

M/621.921

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Modélisation et Simulation d'une Machine Asynchrone à
Double Alimentation

Présenté par :

ZITOUNI AYMEN & SLIMANI MOHAMED LAMINE

Sous la direction de : **Dr. Chams-Eddine FERAGA**

Juin 2016



کتابخانه و اسناد ملی جمهوری اسلامی ایران
کتابخانه و اسناد ملی جمهوری اسلامی ایران
کتابخانه و اسناد ملی جمهوری اسلامی ایران

Remerciement

Avant tout je remercie notre dieu qui m'a donné la force d'entamer ce travail.

Monsieur, je tiens à exprimer du fond du cœur ma sincère gratitude à ceux qui
m'ont aidé à établir ce travail.

Je remercie aussi mon encadreur Monsieur le docteur : Feraga chams-eddine.

En espérant de continuer avec vous. Veuillez, acceptez mes salutations, les
meilleures.

Et aussi je n'oublie pas les enseignants du département de génie
électrotechnique et automatique.

Et enfin je remercie de près ou de loin qui m'ont aidé pour achever mon
thème.

Et aussi je remercie le président, et les membres de jury qui ont accepté de
juger ce modeste travail.

Zitouni Aymen

Slimani Mohamed Lamine

Guelma, juin 2016

Dédicace

Je tiens à remercier en premier lieu Allah qui m'a donné, vie et santé pour le parachèvement de ce modeste ouvrage.

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce fameux travail de fin d'étude

Aux deux êtres les plus chers au monde, qui ont souffert nuit et jour pour nous couvrir de leur chaleur d'amour, mes parents.

L'être qui me guide dans ma vie et que j'imité son honnêteté, son sérieux et sa responsabilité de ces engagements, mon cher père.

A ma source de bonheur, la perle de mes yeux, ma mère.

Que dieu vous garde en bonne santé.

A mes chers frères et sœurs.

A toutes ma famille et ma belle-famille.

A tous mes amis

A mon Encadreur Dr, Chams-eddine Feraga

A mes camarades de l'option de Réseau électrique

A toutes la promo 2015- 2016

Zitouni Aymen

Dédicace

Je tiens à remercier en premier lieu Allah qui m'a donné, vie et santé pour le parachèvement de ce modeste ouvrage.

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce fameux travail de fin d'étude

Aux deux êtres les plus chers au monde, qui ont souffert nuit et jour pour nous couvrir de leur chaleur d'amour, mes parents.

L'être qui me guide dans ma vie et que j'imité son honnêteté, son sérieux et sa responsabilité de ces engagements, mon cher père.

A ma source de bonheur, la perle de mes yeux, ma mère.

Que dieu vous garde en bonne santé.

A mes chers frères et sœurs.

A toutes ma famille et ma belle-famille.

A tous mes amis

A mon Encadreur Dr, Chams-eddine Feraga

A mes camarades de l'option de Réseau électrique

A toutes la promo 2015- 2016

Slimani Mohamed Lamine

Modélisation et Simulation Machine asynchrone à double alimentation

Résumé :

Cette étude présente les différentes configurations de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec une explication du régime de fonctionnement en mode générateur et moteur. L'objectif de la deuxième partie est de faire mathématiquement une modélisation de la MADA sous forme d'état selon le choix des différents repères. Ces modèles sont définies dans un référentiel biphase, soit tournant (d,q) , soit fixe au stator (α,β) . Toute étude théorique doit être suivie par l'étude expérimentale où une simulation numérique qui nous permet d'analyser et de donner une synthèse pour les systèmes avec beaucoup de précision ; donc la troisième partie donne des résultats de simulation sous logiciel MATLAB avec des interprétations.

Mots clés :

- Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)
- Convertisseur statique (onduleur/redresseur)
- Référentiel biphase
- Modélisation
- Simulation numérique.

Tables De Matières :

Remerciement

Dédicace

Résumé

Tables De Matières

Liste des abréviations et des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....01

Chapitre I

La machine asynchrone à double alimentation

I.1.Introduction.....04

I.2.Description de la machine asynchrone à double alimentation.....05

I.3.Classification.....06

I.3.1.Machine à double alimentation simple06

I.3.2.Machine à double alimentation en cascade07

I.3.3.Machine à double alimentation cascade à un repère.....08

I.3.4.Machine à double alimentation sans collecteur.....08

I.3.5.Machine à double alimentation sans balai.....09

I.4.Evaluation de la MADA.....10

I.4.1.Structure de la MADA.....10

I.5.l'utilisation du MADA11

I.6.Etude du fonctionnement en génératrice.....11

I.7.Etude de fonctionnement en moteur12

I.7.1.Premières configurations : Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un Onduleur.....13

I.7.2.Deuxième configuration : Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cyclo convertisseur13

I.7.3.Troisièmes configurations : Stator alimenté par onduleur, rotor alimenté par Unonduleur.....	14
I.8.Mode de variation de vitesse	15
I.8.1.Action sur le glissement	15
I.8.2.Variation de la fréquence.....	16
I.8.3.Action sur le nombre de pôles	16
I.9.Représentation de la machine machines asynchrones à double alimentation	16
I.9.1.Principe de fonctionnement	16
I.9.2.Régimes de fonctionnement de la MADA	18
- Régimes de fonctionnement stationnaire ($g=1$)	18
- Régimes de fonctionnement hypo synchrone ($0 < g < 1$)	18
- Régimes de fonctionnement synchrone ($g=0$).....	18
- Régimes de fonctionnement hyper synchrone($g < 0$).....	19
I.10.Etude et Transferts de puissance dans la MADA	19
I.11.Le rôle de convertisseur statique	20
I.12.Mode de fonctionnement de la MADA.....	21
I.12.1.Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	21
I.12.2.Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	22
I.12.3.Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....	22
I.12.4.Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	23
I.13.Domains d'application de la MADA.....	23
I.14.Avantages et inconvénients de la MADA	24
I.14.1.Avantages de la MADA	24
I.14.2.Inconvénients de la MADA	26
I.15.Conclusion	27

Chapitre II

Modélisation de la MADA

II.1.Introduction	28
II.2.Modèle de la MADA.....	28
II.3.Hypothèses simplificatrices.....	29
II.4.Modèle de la MADA dans le repère a,b,c.....	30
II.5.Changement de repère.....	33
II.5.1.Transformation de Concordia	33
-Grandeurs α - β - Grandeurs d-q.....	34
II.5.1.La transformation de Park	35
II.5.3.Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes(d,q)	38
II.6.Choix du référentiel	39
II.7.Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant.....	39
II.8.Mise sous forme d'équation d'état	41
II.9.Conclusion	43

Chapitre III

Simulation de la MADA

III.1. Introduction	44
III.2. Résultats de simulation numérique du système	44
III.2.1 Résultats de simulation fonctionnement moteur de la MADA.....	45
III.2.2 Interprétation des résultats	51
III.2.3 Résultats de simulation fonctionnement générateur de la MADA	51
III.2.4. Interprétation des résultats	54
III.2.5. Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56
Références bibliographiques.....	57

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure (I-1): Vu du Stator.....	5
Figure (I-2): Vu du Rotor bobinée.....	5
Figure (I-3) : Schéma d'alimentation typique de la MADA.....	6
Figure (I-4) : Schéma de principe de la machine à double alimentation simple.....	7
Figure (I-5) : Schéma de principe de la machine à double alimentation encascade	7
Figure (I-6) : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un Repère.....	8
Figure (I-7) : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur	9
Figure (I-8) : Schéma de principe de la machine à double alimentation sansbalai	10
Figure (I-9) : Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA.....	11
Figure (I-10) : Schéma de l'alimentation de la MADA pour application génératrice.....	12
Figure(I-11) : Schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur première configuration	13
Figure (I-12) : Schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur deuxième configuration	14
Figure (I-13) : Schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur deuxième configuration	15
Figure (I-14): Représentation de la MADA.....	16
Figure (I-15) : La MADA en convention moteur hypo-synchrone.....	19

Figure (I-16) : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	22
Figure (I-17) : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	22
Figure (I-18): Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	22
Figure (I-19) : Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	23

Chapitre II :

Figure (II-1) : Représentationschématique du modèle d'uneMADA	29
Figure (II-2) : Transformation de Concordia ($abc-\alpha\beta$).....	35
Figure (II-3) : Transformation de Park	35
Figure (II-4) : Passage du triphasé au biphasé	36
Figure (II-5) : Représentation de la MADA dans le repère de Park	38
Figure (II-6) : Représentation de la MADA dans le repère biphasé	39

Chapitre III :

Figure (III-1) : Schéma bloc d'une chaine directe du MADA	44
Figure (III-2) : Vitesse de la MADA avec $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= 0 N.m$	46
Figure (III-3) : Couple électromagnétique $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= 0 N.m$	46
Figure (III-4) : Courant statorique de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= 0 N.m$	47
Figure (III-5) : Flux statorique de la MADA avec $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= 0 N.m$	47
Figure (III-6) : Courant rotorique de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= 0 N.m$	48
Figure (III-7) : Flux rotorique de la MADA avec $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= 0 N.m$	48
Figure (III-8) : Vitesse de la MADA avec $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= Cst$	49

Figure (III-9) : Couple C_{em} de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= Cst$	49
Figure (III-10) : Courants statoriques de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= Cst$	49
Figure (III-11) : Flux statoriques de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= Cst$	50
Figure (III-12) : Courants rotoriques de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= Cst$	50
Figure (III-13) : Flux rotorique de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= Cst$	50
Figure (III-14) : Vitesse de la MADA	51
Figure (III-15) : Couple électromagnétique de la MADA	52
Figure (III-16) : Courants statoriques de la MADA	52
Figure (III-17) : Flux statoriques de la MADA	52
Figure (III-18) : Courants rotoriques de la MADA.....	53
Figure (III-19) : Flux rotoriques du MADA	53
Figure (III-20) : La puissance active et réactive statorique.....	53

Liste des tableaux :

Tableau (I -1) : La puissance du MADA	20
Tableau (III-1) : Paramètres de la machine	45

Notations et symboles :

- V_{s-abc} : Tensions simples du stator de la MADA
- V_{r-abc} : Tensions simples du rotor de la MADA
- I_{s-abc} : Courants du stator de la MADA
- I_{r-abc} : Courants du rotor de la MADA
- Φ_{s-abc} : Flux statorique de la MADA
- Φ_{r-abc} : Flux rotorique de la MADA
- (α, β) : Axes correspondant au référentiel lié au stator.
- (d, q) : Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant.
- R_s : Résistance d'une phase due stator
- R_r : Résistance d'une phase du rotor
- L_s : Inductance propre d'une phase du stator
- L_r : Inductance propre d'une phase du rotor
- M_{ss} : Inductance mutuelle entre phases du stator
- M_{sr} : Inductance mutuelle entre phase du stator et du rotor
- M_{rr} : Inductance mutuelle entre phases du rotor
- M : Inductance mutuelle maximale
- n_p : Nombre de paires des pôles
- V_{ds}, V_{qs} : Composantes de la tension statorique respectivement suivant
L'axe d et q
- V_{dr}, V_{qr} : Composantes de la tension rotorique respectivement suivant
L'axe d et q
- I_{ds}, I_{qs} : Composantes du courant statorique respectivement suivant
L'axe d et q
- I_{dr}, I_{qr} : Composantes du courant rotorique respectivement suivant

Liste des abréviations et des symboles

L'axe d et q

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

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

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

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

P_s : Puissance active statorique

Q_s : Puissance réactive statorique

P_r : Puissance active rotorique

Q_r : Puissance réactive rotorique

P_{mec} : Puissance mécanique disponible à l'arbre de la machine

P_{em} : Puissance électromagnétique

S_r : Puissance apparente échangée avec le convertisseur connecté au rotor

S_s : Puissance apparente transitant au stator

W_{mag} : énergie magnétique

f_m : Coefficient de frottement de la machine

J_m : Moment d'inertie de la machine

C_{em} : Couple électromagnétique

C_r : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine

η : Rendement

σ : Coefficient de dispersion magnétique

Ω : Vitesse mécanique

θ : Angle électrique.

θ_s, θ_r : Déphasage de l'axe direct par rapport au stator et rotor.

Liste des abréviations et des symboles

ω_{cor} : Vitesse de rotation du repère de PARK

ω_s : Vitesse électrique du champ tournant

ω_r : Vitesse électrique du rotor

Sigles :

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation.

DFIM : Doubly Fed Induction Machine.

MLI : Modulation à Largeur d'Impulsions.

PI : Action Proportionnelle et Intégrale.

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor.

