

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministere De L'enseignement Superieur Et De La Recherche Scientifique



CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED
UT DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Filière : Génie Electrique et Electronique
Spécialité: Réseaux Electriques

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE LA PREPARATION DU DIPLOME:

MASTER ACADEMIQUE

Thème :

*Commande de la puissances active et réactive
de la génératrice asynchrone à double
alimentation*

Présenté par :

 BELAID Laid

 FERHAT Hadj El Bachir

Proposé et Dirigé Par:

Dr.BENATTOUS Djilani

Promotion : 2011/2012

SOMMAIRE

Introduction générale2

CHAPITRE I

I. 1.Introduction :.....5

I. 2.Topologie et emploi des machines asynchrones à double alimentation :5

I. 2.1. Structure des machines asynchrones à double alimentation:.....5

I. 2.2. Constitution générale d'un moteur asynchrone à rotor bobiné :.....5

I. 2.2.1. Organes électriques :.....6

I. 2.2.2 .Organes magnétiques :.....6

I. 2.2. 3. Organes mécaniques :6

I. 2.2. 4. Le stator :6

I. 2.2. 5. Le rotor :6

I. 2.3: Principe de fonctionnement de la MADA :7

I. 2.4. Description de la MADA :9

I. 2.5. Modes de fonctionnement de la MADA.....10

I.2.5.1.Fonctionnement en génératrice à vitesse variable:10

I.2.5.1.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :.....10

I. 2.5.1.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :.....11

I.2.5.1.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone :.....11

I.2.5.1.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone :11

I. 2.5.2.Fonctionnement à vitesse fixe:.....12

I. 2.6.Classification des machines à double alimentation :13

I. 2.6.1. Machine à double alimentation à rotor bobiné (standard) :15

I. 2.6.2. Machine à double alimentation en cascade asynchrone :16

I. 2.6.3.Machine à double alimentation sans balais :.....	16
I. 2.7.Comparaison entre les différentes variantes de la machine à double Alimentation :.....	17
I. 2.8. Application des machines asynchrones à double alimentation :	19
I. 2.9.Intérêt de la MADA :.....	19
I.2.10.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA :.....	20
I. 2.10.1.Avantages de la MADA :.....	20
I. 2.10.2.Inconvénients de la MADA :	21
I. 2.11.DOMAINES D'APPLICATION DE LA MADA :.....	21
I. 2.12. L'application de la MADA dans les systèmes éoliens :	22
I. 3.Conclusion :	23

CHAPITRE II

II. 1. Introduction :	25
II. 2.Modélisation de la MADA :	25
II. 2.1. Description de machine asynchrone à double alimentation :.....	25
II. 2.2 .Hypothèses :	26
II.2.3.Modèle mathématique de la MADA :.....	26
II. 2.3.1. Equations générales de la MADA :	26
II. 2.3.1.1.Equations électriques :.....	26
II. 2.3.1.2.Equation mécanique :	27
II. 2.3.1.3.Equations magnétiques :.....	27
II. 2.4 .Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park) :	29
II. 2.5.Choix du référentiel :.....	30
II. 2.5.1.Référentiel lié au stator (α, β) :.....	30
II.2.5.2. Référentiel lié au rotor (x, y) :	30
II. 2.5.3. Référentiel lié au champ tournant :.....	31

II. 2.6.Représentation de la MADA dans repère biphasé (dq) :.....	31
II. 2.6.1. Equations des tensions :.....	31
II. 2.6.2.Equation des flux :.....	32
II. 2.6.3.Equation du couple électromagnétique.....	32
II. 3. Résultats de la Simulation.....	33
II. 3. 1.Interprétations	38
II.4. Conclusion :.....	38

CHAPITRE III

III. 1. Introduction :	40
III.2. La commande vectorielle de la MADA :.....	40
III.2.1. Principe :	40
III.2.2. Orientation du repère diphasé (d,q):	40
III.2.2.1. Orientation selon le flux statorique :	41
III.2.2.2. Orientation selon le flux rotorique :	41
III.3. La commande indépendante des puissances active et réactive statoriques de la GADA :.....	42
III.3.1 Principe :	42
III.3.2. Modélisation de la GADA en vue d'une commande indépendante des puissances active et réactive:	42
III.3.2.1. Orientation du repère (d,q) :.....	42
III.3.2.1.1.Relations entre les courants statoriques et rotoriques : :.....	44
III.3.2.1.2. Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone :	44
III.3.2.1.3.Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques :	45
III.4. Commande indirect :	47
III.4.1. Commande en boucle ouverte :	47
III.4.1.1.Synthèse des régulateurs :	48

III.5. Convertisseur MLI :	49
III.5.1. Onduleur a deux niveaux :	49
III.5.2. Principe de la MLI	52
III.6. Schéma de simulation :	53
III.6.1.Simulation du commande vectorielle de la GADA (sans onduleur):	53
III.6.1. 1.Résultat de simulation :	53
III.6. 1.2.Indirecte En Boucle Ouverte (sans onduleur):	54
III.6. 2.Simulation du commande vectorielle de la GADA (Avec onduleur):	56
III.6. 2.1.Indirecte En Boucle Ouverte (avec onduleur):.....	56
III.7.CONCLUSION :	58
Conclusion générale :	60
BIBLIOGRAPHIE :	62
Annexe :	66

Résumé :

La machine à double alimentation s'apparente fortement du point de vue technologique à la machine asynchrone à rotor bobiné classique.

La double alimentation concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statorique et rotorique biphasés où le stator est alimenté par un réseau de tension fixe et le rotor par une alimentation variable que peut être une source de tension ou une source de courant. Elle est utilisée dans les grandes puissances d'entraînement.

Ce présent travail est consacré à l'étude de la commande vectorielle de la MADA alimentée au stator par une source de tension constante et le rotor par un onduleur de tension MLI.

Mots clés :

Machine asynchrone double alimentée MADA, rotor alimenté par onduleur, command vectorielle, régulation.

Remerciements

*Avant tous, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous donne le courage
Et la patience pour réaliser ce travail, malgré toutes les difficultés rencontrées.*

Prière

Nous commençons par notre promoteur

Monsieur Dr. BENATTOUS DJILANI

*Qui nous a donné l'occasion de travailler sur le sujet passionnant, et pour sa
confiance, tous ses conseils et critiques sur le plan scientifique qui nous permet
de bien orienter nos recherches.*

*Des remerciements vont également à tous ceux et celles qui nous ont apporté,
de près ou de loin, orientation, soutien et aide dans la réalisation et la
concrétisation de ce travail, plus particulièrement*

B.ZEGUEB Z.TIR N.BESOUS R.LABDANI

Merci

Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

A ma mère avec toute mon affection.

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A ma famille

*. A mes frères, sœurs, oncles, tantes, leurs
conjoints ainsi que leurs enfants, A tous les
membres de ma grande famille.*

A tous mes amis

À tous mes enseignants

*Et enfin à tous ceux que j'aime et qui
m'aiment (chaque un à son nom).*

Ferhat Hadj El Bachir

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*Mon père et ma mère,
A mes frères et mes soeurs,
Tous mes proches, Tous mes amis,
À tous mes enseignants et enseignantes depuis
Le primaire,
Toute la promotion 2012 d'un réseau
électrique,
Tous ceux qui me sont chers.*

Belaid Laid

Introduction générale :

Les applications industrielles des entraînements à vitesse variable exigent des performances de plus en plus importantes ainsi qu'une fiabilité maximale et un coût minimum.

Il va sans dire historiquement, que la machine à courant continu a été reine dans le domaine de la variation de la vitesse et son emploi est largement répandu même de nos jours. Cependant, elle ne peut servir dans les domaines de grandes puissances, ni aux milieux corrosifs. Enfin le système à balais collecteur nécessite un entretien permanent.

D'autres dispositifs ingénieux ont conduit au développement du moteur asynchrone à rotor bobiné comme le réglage rhéostatique de vitesse mais avec ses limites de plage de variation.

C'est d'ailleurs ce type de machine un peu spéciale qui fait l'objet d'une application de vitesse variable pour un processus spécifique (tels les laminoirs, les bobineuses, les enroulements, la traction électrique,...).

Depuis les années soixante, avec l'apparition des premiers composants électroniques de puissance et la montée progressive de l'informatique, les systèmes de génération évoqués plus haut ont été progressivement remplacés par des convertisseurs statiques. Ces derniers étant de plus en plus élaborés avec des possibilités de contrôle de plus en plus sophistiqués assurent une maîtrise progressive de toutes machines électriques.

Dans le domaine des entraînements de grandes puissances (tel le laminoir par exemple), il existe une solution nouvelle et originale, utilisant une machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier.

Il s'agit de la machine à double alimentation « Double Feed Asynchronous Motor » (DAFM) : le stator est alimenté par un réseau fixe et le rotor par alimentation variable qui peut être une source de tension ou une source de courant.

La commande vectorielle de la MADA constitue actuellement un domaine de recherche particulièrement intéressant : elle représente une solution idéale pour les entraînements de grandes puissances où la plage de variation de la vitesse est limitée, ce qui a conduit à l'introduction des techniques de l'automatique moderne pour sa commande.

Le moteur asynchrone à double alimentation peut développer son couple nominale à une vitesse qui peut aller jusqu'au double de sa vitesse nominale, [1] et il présente un excellent comportement dynamique et qui est dû à la bonne distribution du champ magnétique au niveau de son rotor, et au faible couplage entre le stator et le rotor par rapport au moteur à cage d'écureuil.

Les méthodes classiques et modernes de l'automatique linéaire ont trouvé rapidement une application à la commande du MCC. Avec l'introduction de la commande vectorielle, les chercheurs se sont orientés vers la possibilité d'utiliser ces mêmes méthodes pour la commande des machines à courant alternatif, et plus particulièrement, la machine asynchrone.

Les stratégies de commande sont toujours élaborées afin de rendre le système insensible aux perturbations extérieures. Dans notre cas nous nous intéressons à la commande vectorielle de la MADA par un onduleur de tension MLI.

En effet le travail présenté dans cette mémoire, consiste à étudier par simulation la commande de la vitesse d'un moteur asynchrone à double alimentation alimenté en tension.

Organisation du mémoire :

La structure du présent document est composée de trois chapitres :

Le premier chapitre : est consacré à l'étude des entraînements utilisés dans l'industrie. Un aperçu contenant des applications permettra de situer le présent travail.

Le deuxième chapitre : fera l'objet de la modélisation et de la simulation du GADA où des résultats seront présentés.

Dans le troisième chapitre : on présentera la commande vectorielle du GADA sans et avec onduleur. Cette commande est basée sur la méthode indirecte d'orientation du flux statorique.

Finalement, une conclusion générale : synthétisera les points les plus marquants de ce travail et ouvrira une perspective afin de guider des initiatives futures d'évolution et de recherche.

I. Introduction :

Ce chapitre a pour objectif de mettre en évidence la machine asynchrone à double alimentation, afin d'étudier son principe de fonctionnement et d'évaluer les avantages et les performances apportées par cette machine, ainsi que les différents domaines d'application.

En plus, une classification et une comparaison des différents types de cette machine seront présentées, dans ce chapitre [2].

I. 2. Topologie et emploi des machines asynchrones à double alimentation :

I. 2.1. Structure des machines asynchrones à double alimentation:

La Machine Asynchrone à Double Alimentation 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-1) [3].

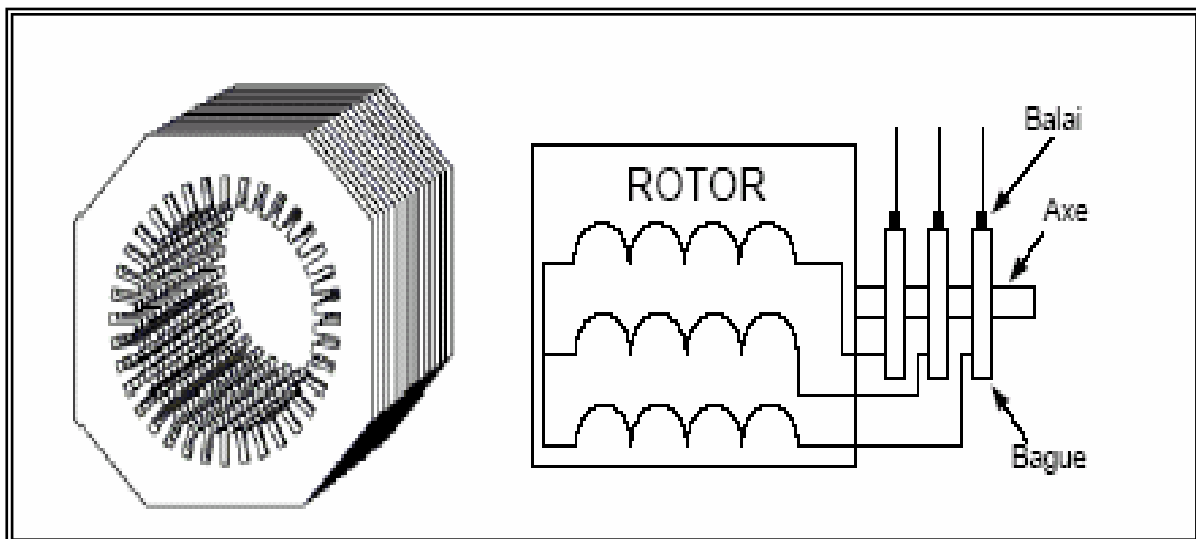


Figure. I.1. Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

I. 2.2. Constitution générale d'un moteur asynchrone à rotor bobiné :

On classe les différentes pièces rencontrées dans toute machine tournante selon les trois grandes fonctions réalisées.

I. 2.2.1. Organes électriques :

- Enroulements statoriques ,
- Conducteurs rotoriques .

I. 2.2.2 .Organes magnétiques :

- Circuit magnétique fixe ,
- Circuit magnétique mobile .

I. 2.2. 3. Organes mécaniques :

- Carcasse avec fixation ou stator ,
- Ventilateur ,
- Rotor avec l'arbre,
- Capot de ventilateur ,
- Tige de montage ,
- Plaque à borne ,
- Roulements à billes,
- Flasques.

I. 2.2. 4. Le stator :

C'est la partie fixe du moteur. Il est constitué d'une carcasse sur laquelle est fixée une couronne de tôles d'acier de qualité spéciale munies d'encoches. Des bobinages de section appropriée sont répartis dans ces dernières et forment un ensemble d'enroulements qui comporte autant de circuits qu'il ya des phases sur le réseau d'alimentation.

I. 2.2. 5. Le rotor :

C'est la partie Mobile du moteur ; il est placé à l'intérieur du stator, et constitué d'un empilage de tôles d'acier formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Il tourne à une vitesse inférieure à la vitesse du champ tournant. Il est placé dans un champ tournant par rapport à lui. Il doit être feuilleté pour réduire les pertes par courant de Foucault [4].

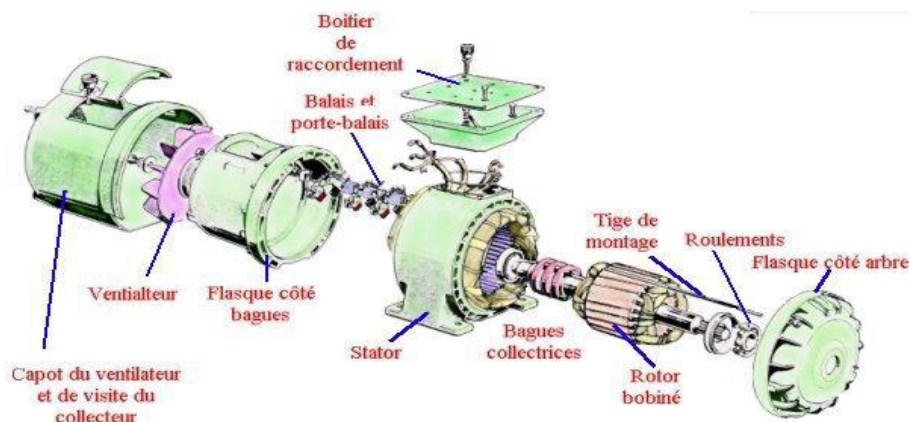


Figure.I.2.Machine asynchrone à rotor bobiné.

I. 2.3: Principe de fonctionnement de la MADA :

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné avec l'enroulement du stator connecté directement au réseau. Le rotor à des enroulements triphasés reliés à un convertisseur de puissance bidirectionnel avec un système ballais bague [5]. Pour le fonctionnement de la machine en régime établi, il est nécessaire que les vecteurs forces magnétomotrices (F.m.m) du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Du moment que le vecteur résultant de la F.m.m de l'enroulement statorique tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire, et que le rotor tourne à la vitesse ω_r , par conséquent, pour satisfaire à cette condition, il faut que le vecteur F.m.m de l'enroulement rotorique tourne par rapport au rotor avec la vitesse:

$$\omega_s = \omega_{0s} - \omega_r = \omega_{0s} - \omega_{0s}(1 - g) = \omega_{0s}g \quad (I.1)$$

Si la vitesse du moteur est inférieure à la vitesse synchronisme, les sens de rotation sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à celle du synchronisme, les sens seront opposés. Pour que la rotation du vecteur F.m.m par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de $\omega_{0s}.g = 2\pi f$; c'est-à-dire :

$$f_r = f_s \cdot g \quad (I.2)$$

Dans les machines synchrones dont l'excitation est assurée par une source continue, le courant dans l'enroulement possède une fréquence $f_r = 0$. A partir de (I.1) et (I.2), on voit qu'il n'y a qu'une seule vitesse synchrone ω_{0s} ; ($g = 0$) [6].

Le stator désigné par "s" et le rotor par "r", et par " n_p " le nombre de paires de pôles de la machine, défini par la relation entre la fréquence du stator et du rotor, comme suit :

$$f_s = f_r + p f_m \quad (I.3)$$

Avec f_m : la fréquence de rotation du rotor.

Le glissement g est défini par :

$$g = 1 - (f_r/f_s) = (n_s - n_m)/n_s \quad (I.4)$$

n_m : est la vitesse mécanique du rotor et n_s la vitesse de synchronisme de la MADA donnée par :

$$n_s = 60 \cdot f_s / n_p \quad (I.5)$$

Les figures (I.3) et (I.4) représentent l'évolution de la fréquence et de la tension du rotor en fonction du glissement, où le circuit du stator est alimenté directement par le réseau et le rotor en circuit ouvert, ces grandeurs dépendent de la vitesse opérationnelle de la machine [7].

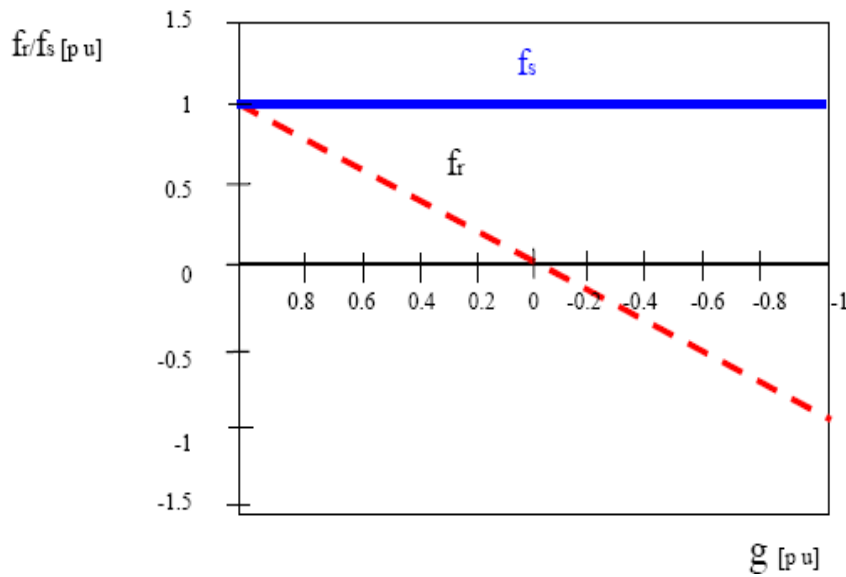


Figure. I.3. Fréquences de la MADA en fonction de glissement.

