



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane
MIRA de BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de génie électrique

Option : Energies renouvelables en électrotechnique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

THÈME :

**Etude et commande d'un système éolien à
vitesse variable basé sur une génératrice
asynchrone à double alimentation.**

Encadré par :

Mr: K. Idjdarene
Mr: S.Tamalouzt

Présenté par :

Mr: Moussaoui Sebiame
Mr: Tighilt Yakoub

2017/2018

Remerciements

Remerciements

Nous remercions en premier lieu, le bon DIEU qui nous a donné le courage et la patience pour parvenir à
finir ce travail.

Nous tenons à adresser nos sincères et respectueux remerciements à monsieur K. Idjdarene et monsieur S.
Tamalouzt pour leur temps, leur disponibilité, leur dévouement et leur orientation qui nous ont permit
d'enrichir nos connaissances, durant la réalisation de ce travail.

Nous remercions aussi les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Un grand merci à nos familles, pour leur soutien constant, leur présence et la confiance dont ils ont fait
preuve.

Enfin, nous tenons également à remercier toute personne, ayant contribué de près ou de loin à la
réalisation de ce travail.

Je dédie ce modeste travail à :

La mémoire de ma grand-mère que dieu bénit son âme.

Ma très chère mère que dieu la préserve.

Mon père et tous ces conseils et son sacrifice.

Mes frères.

Mon oncle.

Tous mes ami(e)s, et toute ma famille.

Je dédie ce modeste travail à :

*La mémoire de ma grand-mère que dieu bénit son âme et à la mémoire de
mon cousin « Saou » paix a son âme.*

Ma très chère mère que dieu la préserve.

Mon père et tous ces conseils et son sacrifice.

Mes frères et ma sœur.

Tous mes ami(e)s, et toute ma famille.

Yakoub

Liste des figures

Listes des figures**Chapitre I Généralité sur les systèmes éolien**

Figure (I.1) Evolution des dispositifs éoliens de l'antiquité à nos jours.	3
Figure (I.2) Conversion de l'énergie cinétique du vent.	4
Figure (I.3) Principaux organes du système de conversion.	4
Figure (I. 4) Les structures de savonius, darrieus et Hrotor.	7
Figure (I. 5) Photographie d'une éolienne à axe horizontal.	8
Figure (I. 6) Composants d'une éolienne.	8
Figure (I. 7) Zone de fonctionnement d'une éolienne.	12
Figure (I. 8) Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse variable.	13
Figure (I. 9) Système éolien basé sur la MADA à vitesse variable.	14
Figure (I. 10) Système éolien basé sur une machine synchrone à Aimants permanents à vitesse variable.	15
Figure (I. 11) Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.	16
Figure (I. 12) Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator.	17
Figure (I. 13) Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.	18
Figure (I. 14) Evolution de la configuration électrique de la machine asynchrone.	19
Figure (I. 15) Mode de fonctionnement de la MADA.	20

Chapitre II Modélisation de la chaîne éolienne

Figure (II. 1) Structure d'un système éolien connecté au réseau basé sur la MADA.	23
Figure (II. 2) Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse (λ) de la turbine et de l'angle d'orientation (β).	25
Figure (II. 3) Schéma bloc d'une turbine éolienne en tenant compte de l'algorithme MPPT.	26
Figure (II. 4) Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée.	28
Figure (II. 5) Passage du triphasé au biphasé.	30
Figure (II. 6) Schéma d'un onduleur de tension.	34
Figure (II. 7) Redresseur et onduleur MLI.	34
Figure (II. 8) L'interrupteur équivalent.	34
Figure (II. 9) Redresseur MLI.	35
Figure (II. 10) Onduleur MLI.	36
Figure (II. 11) Courant circulant dans le bus continu.	37
Figure (II. 12) Comparaison du porteur avec la modulatrice.	38
Figure (II. 13) Modélisation du filtre électrique.	39

Chapitre III La commande vectorielle de la chaine éolienne

Figure (III. 1) Principe de la commande vectorielle.	41
Figure (III. 2) Commande vectorielle qu'on a utilisée dans notre simulation.	45
Figure (III. 3) Système régulé par un régulateur PI.	46
Figure (III. 4) Fonctions d'appartenance des différentes variables du régulateurs flou.	51
Figure (III. 5) Défuzzification par valeur maximum.....	52
Figure (III. 6) Défuzzification par la méthode des hauteurs pondérées.	52
Figure (III. 7) Schéma bloc d'un contrôleur flou.....	53
Figure (III. 8) Schéma synoptique d'un régulateur flou.	55
Figure (III. 9) Fenêtre principale de l'éditeur de logique floue.	56
Figure (III. 11) Allure de la puissance statorique.....	57
Figure (III. 12) Allure de la puissance réactive statorique.	57
Figure (III. 13) Allure de la puissance active rotorique..	57
Figure (III. 14) Allure de la puissance réactive rotorique.	58
Figure (III. 15) Allure de la puissance active générée.	58
Figure (III. 16) Allure du glissement.	58
Figure (III. 17) la courant rotorique..	58
Figure (III. 18) Les Zooms sur les différentes parties du courant.....	58
Figure (III. 19) La tension rotorique V_r (volt).	59
Figures (III. 20) Les zooms sur les différentes parties de la tension rotoriques V_r (volts).....	59
Figure (III .21) Allure de la vitesse de la turbine.	60
Figure (III .22) Allure de la puissance active.....	60
Figure (III .23) Zoom sur la puissance active	60
Figure (III .24) Allure de La puissance réactive.....	60
Figure (III .25) Allure du Glissement.....	61
Figure (III .26) Tension rotorique.	61
Figure (III .27) Zoom sur la Tension rotorique.....	61
Figure (III .28) Puissance réactive rotorique.....	61
Figure (III .29) La puissance rotorique de la génératrice.	62
Figure (III .30) Courant statorique.	62
Figure (III .31) Zoom sur Le courant statorique.	62
Figure (III .32) Le courant rotorique.	62
Figure (III .33) Zoom sur Le courant rotorique.....	62
Figure (III .34) Le couple électromagnétique.	63

Figure (III .35) Puissance active statorique.....	64
Figure (III .36) Puissance réactive statorique.....	64
Figure (III.37 Tension rotorique.....	64
Figure (III.38) Zoom sur la tension rotorique.	64
Figure (III .39) Zoom sur V_r	65
Figure (III .40) Pulsation de la vitesse de rotation ($P^*\Omega$)	65
Figure (III .41) Glissement g	65
Figure (III .42) Couple électromagnétique.....	65
Figure (III .43) Courant rotorique.	66
Figure (III .44) Zooms sur le courant rotorique.	66

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralité sur les systèmes éoliens	
I. 1. Introduction.....	2
I. 2. Historique de l'énergie éolien.....	2
I. 3. Quelques notions sur le vent.....	3
I. 4. Production éolienne.....	3
I. 5. Définition d'une éolienne.....	3
I. 6. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	5
I. 7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	5
I. 7. 1. Avantages.....	5
I. 7. 2. Inconvénients.....	5
I. 8. Les Différents types d'éoliennes.....	6
I. 8. 1. Éoliennes à axe vertical.....	6
a) Avantages (type Darrieus).....	6
b) Inconvénients.....	6
c) Avantages (type Savonius).....	6
d) Inconvénients.....	7
I. 8. 2 Éoliennes à axe horizontal.....	7
a) Avantages.....	8
b) Inconvénients.....	8
I. 8. 2. 1. Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.....	8
I. 8. 2. 2. Catégories des éoliennes à axe horizontale.....	10
I. 9. Systèmes de génération d'électricité.....	10
I. 9. 1 Fonctionnement à vitesse fixe.....	10
I. 9. 1. a. Les avantages.....	10
I. 9. 1. b. les inconvénients.....	10
I. 9. 2. Fonctionnement à vitesse variable.....	10
I. 9. 2. a. Avantages.....	10
I. 9. 2. b. Inconvénients.....	11
I. 10. Systèmes de régulation pour réguler la vitesse de rotation.....	11
I. 11. Zone de fonctionnement d'une éolienne.....	11
I. 12. Applications des éoliennes.....	12

I. 13. Eoliennes connectées au réseau électrique	13
I. 13. 1. Machine asynchrone à cage.....	13
I. 13. 2. Machine asynchrone à double alimentation	13
I. 13. 3. Machine synchrone	14
I. 13. 4. Machines asynchrones à double stator	16
I. 13. 5. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)	17
I. 13. 5. 1. Définition.....	17
I. 13. 5. 2. Constitution de la MADA.....	18
I. 13. 5. 3. Intérêt de la MADA	18
I. 13. 5. 4. Différents modes de fonctionnement de la MADA	19
a) Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone	19
b) Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone	20
c) Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone	20
d) Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone.....	20
I. 13. 5. 5. Domaines d'application de la MADA	20
I. 14. Avantages et Inconvénients de la MADA	21
I. 14. a. Avantages de la MADA	21
I. 14. b. Inconvénients de la MADA.....	21
I. 15. Intérêt du choix de la MADA	21
I. 16. Raccordement au réseau	21
I. 18. Conclusion	22
 Chapitre II: La modélisation de la chaîne éolienne	
II.1. Introduction	23
II.2. Schéma de la structure choisi	23
II.3 Modélisation de la partie mécanique	23
II.3.1 Modèle du vent	23
II.3.2 Modélisation de la turbine éolienne	24
II.3.3 Modèle du multiplicateur	25
II.3.4 Modélisation de l'arbre de transmission	25
II.3.5. Point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT)	26
II.4. La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	27
II.4.1. Modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation.....	27
II .4 .1 .1 Les équations électriques	28

II .4 . 1 .2 Les équations magnétiques.....	29
II .4 .1 .3 L'équation mécanique	30
II .4 .2 Transformation de Park.....	30
II .4 . 3. Choix du référentiel	32
II .4 .3 .1. Référentiel lié au stator	32
II .4 .3 .2 Référentiel lié au rotor.....	33
II .4 .3 .3 Référentiel lié au champ tournant	33
II .5 Model du convertisseur statique	33
II .6 Modélisation des convertisseurs de puissance.....	34
II .6 .1 Redresseur.....	35
II .6 .2 L'onduleur.....	35
II .6 .3 Modélisation du bus continu	37
II .6 .4 Commande MLI des convertisseurs.....	38
II .6 .4 .1 le principe de la commende MLI	38
II .7 Modélisation de la liaison au réseau.....	39
II .7 .1 Modélisation du filtre :.....	39
II .7 .2 Modélisation du transformateur.....	39
II .7 .3 Modélisation du réseau :	39
II .8 Conclusion :.....	40
Chapitre III: La commande vectorielle de la chaine éolienne	
III.1. Introduction	41
III.2. Principe du contrôle vectoriel à flux orienté	41
III.2.1 Modalisation du control vectoriel.....	41
III .3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	42
III .3 .1 Relation entre les puissances statoriques et rotoriques et les courants rotoriques... 44	
III .3 .2 Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	45
III .4 Régulation avec régulateur PI	46
III .4 .1 Synthèse du régulateur classique utilisé	46
III .5 Logique floue	47
III .5 .1 Principe et historique de la logique floue	47
III .5 .2Définition de la logique floue	48
III .5 .2 .1 Contrôleur à base de la logique floue	48
III .5 .3 Notions de base de la logique floue.....	48

III .5 .4 Commande par logique floue	50
III .5 .4 .1 Fuzzification	50
III .5 .4 .2 Règles d'inférence floue	51
III .5 .4 .3 Defuzzification.....	51
III .6 Application de la logique floue au contrôle de l'aérogénérateur	52
III .6 .1 Régulateur de type de MAMDANI	52
III .6 .2 Synthèse du régulateur.....	53
III .6 .3 Loi de commande	54
III .3 .6 .1. Structure de base d'un contrôleur flou de puissance.....	55
III .7 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue	55
III .8 Remarque	57
III .9 Résultats de simulation et interprétations.....	57
III .10 Conclusion.....	67
Conclusion générale.....	68

Introduction générale

Introduction générale

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Parmi ces sources d'énergies, les générateurs éoliens occupent une place particulière. En effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à se développer fortement dans de nombreuses régions, et d'autre part, cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau où elle est injectée.

L'intérêt porté à la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la GADA présente bien des avantages: le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, etc [1].

La conversion d'énergie éolienne en énergie électrique peut être réalisée par divers types de machines. A l'origine, c'était la génératrice asynchrone classique, sans convertisseur d'électronique de puissance associé, qui était la plus largement répandue. Cependant, l'évolution technologique des convertisseurs a progressivement permis de se tourner vers des dispositifs plus complexes [2].

Notre objectif dans ce travail consiste à l'étude d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation, débitant sur un réseau, ainsi que l'apport que pourrait apporter l'emploi de cette dernière associée à un convertisseur « onduleur MLI – redresseur MLI » et les éventuels désavantages qui pourraient surgir. Ce mémoire est alors divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation des généralités sur les systèmes de production d'énergie éolienne. Ce qui nous permettra de faire le choix de la structure à étudier.

Nous présenterons dans le second chapitre la modélisation de l'ensemble de la chaîne de conversion éolienne ainsi que ces constituants, de la MADA et celle des convertisseurs associés, notamment, l'ensemble « redresseur MLI – onduleur MLI ».

Au troisième chapitre, nous aborderons la commande de cette chaîne d'une manière à assurer le bon fonctionnement, et nous discuterons les résultats de simulation concernant la dynamique de la réponse et la qualité des signaux électriques.

Chapitre I :

Généralité sur les systèmes éoliens

I. 1. Introduction

Les énergies renouvelables se révèlent aujourd'hui, comme sources de production d'électricité vitales, obtenues à partir des gisements inépuisables telle que : « Le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau ou encore les marées ».

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal).

Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Ce chapitre fera une présentation générale des différents types d'éoliennes, leur fonctionnement et conception ainsi que leurs avantages et inconvénients.

La dernière partie de ce chapitre est consacré aux différentes machines électriques et plus spécifiquement la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation).

I. 2. Historique de l'énergie éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, l'énergie du vent est la première énergie exploitée par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les systèmes de pompage d'eau. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Danois Poul la Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice électrique. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisé (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [3].

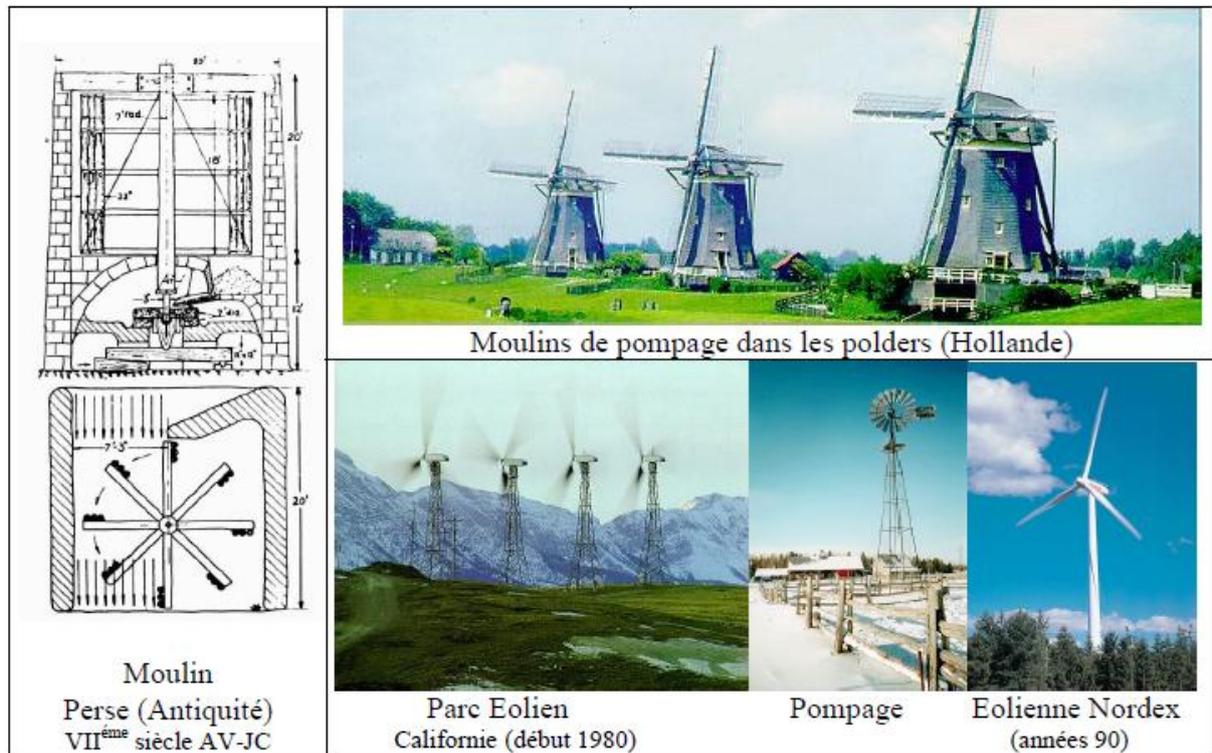


Figure (I. 1) Evolution des dispositifs éoliens de l'antiquité à nos jours [Eole web].

I. 3. Quelques notions sur le vent

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non-polluante. La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers, le vent est défini par sa direction et sa vitesse [4].

I. 4. Production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oubliée, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 37 ans, un développement sans précédent dû, notamment, aux premiers chocs pétroliers [5].

I. 5. Définition d'une éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Figure (I. 2) [6].

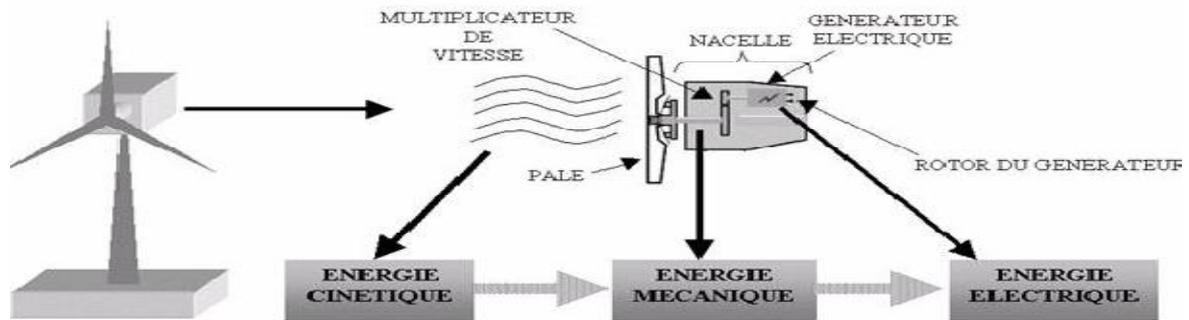


Figure (I. 2) Conversion de l'énergie cinétique du vent [6].

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Ceci est montré sur la figure (I. 3) [7].

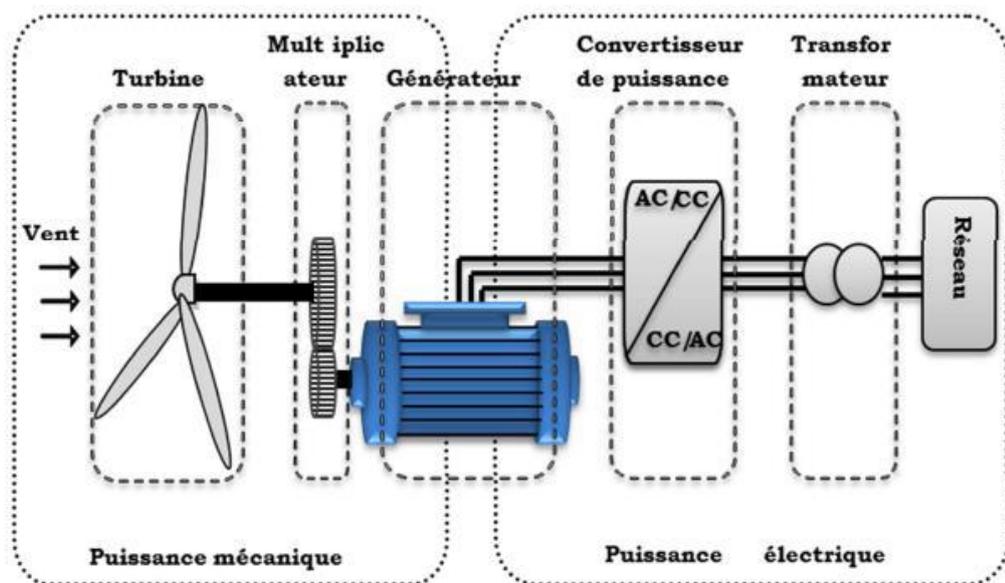


Figure (I. 3) Principaux organes du système de conversion éolien [7].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, 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.). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pâles de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de

plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [6].

I. 6. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un aérogénérateur, couramment appelé « éolienne », est un système qui capte l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) et la convertit en énergie électrique [8]. D'une manière générale, un tel système de conversion est constitué d'une turbine (T), d'un multiplicateur de vitesse (M), d'une génératrice électrique (GE), généralement triphasée, et d'un circuit d'électronique de puissance (EP). Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome.

I. 7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important à l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après [19].

I. 7. 1. Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- ❖ L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes.
- ❖ Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- ❖ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- ❖ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- ❖ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- ❖ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
- ❖ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.

I. 7. 2. Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des inconvénients qu'il faut citer :

- ❖ L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs.
- ❖ La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- ❖ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

I. 8. Les Différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et à axe horizontal.

I. 8. 1. Éoliennes à axe vertical

Cette technologie est bien adaptée aux zones de vents perturbés par des habitations et le relief de la végétation. Elles peuvent aisément s'intégrer à l'architecture des bâtiments et sont d'une conception très simple (roue montée sur un axe qui entraîne directement une génératrice). Le principe aérodynamique permet de bons rendements pour des vitesses de vent faible, une autorégulation de vitesse pour des vents forts et un niveau sonore très faible voir inaudible [9].

Il existe principalement trois technologies de VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) : les turbines Darrieus classiques, à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius. Dans tous les cas, les voilures sont à deux ou plusieurs pales [3], la figure (I. 4) présente les différents type de l'éolienne à axe vertical.

a) Avantages (type Darrieus)

- ✓ Génératrice pouvant être placée au sol (selon les modèles).
- ✓ Moins d'encombrement qu'une éolienne "conventionnelle".
- ✓ Intégrable aux bâtiments.

b) Inconvénients

- ✓ Démarrage difficile contrairement aux éoliennes de type Savonius
- ✓ Faible rendement

c) Avantages (type Savonius)

- ✓ Faible encombrement.
- ✓ Intégrable au bâtiment, esthétique [12].
- ✓ Démarre à de faibles vitesses de vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus.

- ✓ Système peu bruyant.
- ✓ Pas de contraintes sur la direction du vent.

d) Inconvénients

- ✓ Faible rendement.
- ✓ Masse non négligeable.