Introduction générale

Introduction générale

Depuis l'ère de l'industrialisation, les chercheurs ont été confrontés à "comment commander les machines électriques à des vitesses variables". Car les entraînements électriques exigent de plus en plus de hautes performances, une fiabilité accrue, et un coût réduit. Au 19^{ème} siècle, ce problème a été résolu avec les moteurs à courant continu, dont on peut modifier la vitesse de rotation de zéro à la vitesse maximale, et ceci en agissant sur la tension d'induit en gardant le flux d'induction constant. Cependant, la présence du système balais-collecteur les pénalise : ces machines ne peuvent servir ni dans le domaine des grandes puissances, ni en milieux corrosifs, s'y ajoute aussi l'entretien que nécessite le collecteur [1]. Ces contraintes ont donc orienté la recherche dans le domaine de la vitesse variable vers les machines à courant alternatif, et plus particulièrement vers les machines asynchrones. Celles-ci ont en effet de nombreux avantages: coût de fabrication réduit, construction relativement simple, support des surcharges, vitesse de rotation plus élevée et n'exigent pas d'entretien permanent. L'inconvénient de cette catégorie de machines réside dans la complexité de leur fonctionnement, car elles se comportent comme des systèmes multi-variables, non linéaires et fortement couplés, d'où la difficulté de leur commande [2].

Grâce à l'évolution technologique récente de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, les problèmes inhérents aux commandes des machines alternatives ont été résolus, rendant ainsi les machines à courant continu de moins en moins utilisées. L'électronique de puissance permet de générer des grandeurs électriques de fréquence, de tension et de courant variable, tout en assurant un rendement élevé. Les convertisseurs sont associés à une électronique numérique de commande permettant l'implantation de puissants algorithmes de contrôle en temps réel. Il existe une nouvelle solution utilisant la machine alternative fonctionnant dans un

mode un peu particulier, il s'agit de la machine asynchrone à double alimentation "MADA" : c'est une machine asynchrone triphasée avec un rotor bobiné qui peut être alimentée par deux source de tensions l'un au stator et l'autre au rotor.

Un intérêt de plus en plus croissant est accordé à cette machine. Cet intérêt est dû aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor et un élargissement de la plage de vitesse (hypo synchrone, synchrone, hyper synchrone) [2].

Pour un fonctionnement à des vitesses variables on doit insérer à la machine un convertisseur à M.L.I (Modulation à Largeur d'Impulsions) entre la machine et le réseau. Car, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension est redressée et un onduleur connecté côté réseau est chargé d'assurer la cohérence entre la fréquence du réseau et celle délivrée par le dispositif. La machine asynchrone à double alimentation est essentiellement non linéaire, dû au couplage entre le flux et le couple électromagnétique.

Le point de départ de cette étude a été d'aller vers une "modélisation et simulation d'une machine asynchrone à double alimentation". Ce mémoire, est composé de trois chapitres.

Le premier chapitre :

Aborde l'étude sous une forme assez descriptive. En effet, à travers une étude bibliographique. Nous présentons un état de l'art sur la MADA, afin d'étudier son principe de fonctionnement et d'évaluer les avantages et les performances apportés par cette machine, dans les différents domaines d'application. En plus, une classification des différents types de cette machine sera présentée.

Le deuxième chapitre :

Fait l'objet d'une étude de modélisation de la MADA ou un modèle mathématique biphasé de la MADA sera introduit.

Le troisième chapitre :

En fin Une étude par simulation sera présentée avec interprétation et une conclusion.

Chapitre I

La machine asynchrone à double alimentation

- dans la seconde, les deux armatures sont couplées à deux onduleurs de tension. C'est la double alimentation de la machine, dont la structure présente une bonne flexibilité et un nombre suffisant de paramètres de réglage [2].

I.2. Description de la machine asynchrone à double alimentation :

La première apparition de la machine asynchrone à double alimentation "*doubly-fed induction machine (DFIM)* ", date de l'année 1899 [3], [4], [5] ; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [6], [7], [8].

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements ; Figure (I-1) [4], [9].

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulement triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques (rotor bobiné) [6], [10]. Le rotor bobiné comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator raccordé en étoile et dont l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague et permet une connexion externe des bobinages au rotor. Cette connexion est une liaison d'alimentation externe permet de réaliser un contrôle des grandeurs rotoriques ; Figure (I-2) [11].



Figure (I-1): Stator



Figure (I-2): Rotor bobinée

Pour être classé comme machine à double alimentation il faut qu'il y ait des sources actives sur le stator et le rotor à la fois. Dans les systèmes modernes, une de ces sources est dérivée électroniquement, et peut être commandée pour fournir l'opération vitesse variable du système, soit comme un moteur ou un générateur. Le convertisseur de puissance est typiquement relié à l'enroulement du rotor. L'autre source (réseau) a typiquement une fréquence et une tension nominalement fixées, qui est habituellement un raccordement direct au stator ; Figure (I-3) [5].

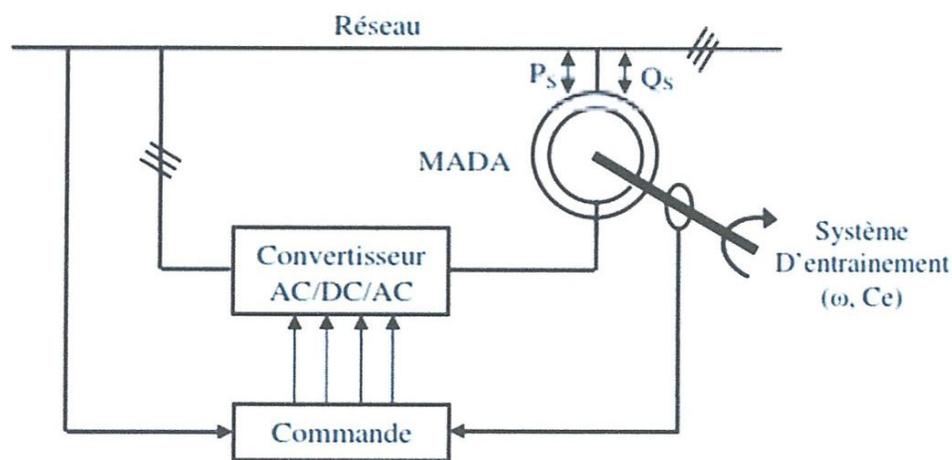


Figure (I-3) : Schéma d'alimentation typique de la MADA.

I.3. Classification :

Dans la littérature du domaine des machines asynchrone à double alimentation, on trouvera la classification suivante [2], [7], [12], [13], [14] :

I.3.1. Machine à double alimentation simple :

La machine à double alimentation simple (MADAS), est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague (Single Doubly Fed Induction Machine). La figure (I-4) illustre le schéma de principe de cette dernière, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, ainsi que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte

dernière, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, ainsi que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte que le glissement de la machine peut être contrôlé. Il faut noter que le convertisseur indiqué dans la figure peut être composé par un redresseur et un onduleur (conversion indirecte) ou bien peut être un cyclo-convertisseur (conversion directe) [12], [13], [14].

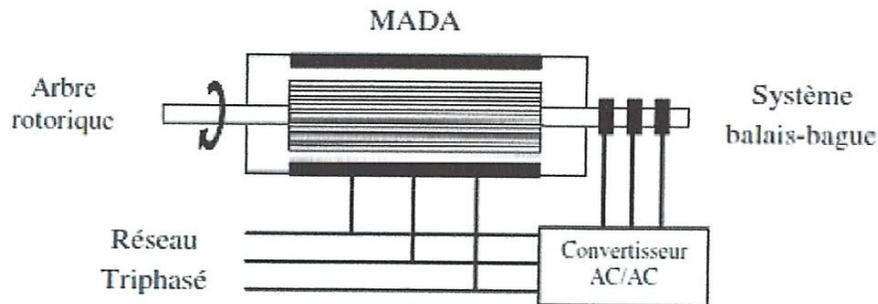


Figure (I-4) : Schéma de principe de la machine à double alimentation simple.

I.3.2. Machine à double alimentation en cascade :

Cette machine est constituée de deux MADA dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement, (Cascade Doubly Fed Induction Machine). La figure (1-5) présente les schémas de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées [2].

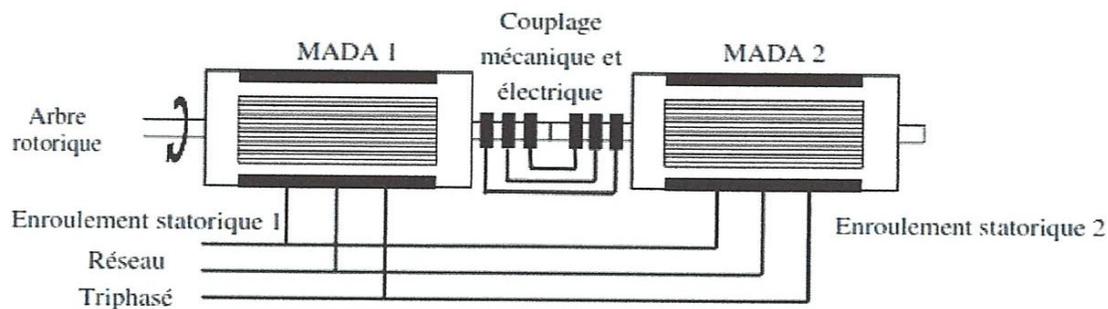


Figure (I-5) : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade.

I.3.3. Machine à double alimentation cascade à un repère :

La machine à double alimentation cascade à un repère consiste de deux machines asynchrones à cage connectés mécaniquement, (Single Frame Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La figure (I-6) présente le schéma de principe, tel que le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté à celui-ci par l'intermédiaire d'un convertisseur alternatif-alternatif [2].

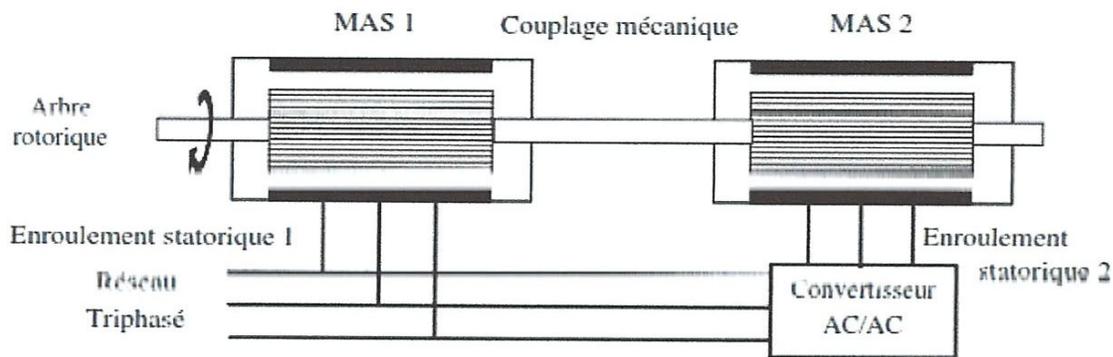


Figure (I-6) : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.

I.3.4. Machine à double alimentation sans collecteur :

Cette machine est constituée par deux enroulements prolongés dans un seul stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre par un convertisseur AC/AC, figure (I-7). Ce type de machine constitué de deux enroulements statoriques ayant des nombres de paires de pôles différents ; ainsi que celui du rotor, qui doit être la somme de ces deux nombres de paires de pôles.

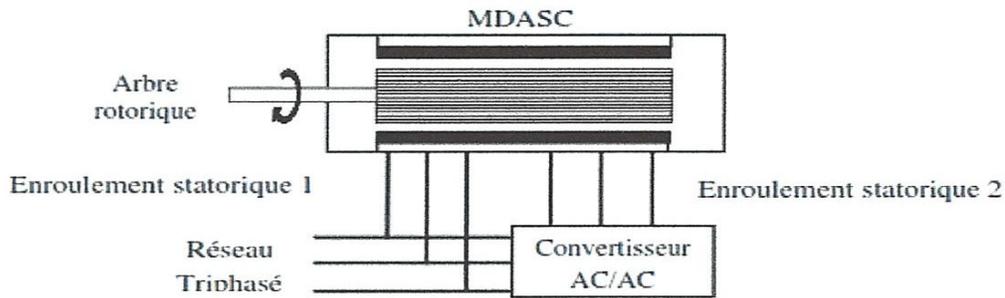


Figure (I-7) : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur.

Parmi les types les plus connus de machine à double alimentation sans collecteur, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable (Doubly Fed Reluctance Machine) qui consiste à un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans collecteur et un rotor basé sur le principe de la réluctance (entrefer variable). Cette dernière est caractérisée par un flux d'entrefer pulsatoire [2].

I.3.5. Machine à double alimentation sans balai :

L'idée de la machine à double alimentation sans balais BDFIM (Brushless Doubly Fed Induction Machine) a été pour la première fois mise en évidence par Steinmetz à la fin du 19^{ème} siècle. Le schéma de montage d'un tel système est montré dans la figure (I-8) où deux machines à rotor bobiné ont été calées sur le même axe. Les enroulements statoriques des deux machines sont reliés au réseau, alors que les enroulements rotoriques sont interconnectés entre eux et par conséquent les bagues sont de facto éliminées. La puissance de glissement de la première machine est donc employée pour exciter la deuxième machine. Ce concept élégant a longtemps été dans les perspectives des concepteurs comme solution efficace pour les applications des grandes puissances [2].

