

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE
N° : CE.283°



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: MEDJENAH NADIA
HAMOUDI CHAHIRA

Intitulé

Amélioration de la performance de la commande des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. ZORIG Assam	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. BERRABAH Fouad	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr. ROUABHI Riyadh	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Mr. ZOUGGAR El oualid	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur
Mr. HRIZI Abd elghafour	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année universitaire : 2017 / 2018

Remerciement

*Avant tout je remercie **ALLAH**, Le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années.*

On adresse mes sincères remerciements à toutes mes enseignants de L'université de M'sila, notamment à mes encadreurs

*Dr. **BERRABAH Fouad**, enseignant à l'Université de M'sila et Dr. **ROUABHI Riyadh**, d'avoir proposé le sujet sur lequel j'ai travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans cette mémoire.*

On tient à exprimer notre gratitude aux membres de jury qui ont bien voulu examiner ce travail.

*A travers ce mémoire, j'adresse mes reconnaissances aux enseignants qui ont contribué à la formation de notre connaissance depuis la première classe du primaire jusqu'à aujourd'hui. Notamment **Mm BELOINISSE Wasila**, enseignante à l'Université de M'sila, pour nous encourage à réaliser ce travail. Aussi pour leur soutien moral*

*Et **Pr BARKAT Saïd** professeur à l'Université de M'sila.*

*Nous remercions vivement mes enseignants : **Mr MOUSSA**, **Mr MAZOUZ** et **Mr HELLALI** à l'Université de M'Sila pour leurs aides, leurs conseils et leurs encouragements pour achever ce travail.*

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin à réaliser ce travail.

Mes vives salutations

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إهداء

أولاً وقبل كل شيء الحمد لله رب العالمين حمداً كثيراً طيباً مباركاً والصلاة والسلام على نبي الرحمة ونور العالمين سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم.

إلى القدوى والمثل الأعلى إلى من علمني النجاح والصبر إلى من أحمل أسمه بكل افتخار. أرجو من الله أن يمد في عمري أبي الذي لم يبخل على يوماً بشيء إلى ملاكي في الحياة. إلى منبع الحب والحنان. إلى بسمَةِ الحياة إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى أمي الغالية إلى إخوتي وأسرتي جميعاً.

للذين كانوا عوناً لنا في عملنا هذا. إلى من زرعو التفأل في دربنا وقدموا لنا المساعدات والتسهيلات، إلى الأخ والصديق طارق فلك منا كل الشكر. إلى أصدقائي الذين تسكن صورهم وأصواتهم أجمل اللحظات والأيام التي عشتها شكري الجزيل وامتناني

إلى كل عزيز على القلب فارق الدنيا إلى دار البقاء والخلود، اللهم أنزلهم منزلاً مباركاً وأنت خير المنزلين

حمودي شهيرة_مجنّاح نادية



TABLE DES MATIERES

Table des matières	I
Liste des figures	II
Liste des tableaux	III
La table des symboles	IV
Introduction générale	04

CHAPITRE I : L'ETAT DU L'ART

I. Introduction	05
I.1 L'état du l'art de l'éolienne	05
I.1.1. Configuration de l'énergie éolienne	05
I.1.2. Principaux composants d'éolienne axe horizontal	06
I.1.3. Avantages et inconvénients de l'éolienne à axe horizontal et à axe vertical	07
I.1.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	08
I.1.5. Connexions d'éolienne	08
I.1.6. Technologies des systèmes éoliens	09
I.2 L'état de l'art sur la machine asynchrone a double alimentation	11
I.2.1. Introduction de la machine asynchrone a double alimentation	11
I.2.2. Classification des machines a double alimentation	11
I.2.3. Structure de la MADA a rotor bobine	11
I.2.4. Mode de fonctionnement de la MADA	12
I.2.4.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	12
I.2.4.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	13
I.2.4.3. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone	13
I.2.4.4. Fonctionnement en mode générateur hyper –synchrone	13
I.2.5. Domaine d'application de la MADA	14
I.2.6. Avantages et inconvénients de la MADA...	15
I.2.6.1. Les avantages de la MADA	15
I.2.6.2. Les inconvénients de la MADA	16
I.2.7 Conclusion	16

CHAPITRE II

MODELISATION ET COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

II. Introduction	18
II.1. modélisation de la machine asynchrone double alimentation	18

II.1.2 hypothèses simplificatrices	18
II.1.3 équations mathématiques de la MADA dans le repère (a, b, c)	19
II.1.3.1 équations électriques	20
II.1.3.2 équations magnétiques	20
II.1.3.3 Equation mécanique	21
II.1.4 Transformation de Park	22
II.1.5 équations mathématiques de la MADA dans le repère (d, q)	22
II.1.5.1 Equations Electriques	23
II.1. 5.2 Equations Magnétiques	24
II.1.5.3 équation du couple électromagnétique	24
II.1.6 choix de repère de référence de Park	25
II.1.7 Modèle d'état de la MADA	25
II .1.8 résultats de simulation numérique du système	26
II.2.onduleur de tension	29
II.2.1 modélisation de l'onduleur	30
II.2.2 commande par MLI sinusoïdale	32
II .3. la commande vectorielle de la MADA	33
II.3.1 principe de la commande vectorielle	34
II.3.2les types de la commande vectorielle	34
II.3.3choix de repère de référence	35
II.3.4 modèle de la MADA à flux statorique oriente	35
II.3.4.1 relation entre le courant statorique et le courant rotorique	36
II.3.4.2 relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	36
II.3.4.3 relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques	37
II.3.5resultats de simulation numérique du système pour une vitesse fixe	39
II.3.6 Interprétations des résultats	41
II.3.7 conclusion	43

CHAPITRE III

COMMANDE PAR MODE GLISSANT ET LA LOGIQUE FLOUE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE

III.INTRODUCTION	44
III.1 Commande par mode glissant	44
III.1.2 principe de la commande mode glissant	44

III.1.3 conception de la commande par mode de glissement	45
III.1.3.1 choix des surfaces de glissement	45
III.1.3.2 conditions d'existence et de convergence du régime glissant	46
III.1.3.2.1 approche directe	46
III.1.3.2.2 approche de Lyapunov	46
III.1.3.3 détermination de la loi de commande	46
III.1.4 Elimination du phénomène du broutement chattering	48
III.1.4.1 proposition de Stoline	49
III.1.4.2 proposition de Harshima	49
III.1.5 structures de commande par mode glissant	50
III.1.5.1 structure avec la commutation au niveau de l'organe commande	50
III.1.5.2 structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état	51
III.1.5.3 structure de régulation avec ajout de la commande équivalente	51
III.1.6 applications de la commande mode glissant à la MADA	52
III.1.6.1 modèle de la génératrice asynchrone double alimentation-GADA	52
III.1.6.2 choix des surfaces de glissants	53
III.1.6.3 conditions de convergences	53
III.1.6.4 loi de commande par mode glissant	54
III.1.7 résultats de simulation pour la commande par mode glissant	56
III.1.8 interprétations des résultats	59
III.2 commande par la logique floue des puissances active et réactive	59
III.2.1 logique floue (FL)	59
III.2.1.1 historique	59
III.2.2 principe de la logique floue	60
III.2.3 structure générale d'un système flou	61
III.2.3.1 constitution d'un système flou	62
III.2.3.2 fuzzification	62
III.2.3.3 la base des règles	62
III.2.3.4 inférence floue	62
III.2.3.5 defuzzification	63
III.2.5 éléments de base de la logique floue	63
III.2.5.1 univers de discours	63
III.2.5.2 fonction d'appartenances	64

III.2.6 application de la commande par la logique floue a la MADA	64
III.2.7 structure de base d'un contrôleur flou de courant	66
III.2.8 résultats de simulation	68
III.2.9 Interprétations des résultats	71
III.2.10 conclusion	71
CONCLUSION GENERALE	73
ANNEXE	
Références Bibliographie	
Résumé	



LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Chapitre_I : L'état Du L'art

Figure_I.1: Conception d'éolienne à AHWT ET Conception d'éolienne à AVWT.

Figure_I.2: : Eolienne à vitesse fixe.

Figure_I.3: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

Figure_I.4: Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

Figure_I.5: Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.

Figure_I.6: Fonctionnement de la MADA en mode moteur.

Figure_I.7: Fonctionnement de la MADA en mode générateur.

Chapitre_II : *MODELISATION ET COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA.*

Figure_II.1 : Représentation schématique de la machine asynchrone double alimentée .

Figure_II.2 : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA .

Figure_II.3 : Transformation des variables statoriques et rotoriques.

Figure_II.4 : Les courants statoriques et Les courants rotoriques triphasés avec un zoom.

Figure_II.5 : Le couple électromagnétique et le flux.

Figure_II.6 : Les puissances actives et réactive statoriques.

Figure_II.7 : :Les puissances actives et réactive rotorique.

Figure_II.8 : : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux .

Figure_II.9 : Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Figure_II.10 : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangule sinusoïdale à une porteuse

Figure_II.11 : Principe de la commande vectorielle.

Figure_II.12 : Schéma bloc de la structure de commande indirecte sans boucle de puissance.

Figure_II.13 : Puissance active et reactive statorique.

Figure_II.14 : les Courant Rotoriques $I_r(abc)$.

Figure_II.15 : les Courant statoriques $I_s(abc)$.

Figure_II.16 : Courant de la source (phase a) .

Figure_II.17 : Spectre harmonique du courant de la source.

Chapitre_III : Commande par mode glissant et la logique floue des puissances active et reactive

Figure_III.1 : Commande équivalente U_{eq} .

Figure_III.2 : Fonction *sign*.

Figure_III.3 : Phénomène de broutement.

Figure_III.4: Fonction *SAT* : (A) - un seuil ; (b) - deux seuils (zone morte).

Figure_III.5: Fonction Cont ($\varepsilon >$ et petit).

Figure_III.6: Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.

Figure_III.7: Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état.

Figure_III.8: Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.

Figure_III.9: Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant.

Figure_III.10: Puissance active statorique .

Figure_III.11: Puissance réactive statorique .

Figure_III.12: Courant Rotoriques $I_s(abc)$.

Figure_III.13: Courant statoriques $I_s(abc)$.

Figure_III.14: Courant de la source (phase a).

Figure_III.15: Spectre harmonique du courant de la source .

Figure_III.16: Structure interne d'un système flou.

Figure_III.17: Les fonctions d'appartenance du contrôleur floue .

Figure_III.18: Schéma bloc de la structure de commande flou.

Figure_III.19 : Schéma bloc de la structure du contrôleur du type PI-flou.

Figure_III.20 : Les fonctions d'appartenances utilisées par le contrôle.

Figure_III.21 : Puissance active statorique.

Figure_III.22 : Puissance réactive statorique.

Figure_III.23 : Courant rotoriques $I_r(abc)$.

Figure_III.24 : Courant statoriques $I_s(abc)$.

Figure_III.25 : Courant de la source (phase a).

Figure_III.26 : Spectre harmonique du courant de la source.

A decorative red border that resembles a scroll, with rounded corners and a vertical strip on the left side that looks like a scroll's edge. The text is centered within this border.

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre_I : L'ÉTAT DU L'ART.

Tableau I.1 : Table de Comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical.

Tableau I.2 : Table d'Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

Tableau I.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne à vitesse fixe et variable.

Chapitre_II : *MODELISATION ET COMMANDE VECTORIELLE MADA.*

Tableau II.1 : Table de tensions possibles à la sortie de l'onduleur.

Chapitre_III : COMMANDE PAR MODE GLISSANT ET LA LOGIQUE FLOUE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE.

Tableaux III.1 : Table des règles de décision pour le contrôleur des puissances.



NOTATION ET SYMBOLE

Acronymes

<i>MADA</i>	Machine Asynchrone à Double Alimentation.
<i>GADA</i>	Générateur Asynchrone à Double Alimentation.
<i>DFIG</i>	Double Fed Induction Generator.
<i>MLI</i>	modulation de largeur d'impulsion.
<i>PWM</i>	Pulse-width modulation.
<i>PI</i>	Correcteur Proportionnelle Intégrateur.
<i>DFIM</i>	Double Fed Induction Motor

Symboles

a,b, c	Indices correspondants aux trois phases.
s, r	Indice relatif au stator et rotor.
d, q	Indices des composantes orthogonales directs et en quadrature.
<i>max, min</i>	Valeur maximale (minimale).
R_s, R_r	Résistances statorique et rotorique.
f_e	Fréquence de la porteuse.
σ	Coefficient de dispersion.
L_s, L_r	Inductances propre statorique et rotorique.
T_r, T_s	Constantes de temps rotorique et statorique.
M_{sr}	Inductance mutuelle stator- rotor.
M_{rs}	Inductance mutuelle rotor – stator.
M_s	Inductance mutuelle entre les enroulements du stator.
M_r	Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor.
Φ_s, Φ_r	Respectivement flux statorique et rotorique.
Φ_{sd}, Φ_{sq}	Les flux statoriques direct et en quadrature.
Φ_{rd}, Φ_{rq}	Les flux rotoriques direct et en quadrature.
I_s, I_r	Les courants de phase statorique et rotorique.
I_{sd}, I_{sq}	Les courants statoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK.
I_{rd}, I_{rq}	Les courants rotoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK.

V_s, V_r	Tensions simples respectivement statorique et rotorique.
V_{sd}, V_{sq}	Les tensions statoriques directe et en quadrature.
V_{rd}, V_{rq}	Les tensions rotoriques directe et en quadrature.
θ_s, θ_r	Angles électriques statorique et rotorique.
W_s, W_r	Pulsations statorique et rotorique.
W_m	Pulsation mécanique.
P	Nombre de paires de pôles.
g	Glissement.
P_e	Puissance d'entrée.
P_{mec}	Puissance mécanique.
P_s	Puissance active statorique.
P_r	Puissance active rotorique.
Q_s	Puissance réactive statorique.
Q_r	Puissance réactive rotorique.
S_s	Puissance apparente statorique.
S_r	Puissance apparente rotorique.
C_e	Couple électromagnétique.
C_r	Couple résistant.
f_m	Coefficient de frottement visqueux.
J_m	Inertie de la machine.
P_s, Q_s	Puissances active et réactive statorique.
P_r, Q_r	Puissances active et réactive rotorique.
k_p	Gain de l'action proportionnel du régulateur.
k_i	Gain de l'action intégrale du régulateur PI.
s	Surface de glissement.
v_1	Gain La surface de glissement de puissance active.
v_2	Gain La surface de glissement de puissance réactive.
∂	Dérivée partielle.
t	Variable de temps.
e	Erreur de poursuite.
\dot{x}	La dérivée de la variable x par rapport au temps.
X_{ref} ou X^{ref}	La référence de la variable x .

<i>FTB</i>	Fonction de Transfer en Boucle Ouverte.
<i>FTBF</i>	Fonction de Transfer en Boucle Fermée.
S. M. C	Sliding Mode Control.
F. L. C	Fuzzy logic Control.
α, β	Axes correspondant au référentiel lie au stator.



***INTRODUCTION
GENERALE***

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La production de l'énergie électrique dans le monde génère diverses pollutions. Ainsi, les centrales thermiques (charbon, pétrole) sont responsables de rejets atmosphériques liés à la combustion d'énergies fossiles. A l'opposé, les centrales nucléaires, dont le développement s'intensifie suite à la crise du pétrole, n'ont pas d'influence néfaste sur la qualité de l'air. Par contre, elles produisent des déchets radioactifs qui engendrent d'importants problèmes de stockage, de traitement transport. Aujourd'hui, la crainte de n'utiliser qu'une seule énergie avec tous ses risques, la prise de conscience des risques pour l'environnement, l'engouement pour les énergies dites renouvelables et l'ouverture du marché de la production d'énergie électrique sont autant de facteurs qui redonnent une place importante à ces énergies (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse, ...) dans la production de l'électricité.[IDJ 10, KTH 17,SMA 11]

Les énergies renouvelables, en pleine expansion, sont l'un des éléments clés du développement soutenable d'aujourd'hui. Elles offrent la possibilité de produire de l'électricité propre. Parmi les énergies renouvelables, on compte principalement les énergies : hydraulique, solaire thermique, photovoltaïque, éolienne, ainsi que la biomasse et la géothermie. L'énergie éolienne est parmi les énergies renouvelables ayant connues la plus forte expansion lors de la dernière décennie grâce aux avantages qu'elle apporte. Cette source est apparue non pas pour le remplacement des ressources conventionnelles, mais comme une énergie complémentaire aux énergies traditionnelles.[ROU 16]

De nos jours, l'énergie éolienne est devenue une solution viable pour la production d'énergie, en complément des autres sources d'énergie renouvelables. Alors que la majorité des éoliennes installées sont à vitesse fixe, le nombre des éoliennes à vitesse variable ne cesse d'augmenter .La génératrice asynchrone à double alimentation est une machine qui présente d'excellentes performances et elle est couramment utilisée dans l'industrie des éoliennes .Il existe de nombreuses raisons pour l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour une éolienne à vitesse variable ; comme la réduction des efforts sur les parties mécaniques, la réduction du bruit et la possibilité du contrôle des puissances active et réactive.[ADK 13]

La machine asynchrone à double alimentation MADA. Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée tant que moteur à grande vitesse. Les problèmes de stabilité rencontrés des lors, l'ont fait abandonner pour un temps. Le schéma de raccordement de cette machine consiste à connecter le stator directement au réseau (génératrice non autonome), ou avec des batteries de condensateurs (fonctionnement dit autonome), alors que le rotor est alimenté à travers le convertisseur de puissance contrôlé. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de celle de synchronisme. [HAM 08]

Le développement de la microélectronique et de la microinformatique dans le domaine de l'énergie éolienne a permis l'application des différentes techniques de commande pour améliorer les performances et réduire les problèmes et les perturbations sur le réseau de distribution.

PROBLEMATIQUE

Aujourd'hui, l'importance de la production d'énergie éolienne a conduit les gens du domaine à mener des recherches approfondies pour améliorer l'efficacité de ces systèmes par un meilleur transfert d'énergie et une bonne qualité de l'énergie produite à travers le choix d'une architecture optimale du système, et des techniques de commandes adéquates qui seront capables de compenser l'effet des perturbations paramétriques et extérieures du système. Dans ce contexte, ce présent travail de mémoire est consacré à l'étude d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone double alimentée (MADA), et où la configuration du système, le type de convertisseur ainsi que la technique de commande adoptée seront considérés.

OBJECTIF DE LA MEMOIRE

L'objectif de notre travail est de présenter une étude théorique sur les différentes structures des systèmes de production d'énergie éolienne afin de choisir la plus performante. Cette structure composée d'une machine asynchrone à double alimentation. Cette machine est couplée directement au réseau par le stator et pilotée par les grandeurs rotoriques à travers deux convertisseurs. La fonction principale de ces convertisseurs dans le système considéré est la connexion de la génératrice

éolienne au réseau électrique de deux façons différentes : l'une sur le convertisseur côté réseau qui permettra le redressement des tensions triphasées des réseaux ; l'autre, sur le convertisseur côté rotor qui permettra le contrôle et l'optimisation du flux énergétique généré par le stator pendant les périodes de fonctionnement de ce système. Pour ce faire, plusieurs techniques de commandes seront développées dans ce travail afin d'assurer un rendement et une qualité de production optimaux. Afin d'atteindre l'objectif principal fixé, différents sous objectifs sont définis comme suit :

- Modélisation de la MADA pour fonctionnement génératrice.
- Modélisation de l'onduleur
- Synthèse d'une loi de commande vectorielle à base des régulateurs PI appliquée au convertisseur côté rotor pour contrôler les puissances générées par le stator de la MADA aux valeurs désirées.
- Synthèse d'une loi de commande par mode glissant toujours pour contrôler l'échange des puissances produites au stator de la MADA.
- Synthèse dans loi de commande à base des régulateurs floue pour remédier aux problèmes de la commande vectorielle à base de régulateur PI.

STRUCTURE DE LA MEMOIRE

Ce travail qui comprend trois chapitres, est organisé de la manière suivante. Dans le premier chapitre, nous allons présenter l'état de l'art de l'énergie éolienne (avantages et ses inconvénients). Ensuite, un rappel théorique sur les différents types d'aérogénérateurs sera donné. Une description détaillée de l'aérogénérateur à axe horizontal qui est l'objet de notre étude, de la technologie de son fonctionnement. Aussi, les différents types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens. Enfin, comme résultat, le choix sera porté sur la MADA qui sera l'objet d'une étude détaillée (sa structure, ses modes de fonctionnement, ses applications, ainsi que ses avantages et ses inconvénients).

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation individuelle de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable. Nous commencerons par la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park lié au champ tournant et son alimentation rotorique (onduleur à deux niveaux) qui permettra l'application des commandes destinées au contrôle des puissances générées par le stator. Par la suite, Le modèle mathématique globale obtenu sera réservé à

l'application des différentes commandes pour assurer un rendement de production optimal. On va commencer par la commande vectorielle aux moyens de régulateurs PI basée sur l'orientation du flux statorique pour linéariser le modèle de la machine et découpler le contrôle des puissances générées.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons deux algorithmes de commandes pour obtenir une bonne qualité d'énergie électrique produite par le système. Ces algorithmes permettront de contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées ; l'une des applications concerne la commande par mode glissant à base des gains estimés. Cette dernière est basée sur le choix de la surface de glissement et la condition de convergence pour créer une loi de commande adéquate ; la deuxième concerne la commande par logique floue basée sur les régulateurs flous afin d'améliorer les qualités de poursuite et d'assurer la robustesse du système.

Les résultats de la simulation numérique obtenus lors de l'application de ces commandes sur le système seront affichés et commentés.

Finalement, le travail sera clôturé par une conclusion générale, ainsi que par des suggestions et quelques perspectives pour les travaux de recherches futurs dans ce domaine.

Chapitre I

L'ÉTAT DU L'ART

I.INTRODUCTION

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pâles profilées ont été utilisés avec succès pour générer l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éolienne [BEN 12].

Dans ce chapitre une étude technique globale sur l'énergie éolienne qui comprend, un état du l'Art et un aperçu détaillé de l'aérogénérateur à axe horizontal, ainsi que ses avantages et ses inconvénients sera présentée.

Ce chapitre sera consacré à un état du l'art sur la machine asynchrone double alimentation (sa structure, ses modes de fonctionnement, ses applications, ainsi que ses avantages et ses inconvénients).

I.1 L'ETAT DU L'ART DE L'EOLIENNE

I.1.1.CONFIGURATION DE L'ÉNERGIE EOLIENNE

La configuration de l'énergie éolienne est classée en deux groupes.

- La conception à axe horizontal (AHWT) comme les moulins à vent de fermes traditionnelles utilisées pour le pompage d'eau
- la conception à axe vertical (AVWT) (modèle Darrieus ou modèle Savonius.)

La différence entre eux est au niveau de l'arbre où le montage de l'arbre détermine l'orientation et la forme des pales de l'hélice. [LEB 16]

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale. [BEN16]

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.

- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW. [BAA 16]

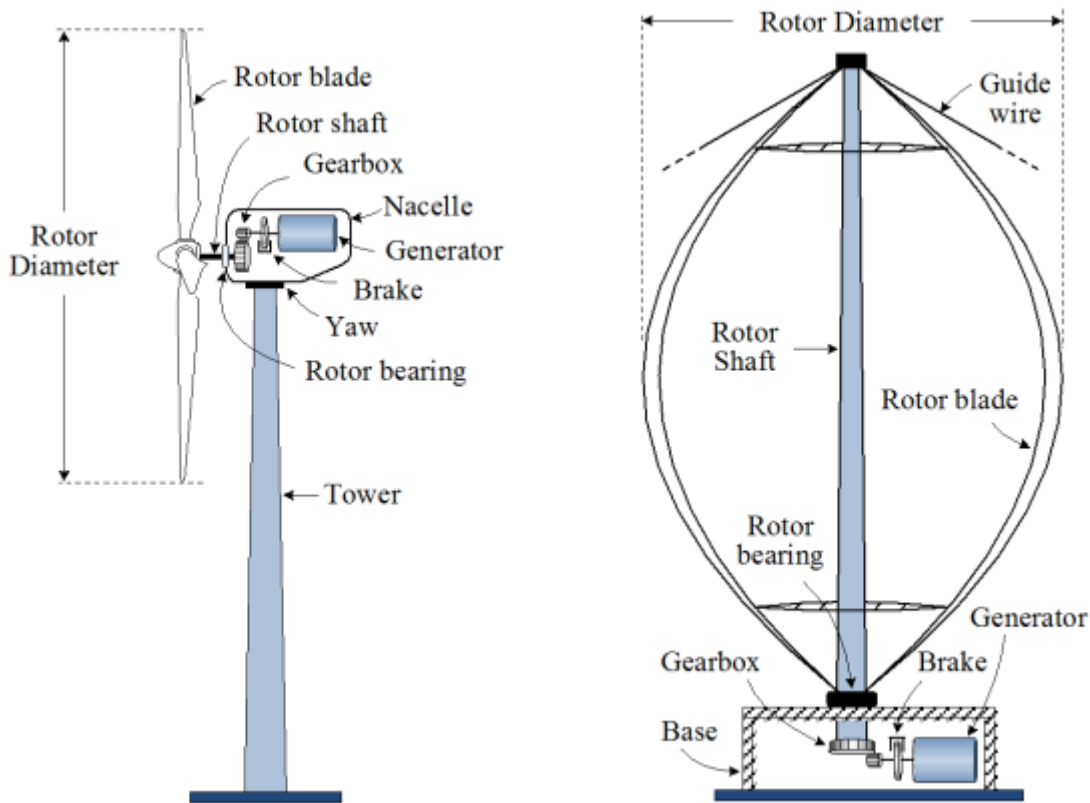


Figure -I.1- : Conception d'éolienne à AHWT ET Conception d'éolienne à AVWT.

les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées parce que leurs conceptions et technologies sont plus largement comprises et développées.