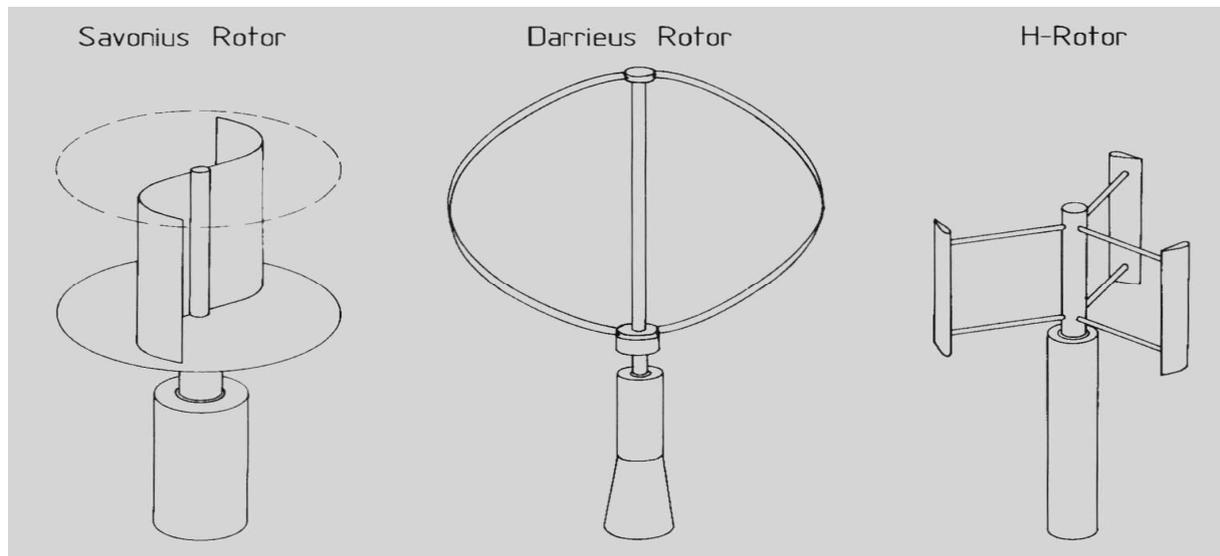


Figure (I. 4) Les structures de savonius, darrieus et Hrotor [Hau_00].

Outre le caractère vertical de leur axe de rotation, ces aérogénérateurs peuvent être classés selon leur principe de fonctionnement aérodynamique. Ainsi, contrairement aux éoliennes à axe horizontal qui utilisent uniquement la force de portance, les éoliennes à axe vertical de type Savonius utilisent la force de trainée et celles de type Darrieus reposent sur l'effet de portance subi par un profil soumis à l'action d'un vent relatif ; cet effet est similaire aux forces qui s'exercent sur l'aile d'un avion.

I. 8. 2 Éoliennes à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pâles [3]. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pâles. Une éolienne à axe horizontal est constituée d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pâles sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent [10]. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un

coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [6].



Figure (I. 5) Photographie d'une éolienne à axe horizontal [11].

a) Avantages [6]

- ✓ Peu de contraintes mécaniques ;
- ✓ Grande efficacité ;
- ✓ Coût limité.

b) Inconvénients [12]

- ✓ Bruit conséquent.
- ✓ Vibrations non négligeables.
- ✓ Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

I. 8. 2. 1. Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

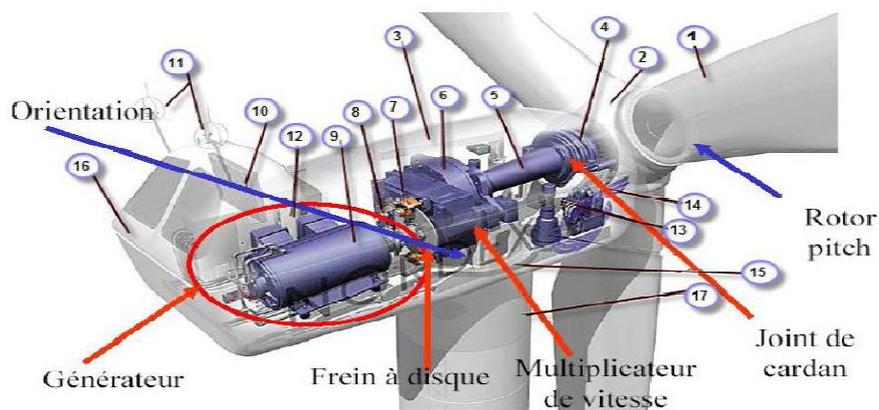


Figure (I. 6) Composants d'une éolienne [13].

- | | |
|----------------|----------------------------------|
| 1. Pâles | 10. Radiateur de refroidissement |
| 2. Moyeu rotor | 11. Central de mesures du vent |

3. Nacelle	12. Contrôle
4. Cardan	13. Centrale hydraulique
5. Transmission	14. Mécanisme des pales
6. Multiplicateur de vitesse	15. Paliers du système d'orientation
7. Frein	
8. Accouplement	16. Capot
9. Génératrice	17. Tour

En général, l'éolienne à axe horizontal est constituée de trois éléments principaux :

La tour (mat), la nacelle et les pâles 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. À 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.
 - ✓ Frein à disque permettant d'arrêter le système en cas de surcharge.
 - ✓ Le générateur.

Les systèmes d'orientation des pâles (régulation de la vitesse) et de la nacelle.

(La surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).

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

Elles existent aussi sous forme de mono pale et bipale

- **Le moyeu** : C'est l'élément qui supporte les pâles. 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 [14].

I. 8. 2. 2. Catégories des éoliennes à axe horizontale

Selon leur puissance nominale [6] :

- Les éoliennes de petite puissance : Moins de 40kW.
- Les éoliennes de moyenne puissance : De 40kW à quelques centaines de kW.
- Les éoliennes de grande puissance : 1MW et plus.

I. 9. Systèmes de génération d'électricité

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une influence sur son fonctionnement, le fait qu'une éolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration.

Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants :

I. 9. 1 Fonctionnement à vitesse fixe

I. 9. 1. a. Les avantages

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électrique de commande.

I. 9. 1. b. les inconvénients

- L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- Difficulté de contrôler la puissance transmise au réseau.
- Présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance.

I. 9. 2. Fonctionnement à vitesse variable

Ce type de fonctionnement présente plus d'avantages que le précédent, ce qui le rend plus utilisé actuellement :

I. 9. 2. a. Avantages

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple.
- Réduction des efforts subis par le convertisseur de puissance.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.
- Réduction des bruits acoustiques.

I. 9. 2. b. Inconvénients

- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,..).
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes

Suivant les puissances et le fonctionnement désirés (connexion au réseau électrique ou fonctionnements isolé et autonome), différentes configurations de connexions au réseau ou à la charge peuvent être adoptées [15].

I. 10. Systèmes de régulation pour réguler la vitesse de rotation

Les trois systèmes de régulation existant :

- La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "**pitch control**", consiste à faire varier l'angle de calage des pâles pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort.
- Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "**stall control**", les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor.
- Un dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation passive et de la régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique, "**active stall**" on l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances [9].

I. 11. Zone de fonctionnement d'une éolienne

Les objectifs de la régulation de l'éolienne sont d'assurer sa sécurité pour les vents forts et de limiter sa puissance. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale P_n qui est obtenue à partir de vitesse de vent V_n . Lorsque la vitesse du vent est supérieure V_n , un système de freinage se met en marche afin d'éviter la destruction mécanique contre la vitesse maximal de fonctionnement, de sorte sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

La figure suivante illustre les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne [16] :

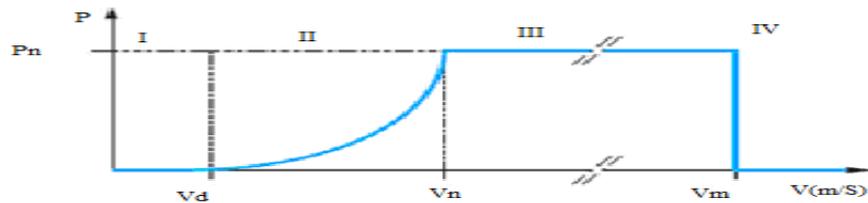


Figure (I. 7) Zone de fonctionnement d'une éolienne [16].

Avec

- V_d : la vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de la puissance.
- V_m : la vitesse maximale du vent, pour laquelle la turbine doit s'arrêter, pour des raisons de sécurité.
- V_n : la vitesse nominale à partir de laquelle l'éolienne est en pleine production.

Les vitesses V_d ; V_m ; V_n définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- **Zone I** : la puissance est nulle (la turbine ne fonctionne pas)
- **Zone II** : dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V .
- **Zone III** : La vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance fournie reste égale à P_n .
- **Zone IV** : dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

I. 12. Applications des éoliennes

L'éolienne transforme l'énergie cinétique des masses d'air en énergie mécanique de rotation qui peut être exploitée soit [10].

- Directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Pour entraîner une génératrice électrique. Dans ce cas, on distingue deux types de configuration :
 - ✓ Stockage de l'énergie dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
 - ✓ Injection directe de l'énergie dans un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne, à avoir d'une part de complémentarité avec les moyens traditionnels de production (centrales thermiques classiques ou nucléaire, barrages...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante et d'autre

part la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voies de développement.

I. 13. Eoliennes connectées au réseau électrique

On peut évaluer deux types d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques: les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [17].

I. 13. 1. Machine asynchrone à cage

La machine asynchrone à cage peut être utilisée en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence comme il est montré sur la figure (I.8) [18]. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable, sans limite physique théorique, mais elle est globalement coûteuse. En effet, le dimensionnement du variateur de fréquence doit être à 100% de la puissance nominale du stator de la machine électrique. Pour ces raisons, cette configuration est rarement exploitée car elle n'est pas concurrentielle avec les autres types de machines et notamment la machine asynchrone à double alimentation.

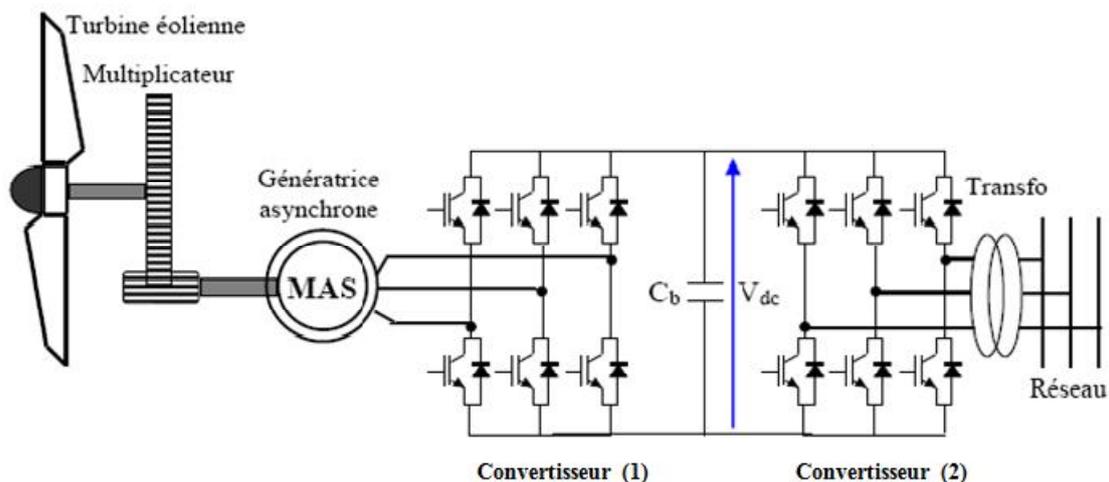


Figure (I. 8) Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse variable [9].

I. 13. 2. Machine asynchrone à double alimentation

Avec les machines synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation

(MADA) à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones à cage et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse.

Une des solutions très intéressante dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au réseau électrique à travers deux convertisseurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur fig (I.10) [12].

Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur. En général, le dimensionnement de la chaîne se limite à 30% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage de vitesse se qui constitue son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau [3].

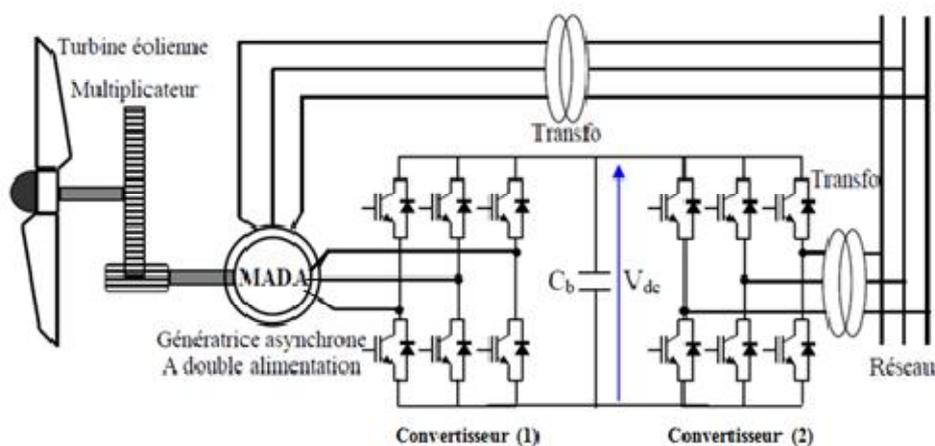


Figure (I. 9) Système éolien basé sur la MADA à vitesse variable [9].

I. 13. 3. Machine synchrone

Les machines asynchrones sont bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple limité, insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. La présence d'un multiplicateur de vitesse est donc indispensable. En revanche, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles) [3].

Par ailleurs, il est difficile de les munir de plusieurs paires de pôles [17]. Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables.

La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux convertisseurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur figure (I.10). Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau [17].

Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration.

Enfin, des structures, interposant un hacheur entre le redresseur et l'onduleur sont également utilisées. La présence d'un hacheur permet alors un contrôle indirect de la puissance transitée autorisant ainsi un fonctionnement en commande à poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking 'MPPT') [12].

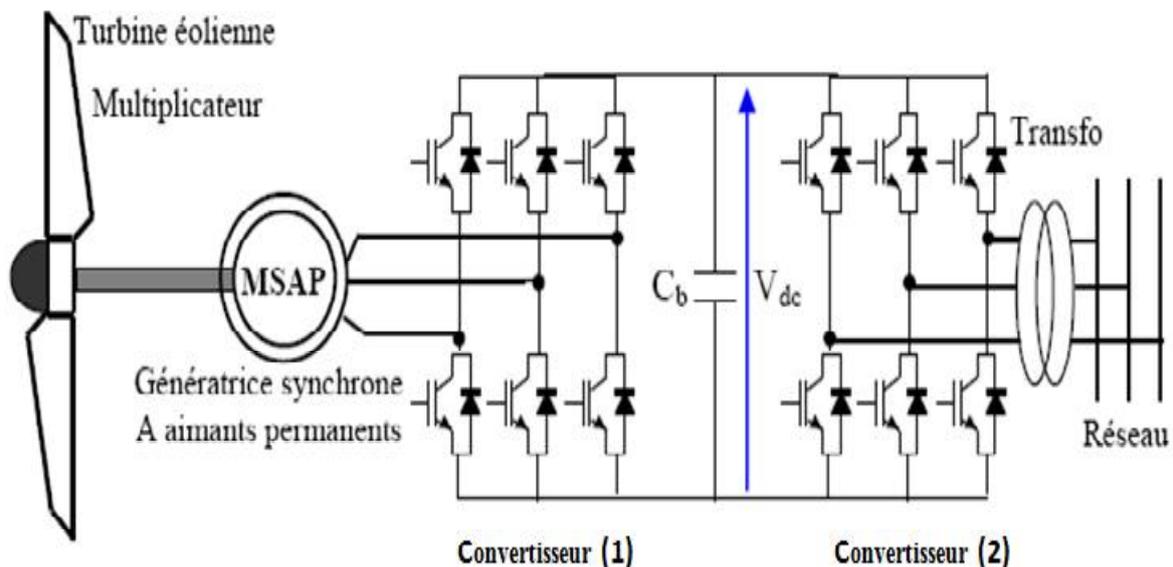


Figure (I. 10) Système éolien basé sur une machine synchrone à Aimants permanents à vitesse variable [9].

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau. La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure (I. 12.) qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

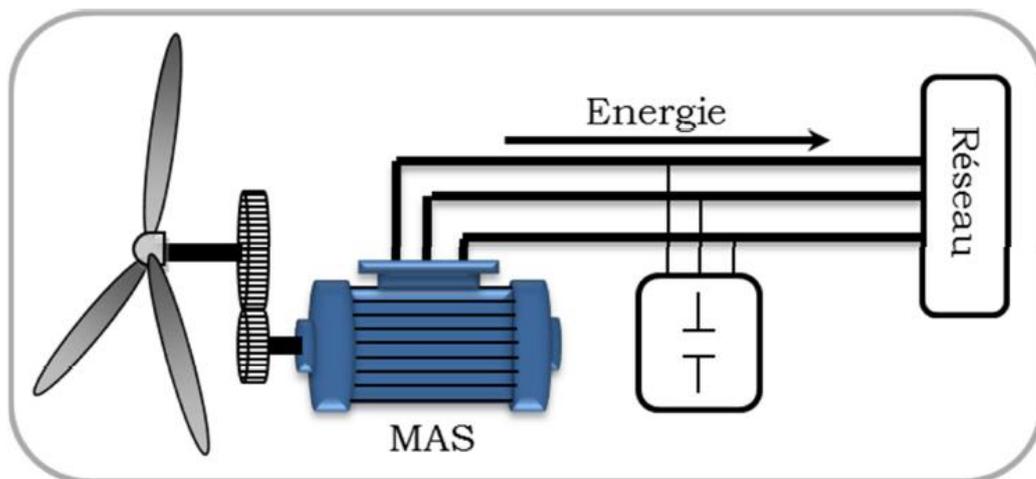


Figure (I. 11) Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau [21].

I. 13. 4. Machines asynchrones à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator Figure (I. 13.)

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.

Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [22].

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pâles atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

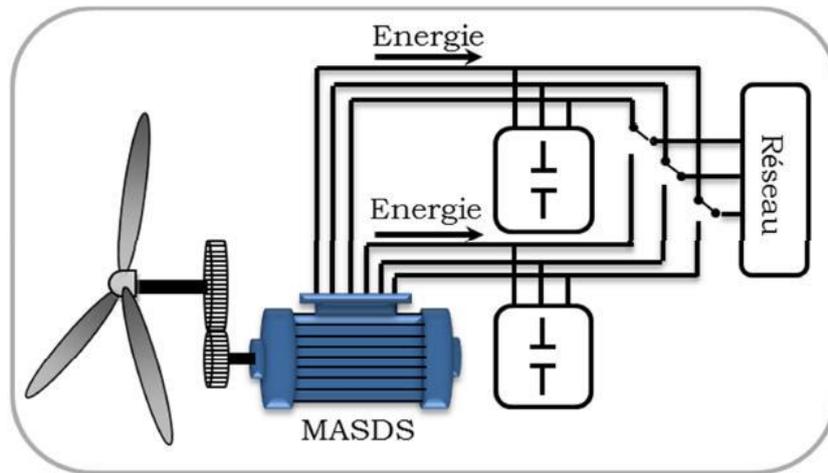


Figure (I. 12) Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator [23].

I. 13. 5. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

I. 13. 5. 1. Définition

La machine asynchrone à double alimentation est un générateur. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution. Contrairement à certaines machines synchrones qui ont des convertisseurs traversés par 100% de la puissance nominale, les convertisseurs de la MADA sont dimensionnés pour laisser passer 25% de la puissance nominale seulement. Ils coûtent moins chers et sont moins encombrants. Ils permettent de piloter la MADA par le rotor en réglant sa vitesse de rotation mécanique. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone, selon ces convertisseurs on peut réaliser plusieurs types de ces machines [24].

I. 13. 5. 2. Constitution de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasé classique. Ce qui est particulièrement dans cette machine est le fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais [7].

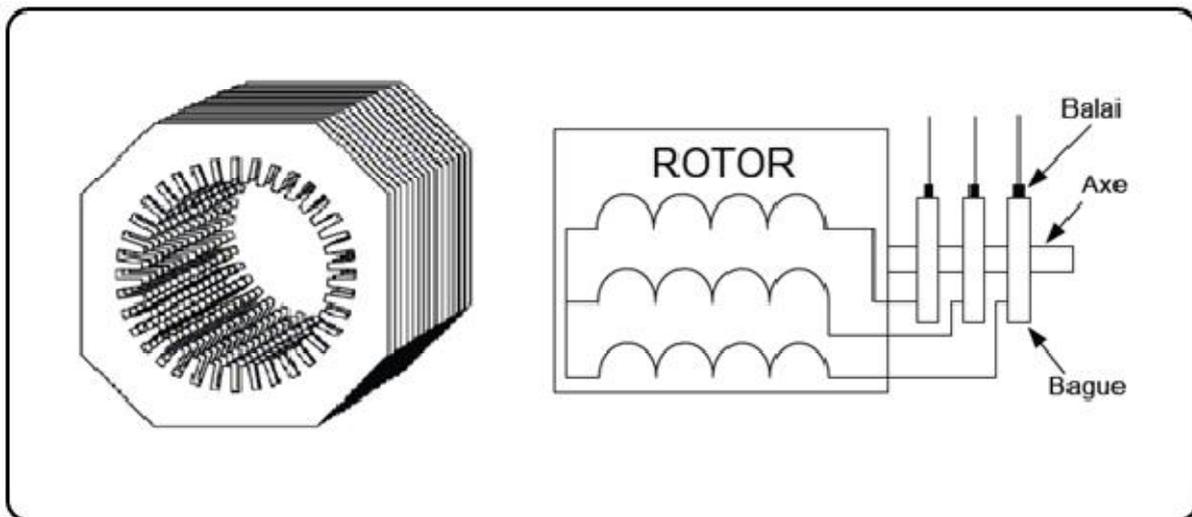


Figure (I. 13) Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [7].

I. 13. 5. 3. Intérêt de la MADA

La connexion directe des machines asynchrones au réseau oblige la vitesse de rotation à rester constante de façon à ce que la machine reste proche du synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite pour des applications en éolienne aux vitesses de vent élevé. L'introduction du convertisseur de puissance entre le stator et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine ce qui permet de fonctionner vitesse variable.

Pour une application éolienne où l'utilisation de la MADA est intense, la vitesse de rotation du rotor est réglée en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hyposynchrone et hypersynchrone. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, ce qui permet de tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent.

Partant de ces constats, la configuration électrique des aérogénérateurs utilisant les machines asynchrones ont subi une grande évolution, ce qui a mené aujourd'hui à une utilisation intense de la MADA dans 80% des aérogénérateurs installés [20].

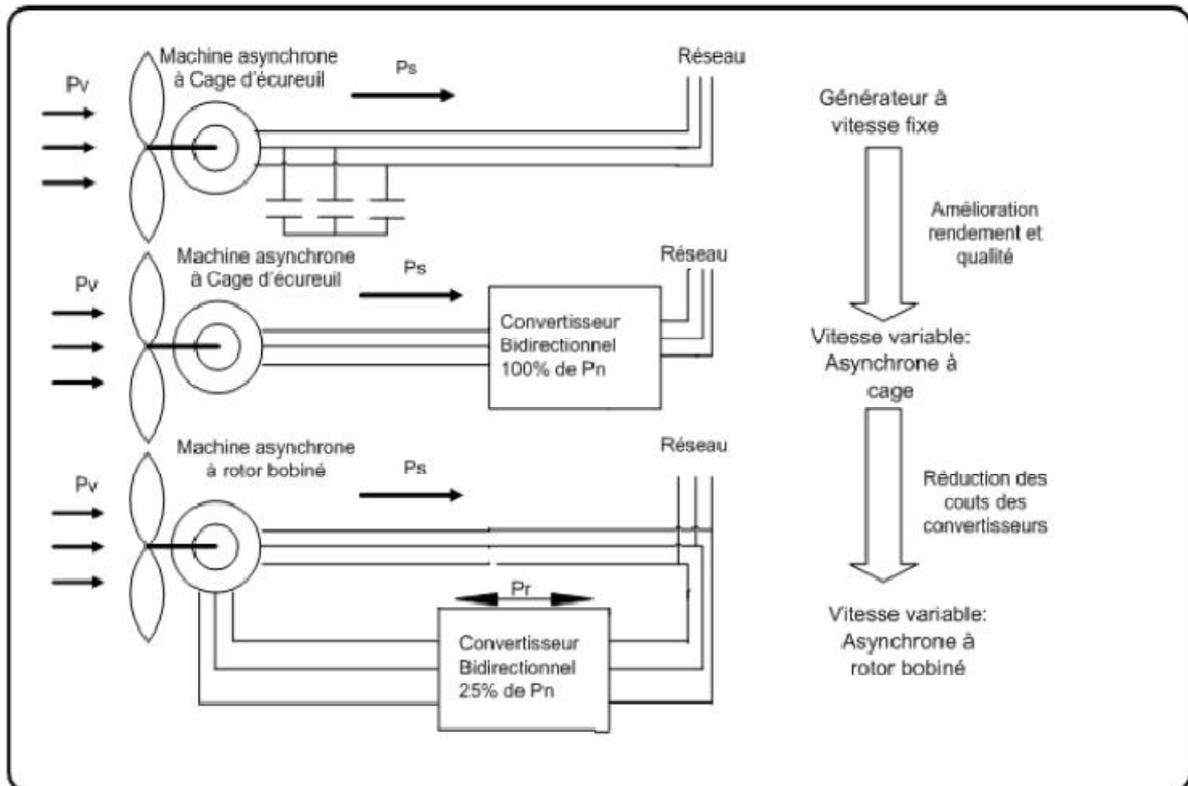


Figure (I. 14) Évolution de la configuration électrique de la machine asynchrone [20].