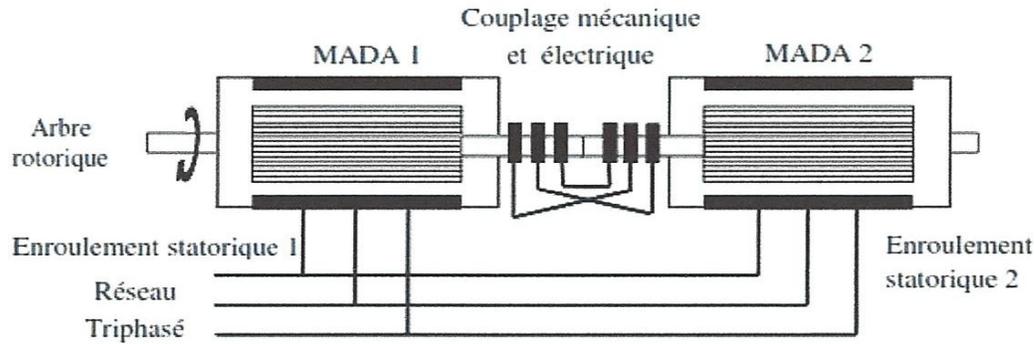


Figure (I-8) : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balai.

D'après cette classification illustrée, on constate que la machine à double alimentation simple (MADAS), représente une construction établie par rapport aux autres types de machines. Economiquement, il est difficile de prévoir quel type de machine à double alimentation sera finalement réussi. Cependant, la machine à double alimentation à réluctance variable (MDARV), qui est analogue à la machine à double alimentation simple par sa commande et son modèle reste la plus attractive par beaucoup de chercheurs [12].

I.4.Evaluation de la MADA :

I.4.1.Structure de la MADA :

La MADA présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques 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 . Figure (I-9), [1], [6].

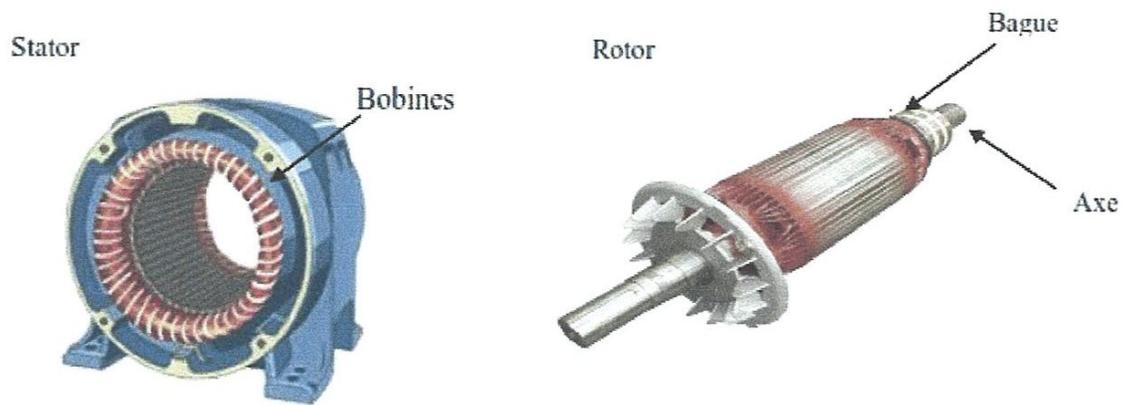


Figure (I-9) : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

I.5. l'utilisation du MADA :

Aujourd'hui la Machine Doublement Alimentée est utilisée pour diverses applications :

- Génératrice pour les énergies renouvelables (pour divers éoliens).
- Moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

I.6. Etude du fonctionnement en génératrice :

L'utilisation de la MADA pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne est très répandue. En effet, avec le regain d'intérêt pour les énergies renouvelables, les systèmes éoliens à vitesse variable avec la MADA connaissent un grand essor et un grand nombre de publications accompagnent ce développement. La littérature est abondante dans ce domaine et les thèmes abordés sont très variés :

- Modélisation des zones limites de fonctionnement et stabilité de la MADA.

- Qualité de l'énergie fournie et qualité des courants et tensions notamment en présence des défauts au niveau du réseau.
- Stratégies de commande de la MADA avec ou sans capteur de vitesse et de position.
- Dimensionnement du convertisseur au rotor.
- Stator relié au réseau ou sur charge indépendante.

La configuration, largement répandue dans les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA, est représentée par , la figure (I-10). Elle consiste à alimenter le rotor par un convertisseur et à lier le stator directement au réseau[12].

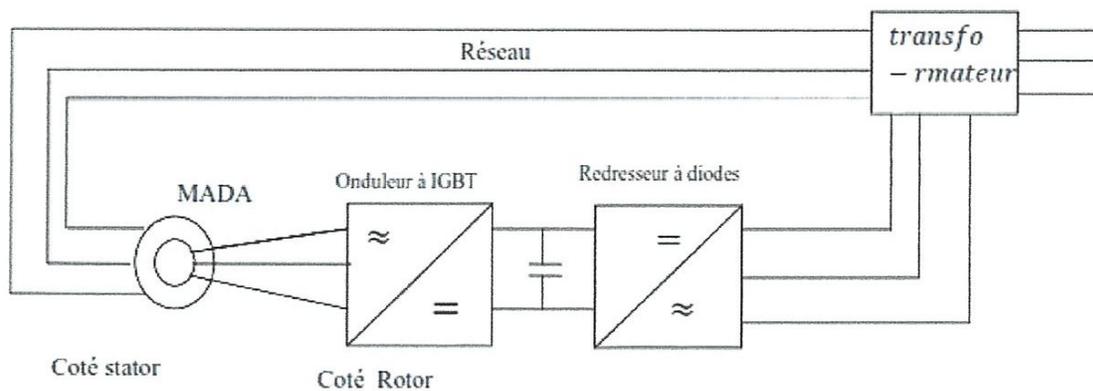


Figure (I-10) : Schéma de l'alimentation de la MADA pour application génératrice

I.7. Etude de fonctionnement en moteur :

Pour le cas de l'application moteur de la MADA, les principales études ont été dédiées aux stratégies de commande linéaires et non linéaires avec ou sans capteur de vitesse ou de Position.

Dans le fonctionnement moteur le rotor de la MADA est alimenté par un convertisseur et le stator est alimenté par le réseau figure (I-11).

Le nombre d'études traitant ce type de configuration est inférieur au précédent. Néanmoins les travaux présents dans la littérature montrent les bonnes performances de cette machine dans ce mode de fonctionnement. Ces travaux concernent principalement les stratégies de commande [1].

I.7.1. Premières configurations : Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur :

Cette classe est dite MADA simple. Les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à son propre onduleur. La figure (I-11) représente un schéma de principe de cette catégorie de MADA [15].

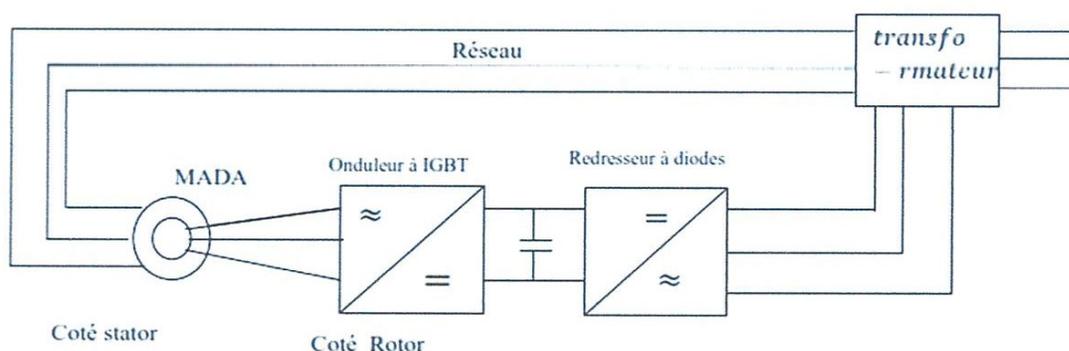


Figure (I-11) : Schéma de l'alimentation de la MADA

I.7.2. Deuxième configuration : Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cyclo convertisseur :

Dans cette configuration les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé fixe tandis que le rotor est relié à un cyclo convertisseur. La figure (I-12) représente un schéma de principe de cette catégorie de MADA [16].

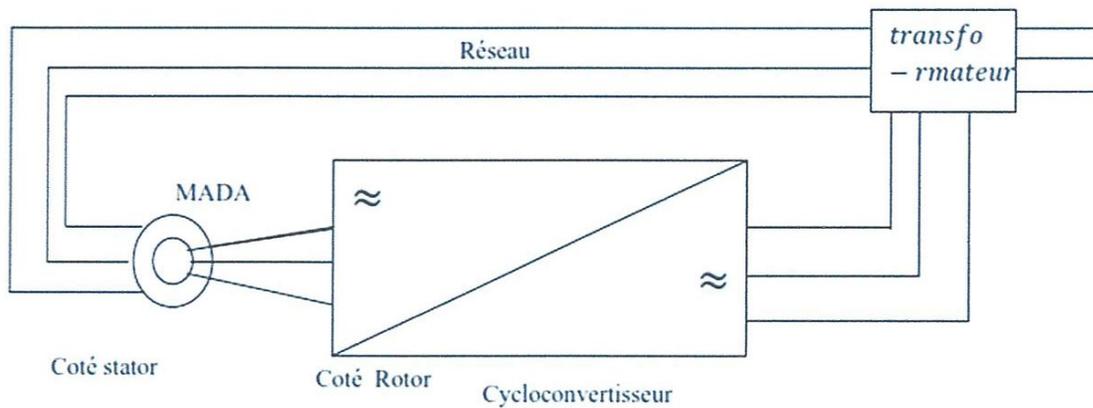


Figure (I-12) : schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur deuxième configuration

I.7.3. Troisièmes configurations : Stator alimenté par onduleur, rotor alimenté par un onduleur :

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

Elle peut prendre deux formes équivalentes :

- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun, ce dernier est donc une source d'alimentation commune aux deux côtés.
- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs. Dans ce cas, c'est le réseau qui est la source du couplage électrique existant entre les deux côtés [15]. La figure (I-13) représente un schéma générique de cette structure.

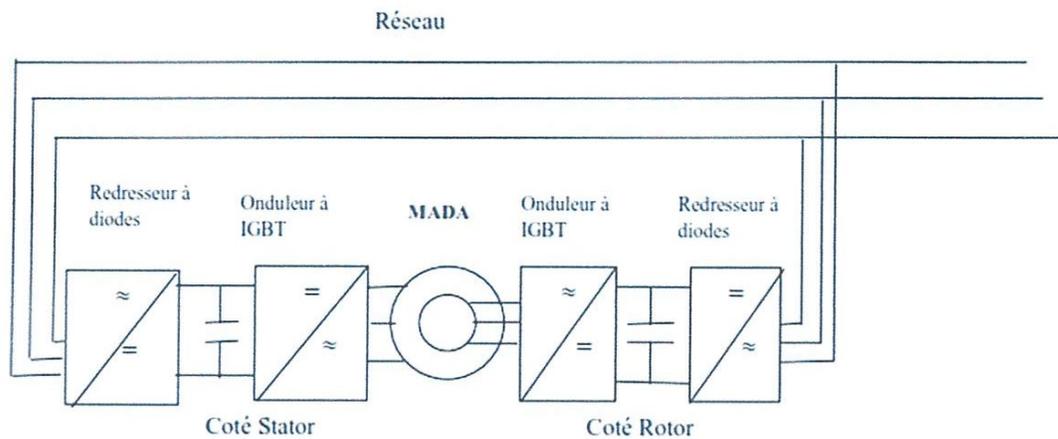


Figure (I-13) : schéma de l'alimentation de la MADA pour application moteur troisièmes configuration

I.8. Mode de variation de vitesse :

L'examen de la formule de la vitesse donné par : $\Omega = \frac{2\pi}{P} f_s (1 - g)$ fait sortir trois modes de variations :

- Action sur le glissement.
- Variation de la fréquence.
- Action sur le nombre de pôles.

I.8.1. Action sur le glissement :

Pour régler la vitesse, lorsqu'on utilise ce principe, on place entre le réseau et le moteur un gradateur pour chacune des phases. On fait varier la vitesse par action sur l'angle de passage des courants durant chaque alternance. Ce mode affecte directement le rendement $\eta = (1 - g)$ Techniquement on réalise ce type par action sur la tension d'alimentation pour le moteur à rotor à cage et avec une résistance rotorique pour le moteur à rotor bobiné.

I.8.2.Variation de la fréquence :

Pour faire varier la vitesse dans de bonnes conditions, il faut faire varier sa fréquence d'alimentation en utilisant des convertisseurs (onduleur MLI ou plein onde, ou bien avec cyclo convertisseur).

