des machines asynchrones à double alimentation……22

I.8.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée…….23

I.8.2. Machine asynchrone à double alimentation : structure de Kramer……..23

I.8.3. Machine asynchrone à double alimentation : structure de Scherbius avec cyclo convertisseur…….24

I.8.4. structure de Scherbius avec convertisseurs MLI de la MADA…….25

I.9 Application des machines Asynchrones à double alimentation……26

1.10.Conclusion……27

Chapitre II :Modélisation de la MADA

II.llntroduction…….....28

II.2. Principe de fonctionnement……..29

II.2.1. Production du couple électromagnétique…….…..29

II.2.2.Fonctionnement en hypo et hyper synchronisme…….....32

II.2.3.Fonctionnement moteur et générateur…….……...34

II.3.Transfert de puissance dans la MADA……...……35

II.4 Avantages et Inconvénients de la MADA……...…37
II.4.1 Les avantages de la MADA…….....…….37
II.4.2 Les inconvénients de la MADA……..…...37
II.5 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation……..38
II.5.1 Hypothèses simplificatrices……38
II.5.2 Modèle de la MADA dans le repère abc……..……..39
II.5.3 Changement de repère……....41
II.5.3.1 Transformation de Park…….....41
II.5.3.2 Equations de la machine dans le modèle de Park……..….43
II.5.3.3 Modèle à quatre paramètres électriques……..44
II.5.3.4 Modèle à cinq paramètres électriques…….46
II.6 Conclusion…….47

Chapitre III :Implémentation de la Commande Vectorielle de la MAS

III.1. Introduction…….48
III. 2. Principe de la commande vectorielle……...48
III.3 Orientation de flux rotorique…….50
III.4 Réglage de vitesse par la commande vectorielle direct…….52
III.4.1. Régulateur du courant iqs…….....54
III.4.2. Régulateur du courant ids…….55

III.4.3. Régulateur du flux Φ_r……...……55
III.4.4. Réglage de la vitesse…….56
III.4.5. limitation du courant iqs……...56
III.4.6. Intérêts et inconvénients……...57
III.5. Réglage de vitesse par la commande vectorielle indirect……58
III.5.1. Intérêts et inconvénients……...……59
III.5.2. Résultats de simulation…….60
III.6 Implémentation de la commande vectoriel direct de la MAS……..62
III.6.1 Présentation du banc d'essai…….62
a- Domaines d'application de la carte DS1103…….62
b- Utilisation de la Real-Time Interface…….62
III.6.2. Résultats expérimentaux……..65
IV.5 Conclusion……68

Chapitre IV : Commande en puissance de la GADA

IV.1. Introduction…….69
IV.2 Commande vectorielle de la GADA……69
IV.2.1. Commande vectorielle direct des puissance (CVD)…….73
IV.2.2. Commande vectorielle indirecte des puissances (CVI)……74

IV.2.3. Synthèse de régulateur PI…….75
IV.2.4. résultats de simulation……..77
IV.2.5. Interprétation des résultats……...78
IV.3 Conclusion……79
Conclusion générale……80
Annexe……..82

Liste Des Figures

Chapitre I : Etat de l'art des génératrices éoliennes

Figure I.1 : Exemples de moulins à vents ……..…… ……05
Figure I.2 : photo d'une première éolienne installée en Algérie…….06
Figure I.3: la forme éolienne de 10 MW àKaberténe (Adrar)……...08
Figure I.4: carte annuelle des vents (m/s) à 10 m du sol……10
Figure I-5 : Différents types d'éoliennes……..12
Figure I.6 :composants d'une éolienn.....14
Figure I.7 : Aérogénérateur à vitesse fixe……16
Figure I.8 : Aérogénérateur à vitesse variable…….17
Figure I.9 : Eolienne basée sur une MADA connectée au réseau……22
Figure I.10 :.MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique…..23
FigureI.11 : Machine asynchrone à double alimentation : structure de kramer……24
FigureI.12 : Structure de Schrbius avec cycloconvertisseur……...24
Figure I.13 : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI……...….25

Chapitre II : Modélisation de la MADA

Figure II.1 : Diagramme vectoriel des forces magnétomotrices…….30
Figure II.2 : Circuit magnétique de la machine……...31
Figure II.3: Configuration des enroulements et des flux dans une MADA……...31
Figure II.4: Circuit électrique au rotor……...33
Figure II.5 : Diagramme vectoriel des forces magnétomotrices en mode moteur et générateur…….34
Figure II.6 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation……..36
Figure. II.7 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation……..38
Figure II.8: Représentation de la MADA dans le repère de Park……...41

Chapitre III : Implémentation de la Commande Vectorielle de la MAS

Figure III.1: Principe de la commande découplée……..49

Figure III.2 : Principe d'orientation du flux rotorique……51

Figure III.3 : Schéma de principe de la commande vectorielle directe……...53

Figure III.4 :Schéma bloc de régulation du courant iqs……..54

Figure III.5 :Schéma bloc de régulation du fluxΦ_r……...……..55

Figure III.6: Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotationω_r……...…..56

Figure III.7 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte……...58

Figure III .8 : Variation de la vitesse en fonction du temps……61

Figure III .9 : Variation du courant statoriqueIas en fonction du temps……61

Figure III .10: Variation du couple éléctromagnétique (Cem) en fonction du temps…….61

Figure III.11-a : Schéma synoptique de la plate-forme expérimentale……...63

Figure III.11-b : montage général de la plate-forme……..63

Figure III.12 : Machine asynchrone à rotor bobiné…….64

Figure III.13 : Onduleur……..64

Figure III.14 : Capteurs de mesure de courant et de tension……...65

Figure.III.15 : Capteurs de vitesse…….……...65

Figure III .16 : Variation du courant statoriqueIas en fonction du temps……..66

Figure III .17 : Variation du couple éléctromagnétique(Cem) en fonction du temps……..66

Figure III .18 : Variation de la vitesse en fonction du temps……..67

Figure III .19 : résultats expérimentale de la tension simple……...67

Chapitre IV : Commande vectorielle de la GADA

Figure IV.1: Orientation du repère de Park……69

Figure IV.2 : Schéma bloc du modèle simplifié de la GADA…….72

Figure IV.3 : schéma bloc de la commande vectorielle direct de la GADA……...74

Figure IV.4 : Schéma bloc de la commande indirect……..75

Figure IV.5 : système régulé par un PI……75

Figure IV.6 :commande vectorielle de la GADA par la méthode indirect (test de suivi de consigne et sensibilité perturbations)……77

Liste des Tableaux

Tableau I-1 : Puissance éolienne installée dans le monde de 2001 à la fin de 2013 (en MW)……..08

Tableau I-2 : classification des turbines éoliennes [MOR05]……10

Tableau I-3 : principaux types de machines électriques utilisées dans la construction des éoliennes……19

Tableau I-4 : Avantages et inconvénients de génératrices synchrones……20

Tableau I-5 : Avantages et inconvénients de génératrices asynchrones……21

Tableau I-6 : Avantages et inconvénients de la génératriceasynchrone à double alimentation……22

Tableau II.1: Point de fonctionnement en synchronisme……..33

Tableau III.1 : Paramètres des régulateurs……60

Notations et Abréviations

R_s : La résistance statorique par phase (Ω).

R_r: La résistance rotorique par phase (Ω).

L_s : L'inductance propre d'une phase statorique (H).

L_r : L'inductance propre d'une phase rotorique (H).

M_s : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques (H).

M_r : L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques (H).

M_{sr} : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et rotoriqueL_{cs} : L'inductance cyclique statorique (H).

M : L'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor (H).

N_s : L'inductance cyclique totale des fuites localisées au stator (H).

N_r : L'inductance cyclique totale des fuites localisées au rotor (H).

N_r' : L'inductance cyclique de fuites magnétiques totales rotoriques ramenée au stator (H).

σ : Le coefficient de dispersion de Blondel.

K : Le coefficient de couplage.

M_c : L'inductance mutuelle cyclique ramenée (H).

p : Le nombre de paires de pôles. g : glissement.

L_{sf} : L'inductance cyclique de fuites magnétiques partielles statoriques (H).

L_{rf} : L'inductance cyclique de fuites magnétiques partielles rotoriques (H).

L_{rf}' : L'inductance cyclique de fuites magnétiques partielles rotoriques ramenée au stator (H).

j_s, I_s: Le courant dans les enroulements statoriques (A).

j_r, I_r: Le courant dans les enroulements rotoriques (A).

V_s : La tension simple statorique (V).

V_r : La tension simple rotorique (V).

θ_r: L'angle entre la phase A du stator et la phase a du rotor (rd).

Ω_s: La pulsation statorique (rd/s).

Ω_r: La vitesse mécanique de la machine (rd/s).

C_{em}: Le couple électromagnétique (m.N).

C_r: :Le couple résistant (m.N).

C_s : Le couple des frottements secs (m.N).

J_m : Le moment d'inertie de la machine (kg.m2). P_{fer} : Les pertes fer (W).

P_{jr} : Les pertes joule rotoriques (W).

P_m : Les pertes mécaniques (W).

T_r, T_s : La constante de temps rotorique et statorique (s).

s,r : Indices correspondants respectivement au enroulement statorique et rotorique.

a_s, b_s, c_s et a_r, b_r, c_r : Phases de l'enroulement statorique et rotorique.

d , q : Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant. θ : Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.

θ_s: Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d.

$V_{abc\,s}$: Tensions des trois phases de l'enroulement statorique.

$V_{abc\,r}$ Tensions des trois phases de l'enroulement rotorique.

$V_{dq\,s}$: Tensions de l'enroulement statorique dans l'axe d,q.

$V_{dq\,r}$: Tensions de l'enroulement rotorique dans l'axe d,q.

$I_{abc\,s}$: Courants des trois phases de l'enroulement statorique. $I_{abc\,r}$: Courants des trois phases rotoriques.

$I_{dq\,s}$: Courants de l'enroulement statorique dans l'axe d,q.

$I_{dq\,r}$: Courants de l'enroulement statorique dans l'axe d,q.

L_m : Inductance mutuellecyclique entre stator et rotor ou (inductance magnétisante).

L : Inductance dynamique

f_r : Coefficient de frottements visqueux.

f_m : Coefficient de frottements.

Ω: Vitesse de rotation de la machine

$\omega_r, \omega_s,$: Pulsations électriques respectivement du rotor, du stator, et de glissement.

P_s, P_r: Puissance active transitant par le stator et rotor.

Q_s, Q_r : Puissance réactive transitant par le stator et rotor

$\Phi_{s\ abc}$: Flux des trois phases de l'enroulement statoriques. $\Phi_{r\ abc}$: Flux des trois phases de l'enroulement rotoriques.

$\Phi_{s\ dq}$: Flux de l'enroulement statorique dans l'axe d, q.
W_{mag}: L'énergie magnétique

ABREVIATIONS

MADA : Machine asynchrone à double alimentation.

GADA : génératrice asynchrone à double alimentation.

MAS : Machine Asynchrone.

MCC : Machine à courant continu.

MLI : Modulation de largeurs d'impulsions.

Introduction générale

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques (chauffage, climatisation, lavage, médicale, informatique…. ect) ont conduit à des besoins planétaires en énergie électrique considérables [POI03]. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général, dans des unités de productionde grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Aujourd'hui, plus de 2 milliards d'êtres humains n'ont pas l'accès à l'électricité pour cause d'économie fragile, d'infrastructures lourdes et coûteuses, de zones difficiles d'accès et d'habitat disperse [DJE15].

Face à l'épuisement des énergies fossiles polluantes (pétrole, gaz et charbon) et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources, d'autres ressources énergétiques alternatives ont été et doivent continuer à être développées. Parmi elles, nous pouvons citer l'énergie de fission nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique (principalement le C02)[CAM03]. Cependant, le traitement des déchets, issus de ce mode de production, est très coûteux et, pour une part, leur radioactivité reste élevée durant de nombreuses années. Une autre alternative, consiste à exploiter les énergies renouvelables, qui offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement el surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Aujourd'hui, la production d'énergie électrique à travers les systèmes éoliens devient compétitive en termes de coûts de production. Il est en train de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre [ABD07].

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie à plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergieàpartir du vent pour générer un courant électrique. La chaîne de conversion de l'énergieéolienne en énergie électrique intègre différents organes électrotechniques. Afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été examinées aussi bien au niveau de la génératrice à utiliser que de l'électronique de puissance.

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Cettevision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et l'éolien, et leurs utilisationspour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, L'Algérie s'engage dans une nouvelle énergétique durable. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22000 MW entre 2011 et 2030 dont 12000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10000 MW à l'exportation[DJE15]. L'exportation de l'électricité est toutefois conditionnée par l'existence d'une garantie d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financements extérieurs.

L'aérogénérateur est la technologie la plus utilisée pour exploiter l'énergiedu vent. Sa production peut varier de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts. Le type le plus utilisé est l'éolienne tripale à axe horizontal.

Actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage, et non des moindres, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasé dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la GADA, ce qui présente un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine synchrone à aimants permanents par exemple). En effet, la GADA permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de ± 30 % autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques car ceux-ci sont connectés entre le bobinage rotorique de la GADA et le récepteur électrique [BOU15].

la commande vectorielle se base sur un contrôle effectif de l'état magnétique de la machine et du couple électromagnétique. Elle a été ces dernières années la voie de recherche la plus importante et la mieux adaptée aux exigences industrielles. Pourtant, il aura fallu attendre 1980 pour voir la première réalisation pratique, alors que les bases de la théorie sur le contrôle vectoriel ou contrôle à flux orienté ont été développées par Blaschke dès 1971.

Ce mémoire sera divisé en quatre chapitres pour décrire le travail envisagé.

Le premier chapitre est consacré aux notions générales et une brève histoire sur l'énergie éolienne. Ensuite, nous présenterons les différents types des aérogénérateurs.Puis, les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées afin de montrer les avantages inégalés de la machine asynchrone à double alimentation surtout en grande puissance et en vitesse variable.

Le deuxième chapitre feral'objet d'une étude de modélisation de la MADA et de son alimentation statorique et rotorique. Nous donnerons modèle mathématique triphasé puis un modèle biphasé de la machine en utilisant la transformation de Park

Dans le troisièmechapitre nous présentons la commande vectorielle de la machine asynchrone à rotor bobiné. Ensuite nous simulons le comportement de la commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone. En fin pour valider l'algorithme proposé nous présentons des résultats pratiques réalisés au laboratoire de recherche en électrotechnique et en automatique de l'université de Médéa

Le quatrième chapitre est dédié à la commande vectorielle par orientation du flux statorique afin de réaliser une commande indépendante de la puissance active et réactive de la GADA, en utilisant des régulateurs classique de type proportionnelle-intégral. Nous exposerons deux types de commandes vectorielles dans cette section. La première appelée commande vectorielle directe dans laquelle on effectue la régulation directement des puissances sans prendre en compte les couplages internes existants entre les énergies dans la GADA. La deuxième c'est la commande vectorielle indirecte qui s'occupe d'abord du réglage des courantes rotoriques de la GADA ensuite le réglage en cascade des puissances.

Finalement, Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche futures.

I.1 Introduction :

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pâles profilées ont été utilisés avec succès pour générer l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

I.2 Historique :

Il y'a plus de 3000 ans déjà, l'énergie du vent était transformée en énergie mécanique, d'une part sur terre par les moulins et des systèmes de pompage de 1'eau, d'autre part en mer, par les bateaux. La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du 19^{eme} siècle. Parmi les pionniers on peut citer **Paul La Cour** au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950 **Johannes Jule** (élève de Paul La Cour) devient aussi un pionnier dans l'utilisation de 1'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif.

Il ne fait aucun doute que les moulins à vents ont connu dans le passé, un grand succès. Ils ont fourni à l'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque. À la réalisation de ses desseins. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation est négligé et souvent abandonnée. L'utilisation du vent semble par conséquent de plus en plus délaissée et son avenir très compromis jusqu'à la crise pétrolière de 1973.



a : moulin à vents – Danemark**b :** moulin à vents –Grec



c : moulin à vents –Allemagne d : moulin à vents –USA

Figure I.1 : Exemples de moulins à vents [HAU06].

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller 1'intérêt pour 1'énergie éolienne dans plusieurs pays. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7MW en 1981 à 386 MW en 1985.

La première éolienne qui a été installée en Algérie revient à la périodede la colonisation française, en 1953 par «le service de la colonisation et de l'hydraulique » relevant des militaires, qui contrôlaient les territoires du sud algérien. Actuellement, il existeà l'intérieur de la station de l'intérieur de la station de l'Institut national de recherche agronomique (INRA) d'Adrar. Constitué d'un mat de 24 m surmonté d'une hélice à trois pales d'un diamètre de 15 mètre.



Figure I.2 : photo d'une première éolienne installée en Algérie.

I.3 Développement de l'éolien :

Suite à la panique engendrée par les deux chocs pétroliers 1973 et 1979, qui débouchasur la recherche d'énergies alternatives et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualitéet connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une vingtaine d'années ; la majorité de la demande des centrales électriques utilisant des combustibles « moins polluants ».

C'est dans ce contexte que l'énergie éolienne est considérablement développée ces dernières années, ainsi la conception des éoliennes s'est orientée vers la conception des prototypes d'éolienne qui dépasse le 1 MW. Cette tendance s'est concrétisée avec la conception et l'installation de plusieurs prototypes d'éoliennes à savoir l'E112 d'ENERCON (4.5MW en 2002) [WOB03], la M5000 de REPOWER et MULTIBRID (5 MW en 2004) et l'E126 d'ENERCON de 6MW et 7.5 MW en 2007 et 2010 respectivement [RAP10]. Ces éoliennes de grande puissance sont destinées principalement aux applications offshores [GHE11], [LIS11]. Des prototypes de 10 MW fabriqués par les constricteurs CLIPPER WINDPOWER et WINDTEC sont déjà en cours de développement, alors qu'ils vont être commercialisés dans un futur proche [GHE11], [DJE15].

Malgré la crise financière de ces dernières années et ses conséquences sur le monde entier, le marché mondial de l'éolien a pu résister. Le chiffre d'affaires du secteur éolien dans le monde entier a atteint le 60 milliards d'euros (75 milliards de dollars) en 2012, après 50 milliards d'euros en 2011. En effet, en 2012 près de 100 pays ont installés des capacités d'énergie éolienne sur leur territoire, parmi eux 34 pays européens davantage que sur n'importe quel autre continent. Le rythme de croissance de l'éolien dans le monde reste globalementsoutenu, selon le rapport annuel de l'association mondiale de l'énergie éolienne (World Wind Energy Association - WWEA) publié en mai 2013, la puissance éolienne mondiale installée durant l'année 2012 est de l'ordre de 44609 MW, soit une puissance mondiale cumulée de plus de 282 GW, La plus grande partie de la puissance installée se trouve en Europe avec environ 107 GW et qui représente 38% de la capacité éolienne mondiale, dont plus de 98.5% de cette puissance est localisée uniquement àl'Union Européenne. En Europe, cette filière assure déjà la consommation électrique de 30millions de foyers (c'est à dire 6.3% de la demande d'électricité) et permettrait d'éviter la production de 140 millions de tonnes de gaz carbonique par an, soit l'équivalent de la circulation de33% des voitures de l'Union Européenne selon l'EWEA (Européen Wind Energy Association) [DJE15].

I.3.1 Production mondiale d'électricité éolienne :

En cinq ans, la puissance éolienne installée a été multipliée par trois dans le monde, passant de 121 GW à 319 GW. La capacité éolienne a augmenté de 197 GW de 2008 à 2013 alors que la capacité nucléaire n'a pas augmenté (317.5 GW fin de 2008 et 371.7 GW fin de 2013). Les pays précurseurs dans le monde ont été le Danemark, L'Allemagne et L'Espagne. Récemment, la chine et les Etats-Unis sont devenus les pays possédant la plus grande capacité éolienne installée, précédant L'Allemagne et L'Espagne qui restent cependant les pays disposant de la plus grande puissance éolienne par habitant avec le Danemark.

	EU 27	Etats-Unis	Canada	Chine	Inde	Japon	Monde
2000	12 950	2 500	150	340	1 200	150	17 700
2003	28 700	6 400	320	640	2 100	570	39 400
2008	65 170	25 240	2 360	12 100	9 600	1 880	**121 000**
2009	75 100	35 100	3 300	25 800	10 900	2 100	158 900
2010	84 950	40 290	4 000	44 500	13 060	2 330	197 700
2011	94 040	46 920	5 260	62 360	16 080	2 540	237 800
2012	106 800	60 010	6 200	75 300	18 400	2 610	283 400
2013	117 700	61 100	7 800	91 400	20 150	2 660	318 600

Tableau I-1 : Puissance éolienne installée dans le monde de 2001 à la fin de 2013 (en MW).

I.3.2Production d'électricité éolienne en Algérie :

En ce qui concerne l'Algérie, l'énergie éolienne n'est pas encore connue à l'heureactuelle le développement qui permettrait leur exploitation. Malgré le gisement éolien dontdispose l'Algérie [KAS06]. Ceci constitue un atout majeur qui pourra être valorisé pourfaire de l'Algérie un fournisseur en énergie électrique.

Un premier pas a été déjà fait par le groupe Sonelgaz en 13 décembre 2010, qui aconfié la réalisation de la première ferme éolienne de Kabertène à Adrar d'une puissancetotale de 10MW (figure 1.5). Douze éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MWchacune, installées dans cette ferme ont été mises en service le 8 juin 2014.



Figure I.3: la forme éolienne de 10 MW àKaberténe (Adrar).

Signalons que la ferme éolienne d'Adrar, première du genre à l'échelle nationale,d'une capacité de 10 MW, est implantée sur une superficie de 30 hectares, dans la zone de Kabertène. 72 kilomètres au nord de la wilaya d'Adrar. Elle est constituée de 12 éoliennesde 850 kW chacune et d'une puissance cumulée de 10.2 MW dont six ont été déjàréceptionnées en juin 2014. Les turbines utilisées dans ce parc sont de type « G52 /850/50 60Hz » fournies par le constructeur espagnol GAMESA, équipées par des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA). Cette nouvelle centrale de production d'électricité, dont les travaux ont été entamés en 2011, appartient à la phase pilote du programme national des énergies renouvelables, qui consiste en l'installation d'unepuissance globale en énergies renouvelables de 22 GW à l'horizon 2030 [DJE15].