I. 13. 5. 4. Différents modes de fonctionnement de la MADA

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. Ceci offre la possibilité de fonctionner en Hypersynchronisme ou en hyposynchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On a donc quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine [14] [24].

a) Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

Dans ce mode de fonctionnement, le stator est connecté au réseau et la puissance de glissement transite par le rotor pour la réinjecter au réseau. Cette puissance est dissipée en pertes Joule dans le cas des machines asynchrones à cage. Le champ tournant créé par les enroulements rotoriques est dans le même sens que le champ statorique.

b) Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone

Dans ce mode de fonctionnement, le stator est alimenté par le réseau et la puissance de glissement est fournie par le réseau au rotor via les convertisseurs statiques afin de la convertir en puissance mécanique. Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est en opposition de phase avec celui du stator car la vitesse devient plus grande que la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

c) Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance est fournie au réseau par le stator tout comme la puissance de glissement est aussi fournie par le stator. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

d) Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone

Dans ce mode de fonctionnement la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près, la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réinjectée par le rotor.

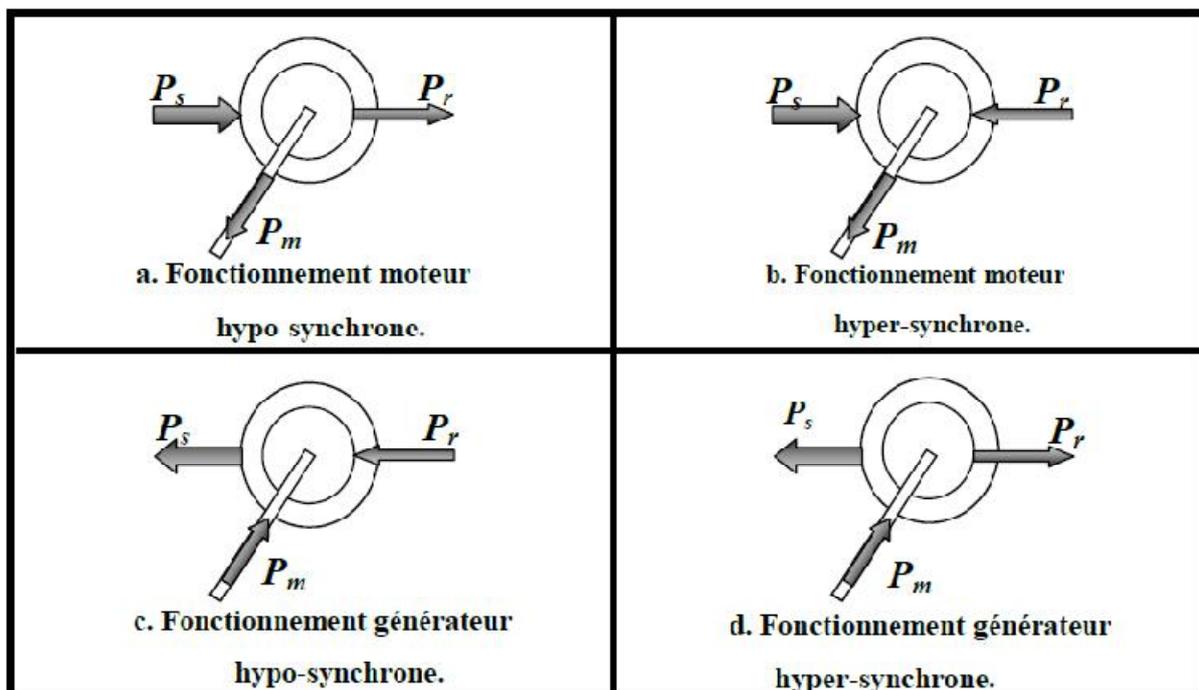


Figure (1. 15) Modes de fonctionnement de la MADA.

I. 13. 5. 5. Domaines d'application de la MADA

Actuellement, la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA peut être

utilisée dans plusieurs applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [26] :

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

I. 14. Avantages et Inconvénients de la MADA

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

I. 14. a. Avantages de la MADA

- La possibilité de reconfiguration grâce à sa double alimentation ce qui permet à cette dernière de trouver un large de domaine d'application.
- Autorise le fonctionnement à vitesse variable.
- Puissance extraite optimisée.
- Machine standard.
- Un fonctionnement possible à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- Connexion de la machine plus facile à gérer.

I. 14. b. Inconvénients de la MADA

- La MADA est plus volumineuse que les autres machines.
- Elle nécessite une maintenance périodique.
- contrôle de commande complexe.

I. 15. Intérêt du choix de la MADA

Notre travail est basé sur la machine asynchrone à double alimentation car elle est mieux adaptée à l'étude de notre système ainsi elle autorise le fonctionnement à vitesse variable et sa puissance extraite est optimisée.

I. 16. Raccordement au réseau

Une fois l'énergie électrique produite par l'éolienne, il s'agit ensuite de la transmettre au réseau de distribution. Pour les machines d'une puissance supérieure à 100 KW, la tension de sortie de l'éolienne est de l'ordre de quelques centaines de volts. Il est alors nécessaire de disposer sur le site de production d'un transformateur élévateur de tension permettant de se raccorder au réseau.

Ce raccordement doit prendre en considération certaines particularités de l'éolienne par rapport à d'autres modes de production d'énergie électrique. Il s'agit de toutes les phases

transitoires du fonctionnement (démarrage, arrêt, absorptions des rafales), qui du fait de nature fluctuante du vent peuvent survenir assez souvent.

Qu'une éolienne soit équipée d'un générateur asynchrone ou asynchrone, il est essentiel que la production d'électricité débute lorsque la machine tourne à un régime fixé. Le démarrage du rotor de l'éolienne peut être autonome ou assisté par le générateur qui fonctionne alors en moteur, puisant son énergie dans le réseau.

Un générateur asynchrone peut absorber de petites variations du vent. Si celles-ci venaient à devenir trop importantes, il faut alors déconnecter le générateur du réseau. Cela s'accompagne d'une forte variation du couple résistant de l'éolienne, et le contrôle de la vitesse de rotation des pales doit être parfaitement maîtrisé pour éviter toute survitesse (utilisation de freinage aérodynamique, mécanique). En cas de fluctuations répétées, les opérations de déconnection/reconnexion ne doivent pas dépasser une certaine fréquence, sous peine de provoquer des échauffements dangereux dans le générateur [26].

I. 18. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions fondamentales de l'énergie éolienne. Nous avons pu parler des différentes parties de l'éolienne leur constitution et les structures connectées au réseau.

Enfin nous avons opté pour un système de production de l'énergie éolien basé sur la MADA qui fera l'objet de notre travail.

Chapitre II :

Modélisation de la chaîne éolienne

II.1. Introduction

La modélisation de la machine électrique est une étape primordiale de son développement. Ainsi la modélisation permet de guider les développements par une calcification du phénomène.

En outre, elle est d'un apport précieux on permettant d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autres part de prévoir le comportement de la machine plus variée que ceux de l'observation expérimentale.

Ce chapitre aura comme objectif une modélisation des différents éléments de la structure de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne à savoir :

- La partie mécanique (turbine).
- La génératrice asynchrone à double alimentation.
- Les convertisseurs de puissance (onduleur, redresseur).
- L'application de la commande vectorielle et le bus continu.

II.2. Schéma de la structure choisi

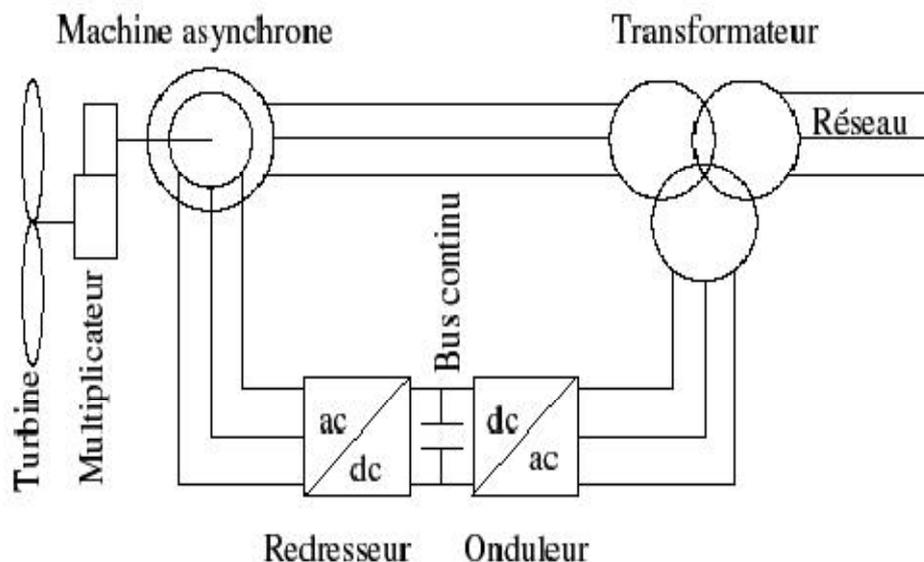


Figure (II .1) Structure d'un system éolien connecté au réseau basé sur la MADA [27].

II.3 Modélisation de la partie mécanique

II.3.1 Modèle du vent

De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés et l'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique la fonction de transfert à déterminé. Ces dépendent de grandeur caractéristique du site et de la nature du vent.

Le vent peut être modélisé par une simple loi exponentiel jusqu'à des distributions spectrales est spatiales très complexes qui tient compte de sa phénoménologie turbulente.

Les vents les plus intéressants qui donnent le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10m/s [3].

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent [12].

II.3.2 Modélisation de la turbine éolienne

Un system éolien classique est constitué d'un aérotrain qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique, d'un multiplicateur de vitesse de gain G qui permet a la fois de diminuer le couple et d'augmenter la vitesse de rotation d'un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique [6].

La puissance du vent capté par les pales est définit de la manière suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \dots\dots\dots (II.1)$$

Avec :

ρ : La densité de l'aire qui est égal à 1,22 Kg/m³.

S : La surface balayée par la turbine qui est égale à πR^2 ou R est la longueur du rayon des pales de l'éolienne.

V_{vent} : La vitesse du vent.

La puissance du vent n'est pas totalement captée par les pales, d'où la puissance aérodynamique est inférieure à celle du vent, les deux puissances sont liées par l'expression suivante :

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{vent} \dots\dots\dots (II.2)$$

Ou :

C_p : Le coefficient de puissance de l'éolien (la valeur maximale théorique est 0,593).Le C_p dépend de la vitesse du vent, du nombre de pales, du rayon, de l'angle de calage β et de leur vitesse de rotation. Pour les éoliennes actuelles, on atteint des valeurs de 0,45 à 0,5.

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent [28].

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{tur}}{V_{vent}} \dots\dots\dots (II.3)$$

La figure (II.2) donne la variation de coefficient de puissance de l'éolienne (C_p) en fonction de Rapport de vitesse (λ) pour L'angle de calage (β) suivant l'équation qui suivie : L'étude d'une éolienne particulière a permis de déduire la formule empirique [29] :

$$C_p(\beta, \lambda) = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \dots \text{(II.4)}$$

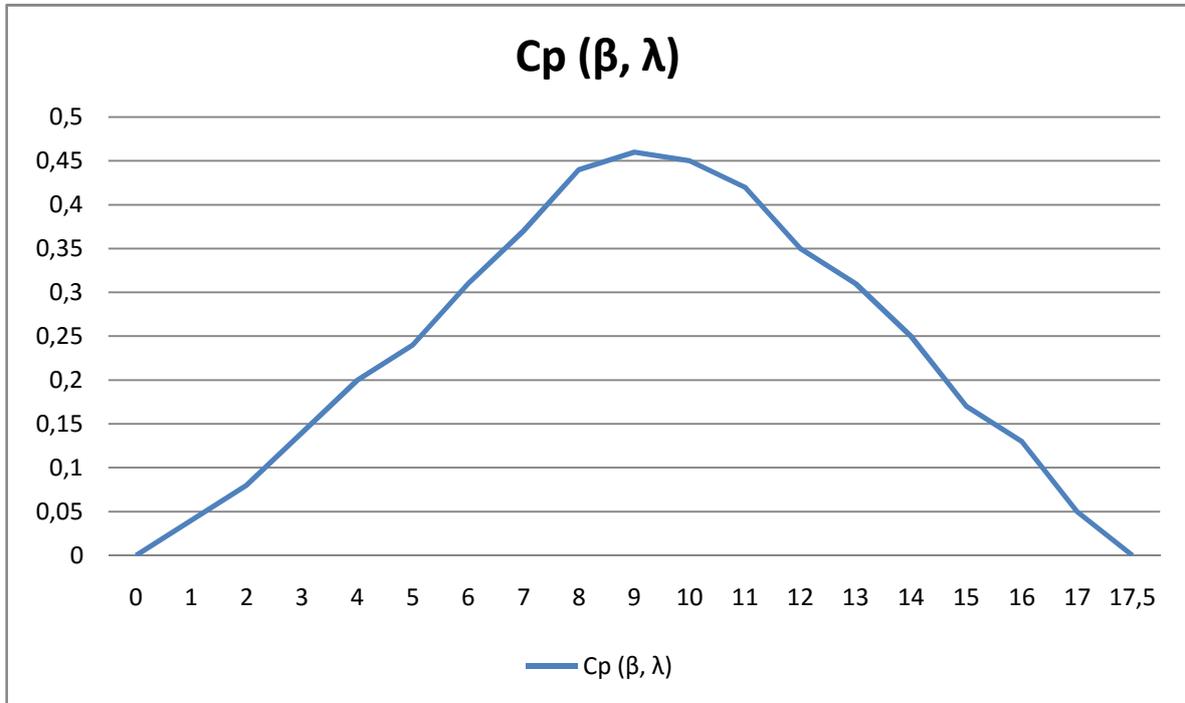


Figure (II .2) Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse (λ) de la turbine et de l'angle d'orientation (β).

Le couple aérodynamique est donné par la formule suivante :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_{turbine}} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \dots \text{(II.5)}$$

II.3.3 Modèle du multiplicateur

Les vitesses mécaniques de la turbine et celles de la génératrice sont liée par la relation suivante [30] :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \dots \text{(II.6)}$$

Les couples sur l'arbre lent C_{aero} et ce sur l'arbre rapide C_{arbre} sont exprimé par la relation suivante :

$$C_{arbre} = \frac{C_{aero}}{G} \dots \text{(II.7)}$$

II.3.4 Modélisation de l'arbre de transmission

Les masses des différents éléments de la turbine sont représenté par l'inertie $J_{turbine}$ et le modèle mécanique proposer considéré l'inertie totale J constituer de l'inertie de la turbine

ramené sur l'axe rapide et celle de la génératrice J_g , et on suppose que le multiplicateur de vitesse est idéal l'inertie totale J est donnée comme suit [18]

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \dots \dots \dots (II.8)$$

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

$$C_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \dots \dots \dots (II.9)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{visq} et le couple issu du multiplicateur C_{arbre}

$$C_{mec} = C_{arbre} - C_{em} - C_{visq} \dots \dots \dots (II.10)$$

Le couple visqueux est donné par l'expression suivante :

$$C_{visq} = f \Omega_{mec} \dots \dots \dots (II.11)$$

Avec :

f : Le coefficient de frottement visqueux.

D'où :

$$C_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{arbre} - C_{em} - f \Omega_{mec} \dots \dots \dots (II.12)$$

II.3.5. Point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT) :

La courbe caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire ayant une forme parabolique admet un maximum C_{p-max} pour λ_{opt} . La vitesse de la génératrice est asservi à une référence issue d'un algorithme (MPPT) permettant l'extraction maximale de la puissance, lui-même nécessite la mesure ou l'estimation de la vitesse du vent.

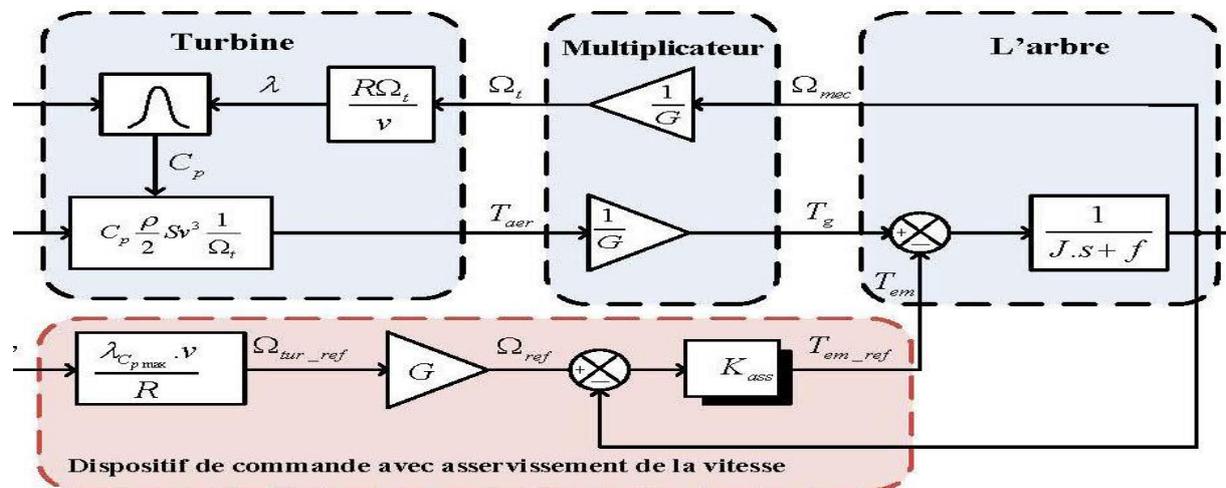


Figure (II .3) Schéma bloc du modèle de la turbine avec MPPT.

En s'appuyant sur le rapport de vitesse optimale λ_{opt} pour lequel le coefficient de puissance est maximal C_{pmax} l'expression du couple électromagnétique de référence est donnée par la relation suivante [22] :

$$T_{em-ref} = \frac{1}{2} \rho \pi C_{pmax} \frac{R^5_t}{\lambda^3_{opt}} \Omega^2_t \dots \dots \dots (II.13)$$

L'estimation de la vitesse de rotation de référence de la MADA, à partir de la vitesse du vent est nécessaire pour que la machine tourne à sa vitesse optimale. Ce qui délivre la référence du couple électromagnétique.

La régulation de la vitesse de l'éolienne est réalisée par un régulateur proportionnel intégral à avance de phase avec anticipation dans le système de commande, la figure (II.4) illustre le schéma bloc fonctionnel d'une turbine éolienne avec asservissement de vitesse mécanique de la machine.

II.4. La modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, en moteur comme en générateur, nécessite de disposer d'un modèle mathématique. Nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné, ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine asynchrone à cage avec comme différence l'existence de tensions rotorique non nulles [31].

La modélisation analytique classique de la machine asynchrone à double alimentation se fait sous les hypothèses simplificatrices résumées ci-dessous :

- L'entrefer est supposé à épaisseur constante.
- L'effet des encoches est négligé.
- L'induction dans l'entrefer est supposée à répartition sinusoïdale.
- La distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est supposée sinusoïdale.
- Les pertes ferromagnétique sont négligées (pas de courants de Foucault ni l'hystérésis).
- L'influence de l'effet de peau est négligée.

II.4.1. Modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation :

On considère que la machine est alimentée par deux systèmes de tensions spiroïdales triphasées équilibrées (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) de pulsation $\omega_s=2.\pi.f_s$ et (V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}) de pulsation $\omega_r=2.\pi.f_r$ [31].

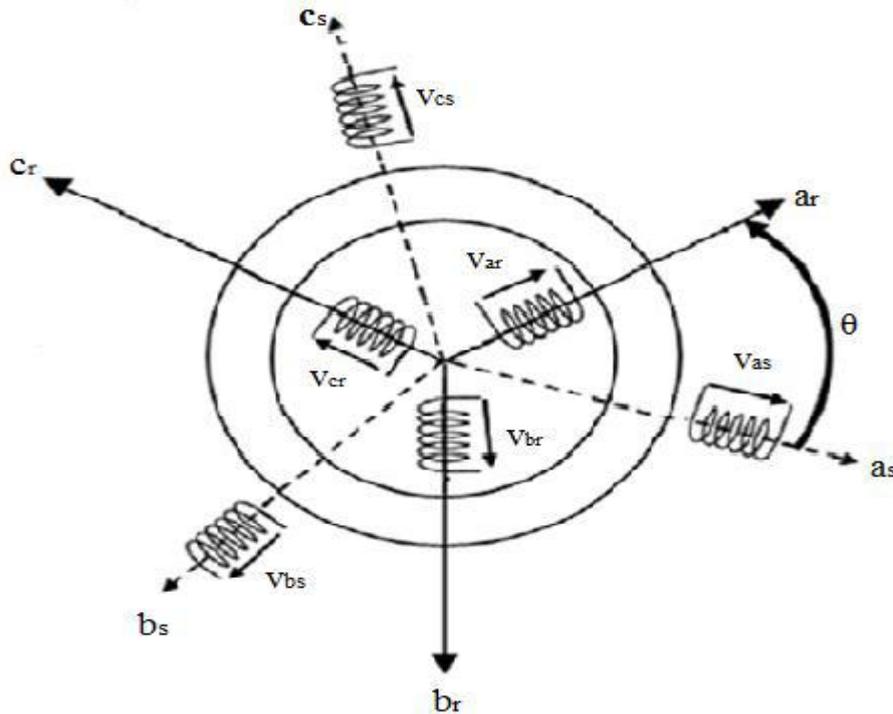


Figure (II .4) Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée [32]. Les équations générales des tensions de la machine s'obtiennent en considérant que la tension appliquée à chacun des enroulements, est la somme de la tension et de la chute de la tension inductif.

$$V = Ri + \frac{d\phi}{dt}$$

II .4 .1 .1 Les équations électriques

Pour les phases statoriques et rotoriques on a :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \dots \dots \dots (II.14)$$

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] \dots \dots \dots (II.15)$$

Les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques sont définies par :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

Les vecteurs des résistances statoriques et rotoriques son définies par :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Les vecteurs des courants statoriques et rotoriques sont définies par :

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

II .4 . 1 .2 Les équations magnétiques

Les équations magnétiques de la MADA sont données par :

$$[\phi_{sabc}] = [L_{ss}] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}] \cdot [i_{rabc}] \dots \dots \dots (II.16)$$

$$[\phi_{rabc}] = [L_{rr}] \cdot [i_{rabc}] + [M_{rs}] \cdot [i_{sabc}] \dots \dots \dots (II.17)$$

Avec :

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

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

L_s, L_r : inductances propre stator et du rotor.

Respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$$[\phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[\phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t M_{\max} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \dots (II.18)$$

$[M_{sr}]$: La matrice des inductances mutuelles stator-rotor.

D’après les relations précédentes, on aura :

$$[\phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_{rabc}] \dots \dots \dots (II.19)$$

$$[\phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [i_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [i_{sabc}] \dots \dots \dots (II.20)$$

Finalement

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d[L_{ss}][i_{sabc}]}{dt} + \frac{d[M_{ss}][i_{rabc}]}{dt} \dots\dots\dots (II.21)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d[L_{rr}][i_{rabc}]}{dt} + \frac{d[M_{rr}][i_{sabc}]}{dt} \dots\dots\dots (II.22)$$

II .4 .1 .3 L'équation mécanique :

L'équation mécanique est donnée par l'expression suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \dots\dots\dots (II.23)$$

II .4 .2 Transformation de Park :

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécanique plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park.

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système.

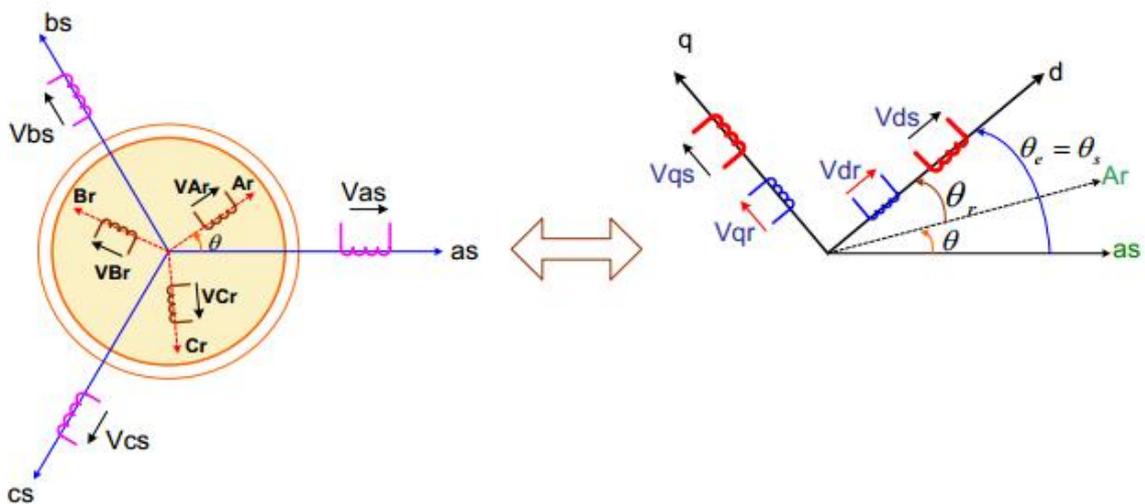


Figure (II .5) Passage du triphasé au biphasé [22].

La matrice de Park est définie comme suite :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.24)$$

La matrice inverse de Park est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.25)$$

L'application de Park à l'équation électrique de la MADA, nous donne :

$$\begin{cases} V_d = R_{i_d} + \frac{d\phi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \phi_q \\ V_q = R_{i_q} + \frac{d\phi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \phi_d \\ V_0 = R_0 + \frac{d\phi_0}{dt} \end{cases} \dots\dots\dots (II.26)$$

La composante homopolaire du système (II.26) est nulle car on a un système équilibré finalement le système d'équation de tension statorique et rotorique et de la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \phi_{rd} \end{cases} \dots\dots\dots (II.27)$$

Equations magnétique de la MADA dans le repère (d, q)

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \dots\dots\dots (II.28)$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique de la machine.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique de la machine.

$M = \frac{2}{3} M_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor de la machine.

A partir des équations des flux (II.28) on tire les expressions des courants :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\phi_{sd}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = \frac{\phi_{sq}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ i_{rd} = \frac{\phi_{rd}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{sd} \\ i_{rq} = \frac{\phi_{rq}}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{sq} \end{cases} \dots\dots\dots (II.29)$$

Plusieurs solutions sont possibles pour orienter le repère « d, q » par rapport au repère triphasé.

Lors d'une alimentation sinusoïdale, il est possible d'écrire, en régime permanent :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s : \text{Pulsation des grandeurs statoriques.}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r : \text{Pulsation des grandeurs rotoriques.}$$

$$\omega_s - \omega_r = P \cdot \Omega = \omega \dots\dots\dots (II.30)$$

Avec :

Ω : La vitesse mécanique.

ω : La pulsation mécanique.

P : Nombres de paires de pôles.

Ainsi, en partant des équations (II.26), (II.27), et en utilisant les équations (II.28) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère (d, q)

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_r M & R_r & -\omega_r L_s \\ \omega_r & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_s & 0 \\ 0 & M & 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

Les puissances statoriques active et réactive sont donnée par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq} \\ Q_s = V_{sq}i_{sd} - V_{sd}i_{sq} \\ P_r = V_{rd}i_{rd} + V_{rq}i_{rq} \\ Q_r = V_{rq}i_{rd} - V_{rd}i_{rq} \end{cases} \dots\dots\dots (II.32)$$

Equations du couple

$$T_{em} = \left\{ P \frac{M}{L_s} (\phi_{sd}i_{rd} - \phi_{sq}i_{rq}) \dots\dots\dots (II.33) \right.$$

II .4 .3 Choix du référentiel

Les équations de la machine utilisée peuvent être exprimées dans trois référentiels selon le positionnement de ses axes par rapport aux axes de la machines [33].

- Référentiel lié au stator $\omega=0$.
- Référentiel lié au rotor $\omega=\omega_r$.
- Référentiel lié au champ tournant $\omega=\omega_s$.

II .4 .3 .1 Référentiel lié au stator

Ce référentiel est choisi dans le but d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} + \omega \phi_{rd} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \omega \phi_{rq} \end{cases} \dots\dots\dots (II.34)$$

II .4 .3 .2 Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est choisi dans les problèmes des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est constante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} \end{array} \right. \dots\dots\dots (II.35)$$

II .4 .3 .3 Référentiel lié au champ tournant

Il est souvent utilisé dans les problèmes de commande, il permet de correspondre des grandeurs continues aux sinusoïdale du régime permanent.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{array} \right. \dots\dots\dots (II.36)$$

II.5 Model du convertisseur statique :

Les convertisseurs considérés dans notre étude sont de type parallèles double PD3et constitués d’IGBT et de diode montées en antiparallèle commandé par la modulation de largeur d’impulsion (MLI) pour deux raisons principales :

- Permet un transfert bidirectionnel de la puissance de glissement entre le rotor et le réseau, ce qui permet les fonctionnements en hyposynchrone et hypersynchrone de la machine.
- Génère moins ou pas de perturbations sur le réseau électrique par propagation de courants harmoniques [35].

A fin de simplifier le modèle des convertisseurs, en considérant les interrupteurs (IGBT et diode) parfaits. La figure (II.8) représente un onduleur de tension alimenté par une tension continu U_{dc} .

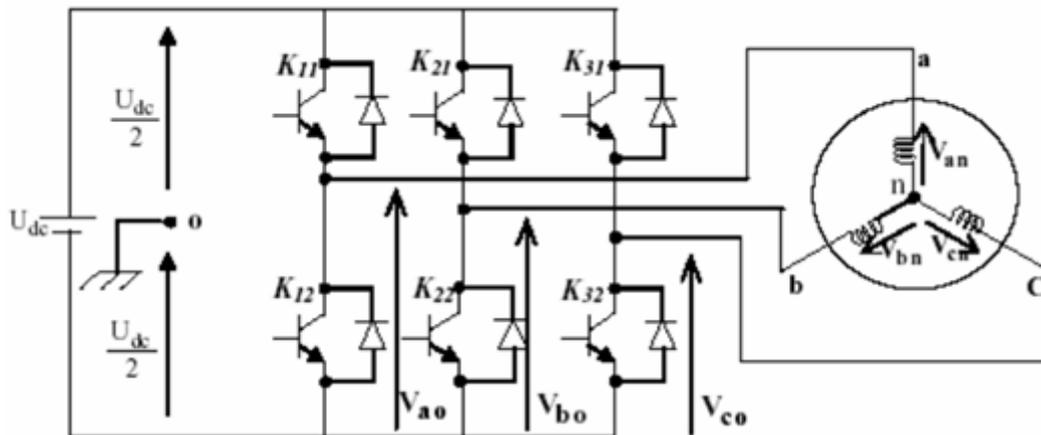
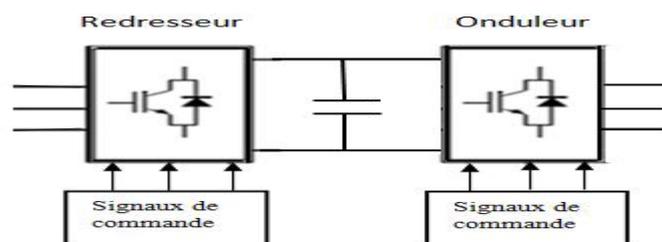


Figure (II .6) Schéma d'un onduleur de tension.

II.6 Modélisation des convertisseurs de puissance

Dans cette partie, on modélisera les convertisseurs qui interviennent dans la chaîne de conversion éolienne (le redresseur et l'onduleur MLI) [36].



(Figure II .7) Redresseur et onduleur MLI [36].

Le redresseur et l'onduleur sont tous les deux formés de trois bras composée chacun de deux cellules de commutation, qui sont constituées d'un élément semi- conducteur commandé et d'une diode antiparallèle

Du fait que les constantes de temps des machines et des régulateur sont très grandes devant le temps de transition d'un état à l'autre des composants semi- conducteurs on peut faciliter la tâche et réduire le temps de simulation en modélisant les convertisseurs par un ensemble d'interrupteurs idéaux : les durées de commutation sont négligeables, la chute de tension produite est proposée nulle lorsqu'ils conduisent et les courant qui les traversent sont nuls lorsqu'ils sont bloqués.

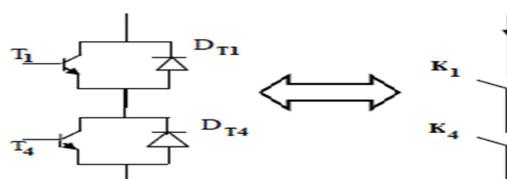


Figure (II .8) interrupteur équivalent.

II .6 .1 Redresseur

Les redresseurs MLI sont des onduleurs utilisés à l’envers qui permettent de produire une tension continue à partir d’un réseau alternatif

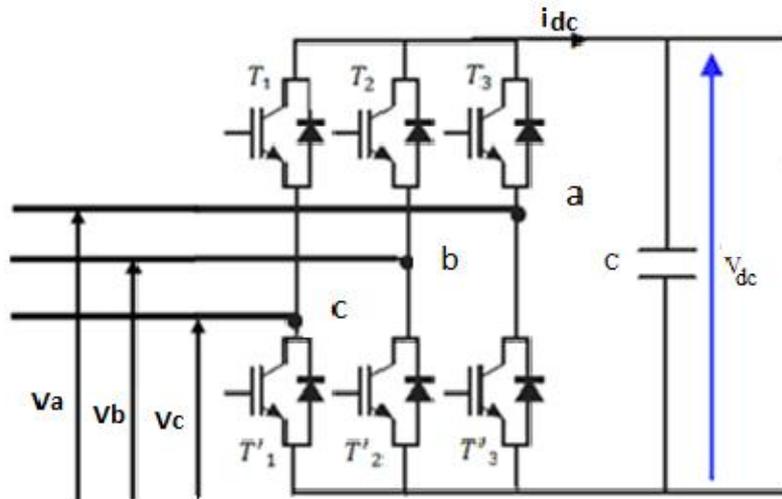


Figure (II .9) Redresseur MLI [36].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.37)$$

$$I_{dc} = F_1 I_a + F_2 I_b + F_3 I_c \dots\dots\dots (II.38)$$

Avec :

- V_{dc} : Tension redressée
- I_{dc} : Courant redressé ou moduler par le redresseur.
- F_1, F_2, F_3 sont des fonctions logiques à l’état des interrupteur (égale à 1 si l’interrupteur est fermé et zéro s’il est ouvert).

II .6 .2 L’ondeur

L’ondeur de tension réalise l’interface entre deux types de source : La première est de courant (Coté alternatif), la deuxième est de tension (coté continu). L’ondeur de tension utilisé, est composé de six interrupteurs, répartis d’une façon symétrique sur trois bras commandés à la fermeture et à l’ouverture, avec des diodes en antiparallèle comme le montre la figure (II.10).

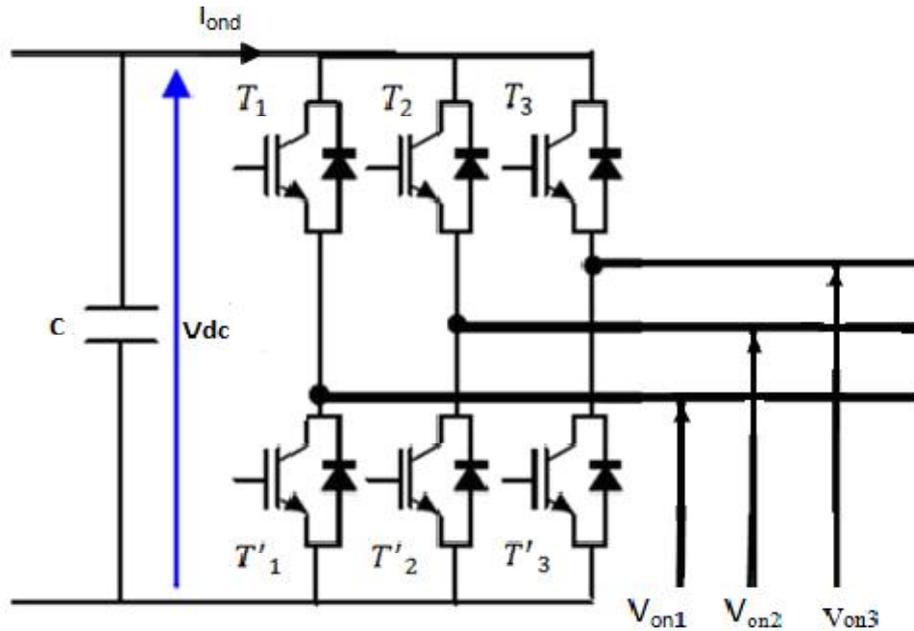


Figure (II .10) Onduleur MLI [36].

La loi des mailles nous donne :

$$\begin{cases} U_{a0} = U_{an} + U_{n0} \\ U_{b0} = U_{bn} + U_{n0} \\ U_{c0} = U_{cn} + U_{n0} \end{cases} \dots\dots\dots (II.39)$$

D'autres part le fait que la charge soit équilibrée donne :

$$U_{an} + U_{bn} + U_{cn} = 0 \dots\dots\dots (II.40)$$

Le potentiel du point neutre est donner par :

$$U_{n0} = \frac{1}{3}(U_{a0} + U_{b0} + U_{c0}) \dots\dots\dots (II.41)$$

D'où :

Les expressions des tensions de phases sont alors exprimées comme suit :

$$\begin{cases} U_{an} = \frac{1}{3}(2U_{a0} - U_{b0} - U_{c0}) \\ U_{bn} = \frac{1}{3}(-U_{a0} + 2U_{b0} - U_{c0}) \\ U_{cn} = \frac{1}{3}(-U_{a0} - U_{b0} + 2U_{c0}) \end{cases} \dots\dots\dots (II.42)$$

- L'avantage principal que présente la MLI est qu'elle repousse vers les fréquences les plus élevées les harmoniques de la tension ce qui facilite le filtrage [37].
- L'inconvénient, quelle génère les impulsions dissymétriques par rapport à la période de la porteuse [36].

- Nous adoptons à la MLI qui s'adapte à fréquence variable coté rotor de la génératrice toute fois de coté réseau à fréquence fixe.

On pose les fonctions logiques suivantes :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

$$S'_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T'_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T'_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction

F'_i Avec ($i=1, 2, 3$) tel que :

$$\begin{bmatrix} V_{on1} \\ V_{on2} \\ V_{on3} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F'_1 \\ F'_2 \\ F'_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.43)$$

F'_1, F'_2, F'_3 Fonction logique correspondant à l'état de l'interrupteur.

II .6 .3 Modélisation du bus continu

Le couplage des deux convertisseurs statiques (coté rotor et coté réseau) est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, comme le montre la figure (2.1) il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit.

Dans la figure (2.6) est représenté en détaille le bus continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur ou sont connectés les deux convertisseurs [38].

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif

$$\frac{V_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_c dt \dots\dots\dots (II.44)$$

Donc la tension du bus continue est égale à l'intégration du courant capacitif la capacité du bus continu ainsi, son expression s'écrira comme suit :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} i_c dt \dots\dots\dots (II.45)$$

- C : La capacité de filtrage du bus continu.

Le courant de condensateur est issu d'un nœud ou circulent deux courant modulés par chaque convertisseur comme le montre la figure ci-dessous

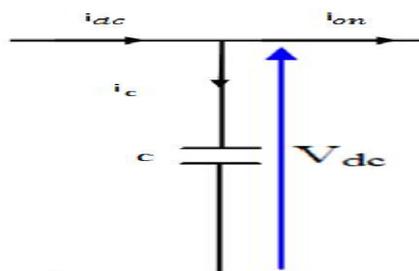


Figure (II .11) Courant circulant dans le bus continu.

$$i_c = i_{dc} - i_{on} \dots \dots \dots (II.46)$$

II .6 .4 Commande MLI des convertisseurs

II .6 .4 .1 le principe de la commande MLI

Le principe de fonctionnement de la MLI consiste à comparer un signal triangulaire (Porteuse) avec une onde généralement sinusoïdale appelée modulatrice.

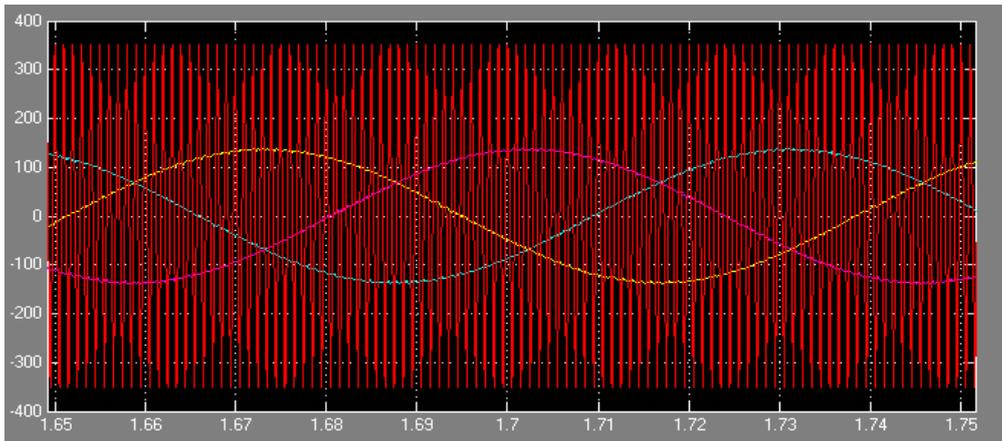


Figure (II .12) Comparaison du porteuse avec le modulatrice.

L’objectif de la commande MLI est diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur .Le principe est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont le fondamental est à la fréquence de la référence .Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur .Cette méthode permet d’obtenir de façon simple ,les temps de conduction de chaque interrupteur [39].

- L’indice de modulation «m » défini comme étant le rapport de la fréquence f_p de la porteuse a la fréquence f_m de la tension de référence :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \dots \dots \dots (II.42)$$

- Le taux de modulation ou coefficient de réglage de tension « r » comme étant le rapport de la tension V_m de référence et l’amplitude V_p de la porteuse.

$$r = \frac{V_m}{V_p} < 1 \dots \dots \dots (II.43)$$

- L’avantage principal que présente la MLI est quelle repousse vers les fréquences les plus élevées les harmoniques de la tension ce qui facilite le filtrage [39].
- Son inconvénient, quelle génère des impulsions dissymétrique par apport à la période de la porteuse.

- Le modèle de la MLI et représenter sure la figure (II.10)

II .7 Modélisation de la liaison au réseau

La liaison au réseau est constituée est filtre R_{res}, L_{res} une source E et d'un transformateur parfait de gain N

II .7 .1 Modélisation du filtre

Il s'agit d'un filtre passif série (R_{res}, L_{res}) raccordé entre le convertisseur de puissance (L'onduleur) et le réseau (Figure II.13) pour réduire la propagation des harmoniques dans le réseau électrique.

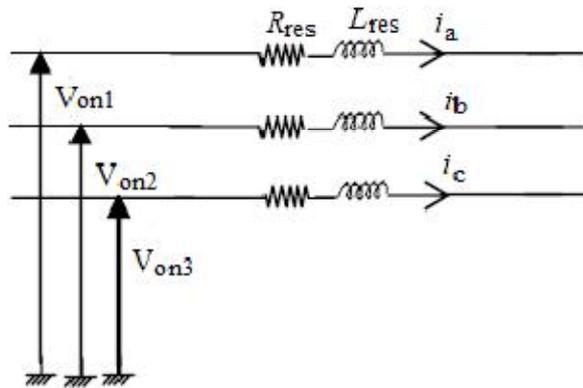


Figure (II .13) Modélisation du filtre électrique.

Le filtre est modélisé par l'équation suivante :

$$i_x = \frac{1}{L_{res} \cdot s + R_s} v_x \dots \dots \dots (II.44)$$

Avec :

- $i_x = i_a, i_b, i_c$ les courants des trois phases.
- $v_x = v_a, v_b, v_c$ les tensions des trois phases.

II .7 .2 Modélisation du transformateur

La fonction de transfert d'un transformateur parfait, de gain N, est donnée par :

$$F_s = \frac{V_{secondaire}}{V_{primaire}} = N \dots \dots \dots (II.45)$$

II .7 .3 Modélisation du réseau

Un réseau peut être caractérisé en un point par sa puissance de court circuit S_{cc} et sa tension nominale U_n . La puissance de court circuit à pour expression :

$$S_{cc} = \sqrt{3} U_n I_{cc} \dots \dots \dots (II.46)$$

Avec I_{cc} courant de court circuit au point du réseau considéré.

IL s'agit d'une puissance fictive car il ne peut y avoir à la fois la tension nominale et le courant de court circuit. En désignant Z_{cc} , l'impédance équivalente ramenée en ce point, la valeur de Z_{cc} , peut être calculé comme suit :

$$Z_{cc} = \frac{U_n^2}{S_{cc}} \dots\dots\dots (II.47)$$

Dans la plupart des cas, la résistance équivalente du réseau est négligeable devant sa réactance, ce qui revient à dire que $Z_{cc} \approx X_{cc}$. la figure (II.16) représente deux niveaux élémentaires de modélisation d'un réseau. Le cas de la figure (a) correspond au cas idéal, à un réseau composé d'une source de tension triphasée parfaite associée à son impédance de court circuit Z_{cc} créant de ce fait une chute de tension suivant le courant appelé. La figure (b) représente un réseau puissant. Ce modèle parfait n'est évidemment pas réalisable et correspond à une puissance de court circuit infinie [41].

