

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF – M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

SPECIALITE : AUTOMATIQUE

THEME

***Modélisation et commande floue d'une génératrice
asynchrone à double alimentation
« Application à l'énergie éolienne »***

Proposé et dirigé par :

M^{me}. BELOUNIS Ouassila

Présenté par :

Mr. REGUIG Bilal

Année Universitaire : 2015 / 2016

N° d'ordre : Aut_200

Dédicaces

A ma tendre mère :DAIFA

Femme vertueuse, pour moi vous êtes toujours prévenante, attentionnée et vigilante, votre sens du devoir, votre rigueur et votre souci constant pour ma réussite fait de vous une mère exemplaire, c'est la raison pour laquelle ce modeste travail vous est entièrement dédié. Puisse Dieu vous accorder longue vie afin de bénéficier du fruit de ce travail.

A mon cher Père : BENABDALAH

Qui a placé mes études au-dessus de tout, Trouvez dans ce travail le témoignage de ma connaissance et de mon indéfectible attachement.

A mon cher frère : SAMI

Pour l'estime et la considération que vous avez pour moi. En témoignage des liens qui nous unissent.

Trouvez ici le fruit des efforts que vous avez consenti à mon égard tout au long de ces années d'études universitaires.

A mes cousins, cousines, oncles et tantes :

Pour moi ce travail est le votre, c'est la raison pour laquelle il vous est dédié, soyez donc honoré, recevez dans ce mémoire mes respects les plus considérables.

Les mots me manquent encore pour vous témoigner ma reconnaissance car un proverbe dit « Quelle que soit la valeur du présent fait à l'homme ; il n'y a qu'un seul mot pour exprimer la reconnaissance inspirée par la libéralité, ce mot c'est Merci ».

Pour son soutien moral et ses encouragements tout au long de la préparation de ce mode de travail.

A toute ma famille Reguig

A tout mes amis.

A tous mes collègues de la promotion 2016.

REGUIG BILAL

Remerciements

Je remercie avant tous ALLAH pour son aide, ses innombrables dons, ALLAH qui m'a donné la force, la volonté et le moral pour accomplir mes études en master en électrotechnique.

*Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreuse **M^{me} BELOUNIS Ouassila** pour avoir d'abord proposer ce thème, pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et qu'elle n'a pas cessé de me donner ses conseils.*

*Mes vifs remerciements vont également à **Mr. BERABEH Fouad** chef de département de Génie Electrique pour ses qualités humaines.*

Je remercie très vivement tous mes Enseignants au département de Génie Electrique.

Mes remerciements vont au président du jury et aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de participer au jury.

Je remercie évidemment mes parents, mes frères et sœurs, qui depuis de si longues années, m'ont encouragé et soutenu dans la poursuite de mes études.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous mes amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

A tous MERCI

REGUIG BILAL



Liste des figures
 Liste des tableaux
 Notation

Introduction Générale 1

Chapitre I : Etude et modélisation d'une machine asynchrone à double alimentation

I.1. Introduction	2
I.2. Structure de la MADA	2
I.2.1. MADA à rotor bobiné	2
I.2.2. MADA sans balais	3
I.2.3. MADA en cascade	3
I.3. Mode de fonctionnement	4
I.3.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	4
I.3.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	4
I.3.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	4
I.3.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	5
I.4. Quelques configurations de la MADA à rotor bobine	5
I.4.1. Configuration pour application moteur	5
I.4.1.1 Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur	6
I.4.1.2 Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cycloconvertisseur	6
I.4.2. MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants	6
I.4.3. Configuration pour application génératrice	7
I.4.3.1. MADA à énergie rotorique dissipée cycloconvertisseur	7
I.4.3.2. MADA «structure de Kramer	8
I.4.3.3. MADA «structure de Scherbius avec cycloconvertisseur»	8
I.4.3.4. MADA «structure de Scherbius avec convertisseurs MLI»	9
I.5. Application des machines asynchrones à double alimentation	10
I.5.1. Application moteur	10
I.5.2. Application génératrice	10
I.6. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	10
I.6.1. Hypothèses de simplification	10
I.6.2. Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel générale	11
I.6.3. Équations magnétiques de GADA	11
I.6.4. La transformée de Park	12
I.6.5. Modèle de GADA dans le référentiel (d,q)	13
I.6.6. Equations électriques et l'équation mécanique de la GADA	13
I.6.7. Mise sous forme d'équation d'état	15
I.7. Résultats de simulation du MADA en Fonctionnement générateur	17
I.7.1. Pour alimentation au rotor de $V_r = 12V$	17
I.7.2. Passage d'un régime hypo synchrone à un régime hyper synchrone	20
I.7.3. Interprétations des résultats	22
I.8. Conclusion	23

Chapitre II: Commande vectorielle de la GADA

II.1. Introduction	24
II.2. Principe de la commande vectorielle de la MADA	24
II.3. Modèle de la GADA a flux statorique orienté	25
II.3.1. Choix du référentiel pour le modèle de la GADA dans le repère d-q	25
II.3.2. Relation entre le puissances statorique et le courant rotorique	25
II.3.3. Relations entre courant statoriques et courants rotoriques	26
II.4. Commande directe des puissances active et réactive	28
II.5. Commande indirecte des puissances active et réactive	28
II.5.1. Commande indirecte sans boucles des puissances	28
II.5.2. commande indirecte en boucle fermée	29
II.6. Calcule des régulateurs utilisés	30
II.6.1. Régulateurs utilisés (PI)	30
II.6.2. Calcule les régulateurs K_i et K_p	31
II.7. Résultats de simulation	31
II.7.1. Interprétation des résultats	33
II.8. Conclusion	34

Chapitre III: Asservissement de la chaine éolienne

III.1. Introduction	35
III.2. Définition de l'énergie éolienne	35
III.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne	36
III.4. Les différent type des éoliennes	36
III.4.1 Les éoliennes à axe vertical	36
III.4.2. Les éoliennes à axe horizontal	37
III.5. Les Principaux composantes des éoliennes à axe horizontal	38
III.6. Conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique	39
III.6.1. Loi de Betz	39
III.6.2. Production d'énergie mécanique	41
III.7. Intérêt de la vitesse variable	41
III.8. Modélisation de convertisseur éolienne	42
III.8.1. Modélisation de la turbine	42
III.8.2. Modèle du Multiplicateur	43
III.8.3. Equation mécanique de l'arbre	44
III.9. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable	45
III.10. Principe de la MPPT	46
III.10.1. Commande indirecte de vitesse (sans asservissement de vitesse)	46
III.11. Résultats de simulation du système de conversion complet	47
III.12. Interprétation des résultats	49
III.13. Conclusion	49

Chapitre IV : Application de la logique floue a la commande des puissances actives et réactive de la GADA

IV.1. Introduction	50
IV.2. Historique	50
IV.3. Domaines d'application	51
IV.4. Notions de base de la logique floue	51

IV. 4.1. Principe de base de la logique floue	51
IV.4.2. Univers de discours	54
IV.4.3. Fonction d'appartenance	54
IV.4.4. Variable linguistique	55
IV.4.4.1. Propriétés des ensembles	55
IV.4.4.1.1. Égalité	55
IV.4.4.1.2. Inclusion	55
IV.4.4.1.3. Support	55
IV.4.4.1.4. Hauteur	55
IV.4.4.1.5. Noyau	56
IV.4.4.1.6. Cardinal	56
IV.4.4.1.7. Partition floue	56
IV.4.5. Opérateurs de la logique floue	56
IV.4.5.1. Opérateur ET (Intersection floue)	56
IV.4.5.2. Opérateur OU (Union floue)	57
IV.4.5.3. Opérateur NON (complémentation floue)	57
IV.4.6. Règles d'inférence floue	58
IV.5. Structure d'un système de commande floue	59
IV.5.1. Interface de fuzzification	59
IV.5.2. Base de connaissance	60
IV.5.3. Inférence floue	60
IV.5.4. Interface de défuzzification	60
IV.5.5 Différentes approches pour la détermination des règles	60
IV.5.5.1 Développement pratique du contrôleur flou	62
IV.5.5.2. Variation de la commande	63
IV.6. Application de la logique floue a la commande de la puissance active et réactive de la GADA	63
IV.7. Résultats de simulation	63
IV.8. Conclusion	65
Conclusion Générale	66
Bibliographiques	67
Annexes	70

Liste des figures

Chapitre I : Etude et modélisation d'une machine asynchrone à double alimentation

Figure I.1	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	2
Figure I.2	Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné	3
Figure I.3	Structure de la MADA sans balais	3
Figure I.4	Structure en cascade de deux machines asynchrones	3
Figure I.5	Les différents modes de fonctionnement de la MADA	5
Figure I.6	Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur	6
Figure I.7	Schéma de la MADA dont le rotor alimenté par un cycloconvertisseur	6
Figure I.8	Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseurs	7
Figure I.9	MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	7
Figure I.10	Effet de la variation de la résistance R sur la caractéristique	8
Figure I.11	MADA, structure Kramer	8
Figure I.12	Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	9
Figure I.13	Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	9
Figure I.14	Modèle de PARK de la MADA	13
Figure I.15	Représentation de la machine dans le repère diphasé	13
Figure I.16	Les courants statoriques triphasés avec zoom	17
Figure I.17	Les courants rotoriques triphasés avec zoom	17
Figure I.18	Les composantes du courant statoriques de la GADA (d-q)	18
Figure I.19	Les composantes du courant rotoriques de la GADA (d-q).	18
Figure I.20	Les composantes du flux statoriques de la GADA (d-q)	18
Figure I.21	composantes du flux rotoriques de la GADA (d-q)	19
Figure I.22	Les puissances actives, réactive et apparente statoriques de la GADA	19
Figure I.23	Les puissances actives, réactive et apparente rotoriques de la GADA	19
Figure I.24	Couple électromagnétique.	19
Figure I.25	La vitesse rotorique (w_r)	20
Figure I.26	Courant statoriques et rotorique (d-q)	20
Figure I.27	Flux statoriques et rotorique (d-q)	21
Figure I.28	Puissance statoriques	21
Figure I.29	Puissance rotorique	21
Figure I.30	courant statoriques et rotorique triphasé (a, b, c)	22
Figure I.31	Couple électromagnétique	22

Chapitre II: Commande vectorielle de la GADA

Figure II.1	Analogie entre MCC à excitation séparée et GADA	24
Figure II.2	Bloc de contrôle à flux orienté	26
Figure II.3	Modèle de la GADA pour le contrôle des puissances	27
Figure II.4	Schéma bloc direct de la commande directe de la puissance active et réactive du GADA	28
Figure II.5	Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA	29
Figure II.6	Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée	29
Figure II.7	Schéma bloc d'un système régulé par un PI	30
Figure II.8	Schéma de la régulation	30
Figure II.9	La puissance active et réactive statorique et rotorique et leurs références	32
Figure II.10	Le courant statorique et rotorique selon l'axe d et q	32

Figure II.11 Le flux statorique et rotorique selon l'axe d et q	32
Figure II.12 Courant statorique et rotorique triphasés (a b c) avec zoom	33
Figure II.13 Couple électromagnétique	33

Chapitre III: Asservissement de la chaîne éolienne

Figure III.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent	35
Figure III.2 Principe de la conversion d'énergie	36
Figure III.3 Éolienne à axe verticale type Darrieus et type Savonius	37
Figure III.4 éolienne à axe horizontal	37
Figure III.5 Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne	38
Figure III.6 Tube de courant d'air autour d'une éolienne	39
Figure III.7 Coefficient de puissance	40
Figure III.8 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	41
Figure III.9 Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse Mécanique et la vitesse du vent	42
Figure III.10 Schéma de la turbine éolienne	42
Figure III.11 Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne	43
Figure III.12 Modèle mécanique de la turbine éolienne	44
Figure III.13 Modèle mécanique simplifié du multiplicateur	44
Figure III.14 Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien	45
Figure III.15 Caractéristique idéale puissance vitesse d'une éolienne	45
Figure III.16 Caractéristique couple-vitesse pour différentes vitesses de vent	46
Figure III.17 la vitesse du rotor (mécanique)	47
Figure III.18 coefficient de puissance de la Turbine éolienne et sa référence	47
Figure III.19 Vitesse relative de l'éolienne	48
Figure III.20 Puissance active statorique	48
Figure III.21 Puissance réactive statorique	48
Figure III.22 Puissance active rotorique	48
Figure III.23 Le courant statorique avec un zoom	48

Chapitre IV: Application de la logique floue à la commande des puissances actives et réactive de la GADA

Figure IV.1 Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou	52
Figure IV.2 Représentation des variables booléenne classique	52
Figure IV.3 Représentation des variables floues	53
Figure IV.4 Différentes formes des fonctions d'appartenance	54
Figure IV.5 Représentation graphique des ensembles flous d'une variable linguistique	54
Figure IV.6 Exemple d'une partition floue formée de trois ensembles flous	56
Figure IV.7 Opérateur ET	57
Figure IV.8 Opérateur OU	57
Figure IV.9 Opérateur NON	58
Figure IV.10 a): Schéma synoptique d'un contrôleur flou, b) : Configuration d'un contrôleur flou	59
Figure IV.11 Schéma bloc d'une boucle régulation à contrôleur flou	62
Figure IV.12 Fonctions d'appartenance utilisée par le contrôleur	62
Figure IV.13 La puissance active et réactive statorique et rotorique et leurs références	63
Figure IV.14 Le courant statorique et rotorique	64
Figure IV.15 Le Flux statorique et rotorique	64
Figure IV.16 Couple électromagnétique	64

Liste des tableaux

Tableau IV.1 Table de control flou de base (qui correspond à la table de règle très connue de Mac Vicar-whilan)**61**

Nomenclature

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation.
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation.
RLF	Régulateur à logique floue.
MPPT	Maximum Power Point Tracking

Symboles

k_b	Coefficient de bobinage
N_r, N_s	Le nombre de spires des bobinages rotoriques et statoriques.
f_r	Fréquence des grandeurs rotorique.
f_s	Fréquence des grandeurs statorique.
f	Le coefficient de frottement visqueux de la GADA
P	Le nombre de paires de pôles.
g	Le glissement.
C_{em}	Le couple électromagnétique.
C_r	Le couple résistant.
j	L'inertie des parties tournantes.
ω	La vitesse de rotation de l'axe de la GADA.
ω_r	Pulsations des grandeurs électriques rotoriques.
ω_s	Pulsations des grandeurs électriques statoriques.
[P]	Matrice de Park.
[P] ⁻¹	Matrice inverse de Park.
a_s, b_s, c_s	Les trois phases du stator.
a_r, b_r, c_r	Les trois phases du rotor.
θ_s, θ_r	Angle électrique statorique, rotorique.
I_s, I_r	Les courants de phase statorique et rotorique respectivement.
I_{rd}	Composante du courant I_r selon l'axe d.
I_{rq}	Composante du courant I_s selon l'axe q.
$[V_{sabc}], [V_{rabc}]$	Les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques suivant les axes a,b,c.
$[\varphi_{sabc}], [\varphi_{rabc}]$	Les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes a,b,c.
V_d, V_q	La tension rotorique directe et en quadrature respectivement.
[R _s]	Matrice résistance statorique.
[L _r]	Matrice d'inductances rotoriques.
[L _s]	Matrice d'inductances statoriques.
[l _s]	Inductance propre d'une phase statorique.

$[L_r]$	Inductance propre d'une phase rotorique.
$[M_s]$	Inductance mutuelle entre phases statoriques.
$[M_r]$	Inductance mutuelle entre phase rotoriques.
M	Mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.
$\varphi_{sq}, \varphi_{sd}$	Les flux statoriques direct et en quadrature.
$\varphi_{rq}, \varphi_{rd}$	Les flux rotoriques direct et en quadrature.
φ, φ	Les flux statorique et rotorique respectivement.
P_s	Puissance active statorique.
Q_s	Puissance réactive statorique.
P_r	Puissance active rotorique.
Q_r	Puissance réactive rotorique.
PI	Proportionnel – Intégrale.
P	Opérateur de Laplace.
K_p	Gain de l'action proportionnel du régulateur PI.
K_i	Gain de l'action intégrale du régulateur PI.
P_{vent}	Puissance du vent.
ρ	Masse volumique du vent.
V_{vent}	Vitesse du vent.
C_p	Coefficient de puissance.
β	Angle de calage.
P_{tur}	Puissance de la turbine.
S	Surface balayée.
λ	Facteur d'avance(vitesse relative) .
Ω_t	Vitesse de la turbine.
Ω_r	Vitesse de rotor de la génératrice.
G	Multiplicateur mécanique.
C_{vis}	Couple des frottement visqueux.
C_g	Couple issu de multiplicateur.
C_t	Couple de la turbine.
R	Rayon de la turbine.

Introduction générale

Introduction générale :

Les machines asynchrones sont les plus utilisées dans l'industrie en raison de leur fiabilité et leur construction simple. Elles occupent plus de 80% dans le domaine de conversion électromagnétique d'énergie. Leur dynamique non linéaire est un problème assez délicat car elle rend la commande très difficile. [1]

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types à vitesse variable, son utilisation dans la chaîne de conversion électromécanique en tant que aérogénérateur ou moteur a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé afin de redresser-onduler les courants alternatifs du rotor a une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur, ce qui réduit son cout par rapport aux topologies concurrentes.

Un intérêt de plus en plus croissant est accordé à la machine asynchrone à double alimentation. Cet intérêt est dû aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor. Certaines études font d'elle une sérieuse concurrente à plusieurs machines électriques, particulièrement la machine asynchrone à cage classique. Pourtant à première vue, la balance semble pencher tout de suite du côté de la machine à cage d'écureuil : La machine asynchrone à rotor bobiné est plus volumineuse, utilise des balais et nécessite plus de convertisseurs pour un fonctionnement moteur. [2]

La GADA utilisée pour la génération d'énergie électrique dans un site isolé ceci est considéré comme une solution écologique intéressante. Le générateur à induction double alimentation "GADA" est d'avantage adapté pour cette application, par ce qu'il reçoit une vitesse variable sur son arbre, et il doit produire une tension à amplitude et fréquence constantes coté charge, donc pour une génératrice autonome, débitant sur un site isolé, le problème devient plus complexe, car il faut contrôler aussi la tension et la fréquence du coté du stator [03].

Dans le domaine de la commande des machines électriques, les travaux de recherche s'orientent de plus en plus vers l'application des techniques de commande modernes. Ces techniques évoluent d'une façon vertigineuse avec l'évolution des calculateurs numériques et de l'électronique de puissance. Ceci permet d'aboutir à des processus industriels de hautes performances. On cite à titre d'exemple la commande adaptative, la commande floue,...etc, l'intérêt récent accordé à cette dernière est dû essentiellement à la disponibilité des interrupteurs à fréquence de commutation élevée et des microprocesseurs de plus en plus performants.

Le point de départ de cette étude d'aller vers une commande de la logique floue des puissances actives et réactive de la GADA Application éolienne.

Ce mémoire, est composé de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons présenter un état de l'art et la modélisation des machines asynchrones à double alimentation, leurs applications et leurs

Particularités. Ceci nous permet de nous positionner quant au choix du type de génératrice utilisée pour la production de l'énergie électrique. Nous y verrons donc l'intérêt que présente la machine asynchrone double alimentée par rapport aux autres machines.

Dans le deuxième chapitre présenté la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans le troisième chapitre la modélisation de la turbine éolienne puis un asservissement du modèle global d'une chaîne de conversion éolienne sera fait.

Cette étape s'intéresse à l'optimisation du rendement de la GADA dans un système éolien (MPPT).

Dans le quatrième chapitre nous présenterons la théorie de la commande par logique floue, et son application sur la GADA où des résultats de simulations seront présentés.

Ce travail sera terminé par une conclusion générale.

Chapitre I

**Etude et modélisation d'une machine
asynchrone à double alimentation**

I.1. Introduction :

Les applications industrielles des entraînements à vitesse variable exigent des performances de plus en plus importantes ainsi qu'une fiabilité maximale et un coût minimum. Historiquement, la machine à courant continu a été la reine dans le domaine de la variation de la vitesse, et son emploi est largement répandu même de nos jours, cependant elle ne peut servir dans les domaines de grandes puissances, ni aux milieux corrosifs, enfin le système balais collecteur nécessite un entretien permanent. [2]

En effet, à travers ce chapitre nous connaissons les raisons d'un tel engouement en commençant par décrire la structure de cette machine, exposer ses différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisées tout en citant ses avantages et ses inconvénients.

I.2. Structure de la machine asynchrone à double alimentation « MADA » :

On peut voir sur la figure (I.1) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais-bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor.

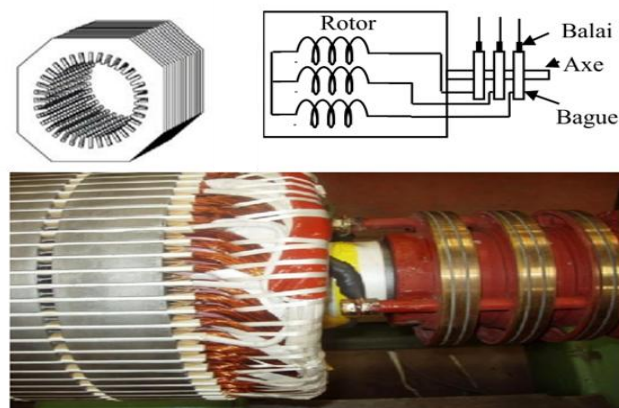


Figure I.1: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

I.2.1. MADA à rotor bobiné :

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné est composée, comme toute machine à courant alternatif, d'un stator et d'un rotor. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone classique. Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoiles dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants.

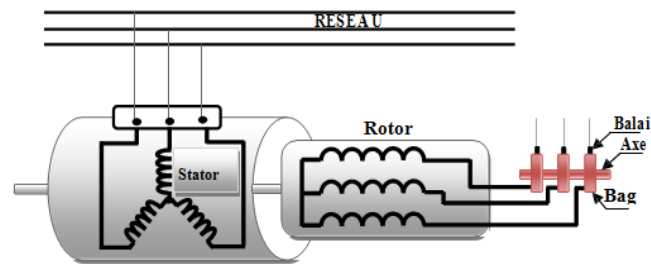


Figure I.2 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné.

I.2.2. MADA sans balais :

Cette machine est très proche à la précédente, sauf que cette fois ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil.

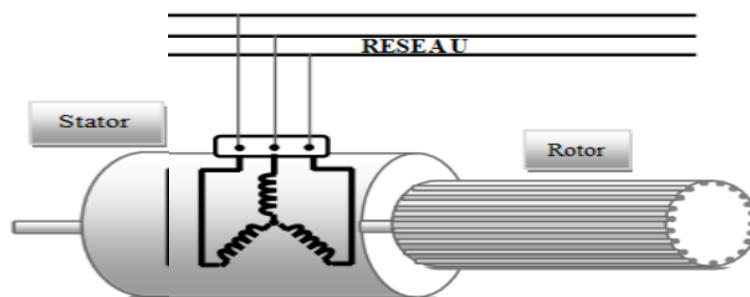


Figure I.3 : Structure de la MADA sans balais.

I.2.3.MADA en cascade :

La structure de la MADA en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Cette structure permet d'avoir un système à double alimentation coté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées.

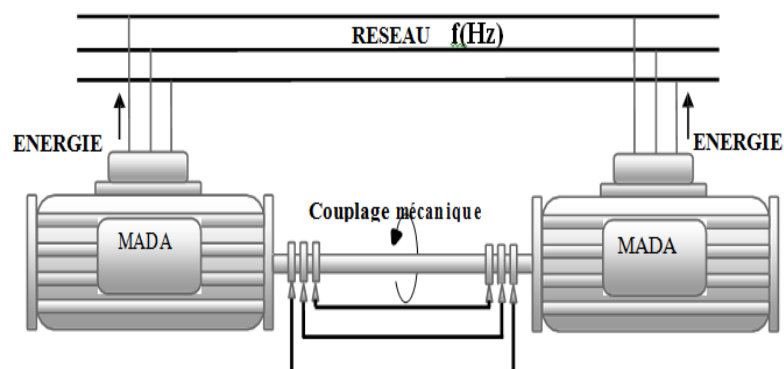


Figure I.4 : Structure en cascade de deux machines asynchrones.

I.3. Mode de fonctionnement :

Contrairement à la machine asynchrone classique, qui ne peut fonctionner en moteur qu'en dessous de sa vitesse de synchronisme et ne peut être en générateur qu'au dessus de cette vitesse, dans la MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine.

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA est basé sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Au lieu de dépenser en pertes joule la puissance rotorique on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques est égale à "g" fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau.

Nous verrons dans les paragraphes suivants comment une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné peut être transformée en génératrice à vitesse variable en contrôlant l'écoulement de puissance entre le rotor et le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur. De plus, grâce à ce mécanisme, sa vitesse de rotation peut être contrôlée. Les différents modes de fonctionnement (figure I.5) de la MADA sont [3].

I.3.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :

L'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injectée au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes joule dans le rotor.

I.3.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :

La puissance statorique est fournie par le réseau ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu.

I.3.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :

L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine, celui-ci la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Afin de permettre un fonctionnement hypo synchrone, l'énergie de glissement, provenant du réseau, se doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour le fonctionnement générateur hypo synchrone, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation. Il est évident qu'un moteur à cage ne peut avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor.

I.3.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à g , P_{mec} est transmise par l'intermédiaire du rotor.

