

République algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université A. Mira-BEJAIA
Faculté de technologie
Département de génie électrique

Projet de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme de :

Master en Electrotechnique

Options :

Automatisme industrielle et électromécanique

Thème :

CONTROLE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE PAR LA LOGIQUE FLOUE

Présenté par :

M^r. KHERBOUCHE Nabil

M^r. TAMENDJARI Dalil

Encadré par :

D^r. H. AMIMEUR (promoteur)

D^r. F. HAMOUDI (Co-promoteur)

Promotion 2014/2015

Remerciements

Avant tout nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à monsieur AMIMEUR Hocine et HAMOUDI Farid pour leurs conseils précieux ainsi que pour la confiance et l'aide qu'ils nous ont accordé pour mener ce travail à terme.

Nous remercions également tous les membres du jury pour avoir bien voulu évalué et examiner notre travail.

Enfin, que tous ceux et celles qui nous ont aidé et soutenu durant tout notre parcours trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A ma très chère mère et mon très cher père pour leurs soutiens,
leurs patiences et leurs confiances.*

*Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour
tout ce qu'ils font pour moi*

« Que Dieu vous garde et vous bénisse ».

A mon frère Fayçal et ma sœur Lynda

A ma grand-mère baya

A toute la famille

*A tous mes amis, en particulier : Sofiane, Dalil, Halliche,
Lyamine et Mounir*

A mon amie Sedda

*A la mémoire de mon grand-père Belkaceme qui nous a quitté
et qui restera toujours dans mon cœur*

NABIL

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire à :

Ma très chère mère, pour sa confiance et son soutien inconditionnel.

Que Dieu, procure santé, et longue vie.

Mon père que dieu procure paix à son âme

A ma sœur, à ma famille.

A mes chers encadreur H. Amimeur.

Et F. Hamoudi.

A mes amis.

Dalil

Sommaire

Sommaire	I
Tables des figures	V
Liste des tableaux	VII
Nomenclature	VIII
Notation	XI
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le système éolien et la MAS	
I.1. Introduction	3
I.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne	3
I.3. Différents types d'éoliennes	3
I.3.1. Eoliennes à axe vertical	4
I.3.1.1. Eolienne à axe vertical de type Darrieus	4
I.3.1.2. Eolienne à axe vertical de type Savonius	5
I.3.2. Eoliennes à axe horizontal	5
I.4. Principales composantes d'éolienne	7
I.4.1. Mât	8
I.4.2. Rotor	8
I.4.3. Nacelle	8
I.4.3.1. Arbre primaire	9
I.4.3.2. Multiplicateur mécanique de vitesse	9
I.4.3.3. Génératrice	9
I.4.3.4. Système de refroidissement	9
I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	9
I.5.1. Avantages	9
I.5.2. Inconvénients	10
I.6.1. Définition de la MAS	10
I.7. Historique sur l'évolution des machines électriques	11
I.8. Constitution de la machine asynchrone	13
I.8.1. Stator	14
I.8.2. Rotor	15
I.8.3. Enroulements	16

I.8.4. Paliers.....	16
I.8.5. Carcasse et arbre mécanique	16
I.8.6. Flasques	16
I.8.7. Ventilateur.....	17
I.8.8. Boite à borne.....	17
I.9. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone et glissement	17
I.10. Cheminement de la puissance active	18
I.10.1. Rendement	19
I.10.2. Pertes Joule dans le rotor	19
I.10.3. Puissance mécanique	20
I.10.4. Couple du moteur	20
I.11. Avantages et inconvénients d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil	21
I.12. Conclusion	21
 Chapitre II: Modélisation d'ensemble turbine, machine	
II.1. Introduction	22
II.2. Description du système étudié	22
II.3. Modélisation du système éolien	22
II.3.1. Introduction.....	23
II.3.2. Modélisation et principe de contrôle de la turbine	23
II.4. Modélisation de l'onduleur de tension	26
II.4.1. Commande par modulation sinus-triangle	27
II.4.2. Résultats de simulation et interprétation	28
II.5. Modélisation de la machine asynchrone	29
II.5.1. Description de la MAS	30
II.5.2. Modèle triphasé de la MAS	30
II.5.3. Equations générales de la machine asynchrone	30
II.5.3.1. Equations électriques	31
II.5.3.2. Equations magnétiques.....	32
II.5.3.3. Equation mécanique	33
II.5.4. Modèle biphasé de la MAS.....	33
II.5.4.1. Transformation de Park.....	33
II.5.4.2. Modèle de la MAS selon le système d'axes généralisé (u,v).....	34
II.5.4.3. Choix du référentiel	35

II.5.4.4. Modèle biphasé de la MAS lié au champ tournant.....	36
II.5.4.5. Couple électromagnétique et puissance absorbée.....	37
II.5.5. Simulation et interprétation des résultats du comportement de la MAS alimentée par le réseau.....	38
II.6. Conclusion.....	41
Chapitre III: Commande par logique floue de la GAS	
III.1. Introduction	42
III.2. Principe de la logique floue.....	42
III.3. Théorie des ensembles flous	42
III.3.1. Différence entre ensemble flou et ensemble booléen.....	42
III.4. Sous-ensembles	43
III.5. Fonction d'appartenance	44
III.5.1. Définition.....	44
III.5.2. Différentes formes de fonction d'appartenance.....	45
III.5.3. Formulation mathématique des fonctions d'appartenance	46
III.5.3.1. Fonction triangulaire	47
III.5.3.2. Fonction trapézoïdale.....	47
III.6. Opération logistiques sur les sous-ensembles flous	47
III.7. Propriétés des opérations sur les sous-ensembles	48
III.8. Régulateur flou	49
III.9. Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue.....	50
III.10. Structure générale d'un système flou	50
III.11. Structure du régulateur par logique floue.....	51
III.11.1. Fuzzification des entrées	51
III.11.2. Base des règles et inférence floue.....	53
III.11.3. Défuzzification	54
III.11.4. Inférence	54
III.11.5. Traitement numérique de l'inférence.....	54
III.12. Orientation du flux rotorique.....	54
III.13. Association du FLC et IFOC de la GAS dédiée au système éolien	56
III.14. Contrôle de la liaison au réseau.....	57
III.15. Résultats et interprétations	60
III.17. Conclusion.....	66

Conclusion générale..	67
Annexe	XII
Bibliographie	XV

Table des figures

Fig.I.1	Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.	3
Fig.I.2	Eoliennes à axe vertical de type Darrieus	4
Fig.I.3	Eolienne Savonius sur une toiture	5
Fig.I.4	Schéma d'éoliennes a axe horizontal monopale, bipale	6
Fig.I.5	Schéma d'éoliennes à axes horizontal tripale	6
Fig.I.6	Eolienne amont et aval	7
Fig.I.7	Constitution d'une éolienne à axe horizontale	8
Fig.I.8	Machine asynchrone de 4.5MW, 45tr/min	12
Fig.I.9	Machine asynchrone à cage d'écureuil	13
Fig.I.10	Photos du stator d'une machine asynchrone	14
Fig.I.11	Rotors d'une MAS	15
Fig.I.12	Cheminement de la puissance active dans un moteur asynchrone triphasé...	19
Fig.II.1	Représentation schématique du système étudié	22
Fig.II.2	Coefficient de puissance (C_p) en fonction du rapport de vitesse (λ)	24
Fig.II.3	Loi de commande optimale d'une eolienne à vitesse variable	24
Fig.II.4	Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine	26
Fig.II.5	Onduleur triphasé à deux niveaux connecté à une charge	27
Fig.II.6	Comparaison entre le signal de la porteuse et la modulante	29
Fig.II.7	Signal de commande de sortie	29
Fig.II.8	Tension de la phase a statorique de l'onduleur M.L.I	30
Fig.II.9	Représentation schématique des enroulements de la MAS	30
Fig.II.10	Représentation de modèle généralisé de MAS selon les axes (u, v)	34
Fig.II.11	Evolution des caractéristiques de la MAS alimentée par source triphasé équilibrée, suivi de l'application des charges $C_r = 10$ N.m et -10 N.m respectivement entre les intervalles de temps $t=[0.75, 1.5]$ et $[2, 2.75]$	40
Fig.III.1	Représentation de « Grands » dans le cas booléen et flou	42
Fig.III.2	Représentation graphique de sous-ensemble dont les ensembles de référence sont infinis	44
Fig.III.3	Exemples des fonctions d'appartenance monotones décroissantes	45
Fig.III.4	Exemples des fonctions d'appartenance monotones croissantes.....	46

Fig.III.5	Exemples des fonctions d'appartenance	46
Fig.III.6	Fonctions d'appartenance triangulaire et trapézoïdale	46
Fig.III.7	Structure générale du régulateur flou	50
Fig.III.8	Structure d'un régulateur à logique floue (RLF)	51
Fig.III.9	Fuzzification continue avec sept fonctions d'appartenance	52
Fig.III.10	Schéma bloc de la FLC associée à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la GAS	57
Fig.III.11	Schéma bloc représentatif du contrôle de la liaison au réseau	59
Fig.III.12	Vitesse mécanique de GAS	62
Fig.III.13	Puissance mécanique de la turbine	62
Fig.III.14	Couple électromagnétique	62
Fig.III.15	Tension et courant statoriques	63
Fig.III.16	Zoom de la tension et du courant statorique	63
Fig.III.17	Courant rotorique	63
Fig.III.18	Tension et courant côté réseau	64
Fig.III.19	Zoom de la tension et du courant coté réseau	64
Fig.III.20	Puissance active et réactive coté réseau	64
Fig.III.21	Tension et courant avant le filtre	65
Fig.III.22	Zoom de la tension et du courant avant le filtre	65
Fig.III.23	Puissance active et réactive statoriques	65
Fig.III.24	Flux direct et quadratique rotoriques	66

Liste des tableaux

Tableau.III.1	Tableau de calcul de la variation de la commande Δu	53
---------------	---	----

Nomenclature

P_{vt}	Puissance du vent captée par les pales [W].
ρ	Densité de l'air [kg/m^3].
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne [m^2].
β	Angle de calage des pales [rd].
P_{aer}	Puissance aérodynamique [W].
λ	Rapport de vitesse.
λ_{opt}	Rapport optimale de vitesse.
Ω_t	Vitesse angulaire de la turbine [rd/s].
v_{vt}	Vitesse du vent [m/s].
R	Rayon des pales [m].
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne.
C_{aer}	Couple aérodynamique [N.m].
Ω_{mec}	Vitesse mécanique de rotation de la turbine [rd/s].
K	Rapport du multiplicateur de vitesse.
C_{aer}	Couple sur l'arbre lent [N.m].
C_{arb}	Couple sur l'arbre rapide [N.m].
$J_{turbine}$	Inertie de la turbine [$\text{kg}.\text{m}^2$].
J_g	Inertie de la génératrice [$\text{kg}.\text{m}^2$].
J	Inertie totale de l'éolienne [$\text{kg}.\text{m}^2$].
C_{visq}	Couple des frottements visqueux [N.m].
f	Coefficient de frottements visqueux [N.m.s].
C_{Pmax}	Coefficient de puissance maximale de l'éolienne.
P	Nombre de paire de pôles de la MAS.
p	Opérateur de Laplace.
N_s	Vitesse de synchronisme [tr/min].
g	Glissement.
θ_r	Position angulaire du rotor [rd].
R_s	Résistance d'une phase statorique de la MAS [Ω].
R_r	Résistance d'une phase rotorique de la MAS [Ω].
$[v_s], [v_r]$	Vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoques [V].

$[i_s], [i_r]$	Vecteur des courants des phases statoriques et rotoriques [A].
$[\Phi_s], [\Phi_r]$	Vecteurs des flux statoriques et rotoriques [Wb].
L_s, L_r	Inductances propres des phases statoriques et rotoriques [H].
M_{sr}, M_{rs}	Inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques [H].
C_{em}	Couple électromagnétique [N.m].
C_r	Couple résistant [N.m].
J	Moment d'inertie de la MAS [kg.m ²].
K_f	Coefficient de frottement [N.m.s].
ω_r	Pulsation des courants triphasés rotoriques [rd/s].
ω_{coor}	Vitesse angulaire de rotation du système d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé [rd/s].
ω_{gl}	Pulsation électrique fondamentale du glissement [rd/s].
$[P(\theta)]$	Matrice de Park.
$[P(\theta)]^{-1}$	Matrice inverse de Park.
v_{ds}, v_{qs}	Tensions statoriques directe et quadratique [V].
v_{dr}, v_{qr}	Tensions rotoriques directe et quadratique [V].
i_{ds}, i_{qs}	Courants statoriques direct et quadratique [A].
i_{dr}, i_{qr}	Courants rotoriques direct et quadratique [A].
Φ_{ds}, Φ_{qs}	Flux statoriques direct et quadratique [Wb].
Φ_{dr}, Φ_{qr}	Flux rotoriques direct et quadratique [Wb].
u_{dc}	Tension du bus continu [V].
*(exposant)	Grandeur de référence.
P_e	Puissance active de la MAS [W].
P_m	Puissance mécanique [W].
P_{jr}	Puissance Joule rotorique [W].
P_{js}	Puissance Joule statorique [W].
η	Rendement de la MAS.
R	Rayon de la turbine [m].
H	Hauteur du mât [m].
G	Gain de multiplicateur de vitesse.
N_p	Nombre de pales.
e	Erreur.

E	Tension continue [V].
N_r	Vitesse rotorique [tr/min].
K	Coefficient de forme du volant inertiel.
K_i	Gain intégral.
K_p	Gain proportionnel.

Notations

IFOC	Indirect Field Oriented Control (commande indirecte à flux orienté).
FLC	Régulation par logique floue
GAS	Génératrice asynchrone à cage d'écureuil.
MAS	Machine asynchrone.
M.L.I	Modulation par Largeur d'Impulsion.
PI	Proportionnel-Intégrale.
FTBO	Fonction de transfert boucle ouvert.
FTBF	Fonction de transfert boucle fermé.

Introduction générale

Introduction générale

La production de l'énergie électrique dans le monde génère diverses pollutions. Ainsi, les centrales thermiques (charbon, pétrole) et nucléaires sont responsables de rejets atmosphériques liés à la combustion d'énergies fossiles; cela fait appel aux énergies dites énergies renouvelables non polluantes (éoliennes, panneaux solaires, etc.) [1].

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et, plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur, son nom est tiré d'Eole le nom donné au lieu du vent dans la Grèce antique.

Aujourd'hui, de nombreux systèmes (éolien, etc.) utilisent les machines asynchrones pour assurer une conversion électromécanique réglable (position, vitesse, etc.). Les gammes de puissances sont très variées et les applications sont très diverses. D'autre part à la différence du moteur à courant continu où il suffit de faire varier sa tension, le moteur asynchrone nécessite l'utilisation du courant alternatif de fréquence variable. Afin de répondre à des critères de performances toujours croissants, des algorithmes de commande de plus en plus complexes, ont été développés. Les progrès des calculateurs numériques ont permis d'appliquer ces nouvelles stratégies dans l'industrie. De ce fait, la commande des machines électriques est devenue un élément très important dans les différents cycles de formation [2].

L'étude de la commande des convertisseurs associés à une machine nécessite des connaissances de base en électrotechnique, électronique de puissance et en automatique. Les développements dans chaque domaine ont contribué à l'amélioration des performances du système et avec les progrès de l'électronique de puissance, liés à l'apparition de composants interrupteurs rapides, ainsi que le développement des techniques de commande câblées ou programmées, il est possible à présent de choisir une structure de commande beaucoup plus évoluée. On cite à titre d'exemple la commande adaptative, la commande par mode glissement, la commande par la logique floue, etc., l'intérêt récent accordé à cette dernière est dû essentiellement à la disponibilité des interrupteurs à fréquences de commutation élevée et des microprocesseurs de plus en plus performants [2].

Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la commande par logique floue d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil dans un système éolien et qui fera l'objet de trois chapitres :

Le premier chapitre, sera consacré à la présentation du système éolien et sa constitution, ensuite on passera aux quelques généralités sur la machine asynchrone à cage, notamment sa constitution, le principe de fonctionnement, le cheminement de la puissance active, les avantages et les inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, on présentera la modélisation de la MAS et de son alimentation. Après une description de la machine, nous développons en premier lieu un modèle réel de la MAS, second lieu le modèle basé sur la transformation de Park. Nous présentons ensuite l'alimentation de la machine par onduleurs de tension à commande M.L.I. et nous commenterons enfin les résultats de simulation après illustration et visualisation de ces derniers.

Le dernier chapitre sera dédié à la commande par la logique floue. On présentera une brève description de la logique floue, puis son application pour la régulation de la vitesse de la génératrice asynchrone par des régulateurs flous à gain fixe, et nous allons enfin montrer les performances de ce type de réglage dans un système éolien connecté au réseau tout en exposant les résultats de simulation.

Le travail sera clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur le système éolien et la MAS

I.1. Introduction

Ce travail permet de présenter le contexte dans lequel s'insère notre étude qui est principalement divisée en deux grandes parties. La première partie s'étalera les notions élémentaires du fonctionnement d'un système éolien. La seconde présentera sur les dispositifs électrotechniques permettant de transformer l'énergie mécanique présente sur l'arbre de la turbine en énergie électrique.

Dans ce chapitre, nous allons définir le système éolien et la machine asynchrone à cage d'écuréuil.

I.2.Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un aérogénérateur, couramment appelé «éolienne », est un système qui capte l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) et la convertit en énergie électrique, d'une manière générale, un tel système de conversion est constitué d'une turbine (T), d'un multiplicateur de vitesse (M), d'une génératrice électrique (GE), généralement triphasée, et d'un circuit d'électronique de puissance (EP) suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique où alimente une charge autonome. Un schéma synoptique est présenté dans la fig.I.1[1].

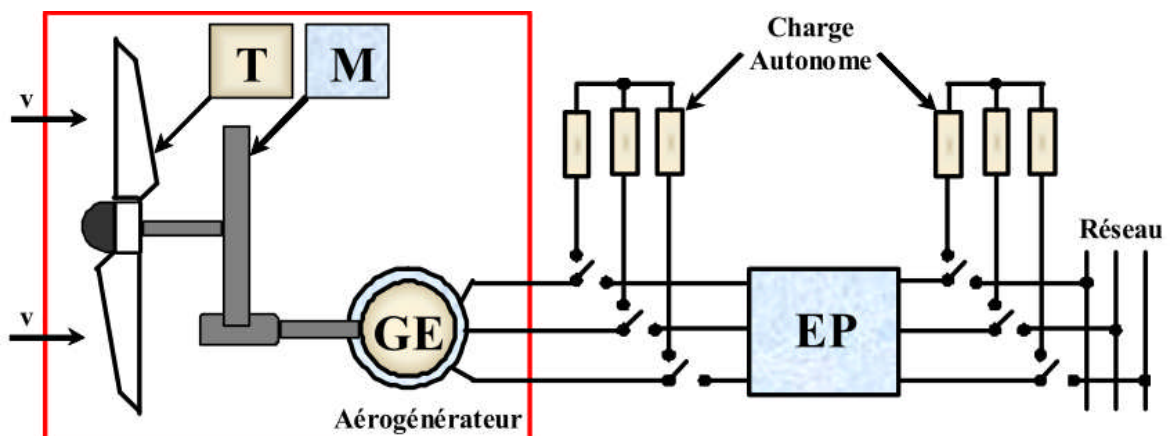


Fig.I.1.Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

I.3. Différents types d'éoliennes

Les éolienne peuvent être classées selon deux catégories : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

I.3.1. Eoliennes à axe vertical

Cette technologie d'éolienne est bien adaptée aux zones de vents perturbés par des habitations et le relief de la végétation. Elles peuvent aisément s'intégrer à l'architecture des bâtiments et sont d'une conception très simple (roue montée sur un axe qui entraîne directement une génératrice). Le principe aérodynamique permet de bons rendements pour des vitesses du vent très faible, voire inaudible. Par contre, elles ne conviennent pas pour la conversion de grandes puissances. Suite aux recommandations récentes en matière de production de l'énergie électrique par des sources renouvelables, ces structures connaissent un fort regain d'intérêt depuis une dizaine d'années pour des applications, à petite et moyenne puissance, en milieu urbain [1].

Il existe principalement technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) : les turbines Darrieus classiques (fig.I.2), à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius (fig.I.3). Dans tous les cas, les voilures sont à deux ou plusieurs pales [1].

I.3.1.1. Eolienne à axe vertical de type Darrieus

- **Avantages** [1]
 - ✓ Génératrice pouvant être placée au sol (selon les modèles) ;
 - ✓ Moins d'encombrement qu'une éolienne "conventionnelle" ;
 - ✓ Intégrable aux bâtiments.
- **Inconvénients** [1]
 - ✓ Démarrage difficile contrairement aux éoliennes de type Savonius ;
 - ✓ Faible rendement.



Fig.I.2.Eoliennes à axe vertical de type Darrieus.

I.3.1.2. Eolienne à axe vertical de type Savonius

➤ Avantages

- ✓ Faible encombrement ;
- ✓ Intégrable au bâtiment, esthétique ;
- ✓ Démarre à de faibles vitesses de vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus ;
- ✓ Système peu bruyant ;
- ✓ Pas de contraintes sur la direction du vent.

➤ Inconvénients

- ✓ Faible rendement ;
- ✓ Masse non négligeable.



Fig.I.3.Eolienne Savonius sur une toiture [1].