Dans le cadre de l'intégration nationale, les capacités de réalisation nationales ont été associées à ce projet attribué au consortium algéro-français (CEGELEC), C'est ainsi que deux sociétés du Groupe Sonelgaz, à savoir ETTERKIB et INERGA, ont pris en charge les travaux de génie civil et de montage des installations.

L'implication de ces dernières traduit la vision stratégique de l'Algérie qui vise à développer tant L'intégration nationale que la maîtrise des nouvelles techniques dans le domaine des énergies renouvelables. Le choix de la région de Kabertène, relevant territorialement de la commune de Tsabit, a été fait suite à une étude cartographique sur les grandes régions de vent en Algérie, et à l'issue de laquelle deux régions dont Adrar ont été définies. Cette wilaya verra également la réalisation de huit nouvelles centrales électriques exploitant des énergies renouvelables, pour une production globale de plus de 270 mégawatts [DJE15].

Le potentiel éolien en Algérie diffère selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les hauts plateaux. Au sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar [PER14],[DJE15].La figure (1.6) présente la cartographie des vents en Algérie.

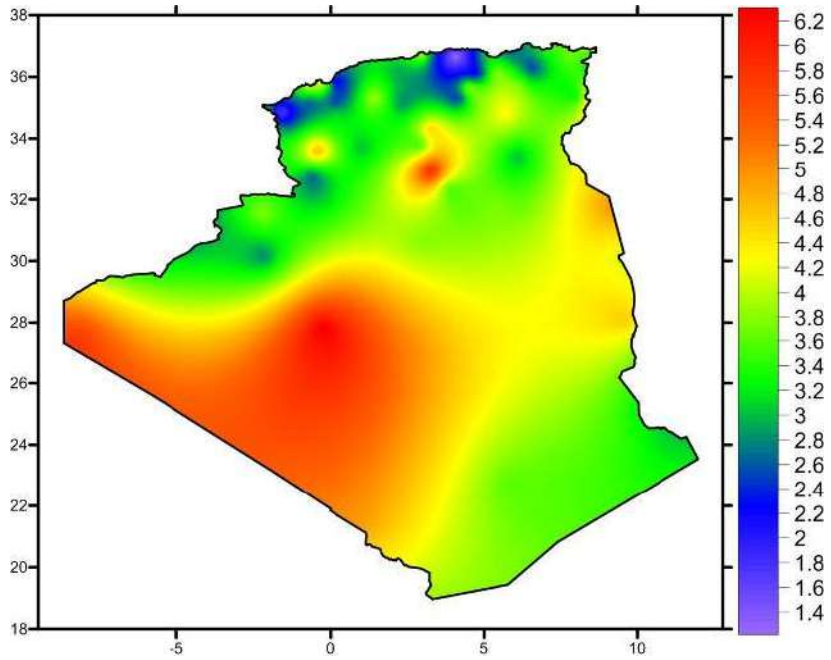


Figure I.4: carte annuelle des vents (m/s) à 10 m du sol [PER14].

Il est évident que certains pays doivent réagir très vite s'ils veulent remplir leurs obligations de 2020, sur le moyen et long terme, les perspectives de croissance de la filière restent intéressantes, estime une capacité globale de plus de 500 GW à l'horizon 2016, et environ 1000 GW (soit 1TW) sera possible par l'année 2020. D'autre part, estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% en 2040 [WWEA].

I.4 Les différents types d'éoliennes :

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I-1 présente une classification des turbines éoliennes.

ECHELLE	DIMÉTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40KW
Moyenne	12 m à 45 m	DE40KWà 1MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau I-2 : classification des turbines éoliennes [MOR05].

- **Les raisons pour choisir une grande éolienne**

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

- **Les raisons pour choisir une éolienne plus petite**

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

5. Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général

beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.



a Eoliennes à axe vertical *b Eoliennes à axe horizontal.*

Figure I-5 : Différents types d'éoliennes.

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

➢ I.4.1 Eoliennes a axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [MUL01]. Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. Selon [AIM04] Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivantes :

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

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).
- Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché [AHM.4].

➢ I.4.2 Eoliennes a axe horizontal :

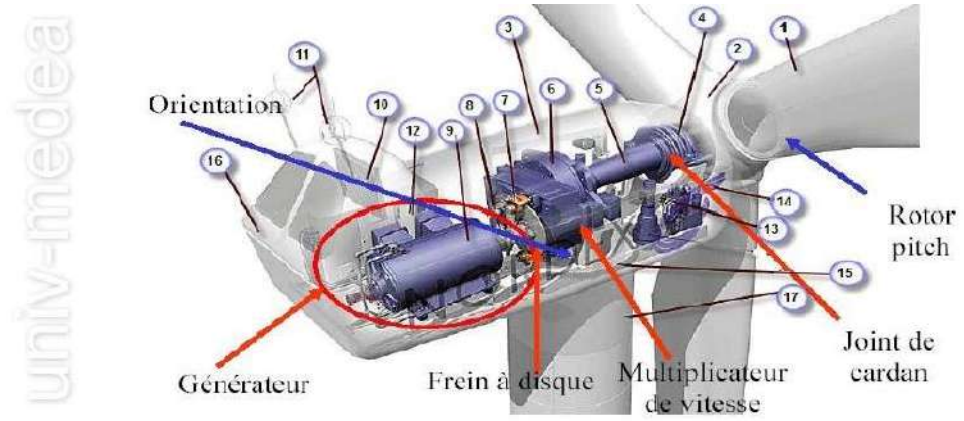
Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [MUL01].

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6 MW.

I.4.2.1. Principaux composants d'une éolienne horizontale :

Il existe plusieurs configurationspossiblesd'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différencestrès importantes. Néanmoins, uneéolienneclassique estgénéralement constituée de trois principaux éléments :



1	pales	7	frein à disque	13	centrale hydraulique
2	Moyeu de rotor	8	accouplement	14	mécanisme d'orientation des pales
3	nacelle	9	génératrice	15	paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque
4	cardan	10	radiateur de refroidissement		
5	transmission	11	centrale de mesure du vent	16	capot
6	multiplicateur de vitesse	12	contrôle	17	mat

FigureI.6 :composants d'une éolienne

- **Le mat**

Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondationimplantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et lastabilité de l'éolienne. Le mat des éoliennes atteint aujourd'hui 80m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100m). Les éoliennes si elles sont si haut perchées c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur , où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles:arbre, maisons .. Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [MUL01].

- **Un rotor**

Composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à et la fois légers assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone . Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor[ELA04].

Un rotor balaye un disque circulaire au cour d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque .la surface A d'un disque circulaire est égale à :

$$A=\pi.r^2=\pi.(d/2)^2$$

Ou r est le rayon du disque circulaire, d est le diamètre.

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent enénergie mécanique . [ELA04]

- **Une nacelle**

montée au sommet du mat et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [ELA04] . Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électrique descendant à l'intérieur du mat de l'éolienne .

Les différents composants d'une nacelle [HAS09]

- **Le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraine la génératrice électrique.
- **L'arbresecondaire** comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- **La génératrice** : **c'est** elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Un contrôleur** électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne.

Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes taches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent)et une girouette(direction du vent),habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

I.5.Etat de l'art sur les génératrices d'éoliennes

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration [CAM03]. Le contrôle au niveau de cette dernière permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens.

I.5.1. éolienne à vitesse fixe

Dans cette technologie, la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance (Figure I-13), sa vitesse mécanique est fixe et imposée par la fréquence de travail du réseau et/ou par le nombre de paire de pôles de la génératrice.

Il nous faut alors un système d'orientation des pales de l'aérogénérateur pour avoir un fonctionnement au voisinage de synchronisme et aussi un multiplicateur de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

- **Avantage du fonctionnement à vitesse fixe**

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

- Simplicité de système électrique.
- Plus grand fiabilité.
- Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne.
- Moins cher.
- fonctionnement à vitesse variable (+- de la vitesse nominale).

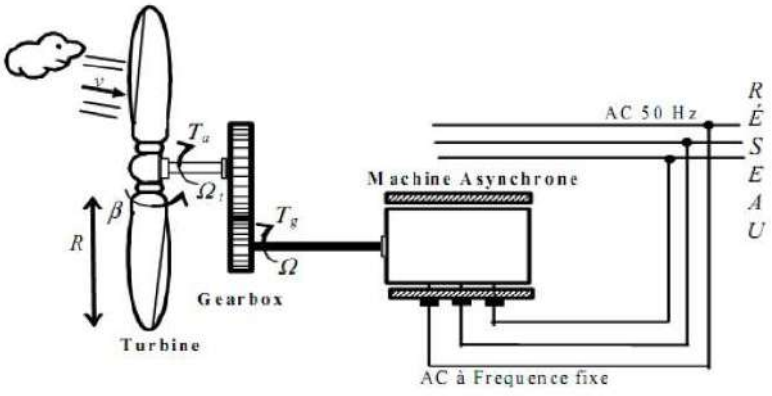


Figure I.7 : Aérogénérateur à vitesse fixe.

I.5.2. éolienne à vitesse variable

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,…), on a cherché l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (figure I.8).

- **Avantage du fonctionnement à vitesse variable**
  - Augmentation du rendement énergétique.
  - Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
  - Réduction des efforts subis par le train de puissance.
  - Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

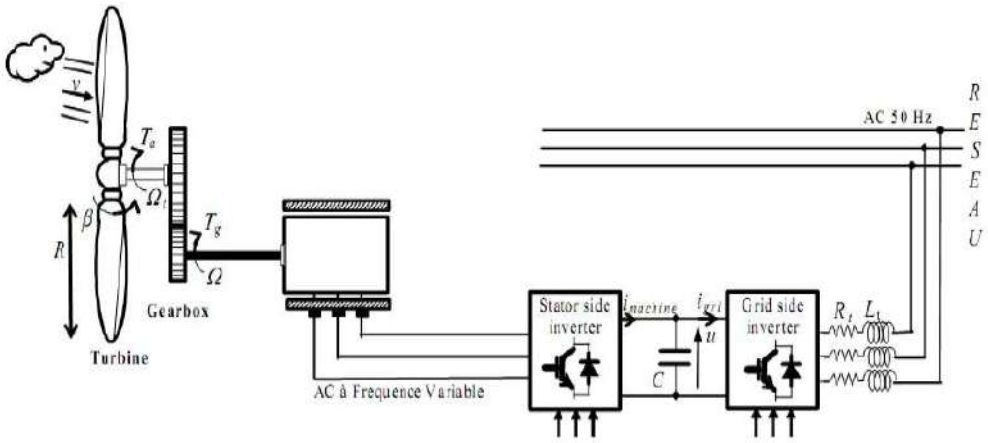


Figure I.8 : Aérogénérateur à vitesse variable.

I.6Les avantages et inconvénients de l'éolien

I.6.1. Avantages de l'éolien :

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas Les avantages et inconvénients de l'éolien de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- Les propriétaires fonciers qui accueillent des éoliennes reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'est fixée l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie.
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du pétrole.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.
- Les éoliennes permettent grâce à la taxe professionnelle de participer au développement local des communes avec une contribution annuelle de l'ordre de 10 000 € par MW d'énergie éolienne produite (ce chiffre peut varier en fonction des communautés de communes concernées par les installations d'éoliennes).
- Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.
- Le prix de revient d'une éolienne a fortement diminué depuis 2011 suite aux économies d'échelle qui ont été réalisées sur leur fabrication.
- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.

➢ **I.6.2 Inconvénients de L'éolien :**

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

I.7Différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens

Le tableau 1.3 résume les principaux types de machines électriques utilisées dans la construction des éoliennes

Générateur	Transmission	Conver-tisseur	Puissance	Société
MADA	Avec multiplicateur	Une partie de la puissance totale	1.5 MW, 3 MW, 5 MW	Sinovel
			2 MW, 2.6 MW, 3 MW	Vestas
			1.5 MW	GE wind
			0.85 MW, 2 MW, 2.5 MW	Gamesa
			2.4 MW, 2.5 MW, 3.0 MW, 3.3 MW	Nordex
			1.0 MW, 1.5 MW, 2.0 MW, 2.5 M	Dong Fang
			2.0 MW, 3.0 MW, 6.0 MW	REpower
			2.1 MW	Suzlon
MSAP	Avec multiplicateur	Sur le flux de la puissance (TP)	3.3 MW	Vestas
			2.5 MW	GE wind
			3.0 MW	WinwinD
			4.5 MW, 5.0 MW	Gamesa
	Sans multiplicateur		8.0 MW	Vestas
			4.0 MW	GE wind
			3 MW, 6 MW	Siemens Wind
MAS	Avec multiplicateur	(TP)	6.0 MW	Sinovel
MS	Avec multiplicateur	(TP)	0.8 MW-7.58 MW	Enercon

Tableau I-3 : principaux types de machines électriques utilisées dans la construction des éoliennes.

I.7.1.Systèmes éoliens utilisant les génératrices synchrones

➢ **Exploitation dans l'éolien**

Le champ crée par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statorique.

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raison, on place systématiquementune interfaceélectronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [RAI02],[NER99].

L'utilisation de génératrice synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à la bobinage inducteur ou à aimant permanent. Les génératrices synchrones a aimant permanent étaient, jusqu'ici, très peu utilisées principalement pour le raison suivantes :

- Prix relativement élevé des aimants (constitués de terres rares) ;
- Démagnétisation progressive découlant de l'utilisation de ces aimants en présence de champs magnétique intense régnant dans le générateur.

Pour une puissance désirée, on a le choix entre une petite génératrice (à faible nombre de pôles) tournant à grande vitesse, ou une génératrice de grande dimension (présentant un grand nombre de pôles) mais tournant plus lentement.

- **Avantages et inconvénients**

Le tableau 1.4 résume les principaux avantages et inconvénients des génératrices synchrones.

Avantages	Inconvénients
➢ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens ; ➢ Absence de boite de vitesse ; ➢ Fonctionnement a vitesse variable sur toute la plage de vitesse.	➢ Machine spécifique ➢ Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moinsa 100% de la puissance nominale ; ➢ Grand diamètre de la machine.

Tableau I-4 : Avantages et inconvénients de génératrices synchrones.

I.7.2. Systèmes éoliens utilisant les génératrices asynchrones

L'éolienne dans cette configuration entraine une génératrice asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement a une éolienne a vitesse fixe, les tensions et les fréquences a la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne, la commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu.

- **Avantages et inconvénients**

Le tableau 1.5 résume les principaux avantages et inconvénients des génératrices asynchrones.

Avantage	Inconvénient
➢ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.	➢ Electronique de puissance dimensionnée au moinsà 100% de la puissance nominale.

Tableau I-5 : Avantages et inconvénients de génératrices asynchrones.

I.7.3.Systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation

- **Principe de la machine asynchroneàdouble alimentation**

Dans cette configuration le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau et le convertisseur de puissance se trouve sur le circuitrotorique (figure1.18). La commande du redresseur permet de contrôler le fonctionnement de la génératrice en imposant la tension des enroulements rotorique. La commande de l'onduleur permet de maintenir la tension du bus constante.

- **Avantages et inconvénients**

Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissancestatoriquedans la configuration classique. Le tableau 1.6 résume les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation de cette génératrice.

Avantages	Inconvénients
➢ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens ; ➢ Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale ; ➢ Fonctionnement à vitesse variable (± 30% de vitesse nominale).	➢ Maintenance du multiplicateur ➢ Commande complexe ; ➢ Oscillations mécanique.

Tableau I-6 : Avantages et inconvénients de la génératriceasynchrone à double alimentation.

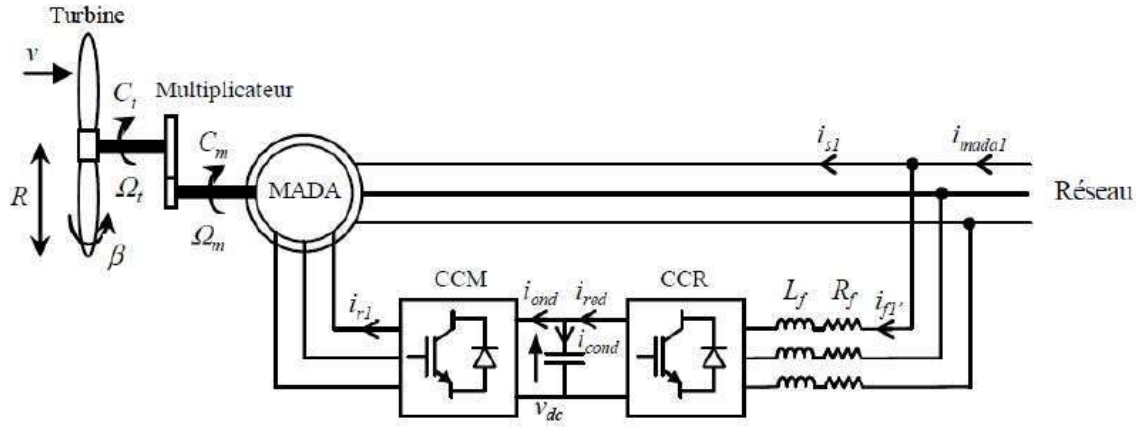


Figure I.9 : Eolienne basée sur une MADA connectée au réseau [GHE11].

I.8.Structure des machines asynchrones à double alimentation :

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

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

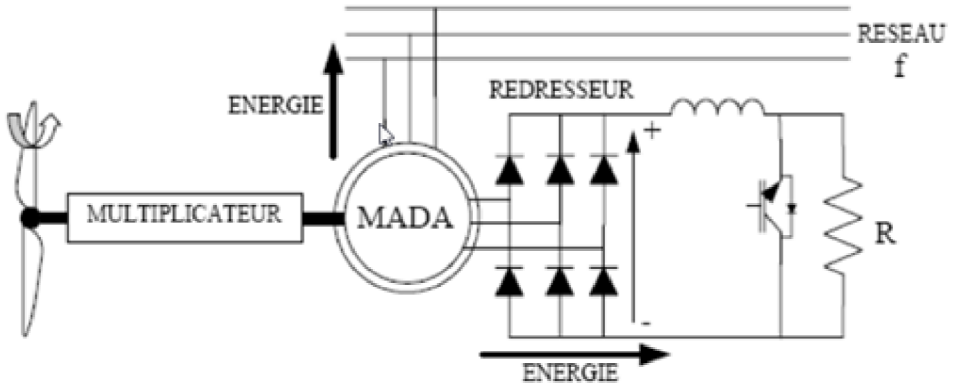
- **Procédure de couplage :**

Pour coupler l'éolienne au réseau, on va suivre la procédure suivante :

- On démarre le système avec le stator de la MADA relié sur une charge.
- On règle ensuite l'amplitude des courants statoriques de manière à ce que tensions statoriques de la MADA aient même amplitude que les tensions du réseau.
- On couple la MADA sur le réseau.
- On débranche la charge maintenant située en parallèle du réseau.On peut maintenant réguler le transit de puissance vers le réseau.

I.8.1.Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Cetteconfiguration à vitesse variable est représentée sur la figure(I.19), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [6]. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

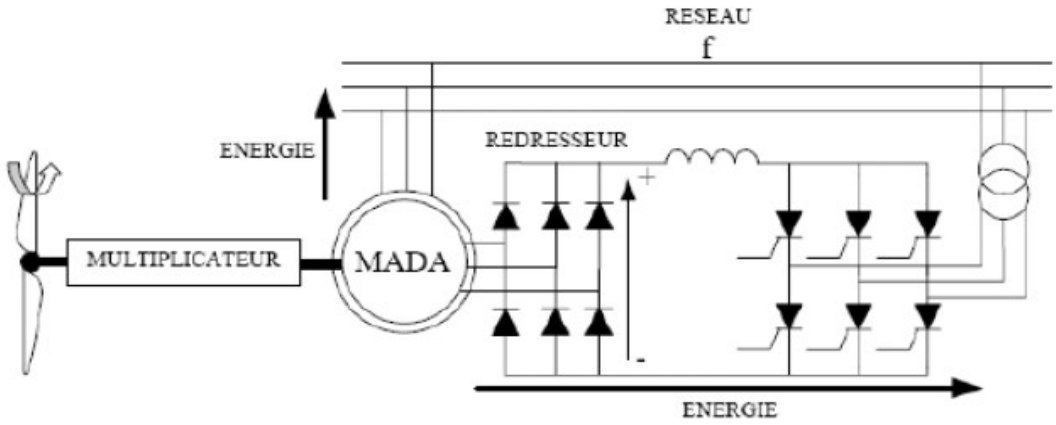


FigureI.10 :.MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique

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

I.8.2.Machine asynchrone à double alimentation : structure de Kramer :

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de kramer) Figure (I.5).

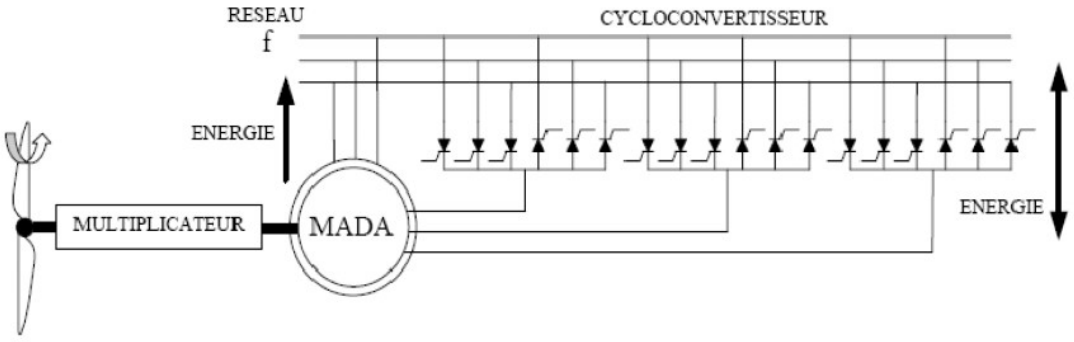


FigureI.11 : Machine asynchrone à double alimentation : structure de kramer

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux et il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle du synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée, au profit de la structure de Schrbius avec convertisseur à IGBT.