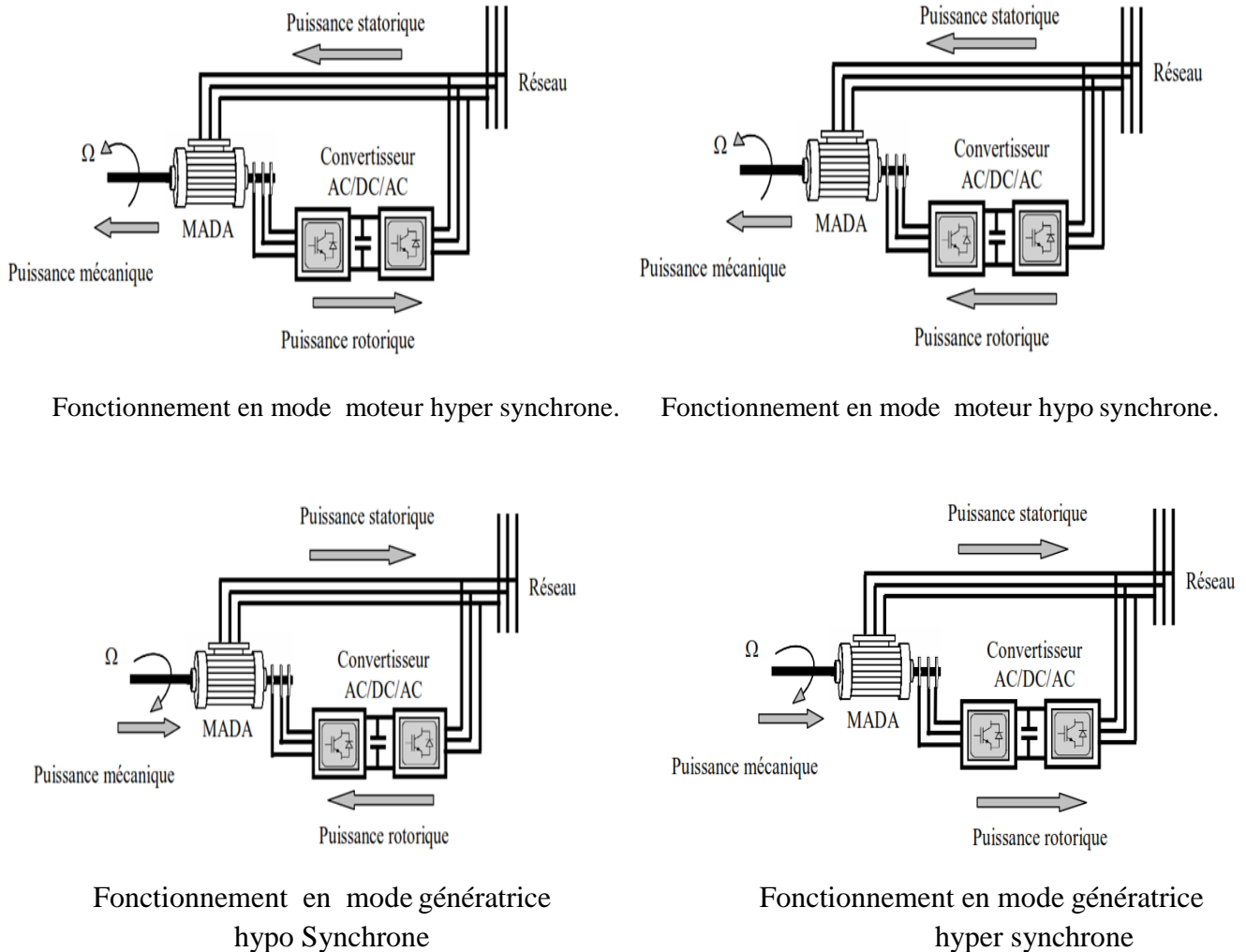


Figure I.5 : Les différents modes de fonctionnement de la MADA.

I.4. Quelques configurations de la MADA à rotor bobiné :

La large plage de variation de la vitesse qu'offre cette machine lui a assurée une place de choix dans différentes applications que ce soit en moteur (laminage, traction ferroviaire, propulsion maritime...) ou en génératrice (centrales hydrauliques...).

Les configurations les plus utilisées pour ces deux applications sont les suivantes :

I.4.1. Configuration pour application moteur :

La variation de la vitesse des machines synchrones et asynchrones classiques nécessitent la variation de la fréquence des courants statoriques par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur.

Généralement, ces deux convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire le nombre de ces convertisseurs d'environ 70 % [8], en agissant sur l'alimentation des enroulements rotoriques.

I.4.1.1 Stator alimenté par le réseau, rotor alimenté par un onduleur :

C'est la configuration la plus simple qui vient à l'esprit c'est-à-dire connecter les enroulements statoriques directement au réseau triphasé fixe, tandis que le rotor est alimenté à travers un redresseur à diodes et un onduleur dimensionnés à 30% de la puissance maximale ce qui permet de réduire considérablement le coût de l'installation [4].

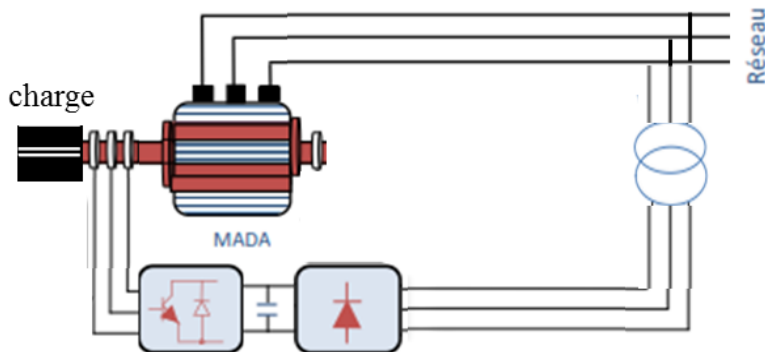


Figure I.6 : Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un onduleur.

I.4.1.2 Stator relié au réseau, rotor alimenté par un Cycloconvertisseur :

Le remplacement de l'association redresseur-onduleur par un cycloconvertisseur autorise un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau.

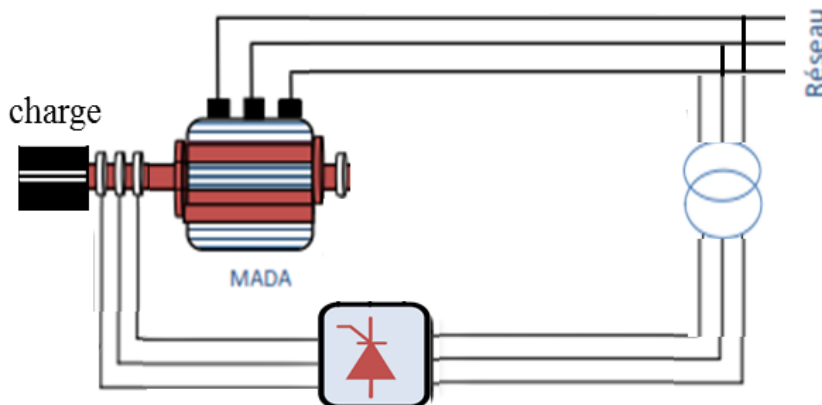


Figure I.7 : Schéma de la MADA dont le rotor est alimenté par un cycloconvertisseur.

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif.

Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés [5].

I.4.2. MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants :

Dans cette structure on trouve plusieurs configurations possibles. Le stator et le rotor sont alimentés soit :

- Deux cycloconvertisseurs.
- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs.
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun.

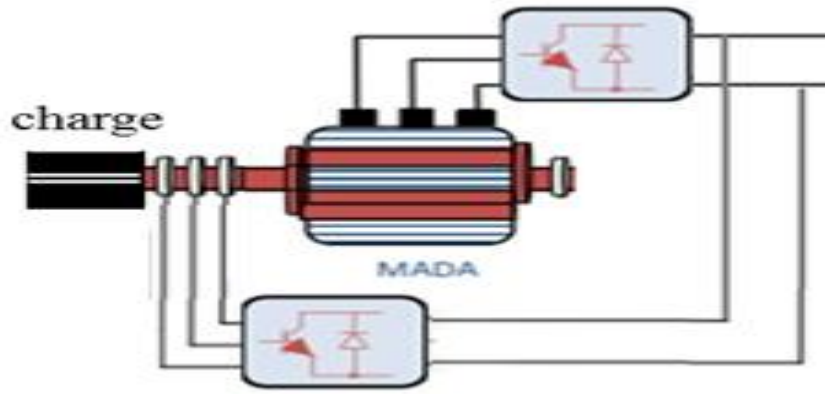


Figure I.8 : Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseurs.

Grâce à ce type d'alimentation, la MADA possède quatre degrés de libertés ce qui rend son contrôle très souple. On peut donc réguler la vitesse (ou le couple), le flux (statorique, rotorique et d'entrefer), le glissement et le facteur de puissance [06].

I.4.3. Configuration pour application génératrice :

C'est l'application par excellence de la MADA, qui est retrouvée principalement dans les systèmes de production éoliens. Généralement son stator est connecté directement au réseau et le rotor est alimenté de différentes façons.

I.4.3.1. MADA à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure I.9, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l' IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [7].

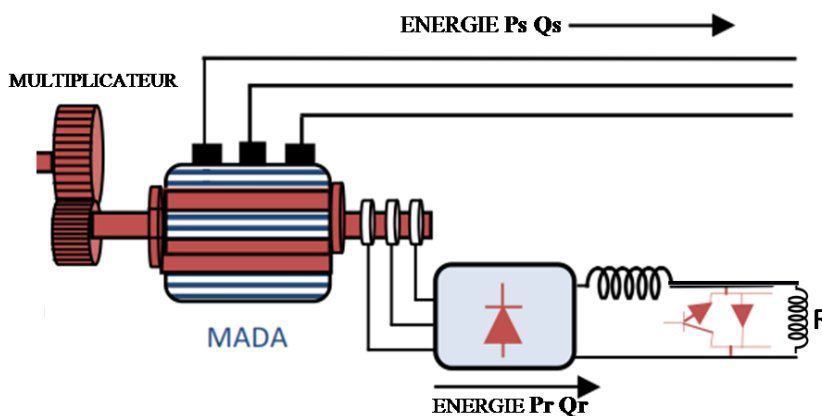


Figure I.9 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système.

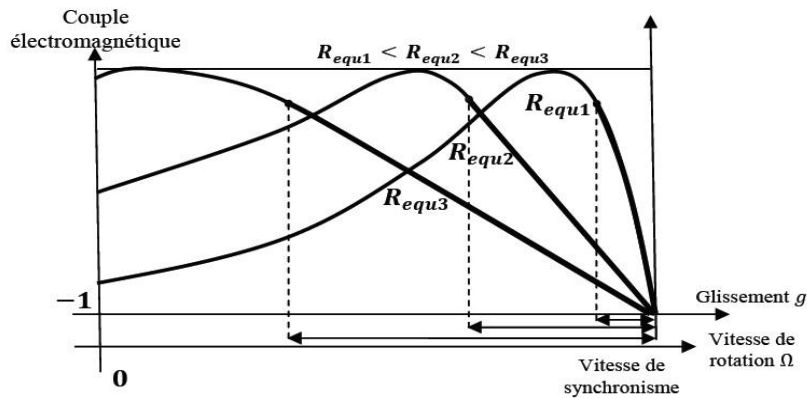


Figure I.10: Effet de la variation de la résistance R sur la caractéristique. [4]

I.4.3.2. MADA « structure de Kramer » :

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, figure I.11).

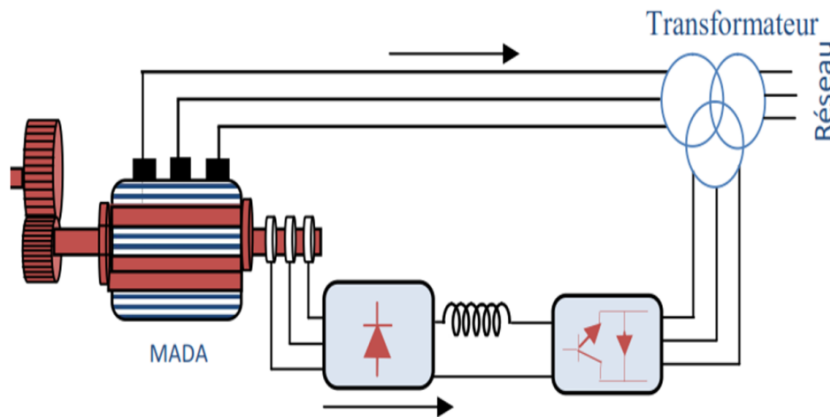


Figure I.11: MADA structure Kramer.

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Comme dans le cas de la machine brushless, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT [7].

I.4.3.3. MADA « structure de Scherbius avec cycloconvertisseur » :

Dans cette configuration, l'échange d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. Cela

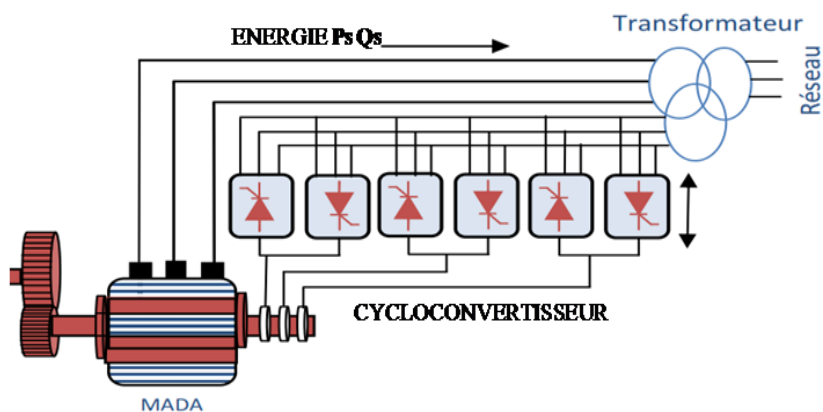


Figure I.12: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

Permet de doubler la plage de variation de vitesse par rapport à la structure de Kramer. En effet, la variation du glissement inférieur à 30% peut être dans ce (fonctionnement hypo synchrone) ou négative (fonctionnement hyper synchrone).

L'inconvénient noté est la génération de perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif [8].

I.4.3.4. MADA « structure de Scherbius avec convertisseurs MLI » :

Une autre structure intéressante figure (I.13) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [8]. Le gain se répercute sur des perturbations moins importantes (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées par la commande MLI). En plus la bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo et le contrôle du facteur de puissance côté réseau [3].

Cette structure est alors particulièrement adaptée pour la génération d'électricité dans les systèmes éoliens et qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études et d'applications

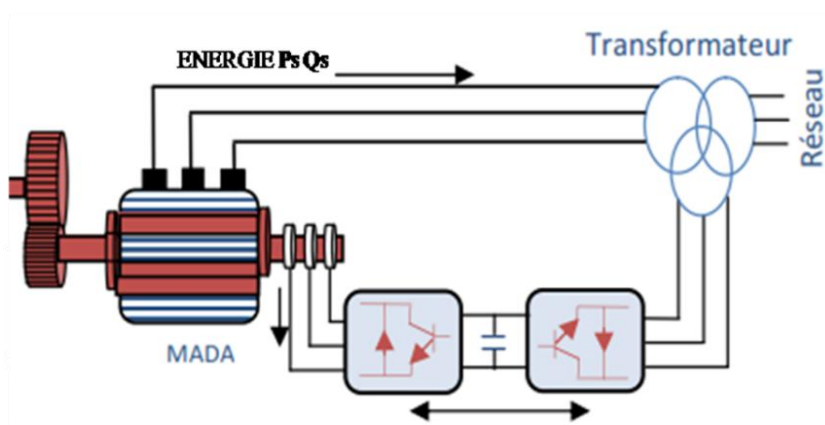


Figure I.13: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

I.5. Application des machines asynchrones à double alimentation :

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

I.5.1. Application moteur :

La première application de la MADA et le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine [09]. En générale La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [10].

I.5.2. Application génératrice :

L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse [09].

I.6. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et maîtrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. D'autre part, elle est une phase primordiale dans le développement de la conception des systèmes [11].

Dans cette partie sera l'objectif d'une étude de modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le référentiel lié au champ tournant. Ce dernier nous a permis d'obtenir un modèle mathématique adapté de la machine asynchrone à double alimentation.

Nous essayons d'aborder par la suite la modélisation en mode générateur, ceci a pour l'objectif la connaissance du comportement de ce type de machine dans ses différents régimes de fonctionnement, éventuellement lors de son contrôle (commande).

I.6.1. Hypothèses de simplification :

Afin d'établir un modèle simple de la machine asynchrone à double alimentation, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :

- La géométrie de la machine est symétrique.

- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable.
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs Elémentaires.
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température.
- Les forces magnétomotrices créent par le stator ou le rotor a une répartition Sinusoïdale.
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

I.6.2. Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel générale :

La machine asynchrone à double alimentation « GADA » comporte trois bobines statoriques (A_s, B_s, C_s) décalées entres elles par un angle de $(2\pi/3)$ et aussi trois bobines rotorique (A_r, B_r, C_r) identique de répartition et similaire à celles du stator.

Les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = -[R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}] \end{cases} \quad (I.1)$$

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix};$$

$[V_{sabc}]$. $[V_{rabc}]$: Sont respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}; [\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}; [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix};$$

$[I_{sabc}]$, $[I_{rabc}]$: Sont respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$[\Phi_{sabc}]$. $[\Phi_{rabc}]$: Sont les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes a,b,c.

$$\text{Avec :} \quad [R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix};$$

$[R_s]$, $[R_r]$: Sont respectivement les matrices les résistances statoriques et rotoriques par phase.

I.6.3. Équations magnétiques de GADA :

Nous devons exprimer les grandeurs magnétiques au stator et au rotor, toujours dans le repère a, b, c :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \quad (I.2)$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r][I_{rabc}] + [M_{sr}][I_{sabc}] \quad (I.3)$$

Pour l'écriture condensée, on met :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statoriques.

$[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotoriques.

$[L_s]$: Matrice Inductance propre d'une phase statorique.

$[L_r]$: Matrice Inductance propre d'une phase rotorique.

$[M_s]$: Matrice Inductance mutuelle entre phases statoriques.

$[M_r]$: Matrice Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

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

Avec :

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$: Est la matrice d'inductance mutuelle stator-rotor.

$[M]$: Est Mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

I.6.4. La transformée de Park :

Appelée souvent transformation des deux axes , cette transformation a été présenté par PARK en 1929 lors de l'étude de la machine asynchrone comme moyen de simplifier les équations de celle-ci . fait correspondre aux variables réelles leurs composantes :

- D'axes directs (indice d)
- D'axes en quadrature (indice q) [10].

Deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes :

d : Indice de la composante directe, **q** : en quadrature et **o** : Indice composante homopolaire.

La transformation du modèle d'un enroulement triphasé en un modèle d'un enroulement biphasée, en prenant en compte la conservation permis par la matrice de Park

$$\text{Donnée ci après [10] : } [P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.5)$$

Et

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

θ : Est l'angle de rotation du repère(d, q) .

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P]^T \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix}$$

En appliquant, la transformation de Park [P] sur les équations:(I.1),(I.2) et (I.3). D'après simplification, les équations électriques et magnétiques modélisant la machine dans le repère biphasé(d, q), sont déduites voir figure (I.14).

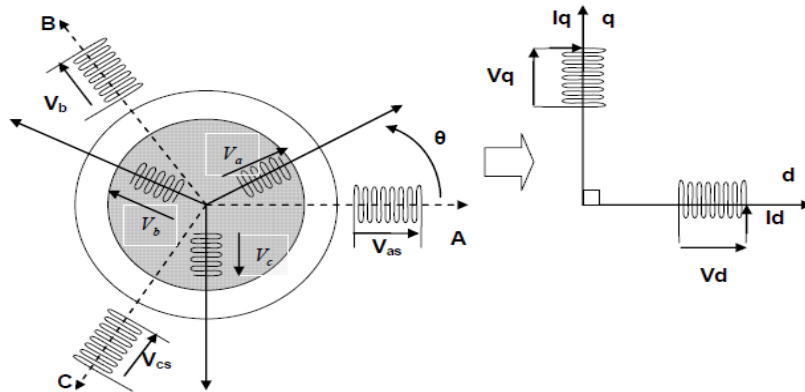


Figure I.14 : Modèle de PARK de la MADA.

I.6.5. Modèle de GADA dans le référentiel (d,q) :

La théorie de la génératrice asynchrone à double alimentation est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations statoriques et rotoriques triphasé a des axes perpendiculaires (biphasés), appelés l'axe direct **d** et axe quadrature **q**.

I.6.6. Equations électriques et l'équation mécanique de la GADA :

Les équations générales de la machine asynchrone classique dans un repère diphasé lié au champ tournant s'écrivent sous la forme suivante :

$$\text{On a: } \theta_s = \theta_r + \theta \tag{I.7}$$

$$\theta_r = \theta_s - \theta \tag{I.8}$$

$$\text{Alors } \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \tag{I.9}$$

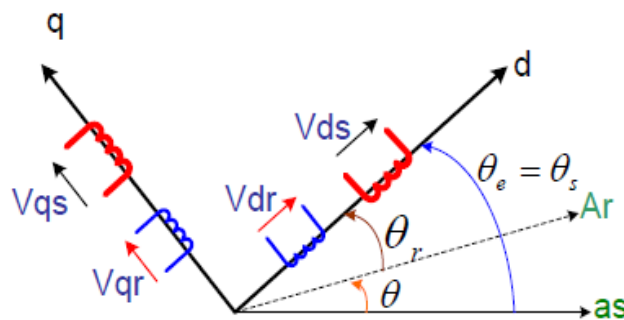


Figure I.15 : Représentation de la machine dans le repère diphasé.

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

Avec respectivement :

V_{sd}, V_{sq}, V_{rd} et V_{rq} : Les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé.

ω_r et ω_s : Les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

$\phi_{sq}, \phi_{sd}, \phi_{rq}$ et ϕ_{rd} : Les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé leurs

$$\text{Expressions sont données par : } \begin{cases} \phi_{sd} = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \phi_{sq} = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (I.11)$$

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (I.12)$$

Avec respectivement :

C_{em} : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant ;

f : Le coefficient de frottement visqueux de la GADA.

J : L'inertie des parties tournantes.

Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la GADA.

➤ L'expression du couple électromagnétique est donnée par les relations suivantes :

➤ Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd} I_{sd} - V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (I.13)$$

P_s : La puissance active statoriques.

Q_s : La puissance réactive statoriques.

➤ Les puissances actives et réactives rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_r = V_{rq} I_{rq} + V_{rd} I_{rd} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (I.14)$$

P_r : La puissance active rotoriques.

Q_r : La puissance réactive rotoriques.