I.3.2.Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une, deux (fig.I.4) ou trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale (fig.I.5), car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical [4].

➤ Avantages [1]

- ✓ Coût limité ;
- ✓ Peu de contraintes mécaniques ;

- ✓ Grande efficacité.
- **Inconvénients** [1]
 - ✓ Bruit conséquent ;
 - ✓ Vibrations non négligeables ;
 - ✓ Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

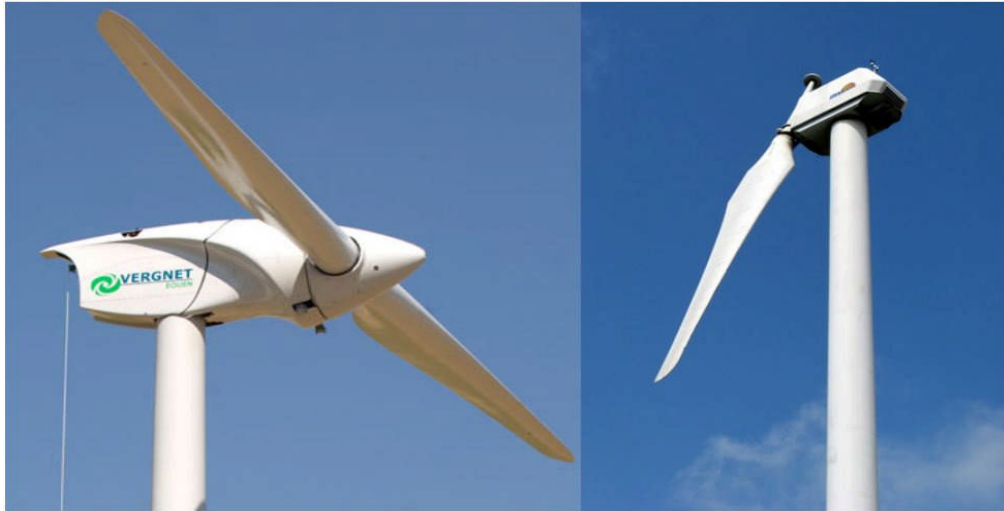


Fig.I.4. Images d'éoliennes à axe horizontal monopale, bipale.



Fig.I.5. Photo d'éoliennes à axe horizontal tripale.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (fig.I.6) :

- ❖ **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- ❖ **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable [4].

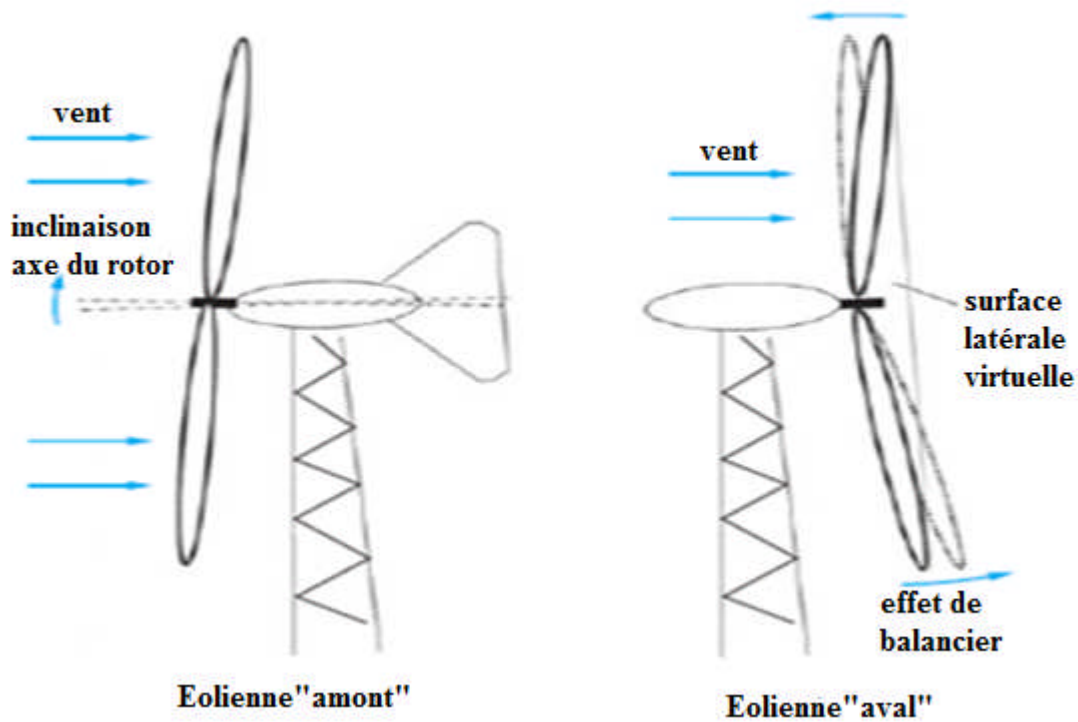


Fig.I.6.Eolienne amont et aval.

I.4.Principales composantes d'éolienne

Une centrale éolienne typique est composée de différents organes. La fig.I.7 donne un aperçu des principales parties dans le cas d'une éolienne à axe horizontal pour la production de masse. Dans ce qui suit, nous allons décrire brièvement chacune des diverses parties ainsi que ses fonctions [1].

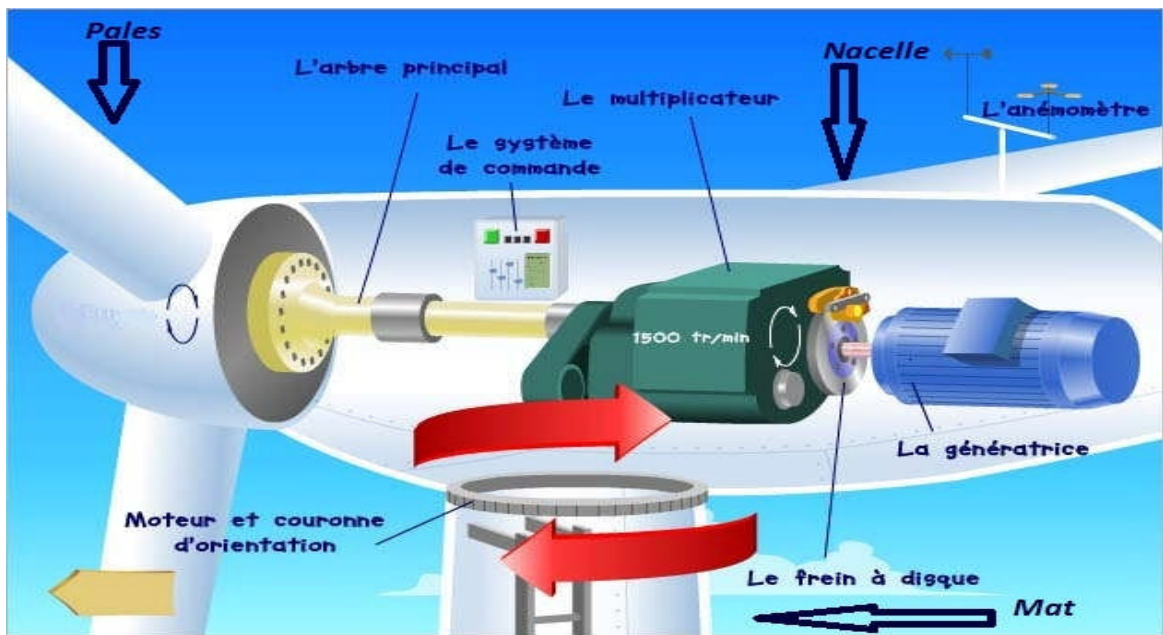


Fig.I.7. Constitution d'une éolienne à axe horizontal.

I.4.1. Mât

C'est une tour qui doit supporter l'ensemble hélice nacelle. Le mât doit avoir une hauteur suffisante pour que l'hélice soit bien exposée au vent.

I.4.2. Rotor

Le rotor est formé par des pales assemblées dans leur moyeu, ces pales construites par des différents matériaux composites tels la fibre de verre et la fibre de carbone, ils sont utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique [3].

I.4.3. Nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbre lent et rapide, roulement, multiplicateur, système de refroidissement, frein, système de commande, génératrice électrique et les systèmes d'orientation des pales [3].

I.4. 3.1.Arbre primaire

C'est l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses faibles, il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur mécanique de vitesse.

I.4.3.2. Multiplicateur mécanique de vitesse

La vitesse de la turbine est très classiquement inférieure à la vitesse de la génératrice. Par conséquent, dans un système conventionnel de conversion de l'énergie éolienne, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. Le multiplicateur relie donc l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. La présence de ces multiplicateurs induit des problèmes de vibrations, de bruits et de coûts de maintenance [1].

I.4.3.3. Génératrice

La fonction de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Dans notre cas c'est une génératrice asynchrone à cage d'écureuil [4].

I.4.3.4.Système de refroidissement

Le multiplicateur de vitesse, comme la génératrice, connaît un échauffement suite aux efforts mécaniques. Des refroidisseurs sont donc utilisés pour limiter les températures de ces organes. Ils se présentent sous la forme de ventilateurs, de radiateurs d'eau ou d'huile. Ce dernier est plutôt destiné pour le refroidissement des multiplicateurs [1].

I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.5.1. Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles ;
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat ;

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

I.5.2. Inconvénients

- La nature stochastique du vent à une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau ;
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés ;
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe ;
- Impact visuel : les éoliennes installées sur terre ont tendance à oublier cette idée reçue ;
- Les oiseaux : les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par le mauvais temps ou la nuit, les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celle-ci [4].

I.6.1 Définition de la MAS

La machine asynchrone est la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car elle offre le meilleur rapport qualité prix. Surtout depuis l'apparition des variateurs dans les années 1980 qui permettent de faire varier la fréquence de rotation du moteur dans une large gamme. Bien que réversible, la machine asynchrone est principalement utilisée en moteur.

La MAS se compose de deux parties principales :

- Le stator (la partie fixe) est relié au réseau électrique ;
- Le rotor est constitué de conducteurs en court-circuit qui sont parcourus par des courants induits par le champ magnétique créé par les courants statoriques.

Cette machine peut, selon sa construction, être reliée à un réseau monophasé ou polyphasé (généralement triphasé car c'est celui de la distribution).

I.7. Historique sur l'évolution des machines électriques [9]

- En 1821 l'Anglais Michael Faraday réalise le premier moteur électromagnétique. L'année suivante Peter Barlow lui adjoint une roue dentée ;
- En 1831 Faraday énonce les principes de l'induction électromagnétique. Dans la même période, le Russe Friedrich Emil Lenz et l'Américain Joseph Henry ont de leur côté effectué des travaux similaires contribuant ainsi à la découverte et à la compréhension de ce phénomène ;
- En 1832 Ampère en collaboration avec le constructeur français Hippolyte Pixii, ont réalisé la génératrice à courant continu ;
- En 1836 l'Anglais Hyde Clarke réalisait une machine dont la structure est inversée par rapport à celle de Pixii/Ampère qui améliorait le commutateur redresseur ;
- En 1842 Davidson utilise un des premiers moteurs tournant à réactance variable ;
- En 1848 apparaissaient les moteurs de Froment dont le couple atteignait 500N.m. Ces moteurs furent probablement les premiers à être utilisés pour les applications industrielles ;
- En 1860 la compagnie "l'Alliance" fabriquait industriellement des génératrices de structures complexes ;
- En 1865 l'Italien Antonio Pacinotti construit un prototype de machine à courant continu à induit en anneau et collecteur radial dont le fonctionnement est très amélioré ;
- En 1888 Nikola Tesla déposa une quantité de brevets pour tout son système Polyphasé (transformateurs, machines synchrones et asynchrones, etc.).

Dans ces années, une lutte entre Edison et Tesla est apparue au sujet du choix du courant continu ou alternatif pour la production, l'utilisation et donc la consommation de l'énergie électrique.

On remarque sur ce brève historique que les chercheurs ainsi que les ingénieurs n'ont pas cessé d'améliorer, de développer et d'inventer d'autres machines, qui ont satisfait les besoins de plusieurs applications industrielles et domestiques, ce qui a donné lieu à de nombreuses machines allant de "micro machines" aux "giga machines".

Les possibilités de conditionnement de l'énergie électrique, qu'offre l'électronique de puissance, ont non seulement permis de modifier considérablement les conditions de fonctionnement des machines conventionnelles à courant continu et à courant alternatif, mais elles ont également conduit au développement de nouvelles classes de machines comme par exemple les machines à courant continu du type brushless (sans balais),etc.

Ces machines peuvent être classées de plusieurs manières, par exemple :

- Par la façon d'alimenter ou de délivrer le courant/tension ;
- Par la construction [9].

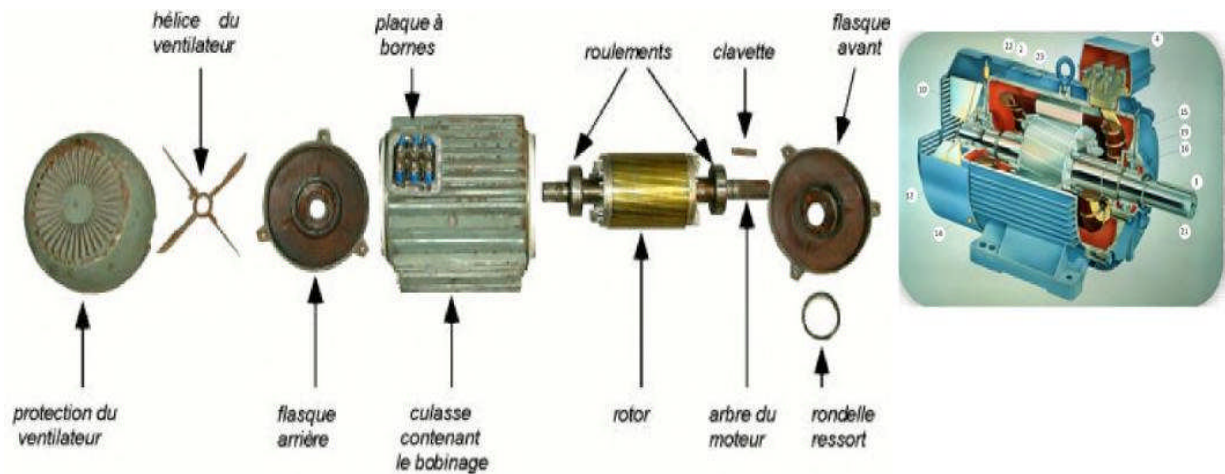
La fig.I.8 représente une machine asynchrone de puissance 4.5MW et de vitesse 45tr/min.



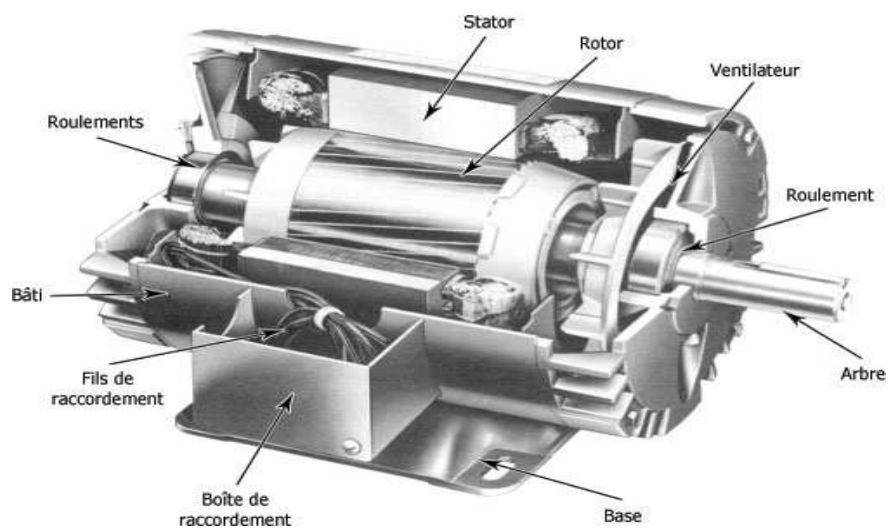
Fig.I.8. Machine asynchrone de 4.5MW, 45tr/min [9].

I.8.Constitution de la machine asynchrone

Les fig.I.9 et I.10, illustrent la vue générale d'une MAS tout en spécifiant ses différentes parties constitutives.



a). Constitution d'une machine asynchrone (vue générale) [9]



b). Coupe d'une MAS

Fig.I.9. Machine asynchrone à cage d'écureuil.

La machine asynchrone à cage d'écureuil est constituée des principaux éléments suivants :

- Stator ;
- Rotor ;
- Enroulements ;
- Paliers ;
- Carcasse et arbre mécanique ;
- Flasques ;
- Ventilateur ;
- Boite à borne.

I.8.1. Stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (fig.I.10). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer, le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique [2].



(a) *Stator sans bobinage*



(b) *Coupe d'un stator*

Fig.I.10. Photos du stator d'une machine asynchrone [7].

I.8.2. Rotor

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (fig.I.11). La cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas du rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre[9].

Les encoches rotoriques sont inclinées par rapport à l'axe longitudinal pour diminuer les harmoniques supérieurs d'espace et réduire la réactance liée à la position de la variation angulaire rotor / stator.



(a) Coupe d'un rotor à cage d'écureuil en aluminium



(b) Cage d'écureuil

Fig.I.11. Rotors d'une MAS [9].

I.8.3. Enroulements

Les trois bobines (un enroulement par phase) sont identiques, décalées l'une par rapport à l'autre de 120° et sont alimentées par des tensions triphasées. Elles produisent un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation. La vitesse au synchronisme s'exprime par la relation suivante :

$$N_s = \frac{60 \times f}{P} \quad (I.1)$$

Avec :

N_s : Vitesse synchrone (tr/min) ;

P : Nombre de paire de pôles ;

f : Fréquence du réseau (Hz) ;

I.8.4. Paliers

Les paliers permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil [6].

I.8.5. Carcasse et arbre mécanique

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc.), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régimes permanent et transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation [9].

I.8.6. Flasques

Elles servent à positionner les paliers par rapport à la carcasse et protègent les organes internes de la machine.

I.8.7. Ventilateur

Il facilite le refroidissement de la machine.

I.8.8. Boite à borne

Le stator porte à l'intérieur des encoches un bobinage formant P paires de pôles, dont l'une des extrémités aboutie à la source et l'autre à une plaque à bornes avec laquelle on choisit le type de couplage : étoile ou triangle

I.9. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone et glissement

Le rotor du MAS est constitué de conducteurs (des bobinages ou carrément des barres métalliques) disposés le long du rotor et court-circuités. Lorsque le champ tournant balaye ces conducteurs, il induit des courants qui entrent en interaction avec le champ et permettent à un couple moteur de se créer. Le rotor se met alors à tourner et se stabilise à une vitesse toujours légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme. Il est impossible pour le rotor de tourner à la vitesse de synchronisme puisqu'il serait alors baigné dans un champ fixe, et donc parcouru par un courant nul. En l'absence de courant, le couple serait nul, et la machine décélèrerait. La légère différence de vitesse justifie le terme de *glissement* du rotor par rapport au champ tournant.

Le *glissement* : grandeur caractéristique du fonctionnement du moteur asynchrone.

Lorsqu'on étudie le fonctionnement d'une machine asynchrone, on distingue deux vitesses de rotations :

- Vitesse de rotation du champ statorique, dite vitesse de synchronisme : N_s (tr/min) ou Ω_s (rad/s) ;
- Vitesse de rotation du rotor : N_r (tr/min) ou Ω_r (rad/s).

Le glissement (g), décrit l'écart relatif entre les deux vitesses. On retiendra :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (I.2)$$

C'est une grandeur sans dimension qui rentre en compte dans quasiment toutes les formules importantes du fonctionnement de la machine [13].

- Pour $g=0$: correspond à la vitesse du synchronisme ($N_r = N_s$), pour laquelle le couple est nul ;
- Pour $g=1$: correspond à une vitesse nulle ($N_r=0$), le rotor est bloqué ;
- Pour $g>0$: correspond au fonctionnement hypo synchrone ($N_r < N_s$), la machine est en fonctionnement moteur ;
- Pour $g<0$: correspond au fonctionnement hyper synchrone ($N_r > N_s$), la machine fonctionne en génératrice.

I.10. Cheminement de la puissance active

Les tensions et les courants d'un moteur asynchrone permettent de comprendre son fonctionnement détaillé. Cependant, on comprend mieux la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique en suivant le cheminement de la puissance active qu'il absorbe (fig.I.12). Ainsi, lorsqu'on alimente un moteur asynchrone, une partie P_{js} , de la puissance active P_e qu'il reçoit est dissipée par effet Joule dans les enroulements du stator, et une autre partie P_f est perdue dans le fer. Le reste de la puissance, P_r est transporté au rotor, par induction, à travers l'entrefer. Une troisième tranche P_{jr} se dissipe par effet Joule dans les enroulements du rotor, et le reste P_m est enfin disponible sous forme de puissance mécanique. Si l'on en soustrait les pertes par ventilation et friction P_v on obtient la puissance mécanique P_{mc} fournie à la charge. Afin d'exploiter ce diagramme de répartition des puissances actives pour les calculs, on donne ci-après trois relations importantes associées à ces diverses puissances [9].