II .8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a modélisé les différentes parties d'un aérogénérateur basé sur une machine asynchrone à double alimentation. On a vu l'intérêt de la transformation de Park qui permet d'avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants facile à exploiter et à résoudre.

Chapitre III :

La commande vectorielle de la chaine éolienne

III .1 Introduction

La MADA est la plus utilisée dans les applications industrielles, mais le seul souci avec cette machine est sa commande complexe car son modèle mathématique est non linéaire et fortement couplé.

Dans ce chapitre nous allons faire la présentation du principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation avec le contrôle du couple électromagnétique et le flux statorique. Ses enroulements sont alimentés par un convertisseur et les grandeurs les plus commandées sont la vitesse et le flux, mais certains modes de fonctionnements spécifiques amènent à choisir d'autres grandeurs.

Cette commande consiste à orienter le repère tournant d'axes (d, q) tel que l'axe d soit confondu avec le vecteur flux statorique. Ce principe est basé sur la séparation des grandeurs flux et couple.

III .2 Principe du contrôle vectoriel à flux orienté

Le principe du contrôle vectoriel permet donc de commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu, c'est -à-dire réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée. A cet effet, il est nécessaire d'orienter le flux en quadrature avec le couple, nous décomposons donc le courant statorique en deux composante i_{sd} , et i_{sq} de telle sorte que i_{sd} , soit orienté suivant l'axe du flux rotorique à flux rotorique constante, le couple dépend uniquement du courants i_{sq}

Il est utile de rappeler que le découplage peut être réalisé par orientation du flux statorique ou du flux d'entrefer ou du flux rotorique.

III .2 .1 Modalisation du control vectoriel

Dans le cas d'une éolienne la Mada sera utilisée en mode génératrice donc nous allons intéresser au contrôle des puissances actives et réactives de la machine avec l'orientation du flux statorique suivant (d, q) [18].

En choisissant un référentiel diphasé (d, q) lié au champ tournant statorique et en alignant l'axe d sur le vecteur flux statoriques ϕ_s .

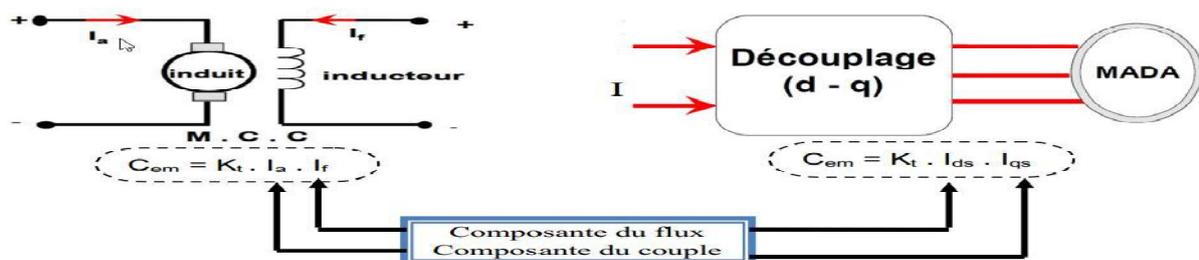


Figure (III. 1) Principe de la commande vectorielle [18].

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

III .3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

La particularité de la MADA est qu'elle possède deux courants à contrôler directement à savoir i_{rd} , et i_{rq} deux courants contrôlés indirectement i_{sd} , i_{sq} [37].

On rappelle d'abord de système d'équation différentielle de la machine :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{sd}}{dt} = V_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_s \phi_{sq} \\ \frac{d\phi_{sq}}{dt} = V_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \dots\dots\dots (III.1)$$

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{rd}}{dt} = V_{rd} - R_r i_{rd} + \omega_r \phi_{rq} \\ \frac{d\phi_{rq}}{dt} = V_{rq} - R_r i_{rq} - \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \dots\dots\dots (III.2)$$

En orientant un des flux, le modèle de la MADA se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte l'est également. Un contrôle vectoriel de cette machine a été conçu en orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul : $\phi_{sq}=0$

Une simplification des équations de la machine asynchrone (au stator et rotor) est obtenue en supposant les composantes homopolaires nulles :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{sd}}{dt} = V_{sd} - R_s i_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \dots\dots\dots (III.3)$$

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{rd}}{dt} = V_{rd} - R_r i_{rd} + \omega_r \phi_{rq} \\ \frac{d\phi_{sq}}{dt} = V_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \dots\dots\dots (III.4)$$

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statoriques ces dessus.

On obtient les expressions suivantes des courants statoriques :

$$\phi_{sd} = \phi_s \dots\dots\dots (III.5)$$

$$\phi_{sq} = 0 \dots\dots\dots (III.6)$$

$$\phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \dots\dots\dots (III.7)$$

$$0 = L_s i_{sq} + M i_{rq} \dots\dots\dots (III.8)$$

$$i_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \dots\dots\dots (III.9)$$

$$i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \dots\dots\dots (III.10)$$

Ces courants statoriques sont remplacés dans les équations des composantes directes et quadrature des flux rotoriques (II.28) :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_r} \right) i_{rd} + \frac{M}{L_s} \phi_{sd} = L_r \cdot \delta \cdot i_{rd} + \frac{M}{L_s} \phi_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} - \frac{M^2}{L_r} i_{rq} = L_r \cdot \delta \cdot i_{rq} \end{cases} \dots\dots\dots (III.11)$$

δ Est le coefficient de dispersion entre les enroulements d et q :

$$\delta = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$$

En remplaçant les expressions des composantes directes et quadrature des courants statoriques (III.9) et (III.10) dans les équations (III.3), puis les expressions des composantes directes et quadratures des flux rotoriques (III.11) dans les équations (III.4) on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} - \frac{R_s}{L_s} M i_{rd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = -\frac{R_s}{L_s} M i_{rd} + \omega_s \phi_{sq} \end{cases} \dots\dots\dots (III.12)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \delta \frac{di_{rd}}{dt} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} - L_r \omega_r \delta i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \delta \frac{di_{rq}}{dt} + L_r \omega_r \delta i_{rd} + \omega_r \frac{M}{L_s} \phi_{sd} \end{cases} \dots\dots\dots (III.13)$$

Les équations rotoriques (III.11) permettent de déterminer les courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{1}{R_r + \delta L_r s} \left[V_{rd} - \left(\frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} - L_r \omega_r \delta i_{rq} \right) \right] \\ i_{rq} = \frac{1}{R_r + \delta L_r s} \left[V_{rq} - \left(L_r \omega_r \delta i_{rd} + \omega_r \frac{M}{L_s} \phi_{sd} \right) \right] \end{cases} \dots\dots\dots (III.14)$$

En notant les f.e.m suivante :

$$\begin{cases} e_d = -L_r \omega_r \delta i_{rq} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ e_q = L_r \omega_r \delta i_{rd} + \omega_r \frac{M}{L_s} \phi_{sd} \end{cases} \dots\dots\dots (III.15)$$

On obtient :

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{1}{R_r + \delta L_r s} [V_{rd} - e_d] \\ i_{rq} = \frac{1}{R_r + \delta L_r s} [V_{rq} - e_q] \end{cases} \dots\dots\dots (III.16)$$

Le couple a pour expression :

$$T_{em} = p(\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}) \dots\dots\dots (III.17)$$

Avec une orientation du flux statorique telle que $\phi_{sd}=0$, on obtient une expression simplifiée :

$$T_{em} = p \phi_{sd} i_{sq} \dots\dots\dots (III.18)$$

Le courant i_{sq} ne pouvant être directement contrôlé, en utilisant l'équation (III.9), on fait apparaître la composante en quadrature du courant rotorique dans l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} \phi_{sd} i_{rq} \dots\dots\dots (III.19)$$

Dans l’hypothèse où le réseau connecté au stator est stable, ceci conduit à un flux statorique constant ; en appliquant cette hypothèse à l’équation (III.6 ; III. 7) nous remarquons que le couple électromagnétique produit par la machine dépend uniquement du courant rotorique de l’axe q. De plus si l’on néglige la résistance du bobinage statorique R , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statorique se réduisent à [37].

$$V_{sd} = 0 \dots\dots\dots (III.20)$$

$$V_{sq} = V_s = \phi_{sd} \omega_s \dots\dots\dots (III.21)$$

III .3 .1 Relation entre les puissances statoriques et rotoriques et les courants rotoriques

Les puissances actives et réactives statoriques d’une machine asynchrone à double alimentation données comme suit :

$$P_s = V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq} \dots\dots\dots(III.22)$$

$$Q_s = V_{sq}i_{sd} + V_{sd}i_{sq} \dots\dots\dots (III.23)$$

Peuvent être réécrites, en tenant compte de (III.6) et (III.7) :

$$P_s = V_s i_{sq} \dots\dots\dots (III.24)$$

$$Q_s = V_s i_{sd} \dots\dots\dots (III.25)$$

A l’aide de l’équation (III.6) on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$i_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \dots\dots\dots(III.26)$$

$$i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \dots\dots\dots(III.27)$$

Les puissances actives et réactive statorique d’une machine asynchrone s’écrivent comme suit :

En appliquant les hypothèses simplificatrices à l’équation (III.10 et III.11) ; on obtient :

$$P_s = V_s i_{sq} \dots\dots\dots(III.28)$$

$$Q_s = V_s i_{sd} \dots\dots\dots(III.29)$$

En remplaçant i_{sd} et i_{sq} par leurs expressions (III.8) dans l’équation (III.7) on obtient :

$$P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \dots\dots\dots (III.30)$$

$$Q_s = V_s \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} \dots\dots\dots (III.31)$$

En approximant ϕ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$ l’expression de la puissance réactive Q_s devient alors :

$$P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \dots\dots\dots(III.32)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} \dots\dots\dots (III.33)$$

III .3 .2 Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques

A partir des équations précédentes nous avons :

$$\phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \dots \dots \dots (III.34)$$

$$\phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq} \dots \dots \dots (III.35)$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (III.16) par leurs expressions dans l'équation (III.7, III.6), on obtient régime permanent :

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} i_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq} \dots \dots \dots (III.36)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} i_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \dots \dots \dots (III.37)$$

V_{rd} et V_{rq} Sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machines pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En contre partie le terme $\left(g \omega_s \frac{M V_s}{L_s} \right)$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation .Son influence n'est pas négligeables car elle entraine une erreur de trainage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

Le but premier d'un système éolien est de produire de l'énergie électrique pour la fournir au réseau de manière la plus constante possible. Ainsi, la génératrice doit produire toute la puissance maximale qu'il est possible d'extraire du vent, puissance qui est déterminée en permanence en fonction de la vitesse du vent.

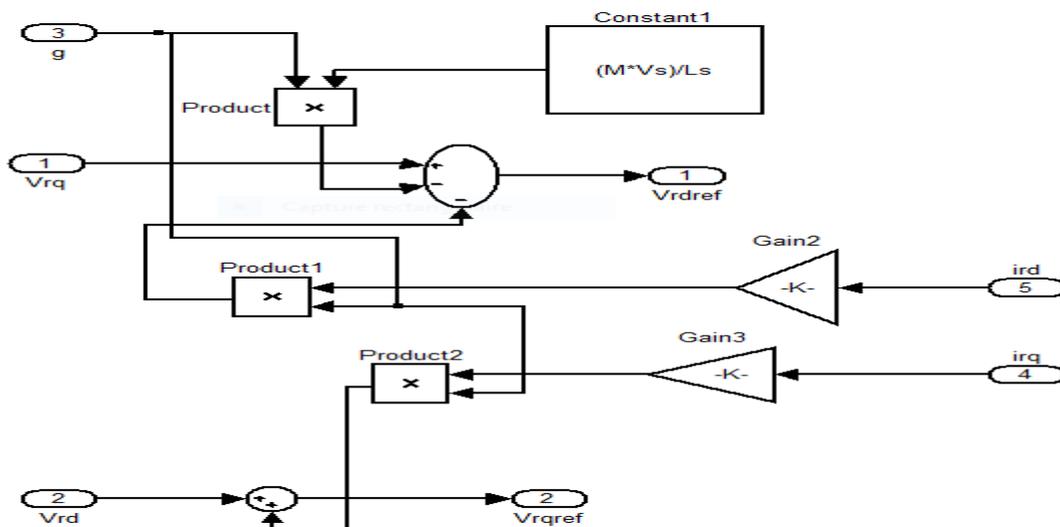


Figure (III .2) Commande vectorielle qu'on a utilisée dans notre simulation.

III.4 Régulation avec régulateur PI

III.4.1 Synthèse du régulateur classique utilisé

Le régulateur Proportionnel Intégral(PI), utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables [43]. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de générateur éolien.

La fonction de transfert de la régulateur PI est de la forme $K_p + \frac{K_i}{p}$, correspondant aux deux régulateurs P et I.

Nous avons donc un système bouclé et corrigé par le régulateur PI :

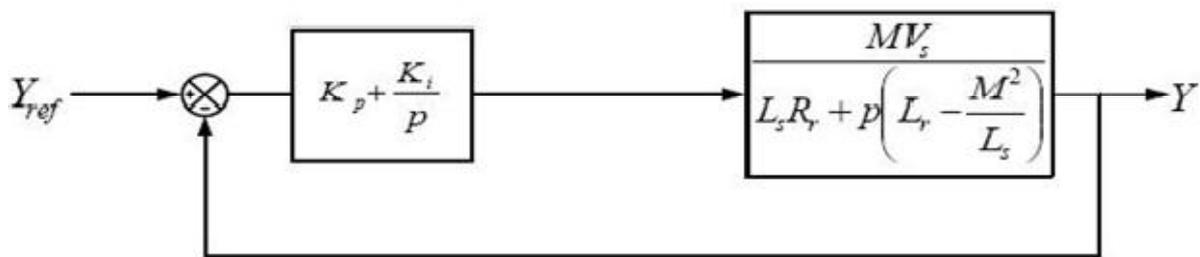


Figure (III.3) système régulé par un régulateur PI.

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

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \dots \dots \dots (III.38)$$

La méthode de compensation des pôles est celle choisie pour la synthèse du régulateur ainsi nous aurons l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \dots \dots \dots (III.39)$$

Il est à noter que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs en dépendent directement. Dans le cas contraire la régulation sera défailante.

En effectuant la compensation de la fonction de transfert en boucle ouverte celle-ci devient :

$$FTBO = \frac{K_p L \frac{M V_s}{s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{P} \dots \dots \dots (III.40)$$

En boucle fermée nous aurons :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r P} \dots \dots \dots (III.41)$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} \dots \dots \dots (III.42)$$

Les gains des correcteurs seront exprimés en fonction des paramètres de la machine comme suit :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} \dots \dots \dots (III.43)$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{M V_s} \dots \dots \dots (III.44)$$

III .5 Logique floue

III .5 .1 Principe et historique de la logique floue

L'imposition des contraintes sévères sur les performances des équipements industriels impose la recherche d'un fonctionnement optimal des systèmes. La démarche de l'automatique classique (approche algorithmique) consistait à construire un modèle mathématique du système à piloter. À partir de ce modèle, une commande est déterminée (PID, commande par retour d'état, commande optimal...) afin d'amener ce système dans les états désirés tout en respectant les critères des performances. La logique floue (fuzzy logic) est de grande actualité aujourd'hui. En réalité, elle existait déjà depuis longtemps et nous pouvons diviser son histoire de développement en trois étapes. Ce sont les paradoxes logiques et les principes de l'incertitude d'Heisenberg qui ont conduit durant les années 1920 et 1930 au développement de la logique à valeurs multiples ou logique floue. En 1937, le philosophe.

M.Black a appliqué la logique continue, qui se base sur l'échelle des valeurs vraies (0, 1/2, 1) pour classer les éléments ou symboles. À partir des années 1960, l'automaticien célèbre

Zadeh appréhende l'aspect douteux que ce type d'approche soit toujours viable pour les systèmes complexes. En effet, l'obtention d'un modèle mathématique précis et simple à exploiter s'avère parfois difficile [43].

Cette constatation a été à l'origine du développement des commandes à base de la logique floue. Ainsi, l'auteur s'est intéressé aux règles floues reposant sur la représentation du savoir des experts pour décrire l'état du système et eut ainsi l'idée d'élargir la notion d'appartenance normalement traduite par « oui » ou « non » aux critères « peut être », « sans doute », « à peu près »... etc. Il a ainsi fixé la notion des sous-ensembles flous et a fourni le point de départ d'une nouvelle théorie [44].

III .5 .2 Définition de la logique floue

III .5 .2 .1 Contrôleur à base de la logique floue

Le contrôleur à base de la logique floue ne remplace pas nécessairement les systèmes classiques de régulation, il est complémentaire et utilisé particulièrement lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander, ou lorsque ce dernier présente de forts non linéarités ou imprécisions. De plus, l'intérêt de ces contrôleurs réside dans leurs capacités de traiter l'imprécis et l'incertain. Ainsi, le succès de la commande par la logique floue trouve en grande partie son origine dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en ensemble de règles linguistiques facilement interprétables [45].

La logique floue inspire ces caractéristiques du raisonnement humain. Elle est basée sur la constatation que la plupart des phénomènes ne peuvent être représentés à l'aide de variables booléennes qui ne peuvent prendre que deux valeurs 0 ou 1.

III .5 .3 Notions de base de la logique floue

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

✓ 1. Ensemble flou

Un ensemble flou est défini par une fonction d'appartenance qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1. C'est l'élément de base de la logique floue. Le concept de ce dernier a pour but d'éviter le passage brusque d'une classe à une autre et de permettre des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe ; c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à une classe. Dans un domaine continu les ensembles flous sont définis par leurs fonctions d'appartenance. Tandis que dans le cas discret les ensembles flous sont des valeurs discrètes dans l'intervalle.

✓ 2. 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 [46].

Les fonctions d'appartenance peuvent avoir différentes formes :

- Monotones (croissantes ou décroissantes).

- Triangulaires : elle est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$:

$$\mu(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{d-c}, 0 \right) \right] \dots \dots \dots \text{(III.45)}$$

- Trapézoïdales : elle est définie par quatre paramètres $\{a, b, c, d\}$:

$$\mu(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}, 0 \right) \right] \dots \dots \dots \text{(III.46)}$$

- En forme de cloche (Gaussiennes) : elle est définie par deux paramètres $\{\sigma, m\}$:

$$\mu(x) = \exp \left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right) \dots \dots \dots \text{(III.47)}$$

- Sigmoidale : elle est définie par deux paramètres $\{a, c\}$:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(a(x-c))} \dots \dots \dots \text{(III.48)}$$

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

✓ 3. Variables linguistiques

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".

Ce genre d'expressions forme ce qu'on appelle des variables linguistiques de la logique floue.

✓ 4. 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. Les opérateurs de l'intersection, l'union, la complémentation et l'implication sont traduites par les opérateurs " *E*, *OU*, *NON* et *ALORS*" respectivement. Soit *A* et *B* deux ensembles flous, dont les fonctions d'appartenance sont $\mu_A(x)$, $\mu_B(y)$ respectivement.

✓ 5. Règles floues

La règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication entre deux propositions floues. Par exemple, considérons deux variables linguistiques (V_1, T_{v1}) , (V_2, U, T_{v2}) et les deux propositions suivantes " V_1 est *A*", " V_2 est *B*" où *A* et *B* sont deux ensembles flous de

V_1 et V_2 . On peut définir la règle floue par l'expression "si V_1 est *A* alors V_2 est *B*".

- La proposition " V_1 est *A*" est la condition de l'implication.
- La proposition " V_2 est *B*" est la conclusion de l'implication.

Généralement, plusieurs règles floues sont nécessaires pour prendre une décision face à une situation donnée. On s'intéresse au cas de plusieurs règles floues dans le domaine de la commande et la régulation. Les règles floues peuvent être décrites de plusieurs façons :

- a **Linguistiquement** : dans ce cas, on exprime les règles de façon explicite comme dans l'exemple suivant : "Si l'accélération est faible et la vitesse est faible Alors faire appel à un grand couple".
- b **Symboliquement** : il s'agit, dans ce cas, d'une description linguistique où l'on remplace la désignation des ensembles flous par des symboles tels que *PG*, *P*.etc désignant (*positif Grand*, *positif petit*.etc).
- c **Par matrice d'inférence** : dans ce cas, on rassemble toutes les règles qui sont désignées symboliquement dans un tableau appelé "*Matrice d'inférence*". Les entrées du tableau représentent les degrés d'appartenance des variables linguistiques des entrées aux différents ensembles flous. Et l'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de sortie défini par la règle [47].

III .5 .4 Commande par logique floue

La commande par la logique floue est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques. Par des inférences avec plusieurs règles, il est possible de tenir compte des expériences acquises par les opérateurs d'un processus technique [47]. Généralement le traitement d'un problème par la logique floue se fait en trois étapes :

III .5 .4 .1 Fuzzification

Cette étape s'occupe de la transformation des valeurs numériques aux entrées en valeurs floues ou variables linguistiques. Les variables d'entrées qui sont l'erreur de vitesse et sa variation sont soumises à une opération de fuzzification et par conséquent converties à des ensembles flous. L'univers de discours normalisé de chaque variable du régulateur (l'erreur, sa variation et la variation de la commande) est subdivisé en cinq ensembles flous. Ceux-ci sont caractérisés par les désignations standards suivantes :

- Négatif grand noté **NG**.
- Négatif petit noté **NP**.
- Environ de zéro noté **EZ**.
- Positif petit noté **PP**.
- Positif grand noté **PG**.

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires comme la montre la figure (III.4)

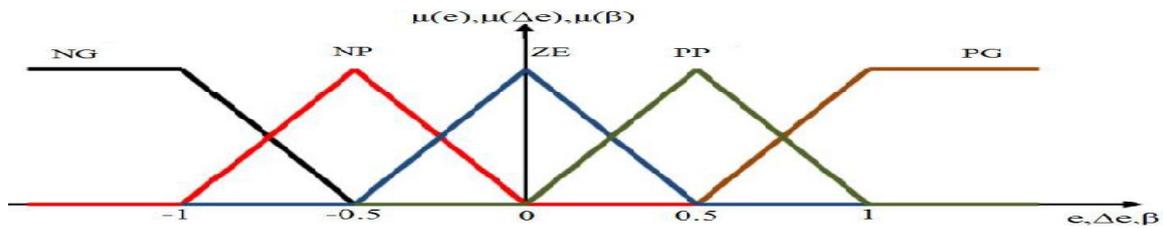


Figure (III .4) Fonctions d'appartenance des différentes variables du régulateur flou.

III .5 .4 .2 Règles d'inférence floue

Les règles d'inférence peuvent être décrites de plusieurs façons, linguistiquement, symboliquement ou bien par matrice d'inférence, dans ce dernier cas, une matrice dite d'inférence rassemble toutes les règles d'inférence sous forme d'un tableau. Dans le cas d'un tableau à deux dimensions, les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrées. L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie définie par la règle. Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont: **Max-Produit**, **Somme-produit** et **Max-Min** (Implication de **Mamdani**), cette dernière méthode la plus utilisée à cause de sa simplicité, elle réalise l'opérateur "**ET**" par la fonction "**Min**", la conclusion "**ALORS**" de chaque règle par la fonction "**Min**" et la liaison entre toutes les règles (opérateur "**OU**") par la fonction **Max**.