I.6.7. Mise sous forme d'équation d'état :

Pour la génératrice asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les flux statoriques et les courant rotoriques comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante :

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

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les courant statoriques et les flux rotoriques comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante :

$$[X] = [I_{dr} \quad I_{qr} \quad \varphi_{ds} \quad \varphi_{qs}]' \quad (I.16)$$

$$[U] = [V_{ds} \quad V_{qs} \quad V_{dr} \quad V_{qr}]' \quad (I.17)$$

$$\text{Avec: } \omega_r = \omega_s - \omega, \quad \omega = p \cdot \Omega$$

A partir d'expressions (I.11), on déduit les expressions des flux rotoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (I.18)$$

A partir d'expressions (I.11), on déduit les expressions des courants statorique :

$$\begin{cases} I_{sd} = -\frac{1}{L_s} \varphi_{sd} + \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{1}{L_s} \varphi_{sq} + \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (I.19)$$

Le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s I_{sd} - L_s \frac{d}{dt} I_{sd} + M \frac{d}{dt} I_{rd} + \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{qs} = -R_s I_{qs} - L_s \frac{d}{dt} I_{sq} + M \frac{d}{dt} I_{rq} - \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + L_r \frac{d}{dt} I_{rd} - M \frac{d}{dt} I_{sd} - (\omega_s - \omega) \cdot L_r I_{rd} + (\omega_s - \omega) \cdot M I_{sd} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + L_r \frac{d}{dt} I_{rq} - M \frac{d}{dt} I_{sq} + (\omega_s - \omega) \cdot L_r I_{rq} - (\omega_s - \omega) \cdot M I_{sq} \\ J \frac{d\Omega}{dt} = -P \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} I_{qs} - \varphi_{qr} I_{ds}) - C_r - f\Omega \end{cases} \quad (I.20)$$

Après le calcul et la simplification du système d'équations (I.21), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & M \omega_s & 0 \\ 0 & M \omega_r & R_r & -\omega_r L_r \\ -M \omega_r & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{sd} \\ \dot{I}_{sq} \\ \dot{I}_{rd} \\ \dot{I}_{rq} \end{bmatrix} \quad (I.21)$$

En considérant les composantes en (d, q) l'équation d'état prend la forme :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_{dr} = -\delta I_{dr} + \omega_r \cdot I_{qr} + \alpha \cdot \varphi_{ds} - \beta \cdot (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qs} - \frac{M}{\sigma L_r L_s} \cdot V_{ds} + \frac{1}{\sigma L_r} \cdot V_{dr} \\ \frac{d}{dt} I_{qr} = -\delta I_{qr} - \omega_r \cdot I_{dr} + \alpha \cdot \varphi_{qs} + \beta \cdot (\omega_s - \omega_r) \varphi_{ds} - \frac{M}{\sigma L_r L_s} \cdot V_{qs} + \frac{1}{\sigma L_r} \cdot V_{qr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{ds} = -\frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{ds} + \omega_s \varphi_{qs} + \frac{M}{T_s} \cdot I_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qs} = -\frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} + \frac{M}{T_s} \cdot I_{qr} + V_{qs} \end{cases} \quad (I.22)$$

La matrice d'état [A] s'écrit :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\delta & \omega_r & \alpha & -\beta \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ -\omega_r & -\delta & \beta \cdot (\omega_s - \omega_r) & \alpha \\ \frac{M}{T_s} & 0 & -\frac{1}{T_s} & \omega_s \\ 0 & \frac{M}{T_s} & -\omega_s & -\frac{1}{T_s} \end{bmatrix} \quad (I.23)$$

La matrice des entrées B s'écrivent:

$$[B] = \begin{bmatrix} -\frac{M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (I.24)$$

On rappelle que :

$$\begin{cases} T_s = \frac{L_s}{R_s} \\ T_r = \frac{L_r}{R_r} \\ \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \\ \alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_r L_s} \\ \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_r L_s} \right) \\ \beta = \frac{M}{\sigma L_r L_s} \end{cases} \quad (I.25)$$

A partir des équations (I.19) et (I.20) (I.22) le modèle peut être exprimé dans l'espace d'état sous la forme suivante :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U]$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta & \omega_r & \alpha & -\beta \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ -\omega_r & -\delta & \beta \cdot (\omega_s - \omega_r) & \alpha \\ \frac{M}{T_s} & 0 & -\frac{1}{T_s} & \omega_s \\ 0 & \frac{M}{T_s} & -\omega_s & -\frac{1}{T_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}$$

(I.26)

I.7. Résultats de simulation du MADA en fonctionnement générateur:

Les résultats de simulation présentée sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation fonctionnement générateur « GADA », entraînée à une vitesse fixe égale à 1440tr/min, alimentée directement par deux sources de tension triphasée parfait. L'une au niveau du stator avec l'amplitude ($220\text{ V} \cdot \sqrt{2}$; $100 \cdot \pi$ rad/s; 50Hz) et une fréquence du réseau qui est 50Hz et l'autre au niveau du rotor avec l'amplitude ($12 \cdot \sqrt{2}\text{ V}$; $4 \cdot \pi$ rad/s; 2Hz) et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

I.7.1. Pour alimentation au rotor de $V_r = 12\text{V}$:

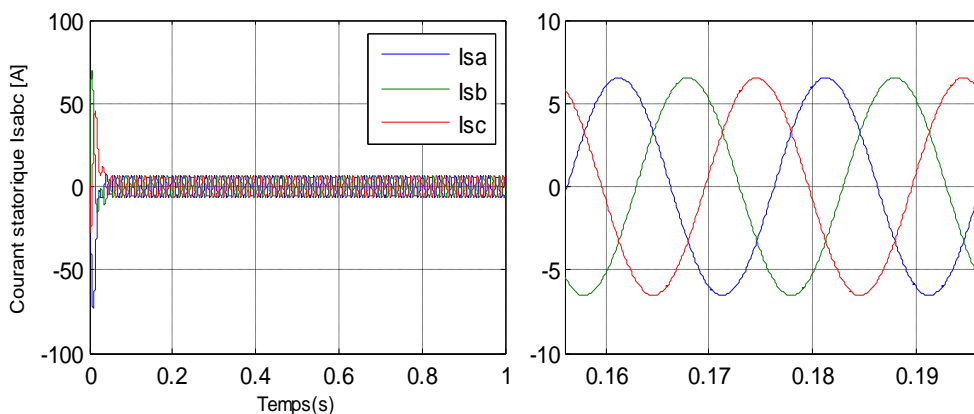


Figure I.16: Les courants statoriques triphasées avec zoom.

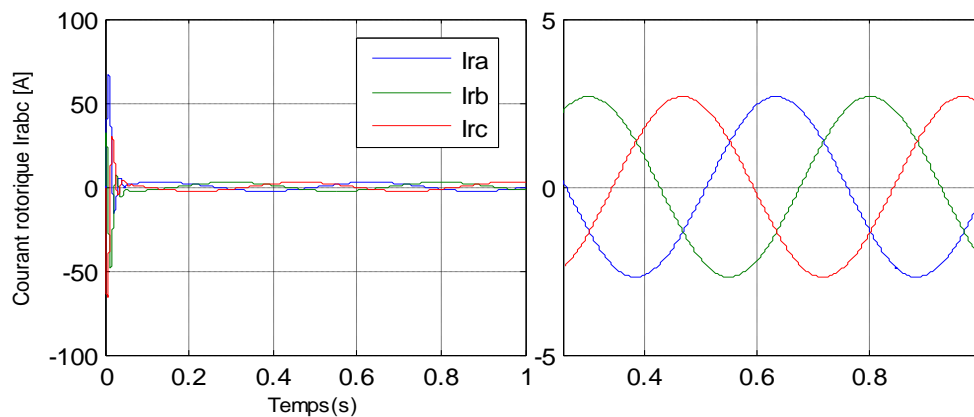


Figure I.17: Les courants rotoriques triphasées avec zoom.

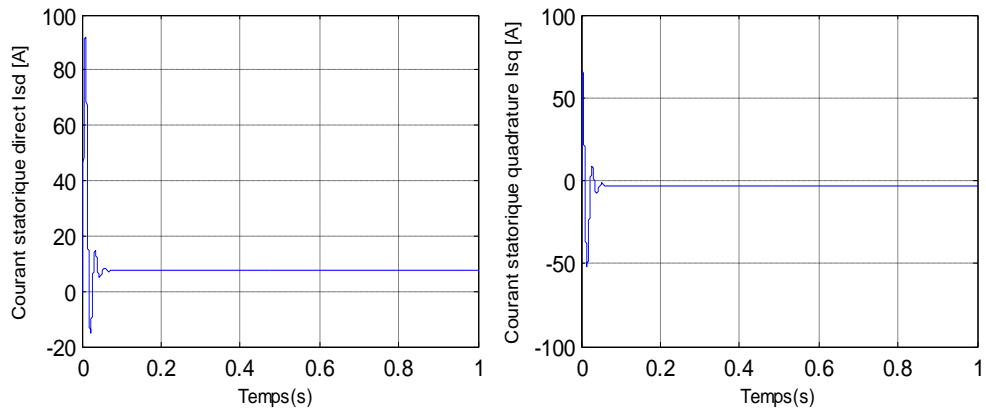


Figure I.18: Les composantes du courant statoriques de la GADA (d-q).

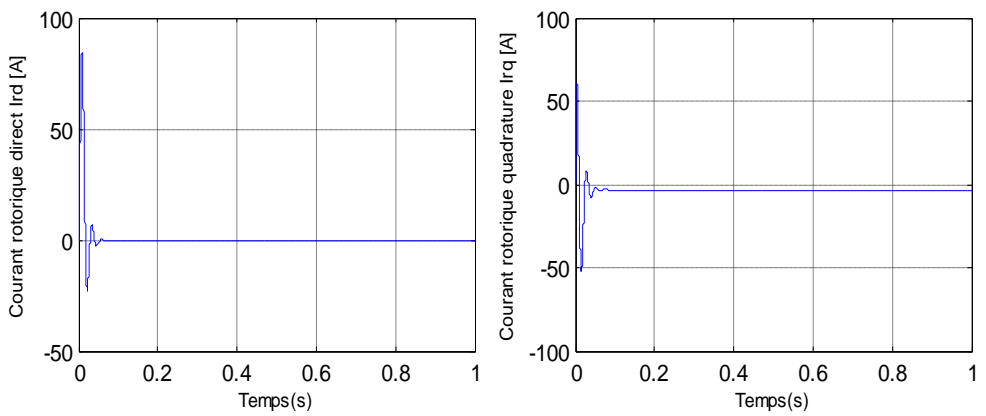


Figure I.19: Les composantes du courant rotoriques de la GADA (d-q).

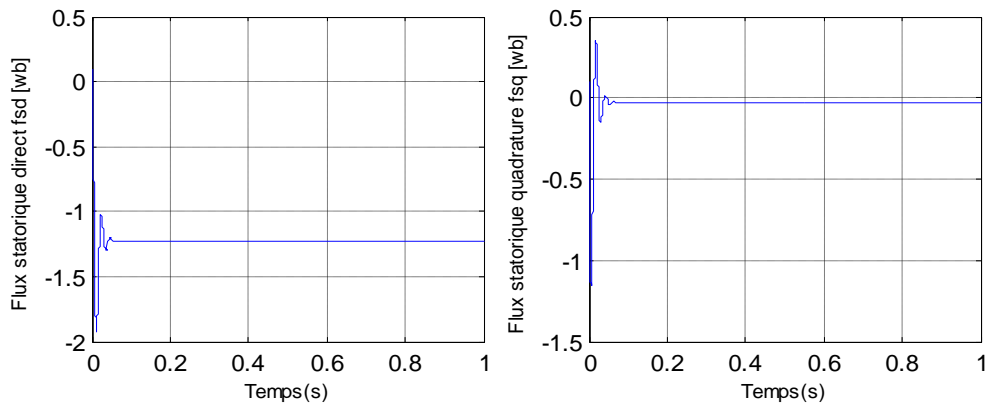


Figure I.20: Les composantes du flux statoriques de la GADA (d-q).

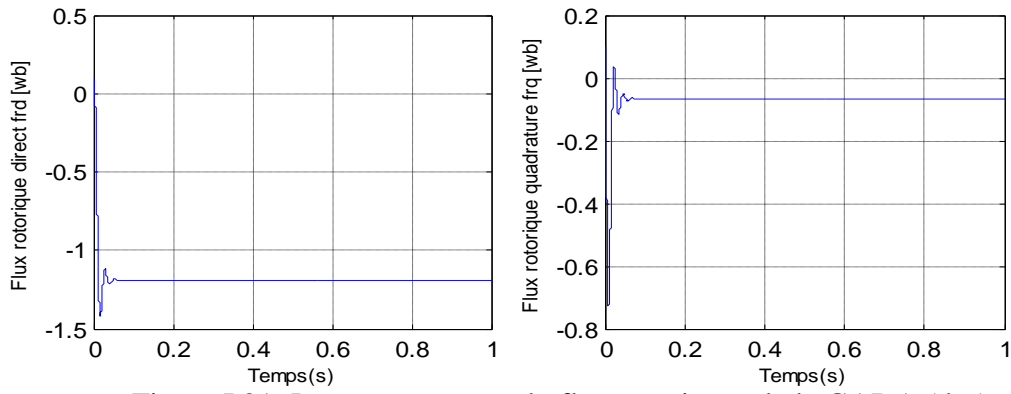


Figure I.21: Les composantes du flux rotoriques de la GADA (d-q).

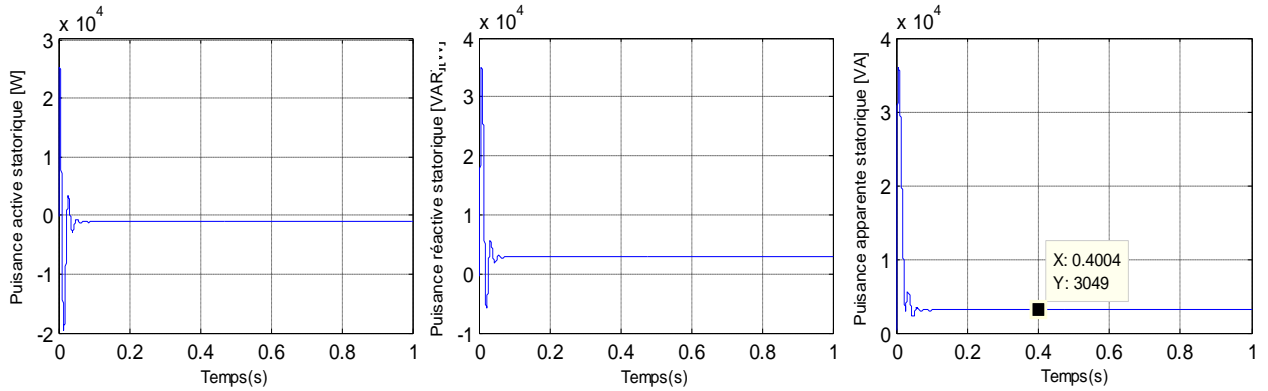


Figure I.22: Les puissances actives, réactive et apparente statoriques de la GADA.

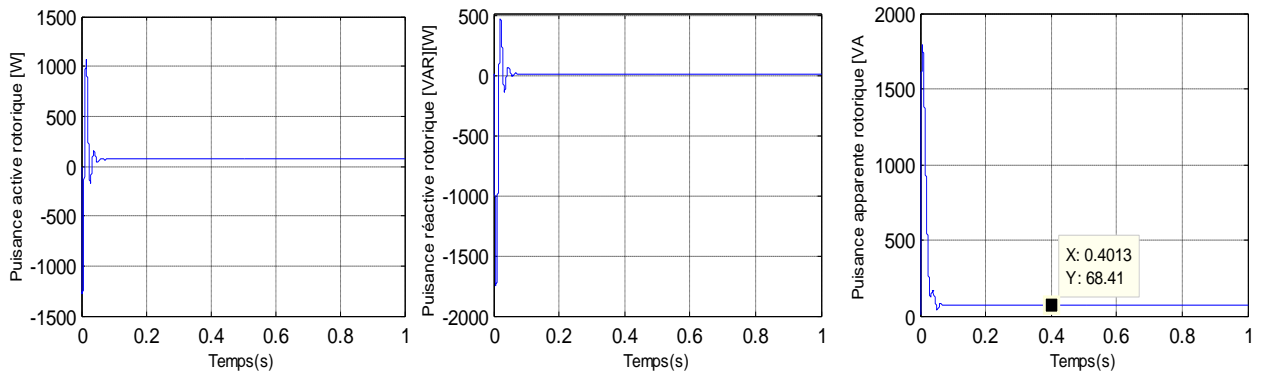


Figure I.23: Les puissances actives, réactive et apparente rotoriques de la GADA.

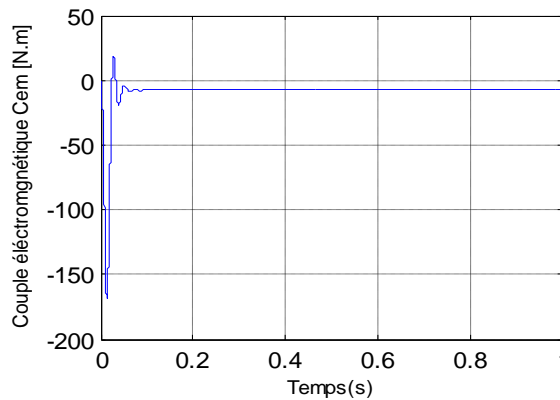


Figure I.24: Couple électromagnétique.

➤ Deux vitesses différentes :

I.7.2. Passage d'un régime hypo synchrone à un régime hyper synchrone :

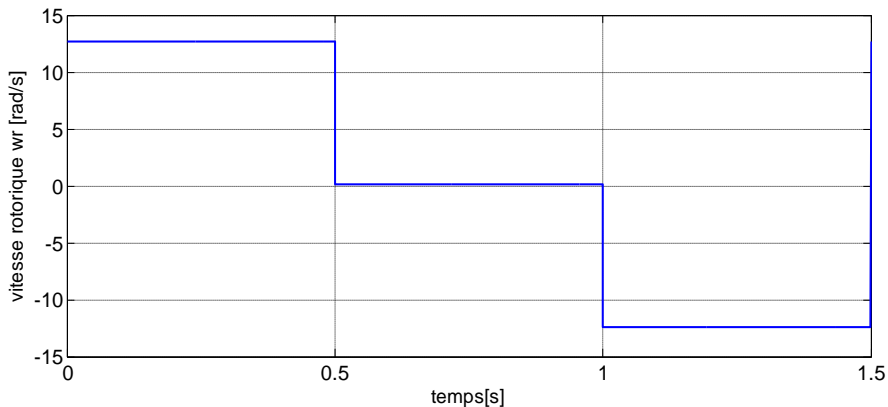


Figure I.25: La vitesse de référence rotorique (w_r)

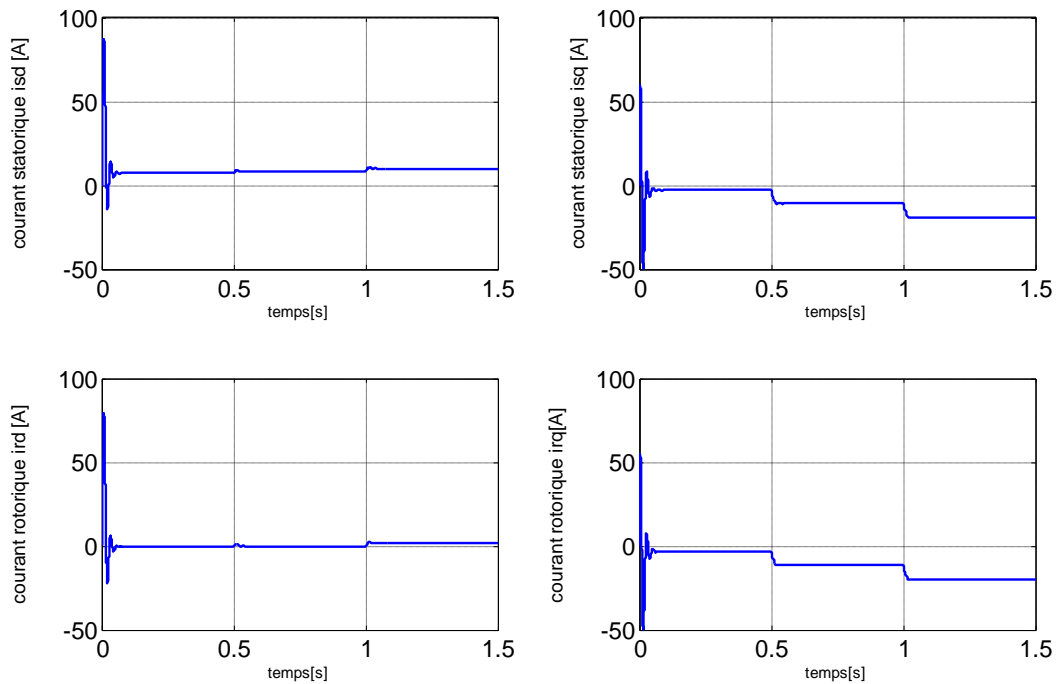


Figure I.26: Courant statoriques et rotorique (d-q).

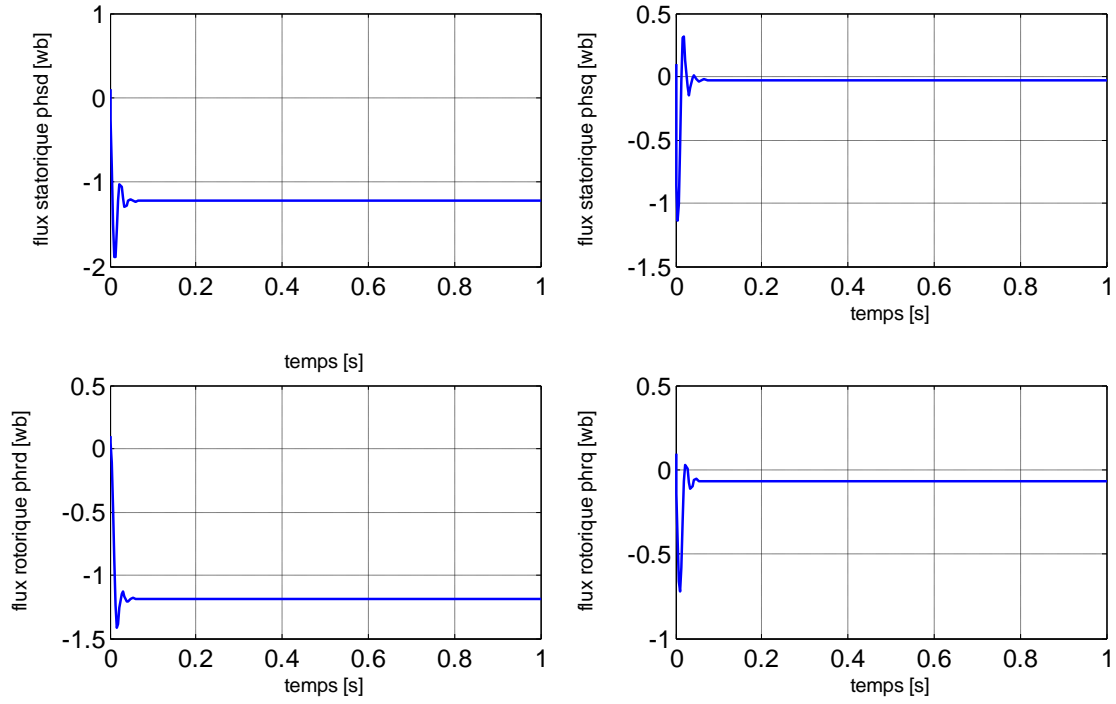


Figure I.27: Flux statoriques et rotorique (d-q).

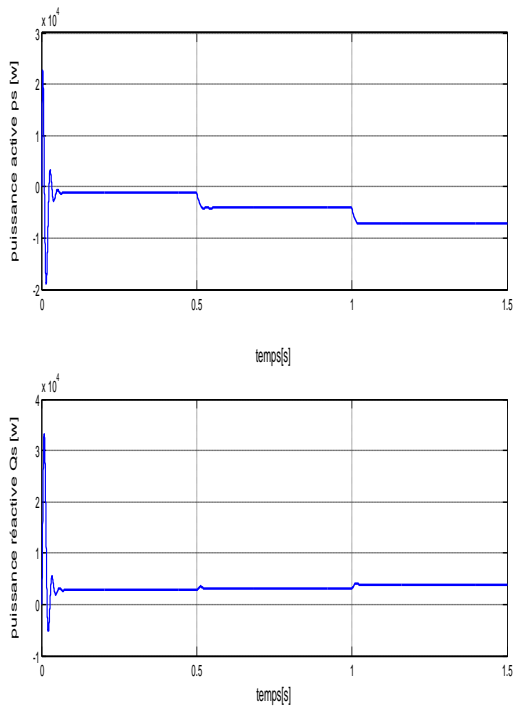


Figure I.28: Puissance statoriques

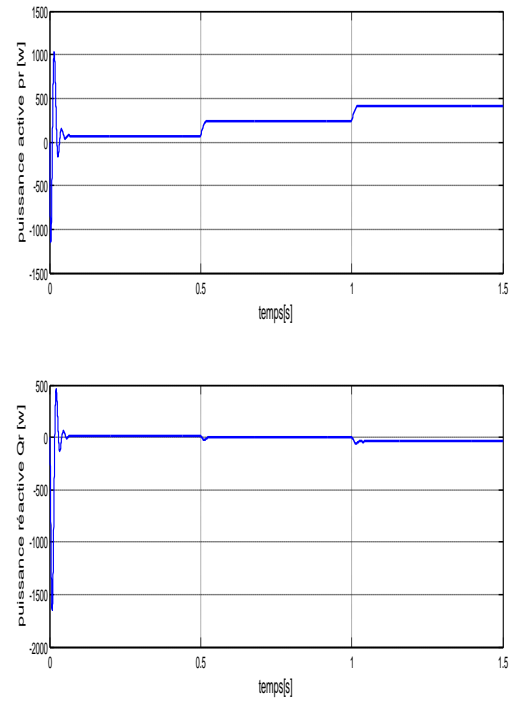


Figure I.29 : Puissance rotorique

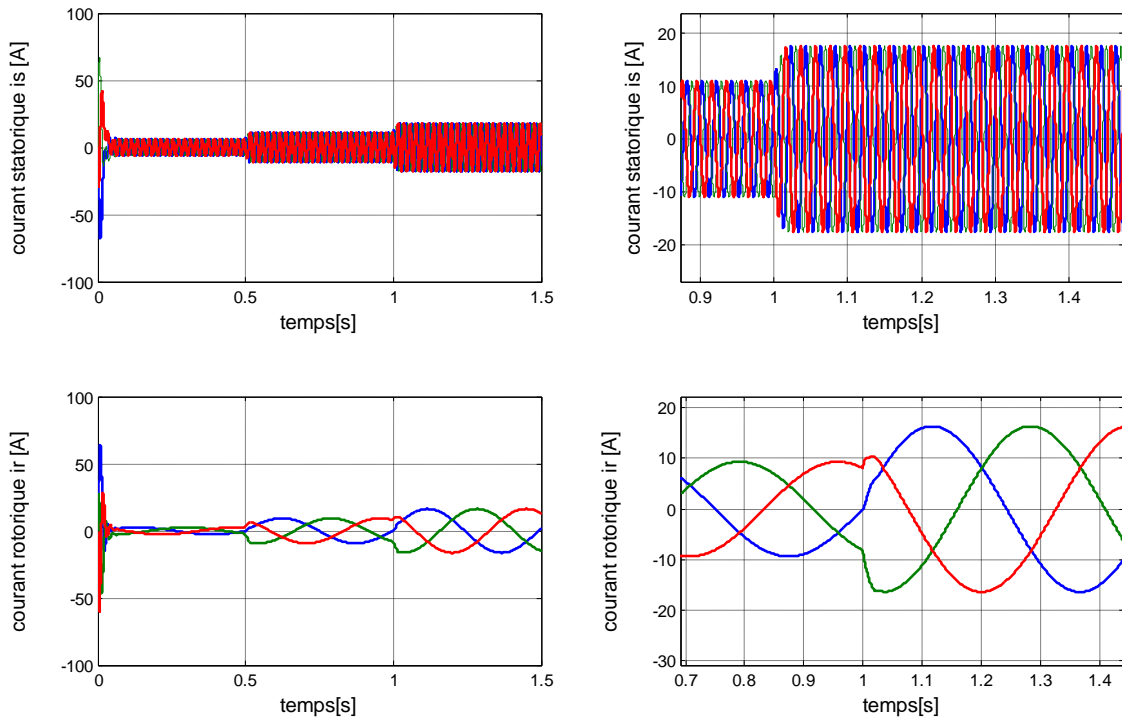


Figure I.30: courant statoriques et rotorique triphasé (a, b, c)

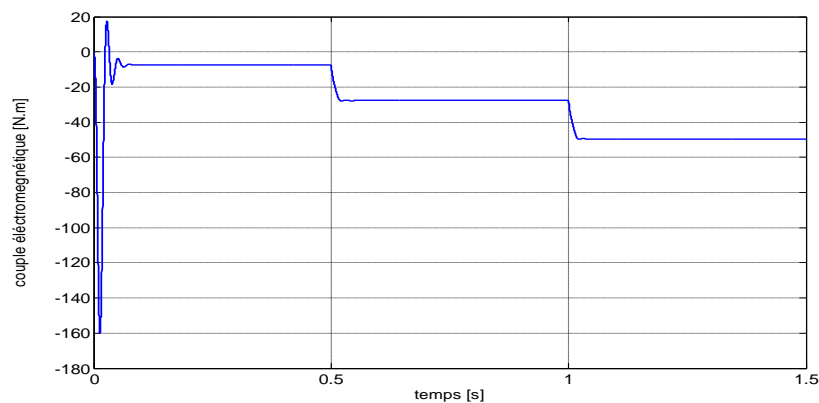


Figure I.31: Couple électromagnétique

I.7.3. Interprétations des résultats :

Les résultats de simulation obtenus montrent l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environ 0.02 s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de 50Hz pour les courants statoriques, et on peut signaler aussi que la tension et la fréquence rotoriques influence sur les grandeurs de la génératrice, et influence sur la puissance au niveau de stator.