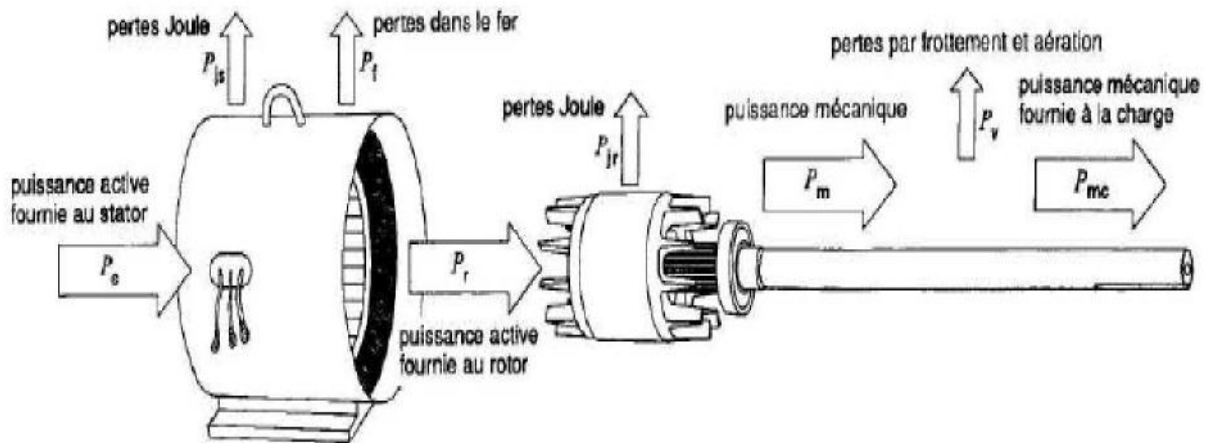


Fig.I.12. Cheminement de la puissance active dans un moteur asynchrone triphasé [8].

I.10.1. Rendement

Le rendement du moteur est, par définition, le rapport entre la puissance mécanique P_{mc} fournie à la charge et la puissance électrique P_e fournie au moteur, soit :

$$\eta = \frac{P_{mc}}{P_e} \quad (I.3)$$

Avec,

η : Rendement.

P_{mc} : Puissance mécanique fournie à la charge.

P_e : Puissance active fournie au stator.

I.10.2. Pertes Joule dans le rotor

La relation entre les pertes Joule P_{jr} dans le rotor et la puissance P_r qu'il reçoit est donnée par la formule :

$$P_{jr} = g \times P_r \quad (I.4)$$

I.10.3. Puissance mécanique

La puissance mécanique P_m , développée par le moteur est égale à la puissance transmise au rotor moins les pertes Joule dans celui-ci. Ainsi [9].

$$P_m = P_r - P_{jr} \quad (I.5)$$

$$P_m = P_r - g \times P_r \quad (I.6)$$

$$P_m = P_r \times (1 - g) \quad (I.7)$$

En raison des pertes (P_v) par frottement et aération, la puissance mécanique P_{mc} disponible pour entraîner la charge est légèrement inférieure à P_m . Dans la plupart des calculs pratiques, on incorpore les pertes P_v avec les pertes dans le fer (P_f). Dans ces circonstances, la puissance P_{mc} se confond avec la puissance P_m .

I.10.4. Couple du moteur

Le couple développé par le moteur est donné par l'expression :

$$C_m = \frac{9.55 \times P_r}{N_s} \quad (I.8)$$

Si on substitue dans cette équation les expressions du glissement et de la puissance mécanique, on obtient :

$$C_m = \frac{9.55 \times P_r (1 - g)}{N_s (1 - g)} = \frac{9.55 \times P_m}{N_r} \quad (I.9)$$

Donc :

$$C_m = \frac{9.55 \times P_m}{N_r} \quad (I.10)$$

Les équations (I.1 à I.10) sont valables pour toutes les vitesses, positives et négatives, y compris la vitesse nulle au moment du démarrage.

L'équation (I.4) nous indique que les pertes Joule dans le rotor croissent lorsque le glissement augmente. Ainsi, un rotor tournant à la moitié de la vitesse synchrone ($g = 0,5$) dissipe sous forme de chaleur 50 % de la puissance qu'il reçoit. Au moment du démarrage ($g = 1$), toute la puissance est dissipée en chaleur dans le rotor.

L'équation (I.8) nous révèle que le couple est d'autant plus grand que la puissance P_r fournie au rotor est plus élevée. Donc, pour obtenir un fort couple de démarrage, il faut fournir une grande puissance active au rotor. Toutefois, comme celle-ci est alors entièrement dissipée en chaleur, température du rotor monte très rapidement.

I.11. Avantages et inconvénients d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil

Le moteur à cage d'écureuil présente de nombreux avantages :

- ▲ Faible coût de construction ;
- ▲ Entretien réduit ;
- ▲ Robustesse.

Les performances obtenues pour les moteurs reliés directement au secteur sont souvent suffisantes grâce à quelques artifices de construction.

Le fait de ne pas pouvoir agir sur les grandeurs rotoriques peut être pallié si nécessaire par les performances des convertisseurs électroniques produisant l'alimentation du stator. Le rendement des moteurs asynchrones est toutefois moins élevé que celui des moteurs synchrones [9].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une brève description de chaînes de conversion d'énergie éolienne, où on a décrit de façon explicite les différents constitutifs et quelque notion du système éolien. Puis on a donné un aperçu des deux grandes familles d'éoliennes, à savoir celles à axe vertical et celles à axe horizontal avec leurs avantages et leurs inconvénients. Ensuite on a exposé quelques généralités sur la machine asynchrone à cage, sa constitution, son principe de fonctionnement et ses avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre, sera consacré à la modélisation et à la simulation de la MAS et de l'onduleur.

Chapitre II

Modélisation d'ensembles
turbine, onduleur et MAS

II.1. Introduction

L'étude d'un convertisseur électromécanique passe, en dehors des essais expérimentaux, par une modélisation du dispositif.

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

Ce chapitre sera donc consacré à la modélisation analytique du système éolien, ensuite de l'onduleur M.L.I, enfin à la machine asynchrone à cage d'écureuil. Le modèle sera établi en utilisant la transformation de Park, suivi par des interprétations des résultats de simulation.

II.2. Description du système étudié

Le système étudié est connecté au réseau, et se compose d'un aérogénérateur basé sur la machine asynchrone et de deux convertisseurs de puissance (un redresseur et un onduleur de tension qui sont à deux niveaux et contrôlés en MLI), du bus continu, du filtre d'entrée et du transformateur. Le schéma global du système est représenté par la fig.II.1.

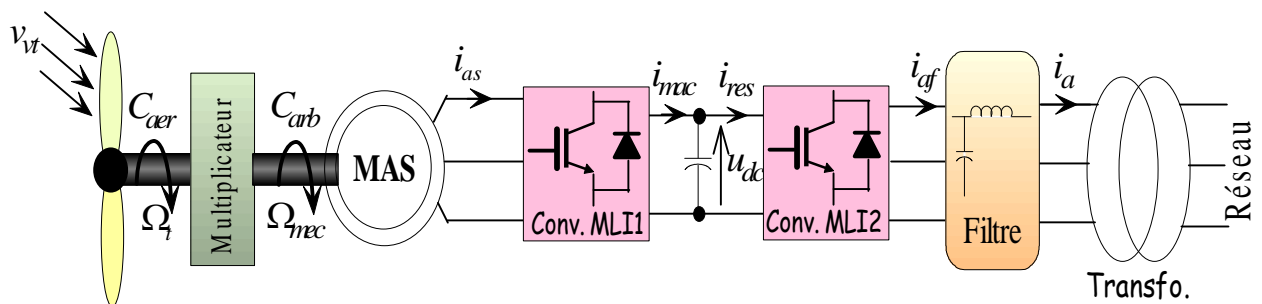


Fig.II.1.Représentation schématique du système étudié [12].

II.3. Modélisation du système éolien

II.3.1. Introduction

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatiques qui dépendent du site [4].

II.3.2. Modélisation et principe de contrôle de la turbine

Un aérogénérateur est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice électrique.

La puissance du vent captée par les pales est exprimée comme suit :

$$P_{vt} = \frac{\rho}{2} S v_{vt}^3 \quad (II.1)$$

Avec :

ρ : Densité de l'air 1.225 kg/m³ ;

S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne (m²) ;

v_{vt} : Vitesse du vent (m/s).

La puissance du vent disponible n'est en réalité jamais totalement captée par les pales, d'où la puissance aérodynamique est toujours inférieure à celle du vent ; dans le cas où l'angle de calage de pales (l'angle de calage est l'angle formé par la pale et le plan de rotation de la pale) est nul ($\beta = 0$), la puissance aérodynamique en fonction de la puissance du vent est obtenue selon le coefficient de puissance de l'éolienne :

$$P_{aer} = C_p(\lambda) P_{vt} \quad (II.2)$$

Le coefficient de puissance (C_p) est exprimé en fonction de la vitesse relative (λ) représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent, qui est donné par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{v_{vt}} \quad (II.3)$$

Où :

Ω_t : Vitesse angulaire de la turbine ;

R : Rayon des pales.

La variation du coefficient de puissance (C_p) en fonction du rapport de vitesse (λ) est représentée par la fig.II.2.

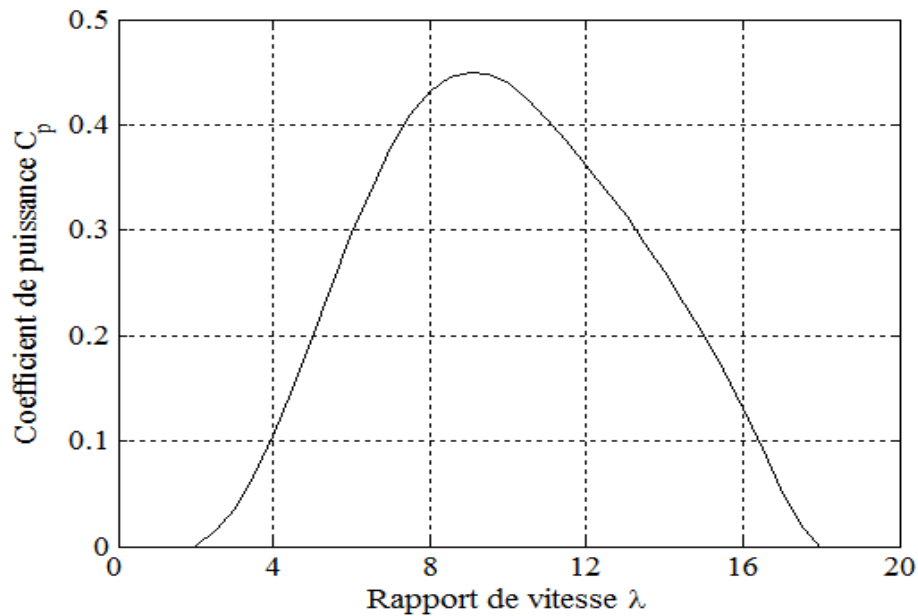


Fig.II.2. Coefficient de puissance (C_p) en fonction du rapport de vitesse (λ).

La caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones :

- ✚ La zone **I**, où aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse de démarrage V_{\min} ;
- ✚ La zone **II**, lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué ;
- ✚ La zone **III**, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{tu} fournie reste sensiblement égale à P_n ;
- ✚ La zone **IV**, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie [18].

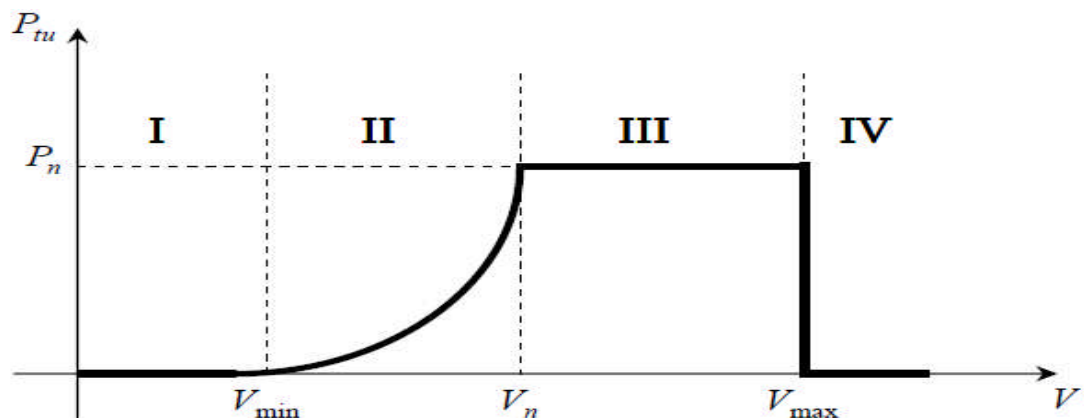


Fig.II.3. Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.

Le couple aérodynamique est donné par [7] :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = \frac{\rho}{2} C_p(\lambda) S v_{vt}^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (II.4)$$

La vitesse mécanique de rotation de la turbine (avant le multiplicateur) et celle de rotation de l'arbre de la génératrice électrique (après le multiplicateur) sont exprimées par l'expression suivante :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{K} \quad (II.5)$$

Avec :

K : Rapport du multiplicateur de vitesse.

Les couples sur l'arbre lent C_{aer} et sur l'arbre rapide C_{arb} sont exprimés par la relation suivante :

$$C_{arb} = \frac{C_{aer}}{K} \quad (II.6)$$

Les masses des différents éléments de la turbine sont représentées par l'inertie $J_{turbine}$. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice J_g , et on suppose que le multiplicateur de vitesse est idéal. L'inertie totale J est donnée par l'expression suivante [7] :

$$J = \frac{J_{turbine}}{K^2} + J_g \quad (II.7)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet d'établir l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum C = C_{mec} \quad (II.8)$$

Le couple mécanique est en fonction du couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, du couple des frottements visqueux C_{visq} , et du couple issu du multiplicateur C_{arb} .

$$C_{mec} = C_{arb} - C_{em} - C_{visq} \quad (II.9)$$

Le couple visqueux est donné par la formule suivante :

$$C_{visq} = f \Omega_{mec} \quad (II.10)$$

Où :

f : Coefficient de frottement visqueux.

Après quelques manipulations des équations (II.8) – (II.10), on aura :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} = C_{arb} - C_{em} \quad (II.11)$$

A partir des équations précédentes, on établit le schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine représenté par la fig.II.4.

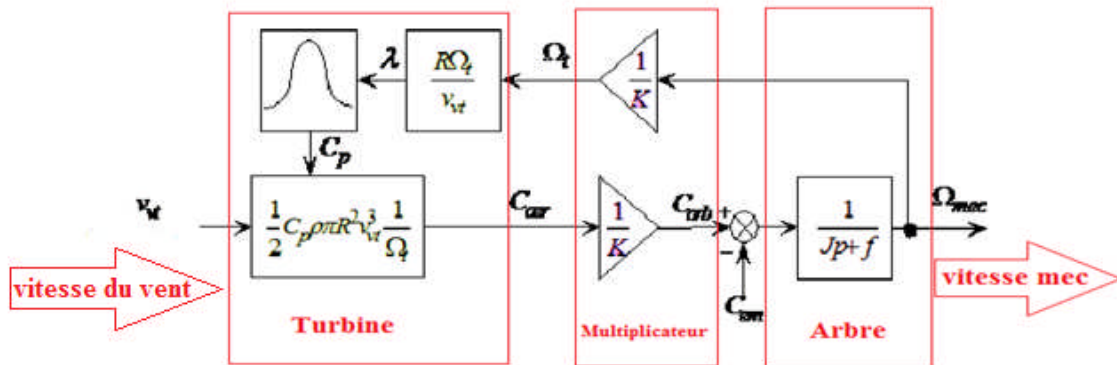


Fig.II.4.Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine.

Le schéma bloc nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée par action sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

La vitesse du vent est variable dans le temps, et pour garantir un captage maximal de l'énergie éolienne incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent. Ceci est réalisé en utilisant la technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT).

La vitesse mécanique optimale de la turbine (correspondant à λ_{opt} et $\beta = 0^\circ$, (fig. II.2)), on la détermine à partir de la vitesse du vent mesurée, et en la multipliant par la valeur du gain du multiplicateur on aura la vitesse mécanique du rotor de la MAS, qui sera utilisée comme grandeur de référence pour la régulation, qui élaborera à son tour la consigne de commande convenant au couple électromagnétique que devrait développer la machine pour passer à la vitesse optimale.

Le couple issu de la régulation de vitesse, sera utilisé comme grandeur de référence du couple dans la structure fonctionnelle du modèle de la turbine. Le schéma bloc fonctionnel avec la régulation de vitesse est donné par la fig.II.4.

En remplaçant le coefficient de puissance C_p par C_{pmax} et λ par λ_{opt} dans l'expression de la puissance aérodynamique(II.2), ou aura l'expression de la puissance mécanique suivante :

$$P_{mec} = -\frac{1}{2} C_{pmax} \frac{\rho \pi R^5}{K^3 \lambda_{opt}^3} \Omega_{mec}^3 \quad (II.12)$$

Le signe négatif (-) est utilisé pour dire que la puissance est générée.

II.4. Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur est un convertisseur statique du domaine de l'électronique de puissance. Il assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative. Il fonctionne en commutation forcée. Il est conçu généralement à base de transistor (IGBT, GTO, MOSFET, etc.). Sa commande peut être réalisée par une commande adjacente ou par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI).

L'onduleur est formé de trois branches indépendantes où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires (fig.II.5); chaque interrupteur est présenté comme une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logiques suivantes [11] :

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur } i \text{ est fermé } (K_i \text{ conduit, } \bar{K}_i \text{ bloqué)} \\ 0 & \text{l'interrupteur } i \text{ est ouvert } (K_i \text{ bloqué, } \bar{K}_i \text{ conduit)} \end{cases}$$

Avec :

$$f_i + \bar{f}_i = 1 \text{ et } i = 1 \dots 3.$$

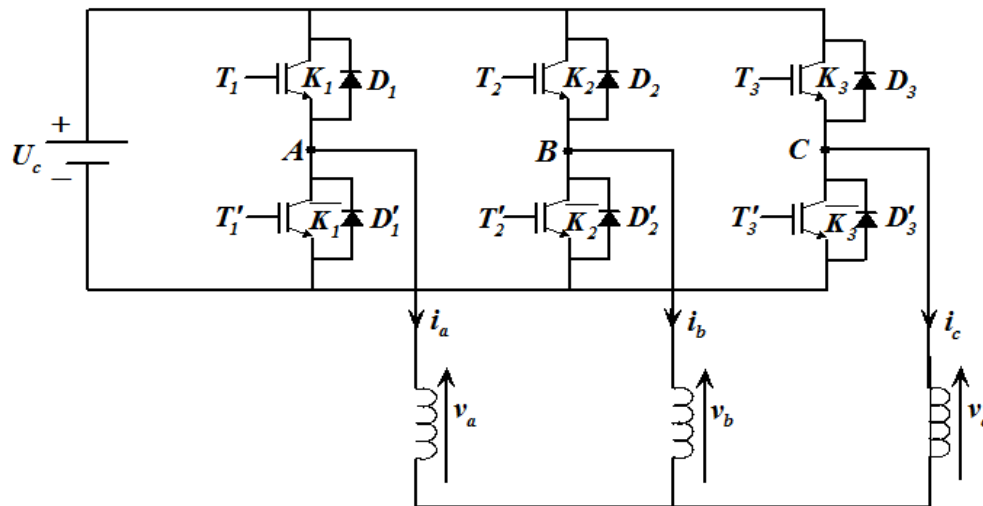


Fig.II.5. Onduleur triphasé à deux niveaux connecté à une charge.

Les tensions composées sont :

$$u_{AB} = v_a - v_b = U_c(f_1 - f_2) \quad (II.13)$$

$$u_{BC} = v_b - v_c = U_c(f_2 - f_3) \quad (II.14)$$

$$u_{CA} = v_c - v_a = U_c(f_3 - f_1) \quad (II.15)$$

Les tensions simple constituent un système équilibré tel que :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (II.16)$$

La résolution des équations (II.13) – (II.16) nous donne :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

II.4.1. Commande par modulation sinus-triangle

La M.L.I. sinus-triangle (Modulation de Largeur d'Impulsion ou PWM : Pulse Width Modulation) est réalisée par la comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire.

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [7].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$v_{aref} = \sqrt{2}v_{eff} \sin(2\pi ft) \quad (II.18)$$

$$v_{bref} = \sqrt{2}v_{eff} \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (II.19)$$

$$v_{cref} = \sqrt{2}v_{eff} \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (II.20)$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} = \left[4\left(\frac{t}{T_p}\right) - 1\right] & \text{si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pm} = \left[-4\left(\frac{t}{T_p}\right) + 3\right] & \text{si } T_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (II.21)$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- ❖ L'indice de modulation m égale au rapport de fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f) ;
- ❖ Le coefficient de réglage en tension r égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence ($V_m = \sqrt{2}v_{eff}$) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_{pm}).

II.4.2. Résultats de simulation et interprétation

La fig.II.8 représente le principe de la commande par M.L.I sinus-triangle dont $r = 0.8$ et $m = 21$ (les résultats sont obtenus sous Matlab/Simulink) qui est basé sur une comparaison, pour chaque bras, entre un signal de référence (la modulante) et un signal triangulaire « dents

de scie » de fréquence plus élevée (la porteuse) (fig.II.7). La fréquence de la porteuse définit la fréquence de découpage, et les points d'intersection entre la modulante et la porteuse (fig.II.6) correspondent aux instants de commutation aux moments desquels l'onduleur change d'état. Parmi les variantes de la modulation MLI intersective (modulation par porteuse), la plus populaire étant la modulation sinusoïdale qui est notre cas « Modulation sinus-triangle SPWM (Sinusoïdale PWM) ».