I.1.2. PRINCIPAUX COMPOSANTS D'ÉOLIENNE AXE HORIZONTAL

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne «classique» est généralement constituée de trois éléments principaux :

- **La tour ou le mât**

généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol et bénéficier au maximum de l'énergie du vent.[KEL 11]

➤ La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone. [KEL 11]

➤ Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire et le bruit. [AMS 13] [KEL 11]

I.1.3.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'EOLIENNE A AXE HORIZONTAL ET A AXE VERTICAL

La comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical a été résumée dans le Tableau I.1. [ABD 16]

Tableau I.1 : Comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
Eolienne à axe horizontal (HAWT)	<ul style="list-style-type: none"> ☺ Rendement plus élevé ☺ Plus facile à accès au vent. ☺ Auto démarrage possible. [DOM 10] 	<ul style="list-style-type: none"> ☹ Coût d'installation plus élevé. ☹ Un mât plus fort pour supporter le poids lourd de la nacelle. ☹ Orientation nécessaire ☹ Nécessite de longs câbles électriques. [DOM 10]
Eolienne à axe vertical (VAWT)	<ul style="list-style-type: none"> ☺ Faible coût d'installation et entretien plus facile. ☺ Fonctionnement indépendant de la direction du vent. ☺ Maintenance des équipements plus aisée. [DOM 10] 	<ul style="list-style-type: none"> ☹ La conversion de l'énergie éolienne est moins efficace. ☹ La régulation de la puissance est limitée. ☹ Doit démarrer en moteur. [DOM 10]

I.1.4. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE EOLIENNE

L'utilisation croissante et rapide de l'énergie éolienne dans le monde est liée aux avantages qu'elle offre.

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

👍 Avantages	👎 Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rapidité d'installation ➤ Puissance beaucoup plus élevée que le solaire ➤ Energie respectueuse de l'environnement [BAS 17] ➤ Les principes techniques sont simples, même si leur mise en application technologique est relativement complexe et perfectionnée [MAZ 13] 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Risques causés par vents forts [BAS 17] ➤ La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau. ➤ Le cout reste plus élevé. ➤ Le bruit : la source du bruit est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe. [MSB 15] ➤ C'est une source couteuse à rendement faible dans les sites moins ventés. [TOU 10]

I.1.5. CONNEXIONS D'EOLIENNE

L'exploitation de l'énergie électrique produite par une éolienne peut se faire de trois manières

➤ **Systèmes isolés :**

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés comme : l'alimentation des îles par l'énergie électrique, le pompage d'eau pour l'irrigation des champs agricoles, l'alimentation en électricité des voiliers, des phares et des balises. [Rou 16]

➤ **Systèmes Hybrides :**

Les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur. [BAS 17]

➤ Systèmes Liés au Réseau :

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie, c.-à-d. toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Ces systèmes nécessitent un convertisseur statique. [BAS 17]

1.1.6. TECHNOLOGIES DES SYSTEMES EOLIENS

Il existe deux types de fonctionnement d'éolienne :

➤ Eoliennes A Vitesse Fixe :

Dans cette technologie, la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écurie) est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance (Figure I-13), sa vitesse mécanique est fixe et imposée par la fréquence de travail du réseau et/ou par le nombre de paires de pôles de la génératrice. Il nous faut alors un système d'orientation des pales de l'aérogénérateur pour avoir un fonctionnement au voisinage de synchronisme et aussi un multiplicateur de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. [MOU 15]

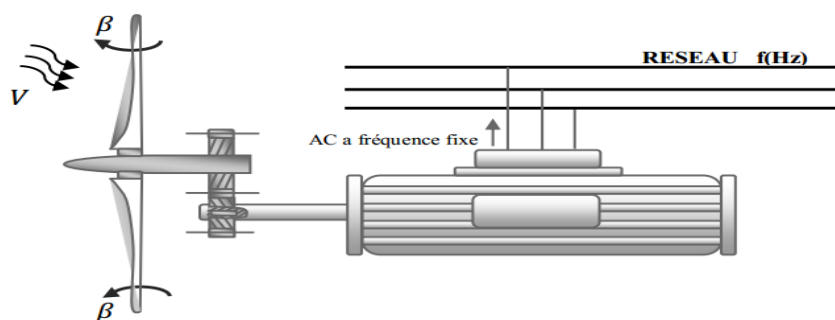


Figure -I.2- : Eolienne à vitesse fixe.

➤ Eoliennes A Vitesse Variable :

A cause des inconvénients du système éolien à vitesse fixe, les industriels ont développés d'autres systèmes plus performants fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large. Ces systèmes sont basés sur l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent en ajustant en permanence la vitesse de la génératrice à celle du vent. Cette technique s'effectue par des commandes sur la chaîne globale du système à savoir : la turbine, le générateur et le convertisseur utilisé qui sert à synchroniser la fréquence et l'amplitude générés par le générateur avec celles du réseau.

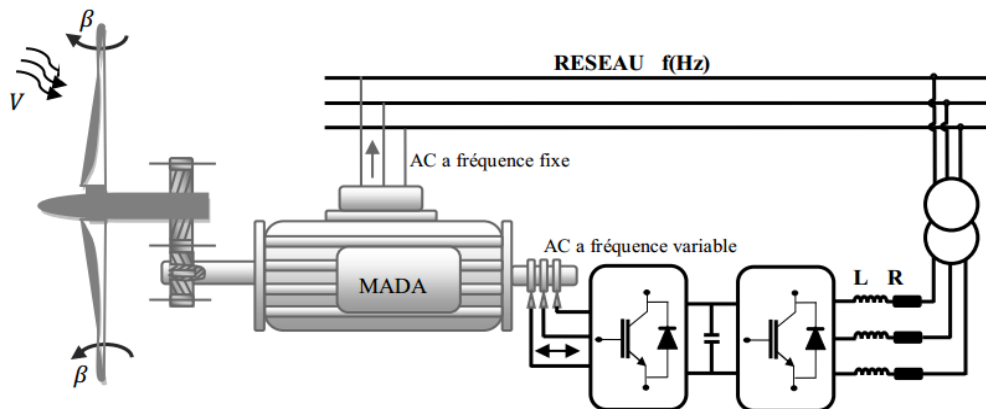


Figure- I.3- : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

Tableau I.3 : Avantages et inconvénients d'éolienne à vitesse fixe et à vitesse variable

Type	👉 Avantages [Ben 12]	👉 Inconvénients [KEN 12, ROU 16]
Eolienne à vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Plus grande fiabilité. ➤ Pas de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne. ➤ Pas besoin de système électronique de commande. ➤ Moins cher. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ En vitesse fixe le maximum théorique de puissance n'est pas atteint. ➤ Un rendement très faible pour les vents faibles et moyens. ➤ Une nécessité de maintenance périodique de la boîte de vitesse.
Eolienne à vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Augmentation du rendement énergétique ➤ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ➤ Réduction des efforts subis par le train de puissance ➤ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût. ➤ Convertisseur de puissance « complexe » ➤ Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA.

I.2 L'ETAT DE L'ART SUR LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

I.2.1.INTRODUCTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE

ALIMENTATION

Appelée DFIG (Doubly Fed Induction Generator) lorsqu'elle est utilisée en génératrice dans la production d'énergie éolienne, ou DFIM (Doubly Fed Induction Motor) pour des applications d'entraînement à vitesse variable, elle peut être qualifiée en français de Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). Le schéma de la Figure (I -5) : représente le symbole d'une MADA. [FRA 08]

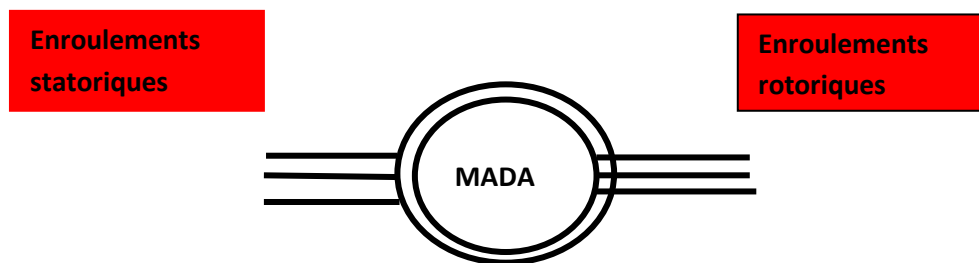


Figure- I.4- : Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

I.2.2.CLASSIFICATION DES MACHINES A DOUBLE ALIMENTATION [ABD 11]

On peut classer les différentes machines à double alimentation par :

- machines à double alimentation à rotor bobiné .
- machines à double alimentation en cascade asynchrone.
- machines à double alimentation sans balais.

I.2.3. STRUCTURE DE LA MADA A ROTOR BOBINE

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) a suscité un intérêt particulier sur tout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie éolienne. Pour les éoliennes utilisant la MADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau) (Figure I .5). [BOU 13]

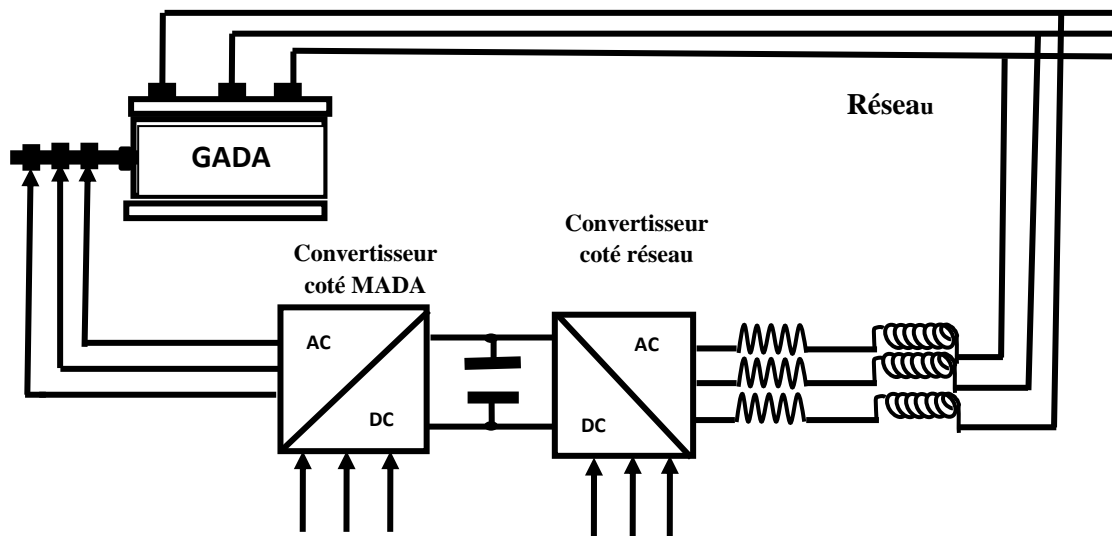


Figure- I.5- : Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

L'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau, mais également pour les vitesses supérieures au synchronisme, du rotor vers le réseau. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. [LOU 17]

I.2-4 .MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA

Comme c'est commun, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, cependant la commande des tensions rotoriques permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur ou générateur. Donc la MADA distingue quatre modes. [LOU 17, MOH 14]

I.2.4.1 . FONCTIONNEMENT EN MODE MOTEUR HYPO-SYNCHROME [Lou 17, Mou 14, Mek 14]

- La puissance est fournie par le réseau au stator
- La puissance de glissement est renvoyée au réseau.
- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionné ainsi mais la puissance de glissant est Alor dissipée en pertes Joule dans le rotor

I.2.4.2 . FONCTIONNEMENT EN MODE MOTEUR HYPER-SYNCHRONE [LOU 17, MOU 14, MEK 14]

- la puissance est fournie par le réseau au stator
- la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement

I.2.4.3. FONCTIONNEMENT EN MODE GENERATEUR HYPO-SYNCHRONE

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est aussi fournie par le stator.
- Le rotor absorbe la puissance du glissement et la direction du champ magnétique est identique à celle du champ du stator.
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime.

I.2.4.4. FONCTIONNEMENT EN MODE GENERATEUR HYPER –SYNCHRONE

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- la direction du champ magnétique est identique à celle du champ du stator.
- La vitesse de la machine est au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

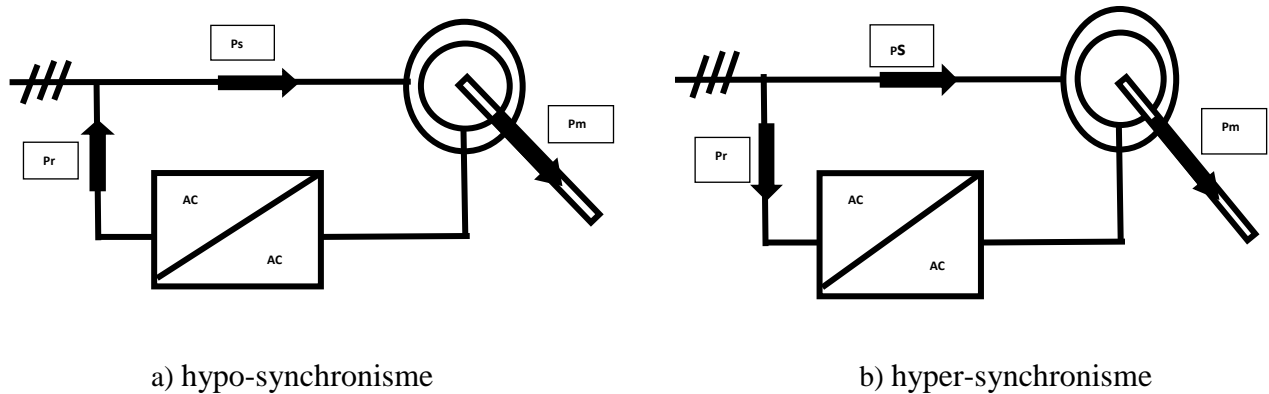


Figure –I.6- : Fonctionnement de la MADA en mode moteur.

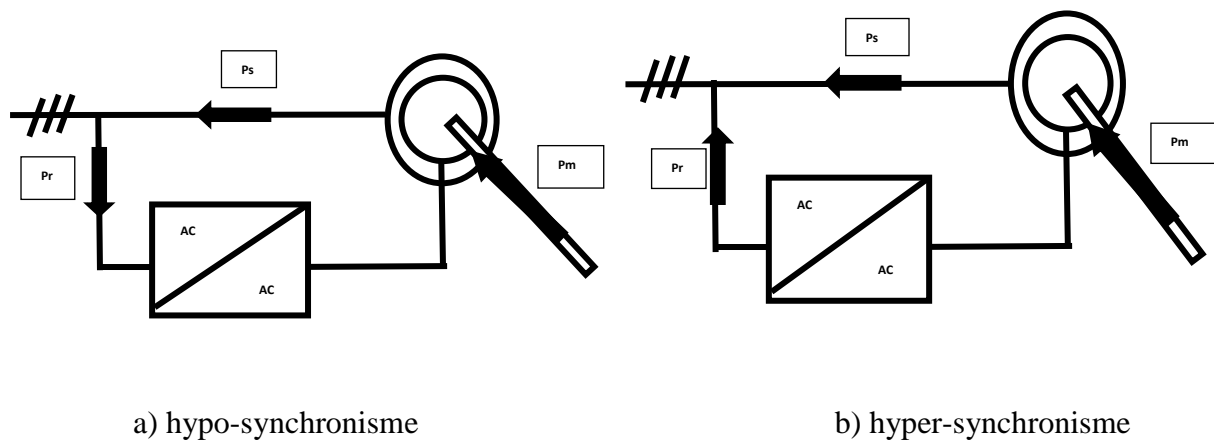


Figure. –I.7- : Fonctionnement de la MADA en mode générateur.

I.2.5. DOMAINE 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. [ARD 10]

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variables.

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

- 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...
- la traction électrique et les systèmes de pompage.

I.2.6.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA

La machine asynchrone à double alimentation Contient plusieurs avantages et inconvénients :
[LOU 17, ROU 16, SAL 07, ABD 11]

I.2.6.1. LES AVANTAGES DE LA MADA

- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale
- La partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances.
- Une grande flexibilité et une grande précision lors des contrôles du flux et du couple électromagnétique grâce à l'accès au rotor qui offre la possibilité de contrôler ses grandeurs électriques (courant et tension).
- La possibilité de fonctionner en régime dégradé grâce à la configuration des deux convertisseurs alimentant la machine.
- Le fonctionnement à vitesse de rotation variable.
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.
- Le transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.

- La commande indépendante des puissances active et réactive

I.2.6.2. LES INCONVENIENTS DE LA MADA

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais – bagues.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- Elle nécessite une maintenance périodique.
- 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).
- Elle est moins fiable que celle à cage à cause de la présence du système balais-bagues et le bobinage du rotor.

CONCLUSION

Dans ce chapitre , nous avons présenté l'état de l'art de l'énergie éolienne (avantages et ses inconvénients). Les différentes structures des éoliennes existantes et leurs technologies aussi les principaux composants des aérogénérateurs a axe horizontale, de la technologie de son fonctionnement .Leurs avantages et inconvénients ,Ce chapitre présente aussi les différents types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens.

Après avoir présentées différentes génératrices utilisées le choix optimal c'est la MADA. Tel que présenté ci-dessus une synthèse orientée vers l'état de l'art sur la MADA (sa structure, ses modes de fonctionnement, ses applications, ainsi que ses avantages et ses inconvénients).

Selon ce qui nous avons été présenté on conclut que la structure de la machine asynchrone double alimentation Pour les éoliennes, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau), Ses avantages sont (un bon compromis entre la variation de vitesse qu'elle autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine).

Dans le chapitre suivant, On a présente la modélisation de la machine asynchrone double alimentation et modélisation du l'onduleur avec une application du commande vectorielle sur cette machine

Chapitre II



***MODÉLISATION ET COMMANDE
VECTORIELLE DE LA
MADA.***

II.INTRODUCTION

Le système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable composé d'une machine asynchrone à double alimentation. [LAA08]

Dans ce chapitre, nous allons axer le travail sur la modélisation individuelle de chaque élément de cette chaîne de conversion, à savoir :

- la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui a un stator directement connecté au réseau, et un rotor alimenté par un onduleur permettant l'application des commandes qui contrôlent les puissances générées par le stator.
- Modélisation de l'onduleur qui alimente le rotor de MADA commandée par la technique MLI.
- présente la commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone à double alimentation. Dans cette partie nous abordons une méthode d'orientation du flux statorique.

II.1.1.MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE

ALIMENTATION

Nous menons une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, les différentes stratégies de commande, et évaluer les performances apportées par cette machine. On présentera aussi sa modélisation dans le repère de Park avec ses deux alimentations, l'une alimente le stator avec un couplage direct au réseau et l'autre alimente le rotor à fréquences variables.[BEN12]

II.1.2 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

A cause de la répartition des enroulements de la MADA et la géométrie propre complexe et afin de faciliter les difficultés, on prend quelques hypothèses simplificatrice avancées habituellement pour modéliser les machines électriques en vu de leur commande en général. [TOU10]

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- La force magnétomotrice a une répartition spatiale sinusoïdale.

- La machine a une construction symétrique .
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire).

II.1.3 EQUATIONS MATHÉMATIQUES DE LA MADA DANS LE

REPERE (a, b, c)

La machine asynchrone double alimentée dont on étudie la mise en équations correspond à la structure de principe représentée sur la Figure II.1. Les armatures magnétique du stator et du rotor sont cylindriques, séparée par un entrefer constant, et munies chacune d'un enroulement triphasé.

- Le stator comporte 3 enroulements dont les axes magnétiques Oa , Ob et Oc sont décalés dans l'espace de 120° .
- Le rotor (rotor bobiné) comporte 3 enroulements triphasés à même nombre de pôles que celui du stator. Ces 3 bobinages dont les axes magnétiques OA , OB et OC sont décalés dans l'espace de 120° .

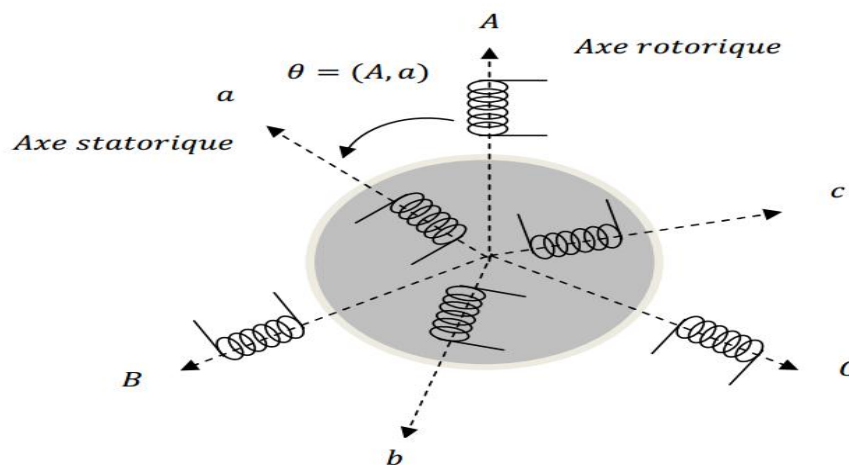


Figure -II.1- : Représentation schématique de la machine asynchrone double alimentée

II.1.3.1 Equations électriques

Dans les conditions précédentes les équations sous forme matricielle s'écrivent :

Pour le stator et pour le rotor :

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

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

Où R_s et R_r sont respectivement les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

- V_s, V_r : les tensions simples statoriques et rotoriques.
- I_s, I_r : les courants de phase statoriques et rotoriques.
- φ_s, φ_r : les flux respectivement statoriques et rotoriques.

II.2.3.2 Equations magnétiques

Les équations des flux magnétiques qui régissent la MADA sont :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$[L_{ss}] \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Où :

- L_{ss}, L_{rr} sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.
- M_s, M_r : les inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques.
- $[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$: la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor qui est donnée par la formule (II. 3)

$$[\mathbf{M}_{sr}] = [\mathbf{M}_{rs}]^T = \mathbf{M}_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

- \mathbf{M}_{max} : est l'inductance mutuelle maximum entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant (II.2) dans (II.1), on obtient le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} [\mathbf{V}_s] = [\mathbf{R}_s] \cdot [\mathbf{I}_s] + \frac{d}{dt} [[\mathbf{L}_{ss}] \cdot [\mathbf{I}_s] + [\mathbf{M}_{sr}] \cdot [\mathbf{I}_r]] \\ [\mathbf{V}_r] = [\mathbf{R}_r] \cdot [\mathbf{I}_r] + \frac{d}{dt} [[\mathbf{L}_{rr}] \cdot [\mathbf{I}_r] + [\mathbf{M}_{rs}] \cdot [\mathbf{I}_s]] \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

II.2.3.3 Equation Mécanique

L'équation mécanique de la machine :

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- C_{em} : le couple électromagnétique de la machine.
- C_r : le couple résistant.
- f_r : le coefficient de frottement visqueux de la MADA.
- Ω : la vitesse de rotation de l'axe de la MADA.
- J : l'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [[\mathbf{M}_{sr}] \cdot [\mathbf{I}_r]] \quad (\text{II.6})$$

- p : le nombre de paires de pôles de la MADA

Les équations différentielles (II.4), (II.5) et (II.6) représentent le modèle de la MADA dans le repère (a, b, c)

II.1.4 Transformation De Park

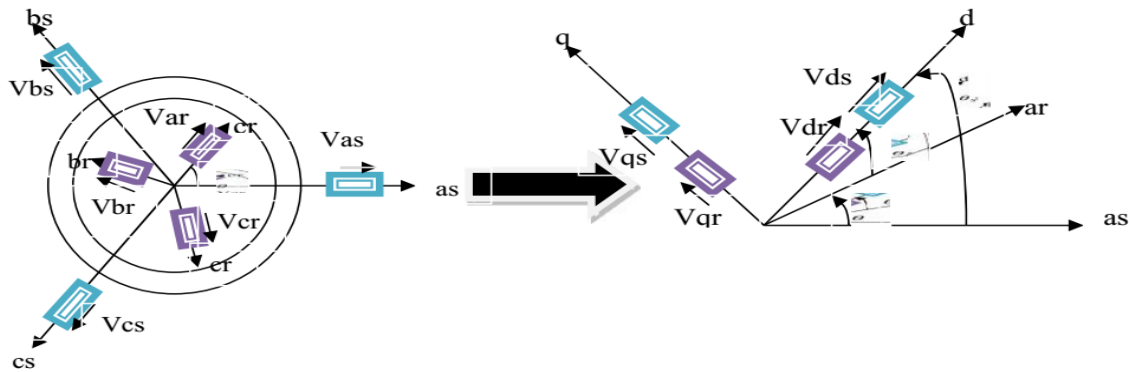


Figure-II.2- : Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif (repère (a, b, c)) à un système biphasé (repère (d, q)), et obtenir un système d'équation à coefficients constants. [ROU16]

La matrice de transformation de Park $P(\theta)$ est :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

- $[P(\theta)]$: permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé
- θ : l'angle entre le repère du système triphasé à transformer et le repère de Park

II.1.5 EQUATIONS MATHÉMATIQUES DE LA MADA DANS LE REPERE (d, q)

L'équation de la transformation de Park pour passer d'un système triphasé à un système biphasé et vice versa est donnée comme suit :

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [x_{abc}] \Rightarrow [x_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [x_{dq0}]$$

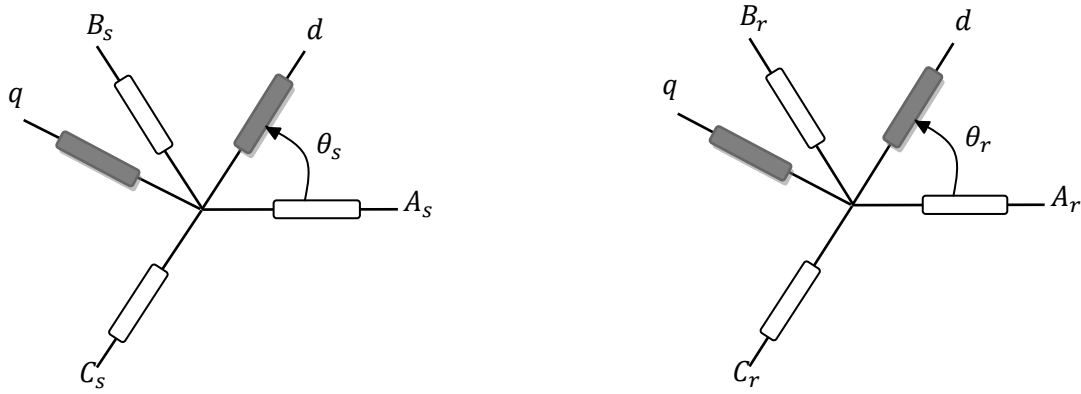


Figure -II.3 : Transformation des variables statoriques et rotoriques.