D'autre part, l'allure du couple électromagnétique présente un pic de -147 N.m pendant le démarrage puis diminue et équilibre le couple des frottements en régime établi.

$$\begin{aligned} \text{Pour le fonctionnement : génératrice hyper-synchrone} & \quad \begin{cases} P_s < 0 \\ P_r < 0 \end{cases} ; \\ \text{Génératrice hypo-synchrone} & \quad \begin{cases} P_s < 0 \\ P_r > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes structures de la machine asynchrone à double alimentation que envisagées dans l'industrie.

Afin de mieux comprendre les avantages que peut procurer cette machine par rapport aux structures classiques, nous avons étudié les possibilités qu'elle offre en fonctionnement moteur et génératrice dans les quatre quadrants.

En suite nous avons détaillé le mode génératrice qui fait l'objet de ce travail. En premier lieu, nous avons analysé le principe de fonctionnement de la machine tout en basant sur le bilan d'énergie d'une machine à induction.

Sous quelques hypothèses simplificatrices, nous avons établi un modèle mathématiques de la machine (génératrice) asynchrone à double alimentation la complexité du modèle a été réduite par l'application de la transformation de Park qui permettait le passage d'un repère triphasé en biphasé, dans le quel les équations sont devenus à coefficients constantes dans le temps ;le montre une bonne conformité au comportement dynamique de la machine (génératrice GADA).

Le prochain chapitre sera consacré à la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse fixe.

Chapitre II

Commande vectorielle de la GADA

II.1.Introduction :

La commande vectorielle de la machine à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l'énergie.

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur [13]

Dans cette optique, nous avons appliqué la loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [14]

II.2. Le principe de la commande vectorielle de la GADA :

La commande vectorielle est un terme générique désignant l'ensemble des commandes tenant compte en temps réel des équations du système qu'elle commande. Le nom de ces commandes vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence des commandes scalaires. Les relations ainsi obtenues sont bien plus complexes que celles des commandes scalaires, mais en contrepartie elles permettent d'obtenir de meilleures performances lors des régimes transitoires. Il existe des commandes vectorielles pour tous les machines à courant alternatif.

Par construction, la machine à courant continu produit un champ magnétique statorique toujours perpendiculaire au rotor, c'est ce comportement que l'on va chercher à obtenir pour les machines alternatives.

Le calculateur qui va agir sur la commande des interrupteurs se doit d'avoir quelques informations pour effectuer les calculs et particulièrement [12]:

- La position du rotor pour les machines synchrones
- La vitesse du rotor pour les machines asynchrones

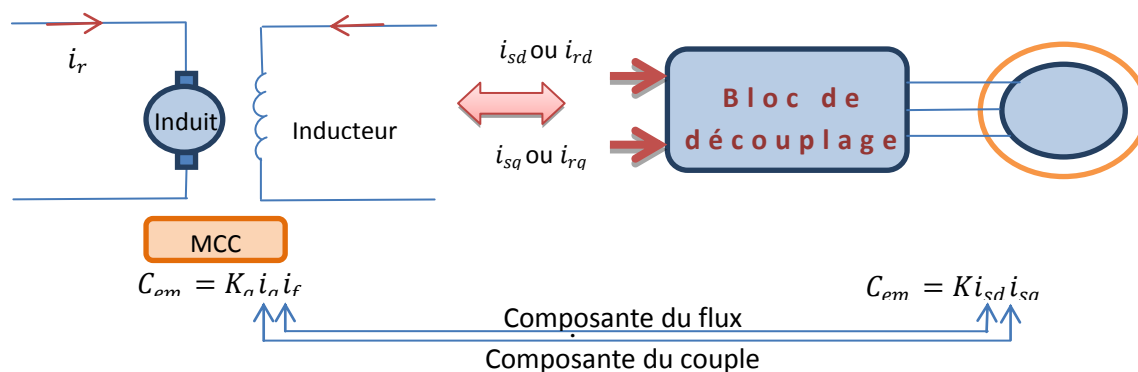


Figure II.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et GADA

II.3. Modèle de la GADA a flux statorique orienté :

On rappelle d'abord le système équations différentielles décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

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

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rd}) - \omega_r \varphi_{rd} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\varphi_{rq}) + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = 0 = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \varphi_{sd} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

II.3.1. Relation entre le courant statorique et le courant rotorique :

Partir de l'équation de flux, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{M}{L_s} I_{rd} - \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{sq} = \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

II.3.2. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :

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

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd} I_{sd} - V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, Et remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} P_S = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_S = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_{sq} \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

$$V_{sq} = V_s = \omega_s Q_S \rightarrow Q_S = \frac{V_s}{\omega_s}$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante

$\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ Prés imposée par le réseau.

Afin de montrer que la commande par orientation du flux statorique permet d'avoir un découplage effectif des grandeurs réelles (couple, vitesse) de la MADA, on considère les tensions rotoriques V_{dr} , V_{qr} comme variable de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté et les courants rotoriques I_{dr} , I_{qr} comme variable d'état. Ces grandeurs sont fonction des grandeurs de consigne p_{ref} et Q_{ref} .



Figure. II.2: Bloc de contrôle à flux orienté.

$$\begin{cases} P_{s-ref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq-ref} \\ Q_{s-ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_{sq} \frac{M}{L_s} I_{rd-ref} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites, et si l'on considère l'inductance magnétisante \mathbf{M} comme constante, le système obtenu liée de façon proportionnelle à la puissance active au courant rotorique d'axe \mathbf{q} et la puissance réactive au courant rotorique d'axe \mathbf{d} .

II.3.3. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

A partir du système d'équation (II.3) et on en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe \mathbf{d} et \mathbf{q} sont alors intégrées aux expressions tensions rotoriques diphasées de l'équation (II.1). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \right) - \omega_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{dI_{rq}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \omega_r \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \right) \end{cases} \quad (II.9)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + g \frac{V_s M}{L_s} \right) \end{cases} \quad (II.10)$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations (II.10), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) P \right] I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) P \right] I_{rq} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (II.11)$$

V_{rd} et V_{rq} : Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés.

$\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$: Est le terme de couplage entre les deux axes.

Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

$g \frac{V_s M}{L_s}$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

A partir des systèmes d'équations (II.6) et (II.10), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous.

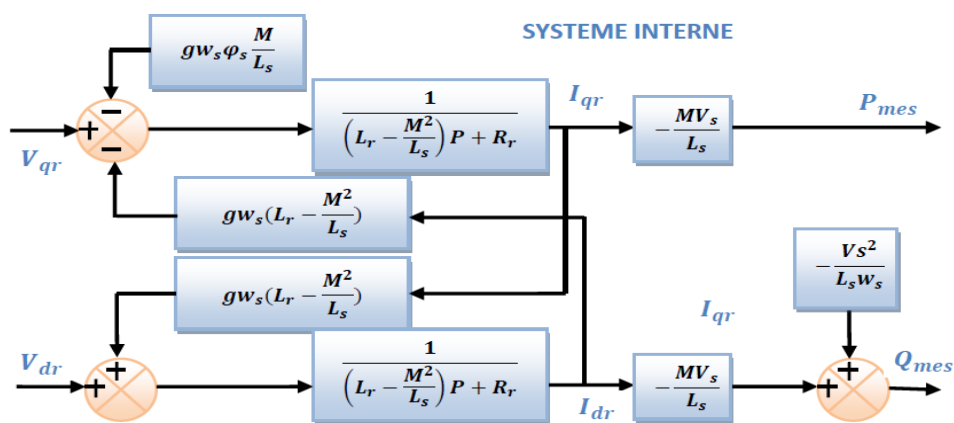


Figure II.3: Modèle de la GADA pour le contrôle des puissances.

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques.

Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné que l'influence du couplage est minime, chaque axe peut être commandé indépendamment avec son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder un transfert de puissance optimal.

II.4. Commande directe des puissances active et réactive :

Dans cette méthode, nous présentons la régulation indépendante des puissances active et réactive statoriques du "GADA" en utilisant deux régulateurs PI où la boucle de régulation de la puissance active P_s et la boucle de régulation de la puissance réactive Q_s .

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure II.3.

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure II.4.

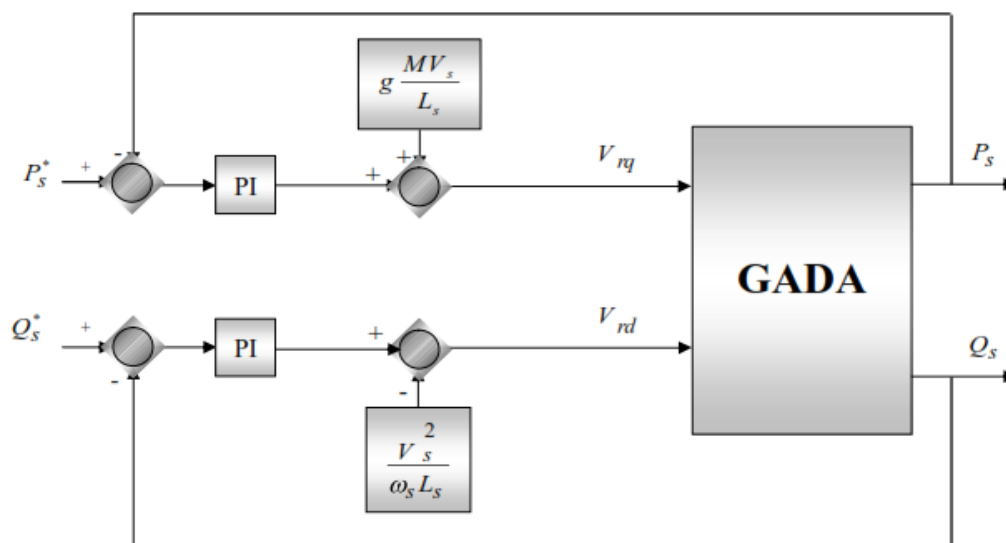


Figure II.4:Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive du GADA.

II.5. Commande indirecte des puissances active et réactive :

II.5.1. Commande indirecte sans boucles des puissances:

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

Les courants rotoriques I_{rd} et I_{rq} sont respectivement les images de la puissance active P_s et la puissance réactive statorique Q_s doivent poursuivre leurs courants de références.

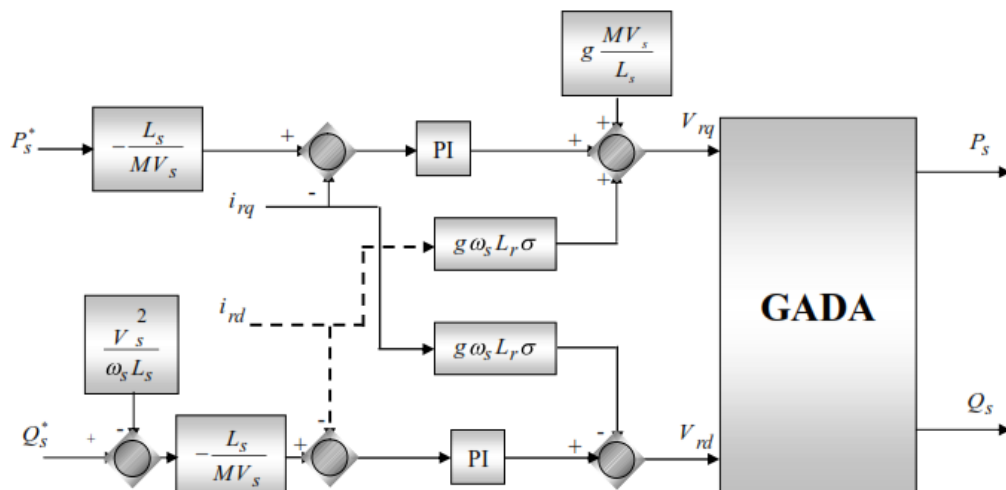


Figure II.5:Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA.

II.5.2. commande indirecte en boucle fermée :

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA .Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante :

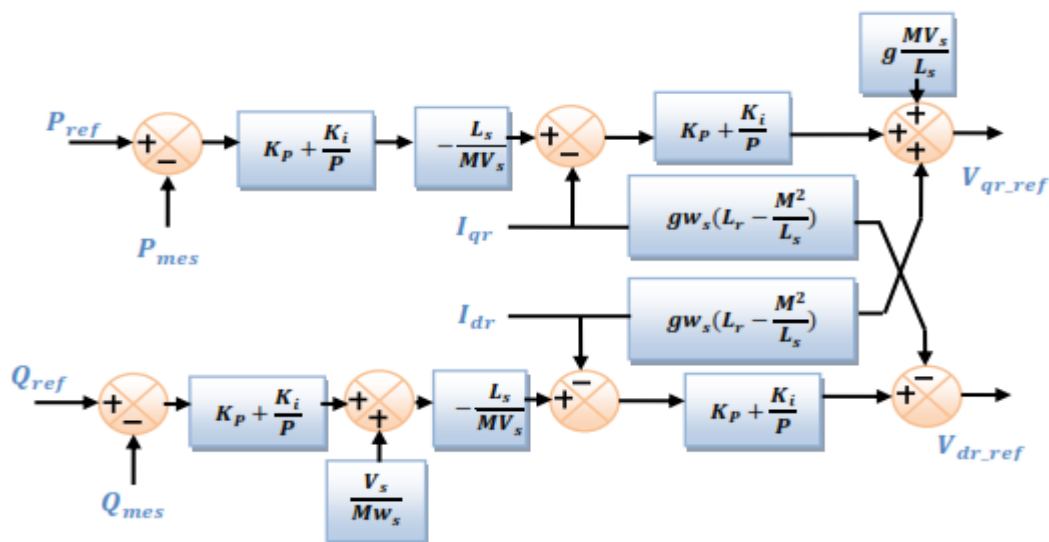


Figure II.6 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toute fois, elle offre une meilleur robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique.

Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour

L'utilisation en génératrice de la MADA. De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers.

II.6. Calcul des régulateurs utilisés :

II.6.1. Régulateurs utilisés (PI) :

Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la "MADA". Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la "GADA", ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels. Les régulateurs de chaque axe a pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances active et réactive de référence et les puissances active et réactive mesurées.

Le régulateur PI. C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre. La figure II.7 montre un système en boucle fermé corrigé par un régulateur PI. Dans notre cas la fonction de transfert $K_p + \frac{K_i}{p}$:

Telle que : $\frac{B}{A}$ c'est une fonction transfert :

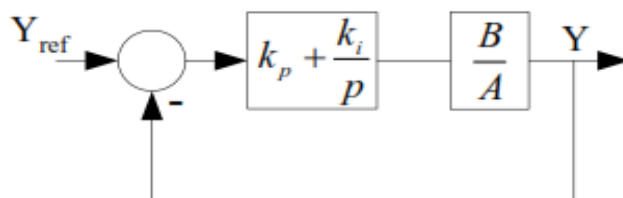
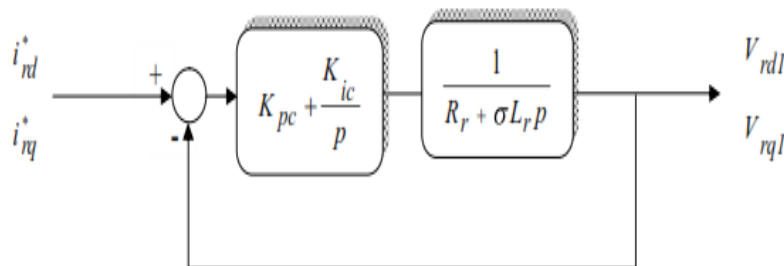
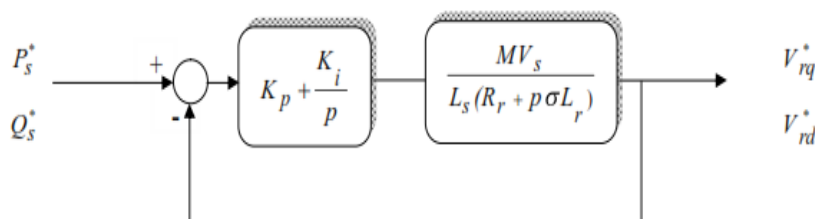


Figure II.7 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

II.6.2. Système régulé par un régulateur PI



a) Schéma de la régulation des courants rotoriques I_{rd} et I_{rq} .



b) Schéma de la régulation des puissances statoriques P_s et Q_s .

Figure II.8: Schéma de la régulation.

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques.

Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence du couplage près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau.

II.6.3. Calcule les régulateurs K_i et K_p :

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s'écrit alors :

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

On prend $\tau = \frac{K_p}{K_i}$ Alors $F_{BO}(p) = \frac{K_i K}{p}$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit : $F_{BF}(p) = \left(\frac{1}{1 + \tau p} \right)$

Et on a $F_{BF}(p) = \left(\frac{K_i K}{K_i K + p} \right) = \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{K_i K} p} \right) \Rightarrow \tau_r = \frac{1}{K_i K}$

Avec:

τ_r : Le temps de repense du système corrigé qui doit être suffisamment rapide. Ainsi, les gains du régulateur peuvent être exprimés de la manière suivante :

Or $K_i = \frac{K_p}{\tau}$ Alors $\tau_r = \frac{\tau}{K_p K}$

$$\text{Donc } \begin{cases} K_p = \frac{\tau}{\tau_r K} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r K} \end{cases}$$

Le temps de réponse τ_r sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performances et rapidité.

II.7. Résultats de simulation :

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les lois de commande en puissance active et réactive que nous venons de présenter sur le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, avec application d'une puissance active $P = -3000W$ entre $t=1s$ et $t=3s$, et une puissance réactive $Q = 1000VAR$ entre $t=2s$ et $t=4s$.

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la "GADA" et entraînée à une vitesse fixe : 1440tr/min.

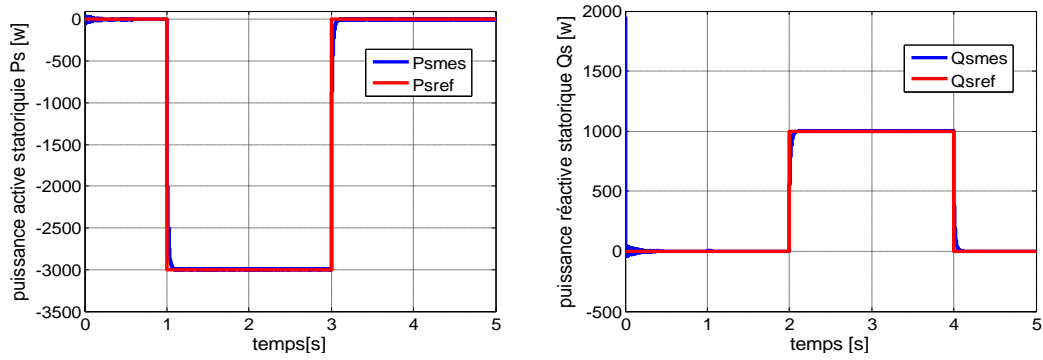


Figure II.9: La puissance active et réactive statorique et leurs références.

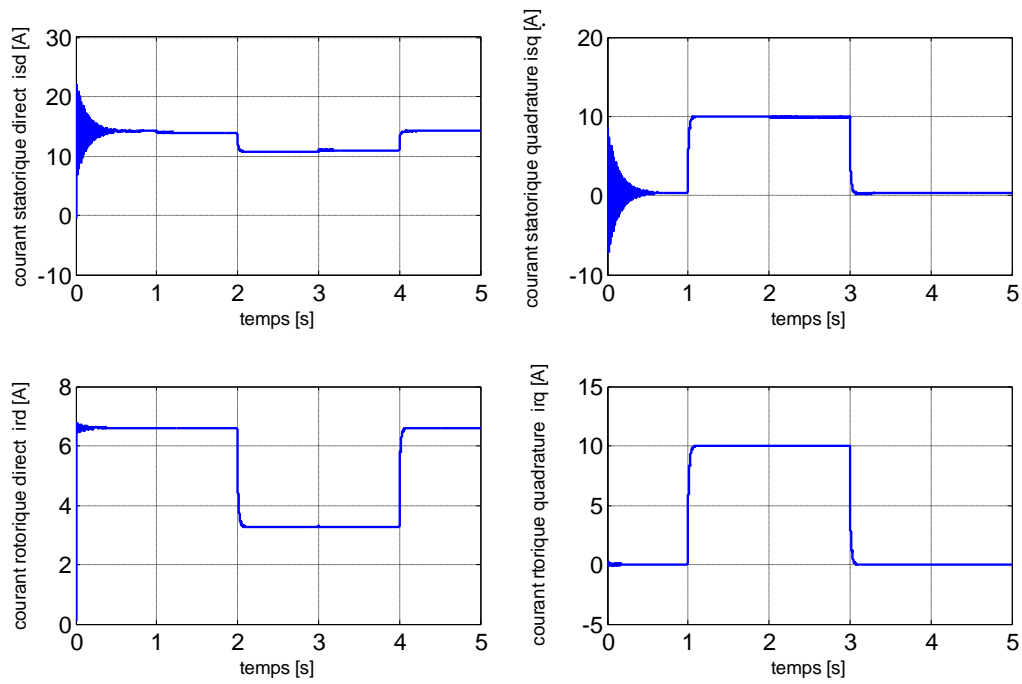


Figure II.10: Le courant statorique et rotorique selon l'axe d et q.

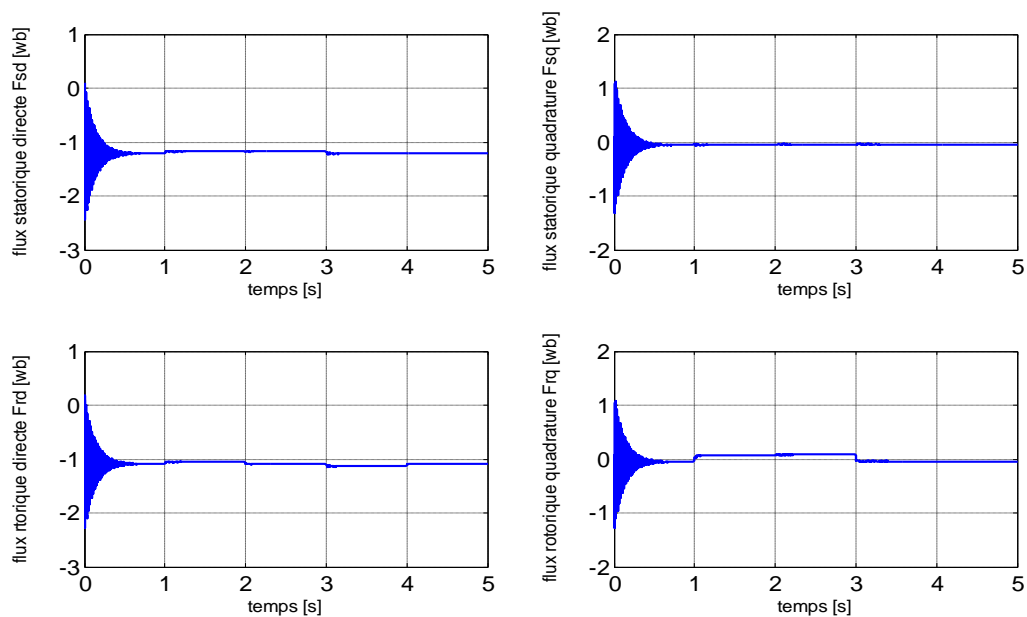


Figure II.11: Le flux statorique et rotorique selon l'axe d et q.