I.8.3.Action sur le nombre de pôles :

C'est un mode constructif par action sur le nombre de pôles, cette technique de bobinage consistant à changer la polarité de la machine par un changement des sens de courant. La vitesse Ω varie du simple au double et inversement ce qui implique une variation discontinue [17].

I.9.Représentation de la machine machines asynchrones à double alimentation :

Les enroulements des trois phases statorique et rotorique dans l'espace électrique peuvent être représentés comme indiqué en ; Figure (I-14).

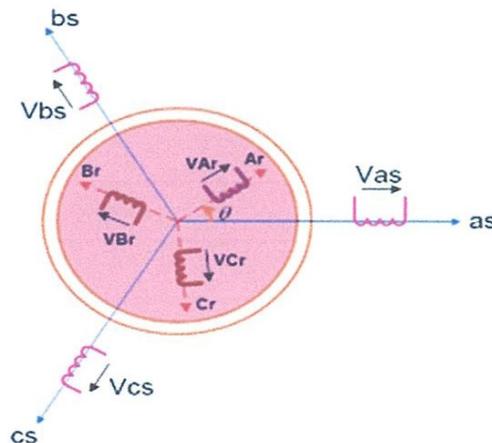


Figure (I-14) :Représentation de la MADA

I.9.1.Principe de fonctionnement :

La machine étudiée est une machine asynchrone à double alimentation triphasé, équilibrée et à rotor bobiné, dont la source d'excitation est disposée au

niveau du rotor.

Les bobines du rotor sont connectées au réseau, un flux magnétique tournant apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans la bobine statorique et rotorique et donc du courant statique pendant la rotation, le flux magnétique génère par le stator crée des F.E.M dans les bobinages du rotor, le rapport entre les F.E.M crée au rotor et stator est :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (\text{I-1})$$

N_r et N_s sont respectivement le nombre de spire de bobinage du rotor et stator
 ω_v et ω_p sont respectivement les pulsation de synchronisme et mécanique de la machine.

En définissant le glissement par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (\text{I-2})$$

Le courant dans le stator et le rotor est défini comme dans le cas d'un transformateur parfait:

$$\frac{I_r}{I_s} = \frac{N_s}{N_r} \quad (\text{I-3})$$

Donc le rapport entre S_r au rotor et la puissance S_s au stator devient :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{I_r}{I_s} \cdot \frac{E_r}{E_s} = g \quad (\text{I-4})$$

L'équation (I-4) montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor et, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator étant supposée constant, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement, [18].

I.9.2. Régimes de fonctionnement de la MADA :

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA, peuvent être divisés en fonction de glissement comme suit :

-Régimes de fonctionnement stationnaire ($g=1$) :

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s ; par conséquent, le rotor est le siège d'une F.E.M induite avec une fréquence f_r identique avec f_s . Dans cette condition, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.

-Régimes de fonctionnement hypo synchrone ($0 < g < 1$) :

En tournant le rotor dans la direction du flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchronisme, plus f_r tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.

-Régimes de fonctionnement synchrone ($g=0$) :

Au point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Dans ce cas les enroulements du rotor tournent avec la même vitesse que celle du flux statorique ; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.

-Régimes de fonctionnement hyper synchrone ($g < 0$) :

Par davantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative. L'augmentation de la vitesse des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor[19].

I.10. Etude et Transferts de puissance dans la MADA :

Grâce aux convertisseurs de puissance bidirectionnels, dans le circuit du rotor, la MADA est capable de travailler en tant que génératrice ou moteur de façon hyper-synchrone ou hypo-synchrone. On utilise le schéma de la MADA en convention moteur hypo-synchrone ; figure (I-15) car c'est la convention habituelle.

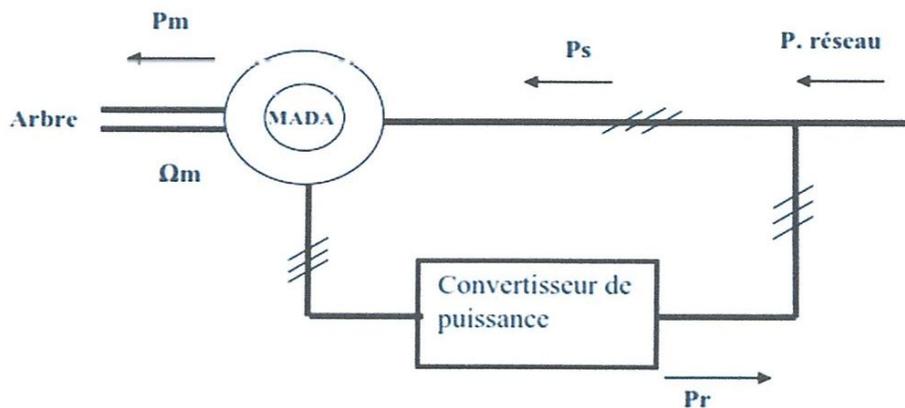


Figure (I-15): la MADA en convention moteur hypo-synchrone

En supposant que les pertes dans les circuits du stator et du rotor peuvent être négligées, on peut relier les puissances ainsi :

$$P_m = P_{\text{réseau}}$$

$$P_{\text{réseau}} = P_s - P_r$$

$$P_r = g \cdot P_s$$

$$P_s = P_{\text{réseau}} / (1 - g)$$

P_m : Puissance mécanique ($P_m < 0$ si la machine est entraînée)

P_s : Puissance active absorbée par le stator ($P_s < 0$ si la MADA est génératrice)

P_r : Puissance active débitée par le rotor (son sens dépend du signe du glissement)

$P_{réseau}$: Puissance active fournie par le réseau à la machine

($P_{réseau} < 0$ si la MADA est génératrice)

Ω_m : Vitesse de rotation de la MADA

-En mode génératrice hyper-synchrone ($\Omega_m > \Omega_s$, $g < 0$), P_r est négatif, la puissance est transmise du rotor au réseau.

-En mode génératrice hypo-synchrone ($\Omega_m < \Omega_s$, $g > 0$), P_r est positif, la puissance est transmise du réseau au rotor. Dans les deux cas la puissance statorique, P_s , alimente le réseau [11], [20].

On peut résumer ceci dans le tableau suivant :

	Moteur $P_m < 0$	Générateur $P_m > 0$
Hypo synchrone $P_s = -(P_m + P_r)$	$P_s > 0$, $P_r < 0$	$P_s < 0$, $P_r > 0$
Hyper synchrone $P_m = +(P_s + P_r)$	$P_s > 0$, $P_r > 0$	$P_s < 0$, $P_r < 0$

Tableaux (I-1) : la puissance du MADA

I.11. Le rôle de convertisseur statique :

Le convertisseur statique se compose d'un redresseur, un bus continu et un onduleur. Il est réversible en courant puisque la puissance rotorique, P_r , transite par le convertisseur dans un sens pour un fonctionnement *hypo-synchrone*, et dans le sens opposé pour un fonctionnement *hyper-synchrone*. L'onduleur devient redresseur et le redresseur devient onduleur. Sachant que

$$P_r = g \cdot P_s$$

Et que généralement, la valeur absolue du glissement g est très inférieure à 1, P_r est seulement une fraction de la puissance statorique P_s . Le signe de P_r change avec le glissement g . On a deux types de fonctionnement possibles pour la génératrice selon le signe du glissement g .

I.12. Mode de fonctionnement de la MADA:

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que dans la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et en dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [21]:

I.12.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :

La figure (I-16) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjecter au réseau. On a donc un fonctionnement moteur au-dessous de la vitesse de synchronisme. Ce régime est généralement connu comme mode de récupération de l'énergie de glissement. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joule dans le rotor.

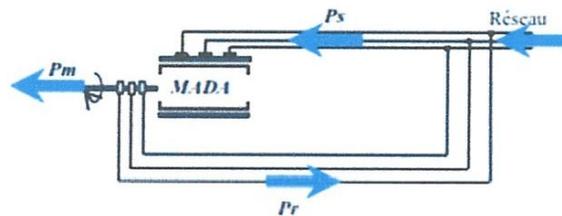


Figure (I-16) : Fonctionnement en mode *moteur hypo synchrone*

I.12.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :

La figure (I-17) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator, la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor, on a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

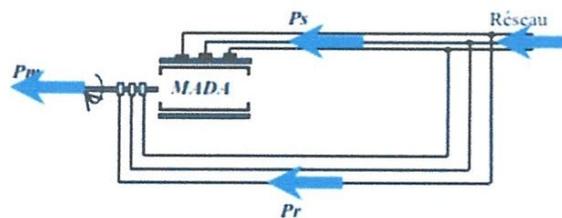


Figure (I-17) : Fonctionnement en mode *moteur hyper synchrone*

I.12.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone :

La figure (I-18) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un

fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

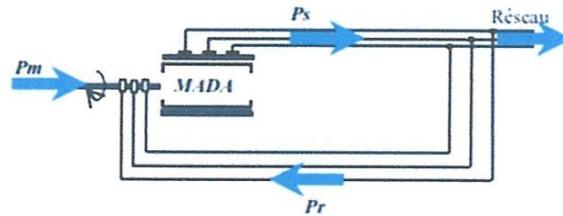


Figure (I-18) : Fonctionnement en mode *générateur hypo synchrone*

I.12.4. Fonctionnement en mode *générateur hyper synchrone* :

La figure (I-19) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée comme des pertes joule dans le rotor.

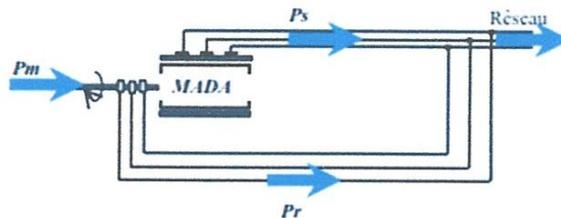


Figure (I-19) : Fonctionnement en mode *générateur hyper synchrone*

I.13. Domaines d'application de la MADA :

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative

sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée tel que, [4] :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variables ;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, tel que [2] :

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines ;
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime ;
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc... .

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage [9].

I.14. Avantages et inconvénients de la MADA :

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs : sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

I.14.1. Avantages de la MADA :

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine [7].
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique [22].
 - La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse [4], [22].
- Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement [7].
 - L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur [4].
- En fonctionnement générateur, 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 synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [4].

- Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau [9].
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances [22].
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6) [22].
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale[22].
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation [22].

I.14.2.Inconvénients de la MADA :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Elle est plus longue à causes des balais [22].
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente.
- L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le contraire[2].
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [22].

I.15. Conclusion :

Dans ce chapitre après avoir passé en revue l'état de l'art sur la MADA on a présenté ses régimes de fonctionnement. Où principalement le fonctionnement en génératrice, qui est dédié pour des applications éoliennes et hydroélectriques, avec une grande variété de modes d'alimentation et de contrôle. Notons aussi, que la simplicité de sa commande et sa souplesse de reconfiguration lui ont associée le surnom d'une « Machine Généralisée ». Le chapitre suivant (II) sera dédié à la modélisation de cette machine.

Chapitre II

Modélisation de la MADA

II-1.Introduction :

Le système d'entraînement de la machine asynchrone intègre l'alimentation, le convertisseur statique, la machine et la commande indispensable au fonctionnement de l'ensemble. De ce fait, une modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, destinée aussi bien à l'étude de son comportement qu'à la mise en place des fonctionnements de la commande, est nécessaire pour le bon déroulement du processus d'entraînement.

Notre objectif est de présenter mathématiquement une modélisation de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'état selon le choix des différents repères. Généralement, ces modèles sont définis dans un référentiel diphasé, soit tournant (d, q) , soit fixe au stator (α, β) . Ces référentiels sont définis à partir du référentiel triphasé naturel de la MADA à l'aide de transformations mathématiques adaptées. , [23].

II-2.Modèle de la MADA :

Comme nous l'avons précédemment vu, la machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone classique à rotor accessible et identique au stator. Donc, le modèle de la MADA est le même que celui de la MAS avec l'exception des tensions rotoriques non nulles.

La machine asynchrone à double alimentation est représentée sur la figure (II-1) par ces si 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).

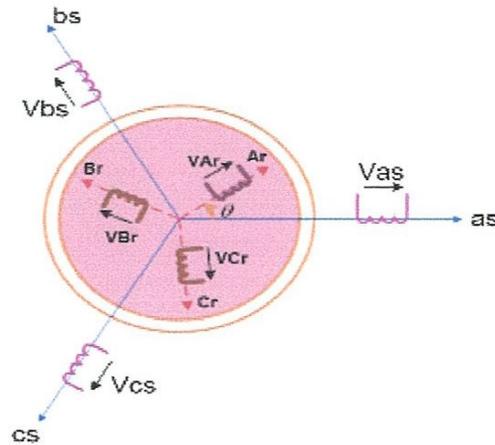


Figure (II-1) : Représentation schématique du modèle d'une MADA

Le modèle de la MADA présenté traditionnellement est un modèle en régime permanent. C'est à dire que la machine est supposée fonctionner en régime établi, qu'elle est alimentée sous un système triphasé de valeurs efficaces constantes et qu'elle tourne à une vitesse constante. Les grandeurs sont alors sinusoïdales et l'approche dans l'espace complexe est valable. Ce modèle n'est plus valable si la machine est alimentée par un onduleur triphasé commandé suivant un contrôle. A cette fin, L'étude de la machine est basée essentiellement sur la transformée de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes électriquement perpendiculaires appelés d pour l'axe direct, et q pour l'axe quadrature.