La transformation de Park appliquée aux équations statoriques :

$$[V_{sdq0}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{sabc}] \Rightarrow [V_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_{sdq0}]$$

$$[I_{sdq0}] = [P(\theta_s)] \cdot [I_{sabc}] \Rightarrow [I_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{sdq0}]$$

$$[\varphi_{sdq0}] = [P(\theta_s)] \cdot [\varphi_{sabc}] \Rightarrow [\varphi_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{sdq0}]$$

La transformation de Park appliquée aux équations rotoriques :

$$[V_{rdq0}] = [P(\theta_r)] \cdot [V_{rabc}] \Rightarrow [V_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [V_{rdq0}]$$

$$[I_{rdq0}] = [P(\theta_r)] \cdot [I_{rabc}] \Rightarrow [I_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{rdq0}]$$

$$[\varphi_{rdq0}] = [P(\theta_r)] \cdot [\varphi_{rabc}] \Rightarrow [\varphi_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{rdq0}]$$

II.1.5.1 Equations Electriques

En appliquant la transformation de Park dans l'équation (II.1):

$$\begin{cases} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_{sdq0}] = [R_s] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{sdq0}] + \frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{sdq0}] \\ [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [V_{rdq0}] = [R_r] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{rdq0}] + \frac{d}{dt} [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{rdq0}] \end{cases} \quad (II.8)$$

$$\begin{cases} [V_{sdq0}] = [R_s] \cdot [I_{sdq0}] + [P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_s)]^{-1}] \cdot [\varphi_{sdq0}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sdq0}] \\ [V_{rdq0}] = [R_r] \cdot [I_{rdq0}] + [P(\theta_r)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_r)]^{-1}] \cdot [\varphi_{rdq0}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rdq0}] \end{cases} \quad (II.9)$$

Avec :

$$[P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_s)]^{-1}] = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; [P(\theta_r)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_r)]^{-1}] = \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Par conséquent, on peut écrire [RUO16]:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

II.1. 5.2 Equations Magnétiques

De la même manière, les équations des flux sont données par :

$$\begin{cases} [\mathbf{P}(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{sdq0}] = [\mathbf{L}_{ss}] \cdot [\mathbf{P}(\theta_s)]^{-1} [I_{sdq0}] + [\mathbf{M}_{sr}] \cdot [\mathbf{P}(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{rdq0}] \\ [\mathbf{P}(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{rdq0}] = [\mathbf{L}_{rr}] \cdot [\mathbf{P}(\theta_r)]^{-1} [I_{rdq0}] + [\mathbf{M}_{rs}] \cdot [\mathbf{P}(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{sdq0}] \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

On peut écrire :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

- L_r, L_s : les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.
- M : l'inductance mutuelle.

II.1.5.3 EQUATION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE :

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rd} \varphi_{sq}) \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- P : le nombre de paires de pôles de la MADA

Les puissances active et réactive statoriques sont:

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

II.1.6 CHOIX DE REPERE DE REFERENCE DE PARK

Le choix d'un repère de référence dépend essentiellement du but de la modélisation et de la compatibilité des composantes du système étudié. Il existe trois repères biphasés de références. [ROU16]

- le repère fixe au stator appelé référentiel stationnaire où : $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$; $\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -w$ Ce repère de référence est le mieux adapté pour les grandeurs instantanées. Il est utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation de la machine.
- le repère fixe au rotor appelé référentiel tournant où : $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$; $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = w$.Ce repère de référence est adapté pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.
- le repère fixe au champ tournant appelé référentiel tournant à la vitesse de pulsation synchrone où: $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} = w_s = w_r + w$.Dans ce repère, les composantes relatives de la machine sont constantes, ce qui justifie sa large utilisation dans le domaine de la commande des machines asynchrones.

Vu les avantages que représente ce dernier repère de référence, il sera retenu dans notre étude.

II.1.7 MODELE D'ETAT DE LA MADA

Pour obtenir le modèle complet de la MADA, on remplace les expressions des flux dans les équations de tension. On obtient quatre équations électriques en fonction des composantes des courants et/ou flux statoriques et rotoriques. L'association de l'équation mécanique aux quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park qui peut être mis sous la forme d'état suivante :

$$\dot{X} = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \quad (\text{II.15})$$

$$\text{avec : } [X] = [\varphi_{sd} \varphi_{sq} i_{rd} i_{rq}]^t ; [U] = [v_{sd} v_{sq} v_{rd} v_{rq}]^t$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & w_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -w_s & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta(w_s - w_r) & -\delta & w_r \\ \beta(w_s - w_r) & \alpha & -w_r & -\delta \end{bmatrix} ; [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma l_r} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma l_r} \end{bmatrix}$$

➤ α, β, δ sont des constantes définies comme suit :

$$\alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_s L_r} \quad ; \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r} \quad ; \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{L_r} + \frac{M^2}{T_s L_s L_r} \right)$$

Pour faciliter la simulation, on décompose la matrice [A] comme suit :

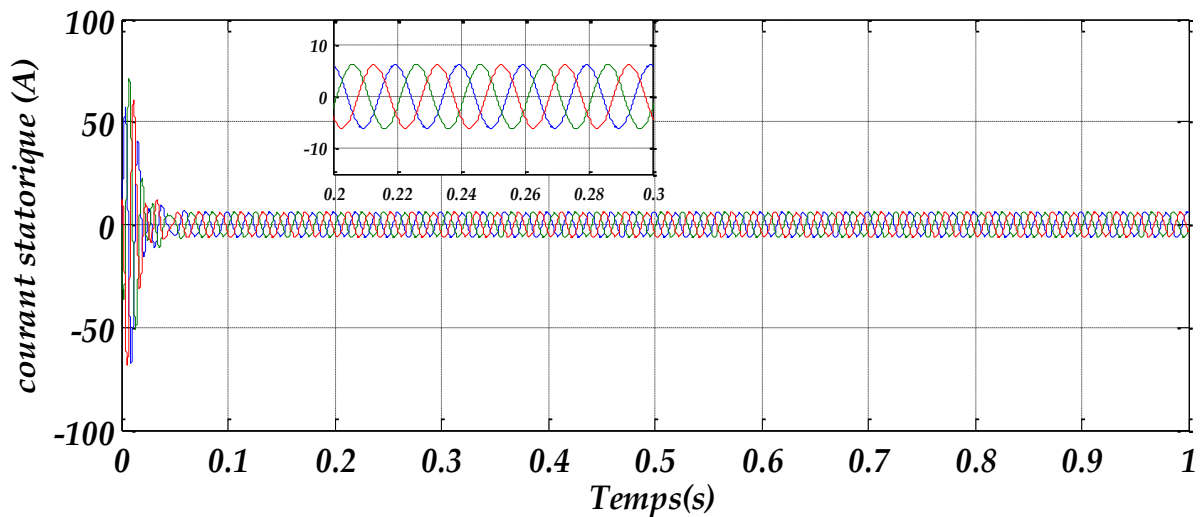
$$[A] = [A_1] + W_s [A_2] + W_r [A_3] \tag{II.16}$$

Telle que :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\delta \end{bmatrix} ; [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & \alpha & 0 & 0 \end{bmatrix} ; [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 1 \\ -\beta & \alpha & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

II.1.8 RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME

La machine est entraînée à une vitesse fixe égale à $1425 \text{ tr}/\text{min}$. Le stator est alimenté par une source triphasée de 220V de fréquence 50Hz, alors que le rotor est alimenté par une source triphasée 12V de fréquence égale à la fréquence de rotation.



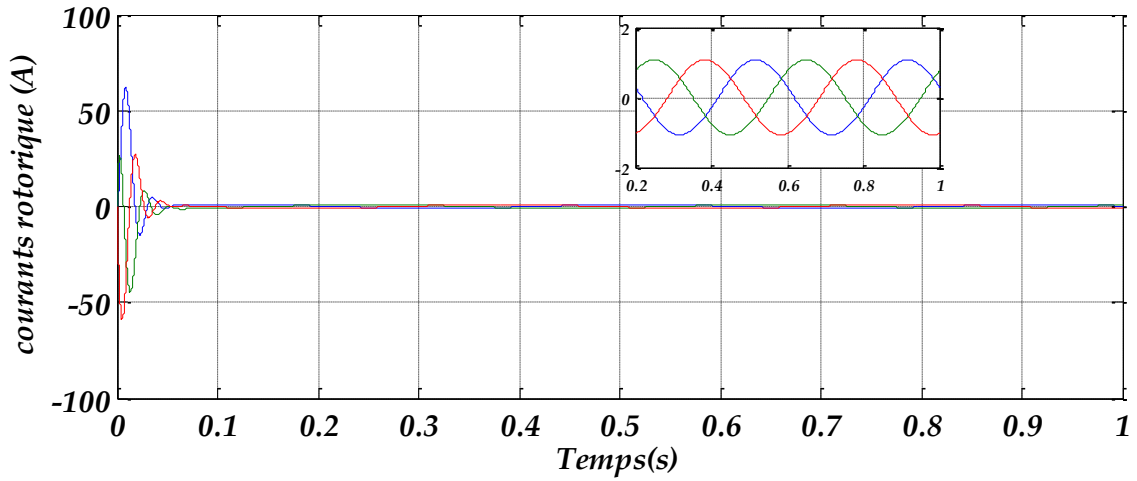


Figure -II.4- : Les courants statoriques et Les courants rotoriques triphasés avec un zoom

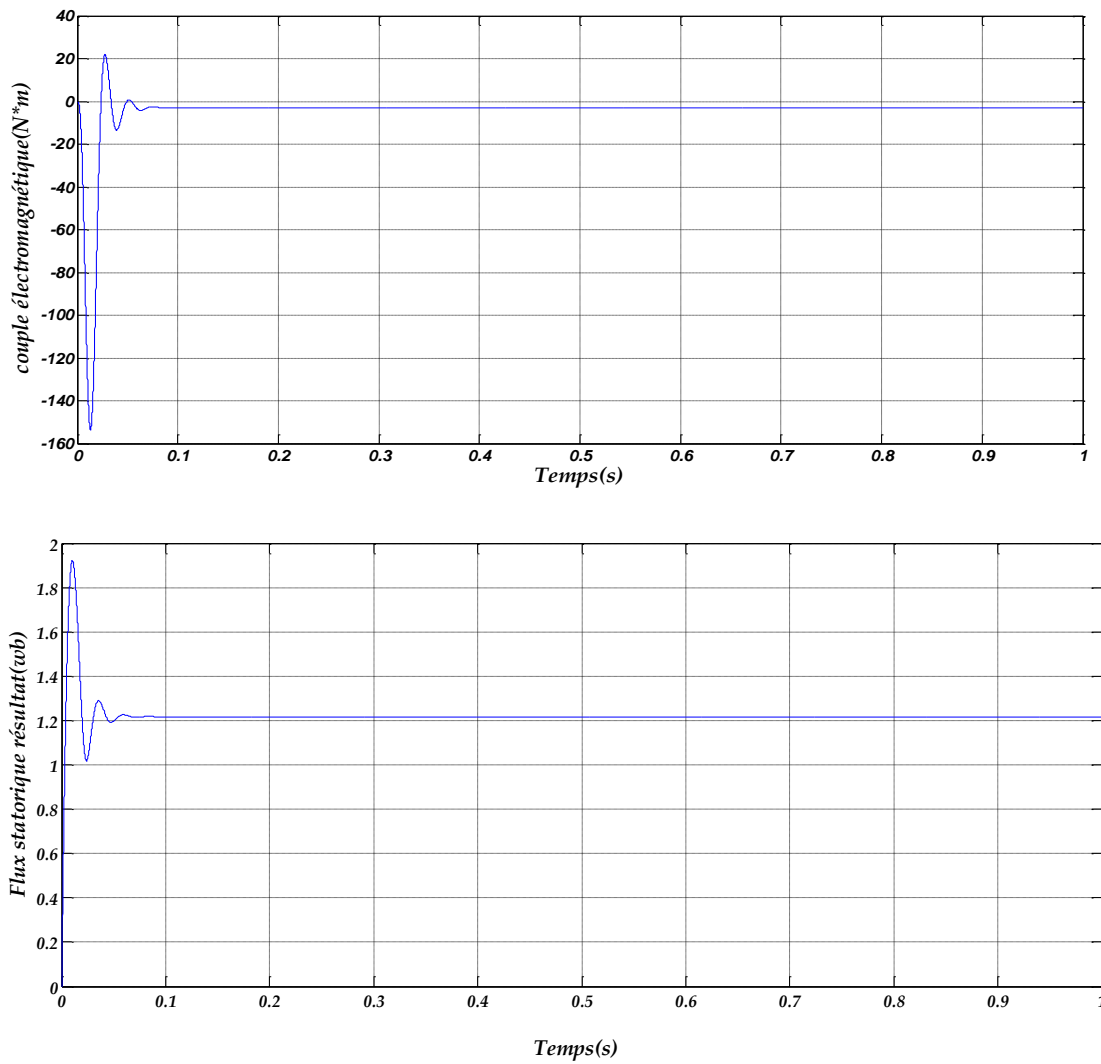


Figure -II.5- : Le couple électromagnétique et le flux.

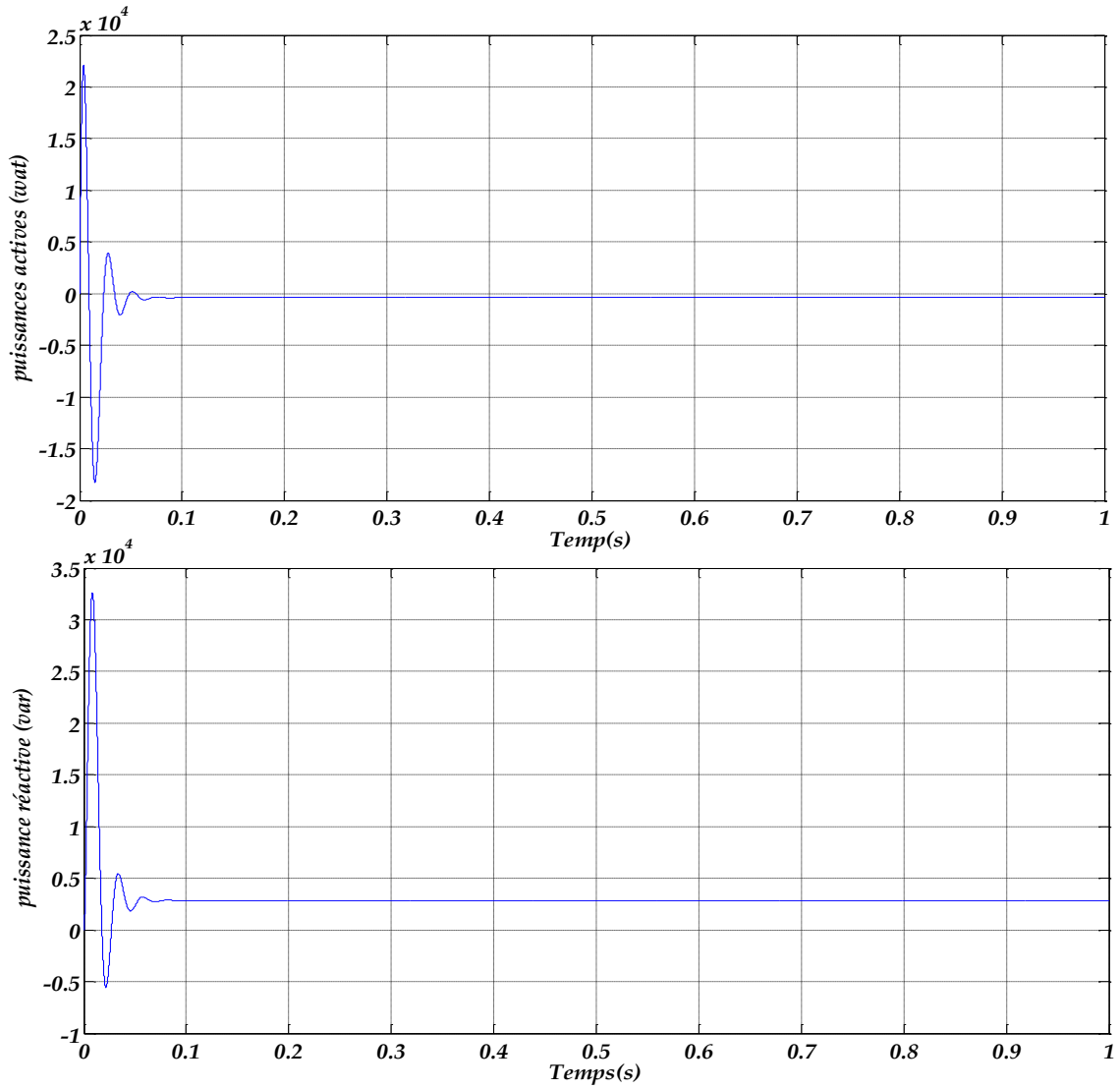
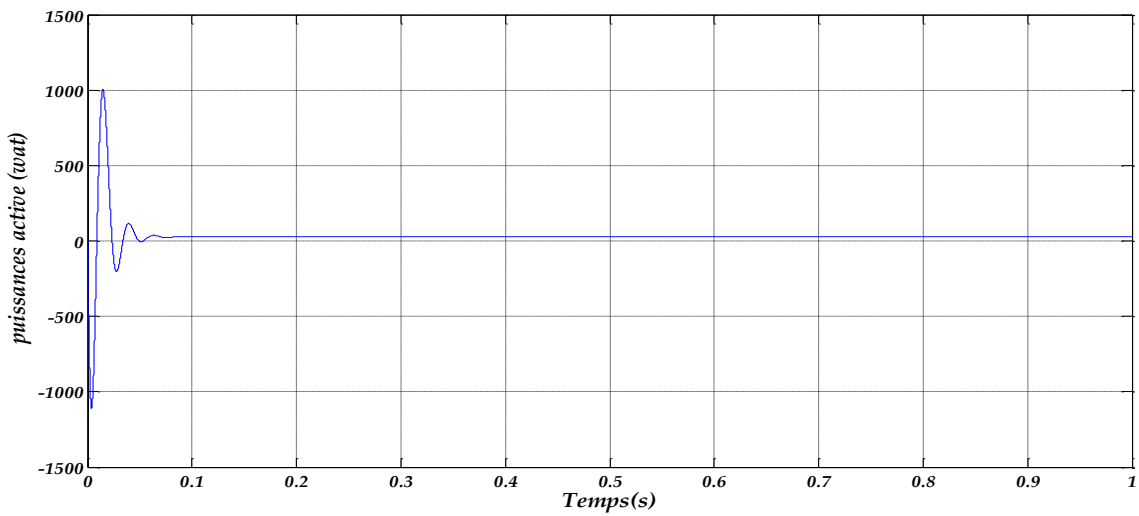


Figure-II.-6- : Les puissances actives et réactive statoriques



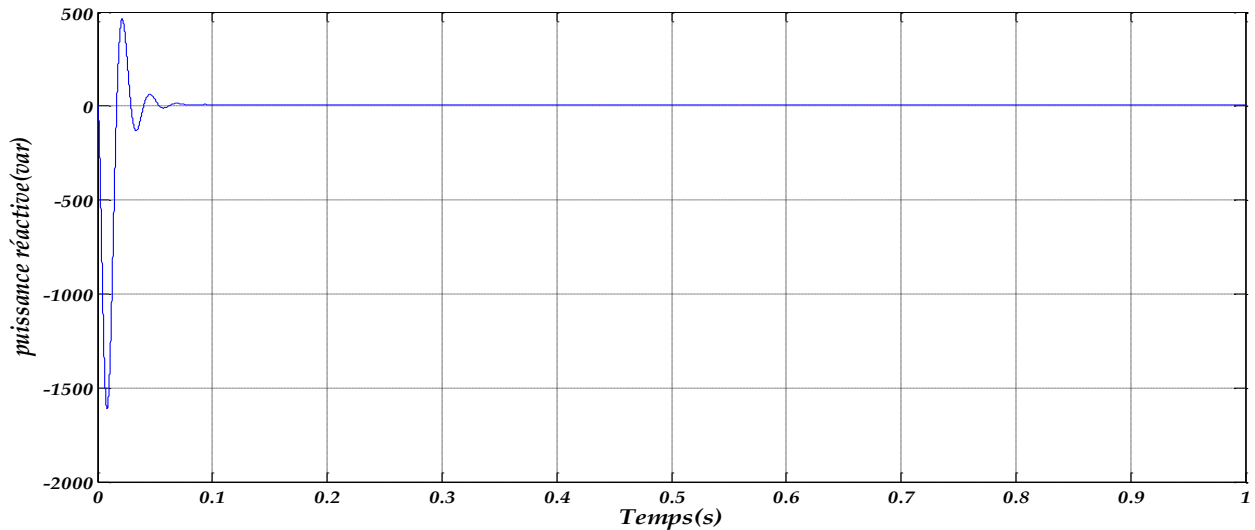


Figure-II7.-. :Les puissances actives et réactive rotorique.

II.1.9 INTERPRETATION DES RESULTATS

Les résultats de simulation montrent que pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique est négatif et atteint au démarrage une valeur maximale de : $-120 N \cdot m$. On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage. Après un temps égal aux environs de $0,05s$, ces courants se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de $50Hz$.

Les résultats de simulation obtenus montrent que pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique est négatif alors la machine fonctionne comme génératrice

II.2. ONDULEUR DE TENSION

Le développement des n'a été possible que grâce au développement des composants de puissance semi conducteurs contrôlables, et aux performances des techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

La figure II.8 montre le circuit d'un onduleur triphasé à structure de tension [20]. On distingue se trois bras dont chacun est formé de deux (2) semi conducteurs (interrupteur) branchés en série, et chaque interrupteurs (GTO ou IGBT) est monté en anti parallèle avec une diode de roue libre, qui assure la circulation du courants. Les interrupteurs sont réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture. Le stockage de l'énergie du côté continu est réalise grâce à un condensateur C_{dc} placé en parallèle avec la tension V_{dc} maintenue à une valeur quasi constante. [ZID15 ,WIR06]

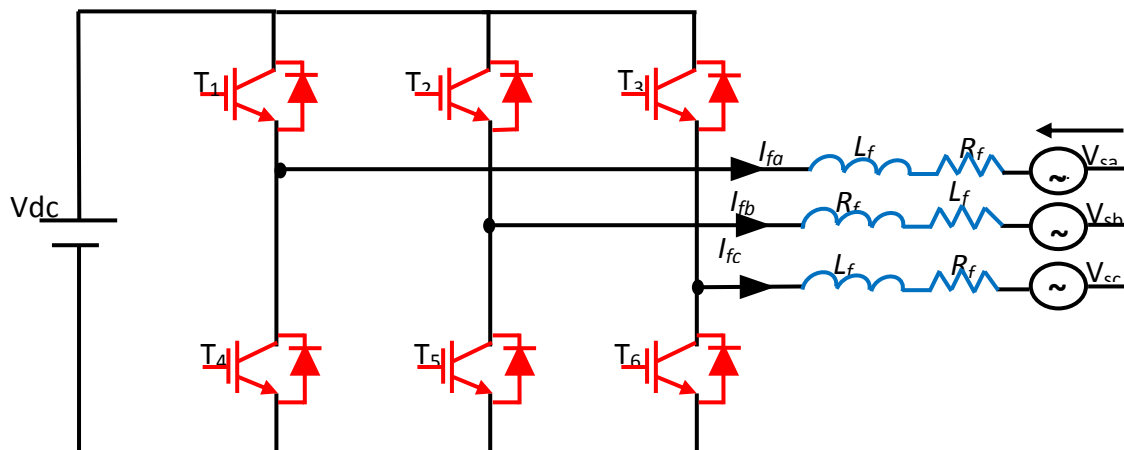


Figure. -II.8- : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux

II.2.1 MODELISATION DE L'ONDULEUR

La sortie d'onduleur (voir la figure II.9) peut prendre deux valeurs de tension ($+\frac{V_{dc}}{2}, -\frac{V_{dc}}{2}$) selon l'état des impulsions de commande des interrupteurs. En pratique, la conduction d'un des deux semi-conducteurs d'un même bras entraîne le blocage de l'autre (complémentaire). [AMA06]

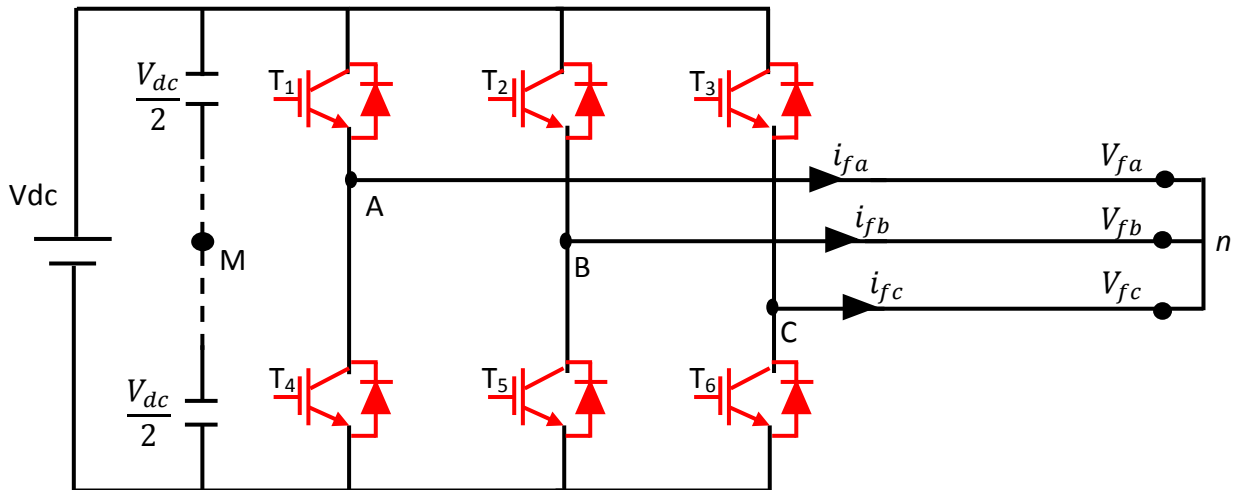


Figure- II.9- :Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux

L'ouverture et la fermeture des semi conducteurs ($T_1 \div T_6$) dépendent de l'état des signaux de commande des trois (S_a, S_b, S_c), comme défini ci-dessous [WIR06]:

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{si } (T_1 : \textit{fermé et } T_4 \textit{ ouvert}) \\ 0 & \text{si } (T_4 : \textit{fermé et } T_1 \textit{ ouvert}) \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{si } (T_2 : \textit{fermé et } T_2 \textit{ ouvert}) \\ 0 & \text{si } (T_5 : \textit{fermé et } T_5 \textit{ ouvert}) \end{cases}$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{si } (T_3 : \textit{fermé et } T_4 \textit{ ouvert}) \\ 0 & \text{si } (T_6 : \textit{fermé et } T_6 \textit{ ouvert}) \end{cases}$$

Les potentielles des nœuds A, B, et C de l'onduleur par rapport au point milieu fictif (imaginaire) M sont donc données par les équations (II.17) et celles composées par (II.18).