I.8.3.Machine asynchrone à double alimentation : structure de Scherbius avec cycloconvertisseur :

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseurfigure (I.12), l'ensemble est alors appelé structure de Schrbius.

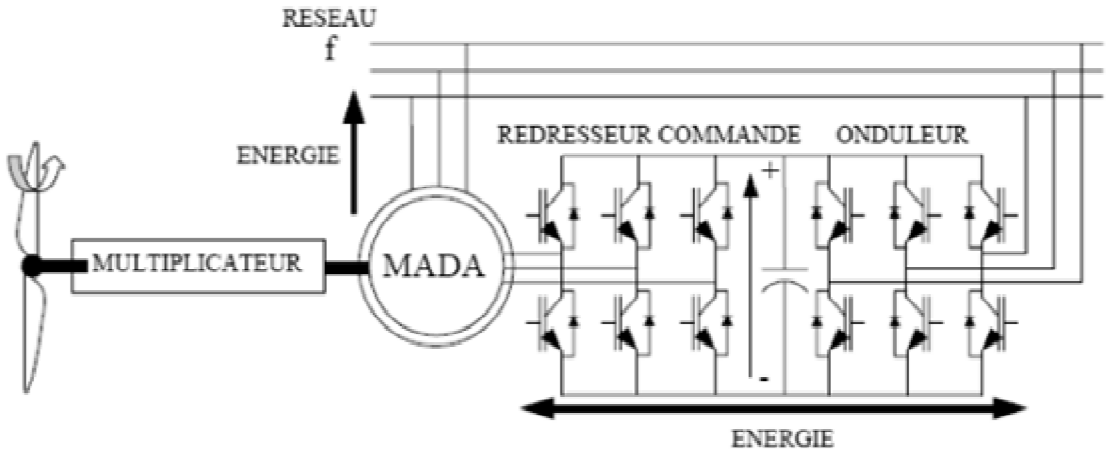


FigureI.12 : Structure de Schrbius avec cycloconvertisseur

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la (Figure I.11). En effet si la variation du glissement doit rester inférieur à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone).

I.8.4. structure de Scherbius avec convertisseurs MLI de la MADA :

Cette configuration Figure(I.13) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [13]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'impulsions(MLI) dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal(rejet des premiers harmonique non nuls vers les fréquence élevées).



FigureI.13 :structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que les autres types de MADA. Plusieurs études récentes, confirmées par des relations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable.

La bi-directionalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance coté réseau. Si le glissement reste inférieur à 30% autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine est ses pertes représente moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. La puissance totale ainsi produite

peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur MLI peut toutefois entrainer des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements.

I.9Application des machines Asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation a été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70%.

Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée :

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable ;
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation du carburant.

1.9.Conclusion :

Dans ce chapitre, un état de l'art sur les différentes sources d'énergie et en particulier, les différentes configurations de conversion de l'énergie éolienne, basées sur les différents générateurs électriques a été présenté.

Dans la première partie, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, puis, un bref aperçu sur les différents éléments qui lui sont associés.

Dans la deuxième partie, un intérêt particulier a été consacré à la technologie d'éoliennebasé sur la génératrice asynchrone à double alimentation. Cette technologie permet de réduire le dimensionnement des convertisseurs statique à 30% en véhiculant seulement la puissance de glissement. En outre, elle permet un réglage de la puissanceréactive,ces avantages de la GADA permettent de minimiser les pertes et le cout de production de l'énergie électrique.

La machine asynchrone à double alimentation propose un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'elle autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine.

Le principal avantage des configurations éoliennes basées sur la MADA est l'utilisation d'un convertisseur de pilotage qui permet d'effectuer un contrôle de vitesse de l'arbre. Le principal inconvénient de ces systèmes est le coût élevé de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Pour pouvoir effectuer une commande robuste du système un bon modèle et des paramètres précis de la machine sont necessaires, c'est pour cela que le chapitre suivant est consacré la modélisation de la MADA, nous développons en premier lieu un modèle triphasé de la machine et en second lieu le modèle biphasé basé sur la transformation bipolaire.

II.1 Introduction

La modélisation d'une machine asynchrone est basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. Les méthodes matricielles sont développées et sont devenues les bases pour une approche de modélisation, de simulation, d'identification et de commande [MER07].

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation. Différentes méthodes de modélisation peuvent être envisagées. Certaines d'entre elles sont plus appropriées pour décrire tel ou tel phénomène avec le meilleur compromis précision/temps de calcul. Nous trouvons dans la littérature principalement trois approches de modélisation des machines électriques :

a. La modélisation par éléments finis

Ce type de modélisation est le plus précis. Ces méthodes particulièrement bienadaptées à des géométries complexes renseignent sur l'évolution des champs en tout point ducircuit magnétique. Cependant, le temps de calculs requis par cette approche est important.

b. La modélisation par réseaux de perméances

La modélisation par réseaux de perméances est basée sur le découpage d'un circuitmagnétique en perméances. Cette technique offre de nombreux avantages : le temps de calculest inférieur aux modèles basés sur la méthode par éléments finis, le couplage avec leséquations de circuit électrique est facile. La principale difficulté de cette méthode se situe auniveau de la représentation de l'entrefer de la machine. L'erreur de modélisation est trèssensible au modèle utilisé pour la perméances d'entrefer.

c. La modélisation par les circuits électriques

La modélisation par les circuits électriques est construite à partir des équations électriques de la machine. Cette méthode de modélisation, très simple à formuler,offre un bon compromis temps de calcul/précision. Ce type d'approche est bien adapté à l'élaboration d'algorithmes de commande. Seule cette dernière méthode de modélisation sera utilisée dans

le présent travail. Elle est aussi appelé "théorie des deux axes". Elle est principalement basée sur un changement de référentiel dit "transformation triphasé-biphasé" [NES07].

II.2Principe de fonctionnement

II.2.1.Production du couple électromagnétique

Quand le stator est alimenté par une source triphasée équilibrée, les courants instantanés circulant dans les trois phases de l'induit créent une force magnétomotrice Fs qui tourne à une vitesse $\Omega s=\omega_s/p$. Du coté rotor, on dispose d'un enroulement triphasé branché à une source alternative ayant une fréquence f_r et qui produit une force magnétomotrice tournante F_r à une vitesse $\Omega r=\omega_r/ p$ par rapport au rotor. Pour que le couple moyen soit constant lorsque le rotor tourne par rapport au stator, il est impératif que les forces magnétomotrices restent synchrones. Ceci impliquerait que le rotor doit lui-même tourner à une vitesse de Ωs- Ωr. Toute autre vitesse produit un glissement continuel des pôles du rotor par rapport aux pôles du stator. Le couple moyen serait alors nul et la machine s'arrêterait .

La force magnétomotrice résultante F est la somme de la force magnétomotrice Fr et la force magnétomotrice Fs, donc on a:

$$\bar{F} = \overline{F}_s + \overline{F}_r \quad \text{(II.1)}$$

Le flux magnétisant résultant dans l'entrefer crée par la force magnétomotrice résultante à une valeur efficace Φm.

Les amplitudes des forces magnétomotrices Fr et Fs sont proportionnelles aux courants qui les créent et au nombre de spires des enroulements :$F_r = N_r.I_r$ *et* $F_s=N_s.I_s$(II.2)

De plus, l'équation (II.1) est une somme vectorielle, le sens du vecteur de la force magnétomotrice résultante $\overline{Fr}$ prend le sens du vecteur -$\overline{Ir}$. Ceci permet d'écrire :

$$\begin{cases} N_s.\overline{Im} = N_s\overline{Im} - N_r.\overline{Ir} \\ Soit \qquad \overline{I_s} = \overline{Im} + \frac{\overline{Ir}}{m} \end{cases} \text{(II. 3)}$$

Le couple électromagnétique qui s'exerce entre les deux forces magnétomotrices représentées par F et Fr est le produit vectoriel de ceux-ci :

$$T_{em} = \bar{F} \wedge \bar{F}_r \text{(II.4)}$$

Si on prend θ comme valeur algébrique de la phase du courant Ir, la valeur algébrique du couple est exprimée par l'équation

$T_{em} = F_r . F . \sin(\pi/2 - \theta)$(II.5)

LaFigure (II.1)présente le diagramme vectoriel des forces magnétomotrices avec le déphasage entre Fr et F en mode moteur et générateur.

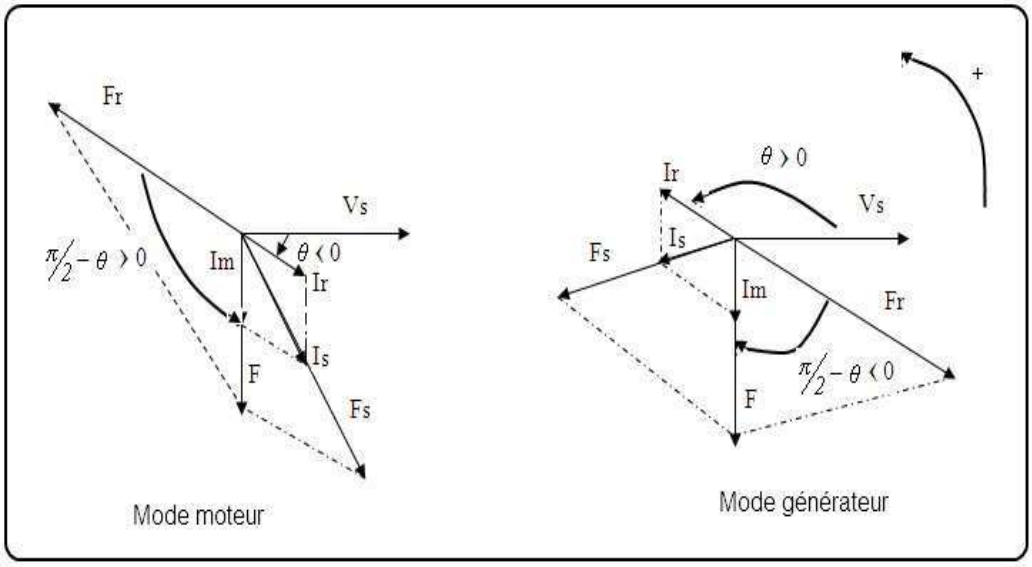


Figure II.1: Diagramme vectoriel des forces magnétomotrices.

On peut bien voir qu'en agissant sur l'amplitude et la phase du courant au rotorIr, on arrive à contrôler le couple électromagnétique et le facteur de puissance. Cependant, les grandeurs de contrôle accessibles au rotor sont le voltage et la phase de la tension au rotor, donc, on agit plutôt sur ces derniers comme grandeurs de contrôle.

Le vecteur flux $\overline{\Phi}_m$ présent dans l'entrefer de la machine est la résultante du flux créé par les bobinages statorique $\overline{\Phi}_s$ et du flux rotorique $\overline{\Phi}_r$ crée par les bobinages du rotor en rotation. Le circuit magnétique de la machine est représenté schématiquement par celui d'un transformateur avec entrefer dans la Figure (II.2).

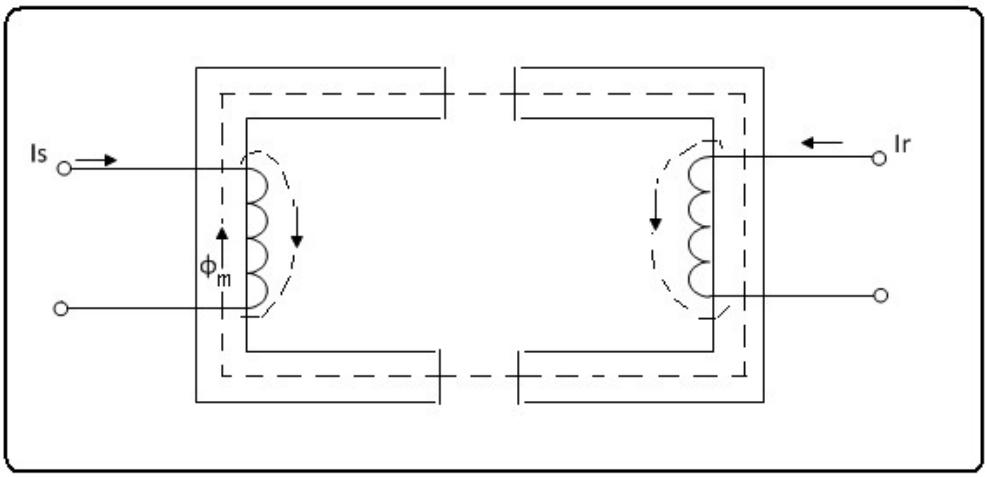


Figure II.2 : Circuit magnétique de la machine.

La Figure (II.3) représente les différents enroulements et les flux présents à l'intérieur de la structure de la MADA.

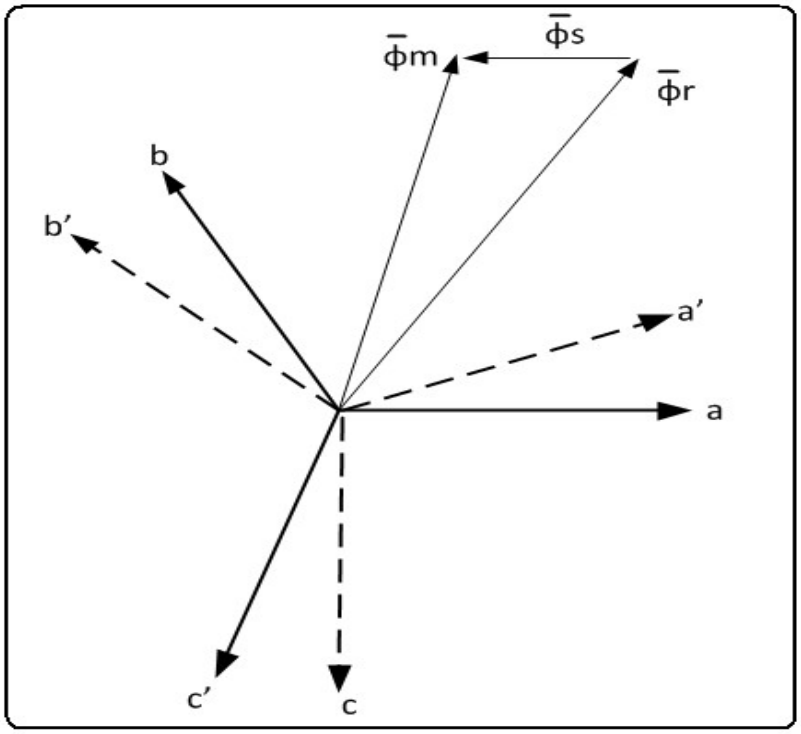


Figure II.3: Configuration des enroulements et des flux dans une MADA.

Avec : a,b.c : Les axes des enroulements statorique.

Et a', b', c' : Les axes des enroulements rotorique.

II.2.2. Fonctionnement en hypo et hyper synchronisme :

On définit le glissement :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{f_r}{f_s} \text{ (II.6)}$$

On en déduit que :

$$\Omega = (1 - g)\Omega_s \text{ (II.7)}$$

Si la source connectée au rotor crée une force magnétomotrice Fr qui tourne dans le sens contraire du sens de rotation de la force magnétomotrice Fs, le glissement devient négative et le rotor tournera plus vite que le champ tournant crée par le statorΩ_s, la machine est dite en fonctionnent hypersynchrone.

Dans le cas où la source connectée au rotor crée une force magnétomotrice Fr qui tourne dans le même sens que le sens de rotation de la force magnétomotrice Fs, le glissement est positive et le rotor tournera moins vite que le champ tournant crée par le statorΩ_s, la machine est dite en fonctionnent hyposynchrone.

Dans la machine asynchrone à cage classique, un signe négatif du glissement traduit un fonctionnement générateur de la machine, ce qui peut porter confusion par rapport à la compréhension du principe de fonctionnement de la MADA. Dans la machine asynchrone doublement alimentée, le signe de glissement traduit un fonctionnement en hypo ou hypersynchronsime et non pas le mode de fonctionnement de la machine (Moteur ou générateur).

De plus, avec la MADA il est même possible de fonctionner en synchronisme ($\omega = \omega_s$) tout en atteignant une valeur de couple élevée. En effet, en considérant le schéma équivalent du circuit électrique au rotor à la pulsation ω_rFigure (II.4), le courant au rotor Ir peut être exprimé par la loi de Kirchhoff.

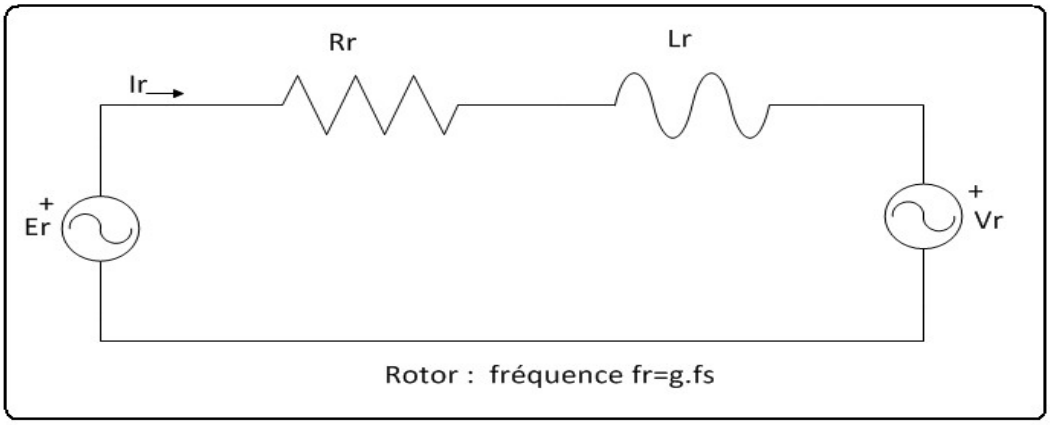


Figure II.4: Circuit électrique au rotor.

Er : Tension efficace électromotrice induite par le champ du rotor dans un enroulementrotorique.

Vr : Tension efficace de la source alternative connectée au rotor.

Rr, Lr : Paramètres du circuit du rotor.

A une pulsationω_r= *0*, la force magnétomotrice au rotor Fr est stationnaire car la valeur efficace de la tension induite dans les enroulements du rotor est nulle (Er=0), la source de tension extérieure connectée au rotor est une tension continue qui délivre un courant continu:

$$I_r = \frac{V_r}{R_r} \text{ (II.8)}$$

Le contrôle en module et en phase de la tension au rotor permet d'atteindre des forts courants rotoriques à la vitesse synchrone. Nous présentons les résultats obtenus pour un point de fonctionnent très proche du synchronisme ($\Omega \approx \Omega_s$) en mode moteur pour un couple et un facteur de puissance imposés [BEN16].

Couple (N.m)	Vitesse (rpm)	Facteur de puissance	Résistance Rr (Ω)	V_r (V)	$I\,r$ (A)
16300	990	1	0.0053	5.2	1603

Tableau II.1: Point de fonctionnement en synchronisme.

II.2.3. Fonctionnement moteur et générateur :

Pour un fonctionnement en génératrice, la MADA requiert un couple sur l'arbre de la machine dans le même sens que le sens de rotation du champ tournant Fs. L'effet de ce couple provoque un décalage en avant des pôles du rotor par rapport aux pôles du stator et par conséquent la force magnétomotrice du rotor Fr est en avance sur les forces magnétomotrices Fs et F Figure (II.5). Le couple électromagnétique de la machine qui s'exerce sur le rotor devient un couple résistant dans le sens contraire du sens de rotation de la machine.

Pour un fonctionnement en moteur, la force magnétomotrice résultante F est en avance sur la force magnétomotrice Fr. Le couple sur l'arbre de la machine est un couple résistant dans le sens contraire de la vitesse de rotation du champ tournant Fs et le couple électromagnétique T_{em} de la machine est un couple moteur dans le même sens que le sens de rotation.

Chaque mode de fonctionnement requiert une commande appropriée des tensions rotoriques, ce qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine et offrir ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hyposynchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

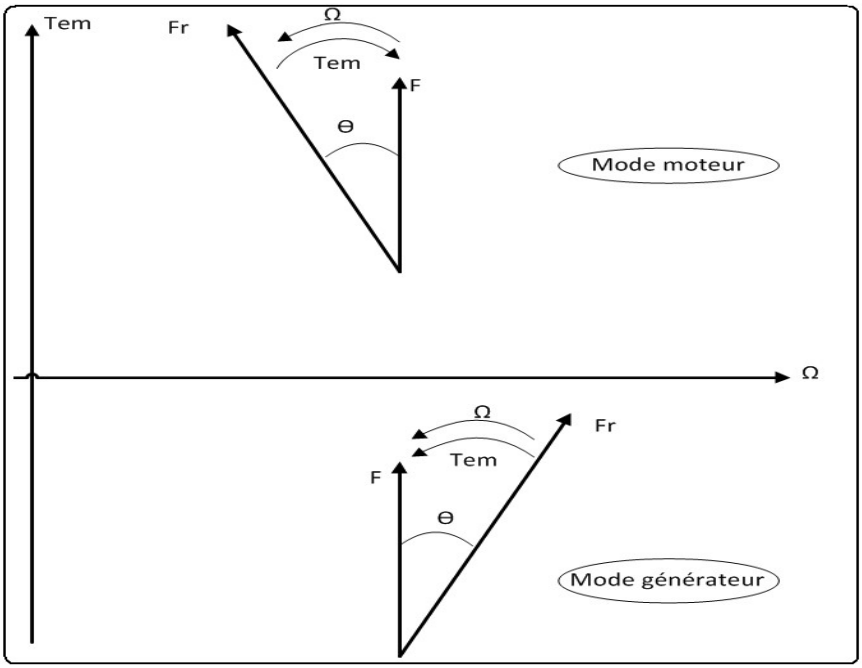


Figure II.5 : Diagramme vectoriel des forces magnétomotrices en mode moteur et générateur.