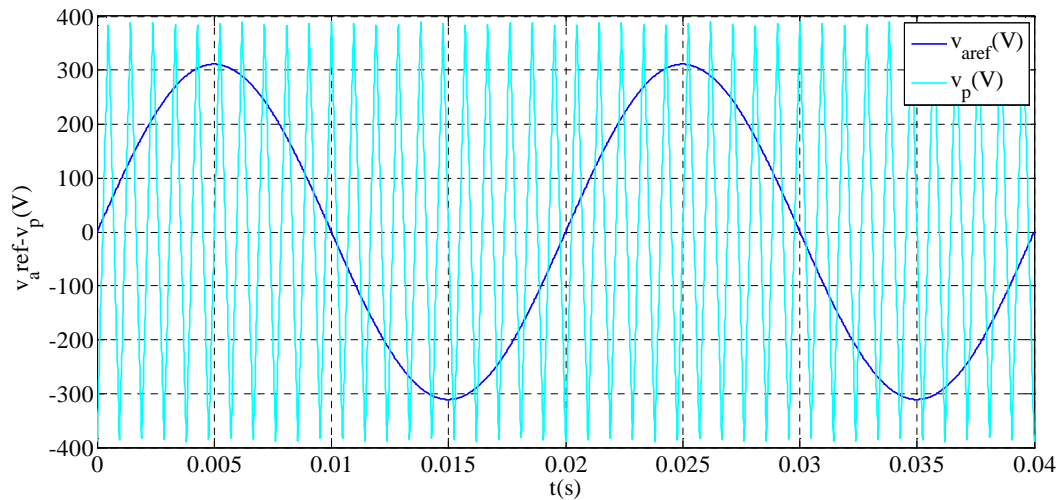


Fig.II.6. Comparaison entre le signal de la porteuse et la modulante.

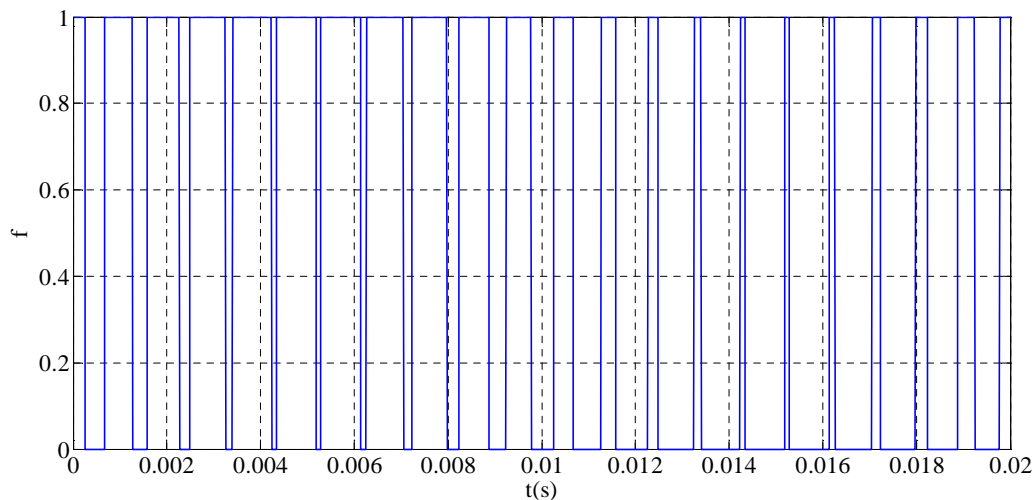


Fig.II.7. Signal de commande de sortie.

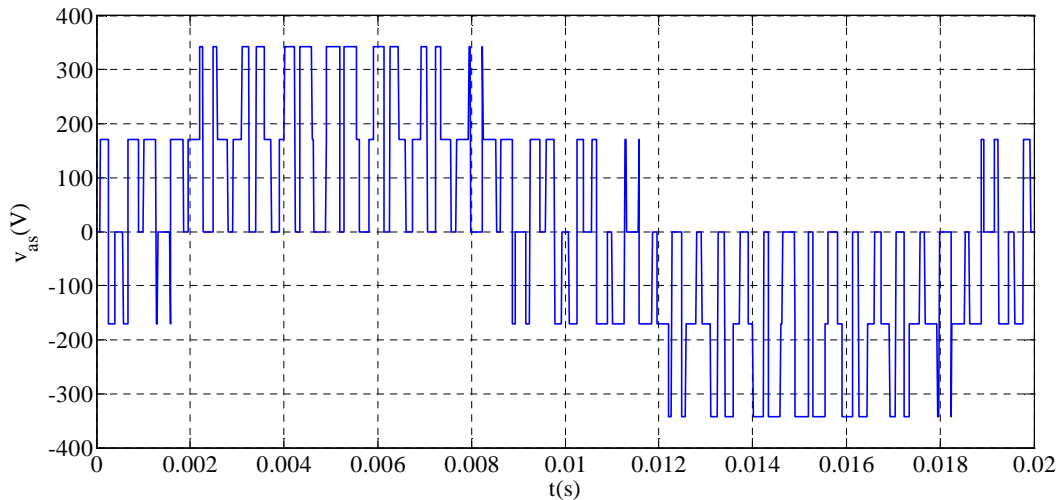


Fig.II.8.Tension de la phase *a* de l'onduleur M.L.I.

II.5.Modélisation de la machine asynchrone

II.5.1.Description de la MAS

La machine asynchrone se compose d'un stator qui est fixe et d'un rotor qui est mobile. Le stator est constitué de trois enroulements séparés d'un angle de 120°, les phases statoriques sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constante ou par un onduleur de tension ou de courant à fréquence et à amplitude réglables.

II.5.2.Modèle triphasé de la MAS

La fig.II.9 représente schématiquement les enroulements de la MAS, où l'angle θ_r représente la position du rotor (phase a_r) par rapport au stator (phase a_s).

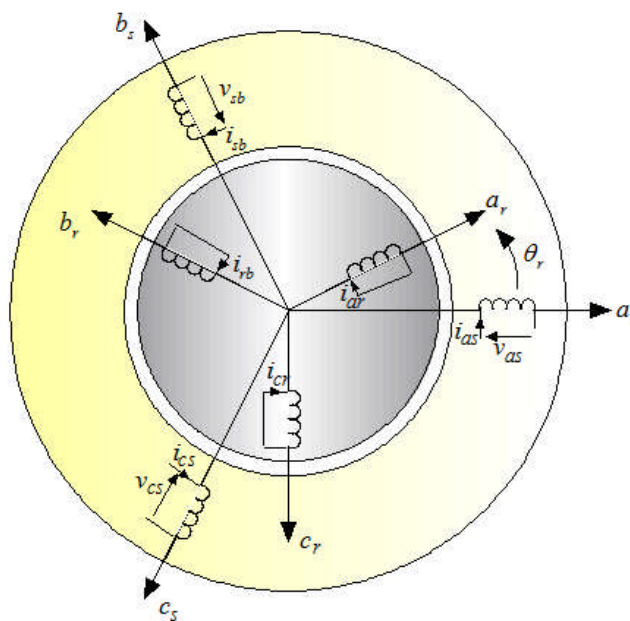


Fig.II.9. Représentation schématique des enroulements de la MAS.

II.5.3. Equations générales de la machine asynchrone

La modélisation de la machine asynchrone nécessite certaines hypothèses simplificatrices en vue d'obtenir des relations simples ; pour cela on supposera que les inductances propres sont constantes, les inductances mutuelles sont en fonction de la position de leurs axes magnétiques et les résistances rotorique sont constantes vis-à-vis de la vitesse de rotation [5].

II.5.3.1. Equations électriques

Les équations électriques des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques s'écrivent [4] :

❖ **Au stator**

$$\begin{cases} v_{as} = R_s i_{as} + \frac{d}{dt} \Phi_{as} \\ v_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d}{dt} \Phi_{bs} \\ v_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d}{dt} \Phi_{cs} \end{cases} \quad (II.22)$$

❖ **Au rotor**

$$\begin{cases} v_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d}{dt} \Phi_{ar} = 0 \\ v_{br} = R_r i_{br} + \frac{d}{dt} \Phi_{br} = 0 \\ v_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d}{dt} \Phi_{cr} = 0 \end{cases} \quad (II.23)$$

Soit on écriture matricielle :

$$\begin{cases} [v_S] = [R_S][i_S] + \frac{d}{dt} [\Phi_S] \\ [v_R] = [R_R][i_R] + \frac{d}{dt} [\Phi_R] \end{cases} \quad (II.24)$$

Avec :

$$[v_S] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; \quad [i_S] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; \quad [R_S] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad [\Phi_S] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$[v_R] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; \quad [i_R] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_R] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \quad [\Phi_R] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}$$

$[V_S], [V_R]$: Vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques ;

$[i_S], [i_R]$: Vecteurs des courants des phases statoriques et rotoriques ;

R_S, R_r : Résistance par phase statorique et rotorique ;

$[\Phi_S], [\Phi_R]$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques ;

II.5.3.2. Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants. L'écriture matricielle ci-dessous résume les équations des flux statoriques et rotoriques [4] [12] :

$$[\Phi_S] = [L_S][i_S] + [M_{sr}][i_R] \quad (II.25)$$

$$[\Phi_R] = [L_R][i_R] + [M_{rs}][i_S] \quad (II.26)$$

Avec :

$$[L_S] = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix} ; [M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & M_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & M_{cc} \end{bmatrix} ; [L_R] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ba} & M_{ca} \\ M_{ab} & M_{bb} & M_{cb} \\ M_{ac} & M_{bc} & M_{cc} \end{bmatrix}$$

L_S : Inductance propre d'une phase statorique (H) ;

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique (H) ;

$M_{sr} = M_{rs} = L_m$: Inductance mutuelle entre phase a_s du stator et phase a_r du rotor (H) ;

M_S : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques (H) ;

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques (H) ;

Pour l'ensemble stator et rotor, on écrira en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} [\Phi_S] \\ [\Phi_R] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_S] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_R] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_S] \\ [i_R] \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

La matrice d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est donnée par :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

M : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les axes en question coïncident.

II.5.3.3. Equation mécanique

C'est l'expression du mouvement (vitesse) de la machine, telle que :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} \quad (II.29)$$

Avec :

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{P} \quad (II.30)$$

Et

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (II.31)$$

J : Moment d'inertie du rotor (kg.m^2) ;

f : Coefficient de frottement visqueux (N.m.s) ;

C_{em} : Couple électromagnétique (N.m) ;

C_r : Couple résistant (charge) (N.m).

II.5.4. Modèle biphasé de la MAS

II.5.4.1. Transformation de Park

Pour simplifier la présentation des équations précédentes, on fait appel à la transformation de Park afin de passer d'un système triphasé d'axes (a,b,c) à un système équivalent biphasé d'axes (d, q) ou l'inverse, pour cela on applique les matrices de passage de Park directe et inverse suivantes [5][10] :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (II.32)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

Avec :

$\theta = \theta_s$: Pour les grandeurs statoriques ;

$\theta = \theta_r$: Pour les grandeurs rotoriques.

Et

$$\theta + \theta_r = \theta_s \quad (II.34)$$

Le changement de variables relatifs aux courants, aux tensions et aux flux est donné par les transformations suivantes :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad ; \quad \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix}.$$

X : tension, courant ou flux ;

o : indice de l'axe homopolaire.

II.5.4.2. Modèle de la MAS selon le système d'axes généralisé (u,v)

La fig.II.10 représente le modèle généralisé de la MAS selon le système d'axe (u, v) tournant à la vitesse ω_{coor} [4].

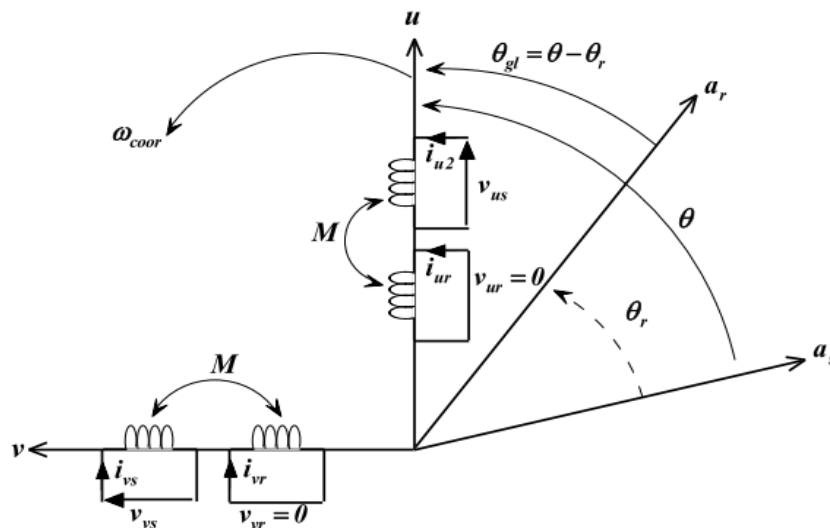


Fig.II.10. Représentation du modèle généralisé de la MAS selon les axes (u, v).

Avec :

$\theta = \int \omega_{\text{coor}} dt$: Angle entre les systèmes d'axes triphasé et biphasé ;

ω_{coor} : vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé par rapport au système d'axe triphasé.

II.5.4.2.1. Système d'équations électriques

$$\begin{cases} v_{us} = R_s i_{us} + \frac{d}{dt} \varphi_{us} - \omega_{\text{coor}} \varphi_{vs} \\ v_{vs} = R_s i_{vs} + \frac{d}{dt} \varphi_{vs} + \omega_{\text{coor}} \varphi_{us} \\ v_{ur} = R_r i_{ur} + \frac{d}{dt} \varphi_{ur} - (\omega_{\text{coor}} - \omega_r) \varphi_{vr} \\ v_{vr} = R_r i_{vr} + \frac{d}{dt} \varphi_{vr} + (\omega_{\text{coor}} - \omega_r) \varphi_{ur} \end{cases} \quad (II.35)$$

II.5.4.2.2. Système d'équations magnétiques

$$\begin{cases} \varphi_{us} = L_s i_{us} + L_m i_{ur} \\ \varphi_{vs} = L_s i_{vs} + L_m i_{vr} \\ \varphi_{ur} = L_r i_{ur} + L_m i_{us} \\ \varphi_{vr} = L_r i_{vr} + L_m i_{vs} \end{cases} \quad (II.36)$$

II.5.4.3. Choix du référentiel

II.5.4.3.1. Référentiel lié au stator (α, β)

Ce système est immobile par rapport au stator, alors

$$\omega_{\text{coor}} = 0 \Rightarrow \theta = 0$$

II.5.4.3.2. Référentiel lié au rotor (x, y)

Ce système est immobile par rapport au rotor, alors

$$\omega_{\text{coor}} = \omega_r \Rightarrow \theta = \int \omega_r dt$$

II.5.4.3.3. Référentiel du champ tournant (d, q)

Ce système est immobile par rapport au champ électromagnétique créée par les enroulements statoriques, donc :

$$\omega_{\text{coor}} = \omega_s \Rightarrow \theta = \int \omega_s dt$$

II.5.4.4. Modèle biphasé de la MAS lié au champ tournant

II.5.4.4.1. Equations électriques

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (II.37)$$

II.5.4.4.2. Equations magnétiques

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (II.38)$$

En introduisant le système d'équations (II.38) dans (II.37), et en posant $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$ et

$p = \frac{d}{dt}$, on aura :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s p i_{ds} + L_m p i_{dr} - \omega_s (L_s i_{qs} + L_m i_{qr}) \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s p i_{qs} + L_m p i_{qr} + \omega_s (L_s i_{ds} + L_m i_{dr}) \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r p i_{dr} + L_m p i_{ds} - \omega_{gl} (L_r i_{qr} + L_m i_{qs}) \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r p i_{qr} + L_m p i_{qs} + \omega_{gl} (L_r i_{dr} + L_m i_{ds}) \end{cases} \quad (II.39)$$

L'écriture sous forme matricielle est :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & -\omega_{gl} L_m & R_r & -\omega_{gl} L_r \\ \omega_{gl} L_m & 0 & \omega_{gl} L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} - \omega_{gl} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \\ -L_m & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

En mettant le système (II.39) sous forme d'équation d'état, on trouve :

$$[I] = [L]^{-1} \{ [B][U] - \omega_{gl}[C][I] - [D][I] \} \quad (II.40)$$

Tel que :

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; [U] = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix}; [I] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}; [I] = p[I]; [L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s L_m & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_r \\ L_m & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

II.5.4.5. Couple électromagnétique et puissance absorbée

L'expression du couple est donnée par la forme suivante :

$$C_{em} = p(\Phi_{ds}i_{qs} - \Phi_{qs}i_{ds}) \quad (II.42)$$

En remplaçant les flux statoriques (Φ_{ds} et Φ_{qs}) donnés par la relation (II.38) dans la relation (II.42), on obtient :

$$C_{em} = pL_m(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \quad (II.43)$$

L'expression du couple électromagnétique en fonction des courants statoriques et des flux rotoriques est exprimée par :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr}i_{qs} - \Phi_{qr}i_{ds}) \quad (II.44)$$

Les puissances active et réactive statoriques sont données par :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} \\ Q_s = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \end{cases} \quad (II.45)$$

II.5.5. Simulation et interprétation des résultats du comportement de la MAS alimentée par le réseau

Pour la simulation, il suffit d'implanter le modèle électromagnétique de la MAS sous MATLAB/SIMULINK.

- La MAS est alimentée par une source triphasée sinusoïdale et équilibrée ;
- Les tensions du rotor sont nulles car ce dernier est en court-circuit, (rotor à cage).

La fig.II.11 représente l'évolution des caractéristiques de la MAS alimenté directement par une source triphasée sinusoïdale et équilibrée, suivi de l'application de deux échelons de la charge $C_r = 10 \text{ N.m}$ entre l'intervalle de temps $t = [0.75, 1.5] \text{ s}$, et $C_r = -10 \text{ N.m}$ entre $t = [2, 2.75] \text{ s}$.

Cette dernière montre que :

Au démarrage et pendant le régime transitoire, la vitesse (Ω_r)(voir fig.II.11.a) augmente et évolue d'une manière linéaire, et elle atteint 312.23rd/s (proche de celle de synchronisme) à $t=0.283 \text{s}$, et elle reste constante jusqu'à l'application du couple résistant, qui va la diminuer à 295rd/s , donc c'est le fonctionnement moteur, et à l'application du deuxième couple résistant à $t=2 \text{s}$, la vitesse augmente et elle atteint 325.2rd/s (supérieur à celle de synchronisme), c'est le fonctionnement génératrice, et cette dernière revient à 312.23rd/s à $t=2.79 \text{s}$.

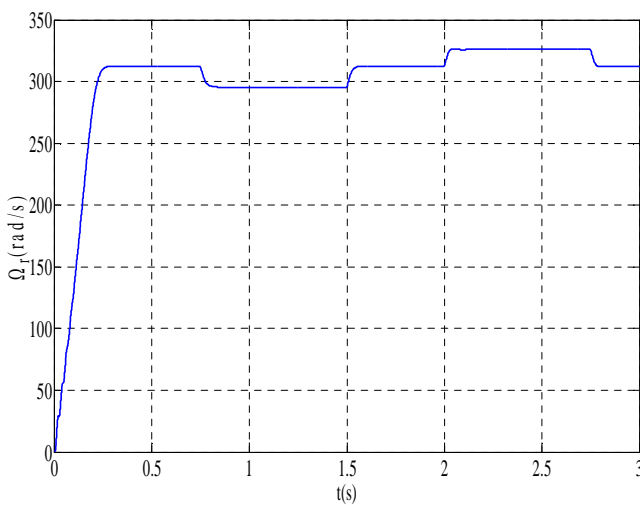
Le couple électromagnétique (C_{em}), au début atteint sa valeur maximale de 45.23 N.m et présente des oscillations qui disparaissent au bout de 0.14s où il rejoint 26 N.m , puis il diminue d'une façon linéaire et se stabilise à sa valeur minimale de 1.264 N.m qui est due aux frottements, et il reste constant jusqu'à l'application du couple résistant, qui va l'augmenter à 11.194 N.m (légèrement supérieur au couple de charge), et ensuite à l'application du deuxième couple résistant, qui va le diminuer à -8.68 N.m .

Le courant statorique (i_{as}) présente des dépassements excessifs induisant de fort appel de courant max est de 27.063 A , qui est d'environ 7 fois le courant nominal, mais qui disparaît au bout de quelques alternances pour donner lieu à des formes sinusoïdales d'amplitude constante (3.8 A) jusqu'à l'application du couple résistant, qui va l'augmenter à (5.68 A , valeur max), ensuite il revient au régime nominale, et à l'application du deuxième couple résistant, le courant augmente une deuxième fois à (4.9 A c'est le courant max).