III .5 .4 .3 Defuzzification

Le résultat de l'inférence en utilisant une des méthodes d'implication floue, Max-min, Max-prod ou Som-prod, est une valeur floue. Cette information ne peut être utilisée directement pour contrôler le système. Une transformation doit être prévue à la sortie du bloc d'inférence pour la convertir en grandeur fixe, cette transformation étant connue par le terme défuzzification (concrétisation)

Plusieurs stratégies de défuzzification existent. Les plus utilisées sont [48] ; [49] :

a. Méthode du maximum

Comme son nom l'indique, la commande en sortie est égale à la commande ayant la fonction d'appartenance maximale. La méthode du maximum simple, rapide et facile mais elle introduit des ambiguïtés et une discontinuité de la sortie (parfois on trouve deux valeurs maximales).

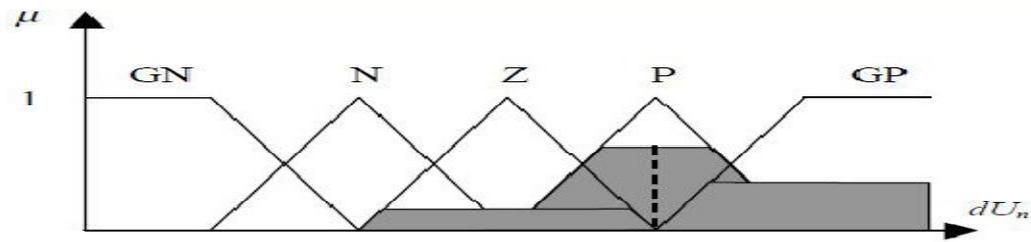


Figure (III .5) Défuzzification par valeur maximum

b. Méthode de la moyenne des maximums

Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance issue de l'inférence est maximale.

c. Méthode du centre de gravité :

Cette méthode est la plus utilisée dans les contrôleurs flous. Elle génère l'abscisse du centre de gravité de l'espace flou comme commande de sortie, l'abscisse de centre de gravité

Δ_{un} Peut être déterminé à l'aide de la relation générale suivante

$$du_n = \frac{\int x\mu_r(x)dx}{\int \mu_r(x)dx} \dots \dots \dots (III.45)$$

Nous nous sommes intéressés à cette méthode à cause de sa simplicité de calculs et sa sortie unique

d. Méthode des hauteurs pondérées :

Elle correspond à la méthode de centre de gravité quand les fonctions d'appartenance ne se recouvrent pas

$$du_n = \frac{\sum x\mu_r(x)dx}{\sum \mu_r(x)dx} \dots \dots \dots (III.46)$$

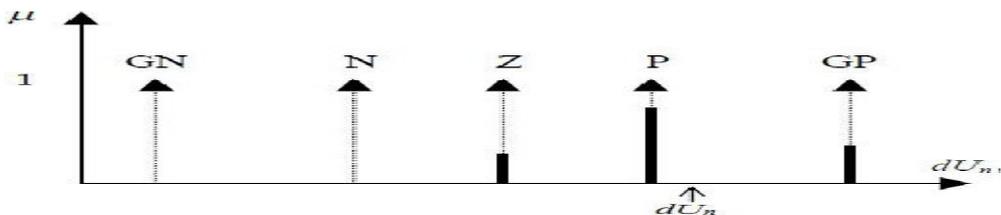


Figure (III .6) Défuzzification par la méthode des hauteurs pondérées.

III .6 Application de la logique floue au contrôle de l'aérogénérateur

Dans cette section, nous nous intéressons à l'application de la commande par la logique floue à l'aérogénérateur. On utilise alors un régulateur de **MAMDANI** pour le réglage de vitesse.

III .6 .1 Régulateur de type de MAMDANI

En 1974 **MAMDANI** a présenté pour la première fois, la technique de réglage par la logique floue et conçoit le premier contrôleur flou. Ce contrôleur est construit autour d'un organe de décision manipulant des règles subjectives et imprécises comme celles du langage

courant qui est appliquées au système, peuvent être contrôlées. L'obtention de ces règles auprès des experts qui connaissent bien le système est facile.

MACVICAR et **WHELAN** ont fait une analyse sur les bases de règles de **KING** et de **MAMDANI** et ont proposé une matrice des règles qui possède deux entrées, l'erreur et sa variation, en se basant sur les deux principes suivants [45].

Si la sortie à régler est égale à la valeur désirée et la variation de l'erreur est nulle, la commande sera maintenue constante.

Si la sortie à régler diverge de la valeur désirée, l'action sera dépendante du signe et de la valeur de l'erreur et de sa variation.

III .6 .2 Synthèse du régulateur

La majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma simple proposé par **MAMDANI** pour les systèmes mono-entrée/mono-sortie. Ce schéma est représenté par la figure (III.7).

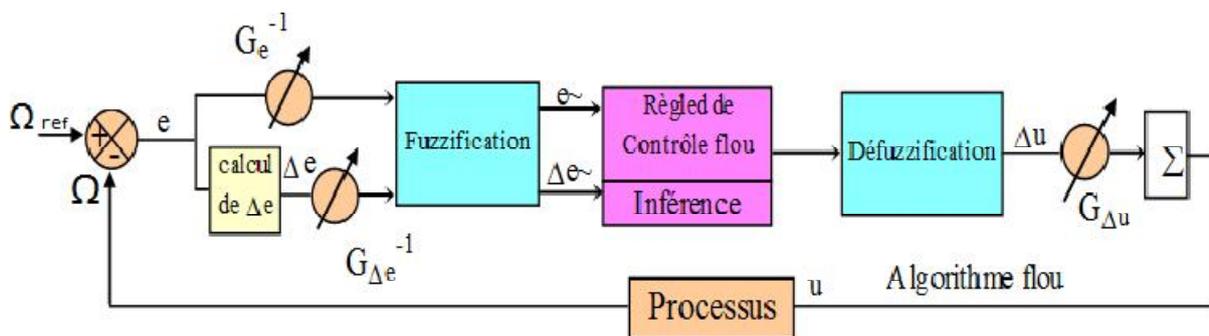


Figure (III .7) Schéma bloc d'un contrôleur flou.

D'après ce schéma, le système est composé:

- D'un bloc de calcul de variation de l'erreur au cours du temps Δe ;
- Des facteurs d'échelle associés à l'erreur, à sa variation et à la variation de la commande Δu ;
- Dun bloc de fuzzification utilisé pour calculer les degrés d'appartenance ;
- Des règles du contrôleur flou;
- D'un bloc de Defuzzification utilisé pour convertir la variation de la commande en valeur numérique;
- D'un bloc sommateur.

Le succès des algorithmes flous dans les systèmes industriels complexes est dû au choix des méthodes relativement pratiques, permettant avec une simplicité notable, la mise au point de tels algorithmes.

$$\begin{cases} X_e = G_e \cdot e \\ X_{\Delta e} = G_{\Delta e} \cdot e \end{cases} \dots\dots\dots (III.47)$$

Où G_e et $G_{\Delta e}$ sont les facteurs d'échelles (normalisation). Nous faisons varier ces facteurs jusqu'à ce que nous ayons un phénomène transitoire de réglage convenable. En effet, ce sont ces derniers qui fixeront les performances de la commande.

III .3 .6 .1. Structure de base d'un contrôleur flou de puissance

Généralement, la conception d'un régulateur flou pour la commande des entraînements électriques exige le choix des paramètres suivants [49] :

- Choix des variables linguistiques;
- Choix des fonctions d'appartenance;
- Choix de la méthode d'inférence;
- Choix de la stratégie de défuzzification.

Pour les systèmes mono variables simples, les entrées du contrôleur flou sont généralement l'erreur (la différence entre la consigne et la sortie du processus) et sa variation (traduction de la dynamique de système). La majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma simple proposé par Mamdani. Comme la montre la figure (III.8).

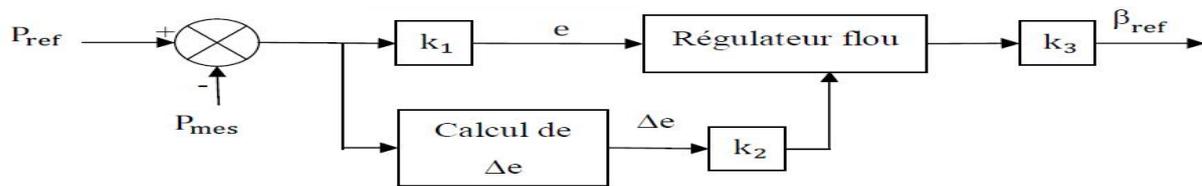


Figure (III .8) Schéma synoptique d'un régulateur flou.

Les deux entrées du contrôleur flou sont l'erreur de puissance et sa variation.

- L'erreur de puissance notée e est définie par :

$$e = P_{ref} - P_{mes}$$

- La variation de l'erreur de vitesse notée Δe est définie par :

$$\Delta_e = e(t + dt) - e(t) = e(k + 1) - e(k)$$

- La sortie du régulateur correspond à l'angle de calage de la commande notée (β).

III .7 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages qui sont [44] :

- La non-nécessité d'une modélisation exacte (cependant, il peut être utile de disposer d'un modèle convenable)
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus

- La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser)
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire).

Les inconvénients de la commande par logique floue sont :

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification) ;
- L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile) ;
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable) ;
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonctionnement non linéaire ;
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

En tout cas, on peut confirmer que le réglage par logique floue présente une solution valable par rapport aux réglages conventionnels. Cela est confirmé non seulement par un fort développement dans beaucoup de domaines d'application, mais aussi par des travaux de recherche sur le plan théorique. Ainsi, il est possible de combler quelques lacunes actuelles, comme le manque de directives pour la conception et l'impossibilité de la démonstration de la stabilité en l'absence d'un modèle valable.

On accède à la fenêtre principale du régulateur logique floue « RLF » par une instruction sur la ligne de commande MATLAB

»fuzzy ;

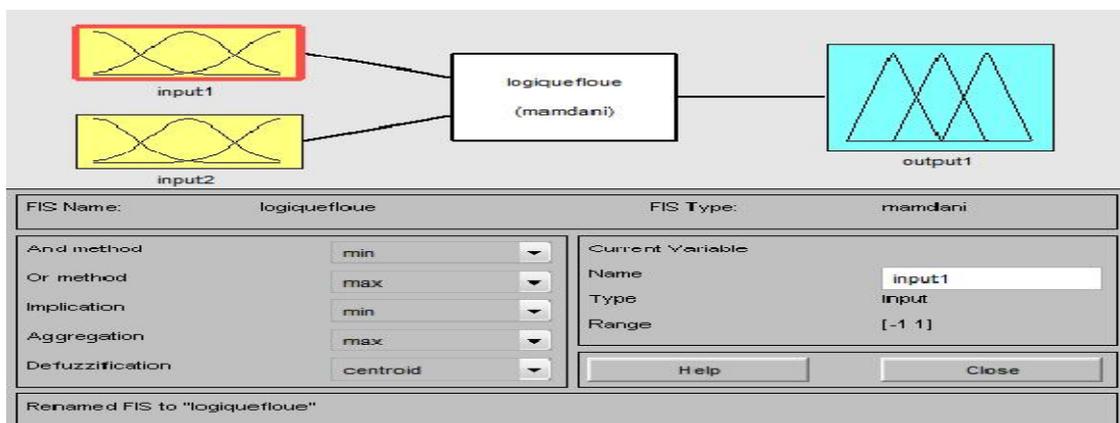


Figure (III. 9) Fenêtre principale de l'éditeur de logique floue.

III.8 Remarque

D'une manière générale, la logique floue donne un meilleur régime dynamique (temps de repense, dépassement et temps de rétablissement) que le régulateur PI.

III.9 Résultats de simulation et interprétations

Notre système est constitué d'une machine asynchrone à double alimentation connectée au réseau ; le stator est relié directement (sans interface), alors que le rotor est alimenté par l'intermédiaire d'un convertisseur statique (redresseur MLI, filtre, onduleur MLI), et ce dispositif d'électronique de puissance qui permet la réversibilité du transfert de l'énergie entre le réseau et le rotor.

Les résultats de simulation sous MATLAB SIMULINK du modèle de système proposé sont montrés sur les figures ci-dessous. Ces résultats sont obtenus en utilisant des régulateurs PI (proportionnel et intégral) et FLOU, commandée en puissance.

Pour l'extraction du maximum de puissance l'algorithme MPPT est appliqué à l'éolienne fonctionnant à vitesse variable.

La régulation pour les régulateurs PI vitesse fixe :

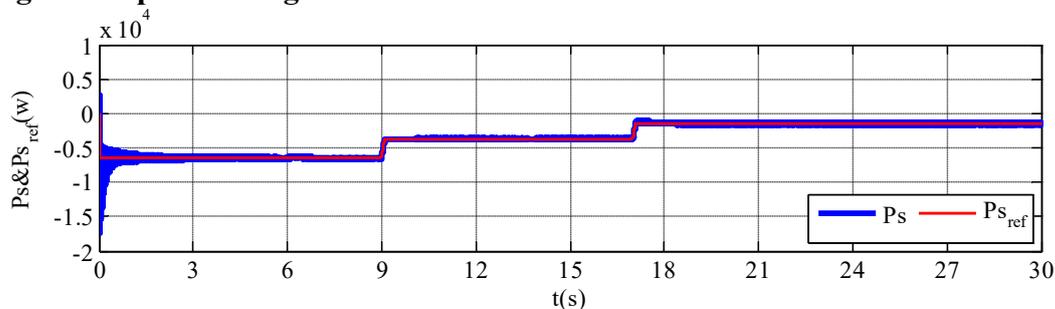


Figure (III. 11) Allure de la puissance statorique.

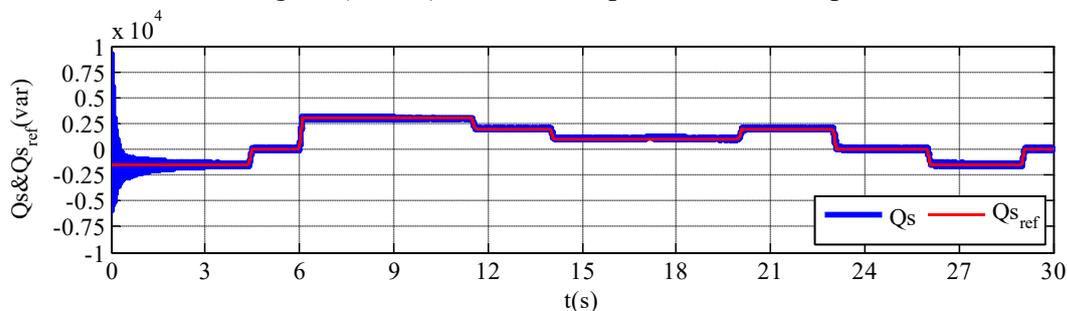


Figure (III. 12) Allure de la puissance réactive statorique.

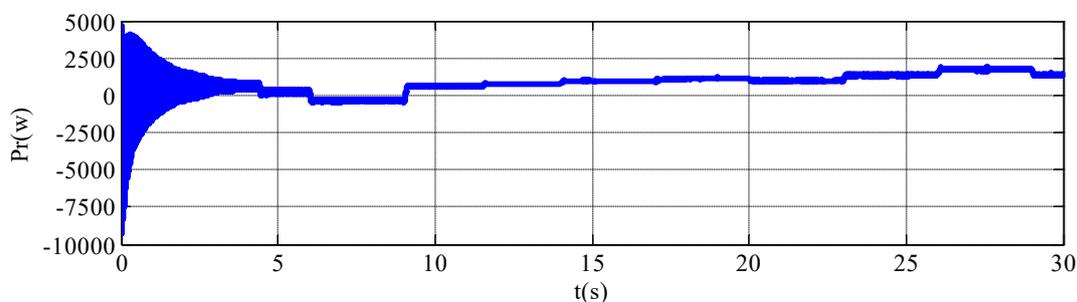


Figure (III. 13) Allure de la puissance active rotorique.

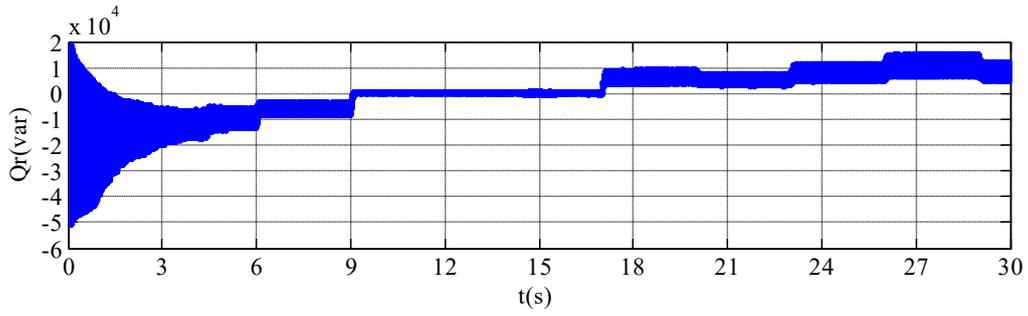


Figure (III. 14) Allure de la puissance réactive rotorique.

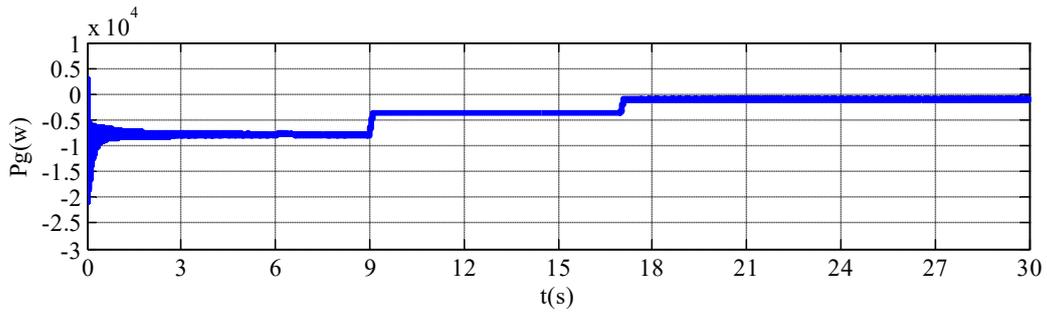


Figure (III. 15) Allure de la puissance active générée.

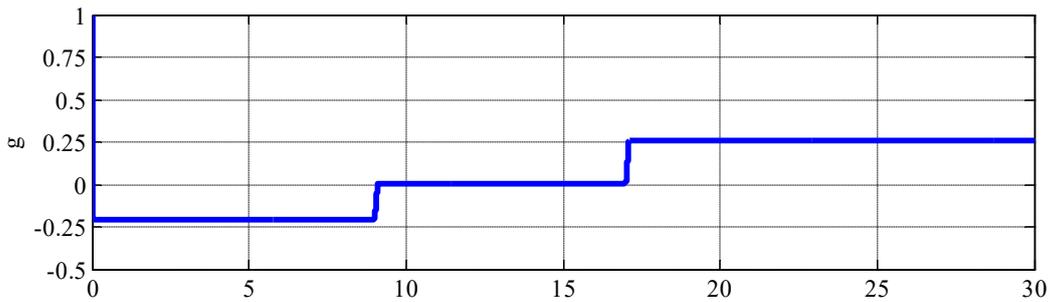


Figure (III. 16) Allure du glissement.

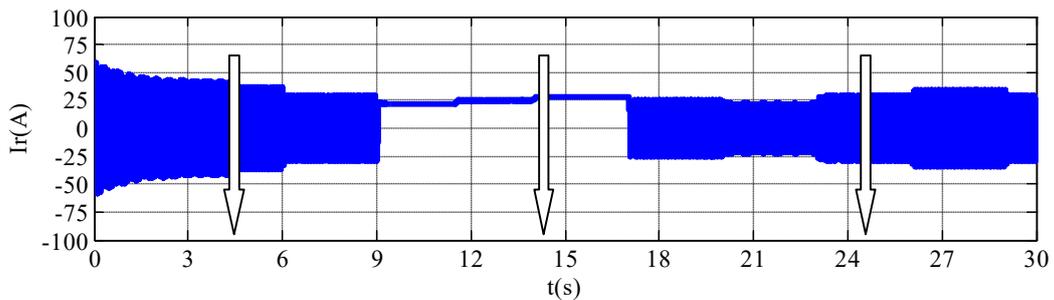


Figure (III. 17) la courant rotorique.

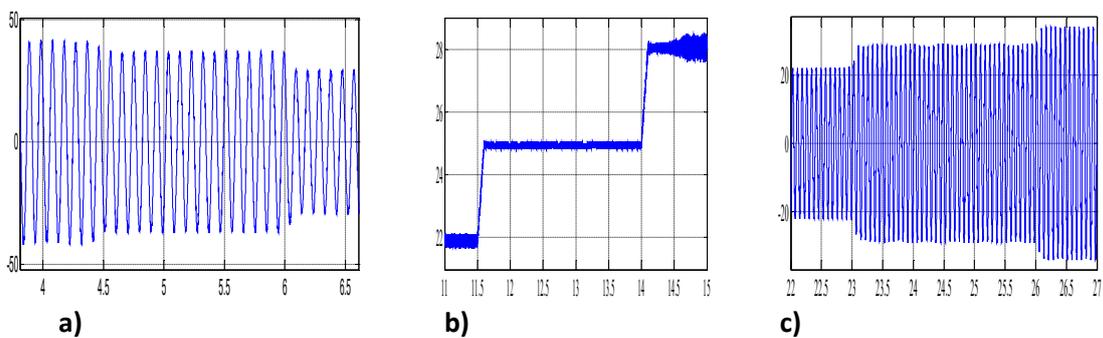
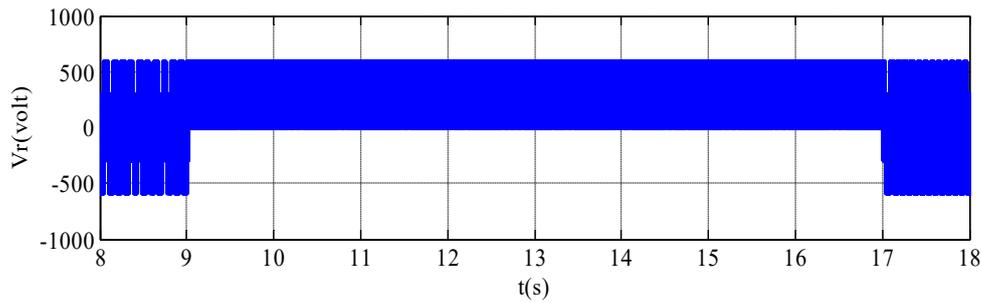
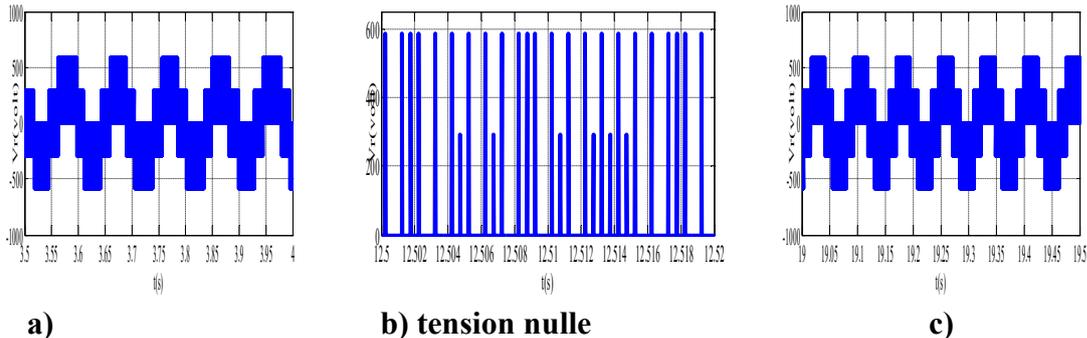


Figure (III. 18) Les Zooms sur les différentes parties du courant.