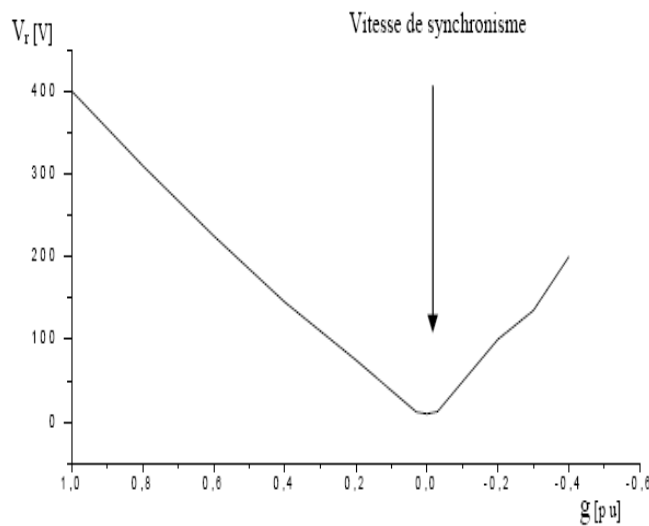


Figure. I.4. Tension mesurée du rotor de la MADA en fonction de glissement.

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

- **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 à f_s . Dans ce cas là, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.
- **Hypo synchrone ($0 < g < 1$)**: En tournant le rotor dans la direction de flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à décroître (Fig. (I.3)). Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchrone, 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.

- **Synchrone ($g = 0$)** : C'est le point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Autrement dit, le rotor tourne 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.
- **Hyper synchrone ($g < 0$)** : Par d'avantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative selon les équations (I.3) et (I.4). Cette valeur négative signifie que l'ordre de phase du rotor " $(a_r; b_r; c_r)$ " s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

I. 2.4. Description de la MADA :

Une machine asynchrone à double alimentation (MADA) est constituée d'un stator fixe équipé de trois enroulements identiques répartis d'une manière symétrique dans les encoches au stator, et d'un rotor tournant autour de l'axe de la machine équipé lui aussi de trois enroulements identiques et symétrique couplés en étoile et reliés à un collecteur constitué de trois ou quatre bagues figure I.5.

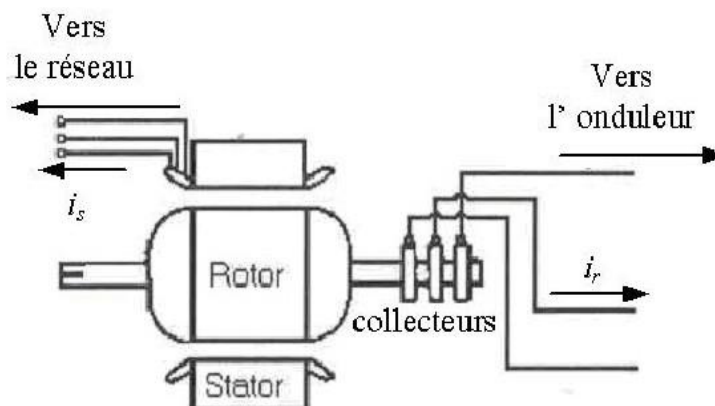


Figure I.5. Structure d'une machine asynchrone à double alimentation.

Trois enroulements rotoriques sont reliés à travers des balais glissants sur les bagues du rotor à un convertisseur d'électronique de puissance pour assurer une deuxième alimentation par le rotor. Selon le mode de fonctionnement, l'ensemble machine asynchrone, convertisseur et éventuellement un transformateur est appelé cascade hypo ou hyper synchrone.

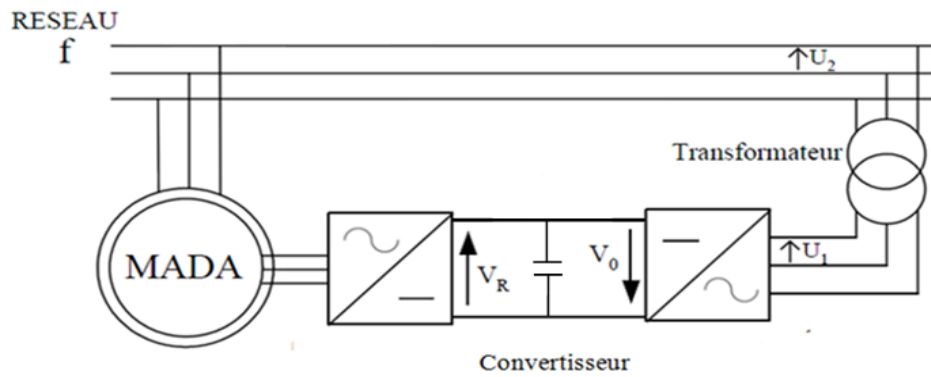


Figure I.6. Cascade d'une machine asynchrone à double alimentation.

I. 2.5. Modes de fonctionnement de la MADA :

I.2.5.1. Fonctionnement en génératrice à vitesse variable:

Les différents modes de fonctionnement de la MADA dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié à ce dernier par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique (alternatif/alternatif) sont :

- Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone
- Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone
- Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone
- Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.

I.2.5.1.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone:

La figure I.7 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement en mode moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

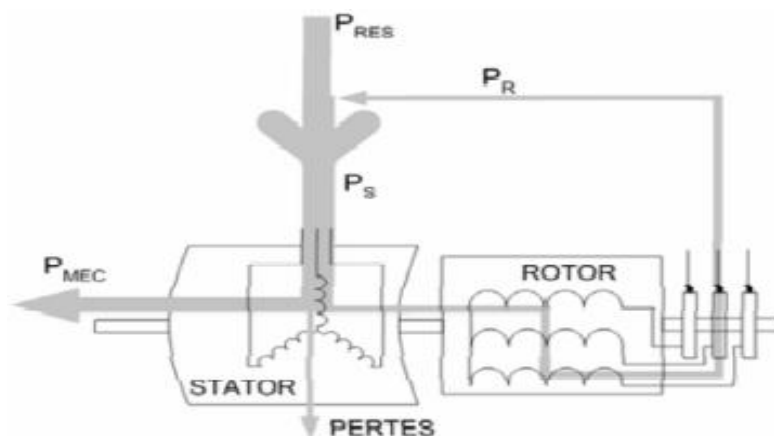


Figure I.7. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone [8].

I. 2.5.1.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :

La figure I.8 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a alors un fonctionnement en mode moteur en dessus de la vitesse de synchronisme.

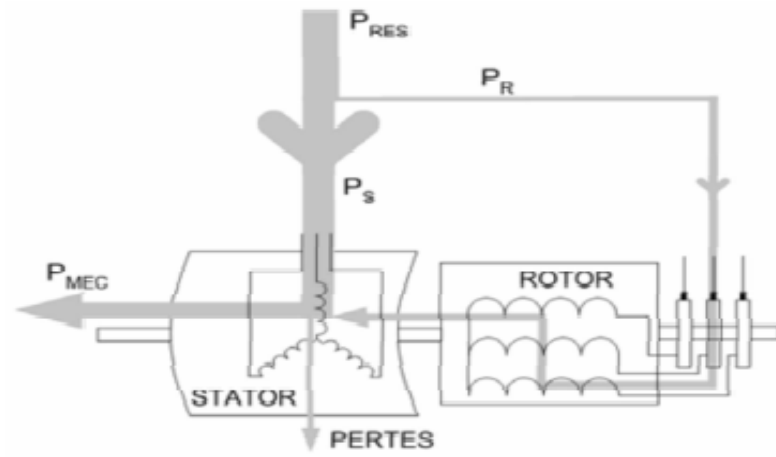


Figure I.8. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone [8].

I.2.5.1.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone :

La figure (I.9).montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. On a de ce fait un fonctionnement en mode moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

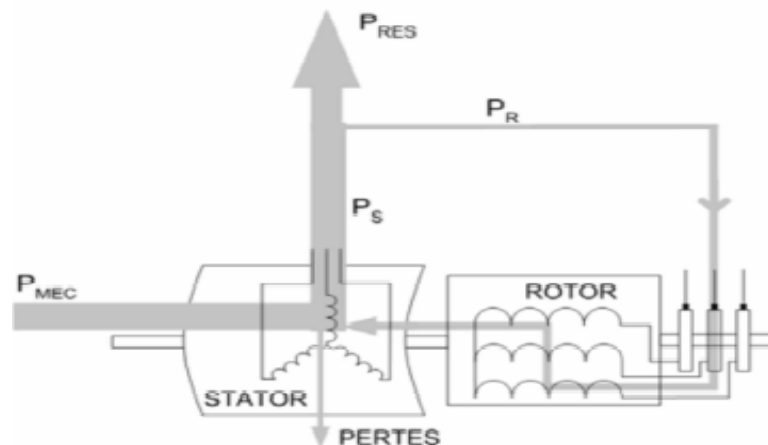


Figure I.9. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone [8].

I.2.5.1.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone :

La figure I .10 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a ainsi un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme [8], [3].

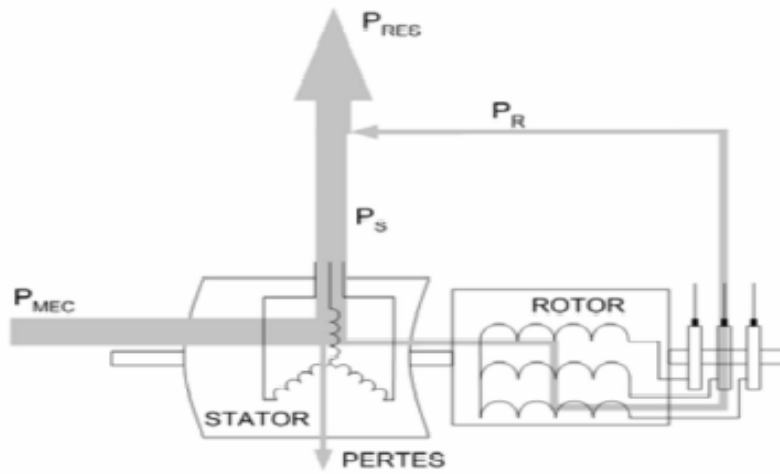


Figure. I.10. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone [8].

On peut résumer ces différents modes dans le tableau suivant :

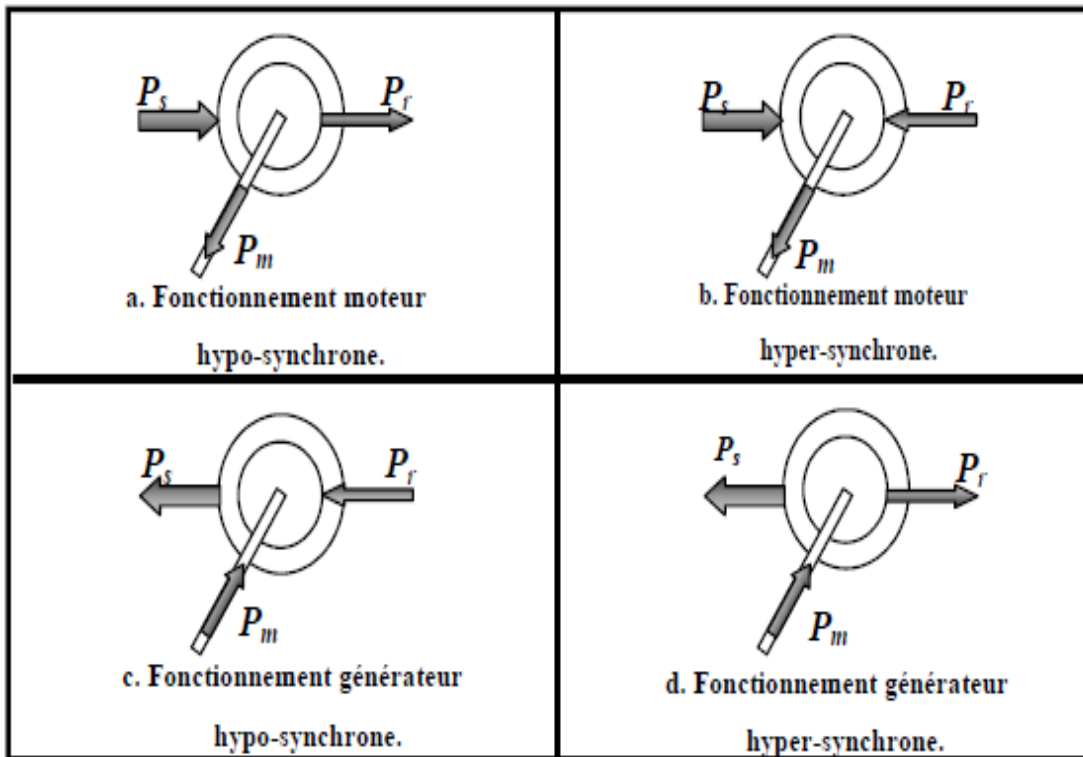


Figure. I.11. Modes de fonctionnement de la MADA.

I. 2.5.2. Fonctionnement à vitesse fixe :

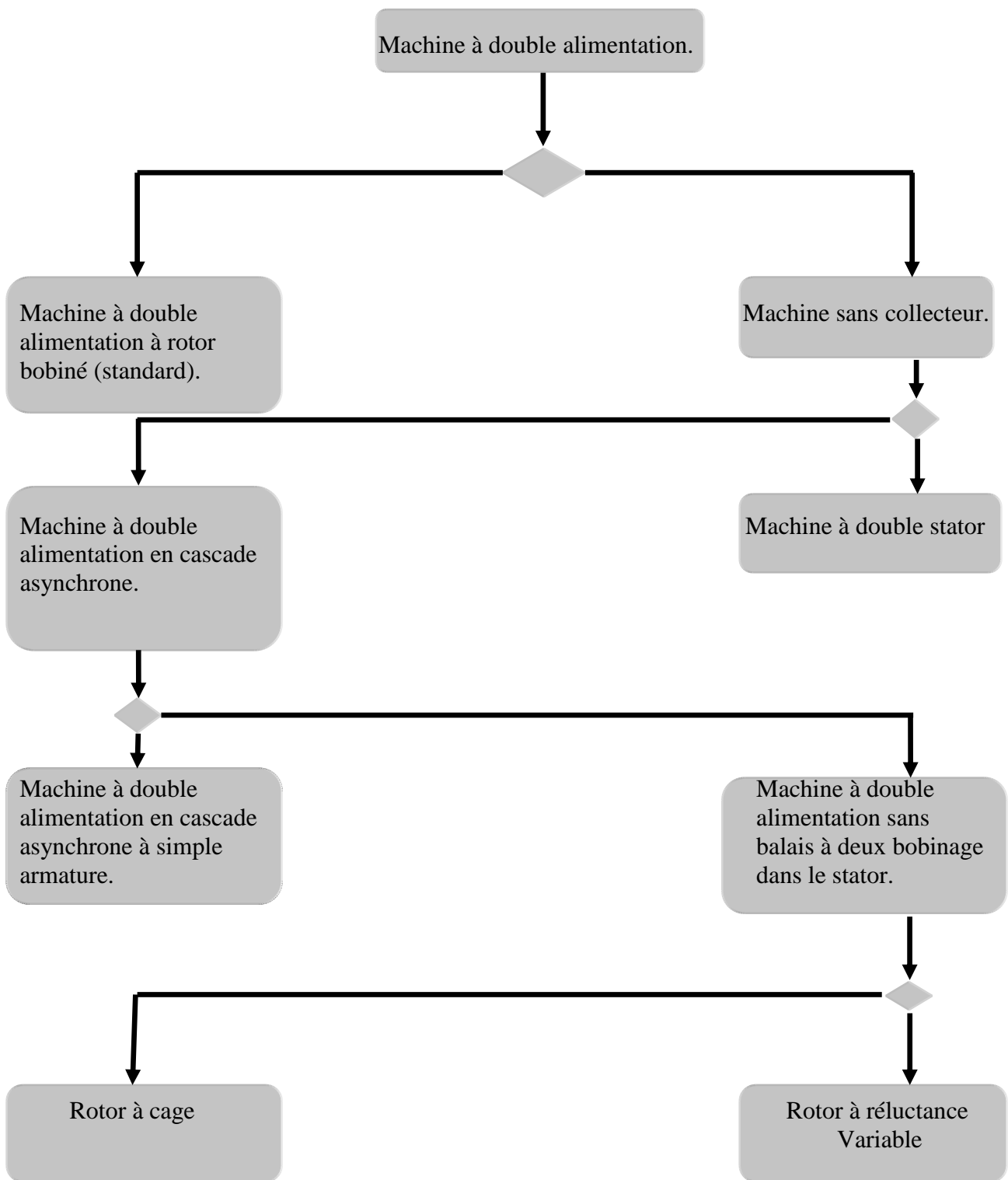
- Système électrique plus simple.
- plus grande fiabilité.
- peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- pas besoin de système électrique de commande.
- moins cher.

Il existe plusieurs types de génératrices utilisées dans le fonctionnement à vitesse variable représentés par le tableau suivant **Tab. (I.1)** [7]:

Génératrices utilisées	Caractéristiques
Machine asynchrone en autonome	Nécessité de capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine.
Machine asynchrone à cage débitant sur un réseau	Obligation de fonctionner au voisinage du synchronisme.
Machine à double alimentation ou MADA	Autorise le fonctionnement à vitesse variable
Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	Bon rendement, faibles puissances, adaptée aux faibles vitesses mais prix élevé.
Machine à réluctance variable (MRV)	Permettant de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse.

I. 2.6. Classification des machines à double alimentation :

La classification de la machine asynchrone à rotor bobiné est obtenue à partir d'une recherche bibliographique qui a été développée dans la littérature du domaine des machines à double alimentation [9, 10, 11, 12].



Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives et les plus développées dans la littérature sont classifiées par un organigramme donné précédemment. Le schéma de principe et la description de chaque variante seront détaillés ci-dessous.

I. 2.6.1. Machine à double alimentation à rotor bobiné (standard) :

La figure (I.12) montre que la machine à double alimentation à rotor bobiné ou standard, est une machine asynchrone occupée par un système balais-bague qui alimente l'enroulement du rotor. La figure (I.13) illustre le schéma de principe de ce type de machines, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, alors que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte que le glissement de cette machine devient une grandeur contrôlable. Il faut noter que le convertisseur bidirectionnel indiqué dans la figure peut être un convertisseur indirect (AC/DC/AC) composé d'un redresseur et d'un onduleur ou bien un convertisseur direct (AC/AC): cyclo-convertisseur ou convertisseur matriciel [11,12].