II-3.Hypothèses simplificatrices :

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

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

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

- Les flux sont additifs.
- Les inductances propres sont constantes.
- Il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

II-4. Modèle de la MADA dans le repère a,b,c :

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 :

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

Avec :

Grandeurs statoriques :

$$\begin{aligned} [V_s] &= [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}]^T \\ [I_s] &= [I_{as} \quad I_{bs} \quad I_{cs}]^T \end{aligned} \quad (\text{II-2})$$

$$[\phi_s] = [\phi_{as} \quad \phi_{bs} \quad \phi_{cs}]^T$$

Grandeurs rotoriques :

$$\begin{aligned} [V_r] &= [V_{ar} \quad V_{br} \quad V_{cr}]^T \\ [I_r] &= [I_{ar} \quad I_{br} \quad I_{cr}]^T \end{aligned} \quad (\text{II-3})$$

$$[\phi_r] = [\phi_{ar} \quad \phi_{br} \quad \phi_{cr}]^T$$

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

$$\begin{aligned} [\phi_s] &= [L_s] \cdot [I_s] + [M_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\phi_r] &= [L_r] \cdot [I_r] + [M_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{aligned} \quad (\text{II-4})$$

Où :

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

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

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

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

Avec :

$$\begin{aligned} [R_s] &= R_s \cdot [I]_{3 \times 3} \\ [R_r] &= R_r \cdot [I]_{3 \times 3} \end{aligned} \quad (\text{II-5})$$

$$\begin{aligned} [L_s] &= L_s \cdot [I]_{3 \times 3} \\ [L_r] &= L_r \cdot [I]_{3 \times 3} \end{aligned} \quad (\text{II-6})$$

$$[M_{ss}] = M_{ss} \cdot \begin{pmatrix} 0 & \cos(2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ \cos(2\pi/3) & 0 & \cos(2\pi/3) \\ \cos(2\pi/3) & \cos(2\pi/3) & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II-7})$$

$$[M_{rr}] = M_{rr} \cdot \begin{pmatrix} 0 & \cos(2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ \cos(2\pi/3) & 0 & \cos(2\pi/3) \\ \cos(2\pi/3) & \cos(2\pi/3) & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II-8})$$

$$[M_{sr}] = M \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{II-9})$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (\text{II-10})$$

Avec :

$[I]_{3 \times 3}$: est la matrice identité d'ordre 3.

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

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

$$W_{mag} = \frac{1}{2} ([I_s]^T [\phi_s] + [I_r]^T [\phi_r]) \quad (\text{II-11})$$

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

$$C_e = \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_{geom}} = n_p \cdot \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_{elect}} \quad (\text{II-12})$$

On peut déduire :

$$C_e = \frac{n_p}{2} [I_s]^T \left(\frac{d[M_{sr}]}{d\theta_{elect}} \right) [I_r] \quad (\text{II-13})$$

L'équation du mouvement (mécanique) est :

$$J_m \frac{d\Omega_r}{dt} + f_m \cdot \Omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{II-14})$$

Où :

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{n_p} \quad (\text{II-15})$$

$$\text{Avec : } [C_{23}] = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II-17})$$

$$\begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{pmatrix} \xrightarrow{C_{32}} \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} \quad \text{C-à-d} \quad [x_{abc}] = C_{32}[x_{\alpha\beta}] ; \quad (\text{II-18})$$

$$\text{Avec : } [C_{32}] = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II-19})$$

-Grandeurs α - β - Grandeurs d-q :

La transformation des grandeurs diphasées du repère fixe alpha - beta vers le repère tournant d - q s'exprime par :

$$\begin{pmatrix} X_d \\ X_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{pmatrix} \quad (\text{II-20})$$

θ est l'angle entre le repère diphasé fixe et le repère tournant d-q. La transformation inverse qui permet de passer de variables exprimées dans le repère diphasé d-q vers des variables exprimées dans le repère alpha - beta est :

$$\begin{pmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_d \\ X_q \end{pmatrix} \quad (\text{II-21})$$

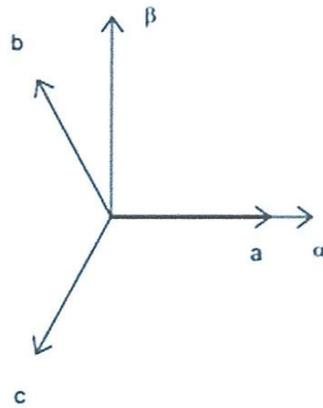


Figure (II-2) : Transformation de Concordia (abc- $\alpha\beta$)

Il apparaît clairement ensuite que les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celles des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier les équations. Ceci se fait en liant les angles :

$$\theta_s = \theta + \theta_r$$

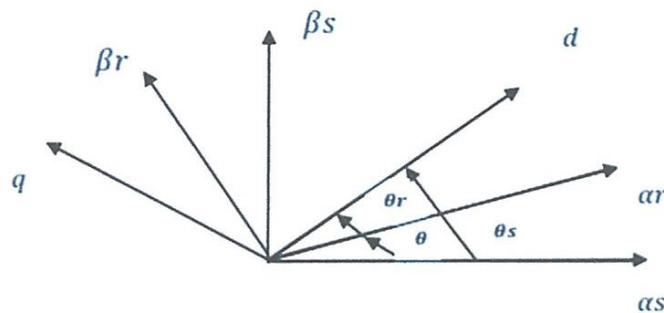


Figure (II-3) : Transformation de Park

II-5-1. La transformation de Park :

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d, q) tournant dont l'orientation est a priori arbitraire.

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

$$\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{pmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} \quad (\text{II-23})$$

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 $[P(\theta)]^{-1}$:

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II-24})$$

Alors les variables réelles sont obtenues à partir des variables biphasées :

$$\begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{pmatrix} \quad (\text{II-25})$$

II-5-3. Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d,q) :

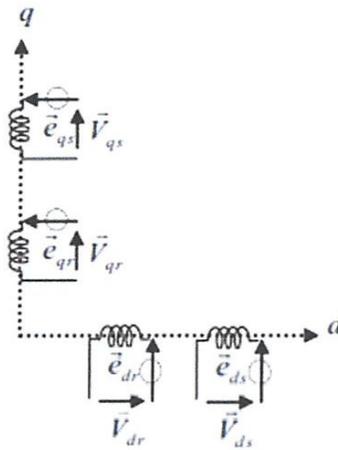


Figure (II-5) : Représentation de la MADA dans le repère de Park

Les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par :

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_{coor} \phi_{qs} \\
 V_{qs} &= R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_{coor} \phi_{ds} \\
 V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{qr} \\
 V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{dr}
 \end{aligned}
 \tag{II-26}$$

Avec :

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

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

$$\begin{aligned}
 \phi_{ds} &= L_s I_{ds} + M I_{dr} \\
 \phi_{qs} &= L_s I_{qs} + M I_{qr} \\
 \phi_{dr} &= L_r I_{dr} + M I_{ds} \\
 \phi_{qr} &= L_r I_{qr} + M I_{qs}
 \end{aligned}
 \tag{II-27}$$

II-6.Choix du référentiel :

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines électriques, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible. En effet, le calcul peut être plus ou moins complexe [26].

A partir du système d'axe (d, q) on peut avoir d'autres axes qui sont des cas particuliers. Sachant que, les composantes homopolaires sont supposées nulles :

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

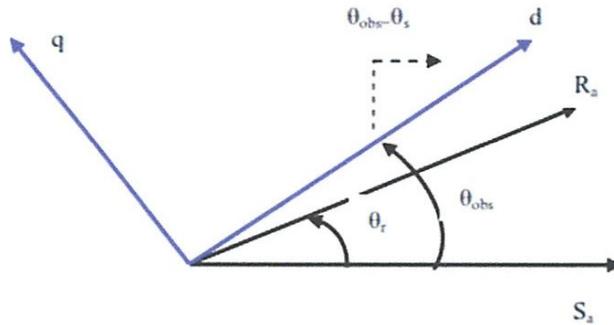


Figure (II-6) : Représentation de la MADA dans le repère biphasé

II-7.Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant :

On exprime les tensions par :

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\
 V_{qs} &= R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\
 V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\
 V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr}
 \end{aligned}
 \tag{II-28}$$

D'autre part, on peut déduire l'expression de la puissance électromagnétique de la machine dans le repère de Park après le calcul de la puissance instantanée comme suit [11], [24]:

$$P(t) = \frac{3}{2} [(V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs}) + (V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr})] \quad (\text{II-29})$$

En remplaçant V_{ds} , V_{qs} , V_{dr} et V_{qr} par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = P_{js}(t) + P_{jr}(t) + P_{mgs}(t) + P_{mgr}(t) + P_{em}(t) \quad (\text{II-30})$$

$P_{js}(t) = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot (I_{ds}^2 + I_{qs}^2)$: représente les pertes joule dans l'enroulement du stator.

$P_{jr}(t) = \frac{3}{2} \cdot R_r \cdot (I_{dr}^2 + I_{qr}^2)$: représente les pertes joule dans l'enroulement du rotor.

$P_{mgs}(t) = \frac{3}{2} \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{ds} + \phi_{qs} \cdot I_{qs})$: représente l'échange d'énergie électromagnétique avec la source rotorique.

$P_{em}(t) = \frac{3}{2} \cdot [-\omega_s \cdot \phi_{qs} \cdot I_{ds} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \cdot I_{qs} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \cdot I_{dr} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \cdot I_{qr}]$: représente la puissance électromagnétique.

En utilisant les expressions des flux magnétiques, on obtient :

$$P_{em}(t) = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qs} + \phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (\text{II-31})$$

Sachant que :

$$P_{em}(t) = \Omega_r \cdot C_{em} \text{ et } \omega_r = \Omega_r \cdot n_p \quad (\text{II-32})$$

On déduit l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot n_p \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qs} + \phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (\text{II-33})$$

Par ailleurs, les puissances active et réactive statorique et rotorique sont données par :

Puissance statorique :

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \\ Q_s &= \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) \end{aligned} \quad (\text{II-34})$$

Puissance rotorique :

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{3}{2} (V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr}) \\ Q_r &= \frac{3}{2} (V_{qr} I_{qr} - V_{dr} I_{qr}) \end{aligned} \quad (\text{II-35})$$

II-8. Mise sous forme d'équation d'état :

Les quatre équations de la machine, ainsi, le modèle globale, constitué des quatre équations, peut être écrit sous la forme standard d'un modèle d'état :

$$\begin{cases} L \cdot \frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot U \\ y = C \cdot x \end{cases} \quad (\text{II-36})$$

$$\text{On choisit pour vecteur d'état } x = [\phi_{ds}, \phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}] , \quad (\text{II-37})$$

$$\text{Avec : } U = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T \text{ et } B = [I]_{4 \times 4} \quad (\text{II-38})$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & \omega_s & \frac{R_s \cdot M}{L_s} & 0 \\ \frac{-R_s}{L_s} & \frac{-R_s}{L_s} & \frac{R_s \cdot M}{L_s} & 0 \\ -\omega_s & \frac{-R_s}{L_s} & 0 & \frac{R_s \cdot M}{L_s} \\ 0 & \frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) - R_r & 0 & \frac{R_s \cdot M}{L_s} \\ -\frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & \frac{M}{L_s} & -R_r & \sigma(\omega_s - \omega_r) \\ 0 & 0 & -\sigma(\omega_s - \omega_r) & -R_r \end{pmatrix} \quad (\text{II-39})$$

σ c'est le coefficient de dispersion définit comme suit :

$$\sigma = 1 - (M^2 / L_s L_r) : \quad (\text{II-40})$$

Et

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma \end{pmatrix} \quad (\text{II-41})$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II-42})$$

II-9. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre, l'étude de la machine asynchrone à double Alimentation. En premier lieu, le modèle de la machine dans le repère (a,b,c) est présenté. Puis, nous avons fait appel à la transformation de Concordia et la transformation de Park en vue de simplifier notre système, et le représenter dans le repère (d,q) tournant. Le modèle de la MADA élaboré dans ce chapitre sera utilisé dans le chapitre suivant, où nous présenterons la simulation de MADA.

Chapitre III

Simulation la MADA

III.1.Introduction :

Tout étude théorique doit-être suivie par l'étude expérimentale où une simulation numérique qui nous permet d'analyser et de donner une synthèse pour les systèmes avec beaucoup de précision.