II.3.Transfert de puissance dans la MADA

La présence du convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler la puissance entre le stator et le réseau. La Figure II.6 montre les différentes configurations de fonctionnement

de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire du convertisseur. $P_{rés}$ est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_s, la puissance transitant par le stator, P_r, la puissance transitant par le rotor, et P_{mec}, la puissance mécanique.

Pour le transfert de puissance, nous distinguons quatre cas possibles :

- Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau au stator. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance Pr ‹‹Puissance de glissement›› est renvoyée sur le réseau, c'est le fonctionnement moteur hyposynchrone. Les conditions mathématiques qui traduisent ce fonctionnement en négligeant tout les pertes sont :

$$g>0,\ P_S>0,\ P_{mec}>0,\ P_R=g.P_S>0.$$

La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce fonctionnement, cependant la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

- En mode moteur hypersynchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique. La puissance est donc fournie à la machine par le stator et le rotor, les conditions mathématiques sont les suivants :

$g<0,\ P_S>0,\ P_{mec}>0,\ P_R=g.P_S<0.$

La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

- En fonctionnement générateur hyposynchrone, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. La puissance est fournie au réseau par le stator et une partie de cette puissance transitant par ce dernier est réabsorbée par le rotor. Les conditions mathématiques sont les suivants :

$$g>0.\ P_S<0.\ Pm<0.\ P_R=g.P_S<0.$$

La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

- En mode hypersynchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près par le rotor et le stator.

Les conditions mathématiques sont les suivants :

$g<0$, $P_S<0$, $Pm<0$, $P_R=g.P_S>0$.

La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce fonctionnement mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quel que soit la vitesse de rotation (hypo ou hypersynchronisme) et la récupération de la puissance de glissement.

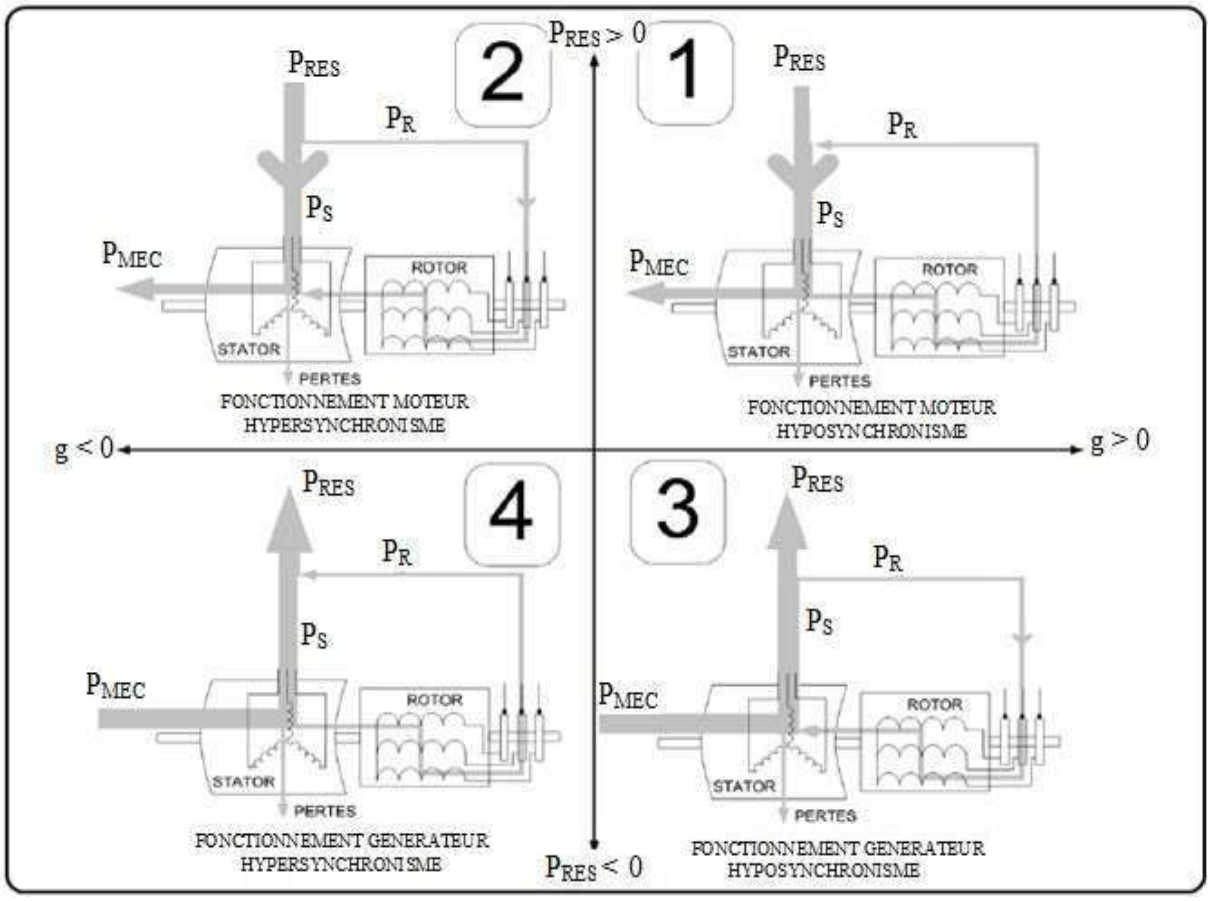


Figure II.6 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.

II.4Avantages etInconvénients de la MADA :

Les avantages et les quelques inconvénient de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable sont :

II.4.1 Les avantages de la MADA

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- La partage des fréqueces entre le stator et le rotor : en effet , dans le cas d'une double alimentation , il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine , réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmenter son rendement.

- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armateurs ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.

- La MADA présente une puissance massique légérement plus elevée que les autres machines a grandes puissances.

- La mesure des courants au stator et au rotor, contrairement à la machine à cage, donnent ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle de flux et de couple électromagnétique [BEN 10].

II.4.2 Les inconvénients de la MADA

Les inconvénients apportés par cette machine sont :

- La machine à bague, dans un milieu corrosif, les bagues peuvent s'oxyder et cela nécessite un entretien particulier. Cependant pour un mêmefonctionnement, les moteurs à bagues demandent un entretien moindre que les moteurs à courant continu.

- La machine à double alimentation requiert un collecteur à trois bagues au rotor. Donc pour une mêmepuissance, ce moteur est un peu plus long et à peine plus lourd que le moteur asynchrone à cage équivalent.

- Le rotor et le stator doivent être relies a l'armoire d'alimentation. Cependant le stator sera généralement connecté par des càbles HT de faible section. L'appareillage est plus important et nécessite un entretien.

- L'aspect multi-convertisseur, augmente le nombre de convertisseur et par conséquent le prix [SAR 00].

II.5 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

La machine asynchrone est représentée sur la figure (II.1) 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*) [BEN12].

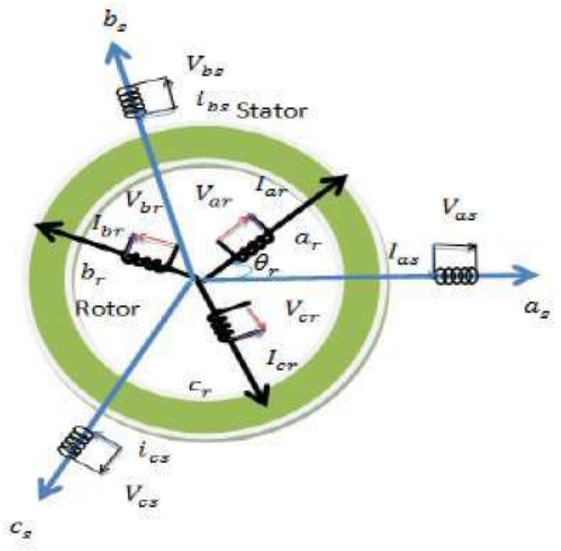


Figure. II.7 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

II.5.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la MADA est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- La f.m.m crée par chacune des phases des deux armatures est supposée sinusoïdale.

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

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

II.5.2 Modèle de la MADA dans le repère abc

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations électriques des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

A : Equations électriques

Les équations de tension des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s].[I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r].[I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \end{cases} \text{(II.9)}$$

Grandeurs statoriques :

$$[\mathrm{V_s}] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix};\ [\mathrm{I_s}] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix};\ [\Phi_\mathrm{s}] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \text{(II.10)}$$

Grandeurs rotoriques :

$$[\mathrm{V_r}] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix};\ [\mathrm{I_r}] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix};\ [\Phi_\mathrm{r}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \qquad \text{(II.11)}$$

B : Equations des flux

L'absence de saturation et la limitation au premier harmonique d'espace nous permettent d'écrire les expressions des flux statorique et rotoriques comme suit :

$$\begin{bmatrix} [\Phi_\mathrm{s}] \\ [\Phi_\mathrm{r}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathrm{L_s}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [\mathrm{L_r}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\mathrm{I_s}] \\ [\mathrm{I_r}] \end{bmatrix} \text{(II.12)}$$

Les quatre sous matrices d'inductances s'écrivent :

$$[\mathrm{L_s}] = \begin{bmatrix} \mathrm{l_s} & \mathrm{M_s} & \mathrm{M_s} \\ \mathrm{M_s} & \mathrm{l_s} & \mathrm{M_s} \\ \mathrm{M_s} & \mathrm{M_s} & \mathrm{l_s} \end{bmatrix} [\mathrm{L_r}] = \begin{bmatrix} \mathrm{l_r} & \mathrm{M_r} & \mathrm{M_r} \\ \mathrm{M_r} & \mathrm{l_r} & \mathrm{M_r} \\ \mathrm{M_r} & \mathrm{M_r} & \mathrm{l_r} \end{bmatrix} \text{(II.13)}$$

$$[\mathrm{M_{rs}}] = [\mathrm{M_{sr}}]^\mathrm{t} = \mathrm{M_{sr}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \text{(II.14)}$$

Les différentes inductances désignent:

l_s: inductance propre d'une phase statorique.

l_r: inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : inductance mutuelle entre phases statoriques.

M_r: inductance mutuelle entre phases rotoriques.

M_{sr}: inductance mutuelle entre stator et rotor.

θ: écart angulaire entre stator et rotor.

C : Equation du couple.

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor :

$$C_{em} = \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_{geom}} = n_p \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_{elect}} \text{ (II.15)}$$

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

$$W_{mag} = \frac{1}{2}([I_s]^t [\phi_s] + [I_r]^t [\phi_r]) \qquad \text{(II.16)}$$

D : Equation mécanique

L'équation mécanique de la MADA est donnée par :

$$J_m \frac{d\Omega_r}{dt} + f_m \Omega_r = C_{em} - C_r \text{ (II.17)}$$

Où :

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{n_p} \quad \text{(II.18)}$$

Avec : J_m Moment d'inertie de la machine, C_{em} couple électromagnétique, C_r couple résistant, et f_m coefficient de frottement de la machine.

Nous constatons la complexité des équations électriques et de l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des

matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps.

II.5.3 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.

II.5.3.1 Transformation de Park

La machine asynchrone à double alimentation est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé.

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au système biphasé s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature.

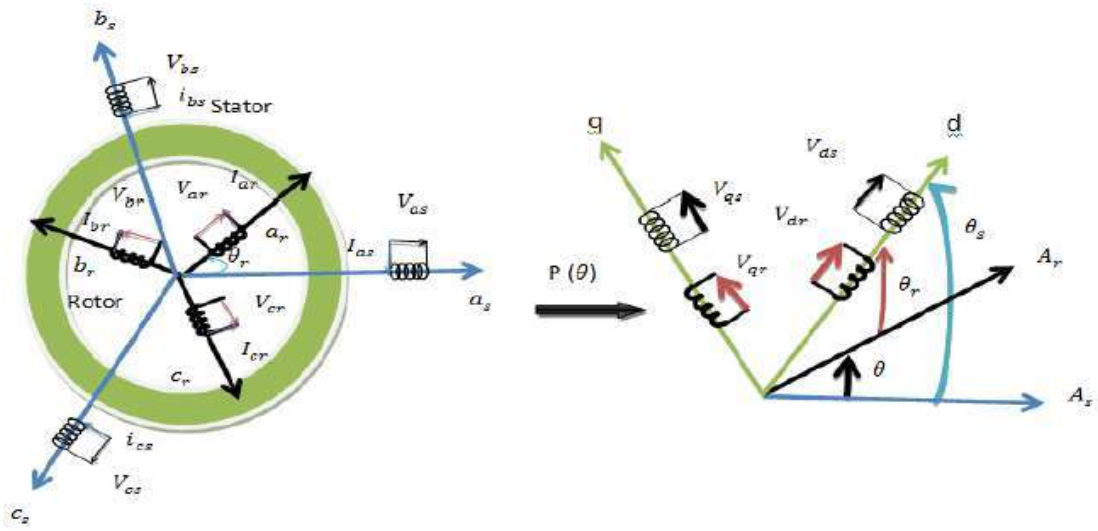


Figure II.8: Représentation de la MADA dans le repère de Park.

Donc pour le passage du système triphasé au système biphasé en utilise la matrice

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(II.19)}$$

Le changement de variables relatifs aux courants, tensions et flux est défini par :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \text{(II.20)}$$

Avec x : tension, courant ou flux, et les indices suivant représentent :

- o: indice de l'axe homopolaire.
- d : indice de l'axe direct.
- q: indice de l'axe en quadrature.

Et pour la transformation inverse on utilise la matrice $[P(\theta)]^{-1}$:

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \text{(II.21)}$$

D'où les transformations inverses des variables :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad \text{(II.22)}$$

II.5.3.2 Equations de la machine dans le modèle de Park

A : Equations de tension

Dans un repère dq tournant à la vitesse ω_a par rapport au stator, les équations (II.23) s'écrivent après application de la transformation de Park aux différentes grandeurs comme suit:

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_\alpha \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dfrac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_\alpha \phi_{ds} \end{cases} \quad \text{(II.24)}$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_\alpha - \omega_m)\phi_{qs} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_\alpha - \omega_m)\phi_{ds} \end{cases} \quad \text{(II.24)}$$

$\omega_a$et ω_m désignent respectivement la vitesse du repère dq et la vitesse du rotor par rapport au stator. Selon l'application envisagée, le repère dq peut être lié au stator (ω_a=0), rotor (ω_r=ω_m) ou au champ tournant ($\omega_a = \omega_s$).

B : Equations des flux

Les différentes expressions des flux statoriques et rotoriques s'écrivent dans le modèle de Park sous la forme suivante:

Pour le stator :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{ds} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{(II.25)}$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{(II.26)}$$

L_s, L_r et M ont pour expressions

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_r = l_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases} \quad \text{(II.27)}$$

Où :

L_s: Inductance propre cyclique du stator.

L_r: Inductance propre cyclique du rotor.

M: Inductance mutuelle cyclique stator-rotor.

C : Les puissances actives et réactives de la MADA

Les puissances actives et réactives côté stator sont:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2}(V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) \end{cases} \text{(II.28)}$$

Les puissances actives et réactives côté rotor sont :

$$\begin{cases} P_r = \frac{3}{2}(V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr}) \\ Q_r = \frac{3}{2}(V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr}) \end{cases} \quad \text{(II.29)}$$

D : Equation du couple)

Dans le modèle de Park, l'expression du couple s'écrit de la manière suivante:

$$C_{em} = PM(I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad \text{(II.30)}$$

P : désigne le nombre de pair de pôles de la machine.

II.5.3.3Modèle à quatre paramètres électriques

En fonctionnement normal de la machine asynchrone, les tensions V_{dr}et V_{qr}sont nulles, ce qui a pour conséquence de réduire le nombre de paramètres à quatre lorsqu'on effectue le changement de variables suivant:

$$I_{dr} = \frac{M}{L_r} I'_{dr} \text{et} I_{qr} = \frac{M}{L_r} I'_{qr} \text{(II.31)}$$

En introduisant le coefficient de dispersion$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$, les constantes de temps rotorique.

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$etstatorique $T_s = \frac{L_s}{R_s}$, les équations (II.31) deviennent:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_s \frac{d}{dt}(I_{ds}) + (1-\sigma) L_s \frac{d}{dt}(I'_{dr}) \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_s \frac{d}{dt}(I_{qs}) + (1-\sigma) L_s \frac{d}{dt}(I'_{qr}) \\ V_{dr} = \frac{1}{T_r}(I'_{dr}) + \frac{d}{dt}(I'_{dr}) + \frac{d}{dt}(I_{ds}) + P\Omega I'_{qr} + P\Omega I_{qs} \\ V_{qr} = \frac{1}{T_r}(I'_{qr}) + \frac{d}{dt}(I'_{qr}) + \frac{d}{dt}(I_{qs}) + P\Omega I'_{dr} + P\Omega I_{ds} \\ J_m \frac{d\Omega}{dt} = P(1-\sigma) L_s (I_{qs} I'_{dr} - I_{ds} I'_{qr}) - f_m \Omega - C_s \end{cases} \quad \text{(II.32)}$$

Et, en faisant apparaître le vecteur d'état $[I_{ds} \;\; I_{qs} \;\; I'_{dr} \;\; I'_{qr} \;\; \Omega]^t$ nous obtenons les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(I_{ds}) = -\frac{1}{\sigma T_s}(I_{ds}) + \frac{1-\sigma}{\sigma} P\Omega (I_{qs}) + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}(I'_{dr}) + \frac{1-\sigma}{\sigma} P\Omega (I'_{qr}) + \frac{V_{ds}}{\sigma L_s} \\ \frac{d}{dt}(I_{qs}) = -\frac{1-\sigma}{\sigma} P\Omega (I_{ds}) - \frac{1}{\sigma T_s}(I_{qs}) - \frac{1-\sigma}{\sigma} P\Omega (I'_{dr}) + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}(I'_{qr}) + \frac{V_{qs}}{\sigma L_s} \\ \frac{d}{dt}(I'_{dr}) = \frac{1}{\sigma T_s}(I_{ds}) - \frac{P\Omega}{\sigma}(I_{qs}) - \frac{1}{\sigma T_r}(I'_{dr}) - \frac{P\Omega}{\sigma}(I'_{qr}) - \frac{V_{ds}}{\sigma L_s} \\ \frac{d}{dt}(I'_{qr}) = \frac{P\Omega}{\sigma}(I_{ds}) + \frac{1}{\sigma T_s}(I_{qs}) + \frac{P\Omega}{\sigma}(I'_{dr}) - \frac{1}{\sigma T_r}(I'_{qr}) - \frac{V_{qs}}{\sigma L_s} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{P}{J_m}(1-\sigma) L_s (I_{qs} I'_{dr} - I_{ds} I'_{qr}) - \frac{f_m}{J_m}\Omega - \frac{C_s}{J_m} \end{cases} \quad \text{(II.33)}$$

L'équation (II.33), montre que le fonctionnement de la machine dépend des quatre paramètres électriques suivants :

$$[\sigma \;\; T_s \;\; L_s \;\; T_r]$$

Et des trois paramètres mécaniques :

$$[J_m, f_m, C_s]$$

II.5.3.4 Modèle à cinq paramètres électriques

Dans un repère lié au stator, les équations électriques de la machine sont déduites des équations (II.30) et (II.31) dans lesquelles ω_a est égale à zéro. En ajoutant l'équation mécanique, la machine sera entièrement décrite par le système suivant:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_s \frac{d}{dt}(I_{ds}) + M \frac{d}{dt}(I_{dr}) \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_s \frac{d}{dt}(I_{qs}) + M \frac{d}{dt}(I_{qr}) \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + L_r \frac{d}{dt}(I_{dr}) + M \frac{d}{dt}(I_{ds}) + P\Omega L_r I_{qr} + P\Omega M I_{qs} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + L_r \frac{d}{dt}(I_{qr}) + M \frac{d}{dt}(I_{qs}) + P\Omega L_r I_{dr} - P\Omega M I_{ds} \\ J_m \frac{d\Omega}{dt} = PM(I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) - f_m \Omega - C_s \end{cases} \quad \text{(II.34)}$$

En réarrangeant les équations précédentes de façon à faire apparaître le vecteur d'état $[I_{ds} \;\; I_{qs} \;\; I_{dr} \;\; I_{qr} \;\; \Omega]^t$, nous obtenons les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(I_{ds}) = -\frac{L_r R_s}{A}(I_{ds}) + \frac{P\Omega M^2}{A}(I_{qs}) + \frac{MR_r}{A}(I_{dr}) + \frac{P\Omega M R_r}{A}(I_{qr}) + \frac{L_r}{A}(V_{ds}) \\ \frac{d}{dt}(I_{qs}) = -\frac{P\Omega M^2}{A}(I_{ds}) - \frac{L_r R_s}{A}(I_{qs}) - \frac{P\Omega M R_r}{A}(I_{dr}) + \frac{MR_r}{A}(I_{qr}) + \frac{L_r}{A}(V_{qs}) \\ \frac{d}{dt}(I_{dr}) = \frac{MR_s}{A}(I_{ds}) - \frac{P\Omega M L_s}{A}(I_{qs}) - \frac{L_s R_r}{A}(I_{dr}) - \frac{P\Omega L_s L_r}{A}(I_{qr}) - \frac{M}{A}(V_{ds}) \\ \frac{d}{dt}(I_{qr}) = \frac{P\Omega M L_s}{A}(I_{ds}) - \frac{MR_s}{A}(I_{qs}) + \frac{P\Omega L_s L_r}{A}(I_{dr}) - \frac{L_s R_r}{A}(I_{qr}) - \frac{M}{A}(V_{qs}) \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{PM}{J_m}(I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) - \frac{f_m}{J_m}\Omega - \frac{C_s}{J_m} \end{cases} \quad \text{(II.35)}$$

Où $A = L_s L_r - M^2$

Le système d'équations (II.34) montre que le fonctionnement de la machine dépend de cinq paramètres électriques [R_s R_r L_s L_r M] et de trois paramètres mécaniques [J_m f_m C_s].