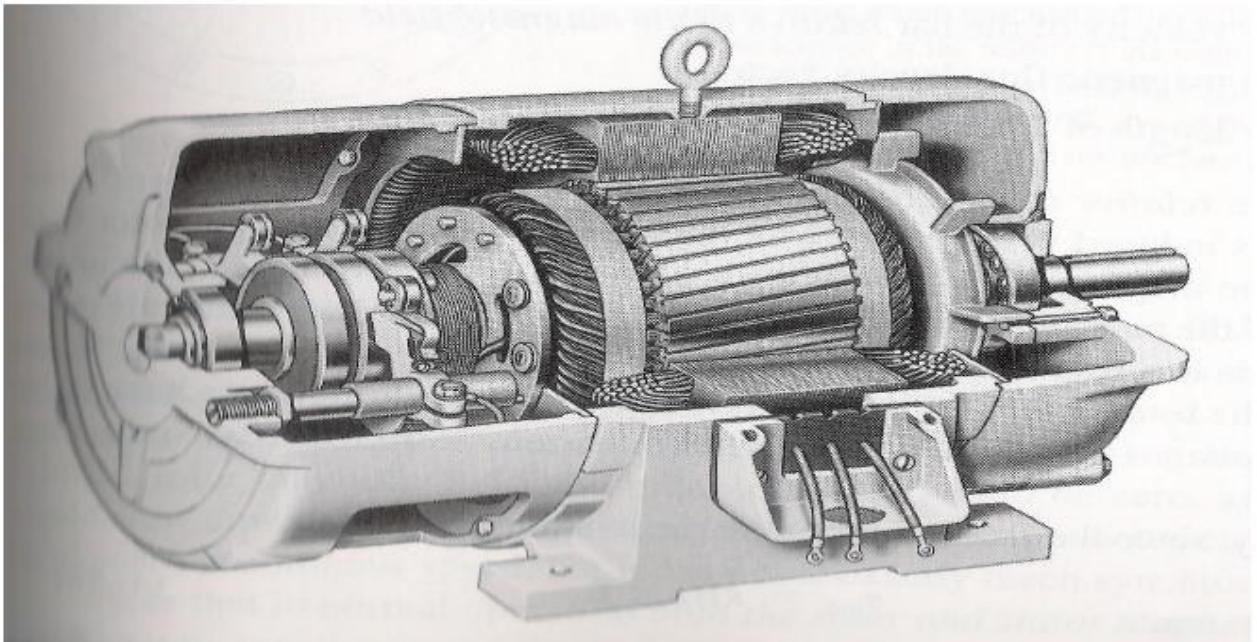


Figure. I.12.Coupe d'une machine asynchrone à rotor bobiné (standard) [13].

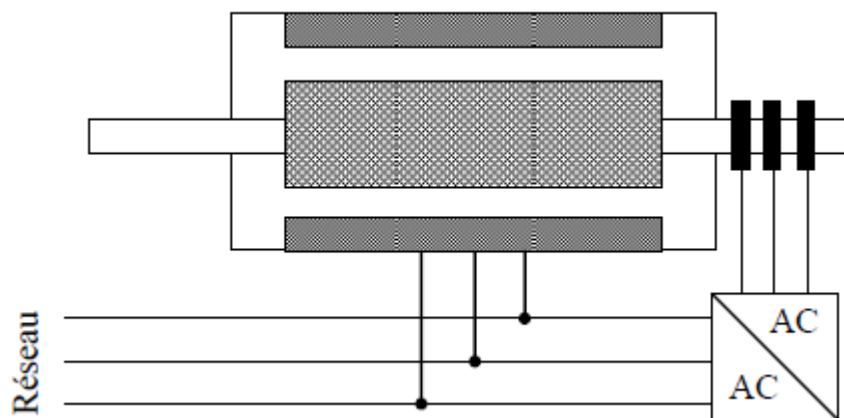


Figure. I.13.Schéma de principe de la machine à double alimentation à rotor bobiné (standard).

I. 2.6.2. Machine à double alimentation en cascade asynchrone :

La machine à double alimentation en cascade asynchrone consiste en deux machines asynchrones avec des rotors bobinés connectés mécaniquement et électriquement, comme il est montré par la figure (I.14). Le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/AC de fréquence. Il est également possible de piloter l'ensemble du système à travers le stator alimenté par le convertisseur.

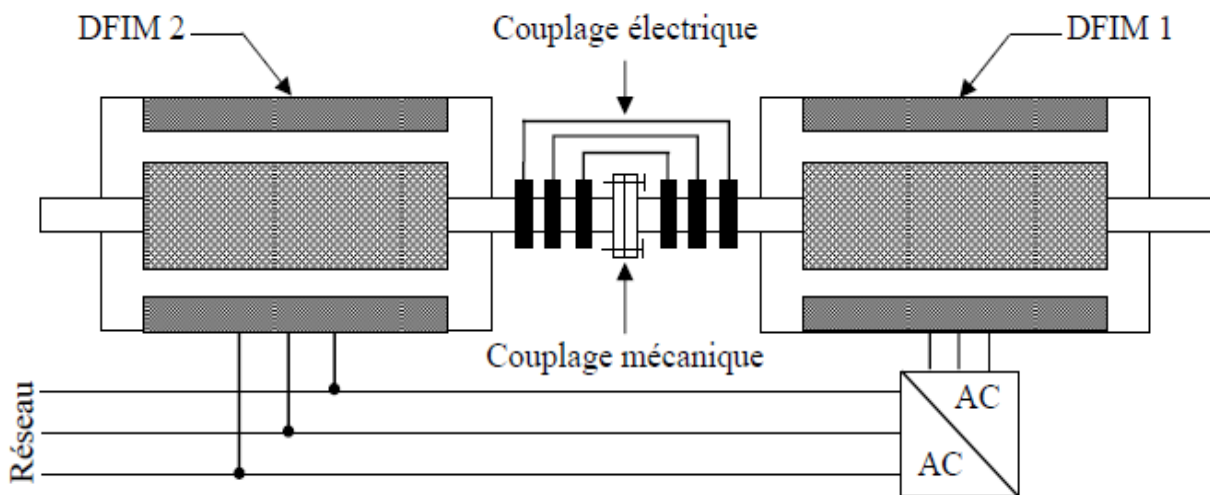


Figure. I.14. Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone.

- Ce type de machines offre la possibilité d'avoir une commande découplée des puissances active et réactive similaire à celle de la machine à double alimentation standard [9,14].

Pratiquement, il est aussi possible de combiner deux machines asynchrones à rotor bobiné dans une seule machine avec un comportement identique à celui de la machine à double alimentation en cascade asynchrone, tel que les deux enroulements des stators sont logés dans une seule armature et le rotor soit à cage d'écureuil, comme dans le cas de la machine à double alimentation sans balais.

I. 2.6.3. Machine à double alimentation sans balais :

C'est une machine asynchrone avec deux enroulements ayant des nombres de paires de pôles différents logés dans la même armature du stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre est alimenté au moyen d'un convertisseur AC/AC (fig. I.15). Le rotor de cette machine possède un nombre de paires de pôles égal à la somme des deux nombres de paires de pôles des deux enroulements statoriques.

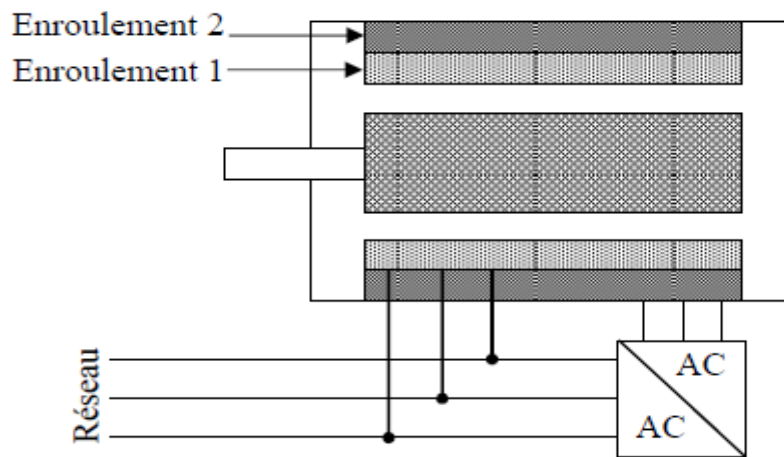


Figure. I.15. Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais.

Parmi les types les plus connus de machines à double alimentation sans balais, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable qui consiste en un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans balais et un rotor basé sur le principe de la réluctance [9, 14].

I.2.7. Comparaison entre les différentes variantes de la machine à double alimentation :

-Le tableau (1.1) donne une brève classification et comparaison des différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives dans la littérature. Dans ce cas, les critères de comparaison sont fondés sur : la complexité de la construction de la machine, la puissance traitée par le convertisseur associé à la machine et la stratégie de contrôle [9, 10].

-On peut conclure que, toutes les machines à double alimentation citées dans le tableau (I.2) doivent fonctionner pour une vitesse autour de celle de synchronisme et nécessitent pour leur commande un convertisseur bidirectionnel de puissance. Dans cette condition, plus la gamme opérationnelle est étroite (qui doit être autour de la vitesse de synchronisme) plus la puissance traitée par le convertisseur est réduite. De point de vue stratégie de commande il n'y a pas de grande différence entre ces variantes.

Table (I.2) : Classification et comparaison des différentes variantes de la machine à double alimentation

Type de la machine à double alimentation	Construction de machine	Convertisseur de puissance	Méthode de commande
Machine à rotor bobiné	Etablie	Dépend de la vitesse opérationnelle	Orientation de flux statorique avec le découplage enter de la puissance active et réactive
Machine en cascade asynchrone	Difficile	Comme la Machine à rotor bobiné	Orientation de flux statorique avec le découplage enter de la puissance active et réactive
Machine sans balais	Spécial prototypes disponible et toujours en recherche	Comme la Machine à rotor bobiné	Orientation de flux rotorique et Orientation simplifié du flux rotorique Comme la Machine à rotor bobiné
Machine à réluctance variable	Spécial prototypes disponible et toujours en recherche	Comme la Machine à rotor bobiné	Comme la Machine à rotor bobiné

-Commercialement, il est difficile de prévoir quel type de machine à double alimentation sera finalement réussi. Cependant, nous pouvons affirmer d'après la littérature que la machine à rotor bobiné standard et la machine à réluctance variable restent plus attractive par beaucoup de chercheurs. D'autre part, un intérêt de plus en plus croissant est actuellement à la machine asynchrone en cascade et la machine sans balais, vu que ces dernières présentent un rendement élevé dû au courant réduit dans leurs rotors [10].

-Jusqu'à présent et grâce à l'évolution récente dans les domaines de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, la machine à double alimentation standard reste la machine la plus attractive de l'avis de nombreux chercheurs, vu qu'elle est bien adaptée dans plusieurs domaines d'application. En effet, elle présente une construction établie et simple par rapport aux autres

types. Sa commande se fait sur la base d'un convertisseur de puissance disponible (AC/AC) ; de même elle possède une commande par orientation de flux statorique permettant d'obtenir un contrôle découplé des puissances active et réactive.

I. 2.8. Application des machines asynchrones à double alimentation :

-La première application de la MADA et le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse.

-Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commande.

-Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine.

-L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques [6].

-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.

-La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse.

I. 2.9. Intérêt de la MADA :

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse [15] [16].

I.2.10. 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. 2.10.1. Avantages de la MADA :

Comme avantages de la MADA, on peut citer :

- 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 [17].
- 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 [12,16].
- -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 terme de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement [17].
- 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 [5].
- 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 [5].
- 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 [18].
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation [12].

I. 2.10.2. 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 :

- ➔ Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer [19].
- ➔ 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 [19].
- ➔ 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) [12].
- ➔ Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [2].

I. 2.11. 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 [20]. 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 telles que [5] :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- 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, telles que [19] :

- 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.

I. 2.12.L'application de la MADA dans les systèmes éoliens :

Actuellement, la majorité des éoliennes installées de puissance supérieure à 1 MW utilisant une machine asynchrone pilotée par le rotor.

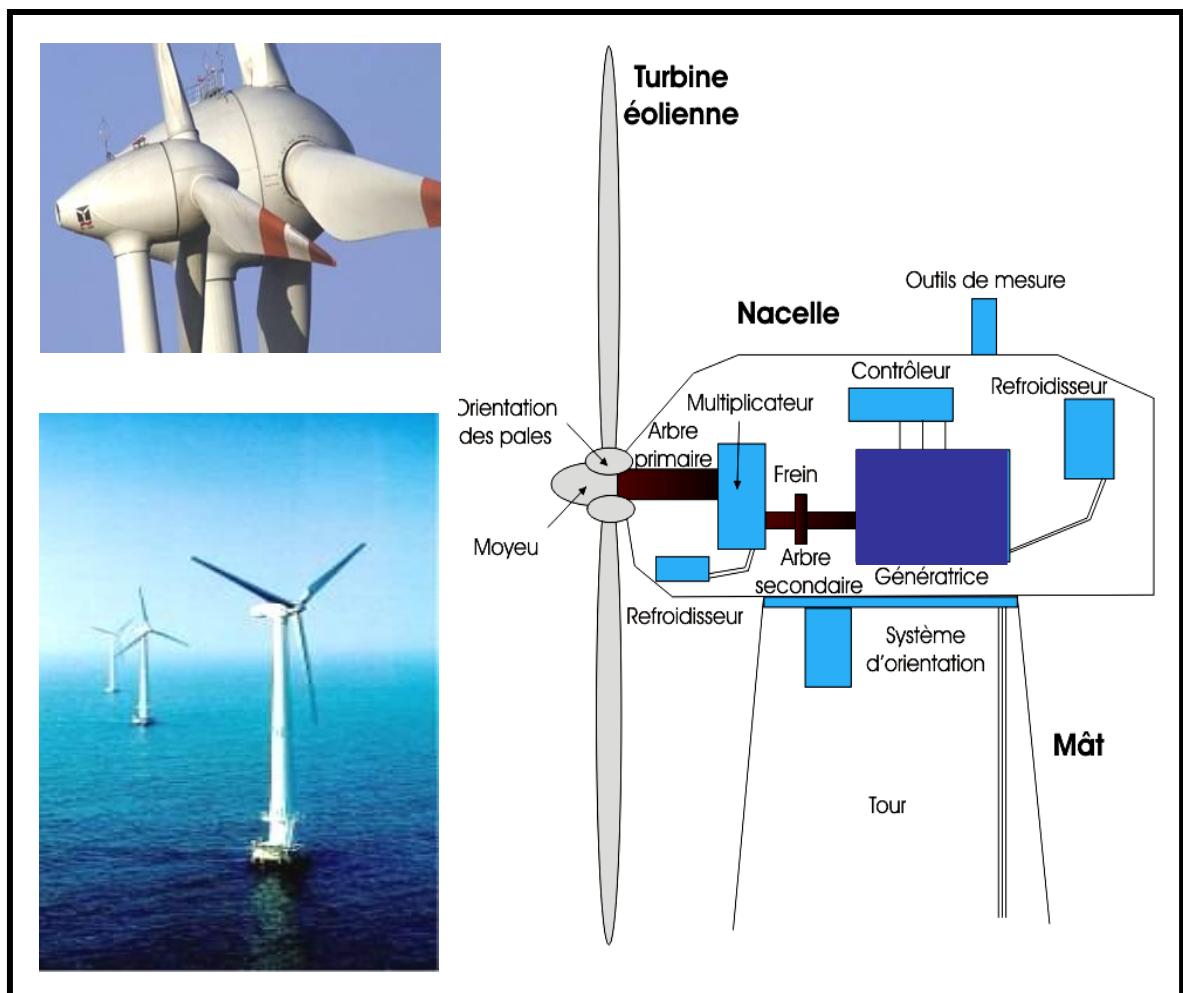


Figure. I.16.Eolienne installée en mer.

Les turbines de vent sont construites pour des puissances allant jusqu'à 4.5 MW. On estime que cette puissance augmentera à l'avenir, particulièrement dans des applications en mer, vu que ce milieu est caractérisé par une vitesse de vent très importante.

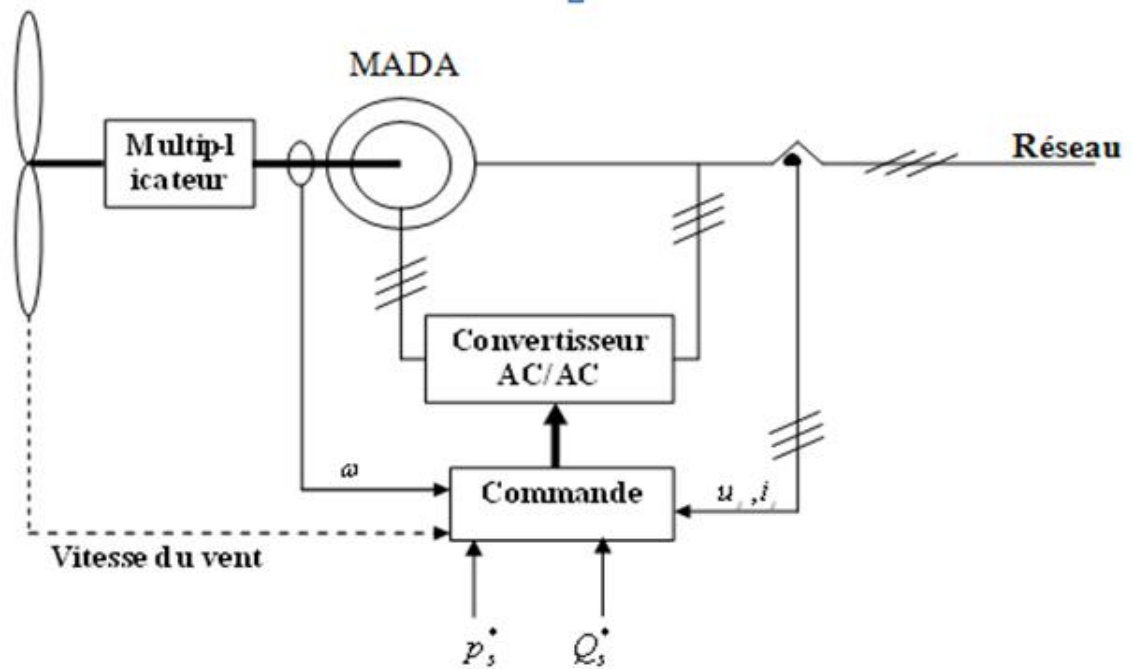


Figure. I.17. Schéma de principe d'un aérogénérateur à base de la MADA.

Une synthèse bibliographique a mis en évidence l'abondante littérature sur ce sujet a permis d'identifier un système d'alimentation particulière adéquat reposant sur l'utilisation d'un convertisseur AC/AC (cyclo-convertisseur) ou bien AC/DC/AC (redresseur-onduleur), figure (I-17). Les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la puissance rotorique qui représente environ de 20 à 30% de la puissance nominale. C'est le principal intérêt de cette technique.

I. 3. Conclusion :

La machine à double alimentation offre des avantages remarquables, ce qui permet à cette dernière de trouver un domaine d'application très vaste, notamment dans les systèmes de génération de l'énergie électrique. L'avantage principal de la MADA dans les systèmes de génération de l'énergie électrique est que le convertisseur associé au circuit du rotor ne traite qu'une fraction de 20 à 30% de toute la puissance du système, ce qui permet de minimiser les pertes et le coût de production.