III.2.Résultats de simulation numérique du système :

A l'aide de logiciel MATLAB, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour les deux types de fonctionnement moteur et générateur a été faite. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de R.H.Park. (Plan (d, q)) lié aux champs tournant. La figure (III 1) représente schéma de principe utilisé pour la simulation [11].

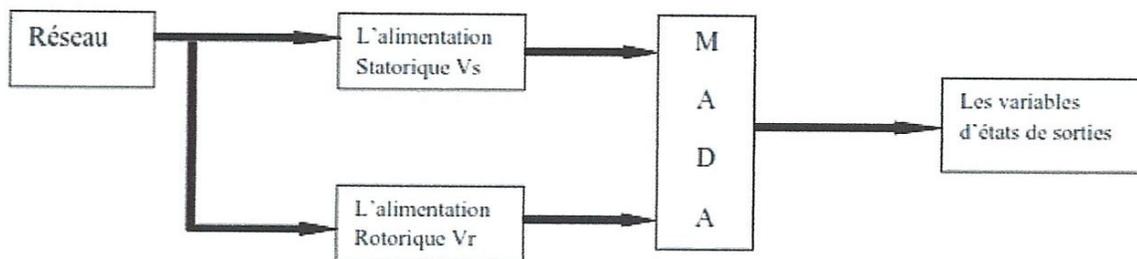


Figure (III-1) : Schéma bloc d'une chaîne directe du MADA.

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 2MW. En effet, les différents paramètres électriques et mécaniques de la machine sont rassemblés dans les tableaux suivants :

Les paramètres de la MADA est dans le tableau suivant :

Puissance nominal	$2 MW$
Résistance statorique (R_s)	$2.6 m\Omega$
Résistance rotorique (R_r)	$2.9 m\Omega$
Inductance de fuite statorique ($L_{\sigma s}$)	$87 \mu H$
Inductance de magnétisation (L_m)	$2.5 mH$
Inductance de fuite rotorique ($L_{\sigma r}$)	$87 \mu H$
Nombre de paires de poles (n_p)	2
Inertie (J)	$890 Kg.m^2$
Coefficient de frottement (D)	$0.0024 Nm.s/rad$
Frequence d'alimentation (f)	$50 Hz$

Tableau (III-1) : Paramètres de la machine

III.2.1. Résultats de simulation fonctionnement moteur de la MADA :

Les résultats de simulation de la machine asynchrone fonctionnement moteur à rotor en court circuit et présentée sur les figures (III-2) à (III-13)

concernant respectivement la vitesse et le couple, les composantes du courant statorique et du courant rotorique, des flux statoriques et rotorique.

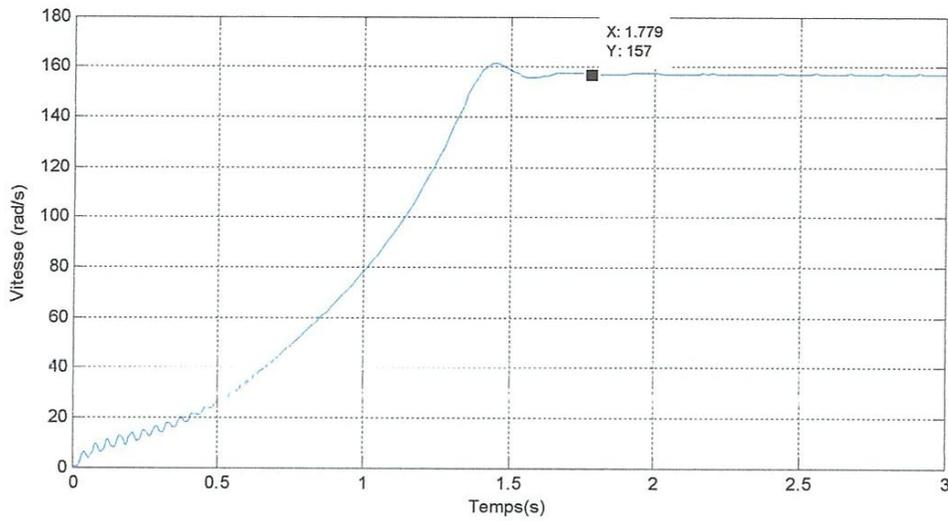


Figure (III-2) : Vitesse de la MADA avec $V_r=0V$, $f_s=50Hz$; $C_r= 0$ N.m.

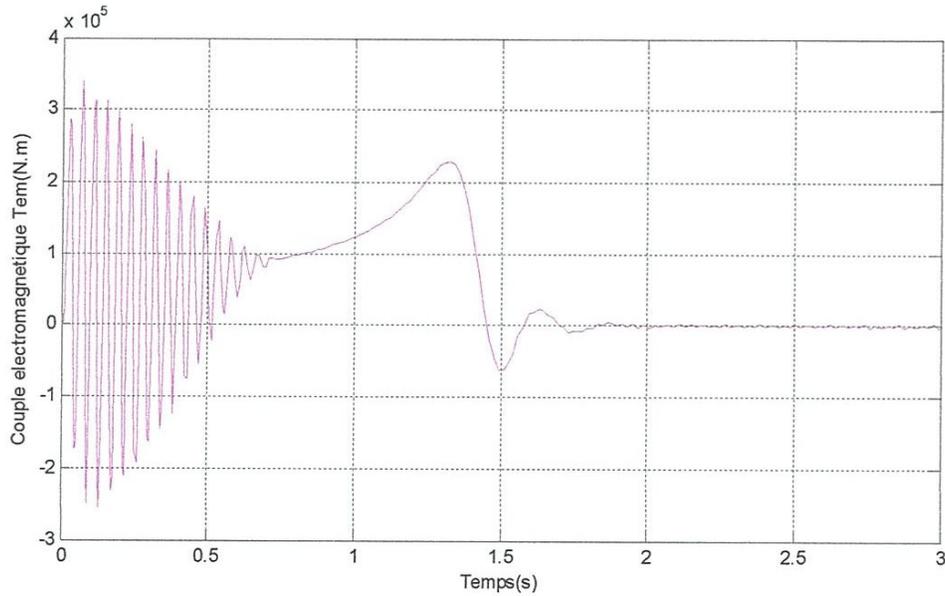


Figure (III-3) : Couple électromagnétique $V_r=0V$, $f_s=50Hz$; $C_r= 0$ N.m.

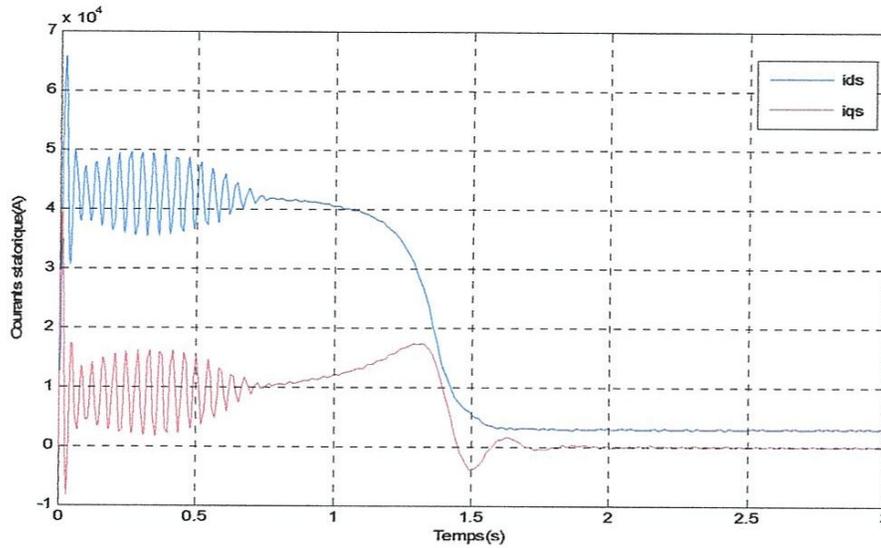


Figure (III-4) : Courant statorique de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= 0$ N.m.

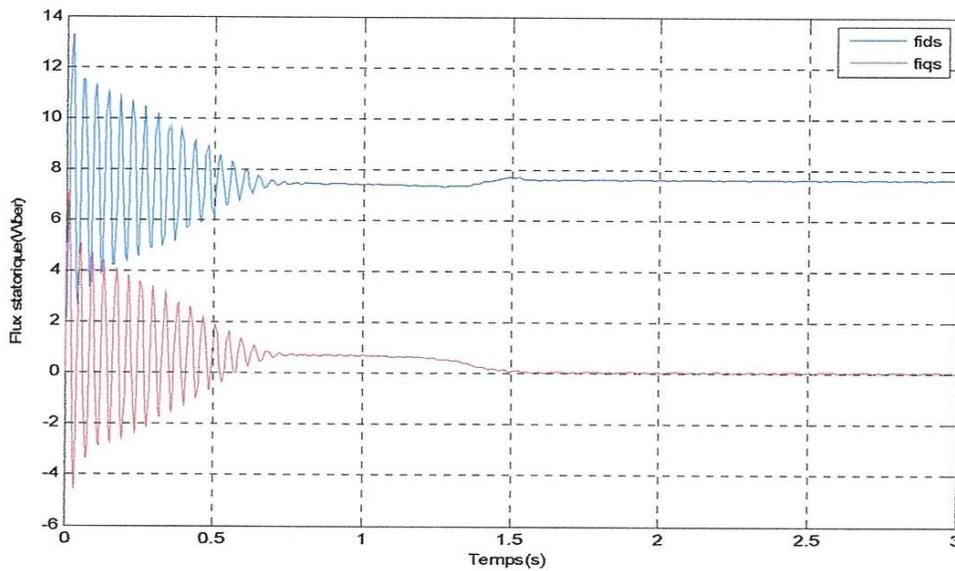


Figure (III-5) : Flux statorique de la MADA avec $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= 0$ N.m.

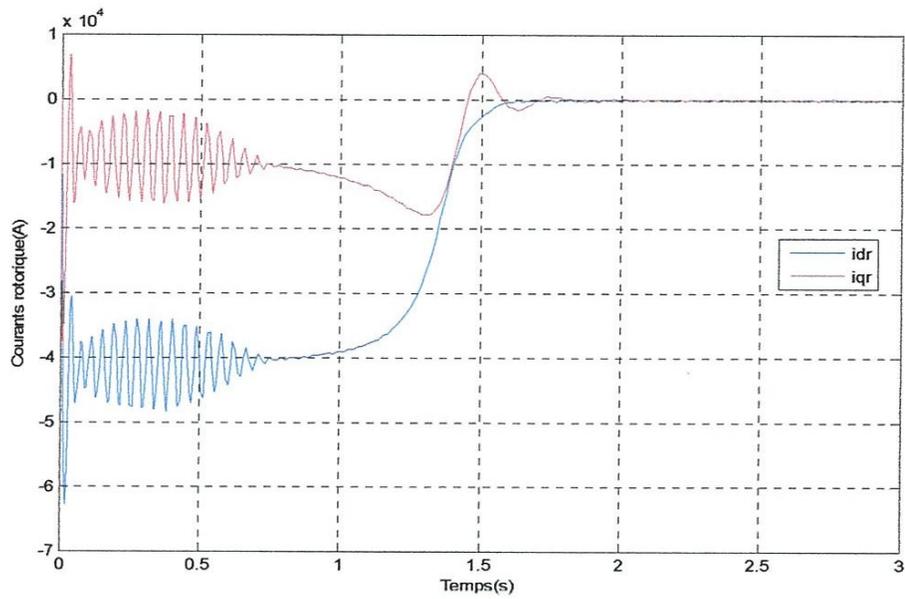


Figure (III-6) : Courant rotorique de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= 0$ N.m.

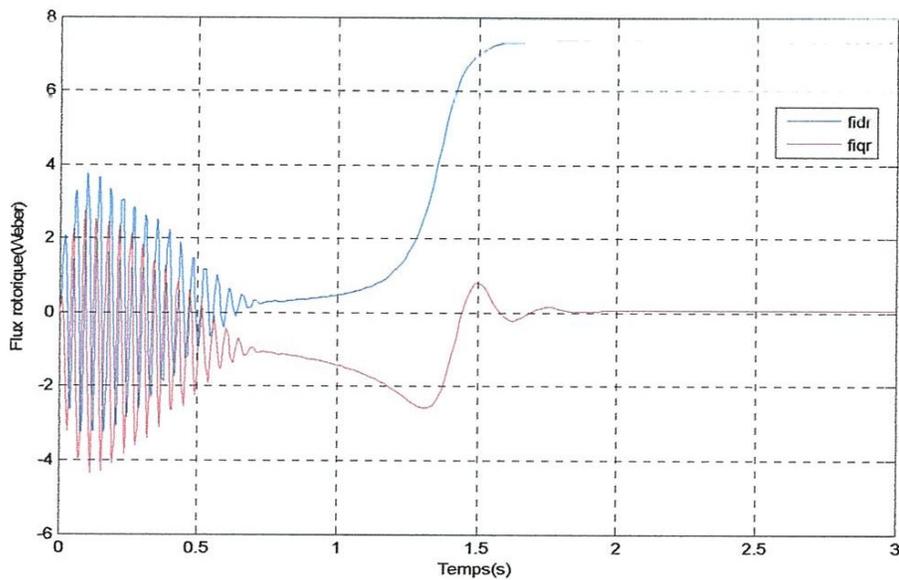


Figure (III-7) : Flux rotorique de la MADA avec $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= 0$ N.m.