Le rotor d'une machine asynchrone à cage n'est pas accessible directement à l'expérimentation et il est impossible de mesurer séparément les vrais valeurs de $R_r L_r$, et M_m qui figurent dans le système d'équations(II.34). Apres un changement de variables du vecteur d'état, nous allons déduire un modèle à quatre paramètres électriques mesurables, le système (II.27) semble surdimensionné.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la machine asynchrone à double alimentation. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps.

On a présenté :

- Le modèle de la MADA dans le repère (a, b, c) auquel on a appliqué la transformation de Park.
- Le modèle à cinq paramètres électriques de la MADA : dans un repère lié au stator.
- Le modèle à quatre paramètres électriques de la MADA : en fonctionnement normal de la machine, les tensions V_{dr}et V_{qr}sont nulles, ce qui a pour conséquence de réduire le nombre de paramètres à quatre lorsqu'on effectue le changement de variables.

III.1.Introduction

Les origines de la commande vectorielle contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de Blondel sur la théorie de la réaction des deux axes. Toutefois, compte tenu de la technologie utilisée à cette époque, il n'était pas question de transposer cette théorie au contrôle des machines électriques. Ce n'est que vers les années cinquante, grâce à l'utilisation dans l'Europe de l'Est, et plus particulièrement en Allemagne et en Hongrie, de la méthode de phaseur temporel que germa l'idée de la commande vectorielle appelée également contrôle par flux orienté. En 1969, les principes de cette commande ont été définis par Hasse et la première publication internationale au sujet de ce type de commande appliquée aux machines à induction est certainement celle de Blaschke en 1971**.**

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent

III.2Principe de la commande vectorielle

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe d, q et une loi de commande assurant le découplage entre le couple et le flux.

Orle coupleest donné par:

$$Ce = p(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) = \frac{pM_{sr}}{L_r}(\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad \text{(III. 1)}$$

Donc si :

- On choisit un repère lié au champ tournant, ($\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$)
- le flux rotorique est orienté sur l'axe d ($\phi_{dr} = \phi_r$ et $\phi_{qr} = 0$).

Alors le couple devient :

$$Ce = \frac{pM_{sr}}{L_r}(\phi_{dr} i_{qs}) \qquad \text{(III.2)}$$

Et l'évolution du flux rotorique est donnée par :

$$T_r \frac{d\phi_r}{dt} + \phi_r = M_{sr} i_{ds} \qquad \text{(III.3)}$$

Le courant i_{ds} fixe le flux et le courant i_{qs} le couple. On retrouve le comportement d'une machine à courant continu. La liaison du repère d, q avec le champ tournant ($\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$) est assurée par l'autopilotage de la machine. La figure III.1 illustre le principe de la commande vectorielle de la MAS.

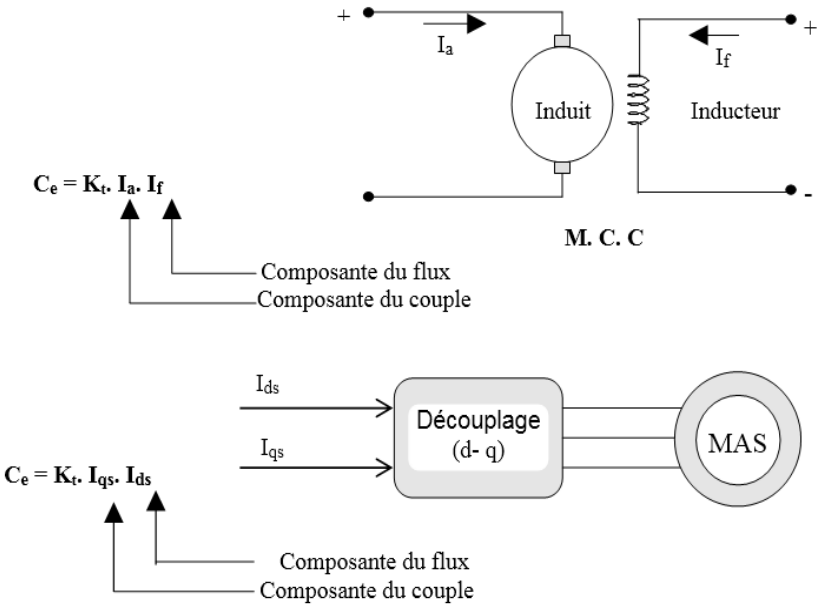


Figure III.1: Principe de la commande découplée.

La régulation de flux rotorique peut être soit directe ou indirecte.

Contrôle direct :le flux est régulé par une contre réaction. Il doit donc être mesuré (rarement) ou estimé. La pulsation statorique ω_s est directement évaluée à partir de la position du flux dans le repère lié au stator.

Contrôle indirect :le flux n'est ni mesuré ni reconstruit. Il est fixé en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux, et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine.

La synthèse de la commande vectorielle se déroule en plusieurs phases [Mendes 93].

- Choisir la machine et son alimentation (source et convertisseur…),
- Choisir la nature des consignes (flux et couple, flux et glissement…),
- Déterminer le repère d, q et la nature de l'orientation (du flux rotorique sur l'axe d par exemple),
- En déduire les variables de commande (courants i_{ds}, i_{qs}, pulsation ω_{gl}…) adaptées au type d'alimentation, un modèle d'état de la machine faisant apparaître la variable intervenant dans l'orientation (le courant, le flux…),
- Déterminer, à partir du modèle d'état, la loi de commande assurant le découplage du flux et du couple et l'autopilotage réalisant l'orientation du repère.

Ce dernier peut être lié au stator : $(\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \ \ et \ \ \frac{\mathrm{d}\theta_r}{\mathrm{dt}} = -\omega)$

Au rotor : $(\frac{d\theta_s}{dt} = \omega \ \ et \ \ \frac{\mathrm{d}\theta_r}{\mathrm{dt}} = 0)$

Ou au champ tournant : $(\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \ \ et \ \ \frac{\mathrm{d}\theta_r}{\mathrm{dt}} = \omega_s - \omega)$

En général, cette dernière solution est retenue pour réaliser le pilotage vectoriel du fait que les grandeurs de réglage deviennent continues dans ce référentiel. Pour agir sur les grandeurs réelles, il faut alors opérer un changement de référentiel c'est-à-dire la transformation inverse de PARK.

Dans ces travaux, nous nous intéressons à une commande en tension. Avec orientation du repère (d, q) lié au champ tournant.

III.3Orientation de flux rotorique

Dans la machine asynchrone, le principe d'orientation consiste à aligner le flux rotorique sur l'axe direct du repère de Park (figure III.2). Il s'agit d'imposer la pulsation de glissement comme suit :

$$\omega_g = \frac{M_{sr} R_r}{L_r \Phi_{dr}} i_{qs} \qquad \text{(III.4)}$$

Ainsi, nous obtenons :

$$\phi_r = \phi_{dr} \quad et \quad \phi_{qr} = 0$$

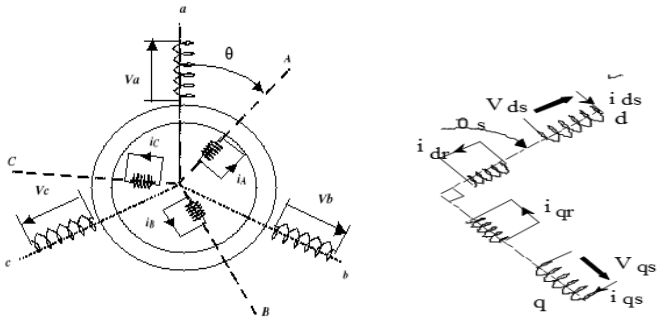


Figure III.2 : Principe d'orientation du flux rotorique.

Le modèle de la MAS après orientation devient :

$$\begin{cases} \dfrac{di_{ds}}{dt} = -\dfrac{1}{\sigma L_s}\left(R_s + R_r\dfrac{M_{sr}^2}{L_r^2}\right)i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \dfrac{M_{sr}R_r}{\sigma L_s L_r^2}\phi_r + \dfrac{1}{\sigma L_s}v_{ds} \\ \dfrac{di_{qs}}{dt} = -\omega_s i_{ds} - \dfrac{1}{\sigma L_s}\left(R_s + R_r\dfrac{M_{sr}^2}{L_r^2}\right)i_{qs} - \dfrac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r}\phi_r\omega + \dfrac{1}{\sigma L_s}v_{qs} \\ \dfrac{d\phi_r}{dt} = \dfrac{M_{sr}R_r}{L_r}i_{ds} - \dfrac{R_r}{L_r}\phi_r \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{p^2 M_{sr}}{jL_r}\Phi_r i_{qs} - \dfrac{f}{j}\omega - \dfrac{p}{j}C_r \end{cases} \quad \text{(III.5)}$$

Après application de la transformation de Laplace, nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned} \phi_r &= \frac{M_{sr}}{1+\dfrac{L_r}{R_r}s}i_{ds} \\ C_e &= \frac{pM_{sr}}{L_r}\phi_r i_{qs} \end{aligned} \quad \text{(III.6)}$$

D'après les équations (III.6), nous constatons qu'il est possible d'agir indépendamment sur le flux rotorique et le couple électromagnétique par l'intermédiaire des composantes du courant statoriques i_{ds} et i_{qs} respectivement.

La principale difficulté de la mise en œuvre de la commande vectorielle de la machine asynchrone réside dans la détermination de la position et l'amplitude du flux rotorique, car ces deux grandeurs ne sont pas mesurables. Or la connaissance de ces deux grandeurs est nécessaire pour contrôler le régime dynamique de la machine.

III.4Réglage de vitesse par la commande vectorielle direct

Afin de déterminer la position et l'amplitude du flux rotorique, l'idée est de mesurer le flux dans la machine à l'aide d'un bobinage supplémentaire ou avec un capteur à effet Hall. Ceci fragilise le moteur et nécessite une construction spéciale de la machine. Le moteur perd sont principal avantage qui est sa robustesse.

Devant la complexité posée par l'installation des capteurs servant à mesurer le flux rotorique. Hasse a proposé une méthode basant sur le modèle dynamique du flux, qui nécessite des grandeurs facilement mesurables tel que les courants, les tensions statoriques et la vitesse de rotation.

Pour déterminer la position et le module du flux, on utilise souvent le modèle de la machine.

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_r}{dt} &= \frac{M_{sr}R_r}{L_r} i_{ds} - \frac{R_r}{L_r}\phi_r \\ \frac{d\phi_s}{dt} &= \omega + \frac{M_{sr}R_r}{L_r\phi_r} i_{qs} \end{aligned} \qquad \text{(III.7)}$$

Le module du flux rotorique et du couple électromagnétique seront contrôlés par contre-réaction. Alors que la pulsation de glissement est directement calculée par l'expression (III.4), à l'aide des grandeurs mesurées ou estimées.

Pour une alimentation en tension (onduleur de tension triphasée à deux niveaux) les tensions statoriques sont obtenues à partir du système (III.8).

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \sigma L_s s i_{ds} + \frac{M_{sr}}{L_r} s\phi_r - \sigma L_s \omega_s i_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \sigma L_s s i_{qs} + \frac{M_{sr}}{L_r} \omega_s \phi_r + \sigma L_s \omega_s i_{ds} \end{aligned} \qquad \text{(III.8)}$$

Afin d'éviter le couplage entre les deux équations, nous utilisons une méthode de compensation statique. Cette méthode consiste à faire la régulation des courants en négligeant les termes de couplage. Ces derniers sont rajoutés à la sortie des correcteurs de courant pour obtenir les tensions de références nécessaires pour le réglage. Les termes supplémentaires sont

déterminés de sorte que les tensions restantes soient en relation du premier ordre avec les courants correspondants.

Les tensions à la sortie des régulateurs sont données par :

$$\begin{aligned} v_{ds}^{r} &= R_s i_{ds} + \sigma L_s s i_{ds} \\ v_{qs}^{r} &= R_s i_{qs} + \sigma L_s s i_{qs} \end{aligned} \quad \text{(III.9)}$$

Les tensions de couplage sont données par :

$$\begin{aligned} v_{ds}^{c} &= -\sigma L_s \omega_s i_{qs} \\ v_{qs}^{c} &= \frac{M_{sr}}{L_r}\omega_s \Phi_r + \sigma L_s \omega_s i_{ds} \end{aligned} \quad \text{(III.10)}$$

D'où les tensions de référence nécessaires pour le réglage sont:

$$\begin{aligned} v_{ds}^{*} &= v_{ds}^{c} + v_{ds}^{r} \\ v_{qs}^{*} &= v_{qs}^{c} + v_{qs}^{r} \end{aligned} \quad \text{(III.11)}$$

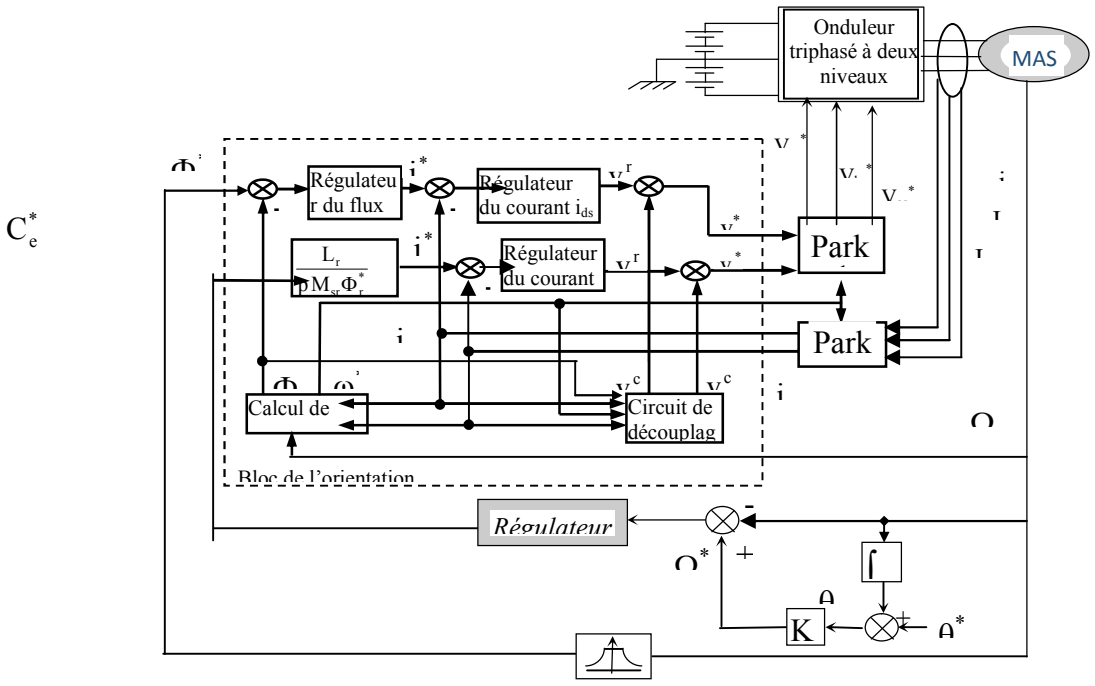


Figure III.3 : *Schéma de principe de la commande vectorielle directe*

Le calcul des régulateurs est effectué à l'aide du principe d'imposition des pôles.

III.4.1. Régulateur du courant i_{qs}

Le régulateur du courant en quadrature fournit la tension v_{qs}^{r} nécessaire pour maintenir le couple à sa valeur de référence.

La fonction de transfert $\frac{i_{qs}}{v_{qs}}$ est donnée par :

$$\frac{i_{qs}}{v_{qs}} = \frac{1/(\sigma L_s)}{s+\rho_s} \qquad \text{(III.12)}$$

Avec $\rho_s = R_s/(\sigma L_s)$

La boucle de régulation du courant est représentée par la figure (III.4).

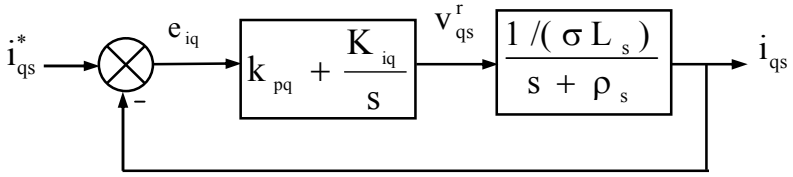


Figure III.4 : Schéma bloc de régulation du courant i_{qs}.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$\frac{i_{qs}}{i^*_{qs}} = \frac{(k_{iq}+sk_{pq})/(\sigma L_s)}{s^2+s(\rho_s+\frac{k_{pq}}{\sigma L_s})+\frac{k_{iq}}{\sigma L_s}} \qquad \text{(III.13)}$$

Le dimensionnement du correcteur est fait à l'aide du principe d'imposition des pôles. Comme le polynôme caractéristique est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles à partie réelle négative pour assurer la stabilité en boucle fermée. Afin d'avoir une réponse avec amortissement relatif optimal, les pôles sont choisis complexes conjuguées avec partie réelle égale à la partie imaginaire.

En imposant les pôles $s_{1,2} = -\rho \pm j\rho$, le polynôme caractéristique s'écrit comme suit :

$$P(s) = s^2 + 2\rho s + 2\rho^2 \qquad \text{(III.14)}$$

Par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$k_{iq} = 2\rho^2 L_s \sigma \qquad k_{pq} = (2\rho - \rho_s)\sigma L_s \qquad \text{(III.15)}$$

III.4.2. Régulateur du courant i_{ds}

Le régulateur du courant direct fournit la tension v^r_{ds} nécessaire pour maintenir le flux à sa valeur de référence.

La fonction de transfert $\frac{i_{ds}}{v_{ds}^{r}}$ est donnée par :

$$\frac{i_{ds}}{v_{ds}^{r}} = \frac{1/(\sigma L_s)}{s+\rho_s} \qquad \text{(III.16)}$$

Les mêmes calculs effectués pour le régulateur du courant i_{qs} sont appliqués à ce régulateur. Les paramètres du régulateur sont donc les mêmes. Ils sont donnés par :

$$k_{id} = 2\rho^2 L_s \sigma \qquad k_{pd} = (2\rho - \rho_s)\sigma L_s \qquad \text{(III.17)}$$

III.4.3. Régulateur du flux Φ_r

La boucle externe est consacrée pour la régulation du flux rotorique (la grandeur ayant la dynamique la plus lente). Pour avoir un bon fonctionnement de la machine, le flux est maintenu constant à sa valeur nominale.

D'après l'équation (II.8), nous avons :

$$\frac{\phi_r}{i_{ds}} = \frac{M_{sr}R_r / L_r}{\rho_r + s} \qquad \text{(III.18)}$$

Avec: $\rho_r = R_r/L_r$

Comme la dynamique du courant est plus rapide que la dynamique du flux, le courant i_{ds} est supposé déjà atteint sa valeur de référence i_{ds}^{*} ($\frac{i_{ds}}{i_{ds}^{*}} = 1$).

D'où le schéma bloc de régulation du flux rotorique.

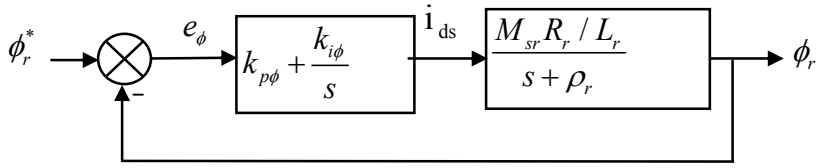


Figure III.5 : Schéma bloc de régulation du flux ϕ_r .

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{\phi_r}{\phi_r^*} = \frac{(k_{i\phi} + sk_{p\phi})M_{sr}R_r / L_r}{s^2 + s(\rho_r + k_{p\phi}\frac{M_{sr}R_r}{L_r}) + \frac{k_{i\phi}M_{sr}R_r}{L_r}} \qquad \text{(III.19)}$$

De la même manière, pour dimensionner le correcteur, nous faisons appel au principe d'imposition des pôles.

En imposant deux pôles ($s_{1,2} = -\rho \pm j\rho$), les paramètres du régulateur seront :

$$k_{i\phi} = 2\rho^2 L_r / (M_{sr}R_r) \qquad k_{p\phi} = (2\rho - \rho_r)L_r / (M_{sr}R_r) \qquad \text{(III.20)}$$

III.4.4. Réglage de la vitesse

La boucle la plus externe est la boucle de régulation de la vitesse (la grandeur mécanique ayant une dynamique la plus lente). Pour cette raison, les pôles imposés pour la boucle externe sont plus proches à l'origine du plan des racines par rapport aux pôles de la boucle interne.D'après l'équation mécanique, nous avons :

$$\frac{\omega}{C_e} = \frac{p/j}{s+\rho_m} \tag{III.21}$$

Avec ρ_m=f/j

D'où le schéma bloc de la boucle de régulation de la vitesse :

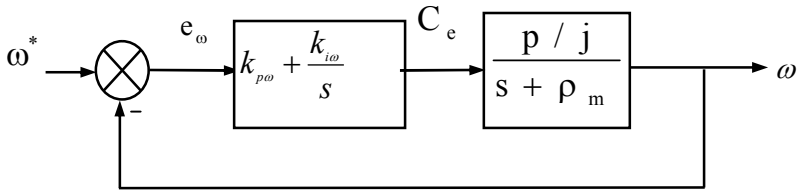


Figure II.6 : Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation ω_r.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{\omega}{\omega^*} = \frac{(k_{i\omega} + sk_{p\omega})p/j}{s^2 + s(\rho_m + k_{p\omega}\frac{p}{j}) + k_{i\omega}\frac{p}{j}} \tag{III.22}$$

Par imposition des pôles en boucle fermée, nous obtenons les paramètres du correcteur.

$$k_{i\omega} = 2\rho^2 j/p \qquad k_{p\omega} = (2\rho - \rho_m)j/p \tag{III.23}$$

III.4.5. limitation du courant i_{qs}

Afin de protéger les semi-conducteurs constituants l'onduleur, il faut atténuer tout dépassement possible du courant i_{qs}. La limitation du courant peut être indirecte en agissant sur les pôles imposés, mais cette méthode rend le système plus lent. La limitation directe repose sur un simple dispositif d'écrêtage définit comme suit :

$$i^*_{qsl} = \begin{cases} i^*_{qs} & si \left|i^*_{qs}\right| \le i_{qs\,max} \\ i_{qs\,max}.signe(i^*_{qs}) & si \left|i^*_{qs}\right| \ge i_{qs\,max} \end{cases} \tag{III.26}$$

Cette limitation provoque un effet d'emballement de l'action intégrale (effet wind up). Ainsi l'état du régulateur doit être corrigé à l'aide d'un système d'anti-wind up afin d'éviter un dépassement de la commande dû au fait que le régulateur continu à sommer une erreur qui ne correspond pas à la commande nécessaire [Bühler 86].