Figure (III. 19) La tension rotorique V_r (volt).Figures (III. 20) Les zooms sur les différentes parties de la tension rotoriques V_r (volts).**Interprétations et commentaires :**

Les puissances active et réactive statoriques sont données sur les figures (III.11) et (III.12), respectivement. Illustrant ainsi une bonne poursuite de consigne malgré un signe transitoire qui est dû aux régulateurs (PI) choisis, le signe négatif de la puissance active statorique (P_s) justifie qu'elle est débitée vers le réseau.

La figure (III.13), illustre l'allure de la puissance active rotorique, qui a un signe positif ($P_r > 0$) confirmant ainsi le mode hypersynchrone. Le signe négatif de la puissance active rotorique, est l'image du fonctionnement hyposynchrone, justifiant que P_r est fourni du rotor de la génératrice vers le réseau.

La figure (III.15) montre l'allure de la puissance active générée. Elle est de signe négatif, ce que montre qu'elle est fournie par le système.

Notre glissement sur cette figure (III.16) nous montre les différents modes de fonctionnement de notre génératrice en hyposynchrone, hypersynchrone et on synchronisme.

De 0 à 9 → on a le fonctionnement en hypersynchrone.

De 9 à 17 → on a le fonctionnement en synchronisme.

De 17 à → on a le fonctionnement en hyposynchrone.

La figure (III.17) nous montre aussi les trois modes de fonctionnement, l'hyposynchrone, l'hypersynchrone et le synchronisme.

Les allures de la tension et du courant (sortie du convertisseur MLI) et de leurs zooms sont données par les fig.(III.17) et(III.19), (III.18) et (III.20) respectivement.

La Figure (III.20) met en évidence la tension rotoriques qui traduit le fonctionnement du convertisseur de puissance (onduleur-MLI).

Le courant rotorique et les zooms sont indiqués dans les fig. (III.17), (III.18) respectivement
Celui-ci augmente et diminue proportionnellement à la puissance mécanique

Régulations en mode aléatoire PI :

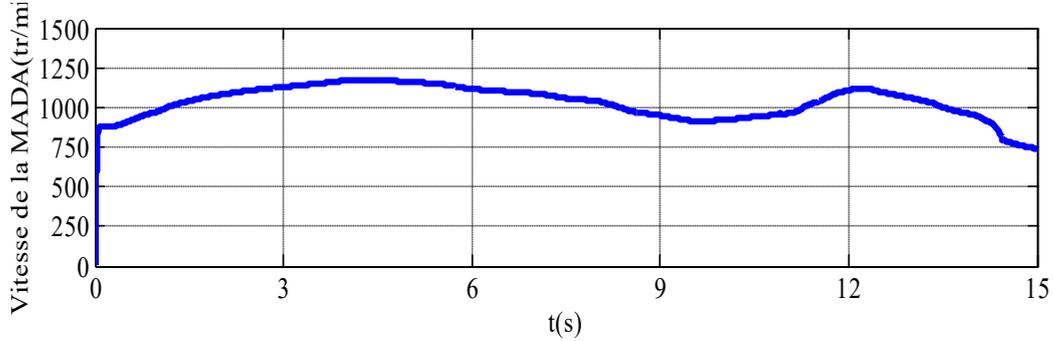


Figure (III.21) allure de la vitesse de la MADA.

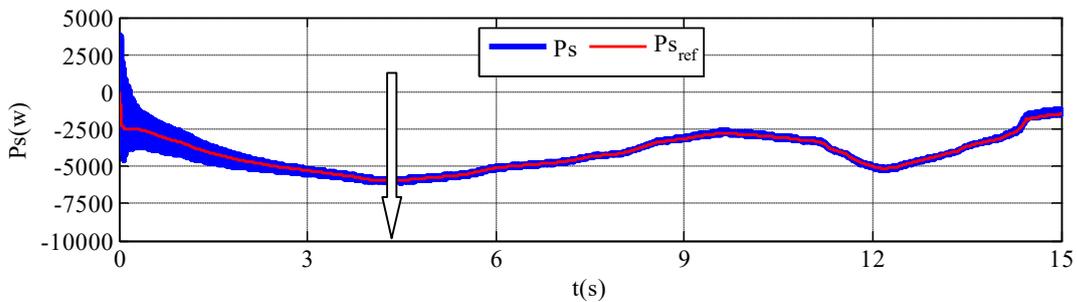


Figure (III .22) Allure de la puissance active.

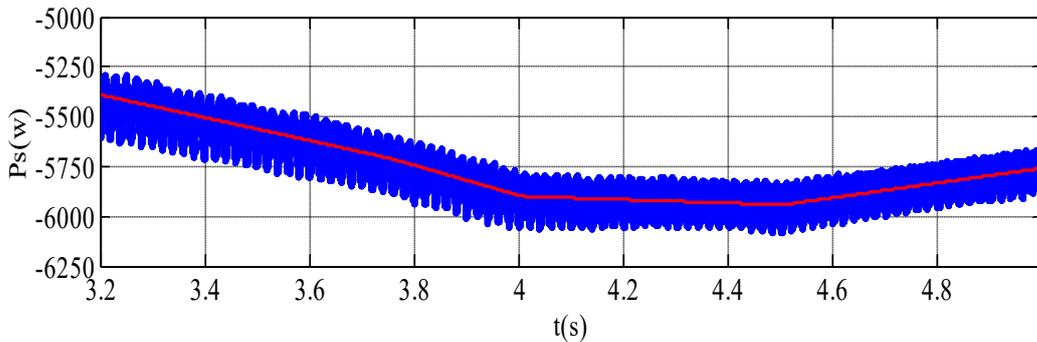


Figure (III.23) Zoom sur la puissance active.

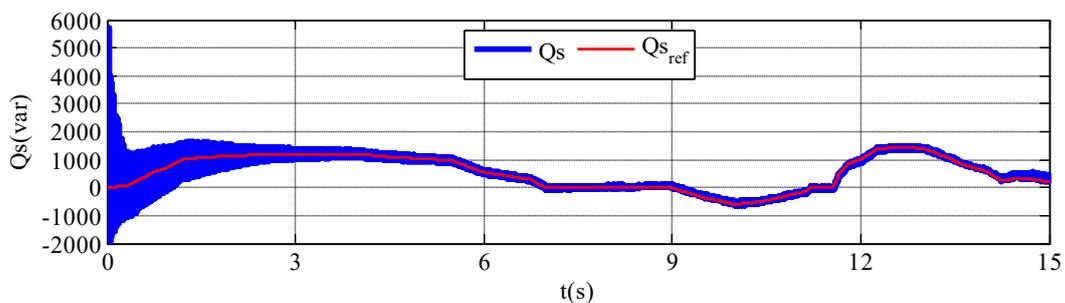


Figure (III .24) Allure de La puissance réactive.

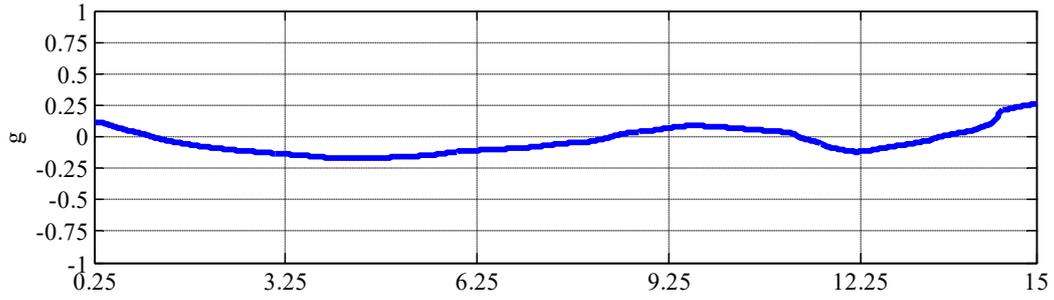


Figure (III .25) Allure du Glissement.

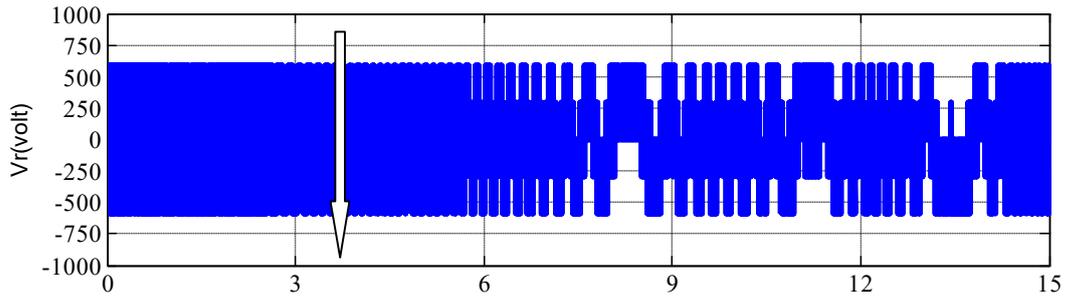


Figure (III .26) Tension rotorique.

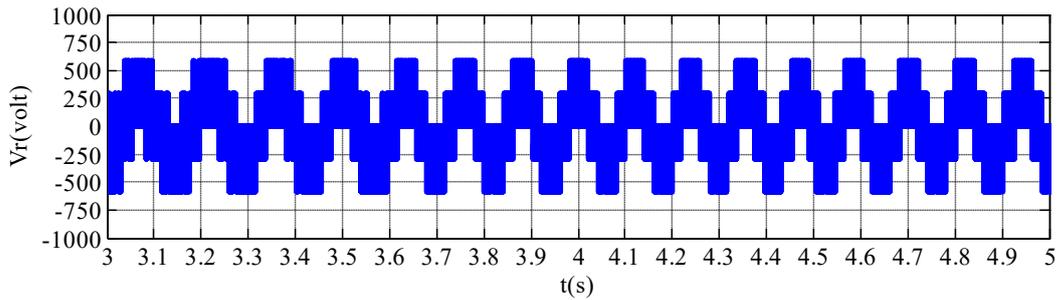


Figure (III .27) Zoom sur la Tension rotorique.

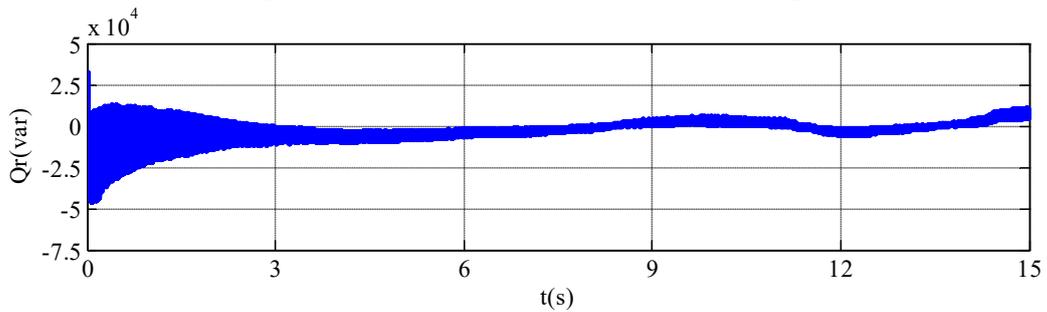


Figure (III .28) Puissance réactive rotorique.

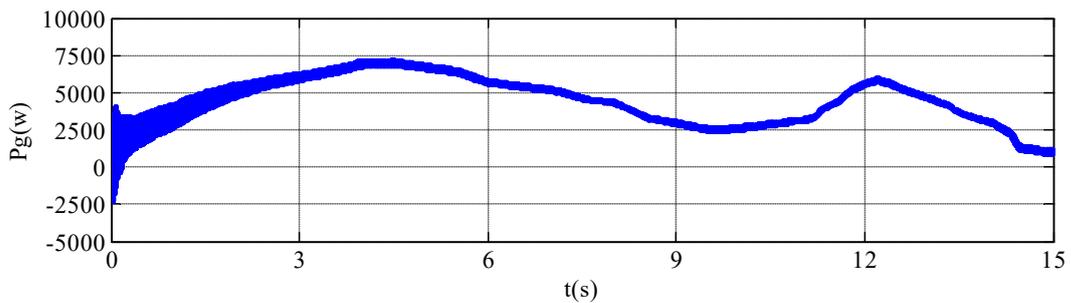


Figure (III .29) La puissance rotorique de la génératrice.

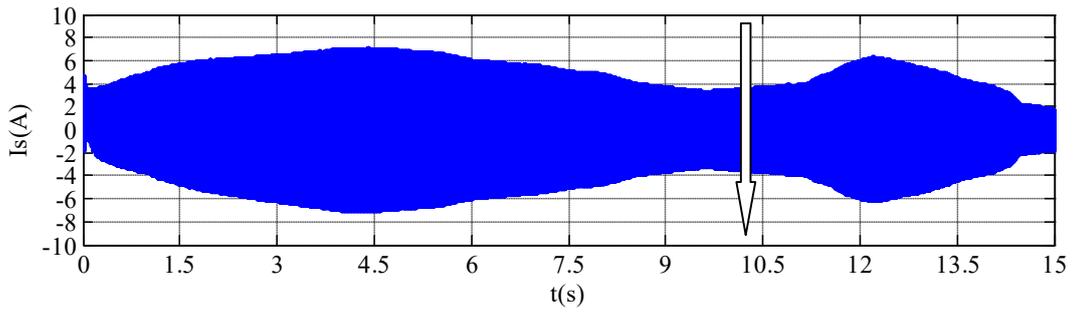


Figure (III .30) Courant statorique.

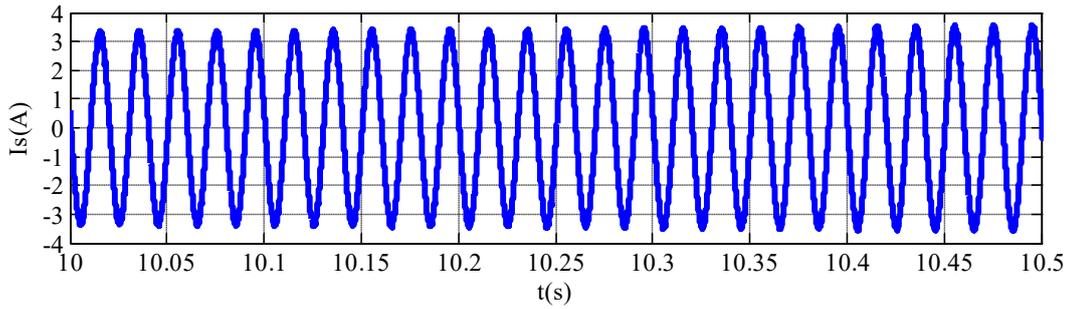


Figure (III .31) Zoom sur Le courant statorique.

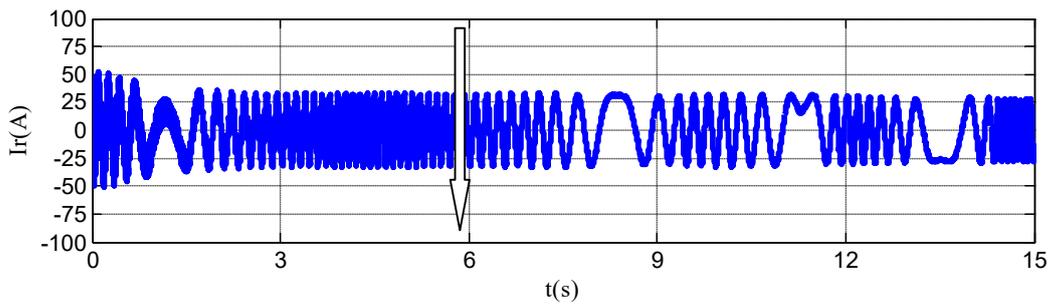


Figure (III .32) Le courant rotorique.

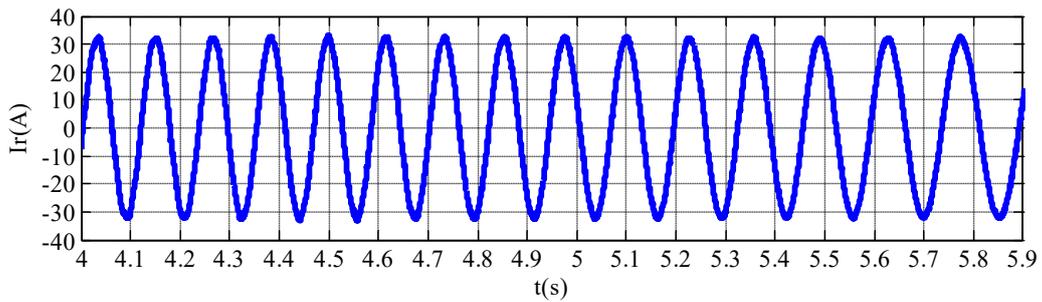


Figure (III .33) Zoom sur Le courant rotorique.

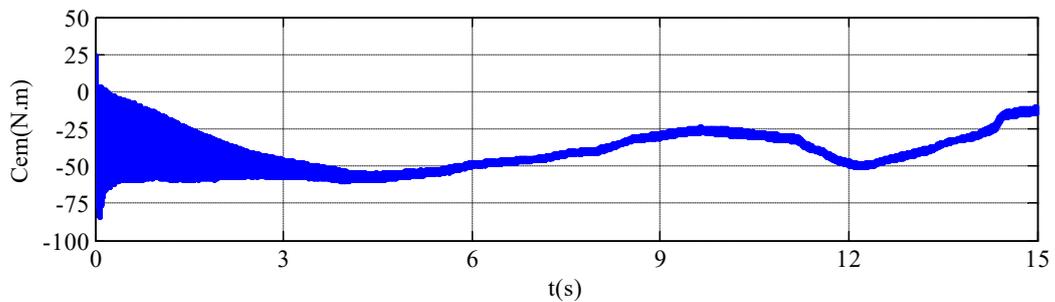


Figure (III .34) Le couple électromagnétique.

Interprétations et commentaires :

Les puissances active et réactive statoriques sont montrées sur la figure (III.22) et (III.23). La poursuite de référence est confirmée par les deux figures.

Sur la figure (III.23) on remarque que la puissance active est négative, ce qui signifie qu'elle est fournie au réseau.

La figure (III.24) c'est une allure du glissement qui nous démontre les différents modes de fonctionnement hyposynchrone, hypersynchrone et synchronisme.

De l'allure du glissement nous pouvons constater que la vitesse de la machine varie autour de la vitesse de synchronisme.

Les figures (III.27) et (III.28) représentent respectivement la puissance active rotorique et la puissance réactive rotorique. Pour $g > 0$ (mode hyposynchrone), la MADA absorbe de la puissance active et pour $g < 0$ (mode hypersynchrone), la puissance active rotorique est fournie par la génératrice. Lorsque $g = 0$, le rotor absorbe une puissance active qui représente les pertes Joules rotorique, alors que la puissance réactive rotorique est nulle.

Les courants statoriques sont de nature sinusoïdale et ont une fréquence de valeur constante égale à 50Hz comme le montre la figure de zoom. Cette valeur correspond à la valeur imposée par le réseau. Le zoom montre aussi que ces derniers sont sinusoïdaux.

Les figures (III.30) et (III.31) représentent le courant et le zoom du courant statorique et ils sont de nature sinusoïdale et ont une fréquence de valeur constante égale à 50Hz comme le montre la figure de zoom. Cette valeur correspond à la valeur imposée par le réseau. Le zoom montre aussi que ces derniers sont sinusoïdaux.

Les figures (III.32) et (III.33) représentent le courant rotorique et son zoom ils sont obtenus au rotor de formes sinusoïdale, mais la fréquence de ces derniers n'est pas constante, car la fréquence des grandeurs rotoriques est : $f_r = g f_s$ donc cette fréquence dépend de la vitesse de la génératrice.

La figure (III.34) représente l'allure du couple électromagnétique.

Régulations par logique floue en régime aléatoire :

Dans ce qui suit on exposera les résultats obtenus après la simulation Sous MATLAB SIMULINK suivit par l'interprétation de ces résultats, et ce pour bien assimiler le comportement dynamique de l'aérogénérateur qui est à base de la machine doublement alimentée (MADA). La commande appliquée est la commande vectorielle en puissance, la régulation des puissances active et réactive est faite par des régulateurs flous.

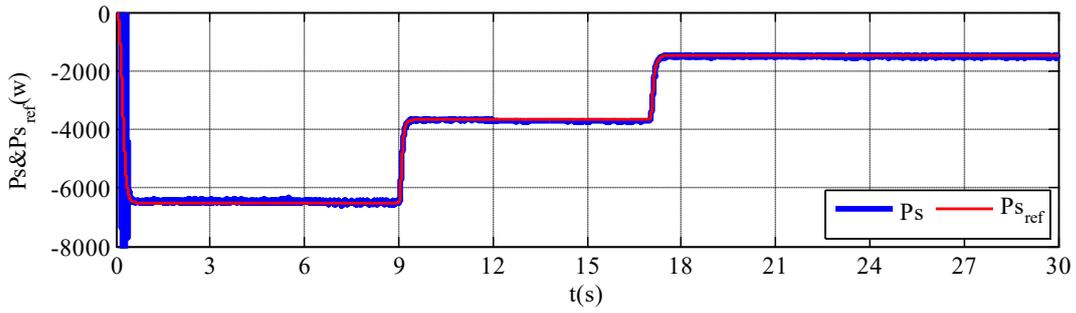


Figure (III .35) Puissance active statorique.

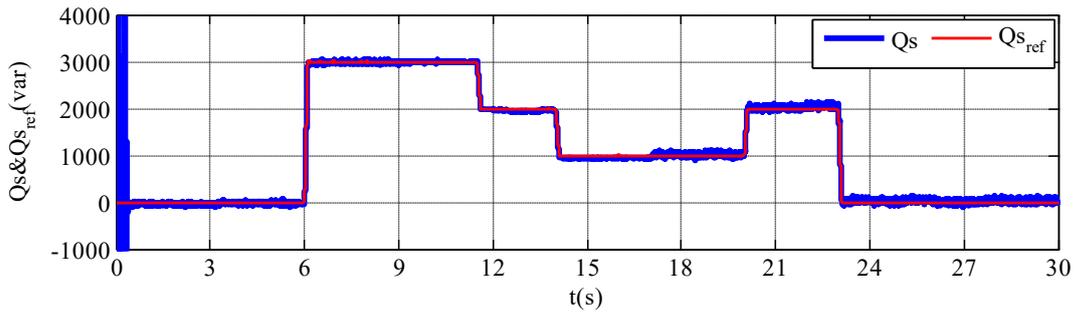


Figure (III .36) Puissance réactive statorique.

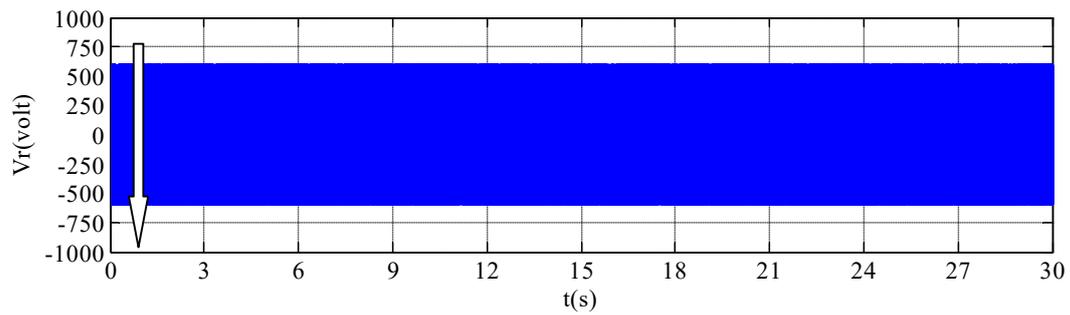


Figure (III.37) Tension rotorique.