La maîtrise et la compréhension du comportement de ce type des machines passent obligatoirement par une étude de modélisation, qui est l'objectif du chapitre suivant.

II. 1. Introduction :

La modélisation de la machine électrique est une étape primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques. [21]

Ce chapitre sera l'objectif d'une étude de modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le référentiel lié au champ tournant. Ce dernier nous a permis d'obtenir un modèle mathématique adapté au réglage découplé des puissances active et réactive au niveau du stator de la MADA.

II. 2. Modélisation de la MADA :

II. 2.1. Description de machine asynchrone à double alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statoriques (A_s, B_s, C_s) décalées entre elles par un angle de $(\frac{2\pi}{3})$, et aussi trois bobines rotoriques identiques de répartition et similaire à celles du stator, (A_r, B_r, C_r).

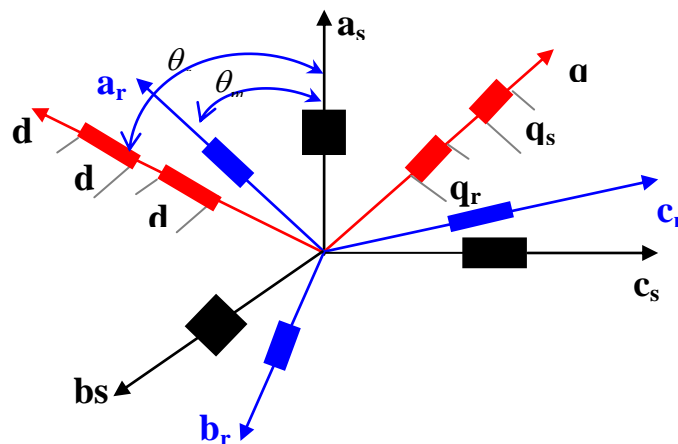


Figure. II.1. Représentation simplifiée de la MADA.

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage. En effet la cage de la machine est assimilée au bobinage triphasé de la MADA. Cependant le rotor de la MADA n'est pas en court circuit et donc les tensions rotoriques ne sont pas nulles.

II. 2.2. Hypothèses :

La machine asynchrone comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe. Par conséquent, pour une analyse tenant compte de sa configuration exacte il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices [22].

- On suppose les circuits magnétiques non saturés. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.

II.2.3.Modèle mathématique de la MADA :

II. 2.3.1. Equations générales de la MADA :

II. 2.3.1.1.Equations électriques:

❖ Au stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{II. 2})$$

❖ Au rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

Les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par :

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (\text{II. 4})$$

$$\text{Avec : } [V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix};$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \text{ et } [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

V_s, V_r : Les tensions simples statorique et rotorique.

I_s, I_r : Les courants de phase statorique rotorique.

φ_s, φ_r : Les flux statorique et rotorique respectivement.

R_s, R_r : Les résistances par phase statorique et rotorique.

II. 2.3.1.2. Equation mécanique :

$$C_e - C_r = j \frac{d\omega_m}{dt} \Rightarrow \dot{\omega}_m = \frac{1}{j} (C_e - C_r) \quad (\text{II. 5})$$

II. 2.3.1.3. Equations magnétiques :

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{II. 6})$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \quad (\text{II. 7})$$

Tel que : $[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}$; $[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$

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

En remplaçant les relations (II. 6) et (II. 7) dans, respectivement les relations (II. 2) et (II. 4), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] \cdot [I_r] \} \tag{II. 8}$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \} \tag{II. 9}$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables ((II.8) et (II.9)). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park.(Figure II-2)

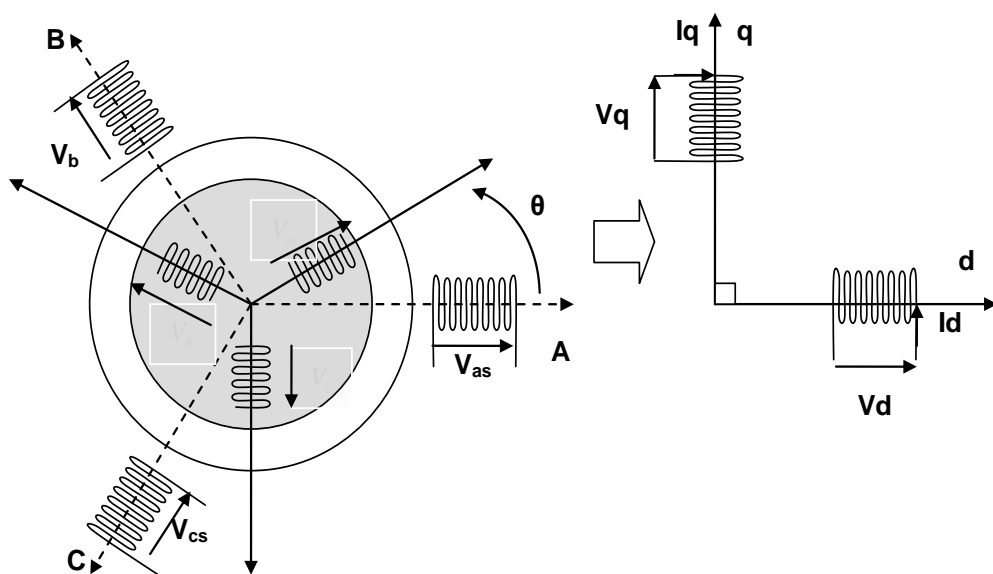


Figure.II.2.Modèle de PARK de la MADA.

II. 2.4 .Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park) :

La transformation de Park est ancienne (1929) et découle de la diagonalisation des matrices inductances statoriques et rotoriques ,Cette transformation est constituée d'une transformation triphasée - biphasée, suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère ($\alpha\beta$), puis vers le repère (dq).

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé [16]. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par [12]:

$$[P(\theta_s)] = c \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 10})$$

Dans le cas de la conservation de la puissance nous avons $c = \sqrt{\frac{2}{3}}$, [23].

Il est noté par θ_s (resp. par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques) (Fig. (II-3)).

La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles θ_s et θ_r , celle-ci s'exprime par :

$$\theta + \theta_r = \theta_s \quad (\text{II. 11})$$

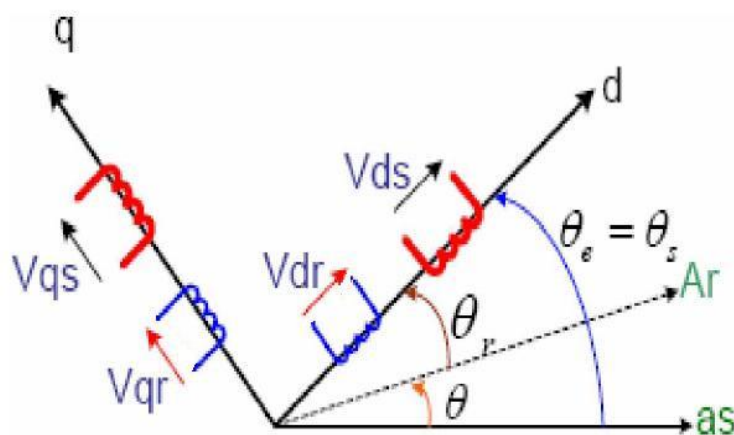


Figure.II.3.Représentation de la machine dans le repère diphasé.

II. 2.5.Choix du référentiel :

Jusqu'ici, on a exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère dq faisant un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre [24].

Il existe trois choix importants : on peut fixer le référentiel (dq) :

- 1) au stator.
- 2) au rotor.
- 3) au champ tournant.

II. 2.5.1.Référentiel lié au stator (α, β) :

$$W_{coord}=0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} U \rightarrow \alpha \\ V \rightarrow \beta \end{bmatrix}$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha s} \\ I_{\beta s} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 12})$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha r} \\ V_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha r} \\ I_{\beta r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 13})$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées

2.5.2. Référentiel lié au rotor (x, y) :

$$W_{coord} = W \Leftrightarrow \begin{bmatrix} U \rightarrow X \\ V \rightarrow Y \end{bmatrix}$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{xs} \\ V_{ys} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xs} \\ I_{ys} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{xs} \\ \Phi_{ys} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -W \\ W & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 14})$$

$$\begin{bmatrix} V_{xr} \\ V_{yr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xr} \\ I_{yr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{xr} \\ \Phi_{yr} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 15})$$

Ce référentiel est intéressant quand on étudie des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

II. 2.5.3. Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est caractérisé par $W_{coord} = W_r$. Dans ce repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine [24].

II. 2.6. Représentation de la MADA dans repère biphasé (dq) :

II. 2.6.1. Equations des tensions :

Appliquons la transformation de Park à l'expression (II. 1) et en multipliant les deux membres de l'égalité par $[P(\theta_s)]$ et en simplifiant, nous trouvons :

$$[V_{sdq}] = [R_s] \cdot [I_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [\Phi_{sdq}] \quad (\text{II. 16})$$

L'expression (2.9) devient alors :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

De manière similaire, et en suivant les mêmes étapes, nous obtenons pour le rotor l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - W_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + W_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (W_s - W) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (W_s - W) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$: Les tensions direct et en quadrature statoriques, respectivement rotoriques.

$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$: Les courants direct et en quadrature statoriques, respectivement rotoriques.

$\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{qr}$: Les flux direct et en quadrature statoriques, respectivement rotoriques.

$\omega_s, \omega_r, \omega$: La pulsation statorique, rotorique et mécanique respectivement.

II. 2.6.2. Equation des flux :

Appliquons la transformation de Park à l'expression (II.3) :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sdq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P^{-1}(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sdq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P^{-1}(\theta_r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{rdq} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 20})$$

En introduisant les inductances cycliques :

$$\begin{aligned} L_s &= l_s - M_s \\ L_m &= \frac{3}{2} \cdot M_{sr} \end{aligned} \quad (\text{II. 21})$$

L'expression (II.16) devient alors :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 22})$$

De la même manière, en appliquant la transformation de Park à l'équation du flux rotorique, et en introduisant l'inductance cyclique:

$$L_r = l_r - M_r \quad (\text{II.23})$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 24})$$

Ou :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

II. 2.6.3. Equation du couple électromagnétique:

Parmi les différentes méthodes qui nous permettent d'exprimer l'équation du couple électromagnétique, deux méthodes sont distinguées. La méthode des travaux virtuels [19], et la méthode du bilan des puissances instantanées. Ainsi grâce à cette dernière, nous pouvons avoir plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique toutes égales :

$$\begin{aligned} P_s &= V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ P_s &= \left(R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s \varphi_{sq} \right) I_{sd} + \left(R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_s \varphi_{sd} \right) I_{sq} \\ P_s &= R_s + (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) + \left(\frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq} \right) + W_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \end{aligned} \quad (\text{II.26})$$

Elle se décompose en trois termes :

- 1) Puissance dissipée en pertes joules :

$$R_s (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) \tag{II.27}$$

- 2) Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source :

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq} \tag{II.28}$$

- 3) Puissance mécanique :

$$W_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \tag{II.29}$$

Et d'autre part on a :

$$C_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s}$$

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P}$$

$$C_{em} = P \frac{P_m}{\omega_s}$$

$$C_{em} = P(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \tag{II.30}$$

II. 3. Résultats de la Simulation :

Les théories et les équations citées seront modélisées pour permettre un traitement avec MATLAB/SIMULINK. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 4 KW.

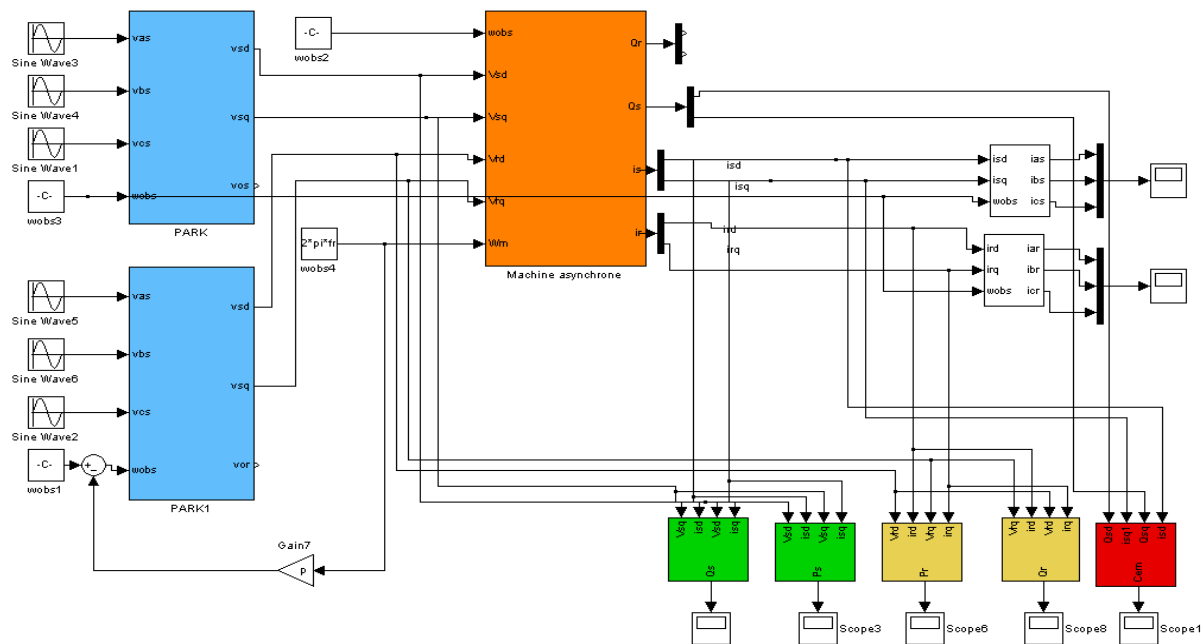


Figure.II.4.Schéma bloqué de la modèle de MADA

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 4 kW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1455 tr/min.

- La figure (II.5) illustre les courants triphasés statoriques avec un zoom ainsi les courants rotoriques sont montrés à la figure (II.6).
- La figure (II.7) et (II.8) représente la tension d'alimentation statorique et rotorique .
- La puissance active et réactive du stator et sont représentées sur la figure (II.9) et (II.10).
- En fin on représente le couple électromagnétique développé par la machine sur la figure (II.11)

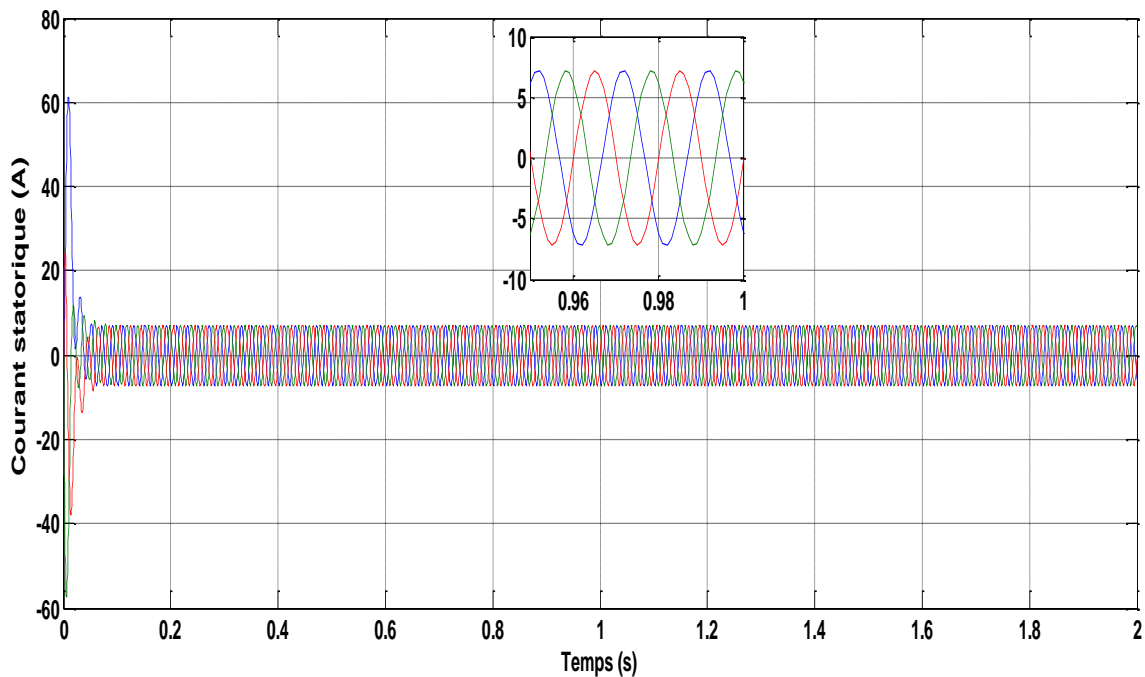


Figure.II.5. Courbe du courant statorique.

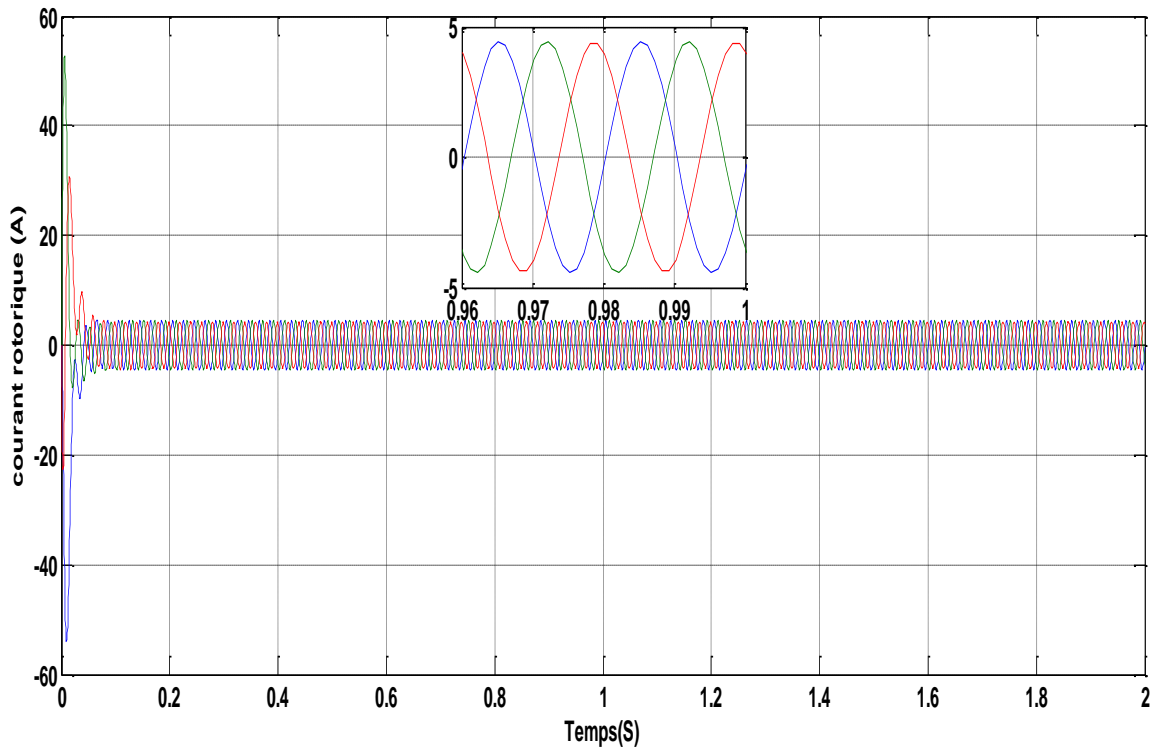


Figure.II.6.Courbe du courant rotorique.