L'état du régulateur doit être corrigé comme suit :

$$e_{\omega l} = e_{\omega} - \frac{1}{k_{\omega}(T_{\omega} + h)}(i_{qs}^{*} - i_{qsl}^{*})\frac{p\,M_{sr}\,\phi_{r}^{*}}{L_{r}} \tag{III.27}$$

Remarque :

Le flux est maintenu constant à sa valeur nominale (Φ_{rN}) lors du fonctionnement à une vitesse inférieur à la vitesse de rotation nominale de la machine ($\Omega_N=\omega_N/p$). Cependant, le flux doit être diminué lorsque la vitesse dépasse sa valeur nominale afin de limiter la tension d'alimentation de la machine. Pour ce fait, nous définissons le flux de référence comme suit :

$$\phi_{r}^{*} = \begin{cases} \phi_{rN} & \text{si} \quad |\Omega| \le \Omega_{N} \\ \dfrac{\Omega_{N}}{\Omega}\Phi_{rN} & \text{si} \quad |\Omega| \ge \Omega_{N} \end{cases} \tag{III.28}$$

III.4.6. Intérêts et inconvénients

Le principal intérêt de la méthode directe est de rester simple de mise en œuvre. En effet, elle permet de découpler totalement le couple et le flux de la machine asynchrone avec une loi de commande qui nécessite peu de calculs. De plus, un seul paramètre est réellement important: la constante de temps rotorique T_r. Les autres paramètresσ, L_s n'interviennent que dans l'estimation du couple et lors du calcul du courant i_{qs} de référence, l'éventuelle mauvaise connaissance de ces paramètres sera compensée par le correcteur de vitesse ou de position.

Une estimation du flux est réalisée, cela engendrait un couplage entre le couple et le flux dépendant du niveau de bruit contenu dans l'estimation. Mais cette estimation du flux permet de palier le principal inconvénient de la méthode indirecte, à savoir la dépendance vis-à-vis de la bonne imposition des courants statoriques. En effet, si en raison de la saturation de l'onduleur $i_{ds}\neq i_{ds}^{*}$ et $i_{qs}\neq i_{qs}^{*}$, l'orientation du champ n'est pas perdue: l'estimateur de flux

connaît l'état réel de la machine par la mesure des courants statoriques et de la position (ou de la vitesse).

Le principal inconvénient de cette méthode est de réaliser une estimation en boucle ouverte du flux sans aucune correction. Le flux estimé ne sera identique à celui qui existe réellement dans la machine que si le modèle de comportement de la machine utilisé pour réaliser l'estimateur est conforme à la réalité. Or cette estimation est basée sur la connaissance de la constante de temps rotorique, qui peut connaître de fortes variations au cours du temps.

III.5. Réglage de position par la commande vectorielle indirect

Le principe de cette méthode de contrôle de la fréquence consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux rotorique mais simplement sa position calculée en fonction des grandeurs de référence. Cette méthode élimine donc le besoin d'utiliser un capteur de flux (capteur physique ou modèle dynamique) mais nécessite l'utilisation d'un capteur de la vitesse rotorique.

Le schéma représentatif de la commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux est donné par la figure suivante.

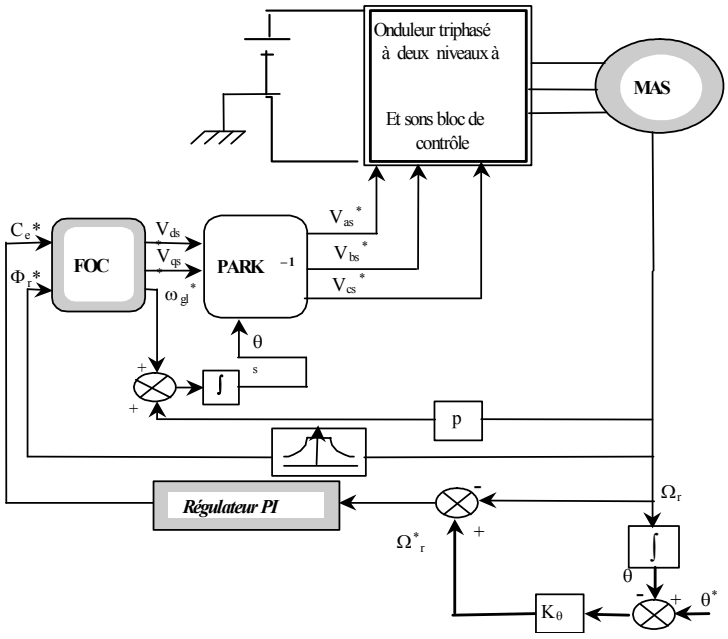


Figure III.7 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte

Le bloc de contrôle FOC (field oriented control) est un bloc qui calcule les trois sorties ($v_{ds}^{*}, v_{qs}^{*}, \omega_{s}^{*}$) donnant, ainsi, les trois tensions de référence, en fonction des deux entrées de

référence (C_e^*, Φ_r^*) qui assurent le découplage. Les équations (III.29) du FOC sont définies en considérant le régime statique pour lequel le flux rotorique et le couple électromagnétique sont égaux à leurs valeurs de référence.

D'après le modèle (II.7) en régime établi, nous tirons :

$$\begin{cases} v_{ds}^* = R_s i_{ds}^* - \sigma L_s \omega_s i_{qs}^* \\ v_{qs}^* = R_s i_{qs}^* + \sigma L_s \omega_s i_{ds}^* \\ \omega_s^* = \omega + \dfrac{M_{sr} R_r}{L_r \phi_r} i_{qs}^* \end{cases} \quad \text{(III.29)}$$

Avec

$$\begin{aligned} i_{ds}^* &= \frac{\phi_r^*}{M_{sr}} \\ i_{qs}^* &= \frac{L_r C_e^*}{p M_{sr} \phi_r^*} \end{aligned} \quad \text{(II.30)}$$

Les grandeurs de commande générées par le FOC produisent, au sein de la machine, les courants i_{ds} et i_{qs} de sorte qu'en régime permanent ces courants soient identiques aux courants de référence (i_{ds}^*, i_{qs}^*). Par conséquent, le flux et le couple prennent leurs valeurs de référence.

Le calcul des régulateurs de vitesse et de position est identique à celui présenté précédemment pour la commande vectorielle directe.

III.5.1. Intérêts et inconvénients

La méthode de commande indirecte est caractérisée par le fait qu'aucune estimation du couple ou du flux n'est nécessaire. Cela permet d'allier la simplicité et l'efficacité du contrôle vectoriel.

Outre la sensibilité vis-à-vis des variations des paramètres de la machine et en particulier de la constante de temps rotorique T_r que nous analyserons par la suite, cette méthode repose en grande partie sur la capacité de l'onduleur et de sa commande à imposer les courants désirés dans la machine. En effet, à partir de l'instant où le système n'impose pas les courants désirés, cette commande perd sa principale propriété de découplage entre le flux et le couple donc de commande vectorielle.

Néanmoins, cette méthode a l'avantage de ne nécessiter que la mesure de la position ou de la vitesse. Les courants de référence i_{ds}^* et i_{qs}^* ne sont déterminés qu'à partir de grandeurs de référence qui par définition ne sont pas bruitées.

III.5.2. Résultats de simulation :

La validation de cette commande est faite à l'aide du logiciel Matlab-Simulink, sur un modèle d'une machine asynchrone de puissance de 1.5kW dont les paramètres ont été identifiés par la méthode des algorithmes génétique au laboratoire Le laboratoire de recherche en électrotechnique et en automatique de l'université de Médéa. On s'est assuré, lors des essais, que nous ne saturons pas la commande, c'est-à-dire que la norme de la tension de sortie ne dépasse pas la valeur limite, admissible par l'onduleur (220 V). La commande de l'onduleur à été effectuée à l'aide de la modulation de largeur d'impulsion de type sinus-triangle de fréquence, f=1050Hz et un pas de simulation Ts =10^{-5}. La simulation dure 3s, pour une consigne de flux rotoriqueΦ_{dr} = 0.3253Wb, et une consigne de vitesse de 150(rad/sec) de t=0s à t=1s, et de 100(rad/sec) jusqu'à t= 2s,et de 150 (rad/sec) jusqu'à t= 3s. Les paramètres du réglage sont donnés par le tableau suivant :

Boucle de régulation	Pôles	k_p	k_i
Courants (i_{ds}, i_{qs})	900± j 900	488.35	443880
Vitesse (ω)	900± j 900	2	0.15

Tableau II.1 : Paramètres des régulateurs

Les figures (III.9), (III.10), (III.11)montrent les performances de la commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone. On constate que la vitesse suit sa référence.

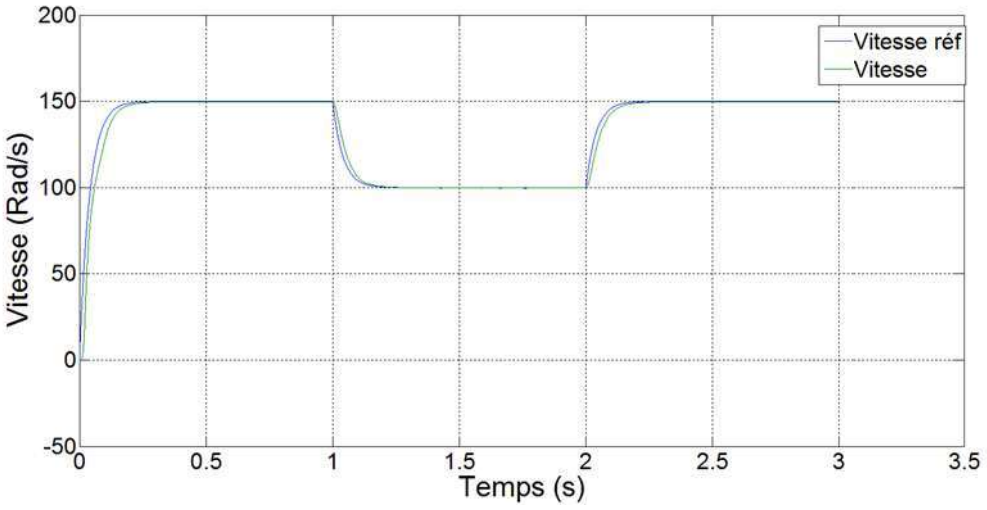


Figure III.8 : Variation de la vitesse en fonction du temps.

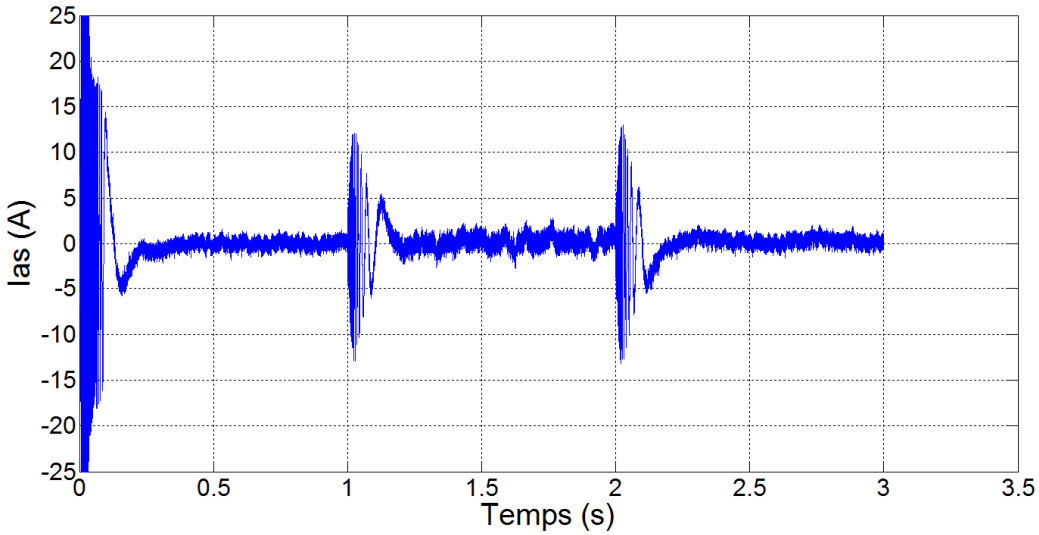


Figure III.9 : Variation du courant statorique Ias en fonction du temps.

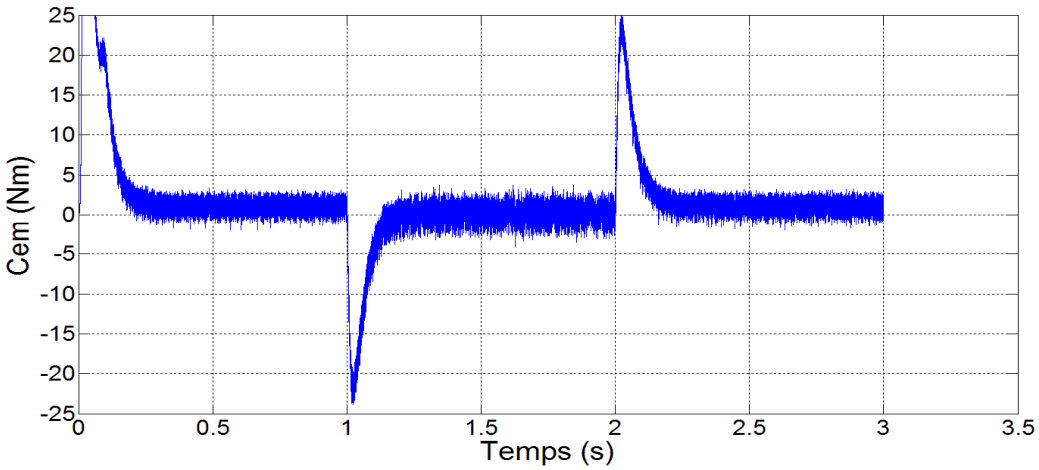


Figure III.10: Variation du couple éléctromagnétique (Cem) en fonction du temps.

III.6 Implémentation de la commande vectoriel direct de la MAS

Le laboratoire de recherche en électrotechnique et en automatique (LREA)de l'université de Yahia Fares est doté d'une plate-forme expérimentale destinée à l'identification des machines électriques, de l'électronique de puissance et de la commande des machines électrique.

III.6.1 Présentation du banc d'essai

Dans le but de commander la machine asynchrone, nous avons mis au point un banc d'essai selon le schéma de la figure(III. 12). Le banc d'essai est composé de :

-une carte DS1103 R&D Controller est un système de développement puissant pour le prototypage rapide de lois de commande. L'Interface Real-Time comporte des blocs Simulink pour la configuration graphique d'E/S. La carte peut être installée pratiquement dans tous les PC possédant un port PCI ou PCIe libre.

a- Domaines d'application de la carte DS1103 :

Le système temps réel basé sur la technologie PowerPC et l'ensemble de ses interfaces d'E/S font de cette carte une solution idéale pour le développement de contrôleurs dans divers domaines, tels que le pilotage de machines, la robotique, l'aérospatiale. La DS1103 est utilisée dans plusieurs laboratoires universitaires.

b- Utilisation de la Real-Time Interface :

Avec la Real-Time Interface (RTI), on peut facilement intégrer nos modèles fonctionnels à la carte DS1103 R&D Controller. On peut configurer graphiquement toutes les E/S, insérer des blocs dans un schéma-bloc Simulink et générer le code du modèle au moyen du Simulink. Le modèle temps réel est alors compilé, téléchargé et démarré automatiquement ce qui réduit au minimum notre temps d'implémentation.

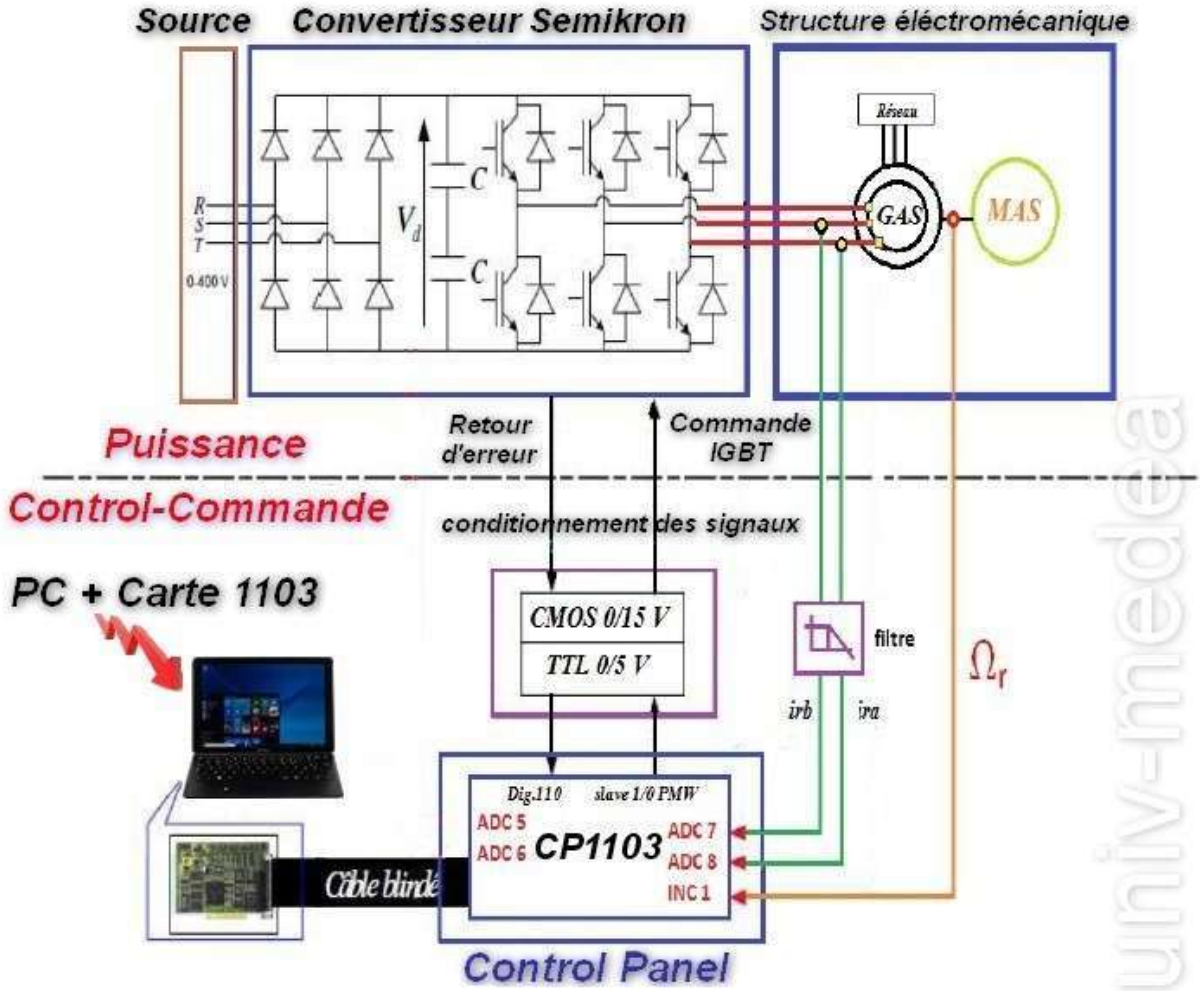


Figure III.11-a : Schéma synoptique de la plate-forme expérimentale.



Figure III.11-b : montage général de la plate-forme.

- Une MAS de puissance nominale 1,5Kw et de tension nominale 380V /220V. Le courant nominal de la machine est 3.7A/6.4Afigure (III.12).

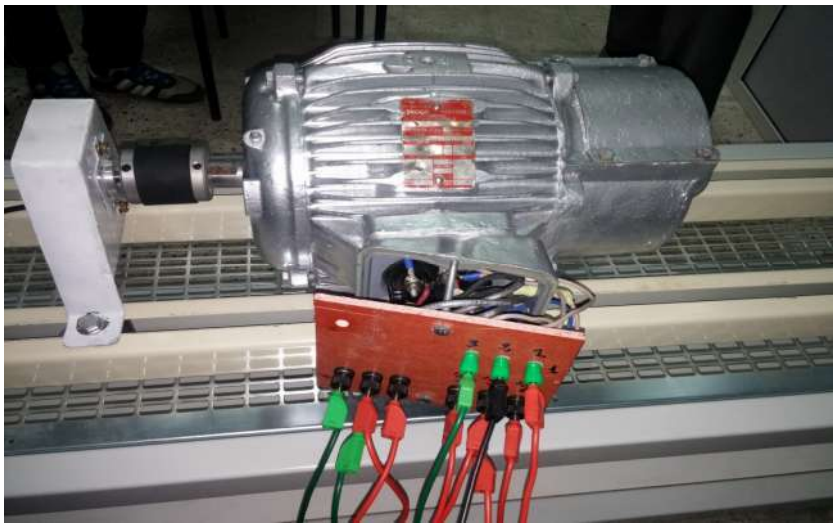


Figure III.12 : Machine asynchrone à rotor bobiné.