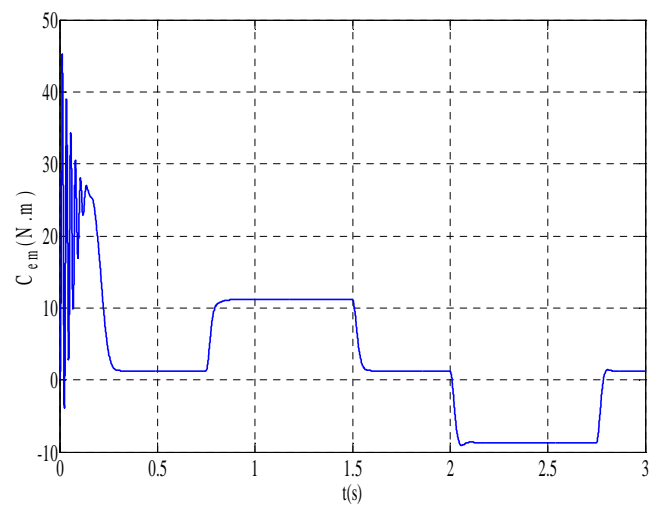
En appliquant la charge $C_r = 10 \text{ N.m}$ (machine en fonctionnement moteur) à partir de l'instant $t=0.75 \text{s}$, on constate des augmentations par le couple électromagnétique, les courants statoriques (direct, quadratique) et par le flux rotorique (d , q), qui se stabilisent respectivement $i_{ds} = -4.362 \text{ A}$ et $i_{qs} = -0.77 \text{ A}$, $\Phi_{dr} = -1.1316 \text{ Wb}$ et $\Phi_{qr} = 0.0461 \text{ Wb}$; cependant, en fonctionnement génératrice (machine entraînée) le glissement diminue et devient négatif (la vitesse d'entraînement est supérieur à celle du synchronisme), la tension

statorique (v_{as}) et le courant statorique (i_{as}) sont déphasés de 180° (voir fig.II.11.g.2), et cela veut dire que la puissance produite est de signe négatif (sens de transition de l'énergie), c'est-à-dire la machine fournit de l'énergie active vers la source.

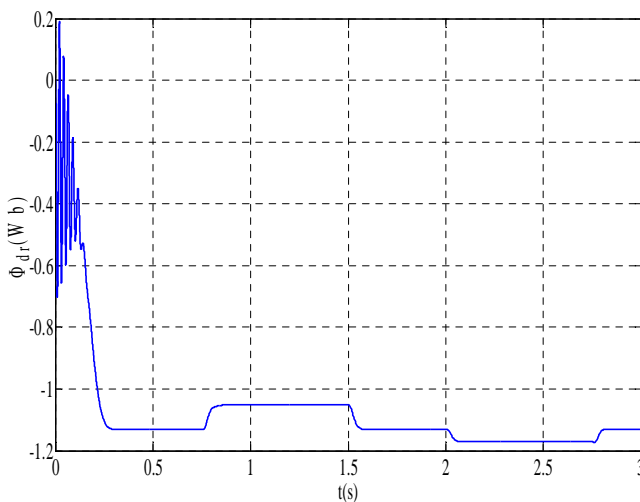
On a multiplié le courant par 10 pour pouvoir éclaircir le déphasage entre la tension et le courant, le premier en moteur et de 22.5° (voir fig.II.11.g.1), le décalage léger dû à l'effet inductif, et pour le fonctionnement génératrice on voit bien qu'il y a un déphasage qui arrive à 176.91° .



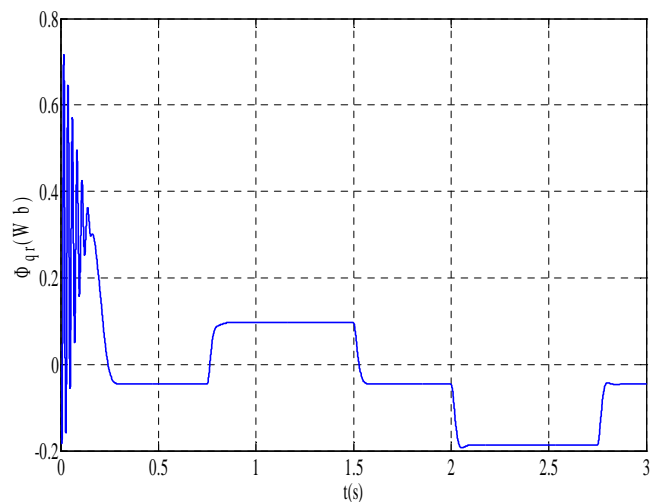
(a) Vitesse (rad/s)



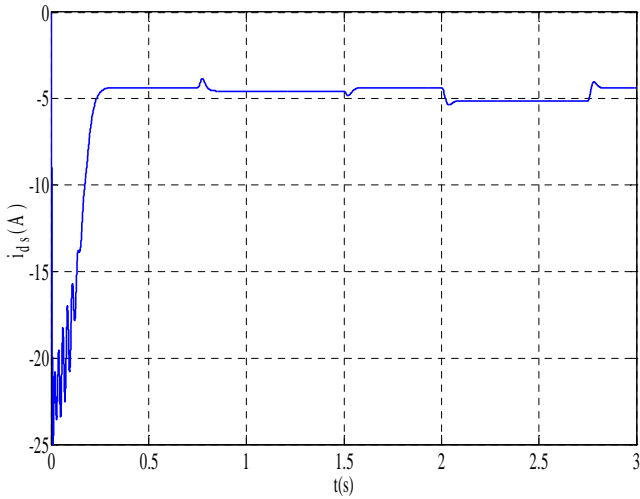
(b) Couple électromagnétique (N.m)



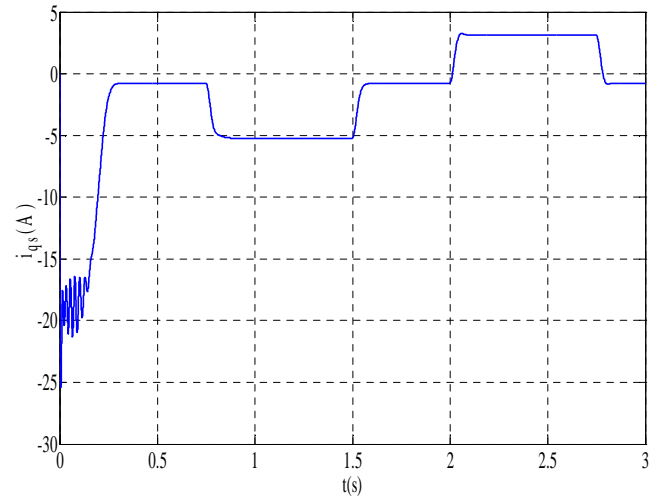
(c) Flux rotorique direct



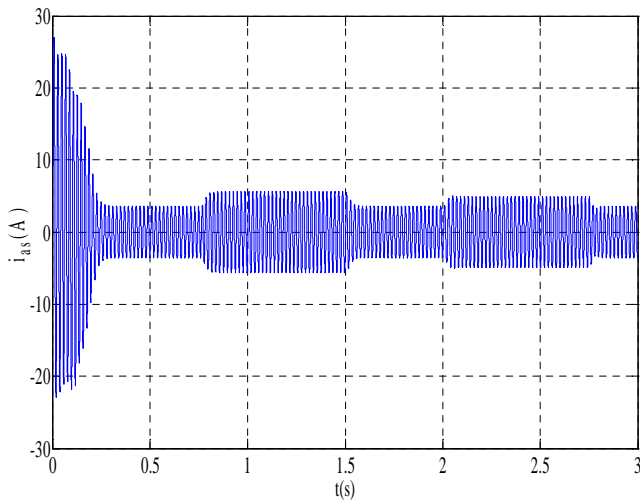
(d) Flux rotorique quadratique



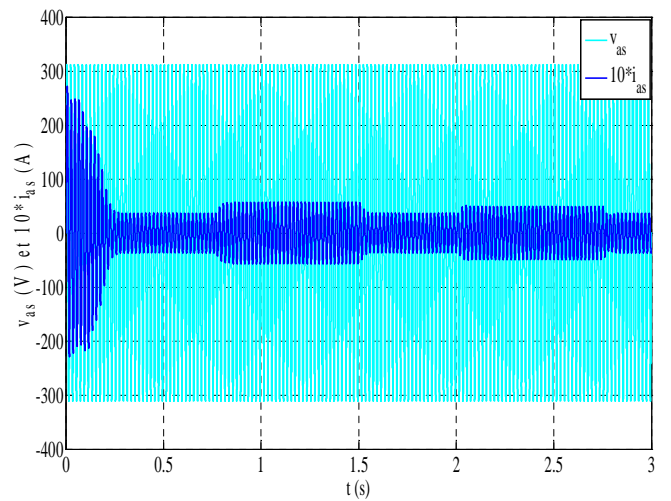
(e) Courant statorique direct



(f) Courant statorique quadratique

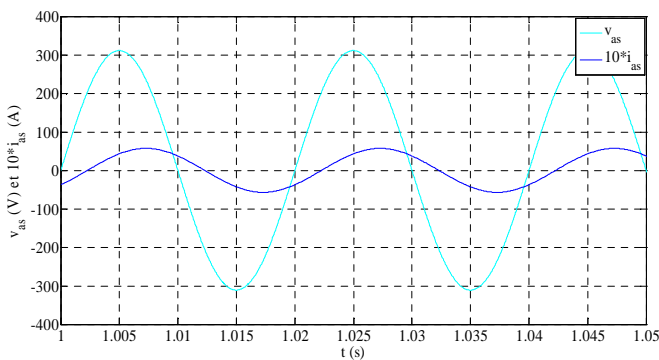


(g) Courant statorique

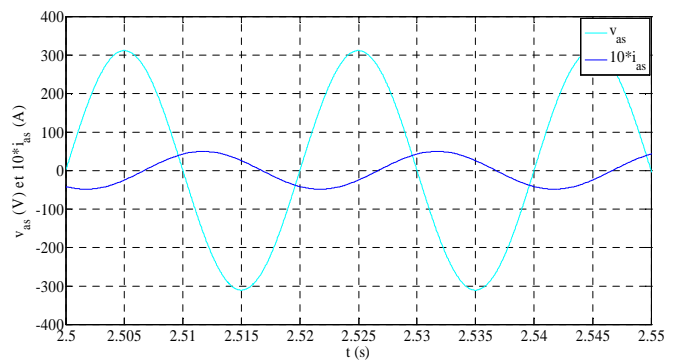


(h) Courbe du courant et de tension statorique

Zoom sur (g) :



(g.1) Moteur déphasage de $\varphi = 22.5^\circ$



(g.2) Génératrice déphasage de $\varphi = 176.911^\circ$

Fig.II.11. Evolution des caractéristiques de la MAS alimentée par source triphasé équilibrée, suivi de l'application des charges $C_r = 10\text{N.m}$ et -10N.m respectivement entre les intervalles de temps $t = [0.75, 1.5]$ et $[2, 2.75]$ s.

II.6. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de la modélisation de l'aérogénérateur à base de la MAS, ensuite la modélisation d'un onduleur de tension MLI, enfin l'établissement d'un modèle mathématique de la MAS basé sur la théorie unifiée des machines électriques tout en adoptant certaines hypothèses simplificatrices.

La simulation du comportement dynamique de la MAS alimentée par une source triphasée sinusoïdale à vide et en charge, nous a démontré les différentes variations (diminution en fonctionnement moteur et augmentation en fonctionnement génératrice) de la vitesse.

Le chapitre suivant, sera consacré à la commande par logique floue de la GAS intégrée dans un système éolien connecté au réseau électrique.

Chapitre III

Commande par logique floue
de la GAS intégrée dans un
système éolien

III.1. Introduction

A travers ce chapitre nous allons exposer en premier lieu les principes et fondements de la logique floue, et introduire les bases et les constituants du régulateur flou.

En deuxième lieu, nous traiterons l'application de la régulation par logique floue du système éolien.

III.2. Principe de la logique floue

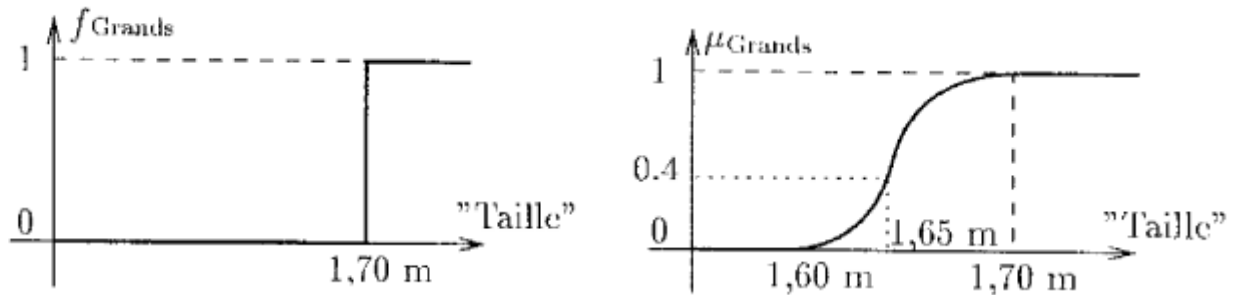
Dans la perspective des sciences de l'ingénieur nous pouvons, admettre que dans les situations où les méthodes traditionnelles de modélisation à partir d'observation physique s'avèrent non satisfaisante. Les sciences subjectives, particulièrement la logique floue, peuvent rendre beaucoup de services, lorsque les connaissances sur la façon de résoudre un problème, de piloter un grand système, d'effectuer un réglage, etc. sont disponibles. Cela suppose que l'on sache définir des méthodes rigoureuses de représentations des connaissances. En pratique la résolution d'un problème concret peut avoir recours à l'utilisation conjointe des méthodes objectives traditionnelles et celles subjectives [8].

III.3. Théorie des ensembles flous

Ce n'est qu'à partir de 1965 que L.A.Zadeh, professeur à l'université de Berkeley, jeta les bases de ce qu'il dénomma "fuzzy set" (ensemble flou), prenant ainsi en considération le problème posé par les connaissances imprécises ou vagues. La notion d'ensemble flou permet alors des graduations dans l'appartenir plus ou moins fortement à cette classe [14].

III.3.1. Différence entre ensemble flou et ensemble booléen

Alors qu'un ensemble booléen est défini par sa fonction caractéristique f à valeurs 0 ou 1, un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance μ à valeurs dans l'intervalle $[0,1]$, (voir la fig.III.1).



Ensemble booléen

Ensemble flou

Fig. III.1. Représentation de "Grands" dans le cas booléen et flou [14].

L'ensemble des tailles possibles d'un individu représente l'univers de discours de la variable "Taille". "Grands" est une valeur linguistique de cette variable.

Soit 1.65 m la taille d'un individu. Dans le cas de l'ensemble flou, l'individu n'appartient pas à la classe des "Grands" avec un degré d'appartenance 0.4.

La notion d'ensemble flou évite l'utilisation arbitraire de limites rigides d'appartenance à des classes ; il serait aberrant de considérer qu'un individu de 1.7 m est grand, mais qu'un individu de 1.695 m ne l'est pas.

III.4. Sous-ensembles

Une des notions fondamentale dans les mathématiques est la notion d'ensemble. La théorie des ensembles a été créée par le mathématicien allemand Georg Cantor. Il a défini les ensembles comme de la collection d'objets. Un ensemble peut être défini, discret ou continu. Nous pouvons le décrire de trois manières différentes :

1. En donnant une liste de ses éléments ;

Par exemple : $E = \{a, b, c, d, e\}$ est un ensemble fini, qui contient cinq éléments. Ces éléments appartiennent à cet ensemble et cela peut être noté :

$a \in E, b \in E, \dots, e \in E$ la relation inverse est notée : $x \notin E$.

2. En donnant une propriété pour l'appartenance ;

Si $P(x)$ est un prédicat qui énonce que l'élément x a la propriété $P(x)$, alors l'ensemble de tous les x avec cette propriété est noté comme : $E = \{x / P(x)\}$.

3. En définissant la fonction caractéristique pour tous les éléments x de l'univers du discours U . L'univers du discours est l'ensemble référentiel qui contient tous les éléments qui sont en relation avec le cotexte donné.

La fonction caractéristique de l'ensemble $E, \mu_E : \{0,1\}$ est défini comme :

$$\mu_E(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in E \\ 0 & \text{si } x \notin E \end{cases}$$

Dans la théorie des ensembles flous, cette fonction s'appelle *fonction d'appartenance*.

III.5. Fonction d'appartenance

III.5.1. Définition

Les valeurs affectées aux variables linguistiques ne sont pas des entiers ou des réels ou autre mais des « ensembles flous ».

Supposons que la fig.III.2.a représente un ensemble classique des personnes dans la force de l'âge. La lettre μ désigne l'appartenance à cet ensemble et x désigne l'âge.

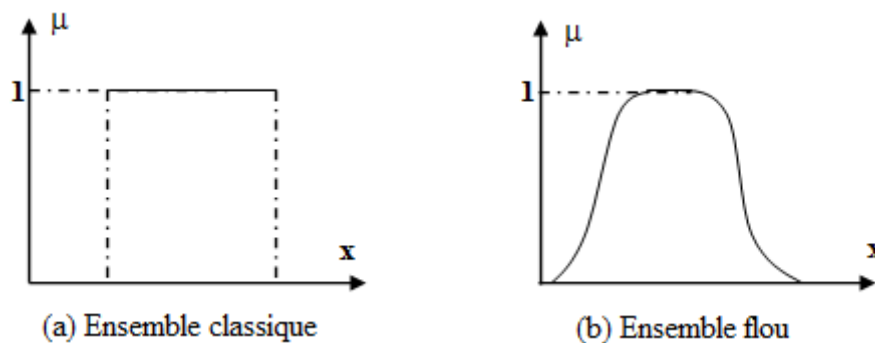


Fig.III.2. Représentation graphique de sous-ensemble dont les ensembles de référence sont infinis [9].

Si l'on présente cette propriété comme une propriété floue, on doit passer à un ensemble flou et nous pouvons dessiner une courbe comme celle de la fig.III.2.b. Cette courbe est arbitraire, subjective, dépendante de l'instant parce que les différentes personnes jugent différemment les propriétés concernant l'âge.

Notation

Pour un ensemble flou continu A dans l'ensemble de référence U, on utilise la notation suivante :

$$A = \int \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (III.1)$$

Où la fonction d'appartenance est exprimée sous une forme analytique.

Par exemple : la fonction qui représente les nombres réels autour de 10 peut être exprimée de la façon suivante :

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{5}(x + 10)\right)^2} \quad (III.2)$$

Il suit l'ensemble flou est :

$$A = \int_R \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{1}{5}(x - 10)\right)^2} \right) \frac{1}{x} dx \quad (III.3)$$

III.5.2. Différentes formes de fonction d'appartenance

Nous avons vu que chaque ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. Si l'ensemble de référence est discret, les fonctions d'appartenance sont des valeurs discrètes de l'intervalle [0, 1]. Si l'univers du discours est un ensemble continu, nous pouvons représenter ces valeurs analytiquement comme fonction d'appartenance. Les fonctions d'appartenances peuvent avoir différentes formes :

- ▲ Monotones (décroissantes ou croissantes), comme le montre les fig. (III.3 et III.4) ;
- ▲ Triangulaires (fig.III.5.a) ;
- ▲ Trapézoïdales (fig.III.5.b) ;
- ▲ En forme de cloche (Gaussiennes), (fig.III.5.c).

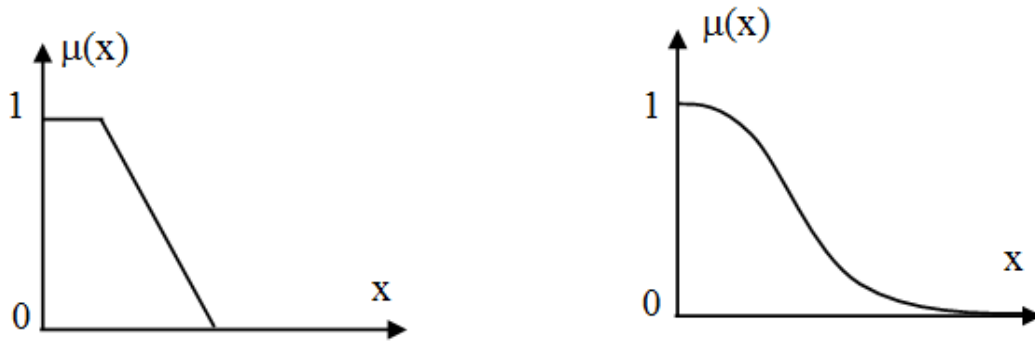


Fig.III.3. Exemples des fonctions d'appartenances monotones décroissantes.

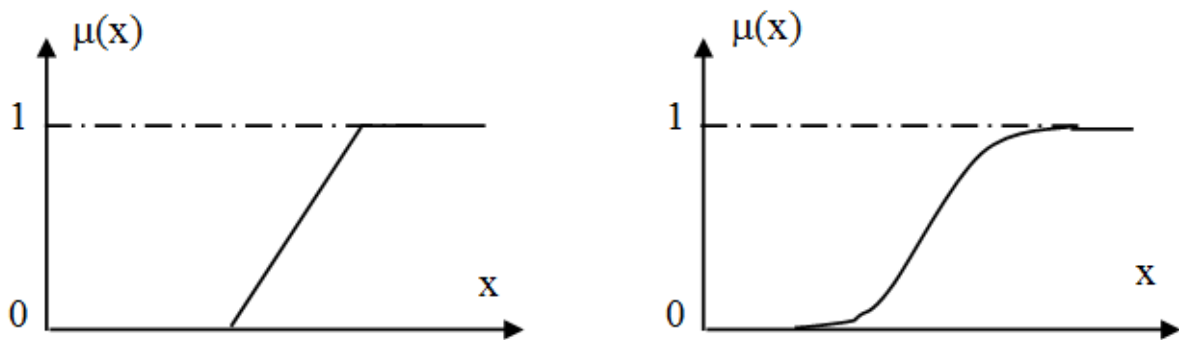


Fig.III.4. Exemples des fonctions d'appartenances monotones croissantes.