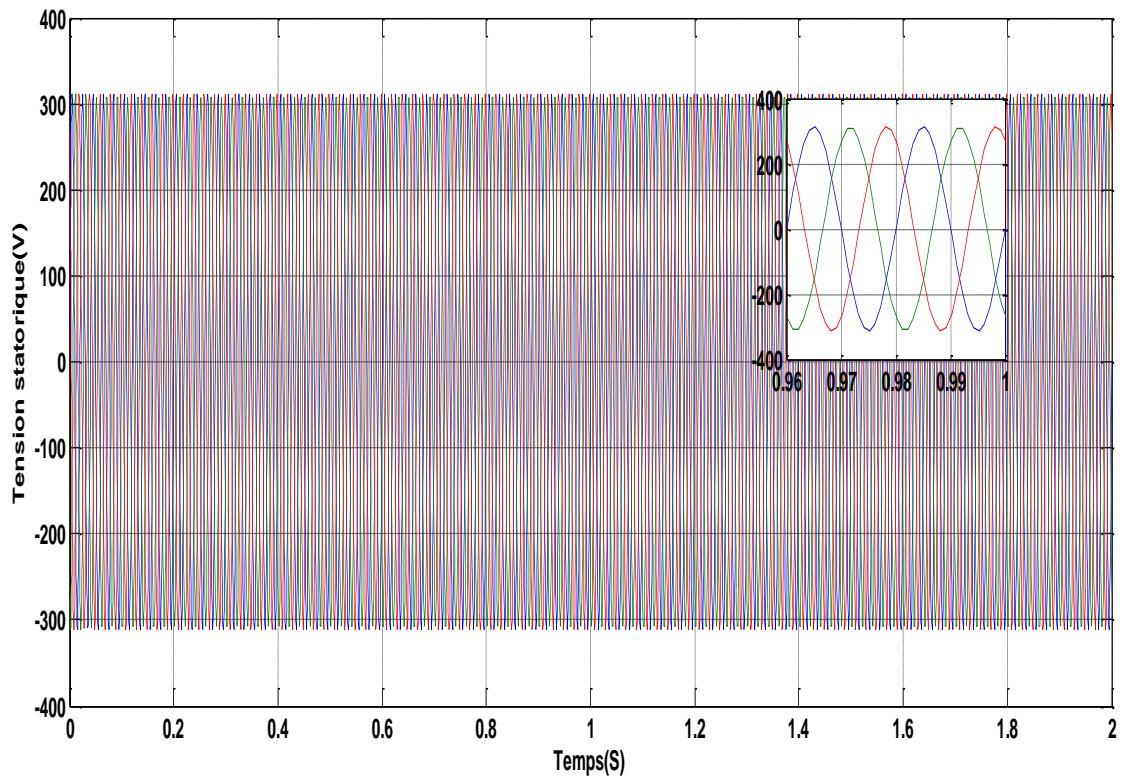


Figure.II.7.Courbe de la tension statorique

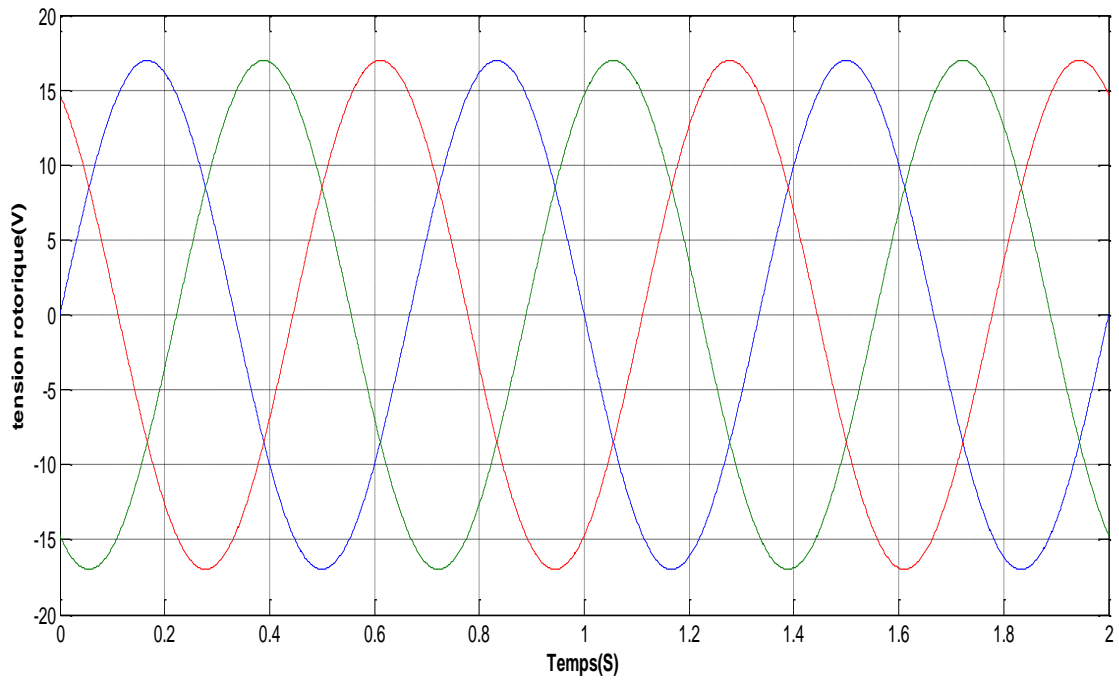


Figure.II.8.Courbe de la tension rotorique

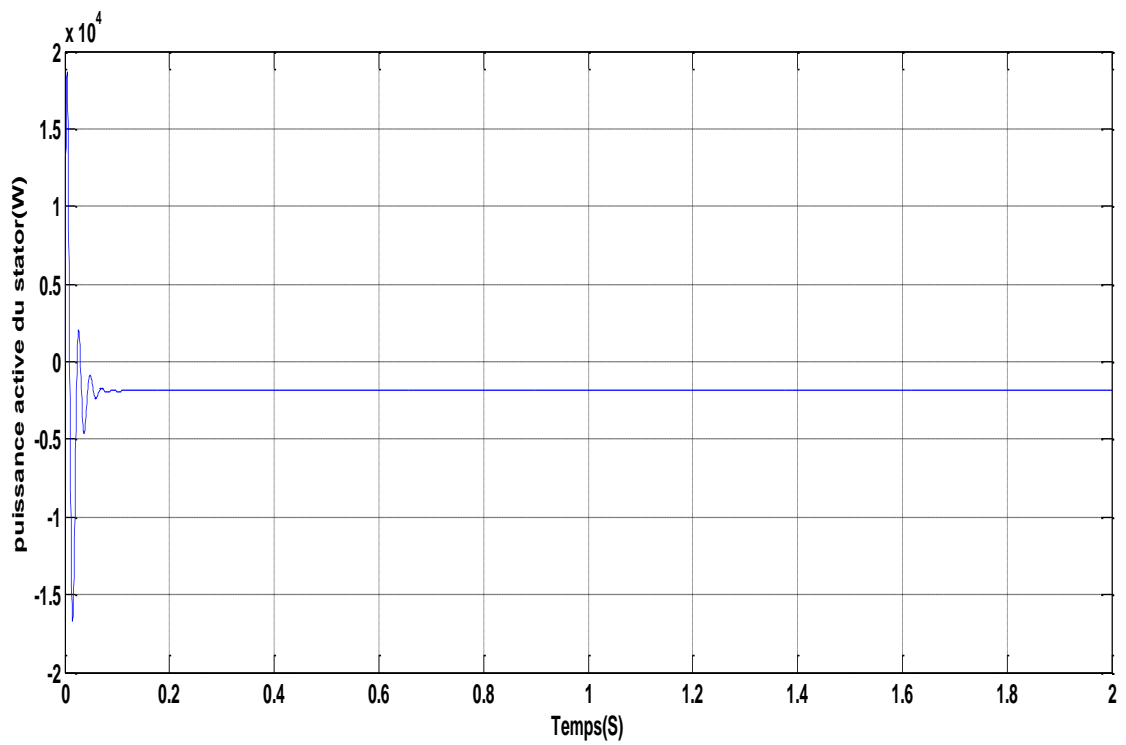


Figure.II.9.Courbe de la puissance active du stator.

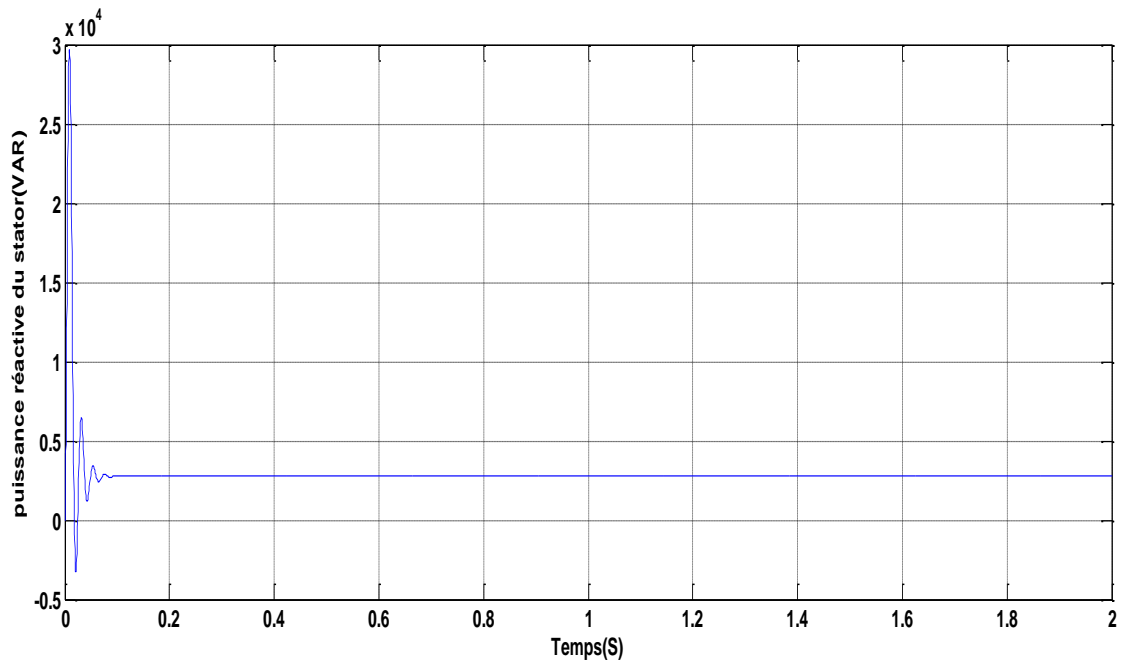


Figure. II.10. Courbe de la puissance réactive du stator.

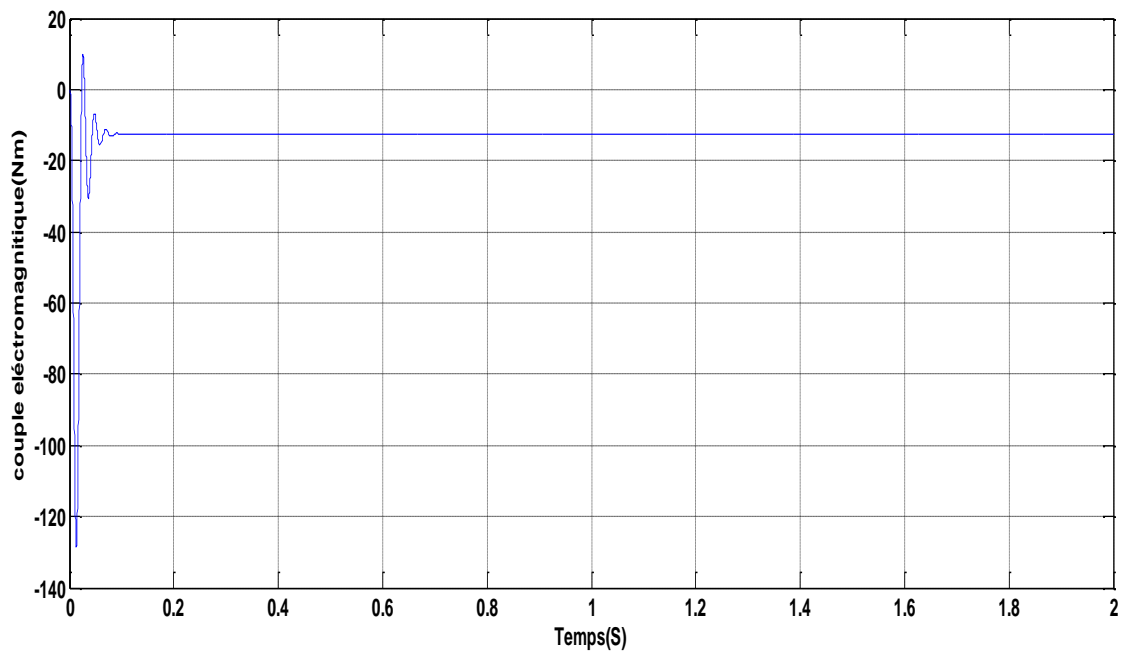


Figure II.11. Courbe du couple électromagnétique .

II.3.1 Interprétations :

- La fréquence rotorique est liée au glissement de la machine qui égal à 1.5 Hz dans ce cas (la machine est entraînée par une vitesse de 1455 tr/min) ; et ce qui est claire aussi sur les figures (II.5) et (II.6).
- En comparant ces deux figures on voit que la fréquence des courants rotoriques est dixième de la fréquence des courants statoriques.
- On constate l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage et après environ 0.05s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales respectivement à fréquence de 50Hz et 1.5Hz.
- Au regard de la figure (II.7) et (II.8), on peut remarquer que la tension statorique et rotorique ont des fréquences différentes. La fréquence statorique est imposée par le réseau (50Hz).
- On peut constater aussi qu'au démarrage le couple électromagnétique présente des oscillations justifiées par le bruit mécanique.

II.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique à 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, la transformation de Park nous à permis de simplifier ce modèle. Ainsi, les résultats de simulation ont été présentés. Le modèle de la MADA a été simulé sous MATLAB/Simulink, et les résultats de simulation ont montré une bonne conformité au comportement dynamique de la machine.

La commande vectorielle sera l'objet du chapitre suivant.

III. 1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la commande vectorielle de puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobine fonctionne en mode générateur.

III.2. La commande vectorielle de la MADA :

III.2.1. Principe :

La commande vectorielle des machines électriques à courants alternatif est une technique qui vise à retrouver le découplage qui caractérise la machine à courant continu à excitation séparée pour la quelle le courant inducteur contrôle le flux et celui de l’induit contrôle le couple.

De la même manière, l’application de la commande vectorielle à la MADA consiste à réaliser un découplage entre les grandeurs générant le couple et le flux de telle sorte que le flux soit régulé par la composante directe du courant statorique ou rotorique (selon l’orientation choisie) et le couple par la composante en quadrature. Ainsi, la commande de la MADA sera ramenée à celle d’une machine à courant continu à excitation séparée (figure III.1).

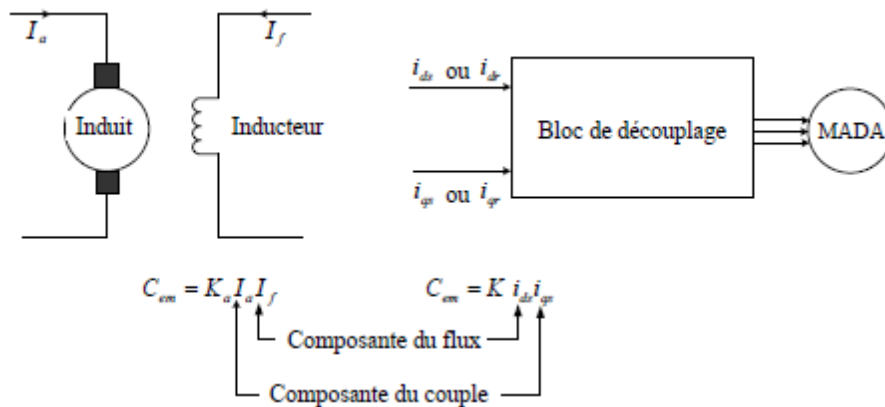


Figure III.1. Analogie entre la MCC à excitation séparée et la MADA commandée vectoriellement.

III.2.2. Orientation du repère diphasé (d,q):

Pour retrouver cette analogie, la commande vectorielle de la MADA est basée sur le choix de l’orientation du repère diphasé (d,q) à la base du quel la transformation de Park est effectué (voir

§II.2.3). On peut à priori choisir d'orienter les axes de référence d et q selon l'un des flux de la machine, à savoir le flux statorique, le flux rotorique ou le flux dans l'entrefer.

III.2.2.1. Orientation selon le flux statorique :

L'orientation du flux statorique signifie qu'on choisit le repère diphasé (d,q) de telle sorte que le flux statorique soit aligné avec l'axe d de ce repère (figure III.2).

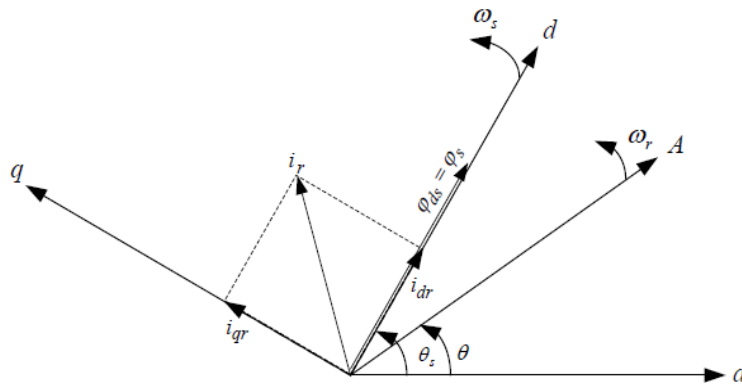


Figure.III.2.Orientation du repère diphasé **d,q** selon le flux statorique

III.2.2.2. Orientation selon le flux rotorique :

Dans ce cas, le repère diphasé (d,q) est choisi de telle sorte que le flux rotorique soit aligné avec l'axe d de ce repère (figure III.3)

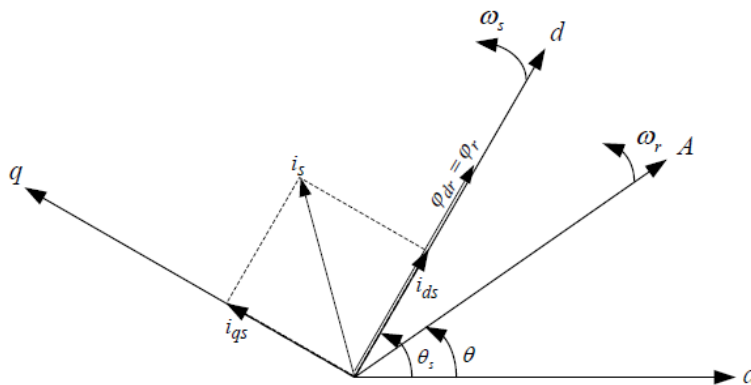


Figure.III.3.Orientation du repère diphasé d,q selon le flux rotorique.