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} 2S_a - 1 \\ 2S_b - 1 \\ 2S_c - 1 \end{bmatrix} \tag{II.17}$$

Les tensions composées de l'onduleur s'expriment en fonction des états des interrupteurs comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{AM} - V_{BM} \\ V_{BM} - V_{CM} \\ V_{CM} - V_{AM} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} S_a - S_b \\ S_b - S_c \\ S_c - S_a \end{bmatrix} \tag{II.18}$$

Et, en fonction des tensions simples de l'onduleur :

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{An} - V_{Bn} \\ V_{Bn} - V_{Cn} \\ V_{Cn} - V_{An} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Ce qui donne :

$$\begin{bmatrix} V_{AB} - V_{CA} \\ V_{BC} - V_{AB} \\ V_{CA} - V_{BC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{An} - (V_{Bn} + V_{Cn}) + V_{An} \\ V_{Bn} - (V_{Cn} + V_{An}) + V_{Bn} \\ V_{Cn} - (V_{An} + V_{Bn}) + V_{Cn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Dans un système de trois tensions équilibrées, la somme des tensions est nulle, alors :

$$\mathbf{V}_{An} + \mathbf{V}_{Bn} + \mathbf{V}_{Cn} = \mathbf{0} \quad (\text{II.21})$$

A partir de la relation (II.21), on peut écrire :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(V_{Bn} + V_{Cn}) \\ -(V_{Cn} + V_{An}) \\ -(V_{An} + V_{Bn}) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

En remplaçant le système (II.22) dans (II.20), on peut trouver les tensions simples de l'onduleur en fonction de celles composées :

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{AB} - V_{CA} \\ V_{BC} - V_{AB} \\ V_{CA} - V_{BC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

A partir des systèmes (II.18) et (II.23), les tensions simples de l'onduleur peuvent s'écrire en fonction des états S_a, S_b et S_c et de la tension V_{dc} comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2S_a - S_b - S_c \\ -S_a + 2S_b - S_c \\ -S_a - S_b + 2S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Ainsi, on exprime les huit (8) combinaisons possibles des états ($S_i, i = a, b, c$) et la tension de sortie du filtre actif v_{fk} correspondante (référéées au neutre n de la source), comme le montre le Tableau (II.1) [15, 34] :

Tableau (II.1) : Tensions possibles à la sortie de l'onduleur

<i>Cas</i>	S_a	S_b	S_c	V_{fa}	V_{fb}	V_{fc}
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$2\left(\frac{V_{dc}}{3}\right)$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$
2	0	1	0	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$2\left(\frac{V_{dc}}{3}\right)$	$-\frac{V_{dc}}{3}$
3	1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-2\left(\frac{V_{dc}}{3}\right)$
4	0	0	1	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$2\left(\frac{V_{dc}}{3}\right)$
5	1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-2\left(\frac{V_{dc}}{3}\right)$	$\frac{V_{dc}}{3}$
6	0	1	1	$-2\left(\frac{V_{dc}}{3}\right)$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
7	1	1	1	0	0	0

À travers le tableau dans le septième cas devient le système :

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{6} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

Le système (II.25) représente le modèle mathématique de l'onduleur MLI triphasé à deux niveaux.

II.2.2 COMMANDE PAR MLI SINUSOÏDALE

Le principe de la stratégie triangle-sinusoidale consiste à comparer un signal triangulaire de fréquence fp appelée porteuse, aux trois tensions de référence sinusoidales de fréquence f , les instants où se produisent les intersections de la porteuse et de la référence déterminent la durée d'ouverture et de fermeture des interrupteurs [ROU16]

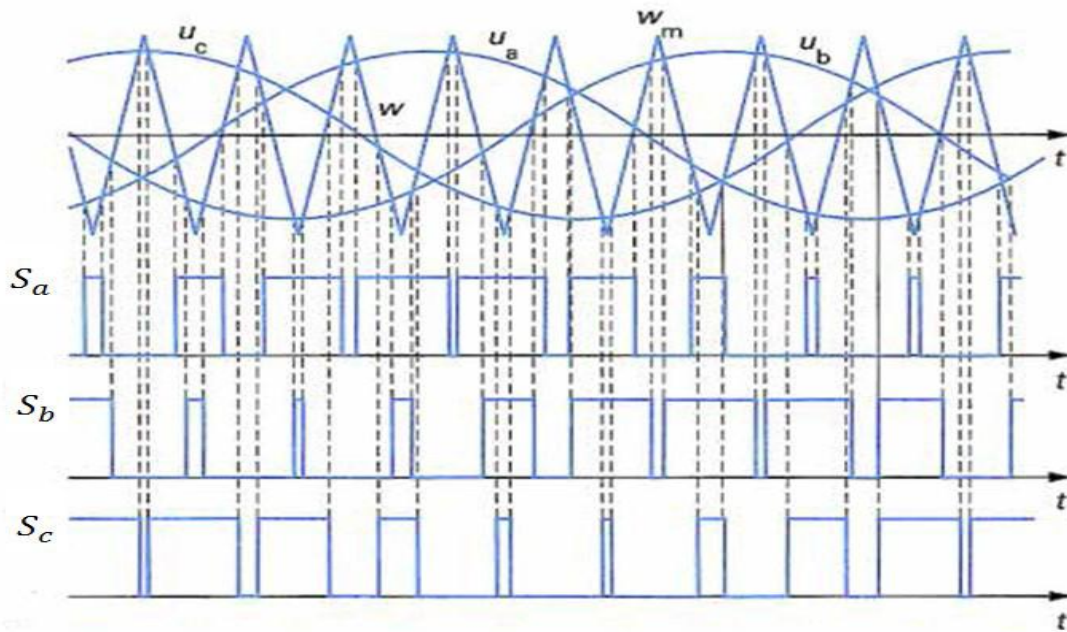


Figure-II.10- : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangle sinusoïdale à une porteuse.

Cette commande 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 :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.26})$$

- Le 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 :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{II.27})$$

- Si m est un multiple de trois nous pouvons éliminer les harmoniques d'ordre trois qui causent les majeurs inconvénients de cette technique.

II.3 LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Ou bien, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui de la

machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit . [FAR07]

II.3.1 PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE

Le principe du pilotage vectoriel des machines électriques est déduit de la machine à courant continu qui était dominante dans le marché industriel des machines à vitesse variable à cause de son caractère spécial lié au contrôle séparé du flux par le courant d'excitation et du couple par le courant d'induit.[TOU10],La puissance active dépend uniquement du courant rotorique I_{rq} , et la puissance réactive dépend uniquement du courant I_{rd}

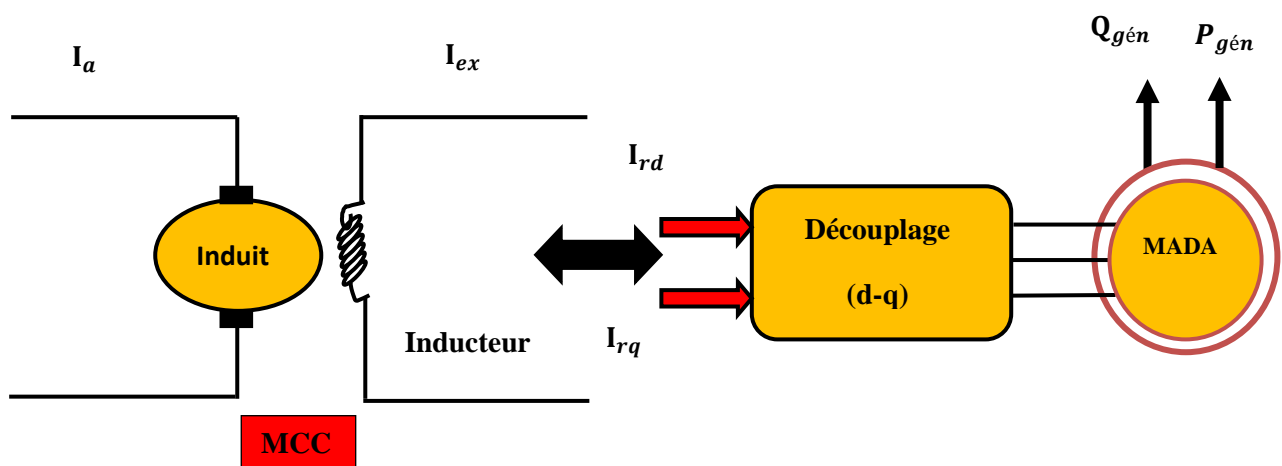


Figure –II.11- :Principe de la commande vectorielle

II.3.2 LES TYPES DE LA COMMANDE VECTORIELLE

On utilise la commande à flux orienté pour piloter la machine sur deux axes : un axe pour le flux et un autre pour le couple. Généralement ces techniques se différencient selon

- la source d'énergie : commande en tension ou en courant.
- l'orientation du repère (d, q) : suivant le flux statorique ou rotorique ou d'entrefer.
- le contrôle du flux : direct par mesure ou indirect par observation.[KHA13]
 - Commande vectorielle directe
 - Commande vectorielle indirect: Ils sont également constitués :
 - ✓ Commande indirecte sans boucle de puissance

✓ Commande indirecte avec boucle de puissance

II.3.3 CHOIX DE REPERE DE REFERENCE

Il ya plusieurs choix, nous décidons d'orienter notre repère suivant un vecteur flux : la variable essentielle de notre contrôle. Il reste donc à déterminer le flux que nous allons retenir pour orienter notre repère (d-q) :

- Le flux statorique.
- Le flux rotorique .
- Le flux d'entrefer.[KHA13]

II.3.4 MODELE DE LA MADA A FLUX STATORIQUE ORIENTE

Dans cette commande, la machine est conçue de telle façon à ce que le flux statorique dans le repère de Park suivant l'axe q soit nul. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constat au stator de la machine.[ROU 16]

Rappelant le système d'équations différentielles (II. 10), décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

un flux statorique constant $\varphi_{sd}=\varphi_s$ et un flux statorique en quadrature orienté $\varphi_{sq}=0$, ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Si on néglige la résistance \mathbf{R}_s , qui est une hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [ROU16] :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

II.3.4.1 RELATION ENTRE LE COURANT STATORIQUE ET LE COURANT

ROTORIQUE

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statoriques

(Équation (II.31)), Nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s I_{rd}} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

II.3.4.2 RELATIONS ENTRE PUISSANCES STATORIQUES ET COURANTS

ROTORIQUES

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

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ \varphi_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ \varphi_s = V_s I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve.

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} \cdot I_{rq} \\ \varphi_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{M V_s}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Il ressort de l'expression (II. 35) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d. à une constante près $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ imposée par le réseau [ROU16]

II.3.4.3 RELATIONS ENTRE TENSIONS ROTORIQUES ET COURANTS ROTORIQUES

A partir du système d'équation (II.32), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + V_s \frac{M}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{rd}}{dt} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{dI_{rq}}{dt} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations, on obtient

$$\begin{cases} V_{rd} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) S \right] I_{rd} - g w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) S \right] I_{rq} + g w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (II.39)$$

V_{rd} Et V_{rq} sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

Avec :

- $\left(\frac{V_s M}{L_s} \right)$: est le terme de couplage entre les deux axes
- $g \left(\frac{M^2}{L_s} \right)$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation

Nous avons appliqué cette méthode :

La commande indirecte sans boucle de puissance, Les courants rotoriques I_{rq} et I_{rd} , sont respectivement les images de la puissance active statorique P_s et la puissance réactive statorique Q_s , doivent poursuivre leurs courants de références [YOU14]

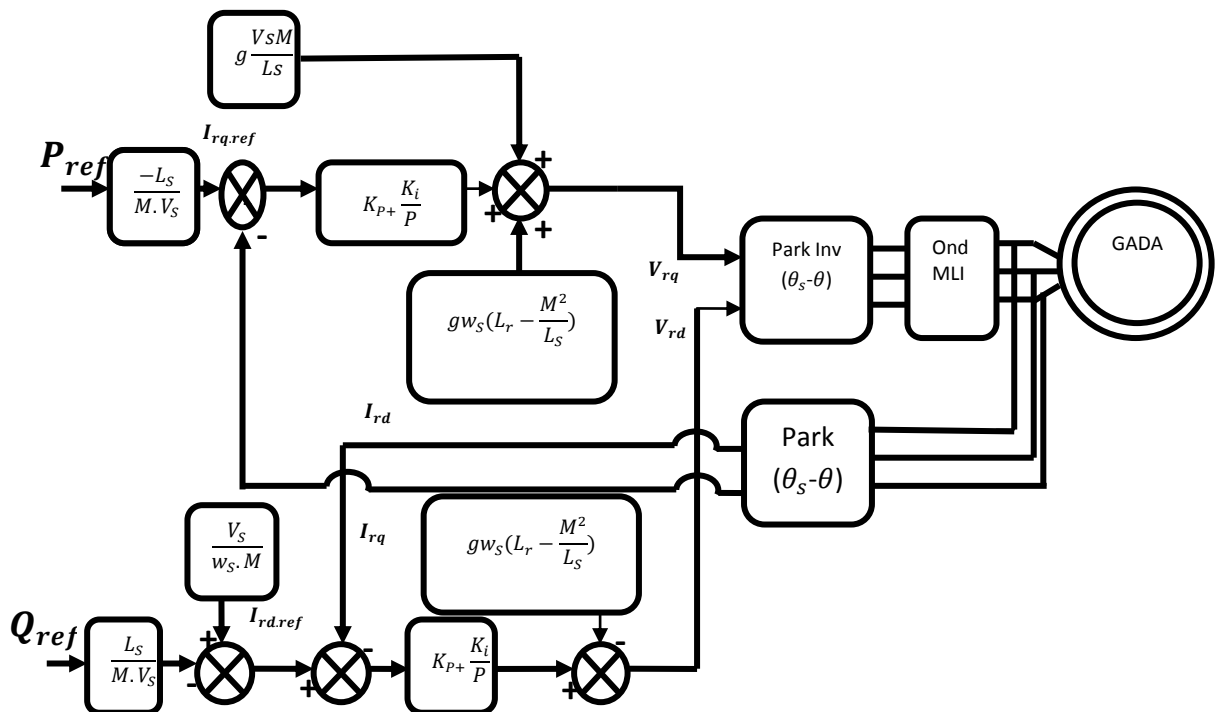


Figure II-12- : Schéma bloc de la structure de commande indirecte sans boucle de puissance.

II.3.5 RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME POUR UNE VITESSE FIXE

Les figures ci-dessous montrent les performances des commandes vectorielle (indirecte sans boucle de puissance) des puissances active et réactive statorique appliquée à la MADA. Cet essai est réalisé dans les conditions suivantes :

Machine entraînée à une vitesse fixe $1440 \text{ tr}/\text{min}^{-1}$

- entre les instants $t = 1 \text{ sett} = 3 \text{ s}$: échelon négatif pour la puissance active (P_{ref} passe de 0 à -3000 W) ;

- entre les instants $t = 2 \text{ sett} = 4 \text{ s}$: échelon positif pour la puissance réactive (Q_{ref} passe de 0 à 1000 VAR).

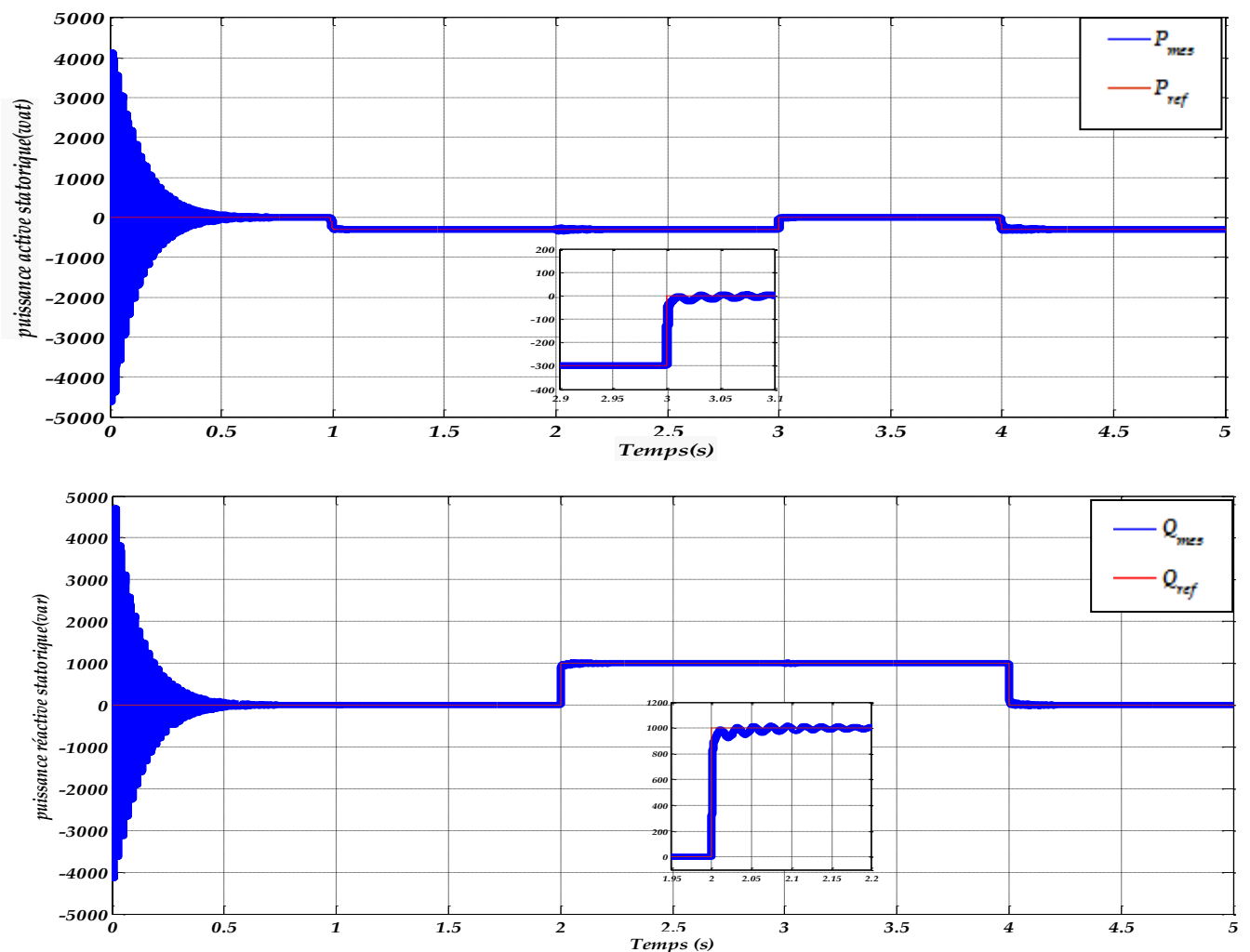


Figure II-13- : Puissance active et reactive statorique

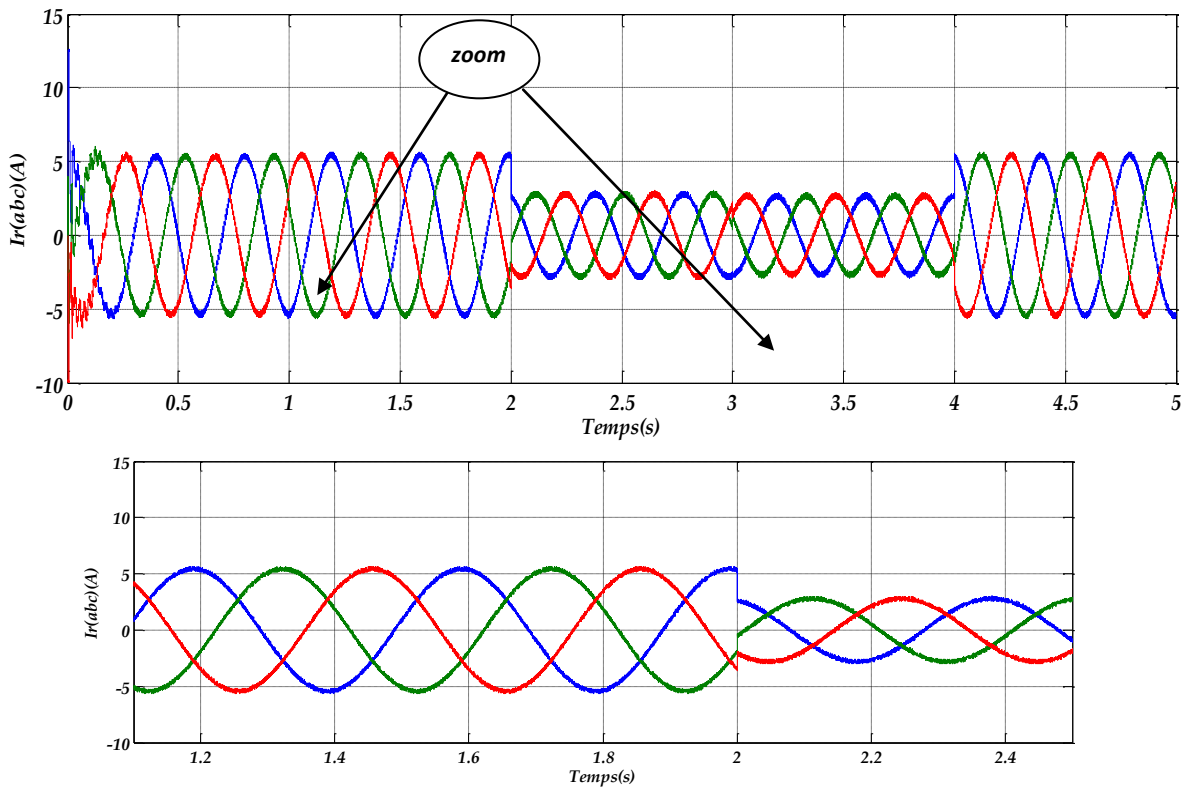


Figure II-14- : les Courant Rotoriques $I_r(abc)$

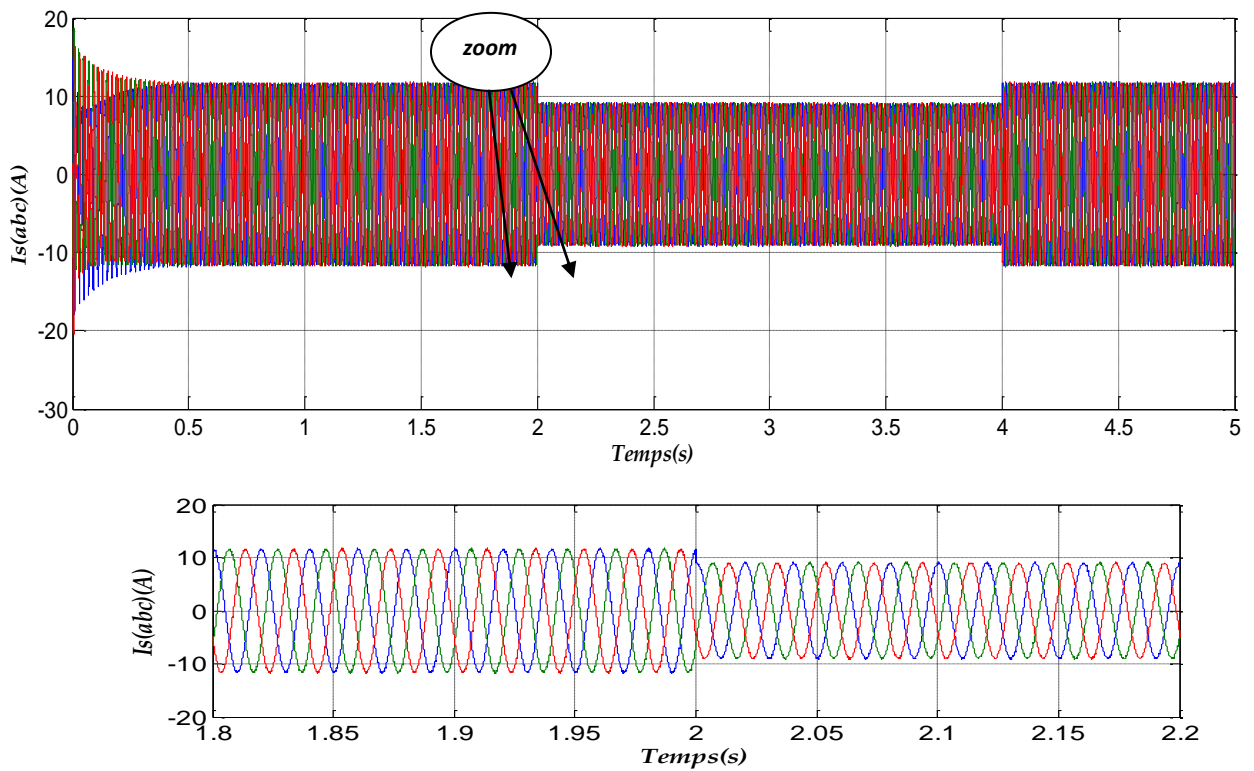


Figure II-15- : les Courant statoriques $I_s(abc)$

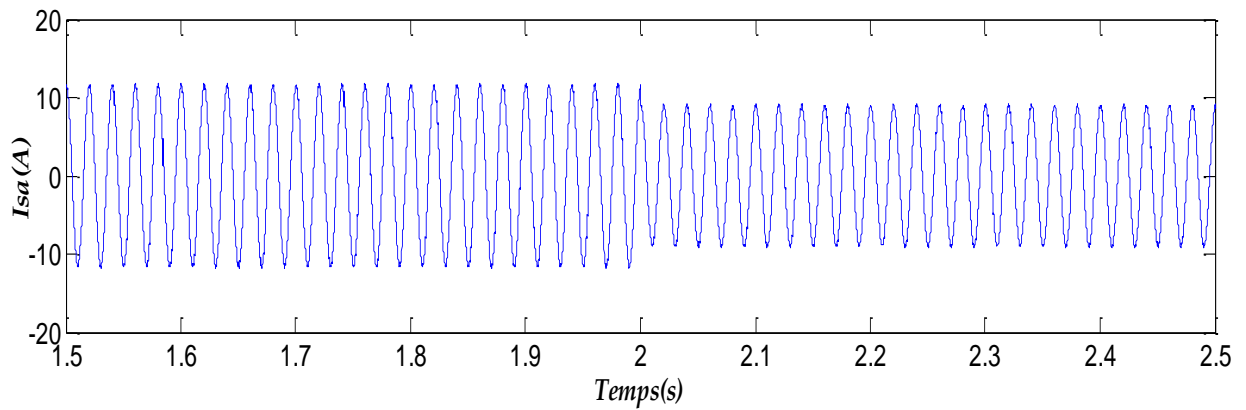


Figure II-14- : Courant de la source (phase a)