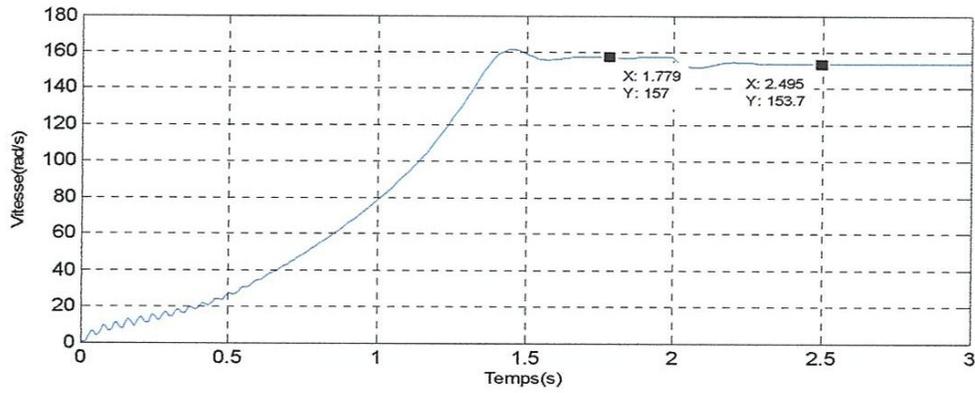


Figure (III-8) : Vitesse de la MADA avec $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r=Cst.$

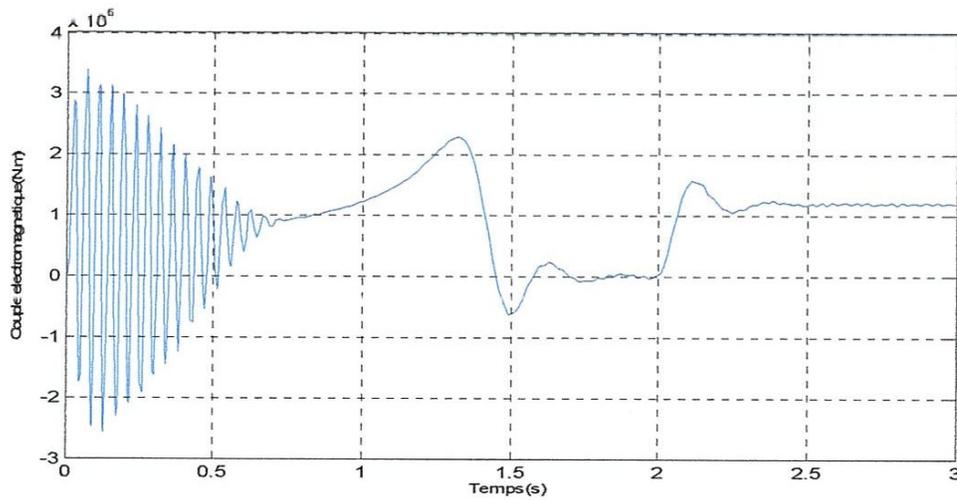


Figure (III-9) : Couple C_{em} de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r=Cst.$

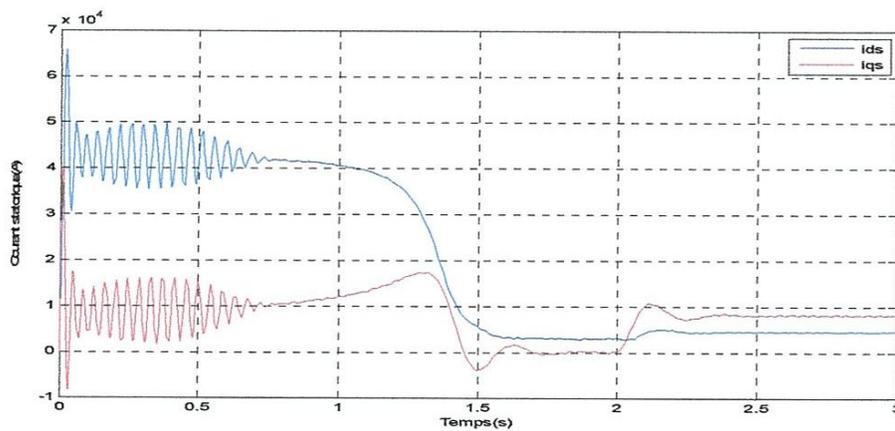


Figure (III-10) : Courants statoriques de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r=Cst.$

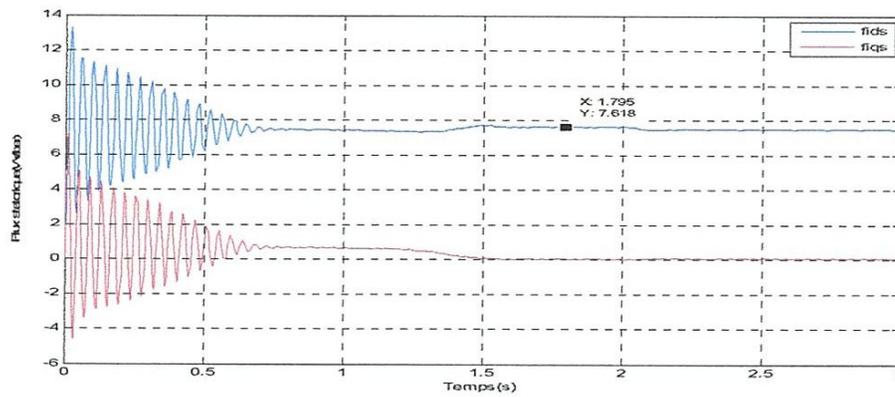


Figure (III-11) : Flux statoriques de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= Cst.$

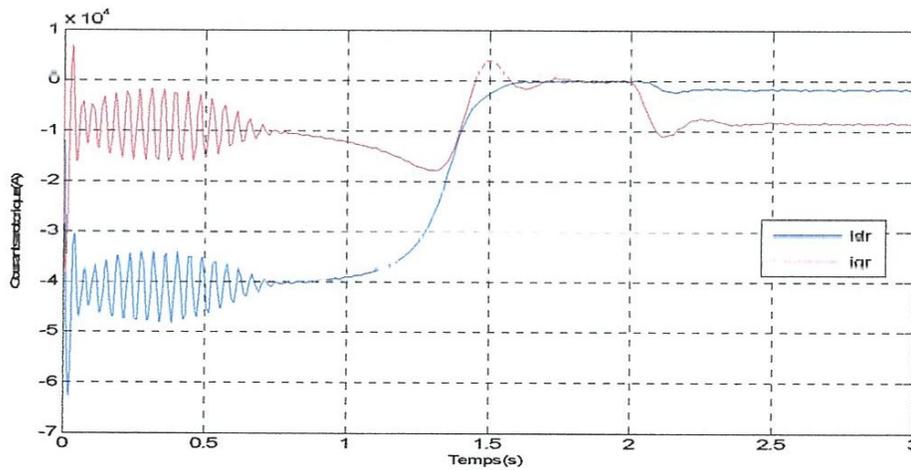


Figure (III-12) : Courants rotoriques de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= Cst.$

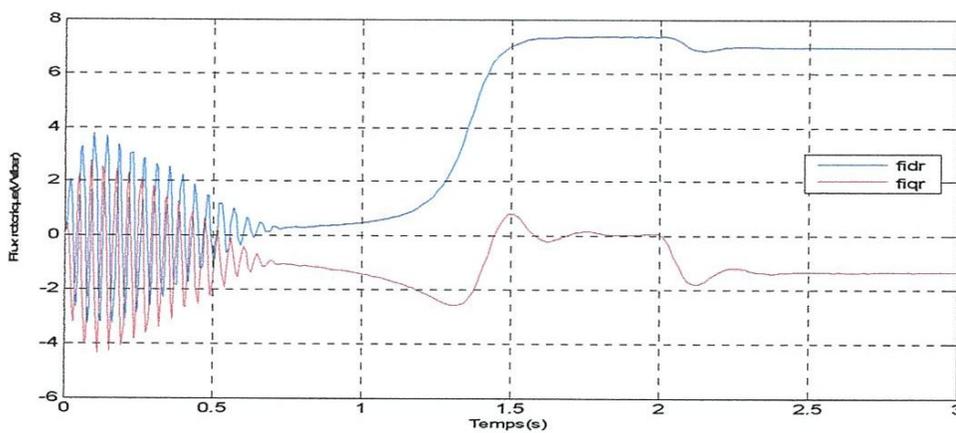


Figure (III-13) : Flux rotorique de la MADA $V_r=0V, f_s=50Hz ; C_r= Cst.$

III.2.2. Interprétation des résultats :

On remarque que toutes les grandeurs passent par un régime transitoire avant l'établissement du régime permanent caractérisé par une vitesse proche du synchronisme ; Figure (III-2). En plus, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche du zéro ; Figure (III-3) (présence de frottements visqueux). L'application d'un couple résistant se traduit par une augmentation du couple électromagnétique, augmentation de l'amplitude des courants statoriques ; Figures (III-8-III-13) et une diminution de la vitesse à cause d'un glissement plus important qui se répercute sur les courants rotoriques (vérification de la relation $f_r = g \cdot f_s$). La machine fonctionne alors en moteur hypo synchrone [6].

III.2.3. Résultats de simulation fonctionnement générateur de la MADA :

Les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle de MADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 1400 tr/min alimentée directement par deux sources de tension triphasée. L'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 690v, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 40v et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