Une analyse de la littérature concernant la commande de la MADA atteste que la commande vectorielle est la stratégie la plus adoptée « La stratégie de contrôle adoptée est quasi systématiquement un contrôle vectoriel. » [12] ; Et le but est la commande indépendante des puissances active et réactive envoyées vers le réseau. Et parmi les flux de la machine selon les quels le repère (d,q) peut être orienté, le flux statorique est celui le plus choisi ([12], [25]) et c'est

d'ailleurs le choix adopté pour notre étude. La commande vectorielle nécessite en effet la détermination à chaque instant du flux à orienter, ceci est assuré soit : - directement par mesure ou observation du vecteur de flux (module, phase); - ou indirectement par contrôle de la fréquence de glissement.

III.3. La commande indépendante des puissances active et réactive statoriques du GADA :

III.3.1.Principe :

La commande vectorielle du GADA est souvent associée à la commande indépendante de ses puissances statoriques, rotoriques, ou celles du réseau. Dans notre étude ce sont les puissances statoriques qui seront commandées. Pour ce faire, l'approche consiste à établir un modèle qui met en évidence la possibilité d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler, et d'une façon découplée, l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau (ou la charge) sur le quel elle débite. Il y a deux cas à distinguer :

- le cas où le GADA est connectée sur une charge isolée. La stratégie de commande doit assurer la régulation de la valeur efficace et de la fréquence des tensions statoriques que débite le GADA sur la charge.
- et le cas où elle est connectée sur un réseau de puissance supposée infinie donc la valeur efficace et la fréquence des tensions statoriques sont dictées par le réseau et on s'intéresse plutôt au contrôle de puissance active et réactive débitées par le GADA sur le réseau.

III.3.2. Modélisation du GADA en vue d'une commande indépendante de puissance active et réactive:

III.3.2.1. Orientation du repère (d,q) :

Le référentiel diphasé choisi est celui lié au champ tournant. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent [26]. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation. Afin de simplifier la commande de la machine, le vecteur flux statorique Φ_s est aligné avec l'axe « d » du repère diphasé (Figure III.4), d'où :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s \quad (III.1)$$

$$\Phi_{qs} = 0 \quad (III.2)$$

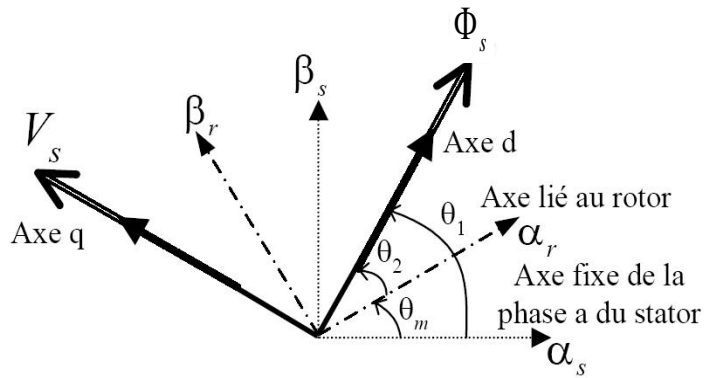


Figure.III.4. Vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi.

L'équation du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \cdot \Phi_{ds} \tag{III.3}$$

Dans l'hypothèse où le réseau auquel est connecté la MADA est stable, le flux Φ_{ds} devient alors constant. Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendant du courant rotorique d'axe q.

Dans le repère triphasé les tensions statoriques s'expriment par l'expression (II.1):

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \tag{III.4}$$

R_s Étant négligeable pour les machines de forte puissance utilisées dans les turbines éoliennes [27], l'expression de la tension statorique devient alors :

$$V_s \cong \frac{d\Phi_s}{dt} \tag{III.5}$$

Dans le même référentiel et dans l'hypothèse où le flux statorique est constant grâce à une alimentation par un réseau stable [17], [4], [22], [27], [28], les équations des tensions s'exprimeront par :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \end{cases} \tag{III.6}$$

En utilisant les simplifications précédentes, les équations des flux s'exprimeront comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (III.7)$$

III.3.2.1.1. Relations entre les courants statoriques et rotoriques :

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statorique (III.7) nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (III.8)$$

III.3.2.1.2. Expression des puissances actives et réactives dans le repère synchrone :

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées par :

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (III.9)$$

L'application des hypothèses choisies ainsi que le système d'axes nous permet d'établir la simplification suivante :

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (III.10)$$

Ainsi en remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (III.11)$$

De l'expression (III.6) nous pouvons écrire :

$$\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (III.12)$$

D'où d'après (III.11)

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (III.13)$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ prés imposée par le réseau.

III.3.2.1.3. Expressions des tensions rotoriques en fonction de courants rotoriques :

Les flux rotoriques s'expriment en fonction des courants rotoriques, après avoir remplacé les courants statoriques par leur expression, da la façon suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (III.14)$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (III.15)$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (III.16)$$

L'étude précédemment établie nous permet de définir le schéma bloc du système à réguler (Figure III.5).

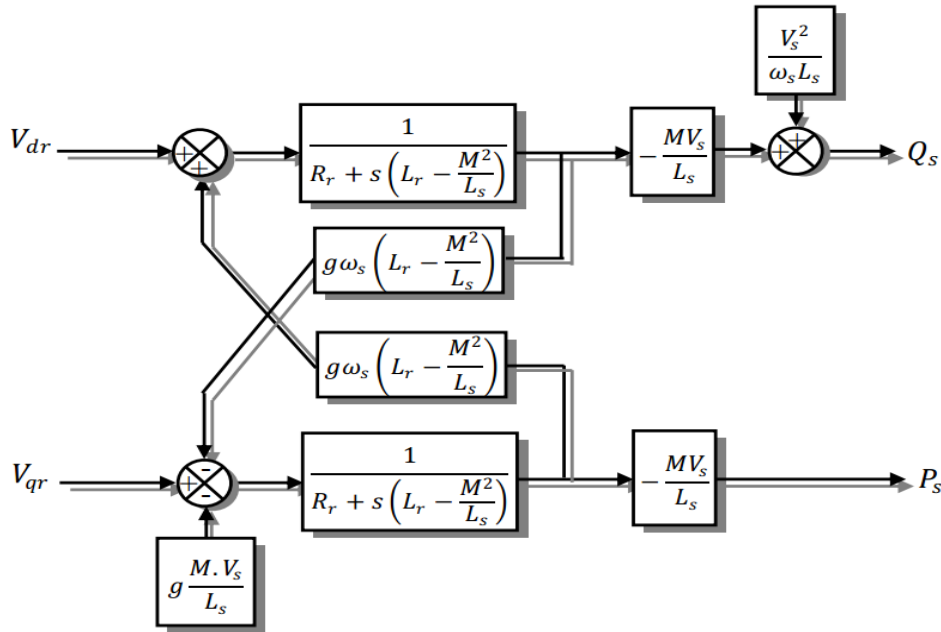


Figure.III.5.Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Les tensions rotoriques diphasées sont les grandeurs à imposer pour contrôler les courants rotoriques. V_{dr} et V_{qr} sont ainsi considérés comme des variables de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté (Figure III.6) et les courants rotoriques I_{dr} et I_{qr} comme des variables d'état. Les tensions rotoriques sont ainsi fonction des grandeurs de consigne P_{ref} et Q_{ref} .

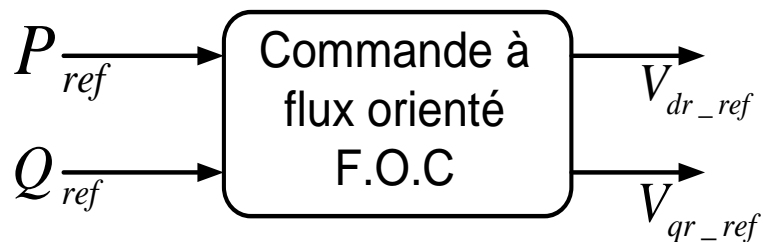


Figure.III.6.Bloc de contrôle à flux orienté.

Il est à noter que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. Du fait du faible couplage entre les axes d et q (glissement faible) il est possible d'établir aisément une commande pour ce système. Ainsi les deux axes pourront être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Cette commande utilisant les puissances actives et réactives comme des consignes est appelée « Commande en P et Q ».

III.4. Commande indirect :

III.4.1. Commande en boucle ouverte :

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

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système IV.11 on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations. [29]

$$\begin{cases} I_{qr-ref} = -\frac{L_s}{V_s M} \cdot P_{s-ref} \\ I_{dr-ref} = -\frac{L_s}{V_s M} \cdot P_{s-ref} + \frac{V_s}{\omega_s M} \end{cases} \quad (III.17)$$

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

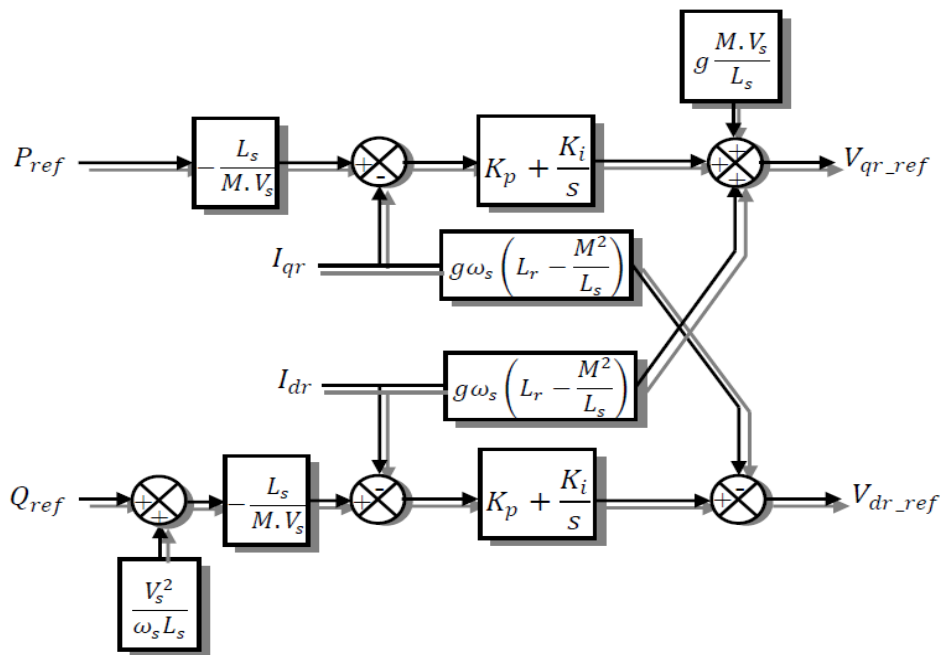


Figure III.7. Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte. [29]

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

III.4.1.1.Synthèse des régulateurs :

Pour réaliser la commande bouclée, on utilise des régulateurs classiques de type PI. Ce type de régulateur assure une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale tandis que la rapidité de la réponse est établie par l'action proportionnelle.

Le schéma de la figure.III.8 montre une partie de notre système bouclé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{S}$. Correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure. III.7.

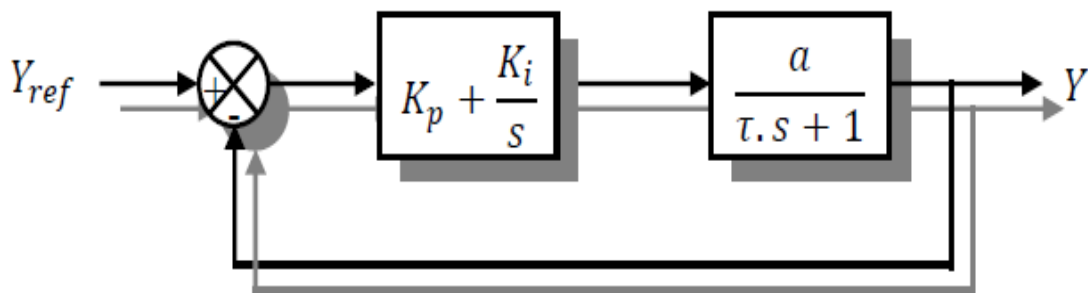


Figure. III.8.Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

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

$$FTBO = \frac{S + \frac{K}{K_p}}{\frac{S}{K_p}} \times \frac{\frac{V_s M}{L_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{S \times \left(L_r - \frac{R_r}{L_2} \right)} \tag{III.18}$$

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

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \tag{III.19}$$

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$FTBO = F_o(t) = \frac{\frac{V_s M}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{\frac{S}{K_p}} \tag{III.20}$$

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

III.5. Convertisseur MLI :

Le rotor de la MADA est alimenté par une tension continue à travers un onduleur de tension qui est supposée constante, la tension de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur.

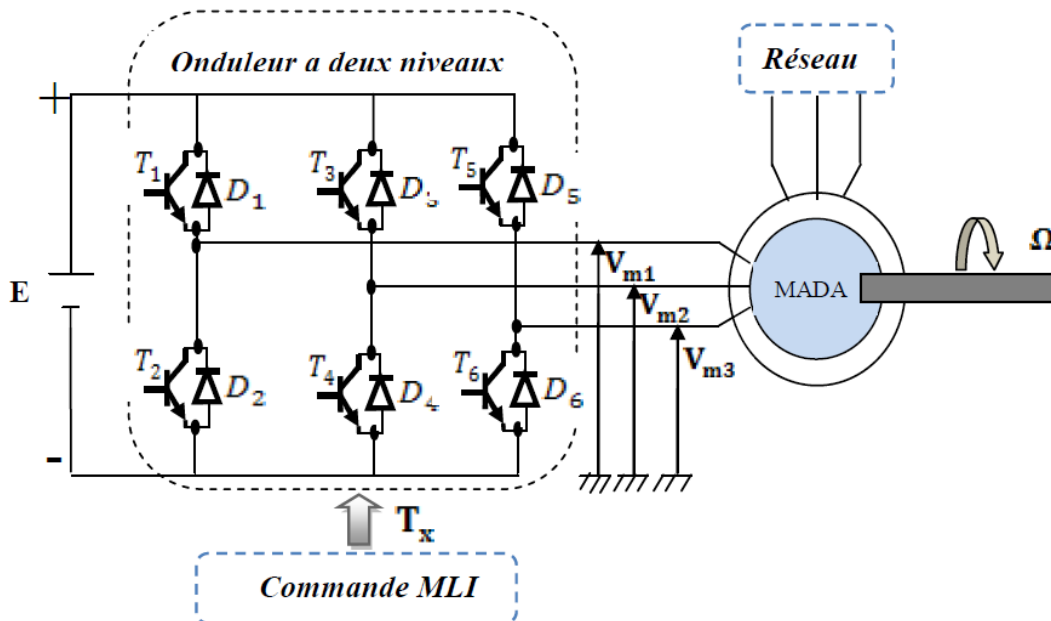


Figure. III.9. Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI.

III.5.1. Onduleur à deux niveaux :

L'onduleur est un convertisseur d'énergie permettant d'onduler la tension du bus continu et la fournir au bobinage du rotor. La tension continue est considérée constante, elle est égale à 381V.

Cette hypothèse nous permet de faciliter la commande du convertisseur. Ainsi la bidirectionnalité de la puissance entre le rotor et le réseau est possible à travers un niveau de tension du bus continu supérieur à la valeur crête de la tension ondulée. Toujours par soucis de simplification, l'onduleur utilisé est à deux niveaux Figure. III.10.

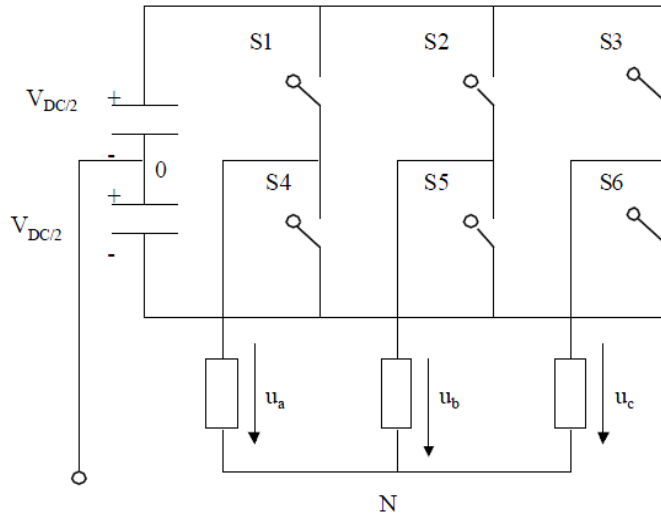


Figure III.10. Onduleur de tension à deux niveaux.

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables S_a , S_b , S_c en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.

❖ **Branche1 :**

- $S_a=0$ si $S1$ est en position off et $S4$ est à on.
- $S_a=1$ si $S1$ est en position on et $S4$ est à off.

❖ **Branche2 :**

- $S_b=0$ si $S2$ est en position off et $S5$ est à on.
- $S_b=1$ si $S2$ est en position on et $S5$ est à off.

❖ **Branche3 :**

- $S_c=0$ si $S3$ est en position off et $S6$ est à on.
- $S_c=1$ si $S3$ est en position on et $S6$ est à off.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{DC}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{DC}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{DC}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$U_a + U_b + U_c = 0 \quad (\text{III.22})$$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ U_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ U_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

D'où on obtient :

$$\begin{cases} U_a = \frac{V_{DC}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ U_b = \frac{V_{DC}}{3}(2S_b - S_c - S_a) \\ U_c = \frac{V_{DC}}{3}(2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulosinusoidale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie.

III.5.2. Principe de la MLI

La technique de modulation de largeur d’impulsion triangulosinusoidale consiste à comparer en chaque instant un signal triangulaire (t) de fréquence, que nous appellerons porteuse, à trois signaux de commande, notés u_a , u_b et u_c . Ces signaux u_i sont les images des tensions que l’on souhaite appliquer sur chaque phase [30]. Les commutations des interrupteurs ont lieu quand on a une égalité du type : $U_i(t) = W(t)$

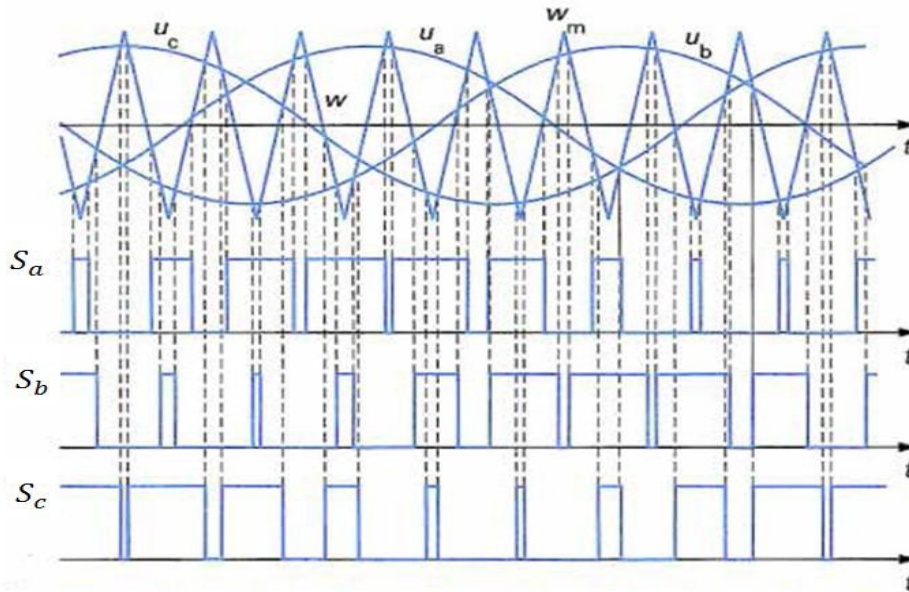


Figure III.11.Principe de la MLI triangle sinusoidale.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- ✓ L’indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \tag{III.26}$$

- ✓ Taux de modulation « r » qui est le rapport de l’amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \tag{III.27}$$

Le choix d’un indice de modulation « m » multiple de trois nous permet d’éliminer les harmoniques d’ordre trois qui représente un handicap de cette technique. Cependant, le taux de modulation « r » varie suivant la référence imposée.