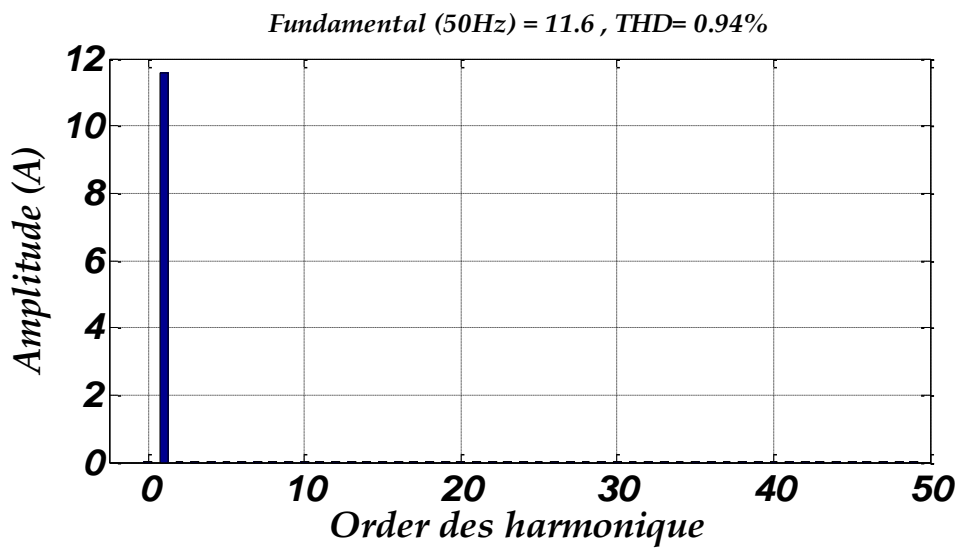


Figure -II.17-: Spectre harmonique du courant de la source

II.3.6 INTERPRETATION DES RESULTATS

D'après les figures (II.13), on peut remarquer la robustesse de la commande vectorielle en terme de découplage et les bons résultats obtenus par la régulation des puissances statorique active et réactive. (P, Q)

Les résultats obtenus par la simulation, montre clairement que l'utilisation de la commande arrive à maintenir les puissances active et réactive à leurs valeurs désirées.

L'analyse spectrale du courant de stator illustré sur la figure(III.17) , montre bien que les harmoniques des rangs faibles sont rejetés vers les hautes fréquences avec tout en diminuant le taux de distorsion harmonique(THD)

II.3.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons modélisé, premièrement la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park (Repère biphasé (d, q)) lié au champ tournant pour simplifier ce modèle. Par la suite, nous avons modélisé, l'onduleur qui alimente le rotor de la MADA..

On utilise la commande vectorielle pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la MADA), Nous avons présenté l'étude et l'application de cette commande sur le système.

Dans notre étude, on a choisi la commande indirecte sans boucle de puissance d'une part sa simplicité de mise en œuvre, ainsi que la possibilité du contrôle et de limitation des courants afin de protéger le bobinage rotorique de la machine.

Afin d'améliorer les résultats de simulation obtenus, On applique deux commandes, l'un c'est par mode glissant et l'autre c'est la commande par logique floue, Tout cela sera discuté dans le chapitre suivant.

Chapitre III

*COMMANDE PAR MODE GLISSANT ET LA LOGIQUE FLOUE DES
PUISSANCES*

ACTIVE ET RÉACTIVE

III.INTRODUCTION

La commande vectorielle possède plusieurs inconvénients, il y 'a deux inconvénients majeurs.

- l'inadaptation avec les systèmes à structures variables.
- l'impuissance de ces correcteurs classiques qui donnent souvent des résultats moins performants.

C'est Pour cela, On va appliquer à la première étape une commande appelée (commande par mode glissement) pour sa simplicité et sa robustesse

Pendant ces circonstances on va utiliser une autre technique c'est : la commande par logique floue dans la deuxième étape de ce chapitre

III.1 Commande par mode glissant

La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriés autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement. Cette commande à base des gains. [BEN 12, ROU 16, ZOU 10]

C'est ce que on va aborder immédiatement dans la première partie de ce chapitre.

III.1.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE MODE GLISSANT

L'idée de base de cette commande est définir une surface appelée surface de glissement $S(x, t)$ pour forcer et d'attirer la dynamique (l'état) du système vers une région convenablement sélectionnée, puis une loi de commande $U(x, t)$ pour garder le système dans même région (toutes les trajectoires sur cette surface).

Ainsi, la conception de contrôleur à mode glissant passe par deux étapes essentielles :

- Déterminer le choix et le nombre des surfaces.
- Déterminer la loi de commande. [ROU 16, BEN 12, REZ 09]

III.1.3 CONCEPTION DE LA COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT

La conception de cette commande représente par trois étapes complémentaires

- Le choix des surfaces.
- L'établissement des conditions d'existence et de convergence.
- La détermination de la loi de commande. [BEN 12] [AMI 08]
- Réduire le phénomène de chattering (broutement), dû à la discrétisation des fonctions de commutation. [ABD]

III.1.3.1 CHOIX DES SURFACES DE GLISSEMENT

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leurs formes en fonction de l'application et de l'objectif visé [ABD] Cette surface S du glissant définit une fonction linéaire $S(x)$ appelée fonction de commutation (switching function), On considère le modèle d'état suivant :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$[X]$: représente le vecteur d'état.

$[U]$: Le vecteur de commande.

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande $[U]$. Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état X vers sa valeur de référence X^* , il faut choisir une surface de glissement qui est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface, la forme générale suivante :

$$S(X) = \left(\frac{d}{dt} - \lambda\right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

λ : Le gain positif.

$e(X) = X - X^*$: Écart de la variable à réguler (est l'erreur entre la variable à réguler et sa référence).

r : le degré relatif.

$S(X) = 0$: Est une équation différentielle linéaire autonome dont unique solution est

$$e(X) = 0$$

En d'autre terme, la difficulté revient à un problème de poursuite de la trajectoire dont l'objectif est de garder $S(X)$ à zéro. Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart (x) en respectant la condition de convergence. La linéarisation exacte de l'écart a pour but de forcer la dynamique de l'écart (référence – sortie) à être une dynamique d'un système linéaire autonome d'ordre r [ZOU 10]

III.1.3.2 CONDITIONS D'EXISTENCE ET DE CONVERGENCE DU REGIME GLISSANT

On présente deux types de conditions :

III.1.3.2.1 APPROCHE DIRECTE

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système de converger vers les surfaces de glissement.

$$s(x)\dot{s}(x) < 0$$

III.1.3.2.2 APPROCHE DE LYAPUNOV

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive de Lyapunov $V(X) > 0$ pour les variables d'état du système, et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{V}(X) < 0$

La fonction de Lyapunov :

$$V(x) = \frac{1}{2} s(x)^2 \quad (\text{III.3})$$

Sa dérivée :

$$\dot{V}(x) = s(x)\dot{s}(x) \quad (\text{III.4})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative. Il suffit d'assurer que :

$$\dot{s}(x) s(x) < 0 \quad (\text{III.5})$$

III.1.3.3 DETERMINATION DE LA LOI DE COMMANDE

La structure de la commande $U(t)$ comporte deux commandes :

- U_{eq} : La commande équivalente ou nominale.
- ΔU : La commande de glissement ou attractive.

Donc :

$$U(t) = \Delta U + U_{eq} \quad (\text{III.6})$$

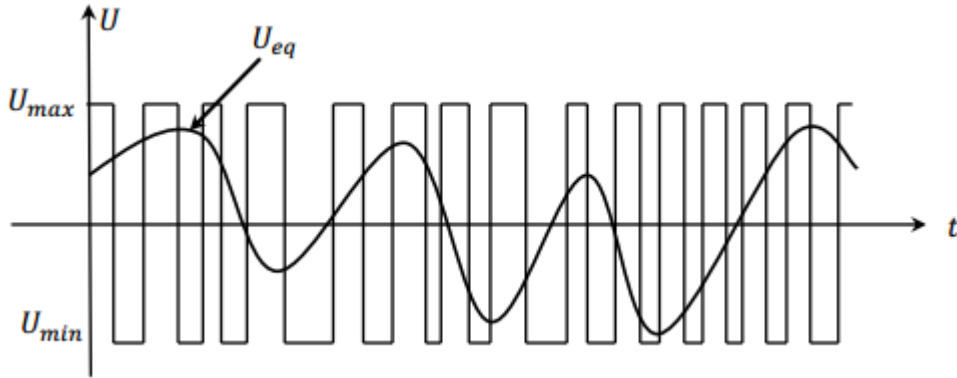


Figure III-1- : Commande équivalente U_{eq}

La dérivée de la surface $S(X)$ est :

$$\dot{S} = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (\text{III.7})$$

En remplaçant (III. 1) et (III. 6) dans (III. 7), on trouve :

$$\dot{S}(x) = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial x} ([A][X] + [B]U_{eq}) + \frac{ds}{dt} [B]\Delta U \quad (\text{III.8})$$

D'après le mode de glissement et le régime permanent

$$U_{eq} = -\left(\frac{\partial s}{\partial x} [B]\right)^{-1} \left(\frac{\partial s}{\partial x} [A][X]\right) \quad (\text{III.9})$$

Avec la condition que:

$$\frac{\partial s}{\partial x} [B] \neq 0 \quad (\text{III.10})$$

Durant le mode de convergence et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (III. 8), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} [B]\Delta U \quad (\text{III.11})$$

Et la condition d'attractivité $S(X)$. $\dot{S}(X) \leq 0$ Devient :

$$S(X) \frac{\partial s}{\partial x} [B]\Delta U < 0 \quad (\text{III.12})$$

Pour réaliser ce qui précède, le signe de ΔU et $S(X) \frac{\partial S}{\partial X} [B]$ est opposé, La forme de la commande discrète c'est fonction **sign** Figure (III.2).

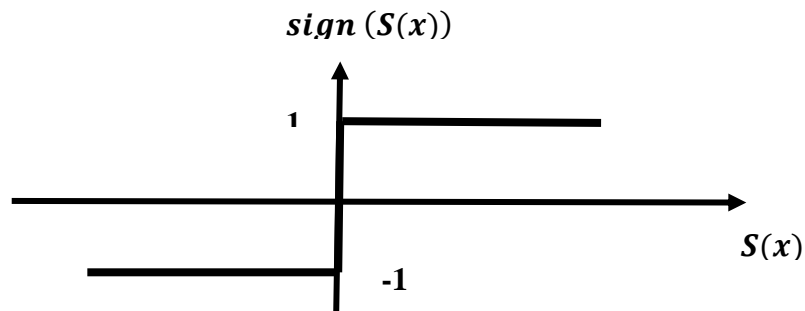


Figure III-2- : Fonction **sign**

$$\Delta U = K_x \text{sign } S(x) \quad (\text{III.13})$$

Donc ; Le signe de K_x est choisi opposé au signe de $\frac{\partial S}{\partial X} [B]$

III.1.4 ELIMINATION DU PHENOMENE DUBROUTEMETCHATTERING

Le principal inconvénient de la commande de ce type c'est phénomène dit broutement "chattering en anglais". Qui additionne au spectre de la commande des composantes de hautes fréquences.

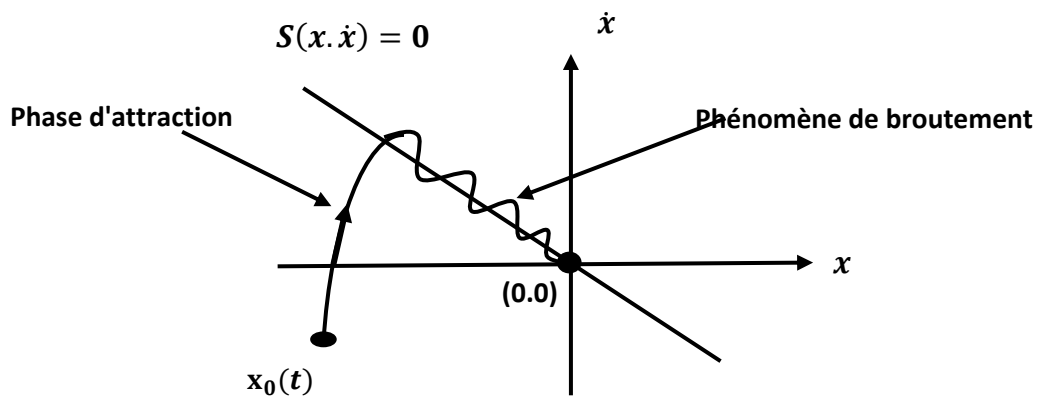


Figure III-3- : Phénomène de broutement.

Ceci étant, d'autres fonctions sont proposées pour palier au phénomène de broutement, on présente deux solutions.

III.1.4.1 PROPOSITION DE SLOTINE

Remplacement de la fonction ''**sign**'' par une fonction de saturation «**sat**» cette fonction caractérisée par un (1) ou deux (2) seuil. [MODE, ROU 16, BEN, AMI 08]

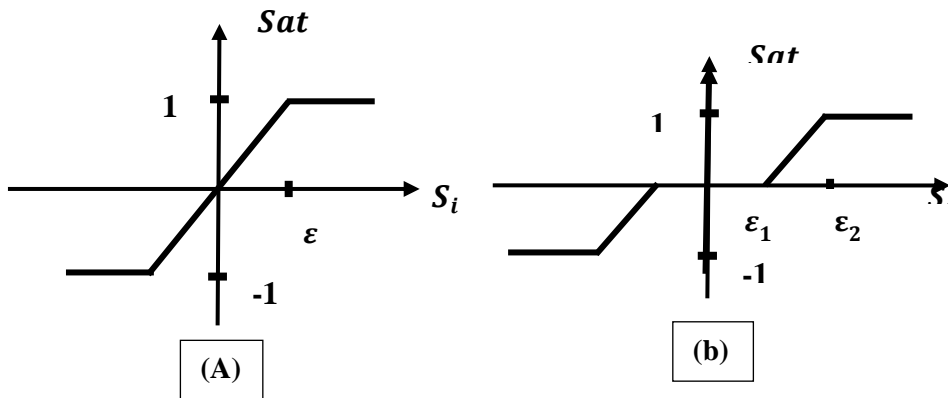


Figure III-4- : Fonction **SAT** : (A) - un seuil ; (b) - deux seuils (zone morte).

Dans ce cas, la commande devient :

$$Sat(S) = \begin{cases} -1 & si & s \leq -\epsilon \\ \frac{s}{\epsilon} & si & -\epsilon < s < \epsilon \\ -1 & si & s \geq \epsilon \end{cases} \quad (III.14)$$

$$Sat(S) = \begin{cases} 0 & si & |s| \leq \epsilon_1 \\ \frac{s}{\epsilon} & si & \epsilon_1 < |s| < \epsilon_2 \\ sign(s) & si & s > \epsilon_2 \end{cases} \quad (III.15)$$

III.1.4.2 PROPOSITION DE HARSHIMA

On peut aussi la remplacer par une fonction «**sign**» par une fonction de lissage appelée «**cont**»

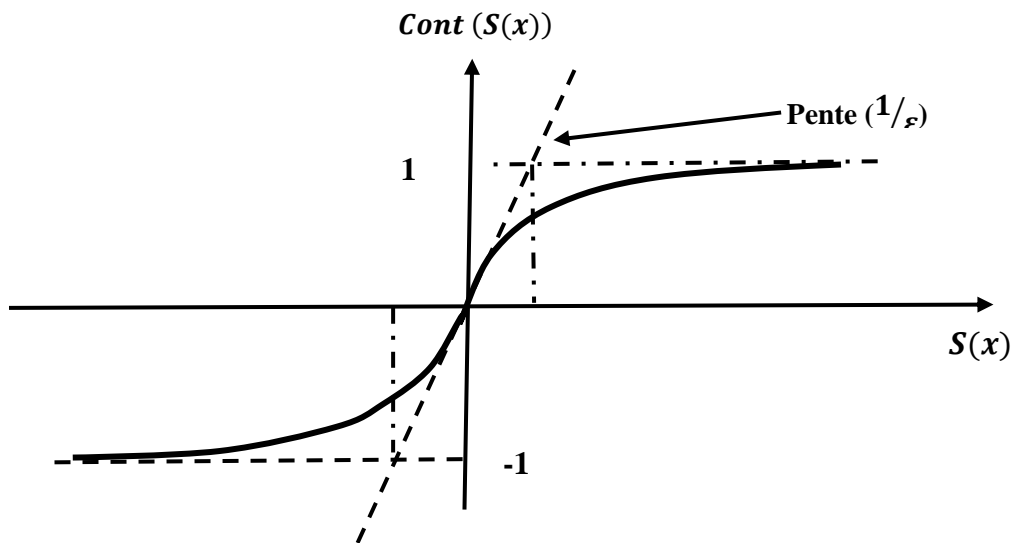


Figure III-5- : Fonction Cont ($\epsilon >$ et petit).

Dans ce cas, la commande devient: $\Delta U = -K_x \text{cont } s(x)$

$$\text{cont}(s) = \begin{cases} \frac{s(x)}{|s(x)|+\epsilon} & \text{si } |s| < \epsilon \\ \text{sign}(s) & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{(III.16)}$$

III.1.5 STRUCTURES DE COMMANDE PAR MODE GLISSANT

On distingue trois (3) structures :

III.1.5.1 STRUCTURE AVEC LA COMMUTATION AU NIVEAU DE L'ORGANE COMMANDE

Cette structure de commande par mode glissant est donnée par la figure (III.6).

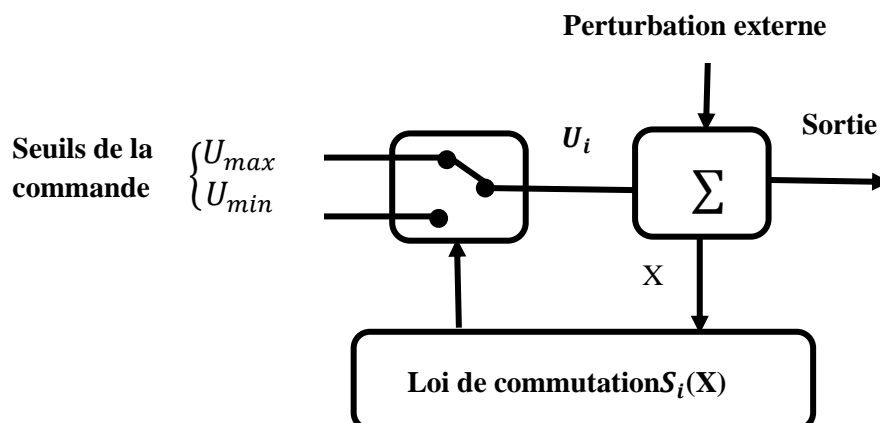


Figure III-6- : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande

Cette structure de commande correspond au fonctionnement tout ou rien «TOR» des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'applications aux variateurs de vitesse. Elle est la plus classique et la plus utilisée (moteurs pas-à-pas). [ROU 16]

III.1.5.2 STRUCTURE PAR COMMUTATION AU NIVEAU D'UNE CONTRE REACTION D'ETAT

Le schéma de puissance d'une telle structure est représenté par la figure (III.7). Le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. Le non linéarité provient de la commutation entre les gains, Cette structure a été utilisée dans la commande des moteurs à courant continu et à aimants permanents. [BOU 15, ROU 16]

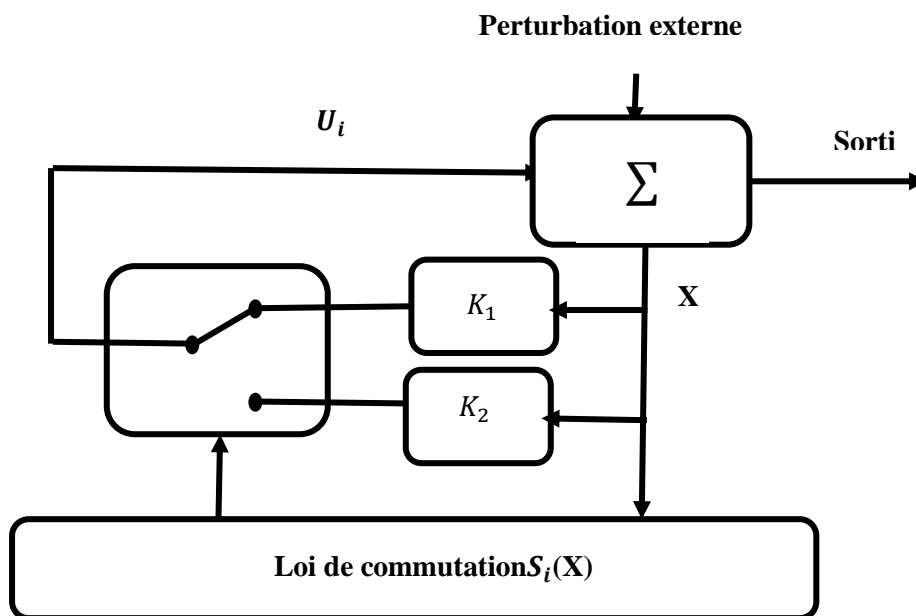


Figure III-7 : Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état

III.1.5.3 STRUCTURE DE REGULATION AVEC AJOUT DE LA COMMANDE EQUIVALENTE

Cette structure présente un réel avantage. Elle permet de repositionner l'état futur du système grâce à une commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent, L'organe de commande est beaucoup moins sollicité mais plus dépendant des variations paramétriques. [BOU 15]

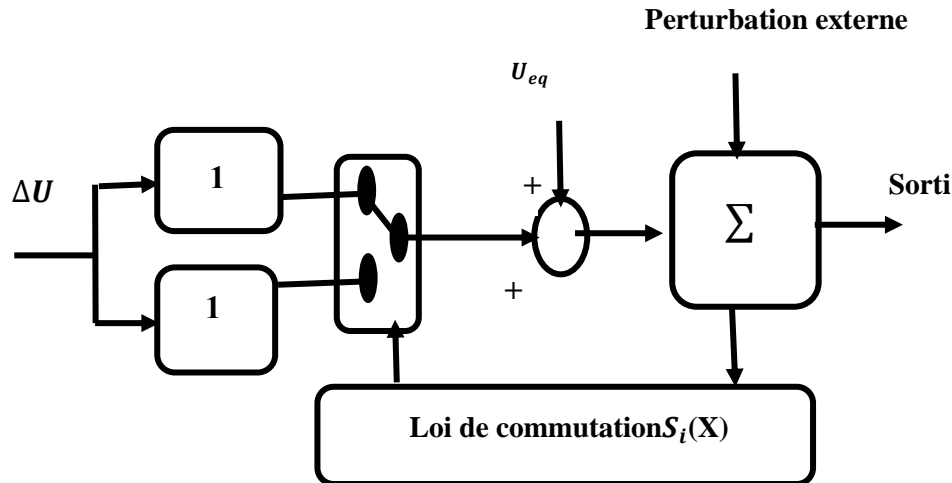


Figure III-8- : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente

III.1.6 APPLICATIONS DE LA COMMANDE MODE GLISSANT A LA MADA

Cette commande appliquée au système de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation est une commande robuste qui résout beaucoup de problèmes liés aux incertitudes et aux variations du système à régler. On applique cette commande pour contrôler indépendamment des puissances active et réactive générées par la machine asynchrone à flux orienté. [ROU 16]

III.1.6.1 MODELE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION-GADA

Le modèle utilisé est le modèle à flux statorique orienté présenté précédemment dont les grandeurs électriques sont toutes exprimées dans un repère fixe lié au stator au repère (d,q) . Le modèle d'état est donné comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

➤ Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.

$$\begin{cases} P_s^{ref} = -\frac{V_s M}{L_s} I_{rq}^{ref} \\ Q_s^{ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s M} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd}^{ref} \end{cases} \quad (III.18)$$

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = -\frac{L_s}{V_s M} P_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_s^{ref} \end{cases} \quad (III.19)$$

➤ Equations des dérivées de courants rotoriques.