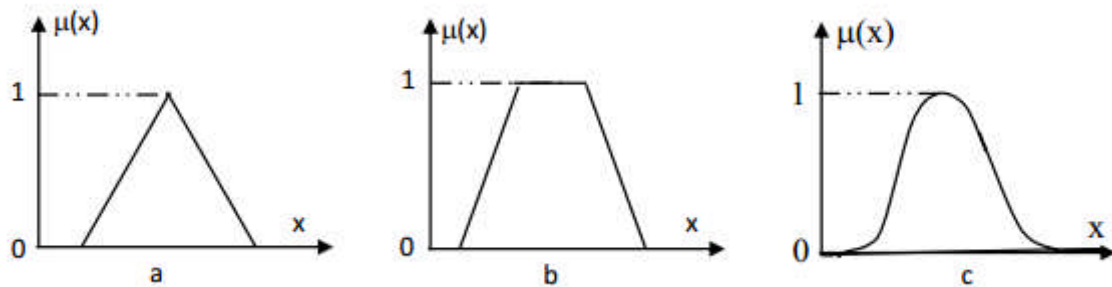


Fig.III.5. Exemples des fonctions d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale et gaussienne).

III.5.3. Formulation mathématique des fonctions d'appartenance

On présente ici seulement les deux fonctions triangulaire et trapézoïdale (voir fig.III.6).



Fig.III.6. Fonctions d'appartenance triangulaire et trapézoïdale.

III.5.3.1. Fonction triangulaire

L'allure de cette fonction est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$ avec :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (III.4)$$

III.5.3.2. Fonction trapézoïdale

Elle est définie par quatre paramètres $\{a, b, c, d\}$.

:

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (III.5)$$

III.6. Opération logistiques sur les sous-ensembles flous

Les opérations de base sur les sous-ensembles flous sont données [9] :

- ❖ Egalité de deux sous-ensembles flous :

Deux sous-ensembles A et B d'un même ensemble de référence D (de discours) sont dits égaux si seulement si :

$$\forall x \in D, \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (III.6)$$

- ❖ Inclusion de deux sous-ensembles flous :

$$A \subset B \Leftrightarrow \forall x \in D, \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (III.7)$$

- ❖ Intersection de deux sous-ensembles flous :

$$\text{Soit } A \cap B = C, \mu_c(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (III.8)$$

L'intersection de deux ensembles flous correspond à l'opération "et".

❖ Union de deux sous-ensembles flous :

$$\forall x \in D, A \cup B = C, \mu_c(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (III.9)$$

❖ Complément de deux sous-ensembles flous :

"B" est le complément d 'un sous-ensemble flou "A" si seulement si :

$$\forall x \in D, \mu_B(x) = 1 - \mu_A(x) \text{ On écrit : } B^c = A \quad (III.10)$$

Les opérateurs "max" et "min" ne sont pas les seuls qui peuvent être choisis pour modéliser l'union et l'intersection floue dans son premier article Zadeh a définis deux opérateurs pour l'union et l'intersection flous.

♣ Union floue :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (III.11)$$

♣ Intersection floue :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (III.12)$$

III.7. Propriétés des opérations sur les sous-ensembles

On suppose que A, B et C sont des sous-ensembles flous dans un ensemble de référence U :

▪ Commutativité : $A \cup B = B \cup A$ (III.13)

$$B \cap A = A \cap B$$

▪ Associativité :

$$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$$

$$(III.14)$$

$$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$$

▪ Distributivité :

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

$$(III.15)$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

▪ Idempotence : $A \cap A = A$

$$(III.16)$$

$$A \cup A = A$$

▪ Identité : $A \cup \emptyset = A$

$$(III.17)$$

$$A \cap U = A$$

$$A \cap \emptyset = \emptyset$$

$$A \cup U = U$$

$$\blacksquare \text{ Involution : } \overline{\overline{A}} = A \quad (III. 18)$$

$$\blacksquare \text{ Transitivité : si } A \subseteq B \subseteq C \text{ alors } A \subseteq C \quad (III. 19)$$

$$\blacksquare \text{ Absorption : } A \cap (A \cup B) = A \quad (III. 20)$$

$$A \cup (A \cap B) = A$$

$$\blacksquare \text{ Théorème De Morgan : } \overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B} \quad (III. 21)$$

$$\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$$

Ces deux propriétés ne sont pas classiques :

$$\blacksquare \text{ Loi de contradiction } A \cap \overline{A} \neq \emptyset \quad (III. 22)$$

III.8. Régulateur flou

La commande floue est certainement le domaine d'application de la logique floue le plus utilisé. Son but est, comme en automatique classique de gérer un processus selon une consigne désirée, par action sur des grandeurs physiques.

Sa particularité est de reproduire le comportement d'un opérateur humain, plutôt que de réaliser un modèle mathématique du système [15].

Les régulateurs flous utilisent une expertise exprimée sous forme de règles.

Cette approche est basée sur deux concepts essentiels : celui de la décomposition d'une plage de variation d'une variable sous forme de nuances linguistique : « faible, moyen, élevé, etc. », et sur règles provenant de l'expertise de l'opérateur humain, qui expriment, sous forme linguistique, comment doivent évoluer les commandes du système en fonction des variables observées [12].

Si l'erreur est positivement grande ;

Et la variation de l'erreur est positivement grande ;

Alors la variation de la sortie est négative.

III.9. Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue

➤ Avantages :

- La théorie est simple s'applique à des systèmes complexes ;

- Pas de modèles mathématique du procédé à asservir ;
- Robustesse de la commande floue vis-à-vis des incertitudes ;
- Possibilités de commande auto adaptative aux variations du procédé.

➤ **Inconvénients :**

- Technique de réglage essentiellement empirique ;
- Performances dépendant de l'expertise ;
- Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse, etc. [8].

III.10. Structure générale d'un système flou

Chaque système basé sur la logique floue est composé de quatre blocs principaux (fig.III.7).

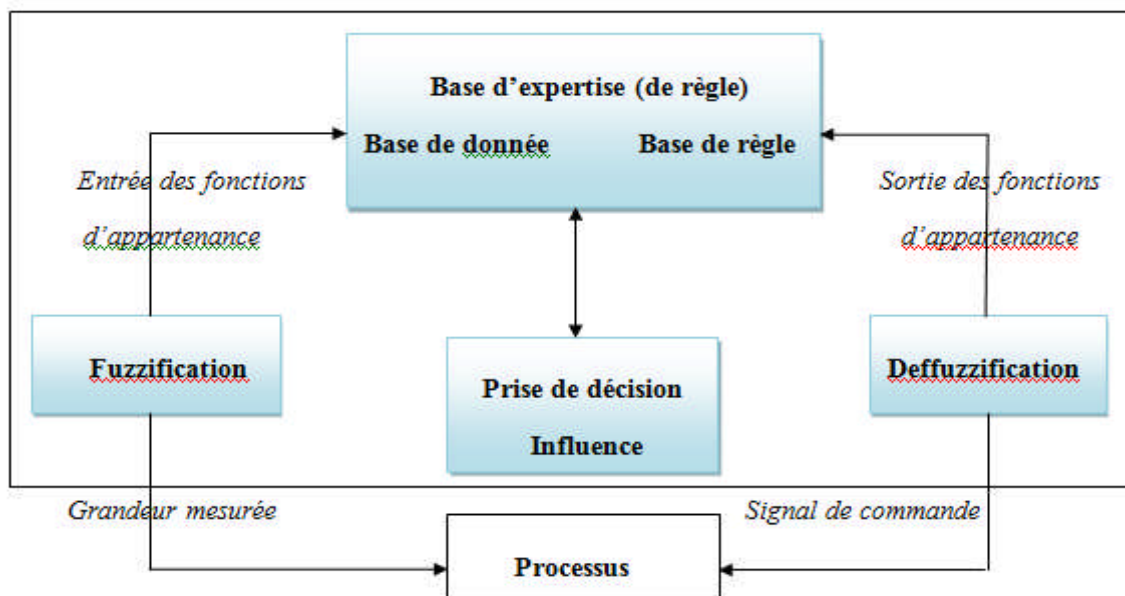


Fig. III.7. Structure générale du régulateur flou [15].

- Base de connaissance : règles et paramètres des fonctions d'appartenance ;
- Bloc de décision ou le moteur d'inférence : inférence des opérations sur les règles ;
- Fuzzification : transformation des entrées précises en degrés d'appartenance ;
- Défuzzification : transformation des résultats flous en sorties précises.

III.11. Structure du régulateur par logique floue

Le régulateur à logique floue possède en générale deux entrées, l'erreur "e" ($e = r - x$) et la variation de l'erreur " Δe " ($\Delta e = e - e_0$). Pour un régime transitoire convenable et un bon réglage de la vitesse, on utilise un facteur d'échelle K_e et $K_{\Delta e}$, K_U le domaine normalisé coïncide avec la variation maximale du signal de commande U_{com} . Pour cela on choisit une forme triangulaire pour la fonction d'appartenance distribuée de manière équidistante avec chevauchement ce qui conduit à une caractéristique linéaire ou quasi- linéaire. Le bloc R.L.F est l'organe principale du régulateur contenant l'interface de fuzzification qui représente l'univers de discours et les variables linguistiques, puis l'inférence qui fournit l'action (la décision) de la commande, et l'inférence de défuzzification qui transforme la commande floue à une commande non floue pour contrôler notre système.

A la sortie du R.L.F, la variable de sortie est multipliée par un facteur d'échelle K_u pour fournir la variable normalisée U de la commande.

La configuration interne d'un contrôleur par logique floue est donnée par la fig.III.8 [16].

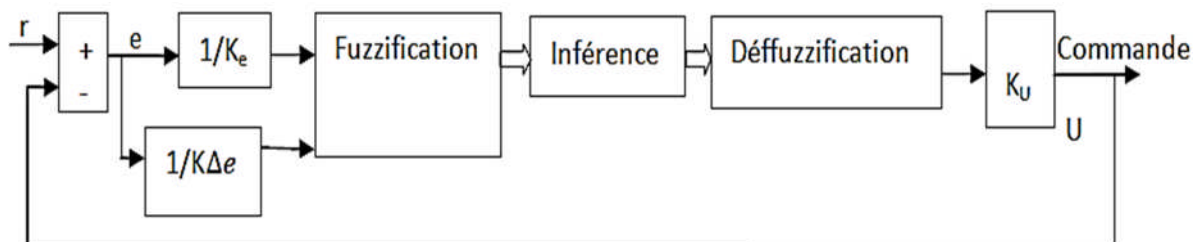


Fig.III.8. Structure d'un régulateur à logique floue (RLF).

III.11.1. Fuzzification des entrées

L'objectif de la fuzzification est de transformer les variables déterministes d'entrée en variables floues, c'est-à-dire en variables linguistiques, en définissant des fonctions d'appartenance pour ces différentes variables d'entrée.

Les grandeurs physiques d'entrée X sont réduites à des grandeurs normalisées x dans une plage de variation, souvent $[-1 \ 1]$, appelée univers de discours, qui peut être soit discret, soit continu. Bien souvent, cet univers de discours est borné, en appliquant une limitation sur

la valeur numérique de $|x| \leq 1$, pour pallier le problème des grandes variations de X . Les gains de normalisation caractérisent des facteurs d'échelles d'entrée x et X .

Dans le cas d'un univers de discours continu, le nombre de valeur linguistique (négative petite, négative moyenne, positive grande, etc.), représenté par des fonctions d'appartenance, pour une variable x_1 peut varier (par exemple trois, cinq ou sept). Un exemple de fuzzification continue est illustré (fig.III.9) pour une seule variable de x , avec les fonctions d'appartenance triangulaire ; les valeurs linguistique correspondantes sont caractérisées par des symboles tel que :

- NG : négative grande ;
- NM : négative moyenne ;
- NP : négative petite ;
- ZE : zéro environ ;
- PP : positive petite ;
- PM : positive moyenne ;
- PG : positive grande.

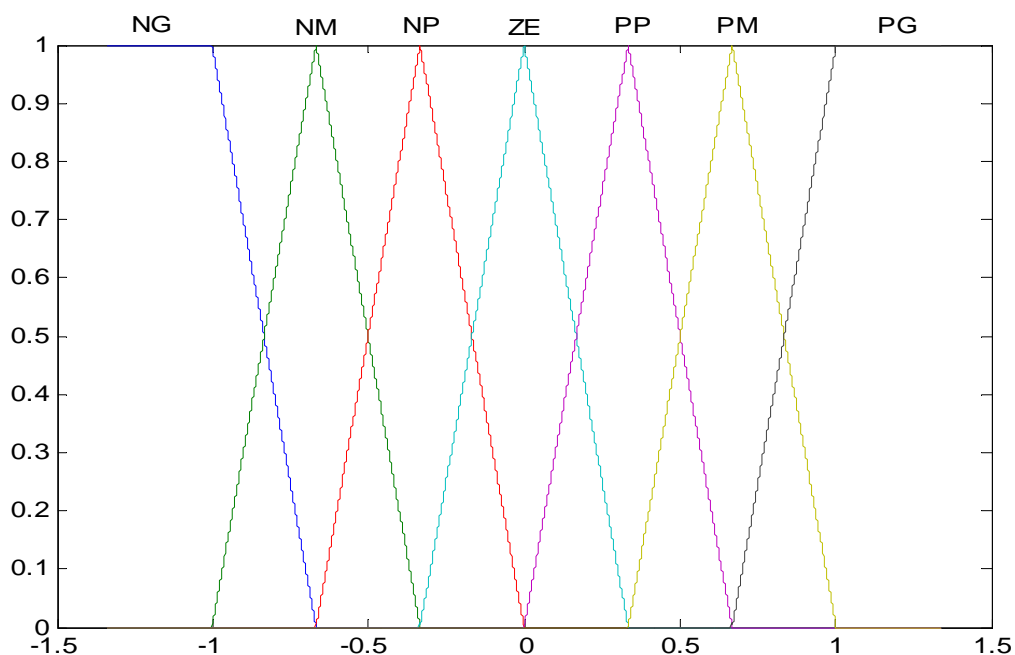


Fig.III.9. Fuzzification continue avec sept fonctions d'appartenance [8].

III.11.2. Base des règles et inférence floue

Les règles floues représentent le cœur du régulateur, est permettent d'exprimer sous forme linguistique les variables d'entrée du régulateur aux variables de commande du système.

Un type de règle peut-être par exemple :

Si x_1 est "positif grand" et x_2 est "zéro environ" alors u est "négatif grand".

Où x_1 et x_2 représentent deux variables d'entrée du régulateur telles que : l'écart de réglage, sa variation et u la commande. L'expérience dans l'élaboration de ces règles joue un rôle important.

Une représentation graphique de l'ensemble des règles, appelée matrice d'inférence ou table des règles, permet de synthétiser le cœur du régulateur flou.

Le tableau.III.1 représente une table d'inférence pour les deux variables linguistiques d'entrée l'erreur de vitesse « e » et la variation de cette dernière « Δe » et la variable de sortie « u ».

$e \setminus \Delta e$	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZE
NM	NG	NG	NG	NM	NP	ZE	PP
NP	NG	NG	NM	NP	ZE	PP	PM
ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
PP	NM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG
PM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG	PG
PG	ZE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Tableau.III.1. Tableau de calcul de la variation de la commande Δu [8].

III.11.3. Défuzzification

La défuzzification consiste à prendre une décision, c'est-à-dire, obtenir une commande réelle à partir de la commande obtenue sous forme d'ensemble flou. Dans le cas d'un raisonnement basé sur l'inférence de règles floues, plusieurs méthodes existent, les plus couramment utilisées sont [9] :

- Méthode du centre de gravité ;
- Méthode de moyenne de maximum ;
- Méthode de moyenne pondérée.

III.11.4. Inférence

L'inférence ou la prise de décision est le noyau du contrôleur flou, elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférence, les règles d'inférence utilisées sont de type :

Si e est x_1 ET Δe est x_2 ALORS le résultat C est x_3 .

Le nombre des ensembles flous pour e et Δe est sept donc il faut $7 \times 7 = 49$ règles d'inférence. Sachant qu'il n'existe pas une loi bien déterminée pour la détermination de la décision de chaque règle. L'expérience humaine, dans ce cas joue un rôle très important [16].

Les règles d'inférence pour notre système sont représentées par une matrice d'inférence selon le tableau.III.1.

III.11.5. Traitement numérique de l'inférence

Après avoir choisi les règles d'inférence, les opérateurs de la logique floue permettent de choisir une méthode pour le traitement de l'inférence. Sachant que l'opérateur ET est le minimum, l'opérateur OU est le maximum et l'opérateur ALORS est le maximum. La méthode retenue sera la méthode min/max [16].

III.12. Orientation du flux rotorique

Les lois de commande sont obtenues à partir des équations de la MAS selon la transformation de Park liée au champ tournant (d, q) et par orientation du flux rotorique. En considérant comme grandeur de référence le flux rotorique Φ_r^* et en exprimant que :

$$\Phi_{dr} = \Phi_r^* \quad (III.23)$$

$$\Phi_{qr} = 0 \quad (III.24)$$

$$p\Phi_r^* = 0 \quad (III.25)$$

Avec :

p : Opérateur de la place.

En remplaçant (III.23) et (III.24) dans les équations des tensions rotoriques (II.37), on obtient :

$$R_r i_{dr} = 0 \Rightarrow i_{dr} = 0 \quad (III.26)$$

$$R_r i_{qr} + \omega_{gl}^* \Phi_r^* = 0 \Rightarrow i_{qr} = -\frac{\omega_{gl}^* \Phi_r^*}{R_r} \quad (III.27)$$

Et partir d'équation (II.38) on trouve :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\Phi_r^* - L_m i_{ds}) \quad (III.28)$$

$$i_{qr} = -\frac{1}{L_r} (L_m i_{qs}) \quad (III.29)$$

En substituant (III.26) dans (III.28), on tire :

$$\Phi_r^* = L_m i_{ds} \quad (III.30)$$

A partir de l'équation (III.29), on trouve :

$$L_m i_{qs} = -L_r i_{qr} \quad (III.31)$$

En remplaçant (III.26) et (III.27) dans le système d'équations des tensions statoriques (II.39), on obtient :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s p i_{ds} - \omega_s^* L_s i_{qs} - \tau_r \Phi_r^* \omega_r^* \quad (III.32)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s p i_{qs} + \omega_s^* L_s i_{ds} - \frac{L_m}{R_r} p \omega_s^* \Phi_r^*$$

Où : $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ et $\omega_{gl}^* = \omega_s^* - \omega_r$

En introduisant l'équation (III. 27) dans (III. 29), on tire :

$$\omega_{gl}^* = \frac{R_r L_m i_{qs}}{L_r \Phi_r^*} \quad (III. 33)$$

En substituant (III. 23) et (III. 24) dans l'expression du couple électromagnétique (II. 44), on aura :

$$C_{em}^* = p \frac{L_m}{L_r} (i_{qs} \Phi_r^*) \quad (III. 34)$$

A partir de la relation (III. 34), on trouve :

$$i_{qs}^* = \frac{L_r}{p L_m} \frac{C_{em}^*}{\Phi_r^*} \quad (III. 35)$$

A partir de l'équation de la tension rotorique v_{dr} du système d'équations (II. 37) et de l'équation d'orientation flux rotorique Φ_r dans le système d'équations (III. 24), on aura :

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \Phi_r - \frac{R_r L_m}{L_r} i_{ds} + p \Phi_r \quad (III. 37)$$

Des équations (II. 29) et (III. 30), on tire :

$$J p \Omega = p \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \Phi_r^* - C_r - f \Omega \quad (III. 38)$$

III.13. Association du FLC et IFOC au contrôle de la GAS dédiée au système éolien

La représentation schématique de la commande par logique floue associée à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la GAS dédiée au système éolien à vitesse variable est illustrée par la fig. III.10.