III.6. Schéma de simulation :

La figure (III.12) représente la structure de la commande vectorielle par orientation du flux statorique de la GADA avec onduleur alimentant le rotor.

III.6.1.Simulation de la commande vectorielle du GADA (sans onduleur):

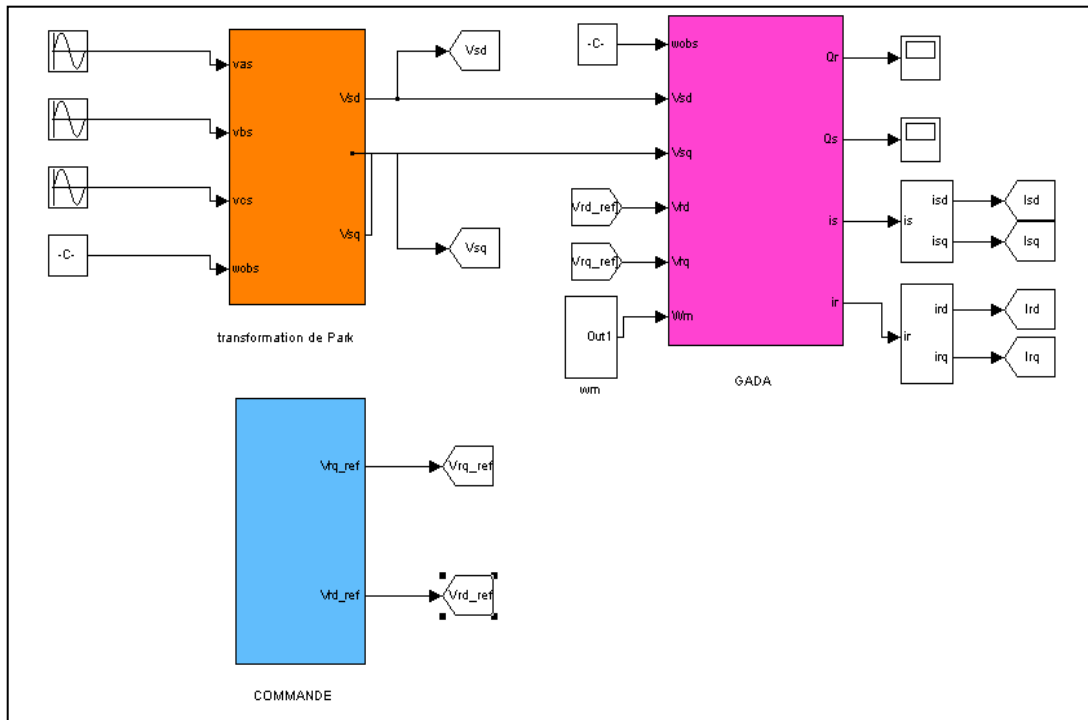


Figure. III.12.Schéma bloc de la commande vectorielle de la GADA (sans onduleur)

III.6.1.1.Résultat de simulation :

Les figures suivantes représentent les différentes courbes obtenues par la commande des puissances active et réactive générées au niveau du stator de la machine asynchrone double alimentée selon deux cas : sans l'association d'un onduleur au coté rotorique et avec l'association de ce dernier au coté rotorique.

La simulation de cette machine à **4 kW** (paramètres donnés en Annexe), a été implantée sous MATLAB/SIMULINK .

On a procédé aux essais suivant pendant une durée de 4s .Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1455 tr/min .

III.6.1.2.Indirecte en Boucle Ouverte (sans onduteur):

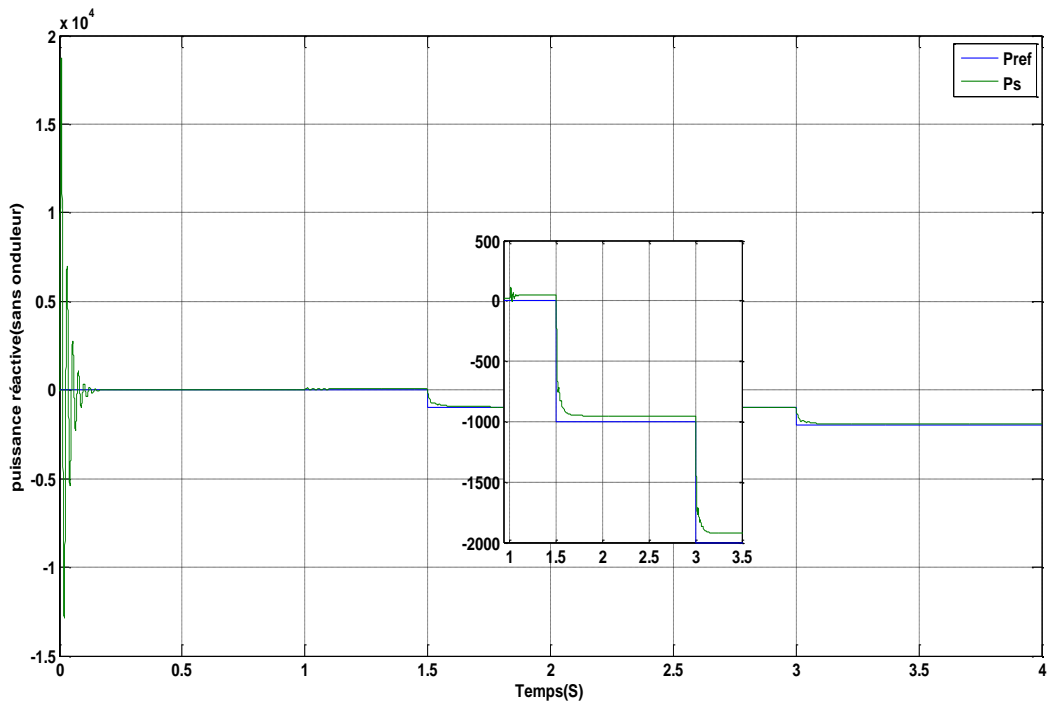
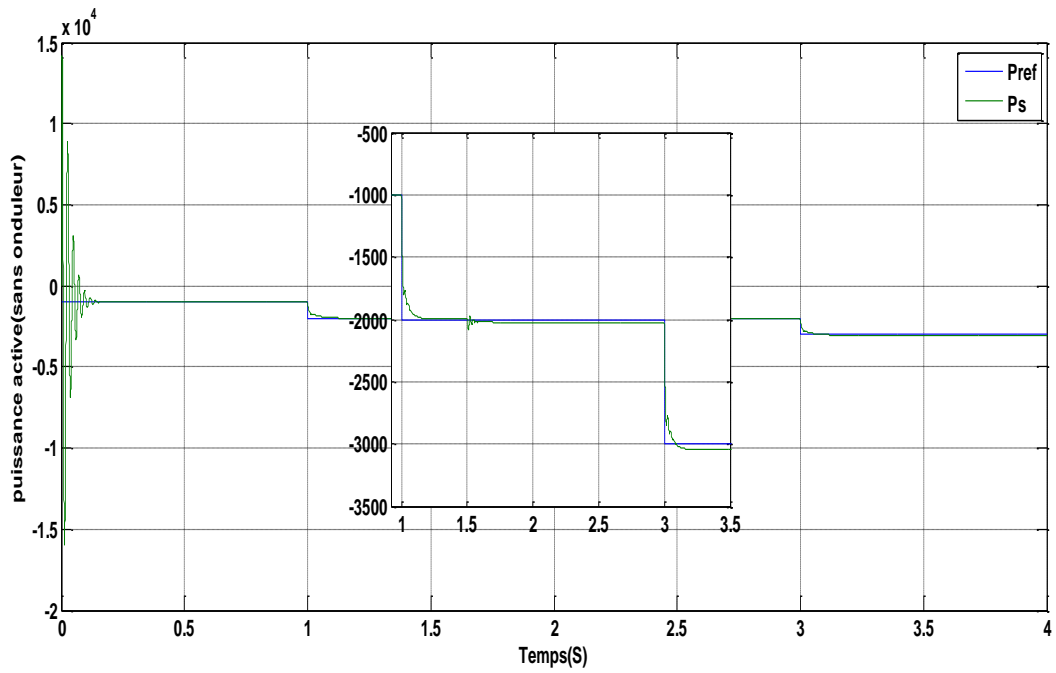


Figure.III.13.puissance active et réactive (sans onduteur).

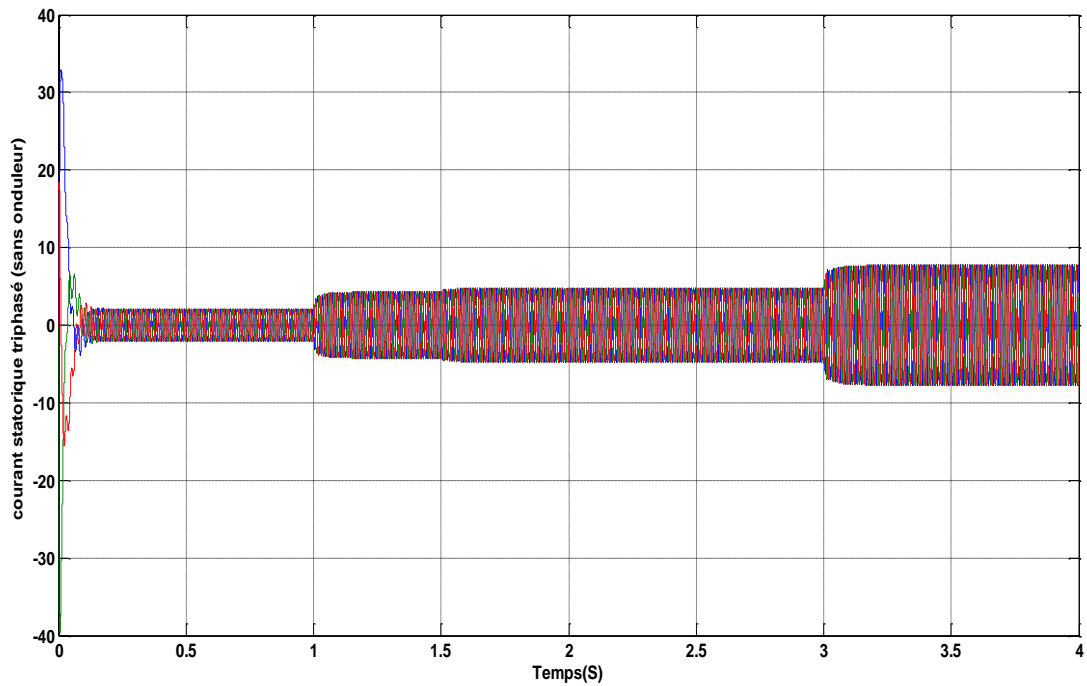


Figure.III.14.Courant statorique triphasé (Sans Onduleur)

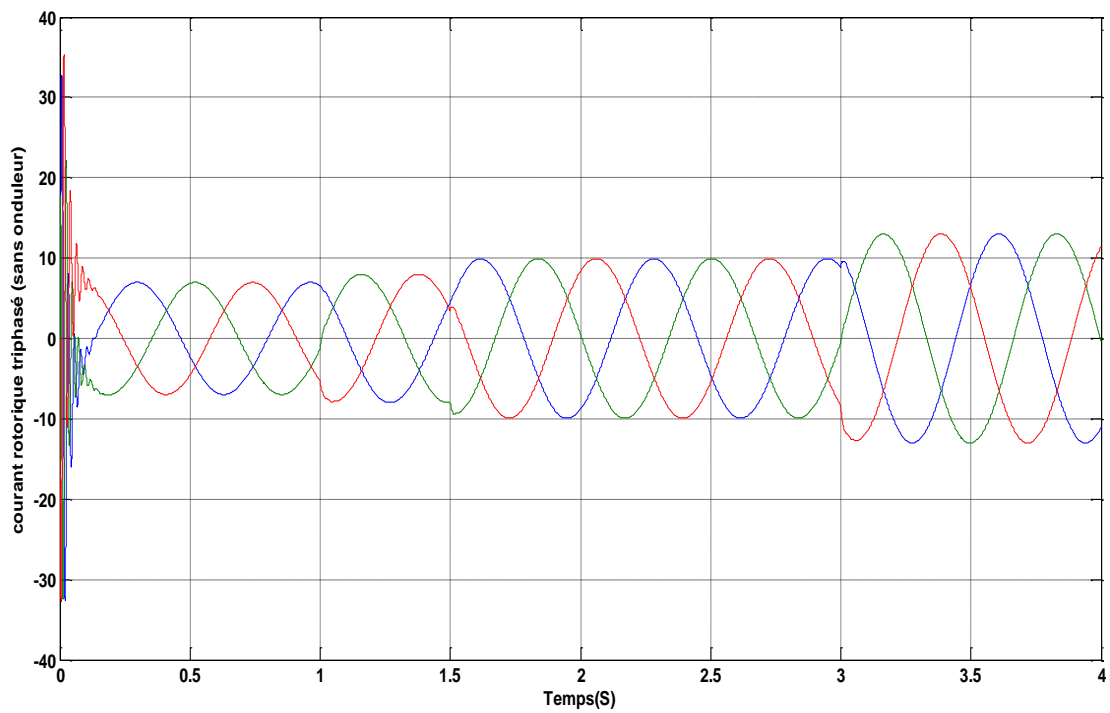


Figure.III.15.Courant rotorique triphasé (Sans onduleur)

III.6. 2.Simulation de la commande vectorielle du GADA (Avec onduleur):

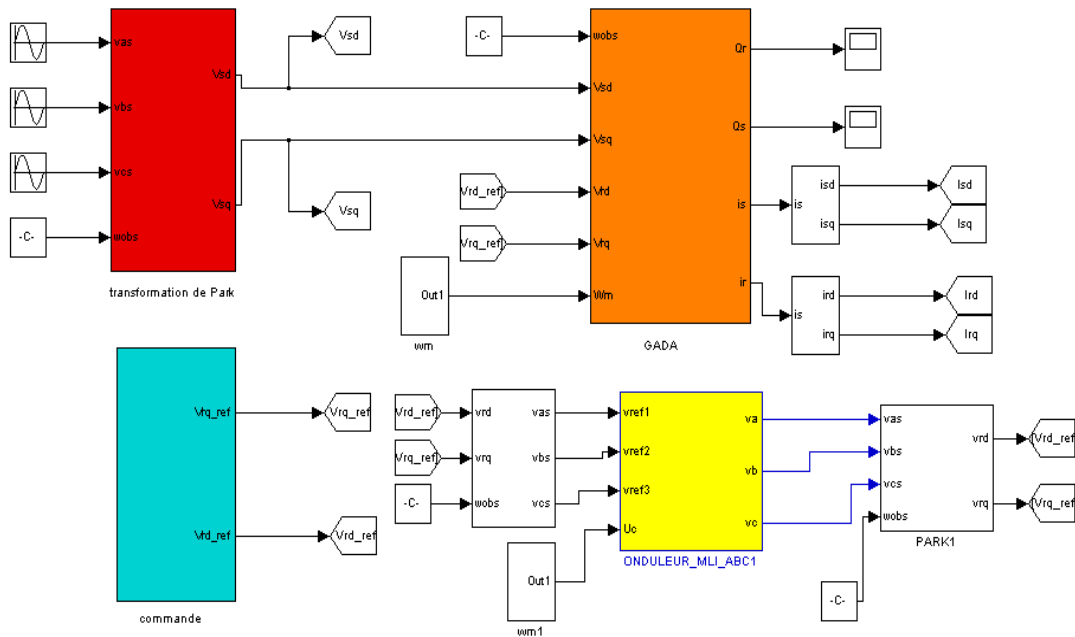


Figure.III.16.Schéma bloc de la commande vectorielle du GADA (avec onduleur)

III.6. 2.1.Indirecte en Boucle Ouverte (avec onduleur):

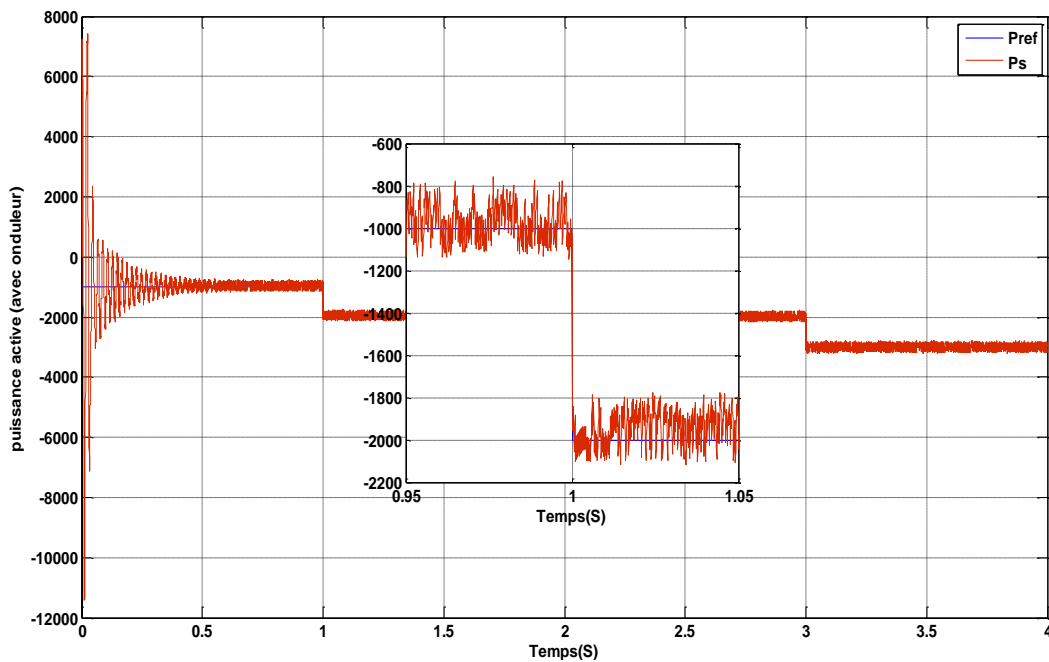


Figure .III.17.puissance active (avec onduleur) .