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \frac{1}{L_r \sigma} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = (V_{rq} - R_r I_{rq} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma I_{rd} - g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s}) \frac{1}{L_r \sigma} \end{cases} \quad (III.20)$$

III.1.6.2 CHOIX DES SURFACES DE GLISSANTS

La puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q , et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d . Pour contrôler la puissance, on prend $n = 1$

Les expressions de la surface de contrôle des puissances active et réactive sont :

$$s(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (III.21)$$

$$s(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (III.22)$$

III.1.6.3 CONDITIONS DE CONVERGENCES

Pour que les variables choisies convergent vers leurs valeurs de référence, il faut que les deux surfaces de glissement soient nulles.

$$\begin{cases} s(P) = 0 \\ s(Q) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d}{dt} (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) = 0 \\ \frac{d}{dt} (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) = 0 \end{cases} \quad (III.23)$$

Lorsque les conditions de convergences sont satisfaites, les puissances active et réactive tendent exponentiellement vers leurs valeurs de références, et pour suivre ces valeurs, il suffit de rendre la surface de glissement attractive et invariante.

Le mode glissant est réalisé à condition que la relation d'attractivité de Lyapov soit inférieure à zéro ; c'est-à-dire $s(x) \cdot \dot{s}(x) \leq 0$

III.1.6.4 LOI DE COMMANDE PAR MODE GLISSANT

L'algorithme de commande est défini par les relations :

$$V_{rq} = V_{rq-Equi} + V_{rq-attr} \quad (III.24)$$

$$V_{rd} = V_{rd-Equi} + V_{rd-attr} \quad (III.25)$$

V_{rq} , V_{rd} : les tensions de commandes.

$V_{rq-Equi}$, $V_{rd-Equi}$:les tensions de commandes équivalentes.

$V_{rq-attr}$, $V_{rd-attr}$:les tensions de commandes de commutations.

➤ *Contrôle de la puissance active :*

Pour contrôler la puissance active, on prend $r = 1$. L'expression de la surface de glissement devient :

$$s(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (III.26)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{s}(P) = (\dot{I}_{rq}^{ref} - \dot{I}_{rq}) \quad (III.27)$$

En remplaçant les dérivées des courants et des courants de références I_{rq}^{ref} et I_{rq} par leurs expressions données par les équations (III. 32)et (III. 33), on obtient :

$$\dot{s}(P) = \left(-\frac{L_s}{M V_s} \dot{P}_S^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} \left(V_{rq} - R_r I_{rq} - g w_s L_r \sigma I_{rd} - g \frac{M V_s}{L_s} \right) \right) \quad (III.28)$$

$$\dot{s}(P) = \left(-\frac{L_s}{M V_s} \dot{P}_S^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rq} - \frac{1}{L_r \sigma} \left(-R_r I_{rq} - g w_s L_r \sigma I_{rd} - g \frac{M V_s}{L_s} \right) \right) \quad (III.29)$$

$$\dot{s}(P) = -v_1 \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (III.30)$$

$$-\frac{L_s}{M V_s} \dot{P}_S^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rq} - \frac{1}{L_r \sigma} \left(-R_r - g w_s L_r \sigma I_{rd} - g \frac{M V_s}{L_s} \right) = -v_1 s \quad (III.31)$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s L_r \sigma}{M V_s} \dot{P}_S^{ref} - \left(-R_r I_{rq} - g w_s L_r \sigma I_{rd} - g \frac{M V_s}{L_s} \right) + L_r \sigma v_1 \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (III.32)$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s L_r \sigma}{M V_s} \dot{P}_S^{ref} + R_r I_{rq} + g w_s L_r \sigma I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} + L_r \sigma v_1 \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (III.33)$$

$$\begin{cases} V_{rq-Equi} = -\frac{L_s L_r \sigma}{M V_s} \dot{P}_S^{ref} + R_s I_{rq} + g w_s L_r \sigma I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \\ V_{rq-attr} = L_r \sigma v_1 \operatorname{sgn}(s(P)) \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

➤ Contrôle de la puissance réactive :

De la même manière que précédemment, pour contrôler la puissance réactive on prend $r = 1$. Expression de la surface de glissement déviant

$$s(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (\text{III.35})$$

Sa dérivée est:

$$\dot{s}(Q) = (\dot{I}_{rd}^{ref} - \dot{I}_{rd}) \quad (\text{III.36})$$

En remplaçant les dérivées des courants et des courants de références I_{rd}^{ref} & I_{rd} par leurs expressions données par les équations (III. 32)(III. 33), on obtient :

$$\dot{s}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_S^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} (V_{rd} - R_r I_{rd} + g w_s L_r \sigma I_{rq}) \right) \quad (\text{III.37})$$

$$\dot{s}(Q) = \left(\left(\frac{V_s}{w_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_S^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r I_{rd} + g w_s L_r \sigma I_{rq}) \right) \quad (\text{III.38})$$

$$\dot{s}(Q) = -v_2 \operatorname{sgn}(s(Q)) \quad (\text{III.39})$$

$$\left(\frac{V_s}{w_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_S^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \sigma} (R_r I_{rd} + g w_s L_r \sigma I_{rq}) = -v_2 \operatorname{sgn}(s(Q)) \quad (\text{III.40})$$

$$V_{rd} = L_r \sigma \left(\frac{V_s}{w_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_S^{ref} \right) - (R_r I_{rd} + g w_s L_r \sigma I_{rq}) + L_r \sigma v_2 \operatorname{sgn}(s(Q)) \quad (\text{III.41})$$

$$V_{rd} = L_r \sigma \left(\frac{V_s}{w_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_S^{ref} \right) - R_r I_{rd} - g w_s L_r \sigma I_{rq} + L_r \sigma v_2 \operatorname{sgn}(s(Q)) \quad (\text{III.42})$$

$$\begin{cases} V_{rd-Equi} = L_r \sigma \left(\frac{V_s}{w_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_S^{ref} \right) - R_r I_{rd} - g w_s L_r \sigma I_{rq} \\ V_{rd-attr} = L_r \sigma v_2 \operatorname{sgn}(s(Q)) \end{cases} \quad (\text{III.43})$$

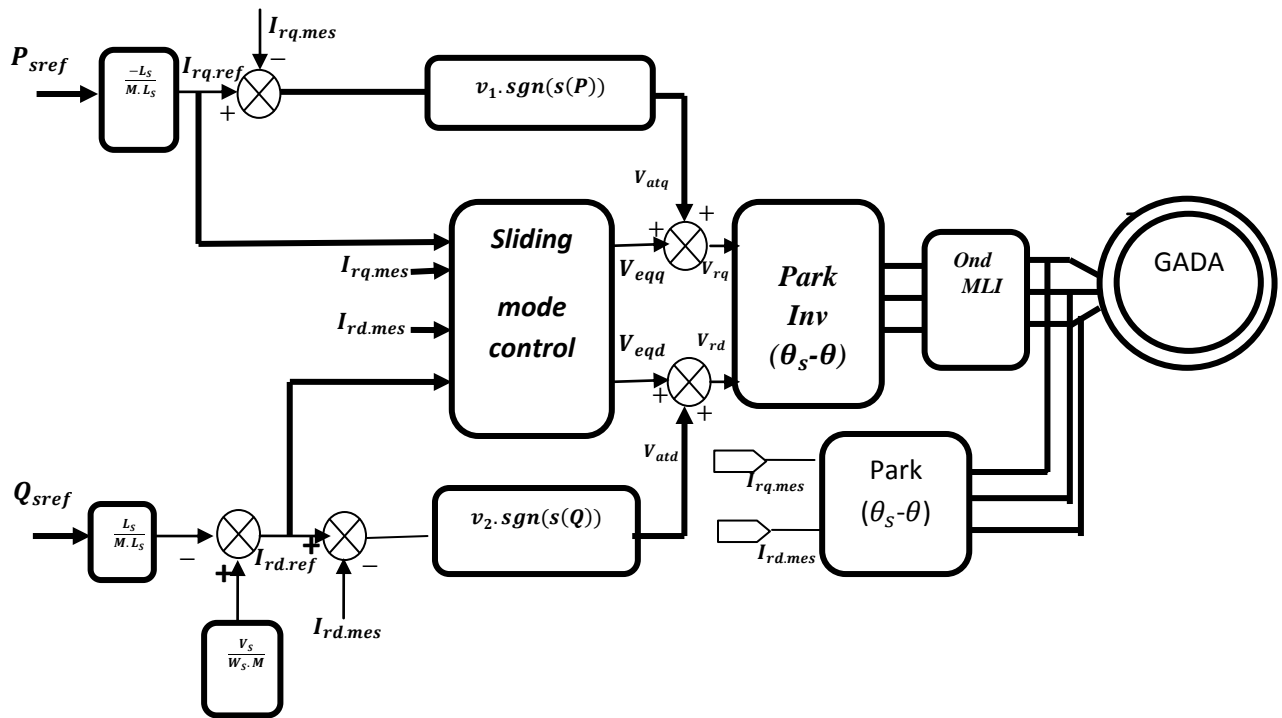


Figure III-9- : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant.

III.1.7 RESULTATS DE SIMULATION POUR LA COMMANDES PAR MODE GLISSANT

Les figures ci-dessous montrent les performances des commandes par mode glissement des puissances active et réactive statorique appliquée à la MADA. Cet essai est réalisé dans les conditions suivantes :

Machine entraînée à une vitesse fixe 1440 tr/min

- entre les instants $t = 1 \text{ sett} = 3 \text{ s}$: échelon négatif pour la puissance active (P_{ref} passe de 0 à -3000 W) ;

- entre les instants $t = 2 \text{ sett} = 4 \text{ s}$: échelon positif pour la puissance réactive (Q_{ref} passe de 0 à 1000 VAR).

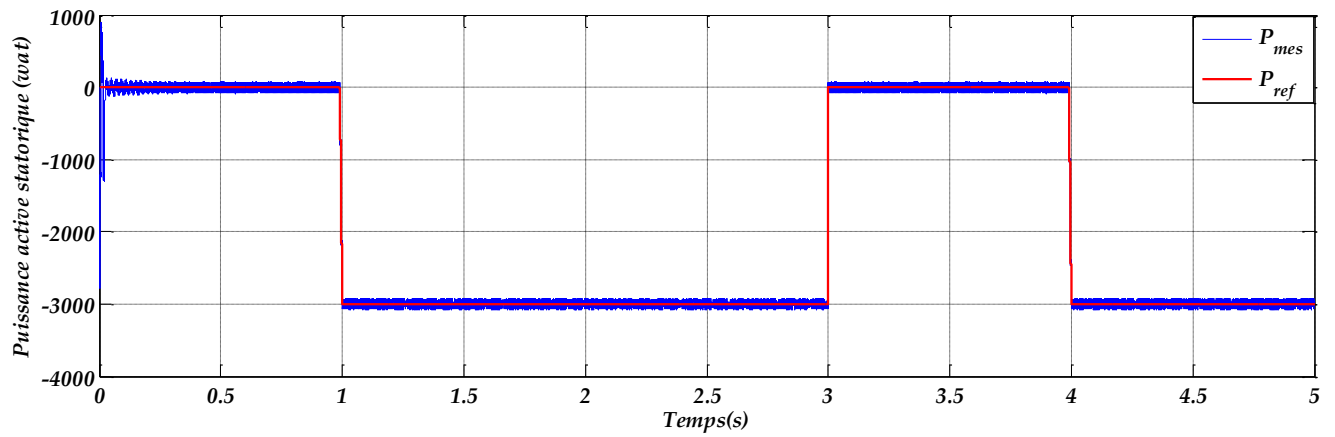


Figure III-10- : Puissance active statorique

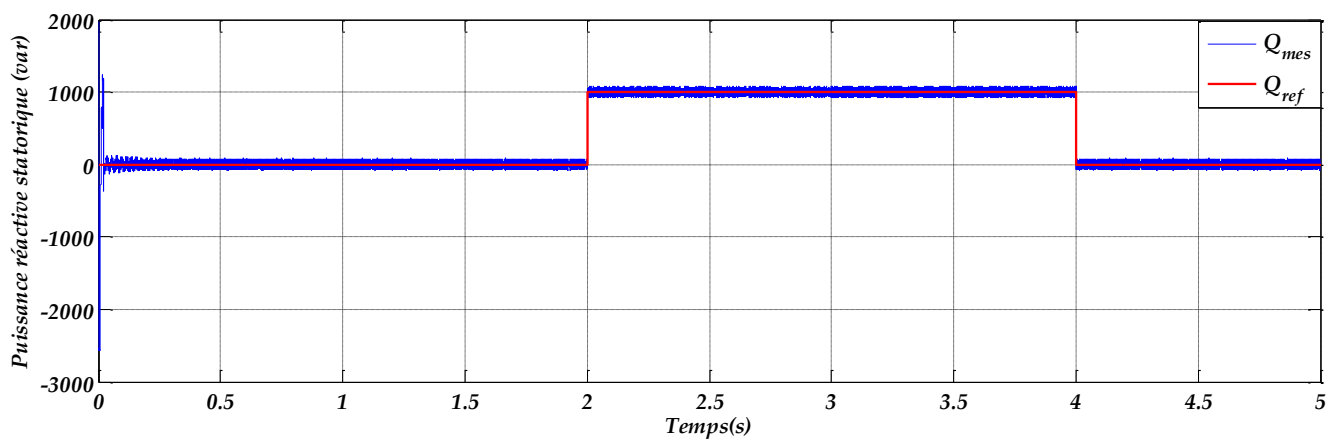


Figure III-11- : Puissance réactive statorique

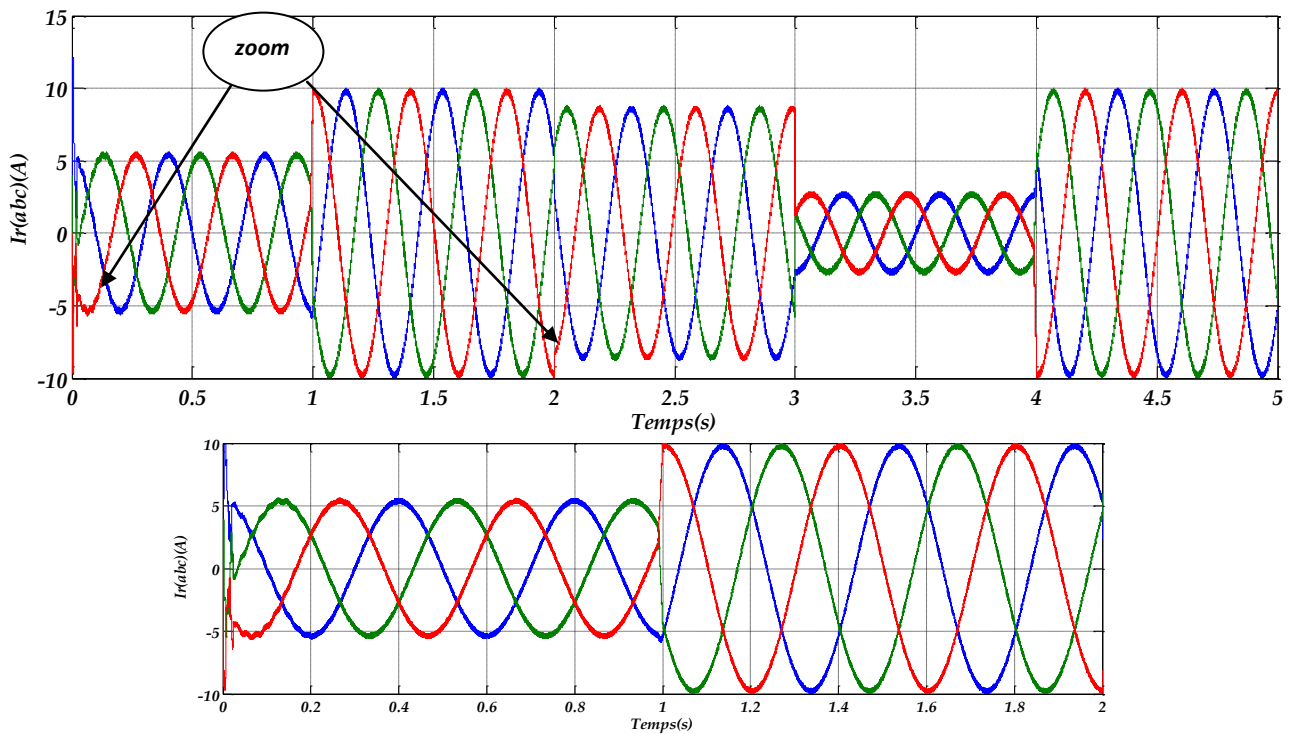


Figure III-12- : Courant Rotoriques $I_s(abc)$

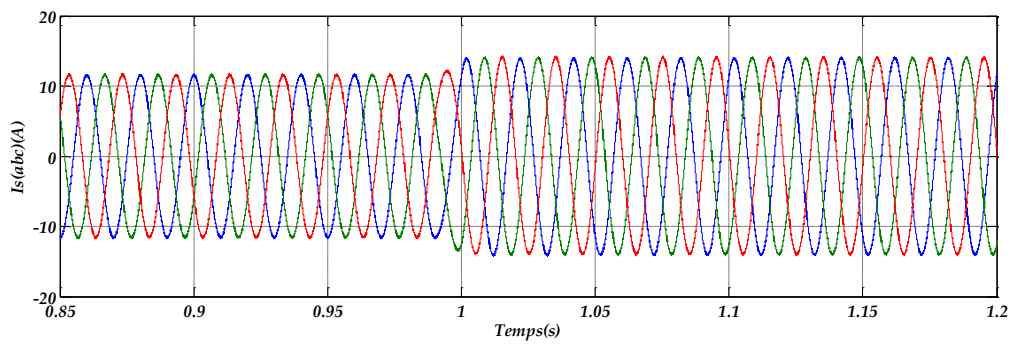
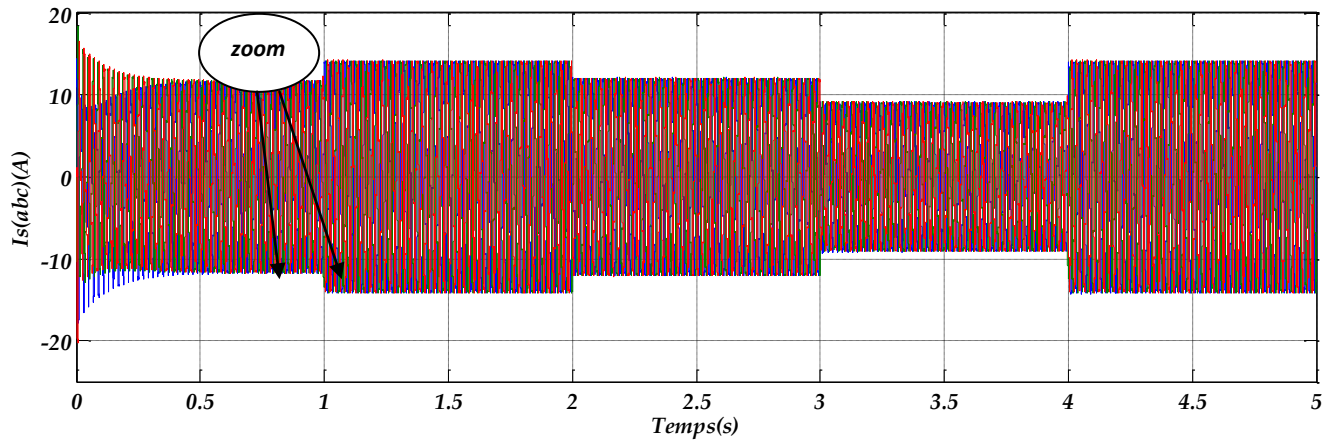


Figure III-13- : Courant statoriques $I_s(abc)$

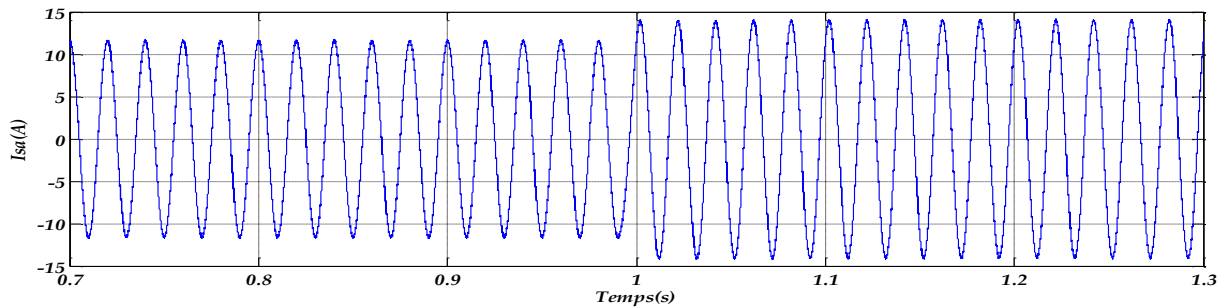


Figure III-14- : Courant de la source (phase a)

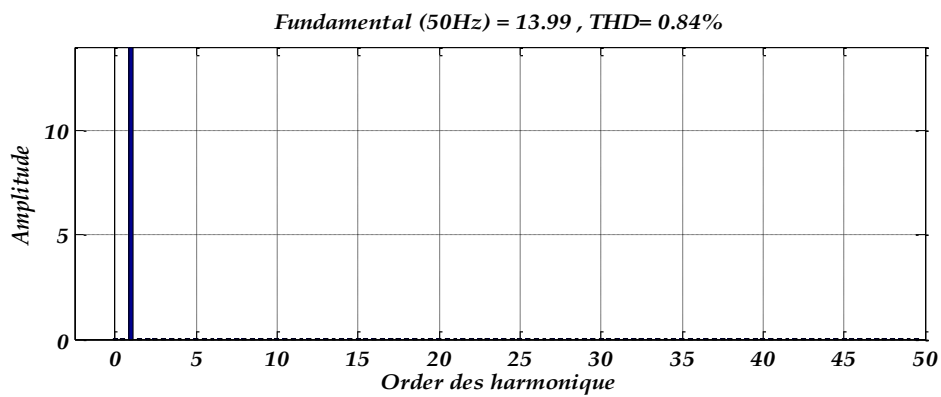


Figure III-15- Spectre harmonique du courant de la source

III.1.8 INTERPRÉTATION DES RESULTATS

D'après les courbes des figures III. Les résultats obtenus par la simulation, montre clairement que l'utilisation de la commande arrive à maintenir les puissances actives et réactive à leurs valeurs désirées.

Avec une amélioration remarquable des résultats obtenus par mode glissant par rapport à la commande vectorielle à savoir :

- une réponse rapide pour le régime transitoire et pour le changement des consignes ;
- une minimisation maximale d'erreur entre les valeurs de consignes et celle mesurées (presque nulle) ;

Une réduction importante des oscillations des puissances.

III.2 COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE

De ce qui précède les deux commandes précédentes présentes deux inconvénients principaux, c'est la faible robustesse de la commande vectorielle et le phénomène de broutement du mode glissant, donc pour améliorer les performances du système et éliminer les deux inconvénients, on va étudier et développé une nouvelle technique de commandes basées sur la LOGIQUE FLOUE. Cette commande permet de garder instantanément un contrôle indépendant des puissances actives et réactive générées par la MADA. Notre objectif, dans ce chapitre, est de développer un algorithme de commandes concerne une commande par LOGIQUE FLOUE basée sur les régulateurs flous afin d'améliorer les qualités de poursuite et d'assurer la robustesse de la commande. Des simulations numériques sont présentées pour tester les performances de régulateur flou.

III.2.1 LOGIQUE FLOUE (FL)

III.2.1.1 HISTORIQUE

La logique floue (*fuzzy logic*) est une technique utilisée en intelligence artificielle. En réalité elle existait déjà depuis longtemps ce sont les paradoxes logiques et les principes de l'incertitude d'Heisenberg qui ont conduit au développement de la "logique à valeurs

multiplés" dans les années 1920 et 1930. En 1937, le philosophe *Max Black* a appliqué la logique continue, qui se base sur l'échelle des valeurs vraies $\{0, 1/2 \text{ et } 1\}$, pour classer les éléments ou symboles. Les bases théoriques de la logique floue ont été formalisées en 1965 par le professeur *Lotfi A. Zadeh* de l'université de Californie de Berkeley [MOK 10]. Ensuite c'est au tour de M. Mamdani qui l'a expérimenté en 1974 en l'introduisant dans la régulation des processus industriels (régulation d'un moteur à vapeur). [REZ 15]

A cette époque la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux en effet les ordinateurs avec leur fonctionnement exacte par tout ou rien (1 et 0) ont commencé à se répandre sur une large échelle ; par contre la logique floue permet de traiter de variable non exacte dont la valeur peut varier entre (1 et 0) [BOU 14]. Par contre, la logique floue permettait de traiter des variables non exactes dont la valeur peut varier entre 1 et 0. Initialement, cette théorie a été appliquée dans des domaines non techniques, comme la médecine et le commerce. Mamdani a été le premier à appliquer ce nouveau formalisme. A partir de 1985, la logique floue a été appliquée dans des domaines aussi variés que L'automatisme, la robotique, la gestion de la circulation routière, le contrôle aérien, l'environnement (météorologie, climatologie, sismologie) [MOK 10].