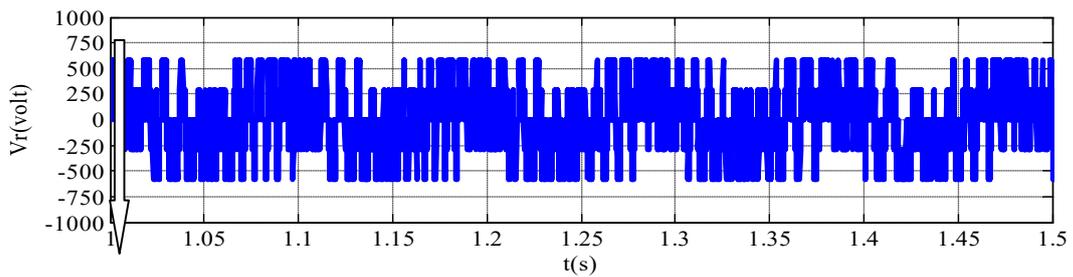


Figure (III.38) Zoom sur la tension rotorique.

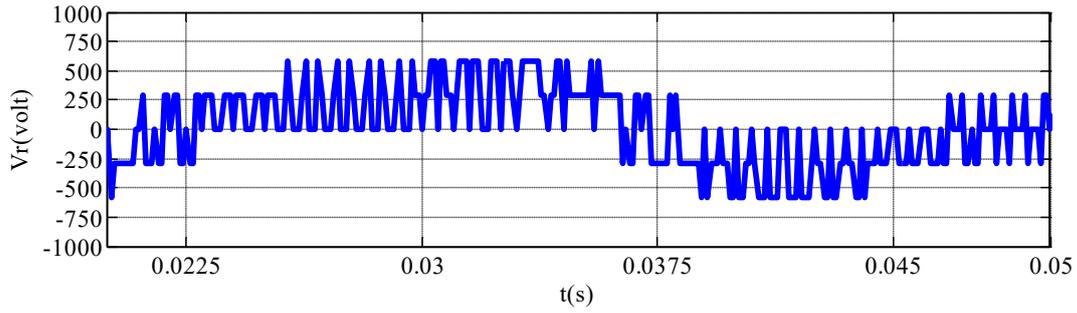


Figure (III .39) Zoom sur Vr.

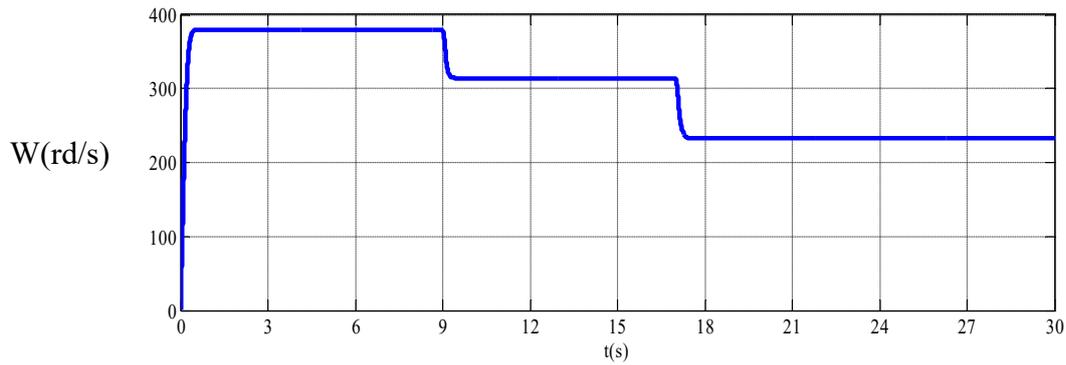


Figure (III .40) Pulsation de la vitesse de rotation ($W=P*\Omega$)

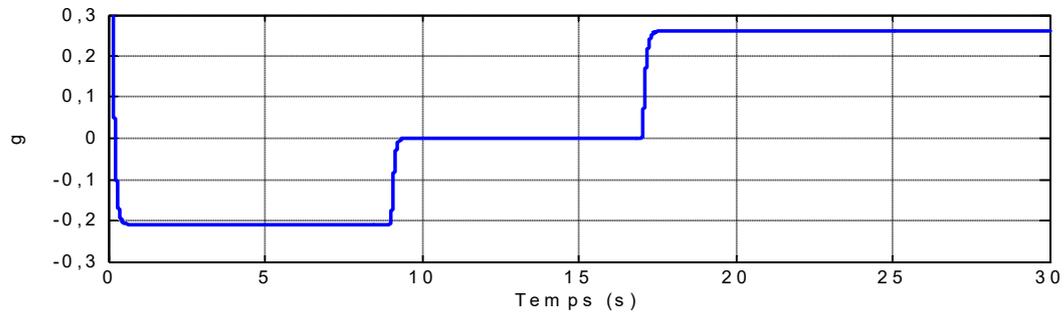


Figure (III .41) Glissement g.

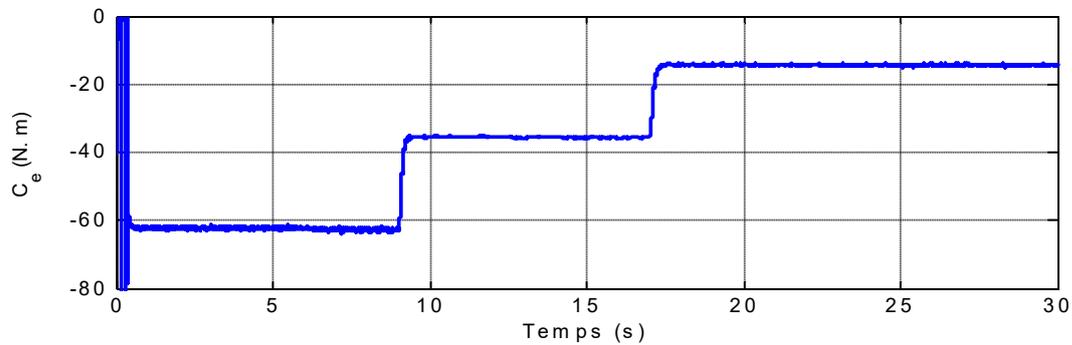


Figure (III .42) Couple électromagnétique.

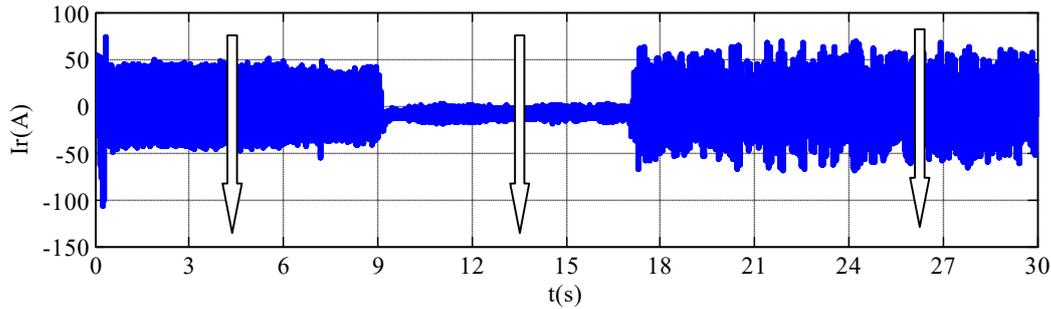


Figure (III .43) Courant rotorique.

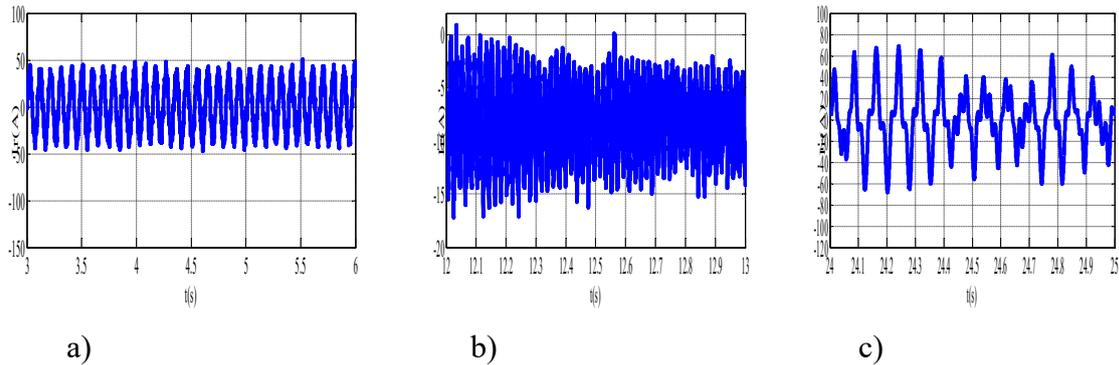


Figure (III .44) Zooms sur le courant rotorique.

Interprétations et commentaires :

Les figures (III.35) et (III.36) représente les allures de la puissance active et réactive statoriques de la GADA. La puissance active est de signe négatif, c'est-à-dire la GADA génère cette puissance et elle évolue de la même façon que la puissance mécanique tout en présentant des fluctuations. Par contre la puissance réactive est de signe positif ce qui veut dire que la machine absorbe cette énergie nécessaire pour sa magnétisation.

La figure (III.39) montre l'allure de la tension rotorique et la figure (III.40) le zoom de cette tension (sortie du convertisseur MLI)

Notre glissement sur cette figure (III.41) nous montre les différents modes de fonctionnement de notre génératrice en hyposynchrone, hypersynchrone et on synchronisme.

De 0 à 9 → on a le fonctionnement en hypersynchrone.

De 9 à 17 → on a le fonctionnement en synchronisme.

De 17 à 30 → on a le fonctionnement en hyposynchrone.

La figure (III.42) montre l'allure de notre couple électromagnétique et son évolution.

Les deux figures (III.42) et (III.43) montrent le courant rotorique et sont zoom et démontre qu'il augmente et diminue proportionnellement à la puissance mécanique.

III .10 Conclusion

Au cours de ce chapitre, les différentes commandes associées ont été développées en vue de l'exploitation par le logiciel MATLAB/Simulink.

On a entamé notre chapitre par la commande vectorielle en puissance de notre machine (MADA), On a procédé dans ce troisième chapitre à la limitation de la puissance au niveau de la turbine éolienne, cette limitation faite par deux méthodes la première est basée sur un régulateur PI et la deuxième sur la régulation par logique floue, où on a fait aussi une petite description sur la théorie de la logique floue.

Conclusion générale

Conclusion générale

A la lumière de notre mémoire, nous traitons la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice. Le but étant la mise en place d'une stratégie de commande nécessaire au bon fonctionnement de l'éolienne en commandant sa puissance.

Dans le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne, on a donné un aperçu sur les différents types d'éoliennes et les différents types de conversion électromécanique.

Au chapitre deux, nous avons modélisé le système turbine éolienne associé à la MADA, nous avons pu voir l'intérêt de la transformée de Park qui a permis d'avoir un système d'équation facile à exploiter.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous avons construit un dispositif de commande de type vectoriel pour le fonctionnement en génératrice de la machine asynchrone à double alimentation, où nous nous sommes intéressés à l'application de deux techniques de commandes pour la régulation de notre système qui sont nommées la régulation par des régulateurs PI (proportionnel intégral) qui et la régulation par la logique floue qui est caractérisée par sa robustesse et son intelligence. Les résultats obtenus par les stratégies de régulation floue présentent des performances satisfaisantes et encourageantes pour des implémentations pratiques. Ils nous ont permis de constater.

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

Il est noté que l'utilisation de la génératrice asynchrone à double alimentation dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Néanmoins, il en demeure quelques problèmes notamment le coût élevé des convertisseurs de puissance dimensionnés 100% de la puissance.

Références bibliographique

Nomenclature

Nomenclature

1. La turbine

- p_v : La puissance fournie par le vent (W).
- p_t : La puissance de la turbine éolienne (W).
- ρ : Masse volumique de l'air (kg/m^3).
- S : La surface balayée par la turbine éolienne (m^2).
- R_t : Rayon de la turbine éolienne(m).
- V_{vent} : La vitesse du vent (m/s).
- Ω_t : La vitesse de la turbine éolienne (rad/s).
- C_p : Le coefficient de puissance.
- SCE : Systèmes de conversion éolien.
- C_m : Le coefficient du couple.
- λ : Le rapport de la vitesse en bout des pales.
- λ_{opt} : Le rapport optimal de la vitesse en bout des pales.
- T_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).
- β : L'angle de calage des pales (rad).

2. La machine

Grandeurs statoriques

Machine réelle

- MADA : Machine asynchrone à double alimentation.
- MSAP : Machine synchrone à aimant permanent.
- GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.
- MAS : Machine asynchrone.
- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions d'alimentation des enroulements statorique.
- i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants statorique.
- R_s : Resistance d'une phase statorique.

Nomenclature

L_s : Inductance propre d'une phase statorique (H).

I_s : Inductance de fuite d'une phase statorique (H).

ω_s : Pulsation du champ statorique (rad/s).

$[V_{sabc}]$: Matrice des tensions statorique (V).

$[i_{sabc}]$: Matrice des courants statoriques.

$[\Phi_{sabc}]$: Matrice des flux statoriques.

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

Machine modélisée

V_{sd}, V_{sq} : Tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) (V).

i_{sd}, i_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A).

Φ_{sd}, Φ_{sq} : Flux statoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).

T_s : Constante de temps statorique (s).

θ_s : Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe $\ll d \gg$ du repère de Park (rad).

$[V_{sdqo}]$: Matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

$[i_{sdqo}]$: Matrice des courants statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

$[\Phi_{sdqo}]$: Matrice des flux statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

Grandeurs rotoriques

Machine réelle

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions d'alimentation des enroulements rotoriques (a, b, c) (V).

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Courants rotoriques (A).

R_r : Résistance d'une phase rotorique (Ohm).

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

I_r : Inductance de fuite d'une phase rotorique (H).

ω_r : Pulsation du champ rotorique (rad/s).

$[V_{rabc}]$: Matrice des tensions rotorique.

Nomenclature

$[i_{rabc}]$: Matrice des courants rotoriques.

$[\Phi_{rabc}]$: Matrice des flux statoriques.

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

Machine modélisée

V_{rd}, V_{rq} : Tensions rotoriques dans le repère de Park (d, q) (V).

i_{rd}, i_{rq} : Courants rotoriques dans le repère de Park (d, q) (A).

Φ_{rd}, Φ_{rq} : Flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).

T_r : Constante de temps rotoriques.

θ_r : Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe $\langle\langle d \rangle\rangle$ du repère de Park (rad).

$[V_{rdqo}]$: Matrice des tensions rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

$[i_{rdqo}]$: Matrice des courants rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

$[\Phi_{rdqo}]$: Matrice des flux rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

Gradeurs communes stator/rotor

Machine réelle

M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).

ω : Vitesse électrique de la machine (rad/s).

ρ : Nombre de paires de pôles de la machine.

θ : Angle électrique de position de la machine (rad).

g : Glissement de la machine.

Machine modélisée

M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).

σ : Coefficient de dispersion.

Grandeurs mécaniques

J : Inertie totale ramenée à l'arbre de moteur

F : Coefficient de frottement visqueux.

Nomenclature

- Ω : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s)
- T_{em} : Couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone (N.m).
- G : Gain du multiplicateur

3. les convertisseurs

Le redresseur

- V_a, V_b, V_c : Tensions de référence (V).
- i_a, i_b, i_c : Courants de référence (A).
- i_{dc} : Courant modulé par le redresseur (A).
- S'_a, S'_b, S'_c : Fonction logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.

L'onduleur

- $V_{on1}, V_{on2}, V_{on3}$: Tensions à la sortie de l'onduleur (V).
- $i_{on1}, i_{on2}, i_{on3}$: Courants alternatifs de l'onduleur (A).
- i_{on} : Courant modulé par l'onduleur (A).
- S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.

Le bus continu

- V_{dc} : Tension du bus continu.
- i_c : Courant capacitif (S).
- C : Capacité du bus continu (F).

La MLI

- m : Indice de modulation de la MLI.
- r : Taux de modulation de la MLI.

4. Le réseau :

- R_{res} : Résistance du réseau.
- l_{res} : Inductance du réseau.
- E : Source.
- i_a, i_b, i_c : Les courants des trois phases.

Nomenclature

V_a, V_b, V_c	: Les tensions des trois phases.
F_s	: Fonctions de transfert d'un transformateur parfait.
N	: Gain
S_{cc}	: Puissance de court circuit.
U_n	: Une tension nominale.
I_{cc}	: Courant de court circuit au point du réseau.
Z_{cc}	: Impédance de court circuit.

Nomenclature

Nomenclature

1. La turbine

- p_v : La puissance fournie par le vent (W).
- p_t : La puissance de la turbine éolienne (W).
- ρ : Masse volumique de l'aire (kg/m^3).
- S : La surface balayée par la turbine éolienne (m^2).
- R_t : Rayon de la turbine éolienne(m).
- V_{vent} : La vitesse du vent (m/s).
- Ω_t : La vitesse de la turbine éolienne (rad/s).
- C_p : Le coefficient de puissance.
- SCE : Systèmes de conversion éolien.
- C_m : Le coefficient du couple.
- C_{mec} : Le couple mécanique.
- λ : Le rapport de la vitesse en bout des pales.
- λ_{opt} : Le rapport optimal de la vitesse en bout des pales.
- T_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).
- β : L'angle de calage des pales (rad).

2. La machine

Grandeurs statoriques

Machine réelle

- MADA : Machine asynchrone à double alimentation.
- MSAP : Machine synchrone à aimant permanent.
- GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.
- MAS : Machine asynchrone.
- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions d'alimentation des enroulements statorique.
- i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants statorique.

Nomenclature

R_s	: Resistance d'une phase statorique.
L_s	: Inductance propre d'une phase statorique (H).
I_s	: Inductance de fuite d'une phase statorique (H).
ω_s	: Pulsation du champ statorique (rad/s).
$[V_{sabc}]$: Matrice des tensions statorique (V).
$[i_{sabc}]$: Matrice des courants statoriques.
$[\Phi_{sabc}]$: Matrice des flux statoriques.
$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

Machine modélisée

V_{sd}, V_{sq}	: Tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) (V).
i_{sd}, i_{sq}	: Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A).
Φ_{sd}, Φ_{sq}	: Flux statoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).
T_s	: Constante de temps statorique (s).
θ_s	: Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe <<d>> du repère de Park (rad).
$[V_{sdqo}]$: Matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
$[i_{sdqo}]$: Matrice des courants statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
$[\Phi_{sdqo}]$: Matrice des flux statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

Grandeurs rotoriques

Machine réelle

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	: Tensions d'alimentation des enroulements rotoriques (a, b, c) (V).
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	: Courants rotoriques (A).
R_r	: Resistance d'une phase rotorique (Ohm).
L_r	: Inductance propre d'une phase rotorique (H).
I_r	: Inductance de fuite d'une phase rotorique (H).
ω_r	: Pulsation du champ rotorique (rad/s).

Nomenclature

- $[V_{rabc}]$: Matrice des tensions rotorique.
 $[i_{rabc}]$: Matrice des courants rotoriques.
 $[\Phi_{rabc}]$: Matrice des flux statoriques.
 $[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

Machine modélisée

- V_{rd}, V_{rq} : Tensions rotoriques dans le repère de Park (d, q) (V).
 i_{rd}, i_{rq} : Courants rotoriques dans le repère de Park (d, q) (A).
 Φ_{rd}, Φ_{rq} : Flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).
 T_r : Constante de temps rotoriques.
 θ_r : Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe $\ll d \gg$ du repère de Park (rad).
 $[V_{rdqo}]$: Matrice des tensions rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
 $[i_{rdqo}]$: Matrice des courants rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
 $[\Phi_{rdqo}]$: Matrice des flux rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

Gradeurs communes stator/rotor

Machine réelle

- M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).
 ω : Vitesse électrique de la machine (rad/s).
 ρ : Nombre de paires de pôles de la machine.
 θ : Angle électrique de position de la machine (rad).
 g : Glissement de la machine.

Machine modélisée

- M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).
 σ : Coefficient de dispersion.

Grandeurs mécaniques

- J : Inertie totale ramenée a l'arbre de moteur

Nomenclature

- F : Coefficient de frottement visqueux.
 Ω : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s)
 T_{em} : Couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone (N.m).
G : Gain du multiplicateur

3. les convertisseurs

Le redresseur

- V_a, V_b, V_c : Tensions de référence (V).
 i_a, i_b, i_c : Courants de référence (A).
 i_{dc} : Courant modulé par le redresseur (A).
 S'_a, S'_b, S'_c : Fonction logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.

L'onduleur

- $V_{on1}, V_{on2}, V_{on3}$: Tensions à la sortie de l'onduleur (V).
 $i_{on1}, i_{on2}, i_{on3}$: Courants alternatifs de l'onduleur (A).
 i_{on} : Courant modulé par l'onduleur (A).
 S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.

Le bus continu

- V_{dc} : Tension du bus continu.
 i_c : Courant capacitif (5).
C : Capacité du bus continu (F).

La MLI

- m : Indice de modulation de la MLI.
r : Taux de modulation de la MLI.

4. Le réseau :

- R_{res} : Résistance du réseau.
 l_{res} : Inductance du réseau.
E : Source.

Nomenclature

i_a, i_b, i_c	: Les courants des trois phases.
V_a, V_b, V_c	: Les tensions des trois phases.
F_s	: Fonctions de transfert d'un transformateur parfait.
N	: Gain
S_{CC}	: Puissance de court circuit.
U_n	: Une tension nominale.
I_{CC}	: Courant de court circuit au point du réseau.
Z_{CC}	: Impédance de court circuit.

Annexe

Annexe

a-Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation

Puissance nominale :	$P=7.5 \text{ kW}$
Tension statorique nominale :	$U_{ns}=415 \text{ V}$
Tension rotorique nominale :	$U_{nr}=440 \text{ V}$
Vitesse nominal:	$N_n=970 \text{ tr /mn}$
Nombre de paires de pôles:	$p= 3$
Resistance statorique:	$R_s=1.06\Omega$
Resistance rotorique:	$R_r= 0.8\Omega$
Inductance cyclique statorique :	$L_s=0.2065\text{H}$
Inductance cyclique rotorique :	$L_r =0.081\text{H}$
Inductance mutuelle:	$M=0.0664\text{H}$

b- Paramètres de la turbine

Puissance nominale :	$P=7.5 \text{ kW}$
Rayon de la turbine :	$R_t=3.24\text{m}$
Vitesse nominal de la turbine :	$\Omega_{tn}=296 \text{ tr /mn}$
Vitesse maximal de la turbine :	$\Omega_{t \max}=10 \text{ tr /mn}$
Vitesse minimal de la turbine :	$\Omega_{t \min}=4 \text{ tr /mn}$
Moment d'inertie :	$J=0.075 \text{ Kg.m}^2$
Le gain de multiplicateur	$G=5.065$

c-Paramètres de régulations PI :

$K_p = 0.035$; $K_p = 0.5$

$K_i = 1$; $K_i = 0.5$

d-Paramètres de régulations FLOUE :

$K_e=0.1$

$K_{de}=0.03$, pour le flou en régime aléatoire on a pris $K_{de}=0.00003$

$K_{dt} = -10$

$K_{e1} = 0.1$

$K_{de1} = 0.03$ pour le flou en régime aléatoire on a pris $K_{de} = 0.00003$

$K_{dt1} = -10$