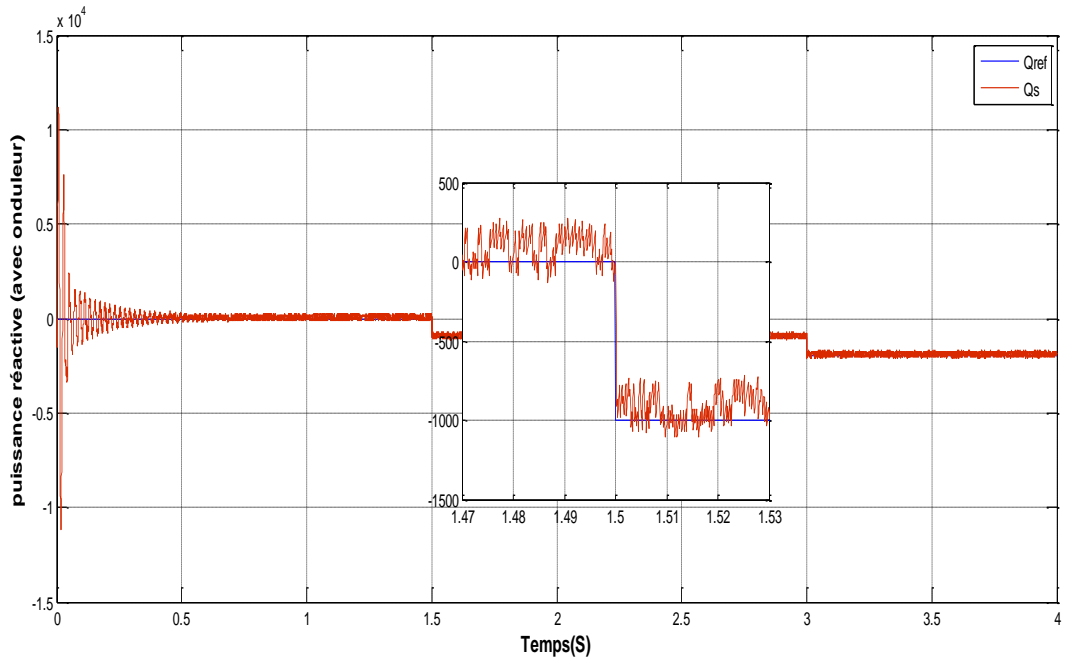


Figure.III.18.puissance réactive (avec onduteur).

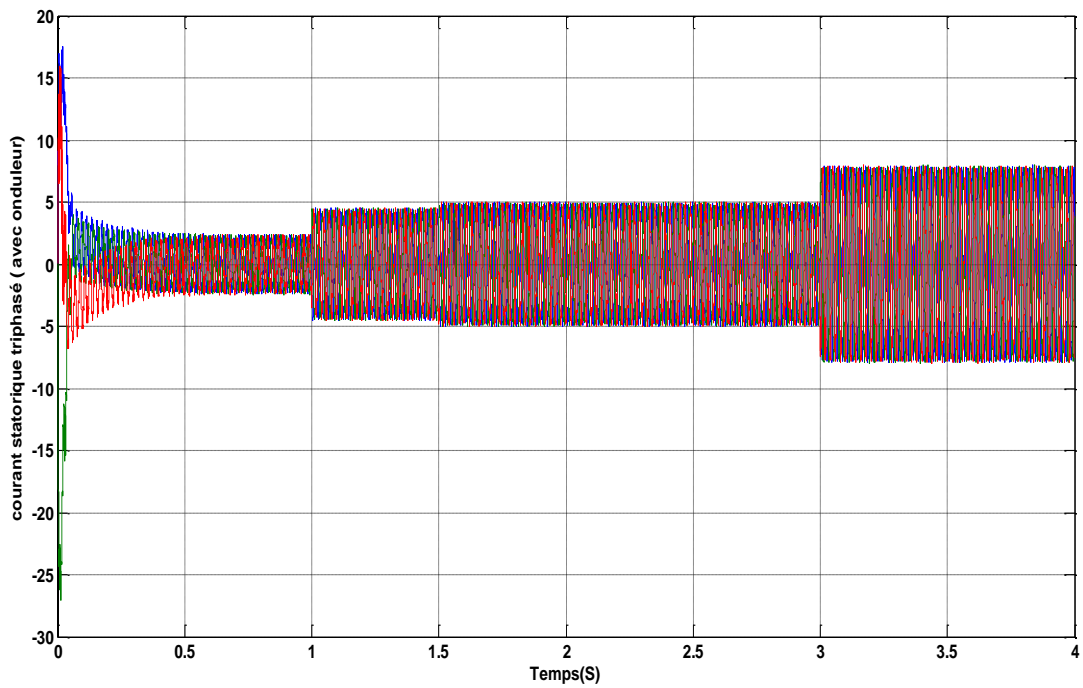


Figure.III.19. courant statorique triphasé (Avec onduteur).

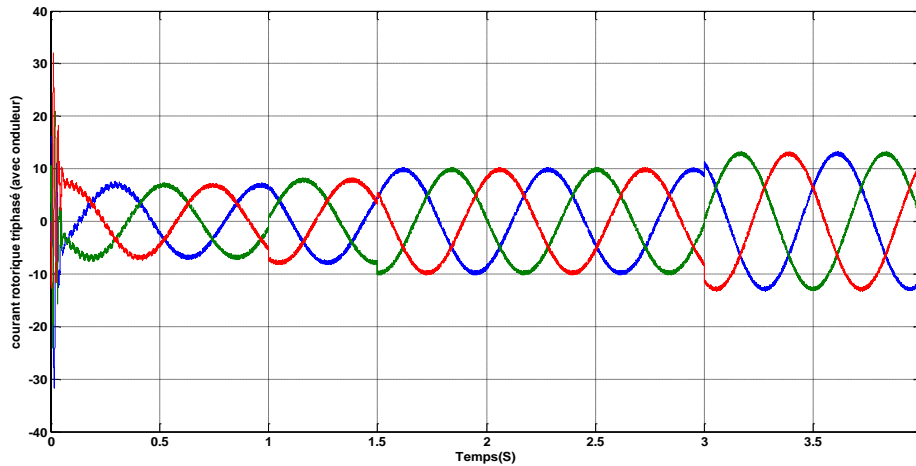


Figure.III.20. courant rotorique triphasé (Avec ondulateur).

Interprétations :

- Les résultats obtenus montrent bien les grandes performances de réglage par des régulateurs PI, dans les deux cas sans et avec ondulateur. Ces derniers présentent un bon découplage au réglage des puissances active et réactive et au niveau du stator ou d'autre manier celle du flux et du couple, ainsi qu'un meilleur suivi des courants rotoriques par rapport à leurs références, dont la puissance active et réactive (P,Q) sont proportionnelles à la composante en quadrature et directe du courant rotorique respectivement.
- Les figures (III.14 ,III.15,III.19,III.20) représentent le courant statorique et rotorique triphasé on constate leur fréquence est 50HZ .1,5HZ.
- De plus on remarque la présence des oscillations dans les courbes avec ondulateur qui sont due à l'harmonique de la tension . Le contrôle de la puissance réactive nous permet d'avoir un fonctionnement en mode capacitive ou inductif.

L'avantage de cette commande est qu'elle permet de mettre les courants rotoriques dans des limites à ne pas dépasser.

III.7. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique. Ainsi, on a représenté un mode de contrôle ont été réalisé .mode indirect où les courants rotoriques sont utilisés pour commander les puissances.

A la fin de ce chapitre on a présenté les résultats de simulation qui ils sont obtenu, sans ondulateur et avec utilisation un ondulateur de tension a deux niveaux.

Conclusion générale :

Le travail, dans le cadre de ce mémoire, a permis d'élaborer l'étude de la commande de la machine asynchrone double alimentée en tension par la commande vectorielle. A l'issue de ce travail, les volets principaux et les perspectives futures envisageables peuvent être résumés comme suit.

La première partie de ce travail a été consacrée à la présentation des généralités de la machine asynchrone, en particulier la machine asynchrone double alimentée MADA.

La deuxième partie est l'étude de la modélisation par la transformation de PARK, avec la précision des différents repères qui peuvent être utilisés, ces derniers dépendent du positionnement de repère de PARK. Le modèle de la machine a été écrit lié au choix des sorties du modèle et du référentiel de travail.

La troisième partie est la commande vectorielle de la MADA utilisant un réglage classique (régulateur PI) nécessite une parfaite connaissance du modèle du système à régler. Cette approche conduit à des lois de commande dont les performances sont fortement liées à la fidélité du modèle dynamique utilisée pour décrire le comportement du système. Des erreurs de modélisation ou de variation paramétrique du système peuvent détériorer les performances de réglage puisqu'elles contribuent directement au calcul de la commande.

Nous remarquons que le réglage classique ne contrôle pas d'une manière satisfaisante le régime transitoire de la MADA lors du changement de consigne.

Suggestions et perspectives:

Nous suggérons pour améliorer ce travail que :

- Commande vectorielle de la MADA avec un estimateur neuronal de vitesse,
- La commande par la logique floue,
- Etude et l'application des algorithmes génétiques.

Difficultés rencontrées :

Au cours de notre travail nous n'avons pas échappés à quelques problèmes : Le choix des paramètres du correcteur de type proportionnel-intégral à été fait par plusieurs essais, ceci réside dans le fait de chercher les paramètres qui donnent le réglage le plus optimal, tout en simulant pour avoir la réponse en vitesse la plus rapide sans qu'il y ait de dépassement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. Azouz « Contribution à l'étude du comportement de la MADA commandée par un Onduleur de tension MLI, ». Mémoire d'ingénieur d'Electromécanique, Université de M'sila, juin 2004.
- [2] A. L. Nemmour, «Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation», Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [3] F. Poitiers, «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne, » Thèse de Docteur de l'Université de Nantes, France, Décembre 2003.
- [4] C. Messaoudi, « Réglage de puissance active et réactive de la GADA, ». Mémoire D'ingénieur d'Electromécanique Université de M'sila, juin 2004.
- [5] F. Poitiers, «Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne : Machine Asynchrone à Cage Autonome, Machine Asynchrone à Double Alimentation Reliée au Réseau»,
- [6] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes , soutenue le 19/12/2003,
- [7] J.G. Sloopweg' H. Polinder Member IEEE, W.L. Kling, Member, IEEE, « DynamicModelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator »
- [8] A. Boyette, «Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à doublealimentation avec système de stockage pour la production éolienne, » Thèsede Doctorat de l'Université Henri Poincaré de Nancy, Décembre 2006.
- [9] Azaizia R, «Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multi-niveaux», Mémoire de magister en genieélectrique, Université de Bouverdes, Algérie, 2008.
- [10] Hopfensperger B. et Atkinson D. J .Doubly-fed a.c machines:classification and comparison , European conf. Power Electronics and Applications (EPE), pp.1-17, Graz, 2001.
- [11] Lindholm M., « Doubly fed drives for variable speed wind turbines», Thèse dedoctorat, Université Technique de Denmark, 2003, Denmark

- [12] 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.
- [13] Chapman S. J., «Electric Machinery Fundamentals», 4th Edition, McGraw Hill, Australia , 2004.
- [14] Petersson A., «Analyse, Modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines», thèse de licence en électrotechnique, université technologique de Chalmers, Göteborg, 2003, Sweden.
- [15] H.S. Vitoratos, J.A. Tegopoulos, J. Fellon. IEEE « Transient State Analysis of A Doubly Fed induction generator under Three Phase short circuit» IEEE national Technical University of Athens, Department of electrical engineering 106 82. Athens. GREECE. IEEE. Transactions on Energy conversion, Vol. 6, NO. 1, March 1991.
- [16] Salama et Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL),
- [17] 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.
- [18] A. Chaiba, «Commande par la Logique Floue de la Machine Asynchrone à Double Alimentation Alimentée en Tension», Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2004.
- [19] V. Paul-Etienne, «Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [20] A. Doria-Cerezo, « Modeling, Simulation and Control of a Doubly-Fed Induction Machine Controlled by a Back-to-Back Converter », PhD Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, 2006.
- [21] Mémoire d'un ingénieur. Université de Batna [2002] « Commande vectorielle et adaptative de la MADA »
- [22] Y.a. Chapuis, D. Roys et S. Courtine, « Commande directe du couple d'une Machine asynchrone par le contrôle direct de son flux statorique, ». Journal Physique III. pp. 863-880, France, Mai 1995.

- [23] L.BAGHLI, «Modélisation et commande de la machine asynchrone » , notes de cours de l'IUFM de Lorraine – Nancy 1, non édité, France, 2005.
- [24] M.A. KHELLAF, K.DOUBI, « Commande vectorielle directe de la machine asynchrone double étoile alimentée en tension » , projet de fin d'études, USTHB, 28 juin 2004.
- [25] S. KHOJET EL KHIL, « Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) » , Thèse doctorat, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [26] R.ACHOURI, M.HIDOUICHE, "Commande vectorielle de la machine asynchrone", projet de fin d'étude, ENP, Juin 2007.
- [27] S. EL AIMANI, « Modélisation de différentes technologies éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension», thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 6 décembre 2004.
- [28] F.MERRAH «Alimentation et commande d'une MADA (application à l'énergie éolienne » mémoire de magistère, ENP, 2007.
- [29] METATLA Samir « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une mada »
- [30]. J.-P LOUIS, C. BERGMANN. « Commande numérique, régimes intermédiaires et transitoires ». Techniques d'ingénieur D 3 643.

Notations et symboles

f_r	Fréquence rotoriques.
g	Glissement.
P_{mec}	Puissance mécanique disponible au niveau de l'arbre de la machine.
MADA	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
d	Indice de l'axe direct.
q	Indice de l'axe en quadrature.
$[V_s]$	Vecteur tension statorique.
$[I_s]$	Vecteur courant statorique.
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique.
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\Phi_r]$	Vecteur flux rotorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
$[L_{ss}]$	Matrice inductance statorique.
$[L_{rr}]$	Matrice inductance rotorique.
$[M_{sr}]$:	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
p	Nombre de paires de pôles.
θ_s	L'angle électrique entre l'axe a_s et l'axe d.
θ_r	L'angle électrique entre l'axe a_r et l'axe d.
θ	La position angulaire du rotor par rapport au stator.
ω_s	Pulsation électrique statorique.
ω_r	Pulsation de glissement ($\omega_s - \omega$).
ω	Vitesse angulaire de rotation.
Ω	Vitesse de rotation mécanique.
C_{em}	Couple électromagnétique.

R_s	Résistance statorique.
R_r	Résistance rotorique
l_s	Inductance propre d'une phase statorique.
l_r	Inductance propre d'une phase rotorique.
M_s	Inductance mutuelle entre deux phase statorique.
M_r	Inductance mutuelle entre deux phase rotorique.
M_{sr}	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe a_s coïncide avec l'axe a_r .
L_s	Inductance cyclique statorique.
L_r	Inductance cyclique rotorique.
L_m	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.
P	Puissance active statorique.
Q	Puissance réactive statorique.
FT	Fonction de transfert.
FTBF	Fonction de transfert en boucle fermée.
FTBO	Fonction de transfert en boucle ouverte.
K_{ond}	Gain statique de l'onduleur.
K_p	Coefficient de l'action proportionnelle du régulateur.
K_i	Coefficient de l'action intégrale du régulateur.
τ_r	Constante de temps du régulateur.
V_a, V_b, V_c	Tensions simples statoriques.
U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}	Tensions composées statoriques.
S_a, S_b, S_c	Etat des commutateurs de puissance.
V_{dc}	Tension continu.
m	Indice de modulation.
f_p	Fréquence de la porteuse.
V_{res}	Tension simple du réseau.
V_{ond}	Tension simple à la sortie de l'onduleur.
I_{ML11}	Courant dans le bus continu généré par l'onduleur.

Tableau des figures

CHAPITRE I

Figure. I.1. Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.	5
Figure. I.2. Machine asynchrone à rotor bobiné.....	6
Figure. I.3. Fréquences de la MADA en fonction de glissement	8
Figure. I.4. Tension mesurée du rotor de la MADA en fonction de glissement.	8
Figure I.5. Structure d'une machine asynchrone à double alimentation.	9
Figure I.6. Cascade d'une machine asynchrone à double alimentation.	10
Figure I.7. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	10
Figure I.8. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	11
Figure.I.9. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	11
Figure. I.10. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	12
Figure. I.11. Modes de fonctionnement de la MADA.....	12
Figure . I.12. Coupe d'une machine asynchrone à rotor bobine (standard)	15
Figure. I.13. Schéma de principe de la machine à double alimentation à rotor bobiné (standard).	15
Figure. I.14. Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone...16	
Figure. I.15. Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais.....	17
Figure. I.16. Eolienne installée en mer.....	22
Figure. I.17. Schéma de principe d'un aérogénérateur à base de la MADA	23

CHAPITRE II

Figure.II.1. Représentation simplifié de la MADA.....	25
Figure.II.2. Modèle de PARK de la MADA.	28
Figure.II.3. Représentation de la machine dans le repère diphasé.	29
Figure.II.4. Schéma bloque de la modèle de MADA.....	33
Figure .II.5. Courbe du courant statorique	34
Figure .II.6. Courbe du courant rotorique	35
Figure.II.7. Courbe de la tension statorique	35
Figure .II.8 . Courbe de la tension rotorique	36
Figure .II.9 . Courbe de la puissance active du stator.	36
Figure.II.10 . Courbe de la puissance réactive du stator.	37
Figure.II.11 . Courbe du couple	37

CHAPITRE III

Figure III.1. Analogie entre la MCC à excitation séparée et la MADA commandée vectoriellement	40
Figure III.2 . Orientation du repère diphasé d,q selon le flux statorique	41
Figure III.3 . Orientation du repère diphasé d,q selon le flux rotorique.	41
Figure III.4 . vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi.....	43
Figure III.5. Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances	46
Figure III.6. Bloc de contrôle à flux orienté.	46
Figure III.7. Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.....	47
Figure. III.8. Schéma bloc d'un système régulé par un PI	48
Figure. III.9. Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI	49

Figure III.10. Onduleur de tension à deux niveaux.	50
Figure III.11. Principe de la MLI triangulosinusoidale.	52
Figure. III.12. Schéma bloc de la commande vectorielle de la GADA sans onduleur	53
Figure III.13. Puissance active et réactive(Sans Onduleur)	54
Figure III.14. Courant statorique triphasé (Sans Onduleur)	55
Figure III.15. Courant rotorique triphasé (Sans Onduleur).....	55
Figure III.16. Schéma bloc de la commande vectorielle de la GADA avec onduleur.....	56
Figure III.17. puissance active (avec onduleur)	56
Figure III.18. puissance réactive (avec onduleur).....	57
Figure III.19. courant statorique triphasé (Avec onduleur).	57
Figure II.20. courant rotorique triphasé (Avec onduleur).	58

Annexe A

Paramètres utilisés

1. Valeurs nominales :

4 kW, 220/380 – 50 Hz, 15/8.6A, 1440 tr/min.

2. Paramètres de la MADA:

- Résistance statorique: $R_s = 1.2 \quad \Omega$.
- Résistance rotorique: $R_r = 1.8 \quad \Omega$.
- Inductance cyclique statorique: $L_s = 0.1554 \quad H$.
- Inductance cyclique rotorique: $L_r = 0.1568 \quad H$.
- Inductance cyclique mutuelle: $M = 0.15 \quad H$.
- Le nombre de paires de pôles est: $p = 2$.

3. Constantes mécaniques de la MADA:

- Moment d'inertie : $J_{mach} = 0.07 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement visqueux : $f = 0.001 \text{ N.m.s/rd}$.

Annexe B

Paramètre de régulateur

Régulation de la commande PI:

❖ Commande indirecte en boucle ouverte

➤ Sans Onduleur

Kp = 2.719

Ki = 100

➤ Avec Onduleur

Kp = 5.6567 .e4

Ki = 8.4764 .e6