Aujourd'hui la commande par la logique floue est de grande actualité. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition à un régulateur classique, Le régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basent sur des variables linguistiques. Dans ce qui suit, nous allons présenter les bases générales de la commande par logique floue et la procédure générale de la conception d'un régulateur flou [TOU 08]

III.2.2 PRINCIPE DE LA LOGIQUE FLOUE

Le principe du réglage par logique floue part du constat suivant : dans les problèmes de régulation auxquels il est confronté, Le principe du réglage par la logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logiques (au sens de la logique binaire ou booléenne) mais des variables linguistiques, proches du langage humain de tous les jours. [BOU 07]

Nous allons appliquer cette commande non linéaire pour contrôler la qualité de l'énergie produite. On va utiliser la structure de la commande vectorielle indirecte sans boucle

de puissance tout en remplaçant les régulateurs PI par des régulateurs flous. Dans ce qui suit, nous allons présenter les principaux fondements de la logique floue.

III.2.3 STRUCTURE GENERALE D'UN SYSTEME FLOU

Le réglage par la logique floue traite les problèmes de commande mais avec une philosophie différente. En effet, ce type de régulateurs flous ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences de plusieurs règles floues se basant sur des variables linguistiques. Ces inférences sont alors traitées par des opérateurs de la logique floue. [ZAR]

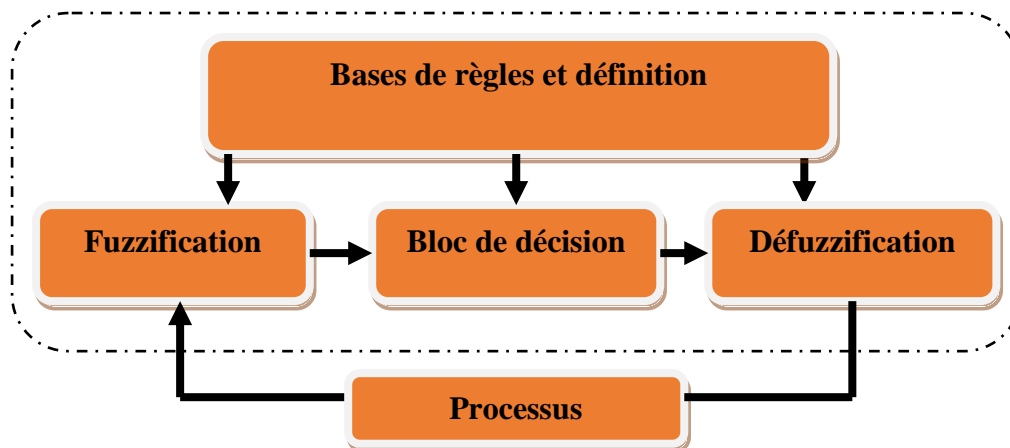


Figure III-16- : Structure interne d'un système flou

Chaque système basé sur la logique floue est composé de quatre blocs principaux :

- Une base de connaissance sous forme de règles floues et paramètres des fonctions d'appartenance.
- Un bloc de décision.
- Une fuzzification qui consiste en la transformation des entrées précises en degrés d'appartenance.
- Une défuzzification qui consiste en la transformation des résultats flous en des sorties précises.

III.2.3.1 CONSTITUTION D'UN SYSTEME FLOU

Un système flou est composé de quatre parties essentielles [ROU 16]

- La base de connaissance constituée d'une base de données et d'une base de règles.
- Le système d'inférence.
- L'interface de fuzzification.
- Une défuzzification.

III.2.3.2 FUZZIFICATION

On définit pour chaque entrée du système un univers de discours et un partitionnement de cet univers en ensembles flous. La fuzzification consiste à attribuer à la valeur réelle de chaque entrée, au temps t , sa fonction d'appartenance à chacune des ensembles flous définies préalablement, et donc transformer l'entrée réelle en un sous ensemble flou. [AGA 07]

Donc l'objectif de la fuzzification est de transformer les grandeurs physiques (numériques) d'entrée en des grandeurs floues (termes linguistiques ou Symboliques).

III.2.3.3 LA BASE DES REGLES

C'est la collection de règle qui permet de lier les variables floues d'entrée et de sortie, elles ont la forme : "*IF THEN*" ou "*SI-ALORS*", elles peuvent être écrites textuellement faisant appel à des entrées et à des sorties et elles sont données par des experts d'une manière directes numériques ou par des termes ou variables linguistique à travers des fonctions d'appartenance.

III.2.3.4 INFERENCE FLOUE

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées, elles lient les grandeurs mesurées, qui sont les variables d'entrées (transformées en variables linguistiques à l'aide de la fuzzification) aux variables de sorties. A partir de la base de règles donnée par l'expert et des sous-ensembles flous correspondants à la fuzzification des entrées, le mécanisme d'inférence calcule le sous ensemble flou Y relatif à la commande du système. La base de règles floues est constituée par une collection des règles linguistiques de la forme :

[AGA 07]

- *SI* (l'ensemble des conditions sont satisfaites).
- *ALORS* (l'ensemble des conséquences peuvent être supposées).

Pour le réglage par la logique floue, on utilise en général l'une des trois méthodes suivantes :
[ROU 16]

- Méthode d'inférence Max-Min (Méthode de Mandeni).
- Méthode d'inférence Max-Produit (Méthode de Larsen).
- Méthode d'inférence Somme-Produit.

III.2.3.5 DEFUZZIFICATION

La défuzzification a pour objectif de transformer le sous ensemble flou défini par le mécanisme d'inférence en une valeur non floue permettant ainsi la commande effective du système. [AGA 07]

L'opération de défuzzification permet de calculer à partir de la fonction d'appartenance résultante, la valeur réelle de la variable de sortie à appliquer au processus. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification : méthode du maxima, méthode du centre de gravité, méthode de la moyenne des maxima. On distingue plusieurs méthodes de défuzzification:

Méthode du maxima, méthode du centre de gravité, méthode de la moyenne des maxima. Il est toutefois reconnu que la méthode du centre de gravité donne les meilleurs resultants [LOU 17, AGA 07, ROU 16]

III.2.5 ELEMENTS DE BASE DE LA LOGIQUE FLOUE

III.2.5.1 UNIVERS DE DISCOURS

C'est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue x et $\mu_A(t)$ est le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble flou A .

Généralement, le domaine de définition de $\mu_A(t)$ peut être réduit à un sous ensemble de l'univers de discours. Donc on peut ainsi avoir plusieurs fonctions d'appartenance, caractérisant un sous-ensemble flou. C'est par l'association de tous les sous-ensembles flous de l'univers de discours que l'on obtient l'ensemble flou de la variable floue x . [LAT 12]

III.2.5.2 FONCTION D'APPARTENANCES

Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance qui correspond à la notion de fonction caractéristique en logique classique. Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et de sortie peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme, mais en général, les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont définies par des formes triangulaires et trapézoïdales, donc par des segments de droite, les fonctions sont alors dites linéaires par morceaux. La plupart des cas, et en particulier pour le réglage par la logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous. [LOU 17, KHE 15]

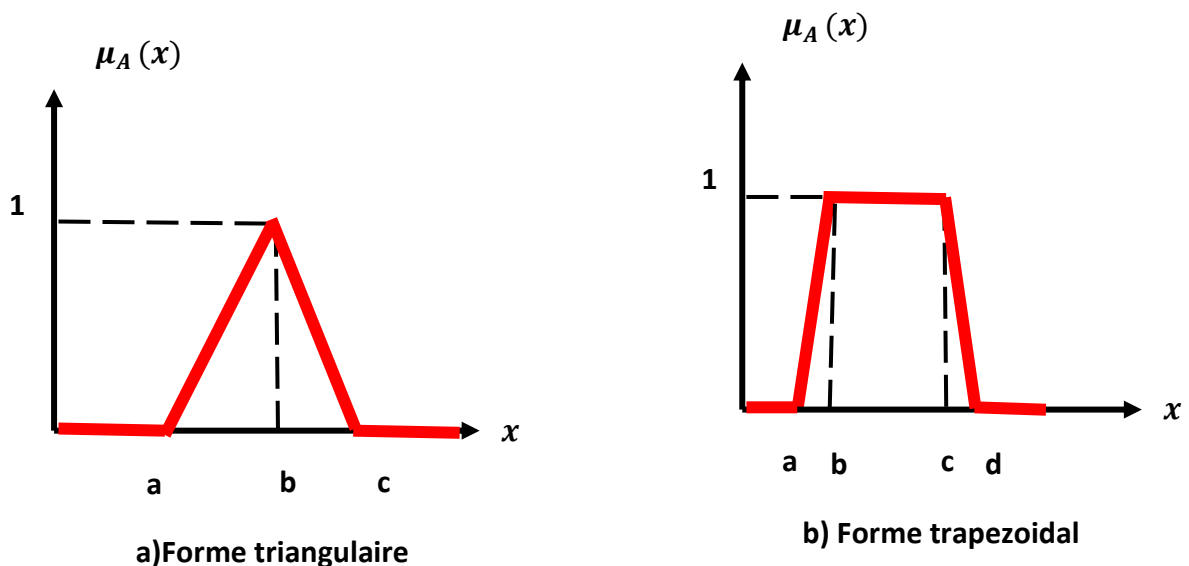


Figure III.-17- : Formes des fonctions d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale)

III.2.6 APPLICATION DE LA COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE A LA MADA

On applique cette commande pour contrôler en permanence et indépendamment les puissances active et réactive générées par la machine asynchrone à flux orienté. et voir les nouvelles qualités de poursuite et de régulation ainsi que la robustesse de la commande.

Le principe de cette commande c'est le même avec la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance avec un seul différent, Où nous remplaçons le régulateurs PI par des régulateurs flous (type Mamdani à sept classes, qui possèdent les mêmes fonctions d'appartenances)

Dans ce cas la différence entre les deux régulateur c'est les gains de normalisation (facteurs d'échelles).

➤ Pour la boucle de courant, les variables d'entrées sont :

L'erreur de courant

$$e_I = I_{rq}^{ref} - I_{rq} \tag{III.44}$$

La variation de l'erreur de courant

$$\Delta_{e_I} = e_I(\mathcal{K}) - e_I(\mathcal{K} - 1) \tag{III.45}$$

Le schéma bloc de la commande avec les régulateurs flous est illustré par la figure ci dessous

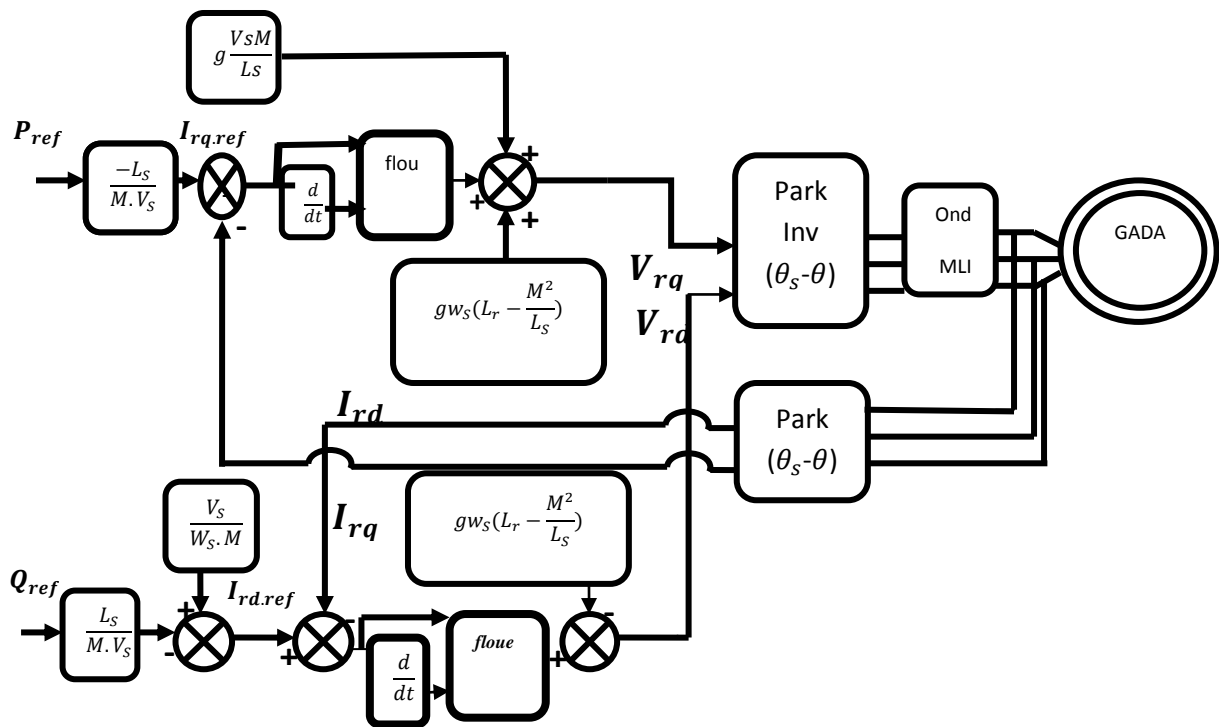


Figure- III.18- : Schéma bloc de la structure de commande flou.

III.2.7 STRUCTURE DE BASE D'UNCONTROLEUR FLOU DE COURANT

La structure du contrôleur du type PI-flou se compose des entrées du contrôleur flou qui sont généralement l'erreur (la différence entre la consigne et la sortie du processus) et sa variation (traduction de la dynamique de système). La majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma simple proposé par Mamdani, comme le montre la figure suivante :

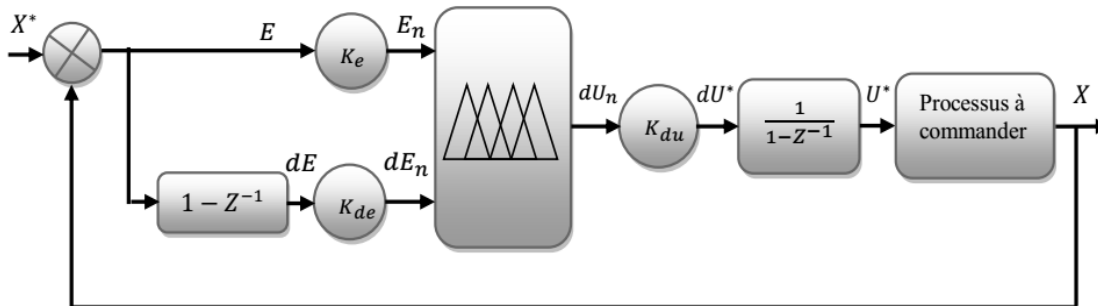


Figure-III.19- : Schéma bloc de la structure du contrôleur du type PI-flou.

Donc le système de régulation floue (contrôleur flou) se compose essentiellement :

- Bloc de calcul de la variation de l'erreur au cours du temps.
- Les gains de normalisation et dénormalisation (k_e , k_{de} , et k_{du} : des facteurs d'échelle) :
 - les gains d'entrées (k_e , k_{de}) réduisent les grandeurs physiques d'entrées dans une plage de variation appelée univers de discours.
 - Le choix adéquat de ces derniers permet de garantir la stabilité et l'amélioration des performances dynamiques et statiques ciblées du système à régler.
- Bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation, pour :
 - Le choix des variables linguistiques (**NG** : négatif grand ; **NM** : moyen négatif ; **NP** : négatif petit ; **EZ** : environ de zéro ; **PP** : positif petit ; **PM** : positif moyen ; **PG** : positif grand).
 - le choix de la forme des fonctions d'appartenance (formes triangulaire et trapézoïdale).
- Bloc de défuzzification de la variation de la commande. Lorsque la sortie floue est calculée, il faut la transformer en une valeur numérique (des grandeurs réelles). Il

existe plusieurs méthodes pour réaliser cette transformation. Dans cette étape, une valeur réelle de la variable de sortie est obtenue en employant la méthode du centre de gravité. [LAT 12, ROU 16, LOU 17]

Les ensembles flous des variables d'entrée, de sortie et leurs fonctions d'appartenance sont présentés comme suit :

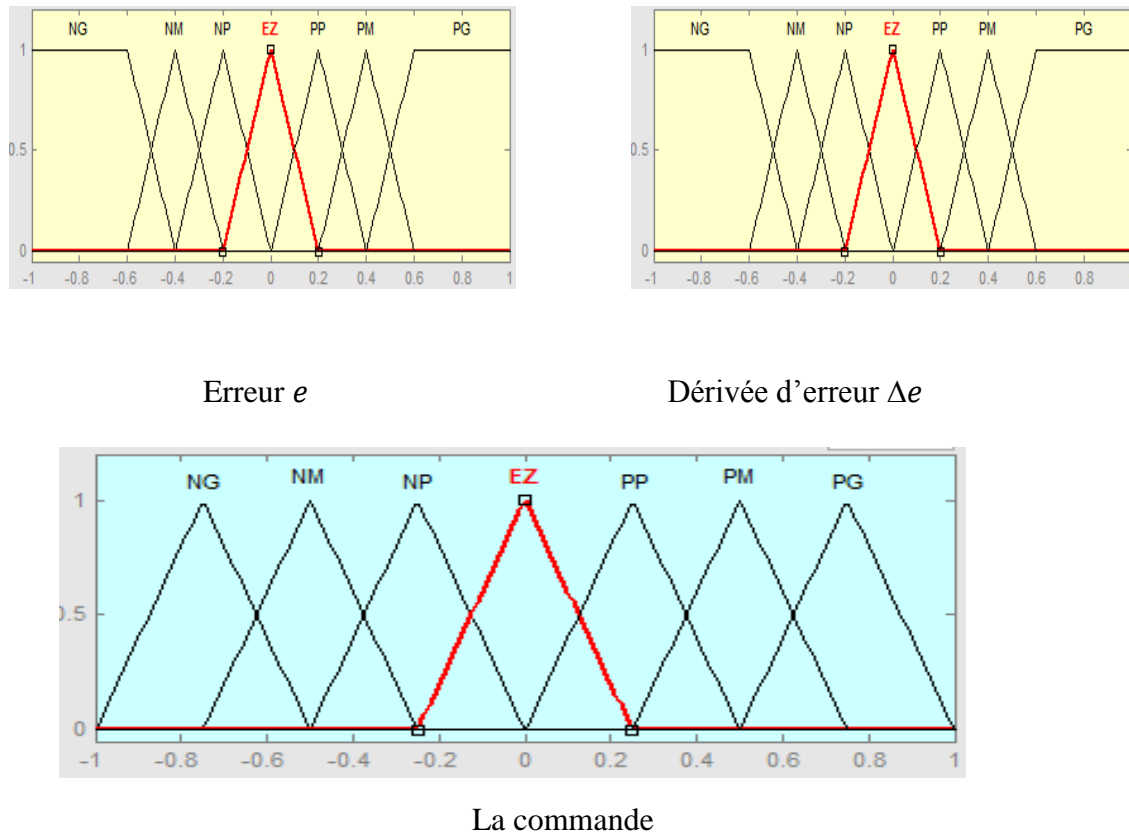


Figure -III.20-: Les fonctions d'appartenance utilisées par le contrôle.

➤ Table des règles :

Selon l'étude du comportement du système, nous pouvons établir les règles de commande, qui relient la sortie avec les entrées. Ces règles d'inférences permettant de déterminer la variable de sortie pour le réglage des courants regroupés, La méthode d'inférence utilisée est la méthode « min-max » de Mamdani

Comme nous l'avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou possède Sept ensembles flous, ce qui donne un ensemble de quarante-neuf règles. Celles-ci peuvent être représentées par la matrice d'inférence suivante :

Tableaux III.1 : Table des règles de décision pour le contrôleur des puissances.[ROU 16]

La commande		Erreur (e)						
		NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
Dérivé de l'erreur (Δe)	NG	NG	NG	NG	NG	EZ	EZ	EZ
	NM	NG	NG	NM	NM	PEZ	EZ	EZ
	NP	NG	NG	NP	NP	PP	PP	PM
	EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
	PG	NM	NP	NP	PP	PP	PG	PG
	PM	EZ	EZ	EZ	PM	PM	PG	PG
	PG	EZ	EZ	EZ	PG	PG	PG	PG

- D'un bloc intégrateur utilisé pour intégrer la variation de la commande numérique résultante et de son application au système que nous voulons commander.

III.2.8 RESULTATS DE SIMULATION

Les figures ci-dessous montrent les performances des commandes par logique floue des puissances active et réactive statorique appliquée à la MADA. Cet essai est réalisé dans les conditions suivantes :

Machine entraînée à une vitesse fixe $1440 \text{ tr}/\text{min}$

- entre les instants $t = 2\text{sett} = 4\text{s}$: échelon positif pour la puissance réactive (Q_{ref} passe de 0 à 1000 VAR).