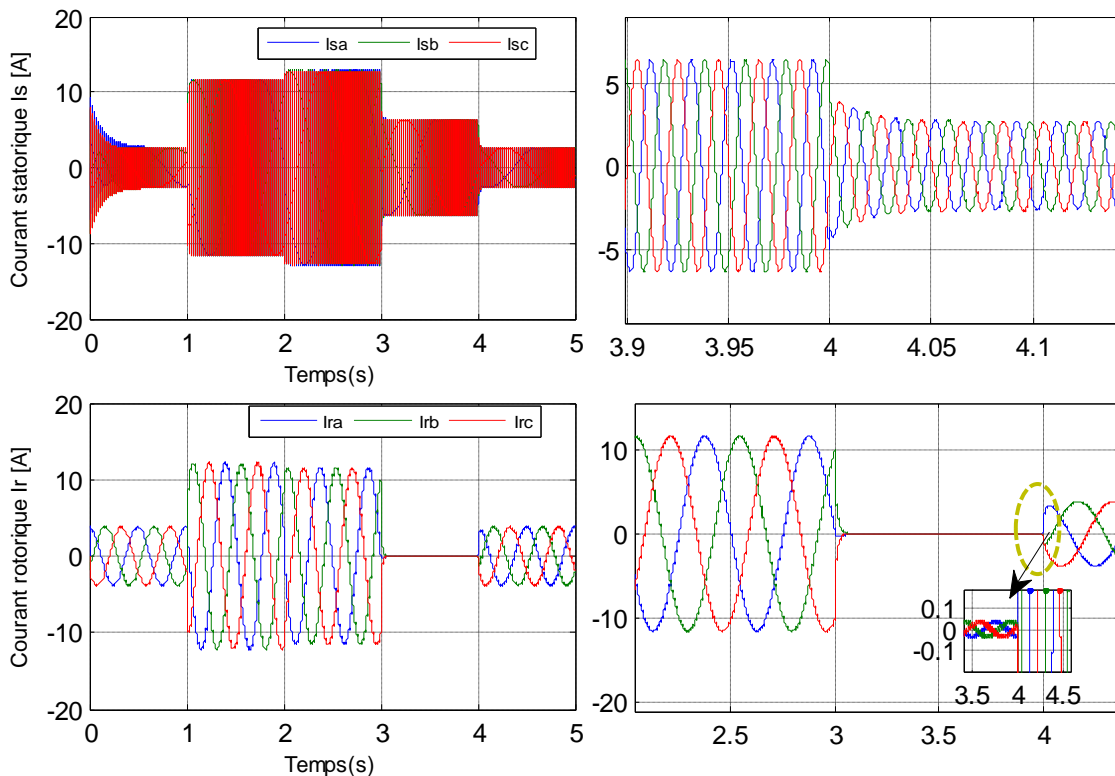


Figure II.12: Courant statorique et rotorique triphasés (a b c) avec zoom.

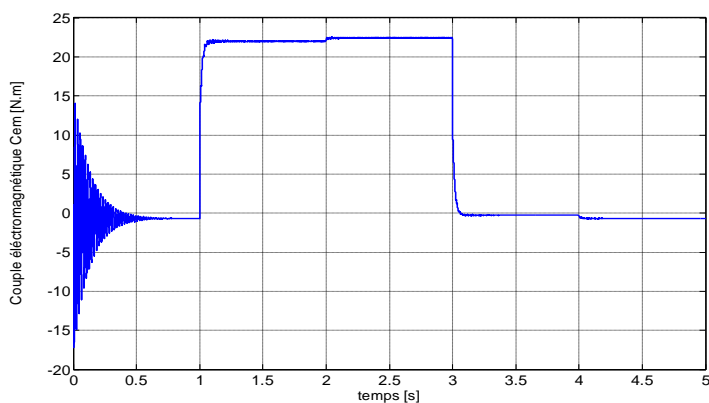


Figure II.13: Couple électromagnétique.

II.7.1. Interprétation des résultats :

La simulation de cette commande a été faite en imposant les puissances actives et réactive statoriques : P_{ref} et Q_{ref} . Pendant que la machine est entraînée à vitesse de rotation constante.

Nous remarquons que les grandeurs de référence ont été suivies par la "GADA" pour les deux puissances active et réactive. et les oscillations aux instants d'application des échelons de puissance dues au couplage entre les deux axes de la machine et remarquer aussi que le couple Électromagnétique dépend directement de la puissance statorique active et ceci traduit par sa forme identique de celle de la puissance statorique active P_s

II.8. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe 'd'. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répandue.

A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

Chapitre III

Asservissement de la chaîne éolienne

III.1.Introduction :

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. C'est en 1891 que le Danois Poule La Cour construisit pour la première fois une turbine à vent générant.

Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Ces dernières sont les plus couramment utilisées pour la production d'énergie électrique sur le réseau électrique. En effet, les éoliennes à vitesse variable, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées [14]. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle), et électriquement (Machine électrique associée à électronique de commande) [15].

III .2. Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure III.1). [16]

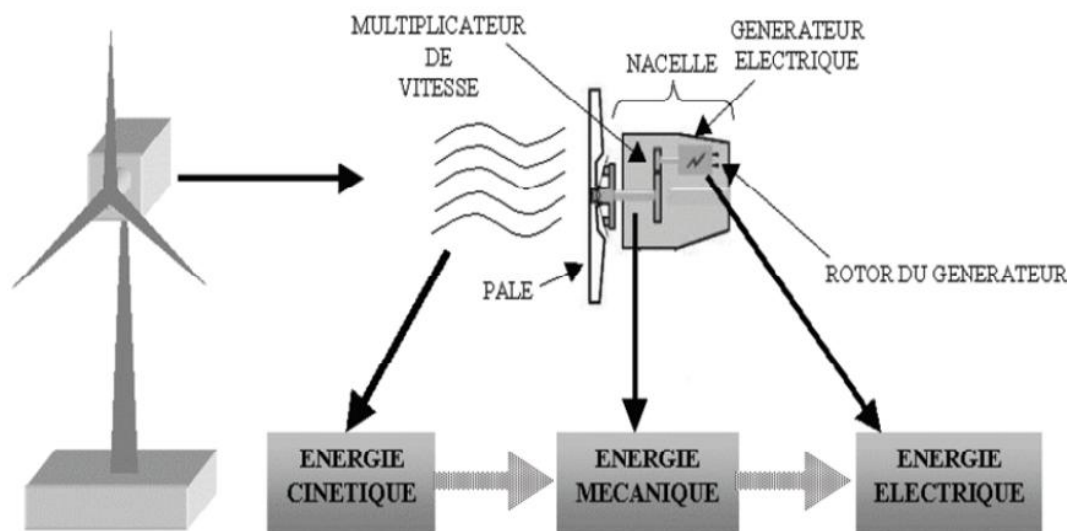


Figure. III.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée).

III.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes:

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure (III.2). L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [16].

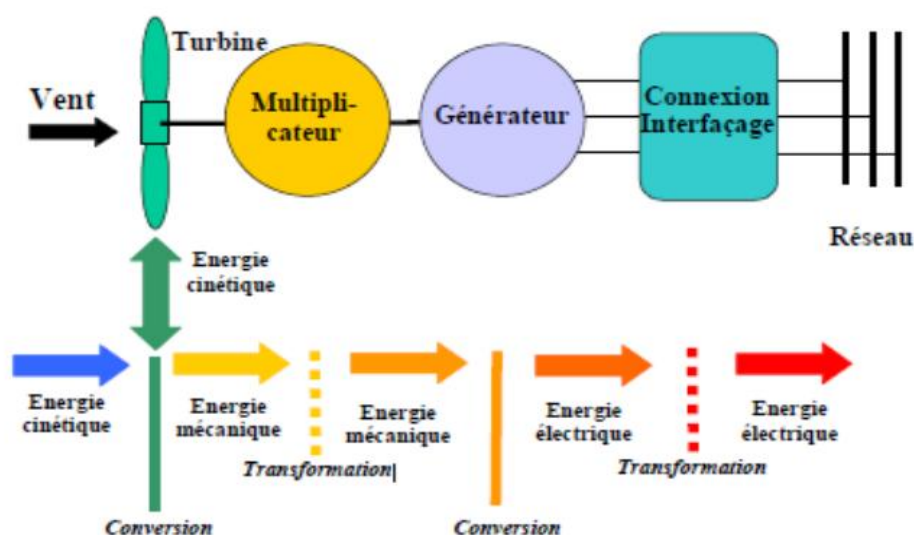


Figure III.2 : Principe de la conversion d'énergie.

III.4. Les différents types des éoliennes:

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles : celle à axe vertical et celles à axe horizontal

III.4.1 Les éoliennes à axe vertical :

Dans ce type l'arbre est perpendiculaire au sol ; il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, donc pas besoin de munir la machine d'une tour, facilitant ainsi les interventions de maintenance ; mais elle présente certaines caractéristiques pénalisantes : elle ne peut pas démarrer seule (nécessité d'un dispositif de lancement), les pales sont plus chères à construire et engendrent un niveau de bruit important ; faible rendement aérodynamique, et grande sensibilité de C_p à la vitesse et provoquent de fortes fluctuations de puissance.

Toutes ces raisons ont conduit à l'abandon de la technologie des éoliennes à axe vertical figure (III.3). Il existe deux structures qui sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de 'Savonius' et le rotor de 'Darrieus' [16].



Fig. III.3.a : Éolienne à axe verticale type Darrieus Fig. III.3.b : éolienne à axe verticale type Savonius

III.4.2. Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ce type d'éoliennes l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisées pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Figure (III.4) [16].



Figure III.4 : éolienne à axe horizontal

III .5. Les Principaux composants des éoliennes à axe horizontal :

L'éolienne à axe horizontale (Figure III.3), étant le sujet de notre étude, En générale, est constitué de trois éléments principaux : La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu.

▪ **La tour:** C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.

▪ **La nacelle:** Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :

- Arbre.
- Multiplicateur.
- Roulements.
- Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
- Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une GADA.
- Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle.

▪ **Les pales:** Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.

▪ **Le moyeu:** C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent [17].

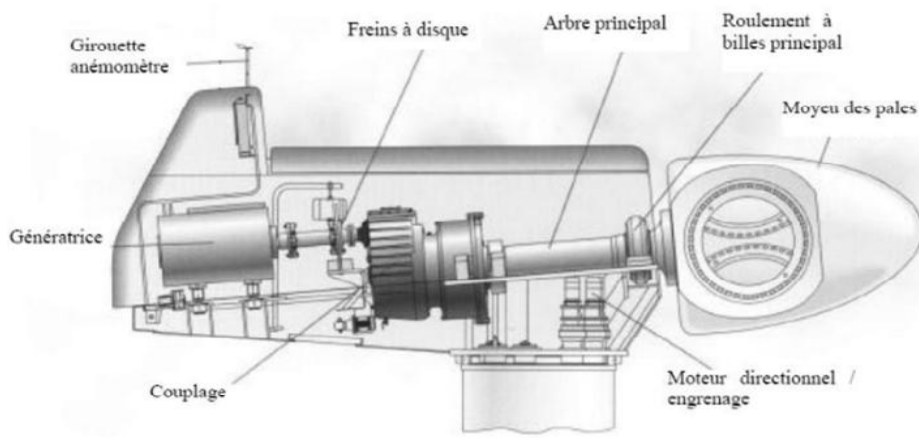


Figure. III.5: Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.

III.6. Conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique:

III.6.1. Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure III.4 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V , soit $(V_1+V_2)/2$ la masse d'air en mouvement de densité traversant la surface S des pales en une seconde est de la figure (III.6) on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement [18].

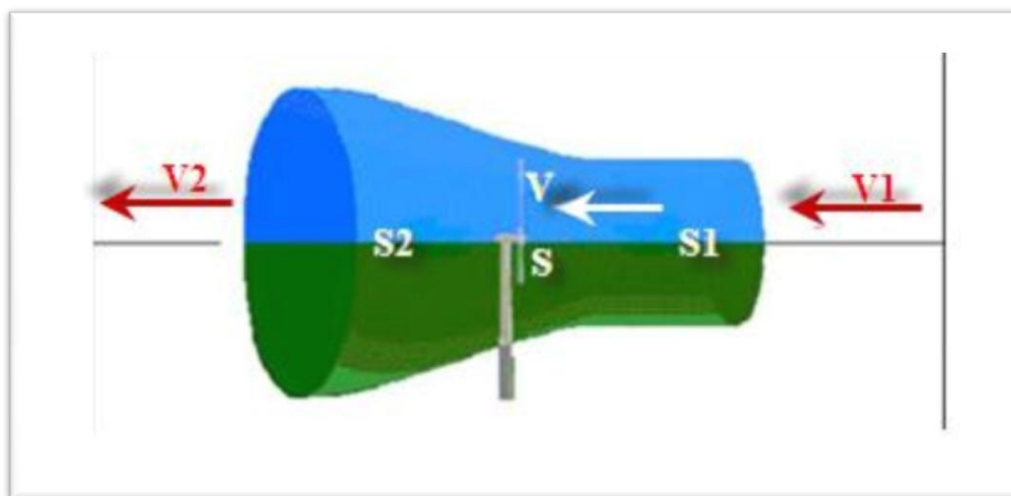


Figure III.6 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

Considérant le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (III.6) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

Désignant par V la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par S_1 et S_2 les sections amont et aval du tube d'air et par S la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit:

$$S_1 V_1 = S_2 V_2 = SV \quad (\text{III.1})$$

La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur d'après le théorème d'EULER:

$$F = \rho \cdot SV \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{III.2})$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = FV = \rho \cdot SV^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{III.3})$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie Cinétique E_c de la masse d'air qui le traverse:

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho \cdot SV \cdot (V_1^2 - V_2^2) = P_{aero} = \rho \cdot SV^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{III.4})$$

On en déduit:

$$V = (V_1 - V_2) / 2 \quad (\text{III.5})$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations (III.2) et (III.3) on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.6})$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (\text{III.7})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (\text{III.8})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est :

$$\frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2}) \cdot (1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)^2}{2} = C_p \quad (\text{III.9})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (III.9), on s'aperçoit que le ratio

$\frac{P_{aero}}{P_{mt}}$ Appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximum de $\frac{16}{27} = 0.59$

(Figure III.7) qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie expérimentalement par son propre coefficient de puissance 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.

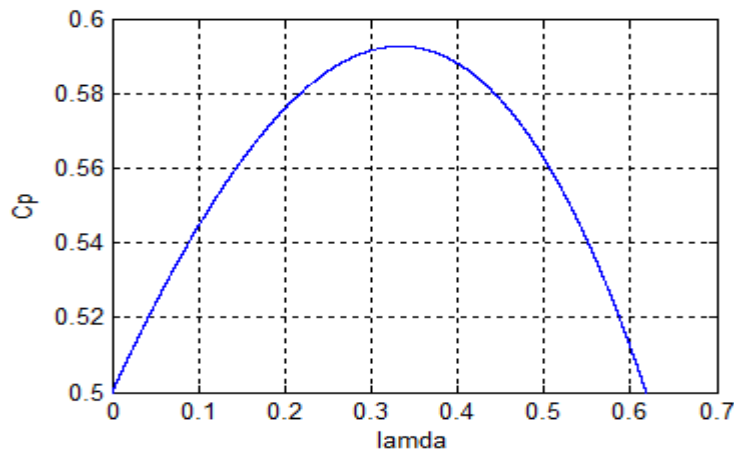


Figure. III.7: Coefficient de puissance.

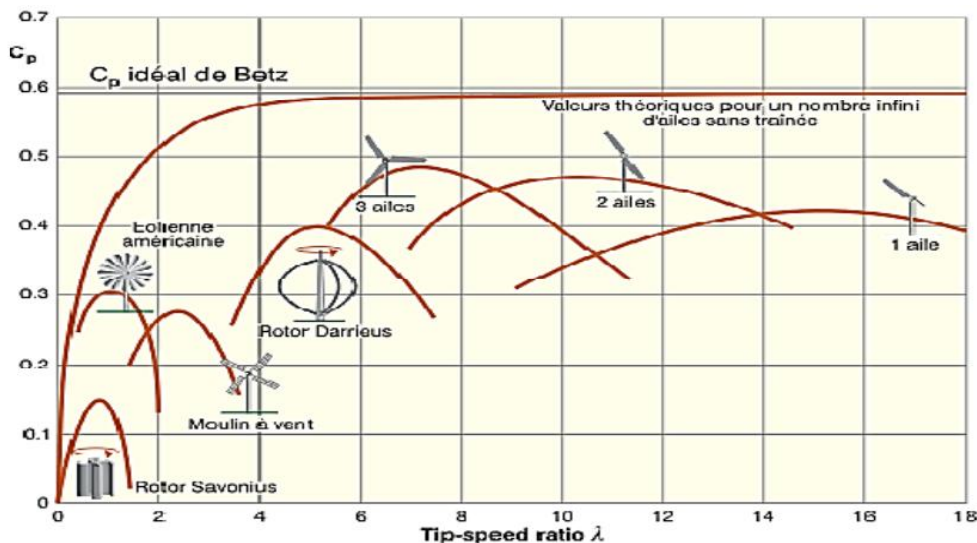


Figure. III.8: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

III.6.2. Production d'énergie mécanique :

En combinant les équations (III.8) et (III.9), la puissance mécanique P_{aero} disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}}\right) \cdot P_{mt} = C_p(\lambda) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \tag{III.10}$$

Avec:

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_1} = \frac{\Omega_{mec} \cdot R}{G V_1} \tag{III.11}$$

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine.

Ω_{mec} : Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent.

III.7. Intérêt de la vitesse variable:

On donne sur la figure (III.9) la caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

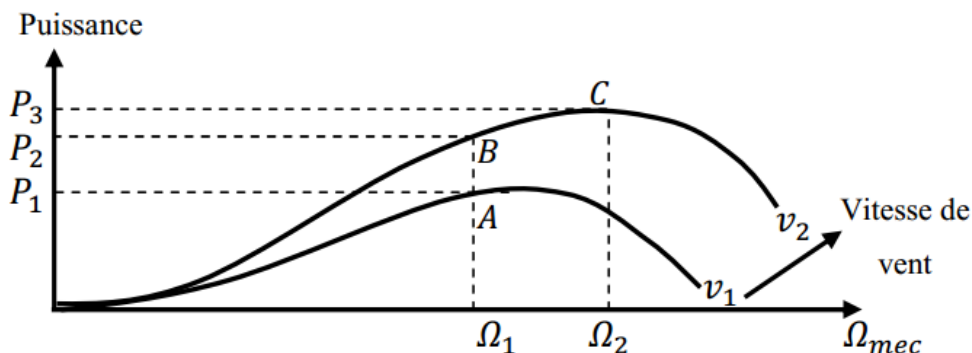


Figure. III.9 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse Mécanique et la vitesse du vent.

III.8. Modélisation de convertisseur éolienne:

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l’arbre lent de l’éolienne. Cette modélisation s’appuie sur des recoupements bibliographiques ou des informations extraites de brochures des différents constructeurs.

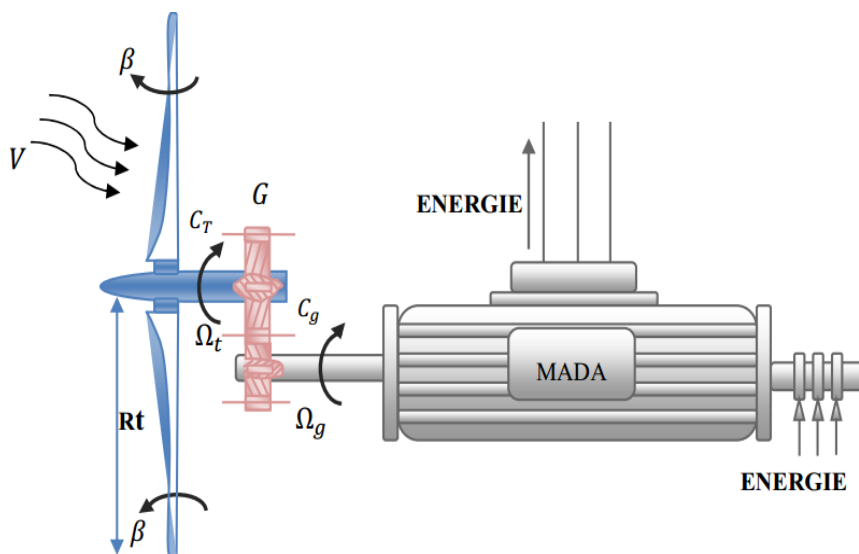


Figure III.10 : Schéma de la turbine éolienne

III.8.1. Modélisation de la turbine :

Le vent de vitesse V , appliqué sur les pales de l’éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l’arbre de la turbine, notée P_{aero} [14], s’exprimant par:

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \tag{III.12}$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique, sa valeur dépend de celle de la vitesse relative de l'éolienne (λ).

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 4 kW pour notre simulation. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Dans notre cas, son évolution en fonction de λ est basée sur l'observation de données de plusieurs petites éoliennes de quelques kW. Suite à ces observations, ses variations sont modélisées par l'approximation suivant:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \cdot \sin\left[\frac{\pi(\lambda + 0.3)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{III.13})$$

Avec:

$$\lambda = \frac{\Omega_{\text{turbine}} \cdot R}{V_1} \quad (\text{III.14})$$

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure (IV.9). La valeur maximale de C_p ($C_{p_{\max}} = 0.5$) est atteinte pour $\beta = 2$ et

$\lambda = 9.2$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur optimale λ_{opt} avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de Fonctionnement [19].

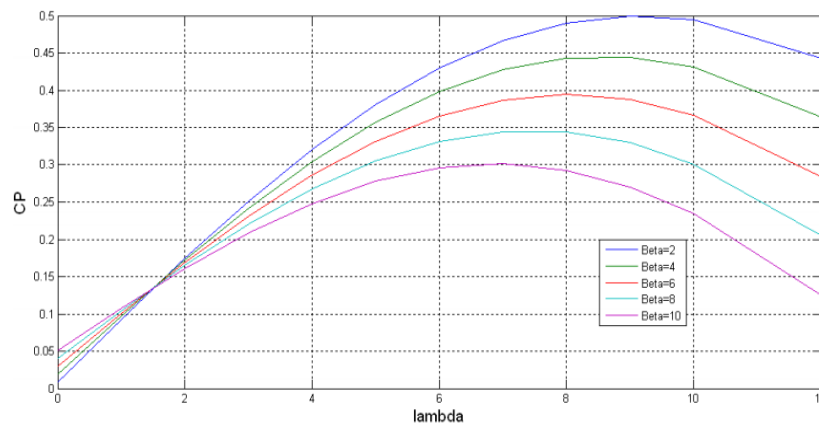


Figure. III.11 : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne

Les expressions de la puissance et la vitesse étant connues, on peut déduire l'expression du couple aérodynamique:

$$C_{\text{aero}} = \frac{P_{\text{aero}}}{\Omega_{\text{turbine}}} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 V^3}{2 \cdot \Omega_{\text{turbine}}} \quad (\text{III.15})$$

III.8.2. Modèle du Multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice figure (III.12), elle est modélisée mathématiquement par les équations suivantes :

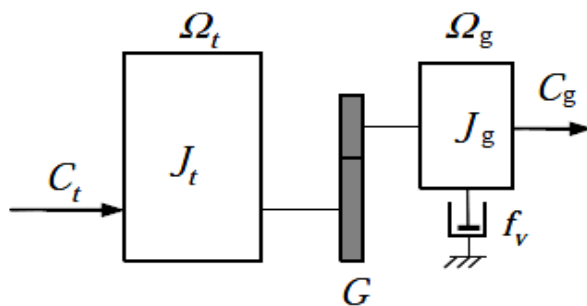


Figure. III.12: Modèle mécanique de la turbine éolienne.

$$C_g = \frac{C_{aero}}{G} \tag{III.16}$$

Avec:

C_g : Couple issu du multiplicateur ;

C_{aer} : Couple aérodynamique ;

G : Gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{III.17}$$

III.8.3. Equation mécanique de l'arbre:

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice.

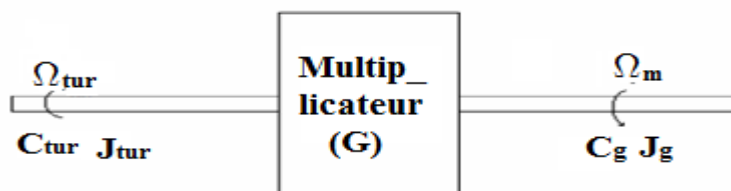


Figure. III.13 : Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \tag{III.18}$$

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{couples} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{III.19}$$

Le couple visqueux étant proportionnel à la vitesse, nous aurons:

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{III.20}$$

Avec:

J : L'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

C_{em} : Le couple électromagnétique produit par la génératrice ;

C_{vis} : Le couple de frottement visqueux ;

C_g : le couple issu du multiplicateur .