- Un onduleur semikronà deux niveaux

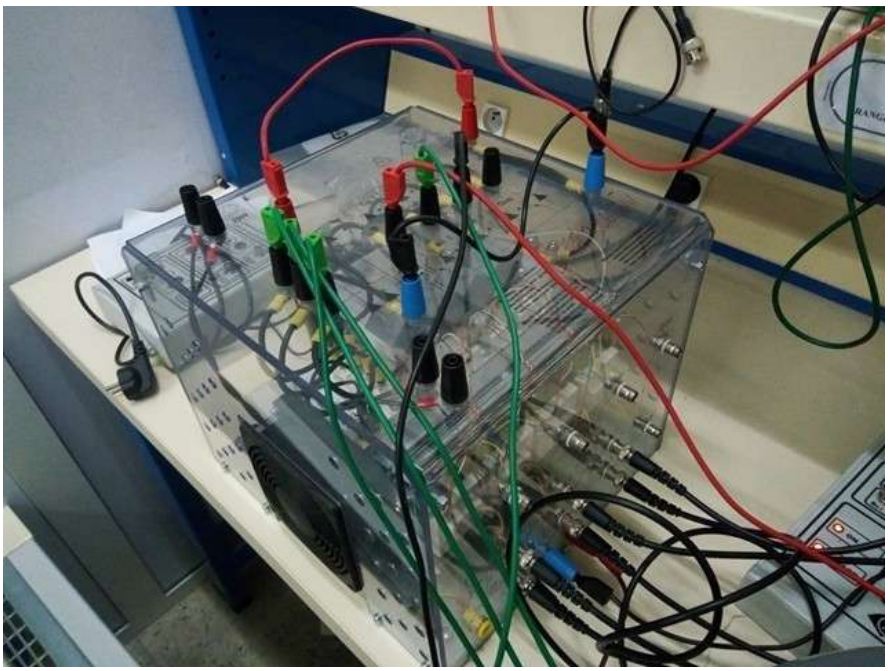


Figure.III.13 : Un onduleur semikron à deux niveaux.

- Deux capteurs de courants et deux capteurs de tensions figure(III.14).

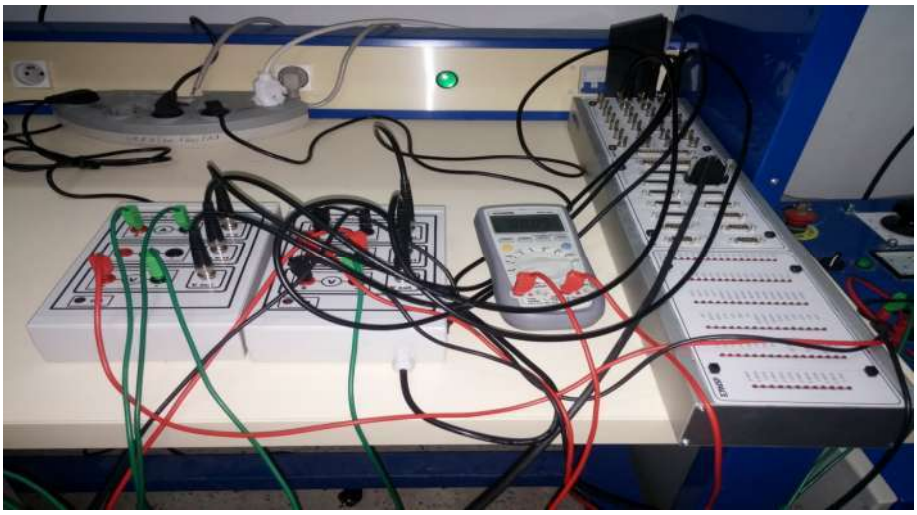


Figure III.14: Capteurs de mesure de courant et de tension.

- Capteur de vitesse figure(III.16)



FigureIII.15 : Capteurs de vitesse.

III.6.2. Résultats expérimentaux :

Les figures (III.19), (III.20), (III.21) représentent les résultats pratiques de la commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone à vide lors d'une application d'une vitesse de consigne égale à :

$$w^* = \begin{cases} 150\text{rad/s de t} = 0\text{s à t} = 16\text{s} \\ 100\text{rad/s de t} = 16\text{s à t} = 24\text{s} \\ 150\text{rad/s de t} = 24\text{s à t} = 30\text{s} \end{cases}$$

Nous constatons que la vitesse suit sa référence avec un petit dépassement au démarrage dû au régulateurs PI. Nous remarquons, aussi un pic de courant au démarrage égal à 18A dû au fort appel de la puissance au démarrage. La figure (III.22) représente la tension simple aux bornes de machine asynchrone. Cette tension n'est pas sinusoïdale ce qui engendre des ondulations du couple électromagnétiques.

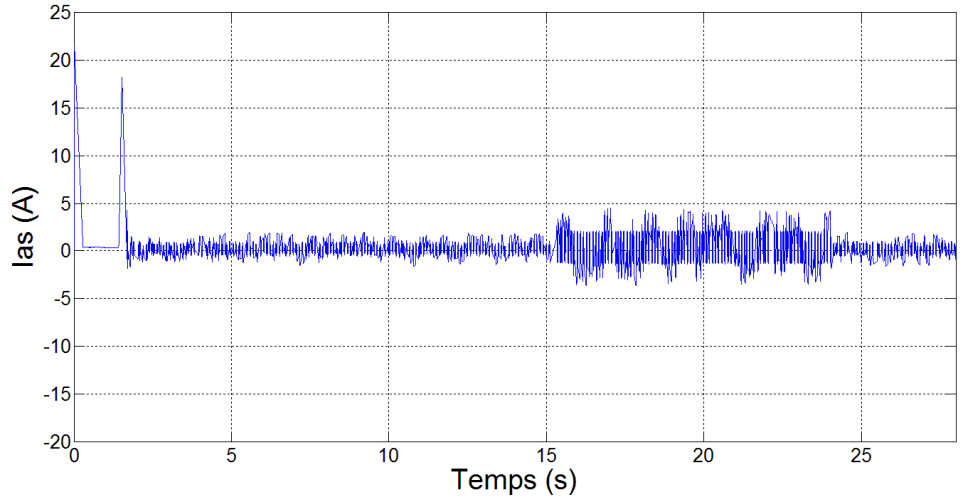


Figure III .16 : Variation du courant statorique Ias en fonction du temps.

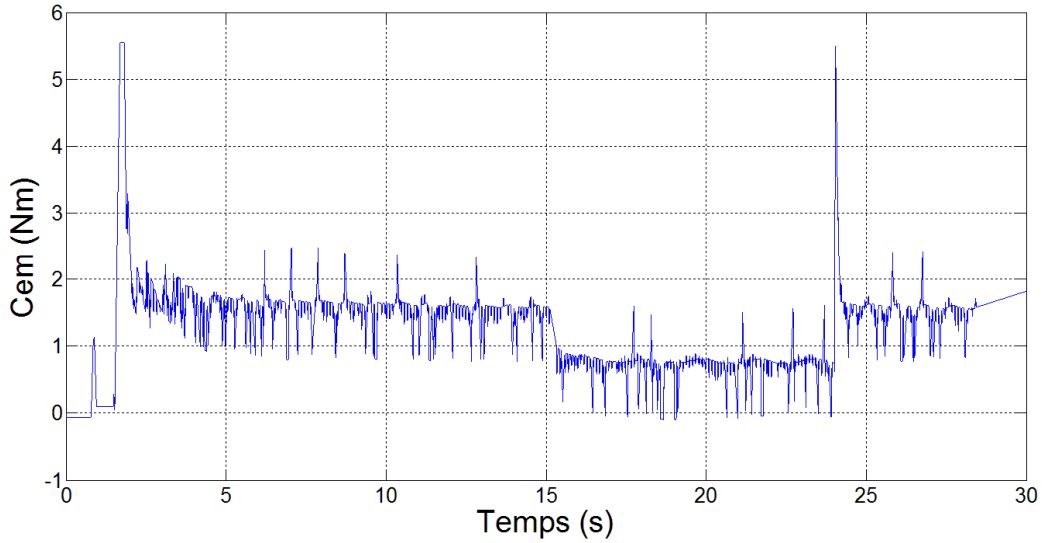


Figure III.17 : Variation du couple électromagnétique (Cem) en fonction du temps**.**

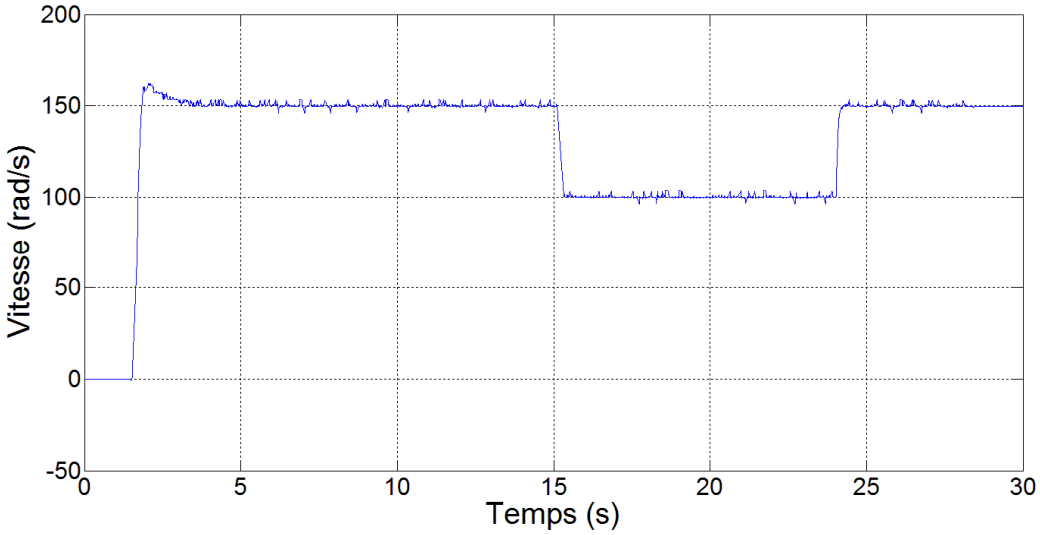


Figure III.18 : Variation de la vitesse en fonction du temps.

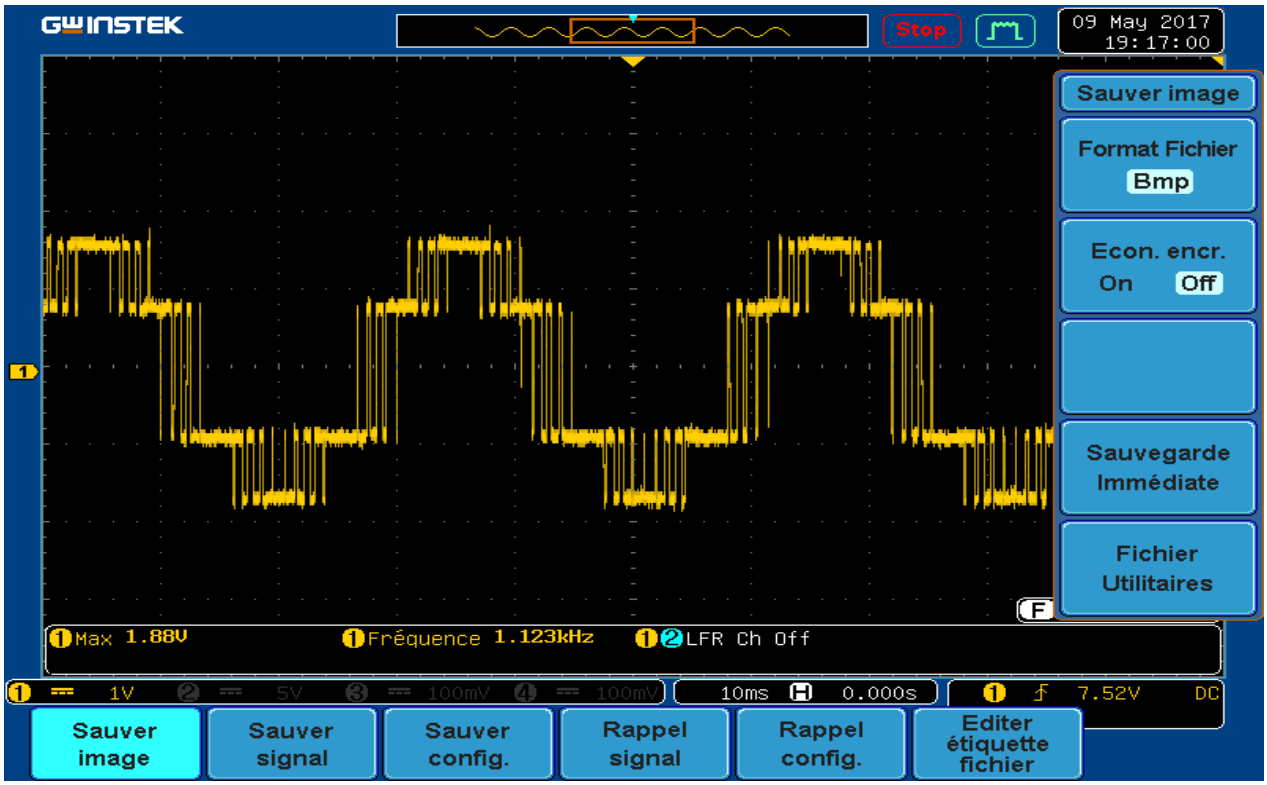


Figure III.19 : la tension simple alimentant la MAS

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la commande vectorielle à la machine asynchrone. Dans un premier lieu, nous avons simulé le comportement de la commande vectorielle indirecte appliqué à la machine asynchrone. Ensuite nous avons présenté la description d'un banc d'essais à base d'une machine asynchrone en mode moteur. En fin, afin de tester expérimentalement la faisabilité de la commande vectorielle indirecte nous l'avons implémenté sur une carte dspace 1103. Les résultats expérimentaux obtenus montrent clairement la validité de l'algorithme de commande utilisé.

IV. Introduction

Actuellement, la littérature atteste du grand intérêt accordé à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergie éoliennes ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [CAM03], [ELA04], [KH06], [SAL07], [VID04] et aéronautique [KHA03]. Cet intérêt est dû essentiellement aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'cessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du coté du stator que du coté du rotor [YAH17].

L'intérêt majeur des systèmes éoliens a base d'une génératrice a double alimentation (GADA) réside dans le fait que le convertisseur coté rotor ou bien coté GADA « CCG » et le convertisseur coté réseau « CCR », transférant la puissance de glissement et l'acheminant vers le réseau électrique, ne sont dimensionnés que pour une partie de la puissance nominal de la GADA. En générale, le dimensionnement de la chaine rotorique se limite jusqu'à 30% de la puissance nominale du stator de la GADA, ce qui suffit à assurer une variation de 30% de la plage de vitesse autour de la vitesse du synchronisme. Ceci constitue le principal avantage de cette structure [YAH17].

IV.2Commande vectorielle de la GADA

En vue de la commande vectorielle de la GADA, il est plus judicieux de choisir le repère d-q lié au champ tournant statorique, lequel est relatif à la fréquence de 50Hz (fréquence du réseau électrique). Par conséquent, le repère de Park sera synchronisé avec le flux statorique(figure IV.1) [HOP00].

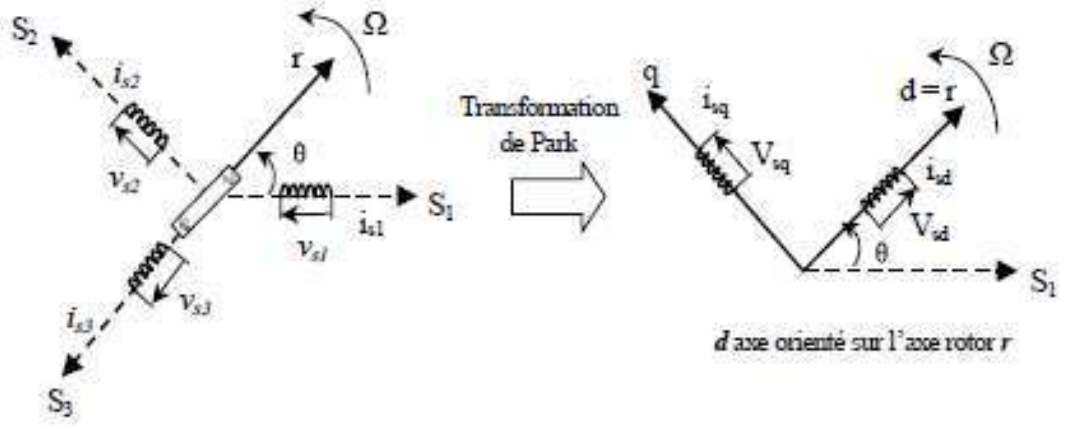


Figure IV.1: Orientation du repère de Park

Souvent dans le cas d'une GADA de moyenne et de grande puissance, la résistance statorique R_s est négligée lors de la synthèse de son modèle sous l'hypothèse d'orientation de flux statorique [MUL02],[TAP03].

En adoptant donc l'hypothèse d'une résistance statorique Rs négligeable et que le flux statorique est constant (cette condition est assurée dans le cas d'un réseau stable connecté au stator de la GADA), et orienté selon l'axe d, on déduit[ABD13] :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases} \text{(IV.1)}$$

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \phi_s \end{cases} \text{(IV.2)}$$

$$\begin{cases} \phi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \text{(IV.3)}$$

A partir de l'équation[IV.3], nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \dfrac{\phi_s}{L_s} + \dfrac{L_m}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\dfrac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{cases} \text{(IV.4)}$$

$$\begin{cases} \phi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases} \text{(IV.5)}$$

En remplaçant dans l'équation des flux(IV.5). Les courant statoriques par l'expression(IV.4), on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \sigma L_r L_{rd} + \dfrac{L_m}{L_s} \phi_s \\ \phi_{rq} = \sigma L_r L_{rq} \end{cases} \text{(IV.6)}$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \dfrac{d}{dt}\phi_{rd} - (\omega_s - \omega_r)\phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \dfrac{d}{dt}\phi_{rq} - (\omega_s - \omega_r)\phi_{rd} \end{cases} \quad \text{(IV.7)}$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation (IV.7) dans l'équation (IV.6), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \dfrac{d}{dt} I_{rd} - g\omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \dfrac{d}{dt} I_{rq} + g\omega_s \sigma L_r I_{rd} + g\dfrac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{(IV.8)}$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s \sigma L_r I_{rd} + g\dfrac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{(IV.9)}$$

Ou g correspond au glissement de la machine asynchrone, et le terme $(gL_m V_s / L_s)$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraine une erreur de trainage Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

$$\begin{cases} P_s = (V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}) \\ Q_s = (V_{sq} I_{sq} - V_{sd} I_{sq}) \end{cases} \quad \text{(IV.10}$$

L'adaptation des équations des puissances(IV.9)) au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas (V_{sd}=0) donne :

$$\begin{cases} P_s = -V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad \text{(IV.11)}$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions de l'équation (IV.4) dans l'équation((IV.11) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances activeet réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \dfrac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \left(V_s \dfrac{\phi_s}{L_s} - V_s \dfrac{L_m}{L_s} I_{rd} \right) \end{cases} \quad \text{(IV.12)}$$

En tirant $\phi_{s=} \dfrac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (IV.2)Le système d'équations (IV.12)devient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \dfrac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = -V_s \dfrac{L_m}{L_s} I_{rd} + \left(\dfrac{V_s^2}{L_s \omega_s} \right) \end{cases} \quad \text{(IV.13)}$$

En partant de l'équation (IV.1), on peut réaliser un découplage de telle façon que le couple sera commandé uniquement par le courant Irq. La relation finale du couple est :

$$C_{em} = -p \frac{L_m}{L_s} \phi_s I_{rq} \text{ (IV.14)}$$

On voit que cette relation est similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée.

En examinant les équations précédentes, on peut établir le schéma bloc de la GADA illustré dans la figure(IV.2) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et on sorties les puissances active et réactive statoriques.

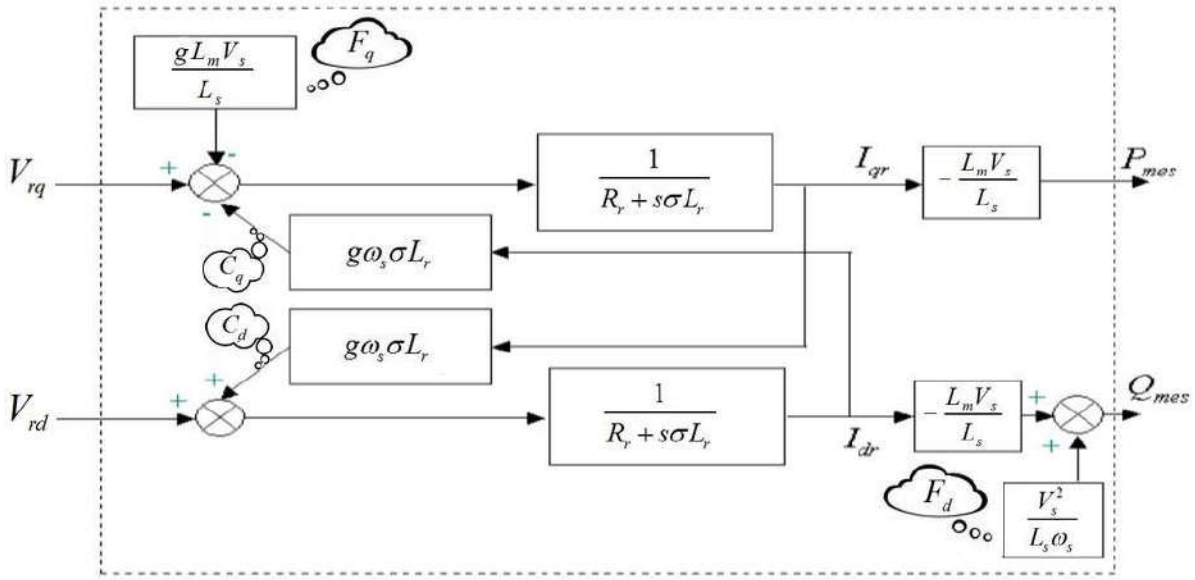


Figure IV.2 : Schéma bloc du modèle simplifié de la GADA

D'après la figure(IV.2), on remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g, il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle cas les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il est apparait deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [BOY06], [POI03] :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée **méthode directe** car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée **méthode indirecte.**

L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants ou de rajouter une référence de courant harmonique pour faire fonctionner la MADA en filtre actif, mais elle est complexe à mettre en œuvre

IV.2.1. Commande vectorielle direct des puissances(CVD)

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites au paragraphe précèdent. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{rq} et d'autre part la puissance réactive et la tension V_{rd} (figure IV.3).