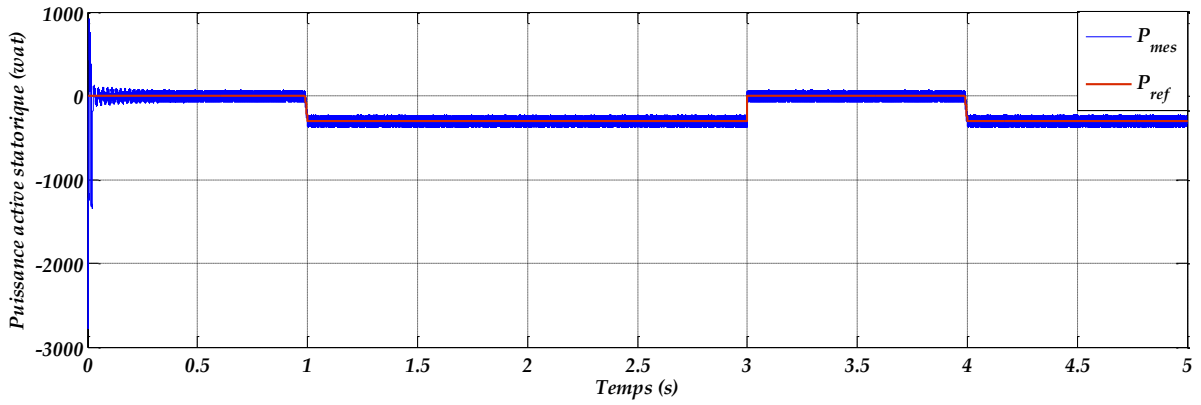


Figure -III.21-: Puissance active statorique

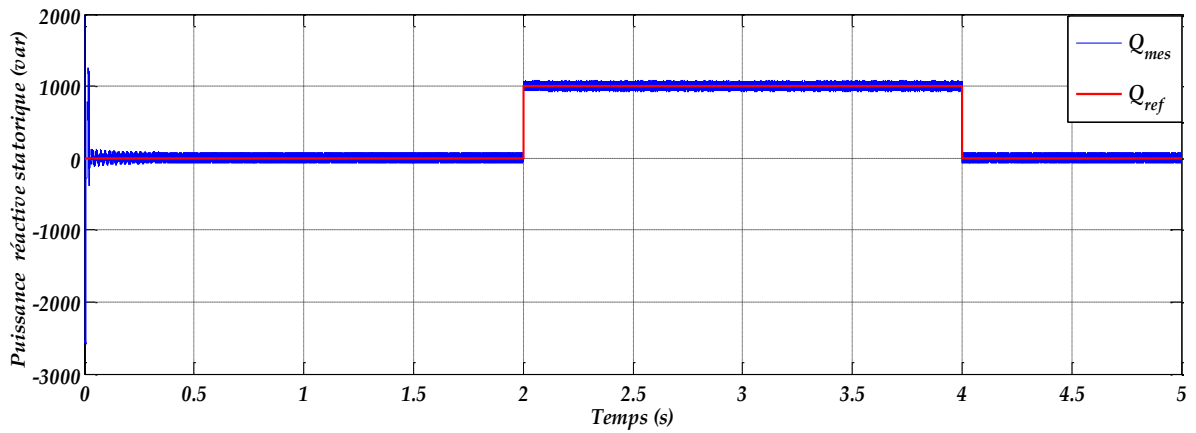


Figure -III.22-: Puissance réactive statorique

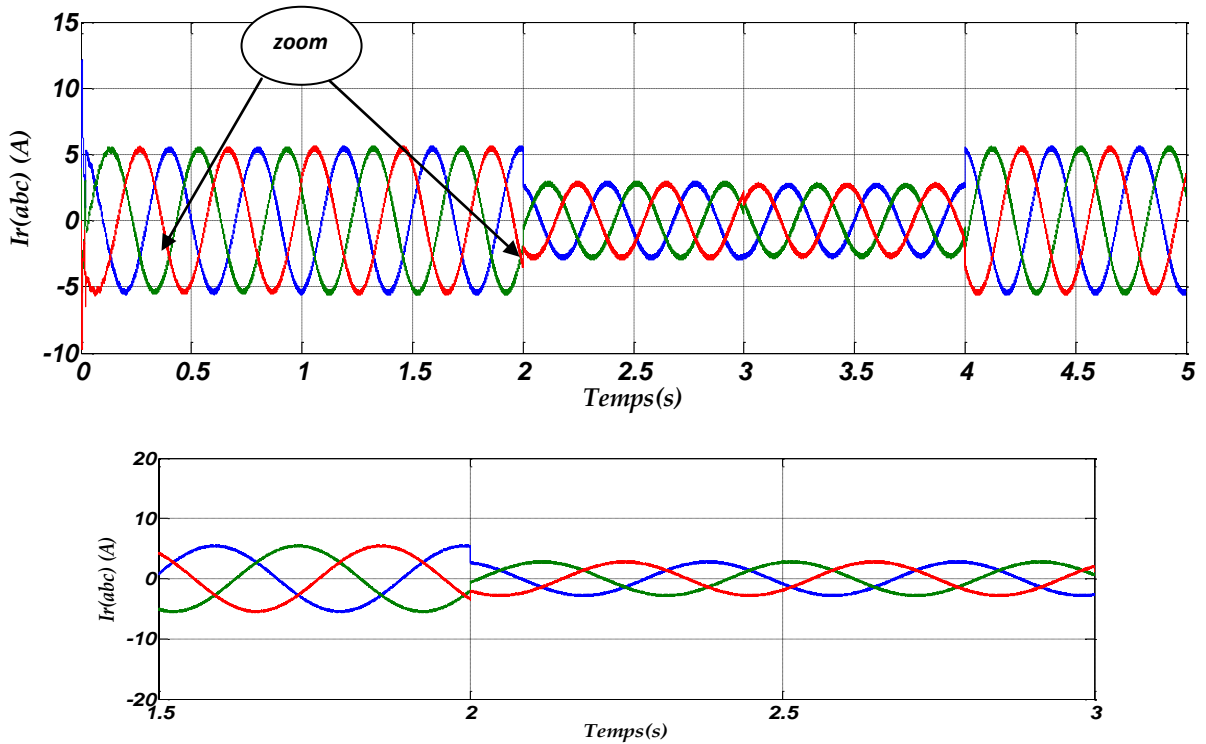


Figure -III.23-: Courant rotoriques $I_r(abc)$

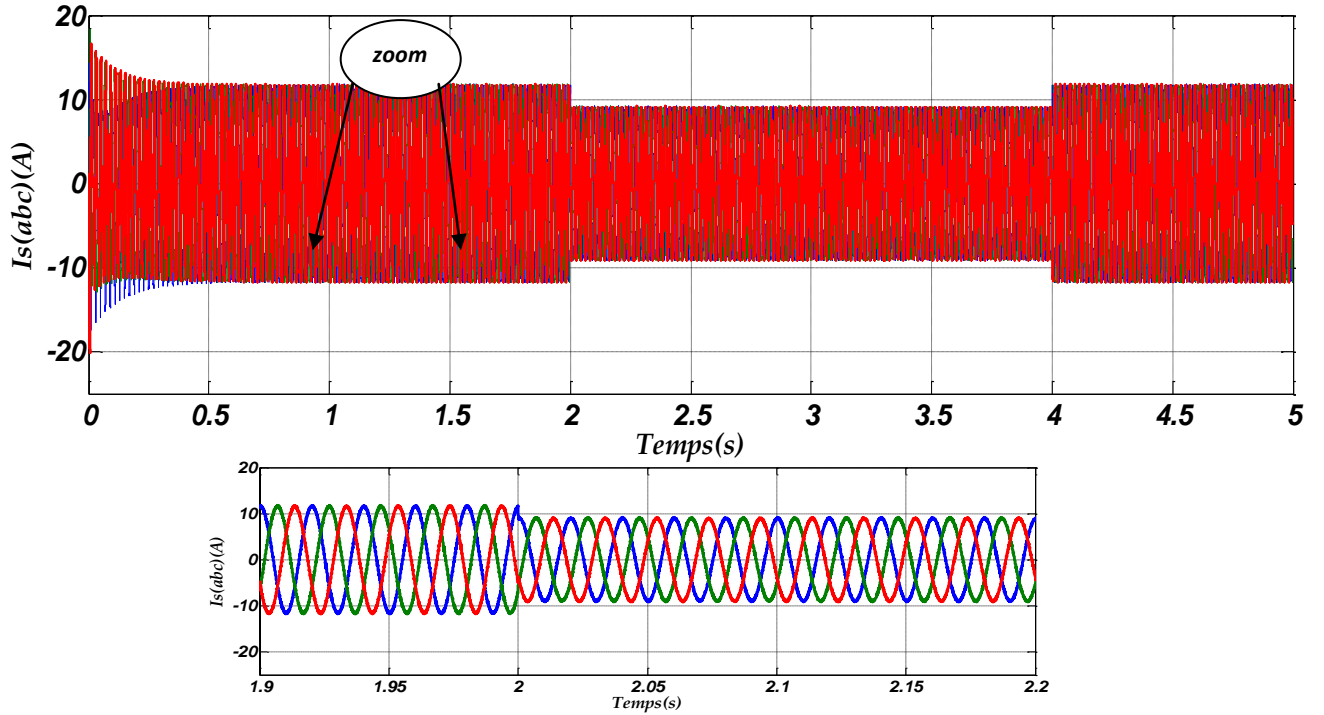


Figure -III.24-: Courant statoriques $I_s(abc)$

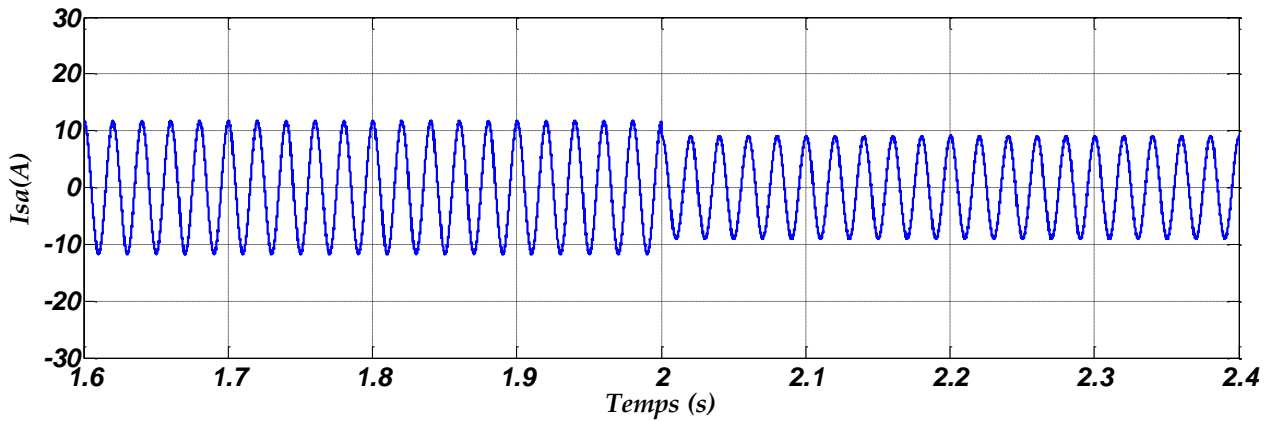


Figure -III.-25-: Courant de la source (phase a)

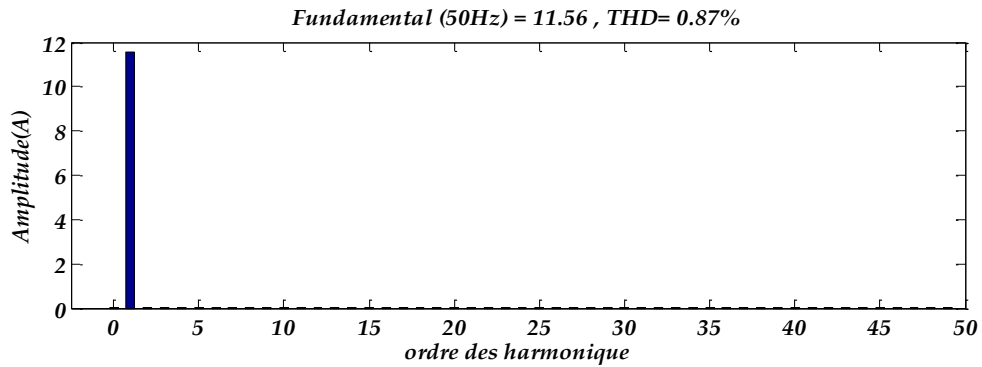


Figure -III.26-: Spectre harmonique du courant de la source

III.2.9 INTERPRÉTATION DES RESULTATS

D'après les résultats de simulation montrés sur les figures, il apparaît clairement que la nouvelle commande présente des performances positives par rapport aux commandes précédentes (vectorielle et mode glissant) à savoir :

Les erreurs de poursuite sont faibles avec des dépassements acceptables, les temps de réponses qui caractérisent le régime transitoire sont faibles.

D'après ces simulations, on peut remarquer la robustesse de la commande floue en termes de découplage et les bons résultats obtenus. Robustesse, simplicité, souplesse, d'une implémentation rapide et peu coûteuse.

III.2.10 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les deux techniques de commande différentes pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la MADA dans un système de production d'énergie éolienne.

En premier étape on a fait une étude sur la commande par mode glissant qui concerne à une définition, son principe de commande, et sa conception (choix de la surface de commutation et la loi de commande). D'un autre côté, on a présenté le phénomène de chattering qui résulte de la loi de commande, l'application de cette commande à flux orienté sur le système a permis de régler indépendamment les puissances produites par la MADA.

On peut conclure après les résultats de simulation que la technique du mode glissant présente de bonnes performances (dépassement, temps de réponse, et précision de poursuite) donc meilleure robustesse et une fiabilité élevée, enfin on remarque que qu'une insensibilité aux perturbations et aux incertitudes paramétriques.

Par la deuxième étape, nous avons présenté la technique de commande par la logique floue.

Où nous avons présenté les notions théoriques de la logique floue, les fonctions d'appartenance, les variables linguistiques, et les opérateurs employés dans ce type de logique; par la suite, nous avons présenté la structure de la commande floue composée des notions de fuzzification, d'inférences floues et de défuzzification pour synthétiser une commande floue à sept fonctions d'appartenance pour le réglage indépendant des puissances générées. Finalement on conclut la commande par la logique floue basée sur les régulateurs flous, cette méthode assure la robustesse en boucle fermée en tout instant.



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le but de ce travail était l'étude et simulation d'un système de production d'énergie éolienne. Nous avons modélisé la machine asynchrone double alimentation ensuite utiliser ces modèles pour élaborer trois stratégies de commande qui permettent l'amélioration de la qualité de production de l'énergie électrique.

Dans le premier chapitre, nous avons entamé ce travail par un rappel sur l'énergie éolienne et les systèmes utilisées pour produire cette énergie, Puis, on a présenté une description générale du système choisi pour notre étude.

Dans le deuxième chapitre, La génératrice asynchrone été destinée pour la production d'énergie dans le domaine éolien, il est donc très utile de raisonner en terme de puissance. On a mené une modélisation globale de ses éléments en mode connecté au réseau, à savoir la machine asynchrone double alimentation,

Sur ce modèle global, on a appliqué la commande vectorielle où on a exprimé les grandeurs statoriques de la MADA en fonction des grandeurs rotoriques pour assurer le pilotage de la machine par le rotor. On a appliqué cette technique de commande pour contrôler indépendamment l'échange des puissances statoriques produites vers le réseau, Les résultats de simulations numériques obtenus pendant l'application de cette commande sur le système montrent leur efficacité. Pour améliorer ces résultats, nous avons développés deux autres techniques de commandes qu'ont été présentées **dans le troisième chapitre**. L'une est la commande par le mode glissant, où nous avons présentés l'aspect théorique de cette commande pour l'appliquer en suit sur le système. L'autre c'est la commande par la logique floue, on a donné un rappel sur les notions de base de la théorie de la commande par la logique floue, puis on a appliqué cette commande sur la même structure de celle de la commande vectorielle avec un remplacement des régulateurs PI par des régulateurs flous. L'objectif de ces deux nouvelles techniques de commande est identique à celui des deux commandes précédentes ; c'est à dire de contrôler indépendamment les puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone découplée par orientation du flux. L'objectif de ces deux nouvelles techniques de commande est identique à celui de la commande précédente ; c'est à dire de contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la machine asynchrone découplée par orientation du flux. Les performances de ces deux dernières commandes ont été justifiées par la simulation.

SUGGESTIONS ET PERSPECTIVES

Suite à cette étude, quelques suggestions et perspectives peuvent être faites afin de pouvoir contribuer si possible à l'amélioration du fonctionnement de la machine considérée, à savoir :

- l'étude et la simulation de la turbine éolienne.
- la modélisation du convertisseur coté réseau (le redresseur).
- Reprendre l'étude présentée en changeant les onduleurs à deux niveaux par d'autres convertisseurs de puissance tels que, les onduleurs multi-niveaux et les convertisseurs matriciels afin d'augmenter le nombre de vecteurs tensions utilisés, ce qui minimise les fluctuations du couple électromagnétique.
- L'utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : la fusion des réseaux de neurones avec les techniques flous, la commande par mode glissant d'ordre supérieur, commande par la méthode du backstepping, commande hybride glissante-backstepping...etc.
- l'implémentation expérimentale des différents algorithmes de commandes proposés.
- l'utilisation des nouvelles techniques plus développées.



ANNEXE A

A.1 - Les paramètres de la machine à induction double alimentée:

Valeurs nominales:

Puissance nominale : $P_n = 4KW$.

Tension nominale : $v/U = 220/380V - 50Hz$.

Courant nominale : $i/I = 15/8.6A$.

La vitesse nominale : $\Omega_n = 1440^{tr}/min$

Nombre de paires de pôles : $P = 2$.

Paramètre :

Résistance du stator : $R_s = 1.2\Omega$

Résistance du rotor : $R_r = 1.8\Omega$

Inductance du stator : $L_s = 0.1554H$

Inductance du rotor : $L_r = 0.1568H$

Inductance Mutuelle : $M = 0.15H$.

Constantes mécaniques :

Moment d'inertie : $J = 0.2 Kg. m^2$

Coefficient de frottement : $f = 0.001 N.m.s/rd$

ANNEXE B

B.1-Type de régulateurs utilisés :

L'utilisation des régulateurs Proportionnels Intégrales (*PI*) est une condition Pour réaliser d'une commande vectorielle en puissances active et réactive, grâce aux ses avantages (rapidité, simplicité, autorisant la fréquence du MLI, etc...). Ils annulent l'écart entre les puissances actives et réactive de références et les puissances actives et réactive mesurées.

Dimensionnement du régulateur PI :

La figure (AN-1) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

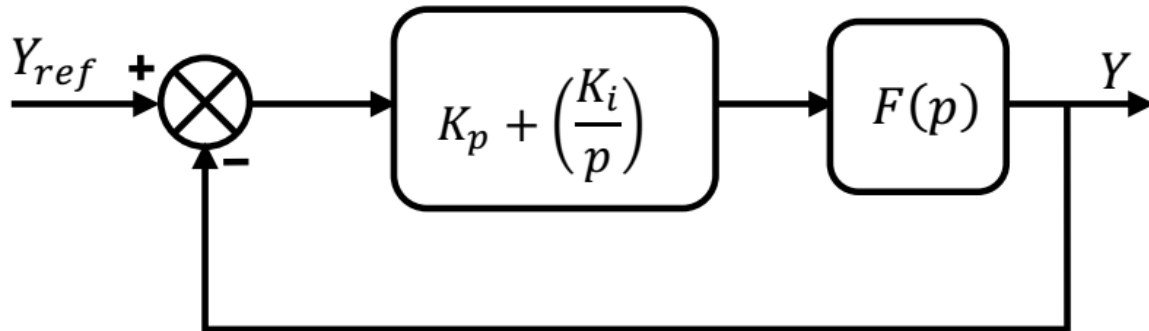


Figure AN-1 : Schéma bloc d'un système réglé par un PI.

La forme du correcteur est la suivante :

$$K_p + \frac{K_i}{p}$$

Avec :

K_p : est le gain proportionnel du régulateur ;

K_i : est le gain intégral du régulateur ;

Si on considère la fonction de transfert suivante :

$$F(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$$

En boucle ouverte on aura la fonction de transfert suivante :

$$F_{BO}(P) = \left(\frac{K_p + \frac{K_i}{P}}{1 + \tau p} \right) = \left(\frac{K(K_p P + K_i)}{P(1 + \tau p)} \right) = K K_i \frac{1 + \left(\frac{K_p P}{K_i} \right)}{P(1 + \tau p)}$$

On prend

$$\tau = \frac{K_p}{K_i}$$

Alors

$$F_{BO}(P) = \frac{K_i K}{P}$$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$F_{BF}(P) = \left(\frac{K_i K}{K K_i + P} \right) = \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{K_i K} P} \right)$$

Pour attendre 95% de la consigne, le temps de repense t_r du système bouclé vaut :

$$t_r = 3 \frac{1}{K_i K}$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau}$$

Alors :

$$t_r = 3 \frac{1}{K_p K}$$

D'où

$$K_p = 3 \frac{\tau}{t_r K}$$

$$K_i = \frac{3}{t_r K}$$

B.2 - Régulateur PI :

On a utilisé un régulateur PI avec :

$$K_p = 18.3808 ; k_i = 602.7319$$

B.3 - Gains du régulateur flou :

Les gains de cet régulateur flou sont obtenus après plusieurs simulations afin d'obtenir des résultats meilleurs, les valeurs suivantes sont alors adoptées :

$$K_e = 10^{-5}, K_{\Delta e} = 1/1000, K_{\Delta u} = 1000000$$



BIBLIOGRAPHIE

Références

[**ABD 11**] Rachid Abdessemed " modélisation et simulation des machines électriques" livre en électrotechnique, imprimé en France ; mai 2011.

[**ABD 16**]BOUMASSATA Abderraouf "modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne",thèse doctorat ; Université des frères mentouri de Constantine, 2016.

[**ABD**] ABDELLI Houaria "Commande par Mode de Glissement d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation" ; thèse de Magister, Université Mohamed Boudiaf d' Oran,

[**ADK 13**]ABAD Dalia Kamilia,AISSOU Amina ;" commande floue et adaptative floue de la puissance optimale d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur uneMADA", D'Ingénieur d'Etat en Automatique ; Ecole Nationale Polytechnique ; 2013.

[**AGA 07**]ABDEL GHANI AISSAOUI, HAMZA ABID, MOHAMED ABID, AHMED TAHOUR" commande par la logique floue et mode glissant d'une machine synchrone autopilotée", Université Sidi Bel Abbes ; Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., 52, 1, p. 89–103, Bucarest, 2007

[**AMI 08**] Hocine AMIMEUR "Contribution `a la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement" ; thèse de Magister, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2008.

[**AMS 13**]ABDOULAYB MAMADIE SYLLA," modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation ", mémoire présenté à L'université du Québec à Trois-Rivières, 2013

[**ARD 10**]ARDJOUN Sid Ahmed El Mahdi,"Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation",magister en Electrotechnique ;Université Djilali liables de Sidi-Bel-Abbès ; 2010

[**BAA 16**]Ben Amar Asma, " Etude de la commande d'un système éolien base sur une Gada", magister en électrotechnique, Université Hadj Lakhdar – Batna, 24/04/2016

[**BAS 17**]Basset Imtinane, Hasnaoui Hanane, "Etude d'une chaîne de conversion éolienne",thèse master,Université Larbi Tébessa – Tébessa 2016 / 2017

[**BEN 12**] Bennour Cherif "Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'un machine asynchrone à double alimentation" ; thèse de Magister,Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.

- [BOU 13]** BOUDJELLAL Mustapha, BOULTIFAT Chaouki Nacer Eddine "Diagnostic Et Commande Tolérante Aux Défauts De La MADA Intégrée Dans Une Chaîne Éolienne "diplôme d'ingénieur d'état en automatique ; Ecole Nationale Polytechnique ; 2013
- [BOU 14]** BOUMARAF Farid" Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", Doctorat En Sciences ; UNIVERSITE DE BATNA ; 2014
- [BOU 15]** BOUGUERRA Abderrahmen " Commande Tolérante aux Défauts d'un Appareil à Vol Vertical"; doctorat en sciences, université Mohamed Boudiaf de m'sila ,2015.
- [BOU 17]** Boufateh Messaoudi, « Utilisation du contrôle direct du flux statorique et du filtre de Kalman en vue du contrôle direct du couple d'un moteur asynchrone », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider De Biskra, 2007.
- [DOM 10]** Dominique Guérette "asservissement d'une éolienne a vitesse variable à pas fixe dans cadre d'un système jumelage éolien diesel à haut pénétration " l'université du Québec à Rimouski ,2010
- [FRA 08]** François BONNET "Contribution à l'Optimisation de la Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée en mode Moteur", thèse doctorat, l'université de Toulouse, 2008
- [HAM 08]** HAMZAOUI Ihssen, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur ", Mémoire de Magister ; Ecole Nationale Polytechnique, le 20/01/2008
- [IDJ 10]** Kassa IDJDARENE," Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes", Thèse de doctorat d'université de Lille 1 (France). 23/05/2010
- [KEL 11]** Kelkoul Bahia "Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation", Magister API ; Université de Tlemcen ; 2011
- [KEN 12]** KENDOULI FAIROUZ " centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique", Doctorat en Sciences ; Université Mentouri de Constantine ; 2012
- [KHE 15]** KHENGAOUI Nafissa, KHENGAOUI Nessrine ;"Commande Floue *Adaptive* d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation" master académique ; Université Kasdi Merbah Ouargla ; 2015
- [KTH 17]** K. Bedoud, T. BAHI and H. Merabet;"Power Control of DFIG Driven by Matrix Converter Under Super and Sub Synchronous Operation Modes", J. Automation & Systems Engineering 11-2 (2017): 141-151.

[LAT 12] Latreche Mohammed Tahar, « *Commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien* », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.

[LEB 16] LEBSIR Abdelkader " Performances Comparées de Machines Synchrones à Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à une Chaîne de Conversion d'Énergie Renouvelable" thèse Master ;Université des Frères Mentouri Constantine ; 2016

[LOU 17] LOUKAL Keltoum "Commande Robuste des Machines Asynchrones à Double Alimentation à Base des systèmes Flous Type Deux", thèse doctorat, Université Mohamed Boudiaf de m'sila ; 2017

[MAZ 13] MAZOUZ FARIDA, "Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents", l'université hadj Lakhdar Batna, Magister 27/06/2013

[MEK 14] Mekki Idriss "commande vectorielle de la machine asynchrone a double alimentation « MADA » à base d'un régulateur flou ", master en génie électrique ; UNIVERSITE DE M'SILA, 2013 / 2014

[MOH 14] Mohammed MALKI, Saïd ALI BELARBI, "Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret", Master en Electrotechnique ; Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 2014

[MOK 10] Mokeddem Diab, « Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas de setif, 2010

[MOU 15] MOUSSAOUI Taha Yacine, HADA Mounir " Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne" MASTER ACADEMIQUE, Université d'EL-Oued 2015

[MSB 15] Madjid Si Brahim "Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone", thèse doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.

[REZ 09] REZGUI SALAH EDDINE "Commande de machine électrique en environnement matlab /simulink et temps réel" ; thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine ,2009.

[REZ 15] REZGUI SALAH EDDINE " techniques de commande avancées de la machine asynchrone : étude comparative et applications" Doctorat En Sciences, université des frères mentouri Constantine, 2015

[ROU 16] ROUABHI RIYADH "Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée " ; thèse de doctorat, université Batna 2, 2016.

[SAL 07] G. SALLOUM, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation ». Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2007

- [SMA 11] M. Smaïl, and A. Benatiallah, "Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne équipée D'une machine asynchrone double alimentation", *Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 (2011)* 233 – 238.
- [TOU 10] TOUAL Belkacem, " Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable", Université de Batna, Magister ,7/10/2010
- [TOU 08] Toufouti Riad "contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone ", doctorat en sciences ; université mentouri Constantine ; 2008.
- [ZAR10]zarour laid "étude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-eolien hors réseau", doctorat en sciences ;université mentouri de Constantine ; 2010
- [ZOU 10]ZOUAOUY YAMINA " commande par mode glissant des courant statoriques de la machine asynchrone" ; thèse de Magister, université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [Wir06] Wira, P., Ould Abdeslam, D., Mercklé, J., Chapuis, Y.-A., and Flieller, D. «Stratégie neuromimétiques d'identification et de commande d'un filtre actif parallèle» *Revue des Systèmes, Série Revue Internationale de Génie Electrique (RS-RIGE)*, vol. 9, no. 1, pp 35-64, 2006.
- [Zid15] Zidane Abdallah et Zellouma Saïd « Compensation des harmoniques et de la puissance réactive à l'aide du filtre actif parallèle» mémoire de MASTER Université d'El-Oued, 2015.
- [Ama06] Amaia Lopez de Heredia Bermeo, «Commande avancées des systèmes dédiés a l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la moyenne tension», Thèse de Doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, (France) 2006.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : COMMANDE ELECTRIQUE

Proposé et dirigé par : DR. BERREBEH FOUADE & DR.ROUABHI RIYADH

Présenté par : MADJENAHNADIA & HAMOUDI CHAHIRA

Thème

Amélioration de la performance de la commande des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée

Résumé :

Dans ce mémoire, nous exposons une étude et la commande du système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation. Le premier chapitre présenté un état de l'art sur les éoliennes, aussi une représentation d'état du l'art du la MADA pour applique cette étude. La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation est détaillée dans le deuxième chapitre, après nous avons présenté la commande vectorielle pour contrôle les puissances active et réactive générée par la MADA. Dans le troisième chapitre, on a présenté deux techniques de commandes pour contrôler toujours les puissances produites par ce système. Enfin les résultats de simulation obtenus ont permis l'évaluation des performances de l'application chaque technique de commande sur la machine asynchrone à double alimentation dans le domaine éolien.

Mots clés:

Energie éolienne - MADA - Modélisation - Commande Vectorielle - Mode Glissant - Logique floue

ملخص:

في هذه المذكرة نعرض الدراسة والتحكم في نظام طاقة الرياح على أساس آلة مزدوجة غير متزامنة. الفصل الأول يعرض الحالة الوصفية لتوربينات الرياح أيضا عرض الحالة الوصفية للآلة المزدوجة الغير متزامنة لتطبيق هذه الدراسة. نموذج الآلة المزدوجة الغير المتزامنة تم تفصيله في الفصل الثاني. بعدها قدمنا تقنية التحكم الشعاعي من اجل مراقبة الطاقة الفعالة والطاقة الارتكاسية المنتجة من طرق الآلة المزدوجة الغير متزامنة. في الفصل الثالث، قدمنا خطتين للتحكم في الطاقة الفعالة والطاقة الارتكاسية التي ينتجها هذا النظام. وأخيراً، سمحت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها بتقييم أداء كل تطبيق على مكنة الطاقة المزدوجة غير المتزامنة في مجال طاقة الرياح.

الكلمات المفتاحية:

طاقة هوائية - مكنة لا تزامنية ثنائية التغذية - محاكاة - تحكم شعاعي - وضع الانزلاق - المنطق الغامض