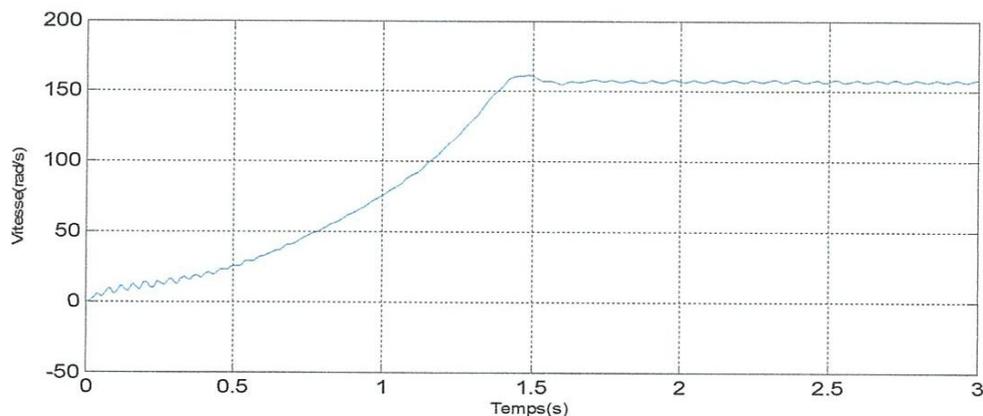


Figure (III-14) : Vitesse de la MADA

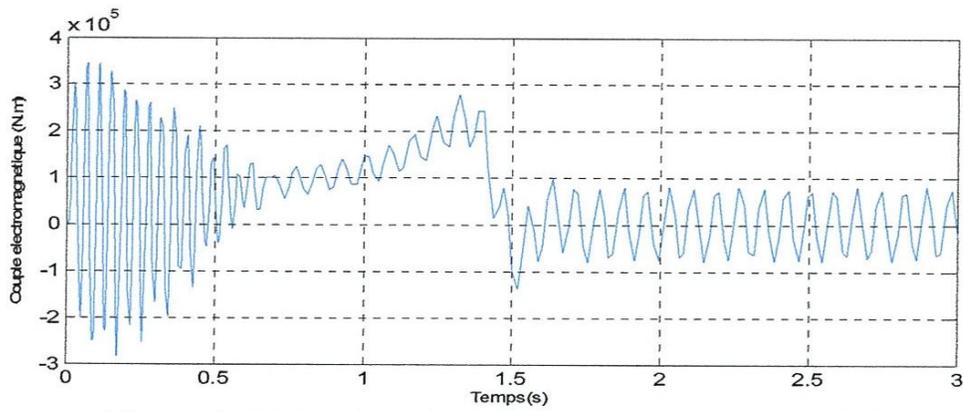


Figure (III-15) : Couple électromagnétique de la MADA

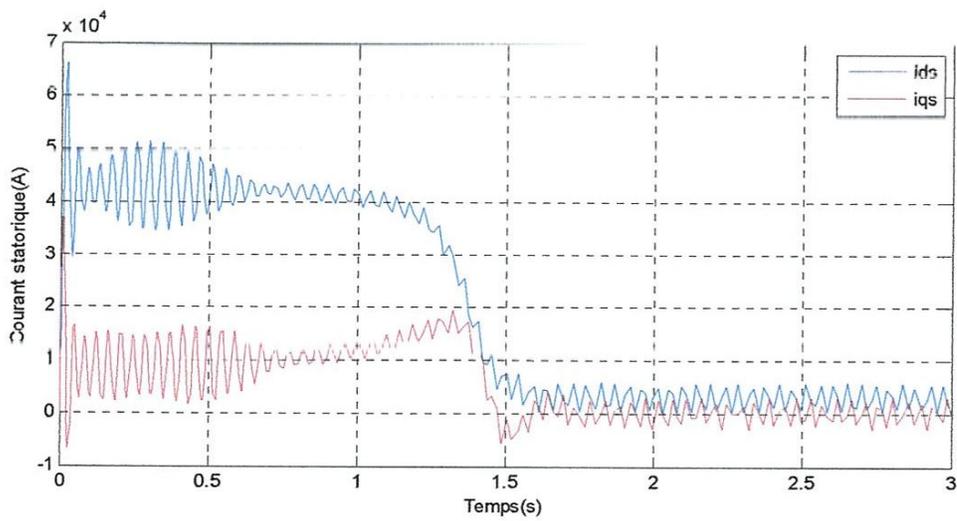


Figure (III-16) : Courants statoriques de la MADA

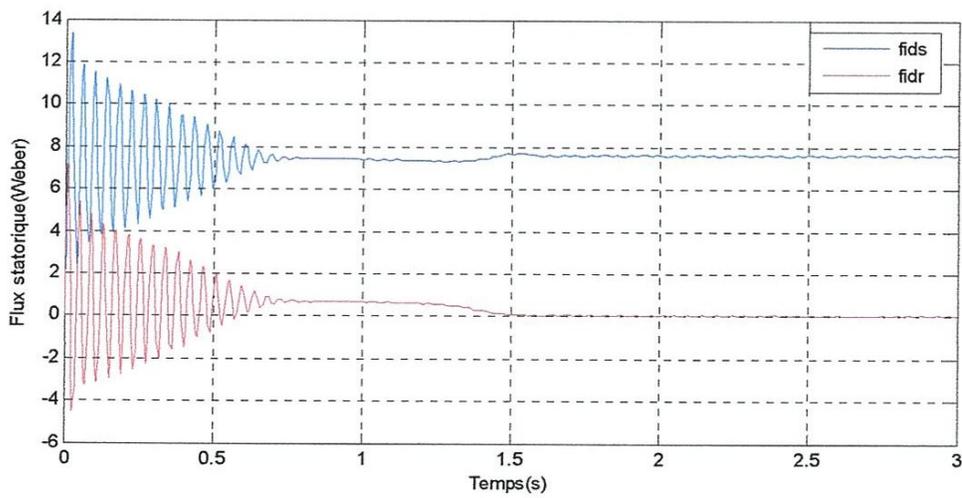


Figure (III-17) : Flux statoriques de la MADA

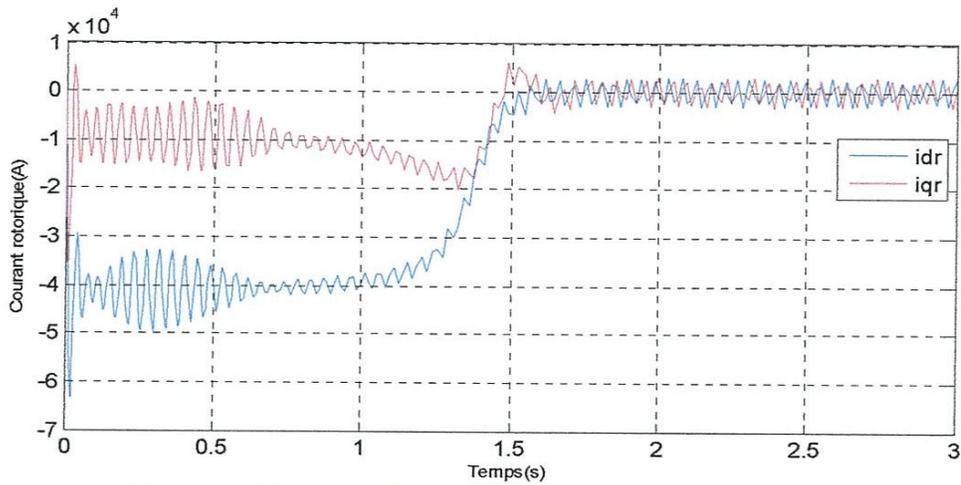


Figure (III-18) : Courants rotoriques de la MADA

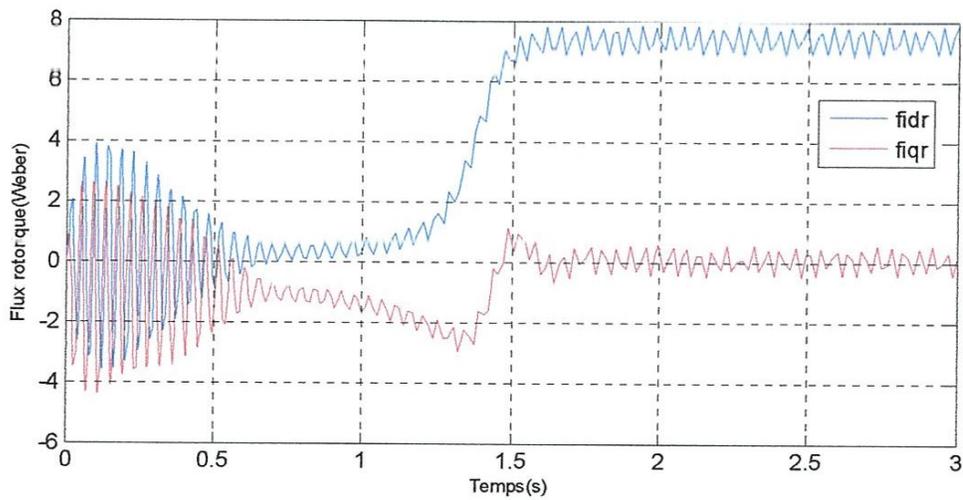


Figure (III-19) : Flux rotoriques du MADA

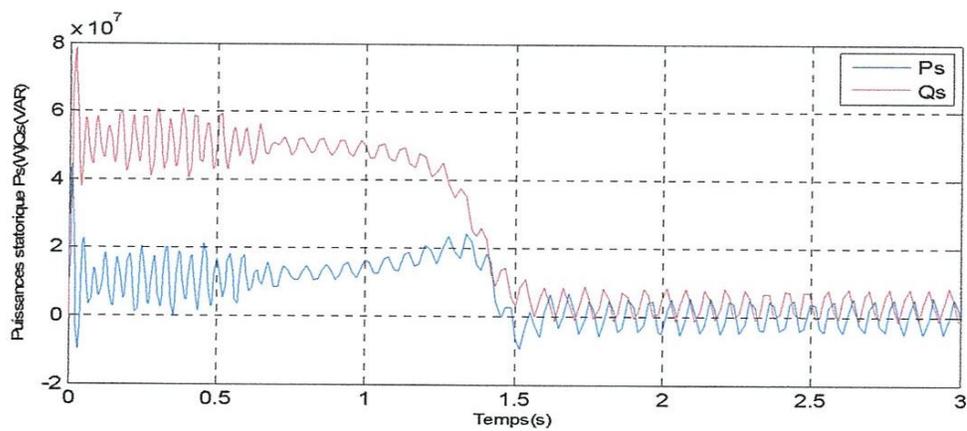


Figure (III-20) : La puissance active et réactive statorique.

III.2.4. Interprétation des résultats :

On constate l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatoire. Durant le régime permanent, on constate des oscillations importantes au niveau des grandeurs comme il est illustré sur les figures (III-14)-(III-20).

III.3.CONCLUSION :

Le modèle de la MADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de R.H.Park nous a permis de simplifier. Les résultats de simulation montrent que Ainsi l'étude des deux modes de fonctionnement de la MADA faite apparaître des appels important en régime transitoire, ainsi que des oscillations au niveau de ses grandeurs en régime permanent.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de master, nous avons travaillé sur le thème : étude de modélisation et simulation d'une machine asynchrone à double alimentation.

Le premier chapitre a traité une description et classification de la machine asynchrone à double alimentation, le principe de fonctionnement dans les quatre quadrants a été abordé en premier lieu.

Ensuite, on a vu que, le mode de fonctionnement de la machine dépend principalement des caractéristiques de la source extérieure (tension, déphasage et fréquence). Puis on a donné les domaines d'application de la MADA et ses avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, Nous avons exposé la modélisation de cette machine en utilisant la transformation de Concordia et la transformation de Park.

Le chapitre trois a été réservé aux résultats de simulation de ce modèle sur Matlab/Simulink qui nous a confirmé la possibilité de la double alimentation de la machine par la visualisation de ces différentes grandeurs étudiées pour un fonctionnement générateur et moteur.

Enfin, ce travail peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de l'énergie éoliennes générée à partir d'une MADA.

Références bibliographies

- [1] : **L. Benalia**, « Commande en tension des moteurs à induction double alimentés », Thèse De Doctorat En Science En Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [2] : **Y. Elbia**, « Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté », Mémoire De Magistère En électrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [3] : **M. S. Vicatos et A. J. Tegopoulos**, « A doubly-fed induction machine differential drive model for automobiles », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, No. 2, pp.225-230, June 2003.
- [4] : **S. Drid**, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation: théorie et expérimentation », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna , Algérie, 2005.
- [5] : **H. A. Toliyat et G. B. Kliman**, « Handbook Of Electric Motors » , second edition, Taylo & Francis Group, USA 2004.
- [6] : **Fenni atmane**, «Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs en mode Glissant D'une Machine Asynchrone à Double alimentation (MADA) », thèse de Magister en Energies Renouvelables, de l'Université de Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [7] : **F. Poitiers**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.

- [8] : **Tamarat Azzouz**, « modélisation d'une chaîne de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation » mémoire de magister, université de Biskra, 2009.
- [9] : **P-E. Vidal**, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [10] : **N.P.Quang et J-A. Dittrich**, « Vector Control of Three-Phase AC Machines» Springer, 2008.
- [11] : **B.Robyns, B.François, Ph.Degobert et J-P.Hautier**, « Commande vectoriel de la Machine asynchrone », Edition TECHNIP, Paris, 2007.
- [12] : **B. Hopfenspeger et D.J.Atkinson**, « Doubly-fed a.c. Machines: Classification and comparison », European Conference on Power. Electronics and Applications (EPE), Gras, 2001.
- [13] : **A. Dendouga**, « Contrôle des puissances actives et réactive de la machine asynchrone à double alimentation (DFIM) », Thèse De Doctorat En Science En Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [14] : **A. Meroufel**, « Contrôle De La Machine Asynchrone ». Polycopie De Cours, Université Djillali Liabes De Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2009.
- [15] : **J-P. Louis**, « Modélisation Des Machines Electriques En Vue De Leur Commande », LAVOISIER, Paris, 2004.
- [16] : **B. De Fornel**, « Alimentation des machines asynchrones », Techniques de l'ingénieur, Traité Génie Electrique, D 3 620, 1990.
- [17] : **P. Lopez et A. S. Nouri**, « Théorie Elémentaire Et Pratique De La Commande Par Les Régimes Glissants », Springer, 2006.
- [18] : **S. Khojet El Khil, I. Slama-Belkhodja, M. Pietrzak-David ET B.De Fornel**, « Sensorless field oriented control of doubly fed induction speed drive », IEEE, The International Conference on "Computer as a Tool", pp: 9-12, 2007.

- [19] : **Y. Bekakra et D. Ben Attous**, « A Sliding Mode speed and flux control of a doubly fed induction machine », IEEE, pp: 174 - 178, 2009.
- [20] : **S. Peresada, A. Tilli et A. Tonielli**, « Power control of a doubly fed induction machine via output feedback », Control Engineering Practice 12, Elsevier Science, pp : 41–57, 2003.
- [21] : **M. Abid**, « Adaptation de la commande optimisée au contrôle vectoriel de la machine asynchrone alimentée par onduleur à MLI », Thèse de doctorat d'état en Electrotechnique, Université Djillali Liabes De Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2009.
- [22] : **G. Salloum**, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [23] : **Rachel Baïle**, « analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne », thèse de doctorat ; université de corse, 2010.
- [24] : **Toual Belkacem**, « modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice asynchrone à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable », mémoire de magister, université de Batna, 2010.
- [25] : **Bennour Cherif**, «Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire de magister, université mohamed khider-biskra, 2012.
- [26] : **Akari Nadia**, « Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat , université de batna , 2010.