Schéma bloc du modèle de la turbine:

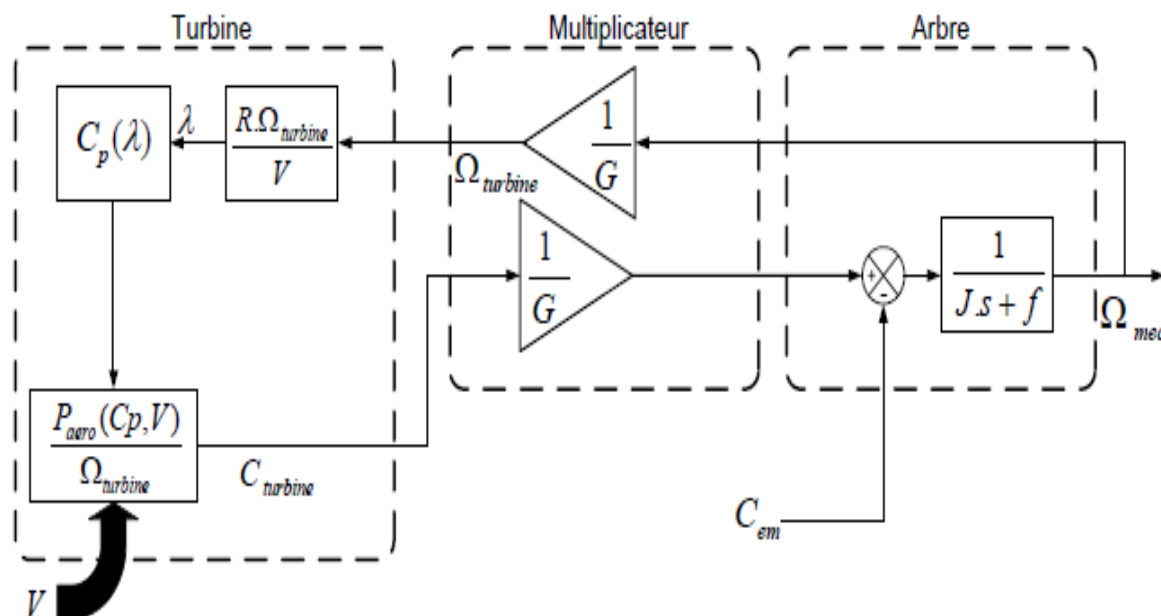


Figure. III.14: Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien.

III.9. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable:

Il y a trois zones de fonctionnement pour une éolienne [20].

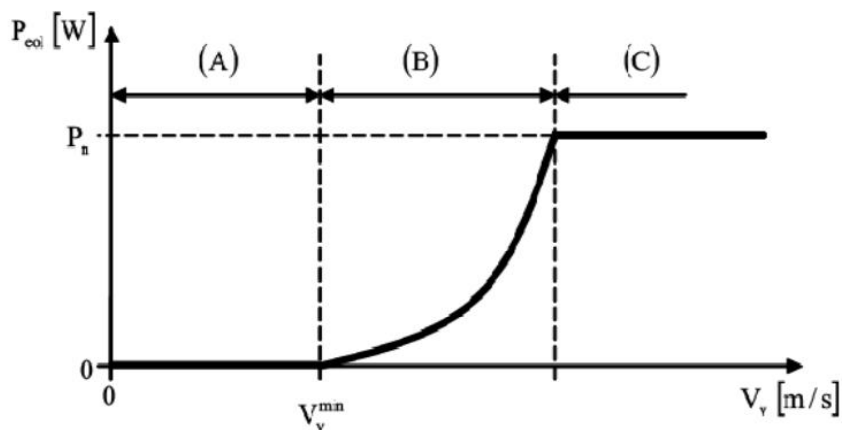


Figure. III.15 : Caractéristique idéale puissance vitesse d'une éolienne.

- **Zone A** : Correspond aux faibles vitesses du vent, la puissance disponible dans cette zone est inférieure à la puissance nominale de la turbine. L'objectif dans cette zone est d'extraire le maximum de puissance du vent en appliquant des techniques appelées techniques d'extraction de maximum de puissance (MPPT, Maximum Power Point Tracking).
- **Zone B** : Zone de transition entre la zone de charge partiel (zone A) et la zone de charge nominale (zone B). Dans cette zone, la vitesse de rotation est maintenue constante pour des raisons mécaniques (contraintes des pales) et acoustiques (bruits généré).

- **Zone C :** Correspond aux vents forts, l'objectif dans cette zone est de limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale de l'éolienne pour éviter les surcharges. Cela se fait par action sur l'angle de calage des pales [20].

III.10.Principe de la MPPT :

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

III.10.1. Commande indirecte de vitesse (sans asservissement de vitesse):

Ce mode de contrôle repose par action sur le couple (commande indirecte de la vitesse) pour recherche du maximum de puissance.

La courbe de rendement aérodynamique maximal est définie dans le plan (Ω_{tur}, C_{aer}) par l'ensemble des points $E(\Omega_{tur-opt}, C_{aer-opt})$ correspondant à l'intervalle des vitesses du vent dans laquelle l'éolienne fonctionne.

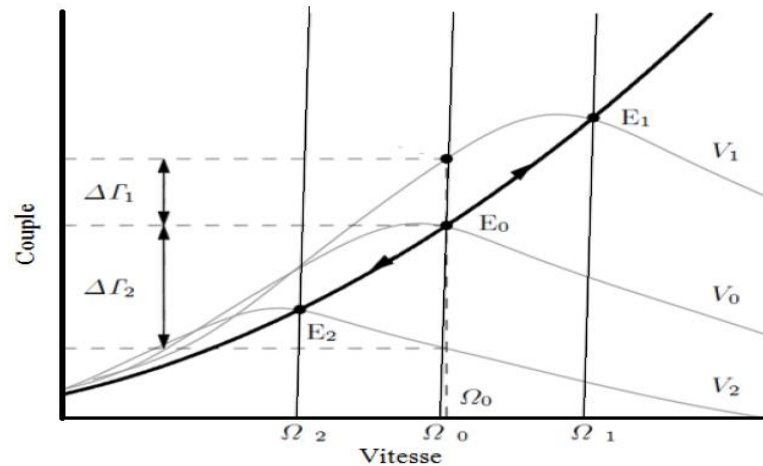


Figure. III.16: Caractéristique couple-vitesse pour différentes vitesses de vent.

$$C_{aero-opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 V^2 \frac{Cp(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (III.21)$$

pour la ramener sur l'arbre rapide (l'arbre du générateur) il suffit de la diviser par le rapport du réducteur de vitesse G

$$C_{g-opt} = \frac{1}{2G} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 V^2 \frac{Cp(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (III.22)$$

Si le couple électromagnétique est commandé de manière à suivre le couple optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal.

Cette commande est basée sur une estimation de la vitesse du vent. Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, la vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit.

$$V = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{\lambda_{opt}} \quad (III.23)$$

D'où le couple éolien C_{aero} peut être exprimé en fonction de la vitesse du rotor comme suit.

$$C_{aero-opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_{turbine}^2 \quad (III.24)$$

On constate que le couple aérodynamique optimal est proportionnel au carré de la vitesse du rotor au point de fonctionnement.

$$C_{aero-opt} = K_{opt} \cdot \Omega_{turbine}^2 \quad (III.25)$$

En régime permanente, l'équation mécanique s'écrit sous la forme.

$$\frac{C_{turbine}}{G} - C_g - f \cdot \Omega_g = 0 \quad (III.26)$$

En remplaçant $C_{turbine}$ par son expression, on trouve.

$$\frac{K_{opt}}{G} \cdot \Omega_g^2 - C_g - f \cdot \Omega_g = 0 \quad (III.27)$$

Avec:

$$\Omega_g = G \cdot \Omega_{turbine} \quad (III.28)$$

D'où:

$$C_{g-opt} = \frac{K_{opt}}{G^3} \cdot \Omega_g^2 - f \cdot \Omega_g = 0 \quad (III.29)$$

Cette expression donne le couple qui doit être imposé à la génératrice pour assurer le fonctionnement optimale de l'éolienne.

III.11. Résultats de simulation du système de conversion complet:

La simulation nous a permis de vérifier la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent. Afin de mieux voir l'évolution des grandeurs mécaniques et électrique lors de la génération de l'énergie éolienne.

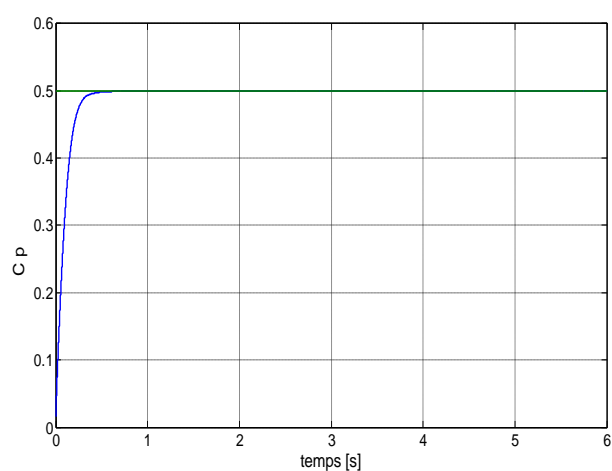
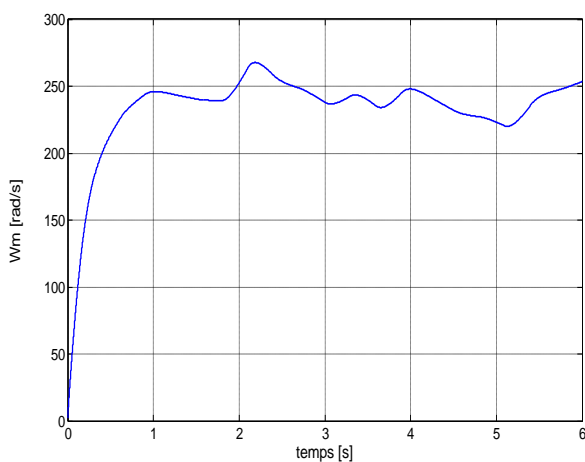


Figure. III.17: La vitesse du rotor (mécanique)

Figure. III.18: coefficient de puissance de la Turbine éolienne et sa référence

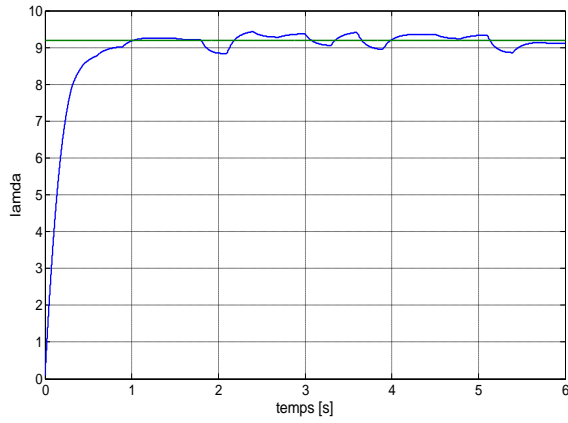


Figure. III.19: Vitesse relative de l'éolienne

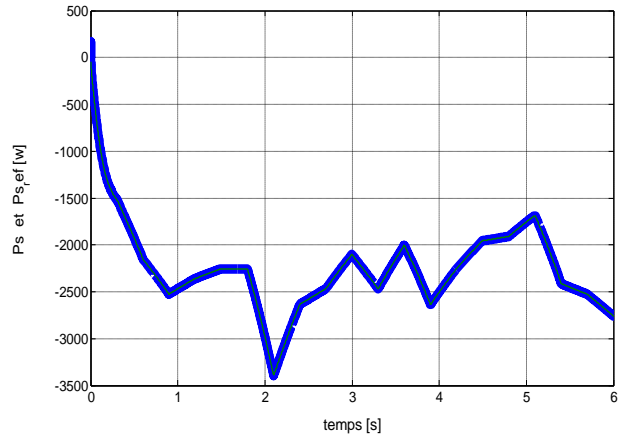


Figure. III.20: Puissance active statorique

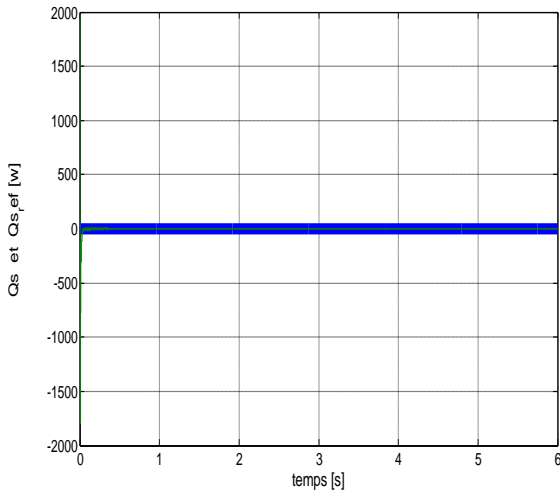


Figure. III.21: Puissance réactive statorique

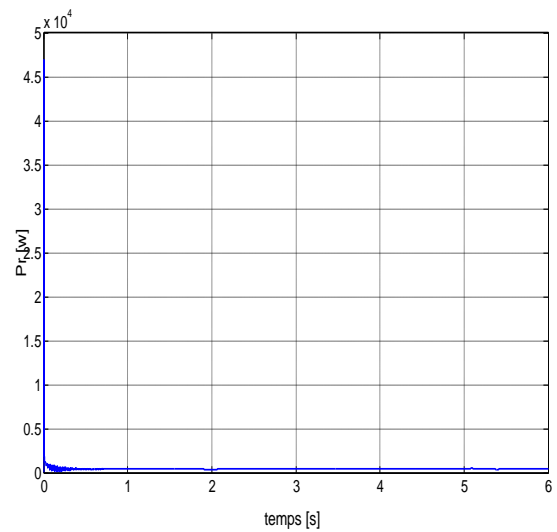


Figure. III.22: Puissance active rotorique

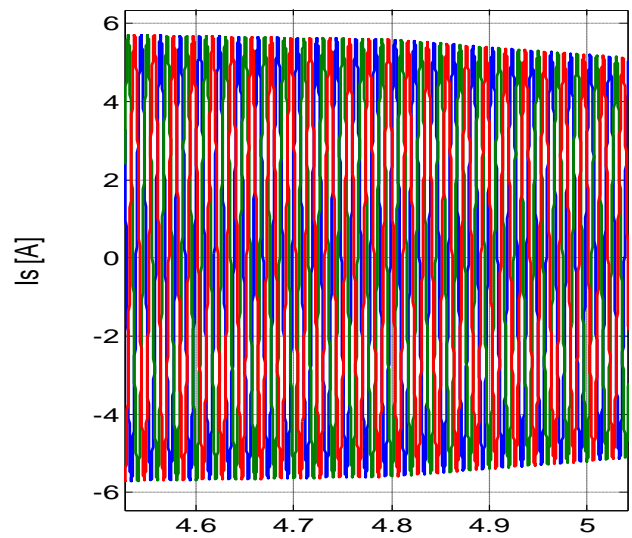
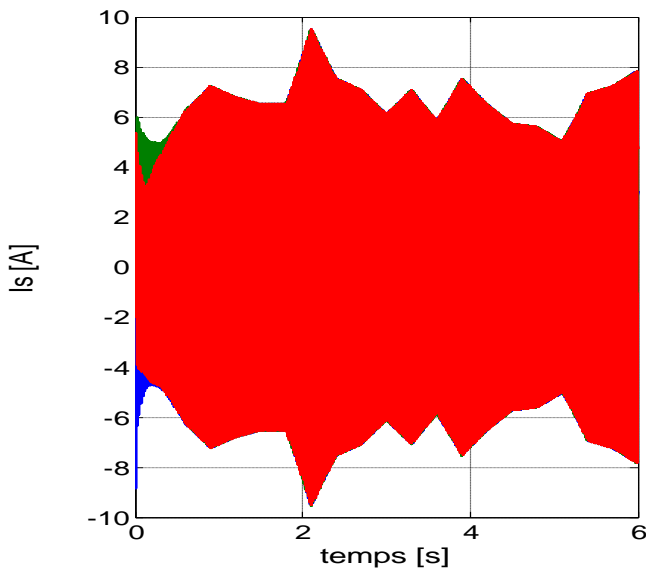


Figure. III.23: Le courant statorique avec un zoom

III.12. Interprétation des résultats:

A travers l'évolution du coefficient de puissance figures (III.18), nous pouvons remarquer que celui-ci est dans le voisinage de sa valeur maximale théorique. Ce coefficient est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta = 2^\circ$), qui nous donne un λ optimale. On remarque que le C_p atteint une valeur maximale de 0.5, il cherche à être gardé au maximum possible pour but de maximiser la production, et varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

En ce qui concerne la vitesse de rotation de la machine figures (III.17), il est constaté que celle-ci reste dans des proportions acceptables.

On constate aussi sur les résultats de simulation une bonne suite de consigne pour puissance active ainsi que la puissance réactive statorique qui est maintenue nulle par les puissances réelles débitées par la GADA figure (III.20) et (III.21).

Les courants statoriques figure (III.23), montrent bien que l'évolution de leurs amplitudes suit presque parfaitement l'évolution de la puissance active.

III.13. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la partie mécanique de la turbine éolienne, nous avons aussi modélisé l'ensemble mécanique y compris le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec la génératrice qui aura la vitesse comme sortie, nous avons vu que cette partie mécanique est un élément très important dans les systèmes de conversion éoliennes.

Chapitre IV

**Application de la logique floue a la
commande des puissances actives et
réactive de la GADA**

IV.1. Introduction :

La logique floue suscite actuellement un intérêt général de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels, et plus généralement de la part de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnement naturel, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellement prises en charge par les humains.

Dans le domaine du génie électrique, la commande à logique floue a fait l'objet de plusieurs travaux : dans la commande des convertisseurs statiques et dans la commande des machines électriques [21], dans la navigation de robots mobiles. Toutes ces applications ont démontré qu'un régulateur à logique floue est plus robuste qu'un régulateur conventionnel [22].

Les performances que la commande floue peut apporter par comparaison avec les commandes classiques, sont essentiellement dues à la méthode de conception de ces régulateurs. En effet, ces derniers ne nécessitent pas la connaissance des modèles mathématiques du système. Par contre ils ont besoin d'un ensemble de règles basées essentiellement sur les connaissances d'un opérateur qualifié manipulant le système.

Afin de pouvoir appliquer la technique de la logique floue à la commande d'une machine électrique en vitesse et position et à la navigation d'un robot mobile dans un environnement inconnu, nous allons nous intéresser de plus près à cette technique. Dans ce contexte, on se limitera aux propriétés essentielles de la commande par logique floue qui n'utilise qu'une petite partie de toutes les règles existantes de la théorie de la logique floue.

IV.2. Historique :

Les origines de la logique floue se trouvent dans le principe de l'incertitude de Heisenberg. Dans les années 20, les physiciens ont introduit la troisième valeur $\frac{1}{2}$ dans le système logique bivalent $\{0, 1\}$. Au début des années 30, le logicien polonais Jan Lukasiewicz a développé le système logique avec trois valeurs [23].

Depuis les années 30, Max Black a appliqué la logique floue aux ensembles d'éléments ou de symboles. Il a dessiné la première fonction d'appartenance (Membership function) [23]. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept des sous-ensembles flous soit proposé par Lotfi Zadeh, automaticien de réputation internationale, qui a contribué à la modélisation de phénomènes sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. Il publia un article intitulé (Fuzzy sets) ou (Ensembles flous).

En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, ce qui introduisait la commande floue dans la régulation des processus industriels. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle que la régulation de fours de cimenterie réalisée par la société Smidt-Fuller en 1978. C'est la première véritable application industrielle de la logique floue. Grâce au chercheur japonais Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985. Les sociétés japonaises comprirent l'avantage à la fois technique et commercial de la logique floue [24].

Freinée par la réticence à appréhender un nouveau concept et par des difficultés de réalisation pratique, la logique floue ne débouche réellement qu'en 1990 avec l'apparition de produits et de systèmes utilisant cette technique. Et en 1995 grâce à Jang, l'application de la logique floue s'élargit aux systèmes à réseaux de neurones et à l'intelligence artificielle. Aujourd'hui, la logique floue est arrivée à maturité et utilisée dans de nombreuses applications industrielles et gestionnaires. Sa mise en œuvre est maintenant facilitée par la disponibilité de microprocesseurs dédiés et d'outils puissants de développement [25].

Depuis, la logique floue connaît au Japon un véritable essor dû au fait que les sociétés japonaises ont vite compris ses avantages, à la fois techniques et commerciaux:

Facilité d'implantation :

- Solutions de problèmes multi variables complexes ;
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes ;
- Possibilité d'intégration du savoir-faire de l'expert.

IV.3. Domaines d'application :

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications, on peut citer [23].

- Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs, ...).
- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.).
- Systèmes autonomes mobiles ;
- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...).
- Systèmes de conditionnement d'ambiance.
- Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production, transformation, traitement de produit et déchet.
- Systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance.
- Systèmes d'autoroute automatisés : direction automatique, freinage et contrôle de la manette des gaz pour les véhicules.
- Robotique : contrôle de la place et organisation de chemin.
- Produits de consommation courante.

IV.4. Notions de base de la logique floue :

Cette section n'a pas pour but de donner un état des lieux complet de la logique floue, mais uniquement fournir les quelques notions de base de la logique floue d'une manière abrégée.

IV. 4.1. Principe de base de la logique floue :

Dans la théorie des ensembles conventionnels, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble, donc le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble ne peut être que nul ou égal à l'unité. Par contre dans la théorie des ensembles flous, un élément peut plus ou moins appartenir à un ensemble, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur comprise dans l'intervalle [0,1].

Ce qui différencie les deux théories provient des limites des ensembles définis. Dans la théorie classique les contours des ensembles sont nets, tandis que pour les ensembles flous les contours sont graduels, ou encore flous comme l'illustre la Fig. IV.1 [26]

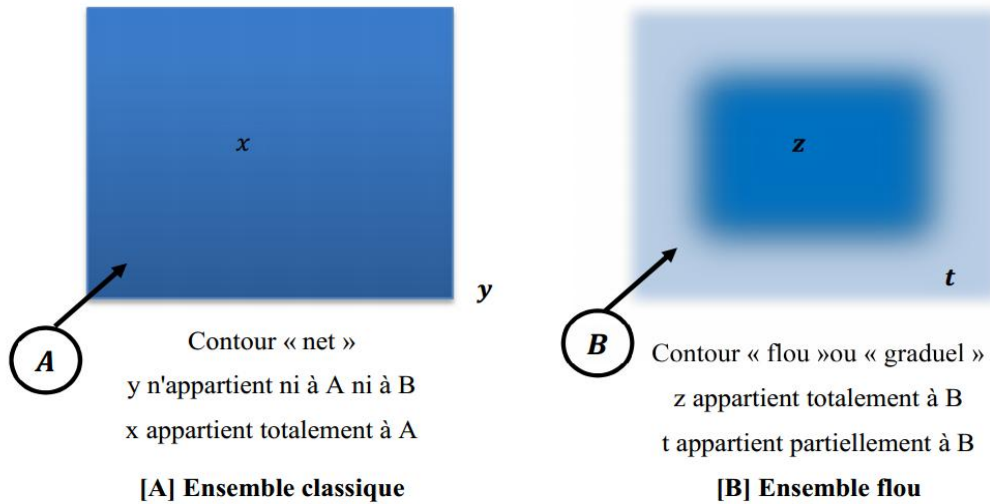


Fig. IV.1 : Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.

A ce titre, on associe aux ensembles classiques la logique binaire dite encore booléenne, et aux ensembles flous la logique floue. Ces deux logiques ne s'opposent pas, au contraire il apparaît comme nous le verrons plus loin, que la logique floue est une extension de la logique binaire pour laquelle les niveaux de vérité (degrés d'appartenance que l'on note μ), au lieu d'être vrai ou faux peuvent prendre des valeurs comprise entre 0 et 1.

Afin de mieux saisir la différence qui existe entre les deux logiques et de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, présentons un exemple simple. Un patient atteint d'hépatite présente généralement les symptômes suivants :

- Le patient a une forte fièvre,
- Sa peau présente une coloration jaune,
- Il a des nausées.

Comment modéliser l'état : "a une forte fièvre" ?

➤ Représentation booléenne

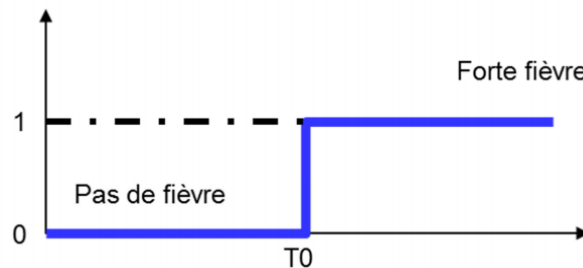


Fig. IV.2 : Représentation des variables booléenne classique.

- La variable booléenne ci-dessus tente de représenter cet état.
- En deçà de la température T_0 , le patient n'a pas de température.

– Au-delà, il doit consulter !

Donc comment quantifier T0 lorsque le phénomène est complexe? La notion de fièvre est typiquement une notion floue difficilement modélisable avec l'algèbre booléenne classique.

➤ La variable "à une forte fièvre" manipulée par la logique floue serait la suivante :

La transition entre les valeurs faux (codée 0) et vrai (codée 1) est maintenant progressive comme la figure suivante :

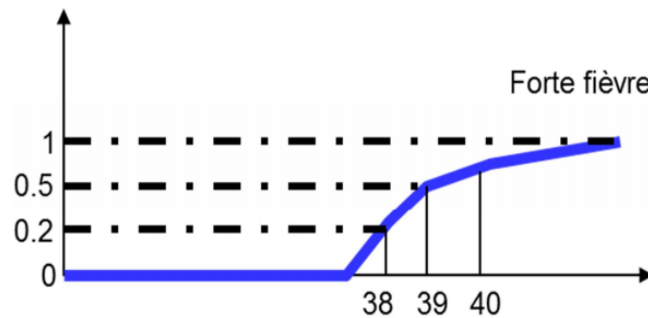


Fig. IV.3 : Représentation des variables floues.

– La fonction représentée doit être considérée comme un **degré d'appartenance** μ à l'état décrit ou comme une **probabilité d'appartenir à l'ensemble** considéré.