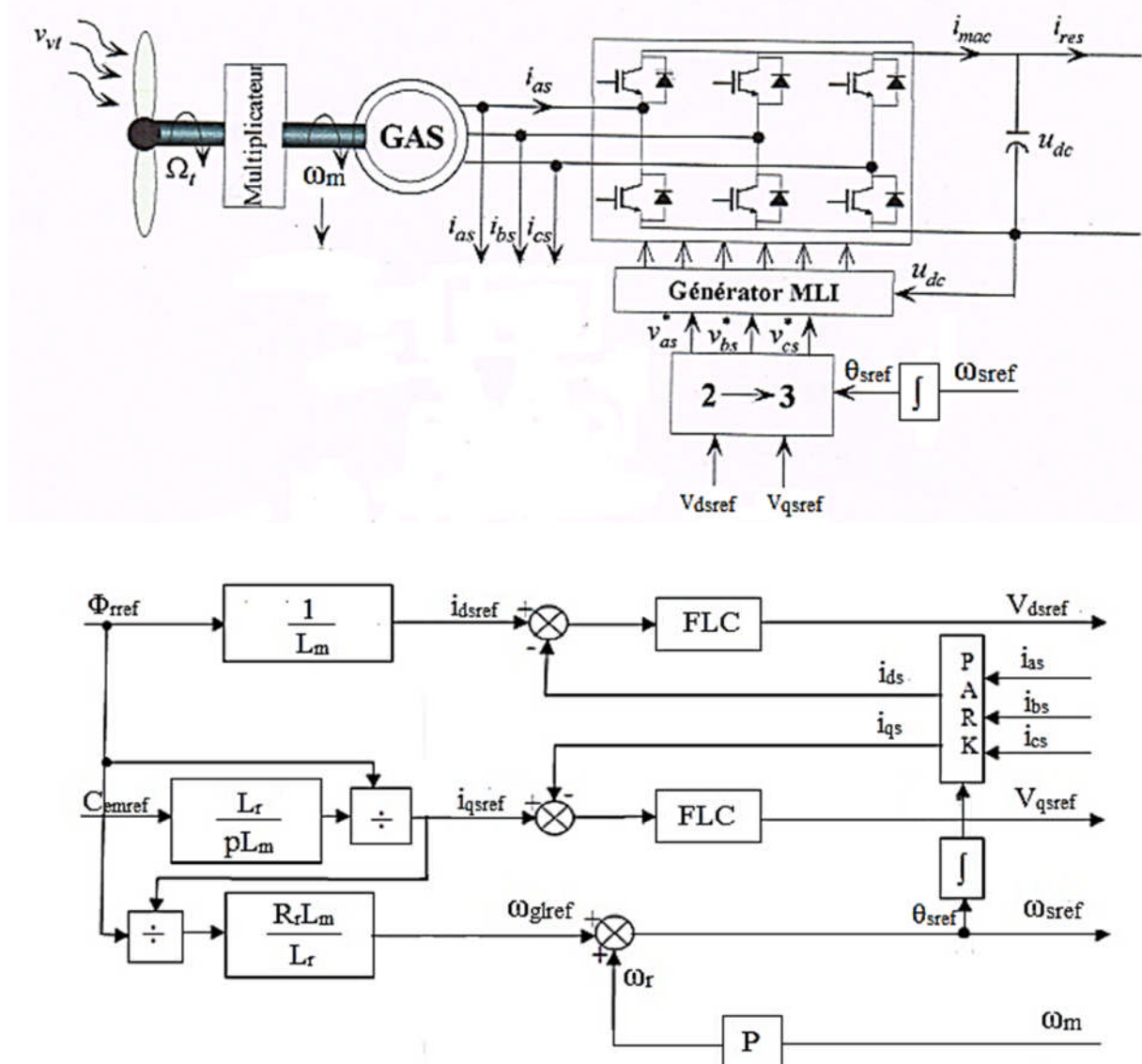


Fig.III.10. Schéma bloc de la FLC associée à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la GAS.

III.14. Contrôle de la liaison au réseau

La topologie du convertisseur MLI2 (situé entre le bus continu et le filtre (voir fig.II.1) permet de générer et également d'appeler un courant provenant du réseau. L'objectif du convertisseur relié au réseau électrique est de maintenir la tension du bus continu constante quelque soit l'amplitude et le sens de la puissance. Ce dernier est commandé de manière à contrôler les courants transités par le filtre. Avec une tension du bus continu imposée.

Les expressions des courants de références en fonctions des puissances active et réactive de références et des tensions du réseau mesurées sont donnés dans le repère de Park (d,q) comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{fd}^* \\ i_{fq}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_d^2 + v_q^2} \begin{bmatrix} P^* & Q^* \\ -Q^* & P^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (III. 39)$$

Afin de maintenir le facteur de puissance du réseau unitaire, la puissance réactive de référence injectée au réseau est fixée à une valeur nulle.

Les tensions de référence sont exprimées selon les axes (d,q) par :

$$\begin{cases} v_{md}^* = v_d^* + v_d - \omega_s L_f i_{fq} \\ v_{mq}^* = v_q^* + v_q + \omega_s L_f i_{fd} \end{cases} \quad (III. 40)$$

Avec :

$$\begin{cases} v_d^* = PI(i_{fd}^* - i_{fd}) \\ v_q^* = PI(i_{fq}^* - i_{fq}) \end{cases} \quad (III. 41)$$

Les puissances active et réactive échangées avec le réseau sont :

$$\begin{cases} P = v_d i_d + v_q i_q \\ Q = v_q i_d - v_d i_q \end{cases} \quad (III. 42)$$

En négligeant les pertes dans le condensateur, dans le convertisseur et dans le filtre, la représentation sous forme d'un schéma bloc du dispositif de commande est donnée sur la fig.III.11.

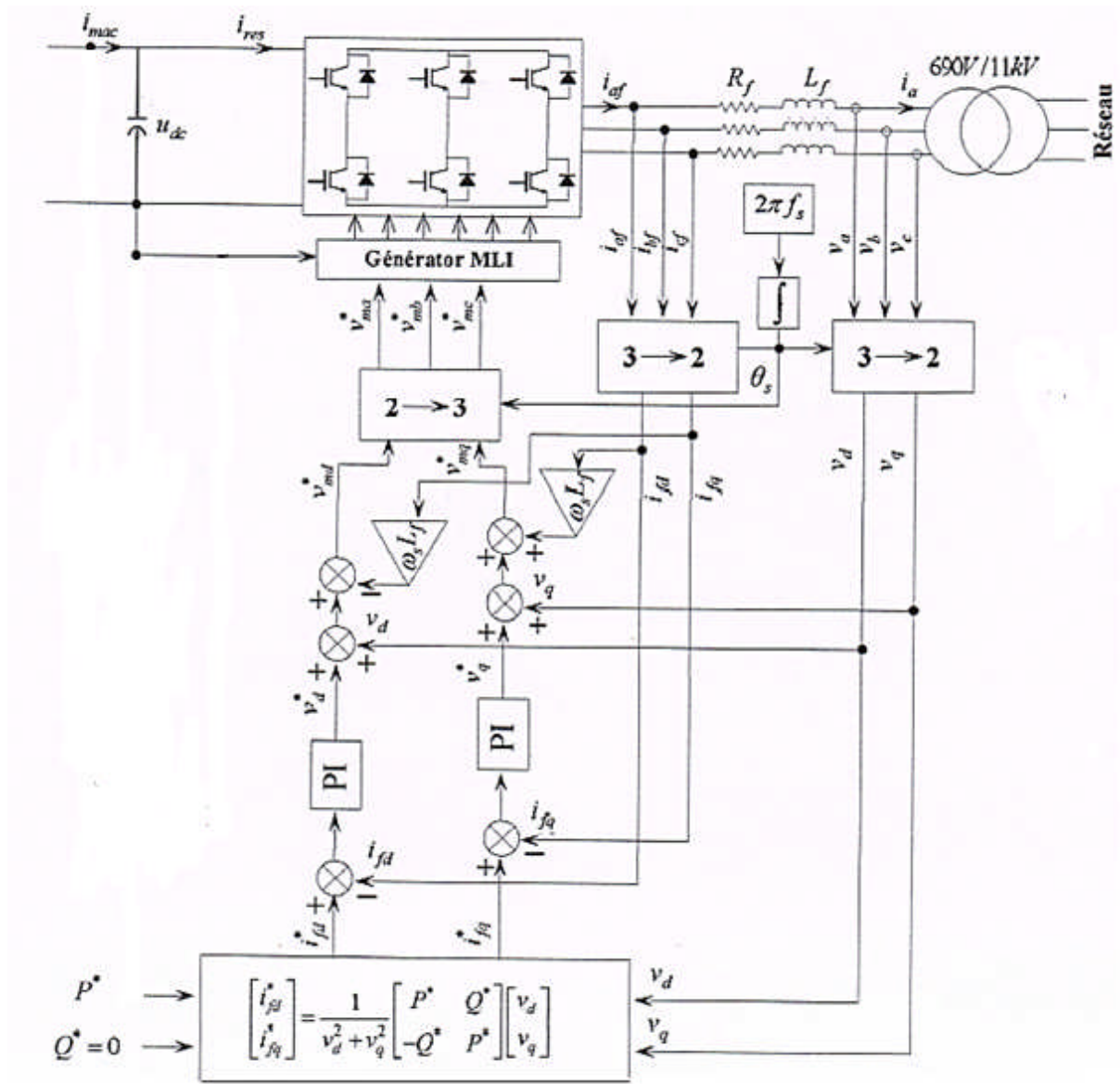


Fig.III.11. Schéma bloc représentatif du contrôle de la liaison au réseau.

Le couplage des deux convertisseurs MLI est fait par l'intermédiaire du bus continu. En se basant sur les équations du dimensionnement du bus continu, dont les démonstrations sont données par [17], on calcule la tension nécessaire à partir des relations suivantes :

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 X^2}{9v_{eff}^4} + 1} \tag{III.43}$$

$$u_{dc} = \alpha v_{eff} 2\sqrt{2} \tag{III.44}$$

Dans notre cas, la puissance nominale est de 1.5 MW, la tension simple efficace est égale à 690 V et l'impédance de la self de lissage de 1 mH à comme valeur de réactance $X = 0.314 \Omega$.

Après tout calcul fait, on trouve : $u_{dc} = 1950 \text{ V}$.

III.15. Résultats et interprétations

Dans cette partie, les résultats de simulation de la chaîne de conversion d'énergie basée sur la génératrice asynchrone à cage en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK (dont les paramètres sont fournis à l'annexe) sont représentés.

La vitesse mécanique ainsi que sa référence de la GAS sont représentées par la fig.III.12. Il est à noter que le profil du vent est choisi aléatoirement, d'une façon à obtenir les différentes performances de la chaîne de conversion de l'énergie, pour des vitesses inférieures et supérieures à la vitesse de synchronisme (nominale) tout en passant par celle-ci, cela pour mettre en évidence les deux zones de fonctionnement de la chaîne (II et III). La vitesse mécanique (Ω_{mec}) suit parfaitement sa référence Ω_{mec}^* .

La puissance mécanique de référence sur l'arbre de la GAS (généré par la turbine) et illustrée par la fig.III.13, cette dernière est limitée à la valeur de -1.55 MW (le signe négatif signifie une puissance générée), et cette puissance varie dans les phases de fonctionnement à des vitesses mécaniques inférieures à la vitesse nominale, et quand à des vitesses supérieures à la vitesse de synchronisme alors la puissance se limite à sa valeur nominale.

L'évolution du couple électromagnétique C_{em} et sa référence C_{em}^* est représentée dans la fig.III.14. Celle-ci montre que le couple électromagnétique poursuit sa référence.

Les fig.III.15 et III.16 montrent l'évolution de la tension et du courant statorique et leurs zooms respectivement. Ceci découvre que la tension et le courant sont presque déphasés de 180° c'est-à-dire de signe opposé, ce que signifie que la puissance produite est de signe négatif (sens de transition de la puissance active, de la machine vers le réseau).

Le courant rotorique est indiqué dans la fig.III.17. Celui-ci augmente et diminue proportionnellement à la puissance mécanique.

Les deux composantes du flux rotorique de la génératrice électrique selon les deux axes direct et quadratique sont données par la fig.III.18. La composante du flux rotorique

(Φ_{dr}) poursuit sa référence, et la composante du flux rotorique quadratique (Φ_{qr}) est nulle, cela est dû au contrôle par orientation du flux rotorique réalisée conjointement avec la commande par logique floue.

La fig.III.19 représente les allures de la puissance active et réactive statoriques de la GAS. La puissance active est de signe négatif, c'est-à-dire la GAS génère cette puissance et elle évolue de la même façon que la puissance mécanique (voire fig.III.13) tout en présentant des fluctuations. Par contre la puissance réactive est de signe positif ce qui veut dire que la machine absorbe cette énergie nécessaire pour sa magnétisation.

Les allures de la tension et du courant avant le filtre (sortie du convertisseur MLI2) et de leurs zooms sont données par les fig.III.20 et III.21 respectivement.

Les fig.III.22 et III.23 représentent les allures de la tension et du courant côté réseau et leurs zooms respectivement, Cela montre que la tension et le courant sont en opposition de phase ce qui veut dire que l'écoulement de puissance est de l'aérogénérateur vers le réseau.

La fig.III.24 montre que la puissance active injectée au réseau poursuit sa valeur de référence et évolue de la même façon que pour la puissance mécanique généré par l'aérogénérateur. La puissance réactive varie légèrement autour de sa valeur de référence imposée nulle afin de maintenir le facteur de puissance côté réseau unitaire.

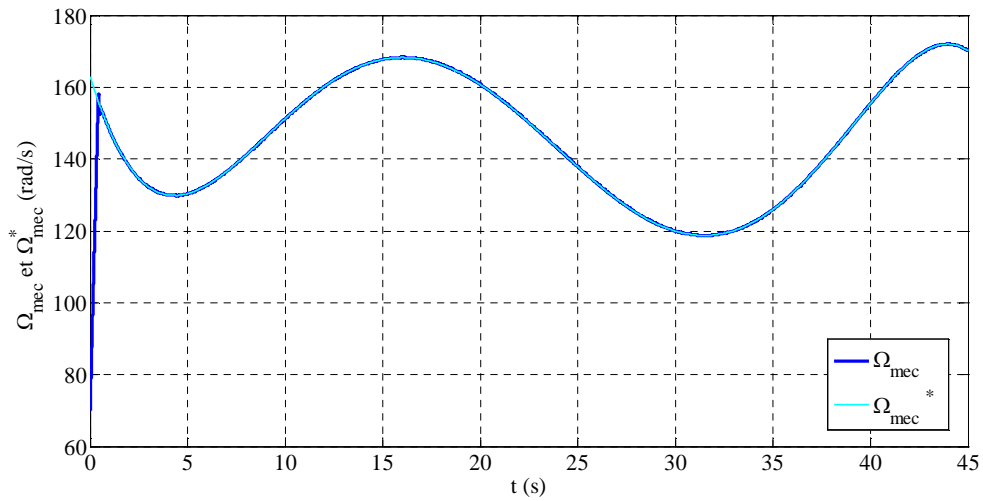


Fig.III.12. Vitesse mécanique de la GAS et sa référence.

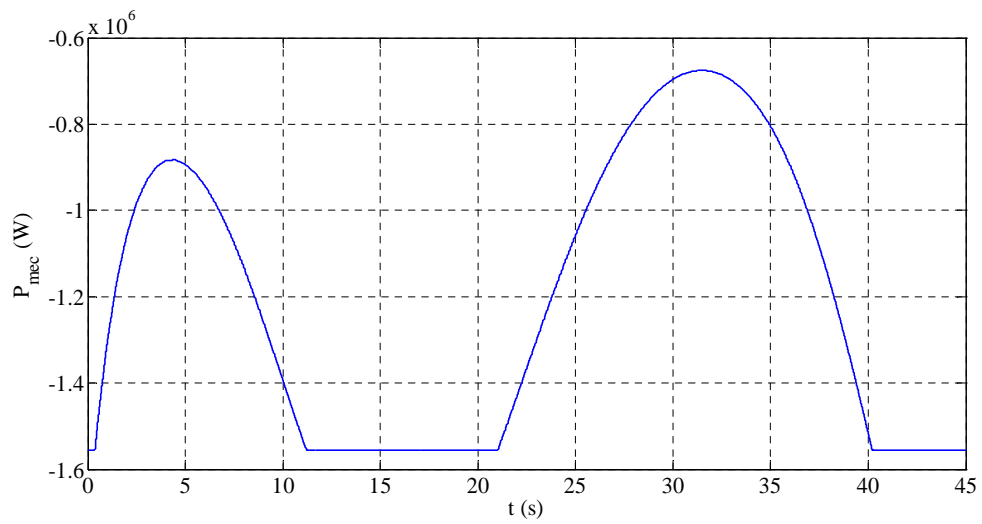


Fig.III.13. Puissance mécanique de la turbine.

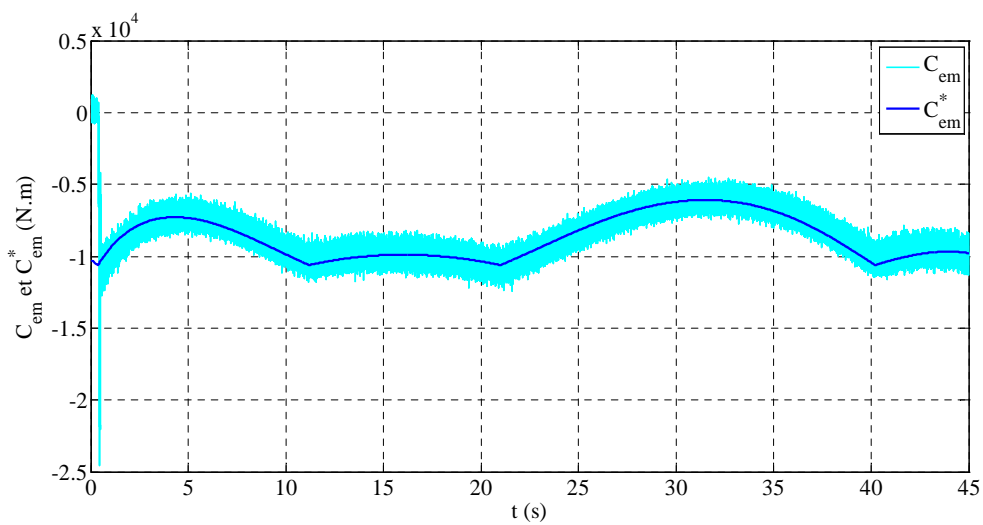


Fig.III.14. Couple électromagnétique et sa référence.

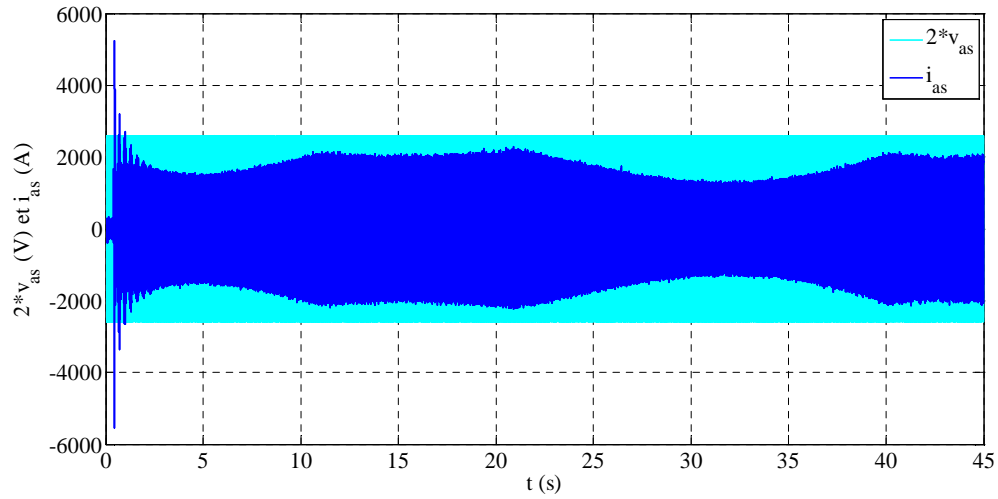


Fig.III.15. Tension et courant statoriques.

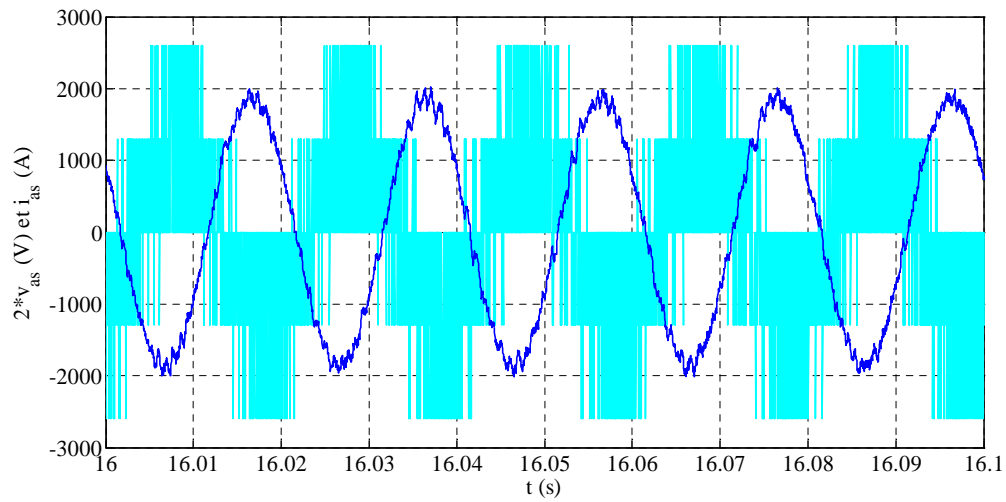


Fig.III.16. Zoom de la tension et du courant statoriques.