Pour simplifier la commande de la GADA, nous considérons que la tension du réseau est stable, ce qui nous permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant. Toutefois nous allons négliger les termes de couplage (C_d et C_q) entre les deux axesd et q, qui apparait dans la figure IIII.14 à cause du faible glissement, tout en compensant aussi les perturbations des *f.e.m's* (F_d et F_q) ce qui nous donne le schéma simplifié représenté dans la figure IIII.15 [BOY06].

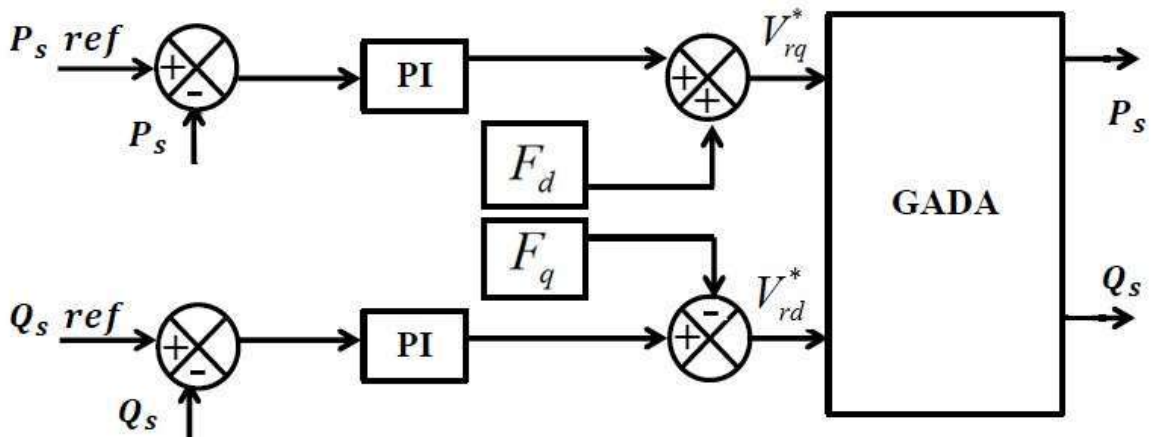


Figure IV.3 : schéma bloc de la commande vectorielle direct de la GADA.

Les régulateurs de la puissance active et réactive ont été choisis de type PI classique. F_d et F_q sont des termes de compensation qui ont pour expressions suivantes :

$$\begin{cases} F_d = \dfrac{V_s^2}{L_s \omega_s} \\ F_q = \dfrac{g L_m V_s}{L_s} \end{cases}$$

IV.6.2. Commande vectorielle indirecte des puissances(CVI)

Cette méthode consiste à tenir compte des termes de couplage (C_d et C_q) et à les compenser en utilisant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la GADA [BOY06], [DAV07], [DJE15]. Le schéma bloc du contrôle de la GADA avec les deux boucles de régulation de puissance et du courant est représenté sur la figure III.16.

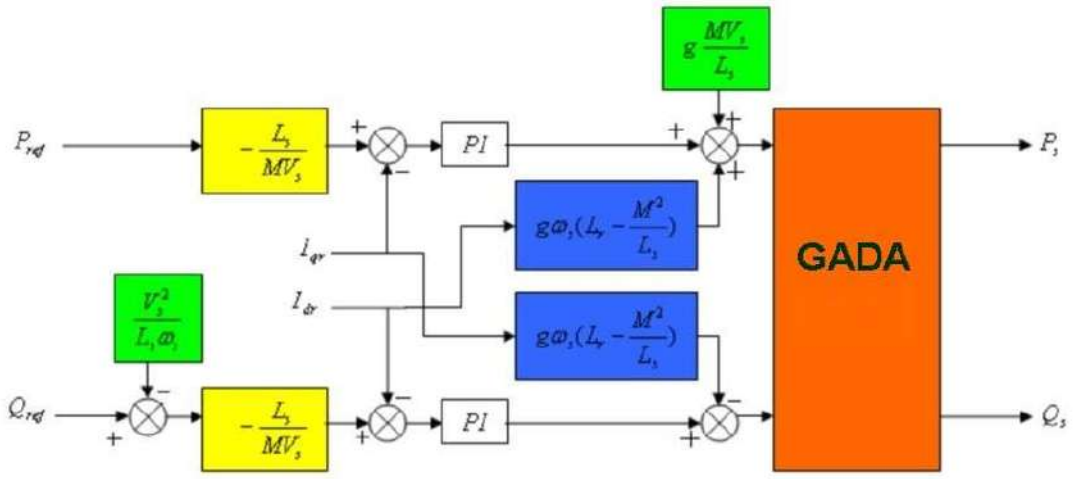


Figure IV.4 : Schéma bloc de la commande indirect.

Les régulateurs de la puissance active et réactive et les régulateurs des courants sur l'axe q et d respectivement, ils ont été choisis de type PI classique. C_d et C_q sont des termes de couplage qui ont pour expressions suivantes :

$$\begin{cases} C_d = g\omega_s \sigma L_r I_{rq} \\ C_q = g\omega_s \sigma L_r I_{rd} \end{cases} \text{(IV.13)}$$

IV.2.3. Synthèse de régulateur PI

Le régulateur proportionnel-intégrale (PI), utilisé pour commander la GADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables[BOY06], c'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de régulation éolien. Figure (IV.5)montre une partie de notre système bouclé et corrigé par in régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $(k_p + (k_i / s))$.

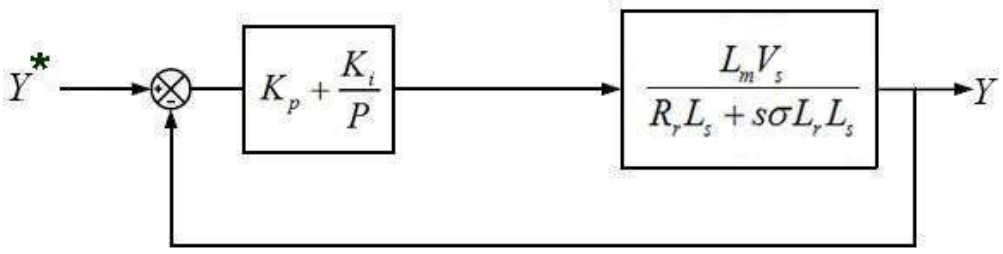


Figure IV.5 : système régulé par un PI.

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

$$FTBO = \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{s}{k_p}} \cdot \frac{\frac{L_m V_s}{\sigma L_r L_s}}{s + \frac{R_r L_s}{\sigma L_r L_s}} \text{ (IV.14)}$$

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

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_r L_s}{\sigma L_r L_s} \text{ (IV.15)}$$

Nous notons ici que l'intérêt de la compensation despôles ne se manifeste uniquement que si les paramètres de la machine sont identifiés avec précision puisque les gains k_p et k_i sont établies en fonction de ces mêmesparamètres. Si les paramètres réels sont différents de ceux utilisés dans la synthèse, la compensation est inefficace. Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{k_p \frac{L_m V_s}{\sigma L_r L_s}}{s} \text{ (IV.16)}$$

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

$$FTBF = \frac{1}{1 + s\tau_r}$$

Avec : $$\tau_r = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{\sigma L_r L_s}{L_m V_s} \text{ (IV.17)}$$

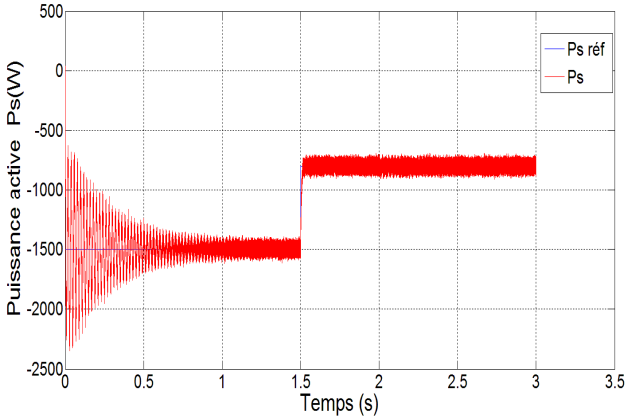
Le terme τ_r désigne ici la constante du temps du système. On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

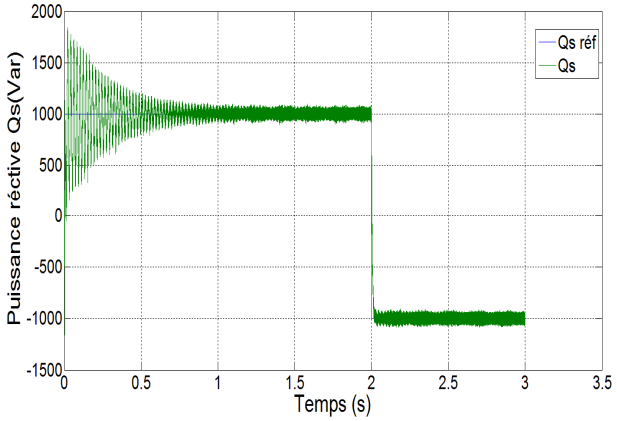
$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{\sigma L_r L_s}{L_m V_s} \text{ (IV.18)}$$

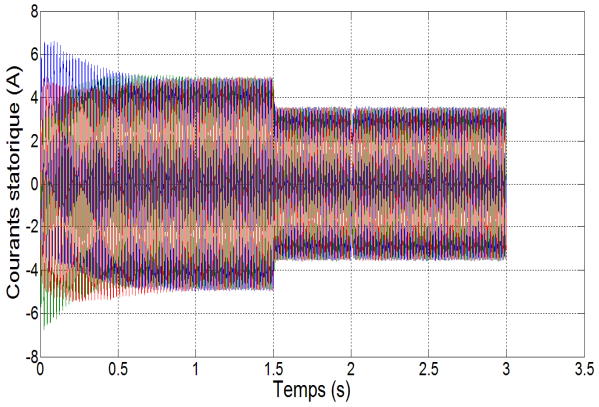
$$k_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r L_s}{L_m V_s} \text{ (IV.19)}$$

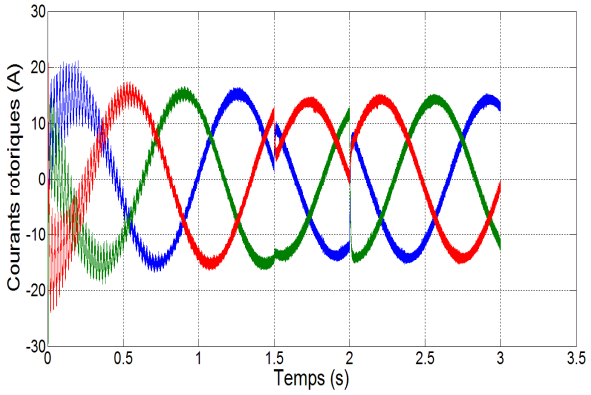
IV.2.4.résultats de simulation :

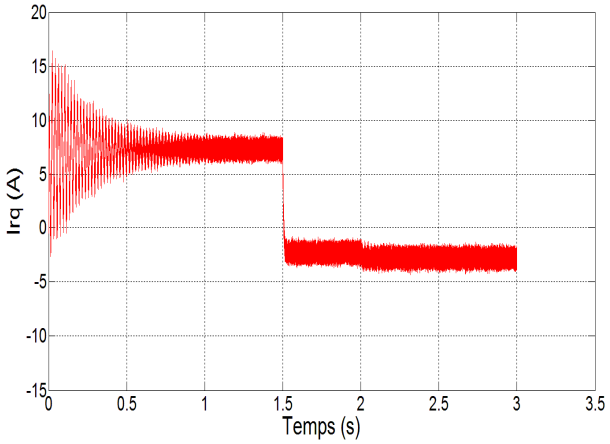
La stratégie indirecte de la commande vectorielle de la GADA a été validée par simulation numérique. On a testé l'association commande vectorielle-onduleur à deux niveaux-machine asynchrone lors d'une application d'une puissance active égalep_{ref}= -1500Wentre t=0 à t=1.5s etp_{ref}= -800W entre t=1.5 à t= 3s et lors d'une application d'une puissance réactive égale Q_{ref}= -1000W entre t=0 à t= 1.5s etQ_{ref}= 1000 W. Ceci dans le but d'évaluer les performances dynamiques et statiques du système.

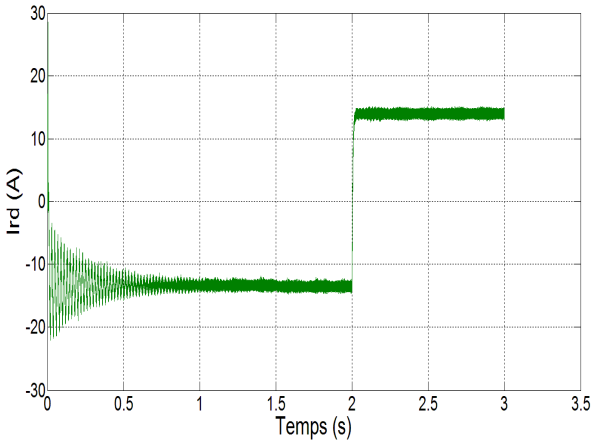












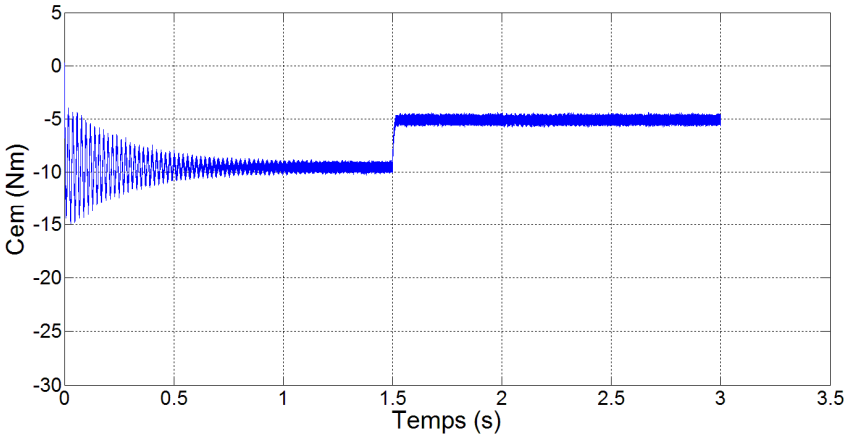


Figure IV.6 : commande vectorielle de la GADA par la méthode indirect (test de suivi de consigne et sensibilité perturbations).

IV.2.5. Interprétation des résultats

D'après les figures de simulation on constate que :

- Les réponses sont satisfaisantes.
- Concernant les puissances active ou réactive, on observe une dynamique qui réagit rapidement et sans dépassement. Les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances. Le couplage entre les deux puissances est très faible et peu perceptible.
- Le fonctionnement de contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif).
- Les valeurs des puissances actives et réactives sont proportionnelles respectivement aux composantes en quadrature et directe du courant rotorique.
- Le couple dépend essentiellement de la composante en quadrature du courant rotorique (*Iqr*).

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix de l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation de la puissance. A partir des résultats de simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du statorique permet de découpler les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre de la commande de la machine asynchrone à rotor bobiné utilisée comme moteur asynchrone et comme génératrice à double alimentation.

Après avoir modélisé la machine asynchrone dans la base naturelle, nous avons appliqué la transformation de Park pour réduire la complexité du modèle obtenu. Ce dernier est non linéaire, couplé et multivariable. Afin de commander notre machine,nous avons appliqué la commande vectorielle. Cette commande découple et linéarise le comportement de la machine.

La commande vectorielle indirecte a été appliquée dans un premier temps pour commander la machine asynchrone en mode moteur. Cette commande a pour objectif le contrôle du couple et du flux. Ensuite nous avons commandé la machine asynchrone à rotor bobiné comme génératrice à double alimentation. L'application de la commande vectorielle indirecte a permet de découpler le modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation et de contrôler séparément l'échange des puissances active et réactive entre la GADA et le réseau.

Après la synthèse des régulateurs PI utilisé par cette stratégie de contrôle, les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité de la méthode proposée.

Une plate-forme expérimentale a été réalisée au laboratoire de recherche en électrotechnique et en automatique de l'université de Médéa afin de confirmer les résultats de simulation obtenus. Les résultats expérimentaux obtenus montrent clairement la validité de l'algorithme de commande utilisé.

Après l'étude menée dans ce mémoire, plusieurs perspectivesintéressantes sont envisageables:

- Utilisation des techniques de commande moderne pour commander la GADA.
- Implémentation des techniques de commande pour contrôler l'échange des puissances actives et réactive de la GADA connectée au réseau électrique.

Les résultats obtenus après application de la méthode du gradient sont résumés dans le tableau suivant [BEN16] :

Les paramètres de la MADA utilisé signification	Paramètres de la MADA par méthode classique	Paramètres de la MADA corrigées par méthode du gradient	Unité
Résistance statorique	Rs=2.3	Rs=2.3	[Ω]
Résistance rotorique	Rr=0.35	Rr=0.35	[Ω]
Inductance statorique	Ls=0.383	Ls=0.084819	[H]
Inductance rotorique	Lr=0.0162	Lr=0.0162	[H]
Inductance mutuelle	M=0.0779	M=0.0354	[H]
Inertie du moteur	J=0.02880	J=0.084819	[Kg.m²]
Coefficient de frottement	f=0.00378	f=0.00178	[N.m.s/rd]
Constante de temps rotorique	Tr=0.0463	Tr=0.015184	Sans unité
Constante de temps statorique	Ts=0.1665	Ts=0.01009	Sans unité
Coefficient de dispersion	δ = 0.0219	δ=0.084525	Sans unité

Le tableau III.3 : Paramètres de la MADA identifiés par la méthode classique et la méthode du gradient

[SJE96]L. Söderlund, JT. Erikson, J. Salonen, H. Vihriälä ans R. Perälä, « A permanent-magnet generatorfor wind power applications », IEEE transaction on magnetics, vol 32, N° 4, july 1996.

[CAR94] O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, A. Larsson, « A comparison of electrical systems for variablespeed operation of wind turbines », European wind energy conf., 1994, p. 500-505.

[MUL01] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, «Axial flux, modular, permanent-magnet generatorwith a toroidal winding for wind turbine applications », IEEE industry applications conference, St Louis,

[ELA04] S. El Aimani, 《 Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.

[HAS09] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B.Bak-Jensen, « Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines », Riso national

[AIM04] S. El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).2004

[AHM04] H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.

[MIC97] R. Michaux, P. Letellier, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997, pp. 37-42.

[GHE11] 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 éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation», thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2011.

[DJE15] Y.Djeriri, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associé à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djilali Liabès, Sidi Bel-Abbès, Algérie, Octobre 2015.

[ABD07] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaine éolienne passive », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France. Octobre 2007.

[CAM03]H. Camblong, « Minimisation de l'Impact des Perturbation d'Origine Eolienne dans la génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable », Thèse de Doctorat, ENSAM, Bordeaux, France, Décembre 2003.

[BOU15]Z.Boudjema, « Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque) », Thèse de doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabés, Sidi Bel-Abbés, Algérie, Février 2015.

[LEE13]S. Lee, E. Son, S. Lee, « Velocity Interference in the rear rotor of a counter-rotating wind turbine », Renewable Eenergy, Vol. 54, pp.235-240, 2013.

[MUL02]S.Muller, M. Deicke, R. W. De Doncker, « Doubly fed induction generator systems for wind turbines », IEEE Industry Applications Magazine, Vol.8, No. 3, pp. 26-33, May-June 2002.

[TAP03]A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza, J. R. Saenz, « Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.18,No.2,pp.194-204, June 2003.

[ABD13]S. Abdeddaim, A. Betka, « Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine », Electrical Power and Energy systems, Vol. 49, pp. 234-242, 2013.

[BOY06]A. Boyette, « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » , Thèse de Doctorat en Génie 2lectrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, France, Décembre 2006.

[POI03]F. Poitiers, »Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, France, Décembre 2003.

[MOU14]A. Moualdia, « Stratégies de Commande DTC-SVMet DPC appliquées à une MADA utilisé pour la production d'energie éolienne », thèse de Doctorat En Génie Electrique, Ecole Nationale d'Alger, Algérie, Juin 2014.

[YAH17] A.Yahdou « commande hybride par mode glissant d'ordre 2 d'un systéme éolien a double rotor ». Magister en Génie Electrique, Univ, HBB, Chelef, Algérie, 2017.

[KHA03] F. Khatounian, et al., "Control cfa doubly-fed induction generator for aircraft application", Records of IEEE IECON 2003, Roanoke, USA. pp.2709-2714, 2003.

[KH006] S. Khojet El Khil, "Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA)", Thèse de Doctorat, Institut National Pol)1echnique de Toulouse, France, Décembre 2006.

[SAL07] G. Salloum, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation", Thèse de Doctorat, institut National Polytechnique de Toulouse, France, Mars 2007.

[VID04] P. E. Vidai, "Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National polytechnique de Toulouse. France, Décembre 2004.

[MER07] F. Merrahi, "Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) ", mémoire de magister, ENP, Alger,2007.

[NES07] A. Nesba, "Caractérisation du phénomène de la saturation magnétique de la machine asynchrone", thèse de doctorat d'état, ENP, Alger, 2007.

[BEN16] I.Benhadj M'hamed"*Identification et commande des puissances* de la machine asynchrone double alimentation "thése de Master Univ, Yahia Fares, Medea Algerie, 2016

Bobiné