– Ainsi, un patient présentant une température de 38 n'a qu'un faible degré d'appartenance 20 % (0,2) à l'état "a une forte fièvre" alors que celui qui atteint 40 présente un fort degré d'appartenance (80 %) à ce même état.

– On voit qu'il est maintenant beaucoup plus aisé de fixer la température de basculement (progressif) d'état. A 39, on n'appartient qu'à 50 % à l'état "a une forte fièvre". Si l'on reprend l'exemple du diagnostic médical, pour un patient dont la température aurait été juste inférieure à la température de transition (38,9 et 39 °C), on aurait exclu l'hépatite alors qu'avec la logique floue, on l'aurait envisagée avec une probabilité moyenne, mais non nulle de 50 % ! Ce type de la Fig. IV.3 est appelé fonction d'appartenance, elle illustre la gradualité introduite par la logique floue. La fonction d'appartenance est désignée par $\mu_A(x)$. L'argument x se rapporte à la variable linguistique, tandis que l'indice A indique l'ensemble concerné.

$\mu_A(x)$, associée à l'ensemble A représentant la forte fièvre. Si $\mu_A(x)$ est égal à '1' alors il est sûr et certain que x est dans A , $\mu_A(x)$ est égal à '0' implique que sûr et certain x n'appartient pas à A , $\mu_A(x)$ est strictement entre 0 et 1 implique que x appartient à A avec un degré de vérité égal à $\mu_A(x)$. A est donc l'ensemble flou associé à la valeur linguistique forte fièvre. A sera noté par [27]

$$A = \{x, \mu_A(x)\} \text{ et } x \in X \quad (\text{IV.1})$$

Si X est discret, A est noté par:

$$A = \sum_x \mu_A(x) / x \quad (\text{IV.2})$$

Si X est continu, A est noté par:

$$A = \int \mu_A(x) / x \quad (\text{IV.3})$$

Où $\mu_A(x)$ est la fonction d'appartenance à A et X est l'ensemble de toutes les valeurs possibles de x (l'univers de discours de x).

IV.4.2. Univers de discours :

L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue x et $\mu_A(x)$ est le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble flou A . Plus généralement, le domaine de définition de $\mu_A(x)$ peut être réduit à un sous ensemble de l'univers de discours. On peut ainsi avoir plusieurs fonctions d'appartenance, chacune caractérisant un sous-ensemble flou. C'est par l'association de tous les sous-ensembles flous de l'univers de discours que l'on obtient l'ensemble flou de la variable floue x [28].

IV.4.3. Fonction d'appartenance :

Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance qui correspond à la notion de fonction caractéristique en logique classique, elle permet de mesurer le degré d'appartenance d'un élément à l'ensemble flou. En toute généralité, une fonction d'appartenance d'un ensemble flou est désignée par (x) . L'argument x se rapporte à la variable caractérisée, alors que l'indice A indique l'ensemble concerné [25]. Les fonctions d'appartenance peuvent avoir différentes formes – Monotones (croissantes ou décroissantes), comme il est montré sur la Fig. IV.4.a, b;

- Triangulaires (Fig. IV.4.c) ;
- Trapézoïdales (Fig. IV.4.d) ;
- En forme de cloche (Gaussiennes), comme le montre la Fig. IV.4.e.

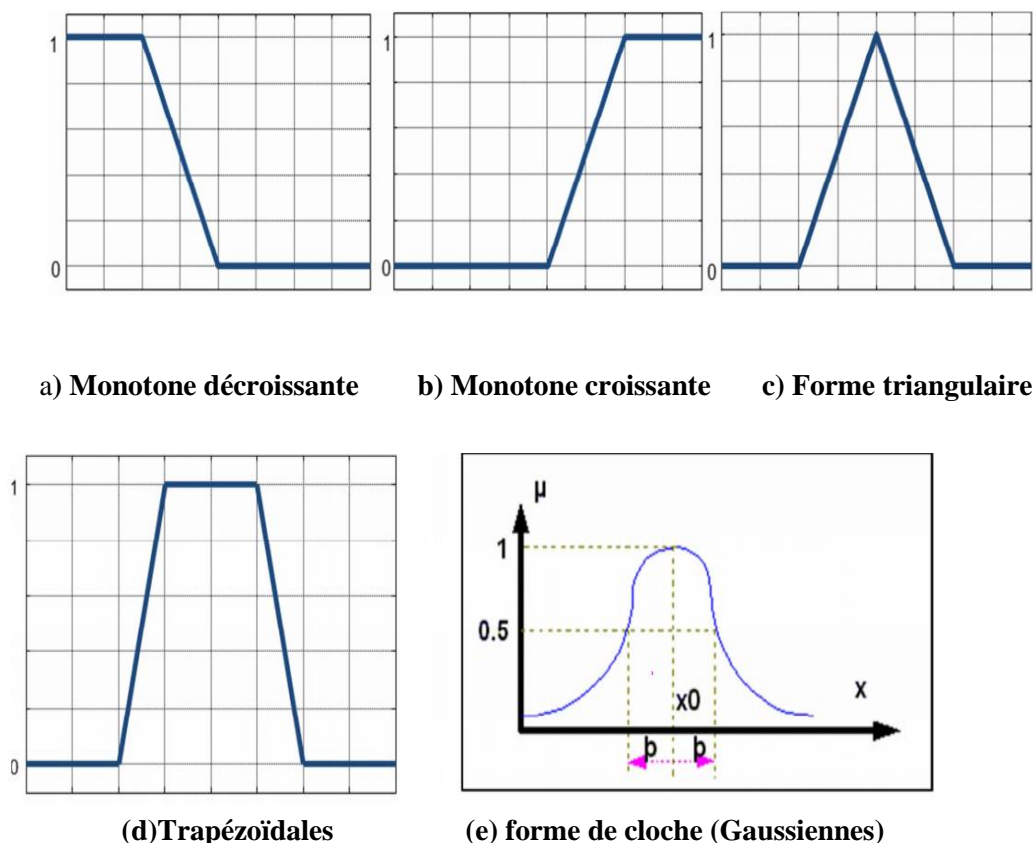


Fig. IV.4 : Différentes formes des fonctions d'appartenance.

Généralement, les plus souvent utilisées sont les fonctions de forme trapézoïdale ou triangulaire.

IV.4.4. Variable linguistique :

Le concept des variables linguistiques joue un rôle important dans le domaine de la logique floue. Une variable linguistique comme son nom le suggère, est une variable définie à base de mots ou des phrases au lieu des nombres. En effet, la description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme "quelque, beaucoup, souvent, chaud, froid, rapide, lent, grand, petit ...etc" [27]. Ce genre d'expressions forme ce qu'on appelle des variables linguistiques de la logique floue.

On peut représenter une variable linguistique par un triplet (x, U, T_x) , tels que : x est une variable numérique (Vitesse, Taille, Température) définie sur un univers de référence U et T_x est un ensemble de catégories floues de U , qui sont utilisées pour caractériser x à l'aide de fonctions d'appartenance. Considérons la vitesse de rotation d'une machine électrique comme une variable linguistique définie sur un univers de discours $UD = [0, 100]$ rd/s, et son ensemble de catégories floues $T_{Vitesse} = (Lente, Rapide, Moyenne)$ [27]. Ces trois ensembles flous de $T_{Vitesse}$ peuvent être représentés par des fonctions d'appartenance comme le montre la fig. IV.5.

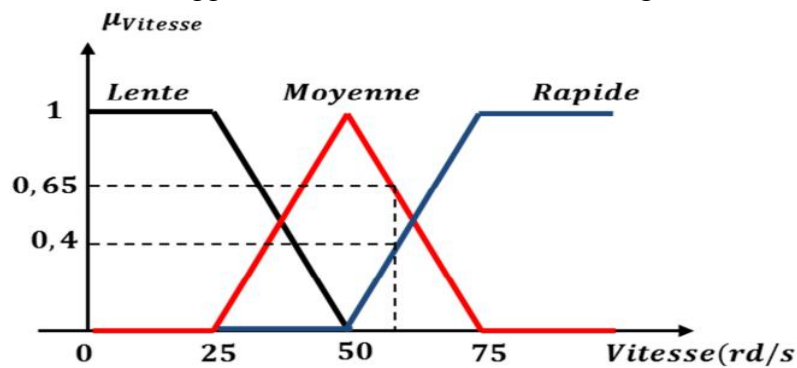


Fig. IV.5 : Représentation graphique des ensembles flous d'une variable linguistique.

IV.4.4.1. Propriétés des ensembles flous :

IV.4.4.1.1. Égalité :

Deux ensembles flous A et B de X sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur pour tout élément de X :

$$\forall x \in X, \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (IV.4)$$

IV.4.4.1.2. Inclusion :

Un ensemble flou A est inclus dans un ensemble flou B si toutes ses valeurs de fonction d'appartenance sont inférieures à celles de B sur tout le domaine X .

$$\forall x \in X, \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (IV.5)$$

IV.4.4.1.3. Support :

Le support est défini comme l'ensemble des valeurs du domaine X pour lesquelles la fonction d'appartenance n'est pas nulle.

$$Supp(A) = \{x \in X \Rightarrow \mu_A(x) \neq 0\} \quad (IV.6)$$

IV.4.4.1.4. Hauteur :

La hauteur d'un ensemble flou A est la valeur max de la fonction d'appartenance sur le domaine X . Un ensemble flou A est dit normal si $h(A)=1$.

$$h(A) = \max_{x \in X} \mu_A(x) \quad (IV.7)$$

IV.4.4.1.5. Noyau :

Le noyau d'un ensemble flou A est l'ensemble qui contient tous les éléments qui appartiennent sûr et certain à A (leurs degrés d'appartenance sont égaux à 1)

$$Kern(A) = \{x \in X \Rightarrow \mu_A(x) = 1\} \tag{IV.8}$$

IV.4.4.1.6. Cardinal:

Le cardinal d'un ensemble flou A est la somme des fonctions d'appartenance (cf. ensemble classique).

$$\| A \| = card(A) = \sum_{x \in X} \mu_A(x) \tag{IV.9}$$

IV.4.4.1.7. Partition floue :

Soit N ensembles flous A_j du référentiel X. $(A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_N)$ est dite une partition floue si

$$\forall x \in X \sum_{j=1}^N \mu_{A_j}(x) = 1 \text{ avec } A_j \neq 0 \text{ et } A_j \neq X \quad \forall 1 \leq j \leq N \tag{IV.10}$$

La Figure. IV.6 illustre un exemple d'une partition floue formée de trois ensembles flous.

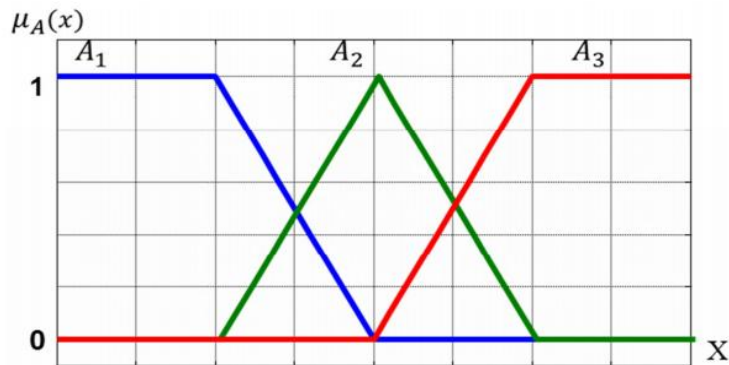


Fig. IV.6 : Exemple d'une partition floue formée de trois ensembles flous.

IV.4.5. Opérateurs de la logique floue :

Une fois les ensembles flous définis, des opérations mathématiques concernant ce type d'ensembles ont été développées. Les opérateurs mathématiques élaborés ressemblent beaucoup à ceux reliés à la théorie des ensembles conventionnels [24]. Les opérateurs de l'intersection, l'union, la complémentation et l'implication sont traduites par les opérateurs " ET, OU, NON et ALORS" respectivement. Soient A et B, deux sous-ensembles flous d'une variable linguistique définis sur l'univers de discours UD par leurs fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$, $\mu_B(x)$. respectivement

IV.4.5.1. Opérateur ET (Intersection floue) :

Le sous-ensemble flou, correspondant à l'intersection des sous-ensembles A et B est défini par les éléments x de l'univers de discours UD qui appartiennent à A et à B. Dans la logique floue, l'opérateur ET peut être exprimé par

$$\mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad \forall x \in UD \tag{IV.11}$$

Ou bien
$$\mu_{A \cap B} = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad \forall x \in UD \tag{IV.12}$$

On parle alors d'opérateur minimum.

Cette opération est représentée à la Figure. IV.7 Comme on le voit, il est possible que la fonction d'appartenance résultante $\mu_{A \cap B}(x)$ n'atteigne pas la valeur 1. On peut facilement vérifier que l'opérateur

minimum est commutatif, c'est à dire qu'il est possible d'invertir $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ sans que le résultat change. Cet opérateur peut être appliqué à plus de deux ensembles. Dans ce cas s'applique le théorème d'associativité.

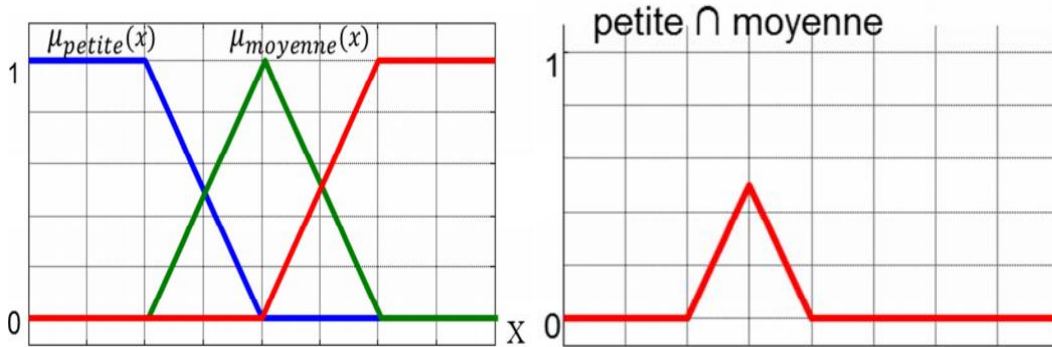


Fig. IV.7 : Opérateur ET.

A noter qu'il s'agit de l'opérateur ET, appelée aussi " intersection".

IV.4.5.2. Opérateur OU (Union floue) :

Le sous-ensemble flou correspondant à l'union des sous-ensembles A et B est un sous ensemble de l'univers de discours UC défini par tous les éléments x de UD qui appartiennent ou bien à A ou bien à B, ce que l'on note (AUB) (Fig. IV.8). L'opérateur OU est généralement réalisé par la formation du maximum, que l'on exprime comme suit :

$$\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad \forall x \in UD \quad (IV.13)$$

Ou bien

$$\mu_{A \cup B} = \mu_A(x) + \mu_B(x) \quad \forall x \in UD \quad (IV.14)$$

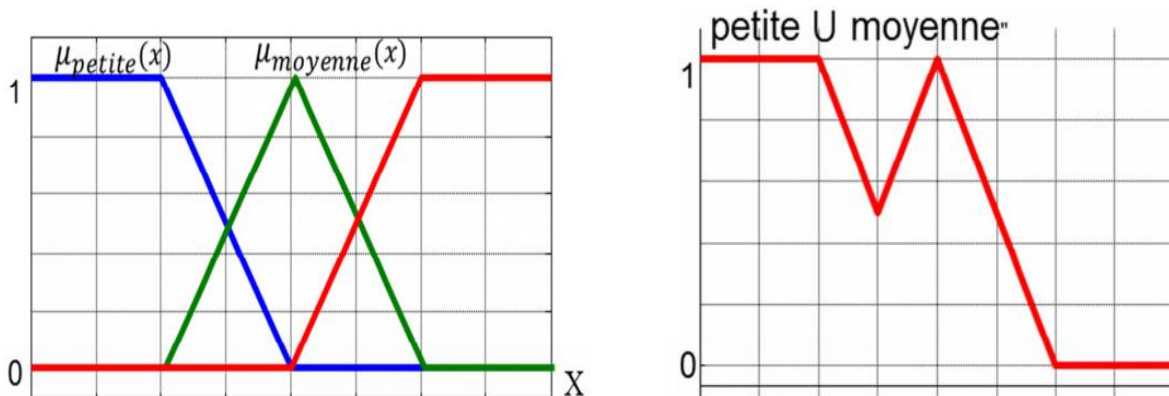


Fig. IV.8 : Opérateur OU.

IV.4.5.3. Opérateur NON (complémentation floue) :

Comme l'illustre la Figure. IV.9, le sous-ensemble flou complémentaire du sous-ensemble A est un sous-ensemble de l'univers de discours UD défini par les éléments x de l'UD qui n'appartiennent pas au sous-ensemble flou A. On peut exprimer ça par :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in UD \quad (IV.15)$$

Le complément flou représente l'opération NON de la logique classique au sens flou.

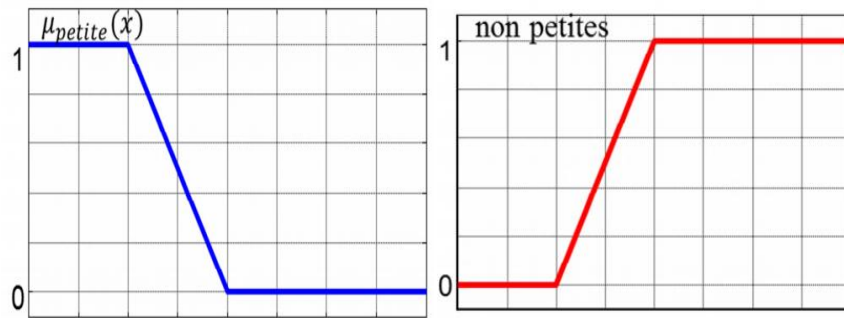


Fig. IV.9 : Opérateur NON.

IV.4.6. Règles d'inférence floue :

Les systèmes basés sur la logique floue utilisent pour prendre des décisions la connaissance humaine présentée sous forme de règles floues, appelées aussi règles d'inférence. Elles sont exprimées sous la forme :

SI (prémisse) **ALORS** (conclusion).

Nous aurons par exemple :

Si (pression forte **ET** température élevée) **ALORS** (ouverture vanne grande) Une règle floue est donc une combinaison entre une condition, nommée (prémisse ou prédicat) qui peut dépendre de plusieurs variables liées entre elles par des opérateurs **ET**, **OU**, **NON** et une conclusion ou conséquence. Les prémisses et conclusions forment des propositions floues exprimées par une conjonction ou une disjonction de prédicats, les conclusions sont obtenues par implication des propositions floues.

Ainsi en logique floue, on interprète la règle suivante : **SI** x est A alors y est B par le fait que si la variable floue x appartient au sous-ensemble A avec un degré d'appartenance $\mu_A(x)$, alors y appartient au sous-ensemble flou B avec un degré d'appartenance $\mu_B(y)$ qui dépend de la validité $\mu_A(x)$ de la prémisse. Plus généralement, l'expertise est donnée sous forme d'un ensemble de z règles, désigné par le terme de système d'inférence flou (SIF), présenté par une énumération du type :

SI [(Prédicat 1) **ET/OU** (Prédicat 1') **ET/OU**] **ALORS** (Conclusion 1) **OU**

SI [(Prédicat 2) **ET/OU** (Prédicat 2') **ET/OU**] **ALORS** (Conclusion 2) **OU**

.... .. **OU**

SI [(Prédicat z) **ET/OU** (Prédicat z') **ET/OU**] **ALORS** (Conclusion z)

L'opérateur **OU** n'est pas utilisé dans les conclusions car il introduirait une incertitude dans la connaissance, l'expertise ne permettrait pas de déterminer quelle décision à prendre [29]. De même, l'opérateur **NON** n'est pas employé, en effet si une règle avait par exemple la conclusion: «**ALORS** pression **NON** forte», il serait impossible de dire si cela signifie «pression faible» ou «pression moyenne», cela serait encore un cas d'incertitude. Quatre étapes sont donc nécessaires pour obtenir la conclusion finale :

- Le calcul des propositions ;
- Le calcul des relations ;
- Les compositions des règles avec les faits observés ;
- L'agrégation des conclusions des règles.

IV.5. Structure d'un système de commande floue :

La logique floue est principalement utilisée dans les domaines de prise de décision, de reconnaissance des formes, de modélisation et de commande des procédés. La commande ou la régulation des systèmes est le domaine industriel de la logique floue le plus exploité. On distingue trois structures majeures de régulateurs à logique floue (RLF):

- La structure pure ;
- La structure de Takagi-Sugeno-Kang (TSK) ;
- La structure de Mamdani ou le modèle « fuzzification - defuzzification ».

Dans la structure pure les variables d'entrée et de sortie du RLF sont des variables floues ou linguistiques. Ceci constitue un handicap étant donné que les entrées et les sorties des régulateurs des systèmes réels sont des variables réelles ou numériques.

La structure TSK résout ce problème par une simple transformation des variables linguistiques en variables réelles. L'inconvénient de cette structure est que le conséquent de chaque règle soit une formule mathématique.

La structure de Mamdani s'est proposé une interface de défuzzification (défuzzificateur) à la sortie de la structure pure. Le fuzzificateur transforme les variables réelles d'entrée en variables linguistiques floues, tandis que le défuzzificateur effectue l'opération inverse. La structure de Mamdani est devenue le modèle standard du RLF le plus utilisé dans la régulation des systèmes. Le schéma synoptique général d'un contrôleur flou est représenté dans la Fig. IV.10 [30]

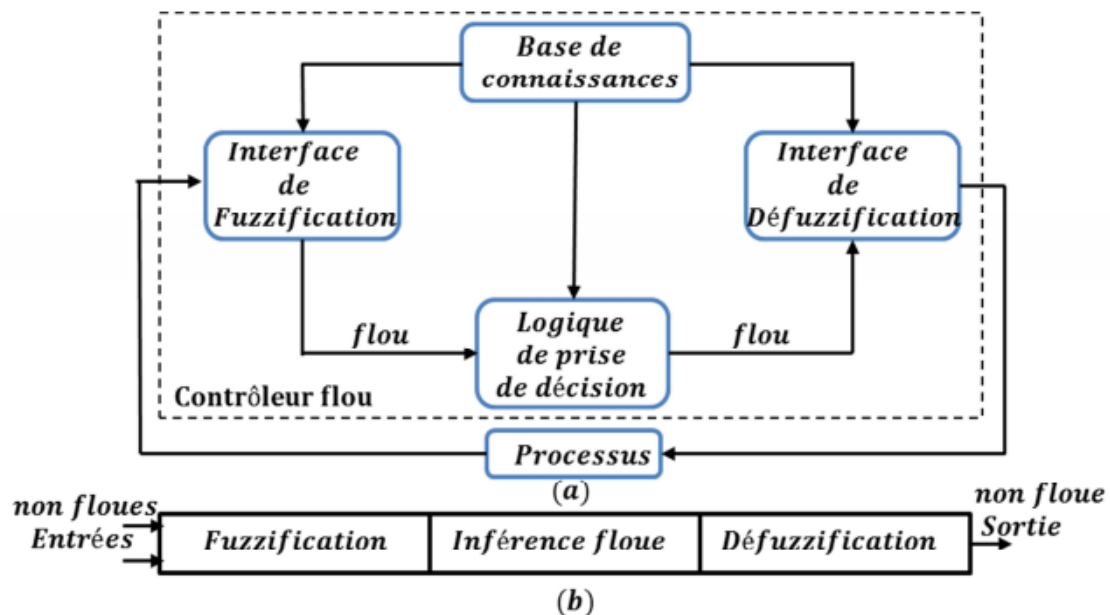


Fig. IV.10 : a): Schéma synoptique d'un contrôleur flou, b) : Configuration d'un contrôleur flou.

Comme le système à commander ne reçoit que des valeurs déterministes (non floues), un RLF devrait convertir les valeurs déterministes à son entrée en valeurs floues, les traiter avec les règles floues et reconvertir le signal de commande de valeurs floues en valeurs déterministes pour appliquer au procédé. Les rôles de chaque bloc peuvent être résumés comme suit [31] :

IV.5.1. Interface de fuzzification :

Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Etablit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées ;

– Effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous. Cette opération doit être effectuée dans un domaine normalisé généralement par l'intervalle $[-1, 1]$ afin de faciliter le calcul.

IV.5.2. Base de connaissance :

Le bloc base de connaissance comporte une connaissance dans le domaine d'application et le résultat de commande prévu. Il consiste en « base de données » et en « base de règles linguistiques (floues) de commande » :

- La base de données effectue des définitions qui sont nécessaires pour établir les règles de commande et manipuler les données floues dans un RLF ;
- La base de règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques.

IV.5.3. Inférence floue :

Le bloc inférence est le cœur d'un RLF, il possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue. Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement:

- La méthode d'inférence max-min ;
- La méthode d'inférence max-produit ;
- La méthode d'inférence somme-produit.

Chacune de ces trois méthodes utilise un traitement numérique propre des opérateurs flous.

IV.5.4. Interface de défuzzification :

La défuzzification consiste à déduire une valeur numérique précise de la sortie du régulateur (x_r) à partir de la conclusion résultante floue ($\mu_{RES}(x_r)$) issue de l'opération d'inférence. Les méthodes couramment utilisées sont :

- La méthode de centre de gravité ;
- La méthode du maximum ;
- La méthode des surfaces ;
- La méthode des hauteurs.