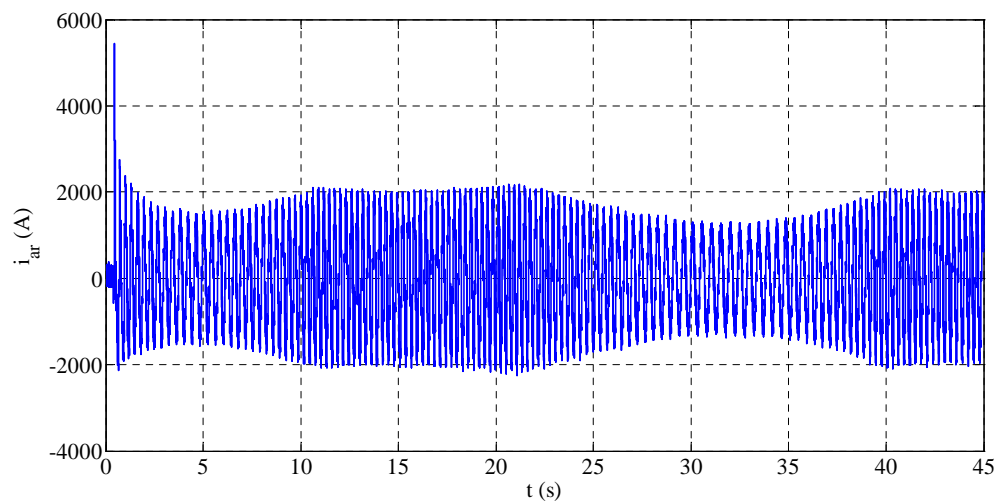


Fig.III.17. Courant rotorique.

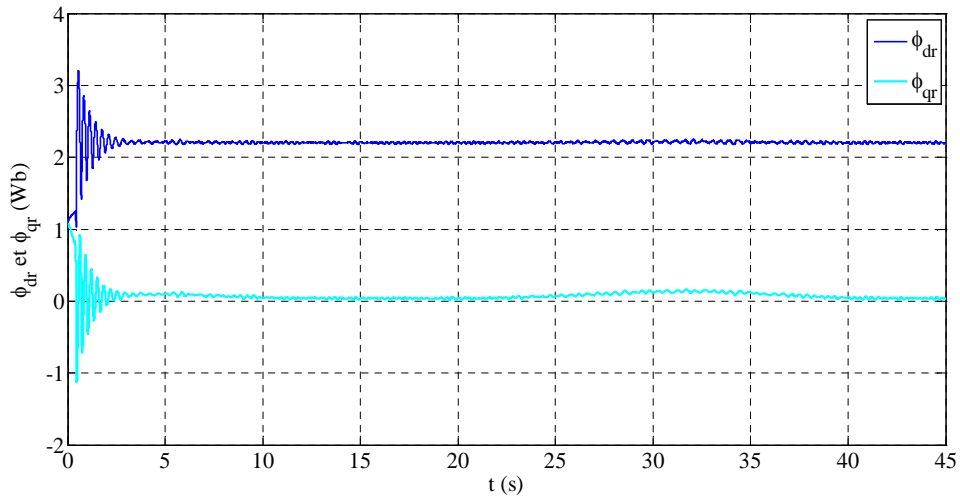


Fig.III.18. Flux direct et quadratique rotoriques.

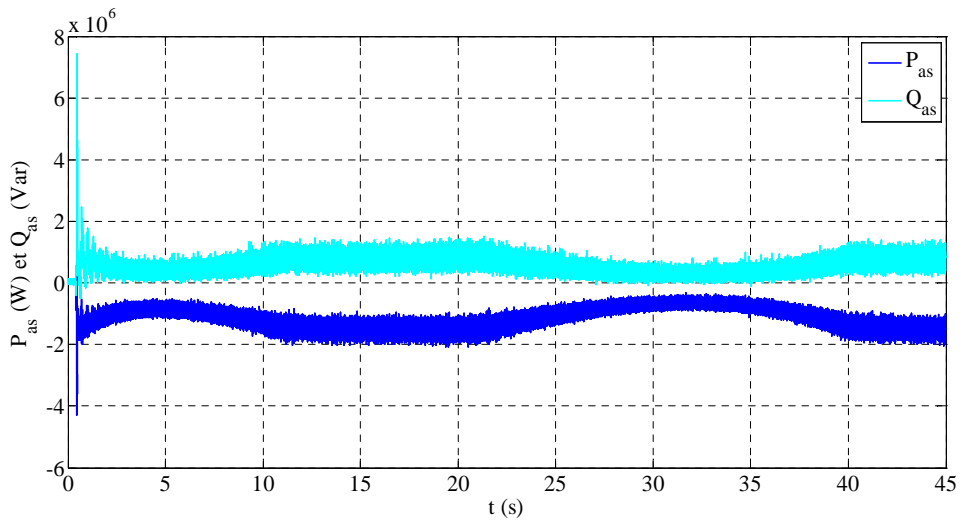


Fig.III.19. Puissance active et réactive statoriques.

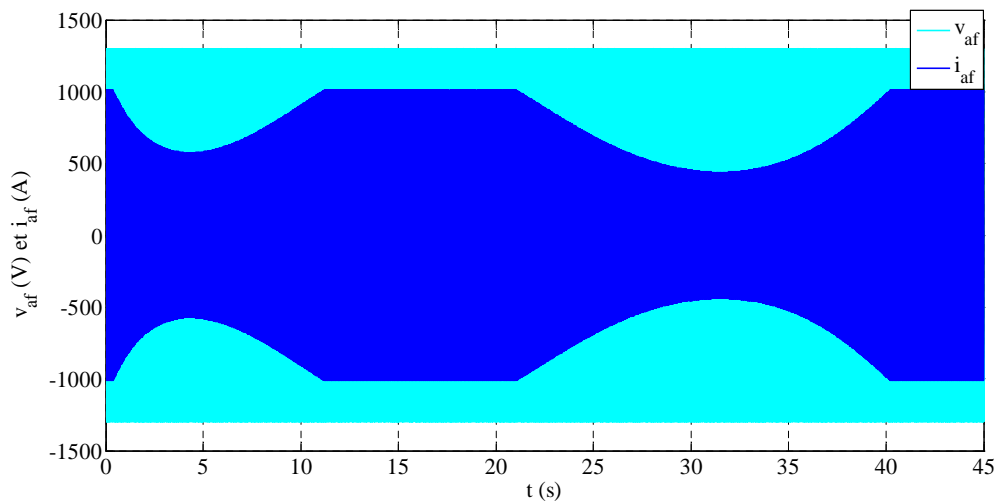


Fig.III.20. Tension et courant avant le filtre.

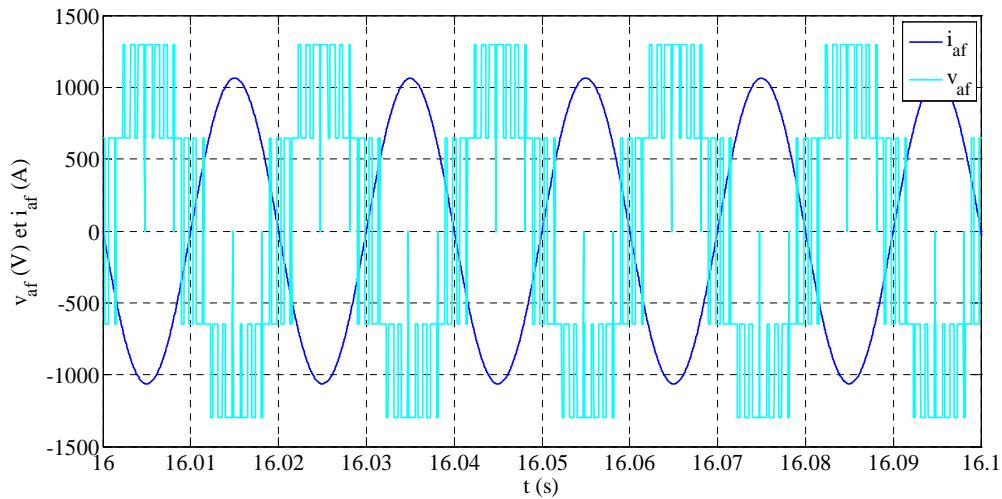


Fig.III.21. Zoom de la tension et du courant avant le filtre.

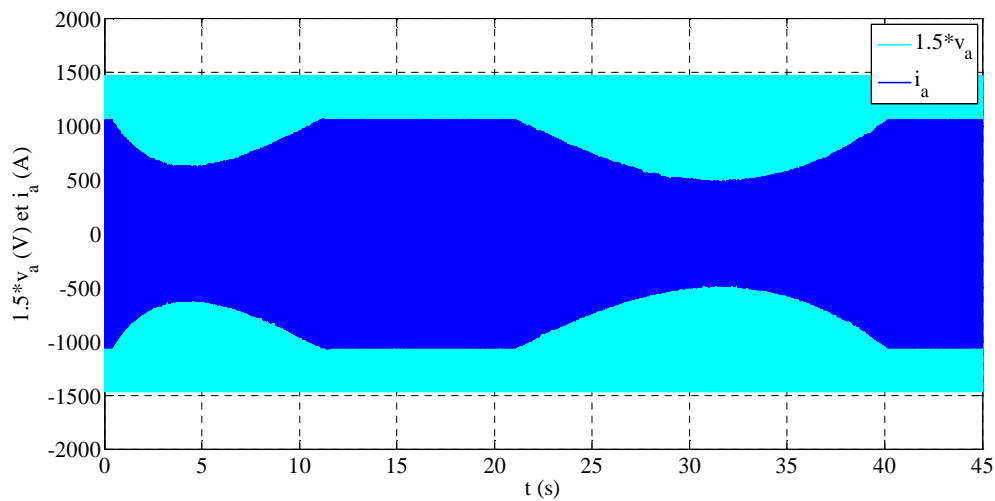


Fig.III.22. Tension et courant côté réseau.

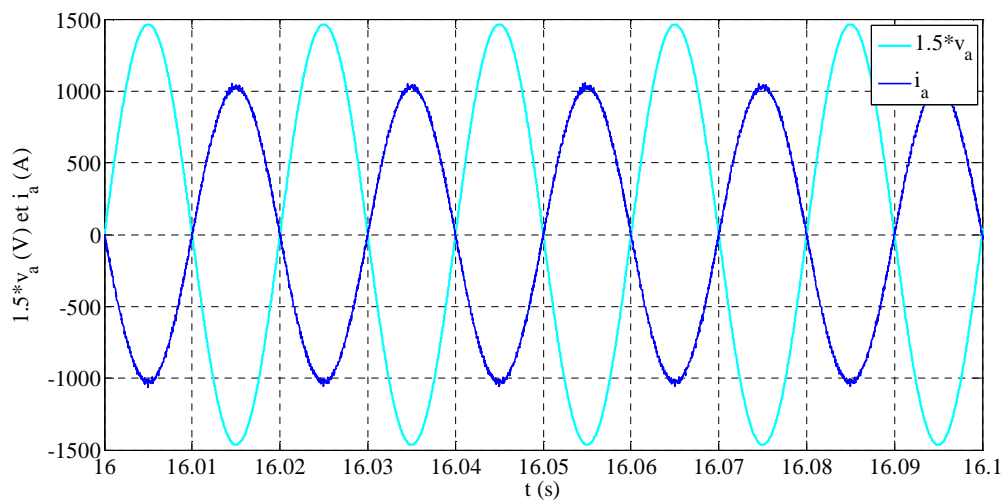


Fig.III.23. Zoom de la tension et du courant côté réseau.

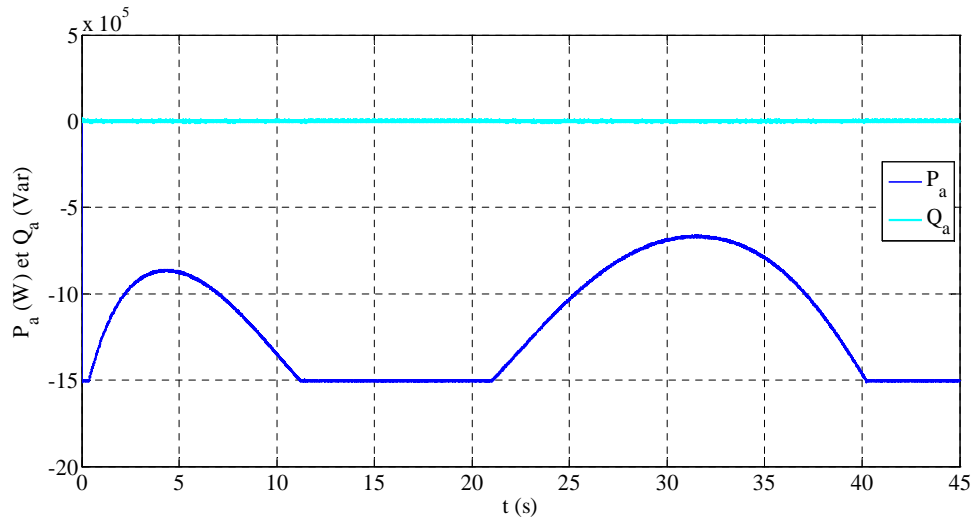


Fig.III.24. Puissance active et réactive côté réseau.

III.17. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts, les avantages, les inconvénients et l'application de la commande par la logique floue dans le système éolien ; où nous avons établi un modèle qui est composé d'une génératrice asynchrone à cage pilotée par le stator par deux convertisseurs contrôlés en MLI et reliés au réseau via un bus continu, un filtre et un transformateur.

Pour la commande de cet ensemble on a construit un dispositif qui se compose de plusieurs blocs de commande. On a particulièrement décrit la commande par la logique floue associée à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la GAS, Les résultats de simulation ont été présentés et commentés.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre travail était la commande d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil par la logique floue intégrée dans un système éolien connecté au réseau par deux convertisseurs MLI.

Afin d'aborder cette étude, le premier chapitre est consacré à quelques généralités sur le système éolien où nous avons fait sa description avec ces différentes parties par ses différentes parties constitutives, son principe de fonctionnement, son énergie de production, etc. Après cela, une description des différents constituants d'une MAS, le principe de fonctionnement et le cheminement de la puissance active.

Le deuxième chapitre a fait l'objet de la modélisation du système éolien, de l'onduleur MLI et de la MAS. Pour cela nous avons élaborés un modèle mathématique basé sur la théorie unifiée des machines électriques suivi des résultats de simulation de ces deux derniers.

Le troisième chapitre est dédié à la commande du système éolien basé sur la GAS piloté par le stator, où nous nous sommes intéressés à l'application d'une technique de commande intelligente et robuste, nommée commande par la logique floue. Les résultats obtenus par les stratégies de régulation floue présentent des performances satisfaisantes et encourageantes pour des implémentations pratiques. Ils nous ont permis de constater :

- ❖ Le bon comportement de la régulation floue côté temps de réponse ;
- ❖ L'annulation de l'erreur statique ;
- ❖ La robustesse de la commande de floue vis-à-vis des incertitudes ;
- ❖ L'offre de bonnes performances statiques et dynamiques.

Annexe

Paramètres du la MAS

$P_n=1.5 \text{ KW}$

$V_{\text{eff}}=220 \text{ V}$

$p=2$

$J=0.031 \text{ Kg.m}^2$

$f=0.0081 \text{ N.ms}$

$R_s=4.85 \ \Omega$

$R_r=3.805 \ \Omega$

$L_s=0.274 \text{ H}$

$L_r=0.274 \text{ H}$

$M=0.258 \text{ M}$

$\omega_s=314 \text{ rad/s}$

Paramètres de la GAS

$P_n=1.5 \text{ MW}$

$V_{\text{eff}}=690 \text{ V}$

$E=1950 \text{ V}$

$p=2$

$J=50 \text{ Kg.m}^2$

$f=0.071 \text{ N.ms}$

$R_s=0.012 \ \Omega$

$R_r=0.021 \ \Omega$

$L_s=0.0137 \text{ H}$

$L_r=0.0137 \text{ H}$

$M=0.0135 \text{ M}$

$\omega_s=314 \text{ rad/s}$

Paramètres de la turbine

$$R=36 \text{ m}$$

$$G=90$$

$$Np=3$$

$$H=85 \text{ m}$$

Paramètres de bus continu et du filtre

$$u_c = 1950 \text{ V}$$

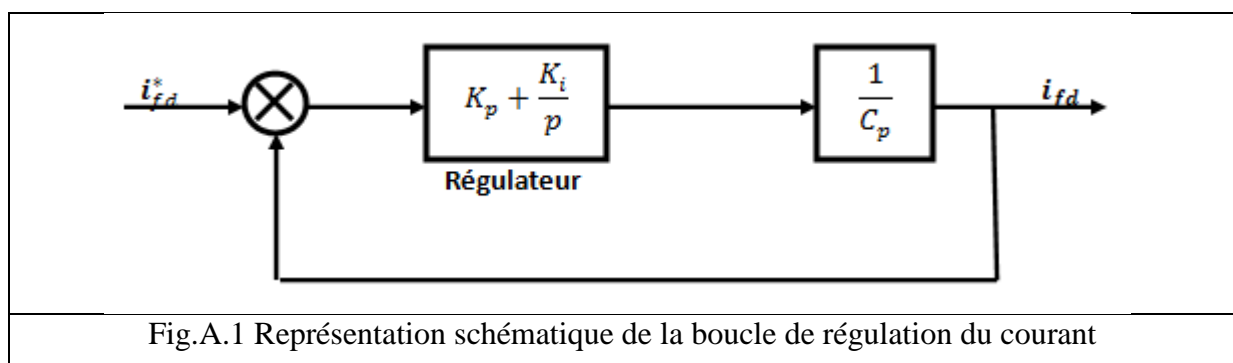
$$C_c = 9.8\text{mF}$$

$$R_f = 10^{-2} \Omega$$

$$L_f = 10^{-3} \Omega$$

Calcul du régulateur PI du courant

La structure de la boucle de régulation de courant est donnée par la Fig.A.1



La FTBO s'écrit :

$$T(p) = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \left(\frac{1}{C_p} \right) = \frac{K_{pp} + K_i}{C_{p^2}} \quad (\text{A.1})$$

La FTBF est :

$$F(p) = \frac{K_{pp} + K_i}{C_{p^2} + K_{pp} + K_i} = \frac{\tau p + 1}{\frac{\tau C}{K_p} p^2 + \tau p + 1} \quad (\text{A.2})$$

Avec

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

En identifiant à un système du second ordre dont l'équation caractéristique est de la forme suivante :

$$\frac{1}{\omega_n^2} p^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} p + 1$$

On tire :

$$\frac{1}{\omega_n^2} = \frac{\tau C}{K_p} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{2\zeta}{\omega_n}$$

En imposant :

$$\zeta = 0.7 \quad \text{et} \quad \omega_n = \frac{3}{t_r}$$

D'où :

$$\tau = \frac{2\zeta t_r}{3} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\omega_n^2} = \frac{C 2\zeta}{K_p \omega_n}$$

Alors :

$$K_p = 2\zeta C \omega_n = \frac{6\zeta C}{t_r} \quad (\text{A.3})$$

Sachant qu'on a :

$$\tau = \frac{K_p}{K_i} = \frac{2\zeta t_r}{3}$$

Donc :

$$K_i = \frac{3 K_p}{2\zeta t_r} = \frac{9C}{t_r^2} \quad (\text{A.4})$$

On prend le temps de réponse en boucle fermée égal à 10^{-1} s.

- [1] K. Idjdarene « *Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes* » Thèse de doctorat, Université A. Mira de Bejaia en cotutelle avec l'école doctorale des sciences pour l'ingénieur, Lille 1, 2010.
- [2] R. Achouri, et M. Hidouche « *Commande vectorielle d'une machine asynchrone* », Mémoire d'ingénieur, école nationale polytechnique, 2007.
- [3] K. Ghebriou et A. Saadi « *Commande d'une génératrice asynchrone dans un système de conversion éolien* », Mémoire de Master, Université A. Mira de Bejaia, 2013.
- [4] R. Kasdi et B. Hantat « *Commande d'une génératrice asynchrone intégrée dans un système éolien connecté au réseau* », Mémoire de Master, Université A. Mira de Bejaia, 2012.
- [5] G. Torchiat et S. Tamert « *Autopilotage d'un moteur asynchrone par la commande floue* », Mémoire de Master, Université A. Mira de Bejaia, 2013.
- [6] M. Nezar « *Diagnostic des associations convertisseurs statiques-machines asynchrone en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle* », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2006.
- [7] H. Amimeur, « *Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile* », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2012.
- [8] N. Meziani et G. Challal « *Commande par la logique floue d'une machine asynchrone* », Mémoire de Master, Université A. Mira de Bejaia, 2014.
- [9] T. Hamadou « *Commande par logique floue d'un moteur asynchrone double étoile* », Mémoire d'ingénieur, Université A. Mira de Bejaia, 2013.
- [10] E. Merabet « *Commande floue adaptative d'une machine asynchrone double étoile* », Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2008.
- [11] R. Abdessemed « *Modélisation et simulation des machines électriques* », Edition, ellipses, 2011.
- [12] H. Amimeur et S. Aouane « *Réglage par mode de glissement d'un moteur asynchrone alimenté par un convertisseur matriciel* », Mémoire d'ingénieur, Université A. Mira de Bejaia, 2009.
- [14] V. Lacrose « *Réduction de la complexité des contrôleurs flous : application à la commande multi variable* », Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 1997.

- [15] H. Allaoua et B. Allaoua « *Contribution à la commande de la machine asynchrone par DTC et logique floue* », Mémoire de Master, Université A. Mira de Bejaia, 2014.
- [16] F. Ghers « *Application des techniques de commandes intelligentes pour contrôle d'une machine asynchrone* », Mémoire de magister, Université B. Mokhtar de Annaba.2006.
- [17] S. El Aimani « *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseau de moyenne tension* » Thèse de doctorat de l'école centrale de Lille et de l'université de sciences et technologie de Lille, France, Décembre 2004.