La méthode du centre de gravité : Cette méthode donne généralement de meilleurs résultats malgré l'exigence d'une grande puissance de calcul. Elle consiste à prendre comme décision à la sortie l'abscisse x_{Gr} du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{RES}(x_r)$.

Cette abscisse est déterminée par la relation suivante :

$$x_{Gr} = \frac{\int x_r \mu_{RES}(x_r) dx_r}{\int \mu_{RES}(x_r) dx_r} \quad (\text{III.16})$$

IV.5.5 Différentes approches pour la détermination des règles :

Il existe deux approches principales pour la détermination des règles d'un contrôleur flou la première est une méthode purement heuristique; les règles sont déterminées de telle sorte que l'écart entre la

consigne et la sortie puisse être corrigé. Cette détermination repose sur la connaissance qualitative du comportement du processus. La seconde approche est une méthode pouvant déterminer d'une manière systématique la structure linguistique et/ou les paramètres satisfaisants les objectifs et les contraintes de contrôle [22].

Une autre méthode a été introduite pour la détermination des règles et cela en se référant à la trajectoire du système en boucle fermée. La recherche intuitive du comportement du système en boucle fermée, pour la détermination des règles dans le domaine temporel, utilise fréquemment l'erreur e (observation) et la variation de l'erreur Δe. (Dynamique du processus) ainsi que la variation de la commande ΔU (entrée du processus à réguler).

La procédure à suivre, pour la détermination des règles du contrôleur flou est expliquée en considérant les points indiqués sur la figure (IV.12). Pour chacun de ces points, on explicite l'expertise sous la forme suivante :

Règle 1: Si e=PG et Δe=EZ alors ΔU=PG. Départ.

Règle 2: Si e=PG et Δe=NP alors ΔU =PM.

Augmentation de la commande pour garder l'équilibre.

Règle 3: Si e==PM et Δe =NP alors ΔU =PP.

Très faible augmentation de la commande pour ne pas dépasser la valeur limite.

Règle 4: Si e=PP et Δe=NP alors ΔU=EZ. Convergence vers l'équilibre.

Règle 5: Si e=EZ et Δe=NP alors ΔU=NP. Freinage du processus.

Règle 6: Si e=NP et Δe=PP alors ΔU =NM. Freinage et inversion de la variation de la commande.

Règle 7: Si e=NM et Δe=EZ alors ΔU=NM. Rappel du processus vers l'équilibre.

Règle 8: Si e=NP et Δe=EZ alors ΔU=EZ. Convergence vers l'équilibre.

Règle 9: Si e=EZ et Δe=EZ alors ΔU=EZ. Equilibre.

En considérant point par point le comportement du processus et l'action de variation de commande à appliquer, on en déduit la table du contrôle flou de base qui correspond à la table de règle très connue de Mac Vicar-whilan [22]

Δe \ e	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	EZ
NM	NG	NG	NG	NM	NP	EZ	PP
NP	NG	NG	NM	NP	EZ	PP	PM
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
PP	NM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG
PM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG	PG
PG	EZ	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Table IV.1 la table du contrôle flou

Sur la diagonale de la matrice d'inférence, on attribue à la variation de la commande l'ensemble EZ.

Par conséquent, le système à régler se trouve dans un état transitoire qui ne nécessite pas d'intervention importante pour atteindre le régime stationnaire.

IV.5.5.1 Développement pratique du contrôleur flou :

La majorité des contrôleurs flous utilisent des algorithmes se basant sur le schéma simple. De Mamdani pour un système mono-variable, figure (IV.11)

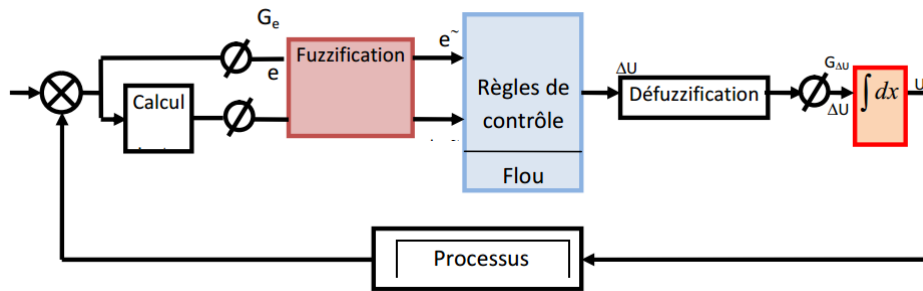


Fig. IV.11. Schéma bloc d'une boucle de régulation à contrôleur flou.

D'après le schéma ci-dessus, le système de régulation floue se compose essentiellement du contrôleur flou et du processus à contrôler. Le contrôleur flou comprend :

- Un bloc de calcul de la variation de l'erreur au cours du temps (Δe) ;
- Les facteurs d'échelle associés à l'erreur, à sa variation et à celle de la commande ;
- Un bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation ;
- Les règles de contrôle flou ;
- Un bloc de défuzzification de la variation de la commande ;
- Un bloc intégrateur.

La figure (IV.12) représente les fonctions d'appartenance utilisées par le contrôleur.

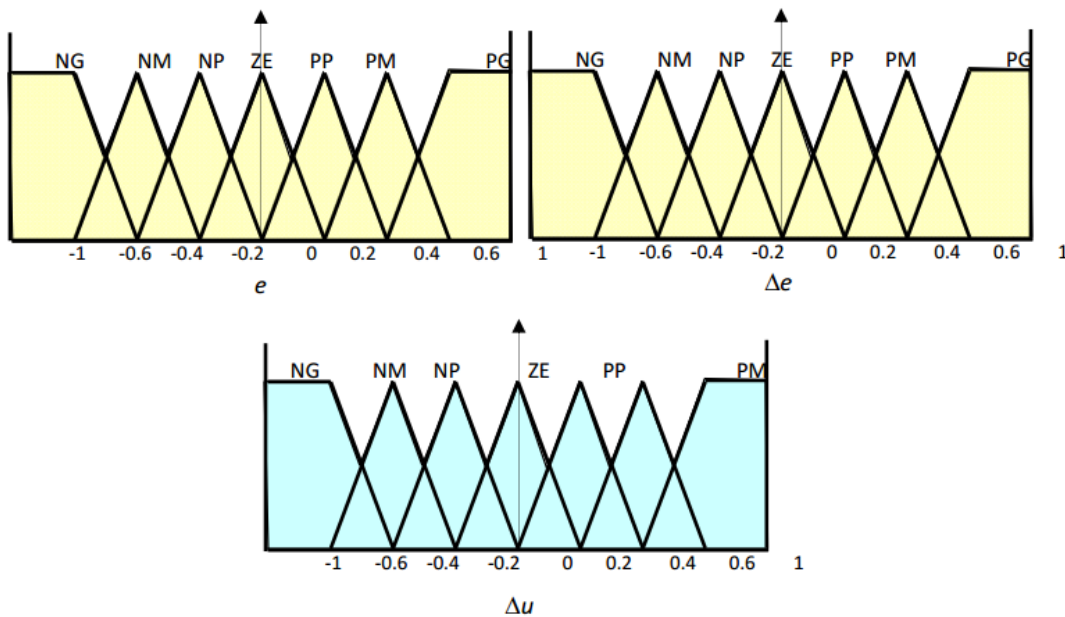


Fig. IV.12. Fonctions d'appartenance utilisées par le contrôleur.

IV.5.5.2. Variation de la commande :

La loi adoptée est fonction de l'erreur et de sa variation ($U=f(e, \Delta e)$). Par conséquent, la variation de la commande nécessaire est donnée par l'activation de l'ensemble des règles de décision associées.

Dans les cas simples, cette variation de commande est obtenue par lecture d'une table de décision définie hors ligne. La forme générale de cette loi de commande est donnée par:

$$U_{k+1} = U_k + G \Delta U \cdot \Delta U_{k+1}$$

Où G_{k+1} est le gain associé à la commande U_{k+1} , généralement choisi faible pour assurer la stabilité du système et ΔU_{k+1} est la variation de la commande.

IV.6. Application de la logique floue à la commande de la puissance active et réactive de la GADA

Dans ce chapitre, nous allons suivre les étapes indiquées de régulateurs par logique floue de type Mamdani pour la boucle de commande des courants et des puissances, dans l'objectif et d'améliorer les performances de la commande, les deux régulateurs sont de même type, et possède les mêmes fonctions d'appartenance.

IV.7. Résultats de simulation :

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les lois de commande en puissance active et réactive que nous venons de présenter sur le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, avec application d'une puissance active et puissance réactive

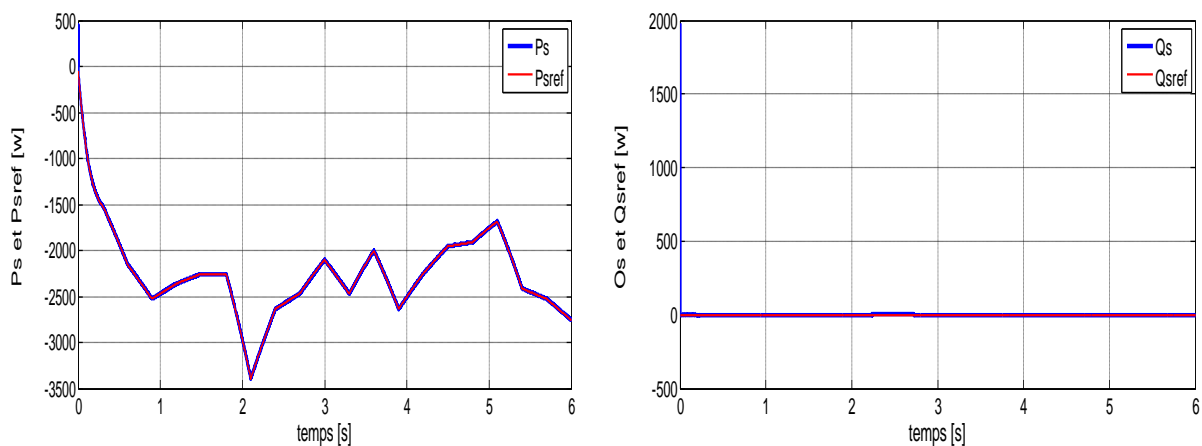


Fig IV.13: La puissance active et réactive statorique et rotorique et leurs références.

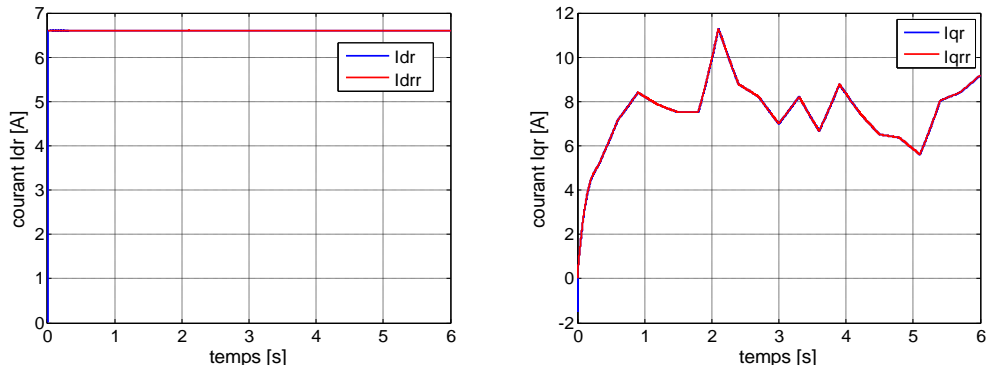


Fig IV.14: Le courant rotorique

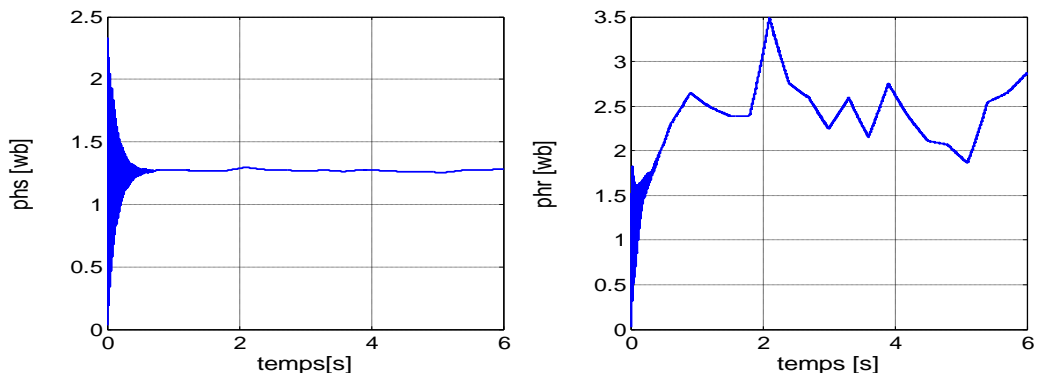


Fig. IV.15: Le Flux statorique et rotorique

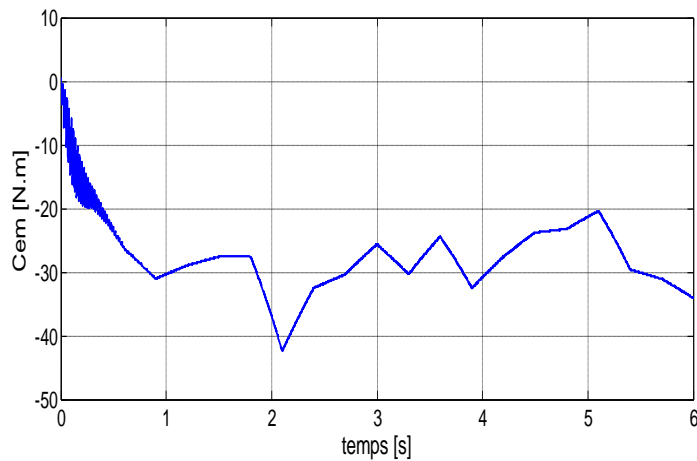


Fig. IV.16: Couple électromagnétique.

Les résultats obtenus dans les chapitres simulation numérique de la génératrice asynchrone à double alimentation dans une chaîne de production d'énergie éolienne, nous permettent d'effectuer une comparaison entre la commande vectorielle " et la commande par logique floue pour la régulation de puissance active et réactive statorique de cette génératrice "GADA.

IV.8. Conclusion :

Ce chapitre présente une stratégie de commande par logique floue appliquée au système de conversion d'énergie d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Cette technique trouve sa plus forte justification au problème d'utilisation d'une loi de commande non linéaire robuste aux incertitudes du modèle. L'objectif est d'appliquer cette commande pour contrôler indépendamment des puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone découplée par orientation du flux statorique. Les résultats de simulations numériques obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes électriques.

A travers les caractéristiques de réponse, on observe les bonnes performances de la poursuite en puissance est sans dépassement. Le découplage, la stabilité et sont assurés.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Ce mémoire traite la modélisation et la commande floue d'une génératrice asynchrone à double alimentation.

C'est dans cet entendement qu'a été réalisé ce travail. En effet, l'objectif principal de ce mémoire est la réalisation de la commande par logique floue. Ce type de contrôle a été suffisamment discuté comparativement à la commande vectorielle par orientation du flux statorique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un état de l'art et la modélisation générale de la génératrice asynchrone à double alimentation « GADA », ses applications, ses modes de fonctionnement et ses avantages. Nous avons exposé la modélisation de cette machine en utilisant la transformation de PARK. Les deux types de fonctionnement moteur et générateur a été effectuée dans le but de connaître le comportement de ce type de machine. Les résultats de simulation de ce modèle sur Matlab/simulink nous confirment la possibilité de la double alimentation de la machine par la stabilité de ces différentes grandeurs étudiées pour un fonctionnement générateur que moteur.

En suite, nous avons consacré le deuxième chapitre à l'utilisation d'une commande vectorielle à orientation du flux statorique. Ce contrôle est réalisé avec corrélation par des puissances de références afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator et le réseau. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances statoriques "active et réactive" par les puissances réelles.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté la turbine éolienne puis un asservissement du modèle global d'une chaîne de conversion éolienne. Afin de régler la vitesse du système éolien étudié à sa valeur optimale assurant la MPPT. Cette application est simulée numériquement en utilisant l'outil MATLAB, mais le dimensionnement du régulateur flou est fait par ajustement manuel pour déterminer les trois gains de normalisation.

Le dernier chapitre ce chapitre nous a permis d'avoir une vue générale sur les systèmes flous s'est porté principalement sur le système flou. Nous avons montré comment appliquer cette théorie en vue de la conception d'un régulateur flou. Une simulation à base d'un contrôleur flou a été effectuée pour faire le réglage de la puissance active et réactive d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Les résultats obtenus montrent que le régulateur flou présente des performances de poursuite très satisfaisantes, il a amélioré la dynamique des puissances statoriques par rapport à celle du réglage par PI. En outre, En fin nous avons fait une comparaison entre les résultats obtenus des différentes commandes.

Perspectives :

D'après les résultats obtenus et des observations enregistrées, les perspectives de cette étude :

- Application d'autres techniques de commande robuste, telles que : la commande floue en mode glissant pour plus minimiser le phénomène du *chattering* au niveau de la puissance active produite.
- Conception d'un contrôle du GADA pour compenser la puissance réactive dans les réseaux de petites puissances.
- La combinaison entre les différentes techniques associées à la commande vectorielle, et la commande par mode de glissement, à titre d'exemples : PI flou, le mode de glissement flou et le flou adaptatif glissant.

Bibliographique

Bibliographie

- [1] **L .Benalia**, « Commande en tension des moteur sa induction double alimentes », thèse de doctorat de l'université de Batna, juin 2010.
- [2]**S. khojet el khil**,«Commande vectorielle d'une machine asynchrone double alimentée (MADA)»,thèse de doctorat ,institut national polytechnique detoulouse,décembre2006.
- [3]**Y.A. Bencherif**, « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne » mémoire d'ingénieur d'état, Ecole Nationale Polytechnique 2008.
- [4] **M. Abbas et M. Mourad** « Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux application à l'energie eolienne » mémoire d'ingénieur d'état, école nationale polytechnique 2006.
- [5] **I. MEZERZI**, «Contribution à la modélisation et la commande d'une éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation» mémoire de master, université mohammed boudiaf de m'sila, 2013
- [6] **R. Rouabhi**, «Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation application énergie éolienne» mémoire de magister, université ferhat abbas-setif [2012]
- [7] **S. Drid**, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : Théorie et Expérimentation ». Thèse doctorat, l'Université de Batna, Algérie 2005.
- [8]**G. Tarak**, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » Thèse de Doctorat, par l'école centrale de lille et l'école militaire polytechnique d'Alger. 29/09/2011
- [09] **N. Hamdi**, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes » Mémoire de magister, université mentouri de constantine .24 /01/2008.
- [10] **.S. Goudjil**, « Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation » mémoire d'ingénieur d'état, Université de Bejaia 2007.
- [11] **P. Frédéric**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ».Thèse de doctorat, université de nantes.19 décembre 2003.
- [12] **A. CHAIBA**, «Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle» Thèse de doctorat de l'université de Batna, 2010
- [13] **A.Maarfa**, « étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée » diplôme de magister, université de batna ,2007.
- [14] **A. Gaillard**, « Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service»; thèse de doctorat en Génie Electrique; Université Henri Poincaré, Nancy-I. 2010
- [15] **F. Poitiers**, «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne»; Thèse de Doctorat en génie Electrique; Université de Nantes. 2003
- [9] **R. Azaizia** «Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux» mémoire de magister en électrotechnique; université de BOUMERDES. 2008

- [17] **Y.A.Bencherif** «Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne»; mémoire de l'ingénieur en électrotechnique; Ecole nationale polytechnique. 2008
- [18] **Ch. Naim** « Conversion d'énergies produit par des générateurs éolienne»; Mémoire de Magister en Electrotechnique; université de Mentouri - constantine. 2010
- [19] **I .Hamzaoui** «Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur»; mémoire de magister en électrotechnique ; Ecole Nationale Polytechnique 2008.
- [20] **S. Metatla** «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA»; Mémoire de Magister en Electrotechnique; Ecole nationale polytechnique. 2009
- [21] **A .Bouafia** «techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs a MLI» thèse de doctorat de l'université Ferhat Abbas – Sétif, 2010
- [22] **L .Kouhail, et El .Djjar** «Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone double alimentation «gada» pour l'utilisation de l'énergie éolienne», mémoire de d'ingénieur, université m'sila, 2011.
- [23] **R. KETATA** « Méthodologies de régulation numérique incluant la logique floue »-Thèse de Doctorat L.A.A.S Toulouse – 1992
- [24] **M. BAUER** « Application de contrôleurs à logique floue pour la commande vectorielle des machines à induction: commande en vitesse et en position » Rapport de stage ingénieur- ESIM-22 Février 1995
- [25] **Y. Youb** «Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté» mémoire de magister de l'université de Batna, 2009.
- [26] **F. CHEVRIE, F. GUELY** «La logique floue» cahier technique schneider, N°191, mars 1998.
- [27] **Document d'Internet**, «Pour y Voir Plus Clair ... dans la Logique Floue !» Disponible à : <http://perso.club-internet.fr/bmantel/pages/logfloue/logfloue01.html>
- [28] **M. LATRECHE** «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien» Magister en électrotechnique, université ferhat abbas de setif 24 /06 /2012
- [29] **F. Boumarfa** «Commande Intelligente D'une Association Convertisseur Statique Machine Asynchrone à Double Alimentation» mémoire de magister de l'université de Batna, 2009
- [30] **L. BAGHLI** «Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques» Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 1 999.
- [31] **B. Toulal** « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister Université de Batna, 2010

Annexes

Annexe A

Données de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

Valeurs nominales :

Puissance nominale :	$P_n = 4 \text{ kW}$
Tension nominale :	$v/U = 220/380 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$
La vitesse nominale :	$\omega_n = 1440 \text{ tr/min.}$
Nombre de paires de pôles	$P=2$

Paramètres :

Résistance du stator :	$R_s = 1.2 \Omega$
Résistance du rotor :	$R_r = 1.8 \Omega$
Inductance stator :	$L_s = 0.1554 \text{ H}$
Inductance du rotor :	$L_r = 0.1568 \text{ H}$
Inductance mutuelle :	$M = 0.15 \text{ H}$

Constantes mécaniques :

Moment d'inertie :	$J = 0.2 \text{ Kg.m}^2$
Coefficient de frottement :	$f = 0.001 \text{ N.m.S/rad}$

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

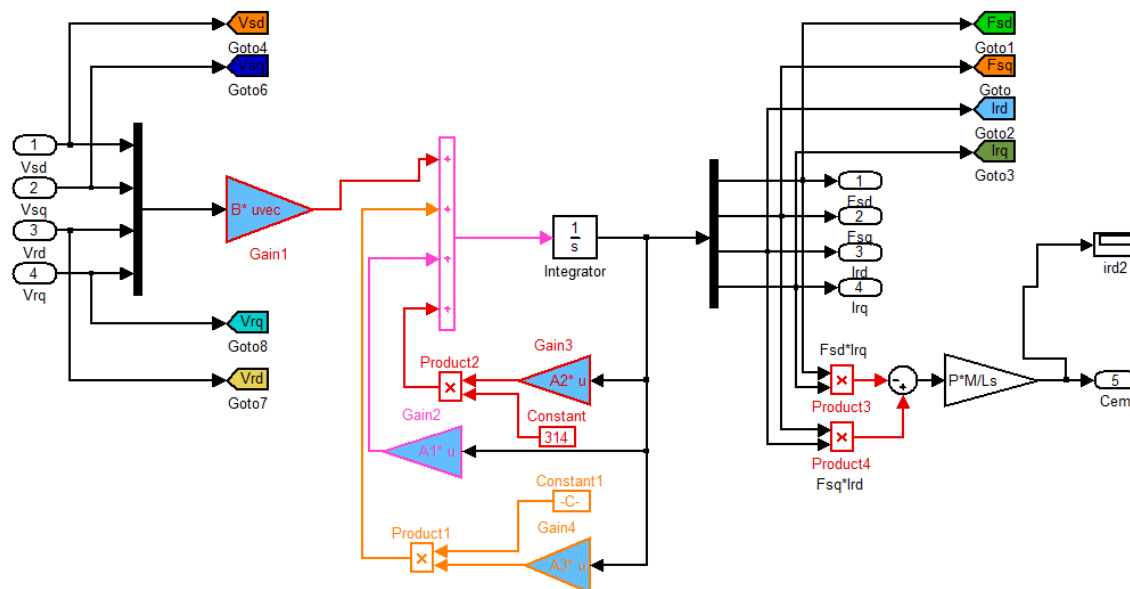
Nombre de pale = 3

Rayon d'une pale $R = 3 \text{ m}$

Gain du multiplicateur $G = 7.2$

Annexe B

❖ Le modèle de la GADA sous *Simulink/MATLAB*.



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DU L'OBTENTION DU DIPLOME
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

Spécialité : **Automatique**

Proposé et dirigé par : **M^{me}. BELOUNIS Ouassila**

Présenté par : **REGUIG BILAL**

THEME

***Modélisation et commande floue d'une génératrice
asynchrone à double alimentation
« Application à l'énergie éolienne »***

Résumé :

Ce travail présente une stratégie de commande par logique floue appliquée au système équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation « GADA ». Cette technique trouve sa plus forte justification au problème d'utilisation d'une loi de commande non linéaire. L'objectif est d'appliquer cette commande pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone « application à l'énergie éolienne ».

Mots clés :

Génératrice asynchrone à double alimentation « GADA », commande vectorielle, la modélisation de la turbine éolienne, commande par logique floue des puissances active et réactive.

N° d'ordre : Aut_200